

한국자기학회 2017년도 임시총회 및 하계학술연구발표회

KMS 2017 Summer Conference

논문개요집



일시 2017. 5. 24(수) ~ 5. 26(금)

장소 한화리조트 해운대 티볼리

주최 한국자기학회

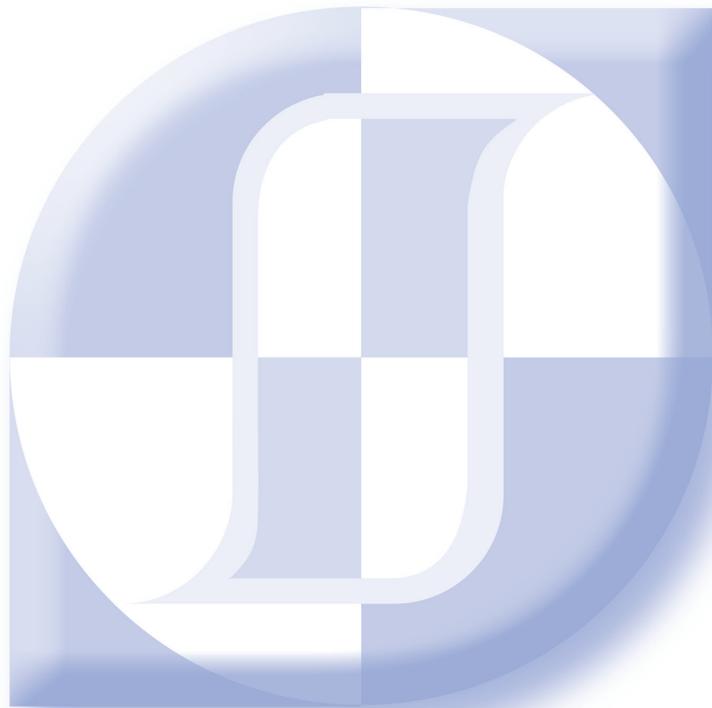
후원 한국과학기술단체총연합회

사단법인 한국자기학회

한국자기학회 2017년도 임시총회 및 하계학술연구발표회

KMS 2017 Summer Conference

논문개요집



일시 2017. 5. 24(수) ~ 5. 26(금)

장소 한화리조트 해운대 티볼리

주최 한국자기학회

후원 한국과학기술단체총연합회

“이 발표논문집은 2017년도 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로 한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 발간되었음”



공지사항

1. 포스터발표를 하시는 회원은 아래의 사항을 지켜주시기 바랍니다.

- 1) 포스터보드 크기는 한 분당 가로 100cm X 세로 180cm 사용할 수 있습니다.
- 2) 포스터는 목요일 오전 09:00~18:00 까지 부착하시면 되고, 포스터 발표 Discussion은 17:10~18:00 사이에 별도 진행됩니다.

2. 일정

| | | | | |
|-------------|---------------|---|----------------------------|---------------------------|
| 5월 24일(수) | 14:00~ | 참가자 등록 | | |
| | 15:30~16:30 | 와인 Blind Challenge (베르나차) | | |
| | 16:30~18:00 | 환영 리셉션 및 토크콘서트 “한국의 자석산업이 나아가야 할 방향” (베르나차) | | |
| 5월 25일(목) | 08:30~ | 참가자 등록 | | |
| | 09:00~11:55 | Special Session I (마나롤라) | Special Session II (코닐리아) | 포스터발표 (베르나차) |
| | | | 구두발표 I (코닐리아) | |
| | 11:55~13:30 | 점심식사 | | |
| | 13:30~15:10 | Special Session III (마나롤라) | 구두발표 II (코닐리아) | |
| | 15:10~15:30 | Coffee Break | | |
| | 15:30~16:30 | 구두발표 III (마나롤라) | 구두발표 IV (코닐리아) | |
| | 16:30~16:40 | Coffee Break | | |
| | 16:40~17:10 | 초청강연 I (마나롤라) | | |
| | 17:10~18:00 | 포스터발표 Discussion & Bierstube (베르나차) | | |
| | 18:00~18:30 | 한국자기학회 임시총회 및 시상식 (마나롤라) | | |
| 18:30~20:00 | Dinner (블루시걸) | | | |
| 5월 26일(금) | 08:30~ | 참가자 등록 | | |
| | 09:00~11:45 | © 초청강연 II / III (마나롤라) | Special Session IV (베르나차1) | Special Session V (베르나차2) |
| | 11:45~13:00 | 점심식사 | | |
| | 13:00~15:00 | 구두발표 V (마나롤라) | 구두발표 VI (베르나차1) | 구두발표 VII (베르나차2) |
| | 15:15~15:30 | 포스터 시상 및 경품, 폐회 (마나롤라) | | |

3. 『Best Poster 시상』이 5월 26일(금) 15:15부터 있을 예정이오니, 회원 여러분의 많은 참여를 바랍니다.

(단, 수상자(발표자)가 불참 시에는 수상이 취소됩니다.)

5월 24일 [수]

| 시간 | 프로그램 |
|---------------|--|
| 14:00 ~ | 참가자 등록 |
| 15:30 ~ 16:30 | 와인 Blind Challenge (베르나차) |
| 16:30 ~ 18:00 | 환영 리셉션 및 토크콘서트 “한국의 자석산업이 나아가야 할 방향” (베르나차) 연사 : 김동환(성림첨단산업), 권해웅(부경대), 이정구(재료연구소), 이우영(연세대), 최판규((주)MTI) 좌장 : 이우영(연세대) |

5월 25일 [목]

| 시간 | 프로그램 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--|--|---|--|--|--|---------------|---|---------------|---|---------------|---|---------------|---|---------------|---|---------------|--|---------------|--|---------------|---|---------------|--|---------------|--|---------------|---|---------------|--------------|---------------|--|---------------|--|--|--|---------------|--|--|--|---------------|---|
| 08:30 ~ | 참가자 등록 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09:00 ~ 11:55 | <table border="1"> <thead> <tr> <th>시간</th> <th>Special Session I (마나롤라) ‘방사광가속기를 이용한 자성재료 및 스핀트로닉스 연구’ 좌장 : 이동렬(숭실대)</th> <th>시간</th> <th>Special Session II (코닐리아) ‘Bio-Magnetics’ 좌장 : 김철기(대구경북과학기술원)</th> <th rowspan="10"> 포스터발표 (베르나차) Session BM [Biomedical Magnetics] Session MT [Magnetic theory and calculations] Session MD [Magnetization dynamics] Session HM [Hard-magnetic Materials] Session SM [Soft-magnetic Materials] Session SS [Semiconductor spintronics] Session SO [Spin orbit coupling and related phenomena] Session NS [Nano-structured materials] Session MO [Magnetic Oxides and Multiferroics] Session SA [Sensor and Applications] </th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>09:00 ~ 09:25</td> <td>초S-I-1. X-ray Resonant Magnetic Scattering Study of Magnetic Proximity Effect in Pd/Co/Pd and Pt/Co/Pt Trilayers 이동렬(숭실대)</td> <td>09:00 ~ 09:25</td> <td>초S-II-1. 자성 마이크로의료로봇 기반 정밀 세포 전달 최홍수(대구경북과학기술원)</td> </tr> <tr> <td>09:25 ~ 09:50</td> <td>초S-I-2. 원형의 강자성 디스크에서 3차원 자속폐쇄구조의 대칭성 깨짐 이기석(울산과학기술원)</td> <td>09:25 ~ 09:50</td> <td>초S-II-2. High Resolution Magnetic Nano-Particle Analyzer 박상윤(서울대)</td> </tr> <tr> <td>09:50 ~ 10:15</td> <td>초S-I-3. Investigation of micro-magnetic structures by using scanning transmission X-ray microscopy 김원동(한국표준과학연구원)</td> <td>09:50 ~ 10:15</td> <td>초S-II-3. 자기장을 이용한 생체분자 물성 연구 김기범(한국뇌연구원)</td> </tr> <tr> <td>10:15 ~ 10:40</td> <td>초S-I-4. Direct domain structure observation depending on relative ratio of metal (FM) and metal-oxide (AFM) in mixture phase film 정민승(대구경북과학기술원)</td> <td>10:15 ~ 10:40</td> <td>초S-II-4. 혈액 내 이성질 순환종양세포의 분리 및 포집을 위한 자력 구배 기반 미세유체시스템 곽봉섭(한국기계연구원)</td> </tr> <tr> <td>10:40 ~ 11:05</td> <td>초S-I-5. Exploring Quantum Emergent Properties using Resonant Inelastic X-ray Scattering 장서형(중앙대)</td> <td>10:40 ~ 11:05</td> <td>초S-II-5. Spintronics Devices for Bio-medical Applications 김철기(대구경북과학기술원)</td> </tr> <tr> <td>11:05 ~ 11:30</td> <td>초S-I-6. In-situ X-ray diffraction on switchable low energy geometric multiferroic single crystal 오윤석(울산과학기술원)</td> <td>11:05 ~ 11:15</td> <td>coffee break</td> </tr> <tr> <td>11:30 ~ 11:55</td> <td>초S-I-7. Current induced skyrmion dynamics observed by transmission x-ray microscopy 최준우(한국과학기술연구원)</td> <td>11:15 ~ 11:35</td> <td> 구두발표 I (코닐리아) (Spin orbit coupling and related phenomena-1) 좌장 : 정명화(서강대) </td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>11:15 ~ 11:35</td> <td>O-I-1. An On-Chip Micromagnet Frictionometer Based on Magnetically Driven Colloids for Nano-Bio Interfaces Goudu Sandhya Rani(대구경북과학기술원)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>11:35 ~ 11:55</td> <td>O-I-2. Magnetism in Rutile-Type Oxides Dorj Odkhuu(인천대)</td> </tr> </tbody> </table> | 시간 | Special Session I (마나롤라) ‘방사광가속기를 이용한 자성재료 및 스핀트로닉스 연구’ 좌장 : 이동렬(숭실대) | 시간 | Special Session II (코닐리아) ‘Bio-Magnetics’ 좌장 : 김철기(대구경북과학기술원) | 포스터발표 (베르나차) Session BM [Biomedical Magnetics] Session MT [Magnetic theory and calculations] Session MD [Magnetization dynamics] Session HM [Hard-magnetic Materials] Session SM [Soft-magnetic Materials] Session SS [Semiconductor spintronics] Session SO [Spin orbit coupling and related phenomena] Session NS [Nano-structured materials] Session MO [Magnetic Oxides and Multiferroics] Session SA [Sensor and Applications] | 09:00 ~ 09:25 | 초S-I-1. X-ray Resonant Magnetic Scattering Study of Magnetic Proximity Effect in Pd/Co/Pd and Pt/Co/Pt Trilayers 이동렬(숭실대) | 09:00 ~ 09:25 | 초S-II-1. 자성 마이크로의료로봇 기반 정밀 세포 전달 최홍수(대구경북과학기술원) | 09:25 ~ 09:50 | 초S-I-2. 원형의 강자성 디스크에서 3차원 자속폐쇄구조의 대칭성 깨짐 이기석(울산과학기술원) | 09:25 ~ 09:50 | 초S-II-2. High Resolution Magnetic Nano-Particle Analyzer 박상윤(서울대) | 09:50 ~ 10:15 | 초S-I-3. Investigation of micro-magnetic structures by using scanning transmission X-ray microscopy 김원동(한국표준과학연구원) | 09:50 ~ 10:15 | 초S-II-3. 자기장을 이용한 생체분자 물성 연구 김기범(한국뇌연구원) | 10:15 ~ 10:40 | 초S-I-4. Direct domain structure observation depending on relative ratio of metal (FM) and metal-oxide (AFM) in mixture phase film 정민승(대구경북과학기술원) | 10:15 ~ 10:40 | 초S-II-4. 혈액 내 이성질 순환종양세포의 분리 및 포집을 위한 자력 구배 기반 미세유체시스템 곽봉섭(한국기계연구원) | 10:40 ~ 11:05 | 초S-I-5. Exploring Quantum Emergent Properties using Resonant Inelastic X-ray Scattering 장서형(중앙대) | 10:40 ~ 11:05 | 초S-II-5. Spintronics Devices for Bio-medical Applications 김철기(대구경북과학기술원) | 11:05 ~ 11:30 | 초S-I-6. In-situ X-ray diffraction on switchable low energy geometric multiferroic single crystal 오윤석(울산과학기술원) | 11:05 ~ 11:15 | coffee break | 11:30 ~ 11:55 | 초S-I-7. Current induced skyrmion dynamics observed by transmission x-ray microscopy 최준우(한국과학기술연구원) | 11:15 ~ 11:35 | 구두발표 I (코닐리아) (Spin orbit coupling and related phenomena-1) 좌장 : 정명화(서강대) | | | 11:15 ~ 11:35 | O-I-1. An On-Chip Micromagnet Frictionometer Based on Magnetically Driven Colloids for Nano-Bio Interfaces Goudu Sandhya Rani(대구경북과학기술원) | | | 11:35 ~ 11:55 | O-I-2. Magnetism in Rutile-Type Oxides Dorj Odkhuu(인천대) |
| | 시간 | Special Session I (마나롤라) ‘방사광가속기를 이용한 자성재료 및 스핀트로닉스 연구’ 좌장 : 이동렬(숭실대) | 시간 | Special Session II (코닐리아) ‘Bio-Magnetics’ 좌장 : 김철기(대구경북과학기술원) | 포스터발표 (베르나차) Session BM [Biomedical Magnetics] Session MT [Magnetic theory and calculations] Session MD [Magnetization dynamics] Session HM [Hard-magnetic Materials] Session SM [Soft-magnetic Materials] Session SS [Semiconductor spintronics] Session SO [Spin orbit coupling and related phenomena] Session NS [Nano-structured materials] Session MO [Magnetic Oxides and Multiferroics] Session SA [Sensor and Applications] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 09:00 ~ 09:25 | 초S-I-1. X-ray Resonant Magnetic Scattering Study of Magnetic Proximity Effect in Pd/Co/Pd and Pt/Co/Pt Trilayers 이동렬(숭실대) | 09:00 ~ 09:25 | 초S-II-1. 자성 마이크로의료로봇 기반 정밀 세포 전달 최홍수(대구경북과학기술원) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 09:25 ~ 09:50 | 초S-I-2. 원형의 강자성 디스크에서 3차원 자속폐쇄구조의 대칭성 깨짐 이기석(울산과학기술원) | 09:25 ~ 09:50 | 초S-II-2. High Resolution Magnetic Nano-Particle Analyzer 박상윤(서울대) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 09:50 ~ 10:15 | 초S-I-3. Investigation of micro-magnetic structures by using scanning transmission X-ray microscopy 김원동(한국표준과학연구원) | 09:50 ~ 10:15 | 초S-II-3. 자기장을 이용한 생체분자 물성 연구 김기범(한국뇌연구원) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10:15 ~ 10:40 | 초S-I-4. Direct domain structure observation depending on relative ratio of metal (FM) and metal-oxide (AFM) in mixture phase film 정민승(대구경북과학기술원) | 10:15 ~ 10:40 | 초S-II-4. 혈액 내 이성질 순환종양세포의 분리 및 포집을 위한 자력 구배 기반 미세유체시스템 곽봉섭(한국기계연구원) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10:40 ~ 11:05 | 초S-I-5. Exploring Quantum Emergent Properties using Resonant Inelastic X-ray Scattering 장서형(중앙대) | 10:40 ~ 11:05 | 초S-II-5. Spintronics Devices for Bio-medical Applications 김철기(대구경북과학기술원) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 11:05 ~ 11:30 | 초S-I-6. In-situ X-ray diffraction on switchable low energy geometric multiferroic single crystal 오윤석(울산과학기술원) | 11:05 ~ 11:15 | coffee break | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 11:30 ~ 11:55 | 초S-I-7. Current induced skyrmion dynamics observed by transmission x-ray microscopy 최준우(한국과학기술연구원) | 11:15 ~ 11:35 | 구두발표 I (코닐리아) (Spin orbit coupling and related phenomena-1) 좌장 : 정명화(서강대) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 11:15 ~ 11:35 | O-I-1. An On-Chip Micromagnet Frictionometer Based on Magnetically Driven Colloids for Nano-Bio Interfaces Goudu Sandhya Rani(대구경북과학기술원) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 11:35 ~ 11:55 | O-I-2. Magnetism in Rutile-Type Oxides Dorj Odkhuu(인천대) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11:55 ~ 13:30 | 점심식사 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



5월 25일 [목]

| 시간 | 프로그램 | | | |
|---------------------|---|--|--|--|
| 13:30 ~ 15:10 | Special Session III (마나톨라) '산업체에서의 자성재료 및 부품개발 동향' 1부 좌장 : 안성용(삼성전기) | | 구두발표 II (코널리아) (Nano-structured / Spintronics / Multiferroics) 좌장 : 유천열(대구경북과학기술원) | 포스터발표 (베르나차) Session BM [Biomedical Magnetics] Session MT [Magnetic theory and calculations] Session MD [Magnetization dynamics] Session HM [Hard-magnetic Materials] Session SM [Soft-magnetic Materials] Session SS [Semiconductor spintronics] Session SO [Spin orbit coupling and related phenomena] Session NS [Nano-structured materials] Session MO [Magnetic Oxides and Multiferroics] Session SA [Sensor and Applications] |
| | 13:30 ~ 13:55 | 초S-III-1. 금속파워 인덕터 개발동향 최강릉(삼성전기) | 13:30 ~ 13:55 초O-II-1. 2D Semiconductor, Transition Metal Dichalcogenides Growth and Its Applications 김용수(울산대) | |
| | 13:55 ~ 14:20 | 초S-III-2. 고주파 부품과 자성소재 김유선(LG이노텍) | 13:55 ~ 14:15 O-II-2. RF 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착된 BiFeO ₃ -CoFe ₂ O ₄ 나노복합체 박막의 자성 연구 김태철(명지대) | |
| | 14:20 ~ 14:45 | 초S-III-3. 자동차 분야의 연자성 소재 및 부품 개발 동향 김신규(현대자동차) | 14:15 ~ 14:35 O-II-3. Magnetic field and temperature control over CoFeB/Ta/CoFeB logic device Artem(대구경북과학기술원) | |
| | 14:45 ~ 15:10 | 초S-III-4. 그래핀 기반의 하이브리드 자성복합재료의 EMI 특성 연구 김명기(유덕첨단소재) | 14:35 ~ 14:55 O-II-4. Structural, magnetic and transport behavior of SrRu _{0.7} Fe _{0.3} O ₃ epitaxial thin film Umasankar Dash(한국외대) | |
| 15:10 ~ 15:30 | coffee break | | | |
| 15:30 ~ 16:30 | 구두발표 III (마나톨라) (Magnetic dynamics) 좌장 : 홍정일(대구경북과학기술원) | | 구두발표 IV (코널리아) (Spin orbit coupling) 좌장 : 박병국(한국과학기술원) | 포스터발표 (베르나차) Session BM [Biomedical Magnetics] Session MT [Magnetic theory and calculations] Session MD [Magnetization dynamics] Session HM [Hard-magnetic Materials] Session SM [Soft-magnetic Materials] Session SS [Semiconductor spintronics] Session SO [Spin orbit coupling and related phenomena] Session NS [Nano-structured materials] Session MO [Magnetic Oxides and Multiferroics] Session SA [Sensor and Applications] |
| | 15:30 ~ 15:50 | O-III-1. Asymmetrical domain wall propagation in bifurcated PMA wire structure due to the Dzyaloshinskii-Moriya interaction 권재석(대구경북과학기술원) | 15:30 ~ 15:50 O-IV-1. Reconfigurable Spin-orbit torque based logic-in-memory 백승현(한국과학기술원) | |
| | 15:50 ~ 16:10 | O-III-2. Embedded Micromagnetics for More Flexible Simulations 유천열(대구경북과학기술원) | 15:50 ~ 16:10 O-IV-2. Intrinsic spin orbit torque in antiferromagnets with weak ferromagnetic order 천수익(포항공대) | |
| | 16:10 ~ 16:30 | O-III-3. Magnetic vortices dynamics in soft magnetic spherical shells 이재혁(서울대) | 16:10 ~ 16:30 O-IV-3. 텅스텐/강자성체 접합구조에서의 스핀-궤 도돌림힘 측정 김동석(한국표준과학연구원) | |
| 16:30 ~ 16:40 | coffee break | | | |
| 16:40 ~ 17:10 | 초청강연 I (마나톨라) 좌장 : 한석희(한국과학기술연구원) | | 초O-I-1. 4차 산업혁명과 자기학(2) 김희중(한국과학기술연구원) | |
| 17:10 ~ 18:00 | 포스터발표 Discussion & Bierstube (베르나차) 좌장 : 김효준(자화전자) / 이기석(울산과학기술원) | | | |
| 18:00 ~ 18:30 | 한국자기학회 임시총회 및 시상식 (마나톨라) | | | |
| 18:30 ~ 20:00 | Dinner (블루시걸) | | | |

5월 26일 [금]

| 시간 | 프로그램 | | | | | |
|---------------|--|---|--|--|---------------|---|
| 08:30 ~ | 참가자 등록 | | | | | |
| 09:00 ~ 11:45 | ◎초청강연 II (마나물라) (Spintronics) 좌장 : 황찬용(한국표준과학연구원) | | Special Session IV (베르나차1) '산업체에서의 자성재료 및 부품개발 동향' 2부 좌장 : 안성용(삼성전기) | Special Session V (베르나차2) '의과학연구회' 좌장 : 유세중(건양대병원) | | |
| | 09:00 ~ 09:35 | (Invited)O-II-1. Spin-orbit entanglement and spin-momentum coupling Hyun-Woo Lee(POSTECH) | 09:00 ~ 09:25 | 초S-IV-1. 무선통신 기기에서의 자성재료 개발동향 김진철(SKC) | 09:00 ~ 09:40 | 초S-V-1. 영상의학정보를 이용한 3D 프린팅 기술의 응용 사례 성열훈(청주대) |
| | 09:35 ~ 10:10 | (Invited)O-II-2. Soliton-like magnetic domain wall motion induced by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction Kab-Jin Kim(KAIST) | 09:25 ~ 09:50 | 초S-IV-2. 고포화자속밀도 및 저손실 특성을 갖는 비정질 자성소재의 개발 및 응용 송용설(아모그린텍) | 09:40 ~ 10:05 | 초S-V-2. 자기공명영상을 이용한 영상유도방사선 치료의 동향 장재욱(충남대병원) |
| | 10:10 ~ 10:45 | (Invited)O-II-3. Heusler alloy based magnetoresistive devices Kazuhiro Hono(NIMS) | 09:50 ~ 10:15 | 초S-IV-3. 차량모터용 자성재료 적용 현황 이형주(현대자동차) | 10:05 ~ 10:30 | 초S-V-3. 방사선 흡수선량 보정위한 대기보정 계수 산출 장치 개발 홍주원(분당서울대병원) |
| | 초청강연 III (마나물라) (Magnetic theory/Thin films) 좌장 : 김동현(충북대) | | 10:15 ~ 10:40 | 초S-IV-4. Nd계 희토자석의 개발동향과 미래과제 김동환(성림첨단산업) | 10:30 ~ 10:55 | 초S-V-4. 물리적으로 변화가 전산화 단층 영상에 미치는 영향 전민철(대전보건대) |
| | 10:55 ~ 11:20 | 초O-III-1. Effect of Solvents and Relative Humidity on $(C_6H_5(CH_2)_2NH_3)_2(Mn,Cu)Cl_4$ thin films 김기연(한국원자력연구원) | 10:40 ~ 11:05 | 초S-IV-5. 자동차 전장부품용 영구자석 소재의 개발 및 응용 김효준(자화전자) | 10:55 ~ 11:20 | 초S-V-5. 기능적 자기공명영상 기반 뇌 활성화 네트워크 분석을 위한 인과성 분석 기법 비교 연구 정영진(동서대) |
| | 11:20 ~ 11:45 | 초O-III-2. Filtering spins at optical-field-induced charge transfers: petahertz spin diode 이재동(대구경북과학기술원) | 11:05 ~ 11:45 | 산업체와의 자유 토론 | 11:20 ~ 11:45 | 초S-V-6. Monte Carlo Simulation of X-ray beam design for multi-energy imaging with charge-integrating detector Using GATE 백철하(동서대) |
| 11:45 ~ 13:00 | 점심식사 | | | | | |



5월 26일 [금]

| 시간 | 프로그램 | | | | | | | |
|---------------------|--|---|---------------------|--|---------------------|--|--|--|
| | 구두발표 V (마나물라) (Hard Magnetic Materials) 좌장 : 김효준(자화전자) | | | 구두발표 VI (베르나차1) (Soft Magnetic Materials) 좌장 : 임혜인(숙명여대) | | | 구두발표 VII (베르나차2) (Spin orbit coupling and related phenomena-2) 좌장 : 이경진(고려대) | |
| 13:00 ~ 15:00 | 13:00 ~ 13:20 | O-V-1. Exchange coupled hard (LTP MnBi)/ soft ($Fe_{65}Co_{35}$) composites 박지훈(재료연구소) | 13:00 ~ 13:20 | O-VI-1. Magnetic Anisotropy in Canted Antiferromagnetic Sr_2IrO_4 single crystals 조연정(경북대) | 13:00 ~ 13:20 | O-VII-1. Hallmarks of the Weyl semimetal: magnetotransport properties in Sb- doped Bi 정윤희(포항공대) | | |
| | 13:20 ~ 13:40 | O-V-2. Ga이 첨가된 Nd-Fe-B 소결자석의 1 차 열처리 온도 변화에 따른 미세구조 와 자기적 특성 최적화 연구 배경훈(고려대) | 13:20 ~ 13:40 | O-VI-2. Static and dynamic magnetic properties of $SrZn_xFe_{(2-x)}Fe_{16}O_{27}$ ($0.0 \leq$ $x \leq 2.0$) synthesized in a low oxygen pressure 유재형(서울대) | 13:20 ~ 13:40 | O-VII-2. Spin Nernst magnetoresistance in ferromagnet/heavy metal bilayer structures 김동준(한국과학기술원) | | |
| | 13:40 ~ 14:00 | O-V-3. 입계확산 처리를 통한 고보자력 이방 성 HDDR 자석 제조 차희령(재료연구소) | 13:40 ~ 14:00 | O-VI-3. Core loss improvement of Fe metal powder Coated with Alumina oxide by sol-gel method 최성준(서울대) | 13:40 ~ 14:00 | O-VII-3. First-principles calculations of Berry curvature: WTe2 and other heavy metals 임성현(울산대) | | |
| | 14:00 ~ 14:20 | O-V-4. Characterization of Ca-La M-type hexaferrites synthesized by solid state reaction 이강혁(서울대) | 14:00 ~ 14:20 | O-VI-4. Sign Inversion of Anomalous Hall Effect in heavy metal/permalloy bilayer structures 강민구(한국과학기술원) | 14:00 ~ 14:20 | O-VII-4. Coupled modes of one-dimensional skyrmion lattices in nanostrips 김준희(서울대) | | |
| | 14:20 ~ 14:40 | O-V-5. The Effect of Shape Control of α - $Fe_{16}N_2$ Particles on Their Magnetic Properties 백연경(재료연구소) | 14:20 ~ 14:40 | O-VI-5. Magnetic Properties and Hysteresis Loss Improvement of Fe Alloy Powder by NH_4OH Etching 이선우(서울대) | 14:20 ~ 14:40 | O-VII-5. Induced Magnetism and Giant Perpendicular Magnetic Anisotropy of Transition Metal Doped Topological Insulator Bi(111) 정주영(인천대) | | |
| | 14:40 ~ 15:00 | O-V-6. Design of high-coercivity $Fe_{16-x}Al_xN_2$ alloy 변진호(부산대) | | | 14:40 ~ 15:00 | O-VII-6. Spin-Orbit Torques in Ferrimagnetic CoTb alloys 제송근(스핀텍) | | |
| 15:15 ~ 15:30 | 포스터 시상 및 경품, 폐회 (마나물라) | | | | | | | |



CONTENTS

KMS 2017 Summer Conference

5월 24일(수) 16:30~18:00

Session : '한국의 자석산업이 나아가야 할 방향' 토크콘서트

베르나차

✿ 좌 장 : 이우영(연세대)

| | | |
|----------|-------|---|
| 토크 콘서트-1 | 16:30 | 국내 희토자석 개발현황 재조명에 의한 향후 발전방안 도출 3 김동환* |
| 토크 콘서트-2 | 16:50 | 고성능 영구자석용 재료 개발의 현황과 전망 4 권해웅*, 이정구, 유지훈 |
| 토크 콘서트-3 | 17:10 | 차세대 산업용 영구자석소재개발을 위한 융합연구 필요성 5 이정구* |
| 토크 콘서트-4 | 17:30 | 한국 자석산업이 나아가야 할 방향 6 이우영* |
| 토크 콘서트-5 | 17:50 | 일본자석산업의 동향과 한국자석산업이 나아가야 할 방향 7 최판규* |

5월 25일(목) 09:00~11:55

Special Session I '방사광가속기를 이용한 자성재료 및 스핀트로닉스 연구'

마나틀라

✿ 좌 장 : 이동렬(송실대)

| | | |
|--------|-------|--|
| 초S-I-1 | 09:00 | X-ray Resonant Magnetic Scattering Study of Magnetic Proximity Effect in Pd/Co/Pd and Pt/Co/Pt Trilayers 11 Dong Ryeol Lee*, Dong-Ok Kim, Ilwan Seo, Yongseong Choi, Jun Woo Choi |
| 초S-I-2 | 09:25 | 원형의 강자성 디스크에서 3차원 자속 폐쇄 구조의 대칭성 깨짐 12 이기석*, 한희성, 이수석, 김남규, 임미영, 유영상, 홍정일 |
| 초S-I-3 | 09:50 | Investigation of micro-magnetic structures by using scanning transmission X-ray microscopy 13 Wondong Kim* |
| 초S-I-4 | 10:15 | Direct domain structure observation depending on relative ratio of metal (FM) and metal-oxide (AFM) in mixture phase film 14 Min-Seung Jung*, Mi-Young Im and Jung-Il Hong† |
| 초S-I-5 | 10:40 | Exploring Quantum Emergent Properties using Resonant Inelastic X-ray Scattering 16 Seo Hyoung Chang*, Myung Joon Han, Jungho Kim |

| | | |
|--------|-------|---|
| 초S-I-6 | 11:05 | In-situ X-ray diffraction on switchable low energy geometric multiferroic single crystal 17 Yoon Seok Oh*, Rongwei Hu, Young Hoon Jeong, Fei-Ting Huang and Sang-Wook Cheong |
| 초S-I-7 | 11:30 | Current induced skyrmion dynamics observed by transmission x-ray microscopy ... 18 Jun Woo Choi*, Seonghoon Woo, Kyung Mee Song |

| | |
|---|------|
| 5월 25일(목) 09:00~11:05 Special Session II 'Bio-Magnetics' | 코넬리아 |
|---|------|

* 좌 장 : 김철기(대구경북과학기술원)

| | | |
|---------|-------|--|
| 초S-II-1 | 09:00 | 자성 마이크로의료로봇 기반 정밀 세포 전달 21 최홍수*, 김상원, 김진영 |
| 초S-II-2 | 09:25 | High Resolution Magnetic Nano-Particle Analyzer 23 김혁준, 박유근, 박상윤* |
| 초S-II-3 | 09:50 | 자기장을 이용한 생체분자 물성 연구 24 김기범* |
| 초S-II-4 | 10:15 | 혈액 내 이성질 순환종양세포의 분리 및 포집을 위한 자력 구배 기반 미세유체시스템 26 곽봉섭*, 이재훈, 이정훈, 강신원 |
| 초S-II-5 | 10:40 | Spintronics Devices for Bio-medical Applications 28 Byeonghwa Lim, Xinghao Hu, Sri Ramulu Torati, Kun Woo Kim, Jonghwan Yoon and Cheol Gi Kim* |

| | |
|---|------|
| 5월 25일(목) 11:15~11:55 Session : 구두발표 I (Spin orbit coupling and related phenomena-1) | 코넬리아 |
|---|------|

* 좌 장 : 정명화(서강대)

| | | |
|-------|-------|---|
| O-I-1 | 11:15 | An On-chip Micromagnet Frictionometer Based on Magnetically Driven Colloids for Nano-Bio Interfaces 33 Sandhya Rani Goudu*, Xinghao Hu, Sri Ramulu Torati, Byeonghwa Lim, Kunwoo Kim and Cheol Gi Kim |
| O-I-2 | 11:35 | Magnetism in Rutile-Type Oxides 34 Purev Taivansaikhan and Dorj Odkhuu* |

| | |
|---|------|
| 5월 25일(목) 13:30~15:10 Special Session III '산업체에서의 자성재료 및 부품개발 동향' 1부 | 마나틀라 |
|---|------|

* 좌 장 : 안성용(삼성전기)

| | | |
|----------|-------|---|
| 초S-III-1 | 13:30 | 금속파워인덕터 개발 동향 37 최강룡*, 박일진, 서정욱, 이우진, 안성용, 유영석 |
|----------|-------|---|

| | | | |
|----------|-------|---------------------------------------|----|
| 초S-III-2 | 13:55 | 고주파 부품과 자성소재 | 38 |
| | | 김유선*, 이상원, 배석 | |
| 초S-III-3 | 14:20 | 자동차 분야의 연자성 소재 및 부품 개발 동향 | 39 |
| | | 김신규*, 김형석, 김영민, 김미루, 정연준, 이두환 | |
| 초S-III-4 | 14:45 | 그래핀 기반의 하이브리드 자성복합재료의 EMI 특성 연구 | 40 |
| | | 김명기*, 진성민, 김상훈, 김예찬, 남재도 | |

5월 25일(목) 13:30~14:55

Session : 구두발표 II (Nano-structured/Spintronics/Multiferroics)

코넬리아

✿ 좌 장 : 유천열(대구경북과학기술원)

| | | | |
|---------|-------|--|----|
| 초O-II-1 | 13:30 | 2D Semiconductor, Transition Metal Dichalcogenides Growth and Its Applications .. | 43 |
| | | Yong Soo Kim*, Chinh Tam Le, Farman Ullah, Joon. I. Jang | |
| O-II-2 | 13:55 | RF 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착된 BiFeO ₃ -CoFe ₂ O ₄ 나노복합체 박막의 자성 연구 .. | 44 |
| | | 김태철*, 이승한, 정재은, 김동훈 | |
| O-II-3 | 14:15 | Magnetic field and temperature control over CoFeB/Ta/CoFeB logic device | 46 |
| | | A.D. Talantsev*, R.B. Morgunov, Y. Lu, S. Mangin, C.G. Kim | |
| O-II-4 | 14:35 | Structural, magnetic and transport behavior of SrRu _{0.7} Fe _{0.3} O ₃ epitaxial thin film | 48 |
| | | Umasankar Dash*, Chang Uk Jung [†] | |

5월 25일(목) 15:30~16:30

Session : 구두발표 III (Magnetic dynamics)

마나틀라

✿ 좌 장 : 홍정일(대구경북과학기술원)

| | | | |
|---------|-------|--|----|
| O-III-1 | 15:30 | Asymmetrical domain wall propagation in bifurcated PMA wire structure due to the Dzyaloshinskii-Moriya interaction | 53 |
| | | J. Kwon*, S. Goolaup, W. L. Gan, C. H. Chang, K. Roy and W. S. Lew | |
| O-III-2 | 15:50 | Embedded Micromagnetics for More Flexible Simulations | 55 |
| | | 김형석, 유천열* | |
| O-III-3 | 16:10 | Magnetic vortices dynamics in soft magnetic spherical shells | 56 |
| | | Jae-Hyeok Lee*, Junhoe Kim, Jaehak Yang, Jaegun Sim and Sang-Koog Kim | |

5월 25일(목) 15:30~16:30

Session : 구두발표 IV (Spin orbit coupling)

코넬리아

✿ 좌 장 : 박병국(한국과학기술원)

| | | | |
|--------|-------|--|----|
| O-IV-1 | 15:30 | Reconfigurable Spin-orbit torque based logic-in-memory | 61 |
| | | Seung-heon Chris Baek*, Kyung-Woong Park, Byong-Guk Park | |

| | | |
|--------|-------|--|
| O-IV-2 | 15:50 | Intrinsic spin orbit torque in antiferromagnets with weak ferromagnetic order 63 Suik Cheon* and Hyun-Woo Lee |
| O-IV-3 | 16:10 | 텅스텐/강자성체 접합구조에서의 스핀-궤도 돌림힘 측정 64 김동석*, 전병선, 김창수, 문경웅, 윤정범, 김대현, 이상선, 황찬용 |

| | |
|---|------|
| 5월 25일(목) 16:40~17:10 Session : 초청강연 I | 마나틀라 |
|---|------|

* 좌 장 : 한석희(한국과학기술연구원)

| | | |
|--------|-------|----------------------------------|
| 초O-I-1 | 16:40 | 4차 산업혁명과 자기학(2) 67 김희중* |
|--------|-------|----------------------------------|

| | |
|--|------|
| 5월 25일(목) 09:00~18:00 Session : 포스터발표 | 베르나차 |
|--|------|

* 좌 장 : 김효준(자화전자) / 이기석(울산과학기술원)

○ Session BM[Biomedical Magnetics]

| | | |
|------|--------|--|
| BM01 | Poster | Analysis of Red Blood Cell by Using a Highly Sensitive GMR-Spin Valve Film Device and μ -Coil and Channel 71 Jong-Gu Choi*, Su-Hee Kim, Ho-Dae Lim, Do-Gwun Hwang, Jang-Roh Rhee and Sang-Suk Lee |
|------|--------|--|

○ Session MT[Magnetic theory and calculations]

| | | |
|------|--------|--|
| MT01 | Poster | The role of elasticity on intrinsic anomalous Hall effect in Ni 73 Do Duc Cuong*, Soon Cheol Hong [†] and S.H. Rhim [†] |
| MT02 | Poster | 탄소 도핑에 따른 τ -MnAl의 자성과 자기이방성에 관한 제일원리계산 74 박진식*, 임성현 [†] , 홍순철 [†] |
| MT03 | Poster | 토크리플 저감을 위한 자속집중형 동기전동기 회전자 설계 75 유준열*, 정재식, 홍정표 |
| MT04 | Poster | Dynamic Symmetry Breaking in a Gyrotropic Motion of a Magnetic Vortex by DC-Spin-Polarized Current 77 Hee-Sung Han*, Ki-Suk Lee |
| MT05 | Poster | Terahertz Spin-Wave Emission from Ferrimagnetic Domain walls 79 Se-Hyeok Oh*, Se Kwon Kim, Dong-Kyu Lee, Gyungchoon Go, Kab-Jin Kim, Teruo Ono, Yaroslav Tserkovnyak and Kyung-Jin Lee [†] |
| MT06 | Poster | Domain wall motion at a step of Dzyaloshinskii-Moriya interaction 80 Ik Sun Hong*, Kyung-Jin Lee |
| MT07 | Poster | 출력밀도 향상을 위한 자속집중형 페라이트 자석 동기전동기의 회전자 설계 81 김학순*, 윤명환, 홍정표 |

| | | | |
|------|--------|---|----|
| MT08 | Poster | Interaction of propagating spin waves with a skyrmion in perpendicularly magnetized thin-film nanostripes 84 Junhoe Kim*, Jaehak Yang, Bosung Kim, Young-Jun Cho and Sang-Koog Kim | 84 |
| MT09 | Poster | SPMSM의 토크 리플 저감을 위한 스텝 스큐 설계 86 윤택준*, 박호용, 김대기, 홍정표 | 86 |
| MT10 | Poster | Fe, Mn, Ni, Cu가 도핑된 그래핀의 전자구조와 자성에 미치는 영향 88 홍문봉*, 임성현, 홍순철 | 88 |
| MT11 | Poster | 거대자기이방성 스핀벨브 구조에서 자화 곤란축 방향에서의 자기 센서 감도 향상 89 정구훈*, 김시년, 임상호 | 89 |
| MT12 | Poster | 고감도 지자기센서 개발을 위한 미앤더 패턴의 거대자기저항 박막 90 김시년*, 정구훈, 안지훈, 이기승, 유천열, 신광호, 임상호 | 90 |

○ Session MD[Magnetization dynamics]

| | | | |
|------|--------|---|-----|
| MD01 | Poster | Magnetic properties and spin-torque ferromagnetic resonance of Pt/GdFeCo/MgO layers 91 J. H. Kim*, D. J. Lee, H. C. Koo, B. C. Min, K. J. Lee, B. K. Ju and O. J. Lee | 91 |
| MD02 | Poster | Micromagnetic simulation of magnetization reversal in a discrete magnetic nano-block chain 92 X.-P. Ma*, S.-D. Kim, H.-G. Piao and D.-H. Kim† | 92 |
| MD03 | Poster | 자성 다층박막의 계면이 미치는 길버트 감쇠 거동 93 김보성*, 조영준, 김준희, 양재학, 김상국 | 93 |
| MD04 | Poster | Reversal magnetization dynamics of the flip-flop transitions in CoFeB/Ta/CoFeB trilayer with perpendicular anisotropy 95 A.D. Talantsev, A.A. Elzwawy*, R.B. Morgunov, Y. Lu, S. Mangin, C.G. Kim | 95 |
| MD05 | Poster | Magnon-photon coupling in a planar resonator-YIG thin film configuration 97 Biswanath Bhoi*, Bosung Kim, Junhoe Kim, Young-Jun Cho and Sang-Koog Kim | 97 |
| MD06 | Poster | Mn이 치환된 Ba ₃ Co _{2-x} Mn _x Fe ₂₄ O ₄₁ (x=0.0, 1.0) Z-type hexaferrite의 투자율 특성 연구 99 황필순*, 임정태, 심인보, 한은주, 김철성 | 99 |
| MD07 | Poster | Precession torque induced dynamic skyrmion creation on a circularly confined magnetic nanostructure 101 June-Seo Kim* | 101 |
| MD08 | Poster | 위상 상수를 조정된 다양한 스커미온의 스핀 궤도 토크에 의한 거동 103 윤정범*, 문경웅, 전병선, 김동석, 김창수, 김대현, 이상선, 김원동, 황찬용 | 103 |
| MD09 | Poster | Current-induced asymmetric magnetoresistance due to energy transfer via quantum spin-flip process 105 Kab-Jin Kim*, T. Moriyama, T. Koyama, D. Chiba, S. -W. Lee, S. -J. Lee, K. -J. Lee, H. -W. Lee, T. Ono | 105 |

| | | |
|------|--------|---|
| MD10 | Poster | 수직자기이방성을 나타내는 W/CoFeB/MgO 박막에서 W두께와 열처리 온도에 따른 계면 드잘로신스카-모리야 상호작용 변화 분석 106 Gyu Won Kim*, Yong Jin Kim, In Ho Cha, Alexander S. Samardak [†] , Bappaditya Pal, Alexander G. Kolesnikov, Alexey V. Ognev, Alexandr V. Sadovnikov, Sergey A. Nikitov and Young Keun Kim [†] |
| MD11 | Poster | Real time detection of magnetic domain wall motion using novel writing method ... 108 Kab-Jin Kim*, Yoko Yoshimura, Woo Seung Ham, Rick Ernst, Yuushou Hirata, Tian Li, Sanghoon Kim, Takahiro Moriyama, Yoshinobu Nakatani and Teruo Ono |
| MD12 | Poster | Stack engineering of spin orbit torque efficiency in magnetic bilayers 109 D. J. Lee*, J. H. Kim, B. K. Ju, H. C. Koo, B. C. Min, K. J. Lee and O. J. Lee |

○ Session HM[Hard-magnetic Materials]

| | | |
|------|--------|---|
| HM01 | Poster | Effect of annealing in low PO ₂ on the structure and magnetic properties of M-type Sr-hexaferrite 110 강영민* |
| HM02 | Poster | Exchange coupling behaviors between Sr-hexaferrite and LaSrMnO ₃ composites 111 강영민* |
| HM03 | Poster | Bi ₂ O ₃ , MnCO ₃ SiO ₂ 첨가제가 스트론튬 헥사페라이트의 구조와 자기적 특성에 미치는 영향 112 임은수, 문광록, 강영민* |
| HM04 | Poster | Anisotropic Nd-Fe-B magnet produced by hot-deformation of iso HDDR powder 113 유재경*, 차희령, 이동윤, 이정구 |
| HM05 | Poster | Exchange-spring magnetic behavior in Sr-hexaferrite/MnZn-ferrite composites for permanent magnet applications 114 Tae-Won Go*, Kang-Hyuk Lee, Sang-Im Yoo [†] |
| HM06 | Poster | Phase transformation and magnetic properties of Mn ₅₄ Al ₄₆ Si _x 115 Hui-Dong Qian*, Ping-Zhan Si [†] , Chul-Jin Choi [†] , Jihoon Park, Kyung Mox Cho |
| HM07 | Poster | Layer-number dependence of the magnetic properties of MnBi films 116 Hongjae Moon, Sumin Kim, Hwaebong Jung, Hyun-Sook Lee* and Wooyoung Lee [†] |
| HM08 | Poster | (Fe _{97.5} Co _{2.5}) _{1-x} C _x 합금의 결정자기이방성상수(K1) 117 김경민*, 권해웅, 이정구, 유지훈 |
| HM09 | Poster | Effect of quenching wheel speed on the magnetic properties of melt-spun NdFeM (M=B, Ti) 119 Sol Jung*, Haein Choi-Yim |
| HM10 | Poster | Influence of additional cooling of casted strips on magnetic properties of Nd-Fe-B sintered magnets 121 Hwaebong Jung*, Hongjae Moon, Sumin Kim, Hyun-Sook Lee [†] and Wooyoung Lee [†] |
| HM11 | Poster | Magnetic properties of large-scaled MnBi bulk magnets 122 Sumin Kim*, Hongjae Moon, Hwaebong Jung, Su-Min Kim, Hyun-Sook Lee [†] , Haein Choi-Yim and Wooyoung Lee [†] |

○ Session SM[Soft-magnetic Materials]

| | | | |
|------|--------|--|-----|
| SM01 | Poster | Nonmetal N-doped BiFeO nanoparticles with enhanced room temperature magnetization | 123 |
| | | Yuefa Jia and Chunli Liu* | |
| SM02 | Poster | Al가 치환된 Z-type hexaferrite의 뫼스바우어 연구 | 124 |
| | | 임정태*, 김철성† | |
| SM03 | Poster | FeCo 나노 입자의 합성 및 특성평가 | 126 |
| | | 박종환*, 김석훈, 최호준, 이정우, 노재철, 서수정 | |
| SM04 | Poster | 회전이방성 특성을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 CoFe 두께에 따른 강자성 공명 신호 분석 | 127 |
| | | 김동영*, 윤석수 | |
| SM05 | Poster | Co 박막의 결정구조에 따른 two magnon 산란 특성 분석 | 128 |
| | | 김동영*, 윤석수 | |
| SM06 | Poster | 미세구조 변화에 따른 Ni 나노선 어레이의 자성특성 분석 | 129 |
| | | Min Jun Ko*, Su Hyo Kim and Young Keun Kim† | |
| SM07 | Poster | CoFe 나노스프링의 미세구조와 자성특성 분석 | 131 |
| | | Da Yeon Nam*, Su Hyo Kim, Yoo Sang Jeon and Young Keun Kim† | |
| SM08 | Poster | Fe ₃ O ₄ @AlFe ₂ O ₄ 나노 페라이트의 자기적 특성 및 온열효과 연구 | 133 |
| | | 최현경*, 김삼진, 김철성 | |
| SM09 | Poster | Sol-gel 제조방법에 따른 CoFe ₂ O ₄ 나노 페라이트 자기적 특성 연구 | 135 |
| | | 박정호*, 최현경, 이영배, 김삼진, 김철성 | |
| SM10 | Poster | Microscopic Investigation of Hysteresis Loss of CoFeB/Pd Multilayers | 137 |
| | | L. Huang*, X.-P. Ma, S.-H. Lee, D.-T. Quach, D.-T. Ngo, T.-L. Phan and D.-H. Kim† | |
| SM11 | Poster | 전해도금 방법으로 제작한 Ni-Fe 연자성 합금의 특성 분석 | 138 |
| | | 김석훈*, 이정우, 박종환, 최호준, 신세희, 노재철, 서수정 | |
| SM12 | Poster | Effect of Metalloid Ge Addition on the Magnetic Properties of Fe-based alloys | 139 |
| | | Sumin Kim* and Haein Choi-Yim | |
| SM13 | Poster | Thermal, Mechanical and Magnetic Properties of the Co-Fe based Alloys for various Fe/Co Ratios | 140 |
| | | Jiyun Oh* and Haein Choi-Yim | |
| SM14 | Poster | Analysis of Thermal and Magnetic Properties by Fe/Co ratio to Fe-based Amorphous Alloys | 142 |
| | | Seoyeon Kwon* and Haein Choi-Yim | |
| SM15 | Poster | Ca-P 코팅된 Fe powder의 자기적 특성 | 144 |
| | | 신세희*, 김태유, 박종환, 김석훈, 최호준, 이경섭, 서수정† | |
| SM16 | Poster | Magnetic and Thermal Properties in the Fe-based amorphous alloy with Zr and Nb | 145 |
| | | Garam Yoo* and Haein Choi-Yim | |

| | | | |
|------|--------|---|-----|
| SM17 | Poster | Fe-Si 기반 magnetic alloy core의 고주파 대역 power inductor 특성에 대한 연구 146 김덕현*, 이석희, 김현성, 이보화† | 146 |
| SM18 | Poster | Effect of Boron Additions on Magnetic Properties of Fe-based Amorphous alloys .. 147 Jihye Kim*, Sumin Kim, Bo Kyeong Han and Haein Choi-Yim | 147 |
| SM19 | Poster | Spin transistor using exchange-biased ferromagnetic electrodes in an InAs quantum well 148 Youn Ho Park*, Jun Woo Choi, Joonyeon Chang, Heon-Jin Choi and Hyun Cheol Koo† | 148 |
| SM20 | Poster | Fe nano powder를 첨가한 soft magnetic composite의 조성비에 따른 에너지 손실 변화에 관한 연구 149 이석희*, 김덕현, 김현성, 이보화† | 149 |
| SM21 | Poster | Empirical correlation between Dzyaloshinskii-Moriya interaction and Work function in Pt/Co/X trilayers 150 Yong-Keun Park*, Joo-Sung Kim, Dae-Yun Kim, Yoon-Seok Nam, Min-Ho Park, Byoung-Chul Min, and Sug-Bong Choe† | 150 |
| SM22 | Poster | The Effect of Annealing on Magnetic Properties of Co-based Amorphous Alloy Ribbons 151 Sumin Kim*, and Haein Choi-Yim | 151 |

○ Session SS[Semiconductor spintronics]

| | | | |
|------|--------|---|-----|
| SS01 | Poster | Study on the structural and magnetic depth profile of $(\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}/\text{GaAs})_{10}$ multilayers by X-ray Resonant Magnetic Reflectivity 152 Dong-Ok Kim*, Byoung Gwan Cho, Ki Bong Lee, Jae Young Kim, Jae Ho Chung, Jun Woo Choi, Dong Ryeol Lee | 152 |
| SS02 | Poster | Edelstein Effect Induced Spin Polarization and Anisotropic Magnetoresistance in Rashba 2DEG 153 Won Young Choi*, Hyung-jun Kim, Joonyeon Chang, Gyungchoon Go, Kyung-Jin Lee and Hyun Cheol Koo | 153 |
| SS03 | Poster | Gate voltage control of the Berry curvature in monolayer MoS_2 154 Kyung-Han Kim* and Hyun-Woo Lee | 154 |

○ Session SO[Spin orbit coupling and related phenomena]

| | | | |
|------|--------|--|-----|
| SO01 | Poster | Co/Pt 이중층 박막의 계면 결정성이 자성에 미치는 영향 연구 155 윤지수*, 문경웅, 이주인, 황찬용, 김재성, 정진용, 유천열, 김원동 | 155 |
| SO02 | Poster | Magnetic and Transport Properties of Ferrimagnetic GdCo Alloy with Various Compositions 157 이재욱, 이수길*, 김갑진, 박병국 | 157 |
| SO03 | Poster | Elimination of thermoelectric artifacts in spin-orbit-torque harmonics measurements 159 Eun-Sang Park*, Byoung-Chul Min and Kyung-Jin Lee | 159 |

○ **Session NS[Nano-structured materials]**

| | | |
|------|--------|--|
| NS01 | Poster | The crystallographic and magnetic properties of single phase garnet $Y_{3-x}R_xFe_5O_{12}$ (R=La, Nd, and Gd) 160 Sang Mu Choi* and Young Rang Uhm |
| NS02 | Poster | Fe_3O_4 다중 과립 나노클러스터의 자성입자 분광 분석 161 Lijun Pan*, Bum Chul Park, Micheal Ledwig, Leon Abelmann† and Young Keun Kim† |
| NS03 | Poster | Coexistence of semimetallic phase and semiconducting phase in WTe_2 alloy 163 Jeehoon Jeon*, Tae-Eon Park, Joonil Cha, Hyun Cheol Koo, Jinki Hong, In Chung, Joonyeon Chang |
| NS04 | Poster | Phase locking of multiple spin-torque nano oscillators 164 Hee Gyum Park*, Chaun Jang and Byoung-Chul Min |

○ **Session MO[Magnetic Oxides and Multiferroics]**

| | | |
|------|--------|---|
| MO01 | Poster | Substrate-Free $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) Spin-Thermoelectric (TE) Module Prepared by the Sol-Gel Synthesis 165 Min-Sun Jang*, Im-Jun Roh, Jungmin Park, Chong-Yun Kang, Won Jun Choi, Seung-Hyub Baek, Kyoung Jin Choi, Sung Soo Park, Jung-Woo Yoo, Ki-Suk Lee† |
|------|--------|---|

○ **Session SA[Sensor and Applications]**

| | | |
|------|--------|--|
| SA01 | Poster | 레일의 인장변형력에 따른 자기이력 특성변화 측정 167 이성우*, 강선주, 손대락 |
| SA02 | Poster | Yoke를 사용한 Tendon의 인장응력 및 결함 탐상에 관한 연구 169 정은지*, 채다운, 강선주, 손대락, 이정우, 조창빈 |
| SA03 | Poster | 중형급 위성용 Magnetic Torque Assembly제작에 관한 연구 170 김은애*, 김상준, 손대락 |
| SA04 | Poster | 중형급 위성용 Three Axis Magnetometer제작에 관한 연구 171 김은애*, 김상준, 손대락 |

5월 26일(금) 09:00~10:45

Session : 초청강연 II (Spintronics)

마나블라

✿ 좌 장 : 황찬용(한국표준과학연구원)

| | | |
|-------------------|-------|--|
| Invited O-II-1 | 09:00 | Spin-orbit entanglement and spin-momentum coupling 175 Hyun-Woo Lee* |
| Invited O-II-2 | 09:35 | Soliton-like magnetic domain wall motion induced by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction 176 Kab-Jin Kim*, Yoko Yoshimura, Yoshinobu Nakatani, Teruo Ono |
| Invited O-II-3 | 10:10 | Heusler alloy based magnetoresistive devices 177 K. Hono |

5월 26일(금) 10:55~11:45

Session : 초청강연 III (Magnetic theory/Thin films)

마나틀라

✿ 좌 장 : 김동현(충북대)

| | | | |
|----------|-------|--|-----|
| 초O-III-1 | 10:55 | Effect of Solvents and Relative Humidity on $(C_6H_5(CH_2)_2NH_3)_2(Mn,Cu)Cl_4$ thin films | 181 |
| | | Ki-Yeon Kim* | |
| 초O-III-2 | 11:20 | Filtering spins at optical-field-induced charge transfers: petahertz spin diode | 182 |
| | | Jae Dong Lee* | |

5월 26일(금) 09:00~11:45

Special Session IV '산업체에서의 자성재료 및 부품개발 동향' 2부

베르나차1

✿ 좌 장 : 안성용(삼성전기)

| | | | |
|---------|-------|--|-----|
| 초S-IV-1 | 09:00 | 무선통신 기기에서의 자성재료 개발동향 | 185 |
| | | 김진철* | |
| 초S-IV-2 | 09:25 | 고포화자속밀도 및 저손실 특성을 갖는 비정질 자성소재의 개발 및 응용 | 186 |
| | | 송용설*, 김우철, 오한호, 윤세중, 황순모 | |
| 초S-IV-3 | 09:50 | 차량모터용 자성재료 적용 현황 | 187 |
| | | 이형주*, 한보경, 이재령, 이두환 | |
| 초S-IV-4 | 10:15 | Nd계 희토자석의 개발동향과 미래과제 | 188 |
| | | 김동환*, 공군승 | |
| 초S-IV-5 | 10:40 | 자동차 전장부품용 영구자석 소재의 개발 및 응용 | 189 |
| | | 김효준*, 김상면 | |

5월 26일(금) 09:00~11:45

Special Session V '의과학연구회'

베르나차2

✿ 좌 장 : 유세종(건양대병원)

| | | | |
|--------|-------|--|-----|
| 초S-V-1 | 09:00 | 영상의학정보를 이용한 3D 프린팅 기술의 응용 사례 | 193 |
| | | 성열훈* | |
| 초S-V-2 | 09:40 | 자기공명영상을 이용한 영상유도방사선치료의 동향 | 195 |
| | | 장재욱*, 주명식, 서선열, 김명삼, 황도근, 조재환 | |
| 초S-V-3 | 10:05 | 방사선 흡수선량 보정위한 대기보정계수 산출 장치 개발 | 196 |
| | | 홍주완*, 박철수, 안우상, 서정민, 최재혁, 원희수 | |
| 초S-V-4 | 10:30 | 물리적으로 변화가 전산화 단층 영상에 미치는 영향 | 198 |
| | | 전민철*, 한만석, 유세종, 나길주, 김갑중, 김병국, 김기홍 | |
| 초S-V-5 | 10:55 | 기능적 자기공명영상 기반 뇌 활성화 네트워크 분석을 위한 인과성 분석 기법 비교 연구 .. | 200 |
| | | 정영진*, 김창규, 배석환, 김정호, 김유민, 장현철 | |

| | | | |
|--------|-------|--|-----------------------------|
| 초S-V-6 | 11:20 | Monte Carlo Simulation of X-ray beam design for multi-energy imaging with charge-integrating detector Using GATE | 201 |
| | | | Cheol-Ha Baek*, Daehong Kim |

5월 26일(금) 13:00~15:00

Session : 구두발표 V (Hard Magnetic Materials)

마나틀라

✿ 좌 장 : 김효준(자화전자)

| | | | |
|-------|-------|--|---|
| O-V-1 | 13:00 | Exchange coupled hard (LTP MnBi)/soft ($\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$) composites | 205 |
| | | | Jihoon Park*, Hui-Dong Qian, Ping-Zhan Si, Jong-Woo Kim and Chul-Jin Choi |
| O-V-2 | 13:20 | Ga이 첨가된 Nd-Fe-B 소결자석의 1차 열처리 온도 변화에 따른 미세구조와 자기적 특성 최적화 연구 | 207 |
| | | | 배경훈*, 이성래, 김효준, 이민우, 장태석 |
| O-V-3 | 13:40 | 입계확산 처리를 통한 고보자력 이방성 HDDR 자석 제조 | 209 |
| | | | 차희령*, 유재경, 유지훈, 권해웅, 이정구 |
| O-V-4 | 14:00 | Characterization of Ca-La M-type hexaferrites synthesized by solid state reaction .. | 210 |
| | | | Kang-Hyuk Lee*, Yan Wel, Sang-Im Yoo [†] |
| O-V-5 | 14:20 | The Effect of Shape Control of $\alpha''\text{-Fe}_{16}\text{N}_2$ Particles on Their Magnetic Properties .. | 211 |
| | | | 백연경*, 김수경, 이정구 |
| O-V-6 | 14:40 | Design of high-coercivity $\text{Fe}_{16-x}\text{Al}_x\text{N}_2$ alloy | 212 |
| | | | Jinho Byun*, Taewon Min, Hyoungjeen Jeon, Sungkyun Park and Jaekwang Lee [†] |

5월 26일(금) 13:00~14:40

Session : 구두발표 VI (Soft Magnetic Materials)

베르나차

✿ 좌 장 : 임혜인(숙명여대)

| | | | |
|--------|-------|--|---|
| O-VI-1 | 13:00 | Magnetic Anisotropy in Canted Antiferromagnetic Sr_2IrO_4 single crystals | 215 |
| | | | Muhammad Nauman, Yunjeong Hong, Hwan Young Choi, Nara Lee, Young Jai Choi, Younjung Jo* |
| O-VI-2 | 13:20 | Static and dynamic magnetic properties of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($0.0 \leq x \leq 2.0$) synthesized in a low oxygen pressure | 216 |
| | | | Jae-Hyoung You* and Sang-Im Yoo [†] |
| O-VI-3 | 13:40 | Core loss improvement of Fe metal powder Coated with Alumina oxide by sol-gel method | 217 |
| | | | Sung Joon Choi*, Sunwoo Lee, Jae-Hyoung You and Sang-Im Yoo |
| O-VI-4 | 14:00 | Sign Inversion of Anomalous Hall Effect in heavy metal/permalloy bilayer structures | 218 |
| | | | Mingu Kang*, Seung-heon Chris Baek, Kab-Jin Kim and Byong-Guk Park |
| O-VI-5 | 14:20 | Magnetic Properties and Hysteresis Loss Improvement of Fe Alloy Powder by NH_4OH Etching | 220 |
| | | | Sunwoo Lee*, Sungjoon Choi, Jae-Hyoung You and Sang-Im Yoo |

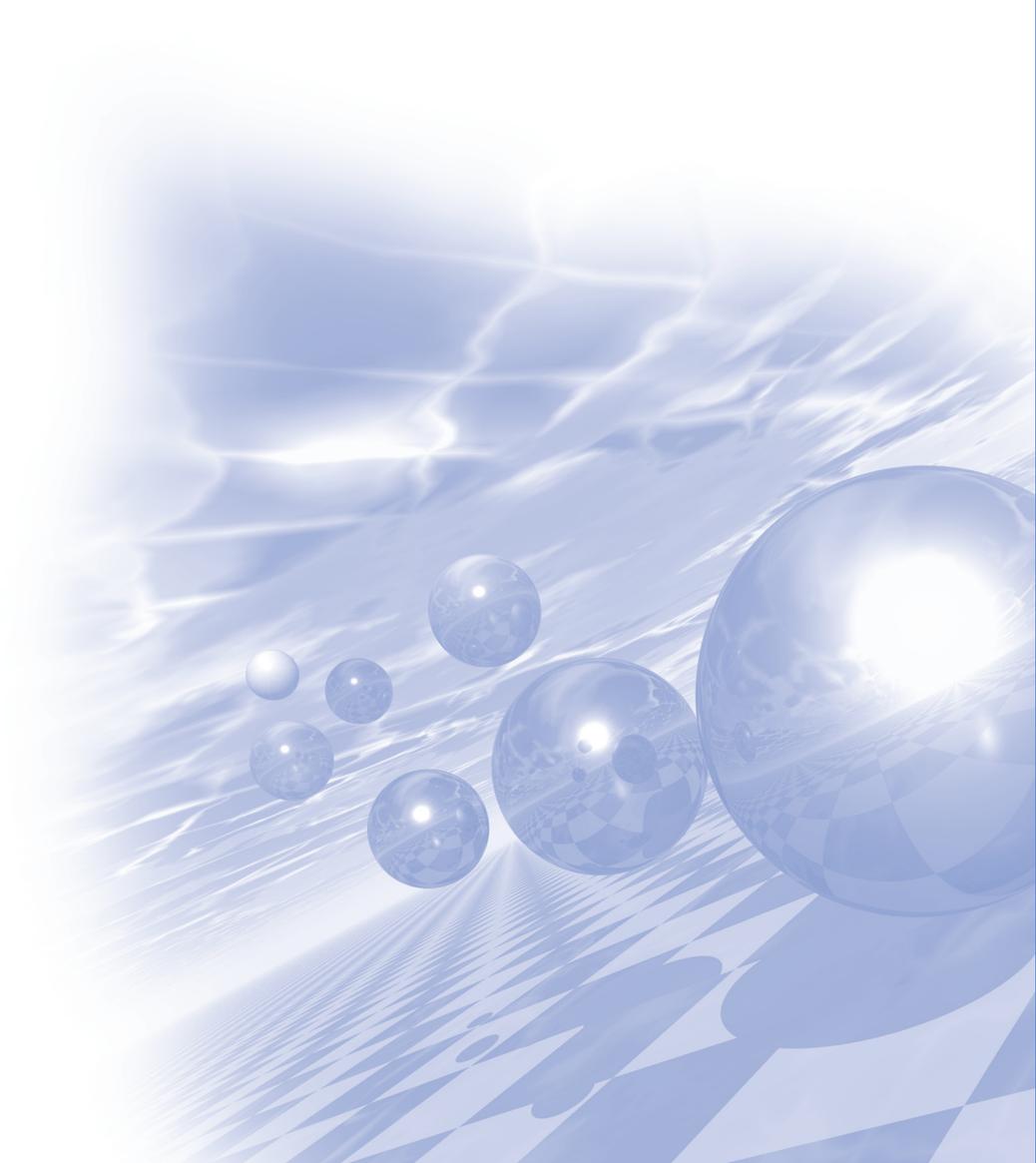
* 좌 장 : 이경진(고려대)

- O-VII-1 13:00 **Hallmarks of the Weyl semimetal: magnetotransport properties in Sb-doped Bi** ··· 223
Y. W. Lee, D. Shin, K.-S. Kim, Yoon H. Jeong*, J. Kim, H. J. Kim
- O-VII-2 13:20 **Spin Nernst magnetoresistance in ferromagnet/heavy metal bilayer structures** ··· 224
김동준*, 전철연, 최종국, 이재욱, Srivathsava Surabhi, 정종율, 이경진, 박병국
- O-VII-3 13:40 **First-principles calculations of Berry curvature: WTe₂ and other heavy metals** ····· 226
Sung-Hyon Rhim*
- O-VII-4 14:00 **Coupled modes of one-dimensional skyrmion lattices in nanostrips** ········· 227
Sang-Koog Kim, Junhoe Kim*, Jaehak Yang, Young-Jun Cho and Bosung Kim
- O-VII-5 14:20 **Induced Magnetism and Giant Perpendicular Magnetic Anisotropy of Transition Metal Doped Topological Insulator Bi(111)** ··········· 228
Juyoung Jung*, Youngjun Kim, Purev Taivansaikhan and Dorj Odkhuu†
- O-VII-6 14:40 **Spin-Orbit Torques in Ferrimagnetic CoTb alloys** ····················· 229
Soong-Geun Je*, J-C. Rojas-Sánchez, T. H Pham, P. Vallobra, T. Fache, M.-C. Cyrille, D. Lacour, G. Malinowski, M. Hehn, G. Gaudin, S. Mangin and O. Boulle



KMS 2017 Summer Conference

‘한국의 자석산업이 나아가야 할 방향’ 토크콘서트



국내 희토자석 개발현황 재조명에 의한 향후 발전방안 도출

김동환*

성림첨단산업(주) 연구소, 대구광역시 달서구 호림동 8

1982년 일본의 Sumitomo metal mining에서 Nd계 희토자석이 발명된 이후 35년 동안 전 세계 많은 연구기관과 희토자석 제조기업에 의해 괄목할만한 기술적 진보를 이어오고 있고, 모터, 액츄에이터, 발전기, 의료기기, 음향기기 등 산업전반에 걸쳐 제품의 효율향상과 신제품 개발에 기여한 바가 매우 크다. 더욱이 최근에는 고온환경 응용분야 제품 중심으로 자석의 중희토 사용량을 획기적 절감시킨 중희토저감형 희토자석이라는 신개념의 3.5세대 영구자석이 출시되면서[1] 그 동안 희토자석 사용상의 가장 큰 애로사항인 고가의 가격과 자원고갈에 대한 우려를 동시에 해결하면서 친환경자동차와 차세대 신제품 개발에 새로운 수요가 급격히 증가하는 추세이다.

이와 같은 지속적인 희토자석의 발전에는 일본과 중국의 대기업 중심으로 광범위한 연구개발 투자를 통해 진행되어오고 있고, 결과적으로 현재 전 세계 희토자석 생산의 대부분은 이들 두 나라가 양분하여 독점적으로 공급하고 있는 실정이다. 반면에, 그 동안의 국내 희토자석 연구와 생산현황을 살펴보면 1990년 이후 여러 대학과 연구기관을 통해 연구가 진행된 사례가 다수 있고 대기업과 중견기업이 희토자석 개발과 생산에 대한 투자를 진행한 실적은 있으나, 원천특허 회피, 기술장벽 극복 및 가격 경쟁력 확보에 있어서 외국기업과 격차를 극복하지 못하고 대부분 사업을 포기한 상태이다. 지금은 일부 중소기업에 의해 개발과 생산을 진행하고 있는데, 중소기업의 투자여력과 기술력의 한계로 인해 고급자석 제조를 위한 본질적 연구에 집중하지 못하고 단순히 희토자석 모재를 수입하여 가공 및 도금에 의해 자석을 생산하여 완성품업체에 공급하고 있는 수준이다.

향후 국내 자동차, 에너지 등 첨단산업의 미래 산업발전 방향에 의하면 희토자석에 대한 기술적 요구가 점차 고도화 되리가 판단되지만, 공급측면에서 해외 희토자석 생산기업들이 자국의 완성품 기술경쟁력 확보를 위해 고급자석에 대한 판매제한이 예상되는 상황이다. 동시에 앞서 언급한 바와 같이 현재의 우리 모습은 일본과 중국기업에 비해 고급 희토자석 생산을 위한 기술적인 격차가 큰 것도 사실이다. 본 발표에서는 전 세계 희토자석의 기술과 생산능력을 우리의 현실과 비교해 재조명 하여 극복해야할 과제를 도출하고, 앞으로 해외 선진사들과의 기술적, 생산역량의 격차를 해결하기 위한 방안에 대하여 논의하고자 한다.

참고문헌

- [1] 이정구, 유지훈, 김휘준, 장태석, Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 22, Number 2, (2002)

고성능 영구자석용 재료 개발의 현황과 전망

권해웅^{1*}, 이정구², 유지훈²

¹부경대학교 재료공학과, 부산광역시 남구 신선로 365 (48547)

²재료연구소, 경상남도 창원시 성산구 창원대로 797 (51508)

현재 진행되고 있는 영구자석용 재료 관련 연구개발 활동은; (1) Nd-Fe-B계 자석에서 Dy, Tb과 같은 중희토류 원소를 사용하지 않거나 그 사용을 최소화하면서 보자력 극대화, (2) 높은 자기이방성과 높은 포화자화를 갖는 새로운 희토류-천이금속계 화합물 탐색 및 자석 성능 발현 연구 개발, (3) 희토류 원소를 사용하지 않으면서 높은 자기이방성과 높은 포화자화를 갖는 3d 천이금속 합금 탐색 및 자석 성능 발현 연구 개발, (4) 경자성이 높은 합금과 포화자화가 큰 합금 간의 복합재료화(nanocomposite)를 통한 자석 성능 향상 등으로 요약할 수 있다. 현재 이루어지고 있는 이들 연구개발 현황에 대하여 전반적으로 토의하고, 이를 바탕으로 하여 고성능 영구자석용 재료 개발의 미래를 전망한다.

차세대 산업용 영구자석소재개발을 위한 융합연구 필요성

이정구*

한국기계연구원 부설 재료연구소

최근 산업계의 제품트렌드 변화에 따라 고성능 영구자석의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 이와 함께, 기존 영구자석의 고특성화 연구와 신규 영구자석 탐색 연구에 연구계와 산업계에서의 관심이 높아지고 있다. 하지만, 개발된 영구자석이 실제로 산업체에서 부품/제품으로 채용되어 상용화되기 위해서는 보다 체계적이고 효율적인 연구개발이 필요한 실정이다. 수요기업-소재기업-연구집단 간의 소통과 협업의 인적융합과 자원기술-소재기술-제품기술의 기술융합이 절실한 시점이며, 이러한 융합연구를 위한 학회의 역할에 관하여 토론한다.

한국 자석산업이 나아가야 할 방향

이우영*

연세대학교, 신소재공학과

영구자석은 “외부의 전원공급 없이 지속적으로 자장을 발생시키는 기능을 하는 소재로서 종전의 전자석 기능을 대체하여 사용”되고 있는데, 전자석과 달리 장치가 간단하고 외부의 에너지(전류) 공급 없이 지속적으로 자장을 발생시킬 수가 있다는 이점으로 인해 후방 산업인 자동차, 가전, IT 분야 산업의 에너지절감, 소형화에 획기적으로 기여하는 핵심 소재이다. 전반적인 산업분야에 걸쳐 고성능이 요구되는 고급제품에는 희토류자석이 우선적으로 사용되고 있고, 상대적으로 저가이면서 고기능이 요구되지 않는 분야의 제품에서는 페라이트 자석이 사용되고 있다. 한편, 희토류자석이 사용되는 산업분야 중에서 자동차분야에서는 2000년대 친환경 자동차(하이브리드/전기자동차) 등에 사용되는 모터가 대부분 희토류자석을 채용하게 되면서 희토류자석 수요의 매우 가파른 상승세를 보이며, 2025년에는 약 30조 시장이 예상되고 있고, 자동차의 지속적인 효율 향상에 기여하기 위해 기술적으로도 기존 희토류자석보다 2-3단계 업그레이드된 성능 개발이 필수적이다. 이를 위해 중 희토류를 사용하지 않고 보자력을 향상시키기 위한 기술적인 해결방안 제시가 필수적이라 할 수 있고 이에 대해 논의해보고자 한다.

일본자석산업의 동향과 한국자석산업이 나아가야 할 방향

최판규*

(주)MTI, 경기도 평택시 청북면 백봉길 27, 힐탑빌 A-309

1985년 NdFeB계 영구자석을 일본 스미토모특수금속 (현 히타치금속) 이 발견한 이래로, 일본은 히타치금속, 신에츠화학, TDK 등 생산기술의 우위를 가진 대기업을 위주로 자석산업을 선도하고 있고, 중국은 풍부한 희토류자원을 가지고 삼환 등의 국영기업들과 이노보 등의 사기업 등이 일본에 이어 기술개발을 지속적으로 진행하여 높은 기술력을 가지고 자석산업을 이끌고 있다. 우리나라는 몇년 전 처음으로 포항제철이 중국에 자석회사를 설립하였으나, 초기설비 투자실패와중국정부의 보이지 않는 사업방해 등으로 사업을 철수하고 말았다. 현재 국내 몇몇의 대기업과 중소기업에서 꾸준히 NdFeB계 영구자석 사업에 관심을 가지고 있다.

또한, 전 세계적으로 희소금속의 중요성이 높아지고 있는 가운데 일본은 2004년부터 원소전략 개념을 도입하고 2007년부터는 원소전략사업을 추진하게 되었다. 일본의 문부과학성의 “원소전략 프로젝트”는 물질과 재료를 구성하고 그 기능과 특성을 결정하는 원소의 역할과 성격을 연구하고, 물질과 재료의 기능과 특성의 발현 기구를 명확히 규명함으로써, 희소원소나 유해원소를 사용하지 않는 고기능을 가진 물질과 재료를 개발하는 것을 목적으로 하고 있다.

특히, 2010년 9월 일본명 센카쿠렛도 (중국명 다오위다오)에서 중국어선과 일본순시선이 충돌하는 사건이 일어나서, 중국어선을 나포하여 영토문제, 외교, 경제 갈등으로까지 확산되었다. 일본이 국내법을 적용하여 사법처리 하려하자, 중국이 꺼낸 카드가 희소금속의 일본수출금지였다. 이 때부터 위기감을 느낀 일본은 더욱더 원소전략 프로젝트에 박차를 가하기 시작했다.

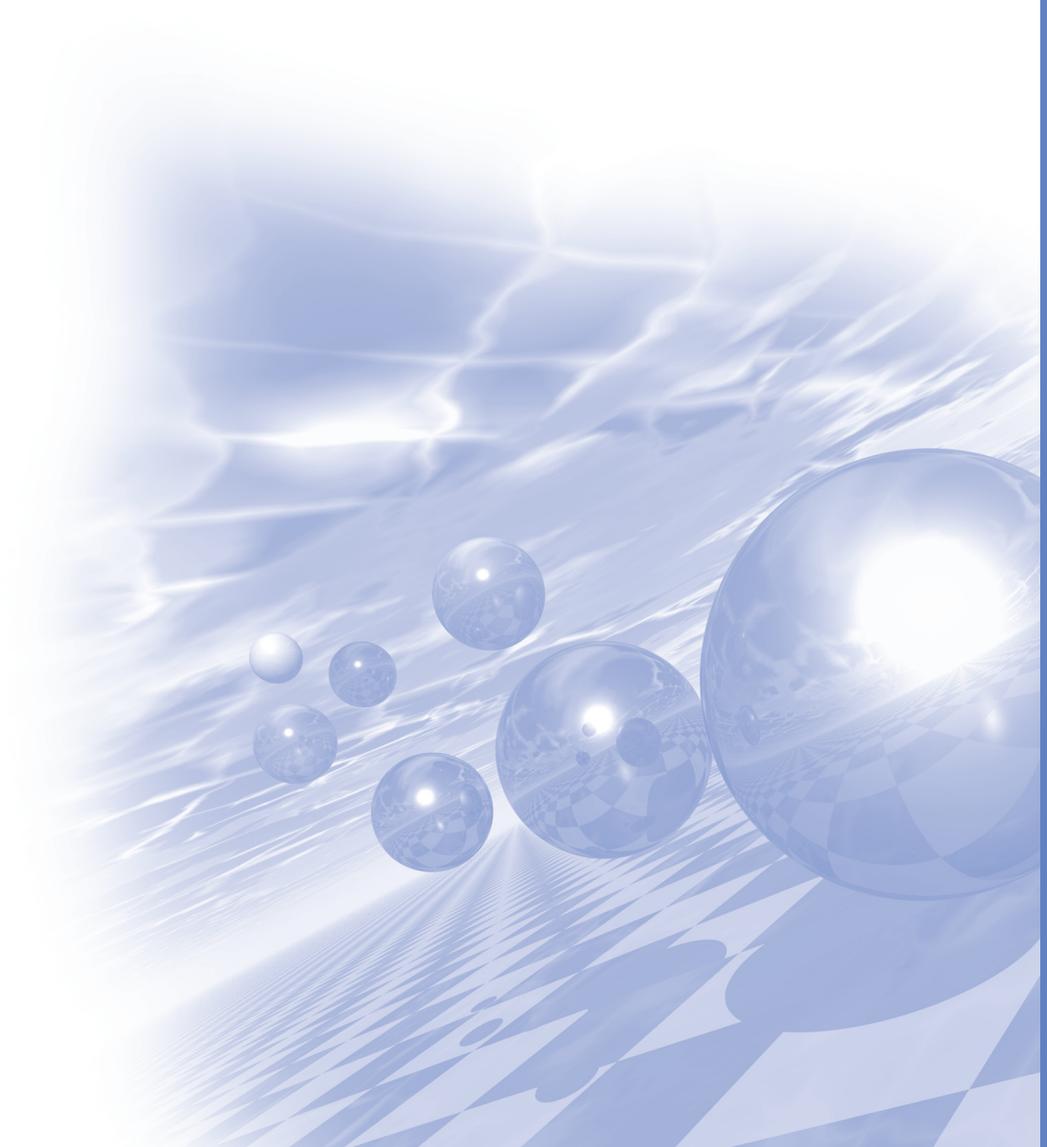
이에 제2회 Talk Concert에서는 앞으로 한국자석산업을 어떻게 전개해나가는 것이 좋은지에 대해서 논의하고, 또 우리나라의 원소전략에 대한 대응책에 대해서 논하고자 한다.



KMS 2017 Summer Conference

Special Session I

‘ 방사광가속기를 이용한 자성재료 및
스핀트로닉스 연구 ’



X-ray Resonant Magnetic Scattering Study of Magnetic Proximity Effect in Pd/Co/Pd and Pt/Co/Pt Trilayers

Dong Ryeol Lee^{1*}, Dong-Ok Kim¹, Ilwan Seo¹, Yongseong Choi², Jun Woo Choi³

¹Department of Physics, Soongsil University

²Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, USA

³Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology

We present an element and depth resolved x-ray resonant magnetic scattering(XRMS) study of the magnetic proximity effect in nonmagnetic/ferromagnetic/nonmagnetic (NM/FM/NM) trilayers. In specific, the top and bottom Pd(Pt) moments in Pd/Co/Pd and Pt/Co/Pt thin films, which is the archetypical film structure in spin-orbitronic devices, have been measured with x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) and x-ray resonant magnetic reflectivity (XRMR) at the Pd L3 (3.174 keV) and Pt L3 (11.56 keV) edges. We found from a quantitative analysis of XRMS curves that the induced Pd(Pt) magnetic moments at the top Co/Pd(Pt) interface are significantly larger than the Pd(Pt) moments at the bottom Pd(Pt)/Co interface.[1] Since interfacial spin transport properties in the NM/FM/NM structure are known to be largely affected by the magnetic proximity effect, such asymmetry in magnetic proximity effects could be important for understanding spin transport characteristics in FM/NM systems and its potential application to spin devices.

Reference

[1] Dong-Ok Kim et. al., Scientific Report 6, 25391 (2016).

원형의 강자성 디스크에서 3차원 자속 폐쇄 구조의 대칭성 깨짐

Symmetry Breaking of 3D Flux-Closure Magnetization Configurations in a Circular Disks

이기석^{1*}, 한희성¹, 이수석¹, 김남규¹, 임미영^{2,3}, 유영상², 홍정일³

¹울산과학기술원(UNIST)

²로렌스 버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory)

³대구경북과학기술원(DGIST)

수백 나노미터 혹은 수 마이크로미터 크기로 패턴된 연자성 박막의 경우 자기구조의 형상은 정자기 에너지를 줄이기 위하여 패턴된 형상을 따라 자속을 폐쇄시키는 구조를 만들게 된다.[1] 정사각형 패턴에서 보이는 란다우 형상이나 원형디스크 형상에서 보이는 자기 소용돌이 구조가 여기에 해당한다. 이러한 형상은 보통 2차원적 형상으로만 파악되어 왔는데 50 nm 이상의 두께를 가지는 박막의 경우 이러한 2차원적 평면 자속 폐쇄 구조뿐만 아니라 매우 복잡한 3차원 구조를 띄게 된다.[2,3] 예를 들어 정사각형이 아닌 직사각형 형상의 경우 가운데 핵이 있고 그 주위를 둘러싼 단순한 자기구조가 아니라 늘어난 ‘ㄷ’자 형태의 블로흐(Bloch) 자구벽 구조와 이를 둘러싸고 있는 네엘-캡(Néel-cap)으로 이루어진 복잡한 3차원 구조가 형성된다.[2,3] 이는 두께방향으로도 정자기 에너지를 줄이기 위하여 자속 폐쇄구조가 형성이 되기 때문이다. 보통 2차원 자속 폐쇄 구조는 가운데 핵의 방향과 폐쇄구조의 회전방향에 따라서 4가지 상태를 가지게 되는데 3차원의 경우는 두께방향의 자속 폐쇄구조의 회전방향까지 더해지게 되어 8가지 에너지적으로 안정한 상태가 가능하다. 그러나 정사각형이나 원형등 180도보다 작은 각으로 회전 대칭을 가지는 형상의 경우에는 회전 대칭적인 자기소용돌이 핵의 구조를 가지게 되어 두께 자속 폐쇄구조 회전방향에 따른 추가적인 자유도는 사라진다.

본 연구에서는 원형 디스크에서 이러한 3차원 자속 폐쇄 구조가 외부 자기장에 의해 형성될 수 있음을 로렌스 버클리 국립연구소 산하 방사광 가속기(Advanced Light Source) 6.1.2 빔라인 자기투과현미경을 통하여 실험적으로 관측하였으며 또한 이 구조의 회전 방향은 2가지의 자유도를 가지는 것이 아니라 외부 자기장과 평면 자속 폐쇄 구조의 방향, 핵의 방향과의 관계에 따라서 항상 특정 방향으로만 형성되는 대칭성 깨짐 현상을 관찰하였다. 또한 이것이 에너지적인 선택이라는 점을 미소자기 전산모사를 통해 규명하였다.

References

- [1] A. Hubert and R. Schäfer, *Magnetic Domains*. (Springer, Berlin, 1999)
- [2] F. Cheynis et al., *Phys. Rev. Lett.* 102, 107201 (2009)
- [3] A. Masseboeuf et al., *Phys. Rev. Lett.* 104, 127204 (2010)

Investigation of micro-magnetic structures by using scanning transmission X-ray microscopy

Wondong Kim^{1,2*}

¹Center for Nanometrology, Division of Industrial Measurement, KRISS

²University of Science and Technology

X-ray magnetic circular or linear dichroism(XMCD/XMLD) has been the representative magnetic measurement technique utilizing synchrotron radiation for last three decades due to its element specific magnetic sensitivity. Recently, the traditional simple XMCD/XMLD measurement technique is evolved into more advanced techniques with additional functionality. Scanning transmission x-ray microscopy(STXM) is recently emerging as a powerful advanced technique to investigate various magnetic phenomena such as heavy metal/ferromagnetic metal bi-layer system and magnetic two-dimensional materials due to its nanoscale spatial resolution combined with element specific magnetic sensitivity based on XMCD and XMLD. By using STXM, we successfully measured the microscopic magnetic domain structure of Co/Pt bilayer systems. By applying external magnetic field in out-of-plane direction, we observed the evolution of magnetic domain from maze-type structure to skyrmion-like bubble structures. We also investigated the changes of these bubble domain structures under the influence of in-plane external magnetic field to identify the character of domain-wall of bubble type magnetic domain. In case of locally oxidized graphene layers where the ferromagnetic order was observed with magnetic force microscopy, we identified the origin of ferromagnetism based on element specific measurement with STXM.

Direct domain structure observation depending on relative ratio of metal (FM) and metal-oxide (AFM) in mixture phase film

Min-Seung Jung^{1*}, Mi-Young Im^{2,3} and Jung-Il Hong^{1,2*}

¹Department of Emerging Materials Science, DGIST, Daegu 42988, Korea

²Research Center for Emerging Materials, DGIST, Daegu 42988, Korea

³Center for X-Ray Optics, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

Strong interface coupling at the interface between ferromagnetic (FM) and antiferromagnetic (AFM) can cause anomalous spin configuration leading to unexpected magnetic properties. In terms of film structure, nanomixed multi-phase film consisting of nanograins of magnetic heterophases may show advantages when compared with conventional bi- or multi-layer films. In other words, when FM and AFM phases are mixed to form nanocomposite structure with grain boundaries distributed randomly in the film, the interface density increases significantly compared with the flat interfaces between layers in the bi- or multi-layer structure film and the interface property can be regarded as the representative property of the nanocomposite structure.

In the present study, we fabricated two-phase nanomixture film with various relative ratios of FM and AFM phases by reactive sputtering. Coexistence of nano-crystalline FM and AFM phases in the film was confirmed by XRD and TEM characterizations. We report interesting results that are thought to be from the internal interface structures of film through magnetic property measurement. The shape anisotropy is reduced as the degree of oxidation in the nanomixture film increases. When the degree of oxidation in the film is approximately 50%, the shape anisotropy of the FM film is almost suppressed and exchange bias effect can be set in both in-plane and out-of-plane directions. In addition to magnetic properties measured by M-H loops, magnetic domain structures of the patterned film were directly observed using a soft x-ray full-field microscope (XM) in Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Magnetic domains in the nanomixture film showed multi-domain structure unlike the Landau patterns in the pure metal films. We further confirmed distinctly different trend of domain structure changes depending on degree of oxidation of films through statistical analyses using 40 patterns.

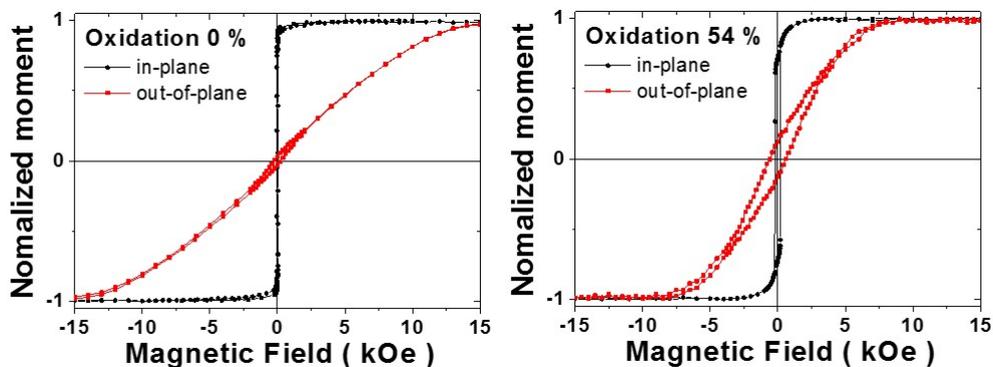


Fig. 1. Hysteresis loops of metal and metal-oxide mixture films measured along in-plane and out-of-plane directions.

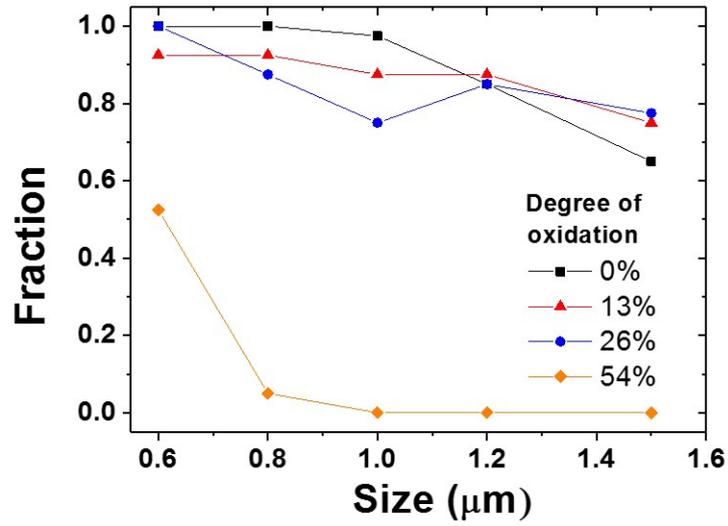


Fig. 2. Fraction of Landau domain formation in the array of square patterns of various sizes and degree of oxidations.

To sum up, in the AFM and FM phase nanomixture film, nano-grains are mixed and entangled that enormously high density of grain boundary forms to effectively block the dipole interactions between FM grains. Therefore, shape anisotropy is ignorably small and exchange bias effect can be set in random direction with regard to the film geometry due to the randomly oriented internal interfaces.

Exploring Quantum Emergent Properties using Resonant Inelastic X-ray Scattering

Seo Hyoung Chang^{1*}, Myung Joon Han², Jungho Kim³

¹Department of Physics, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

²Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

³Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439, USA

*cshyoung@cau.ac.kr

Exploring quantum emergent properties of correlated systems will overcome the conventional trial-error approach. Recently, some researchers suggested an innovative way to search for the properties via controlling ‘spin-orbit coupling’ rather than the conventional physical picture (charge-spin-lattice). However, understanding of the new picture is yet incomplete due to experimental limitations.

In this project, we propose a new experimental approach based on resonant inelastic x-ray scattering (RIXS) and strong spin-orbit coupling systems. Specifically, we will demonstrate new quantum emergent properties (j_{eff} system) of lacunar spinel (GaTa_4Se_8), which is a newly proposed material in theory.

Our project offers a creative and unique approach based on the realization of theoretically-proposed model systems combined with an advanced hard x-ray RIXS. RIXS is a powerful tool to unveil the detailed mechanisms and to detect elementary excitations related to spin-orbit coupling. Furthermore, we will present *in situ* RIXS combined with high pressure and electric field, which can generate new phases and quantum emergent physical properties.

In-situ X-ray diffraction on switchable low energy geometric multiferroic single crystal

Yoon Seok Oh^{1,2,3*}, Rongwei Hu^{2,3}, Young Hoon Jeong⁴,
Fei-Ting Huang^{2,3} and Sang-Wook Cheong^{2,3,4}

¹Department of Physics, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 689-798, Korea

²Rutgers Center for Emergent Materials, Rutgers University, Piscataway, NJ 08854, USA

³Department of Physics & Astronomy, Rutgers University, Piscataway, NJ 08854, USA

⁴Laboratory for Pohang Emergent Materials, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

Geometric ferroelectrics are called as improper ferroelectrics where geometric structural constraints, rather than typical cation-anion pairing, induce proper ferroelectric polarization. Among the geometric structural distortion, trimerization of MnO₅ bipyramids in hexagonal manganites induces most intriguing multiferroicity such as topological vortex-antivortex, angle dependent conducting domain walls, enhanced magnetoelectric coupling at domain walls, etc. The ferroelectric transition induced by incorporation of trimerization and ferroelectricity in hexagonal RMnO₃ (R=Ho, Er, Yb, Lu, Y) occurs at very high temperature 1120 - 1435 C. Because of the high transition temperature, it has been unavailable to study thermodynamic behavior of trimerization and polarization. Here, we present in-situ x-ray diffraction in structural and polarization evolution near the transition temperature of the improper ferroelectric in order to clearly understand the fundamental thermodynamics of improper ferroelectric correlated with trimerization and polarization.

Current induced skyrmion dynamics observed by transmission x-ray microscopy

Jun Woo Choi^{1*}, Seonghoon Woo¹, Kyung Mee Song^{1,2}

¹Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 02792, Korea

²Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04130, Korea

Current induced chiral magnetic skyrmion motion was studied using x-ray magnetic circular dichroism based time-resolved transmission x-ray microscopy. Real-time skyrmion dynamics was measured while nanosecond current pulses were applied. In ferromagnetic Pt/CoFeB/MgO multilayers, we first show that skyrmions can be generated by a bipolar current pulse. The so made skyrmions could be moved along a magnetic strip at velocities up to ~ 10 m/s with current pulses of amplitude $\sim 1.5 \times 10^8$ A/m². It is also found that distinct dynamic behavior of magnetic skyrmions, such as a breathing-like motion or a translational motion, appear and can be reliably tuned depending on the magnitude of the current pulse. We also show the first ever experimental observation of antiferromagnetically coupled skyrmions stabilized in ferrimagnetic GdFeCo multilayers. Similar to ferromagnetic skyrmions, the ferrimagnetic skyrmions could also be translated along a magnetic strip with electrical current. More importantly, the ferrimagnetic skyrmions show a much smaller skyrmion Hall effect, which indicates that ferrimagnetic skyrmions might be better suited for skyrmion based device applications.



KMS 2017 Summer Conference

Special Session II

‘ Bio–Magnetics ’



자성 마이크로의료로봇 기반 정밀 세포 전달

최홍수*, 김상원, 김진영

¹대구경북과학기술원, 로봇공학전공

1. 서론

의료용 마이크로 로봇은 체내에 삽입하여 최소 침습적인 방식으로 진단과 치료에 이용하는 마이크로 크기의 로봇으로, 수술자의 도구 및 손이 진입하기 어려운 국소부위에 진입하여 자기장과 같은 무선제어 방식을 통해 위치와 방위가 정밀 제어된다.[1] 또한 체내에서 약물 및 세포전달을 위한 도구로 사용되었을 때, 국소부위 약물치료 및 세포와 조직의 기능회복에 효과적이다. 현재는 마이크로 크기의 로봇 구조물 제작의 어려움 때문에 주로 단순한 구조의 마이크로 로봇을 통한 위치이동에 그 연구의 초점이 맞추어져 있다. [2] 따라서 마이크로 로봇의 이동뿐만 아니라 다양한 기능을 수행할 수 있는 마이크로 로봇의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 세포의 배양과 성장을 가능하게 하는 3차원 다공성 구조물을 제작하고, 자성물질을 증착 하여 자기장을 통해 유체 내에서 위치 및 방위를 제어하였다. 또한 HEK 293 세포를 마이크로 로봇 구조물 내에 배양시켜 3차원 배양된 세포 전달을 위한 마이크로 로봇을 완성하였다. [3]

2. 실험방법과 결과

2.1 마이크로로봇 제작

마이크로 로봇은 Computer aided design (CAD; Solidworks)를 사용하여 설계하였으며, 세포배양에 알맞도록 구조물의 선폭과 간격을 결정하였다. 전체 길이는 약 150 μm 이고 선폭과 공극의 크기에 따라 두 가지 Type으로 설계하였고, 각 Type은 원통형 및 직육면체 형으로 설계되었다.

설계된 마이크로 로봇은 3차원 리소그래피 공정과 금속층 증착을 통해 제작되었다. 3차원 레이저 리소그래피 시스템은 고에너지 파장 (780 nm)을 가지는 레이저 빔을 포토 레지스트에 조사하여, 조사된 부분의 광경화성 폴리머를 경화시키는 원리를 이용한다. 조사되지 않은 부분을 현상액으로 제거한 후에 원하는 3차원 구조물을 얻을 수 있다. 3차원 구조물이 완성되면 자기장 제어를 위해 자성물질인 니켈(Nickel)을 증착하고, 생체 적합성 물질인 티타늄(Titanium)을 최외곽에 증착하여 완성한다. 그림 1은 완성된 마이크로 로봇(Type 1)의 주사전자현미경(SEM) 사진이다.

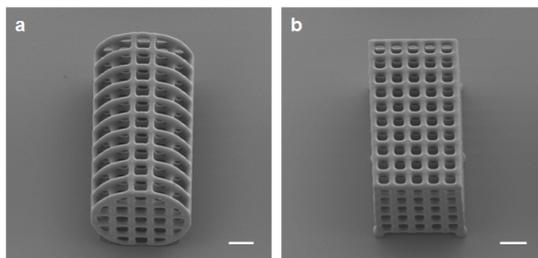


그림 1. 완성된 마이크로 로봇의 SEM 사진;
Type 1의 원통형(a) 및 직육면체 형(b) 마이크로 로봇, Scale bar: 20 μm .

2.2 마이크로로봇의 자기장 제어

제작된 마이크로 로봇은 정밀 자기장 제어기 (minimag; Aeon Scientific)를 통해 제어되었다. 자기장 제어기

내의 8개의 전자석 코일에 인가되는 전류를 통해 3차원 공간에서 자기장 세기(B) 및 자기장 기울기(∇B)를 생성한다. 자기장 세기는 마이크로 로봇의 방위를 결정하고 자기장 기울기는 마이크로 로봇을 선형 이동시키며, 이를 통해 마이크로 로봇의 위치와 방위를 제어한다.

$$T = m \times B \quad (1)$$

$$F = (m \cdot \nabla)B \quad (2)$$

수식 (1)은 자기장 세기에 의해 자성체가 회전하기 위한 자기 토크(T)의 크기를 나타낸다. 수식 (2)는 자기장 기울기에 의해 자성체가 선형이동하기 위한 자기힘(F)의 크기를 나타낸다. m 은 자성체의 자기모멘트이며 그 크기가 클수록 외부 자기장에 잘 반응하여 많은 힘이나 토크를 낼 수 있다. 그림 2는 DI water 내에서 자기장에 의해 제어되는 마이크로 로봇의 제어화면 및 제어 원리를 나타낸다.

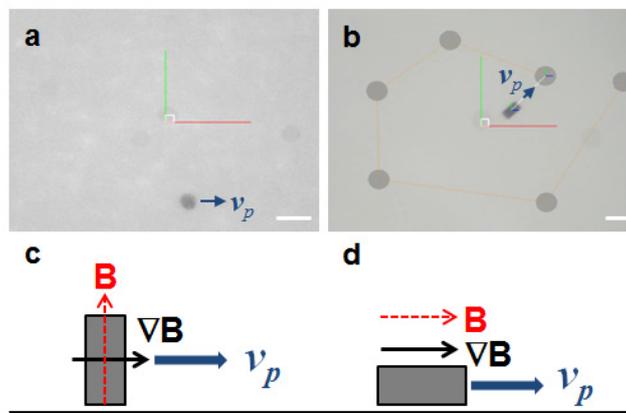


그림 2. 마이크로 로봇의 자기장 제어화면 및 제어원리, (a) 수동제어화면, (b) 자동제어화면, (c) 수동제어화면 a에 대한 제어원리, (d) 자동제어화면 b에 대한 제어원리, Scale bar: 200 μ m.

3. 결론

본 연구에서는 세포전송을 위한 자성을 가진 다공성 마이크로 로봇을 제작하였으며, 자기장 정밀 제어를 통해 제작된 마이크로 로봇의 위치와 방위를 유체 내에서 정밀 제어하였다. 또한 HEK 293 세포의 3차원 배양을 통해 세포 전송용 마이크로 로봇의 기능을 확인하였다. 향후 마이크로 로봇 재료 및 자기장 구동 방식 등을 연구하여 체내 환경에서 이동효율이 좋고, 생체 적합성이 뛰어난 마이크로 로봇을 개발할 수 있다.

4. 참고문헌

[1] B. J. Nelson, et al., “Microrobots for Minimally Invasive Medicine”, Annual Review of Biomedical Engineering, Vol. 12, pp. 55-85, 2010.

[2] S. Tottori, et al., “Magnetic Helical Micromachines: Fabrication, Controlled Swimming, and Cargo Transport”, Advanced Materials, Vol. 24, No. 6, pp. 811-816, 2012.

[3] S. Kim, F. Qiu, S. Kim, A. Ghanbari, C. Moon, L. Zhang, B. Nelson, and H. Choi Advanced Materials, Vol. 25, Issue 41, pp 5863–5868, Nov. 2013.

High Resolution Magnetic Nano-Particle Analyzer

김혁준¹, 박유근¹, 박상윤^{1*}

¹차세대융합기술연구원, 서울대학교

The most important issue for magnetic materials is an understanding of the magnetic and physical properties of a nanometer-sized particle because the use of magnetic nanoparticles (MNPs) in many applications depends predominantly on their inherent magnetic properties. In the case of biomedical applications, the forces that influence the translational, rotational, and vibrational motion of a MNP- tagged biomolecule are the magnetic force due to the magnetization of an individual MNP and the external magnetic field under a given condition. Popular magnetic biosensing platforms such as giant magneto-resistance (GMR) sensors, Hall sensors, and magneto-optical sensors that are used to quantitatively analyze the existence of target molecules are based on the detection of a stray field from a single MNP . Furthermore, structural assemblies of MNPs form various recording media and permanent magnets.

Recently, there have been many attempts to quantitatively analyze a biomolecule by magnetically manipulating the motion of magnetic beads in a microfluidic system because magnetic interactions are generally not affected by changes in the surface charges, pH, or ionic concentration of the surrounding medium, contrary to electrical-driven manipulation.

To precisely manipulate the motion, we should know the characteristics of the MNP, e.g., the size, charge state, and magnetism. There are well-established techniques for investigating the physical and electrical properties of a nanoparticle. For instance, the size and surface charge state of a nanoparticle can be routinely characterized by dynamic light scattering (DLS) and zeta-potentiometry, respectively. These methods can provide information on the distributions and the average values of the size and charge number of each particle. Magnetic characteristics have been usually determined by a superconducting quantum interference device (SQUID) and by a vibrating sample magnetometer (VSM). Unlike DLS and zeta-potentiometry, these techniques, although they have excellent sensitivities, are limited to the average properties of a large number of MNPs. To the best of our knowledge, the resultant data from these techniques do not provide sufficient information on the magnetism of a MNP, which may be considered as a critical bottleneck in facilitating the use of MNPs in various industrial applications. Therefore, the need to characterize a single MNP has been increasingly recognized.

In this work, we investigate the motion of MNPs, 30 nm in diameter, that are driven by both magnetic and electric forces in a nanopore membrane. In this investigation, we measured the velocity of the MNPs passing through the nanopore using an ionic current blockade. We found that the magnetic force enables the MNPs to move more rapidly and that the velocity is linearly proportional to the magnetization of a MNP. Thus, we were able to measure the magnetization of a single colloidal MNP and to acquire hundreds of data points on the magnetization within a few minutes.

자기장을 이용한 생체분자 물성 연구

김기범*

한국뇌연구원, 연구본부

1. 서론

단분자 생물물리는 물리이론과 방법을 활용해서 생명현상을 생체분자 수준에서 연구하는 분야로 최근들어 각각의 생체분자들의 물리적 특성을 정교하게 측정하는 실험 장치들이 개발되면서 다양한 생명현상에 대한 혁신적인 연구들이 왕성하게 발표되고 있다. 특히 생체 단분자에 역학적 조작을 가하면서 물리적 특성을 연구할 수 있는 단분자 역학분석(single molecule force spectroscopy)기법을 이용하여 기존 생물학 연구에서 다룰 수 없었던 새로운 연구영역에서 다양한 연구들이 수행되고 있다.

단분자의 역학적 조작과 분석을 위해 자기집계, 광학집계, 원자력현미경 등이 활용되고 있다[1,2]. 이중 자기집계는 자기장 내에서 작은 자성입자가 받는 힘을 이용하여 단분자를 조작하는 기술이다. 1990년대에 들어와 Bustamante 그룹(USA)과 Croquette 그룹(France)은 각각 자성입자를 이용하여 하나의 DNA분자의 물리적 특성에 대한 연구를 발표하였다[3,4]. 이 연구들은 자기집계를 이용한 단분자 조작기술의 초석이 되었고, 현재까지 단분자 자기집계기술의 표준적인 방법으로 알려져 있다[5].

본 논문에서는 표준 단분자 자기집계의 원리와 방법에 대해 설명하고, 단일 생체분자들의 물성연구에 활용한 사례들을 소개하고자 한다.

2. 실험방법과 결과

단분자 자기집계는 크게 자성입자에 작용하는 힘을 조절하기 위한 자기장 제어장치와 자성입자를 관찰하기 위한 현미경으로 구성되며, 자기장 제어장치로는 영구자석과 전자석을 이용된다[5,6]. 그림 1과 같이 샘플 챔버 위에 두 개의 영구자석을 서로 반대방향으로 나란히 놓으면, 샘플 챔버 내에 수평방향의 자기장이 형성되고, 세기는 자석에서 멀어질수록 감소한다. 이때 샘플 챔버 내의 자성입자들에 자기모멘트 $\vec{m} = \frac{V\chi}{\mu_0} \vec{B}$ 이 유도되어 다음과 같은 힘을 받는다[7].

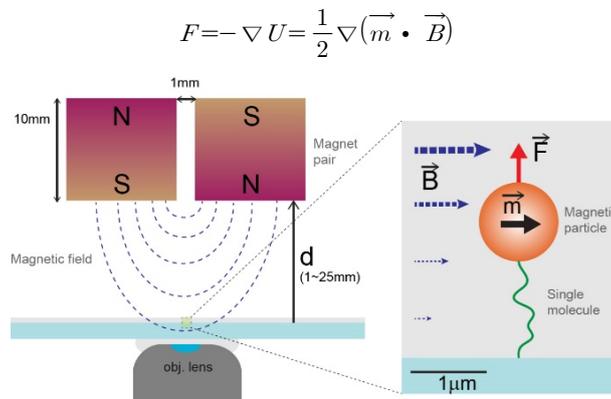


그림 1. 표준 단분자 자기집계의 개략도

정상상태에서 자성입자의 자기모멘트의 방향이 자기장의 방향과 나란해지면서 샘플 챔버에 수직한 방향의 힘이 지배적이 된다. 자성입자가 DNA 같은 단분자에 의해 샘플 챔버 바닥에 고정되었을 때 자성입자를 통해

단분자에 힘이 전달된다. 이때 영구자석 쌍을 샘플챔버에 가까이 하면 단분자에 걸리는 힘이 커지고, 멀리하면 힘이 작아진다. 이렇게 자석쌍의 위치를 제어해서 단분자에 가해지는 힘을 조절할 수 있다. 자석쌍을 이용해서 자성입자를 통해 단분자에 힘이 가해질 때, 단분자의 물리적 변화는 현미경상에서 자성입자의 3차원 실시간 위치 추적을 통해 관찰한다.

실시간으로 저장된 자성입자의 3차원 위치정보로부터 단분자에 가해지는 힘의 크기와 이때 물리적인 길이의 변화를 분석한다. 힘에 따른 단분자의 물리적인 길이 변화(L)는 자석을 제거한 경우에 대한 자성입자의 상대적인 수직위치로 결정되고, 단분자에 가해지는 힘(F)은 입자의 수평방향 움직임과 변화한 길이로부터 결정된다[8].

$$L(F) = \langle Z(F) - Z(0) \rangle, F = \frac{k_B T L(F)}{\langle X(F)^2 \rangle}$$

자석의 위치를 조절하면서 자성입자의 운동을 나노미터 정확도로 측정하여 단분자에 가해지는 0.1~100pN 영역의 힘(Force)과 단분자의 길이변화(Extension)를 동시에 분석할 수 있다.

3. 고찰

단분자 자기집계를 이용한 대표적인 생체분자 물성 연구는 단일 DNA 가닥에 대한 연구이다[9]. 하나의 DNA 양끝을 각각 자성입자와 샘플챔버 바닥에 고정하고, 자석쌍을 샘플챔버에 가까이 하면서 자성입자의 3차원 위치를 측정하여 DNA에 가해지는 힘의 변화에 따른 DNA의 물리적인 길이 변화를 분석할 수 있다. 또한 단분자 자기집계는 단백질의 구조와 기능에 대한 연구 및 migration 기능을 가지는 생체 구동 단백질들의 동역학 연구에 성공적으로 활용되고 있다[10,11]. 최근 많은 연구자들에 의해 자기집계의 제한사항들을 극복하고 장점을 극대화하는 기술적 향상이 발표되고 있다[12].

4. 결론

새로운 실험기술과 방법의 개발은 새로운 발견으로 이어져 과학 발전에 중요한 역할을 한다. 단분자 자기집계는 자기장과 자성입자 사이의 간단한 물리적 현상을 응용한 기술이지만, 최근 20여년 동안 많은 연구자들의 노력으로 매우 정교한 바이오 측정기술로 발전하여 생물학의 다양한 영역에서 새로운 현상들을 발견하고 이해하는데 큰 기여를 하고 있다. 단분자 자기집계의 원리와 활용사례들을 알려 이 기술이 더욱 다양한 연구분야에서 활용되기를 기대한다.

5. 참고문헌

- [1] Greenleaf, W. J. et al. *Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* **36**, 171-190, (2007).
- [2] Neuman, K. C. et al. *Ann. Rev. Mat. Res.* **37**, 33-67, (2007).
- [3] Smith, S. et al. *Science* **258**, 1122-1126, (1992).
- [4] Strick, T. R. et al. *Science* **271**, 1835-1837, (1996).
- [5] Gosse, C. & Croquette, V. *Biophys. J.* **82**, 3314-3329, (2002).
- [6] Revyakin, A. et al. *Meth. Enzymol.* **370**, 577-598, (2003).
- [7] Lipfert, J. et al. *Biophys. J.* **96**, 5040-5049, (2009).
- [8] Lansdorp, B. M. & Saleh, O. A. *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 10, (2012).
- [9] Bouchiat, C. et al. *Biophys. J.* **76**, 409-413, (1999).
- [10] Min, D. et al. *Nat. Commun* **4**, 1705, (2013).
- [11] Min, D. et al. *Nat. Chem. Bio.* **11**, 981-987 (2015).
- [12] De Vlaminck, I. & Dekker, C. *Ann. Rev. Biophys.* **41**, 453-472, (2012).

혈액 내 이성질 순환종양세포의 분리 및 포집을 위한 자력 구배 기반 미세유체시스템

곽봉섭^{1*}, 이재훈^{1,2}, 이정훈^{1,2}, 강신원²

¹한국기계연구원 대구융합기술연구센터

²경북대학교 IT대학 전자공학부

1. 서론

순환종양세포(CTCs)는 암 조직의 성장에 따른 크기, 세포 밀도의 증가로 인하여 산소 농도와 영양분이 부족한 상태에서 생존하기 위하여 단일 세포단위로 혈관을 통하여 이동하는 종양세포이며, 암 전이 진단의 중요한 지표이다. 암 전이를 진단하기 위하여 최근 미세유체 시스템을 이용하여 혈액 내 순환종양세포를 분리하기 위한 많은 연구가 이루어졌다.[1,2] 그러나 이성질의 순환종양세포의 특성 파악이 동시에 가능하지 않으며, 복잡한 유체시스템으로 인한 한계가 있다. 이와 같은 한계를 극복하기 위하여, 본 연구는 순환종양세포의 표면에 발현하는 단백질인 내피세포부착분자(EpCAM : Epithelial cell adhesion molecule)에 특이적으로 나노 자성체를 부착하였으며, 부착량의 차이를 이용하여 이종의 순환종양세포를 포집 함과 동시에 서로 다른 위치에 분리함으로써 순환종양세포의 분리와 특성 파악을 동시에 수행할 수 있는 자력 구배 기반의 미세유체시스템을 개발하였다.

2. 실험방법과 결과

2-1 미세유체시스템 제작

자력 구배 기반의 미세유체시스템은 그림 1과 같이 일반적인 소프트리소그래피(soft-lithography) 기술을 이용하여 제작했다. 자력구배를 형성하기 위하여 6번의 꼬인 형태의 미세유체를 설계하였으며 마지막 샘플 포집 부로부터 300 μm 거리에 4.75kG자력의 영구자석을 위치하였다.

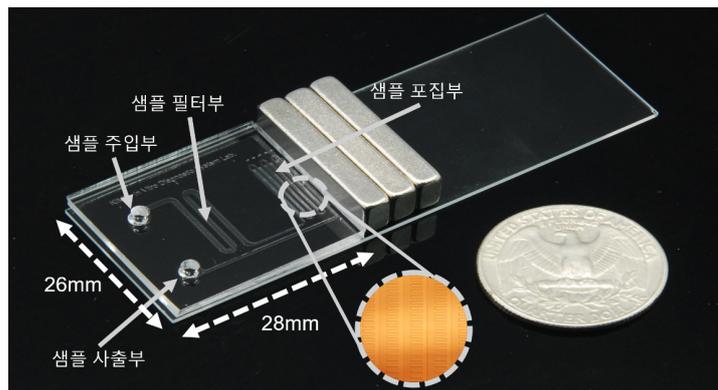


그림 1. 자력 구배 기반의 미세유체시스템

2-2. 마이크로 자성입자 포집, 분리 결과

미세유체시스템의 성능을 확인하기 위하여 그림 2와 같이 5 μm 와 1 μm 의 지름을 가지는 자성 입자로 실험을 진행하였다. 칩의segment 6~3에 5 μm 입자가 79.9% 존재하였고, segment 4~1에 1 μm 입자가 74.6% 존재했다.

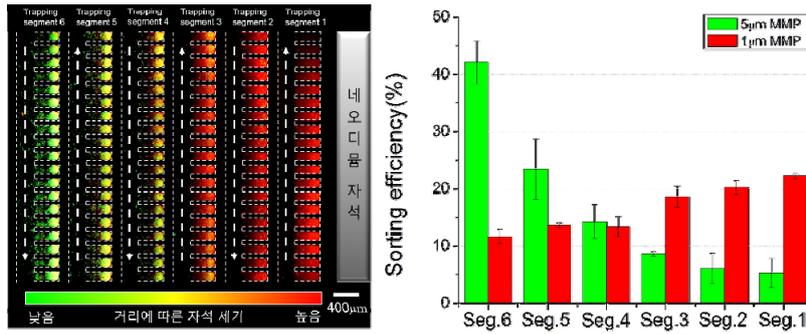


그림 2. 1µm와 5µm 마이크로 파티클 포집 및 분리 결과

2-3. 이성질 순환종양세포의 포집 및 분리 결과

표피세포부착분자 양성 세포인 MCF-7과 음성 세포인 MDA-MB-231을 이용하여 단일 세포 실험을 그림 3과 같이 진행하고 포집 효율을 그래프로 나타내었다. MCF-7은 칩의 segment 6~3에서 72.4%가 포집되어 있었고, MDA-MB-231은 segment 4~1에서 85.4%가 포집 할 수 있음을 확인하였다. 포집 효율은 MCF-7은 95.1%, MDA-MB-231은 74.9 3.4%의 포집 효율을 확인하였다.

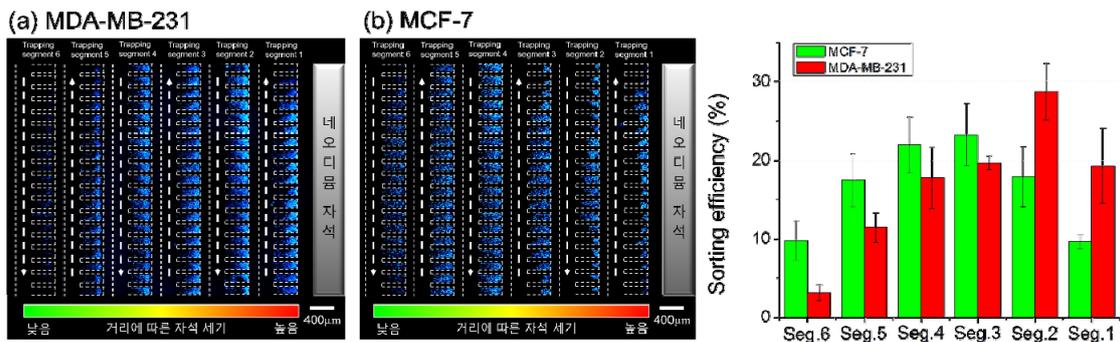


그림 3. (a)MDA-MB-231과 (b)MCF-7 세포의 포집 및 분리 결과

3. 결론

자력 구배 기반의 미세유체시스템을 이용하여 표피세포부착분자의 양이 서로 다른 이종의 순환종양세포를 높은 분리 및 포집 효율로 검증하였다. 이를 이용하여 실제 혈액으로 임상을 실시하였을 때 전이성 암세포와 비전이성 암세포가 구별이 가능하며, 종양 전이 진단에 응용할 수 있다.

4. 참고문헌

- [1] Hyun, K.A., Jung, H.I., 2014. Lab Chip. 14, 45-56
- [2] Nagrath, S., Sequist, L.V., Maheswaran, S., Bell, D.W., Irimia, D., Ulkus, L., Smith, M.R., Kwak, E.L., Digumarthy, S., Muzikansky, A., Ryan, P., Balis, U.J., Tompkins, R.G., Haber, D.A., Toner, M. 2007. Nature. 450, 1235-1239.

Spintronics Devices for Bio-medical Applications

Byeonghwa Lim, Xinghao Hu, Sri Ramulu Torati, Kun Woo Kim,
Jonghwan Yoon and Cheol Gi Kim*

Department of Emerging Materials Science, DGIST, South Korea

The manipulation and monitoring of cells has gaining more important towards gene sequencing, single cell analysis and cell separation technology. Although, several single cell techniques are exist, there is still challenging and complex to collect rare cells and their digital manipulation in large-scale operation. Recently, the flexibility of magnetic transport technology using nano/micro scale magnets for the magnetophoresis has experienced excellent advances and has been used for a wide variety of single cells manipulation tasks. The magnetic transport technology, which can be integrated within microfluidic channels, relies on both magnetic energy and force tunability and remote control implemented by micro- and nano-patterned magnetic structures. Here, we have demonstrated a class of integrated magnetic track circuits for executing sequential and parallel, timed operations on an ensemble of single particles and cells. The magnetic circuitry tracks are designed by conventional lift-off technology and were used for the passive control of cells/particles similar concept to electrical conductor, diodes and capacitor. When the magnetic tracks are combined into arrays and driven by rotating magnetic field, the single cells are precisely control for multiplexed analysis. The concentric cell transportation and separation were performed by the assembly of this magnetic track into a novel architecture, resembled with spider web network consisted of several radii and spirals, where all the particles/cells are concentrated into one position and then transported to apartments array for the single cell analysis (Fig. 1). In addition, a planar Hall resistance (PHR) sensor is integrated with the web networks, and the manipulation and detection are achieved via superparamagnetic particles with dual functions as a biomolecule carrier for transportation and labels for monitoring (Fig. 2). This allows the efficient collection of low-density biomolecule carriers to one specific point and monitors the accumulated carriers.

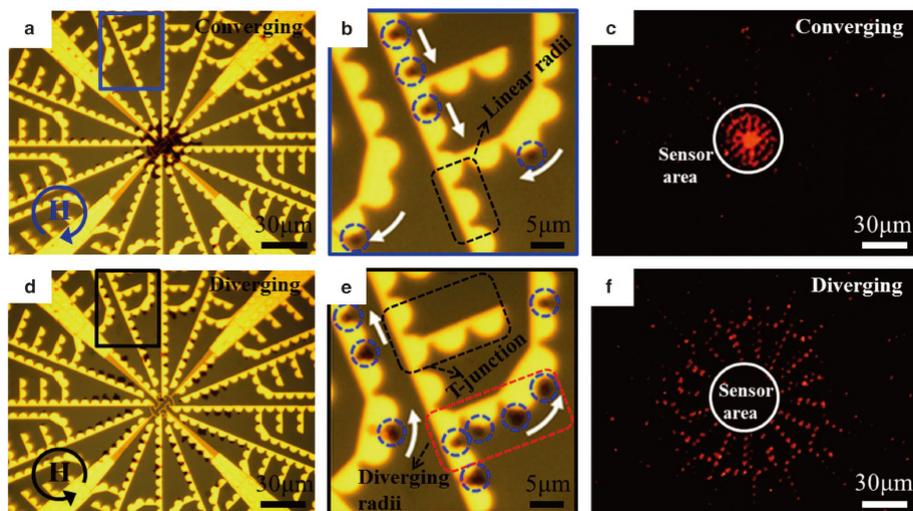


Fig. 1. Collection of bio-agents using the magnetic spider web.

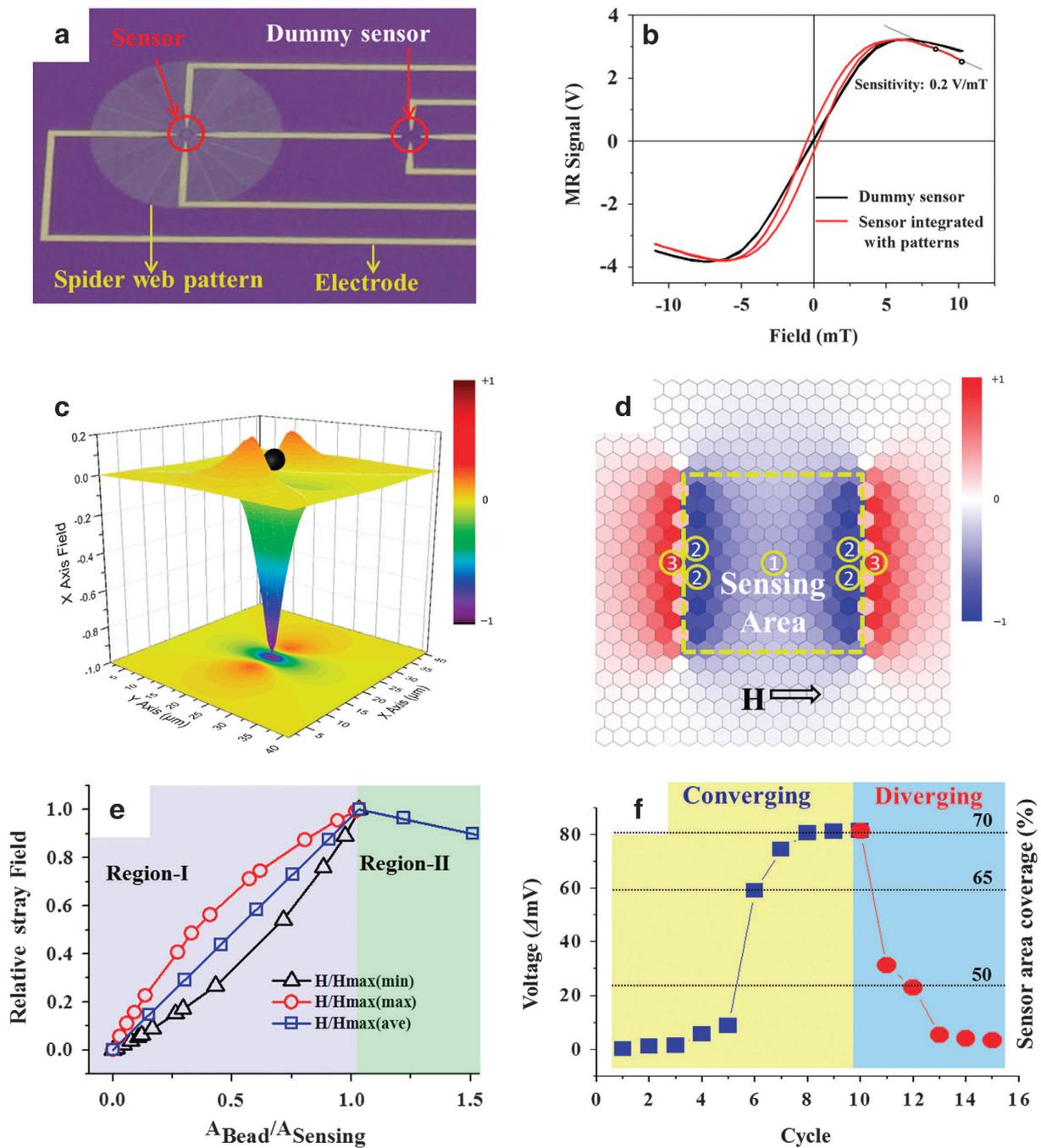
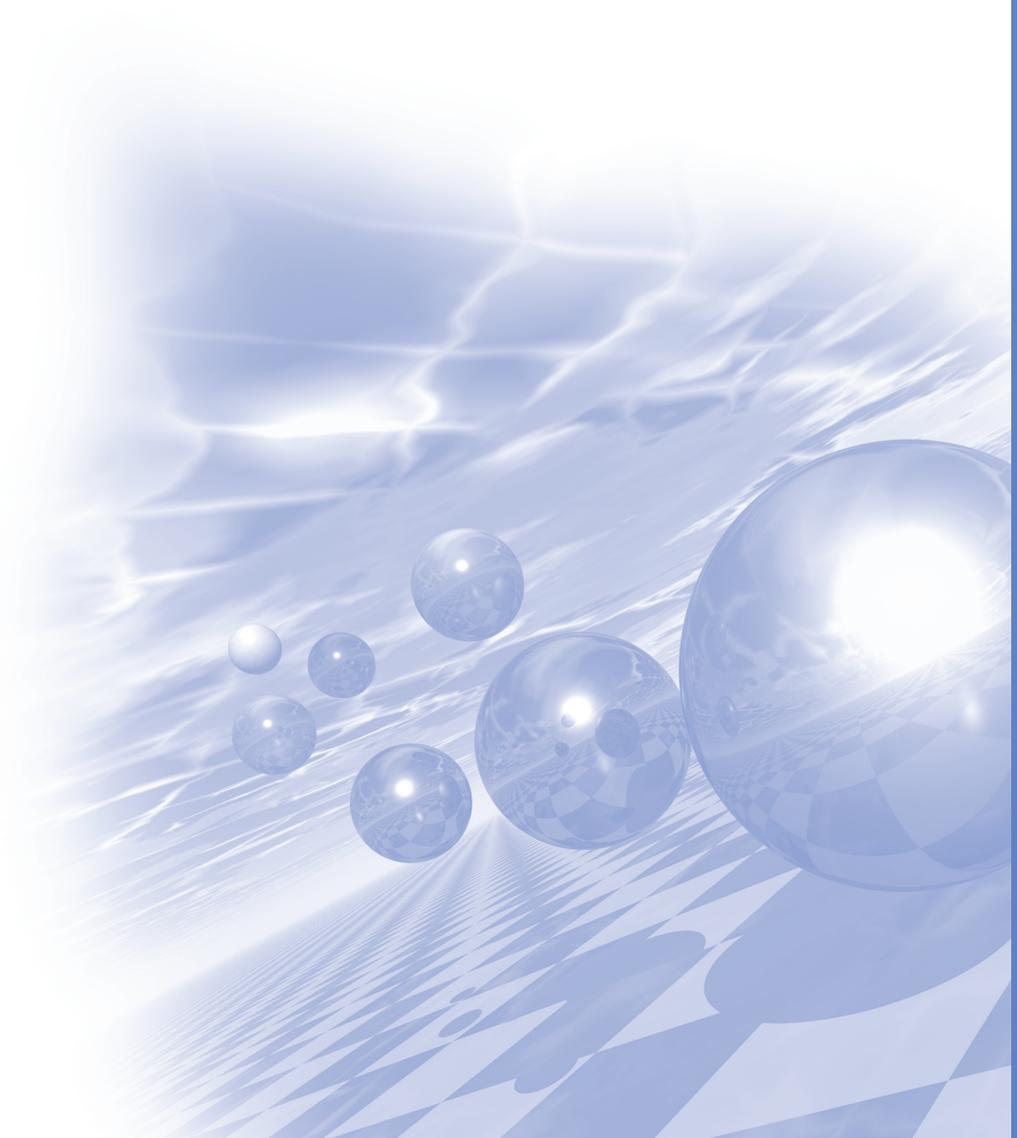


Fig. 2. Simultaneous manipulation and monitoring of bio-functionalized superpara-magnetic particles.



KMS 2017 Summer Conference

구두발표 I



An On-chip Micromagnet Frictionometer Based on Magnetically Driven Colloids for Nano-Bio Interfaces

Sandhya Rani Goudu^{*}, Xinghao Hu, Sri Ramulu Torati,
Byeonghwa Lim, Kunwoo Kim and Cheol Gi Kim

Department of Emerging Materials Science, DGIST, Daegu, 711-873, Republic of Korea

A novel method based on remotely controlled magnetic forces of bio-functionalized superparamagnetic colloids using micromagnet arrays was devised to measure frictional force at the sub-picoNewton (pN) scale for bio-nano-/micro-electromechanical system (bio-NEMS/MEMS) interfaces in liquid. The circumferential motion of the colloids with phase-locked angles around the periphery of the micromagnets under an in-plane rotating magnetic field was governed by a balance between tangential magnetic force and drag force, which consists of viscous and frictional forces. A model correlating the phase-locked angles of the steady colloid rotation was formulated and validated by measuring the angles under controlled magnetic forces. Hence, the frictional forces on the streptavidin/Teflon interface between the colloids and the micromagnet arrays were obtained using the magnetic forces at the phase-locked angles. The friction coefficient for the streptavidin/Teflon interface was estimated to be approximately 0.036 regardless of both vertical force in the range of a few hundred pN and velocity in the range of a few tenths of $\mu\text{m s}^{-1}$.

Magnetism in Rutile-Type Oxides

Purev Taivansaikhan and Dorj Odkhuu*

Department of Physics, Incheon National University, Incheon 22012, Republic of Korea

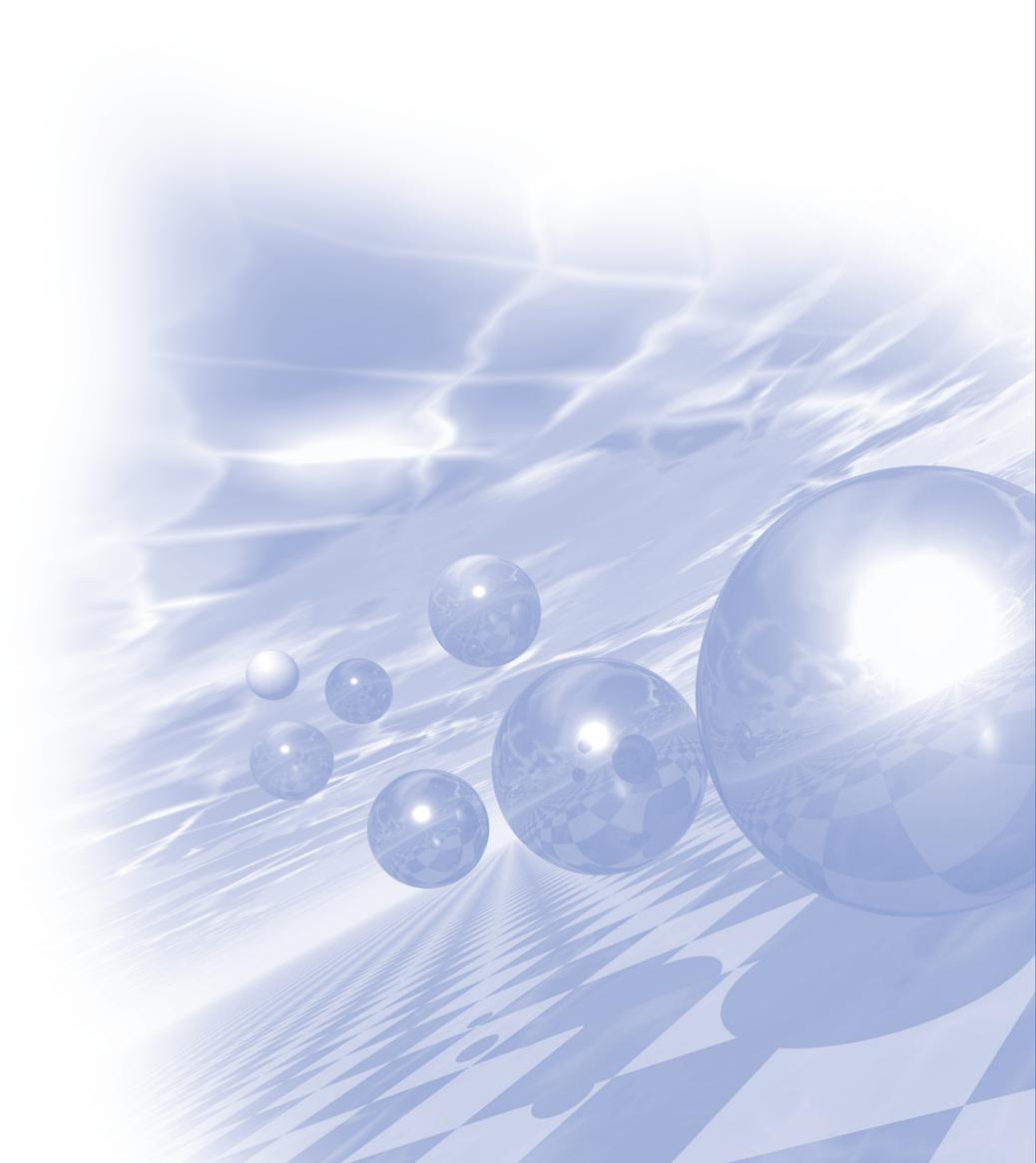
While rutile-type transition metal oxides (TMO₂) have been widely used in a variety of important applications such as an active catalyst, supercapacitors, batteries, and fuel cells, an existence of intrinsic magnetism in RuO₂ has recently drawn much attention in spintronics. In this talk, we will present results of our first-principles density functional theory plus U (DFT+U) calculations on magnetism and magnetic anisotropy energies (MAE) of RuO₂ and OsO₂. These oxides are identified to favor an antiferromagnetic phase, which is a result of mutual mechanisms of Kramer-Anderson superexchange interaction and Jahn-Teller effects. More remarkably, we found very large MAE up to an order of 10 meV per transition metal atom in bulk, which are four orders of magnitude greater than those of the conventional transition metals. This anisotropic phenomenon further exhibits a persistently increasing dependence of film thickness, which is very uncommon in thin film materials.



KMS 2017 Summer Conference

Special Session III

‘산업체에서의 자성재료 및
부품개발 동향’ 1부



금속파워인덕터 개발 동향

최강룡^{1*}, 박일진¹, 서정욱¹, 이우진¹, 안성용¹, 유영석¹

¹삼성전기, 경기도 수원시 영통구 매영로 150, 16674

스위치 모드 전력 컨버터는 전자업계에서 매우 중요한 부품으로써 다양한 제품들에 고효율 솔루션을 제공한다. 스위치 모드 컨버터는 스마트폰, 컴퓨터, 전동공구, TV, 미디어 태블릿, 등과 같은 전자/전기 기기의 전원 및 배터리 충전회로에 사용된다. DC-DC 스텝다운 컨버터의 경우, 고전압에서 저전압으로 강압하기 위한 벡 컨버터로 알려져 있다. 고성능 플랫폼에 대한 산업계의 요구에 따라, 전원 컨버터의 효율이 중요한 고려사항이 된다. 본 연구에서는 컨버터의 효율을 결정하는 많은 요소 중 손실을 줄이기 위한 인덕터의 개발에 관하여 소개하고자 한다.

고주파 부품과 자성소재

김유선*, 이상원, 배석

LG이노텍 R&D센터 선행부품연구소

인공적인 자성소재는 1900년도 상업적 용도의 귀소 전기 강판 개발을 시작으로 본격화 되어 왔으며, 그 후 100년 동안 전기기기의 소형화와 고성능화에 기여해 왔다. 본 연구에서는 사용 주파수 대역 별 자성소재 응용에 대해 소개하고, EMI/EMC (Power 인덕터, Common Mode Filter, 차폐제), Power 분야 (PFC 인덕터, 트랜스, 무선충전), 통신 분야 (signal 인덕터, Common Mode 필터, Isolator, Antenna)에서 각각 요구되는 자성소재 특성과 개발 방향에 대해 논의 한다.

자동차 분야의 연자성 소재 및 부품 개발 동향

김신규*, 김형석, 김영민, 김미루, 정연준, 이두환

현대·기아자동차(주)

최근 친환경차 및 자율주행차의 개발에 발 맞추어 전장 부품의 성능 개선을 통한 소형, 경량화 요구가 커지고 있다. 이 중 친환경차의 주요 시스템 중 하나인 전력변환 분야에서는 고주파수용 페라이트, 연자성 합금 분말, 비정질 등, 전장 부품을 이루는 주요 소재인 자성체에 대한 개발이 활발히 진행 중이다.

또한 기존 전장부품 분야에서도 SMC (Soft Magnetic Composite) 자성재료의 경우, 인젝터/점화코일/모터 분야에 개발이 다수 진행 중이며, 저주파수용 전장부품 분야에서는 적용 및 양산이 보고되고 있다.

본 발표에서는 새로운 전장부품 분야인 전력변환 분야의 다양한 자성소재 개발과 기존 전장부품 분야의 새로운 자성 소재 적용에 대한 동향을 소개하고, 앞으로의 개발 방향에 대해 다루고자 한다.

그래핀 기반의 하이브리드 자성복합재료의 EMI 특성 연구

김명기^{1*}, 진성민¹, 김상훈³, 김예찬³, 남재도^{2,3}

¹유덕첨단소재

²성균관대학교 고분자공학과

³성균관대학교 에너지과학과

그래핀은 탄소 원자로 이루어진 탄소 동소체 중에 하나로써 탄소의 sp^2 혼성으로 이루어진 2차원 단일시트의 구조를 가지고 있으며, 단층의 그래핀은 약 0.3 nm의 두께로 탄성률, 열전도율, 전자이동도 등 여러 특성이 현존물질 중 가장 우수한 소재이다. 이로 인해 디스플레이, 이차전지, 태양전지, 복합재료 등 다양한 분야에 응용될 전략적 핵심소재로 인정받고 있다.[1]

그래핀 박막은 spin-coating, vacuum-filtration, chemical vapor deposition (CVD) 등의 방식으로 제조되고 있으며, 최근에는 전기영동전착 (electrophoretic deposition, EPD)을 이용한 그래핀 박막 제조 및 전기전자 소재로의 응용 연구가 활발히 진행되고 있다.[2] EPD는 전하를 갖는 안정된 suspension을 이용하여 전위가 인가된 두 전극 사이의 전기장에 의해 전하를 갖는 입자들을 전극으로 이동시켜 deposition 이 되도록 하며, 결과적으로 대면적의 다양한 형상을 갖는 치밀한 막을 형성시킬 수 있다.[3]

EPD를 이용하여 그래핀 박막을 얻기 위해서는 그래핀을 용액 내에서 전하를 갖는 상태로 만들어야 한다. 전통적으로는 화학적 박리법을 통해 얻게 되는 GO (graphene oxide)를 수용액 상태에서 분산시킨 후 (-)로 하전된 GO를 (+)전극에 전착시키게 된다. 이후 화학적, 열적 환원 과정을 통해 RGO (reduced graphene oxide) 필름을 얻는 방식이 사용되고 있다. 이렇게 형성된 치밀한 그래핀 막은 고내식·기능성 강판용 표면처리, 이차전지의 전극소재, 대전방지·전자파차폐 필름 및 투명전극 소재 등에 적용 가능하다.

본 연구에서는 improved method를 이용하여 제작된 GO에 paraphenylene diamine을 치환하여 분산 안정성을 갖는 (+)로 하전된 그래핀 콜로이드를 제작하였고, 이를 이용하여 다양한 그래핀 패턴을 형성하였다. 또한, 자성재료를 전하를 갖는 suspension으로 제작하고, 이를 EPD를 통해 그래핀 층에 전착시켜 그래핀-자성재료 층의 복합층을 형성하였다. 이렇게 형성된 그래핀-자성재료 복합층의 전자기적 특성을 이용하여 전자파 차폐 성능을 평가하였다.

참고문헌

[1] 미래창조과학부, 산업통상자원부(2015), **그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵**

[2] K. Sanghoon, K. Myeong-Gi, et. al.(2014), ACS Appl. Mater. Interfaces, 6, 17647-17653

[3] A. Chavez-Valdez, M. S. P. Shaffer, and A. R. Boccaccini(2013), J. Phys. Chem. B, 117, 1502-1515



KMS 2017 Summer Conference

구두발표 II



2D Semiconductor, Transition Metal Dichalcogenides Growth and Its Applications

Yong Soo Kim^{1*}, Chinh Tam Le¹, Farman Ullah¹, Joon. I. Jang²

¹Department of Physics and Energy Harvest Storage Research Center (EHSRC),
University of Ulsan, Ulsan 44610, South Korea

²Department of Physics, Sogang University, Seoul 04107, South Korea

Graphene, a single atomic layer of carbon atoms, has attracted great attention because of its novel physical properties and potential for electro-optical technology. Recently this interest has expanded to the wide class of two-dimensional materials that occur naturally as 2D layers of van-der-Waals crystals. While preserving graphene's flexibility and tenability by external perturbations, atomically thin layers of this broader set of materials provide access to more varied electronic and optical properties, including semiconductor and insulating behavior.

In first part of this presentation, we will discuss some distinctive properties and large area continuous growth of atomically thin 2D semiconductor, especially transition metal dichalcogenide (MX_2 where $\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$ and $\text{X}=\text{Se}, \text{S}$)[1-3]. We also demonstrate monolayer $\text{Mo}(\text{S}, \text{Se})_2$ is next generation nonlinear optical material for its strong optical nonlinear properties with second harmonic generation characteristics[4-7].

In second part of this talk, we will demonstrate the in-plane heterostructure (HS) of monolayer MX_2 , especially MoSe_2 and WSe_2 . From synthetic perspective, unlike vertical HS, the lateral HS can only be created by direct growth method. Here, we present the growth of three-atom-thick lateral HS consisting of MoSe_2 and WSe_2 monolayers by a pulsed-laser-deposition-assisted (PLD-assisted) selenization method.[2] The monolayer lateral HS flakes (size: ~ 15 nm to ~ 40 nm) were obtained by controlling the growth temperature profile. The sharp interface of the grown monolayer lateral HS was verified by morphological and optical characterizations. Interestingly, the photoluminescence spectra acquired from the interface showed clear signatures of pristine MoSe_2 and WSe_2 with no intermediate energy peak related to the formation of the $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ alloy or excitonic matter across the HS, thereby confirming the sharp interface.

References

- [1] V. Senthilkumar, et al., *Nano Res.* **7**, 1759 (2014)
- [2] F. Ullah, et al., *CrystEngComm* **18**, 6992 (2016)
- [3] H. G. Park, et al., *Appl. Spectrosc. Rev.* **51**, 621 (2016)
- [4] D. J. Clark, et al., *Phys. Rev. B* **90**, 121409(R) (2014); *Phys. Rev. B* **92**, 159901(E) (2015)
- [5] D. J. Clark, et al., *Appl. Phys. Lett.* **107**, 131113 (2015)
- [6] C. T. Le, et al., *Ann. Phy.* **528**, 551 (2016)
- [7] C. T. Le, et al., *ACS Photonics* **4**, 38-44 (2017)

RF 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착된 BiFeO₃-CoFe₂O₄ 나노복합체 박막의 자성 연구

김태철^{1*}, 이승한¹, 정재은¹, 김동훈¹

¹명지대학교 신소재공학과

1. 서론

비휘발성, 저전력 소비, 빠른 동작속도, 고집적도가 요구되는 차세대 메모리의 재료로 최근 주목을 크게 받고 있는 다강체는 강자성과 강유전성이 동시에 발현되며 전기장을 인가하여 자기 쌍극자의 방향을 바꾸거나 자기장을 인가하여 전기 쌍극자의 방향을 바꿀 수 있는 획기적인 물질이다. 다강체는 하나의 저장 장소에 다양한 전기적, 자기적 상태를 형성함으로써 다중 비트 메모리 소자를 만들어 정보 저장 집적도를 크게 높일 수 있다.

메모리용 다강체에 대한 연구로 페로브스카이트 구조를 갖는 유전 물질 매질에 스피넬 구조의 강자성 나노기둥이 배열되어있는 에피택셜 나노복합체 박막이 많이 연구되어지고 있다. 특히 압전 특성을 갖는 BiFeO₃ (BFO) 박막에 큰 자왜효과를 갖는 CoFe₂O₄ (CFO) 나노기둥이 단결정 기판위에 수직 방향으로 에피택셜 관계를 가지며 나노복합체를 형성할 때 계면에서의 수직 방향 스트레인은 다강체 박막의 유전특성과 자성을 조절할 수 있게 한다.

현재까지 다강체 나노복합체 박막은 주로 큰 에너지의 레이저를 이용한 고가 장비인 pulsed laser deposition (PLD) 법으로 증착되었으나, 상대적으로 저가이면서 대면적 박막을 증착할 수 있는 스퍼터링 법으로 구현한다면 대면적·저가의 메모리 소자를 실현할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 스퍼터링 법으로 다강성 에피택셜 BFO-CFO 나노복합체 박막을 증착한 뒤, HRXRD (high resolution X-ray diffraction), SEM (scanning electron microscopy), TEM (transmission electron microscopy)를 이용하여 구조 분석 및 스트레인을 조사하였고 VSM (vibrating sample magnetometer)을 이용하여 자성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법과 결과

고상법을 이용하여 BFO-CFO 세라믹 타겟을 제조하였다. BFO는 고온에서 Bi가 쉽게 휘발되어 화학양론비를 맞출 수 없게 되므로 800°C 근방에서 소결온도를 세분화하여 최적 소결 조건을 찾았다.

RF 마그네트론 스퍼터링 법을 이용하여 Nb이 1% 도핑 된 STO (001) 기판에 나노복합체 박막을 제조하였다. RF 파워, 증착 온도, 증착 압력, 그리고 아르곤과 산소의 비를 변화시켜가면서 박막의 결정성과 자성에 미치는 영향을 조사하였다. 2시간 동안 증착된 박막은 200 nm의 두께를 보였다.

X-ray diffraction, SEM, TEM을 이용하여 구조 분석을 하였고, 기판의 수직, 수평 방향으로의 격자 상수와 스트레인을 계산하였다. 15 kOe의 자기장이 인가 된 VSM을 이용하여 상온에서 기판의 수직, 수평방향으로의 자화곡선을 얻었고 자기 이방성을 계산하였다.

3. 고찰

저온에서 증착된 BFO-CFO 나노복합체 박막은 XRD와 SEM 분석 결과 상분리가 일어나지 않았다. θ -2 θ XRD 스캔에서 어떠한 피크도 보이지 않았던 저온 증착 나노복합체 박막은 퍼니스에서 650°C의 온도에서 1시간 동안 열처리 한 후에는 BFO와 CFO 피크를 보였으나 격자 상수는 벌크값과 같은, 즉 스트레인이 완화된 상태였

다. 이 박막은 VSM 분석결과 기판에 수평 방향인 in-plane과 수직 방향인 out-of-plane 자기 이력 곡선이 거의 비슷한 자기 등방성을 보였다.

650°C에서 증착된 나노복합체 박막은 열처리 없이 상분리를 보였으며 격자상수 분석결과 BFO의 영향으로 CFO는 기판에 수직방향으로 압축응력을 받음을 보였다. 나노복합체 박막은 증착 압력과 산소/아르곤의 비율에 따라 스트레인의 정도가 변화하였으며 특정 산소분압에서 정방정 (tetragonal) BFO 상이 형성되었다. 자성 분석결과 650°C에서 증착된 나노복합체 박막은 기판에 수직 방향으로 쉽게 자화가 되었으며 수평 방향으로 자화가 잘 되지 않는 수직자기 이방성을 보였다. 이러한 수직자기 이방성은 음의 자왜상수 값을 갖는 CFO가 기판의 수직 방향으로 압축응력을 받는데서 기인하는 것으로 나노복합체 박막을 형성하면서 계면에서 생긴 스트레인이 자성에 중요한 역할을 함을 보여준다. 또한 수직자기 이방성을 보였던 나노복합체 박막은 에칭을 통해 BFO 상을 제거하였을 때 스트레인이 완화되면서 자기 이방성 또한 사라졌다.

4. 결론

스퍼터링 법으로 단결정 Nb:STO (001) 기판 위에 증착된 BFO-CFO 나노복합체 박막은 이전에 보고된 PLD로 증착된 나노복합체 박막과 거의 비슷한 자기 이방성을 보였다. 자기 이방성의 원인은 CFO의 기둥 모양에서 기인하는 shape anisotropy와 BFO와의 계면에서부터 생긴 스트레인에 기인하는 magnetoelastic anisotropy이다. CFO의 스트레인은 외부 전기장을 가하여 압전 BFO의 스트레인을 변화시킴으로써 조절이 가능하며 이는 전기적 신호로 자성을 변화시킬 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 수행한 나노복합체 박막의 자기 특성에 스트레인이 미치는 연구에 대한 결과는 향후 메모리 소자로의 응용에 있어 자성을 조절할 수 있는 방향을 제시한다.

5. 참고문헌

- [1] D. H. Kim, J. Yang, M. S. Kim, T. C. Kim,, J. Cryst. Growth, 449, 62 (2016).
- [2] D. H. Kim, X. Sun, T. C. Kim, Y. J. Eun, T. Lee, S. G. Jeong, C. A. Ross, ACS Appl. Mater. Inter., 8, 2673, (2016).
- [3] N. M. Aimon, D. H. Kim, C. A. Ross, ACS Appl. Mater. Inter., 7, 2263 (2015).
- [4] D. H. Kim, N. M. Aimon, X. Sun, L. Kornblum, F. J. Walker, C. H. Ahn. C. A. Ross, Adv. Func. Mater. 24, 5889 (2014).
- [5] H. K. Choi, N. M. Aimon, D. H. Kim, X. Y. Sun, J. Gwyther, I. Manners, C. A. Ross, ACS Nano, 8, 9248 (2014).
- [6] D. H. Kim, N. M. Aimon, X. Sun, C. A. Ross, Adv. Func. Mater., 24, 2334 (2014)
- [7] N. M. Aimon, H. K. Choi, X. Sun, D. H. Kim, C. A. Ross, Adv. Mater., 26, 3063 (2014).

Magnetic field and temperature control over CoFeB/Ta/CoFeB logic device

A.D. Talantsev^{1,2*}, R.B. Morgunov², Y. Lu³, S. Mangin³, C.G. Kim¹

¹Department of Emerging Materials Science, DGIST, 42988, Daegu, Republic of Korea

²Institute of problems of chemical physics, 142432, Chernogolovka, Moscow, Russia

³Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine, France

Our work is focused to the study of magnetization reversal processes in synthetic antiferromagnets based on two perpendicularly magnetized CoFeB layers of different widths separated by non-magnetic Ta interlayer. Magnetic hysteresis loops at three temperatures corresponding to three different modes of magnetization switching are presented in the fig.1. The full map (T - H phase diagram) of the different states and switching between them for studied system is shown in the fig.2. The sequence of magnetization reversals of the magnetic layers in this trilayer structure is temperature dependent. In high-temperature mode (150 – 300 K) magnetization reversals are governed by dipole-dipole interaction magnetic layers [1]. Three transitions were resolved: magnetization flop of thin layer magnetization ($M_1 \rightarrow M_2$ transition) at $H = 200$ Oe, flip-flop transition of thick and thin layers, both, at $H = \pm H_C$ ($M_2 \rightarrow M_3$ transition), and flop transition of thin layer at $H = -200$ Oe ($M_3 \rightarrow M_4$ transition).

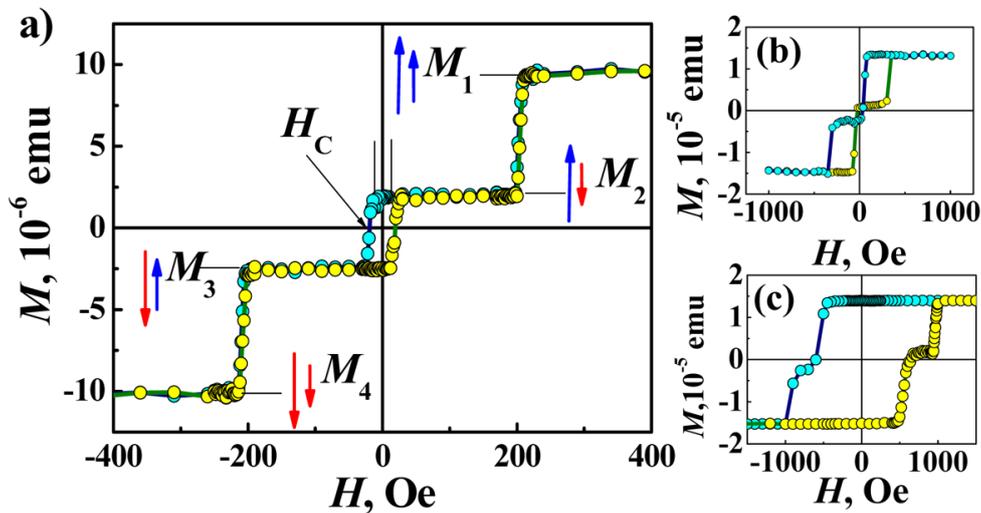


Fig. 1. Magnetic hysteresis loops at 300 K (a), 100 K (b) and 2 K (c).

Long and short arrows correspond to thick and thin layers magnetizations, respectively.

In low temperature mode (2 – 80 K) exchange interlayer coupling dominates dipole-dipole interaction between magnetic [2] layers and the sequence of magnetization switching is governed by magnetic anisotropy of the layers. The sequence contains only two transitions correspondent to independent flop transitions of the thin and thick layers. At the intermediate (80 – 150 K) temperature range the hysteresis loop is most complicated. Competition between dipole-dipole interaction, interlayer exchange coupling and anisotropy of the layers results in the shift of magnetization states M_2 and M_3 and results in a butterfly shape of the hysteresis loop.

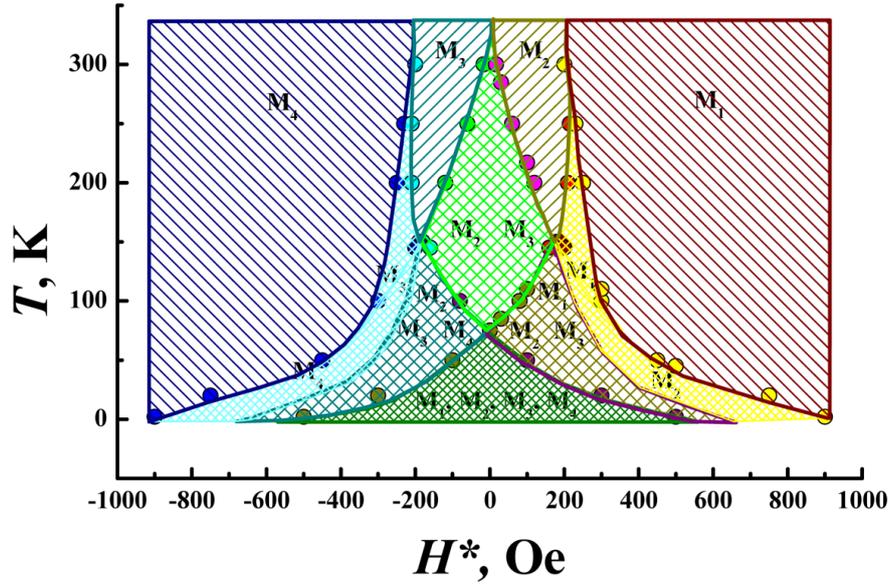


Fig. 2. Phase diagram of different magnetization states existence in the CoFeB/Ta/CoFeB trilayer in H - T space. Denotations M_1 , M_2 etc correspond to areas of existence of a single possible state independently on thermal and magnetic prehistory, the denotations M_1 or M_2 ; M_2 , M_3 , M_4 etc correspondent to possibility to observe several different states dependently on thermal and magnetic prehistory.

This work was supported by the DGIST R&D Program of the Ministry of Science, ICT and Future Planning (17-BT-02) and Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 3.1992.2017/PCh).

References

- [1] T. Hauet and O. Hellwig. J. Appl. Phys. **115**, 123911 (2014).
- [2] N. Vernier, J.-P. Adam, S. Eimer, G. Agnus, T. Devolder, T. Hauet, B. Ocker, F. Garcia, and D. Ravelosona. Appl. Phys. Lett. **104**, 122404 (2014);

Structural, magnetic and transport behavior of SrRu_{0.7}Fe_{0.3}O₃ epitaxial thin film

Umasankar Dash*, Chang Uk Jung†

Department of Physics and Oxide Research Centre,
Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 17035, South Korea

*Corresponding author: cu-jung@hufs.ac.kr; Fax: +82-31-330-4566

1. Introduction

The perovskite oxide SrRuO₃ (SRO) has been in the light of many researchers due to its strong correlated properties with other materials and its metallicity. Much fundamental research focused on the growth of single crystalline SRO epitaxial thin film on SrTiO₃(001) substrates to study the under line behavior in both physical as well as magnetic properties[1,2]. In contrast, more fascinating properties were observed in thin film form than the bulk sample like thickness dependent metal to insulator transition, antiferromagnetism in ultra-thin films, spin glass behavior and spin transitions[3-5]. As we know SRO is a ferromagnetic metallic material whose ferromagnetism originates from a narrow t_{2g} band. The band width can be drastically changed doping at B sites which might give some interesting physical as well as magnetic properties. Different 3d elements were introduced at B sites of SRO and their physical properties were examined. Li Pi *et. al.* studied transport as well as magnetic properties of doped SRO [6]. They showed that, doping Zn²⁺, Ni²⁺, Co²⁺, Cr³⁺, and Mn³⁺ into Ru sites might help to know the lattice distortion, variation in ferromagnetic T_C , metal to insulator transition and other intriguing properties. In our previous report we had shown that, doping Fe into Ru site significantly changes the ferromagnetic T_C as well as resistivity of the thin film.[7]. In this report, we studied the doping effect of Fe on Structural, magnetic and transport behavior of SrRu_{0.7}Fe_{0.3}O₃ epitaxial thin film.

2. Experimental

Fe doped SRO polycrystalline target was prepared by conventional method. The target was put inside the high vacuum chamber for laser ablation. Fe doped SRO epitaxial thin film was grown on SrTiO₃(001) substrates by KrF excimer laser. The substrate temperature was maintained at 750°C. The oxygen partial pressure was kept around 175 mTorr. The thickness of the as deposited thin film was measured by using Field emission scanning electron microscope (FESEM) and was found to be 60nm. Crystal structure and surface morphology of the thin film was characterized by X-ray diffraction (XRD) and atomic force microscope (AFM). The magnetic property of the thin film was measured by superconducting quantum interface device-vibrating sample magnetometer (SQUID-VSM). Hall bar pattern was made on the thin film by photolithography technique in order to measure the magneto-transport behavior. The resistivity and magnetoresistance measurement was carried out using a cryogen free cryostat ($T = 2-300$ K, Field sweep, $H = -9$ T to $+9$ T) (CMag Vari9, Cryomagnetics Inc.) with a dual channel source-measure unit (Keithley 2612A Standard Measurement Unit).

3. Results and Discussion

High resolution X-ray diffraction (HRXRD) studies showed that the as deposited thin film showed excellent

c axis orientation. As reported previously, we had stabilized the single crystalline by using epitaxial strain without co-doping at Sr site [7]. The calculated lattice constant of the thin film was found to be 3.955 Å. The reciprocal space mapping showed the coherently growth of thin film with that of STO substrate [8]. Excellent step in terrace observed from the atomic force microscope measurement. The surface roughness of the thin film was as low as 0.24nm. We have shown that by doping higher concentration of Fe at Ru site, the resistivity of the thin film can be dramatically enhanced. As reported previously, [7] we had shown that with increasing Fe doping concentration (from $x = 0.05$ to 0.20), the film resistivity at low temperature (at 2 K) increased from metallic to semiconducting state. The disorder induced by Fe doping at Ru site might be responsible for the increase of zero field resistivity at low temperature [9]. We had also performed field dependent resistivity study for Fe doped ($x = 0.30$) SRO thin film. It can be noted that, with application of external magnetic field, the film resistance decreased and T_{min} shifts towards left side. Magnetoresistance (MR) measurement of the thin film was carried out and a large MR ($\sim 20\%$) was observed for the thin film. The field was sweep from -9 T to +9 T. The observed high MR in our thin film might be comes from the spin fluctuation of mobile electronic carriers. It should be emphasized that MR of our coherently grown epitaxial thin film has much less contribution from grain boundary compared to MR of poly-crystal. The higher value of MR in the polycrystalline sample for $x = 0.30$ may be attributed to the grain boundary and defects which are absent in our epitaxial thin films [10]. The temperature dependence MR at 9 T also showed similar value of MR ($\sim 20\%$) down to 10K. The saturation of magnetization (M_{Sat}) value of $SrRu_{0.7}Fe_{0.3}O_3$ was found to be 0.6 μ B/Ru.

References

- [1] Q. Gan, R.A. Rao, C.B. Eom, J.L. Garrett, M. Lee, Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 978.
- [2] J.C. Jiang, W.Tian, X.Q. Pan, Q. Gan, C.B. Eom, Appl. Phys. Lett. 72 (1988) 2963.
- [3] P. Mahadevan, F. Aryasetiawan, A. Janotti, T. Sasaki, Phys. Rev. B 80 (2009) 035106.
- [4] R. Palai, H. Huhtinen, J.F. Scott, R.S. Katiyar, Phys. Rev. B 79 (2009) 104413.
- [5] A.J. Grutter, F.J. Wong, E. Arenholz, A. Vailionis, Y. Suzuki, Phys. Rev. B 85 (2012) 134429.
- [6] L. Pi, A. Maignan, R. Retoux, B. Raveau, J. Phys. Condens. Matter 14 (2002) 7391-7398.
- [7] K.R.N. Toreh, D.H. Kim, U. Dash, T. Phan, B.W. Lee, H. Jin, S. Lee, B.H. Park, J. Park, M.R. Cho, Y.D. Park, S.K. Acharya, W. Yoo, M. Jung, C.U. Jung, J. Alloys Compd. 657 (2016) 224-230.
- [8] U. Dash, S.K. Acharya, B.W. Lee, C.U. Jung, Nanoscale Res. Lett. 12 (2017) 168.
- [9] Jiyu Fan, Sicheng Liao, Wenqin Wang, Lei Zhang, Wei Tong, Langsheng Ling, Bo Hong, Yangguang Shi, YanZhu, DazhiHu, LiPi, Yuheng Zhang, J. Appl. Phys.110, (2011)043907.
- [10] A. Mamchik, I-W. Chen, Phys. Rev. B 70 (2004) 104409-1-104409-11.



KMS 2017 Summer Conference

구두발표 III



Asymmetrical domain wall propagation in bifurcated PMA wire structure due to the Dzyaloshinskii-Moriya interaction

J. Kwon^{1*}, S. Goolaup², W. L. Gan², C. H. Chang³, K. Roy⁴ and W. S. Lew²

¹Emerging Materials Science, Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, Korea

²School of Physical and Mathematical Sciences, Nanyang Technological University, Singapore

³School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore

⁴School of Electrical Computer Engineering, Purdue University, USA

1. Introduction

Domain wall (DW) propagation is one of the methods for local magnetization switching in memory and logic device applications.^{1,2)} The perpendicular magnetic anisotropy (PMA) materials are being investigated for utilizing the narrow DWs having Bloch and Neel configurations in higher density memory devices. The asymmetric film stack comprising of the PMA material has been caused to lead interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) wherein Néel DW configuration is favored.^{3,4)} DMI stabilized Neel DW has been reported to have higher speed as the Walker breakdown is shifted to higher external fields.^{5,6,7)} In addition, the DMI stabilized Neel DW configuration have been shown to propagate via a tilting of the DW surface. A tilt DW drives a dynamical effect of magnetization spin configuration in a bifurcated junction structure. The DW tilting leads to a field interval between DWs to arrive at Hall bar in the individual branch. Spin configuration and effective torques acting on the Neel DW play a decisive role in the motion of DW in the structure. Micromagnetic simulation results further reveal that control of DW dynamics in the PMA complex network structures can be achieved by tailoring the strength of DMI.

2. Experiments and Results

A thin film, multilayered Ta(5nm)/ Pt(5nm)/ [Ni (0.25nm)/ Co (0.5nm)]x4/ Co(0.5nm) with a Ta (5nm) capping layer were deposited on Si/SiO₂ substrate using sputtering deposition technique. The structure is asymmetric with respect to the spin Hall angle of the bottom Pt and top Ta layer.⁸⁾ A 2- μ m-wide Y-shaped wire structure with a Hall bar at each branches has been fabricated using a combination of electron beam lithography and Ar ion milling techniques. Fig. 1 shows a Kerr microscopy images of the Y-shaped structure, which comprises of an 8- μ m-long straight wire connected to a curved structure with an 8 μ m radial curvature. The creation of DW via injection line has been investigated with a current pulse injection method. Anomalous Hall effect (AHE) measurements were further performed to detect the DW propagation and pinning in the structure. The effect of DMI on the DW splitting at the junction and its configuration changes were investigated using micromagnetic simulation. The results of micromagnetic simulation were compared with Kerr microscopy images. The measured SOT effective fields in the Hall bar structure was evaluated to be, $\sim \pm 25$ Oe at $J_{ac} \approx +5 \times 10^{10} A/m^2$.

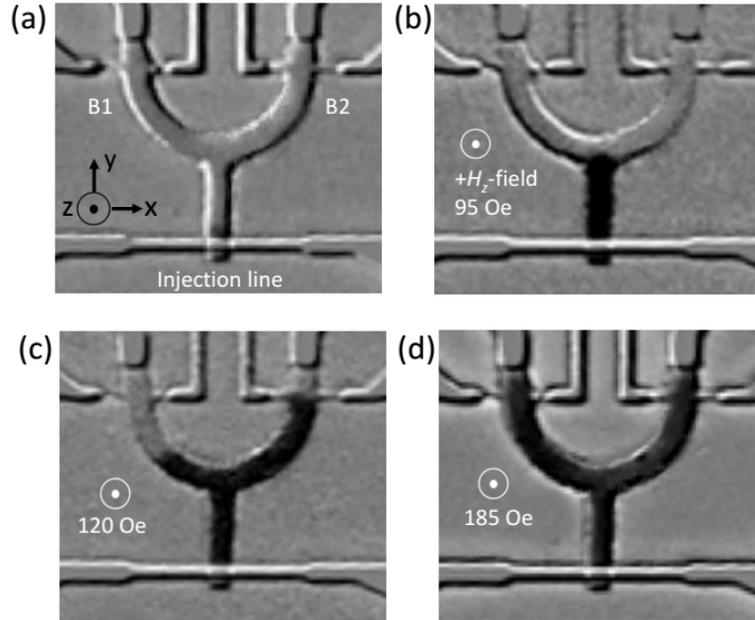


Fig. 1. Kerr images of field induced DW motion in a PMA network structure.

(a) A DW nucleated as a current pulse was applied via the injection line.

(b) The nucleated DW propagated to the junction of the network structure.

(c) and (d) The injected DW splits into two DWs and each propagated into separated branch, B1 or B2.

3. Summary

Direct observation of the DW dynamics in a bifurcated wire reveals that the propagation is via the splitting of DW at the junction, resulting in individual DW in each branch. The DMI induced DW tilting leads to quasi-selective propagation through the network structure, with favored branch determined by the tilting angle of the DW surface. This results in the DW in the individual branches having different depinning fields. Our work shows that by tuning the DMI constant in a material, selective DW motion through a network can be achieved.

4. References

- [1] D. A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit, and R. P. Cowburn, *Science* 309, 1688 (2005).
- [2] S. Parkin and S. H. Yang, *Nat. Nanotechnol.* 10, 195 (2015).
- [3] A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, *Nat. Nanotechnol.* 8, 152 (2013).
- [4] N. Perez, E. Martinez, L. Torres, S. H. Woo, S. Emori, and G. S. D. Beach, *Appl. Phys. Lett.* 104, 092403 (2014).
- [5] A. Thiaville, S. Rohart, É. Jué, V. Cros, and A. Fert, *EPL (Europhysics Letters)* 100, 57002 (2012).
- [6] I. M. Miron, T. Moore, H. Szambolics, L. D. Buda-Prejbeanu, S. Auffret, B. Rodmacq, S. Pizzini, J. Vogel, M. Bonfim, A. Schuhl, and G. Gaudin, *Nat. Mater.* 10, 419 (2011).
- [7] S. Emori, U. Bauer, S. M. Ahn, E. Martinez, and G. S. Beach, *Nat. Mater.* 12, 611 (2013)
- [8] C.-F. Pai, L. Liu, Y. Li, H. W. Tseng, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Appl. Phys. Lett.* 101, 122404 (2012).

Embedded Micromagnetics for More Flexible Simulations

김형석¹, 유천열^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

²Department of Emerging Materials Science, DGIST, Daegu 42988, Korea

최근 자성학의 여러 분야에서 미소자기 동역학 (micromagnetic)를 이용한 연구가 널리 사용되고 있다. 많은 종류의 시뮬레이션 소프트웨어들이 활용되고 있는데, 그 중에서 가장 널리 사용되는 것은 Objected Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF)[1]와 MuMax³[2]이다. 비록 이 두 소프트웨어들은 소스 코드가 공개되어 사용자가 수정하여 사용할 수 있는 길을 열어 놓았지만, 수정을 위해서는 상당한 수준의 프로그래밍 지식이 요구되기 때문에, 많은 사용자들은 주어진 범위에서만 사용이 가능하였다. OOMMF의 경우 많은 extension module이 사용자들에 의해서 개발되고 공개되어 [3], 가능한 시뮬레이션 범위가 넓어졌지만, 모든 사용자의 필요를 충족시키기는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 기존의 OOMMF와 MuMax³ 등의 시뮬레이션 프로그램들이 제공하는 기능을 활용하여, 일종의 embedded 시뮬레이션의 개념을 도입하여 그 활용성을 확장하는 방법을 제시하고자 한다. OOMMF나 MuMax³의 경우 어떤 종류의 프로그램에서든지 system call을 이용하면 command line 명령어로 실행이 가능하다는 점에서 착안하여, 본 연구에서는 MATLAB으로 작성한 메인 프로그램에서 OOMMF의 batch 실행 명령어인 boxii를 실행시키는 방식으로 micromagnetic 시뮬레이션을 구동하였다. 이 방법의 경우 메인 프로그램에서 *.mif 파일을 원하는 방식으로 편집하고, 매우 짧은 시간 $\Delta t=1\sim 10$ ps 정도 간격으로 OOMMF를 실행시킨 후 그 결과를 분석하여 다시 *.mif 파일을 분석하는 방식으로 진행하였다. 이 embedded 방식의 장점은 시뮬레이션 중간에 물질 상수나 전류 밀도, 자기장의 분포 등을 Δt 간격으로 바꿀 수 있어서 사용자 입장에서 훨씬 다양한 종류의 시뮬레이션이 가능하다는 점이다. 본 발표에서는 이와 같은 embedded 방식의 micromagnetics 계산을 통해서 큰 터널링 자기정향을 갖는 터널링 자기저항 소자에서 spin transfer torque가 비균일 전류밀도에 의해서 스위칭 과정이 크게 영향을 받고 있음을 보이고자 한다.

References

- [1] M. J. Donahue and D. G. Porter, OOMMF User's Guide, Version 1.0, Interagency Report NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (Sept 1999).
- [2] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, and B. V. Waeyenberge, AIP Advances **4**, 107133 (2014).
- [3] Hyungsuk Kim, and Chun-Yeol You, Journal of Magnetism **21**, 491 (2016).
- [4] Chun-Yeol You, Journal of Magnetism **17**, 73 (2012).

Magnetic vortices dynamics in soft magnetic spherical shells

Jae-Hyeok Lee^{*}, Junhoe Kim, Jaehak Yang, Jaegun Sim and Sang-Koog Kim

National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory,
Research Institute of Advanced Materials, Department of Materials Science and Engineering, Seoul National
University, Seoul 151-744, South Korea
Corresponding author: sangkoog@snu.ac.kr

1. Introduction

Nontrivial spin textures such as magnetic vortices [1] and skyrmions [2] have been intensively and extensively studied. Novel spin dynamic features including the gyration, azimuthal, and radial modes of vortices in magnetic elements [1] as well as the precession and reversal of vortex cores in nanospheres [3] and half-spheres [4] have been identified. Another distinctive geometry is spherical shells that have been experimentally synthesized [5] and studied on their static spin configurations using micromagnetic simulations [6]. However, the dynamic properties of magnetic vortices in spherical shells have yet been unveiled. In this study, we report on spin dynamic features of intrinsic eigenmodes found in spherical nano-shells, which are different from those of planar disk or square dots.

2. Results and Discussion

Using finite-element micromagnetic numerical simulations of permalloy spherical shells with an outer diameter of 100 nm and a shell thickness of 15 nm, we found two different magnetization states of parallel and anti-parallel vortex-core orientations in two vortex states placed on the north and south poles. Upon relaxing the two cores shifted from their equilibrium positions under external magnetic fields in the case of the parallel vortex cores, translational motions of the coupled two cores on the surface of the spherical shell appear. The two cores represent an out-of-phase motion about the static field direction with a large orbit distance and simultaneously a relatively fast in-phase motion about the core position with a small orbit distance. Using the Fast-Fourier-Transformations (FFTs), we found that the two vortices show two distinct eigenmodes at 80 MHz and 1.5 GHz that represent, respectively, a precession-like motion as in nano-spheres [3] and a gyration-like motion as in planar disks [7]. For the other case, anti-parallel vortex cores, the core motions show complex trajectories of the two vortices. Their FFTs reveal that both cores have their intrinsic gyration frequencies depending on the relative orientation between the core and the direction of static magnetic fields. However, there exist irregular trajectories because the two opposite cores have the same chirality about each core. This configuration is magnetostatically unfavorable in the simultaneous excitation of the two cores' resonant modes. This work provides a further understanding of dynamic-coupled motions of magnetic vortices in spherical shells.

3. References

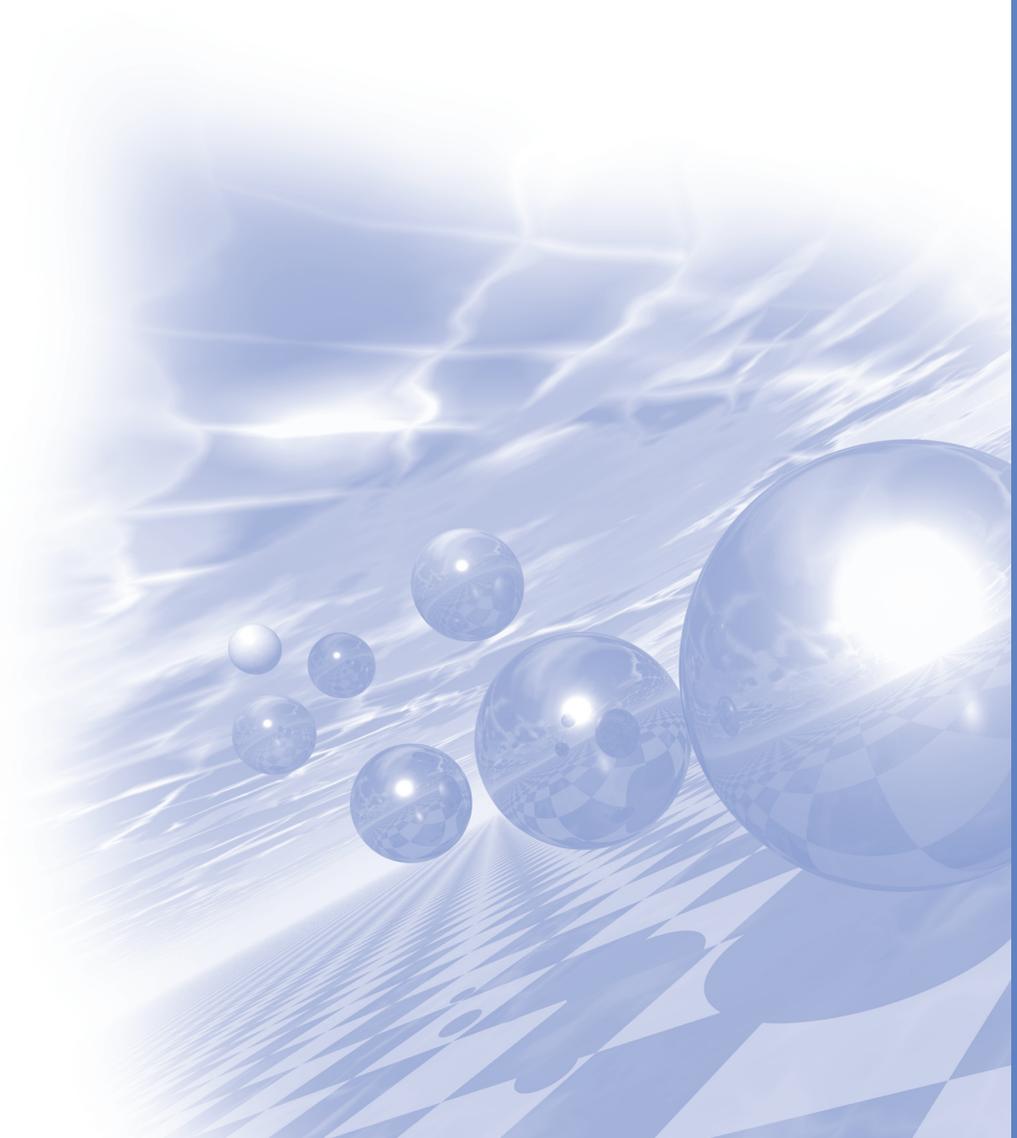
- [1] H. Jung et al., *Sci. Rep.* 1, 59 (2011); M.-W. Yoo and S.-K. Kim, *J. Appl. Phys.* 117, 023904 (2015); M.-W. Yoo, J. Lee, and S.-K. Kim, *Appl. Phys. Lett.* 100, 172413 (2012).

- [2] T.H.R. Skyrme, Nucl. Phys. 31, 556 (1962); A. A. Belavin and A. M. Polyakov, JETP Lett. 22, 245 (1975).
- [3] S.-K. Kim et al., Sci. Rep. 5, 11370 (2015); S.-K. Kim, M.-W. Yoo, J. Lee, J.-H. Lee, and M.-K. Kim, Sci. Rep. 6, 31513 (2016).
- [4] M.-W. Yoo, J.-H. Lee, S.-K. Kim, J. Appl. Phys. 116, 223902 (2014).
- [5] Cabot A et al., Phys. Rev. B 79 094419 (2009); D. Sarkar, M. Mandal., and K. Mandal, J. Appl. Phys. 112, 064318 (2012).
- [6] D. Goll et al., Phys. Rev. B 70, 184432 (2004); V. P. Kravchuk et al., Phys. Rev. B 85, 144433 (2012).
- [7] K. Yu. Guslienko et al., J. Appl. Phys. 91, 8037 (2002).



KMS 2017 Summer Conference

구두발표 IV



Reconfigurable Spin-orbit torque based logic-in-memory

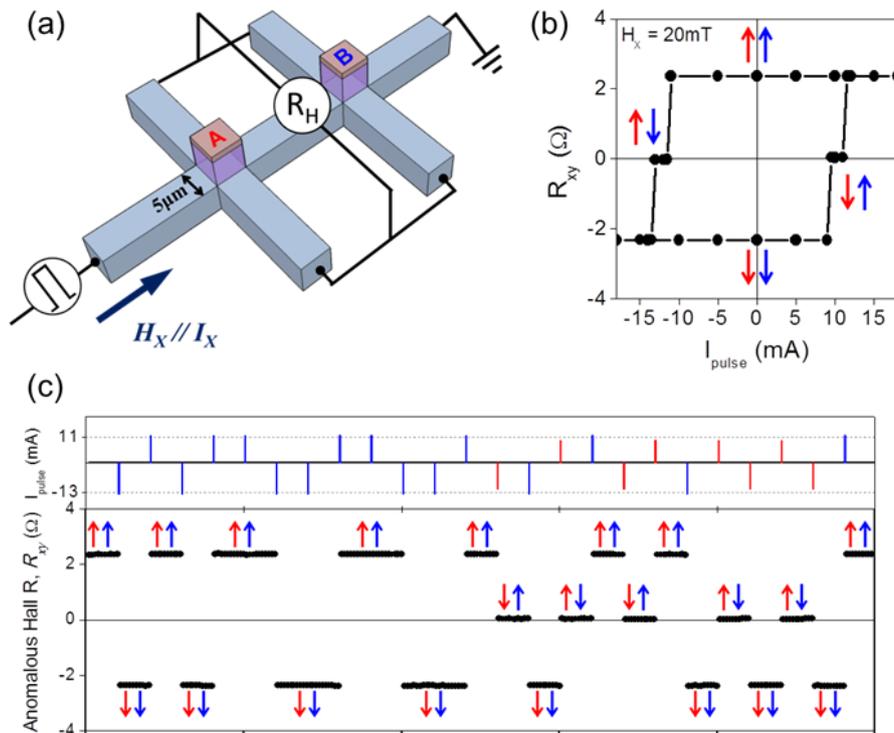
Seung-heon Chris Baek^{1,2*}, Kyung-Woong Park¹, Byong-Guk Park¹

¹Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 34141, Korea

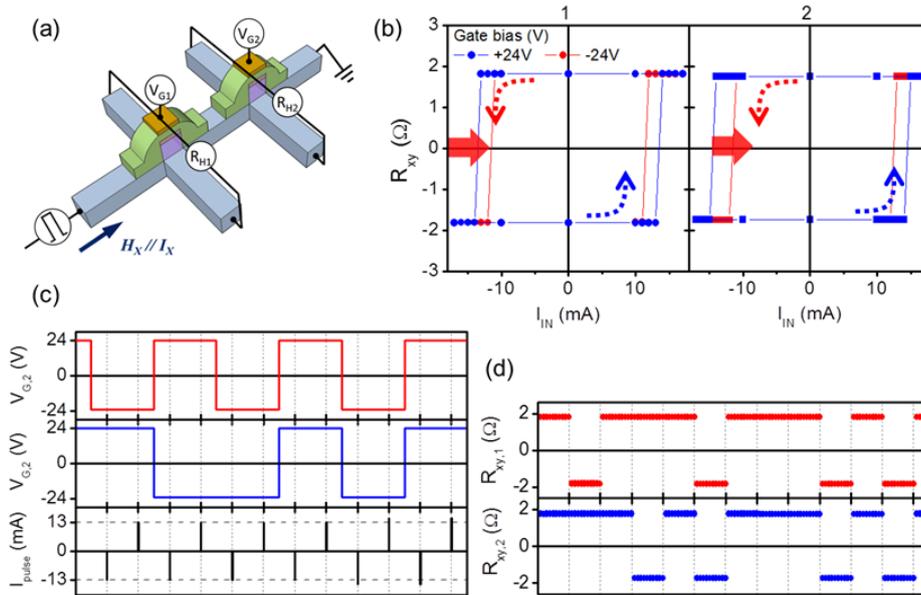
²School of Electrical Engineering, KAIST, Daejeon 34141, Korea

최근 발견된 스핀-오빗 토크 (spin-orbit torque; SOT)는 비자성/강자성/산화막 구조에 흐르는 수평 전류로 인해 생성된 토크로 전기적인 방법으로 수직 자화물질의 자화방향을 제어하게 해준다. 특히 SOT는 기존 스핀-전달 토크 (spin-transfer torque; STT)에 비해 구동 속도가 빠르고 쓰기와 읽기 선이 다르기 때문에 기존 STT-MRAM이 가졌던 단점을 극복할 수 있다. SOT MRAM처럼 수평전류를 이용한 자화방향 제어 방식은 공통의 쓰기 선에 인가된 하나의 펄스전류로 그 위에 제작된 다수의 자기비트를 제어할 수 있다. 본 연구에서는 Ta/CoFeB/MgO 구조에서 발생하는 SOT를 이용하여 CoFeB 층의 자화반전을 유도하고 이러한 현상을 이용해 2-비트의 비휘발성 SOT MRAM을 구현하고자 한다.

본 실험에서는 2개의 CoFeB 비트의 스위칭 임계 전류를 서로 다르게 제작함으로써 인가하는 전류의 크기를 변화시켜 2개의 CoFeB 비트를 자유롭게 제어하였다. 특히 충분히 큰 전류를 인가해주면 동시에 모든 CoFeB 비트의 데이터를 지우거나 (0) 쓸 수 (1) 있다. 이는 현재 사용화 된 플래시 메모리의 erase 동작과 유사한 동작으로 스핀-오빗 토크 기반 소자에서만 볼 수 있는 고유의 동작이다.



[그림 1] (a) 전류 구동 2-비트 SOT MRAM 소자. 공통의 쓰기선 (Ta) 위에 2개의 자성비트 (A, B)가 제작되어 있다. (b) 2-비트 SOT MRAM 소자의 자화반전 임계전류 (JC). (c) 2-비트 SOT MRAM 소자의 구동 동작.



[그림 2] (a) SOT logic-in-memory 소자. (b) SOT logic-in-memory 소자의 게이트 전압에 따른 각 자성비트의 동작. SOT 스위칭 전류의 차이를 볼 수 있다. (c) 2-비트 SOT logic 소자의 input ($V_{G,1}$, $V_{G,2}$, I_{input}). (d) 2-비트 SOT logic 소자의 output ($R_{xy,1}$, $R_{xy,2}$).

본 2-비트 SOT MRAM은 1 트랜지스터로 2개의 비트를 구동 시킬 수 있기 때문에 일종의 multi-level cell (MLC) MRAM의 구현으로 집적도 측면에서는 유리하나 모든 디지털 상태를 쓰기 위해서는 2-step writing을 필요로 한다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 2-비트 SOT MRAM에 게이트막과 게이트 전극을 추가하여 외부전압을 이용해 각 CoFeB 비트를 독립적으로 제어하고자 했다.

이러한 Gated SOT MRAM의 경우에는 voltage controlled magnetic anisotropy (VCMA) 현상을 이용해 각 CoFeB 비트의 자성특성 (magnetic anisotropy)을 독립적으로 제어하고 이를 통해 SOT 스위칭 전류를 제어한다. 이러한 특성을 이용하면 일정한 펄스전류를 인가해 주었을 때 특정 비트는 자화반전이 일어나고 특정 전류는 자화반전이 일어나지 않는 랜덤 selection이 가능해진다. 이 뿐만 아니라 게이트 전압과 펄스전류를 2개의 input으로 고려하면 간단한 로직 동작 (AND, OR) 이 가능해져서 본 소자를 SOT 기반 logic-in-memory 로 활용 할 수도 있다.

References

- [1] Miron, I.M. et al. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection. Nature 476, 189-193 (2011).
- [2] Liu, L., Lee, O. J., Gudmundsen, T. J., Ralph, D. C., & Buhrman, R.A. Current-Induced Switching of Perpendicular Magnetized Magnetic Layers Using Spin Torque from the Spin Hall Effect.. Phys. Rev. Lett. 109, 096602 (2012).
- [3] Matsukura, F., Tokura, Y., & Ohno, H. Control of magnetism by electric fields. Nature Nanotech. 10, 209-220 (2015)

Intrinsic spin orbit torque in antiferromagnets with weak ferromagnetic order

Suik Cheon^{1*} and Hyun-Woo Lee¹

¹Department of Physics, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea

We report a property of antiferromagnet(AFM)-generated spin-orbit torque(SOT) which is absent in its ferromagnetic counterpart. AFM consists of at least two sublattice magnetizations. For instance, in case of AFM with two sublattice magnetizations, says, \mathbf{M}_A and \mathbf{M}_B , there are two independent degrees of freedom, which are Néel order $\mathbf{n}=(\mathbf{M}_A-\mathbf{M}_B)/2$ and ferromagnetic order $\mathbf{m}=(\mathbf{M}_A+\mathbf{M}_B)/2$, unlike FMs with only one degree of freedom. Although \mathbf{m} vanishes in equilibrium, two sublattice magnetizations become noncollinear to each other during the AFM magnetization dynamics[1] and the resulting non-vanishing \mathbf{m} may endow AFM with qualitatively different properties from FMs[2]. Earlier theoretical calculations[3, 4] of SOT in AFM ignore the \mathbf{m} degree of freedom. Here we show that the \mathbf{m} degree of freedom can qualitatively modify properties of SOT in pure AFMs.

References

- [1] A. C. Swaving and R. A. Duine, Phys. Rev. B **83**, 054428 (2011)
- [2] A. V. Kimel, et. al., Nat. Phys. **5**, 727 (2009)
- [3] J. Železný, et. al., Phys. Rev. Lett. **113**, 157201 (2014)
- [4] P. Wadley, et. al., Science **351**, 587 (2016)

텅스텐/강자성체 접합구조에서의 스핀-궤도 돌림힘 측정

김동석^{1*}, 전병선¹, 김창수¹, 문경웅¹, 윤정범¹, 김대현¹, 이상선¹, 황찬용¹

¹나노측정센터, 한국표준과학연구원, 대전 34113

전류에 의한 강자성층 자화 조절은 차세대 자성 메모리나 논리 소자 등의 분야에서 매우 중요한 연구로 각광받고 있다. [1,2] 최근 스핀트로닉스 연구의 화두는 저 전력으로 고 효율의 자화 반전을 얻는 것이다. 강자성층에 인접한 중금속에 전류를 인가하면 스핀-홀 효과에 의한 스핀-궤도 돌림힘이 발생하고, 이는 자화반전을 유도하는 좋은 방법이 된다. [3] 이러한 스핀-궤도 돌림힘의 효율을 스핀-홀 각도($\theta_{SH} = J_S/J_C$)로 정의하며, 인가 전류 대비 고 효율의 스핀전류를 얻는 것이 큰 목적이다. 최근 활발한 연구들의 결과로 Ta, Pt, W 등의 중금속에서 높은 스핀-홀 각도가 보고되었다. 본 연구에서는 β -텅스텐을 이용하여 인접한 강자성체의 강자성공명을 측정하였고, 이를 이용해 텅스텐의 스핀-궤도 돌림힘을 측정하였다.

β -텅스텐/CoFeB (t)/MgO(2)/Ta(1) (in nm.) 구조의 다층박막은 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착되었고, 열산화막이 있는 실리콘 기판을 사용하였다. 스핀토크-강자성공명을 측정하기 위해 시료를 폭 μm , 길이 μm 로 식각 후, 양단에 Ti(5)/Au(65) 전극을 증착하였다. 신호 발생기를 이용하여 GHz 파를 주입한 후, 시료 양단에 인가된 전압을 Lock-in amplifier로 관측하였다. 이 때, 측정되는 강자성 공명 신호는 인가 주파수와 외부 자기장에 따라 변화하며, 공명 자기주파수와 공명 자기장은 Kittel 식을 잘 만족한다. 측정된 신호는 중금속을 통해 흐르는 전류가 만들어낸 스핀-궤도 돌림힘, 암페어 법칙에 의해 만들어진 자기장 (Oersted field)에 의한 강자성 공명을 보여주고, 이는 측정 신호의 대칭 (symmetric) & 비대칭 (asymmetric) 성분을 분리함으로써 분석 가능하다. 이 때, 대칭/비대칭 성분의 비율을 통해 스핀-홀 각도를 얻을 수 있으며 강자성층의 두께 별 스핀-홀 각도를 통해 감쇠형 (damping like, ξ_{DL}), 자장형 (field like, ξ_{FL}) 돌림힘을 구할 수 있다. [4]. 본 연구에서는 β -텅스텐의 스핀-궤도 돌림힘과 스핀-홀 각도를 측정하였고, $\theta_{SH}=0.5$ 의 높은 스핀-홀 각도를 측정하였다. 이는 텅스텐의 스핀-홀 현상이 플래티늄에 비해 강함을 나타내는 좋은 결과이며, 향후 차세대 자성메모리나 논리소자 등의 분야에서 좋은 응용을 기대할 수 있는 보고이다.

References

- [1] L. Berger, Phys. Rev. B 54, 9353 (1996).
- [2] G. Tatara and H. Kohno, Phys. Rev. Lett. 92, 086601 (2004).
- [3] L. Liu, C. F. Pai, L. Yi, H. W. Tseng, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, Science 336, 555 (2012).
- [4] C.F. Pai, Y. Ou, L. H. V-Leao, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, Phys. Rev. B 92, 064426 (2015)



KMS 2017 Summer Conference

초청강연 I



4차 산업혁명과 자기학(2)

김희중*

한국과학기술연구원

2016년 클라우드 슈밋회장 등 다보스포럼(WEF)의 주최자들은 인공지능과 로봇 등 동체와의 결합, 실제와 가상 세계를 융합하는 기술들이 앞으로 산업과 사회의 패러다임을 바꾸면서 세상을 크게 변화시키는 4차 산업혁명으로 발전해 나갈 것이라고 주장하였다.

과거 증기기관의 등장(1차 산업혁명), 전기와 전화의 발명(2차), 디지털 정보기술의 혁신(3차)이 인류 사회의 많은 부분을 변모시킨 것을 알고 있는 우리는 지금 새로운 산업혁명이 시작되었거나 목전에 두고 있다는 느낌을 받고 있다.

전자의 스핀현상에 기초한 자기학은 2차 산업혁명의 핵심인 전기의 발전과 변전 기계, 모터 등 전기-동력 변환을 응용하는 수많은 제품들을 발명하는 기반이 되었다. 또한 자기학은 벨이 발명한 자석식 전화기 등 통신 기계에도 핵심역할을 하였다.

3차 산업혁명의 기반이 된 디지털 정보기술의 초기 발전도 자기학이 기반이 되었다. 메인프레임 컴퓨터의 정보처리장치(CPU)에 페라이트코어 메모리, PC 등의 정보저장장치에 테이프 및 HDD가 주도적 역할을 하였다.

그러나 무어의 법칙을 기반으로 한 반도체가 50년 이상 비약적으로 발전하면서 현재 메인프레임의 CPU, PC의 정보저장장치, 오디오/비디오 기기들에서 자기부품은 대부분 반도체로 대체되었다. 하지만 현재 STT-MRAM을 비롯한 신개념의 자기메모리는 중요성을 인정받아 반도체기업들에서 활발히 개발되고 있으므로 조만간 산업화가 될 가능성이 높다.

또한 차세대 전기자동차나 일반 자동차에도 다양한 기능의 자기부품들의 사용이 대폭 증가할 것으로 여겨지고 있다.

이러한 추세로 미루어 우리가 노력한다면 미래에는 자기학분야에서 지금보다 더 다양하고 많은 새로운 직업이 창출될 가능성은 매우 높다고 생각한다.

금번 강연에서는 먼저 4차 산업혁명시대에 어떤 직업들이 감소되거나 창출될 것인가를 조망해보고 자기학 분야가 이런 미래의 직업들에 어떻게 대응하고, 또 어떻게 새로운 분야를 창출할 것인가에 대해 함께 생각해 보고자 한다.



KMS 2017 Summer Conference

포스터발표



Analysis of Red Blood Cell by Using a Highly Sensitive GMR-Spin Valve Film Device and μ -Coil and Channel

Jong-Gu Choi^{1*}, Su-Hee Kim¹, Ho-Dae Lim¹, Do-Gwun Hwang¹,
Jang-Roh Rhee² and Sang-Suk Lee¹

¹Dept. of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

²Dept. of Nanophysics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Korea

The giant magnetoresistance(GMR)-spin valve(SV) device having a high linearity and a low hysteresis for was developed by the biosensor to analyze the detection property of red blood cell(RBC). The properties for the dual-type GMR-SV film as glass/Ta/NiFe/Cu /NiFe/FeMn or IrMn/NiFe/Cu/NiFe/Ta include a magnetoresistance ratio (MR) of 8.5%-10.0%, a magnetic sensitivity (MS) of 1.0%/Oe -1.5%/Oe, and a coercivity of 1.0 Oe-1.5 Oe for the free NiFe layer applying to the artificial isotropic magnetic property in-plane of film. The multilayer structure with in-plane orthogonal easy axes controlled by the post annealing temperature of 105°C was included of the free and the pinned ferromagnetic layers for applying biosensor. The RBC coupled to the magnetic beads can be captured on the 10 turn μ -coils, which maintain an enough magnitude of magnetic field for the detection of magnetic beads attached to RBC. When RBCs coupled to several magnetic beads passed on the micro channel with a diameter of a few μ m, the movement of those is controlled by the electrical AC input signal applied to the 10 turn μ -coils. The RBCs captured above the GMR-SV device are changed as the output signals for detection status. It implies that this device as biosensor can analyze the coupling force between hemoglobin and magnetic beads for the deformed features of RBCs to pass the narrow capillary. Also, the dual-type GMR-SV device and μ -coil and channel can be applied to analyze a new property of the membrane's deformation of RBC coupled to magnetic beads.

1. Experiments

The coil-channel-composite structure for a modular device was of a type for controlling it as it flows along with the biomolecule passage of red blood cells in the micron size. The first substrate Corning glass (#7059) was deposited over the thin-film GMR-SV. First the photolithographic process and ECR-ion milling process through the width and length are respectively 1 μ m and a size of 20 μ m was produced gateun GMR-SV devices. Through a second photolithography process to pattern the electrode made of Cu GMR-SV electrode element for the biosensor. Developed GMR-SV Bio edge devices other than the center portion of the electrode material of all PR was coated only on the SiO₂ insulating layer while leaving a thin film by rf sputtering method. GMR-SV μ - coil electrode so that the electrode passageway and passage is not connected to each other of the insulating layer was deposited by 100 nm thick SiO₂ thin film by rf sputtering. After each step lithography process for forming a composite structure, the actual shape of the patterning results showed a photograph in Fig. 1. Fig. 1 is the actual shape of the coil wound μ - once patterned by lithography, the Cu thin film was coated on the substrate.

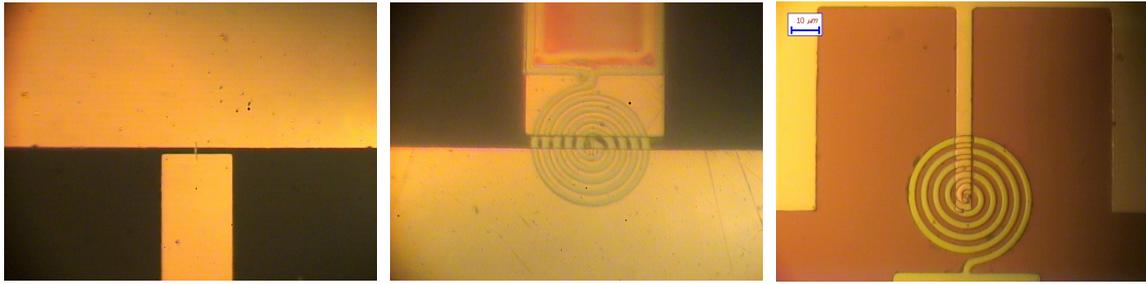


Fig. 1. Three steps of GMR-SV device with a size of $1 \times 18 \mu\text{m}^2$ with 10 turn μ -coils.

2. Results and Discussion

Fig. 2 shows that (a) real photograph of the motion of RBC + μ Beads through out the PR channel above GMR-SV device; (b) visualization of the flow for a RBC + μ Beads inside the PR μ -channel positioned on the center of GMR-SV device. A RBC + μ Beads flows in three steps with moving (A), stop (B), and moving (C) controlled by using input AC signal applied to one turn μ -coil. Fig. 3 shows that the response of the output signals for the input signals (a) $V_{pp} = 200 \text{ mV} : 20 \text{ kHz}$ and (b) $V_{pp} = 120 \text{ mV} : 20 \text{ kHz}$. This input signal has enough amplitude and frequency, which is induced on RBC + μ Beads and applied to one μ -coil.

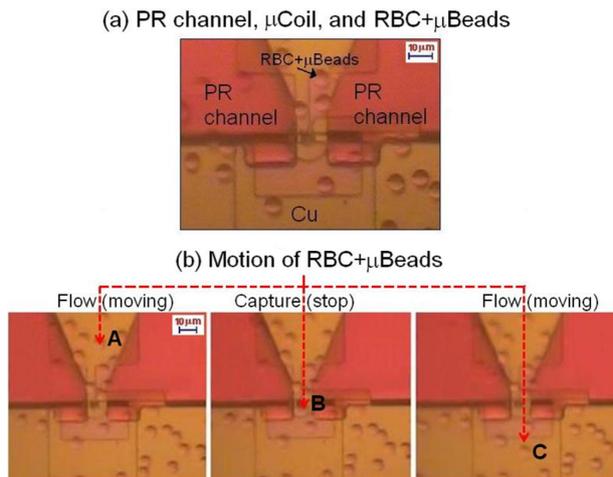


Fig. 2

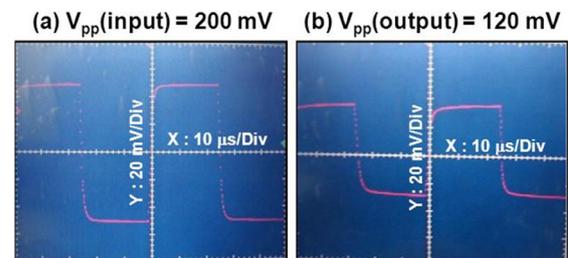


Fig. 3

3. References

- [1] MOTTA, M., HAIK, Y., GANDHARI, A. & CHEN, C. J. 1998. High magnetic field effects on human deoxygenated hemoglobin light absorption, *Bioelectrochem. Bioenerg.* 47, 297-300.
- [2] LEE, J. Y., KIM, M. J. & LEE, S. S. 2014. Signal Detection by Using a GMR-SV Biosensor for Magnetic μ -beads Attached to Red Blood Cells. *New Physics: Sae Mulli*, 64, 958-962.

The role of elasticity on intrinsic anomalous Hall effect in Ni

Do Duc Cuong^{*}, Soon Cheol Hong[†] and S.H. Rhim[†]

Department of Physics and Energy Harvest Storage Research Center, University of Ulsan, Republic of Korea

^{*}schong@ulsan.ac.kr, [†]sonny@ulsan.ac.kr

The anomalous Hall effect (AHE) is commonly observed phenomena in magnetic systems, where 3d ferromagnetic metals are epitomic examples[1-4]. In last decade, the intrinsic anomalous Hall effect (AHE) is well formulated in the framework of Berry phase formalism. In this study, the role of elasticity on AHE in fcc Ni has been investigated using first-principles calculations, where Wannier functions are fully exploited. Different lattice distortions along the (001), (110), and (111) are taken into account while volume is kept constant. The resulting AHE, more specifically, the Berry curvature for different lattice strains are discussed, where exhaustive analysis in Brillouine zone is provided regarding level degeneracies, changes in momentum matrices, and so forth.

References

- [1] Y. Yao et. al. Phys.Rev.Lett **92**, 037204 (2004).
- [2] X. Wang et. al. Phys.Rev.B **76**, 195109 (2007)
- [3] H.R. Fuh et. al. Phys.Rev.B **84**, 144427 (2011).
- [4] W. Feng et. al. Comp.Mater.Sci. **112**, 428 (2016).

탄소 도핑에 따른 τ -MnAl의 자성과 자기이방성에 관한 제일원리계산

박진식*, 임성현†, 홍순철†

울산대학교 물리학과, 에너지 하베스트-스토리지 연구센터 울산 44610 대한민국

*sonny@ulsan.ac.kr, †schong@ulsan.ac.kr

현재 널리 사용되고 있는 영구 자석은 희토류 금속을 포함하고 있는데 희토류 금속을 덜 사용하거나 아예 사용하지 않는 영구 자석 개발에 관심이 높다. 그 중에서 τ -MnAl이 상대적으로 높은 자기이방성과 높은 보자력을 가지고 있는 것을 알려져 있어 희토류 영구 자석을 대체 할 가능성이 있다. τ -MnAl은 단위 낱칸당 망간 원자 2개와 실리콘 원자 2개로 이루어진 $L1_0$ 구조를 가지고 있으며 격자상수는 $a=3.91 \text{ \AA}$, $c=3.56 \text{ \AA}$ 이고 망간당 자기모멘트는 $1.94 \mu_B$ 으로 실험적으로 알려져 있다. 그러나 실험적으로 τ -MnAl가 불안정하다고 알려 있으며 카본을 도핑 했을 때 안정해지며 보자력 증가하는 것으로 알려져 있다.[1]

본 계산에서는 MnAl의 자성에 대한 제일원리계산을 수행하기 위해VASP을 사용하였으며 교환상관표텐셜로는 PBE를 사용하였다. KPOINTS는 $30 \times 30 \times 30$ 를 사용하였으며 끊어버림 에너지는 450 eV 로 두고 계산하였다. 먼저 도핑 하기 전 최적화 된 격자상수는 각각 $a=3.89 \text{ \AA}$, $c=3.50 \text{ \AA}$ 이었으며 Mn 당 자기모멘트와 $2.36 \mu_B$ 과 MCA값은 0.542 meV/cell 로 계산되었다. 본 계산에서의 자기모멘트는 실험치 자기모멘트에 비해 약 21% 크게 나왔다. 그리고 카본 도핑이 된 MnAl에 대한 계산을 위해 $2 \times 2 \times 2$ 슈퍼셀을 만들어 Mn_{16} 과 Al_{16} 로 이루어진 계를 설정하였다. 먼저 치환하기 전 Mn 당 자기모멘트는 $2.301 \mu_B$ MCA는 0.532 meV/cell 로 계산되어 작은 계에 대한 계산치와 일치하여 본 계산의 정확성을 확인할 수 있었다. C이 Mn자리를 치환한 경우 Mn 당 자기모멘트는 $2.167 \mu_B$ 와 MCA는 0.500 meV/cell 로 계산되었으며Al자리를 치환한 경우는 Mn 당 자기모멘트는 $2.302 \mu_B$ 와 MCA는 0.68 meV/cell 으로 계산되었다. C이 Mn자리에 보다 Al 자리에 치환하였을 때 자기모멘트와 보자력이 커질 수 있음을 보여 주고 있다.

Reference

- [1] R. Madugundo, O. Koylu-Alkan, and G. C. Hadjipanayis, AIP ADVANCES **6**, 056009 (2016).

토크리플 저감을 위한 자속집중형 동기전동기 회전자 설계

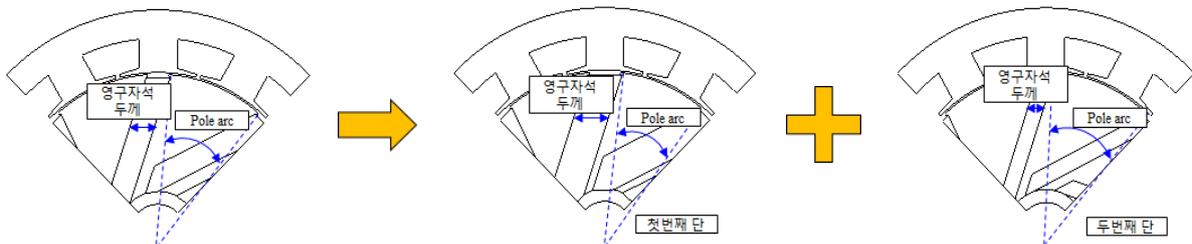
유준열*, 정재식, 홍정표
한양대학교 미래자동차공학과

1. 서론

페라이트 자석을 사용한 자속집중형 동기전동기는 희토류 자석을 사용하지 않으면서 비교적 높은 출력을 발생시키므로 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서, 산업용 서보 모터용으로도 자속집중형 동기전동기가 많이 사용되고 있다. 서보 모터용 전동기는 낮은 토크리플이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 기존 서보 모터용 자속집중형 동기전동기 모델의 토크리플 저감을 위한 회전자 설계를 진행하였다.

2. 실험방법과 결과

기존 서보 모터용 자속집중형 동기전동기 모델의 토크리플 저감을 위해 적층방향으로 영구자석 두께 및 Pole arc가 다른 2단 구조의 회전자 형상을 설계하였다. Fig. 1은 기존 모델과 개선된 모델의 회전자 형상을 나타낸다.



[Fig. 1. 기존 모델 및 개선된 모델의 회전자 형상]

영구자석 사용량을 일정하게 유지하며 기존 모델과 각 단의 영구자석의 두께와 Pole arc를 변화에 따른 공극자속밀도 및 자속밀도 THD를 계산하였다. 공극자속밀도 THD가 최소인 모델을 개선 모델로 제안하였다. 유한요소해석을 통해 기존 모델과 개선된 모델의 무부하 역기전력 THD 결과를 비교하였다. 비교 결과, 개선된 모델의 역기전력 THD를 14.6% 저감하였다.

3. 고찰

적층방향으로 서로 다른 영구자석 두께와 Pole arc를 갖는 2단의 회전자 형상을 통해 토크리플을 저감할 수 있었다. 각 단의 영구자석 두께를 다르게 함으로써, 공극자속밀도를 정현적으로 만들 수 있다. 공극자속밀도가 기존 모델에 비해 정현적으로 개선됨에 따라 역기전력 THD가 감소하게 되고, 이로 인해 토크리플을 저감할 수 있다.

4. 결론

산업용 서보 모터에서는 낮은 토크리플이 요구된다. 본 논문에서는 기존 모델의 토크리플 저감 방안으로 적층방향으로 영구자석 두께와 Pole arc가 다른 2단의 회전자를 설계하였다. 영구자석 사용량을 동일하게 유지

하며 영구자석 두께와 Pole arc 변화에 따른 공극자속밀도 및 자속밀도 THD를 계산하였다. 그 결과, 특정 영구자석 두께와 Pole arc에서 낮은 공극자속밀도 THD를 갖는 회전자를 설계하였다. 그 이유는 적층방향으로 다른 형상의 회전자를 배치함으로써, 공극자속밀도를 정현적으로 만들기 때문이다. 유한요소해석을 통해 기존 모델에 비해 개선된 모델의 역기전력 THD 및 토크리플이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 적층방향으로 서로 다른 형상의 회전자를 배치함으로써, 토크리플을 저감할 수 있다는 것을 말한다.

5. 사사

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2017-2012-0-00628)

6. 참고문헌

- [1] 손형수, 김두영, 홍정표, “자속집중형 BLDC 전동기 토크리플 저감을 위한 형상설계”, 2015 한국자동차 공학회 추계학술대회, pp. 1214-1217, 2015
- [2] 손승완, 신영진, 윤명환, 홍정표, “반응표면법을 이용한 표면부착형 영구자석 동기발전기의 토크 리플 저감설계”, 2015 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 800-801, 2015
- [3] 김태윤, 윤명환, 홍정표, “자속집중형 BLDC 전동기 토크리플 저감을 위한 형상설계”, 2015 한국자동차 공학회 춘계학술대, pp. 1002-1006, 2015

Dynamic Symmetry Breaking in a Gyrotropic Motion of a Magnetic Vortex by DC-Spin-Polarized Current

Hee-Sung Han*, Ki-Suk Lee

School of Materials Science and Engineering,
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Korea

1. Introduction

A magnetic vortex has been attracted many interests owing to its applications to data storage and logic devices. Especially, it has been studied a spin-torque nano-oscillator based on self-sustained gyrotropic motion [1-3]. It is well-known that the initial magnetic vortex state influences only the shift of eigenfrequency for gyrotropic motion when a spin-polarized current is applied [2]. Recently, it is reported that the magnetic vortices are easily deformed along the thickness in relatively thick nanoelements [3-4]. In this work, we shows the symmetry breaking in the gyrotropic motion of magnetic vortex driven by spin-transfer torque (STT) accompanying with the Oersted field, which is completely different from well-known gyrotropic motion in thin nanoelements [2].

2. Simulations

In this work, we used a mumax³ code [5] which is one of the micromagnetic simulation code to calculate the Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation including STT term: $d\mathbf{m}/dt = -\gamma_L[\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] + \alpha[\mathbf{m} \times (d\mathbf{m}/dt)] + \mathbf{T}_{\text{STT}}$, where $\gamma_L = \gamma/(1+\alpha^2)$, which describes the dynamic motion of normalized magnetization \mathbf{m} , with the gyromagnetic ratio γ , the effective field \mathbf{H}_{eff} , the saturation magnetization M_s , the Gilbert damping constant α . The STT term is given by $\mathbf{T}_{\text{STT}} = \mathbf{m} \times [\mathbf{m} \times (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{m}] + \beta \mathbf{m} \times (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{m}$ where $\mathbf{u} = -Pj_s \mu_B / eM_s(1+\beta^2)$ where with non-adiabatic constant $\beta = 0.04$, the current density j_s , Bohr magneton μ_B , electron charge e , and the degree of spin polarization $P = 0.5669$. To apply out-of-plane spin-polarized current into an isolated permalloy (Py, Ni₈₀Fe₂₀) disk of diameter $2R = 300$ nm and thickness $L = 80$ nm. The perpendicular polarizer which have downward spin-polarization is positioned below the disk.

3. Results and Discussions

We observed the deformation of the vortex core (VC) in an initial transient regime and it was affected by the chirality, the in curling direction of in-plane magnetization (\mathbf{M}) of the magnetic vortex structure. For the case of clockwise (CW) chirality, VC is shrunk while it is expanded for the counter-clockwise (CCW) chirality. During the steady gyrotropic motion, a symmetry breaking was significant: the VC structure with CCW chirality was elongated much larger than it with CW chirality as shown in Fig. 1. Such a nontrivial dynamic symmetry breaking might comes from the difference of \mathbf{M} configurations along the thickness direction according to the CW and CCW chiralities, which would affect the adiabatic STT. We will discuss deeply in the presentation.

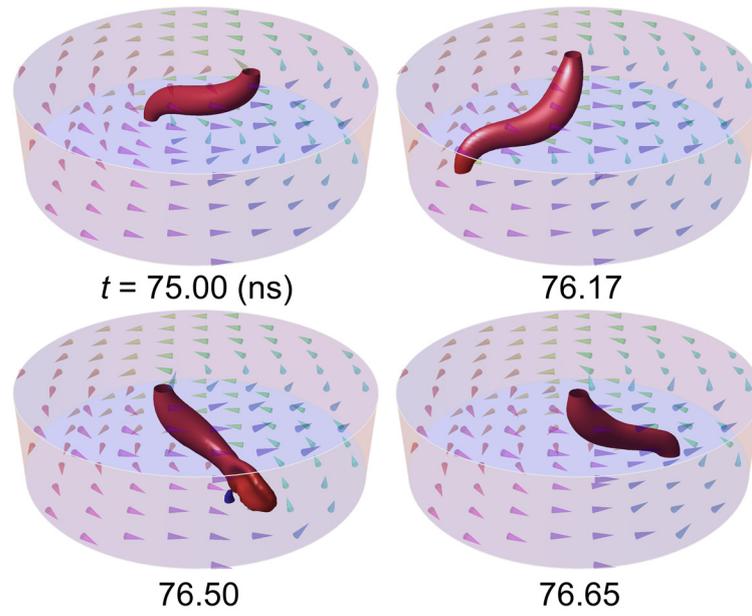


Fig. 1. The current-driven magnetic vortex dynamics for the CCW chirality.

4. References

- [1] A. Dussaux et al., Nat. Comm. 1, 8 (2010)
- [2] Y. -S. Choi et al., Appl. Phys. Lett. 93, 182508 (2008)
- [3] V. S. Pribiag et al., Nat. Phys. 3, 498-503 (2007)
- [4] J. Ding et al., Sci. Rep. 4, 4796 (2014)
- [5] A. Vansteenkiste et al., AIP Advances. 4, 107133 (2014)

Terahertz Spin-Wave Emission from Ferrimagnetic Domain walls

Se-Hyeok Oh^{1*}, Se Kwon Kim², Dong-Kyu Lee³, Gyungchoon Go³, Kab-Jin Kim^{4,5},
Teruo Ono⁵, Yaroslav Tserkovnyak² and Kyung-Jin Lee^{1,3,6,*}

¹Department of Nano-Semiconductor and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

²Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, California 90095, USA

³Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

⁴Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

⁵Institute for Chemical Research, Kyoto University, Kyoto 611-0011, Japan

⁶KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 02841, Korea

*kj_lee@korea.ac.kr

Recently, antiferromagnetic spintronics has attracted much attention due to spin excitation in the terahertz (THz) ranges [1]. It has been recently predicted that spin-orbit torque (SOT) combined with interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction effectively drives an antiferromagnetic domain wall which can emit THz spin waves [2]. Because of the immunity of antiferromagnets to external magnetic fields, however, it is experimentally challenging to create and detect antiferromagnetic domain walls. In this talk, we report theoretical and numerical results on field-driven THz spin wave emission from a ferrimagnetic domain wall which is easy to manipulate thanks to net non-zero magnetic moment. In addition, we show that THz spin wave emission is realized by SOT as well. We focus on a class of ferrimagnets composed of antiferromagnetically coupled two inequivalent sublattices having different Lande-g factor. In this class of ferrimagnets, the angular momentum compensation temperature T_A is different from the magnetic moment compensation temperature T_M . Because of this difference between two compensation temperatures, the field-driven antiferromagnetic spin dynamics is realized for ferrimagnetic domain walls at T_A [3], opening the possibility for field-driven THz spin-wave emission. In the presentation, we will show detailed theoretical and numerical results for field- and SOT-driven dynamics of ferrimagnetic domain wall.

References

- [1] T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley, and J. Wunderlich, *Nat. Nanotechnol.* **11**, 231 (2016).
- [2] T. Shiino, S.-H. Oh, P. M. Haney, S.-W. Lee, G. Go, B. G. Park, and K. J. Lee, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 087203 (2016).
- [3] K.-J. Kim, S. K. Kim, T. Tono, S.-H. Oh, T. Okuno, W. S. Ham, Y. Hirata, S. Kim, G. Go, Y. Tserkovnyak, A. Tsukamoto, T. Moriyama, K.-J. Lee, and T. Ono, submitted (2017).

Domain wall motion at a step of Dzyaloshinskii-Moriya interaction

Ik Sun Hong^{1*}, Kyung-Jin Lee^{1,2}

¹KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University

²Department of Materials Science and Engineering, Korea University

To realize logic and memory devices using magnetic domain walls (DWs), it is important to control the DW position [1]. Recently, the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) has attracted considerable interest [2]. By changing interface between ferromagnet and heavy metal, it is possible to control the interfacial DMI. We assume that two regions have different DMI, called DM step. In this work, we studied about DW motion at a DM step driven by an external field and a spin-orbit torque (SOT).

We performed one dimensional micromagnetic simulations with the following parameters; the exchange constant $A=110^{-6}$ erg/cm, the uniaxial anisotropy constant with easy axis $K=110^7$ erg/cm³, and the spin hall angle $\theta=0.3$. First we studied field-driven domain wall motion at a DM step. An effective field at DM step written as, where indicates a DM vector of which direction is in. When a Bloch type domain wall moving through the DM step, the effective field is almost zero [3]. In the absence of effective field, a Bloch type domain wall easily passes the DM step. On the other hand, the center magnetization of a Néel type domain wall is along the x direction, so that the effective field of DM step is always in z direction, the opposite sign of the external field. It makes a Néel wall difficult to pass the DM step. In the case of SOT-driven domain wall motion [4], the energy barrier of DM step depends on the sign and magnitude of DMI constant. Difference of two DMI constants builds up a potential barrier. We find that a threshold current density of DM step depends on the height of energy barrier.

We propose for domain wall device that it is possible to control the position of domain wall by a DM step. Using a DM step, it is possible to increase the retention of DW devices.

References

- [1] D. Petit, et al., J. Appl. Phys., **103**, 114307 (2008)
- [2] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960)
- [3] A. Mougin, et al., EPL, **78**, 57007 (2007)
- [4] A.V. Khvalkovskiy, et al., Phys. Rev. B **87**, 020402(R) (2013)

출력밀도 향상을 위한 자속집중형 페라이트 자석 동기전동기의 회전자 설계

김학순*, 윤명환, 홍정표
한양대학교 미래자동차공학과

1. 서론

최근 환경 문제가 거론되면서 친환경차에 대한 연구가 진행 중이다. 그 중 전기자동차 견인용 전동기는 자동차 연비 및 성능에 직접적인 영향을 주기 때문에 출력밀도가 굉장히 중요하다. 이에 마그네틱 토크와 톨러턴스 토크를 동시에 사용하는 IPMSM을 주로 사용하며 자석으로 희토류 자석을 주로 사용한다. 하지만 희토류는 중국에서 대부분 수입에 의존하고 있어 가격 변동이 발생하고 잠재적으로 수급에 문제가 발생할 수 있다. 이에 비희토류 자석을 사용하는 전동기에 대한 연구가 활발하다. 비희토류 자석으로 페라이트를 주로 사용하는데 희토류 자석에 비해 잔류자속밀도가 작기 때문에 동일한 성능을 얻기 위해서 자석 사용량을 늘려야 한다. 따라서 본 논문에서는 출력밀도를 높이기 위해 회전자 형상과 극수 변화에 따른 성능 비교를 할 것이다.

2. 실험방법과 결과

1) 회전자 자석 형상에 따른 역기전력 비교

Model 1a ~ 1c까지 자석의 폭을 늘려가면서 자석 사용량을 높였다. 그리고 1c와 1d는 자석의 폭은 동일한 상태에서 두께를 변화시켰다. 아래의 Fig.1부터 Fig.4.은 모델별 형상을 나타낸 것이고 Fig.5.는 각 모델들의 역기전력을 표현한 그래프이다.

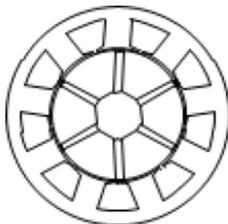


Fig. 1. Model 1a



Fig. 2. Model 1b



Fig. 3. Model 1c



Fig. 4. Model 1d

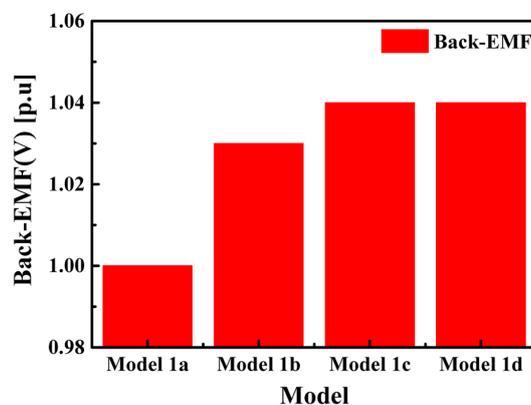


Fig. 5. 역기전력(Back-EMF)

2) 극수에 따른 역기전력 비교

Model 2a ~ 2c는 극수를 증가시키면서 자석 사용량을 높였다. 아래의 Fig.6.부터 Fig.8.까지 모델별 형상을 나타낸 것이고 Fig. 9.은 각 모델별 역기전력을 표현한 그래프이다.

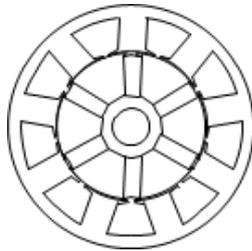


Fig. 6. Model 2a

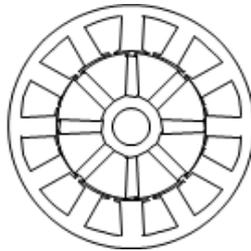


Fig. 7. Model 2b

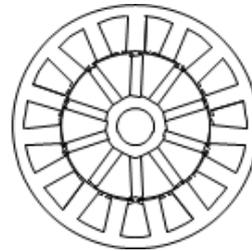


Fig. 8. Model 2c

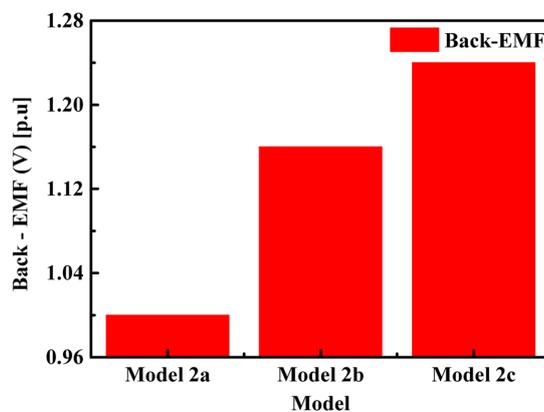


Fig. 9. 역기전력(Back-EMF)

3. 고찰

1) 회전자 형상에 따른 성능 비교

Model 1a부터 Model 1c에 따라 자석 폭을 늘린 결과 역기전력이 증가함을 알 수 있었다. 1c와 1d의 경우 자석의 폭은 동일한 상태에서 두께를 늘린 결과 역기전력은 두 모델이 동일함을 알 수 있다. 이를 통해 역기전력에 영향을 주는 요인은 자석의 폭임을 알 수 있다.

2) 극수 변화에 따른 성능 비교

Model 2a부터 Model 2c까지 극수가 증가하면서 역기전력이 증가함을 알 수 있다. 하지만 Model 2a를 기준으로 각각 2b와 2c의 역기전력 상승률은 2b에 비해 2c가 적음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 페라이트 자석을 적용한 자속집중형 동기전동기의 회전자 형상 및 극수에 따른 성능을 비교하였다. 자석의 폭이 증가할수록 역기전력이 증가함을 알 수 있었으며 극수 증가에 따라 역기전력이 증가함을 알 수 있었다. 이를 통해 자속집중형 페라이트 자석 동기전동기의 출력밀도 향상이 가능한 회전자 설계가 가능하다고 사료된다.

5. 사사

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2017-2012-0-00628)

6. 참고문헌

- [1] 정영훈, 채승희, 윤명환, 홍정표, “출력밀도 향상을 위한 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 형상 변화”, 2014 KSAE 부문 종합학술대회, 1331-1335, 2014
- [2] 정영훈, 박권일, 임명섭, 홍정표, “파라메트릭 디자인을 이용한 듀얼 클러치 변속기용 자속집중형 동기전동기 설계”, 2016 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 663-669, 2016
- [3] Hae-Joong Kim, Doo-Young Kim, and Jung-Pyo Hong, “Structure of Concentrated-Flux-Type Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors Using Ferrite Permanent Magnets”, IEEE Trans. Magn, vol 50, no. 11, pp. 1-4, 2014

Interaction of propagating spin waves with a skyrmion in perpendicularly magnetized thin-film nanostripes

Junhoe Kim^{*}, Jaehak Yang, Bosung Kim, Young-Jun Cho and Sang-Koog Kim

National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory, Department of Materials, Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, South Korea

1. Introduction

Magnetic skyrmions, topological solitons with an integer topological charge, have been found in magnetic bulk materials of non-centrosymmetry as well as in magnetic thin films with large spin-orbit coupling at inversion-symmetry-broken interfaces [1,2]. It is known that this anti-symmetric coupling, known as Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI), plays a crucial role in stabilizing skyrmion formation. Skyrmions' topological stability is advantageous in applications to memory devices, owing to both their nano-scale dimensions and ultra-low critical current density. In this light, reliable manipulation of magnetic skyrmions by electric currents or magnetic fields has attracted great interest. Very recently, skyrmion motions also have been found to be driven by spin waves (SWs) propagation in nanostrips [3, 4]. This alternative approach is of special interest in terms of the promise of all-magnetic control of skyrmions in geometrically constricted elements. However, the underlying physics of SW-skyrmion interactions are still lacking.

2. Methods and Results

In the present study, we employed micromagnetic numerical simulations to examine SW-driven skyrmion motions and elucidate their underlying physics. We found interactions between propagating spin waves (SWs) and a single skyrmion in perpendicularly magnetized nanostrips with DMI. Incident SWs from one end interact with the skyrmion located at the center, giving rise to considerable forward skyrmion motions for specific SW frequencies.

3. Discussion

The frequency-dependent interaction originated from the robust coupling of the SWs with the internal modes of the skyrmion. Here we present correlations of the SW propagation and skyrmion modes. This work provides further understanding of the interactions between magnons and topological solitons in constricted geometries.

4. Conclusion

We studied the propagations of spin waves in W/CoFeB/MgO thin-film nanostrips and their interactions with a skyrmion in the waveguides. It was found that propagating spin waves lead to the rotation and linear motions of the skyrmion. In addition, the rotation sense of the skyrmion and the speed of its linear motion depend on the excitation frequency of spin waves. As reported in Refs [5,6], DMI leads to asymmetric spin wave propagations in the spin-wave guides, thus this effect seems to affect such skyrmion motions as found from this work.

5. References

- [1] S. Heinze, K. V. Bergmann, M. Menzel, J. Brede, A. Kubetzka, R. Wiesendager, G. Bihlmayer, and S. Blügel, *Nature Phys.* 7, 713 (2011).
- [2] A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, *Nature Nanotech.* 8, 152 (2013).
- [3] X. Zhang, M. Ezawa, D. Xiao, G. P. Zhao, Y. Liu, and Y. Zhou, *Nanotechnol.* 26, 225701 (2015).
- [4] J. Ding, X. Yang, and T. Zhu, *IEEE Trans. Magn.* 51, 1500504 (2015).
- [5] J. Moon, S.-M. Seo, K.-J. Lee, K.-W. Kim, J. Ryu, H.-W. Lee, R. D. McMichael, and M. D. Stiles, *Phys. Rev. B* 88, 184404 (2013).
- [6] F. Garcia-Sanchez, P. Borys, A. Vansteenkiste, J.-V. Kim, and R. L. Stamps, *Phys. Rev. B* 89, 224408 (2014).

SPMSM의 토크 리플 저감을 위한 스텝 스큐 설계

원태준*, 박호용, 김대기, 홍정표
 한양대학교 미래자동차공학과

1. 서론

영구자석 부착형 동기전동기(SPMSM)은 다른 타입 전동기보다 높은 출력을 발생시키지만, 토크 리플이 크다는 단점이 있다. 코깅토크는 영구자석 전동기의 슬롯 구조에 의한 자기저항 차이로 인해 발생하는 것으로 고정자에 불균형적인 힘이 작용하여 발생하는 토크다. 코깅 토크는 토크 리플의 원인이 된다. 따라서 토크 리플을 저감하기 위해서 코깅 토크를 저감해야하며, 본 연구에서 코깅 토크를 저감하기 위한 회전자 스텝 스큐 설계를 진행하였다.

2. 실험방법과 결과

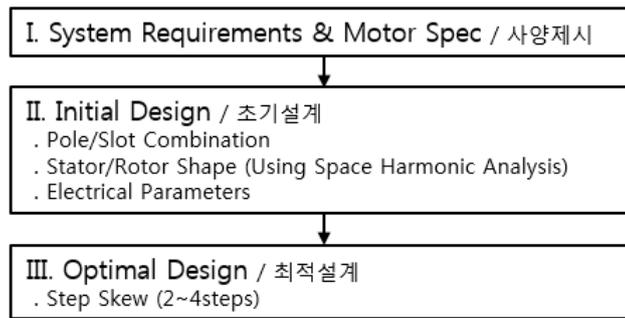


Fig. 1. 전동기 설계 프로세스

Fig. 1은 본 연구의 설계 프로세스이다, 본 연구에서 적용된 모델은 전동휠체어 구동 전동기이며, 스텝 스큐 설계에 앞서 대상 모델의 초기설계를 진행하였다.

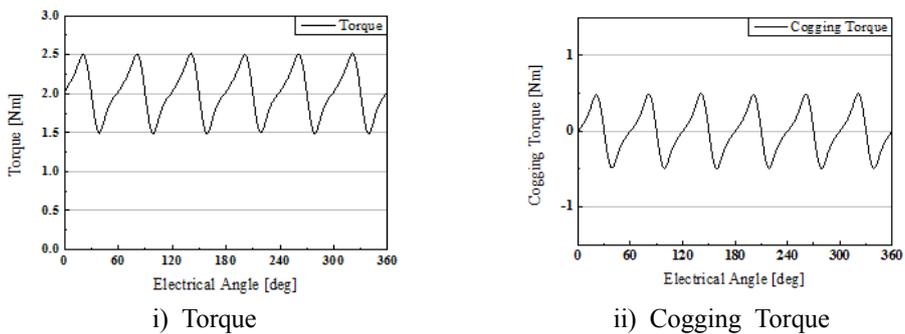


Fig. 2 초기 설계 전동기 토크/코깅 토크

Fig. 2는 초기 설계된 전동기의 토크와 코깅토크이다. 대상 전동기의 회전자에 스텝 스큐를 적용하였다. 회전자 스텝 스큐는 전동기의 회전자를 단수에 따라 적층길이를 나누어 코깅토크의 주기를 단수로 나누는 각도만큼 비틀어 적층하는 방식이다. Fig. 3은 스텝 스큐를 적용한 모델의 코깅토크와 토크리플이다.

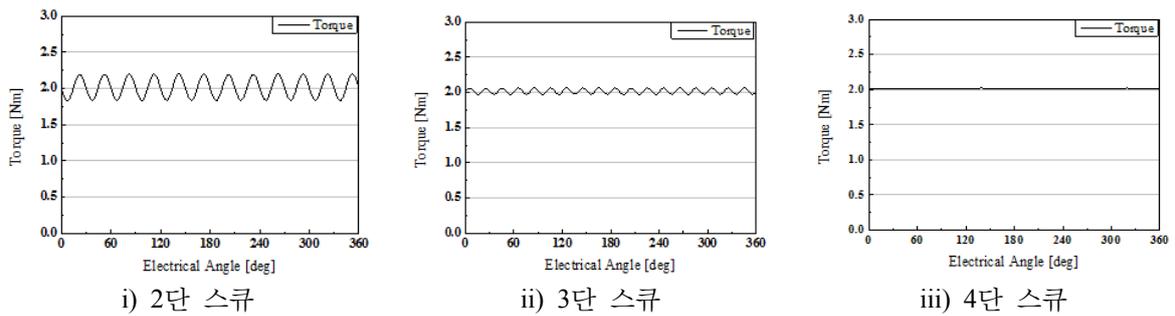


Fig. 3 스텝 적용 전동기 토크

Table. 1 설계 전동기 토크/토크 리플

| Model | Torque [Nm] | Ripple [%] | Harmonics |
|--------------|-------------|------------|---|
| No step skew | 2.01 | 51 | 6 th , 12 th , 18 th |
| 2 step skew | 2.014 | 18.4 | 12 th |
| 3 step skew | 2.014 | 4.47 | 18 th |
| 4 step skew | 2.016 | 0.35 | none |

3. 고찰

초기 설계한 전동기의 특성을 살펴보면 토크 리플이 대부분 코깅 토크에 의해서 발생했음을 알 수 있다. 스텝 스텝을 통해 각 단에서 발생하는 코깅 토크가 공간적인 위상 차이를 가지고 있어 서로 상쇄되며 결과적으로 코깅 토크의 합이 작아졌다. 스텝 스텝의 단수가 많아질수록 코깅 토크의 저감율이 커짐을 확인하였다.

4. 결론

소형 전동기의 토크 리플은 대부분 코깅 토크 성분이다. 코깅토크를 저감하기 위해서 회전자에 스텝 스텝을 적용하면 대부분의 코깅 토크를 저감할 수 있다.

5. 사사

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2017-2012-0-00628)

6. 참고문헌

- [1] S. O. Kwon, S. I. Kim, S. H. Lee and J. P. Hong. “Design of BLDC motor using Parametric design”, KIEE Summer Conference, pp1013-1014, 2007
- [2] S. O. Kwon, D. J. Kim, J. J. Lee, J. W. Jung and J. P. Hong. “A Study on size of rotor considering Pole number to satisfy maximum torque in permanent magnet motor”, KIEE Summer Conference, pp742-743, 2010
- [3] C S. Lee, K. T. Jung, H. J. Kim, Y.. K. Kim and J. P. Hong. “Design of Brushless Permanent Machine with Skewed Stator for Electrical Power Steering System”, Journal of the Korean Magnetics Society 25(6), pp189-197, 2015

Fe, Mn, Ni, Cu가 도핑된 그래핀의 전자구조와 자성에 미치는 영향

홍문봉*, 임성현, 홍순철

울산대학교 물리학과, 에너지 하베스트-스토리지 연구센터

그래핀은 우수한 안정성, 전기전도성, 전하이동도, 유연성, 투명도 등의 특성으로 인해 차세대 디스플레이, 전자소자 등의 소재로서 큰 기대를 모으고 있다. 그러나 에너지띠틈이 없어 전도성 등 제어가 용이한 반도체 물질들과 달리 그래핀은 제어가 어려워 전자 산업에 직접 사용하는데 한계가 있다. 본 계산에서는 VASP을 이용한 제일원리계산 방법을 사용하여 그래핀에 Ni, Cu, Mn, Fe가 도핑된 계에 대해 자성과 에너지띠틈의 변화를 계산하여 스핀트로닉스 소재로 사용할 수 있는지를 탐색해 볼 계획이다. 자성 원소간의 거리에 따른 자성 결합의 변화에 대해서도 보고 할 예정이다.

키워드 : 그래핀, 자성, 에너지띠틈, 제일원리계산

거대자기이방성 스핀밸브 구조에서 자화 곤란축 방향에서의 자기 센서 감도 향상

정구훈^{1*}, 김시년¹, 임상호¹

¹고려대학교 신소재공학과, 서울특별시 성북구 안암로 145, 02841

자기센서에서 신호 대 잡음비는 굉장히 중요한 특성이다. 거대자기저항 스핀밸브 박막은 신호 대 잡음비가 굉장히 뛰어난 것으로 알려져 있다^[1]. 신호 대 잡음비는 보자력과도 연관이 되어있다. 자화이력곡선이 없고 선형성이 좋은 센서를 만들기 위해서는 거대 자기저항의 자화 곤란축을 이용해야 한다. 거대자기저항의 자화 용이축 방향의 특성 향상은 많이 연구되어 왔지만 자화 곤란축에서의 MR ratio 및 감도(%/Oe) 향상에 대한 연구는 많이 진행되어 있지 않다. 그래서 스퍼터를 이용해 만들어진 스핀밸브 구조 박막의 자화이력곡선과 MR ratio를 자화 용이축과 자화 곤란축 방향으로 측정 후 Stoner-Wohlfarth 모델을 이용해 비교하였다. 자화 용이축 방향에서는 자구운동을 하고, 자화 곤란축 방향에서는 자구 운동을 하지 않고 자기모멘트가 회전하기 때문에 자화 곤란축에서 계산값과 실험값이 잘 맞았다. 실험 결과와 계산 결과가 잘 맞는 것을 확인한 후 여러 변수들을 변화시켜가며 계산을 진행하였다. 고정층의 이방성 자기장의 크기를 증가시켰을 때는 MR ratio와 감도의 변화가 미비하였고, 교환 바이어스 자기장 감소 시켰을 때는 MR ratio의 증가가 두드러졌다. 자유층의 이방성 자기장의 크기를 감소시켰을 때는 감도의 증가가 생겼다. 그리고 자유층과 고정층 간의 널 바이어스 자기장이 작을수록 MR ratio와 감도 모두 향상되는 것을 확인하였다. 아무리 자화 용이축에서의 MR ratio가 커도 널 바이어스 자기장이 크다면 자화 곤란축에서의 MR ratio와 감도는 감소하는 것을 실험적으로도 확인할 수 있었다.

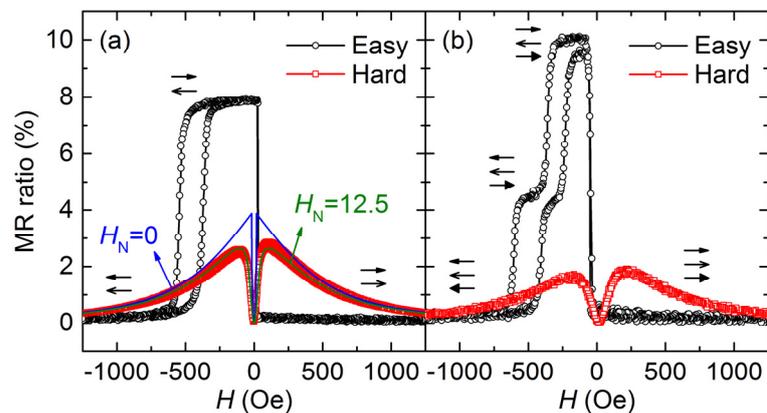


Fig. 1. (a) 스핀밸브 자화 용이축, 자화 곤란축 엠알비
(b) 이중 스핀밸브 자화 용이축, 자화 곤란축 엠알비

참고문헌

- [1] C. Reig *et al.*: Giant Magnetoresistance (GMR) sensors, SSMI 6, PP. 47-70

고감도 지자기센서 개발을 위한 미앤더 패턴의 거대자기저항 박막

김시년^{1*}, 정구훈¹, 안지훈¹, 이기승², 유천열², 신광호³, 임상호¹

¹고려대학교 신소재공학과, 서울특별시 성북구 안암로 145, 02841

²대구경북과학기술원 신물질과학전공, 대구광역시 달성군 현풍면 테크노중앙대로 333, 42988

³경성대학교 정보통신공학과, 부산광역시 남구 수영로 309, 48434

강자성체와 비자성체의 계면에서 일어나는 스핀 의존 산란에 의한 거대자기저항효과는 이미 잘 알려져 있다[1]. 이러한 효과는 Co/Cu 기반의 스핀밸브구조에서 강하게 나타나며, 특히 지자기센서의 특성은 이 구조의 자유층 특성에 의해 좌우된다. 이 센서로 쓰이기 위해서는 큰 자기저항, 작은 널 바이어스 자기장, 작은 보자력 등의 특성이 중요하다. 자유층의 자화 곤란축 방향으로 센서의 각 축을 기준으로 잡으면 널 바이어스 자기장은 완전히 사라지고 보자력없이 선형적인 특성을 확보할 수 있다. 자기저항의 변화가 커야 센서의 감도가 많이 향상되는데, 이는 센서 소자의 저항 크기가 중요하다. 이 소자의 저항은 마이크로 단위의 포토리소그래피를 이용한 패턴 설계로 조절이 가능한데, 센서 소자의 저항을 키우는 데에 많이 쓰이는 미앤더 패턴을 기반으로 폭, 길이, 턴수를 변수로 두어 설계를 진행하였다. 이 패턴의 폭에 대한 길이의 비를 늘리면 저항의 크기도 증가하지만, 형상이방성의 크기도 증가한다. 형상이방성의 크기가 자유층의 유도자기이방성의 크기보다 커지면 자유층의 자화 용이축에 대한 자기저항 신호도 선형적이면서 자화 곤란축보다 2배 이상의 크기로 나타나기 때문에 더욱 향상된 감도 특성을 확보할 수 있다. 따라서, 하나의 미앤더 패턴과 네 개의 미앤더 패턴으로 이루어진 휘트스톤 브릿지 형태의 패턴에 대해서도 길이, 폭, 턴수의 변화에 따라 나타나는 센서 소자의 감도 특성 변화를 관찰하였다.

참고문헌

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988)

Magnetic properties and spin-torque ferromagnetic resonance of Pt/GdFeCo/MgO layers

J. H. Kim^{1,2*}, D. J. Lee^{1,3}, H. C. Koo¹, B. C. Min¹, K. J. Lee^{1,3,4}, B. K. Ju² and O. J. Lee¹

¹Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology

²Graduate School of Electrical Engineering, Korea University

³KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University

⁴Graduate School of Materials Science and Engineering, Korea University

Ferrimagnetic materials have multiple sub-lattices having antiferromagnetic coupling with different magnitudes of magnetization. Especially the amorphous ferrimagnetic GdFeCo alloy, a rare-earth transition-metal (RE-TM) ferrimagnetic alloy, have attracted large interest over the past few years for academic research and spintronic application. Gd has 4f states of half-filled spin electrons, so their orbital momentum and spin-orbit coupling are zero. [1] Therefore it is expected that, little contribute when are Gd were doped to ferromagnetic alloys, the increase of magnetic damping would be negligible [2].

In this study, we investigated magnetic properties, magnetic damping, and spin Hall angle in Pt/GdFeCo/MgO layers using vibrating sample magnetometer (VSM), x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and spin-torque ferromagnetic resonance (ST-FMR). We prepared Si/SiOx/Ta(1 nm)/Pt(5 nm)/GdFeCo(3~20 nm)/MgO(1,2.7 nm)/Ta(2 nm). All samples were deposited by DC & AC magnetron sputtering with base pressure $\sim 2 \times 10^{-8}$ Torr at room temperature. The saturation magnetization (M_s) of the samples decreases exponentially with the thickness of GdFeCo. In addition, the saturation magnetization depends on the thickness of MgO. In this presentation, we shall show the detailed results from our VSM, XPS, and ST-FMR measurements.

References

- [1] Manli Ding et al., J. Magn. Magn. Mater. 339, 51-55 (2013).
- [2] G. Woltersdorf et al., Phys. Rev. Lett. 102, 257602 (2009).

Micromagnetic simulation of magnetization reversal in a discrete magnetic nano-block chain

X.-P. Ma^{1,2*}, S.-D. Kim¹, H.-G. Piao^{1,2} and D.-H. Kim^{1†}

¹Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

²College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002 P. R. China

[†]E-mail: donghyun@cbnu.ac.kr

Magnetic recording media with higher storage density may require patterned magnetic elements. It has been known that the elements have single-domain state as their dimensions decrease down to nanoscale. For arrayed elements with specific structure such as a chain, a further collective feature of the arrayed elements is observed due to the magnetostatic interaction among magnetic elements, which possibly allows a logic operation[1-2]. In this work, micromagnetic simulations have been performed to investigate magnetization reversal mechanism in a discrete magnetic nano-block chain, where each element shape has been varied to be square, circular, and elliptical. Particularly, the nano-block chain with square elements is found to exhibit a shape anisotropy, with easy axes along the diagonals of square, which makes the reversal behaviour significantly different from the reversal in the nano-chains made of circular or elliptical elements.

References

- [1] R. P. Cowburn and M. E. Welland, *Science* **287**, 1466 (2000).
- [2] P. Wadhwa and M. B. A. Jalil, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2367 (2004).

자성 다층박막의 계면이 미치는 길버트 감쇠 거동

김보성*, 조영준, 김준희, 양재학, 김상국

National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory,
Research Institute of Advanced Materials, Department of Materials Science and Engineering, Seoul National
University, Seoul 151-744, South Korea

1. 서론

최근 소자의 소형화, 고집적화를 지향함에 따라 소자를 이루는 박막 두께도 점점 얇아지는 상황에서, 박막을 이루는 물질이 갖는 물리상수의 검증이 중요하게 되었다. 특히 박막의 두께가 수 나노미터 수준 이하로 얇을 경우 물리상수들이 기존 덩어리 (bulk) 값과 상이한 값을 가질 수 있음이 보고되고 있다. 대표적으로 자성 다층박막을 이루는 자성층의 두께와 이에 인접한 물질의 종류에 따라 자성층의 포화자화 (magnetization, M)와 길버트 감쇠상수 (Gilbert damping constant, α) 값의 변화가 관찰된 바 있다.[1,2] 특히 길버트 감쇠상수는 자성체 내에서 일어나는 스핀동역학 (spin dynamics) 뿐만 아니라 자화반전에 미치는 중요한 물리상수로, 스핀트로닉스 소자의 설계와 제작에 있어서 필수적으로 알아야 할 값이다. 본 연구에서는 자성 다층박막에서 자성층의 두께, 그리고 이에 인접한 물질의 종류에 따른 길버트 감쇠상수의 변화를 관찰하기 위해 NM/Py/NM (Py: 퍼멀로이, NM: 비자성 금속) 삼층박막 시료를 제작하였고, 길버트 감쇠상수의 변화를 측정하기 위하여 강자성 공명 (ferromagnetic resonance, FMR) 측정을 진행하였다.

2. 실험방법과 결과

NM/Py/NM 시료는 10 mm × 10 mm 크기의 실리콘 웨이퍼 기판에 바탕 압력 (base pressure) 10^{-8} Torr 이하의 고진공 스퍼터링 방법으로 상온에서 제작하였다. 실리콘 기판 위에 박막의 성장을 돕기 위해 5 nm 두께의 Ta을 씨앗층 (seed layer)으로 먼저 증착하였다. 비자성층은 Pt, Ta, Ti, Cu 원소를 사용하였으며 모든 시료에 대해 5nm 두께로 증착하였다. Py의 두께 (d)는 3 nm부터 10 nm까지 변화시켰다. 강자성 공명은 벡터 네트워크 분석기 (Vector Network Analyzer, VNA)를 이용하여 측정하였으며, 공명 주파수 (resonance frequency)는 20 GHz까지, 외부 자기장은 0.4 T까지 변화시켜가며 측정하였다. 측정 결과, Py의 두께가 감소함에 따라 유효 포화자화 (effective magnetization, M_{eff})가 감소하고 길버트 감쇠상수가 증가함을 볼 수 있었다. 길버트 감쇠상수의 증가량은 $NM = Pt$ 일때 가장 크게 나타났다. Ta은 Pt의 경우보다는 작지만 조금 증가하는 경향을 보였으며, Ti, Cu에서는 거의 변화하지 않는 것을 관찰할 수 있었다.

3. 고찰

Py의 두께에 따른 유효 포화자화의 감소는 이중 접합된 박막계면이 갖는 표면자기 이방성 (K_s) 으로 설명될 수 있으며, 다음과 같은 식으로 해석할 수 있다.[3]

$$M_{eff} = M_s - \frac{2K_s}{M_s d} \quad (1)$$

여기서 M_{eff} 는 시료의 Py가 갖는 유효 포화자화, M_s 는 bulk Py의 포화자화, K_s 는 표면자기이방성, 그리고 d 는 Py의 두께이다. 식(1)을 통해 각 시료가 갖는 K_s 와 M_{eff} 를 얻을 수 있었다. 한편 길버트 감쇠상수의 변화는 Py와 인접한 NM의 종류와 Py의 두께에 의존하여 Py 내부 스핀의 각운동량이 소실되는 정도가 달라짐을 의미한다.

다. 본 경향성은 스핀-펌핑(spine-pumping) 현상으로 이해될 수 있으며, 아래와 같은 수식으로 설명할 수 있다.[4]

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\gamma \hbar}{4\pi M_s d} / g_{\text{mix}}^{\uparrow\downarrow} \quad (2)$$

여기서 α 는 측정된 길버트 감쇠상수이며, α_0 는 벌크 Py에서의 길버트 감쇠상수, $4\pi M_s$ 는 Py의 포화자화, γ 는 자이로 상수, \hbar 는 2π 로 나눈 플랑크 상수, $g_{\text{mix}}^{\uparrow\downarrow}$ 는 NM의 spin mixing conductance를 각각 의미한다. 측정된 길버트 감쇠상수의 증가량 ($\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$) 과 $g_{\text{mix}}^{\uparrow\downarrow}$ 의 d 에 따른 양상을 M_{eff} 와 K_s 로 설명 가능함을 보였으며, 이것은 자성층의 두께가 수 나노미터 이내일 경우 $g_{\text{mix}}^{\uparrow\downarrow}$ 가 기존에 알려진 모델에서 벗어나 거동한다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 NM/Py/NM삼층박막을 제작하여 비자성층의 종류와 Py의 두께를 바꾸어가며 강자성 공명을 측정하였고 이를 통해서 표면자기이방성과 길버트 감쇠상수를 측정하였다. Py의 두께가 얇아질수록 유효 포화자화가 감소함과 동시에 길버트 감쇠상수가 증가함을 알 수 있었다. 또한 M_{eff} 와 K_s 를 이용한 $g_{\text{mix}}^{\uparrow\downarrow}$ 을 분석함으로써 기존 모델로 설명하기 어려운 $g_{\text{mix}}^{\uparrow\downarrow}$ 의 경향을 관찰할 수 있었고 이는 박막두께의 감소에 따른 계면효과가 커지기 때문이다. 본 연구는 얇은 자성층에서 계면이 스핀동역학에 영향을 줌을 보여주는 한편 기존에 수행되어온 스핀-펌핑 현상을 이용한 $g_{\text{mix}}^{\uparrow\downarrow}$ 측정과 inverse spin Hall effect를 이용한 spin Hall angle측정 등의 연구에 있어서도 자성층의 두께가 충분히 얇다면 계면효과를 반드시 고려해야 함을 의미한다.

5. 참고문헌

- [1] S. Mizukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys., 40, 580 (2001).
- [2] J. P. Nibarger, R. Lopusnik, Z. Celinski, and T. J. Silva, Appl. Phys. Lett., 83, 93 (2003).
- [3] Y.-K. Kim and T. J. Silva, Appl. Phys. Lett., 68, 2885 (1996).
- [4] Y. Liu, Z. Yuan, R. J. H. Wesselink, A. A. Starikov, and P. J. Kelly, Phys. Rev. Lett., 113, 207202 (2014).

Reversal magnetization dynamics of the flip-flop transitions in CoFeB/Ta/CoFeB trilayer with perpendicular anisotropy

A.D. Talantsev^{1,2}, A.A. Elzawy^{1,3*}, R.B. Morgunov², Y. Lu⁴, S. Mangin⁴, C.G. Kim¹

¹Department of Emerging Materials Science, DGIST, 42988, Daegu, Republic of Korea

²Institute of problems of chemical physics, 142432, Chernogolovka, Moscow, Russia

³Ceramics Department, National Research Centre, 12622 El-Bohouth Str., Cairo, Egypt

⁴Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine, France

This work is focused to the time-resolved measurements of magnetization reversals in artificial antiferromagnets based on two perpendicularly magnetized CoFeB layers of different width separated by Ta non-magnetic interlayer (fig.1, right insert). The following measurement sequence was used: 1) the sample was magnetized in $H_S = 1$ kOe magnetic field exceeding saturation field, perpendicular to the film plane (i.e. along easy magnetization axis); 2) magnetic field was switched to $H^* < H_S$ and immediately after stabilization of the H^* value, recording of the time dependence of the magnetic moment M was started. This measurement cycle was repeated for different H^* fields +600 Oe and -600 Oe. Magnetic relaxation curves are presented in the Fig.1. Four stable magnetic states F^+ , AF^+ , AF^- and F^- correspond to four stable mutual orientations of CoFeB magnetization in trilayer structure. Flip transitions F^+ to AF^+ and AF^- to F^- are reversible and give no magnetic after-effect (fig.1). AF^+ to AF^- flip-flop transition (simultaneous remagnetization of thin and thick CoFeB layers) is irreversible. Threshold magnetic field initiates gradual leaving of magnetization from AF^+ state until it reaches AF^- state. The straightening of the $(\ln(\Delta M); t)$ curves (fig.1, left insert) reveals exponential dependence $\Delta M(t) \sim \exp(-\Gamma t)$. Accordingly with [1], exponential relaxation of the magnetic moment is typical of the crossing of a potential barrier by an assembly of quasi-identical and independent objects. The field dependences of the relaxation frequencies Γ (fig.2) were described in terms of the model proposed in [2]:

$$T \ln(\Gamma_0/\Gamma) = \Delta E_0 \cdot (1 - H^*/H_P)^\alpha \quad (1),$$

Γ_0 is frequency factor, $\Delta E_0 \cdot (1 - H^*/H_P)^\alpha$ is activation energy of domain wall pinning, ΔE_0 is height of potential barrier in the absence of magnetic field, H_P is threshold magnetic field of pinning, $\alpha = 3/2$ is constant. We have considered typical values $\Gamma_0 = 10^6$ Hz and $\alpha = 3/2$ mentioned in the literature [1,2]. Pinning field H_P was determined from approximation of field dependence $T \ln(1/\Gamma)$ by formula (1) for each temperature separately. The temperature dependence of the pinning field is shown in the fig. 2, left insert. The height of potential barrier $\Delta E_0 = 0.72$ eV was temperature independent.

In contrast with previous works [2], pinning field was temperature dependent in our experiments. For that reason, field dependence of the $T \ln(\Gamma_0 / \Gamma)$ value was plotted versus H^*/H_P to normalize magnetic field at different temperatures. Straightening of the $T \ln(\Gamma_0/\Gamma)$ vs H^*/H_P dependence (Fig.2, right insert) confirms correctness of chosen approach. Thus, exponential dynamics of the flip-flop transition corresponding to single barrier depinning of the domain walls was revealed. The temperature dependence of critical field of domain wall pinning as well as height of the potential barrier were determined.

This work was supported by the DGIST R&D Program of the Ministry of Science, ICT and Future Planning (17-BT-02) and Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 3.1992.2017/PCh).

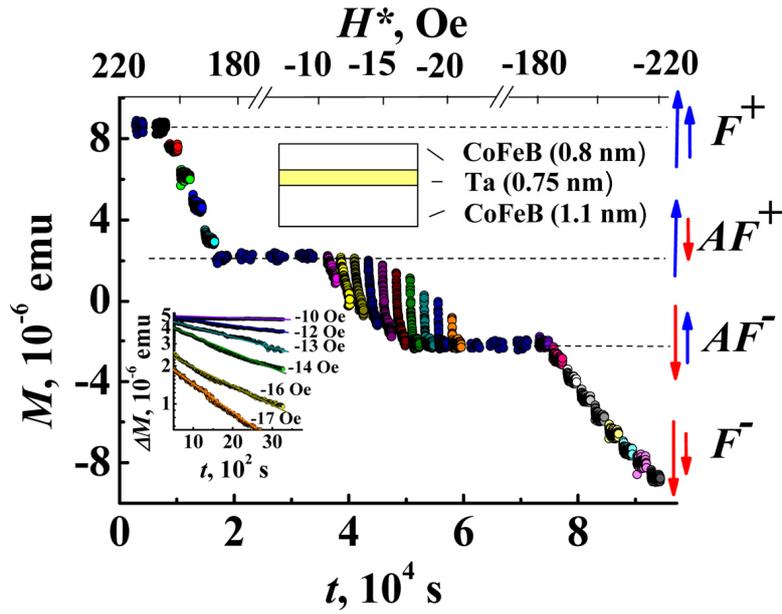


Fig. 1. Time dependences of the magnetic moment M of the sample recorded at $T = 300$ K in reversal magnetic fields H^* lying in the range from -210 Oe till $+210$ Oe. Blue and red arrows on the right panel indicate directions of magnetizations of the ferromagnetic layers in different magnetic states. Left insert: time dependences $\Delta M(t)$ in semi logarithmic coordinates. Right insert: scheme of CoFeB/Ta/CoFeB trilayer structure.

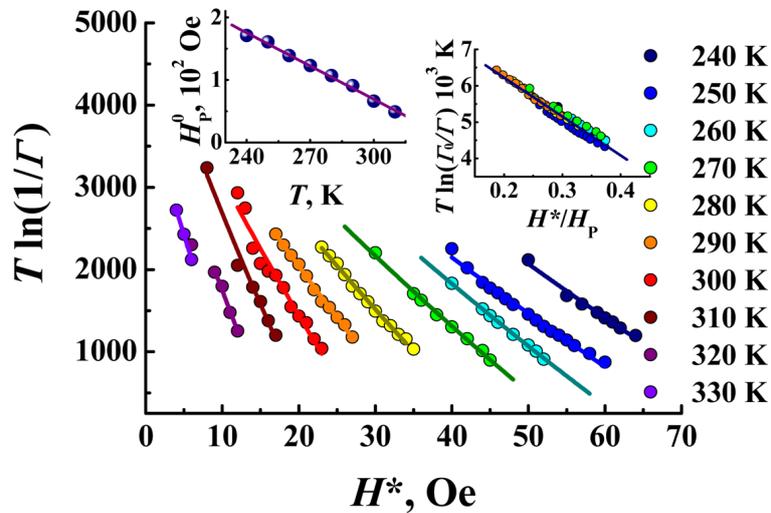


Fig. 2. Field dependences of the magnetic relaxation time constants $1/\Gamma$ at different temperatures in the range 240 - 350 K. Approximations by formula discussed in the text are shown by solid lines. Left insert: temperature dependence of H_p^0 critical pinning field. Solid line is linear approximation. Right insert: dependences of the magnetic relaxation time constants unified into a single curve in normalized coordinates ($\ln(\Gamma_0/\Gamma)$; H/H_p) at different temperatures below $T = 290$ K.

References

- [1] D. B. Gopman, D. Bedau, S. Mangin et al. Journ. Appl. Phys. **115**, 113910 (2014).
- [2] S. Mangin, A. Sulpice, G. Marchal et al. Phys. Rev. B, **60**, 1204 (1999).

Magnon-photon coupling in a planar resonator-YIG thin film configuration

Biswanath Bhoi*, Bosung Kim, Junhoe Kim, Young-Jun Cho and Sang-Koog Kim

National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory, Department of Materials. Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, South Korea

1. Introduction

The study of light-matter interaction is a central subject in quantum information and communication science and technology. In order to be useful for quantum application, a proposed technology has to be able to exchange information with preserved coherence [1-3]. Recently hybrid systems consisting of resonantly coupled spin ensembles and microwaves have been received much attention [4-5]. In the present work, we report on the exploration of the interaction of magnetic resonances in YIG films with microwave photon resonances in a complementary split ring resonator (CSRR) structure.

2. Methods and Results

A CSRR structure along with microstrip line has been fabricated using lithographic techniques on a standard duroid (TLC RF Substrate) substrate of a dielectric constant of 3.2. The dimensions of the CSRR are: size = 5 mm, width = 0.6 mm and split gap = 0.4 mm. The CSRR is capacitively coupled to a microstrip feeding line of a width of 1.85 mm. For the measurements, coaxial connectors have been soldered at the two ends of the stripline. The characterization of this structure has been carried out using a calibrated two-port vector network analyzer (VNA).

In our measurements, an epitaxial YIG film (grown on a GGG substrate) with a dimensions of 3 mm × 3 mm × 25 μm is placed on the top of the microstrip line with the YIG layer facing the strip line. A dc magnetic field (H) is applied (using electromagnet) in the plane of the film in the direction perpendicular to the microstrip line (along X direction). The input and the output of the microstrip feeding line have been connected to the ports of a VNA and the transmission (S_{21}) characteristics have been measured as a function of microwave frequency and the strength H of the applied field. When a microwave current flowing through the microstrip feeding line (along Z direction) the CSRR essentially behaves as an electric dipole and excited by an axial electric field.

The microwave transmissions $|S_{21}|$ are measured as a function of microwave frequency (f) for different applied magnetic field strengths. At H=0 Oe only one resonance mode (which is purely SRR resonance mode) was observed. When the magnetic fields were applied, two peaks (F_1 and F_2) were observed, one with low dB and the other with high dB. Out of these two modes, one resonance mode is strongly dependent on the applied field and continuously shifts towards the higher frequency side with increasing magnetic fields.

3. Discussion

The variation of resonance peak positions are plotted as a function of applied magnetic field. This clearly shows strong anti-crossing of the two lines, which suggests strong coupling between two modes. Importantly, far away from the “anti-crossing” the frequencies are almost the same within and the line slope is practically

vanishing. This identifies the almost horizontal sections of the line as uncoupled (pure) CSRR resonances (“photon modes”). The sections of these lines with significant slopes (close to the anti-crossing area) are CSRR resonances coupled to the magnon mode of the YIG film. The strong anti-crossing between the photon and magnon modes suggests a strong coupling between them.

At the resonant condition of $H=H_{RES}$, the frequency gap, F_{GAP} , between F_1 and F_2 is directly linked to the coupling strength of the system ($F_{GAP}/2=g_{eff}/2\pi$). The coupling strength of the SRR and the magnon mode can be determined using the harmonic oscillator model of two coupled resonators [5-6] for which we can define the upper (F_1) and lower (F_2) branches

$$F_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(F_0 + F_r) \pm \sqrt{(F_0 - F_r)^2 + k^4 F_0^2} \right] \dots\dots\dots (1)$$

where F_0 and F_r are the resonance frequencies in the absence of coupling. F_0 : CSRR resonance mode or photon mode and F_r : FMR frequency or magnon mode (modelled by the Kittel equation) which describes the precession frequency of the uniform mode (without taking into account spin wave distribution) [5]. The parameter k used in Eq. (1) corresponds to the coupling strength, which is linked to the experimental data $g_{eff}/2\pi$ by the equation: $F_{GAP} = F_2 - F_1 = k^2 F_0$. From the fit, we obtain $g_{eff}/2\pi = 180$ MHz and $k = 0.31$. The value of k obtained from the present study is significantly higher than the 3D-cavity/YIG sphere systems [2-4].

4. Conclusion

Using the frequency-domain VNA–FMR spectroscopy we have demonstrated a strong coupling regime of magnons and microwave photons in the planar geometry of a lithographically formed complementary split-ring resonator loaded on a single-crystal epitaxial YIG film. This interaction manifests itself as a strong anti-crossing between the photon and magnon modes. This thin film/CSRR hybrid geometry can be integrated with other planar electronic and optical devices and therefore is a very promising candidate as an information transducer that connects MHz, GHz, and THz frequencies.

5. References

[1] R. J. Schoelkopf and S. M. Girvin, Nature 451, 664 (2008).
 [2] M. Goryachev, W. Farr, D. Creedon, Y. Fan, M. Kostylev, and Mi. Tobar, Phys. Rev. Appl. 2, 054002 (2014).
 [3] Y. Cao, P. Yan, H. Huebl, S. T. B. Goennenwein, and G. E. W. Bauer, Phys. Rev. B. 5, 094423 (2014).
 [4] M. Harder, P. Hyde, L. Bai, C. Match, and C.-M. Hu, Phys. Rev. B, 94, 054403 (2016).
 [5] B. Bhoi, T. Cliff, I. S. Maksymov, M. Kostylev, R. Aiyar, N. Venkataramani, S. Prasad, and R. L. Stamps, J. Appl. Phys. 116, 243906 (2014).
 [6] M. Harder, L. Bai, C. Match, J. Sirker, and C. Hu, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 59117511 (2016).

Mn이 치환된 $Ba_3Co_{2-x}Mn_xFe_{24}O_{41}$ ($x=0.0, 1.0$) Z-type hexaferrite의 투자율 특성 연구

황필순^{1*}, 임정태¹, 심인보¹, 한은주², 김철성¹

¹국민대학교 물리학과

²수원대학교 물리학과

1. 서론

Z-type hexaferrite는 spinel ferrite보다 높은 자기 이방성에 의해 1 GHz에서 우수한 특성을 보여 RF 디바이스에 관한 연구가 진행 중에 있다. 본 연구에서는 직접합성법을 이용하여 제조된 $Ba_3Co_{2-x}Mn_xFe_{24}O_{41}$ ($x=0.0, 1.0$) 통해서 자기적 특성에 대해 연구 하고자 한다. 결정학적 및 자기적 특성을 x-선 회절기(x-ray diffractometer), 진동시료 자화율측정기(vibrating sample magnetometer)와 뫼스바우어 분광기(Mössbauer spectrometer)를 실험에 이용하여 연구하였으며 Agilent 사의 E5071C Network Analyger를 이용하여 측정하였다.

2. 실험방법

Z-type hexaferrite인 $Ba_3Co_{2-x}Mn_xFe_{24}O_{41}$ ($x=0.0, 1.0$) 다결정 분말 시료를 직접합성법(solild-state reaction method)을 사용하여 제조하였다. 출발 물질로 $BaCO_3$, CoO , MnO_2 , Fe_2O_3 를 이용하였으며, 이를 ball mill를 통해 20시간 동안 분쇄를 하였다. 액체 상태의 시료를 24시간 동안 건조 시킨 후 $1000^\circ C$ 에서 하소 한 후에 두 차례($1200^\circ C$, $1250^\circ C$)에 걸친 소결로 $Ba_3Co_{2-x}Mn_xFe_{24}O_{41}$ ($x=0.0, 1.0$) 분말 시료를 합성하였다. 제조 된 시료의 결정학적 특성을 확인하기 위해 $Cu-K\alpha$ 선에 이용한 x-선 회절 실험(XRD)를 진행 후 Rietveld 방법으로 분석 하였다. 진동시료 자화율 측정 (VSM) 실험을 통해 거시적인 자기적 특성을 확인하였으며, 미시적인 자기적 특성을 확인하기 위해 뫼스바우어 분광 실험을 진행하였다. 시료의 주파수에 따른 투자율과 유전율의 특성은 Agilent 사의 E5071C Network Analyger를 50 MHz ~ 4 GHz 범위에서 이용하여 투자율을 측정하였다.

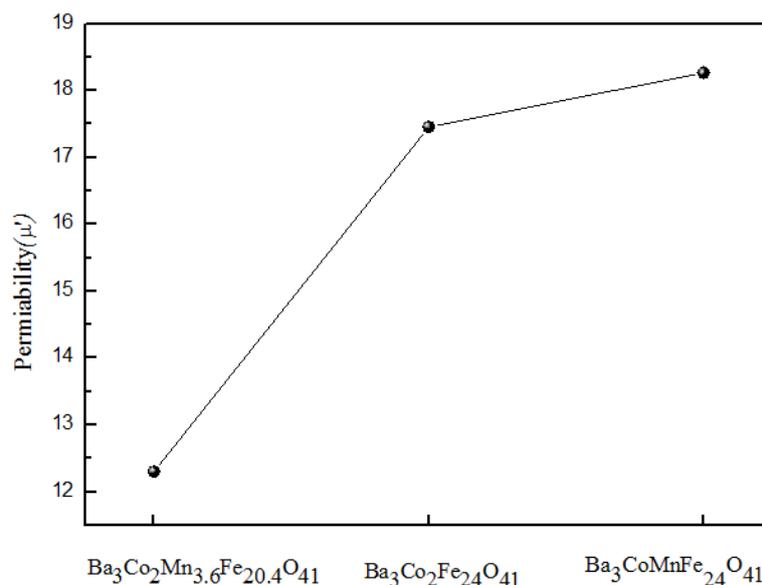


Fig. 1. Fe, Co 이온의 Mn 이온 치환에 따른 투자율 비교

3. 실험결과 및 고찰

직접합성법으로 제조된 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ($x=0.0, 1.0$) 시료의 XRD 데이터를 Fullprof 분석 프로그램으로 분석한 결과 단일 상의 Z-type임을 확인 하였고 각 시료의 Mn 치환 비율에 따른 격자 상수는 a, c 축 각각 $x=0.0$ 인 경우 5.86 Å, 51.91 Å이었으며, $x=1.0$ 인 경우 5.86 Å, 51.86 Å이 측정 되었다. VSM을 이용하여 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ($x=0.0, 1.0$) 시료의 포화 자화(MS)와 보자력(HC)을 측정 한 결과 $x=0.0$ 인 경우 50.90 emu/g, 37.10 Oe, $x=1.0$ 인 경우 60.30 emu/g, 185.74 Oe로 나타났으며 이는 Mn 이온이 up spin site로 치환됨을 의미한다. 미시적인 자기적 특성을 측정하기 위해 상온에서 피스바우어 분광 실험을 한 결과 Z-type hexaferrite 내에 중첩 된 10개의 부격자의 스펙트럼을 6-sextets 형태로 분석하였다. 모든 부격자에서 Fe^{3+} 상태임을 확인하였다. Network Analyger를 이용하여 측정한 $\text{BaCoMnFe}_{24}\text{O}_{41}$ 의 $\tan\delta$ 값은 0.01322가 나왔다.

Mn 이온을 Fe과 Co 이온에 치환하는 것에 따른 투자율 차이를 비교한 결과 Mn이온을 Co이온에 치환한 경우가 투자율이 가장 높게 나왔다.

4. 참고문헌

- [1] Jian Er Bao, Ji Zhou, Zhen Xing Yue, Long Tu Li, Zhi Lun Gui, Materials Science and Engineering B99 (2003) 98-101

Precession torque induced dynamic skyrmion creation on a circularly confined magnetic nanostructure

June-Seo Kim^{1,2,3,*}

¹DGIST-LBNL Research Center for Emerging Materials,
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, Daegu 42988, Republic of Korea

²Intelligent Devices and Systems Research Group,
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, Daegu 42988, Republic of Korea

³Global Center for Bio-Convergence Spin System,
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, Daegu 42988, Republic of Korea

1. Introduction

Skyrmionics, the nucleation and manipulation of individual skyrmions in magnetic structures for future logic applications and non-volatile memory devices, has been demonstrated by J. Sampaio and colleagues in 2013 and they have introduced a new concept of the magnetic racetrack memory based on the individual skyrmion motion induced by means of spin-polarized currents [1]. After this remarkable progress, various approaches to manipulate individual skyrmions for many other applications are extensively investigated [2,3]. However, extremely low energy consumption and ultrafast operation are strongly required for all kinds of applications based on skyrmions.

In this study, we numerically demonstrate a totally new method to nucleate magnetic skyrmion states on a nanoscale disk by applying in-plane magnetic field pulses with varying the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) energy density [4-7] and the uniaxial anisotropy energy density.

2. Simulation Details

The simulations are carried out by performing the object-oriented micromagnetic framework (OOMMF) simulator including DMI. The material parameters are chosen as follows: The saturation magnetization $M_s = 1.1$ MA/m, the exchange stiffness $A_{ex} = 16$ pJ/m, the uniaxial magnetic anisotropy $K_U = 1.0$ MJ/m³, the DM energy density $D = +5.0$ mJ/m. The profile of the in-plane field pulse is following: pulse amplitude $B_x = 10$ mT, rise time $RT = 10$ ps, duration time $DT = 10$ ps, fall time $FT = 10$ ps and the total simulation time = 10 ns. For systematic investigation of the precessional torque induced skyrmion creation, we vary the magnetic damping constant from 0.05 to 0.20 and the uniaxial magnetic anisotropy from 0.7 MJ/m³ to 1.0 MJ/m³ and the DM energy density from 2.0 mJ/m to 5.0 mJ/m.

3. Results and Discussion

The precession torque introduced by in-plane magnetic field pulses exert to rotate the magnetization on a confined structure [8,9] and the position dependent precession torque is utilized as the source of skyrmion nucleation. Due to the damping torque, the precession torque is diminished as a function of time and then the topologically stable skyrmion state as the final state can be formed. From the systematic simulations, the multiple skyrmion states, which depends on the diameter of nanoscale disk and the magnetic damping constant of the system are observed. We highlight that ultrafast Oersted field pulses in picosecond regime are enough to arise

the dynamic skyrmion nucleation process. This new method to create skyrmion states can open a new path to fabricate ultrafast logic devices and non-volatile memory devices based on skyrmions.

4. Conclusion

In conclusion, an ultrafast skyrmion creation by applying an extremely low ($< \text{few mT}$) in-plane external magnetic field pulse is numerically achieved. Due to the stray field as a function of the diameter of the disk, multiple skyrmion state (π , 2π , 3π , and 4π states) are also observed.

5. References

- [1] A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, *Nature Nanotech.* **8**, 152-156 (2013).
- [2] S. Woo, et al., *Nature Mater.* **15**, 501-506 (2016).
- [3] J. Cho, et al., *Nature Commun.* **6**, 7635 (2015).
- [4] N.-H. Kim, et al., *Appl. Phys. Lett.* **107**, 142408 (2015).
- [5] D.-S. Han, et al., *Nano Lett.* **16**, 4438 (2016).
- [6] N.-H. Kim et al., *AIP Advances* **7**, 035213 (2017).
- [7] F. C. Ummelen, D.-S. Han, J.-S. Kim, H. J. M. Swagten, and B. Koopmans, *IEEE Trans. Magn.* **51**, 6000703 (2015).
- [8] J.-S. Kim et al., *Nature Commun.* **5**, 3429 (2014).
- [9] M. J. G. Peeters, F. C. Ummelen, M. L. M. Laliu, J.-S. Kim, H. J. M. Swagten, and B. Koopmans, *AIP Advances* **7**, 055921 (2017).

위상 상수를 조정한 다양한 스커미온의 스핀 궤도 토크에 의한 거동

윤정범^{1*}, 문경웅¹, 전병선¹, 김동석¹, 김창수¹, 김대현², 이상선¹, 김원동¹, 황찬용¹

¹한국표준과학연구원 나노측정센터

²세종대학교 그래핀연구소

1. 서론

중금속/자성 박막에서 생기는 표면 Dzyaloshinskii-Moriya interaction(DMI)에 의해 형성된 스커미온은 자화 구조의 위상이 안정된 상태이기 때문에 자성 정보를 유지하고 이동시키기 유리하다. 그렇기 때문에 차세대 자기 정보 기록 및 전송 또는 자기 logic 장치를 구현할 수 있는 가능성을 갖고 있다. 스커미온이 외부 에너지(전류 또는 자기장)에 의해 이동할 경우 스커미온 홀 효과[1] 때문에 이동 방향이 한쪽으로 치우친다. 그 이유는 스커미온의 위상 상수 $Q = \pm 1$ 에 따라 마그누스 힘이 발생하기 때문이다. 본 연구는 전산 모사를 이용해 자기 구조를 변화시켜 다양한 Q 값의 스커미온이 있는 자성 박막의 자기 에너지를 계산하고 전류에 의한 각각의 스커미온의 이동 방향을 확인하였다.

2. 전산 모사

Damping-like와 field-like 스핀 궤도 토크항들이 추가된 Landau-Lifshitz-Gilbert 방정식을 푸는 object oriented micromagnetic framework(OOMMF[2])을 사용하였고 기본 물질 상수는 Pt/Co 구조를 참고하였다. 먼저, DMI가 고려된 무한 평면의 자성 박막을 가정하고 Q 값이 다른 스커미온을 생성하고 전체 자기 에너지를 계산하였다. 그리고 각각의 스커미온에 전류를 인가하여 이동 방향을 확인하였다. 여기서 전류에 의한 스핀 궤도 토크는 스커미온을 전류 방향으로 밀어준다.

3. 결과 및 논의

다양한 자기 구조의 스커미온의 Q 값을 확인하고 박막의 자기 에너지를 DMI의 크기에 따라 계산하였다. 그림 1과 같이 스커미온이 없을 때에 $Q = 0$ 이고 가장 낮은 에너지 상태를 갖고 스커미온을 구성하고 있는 자구벽이 생길 때마다 에너지는 높아진다. $Q = +1$ 인 스커미온 안에 $Q = -1$ 의 스커미온을 만들었을 때 $Q = 0$ 이 되고 ‘스커미오니엄’이라고 부른다[3]. 그리고 $Q = 0$ 인 ‘스커미오니엄’ 안에 $Q = -1$ 인 스커미온을 하나 더 만들면 $Q = -1$ 인 ‘쌍둥이 스커미온’이 생긴다. 여기서 각각의 스커미온에 전류를 인가하여 이동 방향을 연구하였다. 스커미온은 $Q = -1$ 이면 전류 방향의 왼쪽, $Q = +1$ 이면 오른쪽으로 휘고 $Q = 0$ 이면 평행하게 이동한다. 추가로 자성 박막에 ‘스커미오니엄’을 생성하기 위해 레이저를 이용하여 국소적으로 열을 가했을 경우, ‘스커미오니엄’이 형성되는 과정을 시뮬레이션하였다.

4. 결론

본 연구는 스커미온의 자기 구조를 조정하여 Q 를 바꾸고 전류에 대한 이동 방향을 확인하였다. Q 값에 따라 스커미온의 이동 방향은 전류 방향에 오른쪽 (+1), 왼쪽 (-1), 직진 (0)으로 결정된다. 추가로 국소적 열을 이용한 ‘스커미오니엄’의 형성 과정을 연구하였다. 본 연구 결과는 전류에 의한 스커미온의 이동 방향을 Q 값으로 조정 가능함을 보여주기 때문에 스커미온을 차세대 자기 정보 기록 및 전달, 자기 logic 장치로 이용하기 위한 연구의 초석이 될 것이다.

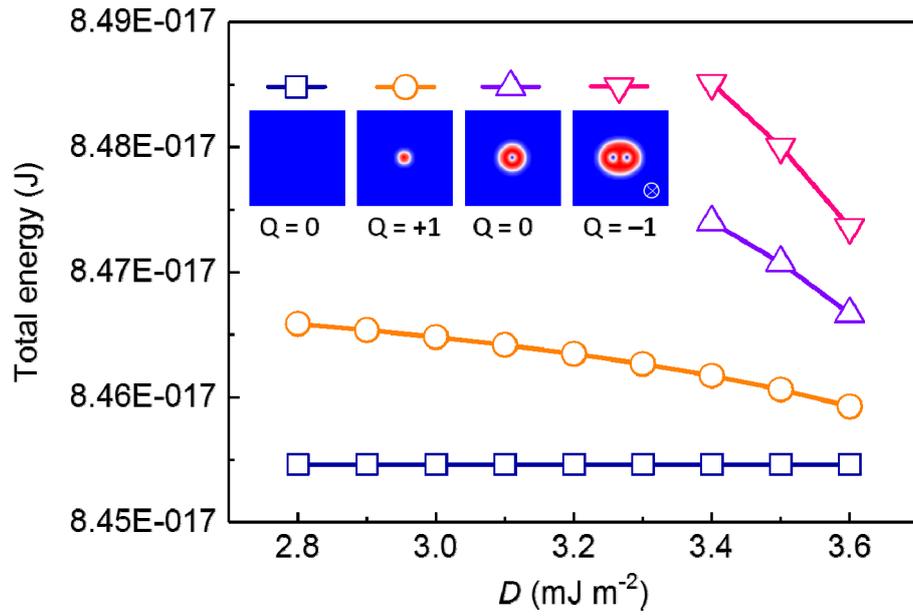


그림 1. Q 값이 다른 스커미온의 DM 상수(D)에 따른 자기 에너지의 변화. 삽입된 전산 모사 결과에서 빨강은 위 방향, 파랑은 아래 방향, 그리고 하양은 평면 방향의 자화를 보여줌.

5. 참고 문헌

- [1] W. Jiang et al., Nat. Phys. **13**, 162 (2017).
- [2] <http://math.nist.gov/oommf>
- [3] X. Zhang et al., Phys. Rev. B **94**, 094420 (2016).

Current-induced asymmetric magnetoresistance due to energy transfer via quantum spin-flip process

Kab-Jin Kim^{1*}, T. Moriyama², T. Koyama³, D. Chiba³, S. -W. Lee⁴,
S. -J. Lee⁵, K. -J. Lee^{4,5}, H. -W. Lee⁶, T. Ono²

¹Institute for Chemical Research, Kyoto University, Japan

²Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Japan

³Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Republic of Korea

⁴KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Republic of Korea

⁵PCTP and Department of Physics, Pohang University of Science and Technology, Republic of Korea

Owing to its ability to manipulate the magnetic moment of materials electrically, the spin transfer torque (STT) effect has made magnetic nanodevices realistic candidates for a variety of spintronic applications, such as STT magnetic random access memory (MRAM), racetrack memory, STT oscillator, STT diode, STT memristor and so on¹. We note that all these devices operate in GHz, which is limited fundamentally by the physics of STT.

Physical background of STT has been established based on the spin angular momentum conservation during the exchange interaction between conduction electron spin and magnetization. Another important mechanism in the interaction, i.e., energy transfer based on the energy conservation, has been ignored so far, though it is physically rightful to consider it. Here, we would like to raise a question on this physically important issue.

In this work, we provide experimental evidences of energy transfer. In ferromagnet/heavy metal bilayers, we observe in-plane current-induced asymmetric magnetoresistance depending on the relative direction of current and magnetization. Combined with electron-magnon scattering, current-induced excitation of magnons by the energy transfer can naturally explain all experimental features of the asymmetry, including characteristic time scale, angular dependence and temperature-dependence, whereas the STT cannot. From the thorough theoretical approach and experimental magnetic field dependence of magnetoresistance, we found that magnons in THz range can be excited by the energy transfer mechanism. Hence effects of the energy transfer mechanism are widely separated in frequency from the corresponding effect of the STT mechanism in GHz range. Our results therefore unveil another aspect of current-induced magnetic excitation, and open a channel for the dc-current-induced generation of THz magnons².

References

- [1] Locatelli et al. *Nat. Mater.* **13**, 11, (2014)
- [2] Kab-Jin Kim et al. *Arxiv.* 1603. 08746 (2016)

수직자기이방성을 나타내는 W/CoFeB/MgO 박막에서 W두께와 열처리 온도에 따른 계면 드잘로신스키-모리야 상호작용 변화 분석

Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction in W/CoFeB/MgO films with perpendicular magnetic anisotropy tuned by variation of the W thicknesses and annealing temperatures

Gyu Won Kim^{1*}, Yong Jin Kim¹, In Ho Cha¹, Alexander S. Samardak^{2†},
Bappaditya Pal², Alexander G. Kolesnikov², Alexey V. Ognev², Alexandr V. Sadovnikov^{3,4},
Sergey A. Nikitov^{3,4} and Young Keun Kim^{1†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

²School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia

³Laboratory "Metamaterials," Saratov State University, Saratov, 410012, Russia

⁴Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009, Russia

카이랄(chiral) 형태의 자구벽 및 스커미온 등의 스핀구조는 차세대 논리(logic) 및 메모리 소자의 동작 원리로 응용 할 수 있다는 점에서 활발한 연구가 진행되고 있다 [1]. 그 중에서도 계면 드잘로신스키-모리야 상호작용(interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction, iDMI)에너지 밀도는 자성체 내부 자화구조의 동역학에 영향을 줄 수 있고 추가적인 교환 에너지(exchange energy)를 만들 수 있다는 점에서 관심을 끌고 있다. 또한 수직자기 이방성을 갖는 Pt/Co/AlOx 구조와 Pt/CoFeB/AlOx 구조에서 자성층의 두께 변화에 따른 iDMI의 변화 경향성에 대해서는 선행 연구를 통해 보고 된 바가 있다 [2]. 본 연구에서는 앞선 연구와 달리 수직자기이방성을 갖는 W/CoFeB/MgO 구조에서 비자성층(nonmagnetic layer)의 두께와 열처리 온도를 변화시켜 iDMI 에너지 밀도의 크기를 측정함으로써 비자성층 두께와 열처리 온도 의존성을 밝히고자 하였다. 실험에 사용된 시편은 스퍼터링 장치를 통해 증착하였고 시편의 구조는 Si/SiO₂/W t_w/CoFeB 0.9/MgO 1/Ta 2 (단위는 nm)이다. 실험에 사용된 CoFeB의 조성은 Co₄₀Fe₄₀B₂₀이고 W의 두께는 1-15 nm로 나누어 2 nm의 간격으로 실험을 진행하였으며, 열처리는 300°C (W3) 와 400°C (W4)에서 1시간동안 실시하였다. 시편의 자성특성을 평가하기 위해 진동시편 자력계(VSM)을 사용하였으며, iDMI 에너지 밀도는 브릴루앙광산란법(BLS)를 통해 측정하였다. 그림 1의 (a), (b)는 각각 300°C와 400°C에서 열처리한 시편의 수직방향의 자력곡선을 나타내며 모든 시편에서 수직자기이방성을 나타냄을 알 수 있다. 특히, 400°C에서 열처리를 한 경우에서도 수직자기이방성이 사라지지 않는데, 이는 실제 메모리 반도체 공정에서 400°C의 후 열처리 공정이 반드시 수반되어야 하므로 실제 소자 응용 측면에서 특성을 잃지 않는다는 점에서 주목할 만하다. 그림 2는 브릴루앙광산란을 이용해 iDMI 에너지 밀도의 변화를 다른 열처리 온도에서 측정한 결과이다. 300°C에서 열처리한 W3 시리즈 시료의 경우 W층의 두께가 두꺼워짐에 따라 iDMI 에너지 밀도 또한 증가하는 경향을 갖는다는 것을 확인 할 수 있다. 하지만, 400°C에서 열처리를 진행한 W4 시리즈 시료의 경우 iDMI 에너지 밀도가 11 nm의 W 두께에서 최댓값을 보이고 이후의 두께에서는 감소하는 경향을 보인다. 위와 같은 결과를 통해 자성층의 두께만이 아니라 비자성층의 두께 변화를 통해서도 iDMI 에너지 밀도를 조절 할 수 있음을 알 수 있다.

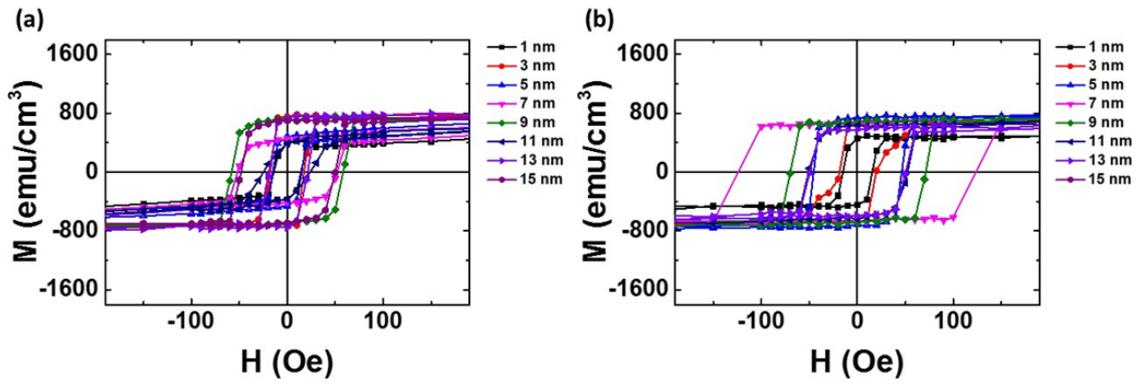


그림 1. (a)300°C와 (b)400°C에서 열처리한 시료의 수직방향 자화이력곡선

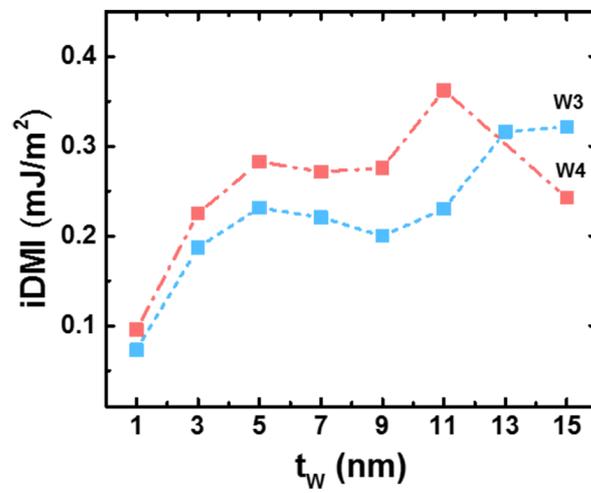


그림 2. W3 시리즈와 W4 시리즈의 iDMI 에너지 밀도

참고문헌

- [1] J. Sampaio et al., Nat. Nanotechnol. **8**, 839 (2013)
- [2] J. Cho et al., Nat. Comms. **6**, 7635 (2015)

Real time detection of magnetic domain wall motion using novel writing method

Kab-Jin Kim^{1*}, Yoko Yoshimura², Woo Seung Ham², Rick Ernst³, Yuushou Hirata², Tian Li², Sanghoon Kim², Takahiro Moriyama², Yoshinobu Nakatani⁴ and Teruo Ono²

¹Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea.

²Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

³Physics of Nanostructures, Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, PO Box 513, 5600 MB, Eindhoven, The Netherlands

⁴University of Electro-communications, Chofu, Tokyo, 182-8585, Japan

A controlled creation, propagation, and detection of magnetic domain wall (DW) is the core process of the DW-motion-based racetrack memory¹⁾. Several technical issues on the device performance of racetrack memory have been raised during last decade, and many parts of the technical issues have been successfully resolved owing to the in-depth understanding of the mechanisms involved. However, there still remain several urgent issues, e.g., the reduction of the power consumption in the writing process and the confirmation of real time multiple DWs motion.

Here, we provide two novel domain writing schemes that consumes power at least an order of magnitude smaller than that of the conventional writing technique. In the first scheme, we use current-induced DW propagation to create an arbitrary domain instead of current-induced local Oersted field²⁾. The key advantage of this scheme is that the current required for propagating a domain is much smaller than that for nucleating a domain. The other scheme relies on the deterministic switching based on the spin Hall effect and Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI). In this scheme, the role of writing current is to provide an in-plane longitudinal field to trigger the deterministic switching and therefore, the required power can be reduced.

By employing the proposed scheme, we then demonstrate the real time detection of current-driven multiple magnetic DWs motion, which directly shows the operation of magnetic domain wall shift register³⁾.

References

- [1] S. Parkin and S.-H. Yang, *Nature Nanotechnol.* **10**, 195 (2015).
- [2] Kab-Jin Kim et al. *Appl. Phys. Express* **10**, 043002 (2017).
- [3] Kab-Jin Kim et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* accepted.

Stack engineering of spin orbit torque efficiency in magnetic bilayers

D. J. Lee^{1,2,*}, J. H. Kim^{1,4}, B. K. Ju⁴, H. C. Koo¹, B. C. Min¹, K. J. Lee^{1,2,3} and O. J. Lee¹

¹Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

²KU-KIST Graduate School, Korea University, Seoul, Korea

³Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul, Korea

⁴Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea

*E-mail: 215353@kist.re.kr

The simultaneous achievement of a larger spin-Hall angle and a lower magnetic damping is of importance to implement successful spin-orbit torque (SOT) devices. Recent works have proposed that the interface transparency of the spin current between a heavy metal and a ferromagnetic layer plays important roles in determining the effective magnitude of the spin-Hall angle; e.g. $\theta_{\text{SH}}(\text{Pt|Co}) \sim 0.11$ vs $\theta_{\text{SH}}(\text{Pt|Py}) \sim 0.05$ [1,2]. Unfortunately, the enhancement of spin-Hall angle with a higher spin transparency will be counteracted by the increase of the magnetic damping due to the spin pumping so that the variation of the transparency would not be much helpful; e.g. $\Delta\alpha_{\text{sp}}(\text{Pt|Co}) \sim 2 \cdot \Delta\alpha_{\text{sp}}(\text{Pt|Py})$ [1,2].

For relieving this issue we utilized ferromagnetic bilayers instead of a single ferromagnetic layer on top of a Pt layer. We used DC/RF magnetron sputtering to deposit two series of multilayer films having different stack orders, Pt|Co|Py or Pt|Py|Co, on a thermally oxidized Si substrate at room temperature. The multilayers consist of, from the bottom to the top, Ta(1)/Pt(5)/Co(*t*)/Py(5-*t*)/MgO(2)/Ta(2) and Ta(1)/Pt(5)/Py(5-*t*)/Co(*t*)/MgO(2)/Ta(2) (thickness in nm) where the thickness of cobalt (*t_{Co}*) layer was varied from 0 to 5 nm.

We investigated spin-Hall angles and magnetic damping in ferromagnetic bilayers by utilizing the spin torque ferromagnetic resonance technique (ST-FMR) [3]. The properties (spin-Hall angle and magnetic damping) of ferromagnetic bilayers critically depend on the stacking order and bilayer thickness. We find that the spin-Hall angle is dominated by the ferromagnetic layer in contact to the Pt layer. On the other hand, the magnetic damping is dominated by another factor, and the magnetic damping has exactly opposite dependence of spin-Hall angle.

In this presentation, we shall show the detailed results from our ST-FMR measurements for the various stacking order and thickness ranges, and will discuss possible damping mechanisms dependent on the stacking order and thickness.

References

- [1] Weifeng Zhang, Wei Han, Xin Jiang, See-Hun Yang and Stuart S. P. Parkin, Role of transparency of platinum-ferromagnet interfaces in determining the intrinsic magnitude of the spin Hall effect, *Nature Physics*, vol 11, 496-502 (2015).
- [2] Chi-Feng Pai, Yongxi Ou, D. C. Ralph and R. A. Buhrman, Dependence of the efficiency of spin Hall torque on the transparency of Pt/ferromagnetic layer interfaces, *Physical Review B* 92, 064426 (2015).
- [3] Luqiao Liu, Takahiro Moriyama, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman Spin-Torque Ferromagnetic Resonance Induced by the Spin Hall Effect, *Phys. Rev. Lett.* 106, 036601 (2011).

Effect of annealing in low PO₂ on the structure and magnetic properties of M-type Sr-hexaferrite

강영민^{1*}

¹한국교통대학교 화공신소재고분자공학부

M-type Sr-hexaferrites are one of the most utilized materials in permanent magnets due to their low price, outstanding chemical stability, and characteristic hard magnetic properties. [1] It has been shown that Ca-La-Co [2] substitutions are one of the most successful approaches, leading to significant enhancement in the crystalline anisotropy without reducing the M_S. In this research, the effects of annealing atmospheres, air and N₂ on the crystalline phase, microstructure, and magnetic properties are comparatively studied for the non-substituted SrM and the Ca-La-Co-substituted SrM. The correlations of the cation substitution ratio of [La³⁺]/[Co²⁺], phase stability, and formation of oxygen vacancy are discussed. It is also clearly revealed that the effect of oxygen vacancy on the magnetic properties of the M-type Sr-hexaferrites through thin film experiment.

Non-substituted SrM (SrFe₁₂O₁₉) and La-Co substituted SrM (Sr_{0.7}La_{0.3}Fe_{11.7}Co_{0.3}O₁₉) and La-Ca-Co substituted SrM (Sr_{0.1}Ca_{0.45}La_{0.45}Fe_{11.7}Co_{0.3}O₁₉) samples were prepared by conventional solid state reaction process. The SrM thin film with thickness of 130 nm was prepared on Si/SiO₂ substrate by pulsed laser deposition (PLD) and subsequent ex-situ annealing process at 970°C in air. Ex-situ annealing on the films was performed in the vacuum at 300-500°C for 1h. Analysis by X-ray diffraction and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) were performed for phase identification and microstructural observation, respectively. Magnetic hysteresis curves were measured using a physical property measurement system-vibrating sample magnetometer at room temperature (300 K) with sweeping magnetic field within ± 5 T.

During annealing in N₂ at 1200°C, the Ca-La-Co-substituted SrM decomposed to the three different ferrite phases of orthorhombic, spinel, and hexagonal structures while non-substituted SrM and La-Co SrM maintained the M structure as the primary phase. It is suggested that the charge-imbalance substitution of La³⁺ - Co²⁺, with the ratio of [La³⁺]/[Co²⁺] = 1.5 induces the phase instability of the hexaferrite structure, which cause oxygen vacancy formation and subsequent phase transformation during the low PO₂ annealing. In the thin film experiment, polycrystalline SrFe₁₂O₁₉ (t = 130nm) films were prepared on the SiO₂/Si substrate by pulsed laser deposition and post-annealing processes. After annealing in vacuum at 500°C, the films showed 80% increased magnetization value at the applied magnetic field of H = 15 kOe with a significantly reduced coercivity without microstructural change. The softer magnetization behavior with the increased M_S over the theoretical limit of SrM is attributed to the formation of oxygen vacancies in the hexagonal structure, which is accompanied with Fe valence change from Fe³⁺ to Fe²⁺.

References

- [1] J. J. Went, G. W. Rathenau, E. W. Gorter, G. W. van Oosterhout, Ferroxdure, A Class of Permanent Magnetic Materials, Philips Tech. Rev. **13**, (1952) 194-208
- [2] Y. Kobayashi, S. Hosokawa, E. Oda, S. Toyota, Magnetic properties and composition of Ca-La-Co M-type ferrites, J. Jpn. Soc. Powder Metall. **55** (2008) 541-546.

Exchange coupling behaviors between Sr-hexaferrite and LaSrMnO₃ composites

강영민^{1*}

¹한국교통대학교 화공신소재고분자공학부

A large number of studies have been performed on magnetic hard-soft composites for not only improving their hard magnetic performance, but also for studying the origin of this phenomenon because of their potential applications in high-performance magnets, magnetic recording devices, and sensors. [1-4] Although both the M-type hexaferrites and perovskite manganites have been studied intensively, the magnetic coupling behavior of composites of the two phases has been rarely reported.

In this study, composites consisting of a magnetic hard SrM and a magnetic soft LSMO were prepared by conventional solid-state reaction methods using two different routes. In the first route (route A), the SrM and LSMO powders, synthesized by calcination (1100°C), were first mixed in a 1:1 ratio (wt%). Then, the mixed powder was ground, pelletized, and calcined at 1200 °C for 2 h. In the second route (route B), the precursor powders of SrCO₃, La₂O₃, Fe₂O₃, Mn₃O₄ were weighed such that they had the same cation ratio as the composite made by the first route (50 wt.% SrM + 50 wt.% LSMO). The weighed mixture of the powders was ball-mixed, and subsequently calcined at 1100°C for 4 h and at 1200°C for 2 h. Analysis by X-ray diffraction (XRD-7000, Shimadzu) and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM, JSM-7610F) were performed for phase identification and microstructural observation, respectively. Magnetic hysteresis curves were measured using a physical property measurement system-vibrating sample magnetometer (PPMS-VSM, Quantum Design) at 300 K with a sweeping magnetic field (H) within ±2 T.

When the LSMO-SrM composite was synthesized directly from the initial precursor powders, it shows a single hysteresis where the hard-soft phases are exchange-coupled. On the other hand, clear double hysteresis without magnetic coupling was observed in the composite prepared by calcination of the mixtures of LSMO and SrM powders. It is suggested that microstructural and compositional differences between the composite samples may give rise to such a difference in the magnetic behaviors.

References

- [1] E. F. Kneller, R. Hawig, *IEEE Trans. Magn.* 27 (1991) 3588-3600.
- [2] E. E. Fullerton, J. S. Jiang, M. Grimsditch, C. H. Sowers, S. D. Bader, *Phys. Rev. B* 58 (1998) 12193-12200.
- [3] Y.-M. Kang, J.-B. Park, Y. Kang, K. Ahn, *Thin Solid Films*, 594 (2015) 40-44.
- [4] W.-B. Cui, Y. K. Takahashi, K. Hono, *Adv. Mater.* 24 (2012) 6530-6535.

Bi₂O₃, MnCO₃ SiO₂ 첨가제가 스트론튬 헥사페라이트의 구조와 자기적 특성에 미치는 영향

임은수¹, 문광록¹, 강영민^{1*}

¹한국교통대학교 화공신소재고분자공학부

헥사페라이트는 페리자성을 띠는 육방정계 구조의 산화물로 조성과 구조에 따라 영구자석, 수직 자기 저장 매체, 연자성 고주파 자기소자 등의 다양한 응용성 측면에서 수십년간 꾸준히 연구가 되어 왔다. 헥사페라이트는 적층 구조에 따라 6개 유형으로 나뉘는데, 그 중에서 M형 스트론튬 헥사페라이트가 낮은 원료가격과 상안정성, 그리고 적절한 경자성 특성으로 인해 영구자석으로 상용화되었다. 본 연구에서는 스트론튬 헥사페라이트의 경자성 특성을 향상하기 위해 Bi₂O₃, MnCO₃, SiO₂를 첨가제로 사용하여 XRD, SEM을 통해 결정구조와 미세구조, 그리고 VSM (vibrating sample magnetometer)을 통하여 자기적 특성을 연구하였다.

Fe₂O₃, SrCO₃를 원료를 6:1의 몰비로 혼합 후 고상법을 통하여 스트론튬 헥사페라이트 (SrFe₁₂O₁₉) 단일상을 1100°C에서 합성하였다. 합성된 SrFe₁₂O₁₉ 하소 분말에 소결 첨가제로 Bi₂O₃,

MnCO₃, SiO₂를 아래 표와 같은 여러 중량비로 첨가 후 볼밀을 진행하여 혼합, 분쇄, 성형한 후 공기중 1260°C에서 2시간 열처리하여 최종 소결체를 얻었다. Bi₂O₃ 첨가량이 0.5%, 1.0%로 증가함에 따라 포화자화값이 향상되었으나 보자력은 감소하며, 1.0% 첨가시 입자성장에 급격히 일어나 보자력이 크게 감소하였다. 0.5wt% Bi₂O₃와 함께 0.5 wt% MnCO₃이 함께 첨가되면 포화 자화의 증가와 함께 적절한 크기의 보자력도 유지함을 확인되었다. 이는 0.5 wt% MnCO₃의 첨가가 입성장을 방해하기 때문이다. 이는 0.5 wt% Bi₂O₃가 0.5 wt% SiO₂와 함께 첨가 되었을 때도 유사한 결과를 보인다. 그러나 Bi₂O₃ 첨가량이 1wt%가 되면 MnCO₃나 SiO₂의 동시 첨가로도 입성장을 제어하기가 어렵고 보자력은 크게 감소하는 결과를 보였다.

표1: 첨가 조성에 따른 소결체 (1260°C)의 포화 자화(M_s)와 보자력(H_c) 특성

| Sample 첨가 조성 | M _s (emu/g) | H _c (Oe) |
|---|------------------------|---------------------|
| SrFe ₁₂ O ₁₉ (SrM) 무첨가 | 71.8 | 4122 |
| SrM+Bi ₂ O ₃ (0.5wt%) | 72.6 | 3098 |
| SrM+Bi ₂ O ₃ (1wt%) | 74.2 | 653 |
| SrM+MnCO ₃ (0.5wt%)+Bi ₂ O ₃ (0.5 wt%) | 73.1 | 3265 |
| SrM+MnCO ₃ (0.5wt%)+Bi ₂ O ₃ (1 wt%) | 71.4 | 726 |
| SrM+SiO ₂ (0.5wt%)+Bi ₂ O ₃ (0.5 wt%) | 70.3 | 3094 |
| SrM+SiO ₂ (0.5wt%)+Bi ₂ O ₃ (1.0 wt%) | 71.1 | 404 |
| SrM+SiO ₂ (0.25wt%)+MnCO ₃ (0.25 wt%)+Bi ₂ O ₃ (0.5wt%) | 71.2 | 3410 |

* 본 연구는 한국교통대학교의 지원을 받아 수행하였음

Anisotropic Nd-Fe-B magnet produced by hot-deformation of iso HDDR powder

유재경^{1,2*}, 차희령¹, 이동윤², 이정구¹

¹한국기계연구원 부설 재료연구소

²부산대학교

1. 서론

우수한 자기특성을 가진 Nd-Fe-B 영구자석은 산업 전반에 걸쳐서 필수 소재로 이용되고 있다. 하지만 사용 온도가 높아짐에 따라 보자력이 크게 저하되어, 하이브리드 자동차의 구동모터로 적용하는데 한계가 있다. Dy, Tb와 같은 중희토류 금속을 첨가하여 보자력을 향상시킬 수 있지만 높은 비용과 자원의 한정으로 최근에는 미세구조제어를 통해 보자력을 향상시키는 연구가 진행되고 있다.

결정립 미세화와 결정립 계면제어를 통해 미세구조를 제어할 수 있는데, HDDR (hydrogenation-disproportionation-desorption-recombination) 법은 결정립을 미세화하는 대표적인 방법이며, 미세화 된 HDDR 분말은 hot-deformation을 통해 이방성 벌크자석으로 제조될 수 있다. 그러나 제조된 자석의 결정립은 미세하지만, 여전히 낮은 보자력을 가지고 있어 입계확산처리와 같은 후처리가 필요하다.

이에 본 연구에서는 결정립 미세화 된 등방성 HDDR 분말을 가지고 온도, 변형속도, 변형률 등 Hot-deformation 조건을 잘 제어하여 이방성 벌크자석을 제조하였고, 후열처리를 통해 보자력을 향상시키는 실험을 하였다.

2. 실험방법

(1) $\text{Nd}_{12.5}\text{Fe}_{61}\text{Ga}_{0.3}\text{Nb}_{0.2}\text{B}_{6.4}$ (at.%)의 조성을 가지는 스트립-캐스팅 합금을 HDDR을 통해 미세화 된 등방성의 분말을 얻고, 100~300 μm 의 크기의 분말로 분쇄한다.

(2) 700 $^{\circ}\text{C}$, 400MPa 하의 조건에서 hot-press를 하고, 온도, 변형속도, 변형률 등의 조건을 제어하여 die-upset을 진행한다.

(3) 제조된 자석의 자기특성과 구조를 분석하기 위해 VSM과 SEM을 측정한다.

3. 실험결과 및 결론

등방성의 HDDR분말은 die-upset 변형률이 증가함에 따라 자화 값은 높아지고, 보자력은 감소하는 경향을 보였고, 높은 온도 낮은 변형속도에서 보자력이 더 감소하는 것을 나타내었다. 700 $^{\circ}\text{C}$, 변형률 1.5, 변형속도 0.001 s^{-1} 의 hot-deformation 조건에서 제조된 자석의 보자력은 800 $^{\circ}\text{C}$ 의 후열처리를 통해 약 2kOe 정도로 크게 향상됨을 보였다. 이에 따라, HDDR hot-deformed 자석의 보자력은 비자성 물질이나 중희토류 화합물과 함께 후처리에 의해 개선될 수 있을 것이다.

Exchange-spring magnetic behavior in Sr-hexaferrite/MnZn-ferrite composites for permanent magnet applications

Tae-Won Go^{1*}, Kang-Hyuk Lee¹, Sang-Im Yoo^{1†}

¹Department of Material Science and Engineering, Research Institute of Advanced Materials (RIAM), Seoul National University, Seoul, Korea

Since the proposal of exchange-spring magnet in 1991 by Kneller and Hawig [ref], powder and layered films have mostly received attention for its applications. However, the exchange coupling effect in bulk permanent magnets has never been reported. In this study, the exchange-spring magnetic behavior in bulk hard/soft magnetic composite was investigated. The hard/soft composite magnets were composed of strontium hexaferrite/manganese zinc ferrite, which were synthesized via conventional solid-state reaction. Raw materials were SrCO₃, Fe₂O₃ for strontium hexaferrite, and Mn₂O₃, ZnO, Fe₂O₃ for manganese zinc ferrite. They were ball-milled and uniaxially pressed into precursor pellets. The strontium hexaferrite precursor was calcined at 1150°C for 12 h in air, and manganese zinc ferrite at 1200°C for 8 h in air. The calcined pellets were crushed and sintered at 1300°C for 2 h in air. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometer (VSM), and scanning electron microscope (SEM). Further results will be presented for a discussion.

Keywords : Exchange-spring magnet, magnetic composite, strontium ferrite, manganese zinc ferrite

Reference

[1] IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 27, NO. 4, JULY 1991

Phase transformation and magnetic properties of $\text{Mn}_{54}\text{Al}_{46}\text{Si}_x$

Hui-Dong Qian^{1,2*}, Ping-Zhan Si^{1†}, Chul-Jin Choi^{1†}, Jihoon Park¹, Kyung Mox Cho²

¹Powder & Ceramic Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, R. Korea

²School of Materials Science and Engineering Pusan National University, R. Korea

*E-mail: cjchoi@kims.re.kr; pzsi@mail.com

The metastable nature of ferromagnetic MnAl usually results in its decomposition during prolonged annealing or high temperature processing. The doping of carbon to MnAl has been proved to be effective in improving the stability of ferromagnetic MnAl. In this work, we systematically studied the effect of silicon doping on the magnetic properties and phase transformation of MnAl. We prepared the $\text{Mn}_{54}\text{Al}_{46}\text{Si}_x$ alloys by using traditional induction melting method and subsequent optimized annealing processes. It is found that the addition of silicon to MnAl increases the triggering temperature for massive phase transformation of MnAl, while the magnetization of the samples is decreased. Several samples with varied atomic percent of silicon were prepared and analyzed by using XRD, SEM and PPMS.

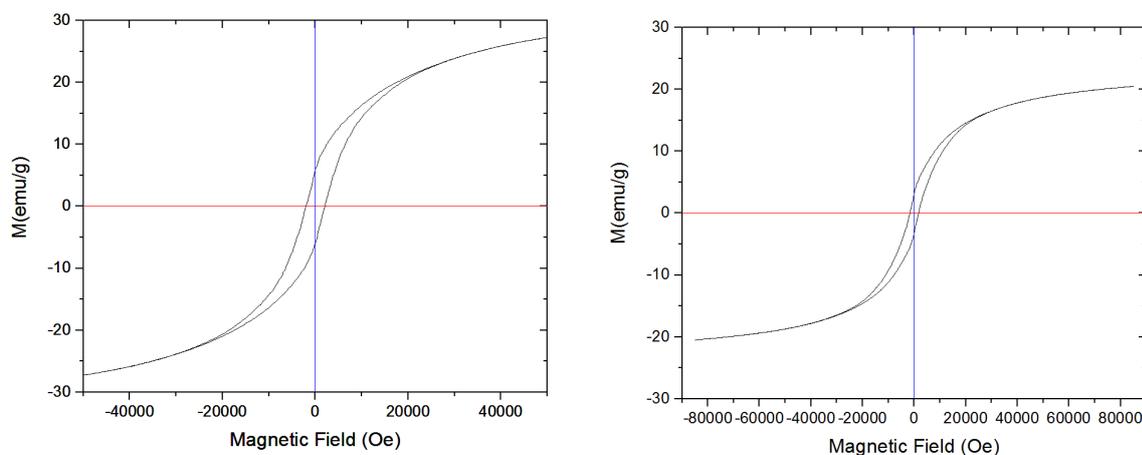


Fig. 1. Magnetic properties of $\text{Mn}_{54}\text{Al}_{46}\text{Si}_{0.5}$ and $\text{Mn}_{54}\text{Al}_{46}\text{Si}$ samples after 482°C heat treatment

Layer-number dependence of the magnetic properties of MnBi films

Hongjae Moon, Sumin Kim, Hwaebong Jung, Hyun-Sook Lee* and Wooyoung Lee†

Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, 262 Seongsanno,
Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

†Corresponding Author E-mail: wooyoung@yonsei.ac.kr

*Corresponding Author E-mail: h-slee@yonsei.ac.kr

Ferromagnetic low-temperature-phase (LTP) of MnBi has attracted much attention because it has a higher coercivity than that of Nd-Fe-B at high temperature ($\sim 200^\circ\text{C}$) and it has been a desirable material as rare-earth-free permanent magnets that can be used in such high temperature. We present the effect of multilayer deposition on the magnetic properties of MnBi thin films. The multilayered MnBi films were fabricated with alternating deposition of Bi and Mn with N ($N = 2-10$) layers (L), followed by *in situ* thermal annealing. As N increases, the even-layered and odd-layered films show a similar layer-number-dependence of the magnetic properties, such as an increasing behavior for H_c and a concave-up behavior for M_r and $(BH)_{\max}$. According to the results of the electron microscopy analyses, the MnBi films show changes in the microstructure and elemental distribution with an increase in the number of deposition layers. (i) The 2L and 3L films grew with c -axis oriented LTP-MnBi having the largest area and the most flat surface, but unreacted Mn remained near the top surface as well as large unreacted Bi islands. (ii) The 4L and 5L films have the relatively smaller fraction of LTP-MnBi, which was obstructed with large amounts of Bi and Mn islands. (iii) The 9L and 10L films grew like nanocrystalline LTP-MnBi with less of the unreacted elements. The higher H_c can be explained by the prevented nucleation of the reversed domain because of the isolated MnBi islands. The higher M_r can be explained by the high volume fraction of LTP-MnBi with less unreacted Bi and Mn. From the results, we found that the changes strongly affect the variation in the magnetic properties and the number of deposition layers is important for obtaining higher magnetic properties. In particular, the element of top layer does affect the magnetic properties and the Bi element at the top layer plays an important role in improving M_r .

Keywords : MnBi, magnetic thin film, multilayer deposition, hard magnetic properties

$(\text{Fe}_{97.5}\text{Co}_{2.5})_{1-x}\text{C}_x$ 합금의 결정자기이방성상수(K_1)

김경민^{1*}, 권해웅¹, 이정구², 유지훈²

¹부경대학교 재료공학과, 부산광역시 남구 신선로 365, 48513

²재료연구소, 경상남도 창원시 성산구 창원대로 797, 51508

1. 서론

지금까지 알려진 영구자석 재료 중 가장 우수한 특성을 보이는 영구자석은 Nd-Fe-B계 영구 자석이다. Nd-Fe-B계 영구자석은 발전기, 모터 등과 같은 에너지 변환 장치의 핵심부품으로 사용되고 있다. 그러나 최근에는 원료의 불안정한 공급과 가격 문제 때문에 희토류 원소의 사용을 최소화 하거나 전혀 사용하지 않는 대체 재료의 개발이 요구되고 있다. 많은 연구자들이 Alnico, MnAl, MnBi, Fe_{16}N_2 와 같은 이전에 알려진 재료를 다시 검토하여 비희토류계 영구자석 재료 개발을 위한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 본 연구에서는 통상의 재료가공공정을 적용해서 Fe-Co계 합금에서 탄소(C)를 첨가하여 대칭성이 낮은 체심정방정구조(BCT)의 (Fe,Co)-C계 단일상 재료를 제조할 수 있는지를 조사하였다. BCT 및 BCC 구조의 (Fe,Co)-C계 단일상 재료의 결정자기이방성상수(K_1)를 실험적으로 측정하여 탄소의 첨가 및 결정구조의 정방성(tetragonality)이 결정자기이방성상수에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 Fe-Co-C계 합금은 고순도 Fe, Co 성분금속 및 Fe-B합금을 아크용해하여 제조하였다. 다양한 조성으로 제조한 시료를 1100°C에서 1시간 유지한 후 퀘칭하여 균질화 시켰다. 재료의 결정구조 및 상분석은 XRD를 이용하여 분석하였으며, 자기적 특성은 VSM을 이용하여 측정하였다. 단일상 시료의 결정자기이방성상수(K_1)는 포화접근법(law of approach to saturation)을 이용하여 측정하였다.

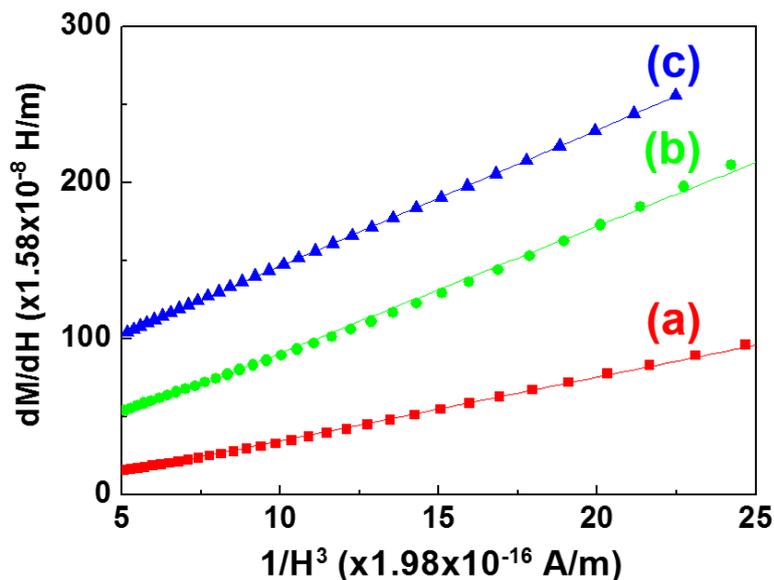


Fig. 1. dM/dH vs $1/H^3$ plots for the law of approach to saturation for the $(\text{Fe}_{97.5}\text{Co}_{2.5})_{1-x}\text{C}_x$ alloys. (a) $x = 0$, (b) $x = 0.032$, (c) $x = 0.062$.

3. 결과 및 고찰

(Fe_{97.5}Co_{2.5})_{1-x}C_x 합금에서 탄소를 포함하지 않는 (Fe_{97.5}Co_{2.5})_{1-x}C_x (x = 0) 합금은 BCC 결정구조를 가졌으며, 그 결정자기이방성상수(K₁)는 6.7 x 10⁴ J/m³ 였다. 소량의 탄소를 포함하는 (Fe_{97.5}Co_{2.5})_{1-x}C_x (x = 0.062) 합금은 BCT 결정구조(c/a = 1.05)의 단일상 재료였다. 이 BCT 상 재료의 결정자기이방성상수(K₁)는 9.9 x 10⁴ J/m³ 로서 탄소를 포함하지 않는 BCC 구조의 (Fe_{97.5}Co_{2.5})_{1-x}C_x (x = 0) 합금의 결정자기이방성상수에 비해 약 50%의 증가를 보였다. 한편, 역시 소량의 탄소를 포함하지만 BCC 구조인 (Fe_{97.5}Co_{2.5})_{1-x}C_x (x = 0.032) 합금의 결정자기이방성상수는 9.5 x 10⁴ J/m³로서 BCT 결정구조의 (Fe_{97.5}Co_{2.5})_{1-x}C_x (x = 0.062) 합금의 경우와 유사하였다(Fig. 1). 이상의 결과는 BCT 결정구조의 (Fe_{97.5}Co_{2.5})_{1-x}C_x (x = 0.062) 합금에서 얻어진 결정자기이방성상수의 증가는 결정구조의 정방성에 의한 것이 아니라 탄소 첨가에 의한 것임을 뒷받침 하는 것으로 판단할 수 있었다.

Effect of quenching wheel speed on the magnetic properties of melt-spun NdFeM (M=B, Ti)

Sol Jung^{1*}, Haein Choi-Yim^{1,2}

¹Department of physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

²Department of applied physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

1. Introduction

In last 60 years, the magnetically compounds composed of rare earth and 3d elements have been developed as high performance permanent magnets such as SmCo₅, Sm₂Co₁₇ and Nd₂Fe₁₄B. In the 1960s, SmCo₅ compound appeared as the first rare earth high-performance magnets. This magnet has magnetic properties such as a large uniaxial magnetocrystalline anisotropy, a relatively high saturation magnetization, a high Currie temperature and very high maximum energy product. Subsequently, the Nd₂Fe₁₄B compound was produced either by powdering/sintering in 1984 and the maximum energy product of this compound reached 36.25 MGOe. This Nd₂Fe₁₄B magnet has been rapidly developed and then the magnet which has the maximum energy product value of 59.25 MGOe was produced. This magnet is the best permanent magnet in the present industry. Recently, permanent magnets are essential components in the many industries because of their ability to provide a magnetic flux and the magnetically hard alloys of nanocomposites with rare earth elements especially have attracted rapidly increasing interest. Nanocomposite magnets consisting of a soft magnetic α -Fe or Fe₃B phase exchange-coupled to a hard magnetic Nd₂Fe₁₄B phase have been extensively studied due to their remanence enhancement effect, high energy product, and low cost. In this paper, we simultaneously investigate the hard magnetically compound and nanocomposite in one type compound by changing quenching wheel speed. We produce the NdFe-based compounds with various quenching wheel speed in order to study a transition from soft phase to hard phase.

2. Experiment

In order to ensure a homogeneous composition, ingots of NdFeM (M=B, Ti) were repeatedly melted and solidified under Ar atmosphere four times. These alloys were fabricated by melt spinning onto a copper wheel at speed of 800 ~ 3000 rpm for rapid solidification. Melt spinning was carried out in a chamber with highly purified Ar atmosphere. The microstructure of the samples were characterized by XRD. The hysteresis loops was obtained a VSM due to study magnetic properties.

3. Result and discussion

Figure 1 and 2 display the XRD patterns and hysteresis loops of Nd₂Fe₁₄B powders for wheel speed values of 2500 and 3000 rpm, respectively. 2500 rpm sample shows only Nd₂Fe₁₄B phase, small coercivity and high saturation magnetization. The XRD pattern of 3000 rpm sample exhibits Nd₂Fe₁₇ and Fe phases, 3000 rpm sample has large coercivity and low saturation magnetization.

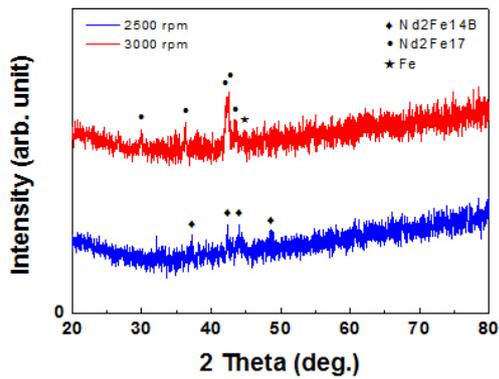


Fig. 1. XRD patterns of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ powders

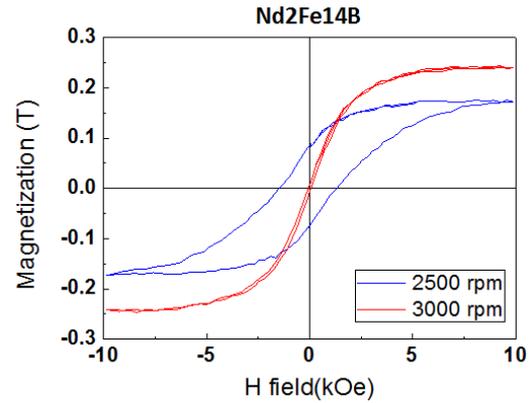


Fig. 2. Hysteresis loops of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ powders

4. References

- [1] K. J. Strnat, G. Hoffer, J. Olson, W. Ostertag, and J. Becker, *J. Appl. Phys.* **38**, 1001 (1967).
- [2] R. K. Mishra, G. Thomsa, T. Yoneyama, A. Fukuno, and T. Ojima, *J. Appl. Phys.* **53**, 2517 (1981).
- [3] M. Sagawa, S. Fujimura, M. Togawa, and Y. Matuura, *J. Appl. Phys.* **55**, 2083 (1984).
- [4] J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee, and F. E. Pinkerton, *J. Appl. Phys.* **55**, 2078 (1984).
- [5] K. J. Strnat, *Ferromagnetic Materials vol 4*, 131-120 (1988).
- [6] S. Sugimoto, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 064001 (2011).
- [7] X. H. Cui, Z. W. Liu, X. C. Zhong, H. Y. Yu and D. C. Zeng, *J. Appl. Phys.* **111**, 07B508 (2012).
- [8] S. Liu, B. Gu, H. Bi, Z. Tian, G. Xie, Y. Zhu and Y. Du, *J. Appl. Phys.* **92**, 7514 (2002).

Influence of additional cooling of casted strips on magnetic properties of Nd-Fe-B sintered magnets

Hwaebong Jung^{*}, Hongjae Moon, Sumin Kim, Hyun-Sook Lee[†] and Wooyoung Lee[†]

Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, 262 Seongsanno,
Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Republic of Korea

[†]Corresponding Author E-mail: wooyoung@yonsei.ac.kr

^{*}Corresponding Author E-mail: h-slee@yonsei.ac.kr

We investigated the additional (secondary) cooling effect of casted strips on magnetic properties of Nd-Fe-B sintered magnets. The Nd-Fe-B sintered magnets were fabricated with the casted strips prepared without and with additional cooling. The additional cooling was performed by blowing Ar gas with various pressures (0.1, 0.3, and 0.6 MPa) on the free-side surface of the strips during strip-casting process. The higher magnetic properties of H_c , B_r , and $(BH)_{\max}$ of the final Nd-Fe-B sintered magnets were obtained for 0.1 MPa rather than for 0.0 MPa. The best microstructure of columnar grains in the casted strips was produced with the aid of lower gas cooling at the free side. It was found that the microstructure of the strips affects the distribution of grains grown in the sintered magnets. This is the first report of demonstrating improved magnetic performance in Nd-Fe-B sintered magnets by additional gas cooling.

Keywords : permanent magnets, Nd-Fe-B sintered magnet, strip casting, additional cooling, magnetic properties

Magnetic properties of large-scaled MnBi bulk magnets

Sumin Kim^{1*}, Hongjae Moon¹, Hwaebong Jung¹, Su-Min Kim², Hyun-Sook Lee^{1†},
Haein Choi-Yim² and Wooyoung Lee[†]

¹Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, 262 Seongsanno,
Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Republic of Korea

²Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Republic of Korea

[†]Corresponding Author E-mail: wooyoung@yonsei.ac.kr

[†]Corresponding Author E-mail: h-slee@yonsei.ac.kr

The high performance MnBi bulk magnet has been required for real applications of hybrid and electric vehicles since the low-temperature-phase (LTP)-MnBi has been attracted much attention as a good candidate for high temperature applications. Much work has reported in MnBi powders because there was a problem to overcome the difficulty of LTP formation. The magnetic properties of bulk magnets are strongly dependent on the details of the synthesis process and should be measured from large-scaled samples. However, the reported values of $(BH)_{\max}$ of MnBi bulk magnets were obtained from only a part of an original bulk sample using a vibrating sample magnetometer (VSM) or a superconducting quantum interference device magnetometer (SQUID). In particular, $(BH)_{\max}$ of bulk magnets obtained by VSM, MPMS, and PPMS can be misled or overestimated due to different sample preparations from that for a B - H loop tracer. It is well known that the B - H loop tracer is a general and reliable apparatus for measuring the magnetic properties of large-scaled bulk hard magnets. In this paper, we investigated the magnetic properties of large, compacted, sintered MnBi bulk magnets with dimensions of $20.3 \times 15.3 \times 10.3$ mm³. We have tried a new procedure for the preparation of high-quality precursor powder to attain high LTP content: melt-spinning, cold-pressing, annealing, magnetic separation, and grinding. By adopting the new process, the amount of LTP obtained was ~98 wt%, which is the highest value compared to that presented in the literature for precursor powders. The improvement of coercivity was accomplished by controlling the particle size using different milling techniques. The magnetic properties of the hot-compacted MnBi bulk magnets were investigated using the entire as-prepared bulk sample without cutting. The highest maximum energy product, $(BH)_{\max}$, obtained among our samples was 7.3 MGOe. This is the first report of demonstrating high performance in large-sized MnBi bulk magnets. Our results show that our process can yield high-performance in MnBi bulk magnets with larger dimensions

Keywords : permanent magnets, MnBi bulk, rapid-solidification, magnetic properties

Nonmetal N-doped BiFeO nanoparticles with enhanced room temperature magnetization

Yuefa Jia and Chunli Liu*

Department of Physics and Oxide Research Center,
Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 17035, Republic of Korea

Bismuth ferrite BiFeO₃ (BFO) belongs to the perovskite structured (ABO₃) family, which is a widely studied multiferroic material having interesting properties with potential technological applications. In this work, N doped BFO(N-BFO) nanoparticles have been synthesized by a conventional solid state reaction. The influences of N doping on the magnetic properties of BFO was investigated systematically. XRD patterns of the prepared samples exhibit presence of BFO crystalline phase. HRSEM images of the N-BFO show that particles are mostly spherical with size in the range of 50-100 nm. The XPS data further confirmed that the nonmetal N element was successfully doped in the BFO nanoparticles. Particularly, the N concentration was found to dramatically affect the room temperature saturation magnetization of N-BFO. In 17 wt% N-doped BFO, the maximum saturation magnetization was measured to be as high as 0.35emu/g, which is much higher than that of pure BFO(0.07 emu/g).

Keywords: N, BiFeO₃, saturation magnetization

Al이 치환된 Z-type hexaferrite의 뫼스바우어 연구

임정태*, 김철성†

국민대학교 물리학과

1. 서론

hexaferrite 물질은 spin current model에 의하여 발생하는 magnetoelectric (ME) effect가 나타나며, 이로 인해 다중강체 물질로 많은 연구가 진행되고 있다. 최근 hexaferrite 물질 중에 Al 이온이 치환된 $\text{BaSrCo}_2\text{Fe}_{11}\text{AlO}_{22}$ Y-type hexaferrite는 상온 부근에서 ME effect가 관찰되었으며, 이는 Z-type hexaferrite 물질 중에서도 Al 이온이 치환되면 ME effect가 발생 할 가능성을 의미한다. 하지만, Sr 이온과 Al 이온이 치환된 Z-type hexaferrite는 좁은 상형성 온도구간에 의해 직접합성법을 이용하여 단일상 형성에 어려운 점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 polymerizable complex method으로 통해 $\text{Sr}_{1.5}\text{Ba}_{1.5}\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_{24}\text{O}_{41}$ ($x = 0.00, 0.05$) 시료를 제조 후 결정학적 및 자기적 특성에 대해 연구하였다.

2. 실험방법

Polymerizable complex method는 저온에서 유기-금속 복합체를 이용하여 1차적인 상을 형성하여 직접합성 법보다 쉽게 Z-type ferrite의 단일상을 형성 할 수 있다. 따라서, 이를 통해 $\text{Sr}_{1.5}\text{Ba}_{1.5}\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_{24}\text{O}_{41}$ ($x = 0.00, 0.05$) 시료를 제조하였다. 증류수에 출발물질인 SrCO_3 , BaCO_3 , $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 를 당량비에 맞춘 후, 구연산을 첨가 하여 70°C 에서 1시간 동안 용해시킨다. 제조 된 metal-citrate 용액에 ethylene glycol를 첨가한 후, 이를 120°C 에서 건조하여, 유기-금속 복합체를 제조하였다. 제조 된 복합체를 320°C 에서 하소 하였으며, 이를 분쇄 후 1180°C 에서 1차 소결을 진행하였다. 최종적으로 상의 균일성과 2차 상을 제거하기 위해, 1230°C 에서 2차 소결 후 단일상의 $\text{Sr}_{1.5}\text{Ba}_{1.5}\text{Co}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_{24}\text{O}_{41}$ ($x = 0.00, 0.05$) 시료를 합성하였다. X-선 회절 실험 (XRD)를 통해 시료의 결정학적 특성을 연구하였으며, 4.2 K부터 상온까지 다양한 온도 구간에서 진동시료 자화율 측정 (VSM) 실험과 뫼스바우어 분광 실험을 통해 자기적 특성을 연구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

상온에서 XRD 실험을 실시하여, 이를 Rietveld 정련법을 통해 분석하였다. 그 결과, $\text{Sr}_{1.5}\text{Ba}_{1.5}\text{Co}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_{24}\text{O}_{41}$ ($x = 0.00, 0.05$) 시료는 $P6_3/mmc$ 공간군을 가지는 hexagonal 구조로 분석 되었으며, 시료의 격자 상수는 $x = 0.00$ 일 때 $a_0 = 5.87$ $c_0 = 52.12$ Å에서 $x = 0.05$ 일 때 $a_0 = 5.84$ $c_0 = 52.04$ Å으로 감소하였다. 이는 Fe 이온보다 작은 이온반경을 가지는 Al 이온에 의한 것으로, Vegard's 법칙을 만족함을 알 수 있다. 거시적인 자기적 특성을 확인하기 위해, 4.2 K부터 상온까지 다양한 온도 구간에서 VSM 실험을 실시하였다. 상온에서 20 kOe까지의 자기이력곡선을 측정한 결과, Al 이온의 치환량이 증가함에 따라 시료는 포화되지 않았으며, 이는 Al 이온에 의한 자기이방성의 변화에 의한 것으로 판단된다. 시료의 20 kOe의 자화값 ($M_{20\text{kOe}}$)는 $x = 0.00$ 일 때 49.05 emu/g에서 $x = 0.05$ 일 때 39.87 emu/g으로 감소한 반면에 보자력 (H_c)는 $x = 0.00$ 일 때 38.70 Oe에서 $x = 0.05$ 일 때 60.27 Oe으로 증가하였다. 이는 비자성 Al 이온이 up-spin 방향의 octahedral site로 치환과 자기이방성의 감소로 인한 것으로 판단된다. 4.2부터 상온까지 Mössbauer 분광 실험을 통해 시료 내의 미세 상호작용 대해 연구하였다. 뫼스바우어 분석 결과, 비자성 Al 이온이 up-spin 방향의 octahedral site로 치환되었으며, 이성질체 이동치를 통해 모든 온도구간에서 철이온은 Fe^{3+} 임을 확인하였다.

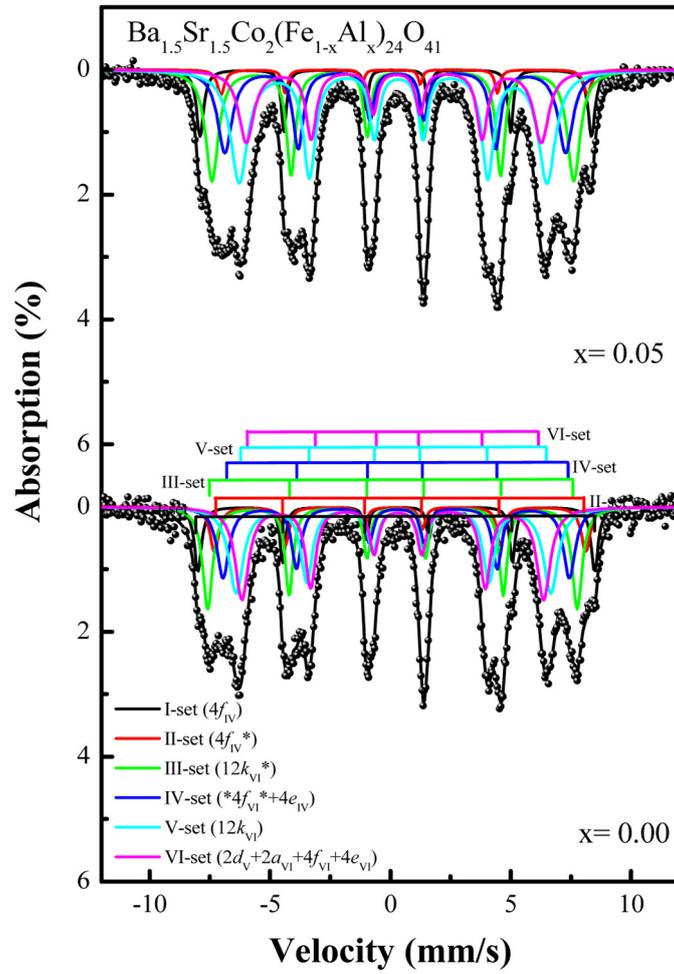


Fig. 1. Mössbauer spectra of $\text{Sr}_{1.5}\text{Ba}_{1.5}\text{Co}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_{24}\text{O}_{41}$ ($x = 0.00, 0.05$) at 295 K.

참고문헌

- [1] T. Nakajima, Y. Tokunaga, M. Matsuda, S. Dissanayake, J. Fernandez-Baca, K. Kakurai, Y. Taguchi, Y. Tokura, and T.-h. Arima, Phys. Rev. B 94, 195154 (2016).

FeCo 나노 입자의 합성 및 특성평가

박종환^{1*}, 김석훈¹, 최호준¹, 이정우¹, 노재철¹, 서수정¹

¹성균관대학교 신소재공학부

1. 서론

FeCo 자기입자는 이원계 합금 중 가장 높은 포화자화, 낮은 보자력, 높은 큐리온도로 인해 다양한 엔지니어링 분야에 쓰인다. FeCo는 열분해, 솔젤법, 금속염 환원, 공침법, 폴리올과 같은 방법으로 합성이 가능하다. 그 중 폴리올 공정은 폴리올의 고유 특성으로 나노입자를 합성을 하더라도 산화방지가 가능하며, 환원속도를 조절하여 입자의 형상을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 발표에서는 합성 시간과 조성에 따라 FeCo 나노입자의 자기특성 변화를 볼 것이다.

2. 실험방법과 결과

폴리올 공정을 이용하여 거의 원하는 조성의 FeCo나노입자를 합성하였다. 조성은 EDS로 확인하였다. $Fe_{75}Co_{25}$, $Fe_{66}Co_{34}$, $Fe_{52}Co_{48}$ 의 중 가장 높은 포화자화값을 가진 조성은 $Fe_{52}Co_{48}$ 이었다. 상기의 조성을 가지고 합성 시간을 1h, 2h, 3h으로 합성하고 포화자화값을 비교했다. 포화자화값을 비교했을 때 최적의 합성 조건은 130°C-2h 이었고 이 수치는 벌크의 수치와 유사했다. TEM을 통해 입자의 형상은 큐빅형 이었고 입자 크기는 거의 100nm가졌다. 하지만 산화가 많이된 일부 수nm의 미세입자가 관찰되었다. EDS Mapping을 통해 FeCo 나노입자에 2-3nm의 얇은 산화층이 확인 되었다.

3. 고찰

조성이 Co at%양이 높아질수록 포화자화 값이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 벌크 중 가장 높은 포화자화 값을 가진 $Fe_{50}Co_{50}$ 조성에 가장 가깝게 합성되어 그런 것으로 보인다. 하지만 나노입자의 포화자화 값은 벌크에 비해 상대적으로 낮으며, 보자력은 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이것은 FeCo 나노입자의 얇은 산화층과 100nm보다 작고 산화율이 더 큰 입자로 인한 것으로 보이며, 분위기 열처리를 통해 보자력을 줄이고 포화자화 값을 더 높일 수 있을 것으로 보인다. FeCo 합성시간이 최적화 조건보다 길 경우 포화자화 값이 낮아지는 것을 확인하였다. 이것은 합성시간이 길어짐에 따라 FeCo 나노입자가 산화된 것으로 보인다.

4. 결론

폴리올 공정을 통해 원하는 조성에 거의 가깝게 합성을 하였다. 입자의 형태는 큐빅형 이었고 2-3nm의 산화층을 가지는 입자였으며 크기는 거의 100nm였다. 그리고 벌크와 비슷하게 $Fe_{50}Co_{50}$ 에 거의 가까운 조성에서 포화자화 값을 가졌다. 그리고 합성시간을 조절하여 특정온도에서 2h 합성 시 가장 최고의 포화자화 값과 가장 낮은 보자력을 가지는 것을 알 수 있었다. 이 보다 길 경우 FeCo의 산화로 인해 더 낮은 값의 포화자화값과 높은 보자력을 가졌다.

5. 참고문헌

[1] Adv. Mater. 2006, 18, 3154-3159

회전이방성 특성을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 CoFe 두께에 따른 강자성 공명 신호 분석

김동영*, 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

교환결합력을 갖는 강자성(F)/반강자성(AF) 박막은 계면에서 비상보성 AF 스핀에 의하여 자화 곡선이 한쪽으로 이동되는 교환 바이어스 특성을 보인다. 이러한 교환 바이어스 특성은 AF의 두께가 임계두께 이상에서 나타나며, AF층이 임계 두께 이하에서는 회전이방성 특성을 보인다. 따라서 본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr재료에서 MnIr의 두께가 임계 두께 이하의 조건에서 CoFe의 두께에 따른 강자성 공명 자기장과 선폭 변화 특성을 분석하였다.

CoFe(t_f nm)/MnIr(2.5 nm) 구조를 갖는 재료는 Si기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터 방법을 사용하여 증착하였으며, MnIr의 두께는 임계두께 이하인 2.5 nm로 고정하였으며, CoFe의 두께 t_f 는 0에서 150 nm까지 변화시켰다. 제작된 박막 재료의 자기장 세기 및 각도에 따른 강자성 공명 자기장 및 선폭은 X-band용 FMR 측정 장치를 사용하였다. Fig. 1은 NiFe/MnIr 박막에서 CoFe의 두께가 20 및 40 nm인 재료 각각에 대하여 자기장 각도에 강자성 공명 자기장(H_{res})을 측정된 결과를 보인 것이다. MnIr의 두께가 0인 재료는 기준 재료로 사용하였다. CoFe의 두께가 20 및 40 nm인 재료의 강자성 공명 자기장은 기준 재료의 일축이방성 특성을 보이며, 교환 바이어스 특성은 나타나지 않고 회전이방성 특성만 보인다. 이들 측정 결과는 Stoner-Wohlfarth 모델을 사용하여 반강자성 재료인 MnIr의 회전이방성 특성으로 분석하였다.

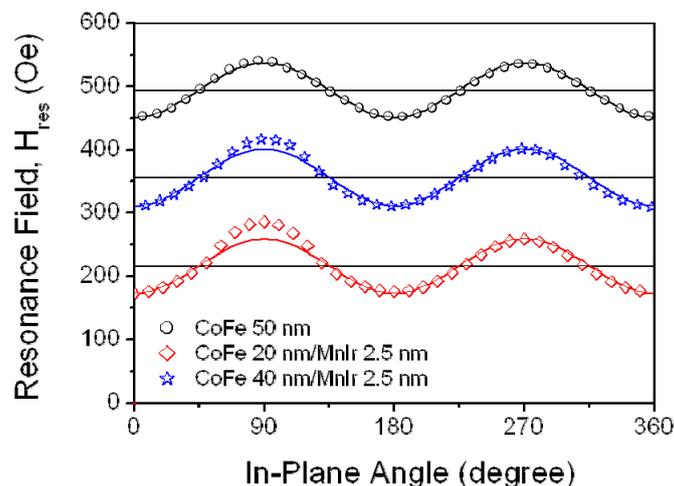


Fig. 1. Angular dependence of H_{res} in CoFe(t_f)/MnIr(2.5 nm) film at $t_f = 20$ and 40 nm.

Co 박막의 결정구조에 따른 two magnon 산란 특성 분석

김동영*, 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

상온에서 증착한 면심입방(FCC)구조를 갖는 Co 박막은 기판온도를 증가시켜 증착하면 육방밀집(HCP) 구조로 결정구조가 바뀐다. 이러한 구조 변화에 따른 강자성 공명 신호의 선폭(ΔH_{PP})은 Co 원자층의 적층구조 변화의 영향을 받는다. 균일한 자성 재료의 선폭은 Gilbert 감쇠 상수 α 와 관련되지만, 적층 구조가 다른 경우에는 국부적인 적층 변화가 국부적인 결함으로 작용하여 스핀파의 산란에 영향을 미치게 된다. 자성 재료 내부에서 생성된 스핀파는 재료 내에 존재하는 결함들에서 산란을 일으켜 선폭을 증가 특성은 two magnon 산란으로 설명되고 있다[1,2]. 본 연구에서는 결정구조가 다른 Co 박막의 자기장 각도에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였으며, 강자성공명 자기장(H_{res})에 대한 이론적인 분석 결과를 토대로 선폭 증가에 영향을 미치는 TMS 특성을 분석하였다. Co (20 nm) 박막은 고진공 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 열산화막이 있는 Si기판 위에 기판의 온도(T_{sub})를 상온에서 600°C까지 변화시키면서 증착 하였다. 제작된 박막 재료의 자기장 세기 및 각도에 따른 강자성 공명 신호 및 선폭은 X-band용 FMR 측정 장치를 사용하였다.

Fig. 1은 Co 박막 재료에서 상온(RT)과 300°C의 기판온도에서 증착한 Co 박막 재료의 각도에 따른 ΔH_{PP} 변화 특성을 보인다. 상온에서 FCC를 구조를 갖는 Co 박막은 선폭이 작은 Gilbert 감쇠 상수에 의한 특성이 두드러지게 나타났다. 그러나 300°C에서 증착한 Co는 HCP와 FCC 구조가 혼합된 경우로 0과 180° 각도에서 선폭이 두드러지게 하였으며, 이러한 선폭의 증가 특성은 원자층의 구조 결함들에 의한 two magnon 산란 특성으로 분석하였다.

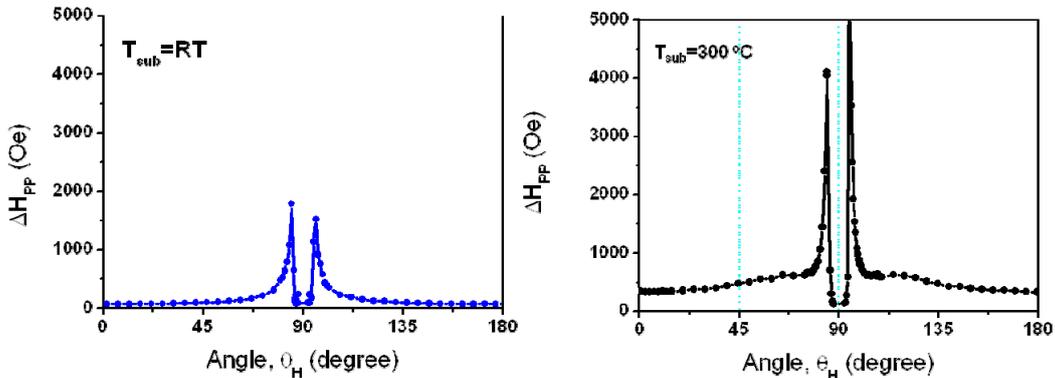


Fig. 1. Angular dependence of ΔH_{PP} in Co thin film at $T_{sub} = RT$ and 300 °C

참고문헌

- [1] J. Linder, et. al, Phys. Rev. B **80**, 224421 (2009).
- [2] P. Landeros, et. al, Phys. Rev. B **77**, 214405 (2008).

미세구조 변화에 따른 Ni 나노선 어레이의 자성특성 분석

Crystallographic orientation and microstructure dependent magnetic behaviors of arrays of Ni nanowires

Min Jun Ko^{1*}, Su Hyo Kim¹ and Young Keun Kim^{1†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

자성나노선은 외부 자장 하에서 자기적 센서, 작동기, 약물전달 시스템, 고열 요법 등 다양한 분야에서 높은 관심을 끌고 있다 [1]. 언급된 여러 분야에 효율적으로 이용되기 위해서는 목적에 맞는 자성 특성의 미세조절이 필수적이다. 나노 세공성 양극 산화 알루미늄 틀을 이용한 전기화학적 증착(electrochemical deposition)은 나노선 어레이의 형상을 쉽게 조절할 수 있고, 균일하게 대용량으로 합성할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 전기화학적 증착 방법을 통해서 합성된 Ni 나노선의 미세구조에 따른 자성특성은 많이 보고되지 않았다. 본 연구에서는 Ni 원자들의 배열, 결정립 크기에 중점을 두고 미세구조 및 자성특성을 이해하고자 한다. Ni 나노선 어레이는 전기화학적 증착방법으로 약 200 nm의 지름을 갖는 양극 산화 알루미늄 틀에서 합성되었다. 같은 전류밀도와 pH 조건에서, Ni 전구체와 완충용액을 조절하여 각기 다른 방향으로 우선 배열된 Ni 나노선 3종과, 전착 온도를 조절하여 결정립 크기에 차이를 보이는 Ni 나노선 3종을 합성하였다. Ni 나노선들의 구조는 엑스선 회절 분석기 (XRD), 주사전자현미경 (SEM), 투과전자현미경 (TEM) 및 진동시료자력계 (VSM)를 이용하여 분석하였다. 그림 1 (a)에서는 표준 Ni 분말의 엑스선 회절 패턴과 Ni 나노선의 회절 패턴을 비교하였고, 각각 [111], [200], [220] 방향으로 배열되어있음을 확인할 수 있다. 그림 1 (b)에서는 결정이 우선적으로 배열한 방향에 따라 다른 자기이력곡선을 보임을 확인할 수 있고, 단결정 면심입방구조에서의 자기 결정 이방성과 비슷한 경향을 보임을 관찰할 수 있다 [2]. 그림 2 (a)에 나타난 엑스선회절패턴 데이터에서 ‘Scherrer equation’을

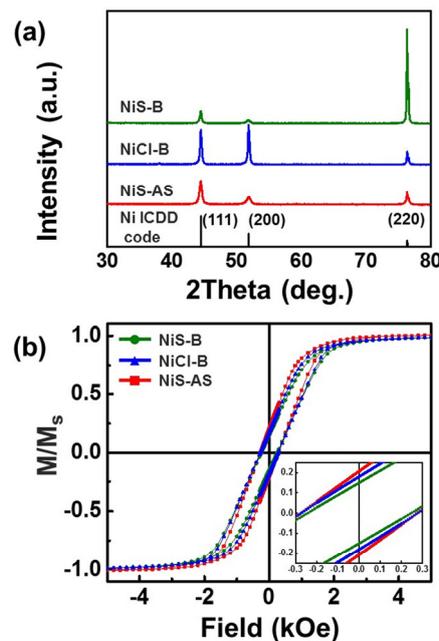


그림 1. 다른 결정방향을 갖는 Ni 나노선 어레이의 엑스선 회절 패턴 (a), 자기이력곡선(b)

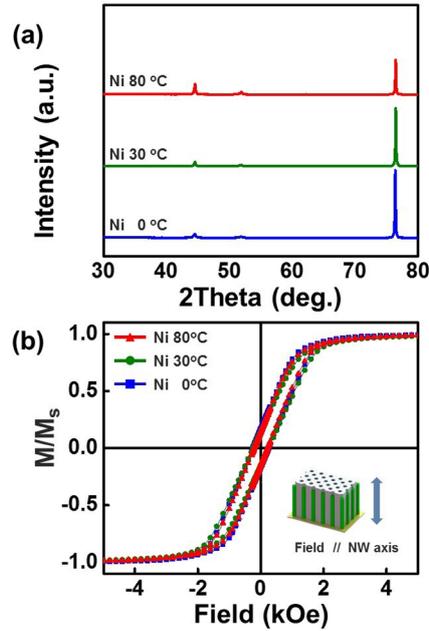


그림 2. 다른 결정립 크기를 갖는 Ni 나노선 어레이의 엑스선 회절 패턴 (a), 자기이력곡선(b)

이용하여 결정립 크기를 계산하였다. 섭씨 영도에서 전기화학적 증착한 Ni 나노선의 결정립 크기는 약 100.1 nm, 섭씨 80도에서 합성한 Ni 나노선의 결정립 크기는 약 374.7 nm로 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 그림 2 (b)에서 확인할 수 있는 것처럼 전기화학적 증착 온도가 증가함에 따라 평균 결정립 크기가 증가하였고, 그 결과 나노선 어레이의 보자력이 감소함을 알 수 있다. 보자력의 감소는, 결정립 크기가 증가함에 따라 나노선 내부에서 결정립계의 영역이 감소하게 되었고, 그 결과 내부 결함이 감소하게 되어 자구벽 운동과 자기 모멘트의 스위칭이 비교적 쉽게 일어나는 것이라고 판단된다.

참고문헌

- [1] J. H. Lee et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 3663 (2007)
- [2] S. Kaya et al., *Sci. Repts. Tohoku Univ.*, 17, 639 (1928)

CoFe 나노스프링의 미세구조와 자성특성 분석

Microstructure and Magnetic Properties of CoFe nanosprings

Da Yeon Nam^{1*}, Su Hyo Kim¹, Yoo Sang Jeon¹ and Young Keun Kim^{1*}

¹Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

자성나노스프링은 외부 자기장을 인가했을 때 액추에이터, 센서, 모터, 그리고 이동운동에 응용될 수 있다는 점에서 최근 다양한 연구가 진행되고 있다. 스프링 형상을 만들기 위해 침광각 침적(glancing angle deposition)법 감아올리는 방법(rolled up strategy), 그리고 템플릿을 기반으로 한 방법이 잘 알려져 있다 [1]. 이 중, 템플릿을 기반으로 한 전기전착법은 대량생산이 가능하고 비용이 적게 들며 쉽고 빠른 합성법이다. 최근 Pd으로 알루미늄 나노스프링(AAO)에 나노스프링을 합성한 연구가 발표되었고, 이와 같은 방법으로 합성한 Pd 나노스프링에 Ni을 증착시켜 자성특성을 부여한 연구도 진행되었다 [2, 3]. 그러나 이 방법은 추가적인 에칭 과정이 필요하고 스프링이 응용되기 위해 또 다른 공정을 거쳐야 한다. 우리는 이전에 발표되었던 방법과 달리 바나딜 이온과 아스코르브산을 적절히 첨가함으로써 CoFe 나노스프링을 한 번에 아주 간단하게 전기전착법으로 합성했다. 그림 1(a)는 AAO 안에 있는 나노스프링의 SEM 이미지, (b)는 AAO를 제거한 후의 TEM 이미지, (c)는 원소 맵핑(elemental mapping) 데이터로 Co가 55 at%, Fe이 45 at% 만큼 있는 것이 확인되었다. 그림 1에 나온 결과들에 따라 나노스프링이 합성된 것과 Co와 Fe이 나노스프링에 고르게 분포되어있는 것을 알 수 있다. 스프링의 두께는 50 nm 정도이고, 스프링 층간 간격은 10 nm 정도인 것을 알 수 있다. 그림 2는 상온에서 나노스프링 어레이의 자성특성을 측정된 자기이력곡선이다. 나노스프링 어레이는 연강자성의 성질을 보이고 있으며 나노스프링 어레이가 자기장에 수직방향과 수평방향이 유사한 이력곡선의 형태를 나타내고 있다.

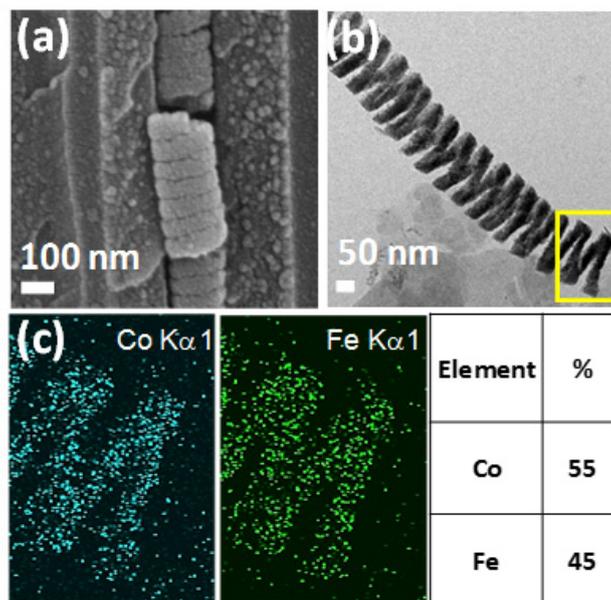


그림 1. (a) AAO안에서의 CoFe 나노스프링의 SEM 이미지, (b) AAO를 제거한 후 에탄올에 분산되어 있는 나노스프링의 TEM 이미지, 그리고 (c)elemental mapping 이미지

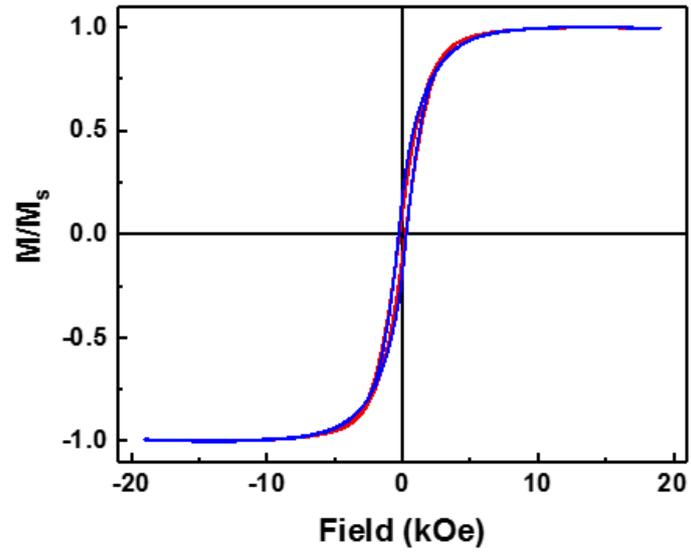


그림 2. 상온에서 CoFe 나노스프링 어레이의 자기이력곡선

참고문헌

- [1] L. Liu et al., *Nanoscale*, 6, 9355 (2014)
- [2] L. Liu et al., *Nano Lett.* 11, 3979 (2011)
- [3] J. Li et al., *Nanoscale*, 6, 9415 (2014)

Fe₃O₄@AlFe₂O₄ 나노 페라이트의 자기적 특성 및 온열효과 연구

최현경*, 김삼진, 김철성
국민대학교 물리학과

1. 서론

나노 자성입자는 바이오, 광학, IT 등의 다양한 분야에서 사용되고 있으며 이를 응용한 연구가 많이 수행되고 있다. 특히, 바이오 분야에서 온열효과를 이용한 암세포 사멸 방법은 방사선 치료와는 달리 많은 부작용을 감소시킬 수 있으며, 국부적인 부위에 선택적인 열을 발생시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Fe₃O₄를 core로 AlFe₂O₄를 shell로 갖는 core/shell 구조의 Fe₃O₄@AlFe₂O₄ 나노 자성입자를 제조하고 자기적 및 온열 특성에 대하여 분석하였다.

2. 실험방법

Fe₃O₄@AlFe₂O₄ 나노 자성입자를 고온열분해법으로 제조하였으며, 먼저 Fe₃O₄ 입자를 제조하기 위하여 Fe(acac)₃, Oleylamine, Oley acid, Benzyl ether를 혼합하여 실험을 진행하였다. 해당 솔루션은 200°C에서 30분 동안 유지 후 300°C에서 30분 동안 최종 반응시켜 core에 해당되는 Fe₃O₄를 제조하였다. 다음은 AlFe₂O₄를 shell로 만들기 위하여, Fe₃O₄ 나노 자성입자를 hexane에 분산시킨 솔루션과 Al(acac)₂, Fe(acac)₃, Oleylamine, Oley acid, Benzyl ether를 혼합한 후, 100°C에서 1시간 동안 열처리하여 hexane을 증발시켰다. 이후, 200°C에서 30분 유지 후 300°C에서 30분 동안 최종 반응시켜 Fe₃O₄@AlFe₂O₄ 나노 자성입자를 제조하였다. 제조된 나노 자성입자는 XRD 측정을 통하여 결정학적 구조를 확인하였으며, VSM, 뫼스bauer 측정을 통하여 거시적, 미시적인 자기적 특성을 확인하였다. 또한, Nano-magneTherm 장비를 이용하여 제조된 나노 자성입자의 발열특성을 확인하였다.

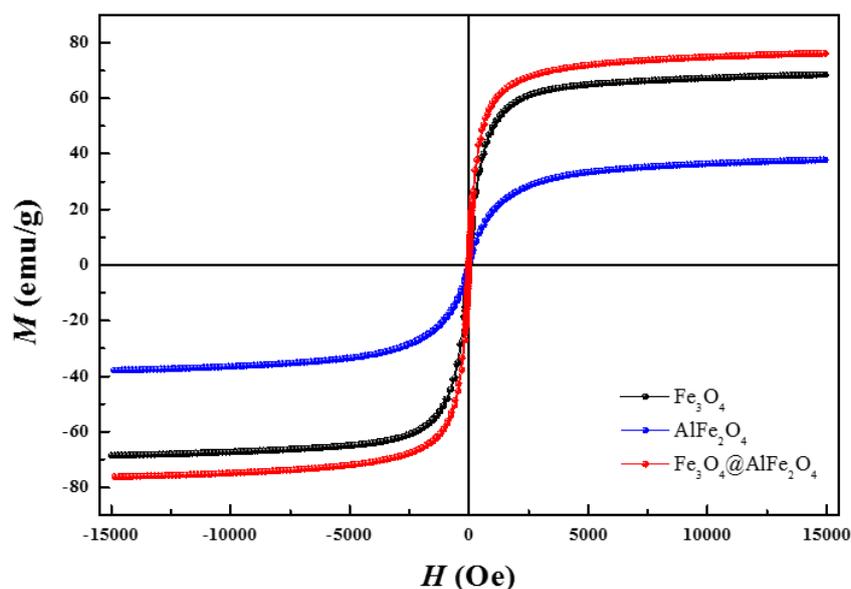


Fig. 1. Hysteresis loops measured Fe₃O₄, AlFe₂O₄ and Fe₃O₄@AlFe₂O₄ nanoparticles for 295 K.

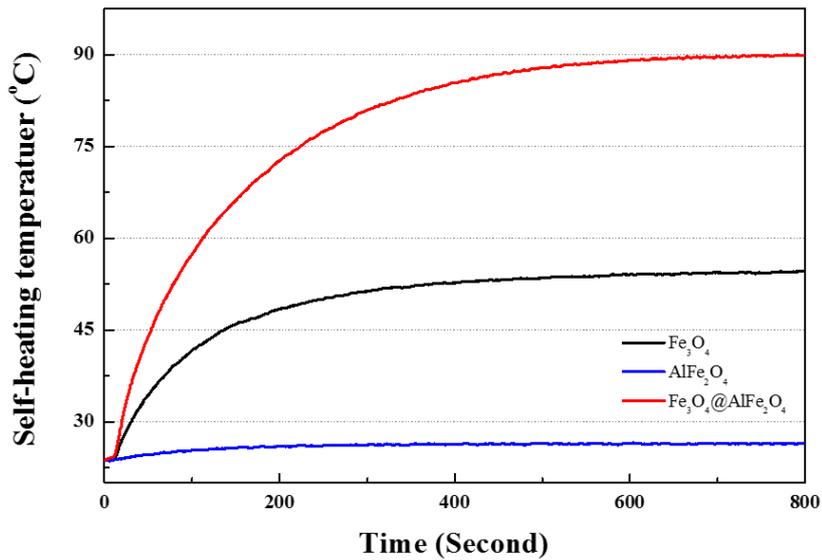


Fig.2. Self-heating temperature as a function of time for Fe₃O₄, AlFe₂O₄ and Fe₃O₄@AlFe₂O₄ nanoparticles.

3. 실험결과 및 고찰

고온열분해법으로 제조된 Fe₃O₄, AlFe₂O₄, Fe₃O₄@AlFe₂O₄ 나노 자성입자를 XRD로 측정한 결과, Cubic spinel 구조를 갖는 단일상으로 확인되었으며, Scherrer equation을 통한 나노 입자의 평균 크기는 대략 11.16, 7.12, 14.9 nm인 것으로 분석되었다. VSM을 이용한 거시적인 자기적 특성은 각각의 포화자화값이 68.4, 37.7, 76.1 emu/g으로, 보자력값이 7.4, 2.1, 9.1 Oe로 측정되었다. magneTherm 장비를 이용하여 250 Oe 자기장 하에 112 kHz 주파수에서 자기발열온도를 측정한 결과, Fe₃O₄와 AlFe₂O₄ 단일입자보다 코어/셸 구조의 Fe₃O₄@AlFe₂O₄ 나노 입자의 자기발열 온도 값이 89 °C로서 더 높은 발열 특성을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 코어/셸 구조의 향상된 자기적 및 발열 특성을 알아보기고자, 피스바우어 실험을 수행하였다. Fe₃O₄ 나노 자성 입자는 6라인으로 이루어진 A, B1, B2-site 총 3개의 부격자로 분석하였으며, AlFe₂O₄는 doublet 형태로 분석되었다. Fe₃O₄@AlFe₂O₄ 자성입자의 경우, 6라인 3세트로 분석되었다.

4. 참고문헌

- [1] K. P. McKenna, F. Hofer, D. Gilks, V. K. Lazarov, C. Chen, Z. Wang and Y. Ikuhara, *Nat. Commun.* 5, 5740, 2014.

Sol-gel 제조방법에 따른 CoFe₂O₄ 나노 페라이트 자기적 특성 연구

박정호^{1*}, 최현경¹, 이영배², 김삼진¹, 김철성¹

¹국민대학교 물리학과

²건국대학교 ICT융합부

1. 서론

CoFe₂O₄는 높은 다양한 자성특성으로 온열효과, 자성미디어, 광학적 장비등에 이용될 수 있다. 본 연구는 바이오, 광학, 자성물리 등 많은 분야에서 사용되는 CoFe₂O₄ 페라이트 물질을 졸겔법을 이용하여 350℃ 가열반응시간에 따른 결정형성과 자기적 특성을 확인하기 위하여 진행하였다. 본 실험은 졸겔(sol-gel)법을 이용하였고 가열반응시간에 따른 CoFe₂O₄의 자성특성에 대해 연구하였다

2. 실험방법

본 연구에서는 CoFe₂O₄ 나노 페라이트를 졸겔 법(Sol-gel)을 이용하여 시료를 합성하였다. 출발 물질은 순도 98 %의 Iron(III) nitrate nonahydrate (Fe(NO₃)₃ · 9H₂O), Cobalt(II) nitrate hexahydrate (Co(NO₃)₂ · 6H₂O)를 이용하였고, 용매로는 Ethylene glycol을 사용하였다. 혼합된 물질들을 300 rpm 속도로 40℃에서 녹인 후, 물질들의 가수분해를 유도하기 위해 80℃까지 승온시켜 점성을 가진 진한갈색의 gel이 형성 될 때 까지 반응시켰다. 얻어진 gel을 350℃에서 10분에서 60분까지 간격을 두고 열처리하였다. 각각 얻어진 최종 물질을 RIGAKU社 XRD를 이용하여 시료의 결정구조를 확인하였으며 Lakeshore 社의 VSM 7404 model과, ⁵⁷Co source (Rh-matrix) 등가속도 피스바우어 분광기를 이용하여 자기적 특성을 확인하였다.

Table. 1 Saturation magnetization (*M_s*) and coercivity (*H_c*) of CoFe₂O₄ with reaction time(10, 15, 30, 45, 60 min).

| Reaction Time (min) | 10 | 15 | 30 | 45 | 60 |
|------------------------------|------|------|-------|-------|------|
| <i>M_s</i> (emu/g) | 6.8 | 23.4 | 35.5 | 26.8 | 20.9 |
| <i>H_c</i> (Oe) | 25.3 | 92.6 | 595.4 | 249.3 | 70.2 |

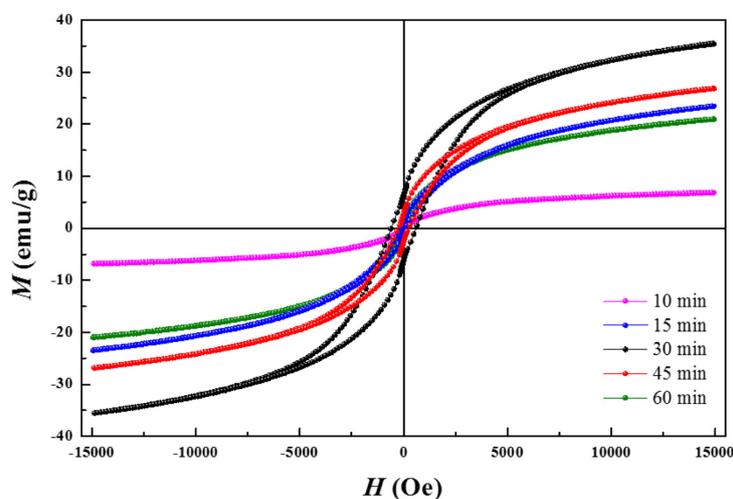


Fig. 1. Hysteresis loops measured CoFe₂O₄ with reaction time(10, 15, 30, 45, 60 min).

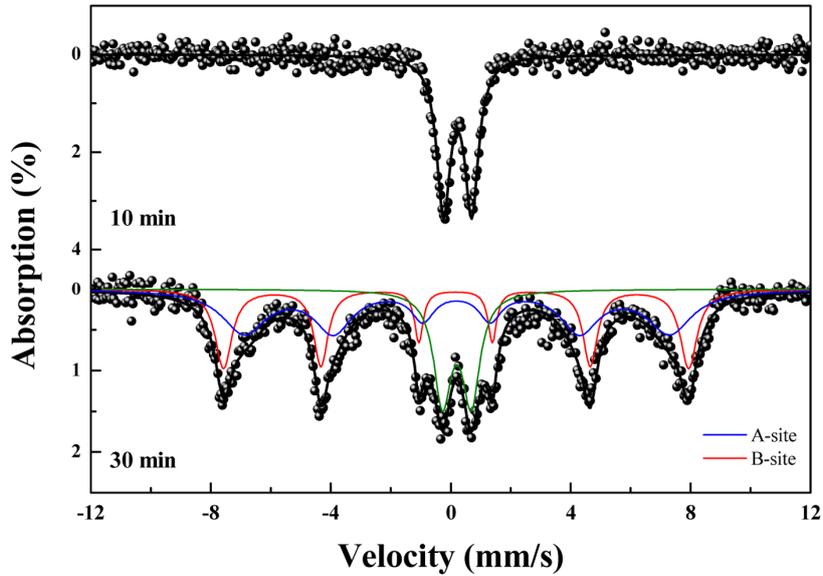


Fig. 2. Mössbauer spectra of CoFe_2O_4 with reaction time(10, 30 min).

3. 실험결과 및 고찰

Cubic 스피넬 구조를 갖는 CoFe_2O_4 자성입자를 반응 처리시간에 따른 졸겔(sol-gel)법으로 합성하였다. 상온에서 VSM을 측정한 결과, 반응 처리시간에 따른 시료의 M_s 값은 6.8, 23.4, 35.5, 26.8, 20.9 emu/g으로, 30분 열처리한 시료가 가장 높게 측정되었다. 뫼스바우어 분광 실험을 이용하여 열처리 시간에 따른 미세적인 자기적 특성을 연구하였다. 10분 열처리한 시료의 뫼스바우어 스펙트럼은 doublet 형태를 보였으며 반응 처리시간이 증가함에 따라 6라인과 doublet이 합쳐진 스펙트럼 형태를 보이는 것으로 확인되었다. 10분간 반응시킨 CoFe_2O_4 의 뫼스바우어 측정결과 값은 $\Delta E_Q = 0.94$ mm/s, $\delta = 0.22$ mm/s로 나타났으며, 30분간 반응시킨 CoFe_2O_4 는 A-site의 $H_{hf} = 441$ kOe, $\Delta E_Q = 0.94$ mm/s, $\delta = 0.22$ mm/s로 나타났으며, B-site는 $H_{hf} = 441$ kOe, $\Delta E_Q = 0.94$ mm/s, $\delta = 0.22$ mm/s로 나타났다. doublet은 $\Delta E_Q = 0.94$ mm/s, $\delta = 0.22$ mm/s로 분석되었다.

4. 참고문헌

- [1] R. A. Jasso-Terán, et al, J. Magn. Magn. Mater. 427, 241–244, 2017.

Microscopic Investigation of Hysteresis Loss of CoFeB/Pd Multilayers

L. Huang^{1*}, X.-P. Ma^{1,2}, S.-H. Lee¹, D.-T. Quach³, D.-T. Ngo⁴, T.-L. Phan⁵ and D.-H. Kim^{1†}

¹Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju, Korea

²College of Science, China Three Gorges University, Yichang, China

³Department of Physics, University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam

⁴Department of Micro- and Nanotechnology, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark

⁵Department of Physics and Oxide Research Center, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

[†]E-mail: donghyun@cbnu.ac.kr

We have investigated microscopic magnetic saturation process for a series of $[\text{CoFeB} (4\text{-\AA})/\text{Pd} (10\text{-\AA})]_n$ ($n = 2, 4, 8$ and 16) multilayers with a perpendicular magnetic anisotropy by means of magneto-optical Kerr microscopy [1,2,3]. Under a cyclic external field during the major hysteresis loop measurement, we find that the magnetic hysteresis loss shows a strong tendency of logarithmically increasing with respect to the repeat number n of multilayer number. By quantitative analysis of magnetic domain patterns at the nucleation state (represented as black in the following figure), it has found that the magnetic domain areas was found to increase exponentially with respect to n , compared to the domain area for the case of $n = 2$ sample.

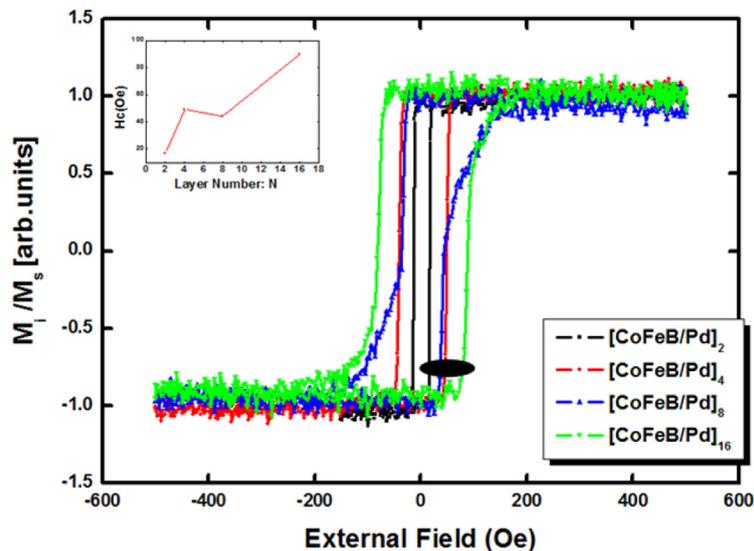


Fig. 1. The magnetic hysteresis loops of samples with exponentially increased multi-layer numbers.

References

- [1] R. Sbiaa, M. Ranjbar and J. Åkerman, J. Appl. Phys. 117, 17C102 (2015).
- [2] D.-T. Ngo, D.-T. Quach, Q.-H. Tran, K. Mohave, T.-L. Phan, and D.-H. Kim, J. Phys. D 47, 445001 (2014).
- [3] D.-T. Quach, D.-H. Kim *et al.*, J. Kor. Phys. Soc, 69, 72 (2016).

전해도금 방법으로 제작한 Ni-Fe 연자성 합금의 특성 분석

김석훈^{1*}, 이정우¹, 박종환¹, 최호준¹, 신세희¹, 노재철¹, 서수정¹

¹성균관대학교 신소재공학부

1. 서론

전해도금은 원하는 설정한 전류 밀도 및 도금 시간에 따라 원하는 두께 만큼 금속 박막을 제조할 수 있다는 장점이 있다. 또한 사용 장비가 다른 공정에 비해 단순하며, 원하는 조성으로 도금액을 제조할 경우 목표하는 금속 조성의 박막을 얻을 수 있는 이점이 있다. 본 연구에서는 이러한 특징을 가지는 전해 도금 방법을 이용하여 제작한 Ni-Fe 연자성 합금 박막의 물성 분석을 실시하였다.

2. 실험방법과 결과

전해도금은 스테인리스 강 전극을 음극으로 하여 실시하였으며, 양극으로는 백금을 이용하였다. 전해도금 후 제조한 박막은 음극 전극에서 분리하여 물성평가를 실시하였다. 제조한 박막의 결정구조를 확인하기 위하여 XRD 분석을 실시하였으며, SEM을 통한 표면 형상 분석, EDS를 통한 박막의 조성 분석, 박막의 표면 전기전도도를 4-point probe를 통하여 확인하였다. 또한 Ni-Fe 합금 박막의 자성 특성을 확인하기 위하여 투자율 측정을 실시하였다.

3. 고찰

전해도금 방법을 이용하여 제작한 Ni-Fe 합금 박막의 조성 변화에 따른 특성 변화를 분석하였다. 도금액 이온 조성의 변화에 따라 합금 박막의 결정구조 및 전기전도도에서 차이가 보였다. 니켈 함량의 변화에 따라 표면 전기전도도의 변화가 나타났으며, 박막의 투자율 또한 조성의 변화에 따라 다르게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서 제작한 Ni-Fe 합금 박막은 연자성체의 특성을 나타냈다. 투자율은 1GHz까지 측정을 실시하였으며, MHz 대역의 저주파 대역에서 투자율이 우수하게 나타났다. 니켈 철 함량 조성 비율에 따른 투자율 변화를 분석하였으며, 본 연구를 통해 최근 주목받고 있는 전자파 차폐 재료의 흡수체로서의 응용 가능성을 확인하였다.

5. 참고문헌

- [1] 최종구 · 황도근 · 이상성 · 이장로(2009), 퍼멀로이와 코네틱 박막의 연자성 특성 비교, 『한국자기학회지』 19(4), 2009.8, 142-146
- [2] 예길춘 · 김용웅 · 문근호(1996), Fe-Co-Ni합금박막의 조성 및 자기적 성질, 『한국표면공학회지』 29(3), 1996.6, 195-202

Effect of Metalloid Ge Addition on the Magnetic Properties of Fe-based alloys

Sumin Kim^{1*} and Haein Choi-Yim¹

¹Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

1. Introduction

Magnetic materials play an increasingly important role in modern industry as essential components of commercial products. Fe-based amorphous alloys have attracted tremendous attention due to their excellent soft magnetic properties including low coercivity and high saturation magnetization. It is necessary to develop Fe-based amorphous alloys with high saturation magnetization using low cost constituent elements. A series of Fe-P-C alloys, which exhibit good soft magnetic properties and low cost have been developed. It has been demonstrated that the contents of metalloid elements play an important role in the glass-forming ability and properties of the Fe-based amorphous alloys. The purpose of this work is to investigate the effects of Metalloid Ge substitution for P on the magnetic properties of the Fe-P-C alloys.

2. Experiment

Alloy ingots were prepared by induction melting mixtures of high purity Fe (99.95%), Ge (99.999%), C and industry-grade pre-alloys of Fe₃P (99 %) in an argon atmosphere. Ribbons of each composition were fabricated using the melt spinning under argon atmosphere at a roll speed of 56.3 m/s. Phase structures of the specimens were identified by X-ray diffraction with Cu-K α radiation. Thermal property of melt-spun alloys was evaluated with a differential scanning calorimetry at a heating rate of 0.33 K/s under an argon flow. The saturation magnetization and coercivity were measured by a vibrating sample magnetometer and a dc B-H loop tracer, respectively. Additionally, the density of the specimens was determined using a helium pycnometer.

3. Result and discussion

For the Fe-metalloid type amorphous alloys, the valence electrons (sp electrons) of the metalloid elements greatly influence the saturation magnetization of them. Generally decreasing sp electrons results in higher saturation magnetization. The numbers of sp electrons in P, C and Ge are 5, 4 and 4, respectively. Thus the substitution of metalloid element Ge for P is expected to increase the saturation magnetization of the alloys.

4. References

- [1] P. Duwez, S.C.H. Jin, J. Appl. Phys. 38 (1967) 4096-4097.
- [2] M. Shi, Z. Liu, T. Zhang, J. Mater. Sci. Technol. 31 (2015) 493-497.
- [3] S. Meng, H. Ling, Q. Li, J. Zhang, Scripta Mater. 81 (2014) 24-27.

Thermal, Mechanical and Magnetic Properties of the Co-Fe based Alloys for various Fe/Co Ratios

Jiyun Oh* and Haein Choi-Yim

Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

1. Introduction

Many soft magnetic alloys have been researched as promising materials. Especially, amorphous alloys can be good candidates in several application industries therefore many research groups have studied various combinations of alloys recently. [1-3] Adding the 4 at. % Ta alloying to the Co-Fe composition enhances the glass forming abilities (GFA) [4]. Our group has studied the thermal and the magnetic properties of Co-Fe based alloys by making a small quantity of Mo, Nb, Cr and Ta addition [5-7]. In this research, we examined the thermal and magnetic properties of the $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{72}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Ta}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) alloys more specific than previous study.

2. Experiment

In this examination, multi-component ingots were made of pure elements and total mass is 6 g. Co-Fe-B-Si-Ta alloy systems were made by vacuum arc melting furnace under argon atmosphere and re-melted at least six times for homogeneity of alloys. The ribbons were rapidly solidified by a copper roller vacuum melt-spinning method. After preparing of ribbons, we identified the thermal, mechanical and magnetic properties of alloys by using various measuring equipment. First, the structure of alloys is confirmed by X-ray diffraction (XRD). Second, the thermal properties, such as crystallization temperatures (T_x) are measured by using differential scanning calorimeter (DSC). Third, mechanical properties are measured by using Thermo Mechanical Analyzer (TMA) and Nanoindentation. Finally the magnetic properties are established by vibrating sample magnetometer (VSM) and dc B-H loop tracer.

3. Result and discussion

In this study, we conducted more research on Co-Fe-B-Si-Ta system than earlier research in order to study deep into the thermal and magnetic properties of Co-Fe based alloys. In XRD results, the curves have broad hump trace of amorphous phase. The thermal stabilities of melt-spun ribbon samples are revealed from the increase of the T_x and the detection of two exothermic peaks. The mechanical properties of the melt spun ribbons are indicated by nanoindentation hardness ($H_{\text{nanoindentation}}$) and elastic modulus (E). The soft magnetic properties of the Co-Fe-B-Si-Ta ribbons are indicated by the shape of hysteresis loop. So these melt-spun ribbons are suitable for various applications which require the good thermal stability and good soft magnetic properties.

4. References

- [1] Y. Han, A. Inoue, F.L. Kong, C.T. Chang, S.L. Shu, E. Shalaan, and F. Al-Marzouki, *J. Alloy. Compd.* 657, 237 (2016).
- [2] O. Gutfleisch, M.A. Willard, E. Bruck, C.H. Chen, S.G. Sankar, and J.P. Liu, *Adv. Mater.* 23, 821 (2011).

- [3] K. Suzuki, N. Kataoka, A. Inoue, A. Makino, and T. Masumoto, *Mater. T. JIM.* 31, 743 (1990).
- [4] C.L. Zhu, Q. Wang, Y.M. Wang, J.B. Qiang, and C. Dong, *J. Alloy. Compd.* 5045, S34 (2010).
- [5] H. Jo, and H. Choi-Yim, *J. Korean Phys. Soc.* 60, 477 (2012)
- [6] H. Jo, and H. Choi-Yim, *J. Korean Phys. Soc.* 61, 460 (2012)
- [7] H. Jo, B Han and H. Choi-Yim *J. Korean Phys. Soc.* 62, 523 (2013)

Analysis of Thermal and Magnetic Properties by Fe/Co ratio to Fe-based Amorphous Alloys

Seoyeon Kwon* and Haein Choi-Yim

Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

1. Introduction

Fe-based amorphous alloy systems have attracted interest for the low material cost, and good soft magnetic properties [1-3]. Particularly, improving the soft magnetic properties and glass forming ability of Fe-based amorphous alloy systems has been studied for the several applications [4,5]. These (Co, Fe)-B-Si alloy system was developed in 1974 and used in field of application development for its good soft magnetic properties and high-strength compared with other Fe-B-Si systems [6,7]. Therefore, we have selected this system. Adding Mo in the Fe-B-Si systems enhances glass-forming ability (GFA) and thermal stability. In this study, we researched on effects of replacing Co by Fe and the part of small Mo additions, in Fe-Co-B-Si-Mo alloy system. We examined the thermal and magnetic properties of $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{72}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) by amorphous ribbons in detail.

2. Experiment

$(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{72}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) alloys were prepared by an arc-melting furnace with high purity metals under Ti-gettered Argon atmosphere. In addition, these ingots were re-melted four times respectively, in order to be homogeneous alloys. Then, these samples, ribbons with width of 3mm were prepared by single copper roller melt spinning machine in 39.27m/s. After processing of ribbons, we identified ribbons' thermal and magnetic property by multiple measuring equipment. The structure of amorphous is confirmed by X-ray diffraction (XRD). We conducted an analysis of the results by differential scanning calorimeter (DSC) to identify the thermal properties such as the crystallization temperature (T_x). The saturation magnetization (M_s) at room temperature was measured by vibrating sample magnetometer(VSM) with a maximum applied field of 800kAm⁻¹.

3. Result and discussion

In this research, we performed diverse study on Co-Fe-B-Si-Mo system in order to identify that adding Mo element enhances glass-forming ability and thermal stability. Also we want to study into the thermal and the magnetic properties for Co-Fe based amorphous alloys with Mo in depth. $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{72}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) amorphous ribbons showed the crystallization temperature (T_x) were decreased with decreased the ratio of Co. Furthermore, the amorphous ribbons of these composition exhibited good soft magnetic properties. Thus Fe/Co ratio in $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{72}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_4$ alloys will be related with the thermal stability and soft magnetic properties and the addition of a small quantity of Mo have beneficial effects on magnetic properties.

4. References

- [1] A. Inoue, B. L. Shen, and C. T. Chang, Acta Mate. 52, 4093 (2004).
- [2] B. L. Shen, A. Inoue, and C. T. Chang, Appl. phys. Lett. 85, 4911 (2004).

- [3] B. L. Shen, C. T. Chang, T. Kubota, and A. Inoue, *J. Appl. phys.* 100, 013515 (2006).
- [4] A. Inoue and A. Makino, *Nano. Mater.* 9, 403 (1997).
- [5] A. Inoue, *Mater. Sci. Eng.* 304, 1 (2001).
- [6] K. Hayashi, M. Hayakawa, Y. Ochiai, H. Matsuda, W. Ishikawa, and K. Aso, *J. Appl. Phys.* 61, 2983 (1987).
- [7] A. Datta and C. H. Smith, *Rapidly Quenched Metals*, vol. eds. S. Steeb and H. Warlimont, North-Holland, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo (1985), p. 1315.

Ca-P 코팅된 Fe powder의 자기적 특성

신세희^{1*}, 김태유^{1,2}, 박종환¹, 김석훈¹, 최호준¹, 이경섭¹, 서수정^{1,2*}

¹성균관대학교 신소재공학부

²성균관대학교 정보통신용 신기능성소재 공정연구센터

1. 서론

soft magnetic composites는 기존의 laminated된 강판에 비해 3차원 구조 형상이 용이할 뿐 아니라 절연막의 종류, 운할제의 함량 및 압력, 열처리 등 제조공정에 따라 다양한 결과를 나타내기 때문에 많은 연구가 진행중에 있다.

2. 실험방법과 결과

106um~150um size의 Fe powder와 Calcium Acetate, ammonium phosphate, Ammonium hydroxide를 농도와 시간별로 교반시켜 Ca-P coating을 실시 하였다. FTIR 과 SEM-EDS를 이용하여 Fe powder표면에 절연막이 형성됨을 확인하였고, BH meter, impedance analyzer, 4 point probe를 이용하여 절연코팅 후 자기적 특성이 향상됨을 확인하였다.

3. 고찰

Fe powder표면에 절연 코팅을 실시하고 절연 코팅된 powder를 이용해 core를 제작하여 아무 처리도 안된 Fe powder에 비해 자기적 특성이 향상되었다. 교반시간에 비례하여 코팅의 두께가 두꺼워 지고 자기적 특성은 향상되지만 밀도특성은 저하된다. core의 밀도와 자기적 특성사이의 접점을 찾는 것이 중요할 것으로 생각된다.

4. 결론

Fe powder표면의 성분을 FTIR과 EDS를 분석한 결과 coating두께에 농도와 교반 시간(반응시간)이 영향을 미침을 확인하였고, 교반 시간을 변수로 실험을 한 결과 교반(반응) 시간에 비례하여 코팅 두께가 증가했으며 비저항 및 자기적 특성이 향상됨을 확인하였다. 결론적으로 코팅분말을 제조한 후 연자성 코어를 제조할 경우 고절연화가 가능하다는 것을 확인했다.

5. 참고문헌

- [1] 이규석, 차현록, 윤철호, 정태욱, 모터 코어용 연자성체의 열처리 특성, 『대한전기학회 학술대회 논문집』 2006.10, 9-11
- [2] H. Shokrollahi, K. Janghorban, Soft magnetic composites, J. Mater. Process. Technol. (2007) 1-12.

Magnetic and Thermal Properties in the Fe-based amorphous alloy with Zr and Nb

Garam Yoo^{1*} and Haein Choi-Yim¹

¹Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

1. Introduction

It is widely known that Fe-based amorphous alloys have good soft magnetic properties which cannot be gained for crystalline magnetic alloys. Besides, the addition of Co improves soft magnetic properties such as high saturation magnetization (M_s), low coercivity (H_c), and glass forming ability (GFA) in Fe-based amorphous alloys. It is well known that metalloids (such as B, P, and Si) play an important role in the GFA in Fe-based amorphous. In this study, we added B to improve the GFA and thermal stability. Similar to the B, Zr improves thermal stability. The famous alloy system with nanocrystalline microstructures known as HITPERM, Fe-Zr-B alloy, is likely to exhibit high M_s and low H_c . Furthermore, we added small Nb to improve the structural properties and the thermal stability.

The purpose of this work is to find alloys that have good soft magnetic properties such as high M_s , low H_c by analyzing magnetic properties in (Fe, Co)-(Zr, Nb)-B alloys with appropriate machines.

2. Experiment

For this research, ingots which weigh 6g were prepared by using arc-melting under a Ti-gettered Ar atmosphere mixture of Fe slug (99.95%), Co slug (99.95%), Zr pieces (99.95%), Nb slug (99.95%), and B pieces (99.5%). Each of them transformed into ribbons with width of 2mm by melt-spinning under Ar atmosphere at a wheel speed of 56.3 m/s. The amorphous structure with no crystalline peak could be confirmed by X-ray diffraction (XRD) using a Cu-K α radiation. Thermal properties were obtained by Differential scanning calorimeter (DSC). Magnetic properties were obtained by vibrating sample magnetometer (VSM).

3. Result and discussion

In this study, we analyzed the magnetic and thermal properties of the (Fe, Co)-(Zr, Nb)-B alloys, and found the optimized composition that has good soft magnetic and thermal properties. HITPERM alloys (such as Fe-Zr-B system) have high M_s and low H_c . Therefore the addition of Zr and Nb in Fe-based amorphous alloys is expected to have good magnetic and thermal properties.

4. References

- [1] K. Suzuki, N. Kataoka, A. Inoue, A. Makino and T. Masumoto, Material Transactions, JIM 31, 743 (1990).
- [2] Baolong Shena and Akihisa Inoue, Appl.Phys. Lett. 85, 4911 (2004)
- [3] Wenbiao Zhang, Qiang Li,a, and Haiming Duana, Journal of Appl. Phys. 117, 104901 (2015)
- [4] Sumin KIM and Haein Choi YIM, JKPS, 67, 2120 (2015)

Fe-Si 기반 magnetic alloy core의 고주파 대역 power inductor 특성에 대한 연구

김덕현*, 이석희, 김현성, 이보화†

물리학과 & 산화물 연구센터, 한국외국어대학교

최근 스마트폰 구동전류가 상승하고 소형화 됨에 따라, power inductor-용 core 재료 또한 높은 투자율과 큰 포화자화를 갖는 magnetic metal composite으로 빠르게 대체되고 있다. 하지만 magnetic alloy의 낮은 resonance frequency와 resistivity로 인해 고주파수 대역에서 성능이 저하 되는 특성이 보고되고 있다. Carbonyl iron powder (CIP)는 투자율이 주파수 및 자기장 변화에 대해 안정적이고, 낮은 eddy current loss 및 hysteresis loss를 나타내어 radio frequency대역 application의 원료로 사용되고 있다. 이에 우리는 Fe-6.5Si에 수 micro size의 CIP를 혼합한 (10-x)Fe-6.5Si-(x)CIP core의 고주파수 대역 power inductor 성능에 대해 연구하였다. 질량비에 따라 혼합한 Fe-6.5Si과 CIP mixture에 epoxy resin을 혼합한 후, pressing 및 열처리를 통해 toroidal 형태의 core를 제작 하였다. 제조한 core의 $M(H)$ 와 $\mu(f)$ 측정을 통해 포화자화 및 고주파수 대역에서의 투자율 변화를 확인 하였으며, B-H analyzer 측정을 통해 조성에 따른 core loss 변화를 확인 하였다. 또한 SEM을 이용한 core body의 cross-sectional image 측정을 통해 core의 micro structure와 고주파수 대역 성능간의 연관관계에 대해 연구하였다.

Effect of Boron Additions on Magnetic Properties of Fe-based Amorphous alloys

Jihye Kim^{1*}, Sumin Kim¹, Bo Kyeong Han¹ and Haein Choi-Yim¹

¹Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

1. Introduction

Fe-based ferromagnetic metallic glasses are known as excellent soft magnetic properties including high saturation magnetization (M_s), low coercivity (H_c), and high permeability. Also, Fe-based alloys have low material cost and ultrahigh strength, and high corrosion resistance [1]. In general, it is well known that the metalloid contents improve to glass forming ability (GFA) [2]. In particular, the suitable ratios of B to transition metals leads to the enhancement of its GFA and thermal properties of amorphous alloys. It is important to find optimization component between B and transition metal, because the addition of transition metal component lead to brittle. In this study, we reported the soft magnetic properties of $Fe_{(87-x-y)}Co_yTi_7Zr_6B_x$ ($x=2, 4$ and $y=20, 25, 30, 35, 40$) alloys [3,4].

2. Experiment

The ingots of $Fe_{(87-x-y)}Co_yTi_7Zr_6B_x$ ($x=2, 4$ and $y=20, 25, 30, 35, 40$) alloys were prepared by vacuum arc melting furnace under argon atmosphere and re-melted four times for homogeneity of alloys. After the arc melting process, ingot re-melted and rapidly cooled by melt spinning at a wheel speed of 56.3m/s. Then, we obtain the ribbons 2 mm in width and 20-30 μm in thickness. Then, we measure the magnetic and thermal properties via various measuring equipment. The structure of amorphous phase was established by X-ray diffraction (XRD). The saturation magnetization (M_s) at room temperature was established by vibrating sample magnetometer (VSM). Thermal properties related of the glass transition temperature (T_g), crystallization temperature (T_x) and supercooled liquid region ($\Delta T_x = T_x - T_g$) was measured by using differential scanning calorimeter (DSC) and thermo mechanical analysis (TMA).

3. Result and discussion

In this experiment, we studied on the effect of Boron additions on magnetic properties of Fe-based amorphous alloys. The ribbons of $Fe_{(87-x-y)}Co_yTi_7Zr_6B_x$ ($x=2, 4$ and $y=20, 25, 30, 35, 40$) showed fully amorphous phase in the XRD patterns except for $Fe_{45}Co_{40}Ti_7Zr_6B_2$ ($x=2$ and $y=40$). From the hysteresis loop of these amorphous ribbons, the highest value of M_s was 1.59 T. The DSC and TMA curves notice the GFA of these alloys. The largest values of ΔT_x were obtained as the B content of 4 at.%. This means, the B contents are influence on ΔT_x . In conclusion, the Fe-Co-Ti-Zr-B alloys have excellent soft magnetic properties and it can be expected to improve their properties after annealing process.

4. References

- [1] P. Duwez and S. C. H. Lin, J. Appl. Phys. **38**, 4096 (1967).
- [2] M. Mitera, M. Naka, T. Masumoto, N. Kazama, and K. Watanabe, Phys. Stat. Sol. (a) **49**, 163 (1978).
- [3] B. Han, S. Kim, and H. Choi-Yim, J. Nanosci. Nanotechno. **16**, 1 (2016).
- [4] S. Kim, B. K. Han, D. T. Quach, D-H. Kim, Y. K. Kim, and H. Choi-Yim, Curr. Appl. Phys. **16**, 515 (2016).

Spin transistor using exchange-biased ferromagnetic electrodes in an InAs quantum well

Youn Ho Park^{1,2*}, Jun Woo Choi¹, Joonyeon Chang¹, Heon-Jin Choi² and Hyun Cheol Koo^{1,3*}

¹Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, Republic of Korea

²Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

³KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology,

Korea University, Seoul 02481, Republic of Korea

*E-mail address: hckoo@kist.re.kr

The spin field effect transistor (spin-FET), proposed by Datta and Das [1], is one of the most popular concepts for next generation devices due to low power consumption, high speed, and nonvolatility. The main operation of spin-FET is that the control of spin-precession angle by a gate electrode in a semiconductor quantum well [2]. In this device, the spin-polarized current is injected from a ferromagnetic source and detected by the other ferromagnetic drain. While travelling spin polarized current from the injector to the detector in a semiconductor quantum well, the angle of spin-precession angle is decided by Rashba field which is controlled by a gate electrode. To be utilized for the logic gate, we should operate spin transistor without external magnetic field and parallel- and antiparallel types of spin-FET (P-ST and AP-ST) which can replaced conventional *n*- and *p*-MOS.

The Rashba field arises along the *y*-axis, so the magnetization direction of source and drain should be along the *x*- or *z*-axis, i.e. perpendicular to the Rashba field (B_{Ry}), to induce spin precession. In this experiment, we choose the ferromagnetic electrodes (FM) with magnetization along the *x*-axis. The lateral sizes of FMs are $0.5 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ and are $0.8 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, respectively. Since the shape anisotropy would lead to a FM magnetization along the *y*-axis, we employ an exchange bias field along the *x*-axis using $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$ bilayers. During the sputtering of $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ and $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$, we applied magnetic fields of +20 mT and -20 mT along the *x*-axis, respectively. Due to interfacial exchange interaction between the $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ and $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$, the first interfacial layer of $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$ has the same magnetization direction as the $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ layer. The antiferromagnetic order of $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$ causes subsequent layers to have alternating magnetizations. The antiferromagnetic order is very stable, so that the ferromagnetic $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ layer retains its magnetization direction even without a magnetic field. The ferromagnet/anti-ferromagnet bilayers have +35.5 mT and -36.3 mT of exchange bias. We also calculated the spin transistor operation using those parallel and antiparallel types spin-FET.

References

- [1] S. Datta et al., Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990).
- [2] H. C. Koo et al., Science, 325, 1515 (2009).

Fe nano powder를 첨가한 soft magnetic composite의 조성비에 따른 에너지 손실 변화에 관한 연구

이석희*, 김덕현, 김현성, 이보화†

물리학과 & 산화물연구센터, 한국외국어대학교

최근 전자기기의 주요 부품인 DC-DC converter 및 PMIC의 구동전류가 높아짐에 따라, 고전류에서 동작 가능한 금속자성분말 기반의 파워 인덕터에 대한 연구가 계속되고 있다. 하지만 금속자성분말의 경우 교류 자장의 주파수가 상승함에 따라 와전류 손실이 급격하게 증가하여 에너지 손실이 커지는 단점을 가지고 있다. 와전류에 의한 에너지 손실을 줄이기 위해, 비저항이 큰 금속 nano powder를 첨가한 SMC core에 대한 연구가 시도 되고 있다. 본 연구에서는 Fe nano powder 첨가량에 따른 soft magnetic core(SMC)의 에너지 손실 변화에 대해 연구 하였다. SMC는 평균입경이 38~45 μm 인 Fe-6.5Si를 조분으로, 200nm인 Fe nano powder를 미분으로 사용하여 제작하였다. 조성비에 따른 투자율 변화는 impedance analyzer를 이용한 $\mu(f)$ 측정을 통해 확인 하였으며, 에너지 손실 변화는 B-H analyzer를 이용한 P_c 측정을 통해 연구, 분석 하였다.

Empirical correlation between Dzyaloshinskii-Moriya interaction and Work function in Pt/Co/X trilayers

Yong-Keun Park^{1,2*}, Joo-Sung Kim¹, Dae-Yun Kim¹, Yoon-Seok Nam¹, Min-Ho Park¹,
Byoung-Chul Min², and Sug-Bong Choe^{1†}

¹Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-747, Republic of Korea

²Center for Spintronics, Korea Institute of Science & Technology, Seoul 02792, Republic of Korea

Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) has been extensively studied nowadays due to academic curiosity as well as technological opportunity toward spin-based nanodevices. It is now well known that the DMI appears at interfaces with inversion symmetry broken structure [1,2]. However, detailed relation between the DMI strength and the nature of the interface remains elusive. Here, we examine an empirical relation between the DMI strength and the work function W of the materials at interfaces, since a large difference of the work function between the interfacial materials may generate a large DMI due to a large electric field at the interface. For this examination, we fabricate a series Pt/Co/X (X =Pt, Pd, Au, Ru, Al, Ta, W, Ti, and Cu) films. The films basically have the same structure except the upper layer material X and thus, one can compare the contribution from the upper Co/X interfaces among the films. Figure 1 plots measured H_{DMI} , DMI-induced effective magnetic field, with respect to W , where W is from the material table in Ref. [3]. The figure shows a clear correlation between H_{DMI} and W . Though the exact value of H_{DMI} in real films largely depends on the crystalline structures and orbital mixing, the present observation provides a good guideline to design the film structure for optimal H_{DMI} .

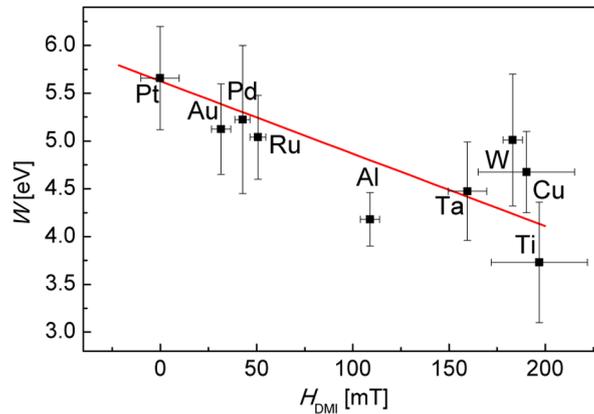


Fig. 1. Plot of the work function with respect to measured H_{DMI} , for Pt/Co/X films with various materials X as denoted in the figure.

References

- [1] I.Dzyaloshinsky, J.Phys.Chem.Solids 4,241(1958).
- [2] T.Moriya, Phys.Rev. 120, 91(1960).
- [3] David R. Lide, Handbook of Chemistry and Physics, 75th ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 1994.

The Effect of Annealing on Magnetic Properties of Co-based Amorphous Alloy Ribbons

Sumin Kim^{1*}, and Haein Choi-Yim¹

¹Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Republic of Korea

1. Introduction

Amorphous alloys are being developed for use in motors, sensor, and electromagnetic shielding applications. Especially, Co-based amorphous alloys with nearly zero magnetostriction are the suitable characteristic for magnetic cores. However, amorphous structure is in a metastable state due to rapid quenching, so further annealing treatment is necessary to optimize magnetic properties. The effect of annealing has been investigated for a number of amorphous alloys and been found that the annealing cause reduction of coercivity and losses. In this study, the annealing effect on the magnetic properties of Co-based amorphous ribbon was investigated

2. Experiment

Alloy ingots with the composition $\text{Co}_{72}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Cr}_4$ and $\text{Co}_{64.8}\text{Fe}_{7.2}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Cr}_4$ were prepared by arc-melting mixtures of high purity constituent elements under a Ti-gettered argon atmosphere. Amorphous ribbons with 2 mm width and 20-30 μm thickness were produced by melt spinning in an argon atmosphere. The melt-spun ribbons were subjected to annealing treatments at various temperatures below glass transition temperature for 15 minutes in a vacuum. The composition and structure of ribbons identified by X-ray diffraction with Cu-K α radiation. Thermal stability associated with the crystallization temperature and glass transition temperature were measured using a differential scanning calorimeter and thermomechanical analysis under a flowing argon atmosphere. The magnetic properties including saturation magnetization and coercivity at room temperature were measured in a maximum applied field of 20,000 Oe by using a vibrating sample magnetometer with field resolution of 1 mOe.

3. Result and discussion

The annealing effect on the magnetic properties is reported for the Co-based amorphous ribbons. All of the ribbon with or without heat treatment was identified as a fully amorphous alloy in X-ray diffraction patterns. We confirmed that heat treatment contributes to soft magnetic properties. The lowest value of coercivity was 0.082 Oe after annealing for 15 minutes at 450°C for $\text{Co}_{64.8}\text{Fe}_{7.2}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Cr}_4$.

4. References

- [1] A. Inoue, B.L. Shen, C.T. Chang, *Intermetallics* 14 (2006) 936-944.
- [2] S. Kim, H. Choi-Yim, *J. Korean Phys. Soc.* 67 (2015) 2120-2123.
- [3] S. Kim, Y.J. Kim, Y.K. Kim, H. Choi-Yim, *Curr. Appl. Phys.* 17 (2017) 548-511.

Study on the structural and magnetic depth profile of $(\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}/\text{GaAs})_{10}$ multilayers by X-ray Resonant Magnetic Reflectivity

Dong-Ok Kim^{1,2*}, Byoung Gwan Cho³, Ki Bong Lee³, Jae Young Kim⁴,
Jae Ho Chung⁵, Jun Woo Choi², Dong Ryeol Lee¹

¹Department of Physics, Soongsil University, Seoul, Republic of Korea

²Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

³Department of Physics, POSTECH, Pohang, Republic of Korea

⁴Pohang Accelerator Laboratory, Pohang, Republic of Korea

⁵Department of Physics, Korea University, Seoul, Republic of Korea

Multilayer structures of dilute magnetic semiconductor (DMS) have been extensively studied in semiconductor spintronics. In magnetic multilayers, the spin-dependent transport properties, such as the giant magnetoresistance (GMR), is highly dependent on the spin configuration of each magnetic layer. Since the interlayer exchange coupling (IEC) between the individual magnetic layers in such systems results in nontrivial magnetizations, since it is important to understand the magnetic configuration of the multilayer system [1,2].

In this study, the laterally averaged structural and magnetic properties of the $(\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}/\text{GaAs})_{10}$ multilayer is investigated using X-ray Resonant Magnetic Reflectivity (XRMR). XRMR is very useful tool for such studies because of its sensitivity to surface and interface properties. At zero field, the change in intensity at the two different Half-Bragg peaks indicate that all magnetic layers are antiparallel due to the antiferromagnetic (AFM) IEC [1,3]. With a strong applied magnetic field, the Zeeman energy overcomes the AFM IEC and all magnetic layers are parallel. When the magnetic field is gradually decreased to zero field, it is found that the top-most magnetic layer retains its magnetization direction, while the magnetic layer beneath flips its magnetization. The subsequent layers follow the magnetic configuration of these first two layers resulting in antiparallel spin configuration. Such reversal process is consistently observed in the antiparallel spin configuration regardless of direction of applied magnetic field. We believe these results will help us understand spin-dependent transport in $(\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}/\text{GaAs})_{10}$ multilayer systems.

References

- [1] J. -H. Chung et al., Phys. Rev. Lett., 101, 237202 (2008)
- [2] M. Luo et al., J. Appl. Phys. 108, 053703 (2010)
- [3] Sunjae Chung et al., New. J. Phys. 15, 123025 (2013)

Edelstein Effect Induced Spin Polarization and Anisotropic Magnetoresistance in Rashba 2DEG

Won Young Choi^{1,2*}, Hyung-jun Kim¹, Joonyeon Chang¹, Gyungchoon Go³,
Kyung-Jin Lee^{2,3} and Hyun Cheol Koo^{1,2}

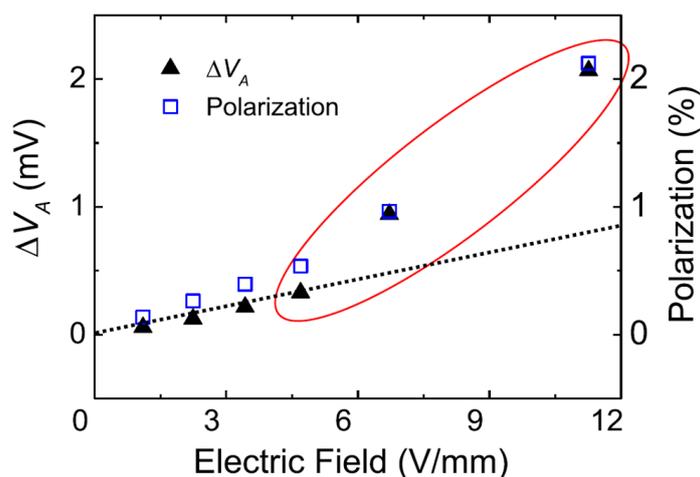
¹Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

²KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

³Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02481, Republic of Korea

In a charge current flowing 2DEG channel, Rashba spin-orbit coupling generates local and bulk spin polarization through spin Hall effect and Edelstein effect, respectively. Spin Hall effect accumulates opposite spins at both edges of channel, so spin current is induced perpendicular to charge current direction. On the other hand, Edelstein effect induces spin polarization with a direction of Rashba effective magnetic field and it makes charge current itself spin polarized. Spin polarization is the most important value in spin related phenomenon, however, it is not easy to quantify the spin polarization experimentally.

In this research we measured anisotropic magnetoresistance (AMR) to determine the spin polarization induced by Edelstein effect. External magnetic field is applied and rotated in 2DEG plane, and AMR is measured for various currents and gate voltages. In 2DEG structure, Rashba effective field is constant for a current, so direction of spin polarization is also fixed unlike AMR in ferromagnetic materials. It makes difference in resistance level (ΔV_A) for parallel and antiparallel ordering between external magnetic and Rashba effective field. Finally we could find out that spin polarization can induce AMR without ferromagnetism and measured AMR (ΔV_A) agrees with spin polarization predicted by Edelstein.



Gate voltage control of the Berry curvature in monolayer MoS₂

Kyung-Han Kim* and Hyun-Woo Lee

Department of Physics, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea

For the monolayer MoS₂, we calculate the Berry curvature, which generates the intrinsic spin/valley Hall effect in the material. By using $k \cdot p$ perturbation theory, we investigate the effect of mirror symmetry breaking in monolayer MoS₂. Unlike the earlier calculation[1], it depends on the gate voltage, which breaks the mirror symmetry and induces the Rashba spin-momentum coupling. We find that the coupling enhances Berry curvature significantly. We calculate the spin/valley Hall conductivity from our result and it can explain recent experimental results.[2-4] Then we extend this analysis to bilayer MoS₂.

References

- [1] D. Xiao, G. Liu, W. Feng, X. Xu, and W. Yao, Phys. Rev. Lett. 108, 196802 (2012).
- [2] S. Wu et al., Nat. Phys. 9, 149 (2013).
- [3] K. F. Mak, K. L. McGill, J. Park, and P. L. McEuen, Science 344, 1489-1492 (2014).
- [4] J. Lee, K. F. Mak, and J. Shan, Nature Nano. 11, 421 (2016).

Co/Pt 이중층 박막의 계면 결정성이 자성에 미치는 영향 연구

윤지수^{1,2*}, 문경웅¹, 이주인¹, 황찬용¹, 김재성², 정진용³, 유천열³, 김원동^{1,4}

¹한국표준과학연구원 산업측정표준본부 나노측정센터

²숙명여자대학교 나노물리학과

³대구경북과학기술원 신물질과학전공

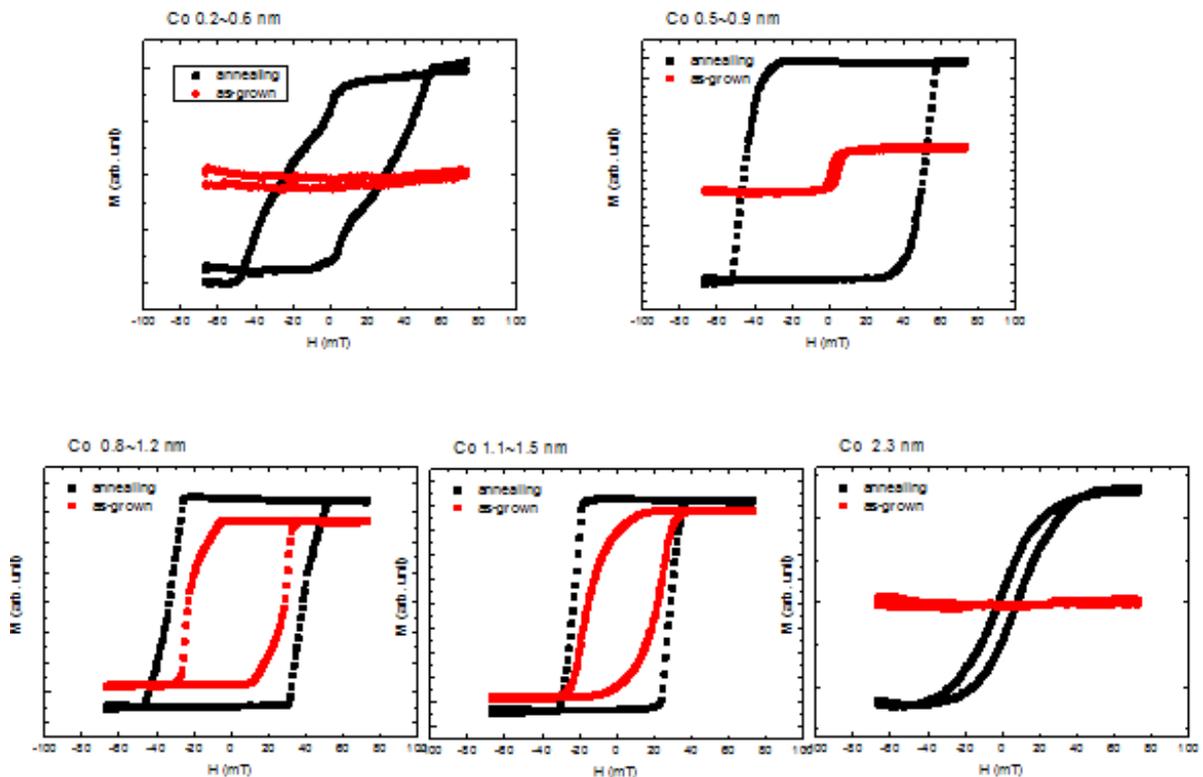
⁴과학기술연합대학원대학교 나노계측과학전공

1. 서론

Co/Pt 이중층은 스핀 홀 효과에 따른 스핀 궤도 토크와 계면 자일로신스키-모리야상호작용(Dzyaloshinskii-Moriya interaction, DMI)에 의한 자성 스키미온 형성과 새로운 자기현상으로 인해 최근 가장 활발히 연구되고 있는 자성 나노 구조이다.[1] 이 연구에서는 열처리에 의해 Co 층 - Pt 층 계면의 결정성을 변화시켰을 때의 자성 변화에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법과 결과

사파이어(0001) 기판 위에 Pt/Co/Pt 박막계와 MgO/Co/Pt 박막계의 시료를 전자빔 증착기를 이용하여 증착하였다. Co 층의 경우 두께에 따른 자성 변화 관찰을 용이하도록 하기 위해서 셔터를 이용하여 썬치 형태로 증착하였다. 각각의 박막계에 대하여 사파이어 기판위에 Pt 층 증착 직후 열처리한 시료와 열처리하지 않은 시료를 준비한 후 Co 층을 증착하였다. 이는 사파이어(0001) 기판 위에 Pt 층을 증착한 후 열처리할 경우 박막 결정성이 향상된다는 결과[2]를 이용하여 계면 결정성의 차이가 자기 특성에 주는 영향을 관찰하기 위함이다.



열처리에 따른 계면 결정성의 차이는 별도로 주사터널링 현미경을 통하여 조사하여 실제로 열처리 결과 Pt 층의 결정성이 크게 향상됨을 확인하였다. 이와 같이 형성된 박막계에 대하여 MOKE 현미경을 이용하여 Co 층 두께에 따른 자기 이력 곡선과 자구구조를 조사하였다. 또한 이러한 계면 결정성이 계면 DMI에 미치는 영향을 알기 위해 브릴루앙 광산란(Brillouin Light Scattering)실험도 수행하였다.

3. 고찰

MgO/Co/Pt 박막계에 대하여 MOKE 현미경 측정결과 얻어진 자기 이력 곡선을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보듯 열처리를 한 경우 박막의 수직 자기 이방성이 크게 향상됨을 알 수 있었다. Pt/Co/Pt 박막의 경우도 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 BLS 측정 결과로부터 계면 DMI 증가의 가능성도 확인하였다.

4. 결론

열처리에 의한 Co-Pt 계면 결정성의 변화를 직접적으로 확인한 후 이에 따른 자성 변화를 조사한 결과 수직 자기이방성의 증대를 확인하였다. 향후 다양한 계면 DMI 측정 방법 및 스핀 홀 효과 측정 방법을 통해 계면 결정성이 이들 새로운 자기 특성에 미치는 영향을 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

- [1] Anjan Soumyanarayanan, Nicolas Reyren, Albert Fert and Christos Panagopoulos, Nature **539**, 509(2016).
- [2] B. M. Lairson, M. R. Visokay, R. Sinclair, and B. M. Clemens, Appl. Phys. Lett. **62**, 639 (1993).

Magnetic and Transport Properties of Ferrimagnetic GdCo Alloy with Various Compositions

이재욱¹, 이수길^{2*}, 김갑진², 박병국¹

¹Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon

²Department of Physics, KAIST, Daejeon

최근 비자성/강자성 이중구조에 전류를 인가하면 그 계면에서의 스핀-궤도 상호작용에 의해 토크가 발생하고, 그로 인해 자화의 방향을 제어하는 연구가 자기메모리로서의 잠재적 응용 가능성으로 인해 활발하게 진행되고 있다. 하지만 강자성 물질은 본질적으로 외부 자기장의 영향을 받을 뿐만 아니라 주변에 표유 자계를 발생시키기 때문에 소자에 적용 시 소자의 집적도 향상 측면에서 단점으로 작용할 수 있다. 이러한 문제점들에 대한 해결방안 중 하나로 비교적 최근에 반강자성 물질이 거론되고 있으나[1] 이들은 알짜 자기 모멘트가 없기 때문에 반강자성체를 이용한 메모리 소자에 저장된 정보를 읽기가 매우 어렵다. 이와 더불어 반강자성체의 매우 견고한 자기적 특성상 자기 모멘트의 정렬 방향 등 원하는 자기적 특성을 쉽게 얻어내기가 어렵다는 단점이 존재하기 때문에 실제 소자에 적용하기 위해서는 아직 해결해야할 문제점들이 많다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 해결책으로 반강자성체처럼 자기 모멘트의 방향이 서로 반대방향으로 정렬되어있지만 강자성체처럼 알짜 자기 모멘트가 존재하는 페리자성체를 이용하는 새로운 방안을 제시하고자한다. 페리자성체의 경우 페리자성체를 구성하고 있는 희토류 금속과 전이 금속의 비율을 조절하거나 측정 온도를 조절함으로써 각각의 자기 모멘트의 크기를 조절할 수 있다는 장점이 있어 반강자성체가 갖고 있는 장점과 강자성체가 갖고 있는 장점을 둘 다 이용할 수 있다. 고로 반강자성체에 비해 원하는 자기적 특성을 얻기가 훨씬 쉽고 알짜 자기 모멘트를 어느 정도 유지시킬 수도 있기 때문에 전기적 측정이 용이할 것으로 예상된다. 고로 본 연구에서는 페리자성체의 희토류 금속 및 전이 금속 비율에 따른 자기적 특성 및 수송 특성을 중점적으로 알아보하고자 한다.

본 연구에서는 수직자기이방성을 갖는 페리자성체 합금을 만들기 위해 Gd와 Co를 동시에 증착할 수 있는 Co-Sputter 장비를 이용하였다. 이때 하부 전극으로 페리자성체의 수직자기이방성을 얻어내기 위해 Ta(3nm)/Pt(5nm)를 먼저 증착하였고 그 위에 GdCo(10nm) 그리고 마지막으로 Ta(3nm) Capping층을 증착하였다. Co-Sputter 장비를 이용하여 증착한 자성 박막의 수직자기이방성 및 자기 이력 곡선 평가는 VSM (Vibrating Sample Magnetometer) 및 AH (Anomalous Hall) 전압을 이용하여 측정하였다.

그림 1은 Ta(3nm)/Pt(5nm)/GdCo(10nm)/Ta(3nm) 구조에서 Co 비율에 따른 보자력 및 포화 자화값의 변화를 관찰한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Co 비율을 증가시키에 따라 보자력이 증가하였다가 감소하는 경향을 볼 수 있는데 이는 보자력이 포화 자화값에 반비례하기 때문이다. 실제로 오른쪽 그림을 보면 포화 자화값이 감소하였다가 증가하는데 포화 자화값이 0으로 수렴하는 구간에서 보자력이 발산하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 포화 자화값이 0으로 수렴하는 구간인 자기 모멘트 보상점이 GdCo 합금같은 경우 Co가 80% 부근에서 나타난다는 것을 알 수 있다.

이 외에 페리자성체 내부의 Gd 또는 Co의 자화 방향이 어떻게 정렬이 되어있는 지 확인하기 위해 수송 특성인 Anomalous Hall 전압을 4-Point Probe Station을 이용하여 측정하였다. 그 결과 VSM 데이터와 마찬가지로 Co가 80% 부근에서 보자력이 매우 커지는 것을 확인할 수 있었고 추가적으로 Anomalous Hall 전압 부호가 자기 모멘트 보상점 기준으로 반대로 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 자기 모멘트 보상점을 기준으로 Gd-Rich 구간에서는 Co가 외부 자기장에 반평행하게 그리고 Co-Rich 구간에서는 Gd가 외부 자기장에 반평행하게 정렬되어있다는 것을 의미한다. 이를 통해 Gd와 Co의 비율을 세밀하게 조절하면 상온에서 원하는 자기적

특성을 갖는 페리자성체를 만들 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

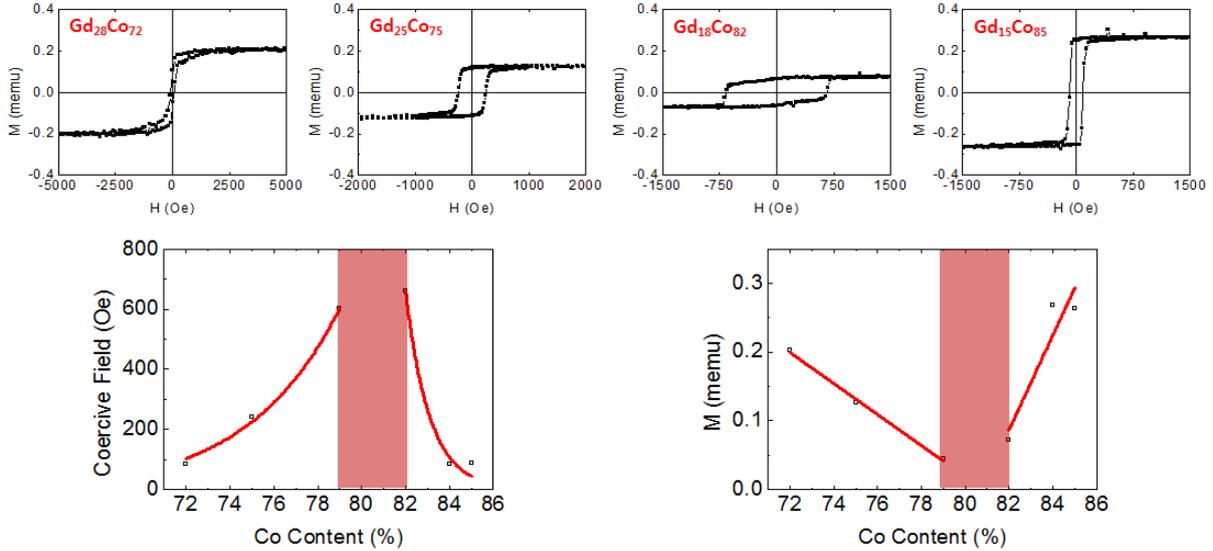


그림 1 VSM을 통해 얻어낸 Ta/Pt/GdCo/Ta 구조에서의 보자력 및 포화 자화값.

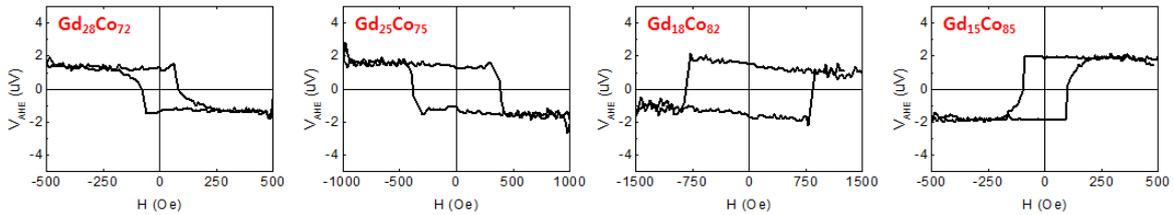


그림 2 AHE 측정을 통해 얻어낸 Ta/Pt/GdCo/Ta 구조에서의 Hysteresis Loop.

본 연구를 통해 Gd와 Co의 비율이 GdCo 페리자성체 합금의 자기적 특성에 미치는 영향을 살펴볼 수 있었고 자기 모멘트 보상점을 기준으로 외부 자기장 대비 Gd와 Co의 자화 방향이 서로 반평행하게 정렬된다는 사실을 전기적 측정을 통해 확인할 수 있었다. 실제로 자기 모멘트 보상점에서 스핀-궤도 토크를 이용하는 소자를 만들게 되면 기존 강자성체를 이용한 소자보다 훨씬 빠른 소자를 구현해낼 수 있을 것으로 예상되어[2] 향후 초고속 스핀트로닉스 소자 연구에 있어서 본 연구에서 연구된 페리자성체가 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

4. 참고문헌

- [1] T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley and J. Wunderlich, Nature Nanotechnology **11**, 231-241 (2016).
- [2] C. D. Stanciu, A. V. Kimel, F. Hansteen, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, and Th. Rasing, Phys. Rev. B **73**, 220402(R) (2006).

Elimination of thermoelectric artifacts in spin-orbit-torque harmonics measurements

Eun-Sang Park^{1,2*}, Byoung-Chul Min² and Kyung-Jin Lee^{1,2,3}

¹KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University

²Center for Spintronics, Korea Institute Science and Technology

³Department of Materials Science and Engineering, Korea University

Recent discovery of spin-orbit torque (SOT) provides a new route to control the magnetization of nano magnets, and the control of magnetization with SOT becomes a very important part of the spintronics. SOT have shown interesting features, for instance, such as unusual angular dependence, that cannot be simply explained by spin Hall effect. In order to understand SOT, it is important to quantitatively measure the magnitude, symmetry, and angular dependence of SOT. Among the several measurement schemes of SOT, harmonics measurements are frequently used for determining the magnitude of SOT because of its simplicity [1]. If a temperature gradient exists in the sample, thermoelectric artifacts can be included in the SOT harmonics measurement.

Here we have studied those thermoelectric artifacts in SOT harmonics measurements, and considered how to exclude them. The samples consisting of Ta (5 nm)/ Pt (3 nm)/ Co (0.6 nm)/ MgO (2 nm)/ Ta (2 nm) were patterned into a Hall bar geometry ($5 \times 5 \mu\text{m}^2$) by ion milling and photolithography. The first and second harmonics signals are measured by a lock-in amplifier. A nominally measured Hall signal can be influenced by several artifacts such as Seebeck, Nernst, Ettingshausen, Righi-Leduc effects as well as misalignment and Ohmic offsets. It turns out that the second harmonics signals corresponding to the field-like torque and damping-like torque are contaminated by considerable thermoelectric artifacts. We have shown that those artifacts, which deteriorate a correct Hall measurement, can be eliminated by considering the current and field symmetry in the 2nd harmonics. The elimination of thermoelectric artifacts enables us to correctly measure the magnitude and angular dependence of SOT, and thereby to properly interpret the physics of SOT.

Reference

- [1] Pi, U. H. et al. Appl. Phys. Lett. **97**, 162507 (2010).

The crystallographic and magnetic properties of single phase garnet $Y_{3-x}R_xFe_5O_{12}$ (R=La, Nd, and Gd)

Sang Mu Choi* and Young Rang Uhm

Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research institute (KAERI)

The crystallographic and magnetic properties of single phase garnet $Y_{3-x}R_xFe_5O_{12}$ (R= La, Nd, and Gd) were studied using x-ray diffraction, Mössbauer spectroscopy, and vibrating sample magnetometer (VSM). The lattice constants increase when substituting rare earth ions of Nd and Gd in YIG. The Curie temperature was slightly increased when substituting rare earth ions such as Gd, Nd and La, with a relatively larger ionic radius than those of Y. It is known that Y^{3+} cation consists of inert krypton core with the 4p (no f-electron) layer fully filled with six electrons of paired spin. So, it has no permanent magnetic moment (0 μ_B). However, both Nd^{3+} and Gd^{3+} ions have a magnetic moment. The ionic radius doped in 24(c) site have a more immediate and vital influence on the magnetization, though super-exchange interaction between 16(a) and 24(d) site is weakened due to heavy rare earth Gd^{3+} ions substituted in 24(c) site. At room temperature, the three sub-lattices are aligned along the [111] direction. Therefore, the net magnetic moment is following equation of $M = M_c - [M_d - M_a]$.

It is well known that the La^{3+} ion is non-magnetic same as Y^{3+} ion. However, the results of magnetic property show that the M_s is decreased. This is because the substitution of La^{3+} affects to a distortion of the 16(a) and 24(d) site to different degrees, and the length and angle of the Fe-O-Fe linkage are changed. The ionic radius doped in 24(c) site have a more immediate and vital influence on the magnetization, though super-exchange interaction between 16(a) and 24(d) site is weakened due to heavy rare earth Gd^{3+} ions substituted in 24(c) site.

Fe₃O₄ 다중 과립 나노클러스터의 자성입자 분광 분석

Magnetic Particle Spectrometry of Fe₃O₄ Multi-granule nanoclusters

Lijun Pan^{1*}, Bum Chul Park¹, Micheal Ledwig², Leon Abelmann^{3,4†} and Young Keun Kim^{1†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02481, Korea

²Pure Devices Würzburg 5397084, Germany

³KIST Europe, Saarbrücken 66123, Germany

⁴University of Twente, Enschede 7522, The Netherlands

자성나노입자는 생물독성이 없고 생체적합성 물질로 알려져 있으며 오랜 기간 동안 연구되고 사용되어 있다. 요즘 자기입자 이미징 (Magnetic Particles Imaging, MPI) 에서 조영제로 응용하는 것을 밝혀다. MPI에서 이미징 콘트라스트는 입자의 자기응답 (dM/dt) 에서 정현파 구동 필드로 발생한다. 민감도와 해상도를 높이려면 드라이브 주파수의 배수에서의 응답 만 고려한다 (고조파). [1] 따라서 Fe₃O₄ 입자의 자기 히스테리시스 루프의 정확한 모양은 MPI 성능에 강한 영향을 미친다. 단결정 입자를 사용하는 경우, 입자 크기와 자기 특성간에 강한 상관관계가 있다. 본 연구에서는 수정된 폴리올 방법으로 Fe₃O₄ 다중과립 나노클러스터를 합성한다. [2] 전구체 농도 및 합성 조건을 조절하면서 입자크기 및 과립크기 조정한다. 입자 미세형상 및 결정구조를 투과전자현미경(TEM)로 관찰하면 X-Ray 회절 (X-ray Diffraction, XRD) 로 측정 했다. 일정한 과립 크기에서의 다른 입자크기 (그룹 1)과 일정한 입자크기에서의 다른 과립크기(그룹 2)의 샘플 히스테리시스 루프 (Vibrating Sample Magnetometry, VSM)측정해서 자성 변화를 조사한다. 20 kHz에서 자성 입자 분광 분석 (Magnetic Particles Spectrometry, MPS)을 통해서 자성입자 MPI 스캐너 중에 이미징 성능 예측할 수 있다. VSM에 의해 측정 된 잔류 자성 및 보자력은 입자 크기뿐만 아니라 과립의 증가에 따라 증가한다. MPS에 의해 측정 된 보자력은 VSM 결과보다 2 ~ 4배 높지만 입자가 구동 분야에서 포화 될 수 있다면 입자 및 과립 크기와 동일한 관계를 따릅니다. 그룹1하고 그룹 2 중에 30 mT 자기장에 히스테리시스 루프 포화되고 제일 크게 나오는 샘플 2개(S3, 77 nm, 과립크기 17.3 nm / S5, 57 nm, 과립크기 36 nm))의 특성 비교 했다. MPS에 자기장 20 mT로 감소시키면 과립크기 큰 입자(S5) 는 더 이상 포화되지 않는다. 따라서 S3의 MPI신호는 30 mT 자기장에 안정하고 강하게 나타나고, 20mT으로 감소해도 상대적으로 안정하게 보여준다. 이들 현상 보면, 나노클러스터의 크기뿐만 아니라, 그중에 과립크기도 그의 MPI 성능 영향을 미친다는 것을 확인했다.

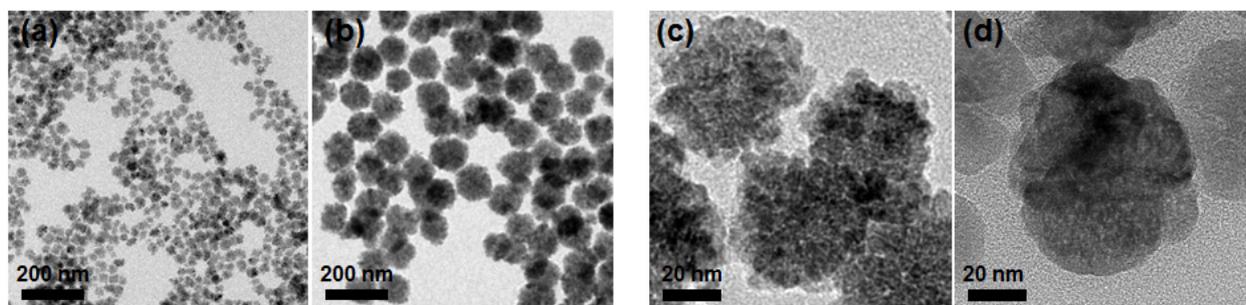


그림 1. 크기 다른 자성나노클러스터 (a), (b)와 과립크기 다른 자성나노클러스터 (c), (d)의 TEM 이미지

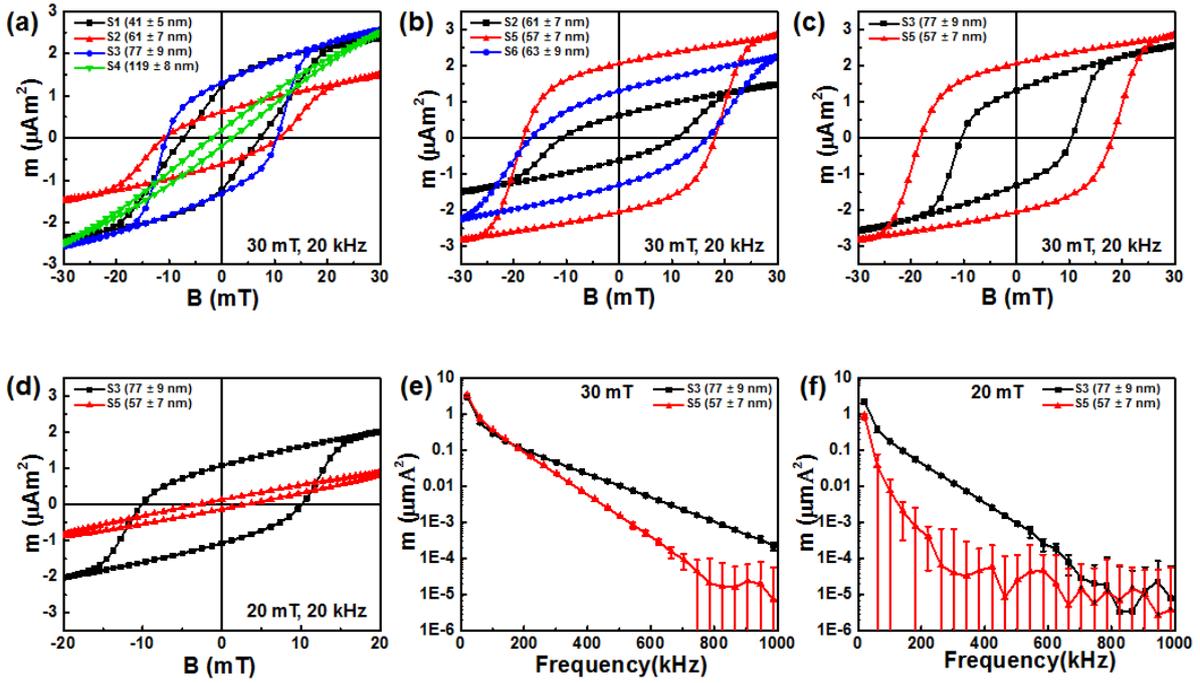


그림 2. 샘플의 MPS 측정

참고문헌

- [1] N. Panagiotopoulos et al., International Journal of Nanomedicine, 10, 3097 (2015)
- [2] J. Cha et al., RSC Adv., 3, 3631 (2013)

Coexistence of semimetallic phase and semiconducting phase in WTe_2 alloy

Jeehoon Jeon^{1,2*}, Tae-Eon Park¹, Joonil Cha^{3,6}, Hyun Cheol Koo^{1,4}, Jinki Hong²,
In Chung^{3,6}, Joonyeon Chang⁵

¹Spin Convergence Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

²Department of Applied Physics, Korea University, Sejong, Korea

³Center for Nanoparticle Research, Institute for Basic Science (IBS), Seoul, Korea

⁴KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul, Korea

⁵Post Silicon semiconductor Institute, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

⁶School of Chemical and Biological Engineering and Institute of Chemical Processes,
Seoul National University, Seoul, Korea

The layered semimetal WTe_2 has been received a lot of attention because of the observation of a non-saturating and extremely large positive magnetoresistance, which can be one of the excellent candidates for magnetic memory and spintronic device. In order to apply to tunable high-performance device effectively, WTe_2 is required to demonstrate band-gap engineering by alloying different materials like bulk semiconductor. WTe_2 is distinguished from other transition-metal dichalcogenides (TMDs) by the existence of an exceptional semimetallic distorted octahedral structure (Td). Therefore, we can take advantage of region, which has the coexistence of the Td phase and the H phase, in various aspect such as easy to make ohmic junction and tune for the transport properties by band-gap engineering.

In this research, we introduce $W_{1-x}M_xTe_2$ ($M = Re, Mo$) and $WSe_{2(1-x)}Te_{2(x)}$ crystals to confirm coexistence possibility of coexistence phase. We obtained ohmic contacts between Ti/Au metal electrodes and the layered WTe_2 alloys by chemical and physical surface treatments. In transport measurement, we observed that magnetoresistance is decreased dramatically, and transverse resistivity tendency is changed. These results indicate that the electron-hole concentration symmetry is broken, which illustrates the first step of making coexistence state. This coexistence phase can open up an exciting opportunity not only for developing devices induced by gate-controlled phase transition but also for understanding their fundamental physical properties of WTe₂ semimetals.

Phase locking of multiple spin-torque nano oscillators

Hee Gyum Park*, Chaun Jang and Byoung-Chul Min

Center for spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

Spin-torque nano-oscillator (STNO) is based on the transfer of spin angular momentum to the local magnetization of nano-magnetic structures, which generates a microwave signal under certain conditions of external magnetic field and DC current [1]. The STNO raises prospects for a microwave generator, but critical disadvantages such as lower power and broad linewidth hinders the real applications of STNO for wireless communications [2]. The synchronization of multiple STNOs is one of solutions to overcome those disadvantages [3].

Here, we have studied the phase locking of multiple STNOs consisting of nano-scale magnetic tunnel junctions by injecting an external microwave signal. The microwave response of an STNO, which shows a broad oscillation peak at 3.1 GHz, is measured with increasing the power of the external microwave signal (P_{ex}). The broad response of the peak is unchanged when P_{ex} is small, gradually decreased from $P_{ex} = -25$ dBm, and almost disappeared at $P_{ex} = -10$ dBm. This indicates that the oscillation of the STNO is locked to the injected external signal. As the frequency of external signal is varied from 1.5 to 8.3 GHz, the injection locking is observed in a wide range of frequency from 1.8 GHz to 2.7 GHz. Next we have investigated the injection locking of two STNOs connected in parallel, which show two distinguished oscillation peaks at 2.0 and 3.1 GHz, respectively. The phase locking of two STNOs to the injected external signal is observed in an unexpectedly wider range of frequency. This wide-range phase locking of multiple spin-torque nano oscillators will be extremely useful for constructing microwave transceivers for wireless communications.

References

- [1] S. I. Kiselev et al., Nature 425, 380 (2003).
- [2] H. S. Choi et al., Sci. Rep. 4, 5486 (2014).
- [3] B. Georges et al., Phys. Rev. Lett. 101, 017201 (2008).

Substrate-Free $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) Spin-Thermoelectric (TE) Module Prepared by the Sol-Gel Synthesis

Min-Sun Jang^{1,3*}, Im-Jun Roh², Jungmin Park³, Chong-Yun Kang^{2,6}, Won Jun Choi⁴,
Seung-Hyub Baek^{2,5}, Kyoung Jin Choi¹, Sung Soo Park³, Jung-Woo Yoo³, Ki-Suk Lee^{1,3†}

¹KIST-UNIST Ulsan Center for Convergent Materials, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),
Ulsan 44919, Republic of Korea

²Center for Electronic Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, Republic of Korea

³School of Materials and Science Engineering, Ulsan

National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Republic of Korea

⁴Center for Opto-Electronic Materials and Devices,

Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, Republic of Korea

⁵Department of Nanomaterials Science and Technology,

Korea University of Science and Technology, Daejeon, 34113, Korea

⁶KU-KIST Graduate, School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 02841, Korea

1. Introduction

Recently, magnetic materials and magnetic phenomena continuously have been highlighted as prominent resource for a future green energy [1, 2]. The ferrimagnet insulator- $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) that is the one of the magnetic material with metal oxides has been taken center stage owing to its prominent applications to eco-friendly spin-caloritronics [3, 4]. During the past decade, most of the studies on the spin Seebeck effect (SSE) have been done on well-grown single crystal sample of YIG by pulsed laser deposition (PLD) method [5]. Here, we report on the SSE of YIG prepared by a sol-gel method, a conventional method for metal oxide materials [6, 7]. In this presentation, we reveal that the temperature of heat treatment and effect of the external mechanical pressure can play a critical role for the magnetic properties of YIG. Furthermore, we demonstrate that considerable spin thermoelectric voltage can be generated successfully by the poly crystal – YIG prepared by the sol-gel method.

2. Experiments

We prepared the YIG precursor by mixing yttrium nitrate ($Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, 99.99%) and iron nitrate ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, 99.99%) powders in a stoichiometric ratio of 3: 5, and adding citric acid ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$). The precursor mixture was dissolved in distilled water (100 mL) by stirring (300 rpm) at 27 °C for 18 hours. The solution of the citric acid was maintained at 1pH. The resulting solution (sol) was then stirred for 24 hours at 80 °C to obtain a homogenous gel. Next, a gel was obtained from the sol by drying the solution, which was decomposed at 100 °C for 5 hours to form a dry material. The YIG powder was obtained by grinding the completely dried gel for 30 min. The calcination process was carried out at 850 °C in the air for 2 hours at a heating rate of the 7.7 °C /min to get rid of residual impurities and the crystallization. After, we did the pressing process to produce the substrate-free YIG by pushing 1.5 ton for 5 minutes and to check out the influence of external mechanics for magnetic properties. Lastly, sintering has been done at 1400 °C for 4 hours. After produced the substrate-free YIG, we designed the platinum (Pt) on the surface of the YIG because of observing the longitudinal SSE. The 15 nm-Pt layer was deposited on the disk-shaped YIG with 1.8 mm thickness and 14

mm diameter. And 400 Oe magnetic field applied parallel to the disk plane and the temperature gradient was formed along out-of-plane direction. We produced not only the substrate-free spin-TE module but also investigated various materials properties of the YIG.

3. Results & Discussion

After pressing, the microstructure resembled a continuous network of almost hexagonal bubble-shaped particles with no vacancies. The field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM; Hitachi, S-4800) images indicate that mechanical pressing after the heat treatments results in grain growth with high densification and a remarkable reduction of impurities in the microstructure. The particles become coarser as the sintering time was increased. Moreover, we found from X-ray diffractometer (XRD; Bruker AXS, D8 ADVANCE) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS; ThermoFisher, K-alpha) measurements that the extra surface energy induced by the pressing and sintering process allows the complete crystallization of polycrystalline YIG to be achieved by increasing the degree of oxidation. Consequently, the M_s was enhanced from 10 emu/g to 26.5 emu/g after the pressing process. From the measurement of the spin-TE module, we observed that the considerable spin thermoelectric voltage was generated successfully. This research might be suggested how to make easily and inexpensively YIG with enhanced magnetic properties as well as the applicable spin-TE module.

4. References

- [1] M. Hatami et al., Phys. Rev. Lett. 99, 066603 (2007).
- [2] X. Yu et al., Nat. Mat. **15**, 383 (2016).
- [3] K. Uchida et al., Nat. Mat. **9**, 894 (2010).
- [4] K. Uchida et al., J. Phys.: Condens. Matter **26**, 343202 (2014).
- [5] N. B. Ibrahim et al., J. Magn. Magn. Mater. **220**, 183 (2000).
- [6] R. Kuchi et al. Nanosci. Nanotechnol. Lett. **7**, 738 (2015).
- [7] H. Adachi, Phys. Rev. B **83**, 094410 (2011).

레일의 인장변형력에 따른 자기이력 특성변화 측정

이성우^{1*}, 강선주¹, 손대락¹

¹한남대학교 광·센서공학과, 대전광역시 대덕구 한남로 70, 306-791

장대레일은 대기조건에 따라서 레일온도가 변화하게 되고, 레일의 온도에 따른 열팽창계수에 의하여 레일이 변형력을 받게 된다. 레일이 받는 변형력을 측정하기 위하여 Barkhausen noise 측정방법 등이 사용되고 있다[1,2].

본 연구에서는 그 기초연구로 현재 국내 철도에 사용되고 있는 레일에 대하여 인장 및 압축 변형력에 따른 자기적 특성의 변화를 조사하고 있다. 특히 변형력에 따른 자기이력곡선의 변화와 Barkhausen noise를 측정하려고 한다. 그림 1은 제작한 측정 장치도이다. 시편에 변형력을 인가하기 위해서 air piston을 사용하였으며, 변위는 광섬유센서를 사용하여 측정하고, 자속밀도는 flux-meter를 사용하여 측정하고, 그리고 Barkhausen noise의 측정은 시편에 부착된 탐지코일에서 유도되는 기전력을 pre-amplifier로 증폭하고 DAQ로 컴퓨터에서 측정을 하고 LabVIEW로 FFT분석을 할 수 있게 하였다. 그림 2는 측정yoke의 도면이고, 그림 3은 자기이력특성 측정장치의 사진이다.

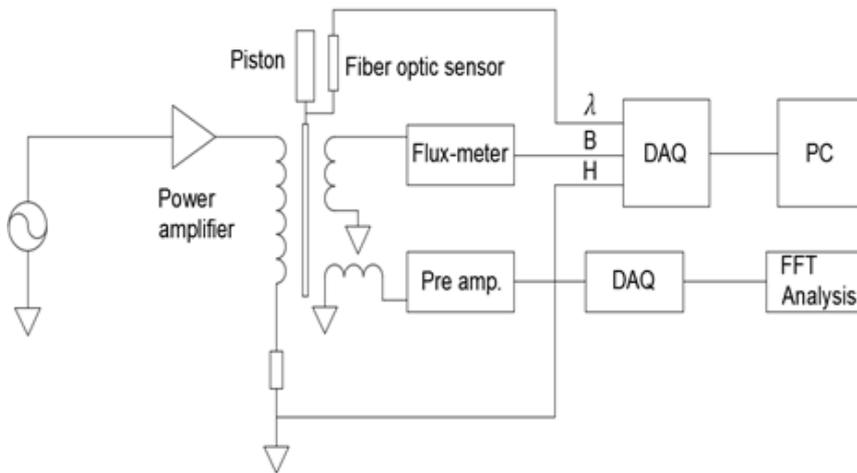


그림 1. 레일로부터 얻은 시편에 대한 자기특성 측정장치의 계략도

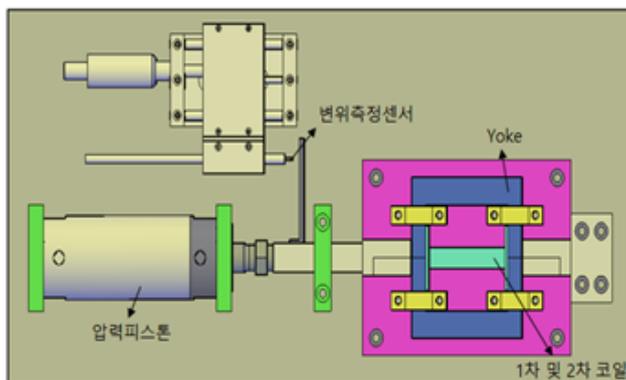


그림 2. 시편에 변형력을 인가할 수 있는 장치의 구조도.

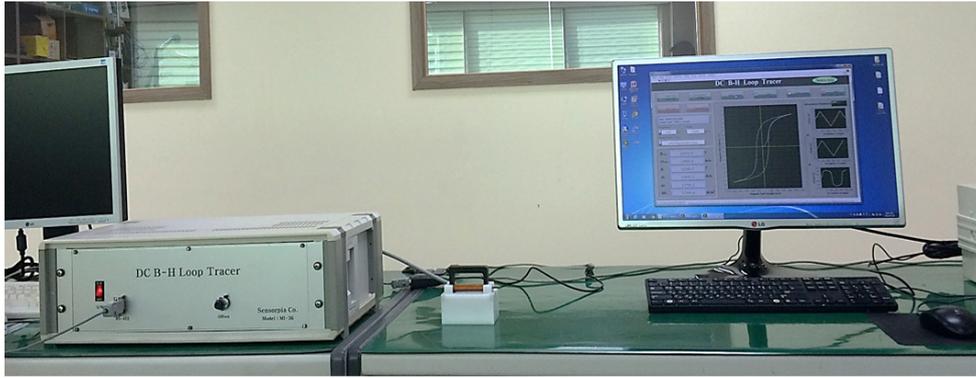


그림 2. 제작된 자기특성 측정장치의 사진.

참고문헌

- [1] Alfred Wegner, IHHA Specialist Technical Session (STS) Kiruna Sweden, 2007
- [2] Ralph (Wei) Zhang and Helen Wu, Journal of Civil Engineering and Architecture ThermitJuly 2011, Volume 5, No. 7 (Serial No. 44), pp. 596-605.

Yoke를 사용한 Tendon의 인장응력 및 결함 탐상에 관한 연구

정은지^{1*}, 채다은¹, 강선주¹, 손대락¹, 이정우², 조창빈²

¹한남대학교 광·센서공학과, 대전광역시 대덕구 한남로 70, 306-791

²한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 411-712

철은 강도와 경도가 높아서 교량 등의 큰 하중이면서도 경량화를 위하여 강철선으로 된 텐던이 사용되고 있다. 교량 등의 구조용 강으로 사용되었을 경우 수명이 수 십년 이상 되어야 되기 때문에 사용 중에도 주기적으로 안전 진단을 하기 위한 방법으로 비파괴 검사(Non-Destructive Testing)가 필수적인데 철강의 자기적 특성이 비선형의 자화곡선과 이력(hysteresis)현상이 있는 자기이력곡선으로 인하여 비파괴 검사에 적용이 어렵다. 자기적인 방법을 교량의 텐던에 적용하기 위한 기초연구로 인장변형력에 따른 자기적 특성의 변화를 측정하였다[1,2].

본 연구에서는 교량에 부착되어 있는 텐던의 인장변형력과 결함을 비파괴 적인 방법으로 적용하기 위하여 그림 1과 같은 측정 장비를 구성하였다. 직경이 7 strand 텐던이 15 가닥 들어있는 직경 100 mm인 텐던을 yoke 장치를 사용 자화를 시키고 인장 응력을 측정하기 위한 B-coil과 결함을 탐지하기 위한 H-coil을 권선하였다.

텐던에 인장변형력을 인가할 수 있는 장치에 부착하여 실험을 하고 있는 사진은 그림 2와 같다.

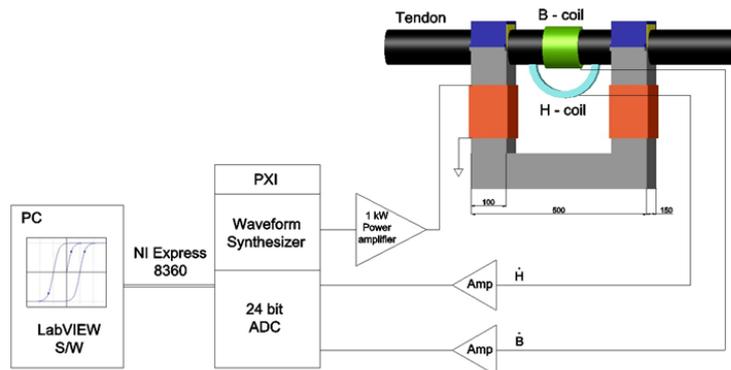


그림 1. 텐던의 인장변형력 및 결함을 탐지할 수 있는 장치의 계략도.



그림 2. 텐던에 인장변형력을 인가하는 장치에 부착된 장치의 사진.

참고문헌

- [1] 강선주, 손대락, 조창빈, 이정우, J. of the Korean Magnetics Society 26(1), 19(2016).
- [2] 강선주, 손대락, 조창빈, 이정우, J. of the Korean Magnetics Society 26(4), 133(2016).

중형급 위성용 Magnetic Torque Assembly 제작에 관한 연구

김은애^{1*}, 김상준¹, 손대락²

¹(주)센서서피아, 대전광역시 유성구 유성대로 1596번길 2층

²한남대학교, 대전광역시 대덕구 한남로70(오정동)

Magnetic torquer는 인공위성의 초기 자세제어나, 모멘텀 휠에 의하여 고정된 위성의 자세를 변화시킬 때 사용 되는 중요한 부품으로 지구자기장하에서 magnetic dipole moment가 받는 비틀림력을 이용하여 인공위성의 회전시키는데 사용된다. 본 연구에서 중형급 위성에 사용되고 saturation magnetic moment가 60 Am²인 MTA(Magnetic Torque Assembly)를 제작하였다. 제작된 MTA 직경이 30 mm, 길이가 450 mm, 질량이 1.3 kg 이었다. 그림 1은 본 연구에서 제작된 MTA의 사진이고, 그림 2는 인가전류에 대한 MTA의 magnetic moment 특성이다.

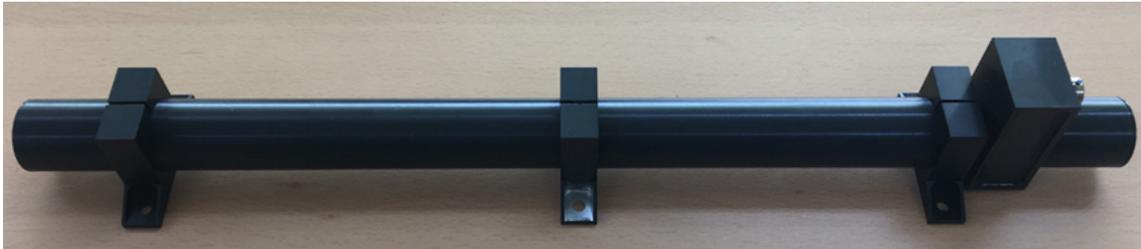


그림 1. 제작된 magnetic torque assembly의 사진.

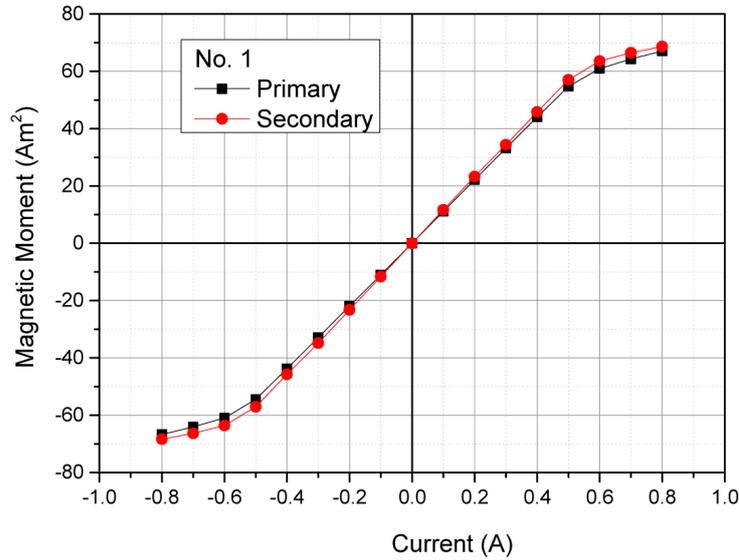


그림 2. 제작된 magnetic torque assembly의 magnetic dipole moment.

중형급 위성용 Three Axis Magnetometer제작에 관한 연구

김은애^{1*}, 김상준¹, 손대락²

¹(주)센서서피아, 대전광역시 유성구 유성대로 1596번길 2층
²한남대학교, 대전광역시 대덕구 한남로70(오정동)

플럭스게이트형 마그네토미터는 2차세계대전을 전후로 개발된 저자장 측정센서로[1-3], 1960년대부터는 로켓트와 인공위성의 자세제어, 우주공간의 자장측정 및 지자장과 그 변화를 측정하는데 사용되었으며, 오늘날 선박의 충돌방지, 비파괴검사 및 강자성체의 탐지용으로 그 응용범위가 매우 다양하다.

Flux-gate 마그네토미터의 원리가 오늘날까지 사용되고 있는 데에는 여러 가지의 장점을 가지고 있기 때문으로, 특히 저자기장 측정기술로 소형이면서 장기적 안정성이 요구되는 분야에 아직도 많이 사용하고 있다. 특히 수명이 긴 인공위성의 경우 우주에서 날라 오는 고 에너지의 방사선과 입자에 대한 내성을 가져야 한다. 인공위성용 flux-gate센서는 이러한 장점을 가지고 있으며, 위성에서 지구의 자기장성분을 측정하기 위한 3-축의



그림 1. 제작된 TAM의 사진.

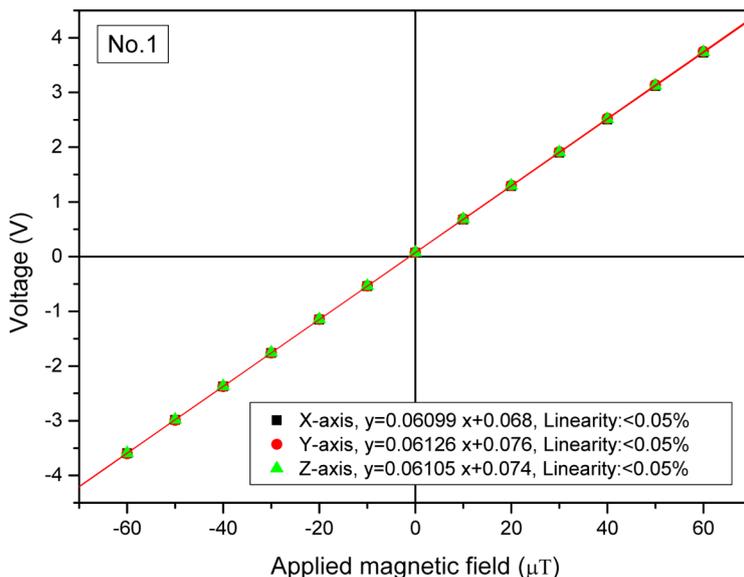


그림 2. TAM의 인가 자기장에 따른 출력전압 특성곡선.

마그네토미터 TAM(Three Axis Magnetometer)의 전자부품도 같이 고 에너지의 방사선과 입자에 대한 내성을 가지게 설계 제작을 하여야 한다. 본 연구에서는 Co-계 비정질 리본을 사용하여 flux-gate센서를 제작하였으며, 전자부품은 FM모델과 동일한 제품의 상용모델을 사용 제작을 하고 특성을 측정하였다. 그림 1은 제작된 TAM의 사진이고, 그림 2는 TAM의 특성곡선이다.

참고문헌

- [1] H.Aschenbrenner. Hoch frequenztechn. U. Electroak., 44, pp. 2(1934)
- [2] F. Forster, Z. Metallkde, Vol. 46, pp.358(1955).
- [3] D. I. Gordon, IEEE Trans. on Mag. Vol. 8, pp. 8(1972).



KMS 2017 Summer Conference

초청강연 II



Spin-orbit entanglement and spin-momentum coupling

Hyun-Woo Lee*

Department of Physics, Pohang University of Science and Technology

Spin-momentum coupling plays important roles in spintronics in various context including spin generation, spin transistor, and spin-orbit torque. Here we show that for the spin-momentum coupling to arise, the entanglement between spin and orbital degree of freedom is indispensable. We also discuss implications of the spin-orbit entanglement on spin split energy bands.

Soliton-like magnetic domain wall motion induced by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction

Kab-Jin Kim^{1*}, Yoko Yoshimura², Yoshinobu Nakatani³, Teruo Ono²

¹Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea.

²Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

³University of Electro-communications, Chofu, Tokyo, 182-8585, Japan

Topological defects such as magnetic solitons, vortices, Bloch lines, and skyrmions start to play an important role in modern magnetism due to their extraordinary stability which can be hailed as future memory devices. Recently, novel type of antisymmetric exchange interaction, namely the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI), has been uncovered and found to influence on the formation of topological defects. Exploring how the DMI affects the dynamics of topological defects is therefore an important task. Here we investigate the dynamics of the magnetic domain wall (DW) under a DMI by developing a time-of-flight measurement scheme which allows us to measure the high DW velocity for magnetic fields up to 0.3T. For a weak DMI, the trend of DW velocity follows the Walker's model which predicts that the velocity of DW increases with field up to a threshold (Walker field) and decreases abruptly. On the other hand, for a strong DMI, velocity breakdown is completely suppressed and the DW keeps its maximum velocity even far above the Walker field. Such a distinct trend of the DW velocity, which has never been predicted, can be explained in terms of magnetic soliton, of which topology can be protected by the DMI. Importantly, such a soliton-like DW motion is only observed in two dimensional systems, implying that the vertical Bloch lines (VBLs) creating inside of the magnetic domain-wall play a crucial role¹.

Reference

- [1] Y. Yoshimura et al. Nat. Phys. **12**, 157 (2016).

Heusler alloy based magnetoresistive devices

K. Hono

Research Center for Magnetic and Spintronic Materials,
National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, Japan

The hard disk drive industry is making continuous efforts to increase the areal density of magnetic recording. To realize the areal density of higher than 2 Tbit/in², the shield-to-shield spacing of read sensors must be smaller than 20 nm with low device resistance (resistance-area product $RA \sim 0.1 \Omega \mu\text{m}^2$), which is very challenging goal for MgO-based TMR devices. There are two approaches to achieve low-RA high-MR devices; one is to reduce RA of tunneling magnetoresistive devices using low resistance barrier and the other is to enhance MR output of current-perpendicular- to-plane giant magnetoresistive (CPP-GMR) devices using half-metallic ferromagnetic layers. We explored several Co-based Heusler alloys with high spin polarization for ferromagnetic layer applications and new barrier and spacer layers that can enhance MR outputs in TMR and CPP-GMR devices. To extract the highest MR outputs that can be expected intrinsically from the combination of the ferromagnetic and nonmagnetic materials, we characterized the interface structures of layered devices using aberration corrected STEM with a near-atomic resolution to understand the structure-property relationships. In this talk, I will overview the current status and perspectives of low-RA high-MR devices for reader applications.

Kazuhiro Hono received the BS and MS degrees in Materials Science from Tohoku University in 1982 and 1984, and a Ph.D. degree in Metals Science and Engineering from Penn State in 1988. After working as a post doc at Carnegie Mellon, he became a research associate at the Institute for Materials Research, Tohoku University in 1990. He moved to the National Institute for Materials Science (NIMS) as a senior researcher in 1995, and is now a NIMS Fellow and the Director of the Research Center for Magnetic and Spintronic Materials. He is also a professor in Materials Science and Engineering at the University of Tsukuba. His current research interest is materials science in magnetic and spintronics materials and their devices.



KMS 2017 Summer Conference

초청강연 Ⅲ



Effect of Solvents and Relative Humidity on (C₆H₅(CH₂)₂NH₃)₂(Mn,Cu)Cl₄ thin films

Ki-Yeon Kim*

¹Neutron Science Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea

Layered two-dimensional organic-inorganic perovskite thin films (A₂BX₄, A= a monovalent organic cation, B=a divalent metallic cation, X=a halide anion) have been proposed for a variety of industrial applications such as semiconducting channel in thin film transistors ((C₆H₅C₂H₄NH₃)₂SnI₄) [1] and multiferroics((C₆H₅C₂H₄NH₃)₂CuCl₄) [2] and optoelectronics devices((C₄H₉NH₃)₂PbBr₄) [3]. Particularly, (C₆H₅(CH₂)₂NH₃)₂CuCl₄ (shortly, Cu-PEA) and (C₆H₅(CH₂)₂NH₃)₂MnCl₄ (shortly, Mn-PEA) belong to a family of layered two-dimensional K₂NiF₄ perovskites where the inorganic part comprises a two dimensional network of corner-sharing BCl₆²⁻ octahedron. The interesting point is that they crystallize in the same space group (No. 61 P 2₁/b 2₁/c 2₁/a) at room temperature and show the almost same lattice parameters (a =7.187 Å, b= 7.344 Å, c=38.549 Å for Cu-PEA, a =7.207 Å, b =7.301 Å, c=39.413 Å for Mn-PEA), but different magnetic behaviors. Cu-PEA is a ferromagnet (*T_C* =9.5 ~13 K) [2], while Mn-PEA is a canted antiferromagnet (*T_N* = 44 K) [4]. It has been reported that organic-inorganic layered perovskite thin films can be readily prepared by a number of simple and versatile techniques such as sol-gel and spin-coating and Langmuir-Blodgett and evaporation. Even though the perovskite layers in all the previous cases were ultrathin (few to tens of nanometers), unencapsulated, and exposed to the air, structure stability of layered perovskite thin film against moisture has been rarely addressed so far. In this talk, the influence of organic solvents and relative humidity on structural and magnetic properties of unencapsulated Cu-PEA and Mn-PEA perovskite thin films synthesized by spin coating technique will be presented.

References

- [1] C. R. Kagan, D. B. Mitzi, C. D. Dimitrakopoulolos, *Science* **286**, 945 (1999).
- [2] Alexy O. Polyakov, Anne H. Arkenbout, Jacob Baas, Graeme R. Blake, Auke Meetsma, Antonio Caretta, Paul H. M. van Loosdrecht, and Thomas T. M. Palstra, *Chem. Mater.* **24**, 133, (2012).
- [3] Letian Dou, Andrew B. Wong, Yi Yu Minliang Lai, Nikolay Kornienko, Samuel W. Eaton, Anthony Fu, Connor G. Bischak, Jie Ma, Tina Ding, Naomi S. Ginsberg, Lin-Wnag Wang, A. Paul Alivisatos, Peidong Yang, *Science* **349**, 1518 (2015).
- [4] Seung-Hun Park, In-Hwan Oh, Sungil Park, Younbong Park, Ji Hyun Kim, and Young-Duk Huh, *Dalton Trans.* **41**, 1237 (2012).

Filtering spins at optical-field-induced charge transfers: petahertz spin diode

Jae Dong Lee^{*}

Department of Emerging Materials Science, DGIST, Daegu 711-873, Korea

A superb manipulation of the optical-field-induced petahertz (PHz, 10^{15} Hz) charge processing driven by a strong few-cycle optical waveform enables an exploration of spin processing at the same speed. In a proposed model of the two-dimensional (2D) ferromagnetic (FM)-nonmagnetic (NM) heterostructure, net spins are found to be filtered down to the NM layer at the optical-field-induced charge transfers oscillating between FM and NM layers. A phase retardation is also found to be caused in the charge transfer by the spin-orbit coupling. This finding introduces a petahertz spin diode, broadening horizons of the spintronics up to the subfemtosecond time span.



KMS 2017 Summer Conference

Special Session IV

‘산업체에서의 자성재료 및
부품개발 동향’ 2부’



무선통신 기기에서의 자성재료 개발동향

김진철*

SKC

스마트 폰, 태블릿 PC 등 디지털 모바일 기기와 고속무선통신기술의 발전으로 자성재료, 특히 연자성재료는 고속무선통신을 사용하는 스마트 폰, 태블릿 PC등의 신호배선에서 발생하는 방사노이즈를 효과적으로 차폐 및 흡수하는 소재로 활용되고 있을 뿐만 아니라, 최근 스마트 폰을 중심으로 적극 채용 되고 있는 근거리 이동통신 (NFC, Near Field Communication), MST (Magnetic Secure Transmission) 및 무선충전 기능에 있어 신호 및 전력을 효과적으로 전송하기 위한 필수 소재로 사용 되고 있다.

근거리 이동 통신(NFC), MST와 무선충전은 근거리에서 코일 형태의 안테나에 전류를 흘려주었을 때 발생하는 전자기파를 이용하여 신호 및 전력을 전달하게 되는데, 이때 송신부 안테나에서 발생하는 전자기파 형태의 신호 또는 전력을 집속하여 수신부 안테나로 효과적으로 전달하기 위하여 application별 사용 주파수에서 높은 투자율과 낮은 투자손실을 갖는 연자성재료가 반드시 필요하다.

본 고에서는 근거리에서 전자기파의 형태로 신호와 전력을 전달하는 NFC, MST, 무선충전에서 사용하는 각각의 주파수에서 높은 투자율과 낮은 투자손실을 갖는 자성재료의 종류 및 개발 동향에 대해 알아보하고자 하였으며, SKC에서 개발한 신규 소재에 대해 소개하고자 한다.

고포화자속밀도 및 저손실 특성을 갖는 비정질 자성소재의 개발 및 응용

송용설*, 김우철, 오한호, 윤세중, 황순모

(주)아모그린텍 부설연구소 자성합금개발팀

연자성(soft magnetic) 소재는 대부분의 전기전자 기기에서, 전력의 전달 및 공급과 관련된 회로의 부품으로 사용되고 있으며, 에너지의 전달 또는 에너지의 안정적 공급을 담당하게 된다. 지금까지 연자성 소재에 대한 전기전자 기기의 요구는 소형 경량화가 주였으나 최근에는 에너지의 효율적 사용 및 새로운 에너지원의 개발에 필요한 요구에 대응하기 위하여 고효율화가 추가적으로 요구되고 있다. 소형 경량화를 위하여 자성소재는 더 큰 포화자속밀도 및 더 높은 고주파에서 견딜 수 있는 소재가 요구되고 있으며, 고효율화를 위하여 손실이 더욱 낮은 소재가 요구되고 있다.

일반적으로 연자성 소재를 사용하는 트랜스포머나 인덕터의 경우, 소형 경량화할 수 있는 방안으로 사용주파수를 높이거나 포화자속밀도가 큰 자성소재의 사용을 생각할 수 있다. 최근까지 사용주파수를 높임으로 소형 경량화하는 방안을 주로 사용하였으나, 주파수를 높임에 따라 급격히 자성손실이 증가함으로 이를 견딜 수 있는 자성소재의 선택이 한계에 이르고 있다. 따라서 최근에는 포화자속밀도가 높은 자성소재의 개발에 많은 관심이 모아지고 있다.

또한 고효율화를 위한 방안으로 저손실 자성소재의 개발이 이루어지고 있다. 연자성 소재에 있어서 에너지의 전달 및 공급은 연자성 소재의 자화과정(magnetization)에 의해 이루어지게 되는데, 이 자화과정에 사용되는 에너지는 시스템에서 전달되는 에너지와 관계없이 사용되는 에너지로써 손실로 나타나게 된다. 즉, 에너지의 효율적 사용을 위해서는 이 자화과정에서 발생하는 연자성 소재의 손실을 줄여야 하는데, 사용되는 연자성 소재의 박판화, 입자 미세화, 비저항의 향상 등이 그 방법이 될 수 있다. 급속응고법에 의해 제조되는 비정질 연자성 소재는 기존의 연자성 소재에 비교하여 높은 비저항 및 박판화 등에 의해 매우 낮은 손실을 나타내게 됨으로써 전기전자 기기의 고효율화를 기대할 수 있다.

고포화자속밀도 및 저손실 특성을 갖는 비정질/나노결정립 자성소재의 개발을 위하여 자성원자인 Fe, Co, Ni, 핵형성 원자인 Cu, 핵형성 크기제어 원자인 Y, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta 및 비정질 형성 원자인 B, C, N, Si, P의 구성 원소별 영향을 분석하여 최적화된 합금 조성을 설계하였다. 설계된 합금조성에 따라 급속응고법을 이용하여 두께 25 μm 의 박판 형태로 연자성 소재를 제조하여 규격에 따라 슬리팅, 권취 및 열처리 공정을 통하여 자성코어로 제작되었다. 제작된 자성코어는 포화자속밀도 1.8 T 이상, 손실 0.28 W/kg (@ 50Hz, 1T) 이하의 자기적 특성을 나타내고 있다.

개발된 자성소재는 대출력 레이저, 고주파 전원, 고속 펄스발생기, SMPS, 고주파 필터, 저손실 고주파 트랜스포머, 고속 스위치 등의 다양한 산업분야에 응용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Akiri Urato, Hiroyuki Matsumoto, Shigeyoshi Yoshida, and Akihiro Makino, "Fe-Si-B-P-Cu nanocrystalline alloy ribbons with high saturation magnetic flux density prepared using industrial materials", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 10, pp. 3177-3179, 2011

차량모터용 자성재료 적용 현황

이형주*, 한보경, 이재령, 이두환

현대·기아자동차(주)

차량의 편의/안전 장치가 소형차까지 확대됨에 따라 전장부품의 수요가 급증하고 있다. 특히 모터의 수요가 증대되고 있으며 차량 1대당 평균 30~40개의 모터가 장착 중이고, 대형차의 경우 100개 이상의 모터가 장착되는 경우도 있다.

차량 내 모터 수요가 급증함에 따라, 모터에 적용되는 소재 개발도 활발히 진행되고 있다. 그 중 모터 구동에 가장 중요한 역할을 담당하는 영구자석, 전기강판 등의 자성재료의 개발은 특히 중요하다고 할 수 있다. 모터 내 자성재료는 모터의 성능, 중량, 사이즈, 원가 등의 결정에 직결되는 재료로서 고성능, 고효율, 저가화를 위해 다양한 소재 및 공법이 개발되고 있다. 또한, 차량용 모터는 용도에 따라 구동 조건 및 환경이 다르기 때문에 그에 따른 최적화된 자성재료의 개발이 필요하다.

본 발표에서는 차량용 모터에 적용 중인 자성재료의 종류와 특성을 소개하며, 더불어 앞으로의 개발방향에 대해 다루고자 한다.

Nd계 희토자석의 개발동향과 미래과제

김동환^{1*}, 공군승¹

¹성림첨단산업(주) 연구소, 대구광역시 달서구 호림동 8

현대사회가 점차 인간의 편이성을 추구하면서 여러 산업분야의 다양한 제품생산이 확대됨에 따라 에너지의 효율적 사용과 지구상의 환경오염 억제가 가장 큰 화두가 되어 있고, 이와 같은 미래 산업트렌드에 부응하기 위해 자동차, 로봇, 에너지, 정보분야 등 첨단산업 중심으로 모터의 사용량이 급격히 증가할 뿐 아니라 모터의 에너지 효율등급이 법적으로 점차 강화되고 있는 추세이다.

또한, 자성소재 측면에서 이들 고효율 모터에 사용되는 핵심소재인 고성능 희토자석 역시 수요가 급증하리라 예상되지만, 희토자석 사용상의 단점인 가격이 고가이고, 희토자원이 중국에 편중되어 정치적 상황에 따라 언제든지 공급에 문제가 있을 수 있다는 우려를 해결하지 못한다면 모터 설계자들 입장에서 희토자석형 모터를 유도전동기 혹은 동기형릴럭턴스 모터로 전환할 가능성이 높다. 따라서, 이와 같은 희토자석의 문제들을 해결하고 희토자석의 사용량을 더욱 확대시키기 위해 2000년대부터 희토자석에 사용되는 희토소재 중 고온용에 필수적으로 사용되는 중희토류(Dy, Tb) 사용량을 줄이는데 연구를 집중하고 있다. 그 외에 2011년 희토류 파동 이후에 희토 생산기지가 중국 이외에 호주, 미국, 말레이시아 등으로 다변화되어 있고, 경희토류(Nd, Pr)의 매장량은 인류가 향후 1000년 이상 사용할 수 있을 정도로 충분하기 때문에 아직 중국의 자원편중이 높은 고가의 중희토만 사용하지 않고 희토자석을 제조할 수 있다면 저가의 희토자석 및 안정적인 희토자석 공급 문제를 동시에 해결하는 해법이 된다.

현재까지 발표된 대표적인 중희토 저감기술에는 중희토 입계확산기술과 입자미세화 기술이 제시되고 있는데, 2005년 Shin-Etsu Chemical에서는 자석 표면에 DyF₃를 도포한 후 진공분위기에서 800~900°C 조건으로 가열하여 중희토 물질의 입계확산을 유도함으로써 보자력을 6 kOe 이상 향상시키는 연구결과를 발표한 바 있다.[1] 또한, 2010년 M. Sagawa 등은 중희토를 함유하지 않는 합금조성에서 분말입도를 1.2 μm까지 감소시켜 자석을 제조함으로써 보자력 20 kOe 이상 자석 제조가 가능하다는 연구 결과를 발표하였다.[2]

당사 연구소에서는 지난 3년간 중희토저감형 희토자석 개발에 역량을 집중하여 연구를 수행하였고 최근에는 국내 H사, L사의 자동차용 모터에 사용되는 중희토저감형 희토자석을 개발 중에 있다. 본 발표에서는 중희토저감형 희토자석 제조를 위한 당사의 고유기술을 소개하고, 향후 대한민국의 희토자석 사업의 기술적 발전 방안에 대한 제언을 하고자 한다.

참고문헌

- [1] H. Nakamura, K. Hirota, M. Shima, T. Minowa and M. Honoshima, IEEE Trans. Magn. **41**, 3844 (2005).
- [2] M. Sagawa: Proc. 21th Int. Workshop on REPM and their Applications (2010) 183.

자동차 전장부품용 영구자석 소재의 개발 및 응용

김효준*, 김상면

자화전자(주)

자동차와 정보통신기술(ICT)과의 융합으로 자동차 시스템의 전자화 및 전동화 추세가 가속될 전망이다. 전자화와 전동화의 변모 방향은 운전자를 사고로부터 보호해주는 안정성, 각종 편의를 제공하는 편의성 그리고 배기가스와 소비 에너지 절감이라는 친환경성의 가치들을 경제적으로 창출하는 것에 지향점을 두고 있다. 자동차의 전자화와 전동화에 핵심 소재인 영구자석은 각종 자기식 센서와 전동기 분야에서 두드러진 활용범위의 확대를 보이고 있다. 전장 부품 분야에서도 다양한 방식의 융복합화 제품이 출현하고 있고 이러한 기술적 환경적 변화에 영구자석은 소재 자체의 자기특성 향상뿐만 아니라, 소재를 활용해 적용하는 전방위 산업의 설계적 측면에서 내열대책, 내구성 및 전체적인 공정비용의 절감이라는 과제를 해결할 새로운 기술적 접근이 필요하다.

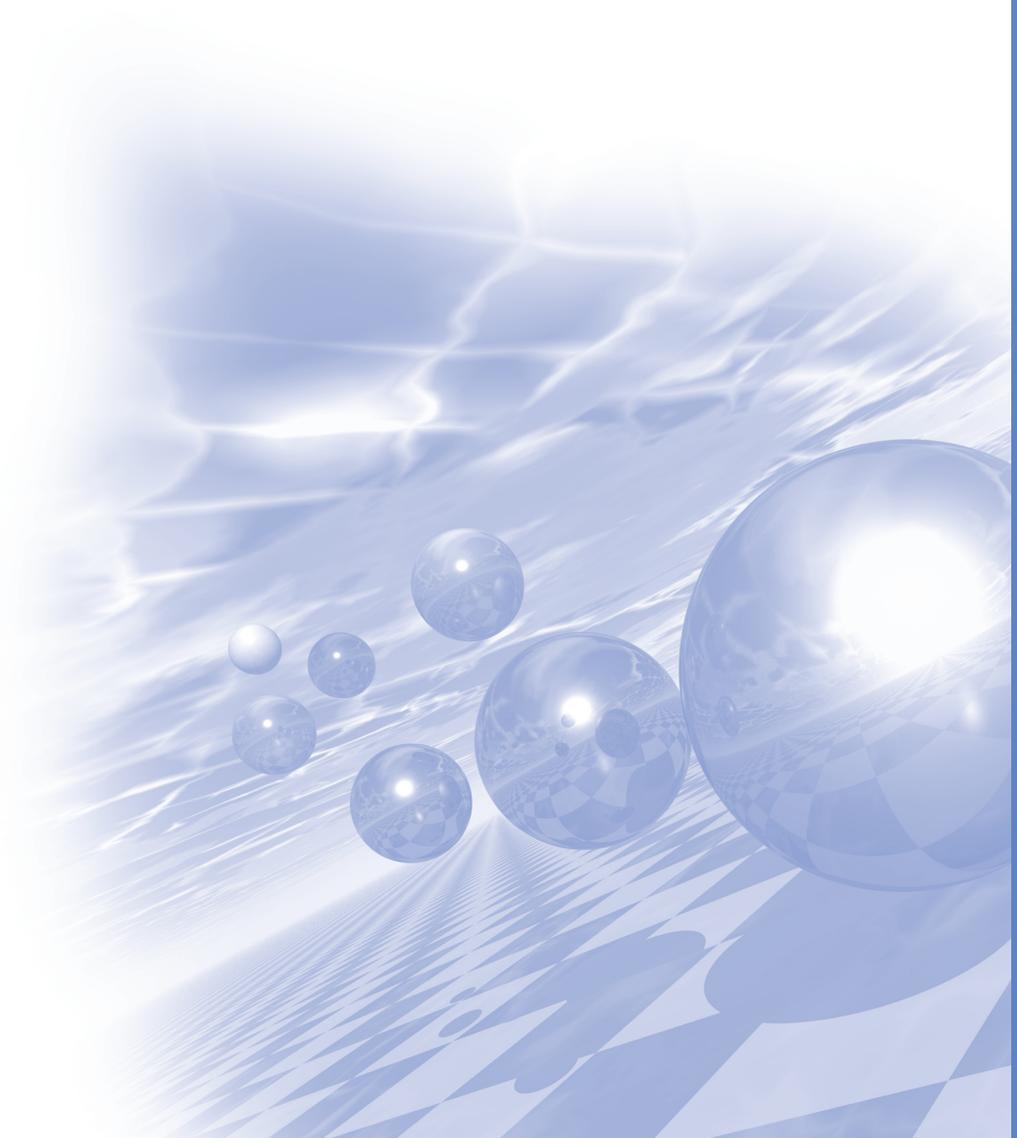
본 학술 발표에서는 자동차 전장에 사용되는 영구자석 소재의 개략적인 기술현황과 각 전장 부품별 특성과 그에 따른 영구자석의 활용 사례를 살펴보고 기술적 과제들을 함께 소개하고자 한다.



KMS 2017 Summer Conference

Special Session V

‘의과학연구회’



영상의학정보를 이용한 3D 프린팅 기술의 응용 사례

성열훈*

청주대학교 보건의료대학 방사선학과

1. 서론

과거에는 조형물을 생산할 때 입체의 재료를 기계 또는 레이저 등을 이용하여 자르거나 깎는 절삭가공 (Subtractive Manufacturing, SM) 방식으로 제작하였다. 하지만 1984년 미국의 Charles (Chuck) W. Hull이 삼차원 (three-dimensional, 3D) 프린터 기술을 최초로 개발하면서 SM 방식과 반대되는 개념의 생산방식인 적층가공 (additive manufacturing, AM) 방식이 등장하였다[1]. AM 방식은 조형물의 단층면을 아주 얇게 잘라 분석한 설계 도면을 기반으로 액체, 파우더 형태의 폴리머(수지), 금속, 목재, 식재료 등을 적층형태(layer-by-layer)로 완성하는 방식으로 신속하게 제작할 수 있어 쾌속조형(rapid prototyping, RP) 방식이라고도 불린다[2,3]. 이러한 기술은 제4차 산업혁명을 주도하는 융합기술로 미국을 비롯한 전 세계가 많은 관심을 가지고 있어 연구 성과가 도출되고 있다. 그러나 3D 프린팅 기술을 적용하거나 응용하는 국내 사례는 해외 사례에 비하여 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히, 맞춤형으로 소량제작이 가능한 3D 프린팅 기술은 의료분야의 특성과 잘 어울려 인공 뼈, 의족, 보청기 개발 등에 활용되고 있다[4,5]. 따라서 본 연구에서는 영상의학정보를 이용하여 3D 프린팅 기술로 제작된 영상의학 분야의 3D 프린팅 사례를 보고하고자 한다.

2. 실험방법과 결과

본 연구에서는 전산화단층영상(CT)정보를 기반으로 자기 맞춤형 부목을 3D 프린팅 기술로 출력하였다. 3D 프린팅 기술은 열에 잘 녹는 고체 플라스틱과 같은 재료를 가는 실(필라멘트)형태의 열가소성 물질을 노즐 안에서 녹여 얇은 필름형태로 출력하여 적층하는 용융적층조형술(fused deposition modeling, FDM)을 사용하였다 [6]. 3D 프린팅 출력과정은 Fig. 1과 같이 총 4단계로 실시하였다. 첫 번째, 스캐닝 단계는 CT를 이용하여 피검자 손목의 영상 해부학적 정보를 획득하는 단계이다. 두 번째, 모델링 단계는 전문 모델러 프로그램에서 재구성된 3D 렌더링을 기반으로 기본 프레임을 구성하고 본 연구 목적에 맞게 부목을 디자인하는 단계이다. 세 번째, 3D 출력 단계에서는 3D 모델링된 정보를 출력할 수 있는 STL 파일로 저장한다. 그리고 슬라이서 프로그램을 이용하여 G-code를 생성하는 후 출력하는 단계이다. 마지막으로 후가공 단계는 하도처리, 중도처리 그리고 상도마감 순으로 진행하였다

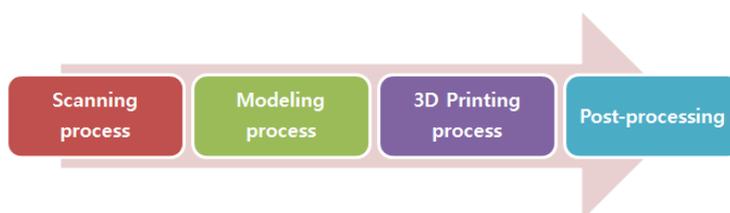


Fig. 1. 3D printing process

그 결과, 착용 시 발생할 수 있는 피부 오염이나 냄새 등을 방지할 수 있는 그물망 형태의 부목이 출력되었다. 출력된 부목과 기존 부목과의 방사선 촬영결과 Fig. 2와 같이 손 허리뼈와 주변 연부 조직 간의 신호강도가 3D 프린팅된 부목 방사선영상에서 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

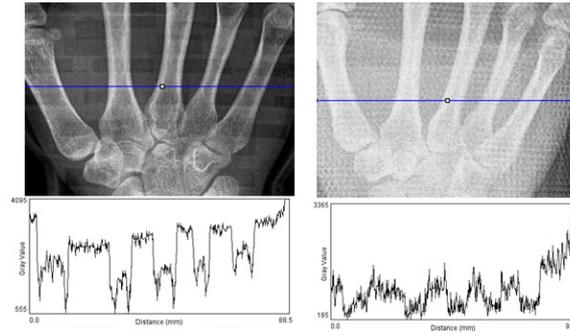


Fig. 2. The radiography and plot profile (a) the cast of 3D Printing (b) the conventional cast

3. 고찰

3D 프린팅 기술이 우리나라 경제의 신동력이 되기 위해서는 다양한 콘텐츠 개발이 시급하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 CT 정보를 이용하여 골 모형을 출력하는 범위를 벗어나 전문모델러에서 CT정보를 기반으로 손목 부목을 모델링하여 3차원 프린팅하였다. 특히, CT정보는 병원에서 사용하는 장비로 손쉽게 접근할 수 있는 장점이 있다. 출력된 손목 부목은 중수지관절과 주관절의 운동에 지장을 주지 않도록 하였고 엄지손가락은 움직일 수 있도록 하였다. 기존의 부목은 통풍이 잘 안되고 샤워나 목욕 시 불편감이 있었고 오랫동안 착용 시 약취 등의 비위생적인 단점이 있었으나 3D 프린터로 출력된 부목은 자기 CT정보를 바탕으로 출력하여 피검 사자의 손목의 외형과 일치하였으며 그물 형태로 디자인되어 기존의 부목의 단점을 개선할 수 있으리라 판단된다. 또한 강도면에서도 기존 부목보다 강하여 골절부위 보호기능도 충분히 있었다. 골절 시 방사선영상으로 추적 검사를 시행하여 골절의 상태를 관찰해야 하는데 3D 프린터로 출력된 부목은 기존 부목보다도 방사선 투과 선량이 약 4배 정도 많아 방사선영상의 품질이 상대적으로 우수하여 손목뼈와 주변의 뼈 구조물 그리고 관절사이공간이 잘 관찰할 수 있어 방사선영상 추적 검사 시 매우 유용할 것으로 판단된다. 또 기존 부목은 장시간 착용 후 해체 시 왕복 톱(oscillating saw)을 이용해야하는데 환자가 톱날에 의해 피부손상을 일으킬 수 있고 심리적으로 불안감을 줄 수 있지만 3D 프린터로 출력된 부목은 해체가 용이하고 안전한 장점이 있었다.

4. 결론

3D 프린팅 기술로 출력된 부목은 기존의 부목 소재보다도 방사선투과성이 우수하여 인체내부 관찰이 용이 하였고, 자기 영상정보를 이용하여 자기 맞춤형 제작이 가능하였으며 그물망형태로 제작하여 통풍이 가능하여 2차 감염 예방에 도움을 줄 수 있으리라 기대한다.

5. 참고문헌

- [1] J. P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, "Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping", Annals of the CIRP, Vol. 47, No. 2, pp. 525-540, 1988.
- [2] P. Kulkarni, A. Marsan, D. Dutta, "A review of process planning techniques in layered manufacturing", Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 18-35, 2000.
- [3] D. Y. Yang, H. K. Shon, "Recent State of Rapid Prototyping Technique for Rapid Product Manufacturing", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 10, pp. 5-10, 2000.
- [4] <http://www.thingiverse.com/>
- [5] E. J. Choi, S. A. Kim, J. Y. Bae, et al., "A Study on the State-of-the-Art of 3D Printers", Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 21, No. 2, pp. 385-388, 2013.
- [6] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 Iss: 4, pp. 248-257

자기공명영상을 이용한 영상유도방사선치료의 동향

장재욱^{1,2*}, 주명식³, 서선열⁴, 김명삼⁵, 황도근⁶, 조재환⁷

¹충남대학교병원 방사선종양학과

²강원대학교대학원 보건의료과학과

³부천순천향대학교병원 영상의학과

⁴울지대학병원 영상의학과

⁵MS메디캠프

⁶상지대학교 한방의료공학과,

⁷안산대학교 방사선과

영상유도방사선치료는 방사선치료기기 또는 동일 치료실내에 설치된 영상획득 장치로부터 획득된 영상을 치료 전 치료계획에 사용된 영상과 비교하여 치료 위치를 확인하고 환자의 자세 재현성을 증가시켜 방사선치료의 정확성을 극대화 시키는 치료방법으로 영상유도방사선치료의 발전으로 표적에 대한 방사선량증가와 정밀한 방사선치료가 가능해 졌다.

영상유도방사선치료기기는 영상획득에 사용되는 에너지 범위에 따라 크게 kVCT와 MVCT영상으로 구분되며, 선형가속기에서 발생된 MV helical CT를 이용하여 MVCT를 촬영하는 토모테라피, On-board imaging system을 사용하는 MV CBCT, kV CBCT 등 다양한 치료 장비들이 임상에서 사용되고 있다.

그러나 이러한 영상유도방사선치료기기는 X-ray를 이용한 CT영상을 사용하기 때문에 영상의 해상력을 증가시키는데 한계가 있으며, 연부조직에 분해능이 현저하게 저하되는 점, 그리고 영상획득 과정에서 환자에게 2차적인 방사선피폭을 발생시키는 단점이 있다.

자기공명영상은 CT영상에 비해 해상력, 특히 연부조직의 해상력이 매우 뛰어나고 영상획득 과정에서 환자에게 2차적인 방사선 피폭을 발생시키지 않기 때문에 MRI를 융합한 영상유도방사선치료기기가 지속적인 개발이 이루어지고 있으나, 선형가속기와 MR장비와의 결합은 자기장 차폐의 기술적 문제와 장비의 거대화로 기술개발이 지연되고 있다.

최근 도입되고 있는 ViewRay system은 0.35T의 소형 MRI장비와 3개의 ⁶⁰Co 선원을 이용한 방사선치료장비가 결합된 형태의 새로운 영상유도방사선치료장비로 장치가 비교적 소형이며, ⁶⁰Co선원을 사용하기 때문에 장치가 비교적 단순하고 선형가속기에 비해 자기장의 영향에 대해 상대적으로 유리하며, MRI영상을 이용하여 실시간으로 표적과 인접장기의 움직임에 대한 직접적인 추적이 가능한 장점이 있다. 그러나 ⁶⁰Co 선원의 반감기에 따른 선원의 교체와 선형가속기에 비해 낮은 출력에너지 등은 치명적인 단점이 존재한다. 따라서 지속적인 기술개발을 통한 MR-LINAC의 빠른 도입이 이루어진다면, 임상에서 환자치료에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

방사선 흡수선량 보정위한 대기보정계수 산출 장치 개발

홍주완^{1*}, 박철수², 안우상³, 서정민⁴, 최재혁⁵, 원희수¹

¹분당서울대학교병원 방사선종양학과

²한림성심대학교 방사선학과

³강릉아산병원 방사선종양학과

⁴대원대학교 방사선학과

⁵국립암센터 양성자치료실

1. 서론

방사선 흡수선량 측정 시 이온함을 이용한 방식은 기온과 기압 변화에 따라 전리량 발생 차이에 따른 부정확한 방사선량이 측정된다. 따라서 이온함을 이용한 방사선 흡수선량 측정 시 기준대기상태 조건과 차이에 따른 기온, 기압 측정 후 대기보정계수 산출을 통한 방사선 흡수선량 보정은 필수적이다. 본 연구의 목적은 실시간 기온과 기압 측정 후 대기보정계수 산출이 가능한 대기보정계수 산출 장치를 개발하고자 한다.

2. 실험방법과 결과

마이크로컨트롤러와 기온, 기압센서를 이용하여 대기보정계수 산출 장치를 제작하였다. 측정된 자료는 마이크로컨트롤러와 컴퓨터간 시리얼 통신을 통해 csv 파일로 획득하였다. 획득한 csv 파일 분석을 위해 엑셀 매크로를 작성하였으며, 이를 통해 기온, 기압, 대기보정계수를 측정 및 산출하고 각각 평균값과 그래프를 도출하였다. 제작한 대기보정계수 산출 장치 성능평가를 위해 9곳의 기온과 기압을 측정하였으며, 동시에 대기보정계수도 산출 하였다. 기온과 기압 측정단위는 각각 섭씨온도(degree of celsius, °C)와 밀리미터 수은주(millimeter of mercury, mmHg)로 측정되도록 프로그래밍하였다. 대기보정계수 산출 장치 정확도 측정을 위해 디지털 기온계(C100, G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH, Germany)와 디지털 기압계(C300, G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH, Germany)를 이용하여 동시 측정을 진행하였다. 각 측정값 통계분석은 일표본 t-검정을 하였으며, 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 로 하였다. 9곳의 기온 측정결과 평균값과 표준편차는 각각 24.07 ± 0.04 , 24.87 ± 0.21 , 24.12 ± 0.07 , 24.67 ± 0.11 , 23.97 ± 0.01 , 24.96 ± 0.01 , 24.55 ± 0.02 , 24.24 ± 0.07 , 23.63 ± 0.18 로 디지털 기온계 측정값과 유의한 차이를 보이지 않았다 ($p > 0.05$). 기압 측정 결과 평균값과 표준편차는 각각 752.34 ± 0.03 , 752.23 ± 0.03 , 750.18 ± 0.03 , 752.37 ± 0.03 , 752.27 ± 0.03 , 752.26 ± 0.03 , 750.05 ± 0.03 , 750.12 ± 0.03 , 749.63 ± 0.03 로 디지털 기압계 측정값과 유의한 차이를 보이지 않았다 ($p > 0.05$).

3. 고찰

본 연구에서 개발한 대기보정계수 산출 장치는 기존 기온계와 기압계 대체 가능성을 확인하였으며, 장치의 기본 개념을 제시하였다고 판단된다.

4. 결론

이는 방사선 흡수선량 측정 시 업무능률향상에 기여할 수 있으며, 대기보정계수 산출 오류 가능성을 낮출 수 있기에 안전하고 정확한 방사선 이용에 유용하게 사용될 것이라 사료된다.

5. 참고문헌

- [1] Seuntjens, J., et al., Absorbed dose to water reference dosimetry using solid phantoms in the context of absorbed-dose protocols. *Med Phys*, 2005. 32(9): p. 2945-53.
- [2] Almond, P.R., et al., AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Medical physics*, 1999. 26(9): p. 1847-1870.
- [3] IAEA, Absorbed Dose Determination in external beam radiotherapy, IAEA technical report 398. 2000.
- [4] Huq, M.S., P. Andreo, and H. Song, Comparison of the IAEA TRS-398 and AAPM TG-51 absorbed dose to water protocols in the dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Physics in medicine and biology*, 2001. 46(11): p. 2985.
- [5] Islam, N.M., The impact of water temperature on the measurement of absolute dose. 2016.

물리적으로 변화가 전산화 단층 영상에 미치는 영향

전민철^{1*}, 한만석², 유세종³, 나길주⁴, 김갑중⁵, 김병국⁶, 김기홍⁷

¹대전보건대학교 방사선학과

²강원대학교 방사선학과

³건양대학교병원 영상의학과

⁴목포과학대학 방사선과

⁵송호대학교 방사선과

⁶한국과학기술원

⁷춘해보건대학교 방사선과

1. 서론

CT에서 감약에 영향을 미치는 물리적 요소로는 X-선 광자 에너지, 조직의 밀도, 조직의 원자번호, 물질의 단위 중량당 전자수(electrons/gram) 등이다. 이들은 CT 영상에서 HU, 노이즈 등 화질을 구성하는 요인들에 영향을 미친다. 이에 본 연구는 CT 화질의 구성요소인 HU, noise를 측정해서 X선 광자에너지, 조직의 밀도와 영상 재구성에 있어 필수 요소인 kernel 변화가 화질에 어떠한 영향을 미치는 가를 평가하고자 한다.

2. 실험방법

1. 물리적 요인 변화에 따른 HU, Noise 측정

관전압, 관전류량 변화에 따른 HU와 Noise 측정하기 위하여 GAMMEX사의 RMI CT density phantom (USA)을 스캔 후 영상을 획득하였다.

2. 획득된 영상을 이용하여 알고리즘(kernel)을 변경하여 HU와 Noise를 측정하였다.

3. 결과

1. 관전압 변화에 따른 HU와 Noise 측정에서 HU는 물리적 성질에 따라 -719.7 HU ~ 1877.3 HU 그리고 Noise는 7.8 ~ 55.7로 나타났다. 관전류량 변화에 따른 HU와 Noise 측정에서 HU는 물리적 성질에 따라 -716.0 HU ~ 1353.0 HU, Noise는 11.7 ~ 50.4로 나타났다.

2. kernel 변화에 따른 HU와 Noise 측정에서 HU는 물리적 성질에 따라 -707.0 HU ~ 1362.3 HU 그리고 Noise는 8.1 ~ 116.1로 나타났다.

4. 고찰 및 결론

HU는 관전압, 밀도에 영향을 받고, 노이즈는 관전압, 관전류량, Kernel 그리고 밀도의 영향을 받는다. 이는 대조도 분해능, 공간분해능에 영향을 미치기 때문에 분해능을 향상시키기 위해서는 검사 부위, 목적에 맞게 X선 광자에너지, kernel을 선택해서 사용해야 한다.

5. 참고문헌

[1] H. C. Jang, Y. S. Kim, H.J. Kim, Analysis of Attenuation Differences According to Radiolucent and Radiopaque Materials : Based on DECT (Dual Energy Computed Tomography), J. The Korea Academia-Industrial cooperation Society. 15(3): 1584-9; 2014.

[2] S. M. HA, S. H. Jung, H. J. Chang, E. A. Park, H. J. Shim, Effects of Iterative Reconstruction Algorithm,

- Automatic Exposure Control on Image Quality, and Radiation Dose: Phantom Experiments with Coronary CT Angiography Protocols, *J. Progress in Medical Physics*. 26(1): 28-35; 2015.
- [3] H. M. Lee, B. G. Yoo, D. C. Keon, Evaluation to Obtain the image According to the Spatial Domain Filtering of Various Convolution Kernels in the Multi-Detector Row Computed Tomography, *J. Radiological science and technology*. 31(1): 71-81; 2008.
- [4] E. Gallagher, T. Lukens, S. Colussiello, D. Morgan, S. Cantrill, M. Campbell, Clinical policy: critical issues for the initial evaluation and management of patients presenting with a chief complaint of nontraumatic acute abdominal pain, *Ann. Eme. Med.* 36(4): 406-15; 2000.
- [5] B. Siewert, V. Raptopoulos, M. F. Mueller, M. P. Rosen, M. Steer, Impact of CT on diagnosis and management of acute abdomen in patients initially treated without surgery, *Am. J. Roent.* 168(1); 173-8; 1997.

기능적 자기공명영상 기반 뇌 활성화 네트워크 분석을 위한 인과성 분석 기법 비교 연구

정영진^{1*}, 김창규², 배석환³, 김정호⁴, 김유민⁵, 장현철⁶

¹동서대학교 방사선학과

²김천대학교 방사선학과

³건양대학교 방사선학과

⁴건양대학병원 방사선종양학

⁵한림대춘천성심병원 영상의학과

⁶수성대학교 방사선과

기능적 자기공명영상기반 뇌 네트워크 분석은 뇌 질환 및 활동의 메커니즘을 이해하는 것에 상당히 임상적으로 중요한 자료로 활용된다. 그러나, 대부분의 기능적자기공명 영상 장치의 초당 프레임 획득 비율이 0.5Hz 미만이며, 이에 따라서 기존의 다양한 네트워크 분석기법의 적용을 제한될 수 있다. 본 연구에서는 낮은 샘플링율(sampling rate)을 가지는 자기공명영상 데이터를 기반으로 한 뇌 활동의 연결성 및 인과성 분석을 위한 해석 신호(analytic signal)기반의 기법을 제안하고 시험하였다. 해석신호를 기능적 연결성과 인과성 분석을 위해서 순간 위상 정보(instantaneous phase information)를 추출 및 응용하였다. 제안한 기법을 검증하기 위해서, 실제의 기능적 자기공명영상 신호를 바탕으로, 다양한 조건을 변경해 가며 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 해석신호 기반 인과성분석기법으로 모의 시험하였다. 그 결과 제안한 기능적 연결성 및 인과성 분석 기법이 기존의 다른 다양한 분석기법들 보다 정확성이 더욱 높음을 확인하였다. 또한 실제의 기능적 자기공명영상 데이터를 측정 및 분석에 적용하였을 때, 이미 알려진 뇌 활동을 관찰할 수 있었다. 제안된 알고리즘은 향후 다양한 기능적 자기공명영상의 네트워크 분석에 잘 활용될 수 있을 것이라 여겨진다.

Keywords: 해석신호, 인과성분석, 기능적자기공명영상, 기능적 연결성, 뇌 네트워크

Monte Carlo Simulation of X-ray beam design for multi-energy imaging with charge-integrating detector Using GATE

Cheol-Ha Baek^{1,2,3*}, Daehong Kim⁴

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

³Department of Health Science, Dongseo University

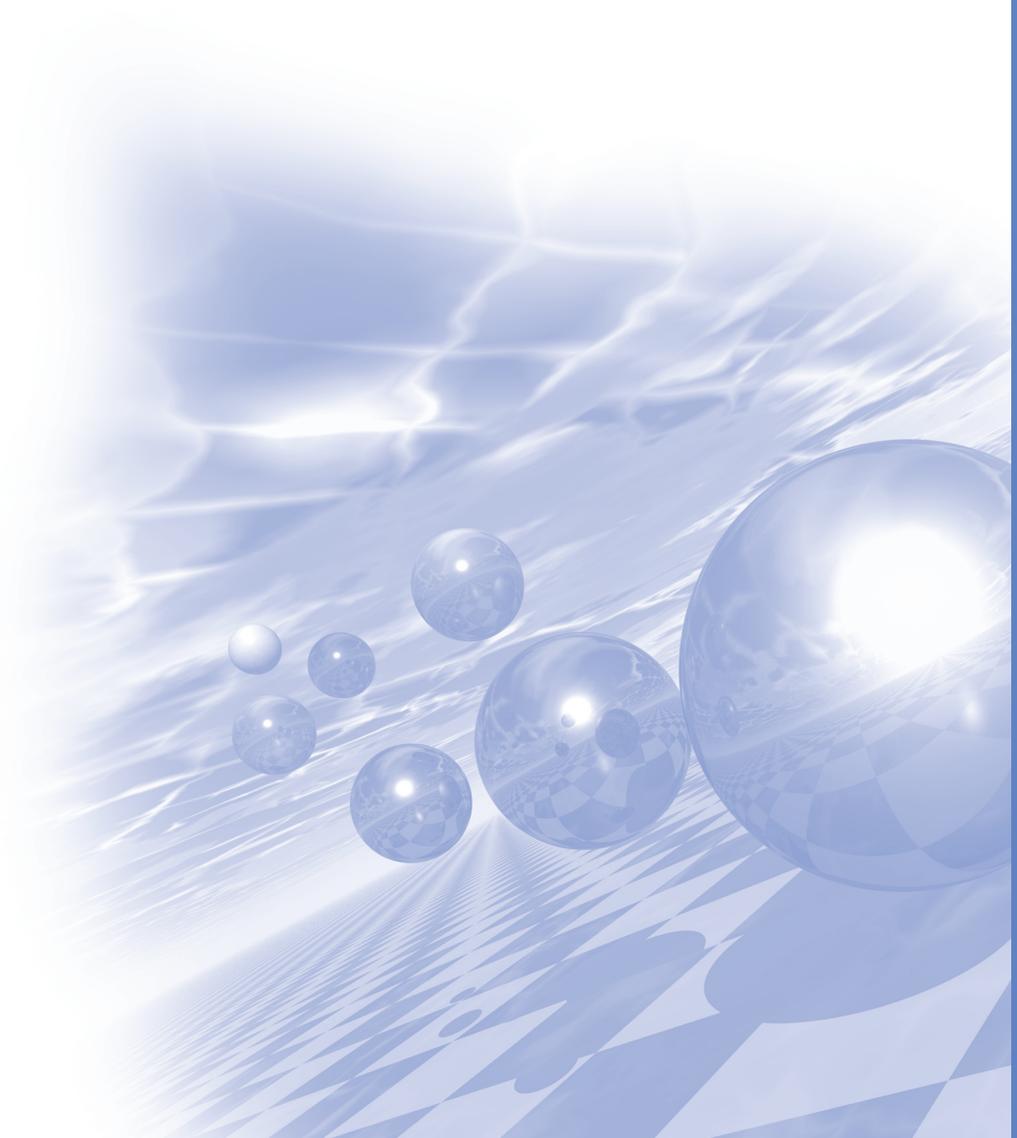
⁴Department of Radiological Science, Eulji University

Multi-energy X-ray imaging systems have been widely used for clinical examinations. In order to enhance the imaging quality of these X-ray systems, a dual-energy system that can obtain specific information has been developed in order to discriminate different materials. Although the dual-energy system shows reliable performance for clinical applications, it is necessary to improve the method in order to minimize radiation dose, reduce projection error, and increase image contrast. The purpose of this study is to develop a triple energy technique that can discriminate three materials for the purpose of enhancing imaging quality and patient safety. The X-ray system tube voltage was varied from 40 to 90 kV, and filters (that can generate three X-ray energies) were installed, consisting of pure elemental materials in foil form (including Al, Cu, I, Ba, Ce, Gd, Er, and W). The X-ray beam was evaluated with respect to mean energy ratio, contrast variation ratio, and exposure efficiency. In order to estimate the performance of the suggested technique, Monte Carlo was conducted, and the results were compared to the photon-counting method. As a result, the density maps of iodine, aluminum, and polymethyl methacrylate (PMMA) using the X-ray beam were more accurate in comparison to that obtained with the photon-counting method. According to the results, the suggested triple energy technique can improve the accuracy of the determination of thickness of density. Moreover, the X-ray beam could reduce unnecessary patient dose.



KMS 2017 Summer Conference

구두발표 V



Exchange coupled hard (LTP MnBi)/soft ($\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$) composites

Jihoon Park*, Hui-Dong Qian, Ping-Zhan Si, Jong-Woo Kim and Chul-Jin Choi
Powder & Ceramic Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

1. Introduction

Ferromagnetic low temperature phase (LTP) MnBi possesses a moderate magnetization of 8 kG [1] and the Curie temperature (T_c) of 613 K [2], and positive magnetic anisotropy coefficient [3]. However, its maximum energy product, $(BH)_{\text{max}}$, is about 17 MGOe at 290 K [1]. This maximum energy product is not enough for high-energy magnetic device applications. Therefore, we have proposed core (LTP MnBi hard magnet)/shell (soft magnet) structure to enhance the $(BH)_{\text{max}}$.

2. Experiment

We have synthesized LTP MnBi micron-powder by arc-melting technique and manual grinding, and $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$ nano-powder by chemical reaction. The synthesized LTP MnBi and $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$ powder were mixed using low energy ball milling. The volume fraction of hard magnetic phase (f_h) dependences of magnetizations and intrinsic coercivities were measured by vibrating sample magnetometer (VSM) and compared with theoretical values. The theoretical f_h dependences of magnetizations [4] and intrinsic coercivities [5] were calculated as shown in Fig. 1.

3. Discussion

The magnetizations and coercivities of synthesized powder were 7 kG and 2.8 kOe for LTP MnBi powder and 16.7 kG and 0.1 kOe for $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$, respectively. It was found that magnetizations and coercivities of low energy ball milled core(LTP MnBi hard magnet)/shell(soft magnet) composites follow theoretically calculated values as a function of f_h as shown in Fig. 1. This indicates that well controlled exchange coupled hard and soft composite magnets can be a breakthrough of enhancement of $(BH)_{\text{max}}$, as shown in Fig. 2, for permanent magnets without rare-earth-elements.

4. Conclusion

The MnBi/FeCo composites were fabricated by mixing separately synthesized MnBi and $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$ powder. The volume fraction of hard magnetic phase (f_h) dependences of magnetizations and intrinsic coercivities of the composites well follow the theoretical values, which indicates potential enhancement of $(BH)_{\text{max}}$, if one can successfully synthesize perfectly exchange coupled composite.

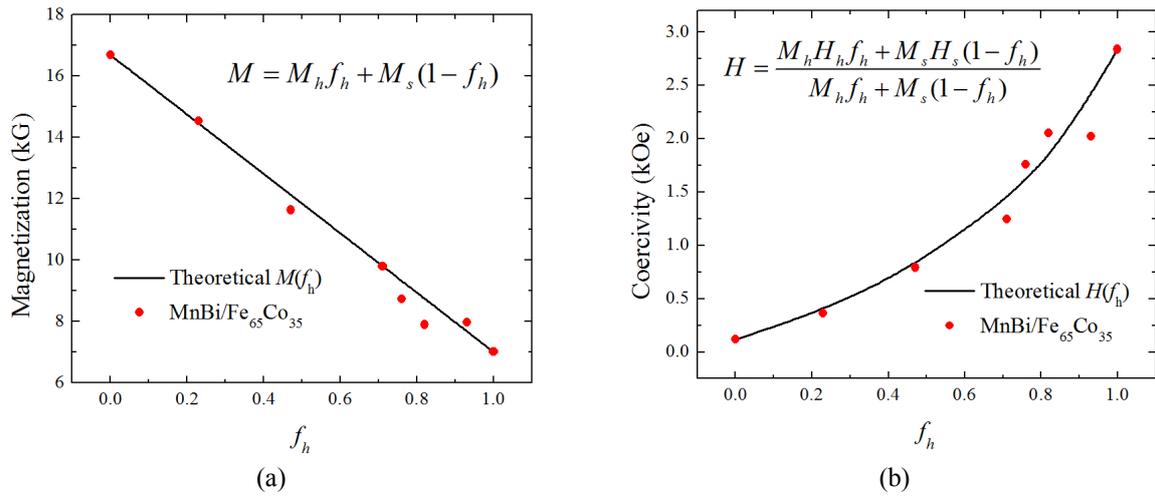


Fig. 1. Experimental and theoretical volume fraction of hard magnetic phase (f_h) dependence of (a) magnetizations and (b) coercivities.

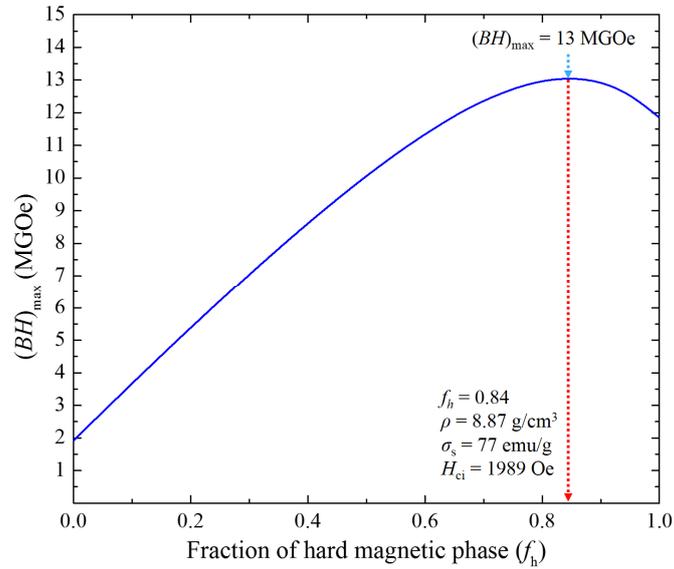


Fig. 2. Calculated maximum energy product, $(BH)_{\max}$, as a function of fraction of hard magnetic phase (f_h) based on the experimental magnetizations and intrinsic coercivities in Fig. 1.

5. References

- [1] R. G. Pirich, D. J. Larson, Jr., Patent 4,784,703. 15 Nov. 1988.
- [2] B. W. Roberts, Phys. Rev. **104**, 607 (1956).
- [3] X. Guo, X. Chen, Z. Altounian, and J. O. Ström-Olsen, Phys. Rev. B **46**, 14578 (1992).
- [4] E. F. Kneller and R. Hawig, IEEE Trans. Mag. **27**, 3588 (1991).
- [5] J. Park, Y. K. Hong, J. Lee, W. Lee, C. J. Choi, X. Xu, and A. M. Lane, J. Magn. **19**, 55 (2014).

Ga이 첨가된 Nd-Fe-B 소결자석의 1차 열처리 온도 변화에 따른 미세구조와 자기적 특성 최적화 연구

배경훈^{1*}, 이성래¹, 김효준², 이민우³, 장태석³

¹고려대학교 신소재공학과, 서울특별시 성북구 안암동 고려대학교, 136-713

²자화전자 R&D 센터, 충청북도 청원군 자화전자, 363-922

³선문대학교 신소재공학과, 충남 아산시 탕정면 선문대학교, 336-708

1. 서론

Nd-Fe-B 소결자석에서 연속적이고 균질한 비자성 Nd-rich 입계상 형성은 Nd₂Fe₁₄B(주상) 입자간의 자기적 결합과 계면에서의 결합을 효과적으로 감소시켜 잔류자화 감소 없이 보자력을 증가 시킬 수 있다 [1, 2]. Cu, Al, Ga과 같은 Nd-rich 상의 용점을 감소시킬 수 있는 원소 첨가는 열처리 이후, Nd-rich 입계상의 연속성 및 균질성을 향상 시킨다 [1-3]. 그러나, 소결자석 내에는 여전히 hexagonal-Nd₂O₃상과 Fe 함량이 높은 강자성 입계상이 형성되어 주상과의 격자부정합도와 주상간의 자기적 결합을 증가시켜 보자력 향상을 방해한다 [1, 2]. 소결자석에 Ga 첨가는 Nd-rich 상의 젖음성 향상 및 구조/화학적 결합을 개선하기 위한 효과적인 원소로 보고되어 있다 [3]. 특히, 특정 열처리 조건에 따라 강자성 입계상의 형성을 효과적으로 억제 시킬 수 있다 [3]. 하지만, 열처리 동안 Ga에 의한 Nd-rich 상의 미세구조 상변태 거동은 아직 명확하게 규명 되지 않았다. 본 연구에서는 Ga이 첨가된 Nd-Fe-B 소결자석의 최적의 자기적 특성을 갖는 1차 열처리 온도를 찾고 그 원인을 규명 하였다. 특히, 1차 열처리 온도 변화에 따른 미세구조 특성 및 상변태 거동을 통하여 Ga 첨가 효과를 연구 하였다.

2. 실험방법

Ga이 0.3 at.% 첨가된 Nd_{28.5}Dy_{0.80}Fe_{bal}B_{1.0}Ga_{0.3}Cu_{0.15}M_{1.87} (at.% M=Al, Co, Nb)인 Nd-Fe-B 소결자석을 준비 하였다. 비교를 위해 Ga이 첨가되지 않은 소결자석(un-doped)을 함께 준비 하였다. 자석의 소결은 1070°C에서 4시간동안 진행 하였다. 소결 이후, 850°C~790°C에서 2시간 동안 온도 변화를 주었다. 이후, 2차 열처리를 530°C에서 2시간, 그리고 3차 열처리를 500°C에서 2시간동안 고정 하여 진행 하였다. 미세구조와 자기적 특성 분석은 EPMA, Line profile (JXA-8500F) (Electron Probe Micro Analyzer), BH loop tracer을 이용하여 미세구조 변화 및 자기적 특성 변화를 관찰하였다. 온도에 따른 상변태 분석은 DSC (differential scanning calorimetry)를 이용하여 Ga 첨가에 따른 상변태 온도를 규명하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Ga이 doping된 (0.15 at.% Cu/ 0.3 at.% Ga) 자석과 un-doped (0.15 at.% Cu) 자석의 1차 열처리 온도 (850 → 760°C) 변화에 따른 자기적 특성 변화를 나타낸다. un-doped 자석은 850°C에서 최적의 특성을 보였으며, 1차 열처리 온도가 감소함에 (850 → 760°C) 따라 보자력도 (17 → 16.4 kOe) 함께 감소하였다. 반면, Ga이 doping된 자석은 790°C에서 가장 높은 보자력을(18.25 kOe) 나타내었으며, un-doped 자석보다 효과적으로 열처리 온도를 감소시킬 수 있었다. Ga이 doping된 자석의 잔류자화는 1차 열처리 온도 감소로 인해 회복 되었다. 미세구조 분석 결과, un-doped 자석은 1차 열처리 온도가 감소함에 따라, 구조/화학적 결합으로 작용하는, Cu 함량이 낮은 hexagonal-Nd₂O₃상과 Fe 함량이 높은 amorphous-Nd₆(Fe,Cu)₁₄상이 형성 되었다. 반면, 790°C에서 1차 열처리 된 Ga이 doping된 자석은 Ga이 용해된 cubic-Nd₂O₃상과 tetragonal-Nd₆Fe₁₃(Cu,Ga)₁상이 형성 되어 구조/화학적 결합을 최소화 하였다. 특히, Ga 원자가 Nd₆(Fe,Cu)₁₄상에 Fe와 치환되면 반강자성체 (비자성체)로

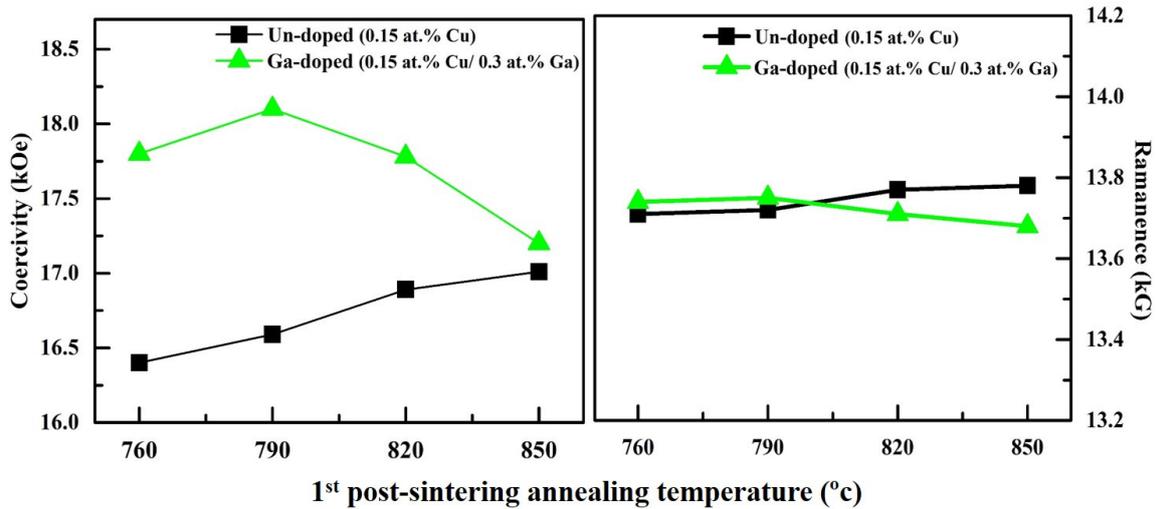


그림. 1 1차 열처리 온도 변화에 따른 Ga이 doping된 자석과 un-doped 자석의 자기적 특성 변화

알려진 tetragonal-Nd₆Fe₁₃(Cu,Ga)₁상이 형성 될 수 있다 [4]. 또한, un-doped 자석과 달리, Cu 함량이 낮은 hexagonal-Nd₂O₃상에 Ga이 용해되면서 부족한 Cu 함량을 보완 해주어 미세구조가 효과적으로 개선되었다. DSC 분석결과, Ga이 doping된 자석은 Nd-rich 상의 용점이 효과적으로 감소되었다. 하지만, 790°C보다 고온에서 열처리를 진행하게 되면, tetragonal-Nd₆Fe₁₃(Cu,Ga)₁상이 공정 반응이 아닌 포정 반응에 의해 형성되기 때문에 상대적으로 입계상 형성이 어려워 보자력 향상에 기여하지 못한다. 또한, fcc-NdO 산화물 상의 형성을 촉진시켜 cubic-Nd₂O₃상의 형성이 어렵다. 따라서, Ga이 doping된 자석의 최적의 1차 열처리 온도는 790°C이며, Ga이 doping된 자석의 Nd-rich 상의 구조/화학적 개선을 극대화하기 위해서는 반드시 1차 열처리 온도를 감소 시켜야 한다.

4. 결론

Ga 첨가에 따른 Nd-Fe-B 소결자석의 1차 열처리 온도 변화에 따른 미세구조 변화와 자기적 특성간의 상관관계에 대해서 연구하였다. Ga이 doping된 자석의 최적의 1차 열처리 온도는 790°C였으며, un-doped 자석보다 효과적으로 1차 열처리 온도를 감소시킬 수 있었다. Ga 첨가와 함께 1차 열처리 온도 감소에 따른 보자력 향상에 대한 두 가지 주요 이유는 다음과 같다. 첫째, Ga이 용해된 비자성 tetragonal-Nd₆Fe₁₃(Cu,Ga)₁입계상이 형성되어 입자간 자기적 결합이 효과적으로 제어되었고, 둘째, Ga이 용해된 연속적이고 균질한 cubic-Nd₂O₃입계상 형성으로 입계 결합을 효과적으로 감소 시켰다. 이 결과, Ga이 doping된 자석은 1차 열처리 온도를 감소했음에도 불구하고, un-doped 자석보다 잔류자화 감소 없이 11.2% 보자력이 증가하였다.

5. 참고문헌

- [1] H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, T. Shima, K. Hono, Acta Mater. 60, 819 (2012).
- [2] T.- H. Kim, S.-R. Lee, M.-W. Lee, T.-Suk Jang, J.W. Kim, Y.D. Kim, and H.-J. Kim, Acta Mater. 66, 12 (2014).
- [3] T.T. Sasaki, T. Ohkubo, Y. Takada, T. Sato, A. Kato, Y. Kaneko, K. Hono, Scr. Mater. 113, 218 (2016).
- [4] P. Schobinger-Papamantellos, K.H.J. Buschow, C. Ritter, J. Alloys Comp. 359, 10 (2003).

6. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원의 기술 혁신사업 (No.10043780)과 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No.NRF-2016R1D1A1B03931980).

입계확산 처리를 통한 고보자력 이방성 HDDR 자석 제조

차희령^{1*}, 유재경¹, 유지훈¹, 권해웅², 이정구¹

¹한국기계연구원 부설 재료연구소

²부경대학교

친환경 자동차 산업의 성장과 함께 전기자동차 구동모터에 사용하기 위한 고보자력 Nd-Fe-B 자석이 요구되고 있다. 현재 Nd-Fe-B 영구자석의 보자력을 향상시키기 위해 Dy와 같은 중희토류 금속을 첨가하고 있지만 Dy의 경우 자원이 한정되어있고 첨가량이 늘어날수록 보자력은 향상되지만 자석의 세기가 저하되는 문제가 있다. 이에 최근에는 자석의 결정립 미세화, 결정립계 제어 등 미세구조 제어함으로써 중희토류 금속의 사용량을 줄이거나 중희토류 금속을 사용하지 않고 보자력을 향상시키기 위한 연구들이 주목받고 있다. 자석의 결정립을 미세화하기 위한 대표적인 방법으로 jet-mill, melt-spinning, HDDR (hydrogenation-disproportionation-desorption-recombination) 법이 있다. 이 중 HDDR 법은 수소가스 반응을 통해 단자구 크기 (~300nm)의 결정립을 가지는 자성분말을 제조할 수 있는 방법으로 공정조건을 적절히 제어한다면 결정립 미세화뿐만 아니라 이방성 분말을 제조하는 것이 가능하다. 하지만 실제 HDDR처리 된 분말의 경우 단자구 크기의 결정립을 가짐에도 불구하고 약 14 kOe 정도의 낮은 보자력을 나타내는데 이것은 결정립은 미세하지만 입계상이 불균일하여 입계결함 또는 결정립간의 자기상호작용 (magnetic coupling)에 의해 자화반전이 쉽게 일어나기 때문이다. 따라서 제조된 HDDR 분말의 입계면을 비자성 또는 중희토류 물질을 이용하여 잘 제어한다면 보자력을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 고보자력의 이방성 자석을 제조하기 위해 HDDR 처리된 분말 ($\text{Nd}_{12.5}\text{Fe}_{61}\text{Ga}_{0.3}\text{Nb}_{0.2}\text{B}_{6.4}$ (at.%))에 $\text{NdH}_x\text{-Cu}$, DyH_x 등의 희토류금속 화합물을 입계확산 처리 (GBDP; grain boundary diffusion process) 하였다. 실험결과 확산 열처리 후 분말 내부의 입계상이 개선되었고, 분말의 보자력이 최대 22 kOe까지 크게 증가하는 것을 확인하였다. 또한 제조된 분말은 이방성 벌크자석으로 제조하기 위해 hot-press를 이용하여 저온 소결하였으며 제조된 자석의 자기특성 및 미세구조는 VSM, BH-tracer, FE-SEM을 통해 분석하였다.

Characterization of Ca-La M-type hexaferrites synthesized by solid state reaction

Kang-Hyuk Lee^{1*}, Yan Wei¹, Sang-Im Yoo^{1†}

¹Department of Material Science and Engineering, Research Institute of Advanced Materials (RIAM), Seoul National University, Seoul, Korea

Ca-La M-type hexaferrites were reported to exhibit high saturation magnetization (M_s) and coercivity (H_c) comparable with M-type hexaferrites. In this study, we tried to synthesize $Ca_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$ and influence of the iron content in the formation process of $Ca_{0.5}La_{0.5}Fe_{12-y}O_{19-\delta}$ ($0.75 \leq y \leq 2.15$) hexaferrite prepared by solid state reaction. Lanthanum oxide (La_2O_3), calcium carbonate ($CaCO_3$) and iron oxide (Fe_2O_3) were used as raw materials for solid state reaction. In this case, the raw materials were mixed by ball-milling for 24h, and were uniaxially pressed into disks. The precursor disks were calcined at 1200~1300°C for 12 h in air and whole process was repeated twice. The pellets were sintered at 1275~1325°C for 4 h. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometer (VSM), and scanning electron microscope (SEM).

All XRD patterns of analyzed $Ca_{0.5}La_{0.5}Fe_{12-y}O_{19-\delta}$ ($1.75 \leq y \leq 2.15$) ferrite obtained in the calcined at 1250 for 12 h and 1300°C for 12 h have single phase hexagonal crystal structure. For the single phases of $Ca_{0.5}La_{0.5}Fe_{12}O_{19-\delta}$ obtained at each sintering temperature, the lattice parameter a , c and unit cell volume are decreased first and increased when y is increased. The maximum M_s value is 77.5 emu/g for the sample of $Ca_{0.5}La_{0.5}Fe_{11.25}O_{19-\delta}$ sintered at 1300°C for 4 h in air. Detailed magnetic properties of M-type hexagonal ferrites will be presented for a discussion.

Keywords : Ca-La ferrite, Hexaferrite, magnetic property

The Effect of Shape Control of α'' -Fe₁₆N₂ Particles on Their Magnetic Properties

백연경*, 김수경, 이정구
재료연구소 분말세라믹본부

α'' -Fe₁₆N₂ has been suggested as a one of the most promising candidate as a future rare-earth free permanent magnet due to abundant amount of Fe and N on the earth, its large magnetocrystalline anisotropy, and large saturation magnetization. Thus, researchers have developed the various synthesis methods such as wet chemical, ball milling and plasma process etc. However, there is no report on the shape control of α'' -Fe₁₆N₂ particles and its effect on the magnetic properties. In this study, we have fabricated α'' -Fe₁₆N₂ particles with various structures and compared their magnetic properties after ammonia nitriding process. This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program (10062130, Theory-driven R&D for non-centrosymmetric structured rare-earth free Fe-based permanent magnet materials) funded by the Ministry of Trade, industry & Energy (MI, Korea).

Design of high-coercivity $\text{Fe}_{16-x}\text{Al}_x\text{N}_2$ alloy

Jinho Byun^{*}, Taewon Min, Hyoungjeen Jeon, Sungkyun Park and Jaekwang Lee[†]

Department of Physics, Pusan National University, Pusan 46241, South Korea

[†]E-mail: jaekwangl@pusan.ac.kr

Iron nitrides (Fe_{16}N_2) have recently attracted considerable attentions for the future rare-earth (RE) free permanent magnets (PMs) due to its low cost and high magnetization compared to other RE-free magnetic materials. In spite of such excellent magnetic properties, its application has been limited by relatively low coercivity. Here, combining the first-principles density functional theory calculations and the alloy theoretic automated toolkit (ATAT), we extensively investigated the structure evolution, stability and magnetic properties of $\text{Fe}_{16-x}\text{Al}_x\text{N}_2$ alloys as a function of Al contents. We find that substituting Fe by Al in Fe_{16}N_2 with Co/Fe ratio=0.14 can increase the coercivity by about 300% compared to the pristine Fe_{16}N_2 . We expect our findings provide an important insight to fabricate optimal $\text{Fe}_{16-x}\text{Al}_x\text{N}_2$ alloy with high coercivity.

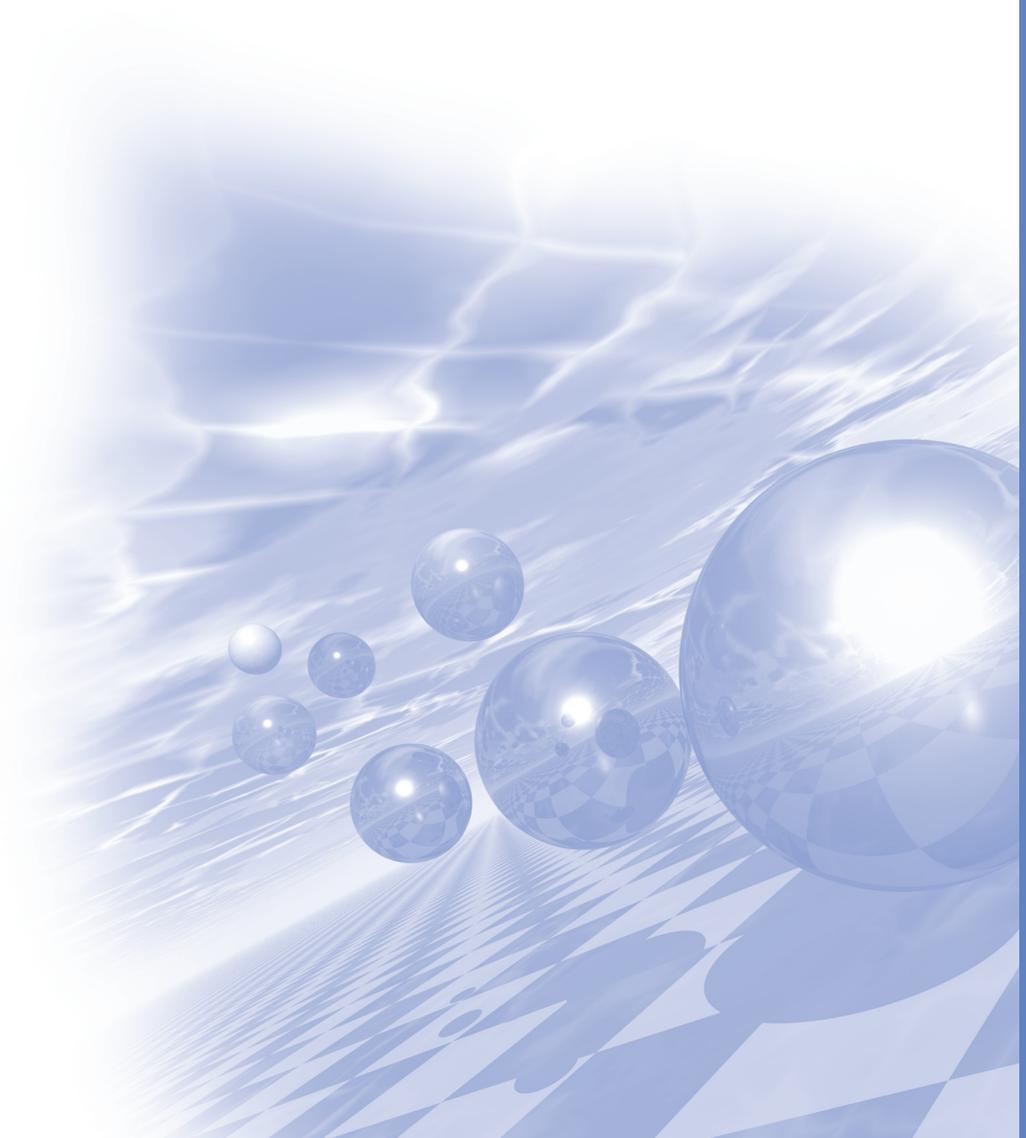
This work was supported by the Industrial Strategic Technology

Development Program(10062130) funded by the Ministry of Trade, industry & Energy (MI, Korea).



KMS 2017 Summer Conference

구두발표 VI



Magnetic Anisotropy in Canted Antiferromagnetic Sr_2IrO_4 single crystals

Muhammad Nauman¹, Yunjeong Hong¹, Hwan Young Choi²,
Nara Lee², Young Jai Choi², Younjung Jo^{1*}

¹Department of Physics, Kyungpook National University

²Department of Physics and IPAP, Yonsei University

The magnetocrystalline contribution to magnetic anisotropy was studied in the canted antiferromagnetic state of layered Sr_2IrO_4 single crystals. We performed torque measurements in magnetic fields up to 9 T under various magnetic field orientations. The strong dependence of torque on the magnetic field revealed that the magnetic easy axis is along the in-plane direction, and that the observed field-induced weak ferromagnetic order is attributed only to the in-plane component of the external magnetic field. The dependence of torque on the angle produces a two-fold symmetric sawtooth-like shape. A simple model consisting of canted antiferromagnetic and magnetic induction terms showed good agreement with the measured torque. These results show that magnetic anisotropy is closely related to the anisotropy of the exchange between antiferromagnetic moments whose canting is mediated by the Dzyaloshinsky-Moriya interaction. Our study demonstrates that torque magnetometry can be extended to the investigation of the magnetic anisotropy of complex magnetic phases.

Static and dynamic magnetic properties of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($0.0 \leq x \leq 2.0$) synthesized in a low oxygen pressure

Jae-Hyoung You^{*} and Sang-Im Yoo[†]

Department of Materials Science and Engineering, Research Institute of Advanced Materials (RIAM),
Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

[†]Sang-Im Yoo, e-mail : siyoo@snu.ac.kr

Strontium W-type hexaferrite ($\text{SrFe}_{18}\text{O}_{27}$, SrW) is a ferromagnetic material possessing high saturation magnetization (M_s) about 80 emu/g and high anisotropy field (H_a) about 19 kOe. Due to its cost effectiveness and suitable magnetic properties, W-type hexaferrite has attracted attention for permanent magnet application and microwave application especially for microwave absorber in the large frequency range of 8–40 GHz. In this report, we tried to prepare Zn-substituted SrW bulk samples with the compositions of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{W}$) where x value was $0.0 \leq x \leq 2.0$ for the first time in a reduced oxygen atmosphere, and identify the effect of Zn^{2+} substitution on their magnetic properties. Furthermore, static and dynamic magnetic properties of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{W}$ with varying x were investigated. For these purposes, the samples with different x values were annealed at the temperature region of 1125–1350°C for 2 h in the P_{O_2} of 10^{-3} atm. As a result, single phase of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{W}$ could be obtained for x values of 0.0, 0.5, and 1.0. Static and dynamic magnetic property measurements revealed that anisotropy field value of the samples decreased with increasing x from 0.0 to 1.0. In the contrast, saturation magnetization value increased with increasing x value. And also, It was found that real permeability value increased and ferromagnetic resonance frequency decreased with increasing x value which is attributable to increased saturation magnetization and decreased anisotropy field. Detailed properties of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{W}$ will be presented for a discussion.

Core loss improvement of Fe metal powder Coated with Alumina oxide by sol-gel method

Sung Joon Choi*, Sunwoo Lee, Jae-Hyoung You and Sang-Im Yoo

Department of Materials Science and Engineering, and Research Institute of Advanced Materials,
Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

In recent years, the soft magnetic composites (SMC) have attracted great interest as the potential applications in electromagnetic circuits, induction field coils and magnetic field shielding. Among AC losses of metal powder. The eddy current loss has been effectively reduced by an insulation-coating to increase electrical resistivity on the magnetic metal powder. For the same purpose, we have tried to fabricate a core-shell layer composed of a Fe powder and Al₂O₃ shell layer by the sol-gel method. In this study, we investigated the influence of coating time on the magnetic properties of the Fe powder. To evaluate the core losses of samples, the toroidal cores were fabricated by mixing Al₂O₃-coated Fe powder with a resin. The microstructural analysis and the magnetic properties of Fe powder coated with Al₂O₃ were conducted using field emission-scanning electron microscope (FE-SEM), transmission electron microscope (TEM) and Inductance analysis and B-H curve analyzer.

This work was supported by a Grant from world class 300 (0417-20160119).

Keywords : Eddy current, Insulation coating, Core-shell structure.

Sign Inversion of Anomalous Hall Effect in heavy metal/permalloy bilayer structures

Mingu Kang^{1*}, Seung-heon Chris Baek^{1,2}, Kab-Jin Kim³ and Byong-Guk Park¹

¹Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

²School of Electrical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

³Department of Physics, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

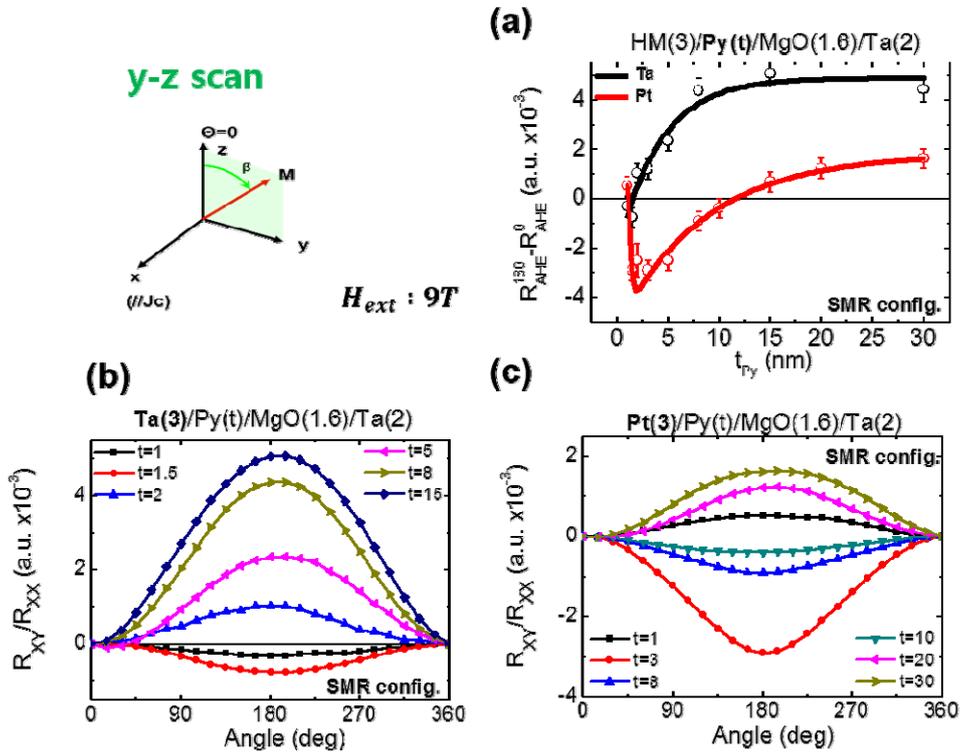
비정상 홀 효과는 전기장과 강자성 금속의 자화 모두에 수직인 전류의 생성을 의미하며 강한 스핀-오빗 결합과 스핀 편극된 전자 사이의 상호작용으로 설명된다. 이처럼 비정상 홀 효과와 스핀 수송 현상간의 밀접한 연관성이 밝혀지면서 비정상 홀 효과에 대한 새로운 관심과 연구가 진행되어 왔다. 그러나 자성 전이 금속들에 대한 이론적, 실험적 연구가 집중적으로 진행되어 온 것과 달리 전이 합금에 대한 연구는 거의 이뤄지지 않았다. Permalloy(Py, Ni₈₁Fe₁₉) 박막은 비정상 홀 비저항과 홀 각도가 다른 자성 전이 금속 및 합금보다 작기 때문에 side-jump나 skew scattering등의 외부의 기여를 분리시키고 새로운 물리적 현상의 메커니즘을 연구하는데 적합하다[1,2].

본 연구에서는 heavy metal(HM)/permalloy(Py)/MgO/Ta 구조에서 HM의 스핀 홀 각도의 부호에 의존하는 홀 저항 신호를 보고함으로써 자성 계면으로부터 발생하는 스핀 의존 산란과 중금속 물질에서 발생하는 스핀 홀 효과의 결합된 거동에 기초한 비 편재된 비정상 홀 효과 이론을 실험적으로 증명하고자 한다. 또한 해당 구조에서 각도에 의존하는 자기저항 신호를 측정함으로써 Py 물질의 스핀 수송 특성에 대해 보고하고자 한다.

비정상 홀 전압의 생성에 있어 자성 계면의 기여도 차이를 주고자 Py 박막을 1nm에서 30nm까지 증가시키며 증착하였으며 9T의 외부자기장에 대해 x방향으로 전하전류를 인가해주면서 x-y, y-z, x-z면으로 자화를 회전시키며 y방향에 생성되는 홀 전압을 측정해 각도 의존 비정상 홀 저항을 구하였고 x방향의 전압을 측정해 각도 의존 자기저항을 구하였다.

Py 두께에 따른 y-z scan 비정상 홀 저항 데이터인 그림 1.(a)을 보면 Ta/Py의 경우, Py 두께가 1.5~2nm인 영역에서 negative에서 positive로 비정상 홀 저항 신호의 부호 반전이 한번 일어나며 Pt/Py의 경우, Py 두께가 1~1.5nm인 영역에서 positive에서 negative로 한번, 10~15nm인 영역에서 negative에서 positive로 총 두 번 부호 반전이 일어난다. 비정상 홀 저항 신호는 자화가 +z일 때와 -z일 때의 저항 차로 정의하였으며 그림 1.(b),(c)는 Ta/Py, Pt/Py 각각의 각도 의존 비정상 홀 저항 신호이다. 중금속 물질에서 발생하는 스핀 홀 효과와 역 스핀 홀 효과가 연속으로 일어나는 메커니즘에 의한 비정상 홀 신호의 경우, 스핀 홀 각도의 제곱에 비례하기 때문에 부호의 반전이 일어나지 않는다[3]. 때문에 그림 1의 비정상 홀 저항 신호의 부호 반전은 자성 계면에서 발생하는 스핀 의존 산란에 의해 생성되며 중금속의 스핀 홀 각도에 비례하는 스핀 편극된 홀 전류에 의한 것으로 보인다.

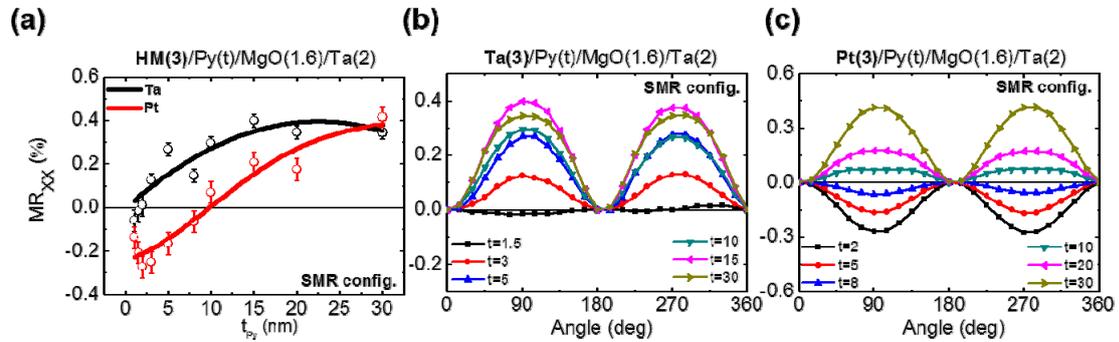
Py 두께에 따른 y-z scan 자기저항 데이터인 그림 2.(a)를 보면 Py두께 10nm영역에서 Pt/Py의 자기저항 값의 부호 반전이 일어남을 알 수 있다. 그림2.(c)의 Pt/Py의 Py 두께가 8nm이하인 자기저항 신호는 기존에 보고된 스핀 홀 자기저항(SMR)신호와 일치한다. 그러나 Py 10nm 이상에서 보이는 반전된 자기저항 신호는 전류 밀도 분배를 고려하였을 때 Py층으로 전류가 dominant하게 흐르면서 중금속 물질에 의해 발생하는 스핀 홀 자기저항 뿐 아니라 Py에 의한 자기저항이 더해지면서 발생하는 것으로 생각된다.



[그림 1] Ta/Py, Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 비정상 홀 저항.

- (a) Py두께에 따른 비정상 홀 저항 (b) Ta/Py의 y-z scan 각도 의존 비정상 홀 저항
 (c) Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 비정상 홀 저항

y-z scan



[그림 2] Ta/Py, Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 자기저항.

- (a) Py두께에 따른 각도 의존 자기저항 (b) Ta/Py의 y-z scan 각도 의존 자기저항
 (c) Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 자기저항

References

- [1] Steven S.-L. Zhang et al. Nonlocal Anomalous Hall Effect. Phys. Rev. Lett, 116, 136601 (2016).
- [2] Y.Q. Zhang et al. Anomalous Hall effect in epitaxial permalloy thin films. JAP 114, 163714 (2013)
- [3] Yan-Ting Chen et al. Theory of spin Hall magnetoresistance, Phys. Rev. B 87, 144411 (2013).

Magnetic Properties and Hysteresis Loss Improvement of Fe Alloy Powder by NH₄OH Etching

Sunwoo Lee^{1*}, Sungjoon Choi¹, Jae-Hyoung You¹ and Sang-Im Yoo¹

¹Department of Materials Science and Engineering, and Research Institute of Advanced Materials,
Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

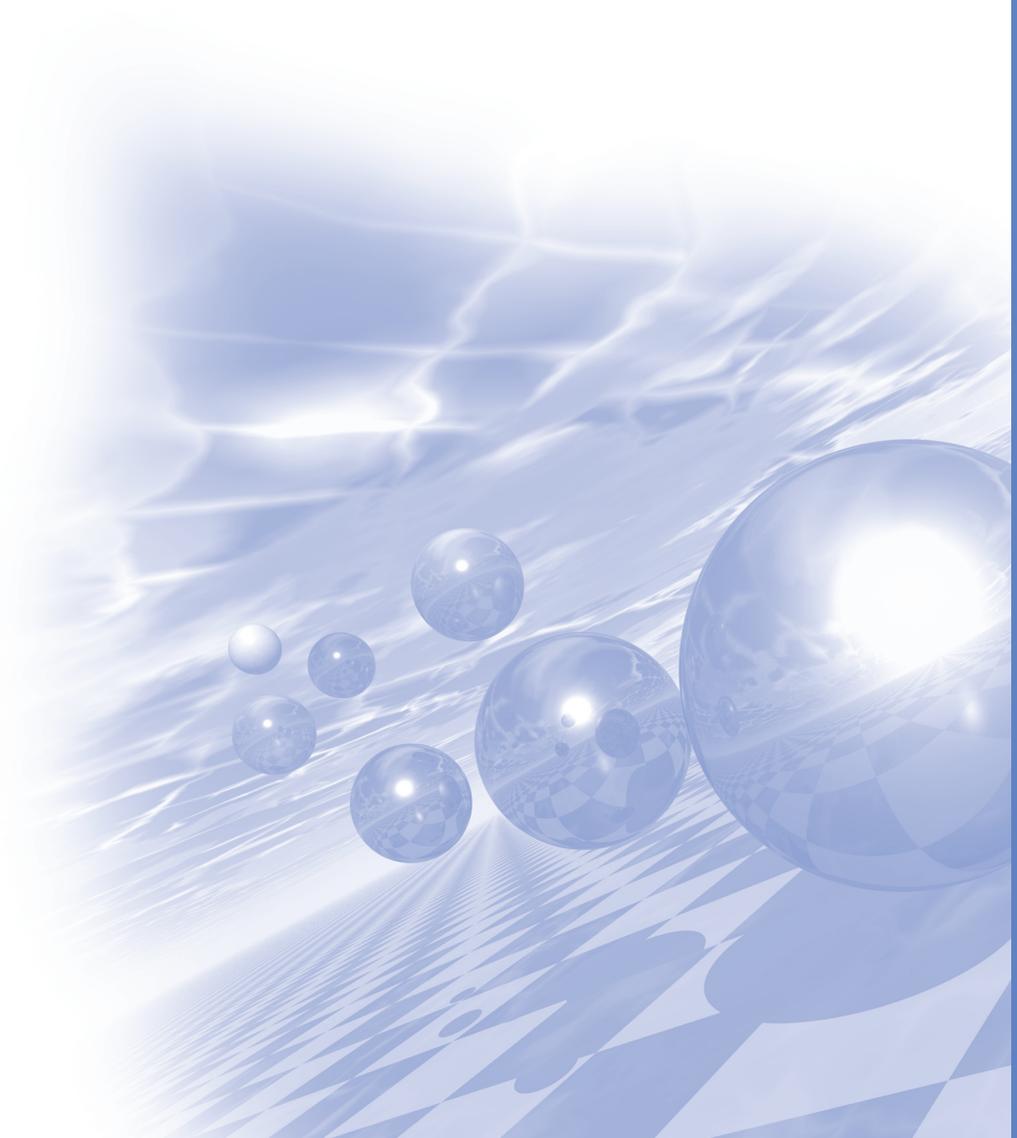
Fe based alloys can be represented one of excellent soft magnetic materials because of its high saturation magnetization with very low coercivity. For this reason, Fe based alloys and their composites have been used for core materials of electromagnetic applications such as inductors and converters operated under alternative current (AC). However, because the applications are used under AC, core loss generation is unavoidable and becomes more serious with increasing AC frequency. Since the operation frequency is required to increase for high performance of applications, core loss improvement strategies must be considered such as composition and microstructure control for hysteresis loss and insulation coating on powder for eddy current loss. In this work, etching with NH₄OH solution of Fe based alloy powder was applied to improve core loss of Fe based alloy powders. As such an effort, Fe based alloy powders were dispersed in NH₄OH solution by ultrasonication. To optimize process parameters, pH, the concentration of NH₄OH solution, and etching reaction time were controlled. Transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were used for microstructure and composition analysis. Magnetic properties including permeability and core loss were measured under various AC frequency using toroidal powder core samples. Etched powder samples showed improved core loss values due to decreased hysteresis loss. Details will be presented for a discussion.

Keywords: core loss, hysteresis loss, Fe powder, surface etching, NH₄OH etching



KMS 2017 Summer Conference

구두발표 VII



Hallmarks of the Weyl semimetal: magnetotransport properties in Sb-doped Bi

Y. W. Lee¹, D. Shin¹, K.-S. Kim¹, Yoon H. Jeong^{1*}, J. Kim¹, H. J. Kim²

¹Department of Physics, POSTECH

²Department of Physics, Daegu University

Weyl fermions, massless chiral fermions in quantum field theory, are also realized in solid state physics; they appear in certain crystals without time reversal or inversion symmetry called Weyl (semi)metals [1]. The electronic band structure of a Weyl metal contains Weyl nodes, pairs of singular points separated in momentum space, at nondegenerate band touch. Spin and momentum are locked except at nodes, and thus chirality is well defined. Due to the existence of a pair of chiral Fermi surfaces, the electromagnetic properties of Weyl metals are described by axion electrodynamics given by the topological $\mathbf{E}\cdot\mathbf{B}$ term.

Transport properties of Weyl metals, particularly their magnetoelectric and magnetothermal conductivities are expected to show distinct behaviors of topological origin. Recent theoretical investigations of electrical (σ) and thermal (κ) conductivities of Weyl metals, based on Boltzmann transport theory with Berry curvature and chiral anomaly terms, predict that σ and κ are enhanced proportional to B^2 when the electrical or thermal current direction and the B direction are parallel [2, 3]. In Weyl metals, Ohm's law in electrical conductivity is expected to break down and the Wiedemann-Franz (WF) law would also fail when a magnetic field is applied. Ohm's law indicates a linear I - V relationship while the WF law states that $\kappa/\sigma T = L_0$, where L_0 is the Lorentz number depending on universal constants only, and holds generally in ordinary metals.

We have grown single crystals of bismuth antimony alloy, $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, which becomes a 3D Dirac metal with time reversal symmetry at $x \sim 0.03$. When a magnetic field is applied, time reversal symmetry is broken and the Dirac metal becomes a Weyl metal. We have measured σ and κ without and with B up to 9 T. We indeed observed the breakdown of Ohm's law and the magnetic enhancements of σ and κ when B is in parallel with electrical and thermal currents. We discuss the details of the measurements and compare the experimental data with theoretical predictions. In particular, the status of Ohm's law and WF law in the Weyl state is discussed.

References

- [1] D. Shin, Y. Lee, M. Sasaki, Y. H. Jeong, F. Weickert, J. B. Betts, H.-J. Kim, K.-S. Kim, and J. Kim, Nature Materials submitted
- [2] S. Murakami, New J. Phys. 9 (2007), 356
- [3] D. T. Son and B. Z. Spivak, Phys. Rev. B 88 (2013), 104412
- [4] Ki-Seok Kim, Phys. Rev. B 90 (2014), 121108(R)

Spin Nernst magnetoresistance in ferromagnet/heavy metal bilayer structures

김동준^{1*}, 전철연¹, 최종국¹, 이재욱¹, Srivathsava Surabhi², 정종율², 이경진^{3,4}, 박병국¹

¹Department of Materials and Science Engineering, KAIST, Daejeon 34141, Korea

²Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

⁴KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 02841, Korea

스핀 전류는 자화 반전 및 자구 벽 운동을 제어하기 위한 핵심 기술로서 사용될 수 있어 이를 생성하는 방법이 스핀트로닉스 분야에서 많은 관심을 받고 있다.[1] 이런 스핀 전류 생성 기술들 중 가장 많이 연구되고 있는 것이 스핀 홀 현상(spin Hall effect)인데, 강한 스핀-오빗 상호작용을 가지는 중금속 물질에 수평 전류를 인가할 때 수직인 방향으로 스핀 전류가 생성이 되는 현상을 말한다. 이론적으로 수평 전류를 수평 온도구배로 대체하였을 때, 스핀 너른스트 효과(spin Nernst effect)에 의해 열에 의한 스핀전류가 생성될 수 있다는 예측이 있어왔으나 아직 실험적으로 보고된 바는 없다.[2]

본 연구에서는 다양한 중금속/강자성 이층접합구조에서 스핀 너른스트 자기저항(spin Nernst magnetoresistance)으로 명명되는 열적 자기저항 변화 양상을 보고함으로써, 실험적으로 스핀 너른스트 현상을 증명하고자 한다. 중금속/강자성 구조에서 수평 전류를 인가할 때, 중금속 물질 내에서 스핀 홀 현상과 연속되어지는 역스핀홀 현상에 의해 발생하는 스핀 홀 자기저항(Spin magnetoresistance)처럼,[3] 수평 온도구배를 중금속/강자성 구조에 인가하면 다음과 같은 거동으로 열적 자기 저항의 변화가 생성될 수 있다: (i) 스핀 너른스트 효과에 의해 스핀 너른스트 각도(θ_{SN})로 정의되는 양만큼 열적 스핀전류가 생성되어 중금속/강자성 계면에서 반사되고, (ii) 반사된 스핀 전류가 중금속 내에서 역스핀 홀 현상에 의해 스핀 홀 각도(θ_{SH})로 정의되는 양만큼 전류로 변환되어 자기저항의 변화를 생성할 수 있다.[Fig. 1 (a)] 이에 의해 생성되는 스핀 너른스트 자기저항의 크기는 θ_{SN} 와 θ_{SH} 의 곱으로서 정의될 수 있다.

이런 거동을 확인하기 위해 다음과 같은 실험을 진행하였다. $10 \mu\text{m} \times 1 \text{mm}$ 의 중금속/강자성 구조에 55mW의 국소 CW 레이저를 인가하여 온도구배를 인가하였고, 100mT 자기장을 x-y방향으로 회전시켜 측정되는 y방향으로의 스핀 열전 신호를 관측하였다. 레이저의 위치를 변화시키기에 따라 여러 수직 (ΔT_z) 및 수평 온도구배 (ΔT_x) 환경이 Fig. 1 (b)처럼 생성될 수 있었다.

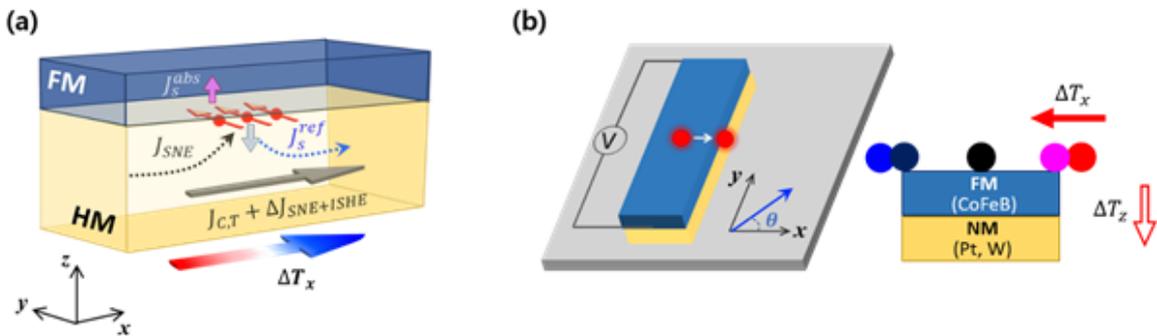


그림 1. (a) 스핀 너른스트 자기저항 현상, (b) 다른 레이저 위치에서 열전 측정 개략도

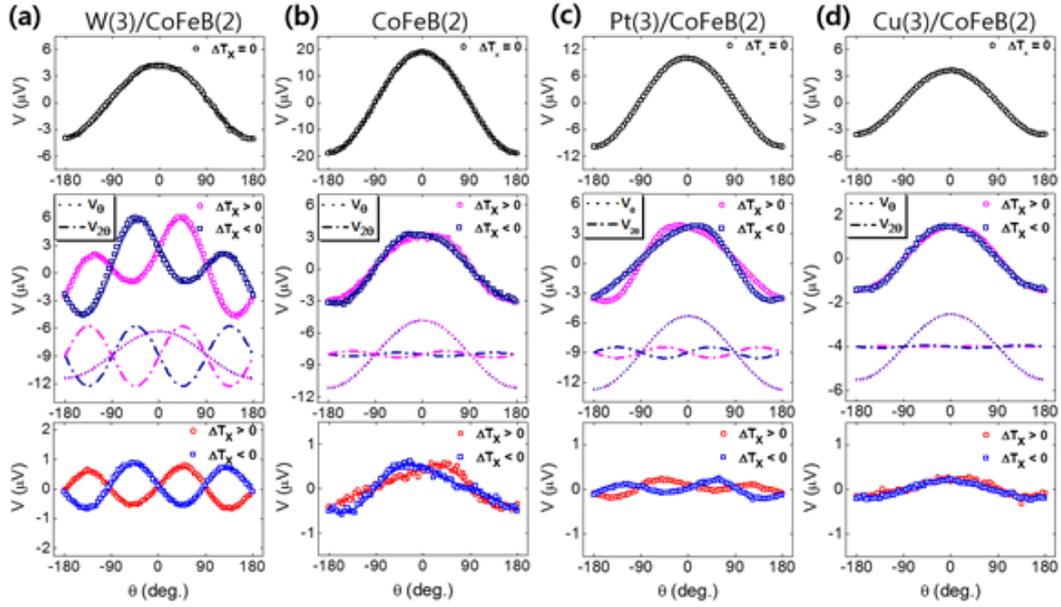


그림 2. (a) W/CoFeB, (b) CoFeB, (c) Pt/CoFeB, (d) Cu/CoFeB 구조 내 다른 레이어 위치에서의 스핀 열전신호 비교도. (top panel : 정중앙, middle panel : 모서리, bottom panel : 샘플 옆)

먼저 W/CoFeB 구조에 샘플의 정중앙에 레이저를 위치시켜 ΔT_x 는 상쇄되고 오직 ΔT_z 만 남아있는 상황의 열전신호를 관측하였다.[Fig. 2 (a) 상단] 측정된 열전신호는 ΔT_z 에 의해 생성되는 스핀 제백 신호(spin Seebeck effect)와 비정상 너른스트 효과(anomalous Nernst effect)로 설명할 수 있는 $\cos\theta$ 거동을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 레이저가 구조의 모서리로 향하여 ΔT_x 가 더 이상 상쇄되지 않게 된 상황에서는, 감소된 $\cos\theta$ 신호와 더불어 추가적인 매우 큰 $\sin 2\theta$ 신호가 관측된다는 것이 Fig. 2 (a)의 중단 및 하단 그래프에서 확인되었다. $\sin 2\theta$ 신호는 강자성 CoFeB 층으로부터 평면 너른스트 효과 (Planar Nernst effect)에 의해 생성될 수 있으나, 평면 너른스트 효과만이 존재하는 CoFeB 단일 구조와 비교해보았을 때 매우 큰 신호의 증대가 있다는 것이 관측되었다.[Fig.2 (b)] 이 증대가 중금속 층으로부터 발생한 스핀 너른스트 자기저항에 의한 것으로 생각되어, 추가적으로 Pt와 Cu의 전극들을 가지는 구조를 분석해보았다. Pt는 W과 반대부호의 θ_{SH} , Cu는 무시할 만한 크기의 θ_{SH} 을 가지기 때문에, 스핀 너른스트 자기저항 모델을 평가하기 위한 W의 대조군 샘플로서 사용될 수 있었다. 흥미롭게도 Pt/CoFeB의 경우에 W/CoFeB 과 비교하여 반대부호의 $\sin 2\theta$ 신호가 관측되었고 [Fig. 2 (c)], Cu/CoFeB에서는 무시가능한 정도의 $\sin 2\theta$ 신호가 관측되었다.[Fig. 2 (d)] 이를 통해 측정된 신호가 θ_{SH} 와 관계가 있는 스핀 너른스트 자기저항 모델을 따르는 것을 확인할 수 있었다. 이는 단일 중금속 물질 내에서 수평 온도구배에 의해 스핀 전류가 생성될 수 있는 스핀 너른스트 효과를 실험적으로 증명한 결과이기 때문에, 스핀전류 생성기술로서 스핀트로닉스 분야에 매우 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

Reference

- [1] G. E. W. Bauer, et al., Nature Mater. **11**, 391 (2012). [2] K. Tauber, et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 026601 (2012). [3] Y.-T. Chen, et al., Phys. Rev. B **87**, 144411 (2013).

First-principles calculations of Berry curvature: WTe₂ and other heavy metals

Sung-Hyon Rhim^{*}

Department of Physics and Energy Harvest Storage Research Center, University of Ulsan, Republic of Korea
sonny@ulsan.ac.kr

With rapid progress in spintronics, utilizing the spin Hall effect (SHE) or the interface spin phenomena has become highly demanding for practical applications with high interests. In this sense, calculation of spin Hall angle (θ_{SH}) or Berry curvature (Ω_z) based on first-principles calculations is of great significance in exploration for materials. Here, we adapt the method proposed by previous work, which has been implemented in FLAPW method. As large spin Hall angle has been reported in tungsten, calculations on tungsten metals - for bcc and A15 structure are presented. Also results on WTe₂ are shown further, where the nonsymmorphic feature of space group plays some important role. Results of other heavy metals are also reviewed for reference.

References

- [1] G. Y. Guo, S. Murakami, T.-W. Chen, and N. Nagaosa, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 096401 (2008).
- [2] Kai-Uwe Demasius and et al. *Nat. Comm.* **7**, 10644 (2016).

Coupled modes of one-dimensional skyrmion lattices in nanostrips

Sang-Koog Kim, Junhoe Kim*, Jaehak Yang, Young-Jun Cho and Bosung Kim

National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory,
Department of Materials. Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, South Korea

Magnetic skyrmions have been intensively studied because they are promising as a potential candidate for information-storage and -processing devices owing to their robust features including nano-scale size, topological stability, and ultra-low threshold current density necessary for their motions [1]. Also, the gyration and breathing dynamic modes of single skyrmions are found[2-4]. Therefore, collective excitations of those modes in one- or two-dimensional arrays of skyrmions are of increasing interest from both fundamental and technological aspects. Here, we report on a delicate study, using micromagnetic numerical simulations, of dynamic coupling between neighboring skyrmions in narrow-width nanostrips where two or more skyrmions are periodically arranged. We found that there exist strongly coupled modes of both the gyration and breathing excitations that exhibit their characteristic dispersions in nanostrips. Moreover, the application of perpendicular magnetic fields allows for the control/modification of the dispersions of their coupled modes, thereby providing a means of controlling the fast propagations of the gyration and breathing modes. This work might offer a new route towards developments of a new type of efficient, reliable, fast, and low-power-consumption information-storage and -processing devices.

References

- [1] A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, *Nature Nanotech.* 8, 152 (2013).
- [2] M. Mochizuki, *Phys. Rev. Lett.* 108, 017601 (2012).
- [3] J.-V. Kim, F. Garcia-Sanchez, J. Sampaio, C. Moreau-Luchaire, V. Cros, and A. Fert, *Phys. Rev. B* 90, 064410 (2014).
- [4] M. Mruczkiewicz, P. Gruszecki, M. Zelent, and M. Krawczyk, *Phys. Rev. B* 93, 174429 (2016).

Induced Magnetism and Giant Perpendicular Magnetic Anisotropy of Transition Metal Doped Topological Insulator Bi(111)

Juyoung Jung^{*}, Youngjun Kim, Purev Taivansaikhan and Dorj Odkhuu[†]
Department of Physics, Incheon National University, Incheon 22012, Republic of Korea
[†]E-mail: odkhuu@inu.ac.kr

Exploring magnetism and perpendicular magnetic anisotropy (PMA) in otherwise nonmagnetic two-dimensional structures such as graphene is at the heart of spintronics research. In this talk, we will present the results of our first-principles electronic structure calculations on the possibility of reaching an atomic-scale PMA by carefully exploring the large spin-orbit coupling, orbital magnetism, and ligand field in a suitable choice of a two-dimensional structure of topological insulator Bi(111) with the Fe-, Ni-, and Co-group *3d*, *4d*, and *5d* transition metal adatoms. It is identified that the substitutions of Fe, Ru, and Os transition metals in a single-layer Bi(111) have induced magnetic moments of 2.91, 0.71, and 0.65 μ_B , respectively, while the other Ni- and Co-group elements have no net magnetism. More importantly, we found the PMA energies up to an order of 100 meV per atom in Ru and Os substituted Bi(111). The underlying mechanism for the induced magnetism and large PMA will be discussed in terms of electronic structure analyses and ligand field theory.

Spin-Orbit Torques in Ferrimagnetic CoTb alloys

Soong-Geun Je^{1,2*}, J-C. Rojas-Sánchez², T. H Pham², P. Vallobra², T. Fache², M.-C. Cyrille³,
D. Lacour², G. Malinowski², M. Hehn², G. Gaudin¹, S. Mangin² and O. Boulle¹

¹SPINTEC, CEA-INAC/CNRS/Univ. Grenoble Alpes, 38054 Grenoble, France

²Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS-Université de Lorraine, 54506 Vandoeuvre lès Nancy, France

³CEA-LETI, 38054 Grenoble, France

Spin-orbit torque (SOT) has been of great interest as an efficient means of manipulating magnetization in heavy metal/ferromagnet bilayers. Recently, as a strategy of reducing the switching current density, ferrimagnetic and antiferromagnetic materials are attracting attention due to the expectation of minimizing net magnetization and hence reducing the angular momentum required to switch the magnetization. In addition, the immunity to the external magnetic field really makes these systems promising materials for future spintronic memory devices.

Here we demonstrate the SOT-induced magnetization switching and the effective field in W(3nm)/Co_xTb_{1-x}(3.5nm)/AlO_x(3nm) perpendicular ferrimagnetic alloys. In order to see how the SOT changes as it passes across the magnetic compensation point, a series of CoTb alloys with a wide range of compositions are prepared using DC magnetron sputtering. The films are then patterned into Hall cross structure to exploit the anomalous Hall effect as a means of probing the magnetization in this compensated magnetic system.

First, the SOT switching is achieved nicely in all samples. Particular, the SOT switching is accomplished even in the sample which has an extremely huge coercive field and anisotropy field with a quite low current density and a tiny in-plane field, suggesting the efficient SOT mechanism. After quantifying the SOT-induced effective field, we find that the effective field scales with the inverse of magnetization, implying the angular momentum conservation still holds in the CoTb system where the spin-orbit coupling is presumed to be large. Apart from this, the effective spin Hall angle is found to increase with increasing Tb concentration, indicating there is an additional influence of SOT coming from Tb atoms.

To conclude, the SOT can serve as a powerful method to encode information in ferrimagnetic materials, enabling realization of highly stable memory devices.

Author Index

| Name | Abstract ID | Page | Name | Abstract ID | Page |
|-------------------------|-------------|------|----------------|-------------|------|
| A.A. Elzawy | MD04 | 95 | D. Shin | O-VII-1 | 223 |
| A.D. Talantsev | MD04 | 95 | D.-H. Kim | MD02 | 92 |
| A.D. Talantsev | O-II-3 | 46 | D.-H. Kim | SM10 | 137 |
| Alexander G. Kolesnikov | MD10 | 106 | D.-T. Ngo | SM10 | 137 |
| Alexander S. Samardak | MD10 | 106 | D.-T. Quach | SM10 | 137 |
| Alexandr V. Sadovnikov | MD10 | 106 | Da Yeon Nam | SM07 | 131 |
| Alexey V. Ognev | MD10 | 106 | Daehong Kim | 초S-V-6 | 201 |
| B. C. Min | MD01 | 91 | Dae-Yun Kim | SM21 | 150 |
| B. C. Min | MD12 | 109 | Do Duc Cuong | MT01 | 73 |
| B. K. Ju | MD01 | 91 | Do-Gwun Hwang | BM01 | 71 |
| B. K. Ju | MD12 | 109 | Dong Ryeol Lee | SS01 | 152 |
| Bappaditya Pal | MD10 | 106 | Dong Ryeol Lee | 초S-I-1 | 11 |
| Biswanath Bhoi | MD05 | 97 | Dong-Kyu Lee | MT05 | 79 |
| Bo Kyeong Han | SM18 | 147 | Dong-Ok Kim | SS01 | 152 |
| Bosung Kim | MD05 | 97 | Dong-Ok Kim | 초S-I-1 | 11 |
| Bosung Kim | MT08 | 84 | Dorj Odkhuu | O-I-2 | 34 |
| Bosung Kim | O-VII-4 | 227 | Dorj Odkhuu | O-VII-5 | 228 |
| Bum Chul Park | NS02 | 161 | Eun-Sang Park | SO03 | 159 |
| Byeonghwa Lim | O-I-1 | 33 | Farman Ullah | 초O-II-1 | 43 |
| Byeonghwa Lim | 초S-II-5 | 28 | Fei-Ting Huang | 초S-I-6 | 17 |
| Byong-Guk Park | O-IV-1 | 61 | G. Gaudin | O-VII-6 | 229 |
| Byong-Guk Park | O-VI-4 | 218 | G. Malinowski | O-VII-6 | 229 |
| Byoung Gwan Cho | SS01 | 152 | Garam Yoo | SM16 | 145 |
| Byoung-Chul Min | NS04 | 164 | Gyu Won Kim | MD10 | 106 |
| Byoung-Chul Min | SM21 | 150 | Gyungchoon Go | MT05 | 79 |
| Byoung-Chul Min | SO03 | 159 | Gyungchoon Go | SS02 | 153 |
| C. H. Chang | O-III-1 | 53 | H. C. Koo | MD01 | 91 |
| C.G. Kim | MD04 | 95 | H. C. Koo | MD12 | 109 |
| C.G. Kim | O-II-3 | 46 | H. J. Kim | O-VII-1 | 223 |
| Chang Uk Jung | O-II-4 | 48 | H. -W. Lee | MD09 | 105 |
| Chaun Jang | NS04 | 164 | H.-G. Piao | MD02 | 92 |
| Cheol Gi Kim | O-I-1 | 33 | Haein Choi-Yim | HM09 | 119 |
| Cheol Gi Kim | 초S-II-5 | 28 | Haein Choi-Yim | HM11 | 122 |
| Cheol-Ha Baek | 초S-V-6 | 201 | Haein Choi-Yim | SM12 | 139 |
| Chinh Tam Le | 초O-II-1 | 43 | Haein Choi-Yim | SM13 | 140 |
| Chong-Yun Kang | MO01 | 165 | Haein Choi-Yim | SM14 | 142 |
| Chul-Jin Choi | HM06 | 115 | Haein Choi-Yim | SM16 | 145 |
| Chul-Jin Choi | O-V-1 | 205 | Haein Choi-Yim | SM18 | 147 |
| Chunli Liu | SM01 | 123 | Haein Choi-Yim | SM22 | 151 |
| D. Chiba | MD09 | 105 | Hee Gyum Park | NS04 | 164 |
| D. J. Lee | MD01 | 91 | Hee-Sung Han | MT04 | 77 |
| D. J. Lee | MD12 | 109 | Heon-Jin Choi | SM19 | 148 |
| D. Lacour | O-VII-6 | 229 | Ho-Dae Lim | BM01 | 71 |

| Name | Abstract ID | Page | Name | Abstract ID | Page |
|--------------------|----------------|------|----------------|----------------|------|
| Hongjae Moon | HM07 | 116 | Jinki Hong | NS03 | 163 |
| Hongjae Moon | HM10 | 121 | Jiyun Oh | SM13 | 140 |
| Hongjae Moon | HM11 | 122 | Jong-Gu Choi | BM01 | 71 |
| Hui-Dong Qian | HM06 | 115 | Jonghwan Yoon | 초S-II-5 | 28 |
| Hui-Dong Qian | O-V-1 | 205 | Jong-Woo Kim | O-V-1 | 205 |
| Hwaebong Jung | HM07 | 116 | Joon. I. Jang | 초O-II-1 | 43 |
| Hwaebong Jung | HM10 | 121 | Joonil Cha | NS03 | 163 |
| Hwaebong Jung | HM11 | 122 | Joonyeon Chang | NS03 | 163 |
| Hwan Young Choi | O-VI-1 | 215 | Joonyeon Chang | SM19 | 148 |
| Hyoungjeen Jeon | O-V-6 | 212 | Joonyeon Chang | SS02 | 153 |
| Hyun Cheol Koo | NS03 | 163 | Joo-Sung Kim | SM21 | 150 |
| Hyun Cheol Koo | SM19 | 148 | Jun Woo Choi | SM19 | 148 |
| Hyun Cheol Koo | SS02 | 153 | Jun Woo Choi | SS01 | 152 |
| Hyung-jun Kim | SS02 | 153 | Jun Woo Choi | 초S-I-1 | 11 |
| Hyun-Sook Lee | HM07 | 116 | Jun Woo Choi | 초S-I-7 | 18 |
| Hyun-Sook Lee | HM10 | 121 | June-Seo Kim | MD07 | 101 |
| Hyun-Sook Lee | HM11 | 122 | Jungho Kim | 초S-I-5 | 16 |
| Hyun-Woo Lee | Invited O-II-1 | 175 | Jung-II Hong | 초S-I-4 | 14 |
| Hyun-Woo Lee | O-IV-2 | 63 | Jungmin Park | MO01 | 165 |
| Hyun-Woo Lee | SS03 | 154 | Jung-Woo Yoo | MO01 | 165 |
| Ik Sun Hong | MT06 | 80 | Junhoe Kim | MD05 | 97 |
| Ilwan Seo | 초S-I-1 | 11 | Junhoe Kim | MT08 | 84 |
| Im-Jun Roh | MO01 | 165 | Junhoe Kim | O-III-3 | 56 |
| In Chung | NS03 | 163 | Junhoe Kim | O-VII-4 | 227 |
| In Ho Cha | MD10 | 106 | Juyoung Jung | O-VII-5 | 228 |
| J. H. Kim | MD01 | 91 | K. Hono | Invited O-II-3 | 177 |
| J. H. Kim | MD12 | 109 | K. J. Lee | MD01 | 91 |
| J. Kim | O-VII-1 | 223 | K. -J. Lee | MD09 | 105 |
| J. Kwon | O-III-1 | 53 | K. J. Lee | MD12 | 109 |
| Jae Dong Lee | 초O-III-2 | 182 | K. Roy | O-III-1 | 53 |
| Jae Ho Chung | SS01 | 152 | K.-S. Kim | O-VII-1 | 223 |
| Jae Young Kim | SS01 | 152 | Kab-Jin Kim | Invited O-II-2 | 176 |
| Jaegun Sim | O-III-3 | 56 | Kab-Jin Kim | MD09 | 105 |
| Jaehak Yang | MT08 | 84 | Kab-Jin Kim | MD11 | 108 |
| Jaehak Yang | O-III-3 | 56 | Kab-Jin Kim | MT05 | 79 |
| Jaehak Yang | O-VII-4 | 227 | Kab-Jin Kim | O-VI-4 | 218 |
| Jae-Hyeok Lee | O-III-3 | 56 | Kang-Hyuk Lee | HM05 | 114 |
| Jae-Hyoung You | O-VI-2 | 216 | Kang-Hyuk Lee | O-V-4 | 210 |
| Jae-Hyoung You | O-VI-3 | 217 | Ki Bong Lee | SS01 | 152 |
| Jae-Hyoung You | O-VI-5 | 220 | Ki-Suk Lee | MO01 | 165 |
| Jaekwang Lee | O-V-6 | 212 | Ki-Suk Lee | MT04 | 77 |
| Jang-Roh Rhee | BM01 | 71 | Ki-Yeon Kim | 초O-III-1 | 181 |
| J-C. Rojas-Sánchez | O-VII-6 | 229 | Kun Woo Kim | 초S-II-5 | 28 |
| Jeehoon Jeon | NS03 | 163 | Kunwoo Kim | O-I-1 | 33 |
| Jihoon Park | HM06 | 115 | Kyung Jin Choi | MO01 | 165 |
| Jihoon Park | O-V-1 | 205 | Kyung Mee Song | 초S-I-7 | 18 |
| Jihye Kim | SM18 | 147 | Kyung Mox Cho | HM06 | 115 |
| Jinho Byun | O-V-6 | 212 | Kyung-Han Kim | SS03 | 154 |

| Name | Abstract ID | Page | Name | Abstract ID | Page |
|---------------------|-------------|------|-----------------------|-------------|------|
| Kyung-Jin Lee | MT05 | 79 | Sang-Im Yoo | O-VI-5 | 220 |
| Kyung-Jin Lee | MT06 | 80 | Sang-Koog Kim | MD05 | 97 |
| Kyung-Jin Lee | SO03 | 159 | Sang-Koog Kim | MT08 | 84 |
| Kyung-Jin Lee | SS02 | 153 | Sang-Koog Kim | O-III-3 | 56 |
| Kyung-Woong Park | O-IV-1 | 61 | Sang-Koog Kim | O-VII-4 | 227 |
| L. Huang | SM10 | 137 | Sang-Suk Lee | BM01 | 71 |
| Leon Abelmann | NS02 | 161 | Sang-Wook Cheong | 초S-I-6 | 17 |
| Lijun Pan | NS02 | 161 | Se Kwon Kim | MT05 | 79 |
| M. Hehn | O-VII-6 | 229 | Se-Hyeok Oh | MT05 | 79 |
| M.-C. Cyrille | O-VII-6 | 229 | Seo Hyoung Chang | 초S-I-5 | 16 |
| Micheal Ledwig | NS02 | 161 | Seonghoon Woo | 초S-I-7 | 18 |
| Min Jun Ko | SM06 | 129 | Seoyeon Kwon | SM14 | 142 |
| Mingu Kang | O-VI-4 | 218 | Sergey A. Nikitov | MD10 | 106 |
| Min-Ho Park | SM21 | 150 | Seung-heon Chris Baek | O-IV-1 | 61 |
| Min-Seung Jung | 초S-I-4 | 14 | Seung-heon Chris Baek | O-VI-4 | 218 |
| Min-Sun Jang | MO01 | 165 | Seung-Hyub Baek | MO01 | 165 |
| Mi-Young Im | 초S-I-4 | 14 | Sol Jung | HM09 | 119 |
| Muhammad Nauman | O-VI-1 | 215 | Soon Cheol Hong | MT01 | 73 |
| Myung Joon Han | 초S-I-5 | 16 | Soong-Geun Je | O-VII-6 | 229 |
| Nara Lee | O-VI-1 | 215 | Sri Ramulu Torati | O-I-1 | 33 |
| O. Boulle | O-VII-6 | 229 | Sri Ramulu Torati | 초S-II-5 | 28 |
| O. J. Lee | MD01 | 91 | Srivathsava Surabhi | O-VII-2 | 224 |
| O. J. Lee | MD12 | 109 | Su Hyo Kim | SM06 | 129 |
| P. Vallobra | O-VII-6 | 229 | Su Hyo Kim | SM07 | 131 |
| Ping-Zhan Si | HM06 | 115 | Sug-Bong Choe | SM21 | 150 |
| Ping-Zhan Si | O-V-1 | 205 | Su-Hee Kim | BM01 | 71 |
| Purev Taivansaikhan | O-I-2 | 34 | Suik Cheon | O-IV-2 | 63 |
| Purev Taivansaikhan | O-VII-5 | 228 | Sumin Kim | HM07 | 116 |
| R.B. Morgunov | MD04 | 95 | Sumin Kim | HM10 | 121 |
| R.B. Morgunov | O-II-3 | 46 | Su-Min Kim | HM11 | 122 |
| Rick Ernst | MD11 | 108 | Sumin Kim | HM11 | 122 |
| Rongwei Hu | 초S-I-6 | 17 | Sumin Kim | SM12 | 139 |
| S. Goolaup | O-III-1 | 53 | Sumin Kim | SM18 | 147 |
| S. -J. Lee | MD09 | 105 | Sumin Kim | SM22 | 151 |
| S. Mangin | MD04 | 95 | Sung Joon Choi | O-VI-3 | 217 |
| S. Mangin | O-II-3 | 46 | Sung Soo Park | MO01 | 165 |
| S. Mangin | O-VII-6 | 229 | Sung-Hyon Rhim | O-VII-3 | 226 |
| S. -W. Lee | MD09 | 105 | Sungjoon Choi | O-VI-5 | 220 |
| S.-D. Kim | MD02 | 92 | Sungkyun Park | O-V-6 | 212 |
| S.-H. Lee | SM10 | 137 | Sunwoo Lee | O-VI-3 | 217 |
| S.H. Rhim | MT01 | 73 | Sunwoo Lee | O-VI-5 | 220 |
| Sandhya Rani Goudu | O-I-1 | 33 | T. Fache | O-VII-6 | 229 |
| Sang Mu Choi | NS01 | 160 | T. H Pham | O-VII-6 | 229 |
| Sanghoon Kim | MD11 | 108 | T. Koyama | MD09 | 105 |
| Sang-Im Yoo | HM05 | 114 | T. Moriyama | MD09 | 105 |
| Sang-Im Yoo | O-V-4 | 210 | T. Ono | MD09 | 105 |
| Sang-Im Yoo | O-VI-2 | 216 | T.-L. Phan | SM10 | 137 |
| Sang-Im Yoo | O-VI-3 | 217 | Tae-Eon Park | NS03 | 163 |

| Name | Abstract ID | Page |
|----------------------|----------------|------|
| Tae-Won Go | HM05 | 114 |
| Taewon Min | O-V-6 | 212 |
| Takahiro Moriyama | MD11 | 108 |
| Teruo Ono | Invited O-II-2 | 176 |
| Teruo Ono | MD11 | 108 |
| Teruo Ono | MT05 | 79 |
| Tian Li | MD11 | 108 |
| Umasankar Dash | O-II-4 | 48 |
| W. L. Gan | O-III-1 | 53 |
| W. S. Lew | O-III-1 | 53 |
| Won Jun Choi | MO01 | 165 |
| Won Young Choi | SS02 | 153 |
| Wondong Kim | 초S-I-3 | 13 |
| Woo Seung Ham | MD11 | 108 |
| Wooyoung Lee | HM07 | 116 |
| Wooyoung Lee | HM10 | 121 |
| Wooyoung Lee | HM11 | 122 |
| X.-P. Ma | MD02 | 92 |
| X.-P. Ma | SM10 | 137 |
| Xinghao Hu | O-I-1 | 33 |
| Xinghao Hu | 초S-II-5 | 28 |
| Y. Lu | MD04 | 95 |
| Y. Lu | O-II-3 | 46 |
| Y. W. Lee | O-VII-1 | 223 |
| Yan Wel | O-V-4 | 210 |
| Yaroslav Tserkovnyak | MT05 | 79 |
| Yoko Yoshimura | Invited O-II-2 | 176 |
| Yoko Yoshimura | MD11 | 108 |
| Yong Jin Kim | MD10 | 106 |
| Yong Soo Kim | 초O-II-1 | 43 |
| Yong-Keun Park | SM21 | 150 |
| Yongseong Choi | 초S-I-1 | 11 |
| Yoo Sang Jeon | SM07 | 131 |
| Yoon H. Jeong | O-VII-1 | 223 |
| Yoon Seok Oh | 초S-I-6 | 17 |
| Yoon-Seok Nam | SM21 | 150 |
| Yoshinobu Nakatani | Invited O-II-2 | 176 |
| Yoshinobu Nakatani | MD11 | 108 |
| Youn Ho Park | SM19 | 148 |
| Young Hoon Jeong | 초S-I-6 | 17 |
| Young Jai Choi | O-VI-1 | 215 |
| Young Keun Kim | MD10 | 106 |
| Young Keun Kim | NS02 | 161 |
| Young Keun Kim | SM06 | 129 |
| Young Keun Kim | SM07 | 131 |
| Young Rang Uhm | NS01 | 160 |
| Young-Jun Cho | MD05 | 97 |
| Young-Jun Cho | MT08 | 84 |

| Name | Abstract ID | Page |
|----------------|-------------|------|
| Young-Jun Cho | O-VII-4 | 227 |
| Youngjun Kim | O-VII-5 | 228 |
| Younjung Jo | O-VI-1 | 215 |
| Yuefa Jia | SM01 | 123 |
| Yunjeong Hong | O-VI-1 | 215 |
| Yuushou Hirata | MD11 | 108 |
| 강선주 | SA01 | 167 |
| 강선주 | SA02 | 169 |
| 강신원 | 초S-II-4 | 26 |
| 강영민 | HM01 | 110 |
| 강영민 | HM02 | 111 |
| 강영민 | HM03 | 112 |
| 공군승 | 초S-IV-4 | 188 |
| 곽봉섭 | 초S-II-4 | 26 |
| 권해웅 | HM08 | 117 |
| 권해웅 | O-V-3 | 209 |
| 권해웅 | 토크콘서트-2 | 4 |
| 김갑중 | 초S-V-4 | 198 |
| 김갑진 | SO02 | 157 |
| 김경민 | HM08 | 117 |
| 김기범 | 초S-II-3 | 24 |
| 김기홍 | 초S-V-4 | 198 |
| 김남규 | 초S-I-2 | 12 |
| 김대기 | MT09 | 86 |
| 김대현 | MD08 | 103 |
| 김대현 | O-IV-3 | 64 |
| 김덕현 | SM17 | 146 |
| 김덕현 | SM20 | 149 |
| 김동석 | MD08 | 103 |
| 김동석 | O-IV-3 | 64 |
| 김동영 | SM04 | 127 |
| 김동영 | SM05 | 128 |
| 김동준 | O-VII-2 | 224 |
| 김동환 | 초S-IV-4 | 188 |
| 김동환 | 토크콘서트-1 | 3 |
| 김동훈 | O-II-2 | 44 |
| 김명기 | 초S-III-4 | 40 |
| 김명삼 | 초S-V-2 | 195 |
| 김미루 | 초S-III-3 | 39 |
| 김병국 | 초S-V-4 | 198 |
| 김보성 | MD03 | 93 |
| 김삼진 | SM08 | 133 |
| 김삼진 | SM09 | 135 |
| 김상국 | MD03 | 93 |
| 김상면 | 초S-IV-5 | 189 |
| 김상원 | 초S-II-1 | 21 |
| 김상준 | SA03 | 170 |
| 김상준 | SA04 | 171 |

| Name | Abstract ID | Page |
|------|-------------|------|
| 김상훈 | 초S-III-4 | 40 |
| 김석훈 | SM03 | 126 |
| 김석훈 | SM11 | 138 |
| 김석훈 | SM15 | 144 |
| 김수경 | O-V-5 | 211 |
| 김시년 | MT11 | 89 |
| 김시년 | MT12 | 90 |
| 김신규 | 초S-III-3 | 39 |
| 김영민 | 초S-III-3 | 39 |
| 김예찬 | 초S-III-4 | 40 |
| 김우철 | 초S-IV-2 | 186 |
| 김원동 | MD08 | 103 |
| 김원동 | SO01 | 155 |
| 김유민 | 초S-V-5 | 200 |
| 김유선 | 초S-III-2 | 38 |
| 김은애 | SA03 | 170 |
| 김은애 | SA04 | 171 |
| 김재성 | SO01 | 155 |
| 김정호 | 초S-V-5 | 200 |
| 김준희 | MD03 | 93 |
| 김진영 | 초S-II-1 | 21 |
| 김진철 | 초S-IV-1 | 185 |
| 김창규 | 초S-V-5 | 200 |
| 김창수 | MD08 | 103 |
| 김창수 | O-IV-3 | 64 |
| 김철성 | MD06 | 99 |
| 김철성 | SM02 | 124 |
| 김철성 | SM08 | 133 |
| 김철성 | SM09 | 135 |
| 김태유 | SM15 | 144 |
| 김태철 | O-II-2 | 44 |
| 김학순 | MT07 | 81 |
| 김혁준 | 초S-II-2 | 23 |
| 김현성 | SM17 | 146 |
| 김현성 | SM20 | 149 |
| 김형석 | O-III-2 | 55 |
| 김형석 | 초S-III-3 | 39 |
| 김효준 | O-V-2 | 207 |
| 김효준 | 초S-IV-5 | 189 |
| 김희중 | 초O-I-1 | 67 |
| 나길주 | 초S-V-4 | 198 |
| 남재도 | 초S-III-4 | 40 |
| 노재철 | SM03 | 126 |
| 노재철 | SM11 | 138 |
| 문경웅 | MD08 | 103 |
| 문경웅 | O-IV-3 | 64 |
| 문경웅 | SO01 | 155 |
| 문광록 | HM03 | 112 |

| Name | Abstract ID | Page |
|------|-------------|------|
| 박병국 | O-VII-2 | 224 |
| 박병국 | SO02 | 157 |
| 박상윤 | 초S-II-2 | 23 |
| 박유근 | 초S-II-2 | 23 |
| 박일진 | 초S-III-1 | 37 |
| 박정호 | SM09 | 135 |
| 박종환 | SM03 | 126 |
| 박종환 | SM11 | 138 |
| 박종환 | SM15 | 144 |
| 박진식 | MT02 | 74 |
| 박철수 | 초S-V-3 | 196 |
| 박호용 | MT09 | 86 |
| 배경훈 | O-V-2 | 207 |
| 배석 | 초S-III-2 | 38 |
| 배석환 | 초S-V-5 | 200 |
| 백연경 | O-V-5 | 211 |
| 서선열 | 초S-V-2 | 195 |
| 서수정 | SM03 | 126 |
| 서수정 | SM11 | 138 |
| 서수정 | SM15 | 144 |
| 서정민 | 초S-V-3 | 196 |
| 서정욱 | 초S-III-1 | 37 |
| 성열훈 | 초S-V-1 | 193 |
| 손대락 | SA01 | 167 |
| 손대락 | SA02 | 169 |
| 손대락 | SA03 | 170 |
| 손대락 | SA04 | 171 |
| 송용설 | 초S-IV-2 | 186 |
| 신광호 | MT12 | 90 |
| 신세희 | SM11 | 138 |
| 신세희 | SM15 | 144 |
| 심인보 | MD06 | 99 |
| 안성용 | 초S-III-1 | 37 |
| 안우상 | 초S-V-3 | 196 |
| 안지훈 | MT12 | 90 |
| 양재학 | MD03 | 93 |
| 오한호 | 초S-IV-2 | 186 |
| 원태준 | MT09 | 86 |
| 원희수 | 초S-V-3 | 196 |
| 유세종 | 초S-V-4 | 198 |
| 유영상 | 초S-I-2 | 12 |
| 유영석 | 초S-III-1 | 37 |
| 유재경 | HM04 | 113 |
| 유재경 | O-V-3 | 209 |
| 유준열 | MT03 | 75 |
| 유지훈 | HM08 | 117 |
| 유지훈 | O-V-3 | 209 |
| 유지훈 | 토크콘서트-2 | 4 |

| Name | Abstract ID | Page |
|------|-------------|------|
| 유천열 | MT12 | 90 |
| 유천열 | O-III-2 | 55 |
| 유천열 | SO01 | 155 |
| 윤명환 | MT07 | 81 |
| 윤석수 | SM04 | 127 |
| 윤석수 | SM05 | 128 |
| 윤세중 | 초S-IV-2 | 186 |
| 윤정범 | MD08 | 103 |
| 윤정범 | O-IV-3 | 64 |
| 윤지수 | SO01 | 155 |
| 이경섭 | SM15 | 144 |
| 이경진 | O-VII-2 | 224 |
| 이기석 | 초S-I-2 | 12 |
| 이기승 | MT12 | 90 |
| 이동윤 | HM04 | 113 |
| 이두환 | 초S-III-3 | 39 |
| 이두환 | 초S-IV-3 | 187 |
| 이민우 | O-V-2 | 207 |
| 이보화 | SM17 | 146 |
| 이보화 | SM20 | 149 |
| 이상선 | MD08 | 103 |
| 이상선 | O-IV-3 | 64 |
| 이상원 | 초S-III-2 | 38 |
| 이석희 | SM17 | 146 |
| 이석희 | SM20 | 149 |
| 이성래 | O-V-2 | 207 |
| 이성우 | SA01 | 167 |
| 이수길 | SO02 | 157 |
| 이수석 | 초S-I-2 | 12 |
| 이승한 | O-II-2 | 44 |
| 이영배 | SM09 | 135 |
| 이우영 | 토크콘서트-4 | 6 |
| 이우진 | 초S-III-1 | 37 |
| 이재령 | 초S-IV-3 | 187 |
| 이재욱 | O-VII-2 | 224 |
| 이재욱 | SO02 | 157 |
| 이재훈 | 초S-II-4 | 26 |
| 이정구 | HM04 | 113 |
| 이정구 | HM08 | 117 |
| 이정구 | O-V-3 | 209 |
| 이정구 | O-V-5 | 211 |
| 이정구 | 토크콘서트-2 | 4 |
| 이정구 | 토크콘서트-3 | 5 |
| 이정우 | SA02 | 169 |
| 이정우 | SM03 | 126 |
| 이정우 | SM11 | 138 |
| 이정훈 | 초S-II-4 | 26 |
| 이주인 | SO01 | 155 |

| Name | Abstract ID | Page |
|------|-------------|------|
| 이형주 | 초S-IV-3 | 187 |
| 임미영 | 초S-I-2 | 12 |
| 임상호 | MT11 | 89 |
| 임상호 | MT12 | 90 |
| 임성현 | MT02 | 74 |
| 임성현 | MT10 | 88 |
| 임은수 | HM03 | 112 |
| 임정태 | MD06 | 99 |
| 임정태 | SM02 | 124 |
| 장재욱 | 초S-V-2 | 195 |
| 장태석 | O-V-2 | 207 |
| 장현철 | 초S-V-5 | 200 |
| 전민철 | 초S-V-4 | 198 |
| 전병선 | MD08 | 103 |
| 전병선 | O-IV-3 | 64 |
| 전철연 | O-VII-2 | 224 |
| 정구훈 | MT11 | 89 |
| 정구훈 | MT12 | 90 |
| 정연준 | 초S-III-3 | 39 |
| 정영진 | 초S-V-5 | 200 |
| 정은지 | SA02 | 169 |
| 정재식 | MT03 | 75 |
| 정재은 | O-II-2 | 44 |
| 정종율 | O-VII-2 | 224 |
| 정진용 | SO01 | 155 |
| 조영준 | MD03 | 93 |
| 조재환 | 초S-V-2 | 195 |
| 조창빈 | SA02 | 169 |
| 주명식 | 초S-V-2 | 195 |
| 진성민 | 초S-III-4 | 40 |
| 차희령 | HM04 | 113 |
| 차희령 | O-V-3 | 209 |
| 채다운 | SA02 | 169 |
| 최강룡 | 초S-III-1 | 37 |
| 최재혁 | 초S-V-3 | 196 |
| 최종국 | O-VII-2 | 224 |
| 최판규 | 토크콘서트-5 | 7 |
| 최현경 | SM08 | 133 |
| 최현경 | SM09 | 135 |
| 최호준 | SM03 | 126 |
| 최호준 | SM11 | 138 |
| 최호준 | SM15 | 144 |
| 최홍수 | 초S-II-1 | 21 |
| 한만석 | 초S-V-4 | 198 |
| 한보경 | 초S-IV-3 | 187 |
| 한은주 | MD06 | 99 |
| 한희성 | 초S-I-2 | 12 |
| 홍문봉 | MT10 | 88 |

| Name | Abstract ID | Page |
|------|-------------|------|
| 홍순철 | MT02 | 74 |
| 홍순철 | MT10 | 88 |
| 홍정일 | 초S-I-2 | 12 |
| 홍정표 | MT03 | 75 |
| 홍정표 | MT07 | 81 |
| 홍정표 | MT09 | 86 |
| 홍주완 | 초S-V-3 | 196 |

| Name | Abstract ID | Page |
|------|-------------|------|
| 황도근 | 초S-V-2 | 195 |
| 황순모 | 초S-IV-2 | 186 |
| 황찬용 | MD08 | 103 |
| 황찬용 | O-IV-3 | 64 |
| 황찬용 | SO01 | 155 |
| 황필순 | MD06 | 99 |



Digests of the KMS 2017 Summer Conference
The Korean Magnetics Society
사단법인 한국자기학회

2017년도 하계학술연구발표회 논문개요집

제 27권 1호

(06130) 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22(역삼동635-4) 한국과학기술회관 신관 905호

TEL. (02)3452-7363, **FAX.** (02)3452-7364

E-mail. komag@unitel.co.kr, **Home-page.** www.komag.org