

# 한국자기학회 2015년도 임시총회 및 하계학술연구발표회

## KMS 2015 Summer Conference

논문개요집



**일시** 2015. 5. 28(목) ~ 5.30(토)

**장소** 한화리조트 해운대 티볼리

**주최** 한국자기학회

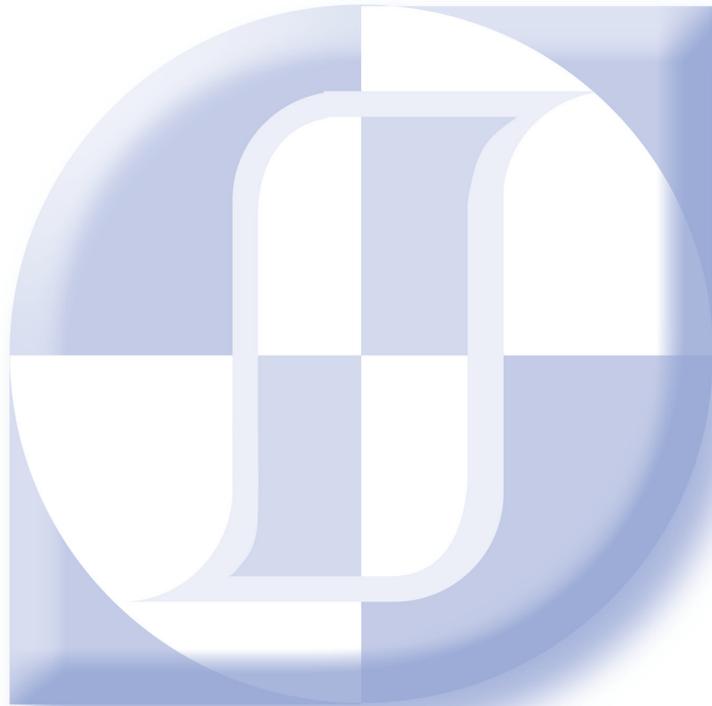
**후원** 한국과학기술단체총연합회

사단법인 한국자기학회

# 한국자기학회 2015년도 임시총회 및 하계학술연구발표회

## KMS 2015 Summer Conference

논문개요집



**일시** 2015. 5. 28(목) ~ 5.30(토)

**장소** 한화리조트 해운대 티볼리

**주최** 한국자기학회

**후원** 한국과학기술단체총연합회

“이 발표논문집은 2015년도 정부재원으로 한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 발간되었음”





## 공지사항

1. 연구발표를 하시는 회원은 아래사항을 지켜주시기 바랍니다.

- 1) 포스터보드 크기는 한 분당 가로 120cm X 세로 180cm 사용할 수 있습니다.
- 2) 포스터 발표자는 발표시간 10분 전에 붙여주시기 바랍니다.

2. 일정

5월 28일(목)	12:00~	참가자 등록		
	13:00~15:10	강습회 프로그램 (마나롤라)		
	15:10~15:30	Coffee Break		
	15:30~16:10	초청강연 I (마나롤라)		
	16:10~16:20	Coffee Break		
	16:20~18:20	구두발표 I (마나롤라)	구두발표 II (베르나차)	
5월 29일(금)	08:30~	참가자 등록		
	09:00~10:20	구두발표 III (마나롤라)	구두발표 IV (베르나차)	
	10:20~10:30	Coffee Break		
	10:30~12:30	초청강연 II (마나롤라)		
	12:30~14:00	Lunch		
	14:00~16:20	Special Session I (마나롤라) '미래 Magenet 연구회 : EV & HEV Motor and Magnetic Materials'	Special Session II (베르나차) '의과학 자기 연구회'	
	16:20~16:30	Coffee Break		
	16:30~17:10	연구회, 자성학 계절학교 운영방향 설명회 (마나롤라)		
	17:10~17:20	Coffee Break		
	17:20~18:00	총회 특별초청강연 (마나롤라) - 김희중(한국나노기술원)		
	18:00~18:30	한국자기학회 임시총회 (마나롤라)		
	18:30~20:30	Dinner (블루시걸)		
5월 30일(토)	08:30~	참가자 등록		
	09:00~11:00	포스터발표 (마나롤라)	Special Session III (코넬리아) '재료/자기 물성측정 및 분석(관련) 세션'	
	11:00~11:30	Best Poster 시상식 및 폐회 (마나롤라)		

3. 『Best Poster 시상』이 5월 30일(토) 11시에 있을 예정이오니, 회원 여러분의 많은 참여바랍니다.

(단, 수상자(발표자)가 불참시에는 수상이 취소됩니다.)

## 5월 28일 [목]

시간	프로그램	
12:00 ~	참가자 등록	
	강습회 프로그램(마나롤라) 좌장: 최판규((주)MTI)	
13:00~14:00	T-1. 전기기기의 기본개념과 특수기기의 개발 및 응용	장석명((주)셈스하이테크엔지니어링)
14:00~14:10	Coffee Break	
14:10~15:10	T-2. 반도체 큐비트의 상태제어와 양자프로세서	김도헌(연세대)
15:10~15:30	Coffee Break	
	초청강연 I (마나롤라) 좌장: 정종율(충남대)	
15:30~16:10	초O-I-1. Signatures of Majorana Fermions in Magnetic Atom Chains on a Superconductor	서정필(대구경북과학기술원)
16:10~16:20	Coffee Break	
	<b>구두발표 I (마나롤라)</b> 좌장: 유천열(인하대)	<b>구두발표 II (베르나차)</b> 좌장: 류권상(한국표준과학연구원)
16:20~16:40	O-I-1. Effect of angular dependence of spin-orbit spin transfer torque on magnetization switching and domain wall motion of perpendicular magnetic layer 이서원(고려대)	16:20~16:40 O-II-1. Asymmetric induced magnetic moment of top and bottom Pd layers in Pd/Co/Pd trilayer system 송경미(숙명여대)
16:40~17:00	O-I-2. 교류자기장에 의한 스커미온 이동 특성연구 문경웅(한국표준과학연구원)	16:40~17:00 O-II-2. Thermally strong perpendicular magnetic anisotropy features of CoFeB/MgO frames via diffusion control 안광국(한양대)
17:00~17:20	O-I-3. 수직자기이방성을 갖는 반강자성체/강자성체/산화물 이종구조에서의 스핀-오빗 토크 오영원(한국과학기술원)	17:00~17:20 O-II-3. Thermally stable features in double CoFeB/MgO frame for perpendicular magnetic tunnel junctions 김재홍(한양대)
17:20~17:40	O-I-4. Various excitation phenomena of a skyrmion in ultrathin magnetic nanodisk induced by Spin Hall Effect Takayuki Shiino (한국과학기술원)	17:20~17:40 O-II-4. Photo-control of exchange bias in epitaxial BiFeO <sub>3</sub> /(La,Sr)MnO <sub>3</sub> thin films 정종훈(인하대)
17:40~18:00	O-I-5. Domain Wall Motion Driven by Negative Spin-Transfer Torque 김주성(서울대)	17:40~18:00 O-II-5. 자성센싱 홀소자 맥진센서를 이용한 모바일 향 건강진단 콘텐츠 개발 이상석(상지대)
18:00~18:20	O-I-6. RF-마그네트론 스퍼터링 방법에 의한 다층구조의 마그네타이트 에피박막성장의 최적화에 대한 연구 국지현(이화여대)	



## 5월 29일 [금]

시간	프로그램		
08:30 ~	참가자 등록		
	<b>구두발표 III (마나톨라)</b> 좌장: 신광호(경성대)		<b>구두발표 IV (베르나차)</b> 좌장: 김미영(숙명여대)
09:00~09:20	O-III-1. Hot-deformation 법을 통해 제조된 Nd-Fe-B 자석의 후열처리 온도에 따른 자기특성 및 미세구조 변화 차희령(재료연구소)	09:00~09:20	O-IV-1. Magnetoelectric effect of strained 5d TM/Fe/MgO(001) (TM=Ta and Pt): A first principles study P. Taivansaikhan(울산대)
09:20~09:40	O-III-2. Optimization of oxide magnetic refrigerants 김종우(재료연구소)	09:20~09:40	O-IV-2. 4원 호이슬러 합금 CoFeCrGa(001) 표면에서 자성과 반쪽금속성에 대한 제일원리 계산 연구 이재일(인하대)
09:40~10:00	O-III-3. Thickness dependent Magnetic Properties of Rare-earth free $L_{10}$ FePt/Fe <sub>45</sub> Co <sub>55</sub> bilayer Imran Khan (부경대)	09:40~10:00	O-IV-3. The magnetic phase and the electronic structure of doped Gd-clustering for topological insulator, Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> 신은하(숙명여대)
10:00~10:20	O-III-4. Magnetic Properties of Zinc-substituted Strontium W-type hexaferrites of SrZn <sub>x</sub> Fe <sub>(2-x)</sub> Fe <sub>16</sub> O <sub>27</sub> (0.0 ≤ x ≤ 2.0) 유재형(서울대)	10:00~10:20	O-IV-4. Magnetism and Magnetocrystalline anisotropies of ordered L10 MnPt alloy: A first principles study on bulk and thin films Qurat ul ain (울산대)
10:20~10:30	Coffee Break		
	<b>초청강연 II (마나톨라)</b>		좌장: 이우영(연세대)
10:30~11:10	초O-II-1. Magnetism and magnetocrystalline anisotropy of FeRh(001) thin films		홍순철(울산대)
11:10~11:50	초O-II-2. Fabrication of High Efficient Permanent Magnet by Alternative Structure of Hard/Soft Magnetic Nanoparticle Nanocomposite		강영수(서강대)
11:50~12:30	초O-II-3. Latest MRI R & D Trends – with high resolution diffusion MRI and CEST		정하규(필립스코리아)
12:30~14:00	Lunch		
	<b>Special Session I (마나톨라)</b> ‘미래 Magenet 연구회 : EV & HEV Motor and Magnetic Materials’ 좌장: 유상임(서울대)		<b>Special Session II (베르나차)</b> ‘의과학 자기 연구회’ 좌장: 한만석(강원대)
14:00~14:30	초S-I-1. 전기자동차용 전동기의 종류와 적정기종 선정 과정 장석명((주)셈스하이테크엔지니어링)	14:00~14:30	초S-II-1. Kernel 변경에 따른 영상평가 연구 전민철(충남대병원)
14:30~15:00	초S-I-2. 친환경자동차 구동모터용 전기강판 및 이용 기술 김재관(포항공대 철강대학원)	14:30~15:00	초S-II-2. 전산화단층촬영에서 인체의 방사선피폭선량 조사 유세중(건양대병원)

시간	프로그램		
15:00~15:40	초S-I-3. Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Shigeaki Ishikawa(Nissan Motor Co., Ltd.)	15:00~15:30	초S-II-3. 의료용 선형가속기를 이용한 영상유도방사 선치료 시 격일 콘빔 CT 적용의 유용성 평가 박병석(삼성서울병원)
15:40~16:20	초S-I-4. Overview of development of magnetic material technology for high-efficiency motors in Future Pioneering Program of Japan Kimihiro Ozaki(AIST)		
16:20~16:30	Coffee Break		
16:30~17:10	연구회, 자성학 계절학교 운영방향 설명회 (마나몰라)		사회: 김삼진(국민대)
17:10~17:20	Coffee Break		
17:20~18:00	과학기술 혁신과 부자	총회 특별초청강연 (마나몰라) 좌장: 김삼진(국민대) 김희중(한국나노기술원)	
18:00~18:30	한국자기학회 임시총회 (마나몰라)		
18:30~20:30	Dinner (블루시걸)		



## 5월 30일 [토]

시간	프로그램	
08:30~	참가자 등록	
	<b>포스터 발표 (마나롤라)</b> 좌장: 신광호(경성대)/정종율(충남대)	<b>Special Session III (코넬리아)</b> <b>'재료/자기 물성측정 및 분석(관련) 세션'</b> 좌장: 김철기(대구경북과학기술원)
09:00~11:00	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]	09:00~09:20 초S-III-1. 파동에너지극한제어연구단 소개 이학주(한국기계연구원)
	Session NS [Nano-structured materials] Session ST [Spin transfer torque for magnetic memory]	09:20~09:40 초S-III-2. 나노자성체 동역학 측정기술 개발 황찬용(한국표준과학연구원)
	Session NM [Nanoscale Magnetism] Session MO [Magnetic Oxides and Multiferroics]	09:40~10:00 초S-III-3. Nano Secondary Ion Mass Spectrometry: A New Approach to the Analysis of Nano Materials 홍태은(한국기초과학지원연구원)
	Session BM [Biomedical Materials] Session SA [Sensors and Applications]	10:00~10:20 초S-III-4. 전기강판에 첨가되는 첨가물의 확산 및 거동 분석 김성규(포항공대)
	Session OT [Others]	10:20~10:40 초S-III-5. 원자단층현미경을 이용한 나노소재 분석 이봉호(대구경북과학기술원)
11:00~11:30	Best Poster 시상식 및 폐회 (마나롤라)	





# CONTENTS

KMS 2015 Summer Conference

5월 29일(금) 17:20~18:00  
Session : 총회 특별초청강연

마나틀라

\* 좌 장 : 김삼진(국민대)

총회초청	17:20	과학기술 혁신과 부자 김희중*	3
------	-------	---------------------	---

5월 28일(목) 13:00~15:10  
Session : 강습회 프로그램

마나틀라

\* 좌 장 : 최판규((주)MTI)

T-1	13:00	전기기기의 기본개념과 특수기기의 개발 및 응용 장석명*	7
T-2	14:10	반도체 큐비트의 상태제어와 양자프로세서 김도현*	8

5월 28일(목) 15:30~16:10  
Session : 초청강연 I

마나틀라

\* 좌 장 : 정종율(충남대)

초O-I-1	15:30	Signatures of Majorana Fermions in Magnetic Atom Chains on a Superconductor Jungpil Seo*, S. Nadj-Perge, I. K. Drozdov, J. Li, H. Chen, S. Jeon, A. H. Macdonald, B. A. Bernevig, and A. Yazdani	11
--------	-------	---	----

5월 28일(목) 16:20~18:20  
Session : 구두발표 I

마나틀라

\* 좌 장 : 유천열(인하대)

O-I-1	16:20	Effect of angular dependence of spin-orbit spin transfer torque on magnetization switching and domain wall motion of perpendicular magnetic layer Seo-Won Lee* and Kyung-Jin Lee	15
O-I-2	16:40	교류자기장에 의한 스커미온 이동 특성연구 문경웅*, 김덕호, 제승근, 전병선, 김원동, 최석봉, 황찬용	17

O-I-3	17:00	수직자기이방성을 갖는 반강자성체/강자성체/산화물 이종구조에서의 스핀-오빗 토크 .....	18
		오영완*, 이해연, 이경동, 박병국	
O-I-4	17:20	Various excitation phenomena of a skyrmion in ultrathin magnetic nanodisk induced by Spin Hall Effect .....	20
		Takayuki Shiino*, Ki-Suk Lee, Byong-Guk Park	
O-I-5	17:40	Domain Wall Motion Driven by Negative Spin-Transfer Torque .....	23
		Joo-Sung Kim*, Soong-Geun Je, Sang-Cheol Yoo, Joon Moon, Byoung-Chul Min, and Sug-Bong Choe	
O-I-6	18:00	RF-마그네트론 스퍼터링 방법에 의한 다층구조의 마그네타이트 에피 박막성장의 최적화에 대한 연구 .....	25
		국지현*, 이년중, 배유정, Anny Michel, 김태희†	

5월 28일(목) 16:20~18:00  
Session : 구두발표 II

베르나차

✿ 좌 장 : 류권상(한국표준과학연구원)

O-II-1	16:20	Asymmetric induced magnetic moment of top and bottom Pd layers in Pd/Co/Pd trilayer system .....	29
		Kyung Mee Song*, Dong-Ok Kim, Jun Woo Choi, Dong Ryeol Lee, Yongseong Choi, Byoung-Chul Min, Miyoung Kim, Han Chul Kim, Jae Sung Kim	
O-II-2	16:40	Thermally strong perpendicular magnetic anisotropy features of CoFeB/MgO frames <i>via</i> diffusion control .....	30
		GwangGuk An*, JaBin Lee, SeungMo Yang, JaeHong Kim, WooSeong Chung, HaeSoo Park, and JinPyo Hong†	
O-II-3	17:00	Thermally stable features in double CoFeB/MgO frame for perpendicular magnetic tunnel junctions .....	32
		JaeHong Kim*, JaBin Lee, GwangGuk An, SeungMo Yang, WooSeong Chung, HaeSoo Park and JinPyo Hong†	
O-II-4	17:20	Photo-control of exchange bias in epitaxial BiFeO <sub>3</sub> /(La,Sr)MnO <sub>3</sub> thin films .....	34
		성길동, 이태권, 정종훈*	
O-II-5	17:40	자성센싱 흡소자 맥진센서를 이용한 모바일향 건강진단 콘텐츠 개발 .....	36
		이상석*, 김근호, 황도근, 이장로	

5월 29일(금) 09:00~10:20  
Session : 구두발표 III

마나틀라

✿ 좌 장 : 신광호(경성대)

O-III-1	09:00	Hot-deformation 법을 통해 제조된 Nd-Fe-B 자석의 후열처리 온도에 따른 자기특성 및 미세구조 변화 .....	41
		차희령*, 유지훈, 권해웅, 김양도, 이정구	

O-III-2	09:20	Optimization of oxide magnetic refrigerants ..... 43 김종우*, 조서현, 최종진, 안철우, 류정호, 한병동, 최준환, 윤운하, 박동수
O-III-3	09:40	Thickness dependent Magnetic Properties of Rare-earth free L1 <sub>0</sub> FePt/Fe <sub>45</sub> Co <sub>55</sub> bilayer ..... 45 Imran Khan*, Jicheol Son, Jisang Hong
O-III-4	10:00	Magnetic Properties of Zinc-substituted Strontium W-type hexaferrites of SrZn <sub>x</sub> Fe <sub>(2-x)</sub> Fe <sub>16</sub> O <sub>27</sub> (0.0 ≤ x ≤ 2.0) ..... 46 Jae-Hyoung You*, SungJoon Choi, Sunwoo Lee, and Sang-Im Yoo <sup>†</sup>

5월 29일(금) 09:00~10:20  
Session : 구두발표 IV

베르나차

✿ 좌 장 : 김미영(숙명여대)

O-IV-1	09:00	Magnetoelectric effect of strained 5d/TM/Fe/MgO(001) (TM=Ta and Pt): A first principles study ..... 49 P. Taivansaikhan*, D. Odkhuu, S. H. Rhim, and S. C. Hong <sup>†</sup>
O-IV-2	09:20	4원 호이슬러 합금 CoFeCrGa(001)표면에서 자성과 반쪽금속성에 대한 제일원리 계산 연구 ..... 50 이재일*, 김동철
O-IV-3	09:40	The magnetic phase and the electronic structure of doped Gd-clustering for topological insulator, Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> ..... 52 Eun-Ha Shin*, Myung-Hwa Chung, Miyoung Kim, Hanchul Kim
O-IV-4	10:00	Magnetism and magnetocrystalline anisotropies of ordered L1 <sub>0</sub> MnPt alloy: A first principles study on bulk and thin films ..... 53 Qurat ul ain*, S. H. Rhim, and Soon Cheol Hong

5월 29일(금) 10:30~12:30  
Session : 초청강연 II

마나틀라

✿ 좌 장 : 이우영(연세대)

초O-II-1	10:30	Magnetism and magnetocrystalline anisotropy of FeRh(001) thin films ..... 57 Soyoung Jekal, S. H. Rhim, and Soon Cheol Hong*
초O-II-2	11:10	Fabrication of High Efficient Permanent Magnet by Alternative Structure of Hard/Soft Magnetic Nanoparticle Nanocomposite ..... 58 Young Soo Kang*
초O-II-3	11:50	Latest MRI R & D Trends - with high resolution diffusion MRI and CEST ..... 59 Ha-Kyu Jeong*

5월 29일(금) 14:00~16:20

Special Session I '미래 Magnet 연구회 :  
EV & HEV Motor and Magnetic Materials'

마나블라

✿ 좌 장 : 유상임(서울대)

초S-I-1	14:00	전기자동차용 전동기의 종류와 적정기종 선정 과정 ..... 63 장석명*	63
초S-I-2	14:30	친환경자동차 구동모터용 전기강판 및 이용 기술 ..... 64 김재관*	64
초S-I-3	15:00	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle ..... 65 Shigeaki Ishikawa*	65
초S-I-4	15:40	Overview of development of magnetic material technology for high-efficiency motors in Future Pioneering Program of Japan ..... 66 Kimihiro Ozaki*	66

5월 29일(금) 14:00~15:30

Special Session II '의과학 자기 연구회'

베르나차

✿ 좌 장 : 한만석(강원대)

초S-II-1	14:00	Kernel 변경에 따른 영상평가 연구 ..... 69 전민철*, 한만석, 장재욱, 장현철, 최재혁, 허영철	69
초S-II-2	14:30	전산화단층촬영에서 인체의 방사선피폭선량 조사 ..... 70 유세종*, 석종민, 원희수, 조재환, 황도근, 서선열	70
초S-II-3	15:00	의료용 선형가속기를 이용한 영상유도방사선치료 시 격일 콘빔 CT 적용의 유용성 평가 ..... 72 박병석*, 서정민, 권순무, 김기홍, 나길주, 박철수	72

5월 30일(토) 09:00~11:00

Session : 포스터발표

마나블라

✿ 좌 장 : 신광호(경성대) / 정종울(충남대)

○ Session MT[Magnetic theory and calculations]

MT01	Poster	Electronic structure and magnetic properties of Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B: A first principles study ..... 77 Imran Khan*, Jicheol Son, Jisang Hong	77
MT02	Poster	Switching current density for spin transfer torque magnetic random access memory with Dzaloshinskii-Moriya Interaction ..... 78 Kyungmi Song*, Kyung-Jin Lee	78
MT03	Poster	자기 소용돌이 핵의 동적 거동에 따른 변형과 분리 ..... 80 한희성*, 이수석, 임미영, 홍정일, Peter Fischer, 이기석	80

MT04	Poster	Nd-Fe-B-Co-Cu-Al-Nb-X계 희토류 영구자석 합금 flake 제조 및 자기적 특성 ..... 82 김상욱*, 주신용, 전병서, 오윤석, 이영주, 송창빈†
------	--------	---

○ Session MD[Magnetization dynamics]

MD01	Poster	강자성체의 자기적 특성을 고려한 탈자 기법 연구 ..... 84 임상현*, 주혜선, 정동욱, 박관수
MD02	Poster	Effect of magnetic anisotropy gradient on current-induced skyrmion dynamics in a nanowire ..... 86 Seung-Jae Lee*, Kyung-Jin Lee
MD03	Poster	강자성 공명 스핀 펌핑 전압의 이력현상 분석 ..... 88 김상일*, 서민수, 최연석, 조영훈, 박승영
MD04	Poster	The Spin dynamic properties on the Pt/CoFeB/Ta structure ..... 90 Nam-Hui Kim*, Jaehun Cho, Seung Ku Kang, Se-June Min, Kwonjin Park and Chun-Yeol You

○ Session HM[Hard-magnetic Materials]

HM01	Poster	Coercivity Enhancement in Nd-Fe-B-type Hot-pressed Magnet by $RF_3$ doping .... 92 J. Y. Kim*, H. W. Kwon, J. G. Lee and J. H. Yu
HM02	Poster	Magnetic Properties of MnBi Bulk Magnets with High-Portion Low-Temperature-Phase ..... 95 Sumin Kim*, Hongjae Moon, Hwaebong Jung, Hyun-Sook Lee, and Wooyoung Lee†
HM03	Poster	Magnetic and Microstructural Properties of MnBi Films ..... 96 Hongjae Moon*, Sumin Kim, Hwaebong Jung, Hyun-Sook Lee, and Wooyoung Lee†
HM04	Poster	$WS_2$ / Al, Ag 동시 첨가에 따른 Nd-Fe-B 소결자석의 입자성장 억제 효과 연구 ..... 97 배경훈*, 이성래, 김효준, 이민우, 장태석
HM05	Poster	$DyH_2$ 용액으로 입계확산 처리한 NdFeB 소결자석에서 Cu/Al의 혼합이 Dy의 확산과 자기적 특성에 미치는 영향 ..... 99 이민우*, 이호상, 장태석, 김태훈, 이성래, 김효준
HM06	Poster	DyCu 공정합금분말 첨가에 따른 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조와 자기적 특성 변화 연구 ..... 101 현승한*, 배경훈, 이성래, 김효준, 이민우, 장태석
HM07	Poster	Al/Cu 동시첨가를 통한 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조 및 자기적 특성 최적화 연구 ..... 103 김태훈*, 이성래, 김효준, 이민우, 장태석
HM08	Poster	Magnetic Properties and Magnetocaloric Effect in $La_{1-x}Ce_xFe_{1.5}Si_{2.5}$ ( $x = 0.2, 0.4, 0.6$ ) Alloys ..... 105 Wen-Zhe Nan, Tae-Soo You, Seong-Cho Yu

○ Session SM[Soft-magnetic Materials]

SM01	Poster	NiFe 박막에서 자기장 각도에 따른 스핀파 공명 신호 분석 ..... 106 김동영*, 윤석수
SM02	Poster	CoFe/MnIr 박막에서 자구의 회전에 의한 마이크로파 흡수 특성 분석 ..... 108 김동영*, 윤석수

SM03	Poster	비정질 CoFeB 박막에서 열처리 온도에 따른 강자성 공명 신호 분석 ..... 110 김동영*, 윤석수
SM04	Poster	전해도금법을 이용한 Ni-Co-Fe 3원계 합금 박막의 특성연구 ..... 111 조영래*, 박화선, 서수정
SM05	Poster	Z-type hexaferrite Ba <sub>2.5</sub> Sr <sub>0.5</sub> Co <sub>2</sub> Fe <sub>24</sub> O <sub>41</sub> 의 뫼스바우어 분광 연구 ..... 113 임정태*, 김삼진, 한은주, 김철성
SM06	Poster	W-Type BaCo <sub>1.5</sub> Zn <sub>0.5</sub> Fe <sub>16</sub> O <sub>27</sub> 의 Spin Reorientation 연구 ..... 114 고병욱*, 심인보, 김철성, 이영배
SM07	Poster	Fe-Si-Cr분말의 열처리가 미세조직 및 전자기특성에 미치는 영향 ..... 115 장평우*, 김종렬, 배철준, 최광보
SM08	Poster	Magnetic properties of Fe alloy powder coated with Titanium oxide ..... 117 SungJoon Choi*, SunWoo Lee, Hui Eun Kim, Sang-Kyun Kwon, and Sang-Im Yoo
SM09	Poster	Cu코어/NiFe셸 복합와이어에서 대각(diagonal) 임피던스 스펙트럼 ..... 118 김동영*, 구태준, 조성연, 윤석수
SM10	Poster	The manufacture of soft magnetic alloy using micro-powder ..... 119 MinYoung Lee, HanYeol Jo*, BoWha Lee, Jihyun Sung and SangYoon Park
SM11	Poster	Magnetic Properties of TiO <sub>2</sub> -coated Fe-Cr-Si alloy powder ..... 120 Sunwoo Lee*, Sungjoon Choi, Hui Eun Kim, Sungjin Choi, Seungnam Yang, Sang-Im Yoo <sup>†</sup>
SM12	Poster	Temperature dependence of magnetic property in CoSiB-based thin-film structures ..... 121 Sol Jung*, and Haein Yim
SM13	Poster	Characterization of Fe-based soft magnetic amorphous alloy system with high saturation magnetization ..... 123 Sumin Kim*, and Haein-Yim
SM14	Poster	Core-shell ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /ZnS composites for photocatalytic applications ..... 125 Pilsun Yoo*, D. Amaranatha Reddy, Sang-Eun Bae, Bo Wha Lee, Seong Huh, and Chunli Liu
SM15	Poster	열처리 조건에 따른 Fe-Cu 시험편의 자기이력곡선 변화 측정 ..... 126 이철규*, 김성수, 손대락, 박덕근

○ Session SS[Semiconductor spintronics]

SS01	Poster	Magnetic and electric properties of FeGe <sub>2</sub> ..... 127 Byong Sun Chun*, Chanyong Hwang
SS02	Poster	자구벽 확장 패턴 분석을 통한 자구벽 형태 결정 ..... 128 김대연*, 김덕호, 문준, 최석봉
SS03	Poster	3d, 4d, 5d 전이금속을 이용한 Co 수직 자성 초박막의 스핀궤도 돌림힘과 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용 ..... 129 조정규*, 황현석, 김대연, 윤상준, 김덕호, 문준, 제송근, 최석봉, 오영완, 박병국
SS04	Poster	Angular dependent exchange bias field and coercivity in FeMn/Py bilayers ..... 130 Hyeok-Chul Choi, Ki-Yeon Kim*, and Chun-Yeol You

○ Session SO[Spin orbit coupling and related phenomena]

SO01	Poster	$\text{Na}_2\text{FeP}_4\text{O}_7$ 양극물질의 자기적 특성 연구 ..... 131 최현경*, 고태준, 김철성, 김성백
SO02	Poster	Study on SOTs in Pt/CoFeB/MgO and Ta/CoFeB/MgO and their interfacial effects by Ti insertion ..... 132 Hae Yeon Lee*, Young-Wan Oh, Byong-Guk Park
SO03	Poster	XMCD 분석을 통한 MgO/Co/Pd 구조에서 열처리 후 수직자기이방성에 각 계면의 기여 연구 ..... 134 박진구*, 김민석, 김상훈, 고정호, 홍종일

○ Session NS[Nano-structured materials]

NS01	Poster	Hot deformed Nd-Fe-B magnets with additions of Nd-Cu-Zn alloy by spark plasma sintering technique ..... 136 Shu Liu*, Nam-Hyun Kang, Ji-Hun Yu, Hae-Woong kwon, Jung-Goo Lee <sup>†</sup>
NS02	Poster	Magnetic Nanostructures Fabricated by Thermal Nanoimprint Lithography ... 137 Chi-Hieu Luong*, Jong-Ryul Jeong
NS03	Poster	Electromagnetic properties of magnetite hollow nanospheres and porous nanospheres ..... 138 Rambabu Kuchi*, Jong-Ryul Jeong
NS04	Poster	Artificial magnetic nanostructures: isolated metal/insulator/metal nanodot arrays with transmission geometry ..... 139 Thanh Son Vo*, Byong-Guk Park, Jong-Ryul Jeong
NS05	Poster	XPS를 이용한 Yttrium Iron Garnet (YIG) 자성박막의 구조적 특성 연구 ..... 140 이예림*, 정종윤
NS06	Poster	리소그래피로 형성된 Co/Pd 줄무늬 패턴의 계면이방성 ..... 141 김시년*, 남윤재, 임상호
NS07	Poster	Fe wire 전기폭발법을 이용한 자성유체용 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 자성 파우더 제작 ..... 142 박정갑*, 이정우, 백승빈, 임태진, 이태일, 서수정
NS08	Poster	Synthesis of Co microtrees assembled by dendrites and their microwave absorption characteristics ..... 144 Rambabu Kuchi*, Kyung Min Lee, Surabhi Srivathsava, Jong-Ryul Jeong
NS09	Poster	Anomalous Behavior In Magneto Transport Measurements in Liquid-gated Pt Thin Films ..... 145 Kil-joon Min*, Taeyueb Kim, Dong-Hun Chae, Sung-jung Joo
NS10	Poster	Synthesis of monodisperse cobalt ferrite ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ) nanoparticles using thermal decomposition method ..... 146 Yoonji Eom*, HeeYoon Noh, Mohamed Abbas, CheolGi Kim

○ Session ST[Spin transfer torque for magnetic memory]

ST01	Poster	CoFeB/MgO와 $[\text{Pt}/\text{Co}]_n$ 사이에 삽입된 Ru/Ta 공간층에 의한 층간 교환 결합 ..... 147 윤석진*, 임상호, 이성래
ST02	Poster	CoSiB/Pt/CoSiB 구조의 Hall Effect 연구 ..... 148 김성용*, 이하나, 김영광, 김태완

ST03	Poster	Quality control of STT-MTJ based random binary code generator utilizing bias voltage adjustment .....	149
		이상혁*, 정구열, 민병철, 김동현, 조영훈, 최연석, 박승영	
ST04	Poster	패턴된 [CoSiB/Pt] <sub>N</sub> Multilayer 층수변화에 따른 Hall effect 연구 .....	150
		김영광*, 이하나, 김성용, 김태완	
○ Session NM[Nanoscale Magnetism]			
NM01	Poster	공침법을 이용한 자성유체용 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 자성 파우더 제작 .....	151
		백승빈*, 박정갑, 임태진, 이태일, 서수정	
NM02	Poster	Magnetotransport properties of 1-dimensional magnetic nanoparticle array .....	152
		Ji Sung Lee, Yoo Sang Jeon*, Woo Seung Ham, and Young Keun Kim	
○ Session MO[Magnetic Oxides and Multiferroics]			
MO01	Poster	CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 박막의 자기이등방성과 스트레인과 상관관계 변화 .....	154
		이두용*, 김지용, 김혜경, 이지성, 배종성, 이정수, 박성균 <sup>†</sup>	
MO02	Poster	La이 치환된 다결정 BaTi <sub>1-y</sub> Fe <sub>y</sub> O <sub>3</sub> (y=0.07, 0.1)의 미세구조 분석 및 전자기적 특성 간의 상관관계 연구 .....	155
		김덕현*, 이보화	
MO03	Poster	Giant interlayer tunneling magnetoresistance in layered manganite .....	156
		C. J. Won*, J. J. Yang <sup>†</sup> , S. W. Cheong, N. Hur	
○ Session BM[Biomedical Materials]			
BM01	Poster	지질다당류와 자성비드가 섞인 염색액으로 처리된 프리모관의 자기장 반응 특성 연구 .....	158
		이혜리, 홍예지, 하예은, 김지영, 노영일, 노민석, 강석윤, 이상석*	
BM02	Poster	Detection Property of Red Blood Cell-Magnetic Beads Using Micro Coil-Channel and GMR-SV Device .....	161
		Ji-Soo Park, Nu-Ri Kim, Hyun-Jun Jung, Purevdorj Khajidmaa, Munkhbat Bolormaa, and Sang-Suk Lee*	
BM03	Poster	고출력 레이저 주사에 따른 세포 내 자성나노클러스터 특성변화 분석 .....	164
		Yu Jin Kim, Bum Chul Park*, Young Soo Choi, and Young Keun Kim	
○ Session SA[Sensors and Applications]			
SA01	Poster	교류 자기장을 이용한 텐던의 인장응력 측정에 관한 연구 .....	166
		강선주*, 조창빈, 이정우, 손대락	
SA02	Poster	Drone을 이용한 자기장 분포 측정에 관한 연구 .....	168
		김상준*, 조영훈, 손대락	
SA03	Poster	직교형 플렉스 게이트 센서의 구동회로 .....	169
		변 옹*, 김태준, 신광호	
SA04	Poster	감온 페라이트를 이용한 온도센서 어레이 .....	171
		변 옹*, 김태준, 신광호	
SA05	Poster	The Fabrication of Spin-Thermoelectric Device using the Sol-Gel Method .....	173
		Min-Sun Jang*, Seung-Hyub baek, Ki-Suk Lee	

○ Session OT[Others]

OT01	Poster	자기냉동기용 회전형 Habach 자석의 설계 및 제작 ..... 175 류권상*, 백운봉, 남승훈, 유성초, 이종석
OT02	Poster	Density functional theory calculations on magnetic properties of FePc on Si(111)4×1-In surface ..... 177 Jung-Min Hyun* and Hanchul Kim
OT03	Poster	Comparison of Hf and W interlayer on the perpendicular magnetic anisotropy of the MgO/(Hf or W)/CoFeB structures ..... 178 Kyoung-Min Lee*, Taufik Bonaedy, Byoung-Chul Min, Junghyun Sok, and Jun Woo Choi
OT04	Poster	Effect of Co doping on the resistance switching behavior of Zn1-xO:Co <sub>x</sub> Films ..... 179 Hongtao Xu*, Zhao Xiahou, Ying Li, Mingyuan Zhu, Yemin Hu, Min Zhong, and Chunli Liu
OT05	Poster	Perpendicular magnetic anisotropy properties of tetragonal Mn <sub>3</sub> Ga epitaxial films under various deposition conditions ..... 181 Hyun-Woo Bang, Woosuk Yoo, Youngha Choi, Chun-Yeol You*, Jung-Il Hong, J. Dolinšek, Myung-Hwa Jung
OT06	Poster	Exchange Bias Effect Determined by Anisotropic Magnetoresistance in Co <sub>x</sub> Ni <sub>1-x</sub> O/Ni <sub>0.8</sub> Fe <sub>0.2</sub> Bilayer System ..... 182 Woosuk Yoo, Seongmin Choo, Kyujoon Lee, Sinyong Jo, Chun-Yeol You*, Jung-Il Hong, Myung-Hwa Jung

5월 30일(토) 09:00~10:40

Special Session III '재료/자기 물성측정 및 분석(관련) 세션'

코넬리아

✿ 좌 장 : 김철기(DGIST)

초S-III-1	09:00	파동에너지극한제어연구단 소개 ..... 185 이학주*, 김광섭
초S-III-2	09:20	나노자성체 동역학 측정기술 개발 ..... 186 황찬용*
초S-III-3	09:40	Nano Secondary Ion Mass Spectrometry : A New Approach to the Analysis of Nano Materials ..... 187 Tae-Eun Hong*, Mi-Rang Byeon, Eui Duck Jeong
초S-III-4	10:00	전기강판에 첨가되는 첨가물의 확산 및 거동 분석 ..... 189 김성규*, 박현진, 이재혁, 백경흠, 박찬경
초S-III-5	10:20	원자단층현미경을 이용한 나노소재 분석 ..... 191 이봉호*





KMS 2015 Summer Conference

# 총회 특별초청강연





## 과학기술 혁신과 부자

김희중\*

한국나노기술원

역사상 혁신적인 과학기술을 개발한 사람들 중 소수만이 부자가 되었다. 특히 과학자로 부자가 된 인물은 많지 않고, 대부분 응용기술을 개발한 후 기업을 만들고 사업에 성공하여 부자가 되었다.

전기, 자기분야에서 기술개발에 성공하여 큰 부자가 된 첫 번째 인물은 아마 자석식 전화기를 개발한 알프레드 벨일 것이다. 이후 에디슨이 전구, 축음기 등을 개발 사업화에 성공하여 부자가 되었다.

하지만 전화기를 최초로 개발한 인물인 안토니오 무치나 교류 발전기, 변압기, 모터 등을 최초로 개발한 니콜라 테슬라는 벨과 에디슨의 견제를 받아 부자가 되지 못하고 어렵게 일생을 살았다.

지금 세계 IT산업을 이끌어가는 마이크로 소프트사의 빌 게이츠, 작고한 애플의 스티브 잡스, 페이스북의 저커버그 등은 탁월한 기술자로 볼 수 있지만 그 기술들을 최초로 개발한 인물은 아니며 개발된 혁신기술을 수요자가 원하는 제품으로 응용하는 데 성공한 사람들이다.

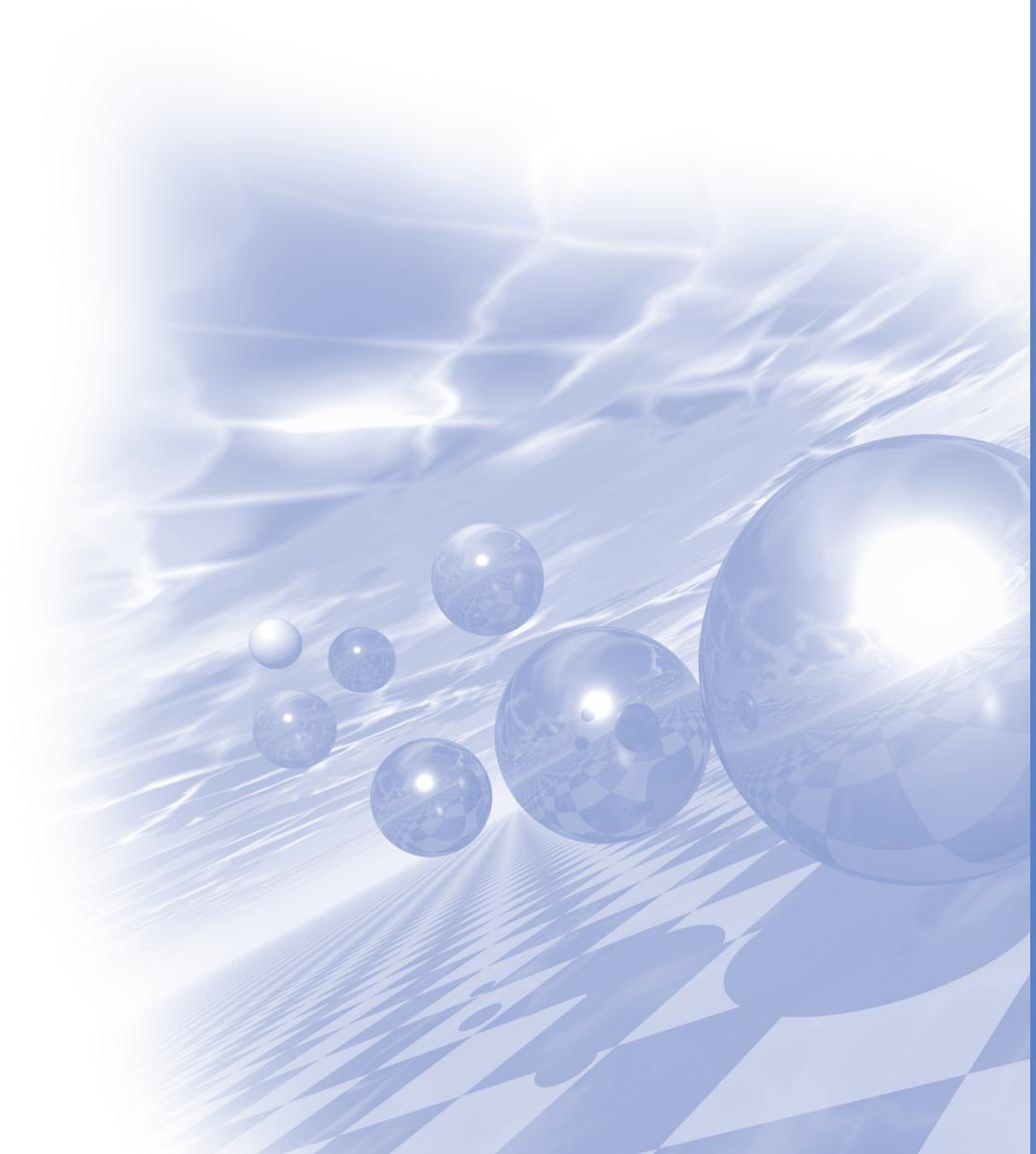
금번 강연에서는 벨-무치, 에디슨-테슬라, 게이츠-잡스 등 동시대의 경쟁자들의 기술혁신과 부자에의 성공 및 실패사례들을 먼저 살펴보고, 미래에 혁신기술 개발자가 어떻게 부자가 될 수 있을까를 생각해 보고자 한다.





**KMS 2015 Summer Conference**

# **강습회 프로그램**





# 전기기기의 기본개념과 특수기기의 개발 및 응용

## The Development and Applications of Special Electric Machines with Basic Concepts of Electric Machines

장석명\*

Jang Seok-Myeong

(주)셈스하이테크엔지니어링 대표이사, 충남대학교 명예교수

SEMS High-Tech.Engineering Co.Ltd & Chungnam National Univ. Emeritus Professor

### 1. Electromagnetic Field for Electric Machines

전기기기의 구동원리가 되는 전자기이론을 소개한다

- 전자기 유도기전력(유도전동기, 와전류손실의 원리)
- 플레밍의 왼손법칙(전동기원리)
- 플레밍의 오른손법칙(발전기원리)
- 교류발전기의 원리
- 전기기기의 기본개념
- 2400kW, 직류여자기를 갖는 500 MW급 동기발전기의 개념
- 권선형계자와 영구자석 기기의 compact, Lightweight 비교

### 2. Electric Machines Family

### 3. Rotating Machines(회전형 기기)

Linear Machines (직선형 기기)

Spherical (구형 기기)

### 4. 최근의 전기기기 동향과 Smart Electric Machine

### 5. Electric Machine의 고출력화

### 6. Linear Machines

개념, 전기 및 Linear Machines의 발명 역사

각종 응용분야 (자기부상열차, 심수대형 고속수조 예인전차추진, 구조물 진동제어

적외선 센서 냉각시스템, 선반이송장치, 자동문, Ropeless Elevator, 전기 햄머,

피스톤, 알미늄회수, 자성체분리장치 Rotary-Linear Motion응용 등 )

### 7. 초고속 기기

원리, 기술동향, 응용분야,

### 8. 풍력발전기

기본개념, 응용

### 9. 플라이휠 에너지저장

기본원리, 응용

## 반도체 큐빗의 상태제어와 양자프로세서

김도현\*

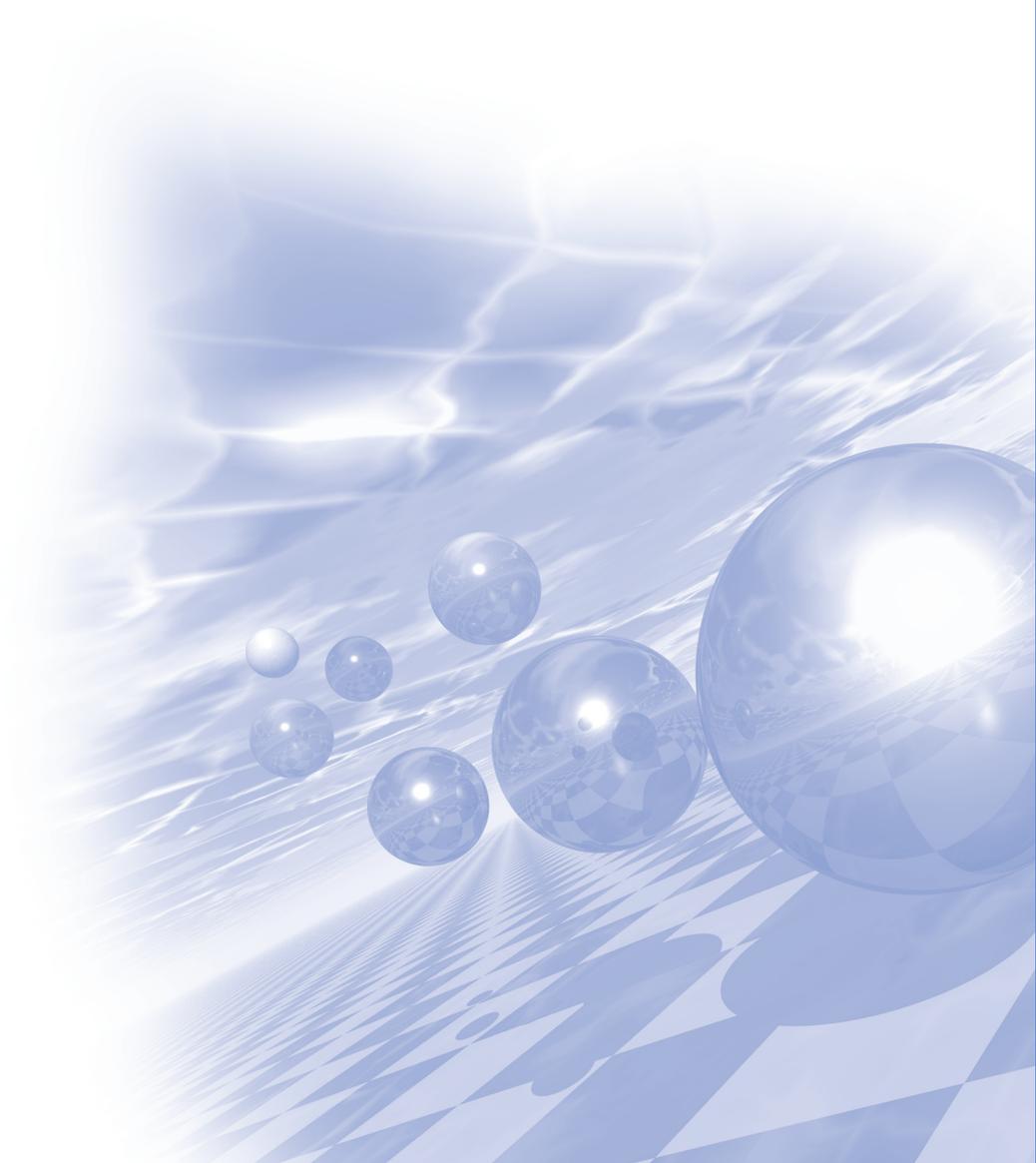
연세대학교 신소재공학부

현대의 반도체 집적도는 단일 소자의 크기가 이미 수십 나노미터에 이르러, 최근에는 실험실 수준에서도 인공적인 양자 두 에너지 준위계, 즉 양자비트(큐빗)를 제작하고 양자중첩 상태의 제어 및 큐빗간의 양자역학적인 얽힘(entanglement)을 시험하는 것이 가능하게 되었다. 본 강연에서는 최근 빠르게 발전하고 있는 반도체 양자점을 이용한 양자역학적 측정분야를 소개한다. 양자소자의 관점에서 좋은 큐빗이란 큐빗의 양자역학적 특성이 유지되는 결맞음 시간(coherence time)내에서 많은 중첩상태를 제어할 수 있는 큐빗을 말한다. 게이트 전압을 이용한 양자점 큐빗, 도핑원자를 이용한 큐빗 등 여러 형태를 소개하고 최근 새롭게 개발된 양자점 스핀-전하 하이브리드(hybrid)큐빗을 소개한다. 반도체 큐빗은 현재 그 제어 신뢰도(gate fidelity)가 99% 이상에 이르렀으며, 따라서 그 정확도를 엄밀하게 평가하는 방법이 요구되고 있다. 실험적으로 가장 많이 사용되는 quantum tomography 방법과 보다 최근 발전하고 있는 randomized benchmarking 방법을 소개하고 실제 반도체 큐빗에 적용된 다양한 예를 소개한다. 단일 큐빗 실험에서 더 나아가 다중 큐빗의 얽힘을 이용한 양자 프로세서를 개발하려는 세계적인 동향을 살펴본다.



**KMS 2015 Summer Conference**

# 초청강연 I





# Signatures of Majorana Fermions in Magnetic Atom Chains on a Superconductor

Jungpil Seo<sup>1,2,\*</sup>, S. Nadj-Perge<sup>2</sup>, I. K. Drozdov<sup>2</sup>, J. Li<sup>2</sup>, H. Chen<sup>3</sup>, S. Jeon<sup>2</sup>,  
A. H. Macdonald<sup>3</sup>, B. A. Bernevig<sup>2</sup>, and A. Yazdani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Emerging Materials Science, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology,  
Daegu 711-873, Korea

<sup>2</sup>Joseph Henry Laboratories and Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

<sup>3</sup>Department of Physics, University of Texas at Austin, Austin, TX 78712, USA

\*jseo@dgist.ac.kr

Majorana fermion is an unconventional particle that is its own anti-particle. The emergence of this peculiar particle is predicted at the edge of a topological superconductor, which can be realized when a ferromagnetic material is placed in proximity to a conventional superconductor. In the experiment, we have built a ferromagnetic iron (Fe) atomic chain on the surface of a conventional superconductor (Pb). Using scanning tunneling spectroscopic techniques, we show the onset of p-wave superconductivity, and appearance of zero-energy states at the edge of the chain. This spatially resolved signature provides strong evidence for the formation of a topological phase and edge-bound Majorana fermions in the atomic chain.





**KMS 2015 Summer Conference**

# 구두발표 (I)





# Effect of angular dependence of spin-orbit spin transfer torque on magnetization switching and domain wall motion of perpendicular magnetic layer

Seo-Won Lee<sup>1,\*</sup> and Kyung-Jin Lee<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials & Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

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

Spin-orbit spin transfer torque (SOT) induced perpendicular magnetization switching in ferromagnet/heavy metal bilayers is of great interest due to its efficiency and ability to separate read and write paths in memory devices [1]. Recently, a general expression of SOT was proposed based on space and time inversion symmetry arguments [2], where the damping-like SOT is given as

$$\mathbf{T} = \gamma c_J [\mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{y}) + \chi_2 m_x \mathbf{m} \times \mathbf{z} + \chi_4 m_x (\mathbf{m} \times \mathbf{z})^3], \quad (1)$$

where  $c_J$  is the magnitude of damping-like SOT,  $\mathbf{m}$  is the unit vector along the magnetization,  $\mathbf{z}$  is film normal,  $\mathbf{y}$  is perpendicular to both  $\mathbf{z}$  and current direction, and  $\chi_2$  and  $\chi_4$  describe additional angular dependences. Experimental measurements of SOT vectors found that  $\chi_2$  and  $\chi_4$  are in general nonnegligible [2, 3]. We note that the bulk spin Hall effect theory predicts no additional angular dependence [4] whereas Rashba spin-orbit coupling (RSOC) effect shows strong angular dependence when RSOC is comparable to sd exchange coupling at interface [5].

In this work, we investigate effect of additional angular dependence on magnetization switching by SOT. Assuming  $\chi_2 \ll 1$  and  $\chi_4 = 0$ , we first derive an analytic threshold of  $c_J$  for switching as

$$c_J^c = H_k \frac{\Gamma - h^4 + \frac{h^6}{4} \chi_2 + \frac{(-8 - 3\Gamma + h^2(3\Gamma - 28))\chi_2}{8 + h^2} - \frac{1}{4} h^2 ((\Gamma + 4)\chi_2 - 80)}{4\sqrt{2}\sqrt{20h^2 - h^4 + \Gamma}}, \quad (2)$$

where  $h = H_x/H_k$ ,  $H_x$  is the external field applied along the current direction,  $H_k$  is the effective perpendicular anisotropy field, and  $\Gamma = 8 - h(8 + h^2)^{3/2}$ . Eq. (2) shows that the switching current decreases with increasing  $\chi_2$  when  $\chi_2 > 0$ . We next perform micromagnetic simulations and find that numerical results are consistent with the analytic solution (Fig. 1). We also find that a positive  $\chi_4$  reduces the switching current further.

Our results show that the additional angular dependence with a specific sign (i.e., positive  $\chi_2$  and  $\chi_4$ ) is beneficial for low power operation of SOT memory devices. As it would be related to the interfacial RSOC [5], interface engineering and its relationship to the angular dependence of SOT are necessary to reach full potential of SOT devices. In the presentation, effect of angular dependence of field-like torque will be also discussed.

## References

- [1] I. M. Miron et al., Nature 476, 189 (2011); L. Liu et al., Phys. Rev. Lett. 109, 096602 (2012); K.-S. Lee et al., Appl. Phys. Lett. 102, 112410 (2013); K.-S. Lee et al., Appl. Phys. Lett. 104, 072413 (2014).

- [2] K. Garello et al., Nat. Nanotech. 8, 587 (2013).  
 [3] X. Qiu et al., Sci. Rep. 4, 4491 (2014).  
 [4] P. M. Haney et al., Phys. Rev. B 87, 174411 (2013).  
 [5] K.-S. Lee et al., paper in preparation.

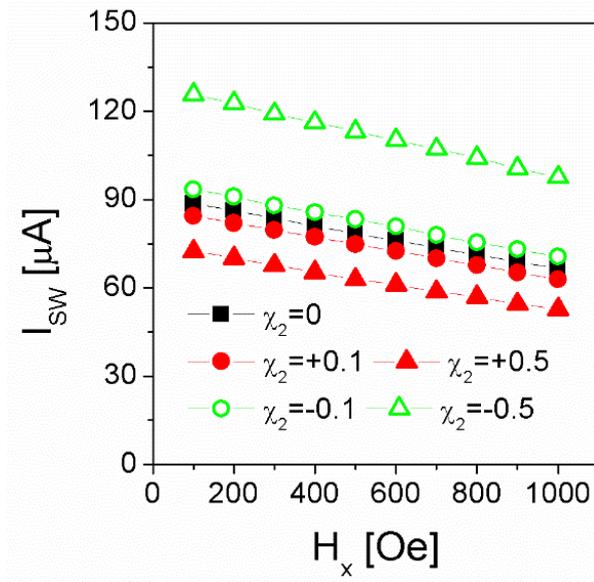


Fig. 1. Switching current with external in-plane field  $H_x$ . (parameters :  $\alpha = 0.1$ ,  $M_S = 1000 \text{ emu/cm}^3$ , effective  $\mathcal{O}_{\text{SH}} = 0.3$ , diameter of ferromagnet =  $30 \text{ nm}$ , thickness of ferromagnet =  $1 \text{ nm}$ , current pulse =  $5 \text{ ns}$ , and current rise time =  $0.5 \text{ ns}$ ,  $H_{k,\text{eff}} = 5000 \text{ Oe}$ ).

## 교류자기장에 의한 스커미온 이동 특성연구

문경웅<sup>1\*</sup>, 김덕호<sup>2</sup>, 제송근<sup>2</sup>, 전병선<sup>1</sup>, 김원동<sup>1</sup>, 최석봉<sup>2</sup>, 황찬용<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국표준과학연구원 나노측정센터

<sup>2</sup>서울대학교 물리천문학부

스커미온의 이동에 대한 연구는 최근 자성학 분야에서 중요한 이슈로 다루어지고 있다. 스커미온 이동을 위해 지금까지 많이 연구된 방법은 시료에 전류를 주입하는 것인데 흘러가는 전류에 의해 자화상태가 한쪽 방향으로 이동하는 현상이 발생하기 때문이다. 최근에는 이런 전류를 이용한 방법 외에 교류 자기장을 이용한 방법이 제시되었다. 이 자기장을 이용한 방법은 실험적으로 구현이 되었지만, 수십 나노미터 크기의 스커미온이 아닌 수십 마이크로미터 크기의 자기버블을 이용하여 구현 되었다. 이번 연구에서는 자성시뮬레이션을 통해 크기가 작은 스커미온이 교류자기장에 의해 이동 할 수 있는지 확인해 보았다. 그리고 스커미온의 이동특성을 결정하는 요인이 무엇인지 탐구 해 보았다.

# 수직자기이방성을 갖는 반강자성체/강자성체/산화물 이종구조에서의 스핀-오빗 토크

오영완\*, 이해연, 이경동, 박병국

Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

강자성/비자성 이종구조에 전류를 인가하면 그 계면에서 스핀-오빗 상호작용에 의해 토크(스핀-오빗 토크)가 발생하고, 그로 인해 자화의 방향을 제어하는 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 이를 이용하면 상온에서 면방향으로 흐르는 전류를 통해 강자성 물질의 자화 제어가 가능하고, 읽기, 쓰기를 서로 다른 전류라인을 통해 구현되는 소자 또한 가능해진다. 스핀-오빗 토크는 비자성 물질 내에 발생한 스핀 홀 현상과 강자성/비자성 계면에서의 비대칭 전기장에 의해서 발생하는 라시바 효과가 주요 원인으로 알려져 있다. 현재까지 연구는 대부분 비자성/강자성/산화물 3중구조에서 진행되고 있다. 특히 스핀-오빗 토크의 크기와 방향이 비자성체에 밀접한 관련이 있기 때문에, Pt, Ta, W 같은 강한 스핀-오빗 상호작용을 가지는 물질을 포함한 구조에 대한 연구가 주로 보고되는 상황이다.

한편, 강한 스핀-오빗 상호작용을 가지는 또 다른 물질로 반강자성 물질이 있다. 이로 인해 발생하는 큰 자기이방성[1], 반강자성 터널접합에서의 자기저항이방성[2] 등이 연구되어 왔으나, 반강자성체에 의한 스핀-오빗 토크에 관한 연구는 아직 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 수직자기이방성을 가지는 반강자성체/강자성체/산화물 이종구조에서 나타나는 스핀-오빗 토크에 대해 고찰하였다.

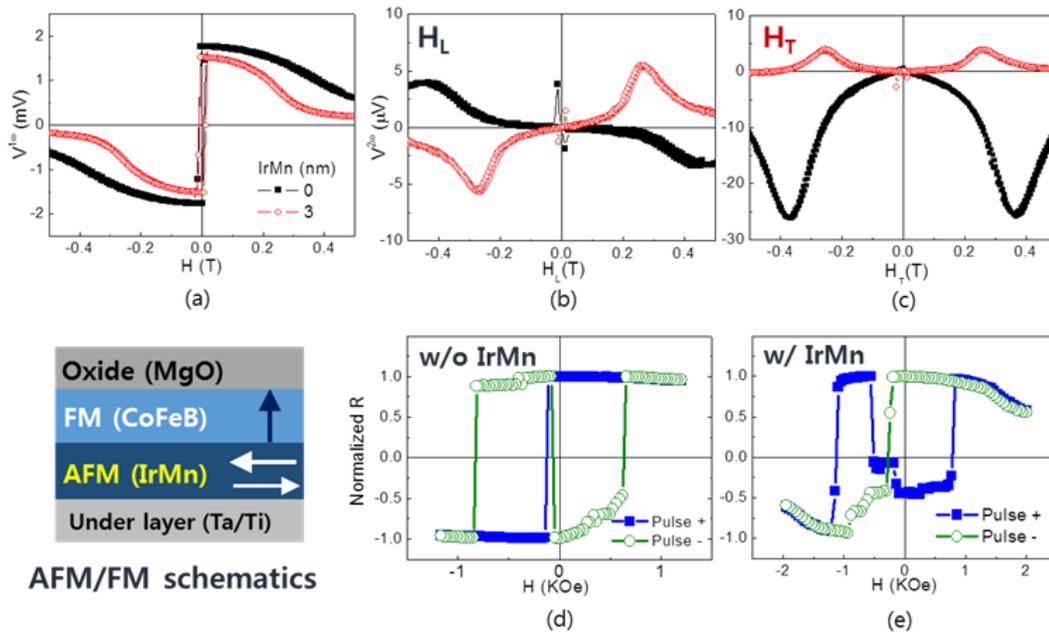


Fig. 1. The 1st (a) and 2nd (b, c) harmonic anomalous Hall voltage of the Ta(5nm)/Ti(5nm)/IrMn(0, 3nm)/CoFeB(1nm)/MgO(2nm) samples for the magnetic ( $H$ ) fields longitudinal ( $H_L$ ) and transverse ( $H_T$ ) direction to the current, and their current-induced switching (d, e). Here the  $H$  field sweeps only from positive to negative direction with each pulse polarity.

본 실험에서는 스퍼터링을 이용하여 반강자성체/강자성체/산화물 박막을 증착하였고, 포토-리소그래피, 이온밀러를 통해 홀바 구조를 갖는 소자를 제작하였다. Figure 1 (a)~(c)은 Ta(5nm)/Ti(5nm)/IrMn(0, 3nm)/CoFeB(1nm)/MgO 샘플에 대한 홀 저항 신호이다. IrMn 삽입으로 인한 홀 신호의 부호 변화를 통해 반강자성체인 IrMn에 기인하는 스핀-오빗 토크가 존재한다는 것을 확인하였다. 보다 자세한 관찰을 위해 IrMn 두께에 따른 스핀-오빗 토크에 대한 평가를 수행하였다. Figure 1 (d), (e)에서는 IrMn 존재 유무에 따른 스위칭 결과를 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이, IrMn 삽입 여부에 따라 선호하는 자화 방향이 전류의 방향과 외부 자기장의 방향에 의존하는 것을 확인하였다.

## References

- [1] A. B. Shick, *et al.* Phys. Rev. B. **81**, 212409 (2010)
- [2] B. G. Park, *et al.* Nature Mater. **10**, 347 (2011).

# Various excitation phenomena of a skyrmion in ultrathin magnetic nanodisk induced by Spin Hall Effect

Takayuki Shiino<sup>1,\*</sup>, Ki-Suk Lee<sup>2</sup>, Byong-Guk Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 689-798, Republic of Korea

## 1. Introduction

Magnetic skyrmions have been considered as promising candidates of the information carriers in future spintronic devices because of their small size and of ultralow current densities required to drive them. Recent studies have suggested that skyrmions can be found in a magnetic ultrathin film sandwiched by a nonmagnetic insulating layer and a heavy metal layer with large spin-orbit interaction. The existence of the skyrmions can be explained by the interfacial Dzyaloshinskii-Moritya interaction (DMI), which originates from the lack of inversion symmetry and from large spin-orbit coupling, and gives a chirality to the magnetization configuration of a ferromagnetic layer [1]. Also, current-induced spin-orbit torques, namely, the spin Hall effect (SHE) and the Rashba effect, can give a new way to control the magnetic configuration of a ferromagnetic layer which is adjacent to a nonmagnetic metallic layer with strong spin-orbit interactions. Recently, several micromagnetic simulation studies have predicted that a magnetic skyrmion can be nucleated and stabilized in a nano-sized ultrathin magnetic disk in the presence of the interfacial DMI [1-3]. However, it has not been reported so far the study on the current-induced skyrmion motion in a magnetic circular disk. In this study, we focused on the simulation of current-induced skyrmion motion in a nano-sized ultrathin magnetic circular disk, which demonstrates three interesting excitation phenomena depending on the excitation frequency.

## 2. Simulation scheme

We conducted micromagnetic simulations for a magnetic disk of 0.6 nm in thickness and 80 nm in diameter using the OOMMF code [4] with the DMI extension [3]. The material parameters are as follows: the saturation magnetization  $M_s = 1.13 \times 10^6 \text{ A/m}$ , the exchange stiffness constant  $A = 1.6 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ , the DMI constant  $D = 3.0 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ , the perpendicular magnetocrystalline anisotropy energy  $K_u = 1.28 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ , and the damping constant  $\alpha = 0.015$ . The mesh size was set to  $1.0 \times 1.0 \times 0.6 \text{ nm}^3$ . The governing equation of the simulation is the Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation with the time-varying SHE term,

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = -\gamma_0 \vec{m} \times \vec{H}_{\text{eff}} + \alpha \vec{m} \times \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} + \gamma_0 \vec{m} \times (\vec{m} \times H_{\text{SHE}} \sin(2\pi f_{ac} t) \vec{e}_y) \quad (1)$$

where  $\vec{m} = \vec{m}(t, x)$  is the dimensionless unit vector of the local magnetization. The first and second terms of the right side of the equation (1) are the conventional LLG equation, while the third term indicates the time-varying SHE term ( $H_{\text{SHE}}$  is the amplitude and  $f_{ac}$  is the excitation frequency) on the assumption that the alternating current is applied along the in-plane  $x$  direction [5]. Here, we assumed only the SHE as a major

driving force, and neglected other possible effects such as the Rashba effect and spin-transfer torque.

### 3. Results and discussion

When ac current is applied to the disk, three distinctive excitation phenomena were observed depending on the driving frequency of the ac current. Figure 1 (a) shows the snapshots of the regular resonant gyrotropic motion excited at  $f_{ac} = 0.26$  GHz, and Fig. 1 (b) shows the corresponding trajectory of the steady-state gyrotropic motion. The gyration frequency  $f_g$  was same as the excitation frequency of 0.26GHz, and this resonant gyrotropic mode has been observed in the magnetic vortices [6]. Second, when ac current of  $f_{ac} = 2.8$  GHz was applied, we observed excitation of resonant breathing mode whose frequency was  $f_s = 5.6$  GHz as shown in Fig. 1 (c). During the breathing motion, the skyrmion showed small elliptic gyrotropic motion in the proximity of the disk center as shown in Fig. 1 (d). We have found that the resonant breathing mode excitation can occur through the elliptic gyrotropic motion of  $f_g = 2.8$  GHz. Third, the simultaneous excitation of two gyrotropic and breathing modes were observed in the frequency range of 4.8~6.2 GHz. As shown in Figs 1(e) and 1(f), the breathing mode of  $f_s = 6.32$  GHz and the gyration resulted from an anharmonic superposition between circular gyrotropic motion with  $f_g = 0.32$  GHz and an elliptical gyrotropic mode with  $f_{ac} = 6.0$  GHz are excited by a single ac current with  $f_{ac} = 6.0$  GHz. Interestingly, we found that these hybridized gyrotropic and breathing modes are always satisfied the relation  $f_s = f_g + f_{ac}$  and which reveals that there is a strong coupling among those modes and thus, they are hybridized mediated by a single harmonic ac current.

Such novel phenomena of hybridization among gyrations and breathing mode can provide a different view angle to understand the inertial mass of a skyrmion in a confined system.

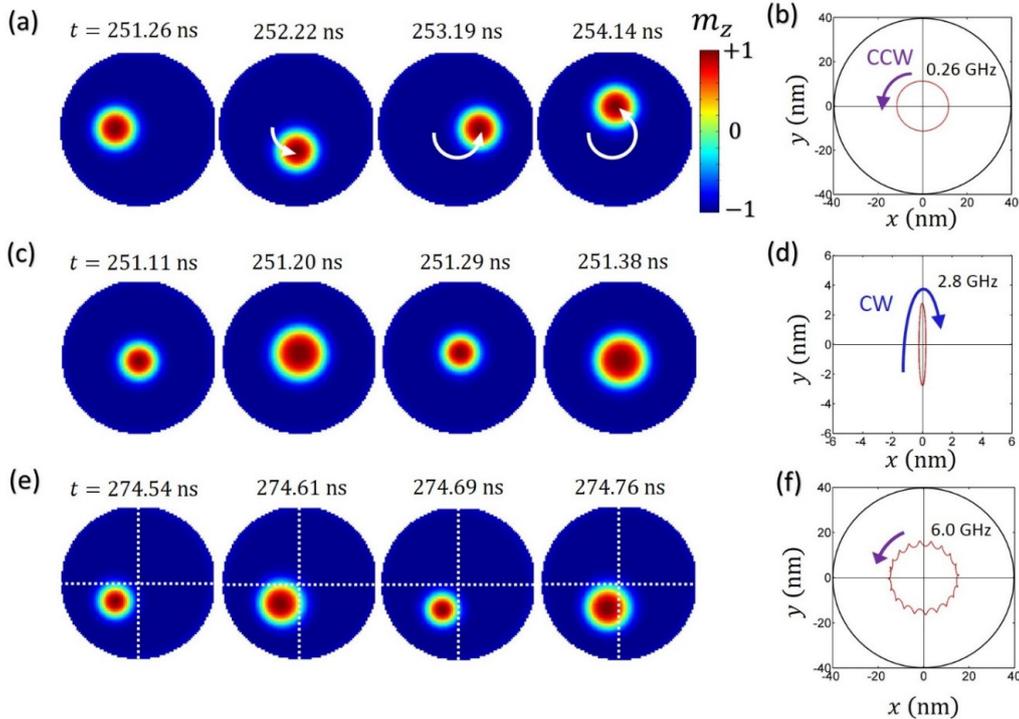


Fig. 1. The snapshot images and the trajectory (a), (b) for the steady-state gyrotropic motion excited at  $f_{ac} = 0.26$  GHz, (c), (d) for the breathing motion excited at  $f_{ac} = 2.8$  GHz, and (e), (f) for the simultaneous excitation of breathing mode and trajectory of the gyrations for  $f_{ac} = 6.0$  GHz, respectively. The amplitude of the applied SHE-based current was  $H_{SHE} = 0.1(2.69) \times 10^4$  A/m with the MHz (GHz) driving frequencies.

## 4. References

- [1] A. Fert et al. *Nature Nanotechnology* 8, 152-156 (2013).
- [2] J. Sampaio et al. *Nature Nanotechnology* 8, 839-844 (2013).
- [3] S. Rohart and A. Thiaville *Phys. Rev. B* 88, 184422 (2013).
- [4] 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).
- [5] Eduardo Martinez et al. *Appl. Phys. Lett.* 103, 072406 (2013).
- [6] Ki-Suk Lee et al. *Phys. Rev. B* 78, 014405 (2008).

# Domain Wall Motion Driven by Negative Spin-Transfer Torque

Joo-Sung Kim<sup>1,\*</sup>, Soong-Geun Je<sup>1</sup>, Sang-Cheol Yoo<sup>1,2</sup>, Joon Moon<sup>1</sup>,  
Byoung-Chul Min<sup>2</sup>, and Sug-Bong Choe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Institute of Applied Physics, Seoul National University,  
Seoul 151-742, Republic of Korea.

<sup>2</sup>Center for Spintronics Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Republic of Korea.

## 1. Introduction

The domain-wall (DW) motion driven by pure electric current has been recently demonstrated. However, the main driving force on such DW motion has remained under debate. This is due to the contradictory experimental results of the DW motion in the direction of the current flow, which is opposite to the prediction of the standard spin-transfer torque (STT) theory. To understand such opposite DW direction, the spin-orbit torque (SOT) on chiral DWs has been recently introduced and extensively studied nowadays [1-4].

## 2. Method & Results

For this study, we fabricated Pt/Co/Pt films, of which the SOT is compensated by adjusting the thicknesses of the upper and lower Pt layers. Interestingly, the DWs of these films, even without the SOT, were observed to move in the direction of the current flow.



Fig. 1. DW motion along the current flow observed in Pt/Co/Pt device with symmetric Pt thicknesses. Black(white) domain represents up(down) magnetic domain, respectively.

## 3. Discussion

We show here that even in the absence of the SOT, the DW moves in the direction of the current flow, manifesting the existence of another origin. The present observation can be explained by introducing the existence of the negative STT ( $n$ STT). Such  $n$ STT is possibly due to either a negative spin polarization or a negative nonadiabaticity.

## 4. Conclusion

These findings are expected to provide the final piece of the controversial puzzle in the current-induced DW motion and new possibility of designing spintronic devices with the  $n$ STT as an additional degree of freedom for manipulating DWs.

## 5. References

- [1] A. Thiaville et al., *Europhys. Lett.* 110, 022405 (2012).
- [2] P. P. J. Haazen et al., *Nat. Mater.* 12, 299 (2013).
- [3] S. Emori et al., *Nat. Mater.* 12, 611 (2013).
- [4] K.-S. Ryu et al., *Nat. Nanotechnol.* 8, 527 (2013).

## RF-마그네트론 스퍼터링 방법에 의한 다층구조의 마그네타이트 에피 박막성장의 최적화에 대한 연구

국지현<sup>1,\*</sup>, 이년종<sup>1</sup>, 배유정<sup>1</sup>, Anny Michel<sup>2</sup>, 김태희<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>서울시 서대문구 이화여자대학교 물리학과

<sup>2</sup>Département de Physique et Mécanique des Matériaux, Université de Poitier, France

\*E-mail: taehce@ewha.ac.kr

높은 큐리온도와 반금속 (half-metallic) 자기적 특성을 기반으로 한 나노소자 소재로의 다양한 응용 가능성으로 인해 마그네타이트(magnetite,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )의 저차원 물성에 대한 연구는 꾸준히 많은 관심의 대상이 되고 있다. 그러나 산화와 환원이 쉽게 일어나는 Fe의 특성으로 인해 역스피넬 구조를 갖는 단일상  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  형성의 어려움과 수직 적층구조의 소자제작을 위한 우수한 평탄도의 마그네타이트 박막 제작조건의 최적화 는 여전히 개선되어야 할 과제로 남아 있다.

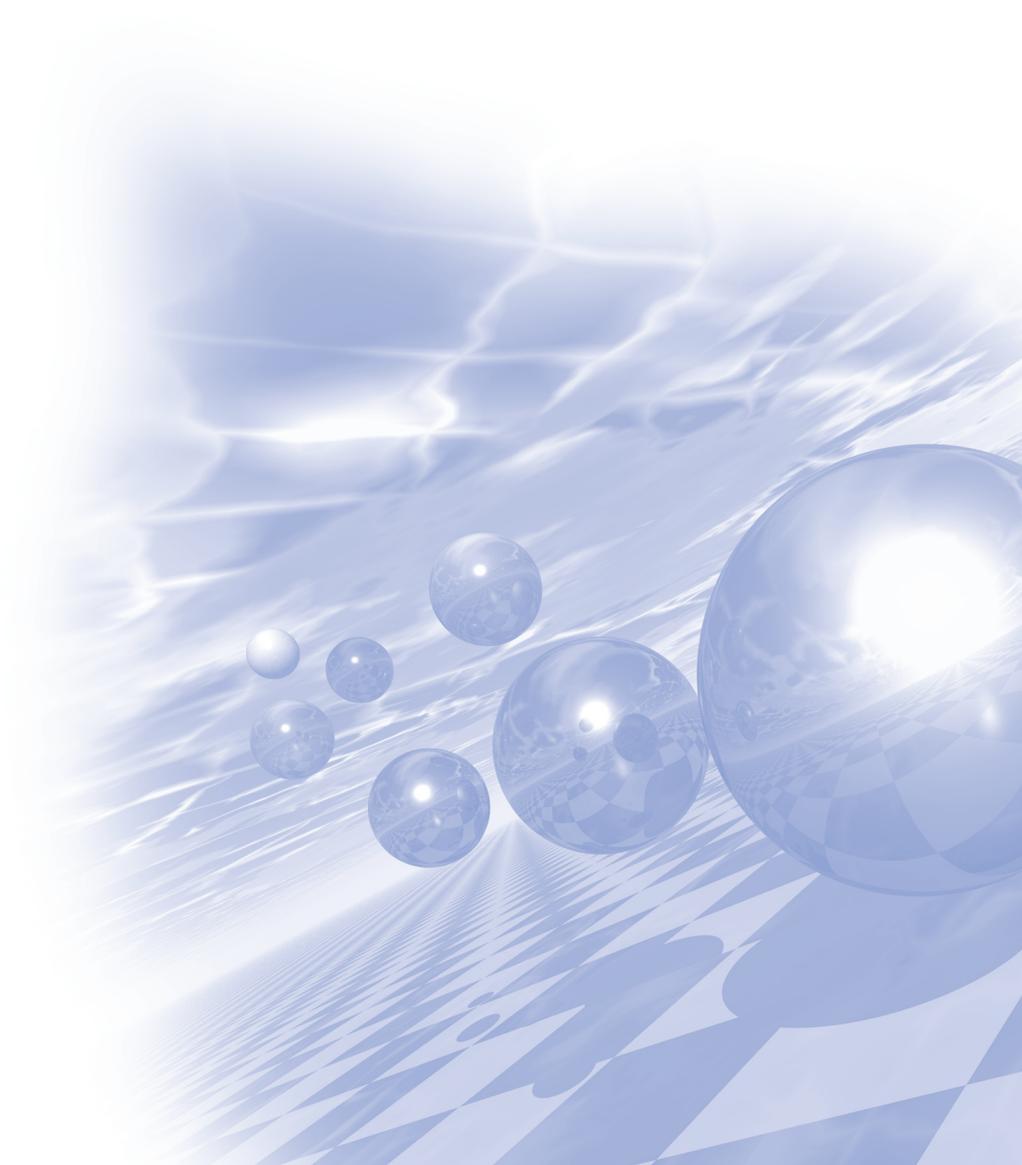
산화막이 제거되지 않은 Si 기판 위에 초고진공-분자선 증착 (Molecular Beam Epitaxy)과 RF 마그네트론 스퍼터링 (RF Magnetron Sputtering) 기법으로  $\text{SiO}_2/\text{Ta}/\text{MgO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  다층 박막을 제작하고 약 70 nm 두께의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  박막의 (001) 에피성장을 유도하기 위한 다양한 기저층의 영향을 탐구하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  박막의 (001) 에피성장을 위한 최적성장조건을 얻기 위해 X-ray와 AFM을 이용한 구조적 특성 분석, VSM을 이용한 자기적 특성과 4극 탐침기법에 전기적 특성에 대한 분석이 진행되었다. 본 연구에서는 그 결과 우리는 450 °C 의 진공 후열처리를 통한 다층 박막의 계면에서 Strain 유발에 의해 약 1nm 이하의 표면 평탄도를 갖는 우수한  $\text{Fe}_3\text{O}_4(001)$  방향의 에피성장이 형성됨을 관찰하였다. 특히 본 연구에서는 x-선 반사 패턴 결과를 기반으로 각 하지층의 미세 계면구조가 마그네타이트 에피성장에 미치는 영향을 심층적으로 탐구하였다. 본 연구는 마그네타이트 기반 나노스핀소자 개발에 있어 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.





**KMS 2015 Summer Conference**

# 구두발표 (II)





# Asymmetric induced magnetic moment of top and bottom Pd layers in Pd/Co/Pd trilayer system

Kyung Mee Song<sup>1,2,\*</sup>, Dong-Ok Kim<sup>3</sup>, Jun Woo Choi<sup>1</sup>, Dong Ryeol Lee<sup>3</sup>, Yongseong Choi<sup>4</sup>,  
Byoung-Chul Min<sup>1</sup>, Miyoung Kim<sup>2</sup>, Han Chul Kim<sup>2</sup>, Jae Sung Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Spin Convergence Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Republic of Korea

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

<sup>3</sup>Department of Physics, Soongsil University, Seoul 156-743, Republic of Korea

<sup>4</sup>Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA

Spin transport properties of a non-ferromagnetic metal (A) / ferromagnet (B) / non-ferromagnetic metal (A) system have been extensively studied. Interfacial phenomena such as spin-orbit torque and Dzyaloshinskii-Moriya interaction are known to affect the spin transport properties in such systems. [1, 2] Even with a symmetric A/B/A structure, it has been argued that the structural difference of the top A/B and bottom B/A interface lead to a broken space inversion symmetry. In this study, the induced magnetic moment of the Pd layers in a Pd/Co/Pd trilayer system were investigated. The magnetic proximity effect is known to induce ferromagnetic behavior in Pd adjacent to a ferromagnetic element. [3] Using x-ray magnetic circular dichroism and x-ray resonant magnetic scattering, it is found that the induced magnetization of the Pd at the top Pd/Co and bottom Co/Pd interface is different. The asymmetry of the Pd moment is possibly due to the difference in strain of the top and bottom Pd. These results suggest that the asymmetry in the interfacial induced magnetic moment need to be considered in explaining interfacial spin transport phenomena.

## 참고문헌

- [1] J. C. Thomas *et al.*, PRB **88**, 214401 (2013)
- [2] M. Jamali *et al.*, PRL **111**, 246602 (2013)
- [3] J.J. Hauser, Phys. Rev. **187**, 580 (1969)

# Thermally strong perpendicular magnetic anisotropy features of CoFeB/MgO frames *via* diffusion control

GwangGuk An<sup>1,\*</sup>, JaBin Lee<sup>1</sup>, SeungMo Yang<sup>1</sup>, JaeHong Kim<sup>2</sup>, WooSeong Chung<sup>3</sup>,  
HaeSoo Park<sup>1</sup>, and JinPyo Hong<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Natural Science, Novel Functional Materials and Devices Lab, Department of Physics,  
Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea

<sup>2</sup>Division of Nano-Scale Semiconductor Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea

<sup>3</sup>Nano Quantum Electronics Lab, Department of Electronics and Computer Engineering,  
Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea

## 1. Introduction

Magnetic tunnel junctions (MTJs) with Ta/CoFeB/MgO frames possessing perpendicular magnetic anisotropy (PMA) are attracting significant interest for realizing the next generation non-volatile memory<sup>1-2</sup> and the spin-orbit torque switching devices.<sup>3</sup> Among all the PMA materials, such as rare-earth-transition metal films, [Co/(Pt, Pd)] and [Fe/(Pt, Pd)] multilayers,<sup>4</sup> and their L1<sub>0</sub> ordered alloy films,<sup>5</sup> Ta/CoFeB/MgO frame combines the advantages over the MTJs with in-plane magnetic anisotropy including giant tunneling magnetoresistance (TMR) ratio via  $\Delta_1$  symmetry, fast switching with low current density based on low damping constant,<sup>1-2,6</sup> and the simple structure to manufacture. However, the PMA features are easily deteriorated at annealing temperature over 300 °C caused by Ta diffusion.<sup>7</sup> In this study, diffusion barrier (DB) was inserted at the Ta/CoFeB interface to prevent Ta diffusion to maintain the PMA properties.

## 2. Experimental Details

Ta (5)/DB (*d*)/CoFeB (1.4)/MgO (2) with Ta capping layers (the numbers in parentheses represent the nominal thickness of each layer in nanometers, *d* represents the thickness of DB.) were prepared by utilizing a DC/RF-magnetron sputtering system on oxidized Si substrates at room temperature and annealed at various temperature for an hour under 3 T magnetic field in high vacuum. After the samples with different DB thicknesses were tested within a nominal thickness range from 0 nm to 1 nm with annealing temperature up to 400 °C, the optimized sample with 0.4 nm thickness was selected for subsequent evaluation in this work. Two series of samples were prepared for in-depth study of PMA properties as follows: subs./Ta (5)/CoFeB (*t*)/MgO (2)/Cap (3) (Series A) and subs./Ta (5)/DB (0.4)/CoFeB (*t*)/MgO (2)/Cap (3), where the numbers in parentheses represent the nominal thickness of each layer in nanometers and the thickness of CoFeB layer (*t*) varied from 1 nm to 2.4 nm.

Vibrating sample magnetometer (VSM) was used to measure the magnetic hysteresis loops of each sample and X-ray diffractometer (XRD) was carried out to confirm the structure crystalline of the DB layer. The effect of the DB was evaluated by the cross-sectional high-resolution scanning transmission electron microscope (HR-STEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX).

### 3. Results and Discussion

Clear PMA properties of Ta/DB/CoFeB/MgO frames containing various DB thicknesses were maintained even after annealing temperature over 400 °C, compared with those the frames without the DB insertion layer. However, as the DB thickness increases, the magnetic dead layer also seems to be increased. The EDX observation suggests some evidences of highly suppressed Ta diffusion due to DB layer and vigorous B diffuse-out at the CoFeB/MgO interface after the high temperature annealing.

Ordinary Ta/CoFeB/MgO frames (Series A) revealed PMA with the largest anisotropy field ( $H_k$ ) about 9 kOe after the 250 °C annealing and dramatically deteriorated with the small  $H_k$  value as the annealing temperature increases. On the other hand, with the 0.4 nm thick DB insertion (Series B), the largest  $H_k$  value of 12 kOe was observed after 350 °C annealing and PMA behaviors were still observed up to annealing temperature 425 °C.

### 4. Conclusion

In summary, we present thermally stable behaviors of Ta/CoFeB/MgO frame with 0.4 nm thick DB layer insertion. The PMA properties were maintained after post thermal annealing of more than 425 °C. It may be due to highly suppressed Ta diffusion by the DB layer insertion. High temperature annealing may lead to the enhancement of the  $H_k$  by providing a vigorous B diffuse-out at the CoFeB/MgO interface. Basic Ta/CoFeB/MgO frame revealed an effective anisotropic energy ( $K_{eff}$ ) of around 4.6 Merg/cc, while a modified Ta/DB/CoFeB/MgO provided a significantly higher  $K_{eff}$  value of 9.6 Merg/cc after proper temperature post annealing.

### 5. References

- [1] S. Yuasa, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, M. Konoto, H. Maehara, H. Kubota, T. Taniguchi, H. Arai, H. Imamura, K. Ando, Y. Shiota, F. Bonell, Y. Suzuki, N. Shimomura, E. Kitagawa, J. Ito, S. Fujita, K. Abe, K. Nomura, H. Noguchi, and H. Yoda, in *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM) Tech. Dig.*, **13-56**, 3.1.1–3.1.4 (2013).
- [2] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno, *Nat. Mater.* **9**, 721-724 (2010).
- [3] G. Yu, P. Upadhyaya, Y. Fan, J. G. Alzate, W. Jiang, K. L. Wong, S. Takei, S. A. Bender, L.-T. Chang, Y. Jiang, M. Lang, J. Tang, Y. Wang, Y. Tserkovnyak, P. K. Amiri and K. L. Wang, *Nat. Nanotech.*, **9**, 548 (2014).
- [4] G. G. An, J. B. Lee, S. M. Yang, J. H. Kim, W. S. Chung, K. S. Yoon, and J. P. Hong, *AIP Advances* **5**, 027137 (2015).
- [5] G.-M. Choi, B.-C. Min, and K.-H. Shin, *Appl. Phys. Exp.* **4**, 023001 (2011).
- [6] S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa, Y. M. Lee, K. Miura, H. Hasegawa, M. Tsunoda, F. Matsukura, and H. Ohno, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 082508 (2008)
- [7] N. Miyakawa, D. C. Worledge, and K. Kita, *IEEE Magn. Lett.* **4**, 1000104 (2013).

# Thermally stable features in double CoFeB/MgO frame for perpendicular magnetic tunnel junctions

JaeHong Kim<sup>1,\*</sup>, JaBin Lee<sup>2</sup>, GwangGuk An<sup>2</sup>, SeungMo Yang<sup>2</sup>, WooSeong Chung<sup>3</sup>,  
HaeSoo Park<sup>2</sup> and JinPyo Hong<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Nano-Scale Semiconductor Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea

<sup>2</sup>Research Institute for Natural Science, Novel Functional Materials and Devices Lab, Department of Physics,  
Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea

<sup>3</sup>Nano Quantum Electronics Lab, Department of Electronics and Computer Engineering,  
Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea

## 1. Introduction

Recent studies for perpendicular magnetic tunnel junctions (*p*-MTJs) has a great attention due to various advantages, such as current switching efficiency and high thermal stability factor ( $\Delta = K_{\text{eff}}V/k_B T$ , where  $K_{\text{eff}}$ ,  $V$ ,  $k_B$ , and  $T$  refer to the magnetic anisotropy energy density, volume of the free layer, Boltzmann constant and  $T$ , respectively).<sup>1-3</sup> Most of all, *p*-MTJs based on CoFeB/MgO frames has exhibited high tunneling magnetoresistance ratio (TMR ratio)<sup>4</sup>, while several issues, such as thermal stability for memory retention and tolerance to annealing process for back-end-of-line (BEOL) processing still remain challenges. In order to get over these issues, double-interface structure inserted by proper metal layer was employed to maintain high thermal stability.<sup>5</sup> In this study, we investigated the MgO/CoFeB/metal X/CoFeB/MgO double-interface frame showing higher thermal stability factor than well-known criterion for high performance 1Gb memory device ( $\Delta = 60$ )<sup>3</sup> at a device size below 20 nm. Clear PMA features was achieved at even higher annealing temperature over than 400 °C. In addition, the interlayer exchange coupling phenomenon between two CoFeB layers was observed by changing the inserted metal thickness.

## 2. Experimental Details

Buffer layer (5)/MgO (1.2)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> ( $t_{\text{CFB1}}$ )/metal X ( $t_X$ )/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> ( $t_{\text{CFB2}}$ )/MgO (1.2)/Capping layer (5) stacks were prepared on thermally oxidized Si substrates at room temperature by dual DC & RF magnetron sputtering, where the numbers in parenthesis refer to nominal layer thickness in nanometers. Two additional single interface structures were prepared for comparison: Buffer layer (5)/MgO (1.2)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> ( $t_{\text{CFB1}}$ )/Capping layer (5) and Buffer layer (5)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> ( $t_{\text{CFB2}}$ )/MgO (1.2)/ Capping layer (5). All the stack were post-annealed at 350 °C, 400 °C, and 425 °C for 1 hour under vacuum conditions of pressure below  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr under a 3 T magnetic field normal to sample plane. Vibrating sample magnetometer (VSM) was used to analyze the in-plane and out-of-plane magnetic hysteresis loops.

## 3. Results and Discussion

Novel metal layer thickness was varied with the range of 0.25 to 3.0 nm. Increasing an insertion layer thickness leads to weak ferromagnetic coupling strength between two CoFeB layers have weakened, resulting in transition to antiferromagnetic coupling region at a metal X thickness over 1.15 nm. Strong ferromagnetic

coupling was observed at  $t_x = 0.55$  nm, representing the achievement of highest thermal stability of more than 60 even at higher annealing temperature. This strong ferromagnetic coupling phenomenon permits the two ferromagnetic layer to act like a single layer in switching process. Thereby, the enhanced thermal stability factor  $\Delta$  could be acquired with expanded volume  $V$  of the CoFeB free layer, which has an anisotropic field value  $H_K$  up to about 10 kOe. Magnetic dead layer (MDL;  $t_d$ ) of 1.3 nm was estimated in this work, possibly providing a small critical switching current density  $J_C$  with a lower saturation magnetization value  $M_S$ . In addition, the possibility of annealing process up to 400 °C would satisfy the industrial requirement for BEOL process.

#### 4. Conclusion

In conclusion, thermally stable free layer frames based on double-interface scheme inserted by novel metal X were developed, where basic MgO/CoFeB/metal X/CoFeB/MgO frame was evaluated at various annealing temperatures. M-H magnetic hysteresis loops analysis indicated that strong ferromagnetic interlayer coupling phenomenon was achieved at a thin insertion layer, confirming high thermal stability factor. Moreover, clear PMA features were kept even at high annealing process over 400 C, that would be suitable for future BEOL process.

#### 5. References

- [1] S. Mangin, D. Ravelosona, J. A. Katine, M. J. Carey, B. D. Terris, Eric E. Fullerton, *Nature Mater.* **5**, 210 (2006)
- [2] Kawahara, T., Ito, K., Takemura, R., and Ohno, *Microelectron. Reliab.* **52**, 613–627 (2012)
- [3] Ki Chul Chun, Hui Zhao, Jonathan D. Harms, Tae-Hyoung Kim, Jian-Ping Wang, and Chris H. Kim, *IEEE J. Solid-State Circuits.* **48**, 598-610 (2013)
- [4] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno, *Nat. Mater.* **9**, 721-724 (2010)
- [5] X. Jiang, R. Moriya, and S. Parkin, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 172407 (2012).

# Photo-control of exchange bias in epitaxial BiFeO<sub>3</sub>/(La,Sr)MnO<sub>3</sub> thin films

성길동<sup>1</sup>, 이태권<sup>1</sup>, 정종훈<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 물리학과

## 1. 서론

상온에서 강유전성과 반강자성이 동시에 존재하고 이들 사이에 결합이 존재하는 BiFeO<sub>3</sub>를 이용한 응용 중에서 가장 가능성이 있는 것 중의 하나가 전기장을 이용하여 BiFeO<sub>3</sub>와 강자성 금속 사이의 교환 상호 작용을 제어하는 것이다 [1]. 현재까지 이러한 전기장에 의한 교환바이어스의 제어는 주로 BiFeO<sub>3</sub>/CoFe(B) 다층 박막에 대해 이루어졌다. 이러한 다층 박막의 연구를 통해 밝혀낸 것은 BiFeO<sub>3</sub> 박막의 109 ° 강유전체 도메인이 교환바이어스에 큰 영향을 미친다는 것이다. 반면 BiFeO<sub>3</sub>/(La,Sr)MnO<sub>3</sub> 다층 박막의 경우, 교환 바이어스에 영향을 미치는 것은 인터페이스에 있는 Fe-Mn 오비탈의 혼성이라는 것이 밝혀졌다.

이러한 교환바이어스에 대한 연구 폭을 넓히기 위해서는 외부의 전기장 이외에 다른 방법을 이용하여 제어할 수 있는 방법을 모색하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 BiFeO<sub>3</sub>/(La,Sr)MnO<sub>3</sub> 다층 박막에서 레이저 빛을 이용하여 교환 바이어스를 제어할 수 있음을 실험적으로 보였고, 이를 SrTiO<sub>3</sub> 기판에서 빛에 의한 전하의 주입으로 설명할 수 있었다.

## 2. 실험

펄스 레이저 증착법을 이용하여 SrTiO<sub>3</sub> 기판위에 (La,Sr)MnO<sub>3</sub> 박막과 BiFeO<sub>3</sub> 박막을 ex-situ 방법을 통해 에피 성장에 성공하였다. 성장된 박막은 x-선 회절, SEM, TEM 실험을 통해 격자 및 미세구조를 연구하였다. 레이저 다이오드를 이용하여 시료 전체에 빨간색의 빛을 비추고, 외부 자기장에 따른 저항을 온도에 따라 수행하였다.

## 3. 결과

그림 1은 빨간색의 빛을 비추었을 경우, 자기 저항을 25 K에서 측정한 결과이다. 빛을 비추지 않을 때에 비해서, 교환 상호작용 자기장이 현격하게 줄어들고, 저항이 커지는 것을 확인할 수 있다. 자기 저항 이외에 자화율을 측정하여 자기 저항을 통해 측정한 보자력과 자화율을 통해 측정한 보자력이 같음을 확인하였다. 이러한 결과는 자기 저항 실험을 이용하여 얻은 교환 바이어스 자기장이 자화율 측정을 통해 얻은 교환 바이어스 자기장과 같음을 의미한다. 온도에 따른 저항 측정을 통해, 붉은 색의 빛을 비추에 따라 나타나는 교환 바이어스의 변화가 시료의 열적인 효과에 의한 것이 아니라는 것을 밝혀내었다.

본 연구에서 사용한 SrTiO<sub>3</sub>은 붉은 색의 빛에 의해서 전자가 (La,Sr)MnO<sub>3</sub> 박막으로 주입할 수 있다. 이렇게 주입된 전자는 홀 전하의 양을 줄임으로 해서 (La,Sr)MnO<sub>3</sub> 박막의 저항을 현격하게 증가시킬 수 있다. 또한, 주입된 전자는 Mn-Fe 사이의 Superexchange interaction을 현격하게 줄일 수 있어, 교환 바이어스의 크기를 줄일 수 있다. 추가 실험을 통해 붉은 색 빛의 끄고 켜에 따라서, 교환 바이어스의 크기, 저항의 크기, 그리고 보자력의 크기가 주기적으로 변화하는 것을 관측하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 전기장 이외에 빛을 이용하여 BiFeO<sub>3</sub>/(La,Sr)MnO<sub>3</sub> 다층 박막의 교환바이어스를 제어할 수

있다는 것을 보였다. 빛은 비접촉적이고 고집적화가 가능하므로, 빛을 이용한 마이크로 사이즈의 자기터널 디바이스와 같은 새로운 디바이스의 가능성을 제시한다.

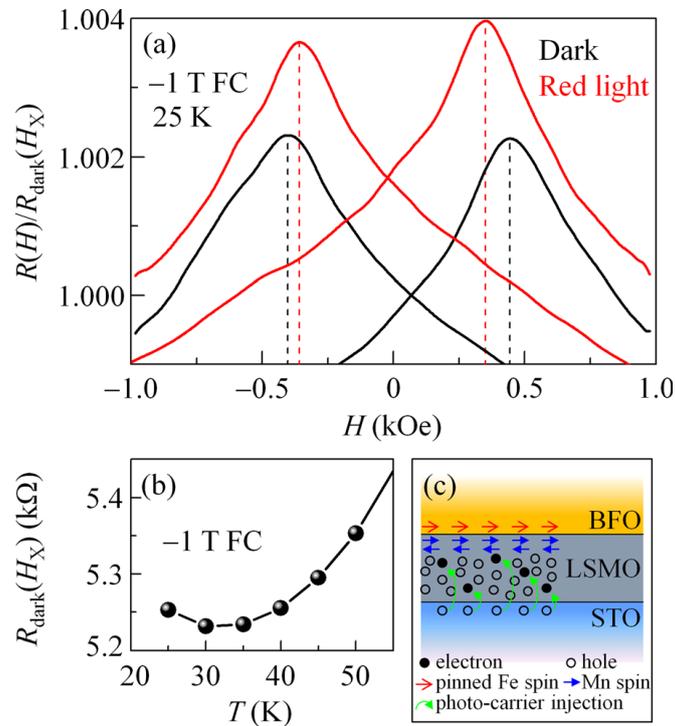


그림 1. (a) 붉은 색의 레이저 조사에 의한 BiFeO<sub>3</sub>/(La,Sr)MnO<sub>3</sub> 다층 박막의 자기 저항. (b) 온도에 따른 저항 변화. (c) 광전하 주입에 따른 저항의 변화와 교환 바이어스 변화 설명 모델.

## 5. 참고문헌

- [1] S. M. Wu, S. A. Cybart, P. Yu, M. D. Rossell, J. X. Zhang, R. Ramesh, and R. C. Dynes, Nature Mater. 9, 756 (2010).

## 자성센싱 홀소자 맥진센서를 이용한 모바일형 건강진단 콘텐츠 개발

이상석<sup>1,\*</sup>, 김근호<sup>1</sup>, 황도근<sup>1</sup>, 이장로<sup>2</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 한방의료공학과,

<sup>2</sup>숙명여자대학교 물리학과

본 연구는 고감도 자성센싱 반도체 홀소자를 맥진센서로 이용하여 미래의 U-헬스케어 한양방 융합의료기기 손목 착용형 스마트 맥진 시계를 개발하고 상용화 단계에 진입함을 목표를 두고 있다. 미래의 헬스케어용 의료기기 개발과 발전은 물리학-IT공학-의료공학-한방의료공학과와의 만남과 융합연구가 필요하다. 인체 생리와 병리 연구에 활용하여 인체의 일중리듬과 각종 질병의 발병 전 징후 탐색하며, 또한 원격진료의 가능성 확대를 통해 측정된 데이터는 휴대폰을 통해 의료기관 등에 전송되고 관리되어 차세대 스마트형 한방의료 진단기기로 사용할 필요성이 대두되고 있다.



〈기 개발된 손목 착용형 맥진기 시제품과 스마트 워치에 적용한 모습〉

인간에 의해 수행되는 전통적인 맥진방법에서 측정하는 주요 요소는 맥동의 힘, 맥동의 주기, 맥의 팽창과 수축의 빠르기, 맥의 축지 깊이, 맥의 폭, 맥의 유효한 축지의 길이 이상의 6종의 요소라고 할 수 있는데 이에 착안한 본 연구에서 개발하고자 하는 손목 착용형 혈압 및 맥박측정기(새로운 한양방 융합 생체정보신호 : 말초혈류속도, 맥파전달속도, 호흡수 등도 포함)는 손목의 요골 돌출부 또는 척골 돌출부에 의하여 지지 고정되어 효과적으로 요골동맥의 맥파를 측정하여 맥박 및 혈압을 분석하고 디스플레이하는 손목 착용형 맥박 및 혈압측정기를 제공하는데 그 기술적 특성이 있다.

종래의 안정시 혈압 측정기나 맥박측정기는 휴대가 불편하거나 압박에 의한 고통으로 생활속에서 사용할 수 없었으며, 손목형 혈압측정기가 일본에서 개발 판매되었으나 이 역시 지속적인 생체신호를 측정하기 못하고, 통증을 유발하거나 다소 큰 부피로 인해 지속적으로 착용하기에는 어려움이 있다.

따라서 본 기술개발의 내용은 차세대 U-Health 시대를 맞아 생활 속에서 휴대가 가능하고 비가압식으로 통증의 유발 없이 혈압 및 맥박과 새로운 한양방 융합 생체정보신호들을 동시에 측정하기 위하여 벨트길이 조절로 피부에 접촉하는 센서부가 요골동맥을 누르는 압력을 조절함으로써 “부”, “중”, “침”에 의한 전통 맥진 방법을 응용함으로써 보다 재현성 있는 혈압 및 맥박을 측정할 수 있으며, 착용에 편리하도록 소형화함으로써 기술경쟁 우위를 실현하고자 한다.

요골동맥에 의한 맥박센서를 개발하고, 이를 이동형 손목장치 혈압 및 맥박기로 제품화하되 소형으로 제품

을 개발하고, 이의 측정 데이터를 유무선 송수신기를 통해 네트워크상에서 구현함으로써 향후 U-헬스케어 시대에 맞추어 원격진료는 물론 개인의 건강 관리에도 활용할 수 있는 제품을 개발하고자 한다.

혈압, 맥박, 말초혈류속도, 맥파전달속도, 호흡수의 정확한 측정데이터를 도출하기 위하여 안정시의 제품을 기반으로 휴대가 가능한 제품으로의 변환을 통해 휴대가 용이하고, 소형화가 가능하도록 연구개발 하였다. 또한 전력소모를 최소화하기 위한 설계 및 회로구성을 통해 실생활에서 손목착용을 통한 지속적인 혈압 및 측정 데이터가 도출될 수 있도록 한다.

재현성이 있는 손목 착용형 맥박 및 혈압측정기 및 한양방 융합 생체신호진단기를 상품화하기 위한 제품디자인 및 기구설계를 소형화하고 맥박 및 혈압기로 얻은 다중생체신호를 비교 분석할 수 있는 S/W개발 및 시스템을 구축할 것이다. 개발될 스마트 맥진 시계에 내장될 S/W를 통해 네트워크상에서 진료 및 운동처방, 식이요법, 기타 생체기초자료를 통한 개인 건강관리를 도모하고자 한다.





**KMS 2015 Summer Conference**

# **구두발표 (III)**





# Hot-deformation 법을 통해 제조된 Nd-Fe-B 자석의 후열처리 온도에 따른 자기특성 및 미세구조 변화

차희령<sup>1,2,\*</sup>, 유지훈<sup>1</sup>, 권해웅<sup>3</sup>, 김양도<sup>2</sup>, 이정구<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 부설 재료연구소

<sup>2</sup>부산대학교

<sup>3</sup>부경대학교

## 1. 서론

최근 에너지저감 및 그린에너지에 대한 관심이 높아지면서 친환경 자동차의 구동모터에 사용하기 위한 고성능 자성소재가 요구되고 있다. Nd 계 영구자석은 자기특성이 우수하여 전기자동차 구동모터용 자성소재로 주목받고 있으나, 취약한 내열안정성 때문에 고온에서 사용하기 위해서는 상온에서 높은 보자력이 요구된다. 현재 Dy와 같은 중희토류 금속을 첨가하여 고보자력의 Nd계 자석을 제조하고 있지만 Dy를 첨가할 경우 보자력은 향상되지만 중희토류 금속의 자원이 한정되어있고 첨가량이 많아질수록 자석의 성능이 저하되는 등의 문제가 있다. 이와 관련하여 최근에는 자석의 결정립 미세화 및 계면제어 등 미세구조 제어를 통한 중희토류 금속 저감 및 대체화와 관련된 연구들이 활발히 진행되고 있다.

미세 결정립을 가지는 고성능 자석의 제조법 중 하나로 hot-deformation법이 있다. 이 공정법은 나노결정립 분말을 hot-pressing 또는 SPS 공정을 통하여 고밀도 등방성 자석으로 제조한 후 die-upset을 통한 저온변형에 의해 결정립을 결정학적으로 이방화함으로써 고성능의 벌크자석을 제조할 수 있는 기술로서 다른 공정에 비해 저온공정이기 때문에 치밀화 과정에서 결정립성장을 최대한 억제할 수 있다. 또한 제조된 자석은 적정온도에서 열처리함으로써 결정립계를 제어하여 보자력을 향상시키는 것이 가능하다. 특히, hot-deformation 법의 경우 일정 압력하에서 성형체를 변형시키기 때문에 공정후 내부에 상당량의 strain 또는 결함이 존재할 것으로 예상된다. 하지만 hot-deformation 법으로 제조된 자석의 경우 후열처리효과에 관한 연구가 거의 보고되지 않고 있다. 이에 본 연구팀에서는 hot-deformation 법으로 제조된 자석의 후열처리 온도에 따른 특성변화를 알아보았다.

## 2. 실험방법

실험은 먼저 수십나노 결정립의 melt-spun ribbon ( $\text{Nd}_{13.6}\text{Fe}_{73.6}\text{Co}_{6.6}\text{Ga}_{0.6}\text{B}_{5.6}$ )을 진공중에서 700°C까지 승온한 후 100 MPa로 가압하여 (hot-pressing) 등방성 자석으로 제조하였다. 제조된 등방성 벌크자석은 다시 동일 온도에서 소성변형시켜 (die-upset) 결정립 이방화를 유도하였으며 변형 시 0.1 s<sup>-1</sup>의 속도로 약 77% (시료높이감소율) 높이 변형을 주었다. 제조된 자석은 내부 strain 또는 결함을 제거하기 위해 400~800°C 범위의 온도에서 후열처리를 실시하였으며 열처리 온도에 따른 미세구조 및 자기특성변화를 FE-SEM 및 VSM을 통하여 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

실험결과 600°C에서 후열처리 하였을 때 다른 첨가물 없이 열처리만으로도 보자력이 약 2.4 kOe 증가함을 확인하였다. 이러한 보자력 향상은 열처리를 통해 hot-deformation 공정 중 생긴 내부 strain 또는 defect가 제거되어 나타난 결과인 것으로 보인다. 하지만 600, 700°C를 제외한 온도에서 열처리 하였을 때에는 오히려 보자

력이 감소하는 결과를 보였다. 먼저, 400°C 정도로 낮은 온도에서 열처리하였을 경우, 주상과 Nd-rich 상의 열 팽창 계수 차이에 의해 오히려 내부 결함 (microcracks 등)을 증가시켜 보자력이 감소한 것으로 사료된다. 반대로 800°C와 같이 높은 온도에서 열처리 하였을 경우에는 내부 strain은 쉽게 제거될 수 있지만, 결정립이 크게 성장하여 보자력이 감소하는 결과를 보였다.

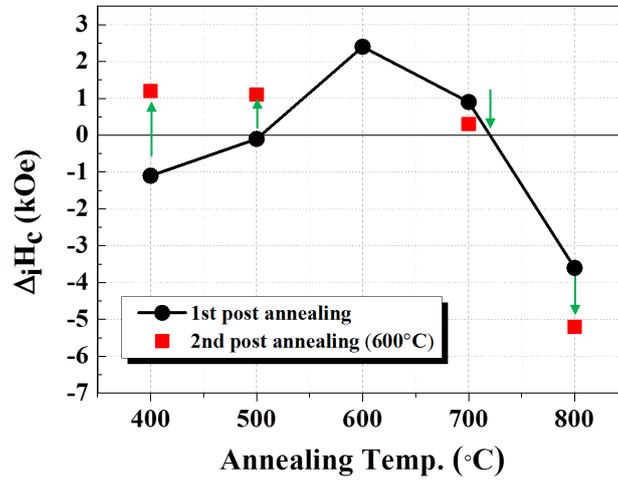


그림 1 후열처리온도에 따른 보자력 변화

#### 4. 참고문헌

- [1] O. Gutfleisch et al., *Adv. Mater.* 23 (2011) 821.
- [2] W. Grunberger et al., *Magnetics, IEEE Transactions On*, 33 (1997) 3889.
- [3] K. Hiraga et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 24 (1985) 699

# Optimization of oxide magnetic refrigerants

김종우<sup>1,\*</sup>, 조서현<sup>1</sup>, 최종진<sup>1</sup>, 안철우<sup>1</sup>, 류정호<sup>1</sup>, 한병동<sup>1</sup>, 최준환<sup>2</sup>, 윤운하<sup>3</sup>, 박동수<sup>3</sup>

<sup>1</sup>분말/세라믹연구본부, 기능세라믹연구실, 재료연구소

<sup>2</sup>실용화연구단, 공정실용화센터, 재료연구소

<sup>3</sup>실용화연구단, 소재실용화센터, 재료연구소

## 1. 서론

인가된 자기장에 의해 소재의 엔트로피가 변화하는 가역적 물리현상인 자기열량효과를 고체자기냉각기로 활용하는 연구가 미래 청정에너지 기술로 주목받고 있다[1,2]. 자기냉각기는 기존의 기체압축방식의 냉각기와는 달리 프레온 가스와 같은 유해냉매를 사용하지 않으며 소음과 진동이 적고, 열역학적 효율이 높은 장점을 가지며 최근 실용화를 위한 연구가 활발하다. 특히, 상온용 자기냉각기는 주거지의 냉난방시설로 응용하여 에너지 절감에도 기여할 수 있을 것으로 전망한다. 자기냉각기의 실용화를 위한 연구방향은 크게 냉각시스템에 관한 연구, 영구자석에 관한 연구, 자기열량소재(자기냉매)에 관한 연구로 나뉘며, 자기냉매는 자기냉각기의 작동온도와 효율에 관련된 중요한 요소이다.

우수한 자기열량 특성으로 알려진 합금계 자기냉매와 비교했을 때 산화물자기냉매의 경우 자기열량효과는 상대적으로 낮으나 특성의 제어가 쉽고 제조 및 취급이 용이하며 화학적으로 안정하여 수소취화 등에 강한 장점을 가진다. 또한 합금냉매 보다 고온에서 사용 가능하여 산화물 자기냉매를 이용해 보다 넓은 온도범위에서 자기냉각기의 활용이 가능하다[3].

자기냉각기의 사용온도 범위를 결정하는 것은 자기냉매의 고유한 특성인 상전이온도( $T_c$ )이며, 이는  $T_c$  부근에서 자기열량효과가 가장 크게 나타나기 때문이다. 자기냉각기를 보다 넓은 온도범위에서 사용하기 위해서는  $T_c$ 의 온도범위가 가급적 넓은 것이 바람직한데, 이를 위해 2차상전이 혹은 넓은 온도범위에 걸쳐 완화형 상전이 거동을 보이는 자기냉매를 개발하는 것이 필요하다. 하지만 단일물질로는 일상생활에서 효율적으로 사용할 수 있는 넓은 온도범위를 갖는 것이 한계가 있어, 서로 다른 상전이온도를 가지는 두 가지 이상의 물질을 병렬 사용하므로써 넓은 작동온도 범위를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 산화물 자기냉매의 적층 형태에 따라 변화하는 자기열량 특성 거동에 관한 연구를 진행하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 서로 다른  $T_c$ 를 가지는 소재로  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (이하 LSMO)와 LSMO에 A-site자리에 10% Ca를 치환한 소재(이하 Ca10)를 사용하였다. 두 물질은 예비실험을 통하여 각각 360K, 342K의 상전이 온도를 가지는 것을 확인하였다. 산화물 적층은 테이프캐스팅(tape casting)법으로 각각의 LSMO와 Ca10 green sheet을 제작한 다음, 두 가지 소재를 교환적층하여 2층, 5층, 10층의 배열을 만들고, 가압 성형한 후 burn-out 및 소결과정을 거쳐 제작하였다. 소결온도는 1400°C이고 2시간 유지한 후 자연 냉각하였다. 소결 후 제조된 시편의 밀도는 이론밀도 대비 95%이상으로 치밀한 조직을 유지하였으며, 자기열량효과는 재료연구소가 보유한 Quantum Design사의 Evercool II PPMS VSM 모듈을 이용하여 측정하였다. 측정된 자기장의 범위는 -2 - 2T, 온도범위는 약 320K - 380K이었다. 자기 엔트로피 변화(magnetic entropy change,  $\Delta S_M$ )은 Maxwell equation을 이용하여 열역학적으로 계산하였다[4].

## 3. 실험결과 및 고찰

자기냉매를 적층하는 방법에 있어서 자기냉각방식을 소형기기에 응용하기에 적합한 박막형태로 제조하는

경우, LSMO 단일층 박막에서는 253.5K의 상전이온도를 보이는데 비해, 다층박막에서는 152K와 253K 두 지점에서 상전이 온도를 가지는 것을 확인하여  $T_c$ 의 범위가 넓어지는 것을 알 수 있었다. 하지만 자기열량소재를 박막의 형태로 제조하는 경우 기관효과를 피하기 어려워 자기엔트로피 변화의 차이를 확인하는 데에 어려움이 있었다. 기관효과를 피하기 위해서는 free-standing 시편이 요구되는데, 이는 테잎캐스팅법을 이용한 산화물 자기냉매 후막화 공정으로 해결할 수 있었다. 제조된 산화물 자기냉매의 단일막과 다층막은 EDX(energy dispersive X-ray spectroscopy)을 이용하여 단면을 관찰함으로써 각각의 층이 잘 형성되었음을 확인하였다. 자기엔트로피 변화 측정 결과, 적층소재의 경우 단일소재보다 넓은 범위의  $T_c$ 를 가짐을 확인할 수 있었다. 적층산화물의 경우 단일 물질로 있을 때보다 완만한 거동을 보이기 때문에 자기엔트로피의 최대값은 감소함을 보였으나,  $T_c$  범위의 자기엔트로피변화의 평균값은 높아지는 결과를 보였으며, 이러한 경향은 인가자기장이 증가할수록 효율이 증가함을 보였다. 산화물 적층 효과를 확인하기 위하여 적층 산화물의 적층 횟수에 따른 자기엔트로피 변화 또한 관찰하였다. 적층 횟수를 증가하여도  $T_c$  범위의 증대에는 영향을 미치지 않았으며, 자기엔트로피의 변화에도 큰 변화가 없었으나, 적층횟수의 증가에 따른 자기엔트로피 변화의 감소가 관측되었다. 이는 계면에서의 결합 및 열화에 의한 것으로 보이며, 따라서 적층 횟수나 두께에 따른 자기열량특성에 대한 최적화 공정이 요구된다.

#### 4. 결론

합금계 자기열량소재 대비 우수한 장점을 가지는 산화물 자기열량소재에 관한 연구를 수행하였다. 넓은 온도범위에서 작동가능한 자기냉매를 개발하기 위하여 서로 다른 자기상전이온도( $T_c$ )를 가지는 물질인 LSMO와 Ca10을 병렬로 적층하는 방법으로 시편을 제조하고  $T_c$  범위 조절에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구결과를 통하여 두 물질을 적층하였을 때에 넓은 상전이 온도 범위를 가지는 것과 적층형 자기냉매는 자기장이 증가할수록 더 높은 자기엔트로피 변화를 보이는 것을 확인하였다. 아울러, 향후 소형화 기기에 전고체 자기냉각기를 활용함에 있어 적층형 박막 및 후막 자기냉매 계면에서의 결합 및 열화에 의한 자기엔트로피 특성의 저하를 피하기 위한 적층 횟수 및 두께의 최적화 연구가 필요할 것으로 보인다.

#### 5. 참고문헌

- [1] A. M. Tishin, Int. J. Refrigeration **37**, 223 (2014)
- [2] S. Fähler *et al.*, Advanced Engineering Materials **14**, 10 (2012).
- [3] M. H. Phan *et al.*, J. Mag. Mag. Mater. **308**, 325 (2007)
- [4] V. K. Pecharsky *et al.*, Phys. Rev. B **64**, 144406 (2001)

## Thickness dependent Magnetic Properties of Rare-earth free $L1_0$ FePt/Fe<sub>45</sub>Co<sub>55</sub> bilayer

Imran Khan<sup>\*</sup>, Jicheol Son, Jisang Hong  
Department of Physics, Pukyong National University

Using the full potential linearized augmented plane wave (FLAPW) method, we have investigated the thickness dependent energy product and coercive field of the rare-earth free FeCo/FePt bilayer systems. We have considered 2, 5 and 10 monolayer (ML) FeCo at 4 ML FePt ( $L1_0$ ). It is observed that both 2 and 5 ML FeCo displayed close to half metallic features, however in 10 ML system an ordinary metallic feature was obtained. A high value of perpendicular magnetocrystalline anisotropy energy ( $E_{MCA}$ ) of 45.6 and 23.9 meV/cell was found for 2 and 5ML FeCo system. The coercive field displayed a decreasing tendency with increasing FeCo thickness. Additionally, the estimated energy product was 74.2, 85.1 and 45.5 MGOe for 2, 5 and 10 ML system respectively. Therefore, our results may imply the FeCo/FePt bilayer can be used for potential rare earth free permanent magnet.

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2013R1A1A2006071) and by the Supercomputing Center/Korea Institute of Science and Technology Information with supercomputing resources including technical support (KSC-2014-C3-071)

## Magnetic Properties of Zinc-substituted Strontium W-type hexaferrites of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ( $0.0 \leq x \leq 2.0$ )

Jae-Hyoung You<sup>\*</sup>, SungJoon Choi, Sunwoo Lee, and Sang-Im Yoo<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Research Institute of Advanced Materials (RIAM),  
Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>†</sup>Sang-Im Yoo, E-mail : siyoo@snu.ac.kr

Since strontium W-type hexaferrite (SrW) is stable at the high temperature region of 1350–1440°C in air, it is hard to obtain a pure phase of SrW at room temperature. A full substitution of divalent metal ions such as Mn, Zn, Co, and Ni for the  $\text{Fe}^{2+}$  site has been reported useful for obtaining the pure SrW phase at room temperature. Recently, we have successfully obtained the SrW pure phase at room temperature by annealing and subsequent furnace-cooling in a reduced oxygen atmosphere. Therefore, in this study, we tried to prepare the Zn-substituted SrW bulk samples with the compositions of  $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  ( $0.0 \leq x \leq 2.0$ ) in a reduced oxygen atmosphere, and identify the effects of  $\text{Zn}^{2+}$  substitutions on their magnetic properties. We also tried to investigate the phase stability region of  $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ . For this purpose, samples were annealed at the temperature region of 1100–1350°C for 2 h in  $PO_2 = 10^{-3}$  atm. As a result, the saturation magnetization of the samples increased with increasing  $x$  from 0 to  $x = 1.5$ , and the phase stability region decreased with increasing  $x$ . Details will be presented for a discussion



**KMS 2015 Summer Conference**

# 구두발표 (IV)





# Magnetolectric effect of strained 5d TM/Fe/MgO(001) (TM=Ta and Pt): A first principles study

P. Taivansaikhan<sup>1,\*</sup>, D. Odkhuu<sup>2</sup>, S. H. Rhim<sup>1</sup>, and S. C. Hong<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Energy Harvest Storage Research Center, University of Ulsan,  
Ulsan 680-749, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Physics, Incheon National University, Incheon 406-772, Republic of Korea

<sup>†</sup>Corresponding author: schong@ulsan.ac.kr

Electric field effect on magnetization and magnetocrystalline anisotropy (MCA) of strained 5d TM/Fe/MgO(001) [TM=Ta and Pt] has been investigated using first-principles calculations. Up to the 4% compressed strain with respect to MgO substrate, the Ta/Fe/MgO(001) always exhibits PMCA, while MCA of Pt/Fe/MgO(001) is switched from in-plane MCA of -2.18 meV/cell (without strain) to PMCA of +0.74 meV/cell (under 4% compressed strain). Moreover, the magnetolectric effect is studied under the electric field perpendicular to the surface. For Pt/Fe/MgO, the PMCA is enhanced to +1.09 meV/cell ( $E=+1$  V/Å), while decreased to +0.03 meV/cell ( $E=-1$  V/Å) in Fig 1. Further, we will discuss origin of magnetolectric effect at the interface of 5d TM/Fe/MgO(001).

Supported by Basic Research Program (2010-0008842) and Research Centers Program (2009-0093818) through National Research Foundation of Korea.

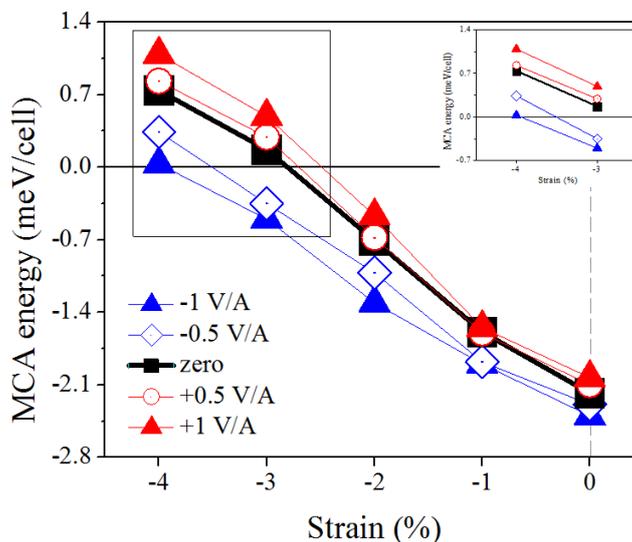


Fig 1. Electric field effect on MCA of strained Pt/Fe/MgO.

# 4원 호이슬러 합금 CoFeCrGa(001)표면에서 자성과 반쪽금속성에 대한 제일원리 계산 연구

이재일<sup>1,\*</sup>, 김동철<sup>2</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 물리학과, 인천광역시 남구 인화로 100, 인천 402-751

<sup>2</sup>한라대학교 전기전자공학과, 강원도 원주시 한라대 1길, 220-712

## I. 연구동기

페르미 에너지에서 10%의 스핀분극율을 가지는 반쪽금속은 스핀트로닉스 소자에 응용 가능성이 크기 때문에 많은 관심을 받아 왔다. 1983년에 de Groot가 반호이슬러 화합물인 NiNbSn에서 반쪽금속성을 처음 발견한 이래 [1], 여러 연구자에 의해 다양한 구조와 화학 조성을 가지는 물질에서 반쪽금속성이 발견되었고 실제로 합성도 되었다. 이 중 호이슬러 화합물은 실용적 면에서 많은 관심을 받아 왔는데 이는 호이슬러 구조가 주로 섬아연광 (zinc-blende) 구조를 가지는 반도체와 구조적으로 잘 부합될 수 있기 때문이었다. 호이슬러 구조를 가진 화합물 중  $\text{Co}_2\text{FeZ}$ 나  $\text{Co}_2\text{CrZ}$ (Z=Al, Si, Ga, Ge) 등 코발트계 화합물이 높은 큐리 온도와 큰 자기모멘트로 각광을 받고 있다. 최근에 Gao 등 [2]은 제일원리 계산에 의해, 4원 화합물인  $\text{CoFeCrZ}$ (Z=Al, Si, Ga, Ge) 들이  $2\mu_B$  ( $\text{CoFeCrAl}$  및  $\text{CoFeCrGa}$ ) 또는  $3\mu_B$  ( $\text{CoFeCrSi}$  및  $\text{CoFeCrGe}$ )의 자기모멘트를 가지는 반쪽금속이 됨을 보였다. 본 연구에서는  $\text{CoFeCrGa}$ 에서 (001)표면의 전자구조를 계산하여 표면의 자성과 반쪽금속성 유지 여부를 검토하고자 한다.

## II. 연구방법 및 모형

4원 호이슬러 합금인  $\text{CoFeCrGa}$ 에서 (001)면을 표면으로 하면, Co와 Fe 원자로 끝나는 표면과 Cr과 Ga 원자로 끝나는 두 종류의 표면이 있을 수 있다. 본 연구에서는 표면의 전자구조를 계산하기 위해 각기 9층으로 이루어진 판 모형을 채택하였고, 이 두 가지 표면을 모두 고려하였다. 전자구조를 계산하기 위한 방법으로는 FLAPW 방법[3]을 이용하였으며, 교환상관 퍼텐셜에 대해서는 PBE형[4]의 일반기울기 근사 (GGA)를 채택하였다.

## III. 결과 및 논의

Fig. 1(a),(b)에  $\text{CoFeCrGa}$ 에서 CrGa 원자로 끝나는 표면계 (CrGa-term으로 나타내기로 한다)와 CoFe 원자로 끝나는 표면계 (CoFe-term)에 대한 원자별 상태밀도가 주어져 있다. Fig. 1(a)의 CrGa-term 계를 보면 오른쪽 패널에서 내부 층 원자들의 경우 모두 소수스핀 상태밀도에서 페르미 에너지를 중심으로 띠간격이 존재하는데, 이는 덩치  $\text{CoFeCrGa}$ 가 반쪽금속인 것과 부합하는 것이다. 왼쪽 패널에서 표면층의 Cr(S)이나 Ga(S)원자, 표면 밑층의 Co(S-1)이나 Fe(S-1)원자에 대한 상태밀도를 보면 오른쪽 패널의 내부층 원자에 비해 가전자의 상태밀도가 낮은 에너지 쪽으로 조금 이동하여 페르미 에너지에 다소 걸쳐 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 CrGa-term 표면계에서는 반쪽금속성이 살짝 깨지는 것을 나타낸다. 실제로 이 계의 총 자기모멘트는  $12.98\mu_B$ 로 반쪽금속의 특성이라 할 수 있는 정수배에 가까운 값을 가지고 있다. 또한 이 계에 표면층 Cr원자의 자기모멘트가  $3.05\mu_B$ 로서 가운데 층 Cr 원자의  $1.83\mu_B$ 보다 훨씬 증가하였는데 이는 자성전이금속 표면에서 전형적으로 나타나는 표면 효과, 즉 띠좁힘 효과와 교환분리의 증가로 인한 것이다. Fig. 1(b)에 주어졌던 CoFe-term 표면계에 대한 상태밀도를 보면 오른쪽 패널에 주어졌던 내부 층의 상태밀도는 거의 반쪽금속성을 유지하고 있으나, 왼쪽 패널의 표면층이나 표면 밑층 원자를 보면 반쪽금속성이 유지되지 못함을 알 수 있다. 실제로 이 계의 총 자기모멘트는  $9.81\mu_B$ 로 정수와의 거리가 있다. 이 계에서 표면 Co(S)원자는 가운데층 Co(C)원자에 비해 자기모멘트가 1.5배 가까이 증가하여  $1.47\mu_B$ 의 값을 가졌는데 이 또한 띠좁힘과 교환분리가 증가하였기 때문이다. 특이한 점으로는 이 계에서 표면 Fe(S) 원자의 자기모멘트가  $-0.05\mu_B$ 로서 거의 자성이 없

어졌다는 것이다.

- [1] R. A. de Groot, F. M. Müller, P. G. van Engen, and K. H. J. Buschow, Phys. Rev. Lett. 50, 2024 (1983).
- [2] G. Y. Gao, L. Hu, K. L. Yao, B. Luo, and N. Liu, J. Alloy. Compd. **551**, 539 (2013).
- [3] E. Wimmer, H. Krakauer, M. Weinert, A. J. Freeman, Phys. Rev. B **24**, 864 (1981).
- [4] J. P. Perdew, K. Burke, and M. Ernzerhof, Phys. Rev. Lett. **77**, 3865 (1996).

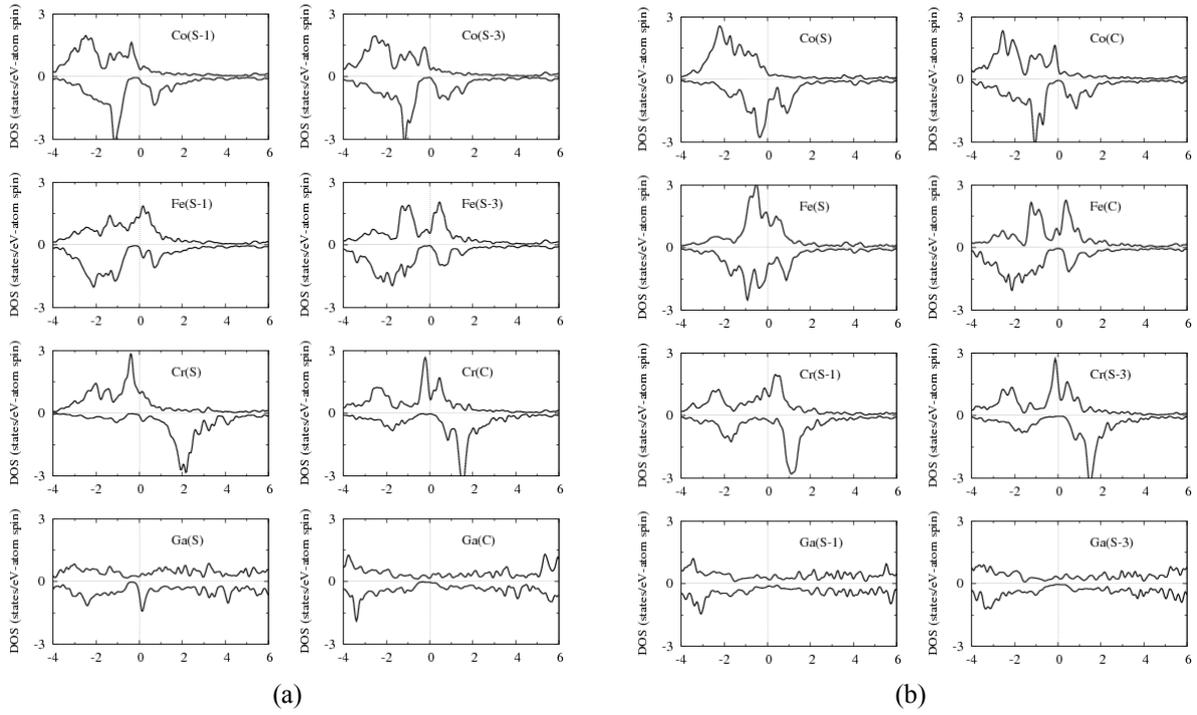


Fig. 1. Atom-projected spin-polarized density of states (DOS) for the chosen atoms of the (a) CrGa-term and (b) CoFe-term of the CoFeCrGa(001) surface system. The spin-down DOS values are multiplied by a negative number, and the Fermi levels are set to zero.

# The magnetic phase and the electronic structure of doped Gd-clustering for topological insulator, $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

Eun-Ha Shin<sup>1,\*</sup>, Myung-Hwa Chung<sup>2</sup>, Miyoung Kim<sup>1</sup>, Hanchul Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Sookmyung Women's University

<sup>2</sup>Department of Physics, Sogang University

The discovery of three dimensional strong topological insulators (TI) has intrigued many researchers. The surface metallicity in contrast to the insulating bulk state is known to be topologically protected by spin-orbit coupling and robust for impurities, disorders and the shape of material as long as the time reversal symmetry is preserved.

One of TI,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  was studied to examine whether topological surface state is hold when the magnetic transition metals such as Fe, Mn, and Co are doped. In this presentation, we report density functional theory calculations on the crystal of  $\text{Bi}_{2-x}\text{Gd}_x\text{Te}_3$  ( $x=0.021, 0.042, 0.063, 0.074, 0.083, 0.125$ ) to understand the effect of substitution of magnetic rare-earth element, Gd ( $\text{Gd}_{\text{Bi}}$ ) on the surface metallicity and the magnetic property.

A single  $\text{Gd}_{\text{Bi}}$ 's in  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  crystal ( $x=0.021$ ) is calculated to carry a spin magnetic moment of  $7 \mu_B$ . Two  $\text{Gd}_{\text{Bi}}$ 's in  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  crystal ( $x=0.042$ ) prefer to be located in the first nearest neighbor sites in the Bi sublattice on a single Bi atomic layer of the same quintuple layer. The magnetic moments of two  $\text{Gd}_{\text{Bi}}$ 's remain unchanged ( $7 \mu_B$ ) and the antiferromagnetic (AFM) configuration is more stable [ $\Delta E (=E_{\text{AFM}}-E_{\text{FM}})$  is  $-2.36\text{meV}$ ] due to super-exchange interaction via the intervening Te atoms.

With the increased concentration of Gd, we found that  $\text{Gd}_{\text{Bi}}$ 's favor to be clustered than to be uniformly dispersed. For instance,  $\text{Gd}_{\text{Bi}}$ 's form a linear chain ( $x=0.083$ ) or a hexagonal ring ( $x=0.125$ ) in the single Bi atomic layer. In most of the clustered structures, the AFM ordering is calculated to be more stable than the FM ordering. Among the considered configurations, the hexagonal ring is most effective in stabilizing the AFM phase ( $\Delta E = -14.7 \text{ meV}$ ).

# Magnetism and magnetocrystalline anisotropies of ordered $L1_0$ MnPt alloy: A first principles study on bulk and thin films

Qurat ul ain\*, S. H. Rhim, and Soon Cheol Hong  
Department of Physics and Energy Harvest Storage Research Center  
University of Ulsan, Ulsan 680-749, South Korea.

The antiferromagnetic MnPt is widely used as a pinning layer in GMR and TMR devices [1-2]. In this paper, magnetism and magnetocrystalline anisotropy (MCA) of ordered binary  $L1_0$  type MnPt are studied by using density functional theory (DFT) in generalized gradient approximation (GGA). Four different spin alignments have been considered FM, A-AFM, C-AFM and G-AFM shown in Figure 1. For MnPt, the most stable phase is the C-type AFM phase with axial ratio of  $c/a = 0.894$  which is in good agreement with the experimental results [3-4]. In this configuration, our calculations show magnetic moment of  $3.745 \mu_B$  on Mn atom and  $0.096 \mu_B$  on Pt atom along with in-plane MCA energy of  $0.22 \text{ meV/atom}$ . High temperature magnetic phase of A-type AFM is calculated to have  $0.455 \text{ eV}$  higher energy than the C-type AFM, but it is calculated to be energetically favorable compared to the FM phase. Lattice parameters, magnetic moments and MCA energies of all the magnetic configurations are catalogued in Table 1. Another silent feature observed in the DOS curve is an extremely deep TDOS minimum or pseudogap near the Fermi energy which is very sharp in C-type AFM, as shown in Figure 2. MCAs of Mn-terminated and Pt-terminated thin films are also investigated. And we will discuss strain effect on the pseudogap in TDOS.

Table 1. Lattice parameters, magnetic moments on Mn and Pt atom, total energies and MCA energies of FM, A-AFM, C-AFM, and G-AFM configurations in bulk.

	a (Å)	c (Å)	c/a	$\mu_{\text{Mn}}$	$\mu_{\text{Pt}}$	Energy (eV)	$E^{(100-001)}$ (meV/atom)
A-AFM	4.12	3.576	0.868	3.805	0.001	0.455	0.1718
C-AFM	4.09	3.658	0.894	3.745	0.096	0.000	0.2226
G-AFM	4.10	3.614	0.880	3.708	0.000	0.633	0.3007
FM	4.14	3.537	0.855	3.830	0.394	0.651	1.240
EXP	4.00*	3.670*	0.920*	$4.0 \pm 0.4^*$	$0.4 \pm 0.4^*$	-----	-----

\*Ref. [4]

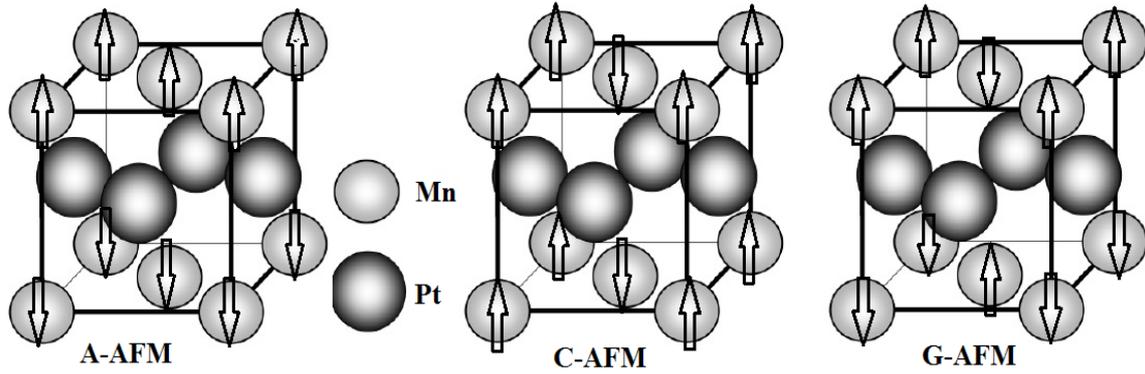


Fig. 1. Schematic diagram of A-AFM, C-AFM and G-AFM phases of  $L1_0$  crystal structure.

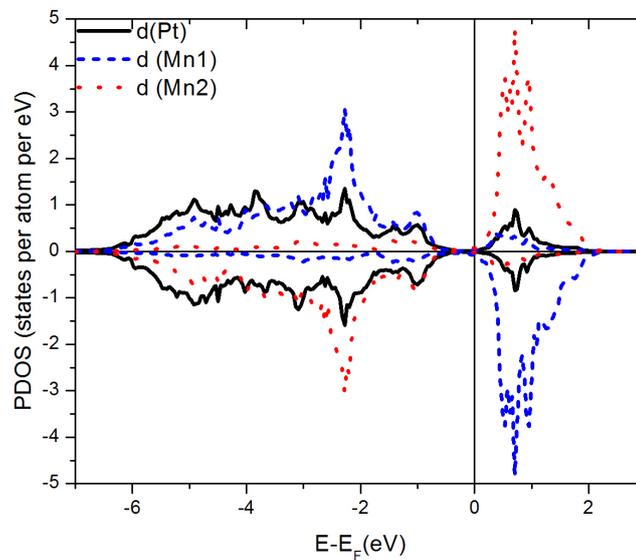


Fig. 2. d-orbital projected DOS of the C-AFM state.

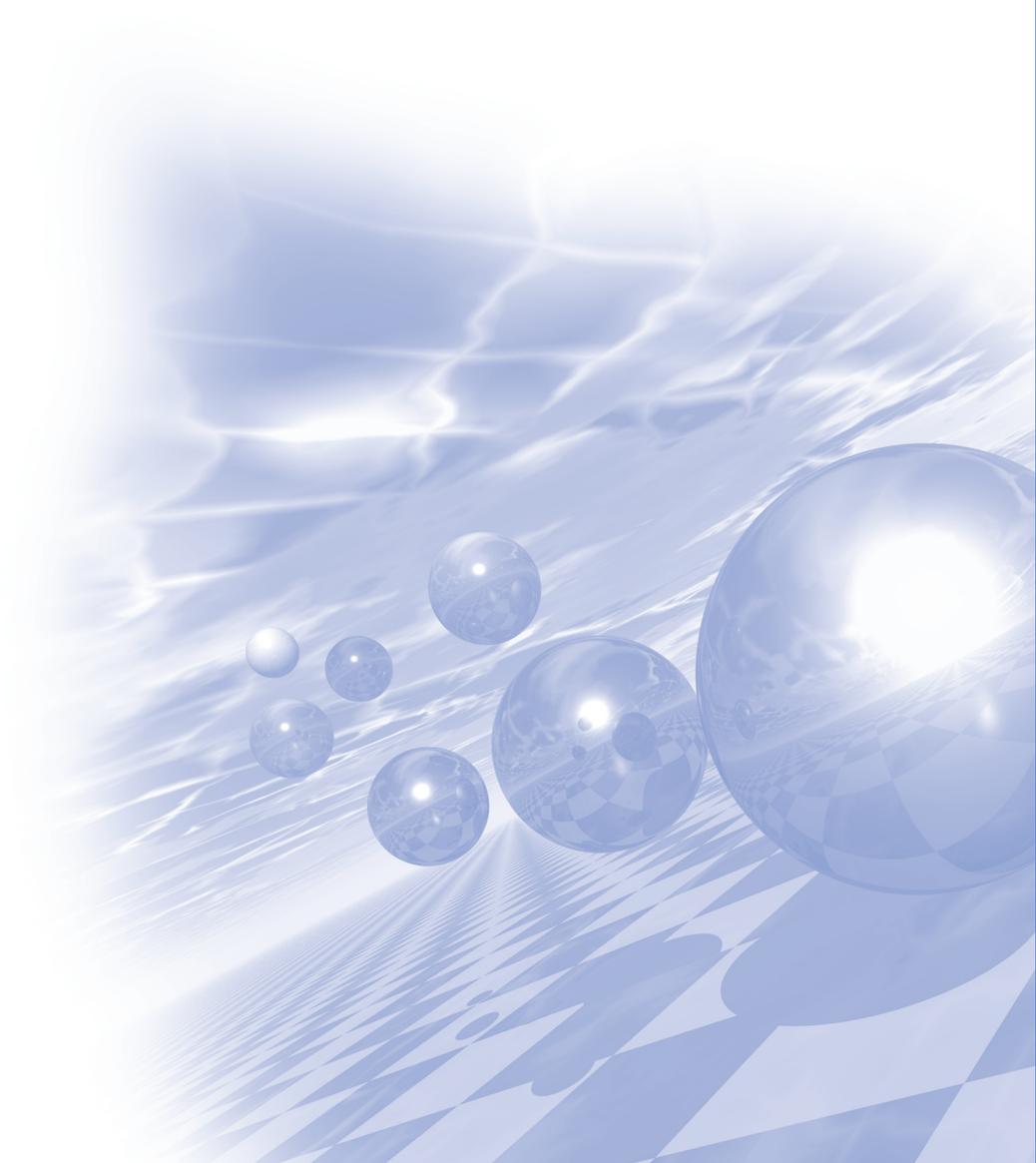
Supported by Basic Research Program (2010-0008842) and Research Centers Program (2009-0093818) through National Research Foundation of Korea.

- [1] R. F. C. Farrow, R. F. Marks, S. Gider, A. C. Marley, S. S. P. Parkin, and D. Mauri, *J. Appl. Phys.* **81**, 4986 (1997).
- [2] M. F. Toney, M. G. Samant, T. Lin, and D. Mauri, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4565 (2002).
- [3] E. Krén, C. Kádár, L. Pál, J. Sólyom, P. Szabó, and T. Tarnóczy, *Phys. Rev.* **171**, 574 (1968).
- [4] C. S. Severin, C. W. Chen, and C. Stassis, *J. Appl. Phys.* **50**, 4259 (1979).



**KMS 2015 Summer Conference**

# **초청강연 II**





# Magnetism and magnetocrystalline anisotropy of FeRh(001) thin films

Soyoung Jekal, S. H. Rhim, and Soon Cheol Hong\*

Department of Physics and EHSRC, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Republic of Korea

\*Corresponding author: schong@ulsan.ac.kr

In this paper we present magnetism and magnetocrystalline anisotropy of FeRh (001) films. They are found to depend strongly on film thickness and surface terminations. While magnetic ground state of bulk FeRh is G-type antiferromagnetism, the Rh-terminated films exhibit ferromagnetism with strong perpendicular MCA whose energy  $+2.1 \text{ meV}/\square$  is two orders of magnitude greater than  $3d$  magnetic metals, where  $\square$  is area of two-dimensional unit cell. The magnetic ground phases of FeRh bulk and thin films are revealed to be results of interplay and competition between three mechanisms – the superexchange interaction, the Zener direct-interaction, and magnetic energy gain. We will also discuss the thickness effects on magnetism and magnetocrystalline anisotropy of the FeRh(001) thin films.

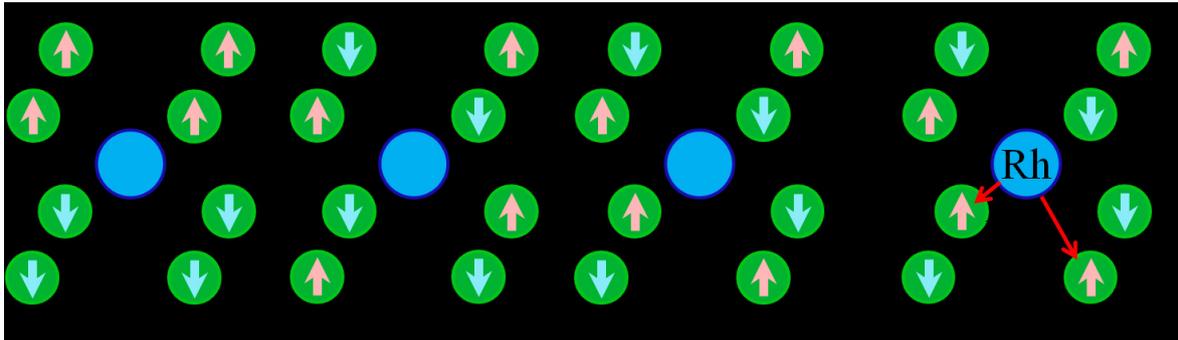


Fig. 1. Schematic diagrams of magnetic structures of (a) A-, (b) C- and (c) G-AFM states of bulk FeRh, and (d) exchange interaction between Fe atoms in the G-AFM state. Small balls at the corners of cubic present Fe atoms and large balls at the center Rh atoms

# Fabrication of High Efficient Permanent Magnet by Alternative Structure of Hard/Soft Magnetic Nanoparticle Nanocomposite

Young Soo Kang<sup>\*</sup>

Department of Sogang University, Seoul 121-742, Korea

Soft and hard magnetic nanoparticles were prepared by hydrothermal methods. Soft phase magnetic nanoparticles such as  $\alpha$ -Fe,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , FeCo and Co were synthesized and characterized on the structure and magnetic property with XRD, TEM and VSM. The homogeneous dispersion of them in the solution could be accomplished by coating dispersing surfactant on their surface and sonication with ultra-sonicator. On the other hand, hard phase magnetic nanoparticles such as  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ,  $\text{SmCo}_5$  and  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  nanoparticles were synthesized by hydrothermal method and annealing and reduction process. The size, morphology, structure and magnetic property were characterized with SEM, TEM, XRD and VSM. The dispersing ability in the solution was characterized by checking SEM and TEM images after coating dispersing surfactants on their surface. The soft phase magnetic nanoparticles were coated with cationic surfactant and hard phase magnetic nanoparticles were coated with anionic surfactant and mixed in the organic solvent to get neutral charge by the equi-molar ratio between soft and hard phase magnetic nanoparticles. The mixed solution of hard and soft phase magnetic nanoparticles was sonicated for 30 min at room temperature under the argon gas to suppress the oxidation of magnetic nanoparticles. A 30 min sonication resulted in the neutrally charged particle solution by the electrostatic interaction and neutralization of the surface charges of hard and soft phase magnetic nanoparticles. Then, the solvent was evaporated in a short period under the reduced pressure to suppress oxidation of the magnetic particles. The solid mixture of the magnetic particles was transferred into the glove box of nitrogen gas and pressed as a pellet. A mixture pellet of magnetic particles was reduced at 600 – 900 °C with Ar/ $\text{H}_2$  (v/v%, 95/5) gas flowing for 5 hrs. The prepared hard/soft nanocomposite magnetic material was characterized with VSM on the magnetic property.  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  alloy has been successfully synthesized by the nitrate-citrate auto-combustion followed by reduction and diffusion process with low energy consumption.  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  were used as precursors and citric acid is used as chelating ligands of metal ions. The ammonia water was used to adjust pH to 7.  $\text{CaH}_2$  is used as reducing agent for reduction and diffusion process.  $\text{NdFeO}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  were produced during auto-combustion of gels. The combustion process of gel has been investigated by TGA/DTA curve measurements. The phase compositions are studied by XRD measurement. The difference of overall morphology and magnetic property are measured by SEM, TEM and room temperature (300 K) vibrating sample magnetometer (VSM). The comparison on the magnetic property of the reduced samples between pellet type and random powder type has been studied with VSM and showed the better magnetic property of pellet type  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Making a compact pellet type sample for reduction is more efficient for solid reduction and phase transition for the higher coercivity.

## Latest MRI R & D Trends - with high resolution diffusion MRI and CEST

Ha-Kyu Jeong<sup>\*</sup>

Philips Electronics Korea, 260-199 Itaewon-dong, Yongsan-gu, Seoul 140-200, Republic of Korea

Trends in human MRI research and development have been evolved toward faster imaging, higher SNR and spatial resolution, novel contrast mechanism and motion robustness. Although there are always tradeoffs between targeted performance and scan time, smarter use of MRI hardware, software and sophisticated physical and mathematical theories applied to MR imaging and reconstruction allowed us to acquire MR images with novel contrast and/or better image quality within faster scan duration.

In this talk, we will discuss the latest MRI research and developmental trends mostly at 3T and some at 7T MRI. Topics will be focused on new & improved image contrast (SWI, pCASL etc), faster and improved data acquisition and reconstruction (SENSE, compressed sensing etc), higher SNR and spatial resolution using 7T MRI and motion-robust data acquisition and processing approaches. Finally, two topics, CEST (chemical exchange saturation transfer) and high resolution motion-robust diffusion MRI (IRIS - Image Reconstruction using Image-space Sampling), will be discussed in detail. Basics and past approaches on these topics will also be discussed.





**KMS 2015 Summer Conference**

# **Special Session I**

**‘미래 Magnet 연구회 :  
EV & HEV Motor and Magnetic Materials’**





# 전기자동차용 전동기의 종류와 적정기종 선정 과정

## Proper Selection Process and Family Tree of Electric Motors for EV

장석명\*

Jang Seok-Myeong

(주)셈스하이테크엔지니어링 대표이사, 충남대학교 명예교수

SEMS High-Tech.Engineering Co.Ltd & Chungnam National Univ. Emeritus Professor

1. Electric Motor Family Tree를 소개
2. Electric Vehicle 추진시스템과 전기기기의 종류
3. Electric Vehicles의 추진용 전동기
  - Brushless DC Machines  
Torque-Speed특성 과 차량추진
  - Permanent Magnet Brushed DC Machines  
Energy Product와 전기기기의 compact화,  
전기기기의 회전자 형태  
Slotless, Slotted, Coreless의 장단점
  - 유도전동기의 기본개념  
차량용 전기기기의 정격용량산정  
전동기의 구동시스템인 인버터의 고조파의 영향, 파형율을 감안하여 정격용량을  
산정해야함을 설명한다.
  - Switched Reluctance Machines의 기본개념
4. 전기자동차용 Motor Type선정평가

# 친환경자동차 구동모터용 전기강판 및 이용 기술 Electrical Steels and Application for EV / HEV

김재관\*

포항공과대학교 철강대학원

Graduate Institute of Ferrous Technology, POSTECH

자동차에서는 편의성, 안정성, 친환경성 등의 목적으로 많은 수의 모터가 사용되고 있고, 고급 승용차일 수록 사용하는 모터의 종류와 수도 늘어나 100개 이상의 모터를 탑재한 차량도 있다. 한편, 최근에 급격한 성장을 보이고 있는 친환경차인 하이브리드차(HEV) 및 전기차(EV), 연료전지차(FCEV) 등에서는 차량의 바퀴를 모터가 회전시키기 때문에 모터의 성능이 차량의 주행성능과 안전성에 직결되어 있다고 할 수 있다.

이들 모터의 철심(Core)에는 연자성 재료인 무방향성 전기강판이 주로 사용되고 있으며 차량에서 사용하는 전기에너지가 효율적으로 이용되는 데 기여하고 있다. 무방향성 전기강판에는 철손이 우수한 제품, 자속밀도가 우수한 제품, 가공성이 우수한 제품 등 다양한 종류가 있는데 모터의 종류에 따라 적절히 선택된다.

친환경차의 구동모터에 있어서 전기강판은 자동차의 성능과 안전을 좌우하는 핵심 소재이므로 요구되는 특성도 까다롭고 다양하다. 따라서 전기강판 제조사에서는 자동차의 설계에 필요한 특성을 갖춘 다양한 특성의 제품을 개발 중이며, 개발된 제품의 특성을 향상시키기 위해 노력하고 있다.

본 강연에서는 이들 무방향성 전기강판 제품의 유형과 특성에 대하여 살펴보고, 향후의 발전 방향에 대하여 토론해 보고자 한다. 아울러 무방향성 전기강판 제조기술의 개요에 대해서도 간단히 소개할 예정이다.

# Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle

Shigeaki Ishikawa\*

EV and HEV Component Engineering Department, Nissan Motor Co., Ltd.

The outline of drive motor and evolution of the motor for the Nissan LEAF Electric Vehicle to be explained in this presentation.

## 1) Outline of a traction drive motor

Drive motor for EV/HEV are required small size, light-weight, low cost, high output, high efficiency and low noise, at the same time.

Interior permanent magnet synchronous motor with rare earth sintered magnet is used for EV/HEV because of excellence in a point as a small size and high efficiency.

## 2) Evolution of the motor for the Nissan LEAF Electric Vehicle

On the 2013 model year LEAF, the electric motor, inverter, reducer, and charging system were integrated into a single unit, thereby achieving a smaller and lighter powertrain capable of being applied to other vehicle models.

The structure and performance of the motor were optimized to issues caused by component integration. The technical details about integrating the motor and the inverter to be explained.

### About the Speaker:

Mar 1978 Graduated from Meiji University, Tokyo, Japan. Bachelor of electrical engineering

Apr 1978 Joined in Nissan Motor Co., Ltd.

Apr 1992 Assistant Manager of Production Facilities Engineering Department

Apr 1996 Manager of Advanced Technology Research and Development Department

Apr 2002 Senior Manager of Powertrain Technology and Prototype Development Department

Apr 2006 Senior Manager of EV Powertrain Engineering Department

Apr 2011 Expert Leader (concurrently Senior Manager)

Sep 2014 The retirement of Nissan Motor Co., Ltd.( By 60-year-old retired provisions)

Oct 2014 Re-employment as a Senior partner to Nissan Motor Co., Ltd. (Technical advisor)

- Work experience -

1978\_1995

Technical development about Electric, Electronics and Computer application, in production facilities. e.g. Robot, Automation equipment, Information system and FA-network.

(1984\_1986 takes charge of Nissan technical college establishment and a lecturer.)

1996\_2005

Development of traction drive motor is begun.

Built the in-house development and production system,

Developing prototype motor for test cars, and supply the Motor for Fuel cell vehicle lease in 2003.

2006\_2015

Realized a competitiveness motor for the LEAF(EV) and the FUGA HYBRID(FR-HEV) which could mass-production.

# Overview of development of magnetic material technology for high-efficiency motors in Future Pioneering Program of Japan

Kimihiko Ozaki\*

Green Magnetic Material Research Lab. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
(Chubu Center) Nagoya, 463-8560 JAPAN

Nd-Fe-B permanent magnet has the highest performance in the world. This includes a heavy rare-earth element, such as Dy or Tb, for high coercivity and for efficiency in high-temperature using. However, these elements are very 'rare metal' in the globe. These have not only low crustal abundance, but also the problem of being mined only within a confined geographic area. Then, Nd-Fe-B permanent magnet without heavy rare-earth element and with the same or more magnetic performance than conventional one needs to be developed. Additionally, development of a new permanent magnet with superior performance is expected.

In Japan, a national project of development of Dy-less Nd-Fe-B permanent magnet was executed from 2007 to 2011. Then, Future Pioneering Program started from 2012. In the program, a project of "development of magnetic material technology for high-efficiency motors" has been executed. The project has been carried out in the technology research association of Magnetic materials for High-Efficiency Motors; MagHEM. The technology research association consists of companies and national research institute. The aim of the project is development of high-performance magnetic materials and high-efficiency motors. The development subjects of magnetic materials are high performance Nd-Fe-B magnet without Dy or Tb, new permanent magnets and soft magnetic materials.

On this day, the overview of the project will be described.

## Introduction

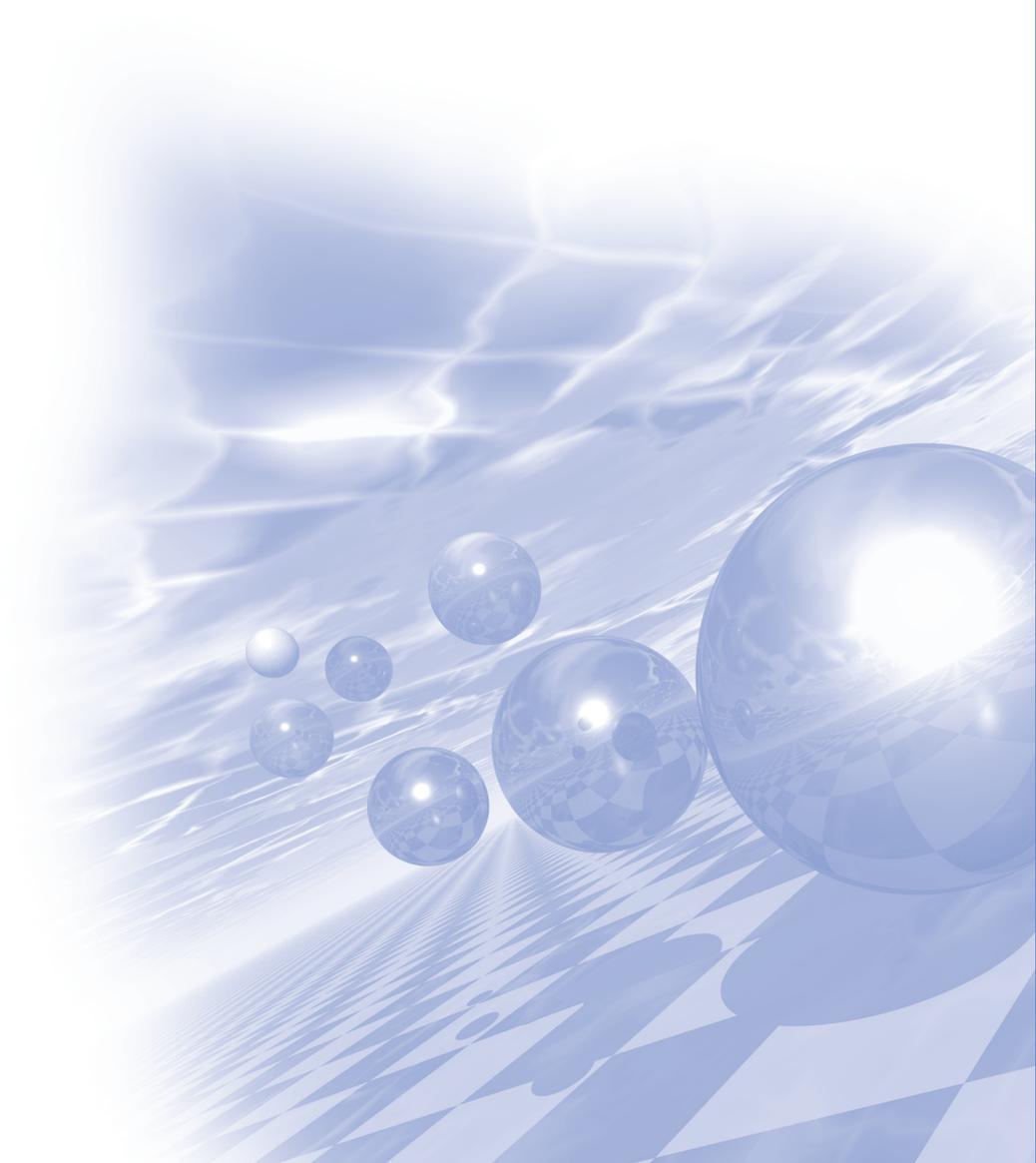
Kimihiko Ozaki is a Japanese researcher of materials processing and engineering. He received his PhD. in micro-discharge phenomena and processing from Osaka University in 1994. In that year, he joined the National Industrial Research Institute of Nagoya, which is the precursor of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology; AIST. He has researched development of non-equilibrium materials based on powder metallurgy, such as an amorphous alloy, a nano-crystallized alloy and an easily-decomposable material. Especially, his research of sintering process has contributed to producing the non-equilibrium materials from hardly-sinterable powder. In these days, he has taken part in a national project of 'rare metal', such as development of tungsten less cutting tool for hard metal tools. At the present, he is the project leader of development of magnetic material technology for high-efficiency motors in Future Pioneering Program of Japan.



KMS 2015 Summer Conference

# Special Session II

‘의과학 자기 연구회’





# Kernel 변경에 따른 영상평가 연구

전민철<sup>1,\*</sup>, 한만석<sup>2</sup>, 장재욱<sup>3</sup>, 장현철<sup>4</sup>, 최재혁<sup>5</sup>, 허영철<sup>6</sup>

<sup>1</sup>충남대학교병원 영상의학과, <sup>2</sup>강원대학교 방사선학과, <sup>3</sup>충남대학교병원 방사선종양학과,  
<sup>4</sup>수성대학교 방사선학과, <sup>5</sup>국립암센터 양성자치료센터 <sup>6</sup>강동경희대병원 영상의학과

## 1. 서론

CT 영상은 우수한 해상능과 조직의 분해능을 바탕으로 양질의 해부학적 정보를 제공하기 때문에 영상평가는 정확한 정보를 제공함에 있어 중요한 부분을 담당하고 있다. 영상을 평가하는 방법으로는 객관적 방법과 주관적 방법이 있다. 본 연구에서는 객관적 평가 방법으로 복부 CT 영상의 화질이 최적화 되는 kernel을 찾자 한다.

## 2. 실험방법

SOMATOM EDGE CT (SIEMENS Healthcare)를 이용하여 복부에서 사용하는 B10, B20, B30, B40, B50 Kernel을 Image J(version 1.49q, NIH) 프로그램을 이용하여 SNR, PSNR, RMSE, MAE를 비교한 후 화질이 좋은 2개의 Kernel을 선택해서 SAFIRE (Sinogram Affirmed Iterative Reconstruction)를 이용하여 다시 한번 화질 평가를 한다.

## 3. 결과

B10, B20, B30, B40, B50 Kernel를 각각 비교했을 때 B30과 B40 kernel 비교에서 SNR, PSNR, RMSE, MAE 값이 각각 31.65, 40.43, 2.43, 1.07로 영상의 화질이 가장 높게 나타났다. B30과 B40 Kernel을 SAFIRE를 이용하여 재구성 하였을 때 B30 Kernel은 SAFIRE(I30) 1단계에서 SNR, PSNR, RMSE, MAE 값이 33.48, 42.27, 1.93, 0.81이고 B40 Kernel은 SAFIRE(I40) 1단계에서 SNR, PSNR, RMSE, MAE 값이 33.25, 42.03, 2.02, 0.87로 영상의 화질이 높게 나타났다. B30과 SAFIRE(I40), B40과 SAFIRE(I30)의 교차 비교에도 SAFIRE 각 1단계에서 영상의 화질이 높게 나타났다.

## 4. 결론

복부 CT에서의 영상의 화질은 SAFIRE(I30) 1단계를 사용함으로써 최적화되는 영상의 화질을 나타낼 수 있다.

## 5. 참고문헌

- [1] Ghetti, C., et al. (2013). "Physical characterization of a new CT iterative reconstruction method operating in sinogram space". J Appl Clin Med Phys 14(4): 4347.
- [2] Yu, M. H., et al. (2013). "Low tube voltage intermediate tube current liver MDCT: sinogram-affirmed iterative reconstruction algorithm for detection of hypervascular hepatocellular carcinoma". AJR Am J Roentgenol 201(1): 23-32.
- [3] Solomon, J., et al. (2014). "Quantum noise properties of CT images with anatomical textured backgrounds across reconstruction algorithms: FBP and SAFIRE". Med Phys 41(9):091908

# 전산화단층촬영에서 인체의 방사선피폭선량 조사

유세종<sup>1,\*</sup>, 석종민<sup>2</sup>, 원희수<sup>3</sup>, 조재환<sup>4</sup>, 황도근<sup>5</sup>, 서선열<sup>6</sup>

<sup>1</sup>건양대학교병원 영상의학과, <sup>2</sup>국립경찰대병원 영상의학과,  
<sup>3</sup>분당서울대병원 방사선종양학과, <sup>4</sup>한림국제대학원 방사선학과,  
<sup>5</sup>상지대학교 한방의료공학과, <sup>6</sup>을지대학교 방사선학과

## 1. 서론

1971년 G.Hounsfield와 J.Ambrose에 의해 의료 영상 분야에 CT(Computed Tomography)가 도입된 이후로 진단적으로 필요불가결한 장비로 인식되어지고 있다. 이후 1990년대 후반부터 Multi-Detector CT(이하 MDCT)가 도입되면서 움직임에 대한 아티팩트가 감소함으로써 진단적 가치가 더욱 높아지게 되었으며, 의료기술과 컴퓨터의 빠른 발전을 함으로써 전 세계적으로 검사빈도가 증가하고 있다[1]. 1990년대 미국과 영국의 조사를 보면 CT검사에 의한 방사선 피폭이 영상의학과 전체 방사선 피폭의 67%를 차지하고 있으며[2][3], 최근에는 256 검출기를 장착한 MDCT가 사용되어지고 있어, 그 빈도는 더 증가할 것을 예상된다. 우리나라에서는 1996년 이후부터 CT가 건강보험급여에 적용됨으로써 이용률과 보급률이 증가했으며[4][5], 의료보험 청구 건수를 2003년과 2007년을 비교 조사한 결과 두부는 2.2배, 흉부 2.4배, 복부는 1.9배, 척수는 1.6배로 증가하는 것으로 나타났다[1].

본 연구는 한 대학병원에서 CT 검사를 통해 부위 별 인체가 받고 있는 피폭선량을 비교하고, 이를 감소시킬 수 있는 부분을 분석하여 결과를 밝히고자 한다.

## 2. 실험방법

대전지역 대학병원 1곳을 선정하여 2014년 3월부터 12월까지 정보값이 누락된 데이터를 제외한 22,487건의 환자 피폭선량을 조사하였다. 조사방법은 CT 검사의 프로토콜을 기준으로 피폭선량에 관여되는 영향인자인 Total DLP를 기준으로 식약처에서 배포한 선량관리 프로그램(K-dose)에 해당 변수를 적용하여 최종 피폭선량을 비교 분석하였다. 검출기 수에 따른 피폭선량의 영향평가를 하기 위해 S사의 128 검출기 CT와 T사의 64검출기를 사용하는 CT를 구분하였으며, 수집된 자료는 통계적 분석으로 SPSS WIN 18.0v 프로그램을 사용하였다.

## 3. 결과

CT 검사의 인체가 받는 전체 평균 피폭선량은 10.92(±10.98)mSv이었으며, 각 부위별로 분석해 보면 복부(N=8,004) 18.12(±12.04)mSv, 두부(N=5,452) 2.38(±0.69)mSv, 흉부(N=5,234) 9.76(±10.22)mSv, 안면부(N=1,163) 14.02(±4.10)mSv로 나타났다. 가장 많은 방사선피폭은 복부, 골반, 안면부, 하지순이었으며, 가장 적은 방사선 피폭은 심장, 안구, 저선량 흉부 순으로 나타났다. 척추부분인 경추, 흉추, 요추, 천추는 하지나 머리보다 피폭이 상대적으로 적게 나타났다(p<0.05). 또한 검출기 수에 따라 피폭선량의 차이는 64 검출기 CT가 128 검출기 CT보다 같은 부위별로 피폭선량이 더 높게 나타났다(P<0.001).

## 4. 고찰 및 결론

CT 검사는 방사선 피폭에 대해 벗어 날 수 없으며, 전통적 진단의 X-선 검사로 인한 피폭선량과 비교 할 수 없을 정도로 매우 큰 영향을 환자에게 줄 수 있다. CT 검사 시 장기의 흡수선량은 진단 목적에 따라 차이는

날 수 있으나, 10~100mGy에 이른다고 보고되고 있다[5]. 최근 들어 피폭에 대한 우려의 목소리가 커지고 있는 이유도 MDCT의 등장으로 더 많은 영상 수를 획득함으로써 선량이 증가될 것으로 보기 때문에 나타난 현상으로 볼 수 있다[5]. 본 연구에서 CT 검사 시 받게 되는 방사선피폭선량은 평균 10.92(±10.98)mSv이었으며, 일반인 개인 연간 피폭선량인 1mSv(5년을 평균으로 한 연간 피폭선량)를 초과하게 된다. 하지만 의료에 관련된 방사선피폭은 치료를 위한 진단 등을 목적으로 하므로 모두 간과하게 된다. 하지만 장기 입원환자 등에 대한 일반화된 방사선 검사를 지속하게 되면 방사선피폭의 위험에 그대로 노출되게 된다. 또한 장비의 검출기나 기술에 따라 피폭선량도 차이가 있었다. 앞으로 검사자, 의료인 모두 의료용 방사선 피폭선량을 감소하기 위한 노력과 제조사의 저선량 CT 등 최첨단 기술이 적용된 장비를 개발해야 할 것으로 사료된다.

## 5. 참고문헌

- [1] SH Ahn, “Establish of DRL & Estimation of Patient Exposure Doses for Diagnostic X-ray Examinations in Korea”, degree of Master of Korea University, Korea, 2011.Author1\_Name, Author2\_Name, “Exploring the bounds of Web latency reduction from caching and prefetching”, In Proceeding(s) of the AICIT Symposium(Conference Title) on Internet Technologies, pp.13-22, 2009.
- [2] JS LEE, DC Kweon, BG You, “Radiation Dose Reducing Effect during the AEC System in the Chest and Abdomen of the MDCT Scanning”, The Korea Contents Society, Vol. 9, no. 3, pp. 225-231, 2009.
- [3] KK Kim, “Study on measuring scan parameter of CTDI (Computed Tomography Dose Index)”, degree of Master of Korea University, Korea, 2011.
- [4] CH Lim, JK Cho, MK Lee, “A Study on the Radiation Dose in Computed Tomographic Examinations”, Korean society of radiology of radiological science, Vol. 30, no. 4, pp. 381-389, 2007.
- [5] JH Ahn, “Measurement of Radiation Exposure on Human Body Parts by Multi-Detector Computed Tomography (MDCT)”, degree of Master of Kyungbook National University, Korea, 2011.

# 의료용 선형가속기를 이용한 영상유도방사선치료 시 격일 콘빔 CT 적용의 유용성 평가

박병석<sup>1,\*</sup>, 서정민<sup>2</sup>, 권순무<sup>3</sup>, 김기홍<sup>4</sup>, 나길주<sup>5</sup>, 박철수<sup>6</sup>

<sup>1</sup>삼성서울병원 방사선종양학과, <sup>2</sup>대원대학교 방사선학과,  
<sup>3</sup>대구보건대학 방사선학과, <sup>4</sup>춘해보건대학 방사선학과,  
<sup>5</sup>목포과학대학 방사선학과, <sup>6</sup>한림성심대학교 방사선학과

## 1. 서론

의료용 선형가속기를 이용한 영상유도방사선치료 시 사용하는 콘빔 CT는 치료자세 오차를 확인하는 중요한 수단이지만 피폭선량을 증가 시키는 단점이 있다. 이에 본 연구는 콘빔 CT의 시행주기를 격일로 하는 시나리오를 만들어 유용성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험방법과 결과

콘빔 CT를 이용하여 세기변조방사선치료를 받은 전립선암 환자 9명을 대상으로 실제 치료 시 매일 콘빔 CT로 치료자세 오차를 분석하여 보정한 값을 바탕으로 격일로 콘빔 CT를 시행하는 시나리오를 만들었다. 시나리오에서 콘빔 CT를 시행하지 않은 날의 치료자세 오차 값을 실제 치료 시의 치료중심점에서 이동하여 치료계획시스템(Pinnacle 9.2, Philips, USA)에 적용한 후 실제 치료와 동일한 조건으로 재 치료계획을 수립하였으며, 이를 바탕으로 PTV(Planning Target Volume)와 정상장기의 선량분포를 비교 분석하였다. 또한 콘빔 CT로 인한 피폭선량을 측정하였다.

매일 콘빔 CT를 시행하였을 때의 치료자세 오차 값을 기준으로 격일로 콘빔 CT를 시행하는 시나리오에서는 X, Y, Z축으로 각각  $0.2 \pm 0.73$  mm,  $0.1 \pm 0.58$  mm,  $-1.3 \pm 1.17$  mm( $p < 0.03$ ) 차이가 나타났다. 이를 치료계획에 적용하여 재 치료계획을 수립하여 선량분포를 평가한 결과는 매일 콘빔 CT를 시행한 결과와 비교하여 PTV의 Dmean : -0.17 Gy, D<sub>99%</sub> : -0.71 Gy, 차이가 나타났다. 정상 장기는 직장 벽의 V<sub>66</sub>: 1.55%, 방광의 V<sub>66</sub> : -0.76% 차이가 나타났다. 콘빔 CT로 인한 피폭선량은 평균 22.28 mGy로 측정되었다.

## 3. 고찰

격일로 콘빔 CT를 시행하였을 경우 선량분포 차이는 약 ±2% 이내이며, 콘빔 CT에 의한 피폭선량은 311.95mGy 감소시키고 촬영으로 인한 추가적인 치료시간을 줄여 줄 수 있다.

## 4. 결론

PTV, 정상장기의 선량분포의 차이가 크지 않으므로 환자의 상태의 따라 격일 콘빔 CT의 적용을 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 참고문헌

[1] Chao KS, Wippold FJ, Ozyigit G, et al. Determination and delineation of nodal target volumes for head-and neck cancer based on patterns of failure in patients receiving definitive and postoperative IMRT. Int J Radia Oncol Bio Phys 2002;53:1174-1184  
[2] Michael Pinkawa, Charbel Attiech, Marc D. Piroth, et al. Dose-escalation using intensity-modulated

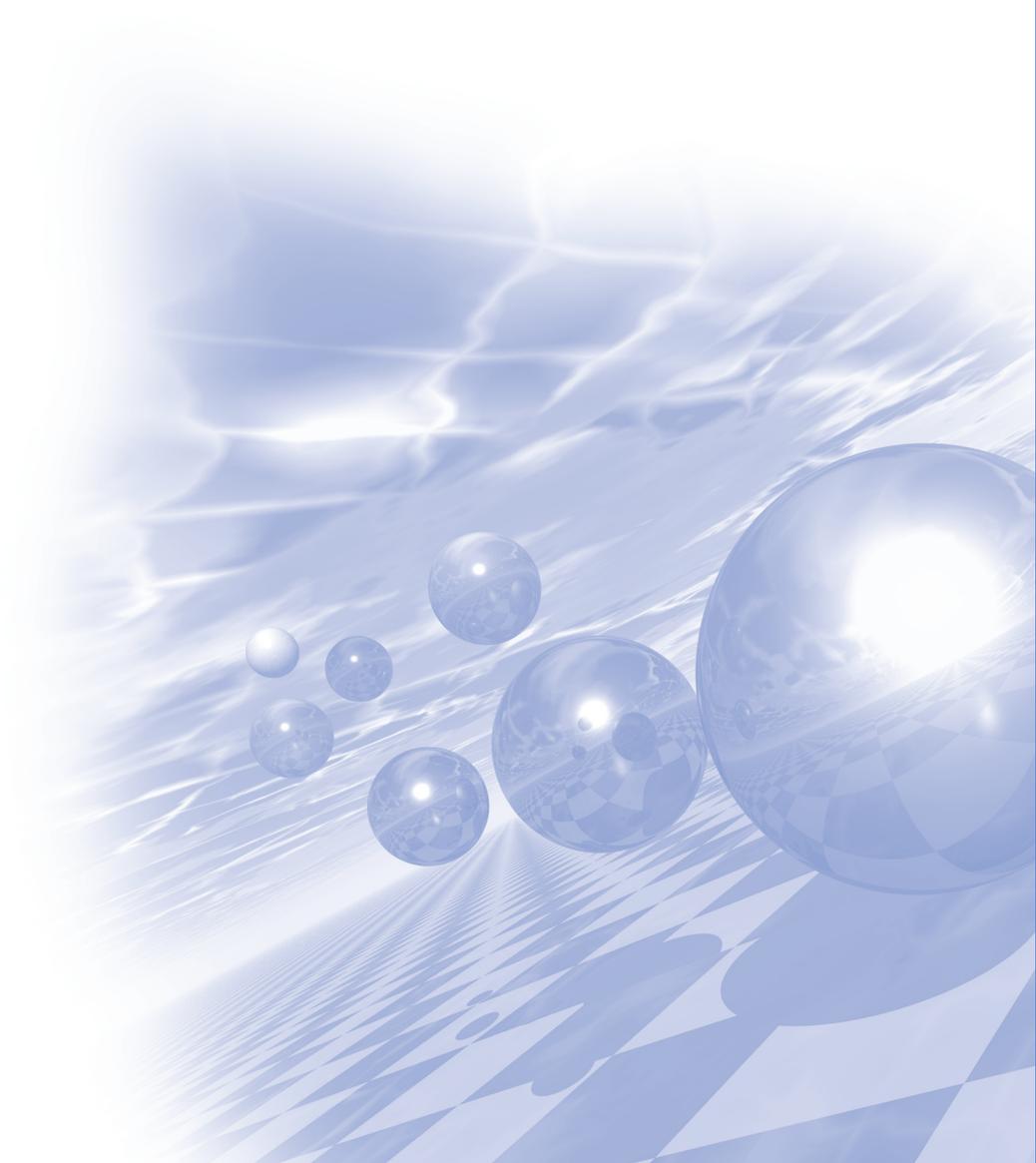
- radiotherapy for prostate cancer Evaluation of the dose distribution with and without 18F-choline PET-CT detected simultaneous integrated boost. *Radiother and Oncol* 2009;93:213-4
- [3] Convery DJ, Rosenbloom ME. The generation of intensity-modulated fields for conformal radiotherapy by dynamic collimation. *Med Phys* 1992;37:1359-1379
- [4] Cheong KH, Suh TS, Cho BC, et al. Analysis of uncertainties due to digitally reconstructed radiographic (DRR) image quality in 2D- 2D matching between DRRs and kV X-ray images from the On-Board Imager (OBI). *Korean J Med Phys* 2006;17:67-76
- [5] Michael J. Zelefsky, Marisa Kollmeier, Brett Cox, et al. Improved clinical outcomes with non-IGRT for the treatment of clinically localized prostate cancer. *Int J Radia Oncol Bio Phys* 2012;84:125-9
- [6] Monica W. K. Kan, M.Phil., Lucillus H. T. Leung, et al. Radiation dose from cone beam computed tomography for image-guided radiation therapy. *Int J Radia Oncol Bio Phys* 2008;70:272-9





**KMS 2015 Summer Conference**

# 포스터발표





# Electronic structure and magnetic properties of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ : A first principles study

Imran Khan<sup>\*</sup>, Jicheol Son, Jisang Hong  
Department of Physics, Pukyong National University

We have studied the electronic structure and magnetic properties of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  by using the full potential linearized augmented plane wave method implemented in Wien2k code. A DFT+U scheme was applied to treat the localized 4f electrons of Nd. It is observed that the antiferromagnet (AFM) configuration between Fe and Nd sublattice is more stable than the ferromagnetic (FM) and the difference between AFM and FM was 940 meV. The total magnetic moment was found to be  $36.48 \mu_B/\text{f.u.}$ , which is in good agreement with the experimentally reported value.

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2013R1A1A2006071) and by the Supercomputing Center/Korea Institute of Science and Technology Information with supercomputing resources including technical support (KSC-2014-C3-071)

# Switching current density for spin transfer torque magnetic random access memory with Dzyaloshinskii-Moriya Interaction

Kyungmi Song<sup>1,\*</sup>, Kyung-Jin Lee<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 136-701, KOREA

<sup>2</sup>Dept. of Mater. Sci. and Eng., Korea University, Seoul 136-701, KOREA

## 1. Introduction

The Dzyaloshinskii-Moriya(DM) interaction [1],[2] has been attracted a lot of attention because of its interesting chiral physics. It is especially strong at the interface between a ferromagnet and a metal with strong spin-orbit coupling.

Examining the critical current density of magnetization switching in nanofilm magnets with perpendicular magnetic anisotropy is also important because current consumption of magnetic random access memory(MRAM), the most promising next generation memory[3], is determined by this critical current density.

In this work, we calculate the critical current density based on numerical work using the Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG) equation. We estimate two cases (with and without DM interaction). Then we investigate the switching current density of a non-uniform switching in these nanomagnets for various cell diameter and DM interactions.

We find that the switching current density depends not only on the cell size but also on the DMI when the switching is governed by the domain wall nucleation.

## 2. Modeling Scheme

Using the LLG equation, we numerically calculate the switching current density. We use the following parameters for numerical calculation : the perpendicular magnetic anisotropy density  $K_u$  is  $1 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ , the saturation magnetization is  $1000 \text{ emu/cm}^3$ , and the free-layer thickness  $t$  is  $1.0 \text{ nm}$ . We use the exchange stiffness constant  $A_{ex}$  of  $1 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ . We also vary the DMI constant  $D$ , the cell diameter  $L$  and an applied current density. We also assume that there is no external field and zero temperature. Commonly, STT-MRAM shows uniform single domain switching for a small cell and domain wall switching for a large cell. We find a clear formation of a domain wall for large cells during the switching.

## 3. Result and Discussion

We obtain results that the switching current changes with the cell size and DMI constants. We find that the single domain switching occurs for the cell diameter smaller than  $20 \text{ nm}$  whereas the domain wall switching occurs otherwise. An interesting feature is that the critical current is increased with decreasing the cell size.

We also compare the switching current density not only for the cell size but also DMI constant. When the cell size is small, the current density for switching is increased. Moreover, for non-zero DMI case, the switching current density increases for large DMI constants. We attribute this phenomenon to the chiral symmetry and

stability for the cases with non-zero DMI.

We will show more detail all about the switching current at the system with DM interaction.

#### **4. Summary**

We investigate the switching current for various cell diameters and DM interaction. We find that the current density for switching can depend strongly on the cell size when the switching is governed by the domain wall motion. Moreover the switching current density is also strongly influenced by DM interaction. In the presentation, we will discuss the effect of domain wall formation and more various DMI constant on the switching current density in detail.

#### **5. Acknowledgments**

This work was supported by the NRF (2011-0028163, NRF-2013R1A2A2A01013188), Pioneer Research Centre Program (NRF-2011-0027906), and Human Resources Development Program, MKE/KETEP (No. 20124030200120).

#### **6. References**

- [1] I. Dzyaloshinskii, "A thermodynamic theory of 'weak' ferromagnetism of antiferromagnetics", *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 4, no. 4, pp. 241-255, 1958.
- [2] T. Moriya, "Anisotropic superexchange interaction and weak ferromagnetism", *Phys. Rev.*, vol. 120, no. 1, pp. 91-98, 1960.
- [3] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno, "A perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction", *Nature Materials*, vol.9, 721-724 (2010)

# 자기 소용돌이 핵의 동적 거동에 따른 변형과 분리

한희성<sup>1,\*</sup>, 이수석<sup>1</sup>, 임미영<sup>2,3</sup>, 홍정일<sup>3</sup>, Peter Fischer<sup>2</sup>, 이기석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술대학교 신소재공학부

<sup>2</sup>Center for X-ray Optics, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA94720, USA

<sup>3</sup>대구경북과학기술원 신물질과학전공

## 1. 서론

자기소용돌이 핵의 구조는 매우 단단한 구조로 임계 속도 이하에서는 회전운동과 같은 동적 거동에 의해서 잘 변형이 되지 않는다고 알려져 왔다. 그러나 최근 원판형 박막의 두께가 증가하면 자기소용돌이의 깊이에 따른 형상이 운동에 의해 변형이 일어나고 이에 따라 고유진동수의 변화가 유발될 수 있다는 것이 밝혀졌다 [1],[2]. 본 연구에서는 두꺼운 시편에서 자기 소용돌이 핵의 구조가 회전운동에 따라 어떠한 변형을 가져올 수 있는지 미소자기학 전산모사를 통하여 관찰 하였다.

## 2. 연구 방법

원판형 퍼말로이( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) 자성 박막 내에서 자기소용돌이의 동적 거동을 전산모사하기 위하여 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 방정식을 기반으로 하는 mumax<sup>3</sup>[3]를 사용하였다. 물질상수는 다음과 같이 퍼말로이의 상수를 이용하였다. 포화 자화값( $M_s$ ) : 860kA/m, 고유 감쇠상수 ( $\alpha$ ) : 0.01, 교환 상수 ( $A_{ex}$ ) : 13pJ/m. 두께에 따른 자기소용돌이 핵의 3차원적 동적 거동을 관찰하기 위하여 지름은 300nm로 고정하였으며, 두께를 40nm에서 100nm까지 변화를 주었다. 셀 사이즈는  $2 \times 2 \times 5 \text{ nm}^3$ 로 설정하였다. 박막면의 위 방향으로 형성된 자기소용돌이 핵의 공명 회전 운동을 여기시키기 위하여 반시계 방향으로 회전하는 자기장을 주어진 형상의 원판 자성 박막에 형성된 자기소용돌이의 고유회전 진동수와 동일하게 맞추어 인가하였다.

## 3. 결과 및 논의

지름 300nm 두께가 50nm 이하인 원판형 박막에 회전하는 자기장을 인가하는 경우, 적절한 세기의 자기장에서는 자기소용돌이 핵이 안정한 회전 운동을 하였으며 이 때 핵의 구조는 거의 변형되지 않은 형태로 잘 회전하였으나 자기장의 세기가 세지면 자기 소용돌이 핵의 회전운동속도가 임계속도에 도달하여 자기 소용돌이 핵이 자기소용돌이-반소용돌이 쌍의 생성 소멸을 거쳐 반전되었다[4]. 하지만, 두께가 80nm 이상일 경우 앞에서 설명한 바와 같은 자기 소용돌이 핵의 반전현상이 나타나지 않았다. 또한 적절한 세기의 자기장 하에서의 회전운동에서도 차이가 생겼다. 정상상태일 때 깊이에 따라서 소용돌이 핵의 위상과 회전반경이 차이가 생겨났다. 또한 자기장의 세기가 클 경우(두께 100nm의 경우 450e정도), 시간에 따라 회전 반경과 위상이 일정하지 않은 움직임을 보여주었으며 자기장의 세기가 더 증가(두께 100nm의 경우, 자기장의 세기가 500e 이상)하면, 앞서 살펴보았던 자기소용돌이 핵의 반전현상이 나타나지 않고 그림 1과 같이 핵의 변형이 커지다가 부분적으로 분리되는 현상이 관찰되었다. 또한 부분적으로 분리된 작은 링 형태의 자기구조는 안정하지 못하고 가장자리로 이동하여 경계면에 도달하면 바로 소멸하게 되었다. 그리고 소멸의 순간 자기소용돌이-반소용돌이의 소멸과 유사한 스핀파가 발생되었다.

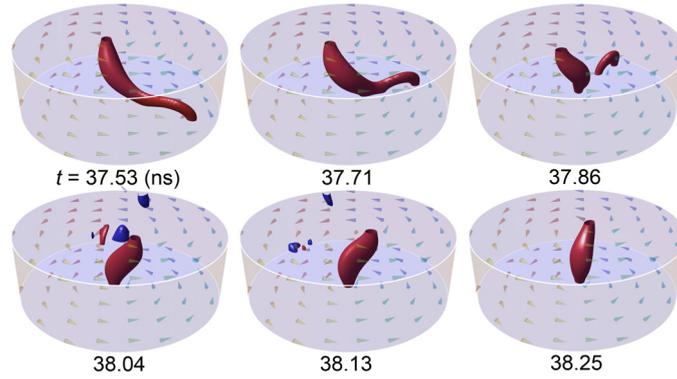


그림 1. 자기 소용돌이 핵의 분리 현상. 빨간색(파란색)은  $m_z = +0.7(-0.7)$ 인 부분을 보여준다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 원판형 박막의 두께가 두꺼워지면, 자기 소용돌이 핵의 구조는 안정하지 않고 변형이 일어날 수 있으며, 이로 인해 속도가 임계점에 도달했을 때, 발생한다고 여겨졌던 핵의 동적 반전현상도 일어나지 않고 핵의 일부분이 표면에서부터 분리 소멸된다는 것을 밝혀내었다. 이는 자기 소용돌이 핵 반전을 이용한 메모리 및 정보 처리소자 개발에 주의점을 제공해 줄 뿐 아니라, 분리된 자기소용돌이 핵이 원판형 박막의 가장자리에 부딪힘으로 인해 발생하는 스핀파동을 이용하여 신개념 스핀파동 생성기에 대한 가능성을 제시한다.

#### 5. 참고문헌

- [1] J. Ding et al., Scientific Reports. 4, 4796 (2014)
- [2] G. Lv et al., Appl. Phys. Lett. 103, 252404 (2013)
- [3] A. Vansteenkiste et al., AIP Advances. 4, 107133 (2014)
- [4] K. -S. Lee et al., Phys. Rev. Lett. 101, 267206

# Nd-Fe-B-Co-Cu-Al-Nb-X계 희토류 영구자석 합금 flake 제조 및 자기적 특성

김상욱<sup>1,\*</sup>, 주신용<sup>1</sup>, 전병서<sup>2</sup>, 오윤석<sup>2</sup>, 이영주<sup>2</sup>, 송창빈<sup>†</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 신소재공학부

<sup>2</sup>포항산업과학연구원

## 1. 서론

고성능 희토류계 영구자석은 각종 소형 모터, 휴대폰, actuator 및 센서 물론, 첨단 의료기기 등의 핵심적인 부품소재뿐만 아니라, 최근 친환경/에너지 절약형 자동차로 화두가 되고 있는 하이브리드 자동차(HEV)/전기자동차(EV)/풍력발전 등의 핵심적인 부품으로서 그 수요량이 증가함과 동시에 제품의 고성능화/경량화/소형화를 위해 보다 우수한 자기적 특성이 요구되는 상황이다.

따라서 본 연구는 희토류 영구자석의 특성 향상에 관한 연구의 일환으로, 본 연구실에서 새롭게 설계 및 제작된 수평식 냉각롤에 의한 RSP장치를 이용하여 Nd-Fe-B-Co-Cu-Al-Nb-X(X=Si,Zr,Ga,Gd,Cr,Mn,Ti,V,W)계 영구자석 합금 flake를 제조하였으며, 제조된 합금 flake를 HDDR 처리하여 미세조직 변화 및 자기적 특성을 조사하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 합금 flake를 제조하기 위해 시약급 Nd(3N), Fe(3N), Co(3N), FeB(15wt%, 3N), Nb, Zr, Ga, Gd, Si, W, Cu, Ti, Cr, Mn을 사용하였다. 1회 용해 시 합금은 이론적 화학조성에 따라 총량 200g을 준비하였다. 합금 용해 시 도가니는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>제를 사용하였으며, 노즐은 BN제로 노즐구의 직경은 φ2.5mm로 가공하여 사용하였다. 냉각롤의 회전속도는 7m/s으로 고정하여 실험하였으며, 제조된 합금 스트립은 815℃에서 H<sub>2</sub>를 100cc/min로 흘려 보내면서 50min동안 HD처리 후, 동일한 온도에서 진공(2.5×10<sup>-4</sup>torr)으로 60min동안 DR처리한 후 상온으로 냉각하였다. 제조된 합금 flake의 HDDR처리 전·후의 상변화는 XRD(Cu-Kα, Rigaku DMAX 2000)를 이용하여 분석하였으며, 미세조직은 SEM/EDS를 이용하여 관찰하였으며, 자기적 특성은 VSM (Tamakawa TM-VSM2130HGC)을 사용하여 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 본 연구에서 제조된 Nd-Fe-B-Co-Cu-Al-Nb-X(X=Si,Zr,Ga,Gd,Cr,Mn,Ti,V,W)계 영구자석 합금 flake를 HDDR처리 후, VSM으로 자기적 특성을 측정한 결과이다. 잔류자화(Mr) 값은 Ga를 첨가한 합금 flake에서 55.14emu/g로 다른 합금 시료에 비해 가장 높은 값이 얻어졌으며, 또한 보자력(iHc)의 경우는 Cr을 첨가한 시료가 10,440Oe로 다른 시료보다 가장 높을 뿐만 아니라, Nd<sub>15</sub>Fe<sub>77</sub>B<sub>8</sub>보다 약 22%정도 높은 값이 얻어졌다. 그 밖에 실험결과는 발표 당일 보고한다.

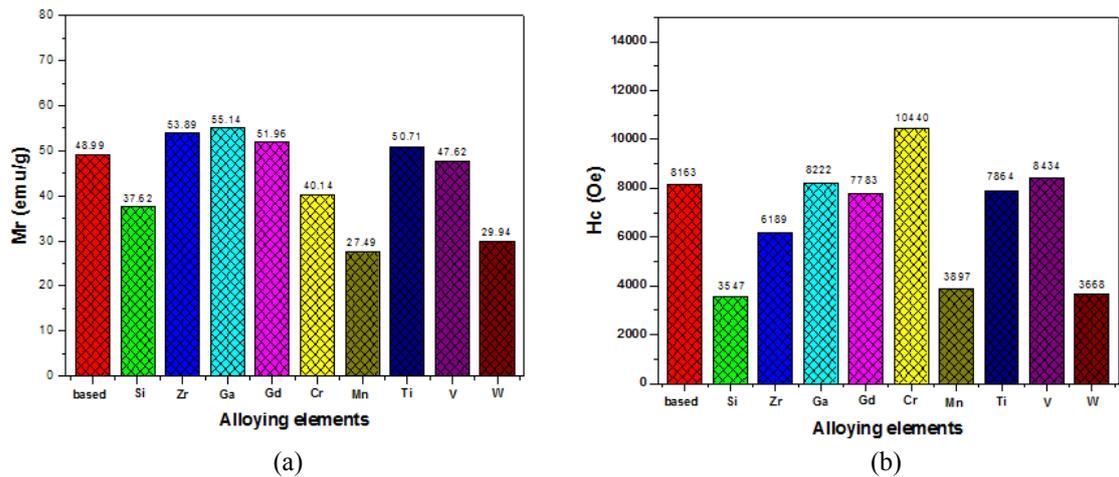


Fig.1. Comparisons of magnetic properties of Nd-Fe-B-Co-Cu-Al-Nb-X system alloy flakes after HD treatment at 815°C for 50min and secondly DR treated at 815°C for 60min; (a) residual magnetization, (b) coercive force.

#### 4. 결론

본 연구는 Nd-Fe-B계 희토류자석의 제조 및 물성 향상에 관한 기초연구로서, RSP장치를 이용하여 Nd-Fe-B-Co-Cu-Al-Nb-X계 합금 flake 제조 및 자기적 특성을 조사하였다. 제조된 합금 flake는 HDDR처리하여 VSM으로 자기적 특성을 측정된 결과, Ga를 첨가한 합금 스트립이 가장 높은 잔류자화(Mr)값을 나타냈지만, 보자력(iHc)은 Cr을 첨가한 합금 flake가 가장 높은 값이 얻어졌다.

#### 5. 참고문헌

- [1] L. Yang: Proceeding of the 19th International Work-shop on HPMA and their Application, (2006) 231.
- [2] W. F. Miao, J. Ding, P. G. McCormick, and R. Street, J. Appl. Phys. 79, 2079 (1996).

# 강자성체의 자기적 특성을 고려한 탈자 기법 연구

임상현<sup>1,\*</sup>, 주혜선<sup>1</sup>, 정동욱<sup>1</sup>, 박관수<sup>1</sup>

<sup>1</sup>부산대학교

## 1. 서론

자성체는 보자력과 투자율과 같은 자기적인 특성을 가진다. 이러한 자기적인 특성을 제거하는 기술을 탈자라고 한다. 이러한 탈자는 다양한 분야에서 사용되고, 특히 국방 연구분야에서 주로 다루어진다. 꾸준히 함정에서 발생하는 수중 자기장을 이용한 기뢰, 어뢰, 대잠 초계기 등 의 무기들이 발달해오고 있고, 이와 더불어 이를 회피하기 위한 탈자 연구의 중요성이 부각되고 있다.

현재 세계적으로 사용되고 있는 탈자 기법으로는 Anhysteretic Deperm, Deperm-ME, Flash-D이 있지만 이는 이론적인 증명보다는 선진국에서의 실험과 경험에 의존한 기법들로, 대상체의 자기적 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다. 또한 각각의 기법들에 대한 장점 및 단점이 뚜렷하게 증명되지 않았기 때문에 탈자 기법의 선택에 있어서도 어려움이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 자성체의 자기적 특성을 이용하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 Anhysteretic Deperm과 Deperm-ME를 통한 자성체 내부의 자화량을 분석하여 두 탈자 기법에 대한 비교 분석을 수행하였다.

## 2. 실험방법과 결과

본 연구에서 사용한 해석 프로그램은 2D simulation tool로써, 3D 대상체의 시뮬레이션 해석값을 보상할 수 있는 scale factor를 고려하고 탈자 과정에서 전류가 변화함에 따라 변화하는 히스테리시스 특성을 반영하여 해석하였다. 자세한 탈자 해석 과정은 다음과 같다.

- 1) 탈자 대상체를 탈자시키기 위한 X축 솔레노이드 코일과 탈자 대상체를 설계한다.
- 2) 탈자를 하기에 앞서, 먼저 솔레노이드에 착자 전류를 인가하고 2차원 유한요소 해석을 수행한 후 수평방향의  $M_x$ 의 분포를 비교한다.
- 3) 각각의 탈자 기법에 따른 전류 값을 계산하고, 이를 솔레노이드에 인가하여 해석한다. 탈자 전류에 따른 교번 자기장이 탈자 대상체의 수평방향으로 인가되면, Preisach 평면상의 자기이력궤적이 남고 이를 이용하여  $M_x$ 을 계산한다.
- 4) 탈자 후 각 탈자 기법의 결과를 비교하기 위하여 탈자 대상체로부터 수직방향으로 16cm 떨어진 지점에서 수평, 수직 방향의 자기장  $B_x$ ,  $B_z$ 를 측정하여 비교한다.

Anhysteretic Deperm, Deperm-ME 두 가지 방법에 대하여 초기 인가 자기장을 4000A/m로 똑같이 인가하였고, 최종 B의 값은 [표 1]같은 결과가 나온 것을 확인할 수 있었다.

	$B_x [\mu T]$	$B_z [\mu T]$
Anhysteretic Deperm	2.75	2.09
Deperm-ME	0.949	0.725

[표 1] 두 가지 탈자 방법에 따른 최종 자기장 비교

그리고 각각의 탈자 기법에 사용된 전류값들과 이에 따라 발생하는 전체 자기장의 분포를 그림 1과 그림 2에서 나타내었다.

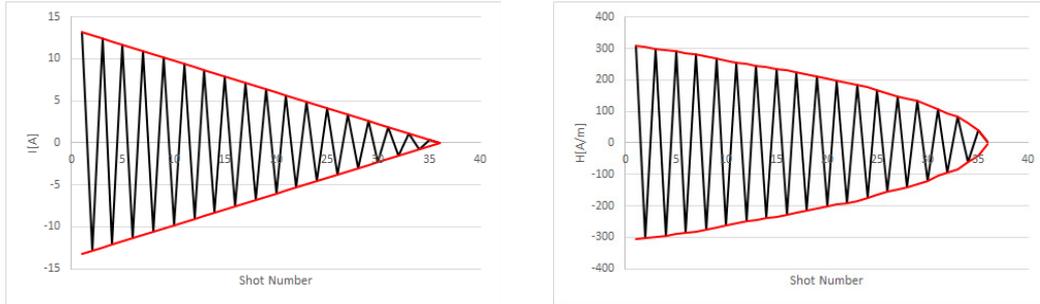


그림 1. Anhyseretic Deperm 탈자 전류 및 최종 자기장 세기

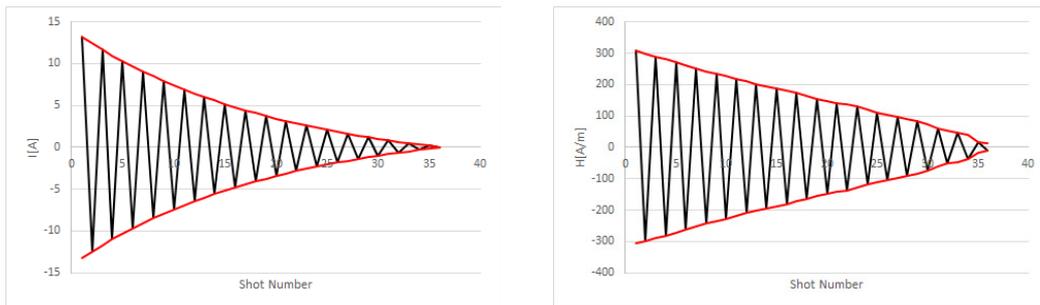


그림 2. Deperm-ME 탈자 전류 및 최종 자기장 세기

### 3. 고찰

Anhyseretic Deperm의 경우 전류를 선형적으로 감소시키지만 자기장은 곡선의 형태로 감소하는 것을 확인할 수 있고, Deperm-ME는 반대로 전류는 곡선의 형태로 감소시키지만 자기장은 선형적으로 감소하는 것을 확인하였다. 이는 탈자 대상체에서 발생하는 반자장의 영향으로 인한 결과로 예상된다.

### 4. 결론

본 논문에서는 Anhyseretic Deperm과 Deperm-ME 기법을 이용한 탈자의 효율성에 대하여 나타내었다. 실험을 통하여 최종적으로 Deperm-ME의 효율이 더 높은 것을 확인할 수 있었으므로 앞으로는 Deperm-ME의 사용이 더 유용할 것으로 예상된다. 또한 위의 결과와 더불어 반자장 및 Shot 수와 같은 변수들과의 결과의 상관관계에 대한 연구가 시행되어진다면 더욱 효율적인 탈자 기법을 확립할 수 있을 것이다.

### 5. 참고문헌

- [1] H. Won, H. S. Ju, S. Park and G. S. Park, IEEE Trans. Magn. 49(5), 2045 (2013).
- [2] 한국자기학회, 한국자기학회 학술연구발표회 논문개요집, 2014.5, 132-133 (2 pages)

# Effect of magnetic anisotropy gradient on current-induced skyrmion dynamics in a nanowire

Seung-Jae Lee<sup>1,\*</sup>, Kyung-Jin Lee<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul, Korea

## 1. Introduction

In magnetic systems with an inversion asymmetry and large spin-orbit coupling, the anti-symmetric exchange interaction called the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) becomes non-negligible[1,2]. It was predicted theoretically that the DMI is partially responsible for the formation of the magnetic skyrmion[3]. Recently, nano-sized skyrmions are expected to have potential as information unit for spintronics devices [4,5]. However, current driven skyrmion motion has threshold current density corresponding to the edge barrier force [6]. In this work, we investigate threshold current density of skyrmion in a nanowire, By changing perpendicular magnetocrystalline anisotropy constant in edge( $K_{u,edge}$ ).

## 2. Simulation Scheme

We investigate threshold current density and velocity of skyrmion using Landau-Lifshitz-Gilbert equation with an Slonczewski-like spin-orbit spin transfer torque with current density and anisotropy constant in edge( $K_{u,edge}$ ) as variables. We assume the anisotropy constant change linearly within 10 cells from the edge of nanowire. We use following parameters; nanowire width is 80 nm, thickness is 1 nm, cell size is  $1 \times 1 \times 1 \text{ nm}^3$ , saturation magnetization is  $800 \text{ emu/cm}^3$ , damping constant is 0.05, exchange stiffness constant is  $1.2 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ , DM constant is  $2 \text{ erg/cm}^2$ , spin hall angle is 0.4, perpendicular magnetocrystalline anisotropy  $K_u$  is  $0.8 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ .

## 3. Result and Discussion

Figure 1 shows threshold current density and maximum velocity of skyrmion can be increased when the  $K_{u,edge}$  is much smaller than  $K_u$ . This behavior can be understood by the confinement effect originating from the DMI for a finite magnetic system. In case of  $K_{u,edge}$  is small, the magnetization vectors in edge are aligned with normal vector of nanowire.

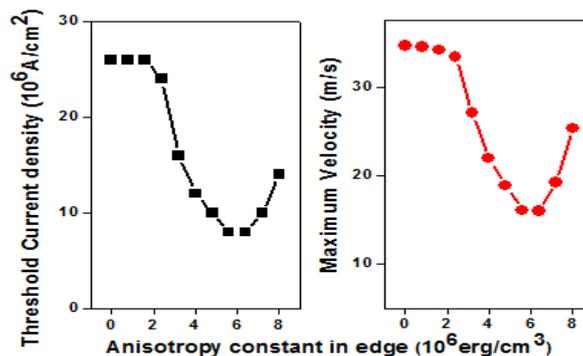


Fig. 1. Threshold current density versus perpendicular magnetocrystalline anisotropy constant in edge.

Therefore, we attribute the increasing threshold current density to abrupt change of magnetization that make strong repulsive force between skyrmion and nanowire edge.

## 5. References

- [1] I. E. Dzyaloshinskii, Sov. Phys. JETP 5, 1259 (1957)
- [2] T. Moriya, Phys. Rev. 120, 91 (1960)
- [3] U. K. Rößler, A. N. Bogdanov and C.Pfleiderer, Nature 442, 797 (2006)
- [4] A. Fert, V. Cros & J. Sampaio, Nature Nanotechnology 8, 152–156 (2013)
- [5] R. Tomasello *et al.*, Sci. Rep. 4. 6784 (2014).
- [6] M. E. Knoester, Jairo Sinova, and R. A. Duine, Phys. Rev. B 89, 064425 (2014)

# 강자성 공명 스핀 펌핑 전압의 이력현상 분석

김상일<sup>1,2,\*</sup>, 서민수<sup>2</sup>, 최연석<sup>2</sup>, 조영훈<sup>2</sup>, 박승영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교, 신소재공학부

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원, 스핀공학물리연구팀

## 1. 서론

전하 전류를 스핀 전류로 변환하는 스핀 홀 효과는 스핀트로닉스 응용 연구 분야에서 효율적인 전자스핀 제어를 위해 활발한 연구가 이루어지고 있다[1]. 일반적으로 스핀 홀 효과는 스핀-궤도 결합 크기와 연관된 물질 상수(전하-스핀 변환 효율:  $\theta_{SH}$ )로 수량화 된다[2]. 스핀 홀 효과의 폭 넓은 이해와 새로운 스핀트로닉스 소자의 응용 측면에서  $\theta_{SH}$ 의 정확한 계측은 대단히 중요하다. 강자성/비자성 이중 접합 시료에서 강자성 공명조건 하에 스핀 펌핑된 스핀 전류는 비자성 층 내부에서 역 스핀 홀 효과에 기인한 전하 전류로 변환된다. 이러한 직류 전압 측정을 통해 비자성 물질의  $\theta_{SH}$ 값을 얻을 수 있다. 그러나 이때 측정되는 직류 전압에는 스핀 정류 효과(이방성 자기 저항 혹은 비정상적인 홀 효과)에 의한 원치 않는 직류 전압도 함께 측정되므로 순수한 역 스핀 홀 효과로부터 생성되는 전압 측정에 어려움이 따른다[3-6]. 또한 한 물질에서 얻어지는  $\theta_{SH}$ 값이 시료의 두께, 기관의 종류, 공명기 모드, 자기장 주사 방향 등에 따라 상이한 결과를 보일 수 있어 실험 설계의 엄밀함이 요구된다. 본 연구에서는 직류 전압의 이력현상 분석을 통해  $\theta_{SH}$ 값의 적합성을 향상 시켰다.

## 2. 실험방법

역 스핀 홀 효과로부터 생성된 전압의 자기장 주사 방향 의존성을 조사했다. 이를 위해 CoFeB(5nm)/Pt(10nm) 구조의 이중 접합 시료를 TE011 모드 공명기의 정중앙에 위치시키고, 자기장을 양방향(자기장의 증가( $H^+$ ) 혹은 감소( $H^-$ ))으로 순차적으로 인가하여 강자성 공명( $dI/dH$  vs.  $H$ )과 직류 전압( $V$  vs.  $H$ )을 측정했다.

## 3. 실험결과

자기장을 증가 혹은 감소시킴에 따라 그림 1과 같은 비가역적인 공명 곡선과 이에 상응하는 전압 곡선을 얻었다. 이전의 실험 방법들은 자기장을 한 방향으로만 인가한 상태에서 전압을 측정하였지만, 실제로 자기장을 양방향으로 인가함에 따른 이력현상이 나타났다. 그림 1(b)의 전압 곡선을 분석하기 위해 아래의 수식을 사용했다.

$$V_{DC} = V_{ISHE} \frac{\Delta H^2}{(H - H_0)^2 + \Delta H^2} + V_{SRE} \frac{-2\Delta H(H - H_0)}{(H - H_0)^2 + \Delta H^2}$$

측정된 직류 전압에서 첫 번째 항은 역 스핀 홀 효과로부터 발생되고, 두 번째 항은 스핀 정류 효과로부터 발생된다. 여기에서  $H_0$ 는 공명 자기장,  $\Delta H$ 는 강자성 공명 곡선의 선포이다.

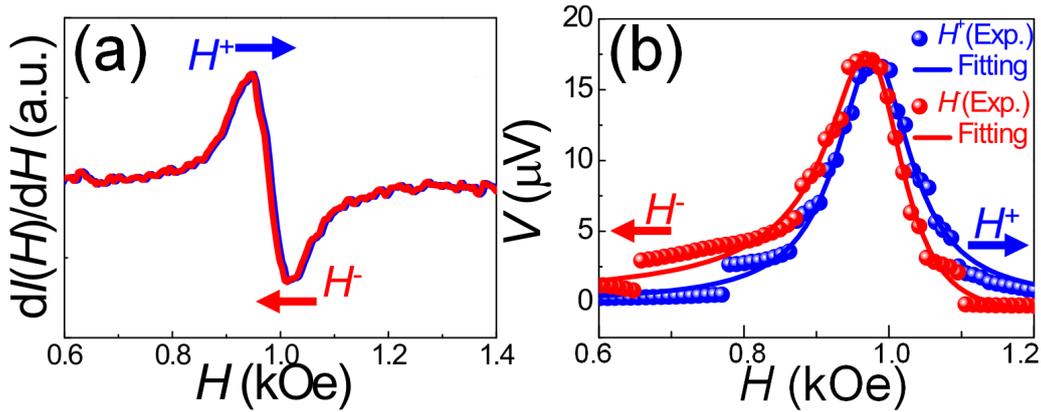


그림 1. Pt 전극을 사용하는 CoFeB 박막에서 자기장 주사 방향에 따른  
(a)강자성 공명과 (b)스핀 펌핑에 의한 전압 출력 곡선

#### 4. 고찰

총 전압( $V_{DC}$ )은 마이크로파 전력에 비례하고, 역 스핀 홀 효과와 스핀 정류 효과로부터 생긴 각각의 전압 ( $V_{ISHE}$ ,  $V_{SRE}$ ) 역시 총 전압의 진폭에 비례한다. 또한  $V_{DC} = R \times V_{ISHE} + (1-R) \times V_{SRE}$ 의 관계식이 성립한다. 자기장 조사 방향에 따른  $V_{ISHE}$ ,  $V_{SRE}$ 의 비율은 서로 상이하나,  $R$ 은 일치하는 결과를 얻었고, 이를 통해  $V_{ISHE}$ ,  $V_{SRE}$ 의 비율 곡선의 기울기를 추출할 수 있었으며, 결과적으로 역 스핀 홀 효과가 전적으로 일어나는 조건( $R = 1$ )에 해당하는 전압( $V_{ISHE} = 17.5 \mu V$ )과  $\theta_{SH} = 0.03$ 값을 얻을 수 있었다.

#### 5. 결론

전압의 이력현상 분석을 통해서 스핀 정류 효과가 억제된 조건( $R = 1$ )하에 품질이 향상된  $\theta_{SH}$ 값( $=0.03$  for Pt)을 얻을 수 있었다.

#### 6. 참고문헌

- [1] E. Saitoh et al., Appl. Phys. Lett., **88**, 182509 (2006).
- [2] K. Harii et al., J. Appl. Phys., **103**, 07F311 (2008).
- [3] S. Kim et al., J. Appl. Phys., **115**, 17C501 (2014).
- [4] S. Kim et al., J. Appl. Phys., **117**, 17D901 (2015).
- [5] S. Kim et al., Appl. Phys. Lett., **106**, 032409 (2015).
- [6] H. Y. Hung et al., J. Appl. Phys., **113**, 17C507 (2013).

# The Spin dynamic properties on the Pt/CoFeB/Ta structure

Nam-Hui Kim\*, Jaehun Cho, Seung Ku Kang, Se-June Min, Kwonjin Park and Chun-Yeol You

Department of Physics, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

## I. Introduction

The CoFeB is possible candidate materials for the spin-transfer torque magnetic random access memory application due to the large tunneling magneto-resistance (TMR) and perpendicular magnetic anisotropy (PMA). Moreover, the heavy metal(HM)/ferromagnet layer structure is actively studied because they are key structure of the spin-orbit torque phenomena.<sup>1),2)</sup> Especially, the magnetic properties of HM/CoFeB are interesting due to interaction at the interface. In this study, we investigated the magnetic properties of Pt/CoFeB/Ta structure using Brillouin light scattering (BLS).

## II. Experiment

We prepared CoFeB thin film sandwiched by 4-nm Pt and Ta, with various CoFeB thickness (1.0 ~ 2.4 nm) by DC magnetron sputtering system. The magnetic properties of the samples were studied by Brillouin light scattering with a Sandercock (3+3) type Fabry-Perot interferometer.<sup>3),4),5)</sup> The light source is a single frequency 532 nm a DPSS laser with output power of about 300 mW. Back scattering geometry used to observe the light scattered by thermal excitations with an in-plane wavenumber  $q_{\parallel}=1.67 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$  with the angle of incident as  $45^\circ$ . Magnetic field of up to 0.98 T were applied parallel to the film plane and perpendicular to the scattering plane.

## III. Results and Discussion

The dependence of spin waves on the applied field has been used to obtained the surface anisotropy and saturation magnetization with the spin wave frequencies as follow<sup>6)</sup> :

$$f_0 = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{[H\cos\theta - (4\pi M_s - \frac{4k_s}{M_s})\sin^2\theta][H\cos\theta - (4\pi M_s - \frac{4k_s}{M_s})(\cos^2\theta - \sin^2\theta)]}$$

where,  $\gamma$  is the gyromagnetic ratio ( $=2.37 \times 10^{11} \text{ T}^{-1}\text{s}^{-1}$ ),  $\theta$  is the angle between the magnetization and the sample plane,  $k_s$  is the perpendicular uniaxial anisotropy constant,  $H$  is the applied magnetic field,  $M_s$  is the saturation magnetization, respectively. In this equations, the contributions of dipolar field and exchange energy have been neglected for the ultrathin limit.

To determine the magnetic constant, we plot the anisotropy energy density ( $K \times t_{\text{CoFeB}}$ ) as a function of  $t_{\text{CoFeB}}$  in Figure 1. In this plot, we obtain slope and y-cross section, which corresponds to the volume anisotropy and the surface anisotropy, respectively. The obtain  $k_s$  value is  $0.37 \pm 0.04 \text{ mJ/m}^2$  and  $M_s$  is  $15.48 \pm 0.83 \text{ kOe}$ .

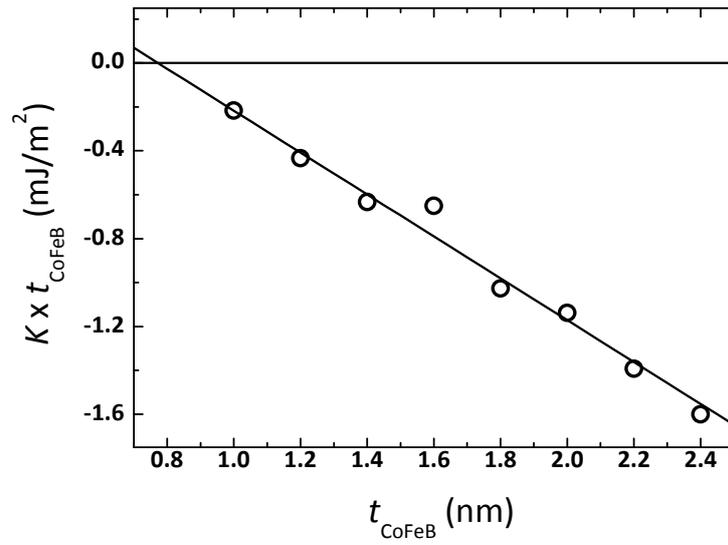


Fig. 1.  $K \times t_{\text{CoFeB}}$  vs  $t_{\text{CoFeB}}$  as a function of CoFeB thickness.

#### IV. References

- [1] Junyeon Kim, *et. al.*, Nat. Mat. 12, 240 (2013)
- [2] Ioan Mihai Miron, *et. al.*, Nat. Mat. 9, 230 (2010)
- [3] J. R. Sandercock: in Light Scattering in Solids III, ed by M. Cardona and G. Guntherodt (Springer-Verlag, Berlin, 1982) p. 173.
- [4] Jaehun Cho, *et. al.*, J. Mag. Mag. Mat. 339, 36 (2013).
- [5] Seung-Seok Ha, *et. al.*, Appl. Phys. Lett. 96, 142512 (2010)
- [6] J. R. Dutcher *et. al.*, J. Appl. Phys. 68, 3464 (1988)

# Coercivity Enhancement in Nd-Fe-B-type Hot-pressed Magnet by $\text{RF}_3$ doping

J. Y. Kim<sup>1,\*</sup>, H. W. Kwon<sup>1</sup>, J. G. Lee<sup>2</sup> and J. H. Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pukyong National University, Busan, Republic of Korea 608 739

<sup>2</sup>Korea Institute of Materials Science, Changwon, Republic of Korea 641 831

## I. INTRODUCTION

Having been used as an essential part in the traction motor and generator of the HEV, EV and wind turbine, the Nd-Fe-B-type magnet is exposed to harsh condition of high operating temperature. Ordinary standard Nd-Fe-B-type magnet cannot function properly at the elevated operating temperature because of its insufficient magnetic properties. Smart technique for enhancing coercivity with avoiding the problems is the grain boundary diffusion (GBD) technique. The GBD technique has also been applied to the hot-pressed or die-upset magnet as a means of enhancing coercivity, and various rare earth fluorides ( $\text{RF}_3$ ) have been investigated as a source of rare earth dopant into the flakes. In this study, the coercivity enhancement in Nd-Fe-B-type hot-pressed magnet by  $\text{RF}_3$  doping were investigated.

## II. EXPERIMENTALS

Commercial melt-spun flakes (MQU-F :  $\text{Nd}_{13.6}\text{Fe}_{73.6}\text{Co}_{6.6}\text{Ga}_{0.6}\text{B}_{5.6}$ ) supplied by the Magnequench (Molycorp) were mixed with 1.6 wt%  $\text{RF}_3$  ( $\text{R} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Dy}$ ) and then hot-pressed at the temperature ranging from 610 °C to 810 °C in a vacuum to prepare fully dense hot-pressed magnet. Magnetic characterization was performed using SQUID (max. field = 5 T) and VSM. Microstructure observation and element distribution analysis was performed by SEM equipped with energy dispersive X-ray analysis (EDX). Decomposition of  $\text{RF}_3$  salt was examined by TGA (thermogravimetric analysis) in Ar gas.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 shows the effect of  $\text{RF}_3$ -doping on the coercivity of hot-pressed  $\text{Nd}_{13.6}\text{Fe}_{73.6}\text{Co}_{6.6}\text{Ga}_{0.6}\text{B}_{5.6}$  magnet pressed at different temperatures. Significant coercivity enhancement was achieved in the hot-pressed magnet doped with  $\text{RF}_3$  ( $\text{R} = \text{Dy}, \text{Nd}, \text{Pr}$ ) with respect to the un-doped magnet, and the most profound coercivity enhancement was achieved in the  $\text{DyF}_3$ -doped magnet hot-pressed at 735 °C.  $\text{NdF}_3$ - and  $\text{PrF}_3$ -doping were also beneficial for enhancing coercivity. For the magnets doped with light rare-earth elements using  $\text{RF}_3$  ( $\text{R} = \text{La}, \text{Ce}$ ), while the  $\text{LaF}_3$ -doping appeared to be some beneficial in the magnet hot-pressed below 700 °C the  $\text{CeF}_3$ -doping exhibited no coercivity enhancement. Coercivity of the magnet hot-pressed at high temperature of 810 °C was radically reduced regardless of the doping. Fig. 2 shows the BSE and elemental mapping images of some elements in the  $\text{RF}_3$ -doped magnet hot-pressed at 735 °C. The Fe atoms in the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  phase of the flakes are believed almost certainly not to have migrated actively during the hot-pressing, the estimation of initial width of the added  $\text{RF}_3$  by the width of dark Fe-free region between the flakes. For the  $\text{DyF}_3$ -doped magnet, as can be seen clearly in Fig. 2(a), the initial 5  $\mu\text{m}$  width of added  $\text{DyF}_3$  (see Fe image) was reduced down to 1.5  $\mu\text{m}$  (see BSE and Dy images) after the hot-pressing. It was found that the Dy diffusion-out region in the initial  $\text{DyF}_3$  region was

back-filled with the replaced Nd atoms from neighboring flake (see Nd image in Fig. 2(a)). Although the thickness of the Dy-substituted region near the flake boundary could not be estimated in the BSE and elemental mapping images in Fig. 2(a) the thickness was believed to be a few  $\mu\text{m}$  thick. This thickness was inferred by the analogy with the observation of  $\text{PrF}_3$ -doped magnet in Fig. 2(b). Unlike the BSE image of the  $\text{DyF}_3$ -doped magnet the BSE image of the  $\text{PrF}_3$ -doped magnet clearly showed the Pr-substituted region (dark bands) around the added  $\text{PrF}_3$  band. As the diffusion characteristics of dopant Dy into the flake was considered to be similar to that of the dopant Pr the thickness estimation of the Dy-substituted region near the flake boundary in the  $\text{DyF}_3$ -doped magnet by the analogy with the case of  $\text{PrF}_3$ -doped magnet was more or less reasonable. Although the diffusion of dopant Nd into the flake could not be examined by means of BSE and elemental mapping because the dopant rare earth in this  $\text{NdF}_3$ -doped magnet was the same element as the rare earth in the flakes, it was almost certainly believed that significant self-diffusion of the doped Nd into the neighboring flakes has occurred. Therefore, the significant coercivity enhancement by  $\text{NdF}_3$ -doping was thought to be not to do with the change of anisotropy field of the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  matrix grains. In this region the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  phase grain boundaries may have been restructured by the self-diffusion of dopant Nd.  $\text{PrF}_3$ -doping was also beneficial to enhance coercivity. As can be seen in the BSE and elemental mapping images of Pr and Nd of the Pr-doped magnet shown in Fig. 2(b) the Nd atoms existed even in the region initially occupied only by the added  $\text{PrF}_3$ . This indicated clearly that Pr and Nd atoms have inter-diffused actively, and the substitution of some Nd by the doped Pr in the region along the flake boundaries may have occurred during the hot-pressing. The Pr-substituted region near the added  $\text{PrF}_3$  was observed clearly as dark bands ( $\sim 4 \mu\text{m}$  thick) as can be seen in the BSE image in Fig. 2(b). For the magnets doped with light rare-earth elements using  $\text{RF}_3$  ( $R = \text{La}, \text{Ce}$ ), the  $\text{LaF}_3$ -doping slightly enhanced coercivity in the magnet hot-pressed below  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ . As can be seen in Fig. 2(c), it seemed that active diffusion of the dopant La has not occurred in the  $\text{LaF}_3$ -doped magnet hot-pressed up to  $735 \text{ }^\circ\text{C}$ . The  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  grain boundaries near the flake surface then would have been restructured slightly, and this may have slightly enhanced coercivity. The  $\text{CeF}_3$ -doping showed no influence on the coercivity in the magnet hot-pressed up to  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  but caused radical coercivity reduction in the magnet hot-pressed above  $735 \text{ }^\circ\text{C}$ . As can be seen in Fig. 2(d), diffusion of the doped Ce into the neighboring flakes has occurred actively in the magnet hot-pressed at  $735 \text{ }^\circ\text{C}$ . The Ce substitution may have reduced the anisotropy field of the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -type grains in the region near the surface of the flakes. The radical coercivity reduction in the  $\text{LaF}_3$ - and  $\text{CeF}_3$ -doped magnets hot-pressed at high temperature of  $810 \text{ }^\circ\text{C}$  may be attributed to the reduced anisotropy field of the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -type grains by the light rare earth substitution in the region near the flake surface.

#### IV. CONCLUSION

In the  $\text{RF}_3$  ( $R = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Dy}$ )-doped magnet hot-pressed at modest temperature ( $735 \text{ }^\circ\text{C}$ ) the dopant Ce, Pr, Nd and Dy actively substituted Nd in the region near the flake surface to form thin shell in the flake.  $\text{RF}_3$  ( $R = \text{Dy}, \text{Nd}, \text{Pr}$ )-doping achieved significant coercivity enhancement and it was attributed to the enhanced anisotropy field of the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -type grains (for Dy-, Pr-doping) and grain boundary restructuring (for Nd-doping) in the shell. The most profound coercivity enhancement as high as  $5 \text{ kOe}$  was achieved in the  $\text{DyF}_3$ -doped magnet. Doping with the light rare-earth elements using  $\text{RF}_3$  ( $R = \text{La}, \text{Ce}$ ) led to poor coercivity enhancement with respect to the  $\text{RF}_3$  ( $R = \text{Dy}, \text{Nd}, \text{Pr}$ )-doping.

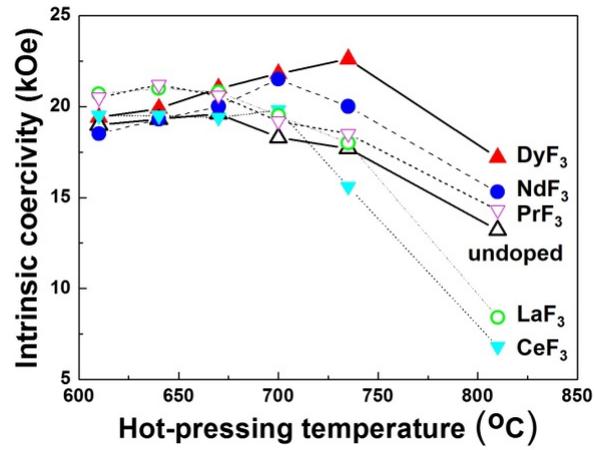


Fig. 1. Effect of  $RF_3$  doping on the coercivity of hot-pressed magnet pressed at different temperatures.

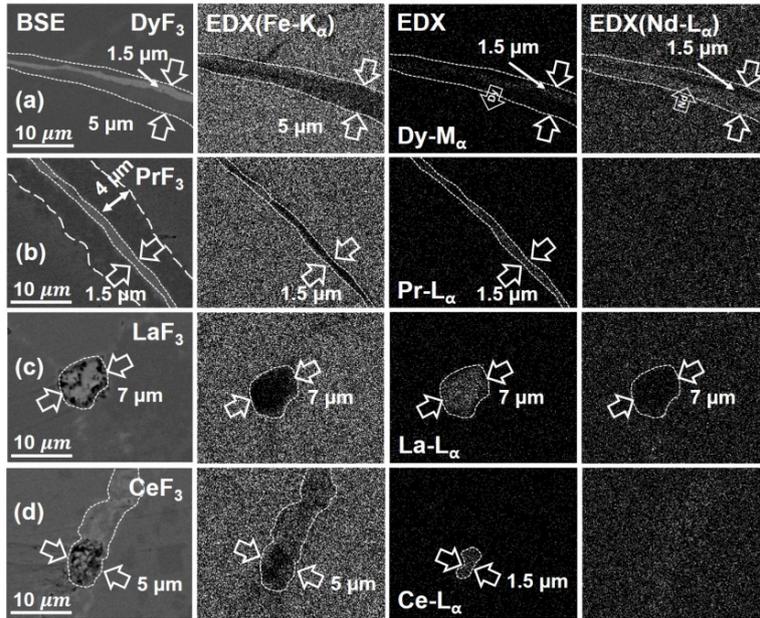


Fig. 2. BSE and elemental mapping of the  $RF_3$  ( $R = Dy, Pr, La, Ce$ )-doped magnets hot-pressed at 735 °C

# Magnetic Properties of MnBi Bulk Magnets with High-Portion Low-Temperature-Phase

Sumin Kim<sup>\*</sup>, Hongjae Moon, Hwaebong Jung, Hyun-Sook Lee, and Wooyoung Lee<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup>E-mail: wooyoung@yonsei.ac.kr

LTP-MnBi [1] is well-known to exhibit a larger anisotropy field with increasing temperature, resulting in a higher coercivity ( $H_c$ ) at elevated temperature, as compared with the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  magnet. Hence, it is a potential candidate for high-temperature applications for use in the electric motors of EVs and renewable power generators. In order to achieve MnBi bulk magnets with high magnetic performance, synthesis process of anisotropic precursor powders is a key. For the synthesis, ingots of MnBi with various Mn and Bi contents were prepared by arc-melting and melt spun at a wheel speed of 55 m/s. And then an annealing process was carried out at 300°C for 40 h to make LTP-MnBi. XRD results indicate that the ingot prepared with 5wt.% excess Mn produces high fraction of LTP-MnBi (95.1wt.%). Low-energy planetary ball milling was employed with various mill times to produce highly anisotropic MnBi powders and magnetic separation method was added to increase the amount of pure LTP-MnBi. The LTP-MnBi bulk magnets were fabricated by utilizing magnetic pressing and hot compaction[2,3]. The bulk magnets show different magnetic properties with depending on the mill time. As the milling time increases,  $iH_c$  increases while remanence ( $B_r$ ) and maximum energy product ( $(\text{BH})_{\text{max}}$ ) decrease: (i)  $iH_c = 5.60$  kOe,  $B_r = 6.00$  kG, and  $(\text{BH})_{\text{max}} = 7.27$  MGOe for 1 h, (ii)  $iH_c = 6.70$  kOe,  $B_r = 5.63$  kG, and  $(\text{BH})_{\text{max}} = 6.92$  MGOe for 2 h, (iii)  $iH_c = 7.30$  kOe,  $B_r = 5.51$  kG, and  $(\text{BH})_{\text{max}} = 6.49$  MGOe for 2.5 h. Increase of coercivity can be due to the decrease of grain size reaching toward a critical single domain diameter. The reduction of remanence leading to the lowered  $(\text{BH})_{\text{max}}$  arises from the loss of main pure LTP-MnBi(defects and microstructural changes) during the low-energy milling. However, it is noteworthy that our synthesis process for 1 h milling gives rise to the higher  $(\text{BH})_{\text{max}} = 7.27$  MGOe.

[1] T. Chen and W. E. Stutis, IEEE Trans. Magn, 10, 581-586 (1974).

[2] N V Rama Rao, A M Gabay and G C Hadjipanayis, J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 062001

[3] J. Cui, et. al., J. Phys.: Condens. Matter 26 (2014) 064212

# Magnetic and Microstructural Properties of MnBi Films

Hongjae Moon<sup>\*</sup>, Sumin Kim, Hwaebong Jung, Hyun-Sook Lee, and Wooyoung Lee<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University,

262 Seongsanno, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

<sup>†</sup>E-mail: wooyoung@yonsei.ac.kr

Low-temperature phase (LTP) of MnBi has attracted much attention due to its larger coercivity than that of Nd-Fe-B at high temperature [1]. Moreover, according to the theory of exchange-coupled core-shell magnet, when the LTP-MnBi is used as a hard magnetic core and combined with soft magnetic shell, the maximum energy product  $(BH)_{\max}$  is estimated to overcome that of Nd-Fe-B. In this regards, there have been many efforts [2] to obtain the LTP-MnBi thin films for the exchange-coupled magnets. Here, we present the structural and magnetic properties of LTP-MnBi thin films. The films were synthesized on a glass substrate by using a UHV sputtering system. In order to form the desired alloy with c-axis texture, the films were annealed in the temperature range of 350°C ~ 400°C for 1~2 hours. XRD results confirmed that all the films were well grown with the c-axis orientation. The elemental composition of the main phase was investigated with EDX. From the analysis of out-of-plane M-H hysteresis loop, we found that the ratio of Bi/Mn strongly has an effect on the magnetic properties of LTP-MnBi films. The highest value of  $(BH)_{\max}$  of LTP film was obtained to be ~ 6.6 MGOe at room temperature when the thicknesses of Bi and Mn were adjusted in 30nm and 20nm, respectively. The magnetic properties of exchange-coupled MnBi with various soft layers such as FeCo and Fe will be discussed in detail.

[1] T. Chen and W. E. Stutis, IEEE Trans. Magn, 10, 581-586 (1974).

[2] B. Li, W. Liu, X.G. Zhao, W.J. Gong, X.T. Zhao, H.L. Wang, D. Kim, C.J. Choi and Z.D. Zhang, J. Magn. Mater, 372, 12-15 (2014).

# WS<sub>2</sub> / Al, Ag 동시 첨가에 따른 Nd-Fe-B 소결자석의 입자성장 억제 효과 연구

배경훈<sup>1,\*</sup>, 이성래<sup>1</sup>, 김효준<sup>2</sup>, 이민우<sup>3</sup>, 장태석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 신소재공학과, 서울특별시 성북구 안암동 고려대학교, 136-713

<sup>2</sup>자화전자 R&D 센터, 충청북도 청원군 자화전자, 363-922

<sup>3</sup>선문대학교 신소재공학과, 충남 아산시 탕정면 선문대학교, 336-708

## 1. 서론

Nd-Fe-B 소결자석에 Nb, W, Mo와 같은 고용점 원소 첨가는 소결 및 열처리 공정 동안 입자성장을 제어하여 효율적으로 보자력이 향상된다 [1-3]. 특히, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>와 같은 고용점 황화물 (High Melting point Element-sulfide, HME-S) 첨가는 희토류 응집 산화물 (RE-rich 상, Nd-Dy-O) 상 형성을 억제하여 불필요한 Dy의 소모를 줄이고, 입계에 석출물을 형성하여 입자성장을 제어 할 수 있다 [1]. 하지만, 입내에 HME-함유 석출상이 형성 되면, 역 자구의 핵 생성 영역으로 작용하기 때문에 보자력에 악영향을 미친다. Nd-rich 상의 용점을 강하시키는 Al, Ag와 같은 원소와 HME-S를 자석에 동시에 첨가하면 HME-함유 석출상을 입계에 선택적으로 형성시킬 가능성이 높다. 또한, 용점강하원소 첨가는 Nd-rich 상의 Cu가 상대적으로 적게 포함되어 있는 Cu<sup>low</sup>-rich 상의 미세구조를 효과적으로 개선하여 Nd-rich 입계상 연속성이 향상 될 수 있다 [4]. 그러나, HME-S/용점강하원소(Al, Ag) 동시 첨가에 의한 소결자석의 미세구조 및 자기적 특성의 변화 기구가 명확하지 않다. 본 연구에서는, WS<sub>2</sub>와 Al, Ag을 동시 첨가한 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조와 자기적 특성 변화간의 상관관계를 연구하였다.

## 2. 실험방법

Nd<sub>29.0</sub>Dy<sub>3.0</sub>Fe<sub>bal</sub>B<sub>1.0</sub>M<sub>2.4</sub>(wt.%, M=Cu, Al, Co, and Nb) 조성을 가진 Nd-Fe-B (5 μm)분말과 WS<sub>2</sub> (2 μm) 분말을 각각 준비하였다. WS<sub>2</sub> 분말은 일반 ball 밀링 기계를 이용하여 분말을 3시간 밀링 하였다. 이후, Nd-Fe-B 분말에 WS<sub>2</sub> 분말을 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 wt.%로 첨가 하였고, Al은 0.3 wt.%, Ag는 0.2 wt.%로 고정시켜 WS<sub>2</sub> 분말과 동시 첨가하였다. 소결은 1070°C에서 4시간 동안 진행하였다. 이 후, 열처리는 850°C, 530°C, 500°C에서 2시간으로 각각 진행하였다. 비교를 위하여, un-doped 자석과, WS<sub>2</sub> (0~1.5 wt.%) 자석도 각각 제조 하였다. 자기적 특성 분석은 B-H tracer를 이용하였다. 각 시편의 미세구조 변화는 주사전자 현미경 (JXA-8500F)과 투과전자현미경 (FEI TecnaiF20)을 이용하여 관찰 하였으며, EPMA (JXA-8500F Electron Probe Micro Analyzer), SADP (FEITecniF20)을 이용하여 상변화 및 상분포를 관찰 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림. 1은 WS<sub>2</sub> 첨가량에 따른 시편 별 자기적 특성 변화를 나타낸다. WS<sub>2</sub>/Al 동시 첨가 자석의 WS<sub>2</sub> 첨가량의 변화에 (0 → 0.6 wt.%) 따른 보자력 (20.67 → 22.4 kOe) 증가는 WS<sub>2</sub> 만 첨가한 자석 (20.67 → 22 kOe) 보다 향상되었다. 그러나 첨가량이 0.6 wt.% 보다 많을 경우, 두 종류 자석 모두 보자력이 감소하였다. 흥미롭게도, WS<sub>2</sub>/Ag를 동시 첨가한 자석의 경우, un-doped 자석보다 보자력이 낮은 수치를 보였으며, WS<sub>2</sub> 첨가량이 증가함에 따라, 보자력이 회복되는 경향을 보여 주었다. 그러나 잔류자화는 매우 감소하였다. 미세구조 비교 결과, WS<sub>2</sub>/Al, Ag 동시 첨가 자석 모두 용점강하원소 첨가로 인해 Nd-rich 상의 유동성이 증가하여, W-석출상이 입계에 선택적으로 형성 되었다. 그 결과, 0.6 wt.-%-WS<sub>2</sub>/Al 또는 Ag 동시첨가 자석의 평균 입자 크기는 각각 6.4, 6.6 μm로 un-doped (7.6 μm) 자석과 0.6 wt.-%-WS<sub>2</sub> 자석 (6.9 μm) 보다 효과적으로 감소하였다. Al과

Ag 원소 첨가에 따른 Nd-rich 상의 미세구조 분석 결과, 두 원소 모두  $\text{Cu}^{\text{low}}$ -rich 상에 응집되어 Nd-rich 입계상의 연속성이 향상 되었다. 하지만, 두 원소가 응집되어 있는 Nd-rich 상의 입계상을 line-profile로 분석한 결과, Ag 첨가 자석의 경우, Nd와 Fe 함량 비율이 59 : 41 (wt.%)로 Al 자석보다 (95 : 5 (wt.%) Nd 함량이 감소하였고 Fe 함량이 매우 증가 하였다. 결국,  $\text{WS}_2/\text{Ag}$ 이 동시 첨가된 자석은 Nd-rich 상의 유동성 증가로 인해 입자성장이 효과적으로 제어 되었지만, 주상과 주상간의 exchange coupling을 효과적으로 차단하지 못하여 보자력은 오히려 감소하는 결과를 초래하였다. 반면,  $\text{WS}_2$ 와 RE-rich 상의 반응으로 인해,  $\text{WS}_2/\text{Al}$  동시 첨가 자석의 RE-rich 상 형성이 억제 되었다. 그러나 첨가량이 0.6 wt.%보다 초과 될 경우, W-함유된 석출상이 입계에서보다 입내에 많이 형성되어 자석의 입자성장 억제 효과는 감소하였다. 따라서  $\text{WS}_2$  과량 첨가는 오히려 소결자석의 자기적 특성을 저하시킨다. 0.6 wt.%  $\text{WS}_2/\text{Al}$  동시 첨가는 평균 입자 크기의 효과적인 감소 (7.6 → 6.4  $\mu\text{m}$ )와 RE-rich 상의 형성 억제 때문에 8.3%의 보자력 향상과 0.8 wt.%의 Dy 저감 효과를 얻었다.

#### 4. 결론

$\text{WS}_2/\text{Al}$  또는 Ag를 동시 첨가한 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조와 자기적 특성 변화를 관찰 하였다. 0.6 wt.%- $\text{WS}_2/\text{Al}$  자석의 경우, 잔류자화 감소 없이 22.4 kOe로  $\text{WS}_2/\text{Ag}$ ,  $\text{WS}_2$ , 그리고 un-doped, 자석 보다 가장 큰 보자력 특성을 보여주었다. 0.6 wt.%- $\text{WS}_2/\text{Al}$  동시 첨가에 의한 보자력 향상은 다음의 미세구조 개선에 기인 하였다. 첫째, 입계에 효과적으로 형성된 W-석출물로 인한 입자 성장 제어, 둘째, 효과적인 RE-rich 상 억제 그리고 셋째, Nd-rich 삼중점상 및 결정립계 미세구조 개선이다.

#### 5. 참고문헌

- [1] W.F. Li, A.M. Gabay, M. Marinescu-jasinski, J.F. Liu, C. Ni, G.C. Hadjipanayis, J. Magn. Mater. 324, 1391-1396 (2012).
- [2] P. Zhang, T. Ma, L. Liang, M. Yan, J. Alloy Comp. 593, 137-140 (2014).
- [3] P. Zhang, T. Ma, L. Liang, M. Yan, Mater. Chem. Phys. 147, 982-986 (2014).
- [4] Tae-Hoon Kim, Seong-Rae Lee, Seok Namkung, Tae-Suk Jang, J. Alloy Comp. 537, 261-268 (2012).

#### 6. 감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부 지원의 기술 혁신사업(No.10043780)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

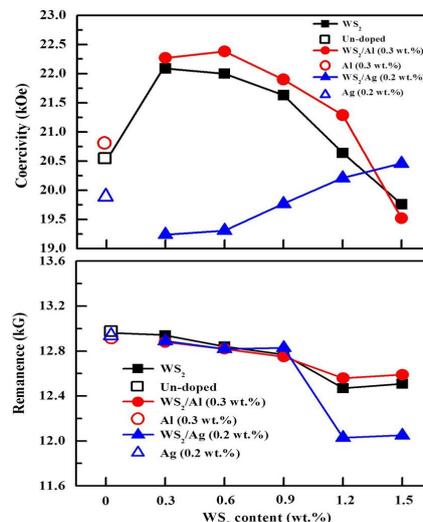


그림. 1  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WS}_2+\text{Al}$  (0.3 wt.%),  $\text{WS}_2+\text{Ag}$  (0.2 wt.%)의  $\text{WS}_2$ 첨가량에 따른 자기적 특성 변화.

# DyH<sub>2</sub> 용액으로 입계확산 처리한 NdFeB 소결자석에서 Cu/Al의 혼합이 Dy의 확산과 자기적 특성에 미치는 영향

이민우<sup>1,\*</sup>, 이호상<sup>1</sup>, 장태석<sup>1</sup>, 김태훈<sup>2</sup>, 이성래<sup>2</sup>, 김효준<sup>3</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 신소재공학과

<sup>2</sup>고려대학교 신소재공학과

<sup>3</sup>자화전자 R&D 센터

## 1. 서론

Nd-Fe-B 소결자석에서 보자력을 증가시키기 위하여 Dy 또는 Tb과 같은 중희토류 원소의 첨가는 필수적이다. 그러나 이들 원소는 Nd에 비해 매우 비싸고 자원이 부족하여 많은 양이 사용될 경우 자석 가격의 상승과 자원고갈 문제도 심각하게 대두될 수 있다. 따라서 최소의 중희토류 원소를 사용하거나 중희토류 원소(Dy, Tb)를 사용하지 않고 보자력을 증가시키는 연구가 진행되고 있다. 그 중 중희토류 원소를 자석 표면에 다양한 방법으로 코팅한 후 열처리를 하여 입계를 따라 중희토류 원소가가 확산되어 들어가도록 하는 연구가 주목을 받고 있다. 이는 역자구가 생성되기 용이한 강자성 2:14:1 상의 계면부분을 중희토류 원소로 치환하여 자기이방성이 높은 층을 형성함으로써 보자력을 향상시키는 방법이다 [1, 2]. 하지만 입계확산용으로 제조되고 있는 소결자석의 밀도가 98 % 이상으로 거의 완전 치밀화 되어있기 때문에 자석의 내부 중심까지 Dy가 확산되기 어렵다. 이러한 점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 Dy화합물을 입계확산용 자석에 단순 도포한 뒤 열처리를 통하여 입계확산 시킴에 있어 저융점 원소의 첨가로 Dy의 확산 깊이를 향상시키고자 하였고, 이에 따른 소결자석의 미세구조 및 자기특성 변화를 조사하였다.

## 2. 실험방법

실험에 사용된 자성분말은 (Nd, Dy)FeB 조성의 분말로 1060 °C에서 4시간동안 소결하여 입계확산용 자석으로 제조하였고, 무수알콜에 DyH<sub>2</sub>분말과 저융점 원소인 Cu, Al분말을 각각 일정량 혼합하여 입계확산용 용액을 제조하였다. 제조된 용액에 입계확산용 자석을 담근 후 건조하여 880 °C, 530 °C, 500 °C에서 각각 열처리하였다. Cu 및 Al와 Dy의 분포는 EPMA를 통하여 관찰하였고 미세구조는 주사전자현미경(SEM; Hitachi S-3000N)을 통하여 분석하였다. 소결체의 자기특성은 BH loop tracer (Magnet physik Permagraph C-300)를 이용하여 측정하였다

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 DyH<sub>2</sub> 분말에 Cu와 Al을 각각 2 wt.% 혼합하였을 경우 보자력이 각각 3.5, 4.2 kOe로 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 Cu와 Al을 혼합하지 않았을 경우(2.9 kOe)와 비교해 보아도 보자력이 더 높은 것을 알 수 있었다. 잔류자속밀도의 경우 최적화된 2 wt.%의 혼합량에서는 두 조건 모두 감소하지 않았지만, Al을 혼합하였을 경우와는 달리 Cu의 혼합량이 증가함에 따라 잔류자속밀도가 감소하는 것으로 나타났다.

※ 본 연구는 2012년도 지식경제부 지원의 기술 혁신사업(No.10043780)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (No. 2011T100200304)

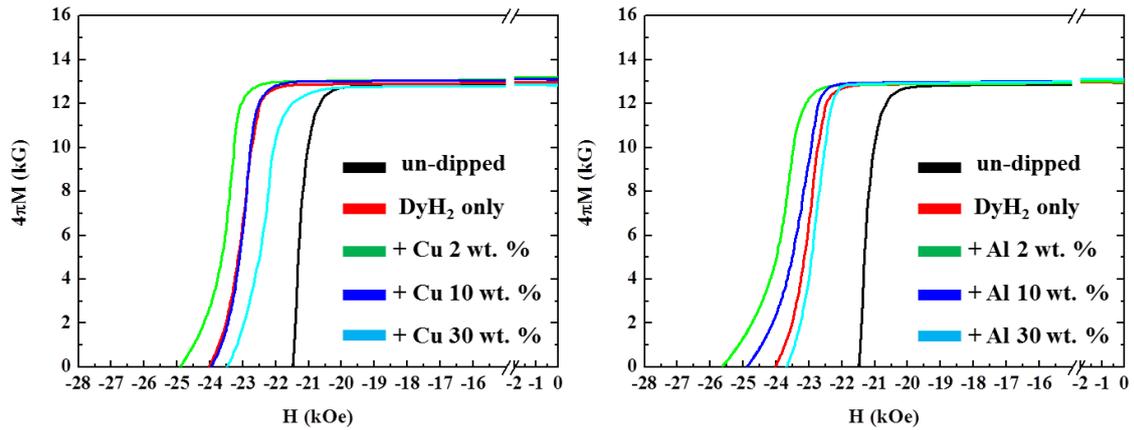


Fig. 1. Demagnetization curves of dipped magnets in DyH<sub>2</sub> + Cu and DyH<sub>2</sub> + Al solution.

#### 4. 결론

입계확산용 소결자석에서 Dy의 확산 깊이를 증가시키기에 있어 Cu보다는 Al의 더욱 효과적이라는 것을 확인 하였으며, 잔류자속밀도의 감소 없이 보자력을 크게 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 이는 Al이 Dy의 확산을 효과적으로 향상시켜주어 보자력이 향상된 것으로 판단되며, 후속연구에 의해 열처리 조건을 최적화하면 보다 높은 자기 특성을 갖는 Dy 저감형 자석을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- [1] K. Hirota, H. Nakumura, T. Minowa and M. Honshima, IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp. 2909-2911, Oct. 2006.
- [2] M. Komuro, Y. Satsu and H. Suzuki, IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 11, pp. 3831-3833, Nov. 2010.

# DyCu 공정합금분말 첨가에 따른 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조와 자기적 특성 변화 연구

현승한<sup>1,\*</sup>, 배경훈<sup>1</sup>, 이성래<sup>1</sup>, 김효준<sup>2</sup>, 이민우<sup>3</sup>, 장태석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 신소재공학과, 서울특별시 성북구 안암동 고려대학교, 136-713

<sup>2</sup>자화전자 R&D 센터, 충청북도 청원군 자화전자, 363-922

<sup>3</sup>선문대학교 신소재 공학과, 충남 아산시 탕정면 선문대학교, 336-708

## 1. 서론

Nd-Fe-B 소결자석의 Dy 함량을 저감하면서 보자력을 향상시키기 위해서는, Dy을 자석 내에 core-shell 형태로 분포시킴과 동시에 균질하고 연속적인 Nd-rich 입계상을 형성시켜야 한다. [1]. Dy의 core-shell 미세구조 구현에는 Dy-X (X= O, F, 그리고 H)화합물 분말첨가 공정이 효율적이고 [1], Nd-rich 상의 미세구조 개선에는 Cu와 같은 Nd-rich 상의 용점을 낮출 수 있는 용점 강하 원소 첨가 및 소결 후 열처리가 효율적이다 [2]. 사전 연구 결과에 의하면, Dy-X (X= O, F, 그리고 H) 화합물 분말 첨가 공정을 통하면 두꺼운 Dy-rich shell이 형성되기 때문에 소결온도를 감소시켜서 얇은 Dy-rich shell의 형성을 유도해야 하는데, 소결온도가 감소하면 자석의 밀도가 감소하여 자기적 특성에 악영향을 미친다 [3]. Nd-Fe-B 소결자석에 Cu와 같은 용점 강하 원소를 첨가하면 Nd-rich 상의 용점 및 상변태 온도가 감소하여 최적의 소결 및 1차 열처리 온도를 감소시킬 수 있다. 따라서 DyCu 합금 분말을 첨가하면 소결 온도 감소를 통해서 Dy-rich shell의 두께를 감소시킬 수 있고, 동시에 이상적인 미세구조를 가지는 Nd-rich 삼중점상 및 입계상의 형성을 유도 할 수 있다. 본 연구에서는 Dy<sub>85.6</sub>Cu<sub>14.4</sub> 공정 합금 분말을 첨가하여, 소결온도와 1차 열처리 온도 변화에 따른 미세구조와 상변화 그리고 그에 따른 자기적 특성의 상관관계를 연구하였다.

## 2. 실험방법

Dy-Cu 합금분말 첨가에 따른 자기적 특성 변화를 알아보기 위하여, 기본 조성이 Nd<sub>29</sub>-Dy<sub>3</sub>-Fe<sub>64.64</sub>-B<sub>0.97</sub>-Cu<sub>0.15</sub>-Al<sub>0.2</sub>-M<sub>2.04</sub> (wt%, M=Co, Nb, 5 μm)인 Nd-Fe-B 분말을 준비하였다. Arc melting을 통하여 공정조성의 Dy<sub>85.6</sub>Cu<sub>14.4</sub>를 준비하였고, ball milling을 통해 평균 5 μm의 크기를 갖는 분말을 제조하여 Nd-Fe-B 분말과 함께 혼합하였다. 모든 자석의 최종 Dy의 함량은 3.5 wt%로 고정하였다. 소결온도 조건은 1070 °C, 1060 °C, 1050 °C에서 각각 4시간동안 진행하였으며, 1차 열처리 온도를 850 °C, 820 °C, 790 °C, 760 °C, 730 °C, 700 °C에서 각각 2시간 동안 진행하였다. 2차열처리는 530 °C에서 2시간, 3차열처리는 500 °C에서 2시간 각각 진행하였다. BH loop tracer로 자기적 특성을 측정하였고, XRD (Rigaku D/MAX-2500V/PC, X-Ray Diffraction)를 통해서 모합금의 상을 분석하였다. 그리고 EPMA (JXA-8500F Electron Probe Micro Analyzer)를 이용하여 합금 분말 첨가 공정에 따른 미세구조 변화와 상변화 및 상의 분포를 조사하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림. 1 은 소결온도 변화에 따른 Dy-Cu 공정합금 첨가 자석과 un-doped 자석 (3 wt.% Dy)의 자기적 특성 변화를 나타낸다. 그림. 1 (a)에서 확인할 수 있듯이, Dy-Cu를 첨가한 소결 자석 (3.5 wt.% Dy)의 경우 un-doped 자석과 비교하여 보자력이 향상 되었다. Un-doped 자석의 보자력을 기준으로 계산한 3.5 wt.% Dy 함유 자석의 보자력과 비교하여도 약 5.8% 향상된 보자력을 나타낸다. 소결온도가 감소함에 따라서 un-doped 자석과 Dy-Cu 첨가 자석의 보자력이 모두 감소하였다. 흥미로운 점은, Dy-Cu 첨가를 통해서 소결온도 감소에 따른 자석의

잔류자화 감소가 억제되었다 (그림. 1 (b)). DyCu 공정합금첨가로 자석내의 Cu 함량 증가가 Nd-rich 상의 용점을 낮추었고, 낮은 온도에서부터 치밀화가 일어나서 낮은 소결온도에서 발생하는 자석밀도의 감소가 개선되었다. 또한 소결온도가 낮아질수록 주상 내부로 Dy의 확산이 줄어들어서 Dy-shell의 두께가 얇아졌기 때문에 잔류자화의 감소량이 줄었다. 그리고 자석내의 주상에 대해 젖음성이 좋은 Cu-rich 삼중점 상이 증가하여 미세구조가 개선이 되었다. 이로 인해 균질한 Nd-rich 입계상이 un-doped 자석보다 더 잘 형성되어 주상을 확실하게 고립시키고 주상과 주상간의 상호 교환 결합 (exchange coupling)을 차단하기 때문에 Dy-Cu 첨가를 통해서 보자력이 향상되었다.

#### 4. 결론

Nd-Fe-B 소결자석에 공정조성의 DyCu를 분말 첨가하여 소결온도의 변화에 따른 자기적 특성의 변화에 대하여 알아보았다. DyCu 첨가 자석의 보자력은 un-doped 자석과 비교하여 전체적으로 증가하였지만 소결온도가 낮아짐에 따라서 감소하였다. 잔류자화 또한 소결온도가 낮아질수록 감소하였지만 un-doped 자석과 비교하여 잔류자화 감소량이 줄어들었다. 그 이유는, 첫째, 자석 내에 존재하는 Cu의 함량 증가로 Nd-rich 상의 용점이 강하여 미세구조가 개선되었고, 둘째, 낮은 상대적으로 주상으로의 Dy 확산이 감소하기 때문에 Dy-shell의 두께가 얇아져서 잔류자화의 감소를 줄였다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Kyoung-Hoon Bae, Tae-Hoon Kim, Seong-Rae Lee, Seok Namkung, and Tae-Suk Jang, J. Appl. Phys. 112, 093912 (2012).
- [2] Tae-Hoon Kim, Seong-Rae Lee, Min-Woo Lee, Tae-Suk Jang, Jin Woo Kim, Young Do Kim, Hyo-Jun Kim, Acta Mater. 66, 12–21 (2014).
- [3] Song-E Park, Tae-Hoon Kim, Seong-Rae Lee, Seok Namkung, and Tae-Suk Jang, J. Appl. Phys. 111, 07A707 (2012).

#### 6. 감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부 지원의 기술 혁신사업(No.10043780)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

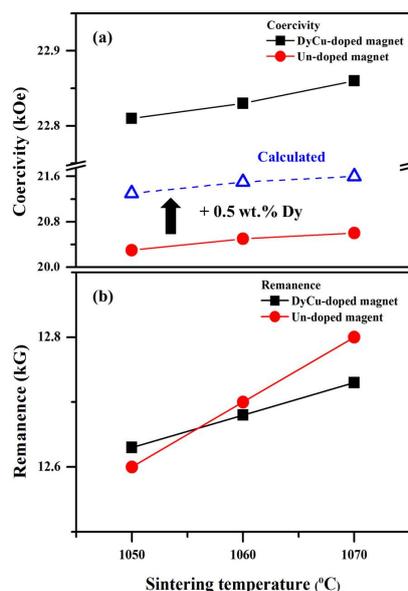


그림. 1 DyCu 공정 합금 첨가 자석과 un-doped 자석의 소결온도의 변화의 따른 자기적 특성 변화

# Al/Cu 동시첨가를 통한 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조 및 자기적 특성 최적화 연구

김태훈<sup>1,\*</sup>, 이성래<sup>1</sup>, 김효준<sup>2</sup>, 이민우<sup>3</sup>, 장태석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 신소재공학과, 서울특별시 성북구 안암동 고려대학교, 136-713

<sup>2</sup>자화전자 R&D 센터, 충청북도 청원군 자화전자, 363-922

<sup>3</sup>선문대학교 신소재공학과, 충남 아산시 탕정면 선문대학교, 336-708

## 1. 서론

Nd-Fe-B 소결자석에 Cu와 같은 Nd-rich 상의 용점을 낮출 수 있는 용점 강하 원소를 첨가하고 열처리 하면, Nd-rich 입계상의 균질도 및 연속성이 향상되어 보자력이 증가한다 [1, 2]. 또한, 500 °C 열처리 동안에 Nd-Cu 간의 공정분해반응으로 인해서 Cu가 Nd-rich 상에 과량 응집되는데 (20 ~ 45 at.% Cu, Cu<sup>high</sup>-rich), 이로 인해서 준안정 c-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 상이 안정화 되고 Nd-rich 상의 비자성성이 향상되어 열처리 이후에 보자력이 증가한다 [1, 2]. 하지만, 상대적으로 Cu의 응집도가 낮은 Nd-rich 상 (5 ~ 15 at.% Cu, Cu<sup>low</sup>-rich)의 형성이 불가피하다. Cu<sup>low</sup>-rich 입계상은 연속성 및 비자성성이 좋지 않을 뿐만 아니라 안정한 h-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 형성되기 때문에 보자력 향상에 기여하지 못한다 [2]. Cu와 함께 다른 용점 강하 원소 (Al)를 Nd-Fe-B 소결자석에 첨가하고 적절히 열처리 함으로써 Cu가 미량 응집된 Nd-rich 상의 구조/화학적 특성을 향상시키면, 열처리 이후의 소결자석의 보자력 향상 효과를 극대화 할 수 있다. 본 연구에서는 Al/Cu 또는 Mn/Cu 동시첨가에 의한 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조 및 자기적 특성의 변화를 연구 하였다.

## 2. 실험방법

기존의 최적 조성을 가지는 29.0Nd-3.0Dy-0.15Cu-0.2Al-bal.Fe-1.0B-2.0M (wt.%, M = Co, Nb)분말에 0.1 wt.%의 Al 분말과 0.15 wt.%의 Cu 분말을 동시에 혼합한 분말 [Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석]과 Cu 만 0.15 wt.% 혼합한 분말 [Cu(0.15) 첨가 자석]을 준비한 후 1050 ~ 1070 °C에서 4시간동안 소결하였다. 준비된 소결자석을 850 ~ 640 °C 에서 2시간동안 1차 열처리 하였다. 이후에, 530 °C에서 2시간, 500 °C에서 2시간 동안 2차, 3차 열처리를 진행하였다. 비교를 위해서, 기존의 공정 조건 (소결 : 1070 °C, 1차 열처리 : 850 °C, 2차 열처리 : 530 °C, 3차 열처리 : 500 °C)으로 제조된 conventional 자석을 준비하였다. BH-tracer를 이용하여 시편의 자기적 특성을 측정하였으며, 주사전자현미경 (JXA-8500F)과 투과전자현미경 (FEI TecnaiF20), EPMA (JXA-8500F Electron Probe Micro Analyzer), SADP (FEI TecnaiF20), DSC를 이용 하여 시편의 상변화 및 상분포를 관찰 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

기존의 공정 조건 (소결 : 1070 °C, 1차 열처리 : 850 °C, 2차 열처리 : 530 °C, 3차 열처리 : 500 °C)으로 제조된 기존자석의 보자력은 20.6 kOe 이었다. Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 경우, 최적의 소결온도 및 1차 열처리 온도는 각각 1050 °C, 790 °C로 감소하였고 보자력은 22.2 kOe로 증가하였다. 미세구조 분석 결과, Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석 내의 Al은 Cu가 미량 응집된 Nd-rich 상 (Cu<sup>low</sup>-rich 상, 6 ~ 8 at.% Cu)에만 선택적으로 응집되어 있었다 (5 ~ 6 at.% Al). Cu<sup>low</sup>-rich 상에 대한 Al의 응집으로 Cu<sup>low</sup>-rich 상의 결정구조가 h-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에서 c-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 변태 되었다. 이 결과, Cu<sup>low</sup>-rich 상과 주상간의 격자부정합이 감소하고 Cu<sup>low</sup>-rich 상의 비자성성이 향상되어 Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 보자력이 향상된다. Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 핵심적인 미세구조 변화는, Al이 Cu가 과량 응집된 Cu<sup>high</sup>-rich 상이 아닌, Cu<sup>low</sup>-rich 상에만 선택적으로 응집 되었다는 것이다. 즉, Nd-rich 상에 Al과 Cu가 분리되어 응집함으로써 Al에 의해 Cu<sup>low</sup>-rich 상의 미세구조가 개선되었다.

Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 DSC 분석 결과, 약 530 °C 부근에서 새로운 peak이 관찰 되었다. Al-Cu 이원계 상평형도를 살펴보면, 약 530 °C 부근에서  $L \leftrightarrow Al + Al-Cu$ 의 공정 분해 반응이 일어난다. 따라서, Al-Cu 간의 공정분해반응으로 인해서 Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석 내의 Al이  $Cu^{low}$ -rich 상에만 선택적으로 응집된다. 흥미로운 점은, Al-Cu 간의 공정분해반응 온도 (530 °C)는 소결자석의 2차 열처리 온도 (530 °C)에 해당하는 온도이다. 사전 연구결과에 의하면 [1], Cu(0.15) 첨가 자석의 보자력 향상에 가장 중요한 공정단계는 Nd-Cu 간의 공정 분해 반응 온도에 해당하는 3차 열처리 (500 °C) 이다. 3차 열처리 이후에 Cu(0.15) 첨가 자석 내에 cubic 결정구조 ( $c-Nd_2O_3$ )를 가지는  $Cu^{high}$ -rich 상이 형성되어 보자력이 증가한다. Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 경우, 2차 열처리 동안에 이미 Al-rich 상과  $Cu^{high}$ -rich 상이 분리되어 형성되기 때문에 3차 열처리 동안의 Nd-Cu 간 공정분해반응이 자석의 보자력 향상에 영향을 미치지 않을 수 있다. 그림 1은 Cu(0.15) 첨가 자석과 Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 공정 진행에 따른 보자력의 변화를 나타낸다. Cu(0.15) 첨가 자석의 경우 3차 열처리 이후에 보자력이 급증하지만 (19 → 21.5 kOe), Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 경우, 2차 열처리 이후에 보자력이 급증한다 (18.7 → 22.1 kOe). 3차 열처리는 Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석의 보자력에 영향을 미치지 않는다. 따라서, Nd-Fe-B 소결자석에 Al과 Cu를 동시에 첨가하면 기존의 3차 열처리를 생략하고도 기존보다 더 높은 보자력 (20.6 → 22.1 kOe) 을 가지는 소결자석을 제조 할 수 있다.

## 5. 결론

Al과 Cu를 동시에 첨가한 Nd-Fe-B 소결자석의 미세구조 및 자기적 특성변화에 대하여 연구하였다. Al-Cu 간의 공정 분해 반응으로 인해서 Al(0.1)/Cu(0.15) 첨가 자석 내 Al이  $Cu^{low}$ -rich 상에만 선택적으로 응집되어  $Cu^{low}$ -rich 상의 결정구조가  $c-Nd_2O_3$ 로 변태 되었다. 또한, Al의 응집으로 인해서  $Cu^{low}$ -rich 입계상의 비자성성 및 연속성이 향상 되었다. 흥미로운 점은, Al과 Cu를 동시에 첨가하면 Al-Cu 간의 공정분해반응온도 (530 °C)에서의 2차 열처리를 통해서 Nd-Cu 간의 공정분해반응온도 (500 °C)에 해당하는 기존의 3차 열처리 공정을 생략 할 수 있다. 결론적으로, Al(0.1)/Cu(0.15) 동시 첨가를 통해서 기존의 3차 열처리 공정을 생략하고도, 용점 강하 원소 첨가를 통한 Nd-rich 상의 미세구조 개선 효과가 극대화되어 7.3%의 보자력이 향상된 소결자석을 제조 할 수 있다.

## 6. 참고문헌

- [1] Tae-Hoon Kim, Seong-Rae Lee, Seok Namkung, and Tae-Suk Jang, J. Alloy. Comp. 537, 261 (2012).
- [2] Tae-Hoon Kim, Seong-Rae Lee, Min-Woo Lee, Tae-Suk Jang, Jin woo Kim, Yound Do Kim, and Hyo-Jun Kim, Acta Mater. 66, 12 (2014).

## 7. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원의 기술 혁신사업(No.10043780)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

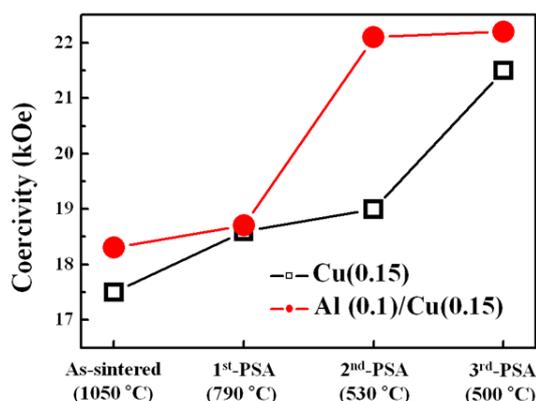


그림 1. 공정 진행에 따른 Nd-Fe-B 소결자석의 보자력 변화.

# Magnetic Properties and Magnetocaloric Effect in $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_{10.5}\text{Si}_{2.5}$ ( $x = 0.2, 0.4, 0.6$ ) Alloys

Wen-Zhe Nan<sup>1</sup>, Tae-Soo You<sup>2</sup>, Seong-Cho Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, South Korea

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, South Korea

The magnetocaloric effect (MCE) is an intrinsic property of a magnetic material. This effect is dependent on temperature ( $T$ ), and is usually largest near the magnetic phase transition temperatures. Basically, the MCE is related to a magnetic entropy change ( $\Delta S_M$ ) in a magnetic material under the application or removal of an external magnetic field. Magnetic refrigeration based on the MCE is currently a potential technology that can replace the conventional technology based on gaseous compression and expansion cycles. Unlike the conventional technology, the MCE-based technology shows up some advantages of environmental pollution reduction, energy saving, and low noise. To promote this technology, however, it is necessary to fabricate successfully MCE material with a large  $\Delta S_M$  in low applied fields and a controllable working temperature range (around magnetic phase transition regions). Additionally, to get a clear idea about the performance of materials used in magnetic refrigeration devices, it is necessary to understand how their MCE evolves in desired temperature and magnetic-field ranges.

In this report, we present a detailed studies on the magnetic properties and MCE of  $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_{10.5}\text{Si}_{2.5}$  ( $x=0.2, 0.4, 0.6$ ) alloys. The samples were prepared from pure (99.9%) La, Ce, Fe and Si metals by an arc-melting method in a high purity argon atmosphere. And then, the products were sealed in a fused-silica jacket under vacuum and annealed at 1323 K for a month. According to the powder X-ray diffraction patterns, the crystal structure of an as-cast sample displayed the elemental Fe-type structure, but after the annealing process, they were transformed into the  $\text{NaZn}_{13}$ -type structure.

Magnetic measurements versus temperature ( $T = 100\text{-}300$  K) and magnetic field ( $H = 0\text{-}10$  kOe) were performed on a vibrating sample magnetometer (VSM). Fig. 1 shows the  $M(T)$  curves for samples, one can see that all the samples exhibiting a ferromagnetic-paramagnetic (FM-PM) phase transition at Curie temperature  $T_C = 250, 239$ , and 230 K for  $x = 0.2, 0.4$ , and 0.6, respectively. This FM-PM phase transition can be seen more clearly if  $H/M$  is plotted versus  $M^2$  [1]. The nonlinear parts in the low field region at temperatures below and above  $T_C$  are driven toward two opposite directions, revealing the FM-PM phase separation. A negative slope corresponding to a first-order phase transition according to Banerjee's criteria [2] has been observed in  $H/M$  versus  $M^2$  curves. Based on isothermal magnetization data,  $M(H, T)$ , we have calculated  $\Delta S_M(T)$  data for samples under an applied magnetic field change  $H = 10$  kOe as shown in Fig. 2. As a function of temperature, the  $\Delta S_M(T)$  curves show a maximum (denote as  $|\Delta S_{M\text{max}}|$ ) at around their  $T_C$ . With  $H = 10$  kOe, the values of  $|\Delta S_{M\text{max}}|$  are found to be 3.0, 2.8, and 1.6  $\text{J}\times\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  for  $x = 0.2, 0.4, 0.6$  samples, respectively. The nature of magnetic properties and MCE in the  $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_{10.5}\text{Si}_{2.5}$  alloys will be discussed thoroughly by mean of the effect of Ce-doping concentration.

## References

- [1] A. Arrott, "Criterion for ferromagnetism from observations of magnetic isotherms", *Phys. Rev.*, 108(6) 1394, (1957).
- [1] S. K. Banerjee, "On a generalised approach to first and second order magnetic transitions", *Phys. Lett.* 12, 16, (1964).

# NiFe 박막에서 자기장 각도에 따른 스핀파 공명 신호 분석

김동영\*, 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388번지, 760-749

## 1. 서론

강자성 박막재료에서 스핀들의 세차 운동(precession)과 RF주파수가 동조된 경우 강자성 공명이라 부른다. 반면, 자기스핀들이 만드는 스핀파(spin wave)가 박막 재료의 두께 방향에서 정상파(standing wave) 조건을 만족하는 경우를 스핀파 공명(spin wave resonance)이라 부른다. 이러한 스핀파는 두께가 560 nm인 NiFe 박막 재료에서 처음 발견되었다[1]. 스핀파 공명 신호는 강자성 공명 신호 보다 작은 자기장에서 나타나므로 두께가 얇은 박막에서는 나타나지 않는다. 두께가 두꺼운 박막재료에서는 강자성 공명 신호와 스핀파 공명 신호가 겹쳐지게 되어 강자성 공명 신호의 선폭을 증가시키는 요인으로 작용한다[2-5].

본 연구에서는 두께 100nm인 NiFe 박막 재료의 수평면(in-plane) 및 수직면(out-of plane)에서 자기장 각도에 따른 강자성 및 스핀파 공명 신호를 측정하였다. 자기장 각도에 따른 스핀파 공명 신호 분석을 통하여 Two magnon scattering의 원인을 분석하고자 하였다.

## 2. 실험방법

NiFe 박막 재료는 고진공 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 열산화막이 있는 Si기판 위에 250°C의 온도에서 증착 하였다. 이때 하부층으로는 Ta(5 nm)/Cu(5 nm)를 증착 하였으며, 자성 박막의 표면 산화를 방지 하기 위하여 자성 재료 상부에 Ta(5 nm)를 증착 하였다. 제작된 박막의 적층 구조는 Ta/NiFe(100 nm)/Cu/Ta/SiO<sub>2</sub>/Si이었다. 제작된 박막 재료의 자기장 세기 및 각도에 따른 강자성 공명 신호는 X-band용 FMR 측정 장치를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1(a)는 수평면에서 측정한 강자성 공명(FMR) 및 스핀파 공명(SWR) 신호를 보인다. 스핀파 공명 신호는 강자성 공명신호 보다 크기가 작으며, 강자성 공명 보다 낮은 자기장에서 나타났다. 이러한 스핀파 공명 자기장은 재료의 두께에 의존하며 다음과 같이 표현된다[2-5].

$$H_{SWR} = H_{FMR} - \frac{2A_{ex}}{4\pi M_{eff}} \left( \frac{n\pi}{t} \right)^2 \quad (1)$$

여기서  $t$ 는 박막의 두께이고, 자성 재료의 스핀들간의 교환 뻗뻗함 상수(exchange stiffness constant)  $A_{ex}$ 는 스핀파의 탄성 특성을 나타내는 재료의 물성이다.  $n$ 은 스핀파의 정상파 모드를 나타내는 정수이다. 식(1)에서 스핀파 공명 자기장은 강자성 공명 자기장 보다 낮은 자기장에서 나타나며, 강자성 공명 자기장과 스핀파 공명 자기장의 차이는 박막의 두께의 제곱에 반비례한다. 따라서 박막의 두께가 두꺼워지면 두 공명 자기장의 차이가 작아져 두 공명 신호들은 겹쳐 보이게 되며, 강자성 공명 신호의 선폭을 증가시키는 Two magnon scattering에 영향을 미치게 된다.

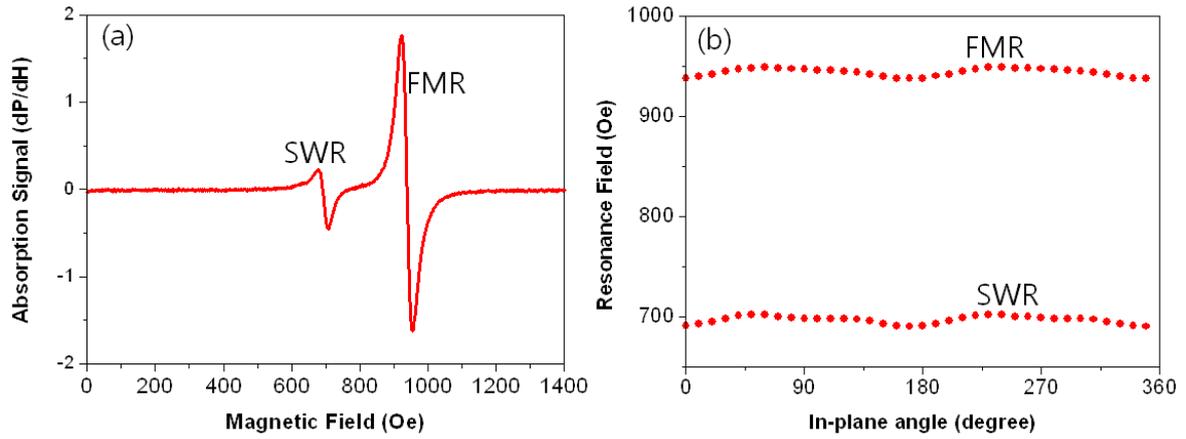


Fig. 1. (a) FMR and spin wave signal  
 (b) Angular dependence of  $H_{FMR}$  and  $H_{SWR}$  in NiFe film. The signal was measured at in-plane angle.

#### 4. 감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF2010-0008282).

#### 5. 참고문헌

- [1] M. H. Seavey, Jr., and P. E. Tannenwald, Phys. Rev. Lett. **1**, 168 (1958).
- [2] C. Bilzer, *et. al*, J. Appl. Phys. **100**, 053903 (2006).
- [3] K. Kiseki, S. Yakata, and T. Kimura, Appl. Phys. Lett **101**, 212404 (2012).
- [4] X. Liu, Y. Y. Zhou, and J. K. Fuedyna, Phys. Rev. B **75**, 195220 (2007).
- [5] Y. Y. Kim, *et. al*, J. Kor. Phys. Soc. **31**, 495 (1997).

# CoFe/MnIr 박막에서 자구의 회전에 의한 마이크로파 흡수 특성 분석

김동영\*, 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 760-749

## 1. 서론

교환 결합력을 갖는 강자성 (F)과 반강자성 (AF) 박막은 F/AF 계면에 존재하는 스핀들간의 상호작용에 의하여 교환 바이어스 (exchange bias) 특성이 나타난다. 교환 바이어스는 강자성층의 자화 방향을 고정 자화 곡선을 한쪽으로 치우치게 하는 역할을 한다. 이러한 교환 바이어스 특성에 기여하는 일방 이방성 에너지( $J_c$ ) 특성을 보이므로 자기장의 방향에 따라서 교환 바이어스 자기장이 변화한다. 자기장 각도에 따른 강자성 공명 자기장 특성으로부터 이들 재료의 일축 이방성 자기장을 얻는다. 한편, 교환 바이어스 특성을 갖는 재료에서 자화 곤란 방향에서 측정된 마이크로파 흡수 특성은 낮은 자기장에서 자화 곡선의 특성을 반영하는 신호가 검출되었다[1]. 이러한 마이크로파 흡수 특성에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 교환 결합 특성을 갖는 CoFe/MnIr 재료에서 자화각도에 따른 마이크로파 흡수 특성을 측정하였으며, Stoner-Wohlfarth 모델을 사용하여 계산한 자화곡선과 마이크로파 흡수 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 실험방법

Co<sub>70</sub>Fe<sub>30</sub>/Mn<sub>75</sub>Ir<sub>25</sub> 구조를 갖는 시료는 Si기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터 법을 사용하여 증착 하였으며, seed층으로 Ta(5 nm)/Ru(5 nm)를 사용하였으며 capping층으로는 Ta(5 nm)/Ru(5 nm) 하였다. 교환 바이어스 특성을 위하여 MnIr 두께는 10nm로 하였으며, CoFe의 두께를 30 nm로 하였다. 제작된 박막 재료의 자기장 세기 및 각도에 따른 강자성 공명 신호는 X-band용 FMR 측정 장치를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 CoFe/MnIr 박막 재료에서 자화 각도가  $\theta_H = 0$ 과  $\theta_H = 90$ 에서 측정된 마이크로파 흡수 신호와 Stoner-Wohlfarth 모델을 사용하여 계산한 자화곡선을 보인다.  $\theta_H = 0$ 에서 측정된 마이크로파 흡수 신호는 약 468 Oe에서 강자성 공명에 의한 마이크로파 흡수 신호를 보이며, 강자성 공명 신호는 자기장의 증가 감소 방향에 의존하지 않는 특성을 보인다. 그러나 약 60 Oe의 낮은 자기장에서 보이는 마이크로파 흡수 신호는 자기장의 증가 감소에 따라서 이력 특성을 보인다. 이러한 이력 특성은 Stoner-Wohlfarth 모델을 사용하여 계산한 자화곡선의 이력 특성을 반영하고 있다.  $\theta_H = 90$ 에서 측정된 마이크로파 흡수 신호는 약 472 Oe에서 강자성 공명에 의한 마이크로파 흡수 신호를 보이며, 약 200 Oe이하의 낮은 자기장에서 보이는 마이크로파 흡수 신호는 자기장의 증가 감소에 따라서 이력 특성이 사라지고 있음을 보인다. 이러한 이력 특성은 Stoner-Wohlfarth 모델을 사용하여 계산한 자화곡선의 특성을 반영하고 있다. 마이크로파 흡수특성에 대한 측정 결과와 자화 곡선에 대한 계산 결과를 비교 분석하여 낮은 자기장에서 나타나는 마이크로파 흡수특성은 자화의 회전에 의한 특성임을 아수 있었다. 따라서 강자성 공명 장치를 이용하며, 강자성 공명특성 뿐만 아니라 자화 특성 분석이 가능하다.

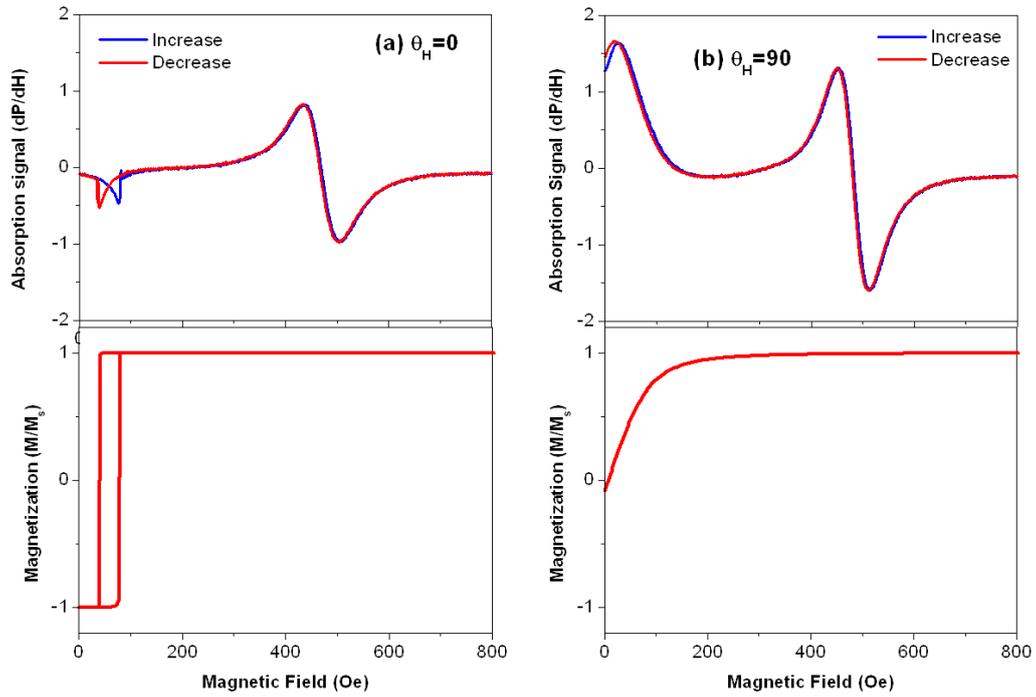


Fig. 1. (a) Microwave absorption signal and Magnetization at (a)  $\theta_H=0$  and (b)  $\theta_H=90$  in CoFe/MnIr bilayers.

#### 4. 감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF2010-0008282).

#### 5. 참고문헌

- [1] J. Kim, et. al., CAP. **14** (2014) 548.

# 비정질 CoFeB 박막에서 열처리 온도에 따른 강자성 공명 신호 분석

김동영\*, 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 760-749

터널링자기저항(tunneling Magnetoresistance) 재료는 비정질 CoFeB 재료를 사용하여 자기저항비를 200% 이상까지 향상시켰다. 이러한 재료의 자기저항비는 CoFeB의 결정 구조에 의존한다. 즉 비정질 CoFeB가 열처리에 의하여 (001)결정면으로 성장하였을 때 자기저항비가 증가한다는 측정 결과가 보고되었다[1,2]. 비정질 CoFeB는 (001)결정면을 갖는 체심입방결정으로 성장하고 있음을 확인하였다[3]. 따라서 본 연구에서는 CoFeB 재료의 열처리 온도에 따른 이방성 특성을 분석하기 위하여 강자성공명 (ferromagnetic resonance, FMR) 신호를 측정하였으며, 강자성 공명 선폭과 마이크로파 흡수신호의 크기 특성을 분석하였다.

본 연구에서 CoFeB 시료는 고진공 DC 스퍼터링 챔버에서 Si기판 위에 상온 증착하였다. 이때 하부층으로는 Ta(5 nm)를 사용하였으며, 시편의 산화를 방지하기 위한 상부층으로 Ta(5 nm)를 증착하였다. 시료의 적층구조는 Ta/CoFeB(4 nm)/Ta로 제작하였다. 제작된 시편은 열처리 온도  $T_a=200, 250, 300, 350, 400, 440^\circ\text{C}$ 에서 1 시간 동안 진공 열처리( $10^{-6}$  torr)를 수행하였다. 또한 자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호(FMR signal)는 FMR 측정 장치인 Bruker Xerp를 사용하여 9.89 GHz (X-band)의 주파수에서 측정하였다. 박막 재료의 수평면 (in-plane)에서 자기 이방성 자기장 및 강자성공명 선폭( $\Delta H_{pp}$ )을 분석하기 위하여 자기장의 방향에 따른 FMR 신호를 측정하였으며, 열처리 온도에 따른 선폭 및 신호크기 특성을 분석하였다.

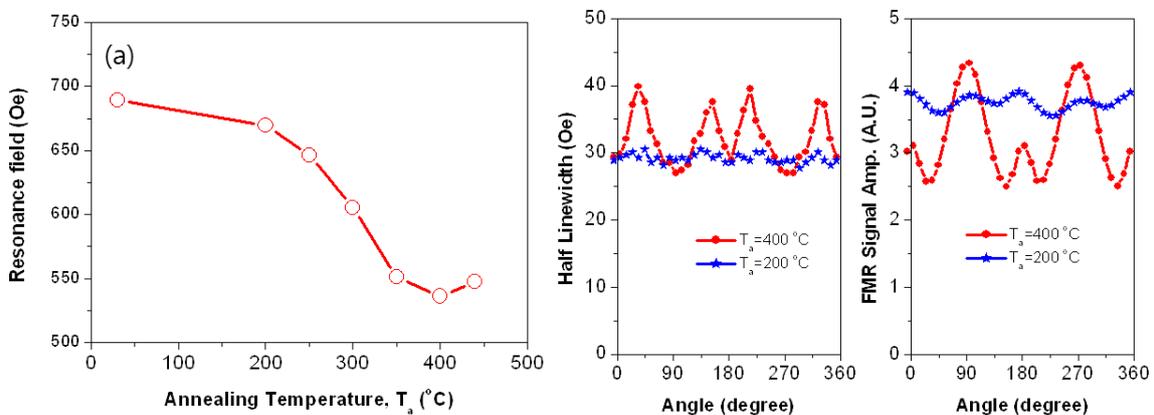


Fig. 1. (a) Annealing temperature and angle dependence of FMR signals

- [1] D. D. Djayaprawira, et. al, Appl. Phys. Lett., **86**, 092502 (2005)
- [2] Y. M. Lee, et. al, Appl. Phys. Lett., **89**, 042506 (2006)
- [3] J. Hayakawa, et. al, Jpn. J. Appl. Phys., **44**, L587 (2005)

# 전해도금법을 이용한 Ni-Co-Fe 3원계 합금 박막의 특성연구

조영래<sup>1,\*</sup>, 박화선<sup>1</sup>, 서수정<sup>1</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 신소재공학과

## 1. 서론

자성재료는 보자력에 의해서 강자성재료와 연자성재료로 나뉜다. 이중 연자성재료는 자기 기록 헤드, 박막 인덕터, 변압기 등에 이용되고 있다. 일반적으로 연자성 재료는 보자력이 12.5 Oe 이상의 값을 가진다. 그리고 전자장치의 주요 구성요소로 사용이 되면서 소형화, 고집적화 되었다. 이에 따라 연자성 재료의 높은 포화 자화(Ms), 낮은 보자력(Hc)등의 특성이 요구되고 있다. 그래서 새로운 연자성 합금 재료들이 연구 개발되고 있다. 전형적인 연자성 합금을 예를 들면 전해도금을 이용한 Co-Fe, Ni-Fe, Co-Ni-Fe합금과 스퍼터링법을 이용한 나노 구조 Fe-N, Ni-Fe/Co-Fe-N/Ni-Fe합금 등이 있다. 본 연구에서는 전해 도금법을 이용한 Ni-Co-Fe 3원계 합금 박막의 특성을 연구하였다. [1,2]

## 2. 실험방법과 결과

전해 도금법을 사용하여 Ni-Co-Fe합금 박막을 형성하였다. 기판은 CCL을 이용하였으며, 양극으로는 1 X 1 cm<sup>2</sup> 크기의 Pt전극을 사용하였으며, 모든 실험의 도금액의 pH는 4로 고정하여 실험하였다. 실험변수는 인가 전압, 도금온도, 도금 시 음극과 양극의 면적비를 변경하여 박막을 제작하였다. 그리고 도금 시 자기장에 의한 영향을 보기위해 시험편과 평행하게 외부 자계를 인가하였으며, 자기장의 세기는 약 300 Oe였다. 미세구조 분석을 위해 SEM을 사용하여 분석하였으며, 결정구조 분석을 위해 XRD를 사용하였다. 화학 조성 분석을 위해 EDS를 사용하여 분석하였다. 그리고 내부식특성을 분석하기 위해 EIS 분석을 실시하였다. 자성 특성 분석을 위해 VSM을 사용하여 포화자화, 보자력 등을 분석하였다.

본 연구에서는 Ni-rich 도금액을 이용하여, CCL 기판위에 Ni-Co-Fe 도금층을 2.5um 두께로 도금을 하였다. 인가 전압은 5mA/cm<sup>2</sup>~25mA/cm<sup>2</sup> 범위에서 5mA/cm<sup>2</sup> 간격으로 도금을 실시하였다. 이때 도금층의 조성비는 Ni는 39~61 at%, Co는 21~32 at%, Fe는 16~28 at%로 나타났다. 평균 보자력은 1.9 Oe, 각형비는 0.33 으로 확인되었다. 그리고 10mA/cm<sup>2</sup>으로 전압을 인가하여 제작된 박막에서는 보자력 1.34 Oe, 각형비 0.27 이었으며, 이때 조성비는 Ni<sub>46</sub>Co<sub>29</sub>Fe<sub>24</sub> (At%)였다. 내부식 특성은 25mA/cm<sup>2</sup>에서 가장 높게 나타났다. 도금액 온도 변화에 따른 실험에서는 40℃에서 2.02 Oe의 보자력을 갖는 결과를 확인하였다. 면적비에 따른 박막의 제조 실험에서는 전체 실험범위에서 비슷한 결과를 확인하였다.

## 3. 고찰

인가 전압에 따른 박막의 특성은 인가전압이 커질수록 Ni의 함량이 커지고, Co와 Fe의 함량이 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 Ni 표준전극의 포텐셜 값이 Fe의 표준전극 포텐셜 값보다 높기 때문에 우선적으로 도금이 되기 때문이다. XRD 분석에서는 FCC(111) 피크와 시험편 CCL의 피크만 확인되었다. 이는 표면에 생성된 박막이 비정질로 성장했기 때문이다. 그리고 이로 인해 보자력과 각형비가 달라질 것이다. 샘플의 자성특성을 확인하였을 때, 10mA/cm<sup>2</sup>에서 가장 낮은 보자력을 확인하였다. Ni의 함량이 커질수록 내부식성 특성은 향상될 것이다. 이는 Ni이 내부식 특성이 좋기 때문에 위와 같은 결과를 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Ni-Co-Fe 합금박막을 전해도금으로 형성하였다. 인가전압에 따라 Ni, Co, Fe의 함량이 변화하는 것을 확인하였으며, Ni의 함량이 커지면 내부식특성이 좋아지지만, 자성특성인 보자력과 각형비가 향상되지 않는 것을 확인하였으며,  $10\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 인가전압에서 좋은 자성특성을 가지는 것을 확인하였다. 도금액의 온도도 박막의 특성에 영향을 주는 것을 확인하였으며,  $40^\circ\text{C}$ 에서 좋은 특성을 가지는 것을 확인하였다.

#### 5. 참고문헌

- [1] O. Shinoura, A. Kamijima, J. Surf. Finish. Soc. Jpn., **44**, 1114 (1993)
- [2] T. Osaka, Nature. 392, **796** (1998)

# Z-type hexaferrite $Ba_{2.5}Sr_{0.5}Co_2Fe_{24}O_{41}$ 의 뫼스바우어 분광 연구

임정태<sup>1,\*</sup>, 김삼진<sup>1</sup>, 한은주<sup>2</sup>, 김철성<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 물리학과

<sup>2</sup>수원대학교 물리학과

## 1. 서론

최근 강유전성 성질과 자기적 성질이 동시에 발현되는 다중강체 물질은 활발하게 진행되고 있으며, 그중 Z-type hexaferrite는 spin current model에 의한 magnetodielectric 효과가 발생되어 다중강체 물질로 많은 연구가 진행되고 있다. 또한, 큰 자기이방성에 의해 고주파 영역에서 RF디바이스로도 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 직접합성법으로 제조된  $Ba_{2.5}Sr_{0.5}Co_2Fe_{24}O_{41}$  시료의 결정학적 및 자기적 특성에 대해 연구하였다.

## 2. 실험방법

Z-type hexaferrite인  $Ba_{2.5}Sr_{0.5}Co_2Fe_{24}O_{41}$  조성의 다결정 분말 시료를 직접합성법(solild-state reaction method)을 통해 제조하였다.  $BaCO_3$ ,  $SrCO_3$ ,  $CoO$ , 그리고  $Fe_2O_3$ 를 출발 물질로 사용하였으며, 이를 마노를 이용하여 혼합, 분쇄하였다. 혼합물을 1000 °C에서 10 시간 동안 하소하였으며, 하소 한 시료를 다시 분쇄 후, 1200 °C에서 1차 소결을 진행하였다. 최종적으로 상의 균일성과 2차상을 제거하기 위해, 1250 °C에서 2차 소결 후 단일 상의  $Ba_{2.5}Sr_{0.5}Co_2Fe_{24}O_{41}$  분말 시료를 합성하였다. 시료의 결정학적 특성을 확인하기 위해 Cu-K $\alpha$  선에 이용한 x-선 회절 실험 (XRD)를 진행하고, 이를 Rietveld 방법으로 분석하였다. 진동시료 자화율 측정 (VSM) 실험을 통해, 자장과 온도에 따른 자화율 변화를 측정하였다. 또한 미시적인 자기적 특성을 확인하기 위해 4.2부터 740 K까지 다양한 온도 구간에서 뫼스바우어 분광 실험을 진행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

직접합성법으로 제조된  $Ba_{2.5}Sr_{0.5}Co_2Fe_{24}O_{41}$  다결정 분말 시료를 Fullprof 프로그램을 통해 XRD 분석 결과, 분석구조 인자( $R_B$ )와 Bragg 인자( $R_F$ )은 5 % 미만으로 단일상임을 확인하였으며, 공간군이  $P6_3/mmc$  인 hexagonal 구조를 가졌다.  $Ba_{2.5}Sr_{0.5}Co_2Fe_{24}O_{41}$  시료의 격자상수  $a_0$ ,  $c_0$ 는 각각 5.87, 52.23 Å으로 분석되었다. 295 K에서 10 kOe까지의 자기이력곡선을 측정한 결과, 준강자성의 거동을 보였으며, 포화자화와 보자력값은 각각 45.59 emu/g, 40.24 Oe로 측정되었다. 100 Oe 외부자기장을 인가하여 온도에 따른 자화율 변화를 측정한 결과, 170 K에서 스핀전이가 발생하였다. 미시적인 자기적특성을 연구하기 위해, 4.2부터 740 K까지 뫼스바우어 분광실험 결과, 큐리온도 이하에서 Z-type hexaferrite내에 중첩된 10개의 부격자의 스펙트럼을 6-sextets 형태로 분석하였다. 스핀전이 구간에서 초미세자기장과 전기사중극자 이동치가 급격하게 변화를 보였으며, 이성질체 이동치를 통해 모든 부격자에서  $Fe^{3+}$ 상태임을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] S. H. Chun, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 177201 (2012).

# W-Type $\text{BaCo}_{1.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 의 Spin Reorientation 연구

고병욱<sup>1,\*</sup>, 심인보<sup>1</sup>, 김철성<sup>1</sup>, 이영배<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 물리학과

<sup>2</sup>한중대학교 교양학부

## 1. 서론

1950년도에 발견된 hexaferrite는 고주파수 영역에서 사용가능한 안테나 소재이며, 그 중 W-type은 다른 type에 비하여 흡수체로서 뛰어난 특성을 가지고 있어서 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 모조성  $\text{BaCo}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  물질의 Co자리에 비자성 물질인 Zn를 치환시키면 원래의 물질보다 더욱 우수한 자기적 특성을 가지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 직접합성법으로 제조한  $\text{BaCo}_{1.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  시료의 결정학적 및 자기적 특성에 대해 연구하였다.

## 2. 실험방법

$\text{BaCo}_{1.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 의 조성을 갖는 W-type hexaferrite 분말 시료를 직접합성법으로 제조하였다.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ 를 출발 물질로 사용, 이것을 혼합한 후 불밀을 이용하여 습식 분쇄를 하였다.  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 열처리 과정을 거친 후  $1275\text{ }^\circ\text{C}$ 를 최종 하소온도로 하여 제조하였다. 시료의 결정학적 특성을 측정하기 위해 Cu-K $\alpha$ 선을 사용하는 x-선 회절 실험(XRD)를 하였고, Rietveld 정련법을 이용한 full prof 프로그램을 통해 격자 상수 값을 얻어내었다. 진동 시료 자화율(VSM) 실험을 통하여 상온에서의 거시적 자화특성과 4.2 K부터 800 K까지의 온도별 자화특성 변화를 측정하였다. 마지막으로 Mössbauer 분광 실험을 통하여 4.2 K부터 295 K까지의 Zn가 치환된  $\text{BaCo}_{1.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 의 미시적인 자기적 특성을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

직접합성법으로 제조된  $\text{BaCo}_{1.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  시료를 x-선 회절(XRD) 실험을 하였다, 이를 Rietveld 정련법을 이용한 full prof 프로그램을 통해 분석하여 단일상인 것을 확인하였으며,  $P6_3/mmc$ 의 공간군을 가지는 hexagonal 구조를 가졌다. 진동 시료 자화율(VSM) 실험을 통해  $\text{BaCo}_{1.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  시료의 자기이력 곡선과 보자력 값, 포화 자화 값을 구했다. 그리고 4.2K부터 800K까지의 온도별 자화 특성 변화를 측정하면서 spin 형태가 변하는 두 번의 spin reorientation가 나타났고, 큐리온도( $T_c$ )도 나타났다. Mössbauer 분광 실험을 통해 4.2K부터 295K까지의 미시적인 자기적 특성과 초미세 상호작용을 확인하였다. 그 결과, 7개의 Fe 결정학적 부격자 ( $4f_{VI}$ ,  $6g$ ,  $4f_{VI}$ ,  $4e_{IV}$ ,  $4f_{IV}$ ,  $12k_{VI}$ ,  $2d_V$ )를 5개의 sextet으로 분석을 하였으며, Zn가 치환되면서 Fe down-site인 tetrahedral site( $4e_{IV}+4f_{IV}$ )의 면적비가 감소하였다.

## 참고문헌

[1] R. C. Pullar, *Prog. Mater. Sci.* **57**, 1191, (2012)

[2] G. Albanese, E. Calabrese, A. Deriu, *hyperfine Interaction*, **28**, 487-489, (1986)

# Fe-Si-Cr분말의 열처리가 미세조직 및 전자기특성에 미치는 영향

장평우<sup>1,\*</sup>, 김종렬<sup>2</sup>, 배철준<sup>2</sup>, 최광보<sup>3</sup>

<sup>1</sup>충북 청주시 청원구 대성로 298 청주대학교

<sup>2</sup>경기도 안산시 상록구 한양대학교로 55 한양대학교 재료공학과

<sup>3</sup>인천시 남동구 남동공단 11B-9L (주)창성

모바일기기가 급속히 보급됨에 따라 전자부품의 크기도 소형화, 고성능화가 진행되고 있으며 이에 따라 인덕터의 작동 주파수도 10 MHz 이상으로 높아지게 되었다. 또한 고주파화와 함께 구동전압의 저전압화, 대전류화가 진행되어 모바일 기기 전원으로 DC/DC 컨버터 회로가 많이 사용되고 있고, 여기에 사용되는 인덕터는 스위칭 주파수의 고주파수에 의한 인덕턴스의 감소와 대전류에 대한 직류저항의 감소가 동시에 요구되고 있다. 이러한 조건을 만족시키기 위해선 잘 알려진 Fe-6.5%Si으로는 비저항이 너무 낮아 고주파에 대응할 수 없어 실리콘의 함량이 더 높은 조성이 더 적합하다. 이와 같이 실리콘 함량이 10% 근처로 높아지면 B2, DO<sub>3</sub>의 규칙상의 생성이 촉진되고 이들의 분포 거동에 따라 자성분말의 전자기적 특성이 영향을 받는다. 본 연구에서 가스분무된 평균직경 14.4 μm 이하의 Fe-9%Si-2%Cr분말을 질소분위기에서 650°C까지 1시간 열처리하여 규칙상의 생성거동, 그리고 이들의 분포 거동에 따른 전자기적 특성의 변화를 조사하였다. x-선 회절 실험결과(Fig. 1) 분무되면서 분말이 응고되면서 비규칙 A2상과 B2상이 생성되었고 550°C 이상에서 열처리하면 DO<sub>3</sub>상도 생성되었다. 이는 상태도상에서 고온에서 B2상이 먼저 생성되고 냉각되면서 B2와 A2상에서 DO<sub>3</sub>상이 생성되기 때문이다. 550°C에서 열처리를 하면 DO<sub>3</sub>상이 생성되기 시작하면서 B2상의 분율이 줄어들기 시작하지만 650°C에서 1시간 열처리한 경우 B2상이 완전히 사라지지 않았다. B2상이 존재하지 않고 DO<sub>3</sub>상만 존재하면  $I_{(111)}/I_{(200)}$ 의 비는 2.1이나 650°C에서 열처리하면 1.5정도이다. Scherrer식으로 계산한 결과 550°C에서 열처리하면 DO<sub>3</sub>상의 크기는 12 nm 정도이며 650°C에서는 48 nm로 성장하였다. DO<sub>3</sub>상의 석출거동은 TEM 분석에서도 확인할 수

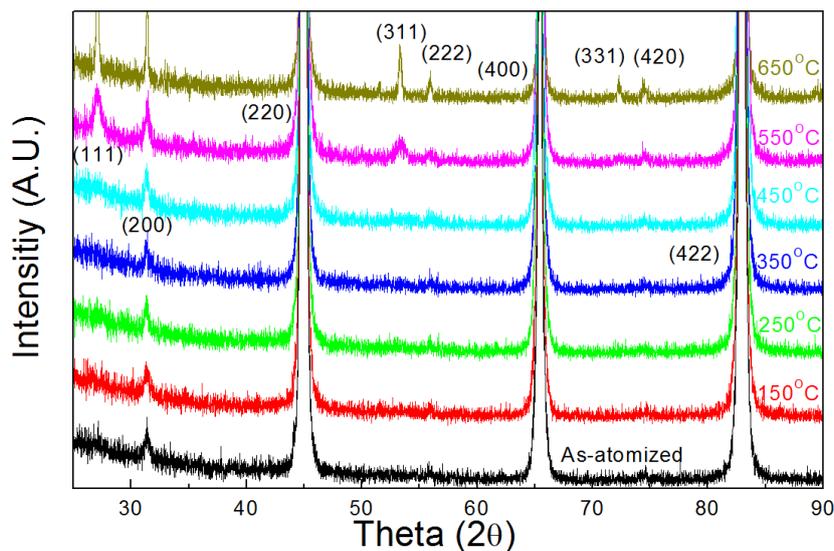


Fig 1. x-ray diffraction patterns of Fe-Si-Cr powder annealed at different temperature.

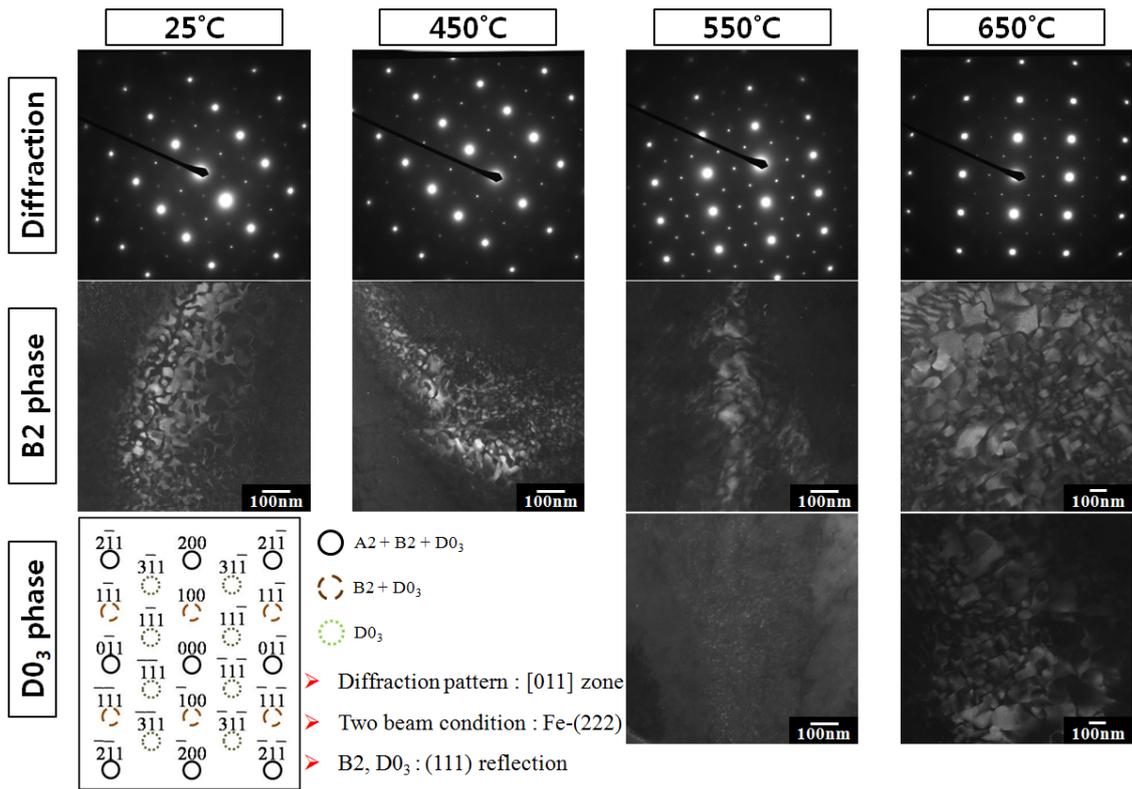


Fig 2. SAD patterns, B2 and DO<sub>3</sub> dark field images of Fe-Si-Cr powders annealed at 25-650°C for 1 hr.

있었다(그림 2). TEM 관찰에서 열처리 온도에 관계없이 DO<sub>3</sub>상의 회절선이 나타났으나 450°C이하에서 열처리 한 분말에서 DO<sub>3</sub> 암시야상을 얻을 수 없었다. 이는 DO<sub>3</sub>상이 수 nm이하로 너무 미세해서 암시야상을 얻을 수 없었던 것으로 판단된다. 그리고 TEM에서 측정된 DO<sub>3</sub>상의 크기는 XRD에서 측정된 크기와 대체로 잘 일치하였다. 이와 같이 미세한 DO<sub>3</sub>상이 분포하게 되면 계면에서 전자산란이 증가하여 전기비저항이 증가하는 것이 잘 알려져 있으며 이러한 비저항의 증가는 고주파 투자율을 현저하게 향상시킬 수 있다. VSM으로 열처리 온도에 따른 보자력을 조사한 결과 가우스미터의 분해능때문에 보자력의 변화경향을 정확히 판단할 수 없었으며 고주파 투자율의 변화와 함께 학술행사장에서 발표할 것이다.

# Magnetic properties of Fe alloy powder coated with Titanium oxide

SungJoon Choi<sup>1,\*</sup>, SunWoo Lee<sup>1</sup>, Hui Eun Kim<sup>1</sup>, Sang-Kyun Kwon<sup>2</sup>, and Sang-Im Yoo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, and Research Institute of Advanced Materials,  
Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>2</sup>Corporate R&D Institute, Samsung Electro-Mechanics, Suwon, 443-743, Korea

In recent years, the soft magnetic composites (SMC) have attracted great interests as the potential applications in electromagnetic circuits, sensors, electromagnetic actuation devices, low frequency filters, induction field coils, magnetic seal systems, and magnetic field shielding. Magnetic powder particles are normally coated by insulating oxides to minimize the eddy current loss in the core loss. For this purpose, we tried to fabricate a coated powder composed of a Fe alloy core and shell layer of TiO<sub>2</sub> via the sol-gel method using titanium butoxide (TBO) as the precursor. A uniform coating of the Fe alloy core with TiO<sub>2</sub> was successfully achievable by controlling the process condition, such as reaction time and concentration of precursor. Also, the effect of dieing pressure during the fabrication of core was studied. Magnetic properties of TiO<sub>2</sub>-coated Fe alloy powder were sensitive to the coating conditions of TiO<sub>2</sub>. Details will be presented for a discussion.

This work was supported by a Grant from *Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.*

## Cu코어/NiFe셸 복합와이어에서 대각(diagonal) 임피던스 스펙트럼

김동영\*, 구태준, 조성언, 윤석수  
안동대학교 물리학과

Cu 와이어에 전기도금으로 NiFe를 증착하여 Cu코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>셸 구조의 복합와이어를 제작하였다. 이때 Cu 코어의 반경은 약 200  $\mu\text{m}$ 였으며 NiFe셸의 두께는 약 20  $\mu\text{m}$ 였다. 제작된 복합와이어에 그림 1(a)와 같이 도선을 부착한 후 주파수  $f$ 의 교류전류  $i(f)$ 를 인가하고 이때 발생한 교류전위차  $v(f)$ 를 측정하면 이 둘의 비  $v(f) / i(f)$ 로부터 Cu코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>셸 복합와이어에 대한 임피던스 텐서의  $Z_{zz}$  대각 성분을 구할 수 있다. 이와달리 그림 1(b)와 같이 복합와이어에 코일을 감은 후 코일에 교류전류를 인가하고 이때 발생한 교류전위차를 측정하면 임피던스 텐서의  $Z_{\theta\theta}$  대각 성분을 구할 수 있다. 본 발표에서는 HP4192A 임피던스 분석장치를 이용하여 10 kHz에서 10 MHz 주파수 범위에서 두 대각 임피던스  $Z_{zz}(f)$ 와  $Z_{\theta\theta}(f)$  스펙트럼을 헬름홀츠 코일을 이용하여 와이어의 길이방향(z방향)으로 가한 외부자기장  $H_e$  하에서 측정한 결과를 제시한다. 그리고 Maxwell 방정식으로부터  $Z_{zz}$ 와  $Z_{\theta\theta}$ 를 각각 복소 투자율 텐서의  $\mu_{zz}^*$ 와  $\mu_{\theta\theta}^*$  대각 성분과 연관짓는 식을 유도하여 제시한다. 이 식을 이용하여 측정된  $Z_{zz}(f)$ 와  $Z_{\theta\theta}(f)$  스펙트럼으로부터 각각  $\mu_{zz}^*(f)$ 와  $\mu_{\theta\theta}^*(f)$  스펙트럼을 뽑아낸 후, 이 두 스펙트럼의 자기장 의존성을 자기완화 현상과의 관계에서 비교분석하여 Cu코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>셸 복합와이어의 자기이방성과 교류 자화과정을 규명하고자 한다. 이러한 분석결과로부터 Cu코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>셸 복합와이어의 자기임피던스 효과를 자기센서에 응용하고자 할 경우  $Z_{zz}$ 와  $Z_{\theta\theta}$  대각 임피던스가 가진 장단점도 제시하고자 한다.

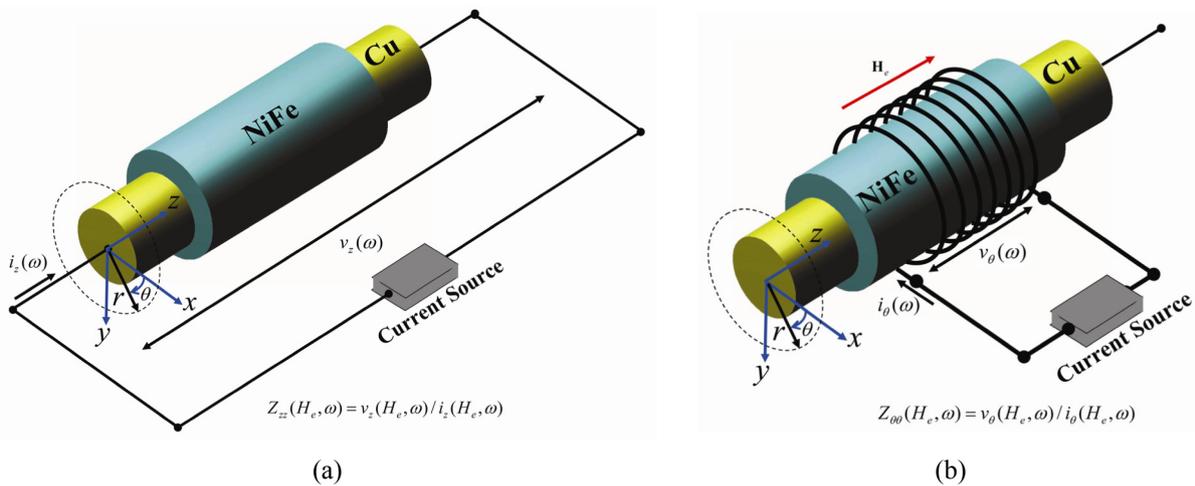


그림 1. Cu코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>셸 구조의 복합와이어의 (a)  $Z_{zz}(f)$ 와 (b)  $Z_{\theta\theta}(f)$  대각 임피던스

# The manufacture of soft magnetic alloy using micro-powder

MinYoung Lee<sup>1</sup>, HanYeol Jo<sup>1,\*</sup>, BoWha Lee<sup>1</sup>, Jihyun Sung<sup>2</sup> and SangYoon Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Oxide Research Center, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Gyeonggi-do

<sup>2</sup>Korea Institute of Industrial Technology, Application Division Ultimate Manufacturing Technology Center

<sup>3</sup>Advanced Institutes of Convergence Technology, Seoul National University

Magnetic alloy are of great interest because of various applications such as electric devices and medical devices. The alloys have been mostly fabricated with the powder metallurgy method which is carried out through a series of common processes including sintering, vacuum melting, and machining. Among them, vacuum melting is a critical step to obtain high quality alloys not only because it prevents the alloy from contamination due to oxidation during alloying but also it makes uniformly alloying. However, this method is very expensive and has limitation in fabricating the patterned and the micro-sized alloys. Herein, we present a rapid method to make high quality magnetic alloys with sub-millimeter pattern scale using Laser cladding method.

The Laser used in this work is a CW CO<sub>2</sub> laser (maximum power: 4kW), and the cladding power is kept at 400W. Purchased high purity Fe, Ni, Co, and Al metal powders are used for binary and ternary alloys. More than two types of metal powders with diameter in the range of 50 to 150  $\mu\text{m}$  are simultaneously injected at a speed of 4g/min with Ar gas. Different growth rates and heights are observed depending on the type and composition of the alloys. By x-ray fluorescence we also observed the difference between the output composition and the input composition, which is strongly dependent on the size and melting point of the injected metal powders. When metal powders with particle size of less than 100  $\mu\text{m}$  were used, the surface of the alloy has many cracks and porous cross-section was observed. Based on the above results, we manufactured soft magnetic alloys such as Fe-Al, Fe-Co (binary alloy), and AlNiFe (ternary alloy) by considering the density and melting points of different metal powders and optimizing the composition and laser power. The microstructural properties and composition uniformity of the alloys are characterized by SEM and EDX, and the magnetic property and crystallization are analyzed by VSM and XRD, respectively. We could also fabricate alloys that can be used directly in everyday life through simple surface treatment process. Therefore in terms of easy molding, the technique of laser cladding can be utilized in various related industrial applications.

# Magnetic Properties of TiO<sub>2</sub>-coated Fe-Cr-Si alloy powder

Sunwoo Lee<sup>1,\*</sup>, Sungjoon Choi<sup>1</sup>, Hui Eun Kim<sup>1</sup>, Sungjin Choi, Seungnam Yang<sup>2</sup>, Sang-Im Yoo<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, and Research Institute of Advanced Materials,  
Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>2</sup>Department of SMD, Changsung, Incheon 405-846, Korea

<sup>†</sup>131-407, Seoul National University, Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea; siyoo@snu.ac.kr

Iron (Fe) metal powder have been used for inductor cores at high frequency since they exhibit soft magnetic properties of high saturation magnetization and low coercivity. However, a large core loss due to the eddy current induced by ac field has been one of the most serious problems at high frequency for real applications. To reduce the inter-particle eddy current loss, we tried to produce a core-shell structure composed of TiO<sub>2</sub> coated-Fe powder. The Fe powder in this study are composed of 8~9%Si, 2%Cr, Fe bal. The Fe-TiO<sub>2</sub> core-shell structure was synthesized by a sol-gel process using titanium-butoxide (TBOT) as a precursor of TiO<sub>2</sub>. The coating parameters, such as the coating time and the concentration of TBOT, were controlled to achieve thin and uniform coating layer. The core loss could be greatly reduced by producing the Fe-TiO<sub>2</sub> core-shell structure. Detailed relationship between processing, microstructure, and magnetic properties of inductor cores using TiO<sub>2</sub>-coated Fe powder will be presented for a discussion.

This work was supported by a Grant from *World Class 300* (0417-20140105).

**Keywords** : Fe powder, TiO<sub>2</sub> coating, insulating coating, eddy current loss

# Temperature dependence of magnetic property in CoSiB-based thin-film structures

Sol Jung<sup>1,\*</sup>, and Haein Yim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Republic of Korea

## 1. Introduction

Since perpendicular magnetic anisotropy was first observed, it has attracted interest in relation to high-density magnetic recording media and has been studied as a possible candidate mechanism for use in high density spin transfer torque magnetic random access memory [1,2]. High-density magnetic recording media are types of next-generation memory technology. However, in order this high-density, next-generation memory devices require large coercivity ( $H_c$ ), high magnetic anisotropy ( $K_u$ ) and low saturation magnetization ( $M_s$ ). Large  $H_c$  is particularly required in order to overcome the demagnetizing fields in high density magnetic recording media [3-6].

Thin films composed of both ferromagnetic metals and nonmagnetic materials have been studied with a view to enhancing  $K_u$ . Furthermore, amorphous materials have been introduced as substitutes for transition metals. As a result, thin films composed of the above mentioned amorphous materials and non magnetic materials have been investigated in the search for relatively high  $K_u$  and low  $M_s$ . In general, amorphous materials have been found to exhibit low  $M_s$  and modest  $K_u$  [7-12].

## 2. Experiment

The chamber's base pressure was up to  $2.0 \times 10^{-7}$  Torr, and the working pressure was  $2 \times 10^{-3}$  Torr. All films were uniformed in size,  $1.4 \text{ cm} \times 1.4 \text{ cm}$ , and were deposited by ultra high-vacuum system at room temperature. In order to study about thermal effect, all samples were annealed by rapid thermal annealing system between  $300^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ . The magnetic properties of all thin-films were measured by a vibrating sample magnetometer.

## 3. Result and discussion

The  $H_c$  and  $M_s$  depend on temperature and the shape of hysteresis loop shows bow-tie shape at high temperature. According to change the values of  $H_c$  and  $M_s$ ,  $K_u$  exhibits various values with increasing temperature. The details will be shown in conference.

## 4. Conclusion

In this research, we studied the thermal effects on the magnetic properties of the CoSiB/Pd multilayers with perpendicular magnetic anisotropy and the temperature dependence. In a future study, a more diverse and systematic study will be performed to confirm this correlation between physical description of the magnetic properties and the temperatures.

## 5. References

- [1] G. H. O. Daalderop, P. J. Kelly, and M. F. H. Schuurmans, *Phys. Rev. B* 50, 9989 (1994).
- [2] F. J. A. den Broeder, D. Kuiper, A. P. van de Mosselaer, and W. Hoving, *Phys. Rev. Lett.* 60, 2769 (1988).
- [3] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsumura, and H. Ohno, *Nature Mater.* 9, 721 (2010).
- [4] J. W. Cai, S. Okamoto, O. Kitakami, and Y. Shimada, *Phys. Rev. B* 63, 104418 (2001).
- [5] J. Z. Sun, *Phys. Rev. B* 62, 570 (2000).
- [6] F. J. Albert, N. C. Emley, E. B. Myers, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Phys. Rev. Lett.* 89, 226802 (2002).
- [7] K. Yagami, A. A. Tulapurkar, A. Fukushima, and Y. Suzuki, *Appl. Phys. Lett.* 85, 5634 (2002).
- [8] D. M. Apalkov, and P. B. Visscher, *Phys. Rev. B* 72, 180405(R) (2005).
- [9] B. S. Chun, I. S. Yoo, Y. K. Kim, J. Y. Hwang, J. R. Rhee, T. W. Kim, and W. J. Park, *Appl. Phys. Lett.* 87, 082508 (2005).
- [10] Y. K. Kim, *J. Magn. Magn. Mater.* 304, 79 (2006).
- [11] J. Y. Hwang, J. S. Park, H. I. Yim, T. W. Kim, and S. B. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 11, 856 (2011).
- [12] S. Jung, J. B. Yoon, and H. I. Yim, *J. Korean Phys. Soc.* 62, L10 (2013).

# Characterization of Fe-based soft magnetic amorphous alloy system with high saturation magnetization

Sumin Kim<sup>1,\*</sup>, and Haein-Yim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Republic of Korea

## 1. Introduction

There has been an increasing interest in Iron-based (Fe-based) ferromagnetic amorphous materials due to their attractive properties such as low material cost, ultrahigh strength and high corrosion resistance. In addition, Fe-based soft magnetic amorphous materials have good soft magnetic properties including high saturation magnetization ( $M_s$ ), low coercivity ( $H_c$ ) and high permeability [1-6]. It is important to choose appropriate component element and composition of Fe-based alloy system for suitable properties [7]. We added Cobalt, because Fe-Co system exhibits the high saturation magnetization and the permeability in comparison to Fe-only and Co-only systems. We also added minor Boron to improve the thermal and structural stability. However, it could decrease the saturation magnetization. Similar to the Boron, Zirconium can promote the glass-forming ability. The goal of this study is to obtain optimum composition of the Fe-based alloy system with high saturation magnetization.

## 2. Experiment

The ingots of a new collection of Fe-based soft magnetic alloy were prepared by arc-melting. By using a melt-spinning technique, we fabricated thin ribbons of amorphous alloys. Also we used a x-ray diffraction to characterize the glassy structure of our ribbons. The thermal characterization was carried out by using a differential scanning calorimeter. The soft magnetic properties including the saturation magnetization and the coercivity were measured by using a vibrating sample magnetometer.

## 3. Result and discussion

The hysteresis loops of these amorphous ribbons were measured by using a vibrating sample magnetometer in order to study magnetic properties. The hysteresis loops of the as-spun Fe-Co-based ribbons with width of  $2 \times 10^{-3}$  m. From these data, the values of  $M_s$  and  $H_c$  are obtained and we will present in the conference. The Fe-Co-Ti-Zr-B alloy system has good soft magnetic properties including a low  $H_c$  (~1 Oe) for good soft magnetic amorphous alloy. In this system, we acquired the highest  $M_s$  (1.67T) that is the best saturation magnetization in recent study.

## 4. Conclusion

In conclusion, in this system, Fe-Co-Ti-Zr-B ribbons have better soft magnetic properties than other soft magnetic amorphous ribbons in our previous study. The specimens used in this experiment have been prepared by the melt-spinning technique without annealing treatment. Therefore, ribbons of the Fe-Co-Ti-Zr-B alloy system is expected to improve their characterization after annealing process. In conclusion, Fe-Co-Ti-Zr-B alloy system studied here are good candidates for practical and functional applications as the soft magnetic materials.

## 5. References

- [1] A. Inoue, B. L. Shen and C. T. Chang, *Acta Mater.* 52, 4093 (2004).
- [2] B. L. Shen, A. Inoue and C. T. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 4911 (2004).
- [3] C. T. Chang, B. L. Shen and A. Inoue, *Sci. Eng. A*, 449-451, 239, (2007).
- [4] S. J. Pang, T. Zhang, K. Asami and A. Inoue, *Acta Mater.* 50, 489 (2002).
- [5] S. F. Guo, L. Liu, N. Li and Y. Li, *Scri. Mater.* 62, 329 (2010).
- [6] B. L. Shen, C. T. Chang, T. Kubota and A. Inoue, *J. Appl. Phys.* 100, 013515, (2006).
- [7] J. Wang and Z. Wang, *J. Magn. Magn. Mater.*, 328, 62 (2013).

## Core-shell ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnS composites for photocatalytic applications

Pilsun Yoo<sup>1,\*</sup>, D. Amaranatha Reddy<sup>1</sup>, Sang-Eun Bae<sup>2</sup>, Bo Wha Lee<sup>1</sup>,  
Seong Huh<sup>2</sup>, and Chunli Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Oxide Research Center, Hankuk University of Foreign Studies,  
Yongin 449-791, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Chemistry and Protein Research Center for Bio-Industry, Hankuk University of Foreign Studies,  
Yongin 449-791, Republic of Korea

ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnS core-shell nanocomposites were prepared to combine the magnetization effect of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles (NPs) and the photocatalytic activity of ZnS for retrievable photocatalytic systems. A two-step synthesis procedure was adopted to prepare the ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnS core-shell nanocomposites. First, magnetic ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> NPs with an average dimension of 60 nm were synthesized by a hydrothermal method. Then, ZnS NPs with an approximate dimension of 5 nm were successfully attached to the surface of the as-synthesized ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> magnetic NPs through a co-precipitation process. Structural features of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> NPs and the composite material were investigated with PXRD and TEM measurements. Although bulk ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> is an antiferromagnetic material, hydrothermally prepared ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> NPs exhibited high enough magnetization to make it possible to re-collect the composites by a magnet after photocatalytic reactions. Photocatalytic decomposition of methyl orange by ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnS core-shell nanocomposites under the irradiation of near-visible light was compared with that of ZnS NPs under the same conditions. The ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnS core-shell nanocomposites showed much faster reaction rate in early stage of reaction (within the first 3 h), and comparable effects after 4 h. Therefore, the ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnS nanocomposites prepared by simple approach can be a promising retrievable photocatalyst.

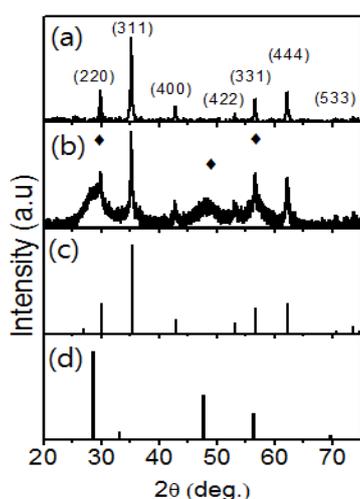


Fig. 1 (a) ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle; (b) ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> /ZnS composite; (c) ICDD data of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ; (d) ICDD data of ZnS

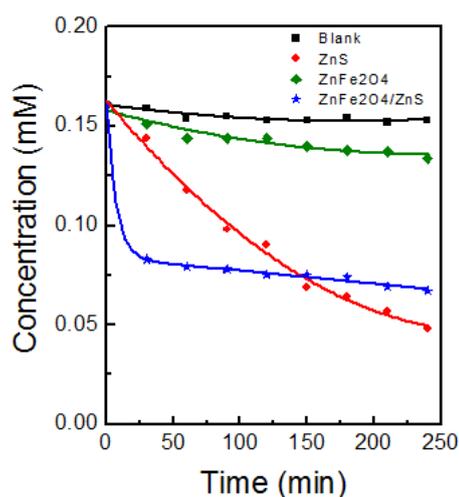


Fig. 2 photocatalytic behavior of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle, ZnS nanoparticle, and ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> /ZnS composite

# 열처리 조건에 따른 Fe-Cu 시험편의 자기이력곡선 변화 측정

이철규<sup>1,2,\*</sup>, 김성수<sup>1</sup>, 손대락<sup>2</sup>, 박덕근<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원 원자력재료안전연구부 (대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111)

<sup>2</sup>한남대학교 광.센서공학과 (대전광역시 대덕구 한남로 70)

## 1. 서론

Fe-Cu 재료는 원자로 압력용기 조사손상을 모사하는데 널리 사용된다. 본 실험에서는 Cu의 Fe-Cu 강은 중성자 조사취화에 가장 많은 영향을 미치는 Cu 석출물을 연구하는데 많이 이용되고 있으며, 열처리를 통한 재료열화평가에도 이용되고 있다. 본 연구에서는 Fe-Cu강을 제조하여 적절한 시간동안의 열처리를 통하여 Cu 석출물을 조절함으로써 조사취화와 재료열화 현상을 모사하는 실험을 하였다.

## 2. 실험방법

Cu의 성분이 0.1%와 0.45%인 Fe-Cu합금에서 열처리 조건을 변화하면서 이에 따른 자기이력곡선의 변화를 측정 하였다. 자기적 성질과 기계적 성질 및 미세조직의 상관관계를 규명하기 위하여 열처리한 Fe-Cu시험편의 미세경도를 측정 하였으며, 전자현미경을 이용하여 Fe-Cu 시험편의 미세조직을 측정하였다. 자기이력곡선을 측정하여 보자력, 잔류자화, 투자율 및 포화자화를 측정하였으며, 보자력은 열처리 시간에 따라 증가하였으며, 포화자화는 거의 변화하지 않았다. 미세경도는 열처리 시간에 따라 증가하였으며, 자기적 파라미터와 미세경도 사이의 상관관계를 구하였다. 본 연구는 자기이력곡선을 사용하여 재료열화를 비파괴적으로 평가하는데 이용될 수 있다. 그림 1은 Fe-Cu 강의 자기이력곡선 측정 결과이다. 이 그림에서 S1은 0.05%의 Cu가 함유된 재료이며, S5는 0.45%의 Cu가 함유된 재료이다.

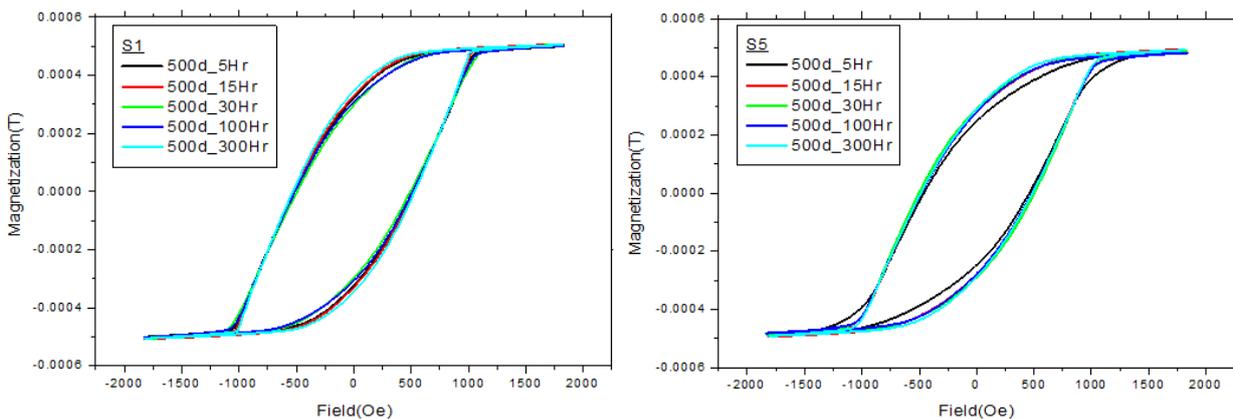


그림 1. Fe-Cu 강의 자기이력곡선 측정

## 3. 참고문헌

- [1] 송은영, CoFe/Cu 박막의 자기저항 효과 속명여대 물리학과 대학원학위논문(1996)
- [2] 신경호외 2인, 열처리 온도와 시간에 따른 비대칭 자기이력곡선의 변화 한국자기학회 (1995)

# Magnetic and electric properties of FeGe<sub>2</sub>

Byong Sun Chun<sup>1,\*</sup>, Chanyong Hwang<sup>1</sup>

Center for Nanometrology, KRISS

Figure shows the magnetization versus temperature (M-T) curves both an in-plane and an out-of-plane configuration at temperatures ranging from 30 to 320 K. In here, magnetization is measured under the external magnetic field of 4 kOe. At above room temperature, FeGe<sub>2</sub> film does not shows any magnetic moment then at around 275 K magnetic moment start to arise. FeGe<sub>2</sub> has different magnetic structure along the c-axis and a-axis. FeGe<sub>2</sub> has ferromagnetic alignment of Fe atoms along the tetragonal c-axis while antiferromagnetic spiral structure along the a-axis and results in formation of two magnetic sublattices. Figure also shows the temperature dependent resistivity of the FeGe<sub>2</sub> film under the external magnetic field. At lower temperature region (30–230 K) the resistivity shows a gradual increase with temperature, which shows a positive gradient of 0.125  $\mu\Omega\text{cm/K}$ . At the temperature from 230 K to 275 K, the resistivity of the FeGe begins to sharply increase with a positive gradient of 7.4  $\mu\Omega\text{cm/K}$ . However, beyond 275 K it suddenly decreases. The nature of decreasing and increasing resistivity with temperature indicates nonmetallic and metallic behavior, respectively. Therefore, the resistivity measurement of the FeGe<sub>2</sub> reveals a semiconductor-metal transition. The presence of a local maximum in the resistivity versus temperature (metal-insulator type transition temperature) in ferromagnetic metals and paramagnetic semiconductors is closed to the Curie temperature ( $T_C$ ). In this, ferromagnetic-paramagnetic transition observed around 275 K ( $T_C$ ). As shown in this figure ferromagnetic-paramagnetic transition have a significant effect on the resistivity. The development of ferromagnetism results in increment of electrical conductivity. Under the external magnetic field with lowering the temperature, the degree of ordering increases and this leads to growth of the ferromagnetic phase but shrinkage of semiconductor phase results in metal-insulator type transition. In FeGe<sub>2</sub>, initially, relatively small metallic ferromagnetic domains (Fe) are embedded in relatively large semiconducting paramagnetic domains (Ge), when the temperature is decrease with increasing external magnetic field, the ferromagnetic domains are growing, and results the type of conductivity change from semiconducting to metallic.

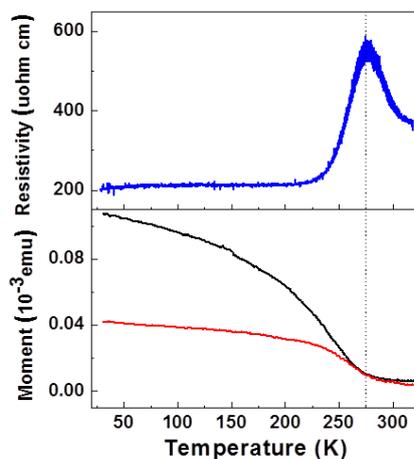


Fig. 1. Magnetic and electric properties of FeGe<sub>2</sub>

## 자구벽 확장 패턴 분석을 통한 자구벽 형태 결정

김대연<sup>1,\*</sup>, 김덕호<sup>1</sup>, 문준<sup>1</sup>, 최석봉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 물리천문학부

전류를 이용한 자구벽 운동은 학문적 측면 뿐 만 아니라 racetrack memory와 같은 소자 응용적인 측면에서도 큰 관심을 받고 있다. 특히 소자로서의 응용적인 측면에서, 빠른 자구벽 운동이 필수적인데, 최근 스핀-궤도 토크가 높은 효율로 자구벽 운동을 발생시킨다는 것이 보고되었다. 이 때, 스핀-궤도 토크는 자구벽의 형태 (Néel혹은 Bloch)에 크게 의존하며, 따라서 물질의 자구벽 형태를 알아내는 것은 굉장히 중요하다. 이번 실험에서는 수평, 수직 외부 자기장 하에서 자구벽의 형태가 서로 다른 세 가지 자성 박막의 자구의 확장 패턴을 관측하였다. 그 결과 right-handed Néel형태의 자구벽은 인가한 수평 자기장과 평행한 방향으로, left-handed Néel형태의 자구벽은 수평 자기장과 반평행한 방향으로, Bloch 형태의 자구벽은 수평 자기장과 수직인 방향으로 길게 성장하는 것을 확인하였다. 이렇게 자구벽의 형태에 따라 자구의 선호하는 확장 방향이 다른 이유는 외부 수평 자기장과 자구의 자화 사이의 Zeeman 에너지가 자구벽 형태에 따라 자구벽의 에너지를 최소화 시키는 지점이 다르기 때문임을 알아내었다. 따라서 최종적으로 자구벽의 형태에 따라 자구의 확장 패턴이 서로 다르다는 것을 이용해, 자구벽의 형태를 결정할 수 있다는 것을 이번 발표를 통해 보고한다. 자구벽의 확장 패턴은 단일 MOKE 이미지만으로 쉽게 확인할 수 있기 때문에, 고효율 자구벽 운동이 가능한 박막을 탐색하는데 도움이 될 것으로 예상된다.

## 3d, 4d, 5d 전이금속을 이용한 Co 수직 자성 초박막의 스핀궤도 돌림힘과 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용

조정구<sup>1\*</sup>, 황현석<sup>1</sup>, 김대연<sup>1</sup>, 윤상준<sup>1</sup>, 김덕호<sup>1</sup>, 문준<sup>1</sup>, 제송근<sup>1</sup>, 최석봉<sup>1</sup>, 오영완<sup>2</sup>, 박병국<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 물리천문학부

<sup>2</sup>한국과학기술원

전류인가 자구벽 운동은 차세대 고집적, 저전력 소자 메모리의 구현 원리로 주목 받고 있다. 특히 Dzyaloshinskii-Moriya(DM)상호작용이 수직자성 초박막에서 자구벽 구조에 존재함이 밝혀지면서 그 응용 범위가 점차 넓어지고 있다. 이는 자성층과 비자성-중금속 물질 내부에 전류전 흐를 때 발생하는 스핀 홀-스핀궤도 돌림힘에 의한 자구벽 이동현상에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 즉, 수직자성 초박막의 DM상호작용과 스핀궤도 돌림힘의 물리적 원리를 규명이 중요할 뿐 아니라 차세대 고집적, 저전력 소자 메모리를 구현하는데 핵심적인 원리를 구현 할 것으로 기대 되고 있다. 본 연구는 다양한 수직 자성 초박막에서 DM상호작용과 스핀궤도 돌림힘을 연구하기 위해 Ta 5nm / Pt 2.5nm / Co 0.6 nm / X (5nm) [X= Ti(3d), Cu(3d), Ru(4d), Pd(4d), Ta(5d), W(5d), Au(5d)] 의 구조의 수직 자성 초박막을 제작하였다. 이렇게 제작된 수직 자성 초박막은 기존에 보고된 비대칭 자구벽 확장법을 이용하여 평면 자기장과 자구벽 속도에 대한 관계로 유효 DM 자기장을 측정할 수 있다.[그림 1.] 이후,  $w$ - $2w$  전기 측정방법을 사용하여 스핀 궤도 돌림힘을 측정할 수 있다. 이로부터 3d, 4d, 5d 전이금속 에 따른 자성 초박막의 DM 상호작용과 스핀궤도 돌림힘의 경향성을 보고하고자 한다.

Current-induced domain-wall motion has been intensively studied over the last decades due to its promising application toward high-density and low-energy-consumption memory and logic devices. Recently, it has been found that the efficiency of the domain-wall motion can be largely enhanced by the spin-orbit torque (SOT) [1] combined with the Dzyaloshinskii-Moria interaction (DMI) [2]. In presence of the DMI caused by a broken symmetry in heavy-metal/ferromagnetic interfaces [3], the Neel-type domain-wall structure is stabilized, which then results in the domain-wall motion driven by the SOT via the spin Hall current from non-ferromagnetic heavy metals [4]. It is therefore radical to analyze the sign and magnitude of the DMI and SOT to understand their physical origin as well as to achieve memory and logic devices. In this study, we investigate the DMI and SOT of various metallic ferromagnetic films, of which the structures are Ta(5 nm)/Pt(2.5 nm)/Co(0.6 nm)/X(1.5 nm) films with various choice of X by Ti(3d), Cu(3d), Ru(4d), Pd(4d), Ta(5d), W(5d), Au(5d), and Mg. The sign and magnitude of the DMI are then measured from the asymmetric domain-wall expansion [3] as shown by Fig. 1. Figure 1 shows the asymmetric domain-wall expansion image (inset) and the domain-wall speed  $v$  with respect to the in-plane magnetic field  $H_x$ , from which the magnitude of the DMI-induced effective field  $H_{DMI}$  is determined by observing the inversion symmetry axis. The figure clearly shows that  $H_{DMI}$  is sensitive to the composition of X. The SOT is then measured by the  $w$ - $2w$  measurement method [5], as exemplified by Fig. 2 for the sample with the choice of X by Ta. The tendency of SOT and DMI will be provided a designing rule for engineering new spintronics devices.

# Angular dependent exchange bias field and coercivity in FeMn/Py bilayers

Hyeok-Chul Choi<sup>1</sup>, Ki-Yeon Kim<sup>2\*</sup>, and Chun-Yeol You<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, South Korea

<sup>2</sup>Neutron Science Division, Korea Atomic Research Institute, Daejeon 305-353, South Korea

We have investigated the angular dependence of both longitudinal and transverse loops in the film plane of the exchange-biased FeMn/Py bilayers by employing vector Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE) magnetometer and numerical calculation based on modified Stoner-Wholfarth model. From the angular dependence, it is found that the relevant magnetic anisotropies such as uniaxial and unidirectional anisotropy is not parallel to the deposition field applied during sample growth. In addition, the rotatable anisotropy much larger than ferromagnetic anisotropy constant is required to elucidate the angular dependence of coercivity in the polycrystalline FeMn/Py bilayers.

# Na<sub>2</sub>FeP<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 양극물질의 자기적 특성 연구

최현경<sup>1,\*</sup>, 고태준<sup>1</sup>, 김철성<sup>1</sup>, 김성백<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 물리학과

<sup>2</sup>건양대학교 기초교육학부

## 1. 서론

최근 차세대 에너지소재로 각광받고 있는 소듐, 리튬이차전지의 양극물질 연구가 활발히 진행 중이다. 소듐 배터리는 낮은 가격과 뛰어난 전기화학적 성능을 보이며, 그 중에서도 높은 열적 안정성을 보이는 Na<sub>2</sub>FeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 양극물질에 주목할 수 있다. Na<sub>2</sub>FeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 양극 물질은 3 V 의 높은 작동 전압을 가졌으며, 이론 용량은 90 mAh/g 으로 우수한 성능을 가지고 있다. 본 연구에서는 Na<sub>2</sub>FeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 물질의 결정학적 특성과 자기적 특성을 연구하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 Na<sub>2</sub>FeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 분말 시료를 직접합성법을 이용하여 제조하였다. 출발 물질인 Na(CH<sub>3</sub>COO), NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O를 계산된 당량비로 혼합하여, agate mortar에서 30분 동안 그라인딩 한 후에, 350 °C 에서 Ar 분위기로 3시간 동안 하소였다. 그 후, 하소한 시료를 다시 agate mortar에서 그라인딩 한 후에, pellet으로 성형한 시료를 600 °C 에서 Ar 분위기에서 소결하였다. x-선 회절 장치 (XRD)을 통하여 시료의 결정학적 특성을 측정하였고, Rietveld 정련법을 통해 분석하였다. 진동시료형 자화측정기 (VSM) 측정을 통하여 상온에서의 거시적 자화 특성을 측정하였고, 피스바우어 분광 실험을 이용하여 미시적인 자기적 특성 변화를 확인하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

직접합성법으로 제조된 Na<sub>2</sub>FeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 양극 물질은 Fullprof 프로그램을 통해 Rietveld 분석 결과, *PI*공간군을 갖는 triclinic 구조로 확인되었다. 격자 상수는  $a_0 = 6.458 \text{ \AA}$ ,  $b_0 = 9.504 \text{ \AA}$ ,  $c_0 = 11.013 \text{ \AA}$ ,  $\alpha = 64.816^\circ$ ,  $\beta = 86.164^\circ$ ,  $\gamma = 73.063^\circ$ 로 분석되었다. 자기적 특성을 얻기 위하여 VSM 실험을 진행하였으며, ZFC-FC 곡선 데이터를 얻었다. 또한, 시료의 reorientation 현상을 알아보기 위하여 VSM 실험을 토대로 피스바우어 분광실험을 실시하였다. 최소자승법으로 분석하였으며, 널 온도 이하의 구간에서 피스바우어 스펙트럼은 8개의 비대칭으로 확인되었다.

## 참고문헌

- [1] P. Barpanda, G. Liu, C. D. Ling, M. Tamaru, M. Avdeev, S. Chung, Y. Yamada, and A. Yamada, *Chem. Mater.*, 2013, **25** (17), pp 3480–3487
- [2] Y. H. Jung, C. H. Lim, J. Kim, and D. K. Kim, *RSC Adv.*, 2014, **4**, 9799-9802

# Study on SOTs in Pt/CoFeB/MgO and Ta/CoFeB/MgO and their interfacial effects by Ti insertion

Hae Yeon Lee<sup>1,\*</sup>, Young-Wan Oh<sup>1</sup>, Byong-Guk Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering and KI for Nanocentury, KAIST, Daejeon 305-701

## 1. 서론

Manipulation of the magnetization by electric field or current has been great interest for realization of spintronic memory and logic devices. Conventionally, spin transfer torques (STTs) were used to control the magnetization especially for STT-MRAM. However, there were numerous disadvantages; perpendicular current that flows across the tunnel barrier causes damage to the barrier, and it shows slow operation speed due to the precessional switching. Recently, new types of torques named spin-orbit torques (SOTs) have been robustly studied as a promising breakthrough, which enables to reduce writing power and to improve reliability of devices.<sup>1</sup>

A number of studies on SOTs have been reported based on heavy metal (HM)/ ferromagnet (FM)/ Oxide (OX) trilayer structure such as Pt/Co/AlO<sub>x</sub> and Ta (W)/CoFeB/ MgO.<sup>2,3</sup> From those early studies, it is known that SOTs are generated by both of two mechanisms: spin Hall effect, which mostly contributes to damping like torque (DLT) and Rashba effect, which mostly contributes to field like torque (FLT). However, it is ambiguous to study each mechanism and its contribution due to the coexistence of interfacial and bulk effects.

In this research, interfacial and bulk effects on SOTs of both Ta/CoFeB/MgO and Pt/ CoFeB/MgO layers were studied by inserting Ti layers with different thicknesses between HM and FM layers. The behaviors of DLT and FLT according to the thickness of Ti were conspicuously different in Ta/Ti(t)/CoFeB/MgO samples and Pt/Ti(t)/CoFeB/MgO samples. Moreover, switching behaviors of each sample were also studied.

## 2. 실험방법과 결과

Two different sets of ferromagnetic layers of Ta(5)/Ti(t)/CoFeB(1)/MgO(1.6) (Ta set) and Pt(5)/Ti(t)/CoFeB(1)/MgO(1.6) (Pt set) were fabricated on Si/SiO<sub>2</sub> substrates by magnetron sputtering where the values of t vary from 0 to 7 (0, 1, 3, 5, 7). Here the numbers in the parenthesis represent the film thickness in nanometers. After adequate annealing for each sample, it became perpendicularly magnetized; Pt(5)/CoFeB(1)/MgO(1.6) sample was annealed at 300 °C with out-of-plane magnetic field cooling and the rest of the samples was annealed at 150 °C without magnetic field.

All samples were patterned to 5 $\mu$ m-width hall cross bar structure by photolithography to measure SOTs. Both DLT and FLT of samples were measured using 2<sup>nd</sup> harmonic lock-in technique with polar angle 86°. To study switching behavior, the Hall resistance was measured applying longitudinal current pulses, which is parallel to the direction of magnetic field sweeping.

As a result, Ta set showed negative 2<sup>nd</sup> signals of DLT and FLT in contrast to Pt set, which showed positive SLT and FLT corresponding to the sign of spin Hall angles of Ta and Pt. The magnitude of both SLT and FLT decreased when Ti layer was inserted between HM (Ta, Pt) and FM layers but the two sets show different decaying behaviors. In Ta set, two torques, SLT and FLT, were gradually decreased maintaining their relative ratio as Ti thickness increases. In Pt set, both two torques were drastically decayed when Ti is inserted compared

to Ta set. Moreover, the magnitude of SLT was significantly larger than that of FLT when there is no Ti insertion. When Ti layer was inserted, the magnitude of FLT exceeded that of SLT. In addition, switching experiment supported the behavior of decreasing SLT.

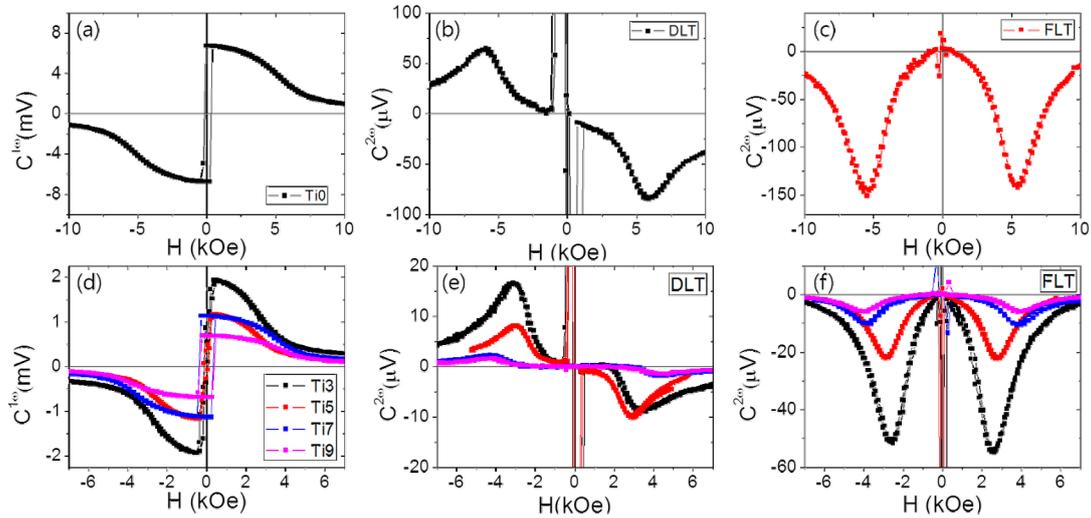


Fig. 1  $1\omega$  and  $2\omega$  signals of Ta set samples were measured at 5 mA. It can be known that the  $2\omega$  signals gradually decreases as Ti thickness increases.

### 3. 결론

We have studied interfacial effect on the SOT in the NM/FM/oxide structures by introduction of Ti layer in-between NM and FM layer. Different behaviors were observed between Ta set and Pt set when Ti is inserted, which indicates that there would not be a single mechanism that determines the magnitude of SOTs.

### 4. 참고문헌

- [1] Hqang-Rae Lee, Kyujoon Lee, Yoshishige Suzuki et al. Scientific Reports 4. 6548 (2014)
- [2] Ioan Mihai Miron, Kevin Carello, Pietro Gambardella et al. Nature 476. 189 (2011)
- [3] Luqiao Liu, Chi-Feng Pai, R. A. Buhrman et al. Science 336 (2012)

# XMCD 분석을 통한 MgO/Co/Pd 구조에서 열처리 후 수직자기이방성에 각 계면의 기여 연구

박진구\*, 김민석, 김상훈, 고정호, 홍종일

연세대학교 공과대학 신소재공학과, 서울특별시 서대문구 신촌동 134, 120-749

## 1. 서론

산화물/강자성체/비자성 금속 구조는 각각의 계면에서 발생하는 수직자기이방성, spin-orbit torque, Dyaloshinskii-Moriya interaction과 같은 특성들을 갖고 있다[1]. 또한 독특하게 모멘텀 공간의 비대칭성으로 인해 라쉬바 현상이 발견될 수 있어 관심이 집중되고 있다[2,3].

MgO/Co/Pd trilayer 구조에서 나타나는 수직자기이방성은 MgO/Co 계면 또는 Co/Pd 계면에서 전자구조의 변화에 의하여 강화될 수 있다. 본 발표에서는 MgO/Co/Pd 구조에서 열처리를 통한 각 계면의 화학적 구조 및 결정구조 변화, 그리고 이러한 변화가 수직자기이방성과 spin-orbit coupling에 미치는 영향에 대하여 논의한다.

## 2. 실험방법 및 결과

MgO 5/Co t/Pd 3 (nm) 구조의 박막은 UHV DC-magnetron 스퍼터링 시스템( $<2.0 \times 10^{-9}$  torr)을 이용하여 증착하였으며, Co 층의 두께를 0.4 nm부터 2.4 nm까지 0.2 nm씩 증가시켰다. 열처리 조건에 따른 수직자기이방성의 변화를 관찰하기 위하여 300 °C, 350 °C, 400 °C에서 각각 1시간 동안 4.5 kOe의 외부 자기장을 가하여 열처리를 진행하였다. Co 층의 두께에 따른 열처리 전후 수직자기이방성의 관찰은 VSM (vibrating sample magnetometer)을 통하여 측정하였다. 계면에서의 화학적 구조와 결정구조는 x-ray absorption spectroscopy (XAS)와 x-ray magnetic circular dichroism (XMCD)를 이용하여 분석하였다. XMCD 측정은 포항 가속기의 2A beam-line에서 진행하였다. 0.6 T의 pulse magnetic field를 번갈아가며 샘플의 수직방향으로 가해주었고, 입사 빔의 angle은 22.5°였다.

MgO/Co/Pd에서 열처리후 자성의 계면에서 구조적 변화효과를 XAS와 XMCD 방법을 이용하여 측정하였다. 열처리 온도에 따른 XAS와 XMCD결과를 그림 1에 나타내었다.

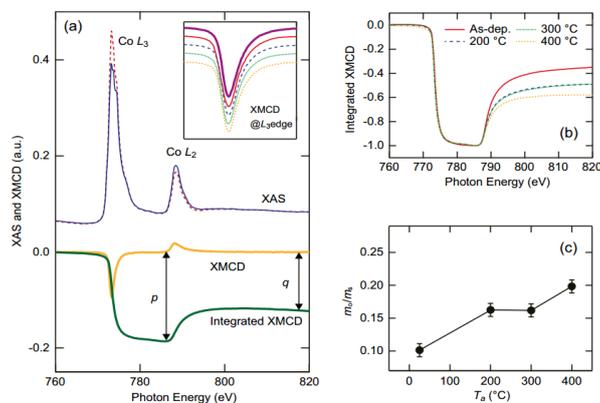


그림 1. (a) MgO/Co/Pd 구조를 400 °C에서 열처리한 시편의 Co L<sub>2,3</sub> edges에서 XAS와 XMCD결과. 붉은 라인과 파란라인은 각각 95% 편광된 X-ray에 parallel과 anti-parallel한 XAS spectra를 나타낸다.

노란색 라인은 XMCD 결과이고, 초록색 라인은 integrated XMCD spectra를 의미한다.

(b) 열처리 온도에 따른 integrated XMCD spectra. (c) 열처리 온도에 따른 m<sub>0</sub>/m<sub>x</sub>.

### 3. 고찰

MgO/Co 계면은 자화특성 변화에 큰 역할을 하지 않음을 확인하였다. Trilayer의 oxidation state는 reference single Co layer와 다르지만, peak의 모양이 전혀 변하지 않음을 확인 할 수 있었다. 이에 열처리 중 MgO/Co/Pd 구조에서 자성특성의 변화는 Co/Pd의 계면의 변화가 주된 원인임을 알 수 있었다. 박막에 수직방향의 orbital의 moments ( $m_o$ )와 spin의 moments ( $m_s$ )를 비를 sum rule로 XMCD spectra에서 계산하였다. 그 결과  $m_o/m_s$ 는 열처리를 하였을 때 크게 증가함을 알 수 있었다.

### 4. 결론

MgO/Co/Pd 구조에서 열처리 전 후의 자기 모멘트 관찰 및 자기이방성의 분석과 XMCD측정을 통해 각 계면이 수직자기이방성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 열처리 후 강한 spin-orbit coupling을 가진다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 MgO/Co/Pd 구조가 스핀전류 형성에 유리한 특성을 가지고 있음을 의미하기 때문에[4] MgO를 기반으로 한 수직자기터널접합, 스핀나노소자 등 수직자화 물질을 이용하는 여러 나노 소자에 응용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 5. 참고문헌

- [1] M. Johnson et al. Rep. Prog. Phys. **59**, 1409 (1996).
- [2] I. M. Miron et al. Nature Mater. **9**, 230 (2010).
- [3] I. M. Miron et al. Nature Mater. **10**, 419 (2011).
- [4] J. H. Jung et al. J. Appl. Phys. **108**, 113902 (2010).

# Hot deformed Nd-Fe-B magnets with additions of Nd-Cu-Zn alloy by spark plasma sintering technique

Shu Liu<sup>1,2,\*</sup>, Nam-Hyun Kang<sup>2</sup>, Ji-Hun Yu<sup>1</sup>, Hae-Woong kwon<sup>3</sup>, Jung-Goo Lee<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Powder & Ceramics Division, Korea Institute of Materials Science, 797 Changwondaero, Changwon 642-831, Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University,  
Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

<sup>3</sup>Department Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Nam-gu, Busan 608-739, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author. Tel./fax: +82 55 280 3606/3392, E-mail address: jglee36@kims.re.kr

The anisotropic hot-deformed (HDed) RE-Fe-B magnets have attracted much attention for their remarkable magnetic properties and broadening various applications due to the ultrafine grained microstructure. Hot deformation usually consists of two steps, hot pressing and die upsetting. During HD process, the initially isotropic Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B nanocrystals in melt-spun flakes transformed to closely stacked laterally elongated grains with the crystallographic *c*-axis parallel to the pressing direction during the DU process, which gives rise to high remanence and energy product, together with exceptional corrosion resistance, thermal stability, and fracture toughness. The spark plasma sintering (SPS) technique has been widely concerned as a new pressure sintering process to consolidate Nd-Fe-B powders to full density at relatively lower temperatures in a short period of time which generates plasma uniform heat the materials and inhibits the grain growth. HDed Nd-Fe-B compact with nanocrystallite texture has been successfully fabricated by SPS and a combination of SPS and HD processes.

In order to further improve the magnetic properties, Dy compounds or low melting point eutectic alloy was applied to grain boundary diffusion coating process. However, a concerted effort was purpose to develop Dy-free high coercivity Nd-Fe-B due to the high cost of the heavy rare earth element Dy. Zn with low melting point (420 °C) has been found increase the wettability and enhance the texture formation and improve the microstructure, Further lead to the increase of remanence and coercivity. The understanding of microstructural evolution with the addition during preparation and deformation is an indispensable step toward the realization of high performance magnets.

In this work, Nd-Cu-Zn alloy was mixed with the initial MQU-F ribbons. HDed Nd-Fe-B magnets were produced by SPS through the optimized method. The effects and microstructure evolution with addition on the magnetic properties hot pressing and die upsetting were discussed in our work.

**Keywords:** NdFeB magnets; Hot deformation; Nd-Cu-Zn; microstructure; SPS

This research was supported by a grant from the Fundamental R&D Program for Core Technology of Materials funded by the Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea.

# Magnetic Nanostructures Fabricated by Thermal Nanoimprint Lithography

Chi-Hieu Luong<sup>\*</sup>, Jong-Ryul Jeong

Department of Materials Science and Engineering and Graduate School of Energy Science and Technology,  
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Recently, nanoimprint lithography (NIL) has received great attention due to their potential applications in devices for electrical, optical, photonic and biological applications. We have successfully fabricated the various magnetic nanostructures using thermal NIL. To fabricate the magnetic nanopatterns, a thin layer of PMMA was coated onto the Si substrate and the PDMS mould was pressed. The sample was heated above the glass transition temperature to transfer the patterns. After the pattern transfer, residual layer was removed using reactive ion etching (RIE). Then ferromagnetic materials such as Fe, Ni, Co were coated by thermal evaporation. In this work, we have investigated the effect of the residual layer on the fabrication of the magnetic nanopatterns and variation of the magnetic properties by changing the geometric shape of the magnetic nanopatterns.

**Keywords:** Magnetic nanostructures, Nanoimprint lithography

# Electromagnetic properties of magnetite hollow nanospheres and porous nanospheres

Rambabu Kuchi<sup>\*</sup>, Jong-Ryul Jeong

Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Energy Science and Technology,  
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Two kinds of Magnetite nanospheres (hollow and porous) composed of primary nanocrystals have been successfully prepared via a one-step solvothermal method with gas-bubble template.  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  was used as single iron resource, polyvinylpyrrolidone (PVP) as the capping agent and urea, sodium acetate were serving as template in this process. To understand the formation mechanism of these nanospheres, the reaction parameters such as the concentration of precursor, gas source are investigated by fixing the reaction temperature and time. Sodium acetate has been played a dual role to control the size and morphology of the nanocrystals based on a gas-bubble Ostwald ripening process. We found that sodium acetate was useful in terms of precipitation of primary nanocrystals furtherly as template. The characterization of the as prepared product was identified with X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and vibrating sample magnetometer (VSM). Due to the porosity, low density of these nanocrystals has been testing for microwave absorbing materials by using the Agilent vector network analyzer.

**Keywords:** Hollow nanospheres, Porous nanospheres, Ostwald ripening, Solvothermal method, Porosity

# Artificial magnetic nanostructures: isolated metal/insulator/metal nanodot arrays with transmission geometry

Thanh Son Vo<sup>1,\*</sup>, Byong-Guk Park<sup>2</sup>, Jong-Ryul Jeong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Energy Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering,  
Chungnam National University, Daejeon 305-764, South Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, KI for the Nanocentury, KAIST, Daejeon 305-701, South Korea

In this study, we have systematically investigated a magnetic resonance absorption and tunability of absorption wavelength in isolated metal-insulator-metal (MIM) nanodot arrays with transmission geometry. The elemental electromagnetic resonances and their hybridizations are studied using 3-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) calculation and resonance properties including the resonance peak tunability, magnetic permeability and quality ( $Q$ ) factor are characterized with respect to the coupling strength. We have found the existence of electric and magnetic resonance mode in the MIM (Au/MgF<sub>2</sub>/Au) structure and the magnetic resonance has larger wavelength tunability than the electric resonance. The absorption cross section calculation revealed that absorption is the dominant extinction process at the magnetic resonance only. Magnetic permeability ( $\mu$ ) calculations for the various MIM parameters showed the maximum value of the imaginary part of  $\mu$  is 16.1 with  $Q$  factor of 9.2 when the size of nanodot is 200 nm and the inter-dot distance is 300nm. The presented calculations can be used to tune the response of the magnetic resonance absorption with a variable resonance wavelength and  $Q$  factor by using the simple MIM structures with transmission geometry.

**Keywords:** metal/insulator/metal structure, magnetic absorption, magnetic permeability, magnetic resonance, nanodot arrays

# XPS를 이용한 Yttrium Iron Garnet (YIG) 자성박막의 구조적 특성 연구

이예림\*, 정종율

충남대학교 신소재공학과, 충남대학교 에너지과학기술대학원

$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)박막은 고주파에서 손실이 매우 작은 전자기 특성과 Faraday 회전이 매우 큰 자기광학특성 때문에 Circulator나 Isolator 등의 고주파 소자나 광통신소자로 널리 활용되고 있다.[1] 최근에는 YIG가 가지는 자성절연체 특성을 활용하는 Spin Seebeck effect를 이용한 열전소자의 소재로도 각광받고 있다. 다양한 YIG 박막 제조 방법 중에 RF sputtering 방법은 원자단위의 균질한 박막의 제조가 가능하고, 타겟에 따라 조성이 결정되어 박막 재현성이 우수한 것으로 알려져 있다. YIG 박막 제조 시 Si (100) 기판을 사용하였다. 일반적으로 YIG 박막 증착 시 격자상수가 거의 일치하는  $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) 기판을 사용하는 것이 일반적이는데, GGG기판의 경우에는 값이 매우 비싸기 때문에 대체의 필요성에 따라 저렴한 Si 기판을 이용하였다. 본 연구에서는 기판 위에 RF magnetron sputtering 방식으로 증착 된 YIG 박막의 자기적 및 자기광학적 특성을 연구하였다. 증착 시 공정온도를 각각 상온과 500 °C로 하였으며 증착 후 700 °C ~ 900 °C에서 post-annealing을 통해 결정화 하였다. 박막 증착 후 post-annealing 온도에 따른 YIG/Si 박막의 구조적 특성 변화를 XPS를 이용하여 연구하였으며, 자기적 특성을 VSM, MOKE를 이용하여 분석하였다.

## 참고문헌

- [1] Setsuo Yamamoto\*, Hirofumi Kuniki, Hiroki Kurisu, Mitsuru Matsuura, and Pyungwoo Jang. phys. stat. sol. (a) 201, No. 8, 1810–1814 (2004)

# 리소그래피로 형성된 Co/Pd 줄무늬 패턴의 계면이방성

김시년<sup>1,\*</sup>, 남윤재<sup>2</sup>, 임상호<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 신소재공학과, 서울특별시 성북구 안암동 고려대학교, 136-713

<sup>2</sup>고려대학교 나노반도체공학과, 서울특별시 성북구 안암동 고려대학교, 136-713

[Co/Pd] 다층박막에서 계면효과에 의해 발생하는 수직자기이방성은 이미 잘 알려져 있다[1]. 그러나 계면 수직자기이방성은  $\sim 4\pi M_s$ (여기서  $M_s$ 는 포화자화값을 의미) 만큼의 강한 탈자기장에 의해 가려진다. 그래서 실질적인 수직자기이방성은 많이 감소되어 나타난다. 탈자기장에 의해 이방성이 감소되는 문제는 박막의 면방향을 따라 Co/Pd 계면을 형성시키면 제거될 수 있다. 따라서 본 연구는 마이크로 및 나노 폭을 지닌 Co/Pd 줄무늬 패턴을 리소그래피로 공정으로 제작한 후 자기적 특성을 측정함으로써 이방성 특성을 평가하였다. 50, 20  $\mu\text{m}$ 의 폭을 지닌 Co/Pd 줄무늬 패턴은 기존의 광리소그래피공정을 이용하였고 382 nm의 Co/Pd 줄무늬 패턴은 나노임프린트 리소그래피를 이용하였으며 증착은 전자빔 증발기와 스퍼터를 통해 제작하였다. Co/Pd 계면이방성의 크기를 측정하기 위해, Co만으로 줄무늬 패턴을 만들어 형상 이방성 필드값을 측정하고 이것과 수직방향으로 계면이방성을 형성한 Co/Pd 줄무늬 패턴의 이방성 필드값을 측정하여 그 차이를 계산하였다. 50, 20  $\mu\text{m}$ 의 Co/Pd 줄무늬 형상에서는 Co의 폭이 넓어 다자구 상태의 자기이력곡선 형태를 보여 이방성 필드값 측정이 힘들었지만, 382 nm의 폭을 지닌 Co/Pd 줄무늬 패턴에서는 Co의 폭이 많이 좁아져 Stoner-Wohlfarth 모델에 근접한 단자구 상태의 자기이력곡선 형태를 보였다. 그리하여, Co 줄무늬 패턴의 이방성 필드값은 261 Oe, Co/Pd 줄무늬 패턴의 이방성 필드값은 237 Oe으로 대략 24 Oe의 계면 이방성 필드값을 확인할 수 있었다.

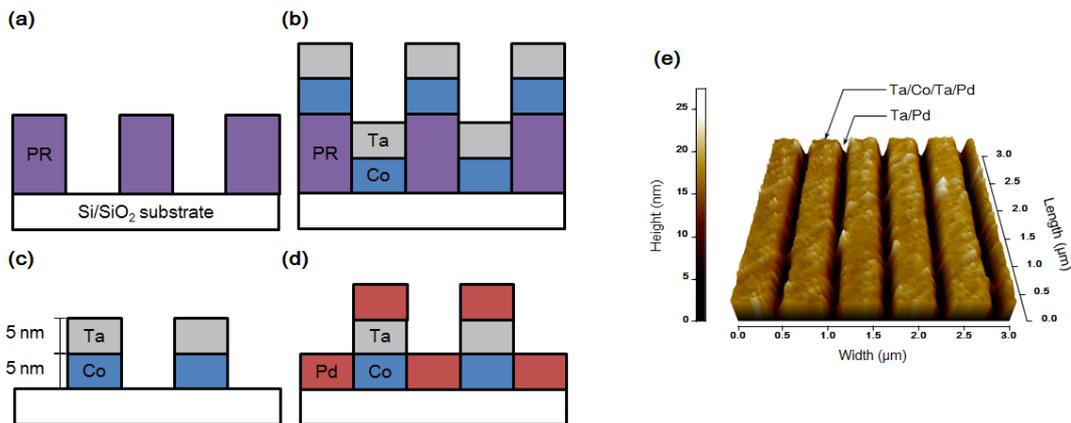


Fig. 1. (a)-(d) Co/Pd 줄무늬 패턴의 전체적인 리소그래피 공정과정  
(e) 완성된 Co/Pd 줄무늬 패턴에 대한 AFM 이미지

## 참고문헌

[1] Carcia, P. F., Meinhardt, A. D., Suna, A., Appl. Phys. Lett. 47, 178-180 (1985).

# Fe wire 전기폭발법을 이용한 자성유체용 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 자성 파우더 제작

박정갑<sup>1,\*</sup>, 이정우<sup>1</sup>, 백승빈<sup>1</sup>, 임태진<sup>2</sup>, 이태일<sup>2</sup>, 서수정<sup>1</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 신소재공학과

<sup>2</sup>㈜태한이엔씨

## 1. 서론

자성유체란(Ferrofluid) 마그네타이트(Magnetite, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)와 같은 자성 분말을 안정하게 분산시키기 위해 콜로이드 용액으로 원심력과 자기장 속에서 분산질과 분산매의 분리가 일어나지 않으며, 외관상 액체가 강자성을 띠어 있어, 액체의 유동이 자기장에 의해 통제될 수 있다. 자성유체는 1960년 대 미항공우주국(NASA)에서 로켓연료를 자성유체화하여 무중력 상태에서도 연료탱크 속에 고정하기 위한 연구에서 개발되기 시작하였다. 그 후 높은 자속이 걸리는 부분의 자성유체를 주입시켜 밀봉(sealing) 작용을 하여, 우주복 등에 적용되었다. 현재에는 여러 가지 기계장치의 구동축이나 컴퓨터 하드드라이브, 회적축의 윤활 및 밀봉, 자성잉크, 복사현상액, 자성도료 등의 기록재료, 발전기의 열교환기, 의료기, 스피커 등에 응용, 지폐의 종류와 진위 여부 판단 등에 사용되고 있다. 그리하여 본 실험에서는 자성유체에 사용되는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노파우더 제작을 위하여 Fe wire를 전기폭발하여 나노파우더를 제조하여 특성을 분석하였다.

## 2. 실험방법

본 실험방법으로는 먼저 99.999%의 고순도 0.2mm Fe wire를 준비하여 전기폭발 장치에 Fe wire를 연결하고 챔버에 1.2L의 DI water를 채워 넣었다. 공정 조건으로는 24mm의 전극간 거리를 설정하고, 1.5 kV의 공정 전압으로 약 4500회 전기 폭발시켜 나노사이즈를 가지는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 자성파우더를 제조하였다. 제조된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 자성 파우더에 계면활성제를 코팅하기 위하여 올레인산 파우더를 약 3g 첨가하여 2시간동안 초음파공정을 진행하였다. 계면활성제까지 코팅된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 자성파우더를 건조시키기 위하여 100nm Mesh망의 Filter sheet를 이용하여 파우더만 Filter시켜 60℃ 온도에서 약 15시간 Oven에서 건조시켜 나노사이즈를 가지는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>자성 파우더를 제조하게 되었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

0.2mm의 Fe wire를 전기폭발시켜 나노사이즈를 가지는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 자성 파우더를 제조하였다. 사이즈 분석을 위한 TEM 분석 결과 약 10~30nm 평균입도를 가지는 자성파우더를 확인하였으며, XRD를 통하여 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 결정구조를 갖는 것을 확인하였다. 마지막으로 VSM 분석 장비를 통하여 54 emu/g의 Ms(포화자화)값을 측정하였다. 여기서 포화자화값은 제조된 자성파우더의 건조 조건(건조 온도 및 분위기)을 최적화한다면 보다 향상될 수 있을 것이다.

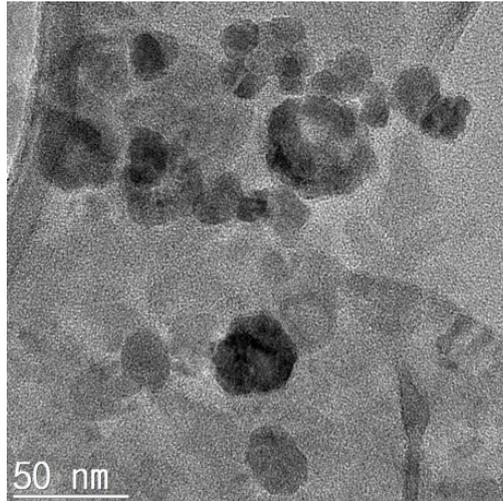


그림. 제조된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 파우더의 TEM분석 이미지.

#### 4. 결론

0.2mm의 99.999%의 고순도 Fe wire를 이용하여 전기폭발시켜 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 결정구조를 가지고, 54 emu/g의 포화자화값, 약 10~30nm의 평균입도 및 균일한 입도분포를 가지는 자성파우더를 제작하였다.

#### 5. 참고문헌

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles synthesis from tailings by ultrasonic chemical co-precipitation, Materials Letters 65 (2011) 1882–1884

## Synthesis of Co microtrees assembled by dendrites and their microwave absorption characteristics

Rambabu Kuchi<sup>\*</sup>, Kyung Min Lee, Surabhi Srivathsava, Jong-Ryul Jeong  
Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Energy Science and Technology,  
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

In this work, we have investigated a mild chemical procedure to synthesize cobalt microtrees assembled by many dendrites at room temperature using hydrazine hydrate as the reductive agent. The structure and morphology of the as obtained products were characterized by X-ray diffractometer (XRD), transmission electron microscopy (TEM), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and vibrating sample magnetometer (VSM). It was found that the dosage of hydrazine hydrate played an important role in the morphology control and the glycol as directing agent of the produced cobalt crystals. These parameters are drastically influenced the morphologies of the final products. The growth mechanism was briefly discussed on the basis of controlled experiments. Additionally, magnetization measurement revealed that the cobalt microtrees exhibited ferromagnetic characteristics at room temperature and we have investigated the microwave absorption characteristics of the magnetic microstructures.

**Keywords:** Cobalt microtrees, Morphologies, Magnetization, Dendritic petals

# Anomalous Behavior In Magneto Transport Measurements in Liquid-gated Pt Thin Films

Kil-joon Min<sup>1,\*</sup>, Taeyueb Kim<sup>2,3</sup>, Dong-Hun Chae<sup>1</sup>, Sung-jung Joo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

<sup>2</sup>Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

<sup>3</sup>Department of Applied Physics, Korea University, Sejong, Korea

We observed a superlinear behavior in the Hall resistance in liquid-gated

Pt thin films. This effect is consistent with a previous experimental result reported by Iwasa group in Japan [Phys. Rev. Lett. 111, 216803 (2013)].

They interpreted this phenomenon with the anomalous Hall Effect usually emerging in ferromagnetic materials even though Pt is considered to be a paramagnetic material according to the Stoner criterion. Here, we present our experimental progress and preliminary results.

# Synthesis of monodisperse cobalt ferrite ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ) nanoparticles using thermal decomposition method

Yoonji Eom<sup>\*</sup>, HeeYoon Noh, Mohamed Abbas, CheolGi Kim  
Department of Emerging Materials Science, DGIST, South Korea

## Introduction

Because of their interesting properties like electric, catalytic, and optical properties, magnetic, many researchers have paid attention for synthesis of magnetic nanoparticles. For the device application, the technology of controllable nanoparticles is an important issue, especially its size control and self-assembles. Many research groups have studied these topic and we also focused on how to easily select nanoparticles in uniform size and disperse with organic solvent. In case of organic solvent, ethanol and hexane being widely used in cleaning and dispersion.

## Experimental

Iron(III) acetylacetonate (0.5 mmol), cobalt(II) acetylacetonate (0.25 mmol), benzyl ether (20 ml), oleic acid (1 ml), and oleylamine (1 ml) were mixed and mechanically stirred. The mixture was heated to 290 °C for 90 min. The mixture was cooled down to room temperature and cleaned with organic solvent. After centrifuging with organic solvent, the brown solution was removed and  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles were obtained.

## Results and discussion

$\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles were characterized by EDS, XRD, TEM and VSM. EDS element analysis of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticle reveal a presence of Co, Fe and O. XRD peaks shows the strongest and clearest intensity. XRD pattern resulted from Size selection of nanoparticles. It is mean that we could obtain uniformly sized and highly crystallized nanoparticles selectively from hexane-hexane treatment.

TEM images showed size of nanoparticles and dispersion. images showed various size distribution of nanoparticles with some aggregation. So average of nanoparticles diameter is each 20.3 nm, 19.58 nm, 19.84 nm. On the other hand, image of size selected sample shows uniformed size distribution of nanoparticles around 13.5 nm and monodispersion.

VSM showed magnetic properties of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles. The saturated magnetization of size selected  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticle is commonly 37.12 emu/g. but saturated magnetizations of another samples as they have 40.21 emu/g, 39.87 emu/g, 40.01 emu/g are significantly larger than size selected  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticle. Because the saturated magnetizations of nanoparticles decrease when specific effective size of nanoparticles decrease. Therefore size selected  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticle has the smallest saturation magnetization.

## Conclusions

Size selection and monodispersion of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles have been synthesized using facile thermal decomposition method. Different analysis techniques of TEM, XRD, and MPMS were used to fully characterize the synthesized ferrite nanoparticles. The simple thermal decomposition approach adopted in our work seems to be a promising route for synthesis of various magnetic nanoparticles with monodispersion and uniform size distribution.

# CoFeB/MgO와 [Pt/Co]<sub>n</sub> 사이에 삽입된 Ru/Ta 공간층에 의한 층간 교환 결합

윤석진\*, 임상호, 이성래  
고려대학교 신소재공학과

최근 들어 고밀도 MRAM (Magnetic random access memory)을 실현하기 위한 강한 수직자기이방성 및 STT (Spin transfer torque) switching을 가지는 MTJ (Magnetic tunnel junction) 구조를 개발하기 위한 연구가 집중되고 있다[1]. 다층박막을 기반으로 한 MTJ 구조가 높은 TMR (Tunneling magnetoresistance) ratio를 확보하기 위해서는 다층박막과 MgO 절연층 사이에 삽입되는 CoFeB 층이 적절한 후열처리 과정에서 CoFeB/MgO의 BCC (001) 집합조직을 형성하는 것이 필수적이다. 때문에 많은 연구들이 다층박막과 CoFeB 층 사이에 Ta 공간층을 삽입하여 다층박막이 CoFeB에 주는 template effect를 막아 높은 TMR ratio를 만들어내었다. 본 연구에서는 Ta 공간층에 반평형 층간 교환 결합을 가지는 Ru 층이 삽입된 [Pt (0.2 nm)/Co (0.4 nm)]<sub>6</sub>/Ru ( $t_{Ru}$ )/Ta ( $t_{Ta}$ )/CoFeB (1 nm)/MgO (1 nm) 합성형 페리자성체 구조의 자기적 특성 변화를 살펴보았다. 합성형 페리자성체 구조는  $8 \times 10^{-8}$  Torr 진공도의 초고진공 DC/RF 마그네트론 스퍼터링 장비를 통해 상온 증착하였으며 CoFeB의 결정화를 위해 증착 후 다양한 온도에서 1시간 동안  $1 \times 10^{-6}$  Torr에서 열처리 하였다. 만들어진 샘플들의 자기적 특성은 VSM (vibrating sample magnetometer)를 통해 측정되었다. 그림 1은 Ru ( $t_{Ru}$ )/Ta(0.4 nm) 공간층을 가진 합성형 자성체 구조의 층간 교환 결합의 Ru 두께 의존성을 보여주고 있다. 층간 교환 결합은 Ru(0.8 nm)/Ta(0.4 nm)에서 가장 큰 값을 보였으며 375°C의 높은 후열처리 공정 이후에도 특성이 거의 유지되었다. 이는 [Pt/Co] 다층박막의 atomically flat한 interface와 비자성층인 Ta 층이 자성층인 Co와 CoFeB 사이의 pinhole 형성을 억제하였기 때문으로 보인다.

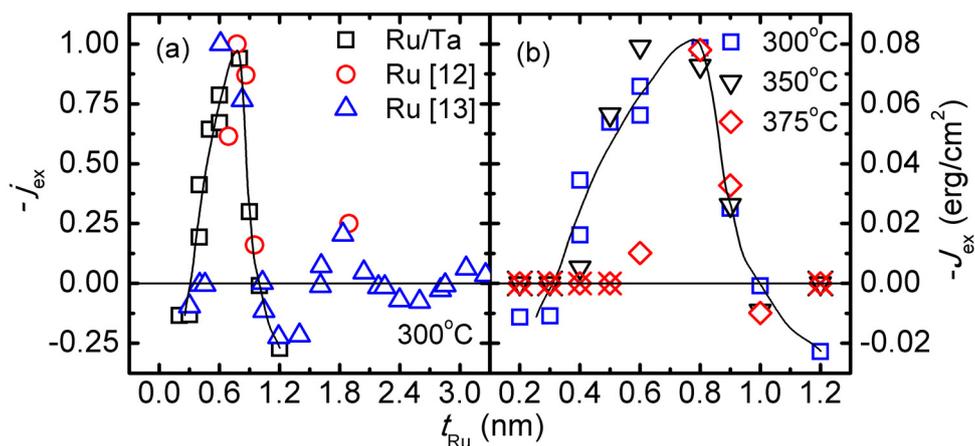


그림 1. Ru 공간층 두께 및 후열처리 온도에 따른 [Pt/Co]<sub>6</sub>/Ru ( $t_{Ru}$ )/Ta (0.4 nm)/CoFeB/MgO 합성형 페리자성체 구조의 층간 교환 결합력.

## 참고문헌

[1] S. Ikeda *et al.*, SPIN 2, 1240003 (2012)

## CoSiB/Pt/CoSiB 구조의 Hall Effect 연구

김성용\*, 이하나, 김영광, 김태완

세종대학교 신소재공학과, 서울시 광진구 능동로 209, 143-747

스핀전달토크(Spin Transfer Torque, STT)는 고밀도 자기메모리 및 자기센서로 연구가 진행되고 있고, STT-MRAM의 개발과 수직자기이방성(Perpendicular Magnetic Anisotropy, PMA)을 가진 자성소재가 함께 주목을 받고 있다.[1] 수평자기이방성을 가지고 있는 자성소재의 특성보다, 수직자기이방성이 낮은 구동전류, 열적 안정성 그리고 고집적화 구성이 가능하고 뛰어난 자발홀효과(Spontaneous Hall Effect)를 가지고 있다.[2]

본 연구에서는 열적 안정성이 확보된 비정질 합금인  $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 을 선택하여 연구를 진행하였다. 기존 실험인  $[\text{CoSiB}/\text{Pt}]_N$  다층박막과는 다른 구조인 샌드위치 형식의  $[\text{CoSiB}/\text{Pt}/\text{CoSiB}]$  구조로 제작하여 특성을 알아보았다. 시료는 DC스퍼터링 장비를 사용하였고 기본진공도  $5 \times 10^{-8}$  Torr, 공정진공도  $3 \times 10^{-3}$  Torr 유지하면서  $\text{CoSiB}/\text{Pt}(t_{\text{Pt}})/\text{CoSiB}$  제작하였다. 이때, Pt 층의 두께( $t_{\text{Pt}}=17\sim 32$  Å)를 다르게 하였다. 그리고 Van der pauw방식을 이용하고, 자기장 -1500 ~ 1500 Oe 가변하여 Hall측정 하였다.

$[\text{CoSiB}/\text{Pt}]_N$ 과는 다르게 Anti-ferro coupling 형상을 보이고, 높은 Hall voltage( $V_{\text{H}}$ )를 가지고 있어 Hall 센서로 응용하여 여러 산업 분야의 적용이 될 것이라 본다.

[1] Takehito Shimatsu, Hiroyuki Uwazumib, Hiroaki Muraokaa and Yoshihisa Nakamura, J. Magn. Magn. Matter. 235, 273 (2001)

[2] M. Nakayama, T. Nagase, M. Yoshikawa, T. Kishi, S. Ikegawa and H. Yoda, J. Appl. Phys. 103, 07A710 (2008)

# Quality control of STT-MTJ based random binary code generator utilizing bias voltage adjustment

이상혁<sup>1,2,\*</sup>, 정구열<sup>3</sup>, 민병철<sup>3</sup>, 김동현<sup>1</sup>, 조영훈<sup>2</sup>, 최연석<sup>2</sup>, 박승영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충북대학교, 물리학과

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원, 스핀공학물리연구팀

<sup>3</sup>한국과학기술연구원, 스핀융합연구단

## 1. 서론

MTJ 소자는 자기메모리(MRAM), 자기장 센서, 논리연산 회로 등 다양한 활용 가능성을 지니고 있어 활발히 연구되고 있다. MTJ소자는 부도체(MgO)층을 사이에 둔 두 자성층의 상대적 자화방향에 따라 저항이 크게 변하는 특성이 있다. 두 자성 박막층은 상대적으로 자기장에 민감한 자유층(free layer)와 자화방향이 변하지 않는 고정층(pinned layer)로 이루어져 있다. 두층의 자화방향에 따라 저항이 변하는 특성은 외부자기장에 따라서 뿐만 아니라, 전기바이어스에 의해서도 나타나게 되는데, 이때 발생하는 소자의 확률적 스위칭 특성을 이용하여 임의 이진코드 발생기<sup>1)</sup>로의 응용이 가능하다.

## 2. 실험방법과 결과

본 연구에서는 임의 이진코드 발생소자로 제작된 Ta/CuN/Ta/PtMn/CoFe/Ru /CoFeB/MgO/CoFeB/Ta/CuN/Ru 구조(Pre-annealing@360°C,60 min)의 스위칭 경계의 스위칭 확률 곡선을 관측하였다. 또한 양질의 임의 이진코드를 출력하는 자기장과 전압을 조사하고, 외부자기장이 고정된 환경에서 전압의 변화에 따른 이진코드의 확률 변화를 조사하였다.

## 3. 고찰

측정 결과 외부자기장이 110 Oe 바이어스 전압 -0.34 V일 때 스위칭 확률이  $50 \pm 5\%$ 의 결과를 얻을 수 있었고, 중심 전압에서  $\pm 0.02$  V내에서  $\pm 20\%$ 의 확률 변화가 조사되었다. 또한 바이어스 전압을 고정시키고 외부자기장을 변화시켰을 때 외부자기장에도 민감하게 반응하여 스위칭 확률이 변하는 것을 볼 수 있었다.

## 4. 결론

자기 터널 접합 소자를 사용한 임의 이진코드 발생기는 외부자기장과 전압 바이어스에 의해 동시에 결정되나, 전압바이어스 조절을 통한 스위칭 확률을 조절이 보다 간편한 방법을 제공한다. 자기장을 고정하고, 전압 제어를 통한 품질 제어 실험을 통해 0과 1의 비율이 50%인 중심 전압에서 1 mV 당 1% 수준의 확률 변화가 제어된 결과를 보였다.

## 5. 참고문헌

[1] Applied Physics Express 7, 083001 (2014)

## 패턴된 [CoSiB/Pt]<sub>N</sub> Multilayer 층수변화에 따른 Hall effect 연구

김영광\*, 이하나, 김성용, 김태완

세종대학교 나노신소재공학과, 서울 광진구 군자동 98, 143-747

고밀도 MRAM(magnetic random access mamory)을 상용화 할 수 있는 가능성을 열어준 것이 바로 STT-MRAM이다.[1] STT-MRAM은 큰 신호전압과 열적 안정성 확보를 중요시하며 스핀전달토크(Spin Transfer Torque, STT)를 기록매체나 센서로 이용하기 위하여 수직자기이방성에 기반을 둔 자기터널접합이다.[2]

박막은 Ta 50/ Pt 30 / [CoSiB 6Å / Pt 14Å]<sub>N</sub>에서 [CoSiB 6Å / Pt 14Å]의 층 수에 변화를 주었고, 층 수는 N=6,9, 12,15,20으로 조건변화를 주며 제작하였다. 증착 시 Initial pressure는  $7 \times 10^{-7}$  로 공정을 잡았고, working pressure는  $3 \times 10^{-3}$ 로 유지하여 제작하였으며, Bulk제작 후에는 Lithograpy공정과 ion-milling을 통하여 hall bar pattern을 만들었다.

N=6,9,12,15,20인 경우 hall voltage가  $2 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$ V에 걸쳐있다. 그리고 일반적인 sample보다 다층박막일 경우 더 큰 홀전압값을 갖는다. 본 실험에서 pattern을 했을 때 각각의 층수별로 확인했을 경우 거리에 상관없이 일정한 홀전압값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 특성을 가지고 앞으로 Hall sensor로 많은 시장에 응용될 것이라 본다.

[1] J.C.Slonczewski, J.Magn.Magn.Mater., 159, L1(1996)

[2] Takehito Shimatwu, Hiroyuki Uwazumib, Hiroaki Muraokaa and Yoshisa Nakamura, J. Magn. Magn. Mater.235, 273(2001)

# 공침법을 이용한 자성유체용 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 자성 파우더 제작

백승빈<sup>1,\*</sup>, 박정갑<sup>1</sup>, 임태진<sup>2</sup>, 이태일<sup>2</sup>, 서수정<sup>1</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 신소재공학과

<sup>2</sup>(주)태한이엔씨

## 1. 서론

자성유체는 콜로이드사이즈(직경 10nm~20nm)의 자성미립자를 올레인산이나 리놀산과 같은 불포화 지방산으로 피복하고, 이를 침전이나 응집이 생기지 않도록 계면활성제를 사용하여 물, 기름 등의 용매에 안정하게 분산시킨 콜로이드액을 말한다. 자성유체는 매우 미세한 강자성체가 액체 중에 균일하게 분산되어 있는 복합재료로 높은 자기장에서도 입자의 응집 및 고액 분리가 일어나지 않고, 마치 액체 전체가 강자성을 가지고 있는 것 같이 행동한다. 이러한 독특한 특성 때문에 다양한 분야에서 주목을 받아왔다. 자성유체는 미국의 우주개발 계획의 부산물로 개발되었다. 그 후 가전기기에 응용이 검토되었고 회전축의 seal, 진동계의 댐퍼, 경사 센서, 스피커의 보이스 코일 등 많은 분야에 응용되어 실용화 되고 있다.

## 2. 실험방법

자성유체는 균일한 사이즈 및 20nm 이하의 자성파우더를 제작하는 것이 가장 중요한 공정이다. 본 실험에서는 화학적 합성법인 공침법을 이용하여 나노 사이즈를 가지는 자성파우더를 제작하였다. 먼저 N<sub>2</sub> 분위기에서 FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O와 FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O를 DI용액에 500rpm / 30min의 조건으로 용해시켜 각 용액을 3ml / 9ml를 다시 50°C 온도에서 600rpm / 40min동안 배합시켰다. 그리고 침전제인 NH<sub>4</sub>OH용액을 분산시켜 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 자성파우더를 석출하였다. 석출된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>파우더를 DI에 세척하여 올레인산의 계면활성제를 코팅하여 필터링을 거쳐 N<sub>2</sub> 분위기의 Oven에서 50°C로 24시간 동안 건조하여 파우더를 제적하였다. 제조된 파우더 사이즈를 분석하기 위하여 FE-SEM, TEM을 이용하여 분석하였고, XRD 및 VSM(Vibration Sample Magnetism)을 이용하여 파우더의 결정구조 및 자성 특성을 분석하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

결과, 약 20nm 이하의 사이즈를 가지고, 계면활성제를 코팅한 파우더가 서로 반발하여 응집되지 않는 현상을 TEM으로 확인하였다. 그리고 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 결정구조를 가지며, 69 emu/g의 포화자화값을 가지는 자성파우더를 제작하게 되었다. 건조 온도, 분위기를 최적화 한다면 더욱 향상된 포화자화값을 얻을 수 있을 것이다.

## 4. 결론

공침법을 이용해 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 결정구조를 가지고, 69 emu/g의 포화자화값, 약 15~20nm의 평균입도 및 균일한 입도분포를 가지는 자성파우더를 제작하였다

## 5. 참고문헌

The Study of Physical Properties of Magnetite Fluids Prepared by Co-precipitation Method, Journal of Korean Magnetism Society. 2001-10 11:217-221

# Magnetotransport properties of 1-dimensional magnetic nanoparticle array

Ji Sung Lee<sup>1</sup>, Yoo Sang Jeon<sup>1,\*</sup>, Woo Seung Ham<sup>1</sup>, and Young Keun Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

자성나노입자의 자기수송특성을 이해하는 것은 나노입자를 이용한 자기저항소자 제작의 가능성을 열볼 수 있기 때문에 최근 과학계에서 큰 관심을 받고 있다. 지금까지는 나노입자의 특성을 알아보기 위하여 다량의 자성나노입자들 위에 패터닝 된 전극을 증착시키거나 펠렛 등의 형태를 만들어 측정하였기 때문에 단일 입자간의 특성을 알 수 없었다. [1], [2] 본 연구에서는 1차원 나노입자를 배열시킨 후 미세전극을 이용하여 그 개수를 조절한 자성나노입자의 자기수송 특성을 측정하고자 하였다. 마그네타이트 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 나노입자는 100 nm 크기로 폴리올 방법을 통해 합성하였다. [3]. 이렇게 합성된 나노입자의 자기적 특성은 그림 1(a)와 같이 페리자성을 보이고 있다. 다음으로  $\text{SiO}_2$  가 덮인 Si 기판 위에 Ti/Au 전극 한 쌍을 전자빔 증착법을 이용하여 증착 하였다. 외부자기장을 인가한 상태에서 자성나노입자 용액을 떨어뜨림으로 나노입자 1차원 배열을 만들 수 있었다. 그림 1(b)와 같이 집속이온빔시스템 (FIB)을 이용하여 Ti/Au 전극과 자성나노입자를 연결하였다. 마지막으로 이렇게 제작된 소자에 다양한 범위의 온도, 자기장 분위기 하에서 전기적 특성을 물성측정시스템 (PPMS)로 측정하였다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 상온에서 560 k $\Omega$  정도의 저항을 보이던 소자는 온도가 증가함에 따라 최대 20 G $\Omega$ 까지 커졌으며 160 K 이하 온도부터는 I-V 곡선이 점차적으로 선형에서 곡선을 변화하면서 절연특성을 보이기 시작하였다. 한편 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 자성나노입자들은  $H=50$  kOe,  $V_b=0$ ,  $T = 80$  K 에서 -16 % 정도의 자기저항 값을 보였다. 이러한 음의 자기저항 값은 가해지는 자기장에 의해 인접한 자성나노입자의 전자 스핀들을 한 방향으로 배열 함으로 터널링이 좀 더 유리해져 전기전도도가 증가한 것으로 보인다.

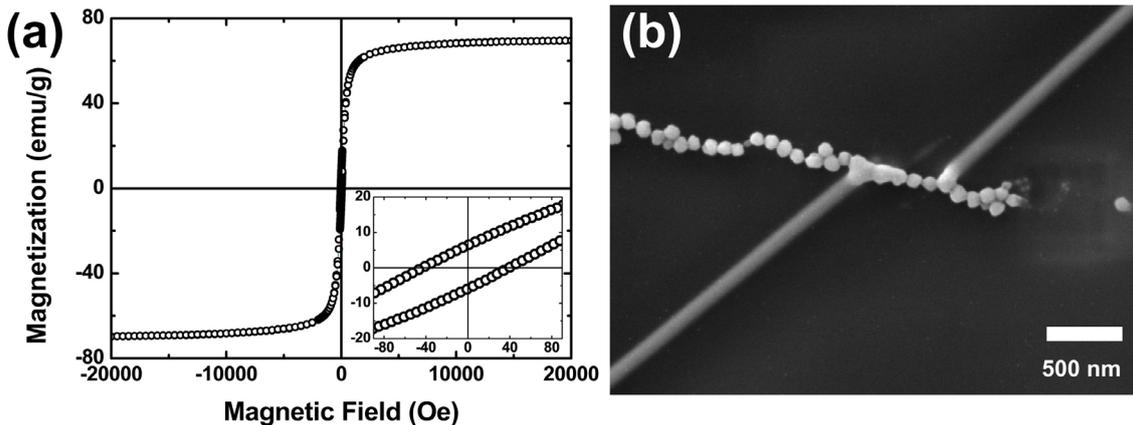


그림 1. (a) 상온에서 측정한 자성나노입자의 자기이력곡선 (b) 1차원 배열된 나노입자의 SEM 이미지

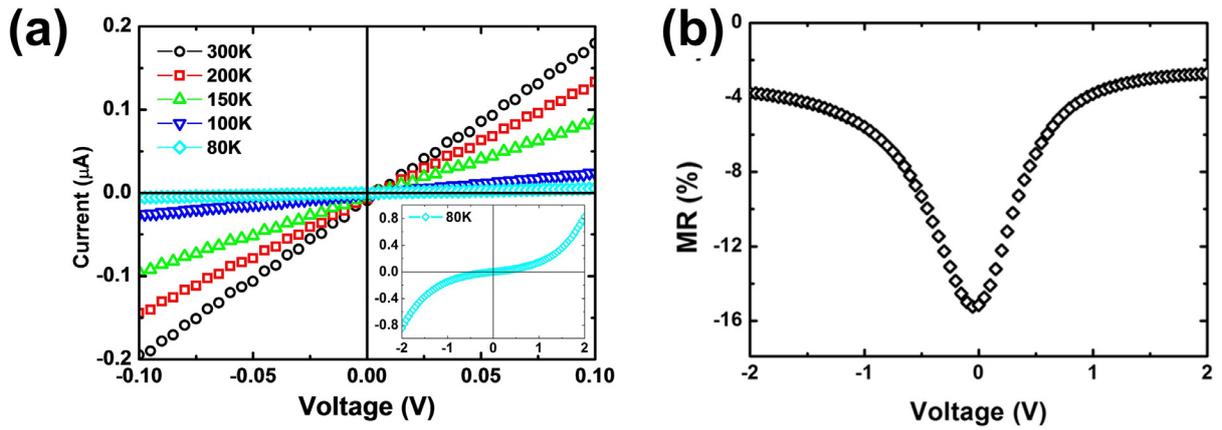


그림 2. (a) 다양한 온도범위에서 측정한 1차원 나노입자의 I-V 곡선  
 (b) 80 K 일 때  $H = 50$  kOe 에서의 전압에 따른 MR 값 변화

### 참고문헌

- [1] S. Kohiki *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 5 11584 (2013)
- [2] J. Wang *et al.*, *APL* 90, 213106 (2007)
- [3] J. Cha *et al.*, *RSC Adv.* 3 3631 (2013)

## CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 박막의 자기이등방성과 스트레인과의 상관관계 변화

이두용<sup>1,\*</sup>, 김지웅<sup>1</sup>, 김혜경<sup>1</sup>, 이지성<sup>1</sup>, 배종성<sup>2</sup>, 이정수<sup>3</sup>, 박성균<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 물리학과, 부산 609-735

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원 부산센터, 부산 618-230

<sup>3</sup>한국원자력연구원 중성자과학연구부, 대전 305-353

†psk@pusan.ac.kr

스피넬 구조를 가진 CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>는 아주 큰 자기이방상수(erg/cm<sup>3</sup> in <100>), 자기탄성특성(자기변형 상수, ), 높은 큐리온도, 화학적 안정성 등의 성질 때문에 고밀도 자기광매체, 자기광미디어, 자기테이프 등 많은 분야에서 응용되고 있다. 하지만, CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>는 A-site와 B-site의 금속이온(Co or Fe)의 상대적 분포에 의해 물질의 color, diffusivity, magnetic behavior, conductivity, catalytic activity 등이 결정 된다. 이러한 금속이온의 분포는 epitaxial strain에 의해 통제가 된다고 이론적으로 알려져 있다 [1].

본 연구에서는 epitaxial strain을 이용하여 CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 박막의 자기적 특성과 금속 이온의 상대적 분포의 상관 관계를 실험적으로 연구하기 위하여 MgO(001) 기판에 다양한 두께의 박막을 증착 하였다. 증착 된 박막은 X-선 회절 분석을 통해 (004) 방향으로 결정화 된 것을 알 수 있었고, 두께가 감소할수록 인장응력이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 박막의 두께가 감소할수록 수직자기이방성과 단축자기이방성 에너지가 증가하는 것을 통해 epitaxial strain이 이방성 에너지에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. X-선 광전자 분광법을 통해 epitaxial strain이 감소 할수록 Fe<sup>3+</sup>(Co<sup>2+</sup>)이온은 A-site(B-site)로 분포하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 금속 이온의 분포에 의해서 박막의 포화 자기값이 증가하는 것을 확인하였다.

이 연구는 한국연구재단 (2011-0031933, 2012R1A1A2005940)의 지원으로 이뤄졌습니다.

[1] D. Fritsch and C. Ederer, Appl. Phys. Lett. **99**, 081916 (2011).

# La이 치환된 다결정 $\text{BaTi}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ( $y=0.07, 0.1$ )의 미세구조 분석 및 전자기적 특성 간의 상관관계 연구

김덕현\*, 이보화

한국외국어대학교 물리학과, 산화물 연구소

상온에서의 전자기적 특성이 분명한 다강체 물질은 차세대 어플리케이션 적용 가능성으로 인해 지속적으로 연구되고 있다. 상온보다 높은 상전이 온도( $T_c=120^\circ\text{C}$ )를 가지는 강유전체  $\text{BaTiO}_3$ 는 다강체 합성의 host 물질로서 큰 관심을 받고 있으며 이미 많은 연구를 통해 3+의 전이 금속 이온(TM :  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$  etc)이 치환된  $\text{BaTi}_{1-y}\text{TM}_y\text{O}_3$ 에서 상온에서의 분명한 강자성 유도 현상이 보고되었다. 하지만 치환이 합성된 시료의 electrical polarization 값을 억제되는 특성이 관측되어 실제 어플리케이션에 적용시키기에 한계를 가지고 있다.

이에 본 연구진은 Ba site에 다양한 양의 La을 치환한 다결정  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  ( $y=0.07, 0.1$ )를 합성하여 La 치환으로 인해 유도되는 미세구조의 변화를 분석하고 다강체 특성간의 상관관계에 대해 연구하였다. 합성된 시료는 Cu-K $\alpha$ 선을 이용한 X-선 회절 측정을 통해 결정상의 변화를 확인 하였고 다강체 특성변화는 VSM을 이용한 M-H, M-T curve 측정과 ferroelectric testor를 활용한 P-E loop 측정을 통해 확인 하였다. 또한 SEM과 Raman spectroscopy 관측 및 측정을 통해 La 치환으로 인해 유도되는 미세구조 변화를 연구 분석 하였다.

# Giant interlayer tunneling magnetoresistance in layered manganite

C. J. Won<sup>1,\*</sup>, J. J. Yang<sup>2+</sup>, S. W. Cheong<sup>2</sup>, N. Hur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Inha University

<sup>2</sup>Rutgers Center for Emergent Materials, Rutgers University

<sup>+</sup>Present : Department of Physics, University of Virginia

## I. Introduction

Ruddlesden-Popper family  $(A,A')_{n+1}TMnO_{3n+1}$  (TM = Transition Metal) is a form of layered perovskites structure which include the intermediate block layer. [1] When the stacking number  $n$  is 2, the  $(A,A')_{n+1}TMnO_{3n+1}$  structure become a bilayer structure  $(A,A')_3TM_2O_7$  which consists of two perovskite stacks and one block layer. The layered manganites  $La_{1+2x}Sr_{2-2x}Mn_2O_7$  ( $n = 2$ ) have conducting bilayer manganite separated insulating  $(La,Sr)_2O_2$  layers. [2] In this report we present the interplane and in-plane magnetoresistance of doped layered manganites single crystal below magnetic ordering temperature.

## II. Experiment Method

Doped LSMO single crystals used in our experience were grown by the Floating Zone method. All samples were polished to rectangular shape and etched in bromine-ethanol. Resistivity measurements was performed with Physical Properties Measurement System (PPMS, Quantum design) using a conventional 4 probe method. Magnetic properties were measured by using Magnetic Properties Measurement System (MPMS, Quantum design).

## III. Results and Discussion

The temperature profiles of resistivity along  $c$ -axis under several magnetic fields displays in Fig. 1. In  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  and  $La_{1+2x}Sr_{2-2x}Mn_2O_7$ , the rise of transition temperature by magnetic fields leads to a giant magnetoresistance at transition temperature. The insulating behavior below  $T_C$  is almost fully suppressed with applied magnetic fields near 5000 Oe. Resistivity without magnetic fields  $\rho(0)$  is about  $\sim 10000\%$  larger than resistivity with magnetic fields  $\rho(H, H > 0.5 \text{ T})$ . The MR at 2 K on LSMO single crystal is displayed in the inset of Fig. 1, which shows dramatic resistivity drop and saturated value after applied magnetic field of  $\sim 7000$  Oe. This MR value below  $T_C$  is extremely larger than MR value of non-doped case. It can be possible to understand since the tunneling magnetoresistance effects arise between magnetic multilayers.

## IV. Summery

we have presented the enhanced interlayer tunneling magnetoresistance in doped  $La_{1+2x}Sr_{2-2x}Mn_2O_7$  single crystal below  $T_C$ . The drastically out-of-plane magnetoresistance observed in magnetic fields perpendicular to the bilayers indicates that spin-polarized magnetic layers in single crystal show as a stack of ordered spin valve.

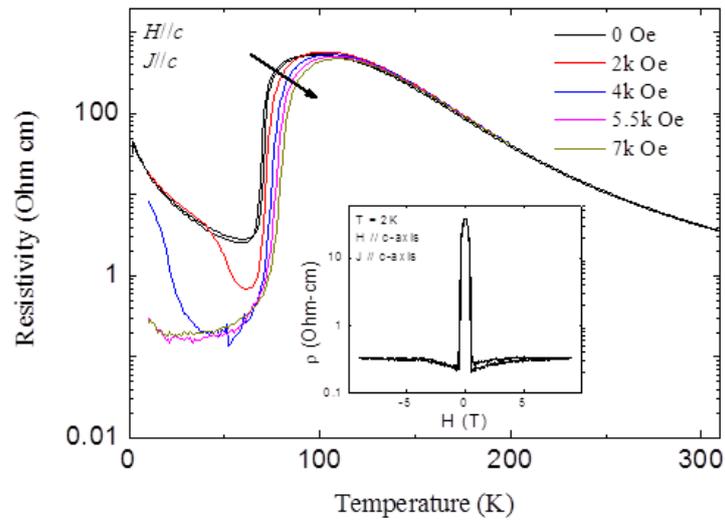


Fig. 1 Resistivity properties with several fixed magnetic fields ( $H = 0, 2000, 4000, 5500, 7000$  Oe) of doped LSMO single crystal as function of a temperature. The magnetoresistance at 2 K with 9T is shown in the inset.

## V. References

- [1] B. V. Beznosikov and K. S. Aleksandrov, Crystallography Reports, Vol. **45** No. 5 792-798 (2000).
- [2] T. Sugiura, K. Iwahashi, K. Horai, and Y. Masuda, J. Phys. Soc. Jpn. **39**, 647 (1975).

# 지질다당류와 자성비드가 섞인 염색액으로 처리된 프리모관의 자기장 반응 특성 연구

이혜리<sup>1</sup>, 홍예지<sup>2</sup>, 하예은<sup>3</sup>, 김지영<sup>4</sup>, 노영일<sup>1</sup>, 노민석<sup>1</sup>, 강석윤<sup>5</sup>, 이상석<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, <sup>2</sup>한외과대학 한의학과, <sup>3</sup>이공과대학 생명과학과, <sup>4</sup>생명자원과학대학 동물생명공학과, <sup>5</sup>한국한의학연구원 의료연구본부 침구경락연구그룹

## I. 서론

기(氣)의 통로인 관의 실체를 존재한다는 관점에서 볼 때, 사람의 몸을 살아 움직이게 하는 가장 중요한 것 두 가지는 기와 혈액이라고 알려져 있다. 그 중 혈액은 혈관을 통하여 우리 몸 구석구석을 돌아다니면서 맑은 공기와 충분한 영양소를 세포에 공급하고 묵은 찌꺼기를 몸 밖으로 버리는 작용을 한다. 이렇게 눈으로 볼 수 있는 피가 혈관을 통하여 운행되듯이 보이지는 않지만 실재하는 기로 흘러다니는 길을 경락이라고 하며, 2010년부터는 세계과학계에서 공인된 의학용어인 프리모 순환시스템(PVS; Primo Vascular Circular System) 또는 프리모시스템으로 불리 운다.

현재 밝혀지고 있는 프리모시스템은 혈관과 림프관과 심장 내강에 존재하는 내 프리모체계, 주로 내장의 표면에 분포하고 있는 내외프리모체계, 혈관이나 신경을 따라 달리고 있는 외프리모체계, 그리고 신경 조직에 분포하고 있는 프리모체계 등 4가지로 구성되어 있다. 본 연구는 4가지 프리모체계 중 가장 잘 관찰되는 림프관내의 프리모관을 택하였다. 실험실 동물로는 뉴질랜드 2 kg의 토끼(rabbit)를 충청북도 음성에 소재한 대한바 이링크 회사로부터 공급 받았다. 실험동물에 대한 해부실험은 2014년에 승인된 상지대학교 동물윤리규정을 따 랐다. 해부 실험에 사용된 토끼들은 줄레틸과 렘폰을 사용하여 근육에 주사하여 마취시켰다. 모든 해부과정들 은 일반적인 마취환경 내에서 이루어졌다. 깊은 마취상태에서 토끼의 복부를 절개 오픈하고, 복대정맥과 장골 주위에 있는 림프관내 프리모관을 채취하여 생리식염수(PBS; Phosphate Buffered Saline)에 담아 자기장에 따른 프리모관의 운동 상태를 연구하였다.

## II. 실험결과 및 고찰

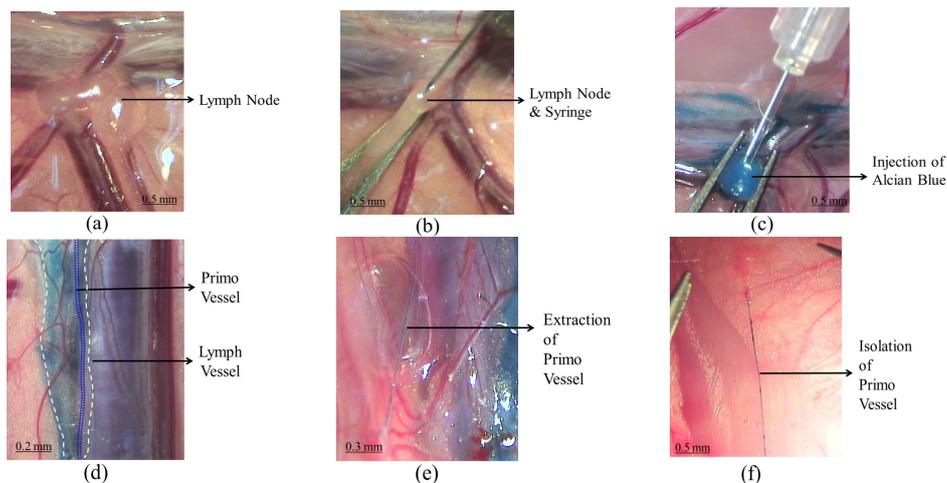


Fig. 1

복대정맥 부근의 림프절에 주입할 알시안블루(Alcian blue) 염색액에 1 ml 당 50 mg의 양으로 있는 1 μm의 초상자성체 자성비드(Co-Si-OH)가 고르게 혼합시켰다. Fig. 1(a)과 1(b)처럼 복대정맥의 부근의 가장 큰 림프절을 찾아 주사기를 조심스럽게 찌른다. Fig. 1(c)는 자성비드와 혼합된 염색액을 림프절에 주입한 후 순식간에 염색액

이 림프관을 통하여 퍼져나간 모습이다. Fig. 1(d)는 림프관의 염색액이 수분의 시간이 지난 후 대부분 림프액이 관을 따라 흘러가면서 염색액도 서서히 묻어지면서 림프관내에 프리모관에 염색된 것만 남게 된 것을 보여준 것이다. 관다발 구조 특성을 가지고 있는 프리모관의 벽에 염색액은 붙어있는 상태로 림프액이 흘러가는 가운데 프리모관의 형태를 유지하면서 그대로 남게 된다. 이로써 림프관 내의 떠있는 상태로 프리모관의 존재를 염색된 상태로 존재함을 쉽게 관찰할 수 있다. Fig. 1(e)와 1(f)는 염색된 프리모관을 조심스럽게 채취한다. 이러한 실험과정을 거쳐서 분리된 프리모관은 림프관과 함께 붙어서 있게 되어 PBS에 담긴 시료함에 보관하게 된다.

본 연구에 사용된 200  $\mu\text{g}$ 의 리포폴리사카라이드 염증 프리모 혈관의 생물학적 효과 연구 결과와 실험방법은 향후에 정상상태와 질병상태 일 때의 프리모관 기능을 설명하는 데 도움이 될 수 있을 것으로 판단한다. Fig. 2은 리포폴리사카라이드 염증을 유발 한 후 토끼의 대정맥의 지역에서 복부 림프 혈관의 광학 현미경 이미지를 보여 주는 것이다. Fig. 2(a)는 림프관내에 촬영된 프리모관의 샘플은 광학 및 형광 현미경으로 관찰된 모습을 보여주는 것이다. Fig. 3(b)의 삽입된 그림에 나타난 것과 동일한 시편의 확대된 광학 현미경 사진이다. Fig. 2(c)는 Alcian Blue로 염색된 림프관에 떠있는 프리모관의 다발 같은 모양을 나타낸 것이다.

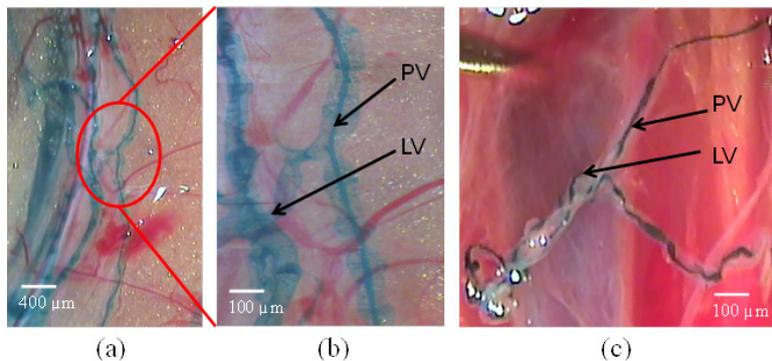


Fig. 2

Fig. 3의 자성비드와 혼합된 알시안블루액에 염색된 프리모관을 자기장 측정시스템을 사용하여 인가한 전자석으로부터 나오는 80 G 정도 자기장하에서 혹은 영구자석 표면에서 1 kOe 이상의 자기장에 영향을 받아 프리모관의 휘어지는 반응 특성을 관찰하였다.

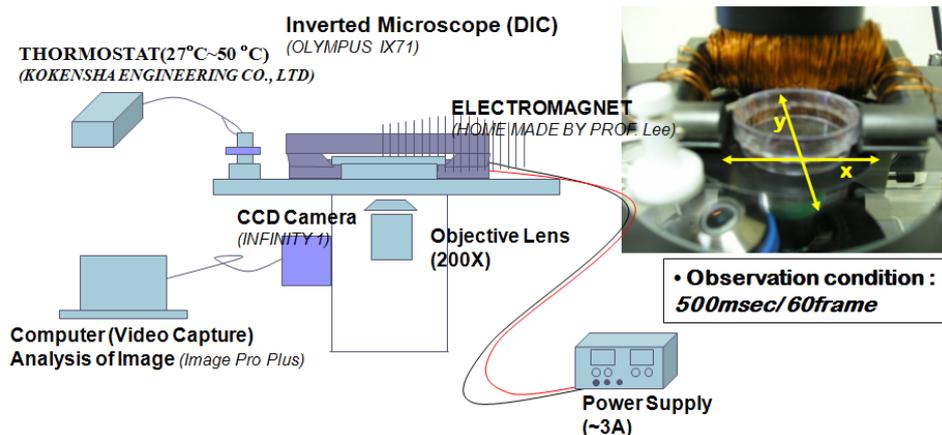


Fig. 3

### III. 참고문헌

- [1] Do-Young Park, Hye-Rie Lee, Min-Suk Rho, and Sang-Suk Lee, "Effective Isolation of Primo Vessels in Lymph by Using Sound and Ultrasonic Wave Stimulation Before Anatomy", Journal of Acupuncture and

Meridian Studies 7(6):298-305 (2014).

[2] Sang-Suk Lee, “Motion Property of Biomolecule Sanals of Primo Vascular System under Magnetic Field”,  
Journal of Acupuncture and Meridian Studies 6(6):293-297 (2013).

[3] Young-Il Noh, Yeong-Min Yoo, Ran-Hyang Kim, Ye-Ji Hong, Hye-Rie Lee, Min-Suk Rho, and Sang-Suk  
Lee, “Observation of a Long Primo Vessel in a Lymph Vessel from the Inguinal Node of a Rabbit”,  
Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine ID429106;1-5 (2013).

#### **IV. 감사의 글**

이 논문은 한국한의학연구원의 지원을 받아 수행하고 있는 2015년 KIOM학부생연구프로그램(URP)에 대한  
연구결과입니다.

# Detection Property of Red Blood Cell-Magnetic Beads Using Micro Coil-Channel and GMR-SV Device

Ji-Soo Park, Nu-Ri Kim, Hyun-Jun Jung, Purevdorj Khajidmaa, Munkhbat Bolormaa, and Sang-Suk Lee\*

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

The micro device, coil, and channel for the biosensor integrated with the GMR-SV device based on the antiferromagnetic IrMn layer was fabricated by the light lithography process. When RBCs coupled with several magnetic beads with a diameter of 1  $\mu\text{m}$  passed on the micro channel, the movement of RBC +  $\mu\text{Beads}$  is controlled by the electrical AC input signal. The RBC +  $\mu\text{Beads}$  having a micro-magnetic field captured above the GMR-SV device is changed as the output signals for detection status. From these results, the GMR-SV device having the width magnitude of a few micron size can be applied as the biosensor for the analysis of a new magnetic property as the membrane's deformation of RBC coupled to magnetic beads.

Keywords : GMR(giant magnetoresistance)-SV(spin valve) device, micro coil, channel, biosensor, RBC (red blood cell), magnetic bead

## 1. 마이크로 코일-채널과 GMR-SV 소자 복합구조체 제작

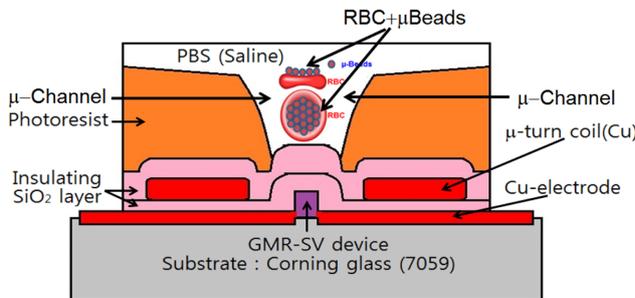


Fig. 1

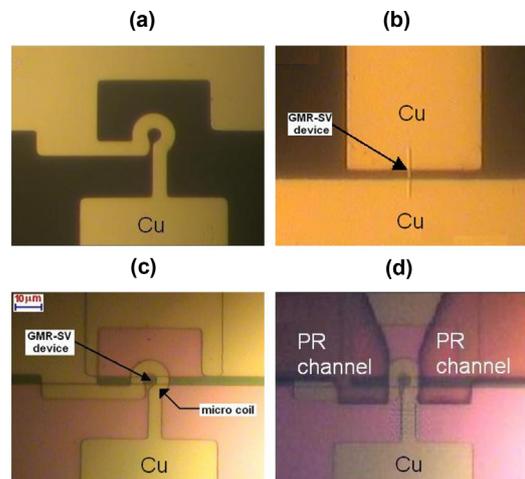


Fig. 2.

Fig. 1에서 보여주듯이 코일-채널-소자가 모듈화하기 위한 복합구조는 마이크론 크기의 생체분자인 적혈구가 통로로 따라 흐를 때 이를 제어하기 위한 형태로 구성되었다. 우선 기판인 Corning glass(#7059) 위에 GMR-SV 박막을 증착하였다. 1차 광리소그래피 공정과 ECR-ion milling 과정을 거쳐 폭과 길이가 각각 1  $\mu\text{m}$ 와 20  $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖은 GMR-SV 소자를 제작하였다. 2차 광리소그래피 공정을 거쳐 Cu 전극을 패터닝하여 바이오센서용 GMR-SV 전극소자를 만들었다. 개발된 GMR-SV 바이오소자의 중앙 소자 부분을 제외한 가장자리 모든 전극 부분에만 PR을 남긴 채 SiO<sub>2</sub> 절연층 박막을 rf 스퍼터링 방법으로 코팅하였다. GMR-SV 전극통로와  $\mu$ -코일 전극통로가 서로 연결되지 않도록 절연층 SiO<sub>2</sub> 박막을 rf 스퍼터링 법으로 100 nm 두께로 증착하였다.

중앙부분에 Cu 층을 고르게 증착한 후 한번 감은  $\mu$ -코일은 3차 리소공정으로 패터닝한 후 ECR-ion 밀링인 건식식각을 거쳐 완성하였다. 여기서 코일에 인가하는 전극은 GMR-SV 전극과 별개의 위치에 배치되게 하였다. 앞 단계에서 언급한 바와 같이  $\mu$ -코일 Cu 통로와 중앙부분에 놓이게 될 생리식염수의 전도성에 의한 누설 효과가 발생하지 않도록 다시 100 nm 두께의 절연층 SiO<sub>2</sub> 박막을 rf 스퍼터링법으로 증착하였다. 4차 리소공정에서 PR을 도포한 후 패터닝하여 마지막 단계인  $\mu$ -채널을 제작하였다.

PR의 두께와 채널 폭은 각각 2  $\mu$ m와 10  $\mu$ m가 되므로 GMR-SV와  $\mu$ -코일이 일치하는 중앙부분에 채널형태의 골을 형성하게 되어 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 생리식염수 내에 적혈구 +  $\mu$ 자성비드가 자유롭게 액체의 압력에 의해 흐를 수 있도록 되어 있다. Fig. 1에서 설명한 복합구조체를 형성하기 위한 각 단계별 리소그래피 공정을 거친 후 실제 패터닝 모양의 사진을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)은 기판 위에 코팅한 Cu 박막을 리소하여 패터닝한 한번 감은  $\mu$ -코일의 실제 모양이다. Fig. 2(b)는  $\mu$ -코일의 중심부분이 일치하도록 Ta/NiFe/Cu/NiFe/IrMn/Ta 다층박막으로 이루어진 GMR-SV 소자의 실제 모양이다. Fig. 2(c)는 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)가 같은 위치에 소자와 코일의 중심부분을 일치하여 복합구조체를 만든 실제 사진이다. Fig. 2(d)는 PR로 도포한 후  $\mu$ -채널을 패터닝한 최종적인 마이크로 코일-채널과 GMR-SV 소자 복합구조를 제작한 실제 모양이다.

## 2. 적혈구 흐름 제어를 위한 전기적 신호 응답

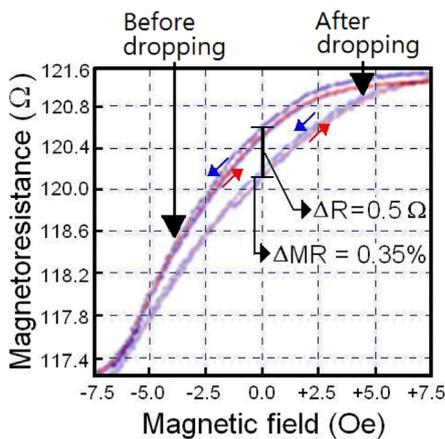
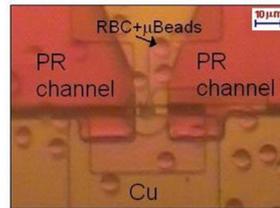


Fig. 3

(a) PR channel,  $\mu$ Coil, and RBC+ $\mu$ Beads



(b) Motion of RBC+ $\mu$ Beads

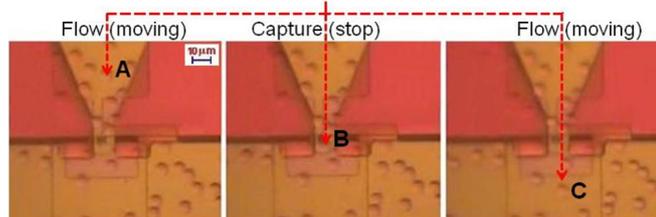


Fig. 4.

GMR-SV 소자와 적혈구가 놓인 곳을 광학현미경으로 확인 한 후, 탐침 봉을 두 전극 사이를 연결하여 자기 저항 특성을 조사하였다. 정확성을 위해 소자와 밀접한 거리에 가우스 미터(gauss meter) 프로브(probe)를 고정시켜 자성비드를 떨어뜨린 전과 후 측정된 minor MR loop를 Fig 3에서 보여 주었다. Fig. 3의 minor MR loop에서 알 수 있듯이 패터닝 후 GMR-SV 소자의 자기저항비는 3.5 %를 유지하고 있다. 외부자기장이 없는 0 Oe에서 완만한 자장감응도가 0.14 %/Oe인 자기저항곡선을 나타내었으며 교환결합력은 거의 0.15 Oe 근방의 값을 보여주었다. 일정한 값으로 유지하던 GMR-SV 소자의 자기저항 값은 Fig. 2(d)에서 보인바와 같이 자성비드가 결합된 RBC를 떨어뜨리기 전과 떨어뜨린 후 자성비드에 반응하여 증가하였다. 0 Oe 부근에서 약 0.5  $\Omega$ 과 약 0.35 % 차이를 갖는 자기저항비를 나타내었다. 여기서 Fig. 2와 같이 GMR-SV 소자에 정착된 자성비드는 인가된 자기장에 따라 자기저항비의 변화를 야기함을 알 수 있었다.

Fig. 2(d)에서 나타난  $\mu$ -코일,  $\mu$ -채널,  $\mu$ -바이오소자 복합구조체 위에 생리식염수에 희석된 적혈구 +  $\mu$ 자성비드가 담긴 액체를 미세관 주사기에 넣어 압력차로 흐를 수 있도록 주사하였다. Fig. 1(a)처럼 PR의 2  $\mu$ m 두께와 10  $\mu$ m 폭인  $\mu$ -채널인 골을 따라 지나가는 적혈구 +  $\mu$ 자성비드가 존재하게 된다. Fig. 4(b)의 시간에 따라

적혈구 +  $\mu$ 자성비드 하나가 A→B→C의 경로로 이동하게 됨을 보여 주었다. A와 C 위치는 GMR-SV 소자 중심부를 가로지르는 채널을 통과하기 전과 후를 나타낸다. 특히 Fig. 4(b)의 B 위치에서 잠시 정지하는 이유는  $\mu$ -코일 AC 입력신호를 인가하여 적혈구 +  $\mu$  자성비드가 유도기전력에 의한 포획된 효과로 볼 수 있다. 이것은 적혈구 막변형에 의존하는 흐름과 유동 속도가 제어될 것으로 보인다. 즉, 균일한 팬케이크(Pan cake)의 모양인 적혈구가 변형되어 있는 막의 경우 유도기전력이 차이가 날뿐 아니라 생리식염수 내 흐르는 유동속도가 다를 것으로 사료된다. Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 관찰된 마이크로 코일-채널-소자 복합구조체 위에 있는 적혈구 +  $\mu$ 자성비드 GMR-SV 소자 중심부를 지나갈 때 코일에 인가한 AC 신호에 따라 정지하는 조건을 찾았다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 상지대학교에서 지원하는 학술장려금의 연구결과이다.

## 고출력 레이저 주사에 따른 세포 내 자성나노클러스터 특성변화 분석

Yu Jin Kim<sup>1</sup>, Bum Chul Park<sup>2,\*</sup>, Young Soo Choi<sup>3</sup>, and Young Keun Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Creative materials and Components, Korea University, Seoul 136-713, Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

<sup>3</sup>Department of Biomicrosystem Technology, Korea University, Seoul 136-713, Korea

자성나노소재는 생체친화적이며 다양한 기능기 도입을 통해 표면특성 조절이 가능하기 때문에 약학, 의학 분야 등 다양한 생물학적 분야에 높은 관심을 끌고 있다 [1]. 그러나 세포와 자성나노소재간의 상호 작용 및 생체환경에서의 입자 특성에 대한 이해가 부족하기 때문에 자성나노소재의 생물학적 응용에 어려움이 있다. 본 연구에서는 자성나노클러스터의 세포 내 함입 시에 나타나는 세포내골격 재배열(intracellular fibrous actin distribution) 현상에 대해 분석하여 자성나노소재와 세포간의 상호작용에 대해 이해하고자 한다. 또한 공초점 형광현미경을 이용한 고출력 레이저 주사에 자성나노클러스터를 함입한 세포의 형광 세기 변화를 분석하여 생체환경에서 자성나노입자의 특성 변화를 이해하고자 한다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 자성나노클러스터는 폴리올 방법을 하여 30 ~ 100 nm로 다양한 크기의 입자를 합성하였고 Alexa fluor-488 형광분자 도입을 위해 카르복실기를 수식하여 사용하였다. 입자의 형상 및 결정 분석을 위해 엑스선회절분석기(XRD), 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 확인하였다. 자성나노클러스터의 크기에 따른 세포내 함입 분석 및 세포내골격 재배열 분석은 공초점 형광현미경(Confocal microscopy)와 진동시료자력계(VSM)을 이용하여 분석하였다. 그림 1 (A), (B), (C)에서는 MCF 10A 세포에서 레이저 주사에 의해 시간에 따라 형광세기가 변화하는 이미지를 볼 수 있다. 그림 2에서는 빨강(F-actin), 초록(자성나노클러스터), 파랑(세포 핵) 형광세기가 시간에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 빨강과 파랑 형광의 세기가 시간에 따라 점진적으로 감소하는 반면에 초록 형광 세기는 포화되는 값까지 증가하는 것을 확인했고 자성나노클러스터가 세포내외에서 고출력의 레이저에 노출되었을 때 광학적 특성에 변화가 나타나는 것으로 판단된다.

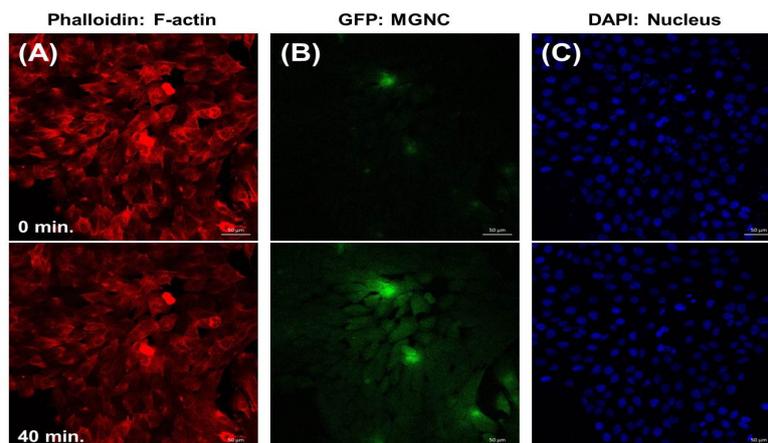


그림 1. 자성나노클러스터가 함입된 MCF 10A 세포의 레이저 주사에 의한 시간에 따른 형광이미지 변화

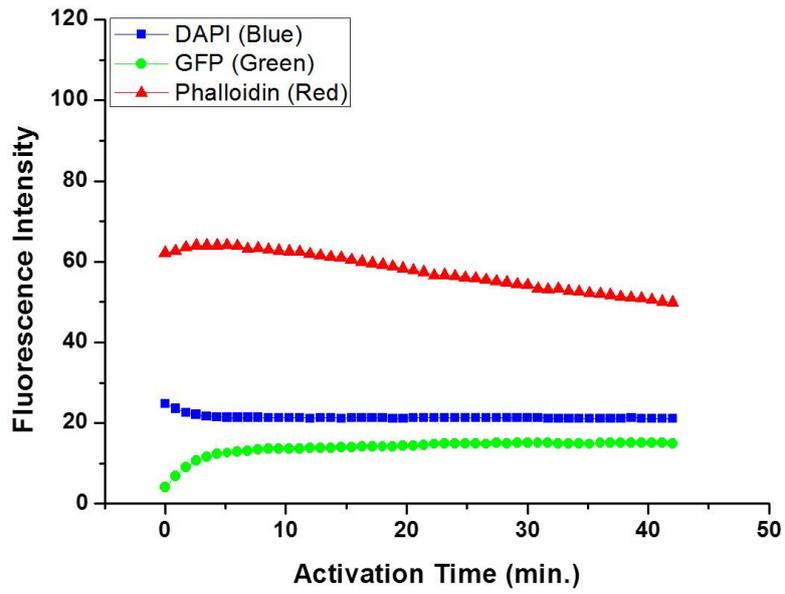


그림 2. 시간에 따른 형광세기 변화

### 참고문헌

- [1] K. A. Whitehead et al., Nat. Rev. Drug Discovery 8, 129 (2009)
- [2] J. Cha et al., RSC Adv., 3, 3631 (2013)

# 교류 자기장을 이용한 텐던의 인장응력 측정에 관한 연구

강선주<sup>1,\*</sup>, 조창빈<sup>2</sup>, 이정우<sup>2</sup>, 손대락<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한남대학교 광·센서공학과 대전광역시 대덕구 한남로 70

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283

## 1. 서론

교량에 사용되고 있는 텐던(tendon)의 인장변형력에 따른 자기 특성을 측정하는 기술은 교량의 안전을 진단하는 매우 중요한 기술이다. 최근에는 안전진단을 위해 초음파를 이용하는 방법이나 피 측정 대상체를 포화 자화 시킨 후 와전류 탐상을 하는 방법, 누설 자속을 탐지하는 정도로 자기적 특성을 활용한 비파괴 탐상이 진행되어 왔다. [1,2]

본 연구는 교량에 사용되고 있는 텐던에 dc전류와 ac전류를 인가하여 인장 변형력에 따른 자기 특성을 측정하는 기술로, 텐던의 직경은 15.5 mm이며 7개의 strand로 구성된 것을 사용하였다. 텐던에 인장변형력에 따른 자기 특성을 측정하기 위해 1.5 GPa 까지 인장변형력을 인가 할 수 있는 측정 장치와 텐던에 dc/ac전류를 인가하여 그에 따른 유도 전압을 보기 위한 측정 yoke를 제작하였다.

## 2. 측정 장치의 제작 및 실험 방법

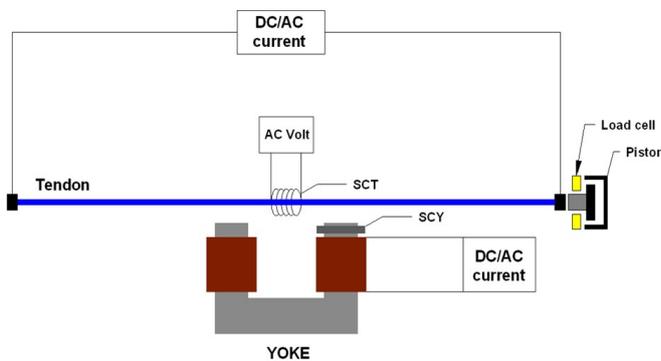


그림 1 본 연구에서 제작된 측정 장치의 계략도

본 연구에서는 인장변형력에 따른 텐던의 특성을 자기적 방법으로 측정하기 위하여 측정 장치를 제작하였다. 그림 1은 본 연구에서 제작된 측정 장치의 계략도이다. 텐던에 인장변형력을 주기 위한 유압 장치는 최대 0.3 MN까지 줄 수 있는 수동 유압 장치를 사용하였고, 힘을 측정하기 위한 load cell은 0.5 MN짜리를 사용하여 제작하였다. 제작된 측정 yoke는 일차코일이 576 회, SCT(search coil in Tendon)은 190회, SCY(search coil on the Yoke)는 1006회 권선하였다. 본 연구에서는 두 가지 방법으로 실험을

## 3. 데이터 측정

제작된 측정 장치로부터 두 가지 조건에서의 인장변형력을 측정하였다. 그림 2는 앞에서 언급한 실험 1의 조건으로, 7 strands tendon에 대하여 인장변형력에 따른 유도 전압을 나타낸 것이다. 그림 2에서 보면 yoke에 ac전류를 0.5 A 인가한 후 tendon에 dc전류를 0, 5, 10, 15, 20 A로 변화시키면서 인가하여 SCT를 통해 ac 전압을 측정하였다. 그림 3은 실험 2의 조건으로, tendon에 ac 전류를 140 A 인가한 후 yoke에 dc 전류를 각각 0, 1 A로 변화시켜 인가하여 SCY를 통해 ac 전압을 측정하였다. 그림 3에서 보면 그림 2와 달리 인장변형력에 따른 유도 전압의 변화가 선형적으로 나타나지 않는다. 따라서 이 방법을 인장변형력을 측정하는 용도로 사용

하는 것 보다는 그 유무를 판정하는 용도로 사용 가능하다고 생각된다.

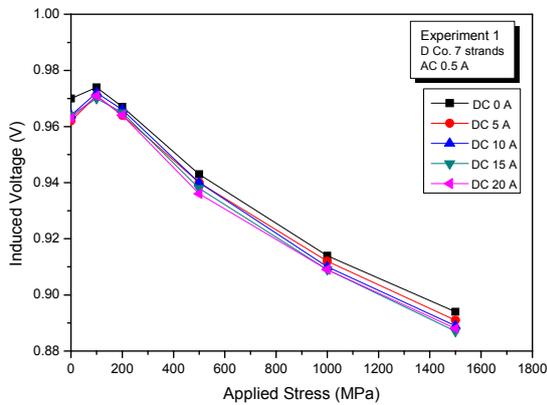


그림 2 Yoke에 ac 전류를 0.5 A 인가한 후, tendon에 dc 전류를 각각 0, 5, 10, 15, 20 A 인가한 경우 인장변형력에 따른 유도 전압의 변화

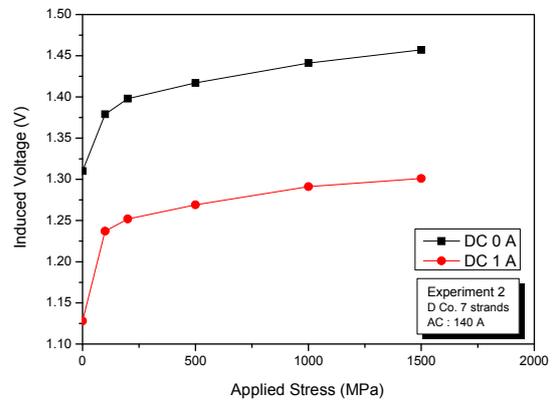


그림 3 Tendon에 ac 전류를 140 A 인가한 후, yoke에 dc 전류를 각각 0, 1 A 인가한 경우 인장변형력에 따른 유도 전압의 변화

#### 4. 결론

본 연구는 텐던에 dc전류와 ac전류를 인가하여 인장 변형력을 측정하는 기초 연구로, 텐던에 인장 변형력에 따른 자기 특성의 변화를 보기 위해 직경 15.5 mm의 7 strands tendon에 대하여 인장 변형력을 1.5 GPa까지 인가할 수 있는 측정 장치와 yoke를 제작하였다. 제작된 측정 장치를 통해 측정된 결과 인장변형력을 측정하기 위한 용도로 사용하는 것 보다는 그 유무를 판정하는 용도로 사용 가능하다고 생각된다.

#### 5. 참고문헌

- [1] A.Jarosevic, "Magnetoelastic method of stress measurement in steel."Nato ASI Series 3 High Technology, Vlol. 65 pp.107, 1998.
- [2] Fernandes, B., Wade J.D., Nims, D, K, and Devabhaktuni V.K., "A New Magnetic sensor Concept for Nondestructive Evaluation of Deteriorated Prestressing Strand", Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 23, No 1, 2012.
- [3] Carl Heck, "Magnetische Werkstoffe and ihre technische Anwendung", p22, Dr. Alfred Huethig Verlag Heidelberg(1975)

# Drone을 이용한 자기장 분포 측정에 관한 연구

김상준\*, 조영훈, 손대락

한남대학교 광·센서공학과 대전광역시 대덕구 한남로 70

## 1. 서론

드론은 군사적인 목적으로 개발되었지만, 최근들어 민간에서의 사용이 확대되고 있다. 많은 분야에서 드론의 사용이 가능하도록 안정성과 정확성을 높이려는 연구와 개발들이 진행되어지고 있다. 현재 나와 있는 드론들은 대부분 상공을 돌아다니는 비행드론이 주류를 이루고 있다. 이제까지 거의 대부분이 군사용으로만 사용되어 오던 무인항공기 기술이 민간 영역으로 확산 보급됨에 따라 이제 속칭 ‘드론(drone)’으로 불리는 무인비행장치는 취미생활 장난감의 수준으로까지 보편화 되었다.[1] 본 연구에서는 드론(drone), X-bee통신기, 탐지코일 마그네토미터, LabVIEW S/W등을 사용하여 군사용 무인 감시 장비를 설계하는 기초연구를 수행하였다.

## 2. 실험방법

드론을 사용하여 자기장분포를 측정할 때 마그네토미터에 진동이 있어서 3축 마그네토미터의 사용이 불가능하다. 그러면 total field를 측정하는 scalar 마그네토미터가 필요한데 NMR이나 optical pumping 마그네토미터 [2]의 경우 센서의 크기가 너무 커서 소형의 드론에 적용이 어렵다. 이 문제를 해결하여 보기위하여 소형의 3축 flux-gate 마그네토미터[3]의 직각도를 보정하여 주는 알고리즘을 개발하여 total 자기장을 측정할 수 있는 장치를 만들었다. 또한 마그네토미터와 컴퓨터와의 연결은 Zig-bee 900 MHz 통신기를 사용하여 데이터를 가져와서 자기장의 분포를 확인하였다. 그림 1은 3축의 flux-gate 마그네토미터를 사용 승용차의 자기장분포를 드론으로 측정한 후 직각도를 보정했을 때와 보정하지 않았을 때를 비교분석한 자기장 분포 그래프이다.

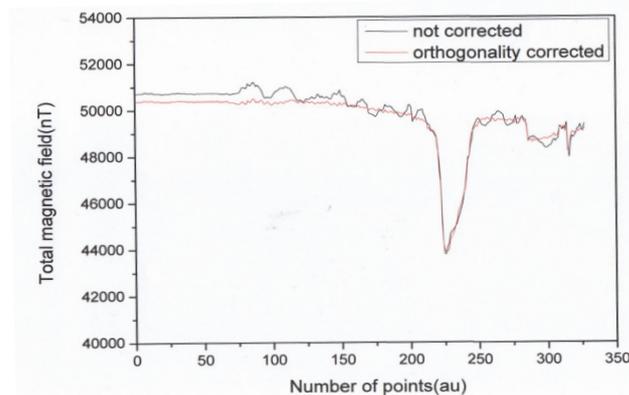


그림 1. Drone을 사용한 승용차의 자기장 분포 측정

## 3. 참고문헌

- [1] 이기명의 4인, 위치기반 무인 수상 드론의 설계 및 구현 한국정보과학회 동계학술발표회 pp.48-49 (2014)
- [2] Pravel Ripka, “Magnetic Sensors and Magnetometers”, Artech House Publishers, pp.296-297 (2001).
- [3] 손대락, 김은애, 전해진 “Low Noise 및 Wide Supply Voltage Range 3-axis Flux-gate Magnetometer 제작에 관한 연구”, 한국자기학회 2014년 하계 학술연구발표회 pp.26 (2014).

# 직교형 플렉스 게이트 센서의 구동회로

변 응\*, 김태준, 신광호

경성대학교 정보통신공학과, 부산광역시 남구 수영로 309, 608-736

## 1. 서론

상온에서 동작이 가능한 고감도 자기 센서인 직교형 플렉스게이트 센서는 구조가 간단하면서 높은 감도와 우수한 분해능을 가진다. 하지만 일반적으로 플렉스게이트 센서 신호처리 방식은 센서 코어의 히스테리시스에 의해 유도된 검출 코일 출력 전압의 제 2 고조파를 검출하는 방식을 사용하기 때문에 신호처리 회로가 복잡한 단점이 있다. 하지만 Sasada 교수는 직교형 플렉스 게이트 센서의 교류 여자 신호에 직류 바이어스 전류를 추가하여 센서의 기본파 구동이 가능하다는 것을 밝혔다[1,2]. 이 연구는 신호처리를 단순화하여 소형화에 적합하다. 그리고 직류 바이어스 전류를 더한다면 자성체의 자벽 이동에 의한 히스테리시스 제거와 자벽 이동에 대한 벌크하우젠 노이즈를 제거하여 센서의 성능을 향상시킨다[3,4,5]. 이와 같은 구동방식을 토대로 본 연구에서는 코발트계 아몰퍼스와이어와 검출코일을 이용하여서 제작한 3축 직교형 플렉스게이트 센서의 고감도, 우수한 분해능을 위해 최적화된 회로를 설계하였다. 이 회로는 교류여자 전류에 직류 바이어스 전류 인가를 더하기 위한 Bias-T를 추가한 구동회로와 센서의 출력신호를 복조 할 수 있는 회로를 설계하여 Lock in amp 회로를 구현하였다.

## 2. 실험방법 및 결과

3축 직교형 플렉스게이트 센서 구동회로는 교류 여자전류를 생성하고 이에 생성한 직류 바이어스 전류를 더하기 위한 여자회로, 검출코일의 출력을 복조하는 회로 총 두가지로 나뉜다. Fig 1.(a) 여자회로의 주파수 발생회로에서 발생한 교류 여자 신호는 출력 교류 전류량이 미약하다. 그래서 전류 증폭기를 이용하여 전류를 증폭하였다. 그 후 Bias-T를 이용하여 교류 전류에 직류 바이어스 전류를 더해주었다. 이렇게 직류와 교류가 더해진 신호는 3축 직교형 플렉스게이트 센서로 인가된다. Fig 1.(b) 복조 회로는 검출코일의 출력을 계측용 증폭기에 입력하여 증폭하였다. 그 후 Band pass filter로 입력하여 Filtering한 후 복조기에 입력하였다. 복조기의 Reference신호는 Fig 1.(a)의 주파수 발생회로의 출력 신호이다. 복조기에 입력되는 두 신호의 위상이 달라지면 감도저하가 일어나게 되므로 위상을 동일상에 맞추었다. 이렇게 복조기에서 출력된 신호는 Low pass filter를 통해 DC 신호로 복조되어진다.

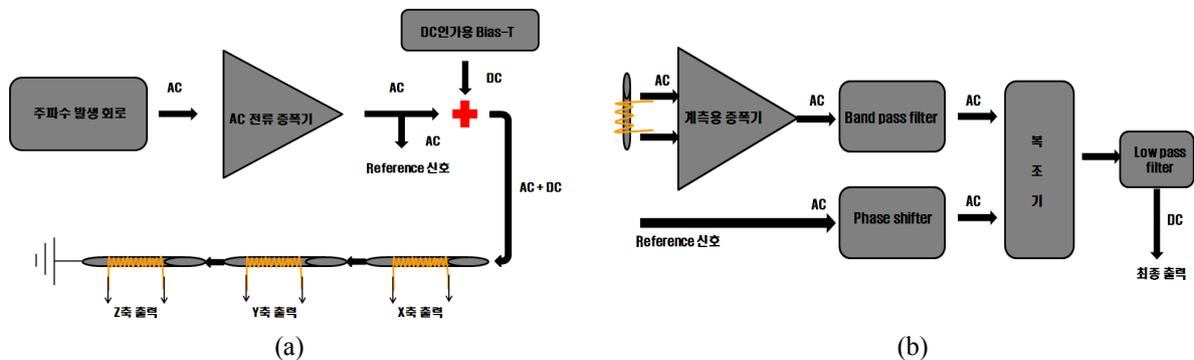


Fig 1. Excitation circuit block diagram(a) and demodulation circuit block diagram(b)

제작되어진 3축 직교형 플럭스게이트 센서 구동회로는 센서에 정현파 630kHz, AC 60mA, DC 35mA를 흘려주었다. 계측용 증폭기의 증폭률은 15로 설정하였다. 아래의 표는 3축 직교형 플럭스 게이트 구동회로를 이용한 X, Y, Z축의 외부자계(-0.7Oe ~ +0.7Oe)에 대한 감도와 0~3kHz까지의 분해능을 나타낸 것이다.

Table 1. Performance of 3 axis orthogonal fluxgate that executes through the circuit

	Sensitivity[V/Oe]	Resolution	Linearity
X axis	9.87	Below 0.1nT	1.5%
Y axis	10.1	Below 0.1nT	1.4%
Z axis	10.6	Below 0.1nT	3.3%

이번 연구에서 개발한 회로를 이용하여 3축 직교형 플럭스게이트 센서의 성능을 평가한 결과 감도는 평균 10.19[V/Oe], 0.1nT 이하의 분해능, DC~3kHz의 응답속도를 나타내었다. 선형성은 평균 2.06% 오차가 발생하였다.

### 3. 결론

기존의 플럭스게이트 센서들보다 신호처리 회로가 DC 바이어스 전류로 인한 기본파 구동으로 간단하여졌다. 이렇게 회로의 구성은 간단해졌지만 성능면으로는 평균 10.19[V/Oe] 고감도와 0.1nT의 고분해능을 나타내었다.

### 4. 참고문헌

- [1] Sasada, I., "Orthogonal Fluxgate Mechanism Operated with DC Biased Excitation", Journal of Applied Physics, 91, 10, p.7789-7791, May., 2002
- [2] Sasads, I., "Symmetric Response Obtain With an Orthogonal Fluxgate Operating in Fundamental Mode", IEEE Transactions on Magnetics, 38, 5, p.3377-3379, Sep., 2002
- [3] Butta, M. Yamashita, S., and Sasada, I., "Reduction of Noise in Fundamental Orthogonal Fluxgate", Sensor and Actuators A, 116, p.405-409, Oct, 2004
- [4] Eugene Paperno, "Suppression of Magnetic Noise in the Fundamental-mode Orthogonal Fluxgate", Sensors and Actuators A, 116, 3, p.405-409, Oct., 2004
- [5] Butta, M. Sasada, I., "Sources of noise in a magnetometer based an orthogonal fluxgate operated in fundamental mode", IEEE Transactions on Magnetics, 48, 4, Apr, 2012

# 감온 페라이트를 이용한 온도센서 어레이

변 응\*, 김태준, 신광호

경성대학교 정보통신공학과, 부산광역시 남구 수영로 309, 608-736

## 1. 서론

자성재료 중 감온페라이트는 특정 온도영역에서 자기적 특성이 급격하게 변하기 때문에 온도센서로써 이용이 되어왔다[1,2]. 이러한 감온페라이트를 이용한 온도측정방법은 온도변화에 의존하는 감온페라이트의 보자력, 포화자속밀도, 투자율 등의 변화를 검출코일을 통하여 검출하는 것이다. 본 연구에서는 감온페라이트에 검출코일을 설치하여 LC 공진형 감온페라이트를 구성하였다. 그리고 온도에 의존하는 감온페라이트의 인덕턴스 변화 즉, 투자율 변화에 따라 LC 공진주파수와 임피던스가 달라지는 것을 확인 하였다. 이 결과를 통해서 온도에 따라 공진주파수가 달라지는 LC 공진형 감온페라이트들을 직렬로 배열한다면 LC 공진형 감온페라이트가 설치된 각 구간의 온도를 공진주파수를 통해 효율적으로 측정 하도록 설계 할 수가 있다.

## 2. 실험방법 및 결과

Fig 1.(a)는 감온페라이트 코어의 사진을 나타낸 것이다. 감온페라이트는 원통형 구조를 가지고 있으며 길이 1.9mm, 내경과 외경은 각각 2.3mm, 4mm이다. Fig 1.(b)는 감온페라이트 코어에 50um의 구리선을 토로이드 형태로 70회 감은 시편의 사진을 나타낸 것이다.



Fig 1. Photographs of ferritecore(a) and toroid sample(b)

제작한 감온페라이트 코어의 검출코일에 병렬 1nF을 설치하였다. 이 때 상온에서 공진주파수는 100kHz이었다. 그리고 직렬 1kΩ를 설치한 후 오실로스코프로 저항 양단에 걸리는 전압을 측정하였다. 이를 통해 공진주파수를 측정하고 임피던스는 계산하였다. 온도에 의존하는 공진주파수 및 임피던스 측정을 위하여 130°C까지 실리콘 오일을 가열시켰다. 가열 후 감온페라이트 코어를 실리콘 오일에 넣어서 자연 냉각 시키며 온도를 변화시켰다. 이 때 실리콘 오일의 온도는 K형 열전대의 기전력을 멀티미터로 측정해 온도로 다시 환산하였다. (Fig 2.)

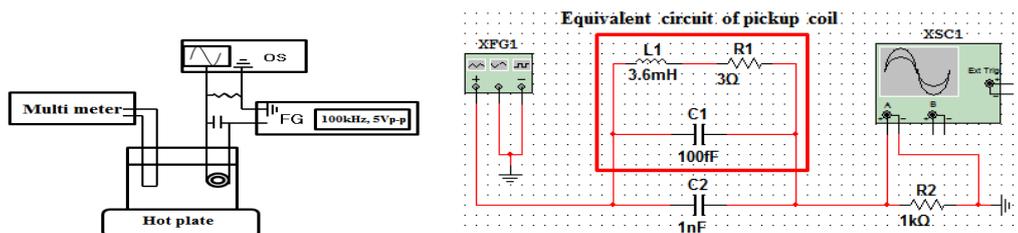


Fig 2. Measurement setup for temperature sensitive ferrite core

Fig 3.(a)에서 알 수 있듯이 공진주파수는 30°C~150°C 구간에서 100kHz~3MHz까지 변화하였다. 공진주파수는 40°C~50°C 구간에서 140kHz~2.2MHz까지 변화 폭이 가장 컸다. 50°C 이상의 온도에서는 공진주파수가 크게 변화하지 않았다. (b)에서는 임피던스의 주파수 특성을 나타내었다.

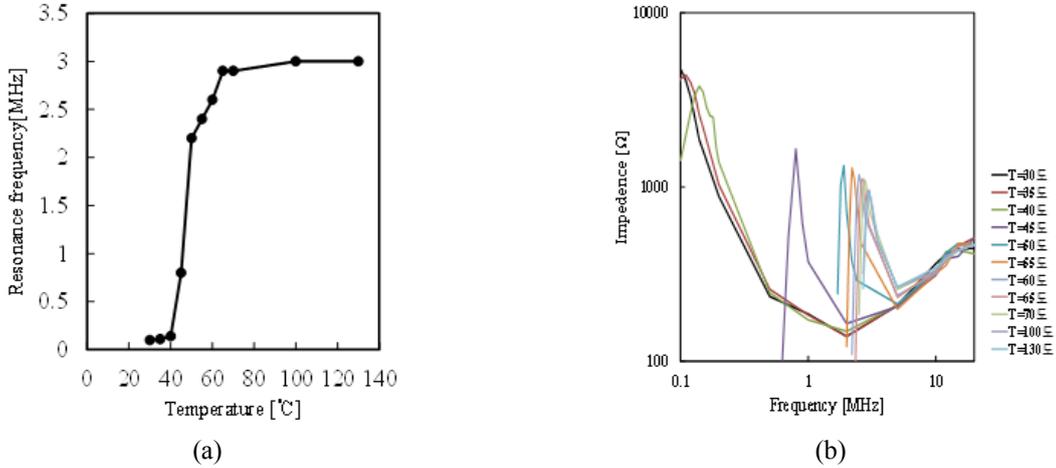


Fig 3. (a) Temperature dependence of (b) Frequency dependence of impedance resonance frequency

감온페라이트의 공진주파수는 검출코일의 turn 수나 캐패시턴스의 값을 변화시킴으로써 바꿀 수가 있다. 따라서 LC 공진형 감온페라이트들을 직렬로 배열하여 연속된 지점의 온도를 측정 할 수 있다.

### 3. 참고문헌

- [1] K. Seki, J. Shimada and K. Murakami, IEEE Trans. Magn., 14, 969(1978).
- [2] R. C. Ebert and A. F. Horefe, Proc., IEEE Engineering in Medicine & Biology Society 10th Annual International Conf., 812(1995).

# The Fabrication of Spin-Thermoelectric Device using the Sol-Gel Method

Min-Sun Jang<sup>1,\*</sup>, Seung-Hyub baek<sup>2</sup>, Ki-Suk Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Materials and Science Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),  
Ulsan 689-798, Republic of Korea

<sup>2</sup>Electronic Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST),  
Seoul 136-791, Republic of Korea

## 1. Introduction

In recent years, a ferrimagnet insulator- $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG) has been attracted much attention due to its prominent applications to spin caloritronic devices such as a spin voltage generator utilizing the spin Seebeck effect (SSE) [1, 2]. Subsequently, a variety of fabrication methods for YIG films have been developed; a pulsed laser deposition [3], an RF/DC sputtering [4], a spin coating [5], and a sol-gel [6] method have been studied. Here, we utilized the sol-gel method to fabricate homogeneous YIG film. The sol-gel method is available to synthesize fine and homogeneous ceramics with high production efficiency. In this presentation, we explore the variation of magnetic properties of YIG film according to the heat treatment procedure.

## 2. Experiments

We prepared raw materials of the yttrium nitrate ( $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 99.99%), iron nitrate ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , 99.99%), citric acid ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). The solution of the citric acid was dissolved into 100 mL of distilled water at room temperature for 18 hours with stirring speed of 300-rpm. The solution of the citric acid was maintained at 1pH. 100 mL of citric acid was added to the yttrium nitrate ( $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 99.99%) and the iron nitrate ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , 99.99%) in regular sequence. The resulting solution was followed by stirring for 24 hours at 80 °C to obtain a homogenous gel. And then the powder YIG was obtained from the grinding the completely dried solution. The calcination process was carried out at 850 °C in air for 2 hours at a heating rate of the 7.7 °C/min to get rid of residual impurities. Sintering has been done at 1400 °C for 2 hours. To measure SSE according to temperature gradient along film thickness direction (longitudinal geometry), the 15-nm-thickness Pt electrodes have been fabricated on the YIG surface through the photolithography and DC sputtering. For the sake of enhancement the SSE signal (spin voltage), we adopted parallel Pt electrodes circuit design. X-ray Diffractometer (XRD) was used for finding crystalline structure. The magnetic properties of the fillet were measured using SQUID Vibrating Sample Magnetometer at room temperature (25 °C) as well as magneto-optical Kerr effect.

## 3. Results & Discussion

To examine the effect of heat treatment to properties of YIG, we compared the crystalline structure and magnetic properties before and after sintering process. For both cases, the XRD pattern showed good agreement with the Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS-ICSD; number 014342) of the pure YIG. However, magnetic properties vary dramatically according to the sintering process. After the sintering process, we found huge enhancement of the saturation magnetization of YIG film. From the previous studies [7], it is

well known that calcination temperature can affect the crystalline structure of YIG film. In this work, however, we found that the sintering process can play a crucial role for the magnetic properties of YIG film.

#### 4. References

- [1] K. Uchida et al., *Nat. Mat.* **9**, 894 (2010).
- [2] K. Uchida et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **26**, 343202 (2014).
- [3] N. B. Ibrahim, C. Edwards, S. B. Palmer, *J. Magn. Magn. Mater.* **220**, 183 (2000).
- [4] Y. M. Kang et al., *J. Appl. Phys.* **97**, 10A319 (2005).
- [5] A. Kirihara et al., *Nat. Mat.* **11**, 686 (2012).
- [6] F. W. Aldbea et al., *J. Sol-Gel Sci Technol.* **71**, 31 (2014).
- [7] S. Zhanxing et al., *Key Engineering Materials* **368-372**, 582 (2008).

# 자기냉동기용 회전형 Habach 자석의 설계 및 제작

류권상<sup>1,2,\*</sup>, 백운봉<sup>1</sup>, 남승훈<sup>1,2</sup>, 유성초<sup>3</sup>, 이종석<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국표준과학연구원 에너지소재표준센터

<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 측정과학

<sup>3</sup>충북대학교 물리학과

<sup>4</sup>강릉원주대학교 기계자동차공학부

## 1. 서론

자기냉동기의 효율은 자기냉각제의 자기열량효과에 의존한다. 자기열량효과에 의해서 자기냉매가 자화되고 소거될 때 자기냉매의 단열온도가 올라가고 내려간다[1]. Curie 온도에서 자기열량효과는 자기장의 2/3승에 비례하기 때문에 효율적인 자기냉동기를 제작하기 위해서는 고자기장이 필수적이다[2]. 자기냉동기에 사용할 수 있는 한 가지 자기장 소스는 영구자석이다. 영구자석을 사용한 자기냉동기는 자석을 움직이거나 자기냉매를 움직이는 것 외에 전력소모가 없다. 강력한 자기장 생성을 위하여  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 과  $\text{SmCo}_5$ 와 같은 희토류 자석이 널리 사용된다. 희토류 금속은 철이나 니켈보다 대단히 비싸기 때문에 주어진 영구자석 재료의 크기와 무게에 대해 가장 높은 자기장을 생성할 수 있도록 자기 배열을 설계하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 내부자석이 회전함으로써 착자와 소거를 할 수 있는 회전형 Halbach 자석을 해석하여 설계하고 제작한 후 자기장을 측정하였으며 최대자기장은 약 1.6 T였다.

## 2. 회전형 Halbach 자석의 모델

유한요소법(FEM)은 전자기장을 전산모사하기 위하여 널리 사용되고 있다. Fig. 1은 제작할 회전형 Halbach 자석의 치수를 보이고 있으며, 내부자석의 내직경은 34.5 mm, 외직경은 72.5 mm이고, 외부자석의 내직경은 79 mm, 외직경은 166 mm이며, 자석의 길이는 200 mm이다. 화살표는 영구자석의 자화 방향을 나타낸다. 사용한 영구자석은 N50M grade로 보자력은 1,042 A/m이고, 잔류자속밀도는 1.4 T이다. Fig. 1에서 보여주고 있는 상태는 자석 내부에 최대 자기장이 발생하는  $0^\circ$  를 나타내고 있다. 내부 자석이  $180^\circ$  회전하면 내부자석과 외부자석의 자화가 반대방향이 되어 자기장은 0이 되어야 한다.

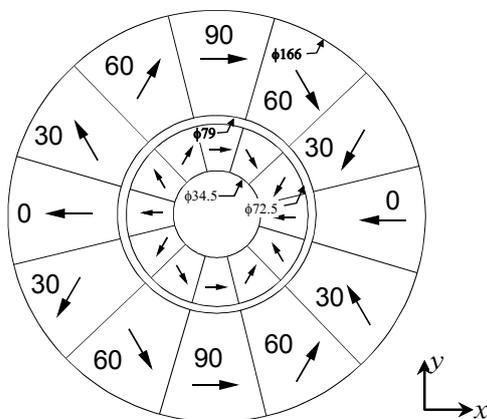


Fig. 1. Model of Halbach magnet for simulating the magnetic field. Arrows show the magnetization.

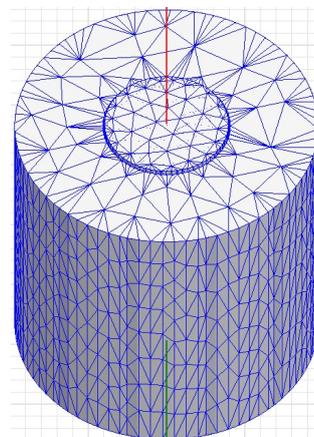


Fig. 2 Mesh configuration for simulating magnetic field.

### 3. 회전형 Halbach 자석의 자기장 전산모사

Fig. 2는 자기장 전산모사를 하기 위해 Maxwell에서 보여주고 있는 메쉬의 모양이다. 전산모사는 Ansys사 Maxwell v12 3D의 Transient solver를 사용하였다[3]. 총 메쉬수는 약 75,000개였다.

FEM에 의해 전산모사된 자석 중심의 자기장 분포가 Fig. 3에 주어지 있다. 실선은 전산모사 결과이고, symbol은 제작한 자석에서 측정한 결과이다. 최대 약 1.6 T의 자기장이 생성되는 것을 알 수 있다. 내부자석과 외부자석의 자화가 반대가 되어 자기장의 세기가 최소가 되는 180도에서 중심에서의 자기장은 0 T가 되나 중심에서 멀어질수록 조금씩 증가하여 전산모사한 값과 다르게 측정되었다. 그러나 전체 거리의 60 %가 0.1 T 이하로 측정되어 자기냉동기에 사용하는 데 문제는 없을 것으로 사료된다. 내부자석이 60° 와 120° 회전하였을 때 자기장은 전산모사한 값보다 다소 낮게 측정되었다.

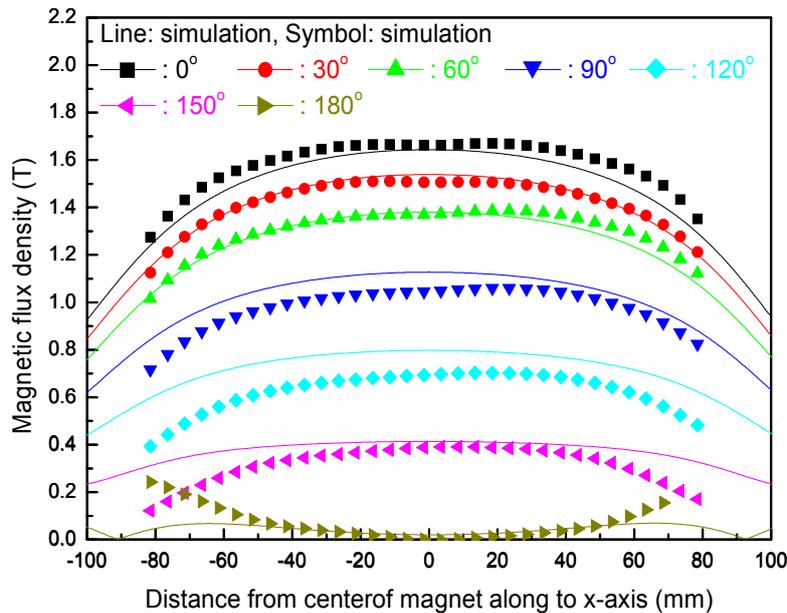


Fig. 3. Magnetic field profiles along z-axis. Lines are the results of simulation, and symbols the results of measurement.

### 4. 결론

회전형 Halbach 자석의 자기장을 전산모사하고 제작한 후 측정하였다. 최대 자기장은 1.6 T로 자기냉동기에 적용하기에 나쁘지 않는 세기였다. 90° 와 120° 에서는 전산모사한 값보다 측정값이 다소 낮았다. 내부자석과 외부자석의 자화가 반대가 되어 자기장의 세기가 최소가 되는 180°에서 중심에서의 자기장은 0 T가 되나 중심에서 멀어질수록 조금씩 증가하여 전산모사한 값과 다르게 측정되었다.

### 5. 참고문헌

- [1] X. N. Xu, D. W. Lu, G. Q. Yuan, Y. S. Han, and X. Jin, J. of Applied Physics, **95**, 6302 (2004).
- [2] R. Björk, C.R.H. Bahl, A. Smith, and N. Pryds, Intl. J. of Refrigeration, **33**, 437 (2010).
- [3] Ansys inc., <http://www.ansys.com>.

# Density functional theory calculations on magnetic properties of FePc on Si(111)4×1-In surface

Jung-Min Hyun\* and Hanchul Kim

Department of Physics, Sookmyung Women's University 100 Cheongpa-ro 47-gil,  
Yongsan-gu, Seoul 140-742, Korea

Metal-organic systems have attracted much attention for potential applications in future electronic devices. Among these systems, metal phthalocyanine (MPc) represents one of the most promising classes because of its thermal and chemical stability. In recent years, there has been a variety of work performed on MPc systems such as FePc, CoPc, NiPc, and CuPc on graphene/Ni(111) [1-2] as well as on metallic surface [3-5]. However, it is scarcely known about them on nanostructured metal-semiconductor hybrid substrates. Theoretical analysis is highly required to understand issues such as the MPc-substrate interaction, which may affect the molecular adsorption mechanism and the magnetic properties on the metal/semiconductor hybrid surfaces. In this presentation, we report density functional theory (DFT) calculations on the FePc on Si(111)In-4×1. The results include a variety of adsorption sites and magnetic moment depending on sites which separate into In-chain, Si-chain, and boundary area. We found that the magnetic moment on the Si-chain area was the larger than on the In-chain area. The stable adsorption sites and electronic structure will be discussed.

This work has been supported by the Future-based Technology Development Program(Nano Fields) (No. 20120006200) and the EDISON program (No. 2012M3C1A6035684) through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Korea government(MEST).

- [1] J. Uihlein et al., J. Chem. Phys. 138, 081101 (2013).
- [2] L. Massimi et al., Beilstein J. Nanotechnol. 5, 308 (2014).
- [3] X. Lu et al., J. Am. Chem. Soc. 118, 7197 (1996).
- [4] K. W. Hiips et al., J. Phys. Chem. 100, 11207 (1996).
- [5] X. Lu et al., J. Phys. Chem. B 101, 5391 (1997).

# Comparison of Hf and W interlayer on the perpendicular magnetic anisotropy of the MgO/(Hf or W)/CoFeB structures

Kyoungh-Min Lee<sup>1,2,\*</sup>, Taufik Bonaedy<sup>1</sup>, Byoung-Chul Min<sup>1</sup>, Junghyun Sok<sup>2</sup>, and Jun Woo Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center of Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Nano Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Republic of Korea

Investigations to tune the perpendicular magnetic anisotropy (PMA) of a MgO/CoFeB system have attracted great interest due to its potential application in various spintronics devices [1-4]. In this study, we have investigated the PMA of a CoFeB/Hf/MgO structure and a CoFeB/W/MgO structure. The full sample structures were Ta(20 Å)/MgO(16 Å)/Hf(0.0~2.0 Å)/CoFeB(12~30 Å)/W(10 Å)/ SiO<sub>2</sub>/ Si and Ta(20 Å)/MgO(16 Å)/W(0.0~2.0 Å)/CoFeB(12~30 Å)/W(10 Å)/ SiO<sub>2</sub>/ Si. The magnetic hysteresis loops were measured with a vibrating sample magnetometer and the elemental distribution were measured by energy dispersive spectroscopy (EDS). It was observed that the effective anisotropy increased with the inserted Hf and W thickness. The coercivity increased with insertion layer thickness in the Hf inserted samples, whereas the coercivity decreased with insertion layer thickness in the W inserted samples. The saturation magnetization, the magnetic dead layer and the interfacial anisotropy was calculated from CoFeB thickness dependent magnetic hysteresis loop measurements. The magnetic dead layer of CoFeB was increased with a W insertion, while the saturation magnetization and the dead layer of CoFeB was decreased with a Hf insertion. These results suggest that the mechanism of the increased PMA is different for samples with Hf and W insertion layer. Using EDS measurements, possible origins of the role of Hf and W will be discussed.

[1] Q. L. Ma, et al. *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) pp.122414

[2] Xi Chen, Guang Hua Yu, et al. *Appl. Phys. Lett.* **105** (2014) pp.092402

[3] M. Yamanouchi, et al. *J. Appl. Phys.* **109** (2011) pp. 07C7712

[4] T. Liu, J. W. Cai, et al. *AIP Adv.* **2** (2012) pp. 032151

# Effect of Co doping on the resistance switching behavior of Zn<sub>1-x</sub>O:Co<sub>x</sub> Films

Hongtao Xu<sup>1,2,\*</sup>, Zhao Xiahou<sup>1,2</sup>, Ying Li<sup>2</sup>, Mingyuan Zhu<sup>2</sup>, Yemin Hu<sup>2</sup>, Min Zhong<sup>2</sup>, and Chunli Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Oxide Research Center, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, 449-471, Korea  
<sup>2</sup>Laboratory for Microstructures/School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, 149 Yanchang Road, 200072 Shanghai, P.R. China

Resistive random access memory (RRAM) is considered promising for next-generation nonvolatile memory application. Resistive switching (RS) phenomena have been studied in many materials including organic materials, binary transition metal oxide, and perovskites<sup>[1]</sup>. Among these materials, zinc oxide (ZnO) has been widely investigated owing to its simple composition, reversible and steady RS performance<sup>[2]</sup>. In our work, the Zn<sub>1-x</sub>O:Co<sub>x</sub> films have been prepared on Pt/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si substrates by the sol-gel method. The influence of Cobalt doping concentration on the forming behavior was studied. The coexistence of Forming Free (FF) and Forming Necessary (FN) unipolar RS behaviors had been found in pure ZnO, 1% doped and 3% doped ZnO films. But for 5% Co doped ZnO film, all the devices need the forming process. It means that the percentage of FF devices decreased with the increase of Co doping concentration. Additionally, there is an obviously difference between FF devices and FN devices in the distribution of the set voltage, i.e., with same film composition, the set voltage of FF devices was more stable as compared to that of the FN devices (Figure 1). This may be due to the pre-existing filamentary paths in pristine devices that showed FF switching, and the conductive filaments can easily re-connect along similar paths after rupture<sup>[3]</sup>. These results suggest that FF devices with relative stable set voltage can be prepared by adjusting the synthesis parameters of Zn<sub>1-x</sub>O:Co<sub>x</sub> films, which should promote the realization of practical RRAM devices.

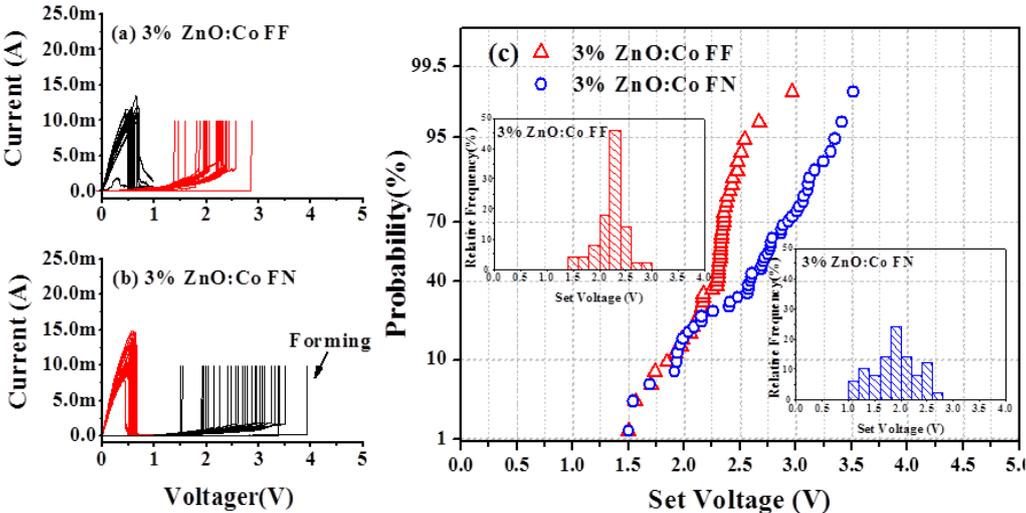


Fig. 1 (a) (b) the typical I-V curves of 3% Co doped ZnO film in FF and FN devices; (c) the accumulative probability of Set Voltage in FF and FN devices, inset was the distribution of the Set voltage.

## References

- [1] R. Waser and M. Aono, *Nat. Mater.* 6, 833 (2007).
- [2] Chun-Cheng Lin, Zong-Liang Tseng, Kuang-Yao Lo, Chih-Yu Huang, Cheng-Shong Hong, Sheng-Yuan Chu, et al, *Appl Phys. Lett.* 101, 203501 (2012).
- [3] F. Kurnia, Chunli Liu, C. U. Jung, and B. W. Lee, *Appl Phys. Lett.* 102, 152902(2013).

# Perpendicular magnetic anisotropy properties of tetragonal Mn<sub>3</sub>Ga epitaxial films under various deposition conditions

Hyun-Woo Bang<sup>1</sup>, Woosuk Yoo<sup>1</sup>, Youngha Choi<sup>1</sup>, Chun-Yeol You<sup>2,\*</sup>, Jung-II Hong<sup>3</sup>, J. Dolinšek<sup>4</sup>, Myung-Hwa Jung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Sogang University, Seoul 121-742, South Korea

<sup>2</sup>Department of Physics, Inha University, Incheon 402-752, South Korea

<sup>3</sup>Department of Emerging Materials Science, DGIST, Deagu 711-873, South Korea

<sup>4</sup>J. Stefan Institute, University of Ljubljana, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

Mn<sub>3</sub>Ga has received renewed attention in recent years because of their multiple structural and magnetic properties for potential applications in spintronics [1]. The hexagonal (D0<sub>19</sub>) phase, that is a triangular antiferromagnet, is easily obtained by arc-melting. On the other hand, the tetragonal (D0<sub>22</sub>) phase, that is a ferrimagnet, is obtained by annealing the hexagonal material at high temperatures [2][3]. The tetragonal epitaxial films exhibited high perpendicular magnetic anisotropy, low saturation magnetization, and high spin polarization [3], which are satisfied with the criteria of spin transfer torque magnetic random access memories (STT-MRAMs). For a practical application to STT-MRAM devices, it is necessary to improve the interface nature and optimize the deposition condition. In this study, we succeeded to grow epitaxial films of tetragonal Mn<sub>3</sub>Ga directly on MgO(100) without any buffer layer by using DC/RF magnetron sputtering method. We changed the deposition conditions; such as deposition temperature (350 - 450°C), RF power (35 - 45 W), and Ar working pressure (2 - 7 mTorr). X-ray diffraction data revealed that the growth direction is the c-axis perpendicular to the film plane. Scanning electron microscope images showed that the top surface is smooth and the maximum thickness is about 290 nm. When the deposition temperature increases, the grain size grows larger, but the samples grown at 450°C show a secondary phase of MnGa. The optimal deposition conditions are 400°C, 35 W, and 5 mTorr in our sputtering system. For the field perpendicular to the film plane, clear hysteresis loop was observed with the coercive field  $H_C = 1.4$  T at room temperature. By extrapolating the hard magnetization data for the field parallel to the film plane, the anisotropic constant was estimated about  $K_1 = 1 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>. These results are promising to use it as one of magnetic components in STT-MRAM devices.

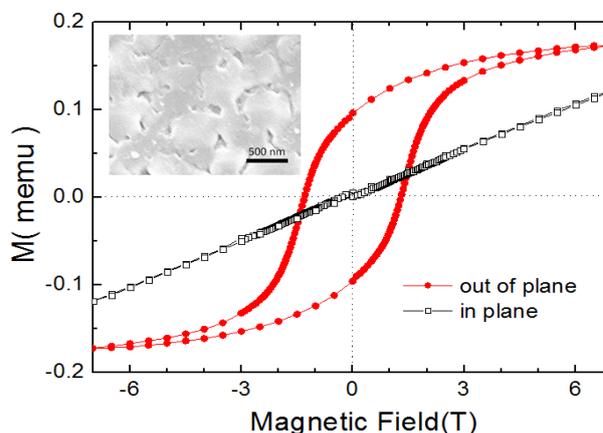


Fig. 1. Magnetization of Mn<sub>3</sub>Ga thin film deposited on MgO(100) at room temperature.

[1] Z. Bai *et al.* Appl. Phys. Lett. **100**, 022408 (2012).

[2] B. Balke *et al.* Appl. Phys. Lett. **90**, 152504 (2007).

[3] H. Kurt *et al.* Phys. Rev. B **83**, 020405( 2011).

# Exchange Bias Effect Determined by Anisotropic Magnetoresistance in $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}/\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}$ Bilayer System

Woosuk Yoo<sup>1</sup>, Seongmin Choo<sup>1</sup>, Kyujoon Lee<sup>1</sup>, Sinyong Jo<sup>2</sup>, Chun-Yeol You<sup>2,\*</sup>,  
Jung-Il Hong<sup>3</sup>, Myung-Hwa Jung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Sogang University, Seoul 121-742, South Korea

<sup>2</sup>Department of Physics, Inha University, Incheon 402-752, South Korea

<sup>3</sup>Department of Emerging Materials Science, DGIST, Deagu 711-873, South Korea

Exchange bias effect is the unidirectional anisotropy induced by the interface between ferromagnetic (FM) and antiferromagnetic (AFM) layers below the Néel temperature of antiferromagnetic materials, leading to a shift of hysteresis loop. The effect of exchange bias has been studied for many years because of its possible application in spintronics, especially in spin valves for magnetic recording and sensor devices [1]. The essentials of exchange bias effect are not fully understood yet. It is generally accepted that the uncompensated moments in the AFM layer play an important role in pinning the spins at the interface and determine the strength of exchange bias field [3]. We prepared bilayer systems composed of the FM layer  $\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}$  and the AFM layer  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$  ( $x = 0.3, 0.4, 0.5, \text{ and } 0.6$ ) by using the DC/RF magnetron sputtering method. Exchange bias field  $H_{\text{EB}}$ , the shift field in hysteresis loop, was observed in all the  $\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}/\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$  bilayer systems. The changes of  $H_{\text{EB}}$  were explicitly studied for various parameters such as the composition of AFM material  $x$ , the measured temperature  $T$ , and the angle  $\theta$  of applied magnetic field. We measured anisotropic magnetoresistance (AMR) and analyzed the AMR data to extract the  $H_{\text{EB}}$ , since the peak structure in AMR is not exactly same to the coercive field  $H_{\text{C}}$ , unlike the magnetization data. We propose a new approach to analysis for AMR in determining  $H_{\text{EB}}$  and  $H_{\text{C}}$  along the field angle  $\theta$  with respect to the field-cooling direction. The results were compared with the variations of  $H_{\text{EB}}$  and  $H_{\text{C}}$  simulated by Mauri model and spin-glass model [3].

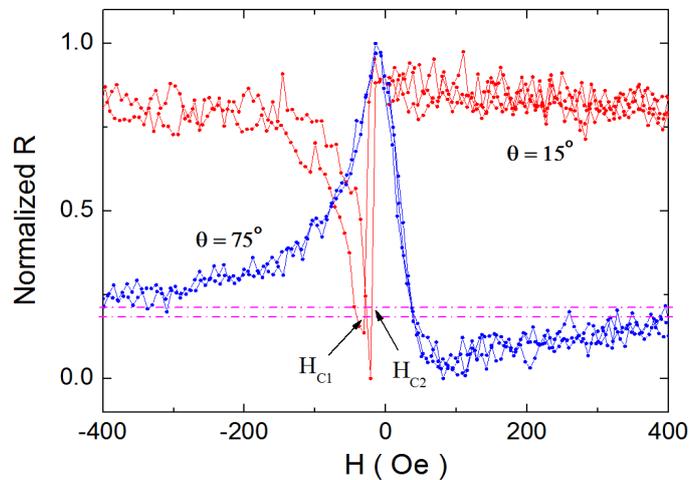


Fig. 1. AMR data for  $\theta = 15^\circ$  and  $75^\circ$  to estimate  $H_{\text{EB}} = (H_{\text{C1}} + H_{\text{C2}})/2$

[1] J. C. S. Kools, IEEE Trans. Magn. **32**, 3165 (1996).

[2] R. Morales and Z. P. Li, Phys. Rev. Lett. **102**, 097201 (2009).

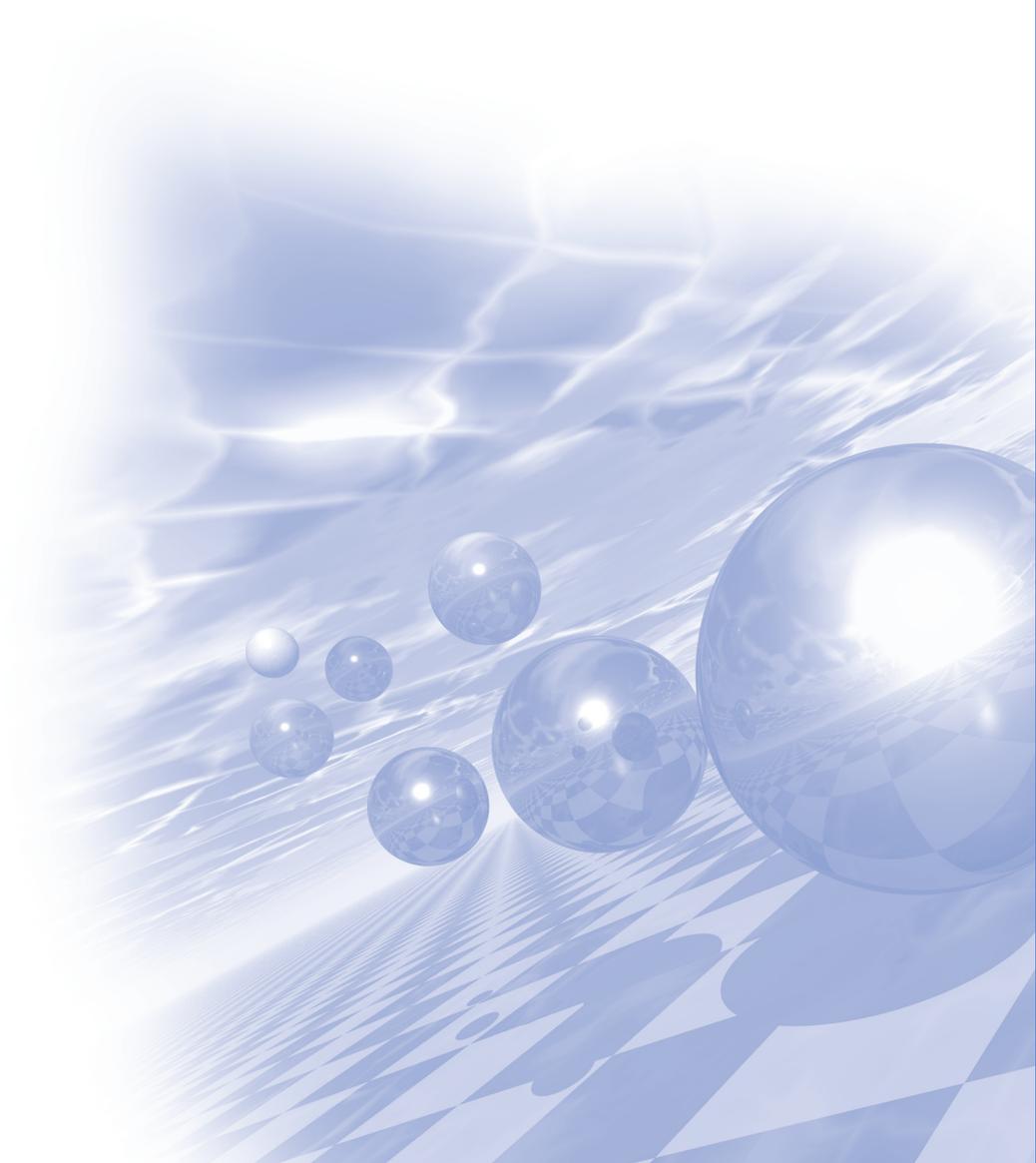
[3] Radu, Florin, and Hartmut Zabel. "Exchange bias effect of ferro-/antiferromagnetic heterostructures." Magnetic heterostructures. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 97-184.



KMS 2015 Summer Conference

# Special Session III

‘재료/자기 물성측정 및 분석(관련) 세션’





## 파동에너지극한제어연구단 소개

이학주<sup>1\*</sup>, 김광섭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 파동에너지극한제어연구단

<sup>2</sup>한국기계연구원

The Center for Advanced Meta-Materials(CAMM) was launched in 2014 as a center for Global Frontier Projects supported by the Ministry of Science, ICT and Future Planning. The center is geared towards developing core technologies in controlling wave energies by incorporating creative artificial structures of sub-wavelength sizes. Furthermore, the center not only investigates novel meta-materials and devices but also builds new design, fabrication and application platforms in order to realize these technologies. The center will create new markets in various industries such as national defense, housing and medical care. In order to accomplish its goals, CAMM is composed of three major divisions: the fabrication/characterization technologies and application division, the advanced metamaterials for electromagnetic wave division and the advanced metamaterials for mechanical wave division. The center will concentrate its efforts in bringing innovations to conventional technologies in sectors such as machinery, ICT, energy and biomedical technology by adopting the use of advanced metamaterial systems. In this talk, we will introduce principles of advanced wave control and describe some advanced metamaterials which can provide new solutions for various social problems in future. Fig. 1 shows the hierarchy and goals of the CAMM.



## 나노자성체 동역학 측정기술 개발

황찬용\*

한국표준과학연구원 나노측정센터

최근 스핀트로닉스 기술이 급발전을 이루면서 스핀소자의 응용 가능성이 대두됨에 따라 나노자성체의 자성 동역학 측정기술이 많은 관심을 받고 있다. 80-90년대 자성체 박막의 물성 측정기술이 이 분야를 이끌었다면 2000년대에는 나노스케일에서 자성현상을 이미징 할 수 있는 기술이 매우 활발히 연구되어 왔다. 현재는 공간분해능이 나노크기를 유지함과 동시에 시간분해능이 수십펨도초에 이르는 자성 동역학 측정기술 연구가 매우 활발하다. 이와 관련하여 실험실에서 이용이 가능한 TR-MOKE-Microscopy, TR-SEMPA 등의 측정기술, 방사광을 이용하여 측정이 가능한 XFMR, TR-STXM 등의 기술을 소개하고자 한다.

# Nano Secondary Ion Mass Spectrometry : A New Approach to the Analysis of Nano Materials

Tae-Eun Hong<sup>1,\*</sup>, Mi-Rang Byeon<sup>1</sup>, Eui Duck Jeong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of High Technology Materials Research, Korea Basic Science Institute

## 1. Introduction

Many of the complex materials developed today derive their unique properties from the presence of multiple phases or from local variations in elemental concentration. Simply performing analysis of the bulk materials is not sufficient to achieve a true understanding of their physical and chemical natures. In the last few years, there have been a tremendous outburst of interest in surface studies [1].

Secondary ion mass spectrometer (SIMS) has met with a great deal of success in materials characterization. The basis of SIMS is the use of a focused ion beam to erode sample atoms from the selected region. The atoms undergo a charge exchange with their local environment, resulting in their conversion to positive and negative secondary ions. The mass spectrometric analysis of these secondary ions results in a method capable of elemental specificity from hydrogen to uranium with detectabilities in the parts per million (ppm) or parts per billion (ppb) atomic range. Extreme sensitivity and excellent depth resolution of SIMS make it ideally suitable for examining dopant profiles in semiconductors [2]. Nano secondary ion mass spectrometer (nano-SIMS, Cameca nano-SIMS 50) equipped with the reactive ion such as a cesium gun and duoplasmatron gun has a spatial resolution of 50 nm which is much smaller than other dynamic SIMS [3]. Therefore, nano-SIMS is used to analyze the spatial distribution of elements on the surface of various materials. Based on the above fact, the present study has developed a new method for the depth profiling of phosphorus implanted silicon by using the nano-SIMS in small area less than 10  $\mu\text{m}$  x 10  $\mu\text{m}$ .

## 2. Experiment

The samples used for depth profiling were Czochralski-grown (001) silicon (Si) wafers implanted with phosphorus at an energy of 80keV and a dose of  $5 \times 10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup>. The Si wafers were chemically cleaned before implantation to remove native oxide and organic contaminants. Nano-SIMS analysis was done with sample mounted in the ring with wood metal. Nano-SIMS has a distinctive feature of normal incident primary ions on the sample surface. Due to the co-axial configuration of primary and secondary ion paths, the working distance of the probe forming lens and extraction is short than other conventional SIMS.

It allows the nano-SIMS to have smaller spot size for a given current: lateral resolution down to 50 nm for Cs<sup>+</sup> primary ions. It also increases secondary ion collection efficiency.

The experiments were carried with a nano-SIMS : the cesium primary ion beam of diameter 100 nm, impact energy of 16.0 keV, and primary ion beam current of 1 pA with high mass resolution technique. Two electron multipliers were used for the parallel detection of <sup>30</sup>Si and <sup>31</sup>P. The mass resolving power was set to be ~5000.

## 3. Result and Discussion

A depth profiling of the nano-SIMS is compared with that of IMS 6f SIMS. In order to clarify the

comparison, we selected the analysis conditions of IMS 6f SIMS that used to remove the sidewall effect perfectly and to get a good detection sensitivity. The depth resolution of the profile taken with IMS6f is similar to that taken by using the nano-SIMS. Detection sensitivity decreases as the analytical area and the rate of volume sampling are reduced. However, the depth resolution and detection limit of nano-SIMS are superior and efficient enough even though small area is used for depth profiling. The improved signal-to-noise ratio and detection sensitivity of nano-SIMS having high collection efficiency makes it well suited to small area depth profiling applications.

#### **4. Conclusion**

The performance on a small area depth profiling of nano-SIMS has been demonstrated on phosphorus implanted silicon wafers. Phosphorus implant characterization for total dose generally requires a high mass resolution which is a key feature of magnetic sector mass spectrometers such as nano-SIMS. Superior depth resolution and detection limits in comparison with IMS6f SIMS are observed on small areas as small as 10 $\mu$ m on a side. We expect that the established method of depth profiling involving nano-SIMS in this work will provide novel technique in evaluating the dopant distributions on the small pattern sample.

#### **5. References**

- [1] J. C. Vickerman, Surface Analysis, John Wiley & Sons, Chichester (1997)
- [2] E.Niehuis, T.Grehl, Proceedings of SIMS XII, Elsevier, (2000) 46
- [3] S. Seki, H. Tamura, Y. Wada, K. Tsutsui, S. Ootomo, Appl. Surf. Sci., 255 (2008) 1373.

# 전기강판에 첨가되는 첨가물의 확산 및 거동 분석

김성규<sup>1,\*</sup>, 박현진<sup>1</sup>, 이재혁<sup>1</sup>, 백경흠<sup>1</sup>, 박찬경<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>포항공과대학교 나노융합기술원

<sup>2</sup>포항공과대학교 신소재공학과

## 1. 서론

전기강판은 일반구조용강이나 용접용강등 일반적인 강판과 다르게 전기기인 변압기, 모터의 철심재료로 사용하며 변압기 모터의 효율을 높이는 역할을 하는 강판이다. 이러한 전기강판은 에너지 효율적인 측면에서 많은 연구를 진행하고 있는데 최근 전기자동차의 수요확대에 따라 전기강판의 수요와 공급량도 크게 증가하고 있다. 전기강판에는 방향성 전기강판과 무방향성 전기강판이 있는데 방향성 전기강판은 주로 대형전력용 변압기나 중소형 변압기에 사용되며 무방향성 전기강판은 발전기 같은 대형 회전기와 냉장고나 에어컨의 모터나 소형가전의 구동용 부품에 사용된다.

본 연구에서는 이러한 전기강판의 구조분석이나 표면 산화층의 성분분석을 확인하기 위한 분석방법을 소개하고 전기강판의 성능을 향상시키기 위한 첨가물의 거동에 대하여 분석한다.

## 2. 실험방법과 결과

전기강판의 표면 분석을 위하여 AFM을 이용하여 표면상태를 확인하였고 내부 자기도메인을 확인하기 위하여 MFM mode를 이용하여 자구의 크기 및 형상을 분석하였다. 특히 전기강판의 표면 산화층의 분석을 위하여 SIMS, TEM, APT를 활용하여 분석을 진행하였으며 내부 강판의 원소가 표면 산화층으로의 거동 및 표면 산화층에서 내부 강판으로의 거동 등을 확인하였다. 특히 SIMS를 이용하여 표면에서 내부강판으로 들어가면서 원소의 분포를 확인하여 전기강판의 철손에 영향을 미치는 원소가 어떠한 분포를 이루는지 확인하였다.

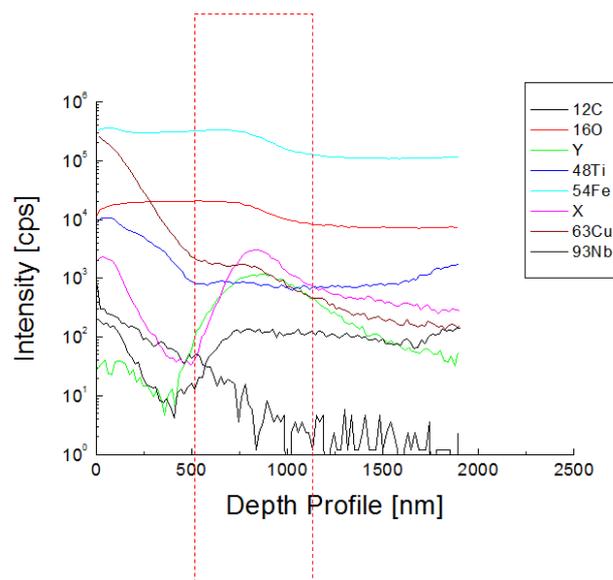


그림 1. SIMS를 이용한 표면 산화층 분석

### 3. 고찰

전기강판의 철손은 기본적으로 강판의 성분에 의해 일차로 정해지는데 이러한 철손을 최소화하기 위한 외 부요인들은 판의 두께나 표면 산화층을 이루는 물질의 변화를 통한 철손을 줄이는 방법을 연구하기도 한다. 특히 강판의 자구를 조절하기 위한 방법으로 기존의 전기강판에 불순물을 첨가하는 방법을 사용하는데 전체 공정상 이러한 불순물의 거동에 의해 철손의 변화가 일어나는 경우가 있는데 이러한 변화를 확인하는 분석을 진행하였다. 특히 산화층에서의 원소 분포 및 결정성을 확인하고 성분분석을 진행하여 각 층의 원소의 분포를 확인하였다.

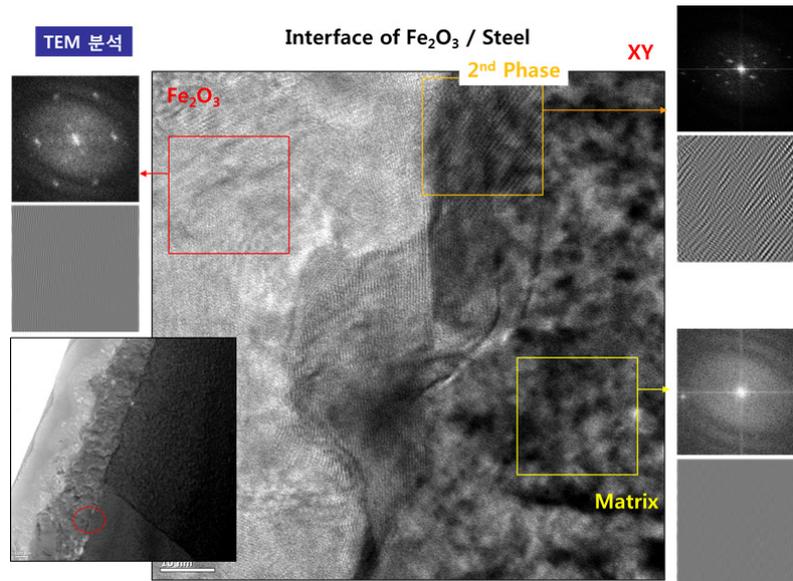


그림 2. 강판과 산화층에서의 결정성 분석

### 4. 결론

전기강판에서의 내부 강판의 불순물 원소의 거동에 대하여 SIMS, TEM, APT를 활용하여 분석을 진행하였고 자구의 형상을 MFM을 활용하여 확인하였다. 특히 미량의 원소를 불순물로 첨가하여 성능향상을 진행하였으므로 미소원소의 분석이 중요한 부분을 차지하는데 이러한 원소분석을 SIM를 통해서 확인하였다.

## 원자단층현미경을 이용한 나노소재 분석

이봉호\*

대구경북과학기술원(DGIST) 중앙기기센터(CCRF)

원자단층현미경(atom probe microscopy; APM, atom probe tomography; APT)은 시료의 구성원소를 원자 단위로 3차원 이미지화(imaging)하거나 정량화(quantification)할 수 있는 최신의 분석기법이다. 원자단층현미경은 탐침형의 시편에 전계 및 레이저펄스(혹은 전계펄스)를 인가하여 시료 표면 구성원자의 전계증발(field evaporation)을 순차적으로 일으키고 증발된 원자가 위치 검출기(position sensitive detector)까지 도달한 시간(TOF; time of flight)과 충돌위치(impact position)를 동시에 검지하여 원자의 종류와 위치를 식별하게 된다. 구성원자 자체를 개별적으로 분석하는 기법이므로 공간 분해능이 0.2 nm - 0.5 nm 수준으로 정밀하고, 증발원자 대비 검출원자의 효율이 높으며 검출한계는 ppm 수준을 나타낸다. 최근에는 전계증발을 일으키는 에너지로 레이저 펄스(UV laser pulse)가 채용됨에 따라 금속 등의 도체뿐 아니라 실리콘 반도체, 복합형 반도체(GaN, GaAs, SiC 등), 비전도성 다층박막(자성재료 등), 세라믹 및 바이오 소재 등의 소재분석이 가능해졌다. 특히, 분석 단위가 원자 수준이므로 수 나노미터(nm) 극 미세 박막(thin film), 양자우물(quantum well), 나노와이어(nano-wire), 나노소자 등의 성분분석이 가능하고 입계(grain boundary), 상경계(phase boundary) 등에서의 미묘한 조성변화를 관찰할 수 있다. 원자단층현미경 분석을 위한 시편은 반경이 대략 50 nm 이하의 뾰족한 탐침으로 제작되어야 하는데 주로 집속이온빔(focused ion beam)을 활용하게 된다.

본 발표에서는 APM의 기본 원리를 고찰하고 자성재료를 포함한 나노소재에 대하여 분야별 응용사례 스토리를 통해 APM 분석기법의 여러 가능성을 살펴보고자 한다.

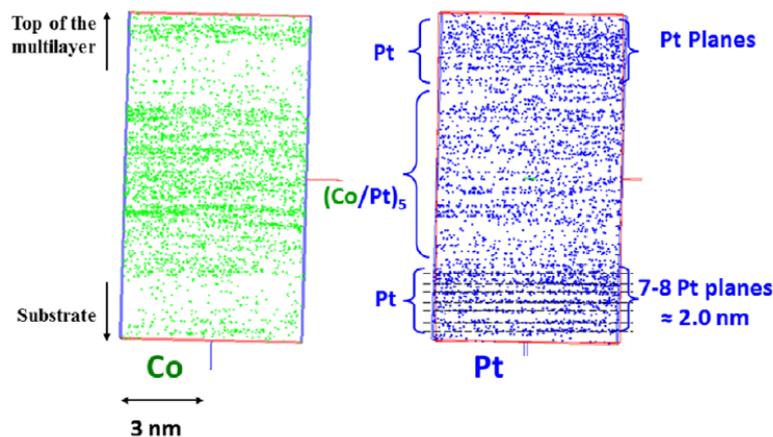


Fig. APT elemental maps of  $(\text{Co}_{0.5 \text{ nm}} / \text{Pt}_{0.4 \text{ nm}})_5 / \text{Pt}_{2 \text{ nm}}$  [3].

- [1] Thomas F Kelly, David J. Larson, Annu. Rev. Mater. Res. 42 (2012) 1.
- [2] K.G. Pradeep, G. Herzer, P. Choi, D. Raabe, Acta Materialia 68 (2014) 295.
- [3] S. Bandiera, etc., J. Phys. D Appl. Phys. 46 (2013) 485003.
- [4] 이봉호, 박찬경, 재료마당 26[6] (2013) 41.

# Author Index

Name	Abstract ID	Page	Name	Abstract ID	Page
A. H. Macdonald	초O-I-1	11	Hanchul Kim	O-IV-3	52
A. Yazdani	초O-I-1	11	Hanchul Kim	OT02	177
Anny Michel	O-I-6	25	HanYeol Jo	SM10	119
B. A. Bernevig	초O-I-1	11	HeeYoon Noh	NS10	146
Bo Wha Lee	SM14	125	Hongjae Moon	HM02	95
BoWha Lee	SM10	119	Hongjae Moon	HM03	96
Bum Chul Park	BM03	164	Hongtao Xu	OT04	179
Byong Sun Chun	SS01	127	Hui Eun Kim	SM08	117
Byong-Guk Park	NS04	139	Hui Eun Kim	SM11	120
Byong-Guk Park	O-I-4	20	Hwaebong Jung	HM02	95
Byong-Guk Park	SO02	132	Hwaebong Jung	HM03	96
Byoung-Chul Min	O- II -1	29	Hyeok-Chul Choi	SS04	130
Byoung-Chul Min	O-I-5	23	Hyun-Jun Jung	BM02	161
Byoung-Chul Min	OT03	178	Hyun-Sook Lee	HM02	95
C. J. Won	MO03	156	Hyun-Sook Lee	HM03	96
Chanyong Hwang	SS01	127	Hyun-Woo Bang	OT05	181
CheolGi Kim	NS10	146	I. K. Drozdov	초O-I-1	11
Chi-Hieu Luong	NS02	137	Imran Khan	MT01	77
Chunli Liu	OT04	179	Imran Khan	O-III-3	45
Chunli Liu	SM14	125	J. Dolinšek	OT05	181
Chun-Yeol You	MD04	90	J. G. Lee	HM01	92
Chun-Yeol You	OT05	181	J. H. Yu	HM01	92
Chun-Yeol You	OT06	182	J. J. Yang	MO03	156
Chun-Yeol You	SS04	130	J. Li	초O-I-1	11
D. Amaranatha Reddy	SM14	125	J. Y. Kim	HM01	92
D. Odkhuu	O-IV-1	49	JaBin Lee	O- II -2	30
Dong Ryeol Lee	O- II -1	29	JaBin Lee	O- II -3	32
Dong-Hun Chae	NS09	145	Jae Sung Kim	O- II -1	29
Dong-Ok Kim	O- II -1	29	JaeHong Kim	O- II -2	30
Eui Duck Jeong	초S-III-3	187	JaeHong Kim	O- II -3	32
Eun-Ha Shin	O-IV-3	52	Jaehun Cho	MD04	90
GwangGuk An	O- II -2	30	Jae-Hyoung You	O-III-4	46
GwangGuk An	O- II -3	32	Ji Sung Lee	NM02	152
H. Chen	초O-I-1	11	Jicheol Son	MT01	77
H. W. Kwon	HM01	92	Jicheol Son	O-III-3	45
Hae Yeon Lee	SO02	132	Ji-Hun Yu	NS01	136
Haein Yim	SM12	121	Jihyun Sung	SM10	119
Haein-Yim	SM13	123	JinPyo Hong	O- II -2	30
HaeSoo Park	O- II -2	30	JinPyo Hong	O- II -3	32
HaeSoo Park	O- II -3	32	Jisang Hong	O-III-3	45
Hae-Woong kwon	NS01	136	Jisang Hong	MT01	77
Ha-Kyu Jeong	초O- II -3	59	Ji-Soo Park	BM02	161
Han Chul Kim	O- II -1	29	Jong-Ryul Jeong	NS02	137

Name	Abstract ID	Page	Name	Abstract ID	Page
Jong-Ryul Jeong	NS03	138	Rambabu Kuchi	NS03	138
Jong-Ryul Jeong	NS04	139	Rambabu Kuchi	NS08	144
Jong-Ryul Jeong	NS08	144	S. C. Hong	O-IV-1	49
Joon Moon	O-I-5	23	S. H. Rhim	초O-Ⅱ-1	57
Joo-Sung Kim	O-I-5	23	S. H. Rhim	O-IV-1	49
Jun Woo Choi	O-Ⅱ-1	29	S. H. Rhim	O-IV-4	53
Jun Woo Choi	OT03	178	S. Jeon	초O-I-1	11
Jung-Goo Lee	NS01	136	S. Nadj-Perge	초O-I-1	11
Junghyun Sok	OT03	178	S. W. Cheong	MO03	156
Jung-Il Hong	OT05	181	Sang-Cheol Yoo	O-I-5	23
Jung-Il Hong	OT06	182	Sang-Eun Bae	SM14	125
Jung-Min Hyun	OT02	177	Sang-Im Yoo	O-Ⅲ-4	46
Jungpil Seo	초O-I-1	11	Sang-Im Yoo	SM08	117
Kil-joon Min	NS09	145	Sang-Im Yoo	SM11	120
Kimihiko Ozaki	초S-I-4	66	Sang-Kyun Kwon	SM08	117
Ki-Suk Lee	O-I-4	20	Sang-Suk Lee	BM02	161
Ki-Suk Lee	SA05	173	SangYoon Park	SM10	119
Ki-Yeon Kim	SS04	130	Se-June Min	MD04	90
Kwonjin Park	MD04	90	Seong Huh	SM14	125
Kyoung-Min Lee	OT03	178	Seong-Cho Yu	HM08	105
Kyujoon Lee	OT06	182	Seongmin Choo	OT06	182
Kyung Mee Song	O-Ⅱ-1	29	Seo-Won Lee	O-I-1	15
Kyung Min Lee	NS08	144	Seung Ku Kang	MD04	90
Kyung-Jin Lee	MD02	86	Seung-Hyub baek	SA05	173
Kyung-Jin Lee	MT02	78	Seung-Jae Lee	MD02	86
Kyung-Jin Lee	O-I-1	15	SeungMo Yang	O-Ⅱ-2	30
Kyungmi Song	MT02	78	SeungMo Yang	O-Ⅱ-3	32
Min Zhong	OT04	179	Seungnam Yang	SM11	120
Mingyuan Zhu	OT04	179	Shigeaki Ishikawa	초S-I-3	65
Min-Sun Jang	SA05	173	Shu Liu	NS01	136
MinYoung Lee	SM10	119	Sinyong Jo	OT06	182
Mi-Rang Byeon	초S-Ⅲ-3	187	Sol Jung	SM12	121
Miyoung Kim	O-Ⅱ-1	29	Soon Cheol Hong	초O-Ⅱ-1	57
Miyoung Kim	O-IV-3	52	Soon Cheol Hong	O-IV-4	53
Mohamed Abbas	NS10	146	Soong-Geun Je	O-I-5	23
Munkhbat Bolormaa	BM02	161	Soyoung Jekal	초O-Ⅱ-1	57
Myung-Hwa Chung	O-IV-3	52	Sug-Bong Choe	O-I-5	23
Myung-Hwa Jung	OT05	181	Sumin Kim	HM02	95
Myung-Hwa Jung	OT06	182	Sumin Kim	HM03	96
N. Hur	MO03	156	Sumin Kim	SM13	123
Nam-Hui Kim	MD04	90	Sungjin Choi	SM11	120
Nam-Hyun Kang	NS01	136	SungJoon Choi	O-Ⅲ-4	46
Nu-Ri Kim	BM02	161	SungJoon Choi	SM08	117
P. Taivansaikhan	O-IV-1	49	Sungjoon Choi	SM11	120
Peter Fischer	MT03	80	Sung-jung Joo	NS09	145
Pilsun Yoo	SM14	125	Sunwoo Lee	O-Ⅲ-4	46
Purevdorj Khajidmaa	BM02	161	SunWoo Lee	SM08	117
Qurat ul ain	O-IV-4	53	Sunwoo Lee	SM11	120

Name	Abstract ID	Page	Name	Abstract ID	Page
Surabhi Srivathsava	NS08	144	김동영	SM02	108
Tae-Eun Hong	초S-III-3	187	김동영	SM03	110
Tae-Soo You	HM08	105	김동영	SM09	118
Taeyueb Kim	NS09	145	김동철	O-IV-2	50
Takayuki Shiino	O-I-4	20	김동현	ST03	149
Taufik Bonaedy	OT03	178	김민석	SO03	134
Thanh Son Vo	NS04	139	김삼진	SM05	113
Wen-Zhe Nan	HM08	105	김상옥	MT04	82
Woo Seung Ham	NM02	152	김상일	MD03	88
WooSeong Chung	O- II -2	30	김상준	SA02	168
WooSeong Chung	O- II -3	32	김상훈	SO03	134
Woosuk Yoo	OT05	181	김성규	초S-III-4	189
Woosuk Yoo	OT06	182	김성백	SO01	131
Wooyoung Lee	HM02	95	김성수	SM15	126
Wooyoung Lee	HM03	96	김성용	ST02	148
Yemin Hu	OT04	179	김성용	ST04	150
Ying Li	OT04	179	김시년	NS06	141
Yongseong Choi	O- II -1	29	김양도	O-III-1	41
Yoo Sang Jeon	NM02	152	김영광	ST02	148
Yoonji Eom	NS10	146	김영광	ST04	150
Young Keun Kim	BM03	164	김원동	O-I-2	17
Young Keun Kim	NM02	152	김재관	초S-I-2	64
Young Soo Choi	BM03	164	김종렬	SM07	115
Young Soo Kang	초O- II -2	58	김종우	O-III-2	43
Youngha Choi	OT05	181	김지영	BM01	158
Young-Wan Oh	SO02	132	김지용	MO01	154
Yu Jin Kim	BM03	164	김철성	SM05	113
Zhao Xiahou	OT04	179	김철성	SM06	114
강석윤	BM01	158	김철성	SO01	131
강선주	SA01	166	김태완	ST02	148
고병욱	SM06	114	김태완	ST04	150
고정호	SO03	134	김태준	SA03	169
고태준	SO01	131	김태준	SA04	171
구태준	SM09	118	김태훈	HM05	99
국지현	O-I-6	25	김태훈	HM07	103
권순무	초S- II -3	72	김태희	O-I-6	25
권해웅	O-III-1	41	김혜경	MO01	154
김광섭	초S-III-1	185	김효준	HM04	97
김근호	O- II -5	36	김효준	HM05	99
김기홍	초S- II -3	72	김효준	HM06	101
김대연	SS02	128	김효준	HM07	103
김대연	SS03	129	김희중	총회초청	3
김덕현	MO02	155	나길주	초S- II -3	72
김덕호	O-I-2	17	남승훈	OT01	175
김덕호	SS02	128	남윤재	NS06	141
김덕호	SS03	129	노민석	BM01	158
김도현	T-2	8	노영일	BM01	158
김동영	SM01	106	류권상	OT01	175

Name	Abstract ID	Page
류정호	O-III-2	43
문경웅	O-I-2	17
문준	SS02	128
문준	SS03	129
민병철	ST03	149
박관수	MD01	84
박덕근	SM15	126
박동수	O-III-2	43
박병국	O-I-3	18
박병국	SS03	129
박병석	초S- II -3	72
박성균	MO01	154
박승영	MD03	88
박승영	ST03	149
박정갑	NM01	151
박정갑	NS07	142
박진구	SO03	134
박찬경	초S-III-4	189
박철수	초S- II -3	72
박현진	초S-III-4	189
박화선	SM04	111
배경훈	HM04	97
배경훈	HM06	101
배유정	O-I-6	25
배종성	MO01	154
배철준	SM07	115
백경흠	초S-III-4	189
백승빈	NM01	151
백승빈	NS07	142
백운봉	OT01	175
변웅	SA03	169
변웅	SA04	171
서민수	MD03	88
서선열	초S- II -2	70
서수정	NM01	151
서수정	NS07	142
서수정	SM04	111
서정민	초S- II -3	72
석종민	초S- II -2	70
성길동	O- II -4	34
손대락	SA01	166
손대락	SA02	168
손대락	SM15	126
송창빈	MT04	82
신광호	SA03	169
신광호	SA04	171
심인보	SM06	114
안철우	O-III-2	43

Name	Abstract ID	Page
오영완	O-I-3	18
오영완	SS03	129
오윤석	MT04	82
원희수	초S- II -2	70
유성초	OT01	175
유세종	초S- II -2	70
유지훈	O-III-1	41
윤상준	SS03	129
윤석수	SM01	106
윤석수	SM02	108
윤석수	SM03	110
윤석수	SM09	118
윤석진	ST01	147
윤운하	O-III-2	43
이경동	O-I-3	18
이기석	MT03	80
이년중	O-I-6	25
이두용	MO01	154
이민우	HM04	97
이민우	HM05	99
이민우	HM06	101
이민우	HM07	103
이보화	MO02	155
이봉호	초S-III-5	191
이상석	BM01	158
이상석	O- II -5	36
이상혁	ST03	149
이성래	HM04	97
이성래	HM05	99
이성래	HM06	101
이성래	HM07	103
이성래	ST01	147
이수석	MT03	80
이영배	SM06	114
이영주	MT04	82
이예림	NS05	140
이장로	O- II -5	36
이재일	O-IV-2	50
이재혁	초S-III-4	189
이정구	O-III-1	41
이정수	MO01	154
이정우	NS07	142
이정우	SA01	166
이종석	OT01	175
이지성	MO01	154
이철규	SM15	126
이태권	O- II -4	34
이태일	NM01	151

Name	Abstract ID	Page
이태일	NS07	142
이하나	ST02	148
이하나	ST04	150
이학주	초S-III-1	185
이해연	O-I-3	18
이혜리	BM01	158
이호상	HM05	99
임미영	MT03	80
임상현	MD01	84
임상호	NS06	141
임상호	ST01	147
임정태	SM05	113
임태진	NM01	151
임태진	NS07	142
장석명	초S-I-1	63
장석명	T-1	7
장재욱	초S-II-1	69
장태석	HM04	97
장태석	HM05	99
장태석	HM06	101
장태석	HM07	103
장평우	SM07	115
장현철	초S-II-1	69
진민철	초S-II-1	69
전병서	MT04	82
전병선	O-I-2	17
정구열	ST03	149
정동욱	MD01	84
정종율	NS05	140
정종훈	O-II-4	34
제승근	O-I-2	17
제승근	SS03	129
조서현	O-III-2	43
조성언	SM09	118
조영래	SM04	111

Name	Abstract ID	Page
조영훈	MD03	88
조영훈	SA02	168
조영훈	ST03	149
조재환	초S-II-2	70
조정구	SS03	129
조창빈	SA01	166
주신용	MT04	82
주혜선	MD01	84
차희령	O-III-1	41
최광보	SM07	115
최석봉	O-I-2	17
최석봉	SS02	128
최석봉	SS03	129
최연석	MD03	88
최연석	ST03	149
최재혁	초S-II-1	69
최종진	O-III-2	43
최준환	O-III-2	43
최현경	SO01	131
하예은	BM01	158
한만석	초S-II-1	69
한병동	O-III-2	43
한은주	SM05	113
한희성	MT03	80
허영철	초S-II-1	69
현승한	HM06	101
홍예지	BM01	158
홍정일	MT03	80
홍종일	SO03	134
황도근	초S-II-2	70
황도근	O-II-5	36
황찬용	초S-III-2	186
황찬용	O-I-2	17
황현석	SS03	129