

# 2015년도 한국자기학회 자성 및 자성재료 국제학술대회

International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015

논문개요집



일시 2015. 11. 25(수)~ 11. 27(금)

장소 대전 호텔인터시티

주최 한국자기학회

후원 한국과학기술단체총연합회

Digests of the International Symposium on Magnetism and Magnetic Materials 2015  
**The Korean Magnetics Society**

사단법인 한국자기학회

# 2015년도 한국자기학회 자성 및 자성재료 국제학술대회

International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015

논문개요집



일시 2015. 11. 25(수)~ 11. 27(금)

장소 대전 호텔인터시티

주최 한국자기학회

후원 한국과학기술단체총연합회

“이 발표논문집은 2015년도 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로 한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 발간되었음.”





## 공지사항

### 1. 연구발표를 하시는 회원은 아래사항을 지켜주시기 바랍니다.

- 1) 포스터보드 크기는 한 분당 가로 1m X 세로 2.5m 사용할 수 있습니다.
- 2) 이번 동계학술대회에서는 목요일 오전 10시부터 오후 7시까지 포스터를 부착하시면 되고,  
포스터 발표 Discussion 시간은 18:05~19:00에 진행합니다.

### 2. 일정

11월 25일(수)	14:00~16:00	참가자 등록 (5층)		
	16:00~18:00	환영 리셉션 (5층)		
11월 26일(목)	09:00~	참가자 등록		
	10:00~11:40	Special Session I (5층 에메랄드홀)	구두발표 I (5층 사파이어홀)	포스터발표 (5층 토파즈홀)
	11:40~13:00	점심식사		
	13:00~13:50	초청강연 (5층 에메랄드홀)		
	13:50~14:00	Coffee Break		
	14:00~15:40	Special Session II (5층 에메랄드홀)	Special Session III (5층 사파이어홀)	
	15:40~16:00	Coffee Break		
	16:00~18:05	Special Session IV (5층 에메랄드홀)	Special Session V (5층 사파이어홀)	
	18:05~19:00	포스터발표 Discussion & Bierstube (5층 토파즈홀)		
	19:00~19:30	한국자기학회 정기총회 및 시상식 (4층 라벤더홀)		
	19:30~20:30	Dinner (4층 라벤더홀)		
11월 27일(금)	08:30~	참가자 등록		
	09:00~10:40	Special Session VI (5층 에메랄드홀)	Special Session VII (5층 사파이어홀)	
	10:40~10:50	Coffee Break		
	10:50~12:40	Special Session VIII (5층 에메랄드홀)	구두발표 II (5층 사파이어홀)	
	12:40~14:00	점심식사		
	14:00~16:20	Special Session IX (5층 에메랄드홀)	Special Session X (5층 사파이어홀)	
	16:20~16:30	폐회 (5층 에메랄드홀)		

### 3. 올해부터 『Best Poster 시상』은 정기총회에서 학회상 시상과 함께 진행될 예정입니다.

11월 26일(목) 19:00부터 시상식이 있을 예정이오니, 회원 여러분의 많은 참여를 바랍니다.

(단, 수상자(발표자)가 불참 시에는 수상이 취소됩니다.)



## 11월 25일 [수]

시간	프로그램
14:00~16:00	참가자 등록 (5층)
16:00~18:00	환영 리셉션 (5층)

## 11월 26일 [목]

시간	프로그램						
09:00~	참가자 등록						
10:00~11:40	Special Session I (5층 에메랄드홀) ‘연자성재료 및 응용 특별세션’ 1부 좌장: 안성용(삼성전기)		구두발표 I (5층 사파이어홀) - 자기응용 좌장: 신광호(경성대)		<b>포스터발표 (5층 토파즈홀)</b> Session MT[Magnetic theory and calculations] Session MD[Magnetization dynamics] Session HM[Hard-magnetic Materials] Session SM[Soft-magnetic Materials] Session SS[Semiconductor spintronics] Session SO[Spin orbit coupling and related phenomena] Session NS[Nano-structured materials] Session ST[Spin transfer torque for magnetic memory] Session NM[Nanoscale Magnetism] Session MO[Magnetic Oxides and Multiferroics] Session BM[Biomedical Magnetism] Session SA[Sensor and Applications] Session OT[Others]		
	10:00 ~ 10:20	초S-I-1. 칩형 커먼 모드 필터용 자성재료의 자기적 특성 김진모(삼성전기)	10:00 ~ 10:25	초O-I-1. 비접촉 동력전달용 자기장치 성능예측을 위한 해석법 최장영(충남대)			
			10:25 ~ 10:37	O-I-2. 습식공정에 의한 Nd-Fe-B 분말 제조에 관한 연구 최철진(재료연구소)			
	10:20 ~ 10:40	초S-I-2. 비정질 연자성 합금 개발 동향 정효연(LG이노텍)	10:37 ~ 10:49	O-I-3. Synthesis and Magnetic Properties of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ( $0.0 \leq x \leq 2.0$ ) 유재형(서울대)			
	10:40 ~ 11:00	초S-I-3. 침상형 산화철 제조에 관한 연구 허남팔(EMW)	10:49 ~ 11:01	O-I-4. Magnetism and magnetocrystalline anisotropies of ordered $L1_0$ MnPt alloy: A first principles study Qurat ul ain(울산대)			
			11:01 ~ 11:13	O-I-5. Manipulation of magnetic state in armchair black phosphorene nanoribbon by charge doping M. Umar Farooq(부경대)			
	11:00 ~ 11:20	초S-I-4. Fe-Co 중공형 자성섬유 기반 ~GHz 대역 전자파 흡수소재 제조 및 특성평가 이상복(재료연구소)	11:13 ~ 11:25	O-I-6. Effects of the Ar pressure on the magnetic properties of amorphous Fe-Zr thin films 김미리(고려대)			
	11:20 ~ 11:40	초S-I-5. 전기영동 전착법에 의한 다양한 그래핀 패턴층 제작 및 그래핀-자성재료 복합층에 대한 연구 소개 김명기(성균관대)	11:25 ~ 11:37	O-I-7. Energy Product and Coercivity of Rare-earth free Multilayer and Bilayer FeCo/FePt and FeCo/AuCu Exchange Spring Magnet Imran Khan(부경대)			
	11:40~13:00	점심식사					



## 11월 26일 [목]

시간	프로그램				
13:00~13:50	초청강연 (5층 에메랄드홀) <div>좌장: 김삼진(국민대)</div>				<div>포스터발표 (5층 토파즈홀)</div> <div>Session MT[Magnetic theory and calculations]</div> <div>Session MD[Magnetization dynamics]</div> <div>Session HM[Hard-magnetic Materials]</div> <div>Session SM[Soft-magnetic Materials]</div> <div>Session SS[Semiconductor spintronics]</div> <div>Session SO[Spin orbit coupling and related phenomena]</div> <div>Session NS[Nano-structured materials]</div> <div>Session ST[Spin transfer torque for magnetic memory]</div> <div>Session NM[Nanoscale Magnetism]</div> <div>Session MO[Magnetic Oxides and Multiferroics]</div> <div>Session BM[Biomedical Magnetics]</div> <div>Session SA[Sensor and Applications]</div> <div>Session OT[Others]</div>
	13:00 ~ 13:25	초O-1. Electrical detection of ballistic spin Hall and Rashba effects in a semiconductor channel <div>구현철(한국과학기술연구원)</div>			
	13:25 ~ 13:50	초O-2. Spintronics with carbon-based materials <div>유정우(울산과학기술대)</div>			
13:50~14:00	Coffee Break				
14:00~15:40	Special Session II (5층 에메랄드홀) ‘연자성재료 및 응용 특별세션’ 2부 <div>좌장: 이정구(재료연구소)</div>		Special Session III (5층 사파이어홀) ‘방사선계측기술을 활용한 자성연구와 우주탐사’ <div>좌장: 엄영랑(한국원자력연구원)</div>		
	14:00 ~ 14:20	초S-II-1. 무선전력전송 시장 현황 및 전망 <div>박철균(삼성전기)</div>	14:00 ~ 14:40	초S-III-1. 뫼스바우어 분광 기술을 이용한 문화재 연구 <div>김철성(국민대)</div>	
	14:20 ~ 14:40	초S-II-2. 자동차 부품용 연자성 소재 개발 및 적용 동향 <div>김형석(현대자동차)</div>	14:40 ~ 15:00	초S-III-2. Infrared Spectrum of the Lunar Surface <div>최영준(한국천문연구원)</div>	
	14:40 ~ 15:00	초S-II-3. 최신 친환경 에너지 및 전기 자동차 전력 변환용 연자성 부품 동향 <div>유봉기((주)창성)</div>	15:00 ~ 15:20	초S-III-3. Solar Neutrino Detection Technology As a Probe to the Inner Structure of Heavenly Body <div>선광민(한국원자력연구원)</div>	
	15:00 ~ 15:20	초S-II-4. 에너지의 효율적 사용을 위한 비정질 연자성소재의 응용 <div>송용설(아모그린텍))</div>	15:20 ~ 15:40	초S-III-4. Development Status of Korean Radioisotope Thermoelectric Generator <div>홍진태(한국원자력연구원)</div>	
	15:20 ~ 15:40	초S-II-5. 모바일용 파워인덕터의 개발 동향 <div>안성용(삼성전기)</div>			
15:40~16:00	Coffee Break				

## 11월 26일 [목]

시간	프로그램			
16:00~18:05	<b>Special Session IV (5층 에메랄드홀)</b> <b>'First-principles calculations: Magnetism and beyond'</b> 좌장: 홍순철(울산대)		<b>Special Session V (5층 사파이어홀)</b> <b>'NMR 및 바이오자성 분야'</b> 좌장: 한만석(강원대)	<b>포스터발표 (5층 토파즈홀)</b> Session MT[Magnetic theory and calculations] Session MD[Magnetization dynamics] Session HM[Hard-magnetic Materials] Session SM[Soft-magnetic Materials] Session SS[Semiconductor spintronics] Session SO[Spin orbit coupling and related phenomena] Session NS[Nano-structured materials] Session ST[Spin transfer torque for magnetic memory] Session NM[Nanoscale Magnetism] Session MO[Magnetic Oxides and Multiferroics] Session BM[Biomedical Magnetism] Session SA[Sensor and Applications] Session OT[Others]
	16:00 ~ 16:25	(Invited) S-IV-1. Modification of magnetism in transition-metal thin films by external electric field Kohji Nakamura(Mie Univ.)	16:00 ~ 16:20	초S-V-1. MR 최신 Trend 및 검사 기법의 이해 오원석(GE헬스케어코리아)
	16:25 ~ 16:50	(Invited) S-IV-2. DFT study for novel noncollinear magnets Tatsuya Shishidou(Hiroshima Univ.)	16:20 ~ 16:40	초S-V-2. CT의 최신 동향: MDCT 및 선량저감기술의 발전 김선규(도시바 메디칼 시스템즈 코리아)
	16:50 ~ 17:15	(Invited) S-IV-3. Spin-Orbit-Coupling induced Anisotropy effects in Antiferromagnets Alexander B. Shick(Institute of Physics ASCR)	16:40 ~ 17:00	초S-V-3. CT 조영제가 방사선치료계획에 미치는 영향 장재욱(충남대병원)
	17:15 ~ 17:40	초S-IV-4. Materials with large MCA and design principles of large MCA 임성현(울산대)	17:00 ~ 17:20	초S-V-4. Analysis of Images According to the Fluid Velocity in Time of Flight Magnetic Resonance Angiography 허영철(한림성심대)
	17:40 ~ 18:05	초S-IV-5. Composition and temperature dependent electronic structures of NiS <sub>2</sub> -xSex alloys: First-principles dynamical mean field theory approach 심지훈(포항공대)	17:20 ~ 17:40	초S-V-5. 흉부와 복부 CT 검사 시 Care Dose 4D 사용에 따른 선량 측정과 영상 평가 석종민(경찰병원)
			17:40 ~ 18:00	초S-V-6. 생식선을 포함하지 않는 Chest CT촬영 시 0.25mmPb 차폐체의 생식선 차폐 유용성 연구 서선열(울지대)
18:05~19:00	<b>포스터발표 Discussion &amp; Bierstube (5층 토파즈홀)</b> 좌장: 박철수(한림성심대) / 안성용(삼성전기)			
19:00~19:30	<b>한국자기학회 정기총회 및 시상식 (4층 라벤더홀)</b>			
19:30~20:30	<b>Dinner (4층 라벤더홀)</b>			



11월 27일 [금]

시간	프로그램			
08:30~	참가자 등록			
09:00~10:40	<b>Special Session VI (5층 에메랄드홀)</b> <b>'First-principles calculations: Magnetism and beyond'</b> 좌장: 임성현(울산대)		<b>Special Session VII (5층 사파이어홀)</b> <b>'The 1st Korea-China-Vietnam symposium on magnetic oxide'</b> - 산화물 연구센터(한국외국어대학교) 주최 좌장: 유춘리(한국외대)	
	09:00 ~ 09:25	초S-VI-1. A mechanism for orbital angular momentum and giant spin-splitting in solids and nanostructures 최형준(연세대)	09:00 ~ 09:20	(Invited) S-VII-1. TM-doped ZnO DMS synthesized by hydrothermal method under high magnetic field Ying Li(Shanghai Univ.)
	09:25 ~ 09:50	초S-VI-2. First-principles studies on the metal contact with carbon-based nanomaterials 장현주(한국화학연구원)	09:20 ~ 09:40	(Invited) S-VII-2. Influence of magnetic field on the critical behavior of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ( $x=0.2, 0.3, 0.4$ ) Peng Zhang(Hubei Univ. of Technology)
			09:40 ~ 10:00	(Invited) S-VII-3. Thermally tunable magnetic metamaterials at THz frequencies Vu Dinh Lam (Vietnam Academy of Science and Technology)
	09:50 ~ 10:15	초S-VI-3. Computational design high-performance rare-earth-free permanent magnet based on hard-soft hybrid structures 이주형(광주과학기술원)	10:00 ~ 10:20	(Invited) S-VII-4. Formation of nanocrystalline $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ powders by mechanical alloying Do Hung Manh(Vietnam Academy of Science and Technology)
	10:15 ~ 10:40	초S-VI-4. Orbital Selective Fermi Surface Shifts in Correlated AFeAs (A = Li, Na) 이근식(울산과학기술대)	10:20 ~ 10:40	(Invited) S-VII-5. Magnetic properties and magnetocaloric effect in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ exhibiting first-order and second-order magnetic phase transitions The-Long Phan(한국외대)
10:40~10:50	Coffee Break			

11월 27일 [금]

시간	프로그램			
10:50~12:40	Special Session VIII (5층 에메랄드홀) ‘First-principles calculations: Magnetism and beyond’ 좌장: 김미영(숙명여대)		구두발표 II (5층 사파이어홀) 좌장: 정종율(충남대)	
	10:50 ~ 11:15	초S-VIII-1. Ab initio study on metal-insulator and magnetic transitions in correlated hollandites: K <sub>2</sub> Cr <sub>8</sub> O <sub>16</sub> and K <sub>2</sub> V <sub>8</sub> O <sub>16</sub> 김수란(포항공대)	10:50 ~ 11:15	초O-II-1. 유기 스핀 소자 내에서의 스핀 거동 이해 김태희(이화여대)
			11:15 ~ 11:27	O-II-2. Investigation of electric field effect on perpendicular magnetic anisotropy with MTJ structures 박경웅(한국과학기술원)
	11:15 ~ 11:40	초S-VIII-2. Lanthanide-like localization of 4d-derived spins in a columnar itinerant niobium oxide lattice 이관우(고려대)	11:27 ~ 11:39	O-II-3. W/CoFeB/MgO 구조에서 스핀-오빗 토크와 스핀 홀 자기저항의 상관관계 백승현(한국과학기술원)
			11:39 ~ 11:51	O-II-4. Determination of magnetic domain-wall types via observing Dzyaloshinskii-Moriya interaction-induced domain expansion patterns 김대연(서울대)
	11:40 ~ 12:05	초S-VIII-3. Quasiparticle self-consistent GW study of cuprates: electronic structure, model parameters, and the two-band theory for Tc 한명준(한국과학기술원)	11:51 ~ 12:03	O-II-5. Creep과 Flow 영역에서 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용에 의한 Chiral 자구벽 동역학의 보편성 김덕호(서울대)
			12:03 ~ 12:15	O-II-6. Current-induced motion of antiferromagnetic domain wall in antiferromagnet/heavy metal bilayers 오세혁(고려대)
	12:05 ~ 12:30	초S-VIII-4. Full <i>ab initio</i> calculations of non-adiabatic electron-atom coupled dynamics 박노정(울산과학기술대)	12:15 ~ 12:27	O-II-7. Non-contact GMR Sensor with Magnetic Nanoparticles for Biomedical Concentration Measurement Xuan Huu Cao(Danang University of Science and Technology)
			12:27 ~ 12:39	O-II-8. Spin-wave-driven domain-wall motions in soft magnetic nanotubes 양재학(서울대)
12:40~14:00	점심식사			



## 11월 27일 [금]

시간	프로그램			
14:00~16:20	<b>Special Session IX (5층 에메랄드홀)</b> <b>'Hard Magnetic Symposium'</b> 좌장: 이정구(재료연구소)		<b>Special Session X (5층 사파이어홀)</b> <b>'한일 미래 스핀 소자 심포지움'</b> 좌장: 문경웅(한국표준과학연구원)	
	14:00 ~ 14:20	(Invited) S-IX-1. Research on the high coercivity in $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ permanent magnet and its microstructure P. Y. Zhang(China Jiliang Univ.)	14:00 ~ 14:25	초S-X-1. Determination of the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Energy density in the heavy metal/ferromagnetic layer/insulator structure 유천열(인하대)
	14:20 ~ 14:40	초S-IX-2. Fabrication and magnetic properties of ferrite based composite magnets 김종렬(한양대)		
	14:40 ~ 15:00	초S-IX-3. Rare-Earth-Free Permanent Magnets : MnBi Bulks and Thin Films 이현숙(연세대)	14:25 ~ 14:50	초S-X-2. Direct observation of spin current based on XFMR 황찬용(한국표준과학연구원)
	15:00 ~ 15:20	초S-IX-4. Coercivity Enhancement by $\text{RF}_3$ -Doping in Hot-Pressed and Die-Upset Nd-Fe-B-type Magnet 김자영(부경대)	14:50 ~ 15:15	초S-X-3. Manipulation of single spin of NV center in diamond Norikazu Mizuochi(Osaka Univ.)
	15:20 ~ 15:40	초S-IX-5. The development of ultra-fine anisotropic magnetic material by HDDR process 차희령(재료연구소)		
	15:40 ~ 16:00	초S-IX-6. Site preferences for La and Dy in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Permanent magnet: A first principles study Imran Khan(부경대)	15:15 ~ 15:40	(Invited) S-X-4. Efficient spin injection and absorption using CoFe-based alloys Takashi Kimura(Kyushu Univ.)
	16:00 ~ 16:20	초S-IX-7. Design and Analysis of Permanent Magnet Array for Development of Large Area Magnetron Sputtering Sources 정종율(충남대)	15:40 ~ 16:05	초S-X-5. Thermal spin generation 최경민(한국과학기술연구원)
16:20~16:30	폐회 (5층 에메랄드홀)			



# CONTENTS

International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015

11월 26일(목) 10:00~11:40

Session : Special Session I '연자성재료 및 응용 특별세션' 1부

5층 에메랄드홀

❁ 좌 장 : 안성용(삼성전기)

초S-I-1	10:00	칩형 커먼 모드 필터용 자성재료의 자기적 특성 .....	3
		김진모*, 전형진, 정창렬, 서정욱, 위성권	
초S-I-2	10:20	비정질 연자성 합금 개발 동향 .....	4
		정호연*, 김소연, 염재훈, 한종수, 송지연, 정명재, 이상원, 배석	
초S-I-3	10:40	침상형 산화철 제조에 관한 연구 .....	5
		허남팔*, 황보미	
초S-I-4	11:00	Fe-Co 중공형 자성섬유 기반 ~GHz 대역 전자파 흡수소재 제조 및 특성평가 .....	6
		이상복*, 정병문, 조승찬, 최재령, 최우혁, 이상관, 김기현	
초S-I-5	11:20	전기영동 전착법에 의한 다양한 그래핀 패턴층 제작 및 그래핀-자성재료 복합층에 대한 연구 소개 .....	7
		김명기*, 김상훈, 김예찬, 황민주, 남재도	

11월 26일(목) 10:00~11:37

Session : 구두발표 I -자기응용

5층 사파이어홀

❁ 좌 장 : 신광호(경성대)

초O-I-1	10:00	비접촉 동력전달용 자기장치 성능예측을 위한 해석법 .....	11
		최장영*	
O-I-2	10:25	습식공정에 의한 Nd-Fe-B 분말 제조에 관한 연구 .....	12
		최철진*, 서영택, 왕 잉, 김동수	
O-I-3	10:37	Synthesis and Magnetic Properties of $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ( $0.0 \leq x \leq 2.0$ ) .....	14
		Jae-Hyoung You*, Sung Joon Choi, Sunwoo Lee, Sang-Im Yoo†	
O-I-4	10:49	Magnetism and magnetocrystalline anisotropies of ordered $L1_0$ MnPt alloy: A first principles study .....	15
		Qurat-ul-ain*, S. H. Rhim, Soon Cheol Hong	
O-I-5	11:01	Manipulation of magnetic state in armchair black phosphorene nanoribbon by charge doping .....	17
		M. Umar Farooq*, Arqum Hashmi, Jisang Hong	



O-I-6	11:13	Effects of the Ar pressure on the magnetic properties of amorphous Fe-Zr thin films .....	18
		Miri Kim*, Nark Eon Sung, Sang Ho Lim	
O-I-7	11:25	Energy Product and Coercivity of Rare-earth free Multilayer and Bilayer FeCo/FePt and FeCo/AuCu Exchange Spring Magnet .....	20
		Imran Khan*, Jisang Hong	

11월 26일(목) 13:00~13:50

Session : 초청강연

5층 에메랄드홀

✽ 좌 장 : 김삼진(국민대)

초O-1	13:00	Electrical detection of ballistic spin Hall and Rashba effects in a semiconductor channel .....	23
		Hyun Cheol Koo*, Won Young Choi, Hyung-jun Kim, Joonyeon Chang, Suk Hee Han	
초O-2	13:25	Spintronics with carbon-based materials .....	24
		Jung-Woo Yoo*	

11월 26일(목) 14:00~15:40

Session : Special Session II '연자성재료 및 응용 특별세션' 2부

5층 에메랄드홀

✽ 좌 장 : 이정구(재료연구소)

초S-II-1	14:00	무선전력전송 시장 현황 및 전망 .....	27
		박철균*	
초S-II-2	14:20	자동차 부품용 연자성 소재 개발 및 적용 동향 .....	28
		김형석*, 김신규, 김영민, 정연준, 이두환	
초S-II-3	14:40	최신 친환경 에너지 및 전기자동차 전력 변환용 연자성 부품 동향 .....	29
		유봉기*	
초S-II-4	15:00	에너지의 효율적 사용을 위한 비정질 연자성소재의 응용 .....	30
		송용설*, 양성철, 김철한	
초S-II-5	15:20	모바일용 파워인덕터의 개발 동향 .....	31
		안성용*	

11월 26일(목) 14:00~15:40

Session : Special Session III

'방사선계측기술을 활용한 자성연구와 우주탐사'

5층 사파이어홀

✽ 좌 장 : 엄영량(한국원자력연구원)

초S-III-1	14:00	믹스바우어 분광 기술을 이용한 문화재 연구 .....	35
		김철성*	

초S-III-2	14:40	Infrared Spectrum of the Lunar Surface .....	36
		Young-Jun Choi*	
초S-III-3	15:00	Solar Neutrino Detection Technology As a Probe to the Inner Structure of Heavenly Body .....	37
		Gwang-Min Sun*, Bo Young Han	
초S-III-4	15:20	Development Status of Korean Radioisotope Thermoelectric Generator .....	38
		Jintae Hong*, Kwang-Jae Son, Jong-Bum Kim, Jong-Han Park, Jin-Joo Kim, Young-Rang Uhm	

11월 26일(목) 16:00~18:05

Session : Special Session IV

'First-principles calculations: Magnetism and beyond'

5층 에메랄드홀

✿ 좌 장 : 홍순철(울산대)

Invited S-IV-1	16:00	Modification of magnetism in transition-metal thin films by external electric field ..	41
		Kohji Nakamura*	
Invited S-IV-2	16:25	DFT study for novel noncollinear magnets .....	42
		Tatsuya Shishidou*	
Invited S-IV-3	16:50	Spin-Orbit-Coupling induced Anisotropy effects in Antiferromagnets .....	43
		Alexander B. Shick*	
초S-IV-4	17:15	Materials with large MCA and design principles of large MCA .....	44
		S. H. Rhim*, Soon-Cheol Hong, Soyoung Jekal	
초S-IV-5	17:40	Composition and temperature dependent electronic structures of $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$ alloys: First-principles dynamical mean field theory approach .....	45
		Chang-Youn Moon, Hanhim Kang, Bo Gyu Jang, Ji Hoon Shim*	

11월 26일(목) 16:00~18:00

Session : Special Session V 'NMR 및 바이오자성 분야'

5층 사파이어홀

✿ 좌 장 : 한만석(강원대)

초S-V-1	16:00	MR 최신 Trend 및 검사 기법의 이해 .....	49
		오원석*	
초S-V-2	16:20	CT의 최신 동향: MDCT 및 선량저감기술의 발전 .....	51
		김선규*	
초S-V-3	16:40	CT 조영제가 방사선치료계획에 미치는 영향 .....	53
		장재욱*, 한만석, 전민철, 서선열, 배석환, 황도근	
초S-V-4	17:00	Analysis of Images According to the Fluid Velocity in Time of Flight Magnetic Resonance Angiography .....	55
		Heo Young Cheol*, Park Cheol Soo, Cho Jae Hwan, Choi Jae Hyock, Yoo Se Jong	

초S-V-5	17:20	흉부와 복부 CT 검사 시 Care Dose 4D 사용에 따른 선량 측정과 영상 평가 ..... 56 석종민*, 허영철, 서정민, 권순무, 원희수, 장현철
초S-V-6	17:40	생식선을 포함하지 않는 Chest CT촬영 시 0.25mmPb 차폐체의 생식선 차폐 유용성 연구 ..... 58 서선열*, 한동균, 장재욱, 이원정, 김갑중

11월 26일(목) 10:00~19:00  
Session : 포스터발표

5층 토파즈홀

❀ 좌 장 : 박철수(한림성심대)/안성용(삼성전기)

○ Session MT[Magnetic theory and calculations]

MT01	Poster	Perpendicular magnetocrystalline anisotropy of 5dTM/Co <sub>x</sub> Fe <sub>1-x</sub> /MgO (TM=Hf, Ta, and W; x=0, 0.5, 1): A first principles study ..... 61 P. Taivansaikhan*, S. H. Rhim, S. C. Hong <sup>†</sup>
MT02	Poster	덩치 및 박막 CrPt <sub>3</sub> 의 자성 제일원리 계산 ..... 63 정태성*, 제갈소영, 권오룡, 임성현, 홍순철
MT03	Poster	The Effect of Interfacial Roughness on a Skyrmion Structure ..... 65 Namkyu Kim*, Ki-Suk Lee
MT04	Poster	공진형 무선전력전송 시스템의 최대허용가능전력에 관한 연구 ..... 67 이진현*, 박영민, 변진규
MT05	Poster	균일자기장에 노출된 도체구 및 회전타원체모델의 유한요소법 해석오차 분석 ..... 70 심재훈*, 성동규, 변진규
MT06	Poster	<i>Abinitio</i> Investigation on the Magnetic Phase Stability of the FePt Surface ..... 72 Miyoung Kim*, Hanchul Kim

○ Session MD[Magnetization dynamics]

MD01	Poster	다결정 Ba <sub>x</sub> A <sub>1-x</sub> Ti <sub>0.9</sub> Fe <sub>0.1</sub> O <sub>3</sub> (A=Bi <sup>3+</sup> , La <sup>3+</sup> )에서의 강유전 및 자기 상전이 현상 분석 ..... 73 김덕현*, 유춘리, 이보화 <sup>†</sup>
MD02	Poster	자기 Bubblecade 속력의 자기장 각도와 세기 의존성 ..... 74 김덕호*, 문경웅, 유상철, 김대연, 민병철, 황찬용, 최석봉
MD03	Poster	Origin of robust interaction of spin waves with a single skyrmion in perpendicularly magnetized nanostripes ..... 75 Junhoe Kim*, Sang-Koog Kim
MD04	Poster	Effect of Dresselhaus spin orbit interaction on current-induced skyrmion dynamics ..... 77 Seung-Jae Lee*, Kyung-Jin Lee

○ Session HM[Hard-magnetic Materials]

HM01	Poster	Magnetic and structural properties of hot deformed Nd-Fe-B magnets diffusion processed with NdHx compound in two-step die upset .....	79
		Shu Liu*, Nam-Hyun Kang, Ji-Hun Yu, Hae-Woong Kwon, Jung-Goo Lee <sup>†</sup>	
HM02	Poster	Synthesis and Magnetic Characterization of M-type $\text{Sr}_{0.75-x}\text{La}_{0.25}\text{Ca}_x\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ hexaferrite by Salt-assisted Ultrasonic Spray Pyrolysis (SA-USP) .....	80
		Jimin Lee*, Tae-Yeon Hwang, Jongryoul Kim, JinBae Kim, Yong-Ho Choa	

○ Session SM[Soft-magnetic Materials]

SM01	Poster	Magnetic annealing effect of Fe-based amorphous ribbon .....	81
		Sumin Kim*, Haein Choi-Yim	
SM02	Poster	Zn가 치환된 Z-type hexaferrite의 고주파 특성 연구 .....	82
		임정태*, 신길수, 김대진, 류대형, 이지수, 김철성	
SM03	Poster	Microring 형태의 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 물질에 대한 자기적 특성 연구 .....	84
		최현경*, 박미령, 이종현, 김철성	
SM04	Poster	Synthesis and characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3$ -coated Fe alloy powder .....	85
		Sung Joon Choi*, Sun Woo Lee, Jae-Hyoung You, Sang-Im Yoo	
SM05	Poster	교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 각도에 따른 선풍 특성 분석 .....	86
		김동영*, 윤석수	
SM06	Poster	NiFe(100 nm)/CoFe(5 nm) 이중층 박막의 스핀파 공명 신호 분석 .....	88
		김동영*, 윤석수	
SM07	Poster	Magnetic Properties of Fe alloy-SiO <sub>2</sub> Core-Shell Structure .....	90
		Sunwoo Lee*, Sungjoon Choi, Sang-Im Yoo <sup>†</sup>	
SM08	Poster	Fe-Cu 합금의 자기적 특성을 이용한 열처리 효과 연구 .....	91
		이철규*, M.B Kishore, 손대락, 박덕근	
SM09	Poster	Thickness Dependence of saturation magnetization in amorphous CoSiB multilayers .....	92
		Sol Jung*, Haein Yim	
SM10	Poster	Preparation and Characterization of Metal-Ceramic Nanocomposite for High Frequency Application .....	94
		Seung-Jae Jung*, Hyo-Ryoung Lim, Tae-Youn Hwang, Yong-Ho Choa <sup>†</sup>	

○ Session SS[Semiconductor spintronics]

SS01	Poster	Magneto-logic device using non-magnetic semiconductors at room emperature .....	95
		Taeyueb Kim*, Sungjung joo, Jinki Hong <sup>†</sup> , Hyun Cheol Koo, Jin Dong Song, Joonyeon Chang	

SS02	Poster	Room temperature spin dependent potentials in a quantum well structure ..... 96 Youn Ho Park*, Hyun-jun Kim, Joonyeon Chang, Heon-Jin Choi, Hyun Cheol Koo <sup>†</sup>
SS03	Poster	All-electric spin transistor using perpendicular spins ..... 97 Ji Hoon Kim*, Joohyung Bae, Byoung-Chul Min, Hyung-jun Kim, Joonyeon Chang, Hyun Cheol Koo <sup>†</sup>

○ Session SO[Spin orbit coupling and related phenomena]

SO01	Poster	Influence of thermal treatment-induced atomic states on spin orbit torque in MgO/CoFeB/W stacks ..... 98 Seung Mo Yang*, Ja Bin Lee, Gwang Guk An, Woo Seong Chung, Haesoo Park, Jin Pyo Hong
SO02	Poster	LiFe <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.05</sub> FePO <sub>4</sub> 의 자기적 특성 연구 ..... 99 고병욱*, 이진현, 조다애, 김철성
SO03	Poster	Rashba effective field induced anisotropic magnetoresistance in InAs quantum well channel ..... 100 Won Young Choi*, Hyung-jun Kim, Joonyeon Chang, Suk Hee Han, Hyun Cheol Koo
SO04	Poster	Study on the Effect of Pt Resistivity on SOTs in Pt/Co/AlO <sub>x</sub> Trilayer Structure ... 101 Jae Wook Lee*, Young-Wan Oh, Byong-Guk Park

○ Session NS[Nano-structured materials]

NS01	Poster	Magnetostatic interaction between domain walls in sub-micron sized dual Co rings ..... 103 Soo-Yeol Yoo*, Hyun-Sik Park, Ki-Bum Lee, Chunghee Nam
NS02	Poster	A novel sonochemical approach for the synthesis of core/shell Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> / Ag nanocubes and SiO <sub>2</sub> /Ag nanospheres with superior catalytic properties .. 104 Mohamed Abbas*, Sri Ramulu Torati, Yunji Eom, Cheol Gi Kim
NS03	Poster	Structural analysis and room temperature ferromagnetism of Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Co <sup>2+</sup> nanorods, synthesized by controlled hydrothermal method ..... 105 Prasanta Dhak*, Sandeep K. S. Patel, Min-Gwan Kim, Jae Hyeok Lee, Miyoun Kim, Sang-Koog Kim
NS04	Poster	Co-doped Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanorods: Structure and magnetism ..... 107 Sandeep K.S. Patel*, Prasanta Dhak, Min-Kwan Kim, Jae-Hyeok Lee, Miyoun Kim, Sang-Koog Kim

○ Session ST[Spin transfer torque for magnetic memory]

ST01	Poster	Detrimental Effect of Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya Interaction on Perpendicular Spin-Transfer-Torque Magnetic Random Access Memory ..... 109 Peong Hwa Jang*, K.-J. Lee
------	--------	--

○ Session NM[Nanoscale Magnetism]

NM01	Poster	공침법을 이용한 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 자성 파우더 및 자성유체 제작 .....	111
		백승빈*, 박정갑, 임태진, 이태일, 서수정	
NM02	Poster	산화철 나노입자의 교류 자화율 특성 분석 .....	113
		김동영*, 윤석수, 정은경	
NM03	Poster	임피던스 분석기를 활용한 자성나노입자의 완화효과 연구 .....	115
		Sunghyun Yoon*	
NM04	Poster	Fe wire 전기폭발법을 이용한 자성유체용 Fe나노파우더 제작 .....	116
		박정갑*, 이정우, 백승빈, 임태진, 이태일, 서수정	

○ Session MO[Magnetic Oxides and Multiferroics]

MO01	Poster	Fabrication and characterization of magnetic particles via hydrothermal synthesis .....	118
		Sung Myung Ryu*, Ki Bum Lee, Chung Hee Nam	
MO02	Poster	다결정 $\text{Ba}_x\text{A}_{1-x}\text{Ti}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ ( $\text{A}=\text{Bi}^{3+}, \text{La}^{3+}$ )에서의 강유전 및 자기 상전이 현상 분석 .....	120
		김덕현, 유춘리*, 이보화†	
MO03	Poster	산소 결함에 따른 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 박막의자기적 특성 변화 .....	121
		이두용*, 김지웅, 김혜경, 이지성, 배종성, 윤형중, 원종한, 이주한, 박성균†	
MO04	Poster	Effect of La deficiency on magnetic properties in polycrystalline $\text{La}_{0.88-6}\text{Sr}_{0.12}\text{MnO}_3$ .....	122
		류상균, 김지웅, 이두용, 진미정, 김동진, 이인원, 박성균, 진형진*	

○ Session BM[Biomedical Magnetism]

BM01	Poster	염증유발 지질다당류(LPS)와 자성비드가 주입된 토끼 프리모관의 자기장 영향 연구 .....	123
		이혜리, 하예은, 김지영, 홍예지, 김근호, 강석윤, 이상석*	
BM02	Poster	적혈구 포획용 마이크로 텀코일 제작과 전산모사를 이용한 자기장 분포 특성 연구 .....	125
		정현준, 박지수, 김누리, 황도근, 이장로, 이상석*	

○ Session SA[Sensor and Applications]

SA01	Poster	Wiedemann 효과를 이용한 텐던의 인장력 측정 .....	128
		강선주*, 조창빈, 이정우, 손대락	
SA02	Poster	원격제어용 DC 자기이력곡선 측정장치 제작 .....	130
		김은애*, 이승주, 박덕근, 손대락	
SA03	Poster	센서를 활용한 무인감시 시스템에 관한 연구 .....	132
		김상준*, 조영훈, 박성근, 오광민, 윤대길, 손대락	

SA04	Poster	Bi-YIG 박막의 Spectrometer 기반 실시간 Faraday Rotation스펙트럼측정연구 ... 134
		강민구*, Kuchi Rambabu, 정종율

○ Session OT[Others]

OT01	Poster	Spontaneous Hall effect in Amorphous CoSiB/Pt/CoSiB structure ..... 135
		Y.K. Kim*, S.Y. Kim, H.N. Lee, T.W. Kim
OT02	Poster	Analyses of Mössbauer spectra for ferrous and ferric state in Dynabi <sub>Tab</sub> ..... 136
		Young Rang Uhm*, Jae Cheong Lim, Sang Mu Choi

11월 27일(금) 09:00~10:40

Session : Special Session VI

'First-principles calculations: Magnetism and beyond'

5층 에메랄드홀

✿ 좌 장 : 임성현(울산대)

초S-VI-1	09:00	A mechanism for orbital angular momentum and giant spin-splitting in solids and nanostructures ..... 139
		Sehoon Oh, Hyoung Joon Choi*
초S-VI-2	09:25	First-principles studies on the metal contact with carbon-based nanomaterials ..... 140
		Seunghun Jang, Jino Im, Min Choi, Jeong-O Lee, Hyunju Chang*
초S-VI-3	09:50	Computational design high-performance rare-earth-free permanent magnet based on hard-soft hybrid structures ..... 141
		Joo-Hyoung Lee*
초S-VI-4	10:15	Orbital Selective Fermi Surface Shifts in Correlated AFeAs (A = Li, Na) ..... 142
		Geunsik Lee*, Hyo Seok Ji, Yeongkwan Kim, Changyoung Kim, Kristjan Haule, Gabriel Kotliar, Bumsung Lee, Seunghyun Khim, Kee Hoon Kim, Kwang S. Kim, Ki-Seok Kim, Ji Hoon Shim

11월 27일(금) 09:00~10:40

Session : Special Session VII 'The 1st Korea-China-Vietnam symposium on magnetic oxide'

– 산화물 연구센터(한국외국어대학교)주최

5층 사파이어홀

✿ 좌 장 : 유춘리(한국외대)

Invited S-VII-1	09:00	TM-doped ZnO DMS synthesized by hydrothermal method under high magnetic field ..... 145
		Min Zhong, Muhammad Tariq, Zihao Zhang, Chunli Liu, Yemin Hu, Wenxian Li, Ying Li*

Invited S-VII-2	09:20	Influence of magnetic field on the critical behavior of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ( $x = 0.2, 0.3, 0.4$ ) ..... 147 P. Zhang*, P. Lampen, T. L. Phan, S. C. Yu, T. D. Thanh, N. H. Dan, V. D. Lam, H. Srikanth, M. H. Phan
Invited S-VII-3	09:40	Thermally tunable magnetic metamaterials at THz frequencies ..... 148 Nguyen Thi Hien, Bui Son Tung, Nguyen Thanh Tung, Vu Dinh Lam*
Invited S-VII-4	10:00	Formation of nanocrystalline $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ powders by mechanical alloying ..... 149 D. H. Manh*, D. K. Tung, L. T. H. Phong, N. X. Phuc, B. W. Lee, T. L. Phan
Invited S-VII-5	10:20	Magnetic properties and magnetocaloric effect in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ exhibiting first-order and second-order magnetic phase transitions ..... 150 T. L. Phan*, T. A. Ho, T. D. Thanh, C. U. Jung, B. W. Lee, S. C. Yu

11월 27일(금) 10:50~12:30

Session : Special Session VIII

'First-principles calculations: Magnetism and beyond'

5층 에메랄드홀

❁ 좌 장 : 김미영(숙명여대)

초S-VIII-1	10:50	Ab initio study on metal-insulator and magnetic transitions in correlated hollandites: $\text{K}_2\text{Cr}_8\text{O}_{16}$ and $\text{K}_2\text{V}_8\text{O}_{16}$ ..... 153 Sooran Kim*, Beom Hyun Kim, Kyoo Kim, B. I. Min
초S-VIII-2	11:15	Lanthanide-like localization of 4d-derived spins in a columnar itinerant niobium oxide lattice ..... 154 K.-W. Lee*, W. E. Pickett
초S-VIII-3	11:40	Quasiparticle self-consistent GW study of cuprates: electronic structure, model parameters, and the two-band theory for $T_c$ ..... 155 Myoung Joon Han*
초S-VIII-4	12:05	Full <i>ab initio</i> calculations of non-adiabatic electron-atom coupled dynamics .. 156 Dongbin Shin, Noejung Park*

11월 27일(금) 10:50~12:39

Session : 구두발표 II

5층 사파이어홀

❁ 좌 장 : 정종율(충남대)

초O-II-1	10:50	유기 스핀 소자 내에서의 스핀 거동 이해 ..... 159 김태희*
O-II-2	11:15	Investigation of electric field effect on perpendicular magnetic anisotropy with MTJ structures ..... 160 박경웅*, 김대훈, 백승현, 서수만, 정성웅, 박병국



O-II-3	11:27	W/CoFeB/MgO 구조에서 스핀-오빗 토크와 스핀 홀 자기저항의 상관관계 ..... 162 백승헌*, 조순하, 이경동, 조영훈, 박병국
O-II-4	11:39	Determination of magnetic domain-wall types via observing Dzyaloshinskii-Moriya interaction-induced domain expansion patterns ..... 164 김대연*, 김덕호, 문준, 최석봉
O-II-5	11:51	Creep과 Flow 영역에서 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용에 의한 Chiral 자구벽 동역학의 보편성 ..... 166 김덕호*, 유상철, 김대연, 민병철, 최석봉
O-II-6	12:03	Current-induced motion of antiferromagnetic domain wall in antiferromagnet/heavy metal bilayers ..... 168 Se-Hyeok Oh*, Takayuki Shiino, Byong-Guk Park, Kyung-Jin Lee
O-II-7	12:15	Non-contact GMR Sensor with Magnetic Nanoparticles for Biomedical Concentration Measurement ..... 170 Xuan Huu Cao*, Duc Long Dang, Van Long Doan, Derac Son
O-II-8	12:27	Spin-wave-driven domain-wall motions in soft magnetic nanotubes ..... 171 Jaehak Yang*, Myoung-Woo Yoo, Sang-Koog Kim

11월 27일(금) 14:00~16:20

Session : Special Session IX 'Hard Magnetic Symposium'

5층 에메랄드홀

✿ 좌 장 : 이정구(재료연구소)

Invited S-IX-1	14:00	Research on the high coercivity in $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ permanent magnet and its microstructure ..... 175 P. Y. Zhang*
초S-IX-2	14:20	Fabrication and magnetic properties of ferrite based composite magnets .... 176 전광원, 김종렬*
초S-IX-3	14:40	Rare-Earth-Free Permanent Magnets : MnBi Bulks and Thin Films ..... 178 Hyun-Sook Lee*, Sumin Kim, Hongjae Moon, Hwaebong Jung, Sumin Kim, Haein Yim, Wooyoung Lee†
초S-IX-4	15:00	Coercivity Enhancement by $\text{RF}_3$ -Doping in Hot-Pressed and Die-Upset Nd-Fe-B-type Magnet ..... 179 J. Y. Kim*, K. M. Kim, H. W. Kwon, J. G. Lee, J. H. Yu
초S-IX-5	15:20	The development of ultra-fine anisotropic magnetic material by HDDR process ..... 180 H. R. Cha*, J. H. Yu, H. W. Kwon, Y. D. Kim, J. G. Lee
초S-IX-6	15:40	Site preferences for La and Dy in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Permanent magnet: A first principles study ..... 181 Imran Khan*, Jisang Hong

초S-IX-7	16:00	Design and Analysis of Permanent Magnet Array for Development of Large Area Magnetron Sputtering Sources .....	182
Ye-Lim Lee, Rambabu Kuchi, Srivathsava Surabhi, Shin-Jae You, Jong-Ryul Jeong*			

11월 27일(금) 14:00~16:05

Session : Special Session X '한일 미래 스핀 소자 심포지움'

5층 사파이어홀

✽ 좌 장 : 문경웅(한국표준과학연구원)

초S-X-1	14:00	Determination of the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Energy density in the heavy metal/ferromagnetic layer/insulator structure .....	185
Chun-Yeol You*, Jaehun Cho, Nam-Hui Kim, June-Seo Kim, Reinoud Lavrijsen, Aurelie Solignac, Yuxiang Yin, Dong-Soo Han, Niels J. J. van Hoof, Henk J. M. Swagten, Bert Koopmans			
초S-X-2	14:25	Direct observation of spin current based on XFMR .....	186
C. Hwang*			
Invited S-X-3	14:50	Manipulation of single spin of NV center in diamond .....	187
Norikazu MIZUOCHI*			
Invited S-X-4	15:15	Efficient spin injection and absorption using CoFe-based alloys .....	188
Takashi Kimura*			
초S-X-5	15:40	Thermal spin generation .....	189
Gyung-Min Choi*, Chul-Hyun Moon, Byoung-Chul Min, Kyung-Jin Lee, David G. Cahill			

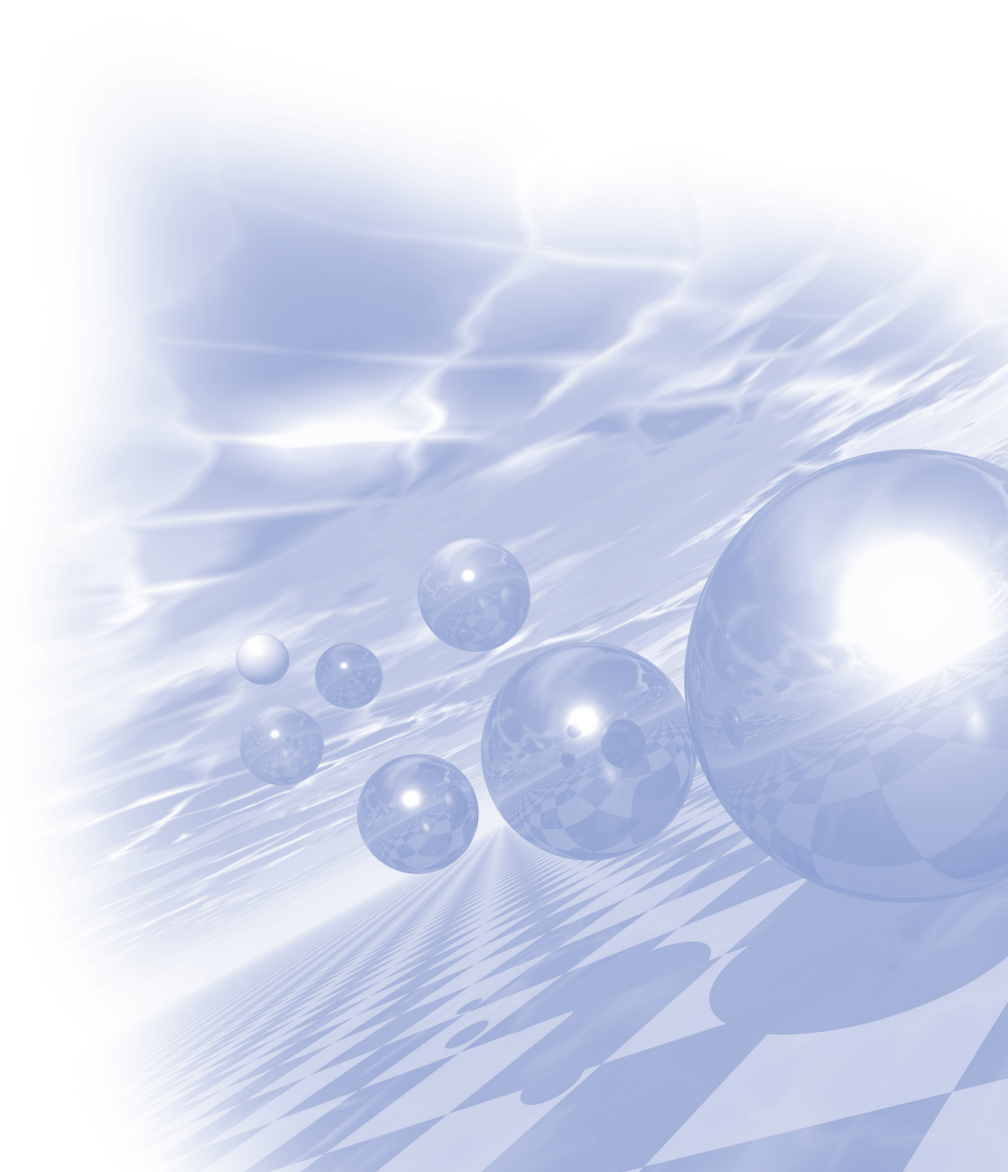




**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session I**

**‘연자성재료 및 응용 특별세션’**





## 칩형 커먼 모드 필터용 자성재료의 자기적 특성

김진모<sup>1\*</sup>, 전형진<sup>1</sup>, 정창렬<sup>1</sup>, 서정욱<sup>1</sup>, 위성권<sup>1</sup>

<sup>1</sup>삼성전기 중앙연구소

자성재료를 활용한 노이즈 제거형 칩형 EMC(Electro-Magnetic Interference)부품에는 대표적으로 적층형 칩 인덕터(Multilayer Chip Inductor), 적층형 칩 비드(Multilayer Chip Bead), 및 칩형 커먼 모드 필터(Chip Common Mode Filter)가 있으며, 이러한 EMC부품 소자에 사용되는 재료는 높은 화학적/구조적인 안정성 및 낮은 cost를 장점으로 갖기 때문에 대부분이 Ni-Zn-Cu 계의 Spinel 구조의 ferrite를 사용하고 있다. [1]

PC의 발전과 함께 디지털 통신의 발전으로 USB3.0, Display Port, IEEE1294, HDMI/DVI, LVDS 등의 차동 모드(Differential Mode)를 기반으로 한 차동 신호 전송(Differential Signal Transformation, 위상이 180도 다른 2개의 선로로 전송하는 방법)이 넓게 보급되었다. [2] 하지만 데이터 전송의 고속화와 함께 입력신호 반사에 의한 신호 파형 품질의 열화가 문제가 되면서 동상 모드(Common Mode)의 노이즈는 제거하고 차동 모드(Differential Mode)의 신호는 통과시키는 ‘커먼 모드 필터’(Common Mode Filter, CMF)가 점차 증가하는 추세이다.

일반적인 Spinel 구조의 Ni-Zn-Cu계 소결체 ferrite의 경우 1 MHz 영역에서 높은 투자율 특성을 갖지만 공진주파수가 약 20 ~ 30 MHz 정도로 그 특성상 실재 사용할 수 있는 영역이 한정된다. 이를 composite화 할 경우 투자율 하락으로 인한 공진주파수가 100~ 200MHz영역까지 이동되나 고주파(1GHz)영역에서는 투자율이 약 2~3정도로 소형화된 EMC소자에서 투자율의 이점이 적고 투자 손실 특성으로 인한 EMC소자의 특성 열화로 소재의 특성 개선이 필요하다. [3-4]

본 연구에서는 현재 커먼 모드 필터의 개발 동향과 소재의 요구되는 자기적인 특성, 그리고 이에 따른 자성 재료에 대하여 논의하고자 한다.

### 참고문헌

- [1] M. Penchal Reddy, W. Madhuri b, G. Balakrishnaiah, N. Ramamanohar Reddy, K.V. Siva Kumar, V.R.K. Murthy, R. Ramakrishna Reddy, *Current Aplied Physics* **11**, 191 (2011)
- [2] B-C. Tseng and L-K. Wu, *IEEE Trans. On Elec. Comp.*, **46**, 571 (2004)
- [3] T. Nakamura, *J. Appl. Phys.* **88**, 348 (2000)
- [4] T. Nakamura, T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, *J. Magn. Magn. Mat.*, **138**, 319 (1994)

## 비정질 연자성 합금 개발 동향

정효연<sup>1\*</sup>, 김소연<sup>1</sup>, 염재훈<sup>1</sup>, 한종수<sup>1</sup>, 송지연<sup>1</sup>, 정명재<sup>1</sup>, 이상원<sup>1</sup>, 배석<sup>1</sup>

LG이노텍 부품소재 R&D센터 선행부품연구소

21세기 첨단 산업의 발전은 각종 전자기기의 고성능화, 고효율화, 소형화 등을 요구한다. 이러한 산업적 요구에 따라 소재 산업 분야에서도 이에 부합하는 고기능성 소재를 개발, 적용하고자 활발한 연구를 진행하고 있다. 단범위 원자 배열 구조를 가지는 비정질 합금(amorphous alloy or metallic glass)은 구조 및 기능 소재로서 다양한 활용이 기대되는 소재들 중 하나이다<sup>[1]</sup>. 비정질 합금은 일반적인 금속 소재와 다른 독특한 원자 배열 구조를 가짐에 따라, 기존 소재에서는 볼 수 없었던 여러 가지 특성들을 나타낸다. 비정질 합금은 상온에서 수 GPa에 이르는 높은 파괴 강도, 고탄성 등의 기계적 특성과 더불어 높은 내마모성, 내부식성, 우수한 연자기적 특성 등의 기능적 특성들을 복합적으로 가진다<sup>[2]</sup>. 강자성 Fe 및 Co를 주원소로 포함하는 비정질 합금은 고투자율 및 저보자력 특성을 나타낼 뿐만 아니라 높은 비저항을 가지므로, 저에너지 손실 및 발열 특성을 나타내는 고효율 연자성 소재로 주목 받고 있다. Metglas® 등을 포함하는 기존의 비정질 합금(conventional metallic glass)은 상대적으로 낮은 비정질형성능(glass forming ability)을 가지고 있어  $10^5 \sim 10^6$ °C/s의 높은 냉각속도를 인가할 수 있는 제조법에 의해 만들어진다<sup>[3]</sup>. 따라서, 제작법 및 소재의 형상이 제한적이므로 제조 가격이 상대적으로 높고, 다양한 활용에 어려움이 있어 왔다. 한편, 1990년대부터는 비정질 합금의 다양한 산업적 활용을 위해 상대적으로 높은 비정질형성능을 가지는 벌크 비정질 합금(bulk metallic glass)의 개발이 이루어져 왔다. 벌크비정질 합금은 상대적으로 낮은 임계냉각속도( $<10^3$ °C/s)를 가지므로, 주조법 및 분무법 등의 다양한 제조방법을 활용하여 형상의 제약이 적은 비정질 소재를 쉽게 제작할 수 있다는 장점을 가진다<sup>[4]</sup>. 본 연구에서는 연자성 비정질 합금의 개발 동향을 확인하고, 전자기 부품 소재로서 광범위하게 활용이 가능한 비정질 합금의 개발 방향에 대해 논의하고자 한다.

### 참고문헌

- [1] W. Klement, R. H. Willens, P. Duwez, Nature 187(1960)869.
- [2] A. Inoue, A. Takeuchi, Materials Science and Engineering A 375-377(2004)23.
- [3] W. H. Wang, C. Dong, C. H. Shek, Materials Science and Engineering R44(2004)46.
- [4] A. Inoue, Y. Shinohara and J. S. Gook, Materials Transactions JIM36(1995)1427.

## 침상형 산화철 제조에 관한 연구

허남팔<sup>1\*</sup>, 황보미<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EMW 중앙연구소 소재소재연구팀

무선전력전송기술은 전력 송신부 코일과 수신부 코일 사이에 발생하는 전자기 유도(Electronic Induction Method) 현상에 의한 유도 전류를 이용하여 무선으로 배터리에 전력을 공급하는 기술이다. 최근 들어 무선 전력전송기술에 대한 관심이 크게 높아지면서 전송 효율 향상에 많은 관심을 갖고 있다.

수신부 코일에 유도되는 전압은 수신부 코일의 인덕턴스와 송신부/수신부 코일의 상호 인덕턴스에 의해 결정된다. 따라서 전송효율을 높이기 위하여 수신부 코일의 인덕턴스를 높여야 한다. 이를 위하여 자성소재는 높은 투자율을 갖고 있어야 하며 누설 자기장을 최소화시켜야 한다. 하지만 자성소재의 고투자율화는 투자손실의 증가로 이어지게 되어 한계를 지니게 된다. 이를 극복하기 위하여 자기 이방성 특성을 이용하여 자기장의 방향을 송/수신 방향과 일치시킴으로써 에너지 전송 효율을 향상시킬 수 있다.

본 연구는 이러한 목적의 침상형 페라이트를 제조하기 위해서 침상형 산화철 전구체의 제조 메커니즘을 규명하고자 한다.

사용한 시약은 공업용 황산제일철과 가성소다를 사용하였으며, 공기를 주입하여 산화반응의 pH 값의 변화와 Ferrous ion의 변화 과정을 지켜봄으로써 대략적인 반응 메커니즘을 추론할 수 있었다. 수산화제일철  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$  현탁액의 산화반응에 관하여서는 오랫동안 연구되어 왔다. [1] 본 연구에서는 R 값( $2[\text{OH}^-] / [\text{Fe}^{+2}]$ )을 변화시켜 수산화제일철 현탁액을 제조하였다. 반응 온도에 따른 영향을 살펴보았다. 반응기와 Ferrous 농도는 0.72M로 고정 시켰다. 최종 제품의 특성은 XRD, 화학정량분석, FE-SEM, BET를 통하여 확인하였다.

R 값의 변화에 따라 침상형 산화철 또는 구형의 산화물을 얻을 수 있었다. 온도가 높을수록 구형의 산화물(마그네타이트)이 용이하게 합성되었다. 침상형 산화철은 알칼리 영역과 산성 영역에서 각기 다른 반응을 거쳐 진행된다는 것을 확인하였다. 알칼리 영역에서는 중간 생성물을 거치지 않고 침상의 산화철 전구체가 만들어졌다. 산화반응 속도는 R 값이 증가할수록 느려졌다. 반면 R 값이 1.05보다 작은 영역에서는 Green Rust라 불리는 중간 생성물을 거쳐 합성된다는 것을 확인할 수 있었다. 산성 영역에서는 R 값이 0.8 부근에서 분기점을 가지고 있었으며 R 값이 0.8보다 낮은 영역에서는 R 값이 적을수록 반응이 느려졌으나, R 값이 0.8~0.88 사이에서는 반응속도가 급격히 달라짐을 확인할 수 있었다. 또한, 2-step으로 반응이 진행되는 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 침상형 산화물 전구체를 제조할 경우 R 값이 2.0 이상 혹은 0.3 이하가 적당하다는 것을 알 수 있었으며 알칼리 영역에서 수산화제일철 현탁액은 중간생성물을 거치지 않고 형성되는 것을 알 수 있었다. R 값이  $1.05 > R > 0.80$ 에서는 Green Rust라는 중간생성물을 거쳐 반응이 진행되는 것을 확인하였으며 구형의 산화물 전구체가 얻어졌다.

### 참고문헌

- [1] Masso Kiyama, Bull. chem. soc. japan, **47** 1646, 1974.
- [2] A. A. Olowe and J. M. R. Genin, Corrosion Science, **32** 965, 1991.



## Fe-Co 중공형 자성섬유 기반 ~GHz 대역 전자파 흡수소재 제조 및 특성평가

이상복<sup>1\*</sup>, 정병문<sup>1</sup>, 조승찬<sup>1</sup>, 최재령<sup>1</sup>, 최우혁<sup>1</sup>, 이상관<sup>1</sup>, 김기현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>재료연구소 복합재료연구그룹

<sup>2</sup>영남대학교 물리학과

전자기기와 차세대 정보통신 기기가 발전함에 따라 회로의 동작 주파수가 고주파 대역으로 증가하고 다기능 소형화됨에 따라 전자파 간섭 및 노이즈 발생에 따른 기기의 오작동 및 신호품질의 문제가 심각해지고 있다. 기존 저주파 대역에 이용되는 고투자율의 자성소재의 경우, ~ GHz 대역으로 증가함에 따라 공진현상 등의 발생으로 인해 투자율의 급격한 감소를 나타낸다. 최근 이러한 문제점들을 해결하기 위한 노력으로 고주파 고투자율 자성소재 및 이를 이용한 전자파 흡수소재에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

본 연구에서는 미세 고분자 섬유에 무전해 도금법을 이용하여 Fe-Co 코팅한 후, 일반 열처리 및 자장열처리를 통하여 높은 중형비의 중공형 자성섬유를 제조하였다. 제조된 중공형 자성섬유에 대해 VSM을 통해 배향방향별 자기적 특성을 평가하였으며, 또한 이를 복합화한 전자파 흡수체를 제조하여 ~ GHz 대역의 고주파에서의 유전율, 투자율 및 전자파 흡수능을 평가하였다. 배향된 Fe-Co 중공형 자성섬유의 수평방향에서 가장 낮은 보자력을 보이는 등, 배향 방향에 따라 다른 전자기적 특성을 보였다. ~ GHz 고주파 전자기 특성의 경우, 기존 구형의 입자에 비해 우수한 특성을 보여, 미세 섬유형상의 자성소재가 고주파에 응용이 가능함을 확인하였다.

# 전기영동 전착법에 의한 다양한 그래핀 패턴층 제작 및 그래핀-자성재료 복합층에 대한 연구 소개

김명기<sup>1,2\*</sup>, 김상훈<sup>3</sup>, 김예찬<sup>3</sup>, 황민주<sup>3</sup>, 남재도<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>삼성전기 LCR사업부 제품개발G

<sup>2</sup>성균관대학교 고분자공학과

<sup>3</sup>성균관대학교 에너지과학과

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

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

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

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

## 참고문헌

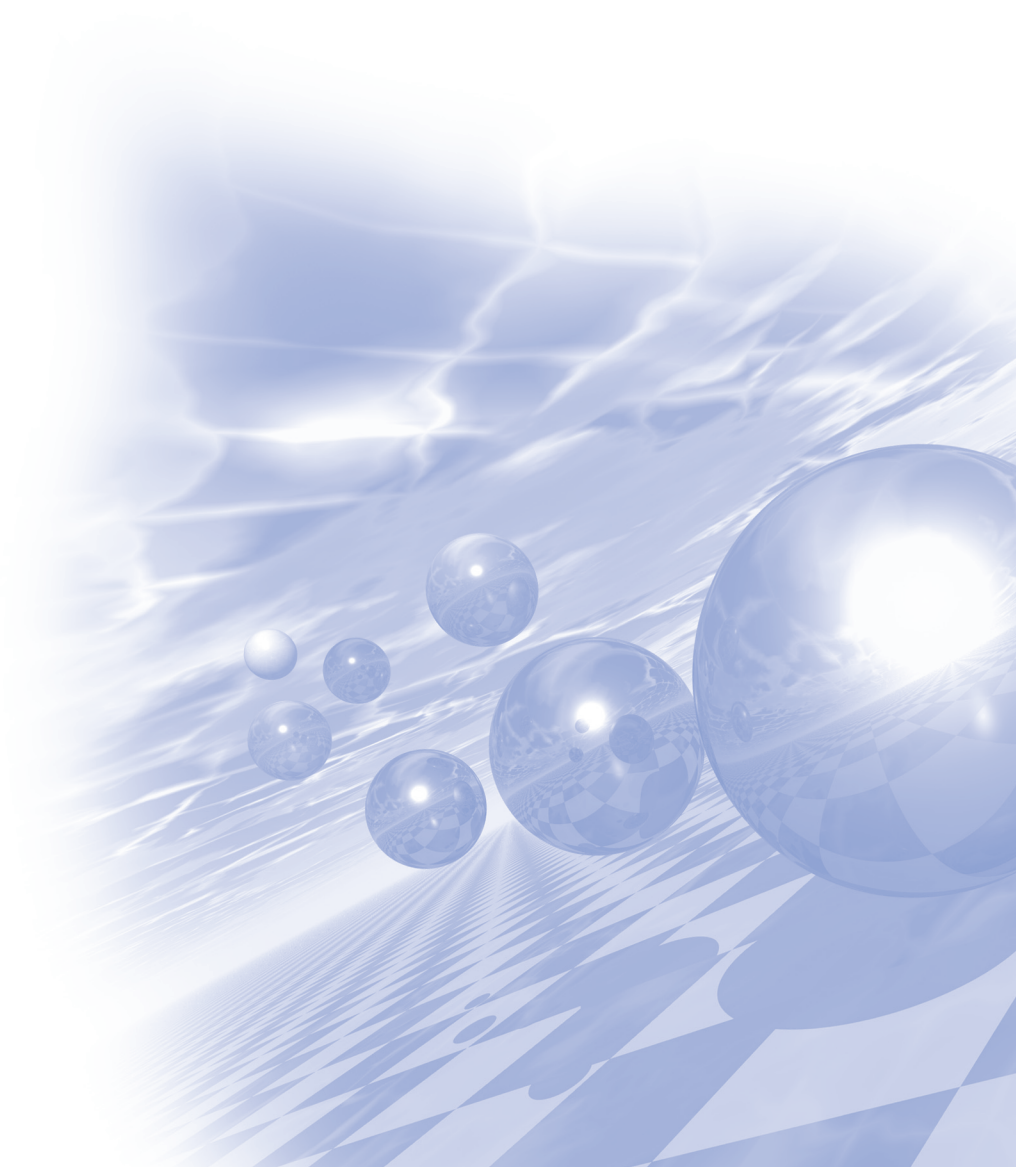
- [1] 미래창조과학부, 산업통상자원부(2015), 그래핀 사업화 촉진 기술 로드맵
- [2] K. Sanghoon, K. Myeong-Gi, et. al.(2014), *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 6, 17647-17653
- [3] A. Chavez-Valdez, M. S. P. Shaffer, and A. R. Boccaccini(2013), *J. Phys. Chem. B*, 117, 1502-1515





**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# 구두발표 I





# 비접촉 동력전달용 자기장치 성능예측을 위한 해석법

최장영<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교

## 1. 서론

전동기의 토크를 기계적 부하에 전달하기 위해서는 기계적 커플링 혹은 기어를 사용하여, 모터와 부하의 축을 물리적으로 접촉하여 연결해야 한다. 그러나 반도체 제조 장비 등, 응용 처에 따라 비접촉으로 동력을 전달해야만 하는 경우, 영구자석을 사용한 커플링 혹은 기어등이 대안이 될 수 있다. 이 외에도, 이러한 자기장치는 기계적 장치에 비해 유지보수, 효율, 토크전달 메커니즘 측면에서 장점을 보유하고 있기 때문에, 그 사용영역이 넓혀져, 기존의 기계적 커플링 혹은 기어를 빠르게 대체할 수 있을 것으로 기대된다 [1-2].

본 연구에서는 대표적인 자기 커플링과 기어에 대한 구조를 언급하고, 각 구조별 해석방법에 대해 제시한다. 최근 상용 유한요소 해석프로그램의 발달과 컴퓨터 계산 속도의 향상으로 인해, 전기기기의 해석 및 설계에 유한요소법이 주로 이용되고 있으나, 이 해석법은 설계변경이 빈번한 초기 설계단계에서는 여전히 많은 시간과 노력을 요한다. 따라서 본 연구에서는 공간고조파법과 같은 해석적 방법을 이용하여, 다양한 종류의 자기장치들을 해석하는 방법에 대해 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법과 결과

본 연구에서는 공간고조파법을 이용하여 다양한 자기장치에 대한 자계특성 및 토크 특성 해석에 대한 방안을 제시하고, 실험 및 유한요소해석법에 의한 결과와의 비교를 통해 해석의 타당성을 확보하고자 한다. 본 연구에서 다루진 자기장치의 종류 및 범위는 다음과 같다.

- 축자속 타입 자기 커플링
- 반경방향 자속 타입 자기커플링
- 싸이클로이드(Cycloid) 자기 기어
- 스퍼(Spur) 자기 기어

해석결과는 2D 유한요소 해석결과와 매우 잘 일치하므로, 해석방법의 타당성이 입증되었다고 판단된다. 다만, 3D 유한요소 해석결과 및 실험결과와의 오차가 존재하는데, 오차에 대한 원인과 이 오차를 줄일 수 있는 해석적 방안을 강구하는 것이 필요하다.

## 3. 결론

본 연구에서는 다양한 자기장치에 대한 구조를 제시하고, 제시된 모델에 대한 해석방법에 대해 제시하였고, 제시된 해석법은 실험 및 유한요소해석법에 의한 결과에 의해 타당성이 입증되었다. 따라서, 각 자기장치의 설계최적화를 위해, 해석적 방법을 이용한 설계변수에 따른 민감도 해석을 수행할 수 있게 되어, 초기설계에 대한 시간과 노력을 줄 일 수 있다.

## 4. 참고문헌

- [1] J. Charpentier and G. Lemarquand, "Optimal design of cylindrical air-gap synchronous permanent magnet couplings," IEEE Trans. Magn., vol. 35, no. 2, pp. 1037–1046, 1999.
- [2] R. Ravaut, V. Lemarquand, and G. Lemarquand, "Analytical design of permanent magnet radial couplings," IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 11, pp. 3860–3865, 2010.

## 습식공정에 의한 Nd-Fe-B 분말 제조에 관한 연구

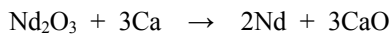
최철진\*, 서영택, 왕 잉, 김동수

한국기계연구원 부설 재료연구소

Since Nd-Fe-B magnet was first discovered by Sagawa et al [1], many kinds of methods have been developed to fabricate, such as powder metallurgical, rapidly quenching and reduction-diffusion (R-D) processes. Nowadays, powder metallurgical and rapidly quenching methods are commonly used. But both of them need several processes for achieving fine particles and increase the production cost due to the use of high purity metals as raw materials. Compared with above methods, main ad-vantages of our proposed process are the use of a relatively inexpensive Nd oxide as raw material and the direct production of fine alloy powder suitable for further procedures. In this study, a novel route to prepare Nd-Fe-B magnetic particles by utilizing mechanochemical and R-D process was proposed.

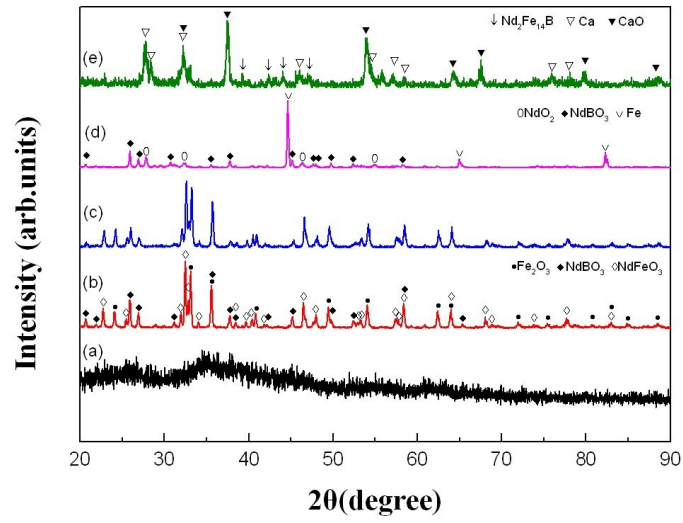
Precursors were prepared by spray drying method using the aqueous solutions containing Nd salt, Fe salt and boric acid with stoichiometric ratio. The spray dried powders were desalted at 800 °C for 2 h in air, followed by ball milling for 20 h. To reduce iron oxides, heat treatment of the milled powders was performed under H<sub>2</sub> atmosphere at 800 °C for 2 h. The amount of Calcium (Ca) as a reducing agent in R-D process was mixed with powders obtained by H<sub>2</sub> reduction in appropriate ratio. The R-D of the compacts was carried out at 1000 °C for 3 h in Argon (Ar) atmosphere. For the effective washing, the compact was pulverized to fine powder and the powders were washed with water several times to achieve Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B powders. The phases and the magnetic properties of the particles were examined by X-ray diffractometer, Scanning electron microscopy and vibrating sample magnetometer.

XRD patterns of each step in this procedure as shown in Fig. 1, depicted that precursors obtained by spray drying was amorphous structure due to volatile compounds and physical adsorption of elements. They were crystallized into oxides of Nd and Fe through desalting at 800 °C that was performed previously by Dong et al. [2]. And then ball milling was performed to triturate the aggregates after desalting. As shown in Fig. 1, Fe oxides were reduced to  $\alpha$ -Fe by heat treatment in H<sub>2</sub> atmosphere. After mixing and compacting with reduced powders in H<sub>2</sub> and exceeded Ca granules, R-D process was carried out. Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B particles were formed and CaO and unreacted Ca were remained. This result came from the reactions as following equations and was almost the same as references by Dong et al. [2] and Jang et al. [3].

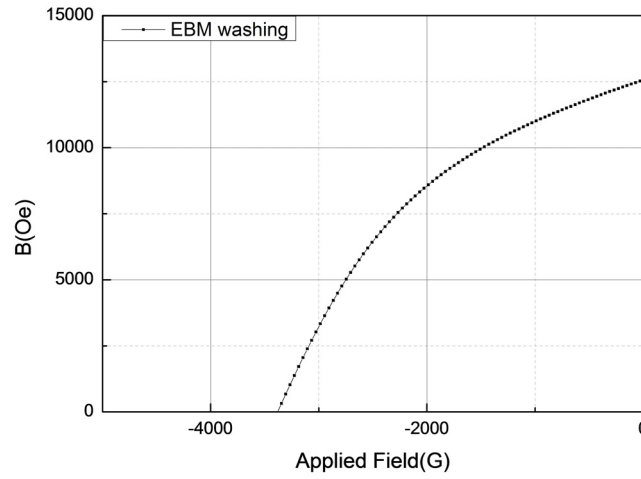


The final step of washing was performed using water to wash out CaO for 1-3 h. The washed powders of (BH)<sub>max</sub> reached 15.5 MGOe after washing for 1 h with de-ionized water.

To reduce non-magnetic phase, ball milling process under an ethanol was added in washing process. The final magnetic property was enhanced to 16.7 MGOe of (BH)<sub>max</sub> with a rectangular demagnetization shape, as shown in Fig. 2. This demonstrates that our process is a promising route for fabrication of Nd-Fe-B magnetic powders, especially for recycling of the Nd magnets. In this paper, we will present the change of phases, morphologies and magnetic properties in Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B powders in R-D process and discuss the potential application to industry.



**Fig. 1.** XRD patterns of powders after  
(a) spray-drying, (b) desalting, (c) ball milling, (d) H<sub>2</sub> reduction and (e) Ca reduction.



**Fig. 2.** Demagnetization curve of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B powder after ethanol balling milling and washing process.

## References

- [1] M. Sagawa, S. Fujimura, M. Togawa, H. Yamamoto, Y. Matsuura, J. Appl. Phys. 55 (1984) 2083.
- [2] X.L. Dong, B.K. Kim, C.J. Choi, K.S. Park, Z.D. Zhang, J. Mater. Resour. 16 (2001) 1083.
- [3] T. Jang, D.H. Lee, T.W. Lim, C.J. Choi, B.K. Kim, Int. J. Jpn. Soc. 50 (2003) 11.



# Synthesis and Magnetic Properties 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>, Sung Joon 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

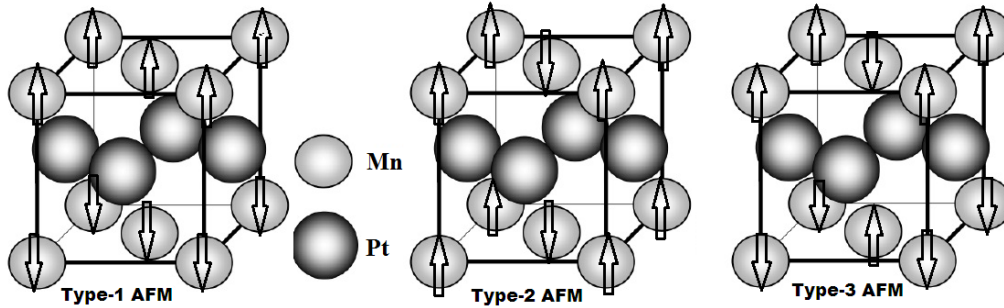
<sup>†</sup>Sang-Im Yoo, e-mail : siyoo@snu.ac.kr

The hexagonal ferrite or simply hexaferrite is a ferromagnetic oxide material that has a hexagonal crystal structure. Since its discovery in 1950s, hexaferrite has drawn a great attention of many researchers due to its low price and multitude of uses and applications. W-type hexaferrite exhibits high saturation magnetization ( $M_s$ ) about 80 emu/g and high anisotropy field ( $H_a$ ) about 19 kOe. For this reason, W-type hexaferrite has attracted attention for microwave applications. In this report, we tried to prepare Zn-substituted SrW bulk samples with the compositions of  $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  ( $0.0 \leq x \leq 2.0$ ) in a reduced oxygen atmosphere, and identify the effect of  $\text{Zn}^{2+}$  substitution on their magnetic properties. Furthermore, we tried to investigate the phase stability region change of  $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  with varying  $x$ . For these purposes, the samples were annealed at the temperature region of 1125–1350 °C for 2 h in  $PO_2 = 10^{-3}$  atm. As a result, lattice parameters of the samples increased with increasing  $x$  due to larger ionic radius of  $\text{Zn}^{2+}$  than  $\text{Fe}^{2+}$ . The saturation magnetization of the samples increased with increasing  $x$  from 0 to 1.0, and decreased from  $x = 1.0$  to 2.0 which is a similar behavior to the spinel ferrite when nonmagnetic ion of  $\text{Zn}^{2+}$  is substituted. The temperature of phase stability region of  $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  decreased with increasing  $x$ , and the width of the phase stability region remained almost constant. Detailed properties of  $\text{SrZn}_x\text{Fe}_{(2-x)}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$  W-type hexaferrite will be presented for a discussion.

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

Qurat-ul-ain\*, S. H. Rhim, and Soon Cheol Hong

Spintronics of antiferromagnets is a new and rapidly developing field of the physics of magnetism [1-3]. Even without macroscopic magnetization, antiferromagnets, similar to ferromagnetic (FM) materials, are affected by spin-polarized current, and as in ferromagnets this phenomenon is based on a spin-dependent interaction between localized and free electrons. We studied electronic structure and magnetism of an ordered binary  $L1_0$  type MnPt alloy by using density functional theory (DFT) in generalized gradient approximation (GGA). Four different magnetic configurations shown in Fig. 1 have been taken into account. For bulk MnPt we find Type-2 antiferromagnetic (AFM) ground state whose magnetic configuration is FM alignment in the inter-plane but AFM in the intra-plane, with  $c/a = 0.894$  which is in good agreement with experimental results [4-5]. In this configuration, our calculations show magnetic moment of  $3.745 \mu_B$  on Mn atom and  $0.096 \mu_B$  on Pt atom and in-plane magnetocrystalline anisotropy (MCA) energy of  $0.22 \text{ meV/atom}$ . For all the magnetic configurations, lattice parameters, magnetic moments, and MCA energies are catalogued in Table 1. In addition, MCA and magnetism of Mn-terminated and Pt-terminated thin films will also be discussed.



**Fig. 1.** Schematic diagram of Type-1 AFM, Type-2 AFM and Type-3 AFM phase for  $L1_0$  crystal structure

**Table 1.** Calculated equilibrium lattice parameters,  $a$  (Å) and  $c/a$ , magnetic moments (in  $\mu_B$ ) on Mn and Pt atom, total energy difference (in eV/atom) with respect to Type-2AFM structure and MCA energies (in meV/atom) of FM, Type-1, Type-2 and Type-3 AFM configuration in bulk. Previous Theoretical results are also given for comparison.

	Type-1 AFM		Type-2 AFM		Type-3 AFM	FM	
	Present	Previous <sup>a</sup>	Present	Previous <sup>a</sup>	Present	Present	Previous <sup>a</sup>
$a$	4.12	4.10	4.09	3.99	4.10	4.14	4.17
$c/a$	0.87	0.87	0.89	0.93	0.88	0.86	0.84
$\mu_{Mn}$	3.81	3.89	3.75	3.80	3.71	3.83	3.94
$\mu_{Pt}$	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.39	0.39
$\Delta E$	0.46		0.00		0.63	0.65	
$E^{(100-001)}$	0.17		0.22		0.30	1.24	

<sup>a</sup>Zhihong et al. [6]

## References

- [1] A. H. Macdonald Phil. Trans. R. Soc. A 369, 3098–3114 (2011).
- [2] A. B. Shick, S. Khmelevskiy, O. N. Mryasov, J. Wunderlich, and T. Jungwirth Phys. Rev. B 81, 212409 (2010).
- [3] Xavier Martí, IEEE transactions on magnetics, 51, 4 (2015).
- [4] E. Kren, C. Kádár, L. Pál, J. Sólyom, P. Szabó, and T. Tarnóczy, Phys. Rev. 171, 574 (1968).
- [5] C. S. Severin, C. W. Chen, and C. Stassis, J. Appl. Phys. 50, 4259 (1979).
- [6] Zhihong Lu, Roman V. Chepurskii and W. H. Butler Phys. Rev. B 81, 094437 (2010).

# Manipulation of magnetic state in armchair black phosphorene nanoribbon by charge doping

M. Umar Farooq<sup>\*</sup>, Arqum Hashmi and Jisang Hong

Department of Physics, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Using the first principles studies, we investigated the width dependent magnetic properties of armchair black phosphorene nanoribbons (APNRs) by controlling the electron charge doping. In the unrelaxed APNRs the antiferromagnetic coupling between two phosphorus atoms in the same edge was found. However, the edge magnetic moment vanished after structure relaxation, and all the APNRs showed a semiconducting feature. Interestingly, the charge doping substantially altered the band structures of the APNRs because the metallic states reappeared in the charge doped APNRs. Besides, the magnetic moment was found in the charge doped systems. We found that the Stoner condition could nicely explain the magnetic moment at the edge atoms. Moreover, we propose that the edge-to-edge magnetic coupling can be manipulated by charge doping because the transition from antiferromagnetic to ferromagnetic state was achieved. Our findings may bring interesting issues for spintronics applications.

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-2015-C3-021).

# Effects of the Ar pressure on the magnetic properties of amorphous Fe-Zr thin films

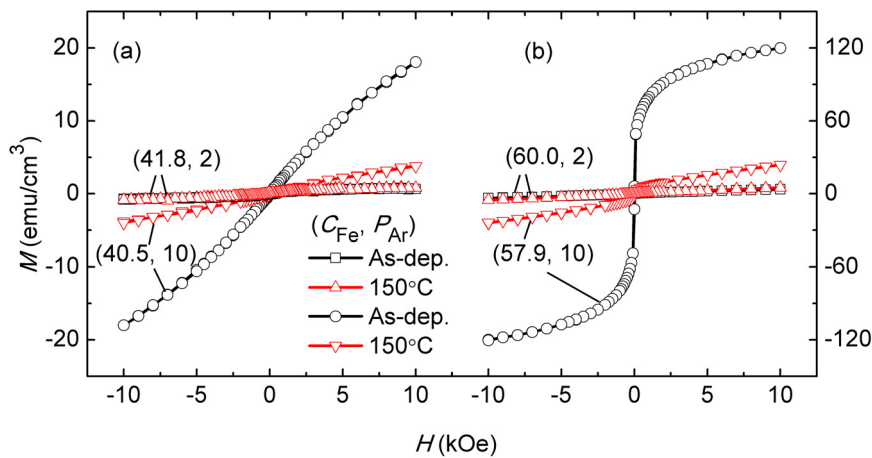
Miri Kim<sup>1\*</sup>, Nark Eon Sung<sup>2</sup> and Sang Ho Lim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Nano Semiconductor Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

<sup>2</sup>Beamline Division Engery & Environment Research Team, Pohang Accelerator Laboratory, Pohang 37673, Korea

<sup>3</sup>Department of Materials Science Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

Amorphous Fe-Zr thin film is one of promising materials for [Pt/Co]<sub>n</sub> multilayers for p-MTJ with strong PMA, which suppresses crystallization at the interface with the multilayer side during annealing.<sup>1,2</sup> It is also well known that the magnetic properties of amorphous materials are extremely sensitive to their microstructure.<sup>3,4</sup> This study deals with the change in the magnetic properties of Fe-Zr thin films depending on Ar pressure during sputtering. The thin films with the structure of Fe-Zr/Ta were fabricated on a Si/SiO<sub>2</sub> substrate by using a DC magnetron sputtering system. The sputtering conditions were fixed, except for the Ar pressure which was varied widely from 2 to 10 mTorr in steps of 4 mTorr. The composition of was controlled by varying Fe chips placed on an Fe<sub>20</sub>Zr<sub>80</sub> alloy target. The amount of Fe, relative to Zr, decreases with increasing Ar pressure due to the fact that Fe atoms which have reduced mass (55.845 g/mol) compared to Zr atoms (91.224 g/mol) are subject to stronger scattering with the Ar atoms. Magnetic properties of as-deposited samples fabricated with the same number of Fe chips were dramatically changed with increasing Ar pressure, which is shown in Fig. 1. For the as-deposited samples which were fabricated with 16 Fe chips(Fig. 1(b)), their *M* values were increased almost 20 times with increasing Ar pressure from 2 mTorr to 10 mTorr. Also, high field susceptibility was emerged with increasing Ar pressure. After annealing at 150°C, the *M* value and high field susceptibility were considerably decreased for samples fabricated at 10 mTorr, whereas only slight changes in both values were observed for samples fabricated at 2 mTorr. This indicates that samples fabricated at 2 mTorr has more relaxed microstructure than samples fabricated at 10 mTorr. The magnetic property changes depending on Ar pressure were dominated by the number of Fe cluster rather than the size of Fe cluster, which was analyzed by the Langevin fitting.



**Fig. 1.** *M-H* loops for Fe-Zr thin films for as-deposited and annealed samples.

(a) *C*<sub>Fe</sub> ≈ 40 at.% (b) *C*<sub>Fe</sub> ≈ 60 at.%

## References

- [1] T.Y. Lee, Y.C. Won, S.H. Lim and S.R. Lee, *Applied Physics Express*, 7, 063002 (2014)
- [2] D. Kim, K.Y. Jung, S. Joo, Y. Jang, J. Hong, B.C. Lee, C.Y. You, J.H. Cho, M.Y. Kim and K. Rhie, *Journal of Magnetism and Magnetic materials* 374, 350, (2015)
- [3] E.M. Chudnovsky, *Journal of Applied Physics*, 64, 5770 (1988)
- [4] M. Kim, M.H. Jung, C.M. Kim and S.H. Lim, *Physica B* (2015)

# Energy Product and Coercivity of Rare-earth free Multilayer and Bilayer FeCo/FePt and FeCo/AuCu Exchange Spring Magnet

Imran Khan<sup>\*</sup>, Jisang Hong

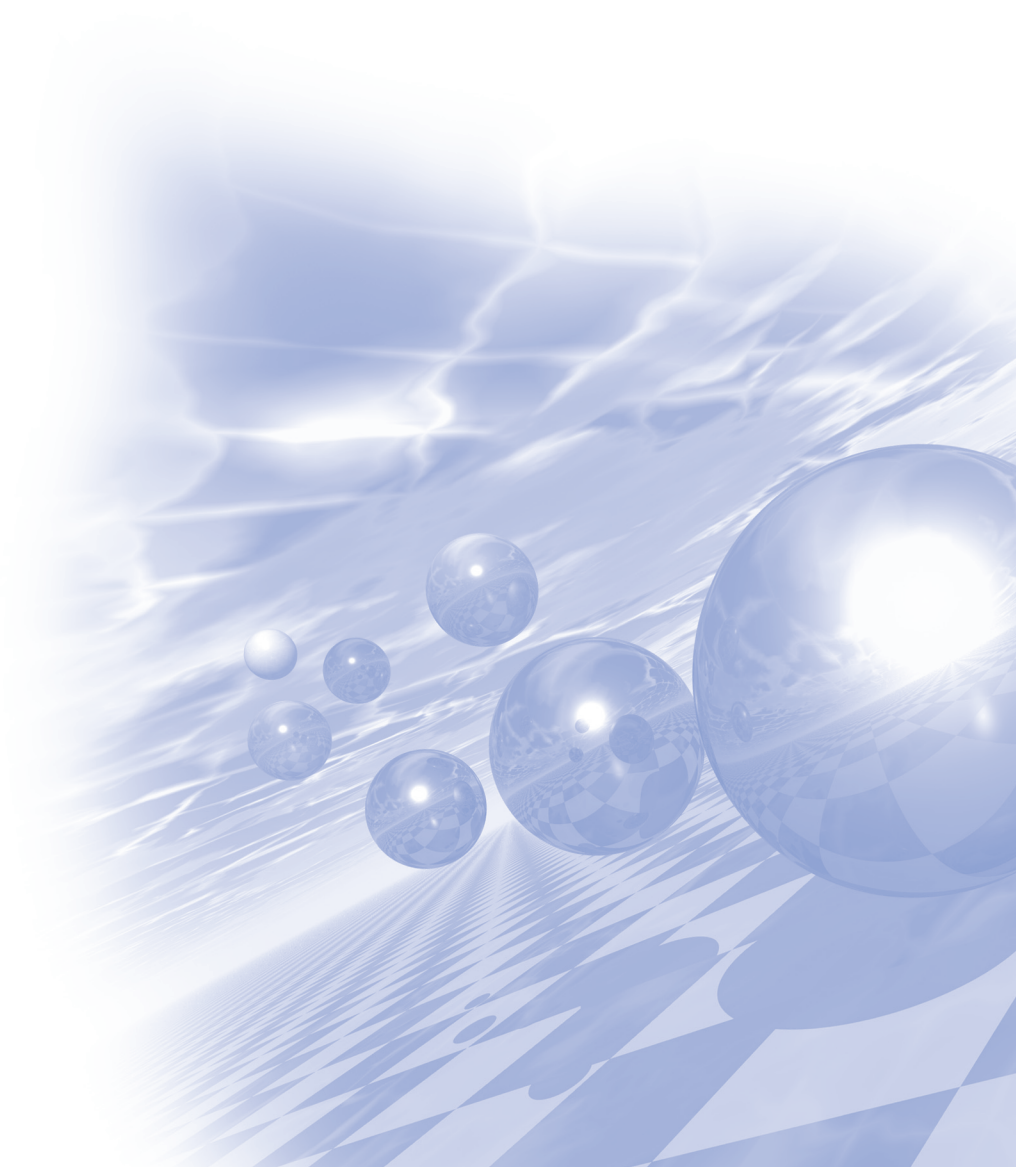
Department of Physics, Pukyong National University

Using the full potential linearized augmented plane wave (FLAPW) method, we have explored the energy product and the coercivity of rare-earth free FeCo/FePt (001) multilayered exchange spring magnet, bilayer FeCo/FePt and FeCo/AuCu systems. A giant perpendicular magnetocrystalline anisotropy energy ( $E_{MCA}$ ) is observed in multilayer and bilayer FeCo/FePt systems. For instance, an  $E_{MCA}$  of 27.24 meV/cell is found in FeCo(9ML)/FePt(5ML) multilayer structure. Besides an energy product of 82 MGOe and coercive field of 130 kOe was obtained for FeCo(9ML)/FePt(5ML) multilayer structure. In bilayer Feco (2ML)/FePt(4ML) system a very high value of uniaxial anisotropy constant of  $9.8 \text{ MJ/m}^3$  was obtained along with a 74 MGOe maximum energy product and coercive field of 143 kOe. In bilayer FeCo(5ML)/AuCu(5ML) we have obtained a uniaxial anisotropy constant of  $0.98 \text{ MJ/m}^3$ . Additionally, the estimated coercive field and maximum energy product for this system are 24.7 kOe and 25 MGOe. Both energy product and coercive field stated above imply that these systems can be utilized for potential rare-earth free permanent magnet.



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **초청강연**







# Electrical detection of ballistic spin Hall and Rashba effects in a semiconductor channel

Hyun Cheol Koo<sup>1,2\*</sup>, Won Young Choi<sup>1,2</sup>, Hyung-jun Kim<sup>1</sup>, Joonyeon Chang<sup>1</sup>, Suk Hee Han<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 136-791, Republic of Korea

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

The spin-orbit interaction in a semiconductor channel provides an exceptionally fascinating area. Coherent spin precession in a Rashba effective magnetic field in the channel of a spin injected field effect transistor (spin-FET) and the spin Hall effect (SHE) are the two most important topics in this area. The original Datta-Das prediction [1] of a gate voltage controlled conductance oscillation in a spin injected field effect transistor (Spin-FET), caused by coherent spin precession in a Rashba spin-orbit system, is the cornerstone of semiconductor spintronics research. Our previous report [2] was the first experimental observation and confirmation of the Datta-Das prediction. In this research [3], we combine spin Hall and Rashba effects to provide two novel results: a direct demonstration of the ballistic SHE and a new technique for an all-electric measurement of the Datta-Das conductance oscillation. We confirm our model of both results by fitting the measured precession spin phase of the conductance oscillation with the Datta-Das wavelength calculated using independently measured parameters. Finally, we use the original Datta-Das technique with a single inverse SHE detector and measure the channel conductance oscillation as gate voltage is varied. Our experiments show that the ballistic SHE can be used for efficient electric injection or detection of spin polarized electrons in a spin transistor or other semiconductor spintronic structures.

## References

- [1] S. Datta *et al.*, Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990).
- [2] H. C. Koo *et al.*, Science, 325, 1515 (2009).
- [3] W. Y. Choi *et al.*, Nature Nanotechnology. 10, 666 (2015).

# Spintronics with carbon-based materials

Jung-Woo Yoo<sup>\*</sup>

School of Materials Science and Engineering,  
Ulsan National Institute of Science and Technology, Republic of Korea

Recent years witnessed increasing research activity in exploiting carbon-based materials as a spin transporting channel, which introduces a new avenue for device integration and functionality. In this talk, I will present application of an organic-based magnetic/non-magnetic semiconductor as an electron spin polarizer/spin transporting layer in the standard spintronic device geometry. The application of organic small molecule films as the spin transporting layer has been studied extensively recently. However, conceptual understanding of how the spins are injected into and transport through these organic semiconductor films was still lacking. With careful study on film thickness, temperature, and bias dependencies, significant differences between tunneling and giant magnetoresistance were resolved. In addition, the room temperature organic-based magnet,  $V(\text{TCNE})_x$  was successfully incorporated into the standard magnetic tunnel junction devices in tandem with LSMO ( $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ ) film.

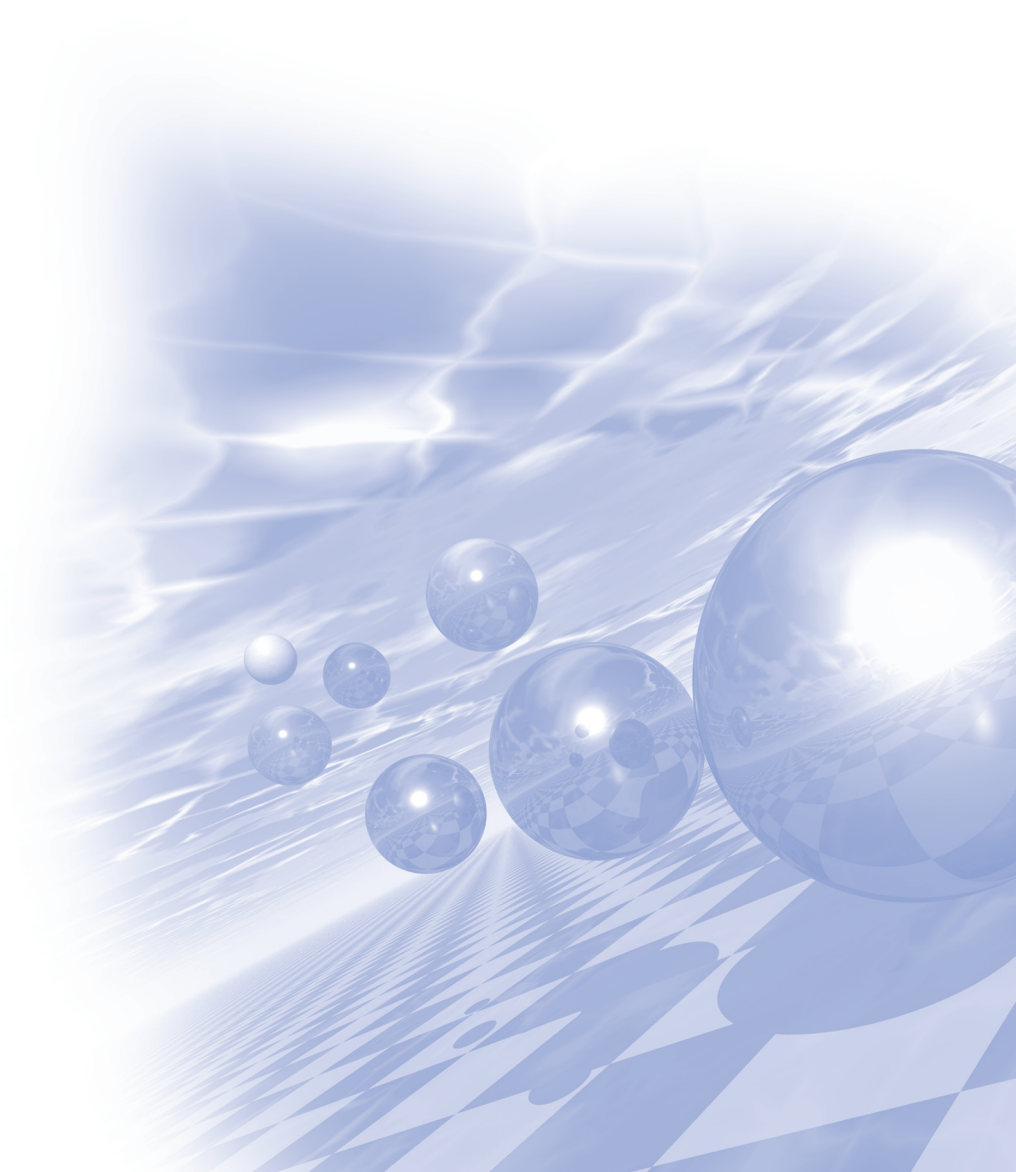
The second part of this talk will be devoted for engineering spin dependent dispersion in graphene and non-local transport study therein. Graphene has been perceived to be an outstanding material for delivering spin information due to its high electron mobility and weak spin-orbit coupling. The mandatory requirement for exploiting electron spins in graphene is facile control of spin-orbit coupling. Instilling spin-orbit coupling into graphene allows splitting and detecting electron spins via spin Hall and its inverse effect. We introduced ultrathin metal pad on graphene to enhance spin-orbit coupling and studied non-local signal to demonstrate alternative spin current generation.



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session II**

**‘연자성재료 및 응용 특별세션’**





## 무선전력전송 시장 현황 및 전망

박철균\*

삼성전기 DM사업부, 경기도 수원시 영통구매영로 150, 16674

몇년전 부터 무선전력 전송이 국제학회 또는 산업체에서 토의 되어 왔으나 최근 주요 업체에서 무선전력 전송을 스마트폰에 채용하면서 산업 전방위에 걸쳐 무선전력전송 활용에 대한 논의가 진행 되고 있다.

본 강연에서는 무선전력전송의 활용과 특히 우리 생활에 밀접한 관련이 있는 스마트폰 적용에 관련 된 사항을 중심으로 무선전력 기술에 대한 이해를 높이는데 중점을 둔다.

## 자동차 부품용 연자성 소재 개발 및 적용 동향

김형석\*, 김신규, 김영민, 정연준, 이두환

현대·기아자동차(주)

지구 온난화 문제가 세계적인 환경 문제로 대두됨에 따라 최근 각국에서는 탄소 배출량 및 연비에 대한 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 연비 개선을 위한 하이브리드 및 전기차 등의 친환경차는 자동차 메이커에 있어 선택이 아닌 필수가 되고 있다.

연자성 소재는 친환경차의 구동 모터, 전력변환시스템의 인덕터 코어 및 무선 충전 차폐재 등에 사용 중인 소재로서 크게 전기 강판, 자성 분말 및 페라이트로 구분될 수 있다. 모터 코어 소재로 주로 사용되는 전기 강판은 저주파에서 우수한 자속밀도와 철손 특성을 갖지만 강판을 적층 하는 형태로 코어를 만들 수 밖에 없어 형상 제한이 있고 고주파에서 손실이 큰 단점이 있다. 반면 연자성 소재를 적용하여 코어를 만들 경우에는 형상제한이 줄어들어 3차원 형상의 장점을 활용할 수 있다. 또한 인덕터 코어에는 자성 분말 대비 높은 투자율과 비저항을 갖는 페라이트가 코어로 주로 사용된다. 하지만 페라이트는 온도에 따라 손실값이 크게 좌우되며, 자속밀도가 낮기 때문에 시스템별 요구 특성에 따라서 상대적으로 온도에 대한 손실값의 변동이 적은 자성 분말 코어가 인덕터 코어로 일부 적용되고 있다. 이와 같이 연자성 소재를 적용하기 위해서는 각 부품의 사용 조건에 맞는 소재 물성 개선과 함께 부품 최적화를 위한 설계 및 해석 기술 또한 매우 중요하다.

본 발표에서는 각국의 환경 규제에 따라 친환경차가 갖는 중요성을 공유하고 현재 자동차 부품용 연자성소재 적용 부품 소개 및 소재 개발 방향 그리고 향후 부품 확대 적용 가능성에 대해 알아보기로 한다.

## 최신 친환경 에너지 및 전기자동차 전력 변환용 연자성 부품 동향

유봉기\*

(주)창성

최근 전력전자 반도체는 인덕터, 캐패시터와 같은 수동소자들의 크기를 줄이기 위하여 고주파 스위칭, 저손실화 되고 있으며, 친환경 에너지 및 전기자동차에 사용되는 SMPS(스위칭 모드 파워 서플라이어)의 핵심 부품이 되고 있다. 또한 전력전자 반도체의 고성능화에 따른 인덕터 부품으로 사용되는 연자성 소재의 요구 사항도 변화되고 있으며, 연자성 소재의 구조 및 조성에 따른 전력 변환용 장치에서의 인덕터 특성도 다양하다. 특히 친환경 에너지 및 전기자동차에 사용되는 태양광 인버터, 전기자동차용 OBC(on board charger), LDC(12V dc-dc converter), HDC(buck-boost converter)용 연자성 부품의 적용사례 및 특성 비교를 통하여 연자성 재료의 응용과 방향을 제시한다.



## 에너지의 효율적 사용을 위한 비정질 연자성소재의 응용

송용설\*, 양성철, 김철한

(주)아모그린텍

지속적인 에너지 사용의 증가 및 이산화탄소 방출에 의한 지구의 온난화와 환경 문제로 인하여 에너지의 효율적 사용 및 새로운 에너지원의 개발에 대해 많은 관심이 모아지고 있다. 이에 대응하기 위하여 많은 연구 및 다양한 에너지 관련 정책이 이루어지고 있으며, 소재 및 부품의 개발도 이러한 문제의 해결을 위한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다.

연자성소재는 대부분의 전기·전자기기, 특별히 전력의 전달 및 변환과 관련된 회로 부품으로 사용되고 있으며, 에너지의 안정적인 전달 및 변환을 담당하게 된다. 지금까지 연자성소재의 개발 동향은 전기·전자기기의 소형·경량화에 초점을 맞추어 진행되었으나, 최근에는 에너지의 효율적 사용 및 새로운 에너지원의 개발에 필요한 요구에 대응하는 것이 가장 중요한 개발의 방향이 되고 있다.

에너지의 효율적 사용 및 친환경 제품의 개발과 관련된 소재 중 자성소재, 특별히 연자성소재의 가장 중요한 요구 조건은 적은 자성 손실이다. 연자성소재에 있어서 에너지의 전달 및 변환은 연자성소재의 자화과정을 통하여 이루어지게 되는데, 이 자화과정에 사용되는 에너지는 시스템에서 전달되는 에너지와 관계없이 사용되는 에너지로 손실로 나타나게 된다. 즉, 에너지의 효율적 사용을 위해서는 이 자화과정에서 발생하는 연자성소재의 손실을 최소화 하여야 하는데, 최근 사용 주파수가 점차 고주파화 함에 따라 자성 손실의 문제는 더욱 크게 부각되고 있으며, 연자성소재의 박판화, 입자 및 자구의 미세화, 비저항의 증가 등이 자성 손실을 줄일 수 있는 방법으로 제안되고 있다.

급속응고법에 의해 제조되는 비정질 또는 나노결정립 연자성소재는 다른 연자성소재와 비교하여 박판화(두께 0.025mm) 및 높은 비저항( $125 \mu \cdot \Omega \cdot \text{cm}$ ) 등에 의해 와전류 손실을 최소화 함으로써 매우 적은 자성 손실을 나타내며, 수백 kHz까지의 주파수 범위에서 우수한 자기적 특성을 유지한다. 이러한 우수한 자기적 특성을 이용하여 개발된 비정질 자성코어는 태양광발전, 풍력발전, 하이브리드자동차, 전기자동차 등의 전력변환장치에 인덕터 등으로 사용되어 적은 자성손실에 의해 시스템의 효율 향상을 가능하게 하고 있다. 또한 에너지의 효율적 사용을 위하여 최근 확대 적용되고 있는 스마트그리드 시스템에서 필요로 하는 전류센서의 자성코어로 적용되어 더욱 정밀하게 에너지의 사용 및 효율을 측정할 수 있도록 하고 있다.

## 모바일용 파워인덕터의 개발 동향

안성용\*

삼성전기 중앙연구소, 경기도 수원시 영통구매영로 150, 16674

스마트폰의 슬림화, 고성능화 및 초고속 통신화가 진행되면서 다양한 기능들을 스마트폰에 적용시키고 있으며 이를 위해서 다양한 부품들이 사용되고 있다. 그 중에서 대표적인 수동소자 부품에는 인덕터, 캐피시터, 저항 등이 있으며 스마트폰의 소형화에 따라 수동소자 부품 또한 소형화가 진행되고 있다. 인덕터(L)는 콘덴서(C)와 저항(R)과 함께 전자회로를 구성하는 필수 수동부품이며, 전자제품의 입력이나 출력단에 콘덴서와 함께 사용되어 노이즈를 걸러내는 필터 역할을 담당하고 있다. 파워인덕터는 직류전류를 가했을 때 일반 인덕터보다 용량의 변화가 적은 인덕터로써 높은 효율성을 가지고 있으며 만드는 형태에 따라 적층형 파워인덕터, 권선형 파워인덕터 및 박막 파워인덕터 등이 있으며 삼성전기에서 개발한 금속자성계 박막 파워인덕터가 삼성전자 갤럭시노트 시리즈와 갤럭시S 시리즈에 적용이 되었다.

기존의 적층형 파워인덕터에서는 NiZnCu ferrite 재료가 사용되고 있으며 상대적으로 낮은 소성온도와 높은 전기 비저항, 높은 투자율, 및 화학적 안정성을 갖는 특성으로 인해 고주파용 재료로 사용되어 왔다[1-2]. 그러나 스마트폰의 기능이 다양화 및 고성능화로 인하여 고전류화 및 고효율화가 필요하게 되고, NiZnCu ferrite의 낮은 포화자화값으로 인해 상대적으로 NiZnCu ferrite에 비해 포화자화값이 큰 금속자성재료를 사용한 파워인덕터가 필요하게 되었다. 이렇게 포화자화값이 큰 금속자성분말을 이용하면 인가전류에 의한 인덕턴스변화율을 작게 할 수 있으며 high current용으로써 적합하다[3].

본 연구에서는 모바일용 파워인덕터의 개발 동향을 확인하고 전자부품 기기의 소형화 및 스마트폰의 발달로 인한 high current에서의 동작 특성이 우수한 금속자성계 파워인덕터 수동소자의 개발 방향에 대해 논의하고자 하였다.

### 참고문헌

- [1] J. Murbe and J. Topfer, *J. Electroceramics*, **15**, 215 (2005).
- [2] H. Su, H. Zhang, X. Tang, L. Jia, and Q. Wen, *Mater. Sci. Eng. B.*, **129**, 172 (2006).
- [3] H. K. Kim and S. Y. An, *J. Magnetism*, **20**, 138 (2015).

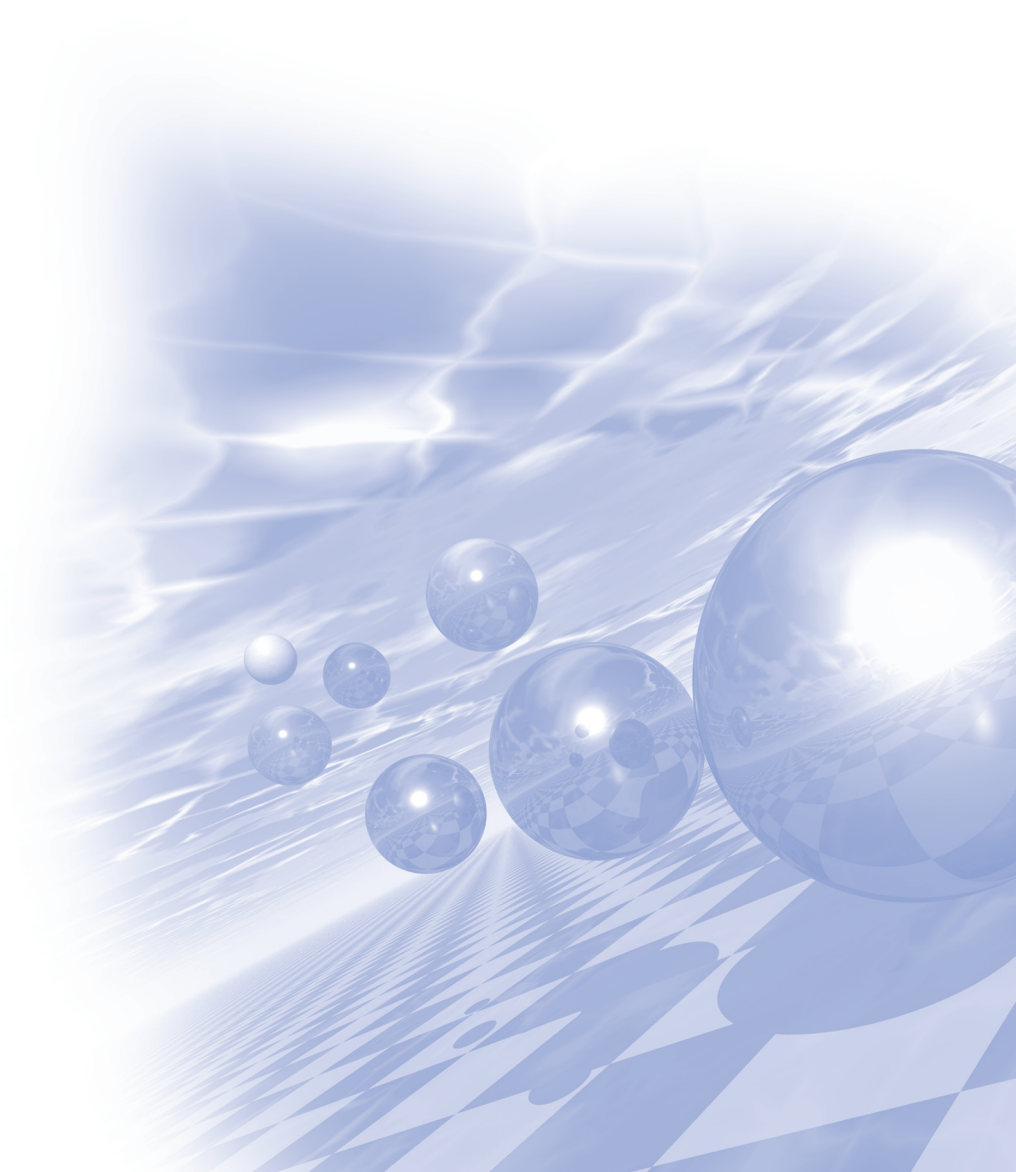




**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session III**

**‘분광기를 활용한 자성연구와 우주탐사’**





## 뫼스바우어 분광 기술을 이용한 문화재 연구

김철성\*

국민대학교 물리학과

뫼스바우어 분광 기술은 하이젠베르크의 불확정성 원리를 만족하는 기술로써 초미세 자기장, 전기장 기울기, 이성질체 이동치, 초상자성 공명진동수 등 물질의 미세적인 자기적 특성과 원자핵의 미세한 상호작용에 따른 에너지 준위의 차이에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 뫼스바우어 분광 기술은 Zeeman 효과를 이용하여 핵 주위의 초미세 자기장을 구할 수 있으며, 철의 특성을 정량적으로 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 문화재 중에서도 고려청자의 경우, 고유한 색도에 영향을 주는 유약에 함유되어 있는 철의 분포에 따른 미세한 차이와 철 이온의 산화 상태 비율( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ )에 따른 색도 차이를 확인할 수 있으며, 철의 이온 상태를 전자기 상호작용에 따라 분석할 수 있다. 또한, 소성분위기 조건에 따른 철 이온의 산화 상태 비율에 대한 정확한 정보를 토대로 청자를 재현할 수 있는 분석 방법을 제공하는 것이 가능하다. 뫼스바우어 분광 측정 기술은 우리나라의 고유한 단청에 철 이온 상태를 결정하는 중요한 방법이다.

## Infrared Spectrum of the Lunar Surface

Young-Jun Choi\*

Space Korea Astronomy and Space Science institute (KASI)

It was well known, since Apollo human exploration, that the Moon has no water results from high temperature condition when originated from giant impact hypothesis. Modern observations, such as neutron spectrometer, however, present indirect evidence that water ice could exist, in particular, at its polar region. Because rotational axis of the Moon is almost perpendicular to the Sun, craters at north/south pole, containing water ice results from cometary impact, will never be heated by solar radiation. Recently Moon Mineralogy Mapper (M3), which is onboard instrument of Chandrayaan, Indian lunar explorer, obtained the global map of hydroxyl and/or water ice of the lunar surface. Due to the limitation of wavelength coverage of M3, unfortunately, direct detection of water ice absorption band near 3.1  $\mu\text{m}$  was not possible. Infrared spectrometer whose wavelength covers up to 4  $\mu\text{m}$  will give us direct evidence of water ice.

## Solar Neutrino Detection Technology As a Probe to the Inner Structure of Heavenly Body

Gwang-Min Sun\* and Bo Young Han

Neutron Application Technology Division, Korea Atomic Energy Research institute (KAERI)

Neutrinos are universal particles emitted from stars and especially our sun emits the solar neutrinos radially outwards like a point radiation source. The neutrinos have three flavors (electron, mu and tau), which act like three colored lights for imaging. Neutrino tomography for the heavenly body, which is very challenging, is just being devised for the study of inner structure of our earth and moon. For the detection of the solar neutrinos, the p-type point contact germanium detector seems to be most promising sensor based on the neutrino-nuclear coherent scattering. The recoiling germanium atom gives its kinetic energy ranged from 10 to 100 eV to the sensor material, which informs us the energy and the flavor of the detected neutrino to reconstruct the inner structure of the heavenly body. The theoretical study of this idea is underway to calculate and expect the attenuated and oscillated solar neutrino intensities during the penetration into the massive moon medium based on the MSW theory.



## Development Status of Korean Radioisotope Thermoelectric Generator

Jintae Hong<sup>\*</sup>, Kwang-Jae Son, Jong-Bum Kim,  
Jong-Han Park, Jin-Joo Kim, and Young-Rang Uhm

Department of Hanaro Utilization and Research, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

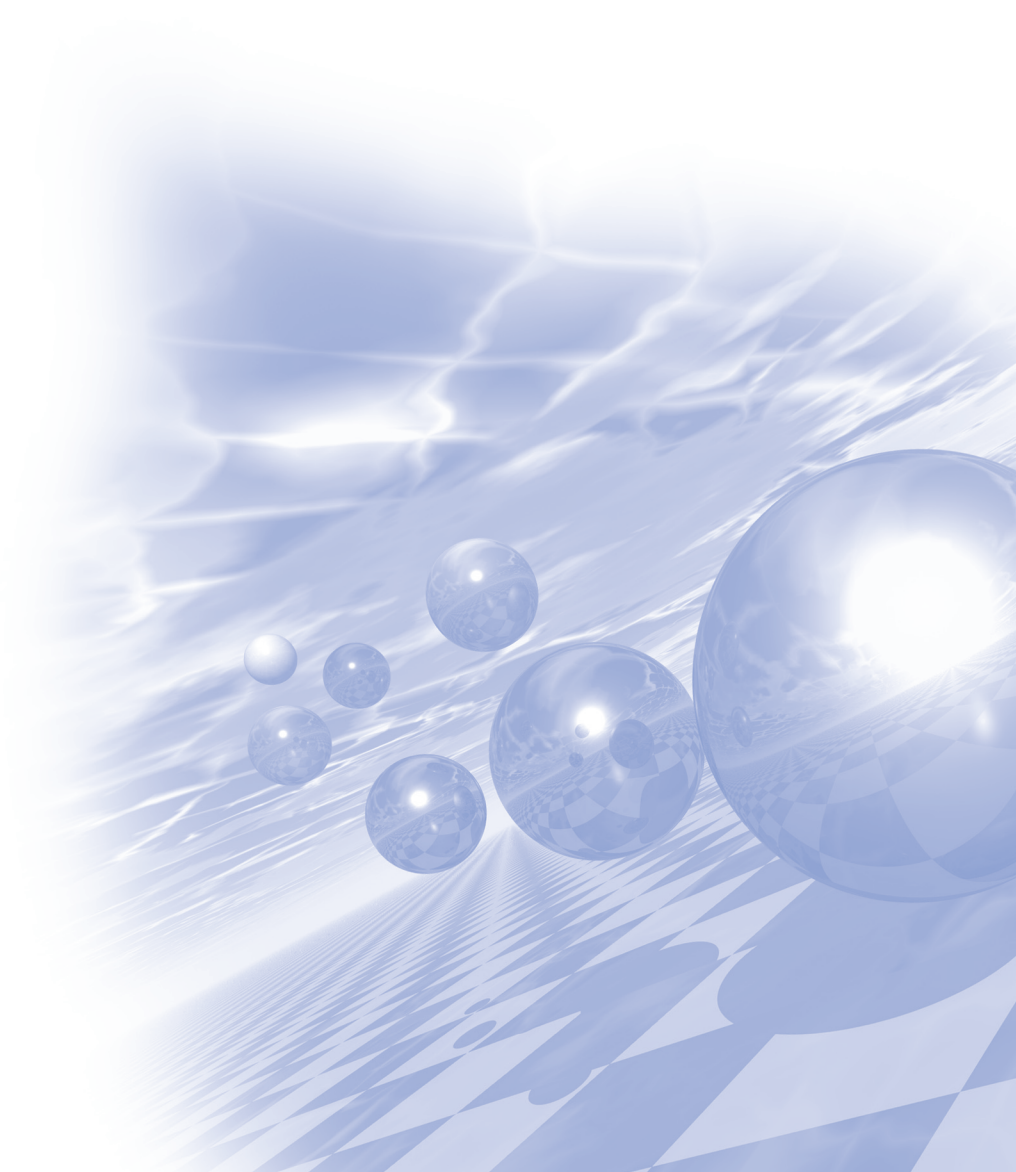
Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG) is one of the most promising power sources which generate stable electricity in a tough environment such as space, deep sea, and arctic area owing to its high reliability and long lifetime. Therefore, RTGs have been applied in many space missions of USA, Russia, and so on. Recently, Korean government announced a plan for lunar exploration, and Korea Atomic Energy Research Institute has been started researches about RTGs to supply electric energy for the lunar lander or the rover. In the RTG, because decay heat of radioisotope is converted to electric energy, technologies for fabrication and treatment of radioisotope, radiation shield, thermoelectric material, shock protection, and heat insulation should be considered. KAERI tested several RTG designs by referring to the designs of USA and Russia, and found out design variables which affect the efficiency of thermoelectric conversion. Then, a simulator which analyzes the efficiency of thermoelectric conversion has been developed, and its performance was verified with several sample tests. Finally, a new RTG was designed for 100 watts of heat input, which uses BiTe type as a thermoelectric material. In this study, development status of RTG and future works will be introduced.



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session IV**

**‘First-principles calculations:  
Magnetism and beyond’**





# Modification of magnetism in transition-metal thin films by external electric field

Kohji Nakamura<sup>\*</sup>

Department of Physics Engineering, Mie University, Japan

Electric-field (E-field) induced modification of magnetism in transition-metal thin films has received much attention as a potential approach for controlling magnetism at the nano-scale with the promise of ultra-low energy power consumption. It was originally reported that the coercivity of thin films, FePt and FePd, was reversibly varied by the application of a voltage, and the magnetocrystalline anisotropy (MCA) of the 3d transition-metal thin films with MgO interfaces was controlled by a voltage, thus opening a new avenue towards MgO-based magnetic tunnel junction electronics. However, continuing challenges still remain for understanding an E-field modification of the Curie temperature ( $T_C$ ) and, more recently, for the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) of thin film ferromagnets. Here, from first-principles calculations by using the full-potential linearized augmented plane wave method, the E-field-induced modifications of magnetism, namely the MCA,  $T_C$  and DMI, were demonstrated for prototypical transition-metal thin films with perpendicular magnetic easy axis, a freestanding Fe monolayer and a Co monolayer on Pt(111).[1] The results predict that a change in the screening charge density at surfaces/interface due to the E-field, which causes a small change in band structures around the Fermi energy, gives rise to the modification of the MCA energy. The applied E-field further modifies the magnon (spin-spiral formation) energy, which leads to modification of the Heisenberg exchange parameters, i.e., the  $T_C$ . The DMI, calculated by the second variation SOC method, was modified by the E-field.

[1] K. Nakamura et.al., PRL102, 187201 (2009); M. Oba et. al., PRL114, 107202 (2015).

# DFT study for novel noncollinear magnets

Tatsuya Shishidou<sup>\*</sup>

ADSM, Hiroshima University, Japan

Noncollinear magnetism (NCM) has been a very active research field. It is known that the emergence of NCM may provide unusual physical properties such as anomalous transport properties in metals and ferroelectric polarization in insulators. NCM includes the magnetic skyrmions and the chiral spin solitons, which are extensively studied now.

In this talk we will pick up two materials exhibiting NCM,  $\text{PdCrO}_2$  and  $\text{Cr}(\text{NbS}_2)_3$ , and will see how important the theoretical study based on the density functional theory (DFT) is to understand their physical properties.

$\text{PdCrO}_2$ [1] crystallizes in the delafossite structure, which is made of alternating stack of triangular layers of Pd and Cr. The  $\text{Cr}^{3+}$  localized moments ( $S=3/2$ ) show antiferromagnetic ordering at  $T_N=37.5\text{K}$ , forming 120 degree noncollinear spin structure. Due to the Pd 4d electrons it shows metallic conductivity bearing strong two-dimensional anisotropy. At temperatures lower than  $T_N$ , unusual Hall resistivity was measured[2]. It displays very strong dependence on the temperature and external magnetic field. Its microscopic mechanism has been unclear for a while. We carried out first-principles DFT calculations and measurements of de Haas-van Alphen oscillations[3]. We found that the Fermi surface reconstruction and the magnetic breakdown at high fields play essential role in the Hall resistivity.

The layered intercalated compound  $\text{Cr}(\text{NbS}_2)_3$  has been attracting extensive interest. The Cr local moments, whose directions are confined in the  $c$ -plane, show a spiral magnetic structure of very long periodicity ( $L=48\text{nm}$ ) with a handedness being in a one-to-one correspondence to the crystal chirality. It has been theoretically predicted [4] and experimentally confirmed [5] that a small external magnetic field perpendicular to the  $c$ -axis can lead to an emergence of a noble chiral spin soliton lattice. In accord with this intriguing soliton formation, an anomaly in the electrical conductivity has also been observed [6]. In the talk, we will present our DFT calculations and discuss the crystal chirality, fundamental electronic structure, magnetocrystalline anisotropy, and various magnetic interactions between the Cr moments.

## References

- [1] H. Takatsu, H. Yoshizawa, S. Yonezawa, and Y. Maeno, Phys. Rev. B **79**, 104424 (2009).
- [2] H. Takatsu, S. Yonezawa, S. Fujimoto, and Y. Maeno, Phys. Rev. Lett. **105**, 137201 (2010).
- [3] Jong Mok Ok, Y.J. Jo, Kyoo Kim, T. Shishidou, E. S. Choi, Han-Jin Noh, T. Oguchi, B. I. Min, and Jun Sung Kim, Phys. Rev. Lett. **111**, 176405 (2013).
- [4] J. Kishine, I. V. Proskurin, and A.S. Ovchinnikov, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 017205.
- [5] Y. Togawa, T. Koyama, K. Takayanagi, S. Mori, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, A.S. Ovchinnikov, and J. Kishine, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 107202.
- [6] Y. Togawa, Y. Kousaka, S. Nishihara, K. Inoue, J. Akimitsu, A.S. Ovchinnikov, and J. Kishine, Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 197204.

# Spin-Orbit-Coupling induced Anisotropy effects in Antiferromagnets

Alexander B. Shick<sup>\*</sup>

Institute of Physics, ASCR, Prague, Czech Republic

The tunneling magnetoresistive effects which couple electrical transport with magnetization orientation are the cornerstone of spintronics.

While in ferromagnets these phenomena have more than 150 years of history, and are routinely accessible due to the broken time reversal symmetry of the ferromagnetic state, they have been elusive in anti-ferromagnets (AFMs) with compensated moments.

Replacing ferromagnetic electrodes with antiferromagnets (AFMs) is an attractive prospect which may lead to ultrafast and ultrahigh-density spintronics.

Based on high-accuracy relativistic density functional theory calculations I will discuss the tunnelling anisotropic magnetoresistance (TAMR) phenomena in AFMs. I will consider as examples  $\text{Mn}_2\text{Au}$  [1] and  $\text{MnIr}$  [2] bimetallic anti-ferromagnets, as well as anti-ferromagnetic semiconductor  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  [3]. Large magnitudes of the spin-orbit-coupling induced magnetic anisotropy energies and anisotropies in the density of states can open the route to use these materials in the nanoscale AFM spintronics devices.

## References

- [1] A. B. Shick, S. Khmelevskyi, O.N. Mryasov, J. Wunderlich, and T. Jungwirth, Phys. Rev. B 81, 212409 (2010).
- [2] Park, B. G. et al., Nat. Mater. 10, 347 (2011).
- [3] I. Fina et al., Nat. Comm. 5, 4671 (2014).

## Materials with large MCA and design principles of large MCA

S. H. Rhim<sup>\*</sup>, Soon-Cheol Hong, and Soyoung Jekal

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

We review here recent studies on MCA, more specifically, Fe/MgO, FeRh films, and Fe layer with transition metal capping using first-principles calculations. While d-d hybridization between Fe and transition metals enlarges spin-orbit matrix, the large MCA found in Fe/MgO can be attributed to perfect epitaxy of the interface rather than widely accepted hybridization between Fe and O. Furthermore, design principles of MCA will be presented relying on the irreducible representation of crystal symmetry. Some other spin-orbit related phenomena, Dzyaloshinskii-Moriya interaction, are discussed briefly within scheme of density functional theory.

# Composition and temperature dependent electronic structures of $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$ alloys: First-principles dynamical mean field theory approach

Chang-Youn Moon<sup>1</sup>, Hanhim Kang<sup>2</sup>, Bo Gyu Jang<sup>2</sup>, and Ji Hoon Shim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Materials Genome Center, Korea Research Institute of Standards and Science,  
Yuseong, Daejeon 305-340, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Chemistry & Physics, Division of Advanced Nuclear Engineering,  
Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

We investigate the evolution of the electronic structure of  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  alloys with varying the temperature and composition  $x$  using the combined approach of density-functional theory and dynamical mean-field theory. Adopting realistic alloy structures containing S and Se dimers, we map their electronic correlation strength on the phase diagram and observe the metal-insulator transition (MIT) at the composition  $x = 0.5$ , which is consistent with the experimental measurements. The temperature dependence of the local magnetic susceptibility is found to show a typical Curie-Weiss-like behavior in insulating phase while a constant Pauli-like behavior in metallic phase. The comparison of the electronic structures for  $\text{NiS}_2$  and  $\text{NiSe}_2$  in different lattice structures suggests that the MIT in this alloy system can be classified as a bandwidth-control type, where the change of the hybridization strength between Ni  $d$  and chalcogen  $p$  orbitals is the most important parameter.



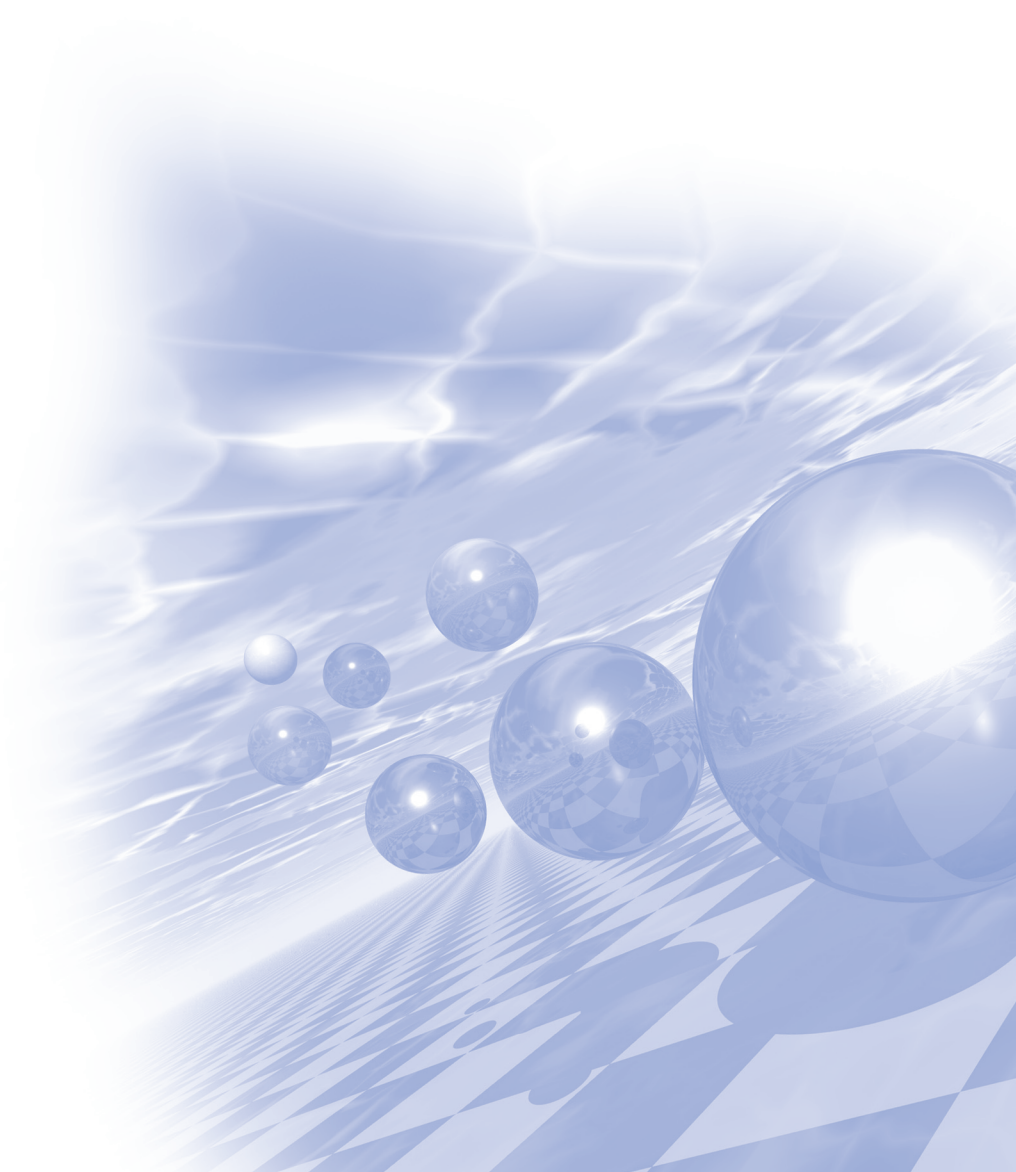




**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session V**

**‘NMR 및 바이오자성 분야’**

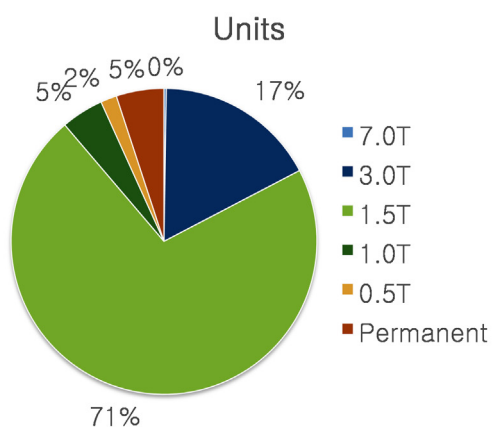




# MR 최신 Trend 및 검사 기법의 이해

GE헬스케어 시스템  
발표자 - 오원석 차장

## Current Status of MR in KOREA



Tesla	Units	Percent (%)
7.0T	2 + 1	0
3.0T	210	17%
1.5T	877	71%
1.0T	55	5%
0.5T	21	2%
Permanent	62	5%
Total	1225	100%

( GE & SIEMENS & PHILIPS Data only - 2015년 7월 )

## Bore Size 1.5T



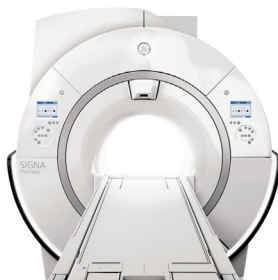
60cm Bore Size  
(99%)

## Bore Size 3.0T



60cm Bore  
Size 49%

70cm Bore  
Size 51%



# CT의 최신 동향: MDCT 및 선량저감기술의 발전

김선규\*

도시바 메디칼 시스템즈 코리아

## 1. 서론(도입)

CT (전산화 단층 촬영, Computed Tomography)는 여러 각도에서 X선 촬영 기법으로 얻은 인체 내부의 투영 데이터(Projection data)를 컴퓨터로 재구성하여 단층영상을 생성하는 기술이다. 인체 내부 장기, 뼈, 연조직 및 혈관에 대해 일반 X선 촬영에 비해 해상도가 우수하고 많은 정보를 알려준다. 1972년 최초로 상용화된 CT는 하나의 단면 영상을 재구성하기 위해 필요한 투영데이터를 촬영하는 시간만 해도 수십 분 정도였다. 지난 40여 년간 CT는 촬영 속도 개선의 측면에서 비약적인 발전을 이루었다. 1990년대 다중 검출 CT (MDCT, Multi-detector row CT)가 개발되면서 검사시간속도와 기능이 크게 향상되었고 다양한 임상적 활용이 가능해졌다. 현재까지 MDCT는 심장 전체를 촬영하는 데 1초 이내로 충분하며, 흉부 전체 영상을 삼차원으로 재구성하는 데 필요한 시간은 수 분 이내이다. 폐종양과 같은 지름 2mm 정도의 인체 내 작은 구조물도 호흡에 의한 흔들림 없이 촬영할 수 있게 된 것이다.

한편 MDCT가 도입되면서 기하학적 반음영 부분에 노출된 방사선이 노출되고 3차원 영상을 만들어내기 위하여 더 얇은 두께의 영상을 얻게 되어 선량이 증가될 수 있고 조영제 주입 후 다중 위상 촬영이 보편화되고 한번에 더 넓은 부분을 촬영할 수 있게 되어 환자가 받는 선량이 증가하게 된다. 불필요한 선량을 감소시키기 위해 다양한 하드웨어와 소프트웨어를 이용한 방법들이 발전되어 왔다. 이 논문에서는 MDCT의 원리 및 동향과 선량저감 기법에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 실험방법과 결과 (MDCT 원리 및 동향/선량저감 기법)

MDCT는 여러 개의 row(열)로 구성된 detector의 array를 이용하여 한 번의 주사로 여러 절편의 정보를 한꺼번에 얻을 수 있는 기계로 검사 범위의 확대로 CT의 진단능력이 크게 향상되었고, 3차원 영상, 가상내시경, 관상동맥 묘사 등 CT 혈관조영술이 보편적으로 적용 가능하게 하였다. MDCT는 같은 조영제의 양으로 넓은 부분을 검사할 수 있고, 역동적(Dynamic) 영상에서 동맥기와 정맥기를 명확히 구별할 수 있으며, 보다 향상된 z축 해상력으로 우수한 3차원 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 4, 8, 10, 16 detector row CT가 개발되면서, CT는 진단방사선영역에서 중요한 역할을 담당하게 되었고, 32, 40 detector row CT가 소개되면서 그 영역은 확대되었다.

Toshiba, GE, Siemens, Philips 등 4대 주요 MDCT 제조사들은 2004년부터 일제히 64-detector CT를 시장에 내놓고 경쟁적으로 제품을 출시해 왔다. 최근에 Toshiba는 이중 슬라이스 기법 (Double slice technique)이 탑재된 “Aquilion ONE ViSION EDITION”이라는 320 detector row CT (640-slices 가능)을 출시하였다. 이 장비는 한 번의 스캔으로 16cm의 범위를 영상화할 수 있고 “Dynamic volume scanning” 또는 “Functional imaging”이 가능하다. GE는 256-detector row CT인 “Revolution CT”를 출시하였고, Siemens는 2006년 이중 선원 CT (Dual Source CT)인 “Somatom Force”를 출시하였고, Philips는 “IQon Spectral CT”를 출시하여 현재까지 영역을 넓히고 있다.

MDCT 발전에 따라 선량을 저감시키는 방법들을 소개한다. 하드웨어를 이용한 방법에서는 갱트리 (Gantry), 검출기 (Detector), 콜리메이터(Collimator) 등을 소개하였고, 소프트웨어를 이용한 방법은 전처리 (Preprocessing) 및 후처리 (Postprocessing) 영상처리 기법을 소개하였다. 특히 Toshiba의 AIDR 3D와 Siemens의 SAFIRE 등과 같이 요즘 많이 쓰이고 있는 반복복원 재구성 기법(IR, Iterative reconstruction)을 소개하였다. CT

제조사들은 기존 영상재구성 기술인 필터 보정 역투영법(FBP, Filtered back projection)에서 한 단계 진화한 원시 데이터 (Raw data) 기반의 반복복원 재구성기술을 활발히 개발해 왔다. 이 기술은 CT 촬영으로 얻은 영상을 만들어지기 전의 미보정 데이터 영역에서도 통계학적 확률 모델 등 기초 자료를 기반으로 연산을 반복해 영상을 재구성하는 보정기술이다. 제조사마다 다르지만 IR을 이용하면 기존 FBP보다 선량을 60~80% 감소가 가능한 것으로 알려져 있으며 동시에 공간 분해능을 개선시키고 잡음을 감소시키는 것이 가능하다.

또한 이러한 하드웨어와 소프트웨어를 통합하여 저선량 프로토콜 기반 작업 흐름 (Low dose protocol-based workflow)은 적절한 관전류(mA), 관전압 (kVp), 자동관전류조절(AEC, Automatic exposure control), IR 등을 선택하여 프로토콜을 최적화시킬 수 있다. 진단에 적합한 영상의 화질을 유지하며 가능한 가장 낮은 수준의 선량을 유지할 수 있다.

### 3. 고찰 및 결론

CT는 인체 내부 장기, 뼈, 연조직 및 혈관에 대해 일반 X선 촬영에 비해 해상도가 탁월하고 더 많은 정보를 알려준다. MDCT의 발전으로 검사시간이 단축되고 검사영역이 확대되었으며, 진단적 가치가 크게 향상되어 의사들이 더 용이하게 암, 심혈관 질환, 감염성 질환, 외상 및 근골격계 질환 등의 문제를 진단하는 것이 가능하다. 또한 하드웨어와 소프트웨어 및 임상 workflow와의 통합으로 인해 환자의 선량 저감이 가능하며, 제조사마다 차이가 존재하지만. 영상의 화질의 저하 및 진단학적 가치의 소실을 야기하지 않는 범위에서 충분히 낮은 선량으로도 촬영이 가능하다.

### 4. 참고문헌

- [1] Goldman LW, 2007, Principles of CT and CT technology, J Nucl Med Technol, 35(3): 115-128
- [2] Anas Alani et al. 2014, Recent Improvement in Coronary Tomography Angiography Diagnostic Accuracy, Clin Cardio 37 (7): 428-433
- [3] Cynthia H et al, 2009, Strategies for Reducing Radiation Dose in CT, Radiol Clin North Am.; 47 (1): 27-40
- [4] ICRP, 2007 Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT). ICRP Publication 02. Ann. ICRP 37 (1).
- [5] John M Boone. 2006, Multidetector CT: Opportunities, Challenges, and Concerns Associated with Scanners with 64 or More Detector Rows. Radiology, 241 (2): 334-337

# CT 조영제가 방사선치료계획에 미치는 영향

장재욱<sup>1\*</sup>, 한만석<sup>2</sup>, 전민철<sup>3</sup>, 서선열<sup>4</sup>, 배석환<sup>5</sup>, 황도근<sup>6</sup>

<sup>1</sup>충남대학교병원 방사선종양학과, <sup>2</sup>강원대학교 방사선학과

<sup>3</sup>충남대학교병원 영상의학과, <sup>4</sup>울지대학교 방사선학과

<sup>5</sup>건양대학교 방사선학과, <sup>6</sup>상지대학교 한방의료공학과

## 1. 서론

최근 방사선치료는 전산화단층영상(CT, Computed Tomography)을 방사선치료계획(RTP, Radiation Therapy Planning)에 활용하여 치료계획표적용적(PTV: Planning Target Volume)을 비롯한 관심영역(ROI, Regions Of Interest)을 설정하고 있다. CT 영상은 표적용적 및 내부 장기의 모양과 위치, 인체 조직의 밀도를 보정 할 수 있으며, 3차원 입체조형 방사선치료(3D CRT, 3Dimension Conformal Radiation Therapy)가 가능한 이점이 있다. 대부분의 RTP에서 ROI 설정 시 종양과 인접 장기들의 구분을 용이하도록 조영증강을 실시한 CT 영상(CE, Contrast Enhancement)을 활용하게 된다. CT조영제는 체내에서 인위적인 대조도 차이를 만들어 HU(Hounsfield Unit)의 변화를 만들게 되고 이는 조직의 물리적밀도와 전자밀도(ED, Electron Density)를 변화시키게 되며 RTP의 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에 CT조영제에 의한 RTP의 오차를 측정하고 그 오차를 줄일 수 있는 방법을 제시하고자 본 연구를 수행하였다.

## 2. 실험방법과 결과

### 1. 조영증강에 따른 조직의 ED 측정

움직임이 가장 적은 두경부암 환자와 골반부(전립선암) 환자를 각각 10명씩 CE에 따른 ED 차이를 측정하였다. 조영증강에 따른 환자의 ED 측정은 Pinnacle 8.0m (Philips Nuclear Medicine, 미국)을 사용 했으며, 기존의 조영증강 영상에서 ROI를 ROI import기능을 이용하여 Pre 영상에 붙여 ED를 측정하였다. 대부분의 ROI에서 ED의 증가가 나타났으며 두경부에서 차이가 크게 나타났는데 GTV를 포함한 CTV, PTV는 약 2.5%, 이하선 3.4%, 하악선 4.2%, 혀 1.1%, 경부의 척수 0.3%로 나타났으며 식도는 약 0.5% 감소하였다. 골반부에서는 1% 이내로 차이가 크지 않았으며 TV(Target Volume)은 0.75%, 림프절은 1% 방광 0.2%, 직장 0.1%, 소장 1.1%, 결장 1.6%Penile bulb는 1%로 대퇴골두는 0.1%정도 증가하였다.

### 2. 조영증강에 따른 방사선치료계획비교

IMRT치료계획은 토모테라피(Accuray, 미국) RTP system에서 CE와 Pre 영상을 이용하여 동일한 조건으로 치료계획을 실시 치료계획 결과를 비교하였고, 3D CRT는 Pinnacle 8.0(Philips nuclear medicine, 미국)에서 0, 60, 90, 120, 180, 240, 270, 300°, 8field로 치료계획을 수립하여 비교하였으며, IMRT와 3D CRT에서 선량차이는 -0.2% ~ 3.5% 정도의 차이가 발생하였으며, 선량차이도 골반부보다 두경부에서 크게 나타났다.

IMRT : 두경부에서 TV는 1.4, 0.6, 0.5%, 이하선 1.7%, 하악선 1.4%, 혀0.5%, 경부의 척수 0.1%, 식도 -0.2%로 나타났으며, 골반부에서는 TV가 0.5, 0.4, 0.2%, 림프절 0.7%, 방광 0.1%, 직장0.4%, 소장0.8%, 결장1.2%, Penile bilb 1.4%, 0.1%의 선량 차이가 발생하였다.

3DCRT : 두경부의 TV는 약 2.0, 1.3, 1.0%, 이하선은 2.5%, 하악선 3.5%, 혀 0.8%, 경부의 척수 0.1%로 나타났으며 식도는 약 0.3%, 골반부에서는 TV 1.0, 0.8, 0.5% 이내로 차이가 크지 않았으며 T림프절은 0.8% 방광 0.1%, 직장 0.1%, 소장 0.8%, 결장 1.1% Penile bulb는 1.1%로 대퇴골두는 0.1%정도의 선량 차이가 발생하였다.



### 3. 고 찰

CT조영제에 의한 ED의 차이는 두경부에서는 -0.5% ~ 4%까지 차이가 발생하였으나 골반부에서는 0.07% ~ 최대 1.5 % 의 차이가 나타났다. CE에 따른 RTP결과는 3D CRT에서 IMRT보다 큰 선량 차이가 발생하였는데 이는 치료계획의 방식의 차이에 의한 것으로 IMRT에서 CE영상을 이용한 방사선치료계획을 그대로 Pre영상에 적용한 것이 아니라 Pre영상을 다시 치료계획을 수립하였기 때문에 차이가 크지 않았던 것으로 판단이 된다. 그러나 방사선 치료시에는 CE영상에서 치료계획을 수립하고 Pre 상태에서 치료를 받기 때문에 실제 치료 시 환자가 받는 선량 차이는 이보다 클 것으로 판단이 된다.

CE에 의한 환자의 ED 차이는 약 3% 이내로 큰 차이가 없었으며, 이는 원자력안전위원회고시 ”의료분야의 방사선안전관리에 관한 기술기준“의 방사선치료기기의 출력안전성 3%, 방사선치료계획 계산 시스템의 일치도 3%내이기 때문에 CT 조영제가 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. 그러나 방사선치료계획에서 방사선 치료에 이르기 까지 여러 단계를 거치면서 수많은 계통오차들이 발생하는 만큼 이러한 오차들이 누적되면 실제 환자가 받는 선량의 변화는 일일 허용 오차보다 커질 수 있을 것 이다.

### 4. 결 론

본 저자들은 CE따른 차이가 큰 두경부 환자의 방사선치료계획에서는 Pre영상에 CE영상을 융합하여(CE영상에 ROI 설정하고 Pre영상에서 치료계획을 수립) 치료계획을 수립하는 등의 노력이 필요할 것이라고 판단된다.

### 5. 참고문헌

- [1] Rankine, A. W.; Lanzon, P. J.; Spry, N. A. Effect of contrast media on megavoltage photon beam dosimetry. Med. Dosim. 33(3):169-74; 2008.
- [2] Ramm, U.; Damrau, M.; Mose, S. Influence of CT contrast agents on dose calculations in a 3D treatment planning system. Phys. Med. Biol. 46:2631-5; 2001.
- [3] Li, H. S.; Chen, J. H.; Zhang, W.; et al. Influence of intravenous contrast medium on dose calculation using CT in treatment planning for esophageal cancer. Asian Pac. J. Cancer Prev. 14(3):1609-14; 2013.
- [4] Wertz, H.; Jakel, O. Influence of iodine contrast agent on the range of ion beams for radiotherapy. Med. Phys. 31(4):767-73; 2004.
- [5] Thomas, S.J. Relative electron density calibration of CT scanners for radiotherapy treatment planning. Br.J.Radiol. 72:781-6; 1999.
- [6] 의료분야의 방사선안전관리에 관한 기술기준. 원자력안전위원회고시 제2015-005호

# Analysis of Images According to the Fluid Velocity in Time of Flight Magnetic Resonance Angiography

Heo Young Cheol<sup>1\*</sup>, Park Cheol Soo<sup>2</sup>, Cho Jae Hwan<sup>3</sup>, Choi Jae Hyock<sup>4</sup>, Yoo Se Jong<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiological Science, hallym polytechnic University

<sup>2</sup>Department of Radiological Science, hallym polytechnic University

<sup>3</sup>Radiological Science, Hallym University of Graduate Studies

<sup>4</sup>Department of Proton Therapy Center, National Cancer Center

<sup>5</sup>The Department Diagnostic Radiology, Konyang University Hospital

In this study we evaluated that flow rate changes affect the TOF(time of flight) image in a three-dimensional TOF angiography. We used a 3.0T MR System, SENSE head coil and a non pulsatile flow rate model. The flow rate model was composed of plastic body and a polyethylene tube, tube had through the plastic body. The inner diameter of the tube was 0.211cm, the conduit area was 0.26cm<sup>2</sup>. Saline was used as a fluid injected at a flow rate of 11.4, 20.0, 31.4, 40.0, 51.5, 60.0, 71.5, 80.1, 91.5, 100.1 cm/sec by auto injector. The fluid signal strength, phantom body signal strength and background signal strength were measured at 1, 5, 10, 15, 20 and 25th cross-section in the experienced images and then they were used to determine signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio. The inlet, middle and outlet length were measured using coronal images obtained through the maximum intensity projection method.

As a result, the length of inner cavity at the flow rate of 11.4cm/sec was 2.66 mm with no difference among the inlet, middle and outlet length. We also could know that the magnification rate is 49-55.6% in inlet part, 49-59% in middle part and 49-59% in outlet part, and so the image is generally larger than in the actual measurement. Signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio were negatively correlated with the fluid velocity and so we could see that signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio are reduced by faster fluid velocity. Signal-to-noise ratio was 42.2-52.5 in 5-25th section and contrast-to-noise ratio was from 34.0-46.1 also not different, but there was a difference in the 1st section. The smallest 3D TOF MRA measure was  $2.51 \pm 0.12$  mm with a flow velocity of 40 cm/s.

Consequently, 3D TOF MRA tests show that the faster fluid velocity decreases the signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio, and basically it can be determined that 3D TOF MRA is displayed larger than in the actual measurement.

**Keywords :** TOF angiography, fluid velocity, length of inner cavity, signal-to-noise ratio, contrast-to-noise ratio

# 흉부와 복부 CT 검사 시 Care Dose 4D 사용에 따른 선량 측정과 영상 평가

석종민<sup>1\*</sup>, 허영철<sup>2</sup>, 서정민<sup>3</sup>, 권순무<sup>4</sup>, 원희수<sup>5</sup>, 장현철<sup>6</sup>

<sup>1</sup>경찰병원 영상의학과, <sup>2</sup>춘천성심대학 방사선과

<sup>3</sup>대원대학교 방사선과, <sup>4</sup>대구보건대학 방사선과

<sup>5</sup>분당서울대병원 방사선종양학과, <sup>6</sup>수성대학교 방사선과

## 1. 서론

1971년 물리학자 G. Hounsfield와 의사 J. Ambrose에 의해 의학 영상분야에 도입된 이후로 CT는 많은 임상적 적응을 보이면서 발전하여 현재는 필수적인 진단 수단의 하나로 자리 매김을 하고 있다[1]. 우리나라는 주요 OECD 국가 중 CT 설치는 3위이며 사용빈도 증가 추세가 다른 선진 국가들보다 높다. 건강보험심사평가원의 통계에 따르면 2009년에 4백 8십여 만 건에서, 이후 매년 20%정도의 증가추세를 보였다[2]. 인체의 병변을 진단하는데 사용되는 CT 검사 시 적절한 X-선 노출 검사조건(scan parameter)의 선택은 낮은 방사선량으로 우수한 영상정보를 획득할 수 있다. MDCT는 촬영시간의 단축과 해상력의 증가라는 장점이 있지만, MDCT에서 높은 해상력을 가진 영상을 구현하기 위해서는 매우 얇으면서 많은 수의 절편이 필요한데 이는 선량의 증가로 이어지는 단점이 있다[3-4].

본 연구는 128 MDCT를 이용한 흉·복부 검사에서 Care Dose 4D 시스템의 적용과 수동노출조절 방법을 이용하여 피검자의 피폭선량 변화를 비교분석 및 유효선량을 추정하고, 임상에서 피검자를 대상으로 피폭선량 경감 및 영상의 품질을 비교하여 임상 유용성을 알아보고자 한다.

## 2. 실험방법

모든 실험에서 환자 대상의 검사 프로토콜과 동일한 조건을 적용하여 Phantom 및 환자 흉·복부 검사를 실시하였고 나선형 주사 모드(helical scan mode)를 적용하였다. 검사조건은 흉부 120kVp, 40mAs, 32cm FOV, 복부는 120kVp, 150mAs, 32cm FOV이며, Standard의 재구성 알고리즘을 사용하였다. 정도관리용 Phantom은 물로 채워져 있는 CT number calibration block 팬텀 영상의 중앙에서부터 3, 6, 9, 12시 방향으로 장비의 ROI analysis 기능을 이용하여 cursor내의 평균 CT계수와 CT계수의 표준편차를 측정한다. 검사자의 영상에서는 Care Dose 4D 사용 전·후 영상을 해부학적 위치에 적용하여 흉부검사에서 Heart의 RCA, LAD, LCX, 복부의 경우 Liver에서 간엽별 8구획에서 측정 하였다. 이를 Care Dose 4D를 적용하지 않은 A군과, 적용한 B군으로 나누어 조사하여 CTDI, 유효선량, CT값, Noise값을 측정 한다. CT 검사자의 체질량지수 및 신체질량지수는 고려하지 않았다. 결과데이터는 SPSS software (SPSS 18.0, USA)로 통계학적 분석을 수행하였다.

## 3. 결과

Chest protocol을 이용한 Phantom Care Dose 4D 적용 전·후 측정 결과 CTDI 측정에서는 Care Dose 4D 적용 후  $0.88 \pm 0.40$  mGy, 적용 전  $2.70 \pm 0.00$  mGy 보다 값이 낮게 측정되었다.

abdomen protocol을 이용한 Phantom Care Dose 4D 적용 전·후 측정 결과 CTDI 측정에서는 Care Dose 4D 적용 후  $1.75 \pm 0.04$  mGy 적용 전  $10.12 \pm 0.02$  mGy 값보다 낮게 측정되었다. 또한 유효선량도 Care Dose 4D 적용 후 값이 낮게 측정되었다( $p < 0.05$ ). Noise는 적용 후  $16.429 \pm 8.12$ 로 적용 전  $5.125 \pm 0.32$ 보다 높게 측정되었다( $p < 0.05$ ). 결과적으로 Care Dose 4D 적용 후 선량은 감소되었으며 CT Number는 변화가 없었으나 Noise

는 증가하였다.

Chest 검사에서 Care Dose 4D 적용 전·후 측정 결과 CTDI 측정에서는 Care Dose 4D 적용 후  $1.71 \pm 0.31$  mGy로 적용 전  $2.70 \pm 0.00$  mGy보다 값이 낮게 측정되었다. 또한 유효선량도 Care Dose 4D 적용 후 값이 낮게 측정되었다( $p < 0.05$ ). 그리고 Noise는 적용 후 전보다 RCA에서 높게 측정되었다( $p < 0.05$ ).

Liver 검사에서 Care Dose 4D 적용 전·후 측정 결과 CTDI 측정에서는 Care Dose 4D 적용 후  $4.47 \pm 2.15$  mGy, 적용 전  $10.24 \pm 1.13$  mGy 보다 값이 낮게 측정되었다. 또한 유효선량도 Care Dose 4D 적용 후 값이 낮게 측정되었다( $p < 0.05$ ). 하지만 CT Number는 적용 전·후 값이 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). 그리고 Noise는 적용후가 전보다 Liver 8구역에서 전체적으로 높게 측정되었다( $p < 0.05$ ). 결과적으로 Care Dose 4D 적용 후 선량은 감소 되었으며 CT Number는 변화가 없었으나 Noise는 증가하였다.

#### 4. 고찰 및 결론

CT는 거듭된 발전을 통해서 진단영역에 있어서 중요한 역할을 차지하고 있다. 하지만 CT검사로 인한 높은 선량은 암을 발생시킬 수 있다고 보고되고 있다[5]. Care Dose 4D를 적용한 여러 논문에서 고정관전류 기법을 사용했을 때보다 radiation dose가 20~60% 정도 감소된다고 보고하고 있다[6].

Phantom Care Dose 4D 적용 전·후 측정 결과 Care Dose 4D 적용 후 선량은 감소되었으며 영상의 질은 변화가 없었다. 임상 검사인 Chest, Liver 검사에서도 Care Dose 4D 적용 후 선량은 감소되었으며 영상의 질은 변화가 없었다. 결론적으로 이에 Care Dose 4D를 사용 하면 환자 선량이 감소되고 영상의 화질을 저하시키지 않고 최적의 영상정보를 제공하는 것이라 사료된다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Kim Yo: Automatic exposure control in : A phantom study on dose reduction and image quality between different manufactures. Korea University 1-2, 2009
- [2] 건강보험심사평가원: 건강보험 통계연보 (2005, 2008)
- [3] Dawson P: Patient dose in multi-slice CT: Why is it increasing and does it matter Br J Radiol 77:S10-S13, 2004
- [4] Yates SJ, Pike LC, Goldstone KE: Effect of multi-slice scanners on patient dose from routine CT examinations in East Anglia. Br J Radiol 77:472-478, 2004
- [5] Brenner DJ, Hall EJ, "Computed tomography: an increasing source of radiation exposure", N Engl J Med, 357, pp. 2277-2284, 2007
- [6] Kalra MK, Rizzo SM, Novelline RA. Reducing radiation dose in emergency Computed Tomography with automatic Automatic exposure control techniques. Emerg Radiol; 11:267-274, 2005

# 생식선을 포함하지 않는 Chest CT촬영 시 0.25mmPb 차폐체의 생식선 차폐 유용성 연구

서선열<sup>1\*</sup>, 한동균<sup>2</sup>, 장재욱<sup>3</sup>, 이원정<sup>4</sup>, 김갑중<sup>5</sup>

<sup>1</sup>을지대학교 방사선학과, <sup>2</sup>을지대학교 방사선학과

<sup>3</sup>충남대학교병원 영상의학과, <sup>4</sup>대전보건대학교 방사선학과, <sup>5</sup>충북대학교 의공학과

## 1. 목 적

CT검사 건수는 점점 증가하는 추세지만 다른 검사방법에 비해 방사선 피폭은 전체 영상의학 검사의 67%의 비율로 높은 환자 피폭선량을 수반하고 있다. 그로 인한 환자의 피폭선량이 증가하고 있으며, 검사부위를 제외한 다른 장기의 산란선에 의한 2차 피폭이 되고 있다. 특히 두부(Brain), 흉부(Chest) CT검사 시 방사선 민감도가 높은 장기인 생식선에 대해서는 CT검사 시 특별한 차폐를 하지 않고 있어 본 연구에서는 생식선을 포함하지 않는 Chest CT검사 시 생식선의 2차 피폭선량과 차폐 방법에 대한 연구를 하고자 한다.

## 2. 대상 및 방법

흉부 CT검사를 시행하는 30세 성인 남성 20명을 대상으로 하였으며 CT장비는 SIEMENS사의 SOMATOM DEFINITION AS\*를 사용하였고, 촬영조건은 일반적인 Chest CT 검사 조건으로 관전압은 120kv, 관전류는 90mAs, slice thickness는 3mm로 설정하였고, 유리선량계(PLD)는 일본 치요다테크놀사의 FGD1000를 사용하였으며, 차폐체는 0.25mmPb의 납Pad로 제작하였다. 연구방법으로 차폐 전과 후의 생식선의 피폭선량을 측정 차폐율을 비교하고 차폐체의 유용성을 평가하였다.

## 3. 결 과

차폐 전 치골결합의 피폭선량은 평균 280.5 $\mu$ Gy, 꼬리뼈의 피폭선량은 평균 151.5 $\mu$ Gy로 측정되었다. 0.25mmPb 납 Pad로 생식선을 차폐한 후 치골결합의 피폭선량은 평균 42 $\mu$ Gy, 꼬리뼈의 피폭선량은 41 $\mu$ Gy로 측정되었다.

## 4. 결 론

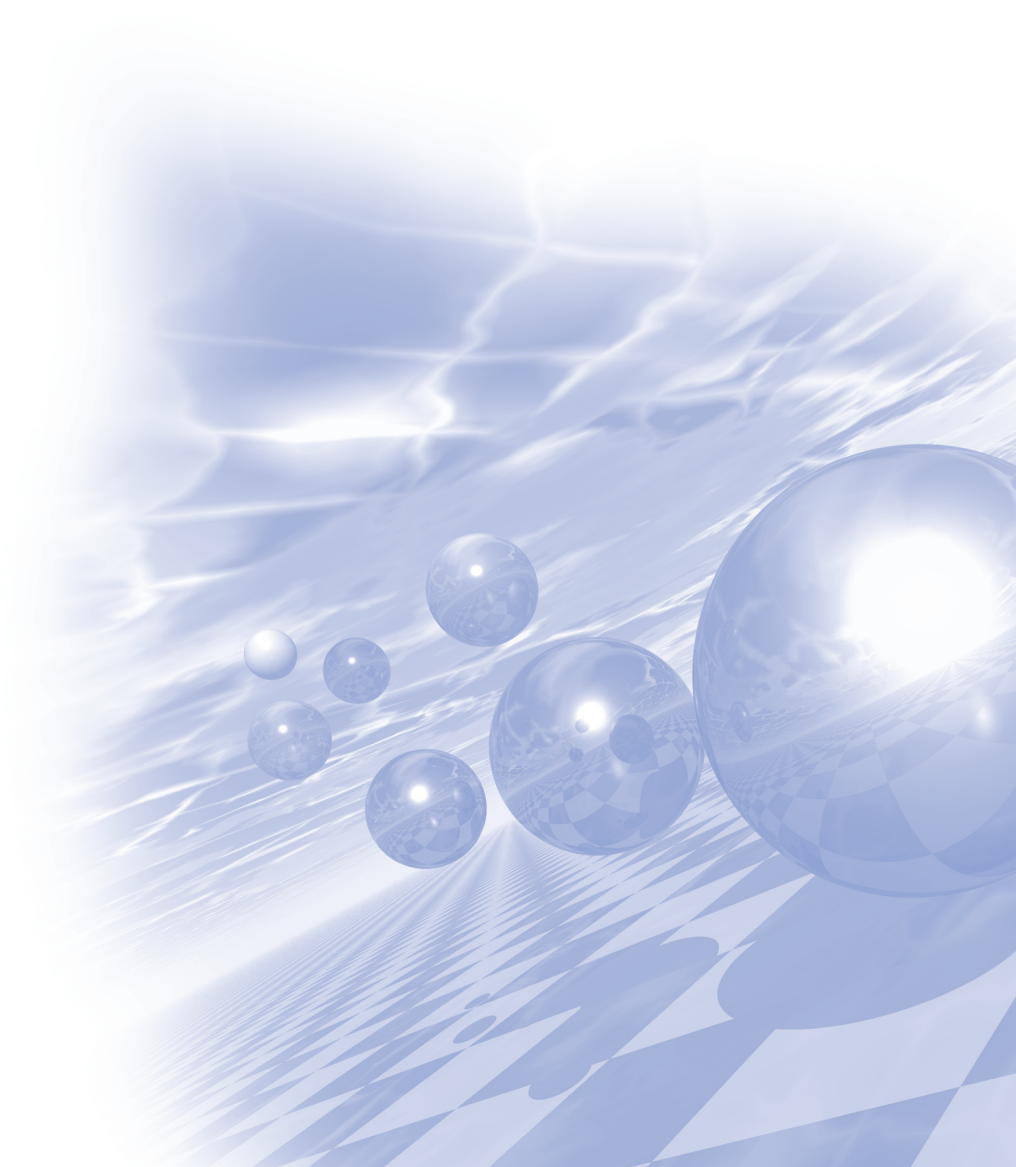
차폐 전과 후의 피폭선량을 비교하였을 때 치골결합은 약 85% 차폐되었고 꼬리뼈 역시 약 73%의 높은 차폐율을 보임을 보았을 때 차폐체의 유용성을 확인할 수 있었다. 생식선을 차폐 했음에도 불구하고 100% 차폐가 되지 않은 것은 내부피폭에 의한 것임을 알 수 있다. 그러므로 생식선을 포함하지 않는 CT검사이시 0.25mmPb 차폐체는 내부피폭을 제외한 모든 산란선을 차폐할 수 있고 본 차폐체가 생식선을 포함하지 않는 CT검사 시 생식선 차폐에 유용하다고 사료 된다.

주제어 : 납 차폐, 전산화 단층촬영(Computed Tomography), 피폭선량, PLD, 생식선



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# 포스터발표





# Perpendicular magnetocrystalline anisotropy of 5d TM/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO (TM=Hf, Ta, and W; x=0, 0.5, 1): A first principles study

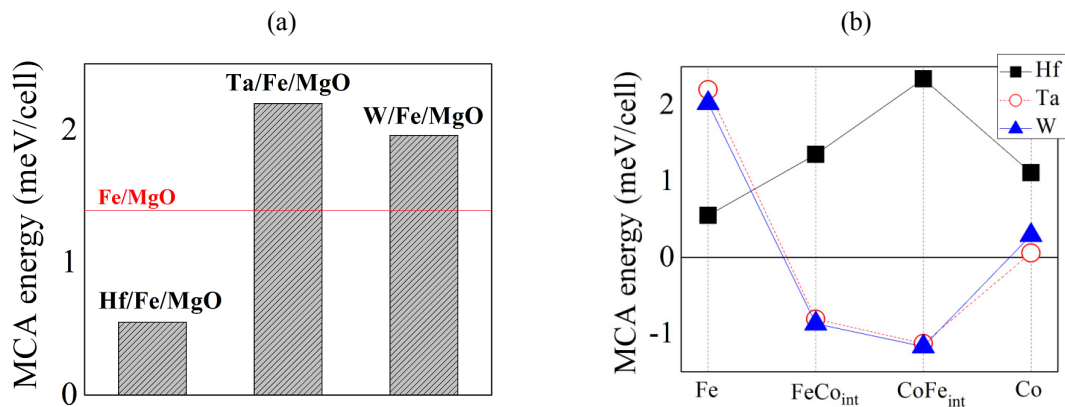
P. Taivansaikhan<sup>\*</sup>, S. H. Rhim, and S. C. Hong<sup>†</sup>

Department of Physics and Energy Harvest Storage Research Center,  
University of Ulsan, Ulsan 680-749, Republic of Korea

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

One of key requirements for STT-RAM is high thermal stability [1]. Ta-capped CoFeB/MgO is widely employed in a typical magnetic tunnel junction (MTJ), but it has been reported that its perpendicular magnetocrystalline anisotropy (PMCA) degrades during the annealing process at temperatures higher than 300 °C [2, 3]. Therefore, to achieve a thermal stability simultaneously with keeping PMCA, it is demanded to replace the Ta-capping layer with other films [4-7]. In this work, we propose possible candidates with strong PMCA, performing a first principles study on magnetism and MCA of Hf/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO and W/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO (x=0, 0.5, 1) and comparing them with those of Ta/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO. We demonstrate that the magnitude of MCA energy of Fe/MgO strongly depends on capping layers, as shown in Fig. 1(a). And Fig. 1(b) shows that MCA sensitively depend on the composition, x: the W-capping has PMCA of 2.02 and 0.29 meV/cell for Fe/MgO and Co/MgO, respectively, while in-plane MCA for CoFe/MgO. Interestingly, the MCA behavior of W/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO is quite similar to that of Ta/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO. On the other hand, Hf/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO exhibits PMCA without respect to x. The largest MCA energy is 2.34 meV/cell for CoFe/MgO, where the Hf is interfaced with Fe. Further explanation for origin of MCA for different capping and FM thin films will be elucidated.

This work is supported by grants from Priority Research Centers Program (2009-0093818) through the NRF funded by the MOE and the Basic Science Research Program (2015R1A2A2A01003621) through NRF funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning.



**Fig 1.** (a) MCA energies of Hf, Ta, and W capping layers on Fe/MgO; Red-dashed line indicates Fe/MgO; (b) MCA energies of Hf/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO, Ta/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO and W/Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>/MgO [x=0; 0.5; 1].

Co<sub>int</sub> and Fe<sub>int</sub> imply Co and Fe interfaced with Hf, Ta or W, respectively.



## References

- [1] A. V. Khvalkovskiy et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **46**, 074001 (2013).
- [2] N. Miyakawa, D. C. Worledge, K. Kita, IEEE. Magn. Lett. **4**, 1000104 (2013).
- [3] S. Ikeda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 082508 (2008).
- [4] G. G. An *et al.*, Acta. Mat. **87**, 259 (2015).
- [5] T. Liu, Y. Zhang, J. W. Cai, and H. Y. Pan, Sci. Rep.
- [6] T. Liu, J. W. Cai, and L. Sun, AIP. Advances. **2**, 032151 (2012).
- [7] T. I. Cheng, C. W. Cheng, and G. Chern, J. Appl. Phys. **112**, 033910 (2012).

# 덩치 및 박막 CrPt<sub>3</sub>의 자성 제일원리 계산

## First principles calculations of bulk and thin-film magnetic CrPt<sub>3</sub>

정태성\*, 제갈소영, 권오룡, 임성현, 홍순철

Department of Physics and EHSRC, University of Ulsan, Ulsan, Republic of Korea

본 논문에서는 제일원리 계산방법을 이용하여 계산한 L1<sub>2</sub>구조 CrPt<sub>3</sub>의 덩치 및 박막의 자성에 대한 계산 결과를 보고하고자 한다. 계산방법으로는 Vienna Ab-initio Simulation Package (VASP)을 슈도포텐셜은 projected augmented wave(PAW)으로 생성하였다. 2차원 브릴루앙 영역 적분을 수행하기 위해  $8 \times 8 \times 8$  k-점 Monkhorst-Pack 그물을 사용하였다. 전자들 사이의 교환상관 작용을 고려하기 위해 Perdew-Burke-Ernzerhof에 의해 정립된 generalized gradient approximation (GGA)방법을 사용하였다. 기저함수로 절단에너지(cutoff energy)는 450eV까지의 평면 파를 사용하였다. 총 에너지 계산결과에 의하면 강자성 상태가 가장 안정하였고 평형 상태에서의 격자상수는 3.925 Å 이었는데 이는 실험치 3.877 Å보다 0.048 Å 컸다. 덩치 구조에서 반강자성 상태 A-type(A-AF), C-type(C-AF), G-type(G-AF)에 대해 계산을 하였는데 강자성 상태에 비해 각각 0.517 eV, 0.591 eV, 0.184 eV 높았다. 7층 박막 구조에서 반강자성 상태 A-type(A-AF), C-type(C-AF), G-type(G-AF)에서는 강자성 상태에 비해 각각 0.615 eV, 0.510 eV, 0.076 eV 높았다. 강자성 상태일 때 Cr의 자기모멘트는 2.748  $\mu_B$ 으로 계산되었다. A-type, C-type, G-type 반강자성 상태일 때 Cr 자기모멘트는 각각 2.805  $\mu_B$ , 2.794  $\mu_B$ , 2.869  $\mu_B$ 으로 계산되었다.

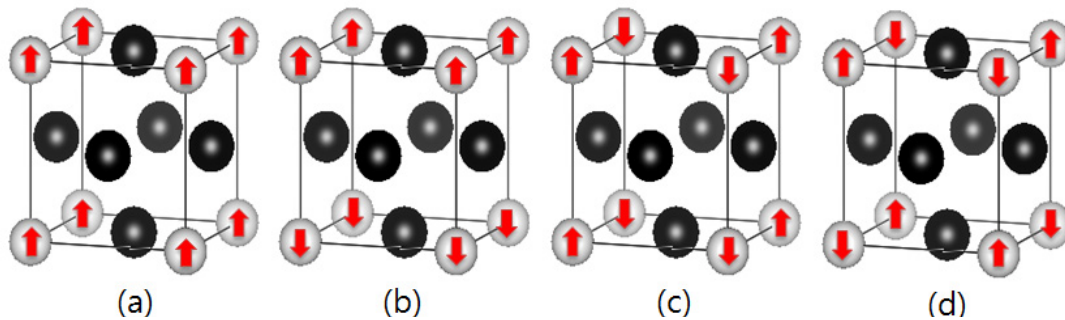


Fig. 1. (a) FM (b) A-AF (c) C-AF (d) G-AF

Table 1. 각 자성 상태일 때 Cr 과 Pt의 자기모멘트

	FM	A-AF	C-AF	G-AF
Cr	2.807 $\mu_B$	-2.805 $\mu_B$	-2.794 $\mu_B$	-2.869 $\mu_B$
Pt <sub>1</sub>	-0.05 $\mu_B$	-0.012 $\mu_B$	-0.01 $\mu_B$	0
Pt <sub>2</sub>	-0.05 $\mu_B$	0	0	0.022 $\mu_B$
Pt <sub>3</sub>	-0.05 $\mu_B$	0	0	0.027 $\mu_B$

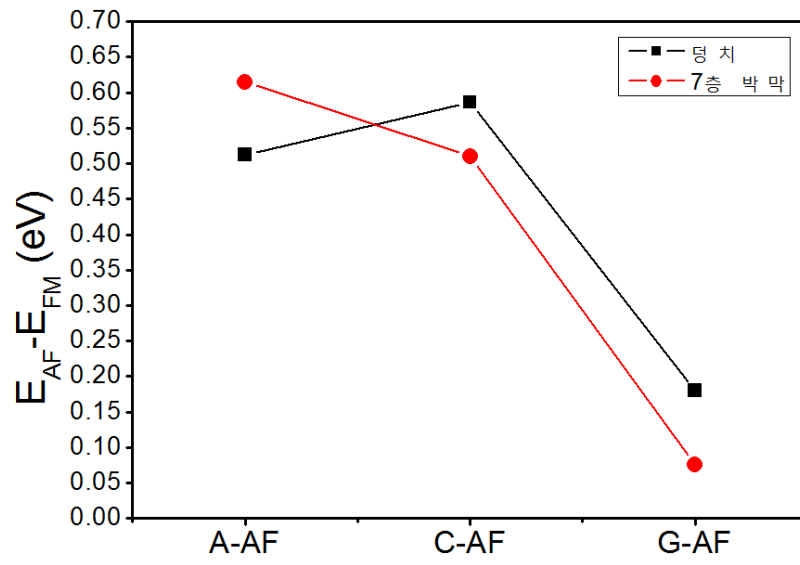


Fig. 2. 총 에너지 차이

# The Effect of Interfacial Roughness on a Skyrmion Structure

Namkyu Kim<sup>\*</sup> and Ki-Suk Lee

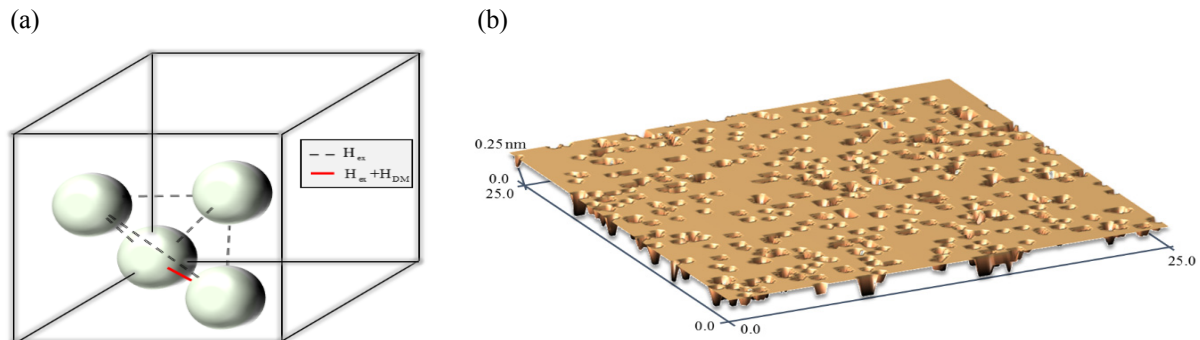
School of Materials Science and Engineering, UNIST, Ulsan 689-798, South Korea

## 1. Introduction

Recently, magnetic skyrmions draw a lot of interests because of their fascinating properties for spintronic devices such as topological stability, high density, and energy efficiency[1]. Although skyrmions are topologically stable, they are inevitably influenced by the interfacial roughness and the thermal fluctuation since they are formed in a monolayer-scaled-thickness thin film. To study such atomistic effects on skyrmion, a numerical method based on the atomistic model for spin dynamics is necessary. In this work, we investigate the effect of roughness on a skyrmion by atomistic simulation [2].

## 2. Simulations

As a model system, 2-monolayers Conanodisk with 60 nm diameter is used in our atomistic simulations. As shown in Fig. 1(a), Co film has face centered cubic (FCC) structure with the lattice constant of 2.5 Å and the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) appears only at the bottom layer (red colored line) [3][4]. The atomistic material parameters for Co are obtained from experiments [2]: the atomic moment is 1.72  $\mu_B$ , the exchange constant  $J_{ij} = 2.0 \times 10^{-21}$  J/link, the atomistic magnetocrystalline anisotropy  $k_u = 2 \times 10^{-23}$  J/atom with the direction perpendicular to the nanodisk plane. The magnitude of DMI is  $1.87 \times 10^{-22}$  J/link, and it is applied as the tensor form of magnetic interaction between neighbor spins. As shown in Fig. 1(b), the radomly formd atomic defects at the bottom monolayer give rise to the interfacial roughness[5]. To obtain the stable skyrmion structure, the initial skyrmion configurations which are formed artificially are relaxed during 500 ps with damping constant  $\alpha = 0.5$  under 0 K.

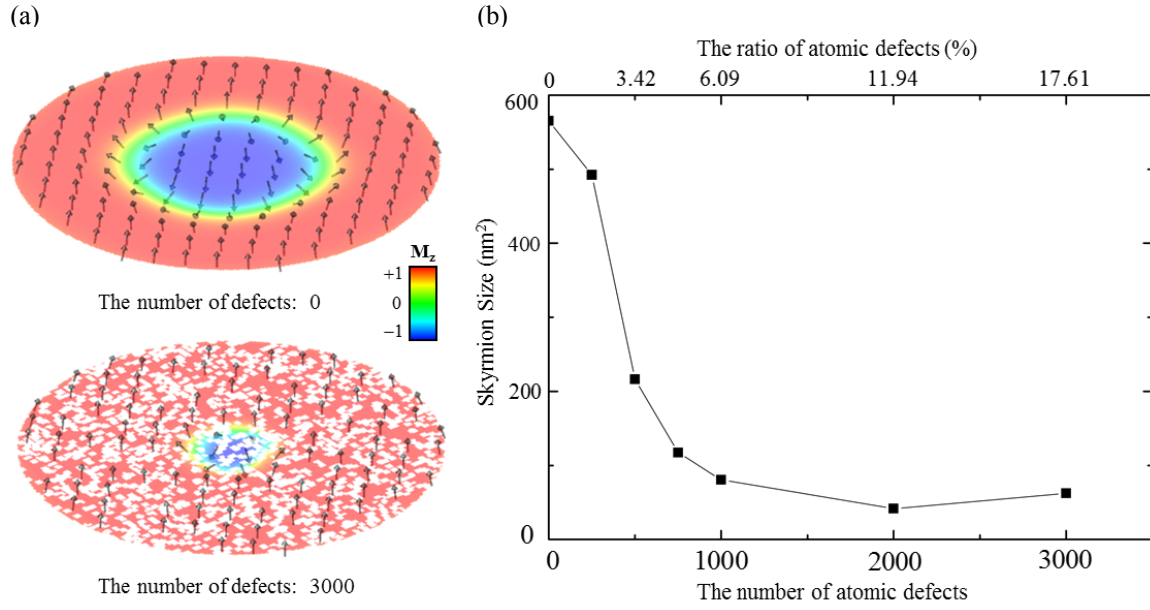


**Fig. 1.** (a) Unitcell of Co layer and its magnetic interaction.  
(b) Surface morphology of the interfacial bottom monolayer.

### 3. Result and Discussion

As shown in Fig. 2, the skyrmion size varies dramatically with roughness, the number of atomic defects; the area of skyrmion decreases exponentially with the number of atomic defects. Which is attributable to the fact that the interfacial defects decrease the number of the spin-orbit coupling between the heavy metal atoms and Co atoms. Consequently, the magnitude of DMI on the whole Co layer decreases with the number of interfacial defects.

These results suggest the fundamental reason about the difference between theoretical value of DMI and experimental one.



**Fig. 2.** (a) Atomic spin configurations of the skyrmions with different numbers of defects.

(b) Area of the skyrmion as a function of the number of defects.

The upper X axis indicates the ratio of the total number of atoms at the interface.

### 4. References

- [1] N. Romming *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 177203 (2015).
- [2] R. F. L. Evans *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **26**, 103202 (2014).
- [3] A. Fert *et al.*, Nat. Nanotechnol. **8**, 152–156 (2013).
- [4] a. Crépieux *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **182**, 341–349 (1998).
- [5] T. Chanthong *et al.*, Int. J. Phys. Sci. **7**, 1820–1827 (2012).

# 공진형 무선전력전송 시스템의 최대허용가능전력에 관한 연구

이진현\*, 박영민, 변진규

승실대학교 전기공학과

## 1. 서론

전 세계적으로 유망기술로 손꼽고 있는 무선전력전송(Wireless Power Transfer, WPT)은 전자기파방식, 자기 유도방식, 자기공진방식으로 구분 될 수 있다. 자기공진형 방식은 전송가능거리가 수 mm로 짧고 충전위치에 따라 효율이 달라지는 자기유도형 방식을 보완할 수 있어 관심이 증가하고 있다. 자기공진형 방식의 경우 원거리 전송이 이루어지기 때문에 송수신부 코일 사이의 전자기장에 인체가 노출되었을 때 인체에 영향을 미칠 가능성이 높아지는데 이에 따른 안전성에 관한 연구가 부족하여 상용화하기에는 무리가 있다. 본 논문에서는 자기공진형 방식에서 송수신부 코일 사이에서 균질 인체모델을 여러 위치조건 하에 배치하여 인체에 유도되는 유도전류를 수치해석 기법을 통해 구했다. 계산된 유도전류 값과 1998년도와 2010년도의 ICNIRP 전자기장 인체보호기준을 근거로 공진형 무선전력전송시스템의 인체모델의 위치에 따른 최대허용가능전력을 구하였다.

## 2. 실험방법

본 논문에서는 150kHz의 공진주파수를 가지는 이중 루프 형태의 공진형 무선전력전송 시스템을 설계하였다. 설계한 무선전력전송 시스템은 아래 표1과 같이 송수신 코일간의 거리(w)와 코일의 직경(D)이 서로 다른 4가지 시스템으로 구성하였다. 송수신부 코일 사이에 IEC-62311 표준에 따른 균질 인체모델을 코일 사이의 여러 위치에 배치하였다. 수치해석 기법을 통해 설계한 무선전력전송 시스템 내에 인체모델이 노출되었을 때를 분석하여 인체모델의 위치 별 99<sup>th</sup> (99백분위율)유도전류를 구하였고 이를 토대로 표2에 제시된 두가지 기준 전류밀도를 이용한 1998년도와 인체 내부전기장을 이용한 2010년도의 ICNIRP 전자기장 인체보호기준을 적용하여 일반인에게 해당하는 최대허용전력을 인체모델의 위치별로 구하였다.

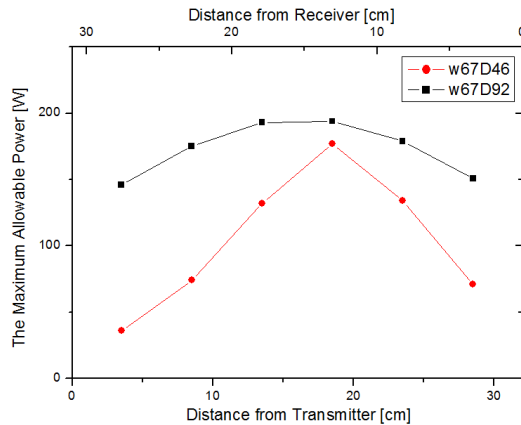
**표 1** 송수신 코일간의 거리와 코일의 직경이 다른 WPT 시스템 [D : 코일의 직경, w :송수신 코일간의 거리]

설계한 WPT 시스템	D=46[cm] w=67[cm]	D=46[cm] w=92[cm]	D=92[cm] w=67[cm]	D=92[cm] w=92[cm]
-------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

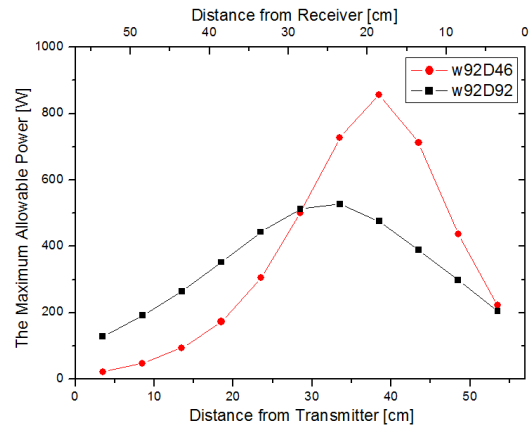
**표 2** 2010년도와 1998년도 ICNIRP 기준에 따른 150kHz 자기장 노출 인체보호기준

노출대상		INCIRP 2010 기준의 인체 내부 전기장	INCIRP 1998 기준의 머리와 몸통의 전류밀도
직업인 노출	머리와 중추 신경계 (CNS)	40.5 [ V/m ](rms)	1.5 [ A/m <sup>2</sup> ](rms)
	머리와 몸의 모든 조직(PNS)	40.5 [ V/m ](rms)	
일반인 노출	머리와 중추 신경계 (CNS)	20.25 [ V/m ](rms)	1.5 [ A/m <sup>2</sup> ](rms)
	머리와 몸의 모든 조직(PNS)	20.25 [ V/m ](rms)	

### 3. 실험결과 및 고찰

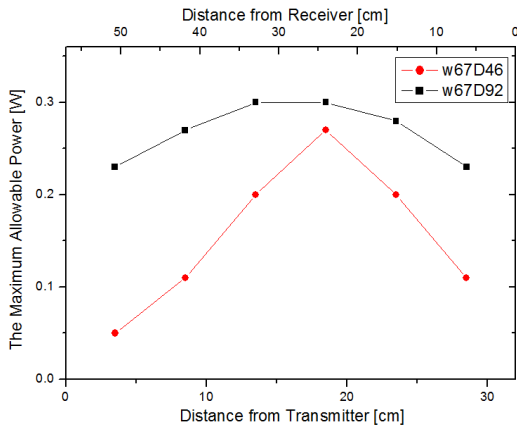


(a) 코일간 거리 67cm

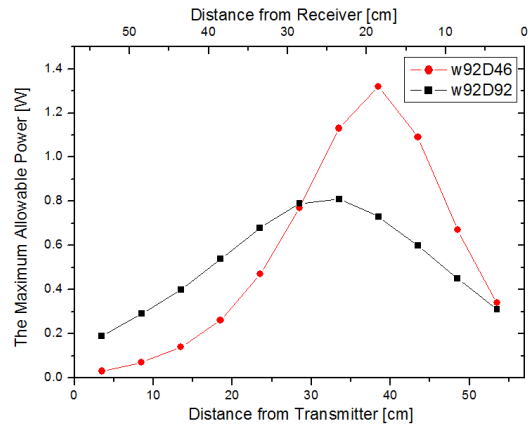


(b) 코일간 거리 92cm

그림 1 2010년 ICNIRP기준과 비교한 모델의 수신부의 거리에 따른 최대 허용가능 전력



(c) 코일간 거리 67cm



(d) 코일간 거리 92cm

그림 2 1998년 ICNIRP기준과 비교한 모델의 수신부의 거리에 따른 최대 허용가능 전력

자기공진형 무선전력시스템에 인체모델이 위치별로 자기장에 노출되었을 때 발생하는 99<sup>th</sup>(99백분위율) 인체유도전류를 계산하여 시스템들의 각 위치에 인체모델이 위치할 때 최대허용가능전력을 구하였다. 전기장은 전력의 제곱근에 비례하는 것을 이용하여 입력전력을 증가, 감소시키면서 안전기준을 만족하는 전력을 구하였다. 그림 1과 그림 2는 각각 2010년도와 1998년도 ICNIRP 기준을 이용한 최대 허용가능 전력그래프이다. 각각 그림1의 (a),(b) 그래프와 그림2의 (c),(d)의 그래프를 비교해 보았을 때 코일의 직경(D)이 크고 코일간의 거리(w)가 멀수록 최대허용가능전력 값이 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 허용최대전력은 인체모델이 두 코일 중 수신부에 가까운 중앙에 위치하였을 때 높게 나타나며 양쪽 코일에 가까이 갈수록 작아진다. 즉 시스템에서 자기장에 노출된 인체의 영향은 양쪽 코일에 가까울수록 특히 송신부에 가까울수록 크게 미친다는 것을 알 수 있다. 그림 1의 2010년 기준으로 구한 최대허용가능전력의 경우 수십W에서 수백W까지 안전한 반면에 그림 2의 1998년 기준으로 구한 최대허용전력은 최소 0.03W에서 1.32W로 아주 작은 값만 허용하는 것을 볼 수 있다. 이는 2010년 기준이 인체조직의 내부전기장의 세기로 적용되는데 비해 1998년 기준이 유도전류의 세기를 기준으로 하는 것을 원인이라 볼 수 있는데 이 이유는 논문에서 사용되는 것과 같이 단일 균질 신체 부위 모델로 시뮬레이션 할 때 유도전류 결과 값이 높게 나오는 경향이 있기 때문이다[5].

## 4. 결 론

본 논문에서 자기공진형 무선전력전송시스템에서 자기장에 노출된 균질 인체모델에 유도된 유도전류를 수치해석 계산을 통해 1998년과 2010년의 다른 ICNIRP 기준을 사용하여 구하였다. 시스템의 최대허용가능전력은 코일의 반경이 클수록, 거리가 멀수록 크다는 것을 알 수 있었고, 이를 통해 자기공진형 무선전력전송 시스템을 설계하였을 때 위치별 최대허용가능 전력을 이용하여 인체에 미치는 영향을 줄이는 데에 도움이 될 것이다. 그러나 균질모델의 경우 실제 신체조직이 구현되어 있는 해부학적 모델에 비해서 차이가 있을 수 있으므로 차후 현실적인 해부학적 인체 모델을 통해 시뮬레이션을 진행 할 필요가 있다.

## 5. 참고문헌

- [1] H. S. Shin, H. -J. Song, D. -G. Sung, J. -K. Byun, “공진형 무선전력전송 시스템에 의한 인체유도전류밀도의 통계적 해석”, 한국자기학회
- [2] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, “The Dielectric Properties of Biological Tissue: Part III-Parametric Models for the Dielectric Spectrum of Tissues”, Phys. Med. Biol., Vol. 41, pp. 2271-2293, 1996
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz – 100kHz)”, Health Physics, Vol. 99, No. 6, pp. 818-836, 2010.
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”, Health Physics, Vol. 74, No. 4, pp. 494-522, 1998.
- [5] IEC-62311, “Assessment of Electronic and Electrical Equipment Related to Human Exposure Restrictions for Electromagnetic Fields (0Hz ~ 300GHz)”, 2007.



# 균일자기장에 노출된 도체구 및 회전타원체모델의 유한요소법 해석오차 분석

심재훈\*, 성동규, 변진규

승실대학교 전기공학부

## 1. 서론

전자기파가 인체에 미치는 영향은 열작용, 비열작용, 자극작용으로 구분한다. 100 kHz ~10 MHz 범위의 주파수에서는 열작용과 자극작용이 동시에 존재하고, 100 kHz 이하 주파수에서는 전류 자극으로 신경계 기능에 영향을 미칠 수 있다. 유도전류가 뇌와 신경에 미치는 모든 영향을 예방하도록 전자기장 노출에 대한 인체 보호기준에 정해져 있다. 하지만 인체 내부에서 정의 되는 인체유도전류와 인체유도전기장은 직접 측정하기 어렵다. 따라서 인체유도전류 해석기법의 기반을 정확한 수치해석에 두고 수치적 인체모델에 적용하여 인체에 미치는 영향을 측정하여야 한다.

본 논문에서는 이론적인 해가 존재하는 구, 회전타원체 등의 표준모델에 유한요소법을 적용해 유도전류를 해석하고 이론적인 해와 비교하여 타당성을 검증한다.

## 2. 해석 모델

회전타원체 내부에 유도되는 전기장은 Spiegel에 의해 정리되었는데, 자기장 입사 방향에 따라 다음과 같이 표현된다 [1].

$$E_1 = \frac{-j2\pi f B_x (a^2 y a_z - b^2 z a_y)}{(a^2 + b^2)} \quad (2-1)$$

$$E_2 = \frac{-j2\pi f B_y (a^2 x a_z - b^2 z a_x)}{(a^2 + b^2)} \quad (2-2)$$

$$E_3 = j\pi f B_z (y a_x - x a_y) \quad (2-3)$$

여기서  $B_x, B_y, B_z$ 는 각각  $x, y, z$ 축 방향으로 입사되는 자기장의 크기이며,  $E_1, E_2, E_3$ 는  $B_x, B_y, B_z$  자기장 노출에 의해 유도되는 정현파 전기장이다.  $a$ 와  $b$ 는 회전타원체의 반장축과 반단축을 나타내며,  $a_x, a_y, a_z$ 는  $x, y, z$ 축 방향의 단위벡터,  $f$ 는 자기장의 주파수이다. 유도전류밀도의 최대값을 계산하면 [그림 1]의 경우,  $|J|_{max} = \sigma r \pi f B_0 = 30\pi \left[ \frac{A}{m^2} \right] \approx 94.25 \left[ \frac{A}{m^2} \right]$ 로 나타나고, [그림 2]의 경우,  $|J| = \sigma 2\pi f B_x \left[ \frac{a^2 u}{a^2 + b^2} \right] \approx 0.410 [A/m^2]$ 로 나타난다. 계산된 수식과 COMSOL Multiphysics에서 제공하는 유한요소법을 사용하여 [그림 1], [그림 2]와 같이 모델링 된 도체구와 회전타원체의 유도전류밀도  $J [A/m^2]$ 를 이론값과 비교하여 요소크기에 따른 오차를 확인한다 [2].

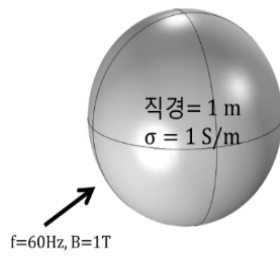


그림 1 유한요소법 도체구 모델

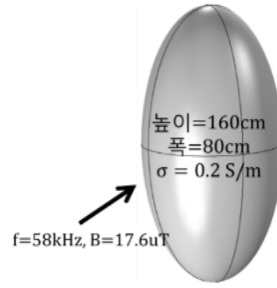


그림 2 유한요소법 회전타원체 모델

### 3. 해석결과

요소크기에 따른 유도전류밀도  $J[A/m^2]$  최대값의 오차율은 [그림 3], [그림 4]와 같다.

이 결과를 보면 해석영역을 나누는 요소의 크기가 작을수록 정확한 값을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 [그림 3]과 [그림 4]를 통해, 요소크기 5mm 이하에서 도체구의 오차율이 0.25% 미만으로 나타났고 회전타원체의 오차율은 1.3% 미만으로 확인되었다.

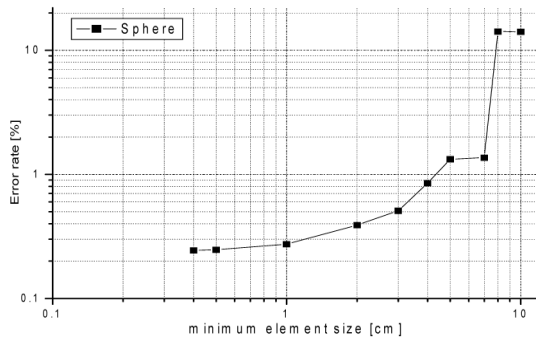


그림 3 요소크기에 따른 유도전류밀도 최대값의 오차율(60 Hz, 1 T 자기장, 직경 1 m, 도전율 1 S/m인 도체구)

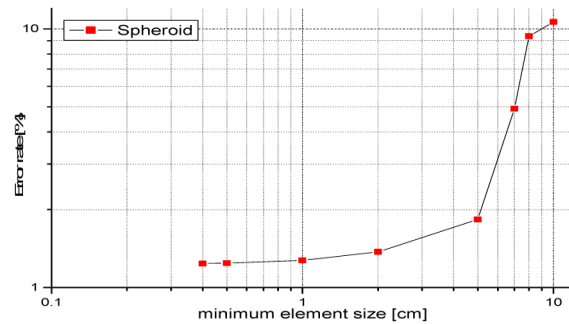


그림 4 요소크기에 따른 유도전류밀도 최대값의 오차율(58 kHz, 17.6 μT 자기장, 높이 160 cm, 폭 80 cm, 도전율 0.2 S/m, 회전축 z축 회전타원체)

### 4. 참고문헌

- [1] Spiegel, R.J. (1976). Magnetic coupling to a prolate spheroid model of man. IEEE Trans. Pwr. Appar. Sys PAS-96(1): 208-212
- [2] Strouboulis, T., Babuška, I., Copps, K., "The design and analysis of the Generalized Finite Element Method". Computer Methods . Vol 181, Issue 1-3, Pages 43-69,7 January 2000.

# *Abinitio* Investigation on the Magnetic Phase Stability of the FePt Surface

Miyoung Kim<sup>\*</sup> and Hanchul Kim

Department of Nano Physics, Sookmyung Women's University, Korea

<sup>\*</sup>mykim.nu@gmail.com

FePt<sub>3</sub> alloy is one of the most studied materials for the patterned media storage applications. Controlling the magnetic phase stability is the main issue for this material since it has a variety of magnetic phases that sensitively transform depending on the environment. In bulk, two antiferromagnetic (AFM) phases in ordered L1<sub>2</sub> cubic structure are stable at low temperature while a chemically disordered single crystal structure is found to stabilize in ferromagnetic (FM) phase with a high  $T_c$  well above room temperature and a large saturation magnetization. In this study, we report *ab-initio* density functional theory (DFT) calculations to predict that, in contrast to the bulk alloy, the ordered FePt<sub>3</sub> thin films on Pt(110) substrate can be stabilized in the FM phase over the AFM phases. Our results reveal that the FM phase is significantly stabilized by missing row surface reconstruction.

# 다결정 $\text{Ba}_x\text{A}_{1-x}\text{Ti}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ ( $\text{A}=\text{Bi}^{3+}, \text{La}^{3+}$ )에서의 강유전 및 자기 상전이 현상 분석

김덕현\*, 유춘리, 이보화†

한국외국어대학교 물리학과 & 산화물 연구소

†e-mail : bwlee@hufs.ac.kr

상온에서 분명한 다강성을 가지는 물질은 차세대 메모리 소자 및 어플리케이션에 대한 적용가능성으로 인해 지속적인 관심을 받고 있다. 강유전체  $\text{BaTiO}_3$  ( $T_c=120^\circ\text{C}$ )에 +3가 전이 금속 이온(TM :  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$  etc)을 치환한 물질들( $\text{BaTi}_{1-y}\text{TM}_y\text{O}_3$ )에서 분명한 다강성이 상온에서 유도됨이 보고되었다. 하지만 전이금속이온 치환으로 인해 electrical polarization 값을 억제되는 특성 또한 관측되었으며, 이러한 특성을 개선시키기 위해 많은 후속 연구들이 진행되고 있다.

이에 본 연구진은  $\text{BaTi}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ 의 Ba site에 다양한 양의  $\text{Bi}^{3+}$  혹은  $\text{La}^{3+}$ 를 동시 치환한  $\text{Ba}_x\text{A}_{1-x}\text{Ti}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$  ( $\text{A}=\text{Bi}^{3+}, \text{La}^{3+}$ )를 합성하여 시료들의 물리적 특성에 대해 연구하였다. 합성된 시료는 Cu-K $\alpha$ 선을 이용한 X-선 회절 측정을 통해 결정상의 변화를 확인 하였고, Raman spectroscopy 관측을 통해 La 치환으로 인해 유도되는 미세구조 변화를 분석 하였다. 상온에서의 자성 및 강유전성은 VSM을 이용한 M-H hysteresis loop 측정과 ferroelectric testor를 활용한 P-E loop 측정을 통해 확인 하였다. 또한 M-T curve와  $\epsilon$ -T curve 측정을 통해 온도에 따른 자기 및 강유전 상전이 현상을 확인하였다.

# 자기 Bubblecade 속력의 자기장 각도와 세기 의존성

김덕호<sup>1\*</sup>, 문경웅<sup>2</sup>, 유상철<sup>1,3</sup>, 김대연<sup>1</sup>, 민병철<sup>3</sup>, 황찬용<sup>2</sup>, 최석봉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교, 물리천문학부, <sup>2</sup>한국표준과학연구원, <sup>3</sup>한국과학기술연구원

## 1. 서론

여러 자구벽(domain wall)을 한쪽 방향으로 동시에 이동시키는 방법은 차세대 메모리와 논리 소자 적용에 중요한 요소중 하나이다. 이를 위해, 나노선에 전류 주입[1]과 복잡한 구조를 이용한 DW의 포텐셜에너지 조절 [2] 또는 교류자기장[3] 등 여러 가지 방법들이 제안되었고, 이를 바탕으로 많은 연구가 진행 되었다. 이 중 교류자기장을 이용하여, 2차원 bubble domain을 같은 모양을 한쪽 방향으로 움직이는 “자기 Bubblecade memory”가 최근에 제안되어 실험적으로 입증 되었다[3]. 메모리 소자는 빠른 속력으로 구동하는 것이 중요한데, Bubblecade 메모리에서는 자기장 세기  $H$ 와 자기장을 기울인 각도  $\theta$ 에 의해 속력  $v$ 이 결정된다. 본 연구에서  $H$ 와  $\theta$ 가  $v$ 에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

## 2. 실험방법과 결과

이 연구를 위해 Pt(2.5 nm)/Co(0.3 nm)/Pt(1.0 nm) 수직 자기 이방성 박막을 준비하여, 광자기 Kerr 현미경(magneto-optical Kerr microscope)을 이용하여 자구벽 속력  $v$ 을 측정하였다. 그림 1은 다양한  $H$ 에서  $\theta$ 에 따른  $v$  변화를 보여주고 있다. 여기에서  $v$ 는 특정 임계각도  $\theta_c$ 에서 최대값을 보여주고 있다. 특히, 실험 결과에서 임계각도  $\theta_c$ 는  $H$ 에 따라 달라짐이 관찰되었다.

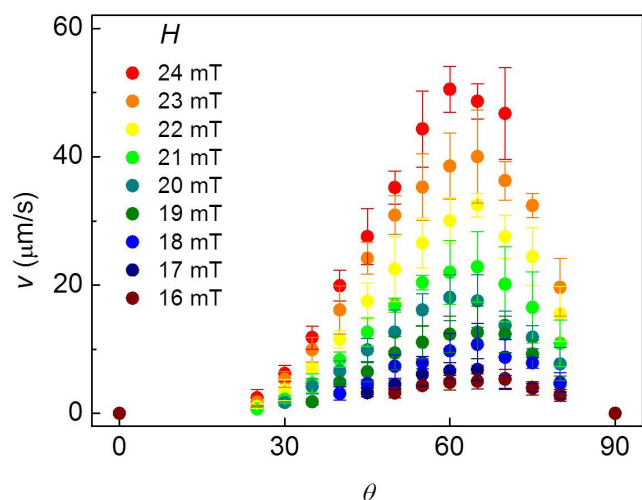


그림 1 자기장 세기  $H$ 에 대해 자기장을 기울인 각도  $\theta$  변화에 따른 bubble 속력  $v$

## 3. 고찰

이 현상을 이해하기 위해서 Creep 이론을 이용하여 Bubble 속력을 분석하였다. 놀랍게도, 임계각도  $\theta_c$ 와  $H$ 에 대해 간단한 관계식으로 얻을 수 있었고, 여러  $\theta$ 와  $H$ 에 대해 bubble 속력을 측정하였더니, 이론적인 값과 실험값이 잘 일치하였다.

## 4. 결론

본 연구는 특정 자기장에서 각도 최적화를 통해 자기 Bubblecade 메모리 소자 구동 속력을 최적화하여, 차세대 메모리 소자 연구에 도움이 될 것으로 생각된다.

## 5. 참고문헌

- [1] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, *Science* **320**, 190 (2008).
- [2] D. A. Allwood *et al.*, *Science* **309**, 1688 (2005).
- [3] K.-W. Moon, *et al.*, *Sci. Rep.* **5**, 9166; DOI:10.1038/srep09166 (2015).

# Origin of robust interaction of spin waves with a single skyrmion in perpendicularly magnetized nanostripes

Junhoe Kim<sup>1\*</sup> and Sang-Koog Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory, Research Institute of Advanced Materials, Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, South Korea

## 1. 서론

The topological stability of skyrmions is highly advantageous to their memory-device applications, owing to both their nano-scale dimensions and ultra-low critical current density [1]. Therefore, reliable manipulation of magnetic skyrmions by spin-polarized currents or magnetic fields has attracted great interest[1-5]. Very recently, skyrmion motions also have been found to be driven by means of propagating spin waves (SWs) in nanostripes [6,7]. This alternative approach is of particular interest in terms of the promise of all-magnetic control of skyrmions in geometrically constricted elements. Despite their fundamental and technological importance, however, the underlying physics of spin-wave-skyrmion interactions remain obscure.

## 2. 실험방법과 결과

In the present study, we employed micromagnetic numerical simulations to study interactions between propagating spin waves (SWs) and a single skyrmion in a perpendicularly magnetized CoFeB nanostripe where the magnetic layer is interfaced with W and MgO. Micromagnetic numerical calculations revealed that robust interactions between the incident SWs and the skyrmion give rise to considerable forward skyrmion motions for specific SW frequencies (e.g., here:  $f_{sw} = 12 - 19$  GHz). Additionally, it was found that there exists a sufficiently low threshold field amplitude, e.g., 0.1 kOe for the  $f_{sw} = 15$  GHz SWs.

## 3. 고찰

Considerable SW reflection from the skyrmion will occur in the specific 12 - 19 GHz range, which corresponds to the skyrmion internal modes. The frequency-dependent interaction originated from the robust coupling of the SWs with the internal modes of the skyrmion, through the SWs' linear momentum transfer torque acting on the skyrmion.

## 4. 결론

In summary, we observed considerable forward skyrmion motions driven by SWs of specific frequencies. The motion velocity varies with the incident SWs' frequency and amplitude. This work provides for all-magnetic control of skyrmion motions with outelctronic currents, and facilitates further understanding of the interactions between magnons and topological solitons in constricted geometries.

## 5. 참고문헌

- [1] A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, *Nature Nanotech.* 8, 152 (2013).
- [2] X. Z. Yu, N. Kanazawa, W.Z. Zhang, T. Nagai, T. Hara, K. Kimoto, Y. Matsui, Y. Onose, and Y. Tokura, *Nature Commun.* 3, 988 (2012).
- [3] J. Iwasaki, M. Mochizuki, N. Nagaosa, *Nature Nanotechnol.* 8 742 (2013).
- [4] J. Sampaio, V. Cros, S. Rohart, A. thiaville, and A. Fert, *Nature Nanotechnol.* 8, 839 (2013).
- [5] C. Moutafis, S. Komineas, and J. A. C. Bland, *Phys. Rev. B* 79, 224429 (2009).
- [6] X. Zhang, M. Ezawa, D. Xiao, G. P. Zhao, Y. Liu, and Y. Zhou, *Nanotechnol.* 26 225701 (2015).
- [7] J. Ding, X. Yang, and T. Zhu, *IEEE Trans. Magn.*, doi: 10.1109/TMAG.2015.2446516 (2015).

# Effect of Dresselhaus spin orbit interaction on current-induced skyrmion dynamics

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

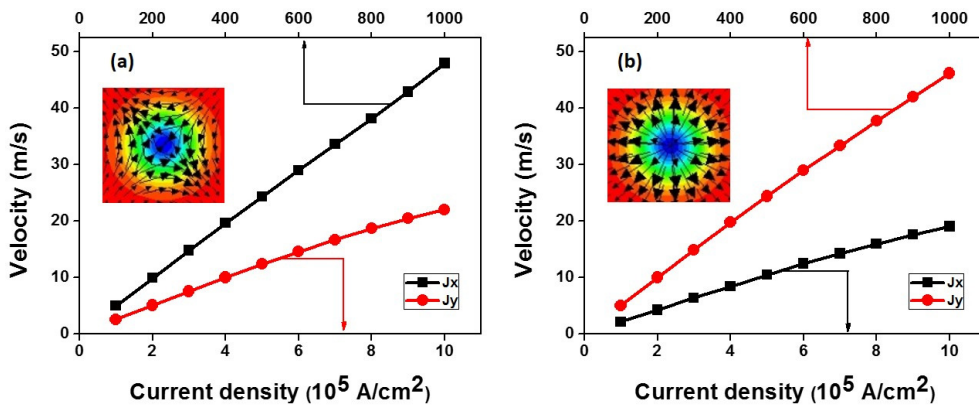
In magnetic systems with an inversion asymmetry and large spin-orbit coupling, the anti-symmetric exchange interaction called the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) becomes non-negligible[1,2]. Recently magnetic skyrmions stabilized by DMI are expected to have potential as information unit for storage and logic devices [4,5]. There are two main spin orbit interaction in skyrmion studies. One is formed by interfacial DM interaction induced by Rashba spin orbit interaction. The other is bulk DM interaction induced by Weyl spin orbit interaction. But studies about skyrmion stabilized by Dresselhaus spin orbit interaction has lacked.

## 2. Simulation Scheme

We investigate skyrmion velocity using Landau-Lifshitz-Gilbert equation with an spin hall spin transfer torque with two types spin orbit interaction (Rashba and Dresselhaus). We use following parameters; nanowire width is 40 nm, thickness is 1 nm, cell size is  $1 \times 1 \text{ nm}^3$ , saturation magnetization is  $800 \text{ emu/cm}^3$ , damping constant is 0.1, exchange stiffness constant is  $1.2 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ , DM constant is  $2 \text{ erg/cm}^2$ , spin hall angle is 0.1, perpendicular magnetocrystalline anisotropy  $K_u$  is  $0.8 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ .

## 3. Result and Discussion

Figure 1 shows that both skyrmion velocity have linear dependence with current density, which is consistent with the prediction based on collective coordinate approach. In contrast to interfacial DM interaction, the DM



**Fig. 1.** Skyrmion velocity as a function of current density  $J$  for different current flow direction. (a) DM induced by Dresselhaus spin orbit interaction, (b) DM induced by Rashba spin orbit interaction



interaction induced by Dresselhaus spin orbit interaction case has different aspect for current flow direction, it is because spin hall torque symmetry has  $90^\circ$  difference with spin orbit torque symmetry driven by Dresselhaus spin orbit interaction.

## 5. Reference

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

# Magnetic and structural properties of hot deformed Nd-Fe-B magnets diffusion processed with NdHx compound in two-step die upset

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

Nd-Fe-B magnets are known to exhibit a high maximum energy product and thus have attracted much attention for motors in hybrid and electric vehicles. The anisotropic dense Nd-Fe-B magnets could be prepared by hot pressing and die upsetting of rapidly solidified ribbons. During hot deformation, the plate-like grains of main phase tended to rotate by grain boundary sliding so that the easy direction of magnetization is parallel to the c-axes. This led to the highly anisotropic magnets. Moreover, the grain boundary sliding lead to stress concentration was accommodated by the interface-controlled solution-precipitation reaction by the Nd-rich phase along the grain boundaries. Therefore the grain refinement and grain rotation of a and c axes are important factors to influence the magnetic properties.

Dy or Dy compounds are known as the effective addition in increasing coercivity, however, Dy is a scarce resource and tends to be relatively expensive. Recently extensive efforts have been devoted to develop Dy-free high magnetic properties Nd-Fe-B magnets. Nd and its compound is also good candidate to increase coercivity. Specially The spark plasma sintering (SPS) technique supply the pressure from initial stage to the end 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.

In this work, two-step die upsetting process was carried out to realize grain refinement and sharp texture formation of the main phase, HDedNd-Fe-B magnets were produced by SPS through the optimized method and the NdHx compound was selected as the addition to increase the coercivity from diffusion process. The microstructure evolution of two steps die upsetting process and magnetic properties after dipping with addition 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.

# Synthesis and Magnetic Characterization of M-type $\text{Sr}_{0.75-x}\text{La}_{0.25}\text{Ca}_x\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ hexaferrite by Salt-assisted Ultrasonic Spray Pyrolysis (SA-USP)

Jimin Lee<sup>1\*</sup>, Tae-Yeon Hwang<sup>1</sup>, Jongryoul Kim<sup>2</sup>, JinBae Kim<sup>3</sup>, and Yong-Ho Choa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Fusion Chemical Engineering, Hanyang University, Ansan, Gyeonggi 426-791, Korea

<sup>2</sup>Department of Metallurgy and Materials Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, South Korea

<sup>3</sup>Advanced Research Institute, LG Electronics Inc., Seoul 137-724, South Korea

Fax: +82-(31)-400-5650 E-mail address: choa15@hanyang.ac.kr

Strontium M-type hexaferrite has widely used in electronic industry as a permanent magnet due to its relatively high intrinsic coercivity and chemical stability. Recently, many attempts such as cationic substitution have been made to increase the magnetic performance of the ferrite. It has been investigated that substituting  $\text{La}^{3+}$ - $\text{Co}^{2+}$  with  $\text{Sr}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$  in hexaferrite can improve the magnetic properties resulting from the change of magnetic moments.

However, it is necessary to reduce material cost because strontium and lanthanum are rare and these elements cause the cost increase. Calcium, which has same oxidation state with strontium, is more abundant geochemically and also cheaper than strontium. In addition, it was reported that partial  $\text{Ca}^{2+}$  substitution with  $\text{Sr}^{2+}$  in the strontium hexaferrite can increase the coercivity. Therefore substituting  $\text{Ca}^{2+}$  in  $\text{La}^{3+}$ - $\text{Co}^{2+}$  substituted strontium ferrites is a great solution to both reduce the cost and enhance the magnetic properties.

In this study,  $\text{Sr}_{0.75-x}\text{La}_{0.25}\text{Ca}_x\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$  ( $0 \leq x \leq 0.75$ ) hexaferrites were synthesized by salt-assisted ultrasonic spray pyrolysis (SA-USP) process. SA-USP was adopted to synthesize non-agglomerated hexaferrite particles with high uniformity. Both the structural and magnetic properties of the particles with different molar concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  have been investigated systematically.

**Keywords:** M-type Strontium hexaferrite, Calcium substitution, La-Co substitution, Salt assisted ultrasonic spray pyrolysis (SA-USP), Magnetic properties

# Magnetic annealing effect of Fe-based amorphous ribbon

Sumin Kim<sup>1\*</sup>, and Haein Choi-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 soft magnetic properties such as high saturation magnetization, low coercivity and high permeability. We studied Fe-based materials, and published paper about Fe-Co-Ti-Zr-B alloys. The results of this paper are that Fe-based amorphous ribbons exhibited soft magnetic properties with a low coercivity and a high saturation magnetization. In this work, we investigated the magnetic annealing effect of Fe-based alloys.

## 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

After annealing process, the amorphous phase of the melt-spun ribbons changed to a nanocomposite structure consisting and residual amorphous phases. The nanocomposite alloys exhibited improved values of the saturation magnetization.

## 4. Reference

- [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).

# Zn가 치환된 Z-type hexaferrite의 고주파 특성 연구

임정태\*, 신길수, 김대진, 류대형, 이지수, 김철성

국민대학교 물리학과

## 1. 서론

최근 무선통신기기의 발달로 인하여 고주파 대역에서의 RF 소재에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 이들 소재의 고효율, 소형화, 광대역화를 위해 투자율과 유전율을 동시에 가지는 자성물질이 각광 받고 있다 [1]. 특히, Z-type hexaferrite는 spinel ferrite보다 높은 자기 이방성에 의해 수백 MHz대역에서 우수한 특성을 보인다. 따라서, 본 연구에서는 직접합성법으로 제조된  $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  ( $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ) 시료의 결정학적과 자기적 특성 및 고주파 특성에 대해 연구하였다.

## 2. 실험방법

Z-type hexaferrite인  $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  ( $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ) 다결정 분말 시료를 직접합성법 (solid-state reaction method)을 사용하여 제조하였다. 출발 물질로  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{ZnO}$ , 그리고  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 를 이용하였으며, 이를 ball mill를 통해 24시간 동안 습식분쇄를 하였다. 혼합물을  $1000^\circ\text{C}$ 에서 3 시간 동안 하소하였으며, 하소 한 시료를 다시 습식분쇄 후,  $1200^\circ\text{C}$ 에서 1차 소결을 진행하였다. 최종적으로 내경이 3.04 mm, 외경이 7 mm인 toroid 형태로 성형 후  $1250^\circ\text{C}$ 에서 2차 소결 후  $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  ( $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ) 분말 시료를 합성하였다. 제조된 시료의 결정학적 특성을 확인하기 위해 Cu-K $\alpha$  선에 이용한 x-선 회절 실험 (XRD)를 진행 후 Rietveld 방법으로 분석하였다. 진동시료 자화율 측정 (VSM) 실험을 통해 거시적인 자기적 특성을 확인하였으며, 미시적인 자기적 특성을 확인하기 위해 피스바우어 분광 실험을 진행하였다. 시료의 주파수에 따른  $\mu$ 와  $\epsilon$ 의 특성은 Agilent 사의 E5071C 회로망 분석기를 이용하여 toroid 형태의 소결체로 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

측정된 XRD 결과를 Fullprof 프로그램을 이용하여 분석하였으며, 그 결과 분석구조 인자( $R_B$ )와 Bragg 인자( $R_F$ )은 5 % 미만으로  $P6_3/mmc$  공간군을 가지는 hexagonal 구조의 단일상임을 확인하였다. Zn가 치환됨에 따라 시료의 격자상수  $a_0$ ,  $c_0$ 는 증가하였으며, 이는 Co 이온의 이온반경보다 큰 Zn 이온의 이온반경에 의한 것으로 판단된다. VSM를 통해 295 K에서 10 kOe까지의 자기이력곡선을 측정하였으며, 모든 시료는 준강자성의 거동을 보였다. Zn가 치환됨에 따라 포화자화 값은 증가하였으며, 이는 비자성 Zn 이온이 down-spin 방향의 tetrahedral site로의 치환에 의한 것으로 판단된다. 또한, 보자력값은 Zn가 치환됨에 따라 감소하였다. 미시적인 자기적 특성을 연구하기 위해 상온에서 피스바우어 분광실험을 실시하였으며, Z-type hexaferrite내에 중첩된 10개의 부격자의 스펙트럼을 6-sextets 형태로 분석하였다. 이성질체 이동치를 통해 모든 부격자에서  $\text{Fe}^{3+}$ 상태임을 확인하였고, Zn가 치환됨에 따라 tetrahedral site의 상대적인 면적비가 감소하였다. 회로망 분석기를 통해 100 MHz부터 4 GHz까지 투자율과 유전율을 측정하였으며, 그 결과 Zn가 치환됨에 따라 투자율은 증가하였

다. 따라서, 200 MHz에서 투자율 21.4, 투자손실이 0.1 이하의 값을 가지는  $\text{Ba}_3\text{Co}_{1.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  시료가 자성체 RF 소재로서의 응용가능성이 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] J. Lee, *et al.*, J. Appl. Phys. **109**, 09E530 (2011).

# Microring 형태의 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 물질에 대한 자기적 특성 연구

최현경\*, 박미령, 이종현, 김철성

국민대학교 물리학과, 서울 성북구 정릉로 77, 136-702

## 1. 서론

여러 변수 조건에 따른  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  물질은 다양한 형태를 가지며, 이는 산업 및 여러 응용 분야에 대해 많은 연구가 진행되고 있다 [1]. 특히, 마이크로 사이즈의 링 형태는 가장 견고한 산화철로 n형 반도체적 특성을 지니고 있으며 저렴한 가격과 독성이 없는 특징으로 연구가 각광받고 있으나, 다양한 변수로 인한 시료 제조의 어려움을 겪고 있는 것이 널리 알려진 사실이다. 본 연구는 마이크로 사이즈의 링 형태를 가지는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 를 제조하기 위하여 최종적인 열처리 온도 및 처리 시간에 따른 링의 형태를 확인하였으며, 진동시료 자화율 측정 장치 및 피스바우어 분광기를 이용하여 자기적 특성을 연구하였다.

## 2. 실험방법

Microring 형태의  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  시료는 수열합성법(Hydrothermal method)에 의해 제조되었다. 0.8 mM의 Potassium Hexacyanoferrate(III) 수용액과 0.16 mM의 Sodium hydroxide 수용액을 D.I. Water와 혼합한 후, teflon coating이 되어있는 압력기에 넣어 200 °C에서 9시간 동안 열처리하였다. 그 후, 원심분리기를 거쳐 60 °C에서 6시간 동안 진공 건조하였으며, 전기로에서 4시간동안 700 °C로 소결하였다. 제조된 시료는 x-선 회절기를 사용하여 결정구조를 확인하였고, 자성 특성을 측정하기 위하여 진동시료 자화율 측정 장치(VSM)를 이용하였다. 또한, 미시적인 자기적 특성을 확인하기 위하여 피스바우어 분광 실험을 진행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Microring 형태의  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  시료의 x-선 회절 측정 결과,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 의 혼합상이 형성되었음을 확인하였고, 이를 FULLPROF 프로그램을 이용하여 Rietveld 정련법으로 분석하였다. Fig.1은 거시적인 자기 특성을 확인하기 위하여, Microring 형태의  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  물질을 상온에서 15000 Oe 인가자장에 따른 자기모멘트의 변화를 측정한 결과이다. 일반적인  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  피스바우어 스펙트럼은 6라인의 흡수선을 나타내었으나, Microring 형태의  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  물질은  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 와 혼합되어 6라인의 여러 Site를 스펙트럼을 확인할 수 있다.

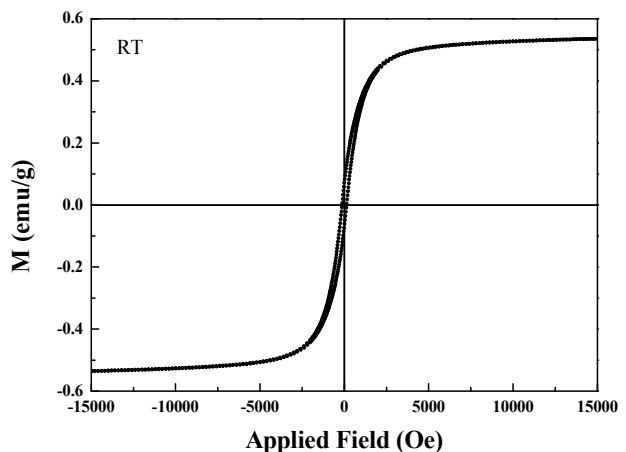


Fig.1. Hysteresis loop for  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  powders at 295 K.

## 4. 참고 문헌

- [1] Kingsley L. Taft, Stephen J. Lippard, *J. Phys. Chem. C.*, **112**, 19946 (2008).

# Synthesis and characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated Fe alloy powder

Sung Joon Choi<sup>\*</sup>, Sun Woo Lee, Jae-Hyoung You, and Sang-Im Yoo

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

In recent years, the soft magnetic composites (SMC) have attracted great interest as the potential applications in electromagnetic circuits, sensors, electromagnetic actuation devices, low frequency filters, induction field coils, magnetic seal systems, and magnetic field shielding. Among AC losses of metal powder, the eddy current loss could be reduced by an insulation coating to increase electrical resistivity. For the same purpose, we have tried to fabricate a core and shell layer composed of a Fe alloy powder and layer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by the sol-gel method. In order to obtain a uniform coating of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer, we used sonication to avoid the agglomeration of Fe alloy powder before the coating process. In this study, influences of the process conditions such as reaction time and concentration of Aluminum isopropoxide (AIP) on the magnetic properties of the Fe alloy powder were investigated. Also the effect of the dieing pressure during the fabrication of core using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated Fe alloy powder was investigated. The analysis of Fe alloy metal powder coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was conducted using field emission-scanning electron microscope (FE-SEM), transmission electron microscope (TEM), Inductance analysis and B-H curve analyzer. The results showed that the Fe alloy powder was uniformly coated by a thin layer of Titanium oxide. Details will be presented for a discussion.

This work was supported by a Grant from *world class 300* (0417-20140105)



# 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 각도에 따른 선폭 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 ( $H_{ex}$ , 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. 강자성 공명 신호의 선폭( $\Delta H_{pp}$ )은 자성 재료의 자기 이완 특성을 내포하고 있으며, 자화가 균일한 자성 재료의 경우에는 재료 고유의 이완 특성인 Gilbert 감쇠 상수  $\alpha$ 와 관련된다. 한편, 교환 바이어스 특성을 갖는 재료에서 선폭변화는 자화 곤란축에서 증가하는 특성을 보이며, 이러한 특성은 F와 AF의 자화 용이축의 분포 특성과 교환 바이어스의 분포 특성으로 해석되고 있다[1].

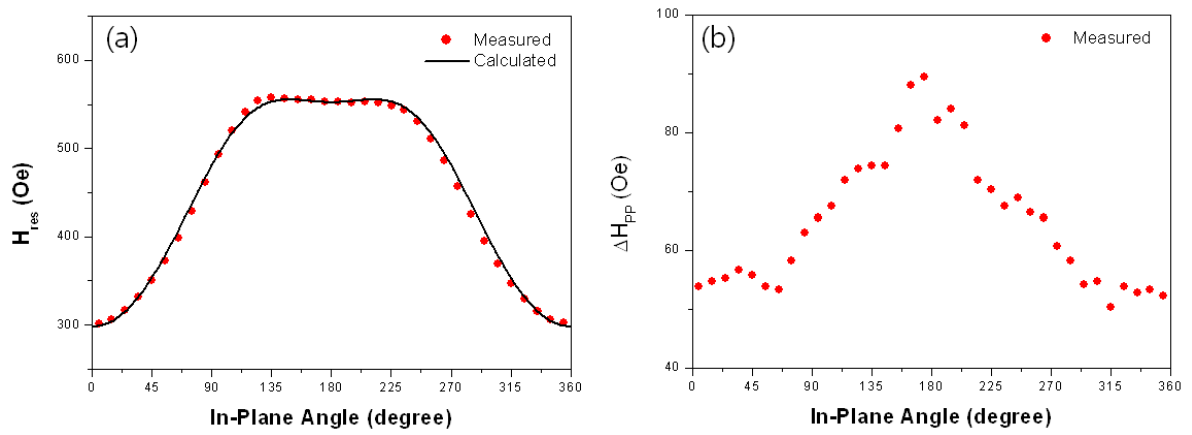
본 연구에서는 교환 결합 특성이 우수한 CoFe/MnIr 재료에서 자화각도에 따른 선폭 특성 변화에 대하여 two-magnon 산란 특성과 자화 용이축의 분포 특성을 고려한 분석을 시도하였다.

## 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 시편은 열처리 온도 300°C에서 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 이방성 자기장 및 강자성공명 선폭( $\Delta H_{pp}$ )을 분석하기 위하여 자기장의 방향에 따른 FMR신호를 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 CoFe/MnIr 박막 재료에서 자화 각도에 따른 강자성 공명 자기장과 선폭변화 특성을 보인다. 각도에 따른 강자성 공명 자기장 특성을 Stoner-Wohlfarth 모델을 사용하여 계산하였으며, 이들 계산 결과로부터 일축 이방성 자기장과 교환 결합력은 각각  $H_k=28$  Oe,  $H_{ex}=134$  Oe를 얻었다. 선폭 변화 특성은 각도가 자화 용이축인 0도와 360에서 작으며, 자화 곤란축인 180도에서 증가하는 특성을 보인다. 이러한 증가 특성은 F/AF 계면에서 고정된 AF에 의하여 F층의 자화가 회전하는 특성에 기인한다. 이러한 회전은 선폭증가의 원인이며, 곤란축에서 이러한 회전이 증가한다. 또한, 계면에서 AF를 이루는 입도들의 자화 용이축은 제조상에서 균일한 분포를 이루고 있으며, 이러한 분포 특성은 선폭 증가의 또 다른 원인 중의 하나로 작용한다. 본 연구에서는 자기장의 각도에 따른 선폭 변화를 자화 용이축의 분포 특성, F층 스핀의 회전, two-magnon산란특성을 도입하여 측정결과를 설명한다.



**Fig. 1.** Angular dependence of  
(a) ferromagnetic resonance field,  $H_{\text{res}}$ , and (b) linewidth,  $\Delta H_{\text{pp}}$  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] R. L. Rodriguez-Suarez, et. al., Phys. Rev. B **83** (2011) 224418.

# NiFe(100 nm)/CoFe(5 nm) 이중층 박막의 스핀파 공명 신호 분석

김동영\*, 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388번지, 760-749

## 1. 서론

강자성 박막재료에서 스핀들의 세차 운동(precession)과 마이크로파의 주파수가 동조된 경우 강자성 공명(FMR, ferromagnetic resonance)이라 하며, 자기 스핀들이 만드는 스핀파(spin wave)가 박막 재료의 두께 방향에서 정상파 조건을 만족하는 경우를 스핀파 공명(SWR, spin wave resonance)이라 부른다. 스핀파는 두께가 560 nm인 NiFe 박막 재료에서 처음 발견되었으며[1], 스핀파 공명 신호는 강자성 공명 신호 보다 낮은 자기장에서 나타나므로 두께가 얇은 박막에서는 나타나지 않는다. 두께가 두꺼운 자성 분리되어 나타난다. 스핀파는 두께의 정상파 조건에 의한 intrinsic 스핀파와 재료의 불순물에 의한 표면 스핀파로 두 가지로 구분된다.

본 연구에서는 NiFe(100nm)/CoFe(4 nm) 박막 재료의 수평면(in-plane) 및 수직면(out-of plane)에서 자기장 각도에 따른 강자성 및 스핀파 공명 신호를 측정하였다. NiFe 두께에 의한 intrinsic 스핀파 특성과 CoFe(5 nm) 박막에 의한 표면 스핀파 특성을 동시에 분석하고자 하였다.

## 2. 실험방법

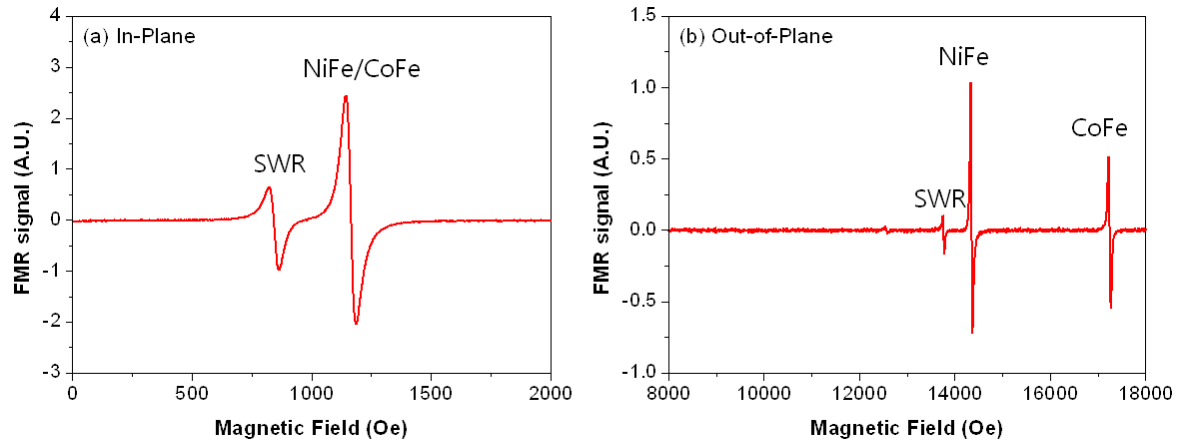
NiFe/CoFe 박막 재료는 고진공 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 열산화막이 있는 Si기판 위에 250°C의 온도에서 증착 하였다. 이때 하부층으로는 Ta(5 nm)/Cu(5 nm)를 증착 하였으며, 자성 박막의 표면 산화를 방지하기 위하여 자성 재료 상부에 Ta(5 nm)를 증착 하였다. 제작된 박막의 적층 구조는 Ta/NiFe(100 nm)/CoFe(5 nm)/Cu/Ta/SiO<sub>2</sub>/Si이었다. 제작된 박막 재료의 in-plane 및 out-of-plane에서 자기장 세기 및 각도에 따른 강자성 공명 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 스핀들 간의 교환 뻗뻗 상수(exchange stiffness constant)  $A_{ex}$ 는 스핀파의 탄성 특성을 나타내는 재료의 물성이다.  $n$ 은 스핀파의 정상파 모드를 나타내는 정수이다. 두께에 의한 스핀파 공명 자기장은 강자성 공명 자기장 보다 낮은 자기장에서 나타나므로 in-plane에서는 intrinsic 스핀파 특성만 나타나지만 out-of-plane에서는 CoFe에 의한 표면 스핀파가 강자성공명 신호보다 높은 자기장에서 나타나고 있다. out-of-plane에서 측정한 각도에 따른 강자성 공명 신호로부터 intrinsic 스핀파 과 표면 스핀파 특성을 동시에 분석 한 결과를 발표할 예정이다.



**Fig. 1.** (a) FMR and spin wave signal measured at (a) in-plane and (b) out-of-plane in NiFe(100 nm)/CoFe(5 nm) bilayers.

#### 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).

# Magnetic Properties of Fe alloy – SiO<sub>2</sub> Core – Shell Structure

Sunwoo Lee<sup>\*</sup>, Sungjoon Choi, Sang-Im Yoo<sup>†</sup>

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

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

Iron (Fe) metal powder shows soft magnetic properties such as high saturation magnetization and low coercivity. For that reason, it has been used for inductors of high frequency applications. However, because of its metallic property, eddy current is generated under AC field. The eddy current causes heat generation and critical failure at high frequency region. Considering inter-particle eddy current loss, coating Fe based powder with insulating materials has been researched to block the inter-particle current path. In this study, to reduce inter-particle eddy current loss under AC magnetization, core-shell structure consisting of Fe alloy powder and SiO<sub>2</sub> insulating coating layer was fabricated. SiO<sub>2</sub> coating was performed by sol-gel method using Tetraethyl orthosilicate (TEOS) as a precursor of SiO<sub>2</sub>. The coating parameters, such as the coating time and the concentration of TEOS were controlled. Magnetic properties of SiO<sub>2</sub>-coated Fe alloy powder, including permeability and Q factor, will be presented for a discussion.

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

# Fe-Cu 합금의 자기적 특성을 이용한 열처리 효과 연구

이철규<sup>1,2\*</sup>, M.B Kishore<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)

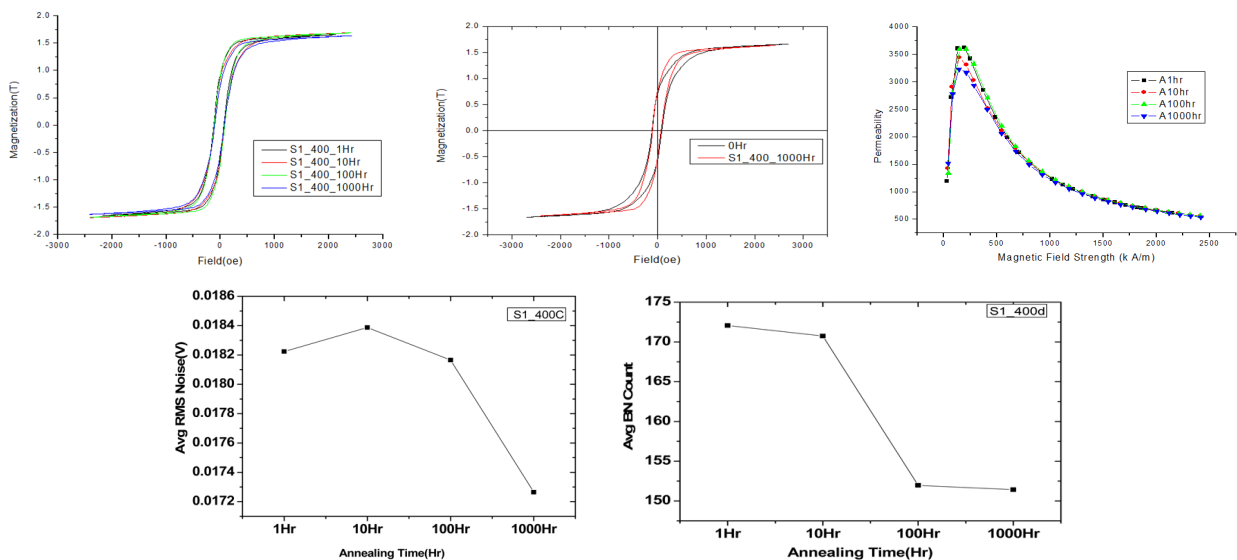
## 1. 서론

재료의 자기적 특성에 영향을 미치는 많은 것들이 있다. 이 실험에서는 Fe-Cu 합금의 자기적 특성을 이용해 열처리 효과를 알아보았다. 히스테리시스 루프(BH)와 바크하우젠 노이즈(BN)와 같은 자기 기술은 미세구조 변화에 매우 민감하기 때문에 원자로 압력 용기의 취화를 증가시키기 위한 유용한 도구이다. Fe-Cu 합금 시험편의 바크하우젠 노이즈(BN)와 히스테리시스 루프(BH)를 측정한다. 그리고 열처리 온도와 시간에 따른 각각의 Fe-Cu 합금 시험편 각각의 신호 변화를 측정했다.

## 2. 실험방법

Fe-Cu 합금 시험편을 열처리 시간, 열처리 온도등 열처리 조건을 변화하면서 각각의 히스테리시스루프(BH)와 바크하우젠 노이즈(BN)를 측정하였다. 자기적 성질과 기계적 성질 및 미세조직의 상관관계를 규명하기 위하여 열처리한 Fe-Cu시험편의 미세경도를 측정하였고, 전자현미경을 이용해 Fe-Cu 시험편의 미세조직을 측정하였다.

## 3. 결과



## 4. 참고문헌

- [1] 남영현, 열처리에 따른 3Cr-Lmo 강의 바크하우젠 노이즈 특성, 열처리공학회지(2008.7)
- [2] 이명호, 바크하우젠 노이즈 해석에 의한 재료의 열화도 평가, 한국 생산 제조 시스템학회지(2005)
- [3] 송은영, CoFe/Cu 박막의 자기저항 효과, 숙명여대 물리학과 대학원학위논문(1996)

# Thickness Dependence of saturation magnetization in amorphous CoSiB multilayers

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

Magnetic multilayers with perpendicular magnetic anisotropy are one of the most attractive systems for the next-generation device applications such as high-density data storage and spin-transfer torque magnetic random access memories [1-3]. Perpendicular magnetic anisotropy is the phenomenon of a magnetic multilayer that is preferentially magnetized in a direction perpendicular to the film's surface. Perpendicular magnetic anisotropy was suggested and investigated in 1975 and was first observed in Co/Cr films [4]. It has been established to the importance of interfaces as the driving mechanism for Perpendicular magnetic anisotropy in the multilayers [5].

For applications to high-density devices, magnetic multilayers with perpendicular magnetic anisotropy must have a large magnetic anisotropy ( $K_u$ ) and a low saturation magnetization ( $M_s$ ) [2, 6]. Therefore, multilayers with PMA consist of ferromagnetic materials and non-magnetic materials have been studied for reducing  $M_s$  and enhancing  $K_u$ . Moreover, a multilayer with PMA must have a large coercivity ( $H_c$ ) because of the demagnetizing field. The demagnetizing field increases with decreasing thickness of the ferromagnetic layer for the same width and height [7]. In this study, we investigated  $M_s$  and  $H_c$  of CoSiB/Pd multilayer with various Pd-layer's thickness. We note the dependence of the  $M_s$  and  $H_c$  of Pd-layer thickness in CoSiB/Pd multilayer.

## 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 cm  $\times$  1.4 cm, and were deposited by ultra high-vacuum system at room temperature. The magnetic properties ( $M_s$  and  $H_c$ ) of all thin-films were measured by a vibrating sample magnetometer.

## 3. Result and discussion

We investigated the PMA and the Hall effect of [CoSiB (7 Å)/Pd ( $t_{Pd}$ )]<sub>5</sub> multilayers with various thicknesses of the Pd layer. We found the dependences of  $M_s$  and  $H_c$  on the thickness of the Pd layer. In the [CoSiB (7 Å)/Pd (20 Å)]<sub>5</sub> multilayer, the maximum value of  $H_c$  and the minimum value of  $M_s$  were measured as 195.9 Oe and 631.2 emu/cm<sup>3</sup>, respectively. We will show the multilayer including CoSiB and interpret the correlation between magnetization and the Pd-layer thickness in the conference.

## 4. Reference

- [1] Y. Fujisaki, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 040001 (2013).
- [2] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura, and H. Ohno, Nature Mater. **9**, 721 (2010).

- [3] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, *Science* (N.Y.) **320**, 190 (2008).
- [4] S. Iwasaki, and K. Takemura, *IEEE Trans. Magn.* **11**, 1173 (1975).
- [5] P. F. Carcia, A. D. Meinhaldt, and A. Suna, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 178 (1985).
- [6] I. Kohichiro, *Non-Voltage Magnetic Memory MRAM* (Engineering Information Co., Korea, 2007).
- [7] B. D. Cullity, and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials* (John Wiley & Sons, Inc., USA, 2009).



# Preparation and Characterization of Metal-Ceramic Nanocomposite for High Frequency Application

Seung-Jae Jung<sup>\*</sup>, Hyo-Ryoung Lim, Tae-Youn Hwang, and Yong-Ho Choa<sup>†</sup>

Department of Fusion Chemical Engineering, Hanyang University,  
1271 Sa-1 dong, Ansan, Gyeonggi-do 426-791, South Korea

<sup>†</sup>choa15@hanyang.ac.kr

In order to use magnetic materials for the electronic or electromagnetic systems in several gigahertz frequency ranges, their magnetic properties such as saturation of magnetization, and relative permeability must be enhanced further.

Among various soft magnetic materials, transition metals (Fe, Co, and Ni) have been conventionally used for relatively high frequency system applications. However, these materials cause high energy losses in several gigahertz frequency ranges, so limit their applications. In addition to energy loss problem, oxidation also degrade magnetic properties. Therefore, effective insulation of the materials have become a solution in this situation. In this study, we synthesized metal particles insulated with ceramics by following steps. First, we synthesized metal oxide/ceramic nanocomposites powders through ultrasonic spray pyrolysis. Then the synthesized oxide powders were reduced by hydrogen reduction. Consequently, metal nanocomposites insulated with ceramics are fabricated. The effects synthesis parameters on magnetic properties of nanocomposites was also discussed.

**Keywords:** Soft magnetic material, Metal-Ceramic composite, Electrical insulation, Ultrasonic spray pyrolysis, Gigahertz frequency.

# Magneto-logic device using non-magnetic semiconductors at room temperature

Taeyueb Kim<sup>1,2\*</sup>, Sungjung joo<sup>3</sup>, Jinki Hong<sup>2†</sup>, Hyun Cheol Koo<sup>1,4</sup>,  
Jin Dong Song<sup>5</sup> and Joonyeon Chang<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>2</sup>Department of Display and Semiconductor Physics, Korea University, Sejong 339-700, Korea

<sup>3</sup>Center for Electricity & Magnetism, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea

<sup>4</sup>KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>5</sup>Center for Opto-Electronic Materials and Devices, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>6</sup>Post-Silicon Semiconductor Institute, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>†</sup>E-mail address: jkhong@korea.ac.kr

Recently, new type of transistor has been proposed in which electric switching function is manipulated by magnetism instead of electricity. Non-volatile reconfigurable processor is a logic device based on this magnetic switch, promising zero quiescent power and novel functions such as programmable logic operation and non-volatile built-in memory [1].

A simple analytic expression describing operation of avalanche magneto-diode is proposed. The operating mode is classified into high and low conducting states, and they are determined by electric and magnetic field. The proposed expression provides a phase diagram distinguishing these two conducting states. In order to verify our proposal, avalanche magneto-diodes were fabricated, and various experimental data were taken from these devices. The theoretical results well simulate the measured data, which can be considered as successful verification of our theoretical model. This model can work as a basic framework for engineering avalanche magneto-diodes and for further fundamental research about magnetic-field-dependent impact ionization process. In circuits composed of these switches, logical operations are programmed dynamically by magnetic signals, showing magnetic-field-controlled semiconductor reconfigurable logic at room temperature.

- [1] Sungjung Joo, Taeyueb Kim, Sang Hoon Shin, Ju Young Lim, Jinki Hong, Jin Dong Song, Joonyeon Chang, Hyun-Woo Lee, Kungwon Rhie, Suk Hee Han, Kyung-Ho Shin & Mark Johnson, *Nature* 494, 72-76(2013).

# Room temperature spin dependent potentials in a quantum well structure

Youn Ho Park<sup>1,2\*</sup>, Hyun-jun Kim<sup>1</sup>, Joonyeon Chang<sup>1</sup>, Heon-Jin Choi<sup>2</sup>, and Hyun Cheol Koo<sup>1,3†</sup>

<sup>1</sup>Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 136-791, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Republic of Korea

<sup>3</sup>KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University,

Seoul 136-701, Republic of Korea

<sup>†</sup>Correspondence to: hckoo@kist.re.kr

The spin field effect transistor (spin-FET), proposed by Datta and Das [1], is one of the fascinating concepts for next generation devices due to low power consumption, high speed, and nonvolatility. For developing Spin-FET, spin transport efficiency in a quantum well structure is crucial factors. Previous works [2, 3] have reported spin injection into semiconductor quantum well, however, the spin injection efficiency is insufficient to operate spin-FET at room temperature. In this research, we experimentally observed spin dependent electrochemical potentials in the non-local geometry at room temperature.

We utilized the inverted High Electron Mobility Transistor (HEMT) with a 2 nm In As active layer. The channel size of 8  $\mu\text{m}$  was defined by conventional Ar-dry etching. Previous works [2, 3] used etching process for top contact between spin injector and the semiconductor channel. In this research, we deposited  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  magnetic electrodes (FM) at the side of the InAs quantum well channel. The junction area between FM1 (FM2) and the InAs channel is only  $0.5 \mu\text{m} \times 2 \text{ nm}$  ( $1 \mu\text{m} \times 2 \text{ nm}$ ) which is much smaller than that of conventional contact.

The potential difference between parallel and antiparallel alignments of two ferromagnetic electrodes (FM1 and FM2) was clearly detected in the non-local geometry up to room temperature. The detected signal is  $1.2 \Omega$  which is large enough to operate spin-based devices. Using the hysteresis behaviors of two ferromagnetic electrodes, we also detected four different potential levels. From these four states, this device can be applied to spin logic and multi-level memory devices.

## References

- [1] S. Datta *et al.*, Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990).
- [2] H. C. Koo *et al.*, Science, 325, 1515 (2009).
- [3] J. Wunderlich *et al.*, Science. 78, 1335, (2010).

# All-electric spin transistor using perpendicular spins

Ji Hoon Kim<sup>1,2\*</sup>, Joohyung Bae<sup>1,3</sup>, Byoung-Chul Min<sup>1</sup>, Hyung-jun Kim<sup>1</sup>,  
Joonyeon Chang<sup>1</sup>, and Hyun Cheol Koo<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, Korea

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

<sup>3</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

<sup>†</sup>Author to whom correspondence should be addressed. Electronic mail: hckoo@kist.re.kr.

The spin field effect transistor proposed by Datta and Das involves the spin injection, detection, and gate modulation using a two-dimensional electron gas system[1]. On disadvantage in previous work [2, 3] was that external magnetic fields should be applied to align the magnetization of ferromagnets transverse to the Rashba field for spin precession.

In order to realize fully electrical spin transistor, we employ a perpendicular magnetization system which enables us to operate the spin transistor without an external magnetic field. For the injection and detection of perpendicular spins in the quantum well channel, we use  $\text{Tb}_{20}\text{Fe}_{62}\text{Co}_{18}/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  electrodes, where the  $\text{Tb}_{20}\text{Fe}_{62}\text{Co}_{18}$  layer produces perpendicular magnetization and the  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  layer enhances the spin polarization of the ferromagnetic source. In this spin transistor device, a gate-controlled spin signal as large as  $80\text{m}\Omega$  is observed at  $10\text{K}$  without an external magnetic field. In order to confirm the spin injection and relaxation independently, we measure the three-terminal Hanle effect with an in-plane magnetic field, and obtain a spin signal of  $1.7\text{m}\Omega$  at  $10\text{K}$ . These results clearly present that the electric field is an efficient way to modulate spin orientation in a strong spin-orbit interaction system.

## Reference

- [1] S. Datta, B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990).
- [3] H. C. Koo, J. H. Kwon, J. Eom, J. Chang, S. H. Han, and M. Johnson, Science, **325**, 1515 (2009).
- [4] H. C. Koo, J. H. Kwon, J. Eom, J. Chang, S. H. Han, and M. Johnson, J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 064006 (2011).

# Influence of thermal treatment-induced atomic states on spin orbit torque in MgO/CoFeB/W stacks

Seung Mo Yang<sup>1\*</sup>, Ja Bin Lee<sup>1</sup>, Gwang Guk An<sup>1</sup>, Woo Seong Chung<sup>3</sup>,  
Haesoo Park<sup>1</sup>, and Jin Pyo Hong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Novel Functional Materials and Devices Lab, The Research Institute for Natural Science,  
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

Spin-orbit-torque (SOT) effect, which arises from in-plane current, has recently garnered considerable attention as a novel magnetization switching mechanism for low power consumption, and new physical phenomenon [1,2]. The Rashba effect and the spin Hall effect have been considered to generate this kind of magnetic switching operated by SOT [3]. However, X. Qiu [4] has reported that there may be a new mechanism of spin-orbit torque associated with the oxidation states. Therefore, we examined the current-induced effective field related with SOT in W/CoFeB/MgO stacks with various post-annealing temperatures. SOT property has been investigated as atomic states and distribution at various annealing temperatures are changed.

## 2. EXPERIMENTAL DETAILS

MgO/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>/W stacks were prepared on thermally oxidized Si substrates utilizing a radio-frequency (RF) magnetron sputtering-system. Species were [Si/SiO<sub>2</sub>] Substrate/MgO (2)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> (t<sub>CFB</sub>)/W (8), where numbers in parenthesis refer to layer thickness in nanometers. To show post-annealing influence on magnetic and atomic features, a post-annealing process was carried out at 325°C, 350°C, 375°C, and 400°C for 1 hour under vacuum conditions below  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr, with a 3T perpendicular magnetic field. Finally, these stacks were patterned into the width and length with 20  $\mu\text{m}$  and 120  $\mu\text{m}$  Hall bar by standard photolithography and Ar ion-milling techniques.

## References

- [1] Liu, L. Q. et al. Spin-torque switching with the giant spin Hall effect of tantalum. *Science* **336** (2012) 555-558.
- [2] Miron, I. M. et al. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection. *Nature* **476** (2011) 189-193.
- [3] Kim, J. et al. Layer thickness dependence of the current-induced effective field vector in Ta/CoFeB/MgO. *Nature Mater.* **12** (2013) 240-245
- [4] Qiu, X. et al. Spin-orbit-torque engineering via oxygen manipulation. *Nature nanotech.* **10** (2015) 333-338

# LiFe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>FePO<sub>4</sub>의 자기적 특성 연구

고병욱\*, 이진현, 조다애, 김철성

국민대학교 물리학과

## 1. 서론

이차전지 양극물질로 Olivine 계열의 리튬인산화물(LiMPO<sub>4</sub>, M = 전이금속)에 관한 연구가 활발하다. 그 중 희소성이 매우 작고 무독성이며, 열적 안전성과 경제성이 뛰어난 Fe을 사용한 리튬인산철(LiFePO<sub>4</sub>)이 여러 분야에서 사용되고 있다. 하지만 전이금속 Fe은 에너지 밀도가 작아 리튬인산철 이차전지는 다른 전이금속 이차전지에 비하여 작동전압이 낮다. 현재 이러한 단점을 극복하기 위해 철 이외의 다른 전이금속을 치환시키는 연구가 진행 중이다. 따라서 본 연구에서는 리튬인산철에 에너지밀도가 높은 전이금속인 Mn을 미량 치환한 LiFe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>FePO<sub>4</sub>에 관한 자기적 특성을 연구하였다.

## 2. 실험방법

LiFePO<sub>4</sub>에 미량의 Mn이 치환된 LiFe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>FePO<sub>4</sub> 분말 시료는 직접 합성법으로 제작되었다. Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, MnCO<sub>3</sub>, 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 시작물질로 하여 당량비로 혼합 후 마노를 사용해 곱게 갈았다. 혼합된 시료를 Ar 가스 분위기에서 350 °C로 3시간 동안 하소(calcination)하고 하소한 시료를 유압 압축기를 이용하여 5000 N/cm<sup>2</sup>로 압축(pelleting), Ar 가스 분위기에서 700 °C로 10시간 동안 소결(sintering)하였다. 이렇게 제조한 시료를 XRD(X-ray diffractometer)를 사용, Rietveld 정련법을 이용한 Full Prof 프로그램을 통해 결정학적 구조를 분석하였으며, VSM(vibrating sample magnetometer)을 사용하여 온도에 따른 자화 변화를 측정하였다. 또한 Mössbauer 분광 실험을 통해 LiFe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>FePO<sub>4</sub> 분말 시료의 미시적인 자기적 특성을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

XRD(X-ray diffractometer)를 사용하여 직접합성법으로 제조된 LiFe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>FePO<sub>4</sub> 분말 시료를 측정, Rietveld 정련법을 이용한 Full Prof 프로그램으로 분석결과 제조된 시료는 공간그룹이 Pnma였으며 orthorhombic 구조로 분석되었다. VSM(vibrating sample magnetometer)을 사용한 온도에 따른 자화 변화를 측정한 결과 반강자성체에서 상자성체로 자기 상전이가 일어나는 Nil온도(T<sub>N</sub>)를 확인하였다. 마지막으로 Mössbauer 분광 실험을 통해 상온에서의 전기 4중 극자 분열치(ΔE<sub>Q</sub>)와 이성질체 이동치(δ)를 구했다. LiFe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>FePO<sub>4</sub> 분말 시료의 ΔE<sub>Q</sub> = 2.95 mm/s, δ = 1.11 mm/s로, 상온에서 Fe 이온은 Fe<sup>2+</sup>상태로 존재한다는 것을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] A. Yamada, and C. Sai-Cheong, Journal of The Electrochemical Society, **148**, A960-A967 (2001)

# Rashba effective field induced anisotropic magnetoresistance in InAs quantum well channel

Won Young Choi<sup>1,2\*</sup>, Hyung-jun Kim<sup>1</sup>, Joonyeon Chang<sup>1</sup>, Suk Hee Han<sup>1</sup> and Hyun Cheol Koo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

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

The Rashba spin-orbit interaction (SOI) has been to the forefront as a core of spin-FET introduced by S. Datta and B. Das. And recently, Rashba SOI at interface between heavy metal and ferromagnetis being actively researched as a source of spin-orbit torque due to its applicability. On the other hand, Rashba SOI in 2DEG channel is also able to act as an origin of spin polarization which affects transport property via SOI, so-called anisotropic magnetoresistance (AMR). In our research, estimation of Rashba SOI in quantum well channel using AMR will be discussed.

We used InAs quantum well structure with carrier density,  $n_s = 2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ , and Rashba SOI field,  $B_R = 7.9 \text{ T}$ , was evaluated by Shubnikov-de Haas (SdH) oscillation at 1.8 K. To observe AMR we applied in-plane magnetic field because Rashba SOI induced spin polarization istransversal. Then sample was rotated to make total effective field tilt from current direction and angle dependence of resistance was observed.

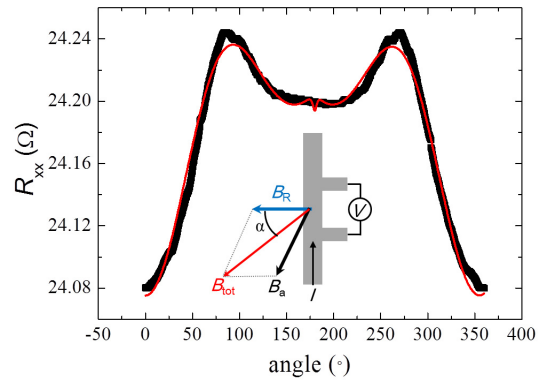
Measured AMR data is shown in Fig. 1. At angle  $0^\circ$  or  $180^\circ$ , total effective fieldisnormal to current direction, so resistance is low. However external magnetic field is parallel ( $0^\circ$ ) or antiparallel ( $180^\circ$ )to Rashba effective field, so Rashba parallel state,  $0^\circ$ , has much lower resistance due to greater total effective field.

Taking cubic symmetry and Rashba field into account, AMR is described by [1]

$$R_{xx} = a_0 + a_1 B_{tot} \cos^2(\alpha + \varphi) + a_2 B_{tot} \cos^4(\alpha + \varphi),$$

where  $\alpha$  is angle between Rashba and total effective field,  $\varphi$  is arbitrary phase shift. Solid line in Fig. 1 is fitting result using this equation and Rashba field was 7.7T which is comparable to the value from SdHoscillation.

Finally, spin polarization of 2DEG with Rashba SOI was confirmed by measuring AMR and we could estimate the Rashba effective magnetic field.



**Fig. 1.** AMR data of InAs channel

## Reference

- [1] K. Narayanapillai *et al.* *Appl. Phys. Lett.* 105, 162405 (2014).

# Study on the Effect of Pt Resistivity on SOTs in Pt/Co/AlOx Trilayer Structure

Jae Wook 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, KAIST, Daejeon 305-701

## 1. 서론

Since the discovery, spin-orbit torque has been receiving a great deal of attention due to its possible applications in non-volatile spin-orbit torque magnetic random access memory (SOT-MRAM) as well as in reprogrammable magnetic switch which can be integrated in spin logic devices [1]. In heavy metal/ferromagnet/oxide structures, in-plane current generates spin accumulation at the HM/FM interfaces with spin Hall effect (SHE) and/or interfacial spin-orbit coupling (ISOC), which gives rise to a spin-orbit torque arising from the spin orbit coupling to the FM layer. As of today, there are several reports on the contribution of the ISOC, which was controlled by inserting Cu layer at the HM/FM interface or by oxygen manipulation [2]. On the other hand, there is only a handful of study on the modulation of the SHE, which is considered to be determined when the materials are chosen.

In this work, we report a systematic study on an effect of the underlayer Pt resistivity on the spin-orbit torque in Pt/Co/AlOx structure, the well-studied structure that has a strong PMA, by means of Pt deposition pressure manipulation. Our harmonic lock-in measurement results and the current induced magnetization switching results both demonstrate that the SHE contribution to the SOT can be improved by the increase of the Pt resistivity.

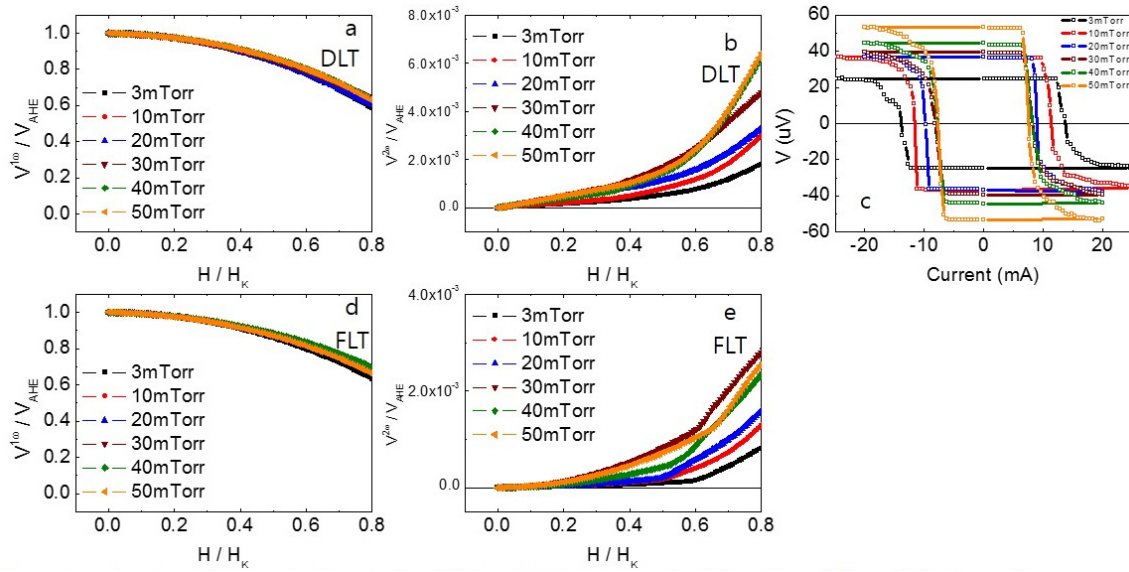
## 2. 실험방법과 결과

The thickness of the Pt layer between Ta underlayer and Co layer was carefully controlled in order to obtain 5 nm thickness with thickness deviations of less than 2% for the entire set of samples using X-ray reflectivity (XRR) analysis. Based on the XRR data, the deposition rates for the Pt layer were obtained and Ta(3)/Pt(5)/Co(0.8)/AlOx(1.8) layers (numbers in nanometers) were deposited on Si/SiO<sub>2</sub> substrates by magnetron sputtering with Pt deposition pressures of 3, 10, 20, 30, 40, 50mTorr accordingly. Here, only the Pt deposition pressures were varied and all the other layers were deposited at 3mTorr.

All samples were patterned into 5  $\mu$ m-width hall cross bar using photolithography and ion milling. The SOTs were measured using harmonic lock-in technique with polar angle of 4° with in-plane fields applied parallel (DLT) and perpendicular (FLT) to the current flow direction. Finally, the current-induced magnetization switching characteristics were studied by applying longitudinal current pulses with fixed magnetic field along the current flow direction.

In this study, the resistivity of the Pt was tuned up to around 60% with control of the deposition condition. As can be seen in the harmonic signals, the slope of the second harmonic signal increased as the Pt deposition pressure increased. This increase in the slope of the harmonic signals suggest that the effective fields which reflect SOT also increased with increase in Pt resistivities. Moreover, the current-induced magnetization switching results show decreased critical current with increased Pt deposition pressures which show good agreement with the harmonic lock-in measurements.





**Fig. a, b, d, e,** Harmonic signals for DLT and FLT measured at 2mA for different Pt deposition pressures normalized by  $V_{AHE}$  **c,** Current-induced magnetization switching for different Pt deposition pressures with external longitudinal field of 100Oe.

### 3. 결론

We have studied the effect of Pt resistivity on the spin-orbit torque in Pt/Co/AlOx structure by controlling Pt deposition pressures from 3 to 50mTorr. Increase in the slope of the second harmonic signal was observed with increase in the Pt deposition pressures. Moreover, switching results show decrease in switching current with increase in Pt deposition pressures both of which suggest the increase of SOT with increase of Pt resistivities.

### 4. 참고문헌

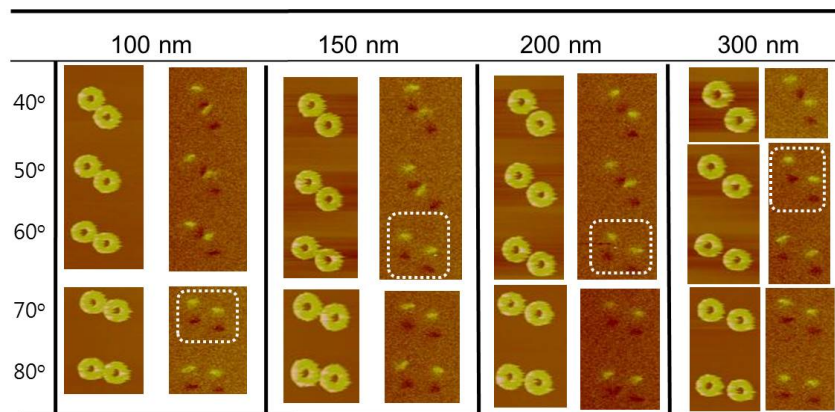
- [1] Miron, I.M. *et al.* Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection. *Nature* **476**, 189-193 (2011).
- [2] Qiu, X. *et al.* Spin-orbit-torque engineering via oxygen manipulation. *Nature Nanotechnology* **10**, 333-338 (2015).

# Magnetostatic interaction between domain walls in sub-micron sized dual Co rings

Soo-Yeol Yoo<sup>\*</sup>, Hyun-Sik Park, Ki-Bum Lee, Chunghee Nam

Department of Photonics and Sensors, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

Magnetostatic interaction of magnetic domain walls (DWs) is investigated by using magnetic force microscope (MFM) techniques at the remanent state in closely placed Co dual rings with 10 and 20 nm in thickness and different spacing between Co rings. In an array of dual rings in 10° step against an applied field direction, the angular dependence of DW interaction shows an obvious change from coupling of DWs to decoupling of DWs in the MFM measurements, as shown in Fig.1. It is found that strong interaction between DWs at the lower angles and the smaller spacing is owing to the surface magnetic charge attraction. On the other hand, the volume magnetic charge attraction accounts for weak DW interaction at the higher angles and the larger spacing[1]. In addition, the dependence of the Co thickness on the magnetostatic DW interaction can be explained by the magnetic volume effects[2].



**Fig. 1.** AFM and MFM images of dual rings in terms of the gap spacing and the angle between the magnetic field direction and the coupling axis, where the white dotted box in the MFM images corresponds to the de-coupled remanent state of rings.

## References

- [1] L. O'Brien, D. Petit, H. T. Zeng, E. R. Lewis, J. Sampaio, A. V. Jausovec, D. E. Read, and R. P. Cowburn, *Phys. Rev. Lett.* 103, 077206 (2009)
- [2] R. Sbinaa, Z. Bilin, M. Ranjbar, H. K. Tan, S. J. Wong, S. N. Piramanayagam and T. C. Chong, *J. Appl. Phys.* 107, 103901 (2010)

# A novel sonochemical approach for the synthesis of core/shell $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ag}$ nanocubes and $\text{SiO}_2/\text{Ag}$ nanospheres with superior catalytic properties

Mohamed Abbas<sup>1\*</sup>, Sri Ramulu Torati<sup>2</sup>, Yunji Eom<sup>2</sup>, Cheol Gi Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ceramics Department, National Research Centre, El-Bohous Street, 12622 Cairo, Egypt

<sup>2</sup>Department of Emerging Materials Science, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST),  
711-873 Daegu, South Korea

A novel sonochemical approach was developed for the synthesis of different core/shell structures of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ag}$  nanocubes and  $\text{SiO}_2/\text{Ag}$  nanospheres. The total reaction time of the three sonochemical steps for the synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ag}$  nanocubes is shorter than the previously reported methods. A proposed reaction mechanism for the sonochemical functionalization of the silica and the silver on the surface of magnetic nanocubes was discussed in details. Transmission electron microscopy revealed that small Ag nanoparticles of approximately 10-20 nm in size decorated on the surface of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  nanocubes, and the energy dispersive spectroscopy mapping analysis confirmed the morphology of the structure. Additionally, X-ray diffraction data were used to confirm the formation of both phases of a cubic inverse spinel structure for  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and bcc structures for Ag in the core/shell structure of the  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ag}$  nanocubes. The as-synthesized  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ag}$  nanocubes displayed a high efficiency in the catalytic reduction reaction of 4-nitroaniline to 4-phenylenediamine, and with better performance than both Ag and  $\text{SiO}_2/\text{Ag}$  nanoparticles. The grafted silver catalyst was recycled and reused at least fifteen times without a significant loss of catalytic efficiency.

# Structural analysis and room temperature ferromagnetism of $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ nanorods, synthesized by controlled hydrothermal method

Prasanta Dhak\*, Sandeep K. S. Patel, Min-Gwan Kim,  
Jae Hyeok Lee, Miyoung Kim, and Sang-Koog Kim

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

## 1. Introduction

In present day research, diluted magnetic oxide (DMO) system are one of the promising candidates for potential spintronics application, because they display room temperature ferromagnetism<sup>1</sup>. The development of today's spintronics research has provided many possibilities of revolutionizing semiconductor technology<sup>2</sup>. There are so many previous researches till date focusing on ZnO, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> systems of a low band gap around 3.0 eV, but here we have focused our research on DMO of nearly insulating system with a medium band gap  $\sim 5.0$  eV doped with transition metal ions. For the hybrid device application in the present day research, high  $\kappa$  dielectric systems like HfO<sub>2</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are of great interest. Recently, few researchers have reported the existence of room temperature ferromagnetism in transition metal ion doped HfO<sub>2</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films and nanocrystals<sup>3</sup>, but little attention has been given to one dimension (1D) nanostructures of it. Studies on 1D semiconductor nanostructures has given huge interest form the last one decade, because they have extraordinary lengths, flexibility, shape anisotropy and unique electronic features due to their 1D quantum confinement effect. Here, we have synthesized  $\text{Y}_{2-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ; ( $x = 0.00, 0.04, 0.08$ ) nanorods by a cheap and easy hydrothermal method and studied the room temperature magnetic property for pure and transition metal ion  $\text{Co}^{2+}$  doped Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods for the first time. The hydrothermal method is used for the preparation of 1D nanostructure because; it requires neither templates nor catalysts to yield the product continuously. The details of synthesis mechanism, structural and microstructural analysis along with the explanation of the existence of room temperature ferromagnetism (RTFM) in our studied materials have been discussed here. The combination of ferromagnetism with high  $\kappa$  dielectric characteristics of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped with  $\text{Co}^{2+}$  ions will enhance the integration of complementary metal-oxide semiconductor with spintronic technology.

## 2. Experiment method, results and discussion

For the synthesis of  $\text{Y}_{2-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ; ( $x = 0.00, 0.04, 0.08$ ) nanorods using hydrothermal method, 10% NH<sub>4</sub>OH solution was added to the appropriate amount of stock solution of the metal ions to get the hydroxide precipitate of it. The white slurry was placed in a stainless steel Teflon-lined autoclave for hydrothermal treatment at 190°C for 20 h. The autoclaved product was then washed several times with water and calcined at 550°C for 4h to get the final product. X-ray diffraction, Raman spectra and X-ray photoelectron spectroscopy were carried out which indicated the formation of pure cubic phase structure of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped with  $\text{Co}^{2+}$  ions without any secondary phase formation. The growth mechanism of the synthesized nanorods has been proposed and it grew along [100]

directions.<sup>4</sup> The scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) images support the growth mechanism of the nanorods with average diameters of 100 nm and length of 2  $\mu\text{m}$ . Magnetic property of all the samples are studied by vibrating sample magnetometer (VSM) analysis. The M-H curve of pure  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanorods shows almost linear diamagnetic curve whereas  $\text{Co}^{2+}$  doped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  exhibits clear signature of ferromagnetism. The existence of room ferromagnetic behavior in  $\text{Co}^{2+}$  doped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  is mainly due to the existence of oxygen vacancies originated after the doping of transition metal ion in the host lattice. Oxygen vacancies are acting as defect centers in the bound magnetic polaron model to account for this dilute magnetic oxide of medium band gap with low carrier concentration.<sup>5</sup> The existence of intrinsic defects such as oxygen vacancies in our studied materials  $\text{Y}_{2-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  nanorods has been further supported by the analysis of room temperature photoluminescence spectra.

### 3. Conclusion

In conclusion, we have synthesized pure and Co doped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanorods using a simple and inexpensive hydrothermal process. Pure  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanorods exhibit linear diamagnetism whereas Co doped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanorods show room temperature ferromagnetism. The existence of ferromagnetism is due to the incorporation of transition metal ion in  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanorods which is again due to the creation of oxygen vacancy during defect formation in the host lattice. The ferromagnetic behavior is mainly due to the defect mediated mechanism in the framework of bound magnetic polarons. The presence of defect related oxygen vacancy is confirmed by photoluminescence measurements. The observation of room temperature ferromagnetic behavior in our studied materials suggests a generic feature of Co doped high  $\kappa$  oxides as a good candidate for DMO. Such modulation in the magnetic behavior of DMO via oxygen vacancy by means of doping transition metal ion can be exploited for potential applications in spintronics.

### 4. References

- [1] W. H. Heo S. J. Pearton, M. Ivill, D. P. Norton, and T. Steiner, *Semicond. Sci. Technol* 19, R59 (2004).
- [2] H. Ohno, *Science* 291, 840 (2001).
- [3] Y. L. Soo Y. H. Chang, W. C. Lee, M. L. Huang, Y. J. Lee, S. C. Weng, W. H. Sun, M. Hong, J. Kwo, S. F. Lee, J. M. Ablett, and C.-C. Kao, *Appl. Phys. Lett.* 91, 082504 (2007).
- [4] Wang, Z. L.J. *Phys. Chem. B*, 104, 1153 (2000).
- [5] J. M. D. Coey, M. Venkatesan, and C. B. Fitzgerald, *Nature Materials* 4, 173 (2005).

# Co-doped Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods: Structure and magnetism

Sandeep K.S. Patel\*, Prasanta Dhak, Min-Kwan Kim,  
Jae-Hyeok Lee, Miyoung Kim, and Sang-Koog Kim

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

## 1. Introduction

Diluted magnetic semiconductors (DMSs) have attracted a considerable amount of attention owing to their promising applications in spintronics and magneto-optics [1,2]. Over the past decades, the enhancement of DMS magnetic properties such as Curie temperature has been the focus of intense research. Curiously, in this context, TM-ion-doped rare-earth ( $R^{3+}$ ) oxides have yet to be given significant consideration. Binary rare-earth oxides are the most stable rare-earth compounds, in which rare-earth ions typically hold the trivalent state. In TM ions, magnetic moment arises from the partially filled outermost 3d electrons, whereas in  $R^{3+}$  ions, magnetic moment arises from the inner 4f incomplete sub-shell. Considering the importance of  $R^{3+}$  rare-earth oxides, particularly the broad interest in Gd-based oxides, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> may be an advanced potential DMS candidate after doping with Co<sup>2+</sup> ions. The ferromagnetism of the Gd atom below 289 K drives the study of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'s magnetic properties.

## 2. Experimental method and Results

We synthesized Gd<sub>2-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>3</sub> ( $x = 0, 0.02, 0.04, 0.06$ ) nanorods via the following hydrothermal procedure. First, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders and stoichiometric amounts of Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O were dissolved in diluted nitric acid solution. Then, 25% NH<sub>4</sub>OH solution was slowly added to the above solution under vigorous stirring, adjusting the pH value of the new colloidal solution between 10 and 12. The hydrothermal reaction was conducted at 190°C for 20 h in a Teflon-lined autoclave. The solid products were collected by filtration and washed with distilled water. Subsequent 3 h heat treatment at 550°C induced the formation of Co-doped Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods. From FESEM and TEM images, the morphology is rod-shaped with less than 100 nm diameter and 200 nm–2 μm long. With increasing Co-doping concentration, the length and diameter of the nanorods decreases. EDS elemental mappings shows the uniform distribution of the Gd, Co, and O elements in the crystal.

## 3. Discussion and Conclusions

XRD, Raman, XPS, and TEM measurements showed the samples to have a single cubic phase structure of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped with Co<sup>2+</sup> cations, without any cobalt clusters. The XPS spectra revealed the Co ions to be in divalent Co<sup>2+</sup> states and in octahedral symmetry. All the samples exhibited mostly paramagnetism along with very weak antiferromagnetism; this was due to the non-interacting nature of the Gd<sup>3+</sup> ions which, incapable of undergoing strong ferromagnetic interaction with the neighboring ions. The samples also exhibited negative Curie–Weiss temperature due to the super-exchange interaction of Gd<sup>3+</sup> and Co<sup>2+</sup> ions via O<sup>2-</sup> ions and coupling between Co<sup>2+</sup>–Co<sup>2+</sup> pairs, indicating the presence of very weak antiferromagnetism in the Gd<sub>2-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>3</sub> ( $x = 0, 0.02, 0.04, 0.06$ ) nanorods.

#### 4. References

- [1] H. Ohno, Science **281**, 951 (1998).
- [2] S. A. Wolf *et al.*, Science **294**, 1488 (2001).

# Detrimental Effect of Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya Interaction on Perpendicular Spin-Transfer-Torque Magnetic Random Access Memory

Peong Hwa Jang<sup>1\*</sup>, K.-J. Lee<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 136-713, Korea

## 1. 서론

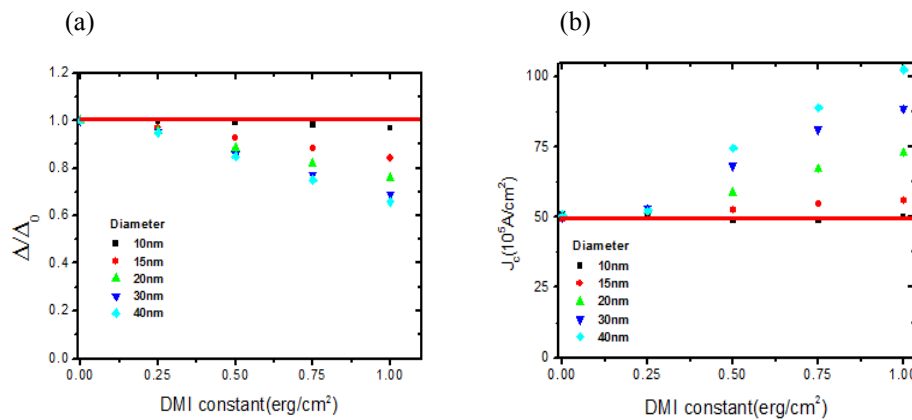
Recently, perpendicular magnetic anisotropy based spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM) is drawing a great attention to researchers studying MRAM due to its advantages of having the density of DRAM, fast response time of SRAM and the non-volatility of flash memory. [1]

Moreover, recent studies has shown that the spin orbit coupling, which results in the interfacial perpendicular magnetic anisotropy, and the inversion symmetry breaking at the interface between free layer and heavy metal of magnetic tunnel junction (MTJ) results in antisymmetric exchange interaction named as Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI).[2]

We numerically studied the effect of DMI and size of the cell on switching current density at room temperature and thermal stability at 0K which are the important factors for commercialization of STT-MRAM. [3] We used for exchange stiffness constant, for anisotropy constant, for saturation magnetization and for DMI constant for cells with diameter of.

## 2. 실험방법과 결과

First, we studied the effects of DMI and cell diameter on the thermal stability that is a good parameter for determining the retention time of the data. According to our study with String method [4], the larger DMI constant lead to the smaller thermal stability as shown on Figure 1(a).



**Fig. 1.** (a) Normalized thermal stability as a function of DMI constant.

(b) Switching current density as a function of DMI constant. Both thermal stability and switching current density is less effected by DMI constant as the diameter of the cell is decreased.



Next, we calculated the switching current density at room temperature as a function of DMI constant. We found that the current density increased as DMI constant got larger due to its tendency to keep its skyrmion number maintained. [5]

### 3. 고찰 및 결론

In conclusion, we showed that DMI deteriorates both the switching current and the thermal stability of the device. Hopefully, the DMI effect vanished as the device diameter, as required in the commercialization of STT-MRAM, got smaller.

### 4. 참고문헌

- [1] A V Khvalkovskiy et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **46**, 139601 (2013)
- [2] T. Moriya, Physical Review **120**, 91 (1960).
- [3] J. Z. Sun et al., Phys. Rev. B **88**, 104426 (2013).
- [4] Weinan E, Weiqing Ren, Eric Vanden-Eijnden, J. Chem. Phys., **126**, 164103.
- [5] R. S. Ward, Lett.Math.Phys. **35** (1995) 385-393

# 공침법을 이용한 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 자성 파우더 및 자성유체 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 올레인산이나리놀산과 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 실용화되고 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  $\text{N}_2$  분위기에서  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 를 DI용액에 500rpm / 30min의 조건으로 용해시켜 각 용액을 3ml / 9ml를 다시 50℃ 온도에서 600rpm / 40min동안 배합시켰다. 그리고 침전제인  $\text{NH}_4\text{OH}$ 용액을 분산시켜  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 의 자성파우더를 석출하였다. 석출된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 파우더를 DI에 세척하여 올레인산의 계면활성제를 코팅하여 필터링을 거쳐  $\text{N}_2$  분위기의 Oven에서 50℃로 24시간 동안 건조하여 파우더를 제작하였다. 제조된 파우더 사이즈를 분석하기 위하여 FE-SEM, TEM을 이용하여 분석하였고, XRD 및 VSM(Vibration Sample Magnetism)을 이용하여 파우더의 결정구조 및 자성 특성을 분석하였다.

그 후 자성파우더와 실리콘 오일을 혼합하여 자성유체를 만들었다. 혼합 방법은 볼밀 공정을 이용했다. 40 wt%의 파우더와 실리콘 오일을 혼합 하였으며 120rpm으로 48h 동안 공정을 진행했다. 비드로는 5mm, 10mm의 지르코니아 볼을 사용했다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

결과, 약 20nm 이하의 사이즈를 가지고, 계면활성제를 코팅한 파우더가 서로 반발하여 응집되지 않는 현상을 TEM으로 확인하였다. 그리고  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 의 결정구조를 가지며, 69 emu/g의 포화자화값을 가지는 자성파우더를 제작하게 되었다. 또한 오일과의 혼합을 통하여 스파이크 형상을 확인할 수 있었다. 건조 온도, 분위기를 최적화 한다면 더욱 향상된 포화자화값을 갖는 자성파우더를 얻을 수 있을 것이다.

## 4. 결론

공침법을 이용해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 의 결정구조를 가지고, 69 emu/g의 포화자화값, 약 15~20nm의 평균입도 및 균일한 입도분포를 가지는 자성파우더를 제작하였고 실리콘 오일과 혼합하여 스파이크 모양을 관찰하였다.



**Fig. 1.** 자성유체의 스파이크 형상

## 5. 참고문헌

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

# 산화철 나노입자의 교류 자화율 특성 분석

김동영\*, 윤석수, 정은경

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 760-749

## 1. 서론

자성 나노입자의 초상자성 특성은 자화 곡선 측정 또는 온도에 따른 투자율 변화로 확인할 수 있다. 자화 곡선 측정에서는 보자력이 0이고, Langevin 함수를 따른다. 강자성 공명 신호는 자성 나노입자 내부의 스핀들의 영향을 반영하고 있으므로, 자성 나노입자의 자화량, 형상 및 결정 이방성 등의 특성을 모두 포함한다. 따라서 강자성 공명 신호를 해석할 경우 자성 나노입자의 여러 가지 물성을 분석하는 것이 가능하다. 자성 나노입자의 크기 및 크기의 분포에 따른 강자성 공명 신호를 계산을 통하여 분석하였으며, 초상자성 자성 나노입자의 강자성 공명신호를 해석하여 결정 이방성 상수를 분석하였다. 자성나노입자를 의료분야에 응용하기 위하여 투자율 스펙트럼을 측정하고 있으며, 자성나노입자의 크기에 따라서 브라운 운동과 널 운동특성이 서로 독립적인 특성을 보인다[1].

본 연구에서는 초상자성 특성을 갖는 산화철 나노입자를 열분해법을 사용하여 제조하였으며, 제조한 나노입자의 투자율 스펙트럼을 측정하였다. 브라운 운동과 널운동에 대한 특성분석 결과로부터 제조된 나노입자의 크기분포특성을 분석하였다.

## 2. 실험방법

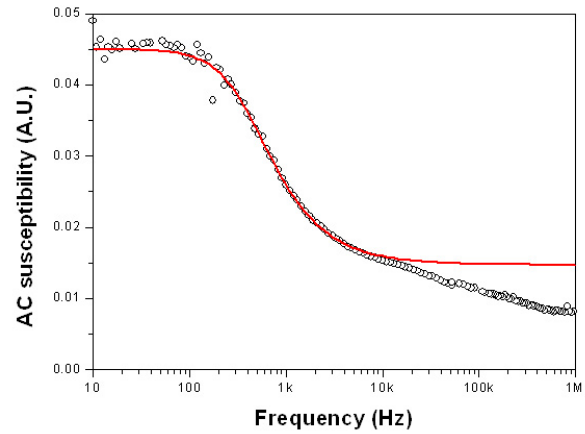
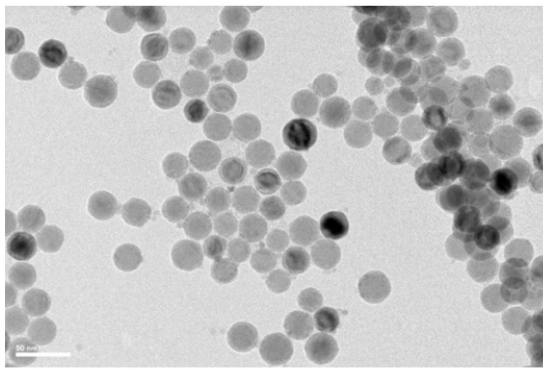
주파수에 따른 교류 자화율 분석에 사용한 산화철 나노 입자는 Trioctylamine 용매에  $\text{Fe(OL)}_3$  전구체를 고르게 섞은 반응 용액을 사용하여 고온 열분해 방법으로 제조하였다. 산화철 나노 입자를 관측하기 위한 TEM 시편은 1.0 ml의 반응 용액을 에탄올에 희석시켜 잔류 유기 용매를 세척한 후 원심분리기를 이용하여 산화철 나노입자를 추출한 후, 초음파 세척기를 이용하여 핵산 용액에 균일하게 분산시킨 후 Cu-grid 위에 분산시켜 제작하였다. 또한 반응 용액의 1.0 ml를 유리 튜브에 담은 후 10Hz-1MHz의 주파수 범위에서 Lock-in Amplifier를 사용하여 교류 자화율 스펙트럼을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 산화철 나노입자의 TEM 사진과 교류 자화율 스펙트럼을 보인다. TEM 사진으로부터 열분해 방법으로 제조한 산화철 나노 입자의 평균 크기는 약 23 nm였으며, 나노입자들은 균일한 크기의 분포 특성을 갖는 것으로 보인다. 교류 자화율 스펙트럼은 다음의 이완(relaxation) 특성을 사용하여 분석하였다.

$$\chi = \chi_{\infty} + \frac{\chi_B - \chi_N}{1 + i\omega\tau_B} \quad (1)$$

여기서  $\chi_B$ 는 브라운 운동에 의한 자화율,  $\chi_N$ 는 널 운동에 의한 자화율,  $\tau_B$ 는 브라운 운동에 의한 이완 시간이다. 그림에서 실선은 식(1)을 사용하여 계산한 결과이며, 계산에 의한 이완 주파수는 400 Hz였다. 저주파수 이완 특성은 브라운 운동에 의한 효과이며, 제조한 나노입자는 브라운 운동 효과와 이완 주파수가 높은 널 운동특성이 함께 보이고 있다. 따라서 제조한 나노입자는 브라운 운동에 기여하는 23 nm 크기의 입자와 크기가 작은 입자들이 함께 공존하고 있음을 알 수 있다.



**Fig. 1.** (a) TEM image of iron oxide nanoparticles and  
(b) AC susceptibility spectrum of iron oxide nanoparticles

#### 4. 감사의 글

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

#### 5. 참고문헌

[1] J. Carrey, et. al., JAP. **109** (2011) 083921.

## 임피던스 분석기를 활용한 자성나노입자의 완화효과 연구

Sunghyun Yoon<sup>\*</sup>

Department of Physics, Gunsan National University, Gunsan 573-701 Korea

임피던스 분석기를 이용하여 소량의 나노입자 분산액의 복소수 자기감수율을 주파수의 함수로 측정하는 방법을 연구하였다. 단분산(monodispersed) 자성유체 용액에 대한 복소수 자기감수율 모델을 다분산성(polydispersed) 자성유체로 확대적용하고 시료에는 Brown 과 Neel의 서로 다른 완화 메커니즘이 존재함을 가정하였다. 이 결과를 기존의 자기력계 데이터와 병합하여 다분산 자성유체의 입자 사이즈 분포, 분산액 중 입자의 체적비율(volume fraction), 자기이방성 상수 등을 구하는 방법을 알아보고 이를 마그네타이트와 망간 페라이트 나노물질에 적용하여 기존의 결과와 비교해 보았다.

# Fe wire 전기폭발법을 이용한 자성유체용 Fe나노파우더 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>(주)태한이엔씨

## 1. 서론

자성유체란(Magnetic fluid) 마그네타이트(Magnetite,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )와 같은 자성 분말을 안정하게 분산시키기 위해 콜로이드 용액으로 원심력과 자기장 속에서 분산질과분산매의 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, 자성도로 등의 기록재료, 발전기의 열교환기, 의료기, 스피커 등에 응용, 지폐의 종류와 진위 여부 판단 등에 사용되고 있다. 그리하여 본 실험에서는 자성유체에 사용되는 Fe나노파우더 제작을 위하여 Fe wire를 전기폭발하여 나노파우더를 제조하여 특성을 분석하였다.

## 2. 실험방법

본 실험방법으로는 먼저 99.999%의 고순도 0.1mm Fe wire를 준비하여 전기폭발 장치에 Fe wire를 연결하고 챔버에 1.0L의 IPA 용액을 채워 넣었다. 공정 조건으로는 16mm의 전극간 거리를 설정하고, 1.5 kV의 공정 전압으로 약 4500회 전기 폭발시켜 나노사이즈를 가지는 Fe 자성파우더를 제조하였다. 제조된 Fe 자성파우더에 계면활성제를 코팅하기 위하여 올레인산 파우더를 약 3g 첨가하여 2시간동안 초음파공정을 진행하였다. 계면활성제까지 코팅된 Fe 자성파우더를 건조시키기 위하여 100nm Mesh망의 Filter sheet를 이용하여 파우더만 Filter시켜 60℃ 온도에서 약 15시간 Oven에서 건조시켜 나노사이즈를 가지는 Fe자성 파우더를 제조하게 되었다.

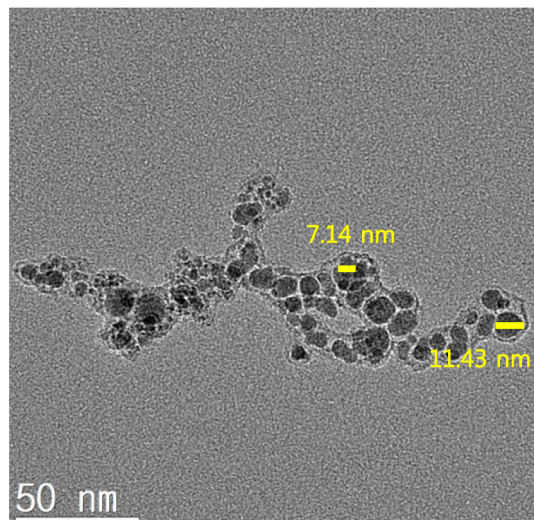


그림. 제조된 Fe 파우더의 TEM분석 이미지

### 3. 실험결과 및 고찰

0.1mm의 Fe wire를 전기폭발시켜 나노사이즈를 가지는 Fe 자성 파우더를 제조하였다. 사이즈 분석을 위한 TEM 분석 결과 약 10~20nm 평균입도를 가지는 자성파우더를 확인하였으며, XRD를 통하여 Fe의 결정구조를 갖는 것을 확인하였다. 마지막으로 VSM 분석 장비를 통하여 100.3 emu/g의 Ms(포화자화)값을 측정하였다. 여기서 포화자화값은 제조된 자성파우더의 건조 조건(건조 온도 및 분위기)을 최적화한다면 보다 향상될 수 있을 것이다.

### 4. 결 론

0.1mm의 99.999%의 고순도 Fe wire를 이용하여 전기폭발시켜 Fe의 결정구조를 가지고, 100.3 emu/g의 포화자화값, 약 10~20nm의 평균입도 및 균일한 입도분포를 가지는 자성파우더를 제작하였다.

### 5. 참고문헌

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



# Fabrication and characterization of magnetic particles via hydrothermal synthesis

Sung Myung Ryu<sup>\*</sup>, Ki Bum Lee and Chung Hee Nam

Department of Physics & photonics and sensors, Hannam University, Daejeon 306-791, Republic of Korea

## 1. Introduction

Ironoxide( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) have attracted considerable attention due to their potential applications in the field of drug delivery carrier[1], lithium-ion batteries[2] and catalysis[3]. Magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  has become a particularly interesting research target due to its low cost, good biocompatibility, as well as outstanding stability in physiological conditions.

Up to now, a variety of methods have been developed to prepare  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , including sol-gel method, co-precipitation. Compared with the above methods, hydrothermal method has interest owing to low cost, good biocompatibility and outstanding stability in physiological conditions.

This paper reports the growth of magnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  particles from iron powder (spherical, <10 micron) through an alkaline hydrothermal process. We observed an interesting role of KOH on the formation of magnetite octahedron[4].

## 2. Method

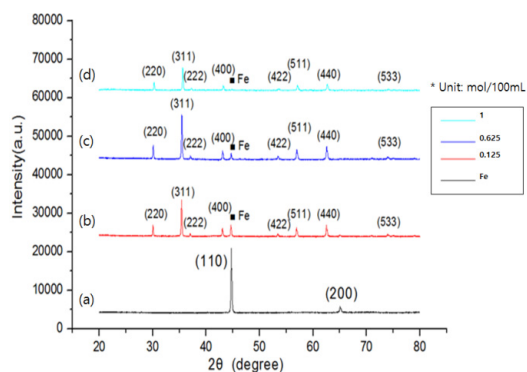
Both Fe powder (99% purity, <10 micron) and potassium hydroxide KOH (85% purity) used in this experiment were of analytical grade without further purification. Typically, Fe powder (1.4g), 1-10  $\mu\text{m}$  in diameter, were dispersed in separate 100mL KOH aqueous solutions of three concentrations: (1) 0.125 (2) 0.625 (3) 1 mol/100mL. The solution was then sealed into a Teflon-lined stainless-steel autoclave and kept at 180°C for 24 h (with different times). Then, the autoclave was allowed to cool at room temperature naturally. The product was washed with deionized water several times until the filtrate pH 7. The obtained particles were then dried under vacuum at 50°C for 12 h.

## 3. Results and discussion

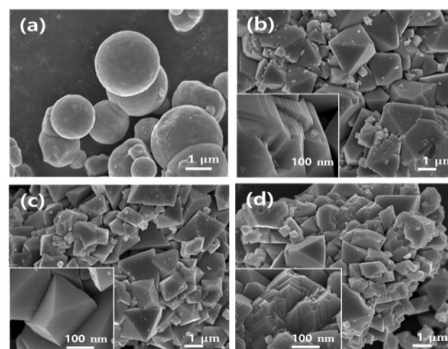
Fig. 1 shows the XRD patterns of both raw iron powder and as-grown products prepared under different KOH concentrations at 180°C for 24 h, illustrating the diffraction peak intensities of the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and iron. The peak intensities of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  remarkably increased while that of iron decreased with increasing KOH concentration.

Fig. 2 shows SEM images of raw iron powder and as-grown products prepared under different KOH concentrations. Fig. 2(a), the morphology of raw iron powders does not appear so uniform. The as-obtained products were spherical in morphology. Fig. 2(c), shows the representative morphology of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  octahedrons prepared under KOH concentration of 0.625 mol/100mL, revealing their smooth surfaces.

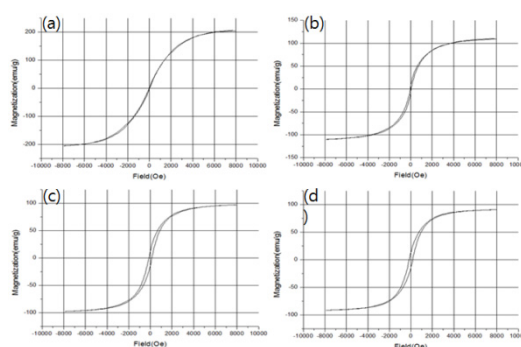
Fig. 3 shows the magnetic curves of the Fe powder and magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Fig. 1(a) shows the values of saturation magnetization is 204.87 emu/g. As shown in Fig. 3 (b), (c), (d), the values of saturation magnetization decrease to 109.23, 97.12 and 90.97 emu/g, respectively.



**Fig. 1.** XRD patterns of (a) Iron powder and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  powder grown in KOH of concentrations: (b) 0.125 (c) 0.625 (d) 1 mol/100mL.



**Fig. 2.** SEM images of (a) Iron powder and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  grown in KOH solutions of different concentrations: (b) 0.125 (c) 0.625 (d) 1 mol/100mL.



**Fig. 3.** Magnetic hysteresis loops of (a) Iron powder and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  grown in KOH solutions of different concentrations: (b) 0.125 (c) 0.625 (d) 1 mol/100mL

## 4. Conclusions

Micrometer-scale octahedral  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  crystals were grown directly from iron powder via a hydrothermal process. (1) we were experimented with different KOH Molar concentration at the same hydrothermal time and (2) different KOH Molar concentration at the different hydrothermal time. It was found that KOH concentration plays an important role in the formation of magnetite octahedrons. The as-prepared particles (good crystalline, 0.625 mol/100mL) exhibited a relatively high saturation magnetization of bulk magnetite ( $M_s$ : 96.7 emu/g).

## 5. References

- [1] Zhu X-M, Yuan J, Leung KC-F, Lee S-F, Sham K WY, Cheng CHK, Au DWT, Teng G-J, Ahuja AT, Wang Y-XJ: Hollow superparamagnetic iron oxide nanoshells as a hydrophobic anticancer drug carrier: intracellular pH-dependent drug release and enhanced cytotoxicity. *Nanoscale* 2012, 4(18):5744–5754.
- [2] Byung-Young Jung, Hyung-Seok Lim, Yang-Kook Sun, Kyung-Do Suh: Synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$  composite microspheres for a high performance lithium-ion battery anode: *Journal of Power Sources* 244 (2013) 177e182
- [3] Xiansong Wang, He Huang, Guoqing Li, Yi Liu, Jiale Huang<sup>3</sup> and Da-Peng Yang: Hydrothermal synthesis of 3D hollow porous  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  microspheres towards catalytic removal of organic pollutants: *Nanoscale Research Letters* 2014, 9:648
- [4] Dengfeng Peng, Sadeh Beysen, Qiang Li, Jikang Jian, Yanfei Sun, Jilili Jiwuer: Hydrothermal growth of octahedral  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  crystals. *Particuology* 7 (2009) 35–38

# 다결정 $\text{Ba}_x\text{A}_{1-x}\text{Ti}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ ( $\text{A}=\text{Bi}^{3+}, \text{La}^{3+}$ )에서의 강유전 및 자기 상전이 현상 분석

김덕현, 유춘리\*, 이보화†

한국외국어대학교 물리학과 & 산화물 연구소

†e-mail : bwlee@hufs.ac.kr

상온에서 분명한 다강성을 가지는 물질은 차세대 메모리 소자 및 어플리케이션에 대한 적용가능성으로 인해 지속적인 관심을 받고 있다. 강유전체  $\text{BaTiO}_3$  ( $T_c=120^\circ\text{C}$ )에 +3가 전이 금속 이온(TM :  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$  etc)을 치환한 물질들( $\text{BaTi}_{1-y}\text{TM}_y\text{O}_3$ )에서 분명한 다강성이 상온에서 유도됨이 보고되었다. 하지만 전이금속이온 치환으로 인해 electrical polarization 값을 억제되는 특성 또한 관측되었으며, 이러한 특성을 개선시키기 위해 많은 후속 연구들이 진행되고 있다.

이에 본 연구진은  $\text{BaTi}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ 의 Ba site에 다양한 양의  $\text{Bi}^{3+}$  혹은  $\text{La}^{3+}$ 를 동시 치환한  $\text{Ba}_x\text{A}_{1-x}\text{Ti}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$  ( $\text{A}=\text{Bi}^{3+}, \text{La}^{3+}$ )를 합성하여 시료들의 물리적 특성에 대해 연구하였다. 합성된 시료는 Cu-K $\alpha$ 선을 이용한 X-선 회절 측정을 통해 결정상의 변화를 확인 하였고, Raman spectroscopy 관측을 통해 La 치환으로 인해 유도되는 미세구조 변화를 분석 하였다. 상온에서의 자성 및 강유전성은 VSM을 이용한 M-H hysteresis loop 측정과 ferroelectric testor를 활용한 P-E loop 측정을 통해 확인 하였다. 또한 M-T curve와  $\epsilon$ -T curve 측정을 통해 온도에 따른 자기 및 강유전 상전이 현상을 확인하였다.

## 산소 결함에 따른 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 박막의 자기적 특성 변화<sup>†</sup>

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

<sup>1</sup>부산대학교 물리학과, 부산 46241, 한국

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원 부산센터, 부산 46742, 한국

<sup>3</sup>나노표면연구팀, 한국기초과학지원연구원, 대전 34133, 한국

<sup>†</sup>psk@pusan.ac.kr

페라이트는,  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  ( $\text{M} = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Mg}$ ), 트랜스포머 코어, 로드 안테나, 무선주파수 코일, 레이더 흡수물질 등과 같은 전자 장치에 광범위하게 사용된다. 페라이트는 금속 이온의 점유위치에 두 종류가 있는데, 사면체구조를 갖는 A-site와 팔면체구조를 갖는 B-site가 있다. 이러한 구조들의 금속이온 분포에 따라 정상 스핀넬 구조와 역스핀넬 구조, 또는 혼합 스핀넬구조로 나눈다. 또한, 제조방법이나 크기, 열처리 조건에 의해 화학양론이 변화하여 시편의 물리적 특성이 달라지는 것으로 잘 알려져 있다. 특히 자기적 특성은 양이온의 교환이나 산소결함에 의해 변화한다. 이러한 효과는 페라이트를 나노입자나 박막으로 만들 경우 더욱 향상된다.

본 연구에서는 대표적인 스핀넬페라이트 중 하나인  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  박막을 산소결함에 따라 물성을 조사하였다. RF 스퍼터링 방법으로  $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$  기판에 산소와 아르곤분압의 상대적인 비를 조절하여 증착된  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  박막은 산소 분압의 비가 증가할수록 박막의 <111> 결정성이 향상되는 것을 확인하였다. 또한 산소분압 비가 증가하면 박막내의 산소결함 ( $\text{V}_\text{O}$ )의 상대적인 비가 감소하는 것을 X-선 광전자 분광측정을 통해 확인하였다. 진동 시편 자력계 측정을 통해 산소 결함이 상대적으로 적은 시편일수록 포화자기값이 증가함을 알 수 있었다.

<sup>†</sup>본 연구는 한국연구재단 원자력선진기술센터 (2011-0031933)와 한국기초과학지원연구원 (E35800)의 지원으로 이루어졌습니다.

# Effect of La deficiency on magnetic properties in polycrystalline $\text{La}_{0.88-\delta}\text{Sr}_{0.12}\text{MnO}_3$

류상균<sup>1</sup>, 김지웅<sup>1</sup>, 이두용<sup>1</sup>, 진미정<sup>2</sup>, 김동진<sup>1</sup>, 이인원<sup>3</sup>, 박성균<sup>1</sup>, 진형진<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 물리학과, 부산 46241

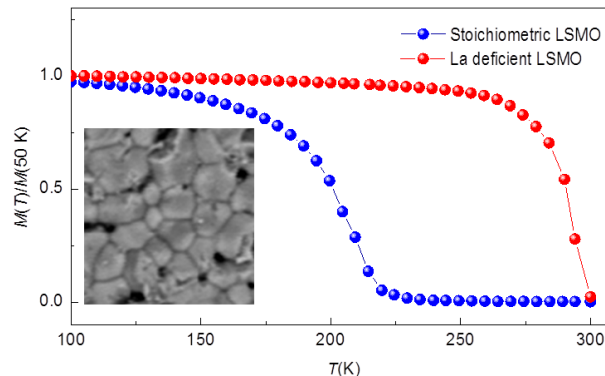
<sup>2</sup>부산대학교 공동실험실습관, 부산 46241

<sup>3</sup>부산대학교 조선해양플랜트 글로벌 핵심연구센터, 부산 46241

\*교신저자 전자메일 주소: hjeen@pusan.ac.kr

$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO)는  $x$ 의 값에 따라 다양한 자기적, 전기적 기저 상태를 가진 물질이다.<sup>1</sup> 특히, 스트론튬 (Sr) 량이  $0.1 \leq x < 0.175$  부근의 LSMO는 독특한 강자성 부도체 (Ferromagnetic insulator) 특성을 보인다.<sup>2</sup> 또한, Sr의 도핑량에 따라 상전이 온도( $T_c$ )가 급격히 변화하는 것이 잘 알려져 있다.

본 연구에서는 기존의 Sr 량의 조절을 통한 자기적 성질의 변화 연구에서 벗어나서 인위적으로 란타넘(La) 결함량조절을 통하여 다결정  $\text{La}_{0.88-\delta}\text{Sr}_{0.12}\text{MnO}_3$ 를 제작하고, 화학적 조성, 결정 구조 및 자기적 성질의 변화를 연구하였다.



**Fig. 1.** 란타넘 결함에 따른 자기적 상전이 온도의 변화. (Inset: 다결정 시료의 SEM 이미지)

란타넘의결함량 조절은 LSMO를 만들 때 들어가는  $\text{La}_2\text{O}_3$ 량을 조절하여 다양한 La 결함량을 가지는 LSMO를 만들었으며, 전자현미경 분석 (EPMA) 을 통하여 성분비 및 결함량의 변화를 알아내었다. 엑스선 회절법을 이용하여 결함량에 따른 결정구조의 변화를 확인하였으며, SQUID 자력계를 이용한 자기적 성질의 측정을 통해서 란타넘 결함에 의해 상전이 온도가 급격히 증가(최대 80 K) 하는 것을 확인하였다. 본 연구는 전이금속 산화물에서 양이온결함량 조절을 통한 물성 연구에 도움이 될 것이다.

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2011-0030013)

## References

- [1] Urushibara, A. *et al.* Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ . *Phys. Rev. B* **51**, 14103-14109 (1995).
- [2] Endoh, Y. *et al.* Transition between Two Ferromagnetic States Driven by Orbital Ordering in  $\text{La}_{0.88}\text{Sr}_{0.12}\text{MnO}_3$ . *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4328-4331 (1999).

## 염증유발 지질다당류(LPS)와 자성비드가 주입된 토끼 프리모관의 자기장 영향 연구

이혜리<sup>1</sup>, 하예은<sup>2</sup>, 김지영<sup>3</sup>, 홍예지<sup>4</sup>, 김근호<sup>5</sup>, 강석윤<sup>6</sup>, 이상석<sup>1\*</sup><sup>1</sup>상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, <sup>2</sup>이공과대학 생명과학과,

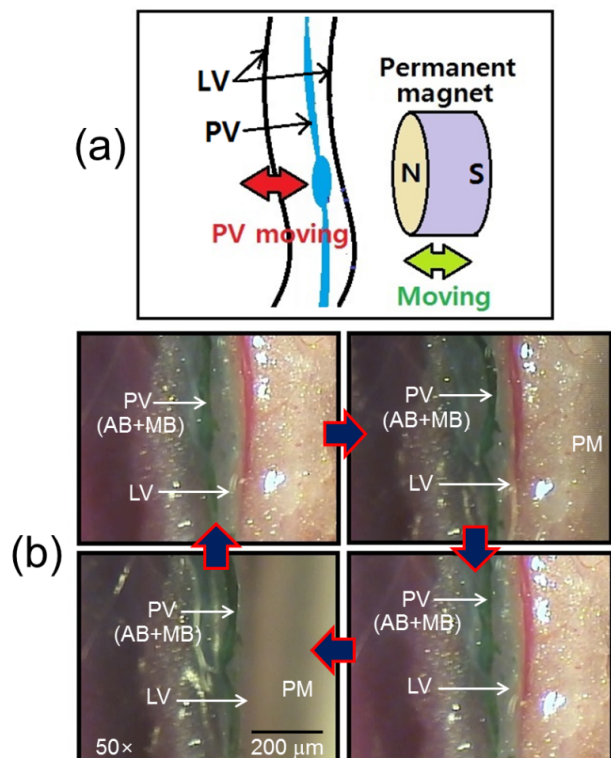
<sup>3</sup>생명자원과학대학 동물생명공학과, <sup>4</sup>한의학대학 한의학과, <sup>5</sup>일반대학원동서의료공학과, 원주 220-702,

<sup>6</sup>한국한의학연구원, 의료연구본부, 침구경락연구그룹, 대전 305-811

본 연구의 토끼 해부실험은 상지대학교 동물실험윤리위원회(IACUC)에서 심의를 거쳐 승인된 동물실험윤리규정(승인번호 : 2014-16)을 따라 진행되었다. 토끼는 태어난 지 10주가 지난 뉴질랜드산 암컷으로 몸무게는 약 1.5 kg ~ 1.7 kg이다. 해부실험에 필요한 마취제, 염색약, 알코올, 식염수, 전자저울, 형광현미경, 마이크로 핀셋, 실험용 가위, 실험용 집게, 마이크로 튜브를 준비하였다[1-2].

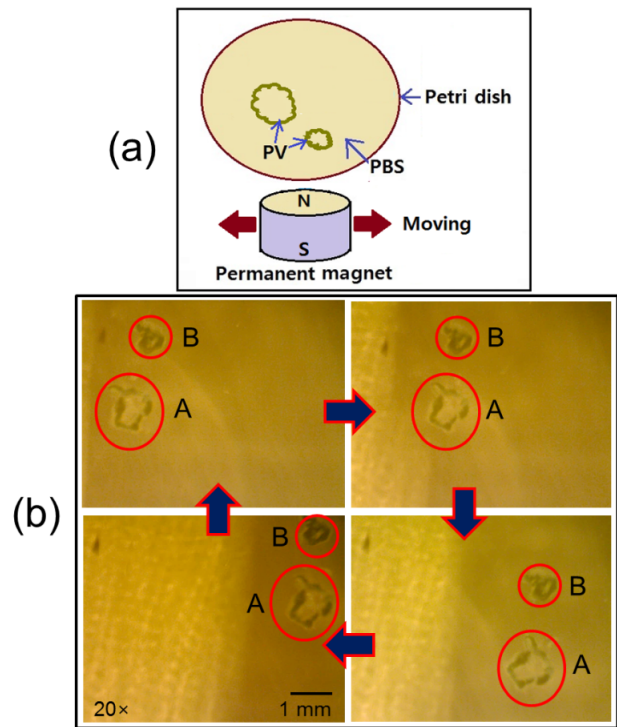
염색액 주입전에 림프관내 프리모관을 쉽게 발견하기 위해 토끼의 림프절인 림프노드(Lymph Node; LN)에 200  $\mu\text{g}$ 의 지질다당류인 LPS를 주입한다. 또한 염색액에 직경 1  $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 1 ml 당 50 mg의 양으로 있는 1  $\mu\text{m}$ 의 초상자성체자성비드(Magnetic Bead; MB)인Co-Si-OH 용액을 골고루 섞어서 미세 주사기를 사용하여 혼재한 용액을 림프관을 따라 30 초간 서서히 주입한다. 림프관을 따라 현미경으로 관찰을 하면서 림프관 속에 발견된 프리모를 찾는다. 림프관 안에 가느다란 굵은 실 같은 모양의 프리모를 관찰한다. 프리모가 잘 보이지 않는다면, 혈관 근처 조직을 핀셋으로 찢어 가면서 찾아본다. 프리모는 토끼의 상태에 따라 여러 가지 복합적인 요인으로 항상 보이지만은 않는다. 자성비드가 혼합된 알시안블루 염색액이 흡착된 프리모관의 색깔을 관찰하여 두께를 확인한 후, 영구자석(Permanent Magnet ; PM)을 이용하여 생체 내에서 진행되는 *invivo* 상태에서 자기장에 따라 프리모관이 운동하고 프리모관 내외에 흡착된 알시안블루와 자성비드의 혼합 염색액이 흐르는 모양을 조사한다. 프리모관을 발견하고 림프관 안에 있는 프리모관을 채취하기 위해서 핀셋을 이용해 조심스럽게 림프관을 제거한다. 림프관을 제거하면 프리모관은 수축되는 경우가 있다. 또한 마이크로 핀셋으로 림프관과 함께 필요한 부분을 추출해 생리식염수(Phosphate Buffered Saline; PBS) 1:100 비율의 5 ml가 담긴 마이크로 튜브(Eppendorf Tubes)에 넣어 냉장고에 보관한다. 그리고 분리된 프리모관이 자성에 의한 의존성을 조사하기 위한 생체 외에서 진행되는 *in vitro* 실험을 진행한다.

왼쪽 그림은 토끼의 림프노드에 LPS를 주입하고, 앞에서 언급한 림프관에 AB와 MB 혼합 용액을 주입하여 나타난 진한녹색의 프리모관 가까이 가져간 영구자석의 움직임에 따라 PV의 움직이는 것을 관찰한 것을 보여준 그림이다. 생체내의 실험으로 *in vivo* 조건 상태로 실험적 도시체계를 그림(a)에 나타내었다. 표면 자기장세기 500 G를 띄는 원통형 영구자석(PM)을 사용하여 프리모관에 약 80 G의



수평방향으로 주기적으로 진동했을 때, 그림(b)처럼 30  $\mu\text{m}$  굵기의 프리모관이 자석으로 움직임에 따라 주기적으로 변하는 것을 보여 주었다.

왼쪽 그림은 위의 그림과 마찬가지로 토끼의 림프노드에 LPS를 주입하고, 앞에서 언급한 림프관에 AB와 MB 혼합 용액을 주입하여 나타난 진한녹색의 프리모관을 림프관에서 분리하였다. 생체 외의 실험으로 *in vitro* 조건 상태로 실험적 도시체계를 그림(a)에 나타내었다. 그림(b)처럼 추출된 프리모관은 PBS 용액이 담긴 패트리디쉬(Petri Dish)에 담았을 때 긴 실 모양의 프리모관은 오그라들어 불규칙한 둥근 테모양을 보인다. 투명한 패트리디쉬 뒤쪽에서 수직방향으로 가까이 가져간 영구자석의 움직임에 따라 PV의 움직이는 것을 관찰한 것을 보여주고 있다. 표면 자기장세기 200 G를 띄는 막대형 영구자석을 사용하여 프리모관에 약 50 G의 수직방향으로 인가된 자기장 방향에 수평방향으로 주기적으로 진동했을 때, 그림(b)처럼 30  $\mu\text{m}$  굵기의 분리되어 추출된 2가지 둥근 테모양의 프리모관이 자석으로 움직임에 따라 주기적으로 변하는 것을 보여 주었다.



프리모관 내에 존재하는 산알(Sanal)은 각종 무기물 함유량 중 강자성체성분인코발트(Co)가 적지 않게 들어 있다[3]. 자체회전운동을 하는 산알은 외부에서 인가한정자기장에 영향을 받을 수 있게 된다고 사료된다. 프리모관 조직의 구조와 기능의 탐색은 침술 자극의 전달경로와 경락체계를 추적할 수 있는 유일한 수단으로, 이러한 시그널 전달경로를 모니터링하기 위해 프리모관에 들어간 자성비드를 통하여 장기 내부에 시작하여 피부표면에서 표적기관에 이르게 하는 프리모액의 이동 경로를 추적할 수 있다. 이는 프리모연결망 (Primo Connectome)을 제공할 수 있다. 본 연구의 결과로 프리모 조직의 마이크로 단위인 양적 제한한계를 극복하여 토끼의 복부 림프관에서 프리모 조직을 미세적출하고, 자성비드가 혼합된 염색액에 면역조직화학적 영상분석을 통한 프리모 시스템의 해부학적 자료를 축적할 수 있다. 이러한 추가연구를 통한 실험결과에서 도출되는 프리모 연결망 추적 연구는 세계 최초로 경락침술이 미래의학으로 진입하는 계기가 될 것이다.

**감사의 글:** 본 연구는 한국한의학연구원(KIOM) “2015년 학부생 연구프로그램”의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] K. S. Soh, J. Acupunct. Meridian Stud. **2**, 93(2009).
- [2] Y. I. Noh, Y. M. Yoo, R. H. Kim, I. J. Hong, H. R. Lee, M. S. Rho, et al., Evid. Based Complement. Alternat. Med. Article **429106**. 1-5 (2013).
- [3] Y. I. Noh, Y. J. Hong, J. Y. Shin, J. K. Rhee, and S. S. Lee, J. Magnetism **18**, 188 (2013).



# 적혈구 포획용 마이크로 턴코일 제작과 전산모사를 이용한 자기장 분포 특성 연구

정현준<sup>1</sup>, 박지수<sup>1</sup>, 김누리<sup>1</sup>, 황도근<sup>1</sup>, 이장로<sup>2</sup>, 이상석<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원 원주시 상지대길 83, 220-702

<sup>2</sup>숙명여자대학교 나노물리학과, 서울, 140-742

적혈구는 직경 8  $\mu\text{m}$ , 중심부는 1  $\mu\text{m}$ , 가장자리 두께 2  $\mu\text{m}$ 이며 중앙부분은 움푹 들어간 팬-케이크형태를 띠고 헤모글로빈이라는 단백질을 갖고 있는 산소 운반을 위해 특화된 세포이다[1]. 실제로 인체의 혈액을 원심 분리하여 정제된 적혈구만 추출하여 생리 식염수에 넣어서 관찰해 본 것을 토대로 도시한 결과 Fig. 1(a)처럼 적혈구는 그 중심 부분이 움푹 들어간 전형적인 팬케이크 모양이었다. 1 ml 당 50 mg의 밀도를 갖는 1  $\mu\text{m}$ 의 초상자성체 자성비드(Co-Si-OH)는 추출된 적혈구에 분자적인 생체전자장 영향을 받아 붙을 것으로 예상하였다. Fig. 1(a)처럼 코발트(Co) 분자를 고르게 함유하는 적혈구는 1  $\mu\text{m}$  크기의 자성비드 여러 개들과 자기쌍극자 모멘트 배열을 이루어 자성비드가 적혈구의 움푹 들어간 부분에 등방적으로 붙은 모양으로 존재하는 것과는 다르게 나타났다[2]. 즉, 광학현미경으로 관찰한 결과 적혈구의 가장자리 부근에 자성비드가 등방적으로 붙어있는 모양을 띠어 순수한 적혈구에 자성비드가 결합된 새로운 형태를 띠고 있음을 보여 주었다.

Fig. 2은 10번 감은  $\mu$ -코일을 800배 배율로 확대하여 나타낸 모습이다. Fig. 2에 표시한 화살표 방향으로 코일 폭 2  $\mu\text{m}$ 에 AC 전류(I) 0.2 mA가 흐를 때 생성되는 자기장의 분포를 점선 부분으로 표시하였다. 한편 Fig. 3에서는 전자기 유한요소법, 비오-사바트 법칙(Bio-Savart's law)과 암페어법칙(Ampere's law) OPERA-3D/SCALA SW 프로그램을 이용하여 코일의 직경 내부에서의 자기장 분포를 영역별로 분석하였다.

Fig. 3(a)는 10번 감은 코일의 전산모사 결과 자기장 분포를 나타내었다. 적혈구의 AC 교류 자기장의 인가에 따른 적혈구의 흐름과 운동과 막변형 모양을 관찰하기 위한 시스템을 구현하도록 최적화 자기장을 위해 주파수 20 kHz인 AC 교류장의 인가에 따른 전산모사 결과를 적용하였다. Fig. 1(b)에서 보여 주었듯이 여러 개의 자성비드가 붙은 적혈구 자성 측정 바이오소자 중심부에 1  $\mu\text{m}$ 이하의 선폭 크기를 갖는 GMR-SV 바이오 소자 가장자리에 외부 자기장을 인가할 수 있는  $\mu$ -턴 코일을 구성하며, 박막소자 면에서 Fig. 3(b)는 y-축의 수평방향과 Fig. 3(c)는 z-축의 수직방향에서 자기장 분포의 특성을 분석하

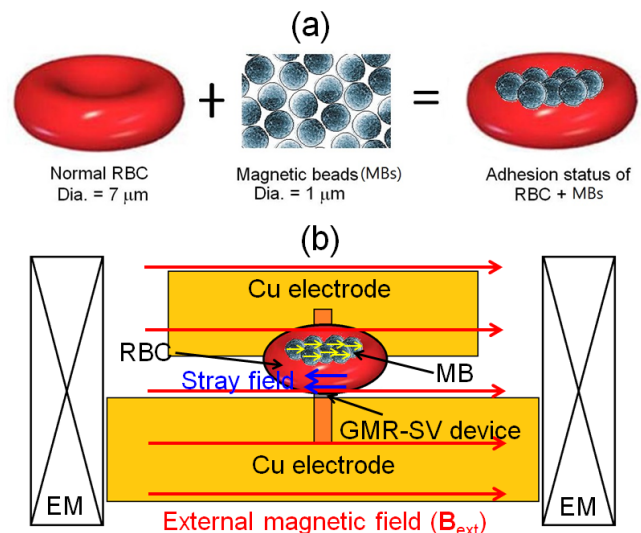


Fig. 1

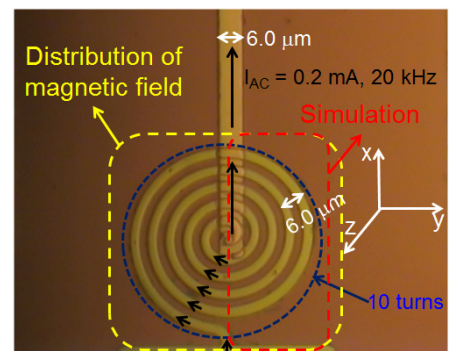


Fig. 2



면 수직 성분의 자기장이 실제로 적혈구를 포획하는 데 사용될 수 있다.  $\mu$ -턴 코일에 인가된 전류에 의해 계산된 수직방향의 자기장은 인접해 있는 GMR-SV 소자가 감지하는 수평방향의 미세자기장 영향을 미치지 못하고, 자성비드에서 발생하는 수평방향의 누설 자기장과 간섭에 의한 효과로 실제 적혈구 포획의 제어에 따른 검출능력이 결정된다고 볼 수 있다.

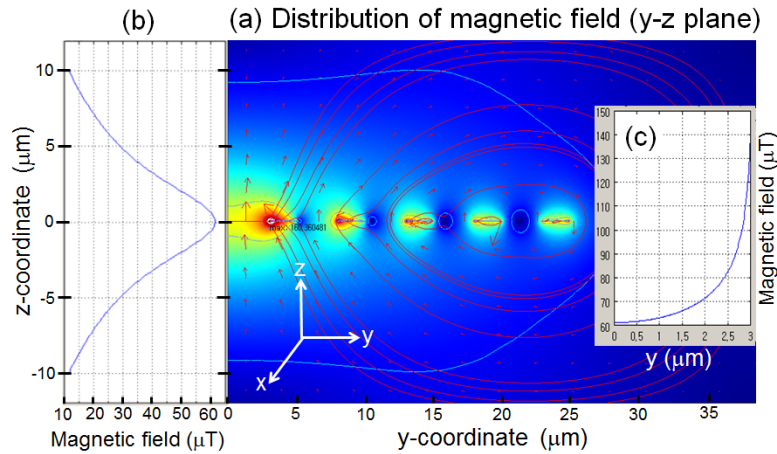


Fig. 3

Fig. 2에서 도시하였던 y-z 평면상에서 10번 감은  $\mu$ -코일로 흐르는 전류에 따른 자기장 분포를 분석하였다. 코일 중심을 지나는 수직축의 위치에 따른 자기장의 값을 전산모사한 결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 주파수 20 kHz인 AC 전류와 DC 전류가 0.1 mA, 0.2 mA, 1.0 mA, 10.0 mA로 각각 흐를 때 코일 중심점에서 생성된 자기장과 중심에서 높이 10  $\mu$ m로 떨어진 점에서 자기장을 비교해 보았다. 0.1 mA의 DC 전류가 흐를 때와 100 배인 10.0 mA 흐를 때의 생성된 자기장은 각각 3090  $\mu$ T = 30.9 Oe와 31  $\mu$ T = 0.31 Oe로 약 100배로 증가한 전류 값에 비례하여 증가하였다.

한편 AC 전류가 0.1 mA 흐를 때와 100 배인 10.0 mA가 흐를 때에 생성된 자기장은 각각 30.6  $\mu$ T = 0.306 Oe와 3060  $\mu$ T = 30.6 Oe이 되어 약 100배로 증가한 전류에 비례하여 증가하였으며, 이것은 DC 전류의 경우와 동일한 경향을 보여주었다. 이러한 자기장 분포의 특성은 높이 10  $\mu$ m에서는 0.1 mA와 10.0 mA의 DC 전류가 흐를 때 생성된 자기장은 각각 6  $\mu$ T = 0.06 Oe와 570  $\mu$ T = 5.7 Oe로 중심에서 나타난 자기장의 특성처럼 역시 약 100배의 값으로 증가하였다. 한편 0.1 mA와 10.0 mA의 AC 전류가 흐를 때 생성된 자기장은 각각 5.9  $\mu$ T = 0.059 Oe와 510  $\mu$ T = 5.1 Oe로 약 100배의 값으로 증가한 전류 값에 비례하여 나타났다.

**Table 1.** The values of perpendicular magnetic field( $B_{\perp}$ ) at the position of  $z = 0, 10 \mu\text{m}$  in the multi turn coils according to the applied AC and DC currents(I) of 0.1 mA~10 mA.

Applied current(I)	Perpendicular magnetic field( $B_{\perp}$ ) of multi turn coils			
	DC		AC <sup>(a)</sup>	
	$z = 0 \mu\text{m}$	$z = 10 \mu\text{m}$	$z = 0 \mu\text{m}$	$z = 10 \mu\text{m}$
0.1 mA	31 $\mu\text{T}$ <sup>(b)</sup>	6 $\mu\text{T}$	30 $\mu\text{T}$	5.9 $\mu\text{T}$
0.2 mA	61 $\mu\text{T}$	12 $\mu\text{T}$	60 $\mu\text{T}$	11 $\mu\text{T}$
1.0 mA	307 $\mu\text{T}$	56 $\mu\text{T}$	306 $\mu\text{T}$	51 $\mu\text{T}$
10.0 mA	3090 $\mu\text{T}$	570 $\mu\text{T}$	3060 $\mu\text{T}$	510 $\mu\text{T}$

<sup>(a)</sup>The frequency of AC current is 20 kHz.

<sup>(b)</sup>The value of 1.0  $\mu\text{T}$  equals to 0.01 Oe.

여기서 특이한 현상은  $z = 10 \mu\text{m}$ 에서 생성된 자기장이  $z = 0 \mu\text{m}$ 인 중심에서 생성된 자기장보다 대략 1/6배로 줄어들었다. 이러한 전산모사에 의한 자기장의 분포를 통하여 인가된 AC와 DC 자기장은 자성비드가 붙은 적혈구 포획에 충분한 자기장의 크기로 생각된다. 또한 소자 위에 놓일 적혈구는  $\mu$ -턴 코일의 x-y 평면에 수직으로만 자기장이 생성하므로 적혈구 포획에만 기여하게 된다. 이러한 결과는 자성비드를 결합한 적혈구의 막 변형에 따른 운동 특성을 분석하는 바이오센서로 활용할 수 있음을 보여 주었다.

## 참고문헌

- [1] Y. I. Cho, J. Y. Yoo, S. H. Seo, B. K. Lee, S. J. Lee, and H. M. Kwon, *Bio Fluid Mechanics*, Yasmedia, Seoul. pp. 1-82 (2006).
- [2] J. Y. Lee, M. J. Kim, J. K. Rhee, and S. S. Lee, *J. Kor. Magn. Soc.* **24**, 101 (2014).
- [3] J. S. Park, N. R. Kim, H. J. Chung, and S. S. Lee, *J. Kor. Magn. Soc.* **25**, 16 (2015).

# Wiedemann 효과를 이용한 텐던의 인장력 측정

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

교량의 경량화를 위하여 사용되고 있는 텐던(tendon)의 인장력 측정은 교량의 안전점검에서 매우 중요한 부분이다. 따라서 안전 진단을 위해 현재 많은 방법이 사용되고 있다. 그 예로는, 초음파를 이용하는 방법이나 와전류 탐상 방법, 누설 자속 탐지 방법 등 다양한 비파괴 검사(Non-Destructive Testing)가 있다[1,2].

본 연구에서는 교량에 사용되고 있는 텐던이 나선형으로 여러 가닥 꼬여있는(twisted) 구조이고 인장력에 의하여 나선형의 형태가 변화되는 것에서 착안하여 인장력에 따른 wiedemann 효과를 이용하여 측정하였다. 실험은 텐던에 탐지코일을 권선하고 텐던에 인장력을 인가한 상태에서 교류 전류를 직접 텐던에 인가하면 탐지코일에 유도기전력에 발생하게 되고, 이 교류 전압과 텐던의 인장력에 따른 상관관계를 연구하였다. 본 연구에서 사용된 텐던은 직경이 15.5 mm이고 7개의 strand로 구성되어 있다. 인장력에 따른 자기 특성을 측정하기 위해 2 GPa까지 인장력을 인가 할 수 있는 측정 장치와 텐던에 교류 전류를 인가하여 그에 따른 유도 전압을 측정하는 전류 인가장치를 제작하였다.

## 2. 측정 장치의 제작

본 연구에서는 텐던에 인장력을 2 GPa까지 인가하여 그에 따른 텐던의 인장력을 자기적 방법으로 측정하기 위한 측정 장치를 제작하였다. 그림 1은 본 연구에서 제작된 측정 장치의 개략도이다. 텐던에 인장력을 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. 텐던에 인가되는 교류 전류는 전류변압기(CT)를 사용하여 60 Hz의 전류를 300 A<sub>rms</sub>까지 인가할 수 있도록 하였다.

텐던에서 발생하는 자화의 변화를 측정하기 위한 탐지코일(search coil on tendon; SCT)은 직경이 1.0 mm인 에나멜 동선을 190회 권선하여 사용하였다.

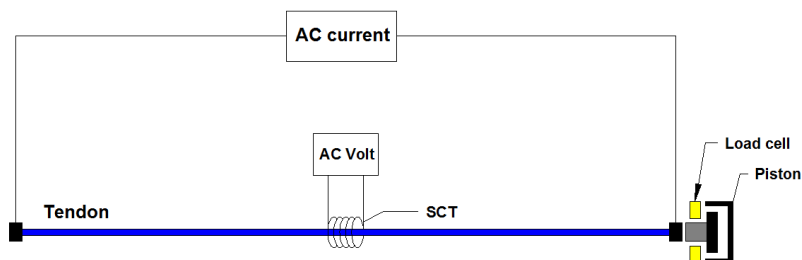


그림 1. 본 연구에서 제작된 측정 장치의 개략도

## 3. 측정

본 연구에서는 두 제조회사에서 제작된 7 strands 텐던을 사용하여 인장력에 따른 텐던의 자화상태 변화를 측정하였다. 그림 2는 앞에서 언급한 wiedemann 효과 실험의 조건으로, 텐던의 인장력에 따른 유도 전압의 변화를 보여준다. A와 B의 텐던은 동일한 조건으로 실험하였으며 텐던에 직접 교류 전류 140 A<sub>rms</sub>를 인가한

후, 인장력을 0 GPa에서 1.5 GPa까지 변화시키면서 SCT에서 유도된 교류 전압을 측정하였다. 그림 2에서 보면 인장력에 따른 유도 전압의 변화가 비교적 선형적인 것을 볼 수 있다. 따라서 텐던에 탐지코일을 부착하여 제작한 텐던을 신설되는 교량에 적용한다면, wiedemann 효과를 이용하여 텐던의 인장력을 자기적 비파괴 측정 방법으로 측정 가능할 것이라고 예측된다.

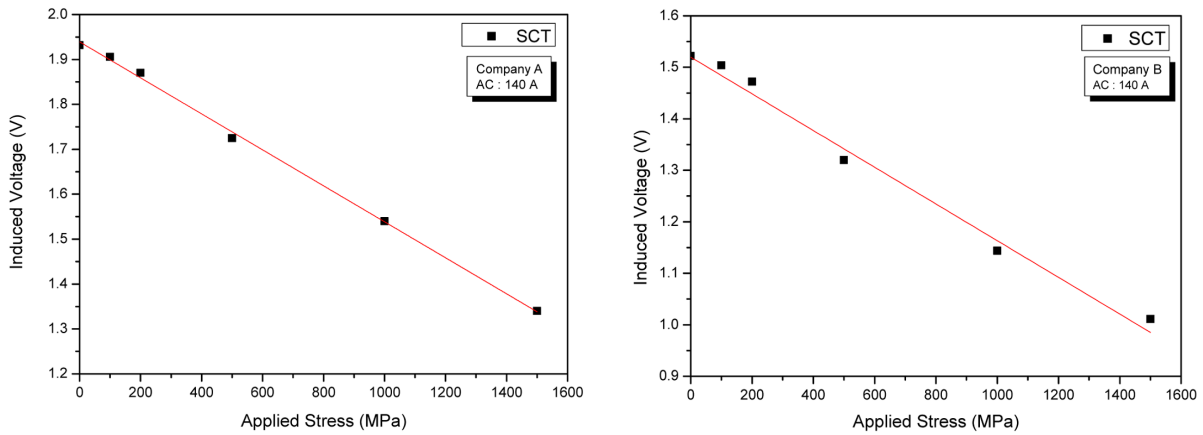


그림 2. 텐던에 교류전류를 140 A<sub>rms</sub> 인가한 후, 인장력을 0 GPa에서 1.5 GPa까지 변화시키면서 SCT에서 유도된 교류전압 측정; (a) company A, (b) company B.

#### 4. 결론

본 연구에서는 텐던에 교류 전류를 인가하고 인장력에 따른 텐던의 자화상태 변화를 측정하기 위한 기초연구로, 두 제조회사의 텐던을 비교하기 위해 텐던의 직경이 15.5 mm이고 7개의 strand로 구성된 텐던을 사용하여 실험하였다. 본 연구에서 제작된 측정 장치는 텐던에 인장력을 2 GPa까지 인가 할 수 있도록 하였고, 텐던에 교류 전류를 인가하기 위하여 전류변압기(CT)를 통해 60 Hz의 전류를 300 A<sub>rms</sub>까지 인가할 수 있도록 하였다. 제작된 측정 장치를 통해 측정한 결과 SCT에서 유도된 교류 전압이 비교적 선형적인 것을 볼 수 있었고, 이를 통해 wiedemann 효과를 이용한 실험 방법이 신설되는 교량에 적용된다면 텐던의 인장력을 측정하기 위한 자기적 비파괴 측정 방법으로 사용 가능하다고 생각된다.

#### 5. 참고문헌

- [1] A. Jarosevic, "Magnetoelastic method of stress measurement in steel." Nato ASI Series 3 High Technology, Vol. 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)

# 원격제어용 DC 자기이력곡선 측정장치 제작

김은애<sup>1\*</sup>, 이승주<sup>1</sup>, 박덕근<sup>2</sup>, 손대락<sup>3</sup>

<sup>1</sup>주)센서피아, 대전광역시 유성구 유성대로1596

<sup>2</sup>한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로1045

<sup>3</sup>한남대학교 광·센서공학과, 대전광역시 대덕구 한남로 70

## 1. 서론

직류 자기이력곡선의 측정은 ring 시편의 경우 권선에서부터 적분기의 drift 조절, 최대 자화력의 조절 등 측정 과정에서 숙련된 기능을 필요로 하는 부분이 많다. 또한 원자력 분야와 같이 방사능이 노출되는 지역에서는 실험자가 직접 측정을 할 수 없기 때문에 원격에서 시편을 넣고, 측정 또한 원격으로 모두 제어되어야 바람직하다. 본 연구에서는 방사능이 노출되는 지역에서도 직류자기이력곡선 측정 장치를 원격에서 제어할 수 있는 장치를 고안 제작하였다.

## 2. 측정 장치 구성

본 연구에서는 단일 강대(single strip)형의 시편에 대하여, 자동으로 적분기의 drift를 조절 할 수 있는 적분기와 DAC(Digital to Analog Converter)와 micro-controller를 사용 삼각파형의 주파수와 진폭을 조절할 수 있게 하여, 컴퓨터에서 protocol을 사용 RS232C통신을 사용 제어 할 수 있게 하고, 측정된 자속밀도 B와 자기장의 세기 H 신호는 24 bit ADC(Analog to Digital Converter)를 사용 디지털 신호로 변환 시킨 다음, 컴퓨터로 데이터를 가져 갈 수 있게 하였다.

그림 1은 본 연구에서 개발한 측정 장치의 구성도로서, 자화를 시키기 위한 삼각파형은 12bit DAC를 사용하였으며 micro-controller의 내부 clock과 counter를 사용 주파수는 0.005 Hz, 0.01 Hz, 0.05 Hz, 0.1 Hz, 0.2 Hz 및 1 Hz로 삼각파형을 합성할 수 있게 하였다. 자기이력곡선 측정 시 최대 자화력을 조절하기 위한 삼각파형의 진폭조절은 16bit의 multiplying형 DAC를 사용하였고, 일차코일을 여자시키기 위하여 DAC출력을 전력증폭기에 입력하였다. H-신호는 일차코일에 흐르는 전류를 셉티저항을 사용 전압으로 변환시킨 후 4-CH DAQ에 입력하였다. 한편, B신호는 drift self-compensating형 적분기[1]를 사용 적분을 한 다음 4-CH DAQ에 입력하였다. 컴퓨터와 PC와의 통신은 RS232C로 하였다. 자기이력곡선을 측정하기 위한 탈자과정과 B-H 신호의 계산은 모두 PC에서 LabVIEW로 software를 구성하였다.

그림 2는 본 연구에서 개발한 장치를 사용하여 자동으로 탈자 시키고, 자화곡선 및 자기이력곡선을 측정한 결과를 보여주고 있다.

## 3. 결론

본 연구에서는 먼 거리에서 시편의 직류자기이력곡선을 측정하는 장치를 개발하였다. 따라서 실험자가 직접 접근이 불가능한 실험실 등에서도 자기이력곡선을 측정할 수 있는 장치를 구축하였다. 이는 원자력분야 뿐만 아니라, 측정을 잘 모르는 실험자도 쉽게 자기이력곡선을 측정하는데 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

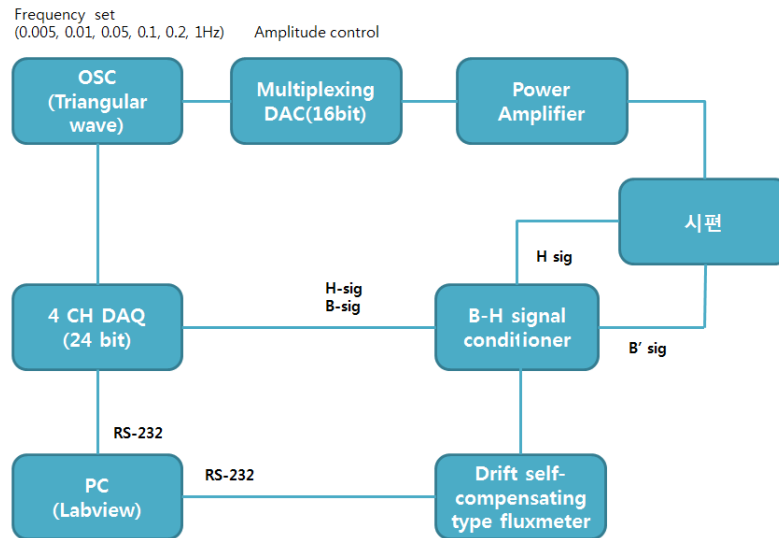


그림 1. 자기이력곡선 측정 장치의 계략도

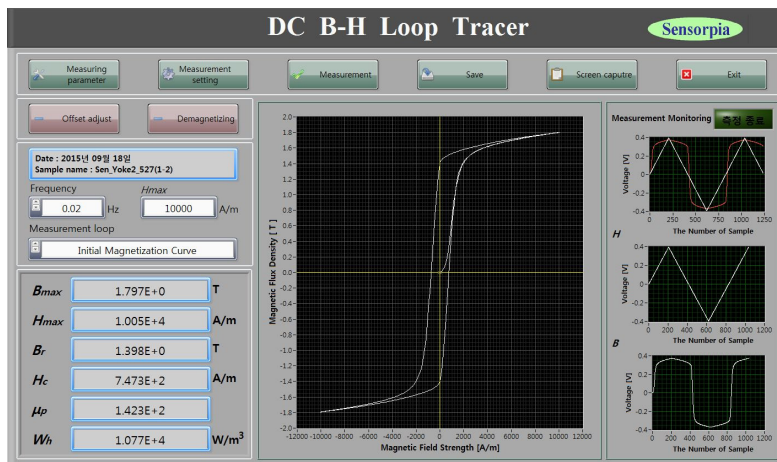


그림 2. 자기이력곡선 측정 장치의 VI창

## 참고문헌

- [1] 가은미, 손대락, “Digital Sample and Hold 증폭기를 사용한 드리프트 자체보상형 자속계의 제작”, 한국 자기학회지, Vol. 15, No.6, 333(2005).

# 센서를 활용한 무인감시 시스템에 관한 연구

김상준<sup>1\*</sup>, 조영훈<sup>1</sup>, 박성근<sup>1</sup>, 오광민<sup>1</sup>, 윤대길<sup>1</sup>, 손대락<sup>1</sup>

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

## 1. 서론

군사시설이나 주요 산업시설의 물리적 보안체계는 주로 인력에 의한 체계로 운용되고 있다. 특히, 군부대처럼 철책선이나 높은 담장과 같은 울타리에서 또는 외부에서 내부로 불법 침입자를 감지할 수 있는 경계 병력을 운용하기도 한다. 그러나 인력에 의존하는 물리적 보안 감시체계는 다수의 인력이 필요로 되고 장시간 근무로 피로도가 누적되어 침투에 대한 긴장도가 이완될 우려가 있으며, 또한 감시 사각지역으로 침투 시와 심야, 안개, 우천, 강설등 기상 이변이 열악한 환경에서는 능력이 저하되어 보안상 문제가 발생할 수도 있다[1]. 그래서 본 연구에서는 인력에 의한 물리적 보안체계를 보완할 수 있는 자기장 센서와 적외선, 음향 및 모션 센서를 이용한 무인 감시체계에 대한 사전 연구를 수행하였다.

## 2. 장치구성

물리적 보안체계는 여러 가지 요인에 의해 보안의 문제 위험성이 높다. 그래서 본 연구에서는 자기장 센서와 적외선, 음향 및 모션 센서를 활용하여 침투하여 오는 사람이나 물체를 감지하고, 이를 무선네트워크로 전송하는 시스템을 구축하였다.

광학적 방법으로는 적외선 laser diode와 photo diode를 사용하여 침입 시 빛이 차단되는 것을 감지한다. 음향 방법으로는 microphone을 사용하여 발생하는 소음을 감지하고, motion sensor로 침입자의 움직임을 감지한다. 또한 자기적 방법으로는 동물과 사람을 구별할 수 있는 유일한 방법으로 침입자가 강자성체를 소지할 경우 이를 감지하는 방법으로 사용하였다[2].

한편 이들 4개의 센서로부터 측정된 데이터를 전송하기 위해서 4-Channel의 data acquisition module을 사용하고 이들 디지털 데이터를 900 MHz대의 Zig-bee를 사용하여 상황실로 전송하고 상황실에서는 900 MHz의 Zig-bee 사용 수신하고, 상황판은 LabVIEW VI(Virtual Instrument) 창을 프로그램 하였다.

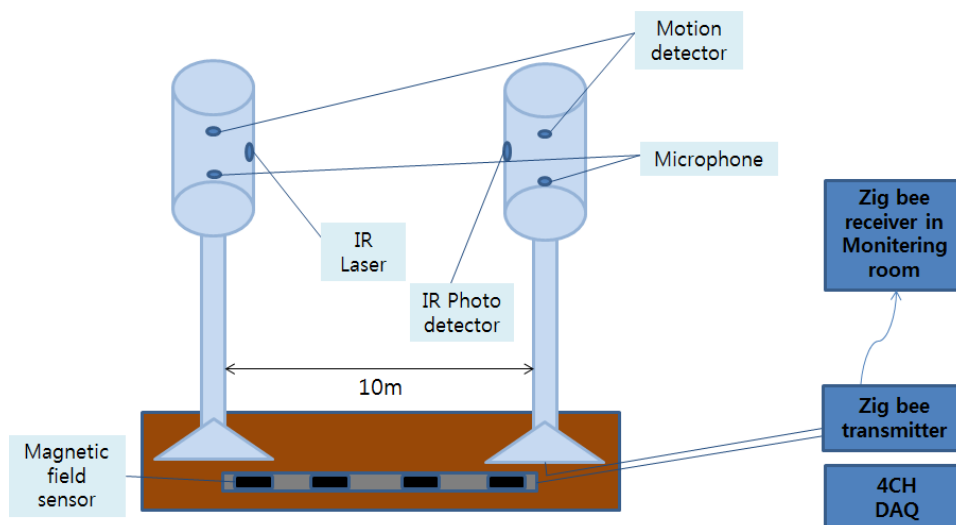


그림 1. 자기장 센서와 적외선, 음향 및 모션 센서를 이용한 무인 감시체계

### 3. 참고문헌

- [1] 최치원, 송태식, 엄정호 “과학화 장비를 활용한 무인 보안시스템 운영 방안에 관한 연구”, 보안공학연구 논문지 (Journal of Security Engineering), 제 9권 제 3호 2012년 6월
- [2] 유현재 외 2인 “감시정찰 센서네트워크 상에서 자기센서를 이용한 소총인원 탐지”, 한국정보과학회 제 40회 정기총회 및 추계학술발표회, 2013.11, 137-139 (3 pages)



## Bi-YIG 박막의 Spectrometer 기반 실시간 Faraday Rotation스펙트럼측정연구

강민구\*, Kuchi Rambabu, 정종율

충남대학교신소재공학과, 에너지과학기술대학원

Bi-YIG박막은 고주파에서 유전손실과 광손실이 매우 작은 전자기특성과 Faraday Rotation이 매우 큰 자기광학 특성 때문에 optical isolator, circulator 등의 고주파 소자나 광통신 소자를 개발하기 위한 기능성 재료로서 널리 활용되고 있다. [1]물질의 자기광학 특성은 편광된 빛이 자화된 매질을 전파할 때 빛과 매질과의 상호작용에 의해 생기는 것으로, 자기광학 특성 중 하나인 Faraday rotation은 Bi-YIG를 이용한 광통신 소자 구현시 소자의 성능을 결정하는 중요한 parameter가 되기 때문에 정확한 이해를 필요로 한다. 불연속적인 단일 파장으로 구성되어 있는 빛의 경우, 파장에 대해 섞여있는 정도를 스펙트럼이라 하는데 monochrometer를 사용하여 측정하면 측정시간이 길어지는 단점이 있다. 최근에는 분해능이 향상된 spectrometer를 사용함으로써 측정시간을 단축해 편광된 빛의 스펙트럼의 실시간 측정이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 Bi-YIG박막의 Faraday rotation 스펙트럼을 spectrometer를 기반하는 실시간 측정 장비를 이용하여 측정하였다. Faraday Rotation측정을 위해 자기장은 길이11cm의 솔레노이드를 이용해 인가하였고 Halogen-tungsten lamp를 광원으로 사용하였다. 본 발표에서는 Faraday rotation 측정을 위한 측정원리 및 측정방법에 대해 발표하고자 한다.

### 참고문헌

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

## Spontaneous Hall effect in Amorphous CoSiB/Pt/CoSiB structure

Y.K. Kim<sup>1\*</sup>, S.Y. Kim<sup>1</sup>, H.N. Lee<sup>1</sup>, T.W. Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Advanced Materials Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea

Magnetic multilayer films with perpendicular magnetic anisotropy have been extensively studied for the application of magnetic recording media and magnetic sensor. The spontaneous Hall effect (Extraordinary Hall effect) in magnetic metals and alloys which is caused by spin-orbit interaction is substantially larger than the ordinary Hall effect due to Lontz force. Some materials exhibit quite large spontaneous Hall effect suitable for Hall sensor. These materials include amorphous rare earth (RE)-transition metal (TM) alloy and Pt-based magnetic multilayer.

In this study, we have quantitatively investigated the Spontaneous Hall effect (SHE) in amorphous CoSiB/Pt/CoSiB sandwich structure. The amorphous CoSiB/Pt/CoSiB sandwich structure were prepared by changing Pt thickness. The thickness of Pt were varied in the range of from 11 to 42 Å. The amorphous CoSiB/Pt/CoSiB sandwich structure exhibited moderate spontaneous Hall resistivity ( $\rho_H$ ,  $0.016 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \sim 0.39 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ) and large Hall angle ( $\rho_H/\rho$ , 2.5~9.5%), which was larger than those of amorphous rare-transition metal alloys ( $\rho_H/\rho$ , 3%) and normal transition metal alloys ( $\rho_H/\rho$ , 6~8%).

## Analyses of Mössbauer spectra for ferrous and ferric state in Dynabi<sub>Tab</sub>

Young Rang Uhm<sup>\*</sup>, Jae Cheong Lim, and Sang Mu Choi

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

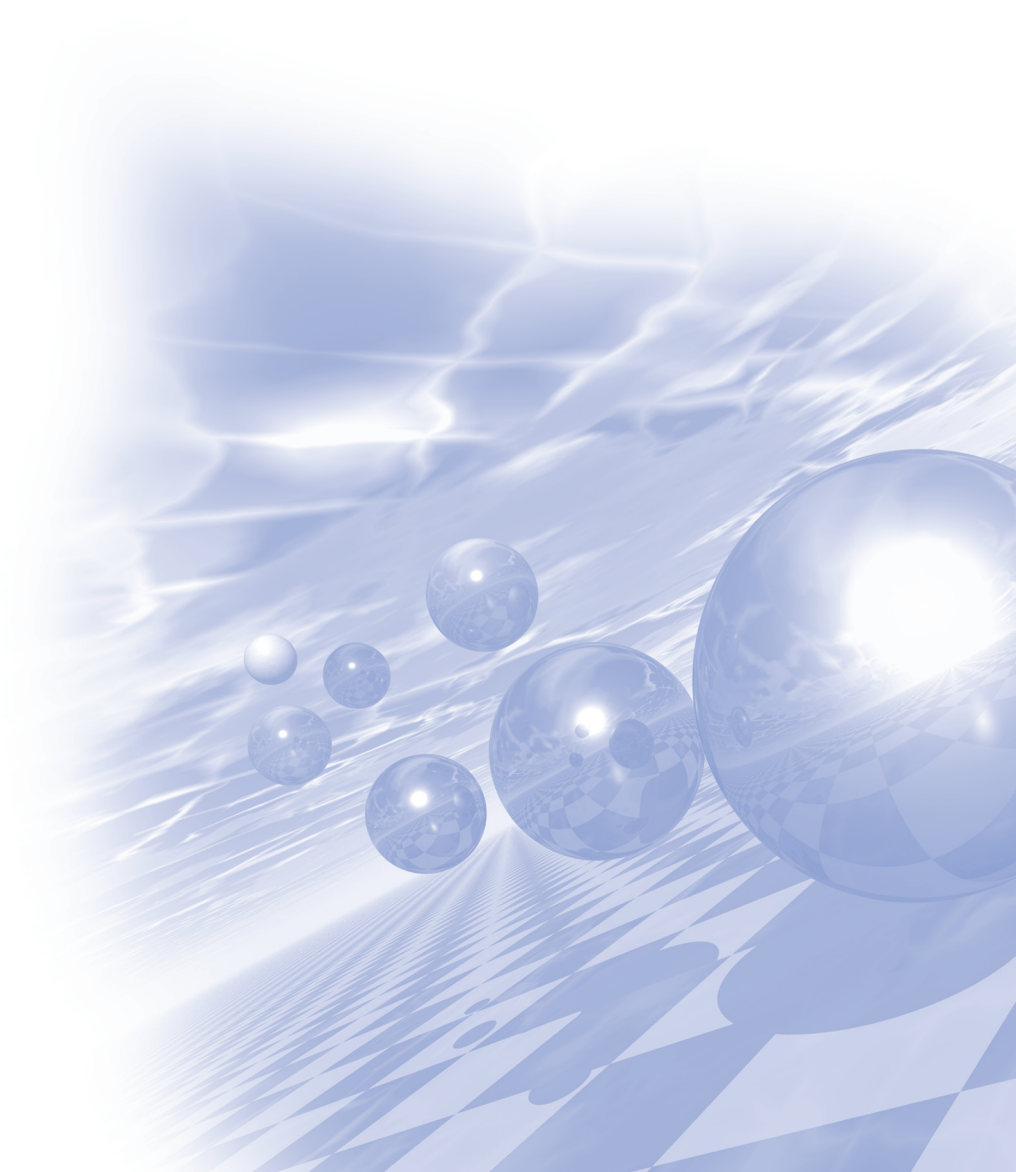
Antianemic medicament ferrous gluconate, ferrous fumarate, and a Dynabi tablet with basic iron bearing ingredients were studied using Mössbauer spectroscopy. Room-temperature spectra of ferrous gluconate provided clear evidence that the two phases of iron present were ferrous ( $\text{Fe}^{2+}$ ) as the major phase with a contribution of 91%, and ferric ( $\text{Fe}^{3+}$ ), whose contribution was found to be 9%. In the case of ferrous fumarate, a single phase was detected corresponding to ferrous ( $\text{Fe}^{2+}$ ). The Dynabi tablet consists of ferrous gluconate (91%) and ferrous fumarate (9%). However, the actual values of the contributions of the iron ions in Dynabi<sub>Tab</sub> were shown to depend on the storage temperature of the sample. The ferric phase was increased at high storage temperature of 50 °C.



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session VI**

**‘First-principles calculations:  
Magnetism and beyond’**





# A mechanism for orbital angular momentum and giant spin-splitting in solids and nanostructures

Sehoon Oh and Hyoungh Joon Choi\*

Department of Physics and IPAP, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

Giant spin-splitting of electronic bands, which is several orders of magnitude greater than Rashba splitting, has been observed in noble-metal surfaces, thin films of transition-metal dichalcogenides, etc. Here, we study structural and orbital conditions for emergence of a giant spin-splitting by using tight-binding and first-principles calculations. We find that broken mirror symmetry of local atomic structure around an atom can produce non-zero orbital angular momentum (OAM) at the atom. This OAM results in a giant spin-splitting if the atom is a high-atomic number element. We demonstrate these structural and orbital conditions in the cases of simple atomic chains, WSe<sub>2</sub> monolayer, Au(111) surface, and bulk HgTe. Based on this mechanism of the spin-splitting, we suggest methods to control the magnitude and direction of spins, which can be used in applications such as spintronic devices. This work was supported by NRF of KOREA (Grant No. 2011-0018306) and KISTI supercomputing center (Project No. KSC-2015-C3-039).

## First-principles studies on the metal contact with carbon-based nanomaterials

Seunghun Jang, Jino Im, Min Choi, Jeong-O Lee, and Hyunju Chang<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Research Institute of Chemical Technology Daejeon, 305-600, Korea

<sup>\*</sup>Presenting author's email: [hjchang@krikt.re.kr](mailto:hjchang@krikt.re.kr)

For the experimental realization of the device using carbon-based nanomaterials (CNMs), such as graphene (GR) or carbon nanotubes(CNTs), it is important to understand the properties of the interfaces with metal electrodes. Even there have been extensive studies on the metal-GR (or CNT) interfaces with various metal elements, there are some missing metal elements, such as indium. In this paper, we present the first-principles calculations based on density functional theory on the metal-GR (or CNT) interfaces, including indium and other metal elements. We will discuss the metal-CNMs interface properties with respect to the chemical properties of metal elements, themselves.

# Computational design high-performance rare-earth-free permanent magnet based on hard-soft hybrid structures

Joo-Hyoung Lee<sup>\*</sup>

School of Materials Science and Engineering, GIST

Permanent magnets (PMs) are playing a key role in modern industry, particularly in energy conversion applications, mostly mechanical to electrical or vice versa, which includes automobiles, electronics and power generators. The conversion efficiency of such devices critically depends on the magnets' performance, which makes it a first-priority task to develop PMs with higher strength. Today, most high-performance magnets are based on rare-earth elements such as Nd, Sm or Dy. Going through the so-called "Rare-earth crisis" around 2010, many countries initiated interdisciplinary research programs to design novel PMs without containing rare-earth elements. In this talk, we will present our recent results along this direction using the exchange spring magnet. By employing first-principles density functional theory, we compute important magnetic properties for strong PMs, saturation magnetization ( $M_s$ ), energy product ( $(BH)_{\max}$ ) and coercivity ( $H_c$ ), of hard-soft hybrid structures which consist of periodic arrangement of MnBi and Fe layers. Through calculating the magnetic properties by varying the thickness of each phase, we demonstrate that  $M_s$ ,  $(BH)_{\max}$  and  $H_c$  of MnBi/Fe all show large improvement over MnBi; Compared to MnBi,  $M_s$ ,  $(BH)_{\max}$  and  $H_c$  of the hybrid structure are increased by 20%, a factor of two and three, respectively. These findings indicate that MnBi/Fe holds a great potential for high-performance, rare-earth-free permanent magnet for next-generation applications.



## Orbital Selective Fermi Surface Shifts in Correlated AFeAs (A = Li, Na)

Geunsik Lee<sup>6\*</sup>, Hyo Seok Ji<sup>1</sup>, Yeongkwan Kim<sup>2</sup>, Changyoung Kim<sup>2</sup>,  
Kristjan Haule<sup>3</sup>, Gabriel Kotliar<sup>3</sup>, Bumsung Lee<sup>4</sup>, Seunghyun Khim<sup>4</sup>,  
Kee Hoon Kim<sup>4</sup>, Kwang S. Kim<sup>1,6</sup>, Ki-Seok Kim<sup>5</sup>, Ji Hoon Shim<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute of Physics and Applied Physics, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Physics and Astronomy, Rutgers University, Piscataway, New Jersey 08854, USA

<sup>4</sup>Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 151-747, Republic of Korea

<sup>5</sup>Department of Physics, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Republic of Korea

<sup>6</sup>Department of Chemistry, School of Natural Sciences UNIST (Ulsan National Institute of Science and Technology), Korea

E-mail: gslee@unist.ac.kr

Based on the dynamical mean field theory and angle resolved photoemission spectroscopy, we have investigated the mechanism of high  $T_c$  superconductivity in stoichiometric LiFeAs. The calculated spectrum is in excellent agreement with the observed angle resolved photoemission spectroscopy measurement. The Fermi surface (FS) nesting, which is predicted in the conventional density functional theory method, is suppressed due to the orbital-dependent correlation effect within the dynamical mean field theory method. We have shown that such marginal breakdown of the FS nesting is an essential condition to the spin-fluctuation mediated superconductivity, while the good FS nesting in NaFeAs induces a spin density wave ground state. Our results indicate that a fully charge self-consistent description of the correlation effect is crucial in the description of the FS nesting-driven instabilities.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (Grant No. 2011-0010186).

### References

- [1] G. Lee *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 177001.
- [2] H.S. Ji *et al.*, Progress in Superconductivity **14** (2012) 11.

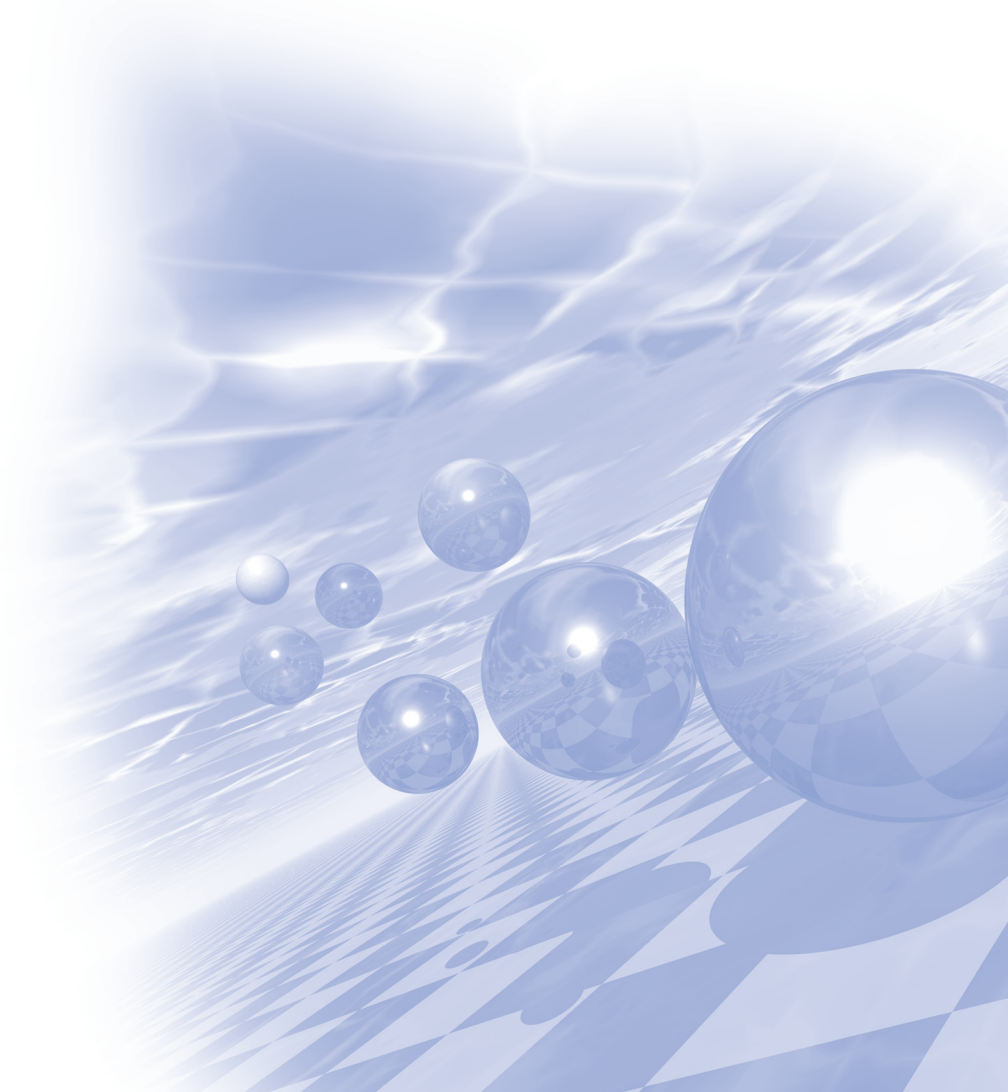


**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session VII**

**‘The 1st Korea–China–Vietnam  
symposium on magnetic oxide’**

**– 산화물 연구센터(한국외국어대학교) 주최**





## TM-doped ZnO DMS synthesized by hydrothermal method under high magnetic field

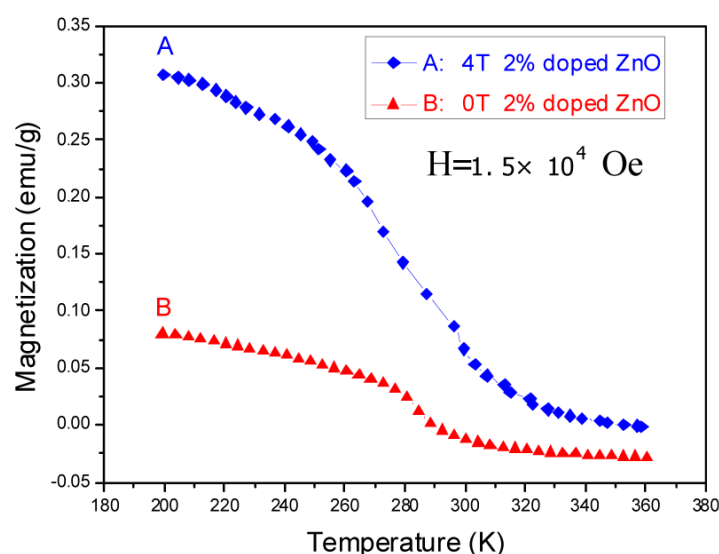
Min Zhong<sup>1</sup>, Muhammad Tariq<sup>1</sup>, Zihao Zhang<sup>1</sup>, Chunli Liu<sup>2</sup>, Yemin Hu<sup>1</sup>, Wenxian Li<sup>1</sup>, Ying Li<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Microstructures/School of Materials Science and Engineering,  
Shanghai University 149 Yanchang Road, 200072 Shanghai, P.R. China

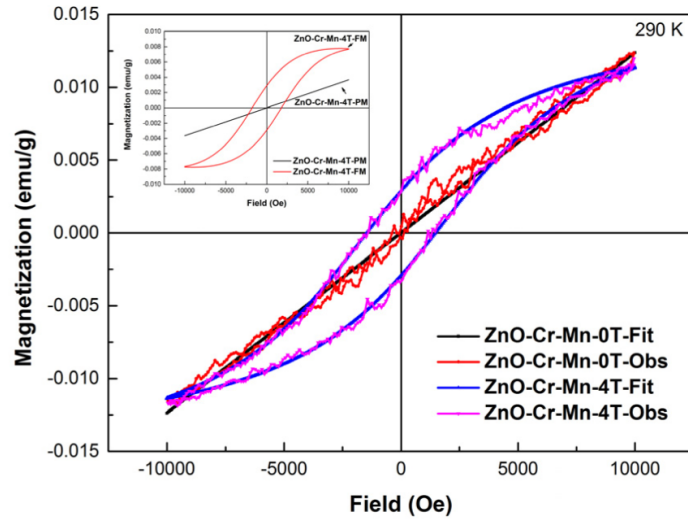
<sup>2</sup>Department of Physics and Oxide Research Center,  
Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, 449-471, Korea

\*liying62@shu.edu.cn

Transition metal(TM)-doped ZnO has emerged as an attractive candidate in the quest for High  $T_C$  diluted magnetic semiconductors(DMS) which have both semiconductor and magnetic properties[1]. In our study[2,6], room-temperature ferromagnetic TM(Cr, Mn, Co, Ni,.....) doped ZnO diluted magnetic semiconductors were synthesized by hydrothermal method with 4 T pulse magnetic field-assisted. X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) were used to characterize the microstructure. And the HRTEM, EDS and XPS measurements ensured how many the dopant ions had incorporated into the ZnO host matrix and their states. The effects of the magnetic field on the microstructure and the magnetic properties of TM doped ZnO were studied. The experimental results show that the magnetic field could change the morphology of the crystalline ZnO and improve the amount of the dopants in ZnO DMS, curie temperature and ferromagnetism of the samples. Figure 1 is the results of magnetization dependent on the temperature under the magnetic field of  $H=1.5 \times 10^4$  Oe for 2 % Cr doped ZnO. It shows that the curie temperature increases 15 K (from 284.02 K to 299.15 K) for 4T processing sample. Figure 2 gives the M-H curves for Cr-Mn codoped ZnO which reveals the appearance of ferromagnetism resulted from the magnetic field processing.



**Fig. 1.** Temperature-dependent magnetization of 2% 0T and 2%-4T samples under  $1.5 \times 10^4$  Oe.



**Fig. 2.** M-H curves of ZnO-Cr-Mn-0T and ZnO-Cr-Mn-4T samples detected at 290 K. The inset shows the paramagnetic and ferromagnetic contributions obtained by fitting of ZnO-Cr-Mn-4T sample.

## References

- [1] H. Ohno, Making nonmagnetic semiconductors ferromagnetic, *Science* 281 (5379) (1998) 951-956.
- [2] Min Zhong, Shiwei Wang, Ying Li, Yemin Hu, Mingyuan Zhu, Hongmin Jin, Yibing Li, Haimin Zhang, Huijun Zhao, Roomtemperature ferromagnetic Cr-Ni codoped ZnO diluted magnetic semiconductorssynthesized by hydrothermal method under high pulsed magnetic field, *Ceramics International*, 41, 451-7, 2015
- [3] Shiwei Wang, Weiqiang Bo, Min Zhong, Cong Liu, Ying Li, Mingyuan Zhu, Yemin Hu and Hongmin jin, Effect of Cr Content on the Properties of Magnetic Field Processed Cr-Doped ZnO-Diluted Magnetic Semiconductors, *Journal of Nanomaterials*, 2012, 501069
- [4] Yibing Li, Ying Li, Mingyuan Zhu, Tao Yang, Jin Huang, Hongming Jin, Yemin Hu, Structure and magnetic properties of Cr-doped ZnO nanoparticles prepared under high magnetic field, *Solid State Communications*, 150(15-16), 2010, 751-4
- [5] Jin Huang, Mingyuan Zhu, Ying Li, Tao Yang, Yibing Li, Hongming Jin, and Yemin Hu, Fabricating Co Doped ZnO Nanocrystallines by Hydrothermal Method with High Pulsed Magnetic Field, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10(11), November 2010, 7303-7306
- [6] Tao Yang, Y. Li, M. Y. Zhu, Y. B. Li, J. Huang, H. M. Jin, Y. M. Hu, Room-temperature ferromagnetic Mn-doped ZnO nanocrystal synthesized by hydrothermal method under high magnetic field, *Materials Science & Engineering B*, 2010, 170, 129-32

# Influence of magnetic field on the critical behavior of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ( $x=0.2, 0.3, 0.4$ )

P. Zhang<sup>d\*</sup>, P. Lampen<sup>c</sup>, T. L. Phan<sup>a</sup>, S. C. Yu<sup>a</sup>, T. D. Thanh<sup>b</sup>,  
N. H. Dan<sup>b</sup>, V. D. Lam<sup>b</sup>, H. Srikanth<sup>c</sup>, M. H. Phan<sup>c</sup>

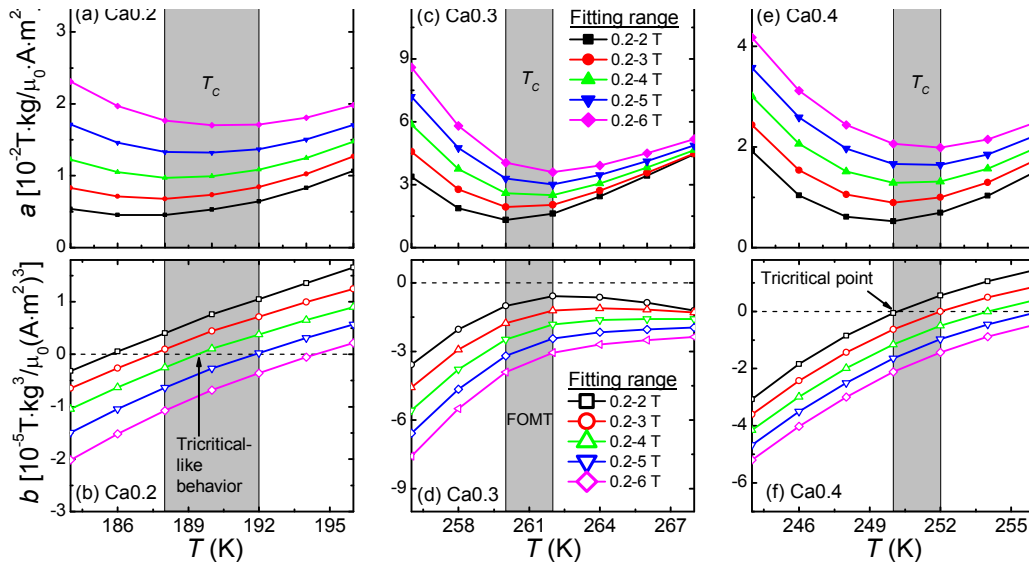
<sup>a</sup>Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, South Korea

<sup>b</sup>Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

<sup>c</sup>Department of Physics, University of South Florida, Tampa, FL33620, USA

<sup>d</sup>School of Electrical & Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, 430068, China

The properties of the ferromagnetic to paramagnetic transition in polycrystalline manganites  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  ( $x=0.2, 0.3, 0.4$ ) is presented in detail. The first order transition in  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  is bordered by second order transitions in the neighboring  $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_3$  and  $\text{La}_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{MnO}_3$  compositions. Analysis of the Landau–Lifshitz coefficients obtained from Arrott plots showed that while  $b(T)$  is uniformly negative in  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ , it changes from positive to negative values in different magnetic field ranges for  $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_3$  and  $\text{La}_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{MnO}_3$ , indicating that the behavior cannot be described within a single model under the application of a strong field. The Kouvel–Fisher procedure performed on the samples with continuous transitions over different ranges of fitting field confirmed tricritical exponents in  $\text{La}_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{MnO}_3$  but revealed that the critical exponents obtained for  $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_3$  depend strongly on the choice of field range, shifting from values consistent with short range (3D Heisenberg/3D Ising) interactions to those approaching the tricritical mean field model. This observation is attributed to the influence of magnetic field on the coexistence of energetically close double-exchange and super-exchange ferromagnetic interactions in  $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_3$ .



**Fig. 1.**  $a$  and  $b$  parameters in the Landau-Lifshitz equation of state obtained by fitting in different field ranges as a function of temperature in  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ .

The shadowed areas represent the temperature zone of  $T_C$  shifting with the applied field.

# Thermally tunable magnetic metamaterials at THz frequencies

Nguyen Thi Hien, Bui Son Tung, Nguyen Thanh Tung and Vu Dinh Lam<sup>\*</sup>

Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology

18 Hoang Quoc Viet-Cau Giay-Hanoi-Vietnam

<sup>\*</sup>Email: lamvd@ims.vast.ac.vn

Looking for alterable metamaterials, whose electromagnetic properties can be dynamically and real-time controlled, has attracted a great attention recently. In this report, we firstly investigated theoretically and numerically the tunability of the magnetic property of metamaterial in the THz region via thermal control. Then the thermo-tunable polarization-insensitive of the left-handed metamaterials was studied. The conventionally used metal is replaced by InSb in which the temperature-dependent conductivity plays a key role in tuning the magnetic and also the left-handed frequencies. It was found that when the temperature of the InSb stack increases from 300 to 350 K, the resonance peak of the transmission spectra shows a shift from 0.6 to 0.85 THz accompanied by a stronger magnetic behavior. While the left-handed transmission peak shifts from 0.8 to 1.1 THz and fractional bandwidth of the negative refractive index goes from 14% to 22%. Thermally increased carrier density of InSb is found to be the reason for the enhanced magnetic resonance and stronger left-handed behavior in addition to the tunability. The equivalent LC circuit model and standard retrieval method are performed to elaborate our proposed idea.

## References

- [1] V. D. Lam et al., Opt. Express **16** 5934 (2008).
- [2] V. D. Lam et al., J. Phys. D **42** 115404 (2009)
- [3] V. T. T. Thuy *et al.*, Opt. Commun. **283** 4303 (2010).
- [4] N. T. Tung *et al.*, Appl. Phys. Express **5** 112001 (2012)
- [5] B. S. Tung, *et al.*, J. Opt. **15** 075101(2013).
- [6] N. T. Tung et al., J. Appl. Phys. **116**, 083104 (2014)
- [7] Nguyen Thi Hien, *et al.*, Comp. Mater. Sci. **103** 189 (2015)

## Formation of nanocrystalline Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub> powders by mechanical alloying

D. H. Manh<sup>1\*</sup>, D. K. Tung<sup>1</sup>, L. T. H. Phong<sup>1</sup>, N. X. Phuc<sup>1</sup>, B. W. Lee<sup>2</sup>, and T. L. Phan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology,  
18 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Department of Physics and Oxide Research Center, Hankuk University of Foreign Studies,  
Yongin 449-791, South Korea

\*Email: manhdh@ims.vast.ac.vn

Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub> nanocrystals were prepared by mechanical alloying in air, used Fe and Co powders (3N). The variations of crystal structure, morphology, and magnetic property were investigated as a function of milling time (in the range between 0.5 and 32 h) by using an X-ray diffractometer, field-emission scanning electron microscopy, and vibrating sample magnetometer. The complete formation of bcc Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub> solid solution was observed after 10 h of alloying in dependence on the milling conditions. At this time, the alloy powders with average crystallite size of about 8 nm and a maximum saturation magnetization of 200 emu/g were obtained. For longer milling times, both the crystallite size and the magnetization decreased, while the coercive increased rapidly. The saturation magnetization of as-milled powders remained almost unchanged for a long time of their keeping in air, which suggests a due to a formation of thin oxide layer on the particles.

**Keywords:** FeCo nanoparticles, Mechanical alloying, Magnetic properties



# Magnetic properties and magnetocaloric effect in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ exhibiting first-order and second-order magnetic phase transitions

T. L. Phan<sup>1\*</sup>, T. A. Ho<sup>2</sup>, T. D. Thanh<sup>2</sup>, C. U. Jung<sup>1</sup>, B. W. Lee<sup>1</sup>, and S. C. Yu<sup>2</sup>

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

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

\*Electronic mail: ptlong2512@yahoo.com

We have prepared polycrystalline samples  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0, 0.025, 0.05, 0.075$  and  $0.1$ ) by solid-state reaction, and then studied their magnetic properties and magnetocaloric (MC) effect based on magnetization versus temperature and magnetic-field ( $M$ - $H$ - $T$ ) measurements. Experimental results reveal the easiness in tuning the Curie temperature ( $T_C$ ) from 260 to about 300 K by increasing Ba-doping concentration ( $x$ ) from 0 to 0.1. Under an applied field  $H = 50$  kOe, maximum magnetic-entropy changes around  $T_C$  of the samples can be tuned in the range between 6 and 11  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , corresponding to refrigerant-capacity values ranging from 190 to 250  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ . These values are comparable to those of some conventional MC materials, and reveal the applicability of  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$  materials in magnetic refrigeration. Analyses of the critical behavior based on the Banerjee criteria, Arrott plots and scaling hypothesis for  $M$ - $H$ - $T$  data, and scaling laws for the MC effect prove a magnetic-phase separation when Ba-doping concentration increases. In the doping region  $x = 0.05$ - $0.075$ , the samples exhibit the crossover of first- and second-order phase transitions with the values of critical exponents  $\beta$  and  $\gamma$  close to those expected for the tricritical mean-field theory. The samples with  $x < 0.05$  and  $x > 0.075$  exhibit first- and second-order transitions, respectively. More detailed analyses related to the Griffiths singularity, the critical behavior for different magnetic-field intervals started from 10 kOe, and the magnetic-ordering parameter  $n = d\ln|\Delta S_m|/d\ln H$  (where  $\Delta S_m$  is the magnetic-entropy change) demonstrate magnetic inhomogeneities and multicritical phenomena existing in the samples.

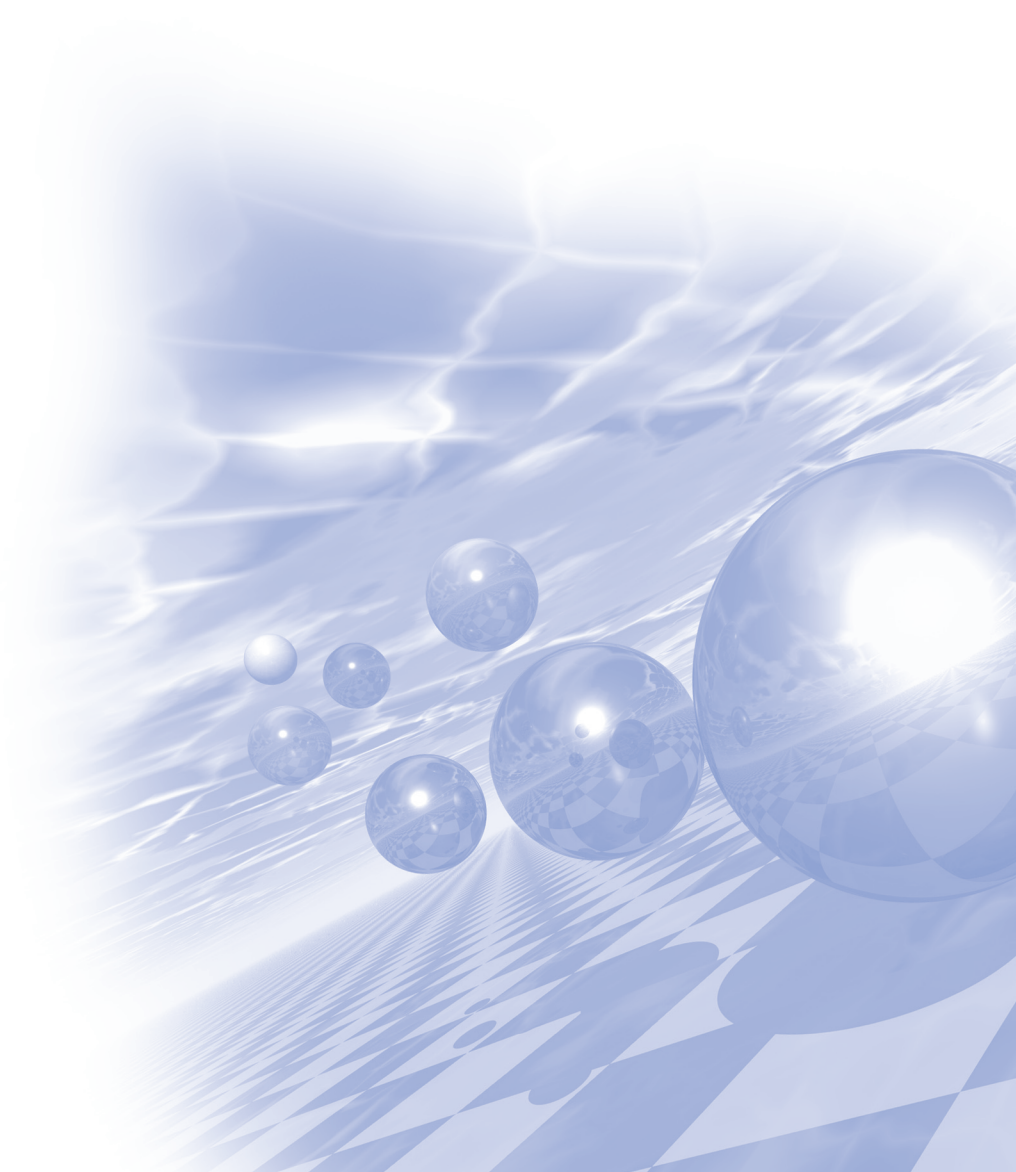
**Keywords:** Perovskite manganites, Magnetic properties, Magnetocaloric effect



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session VIII**

**‘First-principles calculations:  
Magnetism and beyond’**





# Ab initio study on metal-insulator and magnetic transitions in correlated hollandites: $K_2Cr_8O_{16}$ and $K_2V_8O_{16}$

Sooran Kim<sup>1,2\*</sup>, Beom Hyun Kim<sup>1</sup>, Kyoo Kim<sup>1,2</sup>, B. I. Min<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Pohang University of Science and Technology, Pohang, 790-784, Korea

<sup>2</sup>c\_CCMR, Pohang University of Science and Technology, Pohang, 790-784, Korea

## 1. Introduction

Hollandite-type TM oxides  $A_2M_8O_{16}$  ( $A$ =alkali metal,  $M$ =TM element) have drawn recent attention due to their quasi-one-dimensional column structure made of four double MO chains. Despite the similarity in the crystal structures, these materials have different physical properties depending on the TM element.  $K_2Cr_8O_{16}$  and  $K_2V_8O_{16}$  exhibit the metal-insulator transition (MIT) and the structural transition concomitantly upon cooling [1,2].

In order to explore the driving mechanism of the concomitant metal-insulator and structural transitions in quasi-one-dimensional hollandite  $K_2Cr_8O_{16}$  and  $K_2V_8O_{16}$ , electronic structures and phonon properties are investigated by employing the *ab initio* density functional theory (DFT) calculations. We have also investigated magnetic properties of  $K_2Cr_8O_{16}$  and  $K_2V_8O_{16}$ .

## 2. Results and Discussions

For  $K_2Cr_8O_{16}$ , we have found that the Coulomb correlation plays an essential role in MIT and the structural transition. Above the MIT temperature,  $K_2Cr_8O_{16}$  has ferromagnetism and a half-metallic nature. After MIT,  $K_2Cr_8O_{16}$  goes ferromagnetic insulator.  $U$  effect facilitates the MIT and structural transition by increasing the hybridization between Cr  $d_{yz+zx}$  and O  $p_z$ . Thus we proposed the Mott-Peierls transition as the driving mechanism of the concomitant MIT and the structure transition in  $K_2Cr_8O_{16}$ . The unique feature of  $K_2Cr_8O_{16}$  is that the Mott-Peierls transition occurs in the fully spin-polarized band.[3]

For  $K_2V_8O_{16}$ , we have obtained the insulating electronic structures with charge ordering (CO) and orbital ordering (OO). The optical conductivity and magnetic exchange interaction were calculated to investigate the ground state of  $K_2V_8O_{16}$ . The CO of  $V^{3+}$  and  $V^{4+}$  occurs in separate chains, preserving the inversion symmetry of the crystal. Thus,  $K_2V_8O_{16}$  is to be a model system for investigating a spin-orbital-lattice coupled Mott system. The MIT of the system occurs via the orbital-selective Mott transition. The insulating ground state of  $K_2V_8O_{16}$  arises from the interplay of on-site Coulomb interaction, the magnetic-exchange interaction, and tetragonal distortion, causing the CO of  $V^{3+}$  and  $V^{4+}$  and the OO of  $d_{xy}$  and  $d_{yz+zx}$ . We have separated the physics of MIT and Peierls-like distortions in  $K_2V_8O_{16}$ , whereby demonstrated that the Peierls physics is not essential in driving the MIT.

## 3. References

- [1] T. Toriyama, A. Nakao, Y. Yamaki, H. Nakao, Y. Murakami, K. Hasegawa, M. Isobe, Y. Ueda, A.V. Ushakov, D. I. Khomskii, S. V. Streltsov, T. Konishi, and Y. Ohta, Phys. Rev. Lett. 107, 266402 (2011).
- [2] M. Isobe, S. Koishi, N. Kouno, J.-I. Yamaura, T. Yamauchi, H. Ueda, H. Gotou, T. Yagi, and Y. Ueda, J. Phys. Soc. Jpn. 75, 073801 (2006).
- [3] S. Kim, K. Kim, and B. I. Min, Phys. Rev. B 90, 045124 (2014)

# Lanthanide-like localization of 4d-derived spins in a columnar itinerant niobium oxide lattice

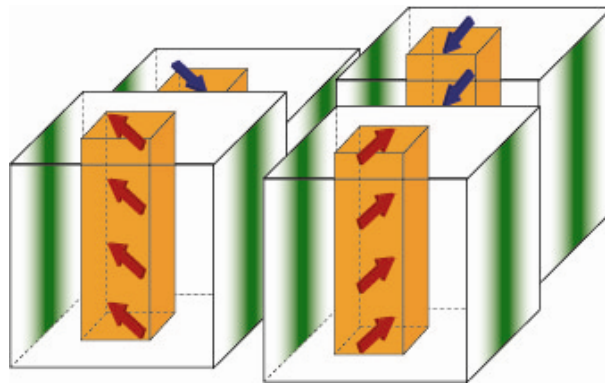
K.-W. Lee<sup>1,2\*</sup> and W. E. Pickett<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Graduate School, Korea University, Sejong

<sup>2</sup>Department of Display and Semiconductor Physics, Korea University, Sejong

<sup>3</sup>Department of Physics, University of California, Davis, CA, USA

Local moments embedded in conducting media form a rich platform for unusual phases, with phenomena including Kondo systems, heavy fermion metals and superconductors, and still unexplained non-Fermi liquid behavior. Two decades ago it became clear that the suboxide  $\text{Nb}_{12}\text{O}_{29}$  displayed local spins in a conducting background, but the origin has remained a conundrum and its low temperature behavior has not been studied extensively. Using first principles based methods and the refined crystal structure based on columns of  $3 \times 4$  planar blocks of  $\text{NbO}_6$  octahedra, we find that orthorhombic (o)- $\text{Nb}_{12}\text{O}_{29}$  introduces a new class of transition metal oxide. The electronic system consists of a Nb dimer spin-orbital comparable in size to those in metallo-organic compounds, yet is tightly bound and weakly interacting with itinerant electronic bands. These local moments - a rare occurrence for Nb - form one-dimensional spin chains that criss-cross perpendicularly oriented conducting “nanowires.” The local moment bandwidth is comparable to what is seen in rare earth compounds with extremely localized orbitals. The microscopic origin is elucidated based on the local structure of the  $\text{NbO}_6$  octahedra and orbital+spin ordering. The resulting anisotropic two-dimensional Heisenberg-Kondo lattice model provides a new and distinctive spin-fermion lattice system for further study.



# Quasiparticle self-consistent GW study of cuprates: electronic structure, model parameters, and the two-band theory for $T_c$

Myoung Joon Han<sup>\*</sup>

Department of Physics, KAIST

An important open question for high- $T_c$  cuprates is about the material dependence of the superconducting properties. Using the quasiparticle self-consistent GW (QSGW) method, we re-examine the electronic structure of the parent compounds of copper oxide high- $T_c$  materials. We show that QSGW captures several important features, distinctive from the conventional LDA results. The energy level splitting between  $dx^2-y^2$  and  $d_{3z^2-r^2}$  is significantly enlarged and the van Hove singularity point is lowered. The calculated results compare better than LDA with recent experimental results from resonant inelastic x-ray scattering and angle resolved photoemission experiments. This agreement with the experiments supports the previously suggested two-band theory for the material dependence of the superconducting transition temperature,  $T_c$ .

## Full *ab initio* calculations of non-adiabatic electron-atom coupled dynamics

Dongbin Shin, Noejung Park<sup>\*</sup>

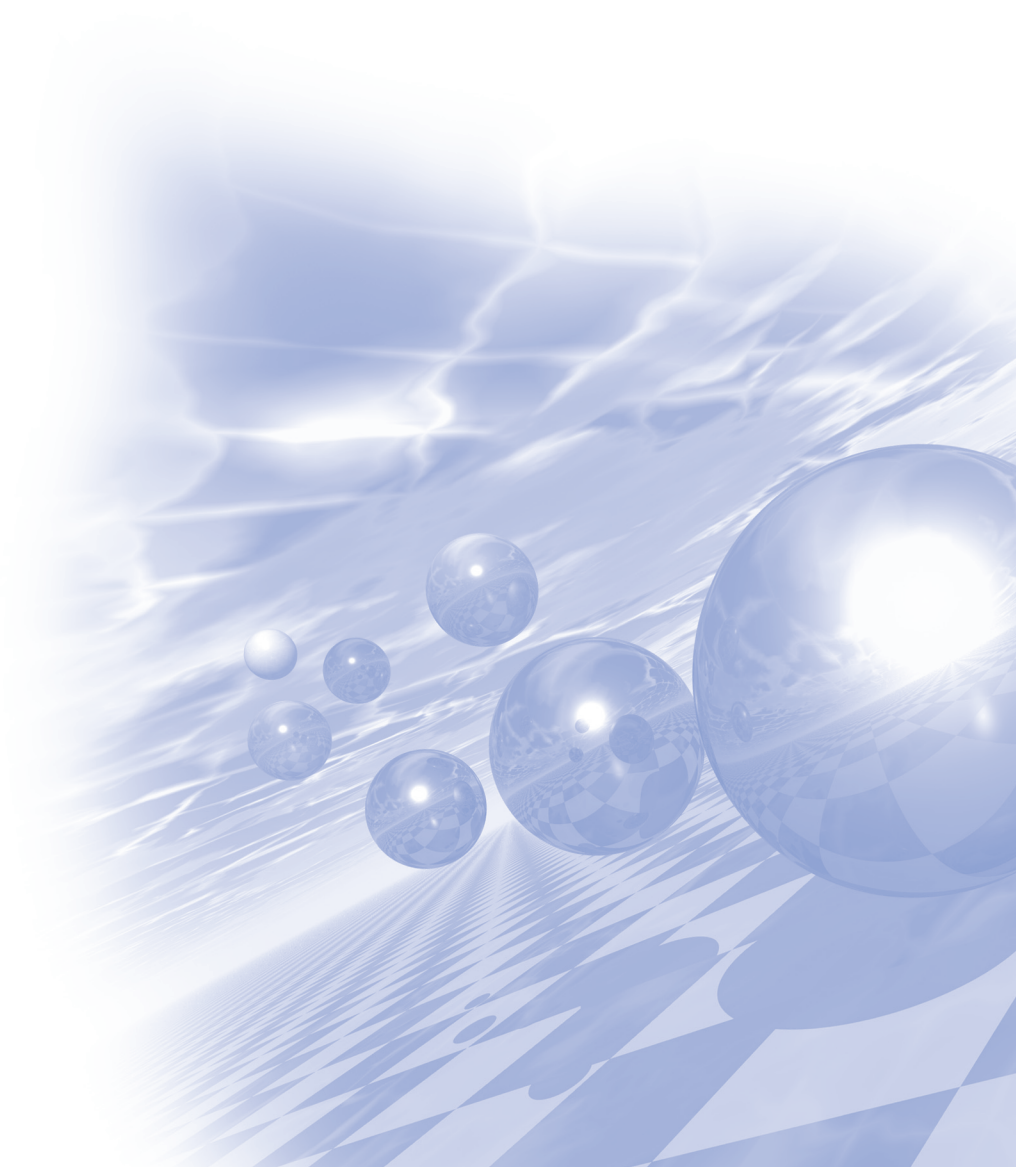
Department of Physics and Center for Multidimensional Carbon Materials,  
Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, 689-798 Korea  
noejung@unist.ac.kr

Since the Schrodinger's and Dirac's formulation of quantum mechanics at the beginning 20th century, diverse branches of theories have developed to deal with quantum mechanics of condensed matters in a way of as ab-initio as possible. The most widely used method is the density functional theory in which the one body Hamiltonian is solved self-consistently, and atomic degrees of freedoms are singled out through the Born-Oppenheimer approximation. Various hierarchical and complementary treatments have been introduced to overcome limitations of such an effective one-body theory. Now the community in this field is ready to include perturbations, such as photons or electrons colliding with condensed matters, to study sub-femto second phenomena beyond Born-Oppenheimer approximation. As a practical implementation in this direction, we developed the package of real-time time-dependent density functional theory, in which the Kohn-Sham orbitals evolve along with the self-consistent evolution of density and Hamiltonian. We present our results for electron tunneling across an oxide insulator and collision of an electron wave packet in a material system. We particularly put emphasis on the fact that, because of the over-delocalization error of the conventional local density functionals, an explicit control parameter for the electrons correlation, such as Hubbard U term, is necessary in the time-dependent equation. We show that the non-local Hubbard potential can be implemented in, line with other non-local components, in the Suzuki-Trotter's splitting scheme as well as in Crank-Nicolson form of propagator. As example studies, we calculated the high speed motion of alkali atoms on metal surface and the exchange of electron between localized defects and metallic bath, as sketched in the Anderson model.



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **구두발표 II**







## 유기 스핀 소자 내에서의 스핀 거동 이해

김태희\*

이화여자대학교 물리학과

유기반도체의 긴 스핀 플립 시간(long spin relaxation time), 또 유기소재의 다양한 물리화학적 특성 등을 기반으로 스핀정보를 효율적으로 전달과 제어가 가능한 차세대 다기능 메모리 및 논리 소자 개발에 대한 관심이 날로 높아지고 있다. 유기물의 다양한 화학적기능을 기존의 반도체 또는 금속 기반 스핀소자 기술에 접목하려는 시도가 많이 보고되고 있고, 2004년 미국 Utah 대학 연구진의 선도적 연구결과 발표이후 최근 10년 동안 세계 학계에서 거둬들인 괄목할 만한 성과 또한 차세대 스핀융합소자 개발에 대해 긍정적 연구 방향을 제시하고 있다. 특히, 유기분자의 화학적, 구조적 변조를 통한 계면특성의 조율로 스핀 수송을 제어하려는 연구는 ‘spinterface’라는 새로운 패러다임을 형성할 만큼 강자성금속/유기반도체 계면특성의 중요성이 부각시키며 유기물 스핀소자 내 스핀 거동에 대한 이해를 진일보시켰다. 그러나 앞서 보고된 주목할 만한 다수의 결과들은 오로지 저온 또는 극히 제한된 소자구조에 대해 확보된 한정된 성과들로, 강자성금속/유기반도체의 전도도 불일치에 의하여 계면에서 스핀 덩치기(trapping)와 산란으로 스핀 주입에 대한 어려움과 유기장벽내 스핀 수송 메커니즘에 대한 불완전한 이해 등은 실온에서 작동 가능한 높은 재현성의 유기스핀소자 개발의 난제로 여전히 남아 있다.

본 연구에서는 최근 본 연구진에 관찰한 계면 특성에 의해 유도된 유기장벽의 분자정렬과 질서도가 유기물 스핀소자의 기능향상에 미치는 막대한 영향에 대해 집중적으로 다루고자 한다. 최첨단 UHV-무기/유기분자빔 박막 증착 장비를 이용하여 다층박막의 에피성장구조를 형성하여 스핀주입의 효율을 향상시켰을 뿐만 아니라 우수한 질서도가 확보된 유기장벽 내 스핀수송 측정결과의 재현성 향상에 의해 스핀수송현상에 대한 이론적 이해를 도모하였다. 궁극적으로 본 연구진이 최근 관찰한 실온에서 약 30% 가까이 이르는 유기스핀소자의 거대자기저항 현상은 미래 첨단 스핀 융합소자의 개발을 앞당기는데 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

# Investigation of electric field effect on perpendicular magnetic anisotropy with MTJ structures

박경웅<sup>1,2\*</sup>, 김대훈<sup>1</sup>, 백승현<sup>1</sup>, 서수만<sup>2</sup>, 정성웅<sup>2</sup>, 박병국<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon

<sup>2</sup>Research and Development Division, SK hynix semiconductor Inc., Gyeonggi-do

## 1. 서론

모바일 통신 기기의 급격한 증가와 대용량 정보 전달의 효율성을 확보하기 위하여 비휘발성 메모리 소자를 이용한 에너지 효율 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 차세대 반도체 메모리로 각광 받고 있는 STT-MRAM의 경우 뛰어난 동작 속도와 영구적인 비휘발성 같은 장점을 가지고 있기 때문에 non-volatile computing architecture를 구성하는데 있어 ROM (read only memory) 및 SDRAM 또는 DRAM을 대체 가능한 메모리 소자로 주목 받고 있는 상황이다. 그러나 충분한 switching current를 확보하기 위한 transistor 개수의 증가가 소자 집적도 증가에 큰 저해요소가 되고 있으며[1], device size 감소 시 자성 물질의 체적 감소에 기인하는 thermal stability 감소 등의 문제가 대두되고 있다. 최근 보고된 연구에 의하면, 수직 MTJ에 electric field를 인가할 때 switching에 필요한 에너지 장벽을 감소시킴으로써 switching current 감소 효과 및 transistor 개수 감소에 따른 고집적화에 용이하며, switching 후 electric field를 제거하면 에너지 장벽이 원래의 상태로 복구되면서 정보저장 안정성을 확보하는 구조를 나타낸다고 알려져 있다. 그러나 전계 인가에 따른 자성 물질의 특성 변화의 원인과 제어 인자에 대한 분석은 아직 명확히 규명되지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 MTJ 적층 구조에 따라 electric field가 미치는 영향을 파악하고 물리적 원인과약을 위한 근거를 마련하고자 하였다.

## 2. 실험방법과 결과

본 연구에서는 electric field가 MTJ 소자에 미치는 영향을 명확하게 파악하기 위하여 Non Magnet/Ferromagnet/oxide와 같은 단일 자성박막에 대한 현상을 살펴보았다. 전극 물질로는 Ta, Pt, Ta/Ru/Ta를 사용하였고, 자성 박막은 Co와 CoFeB에 대해 각각 비교하였다. 상부 interface anisotropy 확보를 위한 산화물은 MgO/AlO 박막을 적용하였다. 각 박막은 UHV sputtering 법으로 제작한 다음 열처리 공정을 수행하였다. 한편, 안정적인 수직 자기 이방성을 유지하면서 효율적인 전계 전달 효과를 확보하기 위하여 저온 ALD법을 통한 고유전율의 ZrO<sub>2</sub> 박막을 증착한 다음 상부 전극을 형성하였다. 자성 박막의 수직 자기 이방성 및 자기 이력 곡선 평가는 VSM (vibrating sample magnetometer) 및 AHE (anomalous hall effect) 법을 이용해 측정하였다.

Figure 1은 Ta(10)/CFB(1)/MgO(1.6)/AlO(1.5)/ZrO<sub>2</sub>(40nm) 구조에서 electric field 크기와 방향에 따른 수직 MTJ의 coercivity (H<sub>c</sub>)변화를 관찰한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 negative electric field를 인가하였을 때에는 수직 자기장하에서 H<sub>c</sub>가 증가되었고 electric field를 제거한 다음에도 그 효과가 지속되었으며 반대로 positive electric field를 인가함에 따라 증가되었던 H<sub>c</sub>가 원래의 값으로 회복되는 결과를 나타내었다. 이는 electric field가 인가될 때 FM/oxide 계면에서 non-volatile, reversible reaction을 유도하는 것으로 판단되며, 특정 자기장하에서 완전한 저항 hysteresis loop가 형성되는 결과를 통해 electric field 만으로도 저항 상태의 변화를 제어할 수 있다는 결과를 확보하였다. 상기과 같이 electric field가 수직 이방성에 영향을 미치는 예상 원인으로는 FM/oxide 계면에서 charge transfer 효과와 ion migration에 따른 FM-Oxygen 결합 상태 변화로 예상할 수 있다[2]. 두 효과가 모두 수직 자기 이방성에 영향을 미치는 인자이나, 전자의 경우 순수한 FM의 band structure

나 수직 moment를 갖는 3d orbital 분포 등에 영향을 받기 때문에 electric field에 대해 즉각적이며 휘발적 특성을 보이는 반면에, 후자의 경우 이온 이동에 필요한 시간 의존성을 가지며 비휘발적 특성을 나타낼 확률이 높게 된다. 이러한 물리적 원인을 실험적으로 비교 평가 하고자 electric field를 일정시간 인가한 후  $H_c$ 가 변화되는 경향을 살펴보았다. 그 결과 임계 전압 이상에서 포화  $H_c$  변화량을 갖는데 수십초 이상 필요한 것으로 확인됨에 따라 charge transfer effect 보다는 ion migration 효과에 주로 기인하는 것으로 예상된다. 이는 FM/oxide 계면 산화 상태뿐만 아니라 후속 열처리 및 process integration 공정 조건에 따라 electric field가 interface anisotropy에 미치는 효과에 영향을 미칠 수 있다는 것을 내포한다. 한편, in-plane 자기 이방성을 갖는 시편에 대한 electric field 의존성을 살펴본 결과에 의하면, electric field 만으로 anisotropy field ( $H_A$ )도 reversible, non-volatile hysteresis loop를 확보하는 것이 가능하였다. 이는 실제 STT-MRAM의 switching 동작에 있어 electric field 제어에 따라 switching current를 감소시키는 것이 가능하다는 것을 간접적으로 확인한 것이다.

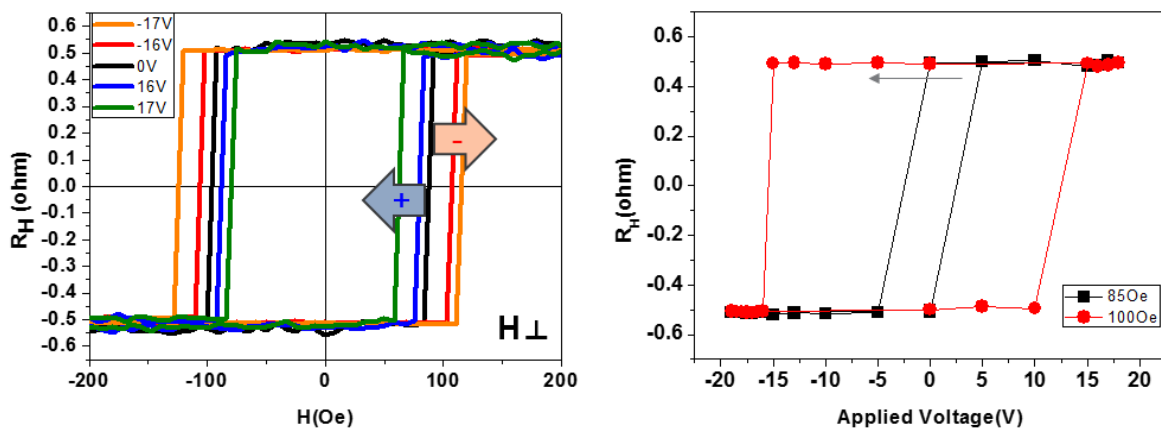


Fig. 1. Ta/CFB/MgO/AIO 구조에서 electric field의 크기 및 방향에 따른 AHE 효과 비교 및 저항 hysteresis loop.

### 3. 결론

본 연구를 통해 electric field 효과가 수직 자기 이방성에 미치는 영향을 살펴본 결과, electric field 만으로  $H_c$  및 anisotropy field ( $H_k$ )를 비휘발적, 가역적으로 제어하는 것이 가능함에 따라 STT-MRAM의 switching current 감소가 가능하다는 것을 간접적으로 확인하였다. 또한 이 효과가 시간에 따른 의존성을 갖는 것으로부터 ion migration과 동일한 물리적 원인을 유추하는 것이 가능하였다. 이는 FM/oxide 계면에서 산소결합상태 및 후속 공정에 큰 영향을 받을 수 있으며, 실제 소자에 적용하기 위해서는 시간 의존성을 최소화하고 Full MTJ에 적용 가능성을 평가하는 것이 요구된다.

### 4. 참고문헌

- [1] T. Kawahara et al. Microelectronics reliability **52** (2012)
- [2] Chong. Bi et al. PRL **113**, 267202 (2014)

## W/CoFeB/MgO 구조에서 스핀-오빗 토크와 스핀 홀 자기저항의 상관관계

백승현<sup>1,2\*</sup>, 조순하<sup>1</sup>, 이경동<sup>1</sup>, 조영훈<sup>3</sup>, 박병국<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

<sup>3</sup>Division of Scientific Instrumentation KBSI, Daejeon 305-806, Korea

자기장 없이 순수하게 전기적인 방법을 통해서 자화방향을 제어하려는 연구는 차세대 전기전자(스핀트로닉스) 소자 개발을 위해서 많이 진행이 되어왔다. 여러 가지 시도되고 있는 방법 중 하나가 최근 알려진 스핀-오빗 토크를 이용하는 방법이다. 이 방법은 비자성/강자성/산화막 구조에서 비자성층을 통과하는 수평 전류로 인해 생성된 스핀-오빗 토크가 강자성 층에 토크를 전달하여 자화방향을 제어하는 방법이다. 이와 반대로 자화방향에 따라 비자성/강자성/산화막 구조의 저항이 바뀌는 현상 역시 존재 한다는 것이 최근에 알려졌다.

본 연구에서는 W/CoFeB/MgO 구조의 자기저항과 스핀-오빗 토크의 상관관계를 관찰하고 그 현상에 대해 연구하는 것을 목표로 한다. W/CoFeB/MgO 구조에서 관찰된 자기저항은 자화방향과 전류사이의 각도에는 영향을 받지 않지만 자화방향과 계면에 축적된 스핀의 상대적인 방향에 매우 큰 영향을 받는 것을 관찰하였다. 이러한 현상은 스핀 홀 자기저항이라고 알려진 현상과 일치하며 본 실험에서는 약 1% 이상의 스핀 홀 자기저항을 측정할 수 있었다. 이 값은 기존의 Pt/YIG에 비해 최소 10배 이상 큰 값이며 Ta/CoFeB/MgO 혹은 Pt/Co/AlOx 구조보다도 큰 값이다. 이러한 결과로 비추어 볼 때 W의 스핀 홀 각도가 Ta이나 Pt보다 크다고 유추할 수 있다. 또한 W의 두께에 따른 자기저항의 변화와 스핀-오빗 토크에 의한 자화반전 효율이 같은 경향성을 보이는 것을 알 수 있었다. 그림 1(a)를 보면 W 두께에 따른 스핀 홀 자기저항 값의 변화를 나타낸다. W 두께에 매우 큰 의존성을 보이는 것으로 보아 이는 W에서 일어나는 스핀 홀 현상에 매우 큰 영향을 받는 것이라고 판단된다. W 두께가 얇을 경우에는 계면에서 스핀 전류가 반사되는 효과를 보여 스핀 홀 효과에 의한 스핀 전류가 감소하기 때문에 스핀 홀 자기저항의 값이 감소하는 경향을 보이고, W 두께가 두꺼울 경우에는 current shunt 효과에 의해 자기저항 값이 감소하게 된다. 이러한 점을 고려하여 fitting을 해보면 빨간선과 같이 fitting이 잘 되는 것을 볼 수 있다. W 두께가 두꺼운 부분에서는 W의 crystallography가 얇을 때와 달라서 스핀 홀 각도가 다르기 때문에 이러한 fitting과는 조금의 차이를 보인다고 생각된다. 또한 그림 1(b)에서는 W

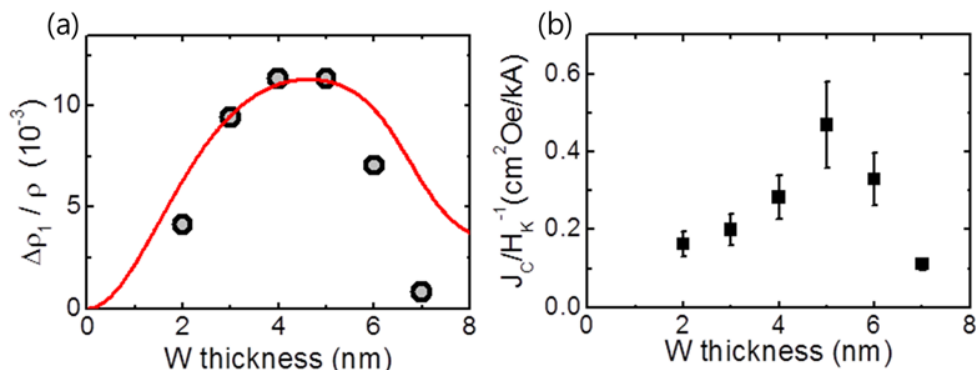


그림 1 (a) W 두께에 따른 스핀 홀 자기저항의 변화  
(b) W 두께에 따른 스핀-오빗 토크에 의한 자화반전 효율의 변화

두께에 따른 자화반전 효율을 나타낸 것인데, 그 형태가 스핀 홀 자기저항의 형태와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 이러한 점을 고려해 볼 때 스핀 홀 자기저항과 스핀-오빗 토크, 2가지 물리적 현상이 매우 큰 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 현상을 바탕으로 다양한 스핀-오빗 현상에 대해 공부하고 그 원인을 규명하는데 도움이 될 수 있을 것이라고 생각된다.

## References

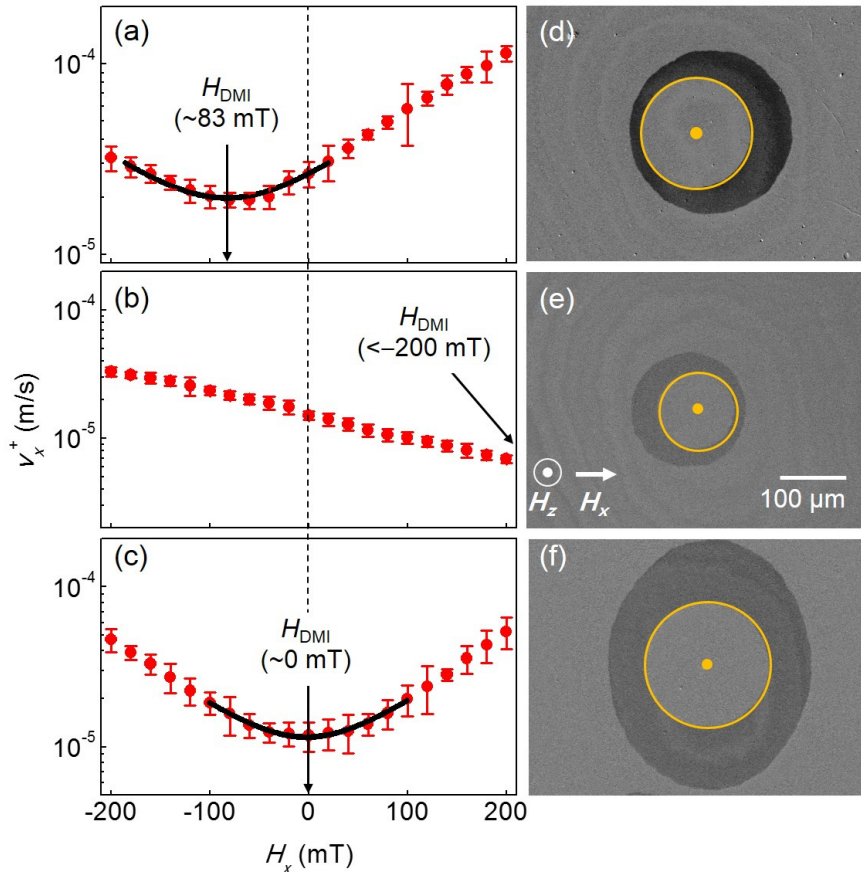
- [1] Miron, I.M. et al. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection. *Nature* 476, 189-193 (2011).
- [2] Liu, L., Pai, C.-F., Li, Y., Tseng, H.W., Ralph, D.C. & Buhrman, R.A. Spin-torque switching with the giant spin Hall effect of Tantalum. *Science* 336, 555-558 (2012).

# Determination of magnetic domain-wall types via observing Dzyaloshinskii-Moriya interaction-induced domain expansion patterns

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

<sup>1</sup>Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

In materials with perpendicular magnetic anisotropy, current-induced domain-wall (DW) motion has been attracted a great attention for its technological application toward spintronic devices such as Magnetic magnetic Racetrack racetrack Memory memory [1]. Recently, the efficiency of the current-induced DW motion is found to depend on its DW type sensitively [2]. Since the DW type is determined by the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) [3], here, we report that the DMI-induced asymmetric domain expansion pattern provides the information of the DW type: either Néel or Bloch. For this study, Pt/Co/Pt (Sample I), Pt/Co/Pd (Sample II), and Pd/Co/Pd (Sample III) films are were deposited on Si substrates with 100-nm SiO<sub>2</sub> layer by use of dc magnetron sputtering. The DW expansion images are were then observed by use of a magneto-optical Kerr effect microscope and the DW speed is was measured from the sequential domain images. As shown in Fig. (a)-(c), the DW speed  $v_{DW}$  shows an inversion symmetry with respect to an offset, which is known to be a direct measure



of HDMI [3, 4]. It is clear from the figure that the samples exhibit distinct signs and magnitudes of HDMI, which finally induces different DW type: the right-handed-Néel-type ( $H_{\text{DMI}} = +85$  mT) for Sample I, left-handed-Néel-type ( $H_{\text{DMI}} < -200$  mT) for Sample II, and Bloch-type for Sample III ( $H_{\text{DMI}} \sim 0$  mT), respectively. Interestingly, these samples also exhibit distinct domain expansion patterns as seen in Fig. (d)-(f): elongation to  $+x$  direction for Sample I,  $-x$  direction for Sample II, and  $y$  direction for Sample III, respectively. Such distinct domain expansion patterns is indicated to be accounted for that the spatial distribution of the DW energy on the circular domains under an external magnetic field  $H_x$  depends is related to the DW type. Detailed analysis will be discussed.

## References

- [1] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, “Magnetic domain-wall racetrack memory”, *Science* 320, 190 (2008).
- [2] P. P. J. Haazen, E. Murè, J. H. Franken, R. Lavrijsen, H. J. M. Swagten, and B. Koopmans, “Domain wall depinning governed by the spin Hall effect”, *Nat. Mater.* 12, 299 (2013).
- [3] A. Thiaville, S. Rohart, É. Jué, V. Cors, and A. Fert, “Dynamics of Dzyaloshinskii domain walls in ultrathin magnetic films”, *Europhys. Lett.* 100, 57002 (2012).
- [4] S.-G. Je, D.-H. Kim, S.-C. Yoo, B.-C. Min, K.-J. Lee, and S.-B. Choe, “Asymmetric magnetic domain-wall motion by the Dzyaloshinskii-Moriya interaction”, *Phys. Rev. B* 88, 214401 (2013).



# Creep과 Flow 영역에서 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용에 의한 Chiral 자구벽 동역학의 보편성

김덕호<sup>1\*</sup>, 유상철<sup>1,2</sup>, 김대연<sup>1</sup>, 민병철<sup>2</sup>, 최석봉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교, 물리천문학부

<sup>2</sup>한국과학기술연구원

## 1. 서론

Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 상호작용으로 관련된 많은 물리적인 흥미로운 현상과 이것을 이용한 기술적인 응용 가능성으로, DM 상호작용으로 형성된 Chiral 자구벽(domain wall)에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다 [1,2]. 자구벽에 수평 자기장  $H_x$ 를 걸어주면, 이에 따라 자구벽 구조가 변하여, 유한한 DM 상호작용이 있는 계에서는 비대칭적인 자구벽 운동을 한다[3]. 최근 Creep 영역에서 이런 비대칭적인 운동에 대한 많은 연구들이 수행되었는데, DM 상호작용에 의한 유효자기장  $H_{DMI}$ 에 관련된 대칭적 효과(자구벽 에너지 밀도 변화[3-5])와 비대칭적인 효과(Chiral damping 또는 기타 변화[6])를 이용해 비대칭적인 운동을 설명하였다. 본 연구에서는 비대칭적인 자구벽 운동에 대한 이해를 확장하기 위하여, Creep 영역과 Flow 영역에서 비대칭 자구벽 운동을 관찰해보았다.

## 2. 실험방법과 결과

이를 위해 Pt(2.0 nm)/Co(0.3 nm)/Pt(2.0 nm) 구조의 수직 자기 이방성 박막을 제작하였고, 광자기 Kerr 현미경(magneto-optical Kerr effect microscope)을 이용하여 수직자기장  $H_z$ 를 고정하고, 수평자기장  $H_x$ 에 따른 자구벽 속력  $v$ 를 측정하였다. 기존의 Creep 영역의 비대칭적 자구벽 운동은  $H_{DMI}$ 축을 기준으로 구분된 대칭과 비대칭 효과를 이용하여 설명할 수 있다. 그림1(a)는 Creep 영역에서( $H_z = 1.7$  mT로 고정)  $H_x$ 에 대한  $v$ 결과이다.

## 3. 고찰 및 결론

이 결과를 최근 Appl. Phys. Lett.에 보고된 방법[5]을 이용하여  $H_{DMI}$ 를 구하면,  $H_{DMI}$ 가  $60 \pm 5$  mT로 얻을 수 있었다. 흥미롭게도, Flow 영역에서도 거의 비슷한 현상이 관찰되었다. 그림1(b)는 Flow 영역에서( $H_z = 51$  mT로 고정)  $H_x$ 에 대한  $v$ 결과이다. 이 결과에서 Flow 영역에서는 비대칭 효과가 없어지고, 대칭 효과만 나타나는데, 놀랍게도 Creep에서 구한  $H_{DMI}$ 와 정확히 같은 값을 대칭축을 가지고 있었다. 이 결과로부터  $H_{DMI}$ 는 Creep과 Flow 모든 동역학 구간들에서 보편적인 값을 확인하였다. 이는 자구벽 이동을 통한  $H_{DMI}$ 측정법에 대한 이해에 많은 도움이 될 것으로 생각된다. 세부적인 내용은 추후 발표에서 논의할 예정이다.

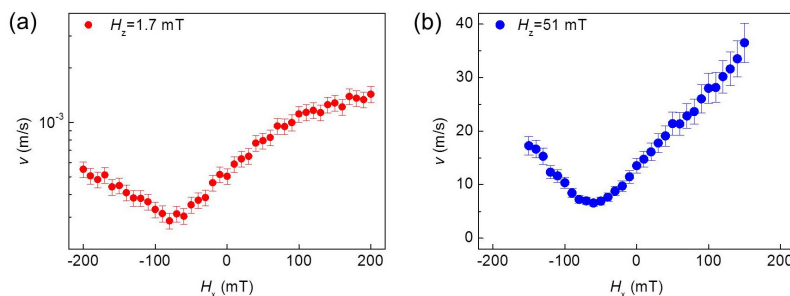


그림 1 수평 방향 자기장  $H_x$ 에 따른 자구벽 속력  $v$  (a)수직방향 자기장  $H_z=1.7$  mT (b)  $H_z=51$  mT

#### 4. 참고문헌

- [1] K.-S. Ryu, L. Thomas, S.-H. Yang, and S. Parkin, *Nat. Nanotech.* **8**, 527 (2013).
- [2] K.-W. Moon *et al.* *Sci. Rep.* **5**, 9166; DOI:10.1038/srep09166 (2015).
- [3] S.-G. Je *et al.* *Phys. Rev. B* **88**, 214401 (2013).
- [4] R. Lavrijsen *et al.* *Phys. Rev. B* **91**, 104414 (2015).
- [5] D.-Y. Kim, D.-H. Kim, J. Moon, and S.-B. Choe, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 262403 (2015).
- [6] E. Jué *et al.* *ArXiv* 1504.04411 (2015).

# Current-induced motion of antiferromagnetic domain wall in antiferromagnet/heavy metal bilayers

Se-Hyeok Oh<sup>1\*</sup>, Takayuki Shiino<sup>2</sup>, Byong-Guk Park<sup>2</sup>, Kyung-Jin Lee<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Nano Semiconductor Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Material Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

## 1. Introduction

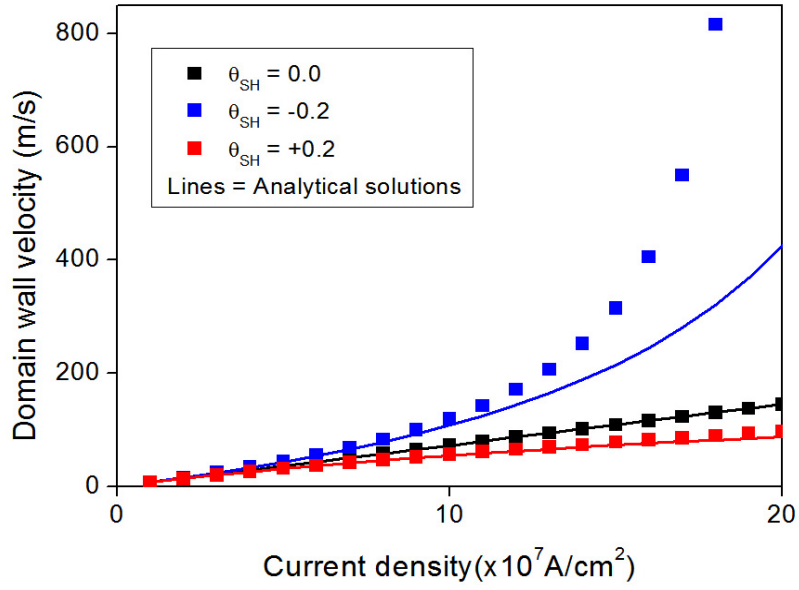
Antiferromagnetic spintronics is attracting considerable interest nowadays as the antiferromagnet is immune to external magnetic fields [1] and compatible with metal or semiconductor electronic structure [2]. To be used as functional devices, one has to find an efficient driving force to manipulate antiferromagnet spins. The effect of spin transfer torque (STT) on antiferromagnetic spins has been identified [3]. Recently, Hals et al. [4] reported a theory of STT-induced dynamics of antiferromagnetic domain wall (AF-DW) and found that the DW velocity is proportional to the ratio between the dissipative torque and the damping, as for ferromagnet (FM) DWs.

## 2. Experiment

In this talk, we report theoretical and numerical results of current-induced AF-DW motion in antiferromagnet/heavy metal bilayers where the injection of in-plane current generates spin-orbit torque (SOT) as well as conventional STT (i.e. adiabatic and nonadiabatic STTs). Based on the nonlinear sigma model for the Néel vector [5], we derive analytical solution of steady-state domain wall velocity. We also perform numerical computation based on atomistic spin model [6].

## 3. Result and discussion

Figure 1 shows the DW velocity  $v_{DW}$  as a function of current density for  $\beta/\alpha = 1$  where  $\alpha$  is the Gilbert damping and  $\beta$  is the non-adiabaticity of spin current. When only STT is present (i.e., the effective spin Hall angle,  $\theta_{SH} = 0$ ),  $v_{DW}$  is linearly proportional to the current density. On the other hand, when both STT and SOT are present,  $v_{DW}$  deviates largely from the linear relation. For a specific sign of  $\theta_{SH}$  (or current direction equivalently),  $v_{DW}$  increases rapidly with current magnitude. This rapid increase of  $v_{DW}$  (i.e.,  $\theta_{SH} = -0.2$  in Fig. 1) assisted by SOT is similar to the case of FM-DW [7]. However, we observe an important difference between FM-DW and AF-DW; a current range for very high  $v_{DW}$  is quite narrow for FM-DW due to the Walker breakdown [7], whereas such a very high  $v_{DW}$  is obtained for the current above a certain threshold for AF-DW because the Walker breakdown of AF-DW occurs at a much higher current density ( $> 10^9$  A/cm<sup>2</sup>). We also observe a large deviation between analytic solution and modeling results at high current regime, caused by the breakdown of continuum approximation used for the nonlinear sigma model. In the talk, we will discuss spin wave generation from AF-DW at high current regime in detail.



**Fig. 1.** Steady-state velocity of antiferromagnetic domain wall by STT and SOT. Symbols are numerical results.

#### 4. References

- [1] X. Martí, I. Fina, and T. Jungwirth, IEEE Trans. Magn. **51**, 1 (2015).
- [2] T. Jungwirth et al., Phys. Rev. B **81**, 212409 (2008); P. Wadley et al., Nat. Commun. **10**, 347 (2011).
- [3] A. S. Núñez, R. A. Duine, P. Haney, and A. H. Mac Donald, Phys. Rev. B **73**, 214426 (2006); Z. Wei et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 116603 (2007); S. Urazhdin and N. Anthony, Phys. Rev. Lett. **99**, 046602 (2007); P. M. Haney and A. H. Mac Donald, Phys. Rev. Lett. **100**, 196801 (2008).
- [4] K. M. D. Hals, Y. Tserkovnyak, and A. Brataas, Phys. Rev. Lett. **106**, 107206 (2011).
- [5] A. C. Swaving and R. A. Duine, Phys. Rev. B **83**, 054428 (2011).
- [6] R. F. L. Evans et al., J. Phys.: Condens. Matter **26**, 103202 (2014).
- [7] S.-M. Seo, K.-W. Kim, J. Ryu, H.-W. Lee, and K.-J. Lee, Appl. Phys. Lett. **101**, 022405 (2012).

# Non-contact GMR Sensor with Magnetic Nanoparticles for Biomedical Concentration Measurement

Xuan Huu Cao<sup>a\*</sup>, Duc Long Dang<sup>b</sup>, Van Long Doan<sup>c</sup>, and Derac Son<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Department of Electronics and Telecommunication Engineering,

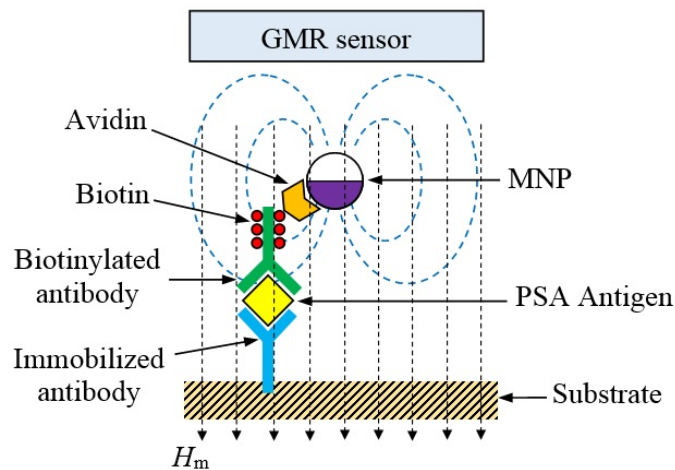
Danang University of Science and Technology (DUT), 54 Nguyen Luong Bang, Danang, Vietnam

<sup>b</sup>VN-UK Institute for Research and Executive Education, the University of Danang, 41 Le Duan, Danang, Vietnam

<sup>c</sup>Research Center of Electronics, Informatics and Automation in the Middle of Vietnam K25/16 Ly Thuong Kiet, Da Nang, Vietnam

<sup>d</sup>Department of Physics, Hannam University, Daejeon 306-791, Republic of Korea

GMR sensors have been studied and integrated into a sensitive system for detecting and quantifying biomedical molecule concentration. The targets of the detection and the measurement are prostate cancer antigens (PSAs) to which antibody-magnetic nanoparticles (MNPs) complexes made a specific binding. To employ a GMR sensor for the measurement, a process of linking between anti-PSA (antibody specific for PSAs) with MNPs has been developed. Owing to these bindings, the induced magnetic field from MNPs in a sample well was the primary measure of the biological molecule concentration. In this configuration, the sample well containing MNPs was non-contact and moving relatively to the immobile GMR sensor in a magnetizing field. The sensor system could detect a wide range of PSA antigen concentration, from 4 ng/mL to 1  $\mu$ g/mL.



**Fig. 1.** Non-contact GMR sensor in measurements of magneto-biological sample.

# Spin-wave-driven domain-wall motions in soft magnetic nanotubes

Jaehak Yang<sup>1\*</sup>, Myoung-Woo Yoo<sup>1</sup>, Sang-Koog Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory,  
Research Institute of Advanced Materials, Department of Materials Science and Engineering,  
Seoul National University, Seoul 151-744, South Korea

## 1. 서론

Magnetic domain-wall (DW) motions have attracted growing interest for potential future magnetic applications such as race-track memory [1] and magnetic logical devices [2]. However, a drawback of electric-current-driven DW motions is the Joule heating [3] due to the extremely high current density. Recently, micromagnetic simulations [4] have shown that spin waves (SWs) propagating along ferromagnetic nanowires allow for DW motions without Joule heating. More recently, fundamental understanding of DW motions in three-dimensional (3D) magnetic nanotubes has been obtained from theoretical studies, numerical simulations, and several experiments. [5] As a consequence of the tubular topology and superior stability of the nanotubes, a much higher threshold field is needed to destroy the DW structures. Since fast and precisely controlled DW motion is a prerequisite for operations performed by such devices, herein we present the results of a study on the interaction of SWs and DWs in nanotubes.

## 2. 실험방법과 결과

We here report a micromagnetic simulation study on interactions between propagating SWs and a vortex DW in cylindrical magnetic nanotubes[6]. In such cylindrical nanotubes, we found that DW propagation speed is sensitive to both SW amplitude and its frequency. From a fast Fourier transformation analysis of SWs, we found that DW speed is quantitatively correlated with SW amplitude change. We also determined that the DW moves away from the SW source over a wide frequency range, at a velocity that is an order of magnitude faster than in flat nanostrips. Partial or complete reflection of spin wave also occurs at complex vortex DWs in cylindrical nanotubes, in which momentum transfers between the SW and DWs give rise to specific torques acting on the DW that allow for DW movement in the same direction as that of the incident SWs. Overall, this work provides a fundamental understanding of SW and DW interactions in magnetic nanotubes and shows the way to potential applications in future all-magnonic spin-wave devices.

## 3. 고찰

The transmittance in the  $f_0 = 13 - 18$  GHz range is extremely small, as low as  $\sim 10^{-4}$ . This almost zero transmittance of SWs across the DW represents almost complete reflection of incident SWs from the DW placed in the SW guide. This observation is consistent with the fact that propagating SWs can be totally reflected from a DW in cases where SW's wavelengths are larger than the width of a DW. Thereby, the magnonic linear momentum is transferred completely to the DW, so that the DW can move forward at a remarkably high speed on the order of a few hundreds of m/s or higher. Such strong SW reflection from DWs is a unique behavior

in the nanotube geometry, because the lack of a lateral boundary makes the DW stable, subsequently yielding a stronger interaction with incident SWs. Accordingly, the strong SW reflection by the stray fields arising from the vortex-type DW can impart magnonic linear momentum transfer torques to the DW. Moreover, the internal normal oscillation modes of the DW also influence DW motions, resulting in an additional reflection of incident SWs. As reported earlier, magnonic linear momentum transfer torques from SWs' reflection is an order of magnitude more effective than spin angular momentum transfer torques arising from. Such reflection of SWs from a DW plays a key role in magnonic linear momentum transfer to the DW. Our simulation results and interpretations unambiguously reveal that the DW speed is enhanced just by manipulating the frequency and amplitude of SWs excited in nanotube geometries.

#### 4. 결론

In summary, we studied the interaction between propagating SWs and a vortex-like DW in a specific nanotube geometry, and found SW-driven, fast DW motions. The DW speed is determined by the SW amplitude and frequency in a nanotube of given dimensions, and was as high as  $\sim 660$  m/s in this study. Based on the data of the amplitude and transmission coefficient of SWs passing across the DW, we found that magnonic linear momentum transfer torques, arising from the strong reflection of SWs from the DW in a specific nanotube geometry, allow for fast DW motion in the same direction as that of the incident SWs of a specific frequency band, here  $f_0 = 13 - 18$  GHz. This work constitutes an important step toward the achievement of all-magnetic-based DW memory and logic devices based on fast DW motion.

#### 5. 참고문헌

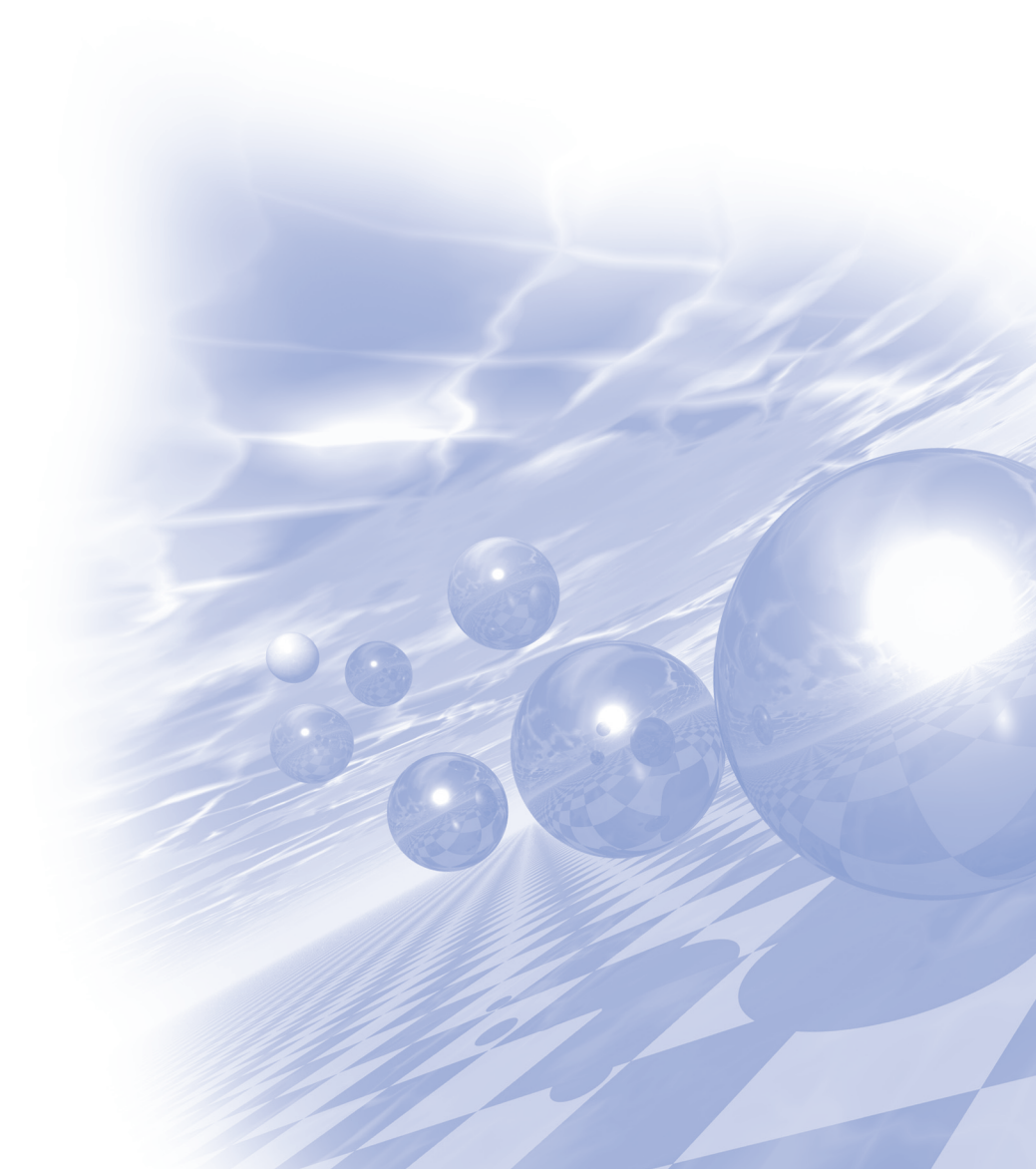
- [1] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, "Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory", *Science* 320,190 (2008).
- [2] D. A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit, and R. P. Cowburn, "Magnetic domain-wall logic", *Science* 309, 1688 (2005).
- [3] A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, and T. Shinjo, "Real-Space Observation of Current-Driven Domain Wall Motion in Submicron Magnetic Wires", *Phys. Rev. Lett.* 92, 077205 (2004)
- [4] D. S. Han, S. K. Kim, J.Y. Lee, S. J. Hermsdoerfer, H. Schultheiss, B. Leven, and B. Hillebrands, "Magnetic domain-wall motion by propagating spin waves", *Appl. Phys. Lett.* 94, 112502 (2009).
- [5] M. Yan, C. Andreas, A. Ka'kay, F. Garc'ia-Sa'nchez, and R. Hertel, "Fast domain wall dynamics in magnetic nanotubes: Suppression of Walker breakdown and Cherenkov-like spin wave emission", *Appl. Phys. Lett.* 99, 122505 (2011).
- [6] D. Suess, and T. Schrefl, FEMME: Finite Element Micro Magn Etics 5.0.9 (Suess Co, <http://suessco.com/>).



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session IX**

## **‘Hard Magnetic Symposium’**







## Research on the high coercivity in $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ permanent magnet and its microstructure

P. Y. Zhang<sup>\*</sup>

Department of Materials Science and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018 China  
Zhang\_pengyue@cjlju.edu.cn, Tel: 0571-87676238, Fax: 0571-83766238

RE-TM based compounds have been a subject of interest for many researchers due to their potential for magnetic application such as permanent magnets and magnetic-recording media. In particular they show a strong magnetocrystalline anisotropy which is mainly produced by RE ions as a consequence of the crystal field acting on the 4f electrons, and hence high coercivity ( $H_{cj}$ ). In addition the TM sublattice is responsible for the large magnetic moment and high Curie temperatures characteristic of RE-TM compounds, also supplies a relevant contribution to the anisotropy, which is dominant at high temperatures. Recently, it has also shown the additives can enhance the coercivity effectively by refining the microstructure and modifying the grain boundary structure. In order to do this, many elements have been added to these alloys. In the present work, as far as 2:17 type rhomboedral (R/3m) SmCo sintered permanent magnets was concerned, the influence of Lu, Pr, Gd and Ga addition on crystal structure and magnetic properties of  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  compounds were investigated by using X-ray diffraction, transmission electron microscopy, and magnetic measurements, respectively. The result shows that both Lu and Gd additions have proved to result in relevant improvements in the microstructure and magnetic properties. The Lu addition has a greater effect on the coercivity  $H_{cj}$ , but Gd especially on  $(BH)_{max}$ , respectively. It is shown that the  $H_{cj}$  of  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  magnet is improved by an additional 6wt% Lu from 2067.2 up to 2832.2 kA/m, and the  $(BH)_{max}$  is improved by an additional 5wt% Gd from 202.9 up to 217.3 kJ/m<sup>3</sup>. The enhanced mechanism for the excellent magnetic properties, especially for high coercivity, in the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  sintered magnets was analyzed by their microstructure.

**Keywords:** 2:17 type SmCo; Sintered permanent magnets; Coercivity

# Fabrication and magnetic properties of ferrite based composite magnets

전광원, 김종렬\*

한양대학교 재료공학과, 경기도 안산시

## 1. 서론

자성재료는 전기적 에너지와 기계적 에너지의 상호 대규모 전환이 가능한 유일한 물질로, 발전 및 모터 분야 등의 핵심 소재로 활용되고 있다. 최근 에너지 저감, 부품의 소형화 및 고성능화에 따라 모터의 효율성 향상을 위해서 외부이 자장이 인가되지 않아도 지속적으로 자기장을 발생할 수 있는 영구자석에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 현재 자성재료의 시장은 희토류 자석과 페라이트 자석으로 양분되어 있으며, 페라이트 자석은 원료의 수급이 쉽고, 제조 단가가 낮으며, 상안정성이 우수하고, 강자성 상전이 온도( $T_c$ )가 높은 장점을 지니고 있어, 효율 향상을 통한 지속적인 시장 확대가 예상되고 있다. 본 연구에서는 페라이트 자성 분말의 형상 및 입도 제어를 통한 분말 자체의 특성향상과 더불어 다른 자성소재와의 혼합을 통한 소결 자석의 특성향상에 관한 연구를 진행하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 spray pyrolysis 공정을 통해 형상 및 입도가 제어된 Sr-페라이트 분말을 제조하였다. 기존 고상 합성법의 최대 단점인 형상 제어와 입도 성장 제어에 대한 한계를 극복하기 위하여 염이 첨가된 액상의 모상 용액을 제조하고, 700℃의 고온에서 spray pyrolysis 공정을 통해 구형의 염 내에 페라이트 모상 분말이 고르게 분포되어 있는 모상의 분말을 생성하였다. 생성된 모상 분말은 1,050℃에서 하소 공정을 통해 용융염 내에서 형상 및 입도가 제어된 Sr-페라이트 분말로 제조하였고, 수세를 통하여 용융염을 제거하였다. 제조된 페라이트 분말을 자장 내 정렬 및 성형과 소결 공정을 통하여 소결 페라이트 자석을 제조하였다. 또한, AlNiCo 자석을 약 100  $\mu\text{m}$ ~500  $\mu\text{m}$ 의 두께로 제조하여 소결 페라이트 자석과 층상 구조의 복합 자석을 제조함으로써 함량 및 두께 조절에 의한 페라이트 특성 향상 효과를 확인하였다.

## 3. 실험결과

그림 1은 spray pyrolysis 공정을 통해 얻어진 구형의 염 내에 페라이트 모상 분말과 하소 및 수세 공정을 통하여 얻어진 입도 및 형상이 제어된 Sr-페라이트 분말의 SEM 이미지이다. 구형의 염은 하소 공정 동안 용융되어 페라이트 모상 분말의 페라이트 상 형성시 입도 및 형상을 제어하여 약 1  $\mu\text{m}$  내외의 크기를 지니는 육각 판상형의 페라이트 분말을 얻을 수 있었다.

그림 2는 소결 페라이트 자석과 AlNiCo가 층상 구조로 된 복합 자석의 최대 자기 에너지적( $(BH)_{\text{max}}$ ) 및 자성 특성에 관한 결과이다. AlNiCo가 약 5 wt%가량 함유된 페라이트 복합 자석에 비하여 AlNiCo가 약 20 wt%가량 함유된 페라이트 복합 자석은 포화자화 값은 상승하지만, 보자력이 감소되었다. 이러한 보자력의 감소가 페라이트 복합 자석의 최대 자기 에너지적( $(BH)_{\text{max}}$ )을 감소시키는 요인으로 작용하여, 약 100  $\mu\text{m}$  두께의 AlNiCo를 약 5 wt%가량 함유한 페라이트 복합 자석의  $(BH)_{\text{max}}$ 가 AlNiCo를 함유하지 않은 페라이트 자석의  $(BH)_{\text{max}}$ 에 비하여 약 8.5% 가량 증가함을 확인하였다.

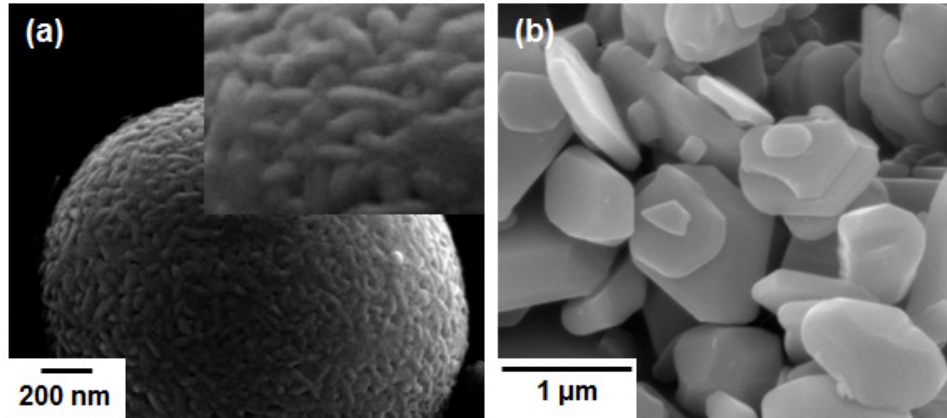


그림 1. (a) spray pyrolysis 공정을 통해 얻어진 구형의 염 내에 분산된 페라이트 모상 분말과 (b) 하소 및 수세 공정을 통해 얻어진 육각판상형 페라이트 분말

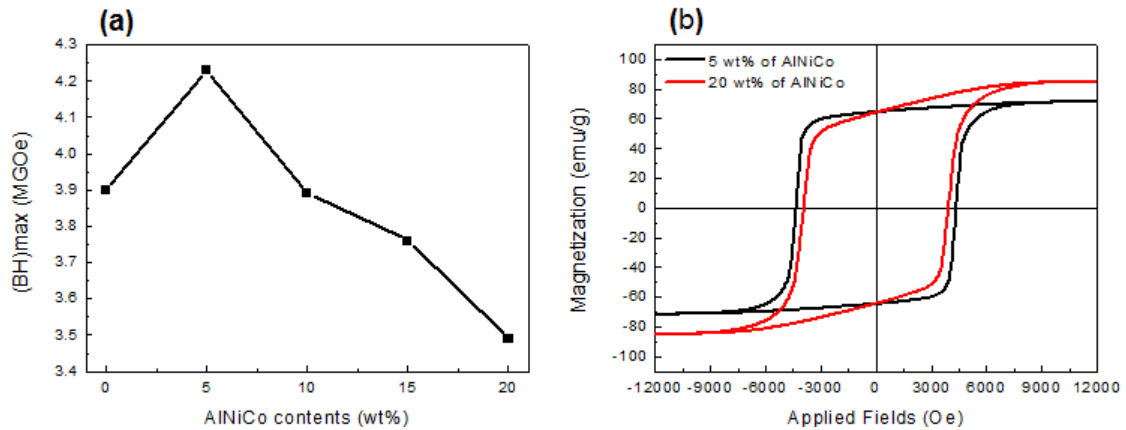


그림 2. (a) AlNiCo가 첨가된 페라이트 복합 자석의 AlNiCo 함량에 대한 최대 자기에너지적 변화와 (b) 자기 이력 곡선 변화

#### 4. 결론

Spray pyrolysis 공정을 통해 구형의 염에 페라이트 모상 분말이 고르게 분포된 염 첨가 페라이트 모상 입자를 하소 및 수세 공정을 통하여 약 1  $\mu\text{m}$  내외의 육각판상형 페라이트 분말을 얻을 수 있었다. 육각 판상형 페라이트 분말은 자장 내 정렬 및 성형, 소결 공정을 통하여 소결 페라이트 자석을 제조하였고, 소결 페라이트 자석의 특성 향상을 위하여 AlNiCo를 층상 구조로 첨가하여 복합자석을 제조하였다. 제조된 복합자석은 약 100  $\mu\text{m}$  두께의 5 wt% AlNiCo가 첨가되었을 때  $(BH)_{max}$  값이 AlNiCo를 첨가하지 않았을 때에 비하여 약 8.5% 증가하였고, 이를 이용하여 La-Co 치환형 페라이트 자석을 제조하여 층상구조의 복합자석을 제조한다면, 기존 5 MGOe 급의 특성에서 5.5~6 MGOe 급의 특성을 지니는 페라이트 복합자석을 제조할 수 있을 것으로 기대된다.

## Rare-Earth-Free Permanent Magnets : MnBi Bulks and Thin Films

Hyun-Sook Lee<sup>1\*</sup>, Sumin Kim<sup>1</sup>, Hongjae Moon<sup>1</sup>, Hwaebong Jung<sup>1</sup>,  
Sumin Kim<sup>2</sup>, Haein Yim<sup>2</sup> and Wooyoung Lee<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University,  
262 Seongsanno, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul, 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. 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 to obtain the LTP-MnBi bulks and thin films for the exchange-coupled magnets. We report on the magnetic properties of low-temperature-phased (LTP) MnBi bulks synthesized by arc-melting and melt-spinning, and LTP-MnBi thin films grown by a UHV sputtering system. First of all, we found that MnBi bulks shows  $\mu H_c = 5.60$  kOe,  $B_r = 6.00$  kG, and  $(BH)_{\max} = 7.27$  MGOe for 1 h milling (low-energy planetary ball milling) in the synthesis process, indicating that anisotropic precursor powders are crucial in achieving high-performance MnBi bulk magnets. On the other hand, 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  $\sim 8.6$  MGOe at room temperature when the thicknesses of Bi and Mn were adjusted in 36nm and 14nm, respectively. The magnetic properties of exchange-coupled MnBi with various soft layers such as FeCo and Fe will be discussed in detail.

# Coercivity Enhancement by $\text{RF}_3$ -Doping in Hot-Pressed and Die-Upset Nd-Fe-B-type Magnet

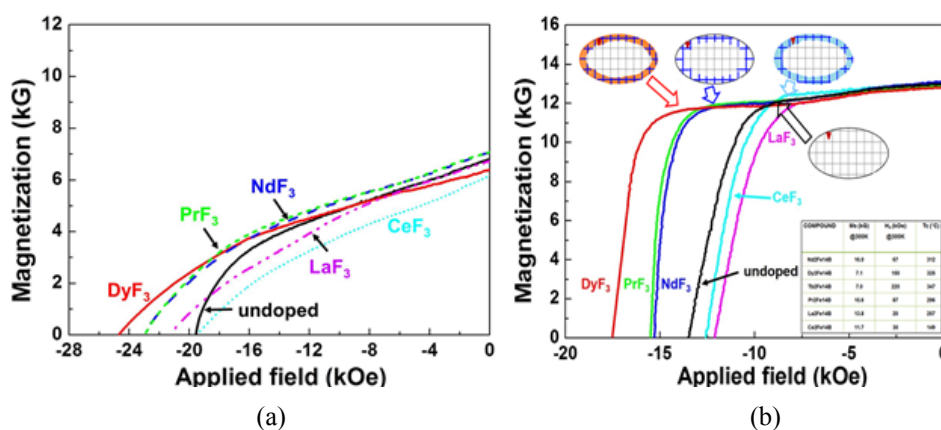
J. Y. Kim<sup>1,3\*</sup>, K. M. Kim<sup>1</sup>, H. W. Kwon<sup>1</sup>, J. G. Lee<sup>2</sup> and J. H. Yu<sup>2</sup>

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

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

<sup>3</sup>Pacific Metals, Gumi, Republic of Korea

Nd-Fe-B-type magnets with excellent room temperature properties have been expanding their use in rather harsh condition of high operating temperature ( $\approx 200^\circ\text{C}$ ) such as the magnets in the traction motor and generator of the HEV, EV and wind turbine. Due to high temperature coefficients ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) of remanence and coercivity the ordinary grade Nd-Fe-B-type magnet cannot function properly at the elevated operating temperature unless it possesses sufficiently high room temperature magnetic properties. In particular, sufficiently high room temperature coercivity is definitely needed in those applications because the magnet can be readily demagnetized by the reverse applied magnetic field during operation. Current technology for enhancing the coercivity in the Nd-Fe-B-type magnet is an alloying technique or grain boundary diffusion (GBD) process by using heavy rare-earth, such as Tb, Dy. In this study, diffusion of rare earths in the Nd-Fe-B-type hot-pressed and die-upset magnets using various  $\text{RF}_3$  as a diffusion source of rare-earth, which are chemically more stable and less expensive, was attempted, and its effect on the coercivity were investigated. Commercial melt-spun flakes (MQU-F :  $\text{Nd}_{13.6}\text{Fe}_{73.6}\text{Co}_{6.6}\text{Ga}_{0.6}\text{B}_{5.6}$ ) were mixed with 1.6 wt%  $\text{RF}_3$  ( $\text{R} = \text{La, Ce, Pr, Nd, Dy}$ ) and then hot-pressed and die-upset.  $\text{RF}_3$  ( $\text{R} = \text{Pr, Nd, Dy}$ )-doping led to an overall coercivity enhancement with respect to the un-doped magnet. In the hot-pressed magnet, the most profound coercivity enhancement (5.0 kOe) was achieved in the  $\text{DyF}_3$ -doped magnet.  $\text{NdF}_3$ - and  $\text{PrF}_3$ -doping was also beneficial for enhancing coercivity (3.5, 3.5 kOe). In the die-upset magnets,  $\text{RF}_3$  ( $\text{R} = \text{Pr, Nd, Dy}$ )-doping was still beneficial for enhancing coercivity (4.0 kOe, 2.0 kOe, and 2.0 kOe for  $\text{RF}_3$  ( $\text{R} = \text{Pr, Nd, Dy}$ )-doping, respectively). The coercivity enhancement was attributed mostly to the substitution of Nd in  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  matrix grains and the modification of Nd-rich grain boundary in the flake by the dopant.



**Fig. 1.** Demagnetisation curves of the hot-pressed (a) and die-upset (b) Nd-Fe-B-type magnets doped with  $\text{RF}_3$ .

# The development of ultra-fine anisotropic magnetic material by HDDR process

H. R. Cha<sup>1,3\*</sup>, J. H. Yu<sup>1</sup>, H. W. Kwon<sup>2</sup>, Y. D. Kim<sup>3</sup> and J. G. Lee<sup>1</sup>

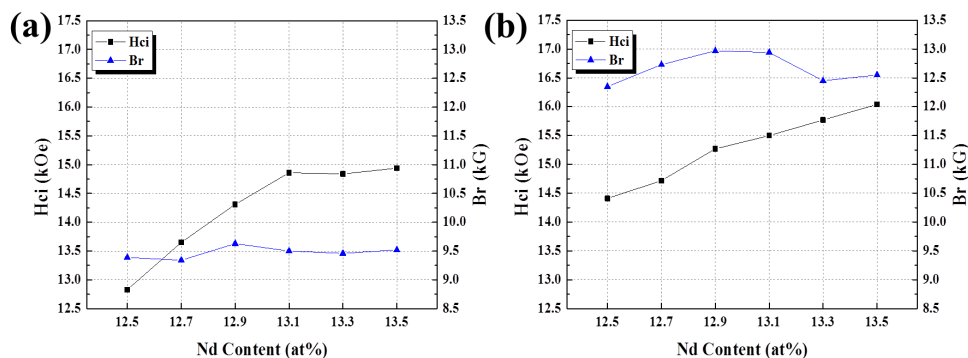
<sup>1</sup>Korea Institute of Materials Science, Changwon, Republic of Korea

<sup>2</sup>Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

<sup>3</sup>Pusan National University, Busan, Republic of Korea

Recently, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets have drawn a great attention for hybrid electric vehicles (HEVs) or electric vehicles (EVs). To achieve high coercivity without heavy rare earth elements, the control of microstructures such as grain size and grain boundary is of significant importance. Hydrogenation-disproportionation-desorption-recombination (HDDR) process is one of the simple methods to obtain Nd-Fe-B magnetic powders with single domain-sized grains. Furthermore, the powders show anisotropic magnetic properties under optimal conditions, which have been focused on hydrogenation-disproportionation (HD) stage although desorption-recombination (DR) stage is also thought to be important for improvement of magnetic properties. In the present study, effect of master alloy and DR condition on the microstructure and magnetic properties of Nd-Fe-B powders prepared by HDDR process has been studied.

The strip ( $\text{Nd}_{12.5}\text{B}_{6.4}\text{Ga}_{0.3}\text{Nb}_{0.2}\text{Fe}_{\text{bal}}$ ) and mold [ $\text{Nd}_x\text{B}_{6.4}\text{Ga}_{0.3}\text{Nb}_{0.2}\text{Fe}_{\text{bal}}$  ( $x=12.5-13.5$ , at.%) ] cast alloys were subjected to HDDR process after homogenization heat treatment. During desorption-recombination stage, dehydrogenation speed and time were systematically changed to control the speed of the desorption-recombination reaction. In the result, it was confirmed that the texture and Nd-rich distribution of HDDR powder was related to master alloy powder. Therefore the master alloy powders must have a single crystalline and uniform distribution of Nd-rich phase for higher magnetic properties of HDDR powder. Furthermore the higher Nd content resulted in higher coercivity of the HDDR powder due to the thicker and more uniform Nd-rich phase at grain boundaries. And it was also confirmed that the slow dehydrogenation speed could maximize the effect of high Nd content on the magnetic properties of HDDR powder. At the optimized dehydrogenation speed, the coercivity and remanence was 15.3 kOe and 13.0 kG, respectively, at 12.9 at.% Nd content, which resulted in a (BH)<sub>max</sub> of 36.8 MGOe.



**Fig. 1.** Dependence of magnetic properties of HDDR powders processed by (a) fast-DR, (b) slow-DR process on the Nd content.

# Site preferences for La and Dy in Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B Permanent magnet: A first principles study

Imran Khan\* and Jisang Hong

Department of Physics, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

We studied the electronic structure and magnetic properties of pure, La and Dy substituted Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B by using the full potential linearized augmented plane wave method. A DFT+U scheme was applied to treat the localized 4f electrons of Nd and Dy. To explore the magnetic ground state, we considered both ferromagnetic (FM) and antiferromagnetic (AFM) spin interaction between Fe and R (rare-earth) sub-lattice. The total energy calculation predicts that both La and Dy prefer 4f-site in Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B on lower substitution, along with a negative value of substitution energy (-3.04 eV/atom) and (-4.04 eV/atom) respectively. The negative value of substitution energy shows that both La and Dy prefer to enter the Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B phase on lower substitution. On increasing the substitution level La prefer g-site according to the total energy calculation but its substitution energy is positive (0.13 eV/atom), which shows that La don't prefer to enter Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B phase rather it will be segregated at the grain boundaries. The calculated spin magnetic moments for different Fe and R sites were in good agreement with previously reported value. We found that for light rare-earth elements like Nd and La the spin and orbital magnetic moment was always anti-parallel. Overall, these findings will help for enhancing the magnetic properties of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B permanent magnet.



# Design and Analysis of Permanent Magnet Array for Development of Large Area Magnetron Sputtering Sources

Ye-Lim Lee<sup>1</sup>, Rambabu Kuchi<sup>1</sup>, Srivathsava Surabhi<sup>1</sup>, Shin-Jae You<sup>2</sup>, Jong-Ryul Jeong<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, South Korea

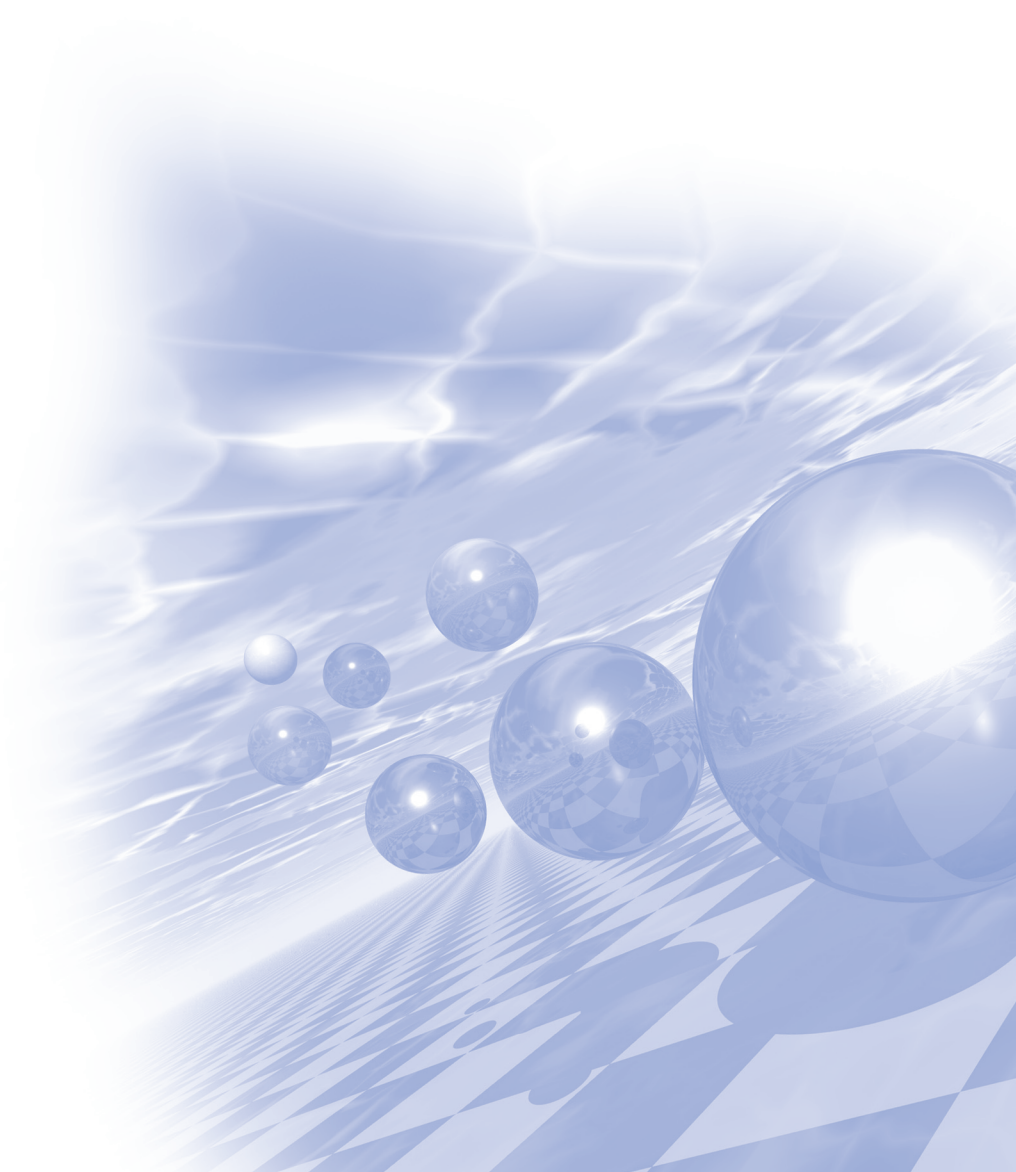
Recently, large area magnetron sputtering sources have become one of the most important methods in thin film fabrication area. Therefore, development of novel sputtering source available for large area process with high sputtering efficiency is highly demanded. In general, the permanent magnets utilized in the sputtering source affect plasma density, plasma uniformity, target voltage, and directionality of the ions and electrons and eventually affect to the sputtering performance such as deposition uniformity, sputtering yield, target efficiency etc. In this study, we have investigated the analysis method for designing the high-efficiency large area sputtering source. Especially, various kinds of sputtering parameters including plasma uniformity and sputtering yield were systematically studied by varying the permanent magnet configuration and source design.



**International Symposium on Magnetism and  
Magnetic Materials 2015**

# **Special Session X**

**‘한일 미래 스핀 소자 심포지움’**





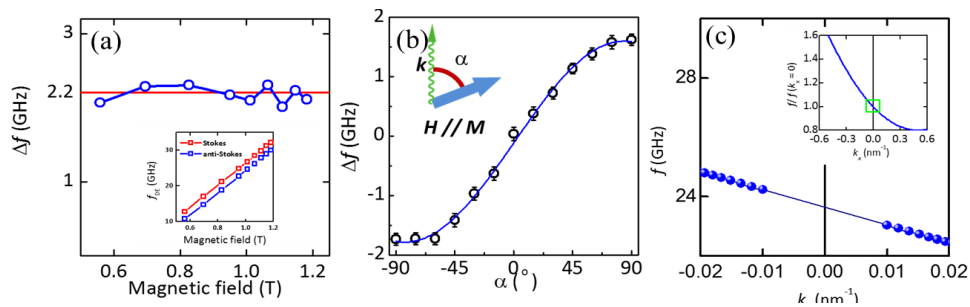
# Determination of the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Energy density in the heavy metal/ferromagnetic layer/insulator structure

Chun-Yeol You<sup>1\*</sup>, Jaehun Cho<sup>1</sup>, Nam-Hui Kim<sup>1</sup>, June-Seo Kim<sup>2</sup>, Reinoud Lavrijsen<sup>2</sup>, Aurelie Solignac<sup>2</sup>, Yuxiang Yin<sup>2</sup>, Dong-Soo Han<sup>2</sup>, Niels J. J. van Hoof<sup>1,2</sup>, Henk J. M. Swagten<sup>2</sup>, and Bert Koopmans<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Applied Physics, Center for Nano Materials, Eindhoven University of Technology,  
PO Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands

We determined the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya (iDM) energy density by using Brillouin Light Scattering (BLS). Since BLS measurement provides Stokes and anti-Stokes spin waves, corresponding to  $\pm$  propagation spin wave vectors, simultaneously, the frequency difference,  $\Delta f = f(+k_x) - f(-k_x)$ , can be obtained, where finite  $\Delta f$  is a finger point of the iDM [2]. We performed three different measurements (1)  $\Delta f$  as a function of the external field, (2)  $\Delta f$  as a function of the angle between spin wave propagation direction, and (3) spin wave dispersion relations as shown in Fig. 1 (a)~(c). Based those three independent measurements, we can successfully rule out other possible sources of  $\Delta f$  in our experiments, and determine iDM energy density precisely. By virtue of local probing nature of BLS, we investigated the thickness dependent iDM in Pt/Co( $t_{\text{Co}}$ )/AlO<sub>x</sub> and Pt/CoFeB( $t_{\text{CoFeB}}$ )/AlO<sub>x</sub>wedge samples. In order to extract iDM energy density from the  $\Delta f = \frac{2\gamma D}{\pi M_s} k_x$ , the only additional necessary physical quantity is the saturation magnetization  $M_s$ , and it can be determined in the BLS measurement, which is one of the strong advantages of the BLS measurement compared to other methods. The maximum iDM energy densities are 1.2 mJ/m<sup>2</sup> for 1-nm thick Co and 0.7 mJ/m<sup>2</sup> for 1.6-nm thick CoFeB samples. Furthermore, we found the inverse proportionality of iDM energy density to the  $t_{\text{Co}}$  and  $t_{\text{CoFeB}}$ , it implies the measured iDM in our system is true interfacial term.



**Fig. 1** (a)  $\Delta f$  as a function of the external field. Inset: Stokes and anti-Stokes spin wave frequencies as a function of the external field. (b)  $\Delta f$  as a function of the angle between spin wave propagation direction and the magnetization direction. (c) Spin wave dispersion relations as a function of wave vector  $k_p$ . Inset: Theoretical spin wave dispersion relation with wider range of wave vector, and green box indicates the experimental range.

## References

- [1] Jaehun Cho *et al.* Nat. Comm. **6**, 7635 (2015).
- [2] J. H. Moon *et al.* Phys. Rev. B **88**, 184404 (2013).

## Direct observation of spin current based on XFMR

C. Hwang<sup>\*</sup>

Center for Nanometrology Korea Research Institute of Standards and Science

Spin-current based on spintronics has drawn a lot of attention due to its simple structure compared with other spin technology. Although this field has drawn a lot of attention for the last ten years, the observation of spin current has remained indirect, being measured through the effect of the spin current on other physical entities. We will show a new method of direct observation of spin currents by synchronizing a microwave waveform with the synchrotron x-ray pulses. Ferromagnetic resonance of the magnetic layer is used to pump a pure spin current into the spacer layer, and then directly probe the spin current in this spacer layer by a time-resolved x-ray magnetic circular dichroism (XMCD).

# Manipulation of single spin of NV center in diamond

Norikazu MIZUOCHI<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering Science, Osaka University 1-3, Machikane-yama,  
Toyonaka-city, Osaka, 560-8531, JAPAN

<sup>2</sup>JST-CREST

NV center in diamond has been extensively interested because the single spin of it can be manipulated and detected at room temperature (RT). Furthermore, coherence time ( $T_2$ ) of the NV center is very long.  $T_2$  is the time to retain coherence (superposition state) and directly relates to the sensitivity of magnetic sensor. Therefore, the unique and excellent properties are expected to be applied for quantum computing, quantum communication and high-sensitive magnetic sensor with nano-scale resolution. By using the NV center, we previously investigated the quantum entanglement generation [1], spin coherence properties [2], and quantum coupling with a flux-qubit [3], and electrically driven single photon source at RT [4].

Recently, we realized deterministic electrical charge-state control of single NV<sup>-</sup> center [5] by using a p-i-n diode that facilitates the delivery of charge carriers to the defect for charge state switching. A homebuilt confocal microscope was used to observe the single NV centers. By developing this technique for the decoupling of nuclear spins from the NV electron spin, realization of quantum memory of nuclear spin with very long  $T_2$  can be expected. In addition, we also realized nearly perfect alignment (more than 99 %) of the NV axis along the [111]-axis [6]. This result enables a fourfold improvement of optical detection efficiency for spin information in quantum device and a fourfold improvement in magnetic-field sensitivity. These achievements are considered to be a crucial step towards elaborated diamond-based quantum spintronics devices.

These researches are supported ImPACT Program of Council for Science, Technology and Innovation (Cabinet Office, Government of Japan), SCOPE program, and JST CREST program. The p-i-n diode was produced by AIST in Japan.

## References

- [1] P. Neumann, & NM, et al., Science, 320, 1326 (2008).
- [2] N. Mizuochi, et al., Phys. Rev. B, 80, 041201(R) (2009).
- [3] X. Zhu, & NM, et al., Nature, 478, 221 (2011).
- [4] N. Mizuochi et al., Nature Photon. 6, 299 (2012).
- [5] Y. Doi, & NM, et al., Phys. Rev. X. 4, 01107 (2014).
- [6] T. Fukui, & NM, et al., Appl. Phys. Express 7, 055201 (2014).

# Efficient spin injection and absorption using CoFe-based alloys

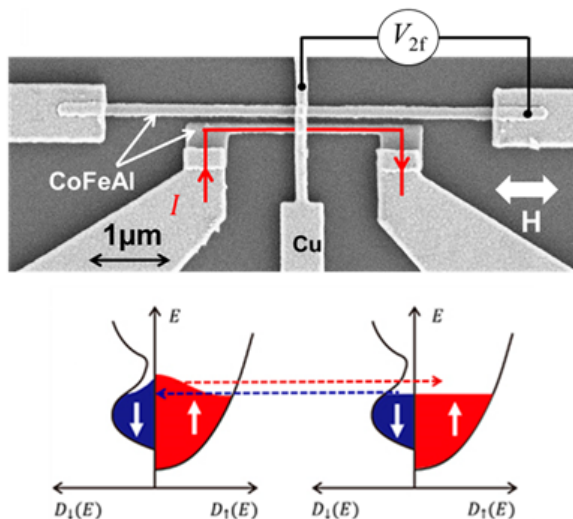
Takashi Kimura\*

<sup>1</sup>Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka, Japan

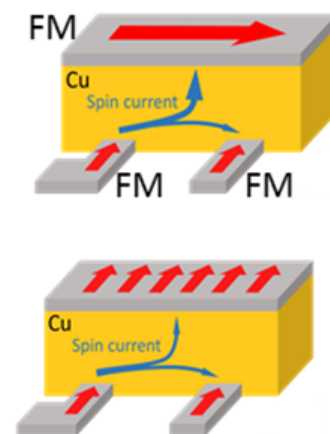
Generation, manipulation and detection of spin currents are important issues in the operation spintronic devices because a spin current plays an important role in spin-dependent transport and spin-transfer switching. Especially, pure spin current which is the spin current without accompanying the charge current is an attractive quantity for utilizing the spin current efficiently. Nonlocal spin valve measurements in laterally configured ferromagnetic metal (FM)/nonmagnetic metal (NM) hybrid nanostructures is a powerful means for evaluating the intriguing properties of pure spin current precisely. In this talk, I will introduce materials for the efficient generation and detection of the pure spin current and a structure for efficient control of the absorption property of the pure spin current.

In the first part, I will introduce the results on the efficient generation of pure spin current using CoFeAl. We show that CoFeAl alloy is an excellent material not only for the electrical spin injection but also thermal spin injection because of its favorable band structure as schematically shown in Fig. 1.[1]

In the second part, I will introduce an unconventional lateral spin valve structure, in which the pure spin current flows in a FM/NM bilayer shown in Fig. 2. We show that the effective spin diffusion length can be modulated by the direction of the magnetization of the FM layer in the spin-current channel.



**Fig. 1** Schematic illustration of the efficient spin injection together with a SEM image of lateral spin valve



**Fig. 2** Conceptual image of modulation of the spin absorption.

## Reference

- [1] S. Hu, H. Itoh and T. Kimura: NPG Asia Mater. 6, e127 (2014).

# Thermal spin generation

Gyung-Min Choi<sup>1,2\*</sup>, Chul-Hyun Moon<sup>2,3</sup>, Byoung-Chul Min<sup>2</sup>,  
Kyung-Jin Lee<sup>3,4</sup>, and David G. Cahill<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois 61801, USA

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

<sup>3</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>4</sup>KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 136-701, Korea

The coupling of spin and heat gives rise to new physical phenomena in nanoscale spin devices. In particular, spin transfer torque (STT) driven by passing heat currents through magnetic layers provides a new way to manipulate local magnetization. Hatami *et al.* theoretically predicted thermally-driven STT in metallic spin valves [1]; Slonczewski suggested the initiation of thermally-driven STT in ferrite/metal structures and predicted a greatly enhanced quantum efficiency compared to charge-current-driven STT [2]. These new phenomena, namely, “thermal STT” rely on the transport of thermal energy, in contrast to the transport of electrical charge, and provide a new way to manipulate magnetization [1, 2]. To fully realize the envisioned advantages of thermal STT, it is important to observe thermal STT directly and quantify its sign and magnitude. Although thermal spin injections in ferromagnetic metal (FM)/normal metal (NM) [3], ferrite/NM [4], and FM/semiconductor [5] have been achieved, direct and conclusive evidence of thermal STT has remained elusive.

Here I provide direct evidence of thermal STT in metallic spin valves with the structure Pt/FM1/Cu/FM2. Heating by the ultra-fast pump optical pulse generates spin currents in the structure by two distinct mechanisms: i) volume spin generation in the FM1 layer by ultrafast heating and associated ultrafast demagnetization of FM1 [6]; ii) interfacial spin generation at the Pt/FM1 and FM1/Cu interfaces by heat current passing through the FM1 layer [7]. The spin-dependent Seebeck effect (SDSE) of FM1 converts the heat current into spin current. Both demagnetization-driven and SDSE-driven spin generation on FM1 can diffuse to FM2 and exert STT on FM2 magnetization.

The demagnetization-driven spin generation is due to thermal transport between electrons and magnons of FM1 and angular momentum conservation of electron-magnon coupling of FM1 [6]. The demagnetization-driven spin generation is significant for only the first ~3 ps after the pump optical pulse; 3 ps is approximately the time required for electrons, magnons, and phonons of FM1 to equilibrate.

The SDSE-driven spin generation is due to thermal transport between FM and NM at FM/NM interface. In contrast to ultrafast demagnetization, the heat current passing through FM1 persists for a much longer time, ~100 ps, the time required for the various layers in the structure (Pt, FM1, Cu, and FM2) to equilibrate. The amount of SDSE can be controlled by the composition of FM1, which is a spin source layer, and thickness of Cu, which is a heat sink layer.

## References

- [1] M. Hatami *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **99**, 066603 (2007).
- [2] J. C. Slonczewski, *Phys. Rev. B* **82**, 054403 (2010).
- [3] A. Slachter *et al.* *Nature Phys.* **6**, 879 (2010).



- [4] K. Uchida *et al.* *Nature Mater.* **9**, 894 (2010).
- [5] J.-C. Le Breton *et al.* *Nature* **475**, 82 (2011).
- [6] G.-M. Choi *et al.* *Nature Commun.* **5**, 4334 (2014).
- [7] G.-M. Choi *et al.* *Nature Phys.* **11**, 576 (2015).

# Author Index

Name	Abstract ID	Page	Name	Abstract ID	Page
Alexander B. Shick	Invited S-IV-3	43	H. W. Kwon	초S-IX-5	180
Arqum Hashmi	O-I-5	17	H.N. Lee	OT01	135
Aurelie Solignac	초S-X-1	185	Haein Choi-Yim	SM01	81
B. I. Min	초S-VIII-1	153	Haein Yim	초S-IX-3	178
B. W. Lee	Invited S-VII-4	149	Haein Yim	SM09	92
B. W. Lee	Invited S-VII-5	150	Haesoo Park	SO01	98
Beom Hyun Kim	초S-VIII-1	153	Hae-Woong Kwon	HM01	79
Bert Koopmans	초S-X-1	185	Hanchul Kim	MT06	72
Bo Gyu Jang	초S-IV-5	45	Hanhim Kang	초S-IV-5	45
Bo Young Han	초S-III-3	37	Henk J. M. Swagten	초S-X-1	185
Bui Son Tung	Invited S-VII-3	148	Heo Young Cheol	초S-V-4	55
Bumsung Lee	초S-VI-4	142	Heon-Jin Choi	SS02	96
Byong-Guk Park	O-II-6	168	Hongjae Moon	초S-IX-3	178
Byong-Guk Park	SO04	101	Hwaebong Jung	초S-IX-3	178
Byoung-Chul Min	초S-X-5	189	Hyo Seok Ji	초S-VI-4	142
Byoung-Chul Min	SS03	97	Hyo-Ryoung Lim	SM10	94
C. Hwang	초S-X-2	186	Hyoung Joon Choi	초S-VI-1	139
C. U. Jung	Invited S-VII-5	150	Hyun Cheol Koo	초O-1	23
Chang-Youn Moon	초S-IV-5	45	Hyun Cheol Koo	SO03	100
Changyoung Kim	초S-VI-4	142	Hyun Cheol Koo	SS01	95
Cheol Gi Kim	NS02	104	Hyun Cheol Koo	SS02	96
Cho Jae Hwan	초S-V-4	55	Hyun Cheol Koo	SS03	97
Choi Jae Hyock	초S-V-4	55	Hyung-jun Kim	초O-1	23
Chul-Hyun Moon	초S-X-5	189	Hyung-jun Kim	SO03	100
Chung Hee Nam	MO01	118	Hyung-jun Kim	SS03	97
Chunhee Nam	NS01	103	Hyunju Chang	초S-VI-2	140
Chunli Liu	Invited S-VII-1	145	Hyun-jun Kim	SS02	96
Chun-Yeol You	초S-X-1	185	Hyun-Sik Park	NS01	103
D. H. Manh	Invited S-VII-4	149	Hyun-Sook Lee	초S-IX-3	178
D. K. Tung	Invited S-VII-4	149	Imran Khan	초S-IX-6	181
David G. Cahill	초S-X-5	189	Imran Khan	O-I-7	20
Derac Son	O-II-7	170	J. G. Lee	초S-IX-4	179
Dongbin Shin	초S-VIII-4	156	J. G. Lee	초S-IX-5	180
Dong-Soo Han	초S-X-1	185	J. H. Yu	초S-IX-4	179
Duc Long Dang	O-II-7	170	J. H. Yu	초S-IX-5	180
Gabriel Kotliar	초S-VI-4	142	J. Y. Kim	초S-IX-4	179
Geunsik Lee	초S-VI-4	142	Ja Bin Lee	SO01	98
Gwang Guk An	SO01	98	Jae Cheong Lim	OT02	136
Gwang-Min Sun	초S-III-3	37	Jae Hyeok Lee	NS03	105
Gyung-Min Choi	초S-X-5	189	Jae Wook Lee	SO04	101
H. R. Cha	초S-IX-5	180	Jaehak Yang	O-II-8	171
H. Srikanth	Invited S-VII-2	147	Jaehun Cho	초S-X-1	185
H. W. Kwon	초S-IX-4	179	Jae-Hyeok Lee	NS04	107

Name	Abstract ID	Page
Jae-Hyoung You	O-I-3	14
Jae-Hyoung You	SM04	85
Jeong-O Lee	초S-VI-2	140
Ji Hoon Kim	SS03	97
Ji Hoon Shim	초S-IV-5	45
Ji Hoon Shim	초S-VI-4	142
Ji-Hun Yu	HM01	79
Jimin Lee	HM02	80
Jin Dong Song	SS01	95
Jin Pyo Hong	SO01	98
JinBae Kim	HM02	80
Jin-Joo Kim	초S-III-4	38
Jinki Hong	SS01	95
Jino Im	초S-VI-2	140
Jintae Hong	초S-III-4	38
Jisang Hong	초S-IX-6	181
Jisang Hong	O-I-5	17
Jisang Hong	O-I-7	20
Jong-Bum Kim	초S-III-4	38
Jong-Han Park	초S-III-4	38
Jongryoul Kim	HM02	80
Jong-Ryul Jeong	초S-IX-7	182
Joo-Hyoung Lee	초S-VI-3	141
Joohyung Bae	SS03	97
Joonyeon Chang	초O-1	23
Joonyeon Chang	SO03	100
Joonyeon Chang	SS01	95
Joonyeon Chang	SS02	96
Joonyeon Chang	SS03	97
June-Seo Kim	초S-X-1	185
Jung-Goo Lee	HM01	79
Jung-Woo Yoo	초O-2	24
Junhoe Kim	MD03	75
K. M. Kim	초S-IX-4	179
K.-J. Lee	ST01	109
K.-W. Lee	초S-VIII-2	154
Kee Hoon Kim	초S-VI-4	142
Ki Bum Lee	MO01	118
Ki-Bum Lee	NS01	103
Ki-Seok Kim	초S-VI-4	142
Ki-Suk Lee	MT03	65
Kohji Nakamura	Invited S-IV-1	41
Kristjan Haule	초S-VI-4	142
Kuchi Rambabu	SA04	134
Kwang S. Kim	초S-VI-4	142
Kwang-Jae Son	초S-III-4	38
Kyoo Kim	초S-VIII-1	153
Kyung-Jin Lee	초S-X-5	189

Name	Abstract ID	Page
Kyung-Jin Lee	MD04	77
Kyung-Jin Lee	O-II-6	168
L. T. H. Phong	Invited S-VII-4	149
M. H. Phan	Invited S-VII-2	147
M. Umar Farooq	O-I-5	17
M.B Kishore	SM08	91
Min Choi	초S-VI-2	140
Min Zhong	Invited S-VII-1	145
Min-Gwan Kim	NS03	105
Min-Kwan Kim	NS04	107
Miri Kim	O-I-6	18
Miyoung Kim	MT06	72
Miyoung Kim	NS03	105
Miyoung Kim	NS04	107
Mohamed Abbas	NS02	104
Muhammad Tariq	Invited S-VII-1	145
Myoung Joon Han	초S-VIII-3	155
Myoung-Woo Yoo	O-II-8	171
N. H. Dan	Invited S-VII-2	147
N. X. Phuc	Invited S-VII-4	149
Nam-Hui Kim	초S-X-1	185
Nam-Hyun Kang	HM01	79
Namkyu Kim	MT03	65
Nark Eon Sung	O-I-6	18
Nguyen Thanh Tung	Invited S-VII-3	148
Nguyen Thi Hien	Invited S-VII-3	148
Niels J. J. van Hoof	초S-X-1	185
Noejung Park	초S-VIII-4	156
Norikazu MIZUOCHI	Invited S-X-3	187
P. Lampen	Invited S-VII-2	147
P. Taivansaikhan	MT01	61
P. Y. Zhang	Invited S-IX-1	175
P. Zhang	Invited S-VII-2	147
Park Cheol Soo	초S-V-4	55
Peong Hwa Jang	ST01	109
Prasanta Dhak	NS03	105
Prasanta Dhak	NS04	107
Qurat-ul-ain	O-I-4	15
Rambabu Kuchi	초S-IX-7	182
Reinoud Lavrijsen	초S-X-1	185
S. C. Hong	MT01	61
S. C. Yu	Invited S-VII-2	147
S. C. Yu	Invited S-VII-5	150
S. H. Rhim	초S-IV-4	44
S. H. Rhim	MT01	61
S. H. Rhim	O-I-4	15
S.Y. Kim	OT01	135
Sandeep K. S. Patel	NS03	105

Name	Abstract ID	Page
Sandeep K.S. Patel	NS04	107
Sang Ho Lim	O-I-6	18
Sang Mu Choi	OT02	136
Sang-Im Yoo	O-I-3	14
Sang-Im Yoo	SM04	85
Sang-Im Yoo	SM07	90
Sang-Koog Kim	MD03	75
Sang-Koog Kim	NS03	105
Sang-Koog Kim	NS04	107
Sang-Koog Kim	O-II-8	171
Sehoon Oh	초S-VI-1	139
Se-Hyeok Oh	O-II-6	168
Seung Mo Yang	SO01	98
Seunghun Jang	초S-VI-2	140
Seunghyun Khim	초S-VI-4	142
Seung-Jae Jung	SM10	94
Seung-Jae Lee	MD04	77
Shin-Jae You	초S-IX-7	182
Shu Liu	HM01	79
Sol Jung	SM09	92
Soon Cheol Hong	O-I-4	15
Soon-Cheol Hong	초S-IV-4	44
Sooran Kim	초S-VIII-1	153
Soo-Yeol Yoo	NS01	103
Soyoung Jekal	초S-IV-4	44
Sri Ramulu Torati	NS02	104
Srivathsava Surabhi	초S-IX-7	182
Suk Hee Han	초O-1	23
Suk Hee Han	SO03	100
Sumin Kim	초S-IX-3	178
Sumin Kim	초S-IX-3	178
Sumin Kim	SM01	81
Sun Woo Lee	SM04	85
Sung Joon Choi	O-I-3	14
Sung Joon Choi	SM04	85
Sung Myung Ryu	MO01	118
Sunghyun Yoon	NM03	115
Sungjoon Choi	SM07	90
Sungjung joo	SS01	95
Sunwoo Lee	O-I-3	14
Sunwoo Lee	SM07	90
T. A. Ho	Invited S-VII-5	150
T. D. Thanh	Invited S-VII-2	147
T. D. Thanh	Invited S-VII-5	150
T. L. Phan	Invited S-VII-4	149
T. L. Phan	Invited S-VII-2	147
T. L. Phan	Invited S-VII-5	150
T.W. Kim	OT01	135

Name	Abstract ID	Page
Tae-Yeon Hwang	HM02	80
Tae-Youn Hwang	SM10	94
Taeyueb Kim	SS01	95
Takashi Kimura	Invited S-X-4	188
Takayuki Shiino	O-II-6	168
Tatsuya Shishidou	Invited S-IV-2	42
V. D. Lam	Invited S-VII-2	147
Van Long Doan	O-II-7	170
Vu Dinh Lam	Invited S-VII-3	148
W. E. Pickett	초S-VIII-2	154
Wenxian Li	Invited S-VII-1	145
Won Young Choi	초O-1	23
Won Young Choi	SO03	100
Woo Seong Chung	SO01	98
Wooyoung Lee	초S-IX-3	178
Xuan Huu Cao	O-II-7	170
Y. D. Kim	초S-IX-5	180
Y.K. Kim	OT01	135
Ye-Lim Lee	초S-IX-7	182
Yemin Hu	Invited S-VII-1	145
Yeongkwan Kim	초S-VI-4	142
Ying Li	Invited S-VII-1	145
Yong-Ho Choa	HM02	80
Yong-Ho Choa	SM10	94
Yoo Se Jong	초S-V-4	55
Youn Ho Park	SS02	96
Young Rang Uhm	OT02	136
Young-Jun Choi	초S-III-2	36
Young-Rang Uhm	초S-III-4	38
Young-Wan Oh	SO04	101
Yunji Eom	NS02	104
Yuxiang Yin	초S-X-1	185
Zihao Zhang	Invited S-VII-1	145
강민구	SA04	134
강석운	BM01	123
강선주	SA01	128
고병욱	SO02	99
권순무	초S-V-5	56
권오룡	MT02	63
김갑중	초S-V-6	58
김근호	BM01	123
김기현	초S-I-4	6
김누리	BM02	125
김대연	MD02	74
김대연	O-II-4	164
김대연	O-II-5	166
김대진	SM02	82
김대훈	O-II-2	160

Name	Abstract ID	Page	Name	Abstract ID	Page
김덕현	MD01	73	박영민	MT04	67
김덕현	MO02	120	박정갑	NM01	111
김덕호	MD02	74	박정갑	NM04	116
김덕호	O-II-4	164	박지수	BM02	125
김덕호	O-II-5	166	박철균	초S-II-1	27
김동수	O-I-2	12	배석	초S-I-2	4
김동영	NM02	113	배석환	초S-V-3	53
김동영	SM05	86	배종성	MO03	121
김동영	SM06	88	백승빈	NM01	111
김동진	MO04	122	백승빈	NM04	116
김명기	초S-I-5	7	백승현	O-II-2	160
김상준	SA03	132	백승현	O-II-3	162
김상훈	초S-I-5	7	변진규	MT04	67
김선규	초S-V-2	51	변진규	MT05	70
김소연	초S-I-2	4	서선열	초S-V-3	53
김신규	초S-II-2	28	서선열	초S-V-6	58
김영민	초S-II-2	28	서수만	O-II-2	160
김예찬	초S-I-5	7	서수정	NM01	111
김은애	SA02	130	서수정	NM04	116
김종렬	초S-IX-2	176	서영택	O-I-2	12
김지영	BM01	123	서정민	초S-V-5	56
김지웅	MO03	121	서정욱	초S-I-1	3
김지웅	MO04	122	석종민	초S-V-5	56
김진모	초S-I-1	3	성동규	MT05	70
김철성	초S-III-1	35	손대락	SA01	128
김철성	SM02	82	손대락	SA02	130
김철성	SM03	84	손대락	SA03	132
김철성	SO02	99	손대락	SM08	91
김철한	초S-II-4	30	송용설	초S-II-4	30
김태희	초O-II-1	159	송지연	초S-I-2	4
김형석	초S-II-2	28	신길수	SM02	82
김혜경	MO03	121	심재훈	MT05	70
남재도	초S-I-5	7	안성용	초S-II-5	31
류대형	SM02	82	양성철	초S-II-4	30
류상균	MO04	122	염재훈	초S-I-2	4
문경웅	MD02	74	오광민	SA03	132
문준	O-II-4	164	오원석	초S-V-1	49
민병철	MD02	74	왕잉	O-I-2	12
민병철	O-II-5	166	원종한	MO03	121
박경웅	O-II-2	160	원희수	초S-V-5	56
박덕근	SA02	130	위성권	초S-I-1	3
박덕근	SM08	91	유봉기	초S-II-3	29
박미령	SM03	84	유상철	MD02	74
박병국	O-II-2	160	유상철	O-II-5	166
박병국	O-II-3	162	유춘리	MD01	73
박성균	MO03	121	유춘리	MO02	120
박성균	MO04	122	윤대길	SA03	132
박성근	SA03	132	윤석수	NM02	113

Name	Abstract ID	Page
윤석수	SM05	86
윤석수	SM06	88
윤희중	MO03	121
이경동	O-II-3	162
이두용	MO03	121
이두용	MO04	122
이두환	초S-II-2	28
이보화	MD01	73
이보화	MO02	120
이상관	초S-I-4	6
이상복	초S-I-4	6
이상석	BM01	123
이상석	BM02	125
이상원	초S-I-2	4
이승주	SA02	130
이원정	초S-V-6	58
이인원	MO04	122
이장로	BM02	125
이정우	NM04	116
이정우	SA01	128
이종현	SM03	84
이주한	MO03	121
이지성	MO03	121
이지수	SM02	82
이진현	MT04	67
이진현	SO02	99
이철규	SM08	91
이태일	NM01	111
이태일	NM04	116
이혜리	BM01	123
임성현	MT02	63
임정태	SM02	82
임태진	NM01	111
임태진	NM04	116
장재욱	초S-V-3	53
장재욱	초S-V-6	58
장현철	초S-V-5	56
전광원	초S-IX-2	176
전민철	초S-V-3	53
전형진	초S-I-1	3

Name	Abstract ID	Page
정명재	초S-I-2	4
정병문	초S-I-4	6
정성웅	O-II-2	160
정연준	초S-II-2	28
정은경	NM02	113
정종율	SA04	134
정창렬	초S-I-1	3
정태성	MT02	63
정현준	BM02	125
정효연	초S-I-2	4
제갈소영	MT02	63
조다애	SO02	99
조순하	O-II-3	162
조승찬	초S-I-4	6
조영훈	O-II-3	162
조영훈	SA03	132
조창빈	SA01	128
진미정	MO04	122
진형진	MO04	122
최석봉	MD02	74
최석봉	O-II-4	164
최석봉	O-II-5	166
최우혁	초S-I-4	6
최장영	초O-I-1	11
최재령	초S-I-4	6
최철진	O-I-2	12
최현경	SM03	84
하예은	BM01	123
한동균	초S-V-6	58
한만석	초S-V-3	53
한종수	초S-I-2	4
허남팔	초S-I-3	5
허영철	초S-V-5	56
홍순철	MT02	63
홍예지	BM01	123
황도근	초S-V-3	53
황도근	BM02	125
황민주	초S-I-5	7
황보미	초S-I-3	5
황찬용	MD02	74