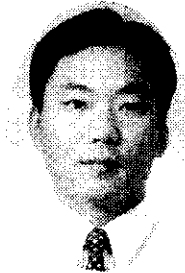


## 거대 자기저항 소자와 터널 자기저항 소자의 원리와 응용



서수정  
(성균관대 신소재공학과 교수)



김영근  
(고려대 재료금속공학부 조교수)



이성래  
(고려대 재료금속공학부 교수)

### 1. 서론

디지털 및 이동 정보 통신기술이 급성장에 따라 하드웨어를 구성하고 있는 정보저장 및 처리기술에 대한 요구가 가중되고 있다. 이러한 요구는 지난 십 년간의 정보저장 및 처리 소자의 대부분을 차지하고 있는 반도체산업의 급격한 성장을 이루게 하였다. 그러나, 21세기를 시작하는 현시점에서 반도체를 이용하는 메모리 소자의 한계성이 점차 드러나고 있고 새로운 정보 기록저장 소자의 필요성이 절실한 실정에 있다. 최근 새롭게 각광을 받고 있는 기록매체는 '자기저항 현상(Magnetoresistance, MR)'을 이용하는 자기메모리 소자가 반도체 기록저장 소자의 뒤를 이을 것으로 판단된다. 자기메모리 소자(Magnetic Random Access Memory, MRAM)는 넓은 의미로서 자성재료를 이용하는 메모리소자를 통칭하며, 이는 1970년대의 페라이트 코어와 자구(magnetic domain)을 이용한 자기버블기술이 그의 첫 번째 기록저장에 적용된 최초의 형태이다.[1] 자성체로부터의 MR 현상은 초기에는 연자성 박막으로부터 이방성(anisotropy) MR를 이용하기 시작하여 거대자기저항(Giant magnetoresistance, GMR) 및 터널링 자기저항(Tunneling magnetoresistance, TMR)현상을 자기메모리 소자에 적용하는 단계까지 발전되어 왔다. 1980년대 일부 국한되어

사용되어 오던 MR소자를 센서나 기록저장(Anisotropy magnetic random access memory, AMRAM)에 까지 응용하는 기술이 발전되어 왔다.[2] 하지만 낮은 MR비(약 2%)는 HDD 헤드와 AMRAM의 낮은 출력의 원인이 되어 고밀도 자기기록을 이루기에는 어려웠다. 이런 상황에서 1988년 프랑스의 Baibich 그룹은 Fe/Cr로 이루어진 다층박막으로부터 높은 자기저항을 얻을 수 있는 GMR 현상을 발견하였다. 이는 자기저항 소자 연구에 새로운 계기를 마련해 주었다.[3]

GMR 현상은 높은 자기 민감도(저항의 변화율/인가 누설 자장,  $\Delta R/Oe$ )와 고밀도에 필요한 높은 저항비를 갖추고 있어서 MRAM 및 자기센서에 대한 연구에 활기를 주었다. 기존에 연구되어져 왔던 MR 센서나 AMRAM은 GMR소자를 적용한 GMR 센서나 GMR MRAM[4]으로 점차 대체되어 갔으며 고밀도 HDD의 자기헤드로 현재 상용되고 있다.

1995년 미국의 Moodera와 일본의 Miyajaki 그룹이 상온에서 높은 자기 저항비를 갖는 터널링 자기저항소자를 발표하였다.[5-6] GMR를 이용하여 고밀도화를 이루기에는 어려움을 안고 있었던 때에 자기 기록매체의 가능성이 더욱 가시화된 계기가 되었다. 그러나, TMR은 소자제작의 재현성의 문제점 등과 같이 기술적 접근이 쉽지 않았다. 하지만 최근 문제점들을 해결해 나감에 따라 현재는 센서나 MRAM

에의 적용이 가능해진 시점까지 왔다.

가장 작은 단위로서 존재하는 전자의 스핀에 의존하는 GMR과 TMR 현상을 메모리 소자로서 적용하는 것은 현재 이론적으로 거론되고 있는 'spin switching', 'spin injection' 및 'current driven switching' 등의 차차세대 메모리 제어기술의 초석이 될 것으로 생각된다.

본 논문에서는 GMR과 TMR 현상과 응용되고 있는 자기 메모리 소자로서의 응용 및 앞으로의 전망에 대하여 간략히 소개하겠다.

## 2. GMR과 TMR 현상

비자성층을 사이에 둔 인접한 강자성층간의 자화방향에 따라 나타나며, 그 기구는 일반적으로 two-current 모델로서 설명이 된다.[6] 전도전자에 기여하는 전자는 두 가지 스핀 상태를 가지게 되며 큐리온도보다 낮은 온도에서 전자가 산란되는 과정 중에서도 전도전자 자신의 스핀상태가 보존되는 것이다. 따라서 고유의 스핀 상태를 가지는 전자가 강자성층을 통과할 때 강자성층의 자화 방향과 평행하면 부가적인 산란 없이 진행하게 되고 반평행하면 전자는 산란하게 되어 저항 값이 높아지게 된다.이런 현상을 스핀의존 산란(spin dependent scattering)이라 한다. 스핀의존산란은 강자성

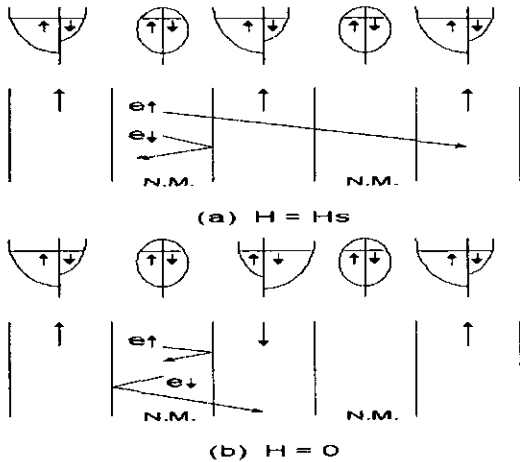


그림 1. 강자성의 스핀의 상태밀도와 (a) 평행인 경우와 (b) 반평행한 스핀인 경우 전도전자의 산란.

표 1. 다양한 강자성체의 스핀 분극 값.(8)

Materials	Ni	Co	Fe	Ni <sub>30</sub> Fe <sub>70</sub>	Co <sub>30</sub> Fe <sub>70</sub>	Co <sub>84</sub> Fe <sub>16</sub>
Polarization	33%	45%	44%	48%	51%	49%

보호층
반강자성층
강자성층(고정층)
전도층
강자성층(자유층)
씨앗층
Si 기판

그림 2. 기본적인 스핀밸브구조.

층의 d밴드전자밀도에 의존하게 되며 외부자장과 평행한 스핀이 Fermi 에너지 준위에 높은 밀도로 분포하게 된다. 이는 물질 고유의 성질로서 스핀 분극(spin polarization, P)이라고 한다. 표 1에 다양한 강자성체의 분극값을 나타내었다. 즉, 외부자장과 평행한 전자를 갖는 전도전자들이 전류의 흐름을 주도하게 된다. 만약 자장이 0의 근처에 도달하게 되면 두 강자성층간의 강한 반강자성 결합이 주도되어 반대 방향으로 두 자성층의 스핀이 배열하게 되면 저항이 점점 증가하게 되는데 이러한 산란은 각 층간에 계면(interface scattering)과 자성층내(bulk scattering)에서 발생하게 된다.[9] 예를 들면 Cu/Ni, Co, Fe 다층박막에서 Ni나 Co는 주로 계면 산란을 주도하고 Fe는 자성층 내에서의 산란을 주도하는 것으로 보고되고 있다. GMR의 경우 다층박막에 평행한 방향(Current in plane, CIP)과 수직인 방향(Current perpendicular plane, CPP)으로 전류를 흐르게 할 수 있다. GMR의 경우 두 가지 형태가 전부 적용이 되고 있으며 전도전자의 평균자유행로에 따라 MR에 대한 해석이 다소 차이를 나타내고 있다. TMR 소자의 경우는 10 Å 정도의 얇고 좁은 접합계면에 수직으로 전류가 흐르게 된다. 이런 점이 고기록밀도의 MRAM의 구조를 가능케 한다.

자기저항효과를 높이기 위해 효과적인 스핀배열이 필수적이다. 그 동안 자성층/비자성층으로 이루어진 다층박막구조를 대부분 가지고 있었으나 IBM에 의해서 1991년에 스핀밸브 기구가 소개되었다[10]. 스핀밸브의 기본적인 구조는 그림 2에 나타난 바와 같이 반강자성층이 인접한 강자성층의 스핀에 안정성을 주게 되어 소자의 자기적 안정성에 영향을 주게 된다. 반면, 자유층은 미세한 자장에서 쉽게 스핀의 반전이 발생하게 되어 높은 출력과 다층박막 GMR 소자보다 S/N 비가 향상된다. 그리고 기록매체나 MRAM의 고밀도화

에 따른 미세한 누설 자장에서 높은 감응도와 안정적인 소자의 구현을 할 수 있는 것으로 나타났다. 교환 결합형 소자의 기본적인 원리는 Meiklejohn과 Bean에 의해 제안된 교환이방성이다.[11] 교환이방성은 자기 이력곡선을 교환이방성의 방향에 따라 + (인가자장에 역방향) 또는 - (인가자장 방향) 방향으로 이동시킨다. 이러한 현상은 반강자성층이 인접한 강자성층내의 스핀을 외부자장으로부터 고정시켜주는 역할을 하여 안정된 스핀 상태를 부여하기 때문이다. 교환 이방성에 대한 원인에 대한 여러 가지 이론적, 현상적 의견들이 제시되어 왔지만 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다.

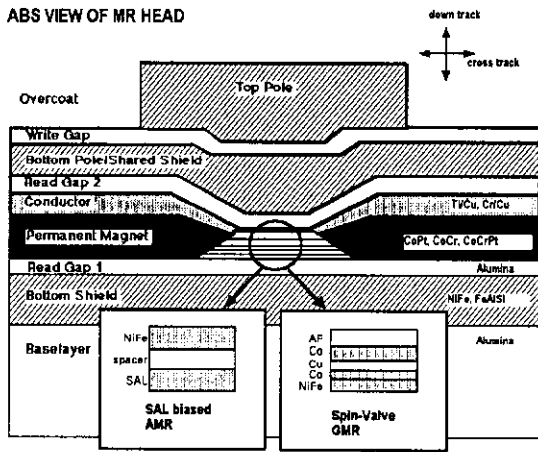


그림 3. GMR를 적용한 자기헤드구조.[12]

### 3. 응용분야

자기 기록매체의 고기록밀도화에 따른 빠른 읽기/쓰기를 위한 자기 헤드분야와 새롭게 각광을 받고 자기 메모리 소자로서 MRAM분야에 대하여 소개하고자 한다.

#### 3.1 자기헤드분야

90년대 중반의 모든 HDD에 사용되고 있는 MR헤드는 강자성 박막내로의 sensing 전류와 강자성 박막의 자화 방향과 이루는 각도에 의존하게 된다. 대부분 약 2%의 MR비를 나타내었다. 하지만 Baibich 등이 MBE로 에피택시하게 성장시킨 Fe/Cr의 다층박막에서 높은 MR비를 발견한[3] 이후로 다양한 재료와 손쉽게 극박막을 제작할 수 있는 sputtering법의 발달로 IBM은 낮은 자기장에서 GMR비를 얻을 수 있는 새로운 스핀밸브구조를 소개하였다. 스핀밸브GMR 소자의 안정성은 대부분 반강자성체의 종류에 의해 결정되어

지는데 다양한 반강자성층들이 연구되어져 실제 자기헤드에 적용되고 있다. 그림 3에서 GMR소자가 적용된 자기헤드를 볼 수 있다. 1994년도에 Honeywell사에서 자기장 센서를, 1997년에는 IBM에서 HDD의 재생헤드 개발에 성공하므로써 HDD의 먼기록밀도를 10년 가까이 단축하면서 1999년에는 20 Gb/in<sup>2</sup> 및 2000년 50 Gb/in<sup>2</sup> 라는 초고기록밀도의 데모에 성공하여 정보저장 기술에 큰 변혁을 이루었다. 이 정도의 기록밀도를 이루기 위해서는 재생트랙폭이 약 0.25 μm 정도가 되어야 한다. 참고로, 50 Gb/in<sup>2</sup>의 기록밀도가 3.5 인치 디스크 1장당 약 35 Gbyte의 대용량의 정보를 저장 할 수 있다. 현재 상용화하고 있는 헤드로는 약 10~15 Gbit/in<sup>2</sup>의 기록밀도가 가능하다. 이와 같이 소자의 크기는 점점 sub-μm이하로 소형화됨에 따라 기존의 스핀밸브구조의 구속층(반강자성층과 인접한 강자성층)으로부터 발생하는 누설자계에 따른 자유층의 자화 거동을 방해하는 현상이 두드러져 신뢰성이 높은 자기헤드구조에 큰 장애로 자리잡고 있다. 이를 극복하기 위해 반강자성이 강한 교환결합을 하는 synthetic 삼층 박막 구조가 제안되었다.[13] synthetic 구조를 도입하는 경우에는 강한 반강자성 교환결합으로 인해 열적안정성과 자유층내의 스핀에 작용하는 누설자장의 영향을 극복하게 되어 자기헤드의 소형화에 따른 문제점을 해결 할 수 있었다. 하지만 synthetic 삼층구조는 강한 반강자성 결합을 하고있기 때문에 기존의 교환 이방성에너지와 새로운 에너지가 고려되어야 하므로 소자의 자화거동에 대한 많은 연구가 요구된다.

TMR 소자의 경우 높은 MR비와 접합면의 크기가 매우 작기 때문에 자기헤드에 적용에 유리한 장점을 가지고 있으나

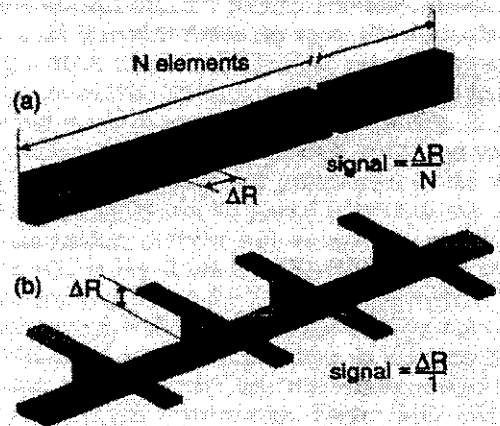


그림 4. (a) 하나의 비트라인에 여러개의 GMR MRAM셀이 연결된 경우와 (b) 각각의 비트선과 하나의 word line이 연결된 TMR MRAM의 도식적 모습.[15]

두께가 십 A 정도인 절연층의 제어와 재현성에 대한 어려움 등 많은 제약이 TMR헤드에 대한 적용에 어려움을 가지고 있다. 하지만 최근에 TDK, Motorola, Segate 등의 자기헤드 제작회사들이 TMR을 이용한 헤드 개발의 가능성이 탐색되고 있다.[14]

### 3.2 MRAM

GMR 소자는 자기헤드에 물론 MRAM에도 적용되어져 왔으나 GMR을 사용한 MRAM의 경우 정확한 신호판별을 위해 두 번 정도 반복적으로 재생하는 작업이 필요하게 되어 속도가 떨어지게 되는데 이는 GMR의 MR비가 10 % 정도이고 한 개의 비트선에 여러개의 MRAM셀이 연결되어 있어 실제의 출력값은 더욱 감소하게 된다. GMR을 MRAM으로 사용하기 위해서 MR비를 극대화할 수 있는 신재료의 개발이나 경면반사효과를 이용하는 계면에서의 스핀분극이동량을 크게 만들어 궁극적인 S/N비(signal to noise ratio)를 높여야 한다. 그림 6에는 GMR MARM과 TMR MRAM을 나타내고 있다.[15]

TMR은 GMR의 발견보다 앞선 1975년 Julliere에 의해 저온에서 TMR 현상을 발견하였다. 그 이후 20년이 지난 1995년 Moodera가 제작한 Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiFe의 터널접합구조에서 18 %의 높은 MR비를 얻을 수 있었다.[5] TMR은 전류가 CPP로 흐르기 때문에 자성층의 두께에 의한 손실이 거의 없고 상온에서 높은 MR비를 얻을 수 있고, 이론적으로 40 %가 넘는 높은 MR비를 얻을 수 있고, 포화자기강도가 작아 MRAM상용화에 가능성을 높게 하였다.

TMR은 높은 MR비를 구비하고 있으나 MRAM적용 여부에 영향을 주는 몇가지 큰 인자가 있다. 첫 번째는 TMR소자의 저항이다. 소자저항이 알루미늄이나 두께에 매우 민감하기 때문에 두께 변화에 매우 의존하고 있다. 소자저항은 접합면적×저항으로 나타내며 1999년도에 IBM의 Parkin 그룹은

60 Ωμm<sup>2</sup>에서 109 Ωμm<sup>2</sup>으로 저항을 제어하여 보고 하였다.[15] 이는 절연층의 두께를 7 A 정도의 두께와 그 특성을 제어함으로써 가능하게 되었는데 이는 많은 기술적 know-how가 필요한 부분이다. TMR MRAM에서는 접합체의 저항은 적절한 값을 유지하여야 한다. 너무 크게 되면 임피던스 지연 효과에 의해 속도가 느리게 되며, 반대로 저항이 너무 작으면 출력이 작아지게 되어 바람직하지 않게 된다. 이런 점을 고려할 때 적절한 소자의 저항을 제어하는 기술의 확보는 대단한 의미를 갖는 것이다. 또한 두 번째는 균일한 MR비를 얻을 수 있는 재현성의 확보인데 Parkin 그룹에서는 많은 수의 접합체를 대상으로 평가한 결과 MR를 ±1.5 % 이내의 오차로 제어할 수 있음을 증명하였다. 이는 정확한 절연층의 제어능력을 구비했음을 알 수 있다. 즉 MRAM의 실용화가 그리 멀지 않음을 알 수 있다.

MRAM의 제조공정은 반도체 공정기술과 자성막기술이 결합한 것으로 가장 큰 특징은 비휘발성 메모리며 처리속도가 빠른 점이며 제조 공정이 비교적 단순하므로 DRAM을 대체해 갈 수 있는 메모리 소자이다. 21세기에 접어들어 디지털 기기, 이동형 소형 컴퓨터(일명, palm computer) 등 인터넷 시대에 안성맞춤인 소자로서 부각되고 있다. 방사능 내성이 우수하여 인공위성 및 스페이스 셔틀 등과 같은 우주항공분야에 응용가능성이 높다. 표 2는 MRAM과 다른 메모리 소자들에 대한 비교이다.

MRAM의 고집적도와 수율, 신뢰성 등을 얻기 위해서는 아직도 해결해야 하는 기술적인 문제점이 있다. 고집적도를 위해 소자의 크기가 sub-μm의 단위가 되면 자성체 고유의 스핀특성에 대한 정자기력에 의한 스위칭 자기장이 커지고, 비가역적 자화반전으로 인한 출력신호가 비대칭적으로 되며, 자구(magnetic domain)의 형성에 의한 노이즈가 발생하기 쉽다. 이를 방지하기 위해 소자의 끝 부분의 결합을 최소화 하는 방법을 취해야 한다.

표 2. 여러 메모리 소자들의 속도, 집적도 및 소비전력 비교.[16]

	MRAM	FRAM	Flash EEPROM	DRAM	SRAM
비휘발성	○	○	○	×	×
기록시간	10~50 ns	100~130 ns	30 μs	50 ns	10 ns
재생시간	10~50 ns	100~130 ns	20~110 ns	50 ns	10 ns
Cell 면적(상대치)	1 이하	13	0.8	1	4
기록가능회수	10 <sup>15</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>
최대소비전력	10~400mW	2mW	100mW	400mW	1100mW

주) 현재까지 보고된 시제품을 기준, FRAM: Ferroelectric RAM, EEPROM: Electrically Erasable and Programmable Read Only Memory, DRAM: Dynamic RAM, SRAM : Static RAM

그리고 자성층의 식각을 위한 이온밀링의 사용과 반응성 가스를 이용한 식각과정에서의 반도체 표면에 손상을 줄 수 있고, 300 ℃이상에서의 열처리는 자성체를 열화시켜 특성을 쉽게 잃게 한다. 그리하여 저온에서 이루어지는 반도체 공정이 필요하다.

정자기력에 의한 스핀의 문제는 자기헤드에서와 같이 synthetic layer를 이용하여 이를 극복하여야 하며, 고온에서의 공정을 가급적 피해야 하나 최근 350 ℃부근에서의 TMR 소자의 열적 안정성을 발표하는 등 이를 극복하려는 노력들이 진행 중에 있다.

#### 4. 산업적 전망

수년전에 예상했던 기록밀도의 증가는 매년 60% 이상 계속 증가를 하고 있다. GMR/TMR 소자를 이용한 재생헤드 기술이 이를 가능케 하고 있다. HDD의 응용분야가 민생기기의 전반에 걸쳐 그의 영역을 넓혀 감에 따라 매년 15% 이상의 성장세가 유지되고 있으며 1999년도 시장은 290억불, 2002년에는 320억불을 넘어설 것으로 예측하고 있다. [17] 정보기록 사업은 예측하기 힘들 정도로 빠른 속도로 성장하고 있으며 기존의 틀을 벗어나는 시도들이 진행중이다. Seagate, Quantum 그리고 Sony 등은 HDD를 장착한 PVR(personal video recorder)를 개발함으로써 VCR과 DVD의 대체 매체로 응용이 가능함에 따라 폭발적인 수요의 증가가 예상된다.

비휘발성 MRAM은 반도체의 flash 메모리 보다 경쟁력이 있어 미국 국방성과 IBM을 중심으로 산학연 연구 컨소시엄을 형성하여 집중연구 되고 있어 기존의 flash 메모리 시장을 잠식한다면 2005년 정도에 150억불의 시장규모가 될 수 있다.

메모리 산업에서는 물론 GMR, TMR 센서를 이용하게 되면 기기의 제어가 정교해진다. 공장의 자동화, 민생용 및 기존의 자동차나 항공기의 위치, 속도, 방위의 제어용 센서산업에 대해 일본의 NEC, Matsushita, Sony 등 일본의 주도하에 산업의 규모는 점점 증가하고 있다. 세계의 시장 규모는 98년 기준으로 6억 8천만불에서 1천만불에 육박하고 있으며 매년 4%의 성장률을 보이고 있다.

국내의 자기기록에 대한 연구는 1990년 초부터 학교와 연구소를 중심으로 GMR, TMR에 대한 연구가 진행되어 왔으며 산업체로는 삼성전기에서 GMR 헤드에 대한 연구가 진행되어 왔다. 1999년에는 삼성전기에서 20Gbit/in<sup>2</sup>의 고기록 밀도를 갖는 데모에 성공했다. 현재는 대학과 연구소를 주축으로 GMR과 TMR소자 재료에 대한 기초연구와 응용에 대하여 연구하고 있으며 삼성종합기술원에서는 수직자기기록 매체와 MRAM에 대하여 연구를 진행중에 있다.

또한, MRAM은 21세기 프론티어 사업으로 선정되어 10년간의 장기간의 연구지원을 받고 있다. MRAM의 실현은 우수한 GMR, TMR 소자 제작기술의 확보를 기본으로 소자의 구조의 설계, 논리회로 설계기술 그리고 최적의 공정기술의 확보를 이룰 때 가능하다. 현 국내의 MRAM에 대한 연구가 선진국에 비해 매우 늦게 시작되었지만 그 동안 쌓였던 반도체 기술을 이용하여 공정기술에 대한 전략적 특허의 확보가 단기간에 선진국과 어깨를 나란히 할 수 있는 지름길로 판단된다.

#### 5. 결 언

2000년 개최된 Intermag conference에서 IBM의 Slonzewski는 2020년 정도에 사용될 새로운 개념의 메모리 소자의 개념을 제시하였다. [18] 지금은 가히 접근하기 어려운 공정제어기술을 필요로 하는 소자이지만 10년 전에 현재의 정보 처리 기술에 대한 예측도 그 당시에는 상상치도 못하였을 것이다. 현재 반도체 메모리를 대체하기 위한 새로운 메모리소자로서 GMR과 TMR소자와 같은 스핀제어를 필요로 하는 스핀 전자재료가 미래에는 메모리 소자의 기본 개념이 될 것으로 생각된다. 우리 국내의 경우에도 선진국에 비해 소재부품산업의 기반 많이 취약하고 국가적 지원이 절실한 상황에 있다. 선진기술에 대한 극심한 의존성으로 인해 국내의 산업경기는 항상 예측이 불가능하다. 이를 극복하기 위해 메모리 분야의 새로운 개념이 도입되는 계기를 마련한 GMR, TMR 소자 부품과 같은 기술기반 산업의 활성화가 매우 절실하다.

#### 참 고 문 헌

- [1] B.D. Cullity, Introduction to magnetic materials, Addison wesley publishing company, pp. 534-547, 1972.
- [2] J.M. Daughton, Thin solid films, Vol. 216, p. 162, 1992.
- [3] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Ngen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Greuzet, A. Friedrich, and J. chazelas : phys. Rev. Lett., Vol. 61, 2472, 1988.
- [4] Gary A. Prinz, J. Magn. Magn. Mater., 200, . p. 57, 1999.
- [5] J. S. Moodera, L.R. Kinder, T.M. Wong, and R. Meservey, Phys. Rev. Lett, Vol. 74, p. 3274, 1995.
- [6] T. Miyazaki, and N. Tezuka, J. Magn.

Mater., Vol. 139, pp L 231, 1995.

[7] N. Mott. Proc. Roy. Soc. Vol. 156, p. 368, 1936.

[8] J. S. Moodera, George Mathon, J. Magn. Mater., Vol.200, p. 248, 1999.

[9] R. Cohoohoorn.. Magnetic multilayers and Giant Magnetoresistance, Springer, pp. 65-127, 2000.

[10] B. Dieny, V.S. Sperious, S.S.P. Parkin, B.A. Gruney, D.R. Wilhoit, and D. Mauri : Phys. Rev. B, Vol. 43, p. 1297, 1991.

[11] W.H. Meiklejohn, and C.P. Bean : Phys. Rev. Lett., Vol. 61, p. 2472, 1988.

[12] 김영근, 정인섭, 박태석, 한국자기학회지, 8, p. 99, 1998.

[13] J.L. Leal and M.H. Kryder : IEEE. Trans. Magn. Vol 35., 800 (1999)

[14] Kazuhiko Hayashi, Kiyokazu Nagahara, Masafumi Nakada, Kishi Ohashi, Kazuhiro Matsuda, Atsushi Kamijo, Tsutomu Mitsuzuka, Hisanao Tsuge, 2000 intermag conference Preceeding FA-03, Toroto, (Canada).2000.

[15] S.S.P. Parkin, K.D. Roche, M.G. Samant, P.M. Rice, and R.B. Beyers, R.E. Schenerlein, E.J. O'Sullivan, S.L. Brown, J. Bucchigano. D.W. Abraham, Yulu, M.Rooks, P.L. Trouilloud, R.A. Wanner, and W.J. Ballagher, J. Appl. Phys. Vol. 85. p. 5828, 1999.

[16] Nikkei Electronics, 757, 49, (1999)

[17] Storage Demand Analysis System, Trend Focus Ins. (1999)

[18] J.C. Slonzewiski. 2000 Intermag conference preceeding, EC-02, Toronto, 2000.

**성명 : 서수정**

**❖학력**

1981년 성균관대학교 금속공학과 학사  
 1983년 성균관대학교 금속공학과 석사  
 1988년 성균관대학교 금속공학과 박사

**❖경력**

1999년 일본 동북대학 금속재료연구소 방문교수  
 1999년-현재 성균관대학교 기술혁신센터 소장  
 1990년-현재 성균관대학교 신소재공학과 교수

**성명 : 김영근**

**❖학력**

1985년 서울대학교 금속공학과 학사  
 1987년 서울대학교 금속공학과 석사  
 1993년 MIT 재료공학과 박사

**❖경력**

1993년-1997년 Quantum Corporation, Project Leader  
 1996년-1997년 University of Colorado, Lecturer  
 1997년-2000년 삼성전기주식회사, 개발팀장  
 2000년-현재 고려대학교 재료금속공학부, 조교수

**성명 : 이성래**

**❖학력**

1976년 고려대학교 금속공학과 학사  
 1979년 고려대학교 금속공학과 석사  
 1983년 University of Notre Dame 재료공학과 박사

**❖경력**

1983년-1985년 University of Notre Dame, Post-Doctoral Associate  
 1992년-1993년 Argonne National Laboratory, 방문연구원  
 1986년-현재 고려대학교 재료금속공학부, 교수