

# 1 Tbit/in<sup>2</sup>급 초고기록밀도 구현을 위한 차세대 HDD 핵심기술

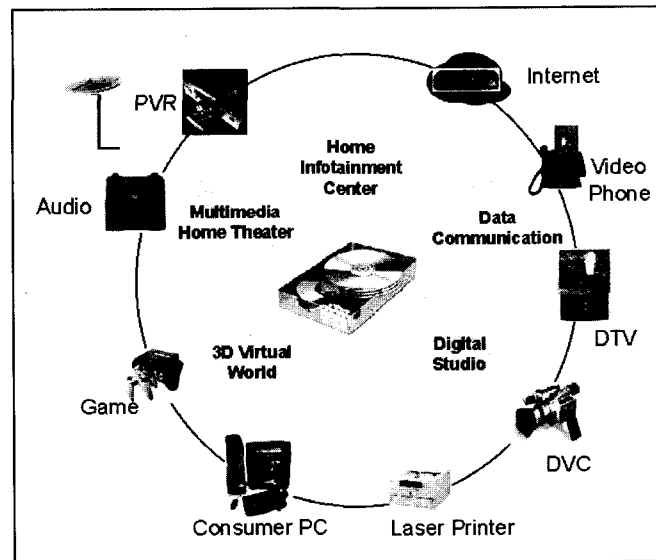
김 영 근

고려대학교 공과대학 재료공학부 정보소자재료연구실

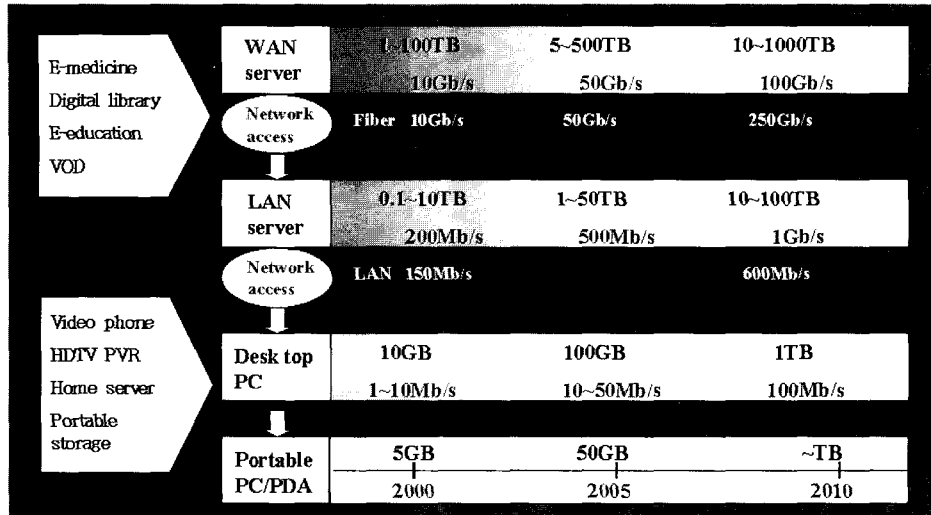
## I. 미래 정보화 사회와 정보저장산업

21세기 들어 정보화, 지식화 사회가 점차 심화됨에 따라 개인이 저장해야 할 데이터 양도 폭발적으로 늘어나고 있어 개인용 저장장치의 개발이 전세계적으로 활발히 추진되고 있다. 개인용 정보단말기기가 다양화되고, 유·무선 통합 환경이 구축되어, <그림 1>에서 보듯 언제, 어디서나 자신의 데이터에 쉽게 접근하고 방대한 데이터를 저장할 수 있는 저장장치의 필요성이 제기되고 있다. 또한 인터넷 이용이 폭발적으로 늘어나면서 언제 어디서나 인터넷 접속이 가능하고 오디오, 비디오와 같은 고용량의 정보를 다운로드 받

을 수 있는 핸드헬드 컴퓨터와 같은 정보기기의 보급도 급증할 전망이어서 초소형 고용량 저장장치는 조만간 휴대형 디지털기기(Mobile Device)에는 필수적인 제품으로 발전할 가능성이 점차 커지고 있다. 고용량 저장장치의 개발에 대한 기술적인 필요성은 향후 요구되는 정보저장용량에 대한 예측으로부터 알 수 있다. WTEC(World Technology Evaluation Center)의 분석에 의하면<sup>[1]</sup> 2010년의 정보량 수요는 <그림 2>와 같이 개인 당 약 1TB 이상이 될 것으로 예상된다. 특히, 향후 10년 내에, 10 나노미터 크기의 비트에 정보를 반복적으로 기록 재생하여 Tbit/in<sup>2</sup>급의 기록밀도와 수 Gbit/s급 이상의 속도를 갖는 정보저장 장치와 부품기술이 구현될 것이다.



<그림 1> 디지털 융합에 따른 정보저장장치의 응용분야.



<그림 2> 연도별 정보량 수요 예측 [출처: Ref. 1].

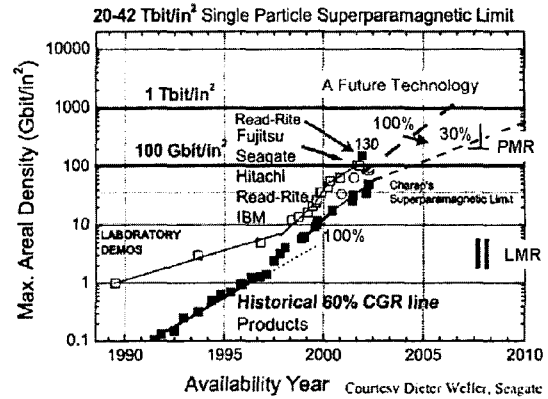
자기기록기술에 바탕을 둔 정보저장장치의 대표격인 Hard Disk Drive(HDD)는 높은 면기록밀도(High Areal Density), 높은 데이터 전송속도(High Data Transfer Rate), 빠른 접근시간(Fast Access Time), 및 낮은 가격(Low Cost) 등과 같은 성능지표의 구현이 가능한 장치로서, Head, Disk, Head-Disk Interface, Channel, Servo, Mechanical Design, System Interface 등의 여러 가지 요소기술을 복합적으로 적용하여 개발된다. 특히 저장용량과 동작속도 그리고 가격은 Head, Disk 등과 같은 핵심부품과 밀접한 관련이 있다. 따라서 HDD 개발기술은 핵심부품 분야의 개발기술과 연관성이 크다고 할 수 있다. 2002년 IDC의 시장분석에 의하면<sup>[2]</sup> HDD 시장은 2001년 \$21B에서 2006년 \$25B으로 지속성장하는 IT 거대시장으로, 총생산대수도 폭발적인 정보저장 수요에 따라 2001년 196M 대에서 2006년 352M 대로 증가가 예상된다. 시장점유율에 있어서 미국 Seagate사가 선두를 달리고 있으며 우리나라의 삼성전자는 4~5위 권을 점하고 있다. 그러나 현재 기술통합 문제, 평균관가의 하락 및 용량의 성장이 지연되고 있으며 이러한 추이가 향후 HDD 산업계에 중요한 변화를 가져올 전망이다.

본 고에서는 100 Gbit/in<sup>2</sup>~1 Tbit/in<sup>2</sup>의 초고 기록밀도의 구현을 가능하게 하는 헤드 및 매체 관련 핵심요소기술의 현황과 발전전망에 관해 중점적으로 고찰하고자 한다.

## II. 자기기록의 원리와 기술의 발전방향

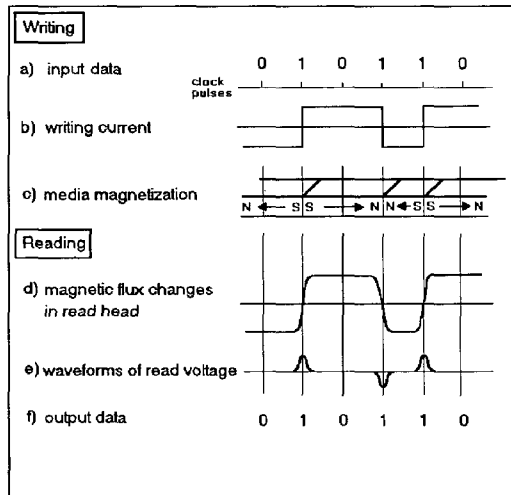
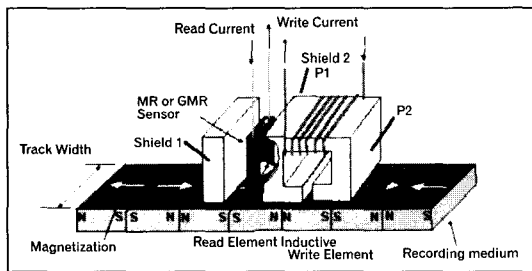
자기기록에 의한 정보저장은 기본적으로 Tape 또는 Disk 형태의 자기매체에 자기헤드를 이용하여 반복적으로 정보를 기록, 재생한다. <그림 3>과 같이 기록시 전자석의 Gap에서 발생하는 자기장으로 매체에 기록하게 되며(흘려주는 전류의 방향에 따라 자화방향이 결정), 재생은 고감도의 자기저항(Magnetoresistive, MR) 센서를 사용하여 매체에서 발생하는 누설 자기장을 감지하여 전기신호로 전환한다. 비트간 자화방향이 S-S 또는 N-N인 경우 누설자기장이 발생하므로 센서에서 전달되는 전압의 변화는 신호처리기를 통해 '1'이라는 디지털 신호로 인식된다. 반면 S-N 또는 N-S와 같은 경우는 누설자기장이 발생하지 않으므로 '0'의 디지털 신호로 처리된다. 현재 HDD에 쓰이고 있는 헤드와 디스크의

경우는 기록밀도의 증가와 소형화에 따라 모두 박막공정을 이용하여 제작되고 있다. 통상 HDD에서 기록밀도는 평방인치 당 저장할 수 있는 비트의 수(bit/in<sup>2</sup>)를 말하는 데, 이는 단위인치 당 비트 수(BPI)와 트랙 수(TPI)의 곱으로 표현된다. 기록밀도의 증가는 단위정보를 저장하는 자기비트 크기의 감소를 의미하는 데 이는 헤드를 위시한 모든 재료부품의 크기가 이에 상응하여 지속적으로 감소하였다. 1955년 IBM에서 최초로 출시한 RAMAC의 경우 2Kbit/in<sup>2</sup>(=100 BPI×2 TPI)의 기록밀도와 직경 24 inch인 디스크 50매로 5MB의 저장용량을 가졌다. 50여년이 지난 현재, 출시되고 있는 고급기종의 HDD는 60 Gbit/in<sup>2</sup>의 기록밀도로 3.5 inch 디스크 1매에 80 GB의 저장용량이 가능하다. 기록밀도 측면에서 약 3천만 배의 증가이다!

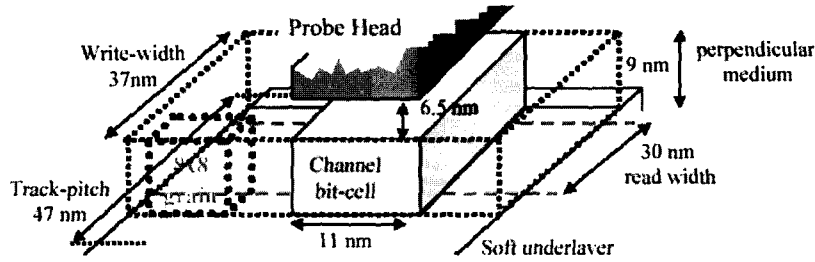


〈그림 4〉 HDD 기록밀도의 증가추이  
[출처 : NSIC Annual Meeting, 2002].

연도별 기록밀도의 증가추이와 주요 이정표들 〈그림 4〉에 표시하였다. 1990년 초 박막 인덕티브 헤드에서 MR (Magnetoresistive) 헤드로의 기술천이가 이루어지면서 기록밀도는 연평균 약 60%의 성장을 이루었다. 또한 매체의 경우도 입자형 매체에서 진공기술을 이용한 박막형 매체로 천이되기 시작하였다. 1990년과 1991년에 IBM과 Hitachi은 각각 MR 헤드와 CoCr 합금계 박막 디스크 매체를 응용하여 1~2Gbit/in<sup>2</sup>의 기록밀도 구현에 성공하였다. MR 헤드는 기록된 정보의 재생 측면에서 MR 재생센서를 사용함으로써 인덕티브 재생방식에 비해 큰 출력과 낮은 잡음특성을 얻을 수 있게 되었다. 재생출력전압은 Ohm의 법칙에 따라,  $V = JR(\Delta R/R)W$ 이며, 여기서 J는 전류밀도, R은 저항,  $\Delta R/R$ 은 MR 비, 그리고 W는 트랙폭이다. J, R, W는 설계 및 신뢰성 관점에서 크게 바꿀 수 있는 여지가 없으며, 따라서 MR 비가 높은 경우 출력면에서 유리하다. 또한 MR 헤드는 재생센서가 기록센서보다 폭이 좁기 때문에 헤드의 정렬도에 덜 민감하게 되었다. 이렇듯 재생과 기록이 분리된 헤드는 각각의 기능을 최적화하는 것을 가능케 해준다. 또한 MR 헤드는 헤드와 기록매체간의 상대속도의 감소에 덜 민감하고, 작은 속도에서도 큰 출력을 얻을 수 있기 때문에 각광을 받아왔다<sup>[3]</sup>. 1988년 다층박막구조의 재료계에서 양자역학 기반의 거대자기저항(GMR) 현



〈그림 3〉 자기기록의 원리를 설명하는 모식도.



<그림 5> IBM에서 제시한 1Tbit/in<sup>2</sup>급 사양 [출처: Ref. 5].

상이 발견된 이래, 1994년 Honeywell에서 자기장센서를, 1997년에는 IBM에서 GMR 현상을 응용한 스핀밸브(Spin-Valve, SV) 재생헤드의 개발에 성공하였다. GMR 재료(MR 비 약 5~10%)는 기존의 MR 재료(MR 비 약 2%)보다 수 배 높은 MR 비를 가지므로 출력전압을 더 높이는 것이 가능하다. 이러한 기술의 혁신에 힘입어 HDD의 기록밀도는 예측을 10년 가까이 단축하여 최근까지 연평균 100%의 획기적인 성장을 가져왔다.

2001년, Fujitsu는 106Gbit/in<sup>2</sup>(=750KBPI×142KTPI)의 기록밀도의 구현에 성공하였는데, 이 경우 비트폭은 34nm, 트랙폭은 179nm 정도이다. Seagate도 100Gbit/in<sup>2</sup>를 구현했다고 발표하였다. 100Gbit/in<sup>2</sup>는 1997년 초 S. Charap에 의해 당시 기술로는 40Gbit/in<sup>2</sup>가 자기기록의 한계점이라 발표했던 사실<sup>[6]</sup>을 무색하게 할 정도로 기술적인, 심리적인 돌파구라는 데 그 의의가 크다. 더 나아가 2002년 IBM의 R. Wood<sup>[6]</sup>와 Maxtor의 M. Mallery<sup>[7]</sup>는 보다 구체적인 기술사양을 제시하였다(<그림 5> 참조). 참고로 현재 상용화된 첨단 HDD 제품의 기록밀도는 60~80Gbit/in<sup>2</sup> 정도이며 (3.5인치 Desktop용 Disk 한 장에 약 80~110Gbyte 용량), 실험실 수준의 기록밀도 검증은 약 130~150Gbit/in<sup>2</sup> 정도이다. 박막공정의 도입, 신재료의 출현, 신호처리, 정밀기계구동, 서보(Servo) 제어와 같은 제 기술의 비약적인 발전 등에 힘입어, 1990년 초 연평균 60%, 그리고 1996년 이후 연평균 100%라는 비약적인 기록밀도 증가가 있었으나, 향후 5~7년 동안에는 물리적 한계 극복을 위한

핵심요소기술 확보의 어려움, 기술통합력의 문제, HDD 판가의 하락 등과 같은 복합적인 문제로 말미암아 연평균 30% 정도의 기록밀도 신장이 진행될 것이라는 예측이 지배적이다.

### III. 문제점과 극복방안

전술한 바와 같이 100Gbit/in<sup>2</sup>와 같은 고기록밀도의 구현은 헤드와 디스크의 재료 및 구조에 관한 끊임없는 기술혁신에 힘입은 바가 크다. 그러나 기존의 방식과 같이 공정을 개선하여 헤드의 크기를 줄이고, 매체의 결정립 크기를 줄여나가는 ‘Scaling Down’ 방식으로는 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 확보할 수 없게 되는 문제에 봉착하게 된다. 다음의 수식으로 표현되는 N. Bertram<sup>[8]</sup>의 해석에 의하면, 기록밀도의 증가에 따라(즉, 비트간격 B와 트랙폭 W의 감소에 따라) SNR은 감소하게 된다. SNR을 유지하기 위해서는 결국 결정립 크기 D, 매체의 두께 t, 및 매체의 자화도인 M<sub>s</sub>(또는 잔류자화인 M<sub>r</sub>)를 줄여야 하는 동시에, 이방성인 H<sub>k</sub>(또는 이에 상응하는 보자력인 H<sub>c</sub>)를 크게 해야 한다.

$$SNR = \frac{0.3\gamma B^2 W}{\alpha^2 D^3}$$

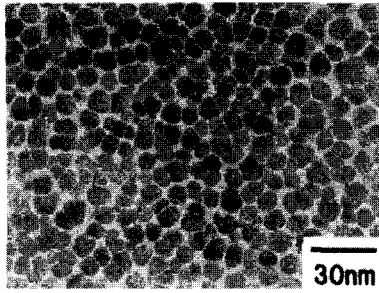
여기서,  $\gamma$ =코드 관련 상수, B=비트간격, W=재생 트랙폭,  $\alpha = a/D = 0.5 + 3.55(M_s/H_k) \ln(1 + 3t/D)$ , D=결정립 직경이며,  $\alpha$ 에서

$a$ =천이지수,  $M_s$ =포화자화,  $H_k$ =이방성 자기장, 및  $t$ :막두께이다. 기록의 단위인 한 개의 비트는 수 백여 개의 Co계 합금 결정립으로 구성되어 있다. 기록밀도 증가에 따른 SNR의 감소를 막기 위해서는 비트 내의 일정한 수의 결정립이 요구되기 때문에, 기록밀도 증가를 위해서는 결정립 크기의 감소가 필수적이다. 일례로 10 Gbit/in<sup>2</sup>급 매체는 12nm 크기의 결정립을, 100 Gbit/in<sup>2</sup>급은 9nm 크기의 결정립을 요구한다. 그러나 작아진 비트 내의 일정한 결정립을 포함시키기 위하여 결정립 크기를 감소시키면 매체가 강자성을 잃게 되는 초상자성(Superparamagnetism) 거동을 보이는 한계에 도달하게 된다. 초상자성거동은 자화의 방향이 열적 요동(Thermal Fluctuation)에 의해 불안정해져 자화방향이 자발적으로 반전되는 거동을 말한다. 만일 기록매체 내에 초상자성 거동이 나타나면 시간에 따라 기록된 정보는 열감쇄(Thermal Decay)에 의해 소실된다. 이러한 초상자성거동의 극복은 자기이방성 에너지 대 열에너지의 비인,  $K_u V/kT \approx 35$  정도면 극복 가능하다고 알려져 있다. 여기서  $K_u$ 는 자기이방성 계수,  $V$ 는 자성체의 부피,  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도를 뜻한다. 결국  $K_u$  값을 높여 상기한 식의 값을 만족시켜야 하며 이는 매체의 이방성  $H_k$ (또는 이에 상응하는 보자력인  $H_c$ )의 강화와 직결된다. 이러한 조건에 가장 근접한 물질로  $L_{10}$  규칙구조의 CoPt, FePt 같은 고  $K_u$  재료들에 대한 선행 연구가 진행 중이나, 이 재료들은 규칙구조를 얻기 위해 600~800°C의 고온 열처리가 필요한 데 열처리에 따른 표면조도의 증가를 방지할 수 있는 해법이나 증착장비의 개발이 현재로는 가시화되지 못하고 있다. 궁극적으로 과연 1Tbit/in<sup>2</sup>급 매체에 필요한 약 6nm 크기의 결정립 형성 자체가 스퍼터링 증착법과 같은 박막공정으로 가능한 지 확인되고 있지 않다. 초고기록밀도 매체의 구현 및 상용화를 이루기 위한 대안으로 불연속 매체(Discrete Media)를 활용하여 초상자성거동 발현을 지연시킬 수 있는 아이디어들이 제시되고 있다. 종래의 포토 리소그래피와 전식

각 등을 이용하는 반도체 공정에 의해 나노미터 크기의 자기비트를 패터닝 하는 방식은 기술적, 가격적으로 바람직하지 않아 보인다. 연식 리소그래피인 나노임프린트(Nano-Imprint) 방법 내지 화학적, 생물학적 방법으로 자기조립 매체(Self-Ordered Magnetic Array)를 만드는 방법들이 제시되고 있으나, 기록특성평가를 포함하여 디스크 형태의 자기기록매체로의 활용은 더 많은 기초연구가 진행되어야 한다.

과도기적으로 자기기록 방식의 변화가 대두되고 있다. 현재의 방식은 지난 40여년간 지속적으로 진보를 이룬 수평자기기록(Longitudinal Magnetic Recording) 방식이다. 즉 정보를 저장하고 있는 자기비트들의 자화방향이 기록매체인 디스크 면에 수평하게 배열해 있고, 비트와 비트 사이에서 발생하는 미소 누설자기장을 헤드가 감지하여 정보의 상태를 인식하는 방식이다. 진술한 바와 같이 수평기록에 의한 매체의 열적 요동 문제를 극복하기 위해, 25년 전 일본의 S.Iwasaki 등에 의해 그 개념이 제시된 수직자기기록(Perpendicular Magnetic Recording) 방식이 최근 다시 주목받고 있다. 수직기록 방식에서는 매체의 자화방향을 면에 수직으로 배열하여 자성층의 두께를 줄이지 않으면서 기록밀도를 높일 수 있도록 고안된 방법이다. 현재까지 연구의 주종을 이룬 것은 단자극(Single Pole) 헤드와 연자성 하지층(Soft Underlayer)가 있는 매체를 사용하는 기술이다. 2001년 11월 미국 Seattle시에서 개최된 Magnetism & Magnetic Materials 학회에서 수직자기기록과 관련한 페널토의가 있었는데, 미국 및 일본의 전문가들은 200Gbit/in<sup>2</sup> 부근부터 수직기록 방식이 본격화 될 것으로 전망하였다. Read-Rite는 올해 146Gbit/in<sup>2</sup>(=830KBPI×189KTPI)의 수직기록 가능성 검증에 성공하였다<sup>[9]</sup>. 수직기록과 관련하여 Fuji는 열처리 없이 상온에서  $D=7\text{nm}$ ,  $t=12\text{nm}$ ,  $K_u V/kT=80$ 인 CoPtCr-SiO<sub>2</sub> 매체(〈그림 6〉참조) 제조에 성공하여 산업계의 주목을 받고 있다<sup>[10]</sup>.

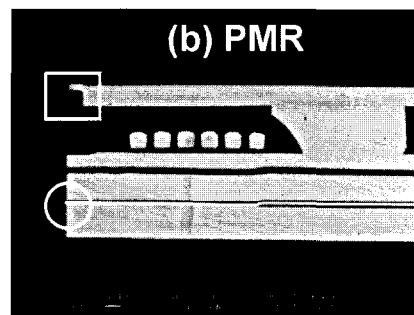
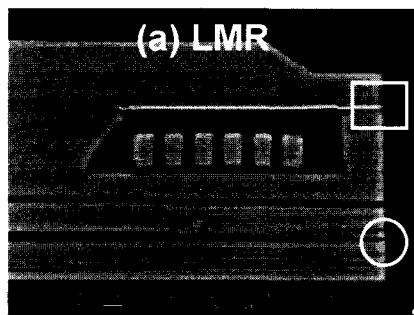
현재 HDD에서 주종을 이루고 있는 GMR 헤



〈그림 6〉 100 Gbit/in<sup>2</sup> 이상의 기록밀도 구현이 가능한 CoPtCr-SiO<sub>2</sub> 매체 [출처: Ref. 9].

드라 불리는 자기헤드는 기록헤드(Writer)와 재생헤드(Reader)의 조합이며 세라믹 기판 상에 박막공정으로 적층된다. 〈그림 7〉의 단면도에서 보듯 헤드는 복잡한 3차원 구조물로 리소그라피, 화학기계연마(CMP)를 포함하는 반도체 공정기술 및 고난도의 박막공정기술이 요구된다. 헤드를 제조하기 위한 일련의 박막공정을 거친 후에 기판은 헤드를 포함하는 Bar 형태로 절단 가공된다. 각 Bar는 기록자극(Pole)과 스핀밸브(SV) 센서의 설계 높이를 얻기 위해 Lapping 공정을 거친다. 각 헤드는 Bar로부터 분리되고 디스크 상에서 비행할 수 있도록 Suspension에 부착된다(오늘날의 헤드의 비행높이는 10nm 이하이다). 모든 공정 분야에서 만족할 만한 수율로 헤드를 제조하기 위해서는 매우 엄격한 공정 제어가 요구된다. 현재 재생헤드에 널리 쓰이는 스핀밸브(Spin-Valve, SV)계 GMR 재료는 두 층의 자성박막의 자화배열 상태(평행 또는 반

평행 상태)에 따라 유도되는 전기저항의 차이로 전압신호를 발생시킨다. 평행배열 시 저항이 낮고, 반평행배열 시 저항이 높아지는 데 이는 두 강자성층의 자화배열 상태에 따른 스핀전자의 산란 양상이 다르기 때문이다. 통상 두 자화층 중 한 자화층의 방향은 고정시키고(고정층, Pinned Layer), 나머지 자화층은 자기장에 따라 자유롭게 움직이도록(자유층, Free Layer) 설계한다. 기록밀도 증가에 따라, 즉 센서 폭의 감소에 따라 센서 동작의 안정성을 높일 수 있는 합성형 반강자성체 기반의 스핀밸브 GMR 센서가 개발되어 이미 헤드에 활용되고 있다. 이러한 센서는 자성층을 포함하여 각 층의 두께가 수 나노미터 정도인 10여 층의 다층박막으로 구성되어 있다. 또한, 스핀의 산란을 방지하는 경면효과(Specularity)를 증대하여 MR 비를 높일 수 있도록 나노산화층을 자성층에 삽입하는 연구가 시도되고 있다. 이와 병행하여 이밖에도 기존의 면수평(Current-In-Plane) 방식으로 흘러주던 전류를 면수직(Current-Perpendicular-to-Plane)하게 주입하여 재생 감도의 증가를 모색하는 기술에 관심이 모아지고 있다<sup>[11]</sup>. 정보재생 측면에서 수직 기록방식은 매체에서 발생하는 누설자기장이 세고 매체의 일부인 연자성 하지층의 영향으로 수평기록방식보다 유리하다. 따라서 기록밀도 증가 측면에서 단지 높은 MR 비를 얻는 데 주력하기 보다는 동적 작동범위가 넓고 공간분해능이 뛰어난 재생센서를 확보하는 것이 더 현실적인 과제이다.



〈그림 7〉 140 Gbit/in<sup>2</sup> 정도의 기록밀도 구현에 필요한 자기헤드의 구조: (a) 수평자기기록용 및 (b) 수직자기기록용(동그라미와 네모는 각각 Reader와 Writer를 표시한다) [출처: Ref. 8].

〈표 1〉 HDD 요소기술의 기술개발 로드맵.

| Areal Density (Gbits/in <sup>2</sup> ) | 1998                | 1999      | 2000                  | 2001                | 2002                           | 2003                                  | 2004   | 2005                                     | 2006   |
|--|---------------------|-----------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|--|--------|
| HDD Products                           | 5                   | 10        | 20                    | 40                  | 70                             | 100                                   | 200  | 500                                      |        |
| Lab Feasibility                        | 10                  | 20        | 40                    | 70                  | 100                            |                                       | 200  |  | 500    |
| Head                                   | Write               |           | Read                  |                     |                                | Write                                 |  | Read                                     |        |
|  | Ring Type           | Pole Trim | Stitching             | High B <sub>w</sub> | High Resistivity               | Short Yoke                            | Single-Pole Heat-Assisted Lamination               |  |        |
| Head                                   | Spin Valve (SV) GMR |           | Advanced GMR          |                     | CPP-GMR/TMR                    |                                       |  |  |        |
|  | G-Line Lithography  |           | I-line                |                     | Specularity (Nano Oxide Layer) |                                       | KrF Deep UV  | ArF                                      | EB/EUV |
| Disk                                   | Longitudinal CoCrX  |           | CoCrTaPt              |                     | AFC                            | Perpendicular CoPtCr-SiO <sub>2</sub> |  | Discrete media High K <sub>w</sub> films |        |
| H/D Interface                          | 1.2 mm Slider       |           |                       | 0.8 mm Slider       |                                |                                       | Near Contact                                       |  |        |
| Spacing (nm)                           | Micro-Texture       |           |                       | Super-smooth Disk   |                                |                                       |  |  |        |
|  | 15                  |           |                       | 10                  |                                | 6                                     |  | 3  |        |
| Signal Processing                      | MEEPRML+Parity      |           |                       |                     | Turbo Code                     |                                       | Woven Convolution PRML for Perpendicular Recording |  |        |
| Servo Mechanism                        | VCM                 |           | Fluid Dynamic Bearing |                     |                                | MEMS Microactuator                    |  |  |        |
|  |                     |           |                       | Dual Stage Actuator |                                | Magnetic Bearing                      |  | COS                                      |        |

수직기록 및 향후 초고기록밀도화에 따라 보다 문제가 되는 부분은 기록헤드 쪽이다. 우선적으로 인접한 트랙에서 발생하는 누설자기장의 영향에 따른 기록신호의 감쇄문제<sup>[12]</sup>를 해결하기 위해 자극 주위에 차폐(Shield) 구조를 붙여주는 방법이 효과적이다<sup>[7]</sup>. 또한 매체 보자력 증가에 상응하도록 기록헤드의 자기장 강화를 위해 포화 자화가 2 Tesla 이상인 자극 재료의 개발이 가속화되고 있다. 그러나 지금까지 알려진 천연금속계 자성재료로 2.45 Tesla 이상을 얻기가 어려우므로 레이저와 같은 광원을 이용하여 기록시 매체의 보자력을 낮추는 열보조 자기기록의 필요성이 대두되고 있다. 기록밀도의 증가와 동시에 기록주파수 또한 수 GHz 정도로 증가될 것인데, 이 정도에선 강자기 공명(Ferromagnetic Resonance) 문제가 발생하게 되어 감쇄계수가 큰 재료가 필요하게 된다. 그밖에 1 Tbit/in<sup>2</sup>급

의 헤드는 약 20 nm 내외의 폭을 요구하는 데, ITRS 2002년 판 반도체 리소그래피 로드맵을 보아도 20 nm 급 극자외선 리소그래피는 2015년 이후에나 상용화가 가능한 상태이다. 따라서 현시점에서 활용가능한 직접 전자빔을 이용한 헤드 가공법이 다시 주목받고 있는 데, 반도체와는 달리 자기헤드의 경우 기판상의 단위소자 집적도 자체가 큰 문제가 되지 않기 때문이다.

이밖에도 종합적으로 〈표 1〉에 HDD 핵심 요소기술의 연도별 주요 전개방향을 정리하였다.

#### IV. 맺음말

자기기록방식의 대표적인 저장장치인 HDD는 정보기록밀도의 비약적인 증가에 힘입어 PC로부

터 대용량 고속화가 필요한 서버(Server) 용 저장장치에 활용되고 있으며, 최근 PVR(Personal Video Recorder), Game 기기와 같은 A/V 정보가전 분야 및 초소형 휴대형 저장장치 분야에 응용범위를 확대하고 있다. 지금까지 HDD 기술에 있어서 기록밀도와 성능의 증가는 헤드, 매체와 같은 핵심부품기술의 발전과 맥을 같이 하였다. 양자역학에 기반을 둔 GMR이라는 나노기술이 재생헤드에 응용되고, 박막공학에 의해 각각 10nm 두께와 결정립 직경을 갖는 매체가 개발되어 100 Gbit/in<sup>2</sup>라는 고기록밀도를 구현할 수 있었다. 향후 10년 내 도래할 1 Tbit/in<sup>2</sup>급의 초고기록밀도 구현은 지금과는 다른 새로운 아이디어와 기술 패러다임의 변화를 요구하고 있다. 과연 진공증착기술로 4nm 크기의 균일한 결정립을 갖는 매체제작은 가능한지? 화학적, 생물학적 자기조립 기술이 대안이 될 수 있는지? 기록자극의 포화자화를 한계치인 2.7 Tesla까지 끌어 올릴 수 있는지? 3GHz급의 초고주파 대응이 가능한지? 아마도 기술의 Breakthrough는 다학제적, 기술융합적 사고와 새로운 과학적 개념에 바탕을 둔 보다 와해적인(Disruptive) 기술혁신에 의해 가능할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 고를 작성하기까지 많은 도움과 좋은 의견을 주신 삼성종합기술원 Storage Lab의 이병규 박사, 오훈상 박사, 그리고 SISA의 홍수열 박사께 감사드립니다.

### 참고 문헌

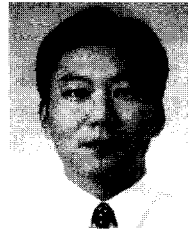
- [1] S. C. Esener et al., 'The Future of Data Storage Technology', ITRI WTEC Panel Report, 1998.
- [2] D. Reinsel, 'Worldwide Hard Disk Drive Forecast and Analysis 2001-2006', IDC, 2002.
- [3] NSIC Annual Meeting : The Future of Data storage, 2002
- [4] 김영근, 정인섭, 및 박태석, '거대자기저항 센서를 중심으로 본 고밀도 정보저장기용 기록헤드기술의 현황과 전망', 한국자기학회지 8 (2), 99~110, 1998.
- [5] S. H. Charap, P.-L. Lu, and Y. He, 'Thermal Stability of Recorded Information at High Densities', IEEE Transactions on Magnetics', 33 (1), 978~983, 1997.
- [6] R. W. Wood, J. Miles, and T. Olson, 'Recording Technologies for Terabit per Square Inch Systems', IEEE Transactions on Magnetics', 38 (4), 1711~1718, 2002.
- [7] M. Mallery, A. Torabi, and M. Benakli, 'One Terabit per Square Inch Perpendicular Recording Conceptual Design', IEEE Transactions on Magnetics', 38 (4), 1719~1724, 2002.
- [8] H. N. Bertram, H. Zhou, and R. Gustafson, 'Signal to Noise Ratio Scaling and Density Limit Estimate in Longitudinal Magnetic Recording', IEEE Transactions on Magnetics, 34 (4), 1845~1847, 1998.
- [9] F. Liu *et al.*, 'Perpendicular Recording Heads for Extremely High-Density Recording', IEEE Transactions on Magnetics, 39 (4), 1942~1948, 2003.
- [10] H. Uwazumi *et al.*, 'CoPtCr-SiO<sub>2</sub> Granular Media for High-Density Perpendicular Recording', IEEE Transactions on Magnetics, 39 (4), 1914~1918, 2003.
- [11] M. Takagishi *et al.*, 'The Applicability of CPP-GMR Heads for Magnetic Recording', IEEE Transactions on Magnetics, 38 (5), 2277~2282,



2002.

- [12] Y. K. Kim, S. Lee, and H. Lee, 'Design of Recessed Yoke Heads for Minimizing Adjacent Track Encroachment', IEEE Transactions on Magnetics, 36 (5) 2524-2526, 2000.
- [13] M. H. Kryder et. al., A Future Technology Roadmap for Magnetic Recording, Digests of The Magnetic Recording Conference, A-1, 2002.

## 저자 소개



김영근

1985년 2월 서울대학교 금속공학 학사, 1987년 2월 서울대학교 금속공학 석사, 1993년 5월 Massachusetts Institute of Technology 재료공학 박사, 1993년 6월~1997년 8월 : Quantum

Corporation, Sr. Design Engineer, 1996년 1월~1997년 6월 : University of Colorado, Lecturer, 1997년 9월~2000년 2월 : 삼성전기주식회사, 수석연구원, 2000년 3월~현재 : 고려대학교, 부교수, 2003년 10월~현재 : IEEE Seoul Section-Magnetics Society Chapter, Chair, 2002년 1월~현재 : IEEE Transactions on Magnetics, 편집위원, 2003년 9월~2004년 2월 : 삼성종합기술원, 객원연구원, <주관심 분야 : 박막재료공학(자성재료, 금속재료), 스핀나노기술(자기저항 센서, MRAM), 정보저장기술(고밀도 저장장치, 기록 및 재생)>