

자기기록매체의 현황과 전망

이택동

한국과학기술원 재료공학과

대전시 유성구 구성동 373-1

(1998년 1월 20일 받음)

I. 서 론

금년으로 자기기록방식이 덴마크의 V. Poulsen에 의해 발명된 지 100년이 되는데 이 시점에서 자기기록의 발달을 되돌아보고 현재의 기술을 평가한 뒤 앞으로의 전망을 조망하는 것은 매우 뜻깊은 일이라고 생각된다.

자기기록방식이 현재까지 널리 쓰이고 있는 이유는 단위 가격당 저장능력이 크다는 점과 기록 및 재생이 쉽고 또 지웠다 다시 기록(rewrite)할 수 있다는 장점 때문이다. 오늘날까지 쓰이고 있는 자기기록방식은 1930~1940년경에 현재 방식이 거의 완성되었다. 즉 이 기간 중에 링(ring)형 헤드, 자기분말도포매체, 교류바이어스법 등 자기기록의 3대 발명이 다 이루어졌고 그 뒤는 이 기술의 개선에 의해서 기록밀도 증가가 꾸준히 이루어졌다.

그러나 최근 반도체기술의 발달로 다른 대체기술들이 개발되면서 자기기록 방식을 대체하려는 연구가 많이 있었다. 예를 들면 반도체에서 EEPROM, EPROM, Ferroelectric RAM, 광기록방식, 광자기기록방식, 비플기록방식 등이 개발되어서 이중 일부는 이미 틈새시장(niche market)을 차지하고 있으나 이러한 도전이 있을 때마다 거의 100년이나 된 역사를 가진 자기기록방식은 더욱 비약적인 발전을 계속해서 아직도 정보기록 및 재생분야에서 독보적인 위치를 차지하고 있다. 가장 최근에서 괄목할 만한 발전을 한 것은 자기저항효과를 이용한 재생전용 magnetoresistive(MR) 헤드의 개발이다. 이에 관한 것은 다른 section에서 상세히 review할 것이다.

자기기록기술이 다른 대체기술에 비해서 가장 큰 장점을 가진 것은 기술적인 장점외에도 가격 경쟁력이다. 1950년대 초기제품은 25,400 \$ /Mbyte였으며 1980년대 후반에서는 10 \$ /Mbyte였고 현재 5 cent /Mbyte의 가격으로 기술의 발전에 따라 Mbyte당 가격은 계속적으로 떨어지고 있다. 물론 현재 DRAM 가격도 크게 떨어지

고 있지만 아직까지 자기 disk에 비해서 경쟁력이 없을 뿐 아니라 그 Mbyte당 가격 절하 폭이 반도체와 disk가 거의 비슷하기 때문에 가까운 장래에 반도체 비휘발성(nonvolatile) 메모리가 이러한 기록장치의 주류가 될 가능성은 없어 보인다.

현재 자기기록방식의 분류는 여러 가지가 있을 수 있으나 여기서는 편리에 따라서 disk drive 형태와 tape 형태의 2가지로 나누겠다. Disk drive 형태는 컴퓨터 등에 주로 쓰이기 때문에 다른 대체 기술로부터 가장 많은 도전을 받고 있으며 따라서 생존을 위해서 가장 많은 발전한 분야이다. 이 분야는 세계적으로 미국이 주도하고 있으며 컴퓨터 산업의 속성상 가장 많은 발전을 요구받고 있기 때문에 회사간 기술경쟁이 매우 치열하다. Tape 형태는 data backup용으로 쓰이는 것과 audio나 video용으로 쓰이는 것이 주류를 이루는데 지금까지는 다른 대체 기술의 위협이 없어서 비교적 발전 속도가 늦었다. 또한 tape 매체는 세계적으로 일본, 한국이 생산을 주도하고 있으며 특히 audio 및 video tape 분야는 가전기기의 life cycle 때문에 발전속도가 비교적 늦었다. 그러나 최근에는 digital video disk(DVD)의 개발로 큰 위협을 받고 있는 상황이다.

본 review는 이미 필자가 다른 학회지에 review한 것[1, 2]을 기초로 해서 최근의 동향을 파악하는데 주력했기 때문에 기초가 필요한 부분은 이것을 참조하기 바란다.

II. 고밀도 자기기록을 위한 매체의 조건

수평기록매체(longitudinal recording media)에서 고 기록 밀도를 위해서는 매체의 보자력이 크고 기록매체의 두께가 얇아야하며, 헤드와의 spacing loss를 줄이기 위해서 표면의 조도를 줄이는 것이 발전의 방향이다.

Digital 기록에서 고밀도 기록을 위해서는 bit 와 bit 사

이의 천이 (transition) 영역이 짧아져야 하는데 천이영역 길이가 만일 헤드의 자장 구배에 의해서 지배된다면 최소 길이는 다음 식으로 주어진다[3].

$$a_d = \sqrt{\frac{M_r \cdot \delta \cdot (d + \delta / 2)}{\pi H_c}} \quad (1)$$

여기서 M_r 은 잔류자화, δ 는 자성층 두께, d 는 헤드와 매체간의 거리, H_c 는 매체보자력이다. 따라서 고밀도화를 위해서는 보자력이 커야하고 M_r , δ , d 는 작아야 한다. 또 매체의 재생시에 최대 출력의 반가폭은 다음 식으로 주어진다[4].

$$PW_{50} = \sqrt{g^2 + 4(d+a)(d+a+\delta)} \quad (2)$$

여기서 a 는 식 (1)에서 구한 천이영역 길이이고, g 는 head gap이다.

고밀도기록을 위해서는 PW_{50} 가 작아야 하는데 이를 위해서는 g 가 작고 d , a , δ 가 모두 작아야 한다. 따라서 위에 언급한 것처럼 매체의 보자력이 크고 두께가 얇아져야 하며 또한 헤드와 매체간의 spacing이 줄어들어야 한다. 그러나 이렇게 될 경우에 재생출력이 크게 떨어지게 된다. 즉 재생출력은 $M_r \cdot \delta$ 에 비례하는데 M_r 도 점점 낮아지고 있고 δ 가 급격히 줄어들기 때문에 결국 고밀도 재생을 위해서는 재생헤드의 감도(sensitivity)가 좋아야한다. 이 때문에 MR 헤드가 개발되었다. 이의 개발로 기존의 inductive 헤드로 재생시에 $M_r \cdot \delta$ 가 약 3 memu/cm² 였으나 최근에는 0.8 memu/cm²로 급격하게 줄어들어도 재생전압은 크게 낮아지지 않았다. 그러나 감도가 높은 헤드를 쓸 경우에 S/N비는 더 나빠질 수 있다. 따라서 고밀도기록이 될수록 매체의 noise 문제는 점점 더 큰 문제로 대두된다. 왜냐하면 이미 MR 헤드에서도 1세대인 AMR 헤드는 MR비가 약 2%인데 비해서 최근 산업화된 2세대인 spin valve형 GMR 헤드는 MR비가 약 4% 정도 되기 때문에 헤드의 감도는 2배 증가했으며 따라서 $M_r \cdot \delta$ 를 현재의 절반으로 줄일 수 있기 때문에 더욱 고밀도 기록이 가능하게 되었다. 앞으로 MR비가 8% 이상 되는 GMR 헤드가 개발될 전망이어서 초고밀도 기록으로 갈수록 매체 noise문제는 점점 더 문제의 핵심으로 대두될 전망이다.

매체 noise 중에서 가장 큰 것이 transition noise이다. Transition noise를 줄이기 위해서는 다결정립 매체에서

는 결정립 크기가 작아야하고 또 결정립들간의 exchange coupling을 줄여야 한다. 결정립간의 exchange coupling을 줄이기 위해서는 이미 알려진 것처럼 자성체 결정립간의 거리를 일정거리 이상 유지하도록 증착하는 물리적 분리방법과 비자성 원자나 분자를 결정입계에 편석시켜서 자성체 결정립간의 exchange coupling을 감소시키는 화학적 분리방법이 대표적인 것이다. 화학적 분리방법에서도 2가지가 있는데 하나는 SiO₂와 같은 비자성체와 Co base의 자성체를 동시에 스퍼터해서 결정입계에 SiO₂ 등의 막으로 결정립을 분리해주는 방법과 CoCrTa와 같이 합금 타겟을 써서 스퍼터시 Cr 등을 결정입계에 편석시켜서 결정립을 분리시켜주는 방법 등이 있는데 산업적으로 포화자화값을 늘이기 위해서 후자를 쓴다.

다른 하나는 최근에 연구되고 있는 소위 "bicrystal" 조직을 가진 Co계 박막이다. Bicrystal이란 Cr(200) plane 위에 Co(11 $\bar{2}$ 0) plane이 heteroepitaxial 성장을 할 때 한 개의 Cr 결정립 위에 Co(11 $\bar{2}$ 0) 결정립이 2개 이상 핵을 생성하면서 성장하게 되면, Cr[1 $\bar{1}$ 0] 방향과 Co[0001] 방향이 평행하게 되고, 동시에 Cr[110] 방향과 Co[0001] 방향이 평행하게 Co 결정립이 성장할 수 있다. 이와 같은 한 개의 Cr 결정립 위에 2개 이상의 Co 결정립이 성장하면 c-축이 서로 90°를 이루는 Co subgrain이 된다. 이와 같은 것을 bicrystal이라 한다.

이러한 bicrystal이 생성되면 Co subgrain간의 결정입계는 거의 Cr 편석이 없고 이 Co subgrain으로 된 Co cluster와 다른 Cr 결정립 위에 성장하는 Co grain 혹은 cluster 사이의 결정입계에는 Cr 편석이 존재할 수 있다. 따라서 Co subgrain 내에 bicrystal 간에는 exchange coupling은 크지만 easy axis가 서로 90°이기 때문에 magnetostatic coupling은 약하게 될 것이다. 이러한 bicrystal 구조를 가진 매체는 micromagnetic simulation의 결과에 의하면 S* (보자력 각형비), S (각형비, Mr/Ms)가 크고 media noise도 낮을 것이라고 예측되었다[5]. 그 뒤 MgO 단결정 위에 Cr, CoCrPtTa를 증착시킨 시편에서도 media noise가 낮아졌다는 보고가 있었지만[6], 단결정 위에 생성되었기 때문에 방향에 따라서 출력 modulation이 심했다. 그 뒤 Chang [7] 등이 NiP 기판 위에 Cr(200) 면이 평행한 다결정을 만든 후 그 위에 성장하는 Co계 합금이 100% bicrystal 조직을 가진 CoCrPtTa 합금막이 되도록 제조하고 noise 측정을 해본 결과 선기록밀도가 증가할수록 noise가 극히 적게 증가하여 noise 특성이 훨씬 좋은 것으로 나타났다. 이것은 매우 흥미있는 결과로 앞으로 초고밀도 기록에서 noise 감소의 한 가지 지침

이 될 것이다.

현재까지 쓰이고 있는 noise 감소 방안은 앞서 언급한 Cr 등의 비자성 원소를 결정입계에 편식시키는 방법이다. 이 방법은 점점 더 결정립이 작아져야 하는 초고밀도 영역에서의 매체에서는 적용하기 힘들지 모른다. 따라서 bicrystal에 대한 연구는 앞으로 더욱 진행되어야 할 것이다.

Ⅲ. 초 고밀도 기록매체에서의 제한요소 (limiting factor)

앞으로 기록밀도가 앞서 언급한 것처럼 현재의 기술적 접근 방법에 기초를 두고 scaling factor에 의해서 dimension을 점점 더 줄여서 접근한다면 어느 정도 기록밀도까지 기록이 가능할까 하는 것이 하나의 흥미있는 사실이다. 현재의 예측으로는 2000년경에 10 Gbit/inch²의 기록밀도의 산업화가 가능하다고 생각되며 이때 매체 두께는 약 100 Å, Mr·δ는 0.3 memu/cm², 보자력은 약 3000~3500 Oe 정도 되며 flying height는 150 Å, 탄소층 두께는 70 Å으로 트랙밀도는 25 ktpi, 선기록밀도는 약 400 kbpj 정도로 예상된다[8]. 물론 여기까지 가는데도 write head의 재료도 Fe base의 Ms가 높은 재료가 개발되어야 하고, 보다 감도가 좋은 헤드가 개발되어야 하며 점점 더 심각한 tribology 문제도 해결되어야 할 것이다.

그러나 10 Gbit/inch² 이후의 전망은 아직은 불투명하다. 점점 고밀도화 될수록 결정립은 noise 때문에 작아져야 하는데 결정립이 작아질수록 superparamagnetic limit에 가까이 가서 결국 기록된 pattern이 열적 요동(thermal fluctuation)에 의해서 지워지기 때문이다. 이때 기준이 되는 superparamagnetic limit는 결정립이 자기적으로 완전히 고립되었을 때 KuV/kT (이때 Ku는 anisotropy energy) ≈ 25 [9]로 주어진다. S/N비가 30 dB 라고 할 때 coding 방법에 따라서 다르기는 하지만 10 Gbit/inch²의 범위에서 결정립 크기는 90~125 Å 정도 되어야 한다고 예측된다[10]. 90 Å의 결정립의 경우 결정립 한 개의 부피는 635 nm³ 정도 되며, 만약 CoCrPtTa 합금에서 비교적 크게 생각해서 Ku가 2×10^6 erg/cc 라면 $KuV/kT = 30$ 정도로 거의 superparamagnetic 영역에 가깝게 된다.

이러한 문제를 해결하는 방법은 매체의 Ku나 결정립간의 exchange coupling을 크게 하는 것이다. 그러나 자기적 exchange coupling은 noise 특성을 저해하기 때문에 초고기록밀도에서 이것을 기대하기는 어렵

다. 따라서 앞으로의 자기기록매체는 Ku가 큰 것을 써야 한다. 현재 Co의 Ku는 4.1×10^6 erg/cc이기 때문에 여기에 어떤 원소를 첨가해도 Ku는 감소하며 Pt가 첨가되면 Ku 감소가 적기 때문에 당분간 CoCrPt에 탄소층을 첨가한 자성층이 쓰일 것이다. 그러나 Charap와 Lu의 연구결과[11]에 의하면 $Ku = 4 \times 10^6$ erg/cc인 Co로 선기록밀도 400 kfcj를 기록할 때도 결정립 크기가 8 nm 이하이면 열적으로 불안정하게 된다고 한다. 이것을 참고하면 현재 방식을 이용하여 기록밀도를 10 Gbit/inch² 이상으로 기록하기 위해서는 선기록밀도보다 트랙밀도를 더 높이거나, 혹은 Ku가 Co보다 훨씬 큰 Sm이나 Nd계 혹은 Ba ferrite계 박막을 써야 할 것으로 생각된다. 또한 현재의 기록방식에 의하면 열적 안정성 면에서 선기록밀도 400 kfcj는 거의 기록한계이지만 트랙밀도를 늘이면 상당한 기록밀도 향상을 얻을 수 있다.

이러한 현재의 관점에서 보면 10 Gbit/inch² 이상에서 계속적으로 수평기록방식으로 발전하기 위해서는 상당한 새로운 기술이 도입되어야 할 것이다. 그중 하나는 소위 patterned media인데 이것은 photolithography 기술로 bit 주위를 etching시켜서 자기적으로 고립시켜서 하나의 bit를 single domain이 되도록 만드는 것으로, 이러한 방법을 사용하면 transition noise 문제를 근본적으로 제거할 수 있기 때문에 순수 Co를 매체로 쓸 수 있다. 이 방법도 역시 트랙밀도를 크게 키워서 bit 하나하나를 읽고 쓰는 system을 만들자는 것이다. 이렇게 하면 이론적으로 1 Tbits/inch²의 기록밀도가 가능하다. 다른 하나는 수직기록방식인데 기본적인 발상은 수직기록 특성상 고기록밀도에서 bit간의 반자계가 극히 적어서 보다 안정할 뿐 아니라 동등한 기록밀도에서 현재의 수평기록매체에서의 두께보다 3~5배 두꺼워도 가능하기 때문에 앞의 KuV/kT 식에서 V가 3~5배 커져서 열적 안정성이 우수하다는 점이다. 그러나 계산을 해보면 역시 현재의 트랙밀도대 선기록밀도의 비율을 유지한다는 가정 하에서는 30 Gbit/inch²에서 현재 수평기록매체의 10 Gbit/inch²와 비슷한 열적 안정성 문제가 대두되어 이 기술이 쓰일 수 있는 영역도 제한되어 있다. 따라서 현재로써는 30 Gbit/inch² 이후에는 patterned media가 한 가지 해결 방식이라고 생각된다. 그러나 이 경우 head와 tracking system에 있어서도 지금과는 상당히 다른 새로운 개념이 도입되어야 한다. Head의 경우는 현재의 MFM(magnetic force microscope)의 head와 비슷한 것이 될 수 있다.

IV. 데이터 저장용 하드디스크 드라이브 (hard disk drive)

Fig. 1은 IBM사에서 생산한 기종의 연도에 따른 기록 밀도를 나타낸 것이다. 그림으로부터 지난 40년간 기록 밀도가 100만배 이상 증가했다는 것을 알 수 있다. 1998년 3월에 발표한 2.5 inch 직경의 Travelstar 6GT는 최고 기록 밀도가 4.1 Gbit/inch²로 최고 선기록 밀도는 256.4 kbp/inch이고 트랙 밀도는 16 ktpi라고 한다. Fig. 1에서 기록 밀도의 증가를 보면 1991년까지는 매년 기록 밀도 증가율이 30% 정도였으며 1991년부터 현재까지는 매년 기록 밀도 증가율이 약 60%를 상회하고 있다. 이와 같은 기록 밀도의 급격한 증가는 MR head의 적용으로 가능하게 되었다. 즉 MR 헤드의 적용으로 여러 가지 개선 중에서 매체 관점에서는 가장 중요한 기록층 두께를 줄일 수 있었기 때문이다. 기존의 자기유도방식 재생헤드를 사용할 때는 헤드 sensitivity때문에 $Mr \cdot \delta$ (보자력 \times 기록층 두께)의 값으로 2 memu/cm² 정도 이상 되어야 하지만 보다 sensitive한 MR 헤드를 사용함으로써 $Mr \cdot \delta$ 의 값이 1 memu/cm² 이하에도 출력이 충분하기 때문에 결국 자성층 두께를 훨씬 줄일 수 있어서 고밀도 자기기록이 가능하게 되었다. 물론 그 외에도보자력의 향상, 결정립의 미세화, 매체 noise의 감소, flying height를 낮추기 위해서 texture 방법의 개선 (laser texture를 이용한 전용 take off, landing 영역 설정) 및 탄소 보호층의 두께 감소, 결정립 미세화 등이 매체분야에서 일어난 변화이다. Fig. 2는 연도에 따른 자성층의보자력 및 $Mr \cdot \delta$ 의 변화를 나타낸 것이다 [12]. 트랙 밀도 증가를 위해서 헤드의 폭 감소, tracking 방법의 개선 등을 통해서 1인치당 트랙 밀도(TPI)의 향상을 이루었다. 고기록 밀도를 위해서 선

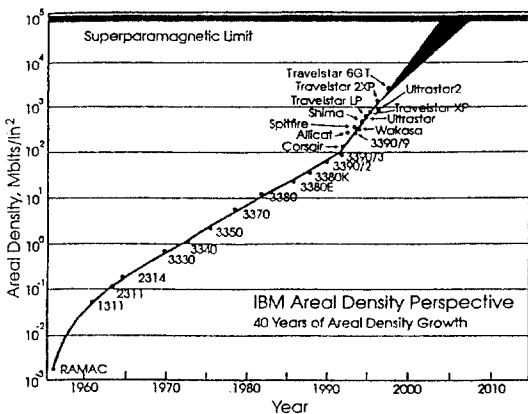


Fig. 1. Areal density perspective of IBM disk drives.

기록 밀도와 트랙 밀도가 동시에 커져야 하는데 Fig. 3은 현재 쓰이는 디스크의 선기록 밀도와 트랙 밀도의 비가 연도에 따라서 어떻게 변화했는가 하는 것을 나타낸다 [13].

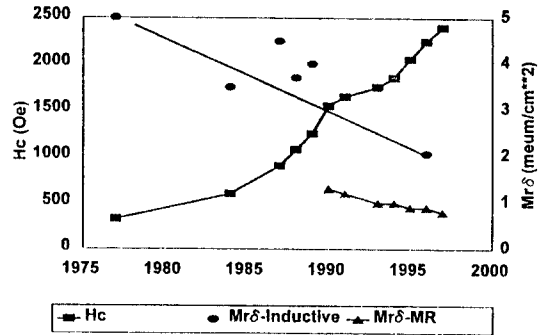


Fig. 2. Change of Hc and Mr · δ with year [12].

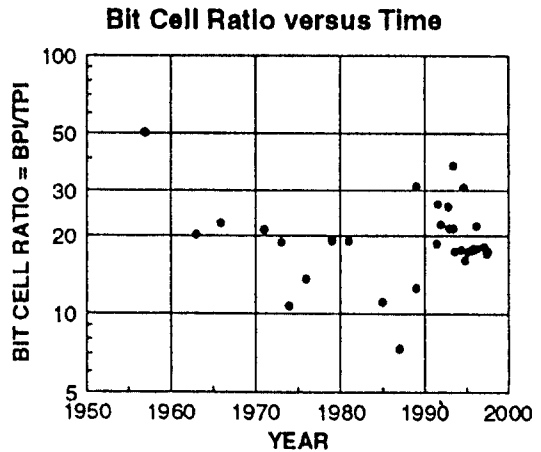


Fig. 3. Ratio of linear to track density of IBM products [13].

위에서 매년 기록 밀도가 상승되는 원인을 살펴보면 기록 밀도 향상을 위해서 점점 더 기록단위의 dimension을 줄이는 것이다. 따라서 앞으로의 기록 밀도 향상을 위해서도 scaling factor를 점점 더 감소시키는 것이 경향일 것이라는 것은 자명한 일이다. 매체에서 자성층 관점에서 본다면보자력은 점점 더 커지고, 두께는 더욱 감소해야 하며 noise를 줄이기 위해서 결정립은 더욱 미세화해야 하고 결정립간의 자기적 decoupling은 더욱 커져야 하며 표면 조도는 더욱 낮아져야 한다.

자성층의 종류를 보면 초기에는 전기도금방식의 CoP를 사용했으나보자력이 900 Oe 정도였다. 그후 스퍼터링 방식으로 박막을 제조하기 시작하여 CoPt, CoNi, CoCr 2원계에서 CoCrTa, CoNiCr, CoPtNi의 3원계를 썼고

1988년경 부터는 CoCrTa와 CoCrPt의 3원계가 주류를 이루었다. 그리고 1995년경 부터는 CoCrPtTa의 4원계가 쓰이기 시작했고 1997년에는 일본의 Fujitsu사에서 CoCrTaPtNb의 5원계를 쓰기 시작했다고 한다. 이와 같은 발전의 배경은 주로 보자력 향상과 noise 특성 향상을 위해서이다. CoCrPt도 보자력이 3000 Oe 이상 높일 수 있지만 noise 특성 향상을 위해서 Ta를 첨가하거나 또는 Nb를 첨가한다. CoCrPt 합금에서 Ta나 Nb를 첨가하면 Cr 편석이 촉진되어 결정립 간의 자기적 decoupling이 강화되어서 천이 noise가 감소하게 된다.

Noise를 줄이기 위한 방안은 크게 결정립 크기를 줄이고 결정립간의 자기적 interaction을 줄이는 것이다. 결정립 크기를 줄이는 방법은 크게 3가지 방법이 있다. 먼저 진공도가 높은 10^{-9} torr 정도에서 스파터함으로써 Cr의 결정립 크기를 줄여서 그 위에 epitaxy로 성장하는 자성층의 결정립 크기를 줄이는 방법[14], Cr 하지층의 두께를 줄여서 결정립 크기를 줄이는 방법, Cr 대신 lattice parameter가 비슷하고 BCC 구조의 NiAl[15]이나, CoTi[16] 등의 금속간 화합물을 써서 결정립 크기를 줄이는 방법 등이 있다. 고진공을 쓰는 것은 현재의 생산 기기로는 어렵기 때문에 일반적으로 Cr 두께를 줄이는 것이 보통이며, ordered structure 구조를 가진 intermetallic compound를 쓸 때는 이들의 생성열(ΔH_f)이 크기 때문에 작은 결정립을 만들 수 있어서 동일 두께에서 Cr 보다 결정립 크기를 줄이는 데는 유리하다. 또 결정립간의 interaction을 줄이기 위해서는 합금 조성을 적당히 선택하고 스파터 조건도 조절함으로써 Cr의 편석을 촉진시켜서 결정립간의 자기적 interaction을 줄이는 방법과 자성층을 성막할 때 자성층 사이에 10 Å 정도의 Cr 층을 쌓으므로써 다층화시켜서 interaction을 줄이는 방법 등이 있다. 후자의 방법은 Cr 삽입층을 여러 층을 쌓으면 interaction이 감소해서 줄기는 하지만 $Mr \cdot \delta$ 가 점점 더 작게 되면서 현재 자성층 두께가 200 Å 이하로 되기 때문에 Cr 층을 1층 내지 2층 이상 쌓기는 어렵다. CoCr계 합금에서 Cr 편석은 실험적으로 증명되어 있으나, 그 양상은 스파터 조건이나 조성에 따라서 달라지게 되는데 이러한 편석 원인에 대해서는 몇 가지 추측이 있을 뿐 아직 밝혀져 있는 정설은 없다.

결정립 크기가 줄어들 때의 문제점은 앞 절에서 설명한 것처럼 여기에도 한계가 있고 이것이 하나의 문제점이기도 하다. 다른 하나는 최근 발표[17]된 것처럼 switching speed에 따른 보자력 증가 문제이다. Particulate media의 결과가 thin film 경우에도 적용

된다면 1 GHz의 frequency 이상에서 보자력이 증가할 것이지만 실제 write에서는 이보다 훨씬 낮은 수백 MHz 영역에서 쓰기 때문에 현재 상태로 큰 문제는 없는 것으로 보인다.

V. Tape 매체

Tape 매체에서도 역시 고기록밀도화를 위해서는 자성층 두께를 줄이고, 자성입자 크기를 작게 하며, 표면의 평탄도를 향상시키고 자성입자의 고보자력화가 발전의 방향이다. 현재 tape 매체의 발전은 크게 2 가지로 나눌 수 있다. 하나는 자성입자를 도포하는 도포 매체와 다른 하나는 금속층을 증착시키는 금속박막매체이다.

먼저 도포매체의 경우를 보면 보자력 300 Oe 근처의 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 입자에서 출발해서 보자력 600 Oe 정도 되는 Co-doped $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 나 Cr_2O_3 를 거쳐 보자력이 2000 Oe 이상의 금속분말이나 Ba ferrite 분말이 쓰이고 있다. 또한 이들 입자의 크기를 보면 극히 작아져서 Ba ferrite의 경우 hexagonal plate 형태인데 직경이 약 0.05 μm 이고 aspect ratio는 3~5 정도 되며, Fe 금속분말은 장축이 0.2~0.016 μm 이고 aspect ratio는 5~10 정도 된다. 특히 이들 금속입자들의 응집을 방지하기 위해서 표면에 보호층을 코팅해야 하는데 최근 한 연구에 의하면[18] H_3BO_3 나 Ln_2O_3 ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Y}, \text{Sm}$) 을 코팅하면 αFe particle의 보자력이 2000 Oe 이상으로 커진다고 한다. 이러한 작은 입자는 코팅시 분산하는 것이 큰 문제인데 이 문제는 해결된 것 같다. 그러나 역시 고밀도기록을 위해서는 자성층의 두께를 얇도록 코팅해야 하는데 이것이 상당히 어려운 일이었다. 그런데 1992년경 일본 Fuji Photo Film사에서 PET film 위에 직경 350 Å의 구상의 비자성 TiO_2 와 자성층을 동시에 코팅하는 소위 "double layer web tensioned die coater"로 코팅하는 방법을 개발함으로써 가능하게 되었는데 최근에는 자성층 두께가 약 두께 0.1 μm 정도까지 얇아지고 두께의 편차도 2%가 되었으며 표면 조도도 2 nm 까지 줄일 수 있었다고 한다[19]. 이것은 상품명으로 ATOMM (Advanced Super Thin-Layer and High Output Metal Media)라고 하며 소위 Hi-8 metal evaporated tape 대응으로, 또 W-VHS 용으로 이미 사용되고 있으며 고밀도 floppy disk 용으로도 적용된다고 한다. 특히 도포 coating 방식이기 때문에 현재의 상용 금속 증착박막과 특성은 비슷하면서도 가격이 싸기 때문에 상당한 시장점유율을 가진 것으로 평가된다. 이들은 Ba ferrite의 입자도 역시 비슷한 방법으로 코팅하는

기술을 개발했다. Fig. 4는 자성층 두께에 따른 PW_{50} 와 D_{50} (출력이 반감되는 기록밀도)를 표시한 것이다. ME라고 표시한 것은 현재 상용 Hi-8 evaporated tape를 표시한다. 이것은 자성층 두께에 따른 자기기록 밀도의 변화를 잘 나타내고 있다. 이것은 결국 두께 감소에 따라서 반자계가 작아져서 생기는 현상이다. 최근에는 이들이 advanced-ATOMM이라는 제품을 개발했는데 이것 역시 표 1에 나타난 것처럼 이중 코팅으로 하지층 입자를 구상의 TiO_2 대신 침상의 αFe_2O_3 를 사용하였으며 자성입자 크기를 줄이고 표면조도를 줄였으며 자성층 두께도 $0.13 \mu m$ 로 줄였다고 한다. 이렇게 제조한 advanced-ATOMM tape는 기존의 ATOMM보다 출력이 약 3 dB 정도 높다고 한다. 이와 같은 높은 출력은 높은 보자력과 자성막의 두께가 얇아져서 반자계가 작아지고 표면이 더욱 평탄해져서 spacing loss가 적어지며 입자의 크기가 작아져서 particle length loss가 작아졌기 때문으로 해석하고 있다. 뿐만 아니라 이들은 금속분말 입자의 포화자화가 커서 상당한 반자계가 존재할 것으로 추정하면서 따라서 앞으로의 개선의 여지가 상당히 있다고 주장한다.

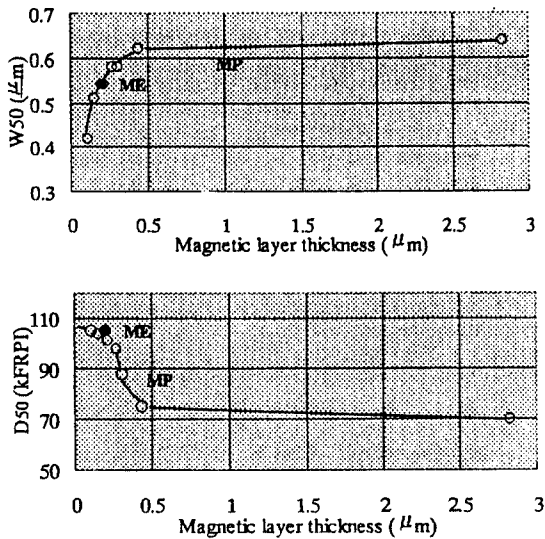


Fig. 4. Dependence of PW_{50} and D_{50} on magnetic layer thickness⁽¹⁹⁾.

Co-(Ni)-O를 증착한 소위 ME tape는 8 mm VCR 용으로 1989년 일본에서 도입되었고 그 뒤에 소위 “NT”, 즉 non digital tracking audio 테이프 레코드에도 적용되었다. 현재 상용화되어 있는 Hi-8ME tape에 이어서 이

를 개선한 AD-ME tape가 customer digital video system용으로 곧 시판될 것이라는 예고가 있다[20]. ME tape는 polymer tape를 큰 냉각드럼에 접착시켜서 증착실 내에서 이동시키면서 증착시킬 때에 분위기는 산소로 하고 증착각도를 조절함으로써 결정립들이 바나나 형태로 비스듬하게 성장하게 제조한다. 다음 표 1은 ME tape의 종류, 조성 및 자기적 특성을 나타낸 것이다. 일반적으로 video tape의 경우에 base film으로 PET를 쓰는데 비해서 NT의 경우는 보통 p-aramid를 쓰는데 이것은 cassette 크기 때문에 보다 얇은 polymer film을 써야하기 때문이다.

표 1. ME tape의 종류, 조성 및 자기특성[20]

	Hi-8 ME	NT	AD-ME
Base film	PET	p-aramid	PET
Magnetic layer	Co-Ni-O (single)	Co-Ni-O (double)	Co-O (double)
Protective layer	n/a	n/a	carbon
보자력(Oe)	1050	1100	1400
잔류자화(G)	3700	3900	4600
각형성	0.75	0.75	0.79

표 1에서 보면 “Hi-8” tape은 Co-Ni-O의 단층으로 되어 있으나 NT 및 AD-ME tape는 2층막으로 되어있다. AD-ME tape의 경우에는 동일한 방향으로 비스듬하게 2회 증착했으며 NT의 경우는 audio cassette tape와 같이 정방향과 역방향으로 같은 특성을 가져야 하기 때문에 한 쪽 방향으로 먼저 증착하고 반대방향으로 다시 증착하여 윗층과 아래층 자성막의 두께는 1:2로 유지한다고 한다 (Fig. 5 참조).

표 2는 이들 각 tape의 noise 및 C/N비를 기존 tape들과 비교한 것이다.

표 2. 각 tape들의 noise level 및 C/N비[20]

측정파장 $\lambda = 0.8 \mu m$

	8 mm-MP	Hi-8 MP	Hi-8 ME	AD-ME
Output (dB)	-6.4	-2.1	0	+4.5
Noise level (dB)	-0.3	-0.4	0	+0.2
C/N (dB)	-6.1	-1.7	0	+4.3

참 고 문 헌

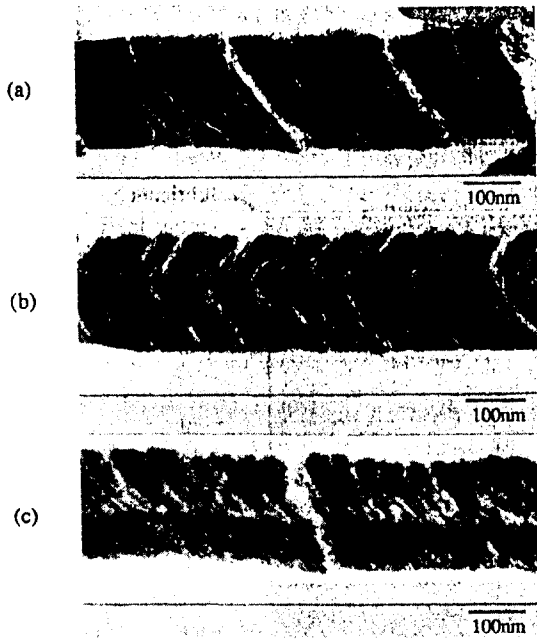


Fig. 5. Cross-Section TEM images of each ME tapes⁽³¹⁾
 (a) Hi-8ME (b) NT (c) AD-ME

AD-ME tape의 출력이 증가한 것은 자성특성이 개선 되었을 뿐만 아니라 표면 산소함량을 줄여서 헤드와 닿는 표면 근처의 산화층의 두께를 줄여서 가능했다. 그러나 내마모성을 향상시키기 위해서 탄소층을 코팅해야하는 단점도 있다. 사용과장이 짧아지면(고밀도기록) 더욱 표면 산화층 함량이 줄어들어야 할 것이다.

자성층 두께는 약 200 nm 정도 된다고 하는데 보자력은 산소함량을 증가시키면 증가하지만 포화자화가 감소하기 때문에 출력이 떨어진다. 이를 개선하기 위해서 전체 두께를 동일하게 유지하면서도 층수를 더 많이 4층까지 증착시키면 보자력은 약 2000 Oe까지 증가한다고 한다. 이렇게 하면 각형성도 향상되며 출력도 증가한다. 이러한 증착 tape도 역시 동일하게 scaling factor를 더욱 줄임으로써 더욱 고밀도화로 발전할 여지를 가지고있는 것으로 판단된다.

끝으로 tape 재료분야의 또하나의 흐름은 분말 coating tape에서 여러가지 solvent를 다량 사용하는데 이것이 환경문제를 유발하기 때문에 선진국에서는 water based solvent를 이용한 coating 기술을 개발 중이며 우리나라도 여기에 대비한 연구를 해야할 것으로 생각된다.

[1] 이택동, 대한 금속학회 회보, 2, 20 (1989).
 [2] 이택동, 대한 금속학회 회보, 10, 373 (1997).
 [3] V. A. J. Maller and B. K. Middleton :IEEE, conf. proc. 26, 137 (1973).
 [4] B. K. Middleton :IEEE Trans. Magn. MAG-2, 225 (1996).
 [5] J. G. Zhu, X. G. Ye, and T. C. Arnoldussen : IEEE Trans. Magn. 29, 324 (1993).
 [6] M. Futamoto, M. Suzuki, N. Inaba, A. Nakamura and Y. Honda :IEEE Trans. Magn. 30, 3975 (1994).
 [7] J. J. K Chang, Q. Peng, Q. Chen, Z. Lin, E. Yen, G. Chen, H. Bertram and R. Sinclair : IEEE Trans. Magn. 33, 885 (1997).
 [8] 예를 들면. D. E. Speliotis :J. of Magn. Society of Japan. 21, No. S2, 119 (1997).
 [9] B. D. Cullity :Introduction to magnetic materials : p414, Addison-Wesley Publishing Co. 1972.
 [10] M. H. Kryder, W. Messner and L. R. Carley : J. Appl. Phys. 79, 4485 (1996).
 [11] P-L Lu, and S. H. Charap :IEEE Trans. Magn. 30, 4230 (1994).
 [12] K. E. Johnson :Diskon USA 1997, 자료집.
 [13] D. A. Thompson :J. of Magn. Society of Japan. 21, No. S2. 9 (1997).
 [14] M. Takahashi, A. Kikuchi and J. Nakai : IEEE Trans. Magn. 33 2983 (1997).
 [15] L. L. Lee, D. E. Laughlin and D. N. Lambeth :IEEE Trans. Magn. 30, 3951 (1994).
 [16] S. Y. Hong, T. D. Lee, K. H. Shin :J. of Magn. Society of Japan, 21, No. S2, 553 (1997).
 [17] L. He, W. D. Dolye, L. Varga, H. Fujiwara, P. J. Flanders :J. of Mag. Mat. & Magnetism :155, 6 (1996).
 [18] N. Sugita, M. Maekawa, Y. Ohta, K. Okinaka, and N. Nagai :IEEE Trans. Magn. 31, 2854 (1995).
 [19] S. Saitoh, H. Inaba and A. Kashiwagi :IEEE Trans. Magn. 31, 2859 (1995).
 [20] T. Kawana, S. Onodera and T. Samoto :IEEE Trans. Magn. 31, 2865 (1995).