

## 고성능 자기헤드와 Fe계 연자성박막



안동훈  
LG전자 디스플레이연구소

### 1. 서론

고도 정보화 산업사회 및 멀티미디어 시대의 도래에 따라 대용량, 고밀도 정보기록의 필요성이 대두되고 있으며, 이러한 필요성에 부응하는 고성능의 정보기록기기 및 기술의 발달이 급속히 진행되고 있다.

정보의 기록과 재생은 기술적인 원리를 기준으로는 자기기록, 광기록, 광자기기록 등으로 분류할 수 있으며 사용분야를 기준으로서는 A/V기기용과 정보기록용, 즉 컴퓨터 보조 메모리로서의 응용이 있다. 광기록은 높은 기록밀도와 기록된 정보의 가반성(可搬性) 때문에 차세대의 기록기술로 기대되고 있다. CD, CD-ROM 등은 이미 널리 사용되고 있고 DVD-ROM은 보급단계에 있다. 그러나 아직은 자기테이프, 플로피디스크, 하드디스크 등의 자기기록 매체가 정보기록, 재생의 주류로 되고 있다. 또한 광기록은 광자기디스크와 상변이 디스

크의 경우 소거/재기록이 가능하지만 실용상으로는 전환한바와 같이 CD Family(CD, CD-ROM, Video-CD etc.) 및 DVD-ROM을 중심으로 하는 재생 전용 광디스크가 주류이며 본격적인 멀티미디어 시대의 도래가 되더라도 자기기록 매체는 계속적으로 광디스크와 공존하며 상호보완의 역할을 하게 될 전망이다.

자기기록은 수평기록방식과 수직기록방식이 있으며 현재 사용되고 있는 대부분의 자기기록은 수평기록 방식을 이용하고 있다. 원리적으로 수평기록보다 기록밀도가 훨씬 높은 수직기록 방식의 적용을 위한 많은 연구가 진행되고 있으나 수평기록의 기록밀도도 비약적으로 증가되고 있어 최근에는 1-2 Gb/in<sup>2</sup>이상의 기록밀도가<sup>1,2,3)</sup> 기술적으로 달성되게 되었으며 10 Gb/in<sup>2</sup> 기록밀도의 가능성도 제시되었다.<sup>4)</sup> 이러한 기록밀도는 실용화기준으로 볼 때 광기록 밀도를 넘어선 수치로 기존의 자기기록밀도의 한계를 갠 기술적 진보이다.<sup>5)</sup> 이러한 높은 기록밀도를 달성하기 위해서는 기록매체와 자기헤드의 고성능화, 시스템, 특히 기구적인 부분의 고정밀화 그리고 고능률 부호화 등의 데이터 압축기술이 필수적으로 따라 주어야 한다.

고밀도 기록을 위해서는 기록매체의 고보자력화가 필수적이며 이러한 기록매체에 기록을 하기 위해서는 자기헤드의 고성능화가 필요하게 되었다. 자기헤드는 기

존의 bulk 타입 페라이트 헤드에서 헤드 갭(Gap)부에 연자성 특성이 우수한 자성박막을 형성한 MIG (Metal-In-Gap) 헤드, core 부분을 자성금속과 유전체로 적층화시킨 적층(Lamination)헤드 또는 박막헤드 등으로 변화되고 있다. 이러한 고성능 헤드는 사용되는 금속자성박막의 특성에 따라 헤드의 성능이 좌우되고 있다.

금속 자성박막으로는 sendust, permalloy 또는 Co계 비정질합금이 주로 사용되어 왔으나 최근에는 이들 재료보다 포화자속밀도 값이 큰 Fe계 미결정 박막에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 FeZrN 계<sup>6,7,8,9,10,11)</sup>, FeTaN 계<sup>12,13,14,15,16)</sup>, FeTaC 계<sup>17,18)</sup>, FeHfC 계<sup>19)</sup>에 대해서는 많은 연구 결과가 발표되고 있으나 아직은 공정조건과 연자기특성 및 미세조직과의 상관관계가 명확하지 않은 상태이다.

본고에서는 자기기록의 원리 및 자기헤드기술의 추세에 대해 설명을 하고 고성능 헤드용 자성박막으로서 기존의 sendust, 아몰퍼스 합금보다 포화자속밀도 값이 높고 연자기특성이 우수한 Fe-M-X 계 미결정 연자성박막 연구에 대한 기술적 소개를 통해 본연구에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다.

### 2. 이론적배경 및 기술추세

#### 2.1. 자기기록의 원리

자기 기록의 원리는 자기헤드에서 나오는 신호자계에 의해 자화된 패턴을 일종의 영구자석인 자기기록매체에 기록을 하게 된다.

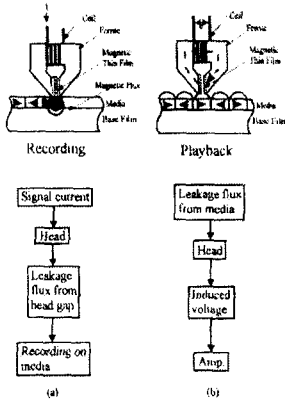


Fig.1. Basic concept of magnetic recording/playback  
(a) Recording process  
(b) Playback process.

또한 자화된 매체에서 나오는 자속(magnetic flux)의 시간에 따른 변화에 의해 유기되는 전압을 증폭하여, 기록된 신호를 읽어 내는 것이 재생과정이다. 그림 1에 자기테이프에 기록·재생이 되는 과정을 나타내었다. 즉

기록과정은 헤드에 가해진 신호 전류에 의해 유기된 자장이 헤드의 공극 (air gap)에서 누설이 되어 인접한 자기테이프를 자화시키게 되며 이때 신호는 테이프 상에 정렬된 자구(磁區 : magnetic domain) 형태로 남게 된다. 자기테이프는 영구자석이므로 이 기록된 자구패턴으로부터 항상 누설자속(leakage flux)이 나오게 되며 헤드와 테이프의 상대적인 운동에 의하여 누설자속의 시간에 따른 변화에 해당되는 전압이 유기되게 된다. 이 유기된 전압은 Faraday 법칙에 의해, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = -n \frac{d\psi}{dt} = -n \cdot \psi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t = -n \cdot \psi_m \cdot 2\pi f \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

여기서

- $n$  : 헤드에 감긴 코일의 수
- $\frac{d\psi}{dt}$  : 매체로부터 나오는 누설 자속의 시간에 따른 변화
- $\psi_m$  : 매체로부터 나오는 자속의 최대치
- $\omega$  :  $2\pi f$

- $f$  : 신호 주파수
- $\lambda$  : 기록과장
- $x$  : 매체길이 방향의 위치 ( $x = vt$ )
- $v$  : 헤드/매체 상대 속도

이러한 자기기록에 필요한 기록매체는 기록된 정보의 안정성을 위해서는 매체의 보자력( $H_c$ )이 커야되며 이러한 매체에 자화반전을 통해 기록을 하기 위해서는 헤드 재료의 포화자속밀도( $B_s$ )값이 큰 것이 요구된다. 또한 기록된 미세한 신호를 재생하기 위해서는 헤드재료의 투자율(특히 초 투자율)이 높은 것이 필요하다.

기록밀도와 재생속도를 높이기 위해서는 고주파 기록을 할 필요가 있으며, 고주파기록을 하게 되면 기록된 비트(bit)의 단위 길이가 짧아지게 된다. 실제로 기록되는 파장은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

여기서  $\lambda$  : 기록 과장

$f$  : 기록 주파수

$v$  : 헤드/매체상대 속도

를 나타낸다.(즉 헤드/매체간의 상대속도를 빨리하게 되면 같은 기록 주파수라도 기록 과장이 길

Table 1. Requirements for magnetic head materials

요구조건	자기기록에 대한 영향	조건
포화자속밀도가 클 것	고보자력 테이프에 기록이 가능	Ferrite : ~4.5kG Metal film : 10KG-15kG
실효투자율이 클 것 (특히 고주파에서)	재생시의 헤드효율 증가	Ferrite : ~500, Metal film : >1000(5MHz)
보자력이 작을 것	Hysteresis loss 감소 대자(帶磁)에 의한 노이즈 감소	<1 Oe
전기비저항이 클 것	eddy current loss 감소에 의한 헤드 효율 증가 (고주파투자율증가)	Ferrite : $10^7 \mu\Omega\cdot m$ Metal film : $\sim 1 \mu\Omega\cdot m$
자왜가 작을 것	기계적 가공/마찰에 의한 자기 특성 열화 방지	$\lambda : 10^0 \sim 10^1$
내마모성이 클 것	매체와의 접촉 안전성 확보	2000hr 이상 주행
가공성이 좋을 것	정밀 가공성(특히 Track가공) 확보	$\pm 1 \mu m$ 이내 기계가공
열적 안정성	유리점합공정시 자기특성 열화 방지	MIG Head : 500~600°C Ferrite Head : 700~750°C
내식성	사용환경에 따른 기록 특성 열화 방지	포화자화 변화 10% 이내

어지게 된다.)

그림 2에는 기록밀도와 헤드/매체간의 상관 관계를 나타내었다. 고밀도 기록이 되어 기록된 비트(즉, 자구)의 단위 길이가 짧아지면, 수평기록의 경우 자구의 자화방향 길이에 비해 두께 방향의 길이가 상대적으로 길어지는 결과가 되어 자구 내부의 반자계(demagnetizing field)가 커지게 된다. 이에 따라 기록된 자구에서 나오는 자속의 양이 감소되고 또한 각 자구간의 경계가 불균일해져서 노이즈가 증가되는 문제가 발생된다. 이때 매체의 자성층 두께를 얇게 하면 반자계 효과를 줄일 수 있으나 자성층 두

께가 너무 얇아지면 단위체적에서 나오는 자속의 절대량이 적어지게 된다. 이 문제는 매체의 보자력을 높여 해결할 수 있다. VCR에 사용되는 테이프의 예를 들면, VHS테이프의 경우 600-700 Oe정도인 것에 비해 8mm VCR에 사용되는 금속증착(ME)테이프 또는 금속분말(MP)테이프의 보자력은 1000-1500 Oe에 달한다. 이러한 높은 보자력을 갖는 매체에 기록을 하기 위해서는 헤드의 포화자속밀도 값이 충분히 높을 필요가 생긴다. 보통은 매체 보자력의 5배<sup>20)</sup>에서 10배까지의 포화자속밀도 값이 헤드재료로서 요구되고 있다.

0~600℃가열)에서의 자기특성의 유지이다. 헤드의 구조 측면에서 살펴보면, HDD용 slider 헤드의 경우, 기록밀도의 증가에 따라 Monolithic, Composite, MIG, 박막 헤드 등으로, 사용되는 헤드 구조도 변형되어 왔다. 수년 전까지는 Composite, MIG, 박막 헤드가 시장을 삼분하였으나 최근에는 MIG 타입 헤드와 박막 헤드가 급격히 증가되고 있으며 재생전용의 MR(magneto resistive) 헤드채용에 의해 기록밀도는 비약적인 발전을 하고 있다. VCR용 헤드의 경우 VHS방식에는 단결정Ferrite를 이용한 bulk 타입 헤드가 사용되어 왔으나 S-VHS, 8mm, Hi-8mm, Digital VCR 등의 고화질 기기용에는 MIG, 적층타입 헤드가 사용되고 있다. 그림 3에 VCR용으로 쓰이고 있는 대표적 헤드의 형상을 나타내었다. 현재, VHS방식 VCR에 가장 많이 사용되고 있는 단결정 Mn-Zn Ferrite는 결정방위의 적절한 선택을 통해 우수한 마모특성과 자기특성을 갖게 할 수 있으나 포화자속밀도 값이 4500 Gauss전후로 고보자력 매체에 기록은 불가능한 단점이 있다.

MIG 헤드는 갭 부위에 자기특성이 우수한 금속 자성박막을 성막시켜 고보자력매체에 사용이 가능한 헤드로서, 새로운 자성박

## 2.2 고성능 자기헤드의 구조 및 재료

전 절에서 언급한 바와 같이 기록밀도를 높이기 위해서는 높은 보자력을 갖는 매체를 사용하게 되고 이러한 매체에 대응될 수 있는 자기헤드 재료는 높은 포화자속밀도 값과 사용주파수 대역에서 높은 초투자율을 갖는 것이 중요하다. 자기헤드재료로서 요구되는 특성을 표 1에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯 헤드용 재료로서 가장 중요한 것은 우수한 연자기특성의 확보와 헤드제조공정에서 필수적인 유리접합공정(MIG 헤드의 경우 약 50

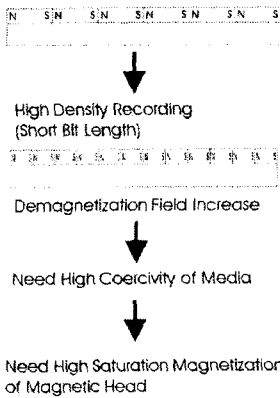


Fig. 2. Requirements of media and head for high density recording.

Table 2. The materials for video head.

Head Type	Core Material	Saturation Magnetization Bs(kG)	Applications
Ferrite Head(bulk type)	Single crystal Mn-Zn Ferrite	4~5	VHS(S-VHS)
MIG Head	Sendust	~10	S-VHS 8mm Hi-8mm D-VCR etc.
	Amorphous alloy (Co/Zr/Nb etc.)	~8	
	Fe based nano-crystalline film	13~16	
Lamination Head	Sendust/SiO <sub>2</sub>	~10	S-VHS, Broadcasting system
	CoNbZr/CoNbZrN	~13	
	FeTaN/SiO <sub>2</sub>	~16	

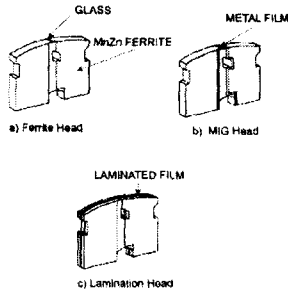


Fig. 3. Various magnetic head for video application.

막의 연구가 활발히 진행되고 있다. 표 2에는 각 헤드에 사용되는 대표적인 재료와 자기특성 및 적용 시스템을 나타내었다. MIG 헤드는 기존의 Ferrite 헤드의 제조 공정을 거의 그대로 적용할 수 있어 제조원가 측면의 장점이 있으며 특성도 현재 사용되고 있는 Video 기기의 포맷을 충분히 만족시키고 있으며 보다 특성이 좋은 자성박막을 개발하여 채용함으로써 기기의 성능을 높일 수가 있다. 한편 적층헤드는 다음과 같은 장점이 있어 차세대 헤드로 주목받고 있다. 즉,

- ① Tape 와 마찰에 의한 rubbing noise(기계적 변형 및 stress 에 의한 자기특성 열화에 기인되는 노이즈)가 있는 Ferrite 를 사용하지 않아 신호 품질이 좋다.
- ②적층막으로만 자로(磁路)를 형성함으로써 인덕턴스를 낮게 할 수 있어 고주파기록에 유리하다.
- ③Track을 기계가공에 의하지 않고 박막공정으로 형성함으로써 협(狹) track제작이 가능하다.
- ④기판재료의 경도를 높임으로써 내마모성을 개선할 수 있다.

그러나 적층헤드는 제조가격이 높고 적층막의 이방성제어가 어려운 문제가 남아있다. 또한 최

근 MIG 헤드의 특성이 민생용 digital VCR에 사용되는 주파수 대역인 20MHz 근처까지는 거의 적층헤드 이상에 도달하고 있어 보다 높은 주파수를 사용하는 방송용이 아닌 민생용에 있어서는 주로 MIG 타입 헤드가 사용될 전망이다. MIG 헤드에 가장 많이 사용되는 자성박막재료로서는  $Fe_{85}Al_{5.4}Si_{9.6}$ (wt.%)의 조성으로 대표되는 sendust합금이 있다. Sendust는 연자기특성과 내식성, 내마모성이 좋고 포화자속밀도가 10 kG 정도로 높아 보자력이 높은 매탈 테이프 대응 헤드로서 많이 사용되고 있다. 그러나 최근에는 매체의 보자력이 1500 Oe 이상으로 더욱 높아지는 경향이 있어, 헤드코어 측면에서는 보다 높은 포화자속밀도값을 갖고 고주파 투자율이 높은 새로운 재료에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 요구에 부응하여 연구가 되고 있는 재료중 대표적인 것이 Fe계 미결정박막이다.

### 3. Fe계 미결정 박막

#### 3.1. Fe-N계 연자성 재료의 연구 배경

Fe 계 연자성 재료는 Fe-Si 계 규소 강판, sendust 합금 등의 고전적인 재료로부터 최근에는 보다 포화자속밀도가 크고 연자성 특성이 좋은 Fe계 비정질 합금(리본) 및 박막까지 발전하게 되었다. 특히 최근에는 자기 헤드 재료로서 관심을 끌고 있는 Fe-N 계 박막이 많은 연구의 대상이 되고 있다. Fe-N 계 박막의 자기 특성에 대한 연구는 1972년 T.K Kim과 M. Takahashi<sup>21)</sup>에 의해 최초로 수행되었다. 이 연구에서는 질소분위기에서 성장된 Fe 박막의 포화자속밀도 값이 2.58T로 측정되어

순 Fe의 2.2T보다 17% 이상 큰 값을 나타내어 당시에는 소위 "거대자화(giant magnetic moment) 현상"으로서 많은 관심의 대상이 되었다. 이때 얻어진 박막은 Fe와  $Fe_{16}N_2$ 의 미결정으로 형성된 다결정 박막으로서, 막 평균의 포화자속밀도 값과  $Fe_{16}N_2$ 의 체적 분율로부터  $Fe_{16}N_2$ 의 포화자속밀도가 2.83T(2250emu/cc)인 것을 추측하였다. 이 값은 강자성 합금에 있어 원자당 (3d+4s) 전자수에 대한 합금들의 포화자속밀도 의존성을 나타내는 Slater-Pauling곡선으로부터 예측되는 값보다 훨씬 큰 값을 갖고 있다.

T. K Kim과 M. Takahashi의 연구 이후로 sputter, CVD등 여러가지 성장법을 이용하여  $Fe_{16}N_2$  상을 얻으려는 많은 시도가<sup>22,23,24)</sup> 있었으나  $Fe_{16}N_2$ 가 불안정한 준안정상이므로 보다 안정한  $Fe_4N$ ,  $Fe_3N$  등의 철질화물상으로 분해되어 버려 높은 포화자속밀도값을 갖는 단일상의  $Fe_{16}N_2$  화합물을 얻는 것이 곤란하였다. 그러나, 1989년 M. Komuro<sup>25)</sup>등과 Y. Konozo<sup>26)</sup>등은  $Fe_{16}N_2$ 의 격자상수 5.72Å 과 거의 같은 격자상수를 갖는 InGaAs (001) 단결정 기판을 이용하여 MBE (Molecular Beam Epitaxy)법으로 단결정  $Fe_{16}N_2$  epitaxial 막을 얻어 포화자속밀도 값이 2.8- 3.0T에 이르는 것을 확인하였다. 또한 Matsuoka<sup>27)</sup>등은 ECR sputtering 법을 이용하여 GaAs (100)/Fe(110) 기판 상에서 포화자속밀도가 최대 2.65T에 달하는  $FeN_x$  상을 얻을 수 있었다. 질화철 자성 재료는 위에서 언급한  $Fe_{16}N_2$  박막을 포함하여 다음과 같은 3 가지 분야로 연구가 진행되고 있다.

- ①  $Fe_{16}N_2$ 박막 : 거대자화 값을 갖는 특성을 이용한 연자성 재료

로의 응용연구

②  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$  : 높은 Curie 온도와 높은 일축이방성을 갖는 영구 자석 재료에 관한 연구<sup>28)</sup>

③ Fe-M-X(M = Zr, Hf 등의 IVB족 원소 또는 Ta, Nb 등의 VB족 원소, X = N, C, B etc.) : 미세 결정립 효과에 기인되는 연자기 특성을 이용한 자기 헤드에의 응용연구.

본 논문에서는 상기 ③번의 Fe-M-X계에 대한 연자기 특성 출현 기구에 대해 연구를 수행하였으며, 공정조건에 따른 자기특성과 미세구조와의 상관관계를 조사하여 고성능 헤드에의 적용 가능성을 연구하였다.

### 3.2. 미세 결정화와 연자기특성

일반적으로 결정립 크기가 작아지면 보자력은 증가되는 것으로 알려져 있다.<sup>29)</sup> 그러나 결정립 크기가 어느 한계 크기 이하로 극히 미세화 되면 오히려 보자력이 감소되어 우수한 연자기 특성을 나타내게 된다. 그림 4에 결정립 크기와 보자력과의 관계를 나타내었다.<sup>30)</sup> 즉, 결정립이 어떤 크기 이상에서는 보자력은 결정립의  $D^{-1}$ 에 비례하며 결정립이 아주 미세화 되면  $D^6$ 에 비례하게 된다.

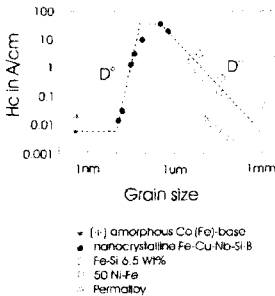


Fig. 4. Grain size and coercivity for various soft magnetic metallic alloys<sup>30)</sup>.

미세 결정립과 연자기 특성에 대한 이론적 고찰은 Hoffmann의 ripple theory<sup>31,32,33,34)</sup>와 Alben<sup>35)</sup>, Herzer<sup>36,37)</sup>의 random anisotropy model에 의해 설명이 된다. M. Takahashi<sup>38)</sup> 등은 Fe-N계에 박막에 대해 ripple theory가 잘 적용된다는 것을 확인하였다. random anisotropy theory는 비정질 형태를 모델로 검토되었으나 Herzer 등이 미세 결정합금에 적용하였다. 결정립의 크기가 극히 미세화 되면 각 결정립간의 자기결합 에너지 (magnetic coupling energy)에 의해 실효자기이방성 (effective magnetic anisotropy)이 감소됨으로 연자기특성이 출현되는 것으로 알려져 있다.

강자성 물질의 스핀간에는 강한 교환상호작용이 있어 스핀의 방향이 거의 한 방향으로 정렬된 상태로 회전이 일어나는 결합영역이 생기게 된다. 이 영역을 자기결합영역(or 강자성교환길이 = ferromagnetic exchange length)이라고 부르며  $L_{ex}$ 로 표시한다. 이것은 실효 결정자기이방성 정수 ( $K_{eff}$ =effective magnetocrystalline anisotropy)와 교환 stiffness 정수 A로부터

$$L_{ex} = \sqrt{A / K_{eff}}$$

로 표현될 수 있다.

결정립 크기 D가 이 자기결합 영역  $L_{ex}$ 보다 작은 경우, 보자력과 결정립 크기의 관계는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 결정립이 아주 작은 경우 교환 상호작용은 상당히 커져서 자기 모멘트를 평행하게 정렬시키게 하며 따라서 각 결정립의 자화용이축을 따라 정렬되는 것을 방해하게 되어 결과적으로 실효 이방성은 몇 개의 결정립을 통해 평균화 되어

버려 결국은 그 크기가 감소하게 된다.

단위길이가  $L_{ex}$ 로 이루어진 입방체의 체적  $L_{ex}^3$ 을 생각하면 이 단위체적 내에 있는 결정립의 수는

$$N = (L_{ex} / D)^3$$

로 표시될 수 있다.

각 결정립이 random하게 배향하고 있다면 이 영역내의 실효결정자기이방성 정수는

$$K_{eff} = \frac{K_1}{\sqrt{N}} = K_1 \left( \frac{D}{L_{ex}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

으로 표현될 수 있다.

상기식들 간의 관계에 의해

$$K_{eff} = \frac{K_1^4}{A^3} D^6$$

로 표시된다.

자화가 coherent spin rotation<sup>40)</sup>에 의해 일어난다면

$$H_c \propto \frac{K_{eff}}{M_s}$$

$$\mu_i \propto \frac{M_s^2}{\mu_o K_{eff}}$$

로 표현되므로

$$H_c \propto \frac{K_1^4 D^6}{M_s A^3}$$

$$\mu_i \propto \frac{M_s^2 A^3}{\mu_o K_1^4 D^6}$$

의 관계를 갖게 된다.

즉, 결정립의 크기가 자기결합 영역  $L_{ex}$ 보다 작은 경우는 보자력은 결정립 크기 D의 6승에 비례하게 되며 투자율은 D의 6승에 반비례하게 된다. 또한 결정립의 크기가 자벽두께 ( $\delta = \pi L_{ex}$ ) 보다 클 때에는 자화과정이 결정립계의 자벽고착 효과

에 의해 지배된다는 사실로부터<sup>29)</sup> 결정립 크기와 보자력 또는 투자율의 관계는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$H_c \propto \frac{\sqrt{A K_1}}{M_s D}$$

$$\mu_i \propto \frac{M_s^2 D}{\mu_o \sqrt{A K_1}}$$

즉, 결정립 크기가 어느 이상 크기로 되면 보자력은 결정립에 대해  $D^{-1}$ 에 비례하게 된다.

$L_{ex}$ 의 크기는  $K_1$ ,  $A$  등의 재료 상수가 잘 알려져 있는 Fe-20 at%Si합금의 경우  $K_1=8 \text{ kJ/m}^3$ ,  $A=10^{-11} \text{ J/m}$  인 것을 이용하면,  $L_{ex}=35\text{nm}$  정도로 계산되며 이것은 FeCuNbSiB 초미세 비정질 합금의 실험치와 잘 일치하고 있음을 Herzer<sup>30)</sup>가 증명하였다.

#### 4. Fe계 미결정 연자성 박막의 연구동향

연자기 특성을 얻기 위하여 결정립을 미세화 시키는 방법에는 재료를 다층화 시키는 방법, 성막 상태에서 미세 결정화 시키는 방법, 열처리에 의해 비정질상으로부터 미세화 시키는 방법 등이 있다. 본 절에서는 미세 결정화를 시키는 방법과 최근까지의 연

구동향에 대해 설명한다.

##### 1) 미세 결정화 방법

① 적층화에 의한 미세결정화 적층화에 의한 고주파에서의 와전류손실(eddy current loss)의 감소는 잘 알려져 있는 방법이다. 즉, 와전류손실에 의한 skin depth 이하로 자성층을 절연층에 의해 분리시킴으로 고주파에서의 투자율을 개선시킬 수 있다. 그러나 최근에는 이러한 고전적인 방법보다는 각 층의 두께를 적절히 조절하여 조성변조막을 얻음으로 자성층 간의 정자결합(靜磁結合)을 일으켜 연자기특성에 유리한 자구구조를 만들거나 또는 결정립을 미세화 시켜 연자기 특성을 개선시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>41)51)</sup>

다층화에 의한 결정립 또는 조직의 미세화는 다음과 같이 설명되어진다. 즉, 박막이 성장되는 초기에는 미세결정립으로 되어 있더라도 박막이 두꺼워짐에 따라 결정립이 점차 커져서 막 전체적으로 불균일한 조직이 형성되어 자기특성이 열화된다. 이것은 막을 적층화 시킴으로, 결정립이 커져서 불균일한 주상(columnar)조직이 되는 것을 방지할 수 있다.

N. Kumasaka<sup>41)</sup> 등의 Fe-Si/

Ni-Fe, Fe-Si/SiO<sub>2</sub> 적층막이 결정립 미세화의 대표적인 연구이다. 이 연구에서 Fe-6.5%Si 박막을 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al, Mo 등의 비자성 박막 또는 Ni, Fe, Ni-20% Fe(permalloy)등의 자성박막으로 적층화시켜, 일례로 FeSi(1000 Å)/FeNi(30 Å)의 경우 Bs=18.5 kG, Hc=0.5Oe,  $\mu'$  (5MHz)=2000의 좋은 연자기특성을 얻을 수 있었다.

적층박막은 자성막과 중간막의 종류, 두께 등의 선택이 중요한 변수이며 경계면의 균일성, 성막 온도 등이 자기특성을 좌우하는 경우가 많다.

또한 적층화 시킴으로 고온 안정성을 얻을 수 있는 효과도 자기헤드의 응용에 중요한 효과로 생각된다.<sup>52)</sup> 표 3에는 대표적인 적층막의 자기특성에 대한 연구 결과를 나타내었다.

②미결정화 원소의 첨가에 의한 방법

Fe-N 또는 Fe-C에 제3원소(Zr, Ti, Nb, Ta, Hf etc.)을 첨가하여 성막 초기부터 미결정화 된 박막을 얻는 방법 즉, Fe와 고용도가 작은 원소를 박막화시켜 과포화 고용체를 만들면 격자왜가 일어나서 결정격자가 불안정해져 결정이 크게 성장하지 못하는 것으로 생각된다.<sup>53)</sup>

Table 3. Some examples of reported magnetic properties of multilayer film systems.

Multilayer system	Hc(Oe)	Bs(kG)	$\mu'$ (at 5MHz)	Reference
Fe-6.5%Si(1000 Å)/FeNi(30 Å)	0.5	18.5	2000	(41)
Fe-10%C(950 Å)/Ni-19%Fe(50 Å)	1	21	3000	(42)
Fe(100 Å)/Ni(20 Å)	1	19.6	-	(43)
Fe(100 Å)/Co(5 Å)	1.5	21	-	(44)
Fe-3.4%Si/SiO <sub>2</sub>	2	17	-	(45)
Fe <sub>96.6</sub> Y <sub>3.4</sub> (500 Å)/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (40 Å)	1	17.5	3000	(46)
FeN(22 Å)/AlN(11 Å)	1	18.5	800	(47)
Fe(70 Å)/SiO <sub>2</sub> (25 Å)	0.3	15.5	4300	(48)
Fe-N(300 Å)/Si-N(50 Å)	0.6	15.1	-	(49)
FeN(50 Å)/FeBN(100 Å)	0.2	16.2	>1000	(50)
Fe(100 Å)/Fe <sub>73.3</sub> Cr <sub>6.7</sub> B <sub>20</sub> (30 Å)	0.1~0.2	19	3000~6000 (10MHz)	(51)

Table 4. The magnetic properties of Fe-M-X nanocrystalline Film.

Systems	Composition	Hc(Oe)	B(kG)	$\mu'$	Reference
FeZrN	Fe <sub>90</sub> Zr <sub>10</sub> +P <sub>N2</sub> 5%	~0.1	17.5	-	(6)
	FeZr <sub>9.0</sub> N <sub>7.5</sub>	-	-	>2000 (5MHz)	(7)
	Fe <sub>76</sub> Zr <sub>6</sub> N <sub>18</sub>	-	15.9	>3000 (5MHz)	(8)
	Fe <sub>80</sub> Zr <sub>8</sub> N <sub>12</sub>	~1	16	>3000 (5MHz)	(9)
	FeZr <sub>0.4-1.6</sub> N	<1	~20	-	(10)
	Fe <sub>81.5</sub> Zr <sub>10.8</sub> N <sub>7.7</sub>	0.2	17	7000 (100KHz)	(11)
FeTaN	FeTa <sub>10.5-14.5</sub> N <sub>8-13</sub>	<0.5	14~17	3000 (20MHz)	(12)
	FeTa <sub>1.6</sub> N	~1	19	1700~2300 (1MHz)	(13)
	FeTaNO	<0.3	19	3500 (1MHz)	(14)
	FeTa <sub>10.5</sub> N <sub>13</sub>	~1	-	~3000 (10MHz)	(15)
	(Fe <sub>90</sub> Ta <sub>10</sub> )-N <sub>13</sub>	~0.1	-	-	(16)
FeTaC	Fe <sub>79.4</sub> Ta <sub>9.5</sub> -C <sub>11.1</sub>	~0.1	15.4	~5000	(17)
	Fe <sub>78</sub> Ta <sub>10</sub> C <sub>11</sub>	~0.1	17	-	(18)
FeZrC	Fe <sub>83.3</sub> Zr <sub>6.8</sub> C <sub>9.9</sub>	3~4	17.1	780 (1MHz)	(17)
	Fe <sub>81.0</sub> Zr <sub>7.1</sub> -C <sub>11.9</sub>	~0.5	16.1	3200 (1MHz)	(19)
FeHfC	Fe <sub>79.8</sub> Hf <sub>7.3</sub> -C <sub>12.9</sub>	0.1~0.2	16.6	3670 (1MHz)	(19)

③비정질로 부터의 미세결정화 성막 후 비정질 상태에서 열처리 과정을 통해 미세결정을 얻는 방법으로, Fe결정립 주위에 질화물 또는 탄화물을 석출시키면 결정립 성장이 억제되어 내열성이 향상된다. 비정질상 형성을 위해 상기 ②번 방법보다 첨가원소의 양이 많아 포화자속밀도 값은 떨어진다.

#### 2) 미세결정 Fe박막의 연구현황

최근 Fe-N 계에서 가장 의미 있는 연구는 Takahashi<sup>38,39,58)</sup> 등의 Fe-N 계와 Fe-Si-N 계 박막의 연구이다. 그들은 조직의 구조분석과 동적미분자화율(dynamic differential susceptibility)의 측정에 의해, 높은 초투자율을 갖는 Fe-Si-N 박막은  $\alpha$ -Fe의 (110)면 배향이 되어 있으며 bulk  $\alpha$ -Fe보다 팽창된 격자상수를 갖고 있음을 알아내었다. 낮은 보자력은 결정립 미세화 효과 뿐 아니라 침입형으로 들어간

N원자에 의한 tetragonal deformation에 의해 (110)면의 총자기 이방성 (total magnetic anisotropy)의 감소에 의한 것임을 주장하였다.

최근의 연구에 대해 Fe-N 계와 Fe-M-X 계로 나누어 설명하면 다음과 같다.

#### ① Fe-N 박막

Terada<sup>54)</sup> 등은 ion beam sputtering을 이용하여  $\alpha''$ -Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> 상을 얻으려고 시도하였으나  $\alpha$ -Fe,  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N,  $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N,  $\xi$ -Fe<sub>2</sub>N의 혼합상을 얻었다. 이들 결정구조는 기판온도, N<sub>2</sub>분압, ion가속전압 등에 의해 변하게 된다. Bs = 24 kG, Hc = ~1 Oe의 값을 확인하였다.

Nagai<sup>55)</sup> 등은 dual ion beam sputtering에 의해 Bs = 22 kG, Hc = 0.3 Oe,  $\mu'$  = 5000의 박막을 얻을 수 있었다. 질소 ion의 bombarding에 의해 결정성을 감소시키고 질소를 박막에 혼입

시킴으로 연자성특성을 얻을 수 있음을 연구하였다. 여기서는 단지  $\alpha$ -Fe상만 확인되었다.

Kijima<sup>56)</sup> 등은 RF sputtering에 의해 Hc = 1 Oe정도의 박막을 얻었으며 Fe<sub>3</sub>N과 Fe<sub>4</sub>N을 포함한  $\alpha$ -Fe상을 얻을 수 있었다. 그들은  $\alpha$ -Fe(110)회절 피크의 반가폭으로부터 질소첨가에 의해 결정립이 600Å에서 150~200Å까지 미세화됨을 확인하였다. Fe-N 박막은 높은 포화자속밀도값을 나타내고 있지만 온도가 상승하면 보다 안정한 FeNx 철질화물로 분해되어 자기헤드에의 적용은 아직 어려운 상황이며 가열문제가 비교적 없는 박막헤드에의 적용 가능성이 검토되고 있다<sup>57)</sup>.

#### ② Fe-M-X계 미세결정박막

Fe-N박막의 열적 안정성을 확보하기 위해 M원소로는 IVB족 원소인 Zr, Hf등이나 VB족 원소인 Ta, Nb등을 첨가하고 X원소

로는 C, N등을 첨가하여 M원소가 M nitride 또는 M carbide 형태로 결합하여  $\alpha$ -Fe 결정립계에 석출되면 고온까지 (500~600°C) 연자기특성을 유지 할 수 있어 자기헤드로의 응용이 가능하게 된다. M원소는 N 또는 C와 결합하여 질화물 또는 탄화물을 안정되게 형성할 수 있는 원소로서 Fe에 고용이 적게되는 원소가 그 효과가 좋은 것으로 생각되어진다.

Nakanishi<sup>3)</sup> 등은 Fe-M-N계에서 M원소로서 Hf, Zr, Ta, Nb를 선택하여 연자기 특성에 대해 연구하였다. 연구결과를 요약하면, Zr, Hf계에 있어서는 N/M의 비율이 1~2 정도 되는 조성에서 포화자왜  $\lambda_s$ 가  $10^{-6}$  정도이며 부호가 정에서 부로 변화되고, 550°C 열처리 조건에서  $H_c < 1$  Oe,  $B_s = 16$  kG,  $\mu(5\text{MHz}) = 3000$ 의 좋은 연자기특성을 얻을 수 있었다. Nb계에서는 특성이 나오는 범위가 좁고  $H_c$ 도 1 Oe 이상으로 Hf, Zr계에 비해 좋지 않다. Ta계는 자기특성은 Zr, Hf계와 비슷하나 조성범위가 좁고 자왜가 정인 영역에서 연자기 특성이 나오는 것으로 보고되었다. Zr, Hf이 가장 넓은 영역에서 자기특성이 우수한 것을 제시하였다.

표 4에는 여러가지 Fe-M-X계 미결정박막의 자기특성에 대해 나타내었다.

그림 5에는 질화물 또는 탄화물의 석출이  $\alpha$ -Fe결정을 미세화시키는 개념을 나타내고 있다. 즉, N 또는 C는 Fe보다 Ta, Zr 등과 용이하게 결합하여 질화물 또는 탄화물로서 Fe의 결정립계 근처에 석출되어 Fe결정립의 성장을 억제할 수 있다. 또한 석출되는 위치는 주로 Fe결정의 삼중점 부근으로 알려져 있으며, 따라서 Fe결정립 간에는 exchange

coupling을 할 수 있는 충분한 접촉면적이 유지될 수 있는 것으로 생각되고 있다.

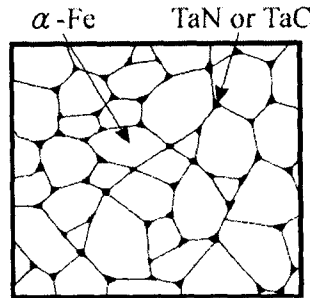


Fig.5 Precipitation of nitride or carbide at  $\alpha$ -Fe grain boundary.

## 5. 결 론

Fe-M-X계 미결정박막은 고평화자속밀도, 저보자력 및 높은 고주파투자율을 갖는 등의 연자기 특성이 우수하여 고성능 자기헤드 재료로 많은 연구가 수행되고 있다. 연구는 주로 박막의 성막조건과 합금조성에 따른 박막의 자기특성 및 미세조직을 조사하고 양자간의 상관 관계를 밝힘으로써 Fe계 미결정의 연자기특성이 출현되는 기구를 확인하는데 집중되어 있으나 실제 자기헤드 적용 시에 고려되어야 할 최적공정 조건을 확립하는 연구도 실용적인 면에서 중요하다 할 수 있다. (Fe-M-X계 미결정박막의 실제 연구 데이터는 지면상 참고문헌을 참조하기 바람. <sup>5)7)3)</sup>)

## 참고문헌

1. Ching Tsang, Mao-Min Chen, Tadashi Yogi and Kochan Ju, IEEE Trans. MAG-26 (1990) 1689
2. Tadashi Yogi, Ching Tsang, Thao A. Nguyen et al., IEEE Trans. MAG-26 (1990)

2271

3. M. Futamoto, F. Kugiya, M. Suzuki, et al., IEEE Trans. MAG-27 (1991) 5280
4. E.S. Murdock, R. Simmons and R. Davidson, paper JA-01 Intermag'92 (1992)
5. H.J. Richter, IEEE Trans. MAG-29 (1993) 2185
6. N. Taneko, Y. Shimada, K. Fukamichi and C. Miyakawa, Jap.J.Appl.Phys., 30 (1991) L195
7. K. Terunuma, H. Kawashima and K. Terazono, J. Magn. Soc. Jpn., 16(1992) 257
8. K. Nakanishi, O. Shimizu, and S. Yoshida, J. Magn. Soc. Jpn., 16(1992) 590
9. K. Nakanishi, O. Shimizu, and S. Yoshida, J. Magn. Soc. Jpn., 15(1991) 371
10. K. Terunuma, M. Miyazaki, H. Kawashima and K. Terazono, J. Magn. Soc. Jpn., 14(1990) 257
11. A. Hosono, S. Tanabe, MR 92-33 (1992) 9
12. N. Ishiwata, C. Wakabayashi and H. Urai, J. Appl. Phys. 69(1991) 5616
13. G. Qiu, E. Haftek and J. A. Barnard, J. Appl. Phys. 73(1993) 657
14. Y. Watanabe, H. Oura and N. Onozata, IEEE Trans., MAG-26 (1990) 1500
15. K. Nago, H. Sakakima, K. Ihara and K. Osano, IEEE Trans., MAG-28 (1992) 2943
16. Y. Takeshima, N. Ishiwata and T. Korenari and H. Urai J. Appl. Phys. 73 (1993) 6576



17. N. Hasegawa and M. Saito, J. Magn. Soc. Jpn., 14(1990) 313
18. M. Miura, A. Obata, Y. Noro, IEEE Trans. MAG-29 (1993) 3049
19. N. Hasegawa and M. Saito, MR 89-12 (1989)9
20. H. Shibaya and I. Fukuda, IEEE Trans. MAG-13 (1977) 1005
21. T.K. Kim and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett., 20 (1972) 492
22. A. Kano, N.S. Kazama and H. Fujimori, J. Appl. Phys., 53 (1982) 8332
23. K. Umeda, E. Kita and A. Tasaki, IEEE Trans. MAG-22 (1986) 591
24. T. Tanaka et al., 제 14회 일본응용자기학회 학술강연 개요집 (1990)464
25. M. Komuro et al., J. Magn. Soc. Jpn., 14 (1990) 701
26. Y. Konozo et al., J. Magn. Soc. Jpn., 15 (1991) 667
27. Matsuoka et al., 제 13회 일본 응용자기학회 학술강연회 개요집 (1989) 398
28. J.M.D. Coey and H. Sun, J. Magn. Mater. (1990) 251
29. M. Kersten, Z.Phys. 44 (1943)63
30. G. Herzer, IEEE Trans. MAG-26 (1990)1397
31. H. Hoffmann, IEEE Trans. MAG-4 (1968) 32
32. H. Hoffmann, J. Appl. Phys., 35 (1964) 1790
33. K. Kempter and H. Hoffmann, Phys. Stst. Sul. 34 (1969) 237
34. H. Hoffmann, Phys Stat. Sul.,33 (1969)175
35. R. Alben, J.J. Becker and M.C. Chi, J. Appl. Phys., 49 (1978) 1653
36. G. Herzer, IEEE Trans. MAG-25 (1989) 3327
37. G. Herzer, IEEE Trans. MAG-26 (1990) 1397
38. T. Shimatsu, M. Takahashi and T. Wakiyama, J. Magn. Soc. Jpn., Suppl. 13 (1989) 577
39. M. Takahashi and T. Shimatsu, IEEE Trans. MAG- 26 (1990) 1485
40. R.M. Bozorth, Ferromagnetism, D. Van Nastrand Co. Inc. NY (1995) 821
41. N. Kumasaka et al., J. Appl. Phys., 55 (1988) 1862
42. T. Kobayashi, R. Nakatani, S. Otomo and N. Kumasaka, IEEE Trans. MAG-23 (1987) 2746
43. Y. Nagai, M. Senda and T. Toshima, J. Appl. Phys., 63 (1988) 1136
44. M. Senda and Y. Nagai, Appl. Phys. Lett., 52 (1988)672
45. S. Sugeno, H. Okayama and Y. Narumiya, J. Magn. Soc. Jpn., 13 (1989) 351
46. H. Okayama, S. Sugeno, O. Kohmoto and Y. Narumiya, J. Appl. Phys., 67 (1990) 5719
47. S. Fujii, S. Ohnuma, F. Matsumoto, H. Fujimori and T. Masumoto, J. Mag. Soc. Jpn., 16 (1992) 269
48. M. Senda and Y. Nagai, MR 88-16,17
49. Y. Hoshi and M. naoe, IEEE Trans. MAG-26 (1990) 2344
50. S. Ohnuma, F. Matsumoto, H. Fujimori and T. Masumoto, J. Magn. Soc. Jpn., 16 (1992) 265
51. F.W.A. Dirne et al., IEEE Trans. MAG-27 (1991) 4882
52. N. Kaminaka, H. Sakakima, K. Takahashi, K. Osano and H. Hasegawa, IEEE Trans. MAG-26 (1990) 2936
53. T. Egami and Y. Waseda, J. Non-Crystal. Solid, 64 (1984) 113
54. N. Terada, Y. Hoshi, N. Naoe and S. Yamanaka, IEEE Trans. MAG-20 (1984) 1451
55. Y. Nagai, A. Tago, K. Yanagisawa and T. Toshima, J. Appl. Phys., 61 (1987) 3841
56. K. Kijima and N. Honda, J. Magn. Soc. Jpn., 12 (1988) 317
57. T. Koshikawa, Y. Uehara, Y. Ohtsuka, J. Toda and K. Kobayashi, Magn. Soc. Jpn., 18 (1994) 764
58. M. Takahashi, H. Shoji and T. Wakiyama, J. Magn. Soc. Jpn. Suppl. 13 (1989)585
59. 안동훈 외, 일본전자통신학회지 MR96-59, 43(1996)
60. 안동훈 외, J. Korean Magnetics Society, vol.6, No.3, 151(June 1996)
61. 안동훈 외, J. Korean Magnetics Society, vol.5, No.5, 874 (Oct. 1995)
62. 안동훈 외, J. Korean Magnetics Society, vol.5, No.5, 601 (Oct. 1995) special issue
63. 안동훈 외, J. Korean Magnetics Society, vol.4, No.2, 135 (June 1994)

< 김경환 위원 >