

## 자기 정보 기록의 기본 원리

조순철

송실대학교 전자공학과  
서울 156-743

(1993년 6월 19일 받음)

### I. 서 론

정보를 자기적으로 기록하는 장치[1, 2, 3]는 전원이 제거되어도 정보를 잃지 않으며, 기록과 재생이 모두 가능하고, 상대적으로 저렴한 가격 때문에 현재 광범위하게 이용되고 있다. 컴퓨터 보조 기억 장치로 사용되는 하드 디스크, 플라피 디스크, 테일 드라이버(driver)로 부터 음성 및 화상 기록 장치로 사용되는 녹음기 및 VCR 과 컴퓨터, 음성, 화상 이외의 정보(Surveillance, Telemetry, Flight information, Satellite linkage 등)를 기록하는 instrumentation recorder 등이 대표적인 자기 기록 장치이다. 이러한 자기 기록 장치는 원하는 전기적인 정보를 자기적인 정보로 바꾸어 기록하며, 기록된 정보를 필요에 따라 전기적인 정보로 바꾸어 사용하게 된다.

정보를 기록하는 전기적인 신호는 아날로그(analog) 신호와 디지털(digital) 신호로 구분할 수 있다. 음성 및 화상 기록은 아날로그, 컴퓨터는 디지털 신호를 사용하여 왔으나, 음성 및 화상 기록도 점차 디지털 신호를 사용하려는 추세이다. 특히 음성 기록 장치는 CD(Compact Disc)의 성공에 자극받아, 아날로그 녹음기 대신 디지털 녹음기인 DCC(Digital Compact Cassette), 또는 광자기 기록을 이용한 MD(Mini Disk) 등 디지털 기록 장치가 출시되고 있다. 화상 기록 장치 또한 HDTV(High Definition TV : 고선명 TV) 전송 방식이 디지털 방식을 채택할 것이 확실시 됨에 따라 점차로 디지털화 할 것으로 전망된다. 그러나 이러한 기록 신호의 차이는 기본적인 자기 기록 과정에 영향을 미치지 않는다. 본 논문에서는 이러한 기본적인 기록 및 재생 과정을 다루고자 한다. 수직 자기 기록[4]과 광자기 기록[5]에 관해서는 본 학

회지 기술 해설에서 이미 취급되었으므로 본 논문에서는 언급하지 않을 것이다.

그림 1 은 자기 기록 장치의 기본 구조와 기록 및 재생 과정을 나타내고 있다.

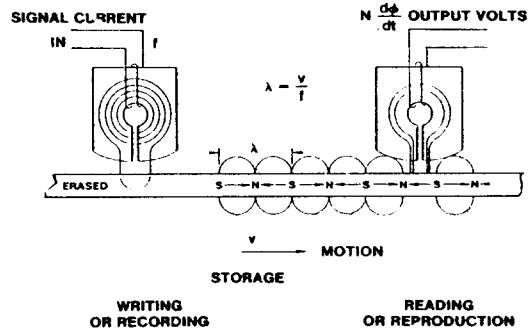


Fig. 1. Fundamental recording and reproduce processes.

모든 자기 기록 장치는 전기적 신호를 자기적 신호로(또는 자기적 신호를 전기적 신호로)바꾸어 주는 자기 헤드(magnetic head)와 자기적 신호가 기록, 저장되는 자기 매체(magnetic media)로 구성되어 있다. 자기 매체와 자기 헤드는 상대적으로 움직이게 되어 있으며(보통 매체가 이동하게 되나 VCR 등에서는 헤드도 회전), 일반적으로 자기 매체는 자기 테일이나 자기 디스크, 자기 헤드 는 간극(gap)이 있는 토로이드(toroid)에 코일이 감긴 모양을 하고 있다. 자기 기록은 시간적으로 변하는 전기적인 신호를 자기 매체에 공간적으로 변하는 자화(magnetization)패턴으로 바꿈으로써 이루어 진다. 신

호 전류가 헤드 코일에 인가되면 헤드를 자화시켜 자속이 헤드를 따라 형성, 헤드의 간극에 누설 자속(leakage flux, fringe flux)를 형성하게 된다. 헤드의 간극은 매체에 인접해 있으므로 누설 자속이 매체를 자화시키게 된다.

입력 신호의 주파수가  $f$ 이고 매체가 헤드에 대해 상대 속도  $v$ 로 움직이면, 자화 패턴은 다음과 같은 기본 파장(fundamental wavelength)을 갖게 된다.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

또한 시간적으로 변하는 입력 신호는 다음과 같이 공간적인 변화로 변환 된다.

$$x = vt \quad (2)$$

여기서  $x$ 는 매체 진행 방향의 좌표이고  $t$ 는 입력 신호의 시간 좌표를 나타낸다. 이러한 자화 패턴은 자기 기록 과정이 기본적으로 비선형 과정이므로 입력 신호 파형과 완전히 같지는 않다.

공간적으로 변하는 자화 패턴으로 기록된(파장  $\lambda$ ) 자기 매체는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 자화 발산(divergence)때문에 자극(magnetic pole)을 형성, 매체 외부에 자장(magnetic field)을 형성하게 된다. 이 자장이 재생(reproduce)헤드의 고 투자율 코어(Core)를 통해 헤드 코일에 자속을 공급하게된다. 매체가 움직이므로 이 자속  $\Phi$ 는 시간에 따라 변하는 다음과 같은 출력 재생 전압을 Faraday의 법칙에 의해 헤드 코일 양단에 생성하게 된다.

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -Nv \frac{d\Phi}{dx} \quad (3)$$

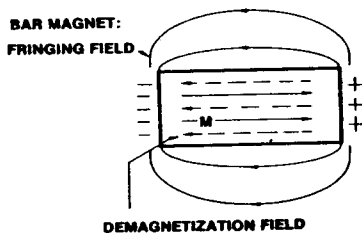


Fig. 2. Schematic diagram of field from a uniformly magnetized "bar magnet."

여기서  $N$ 은 헤드 코일의 권선수이다. 여기에서 출력 전압은 헤드와 매체의 상대 속도  $v (= f \lambda)$ 에 비례함을 알 수 있다.

자화된 자기 매체는 그림 2에 나타낸 바와 같은 미세한 "영구 자석"의 연속이라고 생각할 수 있다.

자석내의 자화가 일정하면 자극 밀도(magnetic pole density)  $\rho_m$ 은 자석 양끝에서만 영이 아닌 값을 갖는다. 이 자극은 자석 내부에 자화와 반대되는 자장을 형성하며 이러한 자장을 감자장(demagnetization field)이라 한다. 그리고 자석 외부 공간에 형성하는 자장을 fringe field 라고 한다. 감자장은 자화 방향에 반대 방향이므로 잔류 자화(remanent magnetization)를 감소시켜 재생 시 신호 전압을 감소시킨다. fringe field는 재생 신호의 원천이 되므로 크게 함이 바람직하다.

## II. 헤드자장

자기 기록 헤드에 의해 생성된 자장은 매체에 기록되는 자화를 계산하는 과정에서와 또한 reciprocity 원리에 의해 재생 과정을 해석하는데 사용되므로 대단히 중요하다. 그림 3은 기록 헤드의 형태와 코일에 기록 전류가 흘렀을 때 헤드의 간극 주위에 생성되는 헤드 자장을 나타내고 있다.

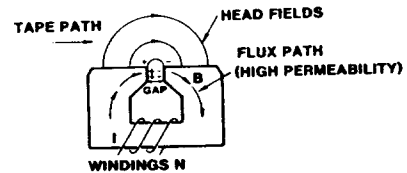


Fig. 3. Fundamental structure of a recording head.

헤드 간극의 양단에는 자극이 생성되며 이는 자장의 근원이 된다. 헤드의 역할은 신호 전류에 의해 헤드 코일에 형성된 자속을 자기 매체가 통과하는 헤드 간극에 집중시켜 큰 fringe field를 형성하는 것이다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 헤드 코어와 헤드의 간극에 폐루프(closed loop)를 형성해 선적분을 행하면(Ampere의 법칙),

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{total} \quad (4)$$

투자율이 아주 크다고 가정하면, 코어내의 자장을 무시할 수 있으며

$$H_0 g = NI \quad (5)$$

$$H_0 = \frac{NI}{g} \quad (6)$$

여기서  $H_0$ 는 간극에서의 자장이고,  $g$ 는 간극의 길이이다. 헤드의 간극으로 부터 멀리 떨어진 곳(매체가 통과하는 부분)의 자장은 그림 3에 보인 나와 같이 반원의 형태이며 그  $x, y$  성분은 다음과 같다.

$$H_x = \frac{H_0 g y}{\pi (x^2 + y^2)} \quad (7)$$

$$H_y = \frac{H_0 g x}{\pi (x^2 + y^2)} \quad (8)$$

$H_x, H_y$ , 는 그림 4에 나타내져 있다.

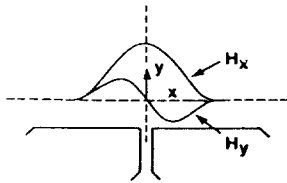


Fig. 4. Field components far from the gap region (Small gap approximation).

간극 근처에서는 Karlqvist[6]에 의한 다음과 같은 표현이 좀더 적절한 근사식이다.

$$H_x = \frac{H_0}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \frac{g/2+x}{y} + \tan^{-1} \frac{g/2-x}{y} \right\} \quad (9)$$

$$H_y = \frac{H_0}{2\pi} \ln \frac{(g/2+x)^2 + y^2}{(g/2-x)^2 + y^2} \quad (10)$$

$$H_0 = \frac{NI\varepsilon}{g} \quad (11)$$

식 (11)에서  $H_0$ 는 헤드의 간극에서의 자장(식 6)에 효율  $\varepsilon$ 을 곱한 것이다. 효율은 헤드의 유한한 투자율을 나타내기 위해 사용된다. 즉 코일의 전류에 의해 형성된 MMF(magnetomotive force :  $NI$ )는 코아내에 존재하는 자장 때문에 전부는 간극에 전달되지 않으며, 그 전달되는 정도를 효율로 나타낸다.

### III. 재생과정

자기 기록 재생의 기본 원리는 식 (3)에 나타낸 바와 같은 Faraday의 법칙이다. 자화의 패턴이 정현파 형태

일 때 헤드 재생 전압은 다음과 같이 표현된다[1].

$$V = N_{cr} W_{\mu_0} H_f \quad (12)$$

여기서  $N$ 은 코일의 권선수,  $\varepsilon$ 은 헤드 효율,  $v$ 는 헤드와 매체의 상대 속도,  $W$ 는 매체에 기록된 트랙 폭(Track width : 기록 헤드의 폭에 상당),  $\mu_0$ 는 진공중의 투자율,  $H_f$ 는 헤드에 인가되는, 매체로부터 생성된 자장을 나타낸다. 즉 재생 전압은 헤드 표면에 인가되는 기록 매체로부터의 자장에 비례함을 알 수 있다.

헤드에 인가되는 자장을 계산하는 데는 두가지 방법이 있다. 첫째는, 매체에 기록된 자화 패턴과 헤드의 구조 및 투자율을 이용하여 자장을 직접 계산하는 것이며, 두번째는 reciprocity 원리를 이용하는 것이다. Reciprocity 원리를 이용하면 헤드 자속  $\Phi$ 는 매체의 자화 패턴과 재생 헤드 자장의 correlation으로 표현된다[2, 3].

$$\Phi(x) = \mu_0 \iiint_{\text{매체}} d^2 \gamma' \vec{M}(\gamma' + x) \quad (13)$$

여기서  $\gamma'$ 은 기록 매체에 고정된 좌표계를 나타내고  $x$ 는 매체에 상대적인 헤드의 움직임을 나타낸다. 헤드 코일에 신호 전류를 흘렸을 때 생성되는 자장을 계산하는 것이, 매체 자화 패턴에 의해 복잡한 구조를 갖는 헤드 표면에 인가되는 자장을 계산하는 것보다 훨씬 쉽기 때문에 reciprocity 원리를 이용한 방법이 많이 사용된다. 재생 전압은

$$V = -N_{cr} \frac{d\Phi}{dx} = N_{cr} W_{\mu_0} \int_a^{a+\delta} dy' \quad (14)$$

$$\int_{-x}^x dx' \frac{\partial}{\partial x'} \vec{M}(x', y') \cdot \vec{H}(x+x', y')$$

여기서  $d$ 는 헤드와 매체간의 거리,  $\delta$ 는 매체의 두께를 나타낸다. Reciprocity 원리를 이용해 재생 전압을 얻기 위해서는 자화 패턴을 알아야 하며 일례로 그림 5와 같이 자화가 매체의 진행방향과  $\theta$ 인 각을 이루고 자화의 천이(Transition)가 급격한 경우를 살펴보자.

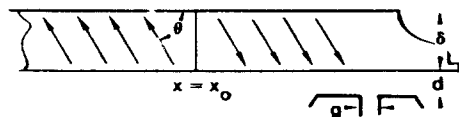


Fig. 5. A perfect transition of magnetization oriented at any arbitrary angle  $\theta$ .

자화의 천이가  $x' = x_0'$  에서 일어나고 자화의  $x'$  에 대한 미분값은 천이가 일어나는 곳 이외에서는 영이라고 가정하면, 자화의  $x'$  에 대한 미분은 아래와 같이 델타(Delta)함수로 표현된다.

$$\frac{\partial M_x}{\partial x'} = 2M \cos \theta \delta(x' - x_0') \quad (15)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial x'} = -2M \sin \theta \delta(x' - x_0') \quad (16)$$

식 (15), (16) 을 식 (14) 에 대입하여, 얇은 매체(매체의 두께가 기록 파장에 비해 훨씬 작은 경우)의 경우에 적분을 행하면

$$V = 2N\epsilon W_r \mu_0 M \delta \{ H_x(x_0 + x, d + \delta/2) \cos \theta - H_y(x_0 + x, d + \delta/2) \sin \theta \} \quad (17)$$

여기서  $\delta$  는 매체의 두께를 나타내며, 재생 전압은 헤드 자장에 비례함을 알 수 있다. 따라서 재생 전압 파형은 그림 4 에 나타난 재생 헤드 자장으로 부터 그림 6 과 같게 됨을 알 수 있다.

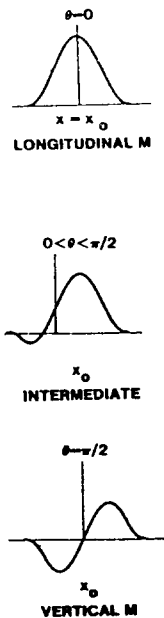


Fig. 6. Reproduced voltage from a single perfect magnetization transition for three orientations of the magnetization.

즉 자화 방향이 매체 진행 방향과 평행일 때( $\theta = 0^\circ$ , longitudinal magnetization) 그림 4 의 와 같은 전압 파형을 나타내며 자화 방향이 매체 진행 방향과 수직일 때( $\theta = 90^\circ$ , vertical magnetization)  $H_y$  와 같은 파형을 나타낸다. 실제 기록된 자화 패턴은  $0 < \theta < \pi/2$  인 자화 방향(intermediate magnetization)을 갖으므로  $H_x$  와  $H_y$  의 합인 재생 전압 파형을 갖게 된다.

식 (12) 와 (17) 로 나타낸 출력 전압은 이상적인 경우이며 실제로는 여러가지 전압 감소 요인에 존재한다. 정현 파(또는 임의의 파형의 기본파)자화 패턴을 갖는 경우 rms 재생 출력 전압은 다음과 같이 나타내어진다[2, 3].

$$V^{rms}(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} N_r W_r \mu_0 M k \delta \left(1 - \frac{e^{-k\delta}}{k\delta}\right) \cdot e^{-k\delta} \cdot \frac{\sin(1.11 kg/2)}{1.11 kg/2} \quad (18)$$

여기서  $k = 2\pi/\lambda$  이며,  $(1 - e^{-k\delta}) k \delta$  은 기록 매체가 유한한 두께를 갖기 때문에 생기는 손실(media thickness loss),  $e^{-k\delta}$  는 매체와 헤드사이의 거리에 의한 손실(spacing loss),  $(\sin \delta/2)/(1.11 kg/2)$  는 유한한 헤드의 간극 때문에 발생하는 손실(head gap loss)을 나타낸다.

#### IV. 기록과정

자화 패턴의 기록은 일반적으로 대단히 복잡한 과정이다. 자화 패턴은 헤드 자장 뿐만이 아니라 기록된 자화에 의해 생성되는 감자장(그림 2)에 의해 결정되며 감자장은 또한 자화에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 간략화된 모델을 취급할 것이다.

자기 기록 과정의 요체는 헤드에 인가되는 입력 신호 전류에 따라 매체에 자화 반전(magnetization reversal)을 생성하는 것이다. 그림 7 에 초기 자화 방향과 반대 방향으로 형성된 기록 자장이 나타내져 있다.

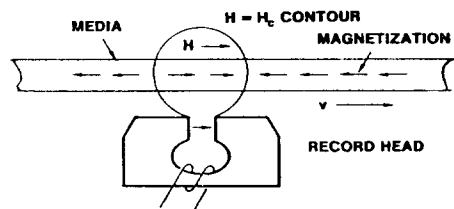


Fig. 7. Simplified view of the recording process.

$H = H_c$  (매체 coercivity)인 contour 내부에서는 자장의 크기가 보자력(coercivity)보다 크므로 자화는 반전된다. 매체가 그림 7 과 같이 오른쪽으로 움직이는 경우 자화 천이는 오른쪽 contour 경계(trailing edge 라 불리움)에서 일어난다. 자화가 이 경계를 지나면 자장의 크기가 보자력 보다 작아지므로 자화 반전이 더 이상 일어날 수 없으며 자화는 이 경계를 지나는 순간의 자화 방향으로 고정된다. 그림 7 에서는 기록 천이 폭(transition width)이 영인 것처럼 나타내져 있다. 그러나 실제로는 유한한 폭을 갖으며 그 이유는 자화 반전이 헤드 자장의 변화에 따라 급격히 일어나지 못하고 유한한 길이를 움직이는 동안 점진적으로 일어나기 때문이다. 그림 8 의 (a) 에 전형적인 기록 매체의 잔류 자기 히스테리시스 루프(remance hysteresis loop : MH Loop)가 그려져 있다.

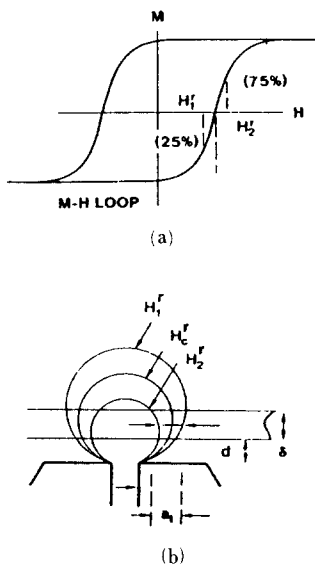


Fig. 8. (a) M-H remanence loop.  $H_1'$  and  $H_2'$  are the and of switching fields. (b) Recording zones defined as the distance( $a_1$ ) between the lines corresponding to  $H_1'$  and  $H_2'$ .

이 그림에서 보는 바와 같이 자화는 보자력 크기의 자장이 인가될 때 급격히  $+M$  에서  $-M$  (또는  $-M$  에서  $+M$ ) 으로 변하지 않으며 일정한 자장 범위내에서 점진적으로 변함을 알 수 있다. 자화가  $-M/2$  에서  $+M/2$  으로 (즉 전체 자화 변화  $2M$  의 25% 에서 75% 로) 변하는 자장을 각각  $H_1'$  과  $H_2'$  이라고 하면 이 자장 변화에 상

당하는 영역을 천이 폭으로 생각할 수 있다.(그림 8 (b) 의  $a_1$ ) 자기 기록의 최소 단위는 천이 폭으로 생각할 수 있다. 즉 디지털 정보(1, 0)를 좌측에서 우측 방향으로, 또는 우측에서 좌측 방향으로 변하는 자화 천이로 기록할 수 있기 때문이다. 따라서 자화 천이 폭을 줄이는 것이 자기 기록 밀도를 줄일 수 있는 가장 기본적인 방법이 된다. 천이 폭은 다음과 같은 세가지 방법으로 줄일 수 있다. 첫째로 M-H 루프가 직사각형(square) 형태 일때, 즉  $H_1' = H_2' = H_c$  일 때  $M$ 이 급격히 ( $H_c$ 에서) 변할 수 있다. 둘째로 주어진 M-H 루프를 갖는 매체에서  $H_1'$ 과  $H_2'$ 에 해당하는 공간적인 위치를 가깝게 한다. 즉 헤드 자장이 급격히 변하게 하면(큰 spatial gradient)  $H_1'$  과  $H_2'$ 에 해당하는 매체내의 거리, 즉 천이 폭이 좁게 된다. 또 헤드와 매체의 거리가 가까우면 그림 8 (b) 에서 보는 바와 같이 헤드 자장의 변화가 급격하여  $H_1'$ 과  $H_2'$ 에 해당하는 거리가 좁아져 천이 폭이 좁아지게 된다. 셋째로 총 자기 기록 자장은 헤드 자장과 기록된 매체에 의해 생성된 감자장의 합이므로 이 두 자장의 합의 변화율(spatial gradient)을 크게 해야 한다. 감자장은 기록 자장의 변화율을 작게 함으로 [2, 3], 감자장을 줄일 수 있는 방법이 모색 되어야 한다.

기록 자화 패턴을 이론적으로 결정하기 위해서는 비선형적인 수치 해석 방법을 사용해야 한다. 이 과정은 앞에서 언급한 바와 같이 복잡하며 iterative procedure 를 사용하여야 한다[8, 9].

지금까지 언급한 기록 과정은 디지털 기록에 적합한 직접 기록(direct recording) 방법이며, 지금부터 녹음기, instrumentation recorder 등에 현재 사용되고 있는 AC 바이어스 기록(AC bias recording) 방법[2, 3, 10]에 관해 간단히 언급하고자 한다. AC 바이어스 기록 방법은 엄격한 선형성(Linearity)이 요구될 때 사용되며 기본적인 기록 과정은 anhyseresis process 라 불리워 진다. 즉 히스테리시스가 없는 기록 과정이라는 의미이며, 그림 9 에서 나타낸 바와 같이 기록 신호와 함께 고주파(최대 신호 주파수의 5~10 배) AC 바이어스 전류를 헤드에 인가하여 기록한다.

이때 AC 바이어스와 기록 신호는 그림 9 에서 나타낸 바와 같이 매체가 헤드 간극으로 부터 멀어짐에 따라, 즉 시간이 증가함에 따라, 그 크기가 자동적으로 감소하게 된다. 이렇게 기록한 신호의 결과가 그림 10 에 나타내져 있다.

그림 10 에 같이 그려져 있는 곡선은 AC 바이어스를 인가하지 않을 때 얻게 되는 초기 자화 곡선이다. anhyseretic remanence 는 작은 입력 신호 자장 범위

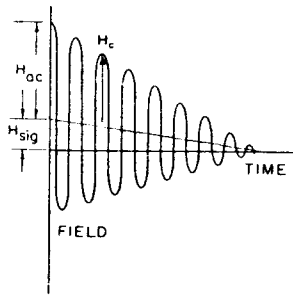


Fig. 9. AC bias and signal field history for anhysteretic process.

내에서는 선형적으로 증가하고 초기 감수율(susceptibility)이 대단히 크다. 즉 훌륭한 선형 transfer 특성을 가짐을 알 수 있다.

### V. 결 론

지금까지 자기 정보 기록의 기본이 되는 기록과 재생 과정을 간단히 살펴 보았다. 재생 과정은 선형적 과정(linear process)이므로 이론적 해석이 용이하나 기록 과정은 비선형적 과정(nonlinear process)이므로 해석이 어려우며 컴퓨터에 의한 수치 해석이 행해지고 있다. 특히 감자장의 계산에 많은 시간이 소요되므로 이를 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 자기 기록과 재생 원리를 이해함은 궁극적으로 자기 기록 밀도를 증가시키며, 정보의 탐색 시간을 감소시키고, 전달 속도를 증가시켜 자기 정보 기록 장치의 성능을 향상 시킴에 목적이 있다. 따라서 본 논문에서 전부 취급되지는 못했으나 시스템 전체의 동작 원리를 이해하고 정량적으로 모델화 함이 또한 필요하다.

### 참 고 문 헌

[ 1 ] F. Jorgenson, The complete handbook of magnetic recording, 3rd Edition, TAB Books, Blue Ridge Summit, PA, U. S. A. , 1988.  
 [ 2 ] R. M. White, Introduction to magnetic recording, IEEE Press, New York, N. Y. , 1989.  
 [ 3 ] C. D. Mee and E. D. Daniel, Magnetic

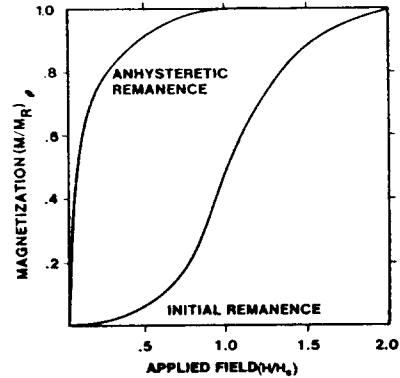


Fig. 10. Anhysteretic magnetization curve versus signal field. Initial dc remanence curve is shown for comparison.

recording handbook, McGraw Hill, U. S. A., 1989.

[ 4 ] 이택동, "CoCr 계 수직 자기 기록 매체의 개발 현황," 한국 자기 학회지, **1**(2), 94(1991)  
 [ 5 ] 신성철, "광자기 기록 매체의 연구 개발 동향," 한국 자기 학회지, **2**(2), 169(1992)  
 [ 6 ] Karqvist, "Calculation of the magnetic field in the ferromagnetic layer of a magnetic drum," Tran. Roy. Inst. Technol. Stockholm, **86**(3), 1954.  
 [ 7 ] J. Wessel-Berg and H. N. Bertam, "A generalized formula for induced magnetic flux in a playback head," IEEE Trans. Magn., **MAG-14**(3), 129(1978)  
 [ 8 ] R. I. Potter and I. A. Beardsley, "Self consistent computer calculations for perpendicular magnetic recording," IEEE Trans. Magn., **MAG-16** 967(1980)  
 [ 9 ] I. A. Beardsley, "Self consistant recording model for perpendicularly oriented media," J. Appl. Phys., **53** 2582(1982)  
 [ 10 ] E. Kneller and E. Koster, "Relation between anhysteretic and static magnetic tape properties," IEEE Trans. Magn., **MAG-13**(5), 1388 (1977)