

## Preisach 모델을 이용한 수직자기기록장치의 재생특성 해석

박관수 · 이항범 · 한송엽

서울대학교 전기공학과

이택동 · 장평우

한국과학기술연구원 기능고속 연구부

(1991년 9월 7일 받음)

히스테리시스 특성을 갖는 자기기록장치의 재생과정을 수치모사할 수 있는 방법을 구현하였다. 수치해석시 기록과정 뿐만 아니라 재생과정에서도 히스테리시스 특성을 고려해 주어야 한다. 수치해석기법으로 유한요소법(finite element method)을 사용하고 히스테리시스 특성을 묘사하기 위하여 spin curling 모드를 이용한 Stoner-Wohlfarth 모델보다 정밀한 해석이 가능한 Preisach 모델을 사용하여 알고리즘을 구성한 후 재생전압을 구하기 위한 수식을 유도하고 이것을 2층매체와 풀형헤드를 갖는 수직자기 기록장치에 적용하였다. 정보가 기록된 매체위를 헤드 가 지나갈 때 코일을 통과하는 자속밀도와 코일에 유기되는 재생전압의 크기가 포화되는 특성을 구함으로써 이것으로부터 기록과정에서 헤드에 흘러줄 최적의 전류를 구하였다.

### I. 서 론

자성체가 포함된 시스템을 수치해석하기 위해서는 자성체의 성질에 대한 정보를 입력으로 주어야 한다. 수치해석적인 관점에서 볼 때 자성체를 세 부류로 나눌 수 있는데, 첫째, 상자성체와 반자성체, 그리고 강자성체 중 포화되지 않는 영역에서 동작하는 연자성체 등은 선형 시스템을 이루는데, 이 경우 자계의 세기와 자화량의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 때의 자화율의 값은 상수가 된다.

$$\mathbf{M} = \chi \cdot \mathbf{H} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{M}$ : 자화량 [A/m]

$\mathbf{H}$ : 자계의 세기 [A/m]

$\chi$ : 자화율

둘째, 포화영역에서 동작하는 연자성체 등은 비선형 시스템을 이루는데 이 경우에도 식(1)은 유효하며 이때의 자화율은 상수가 아니라 자계의 세기의 함수가 되며 비선

형 시스템을 위한 반복계산이 필요하게 된다. 세째로 강자성체와 같이 히스테리시스 특성을 갖는 물질이 포함된 시스템에서 자화량은 자계의 세기뿐만 아니라 자기 이력에 따라 다른 값을 가지므로 식(1)과 같은 단순한 수식으로 나타낼 수 없으며 히스테리시스 특성을 수치모사할 수 있는 모델이 필요하게 된다.

자기기록장치는 기록매체의 히스테리시스 현상을 이용한 것이므로 자기기록장치를 수치모사하기 위해서는 히스테리시스 현상에 대한 계산이 필수적이다. 기록과정에서 뿐만 아니라 재생과정에서도 기록매체위를 헤드가 지나감에 따라 자속의 분포가 달라져 매체의 자화량이 변하므로 정확한 해석을 위해서는 재생과정에서도 매체의 히스테리시스 현상을 고려해야 한다[1].

히스테리시스 특성을 수치모사하기 위한 몇가지 모델 중 [2]-[8], Stoner-Wohlfarth 모델과 이 모델의 부정확성을 보상에 주기 위해 spin curling 모드를 도입한 모델 [5]-[7]은 근본적으로 막대형 자성체의 형상자기이방성(shape anisotropy)과 이방성 에너지 최소화를 이용한 것이므로 현재 수직자기 기록장치의 기록매체로

연구되고 있는 코발트계의 물질과 바륨 페라이트 등과 같이 결정자기이방성(crystal anisotropy)이 강한 물질에는 적용이 곤란하고, 이와같은 결점을 보상해 주기 위한 계수설정에 임의성이 많으며[7], 자성체 입자간의 상호작용(interparticle interaction)을 고려해 줄 수 없는 등의 단점이 있음에 비하여[5], Preisach 모델은 입자간 상호작용이 고려된 데이터를 입력으로 사용하고, 입력의 변환과정을 기억하여 처리하기 때문에 기록장치의 overwrite와 같은 복잡한 히스테리시스 특성을 묘사할 수 있어 보다 정밀한 계산이 가능한 가장 유용한 수단으로 간주되고 있다[8, 9]. Preisach 모델을 이용하여 히스테리시스 특성을 수치묘사하고 이것을 수직자기 기록장치의 수치모사에 적용한 연구는 이미 발표된 바 있다[10].

본 논문에서는 Preisach 모델을 이용하여 기록된 매체의 자화량과 자기이력을 입력으로 하여 수직자기 기록장치의 재생과정을 수치모사하기 위한 방법을 구형하였다. 유한요소법과 Preisach 모델을 이용하여 재생과정을 수치해석하기 위한 알고리즘을 만들고 재생전압을 구하는 수식을 유도한 후 이것을 2층매체와 풀형헤드를 갖는 수직자기 기록장치에 적용하여 재생전압의 파형을 구하였다. 또한 기록과정에서 헤드에 흘러주는 전류를 증가시켰을 경우 재생전압의 크기가 포화되는 특성을 구하여 헤드에 흘러줄 최적의 전류값을 구하였다.

## II. 알고리즘

자기기록장치에서 자화된 매체위로 헤드가 지나가면 헤드의 코일에는 자속의 변화에 따른 전압이 유도된다. 자장의 변화에 대한 유기전압의 전자기 유도에 관한 Maxwell 방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{E}$ : 전계의 세기[V/M]

$\mathbf{B}$ : 자속밀도[T]

미분형으로 표현된 식(2)에 적분을 취한다.

$$\int \nabla \times \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

식(3)의 좌변항에 Stoke 정리를 적용하면 재생전압이 된다.

$$e = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \quad (4)$$

한편 자속밀도는 자기벡터포텐셜의 회전(curl)으로 표현되며 여기에 다시 Stoke 정리를 적용하면 재생전압은

$$\begin{aligned} e &= -\frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} \int \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{L} \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 된다.

이상과 같은 식을 2차원문제에 적용하였을 경우, 길이방향을 Z축으로 잡고 헤드코일양단의 벡터 포텐셜의 값을  $A_r, A_l$  계산과정에서의 시간변위를  $t_1, t_2$ 라 하면 단위길이당 헤드코일에 유기되는 재생전압은

$$\begin{aligned} e &= -\frac{\partial}{\partial t}(A_r - A_l) \\ &= -\frac{[A_r - A_l]_{t_2} - [A_r - A_l]_{t_1}}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (6)$$

과 같이 계산된다.

이상과 같은 식을 이용하여 재생전압을 구하는 알고리즘은 아래와 같다.

자기기록장치의 자화량은 자장의 값에 따라 변한다. 자화된 기록매체위로 헤드가 지나가면 기록매체의 자속의 분포가 달라지게 되므로 자화량의 값도 변한다. 뿐만 아니라 매체에 기록된 자화량도 히스테리시스 과정을 거쳐 기록된 것이므로 매체의 자기이력에 따라 자화량의 변화도 달라진다. 따라서 재생과정에서 매체의 자화량뿐만 아니라 매체의 자기이력도 입력으로 주어져야 한다.

기록매체의 자화량과 자기이력에 대한 정보를 입력으로 받아들인 후, 헤드가 한 위치에 있을 때 유한요소법으로 자장의 값을 구한다. 이것으로부터 Preisach 모델을 이용하여 변경된 자화량을 구한다. 이 새로운 자화량으로 다시 유한요소법으로부터 자장의 값을 구하는 과정을 반복하여 수렴시키면 그 위치에서 기록매체와 헤드의 상호작용으로 변경된 자화량의 값과 자장이 구해진다.

재생과정에서 헤드는 옆으로 이동하므로, 헤드를 조금 이동시킨 후 앞의 과정을 반복하며 매번마다 헤드의 위치에 따른 자기벡터 포텐셜의 값을 저장한

다. 이 자기벡터 포텐셜의 값으로부터 자속밀도를 구할 수 있고 자속의 시간에 대한 미분이 재생전압이 된다.

그림 1은 그 계산 흐름도를 나타낸 것이다.

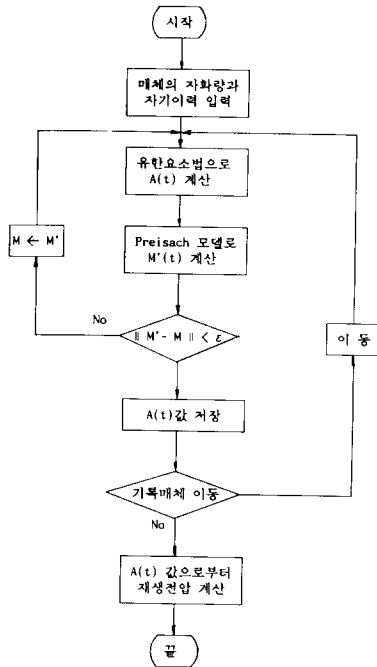


Fig. 1. Flowchart to calculate reproducing signal

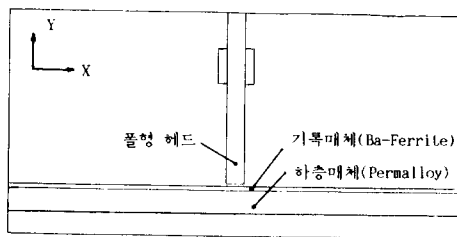


Fig.2. 2-Dimensional model of perpendicular magnetic recording system with pole type haad and double layer media. Width of head is 0.4 mm, air gap length is 0.5 mm. Underlayer is made by Permalloy, its thickness is 5 mm. Recording media is made by Barium ferrite, its thickness is 1mm. ( $H_c : 875$  Oe,  $B_s : 1684$  G,  $S : 0.96$ )

### III. 적용모델 및 결과

그림 2는 폴형헤드와 2층매체를 가진 수직자기 기록장치의 2차원 모델이다. 1989년 Ashar [11] 등은 5 mm두께의 permalloy 위에 1 mm두께의 바륨 페라이트를 입혀 가로세로 10 cm의 기록매체를 만들고 그위 0.5 mm 위로 헤드를 움직여 기록하고 자장을 측정한 실험을 행하였다. 본 논문은 같은 모델을 대상으로 하였다. 기록헤드와 하층매체는 비투자율(permeability)이 각각 2500, 1000인 선형매질로 가정하고, 히스테리시스 특성을 갖는 기록매체의 보자력은 875 Oe, 잔류자속밀도는 1684 G, 직각도(squareness)는 0.96이며 헤드에 0.3 A의 전류를 흘리고 전류의 방향을 한번 바꾸었을 때 기록과정이 수행된 후의 모습은 그림 2와 같다.

유한요소 해석을 위하여 그림 2의 전 영역을 4402개의 요소(element)로 나누었으며 이때의 절점(node)수는 2249개 이다. 기록매체의 자화량은 화살표로 나타냈으며, 기록매체의 이방성이 강하므로 X 방향의 자화량은 무시하였다. 자화량의 천이는 한번 있으며, 기록된 자화량에 의한 자장의 분포는 그림 3과 같고, 자화량의 천이가 있는 부분 위에서의 자계의 세기는 계산치와 실험치가 잘 일치하였다[10]. 그림 3에서 기록매체의 자화량과 자장의 분포를 세밀히 보기 위하여 기록헤드 아래부분을 상하로 5배 확대하여 그린것이 그림 4와 그림 5이다. 본 논문에서는 그림 4와 같이 자화된 기록매체위를 기록헤드가 지나갈 때 헤드코일에 유기되는 재생전압을 구하였다.

그림 5는 재생과정을 보여준다. 헤드가 기록매체위를 지나면서 자화량의 천이가 있는 부분위를 지날 때 헤드의 자속의 양과 방향이 급격히 변함을 볼 수 있으며 식(5)는 자속의 미분값이 재생전압임을 말

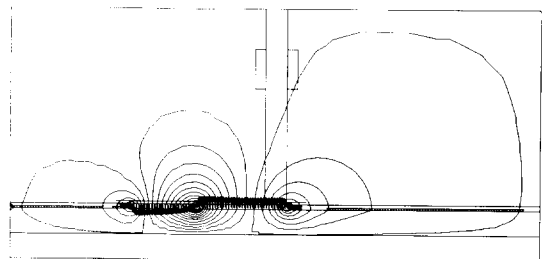


Fig.3. Flux pattern produced by magnetization of single transition.

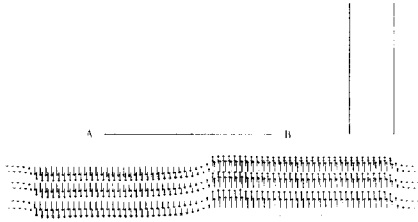


Fig.4. Recorded pattern of magnetization. Reproducing head will move along the AB line.

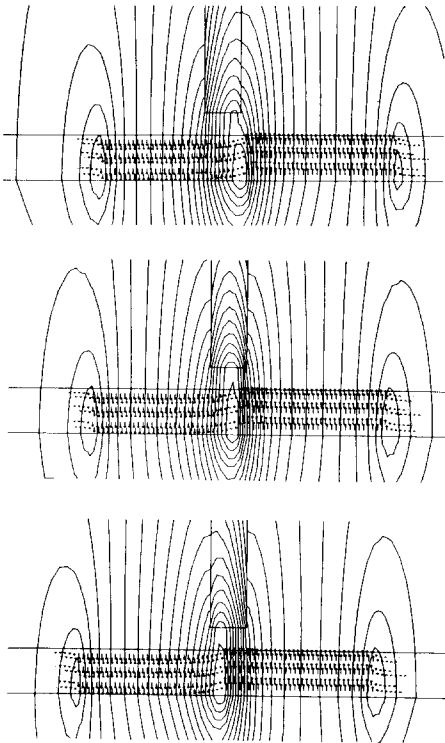


Fig.5. Reproducing process. Head moves above the transition region of magnetization. The flux inside the head changes rapidly.

해준다. 헤드가 한 지점에 있을 때 자장의 변동에 따른 자화량의 변화에 의한 반복계산은 3 내지 4회 수행되며 자화량의 변화가 0.01% 이내 일때 수렴했다고 판정하였다.

그림 6은 헤드코일이 감겨진 부분에서의 자속밀도의 값이다. 자화량의 천이가 있는 10 mm 지점 부근에서 자속밀도의 크기와 방향이 변한다. 이 때 헤드

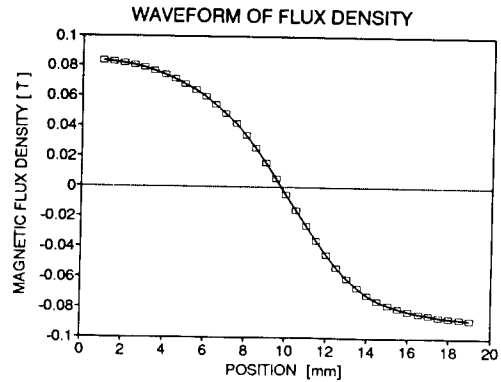


Fig.6. Change of magnetic flux density inside the head coil. Head moves along AB line in Fig. 3. The change of magnetic flux produces reproducing voltage in head coil.

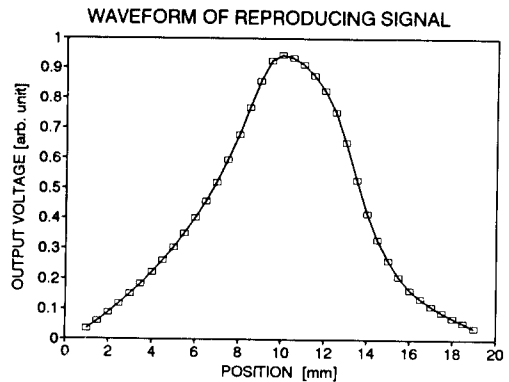


Fig.7. Waveform of reproduced voltage signal induced in head coil. Derivatives of magnetic flux in Fig.5 produces voltage in head coil.

의 코일양단에 유기되는 전압은 헤드의 코일을 지나가는 자속의 변화량에 비례한다.

그림 7은 식(5)를 적용하여 계산된 재생전압의 파형을 그린 것이다. 그림 7은 그림 6의 미분치이며 재생전압은 헤드가 움직여가는 속도, 헤드에 감겨진 코일의 권선수 등에 비례하므로 그림 7의 Y좌표의 값은 상대적인 값이다.

그림 8은 기록과정에서 헤드에 흘러주는 전류의 값을 변화시켰을 때 재생되는 전압의 크기를 나타낸 것이다. 기록과정에서 기록밀도는 17 KFRPI로 동일하게 했으며, 기록전류는 0.2 A로부터 1.0 A까지 계산했다. Y축은 재생전압의 최고치를 나타내며, 이

값은 헤드가 이동하는 속도 및 헤드코일의 턴수에 비례하므로 서로 상대적인 값이다. 그림에서 보듯이 기록전류가 0.4 A 이상에서는 재생전압의 크기가 증가하지 않으므로 본 기록장치에서 재생전압의 크기를 최대로 할 수 있는 기록전류의 값은 0.4 A임을 알 수 있다.

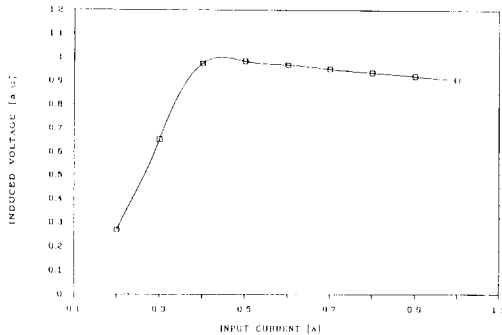


Fig.8. Magnitude of voltage induced in head coil according to increase of recording current. Induced voltage saturates when recording current exceeds 0.4 A.

#### IV. 결 론

자기기록장치에서 정보가 기록된 매체위를 헤드가 지나갈 때 헤드의 코일에 유기되는 재생전압의 파형을 구하는 방법을 기술하였다. 재생과정에서도 기록 매체위로 헤드가 지나갈 때 매체의 자장의 값이 변함으로 인해 자화량이 달라지므로 히스테리시스 특성을 고려한 수치해석방법이 필요하다. 히스테리시스 특성을 묘사하기 위한 방법으로는 Stoner-Wohlfarth 모델과 spin curling 모드를 이용한 방법의 결점을 극복하고 보다 정밀한 계산이 가능한 Preisach 모델을 사용하고, 수치해석 기법으로는 유한요소법을 사용하여 재생과정을 수치해석할 수 있는 알고리즘을

세운 후, 이것을 2층매체와 풀형헤드를 갖는 수직자기 기록장치에 적용하여 기록과정에서 계산치와 실측치가 잘 일치함을 보인 모델에서의 재생전압의 파형을 구하였다. 또한 기록전류를 증가시켰을 경우 재생전압의 크기가 포화되는 것을 구함으로써 헤드에 흘러 줄 최적의 전류값을 구할 수 있었다.

이상의 방법으로 자기기록장치에서 정보의 재생과정에서 발생하는 여러가지 현상들을 히스테리시스 현상이 포함된 수치해석으로 보다 정밀하게 계산해 볼 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] C. Denis Mee and Eric D. Daniel, Magnetic Recording. Vol 1, McGraw-Hill, New York (1987), pp. 22-97.
- [2] A. Savini, IEEE Trans. Mag. **21**(5), 1856 (1984).
- [3] S. Prusty and M. V. S. Rao, IEEE Trans. Mag. **20**(4), 607 (1984).
- [4] Y. Nakatani and N. Hayashi, IEEE Trans. Mag. **24**(6), 3039 (1988).
- [5] Y. Nakamura and I. Tagawa, IEEE Trans. Mag. **24**(6), 2329 (1988).
- [6] T. R. Koehler, J. Appl, Phys, **55**(6), 15(1984).
- [7] Y. Nakamura and S. Iwasaki, IEEE Trans. Mag. **23**(1), 153(1987).
- [8] I. D. Mayergoyz, IEEE Trans. Mag. **22**(5), 603 (1986).
- [9] M. K. Battacharyya, H. S. Gill and R. F. Simmons, IEEE Trans. Mag. **25**(6), 4479 (1989).
- [10] 박관수, 이향범, 한송엽, 정현교, 이택동, 대한전기학회 논문지 **40**(3), 258 (1991).
- [11] K. Sueoka, F. Sai and K. G. Ashar, IEEE Trans. Mag. **25**(5), 4162 (1989).

화를 그림 10에 나타내었다.

피착층 조성을  $x=0.5$ 로 하여 제조한 시료의 경우,  $100^{\circ}\text{C}$  에서 30일간 방치한 후의 보자력 특성은 초기 제조된 시료에 비해 약 8.5%의 보자력 감소율을 나타내었으며 피착층 조성  $x$ 값이 증가함에 따라 보자력의 감소율

3. 당량비 2이상에서 우수한 자기적 있으며, 반응공정도 최종생성물의 향을 미친다.
4.  $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 의 온도 및 경시변화 피착층 조성에 의해 크게 지배된다

## Analysis of Reproducing Characteristics in Perpendicular Magnetic Recording System Using Preisach Model

G. S. Park, H. B. Lee, and S. Y. Hahn

*Dep. of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742*

T. D. Lee and P. W. Jang

*Division of Metal, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791*

(Received 17 September 1991)

Numerical method for analyzing the reading process in magnetic recording system is described. Hysteresis characteristics must be included in numerical analysis not only recording process but also reading process because of hysteretic behavior of recording media. Algorithm which is consisted of finite element method for numerical analysis and Preisach model considered to be more appropriate method than Stoner-Wohlfarth model with spin curling mode for describing hysteresis characteristics is constructed. Equations to calculate waveform of reproduced voltage is proposed. Then, this is applied to perpendicular magnetic recording systems with pole type head and double layer media. Waveform of magnetic flux density and reproduced voltage induced in head coil is obtained. If the recording current increase in recording process, magnitude of reproduced voltage in reproducing process saturates. From this saturation curve, value of current which produce maximum voltage can be obtained.