

전계를 이용한 기억장치 전극의 최적 설계

이성구*, 최재학*, 김용수*, 이주*, 최승길**
 *한양대학교 전기공학과, **안산공과대학 전기공학과

Optimal Design of Electrical Probe of Record Device using Electric Field

Sung-Gu Lee*, Jae-Hak Choi*, Yong-Su Kim*, Ju Lee* and Seung-Kil Choi**
 *Dept. of Electrical Eng. at Hanyang Univ., **Dept. Electrical Eng. of Ansan College of Tech.

Abstract This paper analyzes recording density according to the shape variation of Electric Probe writer, and present a shape design method for improving recording density in perpendicular electric recording device. The gradient of electric field has to be steep to improve recording density because transition region on the media becomes wider when recording. The optimum shape of electrode could be archived by using Response Surface Methodology and 2-Dimensional Finite Element Method.

1. 서 론

근래 가정이나 산업계에서 취급해야 하는 정보의 양은 빠르게 늘어나고 있는 추세이며, 정보의 저장과 관리를 위해 각 산업계에서는 매년 엄청난 금액의 추가비용과 유지관리를 지출하고 있는 실정이다. 이와 같은 상황은 저가의 대용량 저장매체에 대한 연구개발을 촉진시켰으며 이는 자계를 이용하여 정보를 저장하는 기존의 저장매체의 기록밀도에 큰 향상을 가져왔다. 저장매체의 기록밀도 개선을 위한 연구는 지금도 끊임없이 진행 중이지만 기존의 자계를 이용하여 쓰기, 저장과 읽기를 수행하던 저장매체의 기록밀도에 대한 연구는 많은 부분 기술적 포화가 이루어진 상황이라 사료된다. 이에 자계가 아닌 전계를 이용하여 쓰기와 저장을 수행하는 저장매체의 최적화 설계에 대한 연구를 수행하고자 한다.

따라서 본 논문은 전극(Electrical Probe writer)의 형상에 따른 저장 밀도를 분석하고, 저장 밀도가 높은 형상을 결정하기 위한 설계방법을 개발하고자 한다. 설계 및 해석 방법으로 전자기계 해석 기반 기술인 유한요소법과 최적 설계를 위해서 반응표면법을 사용하여 최적 형상을 찾는 것을 목표로 한다. 전계를 이용하여 저장을 하는 방법은 기존의 자계를 이용한 방법과는 달리 아직 많은 연구가 이루어지지 않은 분야이며 단위 전하에 대한 전기력이 단위 전류에 비해 엄청나게 큰 힘이라는 사실에 비취볼 때 충분한 연구 가치가 있을 것으로 생각된다[1].

2. 본 론

2.1 기록 헤드(Write Head)

자계를 이용하는 기존의 저장 장치들은 기록헤드(Write Head), 미디어(Media), 재생헤드(Read Head) 등과 같이 크게 세부분으로 구성되어 있다. 이 중에서 정보의 저장을 담당하는 미디어는 보통 30~100nm 두께의 강자성체로 만들어져 있으며 이 미디어에 우리가 원하는 정보들을 기록하여 저장하게 된다[2]. 기존의 저장 장치들은 미디어의 강자성을 이용하여 정보를 저장하게 되는데 이는 강자성체가 가지는 히스테리시스 현상 중 자속

의 잔류현상을 응용한 기술이다.

그림 1은 본 논문에서 논의할 전계를 이용하여 정보의 쓰기와 저장을 수행하는 저장 장치의 전극형상과 미디어를 나타내고 있다. 미디어는 30nm 두께의 강유전체로 되어 있으며 길이는 5000nm이다. 이와 같은 미디어의 길이는 전극과의 상호작용이 유효한 효과가 있는 구간이란 예측 하에 선정하였으며 이렇게 구성된 모델을 가지고 전극의 형상 최적 설계를 진행하였다.

본 연구에서는 미디어로 사용된 강유전체에 전계를 가하여 유전체의 극성 배열을 바꾸고 이렇게 바뀐 극성 배열들을 강유전체의 히스테리시스 현상을 이용해 유지하는 방식으로 정보를 기록하였다.

그림 2는 미디어에 저장되는 분극의 방향을 나타내고 있다. 분극은 미디어 면에 수평한 방향과 면에 수직인 방향 두 가지 모두가 가능하나 본 논문에서 기록밀도를 높이기 위해 채택한 방식은 분극의 방향이 수직인 형태이다. 미디어의 분극 방향과 기록밀도 상호간의 관계는 본 논문에서 고려하지 않았다. 대신 자계를 이용한 저장매체에서의 경향을 참고하여 미디어 면에 수직인 방향의 분극 형태가 높은 기록 밀도에 유리할 것으로 예상하여 이와 같은 방식을 채택하게 되었다.

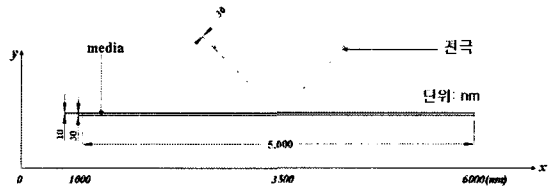
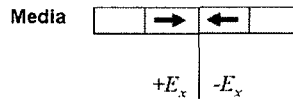
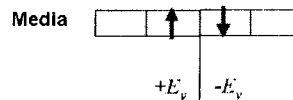


그림 1. 기록헤드 전극과 미디어



(a) 수평 방향



(b) 수직 방향

그림 2. 기록 방향

미디어의 극성을 바꾸어 정보를 저장하기 위한 헤드로 전극을 사용하는데, 이 전극의 모양에 따라 미디어에 저장될 수 있는 기록밀도가 결정된다. 미디어에 저장되는 기록 밀도는 전극과 강유전체 사이에서의 전계의 분포와 강유전체의 물성적인 성질에 의해 결정되는 값이다. 헤드인 전극의 형상에 따라 강유전체의 각 지점에 작용하는 전계의 세기가 달라지며 이에 따라 미디어의 분극도 영향을 받게 된다. 정보는 0과 1로 인코딩 되어 미디어에 저장되며 위쪽 방향의 분극을 0, 아래쪽 방향의 분극을 1로 구분하여 기록하게 된다. 궁극적으로 기록밀도를 높이기 위해서는 특정 지점, 특정 크기에서의 전계의 Gradient를 높게 하는 전극 형상을 결정해야 된다.

그림 3에 나타나 있듯이 전계의 Gradient를 높이면 강유전체에서 극성배열시 transition 영역이 좁아져서 기록 밀도를 증가시킬 수 있다. 강유전체의 극성 배열에 지배적인 영향을 미치는 전계의 방향성분 벡터는 강유전체 미디어의 분극 방향에 따라 결정된다. 즉 수직방향 기록 미디어의 경우, 헤드의 수직방향 성분 전계의 Gradient를 높게 하면 된다. 미디어의 이동방향에 따라 Trailing edge 부분이 달라지므로, 기록밀도를 높이기 위해서는 미디어의 보자력 위치에서 Trailing edge 부분의 Field Gradient가 높아야 한다. Trailing edge 부분의 Field Gradient에 영향을 주는 변수로 본 논문에서 고려한 것들은 모두 전극의 형상과 관련된 변수들이며 전극과 미디어의 유전율과 같은 물성적인 변수들은 본 논문에서 고려되지 않았음을 밝혀두는 바이다. 이와 같은 물성적인 변수들은 다른 연구에서 나온 결과들을 참고로 하였으며 그 중에서 본 연구에 가장 적합하다 생각되는 값들로 연구를 수행하였음을 아울러 밝히는 바이다.

그림 4는 형상과 관련된 변수로써 전극 끝단의 폭(w)과 전극이 미디어와 이루는 각도(θ)를 나타내고 있다. 이와 같은 전극의 전체적인 형상은 이론적인 예측을 통해 가장 적합한 것으로 판별된 모델의 형상을 채택한 것이다.

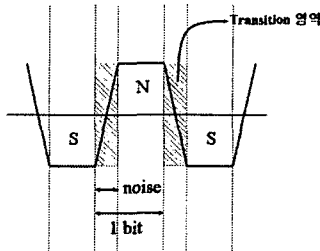


그림 3. 기록 영역과 Transition 영역

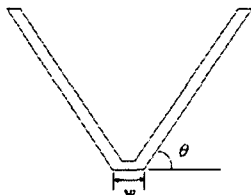


그림 4. 설계 변수

2.2 반응 표면법

본 논문에서는 설계자가 관심을 가지고 있는 반응과 설계 인자들의 관계를 근사적으로 모델링하고 개선 및 최적화하기 위한 유용한 수학적, 통계적 기술들의 집합인 반응표면법(RSM)을 이용하여 Prove writer 설계에 적용하였다. 이 반응표면법은 1951년 Box와 Wilson에

의해 처음 소개되었으며, 그 후 주어진 설계 영역에서 적절한 설계 변수들의 점을 선택하는 실험 계획법(Design of Experiments)에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 근사함수를 생성하기 위한 방법으로는 크게 최소자승법(Least Square Method)과 변수선택법(Variable Selection Method), 근사화된 함수를 평가하기 위한 분산분석(ANOVA), 그리고 반응치를 구하기 위해 설계 공간에 실험 점들을 선택하는 실험계획법(DOE)이 있다. 이 중에서 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻기 위하여 어떻게 실험을 행하고 데이터를 어떻게 취하여 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 되는가 하는 것을 계획하는 실험계획법을 채택하였으며 다항식 모형에서 널리 사용되는 실험계획법으로서의 중심합성 계획법(Central Composite Design)을 이용하였다.

그림 5는 설계변수 개수가 두 개일 때, 실험 데이터의 관측수를 나타내고 있다.

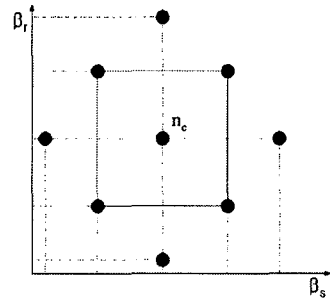


그림 5. 2수준 2인자 중심합성계획법

중심 합성 계획법의 실험 횟수는 다음 식 (1)과 같이 계산 할 수 있다.

$$n=2^k+2k+n_c \quad (1)$$

여기서 2^k 는 요인 배치법에 의한 설계를 위한 실험수이고 $2k$ 는 축상의 점의 수이다. n_c 는 중심점에 대한 반복 실험 횟수이다.

이와 같은 실험 점들을 가지고 수치해석기법중의 하나인 유한 요소해석을 수행하여 얻어진 반응 값 y 을 토대로 n 개의 설계변수와 실제 응답 사이의 관계를 통계적으로 근사 하는 것이 RSM이다. 실험을 통해서 얻어진 반응 값은 어느 정도의 근사 오차로 인해 실제 응답과는 다르며 관계식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)+\varepsilon \quad (2)$$

여기서 $u=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 는 m 개의 설계 변수를 가진 실제 응답 함수이며 ε 는 응답에 대한 오차 항이다.

실제 응답 함수는 테일러급수 전개로부터 1차 또는 2차의 다항식 형태로 나타낼 수 있고 반응표면은 식 (3)에 의해서 표현된다.

$$u=\beta_0+\sum_{j=1}^m\beta_jx_j+\sum_{j=1}^m\beta_{jj}x_j^2+\sum_{i=1}^m\sum_{j=i+1}^m\beta_{ij}x_ix_j \quad (3)$$

2.3 최적설계 결과

그림 6은 중심합성계획법에 의한 실험점 중 한예를 해석한 결과를 나타내고 있다. 선으로 표시된 것은 등전위선이며, 화살표는 전계의 벡터를 나타낸다. 유한 요소 해석시 전극에는 -5V 전압을 인가하였다.

그림 7은 전극의 아래지점을 미디어의 중심점으로 보고 이를 기준으로 앞뒤 500nm 구간에서의 전계의 수직 성분의 값들을 나타낸 그림이다. 전계의 값들은 미디어의 중간 두께 즉 15nm 깊이에서 계산되었다. 수직방향 성분의 전계의 Gradient를 보면, 중심 좌표 500nm를 중심으로 대칭이다. 미디어의 이동방향을 좌에서 우로 가정하였을 때, Trailing edge를 중심으로부터 왼쪽으로 증가하였다. Trailing edge 부분의 Field Gradient가 미디어의 분극에 영향을 주기 때문에 이 위치에서의 Field Gradient를 살펴보아야 한다.

그림 8은 중심합성계획법에 의해 선정된 실험점에 대한 반응표면 분석결과를 나타내고 있다. MINITAB을 이용하여 중심합성계획법으로 실험점들을 추출하였고 추출된 점들을 기준으로 하여 유한 요소해석을 통한 반응값들을 구하였다. 이 실험 점들에 의한 회귀분석 결과를 보여주고 있다. AVOVA표에서 선형항, 제곱항, 교호작용항의 p값이 모두 0.05보다 작으므로 이 분석이 유의함을 알 수 있다. 조정된 상관계수, R-sq(adj)가 95.7%로 전체 변동 중 회귀 곡선에 의해 설명되는 변동이 매우 높은 편임을 알 수 있어 반응표면이 잘 묘사되었음을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10의 각 값들은 미디어의 Trailing edge 지점에서 산출된 전계의 Gradient 값들이다. Trailing edge 지점에서 미디어의 보자력에 해당하는 전계의 크기(0.6V/m) 지점에서 계산된 전계의 Gradient 값들이다.

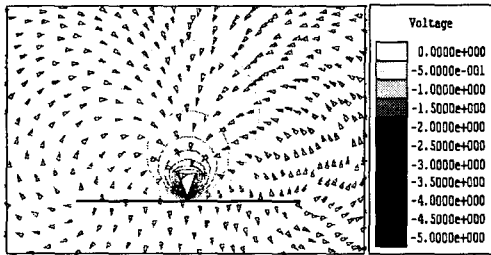


그림 6. 유한 요소 해석결과

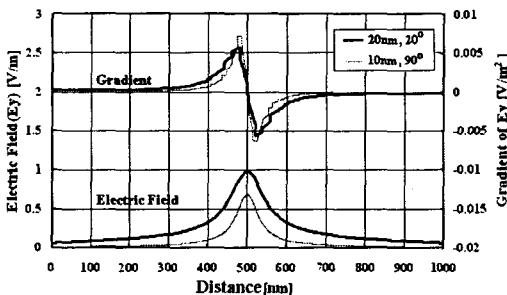


그림 7. 미디어의 중간 위치에서의 수직방향 전계의 크기

Estimated Regression Coefficients for 0.6				
Term	Coeff	SE Coef	T	P
Constant	-0.002826	0.002341	-1.207	0.267
width	0.000040	0.000056	0.708	0.502
angle	0.000297	0.000056	5.301	0.001
width*width	0.000001	0.000000	1.454	0.142
angle*angle	-0.000001	0.000000	-2.482	0.042
width*angle	-0.000002	0.000001	-3.595	0.009

S = 0.0001264 R-Sq = 97.5% R-Sq(adj) = 95.7%

Analysis of Variance for 0.6						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0.000004	0.000004	0.000001	54.13	0.000
Linear	2	0.000004	0.000000	0.000000	15.54	0.003
Square	2	0.000000	0.000000	0.000000	5.24	0.041
Interaction	1	0.000000	0.000000	0.000000	12.93	0.009

그림 8. 회귀 분석 결과

반응표면에서 보듯이 전극의 폭이 작고, 전극의 각도가 클수록 수직방향 전계의 Gradient가 크다는 것을 알 수 있다. 전계의 Gradient가 전극의 옆면이 수평축과 이루는 각도에 더 많은 영향을 받으며 상대적으로 전극의 끝단 폭의 영향은 적은 것으로 나왔다. 전계 Gradient의 최대값은 폭이 0부근이면서 각도가 90도 부근에 존재함을 알 수 있다. 이는 전극 형상은 역삼형 모양보다는 직각형태의 전극이 Field Gradient를 높게 할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

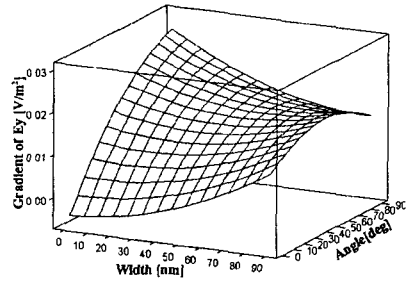


그림 9. 설계 변수에 따른 반응 표면

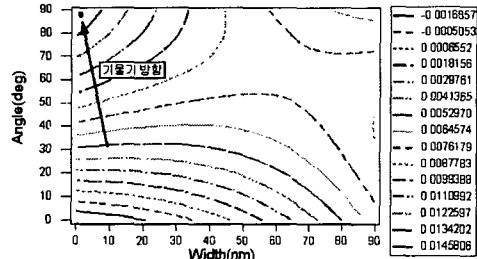


그림 10. 설계 변수에 따른 2차원 평면도

3. 결론

본 논문에서는 전계를 이용하여 정보의 기록과 저장을 수행하는 저장 장치의 Writer Head에 관한 연구를 수행하였다. 높은 기록 밀도의 쓰기가 가능한 Writer Head의 최적 형상을 구하기 위해 RSM과 유한요소법을 사용하여 해석과 최적 설계를 수행하였다. 전극의 끝단 폭과 전극의 옆면이 미디어와 이루는 각도를 설계변수로 하여 연구를 진행하였다. 중앙합성계획법을 통해 구한 실험점들에 대해 유한요소해석을 이용하였으며, 전극의 모양이 직각형태의 모양이 Field Gradient를 높다는 것을 알 수 있었으며, 이와 같은 특성을 갖는 설계 지점에서 미디어의 transition 구간이 최소한으로 줄어들게 되어 저장 장치의 최대 기록 밀도 증대를 가져 올 수 있을 것으로 사료 된다.

감사의 글
본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참고 문헌]

- [1] Edward M. Purcell, "Electricity and Magnetism," Berkeley Physics Course. Volume 2, pp. 107-130, Second Edition.
- [2] C. Denis Mee, Eric D. Daniel, "Magnetic Recording Technology," McGRAW HILL, Chapter 3. Second Edition.