

**Bistable Magnetic Ball을 이용한 전력소비를 최소화하는 Magnetophoretic Display System에 관한 연구**

**김재민, 윤승호, 원혁, 박관수**  
 부산대학교 전자전기공학과

**Research on Magnetophoretic Display System to minimize power consumption by using Bistable Magnetic Ball**

Jae Min Kim, Seung Ho Yun, Hyuk Won, Gwan Soo Park  
 Department of Electronic and Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - 최근 불안정한 세계 경제상황으로 인해 에너지의 효율문제가 대두되고 있다. 본 논문에서 제안된 시스템은 화면의 내용을 갱신할 때만 전원이 필요하고 표시된 화면을 유지할 때는 전원을 전혀 사용하지 않는 시스템으로 효율적인 면에서 상당히 유리하다. 영구자석 볼은 극에 따라 흰색과 검은색으로 도색되어 있고 아래에 위치한 또 하나의 영구 자석의 자화 상태에 의해 그 상태가 바뀌는 구조로 되어있다. 본 논문에서는 이러한 시스템을 해석하기 위하여 3차원 유한요소법을 사용하였다.

**1. 서 론**

현대사회에서 디스플레이 장치는 빼놓을 수 없는 중요한 산업으로 부각되고 있다. 디스플레이 장치는 소형에서 대형에 이르기 까지 그 응용 범위가 다양하고, 산업 기기에서 가전제품까지 실생활에 널리 사용되고 있는 추세이다. 최근 급등하는 유가와 불안정한 세계 경제상황으로 인해 에너지의 효율문제가 대두되고 있다. 디스플레이 산업에서도 역시 이와 같은 문제가 중요시 되면서 효율을 높이기 위해 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지 효율을 높이기 위해 디스플레이의 변화가 적을 때는 전력을 줄이거나, 절전을 하는 방법을 사용하지만, 움직임이 없는 문서나 사진 등의 고정된 상태에서도 화면에 표시할 때 전력공급을 하고 있다. 이러한 에너지 소비는 기기가 대형화 될수록 증가하고 있다.

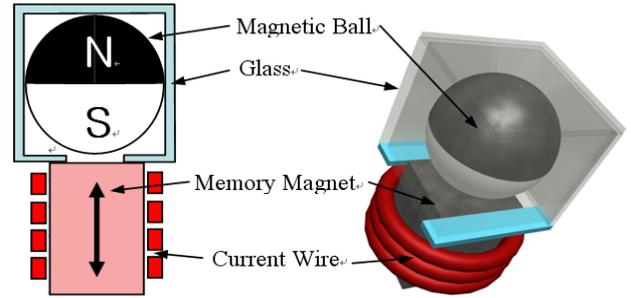
본 논문에서는 에너지 효율을 높이기 위해 화면 변화가 작은 대형 디스플레이 장치에서 변화가 일어나지 않는 시점에서는 에너지 소비를 하지 않는 방법을 제안하였다. 제안된 디스플레이 장치는 표시 부분에 영구 자석 볼을 사용하였다. 영구자석 볼은 두 극으로 이루어져 있고 각각 극에 흰색과 검은 색으로 도색이 되어 있는 형태이다. 영구자석 볼 아래에 위치한 메모리 영구자석의 상태에 의해서 그 상태를 달리하여 화면을 표시하는 원리로 되어 있다. 이는 두 개의 영구자석을 이용한 시스템이기 때문에 화면을 갱신시킬 경우에는 에너지가 필요하지만, 화면을 유지하기 위해서는 전력소비가 전혀 필요치 않으므로 전력 소비를 최소화하는 장점을 가진다. 이는 화면이 자주 갱신되지 않는 대형 디스플레이 시스템에 사용된다면 엄청난 에너지 절감효과를 볼 수 있다.

이러한 원리로 동작하는 디스플레이 장치에 대해 3차원 유한요소법을 사용하여 전자기 해석을 하였고, 실험을 통하여 그 동작을 살펴보았다.

**2. 본 론**

**2.1 Magnetophoretic Display System의 구조**

Magnetophoretic display system은 두 개의 영구 자석을 사용하여 표시화면을 갱신할 때만 전력을 사용하고, 갱신하지 않을 때는 고정되어 화면을 유지하기 때문에 어떠한 외부 에너지도 사용하지 않는 시스템이다. 그림 1은 Magnetophoretic display system의 구조를 나타내고 있다. 상단의 식별 시스템으로 사용된 것은 Bistable magnetic ball이다. 영구 자석 볼은 한 쌍의 N극과 S극으로 구성되어 있고 각 극은 흰색과 검은 색으로 도색이 되어 있다. 이 영구자석 볼은 투명한 물질로 감싸 있어서 그 상태의 변화에 따라 흰색 또는 검은색의 표시를 외부에서 볼 수 있다. 그 아래에는 코일이 감겨있는 구조의 또 다른 영구 자석이 위치해 있다. 이 영구자석은 시스템에서 셀의 상태를 기억하는 역할을 하므로 메모리 영구자석이라고 부른다. 코일에 전류가 흐르면 메모리 영구 자석의 자화상태가 변하고, 이에 의해 상단에 위치한 영구자석 볼이 회전하여 화면 상태를 갱신하게 된다. 따라서 본 시스템은 흰색과 검은색, 두 가지 표현을 화면에 나타낼 수 있다. 시스템은 두 개의 영구 자석을 이용하므로 화면에 표시된 내용이 갱신되지 않는 이상, 에너지의 소모가 없어 효율이 높다. 이것은 화면에 표시된 내용을 자주 갱신하지 않는 중 대형 디스플레이 장치에 사용할 경우 보다 향상된 에너지 절감 효과를 볼 수 있을 것이다.



**<그림 1> Magnetophoretic Display System의 셀 구조**

**2.2 Magnetophoretic Display System의 전자기적 해석**

**2.2.1 지배방정식**

정자계에서 성립하는 방정식은 다음과 같다. Force density F, 전류밀도 J, 자속밀도 B 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = J \times B \tag{1}$$

맥스웰 방정식으로부터 식 (1)은

$$f = (\nabla \times H) \times B = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B \tag{2}$$

으로 된다. 위의 부피 Force density F는 미소 체적에 미치는 힘에 대한 수식이므로 체적에 대해 적분을 하고 벡터 등식으로 바꿔 표현하면 식 (3)과 같다.

$$F = \frac{1}{\mu_0} \left[ \int_V (B \cdot \nabla) B dv - \int_S \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} ds \right] \tag{3}$$

부피에 대한 적분과 표면에 대한 적분으로 구성된 식 (3)에서, 부피에 대한 적분식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$(B \cdot \nabla) B = (B \cdot \nabla) B_x \hat{x} + (B \cdot \nabla) B_y \hat{y} + (B \cdot \nabla) B_z \hat{z} \tag{4}$$

$$\nabla \cdot (B_x B) = (B \cdot \nabla) B_x + B_x (\nabla \cdot B) \tag{5}$$

$$\int_V (B \cdot \nabla) B_x dv = \int_V \nabla \cdot (B_x B) dv = \int_V B_x (B \cdot \hat{n}) ds \tag{6}$$

(4), (5), (6) 식에 의해 식 (3)은 (7)과 같이 표현이 되고,

$$F = \int_S \frac{1}{\mu_0} \left[ (B \cdot \hat{n}) B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] ds \tag{7}$$

식 (7)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F = \int_S P ds \tag{8}$$

여기서,

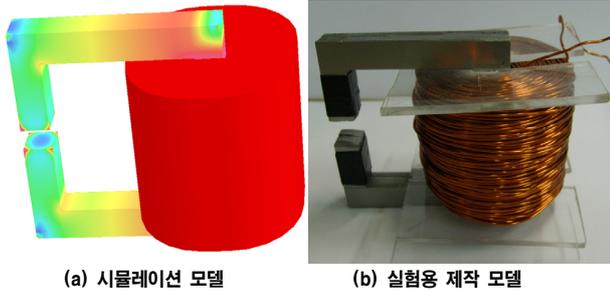
$$p = \frac{1}{\mu_0} \left[ (B \cdot \hat{n})B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] \quad (9)$$

식 (8)에서 P는 식 (9)로 표현되고 이것이 Maxwell Stress tensor이며, 본 논문의 시스템은 위 지배방정식과 자기 포화 곡선을 이용한 비선형 문제이므로, 오차가 일정 값 이하로 될 때까지 유한요소법으로 반복 계산해야 한다.

### 2.3 Magnetophoretic Display System의 모델링

#### 2.3.1 Bistable Magnetic Ball

Bistable한 영구자석 볼을 제작하기 위해 본 연구에서는 그림 2와 같은 착자 시스템을 제작하여 사용하였다.



(a) 시뮬레이션 모델

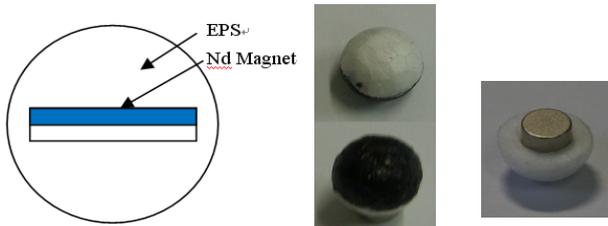
(b) 실험용 제작 모델

〈그림 2〉 영구자석 볼의 착자시스템

그림 2의 (a)는 영구자석 볼의 시뮬레이션 모델이고 (b)는 실험용 제작 모델로써 4A/turn의 전류를 인가함에 따라 약 1200 Oe 정도의 자기장을 발생시킨다. 이 시스템으로 제작한 영구자석 볼은 무게는 2.72g, 지름은 9mm이다. 보자력은 500 Oe 정도로 본 모델에 사용하기 적합한 크기이지만 착자 시스템을 이용하여 착자한 결과 Mr값은 35 ~ 100 Oe 정도로 메모리 자석과의 반발력을 일으키기에는 다소 작다고 볼 수 있다. 실험 결과 영구자석 볼의 상태는 변화되지 않았다. 그 이유는 영구자석 볼의 무게가 메모리 자석과의 반발력으로 회전시키기에 너무 무겁기 때문이다. 즉, 자석에서 발생하는 자기장의 세기가 너무 작기 때문이다.

#### 2.3.2 Nd 자석을 삽입한 구조의 영구자석 볼

위 문제를 해결하기 위해 그림 3과 같이 EPS수지 내부에 Nd자석을 삽입하여 영구자석 볼을 제작하였다. EPS 수지는 단열재, 포장완충재 등에 쓰이는 물질로 가볍고 가공하기 쉽다는 특성을 가지고 있다. 표 1에서 나타난 바와 같이 앞서 제작한 볼에 비해 무게가 1/6으로 줄었다. 또한 Nd자석 표면에서 자기장의 세기는 2900Oe 정도이고 둘러싼 EPS 수지 표면에서는 680 ~ 750 Oe 정도를 가진다. 발생하는 자기장은 반발력으로 영구자석 볼을 회전시키기에 충분한 크기이다.



〈그림 3〉 영구자석 볼의 구조

〈표 1〉 영구자석 볼의 주요 Specification

Weight	Diameter	Hc	Mr
0.48[g]	9[mm]	5000[Oe]	2900[Oe]

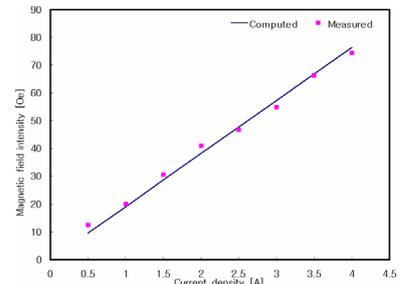
#### 2.3.3 메모리 영구자석

메모리 자석 모델의 형태는 그림 4의 (a)와 같이 원통 형태이다. (b)는 메모리 자석에서 4mm 높이에 발생된 자기장의 세기를 시뮬레이션 한 결과와 실제 모델을 실험한 결과를 비교해 놓은 그래프이다. 아래의 그래프에서 보듯이 실험결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 알 수 있

다. 메모리 자석에 4A/turn의 전류를 인가하였을 경우 800e 정도의 세기를 보이며 잔류 자화량은 200e 정도이다.



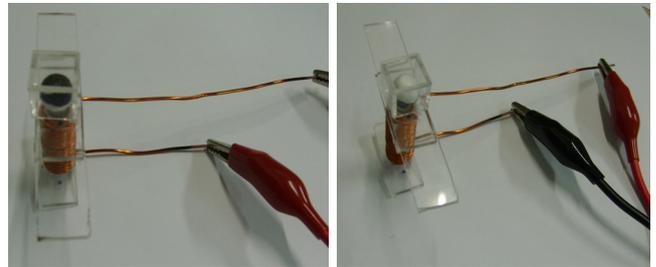
(a)메모리 영구자석의 모델링



(b)메모리 자석의 세기

〈그림 4〉 메모리 영구자석

그림 5는 EPS 수지로 구성된 영구자석 볼을 이용하여 Magnetophoretic display system이 작동하는 모습을 나타내었다. 그 결과 전류밀도 4A/turn을 인가하였을 경우 메모리 자석의 자화된 방향에 따라 영구자석 볼이 흑과 백으로 변화되는 모습을 확인할 수 있었다.



〈그림 5〉 영구자석 볼을 이용한 Magnetophoretic Display System의 구동

### 3. 결 론

본 논문은 Bistable한 영구자석 볼을 사용하여 에너지 효율을 높이기 위해 표시된 화면의 변화가 일어나지 않는 시점에서는 에너지 소비를 하지 않는 방법에 관하여 연구하였다. 이를 위해 영구자석 볼과 메모리 영구자석이라는 두 자석의 상호작용을 이용하는 방법을 사용하였다. 본 논문에서는 두 가지의 영구자석 볼을 제작, 사용하여 연구가 진행되었는데 완벽한 하나의 볼 형태의 자석을 사용할 경우 그 구조적인 문제로 인해 여러 가지 문제가 발생하여 영구자석 볼이 회전되지 않았다. 이를 해결하기 위해 구형의 EPS 수지 내부에 납적한 형태를 가진 Nd 자석을 사용하였으며 그 결과 정상적으로 구동하는 Magnetophoretic display system을 구현할 수 있었다. 본 논문에서 제안된 방식의 디스플레이 장치를 사용하였을 경우 보다 향상된 에너지 절감효과를 얻을 수 있을 것이다.

이에 차후 단일 셀 구조가 아닌 멀티 셀 구조에서의 문제와 USB 입출력 장치를 이용하여 컨트롤되는 디스플레이 표현에 대해 연구를 보완해 나갈 것이다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력 양성사업의 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Gwan SooPark and Hyuk Won, "Eddy Current Effects on the High Density Magnetic Recording System", IEEE Trans. On Mag., vol. 42, No. 4, April 2006
- [2] Chang Seop Koh, Song-yop Hahn and Gwan Soo Park, "Vector Hysteresis Modeling by Combining Stoner-Wohlfarth and Preisach Models", IEEE Trans. On Mag., Vol. 36, No. 4, July 2000
- [3] N. Nishimura et al., "Magnetic tunnel junction device with perpendicular magnetization films for high-density magnetic random access memory", J.Appl. Phys., vol.91, Apr. 2002
- [4] Johan Akerman, Philip Brown, Mark DeHerrera, Mark Durlam, "Demonstrated Reliability of 4-Mb MRAM", IEEE Trans. On Mag., vol.4, No.3, September 2004.