

# 자기 구동기의 역 자기변형성 모델링 및 검증

## Modeling and Verification of Inverse Magnetostrictive Effect of Magnetic Actuator

\*#박해정<sup>1</sup>, 박영우<sup>1</sup>, 최형욱<sup>1</sup>

\*#H. J. Park(army05@naver.com)<sup>1</sup>, Y. W. Park<sup>1</sup>, H. W. Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 충남대학교 BK21메카트로닉스 사업단 메카트로닉스공학과

Key words : Inverse magnetostrictive effect, Magnetostrictive material, Piezoelectric material, Magnetic actuator

### 1. 서론

본 논문에서는 코일을 이용하지 않고 자기력을 제어하는 자기 구동기를 설계하고, 모델링과정을 거쳐 실험으로 검증하려 한다. 기존의 자기 구동기는 코어와 코일을 사용하여 자기력을 발생시키고, 제어하는 방식으로 되어 있으나, 이러한 방법의 문제점은 코일의 발열, 인덕턴스에 의한 손실 및 공간적인 부분에서 발생하므로, 이러한 부분을 지능재료의 특성을 이용하여 개선하고자 한다.

자기변형재료는 자기장을 인가하면 그에 상응하는 변위를 발생한다. 널리 알려진 압전소자보다 큰 힘과 변형율을 가지고 있기 때문에 새로운 구동기로 주목 받고 있다. 이러한 자기변형재료의 역자기변형 효과를 이용하여 영구자석의 자기력을 제어하여 구동기로서의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가해보고자 한다.

### 2. 구동기 구조 및 모델링

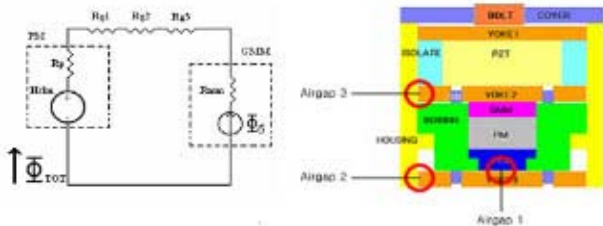


Fig. 1 Magnetic equivalent circuit of magnetostriction material and air-gap

Fig. 1에서 보면, 전체구조는 내부구조의 보호와 자기력의 통로로 사용하기 위한 Housing과 Cover가 존재하며, 이들은 자력을 통할 수 있는 강자성체로 구성된다. 압전소자(PZT)에 예압을 줄 수 있는 Bolt가 존재하며 이는 Cover와 결합되어 있고, 그 아래에 압전소자가 위치하게 된다. 압전소자는 Yoke2와 접해 있으며, Bobbin과 Yoke2 사이에는 0.5mm의 공극을 두어 압전소자가 변형할 시 Yoke2가 Bobbin에 닿지 않고, 자기변형재료(GMM)에 힘을 전달 할 수 있게 하였다. 자기변형재료 아래에는 영구자석(PM)이 위치하며, 영구자석 아래에는 Yoke3에 자력을 전달 할 수 있도록 강자성체인 Rod가 존재하게 된다.

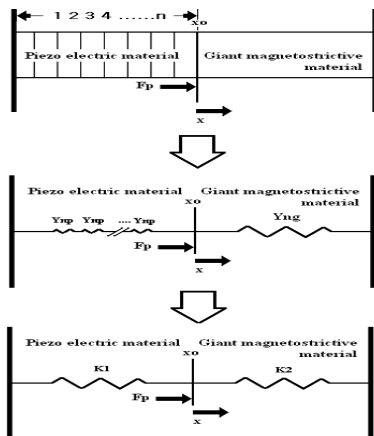


Fig. 2 Spring model of smart material

Fig. 2와 같이 지능재료를 간단히 스프링의 병렬연결을 이용하여 표시하고 모델링할 수 있다. 따라서 힘  $F_p$ 에 대하여 총 변위  $x$ 는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$K_1 = \frac{Y_{np}}{n}, F_p = \frac{Y_{np}}{n}x = K_1x \quad (1)$$

압전재료와 마찬가지로 자기변형 재료도 같은 방식으로 표현된다. 하지만 자기변형 재료는 스택구조가 아니므로, 식 (2)처럼 표현이 가능하다.

$$K_2 = Y_{nG}, F_p = \frac{Y_{nG}}{x} = K_2x \quad (2)$$

두 재료가 서로 블럭된 곳에서 연결되어 있으므로,  $F_p$ 에 대한 총 변위는 다음과 같다.

$$F_p = (K_1 + K_2)x \quad (3)$$

$$x = \frac{F_p}{(K_1 + K_2)} \quad (4)$$

전체 자기저항은 다음과 같으며,

$$R_{TOT} = R_p + R_{g1} + R_{g2} + R_{g3} + R_G \quad (5)$$

Fig. 3에서 자기회로를 흐르는 총 flux  $\Phi_{TOT}$ 는 영구자석으로 인해 만들어지는 flux  $\Phi_p$ 와 외부 힘에 의해 자기변형재료가 생성하는 flux  $\Phi_\sigma$ 의 합으로 표현된다.

$$\Phi_{TOT} = \Phi_{pm} + \Phi_\sigma = \frac{H_m^l}{R_{TOT}} + \Phi_\sigma \quad (6)$$

여기서 자기변형재료가 생성하는 flux  $\Phi_\sigma$ 를 구하기 위해서 식(4)을 이용하면,

$$B_\sigma = d_G \sigma_G, \Phi_\sigma = A_G d_G \sigma_G \quad (7)$$

그러므로,  $\Phi_{TOT}$ 은 식(5)에 식(6)을 대입하여 구할 수 있다.

$$\Phi_{TOT} = \frac{H_m^l}{R_{TOT}} + A_G d_G \sigma_G \quad (8)$$

여기서 최종 목표는 Airgap1의 힘의 변화이다. 따라서 Airgap1의 힘을 살펴보면,

$$F_{g1} = \frac{\Phi_{g1}^2}{2A_{g1}u_0} = \frac{\Phi_{TOT}^2}{2A_{g1}u_0} = \frac{(\Phi_{pm} + \Phi_\sigma)^2}{2A_{g1}u_0} = \frac{\Phi_{pm}^2 + 2\Phi_{pm}\Phi_\sigma + \Phi_\sigma^2}{2A_{g1}u_0} \quad (9)$$

외력에 의해 변화하는 힘은  $\Phi_\sigma$ 에 관여하므로, 식 (10)와 같다.

$$F_\sigma = \frac{2\Phi_{pm}\Phi_\sigma + \Phi_\sigma^2}{2A_{g1}u_0} \quad (10)$$

Table 1 Parameter of design variables

	stiffness (N/m)	piezo constant	perme ability	radius (mm)	thickness (mm)
Piezo	$0.9 \times 10^{10}$	$10 \times 10^{-9}$	*	12.5	15
Magnetostrictive material	$0.8 \times 10^{10}$	$0.9 \times 10^{-9}$	$5 * \mu_0$	10	5
Magnet	*	*	$\mu_0$	10	10
Gap	*	*	$\mu_0$	10	0.1

### 3. 실험 결과

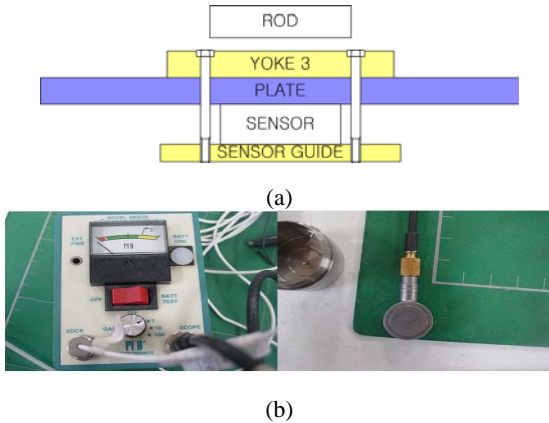


Fig. 5 Experimental structure(a) and Force sensor(b)

자기력의 변화를 측정하기 위하여 Fig. 5의 (a)와 같이 실험 장치를 구성하였고, Yoke3에 가해지는 자기력의 변화를 측정하기 위하여 Force sensor인 PCB社의 Model 480E09(b)를 사용하여 측정하였다.

#### 3.1 압전소자의 변위와 힘

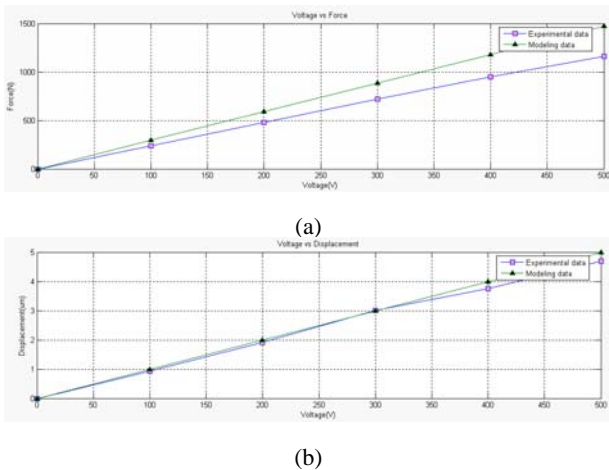


Fig. 6 Force(a) and displacement(b) of piezoelectric material

Fig. 6은 압전소자에 0~500V를 인가하였을 때 발생하는 변위와, 힘에 대한 수학적 모델과 실험값의 비교 그래프이다. 압전소자에서 발생하는 최대 힘은 약 1200N이며, 모델과의 차이는 약 300N의 차이를 보였다(a). 압전소자의 변위는 약 4.7um로 5um로 계산된 모델과는 약 6%의 오차를 보이는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 압전소자에 의한 자기변형 재료의 변형

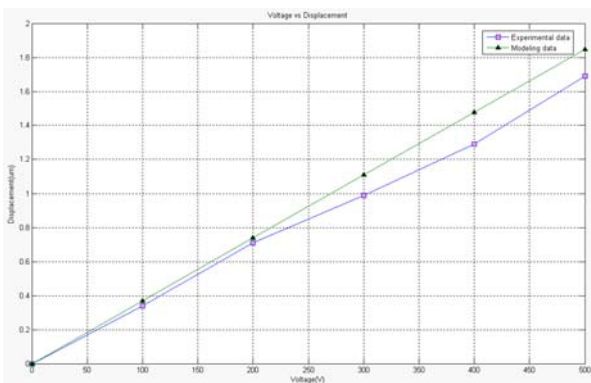


Fig. 7 Displacement of magnetostrictive material by piezoelectric material

Fig. 7은 압전소자에 의해 자기변형 재료의 변위를 측정된 그래프이다. 수학적 모델로 본 자기변형 재료의 변위는 약 1.85um으로 나타났다. 실제 측정된 자기변형 재료의 변위는 약 1.69um가 되어 9%가량의 오차를 보이고 있다.

#### 3.3 자기력의 변화

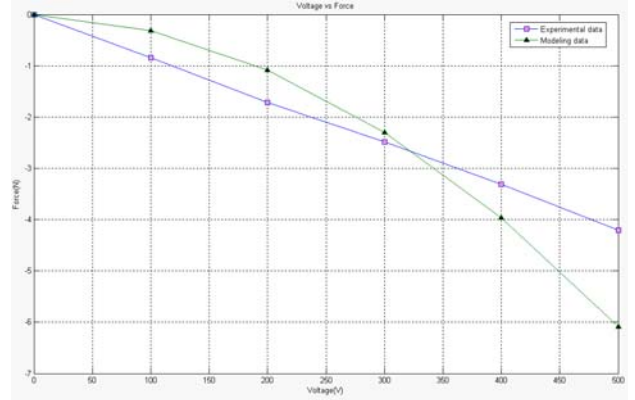


Fig. 8 Variation of magnetic force

본 구동기의 목적인 Yoke3에 가해지는 자기력의 변화를 보여주는 그래프가 Fig. 8에 나타나있다. 총 자기력의 변화는 모델이 약 6N의 변화를 보이는데 반해, 실제 출력 자기력은 4N의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 모델의 형상은 비선형임에 비해 실제 출력된 자기력의 변화 곡선은 선형임을 볼 수 있다.

이러한 차이를 보이는 것은 수식(10)에서 볼 수 있듯이 외력에 의해 발생하는 자기흐름의 영향이 비선형을 띄고 있다. 하지만 실험에 의한 결과를 토대로 살펴보면, 외력에 의한 자기흐름의 영향이 수학적 모델보다 작아 이러한 결과가 출력되었다고 판단된다.

### . 결론

본 논문에서는 코일을 이용하지 않고 자기력을 제어 하여 코일이 가지고 있는 단점을 극복 할 수 있는 방법에 대하여 논하였다. 최종 목적인 자기력의 변화의 수학적 모델에 있어서 발생한 문제점의 원인은 자기변형 재료가 외력에 의해 변형하면서 생성되는 자기흐름이 구조를 이루고 있는 자기 통로를 지나면서 상쇄되어 그 영향의 감소로 추측된다. 이러한 현상은 자기 통로를 이루고 있는 강자성체의 비선형적 투자율과 온도변화에 기인되는 것으로 판단된다. 이와 같은 문제점을 개선한다면 더욱 성능이 좋은 자기 구동기를 설계 및 제작할 수 있을 것이라고 보며, 앞으로 정밀 제어를 위한 구동기기술로서 충분히 가치 있는 연구라 할 수 있다.

### 후기

본 연구는 산업자원부와 한국 산업 기술 재단의 지역혁신 인력 양성사업으로 수행된 연구결과임.

### 참고문헌

1. D. Jiles, "Theory of the magnetomechanical effect", J. Phys. D, vol. 28, pp. 1537-1546, 1995.
2. T. Ueno, J. Qiu, and J. Tani, "Magnetic force control based on the inversemagnetostrictive effect", IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 3, pp.1601-1605, May 2004.
3. Calkins, F.T., and Flatau, A.B., "Terfenol-D Sensor Design and Optimization", Journal of Noise Control Engineering, submitted
4. Dapino, M.J., Calkins, F.T., and Flatau, A.B., "Statistical Analysis of Terfenol-D Material Properties", SPIE 1997, Proceedings on Smart Structures and Materials, paper #3041-20, 3/97.