

자기변형재료의 역자기변형 효과를 이용한 자기 구동기의 모델링

*박해정¹, 박영우²

¹충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

²충남대학교 메카트로닉스공학과

Modeling of magnetic actuators using inversmagnetostriction effect of magnetostrictive material

H. J. Park¹, Y. W. Park²

¹BK21 Mechatronics Group at Chungnam National University

²Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Key words : Inversemagnetostrictive effect, Magnetostrictive material, Magnetic actuator

1. 서론

본 논문에서는 자기변형 재료의 역자기 변형 효과를 이용하여 자기 구동기를 설계하고 모델링을 하고자 한다. 기존의 자기 구동기는 코어와 코일을 사용하여 자기력을 발생시키고, 제어하는 방식으로 되어 있다. 이러한 방법의 문제점은 코일의 발열, 인덕턴스에 의한 손실 및 공간적인 부분에서 발생한다. 이러한 부분을 지능재료의 특성을 이용하여 개선 하고자 한다.

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

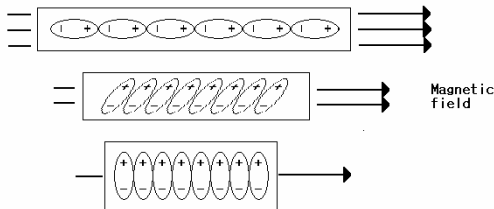


Fig. Position of Magnetic domain by magnetic field

Fig. 1 에서는 양극을 가지고 있는 외력에 따른 자기변형 재료의 자구들의 정렬모습이다. 분자들이 힘을 가함에 따라 투자율이 변하게 되는 원리를 나타내고 있다.

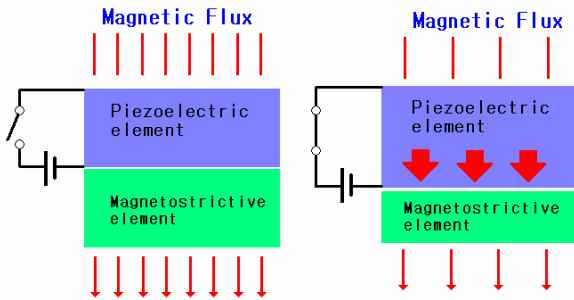


Fig. 2 Inversemagnetostriction by piezoelectric element

Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 압전소자에 전압을 인가하였을 때 변형률이 발생하게 되고, 이에 따른 응력을 자왜소자가 받게 된다. 따라서 자왜소자는 자구의 정렬이 변하게 되어 투자율의 변화를 보이게 되고, 이러한 원리를 역 자기변형 효과라 한다.

2. 시스템 모델링

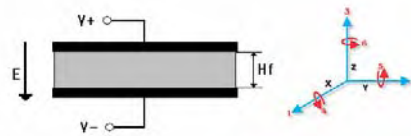


Fig. 3 Structure of piezoelectric element

Fig. 3 은 압전소자의 구조이다. 여기서는 z 방향인 3 변 방향만을 사용하게 된다.

$$\begin{aligned} D &= d_p \sigma + e^s E \\ \epsilon &= S^E \sigma + d_m E \end{aligned} \quad (1)$$

압전소자는 위와 같은 두 개의 식으로 표현이 된다. 여기서 ϵ 는 변형율, S^E 는 일정한 전기장 E 에서 측정된 연성계수, σ 는 응력, E 는 전기장, d 는 압전응력 상수, e^s 는 일정한 응력에서 측정된 유전율이다. 여기서 외력이 없다고 가정할 때 식 (1)에서 변형율과 전기장의 관계와 압전소자의 힘 F_p 는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= d_p E \\ F_p &= \sigma A_p = -s^E_{33} \cdot d_{33} \cdot A_p \cdot V / H_f \end{aligned} \quad (2)$$

자기변형재료의 경우 일반적인 표현식은 다음의 두 식과 같다.

$$\epsilon = \sigma / Y^H + qH \quad (3)$$

$$B = q' \sigma + u^s H \quad (4)$$

여기서 Y^H 는 일정한 자기장 H 에서 측정된 영율, H 는 자기장, d 는 자기변형율, u^s 는 일정한 응력에서 측정된 투자율이다. q 와 q' 의 관계는 다음과 같이 알려져 있다.

$$q' = dB / d\sigma |_H = d\epsilon / dH |_{\sigma} = q \quad (5)$$

식 (5)에서 표현되는 수식은 z 방향만 사용된다 하면, d_{33} 으로 바꾸어 사용할 수 있다.

자기변형재료도 마찬가지로 외력이 없다고 가정하면, 식 (3)에서 자기장과 자기변형율의 관계로 힘 F_m 를 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= qH \\ F_m &= \sigma \cdot A_m = Y^H \cdot \epsilon \cdot A_m = Y^H \cdot A_m \cdot q \cdot H \end{aligned} \quad (6)$$

압전소자가 내는 힘과 자기변형재료가 내는 힘의 차가 자기변형재료의 외력으로 작용하게 된다. 식 (4)에서 힘에 관한 자기변형재료의 자기밀도를 알 수 있다.

$$F_t = F_p - F_m \quad (7)$$

$$B_m = q \dot{F}_t / A_m + u^\sigma H \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 최종적으로 구하고자 하는 자기변형 재료의 투자율을 유도할 수 있다.

$$u_m = q \dot{F}_t / (A_m H) + u^\sigma \quad (9)$$

3. 시뮬레이션

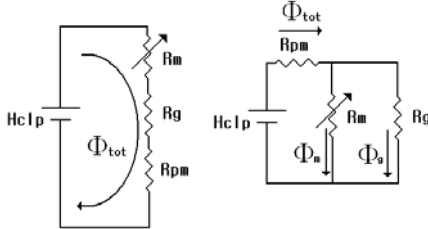


Fig. 4 Magnetic equivalent circuit of serial type and parallel type

Fig. 4 와 같이 직, 병렬로 놓여진 두 가지의 방법을 시뮬레이션하여 어떠한 방식이 좋은 효율을 내는가를 검증하였다. 자기력은 자속밀도와 면적에 의해 결정되므로, 자속 밀도를 계산하기 위해 자기 등가회로를 구성하였다. 여기서 아래첨자 m 은 자기변형재료, g 는 공극, pm 은 영구자석을 의미한다. 일반적인 회로분석을 통하여 전체 자기저항을 계산하고, 공극에 흐르는 자속을 구하여, 자기력을 계산하였다. (9)번 식을 이용하여 R_m 은 힘에 대한 가변저항으로 표시할 수 있다. 일반적인 직렬방식의 전체 저항과 힘은 아래와 같고,

$$\begin{aligned} R_{tot} &= R_m + R_g + R_{pm} \\ F_{gs} &= 1/2u_0(B_{gs}^2 A_g) \end{aligned} \quad (10)$$

병렬방식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{totp} &= R_{pm} + (R_m + R_g) / R_m R_g \\ F_{gp} &= 1/2u_0(B_{gp}^2 A_g) \end{aligned} \quad (11)$$

시뮬레이션에 사용된 변수들은 아래의 Table 1 과 같으며, l 은 길이, A 는 면적을 나타낸다.

Table 1 Coefficients used for simulation

Symbols	Permanent Magnet	Piezoelectric Element	Airgap	Magnetostrictive Element
$s_{33}(N/m^2)$		$6.6 \cdot 10^{10}$		$29 \cdot 10^9$
d_{33}		$310 \cdot 10^{-12}(m/v)$		$9.10 \cdot 10^{-9}(m/A)$
$u(H/A)$	$4\pi \cdot 10^{-7}$			$60\pi \cdot 10^{-7}$
$H_c(A/m)$	$-8.9 \cdot 10^5$			
$l_{pm}(m)$	0.005			
$l_g(m)$			0.01	
$l_m(m)$				0.005
$A_g(m^2)$			$2 \cdot 0.01^2$	
$A_m(m^2)$				$\pi \cdot 0.02^2$
$A_{pm}(m^2)$	$\pi \cdot 0.02^2$			
$V(v)$		0 ~ 1000		
$H_f(m)$		0.005		

4. 결론

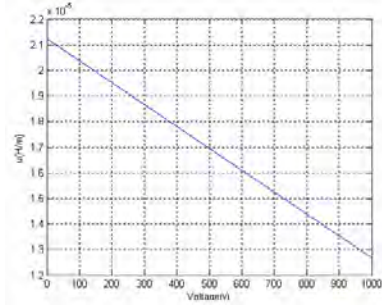


Fig. 5 Change of permeability by voltage

처음 전압이 인가되기 전까지 자기변형재료의 본래 투자율보다 약 10% 가량 높은 투자율을 보이는 것을 Fig. 5 에서 볼 수 있다.

이러한 원인은 영구자석에 의하여 자구가 정렬이 되어 투자율이 높아지는 현상이라 보여진다. 최초 $2.1 \cdot 10^{-5}$ (상대 투자율 약 17)을 보이다, 전압이 전가되면 약 절반가량으로 투자율이 작아짐을 볼 수 있다.

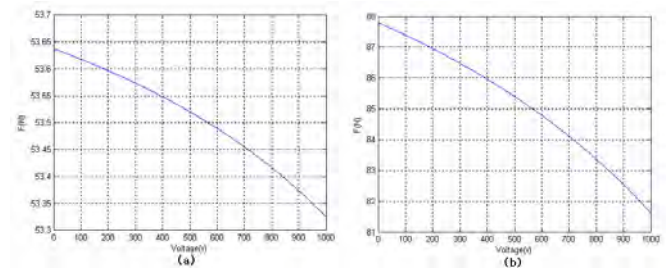


Fig. 6 (a) Magnetic force of serial (b) Magnetic force of parallel

두 가지 방식으로 구동기를 구성해본 결과 힘의 크기는 약 150% 이상 병렬방식이 효율이 좋은 것으로 검증되었다. 힘의 변화도 직렬은 0.4N 에 불과 하지만, 병렬방식은 약 7N 정도 이므로 17.5 배에 이르는 성능을 보이고 있다. 이는 직렬방식은 자기경로에 자왜소자가 포함되어 불필요한 손실을 발생시키지만, 병렬방식은 자기저항이 높아지면 자왜소자가 아닌 공극으로 자속이 이동함에 원인을 찾아 볼 수 있다.

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 4/97.
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.