

역 자기변형성을 이용한 자기 구동기의 설계 Design of Magnetic Actuator Using an Inverse Magnetostrictive Effect

*#박해정¹, 박영우¹

*#H. J. Park(army05@hanmail.net)¹, Y. W. Park¹

¹충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

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

1. 서론

본 논문은 자기 구동기를 구성함에 있어 코일을 사용하지 않고 자기를 제어하기 위해 자기변형 재료의 역자기 변형성을 이용하여 자기력을 제어하고자 한다. 이를 위해서 자기변형 재료와 압전재료를 이용하여 구동하게 되는데, 이를 구동하기 위해 위의 지능재료를 모델링하고, 자기 회로내의 역할과 힘의 출력 등을 알아보고, 자기 유한요소해석 프로그램인 FEMM을 이용하여 위의 모델을 검증하고자 한다.

역자기변형성이란, 자기변형재료의 물질적 특성으로 자기장에 따라 반응하는 자기변형재료가 외부에 힘에 의해 물리적인 변화가 일어나면서, 자기력의 변화를 일으키는 현상을 말한다. 이러한 현상을 이용하는 분야는 대표적으로 Force센서와, 변위센서에 사용되고 있다. 하지만 여기서는 이를 이용하여 새로운 자기 구동기를 설계하여 사용하는 방법을 제시한다.

2. 지능재료 표현식의 정리

Table 1 Numerical expression of smart materials

Piezoelectric materials	Magnetostrictive materials
$\epsilon_p = s_p^E \sigma_p + d_p E$ (1)	$\epsilon_m = s_m^H \sigma_m + d_m H$ (2)
$D = d_p \sigma_p + \epsilon_p E$	$B = d_m \sigma_m + u_m^H H$

피에조(p)와 자기변형 재료(m)가 초기상태, 즉 피에조와 자기변형 재료 각각에 걸리는 전기장, 자기장이 없다고 가정하면 두 물질의 변형량은 다음과 같다.($E = 0, H = 0$)

$$\epsilon_p = s_p^E \sigma_p \tag{3}$$

(3)식으로부터 피에조의 힘을 구해보면, 아래와 같은 식으로 표현이 가능하다. 우선, 양변에 피에조의 면적을 곱한 뒤, 다시 피에조의 두께를 곱하면, 힘과 변위의 관계가 구해진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_p t_p A_p &= s_p^E \sigma_p t_p A_p \\ x_p A_p &= s_p^E F_p t_p \end{aligned}$$

이를 힘에 관해 정리하면,

$$F_p = \frac{x_p A_p}{t_p s_p^E} \tag{4}$$

(4)식에서 $\frac{A_p}{t_p s_p^E} = Y_{np}$ 라 치환하면, 힘에 대한 변위에 대한 식이 표현된다.

$$F_p = \frac{x_p A_p}{t_p s_p^E} = Y_{np} x_p \tag{5}$$

자기변형 재료의 힘도 마찬가지로 정리하면, 힘과 변위에 대한 식이 만들어 진다.

$$F_p = Y_{np} x_p, \text{ (여기서 } Y_{np} = \frac{A_p}{t_p s_p^E} \text{)} \tag{5}$$

$$F_m = Y_{nm} x_m, \text{ (여기서 } Y_{nm} = \frac{A_m}{t_m s_m^H} \text{)} \tag{6}$$

3. 지능재료의 모델링

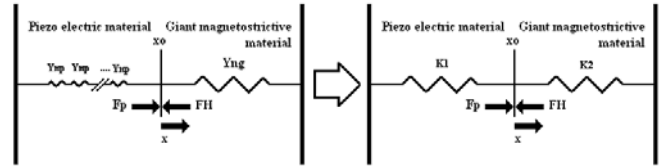


Fig.1 Modeling of smart materials

두 재료의 양단이 고정되어 있고, 압전 재료에서 발생하는 변위(x_p)와 자기변형 재료의 변위가 같다고 가정하면, 압전재료(x_p)와 자기변형 재료(x_m)의 변위는 식(7)과 같다.

$$x = x_p = -x_m \tag{7}$$

압전재료가 스택구조로 이루어져있다고 하면, Fig.1과 같이 스프링의 직렬연결을 이용하여 표시하고 모델링 하면 식(5)와 (6)에 의해, 힘 F 에 대하여 총 변위 x_p, x_m 는 식(8), (9)과 같이 단순화 할 수 있다.

$$F_p = \frac{Y_{np}}{n} x_p = K_1 x_p \tag{8}$$

$$F_p = -Y_{nm} x_m = -K_2 x_m \tag{9}$$

시스템의 총 힘 F_{tot} 는, 압전재료가 내는 힘 F_p 와 영구자석의 자기장으로 인한 자기변형 재료의 변형에 의한 힘 F_H 의 합으로 나타나며, 식(8),(9)를 식(7)을 이용하여 정리하면, 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$F_{tot} = F_p - F_H = (K_1 + K_2)x \tag{10}$$

여기서, 힘 F_H 는 외력이 없을 때 자기장 H 에 따라 자기변형 재료가 내는 변형률 ϵ_H 에 대해 발생하는 힘이므로, 식(2)에서부터 구해질 수 있다.

$$F_H = \epsilon_H Y_m A_m = Y_m A_m d_m H \tag{11}$$

따라서 식(8)과 식(11)을 사용하여 정리하고, 압전재료의 특성인 변위와 전압간의 관계를 이용하면, 시스템의 초기에 가해지는 힘 F_{tot} 을 구할 수 있다.

$$F_{tot} = F_p - F_H = Y_{np} d_p V - A_m Y_m d_m H \tag{12}$$

자기변형 재료에 가해지는 힘 F_m 를 식(8),(9),(12)를 이용하여 자기변형 재료의 변위에 대해 정리하여, 식(13)을 얻을 수 있다.

$$F_m = -\frac{K_2}{(K_1 + K_2)} F_{tot} \tag{13}$$

식(13)을 이용하여 결과적으로 자기변형 재료에 인가되는 응력 σ_m 를 구할 수 있다.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = -\frac{K_2}{A_m (K_1 + K_2)} F_{tot} \tag{14}$$

4. 자기 등가회로의 표현

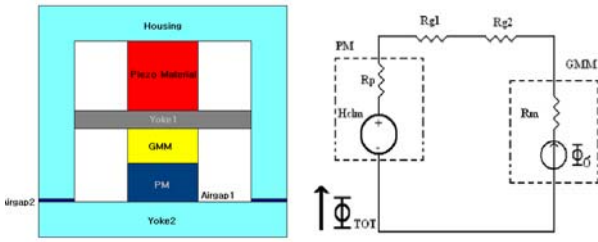


Fig.2. Parameters and Magnetic equivalent circuit

전체구조를 자기 등가회로로 표현하면, Fig.2과 같다. 영구자석(PM)과 공극(g1, g2), 그리고 자기변형 재료(m)로 구성되며, 이 회로의 전체 자기저항은 다음과 같다.

$$R_{TOT} = R_{PM} + R_{g1} + R_{g2} + R_m \quad (15)$$

자기회로를 흐르는 총 자기흐름 Φ_{TOT} 는 영구자석으로 인해 만들어지는 자기흐름 Φ_{PM} 과 외부 힘에 의해 자기변형재료가 생성하는 자기흐름 Φ_{σ} 의 합으로 표현된다.

$$\Phi_{TOT} = \Phi_{PM} + \Phi_{\sigma} = \frac{H_c l_m}{R_{TOT}} + \Phi_{\sigma} \quad (16)$$

여기서 자기변형재료가 생성하는 Φ_{σ} 를 구하기 위해서 식(2)를 이용하면, 식(17)을 구할 수 있다.

$$\Phi_{\sigma} = A_m d_m \sigma_m \quad (17)$$

본 시스템의 목표는 공극1(g1)의 힘의 변화이다. 식(16)을 이용하여 공극1의 힘을 살펴보면,

$$F_{g1} = \frac{\Phi_{g1}^2}{2A_{g1}u_0} = \frac{\Phi_{TOT}^2}{2A_{g1}u_0} = \frac{\Phi_{PM}^2 + 2\Phi_{PM}\Phi_{\sigma} + \Phi_{\sigma}^2}{2A_{g1}u_0} \quad (18)$$

식(18)에서 외력에 의해 변화하는 힘은 Φ_{σ} 에 관여하므로, 다음과 같이 표현된다.

$$F_{\sigma} = \frac{2\Phi_{PM}\Phi_{\sigma} + \Phi_{\sigma}^2}{2A_{g1}u_0} \quad (19)$$

6. 시뮬레이션

자기변형 재료의 자기흐름 밀도의 변화를 표현하기 위하여 FEMM내에서 코일로 변환하여 사용하였다. 길이 10mm에 100회의 코일을 감고, 아래의 식(22)에 의해 전류를 인가하여 시뮬레이션을 실시하였다.

$$\sigma_m = \frac{F_{tot}}{A_m} \quad (20)$$

$$B = d_m \sigma_m + u_m^{\sigma} H \quad (21)$$

$$I = \frac{B}{u_m^{\sigma} \times n} \quad (\text{여기서, } n = \text{Number of turns}) \quad (22)$$

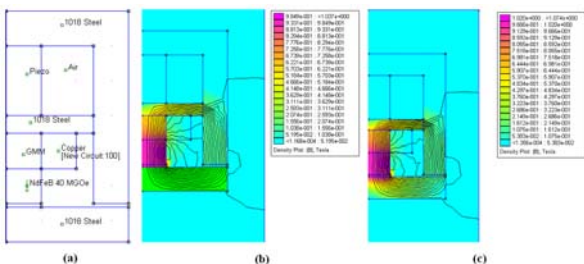


Fig.3. Materials of structure (a) and magnetic force with compressive load (b), without compressive load (c)

압전재료의 입력은 0V~1kV로 설정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 위와 같은 방법으로 시뮬레이션을 한 결과 Yoke2에 최소 약 119N에서 약 110N으로 최대 힘의 변화는 약 8N으로 나타난 것을 확인 할 수 있다.

7. 결론

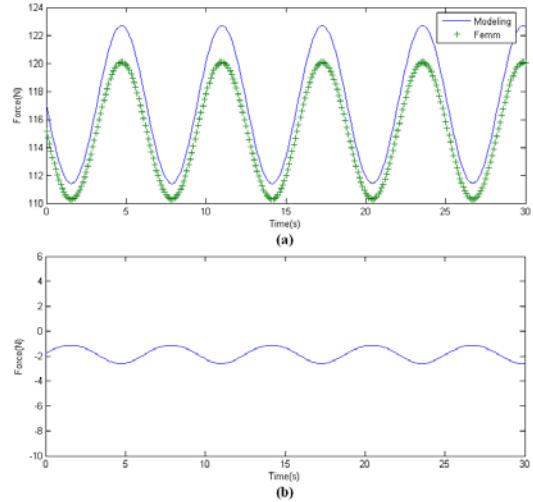


Fig.4. Comparison between modeling data '-' and simulation data '+' (a) and error of modeling data (b)

Sine 파형 입력 시 모델링한 수식을 통한 결과와 FEMM을 통하여 검증하였다. 모델링한 수식에서는 압전재료에 0V입력 시 약 122N이 출력되었으며, 1kV입력 시 약 111N으로, 총 힘의 변화는 약 10N으로 확인 할 수 있었다. 앞서 언급했듯이 FEMM으로 시뮬레이션을 하였을 경우 0V입력 시 약 119N, 1kV 입력 시 약 110N으로, 총 힘의 변화는 약 8.5N으로 확인 되었다.

시뮬레이션 데이터에 대하여, 모델링한 수식의 오차는 평균 약 -2N정도로 나타났으며, 총 힘의 변화에서는 약 -2.5N으로 오차가 나타났다. 이를 종합해보면, 전체 오차는 ±5%의 크기를 보이고 있는데, 이러한 오차의 원인을 분석해보면, 자기회로 내에 자기흐름이 새어나가는 현상(flux leakage)의 발생으로 yoke2를 통하여 자기력이 흘러가지 않고 다른 경로로 가는 현상을 들 수 있다. 자기 구동기 설계 시, 정밀한 제어기를 구축하기 위해서는 위와 같은 부분을 보완해야 한다.

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.