

# 유한 요소 해석을 통한 자기변형 구동기 자기 회로 설계

이석호\*(충남대 대학원 메카트로닉스공학과), 박영우(충남대 메카트로닉스공학과)

The design of magnetic circuit of magnetostrictive actuator using finite element method

S. H. Lee (Mechatronics. Eng. Dept. CNU), Y. W. Park (Mechatronics. Eng. Dept., CNU)

## ABSTRACT

Magnetostrictive actuators have seen increasing use in fine positioning system because it has many advantages such as friction free, resolution of  $\mu\text{m}$  or  $\text{nm}$  scale, and powerful output force. Usually, the magnetic circuit of magnetostrictive actuator has components which are flux return path, coil, and magnetostrictive material. It is classified in two types according to existence of the permanent magnet. The magnetic circuit having optimal performances transfer magnetic field which is obtained by providing input current at coil without energy loss. This paper described mathematical model of magnetic circuit for getting design variables. The modeling equation is obtained from the relations between flux and reluctance of the magnetic equivalent circuit. Also, finite element analysis has been used to study the performance of magnetic circuit according to change of design variables such as existence and shape of the permanent magnet, flux return path etc. The modification of dimensions enables us to optimize magnetic circuit.

**Key Words** : Magnetic circuit, Flux return path, Finite element method, Magnetostrictive material

## 1. 서론

기술의 세계적인 추세는 “smaller, faster, cheaper”로 요약할 수 있으며, 이러한 추세를 반영하여 MEMS(micro electro mechanical systems)와 같이 소형화 되면서 기계적 요소와 전자적 요소를 통합한 메카트로닉스 시스템의 개발이 활발해지고 있다. 이러한 기술의 흐름에 따라  $\mu\text{m}$  또는  $\text{nm}$  수준의 분해능을 갖는 마이크로 구동기(micro actuator)의 필요성은 증가하고 있다. 마이크로 구동기는 구동기 내에 사용되는 재료의 탄성 변형 특성을 이용하므로 마찰에 의한 영향 및 백래쉬가 없으며 고 분해능을 가진다. 이러한 마이크로 구동기에 사용되는 재료에는 압전 재료(piezoelectric material)와 자기변형 재료(magnetostrictive material)가 있다. 일반적으로 압전 재료를 많이 사용하지만, 자기변형 재료는 압전 재료가 가지고 있는 피로현상과 에이징이 없고 출력력이 큰 장점을 가져 현재 사용이 증가하고 있다.

자기변형 구동기는 자기변형 재료 주변에 코일을 감고 전류를 흘려 형성된 자기장에 의해 변위와 힘이 발생하는 자기변형 특성을 이용한다. 따라서 전류에 의해서 발생한 자기장을 자기변형 재료에 효율적으로 전달하여 에너지 적(energy product)을

최대화 할 수 있는 자기 회로(magnetic circuit)를 설계 하는 것은 자기변형 구동기 설계의 중요한 부분이다. 일반적으로 자기변형 구동기의 자기 회로는 flux return path, 코일, 자기변형 재료로 구성되며, 자기 회로를 구분하는 요소는 flux return path 내의 영구자석(P.M.)의 유·무이다.<sup>1</sup>

본 논문에서는 두 가지 형태의 자기 회로에 대한 수학적 모델링을 실시하여 설계 변수를 도출하였고 유한 요소 해석(FEA)을 통해서 효율적인 자기 회로 설계를 위한 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 자기 회로의 수학적 모델링

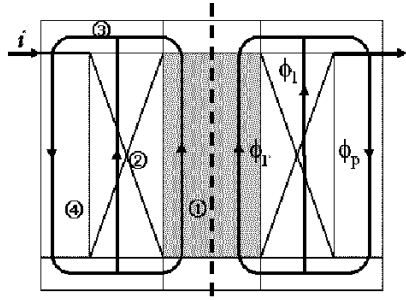
### 2.1 영구자석이 없는 자기 회로 모델링

자기변형 재료의 자기력선속밀도(B)-자장강도(H) 관계가 선형이라는 가정 하에 코일에 가해진 전류에 의해 자기변형 재료에 가해지는 에너지 적은 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2} B_r(\mu, H) \cdot H_r(\phi, R)$$

단,  $B_r$  과  $H_r$  은 각각 자기변형 재료에 걸리는 자기력선속밀도와 자장강도를 나타낸다. Fig. 1 은 자기

회로의 2D 모델로 자기 회로 flux 의 흐름을 나타낸다.<sup>2</sup>



- ① magnetostrictive material ② coil
- ③ flux return path1 ④ flux return path2

Fig. 1 Magnetic circuit 2D modeling and flux flow

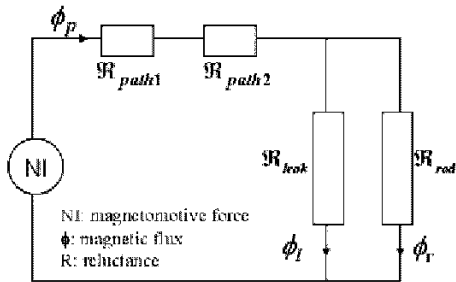


Fig. 2 Equivalent circuit of the drive coil and flux return path for half model of magnetic circuit

Fig. 1 에서  $\phi_p$ ,  $\phi_l$ ,  $\phi_r$  은 flux return path 의 flux, leakage flux, 자기변형 재료의 flux 를 나타내며  $R_{path1}$ ,  $R_{path2}$  는 flux return path 의 리액턴스,  $R_{leak}$  는 flux leakage 의 리액턴스,  $R_{rod}$  는 자기변형 재료의 리액턴스를 나타낸다. 그리고 NI 는 코일에서 발생한 기자력 (magnetomotive force)이다. Fig. 2 는 자기 회로 절반에 대한 등가 회로로서 flux 와 리액턴스 관계는 다음과 같다.

$$\phi_p = \phi_l + \phi_r$$

$$NI = R_{path1}\phi_p + R_{path2}\phi_p + \frac{R_{leak}R_{rod}}{R_{leak} + R_{rod}}\phi_p$$

flux leakage 의 리액턴스는 flux return path 와 자기변형 재료의 리액턴스에 비해 상대적으로 크므로 등가회로에서 flux leakage 부분을 개방회로로 놓음으로써 Fig. 3 과 같이 근사화 할 수 있다. 근사화된 모델로부터 flux 와 리액턴스 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p = \phi_r$$

$$NI = R_{path1}\phi_p + R_{path2}\phi_p + R_{rod}\phi_p$$

$$R_{path1} = \frac{l_{p1}/2}{\mu_{p1}A_{p1}}, \quad R_{path2} = \frac{l_{p2}/2}{\mu_{p2}A_{p2}}, \quad R_{rod} = \frac{l_{rod}}{\mu_{rod}A_{rod}/2}$$

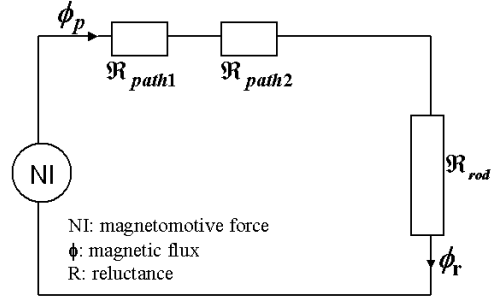


Fig. 3 Approximated circuit of equivalent circuit

## 2.2 영구자석이 있는 자기 회로 모델링

영구자석이 있는 자기 회로는 보통 flux return path2 에 영구자석이 사용된다. 앞서 근사화 했던 것과 같이 flux leakage 가 없다고 가정 했을 때, 영구자석을 사용한 자기 회로의 등가 회로는 Fig. 4 와 같다. 이때 영구자석은 다음과 같은 선형 2 차 탈자 곡선(linear second quadrant demagnetization curve)를 갖는다고 가정한다.

$$B_m = B_{re} + \mu_m H_m$$

여기서  $\mu_m = B_{re}/H_c$  이고  $B_{re}$  은 잔여 자속선속밀도 (residual magnetization),  $H_c$  는 보자력(coercivity)이다.

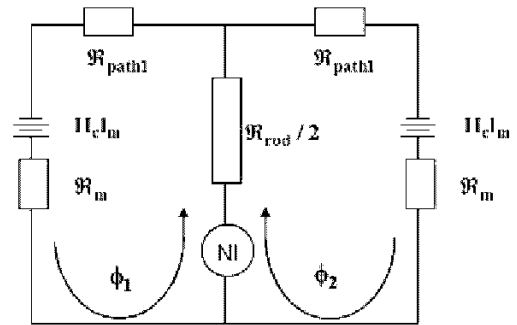


Fig. 4 P.M. equivalent circuit for full model

위의 회로로부터 다음의 수식을 유도할 수 있으며 이때  $H_c I_m$  은 영구자석에 의한 기자력,  $R_m$  은 자석에 의한 리액턴스이다.

$$R_m\phi_1 + R_{path1}\phi_1 + \frac{R_{rod}}{2}(\phi_1 + \phi_2) = NI - H_c I_m \quad \text{--- (1)}$$

$$R_m\phi_2 + R_{path1}\phi_2 + \frac{R_{rod}}{2}(\phi_1 + \phi_2) = NI - H_c I_m \quad \text{--- (2)}$$

식의 (1), (2)로부터  $\phi_1 = \phi_2$  임을 알 수 있으며 이때의 flux return path1 과 자기변형 재료의 리액턴스는 앞서 구한 식과 동일하다. 자기변형 재료에 흐르는

flux 는  $\phi_r = 2\phi_1$  이며 아래의 식과 같다.

$$\phi_r = \frac{2(NI - H_c l_m)}{R_{path1} + R_m + R_{rod}}$$

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_m A_m / 2}$$

보통 flux return path1 의 투자율(permeability)  $\mu_{path1}$  과 영구자석의 투자율  $\mu_m$  의 관계는  $\mu_{path1} \gg \mu_m$  이므로 flux return path1 의 리턴턴스는 무시된다. 따라서 식은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\phi_r = \frac{2(NI - H_c l_m)}{R_m + R_{rod}}$$

두 모델링 식으로부터 에너지 적을 최대화 하기 위한 자기 회로의 형상적 접근 방법은 flux return path 의 리턴턴스를 작게 설계 함으로써 flux 를 크게 하는 것이다. 그리고 영구자석을 사용한 자기 회로에서는 영구자석이 가진 기자력을 최대화 하는 방법이 있다. 따라서 최적화된 자기 회로 설계를 위해서는 영구자석 및 flux return path 의 형상과 관련된 재질, 두께, 길이 등을 설계 변수로 고려해야 한다.

### 3. 설계 변수에 대한 유한 요소 해석(FEA)

모델링 식은 최적화된 자기 회로 설계를 위해 고려해야 할 설계 변수를 제시하였다. 이러한 설계 변수 중 영구자석의 유무 및 flux return path 의 형상에 초점을 맞추어 유한 요소 해석을 실시하였다. 해석을 위해 상용 프로그램인 FEMM 4.0 을 사용하였다. 해석 시 코일이 감긴 영역은 9 mm × 5 mm 로 1A 를 흘려 주었으며 외부 하우징은 알루미늄 6061 로 하였다.

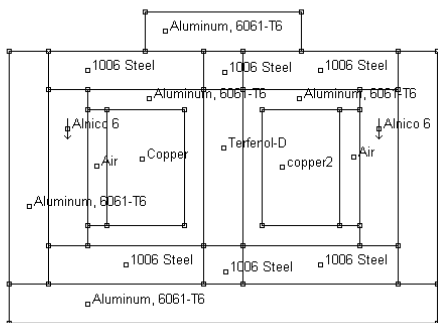


Fig. 5 2D model of magnetostrictive actuator for FEA

#### 3.1 영구자석 유·무 및 형상 변화

보통 구동기의 효율이 그다지 중요하지 않은 시스템 또는 구동기가 입력 에너지와 온도 상승 등의

제한 조건이 적은 시스템에 이용되는 경우 영구 자석을 사용하지 않는 자기 회로를 구성한다. 설계 및 제어가 용이한 장점이 있는 반면 효율이 낮은 단점을 가진다. 이에 반해 영구 자석을 이용한 자기 회로는 자기변형 구동기에 일반적으로 사용되며 효율, 제한된 입력, 온도 상승, 지속적인 구동기 사용 등의 제한 조건이 많을 경우 사용된다. 이러한 두 가지 형태의 자기 회로에 대해 유한 요소 해석을 실시하여 에너지 적을 비교해 보았다.

|                | without P.M. | with P.M. |
|----------------|--------------|-----------|
| B              | 0.06         | 1.83      |
| H              | 30.40        | 1134.80   |
| Energy product | 0.53         | 6090.24   |

Table 1 Comparison of energy product without and with P.M.

해석 결과로부터 영구자석에 의해 생성된 B 와 H 의 영향으로 자기변형 재료에 더 많은 에너지가 걸리는 것을 알 수 있다. 그리고 영구자석이 있는 자기 회로에서 영구자석의 두께 변화 및 종류에 대한 해석을 실시하였다.

|                | Alnico 5 | Alnico 6 | Alnico 8 |
|----------------|----------|----------|----------|
| B              | 1.83     | 1.57     | 1.22     |
| H              | 11341.50 | 8320.60  | 4172.30  |
| Energy product | 6083.22  | 3539.45  | 1320.05  |

Table 2 FEM analysis for various Alnico series

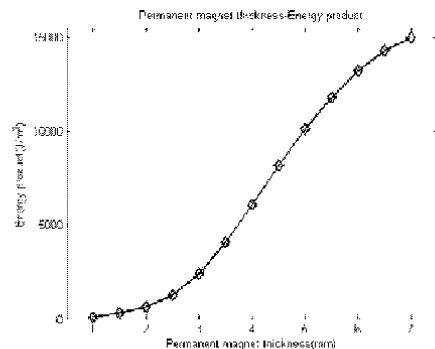


Fig. 6 FEA results for P.M. thickness-energy product

영구자석은 알리코 계열에 대해 해석하였으며 해석 결과는 Table 2 와 같다. 또한 알리코 5 에 대해 길이는 일정하다는 가정하에 두께 변화에 대한 해석을 실시하였다. 두께가 커질수록 에너지 적은 커지는 해석 결과를 보였다. 두께가 커짐에 따라 리턴턴스가 작아짐에 따른 결과이다. 하지만 실제 자기 변형 구동기에 사용될 자기 회로 설계할 경우는 구

동기 자체의 크기를 고려하여 영구자석의 두께를 결정해야 할 것이다.

### 3.2 flux return path 의 형상 변화

flux return path 의 형상 변화는 자기 회로 내의 리턴턴스의 변화와 관계가 있다. 본 논문에서는 flux return path1 의 두께변화에 대해서 해석을 실시하였다. 이때 flux return path2 는 4 mm의 알리코 5 로 하여 해석을 하였으며 flux return path1 의 재질은 1006 steel 로 하였다. 앞서 해석한 영구자석 두께 변화에서의 해석에서는 자석의 두께가 커질수록 에너지 적 또한 커지는 결과를 보였다. 하지만 flux return path1 의 두께가 3 mm에서 더 커지더라도 B, H, 에너지 적이 커지지 않고 포화되는 결과를 보였다. 이 해석 결과는 자기 회로 설계에 있어 flux return path 의 최적 두께가 존재함을 입증한 결과로 설계 시 고려해야 할 사항이다. 특히 구동기의 전체적 크기를 작게 설계 해야 할 경우 이 해석 과정을 통해 구동기를 최소화할 수 있는 설계 변수를 찾아야 할 것이다.

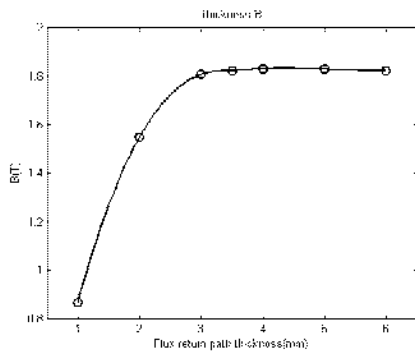


Fig. 7 FEA results for flux return path1 thickness-B

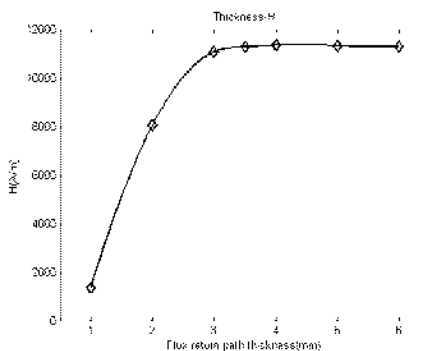


Fig. 8 FEA results for flux return path1 thickness-H

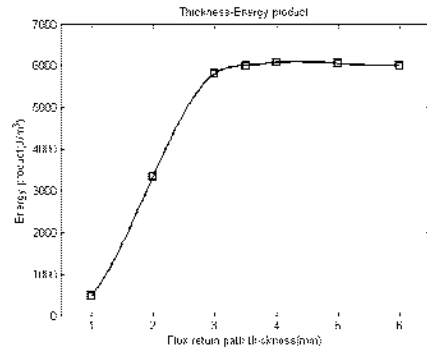


Fig. 9 FEA results for flux return path1 thickness-energy product

## 4. 결론

본 논문에서는 자기변형 구동기의 자기 회로 설계 변수를 도출하였고 도출된 변수에 대한 유한 요소 해석을 실시하여 설계에 대한 방향을 제시하였다. 두 가지 형태의 자기 회로에 대한 수학적 모델링을 위하여 등가회로를 구성하고 회로 내의 리턴턴스와 flux 관계로부터 모델링 식을 얻었다. 수학적 모델링을 통하여 flux return path 의 재질, 두께, 길이가 설계 변수임을 확인하였고 최적 설계를 위하여 설계 변수에 대한 상용 프로그램인 FEMM 을 사용하여 유한 요소 해석을 실시하였다. 먼저 영구자석의 영향에 대한 해석을 실시하여 영구자석이 있을 때 6092.40 J/m<sup>3</sup>로 없을 때 결과 0.53 J/m<sup>3</sup>보다 에너지 적이 높음을 확인하였다. 또한 알리코 계열의 자석 중 알리코 5 에서 가장 좋은 해석 결과를 보였으며 두께가 커질수록 에너지 적도 커졌다. 이와 달리 flux return path1 의 두께 3 mm에서 에너지 적이 포화 현상이 나타났다. 이 결과로부터 자기변형 재료의 에너지 적을 최대화 할 수 있는 자기 회로의 최적 설계 변수가 존재함을 확인하였다. 실제 자기 회로 설계에서는 설계 과정을 통해 최적 설계 변수를 얻고 얻어진 결과와 설계자가 원하는 자기 변형 구동기의 전체 크기를 고려하여 자기 회로를 구성하는 것이 요구된다.

## 참고문헌

1. 김도연, 박영우, 임민철 "자기변형 마이크로 작동기의 설계," 한국 정밀공학회지, 제 21 권, 제 5 호, pp. 174-181, 2004
2. G Engdahl, "Design Procedures for Optimal Use of Giant Magnetostrictive Materials in Magnetostrictive Actuator Applications," 8<sup>th</sup> International Conference on New Actuators, ACTUATOR 2002, pp. 554 - 557, 2002.