자기왜형 물질을 이용한 액츄에이터의 설계 및 특성해석

장석명, 차상도° , 임채욱*, 정태영*
충남대학교, 한국기계연구원*

Analysis and Design Actuator of Using Magnetostrictive Material

S. M. Jang, S. D. Cha° , C. U. Lim*, T. Y. Jeong*.
Chungnam National Uni., KIMM*

Abstract - The characteristic of magnetostrictive is to change shape in a magnetic field. TERFENOL-D is said to produce magnetostriction. A magnetostrictive actuator need to the magnetic circuit. The most important design consideration is the magnetic circuit. The magnetic circuit consists of the solenoid coil, permanets for bias and shaping of the other parts through which the magnetic field passes. A good magnetic circuit ensures the proper magnetic field in th TERFENOL-D and very uniform magnetic field in all phases of the actuator operating cycle.

This paper presents magnetic circuit design and analysis uesing FEM

1. 서 론

자기왜형 물질은 외부 자기장의 변화에 따라 재료의 형상이 변한다. 희토류인 Terbium, Dysprosium과 Iron을 합금하여 만든 TERFENOL-D 라는 재료가 자기왜형 재료의 대표적인 물질로 작은 자기장의 변화에 큰 변형력을 갖는 특징을 갖는다. 작은 스트로크 범위에서 큰 힘을 발생시키고 또한 주파수 응답이 매우 빠르므로 고출력 액츄에이터나 모터 또는 고출력 소나 전환기, 미세 위치 제어기, 연료 분사밸브의 내구력 시험 장치에 이용된다. 그림 1은 TERFENOL-D를 이용한 액츄에이터의 개략도이다. 액츄에이터의 구조는 Rod를 구성하는 자기왜형물질, Rod 부분에 자기장을 발생시키기 위한 영구자석과 솔레노이드 코일부분으로 이루어져 있다. 자기왜형 액츄에이터는 자기장의 변화에 따라 수축과 팽창을 한다. Rod 부분은 영구자석에 의해 기본적으로 팽창된 상태에서 코일 전류의 방향과 크기에 따라 수축력과 팽창력이 발생한다.

주어진 자기왜형 물질의 변형력-자기장 특성곡선으로부터 액츄에이터의 제어범위를 선정하고 이에 적당한 자기 회로를 설계한다. TERFENOL-D 부분에 영구자석을 이용하여 기본적으로 자계을 가하고 또한 솔레노이드 코일 전류에 의해 자계를 변화시킴으로써 액츄에이터로부터 필요한 변형력을 얻는다. 목적에 적당한 자기회로를 설계하기 위해서는 영구자석의 크기와 솔레노이드의 권수가 설계의 주요 변수가 된다. 또한 주어진 자기왜형 물질에 균일한 자기장을 발생시키기 위한 자기회로가 고려되어야 한다. 액츄에이터에 이용되는 TERFENOL-D 재료는 작은 자기장의 변화에 변형력의 변화가 크므로 보다 더 정밀한 해석이 필요하다.

본 논문에서 1차적으로 설계된 모델을 유한요소법을 이용하여 해석한 후 재설계하는 과정을 제시하고자 한다. 축대칭 3차원 모델을 2차원 모델과 등가적으로 해석함으로써 재설계에 필요한 시간을 줄일 수 있다. 또한, 최종 결정된 형상을 2차원 유한요소 해석결과와 3차원 유한요소 해석결과를 비교한다.

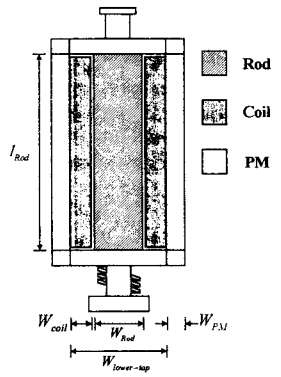
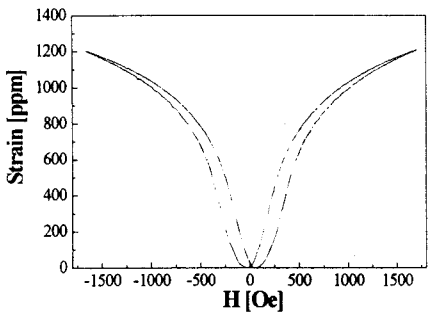


그림 1. 자기왜형 물질을 이용한 액츄에이터의 구조

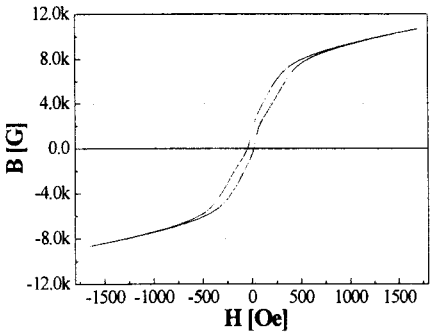
2. 본 론

2.1 등가 자기저항법을 이용한 설계

그림 2는 TERFENOL-D 재료의 자기적 특성곡선을 나타낸다. 위 재료가 필요한 Strain을 얻기 위해 자기회로부터 0~500[*Oe*]의 자계가 필요하다.



(a) Strain/Field

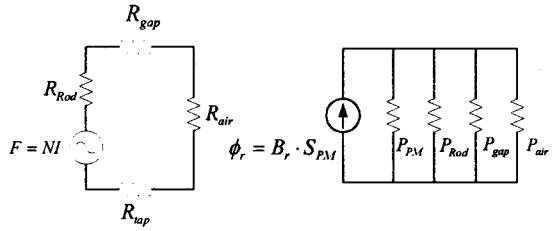


(b) B/H

그림 2. TERFENOL-D 자기특성 곡선

액츄에이터의 자기회로는 영구자석 부분과 솔레노이드 코일 부분으로 이루어져 있다. 설계의 목적은 크게 두 부분으로 나뉘어진다. 첫째, 영구자석을 이용해 TERFENOL-D 물질에 250[*Oe*]의 자계을 가해주기 위해 영구자석의 종류와 크기를 결정한다. 둘째, 솔레노이드 코일 전류에 의해 250[*Oe*]의 자계를 영구자석에 의한 자기장 방향과 동일 또는 반대로 여자시켜 TERFENOL-D 내의 자계가 0~500[*Oe*]의 범위가 되도록 솔레노이드 코일의 권수를 선정한다.

액츄에이터의 자기회로를 각각 분리하여 등가자기회로로 나타내면 그림 3과 같다. 등가 자기저항으로 표현된 자기회로는 공기부분으로 자기 누설이 많고 자기왜형 물질의 투자율이 비교적 작기 때문에 각각 등가 자기저항으로 표현된 부분은 실제와 오차가 많이 발생한다. 하지만 1차적인 형상을 결정하기 위해서는 그림 3과 같은 자기회로로부터 코일의 권수와 영구자석의 두께를 1차적으로 결정하였다.



.(a)전류에 의한 자기회로 (b)영구자석에 의한 자기회로

그림 3. 등가 자기저항

외함에서 밖으로 퍼지는 공기 부분의 자기저항과 영구자석의 퍼미언스는 식(1), 식(2)과 같이 각각 산정하였다.

$$R_{air} = \frac{l_{Rod}}{\mu_o \pi \, W_{Rod}^{\,2}} \tag{1}$$

$$P_{PM} = \frac{\pi \mu_o}{L}\left\{\left(\frac{W_{Rod}}{2} + W_{coil} + W_{PM}\right)^2 - \left(\frac{W_{Rod}}{2} + W_{coil}\right)^2\right\} \tag{2}$$

2.2 유한 요소법을 이용한 해석

액츄에이터의 형상은 원통형으로 원통좌표계로 나타낼 수 있다. 액츄에이터 내의 자속 분포 중 θ 성분이 r 성분과 z 성분에 비해 매우 작을 때, θ 성분을 무시하면 $r-z$평면상의 자속 분포는 θ 좌표값에 관계없이 항상 일정하다. 따라서 자속분포는 θ 방향에는 변화하지 않고 r 방향과 z 방향에만 변화하므로 2차원장과 마찬가지로 취급할 수 있다. 축대칭 3차원장의 지배방정식은 다음과 같이 유도된다.

원통좌표계에서 H, B, A의 관계식은 등방성 재료일 경우 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} H_r \\ H_\theta \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu_r & 0 & 0 \\ 0 & \nu_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \nu_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_r \\ B_\theta \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu_r & 0 & 0 \\ 0 & \nu_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \nu_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\nabla \times A)_r \\ (\nabla \times A)_\theta \\ (\nabla \times A)_z \end{bmatrix} \tag{3}$$

솔레노이드에 코일에 인가되는 전류는 θ방향 성분만을 가지므로 벡터 포텐셜 $\vec{A}$는 A_θ성분만을 갖는다. 따라서 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$의 관계로부터 $\vec{B}$는 식(4)와 같이 표현된다.

$$B_r = -\frac{\partial A_\theta}{\partial z}$$
$$B_z = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta) = \frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \tag{4}$$

$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$ 의 관계식으로부터 식(3)은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\nu_z}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_r \frac{\partial A_\theta}{\partial z}\right) + J_{m\theta} + J_{o\theta} = 0 \tag{5}$$

액츄에이터에 사용된 영구 자석은 TERFENOL-D를 길이 방향으로 여자시키기 위해 z 방향으로 자화되었다. 따라서 영구자석 자화 M 은 z 성분만 존재 하므로 자화전류밀도 J_m 은 식(6)과 같이 표현된다.

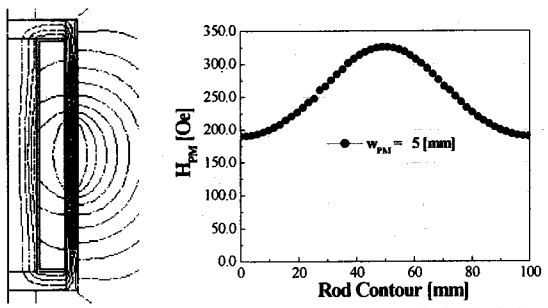
$$J_{m\theta} = -\frac{\partial M_z}{\partial r} a_\theta \tag{6}$$

에너지 범함수는 식(7)과 같이 표현되고, 한 요소에 대한 값으로 표현된 값을 요소를 구성하는 절점의 자기 퍼텐셜로 편미분된 것은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\chi = \frac{1}{2}\int\int_s \left[\nu_z\left(\frac{1}{r}\frac{\partial A_R}{\partial r}\right)^2 + \nu_r\left(\frac{1}{r}\frac{\partial A_R}{\partial z_2^2}\right)^2\right] 2\pi r dr dz - \int\int_s J_{m\theta} A_R 2\pi dr dz - \int\int_s J_{o\theta} A_R 2\pi dr dz \tag{7}$$

$$\frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial A_{Rie}} = 2\pi\left[\frac{1}{4\Delta^{(e)}}\sum_{j=1}^{3}\left(\frac{\nu_z}{r_o^{(e)}} c_{ie}c_{je} + \frac{\nu_r}{r_o^{(e)}} d_{ie}d_{je}\right)A_{Rie} - \frac{\nu_o}{2} M_z c_{ie} - \frac{J_{o\theta}\Delta^{(e)}}{3}\right] \tag{8}$$

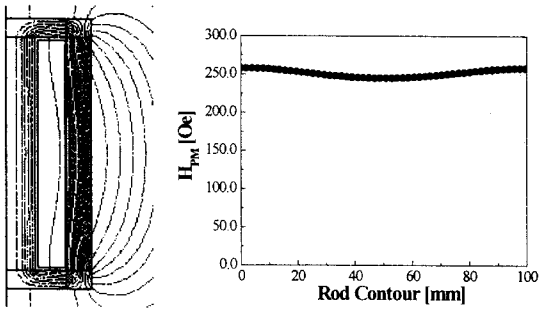
그림 4는 제작 상 영구 자석의 두께를 고려한 1차 모델의 유한 요소 해석결과이다. 그림 4(b)의 결과는 Rod의 길이가 100[*mm*]로 중앙에서의 자계값이다. 이와 같은 형상에서 TERFENOL-D의 양단에 분포하는 자계는 최대값과 최소값의 차이가 130[*Oe*] 이상으로 자기왜형 물질에서 발생하는 힘이 부분적으로 달라질 것이다. 따라서 균일한 자계를 얻기 위한 재설계가 필요하다.



(a) 자속 분포도 (b) TERFENOL-D 내의 자계분포

그림 4. 1차 모델 해석값

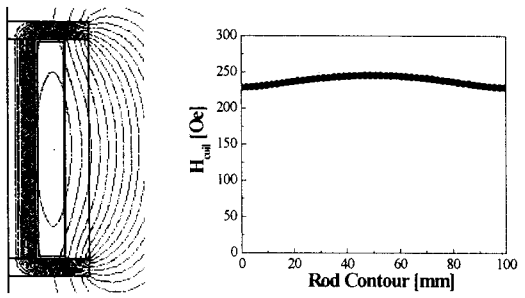
영구자석의 제작을 용이하게 하기 위해서는 두께를 줄일 수 없고 길이가 짧아져야 한다. 하지만 길이가 짧아진다면 TERFENOL-D의 양단에 분포하는 자계의 최대·최소값의 차이는 더욱 커질 것이다. 따라서 잔류자속밀도가 작은 영구자석을 사용하여 체적을 크게 선정하였다. 2차 모델의 해석 결과는 그림 5와 같다. 비교적 균일한 자계가 발생함을 알 수 있다.



(a) 자속 분포도 (b) TERFENOL-D 내의 자계분포

그림 5. 영구자석에 의한 여자

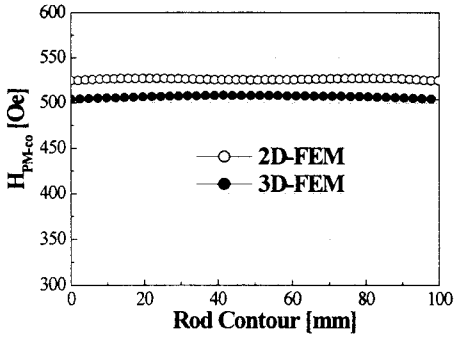
설계 목적에 맞는 영구자석의 형상을 결정한 후 솔레노이드에 의한 기자력을 얻기 위해 동작 전류에 따른 권수를 결정했다. 점적률을 적용한 코일이 차지하는 폭은 12[*mm*]로 선정된 권수와 인가된 전류에 따라 발생하는 자계는 그림 6과 같다.



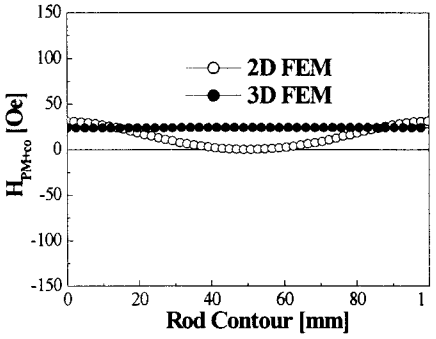
(a) 자속 분포도 (b) TERFENOL-D 내의 자계분포

그림 6. 코일전류에 의한 여자

인가 전류의 방향에 따라 Rod 부분에 발생하는 자계값은 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 영구자석에 의한 여자방향과 솔레노이드에 의한 여자방향이 동일할 때 2차원과 3차원 유한요소법에 의한 해석 결과값을 각각 나타낸다. 그림 7(b)는 영구자석에 의한 여자방향과 솔레노이드에 의한 여자방향이 반대일 때 해석값이다. 3D-FEM 결과와 2D-FEM 결과는 약 4%의 오차가 났다.



(a) 영구자석에 의한 여자방향과 솔레노이드 코일전류에 의한 여자방향이 동일할 때



(b) 영구자석에 의한 여자방향과 솔레노이드 코일전류에 의한 여자방향이 반대일 때

그림 7. 2D · 3D 해석값 비교

3. 결 론

자기왜형을 이용한 액츄에이터의 자기회로를 설계하기 위하여 등가 자기저항법을 이용해 1차적인 설계 변수를 결정하였다. 2차원 유한요소법을 이용하여 다시 설계 변수를 결정함으로써 설계 목적에 만족하는 자기회로를 설계하였다. 2차원 유한요소 해석은 3차원 유한요소 해석에 비해 프로그램화에 따른 어려움과 해석 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다. 축대칭 3차원 형상을 2차원 유한요소법에 따른 해석값과 3차원 유한요소법에 따른 해석값의 오차를 통해 2차원 해석의 타당성을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Rollin J. Parker, "Advances in Permanent", A Wiley-Interscience Publication, 1990.

[2] S. A. Nasar, "Permanent Magnet, Reluctanec, and Self-Synchronous Motors", CRC Press, 1993.

[3] 中田高義, "有限要素法による 交直電磁石の設計と応用", 森北出版株式會社, 1990.

[4] 任達鎬, "電氣界의 有限要素法", 東明社, 1994.

[5] Maxwell User Manual, ANSOFT, 2000