

자왜재료를 이용한 선형 작동기의 유한요소 해석

Finite Element Analysis of Magnetostrictive Linear Actuator

김 윤 창* · 김 재 환†

Yoon-Chang Kim and Jaehwan Kim

(2007년 2월 13일 접수 ; 2007년 3월 16일 심사완료)

Key Words : Magnetostrictive Linear Actuator(자왜선형작동기), Finite Element Analysis(유한요소해석), Magnetostriction(자왜), Terfenol-D(터페놀디)

ABSTRACT

Magnetostrictive materials have been used for linear actuators due to its large strain, large force output with moderate frequency band in the presence of magnetic field. However their performance analysis is difficult because of nonlinear material behaviors in terms of coupled strain-magnetic field dependence, nonlinear permeability, pre-stress dependence and hysteresis. This paper presents a finite element analysis technique for magnetostrictive linear actuator. To deal with coupled problems and nonlinear behaviors, a simple finite element approach is proposed, which is based on separate magnetic field calculation and displacement simulation. The finite element formulation and an in-house program development are illustrated, and a simulation model is made for a magnetostrictive linear actuator. The fabrication and performance test of the linear actuator are explained, and the performance comparison with simulation result is shown. Since this approach is simple, it can be applied for analyzing magnetostrictive underwater projectors and ultrasonic transducers.

1. 서 론

자왜재료(magnetostrictive material)는 자기장에 의해 변형이 발생하는 재료로서 1840년 Joule에 의해 니켈에서 최초로 발견되었으며 자기장에 의해 테르븀(Terbium)에 1,000 ppm의 변형이 발생함을 알게 되었다. 그러나 이 재료는 높은 자기장을 인가해 주어야 할뿐만 아니라 주위의 온도가 낮아야 하는 단점이 있었다. 1988년 Clark은 회토유산화물이 상온에서 큰 자기장을 인가하지 않아도 상온에서 자왜 변형됨을 발견하고 Terfenol-D로 명명된 $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$

를 개발하였다⁽¹⁾. 자왜재료는 자왜 변형이 매우 크기 때문에 압전체를 대체하여 저주파 수중음향 신호변환기에 많이 사용되고 있으며, 각종 센서 뿐만 아니라 작동기에도 사용되고 있다^(2,3).

이 재료는 상온에서 재료의 변형방향과 평행하게 자기장을 인가하면 변형이 발생하는데 이때의 변형방향은 자기장의 부호에 관계없이 항상 양(+)의 방향으로 변형하게 된다. 그리고 압축하중을 가해지면 변형량이 늘어나는 성질을 갖고 있다(Fig.1⁽⁴⁾). 따라서, 한 방향으로만 늘어나는 단점을 보완하기 위하여 영구자석을 사용하여 바이어스 자기장을 걸어 주거나 DC바이어스를 자기장을 형성시켜주는 코일에 걸어서 양방향성(bi-direction)을 가지게 할 수 있다.

자왜재료를 이용한 여러 가지의 기구를 설계하기 위해서는 자왜재료의 모델링이 필요하다. 자왜재료의 과도응답을 해석하기 위하여 비선형 모델이 개발

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : jaehwan@inha.ac.kr
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교 기계공학과 대학원/기아자동차

되었다⁽⁵⁾. 이 모델은 Maxwell 방정식과 고전적인 역학 관계식을 유한차분법으로 풀 모델인데 여기서 필요한 자기적, 기계적 재료계수는 정적인 특성실험에서 구하여 졌다. 이 모델을 이용하여 Terfenol-D봉이 장착된 기구의 응답함수를 구하였다^(6,7). 자왜재료의 기계-자기장 간의 비선형성을 모델링하기 위하여 준정적(quasi-static) 변분 원리와 유한요소법에 근간을 둔 모델링을 시도하였다⁽⁸⁾. 점진적인 구성방정식을 사용하는 이 모델을 이용하여 자왜재료 봉의 직접(direct) 및 역(converse)효과를 계산하였다. 그러나 반복계산에 의해서 구성방정식의 변화와 변위장을 풀어야 하므로 시간이 많이 걸리는 문제가 있다. 따라서 재료가 선형이라는 가정 아래에 자왜재료의 유한요소 정식화가 이루어졌다⁽⁹⁾. 뿐만 아니라 와류 전류는 고려하지 않았으며 주파수는 충분히 낮아서 정자기장(static magnetic field)라는 가정을 하였다. 정자기의 가정은 SAW(surface acoustic wave)디바이스와 같은 고주파 장치에서는 타당하지 않을 수 있다.

이 논문에서는 자왜재료의 선형 구성방정식을 적

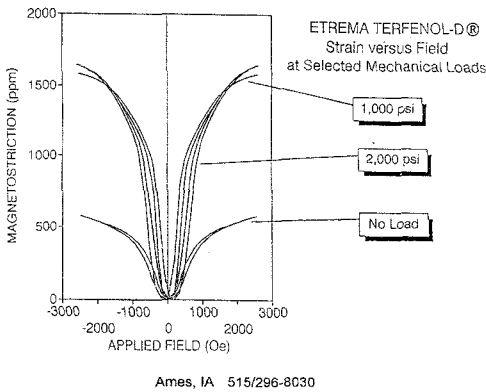


Fig. 1 Strain-magnetic field relation for Terfenol-D

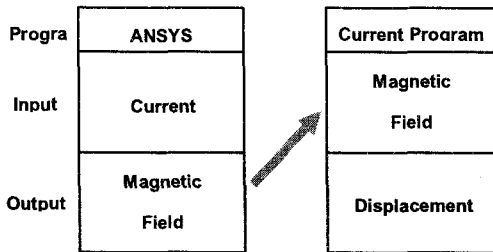


Fig. 2 Concept of separated approach for magnetic field and displacement calculations

용하여 자기장해석과 변위장 해석을 나누어서 수행하는 방법을 채택하였다⁽¹⁰⁾. Fig. 2는 분리해석방법의 개념을 나타낸다. 첫 번째 단계인 자기장해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 수행하였고, 해석결과를 두 번째 해석단계에 입력하여 변위 해석을 수행하였다. 자기장 해석을 투자율의 비선형성과 예압(pre-stress)의 영향을 고려한 상태에서 하므로 쉽게 변위해석을 할 수 있다. 변위의 해석을 위해 FORTRAN으로 된 자왜-탄성체 해석 전용프로그램을 개발하였다.

2. 유한요소 정식화

2.1 자왜재료의 유한요소 정식화

자왜재료의 선형 구성방정식은 다음과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \mathbf{s}^H \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \mathbf{H}_M \\ \mathbf{B}_M &= \mathbf{dT} + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{H}_M \end{aligned} \quad (1)$$

또는

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{c}^H \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{H}_M \\ \mathbf{B}_M &= \mathbf{eS} + \boldsymbol{\mu}^S \mathbf{H}_M \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 여기서, \mathbf{T} 는 응력, \mathbf{S} 는 변형률, \mathbf{H}_M 은 자기장의 세기, \mathbf{B}_M 은 자속의 세기, $\boldsymbol{\mu}$ 는 투자율, \mathbf{c}^h 는 일정 자기장에서 측정된 강성, \mathbf{s}^h 는 일정 자기장에서 측정된 유연성, \mathbf{e} 는 자왜 응력 상수, \mathbf{d} 는 자왜 변형률 상수이다. 식 (1)과 (2)는 압전체의 구성방정식과 동일하지만, 자왜 상수들이 비선형적이기 때문에 물성의 비선형성이 고려된 유한요소식의 도입이 필요하다. 그러나 이 연구에서는 자기장과 변형을 나누어 해석하였기 때문에 상용프로그램에서 자기장을 해석한 후 변형해석에 도입하여 식 (2)에서 자기장 \mathbf{H} 를 안다는 가정하에 첫 번째 식만을 고려하여 유한요소 정식화를 하였다. 이 과정을 거치면 유한요소식은 다음과 같다.

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] \mathbf{U} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_H \quad (3)$$

여기서, \mathbf{M}, \mathbf{K} 는 자왜재료의 질량, 강성행렬이고 \mathbf{F} 는 외력에 의한 절점력으로 자세한 내용은 Table 1

에 나타내었다. 여기서, \mathbf{N} 은 형상함수이고 r 는 자왜재료의 밀도이다. \mathbf{F}_H 는 자기장에 의한 절점력으로 Table 1과 같이 정의 된다. \mathbf{dH} 는 변형률로서, ANSYS에서 자왜재료의 절점에서 자기장 \mathbf{H} 값이 나오면 이에 자왜변형률 상수 \mathbf{d} 를 곱하여 구하는데 Fig. 1과 같이 비선형적이다. 자왜 변형률상수 행렬 \mathbf{d} 의 각 항은 응력 및 자기장의 변화에 따라 비선형적으로 변화하므로, 자왜재료의 비선형적 인자가 고려되어야 한다. 이 논문에서는 Terfenol-D가 축방향으로만 변형한다고 가정하였으며, 축방향을 Z 축으로 가정하고 원통 좌표계를 적용하면, 다음과 같이 행렬 \mathbf{d} 를 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

임의의 하중 조건에서 자기장의 세기에 따른 Terfenol-D의 변형률은 Fig. 1과 같이 비선형형태이다. 이 결과를 선형해석 해석에서 그대로 사용할 수 없으므로 각각의 예압 하에서 6차 함수를 이용하여 다음과 같이 근사화 하였다.

$$\mathbf{dH} = a_0 + \sum_{n=1}^6 a_n H^n \quad (5)$$

여기서 a_n 은 Fig. 1을 커브 피팅하여 구한 6차 다항식의 계수값이고 \mathbf{dH} 는 자기장에 의한 변형률, H 는 각 절점에서 구한 자기장 H 값이다. 즉, 유한요소의

Table 1 Matrices for finite element formulation

Matrix	Description
$\mathbf{M} = \int \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV$	Mass matrix
$\mathbf{K} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{C}^H \mathbf{B} dV$	Elastic stiffness matrix
$\mathbf{F}_H = \int \mathbf{B}^T \mathbf{e}^H dV$ $= \int \mathbf{B}^T \mathbf{C}^H \mathbf{dH} dV$	Force matrix induced by magnetic field

Gaussian 적분점에서 식 (5)에 따라 변형률 \mathbf{dH} 를 구하고 Table 1의 식에 따라 변형행렬 \mathbf{B} 와 탄성행렬 \mathbf{C}^H 를 곱함으로써 \mathbf{F}_H 를 구한다.

2.2 축대칭 요소 적용

자왜재료를 이용한 작동기의 성능을 해석하기 위해 축대칭 요소를 적용하였다. 축대칭 요소는 2차원 요소를 축을 중심으로 단위 각도를 회전했을 경우에 생기는 요소이다. 따라서, 일반적인 2차원요소와 같은 단면을 하고 있지만, 강성 행렬을 구성하기 위해 회전방향으로의 적분이 필요하다. 따라서, 재료는 θ 와 독립적인 등방성(isotropic)으로 가정될 수 있으며, 재료 탄성 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{D} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ & & 1 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, E 는 종탄성계수, ν 는 Poisson비이다. 단위 두께에 대한 적분 대신 회전각에 대한 적분을 적용하여, 축대칭 요소의 강성 행렬 \mathbf{K}_{Axis} 및 질량 행렬 \mathbf{M}_{Axis} 을 계산하면 다음과 같다.

$$\mathbf{K}_{Axis} = \int_{A-\pi}^{\pi} \int \mathbf{B}^T \mathbf{C}^H \mathbf{B} r d\theta dA \quad (7)$$

$$= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int \mathbf{B}^T \mathbf{C}^H \mathbf{B} r d\theta |J| d\xi d\eta$$

$$\mathbf{M}_{Axis} = \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int \mathbf{N}^T \mathbf{N} r d\theta |J| d\xi d\eta \quad (8)$$

여기서, r 은 대칭축과 요소의 중심까지의 거리이다 (11). 축대칭 요소는 축대칭 문제의 해석 시간, 모델링 시간을 현저하게 줄일 수 있는 장점이 있지만, 비대칭 경계조건을 줄 수 없고 모드해석 등을 할 때, 축의 수직방향으로 움직이는 굽힘모드를 볼 수 없는 등의 단점이 있다. 단순히, 축방향의 변형이 중요할 경우 효율적으로 이용될 수 있으며, 비대칭 경계조건을 부여할 수 있는 축대칭 요소가 이미 개발되어 적용되고 있다.

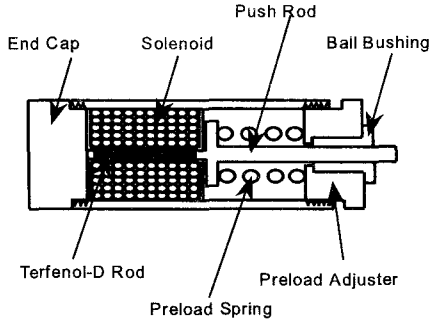


Fig. 3 Schematic cross section of magnetostrictive linear actuator

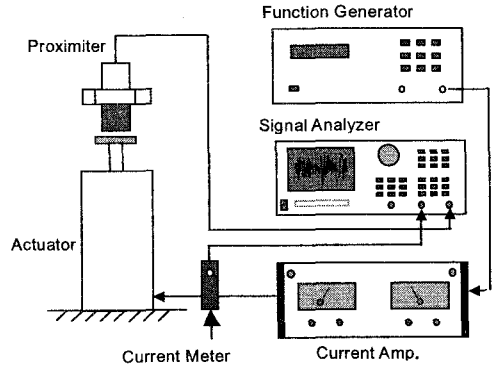


Fig. 5 Performance test setup for the linear actuator

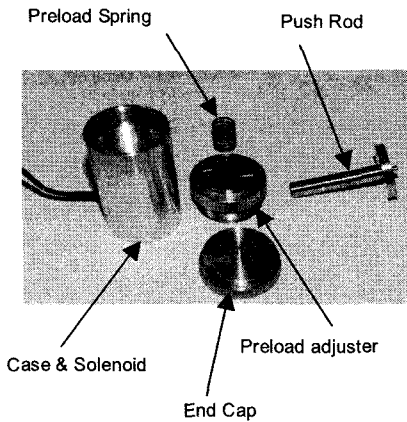


Fig. 4 Photo of parts of the actuator

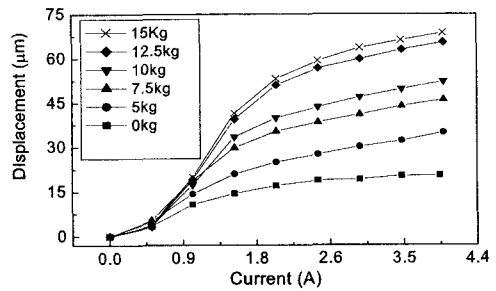


Fig. 6 Displacement output of the linear actuator

800이며, 코일에는 최대 5A까지 전류를 인가할 수 있다.

3. 자왜 선형 작동기 실험

3.1 선형 작동기의 제작

선형 작동기는 기존의 연구를 바탕으로 설계 및 제작하였다⁽¹²⁾. Fig. 3은 선형 자기변형 작동기의 단면을 나타내고 있으며, Fig. 4는 부분품으로 분해된 작동기의 사진이다. Terfenol-D 주위에 자기장을 형성시켜 주기 위하여 솔레노이드 코일을 설치하였으며 자기장에 의해 늘어난 변위가 푸시로드(push rod)에 전달될 수 있게 하였고 가압력을 조절할 수 있게 압축 스프링과 나사부를 설치하였다. 이 논문에서 사용된 Terfenol-D의 치수는 $\phi 6 \times 50$ mm이며 솔레노이드 코일은 Terfenol-D재료에 500 오스테드(Oersted)의 자기장을 인가 시켜줄 수 있도록 제작하였다. 사용된 코일은 코일의 저항 성분에서 발생하는 열 발생을 줄이기 위하여 지름 1.5 mm의 비교적 굵은 코일을 사용하였고 코일의 총 권수는

3.2 선형 작동기의 성능 실험

제안된 작동기의 성능을 실험하기 위해서 Fig. 5와 같은 실험장치를 구성하였다. 신호처리기를 사용하여 정현파형으로 변화하여 나온 신호를 전류앰프(HP6268B)를 거쳐 자기 변형 작동기에 입력시켰다. 그리고, 작동기에서 얻어진 변위는 비접촉식 변위센서(Nevada 7200)를 사용하여 측정하였고, 실제로 인가된 전류는 자속 감지형 전류계(Tektronix A622)를 사용하여 측정하였으며 각각의 신호는 신호분석기(HP35665)를 사용하여 나타내었다. 선형 작동기에 인가되는 예압을 변화시키면서 자기장의 세기에 따른 변위 발생을 측정하였다. Fig. 6은 인가된 자기장에 따른 변위를 예압에 따라 구한 결과이다. 자기장의 세기가 강해질수록 변위가 크게 늘어나다가 거의 일정한 값으로 접근함을 보인다. 예압이 증가함에 따라 변위가 증가하는데 증가폭이 줄어드는 것을 보인다. 이 선형작동기에서 최대 70 mm의 변위가 발생하였다.

4. 선형 작동기의 유한요소 해석

유한요소 해석의 첫 번째 단계로 선형작동기 실험에 사용된 선형 작동기를 축대칭 요소를 사용하여 유한요소 모델링 하였다. Fig. 7은 ANSYS에서 만든 유한요소 모델을 나타낸다. ANSYS를 이용하여 800 Turn의 코일에 1A의 전류를 흘릴 때, 자속밀도 B_M (magnetic flux density)를 Fig. 8과 같이 계산하였다. 축대칭 요소를 사용하였으며, 자기장의 유실이 없도록 선형 작동기의 외관은 자기장에 대해 완전 절연의 경계조건을 부여하였다. 자기장의 세기 H_M (magnetic field intensity)는 $B_M = \mu H_M$ 의 관계를

이용하여 계산한 후, 이 프로그램에 입력하였다. 여기서, μ 는 투자율(permeability, H/m)이며, 상대투자율 μ_r 과 진공의 투자율 μ_0 사이에 다음의 관계가 성립한다.

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \mu_r \quad (14)$$

두 번째 단계로 적용된 유한요소모델은 발생하는 변위를 보기 위해, 공기 부분의 유한요소를 제거하였으며, 미끄럼 운동을 할 수 있도록 Terfenol-D주변의 유한요소를 제거하고 경계조건으로 대체하였다. 이 프로그램을 이용하여 1A의 전류에 의한 자기장에서 발생하는 변위를 계산하였다(Fig.9). 푸시로드의 최대변위가 약 6mm 나왔다. 입력 전류에 대한 변위의 해석결과를 Fig. 10에 나타내었는데 이 결과는 실험결과보다 큰 변위가 발생하였다. 그 이유는 실험에서 발생하는 자기장의 손실이 고려되지 않은 점, 제작된 선형 작동기는 부상(bushing) 등 선형 작동기의 동작 부분에서의 마찰력, Terfenol-D와 푸시로드 사이의 접촉에 의한 변위손실, 작동기 내부의 코일 권선에 따른 불균일한 자기장 분포 그리고 작동기 외면에 발생하는 자기장의 유실 등 때문인 것으로 사료된다. 또한, 식 (5)의 근사화에도 원인이 있을 수 있다. 그리고, ANSYS를 이용한 자기장의 해석결과가 예상보다 작는데, 실제 제작된 작동기와 해석에 사용한 물성치에 차이가 있는 것으로 사료된다. Terfenol-D의 물성치는 Table 2와 같다. 해석을 위해 가정한 물성치에는 비교적 큰 변화가 존재한다. 이 논문에서는 Terfenol-D의 Young's modulus를 25 GPa로 가정하였으며, Poisson비를 0.1로 가정하였다. 축대칭 소재로 유한요소를 정식화 할 때, Terfenol-D를 등방성재료로 가정하였지만, 실제로 Terfenol-D는 비등방성재료이며, 자기장과 예압에 따라 투자율이 변하지만 이 논문에서는 일정한 값으로 가정하였다. Fig. 6과 Fig. 10의 비교에서, 해석결과가 실험결과와 같이 자기장에 따라 수렴하는 경향을 보이지 않은 것은 이러한 투자율의 비선형성이 고려되지 않은 것에 기인한 것으로 사료된다. 보다 정확한 해석을 위해서는 자기장과 예압에 따라 달라지는 투자율의 비선형성을 고려한 자기장 해석이 필요한데, 이 해석은 이 연구에서는 상용 프로그램인 ANSYS를 사용하였는데, ANSYS에서는 이러한 비선형성을 고려하는 기능이 없다. 따라서 비선형성을 고려할 수 있는

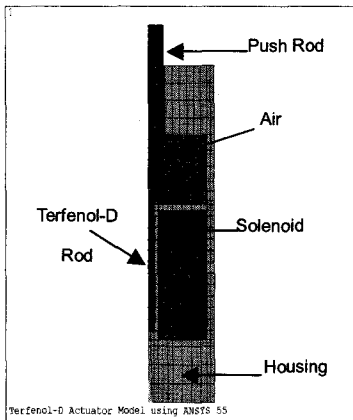


Fig. 7 Finite element model of the linear actuator

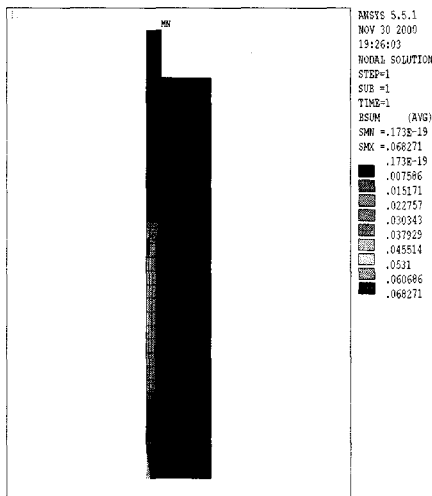


Fig. 8 Magnetic flux density of the linear actuator

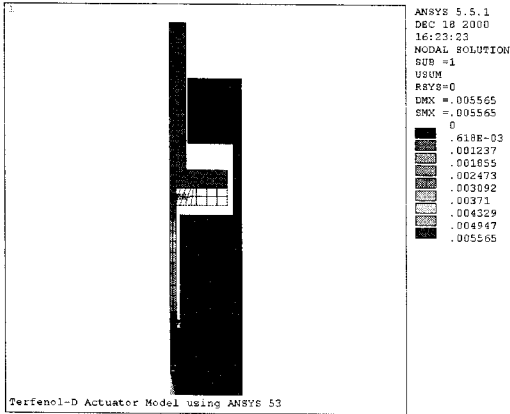


Fig. 9 Magnetic flux density of the linear actuator

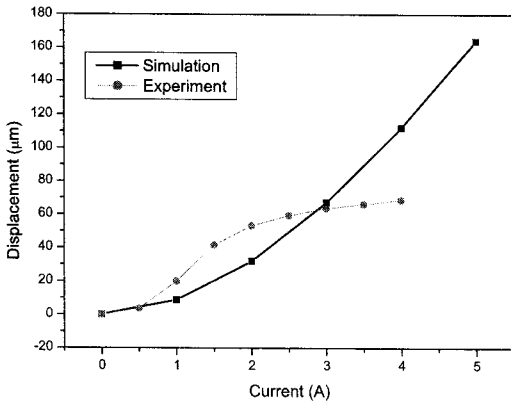


Fig. 10 Simulated displacement of the linear actuator

Table 2 Material properties of Terfenol-D

Density	9,250(kg/m ³)
Young's modulus	25~35(Gpa)
Tensile strength	28(Gpa)
Compressive strength	700(Gpa)
Strain production	800~1,200(ppm)
Relative permeability	3~10
Standard stoichiometry	Tb _{0.3} Dy _{0.3} Fe _{1.9-1.95}
Resistivity	60×10 ⁻⁸ (Ω-m)

자기장해석 프로그램을 사용한다면 실험치와 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 그렇지만 이러한 단순화된 방법으로 비선형적인 자외선형작동기의 성능을 해석할 수 있음은 작동기의 설계에서 실제적인 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결 론

자외재료를 이용한 선형 작동기의 변위를 자기장 해석과 변위해석을 분리한 단순화된 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 결과를 비교하기 위해 자외선형작동기를 제작하여 성능을 비교한 결과, 해석결과가 실험결과보다 더 크게 나왔는데, 이는 자기장해석시 투자율의 비선형성이 고려되지 않은 것과 자기장손실에 따른 오차, 물성치의 오차, 마찰, 접촉에 따른 오차 그리고 일부 근사화된 유한 요소식에 기인한 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 이러한 단순화된 방법으로 비선형적인 자외선형작동기의 성능을 해석할 수 있음은 작동기의 설계에서 실제적인 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) Clark, E. and Teter, J. P., 1988, "Magnetostriction Jumps, in Twinned Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}", J. of Appl. Phys. Vol. 63, No. 8, pp. 3910~3912.
- (2) Cho, S. H., Han S. W., Park, C. I. and Kim, Y. Y., 2006, "Torsional Modal Testing of a Non-ferromagnetic Shaft Using Magnetostrictive Patch Transducers", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 879~885.
- (3) Lim, C.-W., Chung, T.-Y., Moon, S.-J. and Kim, B.-H., 2003, "A Study on Design and Characteristics of Linear Magnetostrictive Actuator Using Terfenol-D", Vol. 13, No. 4, pp. 308~316.
- (4) <http://www.etrema.com/>
- (5) Kvarsjo L. and Engdahl, G., 1991, "Nonlinear 2-D Transient Modeling of Terfenol-D Rods", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 27, No. 6, pp. 5349~5351.
- (6) Tiberg, H., Berggvist, A., Kvarnsjo L. and Engdahl, G., 1992, "A Method of Computing Electro-Mechanical Transfer Function for Magnetostrictive Functional Units", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No. 5, pp. 2808~2810.
- (7) Tiberg, H., Berggvist A. and Engdahl, G.,

1993, "Evaluation of a Magnetostrictive Drive Element Model", J. Appl. Phys. Vol. 73, No. 10, pp. 5851~5853.

(8) Kannom, K. S. and Dasgupta, A., 1997, "A Nonlinear Quasi-static Finite Element Scheme for Magnetized and Deformable Bodies Including Magnetostrictives", SPIE's Int. Symp. on Smart Structure and Materials, Vol. 3041, pp. 652~664, San Diego, CA, USA.

(9) Claeysen, F., Bouchen, D., Anifrani, K., Bossut R. and Decarpigny, J., 1989, "Analysis of Magnetostrictive Transducers by the ATILA Finite Element Code", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 75, Suppl.1, LL4.

(10) Kim, J. and Jung, E., 2005, "Finite Element Analysis for Acoustic Characteristics of Magnetostrictive Transducer", Smart Materials and Structures, Vol. 14, pp. 1273~1280.

(11) Cook, R. D., Malkus, D. S. and Plesha, M. E., 1989, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 3rd Edition, John Willey & Sons, Inc. pp. 293~298.

(12) Kim, J. and Lee, H. I., 2000, "Performance Evaluation of Ultra Precision Stepping Motor Using Terfenol-D Actuator", KSPE, Vol. 17, No. 2, pp. 220~226.