

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 IV

초자기변형소자(Terfenol-D)의 기초특성해석에 관한 연구

A Study on the Fundamental Characteristics Analysis of Giant Magnetostrictive Materials

김동현¹, 이춘만^{1,✉}

Dong Hyeon Kim¹ and Choon Man Lee^{1,✉}

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2011.1.10 / Accepted: 2011.1.30

Terfenol-D is one of several magnetostrictive materials with property of converting energy into mechanical motion, and vice versa. Magnetostriction is the property that causes certain ferromagnetic materials to change shape in a magnetic field. Terfenol-D is said to produce giant magnetostriction, strain greater than any other commercially available smart material. In this paper, fundamental characteristics analysis of giant magnetostrictive materials(Terfenol-D) has been investigated. The magnetic field analysis is carried out by using finite element method simulation ANSYS. The results show 223N in force and 9.5T in maximum magnetic flux density and 7.56 10⁶A/m in maximum magnetic field intensity 1A current. Through the analysis, basic data of Terfenol-D for the application of mechanical system are obtained.

Key Words: Smart Materials (스마트재료), Magnetostriction (자기변형), Giant Magnetostrictive Marials (초자기변형소자), Terfenol-D (터페놀-디), Finite Element Analysis (유한요소해석)

기호설명

H = magnetic field intensity

N = number of coil turns

l = rod length

I = current

λ = magnetostriction

c = compliance

σ = prestress

d = piezomagnetic constant

Δl = elongated length

F = generated force

E = young's modulus of Terfenol-D

A = cross sectional area of the rod

B = magnetic flux density

BH = magnetic energy

1. 서론

스마트 재료(smart materials)는 응답성이 뛰어나고 환경의 변화를 감지하고 반응을 하는 성질을 가지고 있다. 스마트 재료의 공통적인 특징은 외부 자극에 대해 기계적으로 반응하는 것이다. 스마트 소자의 이러한 성질들을 더 효과적으로 적용하기 위해 스마트재료의 특성을 극대화하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 액추에이터(actuator)와 트랜스듀서(transducer)에 스마트재료를 적용하는 기술이 증가하는 추세이다. 스마트재료는

상용 제품뿐만 아니라 군사장비에도 응용되어 지고 있다. 스마트재료의 전세계 매출은 연간 10 억 달러를 상회하고 있다. 전기변형(electrostrictive) 기술이 시장의 75%를 차지하고, 자기변형(magnetostrictive)과 형상기억합금(shape memory materials)이 각 10%, 전자레올리저액체가 5% 를 차지한다. 이 중 자기변형 특성을 가진 초자기변형소자로 불리는 Terfenol-D 소자의 사용이 급등하고 있는 추세이다.

본 논문에서는 초자기변형소자 Terfenol-D 를 기계시스템 구조에 적용하기 위한 기초연구를 수행하였다. 이를 위해 Terfenol-D 소자의 자기변형특성에 대해 알아보고 상용 프로그램 ANSYS 를 이용하여 해석을 수행하였다. 이를 통해 기계시스템 구조에 적용하기 위한 기초 데이터를 확보하고자 한다.

2. 자기변형소자

2.1 자기변형

자기변형 메커니즘은 재료에 전기적 에너지를 가하면 재료가 기계적인 작용을 일으키는 과정을 말한다. 강자성체(ferromagnetic substance)를 자화하면 자성체의 외형이 변하는 현상이다. 변형된 크기와 원래 크기의 비율은 무시할 수 있을 만큼 작다. 자기변형이 일어나는 두가지 이유는 물체에 강자성(ferromagnetism)이 발생할 때 결정격자가 탄성에너지와의 합이 최소가 되도록 변하기 때문이다. 그리고 자기구역(magnetic domain)이 자화되는 방향으로 뒤틀어지기 때문이다. 이 변형에 의해 자성체 내부에 변형력이 생긴다.^{1,2}

Fig. 1 에 Terfenol-D 소자의 자기변형 현상을 나타내었다.³

자기장의 세기는, 식(1)로 표현된다.

$$H = NI / l \tag{1}$$

자기변형은 식(2)로 표현된다.

$$\lambda = c\sigma + Hd \tag{2}$$

만일, $\sigma = 0$ 이면, 식(2)는 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda = Hd \tag{3}$$

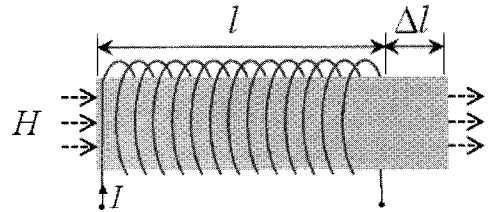


Fig. 1 Magnetostriction phenomenon

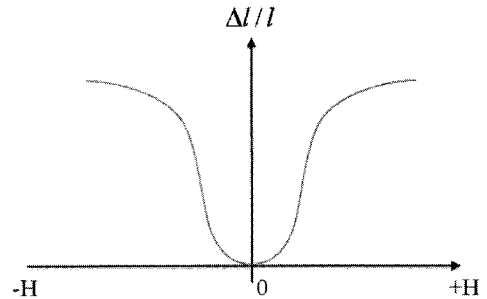


Fig. 2(a) Magnetostriction versus magnetic field intensity

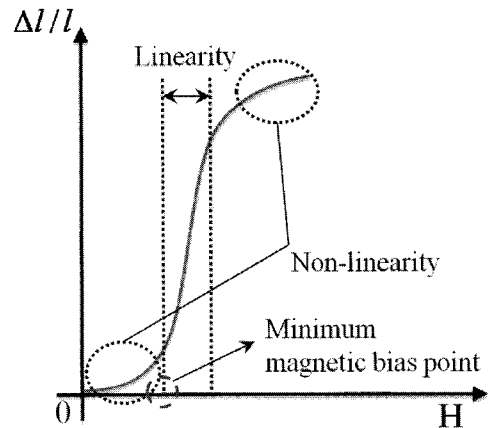


Fig. 2(b) Operation at the linear region

또한, 자기변형은 식(4)와 같이 표현된다.

$$\lambda = \Delta l / l \tag{4}$$

식(3) 과 식(4)를 통해 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\Delta l = Hdl \tag{5}$$

힘은 식(6)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$F = EA(\Delta l / l) \tag{6}$$

2.2 초자기변형소자 (Terfenol-D)

Terfenol-D 소자는 큰 자기변형 성질을 갖는 희토류 원소인 디스프로슘(Dy), 테르븀(Tb)과 높은 큐리 온도를 갖는 철(Fe)을 합금화시킨 것으로 상온에서 높은 자기변형 상수를 가진다.⁴

Terfenol-D 소자 자체는 깨지기 쉬운 성질을 가지고 있으며 인장력에 약한 반면, 압축력에는 굉장히 강한 성질을 가지고 있다. 그리고 자계에 따른 변형량이 매우 크며, 에너지 밀도가 높고, 자기기계적 결합계수(magnetomechanical coupling coefficient)가 커서 가해진 전기적 에너지를 기계적 에너지로 보다 효율적으로 변환시킬 수 있다. 또한 발생력이 크고, 응답속도가 수 μs 정도로 굉장히 빠르며, 주파수 대역이 넓다는 점 등, 여러 가지 장점을 가지고 있다. Terfenol-D 의 기본특성과 압전 세라믹스 및 니켈 과의 물질특성을 비교하여 Table 1 에 나타내었다.

Terfenol-D 소자의 자기 변형은 역방향의 자계가 걸려도 같은 방향으로만 변형을 일으킨다. Fig. 2(a)에 Terfenol-D 소자의 자기장에 따른 대칭변형 특성을, (b)에 Terfenol-D 소자의 선형 구동영역을 나타내었다. 따라서 선형 영역에서 전류의 극성을 바꾸어 양방향의 변형을 얻으려 할 경우에는, 소자에 영구자석을 삽입하거나 구동 솔레노이드 코일에 직류 전류를 흘려 정자계에 의한 변위를 발생시켜, H- λ (자기장-변형률) 곡선의 선형영역 중간에 바이어스 점을 잡아놓은 후에 사용한다. 이 바이어스에 의해 선형영역에서의 양방향 제어가 가능하다. 그리고 Terfenol-D 소자는 투자율이 낮아서 그대로 사용할 경우 자속손실이 많이 발생하여 시스템 효율을 떨어뜨린다. 따라서 투자율이 아주 높은 재료를 사용하여 자기회로를 설계한 후 솔레노이드에서 발생하는 자속이 Terfenol-D 소자 쪽으로 더 많이 통과할 수 있도록 자기회로를 형성하면 된다.⁵⁻¹⁰

2.3 응용현황

Terfenol-D 소자는 상온에서 2,000 ppm 이상의 자기변형을 일으킨다. 변형율은 합금 원소 구성 비율에 따라 차이가 있고 소자의 조성 비율을 변화시킴으로써 소자의 선형성이 증가하고 재료의 강도를 증가시킬 수도 있으므로 용도에 맞는 소자를 사용할 수 있다.^{5,11} 니켈과 압전소자에 비해 변형량이 크고 큰 힘을 발생시키기 때문에 소형이면서 큰 힘을 요구하는 시스템에 적용할 수 있다.¹²⁻¹⁴

Table 1 Material properties⁵

Property	Terfenol-D	PZT	Ni
Density (kg/m ³)	9.25×10 ³	7.7×10 ³	8.97×10 ³
Young's modulus (N/m ²)	2.5-3.5×10 ¹⁰	7.3×10 ¹⁰	32×10 ¹⁰
Tensile strength (MPa)	28		300
Comp. strength (MPa)	700		
Thermal expansion (/°C)	12×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	13.3×10 ⁻⁶
Resistivity ($\mu\Omega$ cm)	60	-	700
Magnetization (T)	1.0		0.485
Curie temperature (°C)	380	300	354
Magnetostriction (ppm)	1500-2500	100	-40
Energy density (J/m ³)	14000-25000	1300	
Coupling factor	0.7-0.75	0.65	0.3
Sound speed (m/s)	1720		4900

또한 에너지 밀도가 커서 낮은 전력으로도 큰 변위를 낼 수 있기 때문에 넓은 주파수 범위에서 사용할 수 있다. 현재 정밀 제어 장치, 선형모터 능동 진동 억제 시스템, 서보밸브, 소너(sonar)의 저주파 음원, 공작기계 등 새로운 분야에의 응용 가능성이 널리 검토되고 있고, 실제로 응용되어 사용 되어지고 있다.¹⁵

Terfenol-D 소자 뿐만 아니라 자기변형특성을 갖는 소자는 기계적인 응력이 어떤 특정 방향으로 적용될 때 소자 내에서 자기장의 변화가 발생하는 역 자기변형특성을 보인다. 그래서 구조물 시공 시 이러한 소재를 분말형태로 삽입하여 자기장의 변화를 측정함으로써 구조물의 결합부나 표면에서의 응력과 변형율을 결정할 수 있고, 이러한 방법을 이용하여 비파괴검사(NDI)를 할 수 있다. 이와 같이 자기유도에서 변화가 측정 가능하여 센서분야에도 응용되어지고 있고, 현재 자기추적 분야에서는 상용 제품도 보급되고 있다.¹⁶

3. 유한요소해석

3.1 해석모델

Fig. 3 은 해석모델을 나타내고 있다. Terfenol-D

소자를 코일과 영구자석이 원통형태로 감싸고 있고 원판형태의 두개의 스틸과 결합된 구조이다. 기존의 연구결과¹⁷를 통하여 Terfenol-D 소자를 적용한 구조에서 영구자석이 있는 경우가 없는 경우보다 더 유리하다는 것을 알 수 있다. 영구자석이 있을 때 높은 자속밀도, 자기력, 에너지를 얻을 수 있다.

해석을 위해 사용한 물성치는 Table 2 와 같다. 입력전류는 1 A 이고 코일은 반지름 25mm, 길이 100mm 의 Terfenol-D 소자를 4,500 회 감고 있다. 전류밀도(current density)는 코일의 특성치로 코일다발의 단면적이 500mm² 이고, 전선에 전류 1A 를 흘렸을 경우 $9 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ 로 하였다.

해석은 magnetostatic 시스템으로 수행하였고, 하중조건은 자속평행조건(magnetic flux parallel)을 적용하였다.

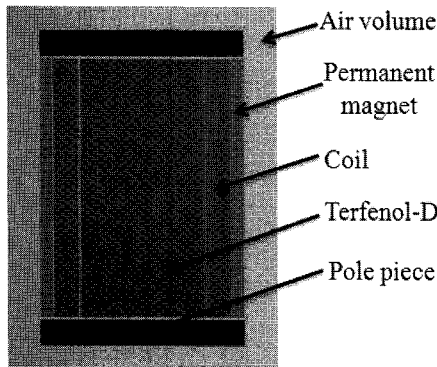


Fig. 3 Magnetostrictive analysis model embedded in the control volume of air (free space)

3.2 자기장 해석

자속밀도와 자장의 세기에 대한 해석결과를 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. 1 A 일 때 최대 자속 밀도 9.50 T, 최대 자장의 세기는 $7.56 \cdot 10^6 \text{ A/m}$ 이다.

Table 2 Magnetic properties of materials

Component	Material	Relative permeability	Coercive force
Rod	Terfenol-D	10	-
Pole piece	Steel	10000	-
Permanent magnet	Alico	1.5	729 Oe
Free space	Air	1	-

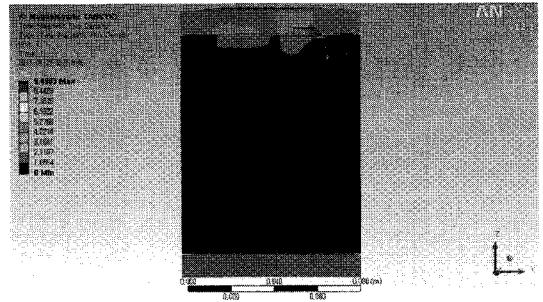


Fig. 4 Distribution of magnetic flux density

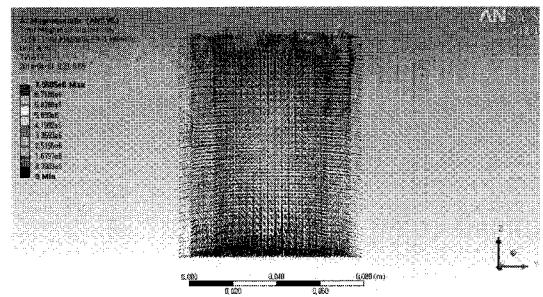


Fig. 5 Magnetic field intensity in the Terfenol-D

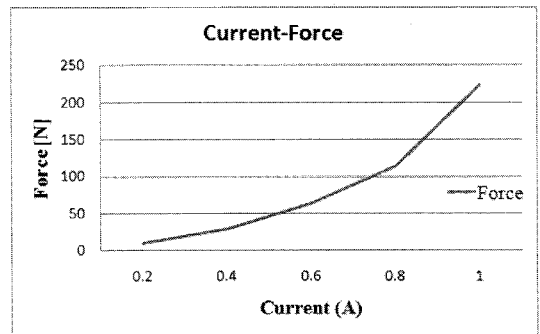


Fig. 6 Force related to current

Table 3 Increase of magnetic energy

Current(A)	B(T)	H(A/m)	BH(T·A/m)
0.2	2.03	$1.47 \cdot 10^6$	$2.98 \cdot 10^6$
0.4	3.75	$2.99 \cdot 10^6$	$11.21 \cdot 10^6$
0.6	5.67	$4.51 \cdot 10^6$	$25.57 \cdot 10^6$
0.8	7.58	$6.03 \cdot 10^6$	$45.70 \cdot 10^6$
1	9.50	$7.56 \cdot 10^6$	$71.82 \cdot 10^6$

Fig. 6 에 Terfenol-D 소자의 출력힘을 나타내었다. 전류를 0.2 - 1 A 까지 0.2 A 씩 증가하며 해석을 수행한 결과이다. 본 해석모델에서 전류가 1 A 일 때 Terfenol-D 소자의 출력힘은 약 223N 이다. 같은

조건으로 전류를 변화시키며 에너지의 증가를 해석한 결과를 Table 3 에 나타내었다. 전류가 1 A 일 때 최대 자기에너지는 $71.82 \times 10^6 \text{ T} \cdot \text{A/m}$ 로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 Terfenol-D 소자의 기초특성해석을 위해 ANSYS 를 이용하여 자기장해석을 수행하였다. Terfenol-D 소자를 감고 있는 코일에 1 A 의 입력전류를 인가했을 때 최대 자속밀도가 9.50 T, 최대 자장의 세기는 $7.56 \times 10^6 \text{ A/m}$ 으로 나타났다. 그리고 전류를 증가할 때 마다 소자가 발생하는 힘이 커짐을 확인하였다. 1A 일 때 최대 223N 이다. 이 때 최대 자기에너지는 $71.82 \times 10^6 \text{ T} \cdot \text{A/m}$ 로 나타났다.

향후 기계시스템에 Terfenol-D 소자의 구조를 적용하기 위해서는 다음 사항들을 추가로 연구할 필요가 있다. 영구자석의 크기와 코일의 권수 조절을 통한 최적화된 자기회로설계, 전자기-열-구조로 이어지는 연성해석을 통한 정밀한 검증, 시제품 제작을 통한 성능평가 등으로 사용목적에 맞는 추가 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0024723).

참고문헌

1. Shim, H. K. and Wang, S. M., "Analysis and design for multiphysics system of electromagnet-thermal-structure," Journal of the KSME, Vol. 49, No. 6, pp. 39-44, 2009.
2. Joule, J. P., "On the effect of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars," Phys. Mag., Vol. 3, pp. 30-76, 1847.
3. Park, Y. W., Kum, K. K. and Han, S. H., "Temperature dependence of magnetostriction in terfenol-D," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 275-278, 2002.
4. Kim, J. C., Kim, J. H., Ye, B. J., Park, W. J. and Lee, Z. H., "The study of solidification characteristics of

- Terfenol-D by Bridgman method," J. Kor. Inst. Metal & Materials, Vol. 36, No. 10, pp. 1605-1613, 1998.
5. Kim, C. M., "Development of a precision magnetostrictive actuator using compressed air cooling," M.S Thesis, Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2008.
6. Olabi, A. G. and Grunwald, A., "Design and application of magnetostrictive materials," Materials & Design, Vol. 29, No. 2, pp. 469-483, 2008.
7. Moon, S. J., Lim, C. W., Kim, B. H. and Park Y., "Structural vibration control using linear magnetostrictive," Journal of Sound and Vibration, Vol. 302, No. 4-5, pp. 875-891, 2007.
8. Jang, S. M., Cha, S. D., Lim, C. U. and Jeong, T. Y., "Analysis and design actuator of using magnetostrictive material," Proc. of KIEE Summer Conference, pp. 18-20, 2001.
9. Sewell, J. and Kuhn, P., "Comparison of magnetic biasing techniques for Terfenol-D," Proc. 2nd Int. Conf. on Giant Magnetostrictive and Amorphous Alloys for Actuators and Sensors, p. 29, 1988.
10. Claeysen, F., Boucher, D., Foggia, A. and Sabonnadiere, E., "Analysis of the magnetic fields in magnetostrictive rare-earth iron transducers," IEEE Trans. on Mag., Vol. 26, No. 2, pp. 975-978, 1990.
11. Park, Y. W. and Won, M. C., "Development of a cutting tool micropositioner using a magnetostrictive material," Journal of the KSPE, Vol. 15, No. 3, pp. 75-81, 1998.
12. Jenner, A. G., Smith, R. J. E. and Wilkinson, A. J., "Actuation and transduction by giant magnetostrictive alloy," Mechatronics, Vol. 10, No. 4, pp. 457-466, 2000.
13. Claeysen, F., Lhermet, N., Le Letty, R. and Bouchilloux, P., "Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 258, No. 1-2, pp. 61-73, 1997.
14. Goodfriend, M. J. and Shoop, K. M., "High force, high strain, wide bandwidth linear actuator using the material, Terfenol-D," Proc. of the Con. on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, pp. 76-82, 1991.
15. Baek, C. W., Kim, B. H. and Kim, Y. K., "Magnetostrictive alloy and their applications," KIEE,

World of Electricity, Vol. 42, No. 9, pp. 38-45, 1993.

16. Jones, B. and Liang, C., "Magnetostriction: revealing the unknown," IEEE AES System Magazine, pp. 3-6, 1996.
17. Kim, D. Y., Park, Y. W. and Yim, M. C., "Design of a magnetostrictive microactuator," Journal of KSPE, Vol. 21, No. 5, pp. 174-181, 2004.