

자기변형 액츄에이터와 그 응용

김병호*, 백창욱, 김용권
서울대학교 전기공학부

Magnetostrictive Actuators and their applications

Byung-Ho Kim, Chang-Wook Baek, Yong-Kweon Kim
Department of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - Magnetostrictive materials are deformed by applying magnetic fields as electrostrictive materials are deformed by applying electric fields. The GMA(Giant Magnetostrictive Alloy: Terfenol-D) shows larger strain and force compared with piezoceramics and SMA. It is expected that the GMA replaces the piezoceramics in various applications. In this paper, the basic properties of GMA and the current trends of its application are introduced.

1. 머리말

선형적인 움직임을 내기 위해서 회전기와 기어물 이용하는 것이 과거의 주된 흐름이었으나 기계적 구조의 복잡함과 낮은 에너지 효율때문에 직접 선형적인 변위를 낼 수 있는 소자에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 현재까지 개발된 선형소자중 압전소자와 형상기억합금이 가장 많이 응용되고 있으나, 변위와 발생력이 작은 문제점으로 인해 많은 한계를 가진다. 최근에 개발된 초자기변형소자는 큰 변위를 낼 수 있고, 발생력이 크다는 장점때문에 여러가지 분야의 응용이 기대되고 있다. 그러나 국내에서는 자기변형소자가 널리 알려지지 않았기 때문에 본고를 통해서 간략하게나마 소개하고자 한다.

2. 자기변형소자의 역사

자기변형현상 자체는 이미 상당히 오래 전부터 알려져 왔었다. 1840년대에 니켈 및 니켈합금이 자기변형을 일으키는 것이 발견된 이후, 1930-1940 년대에 이트러 sonar 및 초음파 등의 응용에 사용되기 시작하였다. 그러나 당시에는 자기변형량이 매우 작아($\Delta l / l = 40$ ppm 정도), 1950 년대에 들어서면서부터 점차 압전 세라믹스로 대체되기 시작했다. 그런데 1960년대 초에 들어서면서부터 Clark, Legvold, Rhyne 등은 테르븀(Tb), 디스프로지움(Dy) 등의 희토류 금속(rare-earth metal)이 극저온에서 거대한 양의 자기변형을 일으키고 영률(Young's modulus)이 자장에 의해 크게 변화하는 사실을 발견하였다¹. 이 사실을 기초로 1970년대부터 미국의 Naval Surface Weapons Center의 Clark, Savage 등이 이 초자기변형(giant magnetostriction)을 극저온이 아닌 실온에서 일어나게 하는 연구를 진행하여, 1980년대에 와서는 Tb,Dy와 철(Fe)의 합금화물

통해 큐리온도들 올려 실온에서 초자기변형을 일어나게 하는데 성공하므로써 최근 실용재료로 급속히 각광받기 시작하였다². 여기에서 발생하는 변형량은 종래의 니켈합금의 50여배, 압전 세라믹스에 비해서도 10배나 되는 최대 2000 ppm에 달하므로, 기존의 압전소자들을 직접 대체하는 효과는 물론이거니와 지금까지 생각하지 못했던 새로운 분야에서의 응용이 가능하게 되었다. 현재 가장 전형적으로 사용되고 있는 자기변형소자는 $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ ($x = 0.27-0.3, y = 1.9-2.0$)의 화학식을 갖는 Terfenol-D 로, 1976년에 Clark와 Savage 가 특허를 신청한 것이 기본이 되고 있다. 상업적으로는 미국의 Edge Technology사의 자회사인 ETREMA 에서 FSZM(Free Stand Zone Melt) 방법과 MB(Modified Bridgman) 방법에 의하여 만들어진 원통형의 Terfenol-D rod 및 선형 액츄에이터를 시판하고 있다^{3,4}.

3. 자기변형소자의 재특성

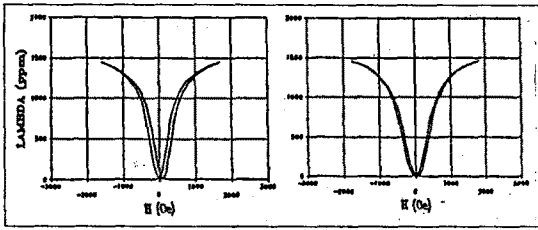
3.1. 자기변형의 원리

자기변형은 어떠한 재료에 자계를 가할 때, 전체에너지를 최소로 보존하기 위하여 재료가 변화하는 것에 의해 발생하는 현상으로 자기이방성(magnetic anisotropy)과 큰 관계가 있다. 단일 자기이방성이 기계적 응력과 무관한 경우 자기변형은 일어나지 않으며, 자기이방성이 너무 큰 경우에는 자기변형을 일으키는 데에 굉장한 큰 자계가 필요하므로 실용상으로 적합하지 않다. 또한 사용시에 응력과 발생변형량이 선형성을 가지는 것이 좋으므로 적당한 양의 자기이방성을 갖는 것이 중요하다⁵.

3.2. 자기변형소자의 물질특성

자기변형소자의 특성은 주로 가해진 자계 H와, 원래의 소자의 길이에 대한 그 자계에서의 변형량의 비 $\lambda (= \Delta l / l)$ 의 그래프으로써 나타낸다.

그림 1과 2는 MB 방법으로 제조되고, 조성비가 다른 두개의 Terfenol-D rod 의 H- λ 곡선이다. 그림에서 자기장이 증가함에 따라 변형량이 증가하며 자계가 어느 한계에 도달하면 변형량이 포화상태에 이르는 것을 볼 수 있다. 전체적인 변형은 비선형적이며 최대 변형량 2000 ppm 에서 약 1000 ppm 정도



(a) Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9-1.95} (b) Tb_{0.28}Dy_{0.72}Fe_{1.9-1.95}
 그림 1. Terfenol-D 의 H-λ 특성곡선

가 선형구간에 해당된다. Tb 의 비율을 낮춰줌으로써 같은 자계에서의 변형량에서 약간의 손실이 생기나 선형성이 증가하고 히스테리시스가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한 Fe의 비율을 낮춰주면 재료의 강도가 증가한다는 사실도 알려져 있다⁵. 따라서 조성비율을 적당히 변화시킴으로써 사용자의 용도에 맞는 소자를 제작할 수 있다.

Terfenol-D 자체는 깨지기 쉬운 성질을 가지고 있으며 인장력에 약한 반면, 압축력에는 굉장히 강한 특성을 가지고 있다. 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 usec 정도로 굉장히 빠르며, 주파수 대역이 넓다는 점 등, 여러가지 장점을 가지고 있다. Terfenol-D 의 기본특성과, 압전 세라믹스 및 니켈 과의 물질특성을 비교하여 표 1에 실어 놓았다.

표 1. 전형적인 물질특성 비교

Property	Tb _{0.27} Dy _{0.73} Fe ₂	PZT	Ni
1. Mechanical			
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		
2. Thermal			
Thermal expansion °C	12 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶	13.3 · 10 ⁻⁶
3. Electrical			
Resistivity μΩcm	60		700
4. Magnetic			
Magnetization T	1.0		0.485
Curie temperature °C	380	300	354
5. Magnetostriction			
Magnetostriction ppm	1500-2500	100 ³	-40
Energy density J/m ³	14000-25000	1300	
6. Magnetomechanical			
Coupling factor	0.7-0.75	0.65	0.3
Sound speed m/s	1720		4900

※ Electrostriction

3.3. 기계적 예압(prestress)과 자기변형

위에서 언급한 대로 Terfenol-D 는 인장력에 굉장히 약하기 때문에, 안정한 상태에서 동작시키기 위해 적당한 예압을 가해 주는 것이 좋다. 예압은 2-3개 정도의 기계적 스트링을 사용하여 10-20 MPa 정도로 가해주는 것이 보통이다. 또한 예압을 가하면 재료의 투자율이 변하고 H-λ 곡선특성도 변하므로 물질 조성비율과 예압을 적당히 조합하여 최대 동작특성을 얻을 수 있다⁷. 그림 2는 Terfenol-D에 예압을 변화시켜 가면서 측정된 H-λ 곡선이다.

3.4. 자기바이어스 자기회로

앞의 그림 1 에서 보는 것처럼, 자기변형은 역방향의 자장이

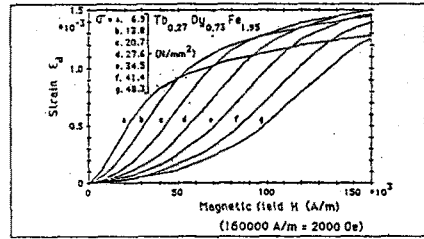


그림 2. 여러가지 예압을 가했을 때의 H-λ 곡선

걸려도 같은 방향으로만 변형을 일으킨다, 따라서 실제 자기변형소자의 동작 주파수는 전원 주파수의 두배가 되는 현상이 발생한다. 만일 사용자가 선형영역에서 전류의 극성을 바꾸어 양방향의 변형을 얻으려 할 경우에는 자기변형소자에 영구자석을 삽입하거나 구동 솔레노이드 코일에 직류전류를 흘려 정자계에 의한 약간의 변위를 발생시켜, H-λ 곡선의 선형영역 중간에 바이어스 점을 잡아놓은 후에 사용한다. 보통 자기바이어스는 400-500 Oe 정도의 평렬형 영구자석을 사용하는 것이 일반적이며 정전류 방식은 잘 쓰이지 않는다. 이 바이어스에 의해 가장 정확한 선형영역에서의 정밀한 양방향 제어가 가능해진다⁸.

자기변형소자는 표 1에 나와있는 것과 같이 투자율이 굉장히 낮아서($\mu_r = 5-10$) 그대로 액츄에이터 등에 사용할 경우 누설 자속이 많이 발생하여 시스템의 효율이 떨어진다. 이 문제를 해결하기 위해서는 투자율이 아주 높은 재료를 사용하여 적절한 자기회로를 설계하여, 솔레노이드에서 발생하는 자속이 자기변형소자쪽으로 더 많이 통과할 수 있도록 자기회로를 형성해 주면 된다⁹.

현재 시판되고 있는, 예압 및 바이어스 자기회로를 포함한 전형적인 선형 액츄에이터의 구조는 그림 3과 같다.

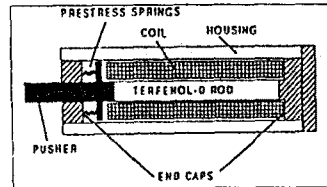


그림 3. Terfenol-D 선형 액츄에이터의 기본적인 구조

4. 자기변형소자의 응용 현황

자기변형소자는 압전소자에 비해 변위가 크고, 큰 힘을 낼 수 있으므로 압전소자를 대체할 수 있고, 그밖에도 넓은 주파수 범위에서 사용할 수 있는 등의 특성을 살린 여러가지 종류의 응용에 쓰일 수 있다. 현재 실제로 사용중이거나 연구가 진행되고 있는 분야는 다음과 같다.

4.1. 능동 진동제거 장치

자기변형 액츄에이터를 이용하면 주변의 진동을 제거하는 장치를 만들 수 있다. 그림 4에서 보는 것과 같이 바닥이 진동하는 것을 센서로 감지하여 바닥의 변위를 상쇄시키도록 자기변형 액츄에이터의 변위를 발생시키면 자기변형 액츄에이터 위의 공간을 주변의 진동으로부터 격리시킬 수 있다¹⁰.

현재 상용화가 되어있는 능동 진동제거 장치는 압전소자나 보이스 코일 모터를 사용하고 있다. 하지만 압전소자는 충분한 변위를 낼 수 없고, 보이스 코일 모터는 에너지 효율이 매우 낮다. 자기변형소자를 이용하면 낮은 전압으로도 충분한 변위와

에너지 효율을 가지는 능동 진동제거 장치를 제작할 수 있다.

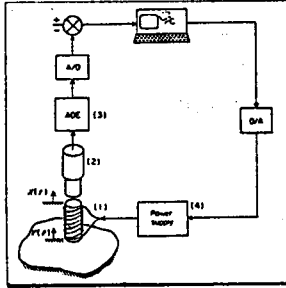


그림 4. 능동 진동제거 장치의 블록선도

4.2. 정밀 위치제어 장치

자기변형소자에 가해주는 자계의 세기를 조절함으로써 자기 변형소자의 변위를 정밀하게 제어할 수 있다. 그러한 응용의 한 가지 예를 그림 5에 나타내었다.

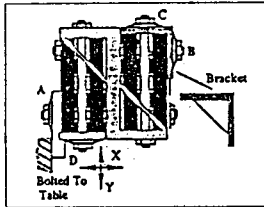


그림 5. 2차원 위치제어 장치

이것은 X축 방향으로 움직일 수 있는 자기변형 액츄에이터와 Y축 방향으로 움직일 수 있는 자기변형 액츄에이터를 직교하게 층으로 붙여서 XY평면상에서 원하는 위치를 취할 수 있는 2차원 위치제어 장치이다¹¹. 이런 식의 장치를 이용하면 현미경의 재물대나 기계공구의 위치제어 장치 등을 만들 수 있다.

4.3. 선형모터

자기변형소자를 이용하면 정밀한 제어가 가능하고, 큰 힘을 낼 수 있고, 변위도 큰 선형모터를 만들 수 있다. 그림 6에서 보는 것은 불연속 동작을 하는 선형모터의 한 예이다. 구동방향 쪽의 고정장치를 풀고 변위발생용 자기변형소자에 자계를 가해 변위를 발생시킨후 고정장치를 다시 잠그고 반대편 고정장치를 풀어준 다음 자계를 제거하는 동작을 반복함으로써 큰 변위를 낼 수 있다.

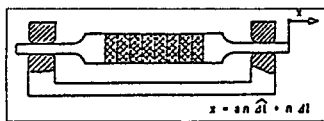


그림 6. 불연속 동작 선형모터

자기변형소자를 이용한 선형모터는 100kg이 넘는 큰 힘을 낼 수 있고, 0.0001 mm 정도의 범위까지 정밀하게 제어할 수 있다.

4.4. 서보밸브

자기변형소자는 높은 주파수에서도 동작할 수 있으므로 수압 밸브, 연료주입밸브, 연소가스밸브의 구동에 매우 효과적으로 쓰

일 수 있다. 그림 7은 자기변형소자를 이용한 밸브의 예이다¹².

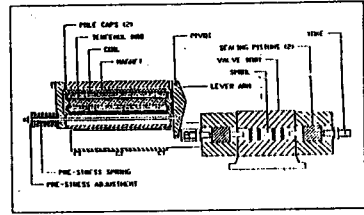


그림 7. Terfenol-D로 구동되는 수압밸브

4.5. 자계측정 센서

자기변형소자를 이용해서 자계의 세기를 알아내는 센서를 만들 수도 있다. 자계의 세기와 자기변형소자의 변위의 관계가 선형적인 구간에서 동작할 수 있도록 바이어스를 걸어준 다음 자기변형소자가 외부의 자계하에서 늘어난 길이를 측정함으로써 자계의 세기를 알아내는 것이 기본적인 구현원리이다.

5. 맺음말

자기변형소자는 압전소자에 비해 변위가 크고, 힘이 세다는 장점으로 인해 압전소자를 대체할 소자로 기대된다. 하지만 자기변형소자가 주목을 받기 시작하지 얼마되지 않았고, 특히 국내에서는 자기변형소자에 대한 연구가 전무한 상태이므로 특정한 분야의 응용에 앞서 소자 자체의 특성에 대한 심도있는 연구가 선행되어야 할 것이다.

References

- 1 A. E. Clark in *Ferromagnetic Materials*, Vol. 1, ed. E. P. Wohlfarth (North Holland, Amsterdam 1980).
- 2 金子秀夫, "超磁歪材料의 應用現況", *日本應用磁氣學會 第 68回 研究會資料*.
- 3 J. D. Verhoeven, E. D. Gibson, O. D. McMasters, H. H. Baker, "The effect of composition and magnetic heat treatment of magnetostriction of Tb₂Dy_{1-x}Fe_x twinned single crystals", *Journal of applied physics*, 66(2), 1989.
- 4 J. L. Butler, Application manual for the design of ETREMA Terfenol-D magnetostrictive transducers, available from Edge Technologies, Inc., Ames, IA., 1988.
- 5 B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley publishing company, 1972.
- 6 D. T. Peterson, J. D. Verhoeven, O. D. McMaster, W. A. Spitzig, "Strength of Terfenol-D", *Journal of applied physics*, 65(9), 1989.
- 7 A. E. Clark, M. L. Spano, H. T. Savage, "Effect of stress on the magnetostriction and magnetization of rare-earth Fe_{1.95} alloys", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 19, No. 5, 1983.
- 8 J. Sewell, P. Kuhn, "Comparison of magnetic biasing techniques for Terfenol-D", *Proceedings, Second International Conference on Giant Magnetostrictive Alloy and Amorphous Alloys for Actuators and Sensors*, Marbella, Spain, 1988.
- 9 F. Claeysen, D. Boucher, A. Foggia, E. Sabonnadiere, "Analysis of the magnetic fields in magnetostrictive rare-earth iron transducers", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 26, No. 2, 1990.
- 10 M. W. Miller, M. D. Bryant, J. Umegaki, "Attenuation and transformation of vibration through active control of magnetostrictive Terfenol", *Journal of Sound and Vibration*, 134(3), 1989.
- 11 Wanjun Wang, Ilene Busch-Vishniac, "A high precision micropositioner based on magnetostriction principle", *Rev. Sci. Instrum.*, 63(1), 1992.
- 12 M. Goodfriend, J. Sewell, C. Jones, "Application of a magnetostrictive alloy, Terfenol-D to direct control of hydraulic valves", *SAE Trans.*, Vol. 99, 1990.