

자기변형 소자와 그 응용

백창욱*, 김병호*, 김용권**

(*서울대 대학원 전기공학과 석사과정,

**서울대 공대 전기공학과 조교수)

1. 머리 말

최근 메카트로닉스(mechatronics)기술이 발전함에 따라서 액츄에이터(actuator)란 말도 이제는 일반인들에게까지 널리 알려지게 되었다. 액츄에이터란 말은 상당히 광범위한 뜻을 포함하기 때문에, 이것을 한 마디로 설명하기란 쉽지 않은 일이다. 가장 일반적인 정의를 내린다면 주어지는 어떠한 구동에너지를 기계적인 에너지 (변위 혹은 응력 등)로 변환시켜주는 일종의 에너지변환기(transducer)라고 할 수 있겠다. 구동에너지로서는 전기, 공기압, 유압, 열 등 여러가지가 있을 수 있고, 기존의 유압 혹은 공기압 실린더, 서보모터등의 각종 모터, 솔레노이드 등도 모두 액츄에이터의 일종이라고 생각할 수 있다.

그런데 최근에는 광범위한 분야(광학, 천문학, 의공학, 정밀가공 등)에서 액츄에이터의 필요성이 증가하고 있어, 액츄에이터의 다양화와 고성능화에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 그 결과 현재는 새로운 원리에 의거한 액츄에이터들이 속속 등장하고 있다.

특히 전력기기 및 자동화기기 등에서는 대상물체를 선형적으로 동작시킬 필요성이 많이 요구되어지고 있다. 과거의 액츄에이터는 회전기에 의한 움직임을 기어등의 변환장치를 이용하여 선형운동으로 바꾸는 구조가 많이 이용되었으나 기계적 구조가 복잡하고 에너지 효율이 낮은 단점이 있었다. 이러

한 단점을 극복하기 위해 소자 자체의 선형적 움직임을 그대로 사용하는 액츄에이터로서 고체 변위소자가 개발되고 있다. 이것은 구동에너지에 의해 발생하는 고체의 탄성변형을 출력으로 이용하게 되는 소자로서, 구동에너지에 따라 압전소자(piezoelectric device : 전계), 형상기억합금(shape memory alloy : 열), 자기변형소자(magnetostrictive device : 자계) 등으로 구분할 수 있다. 압전소자와 형상기억합금은 현재 많이 알려져 있고 상당히 많은 분야에서 쓰이고 있다. 그러나 압전소자는 변위량이 작고 발생력이 낮은 점, 형상기억합금은 응답속도가 느리다는 점 등, 각각 응용에 있어서의 한계점을 가지고 있다.

자기변형소자에 대해서는, 그 현상 자체는 알려진 지 상당히 오래되었으나 역시 변위량이 작아 지금까지는 압전소자등이 널리 사용되어왔고 자기변형소자는 극히 제한된 분야에서 밖에 사용되지 않았다. 그런데 최근에 들어 미국, 스웨덴 등에서 자기변형소자에 대한 연구결과로서 변위량이 기존소자를 훨씬 뛰어넘고 발생력, 응답속도, 에너지 밀도가 뛰어난 자기변형소자를 제조해내고 있다. 이것을 기존의 자기변형소자에 대해서 초자기변형소자(giant magnetostrictive device : GMA)라고 부른다. 이 GMA가 개발됨으로서 기존의 디바이스의 동작특성을 향상시키고 더불어 기존 변위소자로 구현할 수 없었던 새로운 응용분야들을 생각할 수 있게 되었다[1,2]. 실제로 외국에서는 선형모터, 진동

억제장치, 서보밸브, 수중음파탐지기, 펌프, 미소변위조절 등에서의 응용 가능성 및 연구결과들이 계속 보고되고 있으며, 정기적으로 GMA의 특성연구 및 센서 및 액추에이터에의 응용결과를 토론하는 국제학술대회가 개최되고 있으나 우리나라에서는 이에 대한 연구가 아직 보고되지 않았다.

따라서 본 기술해설에서는 자기변형소자에 대해 원리 및 발전 역사를 간략히 소개하고 현재 가장 널리 이용되고 있는 자기변형소자인 Terfenol-D의 물질특성과 동작특성 및 현재의 응용동향과 가능성에 대해 기술하고자 한다.

2. 자기변형현상

자기변형이란 어떠한 재료에 자계를 가할 때, 전체 에너지를 최소로 보존하기 위하여 재료의 길이가 변화하는 것에 의해 발생하는 현상을 말한다[3]. 길이가 변화하면서 실제로는 체적도 변화하게 되는데 보통 길이방향의 변화에 비해서 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 통상 체적자기변형은 무시한다.

단결정 재료의 경우 자기변형은 결정방향에 따라 다르게 일어나며, 결정방향에 무관한 경우를 등방자기변형(isotropic magnetostriction)이라 한다. 다결정 재료의 경우는 단결정 재료의 자기변형이 평균화되어 나타나므로 등방자기변형이 된다.

자기변형 현상은 자기이방성(magnetic anisotropy)과 큰 관계가 있다. 만일 자기이방성이 기계적 응력과 무관한 경우 자기변형은 일어나지 않으며, 자기이방성이 너무 큰 경우에는 자기변형을 일으키는 데에 굉장히 큰 자계가 필요하므로 실용상으로 적합하지 않다. 또한 사용시에 응력과 발생 변형량이 선형성을 가지는 것이 좋으므로 적당한 양의 자기이방성을 갖는 것이 중요하다[2].

3. 자기변형소자의 역사

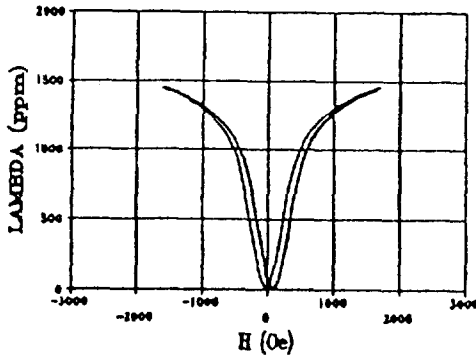
자기변형현상 자체는 이미 상당히 오래 전부터 알려져 있었다. 1840년대에 니켈 및 니켈합금이 자기변형을 일으키는 것이 발견된 이후, 1930-1940년대에 이르러 sonar 및 초음파 등의 응용에 사용되기 시작하였다. 그러나 당시에는 자기변형량이 매우 작아($\Delta l/l = 40$ ppm 정도), 1950년대에 들

어서면서부터 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 발견하였다[4]. 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 합금화를 통해 큐리온도를 올려 실온에서 초자기변형을 일어나게 하는데 성공함으로써 최근 실용재료로 급속히 각광받기 시작하였다[2]. 여기에서 발생하는 변형량은 종래의 니켈합금의 50여배, 압전 세라믹스에 비해서도 10배나 되는 최대 2000 ppm(이론적인 최대변형량은 약 2700 ppm 정도)에 달하게 되었고, 따라서 이는 연구단계를 벗어나 실제 응용의 단계에 접어들게 되었다. 이러한 거대한 변형량 때문에 기존의 압전소자들을 직접 대체하는 효과는 물론이거니와 부수적인 장점들을 결합하여 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 단결정 Terfenol-D로, 1976년에 Clark와 Savage가 특허를 신청한 것이 기본이 되고 있다. 상업적으로는 미국의 Edge Technology사의 자회사인 ETR-EMA에서 FSZM(Free Stand Zone Melt) 방법과 MB(Modified Bridgman) 방법에 의하여 만들어진 원통형의 Terfenol-D rod 및 선형 액추에이터를 시판하고 있다[5,6]. 자기변형소자로 구동되는 이 액추에이터는 빠른 순간속도로 큰 힘을 내며, 효율적이고, 낮은 동작전압으로도 구동되며, 작은 체적으로 큰 에너지를 전달할 수가 있다[7].

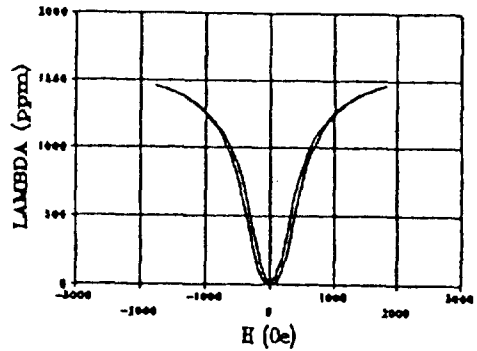
4. 자기변형소자의 제특성

4.1 자기변형소자의 물질특성

자기변형소자의 특성은 주로 가해진 자계 H와, 원래의 소자의 길이에 대한 그 자계에서의 변형량의 비 $\lambda (= \Delta l/l)$ 의 그래프로써 나타낸다. 그림 1



(a) $Tb_{3.0}Dy_{7.0}Fe_{1.9-1.95}$



(b) $Tb_{2.28}Dy_{7.72}Fe_{1.9-1.95}$

그림 1. Terfenol-D의 H-λ 특성곡선

은 MB 방법으로 제조되고, 조성비가 다른 두개의 Terfenol-D rod의 H-λ 곡선이다. 그림에서 자계가 증가함에 따라 변형량이 증가하며 자계가 어느 한계에 도달하면 변형량이 포화상태에 이르는 것을 볼 수 있다. 전체적인 변형은 비선형적이며 최대 변형량 2000 ppm에서 약 1000 ppm 정도가 선형 구간에 해당된다. 실제로 액츄에이터에 응용할 때도 이 영역안에서 사용하는 것이 일반적이다. Tb와 비율을 낮춰줌으로써 같은 자계에서의 변형량에서 약간의 손실이 생기나 선형성이 증가하고 히스테리시스가 줄어든다는 것을 알 수 있다[7]. 또한 Fe의 비율을 낮춰주면 재료의 강도가 증가한다는 사실도 알려져 있다[8]. 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 특징을 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 μsec 정도로 굉장히 빠르며, 주파수 대역이 넓다는 점 등, 여러가지 장점을 가지고 있다. Terfenol-D의 기본특성과, 압전 세라믹스 및 니켈 과의 물질특성을 비교하여 표 1에 실어 놓았다[9].

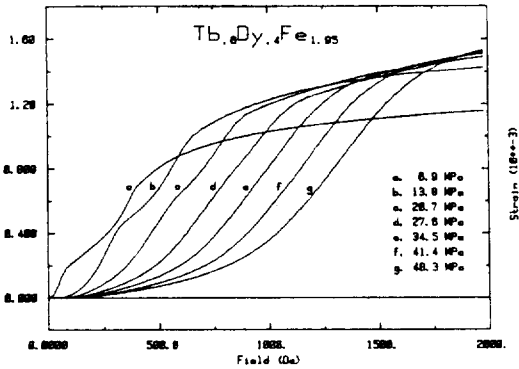
표 1. 전형적인 물질특성 비교

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	$2.5-3.5 \times 10^{10}$	7.3×10^{10}	32×10^{10}
Tensile strength MPa	28		300
Comp. strength MPa	700		
2. Thermal			
Thermal expansion / $^{\circ}\text{C}$	12×10^{-6}	10×10^{-6}	13.3×10^{-6}
3. Electrical			
Resistivity $\mu\Omega\text{cm}$	60		700
4. Magnetic			
Magnetization T	1.0		0.485
Curie temperature $^{\circ}\text{C}$	380	300	354
5. Magnetostriction			
Magnetostriction ppm	1500-2500	100*	-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

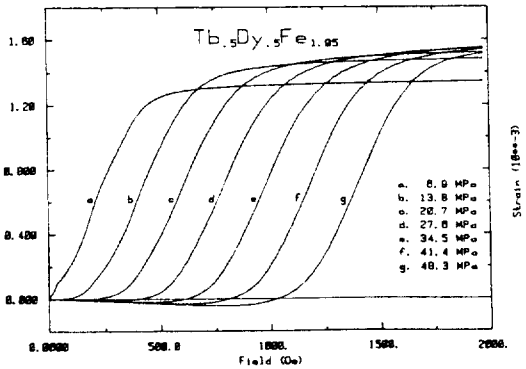
* Electrostriction

4.2 기계적 예압(prestress)과 자기변형

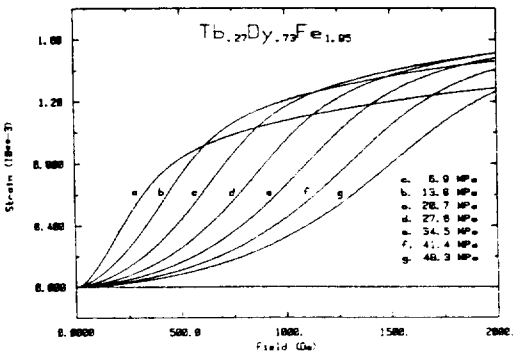
위에서 언급한 대로 Terfenol-D는 인장력에 굉장히 약하기 때문에, 안정한 상태에서 동작시키기 위해 적당한 예압을 가해주는 것이 좋다. 예압은 2-3개 정도의 기계적 스프링을 사용하여 10-20 MPa 정도로 가해주는 것이 보통이다. 또한 예압을 가하면 재료의 투자율이 변하고 H-λ 곡선특성도 변하므로 물질조성과 예압을 적당히 조합하여 최대



(a) $Tb_{0.6}Dy_{0.4}Fe_{1.95}$



(b) $Tb_{0.5}Dy_{0.5}Fe_{1.95}$



(c) $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$

그림 2. 여러가지 예압을 가했을 때의 H-λ 곡선 동작특성을 얻을 수 있다[10]. 그림 2는 Terfenol-D에 예압을 변화시켜 가면서 측정한 H-λ 곡선이다.

4.3 자기바이어스 및 자기회로

앞의 그림 1에서 보는 것처럼, 자기변형은 역방

향의 자계가 걸려도 같은 방향으로만 변형을 일으킨다. 따라서 실제 자기변형소자의 동작 주파수는 전원 주파수의 두배가 되는 현상이 발생한다. 만일 사용자가 선형영역에서 전류의 극성을 바꾸어 양방향의 변형을 얻으려할 경우에는 자기변형소자에 영구자석을 삽입하거나 구동 솔레노이드 코일에 직류 전류를 흘려 정자계에 의한 약간의 변위를 발생시켜, H-λ 곡선의 선형영역 중간에 바이어스 점을 잡아놓은 후에 사용한다. 보통 자기바이어스는 400-500 Oe 정도의 병렬형 영구자석을 사용하는 것이 일반적이며 정전류 방식은 잘 쓰이지 않는다. 이 바이어스에 의해 가장 정확한 선형영역에서의 정밀한 양방향 제어가 가능해진다[11].

자기변형소자는 표 1에 나와있는 것과 같이 투자율이 굉장히 낮아서($\mu_r=5-10$) 그대로 액츄에이터 등에 사용할 경우 누설자속이 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 된다[12].

4.4 Terfenol-D 액츄에이터

현재 시판되고 있는, 예압 및 바이어스 자기회로를 포함한 전형적인 선형 액츄에이터의 구조는 그림 3과 같다. 이 Terfenol-D 액츄에이터의 가장 큰 특징은 에너지 밀도가 매우 높다는 점이다. 즉

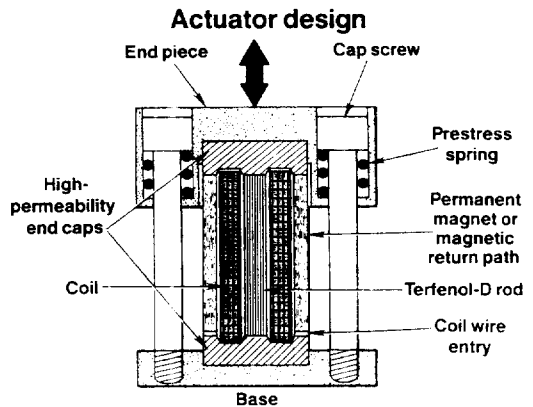


그림 3. Terfenol-D 선형 액츄에이터의 기본적인 구조

낮은 입력 전력으로 큰 변위를 얻을 수 있다. 자기 변형량은 최대 2000 ppm이 넘지만 대부분의 액츄에이터들은 최대 변형량이 1000 ppm 정도가 되도록 디자인된다. 이 영역안에서는 저전력으로 입력 전류에 거의 정확히 비례하는 변위를 얻을 수 있고 이 영역 밖에서는 선형성이 떨어져서 전류를 두 배로 늘려도 두 배의 변위량을 얻을 수 없게된다. 또한 에너지 밀도가 높으므로 다른 액츄에이터보다 큰 힘을 내는 것이 가능하다. Terfenol-D rod에 의해 발생하는 clamped force는 $F = EA \Delta L / L$ 로 주어지고, 지름 50mm rod의 경우 약 4450N의 충분한 힘을 낼 수 있다.

응답속도에 있어서는 거의 제한이 없고, 단지 코일 전류의 주파수에 한계가 있으므로 거기에 의해서만 제약을 받게 대며 대략 $10 \mu s$ 정도이다. Terfenol-D 액츄에이터는 상당히 넓은 주파수대역에서 거의 일정한 변위를 발생시킬 수 있으며 그 범위는 150-2000 Hz 정도이다. 그리고 공진주파수대를 이용하면 훨씬 큰 변위를 얻을 수 있다.

Terfenol-D는 상당히 오랜 시간동안 사용해도 피로현상(fatigue)이 일어나지 않는다. 따라서 동작특성을 오랜 기간동안 일정하게 유지시킬 수 있다. 또한 와전류(eddy current)가 높은 주파수로 일어나지 않는다면 재료에 열이 발생하지 않는다(액츄에이터의 구동부를 적층하면 와전류를 막을 수 있다). 반면 온도에 대해서는 굉장히 많은 영향을 받게 되어, 온도가 큐리온도 근처($380^\circ C$)로 접근하면 자기변형이 선형적으로 떨어지고 모든 자기적 성질이 사라진다. 또한 온도가 $-9.5^\circ C$ 이하로 내려가도 자기변형이 떨어지게 된다.

Terfenol-D의 자기변형은 재현성(reproducibility)이 매우 뛰어나지만 히스테리시스(hysteresis)가 있기 때문에 정밀제어를 위해서는 센싱 시스템이 들어가는 것이 좋다. 또한 자기변형현상이 가역적(reversible)이기 때문에 자기변형소자를 액츄에이터와 센서 모두에 응용할 수가 있다[7].

5. 자기변형소자의 응용 현황

자기변형소자는 압전소자에 비해 변위가 크고, 큰 힘을 낼 수 있으므로 압전소자를 대체할 수 있고, 그밖에도 넓은 주파수 범위에서 사용할 수 있는

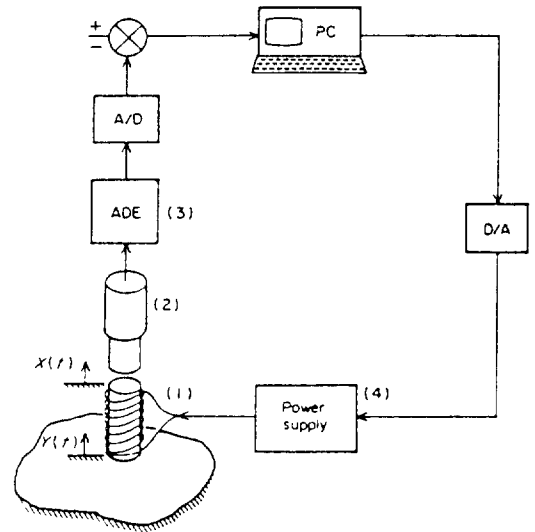


그림 4. 능동 진동제거 장치의 개념도

등의 특성을 살린 여러가지 종류의 응용에 쓰일 수 있다. 현재 실제로 사용중이거나 연구가 진행되고 있는 분야는 다음과 같다.

5.1 능동 진동제거 장치

자기변형 액츄에이터를 이용하면 주변의 진동을 제거하는 장치를 만들 수 있다[13]. 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 있다. 현재 상용화가 되어있는 능동진동제거 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.

5.2 정밀 위치제어 장치

자기변형소자에 가해주는 자계의 세기를 조절함으로써 자기변형소자의 변위를 정밀하게 제어할 수 있다. 그러한 응용의 한가지 예를 그림 5에 나타내었다. 이것은 X축 방향으로 움직일 수 있는 자기변형 액츄에이터와 Y축 방향으로 움직일 수 있는 자기변형 액츄에이터를 직교하도록 2층 구조로 만들

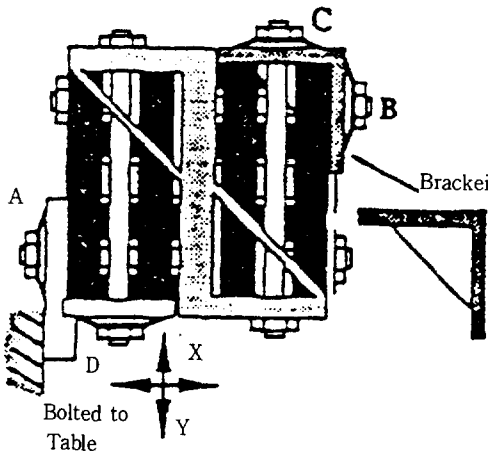


그림 5. 2차원 정밀 위치제어 장치

어 XY 평면상에서 원하는 위치를 취할 수 있는 2차원 위치제어 장치이다[14]. 이런 장치를 이용하면 현미경의 재물대나 기계공구의 위치제어 장치 등을 만들 수 있다. 하지만 많은 전류를 흘려야 하므로 열에 의한 원치않는 변위가 발생할 수 있다. 따라서 실제 응용시에는 센서와 제어기를 이용해서 폐환 제어(feedback control)를 해야할 것이다.

5.3 선형모터

자기변형소자를 이용하면 정밀한 제어가 가능하고, 큰 힘을 낼 수 있고, 변위도 큰 선형모터를 만들 수 있다[15]. 그림 6에서 보는 것은 불연속 동작을 하는 선형모터의 한 예이다. 구동방향 쪽의 고정장치를 풀고 변위발생용 자기변형소자에 자계를 가해 변위를 발생시킨후 고정장치를 다시 잡고 반대편 고정장치를 풀어준 다음 자계를 제거하는 동작을 반복함으로써 큰 변위를 낼 수 있다.

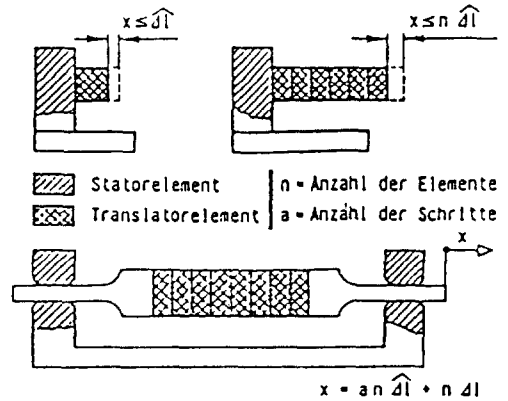


그림 6. 불연속 동작 선형 모터

다른 종류의 선형모터로는 그림 7과 같은 형태의 자체고정 선형모터가 있다. 자기변형소자의 일부에 만 공간적으로 진행되는 자계를 가해서 자계의 진행방향과 반대방향으로 소자를 진행시킨다. 불연속 선형모터와 마찬가지로 위의 동작을 반복함으로써 변위를 누적시켜 큰 변위를 낼 수 있다.

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

5.4 서보밸브

자기변형소자를 이용해서 유압밸브, 연료주입밸브, 연소가스밸브 등을 구동할 수도 있다[16]. 그림 8은 자기변형소자를 이용한 유압밸브의 예이다.

그림 9는 자기변형소자로 구동되는 연소가스밸브이다. 자기변형소자에 자계를 가하면 밸브가 열리고 자계를 제거하면 스프링의 힘에 의해서 밸브가 닫힌다. 밸브를 열 때 스프링이 자기변형소자에 부

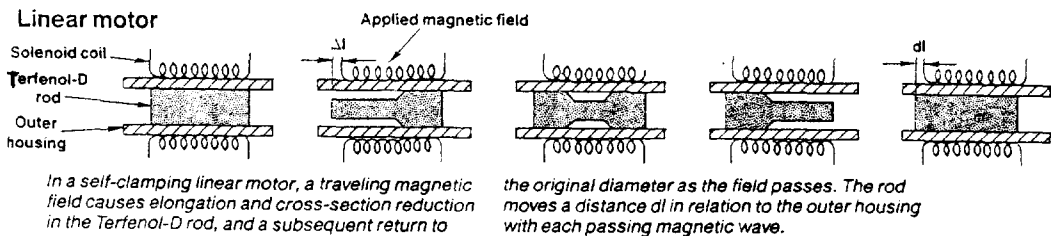


그림 7. 자체고정 선형 모터

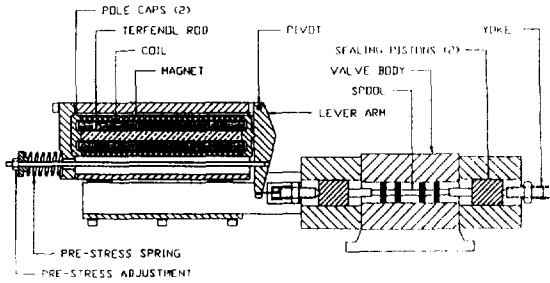


그림 8. Terfenol-D로 구동되는 유압밸브

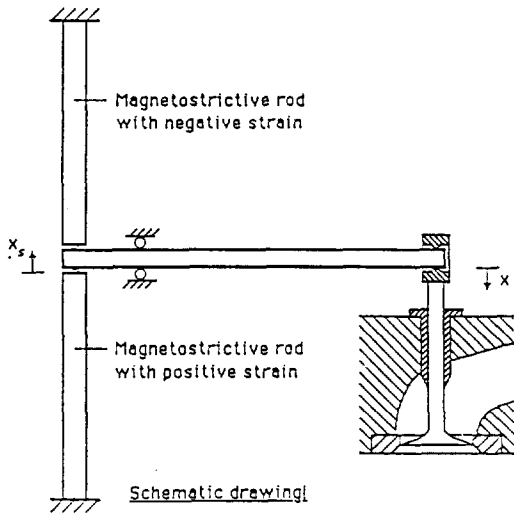


그림 9. Terfenol-D로 구동되는 연소가스밸브

하로 작용하는 결점을 보완하기 위해서 단을 때도 자기변형소자를 이용하는 연소가스밸브도 생각할 수 있다. 자기변형소자는 높은 주파수에서도 동작할 수 있으므로, 매우 빨리 동작해야 하는 밸브의 구동에는 좋은 해결책이 될 수 있다.

5.5 수중 음파탐지기

수중에서는 큰 에너지를 가진, 저주파의 음파가 보다 멀리 전달되고 유용한 데이터를 생성해낼 수 있으므로 수중 음파탐지기에는 큰 에너지의 저주파 음원이 필요하다. 자기변형소자를 이용하면 압전소자보다 큰 에너지를 가진 신호를 만들 수 있을 뿐만 아니라, 압전소자의 동작전압이 수백 볼트 정도인 것에 비해 12V에서 100V사이의 저전압에서 구동시키므로 간단한 전원장치로 구동할 수 있고 절연문제도 쉽게 해결할 수 있다. 이미 자기변형소자

를 이용한 수중 음파탐지기가 널리 상용화되어 있다는 사실은 매우 주목할 만하다.

5.6 자계측정 센서

자기변형소자를 이용해서 자계의 세기를 알아내는 센서를 만들 수도 있다. 자계의 세기와 자기변형소자의 변위의 관계가 선형적인 구간에서 동작할 수 있도록 바이어를 걸어준다음 자기변형소자가 외부의 자계하에서 늘어난 길이를 측정함으로써 자계의 세기를 알아내는 것이 기본적인 구현원리이다. 다만 측정해야 할 자계의 주파수가 높을 경우 자기변형소자의 와전류로 인해서 특성이 크게 나빠질 수 있다는 점을 고려해야 한다.

6. 맺음말

자기변형소자는 압전소자에 비해 변위가 크고, 발생력이 크다는 장점으로 인해 압전소자를 대체할 소자로 기대된다. 하지만 자기변형소자가 주목을 받기 시작하지 얼마되지 않았기 때문에 실제 응용에 있어서 문제점이 완벽하게 해결된 상태는 아니다. 본문에서도 언급했듯이 높은 주파수에서 동작할 때 와전류로 인한 특성의 저하, 구동하는데 많은 전류를 흘려야 하기 때문에 발생하는 열에 의한 변위의 변화 등의 문제는 실제 응용시 꼭 해결해야 할 것들이다. 국내에서는 자기변형소자에 대한 연구가 전무한 상태이므로 특정한 분야의 응용에 앞서 소자 자체의 특성에 대한 심도있는 연구가 선행되어야 할 것이다. 자기변형소자의 특성에 대한 축적된 연구결과를 바탕으로 응용에 힘쓴다면 국내에서도 빠른 시간내에 자기변형소자를 이용한 좋은 응용이 나오기를 기대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 江田 弘, “常溫超磁歪材料開發” 日本精密工學會誌, 57, 3, pp 47-54, 1991.
- [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, pp 65-72, 1991.
- [3] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Chap. 8, Addison-Wesley pub-

- lishing company, 1972.
- [4] A. E. Clark, *Ferromagnetic Materials*, Vol. I, Chap. 7, ed. E. P. Wohlfarth (North Holland, Amsterdam 1980).
- [5] *Catalogues for ETREMA Terfenol-D Actuators*, available from ETREMA Products, Inc.
- [6] J. D. Verhoeven, E. D. Gibson, O. D. McMaster, H. H. Baker, "The effect of composition and magnetic heat treatment of magnetostriction of $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ twinned single crystals", *J. Appl. Phys.*, 66 (2), pp 772-779, 1989.
- [7] M. J. Goodfriend, K. M. Shoop, "High force, high strain, wide bandwidth linear actuator using the magnetostrictive material, Terfenol-D", *Proc. of the conf. on recent advances in active control of sound and vibration*, 1991.
- [8] D. T. Peterson, J. D. Verhoeven, O. D. McMaster, W. A. spitzig, "Strength of Terfenol-D", *J. Appl. Phys.*, 65(9), pp 3712-3713, 1989.
- [9] O. D. McMaster, J. D. Verhoeven, E. D. Gibson, "Preparation of Terfenol-D by Float Zone Solidification", *J. Mag. Mag. Mat.*, 54, 57, pp 849, 1986.
- [10] 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, pp 1964-1966, 1983.
- [11] J. Sewell, P. Kuhn, "Comparison of magnetic biasing techniques for Terfenol-D", *Proc. 2nd Int. Conf. on Giant Magnetostrictive and Amorphous Alloys for Actuators and Sensors*, Marbella, Spain, 1988.
- [12] 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, pp 975-978, 1990.
- [13] M. W. Miller, M. D. Bryant, J. Umegaki, "Attenuation and transformation of vibration through active control of magnetostrictive Terfenol", *J. Sound and Vibration*, 134(3), pp 507-519, 1989.
- [14] Wanjun Wang, Ilene Busch-Vishniac, "A high precision micropositioner based on magnetostriction principle", *Rev. Sci. Instrum.*, 63(1), pp 249-254, 1992.
- [15] L. Kiesewetter, "The application of Terfenol-D in linear motors", *Proc. 2nd Int. Conf. on Giant Magnetostrictive and Amorphous Alloys for Sensors and Actuators*, Marbella, Spain, 1988.
- [16] M. Goodfriend, J. Sewell, C. Jones, "Application of a magnetostrictive alloy, Terfenol-D to direct control of hydraulic valves", *SAE Trans.*, Vol 99, 1990.



백창욱(白昌煜)

1970년 11월 12일생, 1993년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 현재 서울대 대학원 전기공학과 석사과정.



김병호(金柄昊)

1971년 1월 17일생, 1993년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 현재 서울대 대학원 전기공학과 석사과정.



김용권(金容權)

1960년 10월 23일생, 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동경대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1990~1992년 히타치 제작소 중앙연구소(동경) 근무. 현재 서울대 공대 전기공학교 조교수. 관심분야: 전기기기중에서 MEMS와 초전도, 압전재료 등의 소재를 이용한 소형 액츄에이터.