

## 초자기변형합금 Terfenol-D의 기초특성에 관한 연구

백창욱<sup>o</sup>, 김용권  
서울대학교 전기공학과

### A study on the fundamental characteristics of Giant Magnetostrictive Alloy, Terfenol-D

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

#### Abstract

Fundamental characteristics of Giant Magnetostrictive Alloy Terfenol-D ( $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9-1.95}$ ) were measured by experiments. Magnetostrictions of Terfenol-D samples whose lengths are 15 and 25 mm have been measured under compressive stress from 0 to 14 MPa, when the applied magnetic field was up to 1200 Oe. The relationship between magnetostriction and field is shown graphically in the form of  $H-\lambda$  curve. For the experiment, solenoid magnet and lever-arm-type stress equipment were designed and fabricated. The magnetostriction is measured by laser displacement measuring system and the stress applied to the sample is measured by load cell.

#### 1. 서론

어떠한 물질에 자장을 인가했을 때, 그 물질의 형상이 변화하는 현상을 자기변형(magnetostriction)이라 한다. 니켈 등의 금속에 대해 자기변형이 일어난다는 사실이 상당히 오래 전부터 알려져 왔으나, 그 변형량이 40 ppm 정도로 너무 작아서 실제 응용에 있어 널리 사용되지 못하였다. 그런데 최근 미국의 A.E. Clark 등에 의해, 희토류 금속(rare-earth metal) 원소인 Tb와 Dy 및 철의 합금화를 통해 자기변형이 최대 1500 ppm 정도까지 일어나는 물질이 개발되었는데 [1], 이것을 보통 초자기변형합금(Giant Magnetostrictive Alloy : GMA)라 한다. Terfenol-D ( $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$  :  $x = 0.27 \sim 0.3$ ,  $y = 1.9 \sim 2.0$ )라고 명명된 이 합금은 변형량이 매우 크고(니켈의 50여배, 압전소자의 10여배), 에너지 밀도가 높아 큰 힘을 낼 수 있는 특성을 가지고 있어 현재 정밀 위치 제어 장치 및 공작기구, 선형 모터 [2], 능동진동 억제 시스템(active antivibration systems) [3], 소나브, 소너(sonar)의 저주파 음원 등, 새로운 분야에의 응용 가능성이 널리 검토되고 있다 [4].

Terfenol-D를 사용한 디바이스를 설계할 때는 시료에 압축응력을 가하는 것이 일반적이다. 그 이유로서 Terfenol-D가 인장강도는 매우 약한 반면에 압축강도가 굉장히 큰 특징을 갖고 있다는 점을 들 수 있다. 그러나 더욱 중요한 이유는, 가해진

압축 응력이 물질 내의 자구벽(domain wall) 이동을 일으켜 자구 내의 자화 벡터들을 일정한 방향으로 정렬시키기 때문에 자계에 대한 변형량을 증가시킬 수 있다는 점이다 [5]. 따라서 압축응력에 따른 자기변형량을 측정할 때 이러한 자기변형을 이용한 트랜스듀서 설계 및 제작에 있어 매우 중요한 설계변수가 된다.

따라서 본 논문에서는 초자기변형 합금 Terfenol-D의 기본 특성으로서, 봉형 Terfenol-D 시료의 자기변형량을 측정하고 히스테리시스 및 열팽창에 의한 영향을 측정하였다. 또한 시료에 압축응력을 3.5~14 MPa 까지 변화시켜 인가하면서, 길어진 자장에 대한 자기변형량을 측정하여 압축응력이 자기변형에 미치는 영향을 측정하였다.

#### 2. 실험

자기변형의 측정을 위하여 그림 1과 같은 실험 장치를 제작하였다. 측정에 사용한 시료는 지름 5 mm, 길이 15 mm 및 25 mm의 봉형 Terfenol-D로써,  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9-1.95}$ 의 조성을 갖는다. 시료에 자장을 인가하기 위하여 내경 22 mm, 길이 100 mm의 보빈에 지름 0.8 mm의 코일을 6000회 감은 솔레노이드를 제작하였다. 시료에 가능한 균일한 자장을 인가하기 위하여 솔

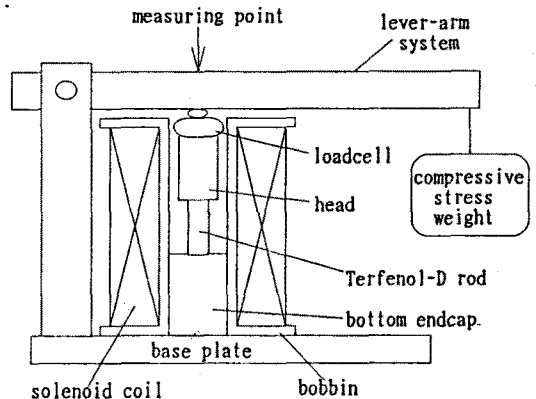


그림 1. Terfenol-D의 자기변형 측정을 위한 실험 장치의 구조

테노이드를 시료보다 길게 만들었고, 반침대에 시료를 고정시킨 후 솔레노이드 중앙에 위치시켰다. 시료에 가해지는 압축응력은 그림과 같이 제작된 지렛대를 이용하여 변화시킬 수 있게 하였다. 가해진 응력의 크기는 로드셀(N. T. S., LCS-50K)을 이용하여 측정하였다.

전체 측정 장치의 블록 선도를 그림 2에 나타내었다. 측정하여야 하는 물리량은 인가된 자장과 변위이다. 솔레노이드에 흘리는 전류를 0에서 2.4 A 까지 증가시켰다가 다시 0으로 감소시키면서 자기변형량을 측정하였다. 이 때 걸리는 시간은 약 20 초 정도이며, 솔레노이드에서 발생하는 열에 의한 열팽창 변형을 줄이기 위해 최대한 빠른 속도로 실험을 진행하였다. 측정된 전류를 솔레노이드의 전류-자장 특성을 이용해 자장으로 변환하여, 자장에 대한 자기변형량을 그래프( $H - \lambda$  곡선)로 나타내었다.

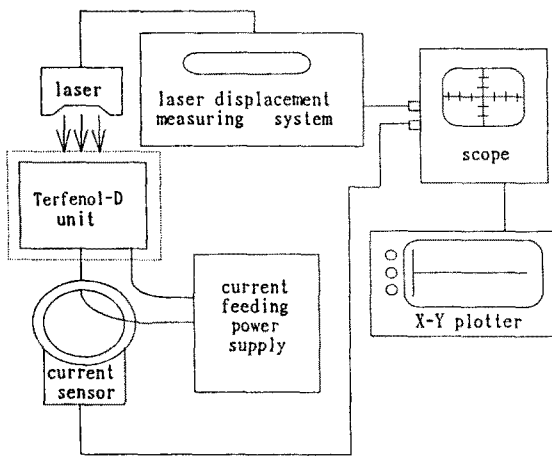


그림 2. 자기변형 측정 시스템의 블록선도

전류의 측정에는 홀 소자를 이용한 전류 센서(DJC-H)를 사용하였고, 자기변형량의 측정에는 레이저 변위 측정 장치(KEYENCE 2510, 해상도 0.05  $\mu\text{m}$ , 샘플링 주파수 40 kHz)를 이용하였다. 출력값을 오실로스코프를 이용하여 잡은 후 X-Y 플로터로 파형을 출력하여 측정 데이터를 얻었다. 솔레노이드의 전류-자장 특성은, 전류를 흘리면서 시료의 양쪽 끝부분과 중심부의 세 군데의 자장을 측정하여, 그 평균값을 사용하였다. 중심부와 양쪽 끝부분의 자장의 편차는 최대 전류(2.4 A)를 흘렸을 때 약 80 Oe 정도였다.

### 3. 결과

자기변형량은 보통 자장과 시료 자체의 길이 L에 대한 변형량  $\Delta L$ 의 비  $\lambda$  ( $=\Delta L/L$ ) 사이의 관계를 나타내는  $H - \lambda$  곡선으로 나타낸다. 그림 3에는 자장을 1200 Oe까지 변화시키면서, 압축 응력을 가하지 않았을 때와 7 MPa의 응력을 가했을 때 측정된 자기변형량을 나타내었다. 그림에서 압축응력을 가하지 않았을 때보다 압축응력을 가했을 때의 변형량이 훨씬 증가하는 것을

볼 수 있다. 응력을 가하지 않았을 때, 1200 Oe에서 약 400ppm의 변위를 보이는 반면, 7 MPa를 가했을 때는 같은 자장에서 약 1000 ppm의 변위를 나타내었다.

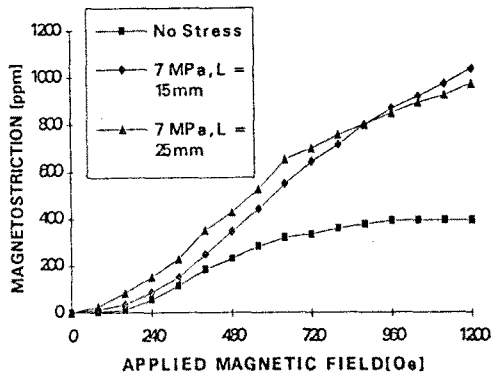


그림 3. 응력이 없을 때와 7 MPa의 응력 인가시의 자기변형량

그림 4에서는 7 MPa의 압축응력 하에서, 자장을 0에서 1200 Oe까지 증가시켰다가 다시 0으로 감소시켰을 때의 자기변형량의 변화를 나타내었다. 일반적인 강자성체의 경우와 같이 히스테리시스 현상을 보이며 자장을 0으로 줄어도 잔류 변형이 남게 된다. 따라서 정밀 위치 제어 장치와 같은 디바이스를 설계할 경우에는 이러한 히스테리시스를 고려하여야 한다.

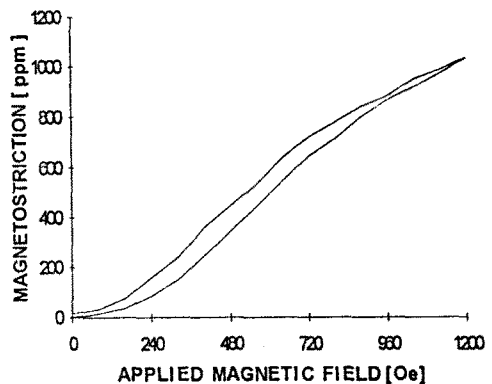


그림 4. 7MPa의 응력 인가시 자기변형의 히스테리시스 현상

또 한 가지 고려하여야 할 것은 시료의 열팽창 효과이다. Terfenol-D의 열팽창 계수는 12 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  정도이며, 이 영향을 고려하기 위해 실험 과정에서 열전쌍(thermocouple)을 장착하여 측정 시작시와 측정 종료시의 온도 변화  $\Delta T$ 를 측정해 보았다. 측정 시간이 짧았기 때문에  $\Delta T = 0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$  정도였고, 열팽창에 의한 최대 변형은  $12 \times 0.3 = 3.6$  ppm 이 된다. 따라서 측정된 최대 자기변형량이 800~1000 ppm 정도임을 고려한다면 열팽창에 의한 변형을 무시할 수 있다. 그러나 트랜스듀서 등의 응용기기에서 교류 구동을 할 경우 구동 전류 및 시료 내에 발생하는 와전류 등에 의해 상당한 양의 열이 발생하여 열에

의한 영향을 무시할 수 없게 되므로, 이를 보상하는 설계가 필요하다.

그림 5는 압축응력을 3.5 ~ 14 MPa 까지 변화시키면서 측정 한  $H - \lambda$  곡선이다. 3.5 MPa 의 곡선을 보면 약 900 Oe 의 자장에서부터 변형량이 포화상태에 접근하는 경향이 나타난다. 압축응력을 7 MPa 로 증가시키면 인가자장이 850 Oe 보다 작을 때는 3.5 MPa 일 때 보다 변형량이 작지만, 자장이 850 Oe 이상이 되면 오히려 3.5 MPa 일 때보다 큰 변형량을 나타낸다. 응력이 9.3 MPa 일 때는 1200 Oe 까지는 3.5 및 7 MPa 일 때보다 변형량이 작고, 1200 Oe 이상이 되면 역시 변형량이 더욱 커짐을 볼 수 있다. 따라서 압축응력을 증가시키면 시료를 포화시키는 데 필요한 자장의 값이 점점 커지며, 그대신 얻을 수 있는 변형량의 최대값도 더욱 커지게 됨을 알 수 있다.

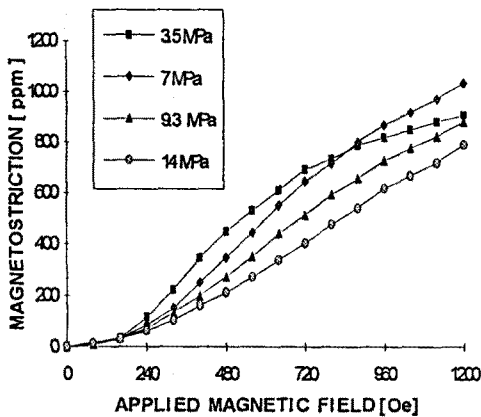


그림 5. 압축응력을 변화시켰을 때의  $H - \lambda$  특성곡선

#### 4. 논의

압축응력에 따라 자기변형이 변화하는 원인은 다음과 같이 설명될 수 있다[6]. 자성재료는 각각 자화벡터  $M_s$ 를 가지는 수많은 자구들로 이루어져 있으며, 각 자구들은 자구벽(domain wall)에 의해 분리되어 있다. 자장을 인가하여 물질을 자화시키는 과정은 자구벽이 이동하여 에너지 측면에서 유리한 자구의 부피를 늘리고 자구내의 자화벡터들이 자장방향으로 회전하여 자장 방향으로 정렬되는 과정(자구 회전)이라고 볼 수 있으며, 이 과정에서 자기변형이 수반된다. 자구벽에는  $180^\circ$  자구벽과 비( $\neq$ )  $180^\circ$  자구벽의 두 가지가 있는데  $180^\circ$  자구벽의 이동은 자화방향을 반대로 하는 역할만 할 뿐, 실제 물질의 치수 변화에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 실제로 자기변형을 수반하는 것은 비 $180^\circ$  자구벽 이동과 자구회전의 두 가지 과정이다. 따라서 자기변형의 효과를 높이려면 비 $180^\circ$  자구벽 이동 및  $180^\circ$  자구회전의 영향을 줄여야 할 것이다. 이러한 효과를 얻기 위하여 시료에 압축응력을 가한다. 인가하려는 자장의 방향으로 압축응력을 가하면 응력에 의한 자구벽의 이동이 일어나서 자구내의 자화 벡터들이 응력축에 수직으로 정렬되므로, 실제 자장을 인가하게 되면  $180^\circ$  자구과정보다  $90^\circ$  자구과정이 주로 일어나게 되므로 최종적인 자기변형량이 증가하게 된다.

실험 데이터에서 특히 주목해야 할 것은 압축응력이 증가되면 포화상태에서 최대로 일어날 수 있는 자기변형량은 더욱 커지게 되나, 같은 자장을 인가했을 때 나타나는 변형량이 압축응력에 따라 커지는 않는다는 것이다. 따라서 응용 디바이스를 만들 때 최대 동작특성을 얻기 위해서는 적당한 양의 압축응력을 가해줘야 한다. 일반적인 트랜스듀서로서 사용할 경우 10MPa 정도의 압축응력을 가해주는 것이 적당하다.

#### 5. 결론

초자기변형 합금 Terfenol-D의 기초특성을 측정, 관찰하였다. 자기변형을 측정할 결과 압축응력을 인가했을 때 특성이 향상되었다. 응력을 증가시키면 초기 구간에서는 동일 자계에 대한 변형은 감소하지만 포화 상태에 최대로 일어날 수 있는 변형량은 커지게 된다. 또한 히스테리시스 현상을 확인하였으며, 열팽창의 효과에 대하여 설명하였다. 위에서 얻어진 기초 특성 데이터를 응용기기 설계시의 기본자료로 활용할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] D. C. Jiles, 'The development of highly magnetostrictive rare earth-iron alloy', *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 27, 1994.
- [2] L. Kiesewetter, 'The application of Terfenol in linear motors', *Proc. 2nd. Int. conf. Giant Magnetostrictive and Amorphous Alloys for Sensors and Actuators*, 1988.
- [3] M. W. Hiller, M. D. Bryant, J. Umegami, 'Attenuation and transformation of vibration through active control of magnetostrictive material', *J. Sound and Vibration*, vol. 134, No. 3, 1989.
- [4] 백창욱, 김병호, 김용권, '자기변형소자과 그 응용', 대한전기학회지, vol. 42, No. 9, 1993.
- [5] A. E. Clark, M. L. Spano, H. T. Savage, 'Effect of stress on the magnetostriction and magnetization of rare earth- $Re_{1.95}$  alloys', *IEEE Trans. Mag.*, vol. 19, No. 5, 1983.
- [6] B. D. Cullity, *Introduction to magnetic materials*, Addison-Wesley pub., 1972.