

초자왜소자의 자왜 특성의 측정

백창욱 · 김용권

서울대학교 전기공학과

서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

(1994년 9월 15일 받음, 1994년 11월 24일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 초자왜소자 Terfenol-D($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9-1.95}$)의 인가자장에 따른 자왜의 변화를 측정하였고, 잔류 자왜 및 초자왜소자의 온도 상승에 의한 열팽창 변형의 영향을 조사하였다. 또한 초자왜소자에 3.5~14 MPa의 압축 응력을 인가하면서 자왜의 변화를 조사하였다. 그 결과는 인가 압축 응력이 7 MPa인 경우 1500 Oe의 자장에서의 자왜는 1000 ppm이었으나 압축 응력을 가하지 않은 경우는 400 ppm이었다. 또한 인가 압축 응력이 커짐에 따라서 자왜가 포화되는 자장의 크기도 커졌다. 잔류 변형과 히스테리시스도 관측되었으며, 따라서 액추에이터로 이용할 때는 이를 보상하는 기구가 필요하며 또한 열팽창에 의한 변형도 액추에이터 응용시에는 고려하여야 한다.

I. 서 론

물체가 자장내에 놓일 때 그 크기가 변화하는 현상을 자왜현상(magnetostriction)이라 한다. 니켈 등의 금속에 -40 ppm 정도의 자왜가 일어난다는 사실은 오래 전부터 알려져 왔으나 자왜가 비교적 작아서 트랜스듀서 등에 응용되고, 큰 변위를 요하는 액추에이터에는 응용이 덜 되었다. 그 후 미국의 A. E. Clark 등이 희토류 금속과 철의 합금이 비교적 낮은 자장에서도 1500 ppm 이상의 큰 자왜를 일으킨다는 사실을 발견한 이후[1-3], 그의 응용에 관심이 쏠리게 되었다. 그 물질은 $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ ($x=0.27\sim0.3, y=1.9\sim2.0$)의 조성을 갖고 있으며, 이것을 초자왜소자(giant magnetostrictive alloy: GMA)라고 부른다. 이 물질은 자왜가 니켈의 50여배, 압전 세라믹스의 변형의 10여배 정도로 매우 크다. 또한 단위 체적당 에너지 밀도가 커서($14\sim25\text{ kJ/m}^3$) 큰 힘을 낼 수 있고 응답 속도가 0.1 msec 정도로 빠른 장점을 지니고 있어 현재 정밀 위치 제어 장치 및 공작기구, 선형 모터[4], 능동형 진동 억제 시스템(active antivibration systems)[5], 서보밸브, 소나(sonar)의 음원 등, 새로운 분야에의 응용 가능성이 널리 검토되고 있다[6]. 초자왜소자를 사용한 기기를 설계할 때는 초자왜소자에 압축 응력을 가하는 것이 일반적이다. 그 이유는 가해진 압축 응력이 물질 내의 자구벽의 이동을 일으키며, 자구 내의 자화 벡터들을 일정한 방향으로 정렬시키기 때문에 자장에 대한 변형량을 증가시킬 수 있기 때문이다[7-8].

본 논문에서는 초자왜소자 Terfenol-D($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9-1.95}$)의 인가자장에 따른 자왜의 변화를 측정하고 잔류 자왜 및 측정시 초자왜소자의 온도상승에 의한 열팽창 변형의 영향을 조사하였다. 또한 초자왜소자에 3.5~14

MPa의 압축 응력을 인가하여 자왜의 변화를 측정하고, 액추에이터에의 응용에 대한 기초자료를 얻었다.

II. 실험장치 및 측정장치

자왜의 측정을 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 제작

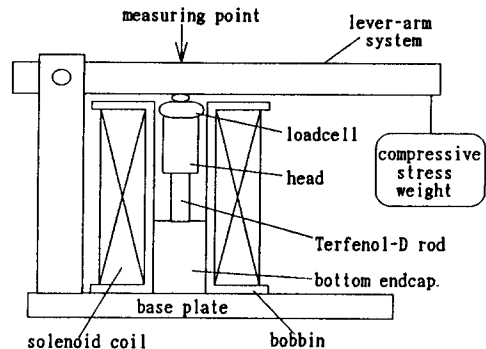


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system.

하였다. 측정에 사용한 시료는 미국의 ETREMA Products, Inc.에서 제작된 지름 5mm, 길이 15mm 및 25mm의 봉형 초자왜소자로서, $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9-1.95}$ 의 조성을 갖는다. 시료에 자장을 인가하기 위하여 내경 22mm, 길이 100mm의 보빈에 지름 0.8mm의 코일을 6000회 감은 솔레노이드를 제작하였다. 시료에 가능한한 균일한 자장을 인가하기 위하여 솔레노이드를 시료보다 길게 만들었고, 받침대에 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 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 솔레노이드에 흘리는 전류를 0에서 2.4 A까지 증가시켰다가 다시 0으로 감소시키면서 자왜를 측정하고 자장에 대한 자왜를 그래프($H-\lambda$ 곡선)로 나타내었다. 이때 걸리는 시간은 약 20초 정도이며, 솔레노이드에서 발생하는 열에 의한 열팽창 변형을 줄이기 위해 최대한 빠른 속도로 실험을 진행하였다. 전류의 측정에는 홀 소자를 이용한 전류 센서(DJC-H)를 사용하였고, 자왜의 측정에는 레이저 변위 측정 장치(KEYENCE 2510, 해상도 0.05 μm , 샘플링 주파수 40 kHz)를 이용하였으며, 출력값을 오실로스코프와 X-Y 플로터에 표시하였다.

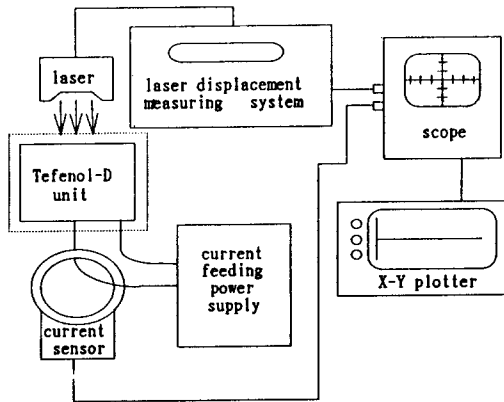


Fig. 2. Block diagram of the measuring system.

III. 실험 및 고찰

자왜는 보통 자장과 시료 자체의 길이 L 에 대한 변형량 ΔL 의 비 $\lambda (= \Delta L/L)$ 사이의 관계를 나타내는 $H-\lambda$ 곡선으로 나타낸다. Fig. 3에는 자장을 1500 Oe까지 변화시키면서, 압축응력을 가하지 않았을 때와 7 MPa의 응력을 가했을 때 측정된 자왜를 나타내었다. 그림에서 압축응력을 가하지 않았을 때보다 압축응력을 가했을 때의 변형이 훨씬 증가하는 것을 볼 수 있다. 응력을 가하지 않았을 때, 1500 Oe에서 약 400 ppm의 변형을 보이는 반면, 7 MPa를 가했을 때는 같은 자장에서 약 1000 ppm의 변형을 나타내었다. 시료는 길이 15 mm인 것과 25 mm인 것을 사용하였는데 이들의 자왜는 크게 다르지 않았다.

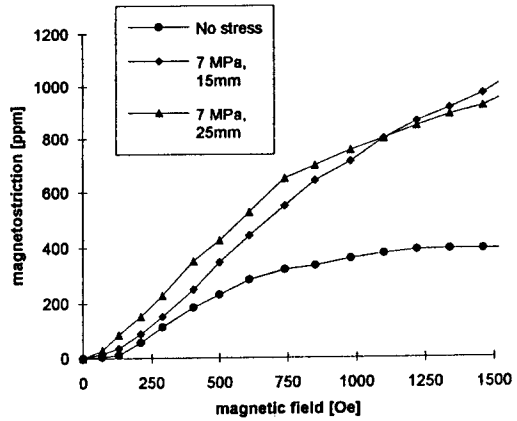


Fig. 3. Magnetostriction under no compressive stress and 7 MPa stress with respect to magnetic field intensity.

Fig. 4에서는 3.5 및 7 MPa의 압축 응력을 가하면서,

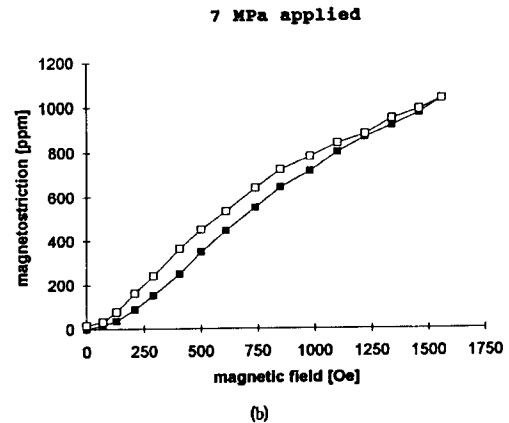
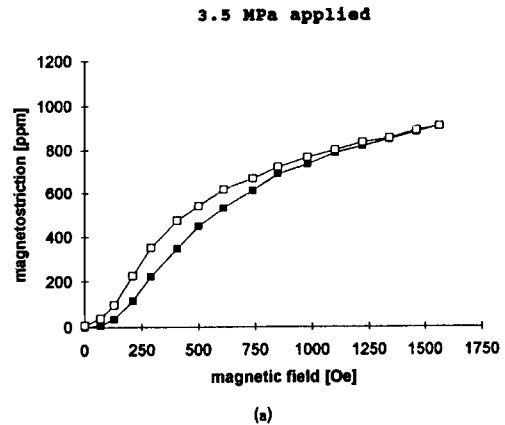


Fig. 4. Hysteresis and residual magnetostriction when the applied stress is (a) 3.5 MPa, (b) 7 MPa.

자장을 0에서 1500 Oe 까지 증가시켰다가 다시 0으로 감소시켰을 때의 자왜의 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 고려하여 피이드 백 제어등을 할 필요가 있다.

또 한 가지 고려하여야 할 것은 시료의 열팽창에 의한 변형이다. Terfenol-D의 열팽창 계수는 12ppm/°C 정도이며, 이 영향을 고려하기 위해 실험 과정에서 열전쌍(thermocouple)을 장착하여 측정 시작시와 측정 종료시의 온도 변화 ΔT 를 측정해 보았다. 측정 시간이 짧았기 때문에 $\Delta T = 0.2 \sim 0.3$ °C 정도였고, 열팽창에 의한 최대 변형은 3.6 ppm이 된다. 따라서 측정된 최대 자왜가 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 열팽창에 의한 변형을 무시할 수 없게 되므로, 이를 구조적으로 보상하는 설계를 하거나 온도제어, 위치제어 기능을 추가하여야 한다.

Fig. 5는 압축응력을 3.5~14 MPa까지 변화시키면서 측정된 $H-\lambda$ 곡선이다. 3.5 MPa의 곡선을 보면 약 1, 100Oe의 자장에서부터 자왜가 포화상태에 접근하는 경향이 나타난다. 압축응력을 7MPa로 증가시키면 인가자

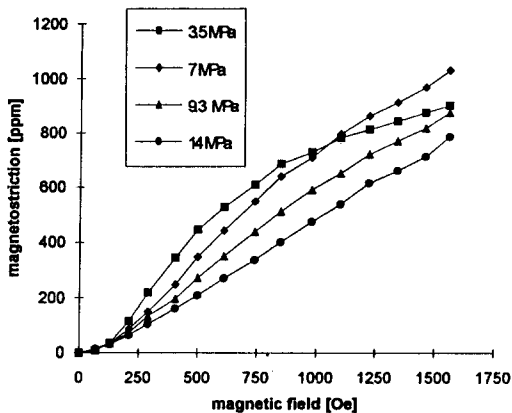


Fig. 5. $H-\lambda$ characteristics when the applied stress is 3, 5, 7, 9.3 and 14 MPa.

장이 1100 Oe 보다 작을 때는 3.5 MPa일 때 보다 자왜가 작지만, 자장이 1100 Oe 이상이 되면 오히려 3.5MPa일 때보다 큰 자왜를 나타낸다. 응력이 9.3 MPa일 때는

1500 Oe까지는 3.5 및 7 MPa일 때보다 자왜가 작고, 1500 Oe 이상이 되면 역시 자왜가 더욱 커짐을 볼 수 있다. 따라서 압축응력을 증가시키면 시료를 포화시키는데 필요한 자장의 값이 점점 커지며, 그대신 얻을 수 있는 자왜 λ 의 최대값도 더욱 커지게 됨을 알 수 있다.

실험 데이터에서 특히 주목해야 할 것은 압축응력이 증가되면 포화상태시 최대로 일어날 수 있는 자왜는 더욱 커지게 되나, 같은 자장을 인가했을 때 나타나는 자왜가 압축응력에 따라 커지지는 않는다는 것이다. 따라서 응용 디바이스를 만들 때 최대 동작특성을 얻기 위해서는 적당한 양의 압축응력을 가해주어야 한다. 일반적인 액츄에이터로서 사용할 경우 10 MPa 정도의 압축응력을 가해주는 것이 적당하다.

압축 응력에 따라 자왜가 변화하는 원인은 다음과 같이 설명할 수 있다[2, 8]. 자왜는 자화 과정에서 일어나는 비(非) 180° 자구벽 이동과정 및 자구 회전 등에 의하여 일어나며, 180° 자구벽 이동 과정은 자왜에 영향을 미치지 못한다. 시료의 축방향으로 압축 응력을 가하여 자구 모멘트들이 응력축에 수직하게 배열된 상태에서 축방향으로 자장을 인가하면 180° 자구벽 이동 및 자구 회전이 최소화 되어 자왜가 증가하게 된다.

IV. 결 론

초자왜소자 Terfenol-D의 기초특성을 측정, 관찰하였다. 자왜를 측정할 결과 압축 응력을 인가했을 때 특성이 향상되었다. 응력을 증가시키면 낮은 자장에서는 동일 자장에 대한 자왜가 감소하지만 포화 상태에 최대로 일어날 수 있는 자왜는 커지게 된다. 또한 히스테리시스 현상을 확인하였으며, 열팽창의 효과에 대하여 설명하였다. 초자왜소자를 이용한 액츄에이터 및 위치제어기기를 설계할 때는 약 1000~2000 Oe 정도의 자장이 필요하며 양방향으로 선형적으로 동작시키려면 500 Oe 정도의 바이어스 자장을 인가하여야 한다. 또 히스테리시스가 존재하므로 정밀한 위치제어를 위해서는 피이드 백 제어를 하여야 하고 초자왜소자의 열팽창에 의한 변형을 최소한으로 줄이거나 이를 상쇄시키는 구조적 또는 전기회로적 설계를 보강하여야 한다.

참 고 문 헌

[1] A. E. Clark, Ferromagnetic Materials, North-Holland, Amsterdam, (1980) vol. 1, chap. 7, pp. 531-589.

- [2] D. C. Jiles, J. Phys. D, Appl. Phys., **27**, 1 (1994).
- [3] 江田 弘, 日本精密工學會誌, **57**(3), 47(1991).
- [4] L. Kiesewetter, Proc. 2nd. Int. conf. Giant Magnetostrictive and Amorphous Alloys for Sensors and Actuators, 7(1988).
- [5] M. W. Hiller, M. D. Bryant and J. Umegami, J. Sound and Vibration, **134**(3), 507(1989).
- [6] 백창욱, 김병호, 김용권, 대한 전기학회지, **42**(9), 38 (1993).
- [7] A. E. Clark, M. L. Spano and H. T. Savage, IEEE Trans. Mag., **19**(5), 1964(1983).
- [8] B. D. Cullity, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley, Messachusetts(1972) pp. 248-285.

감사의 글

본 연구는 한국 전력 공사의 전력 기술 기초 연구 지원 사업 (과제 번호 : 93-43)에 의하여 지원받았음.

Measurement of the Magnetostrictive Properties of
Giant Magnetostrictive Alloy

Chang-Wook Baek and Yong-Kweon Kim

Department of Electrical Engineering, Seoul National University

san 56-1, Shillim dong, Kwanak-ku, Seoul

(Received 15 September 1994, in final form 24 November 1994)

Fundamental characteristics of giant magnetostrictive alloy Terfenol-D($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9-1.95}$) are measured and discussed on the application for actuators. The magnetostriction is measured by laser displacement measuring system and the applied compressive stress is measured by load cell. Magnetostrictions increased as the applied compressive stresses increased. When the stress is 7 MPa, the magnetostriction is 1000 ppm at 1500 Oe. As the stresses increased from 0 to 14 MPa, the magnetic fields for saturating the magnetostriction also increased. The temperature increased during the experiment is 0.3°C, so the thermal expansion is negligible in these experiments. The feedback or temperature control function should be added for the precise position control actuator.