

궤환신호로 보상되는 Michelson 레이저 간섭계를 이용한 $Fe_{49}Co_{49}V_2$ 합금의 자기변형 측정

안승준 · 김철기 · 김호섭 · 김호철
선문대학교 자연과학부 신소재과학과
충남 아산시 탕정면 갈산리 100, 336-708

남궁정
포항산업과학연구원 기능금속연구팀
경북 포항시 남구 효자동 산 32, 790-330

(2000년 8월 16일 받음, 2000년 9월 21일 최종수정본 받음)

$Fe_{49}Co_{49}V_2$ 합금을 500 °C, 750 °C, 800 °C 및 900 °C의 furnace에서 열처리한 후, 공냉조건으로 냉각하여 시료를 제작하였다. Michelson 레이저 간섭계를 이용하여 시료의 자기변형을 측정하였다. 시료의 자기변형은 간섭계의 한쪽 팔에 piezoelectric transducer(PZT)를 부착하여 간섭계의 두 팔 사이의 상대적 광경로를 일정하게 유지하였으며 궤환회로의 전압을 광경로의 변화(자기변형)로 환산하였다. 시료를 900 °C의 furnace에서 열처리한 후, $H = 60$ Oe에서 $Fe_{49}Co_{49}V_2$ 합금의 자기변형을 측정할 결과열처리 전 2×10^{-6} 에서 33.68×10^{-6} 까지 증가하였다. 이것은 시료의 미세구조가 변화되어 자기특성이 개선된 것으로 생각된다.

I. 서 론

자성체가 자기장내에 놓이게 되면 물체의 길이가 자기장의 세기에 따라 변화하는데, 이 효과를 자기변형(magnetostriction)이라 한다[1, 2]. 자기변형은 강자성체의 근본적 특성인 자기탄성효과에 기인한 것으로 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)과 결정 자기이방성[3]에 의존한다. 각종 자기센서 및 자기헤드 가공에 의한 자기특성변화도 상당부분 이것에 의한 것이다. 일반적으로 스케일 제거 방지용 초음파 발진기에는 Fe-Co계 합금이 자기변형 소자의 재료로 사용되고 있는데, 최근에 이르러 Fe-Co계 합금의 가공성을 개선하기 위해 소량의 V이 첨가된 Fe-Co-V 3원계 합금에 대한 연구가 진행되고 있다. 자기장에 의해 소재의 형상 및 크기가 큰 폭으로 변하는 고 자기변형 소자에는 Fe-Co-V 합금계 외에도 많은 종류가 있으며 실제로 일반 산업용 및 방위 산업용 진동소자에 사용되어 왔다. 이들 고 자기변형 소재들 중에서 Fe-Co-V 합금계는 금속계, 고 자기변형소자로서 높은 포화자기변형값과 높은 Curie온도를 갖고 있으며 그리고 전기저항이 비교적 작아서 자기이력손실이 적다는 장점을 가지고 있다. 그러나 Fe-Co-V 합금계는 소재의 가격이 높고 가공성이 어렵다는 단점도 있다.

본 연구에서는 Fe-Co-V 3원계 합금에 대한 자기적 특

성을 평가하기 위하여 소재의 열처리 및 냉각조건에 따른 자기변형을 측정하였다. 자기변형을 측정하는 방법[4, 5]에는 X선 회절장치를 이용하는 방법과 시편의 미소 변위를 측정하는 전기용량 위치변환기, LVDT(linear variable differential transformer) 및 strain gauge 그리고 레이저 간섭계를 이용하는 방법 등이 있다. 레이저 간섭계를 이용하는 광학적인 방법은 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m까지의 길이변형을 측정할 수 있으며 실시간으로 자기변형을 측정할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 비교적 장치가 간단하며 정확도가 높은 Michelson 형의 레이저 간섭계를 이용하여 열처리 및 냉각조건에 따른 Fe-Co-V 합금의 자기변형된 양을 측정하여 외부 자기장 인가에 대한 Fe-Co-V 합금의 자기변형을 측정하였다.

II. 실험 및 실험방법

본 실험에 사용한 시료는 포항제철에서 제작된 박판형 Fe-Co-V 합금을 사용하였다. Table I은 시료의 습식분석한 결과인데, Fe, Co 등 원자조성에서 V이 약 2 wt.% 첨가된 $Fe_{49}Co_{49}V_2$ 합금으로 Cr, Ni, C, S 같은 불순물을 소량 함유하고 있다. 가공성을 개선하기 위하여 2 wt.%의 V과 Mo, W, Ti 등의 원소들이 아주 소량 첨가되어 있으

Table I. Chemical composition of the trial product(wt. %)

Elements	Co	V	Mn	Si	Al	Cr	Ni	C	S	Fe
wt %	46.7	2.17	0.01	0.04	0.09	0.04	0.08	0.005	0.002	49.4

나 과잉 첨가시에는 금속원소들 간에 화합물이 형성되어 오히려 가공성을 악화시키고 자기이력손실을 크게 할 수 있다[6]. 시료는 각 성분원소를 평량하여 50 kg급 진공용 도용해로에서 약 25 kg의 주괴(ingot)를 제조하였다. 그리고 이 주괴를 대기중 1200 °C에서 5시간동안 균질화한 다음 온도를 750 °C 이상으로 유지하면서 열간압연기를 통하여 약 800 μm 두께의 판재를 제조하였다. 열간압연된 판재는 1100 °C의 상압에서 풀림(annealing)처리를 2시간 실시한 후 상온에서 30 % 염산 용액에 산세(산으로 씻음)를 하였다. 그 후 약 200~300 °C에서 온간압연을 실시하면서 점차 냉간압연조건으로 전환하여 두께가 200 μm인 박판소재를 제조하였다. 온간 또는 냉간압연된 박판의 소재는 500 °C, 650 °C, 750 °C, 850 °C, 950 °C의 온도에서 규칙화 열처리를 각각 30분간 실시한 후 공냉(AC-air cooling)조건으로 시편을 준비하였다.

준비된 시편에 자기장을 인가하여 자기장의 세기에 따른 자기변형을 측정하기 위하여 Michelson type의 레이저 간섭계를 구성하였다[7]. 광원으로는 Melles Griot사의 파장이 6328 Å, 최대 출력이 30 mW, s-polarized He-Ne 레이저를 사용하였다.

III. 실험결과 및 토의

Fig. 1은 자기변형을 측정하기 위한 Michelson 레이저 간섭계의 개략도이다. PZT(Piezoelectric Transducer)에 부착된 진반사 거울 M₂는 광 다이오드(detector)에서 수신된 간섭신호를 케환신호로 받아서 레이저 간섭계의 두 팔(arm) 사이의 광경로를 일정하게 유지한다. 시료에 자기장이 인가되면 시료의 길이가 자기장의 크기나 방향에 따라 압축되거나 수축하는 자기변형이 일어나는데, PZT는 PZT drive를 통하여 PZT에 전압을 공급함으로써 시료의 변형된 길이를 보상해 주는 소자이다. 따라서 PZT의 케환전압(feedback voltage)을 측정하여 shift된 간섭무늬의 개수를 알 수 있었으며 이것으로부터 시료의 변형된 길이를 산출하였다.

Fig. 2는 리본형 Fe-Co-V 합금계에 대한 자기변형 측정을 위한 개략도이다. 시편에 자기장을 인가하면 자기변형에 의해 시편의 길이 Δl 가 변하여 간섭무늬의 이동이 생긴

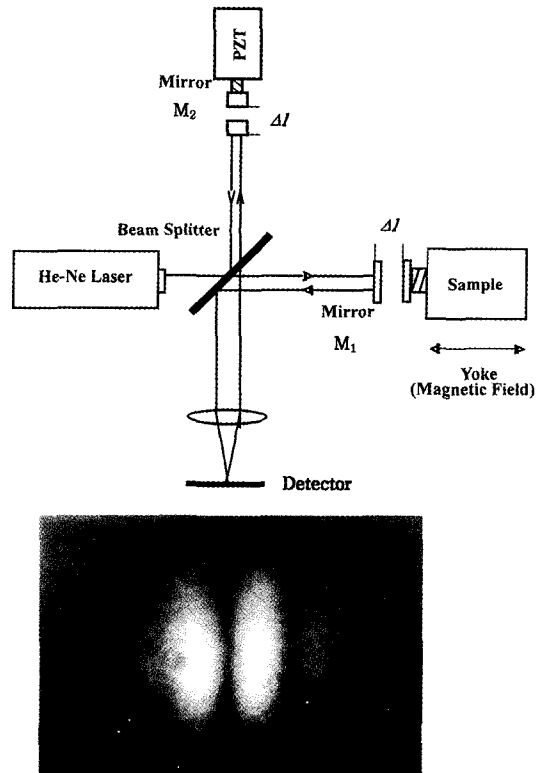


Fig. 1. Experimental set-up of the Michelson laser interferometer.

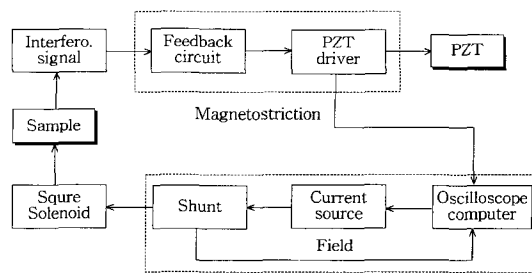


Fig. 2. Block diagram for measuring the dynamic magnetostriction.

다. 시편길이의 변화가 $\lambda/2$ 를 넘을 때마다 간섭무늬의 수가 하나씩 증가하게 된다. 따라서 간섭무늬의 수를 측정하면 자기장의 세기에 따라 시편이 늘어난 길이를 측정할 수 있다. 이와 같이 간섭무늬를 직접 측정하는 것은 정밀도가

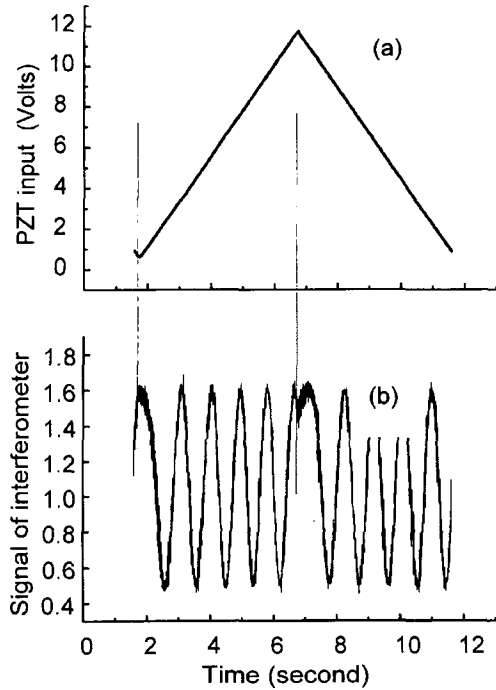


Fig. 3. Characteristics of the PZT versus the applied voltage.

약 $\lambda/4$ 정도밖에 되지 않으므로, 본 연구에서는 보다 정확한 측정을 위하여 PZT를 이용한 보상법을 사용하였다.

자기장이 시편에 인가되면 간섭계의 두 팔 중에 시편이 있는 팔의 광경로가 Δl 만큼 변하게 된다. 따라서 Fig. 1의 전반사거울 M_2 에서 보는 바와 같이 전반사거울에 케환회로를 적용한 PZT를 부착하여 시편이 변한 길이 Δl 만큼 PZT를 같은 방향으로 움직이도록 하면 양쪽 팔의 광경로가 일정하여 간섭무늬의 변화는 일어나지 않게 될 것이다. 이것은 시편이 Δl 만큼 변하게 되면 케환회로의 신호로부터 PZT에 전압이 가해져 간섭계의 두 팔 사이의 거리를 일정하게 유지시키기 때문이다. PZT에 가해지는 전압은 자기변형에 의하여 늘어난 길이만을 보상하기 때문에 자기장의 세기에 따른 케환 전압을 측정하여 자기변형 특성 곡선을 얻을 수 있었다. Fig. 3은 간섭계의 한쪽 팔에 있는 PZT에 삼각파의 인가전압을 인가하여 인가전압에 따른 PZT의 길이변화 특성을 측정한 실험으로 ~11.0 V의 인가전압에 대하여 ~5.5개의 간섭무늬가 이동한 것을 알 수 있다. Fig. 4는 인가전압에 따른 PZT의 길이변화 특성으로 PZT의 길이변화 상수가 $0.162 \mu\text{m}/\text{V}$ 임을 알 수 있었다.

본 연구에서는 이와 같은 특성을 가진 Michelson 레이

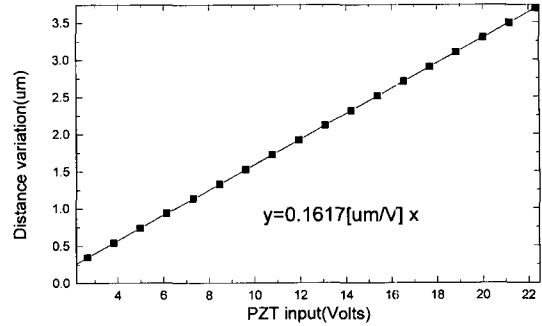


Fig. 4. Calibration of the PZT displacement versus the applied voltage.

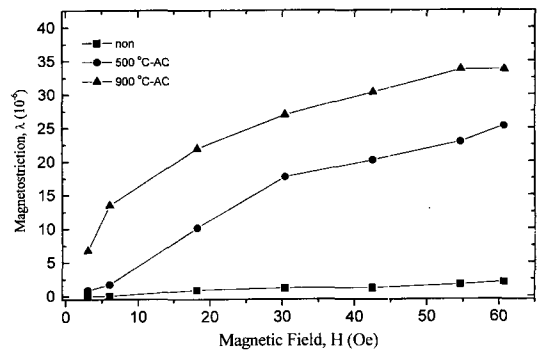


Fig. 5. Magnetostriction curve of an annealed $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{V}_2$ alloy in thermal furnace at 500 °C, 900 °C.

저 간섭계를 제작하여 Fe-Co-V 합금의 열처리 및 냉각조건(500 °C-공냉과 900 °C-공냉)에 따른 시료의 자기변형 특성을 측정하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 500 °C-공냉의 조건에서 $H = 60.75 \text{ Oe}$ 일 때 포화자기변형 $\lambda_s = 22.26 \times 10^{-6}$ 이고, 900 °C-공냉의 조건에서 $H = 60.75 \text{ Oe}$ 일 때 포화자기변형 $\lambda_s = 33.68 \times 10^{-6}$ 이다. 따라서 인가 자기장에 따른 자기변형 값은 900 °C-공냉의 열처리 및 냉각조건이 500 °C-공냉의 열처리 및 냉각조건보다 150 % 정도 증가하였으며, 이것으로부터 열처리가 시료내부의 grain size나 자구와 같은 미세구조 변화에 영향을 준 것으로 생각할 수 있었다[8].

IV. 결 론

자기변형을 측정하기 위하여 레이저 간섭계를 이용하는 광학적인 방법은 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ m}$ 까지의 길이변형을 측정할 수 있으며 실시간으로 자기변형을 측정할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 측정의 정밀도를 높이기 위하여 케환

회로에 의해 광경로를 보상해 주는 방식의 비교적 장치가 간단하며 정확도가 높은 Michelson 형의 레이저 간섭계를 제작하여 일반 산업용 및 방위 산업용 진동소자로 널리 사용되고 있는 고 자기변형소자 재료인 Fe-Co-V 합금의 열처리 및 냉각조건에 따른 자기변형 특성을 측정하였다.

자기장인가에 따른 자기변형은 500 °C-공냉과 900 °C-공냉의 경우 자기장인가에 따라 서서히 증가하다가 H = 60.75 Oe에서 포화자기변형 λ_s가 22.26 × 10⁻⁶와 33.68 × 10⁻⁶으로 측정되었으며 150 %의 차이를 보였다. 이것은 열처리가 시료내부의 미세구조 변화에 영향을 준 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 1997년도 선문대학교 교내학술연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- [1] C. G. Kim, H. C. Kim and K. Haga, J. Phys. D, **23**, 1436 (1990).
- [2] T. Nakata, N. Takahashi, M. Nakano, K. Muramatsu and M. Miyake, IEEE Trans. Mag., **30**, 4563(1994).
- [3] B. D. Culity, Introduction to magnetic materials, Addition-Wesley Publishing Company, ch. 7(1972).
- [4] S. Kadowaki, J. Mag. Mat., **79**, 358(1989).
- [5] K. Narita, J. Yamasaki and H. Fukunaga, IEEE Trans. Mag., **16**, 435(1980).
- [6] S. Chikazumi, Phys. of Mag., 497(1964).
- [7] K. Kakuno and Y. Sondo, J. Appl. Phys., **50**, 7713(1979).
- [8] S. H. Lim, S. R. Kim, T. H. Noh, S. R. Lee and J. K. Kang, Proc. Phys. of Mag. Mat., 1077(1996).

Magnetostriction Measurement of an Fe₄₉Co₄₉V₂ Alloy using the Michelson Laser Interferometer Compensated by Feedback Signal

Seung Joon Ahn, Cheol Gi Kim, Ho Seob Kim and Ho Chul Kim

Department of Physics, Sun Moon University, Asan-si, Chungnam, 336-840, Korea

Jung Namkung

Research Institute of Industrial Science & Technology, P.O. Box 135 Pohang, 790-600, Korea

(Received 16 August 2000, in final form 21 September 2000)

An Fe₄₉Co₄₉V₂ alloy is annealed in thermal annealing furnace at 500 °C, 750 °C, 800 °C, and 900 °C. Annealed samples were cooled in air. The magnetostriction is measured by using a Michelson laser interferometer. Receiving the feedback signal of interference, a mirror attached to piezoelectric transducer (PZT) maintains the optical path length (OPL) between two arms of laser interferometer relatively constant. The feedback voltage is calibrated to the OPL variation. A magnetostriction of 2 × 10⁻⁶ at H = 60 Oe increases up to 33.68 × 10⁻⁶ at an annealing temperature of 900 °C, suggesting that the magnetostrictive characteristics are improved by the microstructural modification.