

비정질 리본의 자기변형 측정용 광섬유 변위센서

유권상 · 김철기

한국표준과학연구원

대전시 유성구 도룡동 1, 305-606

김중복 · 김현아

한국교원대학교, 충북 청원 363-791

(1995년 10월 10일 받음, 1996년 2월 26일 최종수정본 받음)

비정질 리본의 자기변형 측정을 위한 Fabry-Perot 간섭계형 광섬유 변위센서를 구성하였고, 헬름홀츠 코일로써 교류자기장을 인가하여 자기변형을 측정하였다. 구성된 변위센서의 출력신호는 구성요소인 index matching optical oil과 optical isolator의 사용에 의하여 잡음과 요동을 개선하였다. 구성된 변위센서의 분해능은 30 \AA 이었고, 이를 이용하여 1 Hz의 자화 주파수에서 측정된 비정질 $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ 리본의 최대 자기변형 값은 인가자기장 $1.59 \times 10^3 \text{ A/m}$ 에서 28×10^{-6} 이었다.

I. 서 론

외부자기장이 인가될 때 자성체의 물리적 형태가 변하는 현상을 자기변형이라 한다[1]. 강자성체의 포화자기변형이 10^{-5} 이하인 시편의 측정에는 수십 \AA 의 분해능을 갖는 변위센서가 필요하다. 비정질 재료의 자기변형 측정법의 하나로 미소각 자화회전법 (small angle magnetization rotation)이 있는데[2], 이것은 외부 장력에 따른 응력-자화 결합력을 추정하여 포화 자기변형을 구한다. 이 방법은 자화, 응력, 인가자기장의 세기 등 여러 측정변수를 포함할 뿐만 아니라, 동적 자기변형을 측정할 수 없다는 단점이 있다.

1970년대 초반에 저손실 광섬유가 개발됨으로써 광섬유를 이용한 간섭계형 센서가 많이 보고되고 있다[3, 4, 5]. 광섬유 센서는 높은 정밀도를 갖고, 전자파 간섭에 강하며, 좋은 내구성과 굽힘성에 의해 임의의 형태로 만들 수 있는 장점을 갖고 있으므로 미세변위를 측정하는데 많이 이용되고 있다. 1981년에 주파수 1 kHz에서 감도가 $7.9 \times 10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 인 광섬유형 Fabry-Perot 간섭계가 제작되었으며[5], 1982년에는 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 온도, 진동, 음향, 전압 및 자기장 센서에의 응용이 소개되었다[6]. 1990년에는 atomic force microscope에 응용하기 위한 고분해능을 갖는 변위센서가 보고되었고[4], 1992년에는 간섭계형 변위센서에 의해 비정질 리본의 자기변형을 측정되었다[7].

Fabry-Perot 간섭계형 센서는 여러 종류의 광부품을 필수적으로 사용함으로 고가인 단점이 있으나, 광 손실에 영향을 받지 않으며, 높은 정밀도 및 넓은 동작 영역을 나

타낼 뿐만 아니라 국소 부위에서의 측정이 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 간섭계 구성요소의 최소화로 광조정 (optical adjustment)을 최소화할 수 있는 Fabry-Perot 간섭계를 구성하여 간섭계의 변위측정 성능을 평가하였고, 비정질 리본에서 자기변형을 측정하였다.

II. 광섬유 간섭계

Fig. 1은 자기변형을 측정하기 위한 Fabry-Perot 간섭계 구성 요소들의 개략도이다. 진동을 방지하기 위하여 이들 장치를 광학대(Newport XSV-44)위에 설치하였다. Bidirectional coupler (Newport F-506B)는 He-Ne 레이저 파장에서 입사광을 50 : 50으로 분리시키는 beam splitter 역할을 한다. 광원으로는 1.2 mW 출력의 고안정 He-Ne 레이저(Spectra-physics 117A)를 사용하였다. 광섬유의 끝 (1), (2), (3) 및 (4)는 그 단면이 수직이 되도록 fiber cleaver를 이용하여 잘라내었다. 레이저 광이 입사되는 (1)번 끝은 레이저 광에 광섬유 단면이 수직이 되도록 기울이고 움직일 수 있도록 single-mode fiber coupler (Newport F-91-C1)을 이용하여 고정하였고, 광 집속을 위해 배율이 40배인 현미경의 대물렌즈를 사용하였다. 레이저 내로 반사되어 들어가는 광을 차단시키기 위해 beam isolator를 설치하였다. 광섬유 끝 (1)은 레이저 광이 30 % 이상 입사될 수 있도록 polisher로 연마하였다. 끝 (2)에서의 반사광은 간섭신호의 잡음으로 작용하기 때문에 끝에서 반사되는 광을 소거시키기 위해 index matching optical oil 속에 담겼다.

(1)번 끝에 입사된 광의 50%는 변위를 측정하기 위해 fiber optic positioner (Newport PF-2)에 의해 고정된 (3)번 끝에 도달한다. 광섬유 (3)번 끝에서 Fresnel 반사에 의해 약 4%가 반사되고, 투과된 광은 시편에 붙인 알루미늄 포일에서 반사된 후 다시 광섬유로 입사한다. 간섭무늬를 얻기 위해서 광섬유의 끝은 포일면에 ~ 50 μm 정도 근접시켜야 하며, 이 조정을 위하여 submicrometer의 분해능을 갖는 fiber optic positioner (Newport PF-2)를 사용하였다. 이 두 광은 시편의 압축이나 수축에 의한 경로차에 의해 보강간섭이나 상쇄간섭을 하면서 (4)번에 도달되고, photodetector에서의 간섭무늬를 오실로스코프로 관찰하였다.

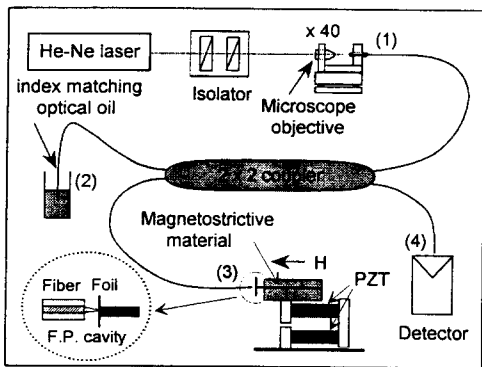


Fig. 1. Arrangement of components for a fiber optic Fabry-Perot interferometer.

III. 자기장 및 변형 측정 시스템

Fig. 2는 자기장 생성장치 및 자기변형 측정장치의 개략도이다. 파형발생기(hp 3325)에서 발생한 싸인파형이 전력증폭기에 의해 증폭된후 헬름홀츠 코일에 인가되면 자기장이 발생한다. 자기장 생성용으로 유효반경이 17 cm인 포머에 폭이 3 mm이고 두께가 2 mm인 코일을 322회 감아 헬름홀츠 코일을 제작하였다. Fig. 3은 제작한 헬름홀츠코일의 코일상수를 측정하기 위하여 인가한 전류에 대해 발생한 자기장의 세기를 나타내는데, 자기장의 세기는 인가한 전류에 비례함을 알 수 있고, 직선의 기울기인 코일상수는 $9.29 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$ 이다.

본 실험에서는 자기변형측정용 시편으로 길이 2.5 cm인 비정질 $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ 리본을 사용하였는데, 최대 자기변형을 측정하였기 때문에 시편의 반자장 계수는 고려하지 않았다. 비정질 시편의 buckling 효과를 최소화하기 위해 Squire에 의해 제안된 방법을 사용하였다[8]. 시

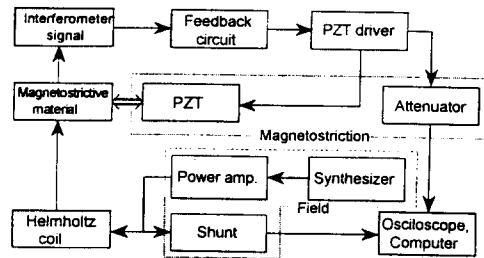


Fig. 2. Block diagram for measuring the dynamic magnetostriction of an amorphous ribbon.

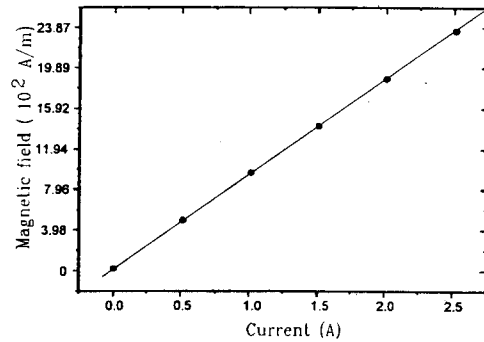


Fig. 3. Measured coil constant of Helmholtz coil for applying magnetic field to sample.

편의 한쪽 끝은 베이크라이트로 고정시켰고 다른 한쪽 끝은 시편이 자유롭게 움직일 수 있도록 하였다. PZT는 열팽창 계수가 $\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 으로 1 K의 온도 변화에 대하여 길이 3 cm인 PZT에서 0.3 μm의 변위가 일어나기 때문에 온도 보상으로 2개의 PZT를 밑부분에 부착하였다[7].

자기장 내의 시편에서 자기변형이 일어날 때 생성된 간섭신호는 PZT driver에서 전압증폭되어 시편의 변형에 반대되는 방향으로 PZT가 수축 또는 팽창하도록 구성하였다. 본 실험장치의 PZT를 이용한 되먹임 장치에서 주파수가 20 Hz 이상이 되면 되먹임(feedback)이 완전하지 않다. 따라서 자화주파수를 1 Hz로 낮추어 수행하였다. 인가전압에 대한 PZT 변형은 Fig. 4에 나타난 것처럼 간섭무늬 갯수가 정수일 때의 전압을 측정하여 교정하였다. 자기장 발생장치의 shunt에서의 전압을 측정하여 이를 헬름홀츠에 인가된 전류로 환산하여 자기장을 계산하였다. 그리고, PZT driver에서 되먹임되는 전압을 측정하여 자기장에 대한 자기변형을 측정하였다. 이때 PZT driver의 전압은 수 백 볼트로 오실로스코프로 측정하기에 높은 전압이기 때문에 6 : 1 감쇠기를 사용하여 측정하였다.

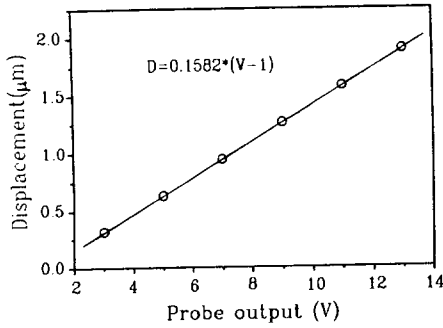


Fig. 4. Calibration of PZT displacement versus applied voltage of 6 : 1 attenuating probe.

IV. 결과 및 논의

Fig. 5는 주파수 1 Hz의 삼각파형을 PZT에 인가하면서 광학계 구성요소에 따른 간섭무늬의 변화를 보여준다. (a)는 PZT에 인가한 전압파형이고, (b)는 index matching oil과 isolator를 사용하지 않았을 때, (c)는 oil은 사용하지 않고 isolator는 사용하였을 때, (d)는 oil은 사용하고 isolator는 사용하지 않았을 때, (e)는 oil과 isolator를 사용하였을 때의 간섭신호이다. (b), (d)에서는 신호의 fluctuation이 크다는 것을 알 수 있는데, 이는

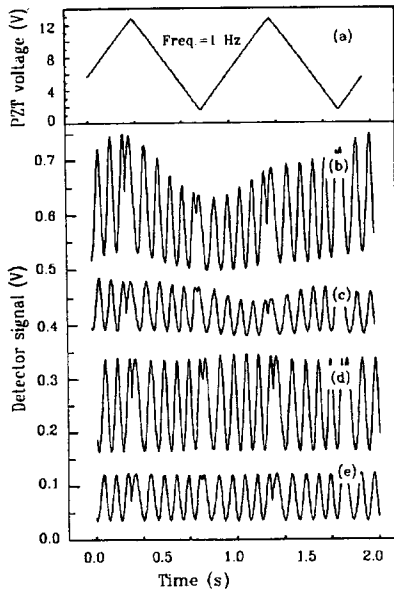


Fig. 5. Change of interference fringes with an index matching optical oil and an isolator.

oil이 isolator보다 간섭신호에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. (c)에서는 isolator의 사용이 신호의 크기를 감소시키고 fluctuation이 있음을 알 수 있다. (e)에서는 신호의 크기는 감소하지만 신호가 안정됨을 확인 할 수 있는데, 본 실험에서는 oil과 isolator를 모두 사용한 간섭 신호를 사용하였다.

Fig. 6 (a)와 같은 0.08 V의 사각파 전압을 PZT에 인가할 때, photodetector에서 측정된 신호를 (b)에 나타내었다. Fig. 6 (b)의 한 pulse는 자기변형 곡선을 구하기 위해 요구되는 시간 (1 s)에 해당되는데, Fig. 4의 PZT 교정값으로부터 0.08 V의 전압으로 PZT는 127 Å의 변위가 생기고, Fig. 6으로부터 간섭계의 드리프트와 노이즈 레벨에 의해 분해능은 30 Å임을 알 수 있다. 이는 2.5 cm 길이의 시편에서 자기변형 분해능 0.1×10^{-6} 에 해당된다.

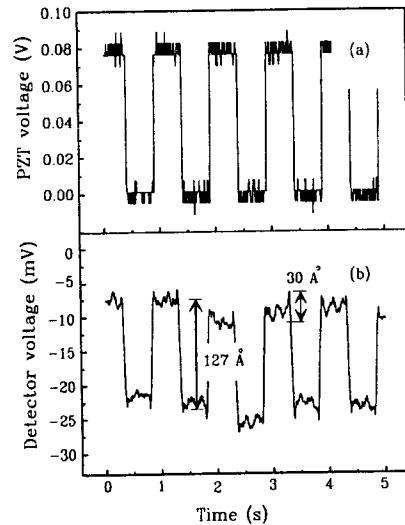


Fig. 6. Output voltage of photodetector for the small PZT voltage of square type.

Fig. 7 (a), (b), (c)는 각각 최대 자기장이 6.68×10^2 A/m, 1.34×10^3 A/m, 2.01×10^3 A/m일 때의 동적 자기변형곡선이다. (a), (b)의 경우, 자기변형에서 이력현상이 나타나지 않다가 (c)에서 약간의 이력 현상이 나타남을 알 수 있다. 인가자기장 1.59×10^3 A/m에서 자기변형값이 최대 28×10^{-6} 으로 측정되어 fiber-optic dilatometer를 이용한 측정값 30×10^{-6} [9]과 거의 같은 값을 보여주었다. 본 실험의 측정에서 자기변형 오차는 레이저 간섭신호 노이즈와 PZT 교정 오차에서

주로 기인될 것으로 추정된다.

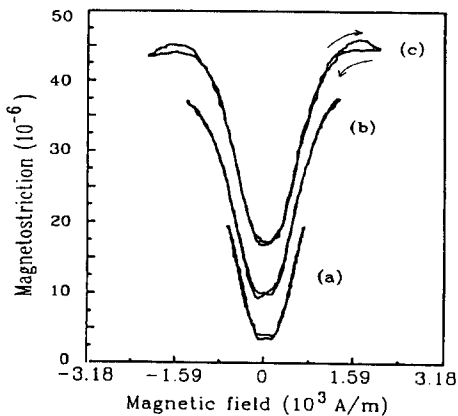


Fig. 7. Dynamic magnetostriction curves of an amorphous $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ ribbon under triangular magnetic fields (a) 6.68×10^2 A/m peak, (b) 1.34×10^3 A/m peak, and (c) 2.01×10^3 A/m peak.

V. 결 론

비정질 리본의 자기변형을 측정하기 위해 Fabry-Perot 간섭계형 광섬유 변위 센서를 구성하였다. 구성된 변위센서는 구성요소인 index matching optical oil과 isolator의 유무에 크게 의존함을 알 수 있었다. 자기장 인가장치로 제작한 헬름홀츠 코일의 코일상수는 $9.29 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$ 이었다. 구성된 변위센서의 분해능은 30 \AA 이었

고, 이를 이용하여 측정한 길이 2.5 cm 비정질 $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ 리본의 자기변형 최대치는 인가 자기장이 $1.59 \times 10^3 \text{ A/m}$ 에서 일어났으며, 그 값은 28×10^{-6} 이었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Chikazumi, "Physics of magnetism", Wiley, New York(1964) pp. 161~185.
- [2] K. Narita, J. Yamasaki, and H. Fukunaga, IEEE Trans. Magn., **MAG-16**(2), 435(1980).
- [3] G. B. Hocker, Appl. Opt. **18**(9), 1445(1979).
- [4] S. T. Vohara, SPIE **2039**, 141, Chaos in Optics (1993).
- [5] S. Breen, B. E. Paton, B. L. Blackford, and M. H. Jericho, Appl. Opt., **29**(1), 16(1990).
- [6] S. J. Petuchowski, T. G. Giallorenzi, and S. K. Sheem, IEEE J. Quantum. Electron., **QE-17**(11), 2168(1981).
- [7] T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh, and T. Ose, IEEE J. Quantum. Electron., **QE-18**(10), 1624 (1982).
- [8] L. Gates and G. Stroink, Rev. Sci. Instrum, **63**(3), 2017(1992).
- [9] P. T. Squire and M. R. J. Gibbs, J. Phys. E, **20**, 499(1987).
- [10] M. R. J. Gibbs, P. T. Squire, P. J. Ford, and D. Brugel, IEEE Trans. Magn. **24**(2), 1764 (1988).

Displacement sensor for Measuring magnetostriction of Amorphous Ribbon

K. S. Ryu, C. G. Kim

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606

J. B. Kim, H. A. Kim

Korea National University of Education, Cheongwon, Chungbuk 363-791

(Received 10 October 1995, in final form 26 February 1996)

We have constructed a displacement sensor for measuring dynamic magnetostriction of an amorphous ribbon under alternating magnetic field using fiber optic Fabry-Perot interferometer. The signal of the sensor was dependent on the index matching oil and the optical isolator. The resolution of the sensor was 30 \AA and the measured peak to peak magnetostriction of the amorphous ribbon $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ was 28×10^{-6} .