

## 본딩 구조에 따른 광섬유 자왜변환기의 응답특성\*

박무윤 · 김태균 · 이경식

성균관대학교, 전자공학과

(1995년 10월 13일 받음)

Metallic glass 2605SC, 2826MB 두 재질에 대해 세 가지 본딩 구조를 가지는 광섬유 자왜변환기를 구성하여 자왜변환기의 구조에 따른 여러가지 자왜응답특성을 측정해 보았다. 측정결과 두 재질 모두에서 양끝 본딩의 경우 가장 좋은 자왜응답특성을 보였다. 2605SC의 경우 양끝 본딩구조를 가진 자왜변환기의 유효자왜상수  $C_{eff}$ , saturation magnetostriction  $\lambda_s$ , 최소감지자계  $H_{min}$ 은 각각  $1.2 \times 10^{-5} \text{Oe}^{-2}$ ,  $7.4 \times 10^{-4}$ ,  $1.6 \times 10^{-7} \text{Oe}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었고, 2826MB재질의 경우 양끝 본딩구조에서의 유효자왜상수  $C_{eff}$ , saturation magnetostriction  $\lambda_s$ 는 각각  $7.6 \times 10^{-6} \text{Oe}^{-2}$ ,  $3.4 \times 10^{-4}$ 로 측정되었다.

### I. 서 론

광섬유 자왜변환기는 자왜재질인 metallic glass ribbon을 주로 단모드 광섬유에 부착하여 제작되며, 간섭계형 광섬유 자계센서는 광섬유 자왜변환기를 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 sensing arm에 연결함으로써 구현된다.<sup>[1,6]</sup> 만일 광섬유 자왜변환기에 자계가 인가되면 자왜변환기에 strain이 생기고, 따라서 sensing arm을 통과하는 빔의 위상이 변화하게 된다. 이 위상변화는 광섬유센서 시스템을 거쳐서 자계신호로 변환되며, 단위 인가 자계량에 대한 위상 변화량은 자왜재질의 종류와 광섬유에 자왜재질을 어떻게 부착했느냐에 따라서 다르다.<sup>[1,2]</sup> 이 때문에 지금까지 광섬유 자계센서의 성능을 높이기 위한 노력으로 여러 연구가<sup>[1,2]</sup>들은 광섬유에 metallic glass ribbon을 여러 가지 본딩 방법으로 부착한 후 자왜변환기의 특성을 비교하기도 하였다. 그러나 이들 본딩 구조에 따른 응답특성비교는 dc 근처의 저주파 영역에 국한되었으며 아직까지 수백Hz에서 수십kHz의 주파수 대역에서 본딩 구조에 따른 자왜변환기의 응답 특성 비교를 한 논문은 없었다.

본 논문에서는 3가지 구조가 다른 변환기를 만들어 순차적으로 실험을 하되 본딩의 양을 다르게 하여 loading effect<sup>[1]</sup>의 효과도 확인하고자 했다. 즉, 먼저 strip 형태의 재질을 양끝 본딩 형태의 변환기로 제작하여 ac

응답, 주파수 응답등 여러 가지 자왜특성실험을 했으며, 그 다음에는 재질 전체에 직선형으로 본딩을 한 후 같은 실험을 행하였다. 마지막으로 똑같은 크기의 재질을 잘라서 직선형 본딩을 한 재질에 샌드위치 형태로 붙여 같은 절차의 실험을 하였다. 변환기의 본딩 구조 및 특성실험장치에 대해서 2장에서 기술하였고 본딩 구조에 따른 자왜특성 실험결과 및 비교분석은 3장에서 각각 설명하였다.

### II. 본딩 구조 및 특성 실험장치

광섬유 자왜변환기는 단모드광섬유를 여러 형태의 자왜재질에 부착하여 제작한다. 여기서 실험하고자 하는 광섬유 자왜변환기용 자왜재질은 Nilaco 회사 제품 Amorphous foil을 리본(ribbon) 형태로 잘라서 사용하였다. 리본의 크기는 대략  $5 \text{cm} \times 0.6 \text{cm} \times 25 \mu\text{m}$ 이다. 자왜변환기의 자왜응답특성은 loading effect에 크게 좌우되는데 이 loading effect는 자왜재질을 광섬유를 어떻게 부착하느냐에 따라 각각 다르게 나타난다.

여기에서는 광섬유와 metallic glass ribbon 사이의 본딩 형태를 세 가지 형태로 바꿔가면서 본딩 구조에 따라서 자왜변환기의 자왜특성이 어떻게 변하는지를 실험해 보고자한다. 그림 1은 세 가지 본딩 구조 즉, 양끝 본딩, 직선형 본딩, 샌드위치 본딩 구조를 보여주는 그림이다. 위 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 양끝 본딩(two-end-point bonding)<sup>[1,2]</sup>은 광섬유와 ribbon사이의 접착 부분이 ribbon 양끝 부분에 제한된 경우이고, 직

\*본 연구는 학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음 (과제번호: 94 자유공모과제).

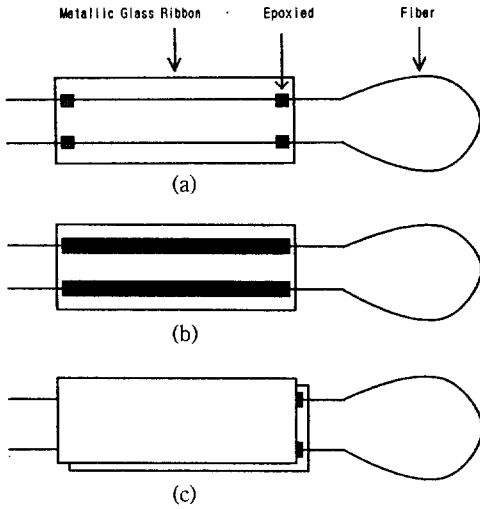


그림 1. Three different bonding configurations of fiber-optic magnetostrictive transducers (a) Two-end-point bonding (b) Straight line bonding (c) Sandwich bonding.

선형 본딩(straight line bonding)<sup>[3]</sup>은 ribbon의 길이 방향으로 광섬유 길이 전체가 접촉되어 있는 경우이며, 샌드위치 본딩(sandwich bonding)<sup>[2,6]</sup>은 위와 같은 방법으로 광섬유가 두 ribbon 사이에서 샌드위치된 채로 접촉된 본딩 구조를 뜻한다. 본 실험에서의 샌드위치 본딩은 직선형 본딩 방법으로 광섬유를 ribbon사이에 샌드위치 시킨 본딩 구조를 의미한다.

이와 같이 여러 가지 본딩 구조를 갖는 광섬유 자왜 변환기의 자왜특성을 측정하기 위해서 그림 2와 같이 광섬유 간섭계의 sensing arm에 제작된 변환기를 연결하여 측정하였다. Reference arm에는 PZT를 감아 광섬유 측정시스템의 안정화를 기했다. 만일 솔레노이드를 통해서 자왜변환기에 균일자계  $H_I$ 가 가해지면 metallic glass ribbon에 생기는 자왜는 재료의 고유 상수인 자왜상수  $C$ 에 비례하며 아래와 같다.

$$e = CH_I^2 \quad (1)$$

그런데 metallic glass ribbon에 생기는 자왜는 전부 광섬유에 전달되지 않고 loading effect에 의해서  $C_{eff}/C$ 만이 광섬유에 전달된다.  $C_{eff}$ 는 재료의 유효자왜상수이며, 자계  $H_I$ 가 직류자계  $H$ 와 교류자계  $H_\omega \cos \omega t$ 로 구성되는 경우 광섬유에 전달되는 자왜의  $\omega$  성분  $e_\omega$ 과 간섭계에서 생기는 위상변화의  $\omega$  성분  $\phi_\omega$ 는 각각 아래와 같다.

$$e_\omega = 2C_{eff}(H - H_c)H_\omega \cos \omega t \quad (2)$$

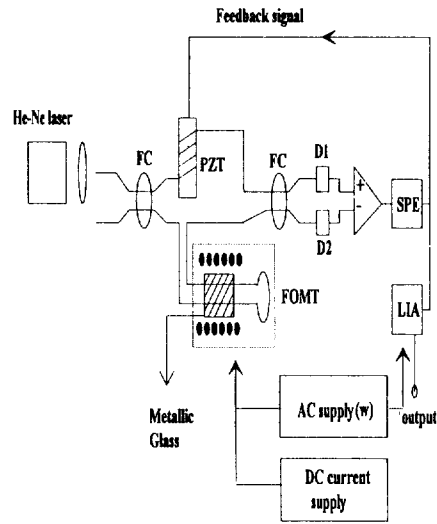


그림 2. Schematic of the experimental setup (FC, fiber coupler; D1 and D2, detectors; SPE, signal processing electronics; FOMT, Fiber-optic magnetostrictive transducer).

$$\phi_\omega = 2k_{eff}LC_{eff}(H - H_c)H_\omega \cos \omega t \quad (3)$$

여기서  $k_{eff}(=1.56m/\lambda)$ 는 굴절률  $n$ 인 광섬유 코어의 유효전파상수이고,  $L$ 는 재질에 부착된 광섬유의 길이,  $\lambda$ 는 진공 중에서의 광원의 파장이며  $H_c$ 는 잔류자계(coercive field)이다.

### III. 실험결과

광섬유 자왜변환기의 본딩 구조에 따라서 자왜응답특성이 어떻게 변하는지를 측정하기 위해서 측정장치(그림 2)를 이용하였다. 측정시 정확도를 높여주기 위해서 광섬유 자왜변환기를 바꿀때마다 또는 측정실험을 시작하기 전에 수시로 측정장치의 reference arm에 부착되어 있는 PZT에 이미 알고 있는 신호를 가해줌으로써 캘리브레이션을 해주었다. 그림 3은 세 가지 본딩 구조 각각에 대한 metallic glass 2605SC로 된 광섬유 자왜변환기의 ac 자왜응답을 보여주는 실험 결과이다. 세 가지 본딩 구조에 대한 ac 자왜응답특성 실험은 자왜응답이 최대가 되는 주파수  $f_p$ 에서 각각 행해졌는데, 2605SC의 경우 양끝 본딩에서  $f_p$ 는 2.44 kHz이고 직선형 본딩은 3.93 kHz이며 샌드위치 본딩은 1.46 kHz였다. 또 2826 MB의 경우는 양끝 본딩, 직선형 본딩, 샌드위치 본딩의  $f_p$ 가 각각 2.5 kHz, 2.6 kHz, 1.03 kHz로 나타났다. 그림

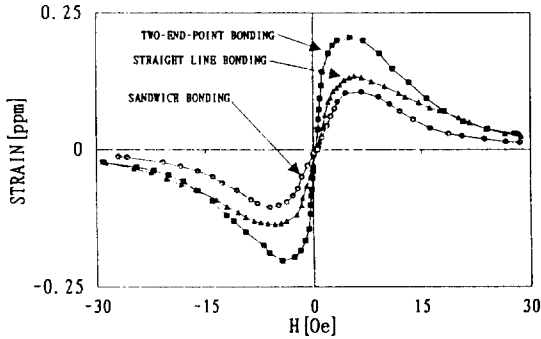


그림 3. ac magnetostrictive responses as a function of dc-bias field for three different configurations (magnetostrictive material = 2605SC,  $H_\omega = 5.9$  mOe,  $f = f_p$ ).

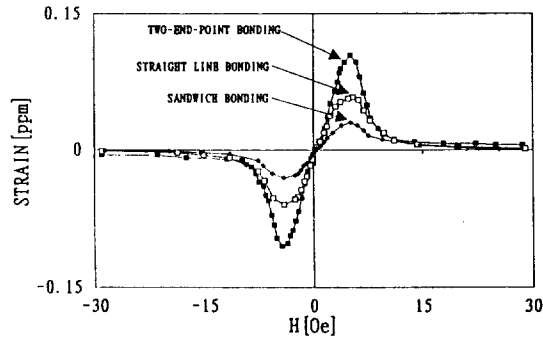


그림 4. ac magnetostrictive responses as a function of dc-bias field for three different configurations (magnetostrictive material = 2826MB,  $H_\omega = 2$  mOe,  $f = f_p$ ).

4는 metallic glass 2826MB로 된 광섬유 자왜변환기의 ac 자왜응답을 보여주는 실험 결과이다.

그림 3과 그림 4로부터 본딩 구조에 따라서 2605SC 및 2826MB 자왜재질에 대한 ac 응답의 경향은 대체로 비슷하지만 본딩 구조에 따라서 ac 자왜응답의 크기가 변함을 알 수 있다. 특히 2605SC의 경우 ac 응답이 최대가 되는 바이어스 지점에서 직선형 본딩의 경우 양끝 본딩보다 35% 정도 감소하고 샌드위치 본딩의 경우는 50%나 감소됨을 알 수 있었다.

측정실험을 통해서 얻어진 ac 자왜특성곡선을 적분하면 dc 자왜특성곡선, 즉 dc 바이어스자계 대 자왜곡선이 얻어진다. 그림 5는 그림 3으로부터, 그림 6은 그림 4로부터 얻어졌으며 각각 metallic glass 2605SC와 2826MB- 자왜변환기에 대한 본딩 구조에 따른 응답특성 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 재질 2605

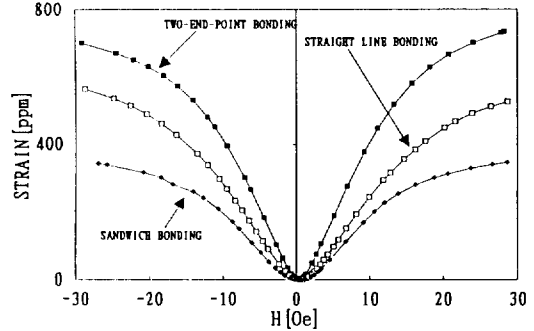


그림 5. Magnetostriction as a function of dc-bias field for three different configurations (magnetostrictive material = 2605SC,  $H_\omega = 5.9$  mOe,  $f = f_p$ ).

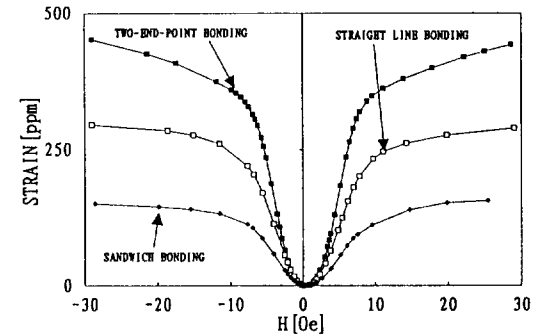


그림 6. Magnetostriction as a function of dc-bias field for three different configurations (magnetostrictive material = 2826MB,  $H_\omega = 2$  mOe,  $f = f_p$ ).

SC와 2826MB의 경우 모두 양끝 본딩의 자왜응답특성이 가장 우수했다. 특성곡선으로부터 계산된 본딩별  $C_{off}$  및 saturation magnetostriction  $\lambda_s$ 는 각각 표 1에 열거되어 있다. 여기서  $\lambda_s$ 는 ac 응답곡선에서 최대응답치의 10%로 떨어질 때의 dc strain 값으로 정의했다. 재질 2605SC의 경우  $\lambda_s$ 는  $7.4 \times 10^{-4}$ 이 됨을 알 수 있었다.

본딩구조가 각기 다른 자왜변환기로 된 광섬유 자계 센서에 대한 성능실험 결과 양끝 본딩을 했을 때 특성이 가장 우수함을 알 수 있었으며 2605SC의 경우 최소감지자계  $H_{min}$ 은  $1.6 \times 10^{-7} \text{Oe}^{-2}$ 이었다. 본딩 구조별 2605SC-자왜변환기와 2826MB-자왜변환기의  $\lambda_s$ ,  $C_{off}$  및  $H_{min}$ 값들은 각각 표 1과 표 2에 열거되어 있다.  $C_{off}$  값은 dc 자왜특성곡선을 curve fitting해서 얻었으며 재질 2605SC 및 2826MB의 경우  $C_{off}$ 가 가장 큰 양끝 본딩의 경우 각각  $1.2 \times 10^{-5} \text{Oe}^{-2}$ ,  $7.6 \times 10^{-6} \text{Oe}^{-2}$ 임을 알 수 있었다.

본딩 구조에 따라서 변환기의 자왜응답특성 뿐만 아니라 주파수특성이 달라진다. 그림 7은 2605SC-자왜 변

표 1. Parameters for fiber-optic transducers of three different bonding configurations (magnetostrictive material = 2605SC,  $H_w = 5.9 \text{ mOe}$ ,  $f = f_p$ )

Bonding configurations	$\lambda_s$	$C_{off}$	$H_{min}$
Two-end-point bonding	$7.4 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-5} / \text{Oe}^2$	$1.6 \times 10^{-7} \text{Oe} / \sqrt{\text{Hz}}$
Straight line bonding	$5.6 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-6} / \text{Oe}^2$	$3.3 \times 10^{-7} \text{Oe} / \sqrt{\text{Hz}}$
Sandwich bonding	$3.5 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-6} / \text{Oe}^2$	$5.3 \times 10^{-7} \text{Oe} / \sqrt{\text{Hz}}$

표 2. Parameters for fiber-optic transducers of three different bonding configurations (magnetostrictive material = 2826MB,  $H_w = 2 \text{ mOe}$ ,  $f = f_p$ ) (A list of Figure Captions)

Bonding configurations	$\lambda_s$	$C_{off}$	$H_{min}$
Two-end-point bonding	$3.4 \times 10^{-4}$	$7.6 \times 10^{-6} / \text{Oe}^2$	$2.3 \times 10^{-6} \text{Oe} / \sqrt{\text{Hz}}$
Straight line bonding	$2.6 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-6} / \text{Oe}^2$	$4.6 \times 10^{-6} \text{Oe} / \sqrt{\text{Hz}}$
Sandwich bonding	$1.4 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-6} / \text{Oe}^2$	

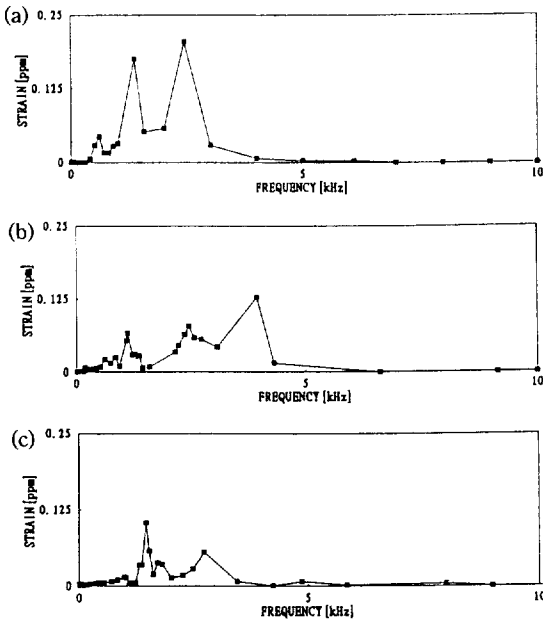


그림 7. Frequency responses for three different configurations (magnetostrictive material = 2605SC,  $H_w = 5.9 \text{ mOe}$ ,  $H = 4.36 \text{ Oe}$ )  
 (a) Two-end-point bonding  
 (b) Straight line bonding  
 (c) Sandwich bonding.

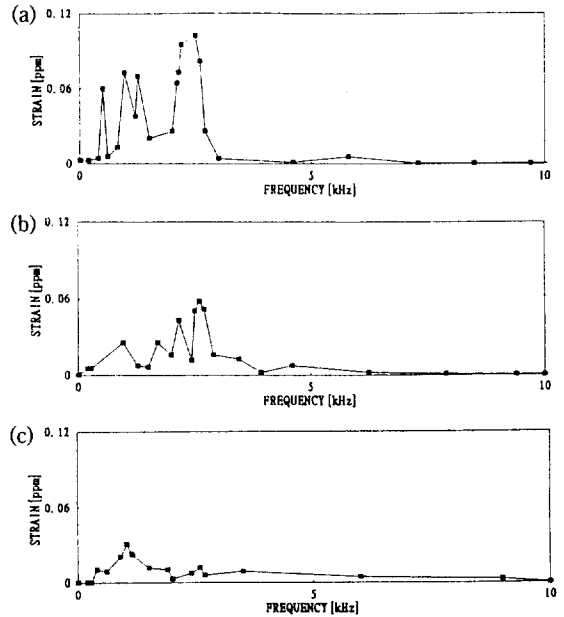


그림 8. Frequency responses for three different configurations (magnetostrictive material = 2826MB,  $H_w = 2 \text{ mOe}$ ,  $H = 4.4 \text{ Oe}$ )  
 (a) Two-end-point bonding  
 (b) Straight line bonding  
 (c) Sandwich bonding.

환기에 대한 본딩 구조에 따른 주파수특성을 보여 주는 그림이고 2826MB-자왜변환기에 대한 본딩 구조에 따른 주파수특성의 변화는 그림 8에 나타나 있다. 그림 7과 8에서 (a), (b), (c)는 각각 양끝본딩, 직선형본딩, 샌드위치본딩의 경우를 나타낸다. 여기서 본딩구조에 따라서

peak가 되는 주파수들이 각기 다른것은 본딩구조에 따라서 loading effect 및 변환기의 구조가 달라지기 때문인 것으로 추측된다. 그림 7, 8로 부터 2605SC의 경우 양끝본딩구조를 갖는 광섬유 자왜변환기가 직선형 본딩구조나 샌드위치 본딩구조를 갖는 변환기에 비해 주파수 0.5

kHz에서 10kHz에 걸쳐서 strain 응답이 대체로 크게 나오는 것을 알 수 있으며, 특히  $f_p$ 에서는 직선형 본딩의 경우가 양끝 본딩의 경우보다 35% 정도 감소했으며 샌드위치 본딩의 경우는 양끝 본딩보다 50% 정도나 감소되는 것을 알 수 있다. 2826MB의 경우에도 2605SC와 비슷한 경향을 보였으며  $f_p$ 에서의 응답은 직선형 본딩과 샌드위치 본딩이 양끝 본딩에 비해서 각각 40%와 70% 정도 감소했다.

#### IV. 결 론

지금까지 수백Hz~10 kHz의 주파수 범위에서 광섬유 자왜변환기의 본딩 구조를 달리하면서 자왜변환기의 자왜 응답특성이 어떻게 되는지를 실험을 해보았다. 실험 결과 본딩 구조에 상관없이 ac 자왜응답의 경향은 대체로 유지됨을 알 수 있었으나 ac 자왜 응답의 크기는 최대 ac 응답이 2605SC재질을 사용한 직선형 본딩의 경우 양끝 본딩보다 35% 정도, 샌드위치 본딩의 경우 50%나 감소되었다. 또한 dc 자왜응답 특성곡선으로부터  $\lambda_s$  및  $C_{eff}$  값들을 얻을 수 있었으며, 재질 2605SC와 2826MB의 경우 양끝 본딩을 했을 때  $C_{eff}$ 가 가장 큰 값인  $1.2 \times 10^{-5} \text{ Oe}^{-2}$ 와  $7.6 \times 10^{-6} \text{ Oe}^{-2}$ 로 각각 측정되었다. 본딩 구조가 다른 자왜변환기로 똑같은 광섬유 자계센서를 구성했을 때 최소감지자계는 재질 2605SC로 된 양끝 본딩의 경우 최대감도  $1.6 \times 10^{-7} \text{ Oe}/\sqrt{\text{Hz}}$ 가 관측되었으며, 직선형 본딩, 샌드위치 본딩순으로 감도가 떨어졌다. 이와 같이 본딩 구조에 따라서 자왜변환기의 특성이 달라지는 것은 본딩 구조에 따라 사용되는 접착제의 양과 광섬유와 재질사이의 본딩된 접촉면적이 다르기 때문이다. 즉, 접착제에 의한 loading effect에 의해 metallic glass에 발생하는 strain이 광섬유에 전달되는 물리적인 양이 달

라지기 때문이다. 따라서, 접착제의 양과 접촉면적이 가장 적은 양끝 본딩이 loading effect가 가장 작아 감도가 가장 좋고, 직선형 본딩, 샌드위치 본딩 순으로 양끝 본딩에 비해 자왜응답특성이 둔화되는 것을 알 수가 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] F. Bucholtz, K. P. Koo., G. H. Sigel, Jr. and A. Dandridge, "Optimization of the Fiber/Metallic Glass Bond in Fiber-Optic Magnetic Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, **Lt-3**(4), pp. 814-816, 1985.
- [2] N. Nader-Rezvani, R. O. Claus and A. K. Sarrafzadeh, "Low Frequency Fiber Optic Magnetic Field Sensors," *SPIE 1584 Fiber Optic and Laser Sensors IX*, pp. 405-414, 1991.
- [3] K. P. Koo., G. H. Sigel, Jr., "Characteristics of fiber-optic magnetic-field sensors employing metallic glasses," *Optics Letters*, **7**(7), pp. 334-336, 1982.
- [4] K. S. Lee, Y. S. Lee and S. J. Suh, "Magnetostrictive transducers for optical fiber magnetic field sensors," *Fiber Optic Laser Sensors XII, SPIE 2292*, pp. 57-65, 1994.
- [5] K. S. Lee, H. S. Kang and M. Y. Park, "Fiber optic magnetostrictive transducers for magnetic field sensing," *Optical Engineering*, **34**(12), 1995. to be published.
- [6] D. Y. Kim, H. J. Kong and B. Y. Kim, "Fiber-Optic DC Magnetic Field Sensor with Balanced Detection Technique," *Photonics Technology Letters*, **4**(8), pp. 945-948, 1992

### Magnetostrictive Response Characteristics of Fiber-optic Transducers with Different Bonding Configurations

Moo Youn Park, Tae Kyun Kim and Kyung Shik Lee

*Department of Electronic Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, 440-746, Korea*

(Received: October 13, 1995)

The magnetostrictive characteristics of three different forms of magnetostrictive transducers made of 2605SC and 2826MB metallic glasses were measured. In both cases, the two-end-point bonding configuration exhibited the best characteristics. With the two-end-point bonding we measured the effective magnetostrictive coefficient  $C_{eff}$  of  $1.2 \times 10^{-5} \text{ Oe}^{-2}$ , the saturation magnetostriction  $\lambda_s$  of  $7.4 \times 10^{-4}$  and the minimum detectable magnetic field  $H_{min}$  of  $1.6 \times 10^{-7} \text{ Oe}/\sqrt{\text{Hz}}$  for the 2605SC metallic glass ribbon. Also for the 2826MB metallic glass ribbon,  $C_{eff}$  and  $\lambda_s$  were  $7.6 \times 10^{-6} \text{ Oe}^{-2}$  and  $3.4 \times 10^{-4}$ , respectively.