

## 매크로 벤딩 측정을 위한 금속 모세관 결합 광섬유 센서

백승인 · 정윤찬 · 이병호<sup>†</sup>

서울대학교 전기공학부

Ⓣ 151-744 서울시 관악구 신림동 산 56-1 번지

(2001년 1월 11일 받음, 2001년 6월 21일 수정본 받음)

금속 모세관을 이용하여 일반적인 단일모드 광섬유를 결합함으로써 매크로 벤딩(macro bending)을 측정할 수 있는 광섬유 센서를 제작하였다. 매크로 벤딩에 의한 곡률 반지름이 감소함에 따라 각도 정렬 오차가 증가하여 투과되는 빛의 에너지가 감소하게 되므로 매크로 벤딩을 측정할 수 있었다. 측정 범위는 곡률 반지름 20 mm에서 85 mm의 영역이었다. 사용한 광섬유 격자의 중심 파장은 각각 1543.3 nm, 1549.5 nm이고 최대 벤딩 손실은 -11.19 dB였다. 이 센서와 광섬유 브래그 격자를 이용하여 다중접 측정이 가능함을 보였다.

분류코드 : FO.030.

### I. 서 론

최근 광섬유를 이용하여 물리적 변수를 측정하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1-6]</sup> 건물이나 교량과 같은 대형 구조물의 물리적인 상태를 진단하는 것은 인간의 안전에 직접적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 광섬유를 이용한 온도나 스트레인 측정에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.<sup>[7-9]</sup> 온도나 스트레인 뿐만 아니라 기계적인 벤딩(bending) 또한 구조물의 손상 정도를 판단하는 매우 중요한 변수 중의 하나이다. 따라서, 이론과 실험을 바탕으로 한 많은 유용한 연구들이 보고되고 있다.<sup>[2,4,10]</sup> 벤딩을 측정하는 방법은 간단하게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 광섬유의 벤딩에 의한 손실을 측정하는 방법과 같이 전송되는 빛의 에너지 양을 측정하는 방법이고, 다른 한가지 방법은 광섬유 격자 구조의 스펙트럼에서 벤딩에 의한 파장의 변위를 측정하는 방법이다. 전자는 후자에 비해 간단하고 비용면의 장점이 있는 반면, 다중화된 측정이 어렵다는 단점이 있다. 반면, 후자는 다중화된 측정은 용이하지만 광섬유 브래그 격자나 장주기 격자의 파장 변위가 온도나 스트레인에 의해서도 변하므로 정확한 측정을 위해서 온도나 스트레인에 의한 파장 변위와 벤딩에 의한 파장 변위를 구별해야 하는 단점이 있다. 따라서, 기본적인 벤딩을 측정할 때에는 온도나 스트레인의 영향을 무시할 수 있는 전자의 방법이 보다 효과적이라고 할 수 있다.<sup>[3]</sup>

구부러진 광섬유의 전송 손실을 측정하는 것은 구조물의 손상이나 전단력에 의한 약화 등을 탐지하는데 유용하게 활용될 수 있다.<sup>[3]</sup> 단일모드 광섬유에서의 마이크로(micro) 벤딩 특성에 대한 연구는 이미 보고된 바 있다.<sup>[4,10]</sup> 일반적으로, 단일모드 광섬유에서 마이크로 벤딩에 의한 손실이 발생하는 곡률 반지름은 수 밀리미터보다 작다. 따라서, 일반적인 단일모드

광섬유는 벤딩에 의한 손실이 거의 없는 효과적인 도파로로 사용될 수 있다. 반면, 벤딩에 의한 손실을 측정할 수 있는 곡률 반지름이 매우 작기 때문에 곡률 반지름이 수십 밀리미터보다 큰 매크로 벤딩을 측정하기 위한 센서로 사용하기에는 부적당하다. 매크로(macro) 벤딩을 측정하는 것은 건물이나 교량 등 대형 구조물의 물리적 상태를 측정하는데 유용하게 사용될 수 있기 때문에 마이크로 벤딩 측정만큼 중요하다. 최근, 코어의 지름이 다른 광섬유를 이용하여 벤딩에 의한 전송 손실의 민감도를 높인 연구가 보고되었다.<sup>[2]</sup> 이에 따르면, 이러한 매크로 벤딩 센서의 최대 측정 가능 곡률 반지름은 약 25 mm였다. 속이 빈 광섬유를 일반적인 단일모드 광섬유 사이에 삽입하여 매크로 벤딩의 민감도를 비약적으로 향상시킨 연구 또한 보고되었다.<sup>[3]</sup> 이에 따르면, 속이 빈 광섬유를 이용한 매크로 벤딩 센서는 수백 밀리미터에서 천 밀리미터의 곡률 반지름을 측정할 수 있었다. 이러한 측정 범위는 대형 구조물의 벤딩을 측정하는데 매우 효과적이지만 벤딩에 대해 센서가 매우 민감하여 벤딩의 곡률 반지름이 작아짐에 따라 벤딩에 의한 손실이 급격히 증가한다. 따라서, 속이 빈 광섬유를 이용한 센서는 수백 밀리미터 이하의 곡률 반지름을 측정하는데에는 부적당하다.

그러므로, 25 mm 이상, 수백 밀리미터 이하의 곡률 반지름을 측정하기 위해서는 다른 방식의 매크로 벤딩 센서가 필요하다. 이와 같은 범위의 곡률 반지름을 측정하기 위해서 본 논문에서는 금속 모세관 접합 광섬유 센서를 제안한다. 이 구조는 매우 간단하고 앞서 언급한 범위의 곡률 반지름을 측정할 수 있는 민감도를 가지고 있다.

### II. 금속 모세관 접합 광섬유 센서를 이용한 매크로 벤딩 측정

단일모드 광섬유를 접합할 때, 빛의 전송 손실은 접합하려는

<sup>†</sup>E-mail: byoungcho@plaza.snu.ac.kr

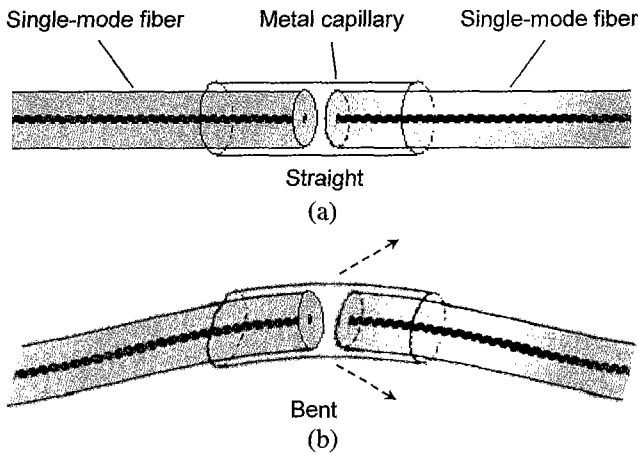


그림 1. 금속 모세관 광섬유 매크로 벤딩 센서 동작 원리도. (a), (b)는 각각 벤딩이 존재하지 않을 때와 벤딩이 존재할 때를 나타낸다.

광섬유의 정렬 정확도에 따라 달라진다.<sup>[11]</sup> 결합 효율은 결합하는 광섬유의 횡축 방향과 횡단면의 각도 정렬 상태에 따라 결정된다.<sup>[12]</sup> 일반적으로 결합 손실을 줄이기 위해서 용융 접합기를 사용한다. 기계적인 접합기를 사용할 때에는 결합 손실을 줄이기 위해 유리관과 굴절률 맞춤 젤(index-matching gel)을 사용한다. 유리관은 접합하는 광섬유의 횡축 방향 정렬 오차를 최소화 하기 위하여 사용되고 굴절률 맞춤 젤은 광섬유 끝에서 발생하는 반사에 의한 손실을 최소화하기 위하여 사용된다. 금속 모세관은 기계적인 접합기의 유리관과 같은 역할을 한다. 그러나, 금속 모세관은 벤딩에 대하여 유연성을 가지며 결합된 부분에 벤딩이 발생하면 광섬유의 횡단면의 각도에 대하여 정렬 오차가 커지므로 결합 손실이 발생하게 된다.

금속 모세관과 일반적인 단일모드 광섬유를 이용하여 그림 1과 같이 매크로 벤딩 센서를 구성하였다.<sup>[13]</sup> 단일모드 광섬유를 금속 모세관을 이용하여 결합하고 접착제를 이용하여 금속 모세관의 양쪽 끝부분에 고정했다. 벤딩이 존재하지 않을 때, 광섬유에서 진행하던 빛은 다른 광섬유로 결합되면서 광섬유 간의 미세한 정렬 오차에 의해 일부가 외부로 유출된다. 이와 같은 금속 모세관을 이용한 센서의 고유한 손실은 금속 모세관의 제작 상태에 따라 1dB 이하로 줄일 수 있다. 금속관 접합 광섬유가 구부러지면 광섬유의 정렬 오차가 커지게 되고 그림 1(b) 처럼 결합 손실이 증가하게 된다. 광섬유가 구부러지게 되면 전기장이 광섬유의 중심으로부터 바깥쪽으로 이동되어 분포하게 되므로 접합된 광섬유 사이의 결합 효율이 작아지나 곡률 반경이 클 경우 그 영향은 크지 않다.<sup>[4]</sup> 또한 접합되는 두 광섬유의 끝에서 패브리페로 간섭 효과가 생길 수 있다. 접합되는 두 광섬유 사이의 공간을 패브리페로 공동(cavity) 길이로 생각할 수 있으므로 벤딩에 의한 곡률 반지름이 변하면 광섬유 사이의 공간, 즉 패브리페로 공동 길이가 변하게 된다. 따라서, 패브리페로 공동 길이의 변화는 벤딩에 의한 광 파워 변화를 결정하는 또 하나의 요인으로 생각할 수 있다. 그러나, 결합하는 두 광섬유를 정확히 정렬하면 벤딩이 존재하지 않을 때 두 광섬유 사이의 길이는 매우 작으므로 큰

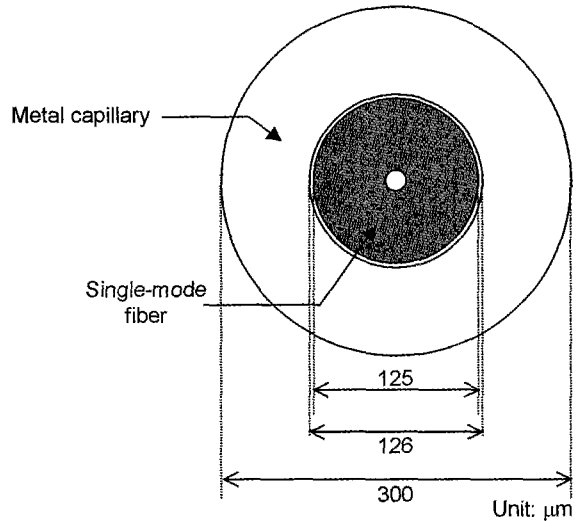


그림 2. 금속 모세관 접합 광섬유의 단면도. 금속 모세관의 외경은 300 μm, 내경은 126 μm이다. 금속 모세관의 내경은 일반적인 단일모드 광섬유의 지름보다 1 μm 더 크다.

접한 공간 주파수 사이의 거리는 매우 길어지게 된다. 그러므로, 센서가 요구하는 파장 범위 내에서 패브리페로 효과에 의한 영향은 거의 나타나지 않는다. 또한 벤딩이 존재할 때 광섬유는 직선상에 존재하지 않기 때문에 다중 반사가 일어날 수 없으므로 패브리페로 효과는 무시할 수 있다. 결론적으로, 전기장의 변형, 반사에 의한 손실, 패브리페로 효과 등 벤딩에 의한 손실이 일어나는 많은 요인들이 존재하지만, 벤딩에 의해 발생하는 광섬유 횡단면의 각도 정렬 오차에 의한 손실이 가장 주요한 손실의 원인이 된다.

그림 2는 금속 모세관 접합 광섬유의 단면을 보여준다. 금속 모세관은 압출 성형을 통해 제작된 스트레인 스틸 재질이며 그 외경과 내경은 각각 300 μm와 126 μm이다. 금속 모세관의 내경은 일반적인 단일모드 광섬유보다 1 μm 더 크다. 금속 모세관과 광섬유 직경의 차이에 의해 횡축 방향의 정렬 오차, 즉 고유의 결합 손실이 발생한다. 이러한 손실을 최소화하기 위하여 횡축 방향의 정확한 정렬이 필요하다. 그러나, 광섬유를 금속 모세관에 접착 시키는 과정에서 약간의 편차가 존재하게 된다. 그림 3은 금속 모세관 접합 광섬유 센서의 실제 사진이다. 이것은 그림 1과 2에서 보인 바와 같이 금속 모세

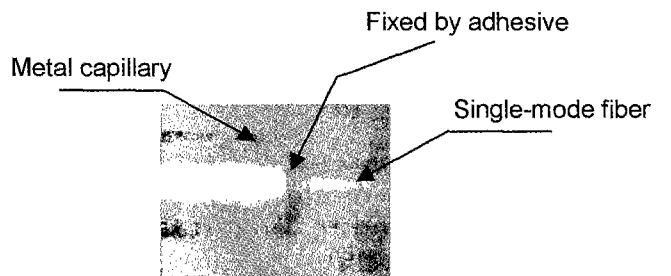


그림 3. 금속 모세관 접합 광섬유 센서의 실제 사진. 금속 모세관의 길이는 5 cm이고 접합 지점은 금속 모세관의 중심에 위치한다.

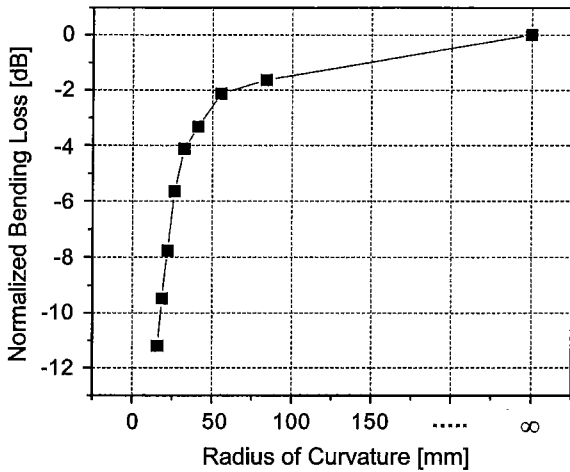


그림 4. 금속 모세관 광섬유 매크로 벤딩 센서의 곡률 반경에 따른 정규화된 벤딩 손실.

관과 일반적인 단일모드 광섬유만을 이용하여 제작되었다. 앞서 언급한 바와 같이 금속 모세관의 외경은 300 μm, 내경은 126 μm이고, 길이는 5 cm이다. 광섬유의 접합 위치는 금속 모세관의 중앙에 위치하며, 결합되는 두 광섬유의 단면은 거의 붙어있다.

그림 4는 벤딩에 의한 곡률 반지름에 따른 금속 모세관 접합 광섬유의 손실을 나타낸다. 그림 4의 손실 값은 아래의 식과 같이 벤딩에 의한 손실을 초기의 손실로 표준화한 것이다.

$$Loss [dB] \equiv 10 \times (\log P_B - \log P_o) \quad (1)$$

식 (1)에서  $P_o$ 와  $P_B$ 는 각각 벤딩이 존재하지 않을 때와 존재할 때 전송되는 에너지 양을 나타낸다. 고유의 손실은 약 1.5 dB로 측정되었다. 금속 모세관 접합 광섬유 센서는 약 20 mm에서 85 mm까지의 곡률 반지름을 측정할 수 있었다. 이러한 측정 범위는 코아 크기가 다른 광섬유를 이용한 센서<sup>[2]</sup>와 속이 빈 광섬유를 이용한 센서<sup>[3]</sup>의 측정 범위 사이의 값을 갖는 것이다. 벤딩에 의한 광섬유 횡단면의 각도 정렬 오차는 광섬유 간의 거리 변화와 경사각 증가로 나타난다. 식 (2)는 광섬유 간의 거리 변화, 식 (3)은 경사각 증가에 따른 빛 에너지의 투과 계수를 나타낸다.<sup>[12]</sup>  $T$ 는 투과 계수,  $D$ 는 광섬유 간의 거리,  $n_2$ 는 광섬유 클래딩의 굴절률, 그리고  $\theta$ 는 경사각을 나타낸다. 곡률 반지름이 작아짐에 따라 식 (2)와 식 (3)에 의한 효과가 커지면서 두 식이 동시에 영향을 미치므로 투과하는 에너지의 양이 급속하게 줄어들게 되는 것이다.<sup>[12]</sup>

$$T = \frac{4Z^2 + 1}{(2Z^2 + 1)^2 + Z^2}, \quad Z = \frac{D}{n_2 k \omega^2} \quad (2)$$

$$T = 2 \exp \left[ -\frac{\pi n_2 \omega \theta}{\lambda} \right] \quad (3)$$

금속 모세관 접합 광섬유 센서의 측정 범위는 속이 빈 광섬유를 이용한 센서처럼 대형 구조물의 벤딩을 측정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 금속 모세관 접합 광섬유 센서

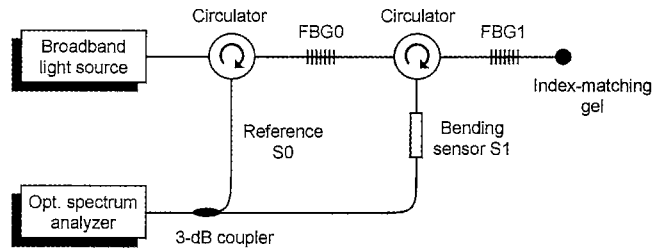


그림 5. 매크로 벤딩 측정을 위한 실험 장치. FBG0, FBG1 등에서 반사된 신호는 S0, S1 등을 지나 측정 장치에 도달한다.

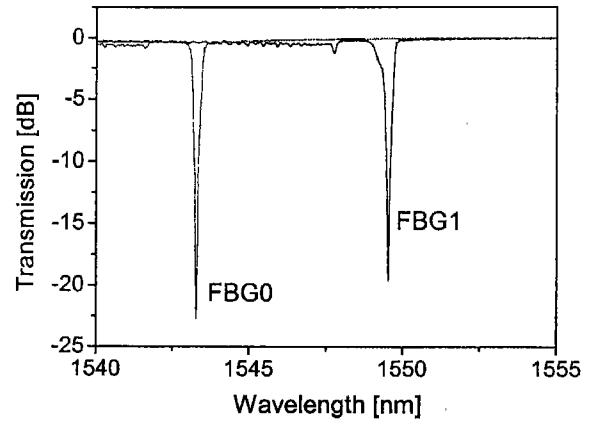


그림 6. 그림 5의 실험 장치에 사용된 광섬유 브래그 격자의 투과 스펙트럼. 광섬유 격자 길이는 각각 1인치이며, FBG0는 기준이 되는 빛을 반사하고 FBG1은 벤딩 센서의 신호를 반사한다. 각 격자의 중심파장은 대략 1543.3 nm, 1549.5 nm이다.

는 금속 모세관과 일반적인 단일모드 광섬유만을 사용하기 때문에 매우 간단하고 적은 비용으로 구현할 수 있다. 또한 온도나 스트레인과 같은 주위 환경에 의한 영향을 구별해야 하는 부가적인 과정이 필요하지 않다.

그림 5는 매크로 벤딩을 측정할 수 있는 도식적인 실험 장치를 보여준다. 이와 같은 실험 장치는 중심 파장이 다른 광섬유 브래그 격자와 매크로 벤딩 센서를 광 순환기(optical circulator)를 이용하여 연결함으로써 여러 지점의 매크로 벤딩을 측정할 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 또한 센서의 다중화에 의한 신호 대 잡음 비의 감소를 배제할 수 있다. 그림 6은 실험에 사용된 광섬유 브래그 격자의 투과 스펙트럼을 나타낸다. 광섬유 브래그 격자의 길이는 각각 1인치이다. 그림 6에서 FBG0는 손실에 대한 기준을 나타내는 격자이고 FBG1은 벤딩 센서이다. 광섬유 브래그 격자의 중심 파장은 각각 1543 nm, 1549 nm이다. 이러한 광섬유 브래그 격자는 위상 마스크 방법을 이용하여 제작되었으며 100°C에서 24시간 동안 열처리 하였다. 그림 7은 매크로 벤딩에 대한 스펙트럼의 변화를 보여준다. S0와 S1의 신호는 각각 기준 신호와 벤딩에 의해 손실된 신호를 나타낸다. 매크로 벤딩 센서 S1의 곡률 반지름이 감소함에 따라 S1을 투과하는 에너지가 감소함을 알 수 있다. 전송 손실이 최대인 경우 약 10 dB의 에너지 손실이 측정되었으며 이것은 그림 3으로부터 곡률 반지름 약 25

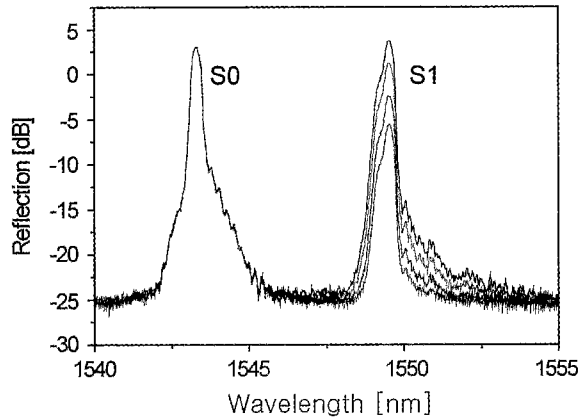


그림 7. 파장분할 신호의 반사 스펙트럼. 벤딩에 의한 곡률 반지름이 감소함에 따라 벤딩 센서 S1을 통과한 신호 또한 감소한다.

mm에 해당됨을 알 수 있다.

### III. 결 론

금속 모세관과 일반적인 단일모드 광섬유를 이용하여 벤딩에 따른 투과 에너지 양을 측정할 수 있는 매크로 벤딩 센서를 제작하였다. 이 광섬유 센서는 금속 모세관과 일반적인 단일모드 광섬유만을 사용하기 때문에 쉽고 간단하며 적은 비용으로 제작할 수 있다. 벤딩에 의한 전기장의 변형, 집합되는 광섬유 끝에서 발생하는 반사에 의한 손실, 패브리-페로 효과 등 손실을 일으키는 여러 가지 요인이 존재하지만 횡단면의 각도 정렬 오차에 의한 손실이 가장 주요한 요인이라 할 수 있다. 측정 가능한 매크로 벤딩 곡률 반지름의 범위는 약 20 mm에서 85 mm까지로 측정되었으며 이것은 코어 크기가 다른 광섬유를 이용한 센서<sup>[2]</sup>와 속이 빈 광섬유를 이용한 센서<sup>[3]</sup>의 중간 범위이다. 금속 모세관 접합 광섬유 센서와 광섬유 브래그 격자를 이용하여 매크로 벤딩 측정 실험을 하였으며 다중점 매크로 벤딩 측정이 가능함을 보였다. 이 센서에는 금속 모세관과 단일모드 광섬유의 직경의 차이에 의한 횡축 방향의 정렬 오차로 인하여 고유 손실이 존재한다. 이것은 금속 모세관을 정확히 제작함으로써 효과적으로 줄일 수 있다. 이외에도 앞서 언급한 바와 같이 몇 가지의 고유 손실을 일으키는 요인들이 존재하므로 고유 손실을 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

### 참고문헌

- [1] W. R. Habel and H. Polster, "The influence of cementitious building material on polymeric surfaces of embedded optical fibers for sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, pp. 1324-1330, 1995.
- [2] K. Watanabe, K. Tajima, and Y. Kubota, "Macrobending characteristics of a hetero-core splice fiber optic sensor for displacement and liquid detection," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, pp. 309-314, 2000.
- [3] Y. Jeong, S. Baek, and B. Lee, "A self-referencing fiber-optic sensor for macro-bending detection immune to temperature and strain perturbations," in *Proc. OFS 2000, Venice, Italy*, Oct. 2000, paper P3-05.
- [4] W. A. Gambling, H. Matsumura, and C. M. Ragdale, "Field deformation in a curved single-mode fibre," *Electron. Lett.*, vol. 14, pp. 130-132, 1978.
- [5] A. D. Kersey, A. Dandridge, and M. A. Davis, "Low-crosstalk code-division multiplexed interferometric array," *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 351-352, 1992.
- [6] V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 692-694, 1996.
- [7] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1442-1463, 1997.
- [8] G. Lin, L. Wang, C. C. Yang, M. C. Shih, and T. J. Chuang, "Thermal performance of metal-clad fiber Bragg grating sensors," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 406-408, 1998.
- [9] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, "Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 3, pp. 160-162, 1997.
- [10] D. Marcuse, "Field deformation and loss caused by curvature of optical fiber," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, pp. 311-320, 1976.
- [11] J. S. Cook, W. L. Mammel, and R. J. Grow, "Effect of misalignment on coupling efficiency of single-mode optical fiber butt joints," *B.S.T.J.*, vol. 52, pp. 1439-1448, 1973.
- [12] D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," *The Bell Sys. Technol. J.*, vol. 56, pp. 703-718, 1977.
- [13] S. Baek, Y. Jeong, and B. Lee, "A fiber-optic sensor aided by a metal capillary splice for macro-bending detection," in *Proc. Photon. Conf. 2000, Cheju, Korea*, Nov. 2000, pp. 601-602.

### **Fiber-optic macro-bending sensor aided by metal capillary**

Seungin Baek, Yoonchan Jeong, and Byoungcho Lee<sup>†</sup>

*School of Electrical Engineering, Seoul National University Seoul 151-744, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: byoungcho@plaza.snu.ac.kr*

(Received January 11, 2001 ; Revised manuscript received June 21, 2001)

A metal capillary splice fiber-optic sensor was fabricated for use as an intensity-based macro-bending sensor. As the radius of curvature due to the macro-bending decreases, the angular misalignment of the fiber ends inside the metal capillary increases, i.e., the coupling efficiency of the fiber splice is reduced. Thus, macro-bending can be detected by the measurement of the reduction of transmitted power. The detectable range of macro-bending was measured approximately from 20 mm to 85 mm. The center wavelengths of the fiber Bragg gratings are 1543.3 nm and 1549.5 nm, respectively. The maximum bending loss of this sensor was measured about -11.92 dB. Using this metal capillary spliced fiber sensor and fiber Bragg gratings, macro-bending detection has been demonstrated, and it is shown to have potential for multi-point macro-bending sensors.

*Classification code* : FO.030.