

# 광커넥터의 반사를 이용한 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서

유정애 · 조재홍

한남대학교 자연과학부 광·전자물리학 전공  
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

권일범<sup>†</sup>

한국표준과학연구원 스마트계측그룹  
Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2004년 3월 16일 받음, 2004년 9월 17일 수정본 받음)

교량과 각종 건물을 비롯한 대형 토목 구조물에서 발생하는 수 mm의 변위를 한 개의 광섬유로 간편하게 측정하기 위하여 광커넥터에서 반사가 굽힘 손실에 의하여 변하는 현상을 이용한 새로운 다중화된 광섬유 변위센서를 제안하고 실험하였다. 한 쌍의 광커넥터 양끝에서 반사광의 신호차이가 두 광커넥터 사이에서 발생한 굽힘 변위에 의해서 달라지는 것을 Optical Time Domain Reflectometer로 측정하여 선형으로 그 변화가 측정되는 변위센서를 만들고, 이 센서 4개를 직렬형으로 배열하여 여러 지점의 변위를 동시에 측정 가능한 다중화 센서 시스템을 구성하고 실험하였다. 그 결과 이 변위센서를 이용하면 4개 지점에서 각각 최대 6 mm까지의 변위를 6%의 오차범위 내에서 0.9942의 선형성을 가지고 변위를 측정할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : Fiber-optic sensor, Bend loss, OTDR, Displacement measurement. Multiplexing.

## I. 서 론

일반적으로 광섬유 센서는 우수한 민감도와 분해능을 가지고 있으며, 그 크기가 작고 유연해서 측정하고자 하는 대상물 특히 구조물에 쉽게 부착하거나 삽입이 가능한 장점을 보유하고 있다. 1980년대 지능형 구조물(smart structure)의 개념이 소개되었으며, 광섬유 센서는 이러한 많은 장점으로 인하여 지능형 구조물의 측정에 적합한 센서로써 주목 받게 되었다. 따라서 현재까지 광섬유 센서에 대한 연구는 지능형 구조물을 바탕으로 진행되었으며 많은 지능형 구조물의 연구 또한 광섬유 센서를 측정 및 감시에 이용하고 있다. 또한 이러한 광섬유센서는 항공우주분야, 의료기기분야, 토목구조물 등에 적용되어지고 있다.<sup>[1]</sup>

굽힘으로 인한 광섬유의 광 손실은 광통신분야에서 주된 관심대상이었다. 이러한 미소 굽힘으로 인한 광 모드결합 효과에 대한 이론은 Marcus와 Gloge 등의 연구자들에 의해 체계화되었다.<sup>[2]</sup> 굽힘으로 인한 광손실은 통신분야에서는 유해한 현상이기 때문에 가능한 한 이를 줄이기 위한 연구가 수행되었지만, 광섬유의 굽힘 광손실이 센서로써 이용될 수 있다는 아이디어가 나온 이후로 광섬유 센서분야에서는 유용한 효과로 인식되고 있다.<sup>[3-4]</sup> 그리고 나서 이 이후로 굽힘 손실을 이용하여 다양한 물리 현상을 측정하기 위해서 많은 혁신적인 기법들이 도입되어 왔다.<sup>[4-5]</sup> 특히 미소굽힘형 광섬유

유 센서는 작동 방식과 신호처리 등이 간편하기 때문에 다양한 적용 분야에서 널리 활용되고 있다. 이러한 보기로는 압력 및 변위 센서가 있으며, 이를 이용하여 바닥 매트에서 광섬유를 삽입한 침입자 감시센서는 일부에서 이미 상품화되고 있다.<sup>[6]</sup> 이러한 미소굽힘형 광섬유센서를 굽힘과 진동을 측정하기 위해 대형 구조물에 부착하는 연구도 있었다.<sup>[7]</sup> 최근의 굽힘형 광섬유센서의 연구에서는 원주길이에 대한 광손실을 정량적으로 분석하였으며,<sup>[8]</sup> Optical Time Domain Reflectometer(OTDR)를 이용한 굽힘형 다수의 센서를 연속적으로 붙여서 이용하는 연구에서는 5 km 이상의 거리내에서 일어나는 변위를 측정할 수 있음도 밝혔다.<sup>[9]</sup>

본 논문에서는 별도의 독립된 광센서들이 아닌 한 쌍의 광커넥터의 양끝에서 반사되는 빛의 신호차이가 커넥터들 사이에서 발생한 굽힘 변위에 의해서 달라지는 것을 OTDR로 측정하여 변위 센서를 만들 수 있음을 보였다. 그리고 수 mm에서 수 cm의 변위를 일으키는 구조물의 변위를 측정하기 위하여 동일한 단일모드 광섬유에서 이 센서 4개를 직렬형으로 배열하여 사용할 수 있는 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서에 의한 변위측정을 제안하고 이를 구현하고자 한다.

## II. 굽힘 손실 이론

광손실형 광섬유 센서는 광섬유의 굽힘에 따른 광손실에 근거를 두기 때문에 굽힘형 광섬유 센서라고 한다. 직선으로

<sup>†</sup> E-mail: ibkwon@kriss.re.kr

뿔은 단일모드 광섬유에 작은 직경의 굽힘이 가해질 때, 전형적인 광파워의 손실은 순수 굽힘손실(pure bend loss)과 모드전환 손실(mode transition loss)에 의해 발생한다.<sup>[8],[10]</sup>

순수 굽힘손실은 코어 굴절률이  $n_{co}$ 이고 클래딩의 굴절률은  $n_{cl}$ 인 광섬유가 굽은 영역에서 파장  $\lambda$ 의 입사파에 대한 단일 횡모드의 입사각이 작아짐으로써 이 횡모드의 세기분포중 가장자리 부분이 광섬유를 도파하지 못하고 새나가는 손실현상을 말한다. 그림 1은 이러한 순수 굽힘손실의 메카니즘을 보여주는 것으로 광섬유에 굽힘이 가해지기 전에 직선으로 뿔은 부분에서는 손실없이 파워  $P_0$ 의 횡모드가 광섬유 축을 따라 전파한다. 그러나 구부림이 있을 경우, 이 부분이 반경  $r_b$ 와 각  $\phi$ 를 갖는 원형으로 구부려진다. 그러면 이 굽힘 영역에서의 모드파면은 굽힘의 곡률 중심으로부터 방사거리에 선형적으로 의존하는 속도로 전파될 것이다. 모드파면의 각위상속도(angular phase velocity)와 광섬유 축을 전파하는 빛의 속도(각군속도(angular group velocity))가 같아지는 특정 값  $r_c$ 보다 큰 횡모드 세기분포의 반경 위치에서는(그림 1에서 어두운 영역에 해당하는 파워  $P_c$ 의 영역) 모드 세기분포가 스스로 사라지면서 분리점으로부터 접선경로로 전파되어 흩어진다. 그러면 순수 굽힘손실에 의한 없어진 파워를 제외하고 진행한 파워는  $P(r_b, \phi) = P_0 - P_c$ 가 된다.

굽힘 광섬유의 곡률  $r_b$ 와 접촉하는 호의 길이  $s$ 에 따른 진행한 후의 순수 굽힘 손실에 의해 없어지고 남은 진행 파워  $P(s)$ 에 대한 표현은 아래와 같다.<sup>[11]</sup>

$$P(s) = P_0 \exp(-\gamma s), \tag{1}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} \left( \frac{a}{r_b} \right)^{1/2} \frac{V^2 W^{1/2}}{U^2} \exp \left[ -\frac{4}{3} \frac{r_b}{a} \frac{W^3 \Delta}{V^2} \right] \tag{2}$$

여기에서

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}, U = a(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2}, W = a(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{1/2}$$

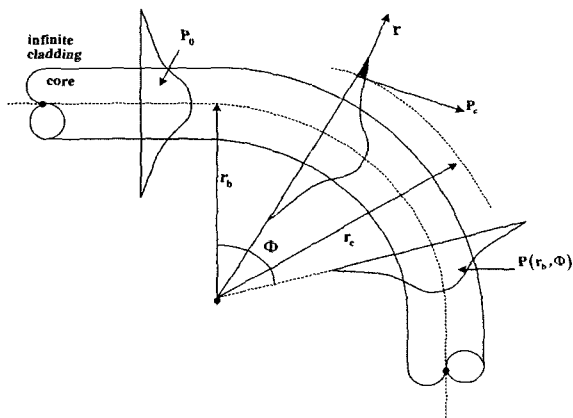


그림 1. 순수 굽힘손실 메카니즘. 굽힘 영역에서 모드 형상의 어두운 영역은 주위의 매질과 결합하여 더 이상 진행하지 않는다.

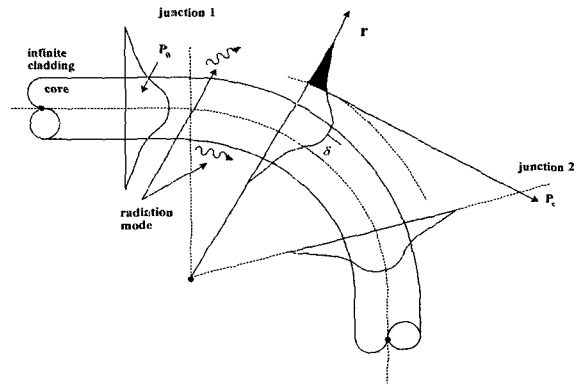


그림 2. 모드전환 손실 메카니즘. 굽힘 부분과 곧은 부분에서의 모드 형상기 때문에 광이 한쪽으로 전파될 때 파워 손실이 발생한다.

이며,  $\Delta = (1/2)(1 - n_{cl}^2/n_{co}^2)$ 이다. 이 식들에서 나타나는  $a$ 는 코어반경이고,  $k$ 는 전파상수로  $k = 2\pi/\lambda$ 이며, 모드조건을 유발하는 광섬유의 횡방향 전파상수 성분은  $\beta = k_0 n_{co} \sin \theta$ 이다.  $\beta$ 의 표현에서  $k_0$ 는 진공 중에서의 전파상수이며,  $\theta$ 는 광섬유 코어 내에서 코어와 클래딩의 경계로 입사하는 광선이 경계면의 입사점에서 세운 법선과 이루는 각도이다. 이  $\beta$ 는  $n_{cl} k < \beta < n_{co} k$ 를 만족한다.

모드전환 손실은 광섬유의 곧은 부분과 굽혀져 있는 부분의 모드 형상이 서로 다른 경우에 발생한다. 그림 2에 나타난 것처럼 굽힘 영역에서 모드의 중심 최대값은 곧게 뿔은 광섬유 영역과 비교해서 거리  $\delta$ 만큼 반경의 바깥부분으로 옮겨진다. 광섬유의 곧은 부분과 굽힘 부분 사이의 교차점 1(junction 1)에서 입사 파워의 일부는 굽힘 영역으로 진행하고 남아있는 파워는 클래딩과 그 외곽의 코팅층 영역에서 방사 모드(radiation mode)와 결합한다. 이러한 진행과 방사 모드의 파워결합 과정은 광섬유가 굽었다가 다시 직선으로 퍼지는 교차점 2(junction 2)에서도 동일하게 발생한다. 굽힘에 따른 총 모드전환 손실의 결과는 두 개의 교차점에서의 손실량을 합하여 계산한다. 또한 모드의 변화는 그림 2에서 어두운 영역에 해당하는 파워의 증가에 따라 순수 굽힘손실의 증가에도 영향을 준다.

이러한 손실이 일어나는 굽힘 영역이 본 연구와 같이 원둘레의 절반(반 바퀴)에 해당하는 긴 영역에서는 앞서 설명한 2 가지 주요 손실 메카니즘에서 순수 굽힘 손실이 모드전환 손실보다 크기 때문에 대부분의 손실은 순수 굽힘 손실로도 그 경향을 설명할 수 있다.

### III. 굽힘 손실을 이용한 광섬유 센서의 원리

앞서 설명한 굽힘 손실을 이용한 굽힘손실형 광섬유 센서는 그림 3과 같이 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)과 2개의 광커넥터(optical connector), 즉 기준 광커넥터(reference connector: RC)와 감지 광커넥터(sensing connector: SC)로 구성한다. OTDR은 펄스광을 광섬유에 입사한 후 되

들어오는 후방산란광을 측정하여 임의의 위치에서 주어지는 외부의 교란의 크기와 위치를 알아내는데 사용한다. 이와 같은 OTDR의 원리를 이용하여 광섬유에 반사를 일으키는 광커넥터의 연결부인 RC와 SC의 두 지점을 두고 펄스광을 입사시키면 OTDR로부터 두개의 반사 신호를 얻게 된다. RC와 SC사이에서 굽힘(bending)에 의한 손실이 발생할 경우, 손실 지점의 이전에 있는 RC에서의 신호는 굽힘손실에 영향을 받지 않으므로 손실지점 이후에 위치한 SC에서의 신호를 측정한다면 RC에서의 기준신호(reference signal)에 대비한 줄어든 SC의 감지신호(sensing signal)로부터 굽힘에 의한 손실을 측정할 수 있다.

그림 3의 광섬유 센서에서 시간(또는 광섬유 거리)에 따라 OTDR에서 나타나는 기준신호(Vr)와 감지신호(Vs)의 전형적인 형태를 그림 4에서 볼 수 있다. 광섬유에 굽힘을 가해지게 되면 기준신호는 변화가 없으나 감지신호는 굽힘 변위에 의해 신호가 감소함을 알 수 있다. 이때 나타나는 기준신호와 감지신호 사이의 차이를 읽음으로 굽힘의 정도를 측정할 수 있다. 이러한 감지신호의 감소정도와 굽힘의 정도  $\delta$ 가 선형적으로 변하는 범위 내에서는 기준신호와 감지신호로부터 굽힘 변위를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\delta = C \left[ \left( \frac{V_r - V_s}{V_r} \right)_i - \left( \frac{V_r - V_s}{V_r} \right)_0 \right] \quad (3)$$

(3)식에서 볼 수 있듯이 굽힘변위 정도인  $\delta$ 는 변위를 가한 후에 기준신호와 감지신호의 차이를 기준신호로 나눈 값  $\left( \frac{V_r - V_s}{V_r} \right)_i$ 에서 변위를 가하기 전의 값  $\left( \frac{V_r - V_s}{V_r} \right)_0$ 의 차이에 상수 C로 곱한 값이다. 여기서 C는 실험으로부터 구한 정규화된 신호값들에서 구한 비례상수이다. (3)식에서와 같이 센서로부터 얻어지는 기준신호와 감지신호로부터 실제 가해진 굽힘변위를 구할 수 있기 때문에 이를 센서로 이용할 수 있다. 또한 뒤의 실험에서 보겠지만 이들 센서를 한 줄의

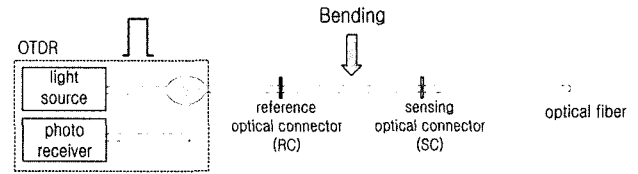


그림 3. 굽힘손실을 이용한 광섬유 센서의 원리 : 광섬유 센서는 OTDR과 2개의 광커넥터(optical connector)인 기준 광커넥터(reference connector: RC)와 감지 광커넥터(sensing connector: SC)로 구성됨.

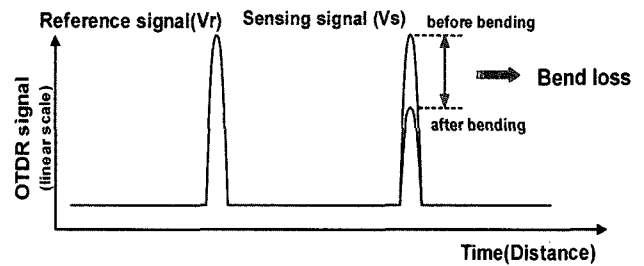


그림 4. 굽힘손실 광섬유 센서에서 시간(또는 광섬유 거리)에 따라 OTDR에서 나타나는 기준신호(reference signal: Vr)와 감지신호(sensing signal: Vs)의 전형적인 형태.

광섬유 상에 여러 개를 설치할 경우, 여러 지점의 변위를 동시에 측정이 가능한 다중화된 광섬유 변위센서를 구성할 수도 있다.

#### IV. 굽힘 손실특성 실험

이론과 여러 논문들에서 보듯이 일정한 크기의 변위에 대해서 광섬유 굽힘 직경이 큰 경우가 직경이 작은 경우보다 광 손실이 적다.<sup>[2,9]</sup> 이처럼 광섬유 굽힘에 대해서 이 굽힘으로 인한 자체 광 손실이 적어야 한다는 측면에서 보면 굽힘 직경이 큰 것이 좋고 변위에 대한 센서의 감도의 측면에서

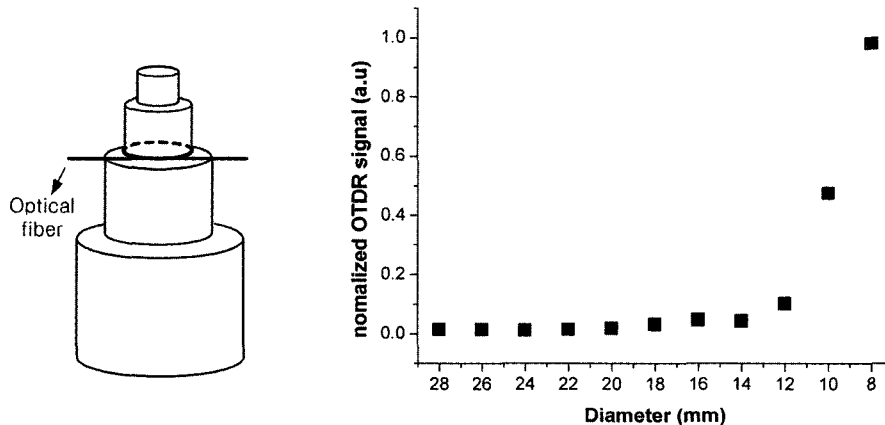


그림 5. 단일모드 광섬유의 굽힘 직경에 따른 OTDR 신호를 측정 후, 굽힘에 의한 OTDR 신호의 변화율(기준 OTDR 신호를 기준으로 굽힘 때문에 줄어든 OTDR 신호의 비)이 얼마나 줄어든지를 측정하기 위하여 규격화된 OTDR 신호인  $(V_r - V_s)/V_r$ 로 계산한 결과.

보면 굽힘 직경이 작은 것이 좋다. 따라서 이 두 점을 고려하여 볼 때 적은 광 손실을 유발함과 동시에 가해진 변위에 대한 센서의 감도를 높일 수 있는 적절한 크기의 굽힘 직경을 만들어 주는 것이 필요하다. 이를 위해서 그림 3의 FC/PC 형태의 광커넥터(East Photonic, EPJC-BSBSAE0300)를 이용한 RC와 SC 사이에 그림 5의 왼쪽과 같은 다단 스테인레스 봉에 단일모드 광섬유를 감아서 굽힘손실을 주는 장치를 설치하였다. 이 스테인레스 봉을 사용하여 광섬유 굽힘직경을 8 mm에서 28 mm까지 2 mm 간격으로 변화시켜가면서 출력단에서 나오는 반사광의 신호를 OTDR로 측정하였다. 실험에 사용된 광섬유는 단일모드 계단형 굴절률 광섬유이며, 코어 반경이 4.15  $\mu\text{m}$ , 코어 굴절률 1.467, 클래딩 굴절률 1.465인 단일모드 광섬유(SUMITOMO, DSF)를 사용하였다. 그리고 OTDR은 파장 1.475  $\mu\text{m}$ 이고 출력이 100 mW 이상인 펄스형 반도체 레이저(Alcatel, A 1948 PLI)를 광원으로 사용하여 자체 제작하였다.

그림 5의 오른쪽 그래프는 그림 5의 왼쪽 장비를 이용하여 단일모드 광섬유의 굽힘 직경에 따른 OTDR 신호를 측정한

후, 굽힘에 의한 OTDR 신호의 변화율(기준 OTDR 신호를 기준으로 굽힘 때문에 줄어든 OTDR 신호의 비)이 얼마나 줄어들었는지를 측정하기 위하여 이를 (3)식에서 사용한 정규화된 OTDR 신호인  $(V_r - V_s)/V_r$ 로 계산한 결과이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 굽힘직경이 8 mm에서 12 mm 사이에서 광손실의 변화율이 가장 크게 일어나면서 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 변위 측정용 굽힘손실형 광섬유 센서를 제작할 때 변위에 위한 굽힘직경이 8 mm에서 12 mm 사이에서 변하는 영역만을 선택하였다.

그림 6은 앞서 실험한 그림 5의 굽힘직경에 변화에 대한 광손실의 실험결과를 토대로 가장 OTDR 신호의 변화가 크게 일어나는 직경 8 mm(■), 9 mm(●), 10 mm(▲)에서 각각 호의 길이를 변화시키면서 OTDR 신호의 변화율이 얼마나 줄어들었는지를 측정하기 위하여 이를  $(V_r - V_s)/V_r$ 로 측정한 결과이다. 그림 6의 왼쪽 그림과 같이 일정 반경을 갖는 원통의 원주 상에서 같은 간격의 5개 위치를 정하여 광섬유를 감은 후 호의 길이 변화에 따른 광손실을 측정한 결과를 그림 6의 오른쪽 그래프에서 볼 수 있다. 이 경우에서

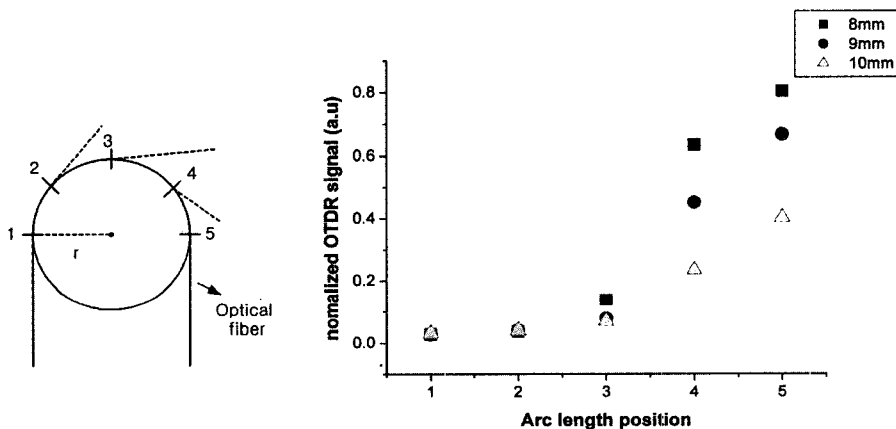


그림 6. 굽힘직경이 각각 8 mm(■), 9 mm(●), 10 mm(▲)인 경우에 각각의 호의 길이를 변화시키면서 OTDR 신호의 변화율이 얼마나 줄어들었는지를 측정하기 위하여 이를  $(V_r - V_s)/V_r$ 로 측정한 결과.

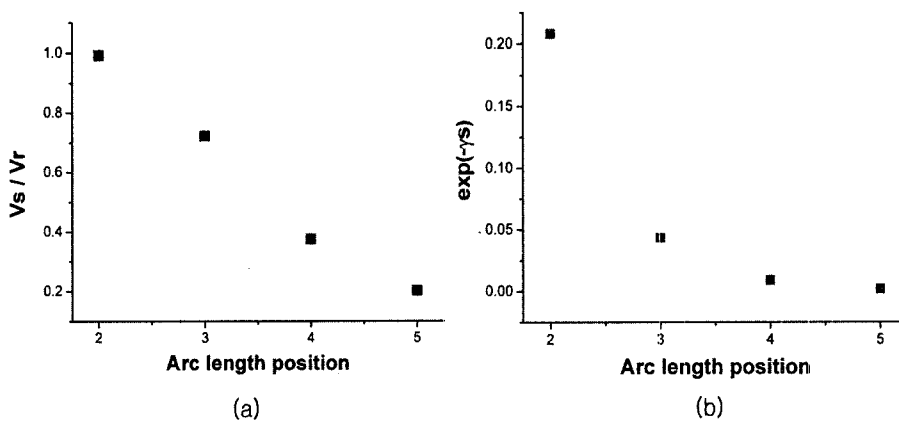


그림 7. 굽힘직경 8 mm에 대한 굽힘 호의 길이 변화에 대한 광손실 실험값(그림 7 (a))을 앞서 설명한 이론값 (1)식과 (2)식을 이용하여 계산한 이론값(그림 7 (b))과 비교한 결과.

보듯이 직경이 작을수록, 굽힘 호의 길이가 길수록 광 손실이 크게 발생함을 알 수 있는데, 이는 (1)식과 (2)식에서 예측하였던 바와 일치한다.

그림 7은 그림 6의 3가지 경우 중에서 직경 8 mm의 직경에 대한 굽힘 호의 길이 변화에 대한 광손실 실험값(그림 7(a))을 앞서 설명한 이론값 (1)식과 (2)식을 이용하여 계산한 결과(그림 7(b))와 비교한 결과이다. (1)식에서  $P(s)/P_0$ 는 입력 파워에 대한 출력파워이므로 굽힘이 가해지기 전의 기준신호와 굽힘이 발생한 후 나타나는 감지신호의 비로써 실험적으로 구한다. 그리고 이론값인  $\exp(-\gamma s)$ 는 실험에 사용한 파라미터를 대입해 (2)식을 이용하여 구한 감쇄상수  $\gamma$ 와 호의 길이 값으로부터 계산할 수 있다. 비교 결과 실험값과 이론값은 아주 흡사한 양상을 가지며, 호의 길이가 길수록 손실에 의한 신호의 감소가 커짐을 알 수 있지만 실험은 직선의 감소를 보이지만 이론은 지수 함수적 감소를 보여주고 있는데, 이는 실험적으로 발생한 측정 오차로 인한 것과, 광섬유의 단단한 성질로 인해 정확한 원호의 형태로 구부러지지 않기 때문에 발생하는 오차, 또한 실험에 사용한 원통의 길이가 제한되어 있어서 굽힘 손실의 최소값과 최대값 사이의 전 영역에 걸쳐 측정이 이뤄지지 않음으로 인해 실험값과 이론값의 차이가 발생한 것으로 여겨진다. 그림 5에서 그림 7까지의 실험적 결과들로부터 굽힘 직경의 변화가 광손실에 의한 OTDR 신호에 선형적으로 비례하는 굽힘 직경의 영역을 알 수 있기 때문에 이를 이용한 변위 광섬유 센서를 제안하고 만들 수 있는 기초자료로 사용한다.

### V. 선형변위 측정 실험

그림 5와 그림 6으로부터는 8 mm의 굽힘직경에서 12 mm의 굽힘직경까지의 총 4 mm의 굽힘직경 변화에 대해서 광손실의 OTDR 신호비가 선형적으로 변하는 영역을 찾을 수 있었다. 그림 8은 그림 3과 그림 4에서 제안한 광커넥터를 이용한 굽힘손실 측정용 광섬유 센서를 이용하여 이러한 선형영역에서 만든 변위센서에 대한 장치도이다. 이 그림에서 보듯이 직경 12 mm의 반원 형태로 구부러진 광섬유를 정밀하게 이동시킬 수 있는 두 금속판에 접착(bonding)하여 고정한다

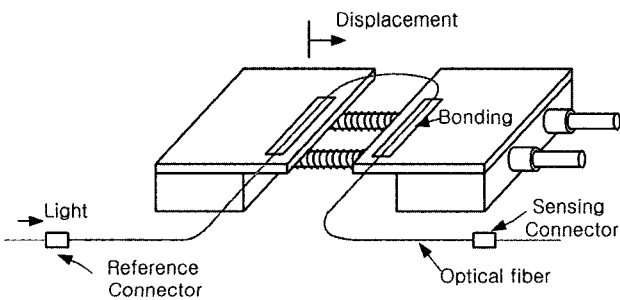


그림 8. 광커넥터를 이용한 굽힘손실형 광섬유 센서를 이용하여 변위 측정용 광섬유 변위 센서에 대한 장치도.

후에 한쪽 금속판을 고정시키고 다른 한쪽 금속판을 밀면 서로 가까워지면서 구부러진 광섬유에 추가적인 굽힘이 생기면서 광손실이 발생한다. 두 고정축이 멀어지게 되면 광섬유의 굽힘이 작아지게 되어 광손실이 적어지고, 두 고정축이 가까워지면 굽힘이 커지게 되어 광손실이 증가한다. 이러한 굽힘손실을 측정함으로써 광섬유가 부착된 물체사이의 변위를 알 수 있다. 광섬유의 굽힘 정도에 따른 광 손실은 그림 8의 기준 커넥터와 감지 커넥터의 반사광의 차이로 알 수 있다. 이를 실용화할 경우에는 선형변위를 인위적으로 인가하는 그림 8의 나사부분을 없애고 광섬유가 접착된 두 금속판을 선형변위가 일어나는 한 지점에서 바로 인접한 두 곳에 부착하여 사용한다.

그림 9는 그림 8에서 만든 광섬유 변위센서 1개를 이용하여 변위를 0 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm를 인가했을 때 OTDR에서 측정거리에 따라 측정된 RC의 반사광(왼쪽 신호)과 SC

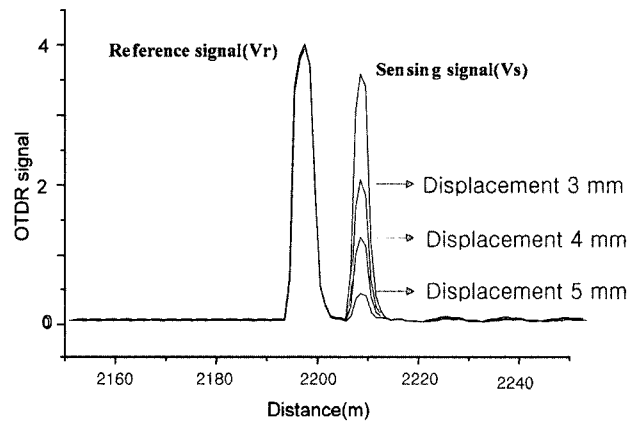


그림 9. 광섬유 변위센서 1개를 이용하여 변위를 0 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm를 인가했을 때 OTDR에서 측정된 RC의 반사광(왼쪽 신호)과 SC의 반사광.

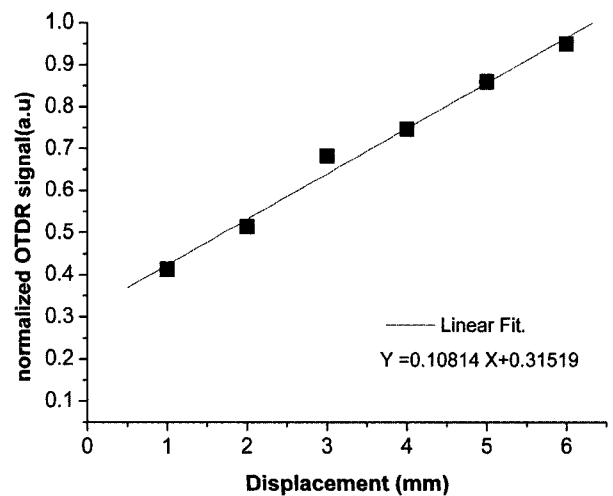


그림 10. 광섬유 변위센서의 변위의 증가에 따른 RC와 SC의 반사광을 정규화된 신호인  $(V_r - V_s)/V_r$ 로 나타낸 결과.

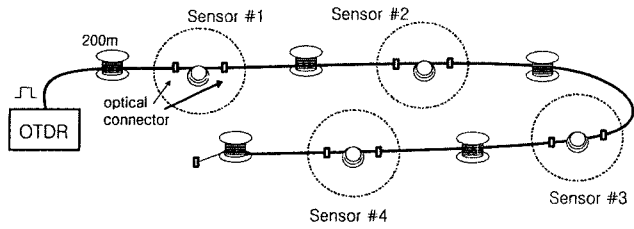


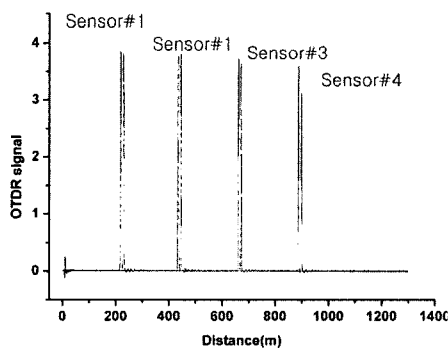
그림 11. 광섬유 변위센서 4개를 직렬형으로 배열한 다중화된 광섬유 변위센서 시스템의 실험장치도.

의 반사광(오른쪽 신호들로 위에서 아래의 순서임)들을 보여준다. 변위가 클수록 RC에서의 기준신호의 크기 및 위치는 변하지 않지만 SC에서의 감지신호는 점점 작아지는 경향을 알 수 있다. 이러한 변위센서 내의 광섬유의 초기 굽힘직경을 12 mm로 잡아서 변위를 1 mm부터 6 mm까지 1 mm 간격으로 주었을 때 RC와 SC의 반사신호들을 사용하여 규격화한 OTDR 신호(normalized OTDR signal)인  $(V_r - V_s)/V_r$ 로 나타낸 것이 그림 10이다. 이들 변위값들에 대한 규격화된 OTDR 신호의 선형 피팅한 결과는  $y = 0.10814x + 0.31519$ 로 기울기로 계산하는 선형 감소율은 상관계수가 0.9942로써 선형성이 매우 높음을 알 수 있다. 그러므로 동일한 단일모드 광섬유에서 변형이 없는 RC에서의 반사광과 변형이 인가된 뒤의 SC에서의 반사광을 OTDR로 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서를 이용하여 매우 선형성이 높으면서 최대 6 mm의 선형변위를 측정할 수 있는 광섬유 변위센서를 제작할 수 있음을 확인하였다.

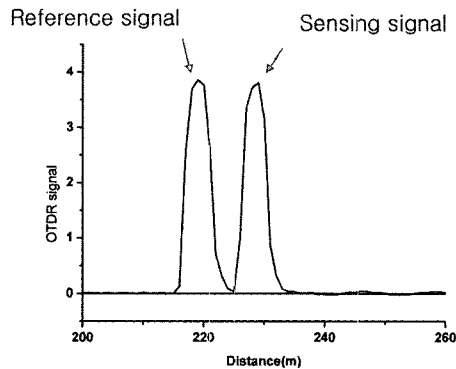
그림 7의 굽힘손실형 광섬유 변위센서 4개를 직렬형으로 배열하여 그림 11과 같이 4군데의 변형지점을 동시에 측정할 수 있도록 다중화된 광섬유 변위센서 시스템을 구성하였다. 각 변위센서는 모두 8.5 m 길이의 광섬유 끝단에 반사를 일으키는 return loss 37~38 dB의 광커넥터로 연결하여 제작하였으며, 각 변위센서 사이에는 200 m 길이의 광섬유를 그림 11과 같이 설치하였다.

그림 12은 그림 11의 센서 1부터 4까지 다중화된 굽힘손실형 단일모드 광섬유 변위센서에 OTDR의 광원에서 50 ns의 펄스 레이저광을 입사시켜서, 변위를 인가하지 않은 경우 (a)는 각 변위센서로부터 기준신호와 감지신호를 얻은 것으로 왼쪽부터 센서 1번, 2번, 3번, 4번에서 나온 기준신호와 감지신호 한 쌍씩의 신호이며, (b)는 이중에서 센서 1번에서 나온 신호를 확대한 것이다. 길이가 길어지고 각 센서에서 일정양의 반사광이 OTDR쪽으로 반사되기 때문에 1번 센서에서 4번 센서로 갈수록 기준신호도 약간씩 줄어들고 동시에 감지신호는 더 많이 줄어들음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 4번째 이상의 센서를 설치할 경우, 앞선 센서에 의한 광량 저하로 인해 굽힘 변위에 대한 반사 신호 측정이 불가능하다. 그러므로 본 논문에서 제작한 다중화 된 광섬유 변위센서는 일렬로 최대 4개까지의 센서를 동시에 설치할 수 있는 것을 알 수 있다. 반사광 신호의 차, 즉 신호의 감소를 기준신호로 나눈 정규화된 광손실에 의한 신호감소량으로부터 (3)식에 따라 변위  $\delta$ 를 구한다. (3)식에서 상수 C는 실험적으로 구하게 되는 비례상수이며 여러 변위에 대해서 정규화된 광손실에 의한 측정값  $[(V_r - V_s)/V_r]$ 와 선형변위가 없을 때의 초기값  $[(V_r - V_s)/V_r]_0$ 사이의 차이들로부터 구한다. 각 센서에 최대 6 mm의 선형변위를 가하면서 비례상수 C를 구한 결과, 센서 1번(S1)은 62.042, 센서 2번(S2)은 29.257, 센서 3번(S3)은 28.103, 센서 4번(S4)은 8.196이었다.

그림 13은 4개의 변위센서 각각에 그림 8의 장치를 이용하여 인위적으로 2 mm의 변위를 (a) S1에만 가한 경우, (b) S1과 S2에만 가한 경우, (c) S1, S2, S3만 가한 경우, (d) S1, S2, S3, S4 모두에 가한 경우에 측정된 신호들로부터 (3)식에 따라 계산한 선형 변위값이다. 그림 13에서 각 센서들에 가해진 변위를 확인할 수 있으며, 변위가 주어지지 않은 센서는 변위가 0임을 확인할 수 있다. 따라서 다중화된 굽힘손실형 단일모드 광섬유 변위센서를 이용할 경우 4군데의 변위측정이 동시에 가능하다는 것을 확인하였다. 그리고 이들 각 센서들로부터 구한 변위값들로부터 2 mm의 변위에 대해서 4



(a) 전체신호



(b) Sensor#1

그림 12. (a) 각 변위센서로부터 기준반사광 신호와 감지반사광 신호를 얻은 것으로 왼쪽부터 센서 1번, 2번, 3번, 4번에서 나온 신호 (b) 센서 1번에서 나온 신호를 확대한 것.

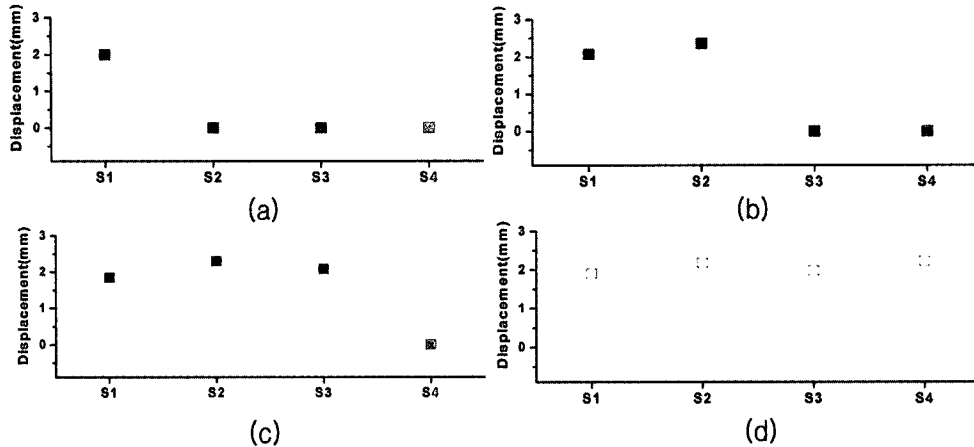


그림 13. 4개의 변위센서 각각에 인위적으로 2 mm의 변위를 (a) S1에만 가한 경우, (b) S1과 S2에만 가한 경우, (c) S1, S2, S3만 가한 경우, (d) S1, S2, S3, S4 모두에 가한 경우에 측정된 신호들로부터 (3)식에 따라 계산한 선형 변위값들.

개의 센서가 0.12 mm의 오차로 변위를 측정할 수 있었다. 이러한 오차는 주어진 변위에 2 mm에 대해 약 6%이며, 이는 광섬유 변위 탐측자의 불안정성이나, OTDR 신호 출력의 변동에 의한 것으로 추정된다. 이로부터 변위센서의 정밀한 설계 및 제작과 OTDR 성능 향상을 위해 연구가 지속적으로 요구된다.

### VI. 결 론

교량, 건물을 비롯하여 노후 항공기 등의 구조물에 발생하는 변위를 한 개의 광섬유로 측정하기 위하여 굽힘손실에 따라 광커넥터의 반사신호가 선형적으로 줄어드는 현상을 이용한 단일모드 광섬유 변위센서를 제안하였다. 그리고 이러한 변위센서의 원리를 확인하기 위한 선행실험으로써 광섬유 굽힘직경과 호의 길이변화에 따른 광손실을 측정하는 광섬유 굽힘손실 특성을 조사하고, 변위센서의 초기 굽힘직경을 결정하였다. 또한 광섬유 변위센서를 제작하여 변위 감지도를 조사한 결과, 변위가 증가함에 따라 센서 신호가 상관계수 0.9942로써 선형적으로 감소함을 알 수 있었고, 측정가능한 변위가 최대로 6 mm까지임을 확인하였다. 또한 구성된 센서로부터 온도에 의한 광손실의 정도를 측정한 결과, 10-60℃ 온도 변화에 대해서 커넥터의 반사 신호의 변동은 거의 없음을 확인하였으며, 본 실험에서 사용한 총 1.2 km의 광섬유에 대해서 광섬유의 자체적인 광량 저하는 거의 없었다. 이에 따라 본 연구에서 사용한 센서는 굽힘 변위에 의한 광손실만을 측정할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 광커넥터의 반사를 이용한 광섬유 변위센서를 일렬로 붙여서 4군대의 지점을 동시에 측정할 수 있는 다중화된 굽힘손실형 단일모드 광섬유 변위센서를 구성하였고, 이를 검증하는 실험을 하였다. 그 결과 다중화된 광섬유 변위센서의 4군대 센서로부터 얻은 변위는 2 mm의 변위에 대해서 0.12 mm의 오차를 갖는다는 것을 확인하였다. 이러한 오차는 최대 변위 2 mm

에 대하여 약 6%로 아주 정밀한 측정은 불가능하나, 토목계 측이나 건축물의 변형을 측정하는데 사용할 수 있다. 또한 본 연구에서는 4개의 다중화 센서 시스템을 구성하였으나, 커플러를 사용하여 각 센서마다의 일정 광량을 조절해줌으로써 최대 수십여개의 다중화 센서를 구현할 수 있다. 향후 이러한 연구결과를 토대로 토목이나 건축물의 변위량인 수십 cm에서 수 m의 아주 큰 변위를 재는 변위센서로 개량하는 연구와, 동시에 정밀도를 높이기 위하여 OTDR과 센서의 각 부분의 정밀도를 향상시키는 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학재단 우수연구센터 사업인 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원으로 수행 되었습니다.

### 참고문헌

- [1] Eric Udd, *Fiber Optic Smart Structure* (John Wiley & Sons, Inc. New York USA, 1995) p.1-21.
- [2] Dietrich Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides* (ACADEMIC PRESS, INC. Boston 1991).
- [3] J. N Fields et. al., "Fiber Optic Pressure Sensor," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 67, no. 3, pp. 816-818, 1980.
- [4] Eric Udd, *Fiber Optic Smart Structure* (John Wiley & Sons, Inc. New York USA, 1995) pp. 319-360.
- [5] John W. Berthold, "Historical Review of Microbend Fiber-Optic Sensors," *J. Lightwave Technol.* vol.13 no.7 1995.
- [6] D. J. Bak, *Optical Fiber Sensor Pressure* (Des, News, March 1986).
- [7] C. K Asawa et. al., "High-Sensitivity Fiber-Optic Strain Sensors for Measuring Structural Distortion," *Electron, Lett.*

- vol. 18, no. 9, pp. 362-364, 1982.
- [8] R. C. Gauthier and C. Ross, "Theoretical and experimental considerations for a single-mode fiber-optic bend-type sensor," *Applied Optics*, vol. 36, no. 25, 1997.
- [9] J. S. Schoenwald et. al., "Evaluation of an OTDR Microbend Distributed Sensor," *Proc. SPIE*, vol. 986, pp. 150-157, 1988.
- [10] D. Marcuse, "Curvature loss formula for optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.* 66, pp. 216-220, 1976.
- [11] Allan W. Snyder and John D. Love. *Optical waveguide Theory* (Chapman and Hall, London, 1983) pp. 250-290.

## Multiplexed Bend Loss Type Single-Mode Fiber-Optic Displacement Sensor Using Reflection Signals Generated at Optical Connectors

Jung-Ae Yoo and Jae Heung Jo

*Applied Optics and Electromagnetics, School of Natural Sciences, Hannam University, Ojung-dong 133, Daeduk-gu, Daejeon 306-791, KOREA*

Il-Bum Kwon<sup>†</sup>

*Smart Measurement Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Doryong-dong 1, Tyseong-gu, Daejeon 305-340, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: [ibkwon@kriss.re.kr](mailto:ibkwon@kriss.re.kr)

(Received March 16, 2004, Revised manuscript September 17, 2004)

We propose and present a new multiplexed bend loss type single-mode fiber-optic sensor system for displacement measurement in order to measure the displacement of several mm of civil engineering structures such as bridges and buildings. We make a bend loss type fiber-optic sensor for measuring displacements using the signal difference between two reflection signals due to various bend losses generating at a pair of optical connectors by using the optical time domain reflectometer. And we fabricate a multiplexed bend loss type fiber-optic sensor detecting linear displacements of 4 measuring positions of an object by setting these new 4 fiber-optic sensors on a single mode fiber simultaneously. We find that the multiplexed fiber-optics displacement sensor has linearity of 0.9942, maximum displacement of 6 mm, and accuracy of 6% for 4 measuring points.

OCIS Codes : 060.2370. 060.2430. 120.4630.