

대변위 측정을 위한 다중화된 광섬유 센서

유정애 · 권일범*[†] · 조재흥 · 서대철*

A multiplexed fiber-optic sensor for measuring large displacement

Jung-Ae Yoo, Il-Bum Kwon*[†], Jae Heung Jo, and Dae Cheol Seo*

Abstract

A multiplexed bend loss type single-mode fiber-optic sensor system was prepared to measure the displacement of several cm of the civil engineering structures such as many bridges, tunnels and various buildings. This bend loss type fiber-optic sensor used the signal difference between two reflection signals due to various bend losses generating at a pair of optical connectors by using OTDR (optical time domain reflectometer) for measuring displacements. And the experiments were conducted for showing the measurement feasibility on the range of 10 cm, and the multiplexing experiments were also performed to measure the displacements of 5 measuring positions of an object by setting these 5 fiber-optic sensors on a single mode fiber simultaneously.

Key Words : Fiber-optic sensor, Bend loss, OTDR, Displacement measurement, Multiplexing

1. 서 론

현대의 교량, 건축물 등의 토목 구조물과 각종 발전 및 생산설비의 기계구조물은 사회 구조의 성장에 따라 점차 대형화, 복잡화 되고 있다. 이에 따라서 과거에는 다소 소홀히 여겨졌던 구조물의 안정성과 건전성 평가에 대한 중요성이 부각되고 있다. 특히 예기치 않았던 구조물의 갑작스러운 손상이나 오랜 사용으로 인한 노후화 및 피로에 대한 파손 가능성 감시 시스템의 구축은 시대적으로 필요한 과제라 할 수 있다.

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 센서로서 주목 받게 되었다. 또한 이러한 광섬유센서는 항공우주분야, 의료기기분야, 토목구

조물 등에 적용되어지고 있다^[1-3].

굽힘으로 인한 광섬유의 광 손실은 광통신분야에서 주된 관심대상이었다. 이러한 미소 굽힘으로 인한 광 모드결합 효과에 대한 이론은 Marcus와 Gloge 등의 연구자들에 의해 체계화되었다^[4]. 굽힘으로 인한 광손실은 통신 분야에서는 유해한 현상이기 때문에 가능한 한 이를 줄이기 위한 연구가 수행되었지만, 광섬유의 굽힘 광손실이 센서로서 이용될 수 있다는 아이디어가 나온 이후로 광섬유 센서분야에서는 유용한 효과로 인식되고 있다^[5,6]. 이 이후로 굽힘 손실을 이용하여 다양한 물리 현상을 측정하기 위해서 많은 혁신적인 기법들이 도입되어 왔다^[7,8]. 최근의 굽힘형 광섬유센서의 연구에서는 원주길이에 대한 광손실을 정량적으로 분석하였으며^[9], OTDR을 이용한 다수의 굽힘형 센서를 연속적으로 붙여서 이용하는 연구에서는 5 km 이상의 거리내에서 일어나는 변위를 측정할 수도 있음을 밝혔다^[10]. 또한 최근에 굽힘 손실을 이용하여 구조물에서 발생하는 수 mm의 변위도 측정가능한 센서가 개발되었다^[11].

본 논문에서는 광커넥터의 양끝에서 반사되는 빛의 신호차이가 커넥터들 사이에서 발생하는 굽힘 변위에 의해서 달라지는 것을 OTDR로 측정하여 변위 센서로 제작하였다. 또한 수 cm에서 수십 cm의 변위를 일

한남대학교 물리학과(Department of Physics, Hannam University)
*한국표준과학연구원 스마트측정그룹(Korea Research Institute of Standards and Science, Smart Measurement Group)

[†]Corresponding author: ibkwon@kriss.re.kr

(Received : January 14, 2005, Accepted : February 16, 2005)

키는 구조물의 변위를 측정하기 위하여 동일한 단일모드 광섬유에서 이 센서 5개를 직렬형으로 배열하여 사용할 수 있는 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서를 제안하고, 이를 통하여 구조물의 각 변위지점에서 독립적으로 센서가 정확하게 변위를 측정함을 확인하였다.

2. 굽힘 손실 이론

광손실형 광섬유 센서는 광섬유의 굽힘에 따른 광손실에 근거를 두기 때문에 굽힘 손실형 광섬유 센서라고 한다. 직선으로 뻗은 단일모드 광섬유에 작은 직경의 굽힘이 가해질 때, 전형적인 광파워의 손실은 순수 굽힘 손실(pure bend loss)과 모드전환 손실(mode transition loss)에 의해 발생한다^{9,12)}.

순수 굽힘 손실은 코어 굴절률이 n_{co} 이고 클래딩의 굴절률은 n_{cl} 인 광섬유가 굽은 영역에서 파장 λ 의 입사파에 대한 단일 횡모드의 입사각이 작아짐으로써 이 횡모드의 세기 분포중 가장자리 부분이 광섬유를 도파하지 못하고 새나가는 손실현상을 말한다. 그림 1은 이러한 순수 굽힘 손실의 메커니즘을 보여주는 것으로 광섬유에 굽힘이 가해지기 전에 직선으로 뻗은 부분에서는 손실없이 파워 P_0 의 횡모드가 광섬유 축을 따라 전파한다. 그러나 구부림이 있을 경우, 이 부분이 반경 r_b 와 각 ϕ 를 갖는 원형으로 구부러진다. 그러면 이 굽힘 영역에서의 모드파면은 굽힘의 곡률 중심으로부터 방사거리에 선형적으로 의존하는 속도로 전파될 것이다. 모드파면의 각위상속도(angular phase velocity)와 광섬유 속을 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 굽힘 손실에 의한 없어진 파워를 제외하고 진행한 파워는 $P(r_b, \phi) = P_0 - P_c$ 가 된다.

굽힘 광섬유의 일정한 곡률 와 접촉하는 호의 길이에 따른 진행한 후의 순수 굽힘 손실에 의해 없어지고 남은 진행 파워 $P(s)$ 에 대한 표현은 아래와 같다¹³⁾.

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

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi} \left(\frac{a}{2a r_b}\right)^{1/2} V^2 W^{1/2}}{U^2} \exp\left[-\frac{4r_b W^8 \Delta}{3a V^2}\right] \tag{2}$$

여기에서

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

$W = a(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{1/2}$ 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. β 의 표현에서 k_0 는 진공 중에서의 전파상수이며, θ 는 광섬유 코어 내에서 코어와 클래딩의 경계로 입사하는 광선이 경계면의 입사점에서 세운 법선과 이루는 각도이다. 이 $\beta < n_{cl} k < \beta < n_{co} k$ 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 뻗은 광섬유 영역과 비교해서 거리 δ 만큼 반

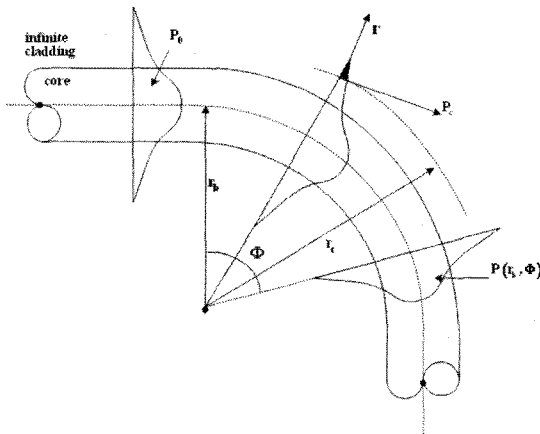


그림 1. 순수 굽힘 손실 메커니즘
Fig. 1. Mechanism of pure ending loss.

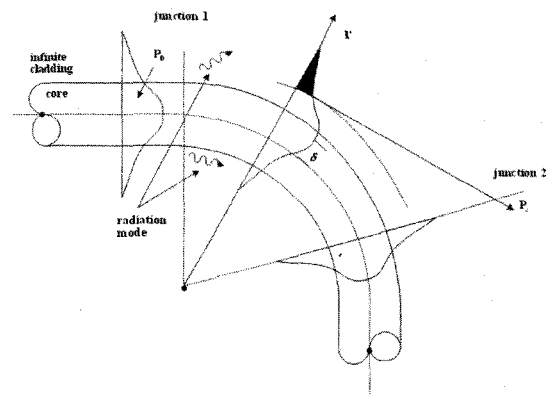


그림 2. 모드 전환 손실 메커니즘
Fig. 2. Mechanism of mode transition loss.

경의 바깥부분으로 옮겨진다. 광섬유의 끝은 부분과 굽힘 부분 사이의 교차점 1(junction 1)에서 입사 파위의 일부는 굽힘 영역으로 진행하고 남아있는 파위는 클래딩과 그 외곽의 코팅층 영역에서 방사 모드(radiation mode)와 결합한다. 이러한 진행과 방사 모드의 파워결합 과정은 광섬유가 굽었다가 다시 직선으로 펴지는 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 파위의 증가에 따라 순수 굽힘 손실의 증가에도 영향을 준다.

3. 굽힘 손실을 이용한 광섬유 센서의 원리

앞서 설명한 굽힘 손실을 이용한 굽힘손실형 광섬유 센서는 그림 3과 같이 OTDR과 2개의 광커넥터(optical connector), 즉 기준 광커넥터(reference connector: RC) 와 감지 광커넥터(sensing connector: SC)로 구성한다. OTDR은 펄스광을 광섬유에 입사한 후 되돌아오는 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 굽힘에 의한 손실이 발생할 경우, 손실 지점의 이전에 있는 RC에서의

신호는 굽힘 손실에 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(V_r)와 감지신호(V_s)의 전형적인 형태를 그림 4에서 볼 수 있다. 광섬유에 굽힘을 가해주게 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 δ 가 선형적으로 변하는 범위 내에서는 기준신호와 감지신호로부터 굽힘 변위를 아래와 같이 구할 수 있다.

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

식 (3)에서 볼 수 있듯이 굽힘 변위 정도인 δ 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 신호 값들에서 구한 비례상수이다. 식 (3)에서와 같이 센서로부터 얻어지는 기준신호와 감지신호로부터 일정한 곡률반경으로 굽혀져서 손실이 발생하는 호의 길비 변화와 동일한 굽힘 변위를 구할 수 있기 때문에 이를 센서로 이용할 수 있다.

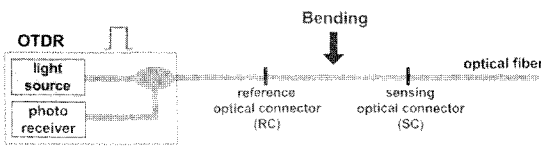


그림 3. 굽힘손실을 이용한 광섬유 센서의 원리
Fig. 3. Principle of fiber optic sensor using bending loss.

4. 굽힘 손실 특성 실험

광섬유 굽힘에 의한 광손실을 측정하기 위해 광섬유 (SUMITOMO,DSF)에 그림 5의 FC/PC 형태의 광커넥터(SM, 0.9 mm Korea Electric Terminal Co., LTD)를 설치하였다. 실험에 사용된 광섬유는 단일모드 계단형 굴절률 광섬유이며, 코어 반경이 4.15 μm , 코어 굴절률 1.467, 클래딩 굴절률 1.465인 단일모드 광섬유와 파장 1600 nm의 OTDR (FIBERPRO)을 사용하였다. OTDR의 전체적인 신호를 그림 5에서 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 광섬유에 설치된 두 개의 커넥터로부터 반사되는 기준신호와 감지신호가 정확하게 나타나며, 이를 이용하여 광손실을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

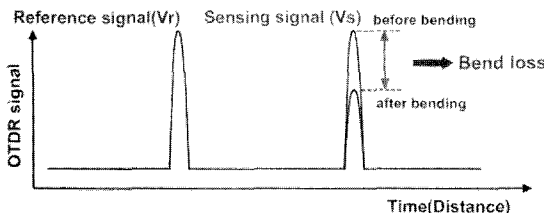


그림 4. OTDR에 나타나는 기준신호와 감지신호의 전형적인 형태
Fig. 4. Reference and sensing signals of fiber optic OTDR sensor.

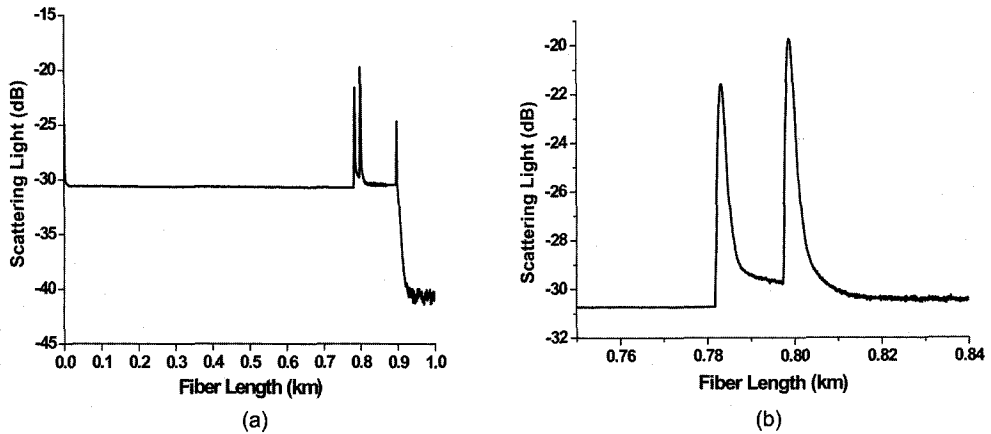


그림 5. OTDR 신호: (a) 전체 신호, (b) 기준 신호와 감지 신호
 Fig. 5. OTDR signal: (a) total signal and (b) reference and sensing signals.

4.1. 굽힘 직경변화에 대한 광손실 측정

이론과 여러 참고 논문들에서 볼 수 있듯이 일정한 크기의 변위에 대해서 광섬유 굽힘 직경이 큰 경우가 직경이 작은 경우보다 광손실이 적다^[3-11]. 이처럼 광섬유 굽힘에 대해서 굽힘으로 인한 자체 광손실이 적어야 한다는 측면에서 보면 굽힘 직경이 큰 것이 좋고, 변위에 대한 센서의 감도의 측면에서 보면 굽힘 직경이 작은 것이 좋다. 따라서 이 두 점을 고려하여 볼 때 적은 광손실을 유발함과 동시에 가해진 변위에 대한 센서의 감도를 높일 수 있는 적절한 크기의 굽힘 직경을 만들어 주는 것이 필요하다. 이를 위해서 광커넥터를 이용한 RC와 SC 사이의 광섬유를 그림 6의 (a)와 같은 다단 스테인레스 봉에 감아서 굽힘 손실을 주는 장치들을 설치하였다. 이 스테인레스 봉을 사용하여 광섬

유 굽힘 직경을 8 mm에서 32 mm까지 2 mm 간격으로 변화시켜가면서 출력단에서 나오는 반사광의 신호를 OTDR로 측정하였다. 그림 6의 (b)에 나타난 그래프는 그림 6의 (a) 장비를 이용하여 단일모드 광섬유의 굽힘 직경에 따른 OTDR의 신호를 측정 한 후, 굽힘에 의한 OTDR 반사 신호의 변화율(기준 OTDR 신호를 기준으로 굽힘으로 인해 줄어든 OTDR 신호의 비)이 얼마나 줄어들었는지를 측정하기 위하여 이를 식 (3)에서 사용한 정규화된 OTDR 신호인 $(V_r - V_s)/V_r$ 로 계산한 결과이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 굽힘 직경 8 mm에서 12 mm 사이에서 광손실의 변화율이 가장 크게 일어남을 볼 수 있다. 따라서 본 실험에서는 변위 측정용 굽힘 손실형 광섬유 센서를 제작할 때 변위에 대한 굽힘 직경이 8 mm에서 12 mm 사이에서 변하는 영역만을

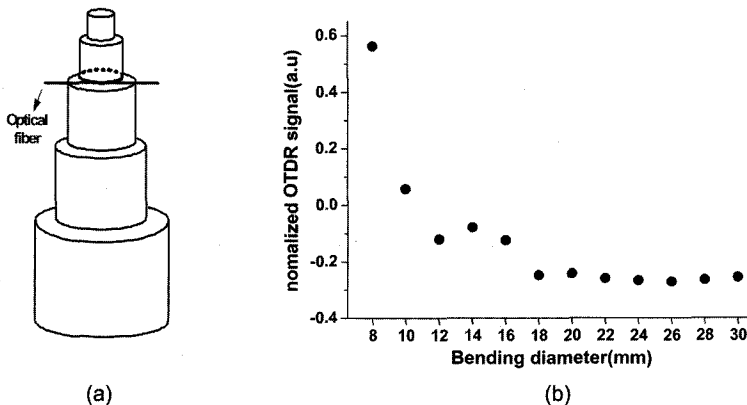


그림 6. 굽힘 직경에 대한 광손실: (a) 굽힘 치구, (b) 굽힘 손실
 Fig. 6. Loss according to bending diameter: (a) bending jig and (b) loss.

선택할 수 있다.

4.2. 굽힘 호의 길이 변화에 대한 광손실 측정

앞서 실험한 그림 6의 (a)의 굽힘 직경 변화에 대한 광손실의 실험결과를 그림 6의 (b)에 보였다. 그림 6에서는 굽힘 직경이 적어도 16 mm 이하여야만 신호 변화가 있음을 볼 수 있다. 이 실험 결과를 토대로 OTDR 신호의 변화가 가장 크게 일어나는 직경 8, 10, 12, 14 mm에서 각각 호의 길이를 변화시키면서 OTDR 신호의 변화율을 측정한 결과를 그림 7에서 보여주고 있다. 그림 7의 (a)와 같이 일정 반경을 갖는 원통의 원주상에서 같은 간격의 5개의 위치를 정하여 광섬유를 차례대로 감은 후 호의 길이 변화에 따른 광 손실을 측정한 결과, 그림 7의 (b)에서 보듯이 기준신호는 굽힘 호의 길이변화에 대해 일정한 값을 가지며, 그림 7(c)의 감지 신호는 초기 굽힘 직경이 작을수록 굽힘 호의 길이가 클수록 광손실이 크게 발생하며, 이에 따라 커

벡터의 반사신호가 감소하게 된다. 그림 7(d)는 굽힘 호의 길이 변화에 의한 OTDR 반사 신호의 변화율을 측정하기 위하여 식 (3)에서 사용한 정규화된 OTDR 신호인 $(V_r - V_s)/V_s$ 로 계산한 결과이다. 이 경우에서 보듯이 직경이 작을수록, 굽힘 호의 길이가 길수록 광 손실이 크게 발생함을 알 수 있는데, 이는 식 (1)과 (2)에서 예측하였던 바와 일치한다. 또한 굽힘 직경이 작을수록 광 손실의 변화율이 가장 크게 일어나면서 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 그림 7의 (d)는 직경 8 mm에서 굽힘 호의 길이변화에 대한 OTDR 신호의 반복실험 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 5회 반복 실험한 결과 신호 변화율이 거의 없기 때문에 센서로 이용하기에 아주 적절함을 알 수 있다.

4.3. 굽힘 호의 길이 변화에 대한 광손실 : 이론값과 실험값의 비교

그림 8은 8 mm의 직경에 대한 굽힘 호의 길이 변화

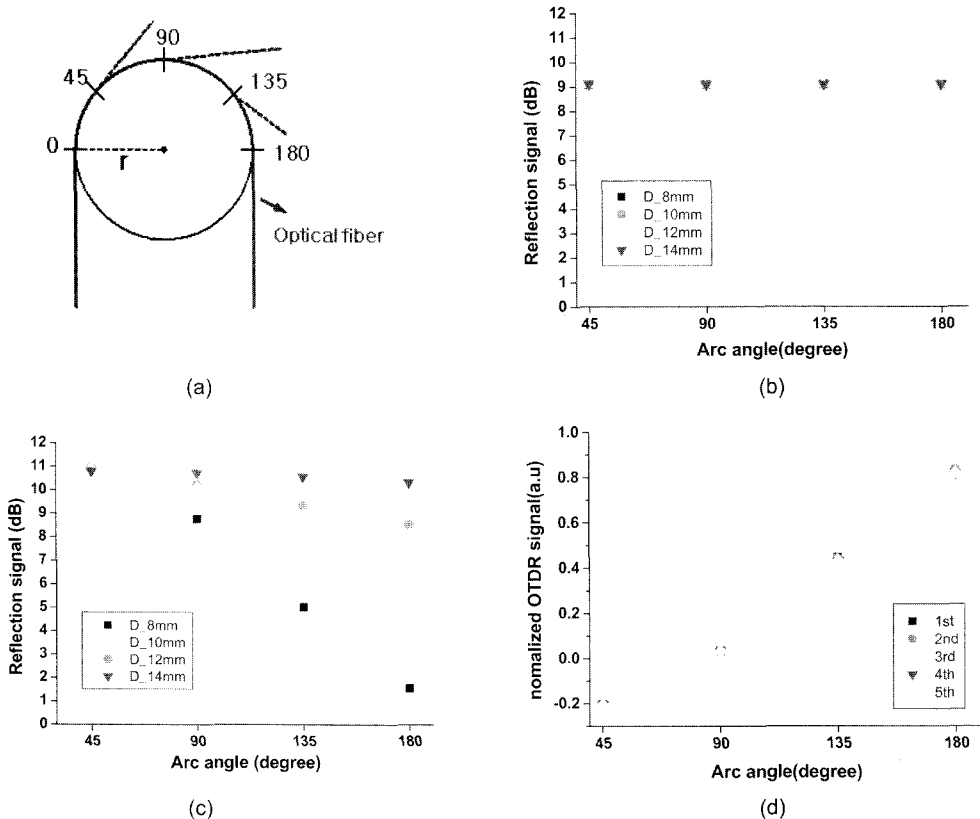


그림 7. 굽힘 호의 길이변화에 대한 광손실: (a) 굽힘 호의 길이 변화, (b) 기준 신호, (c) 감지 신호, (d) 반복 실험 데이터 Fig. 7. Loss according to bend arc length: (a) change of bend arc length, (b) reference signal, (c) sensing signal, and (d) repetition test data.

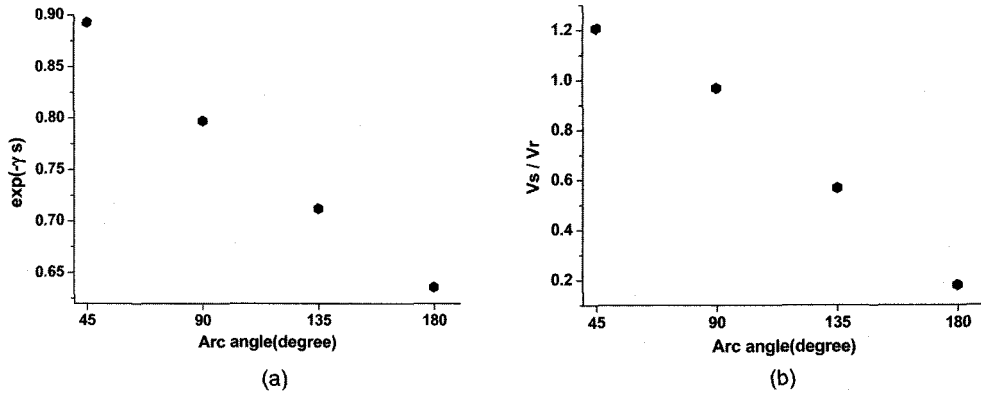


그림 8. 광손실의 비교: (a) 계산값, (b) 실험값 [초기 직경 8 mm]
 Fig. 8. Comparison between theoretical value and experimental value.

에 대한 광손실 실험값을 앞서 설명한 이론에 근거하여 계산한 결과를 비교한 결과이다. 식 (1)에서 $P(s)/P_0$ 는 입력 파워에 대한 출력 파워이므로 굽힘이 가해지기 전의 기준신호와 굽힘이 발생한 후 나타나는 감지 신호의 비로써 실험적으로 구한 값, 즉 V_s/V_r 이다. 그리고 이론값인 $\exp(-\gamma s)$ 는 실험에 사용한 파라미터를 대입해 식 (2)를 이용하여 구한 감쇄상수 γ 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 있다. 이로부터 본 논문에서 연구한 호의 길이변화를 이용한 굽힘 손실형 변위센서는 이론적인 타당성 뿐만 아니라 실험적 적용 가능성을 찾을 수 있다. 그림 6에서 그림 8까지의 실험적 결과들로부터 굽힘 호의 길이 변화가 광손실에 의한 OTDR 신호의 선형적으로 비례하는 영역을 알 수 있기 때문에 이를 이용한 광섬유 변위센서를 제안하고 센서 제작의 기초 자료로 사용하였다.

5. 변위 측정 실험

앞서 실험한 굽힘 호의 길이변화에 대한 OTDR 신호 변화율을 이용하여 변위센서를 제작하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 광손실이 크게 발생하며 선형적인 변화를 보이는 8 - 12 mm의 굽힘 직경을 사용하여 변위센서를 제작할 경우, 굽힘 호의 길이는 3 cm 이하이므로, 실제 변위 측정 범위 또한 수 cm 이하로 제한된다. 그러나 구조물의 안정성 감시를 위한 센서로 사용하기 위해서는 수 cm 혹은 수십 cm의 변위를 측정할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 광섬유 굽힘 호의 길이 변화에 대해 실제 변위가 약 10배 증폭할

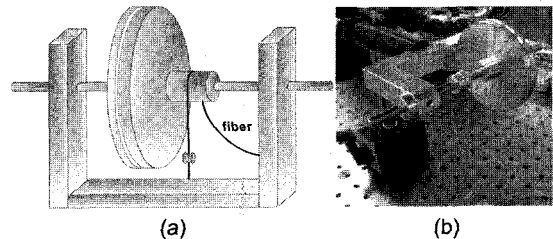


그림 9. 굽힘 손실을 이용한 변위계: (a) 개념도, (b) 사진
 Fig. 9. Displacement with bend loss: (a) conceptual diagram and (b) photograph.

수 있는 기능을 갖도록 변위계를 제작하였다. 그림 9는 제작된 변위계를 보여준다. 그림에서 보듯이 크기가 다른 두 개의 원판을 축에 고정시키고, 작은 원판의 한 점에 광섬유를 고정시킨다. 커다란 원판을 회전시킬 경우, 축이 회전함에 따라 작은 원판 또한 회전하게 되고 이에 따라 광섬유가 감기게 되는 것이다. 이때 같은 각의 회전에 의한 두 개의 원판에서의 호의 길이 변화는 다르다. 예를 들어 원판을 45도 회전시킬 경우 커다란 원판의 호의 길이는 작은 원판의 호의 길이에 비해 약 10배가 크다. 따라서 광섬유의 굽힘 호의 길이 변화를 이용하여 실제 수 cm 혹은 수십 cm의 변위 측정이 가능하다. 실제 제작된 변위계는 큰 원판의 직경을 6.49 cm, 작은 원판의 직경을 1.3 cm로 제작하였으며, 광섬유가 원통에 한 바퀴 감기게 될 경우에 커다란 원판의 호의 길이인 20 cm 이상의 변위를 측정할 수 있게 되는 것이다. 제작된 변위계를 이용하여 실제 변위를 측정할 경우에는 측정하고자 하는 구조물의 변위가 발생하는 지점에, 변위계의 커다란 원판에 줄을 감아서 연결한 기둥을 세워둔다. 따라서 변위가 발생함에 따라

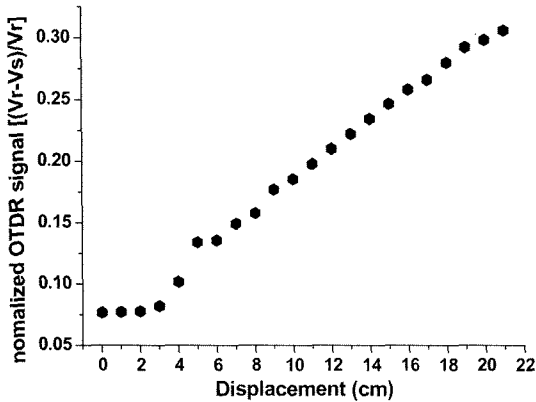


그림 10. 변위에 대한 OTDR 신호
Fig. 10. OTDR signal according to displacement.

줄이 당겨지거나 느슨해지게 되고 이에 따라 커다란 원판이 회전함으로 인해 광섬유가 감기는 작은 원판 또한 회전하게 되어 광섬유의 굽힘 발생하며, 이때 나타나는 광손실에 의한 각 커넥터의 반사 신호를 측정하여 변위를 알아낼 수 있는 것이다.

그림 10은 제작된 변위계를 이용하여 1 cm 간격으로 변위 22 cm를 측정된 결과이다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 변위가 커질수록 광손실에 의한 OTDR 신호는 증가함을 알 수 있다. 또한 변위 4 cm~22 cm 구간에서 선형성이 우수하여 변위센서로 적용이 가능함을 볼 수 있다. 초기의 1~3 cm 변위 구간에서 OTDR 신호변화가 거의 나타나지 않은 것은 광손실이 발생하지 않은 것이며, 다시 말해서 광섬유의 굽힘이 발생하지 않은 원형형태로 구부러지지 않은 결과이다. 이는 변위 측정시에 광섬유 초기 위치를 정확하게 결정함으로써 보완이 가능하다. 또한 전체적인 신호의 오차의 원인으로서는 광섬유코팅의 단단한 성질로 인해 광섬유가 정확한 원형의 형태로 구부러지지 않음으로 인한 것, 즉 변위계의 작은 원판에 광섬유가 감길 때 원판의 홈에서 광섬유가 아주 미세하게 밖으로 휘어짐이 발생한다. 이러한 원인에 의해 전체적인 선형성에 미세한 오차가 발생하지만, 이는 광섬유에 매다는 추의 무게를 적절히 조절함으로써 보완할 수 있으며, 이로부터 보다 나은 실험 결과를

얻을 수 있을 것으로 보인다. 변위에 따른 OTDR 신호를 측정된 실험 결과로부터 제작된 변위계는 구조물의 안정성 감시를 위한 수십 cm의 변위를 측정하는 센서로 적합함을 알 수 있다.

6. 다중화 센서 시스템

앞서 제작한 굽힘 손실형 광섬유 변위센서 5개를 직렬형으로 배열하여 그림 11과 같이 5군데의 변위지점을 동시에 측정할 수 있도록 다중화된 광섬유 변위센서 시스템을 구성하였다. 각 변위센서는 5 m 길이의 광섬유 끝단에 FC/PC 광커넥터로 연결하여 제작하였으며, 각 변위센서 사이에는 약 200 mm 길이의 광섬유를 설치하였다. 그림 12는 센서 1부터 센서 5까지 다중화된 굽힘 손실형 광섬유 변위센서에 OTDR의 광원에서 5 ns의 펄스 레이저광을 입사시켜서, OTDR 신호를 측정된 것이다. 각 변위센서로부터 기준신호와 감지신호가 정확히 나타나며, 이로부터 각 센서에서 감지신호의 광강도 차이를 읽음으로써 변위 측정이 가능함을 확인할 수 있다.

그림 13은 센서 1부터 센서 5까지 독립적으로 변위 1 cm 간격으로 12 cm의 변위를 가하고, 각 센서에서

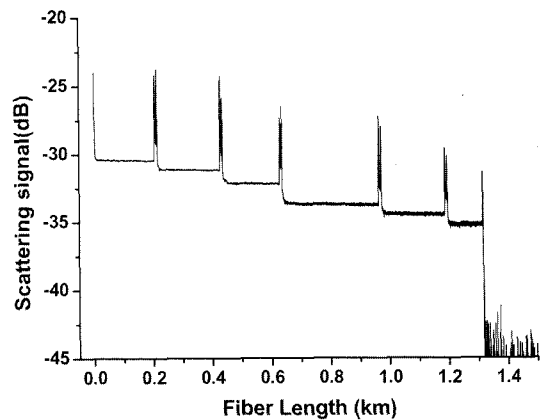


그림 12. 다중화된 센서의 OTDR 신호
Fig. 12. OTDR signals from multiplexed fiber optic displacement sensors.

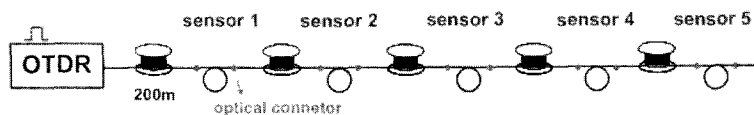


그림 11. 다중화된 광섬유 변위센서 시스템
Fig. 11. Multiplexing of fiber optic displacement sensor with bend loss.

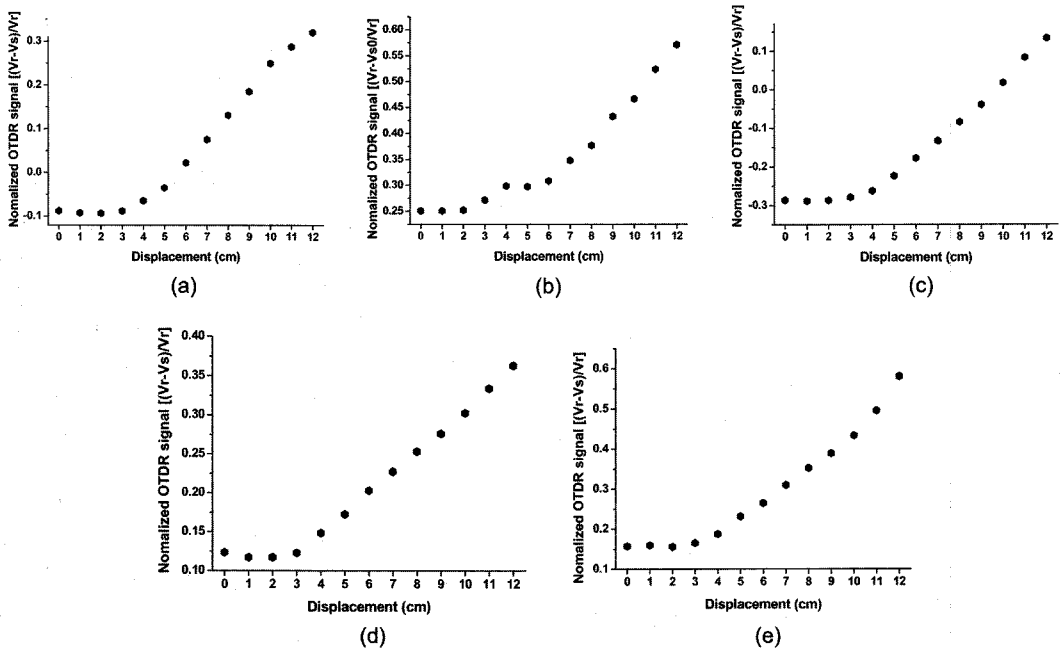


그림 13. 5개의 센서로부터의 OTDR 신호: (a) 센서 #1, (b) 센서 #2, (c) 센서 #3, (d) 센서 #4, (e) 센서 #5
 Fig. 13. OTDR signals from 5 sensors: (a) Sensor #1, (b) Sensor #2, (c) Sensor #3, (d) Sensor #4, and (e) Sensor #5.

변위에 대한 OTDR 신호를 측정한 결과이다. 각 센서마다 변위에 대한 광손실이 선형적으로 증가한다. 특히 변위 3~12 cm 구간의 선형성이 우수하며, 초기의 0~3 cm 변위 구간에서는 광손실이 발생하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 변위 측정의 초기 위치를 변위 3 cm 구간에 두고 실험을 진행하기로 한다.

앞서 설명하였듯이, 본 연구에서는 광섬유 한 가닥

에 변위센서를 직렬형으로 배열하여 다중센서 시스템을 구성하였다. 따라서 여러 개의 변위센서를 설치하여서 앞선 센서에서 많은 양의 광손실이 발생할 경우, 후 반부의 센서에서는 광강도의 저하로 신호가 나타나지 않을 수 있다. 따라서 본 실험에서는 각 센서에 최대 변위를 주고, 마지막 센서에서 변위에 대한 광손실을 측정할 수 있는지를 조사함으로써, 최대로 설치할 수

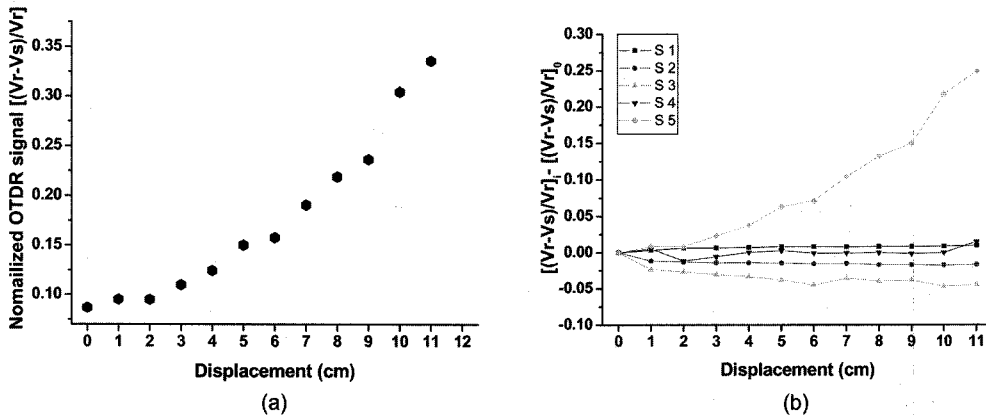


그림 14. 다중화된 센서의 변위에 대한 OTDR 신호: (a) 변위에 대한 OTDR 신호, (b) OTDR 신호 변화량
 Fig. 14. OTDR signals according to displacements from multiplexed sensors: (a) OTDR signals according to displacements and (b) changes of OTDR signals.

있는 센서의 수를 결정하는 실험을 하였다. 센서 1, 2, 3, 4에 10 cm의 변위를 가하고, 이때 센서 5에서 변위에 대한 광손실을 측정하여 결과를 그림 14에서 보여주고 있다. 그림 14(a)에서 볼 수 있듯이, 센서 5에서 변위에 대한 OTDR 신호는 비교적 선형적으로 나타나며, 이로부터 본 연구에서는 5개의 변위센서를 갖는 다중센서 시스템이 가능함을 알 수 있다. 그림 14(b)는 각 센서에서 나타나는 신호를 각 변위에 대한 OTDR

신호에서 변위초기값의 차를 구한 것이다. 센서 1에서 센서 4는 신호변화가 거의 없으나, 예상대로 센서 5에서 OTDR 신호는 변위에 따라 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다.

본 연구의 실험 결과를 토대로 실제 변위센서를 이용할 경우, 변위에 따른 OTDR 신호로부터 실제 가해진 변위를 읽을 수 있어야 한다. 따라서 앞서 이론부분에서 설명하였던 식 (3)을 사용하여, 실험에서 나타나

표 1. 각 센서별 비례상수 C값
Table 1. Proportional constants, C, of sensors

Displacement (cm)	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
0	0	0	0	0	0
1	43.37953586	20.90237693	42.44670874	40.1291098	32.61112362
2	38.11123516	43.08129915	31.92052284	40.83868319	26.93286171
3	27.29288387	51.98761463	27.47740809	37.80022171	27.94176291
4	24.56406394	41.10612072	26.00437593	38.57684546	26.1720932
5	22.88900788	39.57811204	24.72675326	38.53907792	25.59203465
6	22.02705419	32.99169358	24.28466495	39.28468964	25.82542892
7	20.78755967	32.4604409	23.04350226	39.11262627	25.29779566
8	21.33297244	29.32902564	21.6442161	38.03565852	23.64987753
9	22.09369517	28.13564581	21.44483063	37.5907735	21.27317913

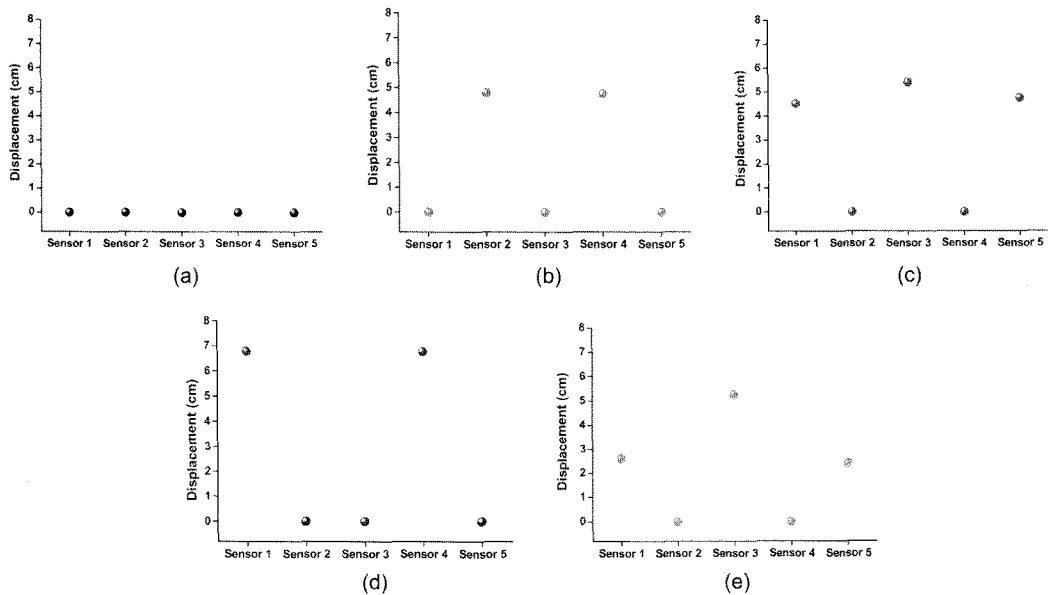


그림 15. 다중화 센서 시스템의 변위 측정: (a) 센서 1부터 센서 5까지 변위 0 cm, (b) 센서 2, 4에 변위 5 cm, (c) 센서 1, 3, 5에 변위 5 cm, (d) 센서 1, 4에 변위 7 cm, (e) 센서 1, 5에 변위 3 cm, 센서 3에 변위 5 cm
Fig. 15. Displacement measurements from multiplexed sensors: (a) displacement 0 cm on sensor #1-#5, (b) displacement 5 cm on sensor #2, #4, (c) displacement 5 cm on sensor #1, #3, #5, (d) displacement 7 cm on sensor #1, #4, and (e) displacement 3 cm on sensor #1, #5, displacement 5 cm on sensor #3.

는 두 개의 반사신호인 기준신호와 감지신호를 정규화한 OTDR 신호의 초기값과 변위 후 발생하는 값의 차이로부터 비례상수 C 값을 구할 수 있다. 표 1은 각 센서별로, 변위구간별로 상수 C 값을 나타낸 것이다.

다중화된 센서 시스템에서 각 센서에 임의의 변위를 가해주고 이때 나타나는 OTDR 신호와 앞서 구한 비례상수 C 값을 계산하여 변위값을 구하고, 이 값이 실제 가해진 변위와 정확한지 실험하였다. 다중화된 센서 시스템으로부터 변위를 측정된 결과를 그림 15에서 보여주고 있다. 그림 15(a)는 5개의 센서에 변위를 가하지 않은 상태이다. 그림 15(b)는 센서 2, 센서 4에 변위 5 cm를 가한 경우이고, 그림 15(c)는 센서 1, 센서 3, 센서 5에 각각 5 cm의 변위를 가한 경우이다. 그림 15(d)는 센서 1, 센서 4에 변위 7 cm를 준 경우이고, 그림 15(e)는 센서 1, 센서 5에 변위 3 cm를 그리고 센서 3에 변위 5 cm를 가한 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 각 센서에 임의의 변위를 가해주었을 때, 서로 다른 위치에 설치된 변위센서의 신호를 독립적으로 측정할 수 있을 뿐만 아니라 각각의 위치에서 발생하는 변위를 정확하게 구별할 수 있다. 측정된 변위값과 실제 가해진 변위 사이의 오차는 약 ± 2.5 mm이며, 이는 수십 cm의 변위를 측정하는 구조물의 안정성감시 시스템에 적용할 수 있는 값이다. 또한 제작된 변위계의 원판의 직경을 조절함으로써 보다 넓은 범위의 변위 측정이 가능함을 알 수 있다.

본 연구에서는 제작된 변위센서를 실제적으로 산사태나 터널의 붕괴등과 같은 자연재해로 인한 피해를 줄이기 위해 경사면의 안정성 감시를 실시간으로 측정하는 시스템에 적용하기 위해 제작되었다. 앞서 설명한 실험 결과로부터 본 연구에서 설계, 제작하여 실험한 다중화된 굽힘 손실형 광섬유 변위센서는 경사면의 수 m 구간에서 발생하는 수 cm, 혹은 수십 cm의 변위를 다중화된 센서 시스템으로부터 정확히 측정할 수 있음을 확인하였다.

7. 결 론

교량, 건물을 비롯하여 터널 등의 구조물에 발생하는 변위를 한 가닥의 광섬유로 측정하기 위하여 굽힘 손실에 따른 광커넥터의 반사신호가 선형적으로 줄어드는 현상을 이용한 단일모드 광섬유 변위센서를 제안하였다. 그리고 이러한 변위센서의 원리를 확인하기 위한 선행 실험으로써 광섬유 굽힘 직경과 호의 길이 변화에 따른 광손실을 측정하는 광섬유 굽힘 손실 특성을 조사하고, 변위센서 제작의 기초 자료를 결정할 수

있었다. 굽힘 직경 변화에 따른 광손실을 측정된 결과, 신호변화율이 가장 큰 8~14 mm 구간을 초기 굽힘 직경으로 결정하였다. 또한 이들 직경에 대한 굽힘 호의 길이 변화에 따른 광손실을 측정된 결과로부터, 각 직경에 대해서 굽힘 호의 길이 변화에 대한 OTDR 신호가 선형적으로 변화함을 확인할 수 있었다. 또한 굽힘 호의 길이 변화에 따른 OTDR 신호의 실험값과 이론값을 비교한 결과로부터 아주 흡사한 양상을 보임을 알 수 있으며, 따라서 본 연구의 이론적 타당성을 확인하였다. 앞서 실험한 결과를 바탕으로 초기 굽힘 직경을 결정하고, 굽힘 호의 길이 변화에 따른 OTDR 신호를 측정하는 방법으로 변위센서를 제작하였다. 제작된 변위계를 이용하여 변위에 대한 OTDR 신호를 측정된 결과, 선형성이 아주 뛰어나음을 확인하였다. 또한 실험 결과 0~22 cm 영역에서 사용가능하며, 변위 측정 범위 20 cm 이상을 가짐을 확인하였다. 또한 제작된 변위센서를 광섬유 한 가닥에 직렬형으로 배열하여 다중화된 센서 시스템을 구성할 하였다. OTDR 신호는 광섬유의 거리상에 나타난 반사신호의 크기를 읽는 것이므로 서로 다른 위치에 설치된 변위센서의 신호를 독립적으로 측정할 수 있다. 실험을 통해 최대 5개의 변위센서를 가지는 다중센서 시스템을 제작하였고, 이로부터 각 센서에 임의의 변위를 가해주었을 때 각 센서로부터 각 지점에서 발생하는 변위를 정확하게 측정할 수 있었다. 또한 실제 변위센서로 적용하기 위해서 주어진 식을 이용해서, 변위에 대해 발생하는 OTDR 신호로부터 실제 가해진 변위를 읽을 수 있었다. 이때 변위 사이에서 발생하는 오차는 약 ± 2.5 mm이며, 이는 실제 변위센서로 적용 가능함을 확인하였다.

결론적으로 본 논문에서 연구한 광커넥터의 반사를 이용한 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서는 토목구조물의 안정성 감시를 위한 수십 cm의 변위를 측정하는 다중화 센서로 적합함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부와 과학재단 우수연구센터 사업인 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Eric Udd, *Fiber Optic Smart Structure*, John Wiley & Sons, Inc. New York USA, pp. 1-21, 1995.
- [2] 권일범, 김치엽, 최만용, 유제왕, "침입감시를 위한

광섬유 BOTDA 센서의 개발”, *센서학회지*, 제10권, 제3호, pp. 16-25, 2001.

[3] 권일범, 김치엽, 김민수, 이왕주, “광주파수변조 광섬유 간섭형 센서의 개발”, *센서학회지*, 제9권, 제3호, pp. 163-170, 2000.

[4] Dietrich Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, ACADEMIC PRESS, INC. Boston, 1991.

[5] J. N. Fields *et al.*, “Fiber Optic Pressure Sensor”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, no. 3, pp. 816-818, 1980.

[6] Eric Udd, *Fiber Optic Smart Structure* John Wiley & Sons, Inc. New York USA, pp. 319-360, 1995.

[7] John W. Berthold, “Historical Review of Microbend Fiber-Optic Sensors”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, 1995.

[8] 백세종, 권일범, 정철, 유재홍, “광섬유 ROTDR 센서를 이용한 침입 탐지기법의 개발”, *센서학회지*, 제11권, 제4호, pp. 209-217, 2002.

[9] 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.

[10] J. S. Schoenwald *et al.*, “Evaluation of an OTDR Microbend Distributed Sensor”, *Proc. SPIE*, vol. 986, pp. 150-157, 1988.

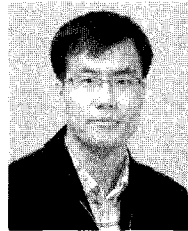
[11] 유정애, 조재홍, 권일범, “광커넥터의 반사를 이용한 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서”, *한국광학회지*, 제15권, 제5호, pp. 415-422, 2004.

[12] D. Marcuse, “Curvature loss formula for optical fibers”, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, pp. 216-220, 1976.

[13] Allan W. Snyder and John D. Love. *Optical waveguide Theory*, Chapman and Hall, London, p. 250-290, 1983.

유 정 애

- 1980년 8월 1일생
- 1999년 한남대학교 광·전자물리학 전공 졸업(이학사)
- 2005년 한남대학교 광·전자물리학과 졸업(이학석사)
- 2005년 ~ 현재 영국, Cambridge, Eurocentres Cambridge에서 이학연수중임
- 주관심 분야 : 광섬유 센서 및 응용, 광계측



권 일 범

- 1963년 5월 12일생
- 1987년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업(공학사)
- 1989년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 1997년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학박사)
- 1989년 ~ 1992년 포항산업과학연구원 강재연구부
- 1997 ~ 현재 한국표준과학연구원 환경안전계측센터 책임연구원
- 주관심 분야 : 광섬유 센서 개발 및 응용, 구조안전 감시기술, 스마트 구조물 설계, 해석 및 제작

조 재 홍

- 1959년 11월 8일생
- 1982년 고려대학교 물리학과 졸업(이학사)
- 1984년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학석사)
- 1987년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사)
- 1987년 ~ 1992년 한국표준과학연구원 레이저연구실 선임연구원
- 1989년 ~ 1990년 독일 PTB 방문연구원
- 2001년 ~ 2002년 (주)엠텍 기술고문
- 1992년 ~ 현재 한남대학교 이과대학 광·전자물리학과 정교수
- 주관심 분야 : 무아레 간섭법, 광계측, 광학계 평가, 광섬유 센서 응용, 에버렛슨트파 응용



서 대 철

- 1971년 5월 9일생
- 1993년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)
- 1995년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 2002년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사)
- 2002년 ~ 2004년 삼성전기 기관사업부
- 2004년 ~ 현재 한국표준과학연구원 환경안전계측센터 선임연구원
- 주관심 분야 : 스마트 센서, MEMS 센서, 광섬유 센서 개발 및 신호처리

