

## 광섬유 OTDR 변위 센서의 탐촉자

### A Probe of Fiber Optic OTDR Displacement Sensor

권일범\*<sup>†</sup>, 김치엽\*, 서대철\*

Il-Bum Kwon\*<sup>†</sup>, Chi-Yeop Kim\* and Dae Cheol Seo\*

**초 록** 광섬유 OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) 센서로 사회 기반 구조물의 변위를 측정하기 위한 탐촉자를 개발하였다. 광섬유 OTDR 변위 센서의 외부에서 주어지는 변위에 따라 광손실을 일으키는 굽힘부와 상용 광섬유 커넥터로 구성되었다. 이렇게 구성된 탐촉자는 광커넥터의 양끝에서 반사되는 빛의 신호차이가 커넥터들 사이에서 발생하는 굽힘 변위에 의해서 달라지는 것을 OTDR 센서 본체로 측정하여 변위 변화를 알아낼 수 있도록 하였다. 또한 수 cm의 변위를 일으키는 구조물의 변위를 측정하기 위하여 동일한 단일모드 광섬유에서 이 센서 탐촉자 5개를 직렬형으로 배열하여 사용할 수 있는 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서를 제안하고, 이 센서 탐촉자들을 사용하여 다중화 실험을 수행하였다.

**주요용어:** 광섬유 OTDR 변위 센서, 탐촉자, 사회 기반 구조물, 다중화

**Abstract** The probes of fiber optic OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) sensor was developed to measure displacements of social infrastructures. This probe was simply constructed with two conventional optical fiber connectors, and a fiber bending part, which transforms displacement to optical loss. When the displacement was affected on the bending loss part, the reflected light intensity of one optical connector was changed. The displacement was determined from this reflected light intensity change of the connector. Fiber optic OTDR displacement sensor was developed as the multiplexed type of one fiber line with 5 sensor probes. Multiplexing operation was tested by these 5 sensor probes.

**Keywords:** fiber-optic otdr displacement sensor, probe, social infrastructure, multiplexing

#### 1. 서 론

광섬유와 반도체 레이저를 이용한 광섬유 센서는 기존의 전자소자 대신에 빛을 이용하여 물체의 변화를 측정하고, 정보의 전달 또한 빛에 의하므로 외란에 의한 전자기적 잡음에 영향을 받지 않는 장점이 있다. 또한 광섬유 자체가 센서로서 넓은 영역의 물리량을 측정할 수 있는 장점을 가진다[1-5].

1980년대 지능형 구조물(smart structure)의 개념이 소개되었으며, 광섬유 센서는 이러한 많은 장점으로 인하여 지능형 구조물의 측정에 적합한 센서로써 주목 받게 되었다. 또한 이러한 광섬유센서는 항공우주분야, 의료기기분야, 토목구조물 등에 적용되어지고 있다[6-8]. 굽힘 손실을 이용하여 다양한 물리 현상을 측정하기 위해서 많은 혁신적인 기법들이 도입되어 왔다[9,10]. 최근의 굽힘형 광섬유센

서의 연구에서는 원주길이에 대한 광손실을 정량적으로 분석하였으며[11], OTDR을 이용한 다수의 굽힘형 센서를 연속적으로 붙여서 이용하는 연구에서는 5 km 이상의 거리내에서 일어나는 변위를 측정할 수도 있음을 밝혔다[12]. 또한 최근에 굽힘 손실을 이용하여 구조물에서 발생하는 수 mm의 변위도 측정가능한 센서가 개발되었다[13]. 본 논문에서는 광커넥터의 양끝에서 반사되는 빛의 신호차이가 커넥터들 사이에서 발생하는 굽힘 변위에 의해서 달라지는 것을 OTDR로 측정하여 변위 센서 탐촉자를 개발하였다. 또한 수 cm 에서 수십 cm의 변위를 일으키는 구조물의 변위를 측정하기 위하여 동일한 단일모드 광섬유에서 이 센서 탐촉자 5개를 직렬형으로 배열하여 사용할 수 있는 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위 센서를 제안하고, 이를 통하여 구조물의 각 변위지점에서 독립적으로 센서가 정확하게 변위를 측정함을 확인하였다.

2. 센서의 측정 원리

굽힘손실형 광섬유 센서는 Fig. 1과 같이 OTDR과 2개의 광커넥터(optical connector), 즉 기준 광커넥터(reference connector: RC)와 감지 광커넥터(sensing connector: SC)로 구성한다.

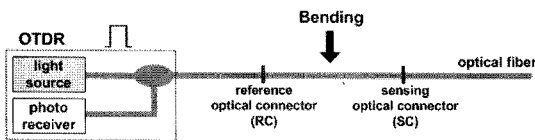


Fig. 1 Fiber optic OTDR displacement sensor

OTDR은 펄스광을 광섬유에 입사한 후 되돌아오는 후방산란광을 측정하여 임의의 위치에서 주어지는 외부의 교란의 크기와 위치를 알아내는데 사용한다.

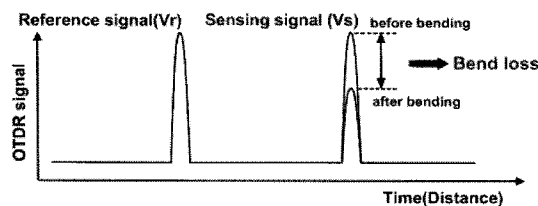


Fig. 2 Typical output signals of fiber optic OTDR sensor with reflectors

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.

Fig. 1의 광섬유 센서에서 시간(또는 광섬유 거리)에 따라 OTDR에서 나타나는 기준신호( $V_r$ )와 감지신호( $V_s$ )의 전형적인 형태를 Fig. 2에서 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  $\delta$ 가 선형적으로 변하는 범위 내에서는 기준신호와 감지신호로부터 굽힘 변위를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\delta = C \left[ \left( \frac{V_r - V_s}{V_r} \right)_i - \left( \frac{V_r - V_s}{V_r} \right)_0 \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 볼 수 있듯이 굽힘 변위 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 신호 값들에서 구한 비례상수이다. 식 (1)에서와 같이 센서로부터 얻어지는 기준신호와 감지신호로부터 일정한 곡률반경으로 굽혀져서 손실이 발생하는 호의 길이 변화와 동일한 굽힘 변위를 구할 수 있기 때문에 이를 센서로 이용할 수 있다.

3. 변위 측정 탐촉자 개발 및 실험

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 이용하기 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 수 있는 기능을 갖도록 변위계를 제작하였다.

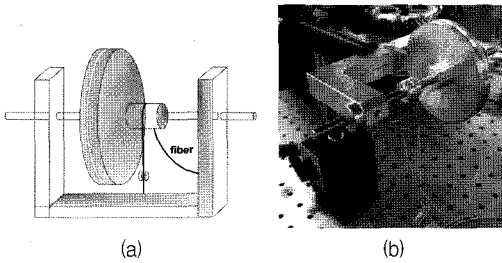


Fig. 3 Experimental setup of displacement sensor: (a) Conceptual diagram, (b) Photograph

Fig. 3은 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 줄이 당겨지거나 느슨해지게 되고 이에 따라 커다란 원판이 회전함으로써 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.

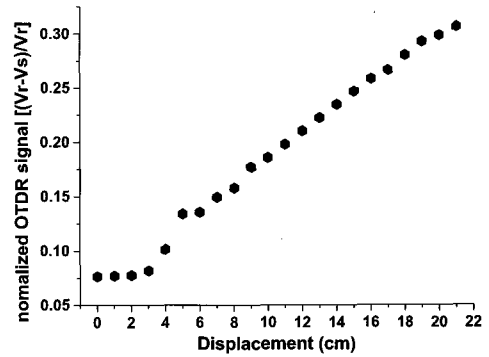


Fig. 4 Normalized signals with respect to displacement



Fig. 5 Manufactured sensor probe

Fig. 4는 제작된 변위계를 이용하여 1 cm 간격으로 변위 22 cm를 측정한 결과이다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 변위가 커질수록 광손실에 의한 OTDR 신호는 증가함을 알 수 있다. 또한 변위 6 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 발생하는 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 발생한다. 변위에 따른 OTDR 신호를 측정한 실험 결과로부터 Fig. 5와 같은 변위 측정을 위한 탐촉자를 제작하였다. 즉 변위 감지를 위한

막대기를 두고 그 막대기의 변위 변화에 따라서 움직이는 회전량을 큰 원판의 회전으로 바꾸고 다시 작은 원판의 회전으로 바꾸어서 작은 원판 둘레에 감겨있는 광섬유의 길이가 변함에 따라서 광 손실 크기가 변화하도록 제작하였다.

4. 다중화 센서 시스템의 구성

굽힘 손실형 광섬유 변위센서 탐촉자 5개를 제작하고 직렬형으로 배열하여 Fig. 6과 같이 5곳의 변위 발생 지점을 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 m 길이의 광섬유를 설치하였다. Fig. 7은 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.

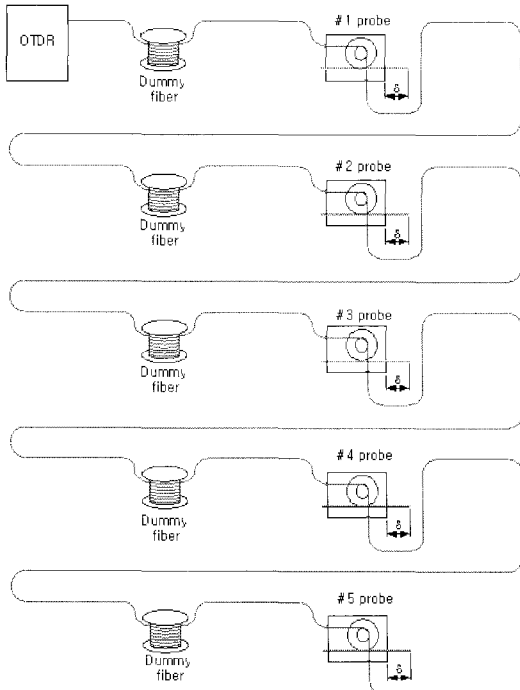


Fig. 6 Multiplexed fiber optic OTDR displacement sensor system

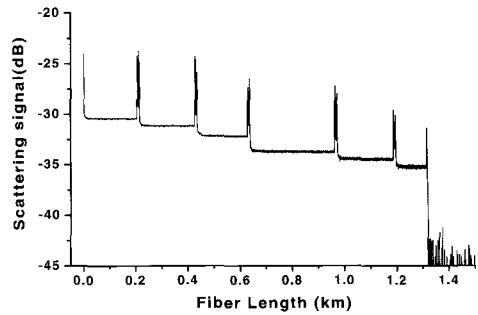
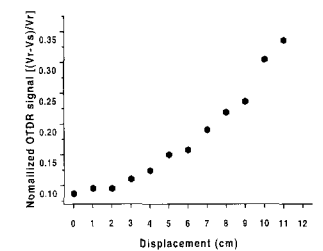
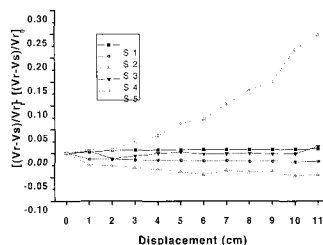


Fig. 7 Signals from multiplexed fiber optic OTDR displacement sensor

각 센서에 최대 변위를 주고, 마지막 센서에서 변위에 대한 광손실을 측정할 수 있는지를 조사함으로써, 최대로 설치할 수 있는 센서의 수를 결정하는 실험을 하였다. 센서 1,2,3,4에 10 cm의 변위를 가하고, 이때 센서 5에서 변위에 대한 광손실을 측정된 결과를 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이, 센서 5에서 변위에 대한 OTDR신호는 비교적 선형적으로 나타나며, 이로부터 본 연구에서는 5개의 변위센서를 갖는 다중센서 시스템이 가능함을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 각 센서에서 나타나는 신호를 각 변위에 대한 OTDR신호에서 변위초기값의 차를 구한 것이다. 센서 1에서 센서 4는 신호변화가 거의 없으나, 예상대로 센서 5에서 OTDR 신호는 변위에 따라 선형적용 증가함을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Sensor signals, (a) signal from #5 probe, (b) signals from whole probes

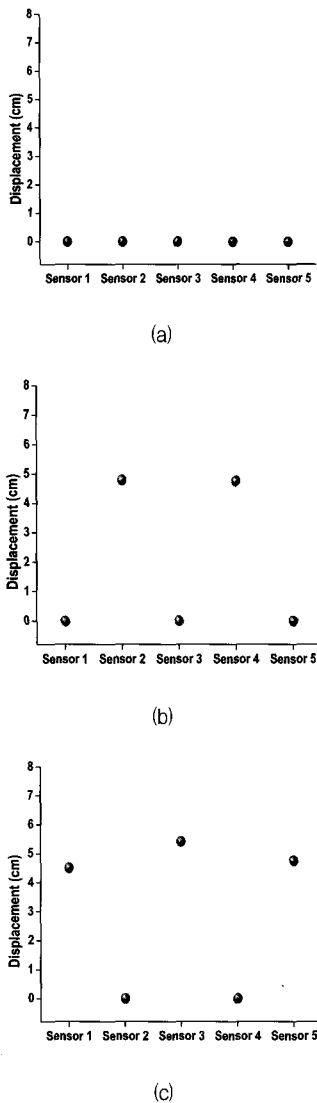


Fig. 9 Multiplexing experimental results: (a) 0 displacement of all probes, (b) 5 cm of #2, #4 probes, (c) 5 cm of #1, #3, #5 probes

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 (1)을 사용하여, 실험에서 나타나는 두 개의 반사신호인 기준신호와 감지신호를 정규화한 OTDR 신호의 초기값과 변위 후 발생하는 값의 차이로부터 비례상수  $C$  값을 구하여 사용하게 된다. 다중화된 센서 시스템에서 각 센서에 임의의 변위를 가해주고 이때 나타나는

OTDR신호와 앞서 구한 비례상수  $C$ 값을 계산하여, 변위값을 구하고, 이 값이 실제 가해진 변위와 정확한지 실험하였다. 다중화된 센서 시스템으로부터 변위를 측정된 결과를 Fig. 9에서 보여주고 있다. Fig. 9(a)는 5개의 센서에 변위를 가하지 않은 상태이다. 그림 9(b)는 센서 2, 센서 4에 변위 5 cm를 가한 경우이고, 9(c)는 센서 1, 센서 3, 센서 5에 각각 5 cm의 변위를 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  $\pm 2.5$  mm이며, 이는 수십 cm의 변위를 측정하는 구조물의 안전성 감시 시스템에 적용할 수 있는 값이다. 또한 제작된 변위계의 원판의 직경을 조절함으로써 보다 넓은 범위의 변위 측정이 가능함을 알 수 있다.

본 연구에서는 개발된 변위센서 탐촉자를 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.

## 5. 결론

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 제안하고 그 탐촉자를 개발하였다. 초기 굽힘 직경을 결정하고, 굽힘 호의 길이 변화에 따른 OTDR 신호를 측정하는 방법으로 변위센서 탐촉자를 제작하였다. 제작된 변위 측정 탐촉자를 이용하여 변위에 대한 OTDR 신호를 측정된 결과, 선형성이 뛰어난 것을 확인하였다. 또한 실험 결과 6 - 22 cm 영역에서 사용가능하며, 변위 측정 범위 20 cm 이상을 가짐을 확인하였다. 또한 제작된 변위센서 탐촉자를 광섬유 한 가닥에 직렬형으로 배열하여 다중화된 센서 시스템을 구성하였다. OTDR신호는 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 가해 주었을 때, 각 센서로부터 각 지점에서 발생하는 변위를 정확하게 측정할 수 있었다. 또한 실제 변위센서로 적용하기 위해서 주어진 식을 이용해, 변위에 대해 발생하는 OTDR 신호로부터 실제 가해진 변위를 읽을 수 있었다. 이때 변위 사이에서 발생하는 오차는 약  $\pm 2.5$  mm이며, 이는 실제 변위센서로 적용 가능성을 확인하였다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

- [1] 홍창선, 권일범, "광섬유를 이용한 스마트 구조물의 안전진단기술", 대한기계학회지, Vol. 37, No. 6, pp. 42-46, (1997)
- [2] Yuwen Fang, Jin Qian, Minming Wang, Xuesong Li, and Tianchu Li, "Distance scale calibration of optical fiber OTDR," Proc. SPIE, Vol. 3552, pp. 108-113, (1998)
- [3] Erlend Ronnekleiv and Kjell Blotekjar, "Distributed fiber sensor for location of disturbances," 9th Optical Fiber Sensors Conference
- [4] Duwayne R. Anderson and Florian G. Bell, "Optical Time-Domain Reflectometry," Tektronix Inc. pp. 1-10, (1997)
- [5] I. J. Bush, Carol A. Davis, Pepe G. Dacis, Allen Cekorich, and Fred P. McNair, "Buried fiber intrusion detection sensor with minimal false alarm rates," Proc. SPIE, Vol. 3489, pp. 30-40, (1998)
- [6] Eric Udd, Fiber Optic Smart Structure, John Wiley & Sons, Inc. New York USA, pp. 1-21, (1995)
- [7] 권일범, 김치엽, 최만용, 유재왕, "침입감시를 위한 광섬유 BOTDA 센서의 개발", 센서학회지, 제10권, 제3호, pp. 16-25, (2001)
- [8] 권일범, 김치엽, 김민수, 이왕주, "광주파수변조 광섬유 간섭형 센서의 개발", 센서학회지, 제9권, 제3호, pp. 163-170, (2000)
- [9] John W. Berthold "Historical Review of Microbend Fiber-Optic Sensors," J. Lightwave Technol. Vol. 13, No. 7, (1995)
- [10] 백세종, 권일범, 정철, 유재왕, "광섬유 ROTDR 센서를 이용한 침입 탐지기법의 개발", 센서학회지, 제11권, 제4호, pp. 209-217, (2002)
- [11] 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)
- [12] J. S. Schoenwald et. al., "Evaluation of an OTDR Microbend Distributed Sensor," Proc. SPIE, Vol. 986, pp. 150-157, (1988)
- [13] 유정애, 조재홍, 권일범 "광커넥터의 반사를 이용한 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위센서", 한국광학회지, 제15권, 제5호, pp. 415-422, (2004)