

# 단일 모드 광섬유의 굽힘손실을 이용한 다점 측정 센서 시스템

## Sensor System for Multi-Point Monitoring Using Bending Loss of Single Mode Optical Fiber

김현영\*, 김대현\*\*†

Heon-Young Kim\* and Dae-Hyun Kim\*\*†

**초 록** 지능형 센서 기반의 구조 건전성 감시를 통해 안전성을 확보하기 위한 연구는 우주항공을 비롯하여 기계/토목 구조물, 수송 기계 분야로 확대되었다. 특히, 실시간으로 운용되는 구조물은 사고로 인한 재산 및 인명 피해를 예방하기 위해 여러 스마트 센서 기반의 구조 건전성 감시 기술이 요구되는 결과로 이어졌다. 한편, 상용화되어 있는 대부분의 센서는 전자기 기반의 센서로써 전자기 간섭 및 부식과 같은 적용성의 제한과 환경적 요인에 취약할 수 있다. 따라서, 전자기 기반 센서의 단점을 보완하기 위한 신개념 센서로 광섬유 센서가 최근 각광을 받고 있다. 하지만, 광섬유 센서를 이용한 실제 구조물의 감시를 위해서는 고가 장비와 시스템이 요구되어 어려움이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 한 가닥의 광섬유를 이용하여 여러 지점에서 발생할 수 있는 충격을 검출하는 센서 시스템을 제안하였다. 이를 위해, 광섬유 굽힘 손실 현상을 이용하여 같은 충격에 대해 위치별 광 강도의 변화량 차이가 존재하도록 센서부의 모듈을 제작하였다. 그리고, 광 강도 변화에 영향을 미치는 변수들을 이용하여 실험 설계를 하였으며, 충격 위치 검출이 가능함을 실험적으로 검증하였다.

**주요용어:** 비파괴검사, 구조 건전성 감시, 광섬유 센서, 굽힘손실

**Abstract** Applications of smart sensors have been extended to safety systems in the aerospace, transportation and civil engineering fields. In particular, structural health monitoring techniques using smart sensors have gradually become necessary and have been developed to prevent dangers to human life and damage to assets. Generally, smart sensors are based on electro-magnets and have several weaknesses, including electro-magnetic interference and distortion. Therefore, fiber optic sensors are an outstanding alternative to overcome the weaknesses of electro-magnetic sensors. However, they require expensive devices and complex systems. This paper proposes a new, affordable and simple sensor system that uses a single fiber to monitor pressures at multiple-points. Moreover, a prototype of the sensor system was manufactured and tested for a feasibility study. Based on the results of this experimental test, a relationship was carefully observed between the bend loss conditions and light-intensity. As a result, it was shown that impacts at multiple-points could be monitored.

**Keywords:** Non-destructive Testing (NDT), Structural Health Monitoring (SHM), Fiber Optic Sensor (FOS), Bend Loss

### 1. 서 론

산업화가 진행되면서 구조물이 대형화되고 기반 시설의 노후화로 인해 상태 검사가 요구되고 있으며, 특히 검사자의 접근이 어려운 고온이나 고압 환경에 있는 구조물이나 파이프라인과 같이 긴 연속체와 넓은 평판 구조물의 검사를 위한 기법 연구가 필요하다. 따라서, 유도초음파를 이용

한 비파괴 초음파검사[1,2], 전자기초음파 탐촉자(EMAT)가 탑재된 로봇을 이용한 자동화검사 시스템 개발[3] 등 자동화검사를 위한 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 구조물의 형태에 따라 검사가 용이하지 못하거나 검사자의 접근 제한에 의해 상태 측정이 어려운 환경에서는 적용성이 낮다.

따라서, 고온·고압 환경과 같이 검사자의 접근이 어려운 구조물과 대형화된 검사체에 여러 센

[Received: January 21, 2015, Revised: February 2, 2015, Accepted: February 13, 2015 \*서울과학기술대학교 기계공학과, \*\*서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea (E-mail: dkim@seoultech.ac.kr)

서를 적용하여 대형 구조물의 상태 감시를 위한 구조 건전성 감시(structural health monitoring, SHM) 기법 연구가 수행되고 있다. 구조 건전성 감시를 위해서는 압전소자(piezoelectric transducer, PZT), 스트레인 게이지(strain gauge), 가속도계(accelerometer), 열전대(thermocouple)와 같은 다양한 지능형 센서(smart sensor)가 사용되며, 이를 이용하여 구조물의 상태를 감시하는 연구가 수행되고 있다[4-6]. 하지만, 대부분 상용화되어 있는 센서는 전자기 기반으로 금속 전도체로 구성되어 전자기 간섭(electro magnetic interference, EMI)에 취약하며, 장시간 사용에 따라 부식에 대한 위험성이 존재한다. 전자기 기반 센서의 단점을 극복하며 구조 건전성 감시를 위해 최근 광섬유 센서(fiber optic sensor, FOS)를 이용한 구조물 감시 연구가 활발히 진행되고 있다. 광섬유 센서는 높은 민감도와 분해능을 가지고 있다. 그리고 그 직경이 250  $\mu\text{m}$ 로 매우 가늘고, 유연성이 우수하여 대상 구조물에 쉽게 부착하거나 삽입이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그리고, 부식과 전자기적 간섭이 없어 최근에는 플랫폼 기계설비 선박, 항공 등 여러 분야로 적용이 확대되고 있다. 특히, 다중화(wavelength division multiplexing, WDM)가 용이한 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서를 사용하여 여러 지점의 물리량을 측정하는 연구가 활발히 수행되고 있다 [7,8]. 하지만, 광섬유 브래그 격자 센서 개발을 위해서는 고가의 장치가 사용되며 시제품의 단가 또한 높다. 그리고, 광 파장을 측정하기 위해 FBG 인터로게이터(interrogator) 장비를 비롯하여 여러 측정 시스템 구성에 많은 비용이 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 레이저 다이오드(laser diode, LD)와 광 검출기(photo detector, PD)와 같은 저가의 단위 광 부품을 이용해 다점 충격 감시가 가능한 단일 모드 광섬유 기반의 센서 시스템을 제안하였다. 환경에 따라 광 손실이 비선형적으로 변화함을 이론적으로 접근하고, 실험적 검증을 통해 기하학적 형상에 따라 굽힘 손실의 차이를 확인하였다.

## 2. 굽힘손실 이론

직선으로 뻗은 단일 모드 광섬유에 국부적인 미소굽힘(local bending)이 가해질 때, 전형적인 광

강도의 손실은 순수 굽힘손실(pure bend loss)과 모드전환 손실(mode transition loss)에 의해 발생한다. 순수 굽힘손실은 코어 굴절률이  $n_{co}$ 이고 클래딩의 굴절률은  $n_d$ 인 광섬유가 굽은 영역에서 파장  $\lambda$ 의 입사파에 대한 단일 횡모드의 입사각이 작아짐으로써 이 횡모드의 세기 분포중 가장자리 부분이 광섬유를 도파하지 못하고 새나가는 손실 현상을 말한다. Fig. 1은 순수 굽힘손실의 메커니즘을 보여주는 것으로 광섬유에 굽힘이 가해지기 전에 직선으로 뻗은 부분에서는 손실 없이 강도  $P_0$ 의 횡모드가 광섬유 축을 따라 전파한다. 하지만, 구부림이 있을 경우, 이 부분이 반경  $r_b$ 와 각  $\Phi$ 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(angular group velocity)가 같아지는 특정값  $r_c$ 보다 큰 횡모드 세기 분포의 반경 위치에서는 모드 세기 분포가 스스로 사라지면서 분리점으로부터 접선 경로로 전파되어 흩어진다. 따라서, 순수 굽힘손실에 의해 없어진 강도를 제외하고 진행한 파워는  $P(r_b, \Phi) = P_0 - P_c$ 가 된다. 굽힘이 발생한 광섬유의 곡률  $r_b$ 와 접촉하는 호의 길이  $s$ 에 따른 진행한 후의 순수 굽힘손실에 의해 없어지고 남은 진행 파워  $P(s)$ 에 대한 표현은 아래와 같다.

$$P(s) = P_0 \exp(-\gamma s) \quad (1)$$

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

여기에서  $V$ ,  $U$ ,  $W$  그리고  $\Delta$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{2\pi a}{\lambda} (n_{co}^2 - n_d^2)^{1/2} \\ U &= a(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2} \\ W &= a(\beta^2 - k^2 n_d^2)^{1/2} \\ \Delta &= (1/2)(1 - n_d^2/n_{co}^2) \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서,  $a$ 는 코어 반경이고,  $k = 2\pi/\lambda$ 는 전파상수이며, 모드 조건을 유발하는 광섬유의 횡방향 전파상수 성분은  $\beta = k_0 n_{co} \sin\theta$ 이다.  $\beta$ 의 표현에서  $k_0$ 는 진공중에서의 전파상수이며,  $\theta$ 는 광섬유 코

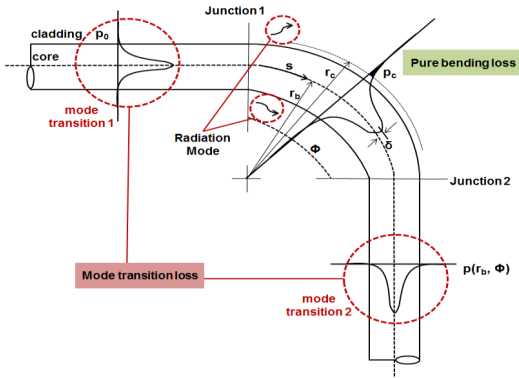


Fig. 1 Mechanism of pure bend loss [10]

어 내에서 코어와 클래딩의 경계로 입사하는 광선이 경계면의 입사점에서 세운 법선과 이루는 각도이다. 그리고,  $\beta$ 는  $n_{cl}k < \beta < n_{co}k$ 을 만족한다.

모드전환 손실은 광섬유의 끝은 부분과 굽혀져 있는 부분의 모드 형상이 서로 다른 경우에 발생한다. Fig. 1에 나타난 것처럼 굽힘 영역에서 모드의 중심 최대값은 곧게 뻗은 광섬유 영역과 비교해서 거리  $\delta$ 만큼 반경의 바깥 부분으로 옮겨진다. 광섬유의 끝은 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 파워 결합 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. 이러한 손실이 일어나는 굽힘 영역이 본 연구와 같이 원둘레의 절반에 해당하는 긴 영역에서는 앞서 설명한 2가지 주요 손실 메커니즘에서 순수 굽힘손실이 모드전환 손실보다 크기 때문에 대부분의 손실은 순수 굽힘손실로도 그 경향을 설명할 수 있다[9].

3. 기하학적 형상에 따른 측정 원리

기하학적 구조에 의해 굽힘 형상의 차이를 가지며, 이에 따라 광 손실의 정도가 다르게 나타나게 된다. 기하학적 구조는 Fig. 2와 같이 여러 굴대(mandrel)를 이용하여 굽힘이 발생하도록 하며, 구조적인 메커니즘을 표현하면 식(4)와 같다.

$$\theta = \left( \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{2r}{\sqrt{(d^2 + D^2)}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{d}{D} \right) \right) \quad (4)$$

굽힘각을 광 손실이론인 식(1)의 굽힘 호의 길이 ( $s = r\theta$ )에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{P(s)}{P_0} = \exp(-\gamma r\theta) \quad (5)$$

따라서, 구조적인 메커니즘의 총 굽힘 각도에 따라 광 손실이 변화하게 된다.

본 논문에서는, Fig. 3과 같이 국부적인 위치마다 굴대간의 거리(D)와 굴대 개수, 각 지점에서

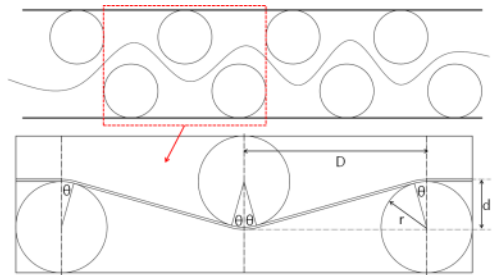
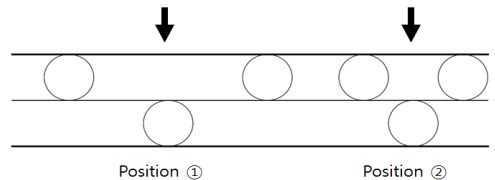
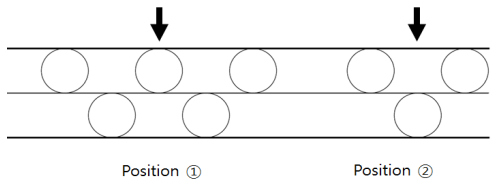


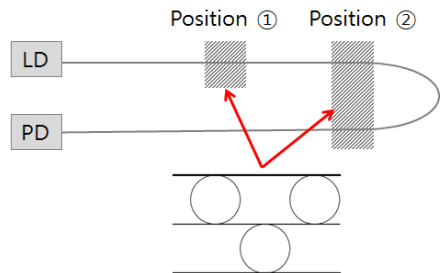
Fig. 2 Model of pure bend loss.



(a) distance of mandrels



(b) number of mandrels



(c) number of optical fibers in each position

Fig. 3 Geometry based on parameters

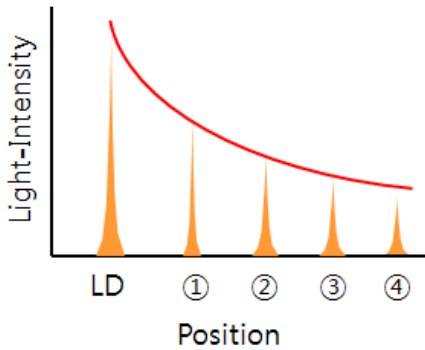


Fig. 4 Expected light-intensity in each position

통과하는 케이블 개수 차이에 의해 총 굽힘 각도의 차이가 발생하게 된다. 여러 지점의 굽힘 형상이 파라미터에 따라 다르다면, Fig. 4와 같이 손실되는 광 강도는 위치마다 차이를 나타낸다. 따라서, 이를 이용하여 단일 광섬유를 이용하여 여러 지점중의 충격 위치를 검출할 수 있다.

#### 4. 순수 굽힘 실험

광섬유의 기하학적 형상에 따라 순수 굽힘손실량을 측정하여 정량화하기 위한 실험을 수행하였다. 측정 위치별로 굽힘손실 정도의 차이를 가져야 하기 때문에 굴대간의 간격(D), 굴대의 개수와 광섬유 개수 세 개의 파라미터를 이용하여 굽힘손실 조건을 설정하였다. 그리고, 형상에 따라 굽힘손실값을 측정하기 위해 눌리는 깊이(d)를 동일하게 하였다. 따라서, 파라미터들을 조합하여 여러 지점의 조건을 다르게 하여 광 손실 정도의 차이를 이용하여 다점중 충격이 가해지는 위치를 검출할 수 있는 가능성을 실험적으로 검증하였다.

##### 4.1. 실험 구성 및 방법

실험을 위한 구성은 Fig. 5와 같으며, 광원으로는 파장 가변 레이저(81949A, Agilent Co.)를 사용하였으며, 광량을 전압으로 변환해주는 광 검출기(2117, Newfocus Co.)를 이용하여 전기신호로 변환하였다. 그리고, 전기신호를 컴퓨터로 전송하기 위한 DAQ(NI USB-5133, National Instrument Co.)를 사용하였다. 광섬유는 대한전선에서 제작한 단일 모드 광섬유(SMF-28e)를 사용하였다. 그

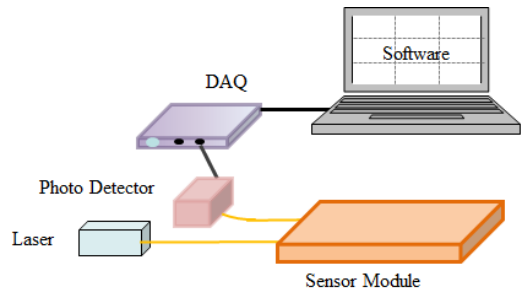


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

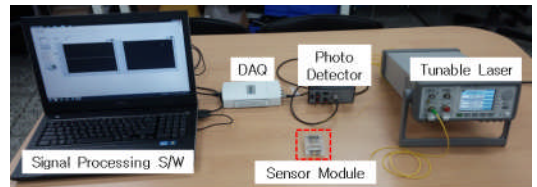


Fig. 6 Photograph of experimental setup

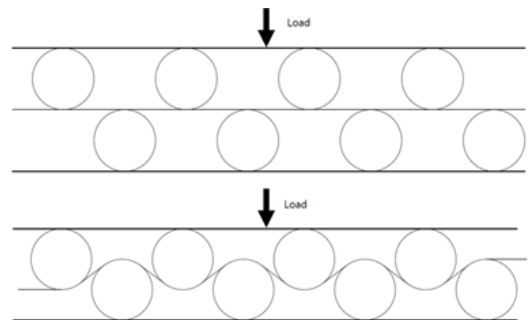


Fig. 7 Geometry of pure bend loss

리고, 유리로 구성된 광섬유의 파손을 방지하기 위해 폴리머 코팅과 자켓이 있는 케이블을 이용하였다. Fig. 6은 실제 실험 구성 사진이다.

순수 굽힘손실이 발생하기 위해서는 Fig. 7과 같이 굴대와의 접촉 호의 총 길이와 굴대간의 간격이 요구된다. 따라서, 이를 위한 모듈을 Fig. 8과 같이 제작하였으며, 굴대의 간격과 굴대의 개수가 다른 여러 모듈을 제작하였다. 센서 모듈은 내부를 확인하기 위해 아크릴로 제작하였으며, 가로 100 mm, 세로 50 mm, 높이 20 mm이고 굴대의 직경은 3mm이다. 굴대의 간격은 6가지(6,7,8,9,10,11 mm) 경우로 제작하였으며, 굴대의 개수는 2가지(3,5개) 경우로 제작하였다. 그리고, 통과하는 광섬유 케이블의 개수는 2가지(1,2가닥)의 경우로 실험을 수행하였다.

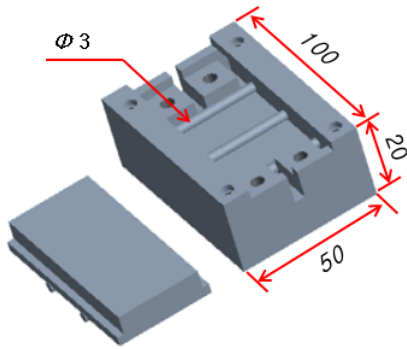


Fig. 8 3D CAD design of sensor module

본 실험은 3개의 파라미터를 이용하여 수행하였으며, 굴대의 간격과 개수, 통과하는 광섬유의 개수에 따라 광 강도의 변화를 측정하였다.

광 신호의 파장은 1570 nm이고 입력 파워는 30 mW이다. 이를 광 검출기를 통해 DAQ로 전송되는 전압의 초기값은 5500 mV이다. 이를 기준으로 강도의 감소량을 측정하였다. 신호처리 및 모니터링을 위해 LabVIEW를 이용하여 실시간으로 데이터를 확인하고 저장하였다.

4.2. 실험 결과

본 실험에서는 순수 굽힘에 의한 광 강도의 변화는 굴대의 개수와 굴대간의 거리, 통과하는 광섬유의 개수에 따라 차이가 발생해야 하며, 이를 이용하여 여러 지점의 광 감쇠의 차이를 이용하여 다점 측정이 가능함을 확인하는 것이다.

그리고, 유리 광섬유의 파손을 방지하기 위해 폴리머 코팅과 자켓이 있는 케이블을 이용하여 실험을 수행하였다. 이는 미소굽힘을 방해하는 요소로써 이론치와 실험치의 오차를 발생하는 요인이 된다. 본 논문에서는 실험 결과를 분석하여 굽힘손실에 대한 정량화를 수행하였다.

실험 수행은 Fig. 9와 같으며, 굽힘에 의해 굽힘 접촉 길이에 따라 총 굽힘 각도가 결정된다. 따라서, 이를 이용하여 굽힘에 따라 광 감쇠의 차이를 확인하였다.

실험 결과, Fig. 10과 같이 세 개의 파라미터에 따라 광 감쇠가 차이가 존재함을 확인하였다. 전체적으로 폴리머 코팅과 자켓에 의해 이론값에 비해 실험치의 광 감쇠가 적은 것으로 확인하였

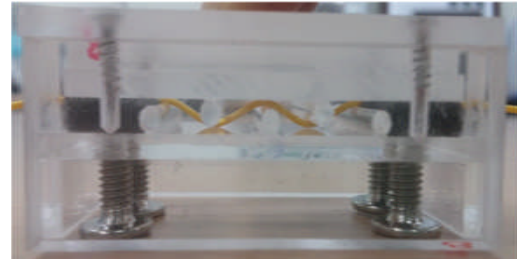
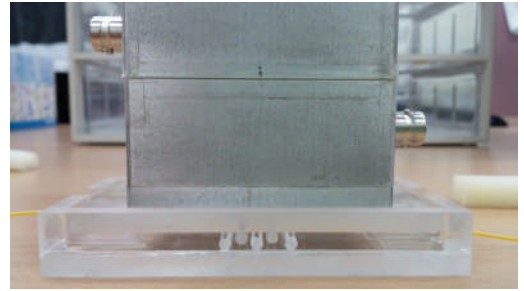
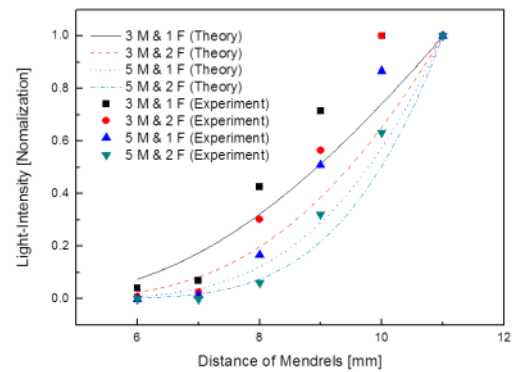


Fig. 9 Photograph of experiments



M : Mandrel, F : Fiber

Fig. 10 Light-intensity of theoretical and experimental value in each structural mechanisms

다. 그리고, 굴대의 직경이 3 mm일 때, 굴대간의 거리가 6 mm인 경우 광 신호가 사라짐을 확인하였고, 11 mm인 경우엔 광 감쇠가 없었다. 굴대간의 거리가 8 mm와 9 mm일 때 확연한 차이가 나타났다. 굴대간의 거리가 일정 거리 이하일 때 광 감쇠가 발생하며, 굽힘 조건을 설계함에 있어 주요 파라미터가 되고 굴대간의 거리에 따라 측정 허용범위가 결정됨을 실험적으로 확인하였다.

4.3. 실험 고찰

본 실험을 통해 여러 지점 중 물리적인 충격이

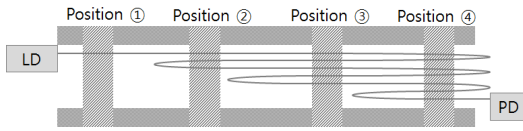


Fig. 11 One of examples for the single fiber optic sensor system

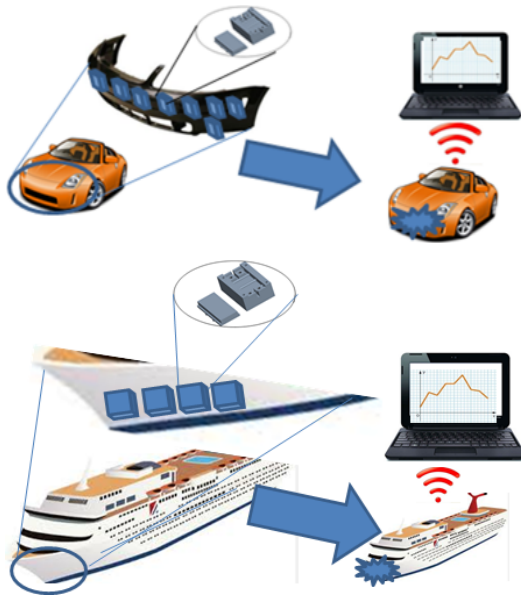


Fig. 12 Application examples of single fiber optic sensors

가해지는 위치를 단일 광섬유 케이블을 이용하여 측정이 가능함을 확인하였고, 여러 분야에 응용이 가능하다. 단일 구조물에 여러 굽힘 조건을 조합하여 광 손실을 발생하는 센서 시스템을 적용한다. Fig. 11은 하나의 개념도이며 굽힘 조건을 만드는 모듈에 광섬유 가닥의 개수를 이용한 하나의 조건이다. 이를 이용하여, Fig. 12와 같이 수송기계 분야에서 차량 범퍼에 본 센서 시스템을 적용하여 충격위치별로 반응하는 에어백을 결정할 수 있으며, 선박의 경우 충격위치에 따라 유기적인 대응이 가능하도록 설계가 가능하다. 이러한 고가의 구조물에 저렴한 센서 시스템을 이용하여 충격을 감지할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 단일 모드 광섬유의 굽힘손실을 이용한 다점 측정 센서 개발을 수행하였다. 단일

케이블로 여러 지점에 가해진 충격을 감지하는 기법을 제안하였다. 각 지점의 기하학적 형상에 따라 광 감쇠의 차이가 발생하도록 하여 다점 측정이 가능함을 실험을 통해 검증하였다. 여러 파라미터들의 조합을 통해 간소화와 저가의 장치로 구성된 센서 시스템을 이용하여 여러 위치의 외부 변화를 감지할 수 있음을 확인하였다. 결론적으로, 여러 지점 중 충격이 가해지는 위치를 한 가닥의 광섬유 케이블을 이용하여 실시간으로 감지할 수 있다.

## 후기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] I. K. Park, Y. S. Cho, W. J. Song and Y. G. Kim, "Application of torsional mode of guided wave to long large pipe inspection," *Key Engineering Materials*, Vol. 326, pp. 473-476 (2006)
- [2] I. K. Park, W. J. Song, Y. S. Cho, H. M. Kim and Y. G. Kim, "Long range ultrasonic guided wave technique for inspection of pipes," *Key Engineering Materials*, Vol. 321, pp. 799-803 (2006)
- [3] J.-H. Lee, S. Han, J. Ahn D.-H. Kim and H. Moon, "Two-module robotic pipe inspection system with EMATs," *Smart Structures and Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 1041-1063 (2014)
- [4] J. B. Ihn and F. K. Chang, "Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-19 (2008)
- [5] B. Yoo, A. S. Purekar, Y. Zhang and D. J. Pines, "Piezoelectric-paint-based two-dimensional phased sensor arrays for structural health monitoring of thin panels," *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 7 (2010)
- [6] S. Kavithaa, R. J. Daniela and K. Sumangalab, "A simple analytical design approach based on

- computer aided analysis of bulk micro-machined piezoresistive MEMS accelerometer for concrete SHM applications," *Measurement*, Vol. 46, No. 9, pp. 3372-3388 (2013)
- [7] K. H. Lee and D. H. Kim. "Shape monitoring of composite cantilever beam by using fiber Bragg grating sensors," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 7, pp. 833-839 (2013)
- [8] H. Y. Kim, D. Kang, J. H. Lee and D. H. Kim, "Characteristics of thermal coefficient of fiber Bragg grating for temperature measurement," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 8, pp. 999-1005 (2013)
- [9] J. A. You, J. H. Jo and I. B. Kwon, "Multiplexed bend loss type single-mode fiber-optic displacement sensor using reflection signals generated at optical connectors," *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 15, No. 5, pp. 415-422 (2004)
- [10] K. H. Lee, B. J. Ahn and D. H. Kim, "Fiber optic displacement sensor system for structural health monitoring," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 4, pp. 374-381 (2011)