

## 구조 건전성 모니터링을 위한 광섬유 변위 센서 시스템 개발

### Fiber Optic Displacement Sensor System for Structural Health Monitoring

이건호\*, 안병준\*, 김대현\*\*†

Kun-Ho Lee\*, Byung-Jun Ahn\* and Dae-Hyun Kim\*\*†

초 록 최근 구조 건전성 모니터링을 위해 다양한 센서와 분석 기술들을 적용하여 기계/토목 구조물의 처짐을 측정하는 연구들이 활발히 수행되고 있다. 처짐을 측정하기 위해 사용되는 다양한 전기 기반 상용 센서의 경우, 많은 수의 센서가 설치될 때 함께 설치된 다량의 전선들은 전기적 잡음 문제를 야기하여 사용상의 어려움을 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 기존 센서의 문제점을 해결하면서 미세 변위를 손쉽게 측정할 수 있는 저가형의 광강도형 광섬유 변위 센서를 제안한다. 이를 위해, 광섬유 굽힘 손실 현상을 이용하여 센서부의 형태를 고안하였으며 민감도, 선형성 그리고 작동 범위를 구하기 위한 기초 실험을 수행하였다. 또한 변위 측정이 용이하고 구조물에 손쉽게 설치할 수 있도록 센서 헤드의 기구부를 새롭게 설계 제작하였으며, 이를 사용하기 위한 실시간 프로그램 또한 함께 개발하여 광섬유 변위 센서 시스템을 개발 완료하였다.

주요용어: 구조 건전성 모니터링, 처짐, 광섬유 변위 센서

**Abstract** It has been doing to research on novel techniques for structural health monitoring by applying various sensor techniques to measure the deflection in mechanical and civil structures. Several electric-based displacement sensors have many difficulties for using them because of EMI (Electro-Magnetic Interference) noise of many lead-wires when they are installed to many points in the structures. In this paper, it is proposed an affordable intensity-based fiber optic sensor to measure small displacement solving the problems of conventional sensors. In detail, the sensor head was designed on the basis of the principle of bending loss and a basic experiment was performed to obtain the sensitivity, the linearity and the stroke of the sensor. Moreover, a prototype was designed and manufactured to be easily installed to a structure and a real-time control software was also successfully developed to drive the fiber optic sensor system.

**Keywords:** Structural Health Monitoring, Deflection, Fiber Optic Displacement Sensor

#### 1. 서론

최근 기계/토목/건축 구조물들의 대형화 및 기존 산업기반 시설 구조물의 노후화로 인해 구조물의 안전성 확보를 위한 첨단 기술의 필요성이 대두되고 있다. 특히 최근에는 여러 가지 센서 및 모니터링 기술이 대형 기계/토목/건축 구조물에 적용되어 새로운 구조 건전성 모니터링

(structural health monitoring) 기술들이 활발히 연구되고 있다. 또한 여러 다양한 필요 기술 중에 거친 환경 구조물에서의 생존성을 보장하고 정확/정밀도를 보다 높일 수 있는 새로운 센서의 개발 기술도 매우 중요하다. 따라서 최근에는 광학/기계/화학/전기 등 다양한 물리 분야의 원리를 이용한 구조 건전성 모니터링 센서가 다양하게 개발되고 있으며, 구체적으로 구조 건전성 모니

터링을 위한 변위, 온도, 가속도, 경사도 등의 다양한 물리량들을 측정할 수 있는 새로운 센서들이 개발되고 있다[1]. 이러한 여러 물리량 중에 구조물의 처짐 측정이 구조 건전성 모니터링 연구 분야에서 매우 중요시 되고 있다. 일례로, 반도체 공정 및 나노켄 관련 미세 가공 및 측정 분야에서는 매우 미세한 변위의 측정이 반드시 필요하다. 또한 대형 토목 구조물 중에 교량의 처짐 측정은 교량의 구조적인 성능 저하 상태와 노후도를 예측 할 수 있는 물리량이기 때문에 교량 구조물의 건전성을 평가할 수 있는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 현장에서는 이러한 처짐을 측정하기 위해 상용 변위계인 LVDT (linear variable differential transformer)를 많이 사용하고 있다. 그러나 실제 이러한 센서들을 대형 구조물에 적용할 때, 많은 수의 센서를 설치해야 하며 함께 설치된 다량의 전선들은 잡음 문제를 발생시켜 사용에 어려움을 야기한다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 다양한 광섬유 센서들, 특히 다짐 측정이 용이한 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서를 사용하여 처짐을 측정하는 연구들이 활발히 진행되고 있다 [2-4]. 그러나 광섬유 브래그 격자 센서의 경우 제작 시 UV 레이저 등과 같은 고가의 장비가 필요하며 광 파장을 계측할 수 있는 인터로게이터 장비 등 측정 시스템 구성에도 많은 비용이 든다는 단점을 가지고 있다[5].

본 논문에서는 기계/토목/건축 구조물의 미세 처짐을 측정할 수 있는 저가형의 광섬유 변위 센서(fiber optic displacement sensor)를 제안하고자 한다. 제안된 광섬유 변위 센서는 빛의 세기(intensity) 변화를 측정하여 변위를 계측하는 광강도형 센서로서 광원(light source)과 광 검출기(photo detector)로만 구성되어 있는 간단한 형태이고, 저가로 계측 시스템을 구성할 수 있다는 장점을 갖고 있다[6]. 그리고 기본적으로 광섬유로 구성된 센서는 전자기적 잡음의 영향을 받지 않아 기존 전자기 기반 센서로 접근이 용이하지 못한 거친 환경 내에서 적용이 가능하고, 원거리 신호의 전달이 효율적이며 부식에 대한 염려가 없어 수중 구조물에서도 적용이 가능하다는 장점 또한 갖고 있다[7].

구체적으로 본 논문에서는 광섬유 변위 센서 개발을 위해 광섬유 굽힘 손실(bending loss) 현상

에 대해 연구하였으며, 이에 따라 정원 형태의 센서부를 고안하였다. 그리고 민감도(sensitivity), 선형성(linearity), 작동 범위(stroke)를 구하기 위한 두 가지의 광섬유 기초 실험을 수행하여 설계 파라미터 값을 도출하였으며, 센서부의 변위 측정 및 구조물에 설치가 용이하도록 센서 헤드의 기구부를 새롭게 설계 및 제작하였다. 또한 센서의 상태를 원거리에서 실시간 모니터링 할 수 있도록 프로그램을 개발하여 계측 시스템을 완성하였고, 최종적으로 시제품 수준의 센서 시스템을 성공적으로 개발하였다.

## 2. 굽힘 손실 이론

굽힘 손실(bending loss)이란, 직선상의 광섬유 코어(core)에 빛이 진행 될 때 굽힘에 의해서 빛이 손실되는 물리적 현상을 의미한다. 특히, 단일 모드 광섬유에서 매크로(macro)한 굽힘이 발생했을 때 발생하는 굽힘 손실은 세부적으로 순수 굽힘 손실(pure bending loss)과 모드 전환 손실(mode transition loss)로 구성된다[8-11].

순수 굽힘 손실은 광섬유 코어(core)와 클래딩(cladding)의 굴절률 차에 의해 빛이 전반사되어 도파하고 있을 때, 굽힘이 발생한 영역에서 입사각이 작아짐으로써 빛이 완전히 도파하지 못하고 일부가 밖으로 손실되는 현상이다. 물리적으로는 Fig. 1에서  $P_0$ 의 세기를 갖는 빛이 곡률  $r_b$  호의 길이  $s$ , 각도  $\phi$  만큼의 굽힘을 갖는 광섬유를 지나가게 되면 클래딩 내부의 빛의 속도와 소산장(evanescent field) 바깥 부분의 위상 속도(phase velocity)가 같아지기 때문에 손실이 발생한다. 결

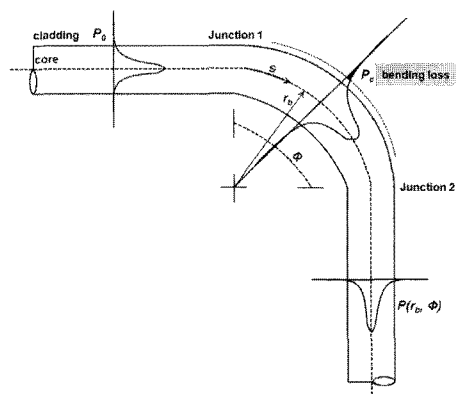


Fig. 1 Bending loss in optical fiber

국, 원래 입사된 빛의 세기와 순수 굽힘 손실로 인해 사라진 빛의 차는  $P(r_b, \phi) = P_0 - P_c$ 와 같으며, 수학적으로 호의 길이  $s$ 를 갖는 굽힘 광섬유를 진행한 후 남은 빛의 세기에 대한 표현은 아래와 같다[10-12].

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

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

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

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_{co}^2 - n_d^2)^{1/2}, \quad U = a(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2} \tag{3}$$

$$W = a(\beta^2 - k^2 n_d^2)^{1/2}, \quad \Delta = (1/2)(1 - n_d^2/n_{co}^2)$$

위 식에서  $n_d$ 은 클래딩의 굴절률,  $n_{co}$ 는 코어의 굴절률이며  $a$ 는 코어의 반경,  $k$ 는 전파 상수로써  $k = 2\pi/\lambda$ 를 의미한다. 또한 광섬유의 횡방향 전파상수 성분  $\beta$ 는  $\beta = k_0 n_{co} \sin\theta$ 이며,  $n_d k < \beta < n_{co} k$ 를 만족한다.  $\beta$ 에서  $k_0$ 는 진공 중에서의 전파상수,  $\theta$ 는 광섬유 코어 내에서 코어와 클래딩의 경계로 입사하는 빛이 경계면의 입사점에서 세운 법선과 이루는 각도이다.

모드 전환 손실은 광섬유 코어로 입사된 빛이 광섬유가 직선 형상일 때와 굽힘에 의한 광섬유의 형상이 다를 때 발생한다. 광섬유의 직선 형상에서 굽힘이 시작되는 교차점 1(junction 1)에서 입사된 빛의 세기 중 일부는 굽힘이 발생한 광섬유로 진행하고, 남은 빛의 세기는 클래딩과 그 외곽의 코팅층 영역에서 방사 모드(radiation mode)와 결합한다. 이와 같은 현상은 굽힘에 의한 광섬유의 형상에서 직선 형상으로 다시 변하는 교차점 2(junction 2)에서도 동일하게 발생한다. 결국, 종합적으로 광섬유의 굽혀진 영역에서 발생하는 순수 굽힘 손실과 두 개의 교차점에서 발생하는 모드 전환 손실로 인하여 전체적인 굽힘 손실 세기가 결정된다[10,11].

### 3. 광섬유 변위 센서의 측정 원리

광섬유 변위 센서의 물리적인 측정 원리는 광섬유 내부를 도파하는 빛의 세기가 손실이 없는

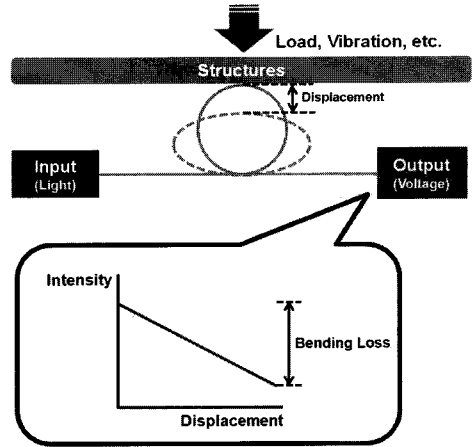
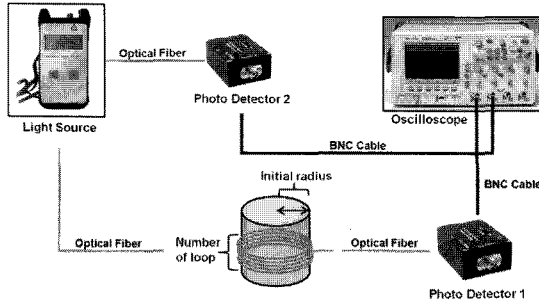


Fig. 2 The measurement principle of fiber optic displacement sensor

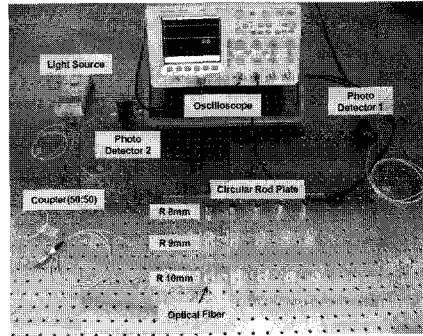
상태에서 변위에 의해 발생하는 굽힘 손실 세기를 측정함으로써 구조물의 변위를 역으로 추정하는 것이다. 따라서 변위가 발생했을 때 광섬유의 굽힘 손실을 효과적으로 일으킬 수 있도록 광섬유를 정원으로 감는 형태의 센서부를 고안하였다. 이러한 센서부가 Fig. 2와 같이 구조물에 부착되어 있을 때 처짐에 의해 구조물의 변위가 발생하게 되면 광섬유가 타원 모양으로 변화되면서 타원의 측면 부분에서는 순수 굽힘 손실이 발생하게 되고, 빛이 들어가는 원의 시작점에서는 모드 전환 손실이 발생한다. 변위가 커질수록 순수 굽힘 손실이 점점 커지므로 변위의 크기에 따라 빛의 손실 세기도 커지게 된다. 따라서 이러한 빛의 손실 세기를 변위로 환산하여 구조물의 처짐에 의해 발생한 변위를 알 수 있게 된다.

### 4. 광섬유 기초 실험

Fig. 2에서 나타난 것과 같이, 광섬유에 가해지는 변위의 크기에 따른 빛의 굽힘 손실 정도를 민감도와 선형성 관점에서 최적화 할 수 있는 센서부를 설계하기 위해 두 가지 기초 실험을 수행하였다. 정원 형태의 광섬유로 구성된 센서부의 민감도와 선형성에 영향을 주는 설계 파라미터로 초기 반경(initial radius)과 감은 횟수(the number of loops) 두 가지를 선택하였고 이 두 설계 파라미터를 다양하게 변경해 보면서 변위계 센서로 사용될 수 있는 최적의 초기 반경과 감은 횟수를 결정하였다.



(a) Schematics of experiments



(b) Photograph of experiments

Fig. 3 Experimental setup for measurement of bending loss versus circle radius and the number of loops

4.1. 정원 반경에 따른 굽힘 손실 측정 실험

실험 광학계 전체 구성은 Fig. 3(a)와 같으며, 본 실험에서 Agilent의 오실로스코프(model: DSO 6034A)로 굽힘 손실 세기를 전압으로 측정하였고, 광원은 KTSOPTONICS의 휴대용 광원(model: LAG-PO11)을 사용하였다. 그리고 광량을 전압으로 변환해주는 광 검출기로는 Thorlabs의 DET001CFC 모델을 사용하였으며, 광섬유는 대한전선에서 제작한 단일모드 광섬유 SMF-28c를 사용하였다.

정원 형태의 광섬유가 높은 민감도를 갖기 위해서는 굽힘 손실이 발생하기 직전의 초기 반경을 가져야 한다. 따라서 정원 반경 변화에 따른 굽힘 손실 값을 측정하기 위해 반경 2 - 10 mm까지 1 mm 크기 변화를 갖는 각각의 원형 봉을 반경별로 판에 본딩하여 여러 개의 원형 봉 플레이트(circular rod plate)를 제작하였다. 그리고 실험의 정확도를 높이기 위해, 일정 길이의 광섬유를 준비하고 광원과 광 검출기를 손쉽게 체결할 수 있도록 광섬유 양단에 광 점퍼코드를 접합하였다. 그리고 Fig. 3(b)와 같이, 광원 앞단에 50:50 커플러(coupler)를 연결하여 커플러 한쪽을 앞서 광 점퍼코드로 연결된 광섬유와 연결하였고, 이후 광 검출기 1(photo detector 1)에 연결하여 오실로스코프 채널 1로 광원의 크기 변화를 측정하도록 하였다. 또한 커플러의 다른 한쪽은 광 검출기 2(photo detector 2)에 직접 연결하여 오실로스코프 채널 2로 광원의 크기 변화를 별도로 관찰하였다. 이때, 오실로스코프 채널 1에서 측정된

광원의 크기는 채널 2의 광원 크기로 나눠줌으로써 광원 자체의 불안정성을 보정할 수 있도록 광학계를 구성하였다.

실험 장치를 완성한 이후, 각각의 반경을 갖는 원형 봉에 광섬유의 감는 횟수를 1 - 5회까지 순차적으로 하나의 원형 봉에 중첩되게 감아서 정원 반경과 감은 횟수에 따른 굽힘 손실 값을 전압 값으로 측정하였다. 이 과정을 5번 반복 측정하여 평균한 후 데이터를 최고 전압 값을 기준으로 정규화(normalization)하여 Fig. 4와 같이 그래프로 나타내었다.

실험 결과, 반경 6 mm까지는 감는 횟수와 관계없이 굽힘 손실이 거의 나타나지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 반경 6 mm는 변위가 발생하지 않아도 손실이 약간씩 발생하여 빛의 세기가 안정적이지 않았다. 따라서 초기 빛의 세기가 안

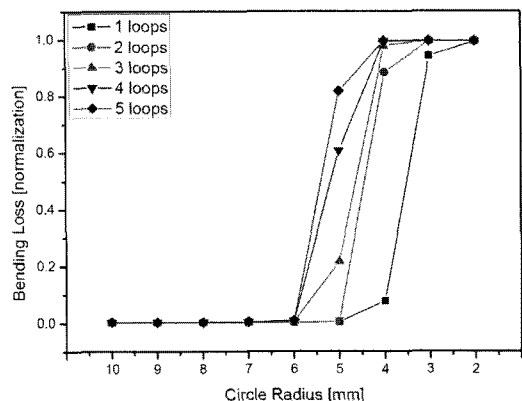
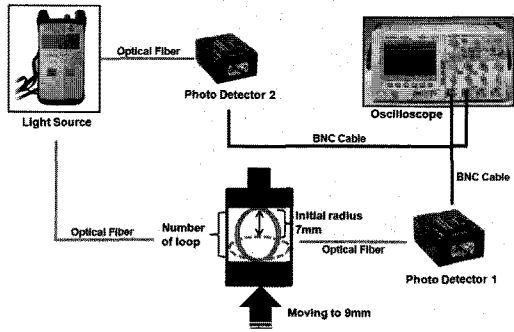
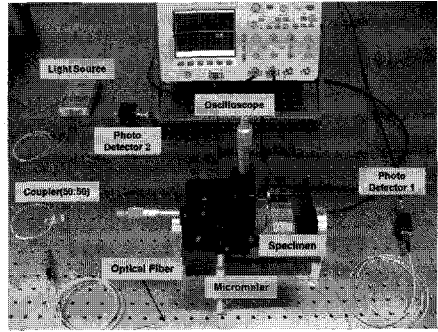


Fig. 4 Experimental data for measurement of bending loss versus circle radius and the number of loops



(a) Schematics of experiments



(b) Photograph of experiments

Fig. 5 Experimental setup for measurement of bending loss versus displacement

정화 되어 있으며, 변위가 발생했을 때 굽힘 손실이 민감하게 발생할 수 있는 7 mm를 최적의 초기 반경으로 결정하였다.

4.2. 변위에 따른 굽힘 손실 측정 실험

앞선 실험에서 결정된 최적의 초기 반경으로 광섬유의 감은 횟수 변경에 따라 굽힘 손실 값이 변위의 변화와 어떤 상관관계를 갖는지 실험을 통해 알아보았다. 본 실험을 위해 광섬유를 반경 7 mm로 1 - 5회 중첩하여 감은 후 입출력단에 광 점퍼코드를 접합하여 감은 횟수 별로 5개의 시험편을 제작하였다.

본 실험도 이전 실험과 마찬가지로 Fig. 5와 같이 광원에 50:50 커플러를 연결하여 커플러 한쪽에서 나온 50%의 빛을 시험편 한쪽의 광 점퍼코드와 연결하였고, 시험편 나머지 한쪽 점퍼코드는 광 검출기 1(photo detector 1)에 연결하여 오실로스코프 채널 1에 연결하였다. 나머지 커플러 한쪽에서 나온 50%의 빛은 광 검출기 2(photo detector 2)에 연결 후 다시 오실로스코프의 채널 2에 연결하여 광원의 안정성이 떨어질 경우에 빛의 손실량을 보정할 수 있도록 하였다.

또한 Fig. 5(b)와 같이, 마이크로미터가 부착된 광학 지그에 제작된 시험편을 고정된 후 마이크로미터를 이용하여 변위를 1 mm 간격으로 0에서 9 mm까지 주어 변위 변화에 따른 굽힘 손실 값을 측정하였다. Fig. 6은 이 과정을 5번 반복 측정하여 평균한 후 데이터를 최고 전압 값을 기준으로 정규화한 그래프이다.

Fig. 6의 결과를 통해서 감은 횟수에 따라 변위를 측정할 수 있는 작동 범위(stroke)가 다를 수 있으며, 또한 작동 범위 내에서 민감도 및 선형성이 다를 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 각각의 감은 횟수에 따라 수직 변위가 주어졌음에도 굽힘 손실이 발생하지 않아 그 크기를 감지할 수 없는 변위 미감지 구간(dead zone)이 존재함을 알 수 있다. Table 1은 감은 횟수에 따른 민감도, 선형성, 작동 범위 그리고 변위 미감지 구간을 보여주며, 여기서 선형성은 선형 상관 계수(R)로 나타내었다. 이때, 가장 중요한 요소인 민감도와 선형성을 정확히 파악하고, 작동 범위가 다르므로 인한 민감도와 선형성에 줄 수 있는 영향을 제거하기 위해 동일한 작동 범위(2 mm) 내에서 민감도와 선형성을 계산하였다.

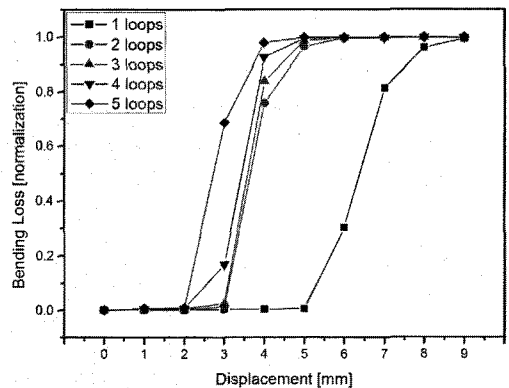


Fig. 6 Experimental data for measurement of bending loss versus displacement

Table 1 Sensitivity, Linearity, Stroke and Dead Zone versus the number of loops

The Number of loops	Sensitivity (/mm)	Linearity	Stroke (mm)	Dead Zone (mm)
1	0.40	0.99	2	5
2	0.48	0.95	2	3
3	0.48	0.93	2	3
4	0.46	0.94	2	2
5	0.49	0.97	2	2

Table 1의 결과를 분석해보면 감은 횟수가 5회 일 때 민감도가 가장 우수함을 알 수 있다. 이는 광섬유의 감은 횟수 증가로 인해, 동일한 변위가 주어졌음에도 굽힘 손실 세기가 크게 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 센서의 선형성은 감은 횟수가 1회 일 때 가장 좋음을 알 수 있으며, 이는 2회 이상 감은 다른 센서부에 비해 제작 오차가 발생하지 않아 변위 변화에 따른 굽힘 손실이 거의 정비례로 발생했기 때문이다. 그리고 변위 미감지 구간은 감은 횟수가 많아질수록 줄어들 수 있으며, 이것 역시 민감도와 마찬가지로 감은 횟수가 많아질수록 굽힘 손실이 증가하므로 상대적으로 작은 변위에도 굽힘 손실이 빨리 발생했기 때문이다. 결국, 구조물로부터 변위를 측정하고자 할 때, 이와 같은 실험 데이터를 바탕으로 변위의 민감도 및 선형성에 대한 중요도에 따라서 센서부의 설계 및 제작이 달라져야 할 것으로 판단된다.

### 5. 기구부 설계 및 제작

광섬유 센서부가 처짐에 의해 발생한 변위를 효과적으로 측정하고, 실 구조물에 설치가 용이하도록 광섬유 변위 센서의 기구부를 설계 및 제작하였다. Fig. 7은 광섬유 변위 센서 기구부의 3차원 CAD 도면을 보여준다.

Fig. 7에서 왼편의 그림은 기구부의 겉을 투과한 내부 모습이며, 오른편은 투과하지 않은 전체 외형을 보여준다. 센서 기구부의 구성품은 ①은 압력부(pressure part)이며, 구조물의 처짐을 센서 기구부로 전달한다. ②는 가이드 부(guide part)이며, 압력부가 위 아래로 자유롭게 상하운동을 할

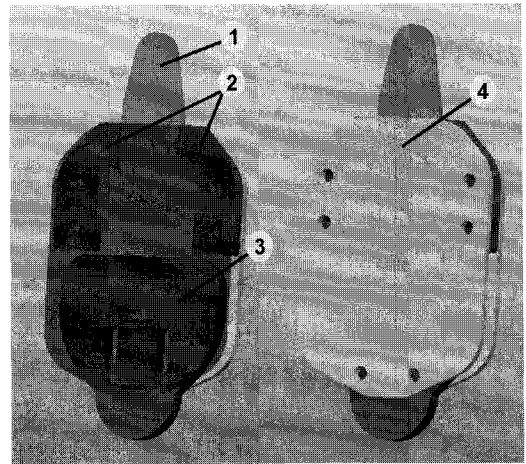


Fig. 7 3D CAD design of mechanism

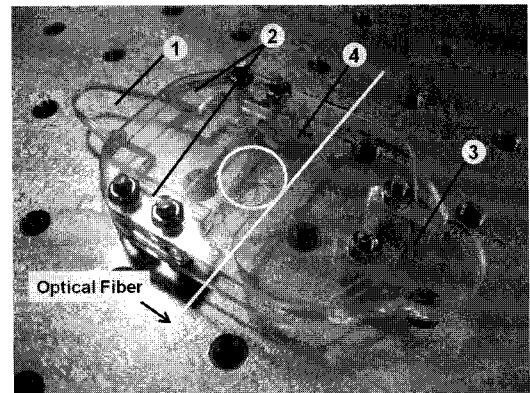


Fig. 8 Prototype of fiber optic displacement sensor

수 있도록 잡아준다. 가이드 부와 압력부는 슬라이드(slide) 형태로 연결하여 압력부가 상하운동을 할 때 마찰 저항을 최소화 할 수 있게 하였다. ③은 지지부(support)이며, 센서부(원형으로 감긴 광섬유)를 접착하여 고정하는 역할과 함께 10 mm 내에서 이동을 할 수 있도록 설계하였고, 이를 통해 센서부에 변위 오프셋(offset)을 주어 변위 미감지 구간을 손쉽게 제거할 수 있게 하였다. ④는 덮개(cover part)이며, 다른 부품들과 결합할 수 있도록 하였다. 압력부를 제외한 나머지 부품에 직경 3 mm의 구멍을 내어 M3(D 3 mm) 규격의 스테인리스 스틸(stainless steel) 볼트와 너트를 이용하여 결합할 수 있도록 하였다. Fig. 8은 아크릴을 이용하여 정밀 제작한 광섬유 변위 센서의 시작품을 보여준다.

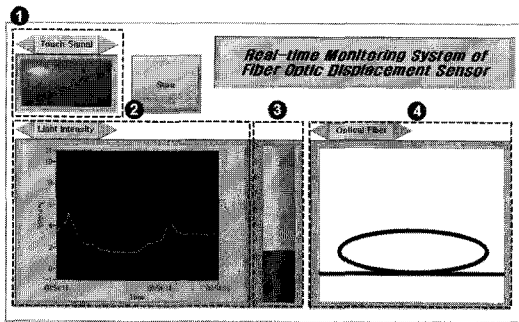


Fig. 9 GUI software for real-time monitoring of fiber optic displacement sensor

## 6. 실시간 모니터링 프로그램 개발

광섬유 변위 센서를 통해 변위가 측정되었을 때 신호 확인과 센서부의 형상을 가시화할 수 있도록 National Instruments의 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 GUI(graphical user interface) 기반의 실시간 모니터링 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램의 목적은 사용자가 광섬유 변위 센서의 상황을 실시간으로 손쉽게 모니터링 하는데 있다.

Fig. 9는 실시간 모니터링 프로그램의 프론트 패널을 보여준다. 여기서 ①은 센서부에 변위가 발생할 때의 감지 상태를 나타내며, 광섬유의 굽힘 손실에 의해 1 mm 이상의 변위가 발생했을 때 초록색에서 빨간색으로 바뀌도록 구성하였다. ②는 빛의 세기 변화를 시간에 따른 그래프로 보여주며, ③은 빛의 세기량 및 변위 변화량을 게이지 형태로 나타내어 사용자가 손쉽게 변위의 변화량을 모니터링 할 수 있도록 하였다. 또한 ④는 원형으로 감겨 있는 광섬유의 형상이 외부 하중에 의해 형상이 어떻게 변화하는지를 실시간으로 손쉽게 관찰할 수 있도록 하였다.

## 7. 결론

본 논문에서는 기계/토목/건축 구조물의 미세 처짐을 실시간으로 모니터링하기 위한 신개념의 광각도형 광섬유 변위 센서를 개발하였다. 개발된 광섬유 변위 센서는 광원과 광 검출기만으로 구성되어 있어 저가형으로 간단히 구성할 수 있으며, 원거리 신호 전달이 좋고 수분에 의한 부식이 발생하지 않아 수중에서도 사용이 가능하다는

장점이 있다. 본 논문에서는 광섬유 굽힘 손실 현상을 이용하여 정원 형태의 센서부를 고안하였고, 민감도와 선형성을 고려한 최적의 설계 파라미터를 찾기 위해 정원 반경 변화에 따른 굽힘 손실 측정과 변위에 따른 굽힘 손실 측정 실험을 수행하였다. 이를 통해, 초기 반경 7 mm에서 변위가 주어지지 않았을 때 빛의 세기가 안정적이며, 변위에 따라 굽힘 손실이 가장 민감하게 발생할 수 있는 반경임을 찾아내었다. 또한 광섬유의 감은 횟수는 5회일 때 변위 크기 변화에 따른 굽힘 손실의 민감도가 가장 우수하고, 1회 일 때 선형성이 가장 좋음을 확인하였으며, 감은 횟수가 커질수록 변위 민감도 구간이 줄어들음을 실험적으로 확인하였다. 그리고 실 구조물에 설치 가능하고 외부 변위 변화를 손쉽게 측정할 수 있는 센서 헤드의 기구부를 새롭게 설계 및 제작하였으며, 광섬유 센서의 상태를 손쉽게 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 GUI 기반의 프로그램을 개발하여 하나의 계측 시스템으로 완성하였다. 향후, 센서의 민감도와 선형성 그리고 작동 범위를 높이는 추가 연구를 통해 변위뿐만 아니라 하중, 진동 등의 다양한 물리량을 동시에 계측할 수 있는 센서의 개발이 가능할 것이라 판단된다. 이를 통해, 다양한 구조 건전성 모니터링 연구와 첨단 비파괴검사 기법 향상에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 김대현, "구조물 건전성 감시를 위한 무아래식 광섬유 경사계 센서 개발", *비파괴검사학회지*, 제28권, 제2호, pp. 157-163 (2008)
- [2] N. -S. Kim and N. -S. Cho, "Estimating deflection of a simple beam model using fiber optic Bragg-grating sensors," *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 4, pp. 433-439 (2004)
- [3] 조남소, 김남식, "FBG 변형률 센서를 이용한 현수교의 정적 처짐형상 추정," *대한토목학회지*, 제28권, 제5A호, pp. 699-707 (2008)
- [4] 장성진, 김남식, "모드 분해 기법을 이용한 변위 응답 추정 알고리즘 실험량 적용," *대한토목학회지*, 제30권, 제3A호, pp. 257-264 (2010)

- [5] 오상우, 최혁진, "케이블의 곡률 측정을 위한 새로운 형태의 광섬유 마이크로밴드 센서 개발", *한국해양환경공학회지*, 제12권, 제4호, pp. 289-295 (2009)
- [6] J. -S. Heo, K. -Y. Kim and J. -J. Lee, "Development of a distributed force detectable artificial skin using microbending optical fiber sensors," *JIMSS*, Vol. 20, No. 17, pp. 2029-2036 (2009)
- [7] 김대현, "광섬유 가속도계 센서의 동적구간 조절을 위한 신호처리 알고리즘 개발", *비파괴검사학회지*, 제27권, 제4호, pp. 291-298 (2007)
- [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] D. Marcuse, "Curvature loss formula for optical fibers," *JOSA*, Vol. 66, Issue 3, pp. 216-220 (1976)
- [10] D. Donlagic and B. Culshaw, "Propagation of the fundamental mode in curved graded index multimode fiber and its application in sensor system," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 18, No. 3, pp. 334-342 (2000)
- [11] 유정애, 조재홍, 권일범, "광 커넥터의 반사를 이용한 다중화된 굽힘 손실형 단일모드 광섬유 변위 센서," *한국광학회지*, 제15권, 제5호, pp. 415-422 (2004)
- [12] A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*, Chapman and Hall, London, pp. 250-290 (1983)