

## 광섬유 센서를 이용한 첨단구조계측 시스템 Advanced Structural Monitoring System Using Fiber Optic Sensors

김기수\*                      김종우\*\*  
Ki Soo Kim\*                Jong Woo Kim\*\*

### 1. 서론

토목 및 건축구조물에 대한 합리적이고 정확한 설계, 시공은 물론 구조물 시공후의 안전 점검, 보수·보강 등을 위한 계측은 구조물의 사용성을 항상 최적의 상태로 유지하고 구조물의 공용수명을 연장시키는데 있어 매우 중요하다.

일반적으로 사용단계의 구조물은 시간이 경과함에 따라 초기의 설계, 시공상 오류에 의한 초기결함, 반복하중 그리고 취약한 환경 등 외부 조건에 노출될 경우에는 구조물 본연의 성능을 점차 상실하게 되어 심지어는 인명과 재산권을 위협하는 대형 붕괴사고를 일으키기도 한다. 따라서 구조물의 사용성을 적정 수준 이상으로 유지하기 위해서는 정기적인 점검을 통해 잔존수명을 미리 예측하여야 함은 물론, 최적의 보수시기와 보수방법을 알려줄 수 있는 첨단 구조 계측시스템이 요구되고 있다.

이러한 첨단 구조 계측 시스템에 대한 관심과 실제 연구 및 적용사례가 최근에 활발해지고 있으나 아직 실제 구조물에 광범위하게 적용되지는 않고 있는데 그 장애 중의 하나가 계측시스템 자체가 갖는 계측결과의 신뢰도 문제와 비용 때문이라고 볼 수 있다.

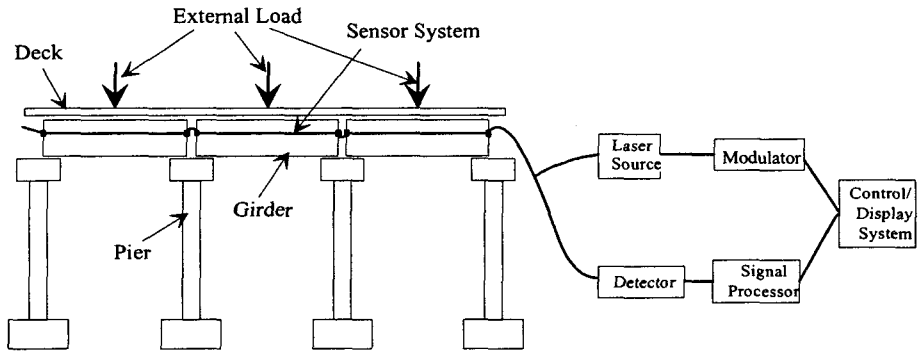
일반적으로 구조 계측시스템은 센서부와 제어부로 이루어지게 되는데, 현재 센서부에 사용되는 센서로는 반도체 센서, 금속박막센서, 압전센서, 광학 센서 등이 있다. 최근에는 작고 가벼울 뿐만 아니라, 전자파에 의한 장애가 없고, 신호의 원거리 전송이 가능한 첨단 광섬유 센서를 사용한 시스템이 주목을 받기에 이르렀다.

그러나 선진국의 많은 학자들은 대부분 복합재료와 소형 구조물에 대해 연구가 편중되어 있고 시멘트 콘크리트 구조물 등의 대형 구조물은 아주 초기단계에 머물러 있는 실정이다. 대형구조물에 대해서는 국내에서도 각종 비파괴 계측장비와 이를 바탕으로 구조물의 안전도를 분석하는 이론과 시뮬레이션이 성행하고 있으나, 광섬유센서를 이용한 시설물 유지 관리 시스템은 선진국의 일부에서 잠수함이나 항공기에 일부 시도되고 있는 실정이며, 국내에서는 최근 들어 광섬유 계측기술에 대한 인식을 넓혀가고는 있지만 아직도 구조계측시스템을 전자식 또는 기계식 계측시스템에 의존하고 있는 실정이다.

다음 <그림 1>은 일반적인 광섬유 센서를 이용한 전형적인 교량의 구조계측시스템을 보여주고 있다. 국내에서는 구조물 유지관리 시스템이 전무한 상태이고 선진국에서는 일부 기존의 센서를 이용한 유지관리 시스템이 있다. 그러나 광섬유 센서는 기존의 전자식 또는 기계식 센서에 비해 다음과 같은 장점이 있어 최첨단의 구조계측시스템의 구성이 가능하다. <표 1>은 광섬유센서가 갖는 일반적인 장점을 요약하고 있다.

\* 정회원 호서대학교 벤처전문대학원 교수, 공박

\*\* (주)ICES 개발팀장



<그림 1> 광섬유를 이용한 교량 유지관리 시스템

<표.1> 기존센서와 광섬유센서의 비교

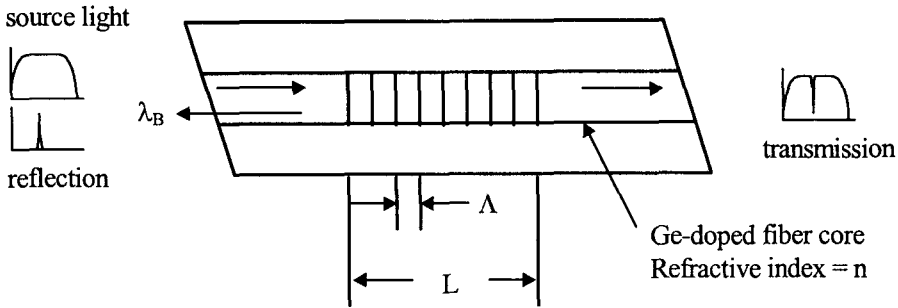
기존센서	광섬유 센서
전자파에 의한 노이즈 발생 (스트레인 게이지의 오차 요인)	전자파 장애 없음
센서매설시 결함 → 콘크리트 균열 발생	100 $\mu$ m정도의 광섬유 사용으로 결함요인 없음
내구성결여 및 리드선 납땜처리문제	내구성 견고
여러개의 센서 매설 필요	한 개의 LINE으로 여러개의 센서 역할
리드선에서의 전자파 장애로 원거리 신호 전달 곤란으로 많은 수의 서브 시스템 필요	원거리 신호전달 용이하며 서브시스템 개수를 줄일 수 있음
리드선의 굵기 및 무게 때문에 매설 센서개수의 제한	센서의 개수가 많아져도 부피가 별로 커지지 않음

## 2. 광섬유 센서의 기본 원리

### 2.1 Fiber Bragg Grating의 원리

FBG 는 Ge가 첨가된 광섬유 코아에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 조사함으로써 굴절률 변화를 유도하여 grating의 주기에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광섬유 소자이다. <그림 2>는 FBG의 구조를 나타낸다.

<그림 2>와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식(1)과 같은 Bragg 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 grating에서 반사되며, 나머지 파장 성



<그림 2> Fiber Bragg Grating 구조

분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

위의 식에서  $n$ 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(effective refractive index)이며,  $\Lambda$ 는 grating 과 grating 사이의 간격(grating period)이다.

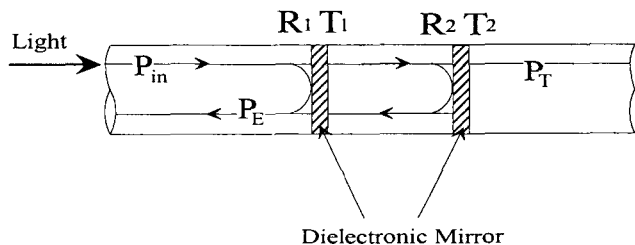
grating에서 반사되는 Bragg 파장은 식(1)과 같이 유효 굴절률과 grating간격의 함수이며, FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 Bragg 파장이 달라진다. 그러므로 Bragg 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 인가된 물리량을 구할 수 있다. strain 변화에 대한 Bragg 중심 파장의 변화는 아래의 식 2과 같으며,

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \epsilon \quad (2)$$

여기서  $P_e$ 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리(germano-silicate glass)의 경우 대략 0.22 의 값을 가지며,  $\epsilon$ 은 광섬유 grating에 가해진 strain이다.

## 2.2 Fabry-Perot 간섭형 광섬유 센서의 원리

<그림 3>에 fabry-Perot 광섬유 간섭형 센서의 구조를 나타냈다. <그림 3>과 같이 광섬유 내에 두 개의 평면 반사경을 일정한 간격으로 평행하게 맞추어 놓으면, 특정주파수의 전자파가 공진하게 되는데 이것을 Fabry-Perot 에타론 또는 Fabary-Perot 공진기라 한다.



<그림 3> Fabry-Perot 광섬유 센서의 구조

<그림 3>과 같이 반사면의 반사율이 각각 R1, R2인 간섭계에서, 반사율이 1보다 훨씬 작고 두 반사면의 거리가 수 cm 이내로 작은 경우, 반사율은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$R = R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 \cdot R_2} \cdot \cos \phi$$

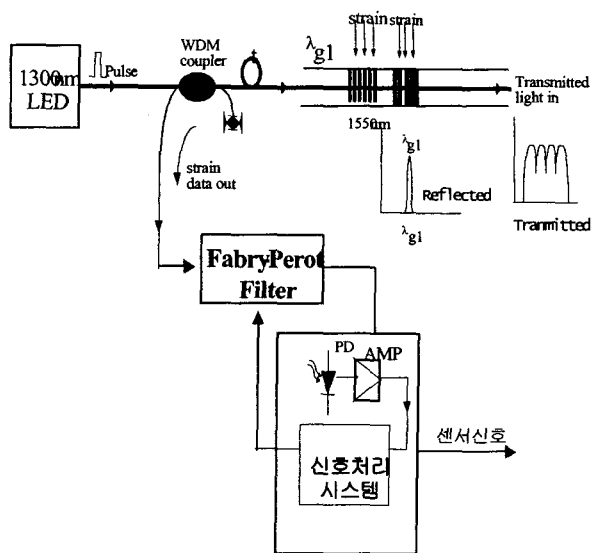
여기서, 간섭계의 광위상차  $\phi$ 는

$$\phi = \frac{4\pi C D O T n \cdot L}{\lambda} = \frac{4\pi \cdot n \cdot L \cdot \nu}{c}$$

$n$  : 간섭계의 유효 굴절율,  $L$  : 두 반사면 사이의 거리,  $\nu$  : 광 주파수,  $c$  : 자유공간에서의 빛의 속도(약  $3 \times 10^8$  m/sec)이며, 이러한 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 센서로 응용할 경우 광위상차  $\phi$ 의 인자  $n, L, \nu$ 의 변화를 이용하여 온도, 압력, 응력 등의 물리적 변화량을 감지할 수 있다.

#### 4. Bragg Grating 센서의 신호 처리 시스템의 구성

본 연구에서 구성 제안한 시스템 구성도는 다음 <그림 4>와 같다. 시스템 구성은 먼저 광원인 ELED(Edge-emitting LED)를 구동하기 위한 LED구동부, 외부의 온도나 strain 등의 물리적 변화를 감지하는 광섬유 센서부, 센서에서 반사되어 돌아온 신호를 Fabry-Perot 필터를 이용하여 검출하는 신호 검출부, 그리고 검출된 신호를 CPU를 이용하여 처리하는 신호 처리부로 구성된다.



<그림 4> Fiber Bragg Grating Sensor System 전체 블럭도

### 3. 철근 콘크리트 보의 FBG 광섬유 센서의 평가

#### 3. 1 시험체 제작

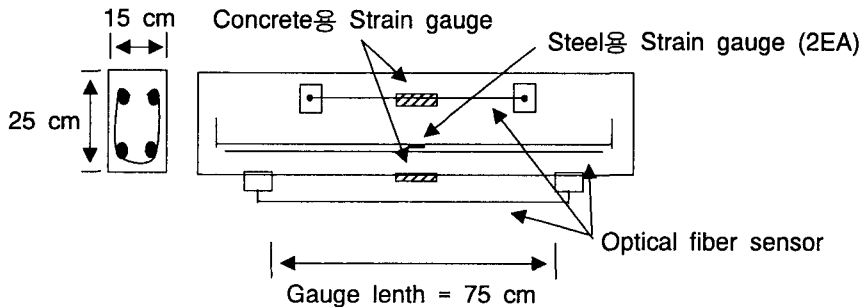
FBG 광섬유센서의 기본특성을 이용하여 광섬유 센서가 철근 콘크리트 구조물에 계측용 센서로 활용 시 그 응답특성과 각종 부착기구의 특성을 평가하기 위하여 15×25×180cm 크기의 보를 제작하고 하중을 가하여 얻어지는 인장 및 압축변형률 값을 상용되고 있는 전기저항식 변형률 게이지와 비교하였다. 실험에 사용된 철근 콘크리트 보의 제원과 물성치는 아래의 <표.2>과 같다.

<표.2> 콘크리트 보의 제원 및 물성치

종류	목적	사용재료	
		철근	콘크리트
CTL I, II	변형률 특성 확인	2@D13(인장) 2@D10(압축)	$\sigma_{ck}=270\text{kg/cm}^2$

#### 3. 2 시험방법

광섬유센서의 신호응답 및 압축변형률의 측정 가능성 확인과 센서의 길이를 증가시켜, 일반적인 전기저항식 게이지로 구현할 수 없는, 균열발생 이후의 변형률 측정할 수 있는 長섬유센서(Macro FBG)의 적용성을 평가하였다. 4점재하 방식으로 하중을 재하하여 인장변형률(CTL I)과 콘크리트 상부의 압축변형률과 철근에 부착하여 매설한 광섬유센서(CTL II)의 신호응답을 평가하였다.(그림 5)

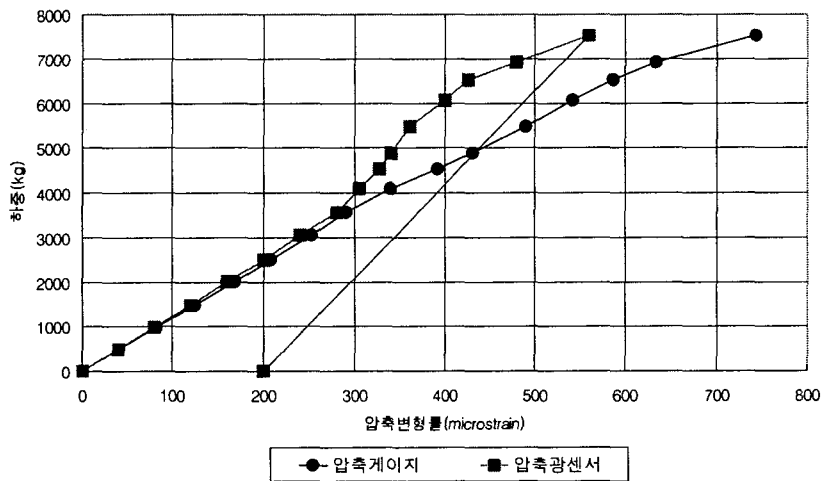


<그림 5> 철근매립부 변형률 측정을 위한 시험체(CTL I, II)

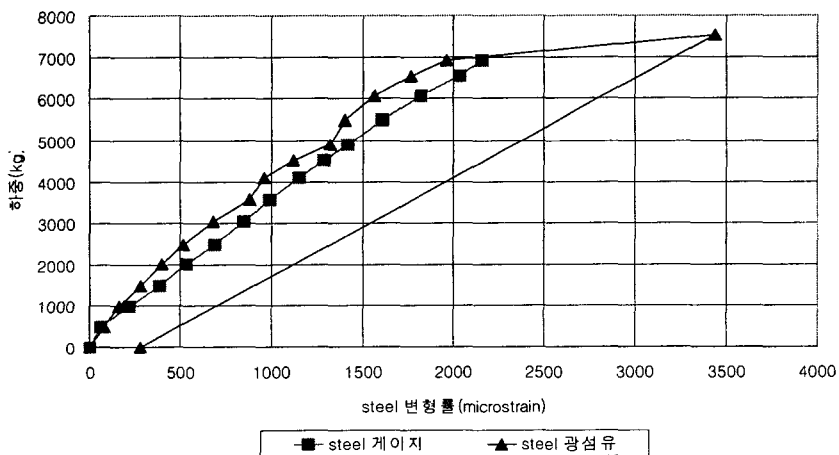
#### 3. 3 시험결과

보 시험체 파괴강도의 약 40%인 4ton까지를 반복재하한 CTL I 시편의 경우,

Loading-Unloading 시 변형률 응답이 기존의 변형률센서와 거의 일치하는 것으로 나타나 광섬유 센서의 부착기구 적용방법 및 시험방법의 적합성을 확인하였다. 또한 CTL II 시편의 경우, 압축변형률 측정을 위하여 게이지 길이 45cm인 광섬유 센서에 미리 2000 $\mu\epsilon$ 의 Pre-Tension을 가하여 실험하였으며, 실험결과 7ton이 가해진 후 전기저항식 변형률게이지는 파손되어 측정이 불가능한 데 비해 광섬유센서는 Unloading 시 잔류변형량도 측정이 가능하므로 균열발생 및 대변형 후에도 유효한 센서로 평가할 수 있었다(그림 6). 철근에 매립된 광섬유 센서의 경우도 기존의 전기저항식 철근게이지와 매우 유사한 거동을 보여주고 있어 구조물 계측용으로 유효 적절한 센서임을 확인하였다(그림 7).



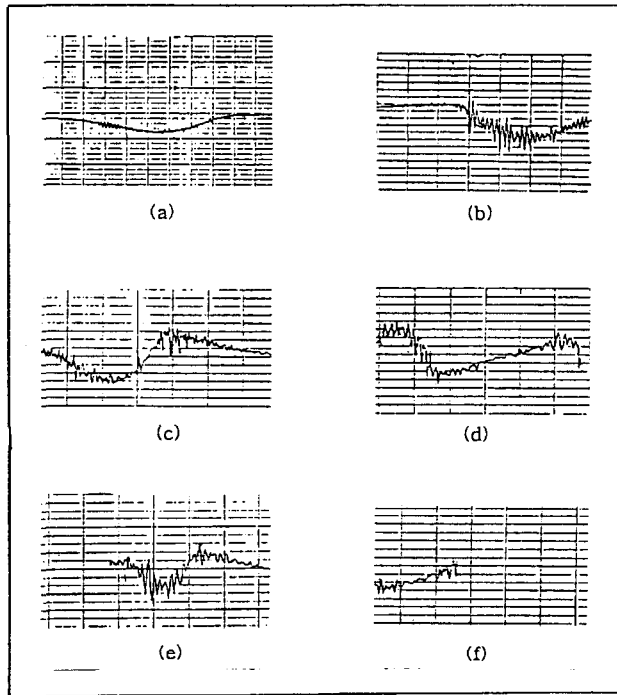
<그림 6> 전기저항식 게이지와 FBG 광섬유 센서의 압축변형률측정결과(CTL II)



<그림 7> 전기저항식 게이지와 FBG 광섬유 센서의 철근매립부 변형률측정결과(CTL II)

#### 4. 광섬유 센서의 성산대교 구조물에의 적용

광섬유센서를 성산대교의 한 경간을 선정하여 거더의 중앙부에 부착시키고 모래를 적재하여 총 중량이 30톤이 되도록 한 차량을 10Km/h부터 60Km/h로 속도를 변화시켜가며 측정하였는데, 속도에 따라서 그림8과 같은 스트레인 패턴을 얻었다.



(a) 10 km/h    (b) 20 km/h    (c) 30 km/h  
 (d) 40 km/h    (e) 50 km/h    (f) 60 km/h

<그림 8> 성산대교에 부착시킨 광섬유 센서의 데이터

#### 5. 결론

광섬유센서를 이용한 첨단구조계측시스템에 대한 소개와 이를 이용한 스트레인의 계측 그리고 이를 통해 모니터링 시스템의 향후방향을 제시하였다. 광섬유센서를 이용한 계측 결과 스트레인 게이지와 유사한 데이터를 보여 주고 있으며, 광섬유 센서의 장점인 내구성과 시스템의 안정성, 다중화 가능성 그리고 절대값의 측정 등을 고려한다면 우수한 계측시스템이 되리라고 보여지며, 실지 성산대교에 부착되어진 광섬유센서의 거동을 측정하였으며, 이를 통해 광섬유센서 모니터링 시스템의 가능성을 보여 주었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학재단의 스마트사회기반시설 연구센터의 지원 하에 이루어 졌으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Kin-tak Lau, Chi-chiu Chan, Li-min Zhou, Wei Jin, "Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fiber sensors", ELSEVIER, Composite Part B, August 2000, pp 33-45
2. Lee, S. E., D. Han, H. Lee and K. S. Kim, "Signal Processing System of Multi-Fiber Bragg Grating Strain Sensors using Wavelength Scanning-Locking of a Fabry-Perot Tunable Filter" 한국통신학회논문지 Vol. 24, pp 1472-1479, 1999.
3. Kin-tak Lau, Libo Yuan, Li-min Zhou, Jingshen Wu, Chung-ho Woo, "Strain monitoring in FRP laminates and concrete beam using FBG", ELSEVIER, Composite Structure, 2001, pp 9-20
4. Kim, K. S., J. Ryu, S. J. Lee and L. Choi, "In-situ Monitoring of Sungsan Bridge in Han River with Optical Fiber Sensor System" Proceedings of SPIE Vol. 3043, pp 72-76, 1997.
5. Kim, K. S., "Smart Concrete Structures with Optical Fiber Sensors" KCI Concrete Journal Vol. 11, pp 109-114, 1999.
6. Kim, K. S., Y. Ismail and G. S. Springer, "Measurement of Strain and Temperature with Embedded Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors", J. of Composite Materials Vol. 27, pp 1663-1667, 1993.
7. Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors" J. of Composite Materials Vol. 27, pp 1618-1662, 1993.