

# 스마트 모니터링용 광섬유센서

## Fiber Optic Sensors for Smart Monitoring

김기수  
Kim, Ki-Soo

**국문 요약 >>** 최근 건설기술이 발달함에 따라 점차적으로 더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측 할 수 있는 기술적인 체제가 요구되고 있는 시점에서, 광섬유센서는 내구성과 높은 분해능, 전자기파 노이즈 저항성, 절대값의 측정, 다중화 등의 가지고 있는 여러 장점 때문에 미국 등 선진국의 경우 교량, 터널 그리고 건물 등에 변위와 변형률 측정에 많은 설치가 진행되어 왔고, 광섬유 센서를 이용한 시스템이 구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 본 논문에서는 이러한 광섬유센서 중에서 일반적으로 가장 많이 사용하고 있는 광섬유격자 센서의 응용의 폭을 확대하기 위하여 여러 가지 응용분야에 적용하고자 하였으며, 특히 전단응력이 많이 걸려 foil형 스트레인 게이지를 사용하기 어려운 보 기둥 접합부에 적용하여 광섬유격자 센서가 일반적으로 사용되는 전자식 변위 센서들과 정밀도가 대단히 차이가 나고 있음을 보여주고 있고, 복합재료와 콘크리트 접합 구조물에 적용하여 흔히 발생하는 결함인 delamination을 측정하는데 광섬유격자 센서가 유효적절함을 보여주고 있으며, 원자력발전소 격납구조물과 같은 대형구조물에 적용하여 변위를 측정함에 있어서 광섬유격자 센서가 시공도 용이하고 데이터도 양호함을 보여 주고 있어, 기존의 어떤 구조물도 광섬유센서를 적용하여 쉽게 광섬유 스마트구조물화 할 수 있음을 보여준다.

**주요어** 광섬유격자센서, 스마트모니터링, 보기둥 접합부, 복합재료보강 구조물, 원자력격납건물

**ABSTRACT >>** Recently, the interests in structural monitoring of civil infrastructures are increased. Especially, as the civil infrastructures such as bridges, tunnels and buildings become large-scale, it is necessary to monitor and maintain the safety state of the structures, which requires smart systems that can supply long-term monitoring during the service time of the structures. In this paper, we investigated the possibilities of fiber optic sensor application to the various structures. We investigate the possibility of using fiber optic Bragg grating sensors to joint structure. The sensors show good response to the structural behavior of the joint while electric gauges lack of sensitivity, durability and long term stability for continuous monitoring. We also apply fiber optic structural monitoring to the composite repaired concrete beam structure. Peel-out effects is detected with optical fiber Bragg grating sensors and the strain difference between main structure and repaired carbon sheets is observed when they separate each other. The real field test was performed to verify the behaviors of fiber Bragg grating sensors attached to the containment structure in Uljin nuclear power plant in Korea as a part of structural integrity test which demonstrates that the structural response of the non-prototype primary containment structures. The optical fiber Bragg grating sensor smart system which is the probable means for long term assessments can be applicable to monitoring of structural members in various civil infrastructures.

**Key words** fiber bragg grating sensors, smart monitoring, beam-column joints, composite repaired structures, nuclear containment structures

### 1. 서론

광섬유센서는 가지고 있는 여러 장점 때문에 미국 등 선진국의 경우 교량, 터널 그리고 건물 등에 변위와 변형률 측정에 많은 설치가 진행되어 왔으나 균열모니터링을 포함한 국내에서의 구조물에 대한 적용은 아직 초기단계라 할 수 있다.

미국의 EPRI를 비롯한 선진국을 중심으로 원자력 분야에서도 내구성이 좋고 정확도가 높은 광섬유센서 계측기술을 원자력 발전소에 적용하려는 노력이 지속되고 있다. 이러한 광섬유센서는 원자력구조물 뿐만 아니라, 교량, 터널, 댐 등 사회기반 구조물의 장기간의 구조물 외부의 변형률을 측정과 균열을 모니터링하는데 적합하며 장기적인 내부의 결점이나 거동을 표시하고 예측하기에는 적합한 것으로 알려져 있다.<sup>(1-7)</sup> 유럽의 Smartec사와 FOSS사, 미국의 IFOS사를 비롯한 여러 회사에서 교량과 터널, 지반구조물, 건축물 등에 대한 다양한 광섬유센서들을 적용하고 있으며, 현재 구조계에 사용하고 있는 변형률계, 변위계, 경사계, 가속도계 등, 거

<sup>1)</sup> 홍익대학교 과학기술대학 재료공학부  
(대표저자: kisookim55@paran.com)

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 10. 12 / 심사종료일 : 2006. 11. 28)

의 모든 종류의 계측기들이 광섬유센서로도 제작되어 광섬유 데이터로거 하나로 필요한 물리량들을 측정할 수 있는 all fiber system이 실현되어 가고 있다. 최근 건설기술이 발달함에 따라 점차적으로 더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측 할 수 있는 기술적인 체제가 요구되고 있는 시점에서, 점차 세계적으로 광섬유 센서를 이용한 시스템이 구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

구조물의 안전성을 예측하기 위해서 변형률, 온도, 변위, 진동, 균열의 변화 등을 측정하는 것이 중요하다. 지금까지 이러한 계측은 여러 종류의 전자식 게이지를 사용하여 측정되어졌으나, 이러한 센서들은 단기간의 구조물 외부의 변형률, 균열의 폭의 변화를 측정하는데 적합하며 장기적인 구조변형이나 creep, 균열의 진전이나 거동을 계측하고 표시하기에는 적합치 않은 것으로 알려져 있다. 전자식 스트레인 게이지를 이용한 센서를 구조물 내 매입(embedding) 또는 부착하는 경우, 구조물의 잔존기간동안 시간이 지남에 따라, 전자식 스트레인 게이지와 리드선 사이에 부식에 의한 결합이 생길 수 있으며 또한 전자식 스트레인 게이지는 병렬 즉, 하나의 센서에 하나의 리드선이 생긴다는 단점 때문에 분해능이 좋고, 광통신 방식을 적용하여 한 개의 리드선으로 열 개이상의 센서를 적용할 수 있는 광섬유센서 시스템 보다 구조물의 장기 계측용 온라인 자동화 시스템(On-Line system)에는 문제가 있는 것으로 판단되고 있다.

기술의 발전에 따라 더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측 할 수 있는 기술적인 체제가 대두되고 있는 시점에서, 점차 세계적으로 광섬유 센서를 이용한 시스템이 구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.<sup>(8-11)</sup>

## 2. 광섬유센서의 작동원리

### 2.1 광섬유센서의 장점

이러한 광섬유 센서는 신뢰성 있는 On-Line 모니터링을 위한 재료로서 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 먼저 재질이 석영이므로 부식이 되지 않아 장기계측에 적합하며, 전자기파에 의해 영향을 받지 않는다는 점이다. 따라서 측정값이 무선 송신기 등과 같은 전자기적 잡음에 의하여 방해 간섭을 받지 않으므로 계측의 안정성이 높다. 특히 고속철도와 같은 전자기적 잡음이 측정신호에 영향을 주는 환경에는 필수적으로 광섬유 센서가 적용되어야 한다고 판단된다. 그리고 정보가 빛의 속도로 전달되므로 엄청난 양의 정보처리가 가능하다고 광섬유의 직경이 1mm 보다 작으므로 측

정범위와 정도에 따라 광범위하게 센서가 사용될 수 있고 구조물 거동에 영향을 거의 미치지 않는다. 원거리 신호전달 능력이 우수하여 현장에는 센서만 설치하고 광케이블로 연결만 해주면 별도의 시스템과 전원이 필요하지 않다.

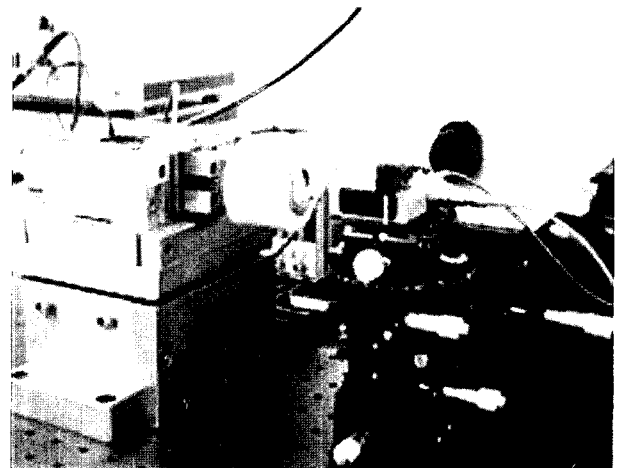
### 2.2 광섬유센서의 제작

광섬유센서 중에서 반도체 제조 공정의 사진식각 공정과 유사한 방법으로 대량생산이 가능하고 다중화가 용이한 광섬유 격자센서가 그 응용의 폭을 넓혀가고 있다. 광섬유 격자센서는 광섬유 안에 주기적인 굴절률변화를 갖는 격자를 설치하여 이 격자의 주기에 딱 맞는 빛은 반사되도록 고안된 일종의 거울인데, 스트레인 또는 온도에 의해 길이가 늘어나면 격자의 주기가 달라져 반사되는 빛의 파장이 달라지고 이 파장변화를 측정함으로써 스트레인 또는 온도를 측정할 수 있게 된다. 그리고 파장을 측정하는 방식을 사용하면 한번에 여러 개의 파장을 한꺼번에 측정할 수가 있어 센서라인 하나에 여러 개의 센서를 배치하여 측정할 수 있다. 이를 다중화 측정이라 하는데 이는 광섬유격자센서가 가지는 큰 장점이다.

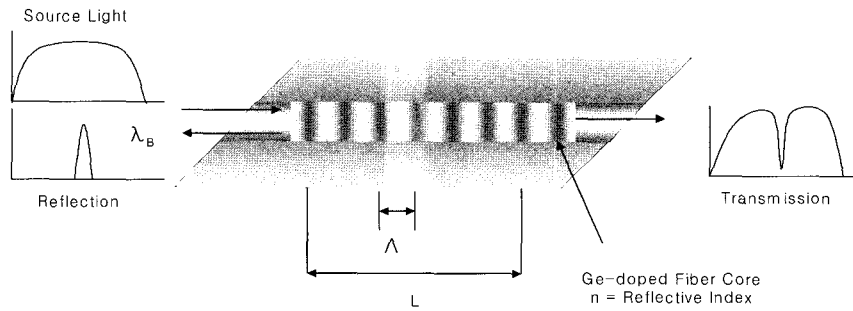
아래의 그림 1은 자외선 레이저를 이용해 광섬유 격자센서를 제작하는 모습으로 격자의 패턴을 새기기 위한 위상 마스크와 레이저 축과의 정렬이 대단히 중요하다.

### 2.3 광섬유센서 측정의 원리

상기와 같이 제작된 광섬유격자센서는 그림 2와 같은 구조를 가지며 그림에서 보이는 바와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식 (1)과 같은 Bragg 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 grating에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.



〈그림 1〉 Fiber Bragg grating fabrication using Eximer laser.



〈그림 2〉 Schematic diagram of Fiber Bragg Grating.

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

위의 식에서  $n$ 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(effective refractive index)이며,  $\Lambda$ 는 grating과 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 (2)와 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 0.22의 값을 가지며,  $\epsilon$ 은 광섬유 grating에 가해진 strain이다.

### 3. FBG 센서의 보 기둥 접합부에서의 활용

과거에는 구조물이 사용하중(service load) 범위 내에서부터 최대하중까지의 거동에 관심을 가지고 있었으나, 오늘날에는 주기적 횡하중(cyclic lateral load)에 대한 내진 골조의 거동에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 또한 최근 철근콘크리트 구조물의 대형화, 고층화되어 가면서 지진하중 및 풍하중과 같은 심각한 비탄성 변형을 일으키는 반복 주기하중을 받을 때 보-기둥 접합부가 부담하는 응력이 이전보다 높아지게 되었으며 균열이 쉽게 발생할 수 있는 구조적으로 취약한 부분으로 밝혀졌다.

현행규준에 따라 구조물을 설계할 경우 모멘트연성골조(ductile moment resisting frame)에서 가장 치명적인 피해의 가능성을 내포하고 있는 영역 중의 하나는 보-기둥 접합부이다. 일반적으로 보-기둥 접합부에서는 구조물이 지진력을 받게 되면, 지진동의 성분이 정, 부 방향으로 반복하여 가해지므로 기둥은 인장과 압축이 교대로 반복되는 변동축

력을 경험하게 된다. 이러한 변동축력은 기둥의 내력과 강성을 변화시키고, 접합부내에서의 보 주근의 정착 및 접합부의 전단 거동에 영향을 주어 구조물의 내력 및 변형능력이 변화될 가능성이 있으므로 접합부에서의 보 주근의 정착 특성 및 접합부의 전단특성을 명확히 파악할 필요가 있다.<sup>(12)</sup>

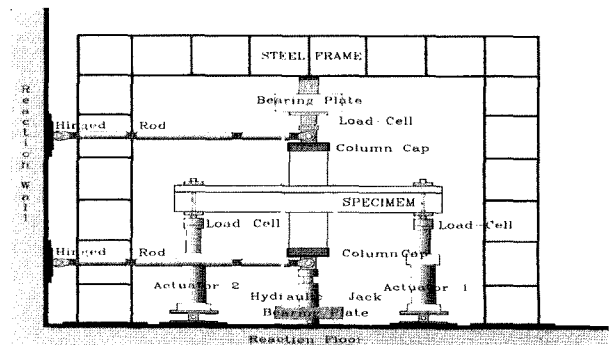
따라서, 고층 골조 구조물의 안전성 및 내진성능을 적절히 평가하기 위해서 보-기둥 접합부에 반복하중을 적용할 때의 광섬유 센서를 사용한 상시 계측에 대해 연구할 필요가 있다. 보-기둥 접합부의 실제적인 거동을 파악하기 위하여 슬래브가 있는 접합부 시편을 제작하여 실험을 실시하였다.

### 3.1 시험체 제작 및 설치

철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 반복하중상태에서의 거동을 계측하기 위하여 슬래브가 있는 보-기둥 접합부 시험체를 2개 제작하였으며, ACI 318-96 및 ACI-ASCE 352 위원회 설계지침에 만족하도록 설계하였다. 시험체의 콘크리트 압축강도는  $270\text{kg/cm}^2$ 이며, 시험체의 제작은 가능한 실제 조건에 근접하도록 하였으며, 시험체의 상세는 ACI-318-96 지침에 따라 제작하였다.

시험체의 형태는 그림 3과 같으며, 기둥단면은  $400\text{mm} \times 270\text{mm}$ , 보단면은  $270\text{mm} \times 370\text{mm}$ , 슬래브 두께는  $95\text{mm}$ 이다.

반복하중상태에서의 접합부의 거동을 얻기 위하여, 기둥



〈그림 3〉 The shape of specimen and the test setup.

부분에 일정한 축력을 유지하면서 보 양끝단에 반복하중을 주어 그에 따른 내력상태를 재현하였다. 기둥의 양 끝단에는 재하판을 설치하고 재하판과 기둥 양 단부사이에는 hydraulic jack과 하중계(loadcell)를 설치하여 축력을 도입하였으며, 실제 건물 변형에서의 반곡점을 재현하며 비틀림을 방지하기 위해 그림 3에서와 같이 상하 가력판의 연결점을 힌지로 처리하였다.

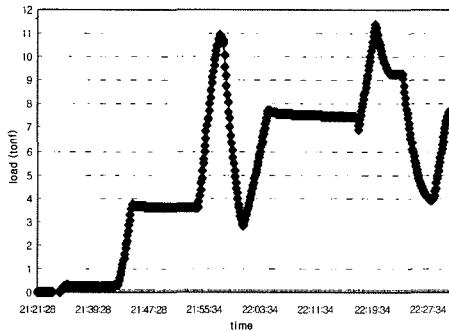
각 재하위치에서 하중계를 사용하여 하중을 검출하였으며, 접합부와 기둥, 보 부재가 접하는 위치에서 주근과 보강근의 변형을 측정하기 위하여 주요부위에 9개의 wire strain gage를 이용하여 철근의 변형도를 측정하였고, 접합부 변형 및 부재 회전을 측정하기 위해 접합부 및 보, 기둥의 소성힌지 부분을 LVDT(linear variable displacement transducer),

potentio meter 등으로 측정하였는데, 포일형 스트레인게이지를 콘크리트표면에 부착하지 못하였는데 이는 전단균열에 의하여 게이지가 쉽게 손상되기 때문이며, 보의 끝단에는 Long LVDT를 사용하여 보의 변위를 측정하였다.

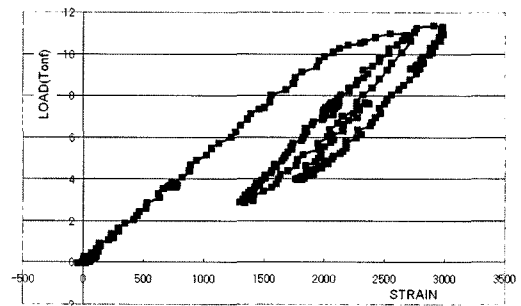
3.2 보-기둥 접합부구조 시험결과

실험은 시험체를 그림 4와 같이 반복 하중을 가력하여 실험을 실시하였다. 그림 5는 시험체 내부의 인장을 받는 철근 스트레인게이지의 결과로서 하중이력에 따른 반복 변형을 반영하고 있다.

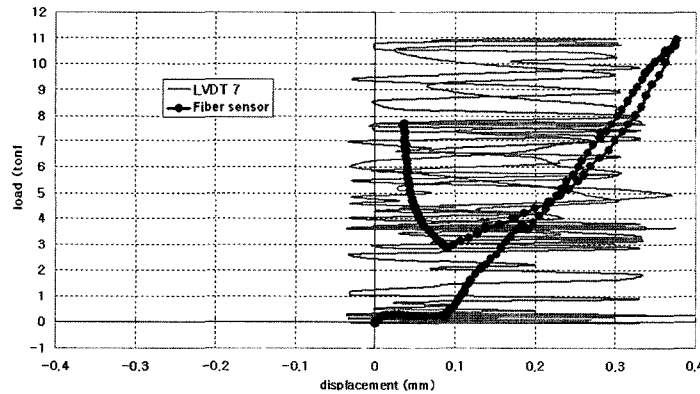
LVDT와 광섬유 센서의 비교 및 접합부의 적용가능성에 대해 살펴보면, 각 센서의 측정 범위에 따라 미소변형을 보이는 접합부의 대각부분과 대변형을 일으키는 부분으로 나



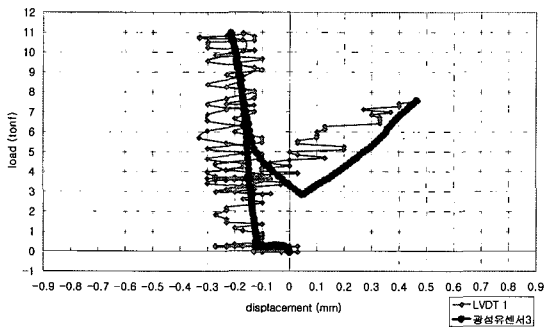
〈그림 4〉 Load history for the experiment.



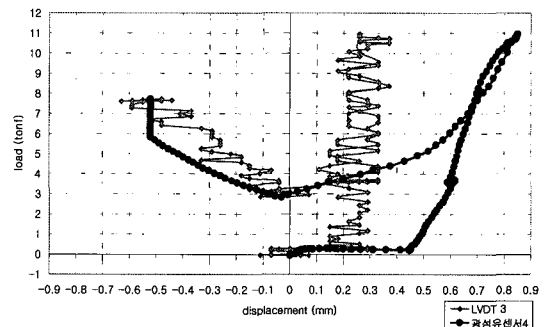
〈그림 5〉 Strain gauge inside the specimen.



〈그림 6〉 Load-Displacement curve for the diagonal part of the joint.



(a) Fiber optic FBG sensor #3



(b) Fiber optic FBG sensor #4

〈그림 7〉 Load-displacement Curves at the end parts of the beam.

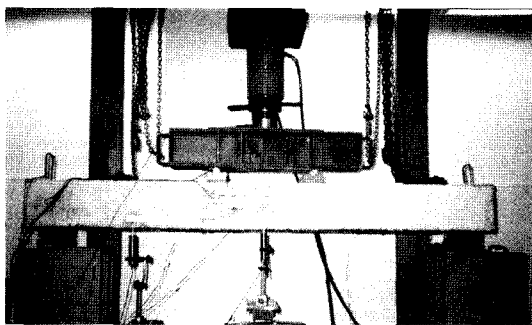
눌 수 있다. 3~12 tonf 사이의 반복하중 가력 시, 접합부 대각부에서 측정된 광섬유 센서 1, 2의 결과를 보면, 그림 6과 같이 인장 시 0.38mm, 압축 시 0.1mm의 변형을 보였으며, 동일 위치의 LVDT의 경우 noise 및 resolution의 한계 때문에 접합부의 미소변형이 정확히 측정되지 못했다.

그림 7과 같이 보 단부의 대변형이 생기는 부분의 센서인 광섬유센서 3, 4의 경우 인장시 0.86mm, 0.52mm의 변형이 나타났으며, LVDT 측정 결과는 광섬유 센서와 유사한 유형을 보였으나 측정값이 선형으로 분포되지 못하고 흔들리는 양상을 보였다.

#### 4. FBG 광섬유 센서를 이용한 섬유재료시트 보강콘크리트의 층간분리 균열 모니터링

##### 4.1 시험체 제작

힘 거동 관찰을 위한 시험체인 철근콘크리트 보는 단면치수 15cm × 25cm, 유효침(d=21cm), 철근량은 최대철근비( $p_{max} = 0.75pb = 0.01466$ )을 기준으로 압축철근 2-D10, 인장철근 2-D13, 길이 2.8m, 순 지간길이 2.4m인 장방향 복근보로 제작하였다. 아울러 시험체의 전단파괴를 방지하기 위하여 전단보강은 D10 철근을 10cm 간격으로 하였다.

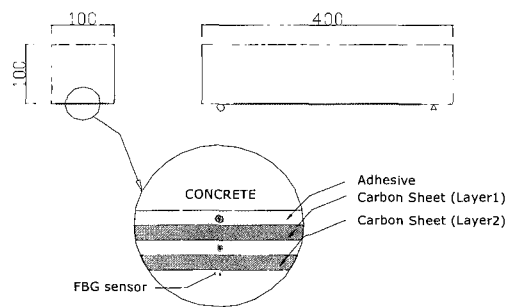


〈그림 8〉 Specimen under 4 point bend test.

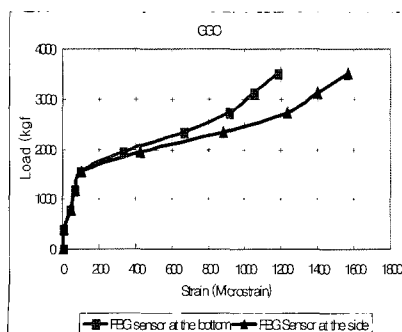
현재 내진성능 보강을 비롯한 보강 및 보수재로 널리 사용되고 있는<sup>(13)</sup> 유리섬유와 탄소섬유를 다시 조합하여 가장 효과적인 조합의 복합 섬유 보강재를 파악하려 하였다. 본 연구의 힘 실험은 그림 8과 같은 가력방법을 이용하여 GCO(유리섬유와 탄소섬유의 조합)와 GGO(유리섬유와 유리섬유의 조합) 두 가지 경우를 콘크리트 보의 옆면과 보강재로 보강된 밑면의 변형률을 비교함으로써 일반적인 복합재료 보강재의 단점인 조기 탈락을 경보할 수 있는 새로운 진단 기법을 개발하고자 하였다. 한편 그림 9와 같이 보 실험의 경우 탄소섬유와 탄소섬유의 조합으로 두 층의 복합재료 보강재 사이와 콘크리트와 보강재 사이에 극소강관을 사용하여 광섬유를 보호하여, 두 지점의 변형률을 측정함으로써 새롭게 조기 탈락을 경보할 수 있는 방법을 시도하였다.<sup>(14)</sup>

##### 4.2 실험결과

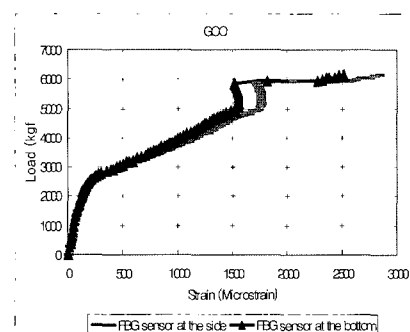
힘 거동 관찰을 위한 두 가지 실험의 경우 그림 10의 GGO 보다 그림 11의 GCO의 경우 역학적으로 파괴에너지가 커서 급작스런 취성파괴의 위험성이 적은 것으로 나타나 더욱 효율적인 보강재 조합인 것으로 나타나고 있다. 또한 두가지 다른 보강재 조합인 GGO와 GCO 모두 하중증가에 따라서 측면과 밑면의 변형률이 차이를 보여주고 있어 효과적



〈그림 9〉 Combinations of lay-ups in shear specimen and embedded FBG sensors.



〈그림 10〉 Bending test result from the beam strengthened with two glass fiber sheets.



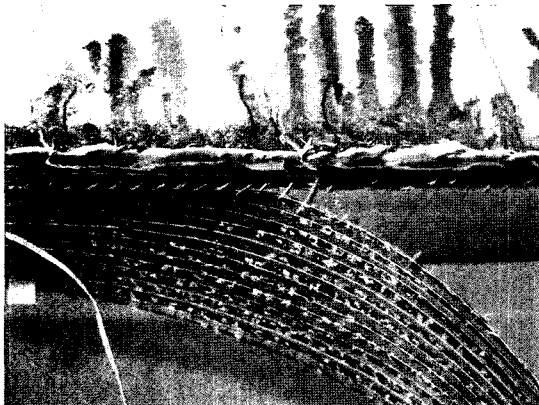
〈그림 11〉 Bending test result from the beam strengthened with one glass fiber sheet and one carbon fiber sheet.

인 탈락 경보 모니터링이라 사료된다. 광섬유센서 적용 시 강관으로 광섬유를 보호하여 실험하였고, 유효적절하게 변형률의 차이를 측정할 수 있음을 확인하였으며, 층간분리 균열에 의한 보강재 탈락을 조기에 경보 할 수 있는 진단기법의 한 방편으로 사료된다.

### 4.3 층간분리 균열에 의한 복합재료 보강재의 탈락 현상

본 연구를 통하여 효율적인 복합재료 보강재의 조합과 광섬유 계측 기술을 건축/토목 보강 구조물에 적용하여, 복합재료의 탈락을 효과적으로 예측할 수 있다. 특히 콘크리트에 부착된 광섬유센서와 보강용 탄소섬유시트에 부착된 광섬유센서는 초기 하중에서는 동일한 거동을 보이다가 하중이 증가하면서 거동이 달라짐을 보인다. 이는 두가지 구조시스템이 특정하중이상에서는 일체로 거동하지 않음을 보여주는 좋은 예이며 이를 이용하여 구조물의 이상을 판별해 낼 수 있을 것이며, 그 원인은 콘크리트의 균열의 발생과 콘크리트와 탄소보강재 사이의 delamination과 접착면에서의 슬립에서 찾아 볼 수 있으며, 접착면사이의 전단에 의한 층간분리 균열에 의한 보강재 탈락의 예가 그림 12에서 잘 보이고 있다.

이러한 결과들을 이용하면 구조물의 효과적인 보강량과 추가적 보강 시점등을 산출해낼 수 있으며 구조물의 유지관리를 위한 정기적인 구조 진단에 따르는 비용을 절감하는데 일조 할 수 있다. 아울러 보다 체계적이고 정량적인 기준을 수립하기 위해서는 광섬유 계측 기술의 발전과 더불어 복합재료 보강재의 실험적 연구자료가 보다 축적되어야 할 것이다.

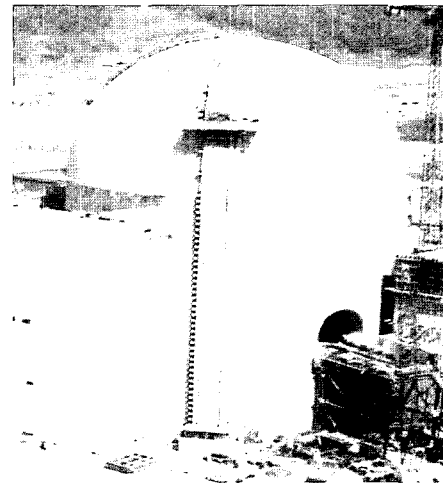


〈그림 12〉 A failure of the structure retrofitted by composite sheets.

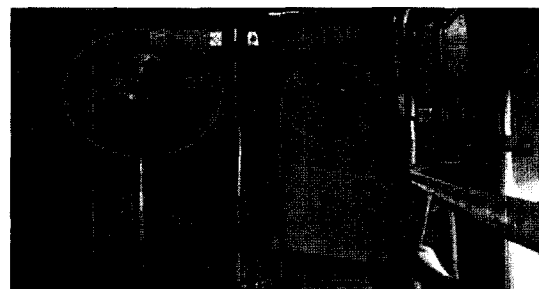
## 5. FBG 센서의 원자력발전소 격납건물 구조안정성 시험시 변위 측정에의 적용

그림 13과 같은 원자력발전소의 격납 건물은 원자로 내부의 방사능 누출을 방지하기 위한 중요시설물중의 하나로 냉각재 유출사고 시, 고압과 지진하중에 견디도록 설계되어 있다. 이러한 설계시의 기본성능을 시공 후 발전소 가동 전에 압력을 부가하고 계측기를 부착하여 실제시험으로서 원자로격납건물의 구조적 안전성과 기밀성을 입증하기 위하여 구조적 건전성시험(SIT, Structural Integrity Test)을 수행하는데, 이의 내용은 격납건물을 가압 및 감압하면서 격납건물 구조물의 반경 및 수직방향 구조적 변위와 격납건물 외부콘크리트 벽의 균열진행상태를 측정하고 감압후의 변위값 및 회복률을 측정하여 탄성적 거동을 확인하는 시험이다. 이 시험에는 40여개의 extensometer를 사용하는데, 정확한 측정을 위하여 가볍고 프리스트레인을 적용하는 것이 가능한 긴 게이지 길이 FBG센서를 설치하여, 기존의 계측 방법인 extensometer와 병행하여 현장적용 가능성 평가하였다.<sup>(15)</sup>

광섬유센서 설치 시 그림 14와 같이 기존의 extensometer



〈그림 13〉 Construction site of nuclear power plant containment structure.



〈그림 14〉 Ordinary extensometer and wheel type FBG fixture.

가 설치된 부근에 FBG센서에 tension을 주기가 용이한 부착 고정구(固定具)를 이용하여 부착하였다. 기존의 extensometer는 중량이 3Kg이고 크기도 대단히 커서 용접하지 않으면 고정이 되지를 않는데 반하여 FBG센서 고정구는 무게가 1/10에 불과하고 크기도 매우 작아 작업이 용이하다. 광섬유센서는 이전 실험에 사용하였던 것과 마찬가지로 광섬유 안에 내장되도록 하여 pre-strain을 가하였으며 센서와 광섬유가 일체가 되도록 하여 센서의 게이지길이가 57m가 되도록 하였다. FBG센서는 고정구를 이용하여 벽면에 부착된 후 아라미드섬유와 플라스틱으로 피복된 광섬유를 리드선으로 하여 시스템에 연결하였다.

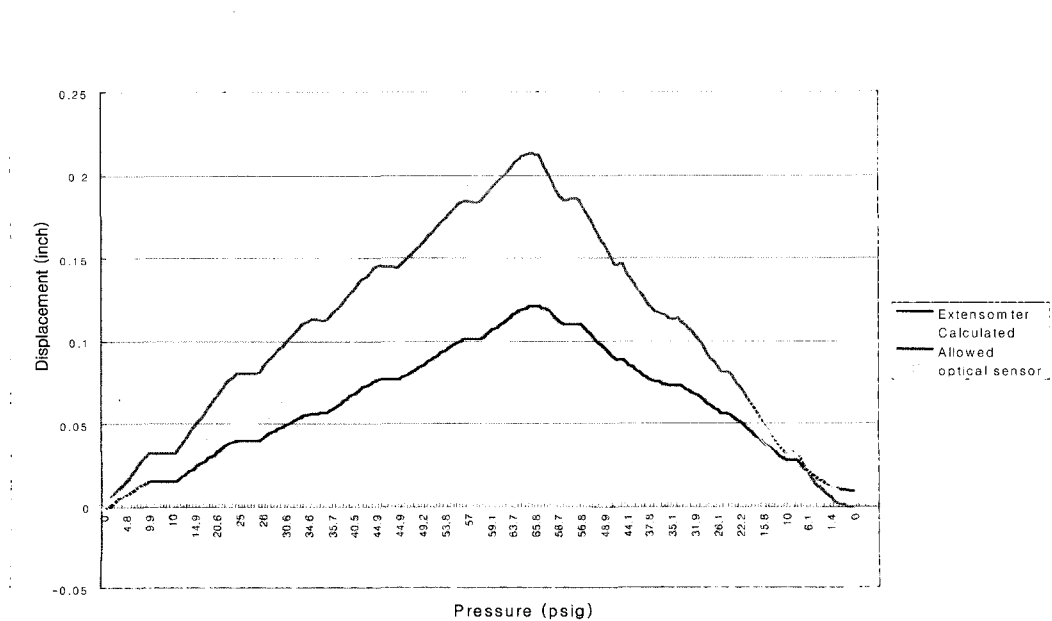
이러한 광섬유 센서는 설치작업을 통해 각기 격납건물 내부의 시스템과 격납건물 외부에 설치된 시스템에 연결되도록 하였으며 내부의 시스템은 LAN을 통해 외부에서도 관찰하고 제어할 수 있도록 하였다.

FBG센서 시스템은 시공이 거의 완료된 시점에서 설치하였기 때문에 연결 챔버를 통하여 격납구조물 안으로 광섬유를 설치하여 시공하는 것이 불가능하여, 격납구조물의 내부에 설치하였으며, 내압용기를 이용하여 시스템을 보호하였다. 시스템을 구동하기위한 220V 전원 공급도 원활하지 못하여 연결챔버 내의 설치되어있는 동선으로 5V 직류 전원을 공급하여 시스템과 노트북 컴퓨터를 설치하여 구동하였으며, 격납구조물 내부의 시스템을 제어하기 연결 챔버의 몇 개의 동선을 이용하여 LAN을 구성하고, 그 LAN을 통하여 원격 구동하였는데, FBG센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형을 측정하는 것이 가능하였고, FBG

센서는 긴 게이지 길이를 갖는 격납건물의 변형을 측정할 수 있는 좋은 수단임을 확인하였다.

격납건물의 내부와 외부에 각각 2지점씩 실제로 적용하여 측정하였으며 격납건물내의 측정지점에서는 내부에 설치된 컴퓨터가 과열로 인해 작동을 중지할 때까지 정확히 잘 측정되었으며, 그림 15에서 보여 주는 바와 같이 외부의 측정지점에서는 시험의 처음부터 끝까지 압력의 증가, 감소에 따라 부피팽창 및 감소를 잘 표현하였다. 그림에서 보이는 Calculated는 유한요소법에 의하여 해석된 계산값이며, Allowed는 계산값을 근거로 안전율을 감안하여 설정해놓은 한계값이고, Extensometer는 기존의 센서에서부터 나온 데이터이다. 광섬유센서로부터 측정된 데이터는 유한요소법에 의해 계산된 값과 유사함을 보이고 있으며, 시공성과 광섬유센서의 장점을 고려해 볼 때 격납구조물의 모니터링에 아주 적합함을 알 수 있다. 그리고 본 연구에서 LAN을 통하여 내부시스템을 외부에서 제어할 수 있음을 보여 주었고, 같은 방식으로 격납구조물에 설치된 시스템을 본사 및 연구소에서도 원격 제어할 수 있음을 확인하였다.

원자력 격납구조물에 FBG센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형을 측정하였다. 외부 해치부분에 설치된 FBG센서는 전체적으로 해치부분의 거동을 잘 묘사하였다. FBG센서는 파장의 변화를 측정하는 것이기 때문에 중간에 데이터 취득이 안되더라도 자기 자신의 파장값을 가지고 있기 때문에 절대량의 변화를 알 수가 있어 중간에 리드선이 단락되더라도 이상 없이 측정할 수 있음을 확인하였고, 긴 게이지 길이 광섬유 격자센서는 이상없이 잘 작동되었다.



<그림 15> FBG sensor data installed to outside hatch.

## 6. 결론

본 논문에서는 FBG 센서의 응용의 폭을 넓히기 위하여 여러 가지 응용분야를 찾았으며, 특히 진단응력이 많이 걸려 foil형 스트레인 게이지를 사용하기 어려운 보-기둥 접합부에서 광섬유센서가 일반적으로 사용되는 변위 센서들과 정밀도가 대단히 차이가 나고 있음을 보여주고 있고, 복합재료와 콘크리트 접합 구조물에서 흔히 발생하는 결함인 delamination을 측정하는데 광섬유센서가 유효적절함을 보여주고 있으며, 원자력발전소 격납구조물과 같은 대형구조물의 변위를 측정함에 있어서 광섬유센서가 시공도 용이하고 데이터도 양호함을 보여 주고 있어, 기존의 어떤 구조물도 광섬유센서를 활용하여 광섬유 스마트구조물화 할 수 있음을 보여준다.

구조물 자동화 계측에 적합한 고분해능의 광섬유 FBG센서를 활용하기 위한 실험의 일환으로 고층구조물의 취약부(보-기둥 접합부)에 대한 장기계측을 위한 각 센서의 성능을 비교 평가할 수 있었다. 스트레인게이지와 LVDT, potentiometer, 광섬유 FBG센서, 이렇게 4종의 센서 중 보-기둥 접합부의 거동을 정확히 계측하기 위해서는 광섬유 FBG센서가 가장 적합함을 알 수 있었다. 그리고 기존의 계측기 중 LVDT의 경우, 보-기둥 접합부에서의 미소변형에 대해서는 그 적용이 용이하지 못한 것으로 보이며, potentiometer의 경우 적용은 가능하나 신호에서 noise가 많이 측정되었으며, 스트레인게이지의 경우, 광섬유 FBG센서와 가장 유사하게 접합부의 거동을 계측할 수 있었으나 역시 미소변형에서는 noise가 많이 검출되었다. 따라서 보-기둥 접합부의 장기 계측을 위한 시스템을 구성하기 위하여 접합부의 대각변형계측을 위해서는 전단에 취약한 foil형 스트레인 게이지를 사용하는 것 보다는 광섬유 FBG센서를 사용하는 것이 가장 효과적이며, 보와 기둥의 대변형을 계측에도 광섬유 FBG센서가 대단히 유효한 것으로 판단되어 광섬유 FBG센서는 대형구조물 장기 거동 측정에 대단히 유용한 센서이다.

광섬유 계측 기술을 활용하여 콘크리트와 복합재료 시트 사이의 층간분리 균열의 효과적으로 예측하고 모니터링할 수 있었다. 콘크리트에 부착된 광섬유센서와 보강용 탄소섬유시트에 부착된 광섬유센서는 초기 하중에서는 동일한 거동을 보이다가 하중이 증가하면서 거동이 달라짐을 보인다. 이는 두가지 구조시스템이 특정하중이상에서는 일체로 거동하지 않음을 보여주는 좋은 예이며 이를 이용하여 구조물의 두 층 사이에서균열이 발생하고 성장함을 판별해 낼 수 있는데, 그 원인은 콘크리트의 균열의 발생과 콘크리트와 탄소보강체 사이의 delamination과 접촉면에서의 슬립에 의

해서 이다. 이러한 결과들을 이용하면 구조물의 효과적인 보강량과 추가적 보강 시점등을 산출해낼 수 있으며, 복합재료 보강구조물의 층간분리균열의 모니터링이 광섬유센서에 의하여 효과적으로 수행될 수 있음을 보여주고 있다.

긴 게이지 광섬유 센서를 강한 바람과 같은 외력으로부터 보호할 수 있는 방법을 모색해 보았는데, 프리스트레인을 가하는 방법이 효과적이며, pre-strain 2400 $\mu\epsilon$  인가했을 때 노이즈레벨이 1/10정도로 작았기 때문에 프리스트레인을 적당히 조절하여 광섬유 센서를 긴 게이지 거리에 측정에 적용할 경우 현재 사용되고 있는 센서인 Extensometer를 대체할 수 있을 것으로 보여진다. 실제로 원자력 격납구조물에 Extensometer를 대체하여 설치한 결과 설치 과정도 간편하고 노이즈도 적고 구조물 가압팽창시 구조물의 거동을 잘 묘사하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학재단 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원과 건설교통부의 사회기반시설물 평가중점연구단의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. Measures, R. M., "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures," *Proc. SPIE*, Vol. 1588, 1991, pp. 282.
2. Morey, W.W., Meltz, G. and Glenn, W.H., "Fiber Optic Bragg Grating Sensors," *SPIE*, Vol. 1169, 1989, pp. 98-106.
3. Dewolf, J. T., Coon, P. E. and O'Leary, P. N., "Continuous Monitoring of Bridge Structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 8, 1994, pp. 2437-2450.
4. Kim, K. S., Laszlo, Kollar and George, S. Springer, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, 1993, pp. 1618-1662.
5. Sarah, E. Mouring & Oscar Barton, Naval Academy, D. Kevin Simmons, "External Retrofit of R/C Beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates," Stanford Univ, USA. Structural Faults & Repair conference, 2001.
6. Kersey, A. D., Koo, K. P. and Davis, M. A., "Fiber Optic Bragg Grating Laser Sensors," *SPIE*, Vol. 2292 Fiber Optic and Laser Sensors XII, 1994, pp. 102-112,
7. Laura De Lorenzis, Brian Miller and Antonio Nanni, "Bond of Fiber-Reinforced Polymer Laminates to Concrete," *ACI Materials Journal*, May-June, 2001.
8. Kim, K. S. and Lee, H. J., "An economical and multiple



- fibre grating system with a rapid response using code division multiple access,” *Measurement Science and Technology (Institute of Physics)*, Vol. 12, 2001, pp. 906-908.
9. Kin-tak Lau, Libo Yuan, Li-min Zhou and Jingshen Wu, Chung-ho Woo “Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors,” *Composite Structures 51*, 2001, pp. 9-20.
  10. Kim, K. S., “Dynamic Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensor System for Smart Structure,” *Key Engineering*, Vol. 279-273, 2004, pp. 2114.
  11. 김기수, “System Identification에 활용할 수 있는 광섬유 센서 계측 시스템”, *전산구조 공학*, 제 16권 1호, 2003, pp. 39-43.
  12. 김기수, “광섬유센서를 이용한 Beam-Column 조인트의 하중에 따른 변위 계측”, *소음진동공학회 논문집*, 제 15권 1호, 2004, pp. 3.
  13. 하기주 “철근콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능 개선 보강 신기술”, *한국지진공학회 논문집*, 8권 2호, 2004, pp. 73-81.
  14. 김기수 “광섬유 센서를 이용한 탄소섬유시트 보수보강 콘크리트구조물에서의 자기진단기법”, *한국비파괴검사학회지*, 23권 2호, 2003, pp. 133-139.
  15. 김기수 “광섬유센서를 이용한 원자력발전소 격납구조물의 가동전 가압팽창을 통한 구조건전성 시험”, *한국복합재료학회지*, 제 16권 6호, 2003, pp. 56-61.