

긴 게이지 길이 광섬유 격자 센서의 측정과 응용

A Study on the Measurement and Application of Long Gauge Fiber Bragg Grating Sensors

김기수

Ki Soo Kim

초 록 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)는 1989년 Melts의 실험이후 광통신 분야 및 센서 분야에 다양한 용도를 가지고 있다. 이를 이용하여 광섬유 레이저, 대역 통과 필터로 사용하거나, 여러 가지 물리량을 측정하기 위한 온도, 변형률, 변위센서 등에 응용할 수 있다. 특히 본 연구에서는 기존 센서가 가지지 못한 긴 게이지 길이에서의 측정을 위해서 광섬유 센서 정적 시스템(FBG Static Logger)과 FBG 센서가 포함된 긴 길이의 광섬유를 이용하여 장대 구조물의 변형이나 외부 reference의 상대변위를 길게 연결하여 측정하기 쉽지 않은 변위를 측정하여 구조물의 상황을 상시 점검하고 더 나아가 잔존수명을 예측하고 보수시기를 알려줄 수 있는 방법을 모색하여 FBG 센서의 패키지(package)를 고안하였다. 이를 통해 효율적인 장거리 변위 측정방법을 정립하고 이를 원자력 격납구조물에 적용하여 성공적으로 측정함으로써 광섬유 격자센서를 이용하여 50 m 이상의 장거리 계측의 가능성을 보여 주었다.

주요용어: 모니터링, 광섬유격자센서, 사회기반 시설물, 긴 게이지센서, 원자력 격납구조물

Abstract In this research, the Fiber Bragg grating sensors with long gauge for displacement measurement in the long distance is developed and tested. The sensors show an accuracy and a capability for displacement measurement oin long distance. Monitoring using static logger of system of FBG sensor with strained optical fiber shows the capability of measurement in the harsh environment such as strong wind. Measurement of long distance displacement by optical fiber sensor if use 250 μ m optical fiber and impose some strong pre-tension shows possibility in monitoring of nuclear containment structure.

Keywords: monitoring, fiber Bragg grating sensors, civil infrastructure, long gauge sensor, nuclear containment structure

1. 서 론

현재 각종 산업분야의 스마트 구조(smart structure)를 구현하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이에 대한 구현을 위해 진단 및 계측용으로 사용하는 센서 및 시스템에 대한 관심이 높아

지고 있다. 이에 따라 고성능의 센서 및 시스템을 요구하고 있기 때문에 기존의 센서에 대한 대안으로 광섬유 브래그 격자 센서에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 전자식 스트레인 게이지(strain gauge)를 건물 내에 매입(embedding)하는 경우 구조물의 잔존기간동안 전자식 스트레인 게이지와 리

드선 사이에 예상치 못한 결점이 생길 수 있으며 또한 시간이 지나면 빗물 등에 저항이 녹슬어 버리는 경우가 많아서 오랫동안 구조물의 변화를 측정하지 못하며 각각의 센서마다 계측용 동선이 필요하고 전력을 공급해 주어야 하므로 계측 점이 많아졌을 때 이 동선 자체도 구조물에 영향을 줄 수 있다. 또한 교량의 경우에는 전력선과 같이 매설이 되기 때문에 전자계의 영향을 받아 올바른 진단을 할 수 없게 된다.

광섬유는 손실이 적고, 가늘며 쉽게 휘기 때문에 기하학적 응용성이 우수하고, 전자기적 간섭에 강하고, 쉽게 장착할 수 있으며, 광섬유 코팅에 통해 다양한 환경 노출에 보호될 수 있다. 또한 하나의 광섬유에 다중의 광섬유 센서를 장착할 수 있으며, 높은 감도와 빠른 감지 속도를 가지고 있고 신호 전송 역할을 겸하고 있어 센서로의 이용 가치가 매우 높기 때문에 여러 분야로 연구가 진행 중이다 [1-9].

특히 기존 센서가 가지지 못한 긴 게이지길이에서의 측정을 위해서 본 연구에서는 광섬유 센서 정적 시스템(FBG Static Logger)과 FBG 센서가 포함된 긴 길이의 광섬유를 이용하여 장대 구조물의 변형이나 외부 reference의 상대변위를 길게 연결하여 측정하는 방법을 적용하여 구조물의 상황을 상시 점검하고 모니터링 할 수 있는 방법을 모색하고, FBG 센서의 부착치구를 고안하며 효율적인 장거리 변위 측정방법과 센서의 부착 및 계측기술에 대하여 논하고자 한다.

2. FBG의 원리

광섬유 브래그(Bragg)격자 배열형 센서(FBG)는, 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 광섬유 브래그 격자를 일정한 길이에 따라 제작한 후, 온도나 강도 등의 외부의 조건변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이다. 일반적으로 광섬유 코어에는 클래딩보다 굴절률을 높이기 위하여 보통 게르마늄(Ge)이 첨가되는데, 이 물질이 실리카 유리에 안착하는 과정에서 구조 결함(defect)이 생길 수 있다. 이 경우 광섬유 코어에 강한 자외선을 조사하면, 게르마늄의 결합구조가 변형되면서 광섬유의 굴절률이 변화된다. 광섬유 브래그 격자는 이러한 현상을 이용하여 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킨 것을 말한다.

광섬유 브래그 격자 배열형 센서에는 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 격자가 사용되는데, 이 경우 각 격자의 반사 파장을 모두 다르게 함으로써, 반사된 빛의 스펙트럼으로부터 특정 격자가 갖는 물리량을 쉽게 구분할 수 있다. 이러한 방법을 파장분할방식이라 하는데, 이 방법에서는 광원의 한정된 선폭에 의하여 동시에 측정할 수 있는 격자의 개수에 제약이 받는다. 측정할 수 있는 격자의 개수를 증가시키기 위한 방법으로 파장분할방식과 시간분할방식을 병행하기도 한다.

아래의 Fig. 1은 FBG 센서의 구조를 나타낸다. 그림에서와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식 (1)과 같은 브래그 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자(grating)에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 그림과 같은 파형이 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

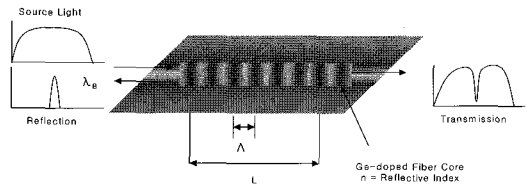


Fig. 1 Structures of Fiber Bragg Grating Sensor

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

위의 식에서 n 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(effective refractive index)이며, Λ 는 grating과 grating 사이의 간격(grating period)이다. Grating에서 반사되는 브래그 파장은 식 (1)과 같이 유효 굴절률과 grating 간격의 함수이며, FBG센서에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그 파장이 달라진다. 그러므로 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 인가된 물리량을 구할 수 있다. 먼저 온도 변화(ΔT)에 대한 브래그 중심파장 λ_B 의 변화량 $\Delta\lambda_B$ 는

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

이며, 여기서 α 는 광섬유의 온도에 따른 팽창 계수(thermal expansion coefficient)로 실리카(silica) 유리의 경우 약 $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이며, ξ 는 온도에 의한

광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열 광학계수 (thermal-optic coefficient)로서 약 $8.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이다. 위와 같이 온도에 의한 브래그 파장의 변화는 굴절률 변화에 기인함을 알 수 있다. 또한 strain 변화에 대한 브래그 중심 파장의 변화는 아래의 식 (3)과 같으며,

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \quad (3)$$

여기서, P_e 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리(germano-silicate glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가지며, ϵ 은 광섬유 grating에 가해진 strain이다. 그러므로 위의 식 (2)와 (3)에 의하여 FBG의 중심파장 변화는 온도와 스트레인에 의해서 변화함을 알 수 있다.

3. FBG 센서 신호처리 시스템의 구성

Fig 2는 본 연구에 사용된 FBG 센서 시스템의 구성을 나타내는 블록도로, FBG 센서의 중심파장을 알아내기 위한 신호처리 방식을 다음과 같이 구현하였다. FBG 신호처리 방식은 반사 파장 측정방식을 적용하였다. Fig. 2는 FBG 센서 시스템의 구성도로 동조 레이저를 swept 반도체 광원 형태로 구성하였고, 광원으로부터 발생한 빛을 FBG 센서로 전달하기 위해 광 결합기(optical coupler)를 이용하여 구성하였으며, 여러 지점의 물리량을 계측하기 위하여 광 스위치(optical switch)를 사용하였다. 또한 FBG 센서로부터 반사되어 되돌아온 신호를 측정하기 위하여 FBG 센서 수신기를 구성하였다. 그리고 반도체 광원의 파장을 보정하기 위한 광 비교부 (optical reference)를 구성하였다.

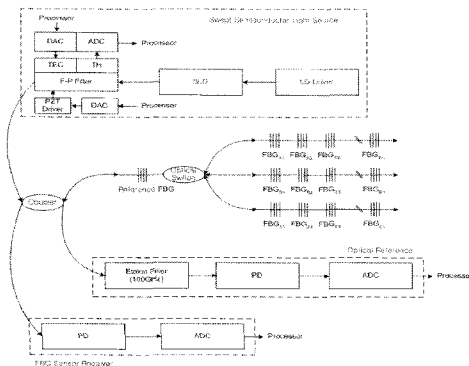


Fig. 2 Block Diagram of FBG Sensors System

이 센서 시스템은 FBG 센서의 특성을 적절하게 이용하였다. FBG 센서는 센서에 가해지는 물리량에 따라 중심파장이 이동하게 되며 입사된 방향으로 빛이 반사하는 특성을 가지고 있고, FBG의 중심파장과 동일하지 않는 빛은 그대로 통과하여 후단의 광섬유 방향으로 전달된다. 만약 FBG 센서들 사이에 중심파장이 각각 다르다면 직렬로 다중화 할 수 있게된다. FBG 센서로부터 반사되어 되돌아오는 중심 파장을 찾기 위하여 빛의 파장을 변환할 수 있는 SLD(Super-luminescent Diode)로 순차적으로 빛의 파장을 바꾸어 가며 광 수신기로 응답 특성을 측정한다. 빛의 진행경로를 보면 광원부의 SLD로부터 빛이 발생하여 tunable F-P filter를 거쳐 광 결합기로 진행한다. 진행한 빛은 광 비교부와 FBG 센서로 진행하게 되며, FBG 센서로부터 반사한 빛은 광 결합기를 거쳐 광 수신기로 받아 최종적인 결과를 얻는다. 여기서 보다 안정적으로 신호를 처리할 수 있도록 보조적인 광소자를 추가하였다. 그리고 광원의 시작 파장을 알기 위해서 외부의 온도 변화 및 스트레인의 변화에 무관하게 항상 일정한 파장의 반사 파장을 갖는 FBG를 사용하여 광수신기를 통해 신호를 검출하도록 하였다.

4. 장거리 변위 측정을 위한 고정구 제작

긴 게이지길이의 장거리 변형을 측정하기 위하여 FBG가 들어있는 광섬유를 고정하기 위한 치구가 필요한데, 그냥 볼일 경우 광섬유가 축 늘어지게 되어 적절하게 측정하기가 쉽지 않다. 따라서 Fig. 3과 같은 휠을 가지고 있는 고정구를 사용하면 프리텐션을 줄 수가 있어 축 늘어지는 것을 방지할 수 있어 장거리 변위 측정이 가능하다. 원의 지름을

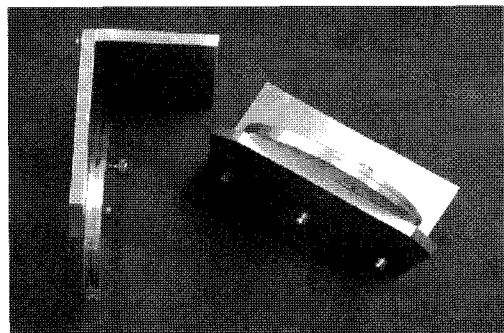


Fig. 3 FBG installation fixture with a wheel for long distance displace measurement

8 cm로 설계한 이유는 광섬유를 지름이 6 cm 이상으로 감았을 때 손실이 없기 때문이다. 또한 원의 중간에 홈을 두어 센서 설치 시 움직임이 없도록 하였으며, 휠을 돌려 적절히 조정하면 프리스트레인을 원하는 만큼 적절하게 가할 수 있어서 광섬유의 처짐과 외부 진동, 바람 등의 영향을 적절하게 줄일 수 있어서 이러한 모양을 가지게 되었다.

5. 광섬유 센서 부착 인장실험

본 실험은 광섬유 센서를 이용하여 긴 게이지 길이의 광섬유 변위센서를 이용하여 변위를 측정하기 위한 예비실험으로 실시되었다.

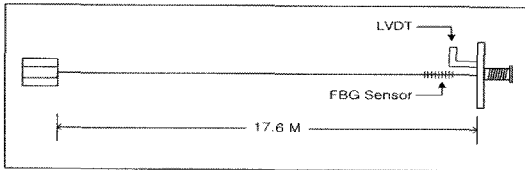


Fig. 4 Horizontal experiment that use optical fiber

Fig. 4와 같이, 광섬유를 17.6 M 떨어진 양끝에 수평으로 부착하고 광섬유가 늘어지지 않게 약간의 텐션을 주었다. 한쪽 끝은 고정구를 이용하여 양쪽 벽면에 고정하였으며 한쪽 벽면은 이동이 가능하도록 설치하여 벽체를 이동하면서 측정하였는데, 벽체의 이동량은 선형의 길이변화를 측정하는 기존의 센서인 LVDT를 사용하여 reference point에 고정하여 측정하였다.

그림에서 세로줄이 중첩되어 격자형태로 표시된 부분이 FBG sensor part로서 그 길이는 3 cm 이내이며 L자 모양 부분은 LVDT로서 FBG sensor와 비교하기 위해 부착한 것이다.

Table 1 Distortion factor by displacement in gage length 17.6 m

Calculation value		Test 1		Test 2	
Displacement (ΔL)	Strain ($\mu\epsilon$)	LVDT Displacement (ΔL)	FBG Strain ($\mu\epsilon$)	LVDT Displacement (ΔL)	FBG Strain ($\mu\epsilon$)
1 mm	56 $\mu\epsilon$	1 mm	45 $\mu\epsilon$	1 mm	60 $\mu\epsilon$
2 mm	113 $\mu\epsilon$	2 mm	110 $\mu\epsilon$	2 mm	120 $\mu\epsilon$

Table 1에서 보는 것과 같이 gage length 17 m에 대하여 비교하기 위한 두 번의 Test값, 즉 LVDT를 이용한 환산 값이 비슷함을 알 수 있다.

이를 참조로 하여 가동 가능한 한쪽 벽체를 이동하여 실험한 결과는 다음과 같다.

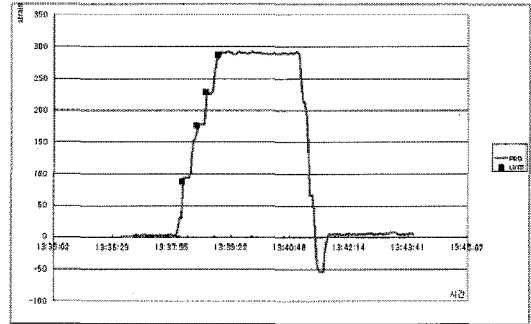


Fig. 5 Result of FBG sensor horizontal experiment for long gage length

Fig. 5의 그래프는 예비 수평실험으로 이동식 벽체를 4단계로 이동해본 것인데 FBG Sensor로 측정된 각 단계별로 증가한 스트레인의 경향이 LVDT로 측정된 것과 같게 나타났다. 즉, FBG sensor와 LVDT가 같은 경향을 보임을 알 수 있었으며, 4번의 Test가 모두 동일하게 측정되었다.

Fig. 6의 그래프는 이동식 벽체를 1 mm씩 이동하면서 인장력을 가하는 실험의 결과로서 처음 5단계까지 계단식으로 증가한 것은 5 mm까지 인장방향으로 벽체가 이동한 것이고, 다시 힘을 제거하면서 복원되는 결과를 나타낸 것이다. 복원이 다 된 후 다시 벽체를 이동시키므로 스트레인이 증가하는 모습을 볼 수 있으며 인장력을 빼면서 재 복원 되는 모습을 볼 수 있다. 이 그래프에서도 FBG sensor와 LVDT의 경향이 같음을 볼 수 있다.

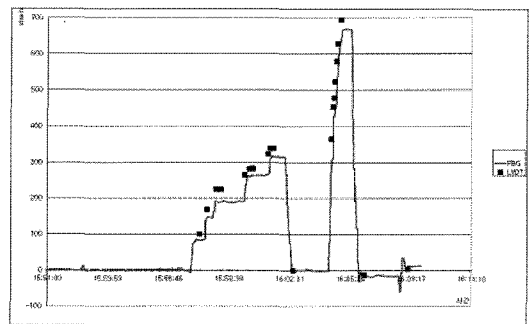


Fig. 6 Result of FBG sensor horizontal experiment for long gage length

6. 32 m의 거리에 pre-strain을 인가한 광섬유의 외부 영향 실험

본 실험은 장거리 변위측정을 위해 설치한 FBG 센서가 외력에 의해 최소한의 영향을 받을 수 있는 방법을 모색하기 위하여 수행하였다. Fig. 7과 같은 간격이 32 m가 되는 두개의 가로등 사이에 wheel이 달려있어 프리스트레인의 부가가 가능한 고정구를 사용하여 프리스트레인의 양을 변화하여 외부의 바람의 변화 등에 대한 영향을 테스트하였다.

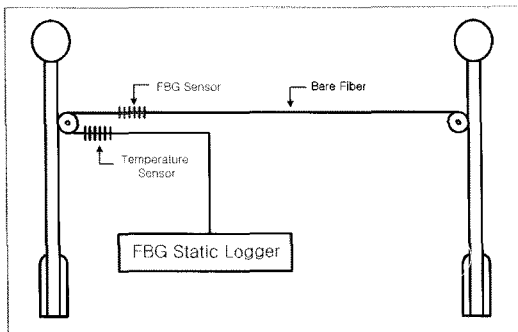


Fig. 7 FBG sensor installed between street lights

32 m의 가로등 사이에 250 μm bare fiber를 이용하여 FBG 센서를 2개를 설치하였으며, 온도에 의한 영향을 보상해 주기 위해 한쪽 기둥에 보상용 온도 센서 package를 FBG 센서와 직렬로 설치했고, pre-strain으로 1200 μE 를 인가했으며 이를 FBG Static Logger를 통해 실시간 monitoring하였다. 1200 μE 의 pre-strain을 준 FBG 센서와 비교하기 위하여 pre-strain 2400 μE 를 인가한 실험도이다. 1200 μE 를 인가한 것과 모든 조건은 같으며 여기에 한 개의 FBG 센서와 보상용 온도 센서 package를 직렬로 연결하였으며 두 배의 pre-strain을 주었다.

Fig. 8은 서로 다른 pre-strain을 인가한 실험에 대해 monitoring한 결과이다. 연두색으로 표시된 그래프는 pre-strain을 2400 μE 인가한 것이고, 파란색으로 표시된 그래프는 pre-strain을 1200 μE 인가한 것이다. 이 그래프에서 보면 큰 pre-strain을 인가한 그래프가 바람이나 차량의 진동과 같은 외력에 영향을 적게 받아 2배의 프리텐션을 가진 광섬유의 흔들림의 정도가 1/10정도 밖에는 되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 외부의 바람이나 흔들림의 영향을 적게 받기 위해서는 프리스트레인을 적절

하게 주는 것이 굉장히 중요한 일이고 FBG센서의 경우 일반적으로 10000 μE 까지 인가하여도 끊어지지 않는 것으로 알려져 있으므로 긴 게이지 길이의 변위 측정 시에는 처짐 효과나 흔들림의 효과를 감소시키기 위하여 3000 μE 정도를 인가한 후 변위를 측정하는 것이 적당한 것으로 보여진다.

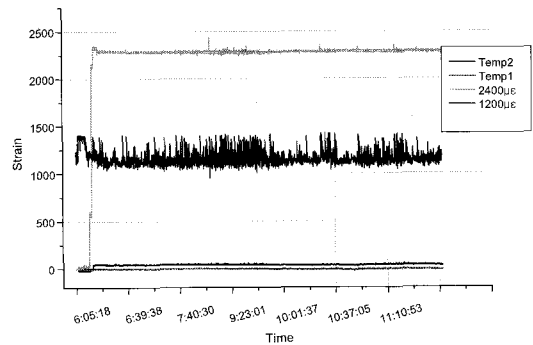


Fig. 8 Effect comparison by pre-strain

7. FBG 센서의 원자력발전소 격납건물에서의 적용

Fig. 9와 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 원자로격납 건물의 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 현장 적용 가능성 평가하였다.

광섬유센서 설치시 Fig. 10과 같이 기존의 extensometer가 설치된 부근에 FBG센서에 tension을 주기가 용이한 Fig. 3에서의 부착 고정구(固定具)를 이용하여 부착하였다. 기존의 extensometer는

중량이 3 kg이고 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 격납 건물 내부의 시스템과 격납건물 외부에 설치된 시스템에 연결되도록 하였으며 내부의 시스템은 LAN을 통해 외부에서도 관찰하고 제어할 수 있도록 하였다.

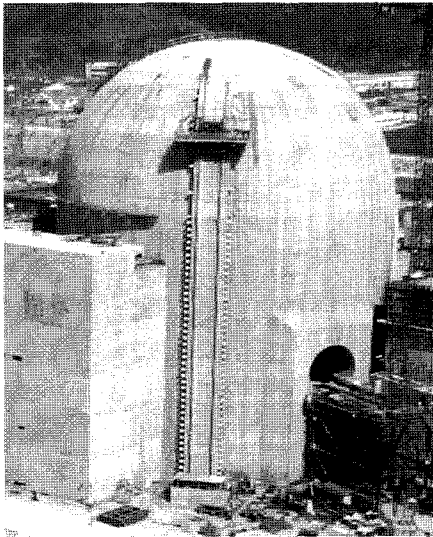


Fig. 9 Construction site of nuclear power plant containment structure



Fig. 10 Ordinary extensometer and wheel type FBG fixture

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 구동하기 위한 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, FBG센서는 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, Fig. 11에서 보여 주는 바와 같이 외부의 측정지점에서는 시험의 처음부터 끝까지 압력의 증가, 감소에 따라 부피팽창 및 감소를 잘 표현하였다. 그리고 LAN을 통하여 내부시스템을 외부에서 제어할 수 있음을 보여 주었고, 같은 방식으로 격납구조물에 설치된 시스템을 본사 및 연구소에서도 원격 제어할 수 있음을 확인하였다.

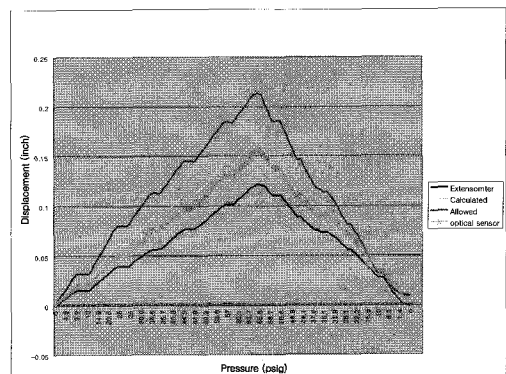


Fig. 11 FBG sensor data installed to outside hatch

원자력 격납구조물에 FBG센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형을 측정하였다. 외부 해치부분에 설치된 FBG센서는 전체적으로 해치부분의 거동을 잘 묘사하였다. FBG센서는 파장의 변

화를 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 이상 없이 잘 작동되었다.

8. 결 론

본 연구에서 가장 중점을 둔 것은 긴 게이지 거리의 변위 측정 시 현재 사용되고 있는 extensometer를 대체하여 광섬유 센서의 적용 가능성을 검토하고 최적화한 측정방법을 모색하는 것이다.

17.6 m의 게이지길이를 갖는 광섬유센서 실험에서 광섬유 센서는 LVDT와 경향이 같음을 볼 수 있었으며 긴 게이지 길이를 갖는 변위센서로 사용 가능성을 보여 주었다. 또한 광섬유 센서는 10000 $\mu\epsilon$ 까지 끊어지지 않기 때문에 gage length 50 m에서 50 mm 상의 변위에도 끊어지지 않고 측정 가능할 것으로 판단된다.

광섬유 센서를 돌풍과 같은 외력으로부터 보호할 수 있는 방법을 모색해 보았는데, 250 μm bare fiber를 이용하여 pre-strain을 각각 1200 $\mu\epsilon$ 과 2400 $\mu\epsilon$ 을 인가해 보았는데, 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 보여지며, 실제로 원자력 격납구조물에 extensometer를 대체하여 설치한 결과 설치 과정도 간편하고 노이즈도 적고 구조물 가압팽창시 구조물의 거동을 잘 묘사하는 것으로 보여진다.

후 기

본 논문은 건설교통부 "사회기반시설물 평가 중점연구단" 사업의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in Optical Fiber

Waveguides. Application to Reflection Filter Fabrication," Appl. Phys. Lett., Vol. 32, No. 10, pp. 647-649, (1978)

- [2] R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures," Proc. SPIE, Vol. 1588, pp. 282, (1991)
- [3] K. P. Koo and A. D. Kersey, "Bragg Grating-Based Laser Sensors Systems with Interferometric Interrogation and Wavelength Division Multiplexing," Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 1243-1248, (1995)
- [4] J. T Dewolf, P. E. Coon, and P. N. O'Leary, "Continuous Monitoring of Bridge Structures," Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 8, pp. 2437-2450, (1994)
- [5] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, "Fiber Optic Bragg Grating Sensors," SPIE, Vol. 1169, pp. 98-106, (1989)
- [6] K. S. Kim, 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)
- [7] A. D. Kersey, K. P. Koo and M. A. Davis, "Fiber Optic Bragg Grating Laser Sensors," SPIE, Vol. 2292 Fiber Optic and Laser Sensors XII, pp. 102-112, (1994)
- [8] P. Ferdinand, et al., "Mine operating accurate stability control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology," Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 1303-1311, (1995)
- [9] K. S. Kim, M. Breslauer and G. S. Springer, "The Effect of Embedded Sensor on the Strength of Composite Laminates," J. of Reinforced Plast and Comp, Vol. 2, pp. 949-958, (1992)