

# 스마트 구조물용 광섬유 격자센서의 원전격납건물 적용 실험 연구

## Study on the Fiber Bragg Grating Smart Sensors for Containment Structure in Nuclear Power Plant

김기수\* 송영철\*\* 방기성\*\*\* 윤덕중\*\*\*\*

Ki-Soo Kim\*, Young-Chul Song\*\*, Gi-Sung Pang\*\*\* and Duk-Joong Yoon\*\*\*\*

### ABSTRACT

This study was performed to verify the behaviors of fiber Bragg grating (FBG) sensors attached to the containment structure in the nuclear power plant as a part of structural integrity test which demonstrates that the structural response of the non-prototype primary containment structure is within predicted limits plus tolerances when pressurized to 115% of containment design pressure, and that the containment does not sustain any structural damage.

### 1. 서론

구조물의 운용 중에 실시간으로 감지할 수 있도록 하여 구조물 상태의 이상 유무에 따라 적절하게 대처할 수 있는 기능이 구조물 자체에 부가되도록 하는 구조물을 일컬어 스마트 구조물(Smart Structure)이라고 한다. 이러한 기능은 무엇보다 막대한 재산과 인명 피해가 발생하는 구조물의 파괴를 미연에 경고할 수 있고 구조물의 유지 및 보수에 따른 비용 절감 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이를 위해서 변형률, 온도 등을 측정하는 것이 중요한데, 특히 변형률은 구조물의 외부, 내부의 결점 혹은 Smart Structure의 형태까지도 측정할 수 있는 요소이다. 지금까지 전자식 스트레인 게이지 등을 통하여 구조물 외부의 변형률을 측정해 오고 있다. 그러나 이러한 센서들은 단기간의 구조물 외부의 변형률을 측정하는데 적합하며 장기적인 내부의 결점이나 거동을 표시하고 예측하기에는 적합치 않다. 전자식 스트레인 게이지를 건물 내 매입(embedding)하는 경우, 구조물의 잔존기간동안 전자식 스트레인 게이지와 리드선 사이에 예상치 못한 결점이 생길 수 있으며 또한 전자식 스트레인 게이지는 병렬 즉, 하나의 센서에 두개의 리드선이 필요하다는 단점 때문에 구조물의 장기 계측용 시스템(On-Line system)에는 문제가 있는 것으로 판단되고 있다. 더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측할 수 있는 기술적인 체제가 대두되고 있는 시점에서, 점차 세계적으로 광섬유 센서를 이용한 시스템이 구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

그리고 여러 가지 광섬유 센서 중에서 게이지 길이가 명확하고 반도체 사진식각공정과 유사한 공정으로 양산이 가능하며, 데이터의 재현성이 좋고, 파장변화를 측정하게 되므로 스트레인의 절대값의 측정이 가능하고, 파장분할다중화가 가능하며, 데이터의 직선성이 좋아서 최근에 광섬유격자센서가 가장 많이 사용되고 있다.

\* 호서대학교 벤처대학원 첨단산업기술학과 교수

\*\* 한전전력연구원 구조연구실 건전성평가그룹장

\*\*\* 한전전력연구원 구조연구실 건전성평가그룹 선임연구원

\*\*\*\* 한전전력연구원 구조연구실 건전성평가그룹 연구원

## 2. Fiber Bragg Grating (FBG)의 원리

FBG는 Ge가 첨가된 광섬유 코어에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 조사함으로써 굴절률 변화를 유도하여 grating의 주기에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광섬유 소자이다. 그림 1은 FBG의 구조를 나타낸다. 그림 1과 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우 Bragg 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 grating에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

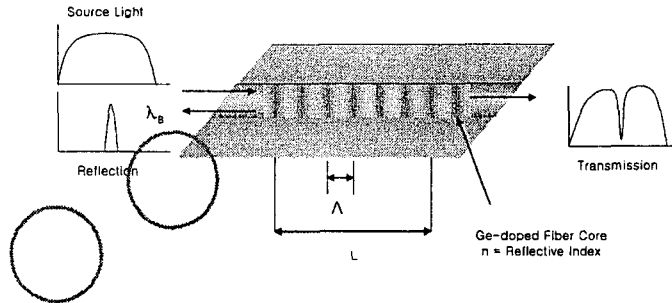


그림 1. Fiber Bragg Grating 구조

## 3. FBG 센서의 원자력발전소 격납구조물의 건전성 평가에의 활용

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 균열 진행상태를 측정하고 감압후의 변위값 및 회복률을 측정하여 탄성적 거동을 확인하는 시험이다. 이 시험에는 40여개의 extensometer를 사용하는데, 정확한 측정을 위하여 가변고 프리스트레스를 적용하는 것이 가능한 FBG센서를 설치하여, 기존의 계측 방법인 extensometer와 병행하여 현장적용 가능성 평가하였다. 설치 시 기존의 extensometer가 설치된 부근에 FBG센서에 tension을 주기가 용이한 다음 그림 2와 같은 부착 고정구(固定具)를 이용하여 부착하였다.

FBG센서는 광섬유 안에 내장되도록 하여 tension을 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 리드선은 그림 3과 같은 선 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 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, 그림 4에서 보여 주는

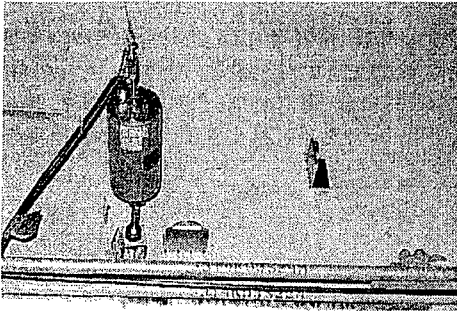


그림 2. FBG센서 부착용 고정구가 설치 원자력 발전소 격납 건물 내부에 설치된 모습

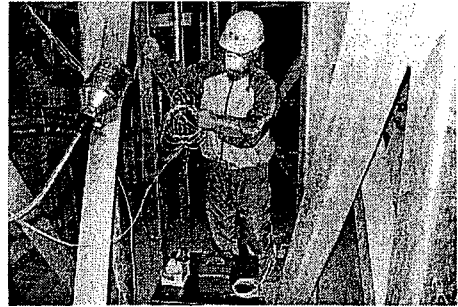


그림 3. 원자력 발전소 격납 건물 내부에 광섬유센서 및 광섬유 리드선의 설치 작업

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.

#### 4. 결론

본 논문을 통하여 광섬유격자센서와 그 활용에 대하여 검토하였으며, 자기진단형 스마트 복합재료 보강재에 사용되어 복합재료의 탈락을 효과적으로 예측할 수 있는 광섬유 격자센서를 사용하여 원자력 발전소 격납구조물의 구조건전성시험에 활용하였고, 이 시험은 원자력발전소 가동 전 원전에서 발행할 가능성이 있는 냉각재 손실사고에 따른 압력증가에 대비하여 설계압력의 115%를 가압하여 구조건전성을 측정하는 시험으로 광섬유센서의 사용가능성을 검토하였으며, 광섬유 FBG센서를 이용하여 효율적으로 변형을 측정하였다.

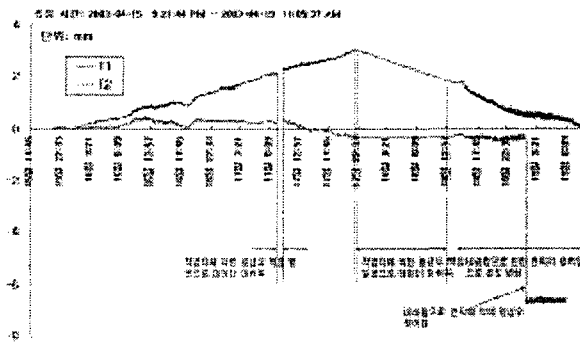


그림 9. 격납구조물의 해치부분에서의 FBG센서 데이터

특히 변형의 측정을 위하여 50m 이상의 긴 게이지 길이를 가지는 센서가 필요한데, FBG센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형을 측정하였다. 그림4에 보이는 외부 해치부분에 설치된 FBG센서는 전체적으로 해치부분의 거동을 잘 묘사하고 있다. 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 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 전력산업 연구개발 사업 기금으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures" Proc. SPIE, Vol. 1588, pp. 282, 1991.
- [2] F. BUCHOLTZ, A. D. Kersey "Multiplexing of Nonlinear Fiber Optic Interferometric Sensors" Journal of Lightwave Technology, Vol. 7, NO.3, pp.514-519, March 1989
- [3] Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors", Journal of Composite Materials Vol. 27, No 17. pp 1618-1662, 1993.
- [4] Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, "Measurements of Strain and Temperature with Embedded Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors," Journal of Composite Materials, Vol.27, No. 17, pp 1663 - 1667, 1993.