광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 원자력발전소 격납건물의 구조 건전성 계측

이승환¹ · 이남권¹ · 이금석² · 이홍표³ · 유윤식^{1,4+}

Structural Health Monitoring of Nuclear Containment Building Using Fiber Bragg Grating Sensor

Seung-Hwan Lee¹, Nam-Kwon Lee¹, Geum-Seok Lee², Hong-Pyo Lee³, and Yun-Sik Yu^{1,4+}

Abstract

Nuclear containment building is used as second blockage to protect us from a radiation leakage caused by the natural disaster or any accidents, so its safety is important and must be kept with continuous surveillance. In this study, we measured the strain of a nuclear containment building's wall by using FBG sensor and investigated the structural safety of a nuclear containment building. 50 FBG strain sensors and 18 FBG strain sensors were attached on the side wall and upper dome of a nuclear containment building, respectively. We measured the strains of the outside concrete wall during the Structural Integrity Test (SIT) of a nuclear containment building. The strain of an upper dome was larger than that of a side wall, about 200 $\mu\epsilon$. And the very small strain was measured at vertical direction of a side wall. These experimental results were used to evaluate the structural health of nuclear containment building.

Keywords : Fiber Bragg grating, Nuclear containment building, SIT, Fiber optic sensor

1. 서론

현대 사회의 편리함을 영위하기 위하여 에너지 수요가 나날이 증가되고 있다. 한정된 자원에서 에너지를 생산하기 위해서 효율성과 경제성이 우수한 원자력 에너지가 많이 이용되고 있다.

최근 일본에서 지진해일로 인한 원자력 발전소의 방사능 유출사고가 발생하면서 원전 격납건물의 안전에 대한 관심이 더욱 증가한

상태이다.

원전 격납건물은 원자로 내부의 방사능 누출을 방지하기 위한 중요 시설물 중의 하나로 냉각재 유출사고 시 고압과 지진하중에 견디도록 설계되어 있다. 그러나 일반 콘크리트 건물과 마찬가지로 격납건물도 시간이 경과하면서 동결 융해, 중성화, 강재부식, 마모, 누수, 누유 등의 환경요인에 의해 열화되므로 합리적인 수명관리를 위한 변형 특성의 규명이 매우 중요하다. 격납건물의 내부를 가압 및 감압하면서 건물의 반경 및 수직 방향 구조적 변위와 건물 외부 콘크리트 벽의 균열 진행 상태를 측정하고 감압 후의 변형률 및 회복률을 측정하여 탄성적 거동을 확인하여 시공 품질과 구조적 성능이 허용 가능한 범위 내에 있음을 입증하는 것을 구조적 건전성 시험(SIT, Structural Integrity Test)이라고 한다. 기존의 계측 방법은 전자식 게이지에 의한 측정 방법으로 측정정확도가 낮을뿐더러 주위의 전자기파에 의한 영향으로 신호 대 잡음비(S/N, signal-to-noise ratio)가 낮은 단점이 있다[1, 2].

최근 들어 통신용으로 사용되던 광섬유를 센서로 응용하여 계측 분야에 적용하려는 노력이 활발히 이루어지고 있다. 이는 광섬유 센서가 빛을 이용하기 때문에 전자기파에 의한 잡음이 없어 전자식 센서에 비해 정확도 및 신호 안정성이 뛰어나기 때문이다. 또한 광섬유는 직경이 작아 구조물에 결함을 주지 않고 설치가 가능하며, 전

¹부산IT융합부품연구소(Convergence of IT Devices Institute Busan)
Sanhak Bldg. 2F, Dong-Eui University, 176, Eomgwangno,
Busanjin-gu, Busan, 614-714, Korea

²에프비지테크(FBGTECH)
Room 416 HANSIN S-MECA 1359 Gwanpyeong-dong, Yuseong-gu,
Daejeon, 305-509, Korea

³한국전력공사 전력연구원(Korea Electric Power Research Institute)
105, Munjiro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-760, Korea

⁴동의대학교 방사선학과(Department of Radiological Science, Dong-Eui University)
Dong-Eui University, 176, Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan,
614-714, Korea

*Corresponding author : ysyu@deu.ac.kr

(Received : Nov. 20, 2012, Revised : Jan. 9, 2013, Accepted : Jan. 11, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

송손실이 작아 장거리 계측에 유리하다[3, 4].

대표적인 광섬유 센서는 A-EFPI (Absolute Extrinsic Fabry-Perot Interferometric) 센서와 광섬유 브래그 격자(FBG : Fiber Bragg Grating) 센서 등이 있다. 이 중에서도 FBG 센서는 위상 마스크 방법을 이용하면 비교적 양산이 쉬우며, 다중화가 용이하여 토목 건축 구조물에 많이 사용되며, 복합재료 내에 매설이 가능하여 스마트 구조물 등에도 다양하게 적용되고 있다[5, 6]. 본 실험에서는 FBG 센서를 원전 격납건물에 적용하여 구조적 건전성 검토와 변형률 계측을 하고자 하였다.

2. 광섬유 브래그 격자

광섬유 코어에 광민감성을 높이기 위하여 게르마늄(Ge), 보론(B) 등과 같은 물질을 첨가하거나 수소처리한 후 강한 자외선을 조사하면, 광섬유의 굴절률이 변화된다. FBG는 이러한 현상을 이용하여 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변조시켜 제작한다. 기본적으로, FBG는 협대역 파장반사 필터의 특성을 나타내며 Fig. 1과 같이 광대역 광원을 FBG에 입사시킬 경우 아래에 주어진 식 (1)과 같은 위상정합조건을 만족하는 파장 성분이 광섬유에 새겨진 격자에서 반사되고, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하게 된다. 이때 반사되는 파장을 브래그 파장이라 한다[7-9].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

Fig. 1. Operating principle of fiber Bragg grating.

여기서 λ_B 는 브래그 파장, n_{eff} 는 광섬유의 유효굴절률, Λ 는 격자 주기이다. 식 (1)로부터 브래그 파장은 유효굴절률과 브래그 격자 주기의 함수임을 알 수 있다. 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 FBG에 온도나 변형을 가하면 브래그 파장이 달라진다. 이때 브래그 파장의 변화량은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - P_e)\Delta\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (2)$$

이때 P_e 는 광탄성 상수이며, $\Delta\epsilon$ 은 광섬유 격자에 가해진 변형률 변화량, α 는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수이며, ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화 그리고 ΔT 는 광섬유 격자에 가해진 온도 변화량을 나타낸다. 온도에 대한 영향을 보상하거나, 온도 변화가 작아 이를 무시할 수 있다고 가정($\Delta T = 0$)하면 구조물의 변형률과 브래그 파장의 관계를 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다. 이로부터 브래그 반사 파장의 변화량 측정을 통해 변형률을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

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

3. 실험 방법

3.1 FBG 센서 설치

원전 격납건물의 외벽 및 돔 상부에 가압 시 가장 압력을 많이 받는 부분인 철근 타설 부위를 비파괴 검사로 찾아 수직, 수평 방향으로 FBG 센서 설치하여 가압 시 발생하는 변형률을 측정하고자 하였다. Fig. 2의 FBG 센서를 Fig. 3처럼 외벽의 수직 방향으로 1,000 mm FBG 센서 25개와 수평 방향으로 500 mm FBG 센서 25개를 설치하였다. 돔 상부에는 수직, 수평 방향으로 500 mm FBG 센서 각각 9개를 설치하였다. 또한 식 (2)처럼 FBG 센서는 스트레인뿐만 아니라 온도에 대한 변화도 있으므로 온도 보상용 FBG 온도 센서 17개를 설치하여 온도에 의한 영향을 보상하였다.

Fig. 2. FBG sensors.

센서 설치 후 24시간동안 예비 실험을 시행하여, 센서의 동작 상태 및 광섬유 이상 유무를 사전에 파악한 후 본 시험에 적용하였다.

Fig. 3. The positions of FBG sensors in a nuclear containment building.

Fig 4는 격납건물의 외벽 및 돔 상부에 FBG 센서가 설치된 모습이다. Fig. 5는 FBG센서 신호 계측장비인 interrogator (sm-125-500, Micron Optics, USA)와 각 센서에서 신호가 발생하여 계측되는 모습이다.

Fig. 4. The images of the installed FBG sensors; (a) Side wall, (b) Upper dome

Fig. 5. The measurement equipment and FBG sensor signals.

3.2 원전 격납건물의 구조적 건전성 시험(SIT)

설치 후 24시간동안 예비 실험을 시행하여, 센서의 동작 상태 및 광섬유 이상 유무를 사전에 파악한 후 본 시험에 적용하였다.

격납건물 구조건전성시험(SIT)은 원전의 설계기준사고 시의 조건에서도 그 구조적 저항능력을 확인하는 시험이다. 원전가동을 중지한 상태에서 격납건물의 설계압력까지 가압 및 감압하면서 구조물의 결함 여부를 확인하고 손상 유무를 평가하게 된다. 본 시험은 아래와 같은 과정으로 총 6일동안 수행되었다.

3.2.1 격납건물의 가압

공기압축기(air compressor)를 이용하여 Fig. 6과 같이 3 psig 씩 총 6단계로 가압하여 격납건물의 설계압력인 18 psig까지 가압한 후 격납건물의 내·외부의 이상 유무를 점검하게 된다.

3.2.2 격납건물의 대기 안정

가압이 18 psig까지 완료되면 격납건물의 온도, 압력에 영향을 미치지 않도록 계통 상태를 일정하게 유지하였다.

3.2.3 누설률 시험 및 구조적 건전성 시험

최소 24시간 이상, 15분 간격으로 데이터를 수집한 후 누설률을 계산하여 판정기준에 만족되면 시험을 수행하였다.

Fig. 6. The SIT schedules of a nuclear containment building.

3.2.4 격납건물의 감압

가압과 마찬가지로 단계별 3 psig씩 총 6단계로 대기압까지 감압을 하였다. 배기공기는 사용 후 핵연료 저장조로 배출하여, 보조건물 환기계통을 통하여 외부로 방출되었다.

격납건물에 설치된 FBG 센서를 이용하여 건물에 가압이 가해지는 시점부터 감압이 끝나는 시점까지 변형률을 지속적으로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

원전 격납건물에 FBG 센서 68개와 온도 보상용 FBG 온도센서 17개를 격납건물 외벽과 돔 상부에 설치한 후 SIT 기간 중에 실험을 진행하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 SIT 기간 중에 격납건물에 부착된 FBG 센서로 측정된 결과이다.

격납건물 외벽의 경우, 내압 18 psig에서 수평 방향에서는 약 $100 \mu\epsilon$ 의 변형이 측정되었으며, 수직 방향으로서는 약 $30 \mu\epsilon$ 정도의 매우 경미한 변형만이 발생하였다.

Fig. 7. Strain measurement of the side wall of a nuclear containment building; (a) The vertical strain of the side wall, (b) The horizontal strain of the side wall.

돔 상부의 경우 센서의 설치 방향과 무관하게 비슷한 특성을 보였으며, 외벽에 비해 격납건물 내압에 대한 변형이 크게 나타났다. 변형이 가장 크게 발생한 돔 상부의 최대 변형은 내압 18 psig에서 대략 $200 \mu\epsilon$ 정도 발생하였다.

FBG 온도센서를 이용하여 FBG 센서 자체의 온도 보상은 실시하였으나, 내압이 일정하게 유지되는 구간에서 센서 측정값이 일정하지 않고 변화가 발생하는 요인은 낮과 밤의 일교차에 따른 콘크리트 재질의 수축 팽창 때문이며, 최대 $60 \mu\epsilon$ 정도 추가변형이 발생하였다. 특히, 건물 외벽의 수직 방향으로서는 내압에 의한 변화보다 일

교차에 의한 변화가 더 크게 나타났다.

Fig. 8. Strain measurement of the upper dome of a nuclear containment building; (a) The vertical strain of the upper dome, (b) The horizontal strain of the upper dome.

5. 결론

전자기와 간섭에 무관하고 정밀 측정이 가능한 FBG 센서를 이용하여 원전 격납건물의 변형을 계속하였다. 격납건물의 외벽 및 돔 상부에 FBG 센서를 설치한 후, SIT 기간 중에 건물의 변형을 측정하였다. 격납건물의 돔 상부에서 최대 변형이 발생하였으며, 내압 18 psig에서 대략 $200 \mu\epsilon$ 정도의 변형이 발생하였다. 또한 격납건물 내압에 의한 변형 이외에 콘크리트 외벽의 자체 열팽창에 의한 추가 변형이 발생하였다.

FBG 센서를 이용하여 격납건물의 변형률을 측정할 수 있음을 확인하였고, 측정 결과들은 격납건물의 구조 건전성 평가에 활용되었다. 또한, 발전소 설계 및 시공 시 FBG 센서를 적용한다면 격납건물의 구조 안전에 대한 상시 측정이 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음.(과제번호 2012AA111)

REFERENCES

- [1] D. J. Yoon, G. S. Pang, Y. C. Song, and K. S. Kim
“Technology on the containment structure's SIT
using fiber Bragg grating sensors”, *Korean Society of
Civil Engineers Workshop*, pp. 520-523, Jeju, Korea,
2005.
- [2] J. G. Lee, “Study about FBG sensor signal process
and control using swept semiconductor light source”,
Master's Thesis, Hoseo University, 2002.
- [3] R. M. Measures, “Fiber optic sensor consideration
and developments for smart structures”, *Proc. SPIE*,
Vol. 1588, pp. 282-299, 1991.
- [4] F. Bucholtz, A. D. Kersey, and A. Dandridge,
“Multiplexing of nonlinear fiber optic interferometric
sensors”, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 7, pp. 514-519,
1989.
- [5] P. Biswas, S. Bandyopadhyay, K. Kesavan, S.
Parivallal, B. A. Sundaram, K. Ravisankar, and K.
Dasgupta, “Investigation on packages of fiber Bragg
grating for use as embeddable strain sensor in
concrete structure”, *Sens. Actuators. A.*, Vol. 157, pp.
77-83, 2010.
- [6] I. B. Kwon, C. G. Kim, and C. S. Hong, “A digital
signal processing algorithm for structural strain
measurement by a 3×3 passive demodulated fiber
optic interferometric sensor”, *Smart Mater. Struct.*,
Vol. 8, pp. 433-440, 1999.
- [7] T. Erdogan, “Fiber grating spectra”, *J. Lightwave
Technol.*, Vol. 15, pp. 1277-1294, 1997.
- [8] K. O. Hill, and G. Meltz, “Fiber Bragg grating
technology fundamentals and overview”, *J.
Lightwave Technol.*, Vol. 15, pp. 1263-1276, 1997.
- [9] J. S. Heo and J. J. Lee, “Development of flexible
force sensor using fiber Bragg grating for tactile
sensor and its evaluation”, *J. of KSPE*, Vol. 23, pp.
51-56, 2006.