

特輯

**광섬유센서를 이용한 원자력 발전소 격납구조물의 가동전 가압 팽창을
통한 구조건전성 시험**

김기수

(주)아이세스 대표이사 겸 호서대학교 첨단산업기술학과 교수

ABSTRACT

In this paper, a fiber Bragg grating(FBG) sensor system is described and FBGs are well-suited for long term and extremely severe experiments, where traditional strain gauges fail. In the system, a reflect wave-length measurement method which employs a tunable light source to find out the center wave-length of FBG sensor is used.

We apply the FBG system to nuclear energy power plant for structural integrity test to measure the displacement of the structure under designed pressure and to check the elasticity of the structure by measuring the residual strain. The system works very well and it is expected that it can be used for a real-time strain, temperature and vibration detector of smart structure.

1. 서론

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, 기존의 extensometer는 wire의 자중 처짐에 의해 정확한 길이의 변화를 측정하기 곤란하다. 그 이유는 미소 변형의 측정에 정확도도 낮을 뿐더러 데이터 logger까지의 도선의 길이가 길어 건물 내외의 전기설비로부터 발생하는 전자기적 노이즈의 영향을 받기 때문이다.

최근 미국 및 유럽의 선진국에서는 통신용 광섬유를 센서로 활용하여 계측분야에 적용하려는 노력이 활발히 이루어지고 있는데 이는 광섬유센서가 빛을 source로 이용하기 때문에 전자기적 노이즈가 없고 전자식 센서에 비해 정확

도 및 신호안정성이 뛰어나기 때문이다. 또한 광섬유는 250 μm 크기의 소형경량이므로 구조물에 결함을 주지 않고 설치가 가능하고 80 km까지 손실 없이 전송할 수 있어 장거리 계측에 매우 유용하기 때문이다[1,2]. 특히 이중에서도 FBG(fiber bragg grating)센서는 양산이 쉽고 multiplexing이 용이하여 항공분야 구조물인 복합재료 안에 매설되어 스마트구조물용으로 다양하게 사용되어 지는 연구가 상당히 많이 수행되어 졌으며[3,4], 최근에는 복합재료 구조물을 벗어나 토목건축구조물에 적용하는 연구가 다양하게 진행되고 있다[5,6]. 본 실험에서는 광섬유센서 중에서 양산이 쉽고 정확도가 높아 최근 들어 활용도를 높여가고 있는 FBG 센서를 이용하여 격납 건물의 변형량을 계측하는 기법을 적용하였다.

2. FBG센서의 일반이론

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 grating에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다[7].

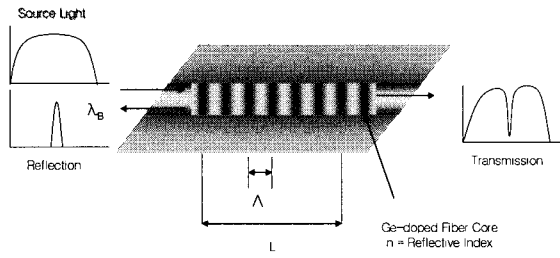


Fig. 1 Fiber Bragg Grating 센서 구조.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

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

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

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \tag{2}$$

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.

상기 식에서 알 수 있듯이 광섬유 브래그 격자는 스트레인에 의해 FBG 센서의 값이 변화하므로 반사되는 브래그 파장의 변화를 측정한다면 광섬유 브래그 격자에 가해진 미지의 스트레인을 구할 수 있다.

3. FBG센서 및 시스템의 격납 구조물로의 설치

3.1 FBG센서의 설치

FBG 센서를 설치하여 구조물의 거동을 판단하고 FBG 센서의 성능을 검토하기 위하여 기존의 계측 방법인 extensometer와 병행하여 extensometer가 설치된 부근에 장애물과 접근의 용이성을 고려하여 격납구조물 내부에 2개소 입구의 해치부분에 2개소 씩 도합 4개소에 센서를 설치

하고 온도 보상용 reference를 각기 1개소 씩 설치하여 도합 6개의 센서를 설치하여 현장적용 가능성 평가하였다.

FBG 센서는 가볍고 부착이 용이하기 때문에 기존의 extensometer가 설치된 부근에 FBG 센서에 tension을 주기가 용이한 Fig. 2와 같은 부착 고정구(固定具)를 이용하여 부착하였다.

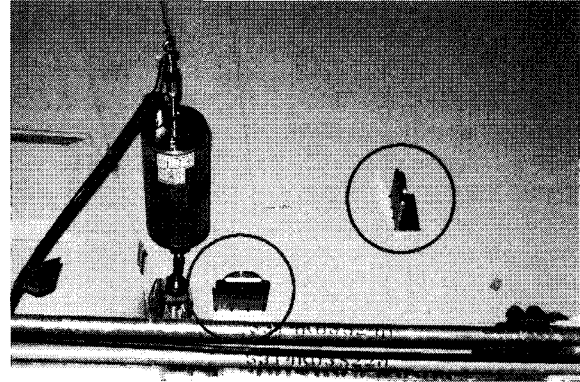


Fig. 2 FBG센서 부착용 고정구의 설치.

FBG 센서는 광섬유 안에 내장되도록 하여 tension을 가하였으며 센서와 광섬유가 일체가 되도록 하여 센서의 게이지 길이가 40 m 이상이 되도록 하였다. FBG 센서는 고정구를 이용하여 벽면에 부착된 후 아라미드섬유와 플라스틱으로 피복된 광섬유를 리드선으로 하여 시스템에 연결하였다. 이러한 광섬유 리드선은 Fig. 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.

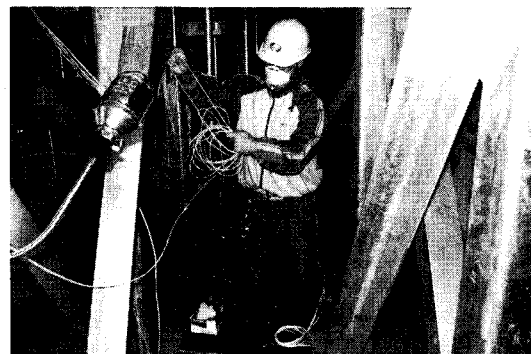


Fig. 3 광섬유센서 및 광섬유 리드선의 설치.

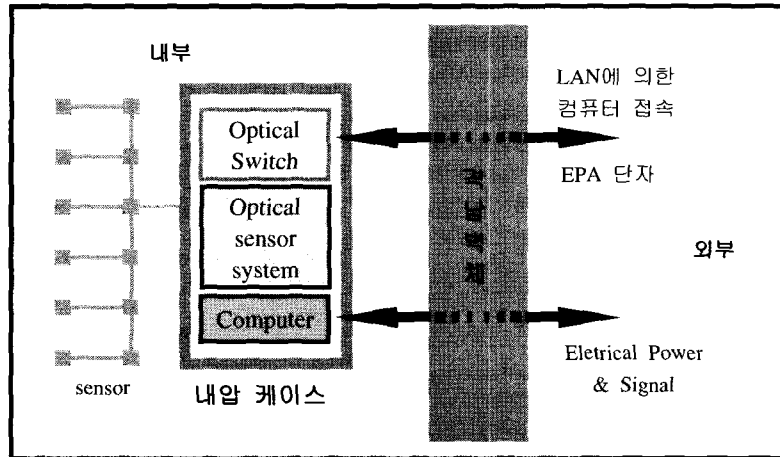


Fig. 4 격납건물 내부에 설치된 FBG 센서 시스템 개요도.

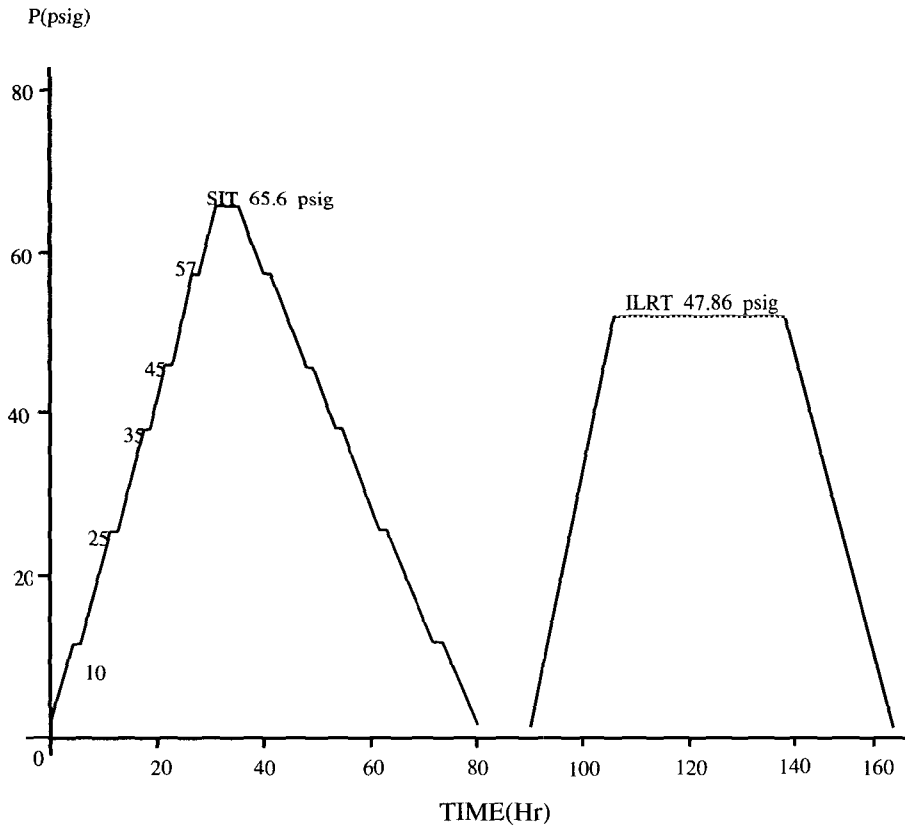


Fig. 5 Containment Pressurizing Model Diagram.

3.2 시스템의 개요 및 Data

FBG 센서 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 그림 4과 같이 원격 구동하였다.

4. FBG센서의 SIT 데이터 및 분석

4.1 SIT 진행 과정 및 시간별 압력변화

SIT는 다음 Fig. 5와 같은 스케줄로 1주일에 걸쳐 여러대의 compressor를 동원하여 65.6 psig까지 가압하였다가 감압하는 과정으로 행하여졌다.

4.2 SIT 진행시 FBG센서 측정 데이터

FBG 센서와 시스템은 전술한 바와 같이 격벽내부에 설치되었으며, FBG 센서는 변형 측정용 긴 게이지 길이의 센서 2 포인트 (R12: 게이지 길이 약 5 m, D0: 게이지 길

이 약 50 m)와 온도보상용 센서 1 포인트가 설치되었고, 시스템은 컴퓨터와 함께 내압용기 내에 담겨져 5V로 구동되어 졌는데, 220V 전원공급이 불가능하여 노트북을 분해하여 기존의 컴퓨터시스템을 대체하도록 하였으며 열 발생을 우려하여 설치하려던 냉각기는 설치하지 못하였다.

설치된 노트북이 시스템에 가까워 CPU의 냉각팬이 노이즈 발생원으로 작용하기 때문에 냉각팬도 제거하였다. 시스템은 24시간 정도 무리 없이 가동되었으며 그 이후 컴퓨터 CPU의 열 발생에 의해 중지되었다. 격벽 내부의 컴퓨터는 LAN과 National Instrument 사의 소프트웨어인 Lab View에 의해 제어 되었는데, 가동되는 기간 중에는 문제없이 잘 작동되었다. 현장에서 급히 컴퓨터의 기능을 노트북으로 대체하게 되어 Reset 기능을 부여하지 못했고 이에 따라 작동이 중지된 이후에는 전혀 데이터를 얻지 못하였다. 가동 중 D0와 R12에 설치된 FBG 센서로부터 얻어진 데이터는 다음 Fig. 6에 도시되어 있다.

위 데이터에서 보이듯이 격납 구조물의 압력이 증가함에 따라서 부피가 늘어나고 있는 모양을 잘 나타내고 있으며 시스템이 중단될 때까지 좋은 데이터를 보여 주고 있다.

4.3 SIT 진행시 해치부분인 T1, T2에서의 FBG센서 측정 데이터

격납 구조물 외부의 해치부분인 T1, T2(게이지길이 약 1.5m)에 부착된 FBG 센서는 Fig. 7과 같은 데이터를 보여주고 있는데 이 데이터에서 보듯 가압시의 이력을 잘 보여주고 있다.

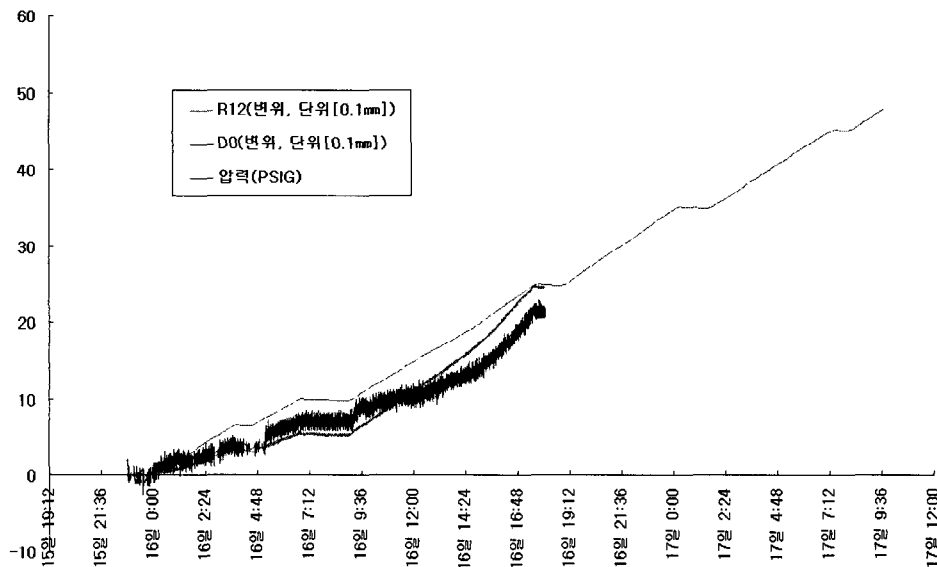


Fig. 6. 격납구조물 내부에 설치된 FBG센서의 데이터.

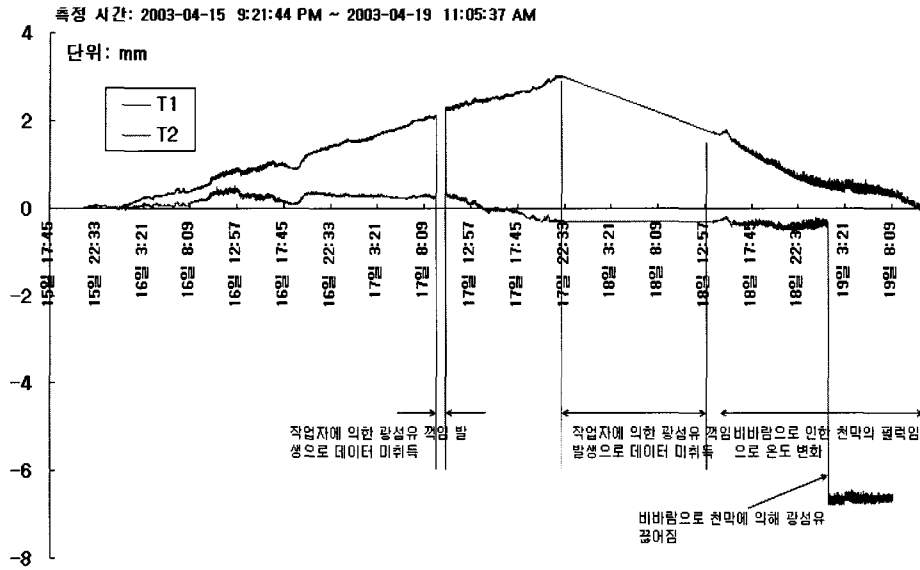


Fig. 7 격납구조물의 해치부분인 T1, T2에서의 FBG센서 데이터.

FBG 센서는 전체적으로 해치부분의 거동을 잘 묘사하고 있으며 센서가 끊어진 것이 아니고 리드선에서 단락이 생겼을 경우에 이어서 측정함에 전혀 문제가 없음을 보여 주고 있다. 보통의 전자식 LVDT나 Strain-Gage에서는 리드선이 끊어진다면 그 시점부터 다시 제로세팅을 해야 하는 것과 달리 FBG 센서는 파장의 변화를 측정하는 것이기 때문에 중간에 데이터 취득이 안 되더라도 자기 자신의 파장값을 가지고 있어 절대량의 변화를 알 수가 있고 따라서 중간의 데이터가 일부 없더라도 전체 데이터를 파악하는데 전혀 문제가 되지 않는다. 상기 데이터에서 측정기간 중 2번 문제가 생겨 데이터 취득이 되지 않았으나 데이터 파악에 전혀 문제가 없음을 잘 보여주고 있다.

5. 측정 결과 및 discussion

격납건물내의 측정지점인 D0와 R12는 내부에 설치된 컴퓨터가 과열로 인해 작동을 중지할 때까지 정확히 잘 측정되었으며 압력의 증가에 따라 부피팽창을 잘 묘사하고 있다. 설치할 때 충분한 시간이 제공 되었고, 광섬유의 접속이 가능하던지 220V 전원의 공급이 가능하였다면 좀 더 여러 포인트의 데이터와 데이터가 중간에 종료되지 않고 처음부터 끝까지 받을 수 있었을 것으로 판단되나 그렇지 못했던 것이 아쉽게 느껴진다. 하지만 컴퓨터가 제대로 작동하고 있을 동안에는 좋은 데이터를 보여 주고 있고 LAN을 통하여 내부시스템을 외부에서 제어할 수 있음을 보여

주었다는데서 의의를 찾을 수 있으며, 같은 방식으로 격납 구조물에 설치된 시스템을 본사 오피스에서도 제어할 수 있음을 보여 주고 있다.

해치부분의 T1, T2에 설치된 FBG 센서는 전체적으로 해치부분의 거동을 잘 묘사하고 있으며, 리드선에서 단락이 생겼을 경우에 이어서 측정함에 전혀 문제가 없음을 보여 주고 있다. FBG 센서는 파장의 변화를 측정하는 것이기 때문에 중간에 데이터 취득이 안 되더라도 자기 자신의 파장값을 가지고 있기 때문에 절대량의 변화를 알 수가 있어 이상 없이 측정할 수 있음을 잘 확인 시켜주고 있다. 데이터를 확인해 보면 T1 부분은 이상 없이 원래의 위치로 복원되는 것을 잘 확인할 수 있었으며 T2 부분은 압력에 무관하게 거의 변화가 없음을 잘 보여 주고 있다. 마지막 부분에 심한 바람으로 인해 천막이 센서를 쳐서 T2 센서가 끊어져 데이터를 취득할 수 없었으나 전체적으로 잘 묘사되고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

FBG 센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형을 측정하였고 FBG 센서는 긴 게이지 길이를 갖는 격납 건물의 변형을 측정할 수 있는 좋은 수단임을 확인하였다.

격납건물의 내부와 외부에 각각 2지점씩 실제로 적용하여 측정하였으며 격납건물내의 측정지점인 D0와 R12는 내부에 설치된 컴퓨터가 과열로 인해 작동을 중지할 때까지

정확히 잘 측정되었으며 압력의 증가에 따라 부피팽창을 잘 묘사하였다. 그리고 LAN을 통하여 내부시스템을 외부에서 제어할 수 있음을 보여 주었고, 같은 방식으로 격납구조물에 설치된 시스템을 본사 및 연구소에서도 원격 제어할 수 있음을 확인하였다.

외부 해치부분에 설치된 FBG 센서는 전체적으로 해치부분의 거동을 잘 묘사하였다. FBG 센서는 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. 압력이 제거된 후 해치 부분은 이상없이 원래의 위치로 복원되는 것을 잘 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures," *Proc. SPIE*, Vol. 1588, 1991, pp. 282.
- 2) F. BUCHOLTZ, A. D. Kersey, "Multiplexing of Nonlinear Fiber Optic Interferometric Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7, No.3, March 1989, pp.514-519.
- 3) 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, 1993, pp. 1618-1662.
- 4) Kim, K. S., A. Segall and G. S. Springer, "The Use of Strain Measurements for Detecting Delaminations in Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 23, 1993, pp. 75-84.
- 5) Ferdinand, P. Ferragu, O. Lechien, J.L. Lescop, B. Magne, S. Marty, V. Rougeault, S. Kotrotsios, G. Neuman, V. Depeursinge, Y. Michel, J.B. Van Uffelen, M. Varelas, D. Berthou, H. Pierre, G. Renouf, C. and Toscano, D., "Mine operating accurate stability control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 7, July 1995, pp. 1303-1311.
- 6) 이호준, 송준용, "WDM을 위한 Fabry-Perot 필터의 로킹 시스템", 대한전자공학회, Vol. 34-D-6, 1997, pp. 58-64.
- 7) M. A. Davis and A. D. Kersey, "Application of a Fiber Fourier Transform Spectrometer to the Detection of Wavelength-Encoded Signals from Bragg Grating Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 7, July 1995, pp. 1289-1295.