논문 2004-41SD-3-5

SLD 동조 광원과 에탈론 필터를 이용한 FBG 센서 신호처리 시스템

(FBG Sensor Signal Processing System using SLD Tunable Light Source and Etalon Filter)

정 철*, 이 호 준*, 김 기 수**

(Chul Chung, Hojoon Lee, and Ki-Soo Kim)

요 약

광섬유 브래그 격자 센서는 광섬유의 코어의 굴절률 변조에 의해서 제작되며, 이 센서는 외부의 스트레인에 따라 브래그 파장이 변화하게 된다. 본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 파장 영역에서 신호처리 할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. SLD와 F-P 필터로 구성된 sweep 반도체 광원과 F-P 필터내의 PZT의 히스테리시스 특성을 보상하기 위한 에탈론 필터와 장기 계측을 위해 절대 파장 기준으로 온도 안정된 광섬유 브래그 격자를 사용하였다. 콘크리트 흄관에서 FBG 센서의 스트레인 응답 특성을 전기저항 센서와 비교하였다. 그리고 광섬유 격자 센서를 이용하여 장거리 변위의 측정 가능성을 확인하였다.

Abstract

Fiber Bragg grating sensors are fabricated by core index modulation using UV laser and phasemask. Bragg wavelength of the grating is changed by the external strain. In this paper, a signal processing system of fiber Bragg grating sensor has studied in the optical wavelength domain. The system is based on the sweep semiconductor light source that consists of SLD, F-P tunable filter and etalon filter. The hysteresis effects of PZT in the F-P tunable filter are compensated. The long term measurement stability is obtained by controlling the temperature of F-P tunable filter and the SLD. We compare the strain data from fiber Bragg grating sensor and that from strain gauge at concrete hume pipe. We also get very good results for the long gauge displacement using fiber Bragg grating sensor which are identical to the data with short gauge length ordinary displacement sensor.

Keywords : FBG(fiber Bragg grating) sensor, tunable F-P filter, sensor system, SLD, etalon filter.

I. 서 론

현재 각종 산업분야의 스마트 구조(smart structure)를 구현하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있으며[1], 이에 대한 구현을 위해 진단 및 계측용으로 사용하는 센서 및 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 고성능의 센서 및 시스템을 요구하고 있기 때문에 기존의 센서에 대한 대안으로 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating) 센서에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이는 환경 변화에 따라 민감한 데이터를 정밀하고 안전하게 수집, 신호처리, 전송해야 하는 복합적인 구조를 필요로 한다. 이 구조는 센서의 신뢰도 뿐만 아니라 센서 신호 전송의 정확성, 안정성 등이 전체 시스템의 신뢰도를 좌우한다. 대표적 안전 진단 센서인 스트레인 게이지(strain guage) 센서는 저항 값의 변화량으로 가해지는 압력이나 구조의 결함 등을 측정하는데 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.

* 정회원, 호서대학교 정보통신공학부
(Department of Information-communication Engineering, Hoseo University)
** 정회원, 호서대학교 벤처대학원 첨단산업기술학과
(Graduate School of Venture, Hoseo University)
접수일자 : 2003년9월19일, 수정완료일 : 2004년3월4일

광섬유 브래그 격자는 1989년 Melts[2]의 실험 이후 광통신 분야 및 센서 분야에 다양한 용도를 가지고 있다. 광섬유 브래그 격자는 190 ~ 250 nm의 영역의 자외선 레이저와 위상마스크를 이용하여 광 민감성 광섬유에 제작된다. 이를 이용하여 광섬유 레이저[3], 대역통과 필터[4]로 사용하거나, 여러 가지 물리량 측정하기 위한 센서[5] 등에 응용할 수 있다. 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 시스템은 대표적으로 2가지 형태로 나눌 수 있다. 첫째로 브래그 격자 센서의 브래그 파장 이동 특성을 파장(wavelength) 영역에서 신호 처리하는 방식[6], [7]과 둘째로 브래그 격자 센서의 이동 특성을 광 강도(optical intensity)를 측정하는 방식[8], [9]이 있다. 기존에 연구된 sweep 레이저의 구성은 광섬유 레이저(fiber laser)와 동조 필터(tunable filter)를 이용하여 구성하는 방식[10]을 사용하였다. 광섬유 레이저 방식은 EDF (Erbium-doped fiber)에 980 또는 1480 nm의 영역에 펌프 레이저(pump laser)를 이용하여 여기(exiting)시켜 발생된 1535 ~ 1565 nm 대역의 빛을 광원으로 사용한다. 이 방식의 장점으로는 고출력의 광을 얻을 수 있으므로 비교적 큰 동적 범위(dynamic range)를 얻을 수 있고 한번의 동조 필터 구동으로 센서 신호와 보정 신호를 얻을 수 있기 때문에 보다 안정적인 측정치를 얻을 수 있으나, 고가의 EDF와 펌프 레이저를 사용하여야 하며 구성이 다소 복잡한 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 고가의 광섬유 레이저를 사용하는 대신 넓은 파장을 갖는 반도체 광원인 SLD (superluminescent diode)를 사용하여 저가로 제작이 가능하도록 하였으며 장기 계측의 기준 파장으로 사용하기 위한 기준 FBG와 필터의 선형성을 확보하기 위하여 에탈론(etalon)을 사용하였다. 또한 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 변형 측정을 위한 시스템을 제안하였으며, 이를 이용하여 기존의 스트레인 게이지와 LVDT(linear variable differential transformer)와 비교한 실험 결과를 제시하였다.

Ⅱ. 광섬유 브래그 센서 신호처리 시스템

본 논문에서 제안된 광섬유 브래그 격자 센서의 신호처리 시스템의 블록도는 그림 1과 같다. Sweep 반도체 광원은 레이저 다이오드 구동부(laser diode driver), SLD, 동조 F-P(Fabry-Perot) 필터, TEC 컨트롤러 등으로 구성되어 있다. SLD의 광출력은 F-P 필터에 연결하였으며, F-P의 거울 간격을 조절하기 위한 PZT의 전압을 변화시킴에 따라 파장 동조가 가능한 형태로 시스템을 구성하였다. 그리고 PZT의 동조 파장의 온도 의존성을 제거하기 위하여 F-P 필터 전체를 온도 안정하였다. 광원으로부터 발생된 빛을 광섬유 브래그 격자 센서로 전달하기 위해 광 결합기(optical coupler)를 사용하였으며, 광섬유 격자 센서의 갯수를 증가시키기 위하여 광 스위치(optical switch)를 사용하였다. 온도 안정화된 기준 광섬유 브래그 격자(reference FBG)는 외부의 온도 변화 및 스트레인에 무관한 기준 파장을 제공하기 위해 사용되며, 반도체 광원의 sweep 시작 파장으로 사용된다. 광섬유 브래그 격자 센서는 가해지는 물리량에 따라 반사광의 중심파장이 이동하는 특성을 가지고 있고, 광섬유 브래그 격자의 중심파장과 일치하지 않는 빛은 그대로 통과하여 다음단의 광섬유 센서로 전달된다. 본 연구의 시스템에서는 중심파장이 서로 다른 광섬유 브래그 격자 센서들을 직렬로 연결하여 다중화 하였다. 광섬유 브래그 격자 센서로부터 반사한 빛은 광 결합기를 다시 통과하여 광섬유 브래그 격자 센서 수신부로 전달된다.

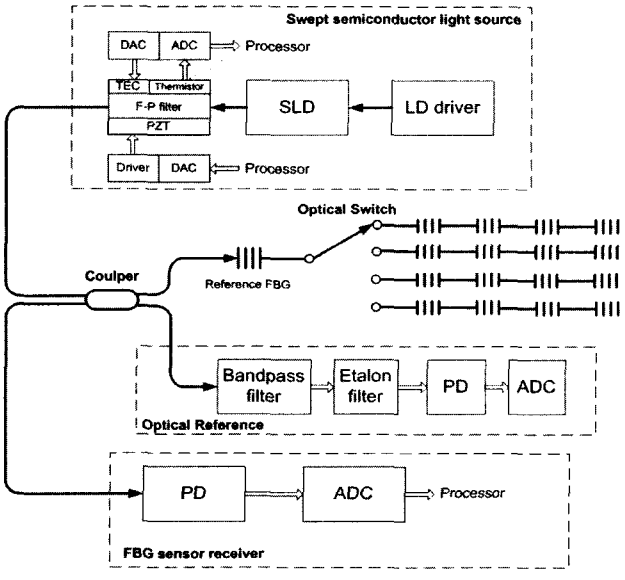

그림 1. FBG Sensors System 구성도
Fig. 1. Block Diagram of FBG Sensors System.

또한 광 결합기에서 나뉘어진 빛은 광학 기준(optical reference)부로 전달된다. 이 광학 기준부에는 주기적인 투과광 특성을 갖는 에탈론, PD 그리고 컴퓨터 연결을 위한 ADC(A/D converter)로 구성되어 있다. 에탈론 필터는 F-P 필터의 파장 sweep을 위해 사용되는 PZT의 히스테리시스 특성에 의한 선형성을 유지하기 위해

사용된다. 광섬유 브래그 격자 센서로부터 반사된 빛의 중심 파장을 측정하기 위하여 sweep 반도체 광원에서 발생되는 빛의 파장을 순차적으로 바꾸어 가며 광 수신기에서 응답을 측정한다.

Ⅲ. FBG 센서 신호처리 시스템 실험

광원은 1mW, FWHM(full-width half maximum)은 45 nm, 그리고 중심 파장은 1552.49 nm인 SLD를 사용하였다. 또한 SLD는 코히어런트 길이가 짧고 무편광의 빛을 발생하며, 낮은 동작 전류로 온도 제어가 가능하며, 비교적 저렴한 가격 등의 특징이 있다. 이러한 광원을 구동하기 위하여 정전류를 흘려주고 온도 제어를 할 수 있는 다이오드 구동부를 사용하였고, SLD의 광전력 안정성을 위하여 thermistor와 TEC를 이용한 제어부가 추가되어 있다. 그림 2는 SLD의 출력 스펙트럼을 OSA (optical spectrum analyzer)에서 측정한 그림이다. 이러한 온도 안정화된 광원을 광섬유 격자 브래그 센서 시스템에 적용하면 장시간 동안 안정적인 측정이 가능하다. 사용된 F-P 필터의 특성을 측정하기 위하여 TLS(tunable laser source)와 광 전력계(optical power meter)를 사용하여 2 pm 단위로 주사(scanning)하며 측정한 결과 삽입 손실(insertion loss)은 2.13 dB, FSR(free spectral range)은 50.526 nm, 그리고 FWHM은 56 pm로 측정되었다. 따라서 finesse는 902.25로 계산된다.

그림 3은 본 논문에서 사용된 SLD의 출력신호가 F-P 필터를 통과한 광 스펙트럼을 OSA로 측정한 결과이다. 넓은 선폭을 갖는 SLD 신호가 F-P 필터를 거친 후 좁은 선폭의 광원으로 변화된 것을 알 수 있다. 여기서 변화된 광 스펙트럼은 형태는 SLD 파장 스펙트럼에 F-P 필터의 투과 특성을 곱한것과 같음을 알 수 있다.

Sweep 반도체 광원으로부터 방출된 빛은 3 dB 광결합기를 통하여 광 센서인 광섬유 브래그 격자 센서에 도달한다. 본 연구에서는 1541.91 nm, 1544.85 nm, 그리고 1550.30 nm의 브래그 파장, 격자 길이 2.0 cm, 대역폭이 <0.2 nm, 그리고 반사율은 >90%을 갖는 FBG를 센서로 사용하였고, 1525.00 nm의 브래그 파장을 갖는 기준 FBG를 사용하였다. 또한 여러 지점의 물리량을 측정하기 위하여 광 스위치를 사용하여 병렬 시스템을 구성하였다.

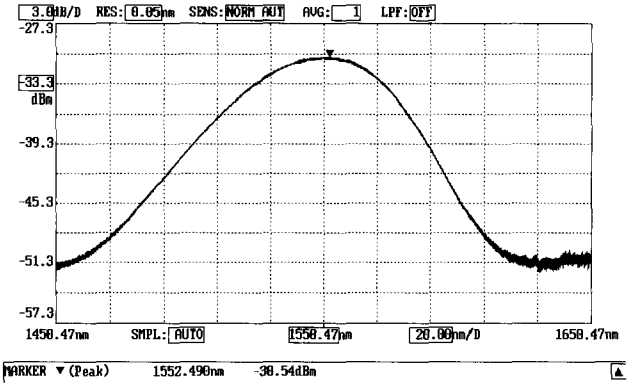

그림 2. OSA로 측정된 SLD의 파장 특성
Fig. 2. Wavelength spectrum of SLD measured by OSA.

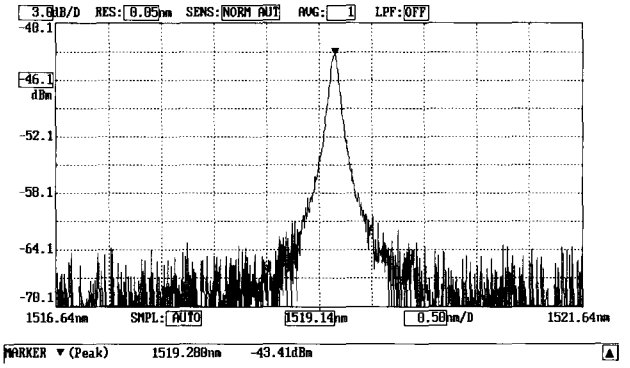

그림 3. F-P 필터를 통과한 광원의 파장 스펙트럼
Fig. 3. Wavelength spectrum of SLD transmitted F-P Filter.

F-P 필터내의 PZT의 히스테리시스로 인한 비선형성을 보상하기 위하여 온도 및 외부 현상에 무관한 에탈론 필터를 사용하였고 이 에탈론 필터는 100 Ghz의 FSR을 갖는 박막필터를 사용하였다. F-P 필터의 PZT 전압이 변화할 때마다 에탈론 필터의 응답 특성을 확인함으로써 F-P 필터의 중심 파장 변화를 알 수 있다.

광섬유 브래그 격자 센서 수신부 및 광 기준부는 광량을 측정하기 위한 PD가 사용되었다. PD는 광섬유 브래그 격자 센서로부터 반사되는 광신호에서 센서에 가해진 스트레인 정보를 얻는 부분으로, 광 신호를 전기신호로 변환한다. 변환된 전기신호는 매우 미약하고 많은 잡음을 포함하므로 신호처리가 가능하도록 잡음 제거와 충분한 증폭이 필요하다. FBG 센서 수신부에서 FBG 반사 스펙트럼을 측정하여 중심 파장 값을 계산한다. 광 기준부의 PD에서는 sweep 반도체 광원이 sweep될 때 100 Ghz 간격으로 최대 전력이 관측되므로 이 신호는 동조 필터의 비선형적인 응답특성을 보상하는 신호처리에 사용된다. 그림 4 (a)는 PZT 구동전압이 -10 ~ +10 V의 범위에 대해 선형적으로 변화하는

모양을 보여주며 이때 sweep 반도체 광원의 파장은 1520 ~ 1570 ㎚의 대역에서 변화된다. 이때 광 기준부에서 측정한 에탈론 필터의 응답 특성(b)와 1개의 기준 FBG와 3개의 FBG 센서에서 반사된 신호(c)를 나타낸다.

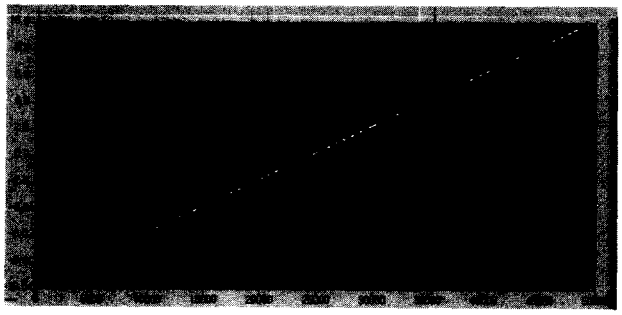

그림 4. 필터 sweep에 따른 광섬유 브래그 격자 센서와 에탈론 필터의 응답특성

Fig. 4. Reflection spectrum of FBG sensor and etalon filter by sweeping tunable filter.

Ⅳ. 광섬유 브래그 격자를 이용한 변형 측정 및 고찰

FBG 센서의 변형을 측정하기 위해 프리스트레스 콘크리트 흄관에 광섬유 센서와 전기 저항식 센서인 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하고 액추에이터(actuator)로 압력을 가하여 데이터를 비교하였다. 흄관은 직경 1.2 m의 시편을 사용하였고 콘크리트 접착용 스트레인 게이지와 광섬유 브래그 격자 센서를 그림 5와 같이 설치하였다. 그림 6은 센서가 설치된 콘크리트 흄관 및 액추에이터의 사진이다.

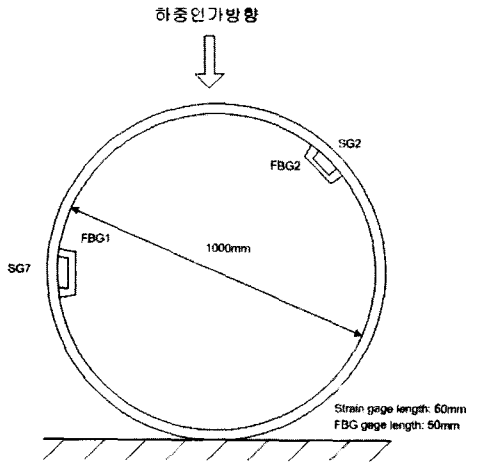

그림 5. 광섬유 브래그 격자 센서와 스트레인 게이지 설치도

Fig. 5. Installation of FBG sensors and strain gauge sensors.

그림 6. 광섬유 브래그 격자 센서와 스트레인 게이지 센서가 부착된 흄관

Fig. 6. Hume pipe with installed FBG sensors and strain gauge sensors.

1m의 흄관의 벽면에 60 mm 콘크리트용 스트레인 게이지 ST 2과 ST 7를 차례로 붙이고, 여기 동일한 위 위치에 아일렌드형 (island type) 50 mm 광섬유 격자 센서 FBG 1과 FBG 2를 연결하였다. 0 에서 9.6 ton 까지 초당 0.01 ton의 힘으로 흄관에 압력을 가하였다. 상측에서 지면 방향으로 인가한 하중의 증가에 따라 센서에 압축력을 받게 되어 점차적으로 압축 스트레인이 증가 하였다. 여기에 스트레인 게이지 센서와 FBG 센서의 응답 특성은 그림 7과 같이 나타났으며, 동일한 위치에 붙인 ST 2와 FBG 2가 각각의 거동이 비슷 경향으로 나타나는 것을 알 수 있었으며, 광섬유 브래그 격자 센서[11]에서 최대 70 $\mu\varepsilon$ 의 값을 읽었다. ST 7과 FBG 1의 거동 또한 경향으로 나옴을 알 수 있으며 최대 170 $\mu\varepsilon$ 의 값이 측정되었다. 여기서 광섬유 격자 센서와 스트레인 게이지의 측정값이 일치하지 않는 이유는 서로 다른 게이지 길이와 피측정물의 표면에 10 mm 가량 높게 붙인 광섬유 브래그 격자 센서가 콘크리트형 스트레인 게이지와 정확하게 일체 거동을 하기 어려운 구조 때문이며, 또한 게이지 길이가 서로 다른 것의 영향일 수 있을 것으로 생각된다. 광섬유 브래그 격자 센서에서의 압축 스트레인이 스트레인 게이지 보다 크게 나오는 요인으로는 원형의 구조를 가지고 있는 단면에 광섬유 브래그 격자 센서의 지점이 평평한 상태가 아닌 곡률 가지고 있는 형태로 연결되어 다소 확대가 된 것을 알 수 있다.

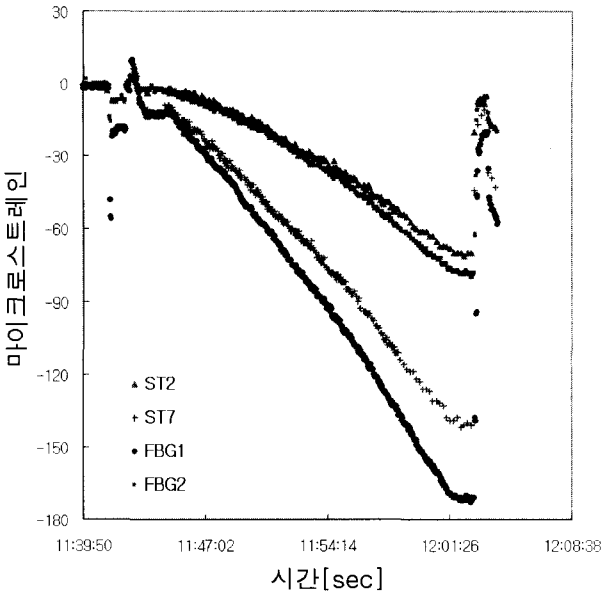

그림 7. 홈관에서의 광섬유 브래그 격자 센서와 스트레인 게이지 센서를 이용한 스트레인 측정 결과

Fig. 7. Result of strain measurement using FBG sensors and strain gauge sensors at hume pipe.

다음 실험은 긴 게이지 길이의 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 변형의 측정이 가능한지 검토하는 것이다. 기존의 장거리 물체의 변위를 측정 방식은 신축계(extensometer)와 인바(invar) 와이어(wire)를 이용하여 측정한다. 이상적인 경우 인바 와이어는 길이의 변형이 전혀 없고, 모든 변위가 신축계에 응집하여야 한다. 그러나 실제로는 인바와이어가 변형이 나타날 수 있으며, 신축계의 무게에 의한 처짐, 연결부의 이상 여부에 의해 영향을 받아 실측값과는 다를 수 있다. 그러나 FBG 센서의 경우 지점과 지점 사이를 125 ㎛ 직경 광섬유로 직접 연결이 가능하며 가볍고 설치가 쉬운 이점이 있다. 본 실험에 앞서 신축계와 광섬유 브래그 격자 센서의 측정 단위를 살펴보면 신축계에 속하는 LVDT의 경우 변위를 측정하게 되는데 반하여 광섬유 브래그 격자 센서의 경우는 스트레인 값으로 측정한다. 스트레인은 단위 길이가 1m인 물체의 변위(displacement)가 1 ㎛인 경우 1 με으로 표시하며 변위와 스트레인(ε)의 관계는 $\Delta L = \varepsilon / L$와 같다. 여기서 ΔL은 변위이고, L은 게이지 길이(gauge-length)이다. 예로 5m의 게이지 길이에서 발생된 경우 20 με의 스트레인이 발생되었을 때 100㎛의 변위가 발생된 것으로 계산된다.

그림 8과 같이, 광섬유를 17.6 m 떨어진 양끝에 수평으로 부착하였다. 한쪽 끝은 치구를 이용하여 벽면에 고정하였으며 다른 한쪽은 스크류 나사를 이용하여 광섬유에 인장력을 가할 수 있게 하였다. 변위를 점차적으로 증가하여 결과를 얻었으며, 변위를 0.8 mm, 1.7 mm, 2.2 mm, 2.8 mm 일때 결과를 살펴보았다. 여기서 광섬유 브래그 격자 센서는 1초당 한개의 데이터를 얻었으며, LVDT는 움직임을 정지하였을 때 결과를 얻은 것이다. 그림 9는 광섬유 브래그 격자 센서와 LVDT로 읽은 변위값 결과이다. 이 실험을 통해 광섬유 브래그 격자 센서로부터 받은 스트레인 값을 변위로 환산하여 LVDT로 얻은 변위와 동일한 결과 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

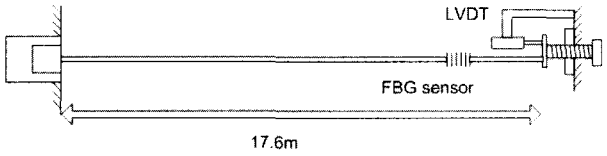

그림 8. 장거리의 광섬유 브래그 격자 센서와 LVDT를 이용한 변위 측정 블록도

Fig. 8. Displacement measurement setup using long gauge FBG sensor and LVDT.

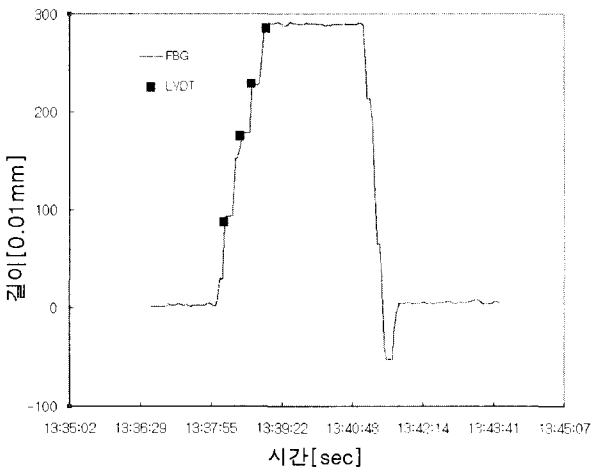

그림 9. 장거리의 광섬유 브래그 격자 센서와 LVDT를 이용한 측정 변위

Fig. 9. Measured displacement using long gauge FBG sensor and LVDT.

V. 결 론

광섬유 브래그 격자 센서는 제조 방법이 용이하고, 대량 생산이 가능하며 향후 차세대 센서로의 많은 이용이 예상된다. 또한 제조할 때 만들어진 브래그 반사 파장을 측정하여 절대 변형량, 누적 변형량을 알아 낼

수 있게 되기 때문에 장기적인 계측이 가능하다. 또한 광섬유를 이용하기 때문에 부식과 외부의 전자파에 영향을 적게 받아 신호의 안정적인 측정 및 전송이 가능하기 때문에 센서 신호를 장거리 전송할 수 있다. 광섬유 센서는 금속 센서와 달리 소성 변형이 없어 탄성 영역 내에서 변형이 일어나기 때문에 측정시 센서 자체의 에러 요인이 없다.

본 논문에서는 SLD 동조 광원과 에탈론 필터를 이용한 FBG 센서 시스템을 제안하였다. Sweep 반도체 광원에서 사용된 PZT의 히스테리시스 특성을 보상하기 위한 에탈론 필터와 절대 파장을 측정하기 위하여 온도 안정된 광섬유 브래그 격자를 사용하였으며 이를 통하여 장기 계측시 측정의 안정성을 높였다. 광섬유 브래그 격자 시스템의 데이터 취득 및 광섬유 브래그 격자의 응답 특성을 알아보기 위해 콘크리트 흡관 실험과 장거리 변위 측정 실험을 통하여 기존의 센서와 비교하여 보았다. 이를 통하여 시스템의 안정적인 데이터 처리능력을 알 수 있었고, 기존의 센서와 광섬유 브래그 격자의 응답 특성을 살펴보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결과로 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 지능형 구조물, 건물, 교량의 안전진단 등에 사용이 가능하리라 생각한다.

참 고 문 헌

[1] R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures" Proc. SPIE, vol. 1588, pp. 282, 1991.

[2] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method," Optics Letters, vol. 14, pp. 823-825, 1989.

[3] Othonos, A., X. Lee and D. P. Tsai, "Spectrally broadband Bragg grating mirror for and erbium-doped fiber laser," Optical Engineering, vol. 35, pp. 1088-1092, 1996.

[4] Bilodeau., F., et al. "High Return Loss narrow-band all fiber bandpass Bragg transmission filter," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 6, pp 80, 1994.

[5] Kersey, A. D., et al. "Fiber grating sensors," IEEE Journal of Lightwave Technol., vol. 15, pp. 1442-1463, 1997.

[6] Kersey, A. D.,T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," Optics Lett., vol. 18, pp. 1370-1372, 1993.

[7] Jackson, D. A., et al. "Simple multiplexing scheme for fiber optic grating sensor network," Optics Lett., vol. 18, pp. 1192-1194, 1993.

[8] Melle, S. M., K. Liu, and R. M. Measures, "A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensor." IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 4, pp. 516-518, 1992.

[9] Zhang, L., et al. "Identical broadband chirped grating interrogation technique for temperature and strain sensing," Proceeding of the Optical Fiber Sensors conference(OFS-12), Williamsburg, VA, USA, pp. 309-311, 1995.

[10] Kersey, A. D., and W. W. Morey, "Multiplexed Bragg grating fibre laser strain sensor," Electron. Lett., vol. 29, pp. 964-966. 1993.

[11] Meltz, G., and W. W. Morey, "Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity," International workshop of Photoinduced Self Organization Effects in Optical Fiber, Quebec City, Quebec, May 10-11, Proceedings SPIE, vol. 1516, pp. 185-199, 1991.

저 자 소 개

정 철(정회원) 제39권 SD편 제10호 참조

이호준(정회원) 제41권 SD편 제1호 참조

김기수(정회원)