

파장 가변 협대역 투과 필터를 이용한 광섬유 격자 동적 센서 시스템

구현덕*[†] · 이상배 · 최상삼

한국과학기술연구원 광기술연구센터

Ⓣ 136-135 서울시 성북구 하월곡동 39-1

송석호 · 김필수

*한양대학교 물리학과

Ⓣ 133-070 서울시 성동구 행당동17번지

조남소 · 김남식

현대건설 기술연구소

Ⓣ 449-710 경기도 용인시 구성면 마북리 102-4

(2000년 12월 18일 받음, 2001년 3월 19일 수정본 받음)

광섬유 브래그 격자는 코어의 굴절률이 주기적으로 변하는 특성으로 인하여, 브래그 조건을 만족하는 파장은 반사 시키고 다른 파장은 통과시키는 소자이다. 본 논문에서는 광섬유 격자를 이용한 동적 스트레인 센서시스템을 구현하였다. 4채널 동적 센서 시스템에 사용된 필터의 선형성을 보강하여 필터의 전 구간에서 동적 신호를 측정하였으며, 실시간 동적 신호의 측정을 위하여 LabView를 이용한 신호처리 및 인터페이스를 하였다. 이러한 센서시스템의 분해능은 5 μ strain이며, 동적 스트레인 측정 범위는 필터의 전 구간 약 1200 μ strain에 해당한다. 센서시스템을 이용하여 외팔보(steel-bar)의 4지점에서의 스트레인의 변화량을 측정하였으며, 콘크리트 시험 보에 적용하여, 하중 인가시 시험 보가 받는 스트레인의 변화량을 실시간 측정하였다.

분류코드 : FO.010, FO.030.

I. 서 론

세계가 하나의 정보망으로 연결되고 국가간에 대용량의 정보를 고속으로 전송하고 수신하는 필요성이 증대되고 있다. 광섬유는 코어와 클래딩으로 구성되어 있으며, 코어와 클래딩의 굴절률의 차이는 전반사 조건을 만족하므로, 광섬유 내부로 입사된 신호는 고속으로 수신단에 전달된다. 이러한 광섬유 내부에 형성된 광섬유 브래그 격자는 코어에 형성되는 굴절률의 변조에 의해 브래그 조건을 만족하는 파장을 반사시키고 나머지 영역은 통과시키는 소자로 삽입 손실이 작고 파장 선택도가 높으며 편광에 무관한 특성을 보이므로 현재 전세계적으로 광섬유 센서와 광통신용 소자로 매우 활발하게 연구되고 있다.

광섬유 격자를 이용한 센서는 안정화, 간소화, 고성능화, 다중화 등의 장점을 갖는다. 광섬유 격자 센서로부터 출력되는 신호를 복조(demodulation)하는 방법에는 여러 가지가 있다. 분광분석기를 이용하면 간단히 광섬유 격자 센서 신호를 분석할 수 있는데 장비가 상당히 고가이고 응답속도가 느리다는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위하여 현재는 복조기(demodulator)로 마하-젠더 간섭계를 이용하거나 패브리페로 필터를 이용하는 방법들의 개발이 진행되고 있으며 이

러한 광섬유 격자를 이용한 센서에 있어서 복조(demodulation)에 관한 연구가 다양하게 진행되어 왔다.^[1] 그러한 연구들 중 패브리페로형 광섬유 격자 센서는 큰 변형을 잘 감지할 수 있으며, 센서의 특성상 신호처리가 비교적 간단하고, 온도 등의 외부 환경에 대해 매우 안정적이라는 장점을 갖고 있다. 파장가변 필터와 광섬유 격자를 이용한 동적 센서시스템을 구현하고 컴퓨터를 이용하여 신호처리 하였으며, 이를 이용한 4채널의 동적 스트레인의 측정 및 콘크리트 시험 보에 적용하여 실험결과를 얻었다. 본 논문에서는 광섬유 브래그 격자를 이용한 동적 스트레인 센서 시스템에 관하여 설명하였다. 2장에서는 광섬유 브래그 격자 센서의 개요를 설명하고, 3장에서는 온도와 스트레인에 대해 광섬유 격자의 파장이 이동하는 원리에 대해 이론적으로 설명하였다. 제 4장에서는 제작된 센서 시스템의 원리 및 신호처리에 대하여 설명하였으며, 센서 시스템을 이용하여 측정한 실험 결과들을 나타내었다. 끝으로 5장에서는 결론을 맺었다.

II. 광섬유 브래그 격자 센서의 개요

광섬유 격자(Fiber Bragg Grating) 센서는 광섬유 격자에 가해진 외부 물리량(스트레인, 온도, 스트레스 등)에 의해 야기되는 광섬유 격자 브래그 파장의 변화를 측정하여 가해진 물리량에 대한 정보를 알아내는데 이용되는 소자이다.^[1] 광섬

[†]E-mail: blue232@kist.re.kr.

유 격자는 광섬유 코어(core)에 형성된 굴절률 주기의 변화와 굴절률의 크기 변화에 의한 파장 선택도를 가지므로, 가해진 물리량에 의하여 굴절률의 크기와 주기의 변화가 있을 경우 그에 따른 브래그 파장의 변화를 보인다. 가해진 물리량에 대한 브래그 파장의 변화율은 선형적이며 따라서 파장의 변화량을 정밀히 측정하면 가해진 물리량에 대한 정보를 역으로 계산해 낼 수 있다. 가해진 물리량에 대한 광섬유 격자 센서의 반응은 브래그 파장의 변화로 나타나므로 광 경로의 변화나 빛의 양의 변화를 측정하는 기존의 광섬유 센서와는 달리 광섬유 전달 경로상에서는 손실등에 영향을 받지 않으며, 조금씩 파장을 달리한 광섬유 격자를 이용하여 다중점 센서로의 확장 또한 매우 쉽게 이루어질 수 있다.

III. 센서의 원리

스트레인(strain), 온도(temperature), 압력(pressure), 동적 자기장(dynamic magnetic field) 등에 관한 센서로서의 광섬유 브래그 격자 센서가 보고된바 있다. 광섬유 브래그 격자의 중심파장은 이러한 물리량들에 대하여 다양하게 변화하며, 그러한 변화를 일으키는 원리 중 스트레인과 온도에 관하여 아래와 같이 설명할 수 있다.

3.1. 스트레인(strain)

가해지는 종 방향 스트레인 $\Delta\epsilon$ 에 대하여, 광섬유 격자의 파장이동 $\Delta\lambda_{BS}$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\Delta\lambda_{BS} = \lambda_B(1 - \rho_\alpha)\Delta\epsilon \quad (1)$$

광섬유의 광탄성 계수 ρ_α 는 식 (2)과 같다.

$$\rho_\alpha = n^2\{\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})\}/2 \quad (2)$$

여기서 ρ_{11} , ρ_{12} 는 스트레인 광학 텐서 (Strain-optics tensor)의 성분이며, n 은 광섬유 코어의 굴절률이고 ν 는 Poisson's ratio이다. 일반적으로 식 (2)의 광탄성계수 ρ_α 는 Germano-silicate glass의 경우 약 0.22값을 가진다.^[1] Silica Fiber의 경우, 스트레인에 대한 파장의 반응도는 800 nm와 1.55 μm 에 대하여 각각 0.64 pm/ μstrain 과 1.15 pm/ μstrain 로 측정되었다고 보고된 바 있다.^[2,3] 식 (1)과 (2)에 의해 가속도, 초음파, 힘의 측정도 응용되어 계측되어질 수 있는 값이다.

초고속 광통신 시스템의 분산 보상 소자로 광섬유 칩 격자 (linearly chirped fiber gratings)를 이용하기도 하며,^[4] 광섬유 칩 격자를 bandpass filter로 사용함으로써, 다수의 파장에 대하여 반사하는 특성을 이용하여 여러 위치에서의 브래그 파장의 변화정도를 측정하였다.^[5] 이러한 광섬유 칩 격자를 이용한 스트레인 측정에 있어서, 반사위치에서의 스트레인 변화량 δ_b 는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\delta_b = -\lambda(B\xi\Delta\epsilon)/(\Delta\lambda_c) \quad (3)$$

여기서 ξ 는 광섬유의 광탄성 성질에 의해 결정되는 상수이며, B 는 격자의 길이이다. λ 는 고정된 소스파장이며, 칩 격자의 임의의 반사파장에 대해 $\lambda_{B1} < \lambda_{B2}$ 일 때, 칩 격자의 반사파장의

표 1. 광섬유의 파장에 따른 스트레인 및 온도에 대한 반응

Wavelength [(m)]	Strain sensitivity [pm/(strain)]	Temperature sensitivity [pm/°C]
0.83	0.64	0.68
1.3	1	10
1.55	1.2	1.3

폭 $\Delta\lambda_c$ 은 $\Delta\lambda_c = \Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}$ 를 따른다. 격자의 길이 B 에 대하여, 광학적 길이의 변화 δ 는 식 (4)로 주어진다.

$$\delta = B\xi\Delta\epsilon \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)의 비는 식 (5)로 표현된다.

$$\delta_b/\delta = -\lambda/\Delta\lambda_c \quad (5)$$

여기서, $\lambda \gg \delta\lambda$, $\delta_b \gg \delta$ 이기 때문에, 광섬유 칩 격자는 스트레인 변화의 값을 비교적 큰 증폭으로 나타내게 된다.

3.2. 온도(Temperature)

온도의 변화에 대하여 파장변화 $\Delta\lambda_{BT}$ 는 식 (6)으로 주어진다.

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B\left(1 + \frac{1}{T}\frac{dn}{dT}\right)\Delta T \quad (6)$$

여기서 ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(Thermo-optics coefficient)이다. Silica Fiber에 대하여 800 nm와 1.55 μm 에서의 온도에 대한 파장의 변화는 각각 6.8 pm/°C와 13 pm/°C이다.^[2,3] 표 1은 광섬유의 파장에 따른 스트레인과 온도에 대한 반응정도를 나타낸다.^[2,3,6]

IV. Sensor Operation and Experimental Results

본 논문에서는 파장 가변 협대역 투과 필터를 광섬유 격자 센서의 복조기로 이용하여 정적, 동적 센서 시스템을 구성한 실험에 관하여 기술하였다. 실험에 사용된 광섬유 브래그 격자는 일반 통신용 단일모드(1.55 μm , step index) 광섬유를 48시간 100°C, 100기압에서 수초처리 한 후, 약 1 cm 길이의 위상마스크를 이용하여, KrF Excimer Laser로 제작되었다. 그림 1은 본 연구에서 구성한 1채널 센서 시스템의 개략도이며, 기본 원리는 협대역 투과 필터의 파장에 따른 광 투과도

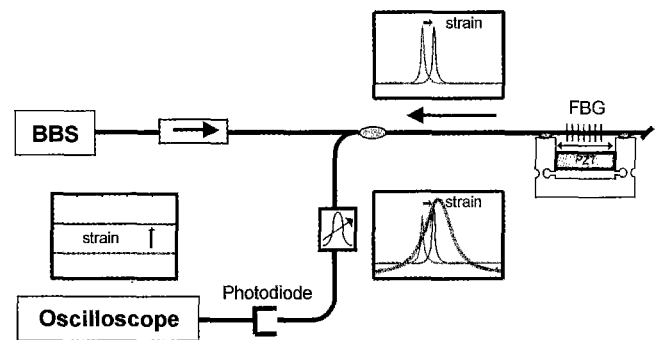


그림 1. 가변 협대역 투과 필터를 이용한 광섬유 격자 센서의 원리.

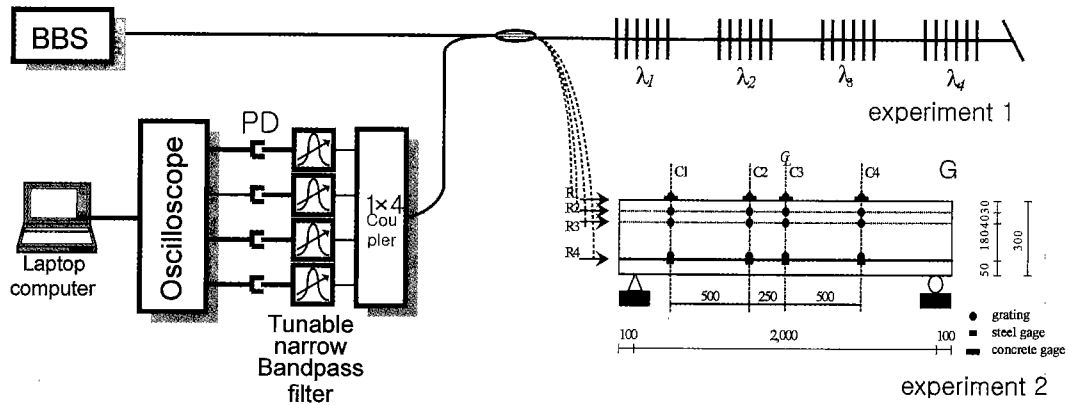


그림 2. 4-채널 광섬유 격자 센서 시스템의 개념도 및 광섬유 격자와 foil gauge의 설치도.

가 다른 점을 이용하여 광섬유 격자의 파장의 변화를 광 세기의 변화로 복조하여 신호처리를 하였다. 그림 1에서 나타내는 본 광섬유 격자 센서 시스템의 원리는 다음과 같다. EDFA로부터의 광원은 PZT 스트레처에 장치된 광섬유 격자에 의해 협대역 반사광으로 변화되며, 커플러를 통해 진행되는 협대역 반사광은 가변 협대역 투과 필터를 만나게 되는데, 광섬유 격자의 파장 이동에 따라 필터의 다른 부분과 만나게 되므로 광 검출기를 통하여 측정된 전압의 변화량을 통하여 스트레인의 변화량을 측정하게 된다. 본 논문에서는 동적 스트레인을 인가하기 위하여 PZT 스트레처에 전압을 인가하였으며, 인가 전압에 대한 광섬유 격자의 파장 변화율은 22 pm/V이었다. PZT 스트레처에 진폭이 각각 다른 3 Hz의 동적 스트레인을 인가하였으며, 광 검출기에서 출력 신호를 얻었다. 인가된 전압의 진폭 2, 5, 10, 14 V에 해당하는 스트레인은 각각 36, 90, 180, 252 μstrain 이며, 진폭의 변화에 따른 광 검출기의 출력이 매우 안정적으로 실시간 측정되었다. 본 시스템은 광 스펙트럼 측정기(Optical Spectrum Analyzer)로 측정하기 어려운 작은 파장의 변화를 고속으로 쉽게 측정할 수 있으며, 광 검지기 신호를 컴퓨터로 입력하여 처리하기 쉬운 장점이 있다. 또한 그림 2와 같이 광 커플러와 다수의 광 투과 필터를 이용할 경우 다채널 광 신호를 동시에 고속으로 측정할 수 있으며 각각의 신호를 컴퓨터 상에서 서로 연관시킬 수 있다. 본 실험에서 사용한 광 투과 필터의 중심파장의 가변대역은 1530~1560 nm이고, 3 dB 대역폭은 1.2 nm이다. 광 투과 필터의 선형 구간은 0.4 nm로서 광섬유 격자의 스트레인에 따른 파장 변화율 1.224 pm/ μstrain 을 고려할 때, 약 327 μstrain 에 해당한다. 필터의 선형성을 보상하였을 때, 측정할 수 있는 동적 스트레인은 약 1200 μstrain 에 해당한다. 필터의 선형성을 보상하기 위하여 Borland C를 이용하였으며, 필터의 선형성 보상의 원리는 다음과 같다. 선형성이 보상되기 전의 필터의 전 구간에 대하여 스트레인에 따른 출력 볼트의 값을 측정하여 기준이 되는 신호로 입력한 후, 입력되는 임의의 스트레인을 기준이 되는 신호의 1차 선형함수의 비로 표시하여 임의의 스트레인에 대한 출력 볼트값을 얻게 된다. 그림 3과 그림 4는 3 Hz의 동적 스트레인이 인가되었을 때, 선형성이 보상된 신호처리 결과를 나타낸다. 이와 같은 신호처리 결과를 나타

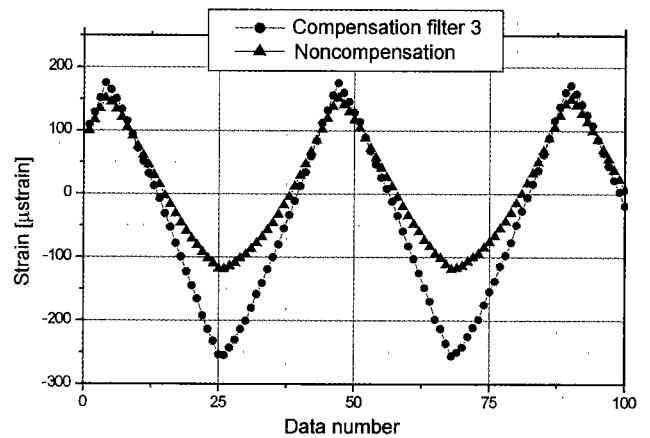


그림 3. 선형성이 보상된 필터의 전구간에 인가된 동적 Ramp 신호.

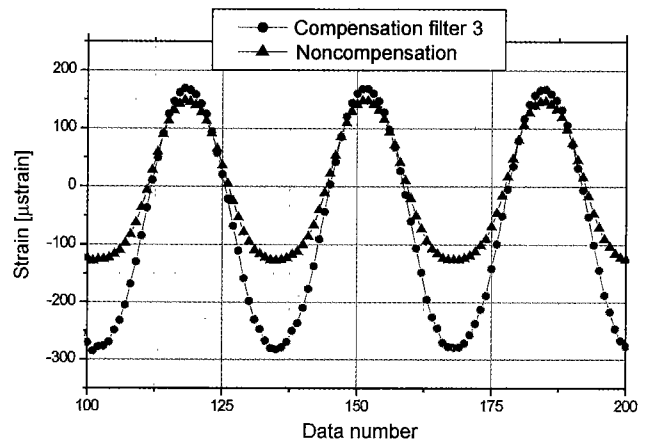


그림 4. 선형성이 보상된 필터의 전구간에 인가된 동적 Sine 신호.

는 원인은, 필터의 특성상 필터의 비선형성이 필터의 전구간을 기준으로 아래 부분이 위 부분에 비하여 크기 때문이다. 센서시스템의 신호를 실시간 측정하기 위하여 LabVIEW에서 제공되는 CIN(Code Internal Node)프로그래밍과 Visual C++을 이용하였으며, 보상된 필터의 전구간을 이용하여 동적 스트레인을 측정하였다.

그림 2와 같은 개념으로 그림 5와 같은 4개의 직렬 광섬유

격자 센서 어레이의 신호를 측정할 수 있는 광섬유 격자 센서 시스템이 제작되었다. 아날로그-디지털 변환기를 통하여 전달

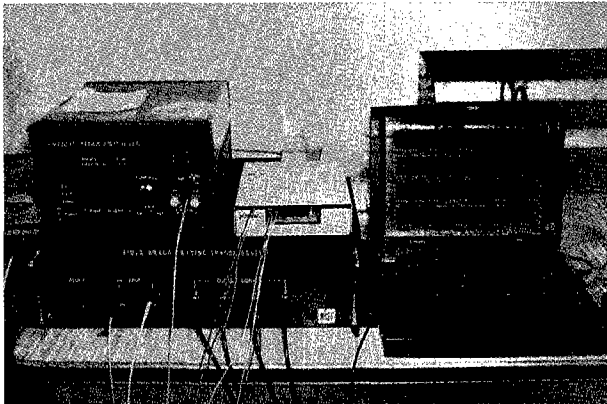
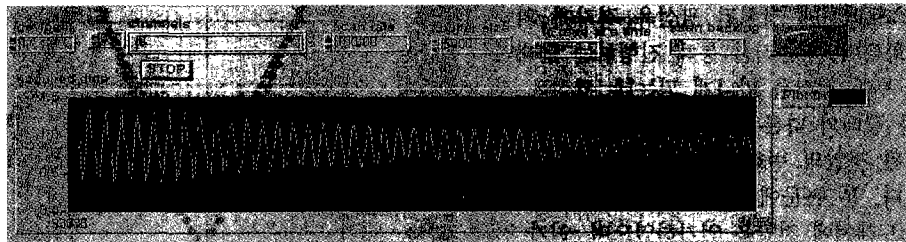
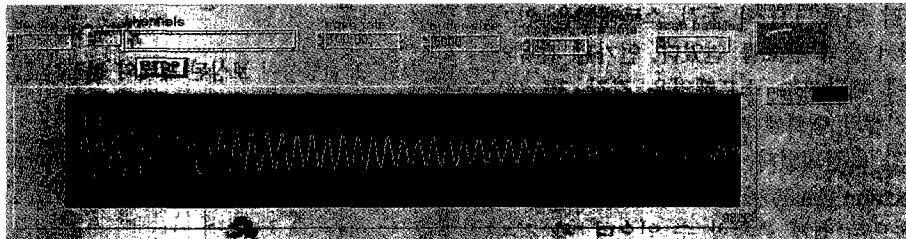


그림 5. 제작된 4-채널 광섬유 격자 스트레인 센서 시스템.

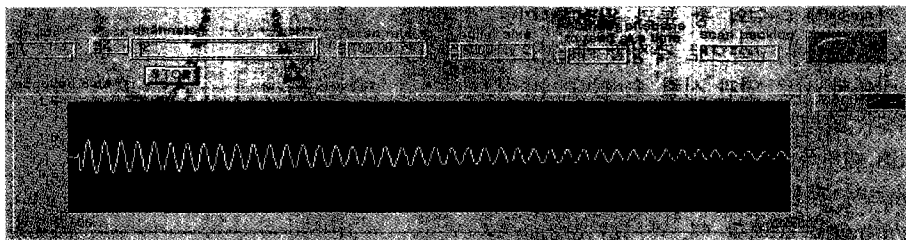
된 4-채널 센서 어레이의 광 검출기 신호는 LabVIEW를 이용하여 노트북 PC에서 실시간 처리되었다. 본 센서 시스템의 스트레인 측정범위는 최대 1200 μstrain 이며, 주파수 측정 범위는 2.5 kHz 이상이다. 이 시스템의 분해능은 5 μstrain 내외로 측정할 수 있는 최소 스트레인은 약 5 μstrain 내외이다. 그림 2는 외팔보의 고정점으로부터 차례로 5 cm 간격으로 부착된 광섬유 격자를 이용하여 각 지점에서 받는 스트레인의 변화량을 측정하는 개념도이다. 중심파장이 다른 광섬유 격자들로부터의 신호를 채널 1(1542 nm), 채널 2(1547 nm), 채널 3(1552 nm), 채널 4(1557 nm)으로 측정하였으며, 그림 6은 감쇠 진동하는 외팔보에 부착된 4-채널 광섬유 격자의 광 신호 출력을 나타내고 있다. 그림 6-(a), 6-(b), 6-(c), 6-(d)는 각각 채널 1, 채널 2, 채널 3, 채널 4의 광 신호 출력을 나타내고 있으며, 진폭이 다른 감쇠진동을 하는 이유는 외팔보의 고정점으로부터 격자가 부착된 위치에 따라 다른 스트레인을 받기 때문이다. 그림 7은 감쇠 진동 하는 외팔보에 부착된 광섬유



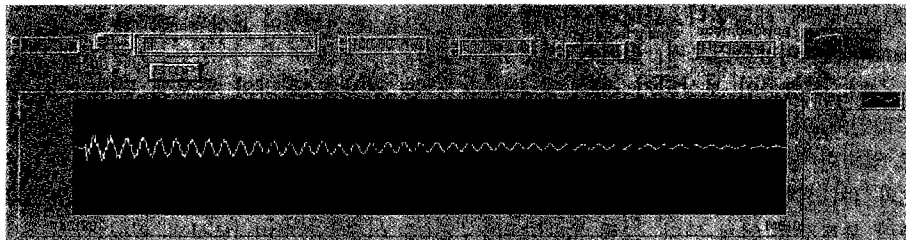
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 감쇠 진동 스트레인이 인가되었을 때의 4-채널 광 검출기 신호.

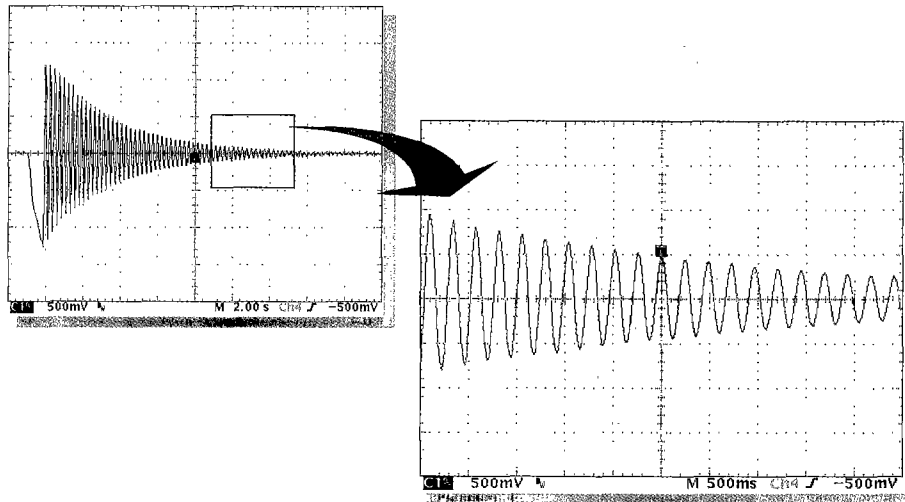


그림 7. 감쇠진동 스트레인이 인가되었을 때의 채널 1의 광 검출기 신호.

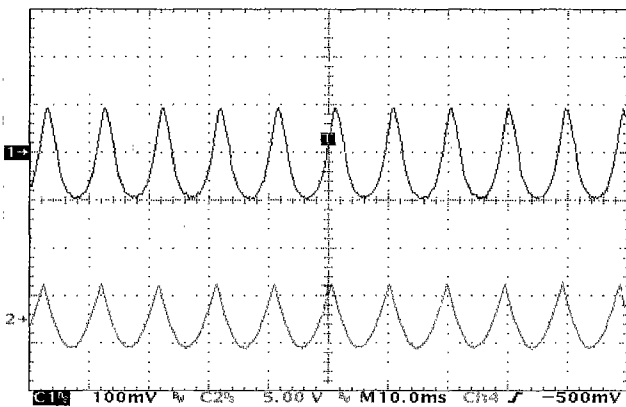


그림 8. PZT에 진폭이 7 V인 100 Hz 신호가 인가되었을 때(위)의 광 검출기 신호(아래).

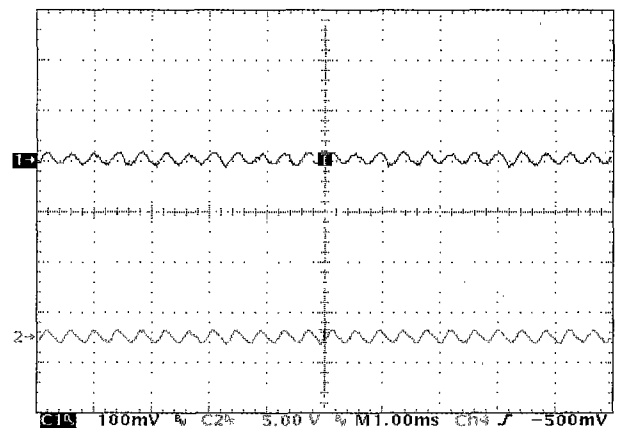


그림 9. PZT에 진폭이 1.2 V인 2.5 kHz 신호가 인가되었을 때 (위)의 광 검출기 신호(아래).

격자들 중 채널 1의 광 신호 출력이다. 실험결과 감쇠 진동 신호의 주파수는 4.3 Hz이었다. 그림 8와 그림 9은 각각 비교적 높은 주파수 100 Hz와 2.5 kHz의 동적 스트레인이 광섬유 격자에 인가되었을 때의 측정 결과이다. 이 실험에서는 2.5 kHz의 신호까지 측정하였으나 이는 전적으로 광섬유 격자의 동적 스트레인이 인가를 위한 PZT 스트레처에 의해 제한 받은 결과이다. 그러므로, 본 센서 시스템의 실제 주파수 측정범위는 이보다 크며, 궁극적으로 광 검출기의 응답 속도에 의해 결정된다.

제작된 본 센서시스템과 광 파장분석기를 콘크리트 시험 보 실험에 적용하여, 하중 인가 시 시험 보가 받는 스트레인의 변화량을 실시간 측정하였다. 콘크리트 시험 보 내에 그림 2과 같이 4개의 광섬유 격자를 하나의 라인으로 연결하여 3개의 라인으로 구성된 광섬유 격자 12개를 부착하였다. 광섬유 격자 센서의 신호를 보정하기 위해 센서와 동일한 위치에 스트레인이 게이지를 설치하여 하중인가 시험을 할 때 광섬유 격자 센서 신호와 스트레인이 게이지 신호를 비교 검토할 수 있도록 하였고, 시험 보 제작 시 2개의 thermocouple을 같이 매설하여 콘크리트 시험 보 내의 온도변화를 측정할 수 있게 하

였다. 광원으로 어븀 첨가 광섬유 광 증폭기를 사용하였으며, 어븀 첨가 광섬유 광 증폭기는 1550 nm 대역에 수십 nm의 발광 대역을 가짐으로써 시험 보에 설치한 광섬유 격자 peak들의 모든 영역을 커버할 수 있었다. 동적 스트레인을 측정하는 본 센서 시스템은 비교적 짧은 시간 동적 스트레인의 변화를 측정하는 특징으로 인해 긴 시간 스트레인의 변화를 측정하는 정적 센서시스템과 달리 광원의 fluctuation에 의한 영향을 배제할 수 있다. 그리고, 실험에 사용한 EDFA는 0.1%이내의 출력 안정성을 가진다.

콘크리트 시험 보에 부착된 광섬유 격자는, 하나의 라인에 각 중심파장이 1541.8, 1545.8, 1551.8, and 1555.8 nm이며, 나머지 두 라인의 각 중심파장도 동일하게 구성되어 부착되었다. 제작된 콘크리트 시험 보는 좌측으로부터 1/8, 3/8, 4/8, 6/8 지점으로 구분하였으며, 각 지점은 그림 2에서 나타내는 C₁, C₂, C₃, C₄에 해당한다. 콘크리트 시험 보의 깊이 방향으로 3/30, 7/30, 25/30의 깊이에 해당하는 지점을 그림 2에서 각각 R₂, R₃, R₄로 나타내었다. 그림 10은 제작된 콘크리트 시험 보에 하중을 인가하는 상황을 나타내고 있으며, 콘크리



그림 10. 최대의 하중 120 kN을 가했을 때 파괴된 시험 보의 사진.

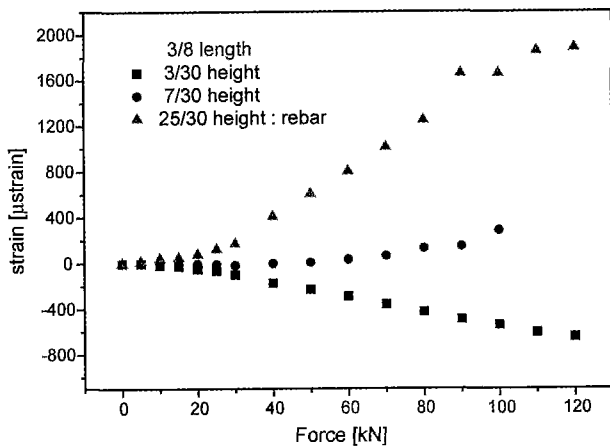


그림 11. 하중이 가해졌을 때, 그림 2의 C₂위치의 R₂, R₃, R₄에서의 격자 신호.

트 시험 보의 각 지점에 인가되는 스트레인의 변화량을 측정하였다. 그림 11은 하중 변화에 따라 광섬유 격자 센서 시스템으로 부터 측정된 콘크리트 시험 보의 스트레인 변화량을 나타내고 있다. 시험 보의 좌로부터 3/8(C₂) 지점이며, 깊이 방향으로 R₂, R₃, R₄ 지점에서의 광섬유 격자의 스트레인에 대한 변화량을 나타내고 있다. 그림 11의 실험결과에서 주목할만한 점은 철근 부위인 25/30(R₄) 위치의 광 신호는 인가되는 스트레인에 대하여 광섬유 격자에 인장력이 가해진 신호이며, 시험 보의 최상위 지점 3/30(R₂) 위치에 매설된 광섬유 격자는 인가되는 스트레인에 대하여 수축력이 가해진 신호로서 시험 보의 최상위 지점 3/30(R₂) 위치는 철근 부위와는 반대로 콘크리트 시험 보에 스트레인이 인가되고 있음을 나타내고 있다. 또한, 7/30(R₃) 위치에 매설된 광섬유 격자에서는 별다른 인장 수축의 신호가 보이지 않았는데 그것은 시험 보의 중립축으로서 외부 인가 하중에 대해서 수축, 인장의 신호를 나타내지 않는 위치이다. 본 실험은 콘크리트에 매립하여 사용하는 센서가 별로 없는데, 광섬유 격자 센서를 매립하여 측정하였는데에 의의가 있으며, 특히 중립축의 위치에서 인가되는 외부 하중에 대해 인장, 수축력이 측정되지 않음을 실험적으로 확인하였는데에 의의가 있다. 그리고, 콘크리트 시험 보의 설계 상 각 3/30, 25/30 지점에서 하중인가 인

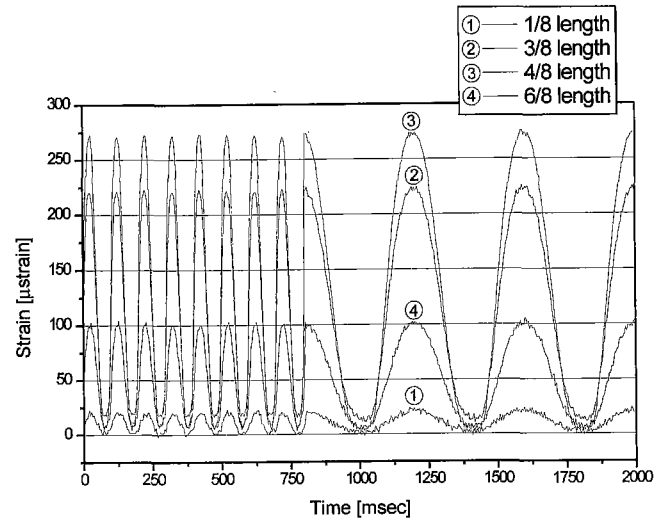


그림 12. 콘크리트 시험 보에 10 Hz에서 2.5 Hz로 변화하는 동적 Sine 신호 인가 결과.

장력과 수축력이 콘크리트 시험 보에 인가될 것이라고 예측했던 결과를 새롭게 개발된 광섬유 격자 센서를 이용하여 실제로 측정하였는데 의미가 있다. 측정결과 철근에서의 최대 인장은 약 2000 μstrain 정도였으며, 3/30(R₂) 지점에서의 최대 수축은 약 900 μstrain 정도로 나타났다. 시험 보의 하중이 증가할수록, 인장과 수축이 없는 7/30(R₃) 지점에서 약간의 인장력이 발생하였는데, 그것은 콘크리트 하부에 균열이 가기 시작하여 인장과 수축이 없는 지점의 위치가 위로 상승하였기 때문이다. 그림 12는 시험 보에 Sine형태의 동적 스트레인이 10 Hz에서 2.5 Hz로 변화하는 동안 센서시스템을 이용하여 시험 보가 받는 스트레인을 측정된 결과이다. 이상과 같이 광섬유 격자 센서를 콘크리트 시험 보에 적용하여 정적, 동적 스트레인에 대한 실험결과를 얻을 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 가변 협대역 투과필터를 복조기로 사용하는 광섬유 격자 동적 스트레인 센서 시스템에 관하여 논하였다. 센서 시스템을 이용하여 외팔보의 진동실험을 수행한 결과 5 μstrain 정도의 분해능을 가짐을 알 수 있었다. 구성된 센서 시스템은 컴퓨터와 인터페이스를 하여 가변 협대역 투과 필터의 전구간의 선형성을 보상하여 실시간으로 신호처리를 수행하였으며, 이러한 시스템을 이용하여 콘크리트 구조물의 스트레인 변화값을 측정하였다. 광섬유 격자 센서로 하중 인가 실험을 한 결과 철근 부위인 위로부터 25/30의 위치에서는 120 kN의 하중 인가 시 최대 2050 μstrain 정도의 인장력이 발생하였으며, 3/30의 상부 위치에서는 120 kN의 하중 인가 시 최대 900 strain 정도의 수축력이 발생하였다. 한편, 스트레인 zero의 지점인 7/30의 위치에서는 50 kN까지는 스트레인의 변화가 관측되지 않고, 120 kN의 하중 인가 시 최대 200 strain 정도의 인장력이 발생하였다. 이는 콘크리트 시험 보의 균열이 진행되면서 스트레인 zero의 지점이 상부쪽으로 이동

하기 때문이다. 본 센서시스템을 이용하여 교량이나 댐 등과 같은 토목 구조물의 내부응력 변화 및 안정성을 감시할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] O. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Artech House).
- [2] W. W. Morey *et al.* "Fiber optic Bragg grating sensor," *Proc. SPIE*, vol. SPIE-1169, pp. 98-107, 1989.
- [3] Y. J. Rao, "Combined spatial and time division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 2149-2151, 1995.
- [4] F. Ouellete, "All-fiber filter for efficient dispersion compensation," *Opt. Lett.*, vol. 16, pp. 303-305, 1991.
- [5] A. D. Kersey and M. A. Davis, "Interferometric fiber sensors with a chirped Bragg grating sensing element," *Proc. 10th. Optic. Fiber Sensor Conf.*, vol. OFS-10, pp. 319-322, 1994.
- [6] M. G. Xu, "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1085-1087, 1994.
- [7] H. D. Ku, S. C. Kang, S. B. Lee, S. S. Choi, P. S. Kim, S. H. Song, N. S. Jo, and N. S. Kim, "Optical fiber grating sensor system using a tunable narrow bandpass filter demodulator," *OECC*, Chiba, Japan, 13B2-3, 2000, pp. 376-377.

Optical fiber grating dynamic sensor system using a tunable narrow bandpass filter demodulator

Heun Duk Ku^{*,†}, Sang Bae Lee, and Sang Sam Choi

IPhotonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, KOREA

[†]E-mail: blue232@kist.re.kr

Pill Soo Kim and Seok Ho Song

**Dept. of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, KOREA*

Nam So Jo and Nam Sik Kim

Hyundai Institute of Construction Technology, Kyunggi-do 449-710, KOREA

(Received December 18, 2000 ; Revised manuscript received March 9, 2001)

We present a fiber Bragg grating (FBG) sensor system for measuring static and high-speed dynamic strains with a resolution of about 5 μ strain. This sensor system demodulates signals from the FBG sensor utilizing a compensated tunable narrow bandpass filter. We have placed a set of twelve FBGs to concrete specimen and measured its internal stress under various applied load conditions.

Classification codes : FO.010, FO.030.