

광섬유 격자 다중화 스트레인 센서 시스템

Multi-Point Optical Fiber Grating Strain Sensor System

이용욱*, 정재훈*, 정승환*, 이병호*, 김남식**

Yong-Wook Lee*, Jae-Hoon Jung*, Seung-Hwan Chung*, Byoung-ho Lee*
 and Nam-Sik Kim**

초 록 광섬유 센서는 구조물에 대한 비파괴적인 측정이 가능하고, 전자파에 의한 간섭이 발생하지 않으므로, 전자파 장애의 영향을 무시할 수 있는 장점이 있다. 또한, 구조물 건조시 콘크리트 같은 대상체에 광섬유를 내장시킬 경우에는 검사시 대상체를 파괴시키지 않고서도 대상체의 손상여부와 역학적 거동을 측정 및 해석할 수 있는 비파괴 검사 기술이다. 특히 광섬유 브래그 격자 센서는 그러한 대상체에 대한 비파괴 검사를 수행하는데 가장 적합한 센서이다. 광섬유 브래그 격자는 특정파장의 빛을 반사 또는 제거시키는 특성을 지니고 있으며, 스트레인 같은 물리량이 광섬유 브래그 격자에 가해지면, 반사되는 빛의 중심파장이 이동하여 이를 통해 물리량을 측정할 수 있다. 정·동적 스트레인을 측정할 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서는 건축물이나 토목구조물 등의 안전 진단(health monitoring)을 위해 사용되고 있으며, 최근에는 도로나 교량과 같은 토목 구조물로의 응용에 있어서 필수적인 동적 스트레인의 측정에 대해 그 관심이 집중되고 있다. 본 연구에서는 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터를 이용하여 다중점에서 동적 스트레인을 측정할 수 있는 센서 시스템을 제작하였으며, 제작된 센서 시스템을 모의 구조물(외팔보)에 적용하여 모의 구조물에 가해지는 정적, 동적 스트레인을 측정하였다. 측정 결과는 기존의 전기적 센서와 유사하였다.

주요용어: 광섬유 센서, 광섬유 격자 센서, 광섬유 브래그 격자, 패브리-페로 복조, 다중화, 다중 위치 측정

Abstract An optical fiber sensor is capable of nondestructive measurement of a structure and it has an advantage of the immunity to electromagnetic interference because light is not affected by electromagnetic wave. In addition, if optical fibers are buried in an object like a concrete, this sensor can analyze defects and physical status of the object without disassembling it. Especially, the fiber Bragg grating sensor is a promising optical fiber sensor capable of nondestructive test of such an object. A fiber Bragg grating has the characteristics of reflecting or blocking light of a specific wavelength. If we apply physical quantity like strain to the fiber Bragg grating, the center wavelength of the reflected light is shifted and then we can find the physical quantity applied to the fiber Bragg grating by measuring the center wavelength shift of the reflected light. The fiber Bragg grating sensor capable of static and dynamic strain measurement is being used in health-monitoring of buildings, structures, etc. Recently increasing is interest in dynamic strain measurement inevitable to the civil structures such as roads and bridges. In this study we implemented the optical fiber sensor system which can measure dynamic strain at multiple points using Fabry-Perot wavelength demodulation. And we measured the static and dynamic strain using this sensor system with a test structure(cantilever). Measurement results were similar to those obtained with the conventional electrical measurement methods.

Keywords: optical fiber sensor, fiber grating sensor, fiber Bragg grating, Fabry-Perot demodulation, multiplexing, multi-point measurement

1. 서론

광섬유 센서는 소형, 경량이고, 전자파에 의한 간섭을 받지 않는다는 장점이 있다. 또한, 구조물 건조시 광섬유를 내장시킬 경우에는 실험시 대상체를 파괴시키지 않고서도 대상체의 손상여부와 역학적 거동을 측정 및 해석할 수 있는 비파괴 검사 기술이다. 특히 광섬유 브래그(Bragg) 격자 센서는 대상체에 대한 비파괴 검사를 수행하는데 있어 가장 적합한 광섬유 센서라고 할 수 있다. 광섬유 브래그 격자는 광섬유를 통하여 전송된 빛 중에서 특정 파장의 협대역 광(약 0.3nm 대역폭)을 반사시키는 특성을 지니고 있으며, 스트레인(strain)이나 온도와 같은 물리량이 광섬유 브래그 격자에 가해지면, 반사되는 협대역 광의 중심파장이 변화한다[1]. 따라서, 이 변화량을 측정함으로써 실제적으로 광섬유 브래그 격자에 가해진 물리량을 측정할 수 있다. 정·동적 스트레인을 측정할 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서는 건축물이나 토목 구조물 등의 안전 진단(health monitoring)을 위해 사용되고 있으며, 최근에는 도로나 교량과 같은 토목 구조물의 응용에 있어서 필수적인 동적 스트레인의 측정에 대해 그 관심이 집중되고 있다.

본 연구에서는 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터를 이용하여 실험량의 다중점에서 동적 스트레인을 측정할 수 있는 센서시스템을 제작하였으며, 제작된 센서 시스템을 실험량을 모델링한 모의 구조물에 적용하여, 모의 구조물에 가해지는 정적, 동적 스트레인을 측정하였고, 이를 통해 모의구조물의 하중에 따른 고유진동수를 구했다.

2. 이론적 배경

광섬유 브래그 격자의 반사 스펙트럼의 피크(peak)의 파장(λ_B : 이하 브래그 반사 파장)은 격자부분에 가해지는 스트레인의 세기에 따라 선형적으로 변화한다. 따라서 브래그 반사 파장의 변화를 통해서 광섬유 브래그 격자에 가해진 스트레인의 세기를 알 수 있다.

본 스트레인 센서 시스템은 파장의 변화에 대한 정보를 패브리-페로 필터를 사용하여 얻은 뒤 그 정보로 스트레인을 알아낸다. 패브리-페로 필터의 일반적인 자유 가변 파장 범위(free spectral range)는 50nm이고, 대역폭은 0.3nm 정도이다. 따라서, 만약 광섬유에 가해진 스트레인에 의해 반사되는 파장의 변화를 최대 3nm 정도로 생각하면 하나의 패브리-페로 필터로 16개의 광섬유 격자 센서의 파장 변화를 측정할 수 있게 된다. 따라서 패브리-

페로 필터를 사용하는 복조(demodulation) 방법은 센서 시스템을 다중화(multiplexing)하는 데에 매우 적합한 방법이라고 할 수 있다.

패브리-페로 필터를 사용하여 스트레인을 알아내는 복조방법의 원리는 다음과 같다. 패브리-페로 필터의 통과대역은 필터에 가해지는 전기적인 신호에 비례하여 이동하므로, 적절한 크기의 선형(ramp) 전압 신호를 주어 필터의 통과대역을 순차적으로 변화시켜 자유 가변 파장 범위 정도로 파장 스캐닝(scanning)을 가능하게 할 수 있다. 만약 센서부의 브래그 반사 스펙트럼 성분들이 필터의 파장 스캐닝 범위 내에 들어온다면, 반사 스펙트럼 성분들은 광 검출기에서 시간적으로 검출이 가능하다. 시간적으로 검출된 신호의 파장을 알아내기 위해 기본적으로 필터에 가해지는 전압 신호의 값과 그 통과대역의 파장 값에 대한 함수관계를 얻어낼 수 있고, 이를 바탕으로, 검출되는 반사 스펙트럼 성분의 시간적인 위치와 실제 반사 파장 값에 대한 함수 관계 또한 얻어낼 수 있다. 이렇게 미리 얻어진 두 함수관계를 기준으로 필터링된 반사 스펙트럼 성분의 시간적인 위치를 이용하여 필터링된 스펙트럼 성분의 반사 파장을 알아낼 수가 있는 것이다.

그리고, 센서부의 광섬유 브래그 격자에 스트레인이나 온도 등의 외부변인이 가해져, 필터를 통과하는 반사 스펙트럼의 파장이 변하는 경우, 반사 파장의 변화($\Delta\lambda_B$)는 광 검출기의 출력 단에서 볼 때 시간 지연(Δt)으로 나타나게 되므로, 이러한 시간 지연을 측정함으로써 반사 파장의 변화를 알아낼 수 있다. 그리하여, 미리 구한 브래그 반사 파장과 격자에 가해진 스트레인의 선형적인 함수관계를 이용하여, 브래그 격자에 가해진 스트레인의 세기를 알아낼 수 있다.

그런데, 만약 센서 헤드(head)의 브래그 격자에 일정 주파수의 동적인 스트레인이 가해진다고 하면, 브래그 반사 파장의 변화량 또한 이와 동일한 주파수로 변하게 된다. 따라서 주기적으로 변하는 파장의 변화를 측정하여 격자에 가해진 동적인 스트레인을 알아내기 위해서는 패브리-페로 필터에서 한 주기의 스캐닝만으로는 불가능하다. 그러므로 필터의 스캐닝은 표본화(sampling) 이론에 근거하여, 격자에 가해지는 동적 스트레인 신호 주파수의 2 배 이상이 되는 주파수로 이루어져야 한다.

Fig. 1은 패브리-페로 필터를 이용한 스트레인 센서 시스템의 개념도이다. 정·동적인 스트레인을 측정할 수 있도록 스캐닝 전압 신호가 선형(ramp) 형태로 주어지고 있으며, 패브리-페로 필터를 통과한 브래그 반사 파장은

광 검출기에서 전기적인 신호로 바뀌며, 이 신호의 시간 지연 정보를 미리 얻어낸 자료들과 같이 비교하여 반사 파장의 변화와 가해지는 스트레인의 세기를 알아낼 수 있다.

Fig. 2는 Fig. 1의 센서 시스템을 다중화하기 위해, 하나의 기준 광섬유 브래그 격자와 네 개의 센서 헤드용 광섬유 브래그 격자를 이용해 구성된 센서 시스템의 개념도를 보여주고 있다.

Fig. 2에서는 스캐닝 전압 신호에 작은 크기로 떠는 떨림(dithering) 신호가 합쳐져서 패브리-페로 필터를 구동하고 있으며, 광 검출기의 출력신호와 떨림신호를 다시 곱하여 저주파 필터링(low-pass filtering)을 하여 출력 단으로 보내는 것을 볼 수가 있다. 저주파 필터링은 잠금 증폭기(lock-in amplifier)를 사용하여 이루어졌다. 이러한 스캐닝 방법은 패브리-페로 필터의 통과대역을 브래그 반사 파장의 근처에서 아주 미세하게 움직여주어 격자의 반사 스펙트럼의 피크를 정확히 찾도록 하기 위한 것이다. 여기서 떨림 신호를 스캐닝 전압 신호에 합쳐줌으로써, 패브리-페로 필터의 통과 대역의 파장을 아주 미세하게 변조시킬 수 있는데, 떨림 신호의 주파수를 f_d 라

고 가정하면, 광 검출기를 통해 출력되는 전기적 신호에는 f_d 의 기본파 성분(fundamental component)과 그밖의 고조파 성분(harmonic components)들이 존재하게 된다. 그런데, 브래그 반사 파장과 패브리-페로 필터의 통과대역의 파장이 일치하게 되면, 광 검출기 출력신호의 기본파 성분은 0이 된다[2,3]. 따라서 기본파 성분이 0이 되는 시간적인 위치를 알아내면, 격자의 반사 스펙트럼 피크의 파장 즉 브래그 반사 파장 또한 알 수 있게 된다.

3. 광섬유 브래그 격자 스트레인 센서 시스템의 실교량 모의 구조물 적용 실험

외팔보 형태인 모의 구조물에 광섬유 브래그 격자를 부착하여 스트레인 센서 시스템의 실험을 수행하였으며, 저주파 필터를 통과시킨 뒤의 전기적인 출력은 DAQ(data acquisition) 보드(board)를 통해 PC로 처리하였다. Fig. 3은 Fig. 2와 같은 개념도를 기반으로 제작된 스트레인 센서 시스템이다. 그림 가장 위쪽에 보이는 두 개의 이동 스테이지(translation stage) 쌍 사이에 광섬유 격자 센서 헤드가 부착되어 있다.

실제 교량에서의 안전 진단을 위해서는 교량 상판 부분의 콘크리트 속에 광섬유 브래그 격자들을 삽입하여 격자들에 가해지는 스트레인을 측정함으로써 교량을 모니터링 할 수 있다. 자연적이나 인위적인 각종 원인에 의해 발생하는 진동에 의해 교량의 각 부분에 가해지는 스트레스들은 콘크리트 속에 내장되어 있는 광섬유 브래그 격자들에게는 스트레인으로 가해지게 된다. 이는 외팔보의 한쪽 단에 힘을 가하여 외팔보에 스트레스가 인가된 경우, 만약 외팔보의 각 지점에 광섬유 브래그 격자들이 부착되었다고 가정하면, 그 격자들에 스트레인이 가해지는 역학적인 현상과 유사하다고 볼 수 있다. 따라서, 실험에서는 3m 정도의 외팔보를 실교량의 모의 구조물로 모델링하여 이에 4개의 광섬유 브래그 격자를 50cm의 간격으로 부착하여 스트레인을 측정하는 실험을 수행하였다. 또한 외팔보에서의 측정 지점마다 광섬유 격자와 모의 구조물이 하나의 동체로 움직일 수 있는 조건을 만들어 주기 위해, 광섬유 브래그 격자가 모의 구조물과 최대한 밀착된 상태에서 적절한 장력을 주어 구조물과 평행하도록 고정시킨 뒤, 격자가 함몰되도록 일정한 두께로 접촉상태를 유지시켰다. Fig. 4는 실교량 모의 실험을 위해 외팔보에 부착된 광섬유 브래그 격자 센서 헤드의 모습이다.

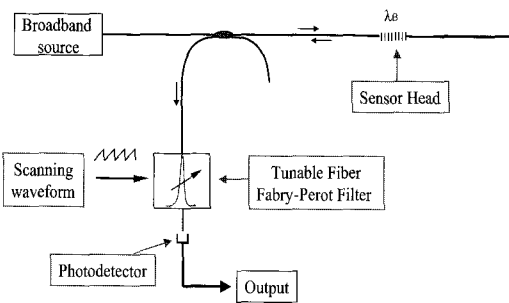


Fig. 1 Schematic diagram of strain sensor system using Fabry-Perot filter

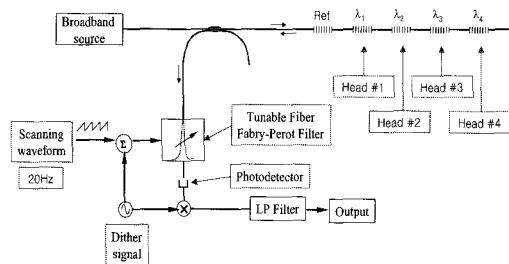


Fig. 2 Schematic diagram of multiplexed strain sensor system using Fabry-Perot filter



Fig. 3 Fiber Bragg grating strain sensor system fabricated by using Fabry-Perot filter

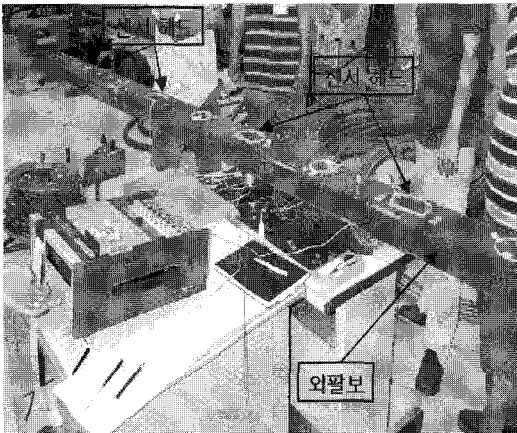


Fig. 4 Sensor heads attached to the cantilever used in our experiment

4. 센서 시스템 실험 결과

실험은 다음과 같은 네 가지 경우에 대해서 각각 수행되었는데, 먼저 정적인 스트레인을 측정하였고, 다음으로 4개의 센서 헤드부분에서 하중을 0, 5, 10kg으로 증가시키며 동적인 스트레인을 측정하였다. 동적 스트레인의 측정은 시간에 따른 세기를 측정하고 이 신호를 FFT (fast-Fourier transform) 분석하여, 외팔보의 고유 주파수를 얻었다.

Fig. 5는 구조물에 10kg의 하중을 주었을 경우 정적 스트레인을 측정한 예를 보여주고 있으며, 정적 하중이 가해진 순간은 시간(초)을 나타내는 가로축의 10 초 이후

부터이고, 세로축은 스트레인의 크기(μstrain)를 나타낸다.

Fig. 6은 구조물에 부착된 추가 없을 경우의 동적 스트레인 측정의 예를 보여준다. 또한, Fig. 7은 5 kg의 추가 구조물에 부착되었을 경우의 동적 스트레인 측정의 예를

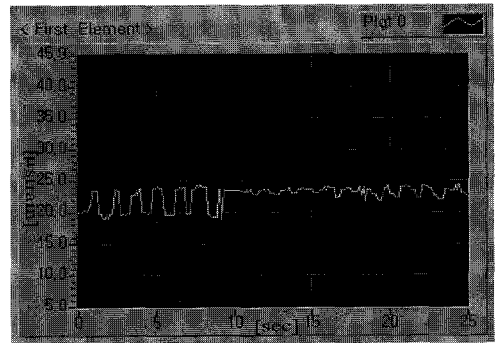


Fig. 5 Static strain measurement when 10kg loads is applied to the cantilever

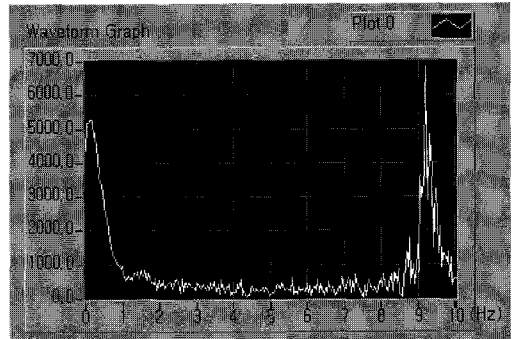


Fig. 6 FFT analysis of dynamic strain signal when no load is applied to the cantilever

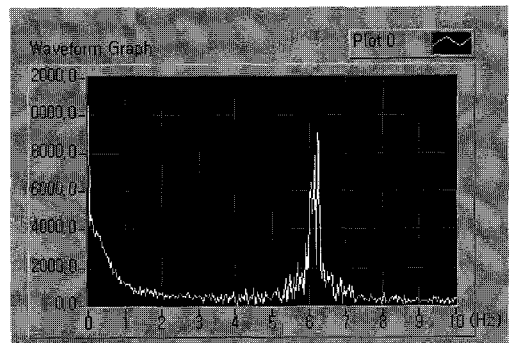


Fig. 7 FFT analysis of dynamic strain signal when 5kg loads is applied to the cantilever

보여주며, Fig. 8은 10kg의 추가 구조물에 부착되었을 경우의 동적 스트레인 측정의 예를 보여준다. Figs. 6, 7, 8에서 각각의 동적 스트레인 측정은 외팔보의 위쪽에서 순간적인 힘을 가한 뒤에 그 크기를 측정하는 방식으로 이루어졌다.

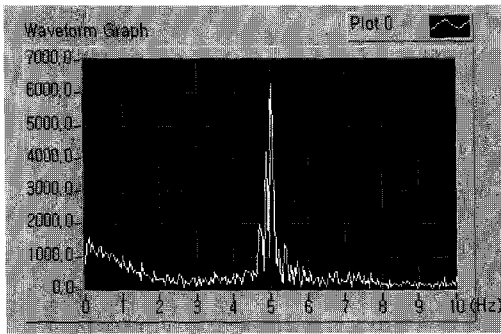


Fig. 8 FFT analysis of dynamic strain signal when 10kg load is applied to the cantilever

5. 실험 결과 고찰

센서 시스템의 헤드 부분에 추가적으로 기준격자(reference grating)를 설치함으로써 센서 시스템 자체의 해상도는 $5\mu\text{strain}$ 이하로 높일 수 있었다. 그리고, 모델링된 외팔보에 하중을 주지 않은 상태에서 동적인 스트레인이 가해졌을 경우, 각 채널에서 얻은 동적인 스트레인 값의 FFT 분석을 통해 얻은 외팔보의 고유 진동수는 평균적으로 약 9.14Hz이었고, 5kg의 하중을 준 상태에서는 약 6.19Hz이었으며, 10kg의 하중을 준 상태에서는 약 5.01Hz이었다. 그리고 동적 스트레인 측정 실험을 기존의 전기적 스트레인 센서를 이용하여 수행한 결과는 Table 1과 같았다. 참고적으로 실험에 사용된 기존의 전기적인 스트레인 센서의 사양은 정적 분해능이 약 $2\mu\text{strain}$ 이고, 4개의 다중점 측정이 가능하며, 정격 전압은 220V, 사용온도가 $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 이었다.

기존의 센서와의 성능비교를 위해 기존 센서로 측정된 고유진동수 값과의 오차를 계산해보면, 오차 값은 1.7% 이내로 본 센서가 기존의 센서와 거의 일치하는 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 그리고, 측정값들의 기울기가 기존 센서의 경우보다 그 절대값이 작은 것을 알 수 있는데, 이는 제작된 센서 시스템의 해상도가 기존의 센서보다 약간 떨어지기 때문에 나타나는 현상으로 생각할 수 있으며, 그 차이는 0.018Hz/kg로 기존 센서로 측정된 결과의 기울기에서 5%이하의 변화를 보임을 알 수 있다.

Table 1 Cantilever resonance frequencies measured with conventional sensors

	Without Load	5kg Load	10kg Load
고유 진동수	9.24Hz	6.19Hz	4.93Hz

6. 결론

본 센서 시스템은 실교량 적용시 정·동적 스트레인의 측정을 통해 고유진동수를 구하고 그 값을 모니터링 함으로써 교량에 가해지는 하중을 알고자 하는 목적으로 제작되었다. 실교량의 모의 구조물에 적용한 실험을 통해, 제작된 광섬유 브래그 격자 센서 시스템이 기존의 센서 시스템과 성능 면에 있어서 뒤지지 않음을 보였다. 또한 기존의 센서가 수 km 정도 떨어진 곳에 대한 측정에서는 그 감도가 떨어지는 반면, 광섬유 스트레인 센서의 경우에는 광섬유 자체의 손실이 0.2dB/km로 매우 낮기 때문에, 수 km 이상의 거리에서도 감도가 유지될 수 있는 장점을 지니고 있어 실교량의 적용에 있어 그 효용 가치가 높다고 할 수 있겠다.

후 기

본 연구는 한국도로공사를 통한 건설교통부의 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, pp. 1442-1463, (1997)

[2] A. D. Kersey, 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, No. 16, pp. 1370-1372, (1993)

[3] T. A. Berkoff and A. D. Kersey, "Fiber Bragg grating array sensor system using a bandpass wavelength division multiplexer and interferometric detection," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 8, pp. 1522-1524, (1996)