

論文98-35D-1-11

# 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 동적 스트레인 신호의 해석 (Dynamic-strain analysis using fiber Bragg grating sensor)

宋民鎬,\* 李相培,\*\* 崔相三,\*\* 李竝浩\*

(Minho Song, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi, and Byoungho Lee)

## 요 약

광섬유 브래그격자를 이용하여 격자에 가해지는 동적 스트레인을 해석하였다. 빠른 응답속도를 얻기 위하여 광섬유 마하젠더 간섭계를 구성한 후, 진동에 따른 간섭신호의 변화를 주파수 영역에서 해석함으로써 광섬유 격자에 가해진 스트레인의 주파수와 상대적인 크기를 측정할 수 있었다. 구성된 간섭계 센서를 이용하여 500 Hz 동신호가 가해졌을 때  $\sim 9.5 \text{ nstrain RMS}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 정밀도를 얻었다. 또한 온도효과 분리형 격자쌍센서를 이용하여 동적스트레인 신호를 해석할 수 있는 방법을 제안하고 실험을 통하여 입증하였다. 제안된 방법은 간섭계에 광경로변조를 가한 상태에서도 동적, 정적 스트레인을 동시에 관측할 수 있었다.

## Abstract

We analyzed dynamic-strain perturbations applied to a fiber Bragg grating. The fiber Mach-Zehnder interferometer was used, and by analyzing the interference signal we could obtain the frequency and relative amplitude information of the dynamic-perturbation. The minimum detectable dynamic-strain using the system was  $\sim 9.5 \text{ nstrain RMS}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 500 Hz. Also we proposed and demonstrated a new method which uses a temperature-discriminating dual-grating sensor head. With the method, we could measure the dynamic-strain as well as static-strain even for the case in which the optical path difference modulation was applied.

## I. 서 론

1989년 G. Meltz<sup>[1]</sup> 등에 의해서 효과적인 제조 방법이 개발된 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, 이하 FBG)는 최근 광통신 응용과 더불어 광섬유 센서로의 연구가 국내외에서 활발하게 이루어

지고 있는 소자이다. FBG는 스트레인과 온도에 대해서 선형적인 브래그 파장변화를 나타내며, 크기가 작고 동작형태가 파장인코딩(wavelength encoding)특성을 가지므로, 복합구조물의 내부에 삽입되어 그 변형이나 이상을 감지할 수 있는 센서로의 가능성이 높게 평가되고 있다.<sup>[2]</sup> FBG 센서 시스템의 성능은, 센서에 가해진 물리량에 의한 브래그 파장변화를 얼마나 정확하고 빠르게 읽어낼 수 있는가에 달려 있으며 이러한 목적을 위하여 다양한 형태의 파장변화량 측정 방법들이 개발되어 왔다.<sup>[3-5]</sup> 그 중, 일정한 광경로차를 갖는 광섬유 마하젠더 간섭계(fiber Mach-Zehnder interferometer)를 이용하는 방법<sup>[3]</sup>은 기존의 분광분석기(optical spectrum analyzer) 등을 이용하는 방법에 비하여 비용이 저렴하고, 정밀도와

\* 正會員, 서울大學校 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

\*\* 正會員, 韓國科學技術研究院 光技術研究中心

(Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

接受日: 1997年9月4日, 수정완료일: 1997年11月20日

측정속도가 월등한 잇점을 가진다. 최근 국내에서도 간섭계를 채용한 광섬유 격자센서의 높은 정밀도와 온도효과 분리에 중점을 둔 연구결과가 발표된 바 있다. [6,7]

본 논문에서는 간섭계 센서의 장점중 하나인 빠른 측정속도를 이용하여, 격자센서에 가해진 동적 스트레인 신호(dynamic-strain)의 해석에 대해서 논하고자 한다. 기존의 단일 FBG 센서외에, 온도특성이 같은 광섬유 격자쌍 [8]에 가해진 동적 스트레인 신호의 해석에 대한 새로운 방법을 제안하며, 그에 대한 실험결과를 보고할 것이다.

## II. 마하젠더 간섭계를 이용한 동적 스트레인(dynamic-strain)의 해석

그림 1은 광섬유 마하젠더 간섭계를 이용한 광섬유 격자센서의 개략도이며, 광폭 스펙트럼(broadband spectrum)의 일정한 파장성분(Bragg 조건을 만족하는)이 FBG에서 반사되어 간섭계를 통과한 후, 아래 식과 같은 간섭신호를 광검출기에서 발생시킨다.

$$I_{det} = I_{d.c.} + a \cos\left(\frac{2\pi nd}{\lambda} + \phi_0\right) \quad (1)$$

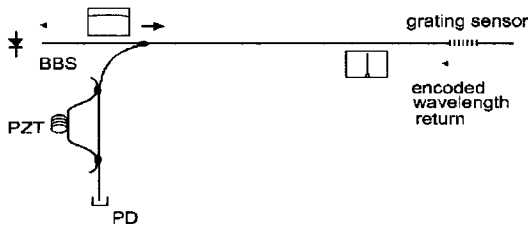


그림 1. 마하젠더 간섭계를 이용한 광섬유 격자 센서의 개략도

Fig. 1. Fiber Bragg grating sensor system using an unbalanced Mach-Zehnder interferometer.

윗식에서  $a$ 는 FBG에서 반사되어 간섭계를 통과하는 빛의 양과 코히어런스 정도 등에 의해서 결정되는 상수이며  $n$ 은 광섬유 코어의 굴절률,  $d$ 는 간섭계의 광경로차이(optical path difference),  $\lambda$ 는 브래그 파장(Bragg wavelength)이다.  $\phi_0$ 는 간섭신호의 위상흐름(phase drift)이나 피드백 위상제어(feedback phase biasing) 등에 의해서 결정되는 위상값으로, 동적 신호를 해석하는 경우에도 위상 바이어스의 정도에

따라 출력이 변할 수 있으므로 되도록 일정한 값을 유지하는 것이 바람직하다.

격자센서에 주파수  $f$ , 최대 브래그 파장 변이  $\Delta\lambda$ 를 일으키는 정현파(sinusoidal) 형태의 진동신호가 가해지는 경우를 가정한다면, 이에 따른 간섭신호의 위상변화는 아래 식과 같다.

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda \sin 2\pi ft \quad (2)$$

느리게 변화하는 물리량을 측정하는 경우에는 물리량에 따른 위상변화량을 기준신호와 비교 측정하기 위하여 간섭신호를 정현파형태로 만들 필요가 있다. 따라서 간섭계의 한쪽팔에 압전소자(piezoelectric transducer, PZT)를 두어 일정한 크기( $2\pi$ )의 광경로차 변조(optical path difference modulation)를 한다. [6] 그러나 동적 신호 측정의 경우, 진동과 변조주파수간의 고조파에 의해서 기준신호와의 위상비교가 어려우며 또한 위상비교장비(lock-in amplifier)의 속도에 의해서도 제한을 받게 되므로, 변조신호를 가하지 않은 상태에서 측정이 이루어진다. 즉 식 (2)와 같이, 변조된 위상에 따라 형성된 간섭신호를 주파수 영역에서 해석하므로써 격자센서에 가해진 진동신호의 주파수와 각 주파수 성분의 크기를 파악한다.

실험에 사용된 광섬유 격자는 60%의 반사율과 1549 nm의 초기 브래그파장을 갖는 것으로, 248 nm 자외선 레이저와 위상마스크를 이용하여 제작하였다. 동적 스트레인 신호를 가하기 위하여 PZT에 광섬유 격자를 부착한 후, 함수발생기의 정현파 출력(40 mV pk-pk, 500 Hz)을 PZT에 가해주었다.

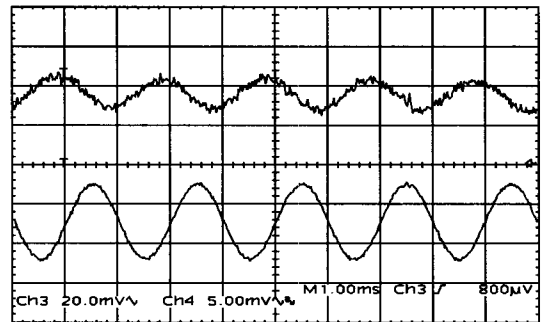


그림 2. 동적 스트레인에 따른 간섭신호(위: 간섭신호, 아래: PZT 구동신호)

Fig. 2. Interference signal by the applied dynamic-strain. (upper: interference signal, lower: PZT drive vibration signal)

그림 2는 PZT에 가해진 구동신호(PZT drive signal)와 그에 따른 간섭 신호의 오실로스코프 출력이다. 매우 약한 진동이 가해졌음에도 불구하고 약간의 시간지연을 제외하면 가해진 진동신호를 그대로 복원하고 있음을 알 수 있다. 간섭신호의 주파수 성분을 해석하기 위해서 디지털 오실로스코프(TEK 744A)의 Fast Fourier Transform(FFT) 기능을 사용하였다. 그림 3은 간섭신호의 FFT 결과를 나타내는 파워 스펙트럼(power spectrum)이다. PZT에 가해진 진동성분(500 Hz)의 신호 대 잡음비는 28 dB 이며(1.37 Hz bandwidth), 격자에 가해진 스트레인은 PZT의 특성을 고려할 때 0.28  $\mu$ strain RMS 이므로 이 간섭계 센서 시스템을 이용하여 측정가능한 최소량은  $\sim 9.5$  nstrain RMS/ $\sqrt{\text{Hz}}$  이다.

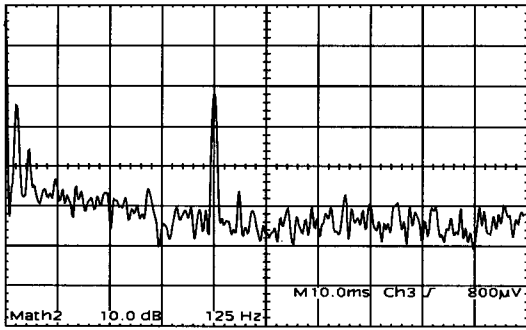


그림 3. 간섭신호의 파워 스펙트럼  
Fig. 3. Power spectrum of the interference signal. (125 Hz/division)

### III. 온도효과와 분리형 광섬유 격자쌍 센서를 이용한 동적 스트레인의 해석

FBG가 복합구조물의 변형 등을 측정하기 위한 스트레인 센서로 사용될 경우, 구조물의 온도변화에 따른 브래그 파장의 변화는 정밀한 스트레인 측정의 장애요소가 된다. 즉 브래그 파장의 변화량중에서 스트레인에 의한 양이 어느 정도인지 정확하게 알 수 없는 것이다. 따라서 온도의 영향을 분리할 수 있는 방법이 요구되어 왔으며, 이를 위하여 다양한 센서 형태가 개발되었다.<sup>[8-12]</sup> 그러나 대부분의 방법들은 분광분석기 등을 이용하여, 두 개 이상의 격자로부터 반사되는 브래그 파장변화를 이용한 계산을 요구하기 때문에, 빠른 응답속도를 얻을 수 없는 구조이다. 최근 발표된, 온도에 무관한 스트레인 측정 방법<sup>[8]</sup>은 격자쌍

(dual-grating) 센서를 이용하면서도 그 동작원리가 속도에 제한을 받지 않는 간섭계 센서를 사용하고 있으므로 동적 신호처리도 가능하다. 그림 1의 간섭계 시스템에 두 개의 격자로 이루어진 격자쌍 센서를 채용할 경우, 그에 따른 간섭신호는 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{det} = I_{d.c.} + a \cos \phi_1 + b \cos \phi_2$$

$$= I_{d.c.} + (a^2 + b^2 + 2ab \cos \Delta\phi)^{1/2} \cos \left[ \phi_1 - \tan^{-1} \left( \frac{b \sin \Delta\phi}{a + b \cos \Delta\phi} \right) \right]$$

(3)

윗 식에서  $a, b$ 는 식 (1)의  $a$ 에 해당하는 값이며,  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는 각 간섭 신호의 위상을 나타내는 함수로서,

$$\phi_i = \frac{2\pi n d}{\lambda_i} - \frac{2\pi n d}{\lambda_i^2} \Delta\lambda_i + \phi_o \quad (i=1,2)$$

(4)

이며,  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 이다. 온도에 대한 브래그 파장 응답특성이 같고 스트레인에 대해서는 서로 다른 두 광섬유 격자로 이루어진 센서헤드를 사용할 경우,<sup>[8,9]</sup>  $\Delta\phi$ 는 온도변화에 무관하며 스트레인에 의해서만 영향을 받으므로,  $\Delta\phi$  변화에 따른 간섭신호의 크기를 관측하면 온도에 무관한 스트레인 센서의 동작을 얻을 수 있다.<sup>[8]</sup>

이와 같이 격자쌍 센서헤드를 이용하는 간섭계 시스템에, 앞 절에서 기술한 동적 스트레인 실험(광경로변조를 하지 않는)을 행할 경우, 그 결과는 단일 FBG 센서의 경우와 거의 유사하다. 이 경우, 가능한 다른 장점은 간섭계에 광경로변조신호를 가한 상태에서도 동적신호의 해석이 가능하다는 것이다. 단일 FBG 센서의 경우, 정적 신호의 경우에는 간섭신호의 위상변화를 측정하는 것이며, 동적 신호인 경우에는 위상변화에 의한 간섭신호의 크기변화를 분석하는 것이므로 기본적인 측정 파라미터가 두 경우에 다르다. 그러나 격자쌍을 이용하는 경우, 정적 신호가 가해지는 경우에도 간섭신호의 크기 변화를 측정하는 것이므로 두 경우 모두 출력의 형태는 동일하다. 따라서 광경로변조가 있는 상황에서 동적신호가 가해질 때, 간섭계의 출력은 광경로변조신호에 의한 간섭신호와 동적신호에 따른 변조가 더해진 형태로 표현된다. 그림 4는 그 한 예를 보여준다. 그림 4(a)는 간섭계의 한팔에 위치한 PZT에 250 Hz의 톱니파형(serrodyne signal)을 가하여 광경로를 변조하여 얻어진 간섭신호이며, 격자쌍 센서에는 진동신호가 가해지지 않았다. 그림 4(b)는

격자쌍센서에 125 Hz 정현파 진동신호를 가할 때, 간섭신호의 포락선이 진동신호에 의해서 변조됨을 보이고 있다(그림의 아래 파형은 스트레인을 주기 위해 PZT에 가해진 정현파를 보여준다). 즉 간섭신호자체의 크기는 격자쌍 센서에 가해진 스트레인 바이어스에 의한 것이며 포락선은 진동신호에 의해서 형성되는 것이다. 그림 5는 이 간섭신호의 파워 스펙트럼이며, 중앙의 광경로변조신호 성분외에 진동신호의 주파수 성분을 나타내주고 있다. 주변에 나타난 고조파성분들은 변조신호의 주파수를 크게한 후 적절한 필터동작을 거친다면 제거할 수 있을 것이다.

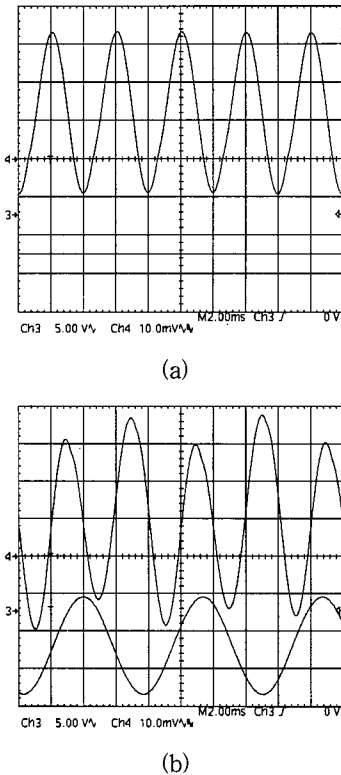


그림 4. 동적 스트레인에 의한 간섭신호의 변조  
(a) 진동신호가 가해지지 않은 경우의 간섭신호 (b) 진동신호에 의한 간섭신호의 변조

Fig. 4. Interference signal modulation by the dynamic-strain signal.  
(a) strain-free interference signal (b) modulated interference signal by the dynamic-strain

#### IV. 결론

광섬유 격자센서의 중요한 응용중 하나인 동적 스트레인 신호의 해석에 대한 실험결과를 보고하였다.

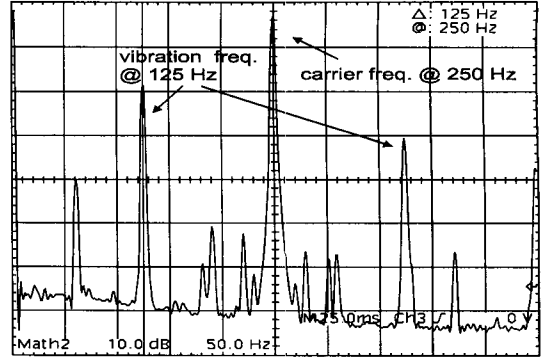


그림 5. 변조된 간섭신호의 파워 스펙트럼  
Fig. 5. Power spectrum of the modulated interference signal.

간섭계 센서는 기계적인 움직임을 요구하지 않으므로 빠르게 변화하는 물리량에 대해서 충분한 속도를 낼 수 있으며, 단일 FBG 센서에 500 Hz 진동주파수를 가하고 구성된 간섭계를 통한 간섭신호를 해석한 결과  $\sim 9.5 \text{ nstrain RMS}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 정밀도를 얻을 수 있었다. 또한 온도효과 분리형 격자쌍 센서를 이용하여 동적 스트레인 신호를 해석하는 방법을 제안하였으며, 이것은 기존에 발표되었던 온도분리형 격자쌍 센서로는 얻을 수 없는 특징이다. 제안한 방법을 이용할 경우, 시스템의 구성을 변형하지 않은 상태에서도 정적, 동적인 물리량이 동시에 측정가능하므로 전체적인 센서시스템 구성이 매우 단순화될 수 있음을 보인 것이라 하겠다. 추후 연구과제는 간섭신호로부터 정적, 동적인 스트레인신호를 정밀하게 분리해낼 수 있는 신호처리 방법의 개발에 집중될 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fiber by a transverse holographic method," *Opt. Lett.* **14**, 823-825(1989).
- [2] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons(1995).
- [3] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," *Electron. Lett.* **28**, 236-238(1992).
- [4] S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures,

- “A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **4**, 516-518(1992).
- [5] M. G. Xu, H. Geiger, J. L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, “Novel interrogating system for fibre Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter,” *Electron. Lett.* **29**, 1510-1512(1993).
- [6] 송민호, 이상배, 최상삼, 이병호, “Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서,” *전자공학회논문지* **34-D**, 205-213 (1997)
- [7] 송민호, 이병호, 이상배, 최상삼, “Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 격자쌍 센서의 신호처리방법,” *한국광학회지* **8**, 게재 예정
- [8] M. Song, B. Lee, S. B. Lee, and S. S. Choi, “Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings,” *Opt. Lett.* **22**, 790-792(1997).
- [9] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, “Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube,” *Opt. Fiber Technol.* **3**, 194-196(1997).
- [10] M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, “Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors,” *Electron. Lett.* **30**, 1085-1087(1994).
- [11] S. W. James, M. L. Dockney, and R. P. Tatam, “Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors,” *Electron. Lett.* **32**, 1133-1135(1996).
- [12] H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, and A. M. Vengsarkar, “Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 1223-1225(1996).

---

 저 자 소 개
 

---

宋 民 鎬(正會員) 第 34編 D卷 第 3號 參照

李 相 培(正會員) 第 34編 D卷 第 3號 參照

崔 相 三(正會員) 第 34編 D卷 第 3號 參照

李 竝 浩(正會員) 第 34編 D卷 第 3號 參照