

## 에탈론 필터를 이용한 광섬유격자 센서의 선형 복조

(Linear interrogation of fiber Bragg grating sensor array  
using a Etalon filter)

김종섭\* · 송민호

(Zhongxie Jin · Minho Song)

### Abstract

A scanned Fabry-Perot(F-P) filter and a Multi-Channel Wavelength Locker(MCWL) were used to interrogate fiber Bragg grating sensor array. When the F-P filter scans over the MCWL which works as a multi-reference, the temporal peaks profiles correspond to the locking wavelengths. To solve the linearity, stability, and accuracy problems caused by the nonlinear response of F-P filter, a polynomial fitting algorithm was used to calculate the relationship between the peak locations and the wavelengths in all the scanning range. Then from the reflected peaks locations and the best fitting line, the Bragg wavelengths can be obtained. The measurement linearity was greatly enhanced with wavelength resolution of about 4 pm in 10Hz scanning frequency.

### 1. 서론

광섬유격자(fiber Bragg grating)는 구조적인 안정성과 파장인코딩(wavelength encoding) 특성에 의하여 구조물의 안전도 등을 측정하는 센서로의 활용이 지난 10여 년간 국내외에서 매우 활발하게 연구되었다[1]. 광섬유격자 센서가 기존의 스트레인게이지(strain gauge)나 가속도계(accelerometer) 등에 비하여 갖는 장점은 고정밀도와 우수한 노이즈특성 외에 준분배형태(quasi-distributive)의 센서어레이(sensor array)를 구성하기가 용이하다는 것이다. 즉 하나의 광섬유라인에 여러 개의 광섬유격자를 연결한 센서어레이를 구성하고 시-, 파장-, 공간-, 코드-, 코히어런스 분할 다중화방식(time-, wavelength-, spatial-, code-, coherence division multiplexing) 등을 이용하여 각 센서의 출력을 분리하여 얻을 수 있다. 이는 기존의 센서들이 병렬구조를 갖는 것에 비하여 매우 단순하고 효율적인 시스템 구성을 가능하게 한다.

그중 가장 대표적인 다중화 방안은 1993년에 A.D. Kersey 등이 발표한 BBS(broadband source, 광폭광원)와 F-P필터를 이용한 광섬유격자 분배 센서 시스템이다. 이는 BBS를 조사하고 격자어레이에서 반사되는 스펙트럼을 F-P필터를 통과시켜 브래그파장변화를 검출하는 매우 간단하지만 효율적인 정밀측정 방법이다. 그러나 이러한 방법은 BBS의 제한된 출력으로 낮은 SNR(signal to noise ratio, 신호 대 잡음비)를 얻

게 되며 이를 극복하기 위해 F-P필터를 공진기 내부에 삽입한 파장가변형 광섬유레이저로 BBS를 대체하여 SNR를 대폭 향상시키는 사례도 발표한 바 있다[2]. BBS와 광섬유레이저를 이용하는 두 경우 모두 F-P필터의 투과파장이 시간에 따라 선형적으로 변화한다는 가정에 그 측정원리를 두고 있으나 실질적으로는 F-P필터의 비선형 동작에 의해서 계측의 반복성과 측정정밀도가 제한 받게 된다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 M-Z(Mach-Zender interferometer)간섭계와 시간지연 샘플링 기법을 이용하여 광원파장을 실시간으로 정밀하게 분석하는 방법이 발표되었고[3] 가스 셀의 흡수스펙트럼(gas absorption line)을 multi-wavelength 기준으로 사용하여 센서출력의 선형성을 높이는 방법도 발표한 바 있다[4]. 그러나 가스 셀의 흡수스펙트럼 획득이 어렵고 또한 제한된 파장대역으로 인해 측정범위가 자유롭지 못하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 파장가변 필터의 비선형 동작에 의한 성능저하를 해결하기 위한 방법으로 MCWL(다중채널 파장 잠긴 필터)를 기준으로 사용하였다. 파장가변 필터가 MCWL의 대역폭을 스캔하면 MCWL에 잠긴 파장이 출력의 시간축상의 각 피크에 할당하게 된다. 잠긴 파장과 피크위치정보를 이용하여 다항식 fitting하여 피크 위치, 즉 시간과 파장의 관계를 알아낼 수 있어 파장가변 필터의 비선형적 동작특성에 무관하게 정밀한 측정이 가능하게 된다. 3개의 광섬유격자로 이루어진 센서 어레이를 이용하여 실험한 결과 약 10 nm의 범위에서

약 4 pm의 정밀도와 함께 선형적인 측정결과를 얻을 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1. 시스템의 구성

F-P필터의 비선형 동작에 영향 받지 않기 위해서는 필터 투과파장의 변화를 직접적으로 분석해야 하므로 그림 1 과 같이 센서 시스템을 구축하였다.

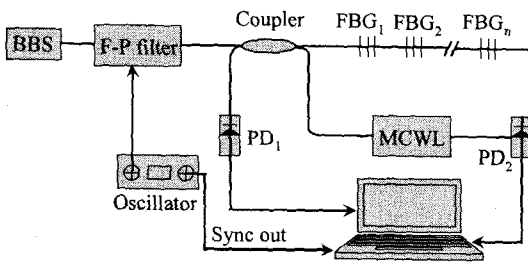


그림 1. 광섬유격자 센서 시스템의 계략도  
Fig. 1. Setup diagram of the Bragg grating sensor system

BBS에서 광폭광원이 일정한 파장대역을 스캔하는 F-P필터를 통과하면서 일부의 파장만 선택되어 광 결합기로 입사한다. 파장이 선택된 빛이 일부는 센서부인 광섬유격자 어레이로 입사하고 일부는 파장이 잠긴 MCWL를 거쳐 PD<sub>2</sub>(photodetector, 광 검출기)로 입사하게 된다. 기존의 방법은 하나의 고정적인 광섬유격자를 선택하여 기준으로 삼아왔으나 이는 F-P필터의 비선형 동작으로 인해 정밀도와 반복성이 떨어진다. 사용한 MCWL은 온도에 영향 받지 않는 Etalon필터로 중심파장이 193.1 THz, FSR(free spectral range)가 100 GHz로 잡혀있다. 1520 nm에서 1620 nm의 작동범위에서 약 125개의 고정된 잠긴 파장을 제공할 수 있으므로 다중 파장 기준으로 사용하는데 적합하다. 스캔하는 F-P필터의 투과파장과 MCWL의 투과파장이 일치할 때 PD<sub>2</sub>에서 신호가 최대로 검출된다. 즉 PD<sub>2</sub>의 출력 신호 중 시간축상의 각 피크위치정보가 MCWL의 잠긴 파장, 그리고 F-P필터의 투과파장에 해당하게 된다. 시간축상의 각 피크위치정보와 MCWL의 잠긴 파장을 다항식 fitting 하여 F-P필터의 투과파장정보를 시간축상의 피크위치정보로 계산하여 실시간으로 파악할 수 있게 된다.

광섬유격자 어레이로 구성된 센서부에서는 일정한 파장, 즉 브래그 파장의 빛만 반사시켜 PD<sub>1</sub>로 검출한다. 광섬유격자는 일정한 파장의 빛만 반사시키므로 F-P필터의 투과파장과 일치할 경우 빛이 최대로 검출된다.

광섬유격자 어레이의 반사 신호는 삽입된 격자의 숫자만큼의 피크가 F-P필터의 변조주파수와 일치하여 주기적으로 나타난다. PD<sub>1</sub>의 출력 파형에서 각 피크 값이 나타나는 시간이 광섬유격자의 반사파장과 밀접하게 관계되므로 이 시간을 다항식 fitting한 best fitting line에 적용하여 F-P필터의 투과파장, 즉 브래그 파장을 구할 수 있다. 이러한 방법으로 F-P필터의 비선형 동작을 보상하여 더욱 정밀한 측정이 가능하게 된다.

### 2.2. 실험 및 결과

본 실험에서는 F-P필터를 10Hz의 톱니파로 구동하였고 이와 동기화된 TTL신호를 외부 클럭으로 사용하여 PD의 신호를 수집하였다. 그림 2 는 다중 파장 기준으로 사용한 MCWL의 투과특성을 보여준다.

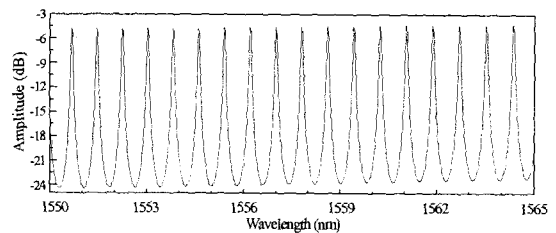


그림 2. MCWL의 투과특성 스펙트럼  
Fig. 2. Transmission spectrum of MCWL

F-P필터를 톱니파로 구동할 때 PD<sub>2</sub>의 출력도 같은 주파수를 가지게 되며 F-P필터가 선형적으로 동작하는 가정아래 출력신호는 파장스펙트럼과 같은 모양을 가져야 한다. 즉 각 피크간의 간격이 같아야 하는데 F-P필터의 비선형동작으로 왜곡되는 현상을 볼 수 있으며 스캔범위가 클수록 왜곡이 커지는 것을 볼 수 있었다. 하나의 기준파장을 사용하는 기존의 방법은 측정의 정밀도와 반복성이 제한돼 있다는 것이다. PD<sub>2</sub>의 출력신호를 최대값 검색하여 각 피크의 위치정보를 수집하고 이를 MCWL의 잠긴 파장들과 함께 신호 처리하여 F-P필터의 동작특성을 파악하였다. 피크의 위치정보, 즉 시간정보와 그때의 MCWL의 파장정보, 즉 F-P필터의 파장정보를 2차, 3차, 4차 다항식 fitting과 exponential fitting을 한 결과 4차 다항식 fitting이 가장 작은 MSE로 4.025E-5를 기록하였고 평균오차는 4 pm이다. 사용한 F-P필터의 FSR는 60 nm로 fine tuning 을 위해 1660 nm를 중심으로 약 10 nm 구간을 스캔하였다. 그림 3 은 피크위치정보와 파장정보의 원시적인 수치와 best fitting line을 보여준다.

센서부에서 반사 온 신호를 PD<sub>1</sub>로 검출하고 똑 같은 최대값 검색을 한다. 검출한 피크위치정보를 위에서 구한 best fitting line에 대입하여 광섬유격자 반사파장

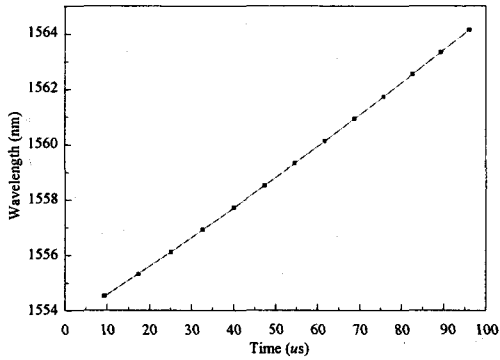


그림 3. 잠긴 파장(Y축)과 피크의 시간정보(X축)의 관계와 best fitting line.

Fig. 3. Locking wavelengths(Y axis) VS peak locations(X axis) and it's best fitting line.

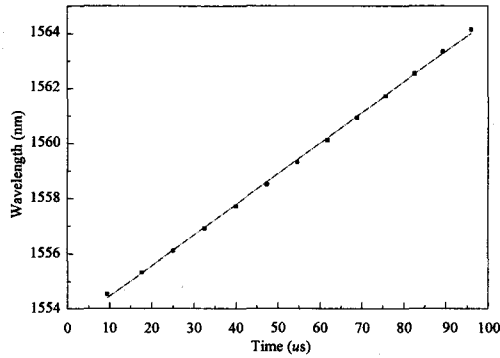


그림 4. 잠긴 파장(Y축)과 피크의 시간정보(X축)의 관계와 linear fitting line.

Fig. 4. Locking wavelengths(Y axis) VS peak locations(X axis) and it's linear fitting line.

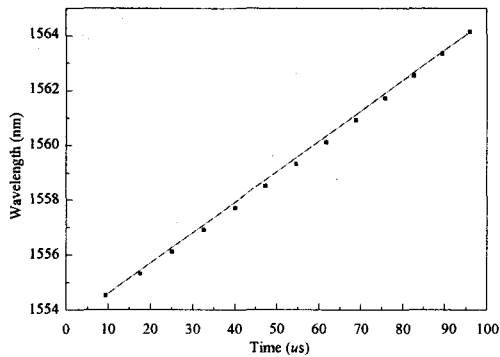


그림 5. 잠긴 파장(검, 점)과 하나, 혹은 두 개의 기준파장을 이용한 파장복조(빨, 선).

Fig. 5. Locking wavelengths(black, dot) and wavelength read out by using one or dual reference(red, line).

을 복조한다. 이러한 방법으로 F-P필터의 비선형성에 영향을 받지 않는 항상 선형적인 출력을 얻을 수 있게 된다.

그림 4는 잠긴 자장과 시간정보를 linear fitting한 결과를 보여준다. MSE는  $5.607E-3$ 을 기록했고 평균오차는 64 pm를 보여줬다. F-P필터가 구동전압에 선형적으로 동작한다는 가정은 이러한 큰 오차를 유발시킬 수 있고 또한 계측의 반복성도 저하하다는 것을 보여준다. 그림 5은 하나의 기준파장, 기리고 계측의 반복성을 높이기 위한 두 개의 기준파장을 사용한 경우의 실제파장과 측정파장을 나타내는 그림이다. 평균오차는 140 pm에 이르렀고 특히 중간 부분은 200 pm의 바이어스 오차가 발생한다는 것을 볼 수 있다. 광섬유격자가 좁은 구간에서의 상대적인 변화를 모니터링 시에는 큰 영향을 받지 않을 수도 있지만 넓은 대역폭에서 다수의 광섬유격자를 동시에 관측할 때는 주요한 오차요인으로 동작할 것이다.

그림 6은 구성된 광섬유격자 센서 시스템으로 광섬유격자에 가해진 스트레인을 복조하는 그림이다. F-P필터의 스캔속도를 20 Hz로 높였으나 고정된 광섬유격자의 random walk는 4 pm로 안정함을 보여줬다. 그림의 상단에 위치한 곡선은 구형파로 변조한 광섬유격자 센서를 복조한 것이다.

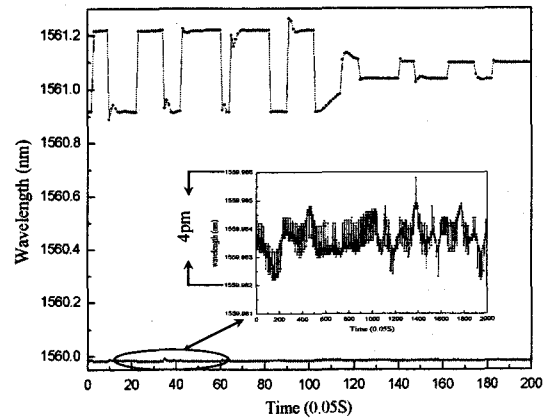


그림 6. 구형파로 변조한 광섬유격자(upper)와 안정된 광섬유격자(lower).

Fig. 6. Fiber Bragg grating operation tuned by square wave (upper) and the random walk of free one(lower).

### 3. 결론

본 논문에서는 MCWL를 다중파장기준으로 이용하여 광섬유격자 센서어레이를 복조하는 방안을 제안하였다. MCWL의 잠긴 파장과 시간축상의 피크위치를 비교하

여 F-P필터의 비선형성에 영향 받지 않는 측정을 가능하게 하였다. 3개의 광섬유격자로 이루어진 센서어레이에 대하여 F-P필터를 약 10 nm의 파장 범위에서 10Hz의 톱니파로 구동하며 실험한 결과 약 4 pm의 파장분해능을 얻었다. 채널 간격이 더욱 작은 MCWL을 사용하거나 F-P필터의 fine tuning 범위가 더 크면 데이터 수가 많아 결과의 신뢰성과 정확성이 더욱 향상될 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [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, no. 8, pp. 1442-1463, Aug. 1997.
- [2] S. H. Yun, D. J. Richardson, and B. Y. Kim, "Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 843-845, Jun. 1998.
- [3] Z. Jin and M. Song, "Fiber grating sensor array interrogation with time-delayed sampling of a wavelength-scanned fiber laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 1924-1926, Aug. 2004.
- [4] C. C. Chan, W. Jin, H. L. Ho, D. N. Wang, and Y. Wang, "Improvement of measurement accuracy of fibre Bragg grating sensor systems by use of gas absorption lines as multi-wavelength references," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 12, pp. 742-743, 2001.