

광섬유 레이저를 이용한 광섬유격자 스트레인 센서

김종섭, 박형준, 송민호
전북대학교 선자정보공학부

Fiber Laser based Fiber Bragg Grating Strain Sensor

Jin Zhongxie, Hyoungjun Park, Minho Song
Chonbuk National University

Abstract - A tunable fiber laser and the Quadrature Sampling technique are used to construct highly sensitive fiber-optic distributive Bragg grating strain sensor system. By using a wavelength-modulated fiber laser, the variations of strain-dependent Bragg wavelengths are transformed into the variations of time-domain reflection profiles. The locations of profile peaks that correspond to the applied strains are demodulated using a precise wavelength encoder that uses a fiber-optic Mach-Zehnder interferometer and Quadrature Sampling technique. With the extremely high sensitive optical encoder, we could obtain not only high sensitivity, but also very linear responses that was impossible with the conventional techniques. This paper is attempted to report the theoretical and experimental results.

1. 서 론

교량이나 고층 건축물 등은 전동이나 바람 등 외란에 의해 흔들리게 되며 만약 이러한 흔들림에 의한 주파수가 건물의 고유 주파수와 같게 될 경우 심각한 위험을 초래할 수도 있다. 이러한 위험을 미리 감지하고 이에 대처할 수 있도록 하기 위하여 복합구조물의 스트레인을 측정하는 연구가 최근 활발하게 진행되어 왔고, 다양한 측정 시스템들이 개발되었다. 본 논문에서는 광섬유 레이저^[1]와 Quadrature Sampling^[2] 기법을 이용하여 실시간으로 다중점 측정이 가능한 초고정밀 광섬유격자 스트레인 센서 시스템을 구축하였다. Quadrature Sampling 기법은 마하젠더(M-Z) 간섭계 출력신호의 위상을 축출하는 방법의 하나로서 입력광원의 세밀한 파장변화를 매우 정밀하게 측정할 수 있다. 그간에 간섭계의 위상정보를 축출하기 위한 많은 연구가 있었는데 Lo가 발표한 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 위상추출 방법^[3]은 저주파나 정지된 스트레인 측정에 어려움이 있고 환경적인 외란에 의해 불안정하다는 약점이 있다. 또한 Dandridge 등이 발표한 phase-generated carrier를 이용한 방법^[4]도 있으나 이는 시스템 구성이 복잡하고 유연성이 떨어지며 데이터 처리량이 많아 디지털 신호처리에 적합하지 않다. Quadrature Sampling 기법은 외란에 안정적이고 패러미터의 조정이 자유로우며 구성이 간단하고 디지털 신호처리에 적합한 장점을 가지고 있다.

본 논문은 구성된 센서 시스템의 이론적인 배경과 실험 결과를 보고한다.

2. 본 론

2-1. Quadrature Sampling 기법

그림 1은 M-Z 간섭계로 구성된 Quadrature 신호(상대적인 위상차가 90도인 신호) 발생부와 샘플링시간의 관계도이다. Piezoelectric transducer(PZT)를 간섭계의 한쪽 팔에 부착하고 톱니파를 가하여 간섭계의 출력 위상을 변조시킨다. 이때 톱니파의 크기를 2π 의 위상변조가 일어나도록 조절한다면 간섭계의 출력은 다음 식과 같이 근사된다.

$$I = \bar{I} \{ 1 + k \cos[\omega t + \Psi(\Delta\lambda) + \Phi_1] \} \quad (1)$$

(\bar{I} : dc, ω : 변조주파수, k : 입사광원의 가시도,
 $\Psi(\Delta\lambda)$: 입사광원의 파장변화에 따른 위상변화량,
 Φ_1 : 외란에 의한 임의의 위상변화)

따라서 입력광의 파장변화는 간섭계 출력의 위상변화로 나타나며 이를 정밀하게 측정하여 광원의 파장변화를 실시간으로 파악할 수 있다. 사인함수 출력의 위상을 축출하기 위해서는 Quadrature 신호처리가 사용되며 이를 위해서는 90도의 위상차를 갖는 두 신호를 발생시키는 것이 필요하므로 그림 1에서 표시한 것과 같이 변조된 간섭계의 출력을 한 변조주기 안에서 두 번 샘플링 한다.

이때 매 주기 안에서 샘플링은 동일한 위치에서 이루어져야 하며 이를 위하여 간섭계의 변조신호와 동기화된 TTL 신호를 외부클럭으로 사용한다. 첫번째 샘플링 시

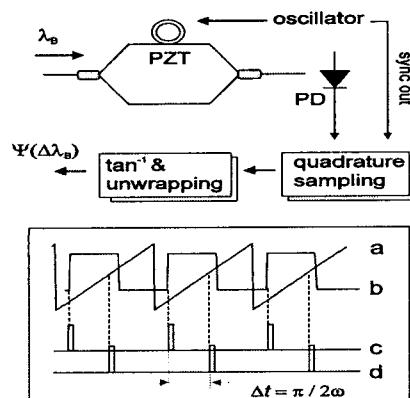


그림 1. M-Z 간섭계를 이용한 Quadrature Sampling 기법의 구성과 시간관계: a, PZT의 구동 신호; b, a에 동기화 하는TTL신호; c, 첫 번째 샘플링 시작; d, 두 번째 샘플링 시작.

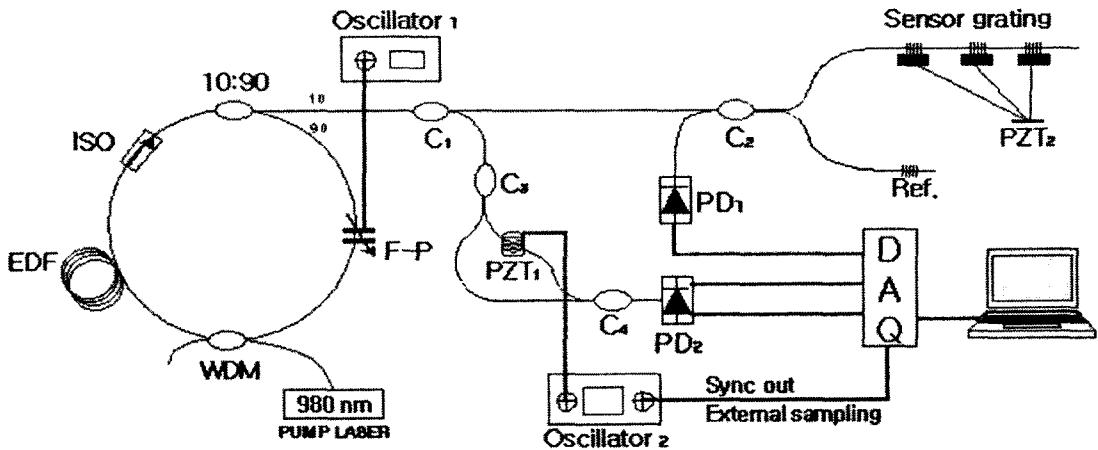


그림 2. 광섬유격자 스트레인 센서의 개략도: EDF, erbium첨가 광섬유; ISO, 광차단기; WDM, wavelength division multiplexer; C_i, 50:50 방향성 결합기; 10:90, 10:90 방향성 결합기; F-P, fabry-perot 필터; PD_i, 광검출기; DAQ, data aquisition.

각은 TTL 신호가 뜰 때, 두번째 샘플링은 Δt 만큼 시간이 흐른 뒤에 이루어진다. 샘플링간의 시간차 Δt 가 적절히 조절되어 $\omega \Delta t = 2\pi$ 를 만족하게 되면 각 샘플링에 의해서 얻어진 두 데이터열(data array)은 90도의 상대적인 위상차를 갖게 되어 Quadrature 신호처리에 필요한 두 신호를 얻을 수 있는 것이다. 엄밀하게는 동일한 시간에 존재하는 신호가 아니므로 Quadrature 신호라고 할 수는 없겠으나 샘플링 주파수 ω 가 충분히 커서 Δt 동안의 위상변화를 무시할 수 있는 경우에 대해서는 기존의 Quadrature 신호에 대한 위상축출 방법을 사용할 수 있게 된다. Quadrature 신호로부터 위상을 축출하는 방법으로는 DCM (differentiate & cross-multiply)과 arctangent demodulation 등이 있는데 디지털 신호처리에서는 arctangent demodulation이 보다 적합하다. 이를 이용하여 M-Z 간섭계의 파장변화에 의한 위상변화를 축출한 출력은 다음과 같다.

$$\Delta\psi(\lambda) \cong \frac{2\pi n d}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (2)$$

(n: 광섬유 코어의 굴절률, d: 간섭계의 광 경로차, λ : 입사광의 중심파장, $\Delta\lambda$: 파장의 변화량)

수식에 표시한 것과 같이 간섭계 출력의 위상변화는 파장변화량에 대해서 거기 선형적이다. Arctangent 함수를 이용하여 위상을 축출할 때 출력 위상은 $\pm\pi/2$ 범위 내에서 반복된다. 파장변화에 따라 연속적으로 누적되는 위상을 구하기 위하여 경계면에서 누적위상에 $\pm\pi$ 를 가해주는 간단한 phase-unwrapping을 사용할 수 있다.

2-2. 실험 및 결과

그림 2는 광섬유격자 스트레인 센서의 구성도이다. 광원으로 사용된 파장 가변형 광섬유 레이저는 약 20 m 길이의 erbium 첨가 광섬유(EDF)와 130 mW 출력의 980 nm 펌프 레이저를 사용하여 제작하였다. 레이저의 공진기는 루프형으로 구성되고 광차단기를 두어 레이저 빛이 한 방향으로만 진행하도록 하였으며 또한 센서부에

서 반사해오는 빛들이 공진기내에서 이득 경쟁하는 것을 억제하도록 하였다.

광섬유 레이저의 파장변조를 위하여 광섬유형 F-P (Fabry-Perot) 필터를 사용하였다. 전기적으로 파장변조가 가능하며 광섬유형이므로 취급이 쉽고 삽입손실이 작은 장점도 있다. F-P필터는 전동자₁(oscillator₁)의 구동 전압에 따라 반사경의 간격을 조절하여 발진파장을 변화시킨다. 사용한 F-P 필터는 투과형으로 파장가변 범위(FSR, free spectral range)가 1520 nm ~ 1580 nm 이므로 광섬유 격자의 스트레인에 대한 파장변화 범위가 3 nm 라 할 때 20개 이상의 광섬유격자 센서의 출력을 검출할 수 있게 된다.

본 실험에서는 F-P 필터를 20 Hz 톱니파를 이용하여 변조하였다. 10:90 분할 비율을 가지는 방향성 결합기 (directional coupler)를 이용하여 발진 레이저 파워의 10%가 방출된다. 변조된 광출력은 50:50의 분할비를 갖는 커플러(C₁)를 거쳐서 광섬유격자 어레이와 M-Z 간섭계로 나뉘어져 입사한다. 센서 어레이에서 반사되어 광검출기₁(PD₁)로 얻어지는 출력은 Data Aquisition (DAQ) 보드를 이용하여 컴퓨터로 읽어들인 후 신호처리 되어진다. 한편 M-Z 간섭계의 출력 또한 DAQ보드

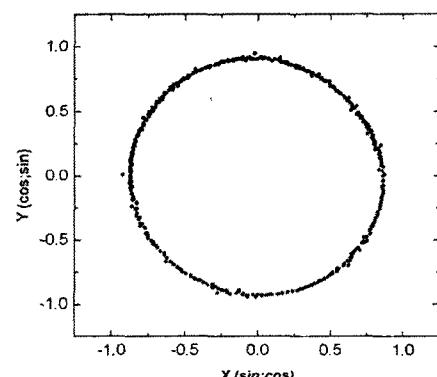


그림 3. Δt 를 7.1×10^{-5} 초로 조절했을 때의 Lissajous 그래프.

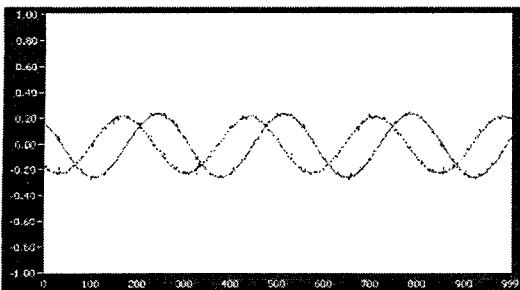


그림 4. 90도 위상 차를 가지는 간섭신호.

를 이용하여 읽어들인 후 Quadrature Sampling 기법을 이용하여 위상을 축출한다. M-Z 간섭계의 한쪽 팔을 PZT₁을 이용하여 Oscillator₂의 톱니파로 변조시키고 톱니파와 동기화된 TTL신호를 DAQ보드의 외부 클럭으로 사용하여 샘플링의 기준신호로 사용한다.

Quadrature Sampling을 이용하여 만들어진 두 신호열로 Lissajous 그래프를 그릴 경우 완벽한 원형을 이룬다면 두 신호열의 위상차가 90도임을 뜻하므로 화면상에서 그래프를 관측하면서 샘플링간의 시간차 Δt 를 적절히 조절하는 것이 필요하다. 그림 3은 M-Z 간섭계를 3 kHz로 변조시킬 때 샘플링간의 시간차 Δt 를 7.1×10^{-5} 초로 조절한 경우로서 신호열간의 위상차가 90도임을 알 수 있다.

그림 4는 샘플링을 통하여 얻은 두 신호열을 시간축에 대하여 표시한 것으로 상대적으로 90도의 위상 차를 갖는 sine과 cosine의 형태를 가지고 있음을 볼 수 있다. sine 신호열을 cosine 신호열로 나누고 이 값에 arctangent 함수를 가하여 파장변화에 비례되는 위상정보를 얻게 된다.

센서부의 광섬유격자 어레이에서 반사되어 PD₁으로 읽어들이는 신호는 F-P필터를 변조하는 주파수와 일치하는 20 Hz의 주파수를 갖는다. PD₁의 출력을 미분하고 미분한 값이 0이 되는 시간이 광섬유격자의 스트레인에 따른 반사파장에 해당된다. 이 시간을 M-Z 간섭

계에서 Quadrature Sampling 기법으로 구한 파장 값과 비교하면 광섬유격자의 파장 변화량을 매우 정밀하게 구할 수 있다.

3. 결 론

파장 가변형 광섬유 레이저와 M-Z 간섭계를 이용한 Quadrature Sampling 기법을 이용하여 광섬유격자의 스트레인에 의한 파장변화 측정 실험을 행하였다. 광섬유 레이저는 기존의 광폭 광원(broadband light source)에 비하여 출력이 매우 크므로 센서시스템의 신호대 잡음비를 획기적으로 개선하였으며 매우 작은 파장선풋으로 인하여 미소 파장변화를 매우 정밀하게 검출할 수 있었다. Mach-Zehnder 간섭계와 Quadrature Sampling 기법을 이용한 파장 분석기를 구성하여 센서 어레이의 출력을 정밀하게 분석하는 방법을 제안하였으며 이는 기존의 방법과는 달리 파장가변 필터의 비선형성에 의한 오차에 전혀 영향을 받지 않는 장점을 갖는다. 제안된 센서 시스템은 각종 복합구조물의 상시 관측에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Youlong Yu, Luenfu Lui, Hwayaw Tam, and Wen ghong Chung, "Fiber - Laser - Based Wavelength-Division Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor System," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 7, 702-704 . July 2001.
- [2] Minho Song, Shizhuo Yin, and Paul B. Ruffin, "Fiber Bragg Grating Strain Sensor Demodulation with Quadrature Sampling of a Mach-Zehnder Interferometer," Applied Optics, Vol. 39, No. 7, 1106-1111, 2000.
- [3] Y.L. Lo, Sirkis, and C.C. chang, "Passive signal processing of in-line fiber etalon sensors for high strain-rate loading," J.Lightwave Technol.15.1578-1585(1997).
- [4] A. Dandridge, A. B. Tveten, and T.G.Giallorenzi, "Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensor using phase generated carrier," IEEE J. Quantum Electron. JQE -18, 1647-1653. 1982.