

논문 2004-41SD-3-4

시간지연샘플링을 이용한 광섬유레이저의 파장변화검출

(Wavelength Readout of A Fiber Laser Using Time Delayed Quadrature Sampling)

김 중 섭*, 송 민 호**

(Zhongxie Jin and Minho Song)

요 약

광섬유격자 센서어레이의 복조에 사용할 목적으로 광섬유레이저의 파장변화 검출방법을 제안하였다. 삼각파로 변조된 광섬유레이저의 출력 파장을 Mach-Zehnder 간섭계와 시간지연샘플링 기법으로 분석하였다. 피크간의 시간차를 측정하는 기존의 방법과 달리 파장변조 메카니즘의 비선형 특성에 무관하게 항상 선형적인 출력을 얻을 수 있었으며 6.5 nm의 스캔범위에서 약 20 pm의 파장분해능을 얻을 수 있었고, 이는 응답특성이 뛰어난 위상변조기를 사용할 경우 크게 개선될 수 있음을 보였다.

Abstract

The wavelength variation of a scanned fiber laser is analyzed using quadrature sampling technique. By time delayed sampling of a phase modulated Mach-Zehnder interferometer, the wavelength information can be precisely determined regardless of the nonlinearity in the Fabry-Perot wavelength filter which scanned the fiber laser. A wavelength readout resolution of ~ 20 pm was obtained at 2 kHz M-Z modulation frequency, and it was shown that the resolution could be improved in case of using an electro-optic phase modulator.

Keywords : fiber laser, quadrature sampling, Mach-Zehnder interferometer, Fabry-Perot filter, phase modulator

I. 서 론

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-, 파

장-, 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. 가장 대표적인 광섬유격자 어레이의 다중화방안은 광폭광원(broadband source, 이하 BBS)을 조사하고 격자어레이에서 반사되는 스펙트럼을 Fabry-Perot(FP) 필터를 통과시켜 브래그파장변화를 검출하는 방법이다^[2]. 센서간의 간격에 제한을 받거나 광소자의 파장분할 특성에 영향을 받는 시-, 코드-, 또는 파장분할 다중화방식에 비하여 매우 간단한 구조로 정밀한 측정이 가능하나 BBS의 제한적인 출력에 의하여 신호처리에 어려움을 갖게 된다. 이에 따라 FP 필터를 공진기 내부에 삽입한 파장가변형 광섬유레이저로 BBS를 대체하여 센서출력의 신호대잡음비를 대폭 향상시키는 시도가 성공적으로 이루어진 바 있다^[3]. BBS

* 학생회원, ** 정회원, 전북대학교 전자정보공학부
(Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00287-0) 지원에 의해서 이루어졌습니다.

접수일자 : 2003년4월22일, 수정완료일 : 2004년2월26일

와 광섬유레이저를 이용하는 두 경우 모두 FP 필터의 투과파장이 시간에 따라 선형적으로 변화한다는 가정에 그 측정원리를 두고 있으나 실질적으로는 FP 필터의 비선형 동작에 의해서 계측의 반복성과 측정정밀도가 제한 받게 된다. 본 논문에서는 준분배형 광섬유격자 센서시스템의 측정정밀도와 선형성 및 재현성을 크게 개선하는 방법으로 광섬유레이저의 출력파장변화를 간접계로 정밀하게 분석하는 방법을 제안하고 이론적인 분석과 실험을 통하여 그 효용성을 입증하였다.

II. 본 론

1. FP 필터를 이용하는 광섬유격자 센서시스템

A.D. Kersey 등은 광섬유격자 센서어레이에서 반사되는 다수의 브래그파장을 광섬유형 FP 필터를 이용하여 분석하는 방법을 제안하였다^[2]. FP 필터의 투과파장을 램프(ramp)나 삼각파전압을 가하여 선형적으로 변화시키면 광검출기(photodetector, 이하 PD) 출력은 센서개수 만큼의 피크파형을 갖게 되고 피크간의 시간차는 브래그파장 차이에 비례하므로 이의 변화를 검출하여 각 센서에 가해진 물리량을 측정하게 된다. 하나의 광섬유라인에 16개의 격자센서를 연결하여 $\sim \pm 1 \mu\text{E}$ 의 정밀도를 얻었으며^[1] 광스위치를 이용하여 센서의 수를 60개까지 늘린 사례도 발표되었다^[4]. 이는 기존의 TDM이나 WDM 기술을 이용하는 경우와 달리 센서간의 거리나 WDM 소자의 분광특성 등에 따른 구조적, 기능적 제한이 없으므로 다중점센서시스템의 대표적인 복조기술로 여겨져 왔다. 그러나 BBS와 FP 필터를 사용하는 경우의 어려움은 PD출력의 크기가 매우 작다는 것이다. 각 격자는 BBS 출력의 일부만을 ($\sim 0.2 \text{ nm}$ 내외) 반사시키며 FP 필터를 거치므로 한번의 스캔으로 PD에서 검출되는 에너지는 각 격자에서 반사된 에너지에 비하여 $\Delta\lambda_{FP}/\Delta\lambda_R \cdot f$ ($\Delta\lambda_{FP}$: FP 필터의 투과파장폭, $\Delta\lambda_R$: 파장스캔범위, f : 스캔주파수)의 비율로 그 크기가 현저히 줄어들어 신호대잡음비가 낮아지고 측정정밀도와 시스템구성의 자유도를 얻는데 있어 제한요소로 작용한다. 이의 해결방안으로 광섬유레이저로 BBS를 대체하여 센서출력을 대폭 증가시키는 방안이 제안되었다. 광섬유레이저의 공진기 내부에 삽입된 FP 필터로 출력파장을 28 nm 범위에서 스캔하여 $42 \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 스트레인 측정정밀도를 얻은 연구결과가 발표되었다^[3]. 광섬유레이저의 작은 선포

($< 0.1 \text{ nm}$) 또한 브래그파장 변화를 보다 정밀하게 검출할 수 있게 한다. 그러나 이와 같이 FP 필터를 이용한 방법들은 모두 FP 필터 내부의 압전소자가 가해진 전압신호에 대해서 선형적으로 동작함을 전제로 한다. 그러나 실제 압전소자의 동작은 어느 정도 비선형성을 가지며 스캔주파수에 따라 팽창과 수축의 정도가 달라진다. 또한 온도변화 등의 환경적 요인이나 시간의 흐름에 따라 동적특성이 변화하므로 인가전압에 대해서 일정한 비율의 선형적인 동작을 가정하는 것은 센서어레이의 동작을 오관하게 하는 요소가 된다. 따라서 바람직한 방법은 직접적으로 레이저의 출력파장을 분석하여 압전소자의 비선형성에 관계없는 기준 파장값을 얻는 것이다.

2. 시간지연샘플링(quadrature sampling) 기법을 이용한 광섬유레이저 출력파장의 분석

앞 절에서 기술한 광섬유레이저의 출력파장분석은 간접계와 시간지연샘플링을 이용한 신호처리를 통하여 얻을 수 있다. Mach-Zehnder 간접계를 통과한 레이저의 출력은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \eta I_0 \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi nd}{\lambda}\right) \right\} \quad (1)$$

위 식에서 η 는 시스템의 손실계수, I_0 는 입사광의 세기, n 은 광섬유의 굴절률, d 는 간접계 팔의 길이차이, 그리고 λ 는 입사광의 파장이다. 광원의 파장변화량($\Delta\lambda$)이 미소할 경우 파장변화에 따른 간접신호의 위상변화량은 아래 식과 같이 선형적인 관계로 근사할 수 있으며

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

위상변화량을 측정하여 입력파장의 변화, 즉 광섬유격자에 가해진 물리량을 계산할 수 있다. 그러나 PD의 출력과 $\Delta\lambda$ 는 식 (1)과 같이 코사인함수 관계이므로 파장변화에 대해서 선형적인 출력신호를 얻기 위해서는 PD신호의 위상을 추출하는 신호처리가 필요하며, 주로 90° 의 위상차이를 갖는 두 신호(quadrature phase shifted signals)를 이용하는 기법이 사용된다. 90° 의 위상차이를 갖는 두 신호, 곧 동일한 위상의 사인, 코사인 신호가 확보되면 DCM(differentiate and cross multiply) 신호처리를 이용하거나 사인신호를 코사인신호로 나눈 후 arctangent 함수를 가하는 복조(arctangent

demodulation)방법을 이용하여 위상을 추출할 수 있다. 따라서 동일한 간섭계 출력으로부터 90°의 위상지연을 갖는 두 개의 간섭신호를 발생시키고자 하는 노력이 많이 이루어 졌는데 시간지연을 이용한 샘플링기법(quadrature sampling)은 phase generated carrier 기법^[5]에 비하여 신호처리가 단순하고 광회로의 손실이나 편광변화 등에 영향 받지 않는 장점을 가지고 있다^[6].

그림 1은 시간지연샘플링에 대한 기본 개념도와 동작원리를 보인다^[6]. 간섭계의 한쪽팔을 원통형 압전소자(piezoelectric transducer)에 감아 주파수 f 의 램프(ramp) 신호로 2π peak-peak 위상차를 발생시키도록 변조한다. 이때 시간에 따른 위상의 변화량 $2\pi/T=2\pi f$ (T : 변조주기)가 간섭신호의 각주파수가 되므로 이상적인 램프신호와 변조기를 가정한다면 식 (1)은 다음 식과 같이 표현될 것이다.

$$I(t) = \eta I_o \left\{ 1 + \cos \left(\omega t + \frac{2\pi n d}{\lambda} \right) \right\} \quad (3)$$

위상변조에 의하여 교류가 된 간섭신호를 한 주기 안에서 두 번 샘플링하며 샘플링간의 시간간격이 다음 조건을 만족하도록 설정한다면 90°의 위상차를 갖는 두 신호열을 발생시킬 수 있다.

$$\omega(t_1 - t_2) = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

그림 1의 구형파(a)는 간섭계를 변조하는 램프신호(b)와 동기화된 TTL 신호로서 매 주기마다 동일한 위상에서 첫 번째 샘플링(c)이 시작될 수 있도록 트리거(trigger) 신호로 사용되고 일정한 시간지연후 두 번째 샘플링(d)을 실행한다. 시간지연샘플링과 arctangent

복조를 이용해서 추출된 위상은 식(2)를 이용하여 광원의 파장변화량으로 계산되어지며 전체 파장변화량을 f_s / f_{FP} 개의 출력값으로 표현하게 된다. f_s 는 간섭신호의 샘플링주파수로 간섭계의 위상변조주파수와 동일하며 f_{FP} 는 FP 필터의 스캔주파수이다. 따라서 파장스캔 범위($\Delta\lambda$)에 대해서 측정가능한 최소 파장변화량은 다음과 같은 관계로 얻어진다. (FP 필터의 변조신호가 램프인 경우이며 삼각파로 변조할 경우는 이의 2배에 해당하는 값을 가진다.)

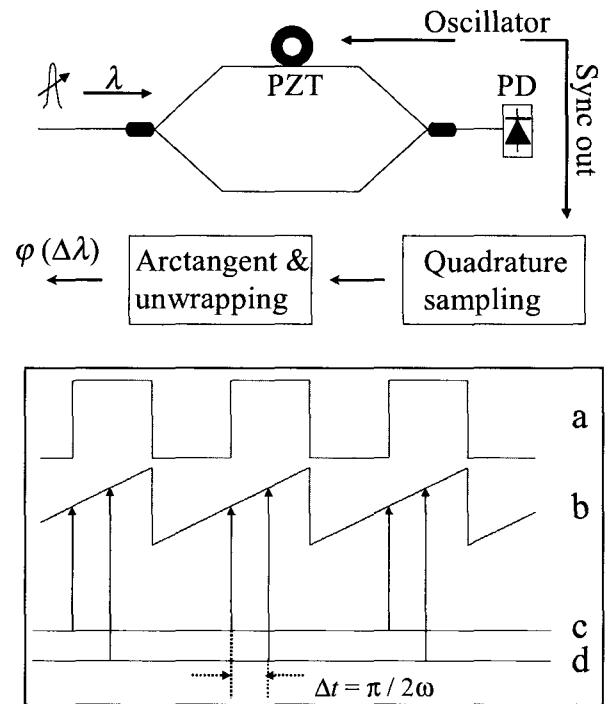


그림 1. 시간지연샘플링의 개념도와 샘플링 다이어그램
Fig. 1. Schematic diagrams of quadrature sampling structure and sampling.

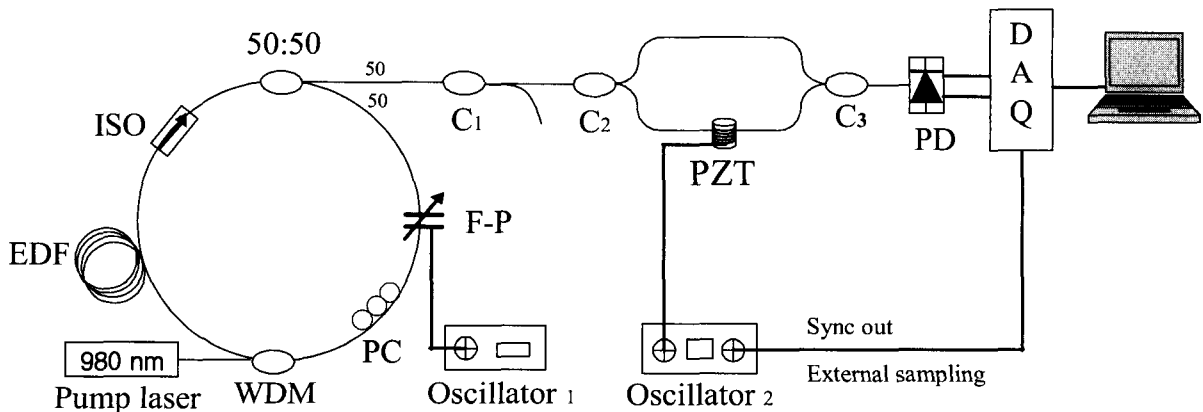


그림 2. 광섬유레이저와 파장분석시스템의 개략도
Fig. 2. Setup diagram of the fiber laser and wavelength readout.

$$\text{Resolution} = \frac{\Delta\lambda}{f_s / f_{FP}} = \frac{\Delta\lambda \cdot f_{FP}}{f_s} \quad (5)$$

단, 식 (5)는 다음 식 (6)의 조건이 만족되는 경우에 성립하며 식 (6)의 좌측항은 샘플링간의 위상변화량이며 우측 항은 N의 비트 수를 갖는 A/D변환기(analog-to-digital convertor)를 이용하여 얻을 수 있는 위상분해능으로 이 조건을 만족하지 않을 경우 분해능은 A/D변환기에 의하여 제한된다.

$$\frac{2\pi \cdot \Delta\lambda}{FSR_{MZ}} \cdot \frac{f_{FP}}{f_s} > \frac{\pi}{2^N} \quad (6)$$

FSR_{MZ} 은 Mach-Zehnder 간섭계의 FSR (free spectral range)이다.

3. 광섬유레이저의 구성

그림 2는 구성된 광섬유레이저의 개략도이다. Erbium 첨가 광섬유에 980 nm 펌프레이저를 조사하는 단방향 루프형 공진기 형태이며 공진기 내부에 FP 필터를 두어 출력파장을 변화시키도록 구성하였다. 이와 같은 형태를 가진 광섬유레이저는 다른 문헌에서 수 차례 발표된 바 있으므로 세부적인 광섬유레이저의 구성과 동작특성은 본 논문에서 기술하지 않는다. 사용된 FP 필터는 60 nm의 FSR과 0.13 nm의 3 dB 파장폭을 갖는 Micron Optics의 제품이다. 그림 3은 구성된 광섬유레이저의 발진 스펙트럼이다. 평균 출력은 0.5 mW 이며 ~10% 내외의 출력변화가 불규칙하게 지속되었고 간헐적으로 광신호의 공진기(~35 m) 진행시간에 해당하는 ~6 MHz 주파수의 모드잠김(mode locking) 펄스가 발생되었으나 PD회로의 주파수 응답시간을 느리게 조절하여 PD출력에 펄스가 나타나지 않도록 하였다^[3].

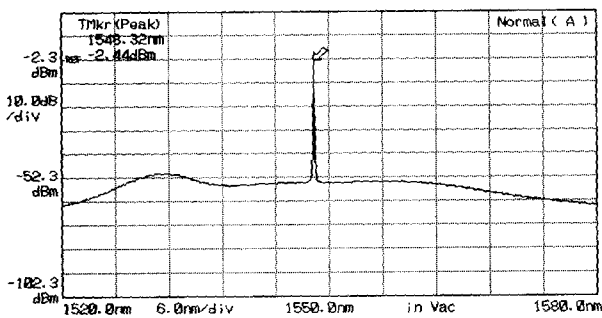
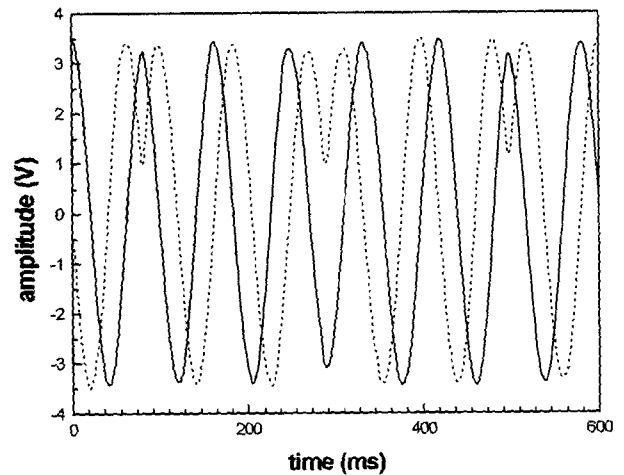


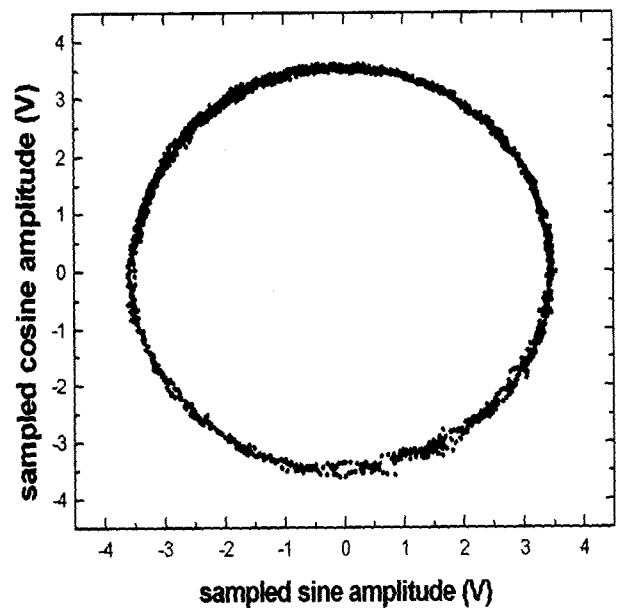
그림 3. 광섬유레이저의 발진 스펙트럼
Fig. 3. Lasing spectrum of the fiber laser.

4. 광섬유레이저의 출력파장분석

제안한 시간지연샘플링 기법으로 출력파장을 분석하기 위하여 FP 필터에 3 Hz의 삼각파형을 가한 후 PD 출력을 신호처리하여 위상을 추출하였다. 간섭계의 한 쪽 팔은 원통형 압전소자에 광섬유를 감고 2 kHz의 램프신호를 가하여 변조하였다. 사용한 압전소자의 공진 주파수는 31 kHz이나 제한된 주파수 특성에 의하여 2kHz 이상의 램프신호를 사용할 경우 대역통과 (band-pass) 필터를 사용하여도 신호의 왜곡을 피할 수 없었다. 따라서 보다 높은 변조주파수가 필요할 경우에는 램프신호가 아닌 사인함수를 이용할 수 있는데 이 경우



(a)



(b)

그림 4. 시간지연샘플링 신호열(a)과 Lissajous 그래프 (b)
Fig. 4. Sampled signals (a) and their Lissajous plot (b).

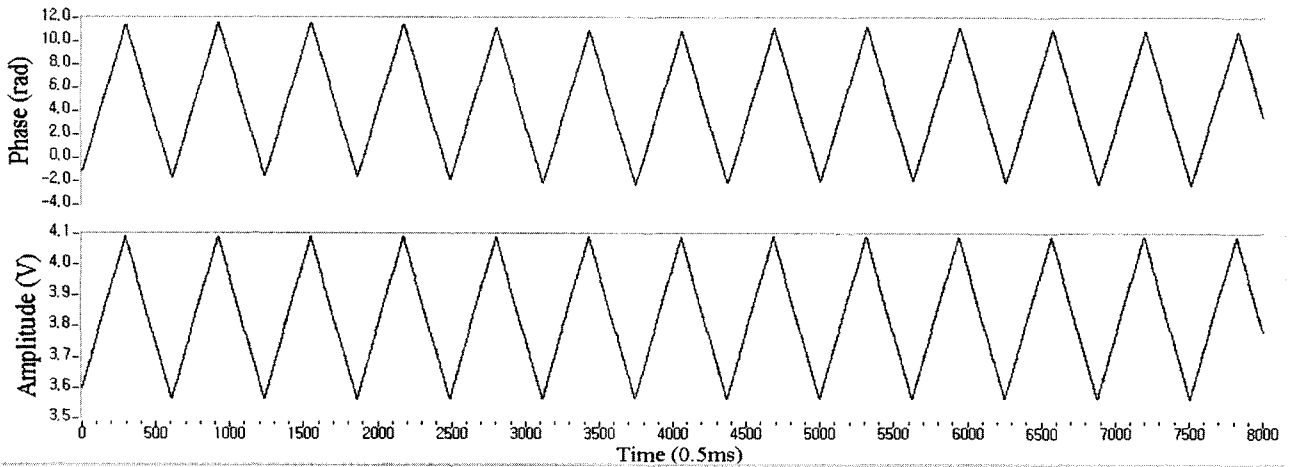


그림 5. 광섬유레이저의 파장변화에 의한 위상변화(위)와 FP 필터에 가해진 삼각파 신호(아래)
 Fig. 5. Reconstructed phase variation (upper trace) and voltage signal applied to FP filter (lower trace).

에는 식 (4)로부터 계산되는 시간지연을 사용할 수 없으며 Lissajous 패턴을 관측하면서 시간지연을 조절하는 방법을 사용하여야 한다. 사인파 변조의 경우 PD출력은 Bessel 함수형태로 전개되고 위상변화는 고조파(harmonics)의 조합에 의해서 얻어지므로 변조주파수를 중심으로 하는 대역통과필터를 사용할 경우 원하는 위상변조를 얻을 수 없게 된다. 따라서 램프신호와 대역통과필터를 사용하는 것이 보다 높은 신호대잡음비를 얻을 수 있는데 광전자식 위상변조기(electro-optic phase modulator)를 사용한다면 보다 자유로운 형태의 변조가 가능할 것이다. 그림 4는 레이저의 파장이 삼각파로 변조되는 경우 PD출력을 시간지연샘플링하여 얻은 두 신호열이며(이때의 시간지연은 1.476×10^{-4} s) 원형의 Lissajous 그래프로부터 두 신호열의 위상차가 90° 임을 알 수 있다.

그림 5는 arctangent 복조와 phase unwrapping으로 계산된 레이저의 출력파장변화를 보이며 출력의 단위는 radian이다. 하단의 삼각파형은 FP 필터에 가해진 삼각파 변조전압이다. DAQ(data acquisition) 보드를 이용하여 컴퓨터로 읽어 들인 PD신호를 Labview™ 프로그래밍을 이용하여 신호처리 하였다.

5. 레이저 파장변화 calibration

구성한 광섬유레이저와 파장변화분석기법을 광섬유 격자 등의 센서에 사용할 경우 출력위상을 파장변화, 또는 이에 상응하는 물리량으로 변환하는 과정이 필요하다. 파장변화와 출력위상간의 관계는 식 (2)와 같이 주어졌으며 간섭계의 팔길이차이(d)가 두 값의 비례를

결정하는 가장 큰 역할을 한다. 광섬유의 길이 차이를 정확하게 측정하기는 어려우므로 간섭계의 FSR을 측정하여 d 를 계산하였다. BBS를 Mach-Zehnder 간섭계에 입사시키고 OSA(optical spectrum analyzer)를 이용하여 파장에 따른 간섭계 출력변화를 그림 6과 같이 나타내었다. 한 주기(FSR)만 측정할 경우 OSA의 정밀도에 의한 제약과 스캔과정 중 온도변화에 따른 간섭신호의 변동에 의하여 정확한 계산이 이루어질 수 없으므로 40 nm의 파장범위에서 형성된 다수의 간섭주기를 측정하고 이를 linear fitting하여 d 를 계산해 내었다. 그림 7은 각 파장대역에서 측정된 주기와 이를 linear fitting한 결과이다. 식 (1)을 변형할 경우 한 주기의 신호변화를 발생시키는 간섭계의 FSR은 다음 식과 같이 구해진다.

$$FSR_{MZ} = \frac{\lambda^2}{nd - \lambda} \approx \frac{\lambda^2}{nd} \quad (7)$$

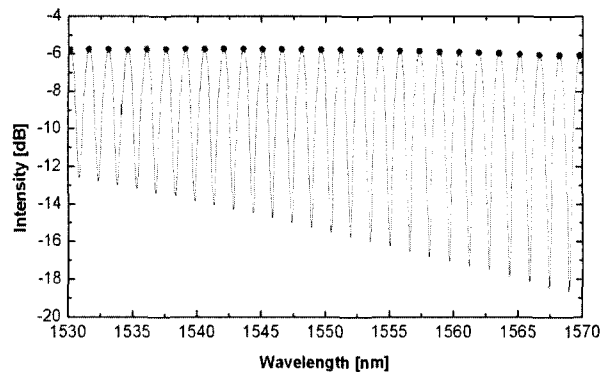


그림 6. Mach-Zehnder 간섭계의 파장에 따른 투과특성
 Fig. 6. Transfer characteristic of M/Z interferometer.

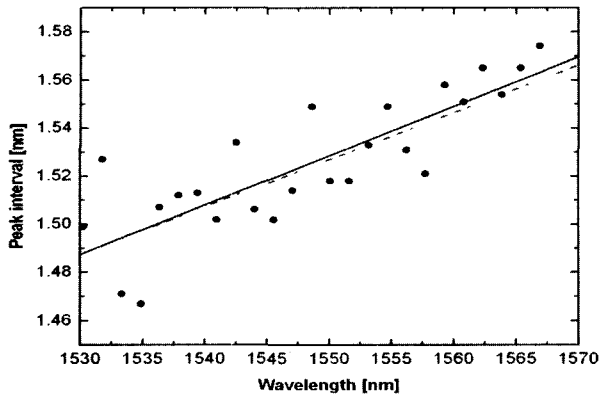


그림 7. Mach-Zehnder 간섭계의 파장에 따른 FSR 측정치(실선 : linear fitting 선, 점선 : 이론치)

Fig. 7. FSR values of Mach-Zehnder interferometer according to wavelength.(solid line : linear fitting line, dotted line : theoretical value)

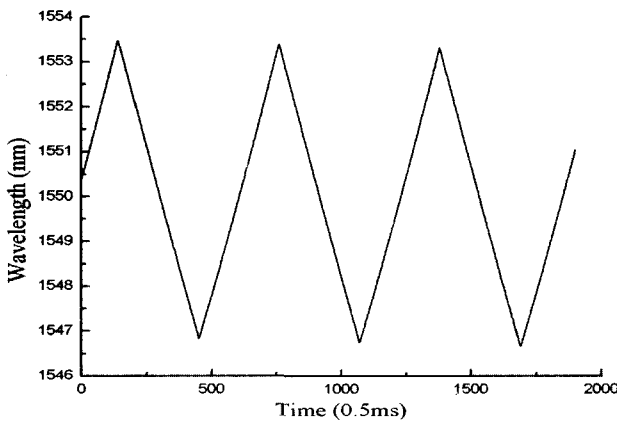


그림 8. 복원된 광섬유레이저의 파장변화

Fig. 8. Calibrated wavelength output.

팔길이차 d 를 변화시키며 FSR_{MZ} 를 그리고 측정결과와 linear fitting 결과와 비교하여 두 그래프를 가장 근접 하게 하는 $d=1.078$ mm의 결과를 얻었다. 이 값

을 이용하여 그림 5의 위상변화량을 파장변화량으로 변환한 것을 그림 8에 나타내었다.

6. 간섭계의 외란에 의한 출력변화제거

간섭계를 이용하는 신호처리에서 가장 흔히 겪게 되는 문제는 주변의 미세한 온도변화에 따라 발생하는 위상흐름(thermal phase drift)이다. 광섬유의 굴절률 n 이 온도에 따라 미세하게 변화하여 발생하는 것으로 광원의 파장변화에 무관하게 간섭계 출력이 변화한다. 광원의 파장변화가 느리거나 정지해 있는 경우라면 위상흐름과 파장의 변화를 분리할 수 없으나 본 논문의 경우는 수 Hz이상의 변조신호에 의하여 파장이 변화하므로 $\ll 1$ Hz의 위상흐름을 필터링을 이용하여 분리할 수 있다. 그림 9는 위상흐름에 따른 출력의 변화와 디지털필터링을 통해서 위상변화를 제거한 경우의 출력이다. 광전자식 광도파(waveguide)형태의 Mach-Zehnder 간섭계를 사용한다면 간섭계의 팔길이가 매우 작아서 위상흐름은 현저히 줄어들고 그 변화의 속도 또한 매우 작아지므로 보다 정밀한 측정과 폭넓은 측정 주파수 범위를 확보할 수 있을 것이다.

III. 결 론

광섬유격자센서 어레이의 출력을 파악할 목적으로 파장가변형 광섬유레이저를 구성하고 그 파장변화량을 시간지연샘플링 기법을 이용하여 측정하는 방법을 제안하고 실험을 통하여 구현하였다. 6.5 nm의 파장스캔 범위에서 2 kHz의 샘플링주파수를 이용하여 ~ 20 pm의 파장분해능을 얻었으며, 주파수 응답특성이 뛰어난 위상변조기를 간섭계에 적용한다면 보다 향상된 분해능을 얻을 수 있음을 이론적인 해석을 통하여 증명하

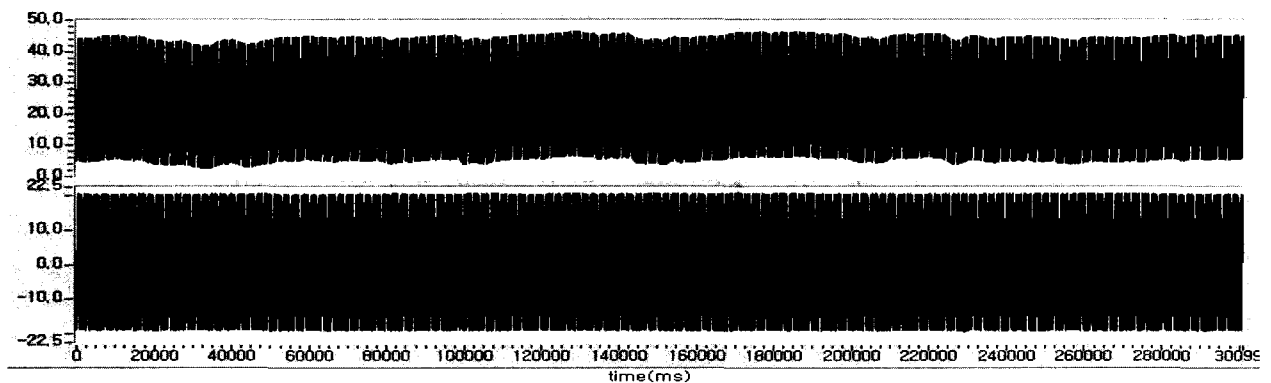


그림 9. 온도에 따른 출력의 변화(위)와 디지털필터링을 이용한 위상흐름의 제거(아래)

Fig. 9. Thermal phase fluctuation (upper) and digitally filtered output (lower).

였다. 제안한 기술은 절대적인 파장이 아닌 상대적인 파장의 변화량을 정밀하게 측정하는 것으로 광섬유격자센서 어레이의 출력을 해석하거나 OFDR(optical frequency domain reflectometry) 등의 정밀한 파장변화량 측정이 요구되는 계측응용에 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 현재 광섬유격자 어레이의 출력분석에 제안한 기법을 적용하는 연구가 진행 중이다.

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] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 16, pp. 1370-1372, Aug. 1993.

[3] 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.

[4] M. A. Davis, D. G. Bellemore, M. A. Putnam, and A. D. Kersey, "Interrogation of 60 fibre Bragg grating sensors with microstrain resolution capability," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 15, pp. 1393-1394, Jul. 1996.

[5] A. Dandridge, A. B. Tveten, and T. G. Giallorenzi, "Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier," *IEEE J. Quantum Electron.*, JQE-18, pp. 1647-1653, Sep. 1982.

[6] M. Song, S. Yin, and P. B. Ruffin, "Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 7, pp. 1106-1111, Apr. 2000.

저 자 소 개



송 민 호(정회원)
 1990년 서울대학교 전기공학과 학사졸업.
 1997년 서울대학교 전기 공학부 박사졸업.
 1997~2000년 미국 PennState 전기 공학과 Post- Doctor.

2000년-현재 : 전북대학교 전자정보공학부 조교수
 <주관심분야 : 광센서계측>



김 종 섭(학생회원)
 1993년 중국 장춘광학기계학원 정밀기계학과 학사졸업.
 1993~2000년 중국 국가지진국 기술원 근무. 2003년 전북대학교 석사졸업. 현재 전북대학교 대학원 제어계측 공학과 박사과정

<주관심분야 : Fiber Bragg grating>

