

시간지연 샘플링을 이용한 광섬유 격자 센서어레이의 선형 복조

김종섭 · 송민호[†]

전북대학교 전자정보공학부

☎ 561-756 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

(2003년 11월 25일 받음, 2004년 1월 13일 수정본 받음)

파장가변형 광섬유레이저로 광섬유격자 센서어레이를 복조하는 방법을 제안하였다. 레이저의 출력파장을 시간지연 샘플링으로 분석하고 이를 이용하여 기존 시스템의 비선형적 동작특성을 개선하였다. 계산된 파장값은 센서어레이 출력파장의 각 피크에 할당되어 파장가변필터의 비선형성에 영향받지 않고 가해진 물리량에 대하여 항상 선형적인 출력을 얻게 하였다. 실험을 통하여 약 20 pm의 분해능을 얻었으며 이는 고속의 위상변조를 사용할 경우 크게 개선될 수 있음을 보였다.

주제어 : fiber Bragg grating, fiber laser, strain sensor, Fabry-Perot filter, time-delayed sampling.

I. 서 론

1980년대 후반 Meltz 등에 의하여 효율적인 제조기법이 개발된 광섬유격자는^[1] 파장인코딩(wavelength encoding)에 따른 우수한 준분배형(quasi-distributive) 센서특성으로 빌딩, 교량 등의 복합구조물에 적용하여 구조적 안전성을 스스로 감지할 수 있게 하는 이른바 지능형구조물(smart structure)의 구현에 가장 적합한 센서로 여겨진다. 하나의 광섬유라인에 다수의 광섬유격자를 연결한 준분배형 센서시스템을 구현하기 위해서는 출력단에서 브래그 파장을 분리하고 그 변화를 정밀하게 측정하는 다중화기술이 필요하다. 이를 위하여 시-, 공간-, 파장분할 다중화방식(time-, spatial-, wavelength division multiplexing) 등이 다양하게 제안되었으며^[2] 그중 파장가변 FP(Fabry-Perot) 필터를 이용하여 브래그 파장의 정보를 시간축에서 신호처리하는 기법이 널리 사용되어 왔다.^[3] 광폭광원(broadband source, BBS)이 센서어레이에 입사하고 각 광섬유격자 센서에서 반사된 스펙트럼은 투과파장(passband)이 선형적으로 변조되는 FP 필터를 통과하여 PD(photodetector)에서 센서의 수에 해당하는 피크파형을 발생시킨다. FP 필터의 파장변화가 시간에 따라 선형적임을 가정할 때 피크간의 시간차는 각 센서의 브래그파장 차이에 비례하므로 시간차의 변화를 검출하여 가해진 물리량을 측정하게 된다. 이 방법은 기존의 시분할, 파장분할 다중화 방식에 비하여 센서간의 거리나 WDM(wavelength division multiplexing) 소자의 분광특성에 따른 구조적, 기능적 제한이 없어 시스템구성이 자유롭다는 장점을 갖는다. 그러나 FP 필터의 투과파장이 시간에 따라 선형적으로 변화한다는 가정은 투과파장을 변조하는 PZT(piezoelectric transducer)의 비선형 동작에 의해서 제한되어지며 이에 따라 계측의 반복성과 측정정밀도가 저하되는 문제를 갖게 된다. 이를 해결하기 위하여 기준용 FP 필터나^[4] 가스 셀의 흡수스펙트럼을^[5] 기준과

장으로 사용하는 방법이 제안된 바 있다.

본 논문에서는 파장가변 필터의 비선형 동작에 의한 성능저하를 해결하기 위한 방법으로 FP 필터를 공진기내에 삽입하여 발진파장을 변조할 수 있도록 구성한 광섬유레이저를 광원으로 사용하였다. 광섬유레이저의 출력을 간섭계와 시간지연 샘플링 기법을 이용하여 정밀하게 분석하고 그 계산된 파장을 시간축 상의 각 피크에 할당하여 FP 필터의 비선형적 동작특성에 무관하게 정밀한 측정을 할 수 있는 방법을 제안하였다. 4개의 광섬유격자로 이루어진 센서 어레이를 이용하여 실험한 결과 약 20 pm의 파장변화측정 정밀도와 함께 선형적인 측정 결과를 얻을 수 있었다.

II. 광섬유레이저 출력파장의 분석

FP 필터의 비선형 동작에 영향 받지 않기 위해서는 필터 투과파장의 변화를 직접적으로 분석해야 하므로 BBS는 사용할 수 없으며 FP 필터에 의해서 직접적으로 파장이 변하는 파장가변형 광원이 필요하다. 그림 1과 같이 FP 필터를 공진기내부에 삽입하여 광섬유레이저를 구성하면 그 출력파장은 FP 필터에 의해 결정되며 출력을 센서 어레이와 간섭계로 동시에 공급하여 시간축에서 피크가 발생하는 시점의 파장값을 실시간으로 파악할 수 있게 된다. 또한 광섬유레이저의 높은 출력으로 BBS에 비하여 출력의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 크게 개선하는 효과도 얻을 수 있다.^[6] 실험에서 사용한 광섬유레이저는 약 20m의 에르븀 첨가 광섬유(erbium doped fiber, EDF), 980 nm 펌프레이저, 광차단기(optical isolator), 광섬유형 FP 필터 등을 조합하여 구성하였다. 사용한 FP 필터(Micron Optics)의 FSR(free spectral range)은 약 60 nm로 EDF의 증폭대역에서 하나의 파장만이 발진 될 수 있게 하였다. 발진한 광섬유 레이저는 ±10% 범위의 불규칙한 출력변화가 지속되었으나 본 논문에서 사용한 시간지연 샘플링기법은 샘플링주파수에 비하여 현저하게 느린 출력변화에는 영향

[†]E-mail: msong@moak.chonbuk.ac.kr

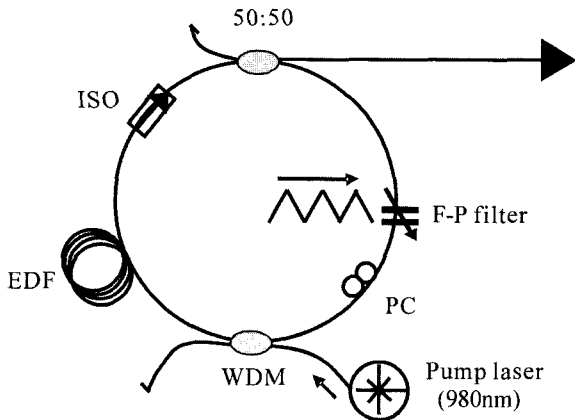


그림 1. FP 파장가변 필터를 이용한 광섬유 레이저.

받지 않으므로¹⁷⁾ 공진기 내부의 편광조절기를 조절하는 이외의 출력안정화 노력은 하지 않았다.

삼각파형으로 변조된 광섬유레이저의 출력을 광섬유 방향성 결합기(directional coupler)를 이용하여 센서어레이에 조사하고 일부는 광섬유 마하젠더(Mach-Zehnder, M/Z) 간섭계로 보내어진다. 간섭계의 한쪽 팔은 램프(ramp)신호로 위상변조되며 간섭계 출력신호는 위상변조신호의 한 주기안에서 일정한 시간지연을 두고 두 번 샘플링 된다. 샘플링으로 얻어진 두 신호열은 arctangent demodulation과 phase unwrapping을 통하여 파장변화에 비례하는 위상신호가 추출된다.¹⁷⁾ 코사인 형태의 간섭계 출력에서 위상정보를 추출하는 대표적인 방법으로 PGC(phase generated carrier) 기법이¹⁸⁾ 널리 사용되어 왔으나 시간지연 샘플링은 신호처리가 단순하며 광회로의 손실이나 광신호의 편광변화 등에 영향 받지 않는 장점을 가진다. FP 필터에 약 3 Hz의 삼각파를 가한 후 시간지연 샘플링 기법으로 출력파장의 변화를 분석한 결과를 그림 2에 나타내었다. 광섬유 M/Z 간섭계는 2 kHz의 램프신호로 위상변조 하였으며 위상변조 주파수가 곧 샘플링주파수가 되므로 이를 증가시킬 경우 파장분석의 정밀도는 더욱 향상된다.

추출된 위상은 식 (1)과 같이 표현되므로 광섬유코어의 굴절률과 M/Z 간섭계의 팔길이차를 대입하면 이로부터 파장의 변화량, 즉 스트레인 정보를 계산할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (1)$$

간섭계의 팔길이차 d 값을 물리적으로 실측하는 것은 매우 어려우므로 다음 식의 관계를 이용하여 M/Z 간섭계의 FSR로부터 팔길이차를 계산하였다.

$$FSR_{M/Z} = \frac{\lambda^2}{nd - \lambda} \approx \frac{\lambda^2}{nd} \quad (2)$$

간섭계의 FSR은 광파장분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 이용하여 쉽게 측정할 수 있으나 파장대역에 따라 그 값이 변화하며 한 주기의 FSR만 측정할 경우 OSA의 정밀도에 의한 제약과 스캔과정 중 간섭신호의 변동에 의하여 정확한 측정이 이루어지지 못한다. 따라서 그림 3(a)와 같이 1520~1620

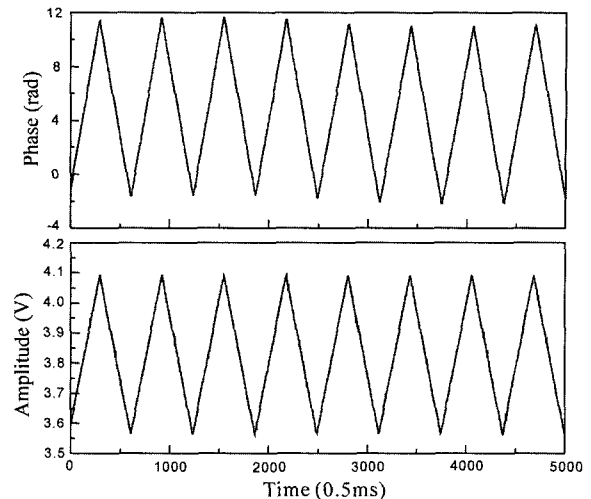
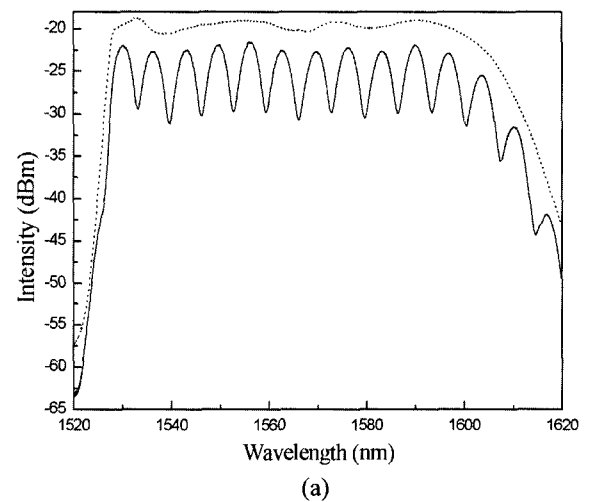
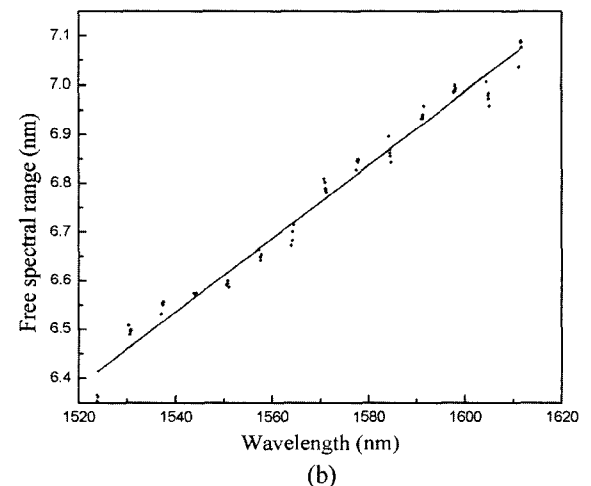


그림 2. 위상지연샘플링을 이용하여 추출한 위상(위)과 FP 필터의 구동전압(아래).



(a)



(b)

그림 3. M/Z 간섭계의 FSR 측정 (a) 간섭계의 투과 스펙트럼 (b) 파장에 따른 FSR 측정치와 linear fit.

nm 파장범위에서 형성된 다수의 간섭주기를 측정하여 fitting 하고 이 실측결과에 가장 근접한 결과를 얻을 수 있는 팔길이

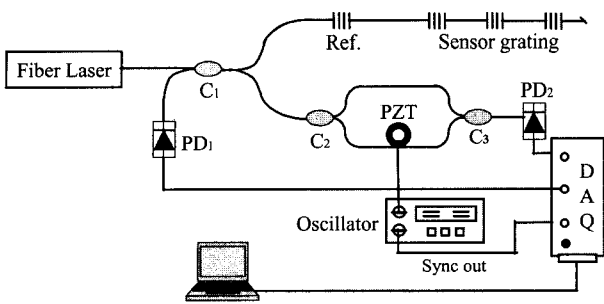


그림 4. 실험 개략도. C_{1,2,3}: 광섬유 방향성 결합기, PD: 광검출기, Ref.: 기준 격자, PZT: 압전소자형 위상변조기, Sync out: 시간지연 샘플링을 위한 외부 클럭.

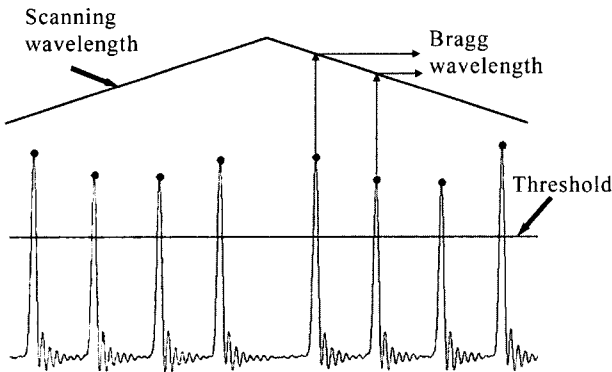


그림 5. 피크의 위치를 브래그 파장으로 변환.

차를 선택하여 확률적 오차를 최소화하였다. 그림 3(b)는 파장에 따른 FSR을 4차례 측정된 것이며 식 (2)와 fitting 결과로부터 $d = 0.225 \text{ mm}$ 의 값을 얻었다.

III. 광섬유격자 센서 어레이의 선형 복조

구성한 파장가변 광섬유레이저와 시간지연 샘플링 기법을 이용하여 광섬유격자 센서어레이의 출력을 복조(demodulation)하였다. 삼각파로 변조된 광섬유레이저의 출력은 그림 4와 같이 일부는 광섬유격자 어레이로 나머지는 광섬유 M/Z 간섭계로 향한다. 간섭계를 통과한 레이저의 PD 출력은 시간지연 샘플링되어 파장의 변화가 지속적으로 모니터링되며 광섬유격자 어레이에서 반사된 스펙트럼은 센서의 수만큼 피크파형을 갖는 PD 출력을 발생시킨다. 피크검색 알고리즘에 의해서 피크의 위치가 파악되면 그림 5와 같이 그 시간에 해당하는 파장값이 각 센서의 출력값으로 할당되어 디스플레이되도록 프로그램하였다.

기술한 방법으로 실제 스트레인 측정실험을 하기 위하여 센서격자에 압전소자를 부착하고 이에 다양한 파형을 인가하였으며 그림 6에서 인가한 파형이 성공적으로 복원되고 있음을 알 수 있다. 이 실험에서 FP 필터는 10 Hz로 변조되었으며 이는 센서의 브래그파장 변화를 읽어내는 샘플링 주파수로 작용하므로 시스템의 대역폭(bandwidth)을 넓히기 위해서는 광원 파장의 변조주파수를 증가시키는 것이 필요하다. FP 필터의 변조주파수가 파장변화의 샘플링 주파수로 작용하는 반면 M/Z

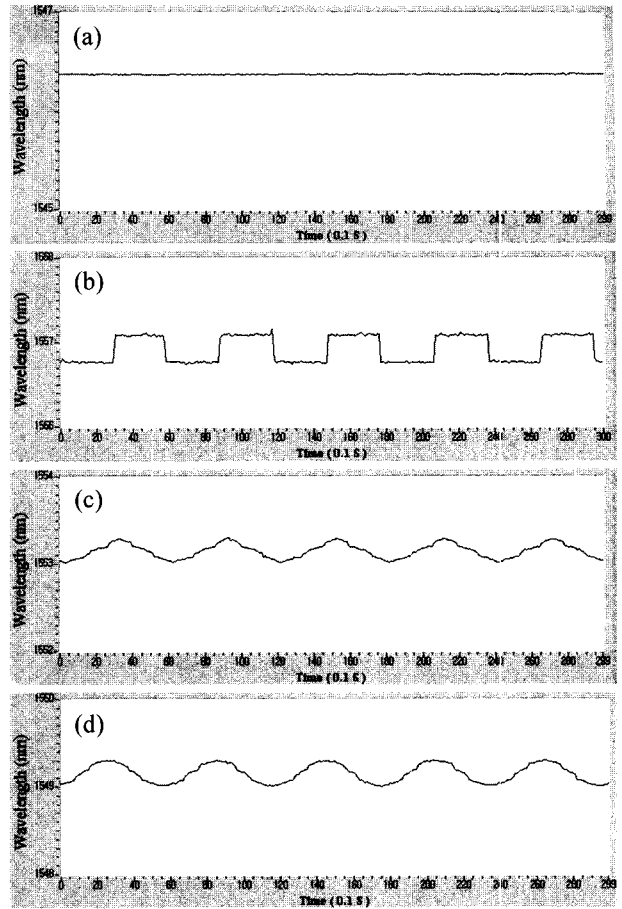


그림 6. 다양한 스트레인 파형 측정 (a)기준격자, (b)-(d) 센서격자.

간섭계의 위상변조 주파수는 시스템의 파장변화 해상도를 결정하게 되므로 측정정밀도를 높이기 위해서는 간섭계의 위상변조 주파수 또한 증가시켜야 한다. 본 실험에서는 위상변조기의 제약에 의하여 간섭계의 변조주파수는 2 kHz로 제한되었다. FP 필터가 구동전압에 대해서 비선형적인 동작을 보이는 경우에도 제안하는 시스템은 선형적인 출력을 나타냄을 보이기 위해서 FP 필터를 사인파로 변조하면서 실험한 후 이를 삼각파형으로 변조한 경우와 비교하였다. 사인파로 FP 필터를 변조한 경우는 필터의 비선형성을 크게 과장한 것으로 생각할 수 있다. 그림 7(a)는 삼각파로 7(b)는 사인파로 FP 필터를 변조한 경우이며 두 경우에 시간적인 피크의 상대적인 위치는 확연하게 다른 것을 알 수 있다. 따라서 피크의 간격에서 스트레인을 계산하는 기존의 방법을 사용한다면 FP 필터가 사인파로 변조된 경우, 즉 필터의 비선형성이 큰 경우에는 출력값에 큰 오류가 발생할 것이다. 그러나 제안하는 시스템의 경우 각 피크에 할당된 파장값들은 두 경우 동일하여 시간적인 피크의 위치변화, 즉 FP 필터의 비선형성에 영향 받지 않음을 확인할 수 있다.^[9]

IV. 정밀도와 오차의 분석

제안하는 시스템의 시간지연 샘플링에 의한 양자화 오차

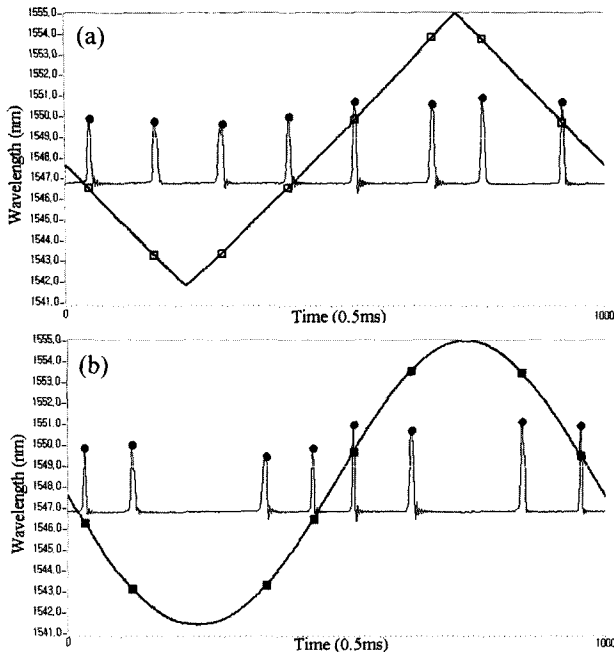


그림 7. 파장변조주파수를 달리한 경우의 출력 (a) 삼각파로 변조, (b) 사인파로 변조.

(quantization error) R 은 다음 식과 같이 표현된다.

$$R = \frac{\Delta\lambda}{f_s/2f_{FP}} = \frac{\Delta\lambda \cdot 2f_{FP}}{f_s} \quad (3)$$

이 식에서 $\Delta\lambda$, f_{FP} 는 각각 FP 필터의 스캔범위와 변조주파수이며 f_s 는 M/Z 간섭계의 위상변조 주파수로서 시간지연 샘플링의 주파수와 동일하다. 본 논문에서 사용한 패러미터를 적용하여 계산한 측정 분해능은 약 20 pm이며 실험을 통해서도 근사한 결과를 얻었다. 정밀한 측정을 위해서는 분해능을 향상시킬 필요가 있는데, FP 필터의 스캔 범위와 스캔 주파수를 조절하는 것은 한계가 있으므로 M/Z 간섭계의 위상변조 주파수 f_s 를 증가시키는 것이 현실적인 방법이 될 것이다. 그러나 실험에서는 사용한 PZT 위상변조기의 공진주파수(31 kHz)에 의하여 램프신호를 이용하는 위상변조의 주파수가 제한되는 문제를 나타내었다. 사인파 위상변조신호를 사용하면 PZT의 응답특성에 제한받지 않고 주파수를 증가시킬 수 있으나 이 경우 출력신호에 bandpass 필터링을 할 수 없게 되어 출력의 신호대잡음비가 감소하게 된다. 따라서 주파수 대역폭 (frequency bandwidth)이 큰 electro-optic 위상변조기를 이용하여 높은 주파수의 램프신호를 가한다면 효율적으로 측정분해능을 향상시킬 수 있을 것이다. 한편 측정오차 E 는 검출한 피크위치와 시간지연 샘플링으로 계산한 파장의 정확도에 의해서 결정되는데 이는 다음 식과 같다.

$$E = \frac{1}{4f_s} \cdot \frac{2f_{FP} \cdot \Delta\lambda}{f_s \cdot FSR_{MZ}} \quad (4)$$

FSR_{MZ} 는 M/Z 간섭계의 투과특성을 나타내는 함수로 식 (2)에서 기술한 바와 같이 간섭계의 팔 길이차 d 에 의해서 결정

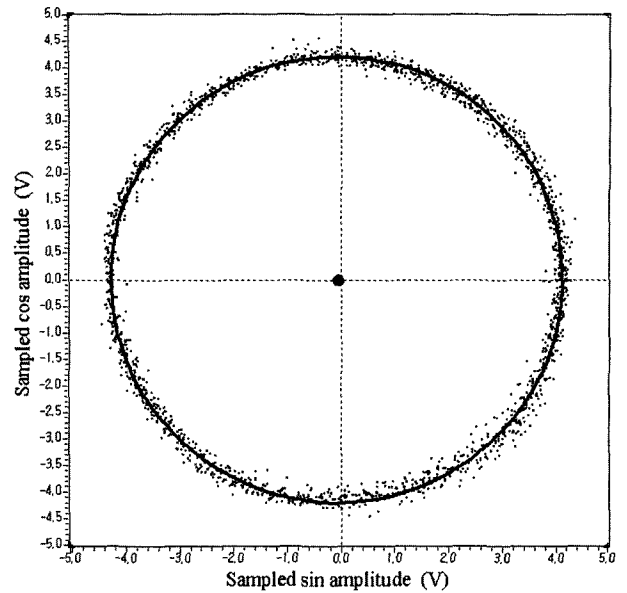


그림 8. 신호열의 Lissajous 그래프와 ellipse model.

되는 값이며 이를 크게 할수록 시스템의 계통오차는 작아지게 된다.

시간지연 샘플링에 의해서 발생한 신호열 간의 상대적 위상차가 조건을 완전하게 만족하지 못할 때에도 측정오차가 발생하므로 Lissajous 그래프를 최대한 원에 가깝게 하는 시간지연을 설정하여 오차를 최소화하여야 한다. 그러나 시각적인 판단만으로 Lissajous 그래프의 원형정도를 정확하게 분석하기 어려우므로 본 논문에서는 Lissajous 그래프를 타원모델로 least square fitting하여 오차를 분석하였다. $\pi/2$ 의 위상차 조건을 완전하게 만족하는 경우는 fitting한 타원의 장축, 단축의 길이가 같고 (0, 0)위치에 중심을 두고 있을 때이다. 그림 8은 실험에서 얻은 Lissajous 그래프를 타원모델로 least square fitting한 결과로서 원점이(-0.02, -0.03), 반경이 4.2인 원의 형태이며 MSE(mean squared error)는 0.034이고 이에 따라 복조된 광원파장의 평균오차는 0.34%이다.

V. 결 론

본 논문에서는 파장 가변형 광섬유레이저와 시간지연 샘플링 기법을 이용하여 광섬유격자 센서어레이를 복조하는 방법을 제안하였다. 기존의 BBS가 아닌 광섬유 레이저를 사용하여 출력의 신호대잡음비를 크게 개선하였으며 M/Z 간섭계와 시간지연 샘플링을 이용한 광원파장의 분석은 파장가변 FP 필터의 비선형성에 영향 받지 않는 측정을 가능하게 하였다. 4개의 광섬유격자로 이루어진 센서어레이를 이용하여 실험한 결과 광섬유레이저의 파장이 비선형적으로 변조되는 경우에도 출력의 선형성이 유지되는 것을 확인하였다. 광섬유레이저의 파장을 20 Hz의 삼각파로 14 nm 범위에서 변조하며 2 kHz의 시간지연샘플링을 이용하여 얻은 시스템의 측정정밀도는 약 20 pm이며 이는 주파수 응답특성이 우수한 electro-optic 위상변조기를 사용하여 보다 빠른 위상변조를 할 경우 크게 향상

시킬 수 있음을 보였다. 제안한 센서어레이의 복조기법은 최근 많은 관심을 받고 있는 각종 복합구조물의 상시 안전도 관측에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 생각되며 현재 이에 관한 후속연구를 활발히 진행하고 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 15, pp. 823-825, 1989.

[2] 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. 1442-1462, 1997.

[3] 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, 1993.

[4] C. Miller, T. Li, J. Miller, F. Bao, and K. Hsu, "Multiplexed fiber gratings enhance mechanical sensing," *Laser Focus World*, vol. 34, no. 3, pp. 119(1), 1998.

[5] 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.

[6] 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, 1998.

[7] 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, 2000.

[8] A. A. Dandridge, A. B. Tveten, and T. G. Giallorenzi, "Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 10, pp. 1647-1653, 1982.

[9] Z. Jin and M. Song, "Fiber grating sensor array interrogation by using time-delayed sampling of fiber laser," *Tech. Digest OFS-16*, Th2-5, Nara, Japan, pp. 560-563, 2003.

Linear interrogation of fiber Bragg grating sensor array using time-delayed quadrature sampling technique

Zhong Xie Jin and Minho Song[†]

Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University, Duckjin-Dong 1 Ga, Chonju 561-756, KOREA

[†]E-mail: msong@moak.chonbuk.ac.kr

(Received November 25, 2003, Revised manuscript January 13, 2004)

A fiber laser of which wavelength was scanned by an intra-cavity FP (Fabry-Perot) filter was used to interrogate a fiber Bragg grating strain sensor array. We calculated the wavelength variation of the fiber laser using quadrature signal processing with an unbalanced M/Z (Mach-Zehnder) interferometer and time-delayed sampling technique. The calculated wavelengths are mapped to corresponding temporal reflection peaks from the sensor array, which enables more accurate and stable interrogation without the problems caused by the FP filter's nonlinear characteristics. Wavelength resolution of ~20 pm was obtained in our experimental setup, which could have been greatly enhanced with faster phase modulation.

OCIS Codes : 060.2370, 060.5060, 060.2310.