

## SLD 동조 광원을 이용한 브래그 파장 측정 LPG 센서의 신호처리 시스템

이호준<sup>†</sup> · 배윤경

호서대학교 정보통신공학부 광통신연구실  
Ⓣ 336-795 충남 아산시 배방면 산 29-1 호서대학교 제1공학관 328호

(2004년 4월 1일 받음, 2004년 8월 19일 수정본 받음)

본 논문에서는 광섬유 장주기 격자를 이용한 센서 신호처리 시스템을 구현하였다. SLD와 Fabry-Perot 필터를 이용한 동조 반도체 광원과 Fabry-Perot 필터내의 PZT의 히스테리시스 특성을 보상하기 위한 에탈론 필터를 사용하였으며, 절대적인 기준 파장을 제공하기 위하여 온도 안정화된 광섬유 브래그 격자를 사용하였다. 시스템에서 검출된 신호를 A/D 변환하여 컴퓨터로 입력하고 신호 처리하여 결과를 모니터상에 표시하였다.

주제어 : LPG(long-period grating) sensor, tunable F-P filter, etalon filter, rotation sensor, optical fiber sensor system.

### I. 서 론

광섬유 장주기 격자(long-period fiber grating, LPG)는 다양한 환경에서 동작하고, 삽입손실이 작기 때문에 센서로 많이 사용되며, 온도, 스트레인, 굴절률, 힘 등을 측정하기 위한 센서로서 연구되고 있다<sup>[1]</sup>. 또한 광통신 시스템에서는 EDFA(Erbium-doped fiber amplifier)의 이득 평탄화 필터나 대역제한 필터로 사용하는 등 광범위하게 연구되고 있다<sup>[2][3]</sup>. 광섬유 장주기 격자는 광섬유 단주기 격자보다 온도에 따른 중심 파장의 이동량이 7배 가량 많이 변화하고<sup>[4]</sup>, 아크 유도 장주기 격자를 사용할 때 고온에서도 지워지지 않는 특성 때문에 광섬유 장주기 격자를 사용한 센서 신호처리 시스템이 요구되고 있다.

그러나 지금까지의 연구에서는 스트레인 등 물리적인 양에 대한 파장 이동의 선형성에 대하여 연구되었으나<sup>[5][6]</sup> 신호처리 시스템에 대한 구체적인 시스템 구성 방법, 브래그 파장을 얻어내는 수치해석 적용 방법과 측정 결과 등에 관련한 연구가 보고 되지 않았다. 본 논문에서는 SLD(Super-luminescent diode) 동조 광원과 에탈론 필터를 이용한 장주기 격자 센서 신호처리 시스템을 제안하고 이 시스템은 SLD와 F-P(Fabry-Perot) 필터로 구성된 동조 반도체 광원과 F-P 필터내의 PZT의 히스테리시스 특성을 보상하기 위한 에탈론 필터를 사용하였고, 컴퓨터에서 신호처리 하여 모니터에 결과를 표시하였다. 또한 LPG 회전 센서 시스템을 구성하여 OSA(optical spectrum analyzer)에서 측정한 결과와 비교하였다.

### II. 광섬유 장주기 격자 센서 신호처리 시스템

그림 1은 본 논문에서 제안된 광섬유 장주기 격자 센서 신

호처리 시스템의 블록도를 나타내며, 동조 반도체 광원부, LPG 센서 측정부, 광학 기준부로 나눌 수 있다. 동조 광원부에서 발생한 광을 광섬유 장주기 격자 센서로 전달하기 위해서 광 결합기(optical coupler)를 사용하였으며, 광섬유 장주기 격자 센서의 광 전력을 측정하기 위해 광 다이오드(PD)를 사용하였고, 광원부에서 발생하는 파장을 정확히 측정하기 위하여 광학 기준부(optical reference)를 사용하였다.

동조 반도체 광원부는 SLD 구동부, SLD, 대역통과필터, 동조 F-P 필터, TEC 컨트롤러 등으로 구성되어 있다. SLD의 광 출력은 1520-1569nm의 대역통과필터와 F-P 필터를 통과하며 F-P필터의 거울간격을 조절하기 위한 PZT의 전압을 변화시킴에 따라 파장 동조가 가능하도록 시스템을 구성하였다. 그리고 PZT의 동조 파장의 온도 의존성을 제거하기 위하여 F-P 필터를 온도 안정화하였다.

광 결합기에서 나뉘어진 또 다른 광은 광학 기준부로 전달된다. 광학 기준부는 절대적인 기준파장을 제공하기 위한 온도 안정화된 광섬유 브래그 격자(athermal grating)와 주기적인 투과 특성을 갖는 에탈론 필터, 광 신호를 수신하는 PD 그리고 컴퓨터 연결을 위한 ADC(A/D converter)로 구성되어 있다. 동조 반도체 광원부의 F-P 필터의 파장 동조를 위해 사용되는 PZT의 히스테리시스 특성에 의한 비선형성을 보상하기 위해 에탈론 필터를 사용하였다. 광학 기준부에 전달된 광 중에서, 온도 안정화된 광섬유 브래그 격자의 중심파장과 일치하는 광은 반사되어 다시 광 결합기를 통해 PD6으로 전달되고, 중심파장과 일치하지 않는 광은 그대로 통과하여 에탈론 필터를 거쳐 PD5로 전달된다.

LPG 센서 측정부(LPG sensors)에서는 LPG 투과 신호와 기준부의 신호를 각 PD에서 측정하며 이 신호들을 A/D 변환하여 컴퓨터로 전송한다. 이 신호들을 처리하여 파장에 대한 광전력이 보상된 신호를 얻어내고, LPG 브래그 파장을 측정할 수 있다.

<sup>†</sup>E-mail: hojoon@office.hoseo.ac.kr

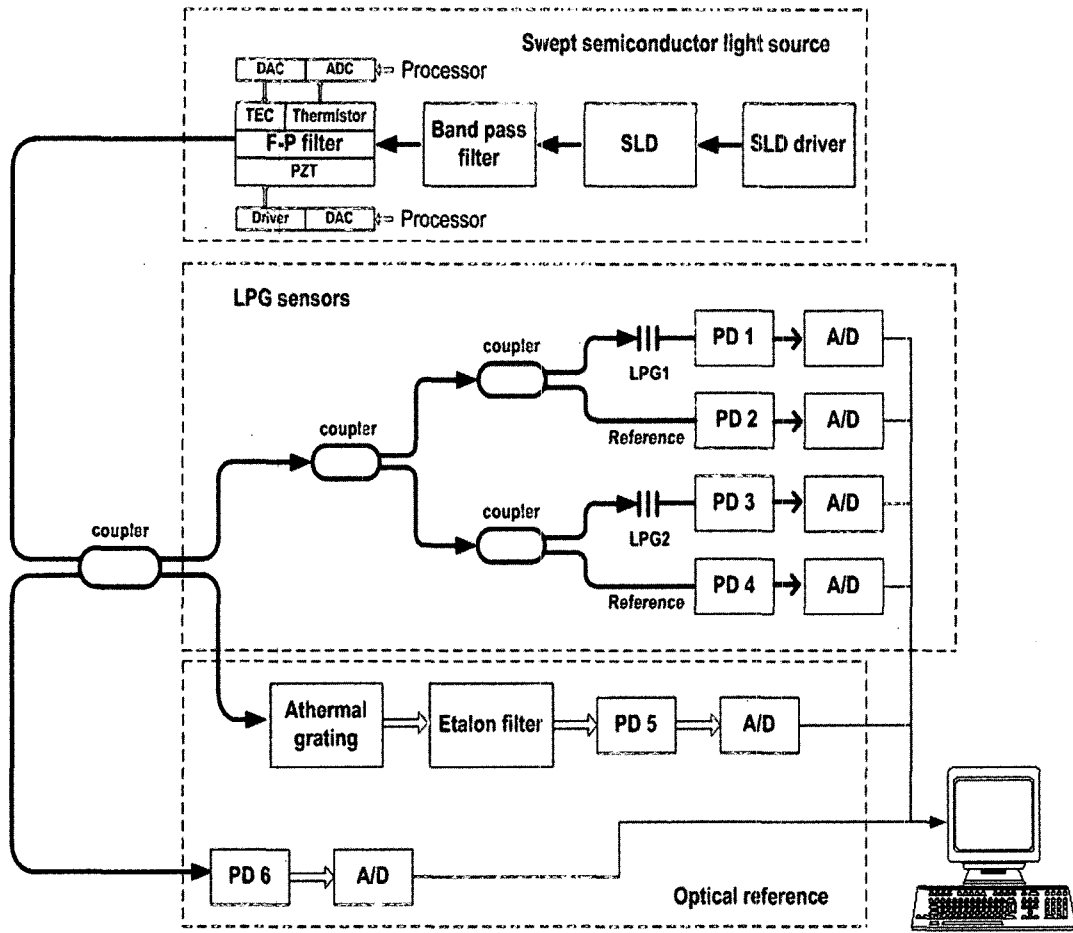


그림 1. LPG 센서 신호처리 시스템 구성도

III. 센서 신호처리 시스템 구성 및 실험

시스템에서 사용된 광원은 중심파장이 1536 nm이고, FWHM (full-width half maximum)은 75 nm인 SLD이며, SLD의 광 파워의 안정성을 위하여 thermistor와 TEC를 이용해 온도 제어를 하였다. 이러한 온도 안정화된 광원을 광섬유 장주기 격자 센서 시스템에 적용하면 장시간 동안 안정적인 측정이 가능하였으며 0.2°C 이내로 안정화하였다.

그림 2는 본 논문에서 사용된 SLD의 출력 스펙트럼(a)와 SLD의 출력이 대역통과 필터를 통과한 광의 스펙트럼(b)를 OSA로 측정하여 나타낸 것이며 분해능은 0.07 nm이다. 사용된 대역 통과 필터의 대역폭은 49 nm이다. 대역통과 필터를 통과한 광 신호는 동조 F-P 필터를 통과한 후 좁은 선 폭의 광원으로 변화된다. 사용된 동조 F-P 필터의 FSR(free spectral range)은 50.53 nm이고 finesse는 약 900이다. PZT의 구동전압에 따라 스캐닝하는 F-P 필터의 출력 스펙트럼을 그림 3에 나타내었으며, 스캐닝 된 세 개의 F-P 필터 신호를 겹쳐서 나타내었다. 여기서 나타낸 광 스펙트럼의 형태는 F-P 필터 입력으로 들어온 광원의 스펙트럼과 F-P 필터의 투과 특성이 곱해진 결과와 같은 형태이다.

동조 반도체 광원으로부터 전송된 광은 3 dB 광 결합기를 통하여 장주기 격자로 전달된다. 본 연구에서는 1552.6 nm의 중심파장을 갖는 광섬유 장주기 격자를 사용하여 실험하였다. 광 결합기를 통하여 광학 기준부로 전달되는 광은 온도 안정화된 광섬유 브래그 격자에 전달되는데, 이 격자는 1525 nm에서 브래그 파장을 갖는다. 광학 기준부의 PD5에

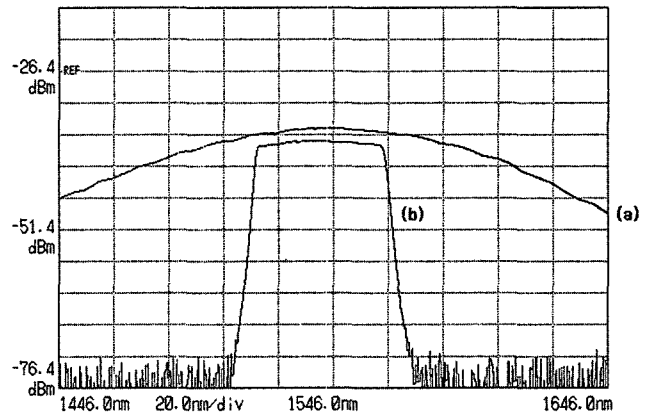


그림 2. SLD와 대역통과필터의 출력 스펙트럼.

서는 에탈론에 의한 일정 파장 간격의 투과특성이 관측되며 이 신호는 동조 필터의 비 선형적인 응답특성을 보상하는 신호처리에 사용된다.

그림 4는 그림 1의 블록도 상에서 FP 필터 구동용 DAC 제어 신호와 각각의 PD에서 측정된 파형을 12bit의 AD변환기를 사용해 컴퓨터로 입력시켜 모니터 상에 표시한 그림이다. 여기서 PZT의 구동전압이 -6~+6V의 범위에 대해 선형적으로 변화하는 모양을 보여주며(a), 이때 동조 반도체 광원의 파장은 1520~1569 nm의 대역에서 변화된다. 이때 광학 기준부에서 측정된 에탈론 필터의 응답특성(b)-PD5와 온도 안정화된 광섬유 브래그 격자(e)-PD6, 그리고 광 전력 기준부(c)-PD2와 LPG 센서를 통과한 신호(d)-PD1을 컴퓨터 모니터에 나타낸다. 시간 축은 ADC의 샘플 수를 나타내며 샘플링 주기는 0.1 ms이며 이 시스템은 약 10초의 측정 속도를 갖는다. 진폭축은 ADC에서 측정된 전압을 나타낸다. 에탈론 필터 응답 특성(b) 중 18,000 부근의 시간축에 나타나는 감쇠는 에탈론 필터 앞에 연결된 온도 안정화된 광섬유 브래그 격자에 의한 반사 때문이다.

SLD의 파장에 따른 광전력의 변화를 보상하기 위하여 기준 광 전력으로 PD2가 사용되며, PD1/PD2의 연산을 하여 파장에 따른 광 전력 변화를 보상할 수 있다. 그림 5에서는 기준부의 신호(a), LPG 센서부의 신호(b) 그리고 파장에 대

한 광 전력 변화가 보상된 스펙트럼(c)을 나타내었다. 광학 기준부의 온도 안정된 에탈론 필터는 F-P 필터 내부의 PZT의 히스테리시스 특성으로 인한 비 선형성을 보상하는 역할을 한다. 실험에서 사용된 에탈론 필터는 100 GHz의 FSR(free spectral range)을 갖는 박막 필터를 사용하였고, F-P 필터의 PZT 전압이 변화함에 따라 에탈론 필터의 응답 특성을 확인함으로써 F-P 필터의 중심 파장 변화를 알 수 있다. 광섬유 장주기 격자 센서 측정부 및 광학 기준부의 광량을 측정하기 위해 PD가 사용되었다. PD에서 수신된 광 신호는 전기신호로 변환되며, 이 전기 신호는 매우 미약하기 때문에 잡음제거와 함께 충분한 증폭을 하여 신호처리 할 수 있는 형태로 구성하였다.

측정된 LPG 센서의 파장을 정확히 얻기 위해서 온도 안정화된 광섬유 브래그 격자의 기준 파장과 에탈론 대역통과 중심 파장  $\lambda_i$  를 사용한다. LPG 센서의 최소점(브래그파장)을 시간축에서  $t$  를 측정하고, 에탈론 투과율이 최대값일 때 시간  $t_i$  를 이용하면 LPG 브래그 주파수의 값을 보간법을 통해 얻을 수 있고, 주파수를 파장의 값으로 변환하며 LPG 브래그 파장을 계산할 수 있다. 신호처리를 위해 사용된 보간법의 식은 다음과 같다. 여기서  $t_i$  는 에탈론의 투과율이 최대 값일 때 시간 축의 값이며,  $f_i$ 는 주파수 축에서 에탈론의 대역통과 중심 주파수이다. 여기서  $i$  는 정수이고  $g$ 는 에탈론의 투과율이 최대 값일 때 주파수에 대한 스캔 시간과의 관계를 나타내는 함수이다.

$$t_1 < t < t_2 \text{ 일 때,}$$

$$t = g(f), t_1 = g(f_1), t_2 = g(f_2), \dots, t_n = g(f_n) \text{ 이고,}$$

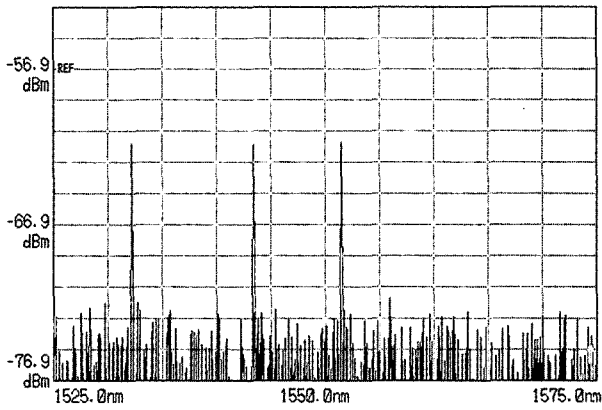


그림 3. 동조 SLD 광원의 출력 스펙트럼

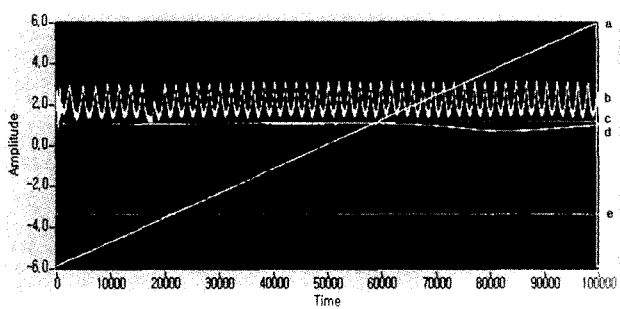


그림 4. F-P filter 인가전압(a) 변화에 따른 LPG의 전송, 에탈론 필터 등의 신호.

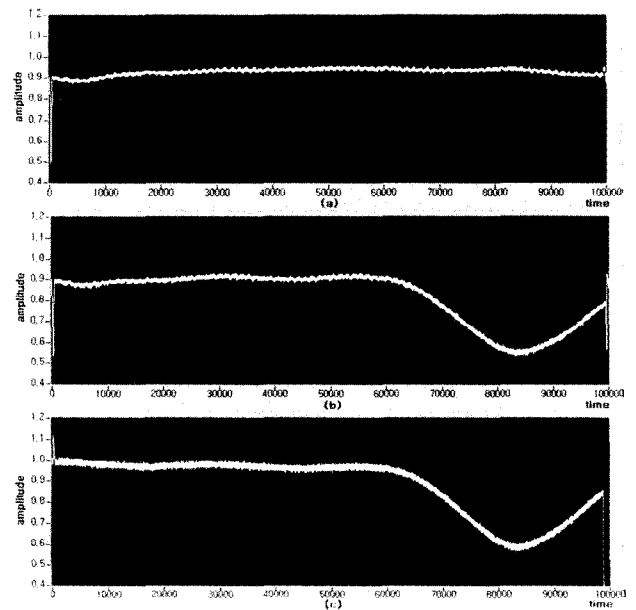


그림 5. PD1(b)와 PD2(a)의 신호와 파장에 따른 광 전력 변화 보상 스펙트럼

$\Delta t = t_2 - t_1, \Delta^2 t = \Delta t_2 - \Delta t_1, \dots, \Delta^n t = \Delta^{n-1} t_2 - \Delta^{n-1} t_1$   
 일 때  $t_0 = t_1$ 이라 하면

$$u_0 = \frac{t - t_0}{\Delta t_0} \tag{1}$$

$$u = u_0 - \frac{1}{\Delta t_0} \sum_{k=2}^n \binom{u}{k} \Delta^k t_0 \tag{2}$$

이고, 먼저 식 (1)을 구하고, 이 결과를 식 (2)에 대입하여  $u_1$ 을 구하고, 구해진  $u_1$ 을 다시 식 (2)에 대입을 반복하여  $u_3$ 를 구한다. LPG 브래그 주파수  $f$ 는 가장 가까운 에탈론 최대값  $t_1$ 으로부터 얻어진  $f_1$ 과 식 (2)에서 구해진 차분 값의 합으로

$$f = f_1 + u_3 \cdot \Delta f \tag{3}$$

가 되며 이 식으로부터 브래그 파장을 구할 수 있다.

#### IV. 회전실험

본 시스템에서 측정을 위해 사용한 광섬유 장주기 격자는 주기적인 아크방전을 이용하여 코어 및 클래딩에 주기적인 직경 변화를 유도하는 방법으로 제작한 것으로<sup>[7]</sup>, LPG의 한 쪽은 고정하고 나머지 한쪽의 광섬유를 회전시켜줌에 따라 광섬유 장주기 격자의 중심파장이 이동한다<sup>[8,9]</sup>.

회전실험을 위하여 그림 6과 같이 시스템을 구성하였으며, 광섬유의 한쪽 부분은 고정시켜두고, 나머지 한 부분에 회전을 가해 주는 방법이며 고정점과 회전점 사이의 거리는 30 cm이다. 시계방향과 반시계방향으로 각각  $6\pi$  씩 회전시켜 주면서 중심파장의 값을 측정하였다. 그림 7은 시계방향으로  $0 \sim +6\pi$  회전시켰을 때의 중심파장의 변화를 나타내었다. 각각의 그래프는 회전을 가하지 않았을 때(a),  $+\pi$ (b),  $+2\pi$ (c),  $+3\pi$ (d),  $+4\pi$ (e),  $+5\pi$ (f),  $+6\pi$ (g) 회전시켰을 때를 나타낸다. 시계방향으로 회전시켰을 때는 광섬유 장주기 격자의 중심파장이 단파장으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 8은 반 시계방향으로  $0 \sim -6\pi$  회전시켰을 때의 중심파장의 변화를 나타내고 있다. 그림 8의 그래프도 회전을 가하지 않았을 때(a),  $-\pi$ (b),  $-2\pi$ (c),  $-3\pi$ (d),  $-4\pi$ (e),  $-5\pi$ (f),  $-6\pi$ (g)회전시켰을 때를 나타내며, 반 시계 방향으로 회전시

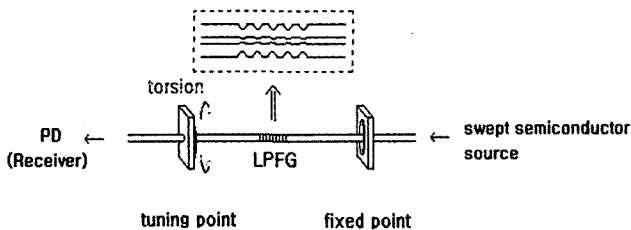


그림 6. 회전 실험의 구성도.

켰을 때는 광섬유 장주기 격자의 중심파장이 장파장으로 이동하였다. 실험 결과 광섬유 장주기 격자의 중심파장은 시계 방향으로 회전시켰을 때 총  $-3.92 \text{ nm}$  만큼 이동했고, 반 시계 방향으로 회전시켰을 때는  $+2.33 \text{ nm}$  만큼 이동했다.

그림 9는 회전에 따른 중심파장의 이동량을 나타내었으며, 시계 방향을 (+) 회전으로 반 시계 방향을 (-) 회전으로 표시하였다. 본 시스템에서 측정한 회전에 대한 브래그 파장 변화를 확인하기 위하여 OSA로 측정한 브래그 파장과 비교하였으며, 본 신호처리 시스템으로 측정한 결과는 ▲으로, OSA로 측정한 결과는 ■로 나타내었다. 두 시스템에서 측정

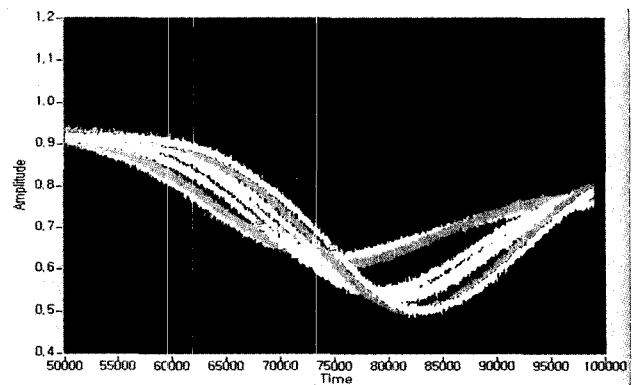


그림 7. 시계 방향 회전 스펙트럼.

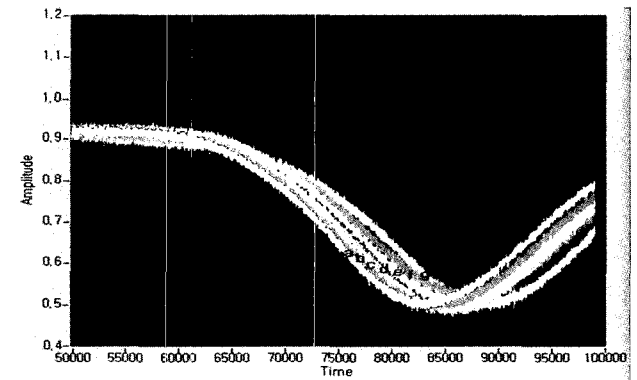


그림 8. 반 시계 방향 회전 스펙트럼.

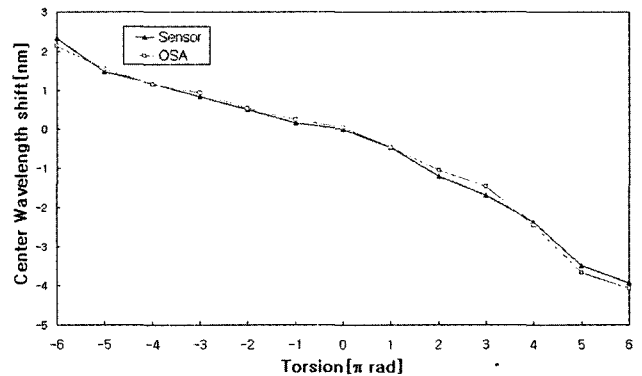


그림 9. 신호처리 시스템과 OSA로 측정된 중심파장 변화.

한 광섬유 장주기 격자의 중심 파장 차이는 평균 0.101 nm로 측정되었다.

### V. 결 론

본 논문에서는 SLD 동조 광원과 에탈론 필터를 이용한 광섬유 장주기 격자 센서 신호처리 시스템을 제안하였다. 온도나 스트레인 그리고 회전 등 외부 물리량의 변화가 광섬유 장주기 격자에 미치는 경우 광 스펙트럼 분석기를 사용하지 않고 실시간으로 측정할 수 있는 센서 신호처리 시스템을 구현하였다. 또한 동조 반도체 광원에서 사용된 PZT의 히스테리시스 특성을 보상하기 위한 에탈론 필터와 절대 파장을 제공하기 위한 온도변화에 안정된 광섬유 브래그 격자를 사용하였다. 이를 통하여 장주기 격자 센서의 선형성을 향상시키고, 장기 계측시 안정성을 향상시킬 수 있었다.

또한 주기적인 아크 방전을 이용하여 코어 및 클래딩에 주기적인 직경 변화를 유도하는 방법으로 제작한 광섬유 장주기 격자를 사용하여 회전 특성을 측정하였으며 OSA 측정 결과와 비교하였다. 그러므로 광섬유 장주기 격자 센서 신호처리 시스템은 여러 물리량 측정 센서 시스템으로 이용될 수 있으며 파장에 따른 광 파워 측정 장치로도 사용될 수 있을 것으로 본다.

### 참고문헌

- [1] R. Kashap, *Fiber Bragg Gratings*, San Diego, CA: Academic, 1999.
- [2] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkings, and P. J. Lemaire, "Long-period fiber-grating based gain equalizers," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp. 336-338, 1996.
- [3] 정철, 인수희, 이호준, "직경 변조 장주기 광섬유 격자 소자를 이용한 EDFA의 이득 평탄화 필터," COOC 2001., FD 3-6.
- [4] Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick, Michel LeBlanc, K. P. Koo, "Fiber Grating Sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [5] Y-J. Rao, Y-P Wang, Z-L Ran, and T. Zhu, "Novel Fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high frequency CO<sub>2</sub> laser pulse," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 1320-1327, 2003.
- [6] V. Bhatia and A. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 9, pp. 692-694, 1996.
- [7] C. Chung, H. Lee, "Wavelength characteristics of arc-induced long-period fiber grating by core and cladding diameter modulation," *LEOS 2001.*, ThO2.
- [8] 인수희, 정철, 이호준, "장력과 회전에 의한 직경 변조 장주기 격자의 투과손실 변화와 중심파장 이동 특성," *Photonics conference 2001.*, F4D3.
- [9] Soohye In, Chul Chung, Hojoon Lee, "The resonance wavelength-tuning characteristics of the arc-induced LPFGs by diameter modulation," *OFS 2002.*, pp. 131-134.

**Long-period grating sensor signal processing system by Bragg wavelength measurement using SLD tunable light source**

Hojoon Lee<sup>†</sup> and Yoonkyung Bae

*Dept. of Information Communication, Hoseo University, Mt. 29-1 Sechul-ri, Baebang-myun, Asan, 336-795*

<sup>†</sup>*E-mail: hojoon@office.hoseo.ac.kr*

(Received April 1, 2004, Revised manuscript August 19, 2004)

A signal processing system of long period grating sensor that works in the optical wavelength domain is proposed. The system is based on a wavelength-swept semiconductor light source that includes an SLD and a F-P tunable filter. The hysteresis effects of PZT in the F-P filter is compensated by using an etalon filter and an athermal Fiber Bragg Grating. The detected signals from the photodiode are transmitted to a computer using an A/D converter and the result of the process is displayed in the monitor.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2370, 050.2770, 050.2230.