

논문 2009-46SC-1-6

더블패스 마하젠더 간섭계를 이용한 광섬유 레이저의 파장검출

(A wavelength readout of a fiber-optic tunable laser using a double-pass Mach-Zehnder interferometer)

박형준*, 김현진*, 송민호**

(Hyoung-Jun Park, Hyun Jin Kim, and Minho Song)

요약

광섬유 격자 센서어레이용 파장가변 광섬유 레이저의 출력파장변화를 복조할 수 있는 시스템을 제안하였다. 광섬유 레이저는 반도체 광증폭기와 Fabry-Perot 필터를 이용하여 제작하였고, 더블패스 마하젠더 간섭계 구조를 적용하여, 90°위상차를 가지는 내부 트리거를 생성하였다. 내부 트리거를 이용하여 얻은 Lissajous 그래프에 원형 피팅을 적용하여 2.51 mrad의 평균위상오차를 얻었다. 실험을 통하여 파장가변필터의 비선형 동작 특성에 의한 광섬유 레이저의 비선형 출력을 확인하였다. 제안한 파장검출 방법을 적용하면 파장가변광원의 비선형성을 보상하여 광섬유격자 센서시스템을 위한 효율적인 광원으로 적용이 가능할 것으로 예상된다.

Abstract

We constructed a simple wavelength readout system for a tunable fiber laser which was used for a fiber Bragg grating sensor array system. A quadrature sampling method was used to demodulate wavelength variations of the tunable laser which consisted of a SOA (semi-conductor optical amplifier) and a fiber-optic Fabry-Perot filter. Internal triggers, which have a 90 degree phase period, have been generated by using a double-pass Mach-Zehnder interferometer. From Lissajous plots with quadrature sampled data, a mean phase error of ~2.51 mrad was obtained. From the wavelength readout experiments, an accurate and fast linear wavelength demodulation has been confirmed.

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

I. 서론

파장가변 광섬유 레이저는 분배형 광섬유격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서시스템과 같이 넓은 파장대역에서 고출력을 내는 입력광원이 필요한 경우에 기존의 저출력 광폭광원(broadband source, BBS)을 대체하는 효율적인 광원으로 각광받고 있다^[1-3].

최근에는 에르븀첨가 광섬유(erbium-doped fiber,

EDF)나 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier, SOA) 등의 광증폭 소자를 쉽게 구할 수 있고 파장가변 필터를 연결하여 손쉽게 원하는 파장대역의 레이저 출력을 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 이러한 파장가변 광섬유레이저를 센서시스템의 입력광원으로 사용하는데 있어 겪게 되는 어려움은 파장변화특성이 입력신호에 대해서 선형적이지 않다는 것이다. 레이저의 발진파장은 파장가변필터의 투과파장에 의해서 결정되며 이를 변조하기 위해서 주로 PZT (piezo-electric transducer) 압전소자를 이용한다. 압전소자는 입력전압의 진폭과 주파수가 입력전압에 대한 출력의 비선형성이 더욱 증가하는 특성을 보이기 때문이다.

파장가변 광섬유 레이저의 비선형특성은 기존의 파장분석기(optical spectrum analyzer, OSA)로는 파악

* 학생회원, ** 정회원, 전북대학교 전자정보공학부
(Division of electronics and information engineering, Chonbuk National University)

※ 이 연구는 2007년 교육인적자원부의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(KRF-2007-521-D00200)

접수일자: 2008년11월17일, 수정완료일: 2009년1월14일

하기 어렵다. OSA의 측정속도가 파장변화의 속도에 비하여 현저하게 느리기 때문이다.

광섬유 마하젠더 간섭계 (Mach-Zehnder interferometer, MZI)는 광섬유 방향성 커플러 (directional coupler)를 이용하여 쉽게 제작이 가능하며 광경로차를 조정하여 파장민감도의 조절이 용이하므로 광섬유 격자센서의 반사파장 복조(demodulator)와 광섬유 레이저의 파장변화 검출 등에 파장필터로 다양하게 적용되었다^[3~5]. 그러나 MZI는 입력파장의 변화에 대해서 코사인 형태의 파워전달함수를 가지므로, 별도의 신호처리 기법을 사용해야 한다^[5~7].

본 논문에서는 선행 연구에서 제안한 더블패스 MZI 구조에서 생성되는 내부 트리거 신호를 이용하여 광섬유 레이저의 파장변화를 복조하였다. 실험을 통하여 파장가변필터의 비선형동작 특성에 따른 레이저의 발진파장 변화를 정밀하게 빠른 속도로 복조할 수 있음을 확인하였다.

II. 본 론

1. 더블패스 마하젠더 간섭계 구조 및 원리

그림 1은 더블패스 MZI의 개략적인 구조를 보인다. 파장이 변조된 광섬유 레이저의 출력은 MZI를 거쳐서 PD2에서 검출된다. 고정된 파장 λ_R 의 광원은 MZI를 통과한 후 기준 FBG에서 반사되고 MZI를 다시 한번 거쳐서 PD1에서 검출된다. PD1과 PD2의 신호를 다음 식(1), (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_{PD2} = I_{ac2} \{1 + B \cos(\omega t + \psi(\lambda) + \phi_0 + \Delta\psi(\lambda))\} \quad (1)$$

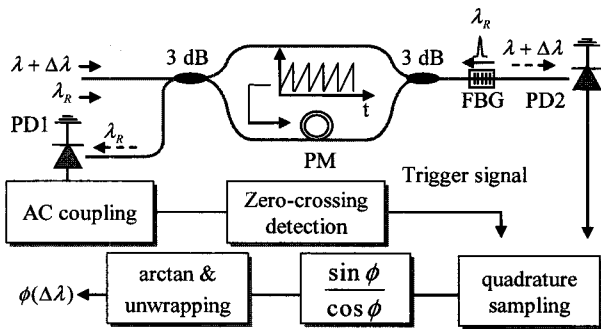


그림 1. 더블패스 MZI의 개념도
Fig. 1. Schematic of a double-pass Mach-Zehnder interferometer (PM: phase modulator, FBG: fiber Bragg grating, PD: photo diode).

$$I_{PD1} = I_{dc1} \{1 + A \cos(\omega t + \psi(\lambda_R) + \phi_0)\} \quad (2)$$

위 식에서, I_{dc1} 과 I_{dc2} 는 간섭신호의 직류성분이고, A와 B는 입력광의 광세기와 손실에 비례하는 크기이다. ω 는 MZI의 한쪽 팔에 위상변조기를 두어 광경로를 변조한 주파수이고, $\psi(\lambda) = 2\pi nd/\lambda$ 와 $\psi(\lambda_R) = 2\pi nd/\lambda_R$ 은 광경로차에 따른 입력파장의 위상성분이며, ϕ_0 는 환경적 외란에 의한 위상변화량이다. 입력광의 파장변화가 크지 않은 경우에 간섭계 출력의 위상변화량 $\Delta\psi(\lambda)$ 는 다음 식과 같이 근사할 수 있다.

$$\Delta\psi(\lambda) = -\frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (3)$$

(n : 광섬유 코어의 굴절률, d : 간섭계의 광경로 차이, λ : 입력 광원의 초기파장, $\Delta\lambda$: 광원의 파장변조량)

식 (1)에서 $\Delta\psi(\lambda)$ 를 추출하기 위해서 본 논문에서는 더블패스 MZI에서 생성되는 내부트리거를 이용하여 Quadrature 샘플링기법을 사용하였다^[8]. 먼저 입사광원의 초기파장을 $\lambda \approx \lambda_R$ 으로 근사할 수 있다면, 식 (2)의 PD1 출력의 교류성분은 코사인함수이므로 연속하는 영점에서의 주기는 항상, π 위상차를 만족하며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\omega t + \psi(\lambda) + \phi_0 = \frac{(2n + 1)\pi}{4}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

이때, 영점주기를 신호취득 내부 트리거로 사용하면, PD2의 간섭신호에서 90도 위상차를 가지는 2개의 샘플 데이터를 얻을 수 있다. 샘플링된 2개의 데이터를 서로 나누고, 탄젠트(tangent)의 역함수를 가하면, 제한된 구간($\pm \pi/2$)안에서 위상이 복원된다. 한정된 구간에서 반복되는 위상을 이어주기 위해 위상풀기(phase unwrapping) 알고리즘을 적용하면 코사인 함수의 위상 변화량을 얻을 수 있으며 식 (3)을 이용하여 정확한 파장복조량을 계산할 수 있다.^[5]

그림 2에서 (a)는 25 Hz 램프파형(5 V)을 한쪽팔의 광섬유가 감긴 원통형 PZT에 인가하여 PD2에서 얻은 MZI의 간섭신호이다. (b)는 기준 FBG에서 반사되어 2배의 광경로차를 경험하고 PD1에서 검출된 광신호를 ac커플링 하였다. ac커플링된 PD2 간섭신호의 영점에서 PD1의 샘플링 트리거 신호가 생성된다.

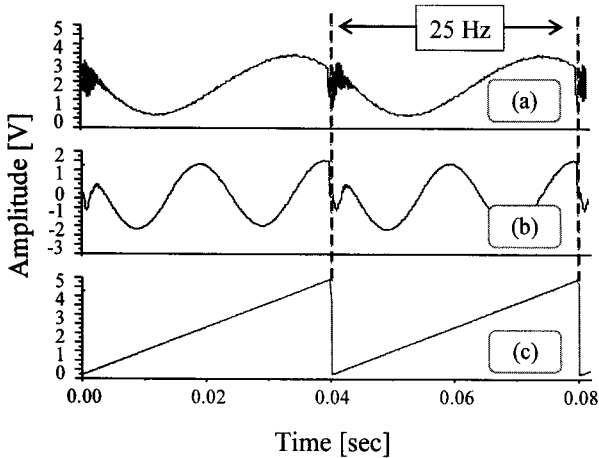


그림 2. 램프구동전압에 따른 간섭파형 (a: PD 2 간섭 신호, b: ac 커플링된 PD 1 간섭신호, c: 위상 변조기 구동전압)
 Fig. 2. Interference signals according to the ramp voltage signal (a: PD 2 signal, b: ac-coupled PD 1 signal, c: voltage on phase modulator).

2. 파장가변 필터

광섬유 레이저의 파장가변을 위하여 Micron Optics 사의 FFP-SI (fiber Fabry-Perot scanning interferometer)를 이용하였으며, 그 제원을 표 1에 나타내었다.

그림 3은 전원공급장치를 파장가변 필터에 연결하고, 0~12 V까지 1 V단위로 승압하면서 파장가변 필터의 투과 파장변화를 광파장 분석기로 측정한 결과이다. 12 V의 입력전압 범위에서 67.2 nm의 파장변화를 얻었으며, 평균 파장 변화율은 5.6 nm/V였다. FBG에 가해지는 물리량에 따른 파장변화량을 정확히 측정하기 위해서는 광섬유 레이저의 선형적인 파장변조가 요구된다. 그림 3과 같이 파장스캔 특성이 비선형적이라면, FBG

표 1. FFP-SI 제원(@1550 nm)

Table 1. The specification of a fiber Fabry-Perot scanning interferometer.

Insert loss	1.11 dB
Free spectral range	64.9 nm (8,151 GHz)
FWHM	9.35 GHz (74.5 pm)
Finesse	870
Tuning voltage/FSR	12 V

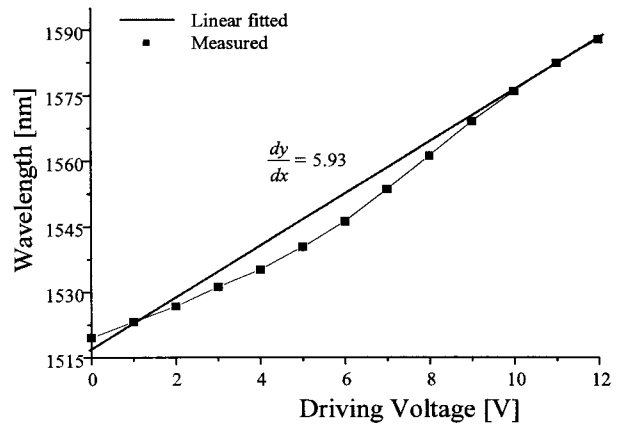


그림 3. 파장가변필터의 비선형 특성
 Fig. 3. The nonlinear characteristic of a tunable filter.

센서의 정확한 파장변화량을 얻을 수 없다. 이를 보상하기 위해서 다수의 기준파장을 가진 필터를 이용하여 파장필터의 비선형성을 보상하는 방법이 제안되었는데^[9], 본 논문에서는 앞 절에서 소개한 더블패스 MZI 구조를 이용하여^[8], 파장가변필터의 비선형 특성에 관계없이 빠르고 정확한 파장복조방법을 제시한다.

III. 실험

그림 4는 더블패스 MZI를 이용하여 광섬유 레이저의 파장변화를 복조하기 위한 시스템의 개략도이다. 광섬유 레이저의 파장가변을 위해 함수발생기를 이용하여 FP 파장필터를 구동하였다. 파장가변 레이저(tunable laser)는 기준 FBG 파장검출을 위해 광원의 파장을 기

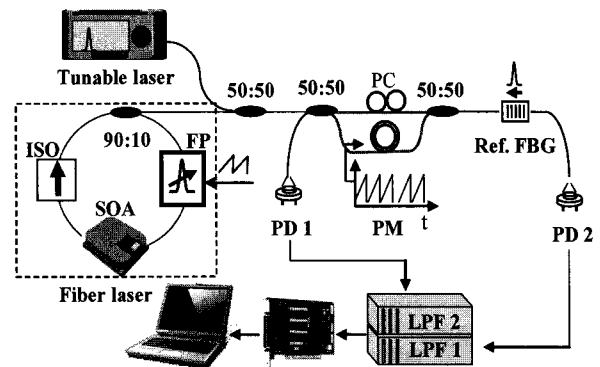


그림 4. 광섬유 레이저 파장복조 시스템의 개략도
 Fig. 4. Schematic of the wavelength demodulation system for a fiber laser (ISO: isolator, PM: phase modulator, FP: Fabry-Perot filter, SOA: semiconductor optical amplifier, LPF: low pass filter, PD: photodiode).

준 FBG의 중심파장(1530 nm)에 고정하였다. 실험의 편의를 위하여 파장가변 레이저를 기준광원으로 사용하였으나, 시스템 구현시 상대적으로 가격이 저렴한 분산 궤환형 레이저 다이오드(distributed feedback laser diode, DFB)와 같이 파장이 고정된 광원을 사용하는 것도 무방하다. 광섬유 레이저와 파장이 고정된 레이저의 출력은 50:50 분리 비를 가지는 광섬유 커플러에서 결합된 뒤, 광섬유 MZI로 입사한다. 위상변조기로 사용하는 원통형 PZT에 감겨진 광섬유는 함수 발생기의 구동 신호에 따라 MZI의 광경로차를 발생하여 간섭을 일으킨다. 파장이 고정된 레이저의 광원은 온도보상 패키징된 FBG (온도민감도: $0.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)에서 반사되어 다시, MZI를 통과면서 두 배의 위상변조를 겪은 후 PD1에서 검출된다. 또한, 파장가변 필터의 변조주파수로 파장변조된 광섬유 레이저의 출력은 MZI를 통과 후 PD2에서 검출된다. 각각의 PD에서 검출한 간섭신호는 전기신호로 변환되고, 저대역통과 필터를 거친 뒤, 데이터 수집 장치를 통해 컴퓨터로 읽어 들인다. PD1에서 검출된 더블패스 MZI의 간섭신호로부터 생성된 내부 트리거를 이용하여, PD2의 간섭신호를 Quadrature 샘플링하였다. LabVIEW 프로그램을 이용하여 90도 위상차를 가지는 2개의 데이터를 서로 나누고, 아크탄젠트함수를 가한 후, 위상풀기 알고리즘을 적용하여, 변조된 광섬유 레이저의 파장변화를 복조하였다. 제안한 시스템 PD2쪽의 광출력을 광섬유 격자어레이의 광원으로 적용하면, 쉽게 파장변화량을 읽을 수 있는 센서네트워크 구

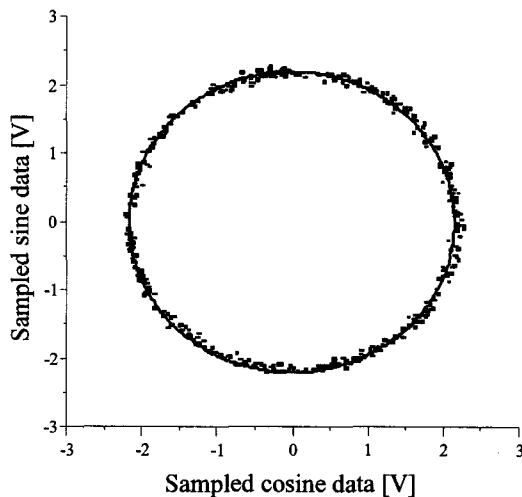


그림 5. 내부트리거를 이용하여 얻은 샘플의 Lissajous 그래프

Fig. 5. Lissajous plot of the data sampled with internal triggers.

축이 가능하다.

파장변조된 광섬유 레이저의 광원을 간섭계에 입사하면, 더블패스 MZI 구조에서 생성되는 내부트리거 신호에 따라 PD2 간섭신호에서 90° 위상차를 가지는 2개의 데이터를 연속으로 얻을 수 있다. 취득한 데이터의 조합으로 Lissajous 그래프를 그림 5와 같이 생성하였고, 데이터사이 90° 위상차 오차분석을 위해 원형모델로 least square fitting을 하였다. Lissajous 그래프를 fitting한 결과는 다음과 같다. MSE (meas squared error)는 3.67×10^{-3} 였고, 평균위상오차는 2.51 mrad 였으며, 90° 위상차를 기준으로 해서 약 0.15 %의 오차를 보였다.

그림 6은 함수발생기를 이용하여 2 Hz (6 V_{p-p} , DC offset: 6 V)의 램프신호로 파장가변필터를 변조한 뒤, 광섬유 레이저의 파장변화를 제안한 파장복조 방법으로 측정된 결과이다. 선형적인 램프 구동신호에 따라 1542.6~1586.5 nm까지 본 논문에서 구성한 광섬유 레이저의 비선형 동작 특성을 확인 할 수 있다.

선행연구에서는 저속의 램프파형 (2 Hz)을 이용하여, 파장스캔을 하였으나^[10], 고속파장 변조 시에는 비연속 구간에서 발생하는 과도적인 진동파형이 커지는 문제가 발생하여 신호처리에 어려움을 겪었다. 고속 파장스캔이 요구되는 광섬유 레이저의 파장변조 기초실험을 위하여 파장가변필터에 10 Hz (2 V_{p-p})의 사인과 삼각파형으로 순차적으로 구동하였고, 더블패스 간섭 구조를 이용하여 그림 7과 같이 파장을 복조하였다. 내부트리거 생성을 위한 더블패스 MZI의 위상변조기는 1 KHz (9 V_{p-p})의 삼각파형으로 구동하였으며, 12 nm 범위의

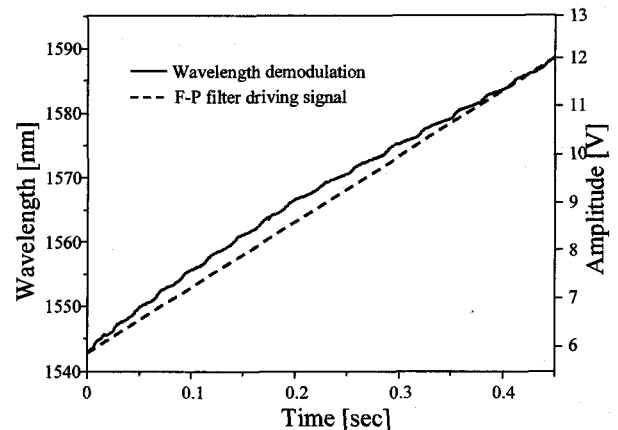


그림 6. 램프 변조 신호에 따른 파장복조

Fig. 6. Wavelength demodulation according to ramp driving voltage.

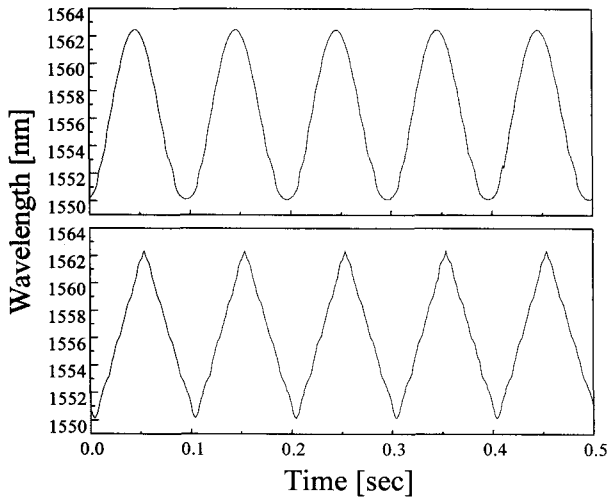


그림 7. 사인과 삼각파로 변조된 파장복조

Fig. 7. Demodulation of wavelength variations when a sine and a triangular wave are applied to a tunable filter.

광섬유 레이저의 파장변화와 약 35 pm의 파장측정 정밀도를 얻었다. 실험 결과로부터 파장필터의 비선형 특성에 상관없이, 구동신호에 따라 변조된 광섬유 레이저의 파장이 충실히 복조되었음을 그림 6과 7로부터 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 더블패스 MZI 구조를 이용하여 파장가변 광섬유 레이저의 파장복조 기법을 제안하였다. 제안한 파장복조 시스템으로 FP파장필터의 비선형 동작 특성에 관계없이 광섬유 레이저의 파장변화를 정확하게 읽어 낼 수 있음을 확인하였다. 다양한 변조파형을 파장가변 필터에 적용한 결과, 10 Hz($2 V_{p-p}$)의 파장변조에서 35 pm의 파장측정 정밀도를 얻었다. 내부 트리거를 이용하여 취득한 데이터를 조합하여 구성한 Lissajous 그래프의 원형 피팅을 통해 2.51 mrad의 위상측정 오차를 구하였다. 제안된 파장복조방법은 대형 전기설비나 원자력 발전소, 대형 교량, 댐과 같은 복합 구조물을 위한 상시 감시용 광섬유 격자 어레이의 파장복조 시스템에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Ball, W. W. Morey, and P. K. Cheo, "Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 700-703, April, 1994.
- [2] 송민호, 이상배, 최상삼, 남희, 이병호, "장주기 격자를 이용한 광섬유 레이저센서의 파장변화 측정," *전자공학회논문지*, 제34권 D편, 제12호, pp. 83-88, 1997년 12월.
- [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, June, 1998.
- [4] L. Martinez-Leon, L. A. Diez, J. L. Cruz and M. V. Andres, "Frequency-output fiber optic voltage sensor for high voltage lines," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 9, pp. 996-998, September 2001.
- [5] M. Song, S. Yin and P. B. Ruffin, "Fiber Bragg grating stain sensor demodulator with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 7, pp. 1106-1111, March 2000.
- [6] 김종섭, 송민호, "시간간연 샘플링을 이용한 광섬유 레이저의 파장변화검출," *전자공학회논문지*, 제41권 SD편, 제3호, pp. 31-37, 2004년 3월.
- [7] Y. L. Lo, J. S. Sirkis and C. C. Chang, "Passive signal processing of in-line fiber etalon sensors for high strain-rate loading," *J. Lightwave Technol.* vol. 15, no. 8, pp. 1578-1585, August 1997.
- [8] 박형준, 송민호, "더블패스 마하젠더 간섭계를 이용한 광섬유 격자 센서의 파장복조," *한국비파괴검사학회지*, 제26권, 제4호, pp. 285-290, 2007년 8월.
- [9] C. C. Chan, W. Jin, H. L. Ho, D. N. Wang and Y. Wang, "Improvement of measurement accuracy of fibre Bragg grating sensor system by use of gas absorption lines as multi-wavelength reference," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 12, pp. 742-732, June, 2001.
- [10] 박형준, 송민호, "Fabry-perot ITU 필터의 기준파장을 이용한 분배형 광섬유 격자 온도센서의 선형복조," *조명.전기설비학회논문지*, 제21권, 제4호, pp. 54-60, 2007년 8월
- [1] G. A. Ball, W. W. Morey, and P. K. Cheo,

저 자 소 개



박 형 준(학생회원)
 2002년 전북대학교 제어계측 공학과 학사 졸업.
 2004년 전북대학교 제어계측 공학과 석사 졸업.
 2004년~현재 전북대학교 제어계측공학과 박사과정.

<주관심분야 : 광섬유 센서, 광위상 신호처리, 광 계측>



김 현 진(학생회원)
 2007년 전북대학교 제어계측 공학과 학사 졸업.
 2007년~현재 전북대학교 전자정보공학부 석사과정.
 <주관심분야 : 광섬유 격자센서, 광섬유 전류센서>



송 민 호(정회원)
 1990년 서울대학교 전기공학과 학사 졸업.
 1992년 서울대학교 전기공학과 석사 졸업.
 1997년 서울대학교 전기공학부 박사 졸업.
 1997년~2000년 Pennsylvania 주립대학교, Post Doctor.
 2000년~현재 전북대학교 전자정보공학부 부교수.

<주관심분야 : 광계측기술, 광섬유 센서네트워크 >