

InGaAs PD 어레이와 광섬유 격자를 이용한 준분배형 전력설비 안전진단 시스템

(A Quasi-Distributed Fiber-Optic Sensor System using an InGaAs PD Array and FBG Sensors for the Safety Monitoring of Electric Power Systems)

김현진* · 박형준 · 송민호**

(Hyun-Jin Kim · Hyoung-Jun Park · Min-Ho Song)

요 약

광섬유 격자를 이용한 센서 네트워크를 이용하여 준분배형 전력설비 안전진단 시스템을 구성하였다. FBG를 이용한 센서는 한 개의 라인에 복수의 센서가 설치가능하며, 전자기 노이즈에 영향을 받지 않는 특성을 가진다. 광섬유 격자에서 반사되는 파장의 신호를 분석하기 위하여 InGaAs PD 어레이와 홀로그램 회절격자를 이용하여 구조가 간단하면서도 고속의 파장복조가 가능하도록 하였다. 제안한 시스템의 정확도를 개선하기 위해 가우시안 라인피팅을 적용하였고, 높은 파장 정밀도(4[pm])와 동작 안정성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract

We constructed a quasi-distributed fiber-optic sensor network for the safety monitoring in power systems. It is possible to construct many of FBG sensors in a line and to be immune from electromagnetic noise. For demodulation analysis of reflected wavelength from FBG sensor, we proposed a simple and fast system using a InGaAs photo-diode array and a holographic diffraction grating. For accuracy improvement of the proposed demodulation system, we applied a Gaussian line-fitting algorithm. We obtained about 4[pm] of wavelength resolution and stability.

Key Words : Fiber Bragg Grating, InGaAs Photo-Diode Array, Diffraction Grating

1. 서 론

최근 전력 설비는 고전압 대전류 환경으로 대형화 되어가는 추세에 있으며, 다양한 원인에 의해 발생하는 전력사고에 의한 피해액도 증가하고 있다. 우리나라 대형전력 설비는 1970년대 중화학 산업단지를 중

* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 박사과정

** 교신저자 : 전북대학교 전자정보공학부 교수

Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394

E-mail : msong@jbnu.ac.kr

접수일자 : 2009년 12월 14일

1차심사 : 2009년 12월 21일

심사완료 : 2010년 2월 1일

심으로 집중적으로 설치되었다. 최근에는 이러한 노후 전력설비에서 집중적으로 발생하는 정전, 계통이상 및 화재사고로 인해 큰 사회적, 경제적 손실이 발생하고 있으며, 설비 취급 특성상 정확한 사고원인을 밝혀 내지 못하고 있는 실정에 있다[1].

전력설비 안전진단을 위해 이용하는 기존의 금속재료의 센서는 전자기노이즈에 취약하며, 여러 곳의 정보를 알기 위해서 분배형 센서 네트워크로 구성할 경우, 연결선이 복잡해지고, 대형·중량화 되는 등의 단점을 가진다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 최근에는 광학적 기술들을 적용하고 있으며 그 중 광섬유 격자(fiber Bragg grating, 이하 FBG)는 부도체인 실리카 재질로 전자기장의 영향에 둔감하며, 여러 개의 FBG 센서를 하나의 광섬유라인에 직렬로 연결하여 동시에 다중 측정이 가능한 분배형 센서 네트워크의 구현이 가능하다는 장점으로 전력설비의 안전성 진단에 적합한 센서 시스템으로 주목받아왔다[2-6].

선행연구인 분배형 광섬유 온도센서 시스템의 개발은 FBG 반사파장을 복조하기 위해 파장가변필터(wavelength-scanned tunable filter)를 이용하여 구성하였으나, 측정범위와 동작신호의 속도가 증가할수록 파장가변필터의 비선형적 동작특성이 커지는 문제점이 발생하였다. 비선형 동작 특성에 따른 오차를 보상하기 위해 MCWL(multi-channel wavelength locker)와 비선형보상 알고리즘을 적용하였으나, 이로 인해 시스템이 복잡해지고 시스템 대역폭이 제한받는 단점이 있었다[7-8].

본 논문에서는 선행연구에서 발생한 문제점을 보완하기 위하여 InGaAs PD 어레이(Hamamatsu C8060-01, 512[pixels])와 홀로그래프 회절격자를 이용하여 FBG 반사파장을 복조할 수 있도록 구조를 단순화하였다. 외부에서 가해지는 온도, 진동, 스트레인과 같은 물리량에 따른 FBG의 반사스펙트럼의 중심파장을 정확히 측정하기 위해 가우시안 라인 피팅을 적용하였다. 제안한 알고리즘을 적용한 센서시스템의 효율성을 입증하기 위하여 단순 최대값 검색 방법과 4차 다항식 피팅 방법을 비교실험하였다.

2. 본 론

2.1 광섬유 격자 센서

FBG는 광섬유 코어 내부에 주기적인 격자(grating)를 생성한 것이며, 다수의 경계면에서 광신호의 일부가 반사 또는 투과하는 과정을 거치면서 다중간섭을 일으켜 위상조건을 만족시키는 파장만을 반사 또는 굴절시키는 광학 소자이다[2-5].

브래그 이론에 따르면 위상조건을 만족하여 FBG에서 반사되는 파장은 다음 식 (1)에 의해 결정된다[4].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

위 식에서 n_{eff} 는 FBG의 유효굴절률이며 Λ 는 굴절률 변화의 간격이다. FBG는 온도센서나 스트레인 변화에 브래그 파장이 선형적으로 변하는 특징을 가지고 있으며, 다음 식 (2)와 같이 온도와 스트레인의 변화에 따른 브래그 파장 변화를 식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda\{ (1 - P_e)\Delta\epsilon + [\alpha + \zeta]\Delta T \} \tag{2}$$

위 식에서 $\Delta\epsilon$ 과 ΔT 는 각각 스트레인과 온도 변화량을 의미하며, P_e 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)이며 광섬유의 재질인 실리카의 경우 0.22의 값을 가진다. 또한, α 는 광섬유의 열팽창계수(thermal expansion coefficient)이고, ζ 는 열광학계수(thermo-optic coefficient)로 온도에 따른 광섬유의 굴절률의 변화를 나타낸다. FBG의 온도에 따른 반사 파장 변화는 1,550[nm] 중심파장에서 대략 10[pm/°C] 정도의 범위를 가지는 것으로 보고 있으며[9], 보다 정밀한 온도, 스트레인 측정을 위한 센서시스템을 제작하기 위해서는 우수한 파장분해능을 가지는 파장 복조시스템이 필요하다.

2.2 FBG 온도센서 시스템의 구성

그림 1은 실험을 위해 제작한 FBG 센서어레이 시스템의 개략적인 구성도이다. 광폭광원(broad-band light source)의 출력은 50 : 50의 분리 비를 가지는 광

섬유 커플러에 의해 나뉘는 뒤, FBG 센서 어레이에 입사하게 된다. 1개의 기준 FBG와 2개의 센서 FBG로 구성된 센서어레이를 구성하였다. 1번째 센서 FBG는 막대형 압전소자에 에폭시를 이용하여 접착한 뒤, 전압신호에 따른 스트레인을 인가하였고, 2번째 센서 FBG는 수조의 바닥에 부착하고 온수와 냉수를 이용하여 온도변화를 주었다. 각센서 FBG에 가해지는 온도와 스트레인에 따라 중심파장이 변화된 FBG 반사스펙트럼은 회절격자를 거친 뒤, 파장성분에 따라 다른 각도로 InGaAs PD 어레이의 각각의 픽셀에서 검출되게 된다. PD 어레이의 구동 트리거 신호와 기준 트리거 신호를 이용하여 검출된 광신호를 DAQ 보드(data acquisition board)로 읽어 들인 후 LabVIEW 프로그램을 통해 FBG 반사스펙트럼의 피크 위치를 검출하여 온도 및 스트레인의 변화량을 측정하였다.

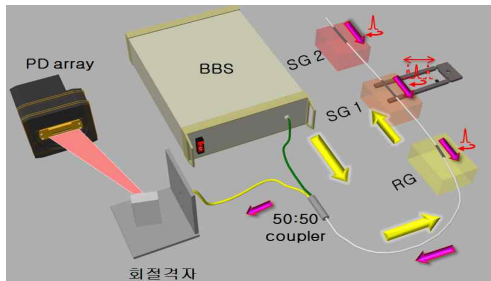


그림 1. FBG 센서어레이 시스템의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of FBG sensor array system(BBS: broad band source, SG: sensor grating, RG: reference grating)

본 실험에서 사용한 InGaAs PD 어레이는 Hamamatsu사의 제품이며 그 제원을 표 1에 나타내었다.

표 1. InGaAs PD 어레이
(C8061-01 G9212-512S)

Table 1. Specification of the photo-diode array

픽셀 수	512
파장응답 범위	900~1,700[nm]
최대 민감파장	1,550[nm]

PD 어레이에는 최대 4[MHz]의 구동 클럭신호를 넣어서 주고 스타트 트리거 신호를 입력하면 PD 어레이에

서 각각의 512개의 픽셀에서 검출된 광신호를 순서대로 전기신호로 변환한다. PD 어레이의 출력신호는 구동신호에 따라 발생하는 기준 트리거 신호에 따라 1번 채널부터 512번까지 순차적으로 얻을 수 있으며, 그림 2는 PD 어레이의 구동 타이밍 차트이다.

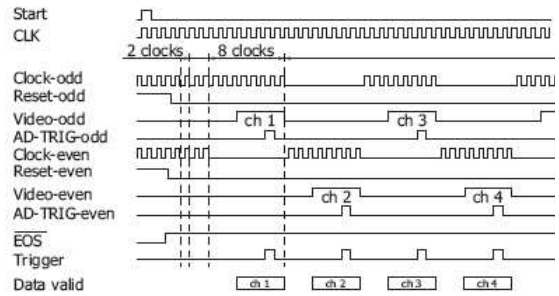


그림 2. PD 어레이 구동 타이밍 차트
Fig. 2. Timing chart of a photo-diode array

제안한 시스템에서 FBG 반사스펙트럼을 복조하기 위해 사용한 회절격자(25×25×6[mm])는 ThorLabs의 GH-25-10U 모델이며 1,000개의 홈(groove)을 가진 반사형 홀로그래프 격자이다. 회절격자에 약 45[nm] 파장범위의 광폭광원을 입사하여 512개 픽셀을 이용한 PD 어레이를 이용하여 샘플을 얻으므로 이에 따른 이론적인 파장분해능은 8.8[pm]로 계산되었다.

표 2. 사용된 FBG의 제원
Table 2. Specification of the FBGs

	반사파장 ([nm])	FWHM ([nm])	반사율 ([%])	온도민감도 ([pm]/[°C])
RG1	1536.40	0.17	96.54	0.74
SG1	1553.02	0.18	95.75	·
SG2	1561.71	0.17	95.56	·

본 연구에서는 1개의 기준 FBG와 2개의 센서 FBG를 하나의 광섬유 라인에 직렬로 연결하였고, 온도와 스트레인 측정에 영향을 주지 않기 위하여 센서 FBG의 파장간격은 8[nm] 간격으로 설치하다. 기준 FBG는 온도보상 패키징되어 온도변화에 둔감하게 설계되었으며, 센서 FBG의 파장변화에 따른 기준값을 제공한다. 실험에 사용된 기준 FBG와 센서 FBG의 초기

반사파장과 반사율 등의 제원을 표 2에 나타내었다.

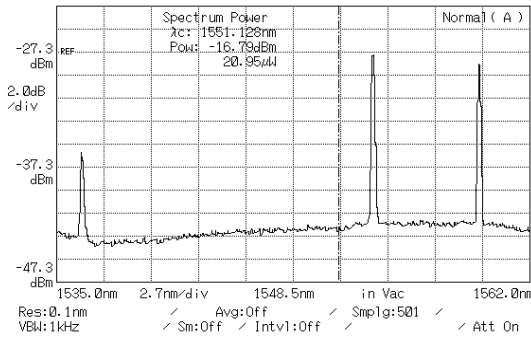


그림 3. 광파장 분석기로 측정한 FBG 반사파장
Fig. 3. The spectrum of a FBG sensor array with an optical spectrum analyzer

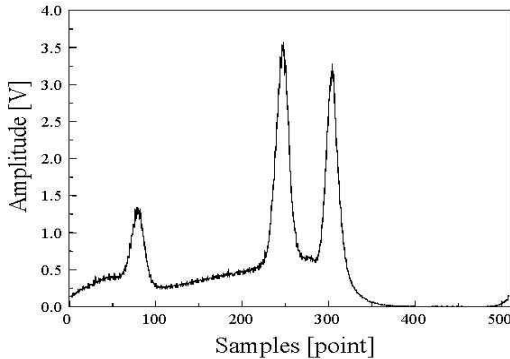


그림 4. PD 어레이로 취득한 FBG 반사파장
Fig. 4. The spectrum of a FBG sensor array with a PD array

2.3 FBG 반사스펙트럼 피팅

FBG 센서의 반사 스펙트럼은 광신호에서 전기신호로 변환될 때 발생하는 양자화 오차가 발생하며, 센서에 가해진 스트레인에 의해 FBG 반사 스펙트럼이 왜곡되기도 한다. 따라서 정확한 FBG 반사 스펙트럼의 중심파장을 얻기 위해서는 적절한 피팅 알고리즘이 요구된다.

본 논문에서는 FBG 센서 반사 스펙트럼의 중심파장을 가우시안 라인피팅을 적용하여 검출하였으며, 제안한 시스템의 효율성을 입증하기 위해 단순피크 검색과 4차 다항식 피팅 방식을 비교하여 실험을 수행하였다. 비선형 곡선의 오차를 보정하기 위해 주로 사용하는

다항식 피팅 함수는 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

다항식의 차수가 높아질수록 연산시간이 증가하는 단점이 있으며, 본 실험에는 4차 다항식을 적용하여 FBG 반사파장의 중심파장을 검색하였다.

본 논문에서 제안한 시스템에서 적용한 가우시안 라인피팅은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (4)$$

위 식에서 a 는 가우시안 함수의 크기를 결정하는 상수이고, b 는 중심좌표를 결정하는 상수이며, c 는 가우시안 분포형태의 폭을 결정하는 변수이다. FBG 반사 스펙트럼은 가우시안 형태와 가장 유사한 것으로 보고되어 있으며[10], FBG 반사 스펙트럼의 중심파장을 검출시에 가장 많이 적용하는 알고리즘이다.

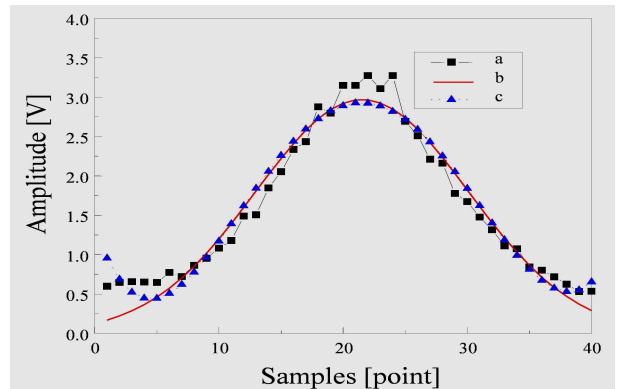


그림 5. FBG 반사파장 피팅(a: 단순 최대값 검색, b: 가우시안 라인피팅, c: 4차 다항식 피팅)
Fig. 5. The line-fitting of FBG spectrum (a: simple-peak-detection, b: Gaussian line-fitting, c: 4th order polynomial fitting)

그림 5는 PD 어레이로부터 취득한 512개의 데이터 중 첫 번째 센서 FBG의 반사스펙트럼의 중심파장을 검출하기 위해 취득한 40 개의 데이터 샘플에 적용한 라인 피팅이다. b는 FBG 반사 스펙트럼을 가우시안 라인피팅을 적용한 결과이며, c는 4차 다항식을 이용하여 라인피팅한 결과이다.

2.4 실험 및 결과

그림 6은 상온에서 FBG 반사스펙트럼을 PD 어레이로 검출한 뒤, 제안한 피팅방법들을 적용하여 얻은 FBG 중심파장변화량을 온도변화로 표현하였다. 특별한 온도변화를 가하지 않은 실온에서 랜덤워크를 관찰 하였는데, 최대값 검출방법을 적용한 경우에는 상온에서 약 2[°C]의 온도변화가 발생하였고, 가우시안 라인 피팅을 적용한 경우에는 비교적 안정적으로 0.4 [°C]의 온도변화 추이를 보였다. 4차 다항식 피팅을 적용한 경우에는 0.8[°C]의 온도변화가 있음을 확인하였다. 상온에서 가우시안 라인피팅 알고리즘을 적용한 온도 측정실험이 가장 안정적으로 구현되고 있음을 확인할 수 있었다.

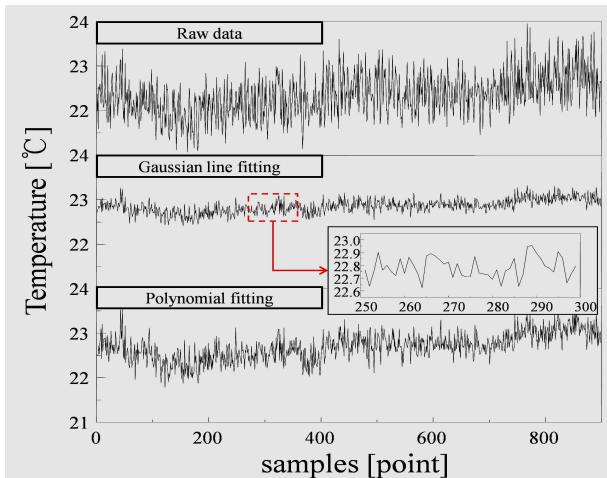


그림 6. 센서 FBG 의 온도변화와 랜덤워크
Fig. 6. Temperature variation and random walk of sensor gratings

그림 7은 1,553.02[nm]의 중심파장을 가지는 FBG 센서를 수조바닥면에 에폭시로 고정시킨 뒤 약 6[°C]의 냉수를 수조에 넣은 후, 측정한 온도변화실험의 결과이다. 단순피크 검출방식, 가우시안, 4차 다항식 피팅 알고리즘을 차례대로 적용하여 비교실험을 하였으며, 가우시안 라인피팅 알고리즘을 적용한 실험결과가 0.4[°C]의 오차범위 안에서 가장 안정적으로 온도변화 추이를 재현하고 있음을 확인할 수 있었다. 단순피크 검출방식의 경우 최대 4~6[°C]의 랜덤워크가 발생하였다.

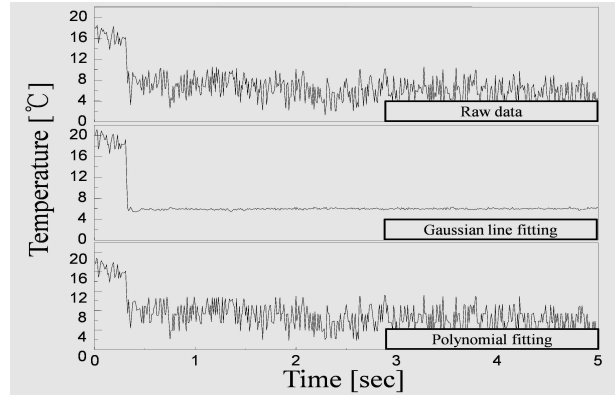


그림 7. 피팅방법에 따른 냉수의 온도 변화
Fig. 7. Temperature variation of cold water according to fitting methods

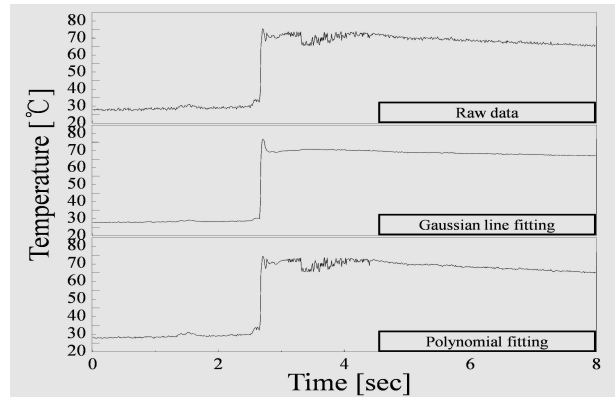


그림 8. 피팅방법에 따른 온수의 온도 변화
Fig. 8. Temperature variation of hot water according to fitting methods

그림 8은 냉수 실험 후 수조를 비우고 약 75[°C]의 온수를 수조에 넣어 온수에 반응한 FBG 센서의 온도 변화 측정결과이다. 온수의 경우에도 가우시안 라인 피팅 알고리즘을 적용한 실험 결과가 가장 안정적으로 온도변화 추이를 재현하였으며, 4차 다항식 피팅 알고리즘은 최대값 검출방식보다는 개선된 온도오차를 보였으나, FBG 반사파장 피팅 알고리즘으로 적용하기에는 적당하지 않은 것으로 판단된다.

변형률 측정 실험을 위해 U자형 압전소자 변조기에 1,561.71[nm]의 중심파장을 가지는 FBG 센서를 에폭시를 이용해 부착한 뒤, 함수 발생기를 이용하여 정현파, 삼각파, 구형파 형태의 구동전압을 막대형 압전소자에 인가하여 30[Hz], 58[μe]의 변형률을 가하였다.

그림 9에 압전소자에 인가한 구동신호에 따라 복원된 출력력을 나타내었으며 광섬유 격자 센서에 가해지는 변형 특성을 충실히 복원하고 있음을 확인하였다.

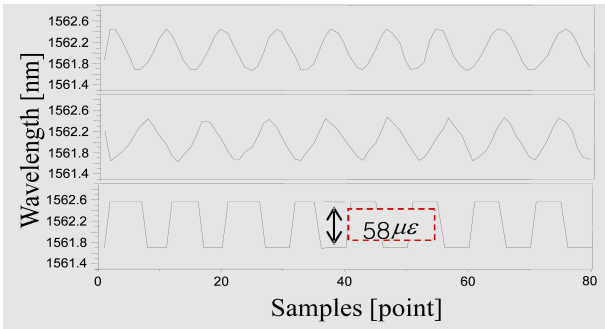


그림 9. 스트레인 신호에 따라 복조된 파형
Fig. 9. Reconstructed strain profiles

3. 결 론

본 논문에서는 대형 전력설비 안전진단을 위한 준분배형 광섬유 센서 네트워크를 InGaAs PD 어레이와 홀로그래프 회절격자를 이용하여 구조가 단순하고 고속의 파장복조가 가능한 시스템으로 구성하였다. 제안된 시스템은 가우시안 라인피팅을 적용하여 약 4[pm]에 해당하는 파장 정밀도를 얻었다. 이는 본 시스템의 이론적인 파장 정밀도 8.8[pm]보다 2배 이상 정밀도가 향상되었음을 의미한다. 단순 피크검색법과 4차 다항식 피팅과 비교실험을 하여 본 시스템에 적용한 가우시안 라인 피팅의 효율성을 입증하였다. 또한, 전력설비의 열화에 의한 온도이상 여부를 조기에 검출할 수 있는 기초실험을 온, 냉수를 이용하여 수행하였으며, 전력설비에 가해지는 진동 및 스트레인 측정을 위해 압전소자에 FBG 센서를 부착하여 기초 실험을 수행하였다. 실험을 통해 고속파장 복조에도 높은 정밀도와 동작 안정성을 가지고 있음을 확인하였으며, 이를 바탕으로 실제 현장에 적용할 경우 FBG 센서의 실용성을 증가시킬 것으로 판단된다.

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역대학우수과학자 지원사업임(No. D00200).

References

- [1] <http://news.mk.co.kr/outside/view.php?year=2008&no=596310>
- [2] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, "Bragg-grating temperature and strain sensors," Proc. OFS, 526, 1989.
- [3] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, "Fibre optic Bragg grating sensors," Proc. SPIE, 1169, 98-107, 1994.
- [4] 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., 15, 1442-1462, 1997.
- [5] 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., 18, 1370-1372, 1993.
- [6] A. Orthonos and K. Kalli, "Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing," Boston, Artech House, 1999.
- [7] H. Kim, H. Park nad M. Song, "Linear interrogation of distributed fiber grating temperature sensor network using a fabry-perot ITU filter", KIEE, vol. 21, no. 7, pp. 54-60, 2007.
- [8] H. Park and M. Song, "Linear FBG Temperature Sensor Interrogation with Fabry-Perot ITU Multi-wavelength Reference," Sensors, 8, 6769-6776, 2008.
- [9] R. J. Campbell and R. Kashyap, "Spectral profile and multiplexing of Bragg gratings in photosensitive fiber," Opt. Lett., 16, 898-900, 1991.
- [10] H. Lee, H. Park, J. Lee, and M. Song, "Accuracy improvement in peak positioning of spectrally distorted FBG sensors by Gaussian curve-fitting," Appl. Opt., 48, 2205-2208, 2007.

◇ 저자소개 ◇

김현진(金炫震)

1980년 11월 8일생. 2007년, 2009년 전북대 전자정보공학부에서 공학사. 공학석사를 취득. 2009년 3월부터 전북대 전자정보공학부에서 박사과정중.

박형준(朴亨浚)

1976년 6월 2일생. 2002년, 2004년 전북대 제어계측공학과에서 공학사, 공학석사를 취득하였고, 2009년 전북대 전자공학과에서 공학박사를 취득하였다. 현재는 전북대학교 BK21-전북전자정보고급인력양성사업단 연구원으로 재직.

송민호(宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년, 1992년, 1997년 서울대학교 전기공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사학위를 취득. 2000년 9월 이후 전북대학교 전자정보공학부 교수로 재직.