

Fabry-Perot ITU 필터의 기준파장을 이용한 분배형 광섬유 격자 온도센서의 선형복조

(Linear Interrogation of Distributed Fiber Grating Temperature Sensor Network using a Fabry-Perot ITU Filter)

박형준* · 송민호

(Hyoung-Jun Park · Min-Ho Song)

요 약

15개의 광섬유 격자를 이용하여 전력설비의 온도변화를 상시 감시하는 분배형 광섬유 온도센서 시스템을 제작하였다. MEMS 파장가변 필터를 사용하는 복조시스템의 비선형 동작특성에 의한 측정오차를 보상하기 위하여 Fabry-Perot ITU 필터의 투과파장을 기준으로 하는 다항식 피팅 알고리즘을 사용하였다. 실험을 통하여 보상알고리즘이 구동주파수와 무관하게 센서시스템의 정밀도를 유지하는 것을 확인하였으며 기준 온도계로 사용한 써모커플과 선형화 오차는 약 0.18[%]로 측정되었다.

Abstract

We constructed a fiber-optic temperature sensor system using a sensor array with 15 fiber Bragg gratings for distributed temperature monitoring in electrical power systems. A polynomial fitting algorithm was used to compensate the nonlinear action of the MEMS tuneable wavelength filter used for Bragg wavelength demodulation. Fixed passband wavelengths from a Fabry-Perot ITU filter were used as reference wavelengths for the fitting algorithm, which obtained constant accuracy regardless of the wavelength scanning range and frequency. About 0.18[%] of linearity error compared to reference thermocouple thermometer has been obtained in the preliminary experimental results.

Key Words : Fiber-optic temperature sensor, Fiber Bragg grating, Fabry-Perot filter

1. 서 론

최근 대용량화 추세에 있는 전력설비는 자연열화, 절연열화 또는 설비불량으로 인한, 고장이나 손실이 발생할 경우, 큰 사회적 혼란과 경제적 손실을 야기한다[1].

국내에서도 2006년 4월 1일 제주도로 전력을 공급

* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 박사과정
Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394

E-mail : spacegon@chonbuk.ac.kr

접수일자 : 2007년 4월 6일

1차심사 : 2007년 4월 10일

심사완료 : 2007년 4월 25일

하는 해저송전케이블의 전력공급이 중단된 뒤 과부하로 인한 발전소의 연쇄적인 가동중단으로 제주도 전역에서 대규모 정전이 발생한 사례를 찾을 수 있다[2]. 전력설비의 열화는 장기간 사용에 따른 기기의 노후화나 성능저하로 발생하는 경우와, 오조작이나 착오에 의한 인위적인 과부하, 예기치 못한 자연재해로 발생하는 경우가 있다. 이러한 사고를 조기 발견하여 경보함으로써 전력설비의 피해를 예방하기 위해서는 한계온도 이상에서 발생하는 비정상적 온도상승을 빠르게 감지할 수 있는 상시 경보시스템이 필수적이다. 1990년대 이후 많은 관심을 받아 온 광섬유 격자(fiber Bragg grating, 이하 FBG) 센서는 하나의 광섬유 라인에 여러 개의 FBG 센서를 연결하여 전자기파 간섭에 둔감하고 휴대 가능한 시스템으로 개발이 가능하므로 넓은 범위의 다중점 온도 측정에 적합한 특성을 가지고 있다[3-13].

본 논문의 선행 연구에서는 10개의 FBG로 센서어레이를 구성하고 파장가변필터를 이용하여 온도에 따른 FBG 센서의 파장변화를 복조하였다[14-16]. 가우시안 라인 피팅 알고리즘을 적용하여, FBG 센서에 가해지는 기계적 변형이나 압력 등의 영향을 보상하는 연구도 성공적으로 수행한 바 있다. 그러나 측정점의 수를 늘리기 위하여 넓은 파장 스캔 범위가 요구되면서 파장가변필터의 비선형 동작특성이 커지고 이에 따라 측정온도의 오차가 커지는 한계를 확인할 수 있었다[16]. 본 논문에서는 FPIF (Fabry-Perot ITU filter)의 투과 스펙트럼을 기준으로 이용하는 다항식 피팅(polynomial fitting)을 적용하여 파장가변필터의 비선형 동작특성에 의한 오차를 보상하는 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1. 광섬유 격자 센서

FBG는 자외선 레이저를 조사하여 광섬유의 코어 굴절률을 주기적으로 변화시킨 광섬유 소자이다. 주기적으로 변조된 굴절률의 경계면에서는 다중반사와 간섭현상에 의해서 아래의 브래그 조건을 만족하는 파장만이 반사된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

위 식에서 n_{eff} 는 광섬유 격자 코어의 유효굴절률이며 Λ 는 새겨진 굴절을 변조의 간격이다. 온도나 스트레인의 변화가 격자에 가해지면 광섬유의 주재료인 실리카(silica glass, SiO_2)의 굴절률과 변조간격 Λ 가 변하므로, FBG의 반사파장이 다음의 변화율을 보이는 것으로 알려져 있다[4-7].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T + (1 - \rho_e)\Delta\epsilon \quad (2)$$

위 식에서 ΔT , $\Delta\epsilon$ 는 온도와 스트레인의 변화량이며 ρ_e 는 광탄성상수, α , ζ 는 각각 열팽창, 열광학계수로서, 실리카의 경우 각각 0.22 , $0.5 \times 10^{-6}/[^\circ\text{C}]$, $8.3 \times 10^{-6}/[^\circ\text{C}]$ 의 값을 갖는다[7-8]. 본 논문에서는 온도검출만을 목표로 하였으므로 불필요한 스트레인 변화를 최소화하기 위하여 금속관의 내부에 FBG 센서를 삽입하였다. FBG에 온도변화만 주어지는 경우를 가정하면 브래그파장 변화는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda(\alpha + \zeta)\Delta T \quad (3)$$

광섬유의 광민감성(photosensitivity) 특성에 따라, 열팽창계수와 열광학계수는 조금씩 달라질 수 있으므로, 1550[nm] 파장 대역에서 온도변화에 따른 FBG의 반사파장 변화는 10~20[pm]/[$^\circ\text{C}$]의 범위를 가진다.

2.2 FBG 분배 온도센서 시스템의 구성

분배형 온도센서 시스템의 분해능 목표를 0.1[$^\circ\text{C}$]로 설정할 경우, 앞 절에서 기술한 내용에 의하면 1~2[pm]의 파장분해능을 가지는 복조시스템이 필요하다. 본 논문에서는 파장분해능이 우수하며 센서의 간격에 제한이 없는 파장가변필터를 이용한 복조방식을 사용하였다[9-10]. 그림 1은 실험을 위해 제작한 분배형 FBG 온도센서 시스템의 구성도이다. 광원은 15개의 FBG 센서와 기준 FBG의 파장범위를 포함하고, 높은 신호대 잡음비를 얻을 수

있도록 고출력 광폭광원인 NXTAR사의 SLD (superluminescent diode)를 사용하였다. 중심파장이 1550[nm]이며 3-[dB] 대역폭은 71.8[nm], 출력은 ~3[mW]이다. 백색광원의 출력은 일정한 주기로 투과파장이 스캔되는 파장가변필터를 통과한 후, 시간에 따라 중심파장이 변화하는 준백색광원의 특성을 가지게 된다. 2×2 광섬유 커플러를 거친 후 FBG 센서어레이로 입사하는 빛은 센서에서 반사되어 PD1(photodetector)에서 전기신호를 발생시키고, FPIF를 통과하는 광신호는 PD2에서 전기신호를 발생시킨다. 센서어레이의 끝단에는 굴절을 정합액(index matching gel)을 바르고 FPIF의 앞단에 광차단기(optical isolator)를 장착하여, 각각 광섬유 절단면과 FPIF 표면에서 반사되는 광노이즈를 최소화하였다. PD출력은 저대역 통과필터를 거친 뒤, 데이터 수집장치와 LabVIEW 프로그램으로 각 신호의 피크 위치를 검출하게 된다.

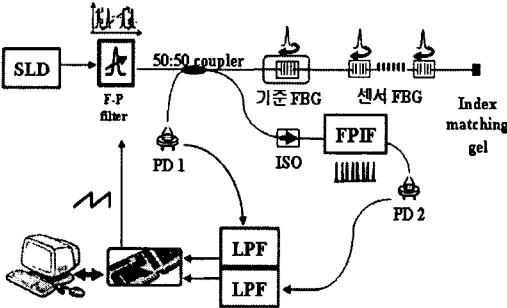


그림 1. 분배형 FBG 온도센서 시스템의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of distributed FBG temperature sensor system

실험에서 사용된 파장가변필터는 MEMS(micro electro-mechanical system) 기술로 제작된 Fabry-Perot 필터로 투과파장의 반복주기인 FSR (free spectral range)이 80[nm], 각 투과파장의 대역폭(Bandwidth)은 4[Ghz]이다. 기존의 광섬유 Fabry-Perot 필터에 비하여 환경적인 영향에 따른 불규칙한 변화가 매우 작지만, 비선형 동작특성이 더 커지는 것은 단점이다. 그림 2는 파장가변 필터의 승압 구동 모듈에 0~10[V]의 구동전압을 가하면서 측정한 파장의 변화이다. 파장변화율의 평균은

-4[nm]/[V]으로 인가전압의 범위에서 ~40[nm]의 파장스캔범위를 얻을 수 있었다. 이 결과는 정적인 동작특성이며 구동주파수에 따라 파장범위와 변화율은 조금씩 변화한다. 실험에 사용된 센서어레이의 파장 범위가 1539.07~1561.88[nm]이므로 25[nm]의 파장범위를 스캔할 수 있도록 2[Hz]의 4.5[V_{p-p}] 역 램프 신호를 구동전압으로 사용하여 초당 2회 온도 분포를 얻을 수 있도록 설계하였다.

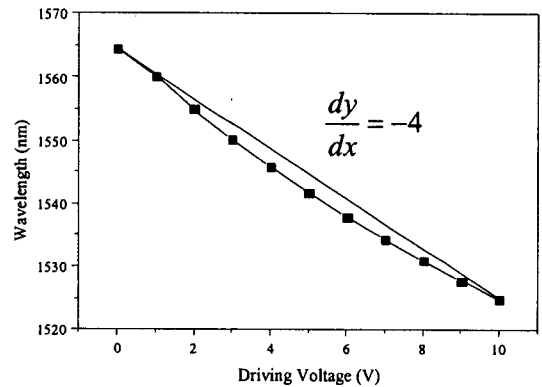


그림 2. 파장가변필터의 비선형특성
Fig. 2. The nonlinear wavelength tuning according to driving voltage

표 1. FP ITU 필터의 특성
Table 1. The characteristic of a FP ITU filter

Channel spacing([Ghz])	100
Wavelength Range([nm])	1525-1620
Finesse	75
Insertion Loss([dB])	< 3.0
Center channel accuracy([Ghz])	≤ ± 1.25

파장가변필터를 이용하는 FBG 센서의 복조방식은 필터의 선형적인 파장변화특성을 요구한다. 반사 스펙트럼의 피크가 검출되는 순간의 구동전압에 비례하는 크기의 온도를 출력으로 할당하기 때문이다. 만일 필터의 투과특성이 그림 2의 결과처럼 구동전압에 비선형적이라면, 기술한 방법은 구조적인 오차를 가지게 되기 때문이다. 구동주파수에 따라서 비선형 특성은 변화하므로 참조표(look-up table)를 이용하는 신호처리는 센서시스템의 동작범위를 크게

제한한다. 따라서 본 논문에서는 외부 조건에 관계 없이 일정한 파장 간격을 가지는 FPIF의 투과파장을 비선형성 보상의 기준으로 사용하였으며 사용된 FPIF의 특성은 표 1에 나타내었다.

FPIF가 상대적인 파장변화의 기준이라면 기준격자 RG(reference grating)는 파장의 절대값을 부여하기 위하여 사용되었다. 환경변화와 무관하게 동일한 파장을 반사시키기 위해 온도보상 패키징(40~85[°C] 범위에서 파장변화율 < 0.74[pm]/[°C])을 하였고 주요 동작특성은 다음 표 2와 같다.

표 2. 사용된 기준 FBG의 특성
Table 2. The characteristic of a reference FBG

반사파장 ([nm])	FWHM ([nm])	반사율 ([%])	온도민감도 ([pm]/[°C])
1539.71	0.18	96.2	0.74

2.3 실험 및 결과

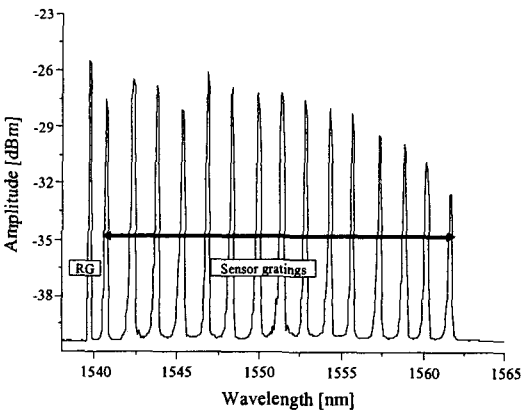


그림 3. FBG 어레이의 반사스펙트럼
Fig. 3. Reflection spectrum of FBG array

그림 3은 FBG 어레이의 반사스펙트럼을 PD1으로 검출한 것이다. 가장 작은 반사파장 피크가 기준 격자의 것이다. 선행연구에서는 2개의 기준 격자를 사용하여 동작주파수에 따른 파장스캔의 범위변화를 보상하였다. 그러나 센서의 수가 증가하고 그에 따른 파장스캔의 범위가 커짐에 따라서 측정오차를 줄이기 위해서는 더욱 많은 수의 기준파장이 요구되었

다. FPIF는 간격이 일정한 다수의 기준파장을 제공함으로써 이러한 요구조건을 만족시킬 수 있는 소자이다. 그림 4는 FPIF를 통과하여 PD2에서 얻은 출력으로 파장필터의 스캔범위 안에서 다수의 투과파장이 100[Ghz](0.8[nm]) 간격으로 존재하는 것을 보여준다. Fabry-Perot 필터의 투과파장은 환경적 변화에 의해서 그 위치가 변할수 있으나 그 간격은 일정하게 유지된다. 그러나 그림 5에서 FPIF의 피크분포를 선형 피팅한 결과와 비교한 것을 보면 FPIF 투과파장의 간격이 선형적이지 않은 것을 알 수 있다. 앞서 정적인 특성에서와 마찬가지로 파장가변필터의 동작특성이 비선형적이기 때문이다.

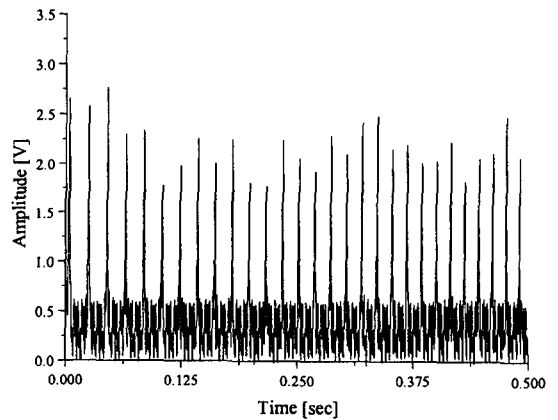


그림 4. FPIF의 출력 파형
Fig. 4. Output waveform of FPIF

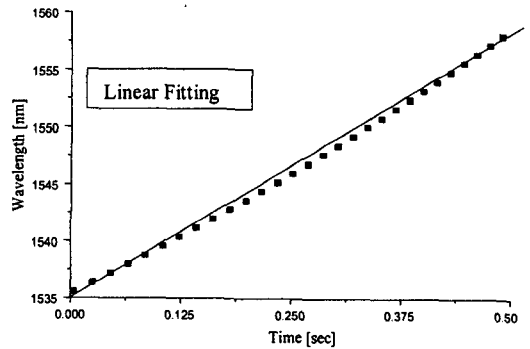


그림 5. FPIF 스펙트럼 피크의 선형 피팅
Fig. 5. Linear fitting of FPIF spectrum peaks

이런 경우에 오차를 줄이기 위한 신호처리는

1) PDI 출력의 피크위치 p_i 를 파악하고, 2) $a_j < p_i < a_{j+1}$ 을 만족하는 FPIF의 피크위치 a_j, a_{j+1} 을 파악하여, 3) 선형화된 $a_j \sim a_{j+1}$ 구간에서의 p_i 값을 기준격자와 a_j, a_{j+1} 으로부터 구하는 것이다. 즉 구간을 세분하여 선형화함으로써 이전의 경우보다 측정오차를 크게 줄일 수 있다. 그러나 이보다 더 효율적인 신호처리는 파장변화율을 함수로 구하여 p_i 를 입력으로 사용하는 것이다.

그림 6은 파장가변필터의 동작특성을 3차 다항식으로 피팅한 결과이며, 투과파장(λ)과 구동시간(t)의 관계식을 아래와 같이 얻을 수 있었다.

$$\lambda = \lambda_0 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t! \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1535 \text{ nm} \\ a_3 &= -1.89e^{-11} \\ a_2 &= 70.5e^{-12} \\ a_1 &= 44.4 \end{aligned}$$

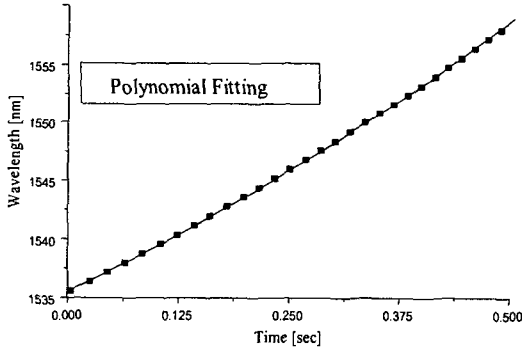


그림 6. FPIF 스펙트럼 피크의 다항식 피팅
Fig. 6. Polynomial fitting of FPIF spectrum peaks

위 식을 이용하면 센서어레이 피크의 위치에 해당하는 투과파장의 위치를 정확하게 계산할 수 있다.

FPIF와 다항식 피팅 알고리즘을 이용한 신호처리 방식의 효용성을 입증하기 위하여 두 가지 피팅 알고리즘을 적용하여 온도변화를 관측한 결과를 그림 7에 비교하여 나타내었다. 2번 FBG(1542.42[nm])를 수조에 넣은 후 온도 변화 추이를 관찰하였다. 약 60[°C]의 온수에서는 선형 피팅과 다항식 피팅 사이에서 최대 4[°C]의 오차가 측정되었으며, 수온이 2.6 [°C]일 때 1.6[°C]의 오차가 관측되었다. 여기에서 선

형 피팅 결과는 FPIF의 피크를 선형으로 피팅한 함수를 이용한 값으로 선형연구에서 2개의 기준격자를 사용한 것과 동일한 결과이다. 파장가변 필터가 구동전압에 따라, 선형적으로 동작하지 않음을 실험 결과로 확인한 것이며, 다항식 피팅으로 온도 변화율의 정밀도가 개선될 수 있음을 보인 것이다.

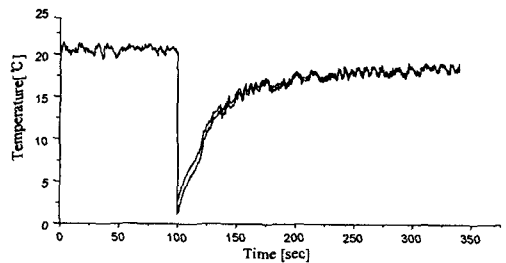
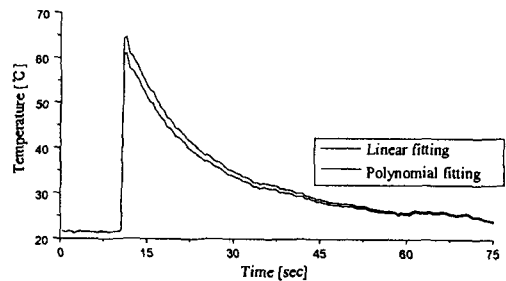


그림 7. 피팅에 따른 온수, 냉수의 온도 변화
Fig. 7. Temperature variation of hot and cold water according to linear and polynomial fitting method

그림 8은 중심파장이 각각 1552.93(6번), 1561.88 (15번)[nm]인 2개의 FBG를 TEC(thermo-electric cooler) 소자위에 고정시킨 뒤, 온도변화를 가하면서 측정할 결과이다. 다항식 피팅의 경우에는 2개 FBG 센서의 최고 온도가 각각 37.5, 37.1[°C]였으나, 선형 피팅의 경우에는 43.1, 37.8[°C]로 측정되었다. 또한 최저온도는 다항식 피팅의 경우, 22.7, 22.5[°C]로 관측되었지만, 선형 피팅의 경우에는 19.9, 22.3[°C]로 측정되었다.

그림 9는 TEC 소자를 이용하여 FBG 센서에 약 20~60[°C]의 온도변화를 주기적으로 인가한 후, 그 출력변화를 써모커플과 비교 관찰한 것이다. 다항식 피팅으로 비선형성을 보성한 FBG 센서와 기준 온도 센서로 사용한 thermocouple의 선형화 오차는

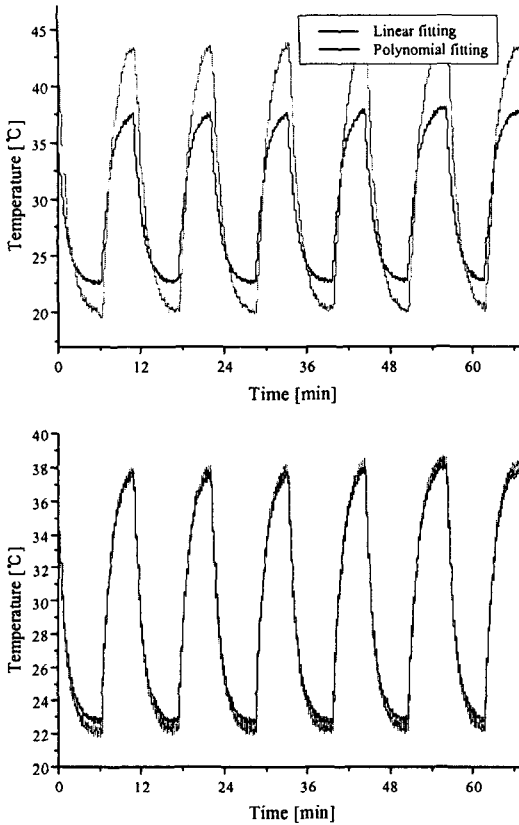


그림 8. 중심파장이 다른 FBG의 온도변화
Fig. 8. Temperature variation of different wavelength gratings

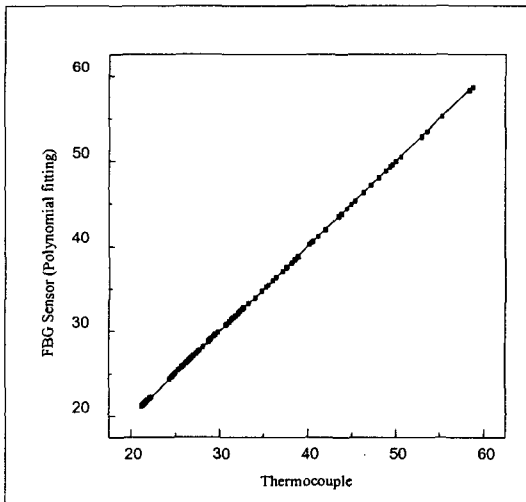


그림 9. FBG 센서와 써머커플의 비교
Fig. 9. Comparison of FBG sensor and thermocouple

0.18[%]로 온도변화를 충실히 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 15개의 센서 FBG를 이용하여 전력 설비를 위한 상시감시가 가능한 분배형 온도센서를 구현하였다. 파장검출의 범위 증가에 따라 발생하는 파장가변필터의 비선형 동작특성을 보상하기 위해 FPIF의 스펙트럼의 피크를 검출하여 이를 기준으로 다항식 피팅알고리즘을 이용하였으며, 제안된 알고리즘으로 스캔폭장의 범위에 관계없이, FBG 센서의 정밀도를 항상 일정하게 유지할 수 있고 센서 수의 확장에도 용이한 시스템을 구현할 수 있음을 확인하였다. 또한 후속 연구로 실용화가 이루어질 경우, 전력설비 안정성 확보와 조기경보 시스템의 개발로 효율적인 전력설비의 운용과 보수가 이루어져, 전력설비 운전의 품질을 향상시킴으로써, 기업의 제품품질 안정화와 경쟁력 향상될 것으로 기대된다.

이 연구에 참여한 연구자는 2단계 BK21사업의 지원비를 받았다.

References

- [1] <http://www.hani.co.kr/section-007000000/2003/08/007000000200308150702085.html>, 한겨레 신문 2003년 8월 15일 기사.
- [2] http://www.hani.co.kr/arti/society/society_general/112675.html, 한겨레 신문 2006년 4월 1일 기사.
- [3] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Applied Physics Lett.*, 32, pp. 647-649, 1978.
- [4] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, "Fibre optic Bragg grating sensors," *Proc. SPIE*, 1169, pp. 98-107, 1994.
- [5] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, "Bragg-grating temperature and strain sensors," *Proc. OFS*, 526, 1989.
- [6] K. O. Hill, B. Malo, K. A. Vineberg, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and I. Skinner, "Efficient mode conversion in telecommunication fiber using externally written gratings," *Electron. Lett.*, 26, pp. 1270, 1990.
- [7] R. J. Campbell and R. Kashyap, "Spectral profile and multiplexing of Bragg gratings in photosensitive fiber," *Opt. Lett.*, 16, pp. 898-900, 1991.
- [8] 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, pp. 1442-1462, 1997.

[9] 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, pp. 1370-1372, 1993.

[10] S. H. Yun, D. J. Richardson, and B. Y. Kim, "Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser," Opt. Lett., 23, pp. 843-845, 1998.

[11] 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 reference," Electron. Lett., 37, pp. 742-743, 2001.

[12] 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, pp. 1106-1111, 2000.

[13] Z. Jin and M. song, "Fiber grating sensor array interrogation with time-delayed sampling of a wavelength-scanned fiber laser," IEEE Photon. Technol. Lett., vol 16, pp. 1924-1926, 2004.

[14] H. Lee, Z. Jin and M. song, "Investigation of fiber Bragg grating temperature sensor for applications in electric power systems," Proc. SPIE, 5634, pp. 579-584, 2004.

[15] H. Lee, M. song, "FBG interrogation with a scanning Fabry-Perot filter and Gaussian line-fitting algorithm," 2005 IEEE LEOS Annual Meeting, 963-964, 2005.

[16] 박형준, 이준호, 송민호, "전력설비 보호를 위한 분배형 광섬유 온도센서," 조명전기설비학회 논문지, vol.20, no. 5, pp. 216~221, 2006.

◇ 저자소개 ◇

박형준 (朴亨浚)

1976년 6월 2일생. 2002년 전북대 제어계측공학과 졸업. 2004년 전북대 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 전북대학교 전자정보공학부 박사과정.

송민호 (宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대학교 전기공학부 졸업(박사). 1997~2000년까지 Pennsylvania 주립대학의 Post-Doc tor로 일하였으며 2000년 9월 이후 전북대학교 전자정보공학부 부교수 재직.