

전력설비 보호를 위한 온도계전기용 광섬유 분배센서

(Distributed fiber-optic sensor network for the over temperature protection relay of electric power systems)

박형준* · 이준호 · 송민호

(Hyung-Jun Park* · June-Ho Lee · Minho Song)

Abstract

We proposed a distributed fiber-optic sensor system, with 10 fiber Bragg gratings, for over temperature protection relay in power systems. We applied Gaussian line-fitting algorithm to compensate the distortion effects in the wavelength-scanned Farby-Perot filter demodulation scheme. Compared with the highest-peak-detection method, the proposed algorithm was proved to minimize the random errors of distorted PD profiles. From experimental results, the overall measurement error was within 1 % compared with the reference thermocouple and the linearity error was less than 0.37 %.

1. 서 론

전력수요 증가함에 따라서 전력설비들의 대형, 고압, 대전류화가 요구된다. 대형 전력설비는 환경적 재난이나, 시설의 노후화, 또는 인위적인 영향에 의한 사고가 발생하는 경우, 큰 사회적 혼란과 경제적 손실을 야기할 수 있다[1]. 전력설비나 전력공급 계통은 대부분 사고가 발생하기 전에 과부하에 의한 비정상적인 온도상승이나 화재, 폭발과 같은 열적 현상으로 이상 징후를 표출한다. 국내에서도, 4월 1일 전력공급 계통의 과부하로 인한 제주도 전역에서 대규모 정전사태가 발생하였다[2]. 과부하로 인한 한계온도 이상의 동작을 감시하여 조기에 경보함으로써 전력시스템의 사고발생시 피해확산을 최소화 하므로 이를 위한 전력설비와 전력공급 계통의 주변 온도 상승 감시체계가 필요하다.

그러나 기존의 온도감시 및 경보시스템은 전력설비와 전력공급 계통의 주변의 강한 전자기장에 영향을 받으며, 여러 곳의 정보를 알기 위한 분배형 센서 네트워크를 구성할 경우, 병렬로 연결되어 연결선이 복잡해지고, 대형·중량화 되는 등의 단점을 가진다. 광섬유격자(fiber Bragg grating, 이하 FBG)는 전자기장의 영향에 둔감하며, 하나의 광섬유 라인에 여러 개의 센서점을 직렬로 연결하여 동시에 여러 부위의 온도를 측정할 수 있는 분배형 온도센서의 구현이 가능하다는 장점으로 전력설비의 안전성 진단에 적합한 센서 시스템으로 주목받아왔다[3-7]. 본 논문에서는 FBG의 이러한 장점을 이용하여 전력설비의 온도를 상시감시할 수 있는 분배형 온도센서 시스템을 파장가변필터(wavelength-scanned tunable filter)를 이용하여 구성하

였다[5-11]. 10개의 FBG를 이용하여 센서네트워크를 구성하였으며, 2개의 기준 FBG를 따로 두어 온도측정의 정밀도를 향상시켰다. FBG 센서에 가해지는 기계적 변형이나 압력 등의 영향을 보상하기 위하여 광검출기의 출력신호를 가우시안 line-fitting한 후 이로부터 피크의 위치를 계산하는 방법을 사용하여 기존의 최대값 검출 방식과 비교분석하였으며, 이로부터 크게 개선된 측정 오차를 얻을 수 있었다. 가우시안 fitting에 의한 연산량을 줄이기 위하여 평균제곱오차(mean square error)에 이진검색법을 적용하였으며, 외부의 압력이나 스트레인에 의한 왜곡의 영향을 현저하게 줄일 수 있음을 확인하였다.

2. 서 론

2.1. 광섬유 격자 센서

광섬유격자(FBG)는 250 nm 대역의 파장을 갖는 자외선레이저를 광섬유의 측면에 조사하여 광섬유 코어내부에 주기적인 격자(grating)를 생성한 것이다. 레이저의 조사량에 따라 코어의 굴절률이 변화하며 다수의 경계면에서 광신호의 일부가 반사 또는 투과하는 과정을 거치면서 다중간섭을 일으키어 위상조건을 만족시키는 파장만을 반사 또는 굴절시키는 역할을 하게 된다. 광섬유격자는 그 용도와 형태에 따라서, FBG, LPG(long-period grating), CFBG(chirped FBG), SFBG(sampled FBG) 등의 다양한 종류가 있으나, FBG가 가장 많이 사용되며 그림 1과 같은 구조와 동작특성을 갖는다.

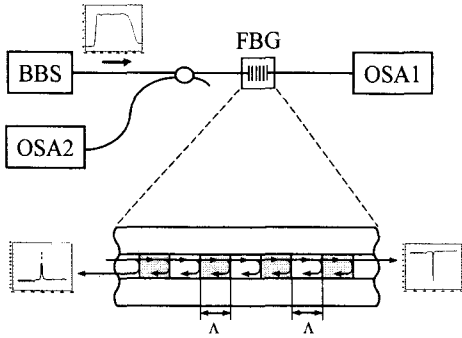


그림 1 그림 1. FBG의 반사·투과 특성
Fig. 1. Reflection/transmission of FBG
(BBS: broadband source, OSA: optical spectrum analyzer)

그림에서 광폭광원(broadband source, 이하 BBS)의 출력이 방향성결합기(directional coupler)를 통해 FBG에 입사하는 경우, FBG의 위상조건을 만족하는 파장은 반사되고 나머지 파장성분은 투과하는 FBG의 동작특성을 보여준다. 위상조건을 만족하여 FBG에서 반사되는 파장은 다음 식 (1)에 의해 결정된다.

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

위 식에서 n_{eff} 는 FBG의 유효굴절률이며 Λ 는 굴절을 변화의 간격이므로 반사파장은 굴절률과 격자간격에 변화가 가해지는 경우 달라지게 된다. 일반적으로 광섬유의 주원료인 실리카(silica glass, SiO₂)는 온도의 변화에 따라 굴절률이 변화하며 FBG의 반사파장도 따라서 같이 변화하게 되는데 실리카 광섬유 FBG의 온도에 따른 파장변화율은 다음과 같이 알려져 있다.[3]

$$\lambda_B = 2\Lambda \left[n_{eff} + n_{eff}\alpha\Delta T + \frac{dn_{eff}}{dT}\Delta T \right] \quad (2)$$

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right] \Delta T \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} = \alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT}$$

(4)

위식에서 α 는 광섬유의 열팽창계수(thermal expansion coefficient), dn/dT 는 온도에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학계수(thermo-optic coefficient)로 실리카(SiO₂)의 경우 각각 $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 정도의 값을 가지나 광민감성(photosensitivity) 광섬유의 특성에 따라 그 값은 조금씩 달라진다. 두 가지 파장변화 요인을 모두 고려할 때, 1550 nm 파장대역에서 FBG의 온도에 따른 반사파장 변화는 대략 $10 \sim 20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 정도의 범위를 가진다[4][5]. 따라서 1 °C의 온도변화를 측정하는 센서시스템을 제작하기 위해서는 복조시스템의 FBG 반사파장

분해능이 10 pm 보다 우수한 파장분해능을 가져야 한다.

2. 2. FBG 온도센서 시스템의 구성

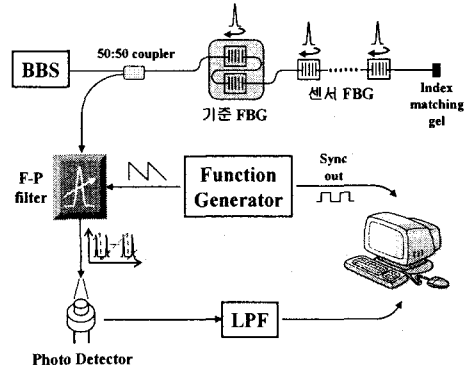


그림 2. FBG 온도센서 시스템의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of FBG temperature sensor system

그림 2는 제작한 FBG 온도센서 시스템의 개략적인 구성도이다. 광원의 출력이 50:50의 분리비를 가지는 광섬유 커플러를 거쳐서 FBG 센서어레이로 입사하며, 각 FBG 센서에서 반사된 광신호는 다시 커플러와 FP(Fabry-Perot) 필터를 거쳐 PD(photodetector)에서 전기신호를 발생시킨다. FBG가 연결된 광섬유의 끝단에는 index matching gel을 발라서 절단면에서 반사되는 광노이즈를 제거하였다. PD출력신호는 저대역 통과필터를 거친 후, DAQ 보드에 입력되어 컴퓨터로 읽어 들여지고 그 피크의 위치를 검출하여 온도변화를 읽어내는 구조를 가지고 있다[14].

본 연구에서 사용한 방법은 FBG를 하나의 광섬유 라인에 직렬로 연결하므로, 각 FBG의 반사파장은 서로 겹치지 않아야 한다. 기술한 바와 같이 FBG의 온도에 대한 민감성은 대략 $\sim 1 \text{ nm}/100^\circ\text{C}$ 정도이므로 측정하고자 하는 전력설비의 온도변화가 200°C 정도임을 가정하여, 각 센서 FBG의 초기 반사파장은 2 nm 이상의 파장간격을 유지하도록 설정하였다. 2개의 기준 FBG는 측정대상체가 아닌 시스템의 외함내부에 설치되어 온도 변화에 무관하게 일정한 파장만을 반사시켜야 하므로, 온도보상 패키징을 이용하여 $-20 \sim 80^\circ\text{C}$ 범위에서 $< 1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 의 매우 낮은 온도민감도를 가지도록 구성하였다. 온도변화에 따른 FBG 반사파장의 변화를 읽어내기 위해서, 일정한 파장대역만을 통과시키는 광학적 패스밴드 필터인 FP 필터를 이용하는 복조방식을 사용하였다. FP 필터에 램프신호를 가하고 FBG의 반사광을 통과시키면 FP 필터는 일정한 파장범위의 스펙트럼을 주기적으로 스캔하여 전기신호의 파형으로 변환하는 효과를 얻게 된다. 이 과정은 그림 3으로 설명될 수 있다.

그림 3(a)는 FBG 반사스펙트럼을 광과장분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 이용하여 측정된 것이고, 그림 3(c)는 램프신호로 스캔되는 FP 필터를 통과한 광신호를 PD를 이용하여 검출한 전기적인 출력 파형이다. 즉, FP 필터스캔을 이용하여 광학적인 스펙트럼분포가 전기적인 파형으로 변환되며, 이 파형의 피크위치변화를 검출하는 것은 FBG 반사파장 변화를 측정하는 것과 동일한 효과를 얻게 된다. 실험에 사용된 12개의 FBG 반사파장 범위가 1540.08~1559.99 nm이므로 20 nm 이상의 파장범위를 스캔할 수 있도록 4.5 Vp-p의 크기와 2 Hz의 주파수를 가지는 램프전압을 FP 필터에 가하여 약 25 nm의 파장범위를 스캔하였다.

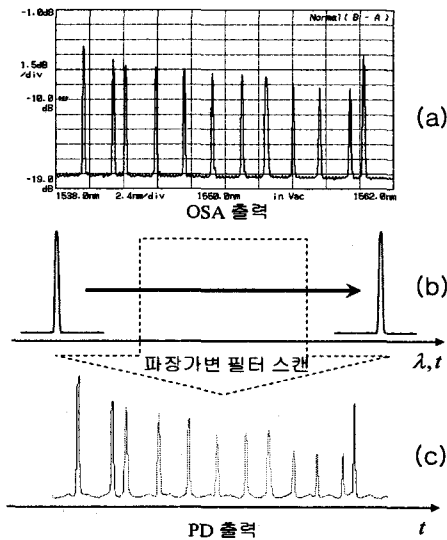


그림 3 FBG 반사신호의 복조(a: OSA 출력, b: 파장필터 스캔, c: PD 출력)
Fig. 3. Demodulation of FBG signal

2. 3. 실험 및 결과

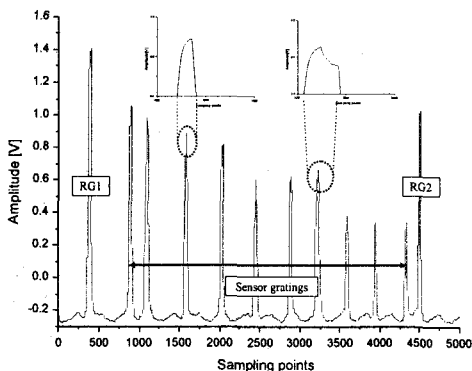


그림 4. PD 출력파형
Fig. 4. Output waveform of PD

그림 4는 12개의 FBG 반사스펙트럼을 PD로 검출한 출력신호이며, 양 끝단에 위치한 피크가 2개의 기준 FBG 반사파장에 의한 신호이다. 2개의 기준 FBG는 그 파장이 변하지 않음을 가정하여, 시간축 상에 위치한 각 피크들의 기준파장으로 동작한다. 2개의 기준 FBG를 사용한 것은 파장가변필터의 동작주파수가 변하는 경우, 동일한 전압에 대해서도 파장스캔의 범위가 변하는 것을 보상하기 위함이다. 기준 파장의 수가 보다 커지고 그 간격이 좁아질수록 정확한 계산이 가능하게 된다. 그림 3에서 설명되었듯이 온도에 의한 FBG의 반사파장 변화는 PD 출력의 피크위치 변화로 변환되었으므로 피크위치를 정확하게 검출하는 것이 FBG 센서시스템의 정밀도를 결정하게 된다. 따라서 전체 파장범위를 샘플링하는 간격에 따라, 즉 샘플링 주파수에 따라, 기본적인 양자화 해상도가 정해지게 되는데, 본 연구의 목적은 전력설비의 비정상적인 동작온도 감지에 있으므로 최대 해상도를 1 °C로 설정하였다. 이 경우 20 nm의 파장범위에 대해서 1 °C의 온도변화에 해당하는 10 pm의 파장변화를 감지하기 위해서는 2,000샘플 이상을 얻어야 하므로 샘플링 주파수를 5 kHz로 설정하였고, 양자화에 따른 파장분해능은 48 pm로 계산되었다.

FBG의 반사스펙트럼은 이상적인 경우, 가우시안(Gaussian)과 근사한 파형을 이루어 좌우 대칭의 형태를 가진다. 그러나 외부의 압력이나 스트레인을 받는 경우 반사파형은 불규칙하게 변형되며 그 피크의 위치는 작은 변형에도 쉽게 변화되어 결국 시스템의 해상도의 저하시키는 요인으로 작용하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 PD로 검출한 FBG의 반사파형을 가우시안의 형태로 가정하고 line-fitting을 수행하고 계산된 파형의 중심값을 FBG 센서의 출력으로 설정함으로써 외부 노이즈에 의한 영향을 최소화 하고자 하였다[13].

그림 5은 기술한 바와 같이 불규칙한 외부 스트레인에 의해서 변형된 센서 FBG의 반사스펙트럼과 이를 가우시안 fitting하여 계산한 파형을 보인다. PD의 출력이 계산된 파형의 최대값과 일치하지 않음을 확인할 수 있는데, 샘플링과정의 양자화오차, 필터링에서의 파형왜곡, 또는 FBG에 가해지는 외부압력에 의한 스펙트럼 왜곡 등에 의해서 그 최대값의 위치가 불규칙하게 변화하였기 때문이다. Fitting에 의한 파형은 PD 출력과의 평균제곱오차(mean square error, MSE)를 최소화하는 형태로 생성되므로 다양한 원인에 의해서 발생하는 오차를 크게 줄일 수 있게 된다.

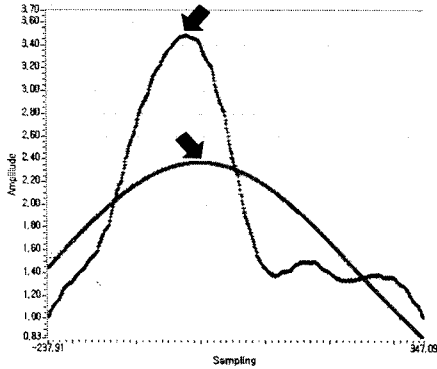


그림 5. 가우시안 라인 피팅
Fig. 5. Gaussian line-fitting

PD 출력의 피크 위치는 온도에 따라서 달라지므로 중심이 고정된 경우에 비하여 curve-fitting은 복잡한 과정을 거친다. 본 논문에서는 PD 출력에서 기준값(1 V) 이상을 갖는 12개의 최대값에 대해 새로운 배열을 생성하고 각 피크에 대하여 fitting을 수행하였다. 하나의 FBG 반사파장의 최대값이 n개의 데이터로 이루어진 배열에 저장되어 있다면 가우시안 함수의 중심을 n번 이동시키며 fitting을 수행하고, 각 위치에서의 계산결과와 데이터간의 평균제곱오차는 새로운 배열에 저장된다. 평균제곱오차가 최소화되는 위치가 해당 센서의 출력이 되며 이러한 계산과정은 많은 연산을 요구하므로 이진 검색법을 이용하여 계산량을 1/10이하로 줄였다.

그림 6은 측정방법을 달리하여 얻어진 온도측정실험의 결과이다. 차례대로 FBG 센서의 출력파형을 단순한 최대값 검색으로 측정한 경우와, 가우시안 fitting을 사용한 결과, 그리고 기준 온도계로 사용한 써모커플(thermocouple)의 출력을 보인다. 최대값 검색의 경우, 온도변화를 가하지 않고 얻은 출력의 최대 진폭은 3~6°C에 해당하였고, 큰 변화를 제외하고도 약 1.8 °C 범위의 온도변화를 얻었다. 써모커플을 이용한 측정에서도 FBG 센서를 최대값 검색한 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 반면 가우시안 line-fitting을 가하여 측정한 경우에는 약 0.3 °C내외의 범위에서 안정적으로 동작하고 있음으로 보여준다.

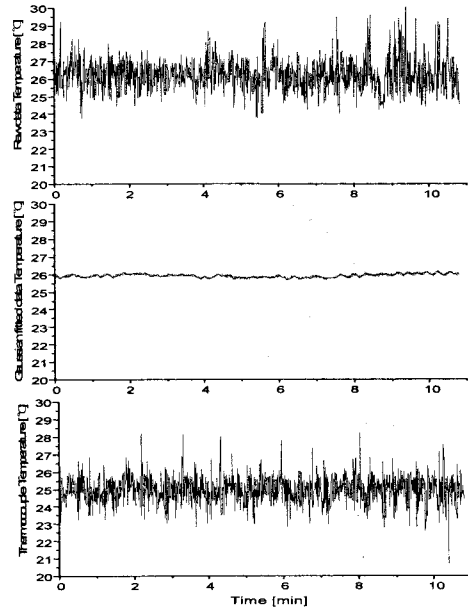


그림 6. 단순검색, 가우시안 fitting, 써모커플을 이용한 측정의 노이즈레벨
Fig. 6. Noises of Raw-, Gaussian-fitted- and Thermocouple-data

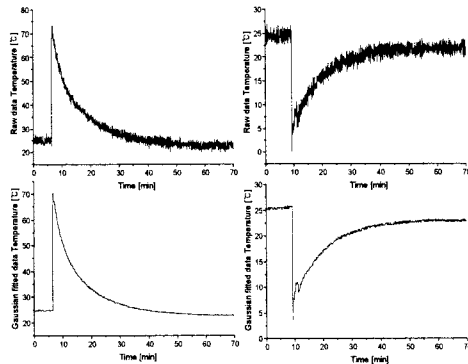


그림 7. 최대값검출 방법에 따른 냉수의 온도변화
Fig. 7. Gaussian line-fitted data vs. Raw data (with temperature variation of hot and cold water)

그림 7은 FBG 센서를 실온에서 약 75 °C의 온수와 5 °C의 냉수에 넣은 후 출력변화를 관찰한 그래프이다. 역시 최대값 검출방식을 이용한 경우와 가우시안 fitting 알고리즘을 이용한 경우를 비교하였고, 온도변화를 충실히 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

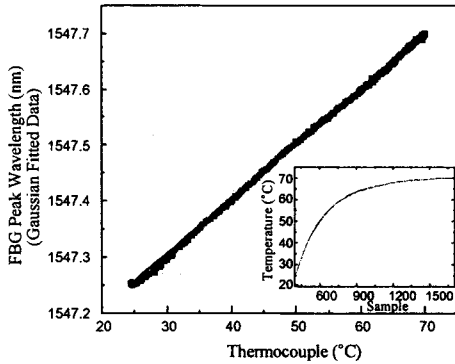


그림 8. 써모커플 vs. 가우시안 line-fitting
Fig. 8. Thermocouple vs. Gaussian line-fitting

식 (4)에서 정의한 온도에 따른 파장의 변화율을 이용하여, 온도에 따른 센서 FBG의 파장변화량을 측정하여, 그림 8에서 그래프로 표현하였다. 약 25~70°C까지의 온도변화는 기준 온도계로 사용한 써모커플의 출력이며 측정값을 fitting한 결과와 측정값 사이의 최대 선형화 오차는 0.367 %이며 온도에 따른 파장변화량은 1547.26 nm 중심파장에서 약 12.9 pm/°C 이었다.

3. 결 론

전력설비가 적정 온도에서 작동하는지 상시 감시 할 수 있는 준분배형 FBG 온도 시스템을 구성하였다. 총 10개의 센서 FBG를 이용한 광섬유 온도센서 시스템을 구현하였고, 다양한 온도변화를 가함으로써 실제 현장에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 출력신호를 가우시안 line-fitting한 후 최대값을 검출함으로써 전기적인 노이즈와 샘플링에 의한 양자화 오차를 최소화 하였으며, 단순 피크 검출과 비교하여 10배 정도 향상된 0.3~0.6°C 범위의 정밀도를 얻을 수 있었다. 또한, 제안된 알고리즘으로 왜곡된 FBG 반사 스펙트럼의 피크 검출시에도, 높은 정밀도와 동작 안정성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 실제 현장에 적용할 경우 발생할 수 있는 환경적 변화에 따른 복조방식의 오동작과 오차는 제안된 방법으로 크게 줄일 수 있으며, FBG 센서의 실용성을 증가 시킬 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[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
[1] 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, 647-649, 1978.
[2] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, "Fibre optic Bragg grating sensors," *Proc. SPIE*, 1169, 98-107, 1994.
[3] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, "Bragg-grating temperature and strain sensors," *Proc. OFS*, 526, 1989.
[4] 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, 1270, 1990.
[5] R. J. Campbell and R. Kashyap, "Spectral profile and multiplexing of Bragg gratings in photosensitive fiber," *Opt. Lett.*, 16, 898-900, 1991
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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, 843-845, 1998.
[9] 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, 742-743, 2001.
[10] 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.
[11] 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.
[12] H. Lee, Z. Jin and M. song, "Investigation of fiber Bragg grating temperature sensor for applications in electric power systems," *Proc. SPIE*, 5634, 579-584, 2004.
[13] 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.