

전력설비 보호를 위한 분배형 광섬유 온도센서

(Distributed Fiber-Optic Temperature Sensor Network for Protection of Electric Power Systems)

박형준* · 이준호 · 송민호**

(Hyoung-Jun Park · June-Ho Lee · Min-Ho Song)

요 약

전력설비의 비정상적인 온도변화를 감시할 목적으로 10개의 광섬유격자를 이용하여 1[°C] 이내의 온도분해능을 가지는 분배형 광섬유 온도센서를 제작하였다. 과장가변 FP 필터를 스캔하여 얻어지는 PD 출력파형의 피크위치를 검색하여 광섬유격자 센서의 출력변화를 읽어내었고, 가우시안 line-fitting 알고리즘으로 광섬유격자의 반사스펙트럼 왜곡에 의한 영향을 보상하고 정밀도를 향상시켰다. 제작한 센서시스템과 기준 온도계로 사용한 thermocouple 간의 측정값 오차는 1[%] 이내이며, 선형화 오차는 약 0.37[%]으로 측정되었다.

Abstract

We developed a fiber-optic temperature sensor system, with 10 fiber Bragg gratings, for abnormal high-temperature monitoring in power systems. We used Gaussian line-fitting algorithm to compensate the spectrum distortion in the wavelength-scanned Farby-Perot filter demodulation scheme. Compared with highest-peak-detection method, the proposed algorithm substantially reduced measurement errors. The overall measurement error was less than 1[%] compared with the reference thermocouple and the linearity error was 0.37[%].

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

1. 서 론

전력설비가 대형, 고압, 대전류화 되면서, 환경적 또는 인위적인 영향에 의한 사고가 발생하는 경우,

큰 사회적 혼란과 경제적 손실을 야기할 수 있다. 전력설비는 대부분 비정상적인 온도상승과 같은 열적 현상으로 이상 징후를 표출한 후, 화재, 폭발과 같은 사고로 이어지게 된다. 따라서 한계온도 이상의 동작을 감시하여 조기에 경보함으로써 전력시스템의 사고를 방지하거나 피해확산을 최소화 할 수 있으며, 따라서 이를 위한 전력설비의 주변 온도 상시 감시 체제가 필요하다.

그러나 기존의 온도감시 및 경보시스템은 전력설

* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 박사과정

** 교신저자 : 전북대학교 전자정보공학부 부교수

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

E-mail : spacegon@chonbuk.ac.kr

접수일자 : 2006년 2월 21일

1차심사 : 2006년 2월 27일

심사완료 : 2006년 3월 27일

비 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[1-3]. 본 논문에서는 FBG의 이러한 장점을 이용하여 전력설비의 온도를 상시감시할 수 있는 준분배형 온도센서 시스템을 파장가변필터(wavelength-scanned tunable filter)를 이용하여 구성하였다[4]. 10개의 FBG를 이용하여 센서네트워크를 구성하였으며, 2개의 기준 FBG를 따로 두어 온도 측정의 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 검출방식과 비교분석하였으며, 이로부터 크게 개선된 측정오차를 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 확인 하였다.

2. 본 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[5]. (이에 관한 이론적인 내용은 많은 문헌에서 다루어졌으므로 본 논문에서는 생략하도록 한다.) 광섬유격자는 그 용도와 형태에

따라서 FBG, LPG(long-period grating), CFBG(chirped FBG), SFBG(sampled FBG) 등의 다양한 종류가 있으나, 센서응용에서는 FBG가 가장 많이 사용되며 그림 1과 같은 구조와 동작특성을 갖는다.

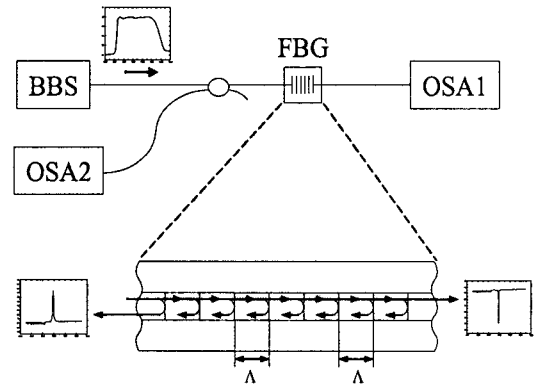


그림 1. FBG의 반사·투과 특성
 Fig. 1. Reflection/transmission of FBG
 (BBS: broadband source, OSA: optical spectrum analyzer)

그림에서와 같이 광폭광원(broadband source, 이하 BBS)의 출력이 광섬유 커플러(directional coupler)를 통해 FBG에 입사하는 경우, FBG의 위상조건을 만족하는 파장은 반사되고 나머지 파장성분은 그대로 투과한다. Bragg 이론에 따르면 위상조건을 만족하여 FBG에서 반사되는 파장은 다음 식 (1)에 의해 결정된다.

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

위 식에서 n_{eff} 는 FBG의 유효굴절률이며 Λ 는 굴절률 변화의 간격이므로 반사파장은 굴절률과 격자간격에 변화가 가해지는 경우 달라지게 된다. 일반적으로 광섬유의 주원료인 실리카(silica glass, SiO_2)는 온도의 변화에 따라 굴절률이 변화하며 FBG의 반사파장도 따라서 같이 변화하게 되는데 실리카 광섬유 FBG의 온도에 따른 파장변화율은 다음과 같이 알려져 있다[3].

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

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} = \alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \quad (3)$$

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 $0.5 \times 10^{-6}/CENTIGRADE$, $11 \times 10^{-6}/CENTIGRADE$ 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 $10 \sim 20 \text{ pm}/CENTIGRADE$ 정도의 범위를 가진다 [5]. 따라서 1[°C]의 온도변화를 측정하는 센서시스템을 제작하기 위해서는 복조시스템이 10[pm] 보다 우수한 파장분해능을 가져야 한다.

2.2 FBG 온도센서 시스템의 구성

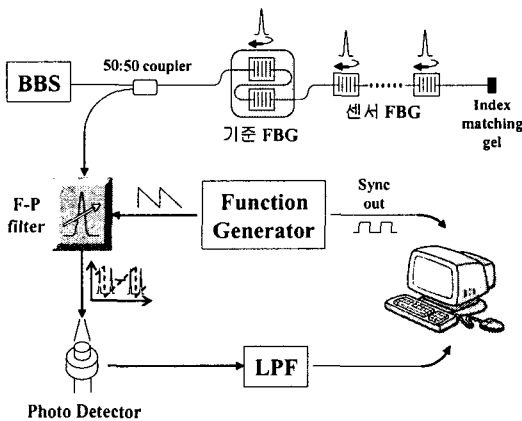


그림 2. FBG 온도센서 시스템의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of FBG temperature sensor system

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(photo-detector)에서 전기신호를 발생시킨다. FBG가 연결된 광섬유의 끝단에는 index matching gel을 발라

서 절단면에서 반사되는 광노이즈를 제거하였다. PD출력신호는 저대역 통과필터를 거친 후, DAQ 보드에 입력되어 컴퓨터로 읽어 들여지고 그 피크의 위치를 검출하여 온도변화를 읽어낸다.

광원은 12개의 FBG 파장범위를 포함하는 대역폭과 고출력을 동시에 얻을 수 있도록 고출력 광폭광원인 SLD(superluminescent diode)를 사용하였으며, 그 제원을 표 1에 나타내었다.

표 1. SLD 광원 (NXTAR SLD-500)
Table 1. Specification of the SLD source

중심파장	1550±20[nm]
3-[dB] 대역폭	71.8[nm]
광파워밀도	≥3[mW]

기존의 LED(light emitting diode)는 저렴하고 사용이 편리한 장점이 있으나 출력이 매우 작아서(수 [μW]) 긴 적분시간을 요구하므로 시스템의 응답특성을 저하시키는 단점을 갖는다.

본 연구에서는 다수의 FBG를 하나의 광섬유 라인에 직렬로 연결하므로, 각 FBG의 반사파장은 서로 겹치지 않아야 한다. 실험에서 사용한 FBG의 온도에 대한 민감성은 대략 1[nm]/100[°C] 정도이므로 측정하고자 하는 전력설비의 온도변화 범위를 200[°C] 정도로 가정하여, 각 센서 FBG의 반사파장은 2[nm] 이상의 간격을 유지하도록 설정하였다. 실험에 사용된 기준 FBG와 센서 FBG의 초기 반사파장과 반사율 등의 제원을 표 2에 나타내었다.

2개의 기준 FBG는 측정대상체가 아닌 시스템의 외함내부에 설치되어 온도변화에 무관하게 일정한 파장만을 반사시켜야 하므로, 온도보상 패키징을 이용하여 -20~80[°C] 범위에서 < 1[pm/[°C]]의 매우 낮은 온도민감도를 가지도록 구성하였다.

온도변화에 따른 FBG 반사파장의 변화를 읽어내기 위해서, 일정한 파장대역만을 통과시키는 광학적 패스밴드필터인 FP 필터를 이용하는 복조방식을 사용하였다. 사용한 FP 필터의 제원은 표 3과 같으며 필터에 가해지는 전압에 따라 패스밴드의 파장이 선형적으로 변화하는 특성을 가진다. 기존의 연구에서는 반투명 코팅을 한 광섬유를 맞댄 구조의 FP 필터

를 이용하였으나 온도변화에 따른 패스밴드의 파장 변화가 심하여 MEMS 기술로 제작된 FP 필터를 사용하였다. 패스밴드가 반복되는 주기를 나타내는 FSR이 80[nm]이므로 2[nm] 간격으로 배치할 경우 FBG를 40개까지 동시에 신호처리할 수 있을 것이다. 0~10[V]의 구동전압은 내부 승압회로를 이용하여 70~100[V]로 필터에 가해진다.

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

	반사파장 ([nm])	FWHM ([nm])	반사율 ([%])	온도민감도 ([pm/°C])
RG1	1540.08	0.17	96.54	0.74
RG2	1559.99	0.16	92.70	0.63
SG1	1542.09	0.18	95.75	.
SG2	1543.04	0.17	95.56	.
SG3	1545.19	0.17	94.79	.
SG4	1547.21	0.195	95.97	.
SG5	1549.22	0.17	90.83	.
SG6	1551.33	0.18	94.84	.
SG7	1553.09	0.27	96.09	.
SG8	1554.99	0.16	93.29	.
SG9	1556.80	0.15	92.67	.
SG10	1558.96	0.16	94.11	.

표 3. 파장가변 필터의 제원(@1550[nm])
Table 3. Specification of the Fabry-Perot filter

Free Spectral Range([nm])	80
Finesse	4000
Bandwidth([GHz])	4
Max. Tuning Voltage([V])	10

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[6-7].

그림 3 (a)는 FBG 반사스펙트럼을 광파장분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 이용하여 측정 한 것이고, 그림 3 (c)는 램프신호로 스캔되는 FP 필

터를 통과한 광신호를 PD를 이용하여 검출한 전기적인 출력파형이다. 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[nm]이므로 20[nm] 이상의 파장범위를 스캔할 수 있도록 4.5 Vp-p의 크기와 2[Hz]의 주파수를 가지는 램프전압을 FP 필터에 가하여 약 25[nm]의 파장범위를 스캔하였다.

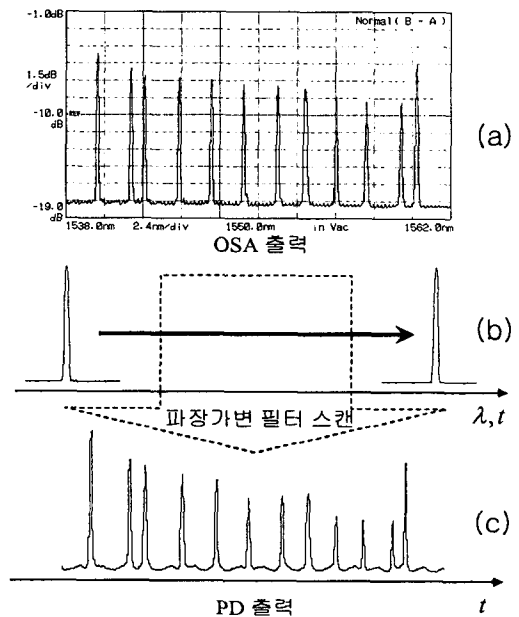


그림 3. FBG 반사신호의 복조(a: OSA 출력, b: 파장필터 스캔, c: PD 출력)
Fig. 3. Demodulation of FBG signal

2.3 실험 및 결과

그림 4는 12개의 FBG 반사스펙트럼을 PD로 검출한 출력신호이며, 양 끝단에 위치한 피크가 2개의 기준 FBG에 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

전력설비 보호를 위한 분배형 광섬유 온도센서

범위가 변하는 것을 보상하기 위함이다. 기준 파장의 수가 보다 커지고 그 간격이 좁아질수록 정확한 계산이 가능하게 된다[8]. 그림 3에서 설명되었듯이 온도에 의한 FBG의 반사파장 변화는 PD 출력의 피크위치 변화로 변환되었으므로 피크위치를 정확하게 검출하는 것이 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 감시에 있으므로 최대 해상도를 1[°C]로 설정하였다. 이 경우 20[nm]의 파장 범위에 대해서 1[°C]의 온도변화에 해당하는 10[pm]의 파장변화를 감지하기 위해서는, 2,000샘플 이상을 얻어야 하므로 샘플링 주파수를 5 kHz로 설정하였고, 이에 따른 이론적인 파장분해능은 4.8[pm]로 계산되었다.

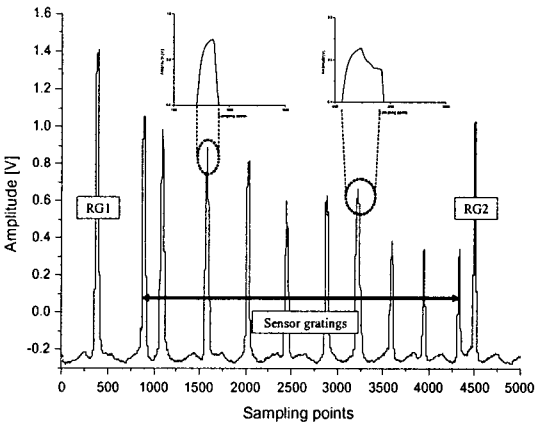


그림 4. PD 출력파형
Fig. 4. Output waveform of PD

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 수행하였다. 이로부터 계산된 가우시

안 파형의 중심값을 FBG 센서의 출력으로 설정함으로써 외부 노이즈에 의한 영향을 최소화 하였다[9].

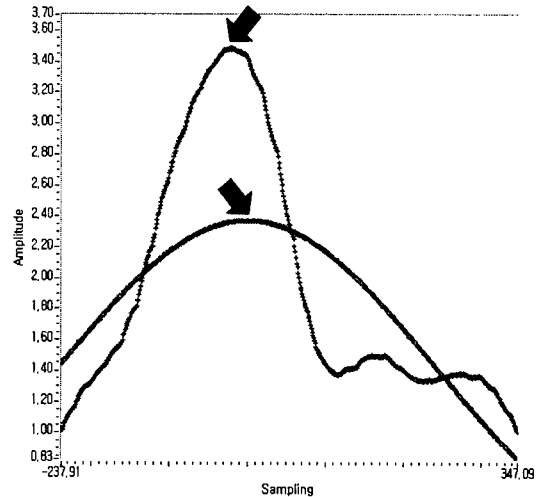


그림 5. 가우시안 라인 피팅
Fig. 5. Gaussian line-fitting

그림 5는 불규칙한 외부 스트레스에 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. 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. 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 이진검색법을 이용하여 계산량을 1/10이하로 줄였다.

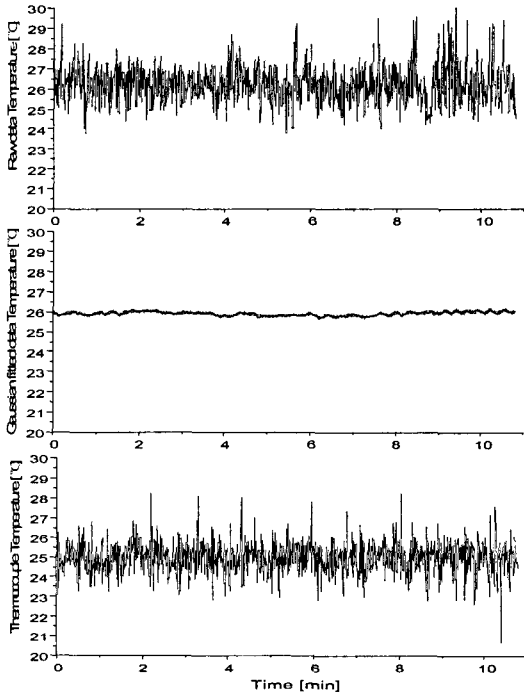
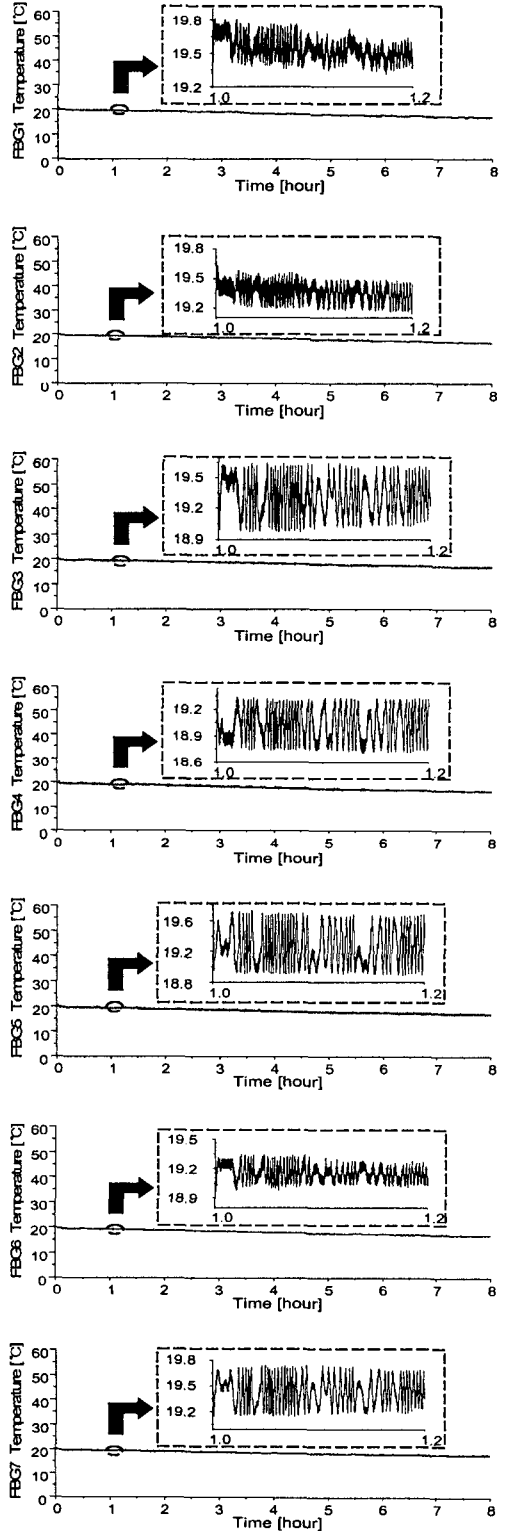


그림 6. 단순검색, 가우시안 fitting, 써모커플을 이용한 측정의 노이즈레벨
 Fig. 6. Noises of Raw-, Gaussian-fitted- and Thermocouple-data

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 출력이다. 최대값 검색의 경우, 출력의 최대 진폭은 3~6[°C]에 해당하였고, 큰 변화를 제외하고도 약 1.8[°C] 범위의 불규칙한 온도변화를 나타내었다. 써모커플을 이용한 측정에서도 FBG 센서를 최대값 검색한 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

반면 가우시안 line-fitting을 이용한 경우에는 약 0.3[°C] 내외의 범위에서 안정적으로 동작하고 있음으로 보여주어 기존의 최대값 검색방법이나 전기적 온도센서에 비하여 우수한 성능을 확인할 수 있다.



전력소비 보화를 위한 분배형 광섬유 온도센서

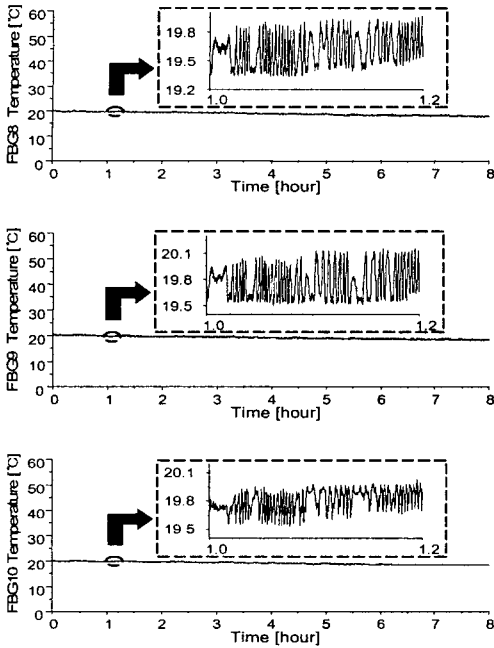


그림 7. 센서 FBG 의 온도변화와 랜덤 워크
Fig. 7. Temperature variation and random walk of sensor gratings

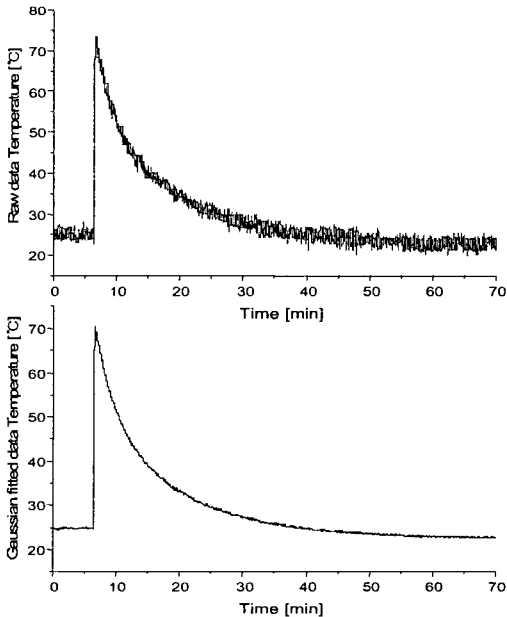


그림 8. 최대값검출방법에 따른 온수의 온도변화
Fig. 8. Gaussian line-fitted data vs. Raw data (with temperature variation of hot water)

그림 7은 8시간 동안 센서 FBG 10개의 온도변화를 가우시안 fitting 알고리즘으로 측정하고 표시한 그래프이다. 장시간의 측정에서도 0.2~0.6[°C] 범위 안에서 안정적으로 동작하고 있음을 확인할 수 있었다.

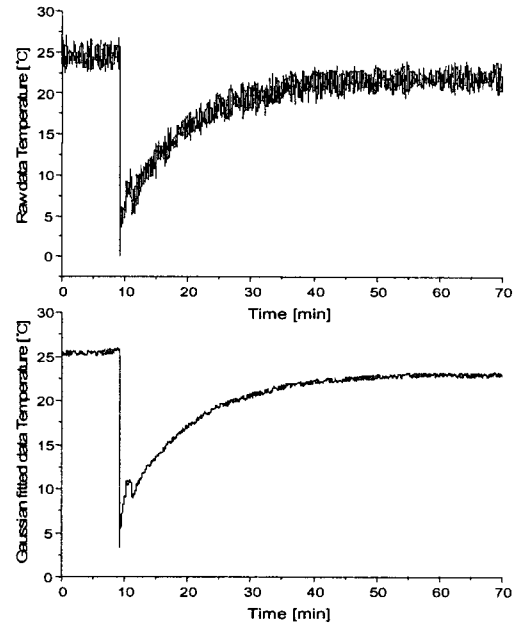


그림 9. 최대값검출 방법에 따른 냉수의 온도변화
Fig. 9. Gaussian line-fitted data vs. Raw data (with temperature variation of cold water)

그림 8과 9는 실온의 FBG 센서를 약 75[°C]의 온수와 5[°C]의 냉수에 넣은 후 출력변화를 관찰한 그래프이다. 역시 최대값 검출방식을 이용한 경우와 가우시안 fitting 알고리즘을 이용한 경우를 비교하였고, 온도변화를 충실히 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

식 (3)에서 정의한 온도에 따른 파장의 변화율을 결정하기 위하여, 온도에 따른 센서 FBG의 파장변화량을 측정하여 그림 10에 표시하였다. 약 25~70 [°C]까지의 온도변화는 기준 온도계로 사용한 써모커플의 출력이며 측정값을 fitting 한 결과와 측정값 사이의 최대 선형화 오차는 0.37[%]이고 온도에 따른 파장변화량은 1550[nm] 중심파장에서 약 10.7[pm/°C]이었다.

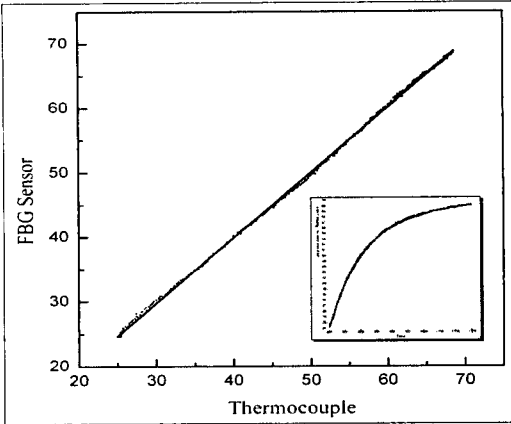


그림 10. 써모커플 vs. 가우시안 line-fitting
Fig. 10. Thermocouple vs. Gaussian line-fitting

3. 결 론

전력설비의 온도를 상시 감시할 수 있는 준분배형 FBG 온도센서 시스템을 구성하였다. 총 10개의 센서 FBG를 이용하여 시스템을 구현하였고, 다양한 온도변화를 가하여 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. 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.

References

[1] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, "Bragg-grating temperature and strain sensors," Proc. CFS, 526, 1989.
[2] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, "Fibre optic Bragg grating sensors," Proc. SPIE, 1169, 98-107, 1994.
[3] 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.
[4] 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.

- [5] A. Orthonos and K. Kalli, "Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing," Boston, Artech House, 1999.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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.

◇ 저자소개 ◇

박형준 (朴亨浚)

1976년 6월 2일생. 2002·2004년 전북대 제어계측공학과에서 학사·석사를 취득. 현재 전북대학교 전자정보공학부 박사과정.

이준호 (李峻昊)

1962년 9월 25일생. 1985·1987·1992년 서울대학교 전기공학과에서 학사·석사·박사학위를 취득. 1993~1994년까지 日本 電力中央研究所 電力部 絶縁材料 group의 Post-Doctor로 근무. 현재 호서대학교 전기정보통신공학부.

송민호 (宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990·1992·1997년 서울대학교 전기공학과에서 학사·석사·박사학위를 취득. 1997~2000년까지 Pennsylvania 주립대학의 Post-Doctor로 근무. 2000년 9월 이후 전북대학교 전자정보공학부 부교수.