

전력 시스템 보호를 위한 광섬유 격자 온도센서의 정밀도 개선

(Accuracy improvement of FBG temperature sensor system for usage in electric power systems)

이현욱* · 이준호* · 송민호

(Hyun-Wook Lee · Junho Lee* · Minho Song)

전북대학교 전자정보공학부 · 호서대학교 전기공학과*

Abstract

A distributed FBG temperature sensor system was constructed for the use in protection of electric power system. A F-P wavelength tunable filter is used converting temperature-induced wavelength variations to temporal peak locations. We used Gaussian line-fitted algorithm to alleviate the error caused by quantization and electrical noises. The experimental results showed much better accuracy than the raw peak-detection scheme.

1. 서론

현재 우리 사회 전반에 걸쳐 커다란 영향을 미치고 있는 전력 시스템이 여러 가지 원인으로 인하여 오동작 하게 될 경우 큰 사회적 혼란과 더불어 경제적 손실을 야기할 수 있다. 한계온도 이상에서의 동작 역시 시스템이 오동작을 일으키는 주요 원인 중 하나이다. 또한 전력 시스템은 최종적인 사고의 단계에서 비정상적인 온도상승이나 화재와 같은 열적 현상으로 표출된다. 그러므로 시스템이 항상 적정온도에서 동작하고, 화재가 발생할 경우 조기에 경보하여 전력설비의 안전사고를 예방하며 사고발생시 피해확산을 최소화 할 수 있도록 시스템 주변 온도의 상시 감시가 필요하다. 그러나 기존의 감시 및 경보시스템은 전기장의 영향으로 큰 측정오차를 갖고, 동시에 여러 위치 정보를 얻기 위해 여러 개의 개별센서를 배열함으로써 대형중량화되는 등의 단점을 갖고 있다. 광섬유 격자를 이용한 온도센서는 주변 전기장의 영향을 받지 않고, 여러 개의 격자를 하나의 광섬유 라인에 연결하여 동시에 여러 부위의 온도를 측정할 수 있는 준분배형 온도센서의 구현이 가능하다는 장점으로 전력 시스템의 안전성 진단에 적합한 센서 시스템으로 인식된다[3]. 본 논문에서는 전력 시스템 주변 온도의 상시 감시를 위해 Fabry-Perot 파장가변필터를 이용, 여러 광섬유 격자에서 반사된 신호를 동시에 측정함으로써 준분배형 온도센서

시스템을 구성하였다[4][5]. Kersey 등에 의해 제안된 방법으로 FBG 중심파장의 변화를 PD 출력 신호 피크의 위치변화로부터 해석하였지만 샘플링에 따른 양자화 오차와 전기적인 노이즈로 인하여 정밀도가 크게 저하됨을 확인할 수 있었다. 보다 높은 정밀도를 얻기 위해 PD신호를 Gaussian line-fitting하였고, 단순 피크검색의 경우와 비교하여 크게 개선된 실험결과를 얻을 수 있었다[6].

2. 본론

2.1. 광섬유 격자

통신과 센서 응용분야에서 활발히 연구되어 온 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating, 이하 FBG)는 광섬유에 자외선을 조사시키면 광섬유 코어의 굴절률이 변하는 특성을 이용, 코어에 격자를 새겨 특정 파장은 반사시키고 그 외의 파장은 통과시키도록 만든 것이다[3].

[그림 1]은 FBG의 반사 원리를 간단히 표현한 것이다.

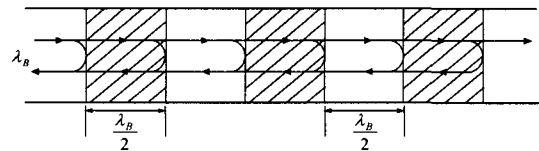


그림 1. FBG의 반사 원리
Fig. 1. Reflect principle of FBG

그림의 빗금 쳐진 부분이 자외선을 조사하여 광섬유 코어의 굴절률이 높게 변한 부분이다. 그림과 같이 굴절률이 높고 낮은 부분의 경계에서 특정 파장의 빛만 반사되고 그 외의 파장은 통과하게 된다[1].

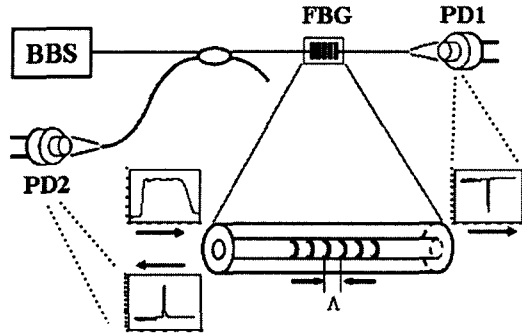


그림 2. FBG의 반사·투과 파형
Fig. 2. Reflection/transmission spectra

[그림 2]는 광원으로 Broad Band Source(이하 BBS)를 사용하고 커플러를 통해 FBG에 입사한 빛이 각각 반사되고 투과한 후의 PD에 의해 검출된 신호를 보여준다. BBS로부터 출력된 광대역 신호가 FBG의해 반사·투과된 신호를 PD1과 PD2의 출력신호에서 확인할 수 있다.

FBG에 의한 반사 파장은 다음 식 (1)에 의해 결정된다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

n 은 광섬유 코어의 굴절률을 의미하고, Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자 간격을 의미한다. 즉, 광섬유 코어의 굴절률과 코어에 새겨진 격자의 간격에 의해 반사되는 파장이 결정된다.

이러한 FBG는 온도와 스트레인의 변화에 따라 반사되는 파장이 거의 선형적으로 변하는 특성을 가지고 있다. 온도가 변하면 광섬유 코어의 굴절률에 변화가 생겨 반사파장이 변하고, 스트레인이 변하면 코어에 새겨진 격자의 간격이 변하게 되어 반사파장이 변하게 된다. 식 (2)는 온도와 스트레인의 변화에 따른 파장의 변화를 나타내는 식이다.

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left(\left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \Delta\epsilon \right)$$

$$+ \left[a + \frac{dn}{dT} \right] \Delta T \quad (2)$$

$\Delta\epsilon$ 은 스트레인의 변화량이고, ΔT 는 온도의 변화량이다. 식 (2)에서 $\left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$ 는 광탄성상수(photo-elastic constant)라 하고 P_e 로 표시하며, 광섬유에 주로 사용되는 실리카의 경우 0.22의 값을 갖는다. 또한 a 는 열팽창 계수

(thermal expansion coefficient)이고, $\frac{dn}{dT}$ 은 열광학 계수(thermo-optic coefficient)로서 ξ 로 표시하고, 실리카의 경우 각각 $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 와 $8.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 의 값을 갖는다. 따라서 1550 nm 대역의 광원을 사용할 경우 온도가 1 $^\circ\text{C}$ 변할 때 FBG 반사파장은 약 13.6 pm 변하고, 스트레인이 1 $\mu\epsilon$ 변할 때 반사파장의 변화는 약 1 pm가 된다[2].

본 연구에서는 스트레인에 의한 변화가 없다는 가정 하에($\Delta\epsilon=0$) 온도변화에 의한 파장 변화를 검출하였다.

2. 2. 시스템 구성

[그림 3]은 구현한 FBG 온도센서 시스템의 개략도이다.

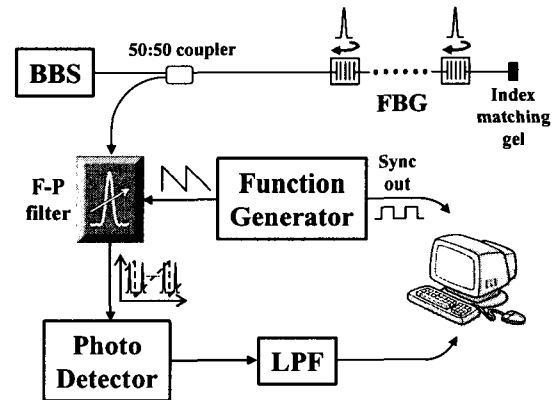


그림 3. FBG 온도센서 시스템
Fig. 3. FBG temperature sensor system

광원으로 1530~1610 nm 대역의 BBS를 사용하였고, 1539.7 nm, 1542.1 nm, 1544.4 nm, 1547.3 nm, 1549.2 nm, 1550.7 nm의 반사파장을 갖는 6개의 FBG를 사용하였다. 각각의 FBG로부터 반사

되어 나온 신호를 PD로부터 동시에 받아들이기 위해 64.9 nm의 Free Spectral Range(FSR)를 갖는 Fabry-Perot 파장가변필터를 사용하였고, 300 Hz의 차단주파수를 갖는 저대역필터(이하 LPF)를 사용하였다. 6개의 FBG 중 2개는 온도보상 패키징이 된 FBG로서 기준격자(Reference Grating, 이하 RG)로 사용하였고, 나머지 4개는 센서격자(Sensor Grating, 이하 SG)로 사용하였다. 가장 작은 파장과 가장 큰 파장의 FBG를 RG로 사용하여 Fabry-Perot 파장가변필터의 비선형적 동작에 의한 오차를 방지하였다. FBG가 연결된 광섬유의 끝단에는 Index matching gel로 처리하여 절단면에서 반사되어 돌아오는 노이즈를 제거하였다.

BBS에서 조사된 빛은 50:50 커플러를 통과한 후 6개의 FBG를 통과하며 각각의 FBG에 의해 특정 파장이 반사되게 된다. 반사된 신호는 다시 50:50 커플러를 거쳐 2 Hz의 램프(ramp)신호에 의해 동작하는 Fabry-Perot 파장가변필터에 인가된 후 PD에 의해 6개의 피크를 갖는 전기적인 신호로 검출되게 된다. 이 신호는 다시 LPF를 통과하고 마지막으로 컴퓨터에서 피크 검사를 수행함으로써 각 FBG의 파장 변화를 관찰하게 된다.

2. 3. 실험 및 결과

[그림 4]는 PD의 출력신호이다.

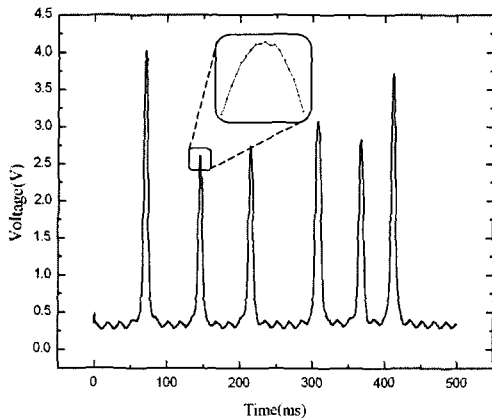


그림 4. PD 출력파형
Fig. 4. Output waveform of PD

위 그림에서 확인할 수 있듯이 전기적인 노이즈에 의해 출력신호의 피크부분이 매끄럽게 이어지지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 FBG에 의

한 피크파형을 Gaussian 형태로 가정하고 line-fitting을 수행하여 피크의 위치를 검출함으로써 노이즈에 의한 영향을 최소화 하였고, 또한 샘플링에 의한 양자화 오차도 최소화 하였다.

[그림 5]는 Gaussian line-fitting을 하지 않고 단순히 피크 검사를 하였을 때 측정 정밀도를 표현한 그림이다. 각 SG의 파장 변화는 각 스캔주기마다 측정된 2개 RG의 샘플링 간격에 대해 상대적인 차이를 계산하였다.

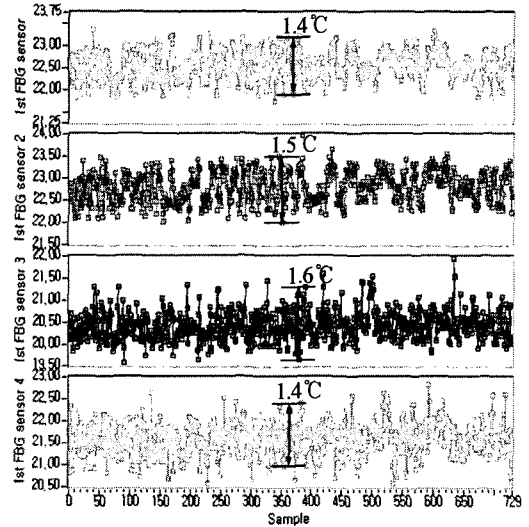


그림 5. 단순 피크 검색 데이터의 Random walk
Fig. 5. Random walk of Raw Data

1스캔 주기 당 10,000번의 샘플링을 하게 되고, Fabry-Perot 파장가변필터가 스캔하는 구간의 길이가 약 15.8 nm이므로 이론적 측정 정밀도는 약 1.58 nm가 된다. 그러나 샘플링에 의한 양자화 오차에 의해 그래프에 spike가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 이러한 spike를 제외할 경우 4개의 SG는 각각 약 16.8~19.3 pm의 변화량을 갖게 됨으로써 최소 측정온도 변화가 1.4~1.6 °C인 것을 확인할 수 있다.

[그림 6]은 SG에 서로 다른 온도변화를 가하며 얻은 PD 출력을 특별한 신호처리 없이 단순히 피크를 검출하여 출력변화를 표현한 그래프이다.

첫 번째와 세 번째 SG에는 특별한 온도변화를 가하지 않고 실온에서 측정하였고, 두 번째와 네 번째 SG는 일정시간 실온에서 측정한 후 각각 약 75 °C의 온수와 5 °C의 냉수에 넣고 온도변화에 따른 SG의 출력변화를 관찰한 그래프이다.

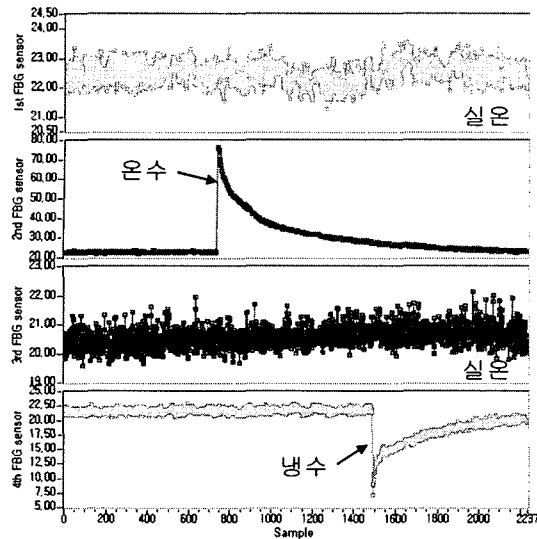


그림 6. 온도변화에 따른 SG의 출력신호
 Fig. 6. SG's output signal according to temperature variation

전반적으로 주변의 온도변화를 충실히 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

[그림 7]은 PD 출력을 특별한 신호처리 없이 단순히 피크를 검출한 데이터와 Gaussian line-fitting을 한 후 피크를 검출한 데이터를 비교한 그래프이다.

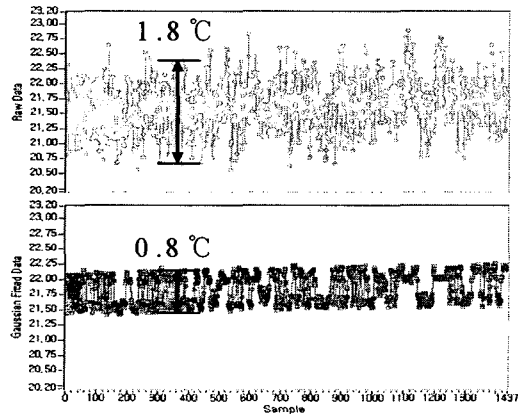


그림 7. 피크검출 방법에 따른 SG의 출력신호 비교 (온도변화가 없는 경우)
 Fig. 7. Gaussian line-fitted data vs. Raw data (without temperature variation)

PD 출력신호를 단순 피크검색만을 했을 때 측정정밀도는 약 1.8 °C이고, Gaussian line-fitting을 한 후 피크검색을 했을 때의 측정정밀도는 약 0.8

°C임을 확인할 수 있었다.

[그림 8]은 앞에서 실행한 실험을 Gaussian line-fitting을 실행한 후 피크를 검출한 데이터와 비교한 그래프이다.

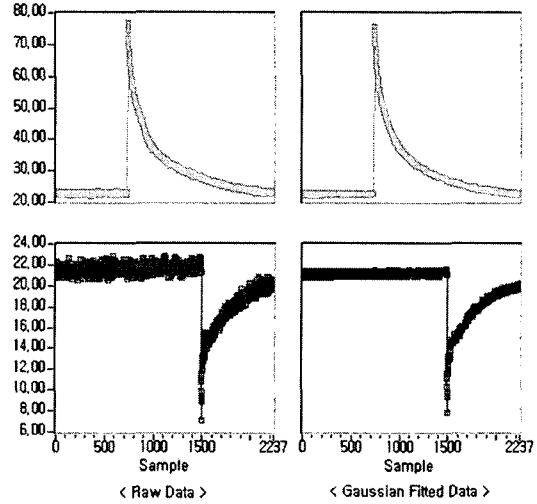


그림 8. 피크검출 방법에 따른 SG의 출력신호 비교 (온도변화를 가한 경우)
 Fig. 8. Gaussian line-fitted data vs. Raw data (with temperature variation)

Fitting을 통하여 얻은 결과의 안정성이 2배 이상 향상되었음을 확인할 수 있으며 노이즈의 영향을 배제한 수치적 정밀도의 경우는 10배 이상 정밀도가 증가함을 확인할 수 있었다.

3. 결론

FBG를 이용한 광섬유 온도센서를 구현하고 온도변화를 가함으로써 실제 현장에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 출력신호를 Gaussian line-fitting한 후 피크를 검출함으로써 전기적인 노이즈와 샘플링에 의한 양자화 오차를 최소화 하였으며, 단순 피크검출과 비교하여 크게 향상된 정밀도와 안정성을 확인하였다.

시스템에 사용된 FBG를 메탈 튜브에 넣어 스트레인에 의한 영향을 제거하고 실제 전력 시스템에 적용하여 실험할 계획이다.

참고 문헌

- [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] 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] 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.
- [6] 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.