

광섬유격자 온도센서의 정밀도 개선

이현욱 · 송민호[†]

전북대학교 전자정보공학부
Ⓣ 561-756 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

이준호

호서대학교 전기공학과
Ⓣ 336-795 충남 아산시 배방면 세출리 165번지

(2006년 3월 28일 받음, 2006년 6월 14일 수정본 받음)

전력시스템의 비정상적 동작에 의한 열적 현상을 감지하기 위하여 준분배형 광섬유격자 온도센서를 구현하였다. 2개의 기준격자와 4개의 센서격자를 사용하고, Fabry-Perot 가변파장필터를 사용하여 반사파장의 변화를 측정함으로써 각 센서 위치에서의 온도변화를 관측하였다. 측정의 정밀도를 높이기 위하여 광검출기의 신호를 가우시안 curve-fitting 알고리즘으로 처리한 후 계산된 파형에서 피크를 검출하였다. 실험을 통하여 기존의 피크검출방식에 비하여 높은 정밀도를 얻었으며, 반사 스펙트럼이 왜곡된 광섬유격자 센서의 출력검출에서도 뛰어난 오차보상 특성을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 2 Hz의 대역폭에서 0.3 °C의 정밀도를 얻었고, thermocouple 기준온도계와 비교한 온도측정실험에서 약 0.37 %의 선형화오차를 확인할 수 있었다.

주제어 : Fiber bragg grating, Temperature sensor, Fabry-perot filter, Gaussian curve-fitting.

I. 서 론

전력설비가 나날이 대형, 고압화 됨에 따라 사고가 발생하는 경우, 그에 수반되는 산업, 경제, 사회적인 손실 또한 그 규모가 매우 커지는 경향을 가진다. 전력설비의 사고는 많은 경우 폭발, 화재의 형태를 띠게 되는데, 비정상적인 온도상승을 미리 감지함으로써 사고의 조기 발견 및 방지가 가능하다. 따라서, 전력설비의 주변온도를 상시감시하기 위한 감시 및 경보시스템은 안정적인 전력설비 운용에 반드시 필요한 요소이다. 그러나 기존의 온도감시 및 경보시스템은 전력설비 주변에 형성되는 강력한 전자기파 간섭의 영향을 받게 되며, 여러 부위의 온도를 동시에 측정하기 어렵다는 문제점을 갖고 있다. 반면, 광섬유를 이용하는 온도센서는, 전자기파 간섭의 영향이 적고, 가볍고 부식되지 않는 점 등으로 인해 전력설비 보호를 위한 온도센서로 사용하기에 적합하다. 특히 1990년대부터 많은 관심을 받아 온 광섬유격자(fiber Bragg grating, 이하 FBG)는 하나의 광섬유 라인에 여러 개를 직렬로 연결함으로써 동시에 여러 부위의 온도측정이 가능하며 온도변화에 반응하는 부위가 FBG의 길이에 한정되므로 넓은 범위의 다중점 온도측정에 가장 적합하다^[1,2].

FBG는 반사파장이 온도와 스트레인의 변화에 거의 선형적으로 변화하므로 그 파장변화를 읽어내어 가해진 온도나 스트레인을 읽어낸다. FBG에 간단한 트랜스듀서를 조합하

여 다양한 물리량을 측정하는 센서를 만들 수 있으므로, 많은 연구들이 FBG 반사파장의 변화를 효율적으로 읽어내는 복조방식의 개발에 집중되어 왔다. 그 중에서 Kersey 등이 제안한 바 있는 F-P(Fabry-Perot) 가변파장필터를 사용하는 방법^[3]은 구조가 간단하고 FBG의 간격에 영향 받지 않는 등의 장점으로 인하여 FBG 센서의 복조방식으로 가장 많이 사용되어왔다.

가변파장필터를 이용하는 복조방식은 FBG의 반사파장분포를 시간 축으로 이동한 후 피크간의 시간간격을 검출하는 방식으로 이루어진다. 즉, FBG의 반사광은 주기적으로 스캔하는 F-P 필터를 거친 후 PD에서 광학적인 반사 스펙트럼과 동일한 패턴의 피크신호를 생성하며 이 피크신호의 위치를 검출하여 FBG의 파장변화를 해석하는 것이다. 따라서 PD 출력상의 피크위치를 정확하게 검출하는 것이 전체 시스템의 정밀도를 결정하므로, 실제 적용에서 겪게 되는 전기적인 노이즈나 양자화 오차 등이 측정오차의 주요 원인이 된다. 특히 FBG 센서에 가해지는 외부 압력이나 스트레스 등에 의하여 반사 스펙트럼의 폭이 넓어지고 비대칭적인 형태로 왜곡되는 경우에는 보다 큰 오차와 불안정성을 가지게 된다^[4].

이러한 불안정성을 최소화하기 위하여, 본 논문에서는 FBG 반사광을 가우시안 함수의 형태로 가정하고 PD 출력에 가우시안 curve-fitting 알고리즘을 적용한 후 피크를 검색하는 방법을 사용하였다^[5]. 최대값 검출방식과 비교한 실험을 통하여 fitting 알고리즘을 사용하는 경우, 정밀도와 출력 안정성을 크게 개선할 수 있음을 확인하였으며, 평균계급오차

[†] E-mail: msong@chonbuk.ac.kr

(mean square error)에 이진검색법을 적용하여 curve-fitting에 의한 계산량을 1/10 이하로 줄였다. 외부의 압력에 의하여 반사 스펙트럼이 크게 왜곡된 FBG 센서를 이용한 실험에서도 가우시안 fitting 알고리즘을 적용한 경우, 스펙트럼의 왜곡에 따른 출력의 변화를 현저하게 줄일 수 있음을 확인하였다.

II. Fabry-Perot 가변파장필터를 이용한 FBG 온도센서 시스템

FBG는 자외선 레이저를 이용하여 광섬유의 코어굴절률을 주기적으로 변조시킨 것으로, 각 굴절률변조의 경계면에서 일어나는 다중반사와 간섭현상에 의해서 일정한 파장범위를 반사시키는 소자이다. FBG에서 반사되는 중심파장은 다음 식과 같이 표현된다.

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

위식에서 n_{eff} 은 FBG의 유효굴절률이며, A 는 격자 간격이다. 광섬유의 유효굴절률과 격자간격은 FBG에 가해지는 온도와 스트레인에 따라서 변화하지만 본 연구에서는 스트레인의 영향이 없다고 가정하고 온도변화에 따른 파장변화를 분석하였다. FBG에 온도의 변화(ΔT)만 주어지는 경우 FBG 반사파장과 변화량은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

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

$$\Delta\lambda_B = 2An_{eff} \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right] \Delta T \tag{3}$$

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} = \alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \tag{4}$$

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^[6,7]. 따라서 1 °C의 온도변화를 측정하는 센서시스템을 제작하기 위해서는 복조시스템의 FBG 반사파장 분해능이 10 pm 보다 우수한 파장분해능을 가져야 한다.

FBG 반사파장 변화량을 정밀하게 측정하는 복조(demodulation)방법은 응용의 형태와 범위에 따라 다양한 형태가 있으나^[1], 본 연구에서는 하나의 광섬유 라인에 여러 개의 FBG를 연결하여 동시에 여러 부위의 온도정보를 추출하는 준분배형 온도센서 시스템의 구현을 목적으로 하였으므로 이에 적합한 F-P 가변파장필터를 이용한 복조방법^[3]을 사용하였다. 그림 1은 구성한 FBG 온도 센서시스템의 개략도이다.

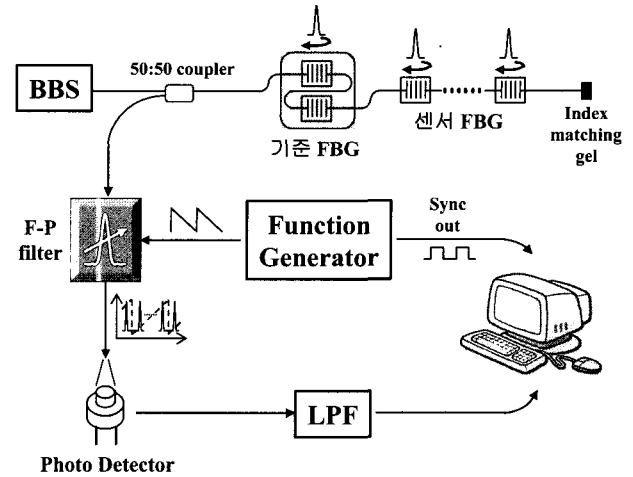
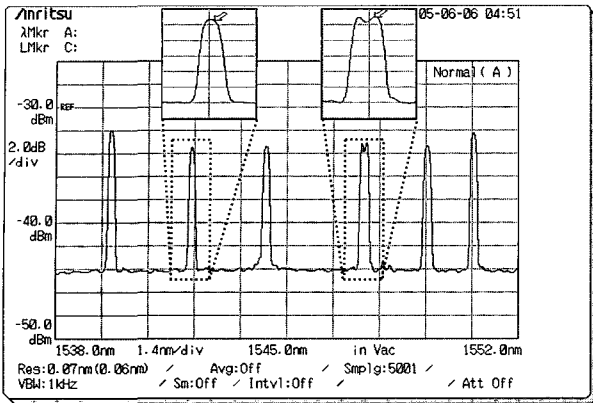


그림 1. FBG 온도센서 시스템 구성도.

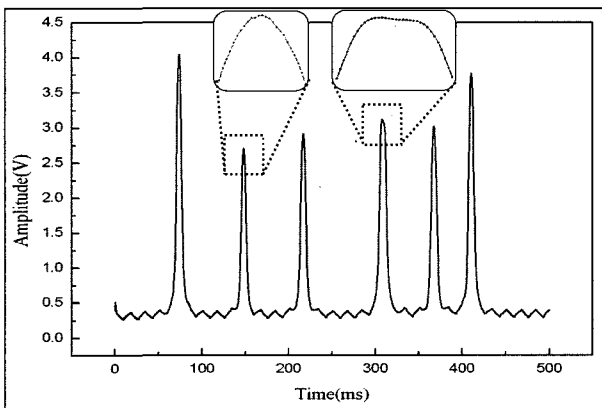
광원은 중심파장이 $1550 \pm 20 \text{ nm}$ 인 SLD(super luminescent diode)를 사용하였고, 센서 어레이는 1539.7 nm, 1542.1 nm, 1544.4 nm, 1547.3 nm, 1549.2 nm, 그리고 1550.7 nm의 반사파장을 갖는 6개의 FBG로 구성하였다. 반사파장이 가장 작은 것과 큰 것은 온도보상 패키징($-40 \sim 85^\circ\text{C}$ 범위에서 파장변화율 $< 0.74 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)이 된 것으로 기준격자(reference grating, 이하 RG)로 사용하였고, 나머지 4개는 센서격자(sensor grating, 이하 SG)이다. 피크가 검출되는 순간에 F-P 필터에 가해진 전압으로부터 파장을 계산하는 것이 동작원리이나, F-P 필터의 투과파장이 주변의 온도변화에 따라 불규칙하게 변화하기 때문에 온도에 둔감한 RG의 피크위치를 기준으로 SG의 파장을 계산하는 것이다. 2개의 RG를 사용한 것은 혹시 있을 수 있는 F-P 필터의 비선형적 동작에 의한 오차를 최소화하기 위한 것이다. FBG가 연결된 광섬유의 끝단은 index-matching gel로 처리하여 절단면으로부터 반사되는 광신호에 의한 노이즈를 방지하였다.

FBG에서 반사된 광신호는 커플러를 거쳐 램프(ramp)신호로 구동되는 F-P 필터(FSR : 65 nm, bandwidth: 9.35 GHz)를 통과한 후 PD에서 출력을 발생시킨다. PD 신호는 저대역통과필터(lowpass filter)를 거친 후 컴퓨터로 읽어 들여지며, 파형의 피크 위치를 검출하여 파장의 변화를 읽어내게 된다. 그림 2(a)는 광파장분석기(optical spectrum analyzer, 이하 OSA)로 FBG 어레이의 반사 스펙트럼을 측정하는 것이며, (b)는 반사 스펙트럼이 F-P 필터를 통과한 후 PD에서 발생시키는 파형이다.

F-P 가변파장필터가 FBG의 반사파장에 해당하는 파장을 가질 때 PD 출력 역시 최고값을 갖게 된다. 즉, 파장축의 상대적 피크 분포를 시간 축으로 이동시킨 것이므로 PD 출력의 피크위치를 정밀하게 검출하면 파장분석 없이도 FBG 반사파장의 변화를 읽어내게 되는 것이다. F-P 필터가 한 주기 스캔하는 동안 6개의 FBG로부터 반사된 피크를 볼 수 있으며 피크를 확대한 그림에서 각 피크의 형태가 동일하지 않음



(a) OSA 출력



(b) PD 출력

그림 2. FBG 반사파형 측정

을 알 수 있다. 이것은 FBG 제조과정의 여러 변수에 따라 이론적인 형태와 달리 반사 스펙트럼이 왜곡된 것이거나 FBG 센서를 적용하는 과정에서 사용된 접착제 또는 트랜스듀서에 의해서 발생하는 비대칭 스트레인에 따른 것이다^[4]. 따라서 단순히 PD 출력의 최대값이 발생하는 위치를 피크의 중심으로 인식하는 경우 큰 오차가 발생할 수 있다. 이를 확인하기 위해서 최대값 검출방식을 이용하여 FBG 온도센서의 출력을 얻고 이를 그림 3에 표시하였다.

F-P 필터는 2 Hz의 램프신호로 14.4 nm의 범위를 스캔하도록 구동하였고, PD 출력을 스캔주기마다 10,000번 샘플링 하였으므로, 양자화에 따른 최대 파장분해능은 1.44 pm이다. 그러나 최대값 검출방식으로 측정된 결과는 4개의 SG에서 29.8~39.66 pm의 불규칙한 변화를 보였으며 이는 3~4 °C의 온도변화에 해당한다. SG에 급격한 온도변화가 가해지지 않도록 한 상태에서 측정된 결과이므로 이는 측정오차이며 전력설비에 적용할 온도 센서시스템이 높은 해상도를 요구하지 않음을 감안하더라도 실제 적용하기 어려운 수준이라 할 것이다.

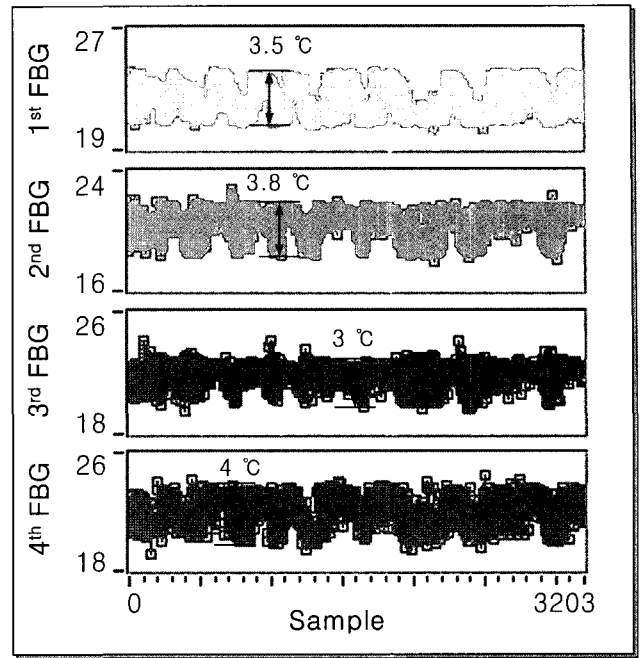


그림 3. 최대값 검출 방법에 의한 출력변화

III. 가우시안 curve-fitting을 이용한 정밀도의 향상

앞 절에서 기술한 최대값 검출 방식의 오차를 최소화하기 위하여, 본 논문에서는 FBG 반사광의 PD 출력을 가우시안 형태라 가정하고 curve-fitting을 취한 후 계산된 파형의 피크를 검출하는 방법을 사용하였다. 그림 4는 1, 3번째 SG의 PD 출력(짙은 선)과 이를 가우시안 curve-fitting 알고리즘을 적용하여 얻은 파형(연한 선)이다.

그림에서 PD 출력과 계산된 파형의 피크가 일치하지 않는 경우가 있음을 확인할 수 있는데, 샘플링과정의 양자화오차, 필터링 과정에서의 파형왜곡, 또는 FBG에 가해지는 외부압력에 의한 스펙트럼 왜곡 등에 의해서 그 최대값의 위치가 불규칙하게 변화하기 때문이다. Fitting에 의한 파형은 PD 출력과의 평균제곱오차를 최소화하는 형태로 생성되므로 다양한 원인에 의해서 발생하는 오차를 크게 줄일 수 있게 된다.

PD 출력에서 다수의 피크파형은 온도에 따라 그 위치를 달리하므로, 중심이 고정된 경우에 비하여 curve-fitting은 복잡한 과정을 거쳐야 하며 본 논문에서 사용한 방법은 다음과 같다. PD 출력에서 기준값(1 V) 이상을 갖는 6개의 피크에 대해 새로운 배열을 생성하고 각 피크에 대한 fitting을 수행한다. 하나의 FBG 반사피크가 n개의 데이터로 이루어진 배열에 저장되어 있다면 가우시안 함수의 중심을 n번 이동시키며 fitting을 수행하고, 각 위치에서의 계산결과와 데이터간의 평균제곱오차는 새로운 배열에 저장된다. 그림 5는 가우시안 함수의 중심을 이동하며 계산하는 과정과 각 위치에서 발생하는 평균제곱오차의 분포를 보여준다. 그림 5(a)와 (d)는 각각 새로이 생성된 n개의 데이터 중 첫 번째 값과 마지막 값에 피크가 있다고 가정하고 fitting을 수행한 결과이고,

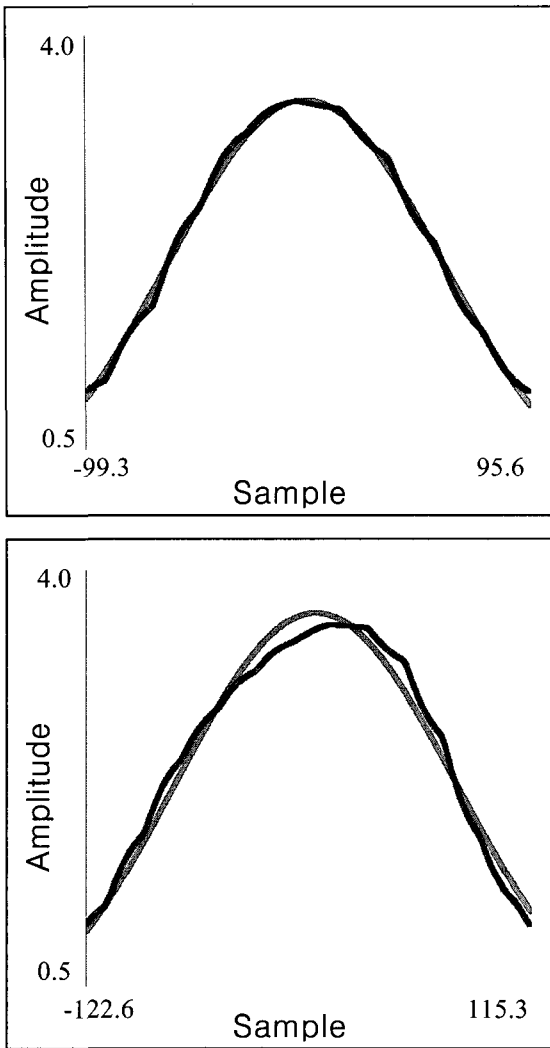


그림 4. SG1, SG3의 원파형과 가우시안 출력파형.

(b)는 n번의 fitting을 수행하며 얻은 mse(mean squared error) 값의 분포를 나타낸 것이다. 오차가 최소화 되는 위치에서의 fitting 결과(c)가 PD 출력파형에 가장 근사한 가우시안 파형으로 결정된다.

그러나 이 방법은 데이터의 수만큼 피팅과정을 반복하게 되어 계산량이 늘어나고 전체적인 신호처리에 부담을 주게 된다. 보다 적은 연산량으로 최적 피팅결과를 얻기 위해서 그림 6과 같은 이진검색 알고리즘을 적용하였다.

그림 6의 블록도에서 표현한 것과 같이 반사파형이 기록된 배열의 임의의 두 위치 A, B와 그 중간인 C를 설정하고, 미소량 증감시킨 C+dx, C-dx와 C에서 각각 fitting을 수행하여 평균제곱오차를 구한다. 구해진 세 점에서의 값들을 비교하여 오차가 줄어드는 방향으로 계산점(A, B, C)을 이동하며 C가 C-dx, C+dx보다 작을 때까지 계속해서 fitting과 비교를 반복 수행하게 된다. 이는 연산을 무의미하게 반복하지 않고 짧은 시간에 최소오차 발생위치를 확인하게 해주어 이전의 과정에 비하여 계산량을 1/10 이하로 줄여줄게 하였다.

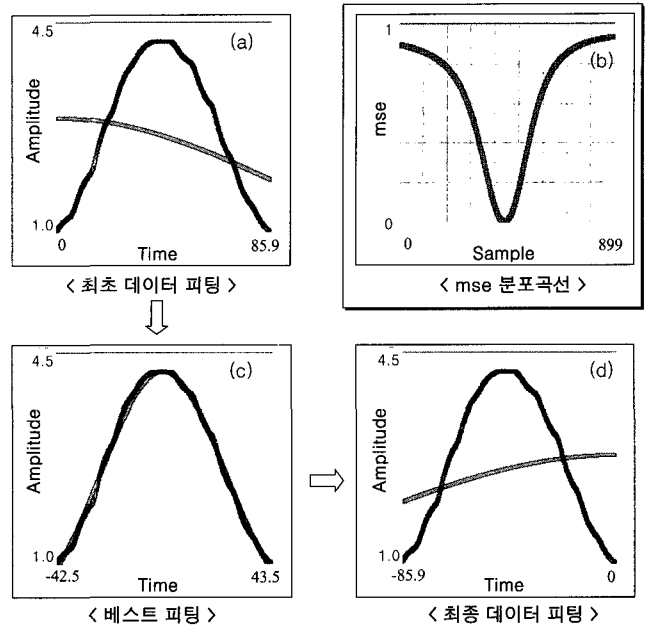


그림 5. 가우시안 curve-fitting 과정.

기술한 방법의 효용성을 보이기 위하여 4개의 SG에 서로 다른 온도변화를 가하면서 FBG 센서의 출력변화를 최대값 검출방식과 가우시안 fitting에 의한 검출방식으로 각각 구한 후 그림 7에 비교하여 표시하였다. F-P 필터는 2 Hz 램프(ramp)신호로 구동하였으며 PD 출력은 한 주기당 4,000번 샘플링하였다.

그림에서 가우시안 피팅의 효과는 매우 분명하게 나타난다. 실온에 노출한 1, 3번째 SG의 경우 최대값 검출방식의 측정 가능한 최소온도변화량이 약 4~10°C인데 반해 fitting을 수행한 후 피크를 검출한 경우에는 약 0.3~0.6°C의 범위를 갖는 것으로 확인되었다. 수조에서 76°C의 온수와 5°C의 냉수를 이용하여 온도변화를 가한 후 출력변화를 비교한 경우에서도 fitting 알고리즘을 사용한 경우가 최대값 검출방식에 비하여 크게 안정되어 있음을 확인할 수 있다.

IV. 스펙트럼이 왜곡된 FBG 센서의 오차보상

제한한 신호처리 방법은 반사 스펙트럼이 왜곡된 FBG 센서의 신호를 처리하는 데에도 매우 유용하게 사용될 수 있다. FBG 센서는 측정 대상체의 표면에 에폭시를 이용하여 부착하거나 내부에 삽입된다. 센서의 주변 환경에 따라 예기치 못한 외부 요인이 가해질 수 있는데, 알카리성 콘크리트에 의한 FBG의 손상이나 측면에서 가해지는 불균일한 스트레스, 혹은 에폭시 접착제의 변성에 따른 불균일한 스트레인 분포 등이다. 그에 따른 결과로 반사 스펙트럼의 폭이 넓어지거나 형태가 왜곡되는데, 균일한 형태의 반사 스펙트럼을 가정하는 기존의 복조방법을 그대로 사용할 경우 큰 측정오차를 수반하게 된다. 복합구조물의 안전도 모니터링을 위한

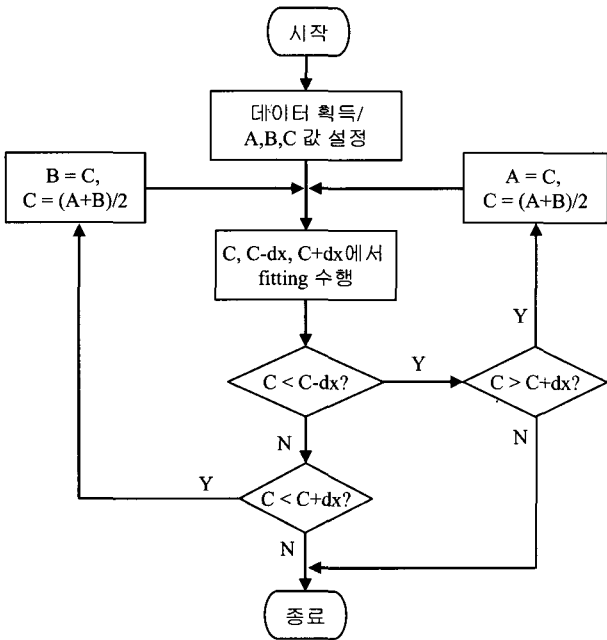
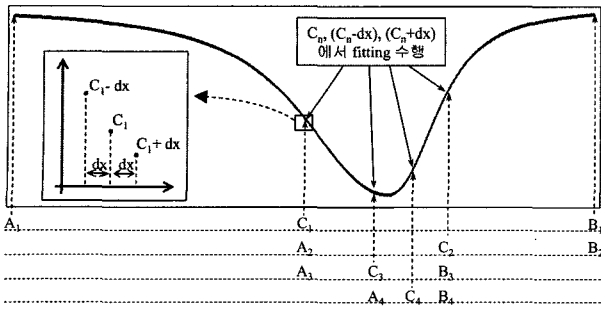


그림 6. 이진검색 알고리즘.

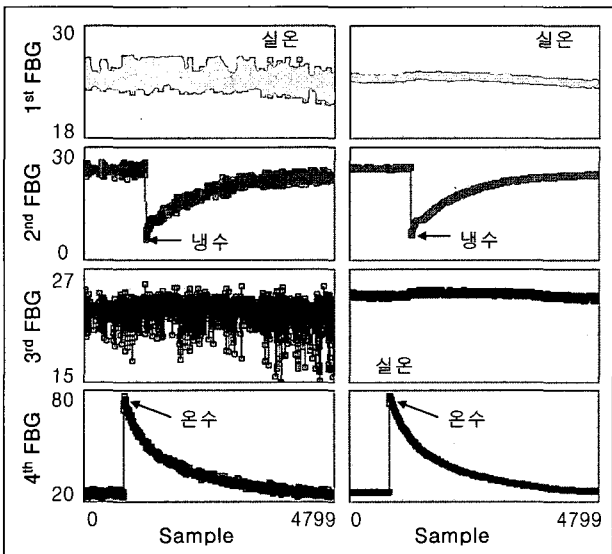
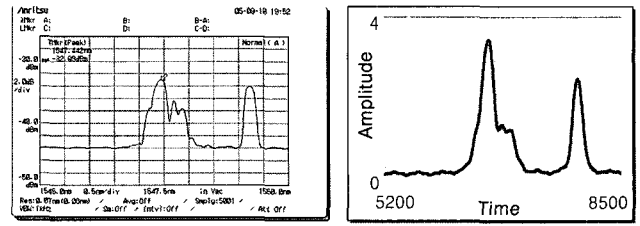
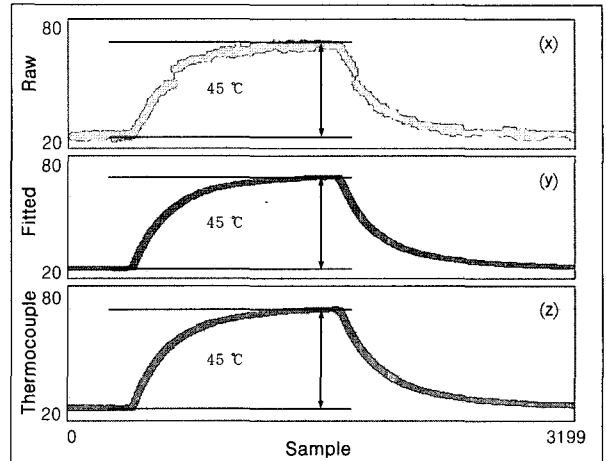


그림 7. 피크검출 방법에 따른 출력신호 변화.



(a) OSA output (b) PD output



(c) 온도변화에 따른 출력변화

그림 8. 가우시안 curve-fitting에 의한 왜곡의 영향 극복.

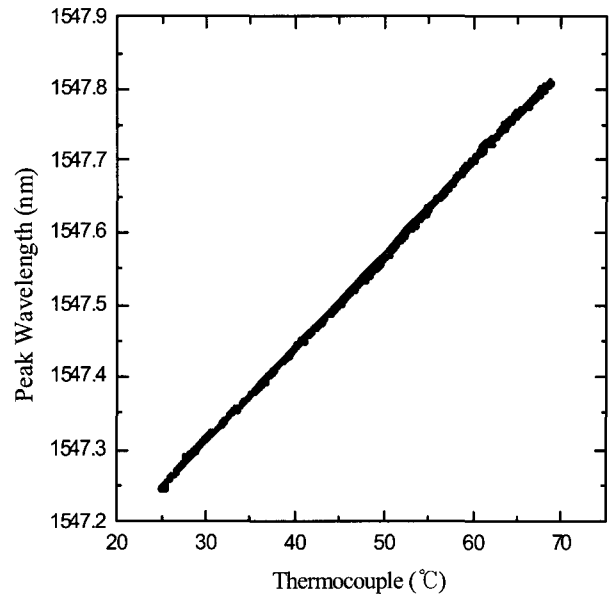


그림 9. 온도변화에 따른 SG의 파장변화.

센서시스템이라면 수십 년 이상의 수명을 가정해야 하며, 콘크리트나 복합구조물에 삽입된 경우라면 센서를 교체하는 것도 용이하지 않으므로 스펙트럼 왜곡에 따른 출력오차를 보상할 수 있는 신호처리 방법이 요구되는 것이다. 그림 8은 실험실에서 측면방향의 불균일한 스트레스를 가하여 왜곡시

킨 FBG 센서의 반사파형과 이를 이용하여 온도를 측정된 결과를 보인다.

왜곡된 FBG의 스펙트럼은 정상상태의 FBG에 비하여 그 폭이 넓어지고 다수의 불규칙한 피크로 이루어져 있으며 최대 피크의 위치가 불안정하여 미세한 압력변화에도 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 8(c)는 왜곡된 SG에 약 45°C 범위의 온도변화를 가하며 그 출력변화를 최대값 검출방식(x)과 가우시안 fitting에 의한 방식(y)을 이용하여 기록한 후 비교한 그림이다. 세 번째 파형(z)은 기준값으로 사용하기 위하여 동일한 온도변화를 thermocouple로 측정한 것이다. 예상한 것과 같이 최대값 검출방식을 사용한 경우에는 5°C 이상의 불규칙한 변화와 더불어 때때로 측정값이 크게 변하는 현상을 보였다. 반면 가우시안 피팅을 이용한 실험 결과는 이전의 정상적인 SG를 사용한 경우와 크게 다르지 않는 성능을 얻을 수 있었다.

측정한 파장변화를 온도의 크기로 변환하기 위해서는 식 (4)에서 정의한 온도에 따른 파장의 변화율이 필요하며 이를 정확하게 측정하기 위해서 온도에 따른 FBG의 파장변화량을 측정하고 그림 9에서 그래프로 표현하였다. 약 25~70°C까지의 온도변화는 기준 온도계로 사용한 thermocouple의 출력이고 측정값을 fitting한 결과와 측정값 사이의 최대 선형화 오차는 0.367%이며 온도에 따른 파장변화량은 1547.26 nm 중심파장에서 약 12.9 pm/°C 이었다.

V. 결 론

전력설비의 안전도를 상시 모니터링할 목적의 FBG 준분배형 온도센서시스템을 구성하였다. 파장가변형 F-P 필터를 사용하는 복조방식에서 다양한 원인에 의해 발생하는 PD 출력의 피크검출 오차를 최소화하기 위해 PD 출력신호를 가우시안 curve-fitting 알고리즘을 이용하여 신호처리한 후 피크 검색을 행하였다. 실험으로부터 fitting 알고리즘을 이용하는 경우, 최대값 검출을 하는 경우에 비해서 10배 정도 정밀도가 향상된 0.3~0.6°C 범위의 정밀도를 얻을 수 있었다. 또한 동일한 방법을 환경적인 외란에 의해서 반사 스펙트럼이 왜곡된 FBG의 출력보정에 사용한 경우에, 역시 최대값 검출방

식에 비해서 월등히 높은 정밀도와 동작 안정성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 제안한 방법은 FBG 센서를 실제 현장에 적용하는 경우 발생하게 되는 환경적 변화에 따른 복조방식의 오동작과 오차를 크게 줄여서 FBG 센서의 실용성을 크게 증가시킬 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam, and E.J. Friebel, "Fiber Grating Sensors," *J. Lightwave Technol.*, 15, 1442-1462, 1997.
- [2] A. Orthonos and K. Kalli, *Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing*, Boston, Artech House, 1999.
- [3] 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.
- [4] C.C. Chang, G.A. Johnson, S.T. Vohra, "Effects of Fiber Bragg Grating Spectrum Distortion on Scanning Fabry-Perot and Fiber Interferometer Based Wavelength Shift Detection Schemes," *Proc. OFS*, 141-144, 1999.
- [5] 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.
- [6] R.J. Campbell and R. Kashyap, "Spectral profile and multiplexing of Bragg gratings in photosensitive fiber," *Opt. Lett.*, 16, 898-900, 1991.
- [7] W.W. Morey, G. Meltz, W.H. Glenn, "Fibre optic Bragg grating sensors," *Proc. SPIE*, 1169, 98-107, 1994.

Accuracy Improvement of FBG Temperature Sensor System

Hyun Wook Lee, and Minho Song[†]

Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University

June-Ho Lee

Department of Electrical Engineering, Hoseo University

[†] *E-mail: msong@chonbuk.ac.kr*

(Received March 28, 2006, Revised manuscript June 14, 2006)

We propose the use of the Gaussian-curve fitting algorithm for the improvement of measurement accuracy in wavelength-scanned Fabry-Perot filter based demodulation systems. The peak locations of FBG sensors were calculated from the fitted curves rather than from distorted PD profiles, resulting in much better measurement accuracy than that of the highest-peak search algorithm. Also, the algorithm was proved to minimize measurement uncertainty of spectrally-distorted grating sensors. From our experimental results, a temperature resolution as small as $\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ was readily achieved by use of the Gaussian-curve fitting algorithm whereas the highest-peak search algorithm gave a temperature resolution larger than $\sim 4^{\circ}\text{C}$.

OCIS code : 060.2370.