

# 웨이블릿 변환을 이용한 광섬유 격자 온도센서의 정밀도 개선

(The Accuracy Improvement of FBG Temperature Sensor by using Wavelet Transform)

조요한\* · 김현진 · 송민호\*\*

(Yo-Han Cho · Hyun-Jin Kim · Minho Song)

## Abstract

We developed a noise reduction algorithm for the measurement accuracy improvement of a fiber-optic distributed temperature sensor system. The denoising technique is based on the wavelet transform. The proposed algorithm was applied to a FBG sensor output with the Gaussian line-fitting algorithm to minimize the output noise which originated from the intensity noise of the laser light source and the instability of signal processing. We confirmed the feasibility of the denoising algorithm by comparing the measurement results with those obtained with the Gaussian line-fitting algorithm only.

Key Words : Fiber Bragg Grating, Temperature Sensor, Gaussian Line-Fitting, Wavelet Transform

## 1. 서 론

광섬유 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 가해지는 온도와 변형률에 따라 선형적으로 반사파장이 변화하는 광섬유 소자이다. 광섬유 격자 센서는 내구성이 좋고 정확도가 높으며 전자기와 간섭의 영향을 받지 않는 등의 여러 장점을 가지고 있어서 전력설비의 비정상적인 온도 감시, 구조물의 균열 감시 등에 활용되고 있다. 또한 간단한 트랜스듀서와 결합하여 온도, 압력 이외의 다양한 물리량을 측정하는 계측기로도 활용되고 있다[1-3].

가해진 물리량에 의해서 변화되는 광섬유 격자 반사파장을 측정하는 것을 파장복조라 하며 가장 많이 사용되는 방법은 kersey 등이 제안한 파장가변필터를 이용한 것이다[4]. 본 연구에서도 MEMS(micro electro-mechanical system) 파장가변필터를 이용하는 파장복조를 사용하여 광섬유 격자에 가해지는 온도변화를 측정하는 파장복조시스템을 구성하였다.

광섬유 격자 온도센서 시스템을 구성하는 모든 소자는 광섬유로 연결되기 때문에 광정렬이 쉽고 연결 손실을 줄일 수 있다. 하지만 외부환경에 노출되어 있는 광섬유 격자에 불특정한 외부압력 등이 가해지면 반사스펙트럼의 형태가 불규칙하게 변화하여 정확한 온도측정을 어렵게 한다[5]. 또한 광폭광원이 아닌 레이저 광원을 사용하는 경우에는 레이저 출력의 불안정성으로 인해 측정오차가 커지는 문제점이 발생한다[6].

\* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 석사  
\*\* 교신저자 : 전북대학교 전자정보공학부 교수  
Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394  
E-mail : msong@chonbuk.ac.kr  
접수일자 : 2011년 2월 15일  
1차심사 : 2011년 2월 19일  
심사완료 : 2011년 4월 18일

이러한 오차를 개선하고자, 본 논문에서는 광섬유 격자의 반사파장 신호를 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 적용한 잡음제거기법(denoising) 및 선형연구에서 사용되었던 가우시안 라인피팅(gaussian line fitting) 신호방식으로 처리하여 온도측정의 정밀도를 개선하였다.

웨이블릿 변환으로 분석된 신호 성분에 임계치법을 적용하여 잡음을 제거하면 불규칙한 파장변화가 안정화 되고 온도측정의 정밀도가 향상됨을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 정밀도 향상을 위한 신호처리

#### 2.1.1 웨이블릿 변환(Wavelet transform)

웨이블릿 변환은 신호분석을 위한 수학적 도구로써 시간과 주파수 영역에서 변동크기를 갖는 마더 웨이블릿 함수(mother wavelet function)를 이용하여, 시간과 주파수 영역의 정보를 동시에 분석할 수 있다. 또한 신호의 재구성을 통하여 신호의 압축, 잡음제거 등 적용되는 내용에 맞게 의료, 영상, 경제, 지진연구 등 다양한 분야에 응용되고 있다[7]. 웨이블릿 변환은 다음 식으로 표현된다.

$$\psi_{s,\tau} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (1)$$

여기서  $s$ 는 마더 웨이블릿 함수를 축소 및 확대시키는 스케일링 파라미터(scaling parameter)이고  $\tau$ 는 기저함수를 시간축에 따라 평행이동시키는 천이 파라미터(translation parameter)이며  $1/\sqrt{s}$ 은 에너지 정규화를 위한 항이다. 웨이블릿 변환을 이용하여 연속적인 신호를 분석할 경우 다음 식으로 표현된다.

$$W_f(s,\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (2)$$

또한 이산신호(discrete signal)를 웨이블릿 변환 처리하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W_f(2^{-j}k, 2^j) = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(2^j x - k) dt \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 마더 웨이블릿 함수  $\psi(t)$ 의  $s$  및  $\tau$ 값을 변화시키고 임의의 신호  $f(t)$ 와 컨볼루션(convolution)하여 분석한다.  $s$ 값의 변동으로  $\psi(t)$ 가 수축 및 팽창하여 신호의 저주파 및 고주파 성분을 분석하고  $\tau$ 값의 변동으로 주파수가 변화한 시간정보도 분석한다[8].

그림 1과 같이 웨이블릿 변환은 마치 신호를 저주파 필터(lowpass filter)와 고주파 필터(highpass filter)에 통과시킨 것과 같으며 분해된 신호의 성분들을 웨이블릿 계수라 한다. 이렇듯 이분된 A와 D값은 정해진 시간구간에서 신호를 분석하여 나오게 된 근사정보(저주파 성분)와 상세정보(고주파 성분)로써 계수의 값으로 표현되어진다.

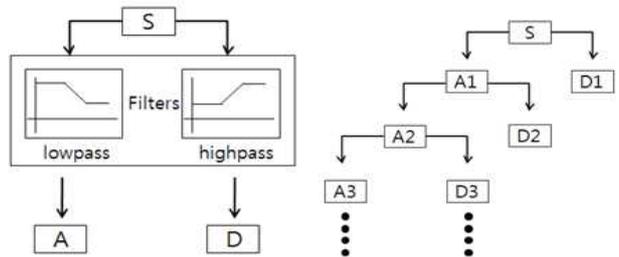


그림 1. 웨이블릿 변환의 효과적인 알고리즘  
Fig. 1. An efficient algorithm of wavelet transform

일반적으로 잡음이 포함된 신호는 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$u = f + w \quad (4)$$

식 (4)에서  $u$ 는 잡음에 의해 손상된 신호,  $f$ 는 유한 에너지를 갖는 미지의 신호이고  $w$ 는 어떤 형태로든 신호에 포함될 수 있는 잡음이다. 식 (4)에서 판단했을 때 잡음제거 과정은 측정된  $u$ 로부터  $f$ 를 복원하는 문제이다. 잡음이 포함된 신호 데이터  $u$ 의 값만 알뿐 실제신호와 잡음데이터를 알 수 없기 때문에 잡음을 줄이고 없애는 방법은 매우 어려운 일이다. 하지만 웨이블릿 변환으로 분석된 신호의 계수성분을 이용한다면

원신호와 유사한 형태로 구현할 수 있다. 그 과정으로 강력한 잡음제거 성능을 가진 웨이블릿 변환의 임계치법이 있다.

임계치법을 이용한 잡음제거는 그림 2와 같이 크게 3가지 과정을 거친다. 첫 번째, 잡음이 포함된 신호에 웨이블릿 변환을 적용하여 신호의 계수성분을 계산한다. 두 번째, 임계치법으로 불필요한 계수성분은 제거하고 필요한 성분만 남긴다. 세 번째, 역웨이블릿 변환을 이용하여 잡음이 제거된 원신호와 가까운 신호로 재구성된다.

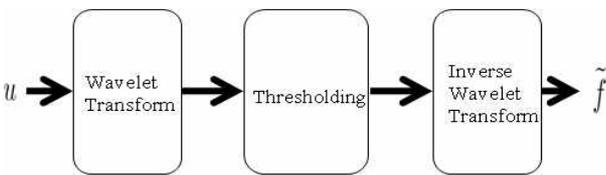


그림 2. 웨이블릿 변환을 이용한 잡음제거 과정  
Fig. 2. A denoising process using wavelet transform

두 번째 과정에서 처리하는 임계치법은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

- 강한 임계화(hard-thresholding)

$$T(x, \lambda) = \begin{cases} x, & \text{if } |x| \geq \lambda \\ 0, & \text{if } |x| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

- 부드러운 임계화(soft-thresholding)

$$T(x, \lambda) = \begin{cases} \text{sign}(x)(|x| - \lambda), & \text{if } |x| \geq \lambda \\ 0, & \text{if } |x| < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서  $\lambda$ 는 웨이블릿 변환으로 계산된 계수값이다. 임계치법은 계수의 절대값이 적절하게 설정된 임계값보다 클 경우 계수값을 그대로 처리하거나(hard thresholding) 임계값과의 차이만큼 줄여준다(soft thresholding). 계수 절대값이 임계값 보다 작을 경우엔 잡음으로 판단하여 0으로 처리한다. 분석신호를 관찰하며 적정 임계값을 설정하여 가장 안정된 상태를 찾음으로써 신호에 포함된 잡음을 크게 줄일 수 있다. 다음으로 세 번째 과정인 역웨이블릿 변환을 함

으로써 원신호에 가까운 신호로 재구성되며 잡음이 제거된 신호를 얻게 된다[9]. 마더 웨이블릿 함수의 종류 중 도베쉬 4(Daubechies 4) 함수를 이용하였고 Labview 8.2에서 제공하는 함수를 사용하였다.

### 2.1.2 가우시안 라인피팅

광섬유 격자 반사과장 스펙트럼의 가장 이상적인 경우는 좌우대칭이 이루어지는 가우시안과 로렌치안(Lorentzian) 함수의 중간 형태이다. 그러나 광섬유 격자 제조 과정의 문제에 의해서, 혹은 광섬유 격자 센서에 가해진 불규칙한 외부 압력이나 스트레스에 의해서 광섬유 격자의 반사과장은 이상적인 형태에서 변형되고 피크의 불안정한 변화로 인하여 측정결과의 정확도가 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 그림 3[10]과 같이 광검출기(photo detector, PD)로 수집한 반사과장이 가우시안 형태임을 가정하고 가우시안 라인피팅 처리를 한 후 계산된 가우시안 파형의 중심값을 센서의 출력으로 설정함으로써 잡음에 의한 영향을 줄일 수 있다[11].

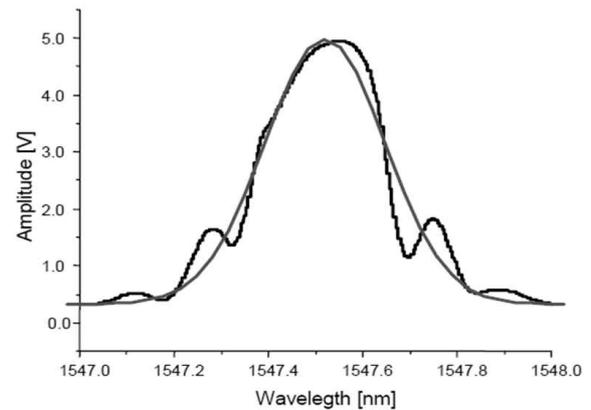


그림 3. 가우시안 라인피팅  
Fig. 3. Gaussian line-fitting

## 2.2 광섬유 격자 온도센서 시스템

그림 4는 광섬유 격자에 가해지는 온도를 측정하기 위해 구성한 센서시스템의 개략도이다. 반도체 증폭기(semiconductor optical amplifier, SOA)와

웨이블릿 변환을 이용한 광섬유 격자 온도센서의 정밀도 개선

Fabry-Perot 파장가변필터를 이용하여 링구조로 구성된 광섬유 레이저 광원의 출력이 50:50의 분리비를 가지는 광섬유 커플러를 지나 광섬유 격자에 입사한다. 광섬유 격자에서 반사된 광신호는 광검출기에서 검출되어 전기신호를 발생시킨다. 광검출기 신호는 컴퓨터에 장착된 데이터수집보드(data acquisition board, DAQ board)로 읽어 들인 후, Labview 프로그램으로 파형의 피크 위치를 검출하여 온도를 측정한다. 파장가변필터에 1[kHz]의 램프신호를 가함으로써 실시간으로 광섬유 격자에 가해지는 온도를 스캔하도록 하였다. 광섬유 격자 센서의 끝단에 굴절률 정합액(index matching gel)을 발라서 반사되는 광잡음을 제거하였다.

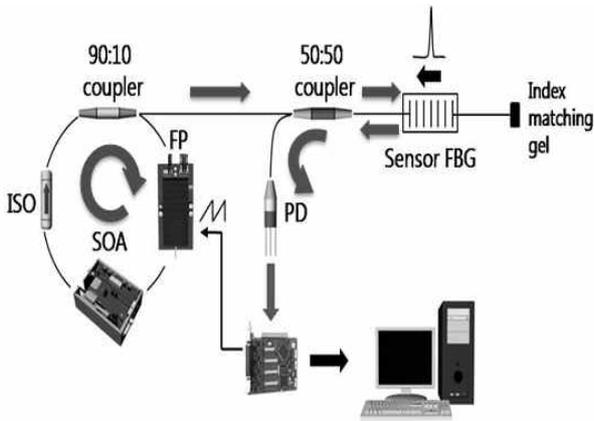


그림 4. 광섬유 격자 온도센서 시스템의 개략도  
Fig. 4. Schematic diagram of FBG temperature sensor system

### 2.3 실험 및 결과

그림 5는 광섬유 격자의 반사스펙트럼과 가우시안 라인피팅을 적용한 결과를 같이 나타낸 것이다. 가우시안 라인피팅의 결과로 보다 안정적인 출력을 얻을 수 있었으나 파장축을 레이저의 동작속도가 증가함에 따라 광검출기 출력신호와 라인피팅의 결과가 모두 불안정해지는 결과를 얻었다.

신호의 잡음을 제거하기 위하여 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)이 여러 분야에서 쓰이고 있다. 하지만 고속 푸리에 변환을 이용한 잡음제거

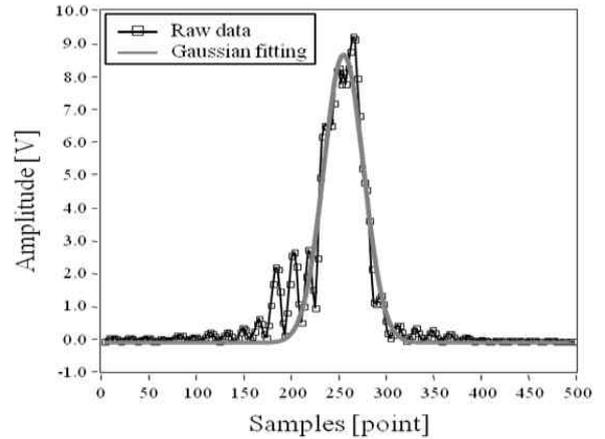


그림 5. 가우시안 라인피팅 결과  
Fig. 5. The Gaussian line-fitting of a FBG spectrum

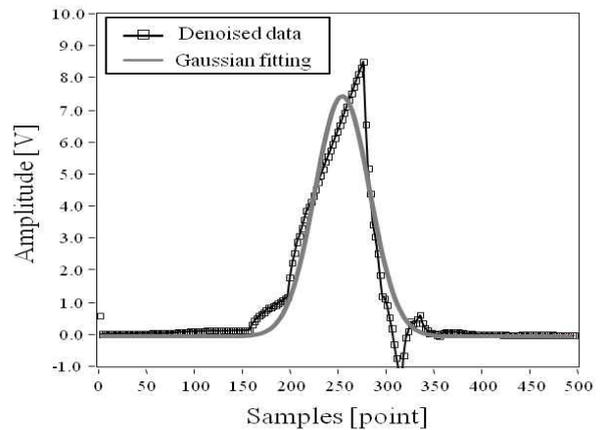


그림 6. 잡음제거 후 가우시안 라인피팅 결과  
Fig. 6. The Gaussian line-fitting of FBG spectrum after wavelet transform denoising

방법은 신호의 평균값을 낸 형태이기 때문에 원신호와 다른 왜곡된 형태로 나타날 수 있다. 반면에 웨이블릿 변환을 이용한 잡음제거 방법은 정밀한 신호성분 분석으로 인해 원신호와 유사한 형태로 재구성될 수 있고 잡음 성분을 직접 제거하여 결과를 얻기 때문에 고속 푸리에 변환보다 더 뛰어난 잡음제거 성능을 보인다. 그림 6은 광검출기로 검출된 반사파장 신호를 웨이블릿 변환을 이용한 잡음제거 처리를 하고 가우시안 라인피팅한 파형이다. 웨이블릿 변환을 통하여

반사파장의 신호를 분석하고 생성된 웨이블릿 계수에 임계치법을 적용한다. 적절한 임계값을 설정하여 잡음을 제거하고 역웨이블릿 변환을 통하여 신호를 재구성함으로써 가장 안정된 상태의 센서출력을 구현하였다.

그림 7은 반사파장을 가우시안 라인피팅 처리하고 피크를 검출하여 측정된 온도데이터이다. 항온항습용 온도챔버(drying oven) 안에 광섬유 격자를 설치하여 온도를 측정하였고 약 0.8~1[°C]의 진폭 안에서 온도가 측정됨을 보인다.

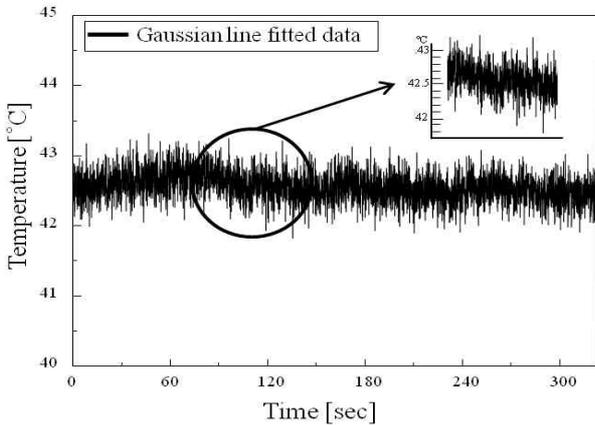


그림 7. 가우시안 라인피팅한 광섬유 격자 온도센서의 출력  
Fig. 7. Temperature sensor output with Gaussian line-fitting

그림 8은 웨이블릿 변환의 잡음제거 기법으로 반사파장을 안정화 시키고 가우시안 라인피팅 처리한 후 피크를 검출하여 온도를 측정된 데이터이다. 그림 7과 마찬가지로 온도챔버에서 일정하게 유지되는 42.5[°C]의 온도를 측정하였으며 가우시안 라인피팅 처리만 했을 경우보다 약 0.3~0.5[°C]의 온도측정 진폭이 줄어드는 결과를 얻었다.

그림 9는 항온항습기로 30[°C]에서 60[°C]까지의 온도를 광섬유 격자에 가했을 때 측정된 온도데이터이다. 웨이블릿 변환을 이용하여 처리된 것으로 온도가 점진적으로 증가하면서 최고 설정온도인 60[°C]에서 온도가 유지됨을 보였다.

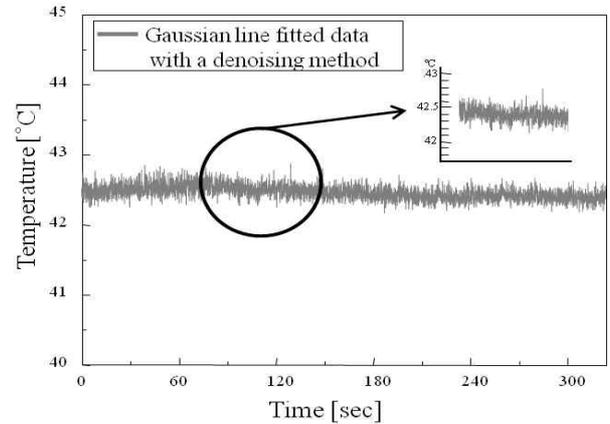


그림 8. 웨이블릿 변환과 가우시안 라인피팅 처리했을 경우의 온도변화  
Fig. 8. Temperature sensor output with Gaussian line-fitting and wavelet transform

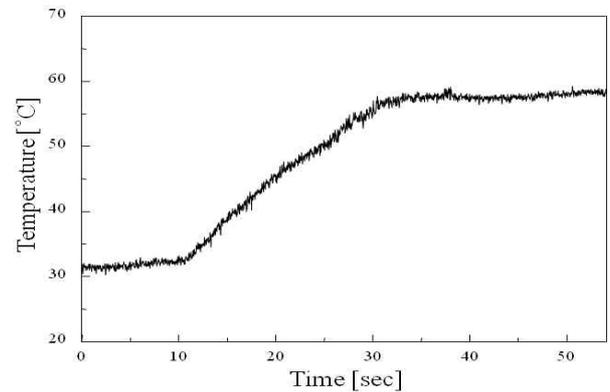


그림 9. 온도변화 데이터  
Fig. 9. Temperature variation

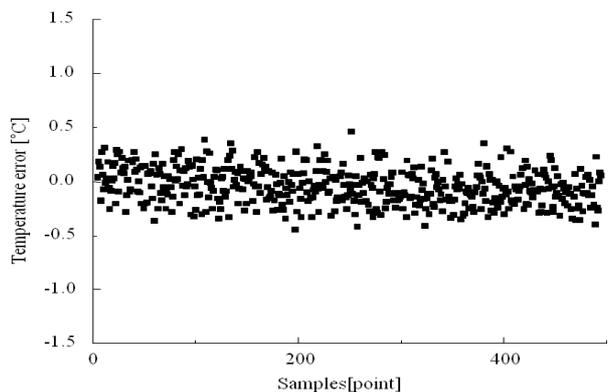


그림 10. 온도 오차 분포  
Fig. 10. Temperature error distribution chart

그림 10은 웨이블릿 변환을 적용하여 온도를 측정했을 때의 온도 오차분포이다.  $\pm 0.5[^\circ\text{C}]$  범위 안에서 안정적으로 측정됨을 보인다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 광섬유 격자와 파장가변필터로 구성된 다채널 분배용 온도센서를 구현하였다. 레이저 광원의 출력잡음과 외부환경변화에 따른 측정 오차를 줄이고자 웨이블릿 변환을 이용한 잡음제거 및 가우시안 라인피팅을 적용하였다. 실험을 통하여 실시간으로 온도측정에 적용될 수 있음을 확인하였다. 가우시안 라인피팅만 적용했을 경우보다 두 가지 기법을 동시에 적용했을 때 안정적인 반사파장의 피크를 검출함으로써 약  $0.3\sim 0.5[^\circ\text{C}]$ 의 온도오차가 줄어드는 결과를 얻었고,  $\pm 0.5[^\circ\text{C}]$  오차범위 안에서 온도측정이 가능함을 보였다.

제안한 방법은 빠른 신호처리 및 뛰어난 잡음 제거 효과로 온도센서뿐만 아니라 잡음이 심한 환경에서 측정되는 기계 감시 센서, 부분방진 감시 센서, 구조물 감시 센서 등에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2008T100100253) 주관으로 수행된 과제임.

### References

[1] 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.

[2] A. Orthonos and K. Kalli, "Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing," Boston, Artech House, 1999.

[3] A. D. Kersey, K. P. Koo, and M. A. Davis, "Fiber optic Bragg grating laser sensors," *SPIE*, 2292, 102-112, 1994.

[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] C. C. Chang, G. A. Johnson, and 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.

[6] C. C. Chana, J. M. Gong, W. Jin, and M. S. Demokan, "Investigation of unwanted interferometric signals in a fiber Bragg grating sensor using a tunable laser and a first derivative interrogation technique," *Opt. Comm.*, 173, 203-210, 2000.

[7] M. B. Ruskai, "Wavelets and Their Applications," Jones and Bartlett, 1992.

[8] H. Z. XU and D. Zhang, "Wavelet-based data processing for distributed fiber optic sensors," *Proc. ICMLC*, 13-16, 2006.

[9] C.B. Smith, S. Agaian, and D. Akopian, "A Wavelet denoising approach using polynomial threshold operators," *IEEE Sig. Pro. Lett.*, 15, 906-909, 2008.

[10] June-Ho Lee, Soo-Gil Kim, Hyoung Jun Park and Minho Song, "Investigation of fiber Bragg grating temperature sensor for application in electric power systems," *ICPADM 2006*, 431-434, 2006.

[11] Hyun-Wook Lee, Hyoung-Jun Park, June-Ho Lee and Minho Song, "Accuracy improvement in peak positioning of spectrally distorted FBG sensors by Gaussian curve-fitting," *Appl. Opt.*, 48, 2205-2208, 2007.

### ◇ 저자소개 ◇



**조요한(曹堯翰)**  
1982년 12월 13일생. 2009년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2009년 3월 전북대학교 전자정보공학부 졸업(석사).



**김현진(金炫震)**  
1980년 11월 8일생. 2007년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2009년 전북대학교 전자정보공학부 졸업(석사). 2009년 3월 전북대학교 전자정보공학부 박사과정.



**송민호(宋民鎬)**  
1968년 8월 26일생. 1990년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 2000년 9월 이후 전북대학교 전자공학부 교수.