

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 절대 변형률 측정

송인천*, Lou-shuang(광주과학기술원 (원)), 이병하, 이선규, 정성호(광주과학기술원)

Absolute Strain Measurement Using Fiber Bragg Grating Sensor

I.C. Song, Lou-shuang, B.H. Lee, S.K. Lee, S.H. Jeong (K-JIST)

ABSTRACT

This paper describes a matched-filter type strain sensor system using optical fiber Bragg grating (FBG) sensor. Matched-filter type uses another wavelength-matched FBG filter to track wavelength shift in the FBG sensor. Filter FBG is attached on a fiber stretcher and stretched by PZT actuator. To overcome the nonlinearity and hysteresis of the PZT actuator that degrades system accuracy, a string resonator which can measure an absolute strain is employed. And the effect of vibration modes on string resonator is investigated particularly regarding its sensitivity and stability.

Key Words : Strain Sensor(변형률 센서), Absolute Strain(절대 변형률), Fiber Bragg Grating Sensor(광섬유 브래그 격자(FBG) 센서), Fiber Optic Sensor(광섬유 센서), String Resonator(현 공진기)

1. 서론

광섬유 코어 부분의 굴절률을 주기적으로 변조시켜서 제작하는 광소자를 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; FBG)라고 한다. 이러한 광섬유 브래그 격자에 빛을 입사시키면 굴절률이 변하는 경계부분에서 특정파장대만의 빛을 반사시키며, 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. 이 중심파장을 브래그 파장이라 하며, 반사되는 브래그 파장은 격자에 가해지는 변형률이나 온도에 반응하여 변하게 된다. [1]

브래그 격자의 이러한 성질은 변형률 센서로 널리 적용되는데 브래그 격자의 신호 처리를 위해 빛의 위상간섭 특성을 이용한 인터페로미터 방식과 광섬유 페브리-페롯을 이용한 방식, 그리고 두개의 브래그 격자 센서를 이용한 방식이 주로 사용되고 있다.

Kersey 등은 마하-젠더 인터페로미터를 사용하여 100Hz 이상에서 $\sim 0.6\mu\epsilon/(\text{Hz})$ 의 동적 변형률을 측정하였고[2], Brady 등은 인터페로미터와 브래그 격자를 사용하여 20Hz 에서 $\sim 0.05\mu\epsilon/(\text{Hz})$ 의 동적 변형률을 측정하였다.[3] Morey 등은 페브리-페롯 필터를 사용하여 광섬유 브래그 격자 센서의 신호처리를 하여 단일점에서 $0.3\mu\epsilon$ 의 분해능으로 정적 변형률

을 측정하였고, 4 개의 브래그 격자 센서를 멀티플렉싱 시켰을 때 전체 $700\mu\epsilon$ 의 영역에서 약 $\pm 3\mu\epsilon$ 의 분해능으로 변형률을 측정하였다. [4]

Jackson 등은 하나의 브래그 격자를 센서로 사용하고 다른 하나의 광섬유 브래그 격자 이용해서 센서로부터 되돌아오는 신호를 처리하였으며 $4.12\mu\epsilon$ 의 분해능으로 정적 변형률을 측정하였다. [5] 또한 Davis 등은 2 개의 브래그 격자를 센서로 사용하고 또 다른 2 개의 브래그 격자를 필터로 사용하였으며, $200\mu\epsilon$ 의 동적범위(Dynamic range)에서 27Hz로 가해지는 $0.4\mu\epsilon$ 의 동적 변형률을 측정하였다. [6]

본 연구에서 사용된 변형률 측정 시스템은 두개의 FBG 센서와 현 공진기 그리고 두 개의 궤환 회로로 구성되어 있다. 센서용 FBG 에는 임의의 변형률이 가해지고 필터용 FBG 는 광섬유 인장기에 부착되어 센서와 필터의 중심파장이 언제나 일치하도록 궤환회로에 의해 제어된다. 즉 센서 FBG 에 변형률이 가해져서 중심파장이 변화하면 광섬유 인장기는 필터 FBG 를 인장 또는 압축하여 센서 FBG 의 중심파장과 일치하도록 제어한다. 이 때 광섬유 인장기에 부착된 필터 FBG 는 현 공진기에 의해 언제나 공진 상태를 유지하며 변형률과 공진주파수의 관계를 이용하여 센서 FBG 에 발생하는 변형률을 측정할 수 있다. [7]

본 논문에서는 이와 같은 변형률 측정 시스템을 이용한 변형률과 온도 측정에 대해 논의 할 것이며, 현 공진기와 공진 유지를 위한 제환 회로에서의 1 차/3 차 모드 추종시의 장단점을 비교할 것이다.

2. 변형률 측정 시스템

2.1 파장 추종의 원리 [7]

그림 1 은 FBG 를 이용한 변형률 측정 시스템의 개념도를 보여준다. SLED (Superluminescent Light Emitting Diodes)에서 발생하는 광대역 빛은 3dB 광 결합기를 거쳐 두 방향으로 각각 세기가 반으로 줄어 진행된다. 하나는 센서 FBG 쪽으로 진행하며, 다른 한쪽은 fresnel 반사를 막기 위해 index matching Gel(IMG)이 처리된, 절단된 쪽으로 향한다. 센서 FBG 로 향한 빛은 브래그 격자에 가해진 변형률에 의해 반사파장이 변화 되며, 결합기를 통해 다시 세기가 반으로 줄어 필터 FBG 로 향한다.

필터 FBG 로 들어온 빛은 필터 FBG 의 브래그 파장 대역 부분이 감쇠 되어 통과되어, 광 파워를 광 다이오드를 이용하여 측정한다. 만약 필터 FBG 의 중심파장이 센서 FBG 의 중심파장과 정확히 일치한다면, 필터 FBG 는 센서 FBG 로부터 반사되어 돌아오는 빛의 대부분을 반사 시켜서 광 다이오드를 이용해 측정한 광 파워는 최소가 될 것이다. 광 다이오드가 동작 파장 범위에 대해 일정한 반응을 을 보인다면 광 파워는 식(1)과 같이 표현된다.

$$P_d = \int_0^{\infty} I_d d\lambda = \frac{(1-\gamma)}{4} \int_0^{\infty} I_i(\lambda) R_s(\lambda) T_r(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

P_d , $I_d(\lambda)$ 는 각각 광 다이오드에서의 광 파워, 파장에 따른 세기이고, $I_i(\lambda)$ 는 광원에서 나온 빛의 세기, 그리고 $R_s(\lambda)$, $T_r(\lambda)$ 는 각각 파장에 따른 센서 FBG 의 반사율, 필터 FBG 의 투과율이며, γ 는 광섬유의 굽힘이나 연결에 따른 손실률이다.

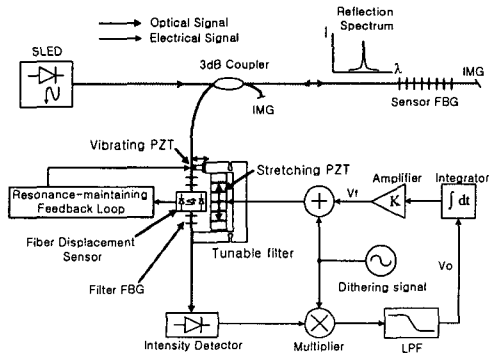


Fig. 1 Tunable filter system for wavelength interrogation

제환제어를 위한 오차신호를 얻기 위해 디더링 법(dithering method)을 사용한다. 디더링 법은 두 격자간의 파장차에 해당하는 신호에 작은 진폭의 고정 주파수 신호를 첨가함으로써, 식(2)와 같이 오차 신호가 실제 격자간의 파장 차에 의한 신호와 디더링에 의한 신호의 합으로 나타나게 된다.

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 - \lambda_d \sin \omega_0 t = (\lambda_s - \lambda_{r0}) - \lambda_d \sin \omega_0 t \quad (2)$$

여기서, $\Delta\lambda$ 는 필터와 센서 FBG 의 파장차, λ_{r0} 는 필터 FBG 의 평균 브래그 파장, ω_0 는 디더링 신호의 주파수, λ_d 는 디더링 신호의 파장에 해당하는 진폭을 나타낸다.

이와 같이 디더링법으로 변조된 신호의 복조를 위해 디더링 신호를 다시 곱하고 저주파 통과필터를 사용하면 직류 성분만 남게 되며 식(3)과 같이 센서와 필터의 파장차에 비례하는 오차 전압 신호를 얻을 수 있다.

$$V_o(\Delta\lambda_0) = -\eta\zeta R_s P_o R_r \frac{\sigma_r}{\sigma_s} 2\Delta\lambda_0 \lambda_d \quad (3)$$

여기서 η 는 광다이오드의 광전류 대 광량 변환 계수이고, ζ 는 복조 과정에 따르는 계수값이며, R_r 는 전류를 전압신호로 바꿔주기 위한 트랜스 임피던스의 저항값이다.

결론적으로 광 다이오드에서 측정되는 총 광파워를 최소가 되도록, 즉 센서 FBG 와 필터 FBG 간의 파장차이가 0 이 되도록 연속적으로 제환 제어를 하여주면, 필터 FBG 의 브래그 파장은 항상 센서 FBG 의 브래그 파장과 동일한 값을 갖게 되고 결국 센서 FBG 와 필터 FBG 는 같은 변형률을 유지하게 된다.

이와 같이 광섬유 인장기의 구동전압을 측정함으로써 센서 FBG 에 가해진 변형률을 측정할 수 있지만 광섬유 인장기에 사용되는 압전소자의 비선형성과 히스테리시스 특성으로 인해 오차가 증가하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 현공진기를 도입하여 높은 정확도로 변형률을 측정할 수 있다.

2.2 현 공진기를 이용한 절대 변형률 측정

일반적으로 양단이 고정된 빔 구조물에 변형률이 가해질 때 빔의 고유진동수는 빔에 가해진 절대 변형률과 일정한 관계를 갖는다.

일반적으로 시스템의 감쇠를 무시할 경우 광섬유는 축 방향력과 굽힘 강성을 포함하는 빔 요소로 생각할 수 있다. 축 방향 힘을 고려한 보의 자유진동 방정식은 식(4)와 같다.

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - P \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

여기서, E 는 빔의 탄성계수, I 는 빔의 관성모멘트, ρ 는 빔의 밀도, A 는 빔의 단면적, P 는 빔에 가해지는 인장력을 나타낸다.

위 식의 해를 $w(x,t) = W(x)(A\cos\omega t + B\sin\omega t)$ 라 가정하고 모드 가정법과 양단이 고정된 보의 경계 조건을 적용하면 식(5)와 같이 변형률과 공진주파수의 관계식을 구할 수 있다. [8]

$$\left\{ \frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2} \right\} EA_s \Gamma_{o,ij} - \left\{ \Lambda - \frac{\omega_{bo,j}^2}{(1+\varepsilon)^3} \right\} \delta_{ij} = 0 \quad (5)$$

여기서 A_s , $\omega_{bo,j}$, $\Gamma_{o,ij}$ 는 각각 변형률이 0일 때의 단면적, 이상보 고유진동수, 계수행렬 Γ 을 의미한다. Λ 는 고유치이며, 축방향 힘을 고려한 보의 고유진동수 ω_j (rad/sec)의 제곱의 값을 갖는다. 일반적인 단일모드 광섬유의 물성치를 사용하여 식(5)의 해를 시뮬레이션 한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

시뮬레이션 결과로부터 변형률과 공진주파수의 관계를 알 수 있으며, 고차모드 일수록 단위 변형률 당 공진 주파수의 변화량이 더 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 고차모드에서는 변형률에 대한 민감도가 더 높아진다고 할 수 있겠다.

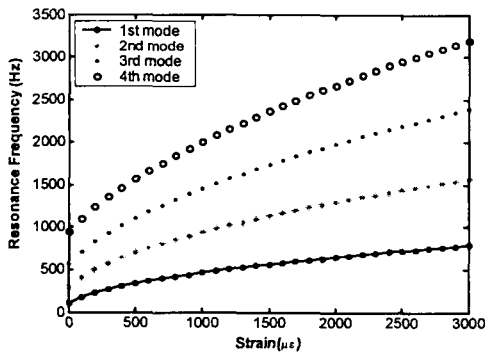


Fig. 2 Vibration of resonance frequency with respect to strain for different modes

Fig. 3은 공진 유지 회로의 블록 다이어그램이다. 포토 인터럽터에서 측정된 광섬유의 변위 신호는 고주파 통과 필터를 거쳐 직류성분이 제거된 후 증폭된다. 증폭된 신호는 시스템의 위상관계를 일정하게 유지하기 위해서 위상변환기를 거치며, 자동 게인 조절기에 의해 진폭이 조절되어 항상 일정한 진폭의 가진 신호로 가진용 PZT에 구동하게 된다.

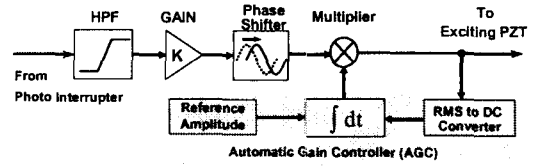


Fig. 3 Functional diagram of resonance-maintaining feedback circuit

3. 실험 결과

3.1 절대 변형률의 측정

센서 FBG에 가해지는 변형률에 대한 필터 FBG의 공진주파수 변화를 보기 위해 센서 FBG에 변형률을 가하면서 필터 FBG의 공진주파수를 측정하였다. 약 $1700\mu\epsilon$ 의 정적 변형률 범위에서 현 공진기의 공진 모드별 공진 주중 특성을 알아보기 위해 1차 공진모드와 3차 공진 모드에서 각각 변형률에 대한 공진주파수를 측정하였다. 측정 데이터와 fitting 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

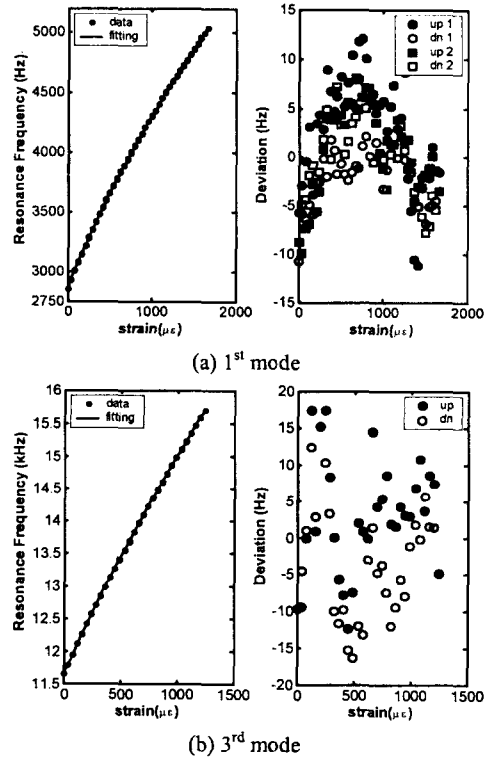


Fig. 4 Fitting curve and its deviation from fitting curve

Table. 1 Coefficients calculation of fitting equation (6)

	$D_i (hz^2)$	$\epsilon_o (\mu\epsilon)$
1 st mode	10405	516.8
3 rd mode	89675	427.9

데이터의 fitting 을 위해 식 (5)에서 식 (6)을 얻을 수 있다. 여기서 f_i 는 i 번째 모드의 공진주파수, $f_{b,i}$ 는 변형률이 0 일 때의 i 번째 모드 공진주파수, ϵ_o 는 공진기에 가해지는 초기 변위에 의한 변형률 그리고 D_i 는 각 모드에서 결정되는 모드별 상수이다. 각 진동 모드에서 측정된 데이터를 fitting 했을 때의 fitting 식의 계수는 표 1 에 나타내었다.

$$f_i^2 = \frac{D_i(\epsilon_o + \epsilon)}{(1 + \epsilon_o + \epsilon)^2} + \frac{f_{b,i}^2}{(1 + \epsilon_o + \epsilon)^3} \approx \frac{D_i\{(\epsilon_o + \epsilon) + (\epsilon_o + \epsilon)^2\} + f_{b,i}^2}{1 + 3(\epsilon_o + \epsilon)} \quad (6)$$

Fig. 4 에서 fitting 커브에 대한 측정 데이터의 최대 오차는 1 차 모드에서 $\pm 12\text{Hz}$, 3 차 모드에서 $\pm 17\text{Hz}$ 로 나타났으며 오차 값을 변형률 값으로 환산하면 1 차 모드와 3 차 모드에서 각각 $\pm 7.8\mu\epsilon$, $\pm 4.9\mu\epsilon$ 에 해당하는 값이다. 3 차 모드에서의 공진 주파수의 오차는 1 차 모드에 비해 약 1.5 배 이지만 등가 변형률로 환산했을 때 3 차 모드에서의 변형률 오차가 더 적은 것을 알 수 있다. 이것은 2.2 절에서 언급했듯이 고차 모드일수록 단위 변형률에 대한 공진주파수의 변화량이 더 커지기 때문이다. 실제 실험결과(Fig. 4)에서도 각 모드별 단위 변형률당 공진주파수 변화가 3 차 모드일 때 월등히 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 변형률과 공진주파수의 제곱에 가장 큰 영향을 주는 상수 D_i 를 대상으로 표 1 에 제시된 값을 모드별로 비교해 볼 때 3 차 모드에서 1 차 모드에 비해 약 8 배 정도 큰 값을 알 수 있다.

3.2 계단 입력에 대한 시스템의 응답

변형률 측정 시스템의 분해능을 알아보기 위해 미소 계단 입력에 대한 공진주파수를 측정하였다. 센서 FBG 에는 약 $0.6\mu\epsilon$ 의 미소 변형률이 가해졌으며 실험결과는 Fig. 5 에 나타내었다.

실험 결과 1 차 모드와 3 차 모드에서 유사정적 분해능은 각각 0.13Hz , 0.3Hz 로 계산되었다. 이 값은 변형률로 환산될 때 1 차 모드와 3 차 모드에서 각각 $0.117\mu\epsilon$, $0.085\mu\epsilon$ 에 해당하는 값이다. 앞에서와 같이 각 정적 구간에서 1 차 모드에서는 3 차 모드에 비해 안정된 주파수 특성을 보임을 알 수 있고, 3 차 모드의 변형률 민감도는 1 차 모드에 비해 훨씬 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

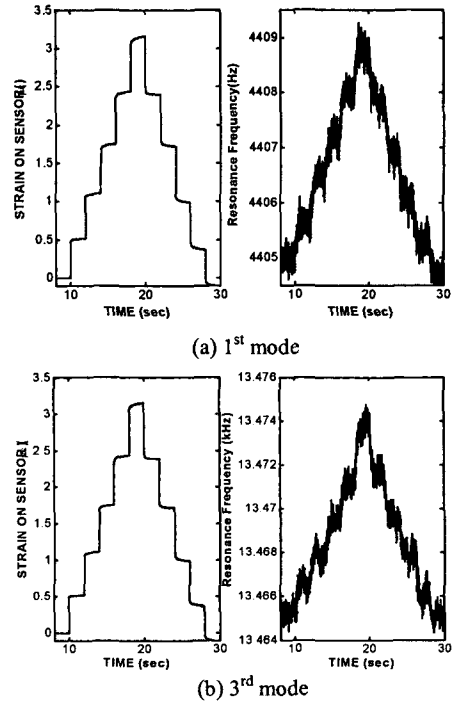


Fig. 5 Fitting Small step response of string resonator

3.3 온도 측정

Fig. 6 은 온도변화에 의한 공진주파수의 변화를 측정한 것이다. 센서 FBG 는 알루미늄 플레이트에 부착되었으며 알루미늄 플레이트에는 Heat Pad 를 이용해 약 30°C ~ 106°C 까지 온도를 변화시켰다. 온도 측정은 열전대와 온도 지시계를 이용했다.

식 (6)를 이용하여 fitting 커브를 구할 때 최적화된 fitting 커브의 계수는 각각 $D_1=27886(\text{hz}^2)$, $\epsilon_o=8.2(\mu\epsilon)$ 로 계산되었고 fitting 커브와 오차는 Fig.6 에 나타내었다. Fig. 6 에서 온도에 대한 공진 주파수의 변화는 fitting 커브에 대하여 최대 약 6Hz 의 오차를 나타내며 이 값은 70°C 근처에서 약 0.9°C 의 온도변화에 해당하는 값이다. 실험에 사용된 온도 지시계의 분해능은 0.1°C 이고 정확도는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 임을 고려할 때 현 공진기와 브래그 격자를 사용해서 측정된 데이터는 신뢰할 수 있는 값이라 할 수 있겠다. 온도에 의한 공진주파수의 변화를 변형률의 경우와 비교할 때 fitting 커브의 계수를 비교함으로써 온도 및 변형률에 대한 공진주파수의 민감도를 알 수 있다. 따라서 온도 변화의 경우에 결정된 fitting 커브의 계수 D_i 를 표 1 에 제시된 변형의 경우와 비교할 때 온도 변화에 대한 민감도는 변형률에 대해 약 10 배 정도 되는 것을 알 수 있다.

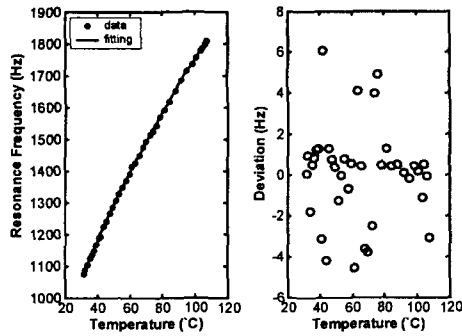


Fig. 6 Fitting curve of temperature measurement and its deviation from fitting curve

4. 결론

FBG 센서와 광섬유 인장기 그리고 현 공진기를 사용하여 변형률을 측정하였다.

1. 정적 변형률의 경우 $1700\mu\epsilon$ 의 동적 범위에서 1차 모드와 3차 모드 공진 주파수 측정 시에 각 모드에서의 정확도는 각각 $7.8\mu\epsilon$ 과 $4.9\mu\epsilon$ 으로 측정되었다.
2. 계단입력에 대한 시스템의 응답은 1차 모드와 3차 모드에서 각각 $0.117\mu\epsilon$, $0.085\mu\epsilon$ 으로 계산되었다.
3. 변형률에 대한 1차/3차 공진 모드의 민감도를 비교해 본 결과 3차 모드의 민감도가 1차 모드에 비해 약 8배 이상 높다는 것을 알 수 있다.
4. 온도 측정 결과 약 80°C 의 온도 측정 범위에서 정확도는 약 0.9°C 로 측정되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-007-2)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. A. D. Kersey et al., "Fiber Grating Sensors", Journal of Lightwave Technology, Vol.15, No.8, pp.1442-1463 1997
2. A.D. Kersey et al., "High resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection", Elect. Lett., vol. 28, No. 3, Jan. 1992
3. G. Brady et al., "Simultaneous interrogation of interferometric and Bragg grating sensors", optics letters, vol. 20, No. 11, June 1995
4. A. D. Kersey, T. A. Kerkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter", optics letters, vol. 18, No. 16, pp 1370-1372, Aug. 1993
5. D.A. Jackson and A.B. Lobo Ribeiro, " Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network", Optics letters, Vol. 18, No. 14, July 1993
6. M.A. Davis and A.D. Kersey, " Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays", Electronics letters, Vol. 31, No. 10, May 1995
7. Byeongha Lee, "Absolute Strain Measurement Using Fiber Bragg Grating", Ph.D Thesis, Univ. of Colorado, 1996
8. YeongKyoon Lee, "Real-time Monitoring of the Precision Machine Structure Using Fiber Bragg Grating(FBG) Sensors", Ms.D Thesis, K-JIST, 2001