

경량 구조물의 진동 및 변형 감지/제어를 위한 광섬유 센서 기술

Fiber optic sensor technology for sensing/controlling vibration and deformation of lightweight structures

한재흥[†] · 강래형^{*} · Uwe C. Mueller^{**} · Stephan Rapp^{**} · Horst Baier^{**}
Jae-Hung Han, Lae-Hyong Kang, Uwe C. Mueller, Stephan Rapp and Horst Baier

Key Words : Fiber Optics Sensor(광섬유 센서), EFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, 외부 페브리-페로 간섭계), FBG(Fiber Bragg Grating, 광섬유 브래그 격자), Lightweight Structure(경량 구조물), Deformation(변형), Vibration(진동), Control(제어)

ABSTRACT

Vibration and deformation sensing/control of lightweight structures using optical fiber sensor technology is introduced in this presentation. This paper shows several examples of vibration control and deformation estimation for structures using these optical fiber sensor systems. Among various optical fiber sensors, in this paper, two types of optical fiber sensors, Fabry-Perot Interferometer(EFPI) and Fiber Bragg Grating(FBG) sensors, are mainly dealt with. Fiber optic sensors show many advantages over conventional strain gages for the measurement of vibration and deformation of lightweight structures.

1. 서론

항공우주 구조물을 비롯하여 각종 기계 구조물, 토목 구조물의 경량화는 매우 중요한 문제이다. 그러나 구조물의 경량화는 필연적으로 과도한 진동이나 변형이 수반될 가능성이 있어, 구조물의 운용 중에 실시간으로 진동이나 변형을 모니터링하거나, 경우에 따라서는 적절한 제어를 통해 구조물의 성능을 향상시킬 필요가 있다. 본 발표에서는 당 연구팀에서 그 동안 수행해 온 구조물의 변형 및 진동을 감지하기 위한 광섬유 센서 연구 내용을 소개하고자 한다.

1980년대부터 광섬유 센서를 구조물에 적용하려는 연구가 시작되었으며 초기 연구는 특히 구조 건전성 모니터링 분야가 주 연구 대상이었다.^(1,2) 광섬유는 특히 적층 복합재 구조물의 내부에 삽입할 수 있어, 구조물의 표면 뿐만 아니라 내부의 변형률 또한 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 외에도 광섬유 센서는 작동 온도 범위가 넓고, 전자기파 간섭을 받지 않으며, 직경이 작고 유연하여 원하는 크기의 센서를 제작하기가 용이하다.

그 뿐만 아니라 센서 크기가 작고 가벼워서 구조물에 적용할 경우 부가 효과가 작고 주구조물의 성능을 저하시키지 않는다. 특히 간섭을 이용하는 센서 시스템의 경우 광원의 파장 단위 이하의 매우 높은 해상도를 갖는다. 또한 센서 시스템 구성에 따라 변형률, 온도 등의 여러 물리량을 동시에 측정 가능한 장점이 있다.

광섬유 센서는 구성하는 방법에 따라 광강도형 센서, 편광형 센서, 간섭형 센서, 산란형 센서, 격자형 센서 등으로 나눌 수 있다.⁽³⁾ 광강도형 센서와 편광형 센서는 구성이 간단하지만 해상도가 떨어지고 센서의 응답 특성이 좋지 않다. 또한 국부적인 측정이 어렵고 물리량을 정량적으로 측정하기 어려워 센서 연구 초기에만 많이 사용되었다. 산란형 센서는 광섬유를 적용한 피측정물의 전구간에 대해 감지할 수 있는 장점이 있으나 공간적인 위치 해상도가 매우 낮고 측정 해상도도 좋지 않아 대형 구조물에만 적용되고 있다. 이에 반해 간섭형 센서는 높은 해상도를 가지므로 구조물의 정밀한 변형률 측정을 위한 연구에 많이 적용되어 왔다. 하지만 마이켈슨 간섭계를 사용하는 경우, 감지선과 기준선이 각기 다른 두 광섬유로 분리되어 있어 출력 광신호의 떠다님(drifting)이 발생하며 광섬유의 비틀림이나 광섬유에 가해진 응력에 따른 광섬유 내부 굴절률 분포 변화에 의한 신호 맥놀이 현상이 발생하는 단점이 있다. 다른 간섭계 센서로서 외부 페브리-페로 간섭계 (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI) 센서를 사용하면

[†] 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과
E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3723, Fax : (042) 869-3710

^{*} 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과

^{**} Technical Univ. of Munich, Institute of Lightweight Structures

마이켈슨 간섭계형 센서에서 발생하는 신호의 떠다님 현상은 발생하지 않지만 마이켈슨 간섭 센서와 마찬가지로 가해진 변형률에 대해 비선형적인 정현파 형태의 신호를 변형률로 변환하기 위해 복잡한 간섭 무늬 계수 기법이나 위상 추적 기법 등을 사용해야 한다. 격자형 센서인 FBG 센서는 변형의 절대량을 측정할 수 있으며 출력 신호가 빛의 파장에만 관계하므로 광강도의 변화에 무관하여 시스템 구성이 용이하고 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 등의 기법을 사용하여 동시 다점 측정이 가능하다.

본 발표에서는 경량 구조물의 진동이나 변형을 측정하는 데 유용한 대표적인 광섬유 센서 형태인 EFPI 센서와 FBG 센서를 사용한 진동, 변형 감지/제어 및 센서 구동 시스템에 대해 전반적으로 소개하고자 한다.

2. EFPI 를 사용한 감지 및 제어

2.1 EFPI 센서 및 시스템

EFPI 센서는 Fig. 1 과 같이 반사파의 간섭을 이용하여 변형률을 측정하는 간섭계 센서이다. 입사광(I_0)이 광섬유 속을 진행하여 공기 층과 만나는 첫 번째 반사면에서 반사된 빛(I_1)과 간극길이 s 만큼 진행하여 반사된 빛(I_2)이 간섭하여 출력광을 만들어 낸다. 출력광 강도(I)는 다음과 같이 조화함수의 형태로 표현될 수 있다.⁽⁴⁾

$$I \propto A(1 + B \cos \phi) \quad (1)$$

여기서, A 와 B 는 광섬유 코어의 반경, 간극 길이, 공기/유리 접촉면의 전달 상수, 개구수(Numerical Aperture)와 입사광 강도(I_0)로 표현되는 값이고, ϕ 는 광학적 위상을 나타낸다. 광학적 위상(ϕ)과 간극길이(s)의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = 2ks \quad (2)$$

여기서, k 는 $2\pi n_c/\lambda_0$ 로 표현되는 파동수(wave number), n_c 는 게이지 구간에서의 굴절률, λ_0 는 진공 상태에서 레이저 광원의 파장이다. 식 (2)를 이용하여 두 반사파(I_1, I_2)의 위상차, $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda_0}(n_c \cdot \Delta s + \Delta n_c \cdot s) = \frac{4\pi}{\lambda_0}(n_c \cdot \Delta L + \Delta n_c \cdot s) \quad (3)$$

EFPI 의 게이지 구간에서의 광 매질이 공기이므

로 굴절률의 변화는 거의 없다. $n_c \cong 1, \Delta n_c \cong 0, \lambda_0=1310$ nm 를 사용하면 $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\phi = 0.9593 \times 10^7 \Delta L \text{ (rad/m)} \quad (4)$$

본 연구에서 사용된 광섬유 센서 시스템의 구성은 Fig. 2 와 같다. 광원으로 레이저 다이오드가 사용되었고, 레이저 다이오드를 구동하기 위한 전류 공급기(current source), 레이저 광원의 역방향 전파를 방지하는 광격리기(isolator), 레이저를 분기하는 양방향 연계기(bi-directional coupler), 센서로부터 나오는 빛을 감지하기 위한 광검출기(photo detector), 광검출기 구동을 위한 전원 공급기로 구성되어 있다.

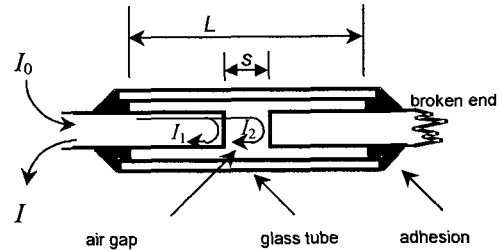


Fig. 1 Schematic diagram of EFPI.

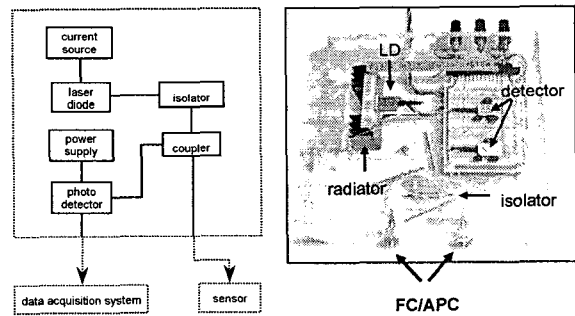


Fig. 2 Fiber optic sensor system.

2.2 EFPI 센서의 감지 특성

EFPI 센서가 구조물의 표면 또는 내부에 삽입될 경우 구조물에 발생하는 변형은 게이지 길이 (L)의 변화를 유발하고 식(3)에 나타난 것과 같이 간섭 신호의 위상 변화가 발생하게 된다. 간섭 센서의 특성상 EFPI 센서의 출력광 강도는 기계적 변형률과 선형 비례 관계를 갖지 않는다. Fig. 3 은 식 (1)에서 $A=B=1$ 인 경우 출력광 강도의 변화를 나타낸 그림이다. 도식한 바와 같이 동일한 진동에 의해 유발되는 두 반사파의 위상 변화에 대해서도 출력광 강도는 두 반사파의 초기 위상 차에 따라 다른 형태로 나타날 수 있다.

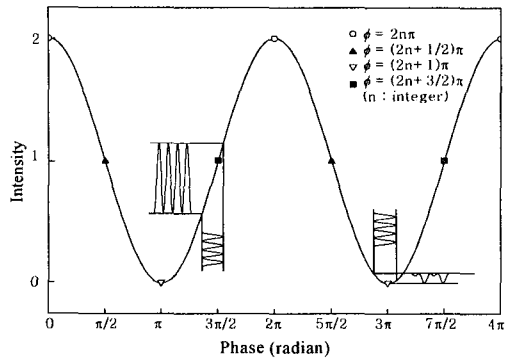


Fig. 3 Relation between intensity and strain variations.

초기 위상차가 극대 혹은 극소 값 부근일 경우 간섭 신호는 심하게 왜곡된 진동 정보를 나타낼 수 있다. 초기 위상이 $\phi=(2n+1/2)\pi$ 또는 $\phi=(2n+3/2)\pi$ 인 경우 왜곡 없이 진동을 측정할 수 있는 범위가 가장 넓어진다.

Fig. 4의 알루미늄 평판에 제작된 EFPI 센서(개이지 길이(L)와 간극 길이는 각각 5.13 mm, 55 μm)와 압전 작동기(Fuji Ceramics, C-8, 두께 : 0.4mm)를 부착하였다. 평판의 첫번째 굽힘 모드의 주파수(5.73 Hz)로 가진 한 경우의 EFPI 센서의 신호와 레이저 변위계의 신호를 Fig. 5에 나타내었다. 진폭이 증가함에 따라 EFPI 센서의 신호가 왜곡됨을 살펴볼 수 있다.

EFPI 센서를 진동 감지 특히 진동 제어를 위한 센서에 사용하는 경우는 이와 같이 진동 진폭이 커지는 경우 신호 왜곡 문제를 극복하여야 한다. 본 발표에서는 신경망 제어기와 같이 비선형 제어기를 사용하며, EFPI 센서 신호를 이용 구조물의 진동 제어를 수행할 수 있음을 보이고, 나아가 압전 감지기를 같이 이용하여, 왜곡 신호를 보상할 수 있는 방법을 소개하고자 한다.

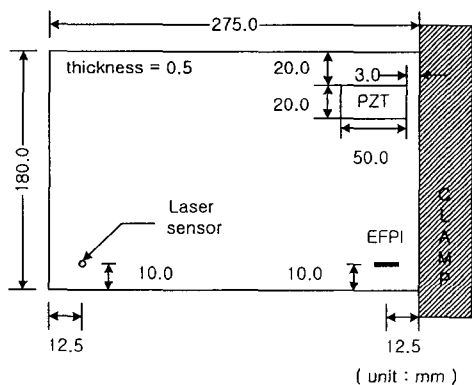


Fig. 4 Schematic diagram of the aluminum plate.

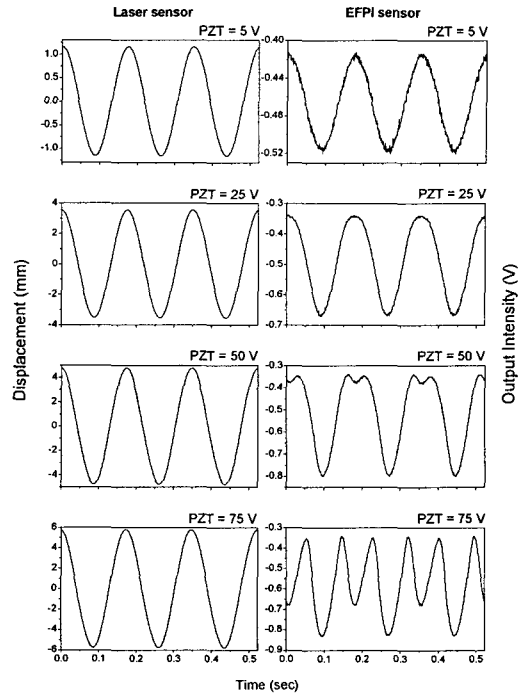


Fig. 5 Comparison of displacement and intensity signals.

2.3 작은 변형에 대한 진동 제어

Fig. 4의 시편에 대한 진동 제어 실험에서는 EFPI 센서가 심각한 왜곡 없이 기계적 변형률을 나타낼 수 있는 범위 내에서 수행되었다.⁽⁵⁾ 또한 EFPI 센서의 출력 신호가 가지고 있는 D.C. 성분을 제거하기 위하여 버터워스 고주파 통과필터(Butterworth high-pass filter)를 사용하였다.

다중 모드 제어를 수행하기 위하여 LQG 최적 제어기를 사용하였으며 주파수 영역에서의 정상상태 응답을 통해 제어 성능을 살펴 보았다. Fig. 6은 실험을 통해 측정된 주파수 응답함수를 나타내고 있다. 세 모드에서 -20.5 dB, -16.2 dB, -15.7 dB의 진동 저감 효과를 얻을 수 있었다.

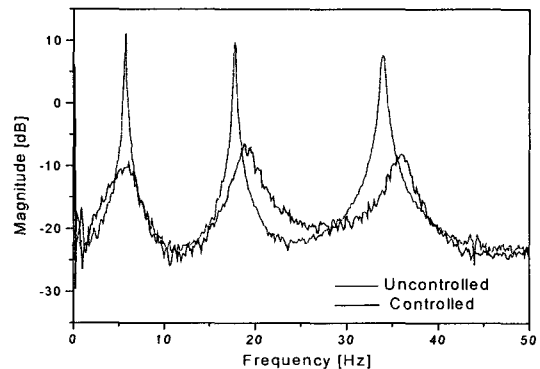


Fig. 6 Experimental frequency responses of the uncontrolled and the controlled systems.

2.4 큰 변형에 대한 진동 제어

EFPI 출력 신호의 왜곡이 많은 경우의 진동 제어 특성을 살펴보기 위해 Graphite/Epoxy [90/0] 복합재 외팔보를 제작하였다. 그리고 신경망 제어기⁽⁶⁾를 사용하여 구조물의 진동을 억제하였으며, 미소 변형에서의 랜덤 가진에 의한 주파수 응답과 EFPI 센서의 왜곡이 발생하는 큰 진폭의 진동에 대해 조화 가진의 외력이 작용하는 조건에서의 진동 제어 실험을 수행하였다.

미소 변위의 랜덤 가진에 대한 주파수 응답 함수를 Fig. 7에 도식하였다. 그리고 Fig. 8은 외팔보의 첫 번째 공진 주파수인 3.97 Hz로 조화 가진한 경우의 제어 결과를 나타내었다.

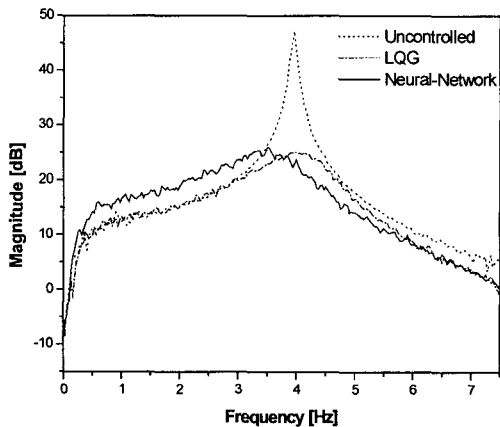


Fig. 7 Frequency responses of the uncontrolled and controlled systems.

가진력이 작은 경우, 즉 EFPI 센서의 신호 왜곡이 심하지 않은 경우에는 두 제어기 모두 우수한 성능을 나타내지만 신호의 왜곡이 심한 경우에는 신경망 제어기를 사용한 경우에서만 진동이 제어됨을 알 수 있었다. 즉, 신경망 제어기를 사용할 경우 넓은 신호 왜곡의 범위에서도 시스템을 안정화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다

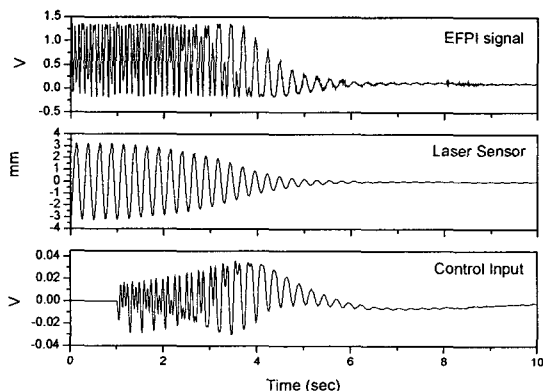


Fig. 8 Neural-Network controlled result.

2.5 패치형 감지기^(7,8)

스마트 센서 구현을 위해 여러 센서들의 결합 형태인 패치 형태 센서들에 대해 최근 연구가 많이 수행되고 있다. 이러한 감지기들은 각각의 단점을 해결하는 동시에 각 센서들의 장점을 극대화시키는 형태로 발전하고 있다. 그 중 압전 재료는 기전연계특성이 있어서 감지기 및 작동기로 각광을 받고 있으나, 히스테리시스 및 비선형 거동으로 인한 단점을 가지고 있다. 한편, EFPI 센서는 앞서 언급한 바와 같이 변형이 큰 경우에는 신호가 왜곡되는 현상을 보인다. 본 절에서는 Fig. 9와 같이 압전 재료의 표면에 EFPI 센서를 부착함으로써 변형률의 절대량 측정이 가능함을 보이고자 한다. 변형률을 추출하기 위해 사용된 위상 추적 기법에 대한 흐름도를 Fig. 10에 도식하였다. 이는 참고문헌 (7)에서와 같이 특허로 등록되어 있다.

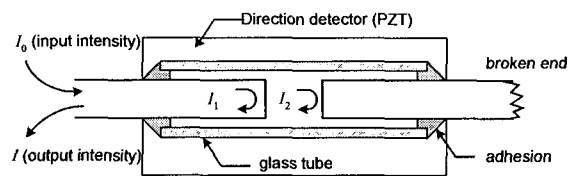


Fig. 9 Schematic diagram of a sensing-patch.

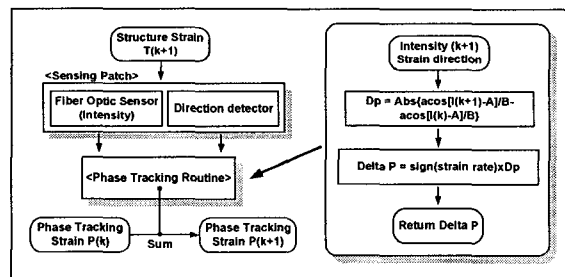


Fig. 10 Flow chart for the phase tracking method.

식 (1)과 식 (2)로부터 위상을 구해보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \text{sign}(\text{strain rate}) \times \left| \cos^{-1} \left(\frac{I_{k+1} - A}{B} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{I_k - A}{B} \right) \right| \quad (5)$$

식 (5)를 이용하면 압전 재료로부터 변형의 방향 정보를 추출하고 광섬유 센서의 이전 위상 정보에 적절히 더해줌으로써 위상의 변화를 정확히 알아낼 수 있다. Fig. 11에서 보듯 왜곡된 EFPI 출력 신호에 관계없이 변형률을 측정할 수 있음을 알 수 있고, 기존 스트레인게이지보다 해상도가 좋을 수 있다. 또한 이 신호를 사용하여 진동 제어에 이용할 수 있다.

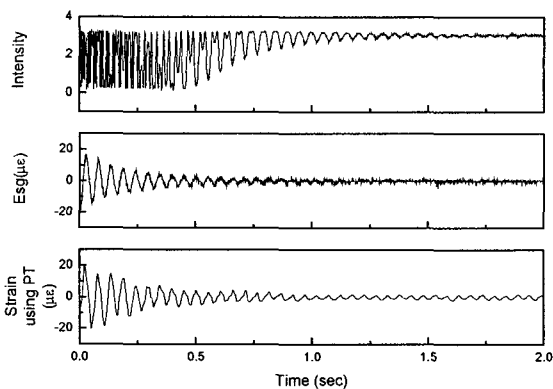


Fig. 11 Experimental result of strain gage and phase tracking signal.

3. FBG를 사용한 감지 및 제어

3.1 FBG 센서

광섬유 브래그 격자 센서는 코어의 주기적인 굴절률 변화를 이용하며 Fig. 12 와 같은 구조와 특징을 보인다. 브래그 격자에 광대역 광을 입사시키면 굴절률이 변하는 경계면에서 빛을 반사하게 되는데 이들 중 $\lambda_B = 2n_e\Lambda$ (n_e : 유효굴절률, Λ : 격자 간격)와 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 해당하는 파장의 빛은 보강간섭을 일으켜 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 이 외에 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. 따라서 이를 이용하면 광섬유 하나에 반사 파장이 다른 여러 개의 센서를 동시에 제작이 가능하게 된다.

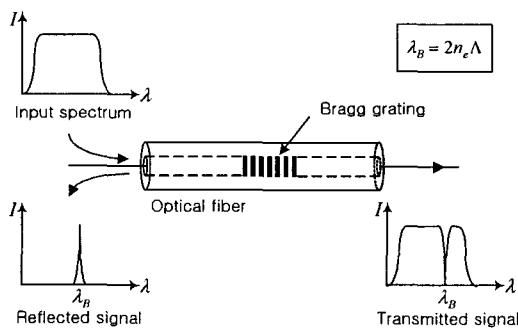


Fig. 12 FBG wavelength-encoding operation.

FBG를 사용하여 구조물의 변형률을 측정할 경우, 센서에 가해진 온도의 변화가 없다고 가정 ($\Delta T = 0$)하면 변형률을 구하는 식은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1}{1-p_e} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (6)$$

여기서, p_e 는 광탄성 상수이며 대개 0.22의 값을 가진다. 식 (6)을 이용하면 FBG를 변형률 센서로 사용할 수 있으며 수식에서 알 수 있듯이 변형률은 파장의 변화량을 정확히 측정하면 구할 수 있다.

FBG 센서는 변형률 측정이 쉽고 정밀하며 다점 측정이 용이하다는 것이 가장 큰 장점이다. 따라서 본 장에서는 FBG 센서 시스템의 종류 및 그에 맞는 응용 분야에 대해 살펴본다.

3.2 고주파 진동 측정을 위한 시스템

본 연구에서는 한국과학기술원 항공우주공학전공 스마트 구조 및 복합재료 실험실에서 제작한 FBG 센서 시스템을 사용하였다.⁽⁹⁾ Fig. 13에 나타낸 이 시스템은 광대역 광원과 광분리기, 광검출기 및 패브리-페로 필터를 사용하여 구성된다. 이 시스템의 장점은 실시간으로 빠른 측정을 수행할 수 있고 간단하다는 것이지만 다점 측정을 위해서는 고가의 패브리-페로 필터와 광분리기를 추가적으로 도입되어야 하고 안정화 시키기에 어려운 단점을 가지고 있다.

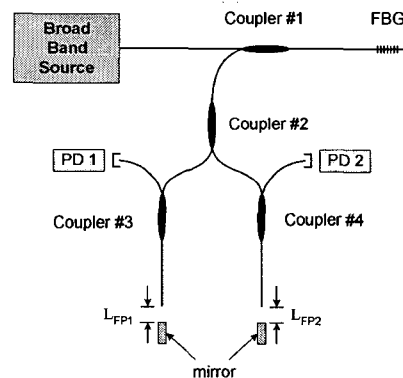


Fig. 13 Schematic diagram of FBG sensor system.

3.3 다점 측정을 위한 시스템

본 절에서는 Fig. 14와 같이 다점 측정에 보다 용이한 Wavelength-Swept Fiber Laser(WNFL, 파장 이동 광섬유 레이저)에 대해 살펴보고 동시에 여러 곳의 변형률을 측정함으로써 구조물의 전체 변형을 알아내는 기법에 대해 소개한다.

동작원리는 다음과 같다. 우선 가변 패브리-페로 필터에 200 Hz의 주파수로 파장 영역을 스캐닝할 수 있도록 가변 패브리-페로 필터 제어기를 이용하여 삼각파 형태의 변조 전압 신호를 가한다. 삼각파의 형태에서 전압이 증가할 때 레이저 출력 파장은 장파장대로 이동하며 전압이 감소할 때 레이저 출력 파장은 단파장대로 이동한다. 이를 이용하여 여러 센서의 중심파장의 변화를 측정할 수 있다. 하지만 가변 패브리-페로 필터의 샘플링 주

과수에 따라 최대 측정 가능한 주파수 범위가 결정되기 때문에 고주파 신호의 측정이 힘든 단점이 있다.

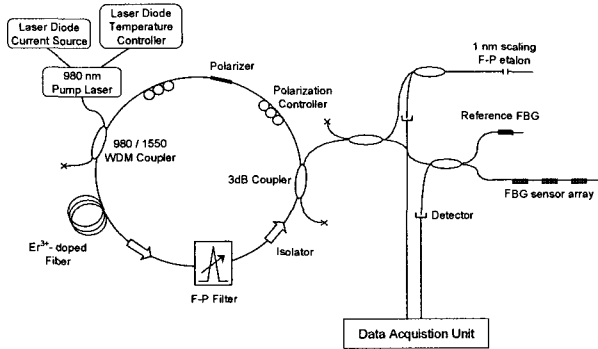


Fig. 14 Configuration of the WSFL system.

본 절에서는 이 시스템을 상용화한 도남시스템의 IS7000⁽¹⁰⁾을 사용하였으며 변위-변형률 변환 행렬을 통하여 알루미늄 외팔보(길이 : 300mm, 두께 : 0.5mm)의 동적 거동을 살펴보았다. 또한, Fig. 15 와 같이 각각 1531.91nm, 1535.43nm, 1540.52nm, 1555.48nm 의 중심파장을 가지는 네 개의 FBG 센서를 제작하였다. 제작된 FBG 센서는 알루미늄 보의 고정단으로부터 각각 20mm, 75mm, 140mm, 230mm 떨어진 부분에 부착되었다.

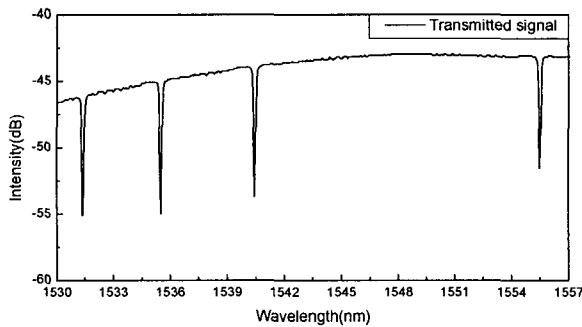


Fig. 15 Transmitted signal of FBG sensor array.

다점 측정된 변형률 정보로부터 변위 형상을 실시간으로 예측할 수 있으며, Fig. 16 은 외팔보에 대한 가진 실험 결과이다.⁽¹¹⁾

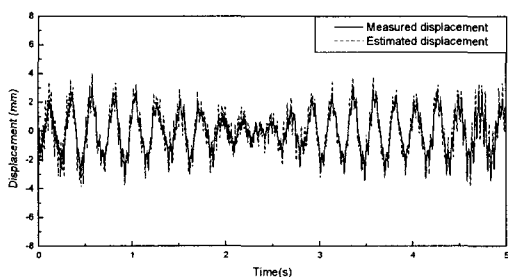


Fig. 16 Time response to random excitation.

3.4 정밀 측정을 위한 시스템

본 절에서는 변형률을 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이하로 정밀하게 측정할 수 있는 시스템에 대해 살펴본다. 이는 Fig. 17 에 나타난 광기계구조물과 같이 높은 정밀도를 요구하는 분야에 적용될 수 있다. Fig. 18 에 독일 뮌헨공대에서 개발된 FBG 센서 시스템을 나타내었으며, Fig. 19 에서 나타난 PSD(Position Sensitive Detector)와 CCD(Charge Coupled Device) 두 가지의 광검출기를 고려하였다.⁽¹²⁾ 각 광검출기의 특성은 Table 1 에 나타내었다. 이 시스템은 매우 정밀한 측정을 위한 응용분야에 적절하지만 시스템 내부에 반사경을 사용하기 때문에 Fig. 18 에서 ④ 부분의 안정화가 필요하다.

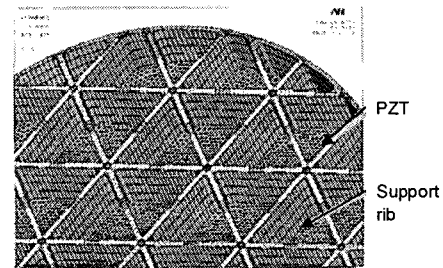


Fig. 17 Support structure of lightweight optical mirror with piezo actuator.

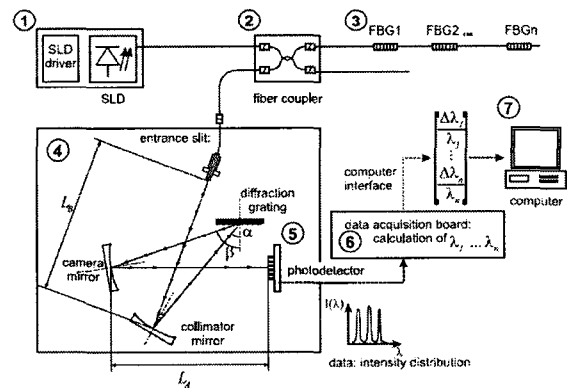


Fig. 18 FBG interrogation unit.

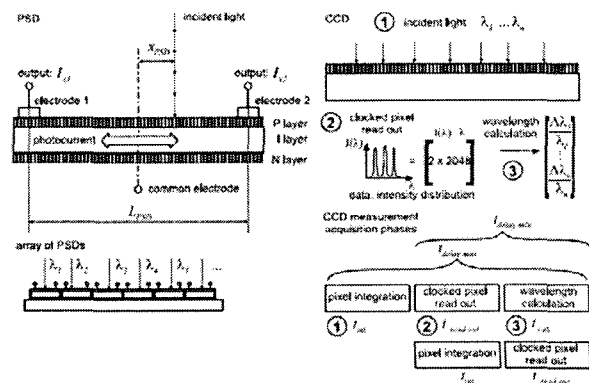


Fig. 19 Comparison of PSD and CCD.

Table 1. Performance comparison of PSD and CCD.

Sensor type	Max. freq.	No. of sensors	Delay time
PSD	> 100 kHz	5-8	34.5μs at 11 kHz
CCD	1-10 kHz	25	1.6ms at 11 kHz

단순지지된 강철 보 구조물(500×20×100 mm³)에 본 시스템을 적용하여 정밀 측정 실험을 수행한 결과를 살펴보면, 5Hz 획득주파수(acquisition frequency)에서 PSD 기반의 시스템은 0.26 μm/m, CCD 기반의 시스템은 0.18 μm/m의 변형률 분해능을 가짐을 알 수 있었다.

4. 결론

연구 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) EFPI 센서의 감지 특성을 상용 레이저 변위계와 비교를 통해 고찰하였다. 센서 내 두 반사면의 초기 간극 길이에 따라 센서의 선형 범위가 제한될 수 있으며, 구조물 진동의 진폭이 커지면 왜곡된 신호가 발생됨을 확인하였다.
- 2) EFPI의 출력 신호가 왜곡될 정도 수준의 진동을 신경망 제어기 및 LQG 제어기를 사용하여 제어를 수행하였다. 선형 제어기인 LQG 제어기에 비해 신경망 제어기가 센서의 비선형성과 고유 진동수 변화에 대한 좋은 적응성을 나타내었다.
- 3) 압전 세라믹과 EFPI를 패치형 감지기로 구성하여 EFPI의 신호가 왜곡되는 것에 상관없이 변형률의 크기를 실시간으로 측정하는 시스템을 구성하였다.
- 4) 패브리-페로 검출기를 채택한 고주파 진동 측정용 FBG 센서 시스템을 개발하여 진동 제어에 응용하였다.
- 5) 다점 측정이 용이한 WSFL 장비를 사용하여 하나의 광섬유를 가지고 여러 곳의 변형률을 동시에 측정하였다. 그리고 이렇게 측정된 변형률을 이용하여 구조물의 전체 변형 형상을 예측해 보았다.
- 6) 우주 구조물 변형의 정밀한 측정을 위한 FBG 센서 시스템을 구현하였다. 이 시스템을 사용하여 변형률을 1 μm/m 이하로 정밀하게 측정할 수 있었다.

이상과 같이 본 논문에서는 경량 구조물의 변형 및 진동에 대한 감지를 위한 EFPI와 FBG의 광섬유 센서 기술에 대하여 살펴보았다. 요약한 바와 같이 광섬유 센서를 사용하여 구조물의 진동 및

변형을 감지/제어하였으며, 센서를 구동하기 위한 다양한 시스템에 대해 알아보았다. 본 논문에서 소개된 광섬유 센서 기술이 우주 구조물과 같은 경량화 구조에 적용되어 진동 제어 및 구조 건전성 모니터링, 형상 예측 및 제어 등 다양한 기능을 수행하는데 활용될 것으로 기대한다.

참고문헌

- (1) Waite, S. R., and Sage, G. N., 1988, "The failure of optical fibres embedded in composite materials," *Composites*, Vol. 19, pp. 288-294.
- (2) Glossop, N. D. W., Dubois, S., Tsaw, W., Leblanc, M., Lymer, J., Measures, R. M., and Tennyson, R. C., 1990, "Optical fibre damage detection for an aircraft composite leading edge," *Composites*, Vol. 1, pp. 71-80.
- (3) 강현규, 2001, "광섬유 센서를 이용한 스마트 복합재 구조물의 다중 파라미터 동시 측정에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원.
- (4) Park, J. W., Ryu, C. Y., Kang, H. K., and Hong, C. S., 2000, "Detection of buckling and crack growth in the delaminated composites using fiber optic sensor," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, pp. 1602-1623.
- (5) 김도형, 한재홍, 양승만, 김대현, 이인, 김천곤, 홍창선, 2002, "광섬유 센서와 압전 작동기를 이용한 평판의 최적 진동 제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 4 호, pp.294~301.
- (6) 김도형, 양승만, 한재홍, 김대현, 이인, 김천곤, 홍창선, 2002, "신경망 제어기를 이용한 광섬유가 부착된 복합재 보의 진동제어?" 한국복합재료학회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 135-138, 전남대학교.
- (7) 이인, 한재홍, 김도형, 장영환, 2005, "광섬유와 압전 재료를 이용한 감지작동기," 대한민국 (등록특허 0533323).
- (8) Kim, D.-H., Chang, Y.-H., Han, J.-H., and Lee, I., 2005, "Optical Phase Estimation for a Patch-type Extrinsic Fabry-Perot Interferometer Sensor System and Its Application to Flutter Suppression," *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No. 4, pp. 696-706.
- (9) Kim, C. G., Kim, D. H., and Hong, C. S., 2002, "Development of FBG sensor System for Measuring the High Frequency Vibration of Structures and the Natural Frequency of Composites," *US-Korea Joint Workshop on Smart Structural Systems*, Busan, Korea.
- (10) <http://www.fiberpro.com/>
- (11) 강래형, 김대관, 한재홍, 2005, "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 구조물의 변형 형상 예측," 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 보광 휘닉스파크, pp. 553-556.
- (12) Mueller, U. C., Zeh, T., Koch, A. W., Baier, H., 2006, "Fiber optic Bragg grating sensors for high-precision structural deformation control in optical systems," *Proc. SPIE Vol. 6167*, p. 64-75, *Smart Structures and Materials 2006: Smart Sensor Monitoring Systems and Applications*.