

복합재 주 날개 모델의 변형률과 진동의 동시 측정

송지용*·윤혁진*·박상욱*·박상오*·김천곤**

Simultaneous Measurement of Strain and High Frequency Vibration of Composite Main Wing Model

Ji-Yong Song, Hyuk-Jin Yoon, Sang-Wuk Park, Sang-Oh Park and Chon-Gon Kim

Abstract

For the simultaneous measurement of strain and vibration signal, a fiber Bragg grating sensor system with a dual demodulator was proposed. One demodulator using a tunable Fabry-Perot filter could measure low-frequency signal such as strain and the other demodulator using a coarse wavelength division multiplexer could detect high-frequency signal such as vibration signal using intensity demodulation method. In order to measure strain and vibration of the composite main wing model under static loading a real time monitoring program was developed. Also using intensity demodulation of CWDM, sensitivity and resolution at high frequency vibration were evaluated.

Key Words: fiber Bragg grating sensor, structural health monitoring, composite wing

기호설명

SHM : structural health monitoring

FBG : fiber Bragg grating

CWDM : coarse wavelength division multiplexer

EDFA : erbium-doped fiber amplifier

1. 서 론

복합재료는 일반 금속재료에 비해 비강성, 비강도가 매우 높고 피로 특성 등이 우수할 뿐만 아니라 역학적인 특성인 이방성(anisotropy)을 이용하여 원하는 특성의 구조물을 제작할 수 있는 등 기존의 재료들과는 다른 여러 가지 구조적 장점을 갖고 있다. 그러나 제조공정에 따라 재료의 물성치의 편차가 있을 수 있으며, 압축강도를 저하시킬 수 있는 층간분리 같은 파손이 발생할 경

우 쉽게 발견할 수 없어 복합재료의 신뢰도를 떨어뜨리고 있다. 따라서 복합재료의 실시간 구조건전성감시(SHM: Structural Health Monitoring)가 요구되고 있다.

광통신 및 광전자기술의 발달로 탄생한 광섬유 센서는 작고 가볍게 만들 수 있으며, 일반적으로 사용되는 광통신용 광섬유의 직경은 250 μm 로서 복합재료를 성형하기 전부터 삽입이 가능하므로 항공기구조에 사용되는 복합재 구조물의 성형과정부터 구조건전성을 모니터링 할 수 있다.

그 중 많이 쓰이는 광섬유 브래그 격자는 브래그 반사파장과 그 변화량으로부터 변형률과 같은 물리량을 계산할 수 있으며, 이러한 과정을 FBG센서의 복조(demodulation)라고 한다.

브래그 파장을 직접 측정하는 방법의 가변 패브리-페로 필터를 사용한 복조기는 브래그 반사파장을 직접 측정할 수 있으며, 현재 개발되어 있는 FBG센서 복조기 중에서 해상도 및 신뢰도가 높아 많이 쓰이고 있으나 가격이 비싸고 압전 작동기의 파장 주사속도의 한계로 인하여 200Hz

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 항공우주공학전공 교수

정도의 측정속도를 가지고 있으며 1kHz이상의 동적 변형률은 측정할 수 없다는 단점이 있다. 광세기 복조(intensity demodulation)방법은 브래그 반사 파장의 이동을 광 세기의 변화량으로 변환시킬 수 있기 때문에 측정 속도는 광 검출기(photodetector)의 주파수대역까지 높일 수 있으므로 매우 빠르고 가변 패브리-페로 필터 방식의 복조방법보다 민감도와 주파수 대역이 우수하다.

본 연구에서는 복합재로 만들어진 모형 날개의 변형률과 진동의 동시 측정을 위하여 동시 다점 측정 시스템을 구현하였으며, 실시간으로 신호 취득을 위한 신호처리 프로그램을 개발하였다. 또한 진동 감지 센서 시스템의 성능을 평가하기 위해 센서의 민감도 및 해상도를 평가하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 광섬유 브래그격자 센서 시스템

브래그 파장 변화를 측정하는 복조는 FBG센서 개발에서 가장 중요한 기술로서 여러 가지 복조 기술이 제안되었으며, 대표적인 복조방법은 그림 1에 나타나 있다. 변형률 및 고주파 진동신호의 동시 측정을 위해서는 FBG센서의 복조기 또한 넓은 측정범위와 높은 주파수 대역 및 고해상도가 요구되고 있으나 이러한 요구조건을 만족시키는 FBG센서의 복조기는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 변형률 및 진동신호의 동시측정을 위해 이중 복조기를 제안하였다. 그림 2와 같이 이중 복조기는 가변 패브리-페로 필터를 사용한 복조기와 CWDM을 사용한 복조기로 구성되며, 두 가지 복조방식의 장점을 모두 활용할 수 있다. 즉 가변 패브리-페로 필터 복조기는 변형률과 같은 저주파 신호를 측정하고, CWDM 복조기는 파손신호나 충격신호와 같은 고주파 신호를 측정한다.

2.1 동시다점 변형률 측정 시스템

2.1.1 시스템의 구성

그림 2에서 보는 바와 같이 광원으로 EDFA를 사용하여 센서 시스템을 구성하였다. 구조물의 여러 지점의 변형률을 동시에 측정하기 위하여 EDFA의 레이저를 연속하여 수십 nm에 걸쳐서 반복적으로 레이저 출력 파장이 나올 수 있도록

로 구성된 시스템에 가변 패브리-페로 필터를 복조기로 사용하고 있다. 광원 출력을 광섬유 격자 센서들에 입사한 후 센서에서 반사되어 돌아온 시간 영역에서의 신호는 가변 패브리-페로 필터를 통과시켜 파장 영역으로 상사시킬 수 있으므로 변형률 측정에 이용이 가능하다. 이렇게 구성된 시스템의 레이저는 출력이 좁은 파장영역에 집중되어 있고 이렇게 집중된 레이저가 광대역으로 움직이므로 출력 파워가 매우 커서 신호대 잡음비를 매우 효율적으로 높일 수가 있다. 복조기로 사용된 가변 패브리-페로 필터는 인가되는 변조 전압에 대해 비선형적으로 거동할 수 있으므로 본 연구에서는 반사된 빛의 골간의 간격이 정확히 0.8 nm가 되는 패브리-페로 에탈론을 신호 처리에 스케일(scale)로 이용하였다.

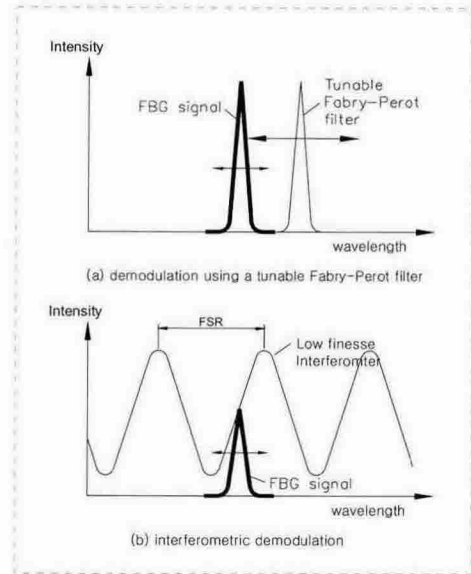


Fig. 1 Typical demodulations of FBG sensor.

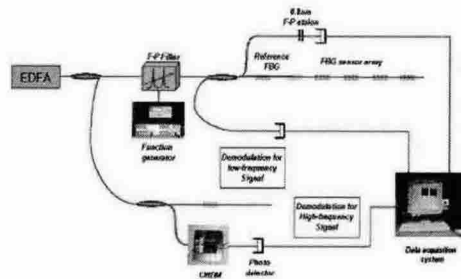


Fig. 2 Configuration of the FBG sensor system.

또한 브래그 파장이 1529.44 nm인 광섬유 브래그 격자를 기준으로 설정하여 실제 변형률 측정에 이용되는 센서들의 파장 변이 측정 시 이용하였고 정해진 파장 영역대를 이동하면서 레이저 출력을 얻기 위해 패브리-페로 필터에 삼각파의 형태로 변조 전압 신호를 주었다.

2.1.2 신호처리 프로그램 개발

구성된 FBG 센서 시스템을 이용하여 실시간으로 실제 구조물의 변형률을 모니터링하기 위하여 graphic user interface(GUI)를 지원하는 National Instruments사의 소프트웨어인 LabVIEW를 이용하여 신호 처리 프로그램을 개발하였다. 신호 처리 프로그램의 알고리즘은 패브리-페로 에탈론과 기준 FBG센서를 이용하여 파장에 관한 좌표계를 생성하는 과정과, 주어진 좌표에 대해 실제 각 센서의 중심 파장 변이를 취득하여 변형률을 계산하고 변형률 선도를 그리는 단계로 구성되어 있다.

첫 단계에서는 패브리-페로 필터의 압전 세라믹에 인가되는 전압의 최소 최대 지점을 트리거(trigger)로 하여 데이터 샘플링 시간(data sampling time)에 해당하는 미세 좌표를 설정한다. 그리고 패브리-페로 에탈론에서 반사되는 빛의 신호에서 각각의 골이 되는 지점을 찾아 그 골들에 대해 미리 지정된 좌표를 상사시켜 위치를 입력시킨다.

두 번째 단계에서는 기준 광섬유 브래그 격자를 참조하여 지정된 좌표계를 파장에 관한 좌표로 환산하고 변형을 받지 않은 초기의 센서들의 위치를 이 좌표계에 일치시킨다. 그 후 실제 변형을 받아 각각의 센서들의 중심 파장이 바뀌면 각 센서들의 피크 위치의 변화를 계산하여 실제 변형률을 계산하고 변형률 선도를 그리도록 하였다. 또한 데이터 후처리 과정에도 이용할 수 있도록 선도를 그리는 것과 동시에 PC에 계산된 변형률 데이터를 저장시키도록 하였다. 이러한 모든 과정은 실시간으로 이루어지며 정적 혹은 동적 변형률 등의 적절한 변형 상태에 따라 샘플링 시간을 달리할 수 있다.

2.2 진동 신호 취득을 위한 민감도 측정

저밀도 파장 분할 다중기(Coarse wavelength division multiplexer, CWDM)의 edge filtering 방법을 이용한 FBG 진동감지 센서 시스템의 성능을 평가하기 위해 센서의 민감도(sensitivity) 및 해상도(resolution)를 구하기 위한 실험을 실시하였다.

특정 진동수의 입력 신호에 대한 센서의 출력 신호의 파워-스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)로부터 구해진 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, S/N)를 나타내는 식은 아래와 같다.

$$S/N = 10 \times \log \left(\frac{\epsilon_{FBG,rms}^2}{Noise^2} \right) \quad (5)$$

위 식에서 $\epsilon_{FBG,rms}$ 는 FBG 센서로부터 취득되어 변환된 변형률 단위의 제곱평균제곱근(root mean square, RMS) 값이며, Noise는 변형률 단위로 나타나는 잡음레벨(noise level)의 RMS 값이다. 위 식으로부터 Noise 값을 계산하면 식 (6)과 같고, 이를 주파수 영역에서의 주파수 증분의 제곱근으로 나누어 주면 식 (7)과 같이 진동센서의 민감도를 구할 수 있다.

$$noise(\epsilon_{rms}) = \frac{\epsilon_{FBG,rms}}{10^{\frac{S/N}{20}}} \quad (6)$$

$$sensitivity(\epsilon_{rms} / \sqrt{Hz}) = \frac{noise}{\sqrt{df}} \quad (7)$$

$$resolution(\epsilon_{rms}) = sensitivity(\epsilon_{rms} / \sqrt{Hz}) \times \sqrt{BW} \quad (8)$$

해당 진동수에 대한 진동센서의 해상도는 식 (7)에서 계산한 민감도 값에 주파수 밴드폭(band width, BW)의 제곱근을 곱함으로써 얻을 수 있으며 식 (8)과 같이 변형률의 RMS값으로 표현이 된다.

2.2.1 실험 장치 및 방법

FBG 진동센서의 성능평가를 위한 실험 장치는 그림 4와 같다. 특정주파수로 FBG 센서에 변형을 가하기 위한 PZT 가진기의 입력전압은 모든 주파수의 가진에 대해 -10~10V 로 설정하였으며, 이때의 정확한 변형량을 측정하여 참조 값으

로 사용하기 위해 변형률 게이지를 별도로 PZT 가진기에 붙였다. FBG 센서와 변형률 게이지는 각각 PZT 가진기(C-82, Fuji Ceramics corp.) 표면에 부착하였으며, 가진기를 원하는 주파수로 진동시키기 위해 디지털 주파수 발생기를 연결하였다.

먼저 $-10V \sim 10V$ 의 PZT 입력전압에 대한 기준 변형률을 변형률 게이지를 이용해서 구했으며, FBG 센서에서 측정된 전압 값의 출력신호는 이 기준 변형률 값을 이용하여 환산하였다. 변형률로 환산된 FBG 센서의 출력 값을 이용하여 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz의 세 가지 진동수에 대해 FBG 센서의 신호 대 잡음비와 민감도, 해상도를 식 (5)~(8)을 이용하여 구하였다.

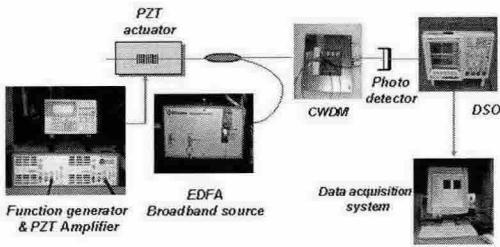
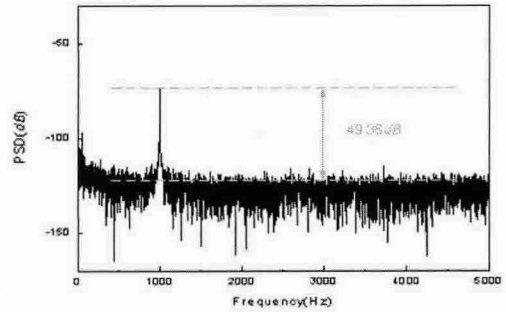


Fig.4 FBG vibration sensor system for the sensitivity evaluation

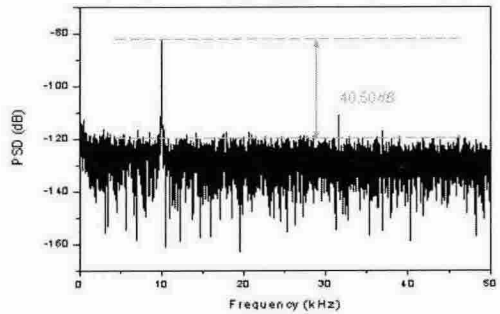
2.2.2 실험 결과

Fig.5의 (a)는 $-10 \sim 10V$ 의 전압과 1 kHz의 진동으로 PZT 가진기를 진동 시켰을 때 광 검출기로부터 얻은 FBG 센서의 응답의 PSD를 나타낸다. PSD로부터 계산한 1 kHz 진동에서의 S/N 비는 49.36 dB이며, 민감도 및 해상도는 각각 $7.82 n\epsilon_{rms} / \sqrt{Hz}$ 과 $0.55 \mu\epsilon_{rms}$ 이다. 마찬가지로 (b)는 10 kHz의 진동으로 PZT 가진기를 진동 시켰을 때의 결과이며, PSD로부터 계산한 10 kHz 진동에서의 S/N 비는 40.50 dB, 민감도 및 해상도는 각각 $6.84 n\epsilon_{rms} / \sqrt{Hz}$ 과 $1.53 \mu\epsilon_{rms}$ 의 결과를 얻었다. 20 kHz의 진동으로 PZT 가진기를 진동 시켰을 때의 결과는 (c)에 나타났으며, 이때 계산한 S/N 비는 39.12 dB, 민감도 및 해상도는 각각 $3.66 n\epsilon_{rms} / \sqrt{Hz}$ 과 $1.83 \mu\epsilon_{rms}$ 을 얻었다. 아래 그래프들을 보면 가진 주파수가 높아지게 되면 센서의 출력 값에 신호 잡음이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이로 인해 신호 대 잡음비는

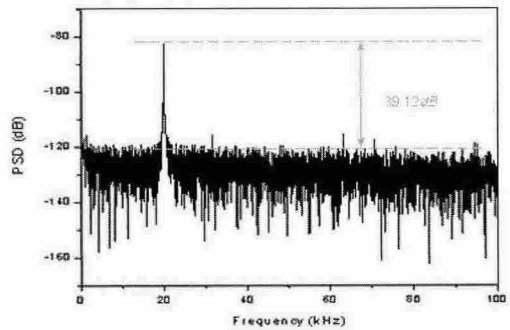
저하된다. 하지만 10 kHz, 20 kHz로 가진 시킨 경우에는 출력신호의 진폭이 상대적으로 커진 효과로 인해 민감도 성능이 나아지는 것으로 보인다.



(a) PSD of FBG on the PZT actuator at 1 kHz



(b) PSD of FBG on the PZT actuator at 10 kHz



(c) PSD of FBG on the PZT actuator at 20 kHz

Fig. 5 PSD of FBG on the PZT actuator at (a) 1kHz (b) 10kHz (c) 20 kHz

Fig.5의 (a)~(c)의 결과를 종합해 보면 FBG 센서의 민감도는 평균 $6.10 n\epsilon_{rms} / \sqrt{Hz}$ 정도로 주파수가 증가함에 따라 좋아지는 경향을 보였으

며, 신호 대 잡음비 및 센서의 해상도 성능은 가진 주파수를 증가시킬수록 저하되는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 구조 건전성 감시를 위한 고주파 진동과 변형률을 동시에 측정할 수 있는 시스템의 개발을 위해 페브리-페로 필터 복조기와 CWDM복조기를 이용하였다. 광세기 복조화 방법을 이용하기 위하여 CWDM을 복조기로 사용한 고주파 진동의 취득 장치의 민감도 성능 측정과 페브리-페로 필터를 이용한 동시 다점 변형률 취득 시스템을 구성하고 실시간 측정을 위하여 프로그램을 개발하였다.

이후에 제안된 FBG 센서 시스템을 이용하여 복합재료로 만들어진 날개에 하중이 가해졌을 때의 변형률과 고주파 진동신호를 동시 다점으로 실시간 취득할 것이다. 또한 변형률을 측정하는 시스템에서 채널당 6개의 센서를 제작하여 4채널로 날개에 삽입함으로써 날개에 정적하중이 가해졌을 때 그 하중이 작용한 위치를 검출해 내는 프로그램을 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 장기기초연구과제(과제번호 : ADD-03-05-02)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] J.I. Koh, H.J. Bang, C.G. Kim and C.S. Hong, "Simultaneous measurement of strain and damage signal of composite structures using a fiber Bragg grating sensor," smart materials and structures, Vol. 14, No. 4, 2005, pp. 658-663
[2] I. Perez, H.L. Cui, and E. Udd, "Acoustic Emission Detection Using Fiber Bragg Gratings," Proceedings of SPIE, Vol. 4328, 2001, pp.209-215.

[3] N. Takahashi, K. Yoshimura and S. Takahashi, "Fiber Bragg Grating Vibration Sensor Using Incoherent Light," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 40, 2001, pp. 3632-3636.
[4] J. Seim, W.L. Schulz, E. Udd, and M. Morrell, "Higher speed demodulation of fiber grating sensors," Proceedings of SPIE, Vol. 3670, 1999, pp.8-15.
[5] D.Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-Sensor System with a Fiber Fabry-Perot Wavelength Filter," Optics Letters, Vol. 18, No. 16, 1993, pp. 1370-1372.