

고주파 진동 측정을 위한 FBG 센서 시스템 개발 및 복합재 시편의 고유진동수 측정

김대현^{*} · 구본용^{**} · 김천곤^{***} · 홍창선^{***} · 이 인^{***}

Development of FBG sensor System for Measuring the High Frequent Vibration of Structures and the Natural Frequency of Composites

Dae-Hyun Kim^{*}, Bon-Yong Koo^{**}, Chun-Gon Kim^{***}, Chang-Sun Hong^{***} and In Lee^{***}

Key Words : FBG, high resolution, high frequency, vibration

ABSTRACT

We introduce a simple optically passive detection scheme for Bragg grating sensors. This detection scheme is based on two cavity lengths in Fabry-Perot read-out interferometers to produce two quadrature phase shifted signals from the Bragg grating sensor. The passive detection technique is demonstrated by the use of Bragg grating sensors in measuring the dynamic vibrations of the composites.

기호설명

FBG : Fiber Bragg grating
FP : Fabry-Perot
EFP : Extrinsic Fabry-Perot
 $L_{FP\#}$: Cavity length of $\#^{\text{th}}$ Fabry-Perot

1. 머리말

여러 가지 광섬유 센서 중에 FBG 센서는 동시 다점 측정에 용이하기 때문에 최근에 각광 받고 있는 센서로서 여러 분야에서 활용 연구가 활발히 진행 중이다[1].

구조물의 진동이나 파손 탄성파와 같은 고주파 미소 진동을 측정하기 위해 보통 PZT(Piezoelectric transducer)를 이용하며 최근에는 광섬유 센서를 이

용한 취득 연구도 이루어지고 있다. 여기서 사용되는 센서는 보통 간섭을 이용하는 마이켈슨 센서나 외부 패브리 페로 센서 등이 있다. 그러나 최근에는 다점 측정이 가능한 FBG 센서의 사용이 점차 증가하면서 간섭형 신호처리를 통한 고해상도 및 고주파수의 변형률 측정시스템 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다[2]. 또한 Y. Lo [3]는 Passive 형태의 신호 처리부를 구성하여 고해상도 FBG 센서 시스템을 구성하였다.

본 연구에서도 Y. Lo[3]가 제안한 개념을 바탕으로 FBG 센서를 이용하여 미세진동을 측정할 수 있는 시스템을 구성하였다. 그래서 일반 간섭형 센서로 고주파 미세 신호 취득 시 신호 민감도가 우수한 구간에서만 신호를 취득할 수 있었던 문제점을 해결하였다. 본 논문에서는 센서 시스템의 검증에 위해 FBG 센서를 PZT에 부착하여 PZT의 고주파 진동을 측정하는 실험을 수행하였다. 그리고 이를 응용할 수 있는 연구로서 복합재 구조물의 고유진동수를 측정하는 충격실험도 수행하였다.

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 박사과정

** ㈜ 도남시스템

*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 교수

2. 측정 원리

2.1 FBG 센서 측정원리

일반적으로 FBG 센서의 측정 원리는 광대역 파장을 갖는 광원을 이용하여 FBG 센서에서 되돌아오는 브래그 파장의 이동량을 측정하므로써 외부의 변형량을 측정하게 된다. 파장의 이동량을 측정하는 방법으로는 가변 패브리 페로 필터를 이용하는 방법이 일반적이다. 그러나 이 방법은 패브리 페로 필터의 가동 주파수에 제한되어 측정 주파수가 정해지기 때문에 고주파의 진동을 측정하기에는 적당하지 않다. 본 연구에서는 고주파의 진동을 측정할 수 있도록 간섭형 시스템을 구축하였다.

2.2 Passive 형태의 간섭식 센서 시스템

그림 1은 전체 실험 장치도를 나타낸다. 4개의 광분할기(Coupler), 2개의 외부 패브리 페로, 광대역 광원 (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), 그리고 2개의 광검출기 (Photo detector, PD)로 간단하게 구성된다. EDFA에서 발진한 광대역 광원은 FBG 센서에 의해 브래그 파장의 단일 레이저 광원으로 필터링되고 다시 광분할기 #1,2,3,4를 통과해 두개의 외부 패브리 페로 부분으로 입사된다. 외부 패브리 페로는 Finesse를 증가시키기 위해 두번째 반사면 광섬유 단면을 금증착 처리하였다[4]. 또한 두 외부 패브리 페로의 간극, L_{FP1} 과 L_{FP2} 를 조절하여 두개의 광검출기에서 측정되는 광강도 (Intensity, I_1, I_2)의 위상의 상대차를 조절할 수 있도록 하였다. 따라서 광강도 I_1 과 I_2 의 위상차 α 는 다음과 같이 L_{FP1} 와 L_{FP2} 로 표현할 수 있다 [3].

$$\alpha = k_B(L_{FP2} - L_{FP1}) = \frac{4\pi}{\lambda_B}(L_{FP2} - L_{FP1}) \quad (1)$$

여기서 λ_B 는 FBG 센서의 브래그 파장으로서 센서에 변형이 가해지면 이동하게 되므로 비선형성을 포함하게 된다. 그리고 α 를 $\pi/2$ 로 유지하면 두 광검출기에서 측정되는 신호는 항상 민감도가 가장 우수한 Quadrature point에 놓이게 된다. 이를 위해 두 간극의 차이를 아래와 같이 조절해야 한다.

$$L_{FP2} - L_{FP1} = \frac{\lambda_{IB}}{8}(1 + 4N) \quad (2)$$

여기서 $N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 이고 λ_{IB} 는 초기 브래그 파장을 나타낸다. 최종적으로 파장의 변화량과 위상차의 관계는 아래와 같이 나타내어 진다.

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda_{IB}^2} L_{FP1} \Delta\lambda_B \quad (3)$$

본 시스템은 하나의 FBG 센서에서 두개의 신호를 취득할 수 있는 시스템으로서 두 신호의 위상차를 $\pi/2$ 로 조절함으로써 하나의 정현파 신호만으로 측정할 때 특정 부분에서의 민감도 미약으로 인한 신호 미취득 문제를 해결할 수 있다. 그러나 이를 위해 두개의 외부 패브리 페로가 이용되므로 인한 광원의 손실이 크게 발생하여 신호를 취득하기 위해 고감도 광검출기를 사용해야 하는 문제점을 낳는다.

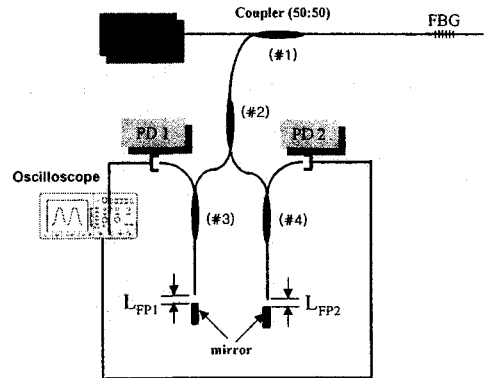


그림 1. 미세 고주파 진동 측정을 위한 브래그 격자 센서 시스템

3. 실험

3.1 시스템 구성

그림 1과 같이 2x1 광분할기(Coupler) 4개를 연결하였고 직접 제작한 EDFA를 연결하였다. FBG 센서는 길이 1인치인 위상 마스크(IBSEN, Phase Mask)와 UV 레이저 (MPB, ASX-750)를 이용하여 직접 제작하였다. 그림 2은 본 실험에서 사용한 EDFA의 스펙트럼 형상이다. 제작한 FBG 센서를 광분할기와 연결한 후에 광학현미경과 마이크로미터가 장착된 특수 지그를 이용하여 두개의 외부 패브리 페로를 제작하였다. 첫번째 외부 패브리 페로의 간극은 고정시키고 두번째 외부 패브리 페로의 간극을 조절할 수 있도록 하였다. 두번째 반사면으로 사용한 광섬유는 금증착 방법을

이용해 수직 단면을 금증착 처리하였다. 또한 그림 1 과 같이 두개의 광검출기(New Focus, Model 2011)를 사용하여 광강도를 측정할 수 있도록 구성하였다.

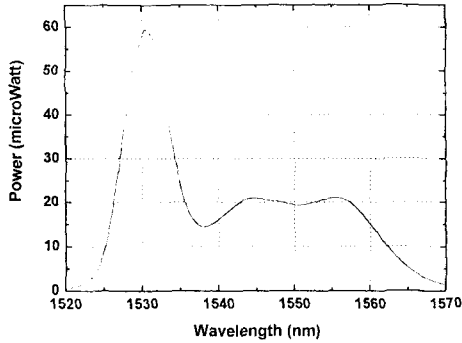


그림 2. EDFA 전체 스펙트럼 형상

우선 두번째 외부 패브리 페로의 간극을 마이크로미터로 조절하여 두 광강도의 위상차를 $\pi/2$ 로 조절하였다. 이를 위해 두개의 광검출기에 연결된 광섬유 두 라인을 OSA (Optical Spectrum Analyzer)에 연결하고 간극 L_{FP2} 를 조절하면서 두 광섬유 라인에서 출력된 빛의 위상차를 측정하였다. 그림 3 은 OSA 로 측정된 두 광섬유 라인의 광출력 스펙트럼을 보여주고 있으며 또한 본 실험에서 사용한 FBG 센서의 스펙트럼도 같이 나타내었다.

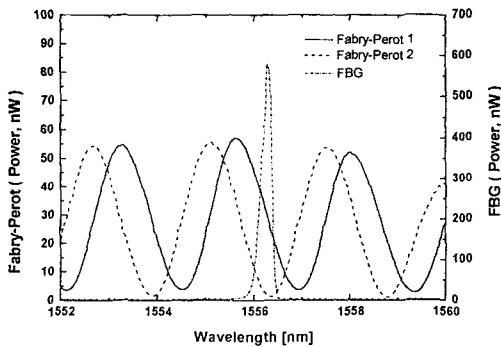


그림 3. EFP1 와 EFP2 그리고 FBG의 광스펙트럼 분포

그림 3 에서 보이는 것과 같이 두개의 외부 패브리 페로를 거쳐 출력된 신호를 살펴보면 서로의 위상차가 $\pi/2$ 임을 확인할 수 있다. 그리고 FBG 센서의 브래그 파장이 1556.3nm 로써 첫번째 외부 패브리 페로 신호와의 교차점이 quadrature point

로서 파장 변화에 대한 광강도의 변화가 가장 민감한 부분에 해당됨을 확인할 수 있다.

3.2 PZT 를 이용한 강제 진동 실험

평판 형태의 PZT (FUJI CERAMICS)에 FBG 센서를 부착한 후에 PZT 를 고압 전압기와 함수 발생기를 이용하여 1kHz, 10kHz 그리고 100kHz 의 정현파 형태로 가진 시켰다. 광검출기에서 취득된 FBG 센서 신호는 디지털 오실로 스코프로 저장한 후에 GPIB 를 이용해 컴퓨터로 전달하였다. 그림 4 는 본 실험의 결과를 나타내는 것으로써 FBG 로 측정된 신호 역시 깨끗한 정현파 형태로 취득되었으며 주파수 특성 분석결과 PZT 가진 주파수와 정확히 일치함을 알 수 있었다.

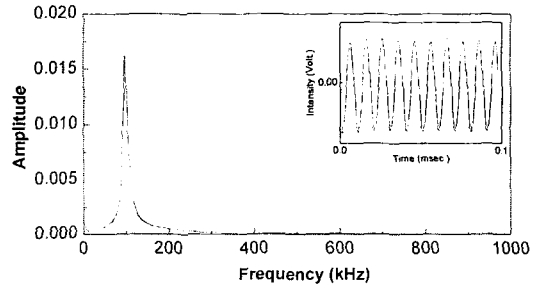


그림 4. FBG 센서를 이용한 PZT의 고주파 진동 측정 (100kHz로 가진)

3.3 복합재 시편의 충격실험

본 논문에서 소개한 FBG 센서 시스템을 이용하여 구조물의 구조 진동을 측정할 수 있는지 적용해 연구를 수행하였다. 이를 위해 Graphite/Epoxy 프리프레그 (㈜한국화이하, CU-125 NS)를 이용하였으며 적층각은 $[90_1/0_2]_s$ 인 직교 적층 복합재 시편을 제작하였다. 시편의 크기는 폭 20mm, 길이 250mm 로 제작하였고 시편의 중간 위치에 이미 제작된 FBG 센서를 순간 접착제(M-bond)를 이용해 부착하였고, 기준 신호를 취득하기 위해 원통 형태의 PZT (FUJI CERAMICS, Model RO.36Z2T5D-L C6)도 같은 위치에 부착하였다. 그리고 시편 양쪽의 45mm 는 압축 지그를 이용하여 완전지지로 고정하였다. 그림 5 는 고정 지그에 의해 완전지지 된 시편의 형상을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 시편을 고정시키고 충격망치로 순간 충격을 가해 본 시편의 고유 주파수를 측정하였다.

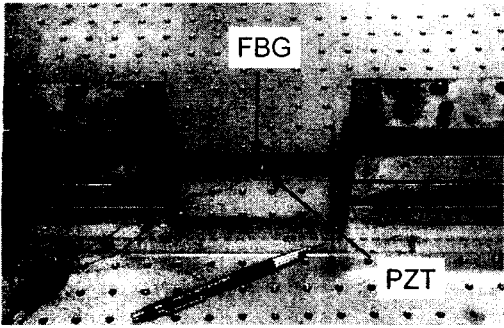
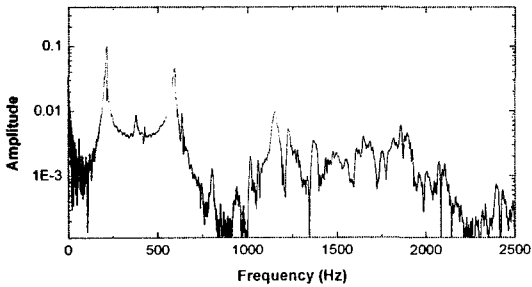
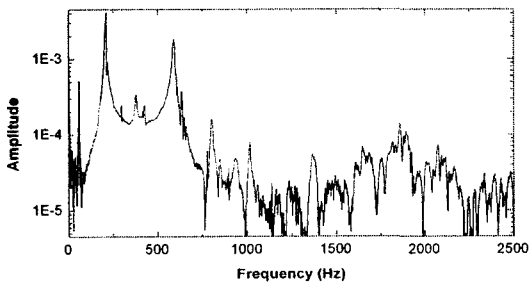


그림 5. 충격 실험을 위한 복합재 시편의 형상

그림 6은 결과로서 FBG 센서로 측정된 결과가 PZT에 의해 측정된 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 본 그림에서는 광민감도가 우수한 첫 번째 외부 패브리 페로에서 측정된 결과만을 표시하였다.



(a) PZT로 측정된 결과



(b) FBG로 측정된 결과

그림 6. 복합재 시편의 고유진동수 측정을 위한 충격 실험

4. 결론

본 논문에서는 기존의 간섭형 광섬유 센서가 아닌 최근 여러 분야에서 활발히 연구되고 있는 FBG 센서를 구조물의 고주파 진동 측정에 사용할

수 있도록 시스템을 구성하였다.

그리고 본 시스템을 이용해 PZT의 100kHz까지의 고주파 진동을 정확히 측정할 수 있음을 확인하였다. 그리고 실제 구조물의 구조 진동을 측정할 수 있는지 확인해 보기 위해 복합재 보 시편에 FBG 센서를 부착하여 구조물의 고유 진동수를 측정해 보았다. 기존 진동 센서인 PZT 센서의 결과와 잘 일치함을 확인함으로써 구조물의 고주파 진동 측정용으로 충분히 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한 센서 시스템이 간섭 방식을 이용하기 때문에 고정밀 고주파 진동을 측정할 수 있으므로 구조물의 파손 신호 측정용으로도 활용할 수 있을 것으로 보인다.

후기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발) 및 국가정연구실 사업으로 지원되어 수행하였습니다.

참고문헌

- [1] M. A. Davis, D. G. Bellemore, and A. D. Kersey, "Design and performance of a fiber Bragg grating distributed strain sensor system," *SPIE*, vol. 2446, 1995, pp. 227
- [2] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High resolution fiber Bragg grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection," *Electronics Letters*, vol. 28, No. 4, 1992, pp. 236-238
- [3] Yu-Lung Lo, "In-Fiber Bragg Grating Sensors Using Interferometric Interrogations for Passive Quadrature Signal Processing," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 10, No. 7, 1998, pp. 1003-1005.
- [4] 김대현 외, "금 증착된 광섬유 외부 패브리-페로 간섭(EFPI) 센서를 이용한 구조물의 동적 변형률 측정," 한국항공우주학회, 제 30 권 제 2 호, pp 52-58, 2002