

브래그 격자 센서 시스템을 이용한 복합재 평판 진동의 실험적 해석

Experimental Analysis on Vibration of Composite Plate by Using FBG Sensor System

김대현

Dae-hyun Kim

초 록 광섬유 센서는 구조 건전성 감시 분야에 적용되는 유망한 센서 시스템이다. 특히 광섬유 브래그 격자(FBG) 센서는 본 분야에 있어 가장 각광받는 센서들 중에 하나이다. 이러한 FBG 센서는 브래그 파장의 이동량을 알아내는 방법에 따라 다양한 시스템 구성이 가능하다. 또한 센서 시스템의 동특성은 이러한 시스템에 의해 결정된다. 본 논문에서는 FBG 센서의 브래그 파장 스펙트럼 최대 경사부에 단일 파장 레이저의 중심 파장을 맞춰 놓을 경우, 센서의 경사도가 센서 감도로 작용할 수 있다는 측정 원리를 이용하였다. 이러한 원리는 전체 측정 범위의 한계는 있지만 높은 민감도를 보장한다. 본 측정 원리의 적용 예로서, FBG 센서를 삽입한 복합재 평판을 오토클레이브를 이용해 제작하고 앞서 설명한 측정 원리를 적용하였다. 첫째로 삽입된 FBG 센서를 이용해 충격 망치로 가해진 복합재 평판의 고유 진동수를 성공적으로 측정하였다. 둘째로 고출력 스피커를 이용해 앞서 측정된 고유진동수 중 하나의 특정 주파수로 복합재 평판을 강제 가진 시켰다. 이때 발생하는 구조 진동을 FBG 센서로 측정하였고 동시에 ESPI 측정 시스템을 이용해 진동 모드 형상 역시 성공적으로 측정하여 복합재 구조물의 동특성을 파악하였다. 따라서, 이러한 두 실험을 통해 FBG 센서 시스템과 ESPI 측정 시스템이 복합재 구조물의 동특성 측정에 매우 유용한 기술임을 증명하였다.

주요용어: 광섬유 브래그 격자 센서, ESPI, 복합재료, 동특성

Abstract A fiber optic sensor is prospective to be applied to structural health monitoring. Especially, a fiber Bragg grating(FBG) sensor is one of the most popular sensors for the structural health monitoring. The FBG sensor has several demodulation systems for tracking the shift of the Bragg wavelength. The dynamic bandwidth is dependent on the demodulation system. In this paper, the sensing mechanism is that the slope of the optical spectrum of FBG could be used as its sensitivity when the tunable laser shot the monochromatic laser wavelength at the highest slope point. In this technique, the high sensitivity is guaranteed even though the sensing range is limited. In an example of the application, the composite plate embedding a FBG sensor was manufactured by using an autoclave method and the above sensing mechanism was applied to the composite plate. Firstly, the natural frequencies of the plate were successfully measured by the FBG sensor during the impact hammer test. Secondly, a high-power speaker was used to force the plate to be vibrated at the specific frequency that was one of the natural frequencies. During the shaking, the FBG sensor measures the dynamic characteristics and ESPI was also used to measure the mode shape. From the two dynamic tests, the availability of the FBG sensor system and the ESPI was proven as a technique for measuring the dynamic characteristics of composite structure.

Keywords: FBG Sensor, ESPI, Composites, Dynamic Characteristics

1. 서론

최근 그린에너지에 대한 관심이 많아지면서 풍력 에너지에 많은 연구가 집중되고 있다. 이때 풍력발전기의 풍력 블레이드 설계 및 제작 기술은 풍력발전기 설계 제작에서 핵심 기술 중에 하나이다. 복합재료는 이러한 풍력 블레이드 제작에 사용되는 핵심 재료로서 여러 산업계 현장에서도 많이 사용되고 있으며, 특히 적층 복합재 구조물은 금속재 구조물에 비해 비강성 및 비강도가 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나 모재균열, 층간분리 및 섬유파손과 같은 복잡한 파손모드를 가지고 있으며, 층간분리 파손은 저속충격이나 구조물의 자유경계단에서 주로 발생하고 좌굴하중 및 압축강도의 급격한 저하를 유발하는 특성을 가지고 있다[1,2]. 또한 이러한 파손모드는 매우 복잡하여 해석적 접근이 쉽지 않아 실질적인 검사방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 따라서 최근에는 이러한 제약점을 보완하기 위해 복합재 구조물 내에 센서를 탑재하여 운행 중에 발생하는 여러 하중 상태에서 구조물의 건전성을 감시하는 구조 건전성 감시 연구가 활발히 연구되고 있다. 이때 복합재 내에 탑재되는 센서는 원래 구조물의 물리적 성질에 영향을 주지 않아야 하기 때문에 그 크기가 작아야 하며 적층 구조물에 적합한 구조를 지니고 있어야 한다. 따라서 이러한 요구사항을 만족하는 센서로서 최근 광섬유 센서가 많은 각광을 받고 있다. 기본적으로 광섬유 센서에 사용되는 광섬유는 보통 250 μm 의 지름을 갖는 얇은 가닥으로써 실제 센서로 가공될 경우 본래 크기를 유지할 수 있어 작은 크기의 센서 제작이 가능하며, 또한 적층 복합재료와 같이 여러 장을 겹쳐 제작되는 구조물 내에 삽입이 용이하다는 장점을 갖고 있다. 따라서 파손 거동이 복잡한 복합재료의 재료 및 구조 건전성 모니터링 등의 연구에 활발히 적용되고 있다. 그리고 기본적인 작동 원리가 전자기 기반의 센서와 달리 광학을 이용하기 때문에 전자기학적 잡음에 영향을 전혀 받지 않는다는 장점도 갖고 있어 기존의 전자기 기반 센서가 접근하기 어려운 환경에서의 센서 활용이 가능하다[3]. 이러한 여러 장점들 때문에 최근에는 변형량, 힘, 압력, 가속도, 진동, 각도 및 음향파 센서 등의 다양한 물리량을 측정할 수 있는 계측자로서 활발히 연구되고 있다[4-10]. 특히 최근 그 사용이 두드러지고 있는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg

grating, FBG) 센서의 경우, EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer)나 마이켈슨(Michelson) 센서와 같은 다른 광섬유 센서들에 비해 다점 측정(multiplexing) 시스템 구성이 용이하다는 큰 장점을 갖고 있어 매우 다양한 활용 연구들이 진행되고 있다. 그러나 신호처리를 위한 시스템 구성이 복잡하고 다점 측정을 위한 광학 시스템 구성시 측정 가능한 동특성 범위에 제약이 따른다. 본 연구에서는 이러한 동적 측정 범위 제한을 해결하고 복합재 평판의 고주파수의 진동을 성공적으로 측정할 수 있는 광학 시스템을 구성하였다. 또한 개발된 광학 시스템을 사용한 FBG 센서 시스템을 구축하고, FBG 센서를 내부에 삽입한 복합재료 평판을 제작하였다. 최종적으로 다양한 진동 측정 실험을 통해 복합재 평판의 동특성 모니터링 실험을 성공적으로 수행하였다. 보다 구체적으로, 복합재 평판의 동특성을 평가하기 위해 임팩트 해머 테스트와 스피커를 이용한 강제 진동 실험 두 가지를 수행하였으며 두 가지 실험 모두에서 FBG 센서는 복합재 평판의 고유 진동수를 정확히 측정하였다. 또한 ESPI (electronic speckle pattern interferometry) 시스템을 이용해 정확한 진동 모드 형상을 성공적으로 측정하였다.

2. 측정 원리

일반적으로 광섬유의 측면에 248 nm 근방 파장의 자외선 레이저를 이용하여 간섭 무늬를 형성하면 Fig. 1과 같이, 광섬유 코어의 굴절률은 간섭 무늬의 에너지 분포에 따라 주기적으로 변화한다[11]. 이때 빛이 진행하는 광섬유의 코어 내에 주기적인 굴절률의 변화가 새겨진 부분은 브래그 격자의 역할을 하게 된다.

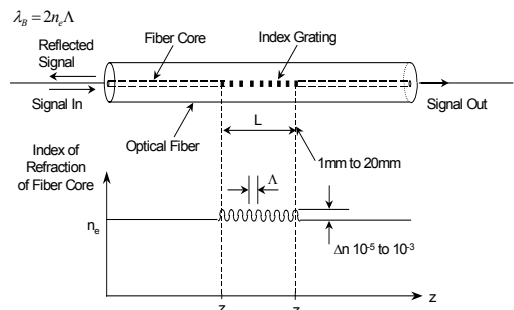


Fig. 1 Fiber Bragg grating and change of index of refraction

또한 광폭 스펙트럼의 광원을 광섬유에 입사 시킬 경우, 브래그 격자 부분에서 다음의 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분만을 반사시키고 나머지 파장 성분들은 모두 통과시킨다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \tag{1}$$

위 식에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 위의 브래그 조건에서 보듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 보다 구체적으로, 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \tag{2}$$

여기에서 α 는 광섬유의 열팽창계수(thermal expansion coefficient), ξ 는 광섬유의 열광학계수(thermo-optic coefficient) 그리고 p_e 는 광탄성 상수(photoelectric constant)를 나타낸다.

만약 온도 차이가 없는 상태에 국한시켜 구조물의 변형을 측정한다면 식 (2)에서 $\Delta T = 0$ 으로 가정할 수 있어 다음의 식 (3)과 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있으며 따라서 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구할 수 있게 된다.

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \tag{3}$$

결국, 브래그 파장의 변화를 어떻게 측정하느냐에 따라 다양한 계측 시스템의 설계가 가능해진다. 대표적인 측정 방법으로는 WSFL(wavelength swept fiber laser)를 사용하여 능동적으로 파장의 변화를 측정하는 방법을 들 수 있다. 그러나 이러한 방법은 레이저의 스위핑(sweeping) 속도에 의해 측정 가능 범위가 결정되어 매우 빠른 속도로 변화하는 동신호의 측정에는 한계점을 드러내고 있다.

따라서 최근에는 높은 속도의 신호를 측정하기 위해 수동적 측정 방법들을 새롭게 제안하고 있다. 본 논문에서도 1 kHz까지의 높은 구조 진동을 측정하고자 하므로 앞서 설명한 WSFL 사용 방법으로는 한계가 있기 때문에 수동적 측정 방법을 고안하여 적용하였다.

본 논문에서 사용한 광학 계측 시스템은 Fig. 2에서와 같이, 단일 파장 가변 레이저와 광검출기로 간단히 구성된다.

이때 사용되는 레이저의 linewidth는 Fig. 3에서와 같이, 함께 사용되는 FBG 센서의 linewidth 보다 상대적으로 매우 작아야 한다. 그림에서와 같이, FBG 센서의 스펙트럼 형상이 봉우리 형태로 존재하게 되며 이때 함께 사용하는 레이저의 파장을 Fig. 3에서와 같이, FBG 센서의 스펙트럼 형상에서 기울기가 가장 높은 지점에 위치시킨다. 이때 외부 하중에 의해 브래그 파장의 변화($\Delta\lambda$)가 발생한다면 FBG 센서에서 반사되어 돌아오는 광량의 변화

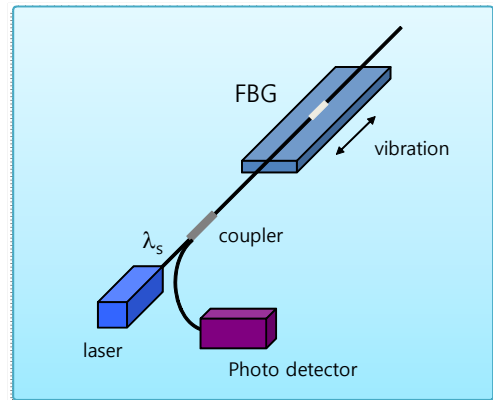


Fig. 2 Schematic diagram of optical system for measuring vibration

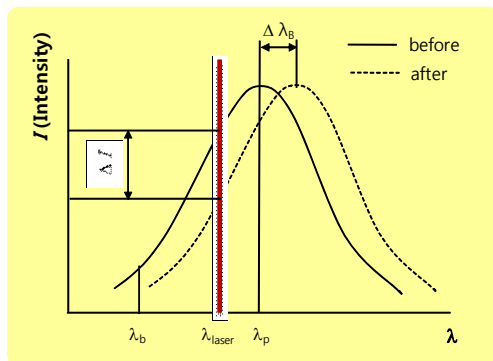


Fig. 3 Sensing mechanism using power spectrum of FBG sensor

변화($\Delta\lambda$)가 발생한다. 만약 그림에서와 같이, 브래그 파장(λ_B)이 변하는 동안, 레이저 파장(λ_{laser})이 λ_B 와 λ_p 사이처럼 스펙트럼 형상의 상승 구간에 항상 놓이게 된다면 브래그 파장의 이동량과 반사 광원의 광량 변화는 항상 비례 관계에 놓인다. 더욱이 브래그 파장 이동량이 매우 작다면 비례 관계는 선형성을 보장할 것이다. 따라서 반사되어 돌아오는 광원의 광량을 광검출기로 측정하여 실제 발생한 외부 변화량을 계산할 수 있게 된다.

3. 복합재 평판의 제작

본 연구에 사용된 복합재 평판은 Fig. 4(a)와 같이 Twintex 사의 woven fabric glass/polypropylene 프리프레그(prepreg)를 사용하여 제작되었다. 프리프레그는 300×300 (mm)의 크기로 절단되었고, $[0_2/90_2/[90]/90_2/0_2]_T$ 형태의 총 8장으로 적층 되었으며 적층 중앙에 FBG 센서를 90도 방향으로 평판 중앙에 삽입하였다. 이때 사용된 FBG 센서는 페이스-마스크(phase-mask)법을 사용해 UV 레이저 조사를 통해 제작되었다. 추가로 사용된 페이스-마스크의 총 길이가 10 mm 로서 완성된 FBG 센서의 게이지 크기 역시 10 mm 이며 코팅처리하지 않았다. 광섬유 센서가 삽입된 복합재로 적층 판은 광섬유 센서가 적층판 모서리에서 파손되는 것을 방지하기 위해 Fig. 4(b)에서와 같이 스틸 튜브와 열 수축 튜브를 사용해 보호하였다.

센서가 삽입된 적층 프리프레그는 오토클레이브 (autoclave)를 사용해 적정온도와 압력(190-200 °C, 7-10 Bar)을 성형 사이클에 맞게 가하여 제작하였다. 성형 완성된 복합재 평판은 광섬유 센서가 파손되지 않도록 주의 깊게 분리하여 최종 시편을 완성하였다. 오토클레이브 성형 중에 발생할 수 있는

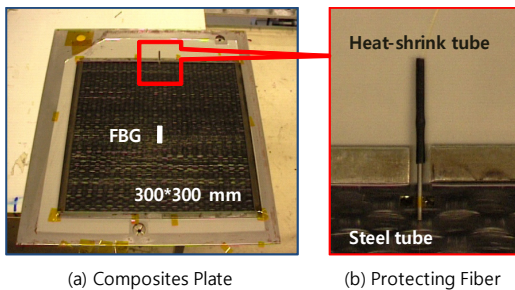


Fig. 4 Manufacturing composites plate inserted by FBG sensor

FBG 센서의 파손 유무를 확인하고 또한 본 실험을 수행하기 전 FBG 센서의 정확한 브래그 파장을 찾기 위해, 가변 레이저를 사용해 삽입된 FBG 센서의 정확한 스펙트럼 프로파일 (spectrum profile)을 측정하였다. Fig. 5는 측정된 센서의 스펙트럼 프로파일을 보여주며 정확한 브래그 파장이 1529.3 nm 임을 확인시켜 준다.

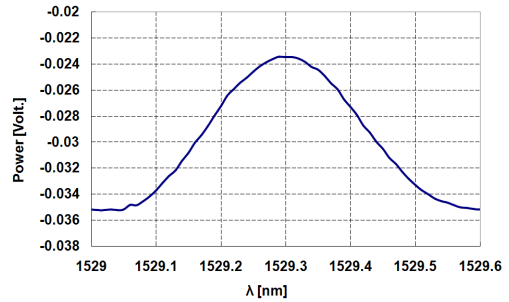


Fig. 5 Profile of power-spectrum of FBG sensor

4. 복합재 평판의 진동 측정

제2장에서 설명한 광학 시스템을 이용하여 실제 FBG 센서가 삽입된 복합재 평판의 진동 측정 실험을 두 가지 수행하였다. 첫째는 복합재 평판의 기본적인 동특성을 파악하기 위해 임팩트 해머 (impact hammer)를 이용해 고유 진동수를 측정하였다. 둘째는 고출력 스피커를 이용해 첫 번째 실험에서 측정된 고유 진동수 중에 특정 주파수로 강제 가진 시키며 진동의 모드 형상을 알아보았다. 이때 모드 형상을 찾기 위해 ESPI(electronic speckle pattern interferometry) 장비를 사용하였다.

첫 번째 실험의 광학 시스템을 구성하기 위해 가변 레이저와 광검출기를 준비하였다. 그리고 제3장에서 설명한 FBG 센서가 삽입된 복합재 평판을 원형의 고정 지지부를 형성시킬 수 있는 특수 거치대 (내경 240 mm) 에 장착하였다. 또한 광검출기는 신호취득 시스템을 통해 컴퓨터로 연결되어 진동시 발생하는 광신호의 변화를 취득하도록 하였다. 그리고 두 번째 실험인 진동 모드 측정 실험을 위해 고출력 스피커를 복합재 평판에 뒤쪽에 위치시켰다. 스피커를 통해 강제 가진 된 복합재 평판의 진동 모드 형상을 측정하기 위해 ESPI 장비를 복합재 평판 앞쪽에 장착하였다. 사용된 ESPI 시스템은 0.632 μm 파장의 He-Ne 레이저와 768×572 픽셀의 소니 CCD 카메라로 구성되었다. 또한 촬영된 이미

지는 $0.447 \mu\text{m}/\text{fringe}$ 의 해상도를 유지하도록 설정하였다. Fig. 6은 앞서 설명한 실험 장치에 대한 개략도를 보여주고 있다.

우선 본 실험에 앞서 FBG 센서의 최종 스펙트럼 형상을 파악한 후에 앞 장에서 설명한 것처럼 가장 기울기가 급격한 지점인 1529.2 nm 에 가변 레이저의 출력 파장을 설정하였다. 그리고 고유 진동수 측정을 위해 임팩트 해머를 이용해 고정 지지된 복합재 평판의 한쪽 모서리를 순간적으로 타격하였다. 타격에 의해 발생하는 복합재 평판의 진동을 평판 내부에 삽입된 FBG 센서를 이용해 측정하였다. 또한 측정된 진동 신호는 동특성을 알아보기 위하여 푸리에 변환을 통해 power spectrum을 계산하였다. Fig. 7은 측정된 결과를 보여주고 있다.

그림에서와 같이, FBG 센서 시스템을 통해 286, 642, 982 그리고 1038 Hz에 이르기까지 고차의 고유 진동수를 성공적으로 측정할 수 있었다. 이를 통해 FBG 센서 시스템이 1 kHz 이상의 고주파 진동을 충분히 취득할 수 있음을 확인하였고 또한 이를 이용해 복합재 구조물의 진동 특성을 성공적으로 측정할 수 있음을 확인하였다.

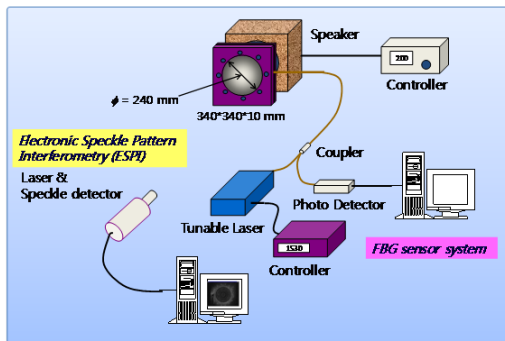


Fig. 6 Test setup for measuring vibration using FBG sensor and ESPI system

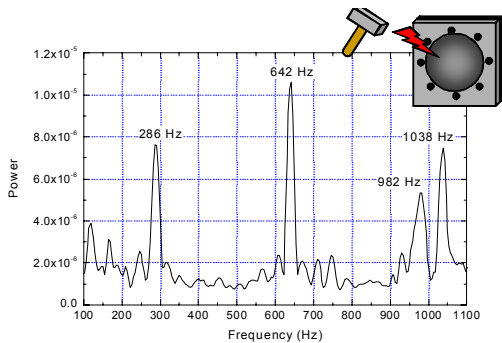


Fig. 7 Power spectrum of vibration signal measured by FBG sensor system

그리고 실제 복합재 평판의 실제 진동 모드의 형상을 알아보기 위해 이전 실험에서 측정된 복합재 평판의 고유 진동수와 동일한 주파수로 복합재 평판 뒤편에 설치된 고출력 스피커를 구동하였다. 실험이 진행되는 동안 이미 설치된 ESPI 장치를 이용해 복합재 평판의 진동 형상을 촬영하였다. Fig. 8은 286 Hz로 가진할 경우 발생하는 진동 신호를 FBG 센서 시스템을 통해 측정된 결과와 ESPI로 측정된 모드 형상 결과를 동시에 보여준다.

그림에서와 같이 FBG 센서 시스템은 286 Hz의 진동 신호를 성공적으로 측정하였으며 ESPI 시스템 역시 성공적으로 진동 모드 형상을 정확히 측정하였다. 또한 기타 고유 진동수의 진동 모드를 알아보기 위해 동일한 시험을 수행하여 Fig. 9와 같이, 기타 고유 진동수에 해당되는 진동 모드를 정확히 확인할 수 있었다. 최종적으로 이를 통해 FBG 센서 시스템과 ESPI 시스템의 효용성을 성공적으로 검증할 수 있었다.

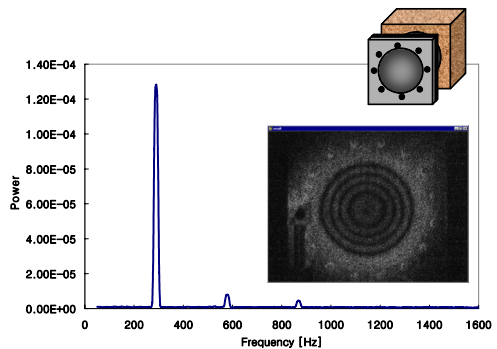


Fig. 8 Power spectrum and mode shape of composite plate measured during shaking at 286 Hz

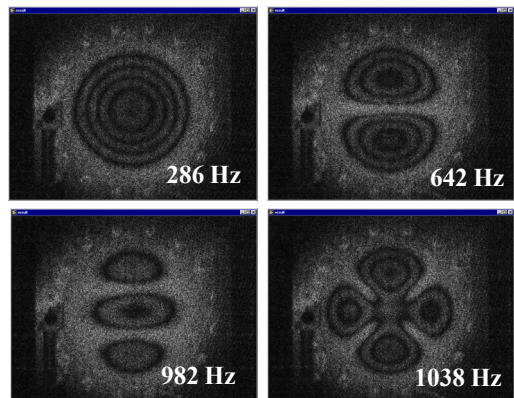


Fig. 9 Mode shapes of composite plate measured by ESPI according to the forced frequencies

5. 결론

본 연구에서는 복합재 평판의 동특성 검사를 위해 FBG 센서 시스템을 새롭게 적용하였으며 특히 1 kHz까지의 높은 고주파수 진동을 성공적으로 측정하기 위해 가변 레이저를 광학 시스템에 적용하였다. 또한 FBG 센서의 광학 스펙트럼의 기술기를 이용함으로써 매우 높은 민감도를 유지할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 직교 적층된 복합재 평판을 제작하고 적층 중간층 중앙에 FBG 센서를 삽입하였다. 그리고 제작된 복합재 평판의 고유진동수 측정을 위해 임팩트 해머로 순간충격을 가하고 이때 발생한 진동 신호를 광섬유 센서 시스템을 이용해 성공적으로 측정하였다. 최종적으로 주파수 분석을 통해 1 kHz 이상의 고유 진동수까지도 정확히 측정되는 것을 확인하였다. 추가로 정확한 진동 모드 형상을 측정하기 위해 고출력 스피커와 ESPI 측정 시스템을 적용하였다. 고출력 스피커를 이용해 앞서 임팩트 해머를 이용해 측정된 고유진동수에 해당되는 동일 주파수로 복합재 평판을 강제 가진시켰다. 그리고 스피커 가진에 의해 발생하는 복합재 시편의 진동을 FBG 센서와 ESPI 측정 시스템을 이용해 측정하였다. 이를 통해, 가진주파수와 동일한 고유진동수가 정확히 측정됨을 확인할 수 있었으며 동시에 모드 형상까지 성공적으로 확인할 수 있었다. 최종적으로 이러한 측정 실험을 통해, 고주파 구조 진동 측정실험에서 FBG 센서 시스템과 ESPI 시스템의 효용성을 성공적으로 검증할 수 있었다.

감사의 글

본 논문에 언급된 여러 실험을 할 수 있는 기회와 여러 장비를 제공해 주신 스위스 로잔 공대 Federico Bosia 박사에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, McGraw-Hill, New York (1975)
- [2] E. Fitzer, *Carbon Fibers and Their Composites*, Springer-Verlag, New York (1985)
- [3] R. M. Measures and K. Liu, "Fiber optic sensors focus on smart systems," *IEEE Circuits Devices Mag.*, Vol. 8, No. 4, pp. 37-46 (1992)
- [4] Udd, E., *Fiber Optic Smart Structures*, Wiley, New York (1995)
- [5] Dae-Hyun Kim, Bon-Yong Koo, Chun-Gon Kim and Chang-Sun Hong, "Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system," *Smart Mater. Struct.* Vol. 13, No. 3, pp. 593-598 (2004)
- [6] Dae-Hyun Kim, Chun-Gon Kim and Chang-Sun Hong, "Simultaneous monitoring of crack signals and strain of composites using a stabilized EFPI sensor system," *Key Engineering Materials* 270-273 pp. 2146-2151 (2004)
- [7] M. Q. Feng and D. H. Kim, "Novel fiber optic accelerometer system using geometric Moiré fringe," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 128, pp. 37-42 (2006)
- [8] B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Opt. Fiber Technol.* Vol. 9, pp. 57-79 (2003)
- [9] 김대현, "구조물 건전성 감시를 위한 무아레식 광섬유 경사계 센서 개발", *비파괴검사학회지* 제28권, 제2호, pp. 157-163 (2008)
- [10] 김대현, "Development of load cell using fiber Bragg grating sensors and differential method for structural health monitoring," *비파괴검사학회지* 제29권, 제4호, pp. 299-307 (2009)
- [11] 류치영, "The strain monitoring of smart composite structures using fiber bragg grating sensors by multiplexing method," 박사학위논문 (2001)