

안정화된 FBG 센서를 이용한 복합적층보에서의 충격위치검출

방형준*·박상오*·홍창선**·김천곤**

Impact Monitoring in Composite Beam Using Stabilization Controlled FBG Sensor System

Hyung-Joon Bang, Sang-Oh Park, Chang-Sun Hong, Chun-Gon Kim

Abstract

Impact location monitoring is one of the major concerns of the smart health monitoring. For this application, multipoint ultrasonic sensors are to be employed. In this study, a multiplexed FBG sensor system with wide dynamic range was proposed and stabilization controlling system was also developed for the maintenance of maximum sensitivity of sensors. For the intensity demodulation system of FBG sensors, Fabry-Perot tunable filter(FP-TF) with 23.8 nm FSR(free spectral range) was used, which behaves as two separate filters between 1530 ~ 1560 nm range. Two FBG sensors were attached on the bottom side of the graphite/epoxy composite beam specimen, and low velocity impact tests were performed to detect the one-dimensional impact locations. Impact locations were calculated by the arrival time differences of the impact longitudinal waves acquired by the two FBGs. As a result, multiplexed in-line FBG sensors could detect the moment of impact precisely and found the impact locations with the average error of 1.32 mm.

Key Words: 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating), 충격 모니터링(impact monitoring)

1. 서론

복합재 구조물이 겪게 되는 저속충격은 구조물 내부에 층간분리나 모재균열과 같이 외부에 노출되지 않는 손상을 유발시킬 수 있다. 하지만 외관상 보이지 않는 손상이 존재할 경우 일반적으로 사용하고 있는 X선이나 초음파탐상법과 같은 비파괴검사법은 손상탐지를 위해 넓은 영역을 검사해야 하므로 비용 상승과 시간의 제약을 받는다는 한계가 있다[1]. 최근에는 기존 비파괴 검사법의 단점을 보완하기 위해 실시간으로 구조물의 충격 및 손상위치를 모니터링 할 수 있는 스마트 복합재 구조를 개발하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다[1-2]. 스마트 구조물에서 충격위치 검출을 위해서는 여러 지점으로부터 응력파

신호를 검출할 수 있는 고주파 신호의 다점측정 기술이 필요하다. FBG(fiber Bragg grating) 센서는 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing) 기법을 통해 동시 다점 측정 기술을 적용할 수는 있으나, 기존의 연구에서는 민감도를 일정하게 유지하며 여러 지점에서 고주파 신호를 동시에 취득하기에는 어려움이 있었다. 따라서 효율적이고 안정적인 충격위치 검출을 위해서는 넓은 주파수 대역의 신호를 동시다점으로 취득할 수 있으면서 민감도를 안정적으로 유지할 수 있는 FBG 센서 시스템의 개발이 요구되었다.

본 연구에서는 파장분할 다중화기법 및 능동 제어 안정화 장치를 이용한 FBG 센서 시스템을 복합재 보에서의 충격위치 모니터링에 적용하였다. 동일 광섬유 선상에서 서로 다른 반사파장을 가진 FBG 센서를 복합재 보의 표면에 부착하였으며 자유낙하 방식으로 복합적층보 시편에 가해진 일차원 충격위치를 검출하는 실험을 실시하였다.

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 항공우주공학전공

2. FBG 센서 시스템

2.1 진동측정원리

FBG 센서에 광대역 광을 입사 시키면 유효굴절률과 격자 간격의 함수로 표현되는 브래그 파장만이 반사된다[3].

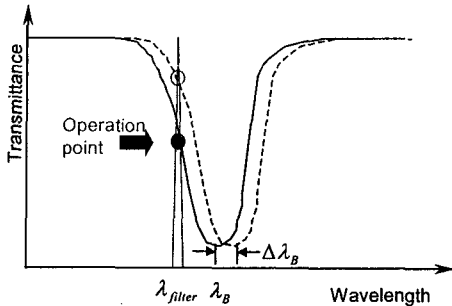


Fig. 1 Interferometric demodulation for FBG vibration sensor.

유효 굴절률과 격자주기는 온도나 변형률 등에 의해 변화하게 되는데, Fig. 1에서와 같이 FBG 센서의 스펙트럼 기울기가 가장 큰 작동지점(operation point)의 파장에 협대역 필터의 파장을 고정시키면 진동에 의해 FBG의 반사파장이 변하게 될 때 복조화 필터를 통과하는 출력신호의 진폭은 입력신호를 따라 변하게 된다[4].

만약 FBG 진동센서 시스템의 신호 복조화 필터로 좁은 파장 간격의 FSR(free spectral range)을 갖는 패브리-페로 필터를 사용한다면 복수의 필터 파장을 이용해 동시에 여러 지점에서의 FBG 센서들의 신호를 복조화 할 수 있게 된다. 이 경우 하나의 FBG 센서에 대해 고정된 하나의 복조화 필터가 쓰이는 것과 같은 효과를 가지므로 넓은 주파수 대역의 신호를 고주파 대역의 손실 없이 동시에 취득이 가능하다.

2.2 민감도 안정화 장치

외란에 의해 센서의 민감도가 낮아지는 페이드아웃(fade-out)문제를 해결하기 위해서는 복조화에 사용되는 단파장 필터의 위치가 센서 스펙트럼(spectrum)의 기울기가 최대가 되는 필터의 작동지점(operation point)에 고정되어야 한다. 본 연구에서는 가변 패브리-페로 필터의 통과 파장을 제어하여 항상 FBG 센서의 작동지점에 위치하

도록 함으로써 센서 시스템이 일정한 민감도를 유지할 수 있도록 하였다.

3. 복합적층보의 충격위치 검출 실험

3.1 실험장치 및 방법

2개의 FBG 센서로 구성된 광섬유 센서 시스템을 이용하여 $[0/45/-45/90]_{2s}$ 로 적층된 graphite/epoxy 복합적층보 시편에 가해진 충격위치를 검출하는 시험을 실시하였다. 두 FBG 센서의 게이지 길이는 5 mm로 동일하며 FBG1의 반사파장은 1532.4 nm이며 FBG2는 1556.2 nm의 파장으로 제작하여 복조화 장치에 사용된 패브리-페로 필터의 투과 파장 간격과 가까운 파장 간격을 갖도록 하였다.

실험에 사용된 시편의 형태는 Fig. 2에 명시된 것과 같이 길이 500 mm, 폭 25 mm, 두께 1.6 mm의 보 형태로 제작되었으며 시편의 양 끝단은 고정지지 되었다. 2개의 FBG 센서는 시편의 아래면 양쪽에 400 mm의 간격을 가지고 부착되었으며 같은 위치의 시편 반대편에는 압전센서를 부착하였다.

충격하중은 가이드가 설치된 추를 자유낙하 시킴으로써 가해지며 추의 질량 및 낙하 높이를 조절함으로써 충격에너지를 조절하였다. 본 시험에서는 시편의 중앙 세 위치에 대해 자유낙하 방식으로 0.15 J의 충격을 가하였다. 충격위치 검출은 FBG 센서로부터 각각 100 mm, 200 mm, 300 mm 떨어진 길이방향 축 상의 세 지점에 대해 1차원 가정으로 한정하여 실시하였다.

본 시험에서는 충격시 방출되는 응력파의 전파 속도를 일정하다고 가정하여 응력파의 도달 시간 차이를 이용하여 일차원 충격위치를 계산하였다. 복합적층보 시편에서 충격에 의한 응력파 전파속

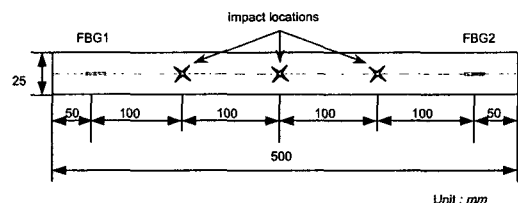


Fig. 2 Composite beam specimen for impact monitoring test.

도는 0.75 km/s로 측정되었으며, 샘플링 주파수는 2 MHz로 설정하였다.

3.2 실험결과

충격하중에 의해 발생한 응력과 신호는 발생 후 전파속도 차이에 의해 종파(longitudinal wave)와 횡파(transverse wave)로 구분된다. 종파는 상대적으로 전파속도가 빠르며 동일한 충격 하중에 대해 반복적인 신호 재현성을 가지고 있다. 이에 반해 횡파는 불규칙적이고 신호 재현성이 떨어지며 20 kHz 이하의 가청주파수 대역 신호가 상대적으로 강조되는 신호특성을 갖는다.

Fig. 3은 복합재 시편의 중앙에 가해진 충격하중에 의해 발생한 응력과 신호를 FBG 센서와 PZT 센서로 취득하여 STFT(short time Fourier transform)을 이용하여 비교한 결과이다. 그림 상단의 시간영역 신호를 보면 규칙적인 신호형을 갖는 종파가 신호발생 초기부터 약 0.3 ms 정도 지속됨을 확인할 수 있으며 두 센서의 신호를 비교한 경우 종파에 해당되는 신호발생 초기에서는 서로 형태가 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 하단의 STFT 선도에서도 마찬가지로의 결과를 볼 수 있다. PZT와 FBG로 취득된 두 신호 모두 약 0.8 ~ 1.1 ms의 시간선상에서, 초기에는 0 ~ 40 kHz에 걸쳐 특정주파수의 강조 없이 고른 분포를 보이다가 1 ms를 전후하여 저주파 성분이 주기적으로 점차 강조되고 있음을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 충격에 의해 발생한 응력과 종파성분으로 경계조건의 영향을 적게 받고, 전달속도가 빠른 [1] 종파의 도달시간 차이를 이용하여 충격위치를 검출하였다.

Fig. 4(a)는 두 개의 FBG 센서를 이용하여 FBG1로부터 100 mm 떨어진 첫 번째 충격위치로부터 취득한 응력과 신호이다. FBG1과 FBG2에 대한 신호전달 시간차이는 종파의 첫 번째 피크(peak)의 도달시간 차이를 이용해 계산하였으며, 이를 통해 예측된 충격위치는 100.24 mm로 평균 약 1.40 mm의 오차를 갖고 계산되었다.

Fig. 4(b)는 FBG1로부터 시편의 정중앙에 충격이 가해졌을 때의 응력과 신호이다. 이 경우 추의 낙하지점으로부터 두 센서까지의 거리가 동일하므로 응력과 신호에서 종파에 해당하는 부분의 피크의 위치가 동일 시간선상에 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(c)는 FBG1로부터 300 mm 떨어진 세 번째 충격위치에서의 실험 결과이다. 충격위치에서 상대적으로 가까운 FBG2에 먼저 신호가 도달했으며 Fig. 4(a)의 FBG1과 유사한 파형을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig 4에 명시된 세 충격위치에 대한 응력과 진폭을 비교해 볼 때 각 시점별로 취득된 응력과 신호의 크기가 크게 다르지 않고 일정한 것을 확인할 수 있다. 이것은 민감도 안정화 장치를 이용하여 실험 중 FBG 센서 시스템의 민감도를 일정하게 유지시킨 결과로 볼 수 있다.

충격위치 검출에 관한 실험결과를 정리하면 Table.1과 같다. 결과적으로 본 연구에서는 안정화된 FBG 센서 시스템을 이용하여 복합적층보내에서 고주파 진동신호인 응력파의 종파성분을 민감하게 검출할 수 있었으며, 충격위치를 평균 오차 1.32 mm, 최대 오차 4.54 mm로 검출할 수 있었다.

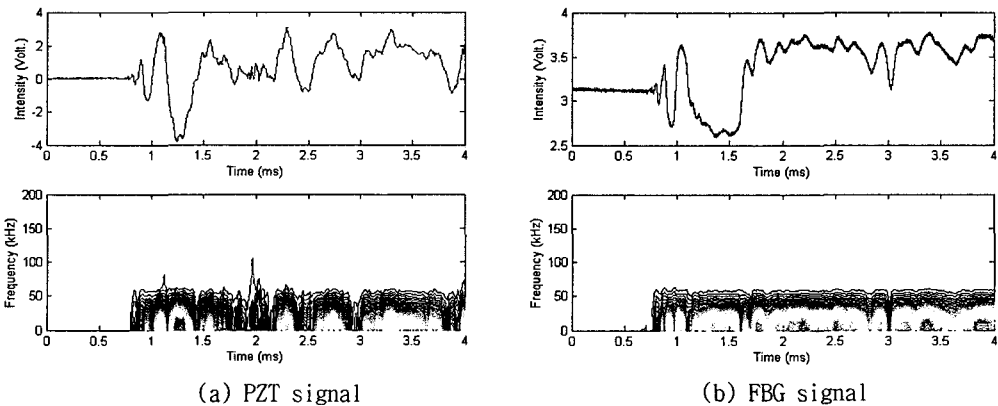


Fig. 3 Comparison of stress wave signals and its STFT induced by impact.

4. 결론

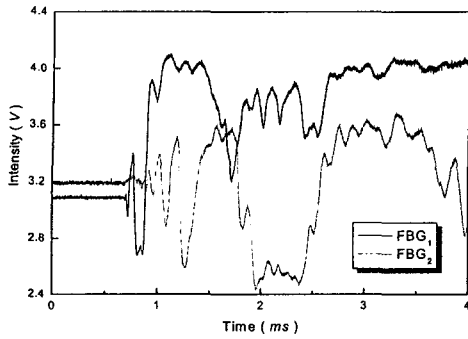
본 연구에서는 안정화된 FBG 초음파 센서를 이용하여 복합적층보에 대한 1차원 충격위치를 검출하는 연구를 수행하였다. 충격에 의한 응력파를 감지하기 위해 초음파 진동신호의 취득이 가능한 다중화된 FBG 센서 시스템을 구성하였으며, 센서민감도를 일정하게 유지하기 위한 안정화 장치를 적용하였다. 충격위치 검출 실험 결과 제안된 FBG 센서 시스템은 충격으로부터 발생한 응력파의 발생시점 및 도달시간을 높은 민감도를 가지고 안정적으로 감지할 수 있었으며, 종파의 도달시간 차이로부터 계산된 충격위치의 경우 최대 오차 4.54 mm, 평균오차 1.32 mm의 정확도를 가지고 검출할 수 있었다.

후기

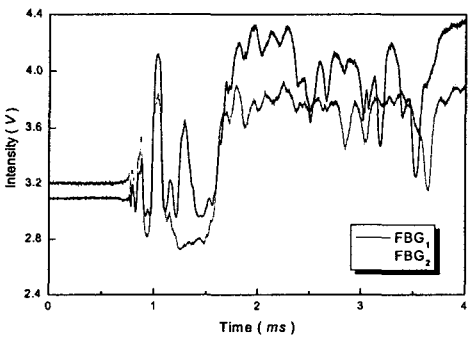
본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다(과제번호: ADD-03-05-02).

참고문헌

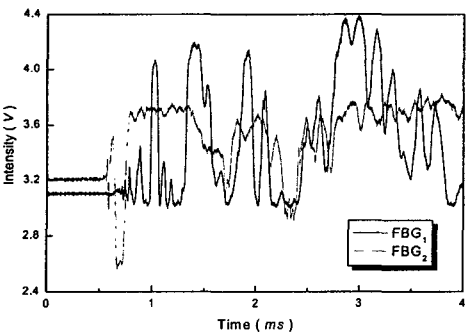
- (1) D. U. Sung, J. H. Oh, C. G. Kim and C. S. Hong, "Impact Monitoring of Smart Composite Laminates Using Neural Networks and Wavelet Analysis" *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, 2000, pp. 180-190.
- (2) J. A. Greene, T. A. Tran, A. Murphy and R. O. Claus et al., "Optical Fiber Sensing Technique for Impact Detection and Location in Composites and Metal Specimens," *Smart Materials and Structures*, Vol. 4, 1995, pp. 93-99.
- (3) C. Y. Ryu and C. S. Hong, "Development of Fiber Bragg Grating Sensor System Using Wavelength-Swept Fiber Laser," *Smart Materials & Structures*, Vol. 11, No.3, 2002, pp. 468-473.
- (4) N. Takahashi, K. Yoshimura and S. Takahashi, "Detection of Ultrasonic Mechanical Vibration of a Solid Using Fiber Bragg Grating," *Jpn. J. of Applied Physics*, Vol. 39, 2000, pp. 3134-3138.



(a) impact signals at 100 mm



(b) impact signals at 200 mm



(c) impact signals at 300 mm

Fig. 4 Stress wave signals of the three impact locations.

Table 1 Result of impact location monitoring.

Actual location (mm)	100	200	300
detected location (mm)	100.24	200.22	300.39
Mean error (mm)	1.40	1.56	0.96
Maximum error (mm)	3.61	4.54	2.97
Total mean error(mm)	1.32		