

복합재 충격손상신호의 FBG센서 입사각도에 따른 주파수분포 특성에 관한 연구

방형준*·송지용*·김천곤**

A Study on Frequency Characteristics of Impact Induced Damage Signals of Composite Laminates as the Incident Angle of an FBG sensor

Hyung-Joon Bang, Ji-Yong Song and Chun-Gon Kim

Abstract

In this research, we investigated the frequency characteristic of low-velocity impact induced damage signals on graphite/epoxy composite laminates using high-speed fiber Bragg grating(FBG) sensor system. Applying the FBG sensors to damage assessment, we need to study the response of FBG sensors as the damage signals of the different incident angles because FBG shows different directional sensitivity. In order to discriminate an impact induced damage signal from that of undamaged case, drop impacts with different energies were applied to the composite panel with different incident angle to the FBG sensor. Finally, detected impact signals were compared using frequency distributions of wavelet detail components in order to find distinctive signal characteristics of composites delamination.

Key Words: Fiber Bragg Grating(FBG) Sensor, Low-velocity Impact, Structural Health Monitoring.

1. 서론

복합재 구조물이 운용 중 겪게 되는 저속충격은 구조물 내부에 층간분리나 모재균열과 같이 외부에 노출되지 않는 손상을 유발시킬 수 있으며 항공기와 같이 절대적인 안전성이 보장되어야 하는 구조물의 경우에는 정기적인 비파괴 검사방법을 이용하여 구조의 건진성을 평가해야 한다.

최근에는 검사 시간 및 공간의 제약을 받지 않는 실시간 구조건진성 평가방법이 기존의 비파괴 검사방법에 대한 상호보완적 수단으로서 연구되고 있으며[1-2], 정량적인 손상평가를 위한 신호처리 방법으로써 wavelet transform(WT)이나 short-time Fourier transform(STFT)의 시간주파수 분석방법의 적용에 관한 연구들도 점차 확대되고 있다[2].

본 연구에서는 고주파 취득용 광섬유 브래그

격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서시스템을 이용하여 저속충격에 의한 graphite/epoxy 복합적층판의 손상신호를 감지하였으며, 손상발생 전후의 주파수 신호특성을 관찰하였다. FBG 센서는 센서에 전달되는 신호의 진입 방향에 따라 각기 다른 민감도를 가지고 있으므로 손상신호의 입사각도에 따른 FBG 신호의 특성을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 이산화된 고주파 웨이블릿 세부성분간의 에너지 분포차이를 이용하여 충격손상 신호의 입사각도에 따른 손상 전후의 신호특성에 관하여 고찰해 보았다.

2. 고주파 취득 FBG 센서의 작동원리

광섬유 브래그 격자 센서에 광대역 광을 입사시키면 특정 파장만이 반사되고 나머지는 통과하게 되는데, 격자간격과 유효 굴절률의 함수로 표현되는 브래그 반사파장의 식은 다음과 같다[1].

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

* 한국과학기술원

여기서 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도나 변형률과 같은 외란에 의해 변화하므로 역으로 브래그 파장의 변화 정도를 알면 외부에서 가해진 외란의 물리량을 환산할 수 있다.

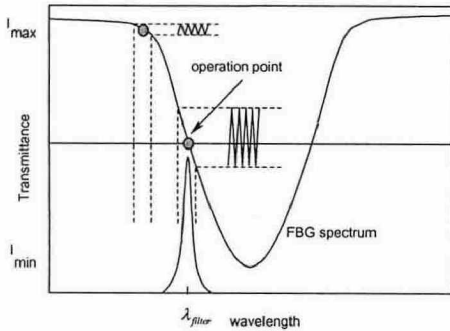


Fig. 1 Principle of intensity demodulation for FBG vibration sensor system.

FBG 센서를 이용하여 고주파 진동을 측정하기 위한 방법으로 많이 사용되는 것이 Fig. 1에서 설명하는 진폭변화 복조화 방법이다. 그림과 같이 FBG 센서의 스펙트럼 기울기가 가장 큰 작동지점(operation point)에 협대역 필터의 파장을 고정시키면 진동에 의해 FBG 센서의 반사파장이 변하게 될 때 작동지점에 고정된 단파장 필터를 통과하는 출력신호의 진폭은 입력신호에 따라 변화하게 된다. 만약 FBG 센서의 격자에 가해지는 변형에 따라 브래그 파장의 이동량이 선형적으로 변화한다고 가정하고, 또한 FBG 센서 스펙트럼의 작동지점 근처의 기울기가 선형이라는 가정을 한다면 진동에 의한 변형은 복조화 필터를 통과한 출력 빛의 세기 변화로 선형적으로 표현될 수 있다[3].

3. 신호처리과정

구조 손상 신호의 특성파악에 많이 이용되는 FT(Fourier transform)는 무한한 길이를 갖는 정현파 기저함수(basis function)를 이용하므로 불연속성을 갖는 신호나 미분 불가능한 신호를 분석하는 데는 한계가 있다. 이에 반해 WT(wavelet transform)는 시간과 주파수 영역에서 국부화된 국부 기저함수(local basis function)

를 이용해서 신호를 분해하므로 파손신호와 같이 급격한 거동을 보이는 신호를 분석하는데 유리하다는 장점이 있다.

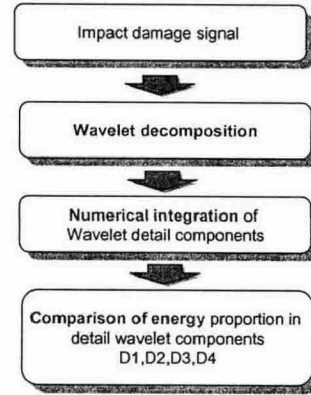


Fig. 2 Signal Processing Procedure.

본 연구에서는 구조 손상 전후의 AE 신호 특성을 비교하기 위해서 500 kHz 이하의 고주파 성분을 나타내는 웨이블릿 분해요소의 세부성분(details)사이의 에너지 분포를 비교하였다. 구조 손상 유무의 판별을 위한 신호처리 과정은 Fig. 2의 도표에 나타내었다. 1 MHz의 샘플링 주파수로 입력된 AE 신호는 다우베치4(Daubechey 4, db4) 웨이블릿 함수를 이용해 세부성분 $D^m_1, D^m_2, D^m_3, D^m_4$ 로 4단계 까지 분해된다. 위 첨자는 샘플링 주파수를 의미한다. 분해된 세부성분은 성분별 에너지 분포 비교를 위해 각각 수치적분되었으며, 최종적으로 4단계의 세부성분에 대한 점유율을 계산하였다.

4. 충격신호의 전달각도에 따른 FBG 센서의 복합재 손상 감지 실험

4.1 FBG 센서 시스템

충격 손상시 발생하는 AE 신호 취득을 위한 FBG 고주파 센서시스템의 개략도를 Fig.3에 나타내었다. 복조화 장치에 사용된 가변 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터의 통과 파장은 시험을 실시하기 전에 FBG 센서의 작동지점에 위치하도록 조절되며, 광섬유 센서 시스템이 작동하는 시험도중에는 케환제어장치를 통해서 센서의 민감도

가 항상 최대가 되도록 FBG 스펙트럼의 기울기가 최대가 되는 작동지점에 고정된다.

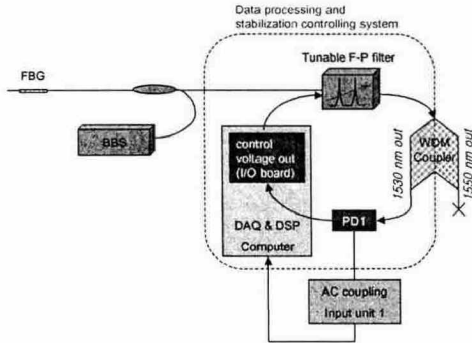


Fig. 3 FBG ultrasonic sensor system.

WDM(wavelength division multiplexer) 커플러(coupler)를 통해 센서의 파장에 해당하는 1530nm 대역의 성분만 분리된 신호는 직류성분을 제거하기위한 교류 커플링 회로를 통과하여 데이터로거(Data logger)에 저장된다.

4.2 실험 장치 및 방법

저속충격실험을 위한 복합재 평판은 한국화이바(주)의 CU125-NS graphite/epoxy 프리프레그를 이용하여 오토클레이브 성형을 하였다. 적층순서는 $[0_2/+45_2/-45_2/90_2]_s$ 이며 시편의 크기는 $830 \times 830 \times 2$ mm 이다. 복합재 평판 시편의 중앙에는 x축을 기준으로 0° 를 설정하여 FBG 센서를 부착하였으며, 반지름 15cm의 원을 따라 시계방향으로 15° 간격으로 각도를 바꾸면서 0° 부터 90° 까지 저속충격을 가하였다.

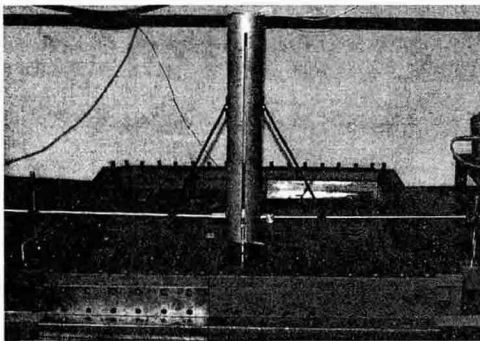


Fig. 4 Experimental setup for low velocity impact tests.

Fig.4는 저속충격 실험을 위한 실험장치의 모습이다. 충격하중은 가이드가 설치된 추를 자유낙하 시킴으로써 가해지게 되며 추의 질량 및 낙하 높이를 조절함으로써 충격에너지를 조절하였다. 손상이 발생하지 않은 상태에서의 충격신호 취득을 위해 먼저 0.1 J의 낮은 에너지로 충격을 가한 후 손상을 발생시키기 위해 5.0 J의 에너지로 저속 충격을 가하였다.

4.3 실험 결과 및 토의

0.1 J의 낮은 에너지로 저속충격을 가한 경우 구조에 손상이 발생하지 않았으므로 40 kHz이상의 초음파 영역을 포함하는 웨이블릿 세부성분 $D^{m_1} \sim D^{m_4}$ 에서는 어떠한 손상신호도 관찰할 수 없었으며 저주파 근사성분 A^{m_4} 만 볼 수 있다. Fig.5는 기준위치인 0° 지점에서 5.0 J의 충격에너지를 가한 경우의 웨이블릿 변환 결과이다. 이 경우 AE 신호의 방출 초기에 약 0.3 ms정도의 시간동안 40 kHz ~ 200 kHz의 영역을 담당하는 D^{m_3} 와 D^{m_4} 의 웨이블릿 세부성분에서 초음파 음향 방출이 감지되었다. 위 주파수 영역은 graphite / epoxy 복합적층판의 층간분리 손상신호의 주파수 영역을 포함하며[2] FBG 센서가 저속충격에 의한 층간분리신호를 취득하였음을 알 수 있다.

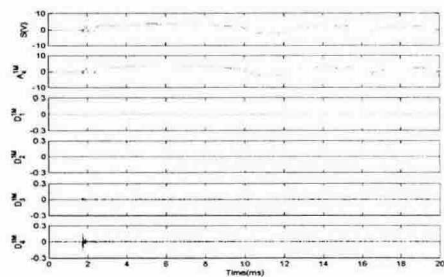


Fig. 5 Wavelet transformed impact damage signal.

위 결과 중 5.0 J의 충격손상 발생 시 가장 에너지 방출 비중이 큰 D^{m_4} 위 최대 진폭변화를 신호입사각도에 따라 나타낸 그래프를 Fig. 6에 명시하였다. 동일한 에너지에 대한 충격손상 신호의 진폭은 FBG 센서의 길이 방향에 대한 각도차이가 커질수록 비선형적으로 감소하며 60도 이상의 입사각도에서는 선행파(leading wave)의 최대

진폭이 뒤따라 발생하는 후행파 또는 반사파의 최대진폭보다 작아지는 결과를 확인할 수 있었다. 방향에 따라 민감도 변화가 없는 PZT 센서와 같은 경우에는 선행파의 음향방출 진폭을 이용하여 손상유무 및 손상정도를 평가할 수 있지만[2], 광섬유 센서와 같은 경우에는 신호진폭만으로 손상유무를 평가하기는 어려우며 입사각 변화에 따른 신호진폭 변화와 무관하게 손상을 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

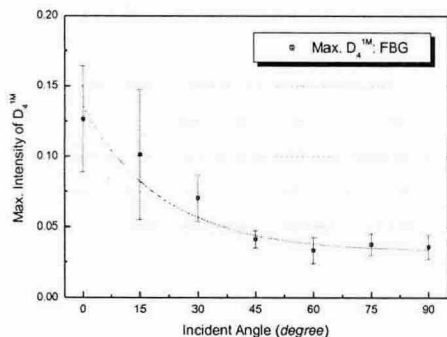


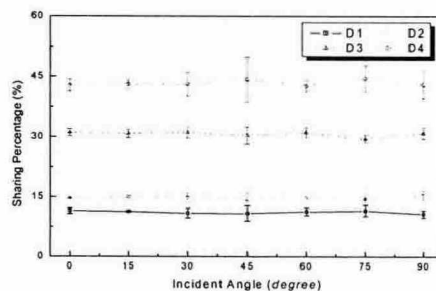
Fig. 6 Maximum amplitude of D4 wavelet detail components of impact damaged signals with different incident angle from FBG.

본 연구에서는 FBG 센서에 입사되는 신호의 각도에 무관하게 손상을 평가하기 위한 방법으로 손상유무에 따른 웨이블릿 세부성분사이의 비율 분포변화를 관찰하였다. Fig. 7은 손상 전후 FBG 센서로 취득된 충격 신호의 입사각도에 따른 웨이블릿 세부성분의 비율분포를 나타낸 결과이다. Fig. 7(a)의 손상전 결과와 Fig. 7(b)의 손상발생 후의 결과에서 볼 수 있듯이 웨이블릿 세부성분의 분포비율을 손상신호의 센서 입사각도와는 무관하게 일관된 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 손상 전후의 에너지 비율 분포를 비교하면 FBG 센서에 대한 입사각도 변화와 무관하게 손상발생 유무를 평가할 수 있는 기준을 확립할 수 있다.

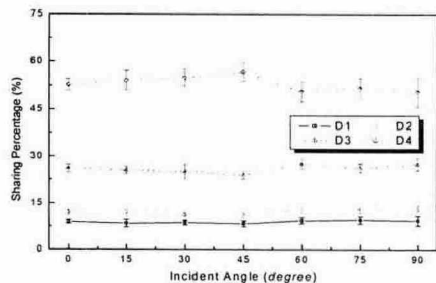
Fig. 8의 그래프는 FBG 센서로 취득된 손상 전후의 충격신호에 대해 웨이블릿 세부성분의 분포 변화를 도기한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 복합적충탄에 충격손상이 발생하면 상대적으로 고주파 대역에 해당하는 $D_1^m \sim D_3^m$ 의 점유율이 감소하며 D_4^m 의 점유율은 증가함을 확인할 수 있었다. 위와 같은 결과는 시편의 동일지점에서

FBG 센서의 반대편에 부착된 PZT 센서에서도 마찬가지로의 에너지 분포변화를 확인할 수 있었다.

결론적으로 웨이블릿 세부성분의 주파수분포 변화를 이용한 손상평가 방법은 FBG 센서와 같이 방향에 따른 민감도 변화를 갖는 센서에서도 정확히 손상 유무를 평가할 수 있는 기준으로 사용할 수 있음을 확인하였다.



(a) 0.1J energy



(b) 5.0J energy

Fig. 7 Energy distribution of detail wavelet components with different incident angle from FBG.

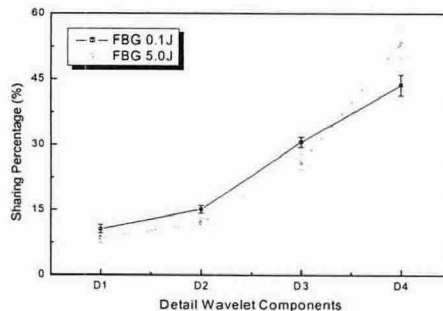


Fig. 8 Comparison of energy distribution of detail wavelet components between undamaged and damaged condition.

5. 결 론

본 연구에서는 복합적층평판의 충격손상여부를 판단하기 위해 FBG센서를 이용한 저속충격실험을 수행하였으며, 웨이블릿 세부성분의 손상 전후 주파수 분포 변화를 이용하여 손상유무를 감지하기 위한 신호처리 기법을 적용하였다. 실험 결과 손상신호의 입사각도 변화에 따라 민감도가 변화하는 FBG 센서의 경우 신호의 입사각도가 60° 이상일 경우에는 선행파의 손상신호 진폭만을 이용해서는 손상유무를 판별하기가 어려웠다. 하지만 손상신호에 대한 웨이블릿 세부성분의 에너지 분포는 충격손상신호의 입사각도에 무관하게 일관된 분포를 보였으며, 손상 전후의 특징적인 주파수별 에너지 분포 차이가 복합적층평판의 충격손상 여부를 판별 할 수 있는 기준이 될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원(ADD-03-05-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, 1995.
- (2) 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" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, 2000, pp. 180-190.
- (3) N. Takahashi, W. Thongnum and S. Takahashi, "Fiber-Bragg-Grating Vibration Sensor with Temperature Stability Using Wavelength-Variable Incoherent Light Source," *Acoustic Science and Technology*, Vol. 23, No. 6, 2002, pp. 353-355.