

論文

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 충격 모니터링 기법 연구

장병욱*, 박상오***, 이연관*, 김친곤***, 박찬익****, 이봉완*****

Impact Monitoring of Composite Structures using Fiber Bragg Grating Sensors

Byeong-Wook Jang*, Sang-Oh Park***, Yeon-Gwan Lee*, Chun-Gon Kim***,
Chan-Yik Park**** and Bong-Wan Lee*****

ABSTRACT

Low-velocity impact can cause various damages which are mostly hidden inside the laminates or occur in the opposite side. Thus, these damages cannot be easily detected by visual inspection or conventional NDT systems. And if they occurred between the scheduled NDT periods, the possibilities of extensive damages or structural failure can be higher. Due to these reasons, the built-in NDT systems such as real-time impact monitoring system are required in the near future. In this paper, we studied the impact monitoring system consist of impact location detection and damage assessment techniques for composite flat and stiffened panel. In order to acquire the impact-induced acoustic signals, four multiplexed FBG sensors and high-speed FBG interrogator were used. And for development of the impact and damage occurrence detections, the neural networks and wavelet transforms were adopted. Finally, these algorithms were embodied using MATLAB and LabVIEW software for the user-friendly interface.

초 록

복합재 구조물에서 발생하는 저속 충격에 의한 손상은 대부분 복합재의 내부나 충격을 받은 면의 반대 면에서 발생하기 때문에 검출이 쉽지 않아 시간이 지날수록 구조물이 위험에 처할 확률이 높아진다. 하지만 기존의 비파괴검사 방법은 일정한 주기에 따라 수행되기 때문에 즉각적으로 충격 손상을 감지할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 이러한 단점을 극복하고자 비파괴검사 장비를 구조물 내에 탑재하여 실시간으로 구조물의 건전성을 확인하는 개념인 구조 건전성 모니터링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중의 하나인 충격 모니터링 시스템은 운용 중에 발생한 충격 이벤트를 감지하고 그 위치 및 손상 정도에 대한 정보를 제공해 주어야 한다. 이를 위한 첫 번째 단계로 본 연구에서는 복합재 평판 및 복잡한 복합재 시편 구조물에 FBG 센서를 부착하여 충격 위치 검출 시험을 수행하였고, 이와 같은 복합재 시편에 대해 충격 파손 시험을 수행하여 손상 발생 유무를 예측하는 시험을 수행하였다. 저속 충격에 의해 발생하는 음향 파는 (주)파이버프로에서 개발한 고속 FBG interrogator를 사용하여 4개의 다중화된 FBG 센서로부터 동시에 취득하였고, 신경회로망을 이용한 학습을 거쳐 충격 발생 위치를 검출하였다. 또한 충격 파손 시험으로부터 취득한 음향 파의 웨이블릿 변환을 통해 충격 손상의 발생 유무 예측 가능성을 확인하였다.

Key Words : 충격 모니터링(impact monitoring), 복합재 구조물(composite structures), FBG 센서(fiber Bragg grating sensor), 고속 FBG interrogator(high-speed FBG interrogator)

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

**+ 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

*** 삼성전자 반도체연구소 공정개발팀

**** 국방과학연구소 제7기술연구본부

***** (주)파이버프로

1. 서론

복합재료는 높은 비강성, 비강도 및 우수한 피로특성 등을 가지고 있어 구조물의 경량화에 유리하기 때문에 항공우주 구조물이나 지상의 운송수단 등에 적용이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 기계적, 열적, 물리적으로 이방성(anisotropy)을 가지고 있기 때문에 원하는 물성을 가지도록 구조물을 설계하기에는 좋으나[1], 설계에 따라 재료의 역학적 특성이 달라지고 파손 특성이 복잡해 진다는 단점도 가지고 있다. 또한 제조 공정에 따라 재료의 물성치의 편차가 발생할 수 있기 때문에 금속재료를 완전히 대체하기 위해서는 높은 신뢰성과 안전성의 확보가 필수적이다.

특히 복합재료는 횡방향 인장이나 층간 전단 강도가 매우 낮기 때문에 외부의 충격에 의해 층간 분리(delamination) 등의 손상이 발생할 가능성이 높다. 이 같은 저속충격 손상은 복합재 내부에 발생하거나 반대 면에 손상의 흔적을 남기기 때문에, 일정 시간 내에 발견하지 못하여 손상이 크게 진전될 경우 치명적인 사고를 유발할 수도 있다. 이를 방지하기 위해 유기체의 신경 및 감각기관의 역할을 하는 센서 시스템을 구조물에 적용하여 실시간으로 구조물의 건전성에 대한 정보를 확인하는 구조 건전성 감시 기법(structural health monitoring technique)이 꾸준히 연구되어 점차적으로 적용이 되고 있다. 이 가운데 충격 모니터링(impact monitoring)은 중요한 기술 중 하나로 자리잡고 있으며, 광섬유 센서 및 압전 센서 등을 이용하여 충격 신호를 계속하고 다양한 신호처리 기법을 통해 손상을 검출하는 연구 등이 수행되고 있다.

본 연구에서는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating; FBG) 센서 시스템을 이용하여 충격이 발생한 위치를 검출하고 실시간으로 손상 발생 유무를 예측하는 충격 모니터링 기법을 제안하고자 한다. FBG 센서는 하나의 광섬유 라인에 다수의 센서를 제작하여 동시에 다점을 측정할 수 있는 다중화(multiplexing)가 가능하나, 고주파 신호 측정의 경우 측정 방법을 구현하기에 복잡하고 구성 비용이 많이 들어 실제 적용에는 불리한 점이 많았다. 하지만 최근에 개발된 (파이버 프로 사의 고속 FBG interrogator는 분광기(spectrometer)를 사용하여, FBG 센서로부터 반사된 스펙트럼을 위상 격자(phase grating)를 통해 일련의 광 다이오드 배열에 파장 별로 분산시키고 이를 병렬적으로 읽어내는 방식을 통해 40 ~ 100 kHz의 취득 주파수로 1530 ~ 1560 nm 사이의 중심 파장을 가진 FBG 센서들의 신호를 동시에 4 지점 이상을 측정할 수 있게 되었다[2]. 이를 통해 본 연구에서는 기존의 연구들[3-5]에 비해 상대적으로 간단하고 저렴한 광섬유 기반 충격 위치 검출 시스템을 구성할 수 있게 되었고, 복합재 보강 패널 등과 같은 복잡한 구조물에 대한 시험을 통해 그 적용성을 검증하였다.

또한 충격 모니터링에서는 충격에 의한 파손 발생 유무를 판단하는 것이 중요하다. 파손 여부를 판단하기 위해서 파손 신

호의 주파수 영역 분석을 위한 푸리에 변환(Fourier transform)이나 시간에 따른 주파수 성분 변화 등을 확인할 수 있는 국소 푸리에 변환(short-time Fourier transform; STFT)과 웨이블릿 변환(wavelet transform; WT) 등을 이용한 연구들이 수행된 바 있다[6-8]. 본 연구에서는 100 kHz의 취득 주파수로 측정된 충격 신호를 다양한 신호처리 기법을 통해 분석하여 충격 파손 검출이 가능한지의 여부를 확인하였다. 우선 STFT를 통해 파손 신호에서 발생하는 주파수 대역을 확인하였고, WT를 거쳐 분해된 각 주파수 성분들의 성분비를 통해 파손 유무를 판단하는 방법을 제시하였다.

본 연구를 통해 개발된 충격 모니터링 시스템은 실시간으로 충격이 발생된 지점들을 사용자에게 전달하게 되고, 동시에 파손 유무를 판단하여 알려줌으로써 위험 상황에 대한 대비가 가능할 것으로 예상된다. 또한 구조물이 운용하지 않을 때 실시하는 비파괴검사를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 정보를 제공하기 때문에 복합재 구조물의 유지/보수 비용의 절감에 효과적일 것으로 기대된다.

2. 충격 위치 검출

2.1 충격 위치 검출 시험

충격 하중이 발생한 위치를 검출하는 것은 사전에 충격의 위치를 모르는 상태에서 센서에서 취득된 신호를 통해 역으로 추정하는 문제이기 때문에 복잡한 비선형 역 처리 문제 중 하나이다. 특히, 복합재 구조물은 모재와 섬유로 구성되어 비등방성을 가지기 때문에 단순한 음향파의 속도를 이용하는 방법은 큰 오차를 야기하거나[9], 센서 간의 간격을 작게 해서 오차를 줄여야 하기 때문에 시스템의 구성이 복잡해 진다 [10, 11]. 이 같은 한계를 극복하기 위해 역 처리 문제를 해결하는데 용이한 신경회로망을 이용한 연구 사례들이 있지만 복잡한 구조물의 넓은 범위에 대해 검출 오차를 줄이기 위해서는 대부분 주파수 대역이 높은 압전 센서를 통해 취득한 신호를 사용하고 있었다[4]. 그러나 압전 센서는 전자기장 환경에서 잡음에 취약하고 센서의 개수에 따라 신호 케이블의 체적이 증가할 뿐만 아니라 이에 따른 측정 장비의 규모나 비용이 커진다는 단점이 있기 때문에 향후 실 구조물에 적용하기에는 한계가 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 다중화된 4개의 FBG 센서를 통해 넓은 범위의 복합재 평판과 복잡한 보강 패널에 대한 충격 위치 검출을 수행하여 실 구조물에 대한 적용성을 높이고자 하였다.

Fig. 1은 충격 위치 검출에 사용한 복합재 평판 시편으로 평판의 네 변을 고정 지지(fully clamped)하였다. FBG 센서는 격자 길이(grating length)가 5 mm인 것을 사용하였고, 축 방향으로 가장 높은 민감성을 가지기 때문에 시편의 중앙을 향하는 방향으로 충격을 받는 면의 반대 면에 표면 부착하였다. Fig. 2는 실제 복합재 항공기 날개의 일부분으로 충격 위치 검출 영역에

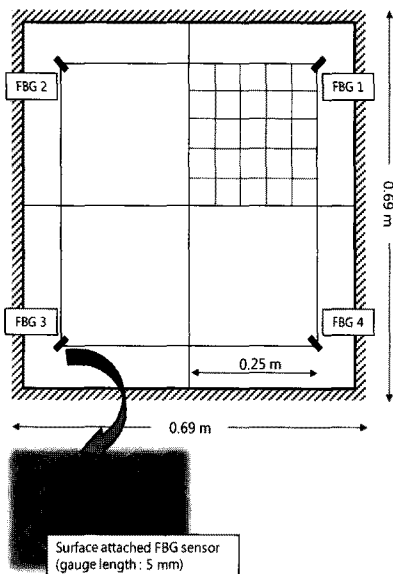


Fig. 1 Composite flat plate specimen.

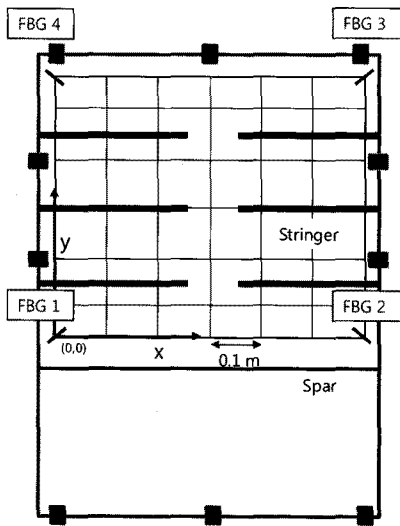


Fig. 2 Composite stiffened panel specimen.

6개의 스트링거(stringer)가 부착되어 있다. 두 시편은 모두 USN 175BX 프리프레그로 제작되었고, 평판은 두께 4.7 mm에 적층 순서는 [45/90/-45/02/-45/0/90/0/-45/0/45/90/-45/0]s이고, 보강 패널 스킨의 적층 순서는 [±45/0/45/90/-45]s 이다.

충격은 각 시편의 격자에 속하는 점에 가하였고, 충격 위치 검출이 목적이기 때문에 손상이 만들어지지 않도록 1.46 kg의 충격체로 1.0 J의 충격 에너지를 가하였다. 평판의 경우 시험

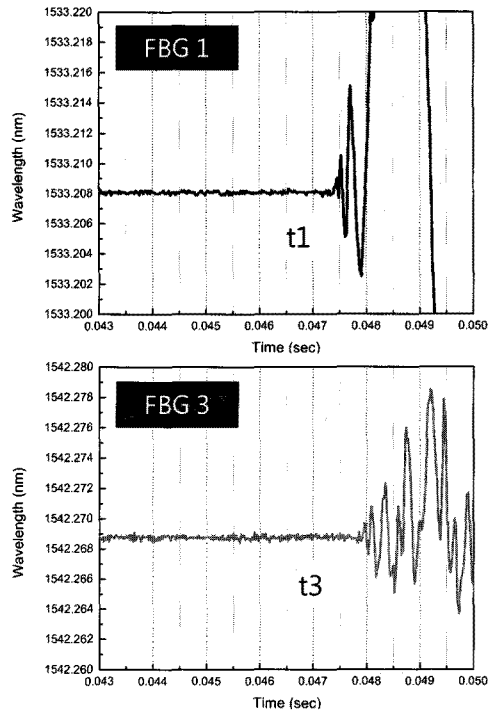


Fig. 3 Impact signals of FBG sensor 1 and 3 in the composite stiffened panel.

영역에서 1사분 면에서만 시험을 수행하였고, 보강 패널의 경우에는 전 영역에 대해서 시험을 수행하였다. 센서 신호는 40 kHz의 취득 주파수로 수집되었다.

2.2 신경회로망 학습

신경회로망은 인체의 신경계를 모방한 계산 구조로 서로 연결된 많은 계산 요소들로 구성되어 있으며, 비선형 모델링이나 패턴 인식, 복잡한 의사 결정 등에 사용되고 있다. 인체의 신경 세포인 뉴런(neuron)과 같이 신경망의 계산 구조는 정보를 교환하는 기능을 하게 되는데, 이러한 노드(node) 사이에는 가중치라고 하는 뉴런과 뉴런 사이의 연관 정도를 나타내는 연결 강도가 존재한다. 연결 강도 값은 입력과 출력의 데이터 쌍을 신경망 구조에 입력하고 원하는 출력 값을 갖도록 가중치를 조절하는 학습 과정을 거쳐 결정된다. 앞서 언급했던 것처럼 충격 위치 검출 문제는 비선형 역 처리 문제이기 때문에 이 같은 신경회로망을 이용한 충격 위치 검출 연구가 다양하게 수행되고 있는데, 본 연구에서는 센서에 도달하는 충격 선행 파의 도달 시간 차이와 이 때의 충격 위치 정보인 x 와 y 를 각각 신경망의 입력과 출력으로 하는 패턴들을 학습시켜 충격 위치를 검출하고자 하였다.

Fig. 3에 보강 패널의(0.2, 0.15) 지점에 충격을 가했을 때 FBG 센서 1과 3의 신호들을 나타내었다. 충격 지점과 FBG 1의

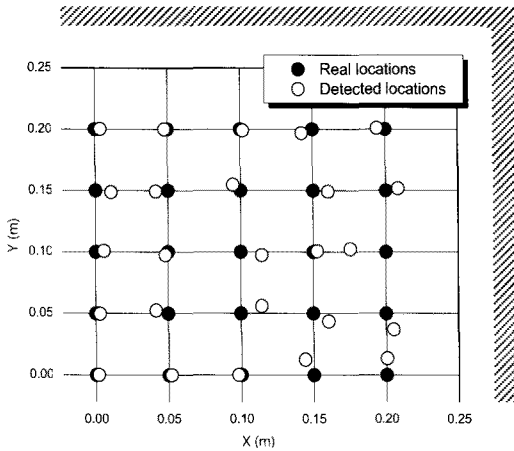


Fig. 4 Detected impact locations for the composite flat plate.

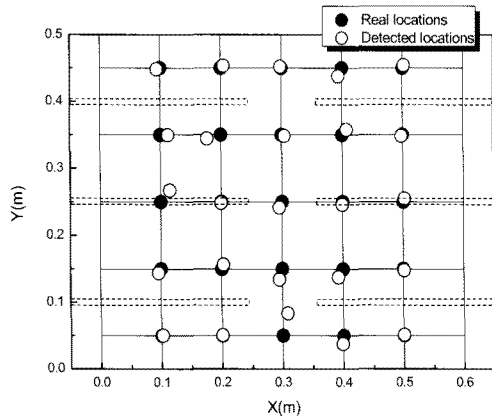


Fig. 5 Detected impact locations for the composite stiffened panel.

거리는 FBG 3보다 가깝기 때문에 신호의 크기가 크고 충격파가 더 빨리 도달하는 것을 확인할 수 있다. 충격파의 도달 시간은 원 충격 신호를 웨이블릿 변환하여 얻어진 D_2 성분을 이용하여 측정하였는데, 충격 전의 신호의 잡음 레벨보다 절대값이 1.5배가 되는 지점을 선행 파의 도달 시간으로 보았다. 충격파의 도달 시간 차이는 선행 파의 도달 시간이나 같은 모드를 가지는 충격 파의 도달 시간을 통해 측정해야 하므로, 웨이블릿 변환을 통해 같은 주파수 대역을 가지는 세부 성분 중 D_2 성분을 도달 시간 측정을 위해 사용하였다.

2.3 충격 위치 검출 결과

평판과 보강 패널에 대한 시험으로부터 얻은 데이터 세트를 신경망 이론에 적용하여 학습된 충격 위치 검출 결과를 각각 Fig. 4와 5에 정리하였다.

그 결과 평판의 경우 학습된 데이터 세트에 대해 최대 오차는 24.62 mm, 평균 오차는 8.20 mm이었고, 보강 패널에

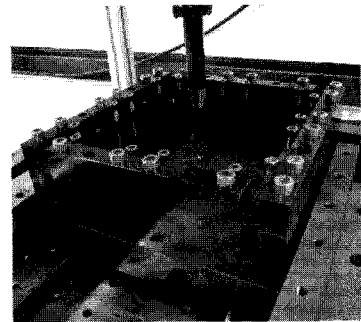
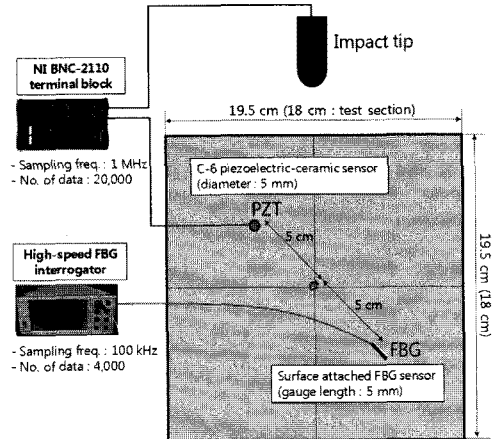


Fig. 6 Impact damage detection test set up.

대해서는 최대 오차가 48.72 mm, 평균 오차가 11.85 mm로 측정되었다. 측정된 오차는 각 시편의 격자 사이의 간격보다 작았기 때문에 각 충격 지점을 충분히 구별할 수 있었다. 비록 기존의 연구들에 비해 오차의 범위를 크게 개선한 결과는 아니지만, 4개의 다중화된 FBG 센서를 사용한 간단한 시스템으로 비교적 넓은 범위의 복잡한 구조물에 대해 충격 위치 검출을 수행하였다는 점에서 의미가 있다고 생각된다.

3. 충격 파손 여부 예측

3.1 충격 파손 시험

복합재 구조물에 충격이 발생할 경우 위치가 검출되어 기록된 후 운용을 마치고 정밀한 검사를 해야 할 때도 있지만, 특정 부위에서는 운용 중에 사용자에게 파손 여부를 알려주어야 할 필요성이 있다. 이러한 이유로 충격이 발생했을 때 근방의 센서로부터 취득된 신호의 분석을 통해 파손 발생 여부를 판단할 수 있는지 그 가능성을 확인해 보았다.

파손 시험 시편은 충격 위치 검출에 사용된 평판과 동일한 것을 사용하였고 취득 주파수는 100 kHz로 신호를 획득하였다. 센서의 부착 위치와 경계 조건은 Fig. 6과 같다. 충격

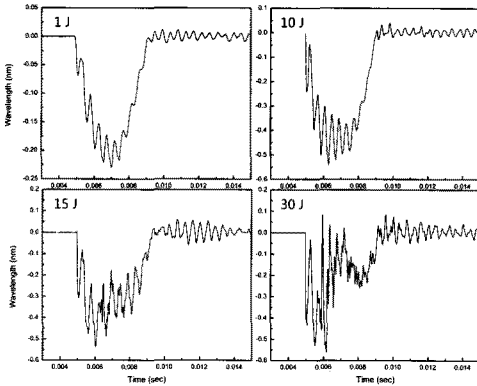


Fig. 7 FBG signals from impact damage detection tests.

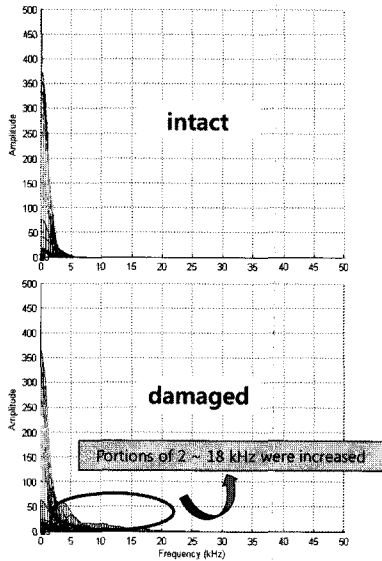


Fig. 8 STFT results of FBG signals from intact and damaged cases.

에너지는 1, 5, 10, 15, 20, 30 J로 점차 증가시켰고, 각 충격 에너지에 대해 2개씩의 시편을 사용하여 시험하였다.

시험이 끝난 시편들은 육안으로는 손상이 거의 검출되지 않기 때문에 C-scan을 통해 층간 분리 손상 여부를 확인하였다. 그 결과 10 J 이하에서는 손상이 검출되지 않았고, 15 J 이상의 충격을 가한 시편에서는 반경 27 ~ 35 mm의 층간 분리 손상이 검출되었다.

3.2 충격 파손 신호 분석

파손 시험을 통해 취득된 FBG 센서 신호를 비 파손 신호와 파손 신호로 분류하여 Fig. 7에 정리하였다. 비 파손 신호의 경우에는 파형이 거의 변하지 않고 충격 에너지에 따라 신호의 진폭이 점차적으로 커지는 것을 확인할 수 있었다.

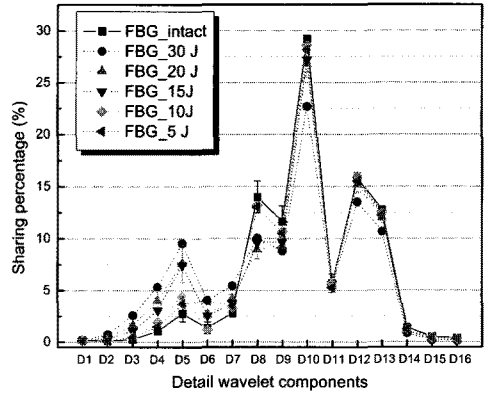


Fig. 9 Sharing portions of detailed wavelet components (D1 ~ D16).

하지만 파손이 발생하는 충격 에너지부터는 진폭은 더 이상 증가하지 않았지만 파손 신호로 의심되는 고주파 성분이 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 이를 정확하게 살펴보기 위해 신호를 국소 푸리에 변환(STFT)하여 파손 시점에서의 주파수 성분을 비교해 보았다. 그 결과 Fig. 8과 같이 파손 신호에서 비 파손 신호에서는 없는 2 ~ 18 kHz의 주파수 성분이 검출되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 충격 에너지의 크기와는 상관없이 파손의 유무에 따라 발생하는 주파수 성분임을 알 수 있었다.

STFT 결과로부터 주파수 대역이 높지 않은 FBG 센서의 신호를 통해서도 충격에 의한 파손 유무 검출의 가능성을 확인할 수 있었다. 이 같은 주파수 대역은 충격 에너지가 높아도 파손이 발생하지 않은 경우에는 검출되지 않았기 때문에 관련된 주파수 성분이 발생하는 것을 확인할 수 있다면, 구조물의 파손 발생 여부를 판단할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 STFT의 경우 신호 처리에 시간이 많이 걸리고 정량적인 판단을 하기가 어려우므로, 신호에서 주파수 성분을 추출할 수 있는 웨이블릿 변환(WT)을 이용한 주파수 성분비 분석을 수행하였다. 기존의 연구[12]에 사용된 FBG 센서 시스템은 1 MHz의 취득 주파수로 수집된 신호를 사용하였기 때문에 D₁ ~ D₄ 레벨의 주파수 성분을 가진 신호의 성분비를 통해 충분히 파손 여부를 판단할 수 있었다. 하지만 본 연구에서는 충분한 주파수 대역을 가진 신호를 취득할 수 없기 때문에 STFT 결과에서 나온 2 ~ 18 kHz의 주파수 성분을 가진 웨이블릿 분해 신호를 먼저 찾아야 한다. 이를 위해 D₁₆ 까지 웨이블릿 변환을 수행한 다음 각 성분의 수치적분을 통해 계산된 성분비를 충격 에너지 별로 정리하여 Fig. 9에 나타내었다.

분해된 웨이블릿 변환 신호들을 다시 주파수 분석을 해보면 D₅ 부터는 4 kHz 이하의 저주파 성분들을 가지고 있었고, D₂ ~ D₄가 파손과 관련된 2 ~ 18 kHz의 주파수 성분을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 취득된

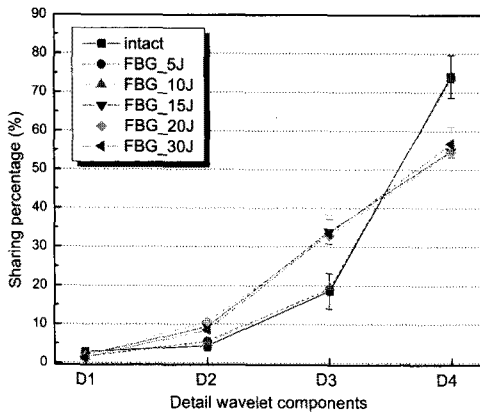


Fig. 10 Sharing portions of detailed wavelet components from the suggested method.

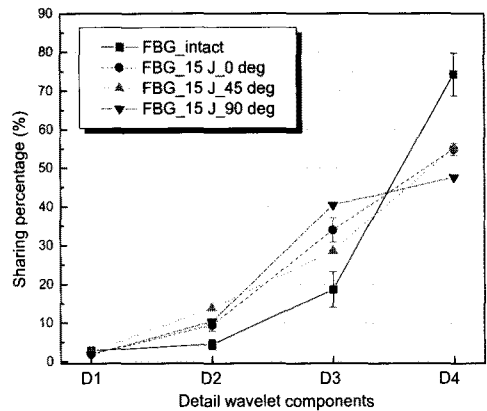


Fig. 12 Sharing portions of detailed wavelet components for different impact angles.

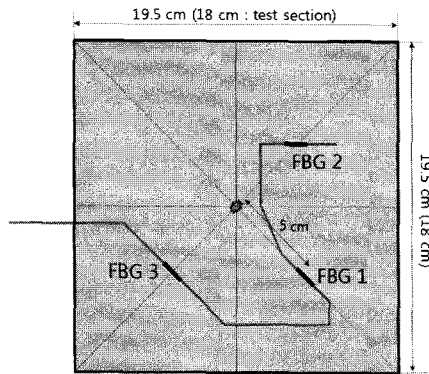


Fig. 11 Test set up for effects of impact angles.

센서 신호는 D₅ 이상의 저주파 성분들이 대부분을 차지하기 때문에 성분비를 함께 계산하게 되면 저주파 성분에 비해 미비한 파손 관련 주파수 성분을 구분하기가 쉽지 않게 된다. 따라서 저주파 성분을 제외한 D₁ ~ D₄의 성분비를 비교하는 것이 효과적이라는 결론을 내릴 수 있었다. 이 같은 생각을 바탕으로 D₁ ~ D₄의 성분비를 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10을 보면 충격 에너지와 관계없이 파손 발생 유무에 따라 D₁ ~ D₄의 성분비의 변화가 거의 일정한 것을 알 수 있다. STFT의 결과에 부합하듯이 파손과 관련된 성분인 D₂ ~ D₃의 성분비가 파손 전에 비해 20% 가량 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 비록 초기 단계이지만 본 연구에서 사용한 고속 FBG 센서 시스템으로부터 취득한 신호의 정량적인 분석을 통해 충격 파손 여부를 판단하는 것이 가능함을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

충격 파손 여부를 검출하는 알고리즘은 현재 예비 단계로 수행된 것으로 사용된 상용 FBG interrogator에 따라 100 kHz의

제한된 계측 성능을 가지고 있기 때문에 파손 주파수의 범위가 50 kHz 이내인 경우에 한해 검출이 가능하다는 한계점이 있다. 하지만 복합재에서의 파손은 단일 종류의 파손 만이 발생하는 것이 아니라 통상적으로 혼합되어 발생하기 때문에 복합재의 종류가 다르다 할지라도 파손의 유무를 검출하는 것은 가능성이 있으리라 판단된다. 다만, 센서와 파손 지점과의 거리 및 각도에 따른 알고리즘의 시험을 통해 본 시스템으로 가능한 적용 범위 및 한계점을 확인할 필요성이 있을 것으로 보인다.

3.3 센서의 각도에 따른 영향 분석

FBG 센서는 각도에 따라 민감도의 영향을 받기 때문에 실 구조물에 적용하기 위해서는 각도에 따른 영향을 분석해야 한다. 이를 위해 Fig. 11과 같이 0°, 45°, 90° 방향으로 FBG 센서를 부착하고 파손이 발생하도록 15 J의 충격을 가한 후 취득한 신호를 앞선 방법과 동일하게 신호 처리해 보았다. 그 결과 Fig. 12와 같이 비록 둔감한 각도로 부착이 되더라도 파손 여부를 판단할 수 있을 정도의 성분비 변화가 발생함을 확인할 수 있었다.

비록 위의 결과는 향후 거리에 따른 영향과 함께 분석되어야 할 필요성이 있지만, 다중화된 3개의 FBG 센서로부터 동시에 파손 신호를 측정하였다는 점에서 본 연구에서 제안한 충격 모니터링 기법의 실 적용 가능성을 더 높여주는 결과라고 판단이 된다.

3.4 센서의 취득 주파수에 따른 차이 분석

앞선 충격 위치 검출에서는 40 kHz의 취득 주파수로 취득된 신호를 이용하였고, 충격 파손 유무 검출에서는 100 kHz로 계측된 신호를 이용하였기 때문에 향후 위치 및 파손 동시 검출을 위해서는 취득 주파수에 따른 신호의 차이를 분석할 필요성이 있다. 이를 위해 보강 패널의 (0.5, 0.25) 지점에 대해 40 kHz와 100 kHz로 센서 데이터를 계속하여 Fig. 13에 나타내었다.

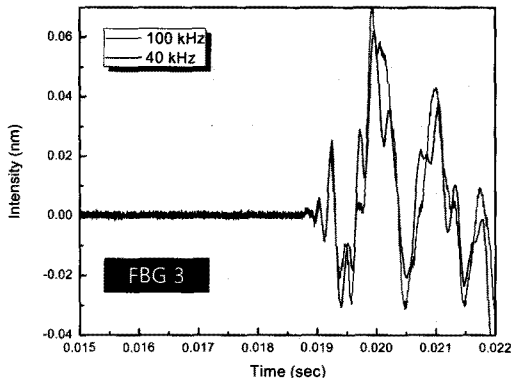


Fig. 13 FBG signals at different sampling frequencies.

Fig. 13을 통해 취득 주파수가 다른 경우에도 신호의 파형은 동일한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 앞선 충격 위치 검출 알고리즘이 100 kHz에서도 적용 가능할 것으로 판단되며, 동일한 취득 주파수로 계속된 센서 데이터를 위치 검출과 충격 파손 유무 검출에 동시에 활용할 수 있기 때문에 효율적인 시스템의 구성이 가능하리라 판단된다. 실제 시스템에서는 충격 파손 유무 검출을 위해 100 kHz의 취득 주파수를 갖도록 시스템을 구성해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 복합재 구조물의 안전한 운용과 효율적인 유지/보수에 필수적인 충격 모니터링 기법의 실 적용 가능성을 높이기 위해 상용화된 고속 FBG 센서 시스템을 이용한 충격 위치 검출 및 파손 유무 판단 기법의 개발을 수행하였다. 기존에는 고주파 신호 취득에서는 다중화가 불리하였던 FBG 센서의 단점을 극복한 ㈜ 파이버프로의 시스템을 이용하여 스트링거가 포함된 복잡한 구조물에서의 충격 위치 검출에 성공하였고, 비교적 낮은 주파수 대역을 가진 신호로부터 파손 여부를 판단할 수 있는 신호 처리 기법을 제안하였다. 이는 실험실 단위에서는 수행이 가능하나 시스템 구성이 복잡했던 기존의 연구들에 비해서 매우 간단한 시스템 구성으로 수행 가능하기 때문에 향후 실 구조물로의 적용성이 높은 충격 모니터링 기법이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 국과연 응용연구(UC080019JD)에 의해 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) R. F. Gibson., Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, International Editions, 1994, pp. 6-13.
- 2) B. W. Lee, M. S. Seo, H. G. Oh and C. Y. Park, "High-speed wavelength interrogator of fiber Bragg gratings for capturing impulsive strain waveforms," *Advanced Materials Research*, Vol. 123-125, 2010, pp. 867-870.
- 3) P. M. Schindler, R. G. May and R. O. Claus, "Location of impacts on composite panels by embedded fiber optic sensor and neural network processing," *Proc. of the SPIE*, Vol. 2444, 1995, pp. 481-489.
- 4) J. R. LeClerc, K. Worden and W. J. Staszewski, "Impact detection in an aircraft composite panel - A neural-network approach", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, No. 3, 2007, pp. 672-682.
- 5) H. Sekine and S. Atobe, "Identification of locations and force histories of multiple point impacts on composite isogrid-stiffened panels", *Composite Structures*, Vol. 89, No. 1, 2009, pp. 1-7.
- 6) K. A. Murphy, C. A. Schmid, T. A. Tran, G. Carman, A. Wang and R. O. Claus, "Delamination detection in composite using optical fiber technique," *SPIE : Smart Sensing, Processing and Instrumentation*, Vol. 2191, 1994, pp. 227-231.
- 7) D. U. Sung, C. G. Kim and C. S. Hong, "Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform," *Composites : Part B*, Vol. 33, 2002, pp. 35-43.
- 8) 방형준, 강현규, 홍창선, 김천곤, "복합적층판의 변형파손 동시감지를 위한 광섬유 센서 시스템에 관한 연구," 한국 복합재료학회지, 제16권, 제3호, 2003, pp. 58-67.
- 9) W. B. Spillman and P. L. Fuhr, "Impact detection and location system for smart skins applications," *Proc. of the SPIE*, Vol. 2370, 1990, pp. 308-315.
- 10) R. Seydel and F. K. Chang, "Impact identification of stiffened composite panels: 1. System development," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, 2001, pp. 354-369.
- 11) R. Seydel and F. K. Chang, "Impact identification of stiffened composite panels: 2. Implementation studies," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, 2001, pp. 370-379.
- 12) H. J. Bang and C. G. Kim, "Study on the wavelet decomposed details of impact induced AE signals in composite laminates using fiber Bragg grating sensors," *Proc. of the SPIE*, Vol. 7647, 2010, 76473E.