

## 압전세라믹 센서와 광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의 건전성 모니터링

### Health Monitoring in Composite Structures using Piezoceramic and Fiber Optic Sensors

김천곤\*<sup>†</sup>, 성대운\*\*, 김대현\*, 방형준\*\*\*

C. G. Kim\*<sup>†</sup>, D. U. Sung\*\*, D. H. Kim\* and H. J. Bang\*

초 록 구조건전성 모니터링은 복합재 구조물이 운용되는 단계에서 뿐만 아니라 설계 및 제작단계에서도 중요한 관심사가 되고 있다. 과도한 하중이나 저속충격은 모재균열이나 층간분리와 같은 복합재 파손의 원인이 될 수 있으며 이러한 손상은 구조물의 하중지지성능을 저하시키게 된다. 지능형 복합재 구조물에서의 구조건전성 모니터링 기술의 개발은 항공기와 같은 복합재 구조물의 안전성 향상에 도움이 될 수 있다. 본 연구에서는 압전세라믹 센서 및 광섬유 센서를 복합재 구조물의 건전성 모니터링에 적용하였으며 파손신호의 특징파악 및 충격위치 검출을 위한 신호처리 방법을 제안하였다.

주요용어: 스마트 구조, 복합재료, 압전세라믹 센서, 광섬유 센서

**Abstract** Health monitoring is a major concern not only in the design and manufacturing but also in service stages for composite laminated structures. Excessive loads or low velocity impact can cause matrix cracks and delaminations that may severely degrade the load carrying capability of the composite laminated structures. To develop the health monitoring techniques providing on-line diagnostics of smart composite structures can be helpful in keeping the composite structures sound during their service. In this study, we discuss the signal processing techniques and some applications for health monitoring of composite structures using piezoceramic sensors and fiber optic sensors.

**Keywords:** smart structures, composite materials, piezoceramic sensors, fiber optic sensors

#### 1. 서 론

구조물이 작동하는 상태에서의 하중변화 및 충격에 의한 복합재 구조의 거동은 구조건전성 모니터링 연구 분야의 오랜 관심대상이 되어오고 있다. 구조건전성 모니터링에 관한 연구는 건전성 모니터링과 파손 모니터링 분야로 나뉘어 연구되고 있

는데, 건전성 모니터링은 복합재 구조가 운용되는 상태에서의 변형률 및 온도 모니터링을 포함한다. 파손 모니터링 분야 중 복합재료의 충격손상에 대한 정확한 특성을 파악하기란 매우 어려우며, 이는 복합재료 내에서 손상의 발생과 진전은 여러 가지 형태의 파손모드가 합쳐진 복잡한 양상으로 나타나기 때문이다. 최근에는 많은 연구들이 충격손상

(접수일: 2003. 8. 21, 심사완료일: 2003. 9. 1) \* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, \*\* 현대자동차연구소, † Corresponding author: Dept. of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701 (E-mail: cgkim@kaist.ac.kr)

의 예측과 복합재료의 잔여강도를 예측하는데 중점을 두고 있다. 기존에는 X선 및 초음파 탐상법 등의 비파괴검사 방법이 사용되었으나, 최근에는 센서기술의 발달로 구조물이 작동하는 중에 건전성을 모니터링하는 새로운 개념의 손상탐지 방법이 개발되고 있다[1,2].

Chang 등은 운용중인 복합재 구조물에서의 충격 손상을 감지하기 위해 압전센서(piezoceramic sensor) 및 압전작동기(piezoceramic actuator)를 이용한 능동 손상 검출(active sensing diagnosis: ASD) 방법을 제안하였다[3]. 이전의 연구문헌들을 보면 수동 손상 검출(passive sensing diagnosis: PSD) 시스템에서 푸리에변환(Fourier transform)를 이용하여 신호의 중요한 특성을 파악하는 연구들이 행해진 바 있다[4,5]. 이러한 PSD 시스템은 작동기를 포함한 ASD 시스템에 비해 간단하고 무게가 가볍다는 장점이 있으며, 최근에는 파손신호 분석에 유리한 시간-주파수 분석방법을 이용한 PSD 방법에 대한 연구가 주목받고 있다. 웨이블릿 변환(wavelet transform)은 웨이블릿-기저함수를(wavelet basis function) 이용하여 센서신호를 분해하며 이를 통해 국부적인 신호의 시간-주파수 특성을 파악하게 되는데, 파손신호와 같이 급격하게 변화하는 과도특성을 가진 신호를 분석하는데 있어 기존의 신호처리 방법에 비해 훨씬 유연하고 해상도가 높다는 장점을 가지고 있다.

본 연구의 목표는 저속충격에 의해 발생한 복합적층판에서의 손상신호 특징을 해석하고, 압전세라믹 센서 및 광섬유 센서를 이용하여 운용 중 복합재 구조물의 건전성을 실시간으로 모니터링할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 또한 본 연구에서는 웨이블릿 변환을 이용한 PSD 방법을 이용하여 저속충격시 복합적층판의 파손으로부터 발생한 음향 방출 신호를 모니터링하는 방법을 제시하였다.

## 2. 충격손상 모니터링

### 2.1. 복합재 구조의 손상진단

충격모니터링은 충격하중에 취약한 복합재 구조물의 안전을 진단하기 위한 방법으로, 충격 발생 여부를 확인하고 충격에 의해 발생한 손상을 진단하는 두 가지 역할을 한다. 다르게 표현하자면 충격 모니터링은 건전성 모니터링과 손상 진단 기술을

포함한다.

본 연구에서는 음향과 신호의 주파수 특성을 검출하는 PSD 방법을 제안하였다. 기존의 연구에서는 count, hit rates, energy, power spectrum과 같은 변수들을 이용해서 음향과 신호의 특성을 구분하였지만 이러한 방법들은 복합적층판에서의 손상모드를 구분하는데 적합하지 못했다.

실 구조물의 건전성 모니터링을 위해 음향과 센서 시스템을 적용하기에는 매우 많은 비용이 들지만, 본 논문에서는 PZT센서를 이용하여 이전 연구 내용에서 제시한 주파수 영역에 대한 신호를 취득하였으며, 사용된 센서는 충격 및 복합재료의 파손으로부터 발생한 음향과 신호를 정확히 취득할 수 있었다. 근본적인 접근방법으로써, 복합재료에서의 모재균열과 자유단에서의 층간분리시 발생하는 음향과 신호의 시간에 따른 주파수 특성을 관찰하기 위해  $[\pm 45/0_2/90_2]_s$ 의 적층순서를 가진 Gr/Ep시편에 대한 인장실험을 실시하였다. 실험결과 시간-주파수 분석을 통해서 모재균열과 층간분리신호 간에 서로 다른 과도특성을 확인할 수 있었다. 또한 웨이블릿 변환을 통해 특정 분해레벨(decomposition level)에서의 과도신호를 이용해 복합재 손상모드들의 특징을 관찰할 수 있었다.

### 2.2. 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환은 기존의 주파수 분석 방법이 가지고 있는 여러 한계를 극복하였는데, 특히 상대적으로 해상도가 높고, 기존의 신호처리 방법에서 놓치기 쉬운 신호의 경향성 파악이나, 미분 불가능한 불연속적인 신호 및 급격한 변화를 보이는 신호의 처리에 유리하다는 장점이 있다. 또한 이산화된 형태의 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform : DWT)을 이용한 경우에는 레벨에 따라 분해된 각 고주파 영역 성분을 비교함으로써 신호특성에 대한 정량적 비교가 가능하다. Fig. 1에서처럼 웨이블릿 변환은 원형의 웨이블릿 기본 함수를 늘이거나 줄여서 수평 이동된 형태의 웨이블릿 함수 군을 이용하여 분석하는 것이다. 웨이블릿 기본 함수는 크기 및 수평이동을 나타내는 변수  $a$ ,  $b$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

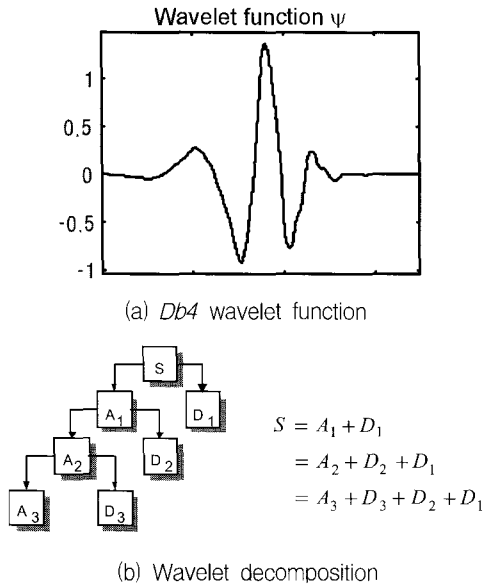


Fig. 1 (a) db4 wavelet function and (b) wavelet decomposition tree

실제 계산을 위해서는 이산화된 형태의 웨이블릿 변환인 DWT를 사용하게 되는데 DWT에서도 스케일 파라미터 a와 수평이동 파라미터 b는 분리되어야 한다.

Wavelet 해석에서 신호는 높은 스케일의 저수파수 성분을 나타내는 근사 성분(approximations)과 낮은 스케일의 고주파수 성분을 나타내는 세부 성분(details)으로 표현된다. 다른 이진 스케일(dyadic scales)을 선택함으로써 신호는 여러 낮은 해상도의 성분으로 분해 될 수 있으며, 이를 wavelet 분해 구조(wavelet decomposition tree)라고 부른다. Fig. 1에서는 원래 신호 S를 3단계로 분해한 것을 보여 준다. 신호 S는 낮은 스케일의 세부성분  $D_1$ 과 그 보다 큰 스케일의 세부성분  $D_2$ ,  $D_3$ 와 높은 스케일의 근사 성분  $A_3$ 로 분해 된다. 웨이블릿 변환에서는 그림의 웨이블릿 분해구조와 같이 여러 가지 다른 스케일의 웨이블릿을 이용하여 입력신호를 보다 낮은 해상도의 여러 요소들로 분해할 수가 있다.

### 3. 압전세라믹 센서를 이용한 손상 모니터링

#### 3.1. 모재균열 및 자유단 층간분리 검출을 위한 인장시험

복합재료의 모재균열 및 층간분리에 의해 발생하는 음향파 신호의 특징을 관찰하기 위해 변형률

게이지와 PZT센서가 부착된 복합적층 시편의 인장 시험을 실시하였다. 일반적인 음향파검출 장비는 2 MHz 이상의 신호까지도 감지할 수 있다. 하지만 복합재료의 파손신호로 발생하는 음향파 신호는 500 kHz 이하의 주파수 범위를 가지고 있으며 층간분리의 경우 250 kHz 이하의 영역에서 발생한다. 따라서 본 연구에서는 모재균열 및 층간분리 신호가 존재하는 20 ~ 250 kHz 영역의 신호를 취득하기 위해 상대적으로 가격이 저렴한 PZT센서를 이용하였다. PZT는 Fuji Ceramics 사의 원판형 타입으로 2 mm 두께와 5 mm의 직경을 가진 제품을 사용하였다.

시편은 (주)한국화이바의 CU125-NS Gr/Ep 프리프레그(prepreg)를 이용하여  $[\pm 45/0_2/90_2]_s$ 의 적층각으로 성형하였다. 프리프레그의 물성치는 다음과 같다.  $E_1=130.0$  GPa,  $E_2=E_3=10.0$  GPa,  $G_{12}=G_{13}=4.85$  GPa,  $G_{23}=3.62$  GPa,  $\nu_{12}=\nu_{13}=0.31$ ,  $\nu_{23}=0.52$ . 시편의 자유경계단에서의 흠을 없애고 자유경계단에서의 파손 발생과 진전 양상을 고찰하기 위해 자유경계단 옆면을 220, 400, 800 그리고 1200 번 사포와 알루미넘 분말을 사용하여 순서대로 연마하였다. 인장시험은 만능시험기(INSTRON 4482)를 사용하여 0.5 mm/min의 변위 제어로 수행하였다.

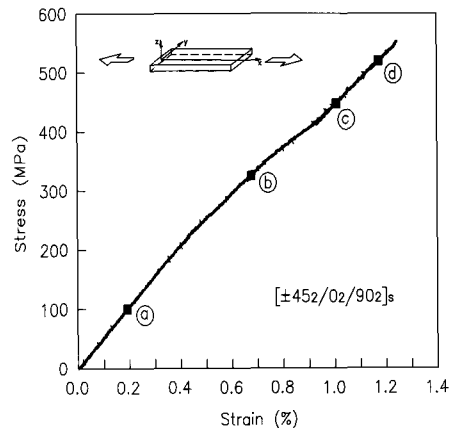


Fig. 2 Stress strain curve in tension test

Fig. 2는 인장시험에서의 응력-변형을 선도이며, Fig. 3(a)은 인장시편에서의 모재균열을 보여주고 있다. Fig. 3(b)는 최종 파손 직전 시편의 측면사진으로 중립면에서 층간분리의 영향으로 자유경계단에서 발생한 면의 방향 변위에 의해 시편의 옆면이 크게 벌어지는 것을 관찰할 수 있다.

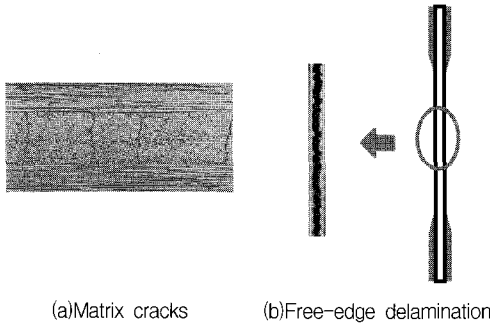


Fig. 3 Side view of specimen before ultimate failure and matrix cracks in  $[45_2/0_2/90_2]_s$  laminate

3.2. 저속충격 시험

복합적층판의 파손에 의해 발생하는 음향파 신호의 특성을 파악하기 위해 복합적층판의 충격손상에 의한 음향파 검출시험을 실시하였다. 본 연구에서는 급격한 과도특성을 갖는 복잡한 형태의 파손신호를 분석하기 위해 웨이블릿 변환에 의한 시간-주파수 분석방법을 사용하였으며, 손상모드와 손상진전의 메커니즘과 같은 저속충격 현상에 대해 연구한 기존의 연구결과를 참조하여 시험을 수행하였다[6]. 시험기는 자유 낙하식 저속 충격 시험기를 이용하였으며, 사용된 시편은 (주)한국화이바의 CU125-NS Gr/Ep 프리프레그로 140 mm × 140 mm 크기의  $[0_2/90_4]_s$  적층 각을 갖는 직교 적층 판을 제작하였다. 사각 평판의 네 변에 대한 경계 조건은 고정지대로 하였으며, Fig. 4에서처럼 시편의 끝단에서 30 mm 떨어진 위치에 한 개의 PZT를 부착하였다.

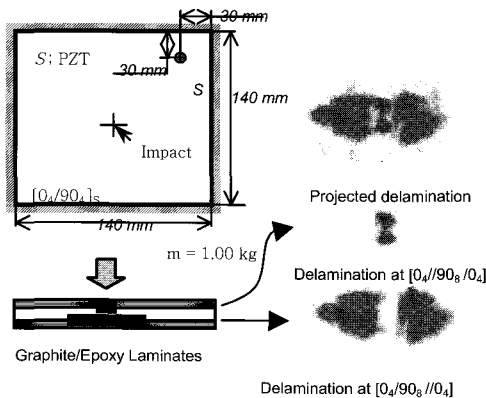


Fig. 4 Test specimen and the delaminations in 3.7 J impacted plate by C-Scan

본 실험에서는 복합재 손상에 해당하는 주파수 대역의 해상도를 높이기 위하여, 샘플링 주파수를 500 kHz로 하였다. 취득된 신호는 20 ~ 250 kHz 구간에서 anti-aliasing필터에 의해서 선처리되었다. 앞서 행해진 연구 결과를 기초로 하여 파손발생 여부와 최종파손을 구분하기 위해 0.1 J, 3.7 J, 6.0 J의 세 가지 종류의 에너지로 저속 충격을 가했으며 충격 후 발생한 층간분리 손상은 초음파 검사기를 이용하여 검출하였다. 첫 번째 0.1 J 에너지의 하중조건에서는 C-Scan 결과 아무런 손상이 발생하지 않았으며, 두 번째 하중에서는 모재균열과 층간분리 손상이 발생하였다. 세 번째 하중에서는 최종 파손 형태로 층간분리 뿐만 아니라, 충격을 받은 뒷면에 섬유 파단 현상이 일어났다. 3.7 J의 충격을 가하였을 경우, Fig. 4에서처럼 망콩 모양의 35 mm × 20 mm 정도의 층간분리가 발생하였음을 C-Scan으로 확인할 수 있었다. 6.0 J로 충격을 가한 경우에는 시편에서 섬유 파손 및 모재균열을 확인할 수 있는 최종 파손 형태를 관찰할 수 있었다.

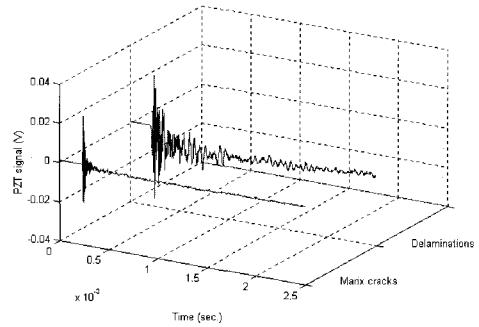


Fig. 5 PZT signals at the event of matrix cracks and free-edge delamination

3.3. 모재균열 및 자유단 층간분리 신호의 특징

Fig. 5는 모재균열 및 자유단에서의 층간분리에 의한 음향 방출 신호를 보여주고 있다. 취득된 신호 파손신호의 특징을 서로 비교하기 위해 보편적인 주파수 해석방법과 웨이블릿 변환을 이용한 시간-주파수 분석 방법을 이용하였다. 인장 시험 동안 여러 번에 걸쳐 모재균열이 발생하게 되는데 PZT센서로 취득된 모재균열 신호는 대부분 비슷한 경향을 보여준다. Fig. 6(a)은 취득된 모재균열 신호의 주파수 스펙트럼을 보여주고 있다. 자유단에서의 층간분리는 Fig. 2에서 명시된 (b)~(c) 사이의 응력단계에서

시편의 바깥 면이 변형되는 시점에서 발생하였다. 층간분리신호에 대한 스펙트럼은 Fig. 6의 (b)에 나타내었는데, 기존의 푸리에변환을 통한 주파수 분석으로는 파손모드를 명확하게 구분하기가 어려웠으며 파손모드에 따라 차이가 나는 대략적인 주파수 범위만을 구분할 수 있었다. 모재균열로 인한 음향파 신호의 지배적인 영역은 350 kHz 이상에 해당하는 주파수이며, 층간분리신호의 경우 250 kHz 이하의 주파수 영역에서 주된 신호특성을 갖는다.

Fig. 7은 모재균열과 층간분리신호를 4차 다우베치 웨이블릿 해석 함수( $Db4$ )를 이용하여 3단계에 걸쳐 분해한 것을 보여준다.  $Db4$ 는 4차 웨이블릿 함수로써 구조 파손 시 방출되는 음향파 신호와 유사한 형태로 급격히 변화하는 낮은 규칙성의 함수

로써 Fig. 1에서 그 형태를 명시하였다. 웨이블릿 변환은 시간 및 주파수에 대해 국부적으로 신호를 분해할 수 있다는 장점이 있으며 이 경우 일정한 밴드폭(bandwidth)을 가진 필터의 역할을 하게 된다. 단계별 고주파수 성분인 세부 성분을  $D_1^{IM} \sim D_3^{IM}$ 에 나타내었으며, 위첨자는 샘플링 주파수를 의미한다.

Fig. 7의 실험결과를 보면, 모재균열 손상은 주로 300 ~ 400 kHz 대역의  $D_1^{IM}$ 에서 지배적으로 발생하며, 층간분리 손상의 경우는 각각 140 ~ 240 kHz 대역과 80 ~ 100 kHz 대역의  $D_2^{IM}$ 과  $D_3^{IM}$  영역에서 주로 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 고주파 세부성분들은 음향 방출 신호의 특성적인 주파수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 웨이블릿 변

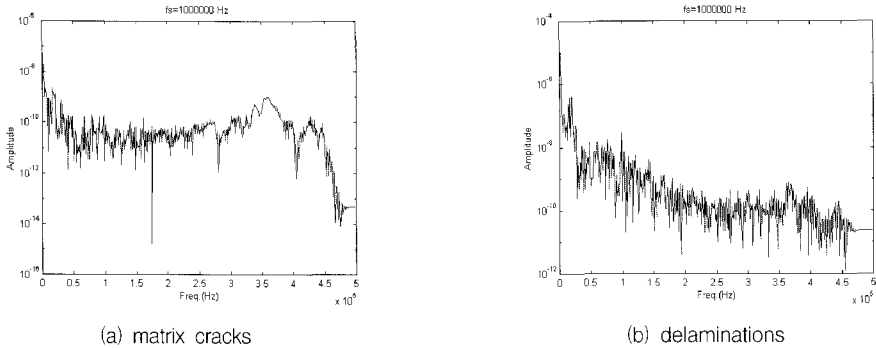


Fig. 6 Frequency spectrums of PZT signals: (a) matrix cracks and (b) delaminations

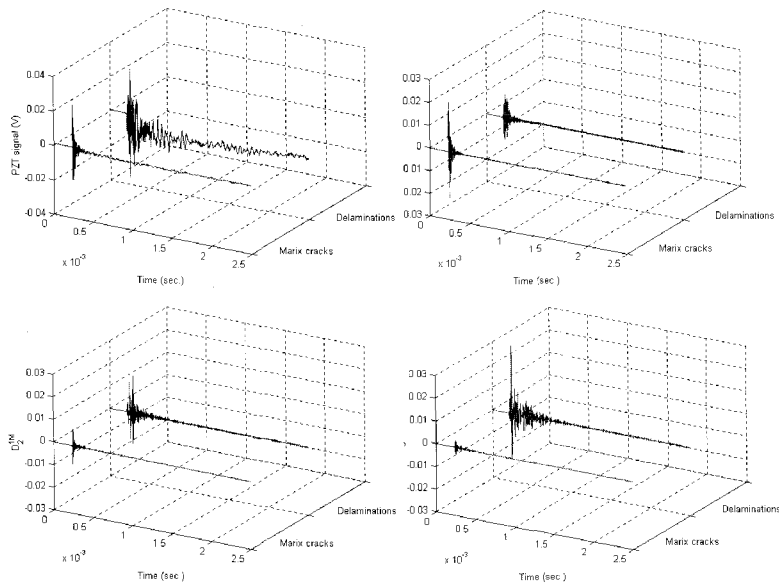


Fig. 7 Details  $D_1^{IM} \sim D_3^{IM}$  of PZT signals of matrix cracks and delaminations by DWT

환에서는 푸리에변환과 같이 정현파 함수를 이용하여 신호를 분해하는 방법으로는 분석할 수 없었던 신호별 특징을 입력신호에 따른 웨이블릿함수의 선택함으로써 특징적인 세부성분으로 신호를 나누어 분석할 수 있는 방법을 제공하였다. 웨이블릿에 의한 세부성분들을 분석해보면 모재균열에 의한 음향파신호는 세부영역  $D_1^{IM}$ 이 가장 지배적인 것을 알 수 있으며, 다음으로  $D_2^{IM}$ ,  $D_3^{IM}$  순으로 큰 진폭을 가지고 있는 특성을 볼 수 있다. 층간분리에 의한 음향파신호에서는  $D_3^{IM}$ 와  $D_2^{IM}$  성분이 지배적이며,  $D_1^{IM}$  성분도 가지고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 충격손상에 해당하는 주파수 대역의 해상도를 더 높이기 위하여, 샘플링 주파수를 500 kHz로 변경하면 250 kHz 이하의 주파영역에 해당하는  $D_1^{0.5M}$ ,  $D_2^{0.5M}$ 과  $D_3^{0.5M}$ 의 세부성분들은 층간분리를 표현하는 음향파신호를 표현하게 된다.

3.4. 충격손상 진단

충격에 의한 복합재 손상신호의 주파수 스펙트럼을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 단지 주파수영역 분석만을 통해서서는 파손모드를 구분하기가 쉽지 않다.

Fig. 8(a)은 0.1 J의 에너지로 충격을 가했을 경우에는 파손에 의한 음향파신호가 발생하지 않는다는 것을 보여주고 있으며, Fig. 8(b)은 3.7 J의 충격 에너지에서는 250 kHz 이하의 주파수에서 음향파에 의한 주파수 응답이 발생함을 보여주고 있다. 특징적인 주파수는 40 kHz 와 130 ~ 200 kHz 대역이었다. 6.0 J의 충격이 가해진 경우, Fig. 8(c)에서는 최종파손에 의한 높은 신호진폭을 보여주고 있다. 이 경우 충격 지속 시간이 짧기 때문에 신호의 지속시간이 3.7 J의 경우보다 짧다. 지배적인 주파수범위는

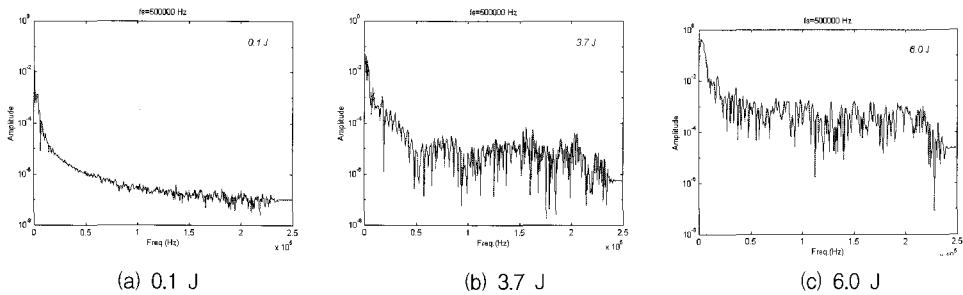


Fig. 8 Frequency spectrums of PZT signals of 0.1 J, 3.7 J and 6.0 J impacts

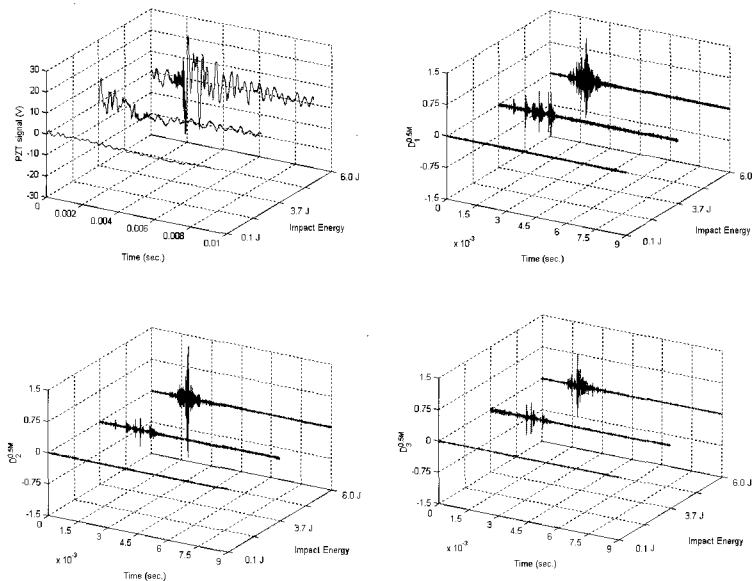


Fig. 9 Details  $D_1^{0.5M} \sim D_3^{0.5M}$  of PZT signals of 0.1 J, 3.7 J and 6.0 J impacts by DWT

40 kHz, 80 ~ 100 kHz, 그리고 150 ~ 200 kHz 대역에서 나타났다. 하지만, 충격신호로부터 손상 모드와 파손정도를 명확히 구분하기는 어려웠다. 주파수 스펙트럼의 분석결과는 단지 음향파신호의 특성 주파수가 넓은 주파수 대역을 갖고 있으며 각 손상 모드에 따라 각기 다른 주파수 영역을 가진다는 사실정도만을 보여주고 있다.

Fig. 9는 0.1 J, 3.7 J, 6.0 J 세 가지 종류의 충격 에너지에 따른 복합적층판의 충격신호를 Db4 웨이블릿을 사용하여, 3 단계의 세부성분으로 분해한 결과를 나타낸다. 이전의 실험 결과를 이용하여 샘플링 주파수는 500 kHz로 하였다. 250 kHz이하의 주파수범위에 있는 세부성분  $D_1^{0.5M}$ ,  $D_2^{0.5M}$ 과  $D_3^{0.5M}$ 는 중간분리를 표현하는 음향파신호를 나타낸다. 0.1 J의 충격이 가해진 경우 낮은 진폭의 신호만이 감지될 뿐 고주파의 음향파 신호는 방출되지 않았음을 알 수 있다. 3.7 J의 충격이 가해진 경우에는 웨이블릿 변환된 세부성분으로부터 중간분리를 감지할 수 있었다. 샘플링 주파수를 500 kHz로 한 경우, 웨이블릿 변환된 영역별 세부성분  $D_1^{0.5M}$ ,  $D_2^{0.5M}$ 과  $D_3^{0.5M}$ 는 각각 대략 150 kHz ~ 200 kHz, 70 kHz ~ 120 kHz, 40 kHz ~ 50 kHz 대역의 신호로 분해 되며, 이러한 세부성분들은 음향파신호의 특징적인 주파수성분들을 표현하게 된다. 6.0 J의 충격이 가해진 경우에는  $D_1^{0.5M}$  ~  $D_3^{0.5M}$ 의 세부성분 영역에서 높은 진폭의 중간분리신호와 섬유파단을 동반한 최종파손 모드가 발생하였다. 이러한 최종파손 모드의 신호는 중간분리가 지배적인 신호의 진폭보다 대략 3배정도 높은 진폭을 보여주었으나, 음향파 신호의 지속시간은 더 짧았다. 이러한 실험 결과를 통해 특정 세부성분의 음향파신호 진폭을 측정하여 구조의 파손 정도와 상태를 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 적층 순서에 따른 모재균열 신호의 특징 변화

복합적층 구조물의 초기 파손형태 중 하나인 모재균열의 특징을 파악하기 위해 적층구조에 따른 모재균열신호의 주파수 특성변화를 관찰하였다. 한국화이버의 CU125-NS graphite/epoxy 프리프레그를 이용하여 제작한 시편의 표면에는 모재균열 신호 취득을 위해 PZT센서를 부착하였다. 모재균열 신호의 변화 비교를 위해 (1) 0° 층 두께를 고정된 상태에서 90° 층 두께를 변화시킨 경우, (2) 전체두

께를 고정한 상태에서 0° 층과 90° 층의 비율을 변화시킨 경우의 두 가지 서로 다른 적층을 갖는 시편이 사용되었다. 시편의 형상은 Fig. 10과 같다. 시편의 두께와 폭의 변화에 따른 모재균열 신호의 정량적인 변화 비교를 위해서 웨이블릿 변환을 통한 시간-주파수 영역 분석방법을 이용하였다. 변환을 통해 분해 된 고주파 성분의 주파수 영역은 1 MHz로 샘플링된 신호에 대해서  $D_1$ 은 약 200 ~ 500 kHz,  $D_2$ 는 100 ~ 300 kHz,  $D_3$ 는 40 ~ 160 kHz,  $D_4$ 는 0 ~ 80 kHz 의 범위를 갖는다.

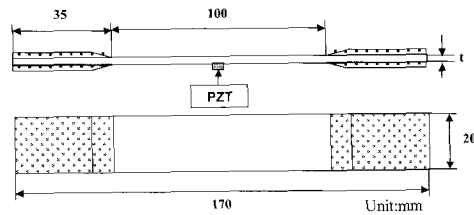


Fig. 10 Tensile test specimen for the matrix cracking signal acquisition

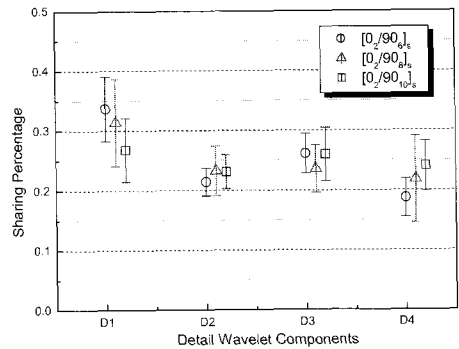


Fig. 11 Comparison of proportion of detail WT components. : [0<sub>2</sub>/90<sub>6</sub>]<sub>s</sub>, [0<sub>2</sub>/90<sub>8</sub>]<sub>s</sub>, [0<sub>2</sub>/90<sub>10</sub>]<sub>s</sub>

Fig. 11은 0° 층이 고정된 상태에서 모재균열이 발생하는 90° 층의 두께를 [0<sub>2</sub>/90<sub>6</sub>]<sub>s</sub>, [0<sub>2</sub>/90<sub>8</sub>]<sub>s</sub>, [0<sub>2</sub>/90<sub>10</sub>]<sub>s</sub>와 같이 증가시켰을 때, 웨이블릿 세부요소들 사이의 에너지 비율변화를 보여주고 있다. 실험 결과 90° 층의 두께가 증가하면  $D_1$ 의 비율은 줄어들고  $D_4$ 의 비율은 증가하는 일관된 경향성을 확인할 수 있었다. 즉, 90° 층의 두께가 증가함에 따라 고주파 성분은 줄어들고 저주파 성분은 늘어난다는 것을 알 수 있다. 하지만 0° 층과 90° 층이 함께 변화하여 0° /90° 의 비율이 변화하는 경우에는 (Fig. 12) 주파수 대역의 변화양상이 복잡하여 일관성을 발견하기가 어려웠다.

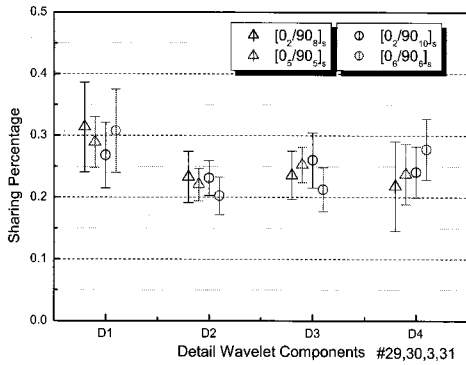


Fig. 12 Comparison of proportion of detail WT components :  $[0_2/90_0]_s$ ,  $[0_5/90_0]_s$ ,  $[0_2/90_{10}]_s$ ,  $[0_6/90_6]_s$

### 5. 광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의 건전성 모니터링

#### 5.1. 복합적층판의 변형 및 파손 동시 모니터링

본 연구에서는 지능형 복합재 구조물의 실시간 건전성 모니터링을 위해 파손 및 변형률을 동시에 감지할 수 있는 광섬유 센서 시스템을 개발하였다. 사용된 센서시스템은 모두 광대역의 EDFA(Erbium doped fiber amplifier) 광원을 사용하였으며 파손신호 취득을 위한 단파장을 분리해내는 과정에 따라서 브래그 격자(fiber Bragg grating; FBG)와 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터를 각각 사용하였다. 변형을 취득에는 광대역 광원을 통해 복합적층판 내에 삽입된 EFPI센서의 다중파장간섭의 원리를 이용하였다. 광섬유 센서로 취득한 변형 및 파손신호와 비교하기 위해 PZT 센서와 변형률 게이지를 인장시험의 표면에 부착하였으며, 모재균열과 같은 파손신호의 시간에 따른 정량적 특성 파악을 위해 SIFT를 이용한 시간-주파수 분석방법을 사용하였다.

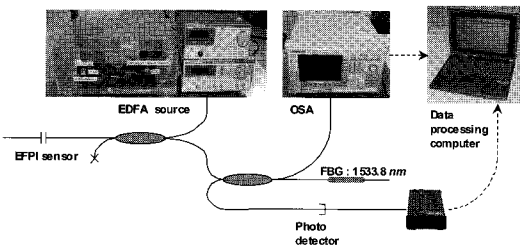
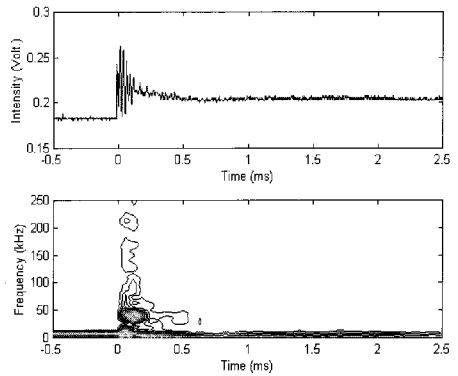
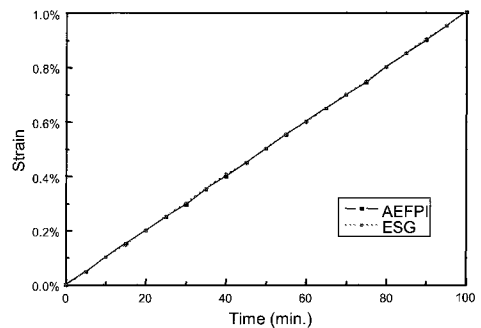


Fig. 13 Fiber optic sensor system for strain and fracture monitoring



(a) AE signal



(b) Strains measured by ESG and FOS

Fig. 14 AE fractural signal and strain measured by FOS

Fig. 14는 변형률 및 파손신호 동시 취득을 위한 인장실험 결과로써, 광섬유 센서시스템으로부터 측정된 변형률 값은 변형률 게이지로부터 측정된 값과 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 파손신호 취득의 경우 파손초기에 발생하는 미세한 모재균열 신호도 감지할 수 있을 만큼 충분한 민감도를 갖고 복합재 파손신호를 감지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 5.2. 스마트 wingbox의 변형률 모니터링

복합재료는 비강도와 비강성이 우수하여 고강도에 경량화가 요구되는 항공우주구조물 등 여러 구조 부재에 대한 사용이 늘어나고 있으며, 복합재료로 만들어진 보강된 wing box는 항공기의 동체 및 날개구조에 적용되고 있다. 본 연구에서는 광섬유 센서가 내부에 삽입된 지능형 복합재 구조의 개념을 적용하여 2개의 스파(spar)와 4개의 보강재(stiffener)로 구성된 복합재료 wing box를 제작하였다[7].



Wing box의 양 끝단은 시험기에 고정이 가능하도록 제작되었다. 스파와 스킨(skin)은 모두 동일하게  $[0_2/90/\pm 45]_s$ 의 적층순서로 만들어졌으며, 보강재는  $[0_2/90/45/0/-45]_s$ 의 적층순서로 제작되었다. 본 연구에서는 스킨과 보강재가 동시성형 되고, 보강재를 가진 상부 스킨과 하부 스킨은 스파를 이용하여 이차 접합(secondary bonding)을 통해서 일체화하여, 동시성형법과 이차접합법을 동시에 사용하는 방법으로 wing box를 제작하였다. Wing box 내부에는 총 24개의 FBG센서가 삽입 되었으며,  $FBG_A$ ,  $FBG_B$ ,  $FBG_C$ ,  $FBG_D$  라인 은 상부 스킨에, 그리고  $FBG_C$ 는 전방부 스파에 삽입되었다. Fig. 15는 wing box 모형 및 삽입된 센서라인의 위치를 표시하고 있다. 센서삽입 위치는 범용 유한요소 코드인 ABAQUS를 통한 해석결과를 이용하여 굽힘 하중 하에서 급격한 변형률 변화가 발생하는 국부좌굴 발생지점에 센서 삽입 위치를 결정하였다. 하중이 가해지는 시편 끝단에 하중계를 부착하였고 FBG센서로부터 측정된 변형률 측정치와 비교하기 위해 wing box의 표면에 변형률 게이지를 부착하였다. LVDT(linear variable differential transformer)는 wing box의 수직 변위를 측정하기 위해 사용되었다.

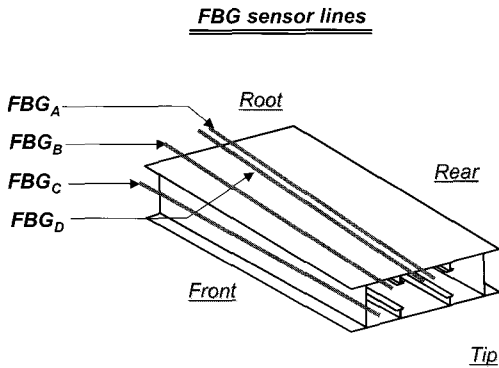


Fig. 15 Location and notation of FBG sensors

Fig. 16은 광섬유 센서를 통해 측정된 시간에 따른 변형률 변화곡선을 보여주고 있다. 센서라인 B와 C에서는 일정하게 하중이 가해지기 시작한 920초 후부터 pop-in(knee point) 현상이 발생함을 명확히 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 굽힘 하중을 대부분 지지하는 스파에 파손이 발생하여 과도적인 변형률 이완현상이 나타났기 때문이다. 상대적으로 스파와 멀리 떨어진 곳에 삽입되었던 센서 라인 A와 D에서는 이러한 변형률 이완현상의 영향

이 덜 미쳤다. 이렇게 측정된 광섬유 센서로부터의 변형률은 변형률 게이지로 측정된 결과와 해석으로부터 예측된 변형률 값과 서로 비교되었다. 앞서 측정된  $FBG_B$ 와  $FBG_C$ 의 변형률 값은 시간에 따라 두 갈래로 나누어지는 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과 복합재 wing box 내부에 삽입된 FBG센서를 이용하여 하중을 지지하는 구조물의 내부 변형률 및 좌굴 발생지점을 성공적으로 감지할 수 있었다.

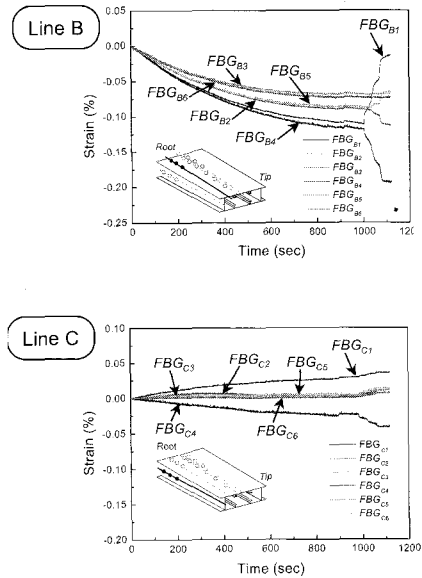


Fig. 16 Strains measured by FBG sensors Line B & C

## 6. 결론

본 연구에서는 압전세라믹 센서를 이용하여 저속 충격에 의해 발생한 복합재 구조물의 손상을 특징을 분석하였으며, 압전세라믹 및 광섬유 센서시스템을 이용하여 구조물의 건전성을 모니터링하는 방법을 제시하였다.

손상신호의 특징을 분석하는 근본적인 접근방법으로, 주파수영역 해석방법 및 웨이블릿 변환을 통해 모재균열 및 자유단에서 발생한 층간분리 신호의 음향파신호특성을 파악하였다. 푸리에변환을 통한 주파수분석의 경우 주파수 영역 해상도가 낮음으로 인해 손상을 감지하고 진단하는데 어려움이 있었으나, 웨이블릿 변환을 통한 신호를 분리한 경우에는 여러 단계에 걸쳐 분해된 신호의 고주파

성분을 관찰함으로써 각 손상 모드의 특징을 구분할 수 있었다. 시험결과 모재균열 시 발생한 음향파 신호는 웨이블릿 분해된 고주파 세부성분  $D_1^{IM}$ 에서 지배적으로 나타났으며, 모재균열 신호의 경우에는 주고  $D_2^{IM}$ 과  $D_3^{IM}$ 의 영역이 혼합되어 나타남을 알 수 있었다. 또한 이러한 파손신호는 시편의 적층방법에 따라 주파수 영역별 분포가 변화하는 것으로 나타났다.

또한 본 연구에서는 복합적층내부에 삽입된 광섬유 센서를 이용해서 변형을 및 파손음향파신호를 취득함으로써 복합재 구조물의 건전성을 실시간으로 모니터링하는 방법을 제시하였다. 시험 결과 복합재 내부에 삽입된 광섬유 센서를 통해 변형을 및 모재균열에 의한 파손시점을 동시에 모니터링할 수 있음을 보였으며 파장분할 다중화된 FBG센서를 통해 구조물 내부의 여러 지점에 대한 내부변형률의 변화를 측정하여 좌굴발생 시점 등을 모니터링하는데 성공적으로 적용하였다.

#### 참고문헌

- [1] J. N. Kudva, C. Marantidis, and J. Gentry, "Smart Structures Concepts for Aircraft Structural Health Monitoring", Proceedings of SPIE on Smart Structures and Materials, Vol. 1917, pp. 974-981, (1993)
- [2] W. B. Spillman Jr., J. S. Sirkis, and P. T. Gardiner, "Smart Materials and Structures; What are they?", Smart Materials and Structures, Vol. 5, No. 3, pp. 247-254, (1996)
- [3] F. K. Chang, "Built-in Damage Diagnostics for Composite Structures", Proceedings of ICCM-10, pp. 283-289, (1995)
- [4] G. W. Sanders, and K. Chandrashekhara et al. "Fiber Optic Vibration Sensing and Neural Networks Methods for Prediction of Composite Beam Delamination", Proceedings of SPIE on Smart Structures and Materials, Vol. 3041, pp. 858-867, (1997)
- [5] A. C. Okafor, K. Chadrashekhara and Y. P. Jiang, "Delamination Prediction in Composite Beams with Built-in Piezoelectric Devices Using Modal Analysis and Neural Network", Smart Materials and Structures, Vol. 5, No.3, pp. 338-347, (1996)
- [6] I. H. Choi, and C. S. Hong, "Low-velocity Impact Response of Composite Laminates Considering Higher-order Shear Deformation and Large Deflection", Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 1, pp. 157-170, (1994)
- [7] C. S. Hong, C. Y. Ryu, J. R. Lee, and C. G. Kim, "Buckling Behavior Monitoring of Composite Wing Box Model Using Fiber Bragg Grating Sensor System," Proceedings of SPIE on Smart Structures and Materials, Vol. 4327, (2001)