

## 저속충격에 의해 발생한 복합적층판 음향방출신호의 웨이블릿 분해 특성에 관한 연구

### Study on the Characteristics of Wavelet Decomposed Details of Low-Velocity Impact Induced AE Signals in Composite Laminates

방형준\*<sup>†</sup>, 김천곤\*\*

Hyung-joon Bang\*<sup>†</sup> and Chun-gon Kim\*\*

초 록 구조물 손상시 방출되는 고주파 음향방출(AE)신호는 실시간 손상 감지에 유리하므로 지능형 구조물의 구조건전성 모니터링에 널리 응용되고 있다. 하지만 복합 적층 구조물에서 방출되는 AE신호의 경우에는 복합재 구조의 특성상 전달 경로에 따른 신호의 감쇄정도가 일반 금속 구조물에 비해 상대적으로 크므로 손상 전후 신호진폭의 크기만을 비교하여 손상을 예측하는 방법은 손상 판단에 오류를 야기할 수 있는 여지가 있다. 따라서 복합적층 구조에서의 정확한 충격손상 예측을 위해서는 신호감쇄의 영향을 덜 받는 신호의 분석 방법이 필요하고 손상 전후 신호특성을 정량적으로 구분할 수 있는 인자의 선택이 필요하다. 본 연구에서는 구조물의 경계조건에 따른 신호특성 변화의 영향을 줄이기 위해 충격손상 발생후 선행적으로 전파되는 선행파(leading wave)의 특성변화를 신호처리에 이용하였으며, 웨이블릿 변환을 이용하여 신호를 분해하였다. 최종적으로 복합적층판의 저속충격 시험에서 압전 센서로 취득된 층간분리 신호를 처리하였으며, 분해된 웨이블릿 고주파 세부성분 사이의 점유율 분포를 이용하여 복합적층판의 손상을 판단하기 위한 신호처리 방법을 제시하였다.

주요용어: 음향방출, 복합재료, 웨이블릿 변환, 저속충격, 층간분리

**Abstract** Because the attenuation of AE signal in composite materials is relatively higher than that of metallic materials, it is required to develop a damage assessment technique less affected by the attenuation property of composite materials in order to use AE sensing as a damage detection method. In the signal processing procedure, it is profitable to use the leading wave that arrives first because the leading wave is less influenced by the boundary conditions. Using wavelet transform, we investigated the frequency characteristics of impact induced AE signals focused on the leading wave in advance and chose the key factors to discriminate the damaged condition quantitatively. In this research, we established a damage assessment technique using the sharing percentage of the wavelet detail components of AE signal, and conducted a low-velocity impact test on composite laminates to confirm the feasibility of the proposed signal processing method.

**Keywords:** Acoustic Emission, Composite Materials, Wavelet Transform, Low-Velocity Impact, Delaminations

#### 1. 서 론

복합재료의 복잡한 파손 거동을 효과적으로 이해

하기 위한 방법으로 AE(acoustic emission) 신호의 주파수 특성을 분석하기 위한 연구가 상당수 진행되었다[1-4]. 특히 구조 파손시 방출되는 AE 신호

와 같이 급격한 변화를 갖는 신호는 시간에 따라 주파수 특성이 변하므로 최근에는 short-time 푸리에 변환(short-time Fourier transform, STFT)이나 웨이블릿 변환(wavelet transform, WT)과 같은 시간-주파수 분석 방법을 구조 건전성 모니터링에 적용하는 연구들이 많이 이루어지고 있다[1].

Wang[5] 등은 웨이블릿 변환을 이용하여 기어박스의 진동신호를 분석하여 기계 구조의 손상여부를 판단하는데 웨이블릿을 이용한 신호처리 방법의 유효성을 확인하였다. Sung[6, 7] 등은 복합적층판의 충격모니터링을 하는데 있어 충격에너지 레벨에 따른 웨이블릿 변환된 AE 신호의 신호 진폭 크기 변화를 이용하여 손상 정도 및 손상 여부를 판단하는 기준으로 삼았다. 하지만 이상의 연구를 포함한 기존의 연구에서는 구조물의 손상 여부를 판단하는데 웨이블릿 변환된 손상 신호의 신호 진폭 크기 변화를 이용하는 방법을 사용했으므로, 복합적층판과 같이 고주파 AE신호의 신호감쇄가 급격한 환경에서는 단지 신호진폭의 크기만 비교했을 경우 구조물의 정확한 손상여부를 판단하는데 오류가 발생할 수 있는 여지가 있다. 따라서 복합적층 구조에서의 정확한 충격손상 예측을 위해서는 신호감쇄의 영향을 덜 받는 신호의 분석 방법이 필요하고 손상 전후 신호 특성을 정량적으로 구분할 수 있는 인자의 선택이 필요하다.

본 연구에서는 구조물의 경계조건에 따른 신호특성 변화의 영향을 줄이기 위해 충격손상 발생후 선행적으로 전파되는 선행파(leading wave)의 특성변화를 신호처리에 이용하였으며, AE 신호를 분해한 웨이블릿 고주파 세부성분 사이의 신호점유 분포를 이용하여 복합적층판의 손상을 판단하기 위한 신호처리 방법을 제시하였다. 최종적으로 손상감지 기법을 carbon/epoxy 복합적층 시편의 충격손상 감지에 적용하여 저속 충격에 의한 층간분리 손상 여부를 판별할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 신호 처리

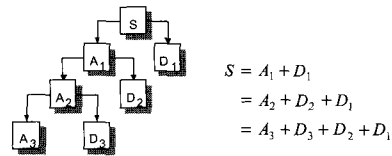
### 2.1. 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환은 원형의 웨이블릿 함수의 크기 및 수평 위치를 변환시켜 입력 신호를 분해하는 것이다. 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform, CWT)은 다음과 같이 정의된다.

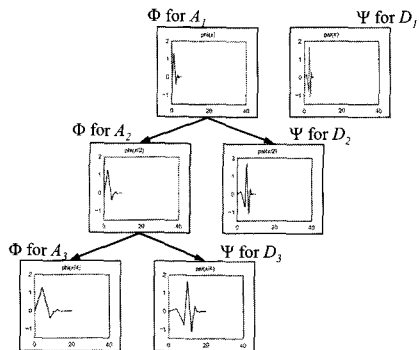
$$CWT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (1)$$

여기서, a와 b는 ( $a>0, b \in \mathbb{R}$ ) 각각 스케일(scale, dilation)과 수평 이동(translation)을 나타내는 요소이다.  $\Psi(t)$ 는 웨이블릿 해석 함수이며  $\Psi^*$ 는 공액복소 함수(complex conjugate)를 나타낸다. 컴퓨터를 이용한 실제 신호처리 과정에서는 이산화된(discretized) 스케일 함수와 수평 이동 함수를 이용하는 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform, DWT)을 사용한다. 따라서 웨이블릿 변환은 서로 다른 이진 스케일(dyadic scales)을 선택함으로써 신호를 여러 낮은 해상도의 성분으로 분해할 수 있으며, 이를 웨이블릿 분해 구조(wavelet decomposition tree)라고 부른다. Fig. 1에서는 원신호 S 를 고주파 세부성분(D, details)과 저주파 근사성분(A, approximates)으로 분해한 것을 보여준다.

본 연구에서는 다우베치4(Daubechey 4, db4) 웨이블릿 함수를 이용해서 1 MHz로 샘플링된 입력 신호를 4단계로 분해하였다. db4는 4차 웨이블릿 함수로서 구조 파손시 방출되는 음향파 신호와 유사한 형태를 갖는 낮은 규칙성의 함수로서 Fig. 2에 그 형태를 명시하였다.



(a) Wavelet decomposition tree



(b) Family of wavelet and scale function through the decomposition tree

Fig. 1 Wavelet decomposition tree and the family of wavelet function and scale function

1 MHz의 샘플링 주파수로 입력신호에 대해 4단계로 분해된 웨이블릿 세부 성분은  $D_1^{1M}$ ,  $D_2^{1M}$ ,  $D_3^{1M}$ ,  $D_4^{1M}$  로 표시되며, 대역별로 서로 다른 주파수 영역을 점유한다. 위 첨자는 샘플링 주파수를 의미하며 아래 첨자는 주파수 대역별로 나누어진 고주파 세부성분의 단계를 의미한다. Fig. 3에 표현된 각 웨이블릿 고주파 세부성분의 주파수영역은  $D_1^{1M}$ 의 경우 약 200 ~ 500 kHz,  $D_2^{1M}$ 는 100 ~

300 kHz,  $D_3^{1M}$ 는 40 ~ 160 kHz,  $D_4^{1M}$ 는 0 ~ 80 kHz 의 범위를 갖는다. 이것은 웨이블릿 함수가 조화함수처럼 하나의 주파수 특성만을 가지고 있지 않은 로컬 함수이기 때문이며, 샘플링 주파수 및 웨이블릿 함수에 따라 다른 주파수 특성을 보이게 된다. 본 연구에서는 Matlab의 wavelet toolbox를 신호처리에 이용하였다.

2.2. 손상 신호 특성 비교를 위한 신호 정량화

본 연구에서는 구조 손상 전후의 AE 신호 특성을 비교하기 위해서 500 kHz 이하의 고주파 성분을 나타내는 웨이블릿 분해 요소의 세부 성분 사이의 에너지 분포 비율 변화를 비교하였다.

신호처리 방법의 순서는 다음과 같다. 1 MHz의 샘플링 주파수로 입력된 AE 신호는 웨이블릿 함수를 이용해 세부성분  $D_1^{1M}$ ,  $D_2^{1M}$ ,  $D_3^{1M}$ ,  $D_4^{1M}$ 의 4단계로 분해된다. 분해된 고주파 세부성분은 먼저 1비트 잡음(bit noise) 등의 신호잡음의 제거를 위해 5점 이동평균화(moving averaging) 과정을 거쳤으며, 세부성분은 성분별 에너지 분포를 비교하기 위해 각각의 웨이블릿 세부성분의 절대값에 대하여 수치적분이 수행되었다. 최종적으로 4단계의 세부성분에 대한 면적의 비율을 계산하였으며 손상 전후 세부성분의 면적 점유 비율 변화를 관찰하였다. 신호처리 과정의 순서도는 Fig. 4와 같다.

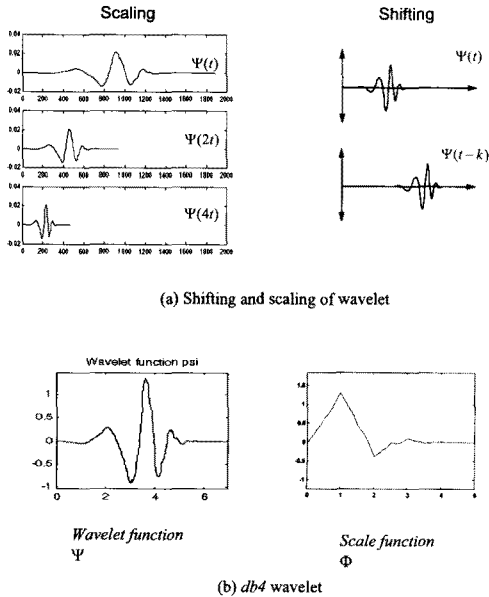


Fig. 2 Db4 wavelet and scale function; scaling and shifting of wavelet.

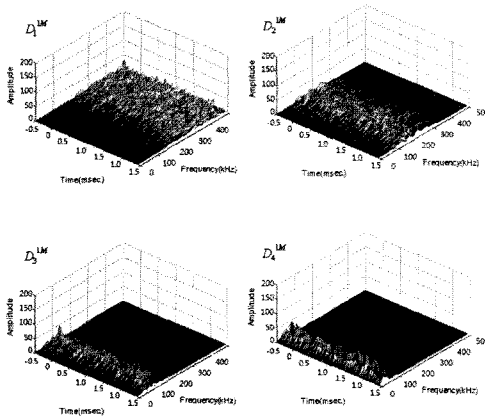


Fig. 3 Frequency range of wavelet details for 1 MHz sampled data

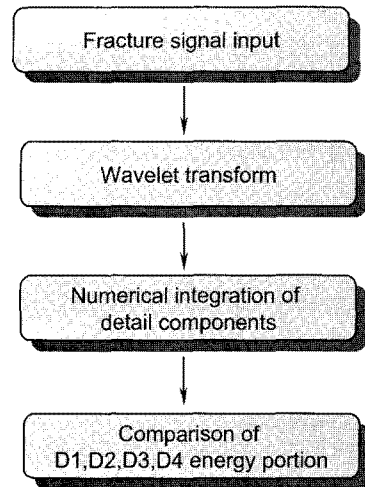


Fig. 4 Signal processing procedure using decomposed wavelet detail components

3. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 시편은 HFG CU-125NS carbon/epoxy 프리프레그를  $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$ 의 순서로 준 등방성 적층한 후 오토클레이브를 통해 성형하였다. 복합적층판은  $830 \times 830 \times 2$  mm의 형태로 제작되었으며 네 모서리의 각각 30 mm 길이를 지그에 고정하여  $770 \times 770 \times 2$  mm의 정사각형 형태의 실험 면적을 갖는다. 복합적층 시편은 Fig. 5와 같이 지그에 고정 지지된다. 본 실험에서는 지그에 고정된 시편이 충격하중에 의하여 미끄러지는 현상을 방지하기 위하여 지그 고정 부위에 #220 사포를 이용하여 그립(grip)을 만들어 부착하였으며, 시편의 끝단은 신호의 난반사 유도를 위해 거칠게 가공하였다.

Fig. 6은 복합적층 시편에 부착된 PZT 센서의 위치와 저속충격을 가한 위치를 나타낸다. 그림에서의 x 축은 복합재 섬유방향의  $0^\circ$ 와 일치한다. 시편의 오른쪽 5개 지점의 하단 면에는 2 mm 두께,

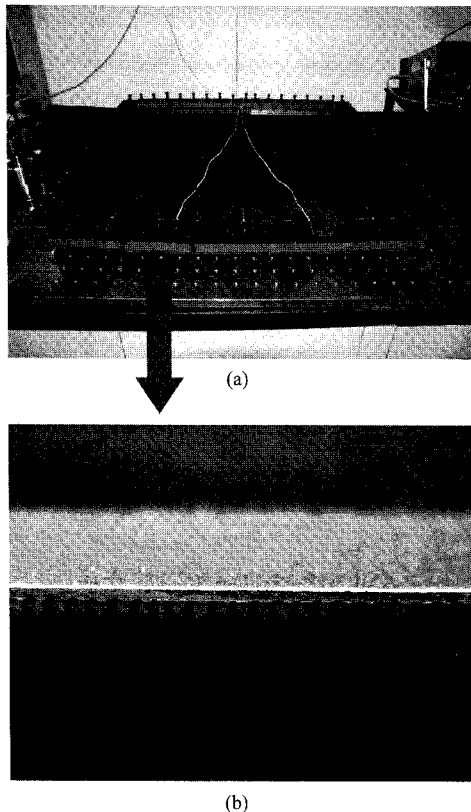


Fig. 5 Carbon/epoxy composite plate specimen for the low-velocity impact test. (a) grip surface (b) rough edge

5 mm 직경의 PZT 센서(C6, Fuji Ceramics corp.)를 시안화-아크릴레이트 순간접착제를 이용하여 부착하였다. 저속 충격을 가한 위치는 PZT 센서로부터 150 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm가 되도록 하여 서로 다른 신호전달 거리에 따른 신호 감쇄도를 측정하였다.

Fig. 7은 저속충격 실험의 장치구성을 나타낸다. 충격하중을 가하는 추는 스테인리스-스틸 재질의 반구형 끝단을 갖는 질량 100 g 및 1.5 kg의 원통형으로 제작되었으며, 설치된 가이드를 따라 자유낙하시킴으로써 충격을 가하며, 낙하 높이 및 추가

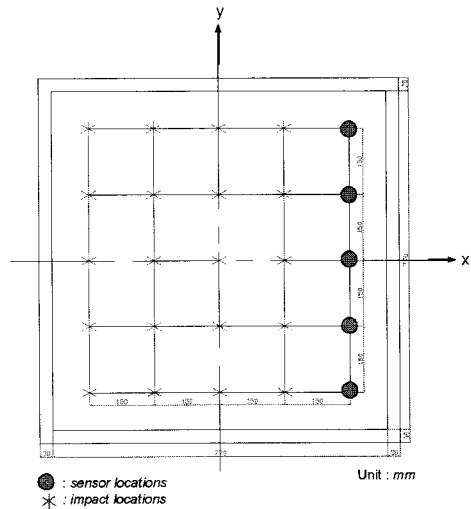


Fig. 6 Dimension of the composite panel specimen for low-velocity impact tests

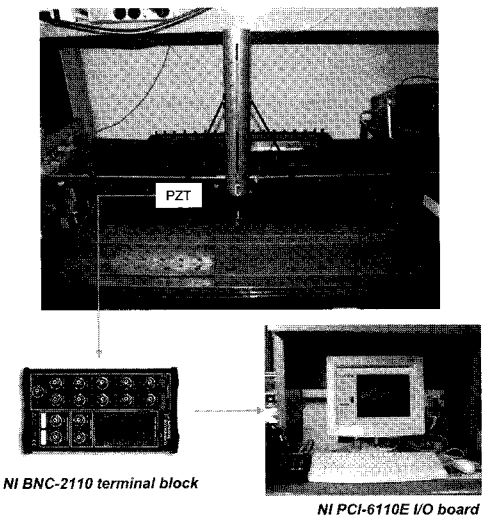


Fig. 7 Experimental setup of low-velocity impact test

적인 추의 질량을 가감함으로써 충격에너지를 조절하였다. 저속충격에 의한 음향방출 신호를 취득하기 위한 데이터 취득 장비로는 16 bit의 신호 분해능과 4 MHz의 샘플링 주파수를 갖는 National Instrument™의 PCI-6110E DAQ 보드를 사용하였다. 넓은 면적을 가진 평판형 시편에 대하여 충격하중을 가하였으므로 충격하중을 변형 및 진동에너지로 흡수하는 양이 많아지므로 3.0 J 이하의 낮은 충격에너지에서는 충격손상이 거의 발생하지 않았다. 따라서 손상 발생 유무에 따른 충격 음향방출 신호의 특징을 비교하기 위해 각각의 충격 위치에 대하여 0.1 J과 5.0 J의 충격 에너지를 가하였으며 웨이블릿 변환을 통한 신호처리 방법으로 주파수 특성 변화를 비교 관찰하였다. 0.1 J의 충격은 100 g의 추를 102 mm 높이에서 자유낙하하여 가했으며, 5.0 J의 충격은 1.5 kg의 추를 340 mm 높이에서 낙하하여 가하였다. 5.0 J의 충격시 외부에서는 손상유무의 판별이 매우 어려우나 C-scan을 통한 검사시 [0<sub>2</sub>/45<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> 복합재 평판 내부에서는 층간분리현상이 발생하는 초기 하중에 해당한다.

4. 저속 충격 손상시 발생한 AE신호 특성

Fig. 8은 0.1 J의 충격에너지가 복합재 평판에 가해졌을 때 방출된 음향방출 신호중 하나를 예시한 결과로써 PZT 센서와 150 mm 떨어진 발생한 AE 신호의 형상이다. 낮은 낙하에너지에 의하여 충격손상이 발생하지 않은 0.1 J의 결과에서는 웨이블릿 세부성분 D<sub>1</sub><sup>IM</sup> ~ D<sub>4</sub><sup>IM</sup> 까지의 어떠한 고주파 영역에서도 손상 음향 방출 신호를 관찰할 수 없다. 이러한 이유는 복합재 구조물에 모재균열, 층간분리, 섬유파손 등의 구조 손상이 발생하지 않은 경우에는 20 kHz 이상의 초음파 음향방출이 거의 없기 때문이다.

저속충격에 따른 음향파 신호는 속도가 빠른 선행 음향파(leading wave)와 선행음향파 이후 지속되는 벌크 음향파(bulk wave)로 나눌 수 있다. Fig. 8의 붉은 적색 점선으로 표시된 영역은 충격 발생 직후 약 0.3 ms 정도 방출이 지속되는 선행 음향파이다. 충격손상이 발생하지 않은 경우 충격신호의 형상은 거리변화에 상관없이 거의 모든 시험 결과에서 Fig. 8과 유사하게 관찰되었다. 선행 음향파는 큰 진폭의 주된 파형이 시작되기 이전에 빠른 속도를 가지고 센서에 도달하는 음향파로써 상대적으로

진폭이 작고 일관된 형태를 유지하는 특성을 갖는다. 벌크 음향파의 경우 신호전달 거리가 달라짐에 따라 서로 큰 파형 변화를 보이며 규칙성을 보이지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 선행 음향파의 경우 벌크 음향파와는 달리 매질의 경계조건에 많은 영향을 받지 않고 재료의 물성에 따라 정해지는 고유의 주기와 형태를 갖는다는 특징에 기인한다.

Fig. 9의 좌측 그림은 복합재 평판에 5.0 J의 충격에너지를 가한 경우 평판 윗면의 생긴 패임(dent) 형상을 나타내며, 우측의 그림은 C-scan으로 감지한 충격 손상 부위의 층간분리 손상을 나타낸다. 이 경우 약 15 mm × 20 mm 의 타원형 층간분리 손상이 복합재 평판 내부에 발생한 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 10은 충격위치에서 150 mm 떨어진 위치에 부착된 PZT센서를 통해 5.0 J의 충격 에너지가 복합재 평판에 가해질 때 발생한 손상 음향 방출 신호에 대한 웨이블릿 변환 결과이다. 충격에 의해

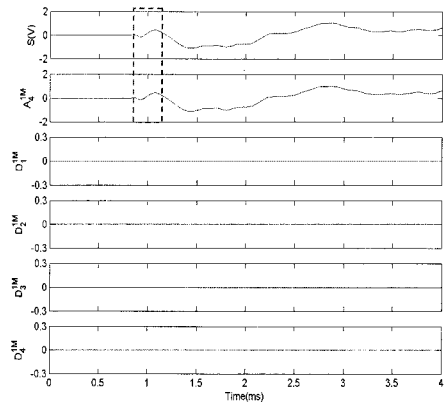


Fig. 8 Impact signals of undamaged case : Wavelet transformed result of 0.1 J impact.

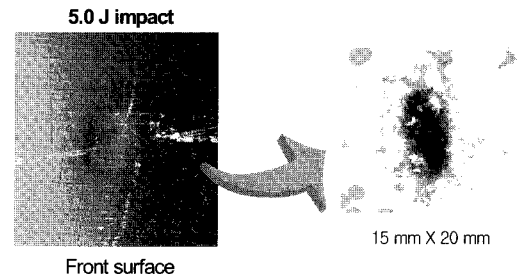


Fig. 9 Investigated delamination of [0<sub>2</sub>/45<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> graphite/epoxy composite plate using C-scan

복합재 평판에 손상이 발생하면 20 kHz 이상의 초음파 음향방출이 발생하는 것으로 알려져 있다. 그림에서 웨이블릿 세부성분을 보면  $D_3^{1M}$ 와  $D_4^{1M}$ 에서 손상음향 방출 신호를 관찰할 수 있다.  $D_3^{1M}$ 와  $D_4^{1M}$ 의 웨이블릿 세부성분이 점유하고 있는 주파수 대역은 160 kHz 이하의 초음파 대역으로써 40 ~ 150 kHz 전후의 주파수 대역에 해당하는 모재균열의 점유 주파수 대역을 포함한다. 위 그림에서 원본신호(S)를 보면 충격 발생 직후 약 0.3 ms 정도 방출이 지속되는 선행 음향파(leading wave)를 확인할 수 있다. 음향 방출 시간을 확인하면 위 선행 음향파가 지속되는 충격초기 0.3 ms 동안에만 복합재의 층간분리에 해당하는 고주파 음향방출 신호를 확인할 수 있다.

5. 신호 전달 거리에 따른 AE 신호 특성

5 J의 저속충격 위치에서 150 mm 떨어진 압전 센서를 이용하여 취득한 Fig. 10의 신호와 300 mm, 450 mm, 600 mm 떨어진 위치에서 측정된 Fig.11의 결과에서 원본신호 (S) 를 보면 충격 발생 직후 약 0.3 ~ 0.5 ms 정도 방출이 지속되는 선행 음향파 (leading wave) 를 확인할 수 있다. Fig. 10의 점선으로 표시된 선행음향파의 경우 Fig. 11에서도 진폭 및 지속시간에서의 차이만 존재할 뿐 유사한 형상을 보이며 존재함을 알 수 있다. 반면 충격 발생 후 약 0.5 ms 이후부터 나타나는 저주파 성분인 벌크음향파의 경우 신호전달거리에 따라 불규칙한 변화를 보였다.

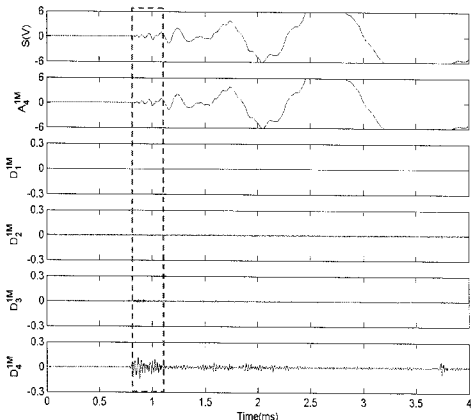
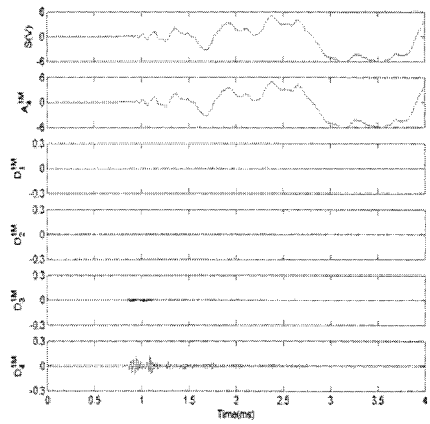
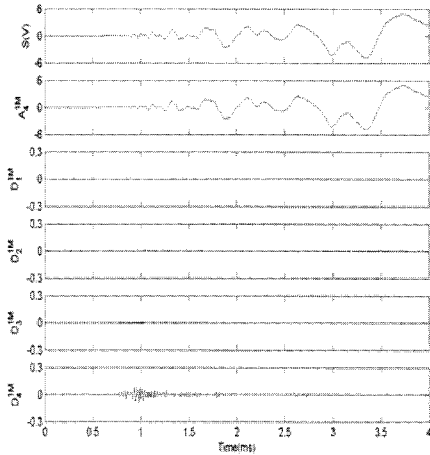


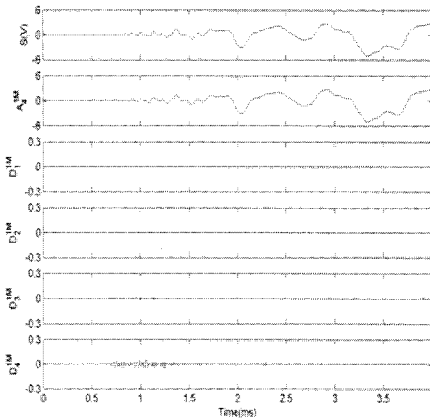
Fig. 10 Impact signals of damaged case : Wavelet transformed result of 5.0 J impact signal (from 150 mm distance)



(a) 300 mm



(b) 450 mm



(c) 600 mm

Fig. 11 Impact signals of damaged case : Wavelet transformed result of 5.0 J impact signals as the signal propagation distance

복합재의 손상발생시 고주파 신호가 분포하는  $D_3^{IM}$ 와  $D_4^{IM}$ 의 웨이블릿 세부성분의 경우 충격지점으로부터 150 mm 떨어진 거리에서 취득한 Fig. 10의 경우 충격초기 0.3 ms 정도의 시간 동안만 신호를 관찰할 수 있었다. 하지만 Fig. 11(c)의 600 mm 거리에서 취득된 결과를 보면  $D_4^{IM}$ 의 성분이 0.7 ms 동안 지속되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 충격지점으로부터 센서까지의 거리가 증가함에 따라 AE신호의 산란(dispersion)정도가 늘어났기 때문이다.

고주파 손상신호의 진폭은 신호전달 거리가 길어질수록 그 신호진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11을 비교할 경우 손상발생시  $D_4^{IM}$ 성분의 진폭을 보면 충격지점에서 150 mm 떨어진 거리에서는 약 0.140, 300 mm 떨어진 지점에서는 0.125 그리고 600 mm 떨어진 지점에서는 0.070 정도로 감소하는 결과를 보였다. 충격지점으로부터의 거리증가에 따른  $D_4^{IM}$  웨이블릿 세부성분 신호진폭의 크기변화는 Fig. 12에 정리하였다.

충격 지점으로부터 센서까지의 거리가 늘어남에 따른 충격 손상 신호의 특성을 종합할 때 거리에 따라 고주파 손상 신호 성분의 신호 진폭 및 지속시간이 변화하므로 단순히 특정 손상 신호의 임계진폭만 가지고는 손상 여부를 판단하기가 쉽지 않다는 것을 알 수 있다.

2.2절에서 제안한 주파수 대역별 웨이블릿 세부성분의 점유 분포 비교를 통한 손상 전후 AE신호의 구분 방법은 신호의 감쇄 정도가 크지 않은 일정 영역 내에서라면 진폭 변화에 큰 영향을 받지

않고 구조의 손상 전후를 구분할 수 있는 신호처리 수단으로 사용될 수 있다. 본 실험에서 사용된 복합재 평판이 저속충격에 의한 손상시 방출한 150 kHz 미만의 진동신호 에너지의 열 소산 정도의 차이가 크지 않다고 가정하면 각각의 웨이블릿 세부성분의 절대값 면적은 전체 신호(S)의 진폭 변화와 달리 크게 변 고주파 신호는 신호전달 거리가 늘어남에 따라 신호진폭은 감소하였으나 신호의 지속시간은 증가하였다. 따라서 웨이블릿 세부성분의 주파수 대역 신호별하지 않을 것을 예상할 수 있다. 직교이방성의 복합적층판에서 응력파의 입사각도에 따른 FBG센서 신호의 주파수 대역별 특성을 시험한 기존의 연구결과를 감안할 때 응력파 신호의 전달 각도에 따른 주파수 특성변화는 크지 않다는 것을 알 수 있었다[8]. 따라서 신호의 감쇄가 크지 않은 일정 영역 내에서는 신호진폭 및 신호입사각에 관계없이 웨이블릿 세부성분의 면적비율 변화로 구조물의 손상 유무를 구분할 수 있는 수단으로 사용할 수 있다.

Fig. 13은 신호 전달 거리 변화에 관계없이 모든 충격시험 결과를 종합하여 손상 전후 웨이블릿 신호의 점유율 분포를 나타낸 그래프이다. 손상이 발생하지 않은 경우에는  $D_4^{IM} \sim D_1^{IM}$ 의 순서대로 웨이블릿 세부 성분 사이에 거의 일정한 점유율 분포 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 구조물에 높은 에너지의 충격이 가해져 충격 신호에 손상 음향방출 신호가 포함되는 경우에는  $D_4^{IM}$  웨이블릿 세부 성분의 점유율이 최대 25% 정도까지 상승한다는 것을 관찰 할 수 있다. 따라서 점유율 변화가

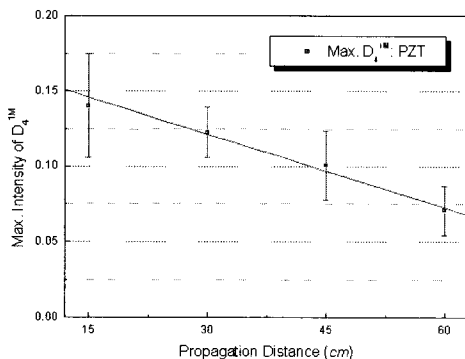


Fig. 12 Amplitude change of  $D_4^{IM}$  detail wavelet component along the impact distance (5.0 J impact)

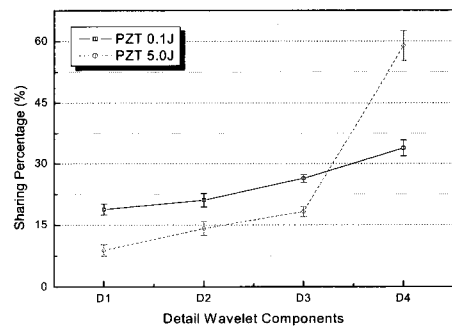


Fig. 13 Comparison of sharing portion of wavelet detail components between undamaged case(0.1J impact) and damaged case(5.0 J impact)

상대적으로 큰 웨이블릿 세부 성분  $D_4^{1M}$ 와  $D_1^{1M}$ 의 변화율을 파악하는 방법을 사용한다면 구조물의 저속충격 손상 여부를 판단하는 기준으로 삼을 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 위와 같은 분석 결과는 150 mm ~ 600 mm 거리에서 수행된 모든 충격시험 결과를 포함한 결과이며 구조물의 충격 손상 여부를 판단하기에 충분한 표준편차 범위를 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 AE 신호를 분해한 웨이블릿 고주파 세부성분 사이의 점유율 분포를 이용하여 복합적충격판의 손상을 판단하기 위한 신호처리 방법을 제시하였다. 충격 손상에 의한 고주파 음향 방출 취득을 위해 압전 세라믹 센서를 이용하였으며 손상 신호 발생 전후에 따른 신호특성 비교를 위해 4 단계로 분해된 웨이블릿 세부성분 사이의 점유율 분포를 비교하였다. 실험 결과 손상 전후 가장 큰 점유율 변화를 보이는 것은  $D_4^{1M}$ 와  $D_1^{1M}$ 의 두 웨이블릿 세부성분으로  $D_4^{1M}$ 는 손상 발생 이후 약 20 ~ 25 % 정도의 대역 점유율이 증가하며  $D_1^{1M}$ 는 손상 발생 이후 약 10% 정도의 점유율이 감소하였다. 실험결과 손상 발생 여부에 따른 웨이블릿 세부성분 사이의 점유율 분포는 770 × 770 mm의 정사각형 형태의 실험 면적 이내에서는 큰 차이를 보이지 않았으며, 고주파 음향방출 신호의 구조 손상 전후 에너지 분포 변화 특성을 이용하여 복합적충 구조의 손상 여부를 판단할 수 있다는 사실을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] 김천곤, 성대운, 김대현, 방형준, "압전 세라믹 센서와 광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의 건전성 모니터링", 비파괴검사학회지, Vol. 23, No. 5, pp. 443-452, (2003)
- [2] K. Komai, K. Misoshima and T. Shibutani, "Investigations of the fracture mechanism of carbon/epoxy composites by AE signal analyses," JSME, Vol. 34, (1991)
- [3] J. H. Williams, Jr. and S. S. Lee, "Acoustic emission monitoring of fiber composite materials and structures," Journal of Composite Materials, Vol. 12, pp. 348-370, (1978)
- [4] S. S. Russell and E. G. Henneke, "Signature analysis of acoustic emission from graphite/epoxy composites," Interim report, NASA Grant NSG 1238, Report No. VPI-E77-22.N, (1977)
- [5] W. J. Wang and P. D. McFadden, "Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection," Journal of Sound and Vibration, Vol. 192, No. 5, pp. 927-939, (1996)
- [6] 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, pp. 180-190, (2000)
- [7] 박상오, 박상욱, 윤혁진, 방형준, 김천곤, "웨이블릿 변환을 이용한 복합재 파손 신호의 특성 연구", 한국항공우주학회 춘계논문집, pp. 560-563, (2006)
- [8] 방형준, 송지용, 김천곤, "복합재 충격손상신호의 FBG센서 입사각도에 따른 주파수 분포 특성에 관한 연구", 한국복합재료학회 춘계논문집, pp. 235-239, (2005)

[1] 김천곤, 성대운, 김대현, 방형준, "압전 세라믹 센서와 광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의