

웨이블릿 변환을 이용한 복합재 모재균열의 신호특성 분석

방형준* · 김대현* · 강동훈* · 홍창선** · 김천곤**

Study of Signal Characteristics of Matrix Cracks in Composites Using Wavelet Transform

H. J. Bang*, D. H. Kim*, D. H. Kang*, C. S. Hong** and C. G. Kim**

Key Words : Composites, Matrix Crack, Fracture Signal, Wavelet Transform

ABSTRACT

The objective of this study is to find the change of signal characteristics of matrix cracks due to the different specimen shapes. As the concept of the smart structure, monitoring of acoustic emission (AE) can be applied to inspect the fracture of the structures in operating condition using built-in sensors. To understand the characteristics of matrix crack signals, we performed tensile tests by changing the thickness and width of the specimens. This paper describes the implementation of time-frequency analysis such as wavelet transform (WT) for the quantitative evaluation of fracture signals. The experimental result shows the distinctive signal features in frequency domain due to the different specimen shapes.

1. 서론

일반 금속재료에 비해 내부의 균열발생을 감지하기 어려운 복합재 구조물의 경우 과도하중 및 충격에 의한 급격한 파손의 위험성을 감소시키기 위하여 모재균열 등과 같은 초기 파손의 발생 여부를 감지하고 손상을 판단할 수 있는 시스템 및 판단기준을 확립하는 것은 매우 중요한 연구 분야 중 하나다. 본 연구는 스마트 복합재 구조물의 안전 진단 시스템에 관한 것으로, 과도하중 및 충격 등에 의해 발생한 모재균열(matrix cracks)과 같은 내적손상에 대한 파손신호 특성에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 실시간 파손 모니터링 시스템에서의 정량적인 파손여부 검출을 위하여 웨이블릿 변환(wavelet transform; WT)과 같은 시간-

주파수 분석 방법(time-frequency analysis)을 적용하였다. WT는 시간에 따라 급격하게 변화하는 신호에 대한 시간-주파수 분석에 매우 적합하다고 알려져 있다[1].

기존의 연구 문헌들을 통하여 볼 때 구조물의 건전성에 이상이 발생하는 경우, 시간에 따른 주파수변화를 보면 파손 발생 시점에서 특이한 주파수 특성 변화가 있다는 것을 알 수 있다[2]. 또한 모재균열이나 층간분리와 같은 복합재 파손이 발생한 경우에는 20 kHz 이상의 음향파가 방출되며 이러한 음향 방출 신호를 시간-주파수 분석하여 복합재 구조의 손상 여부를 검출할 수 있음이 알려졌다[3].

본 연구에서는 복합재 시편의 두께(thickness) 및 폭(width) 변화에 따른 모재균열의 신호특성을 WT에 의한 시간-주파수 분석을 통해 정량적으로 구분하였다.

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 박사과정

** 한국과학기술원 항공우주공학전공 교수

2. 신호처리

일반적 주파수 영역 분석에는 Fourier Transform (FT)이 널리 사용되는데, FT 는 입력신호가 정상(stationary)신호라는 가정 아래 사용할 수 있으며, 파손신호와 같이 국소적인 변화나 일시적인 변형을 보이는 비정상(non-stationary) 신호에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근에는 short time Fourier transform(STFT)이나 wavelet transform(WT)과 같은 시간에 따른 주파수 특성변화 분석기법이 많이 적용되고 있다.

본 연구에서는 신호의 급격한 국소변화에 민감하며 주파수영역 해상도가 높은 WT 은 이용하여 신호처리를 하였다. WT 는 저주파와 고주파로 분리 함으로써 기존의 신호처리 방법이 놓치기 쉬운 trend, break-down 점이나, 미분 불가능한 불연속점의 처리에 유리하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 파손특성을 관찰하기위한 신호의 후 처리에 WT 을 사용하였다. 입력신호 $f(t)$ 에 대한 WT 은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, $a > 0, b \in R$ 는 각각 스케일(scale, dilation)과 수평이동(translation)을 나타내는 파라미터이다. $\Psi(t)$ 는 웨이블릿 해석 함수이고 Ψ^* 는 공액복소함수(complex conjugate)를 나타낸다. 식(1)의 결과는 스케일과 수평이동 파라미터에 대한 웨이블릿 계수이며, 실제 계산에는 이산화된(discretized)

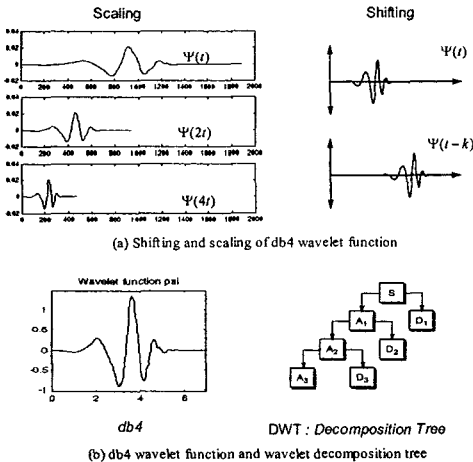


Fig. 1 Scaling and shifting of db4 wavelet function ; wavelet decomposition tree.

스케일 a 와 수평이동 b 를 이용하는 DWT(Discrete Wavelet Transform)을 사용한다. 웨이블릿 해석에서 신호는 높은 스케일의 저주파 성분과 낮은 스케일의 고주파 성분을 나타내는 세부 성분(details)으로 표현된다. 다른 이진 스케일(dyadic scales)을 선택함으로써 신호는 여러 낮은 해상도의 성분으로 분해될 수 있으며, 이를 웨이블릿 분해구조라고 부른다. Fig. 1에서는 신호 S 를 세 단계로 분해한 것을 보여준다. 신호 S 는 낮은 스케일의 세부성분 $D1$ 과 그보다 큰 스케일의 세부성분 $D2, D3$ 그리고 저주파 근사 성분 $A3$ 으로 분해된다. 본 연구에서는 Daubechey 4 웨이블릿 함수를 사용하였으며 신호처리에는 Matlab™ 의 Wavelet Toolbox 를 이용하였다.

3. 모재균열 검출 및 신호특성

3.1 실험방법

복합재료의 모재균열에 신호의 특성을 관찰하기 위해 Fig. 2 와 같은 복합재 시편의 표면에 압전세라믹(piezo-ceramic) 센서를 부착한 후 인장실험을 실시하였다. 복합적층 시편은 Graphite/Epoxy 프리프레그를 적층하여 오토클레이브 성형을 하였으며 모재균열이 쉽게 발생 할 수 있도록 내부에 90°층을 가진 직교적층(cross ply) 시편을 제작하고 0°층인 시편의 중간 표면에 압전세라믹 센서를 부착하였다.

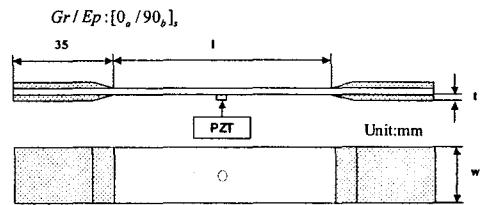


Fig. 2 Specimen for the tensile test.

시편형상을 변화시키는 변수로는 시편의 폭과 모재균열이 발생하는 90°층의 두께변화 두 가지이다. 두께변화의 경우에는 (1) 0°층 두께를 고정된 상태에서 90°층 두께를 변화시킨 경우, (2) 전체두께를 고정된 상태에서 0°층과 90°층의 비율을 변화시킨 경우, (3) 0°층과 90°층의 비율을 고정된 상태에서 전체 두께를 변화시킨 경우의 세 가지에 대해서 모재균열 신호의 특성변화를 관찰하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 3 과 같다.

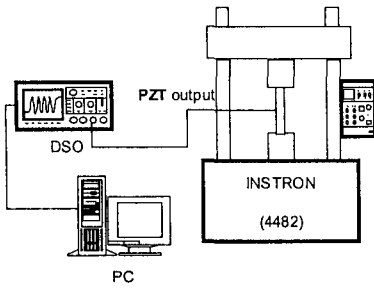


Fig. 3 Experimental setup.

3.2 신호특성 및 결과비교

시편의 두께와 폭의 변화에 따른 모재균열 신호의 정량적인 변화 비교를 위한 방법은 다음과 같다. 먼저 각 신호의 최대값으로 신호를 나눠 정규화(normalize)를 한 후 WT 을 통해 시간-주파수 변환을 한다. 그리고, WT 를 통해 변환되어 분리된 고주파 성분 D1, D2, D3, D4 의 비율 변화를 비교하기 위해 각 성분을 시간에 따라 수치 적분하고 D1, D2, D3, D4 적분 값의 비율 변화를 관찰하였다. 각 고주파성분의 주파수영역은 1MHz 로 샘플링된 신호에 대해서 D1 은 200 ~ 500kHz, D2 는 100 ~ 300kHz, D3 는 40 ~ 160kHz, D4 는 0 ~ 80kHz 의 범

위를 갖는다.

Fig. 4 는 두께변화에 대한 모재균열 신호변화에 대한 첫번째 경우로 0°층 두께를 고정된 상태에서 90°층 두께를 변화시킨 경우 중 하나로, 좌측 그림은 시편의 적층이 $[0_2/90_6]_s$ 인 경우 모재균열 신호의 WT 을, 우측의 그림은 적층이 $[0_2/90_{10}]_s$ 인 경우의 WT 을 나타낸다. 세 번째 그림은 두께 변화 전후의 시편에 대해 WT 된 고주파 요소 D1, D2, D3, D4 의 비율변화를 나타내는 그래프이다. 실험 결과 그림에서 보여지는 바와 같이 대부분의 시편에서 0°층이 고정된 상태에서 90°층의 두께가 증가하면 D1 의 비율은 줄어들고 D4 의 비율은 증가하는 일관된 경향성을 확인할 수 있었다. 즉, 고주파 성분은 줄어들고 저주파 성분은 늘어난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 는 두께 변화의 두 번째 경우로 전체 두께를 고정된 상태에서 0°층과 90°층의 비율을 변화시킨 경우 이다. 좌측은 적층이 $[0_2/90_8]_s$ 인 시편의 신호에 대한 WT 결과이고, 우측은 적층이 $[0_5/90_5]_s$ 의 경우의 결과이다. 하지만 이 경우 90°층의 비율이 증가해도 0°층의 두께가 변하면 D1 ~ D4 의 비율 변화의 일관성을 관찰할 수 없었다.

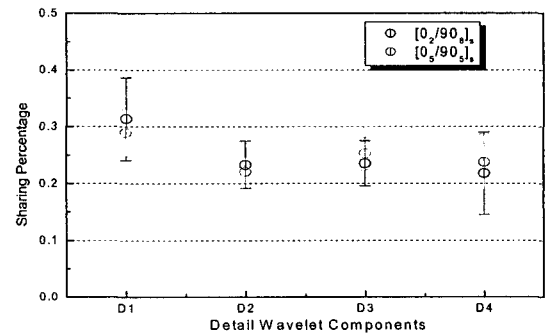
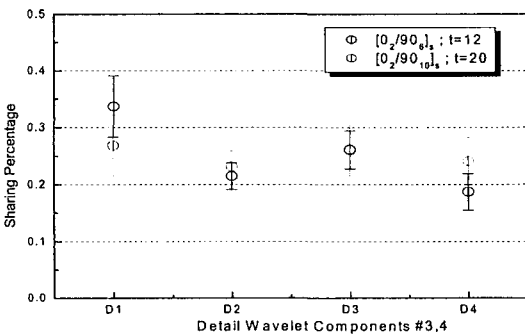
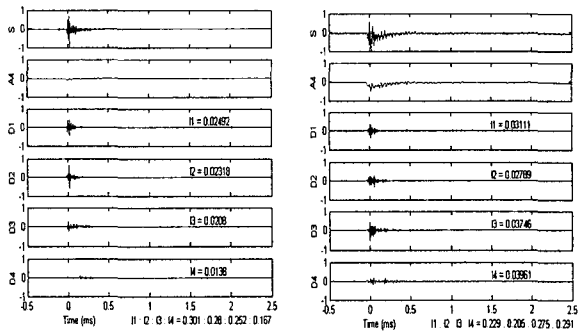
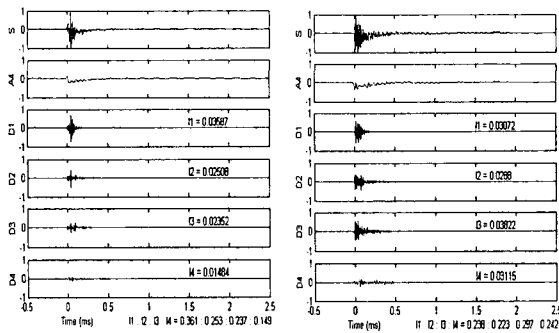


Fig. 4 WT of the matrix crack : thickness change 1.

Fig. 5 WT of the matrix crack : thickness change 2.

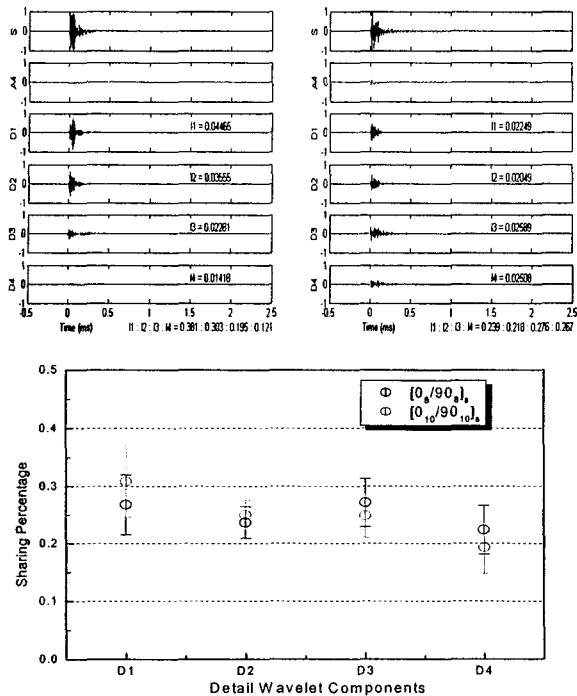


Fig. 6 WT of the matrix crack : thickness change 3.

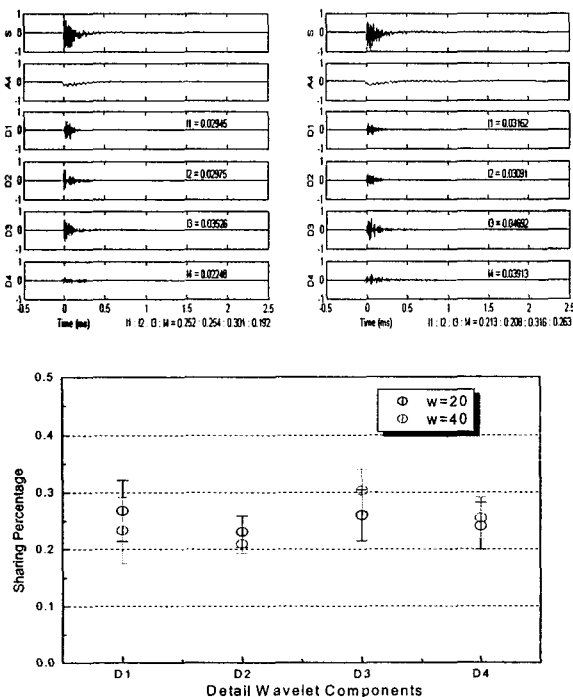


Fig. 7 WT of the matrix crack : width change.

Fig.6 은 두께 변화의 세 번째 경우로 0°층과 90°층의 비율을 고정된 상태에서 전체 두께를 변

화시킨 경우의 예이다. 좌측은 적층이 $[0_8/90_8]_s$, 우측은 적층이 $[0_{10}/90_{10}]_s$ 의 경우에 대한 WT 결과이다. 하지만 이 경우에도 0°층의 두께가 변화하는 경우 90°층의 두께변화와 무관하게 D1 ~ D4의 비율변화에 대한 일관된 규칙성을 보여주지 못했다.

Fig. 7은 시편의 폭을 변화시킨 예로 $[0_2/90_{10}]_s$ 의 적층에 대해 시편의 폭을 20mm에서 40mm로 변화시킨 경우의 예이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시편의 폭이 증가하는 예에서는 대부분의 시편에서 D1과 D2는 감소하는 반면 D3와 D4는 증가하는 일관된 경향성을 보였다.

4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 시편의 0°층 두께가 고정된 상태에서 90°층의 두께가 증가하는 경우 4 단계로 분리된 WT의 가장 높은 고주파 성분을 담당하는 D1 성분은 줄어들고 가장 낮은 고주파 성분인 D4의 비율은 늘어난다. 하지만 0°층의 두께가 변화하는 경우 성분비 변화의 경향성을 보여주지 못한다.
2. 시편의 폭이 증가할수록 높은 고주파 성분인 D1, D2의 비율은 감소하는 반면 보다 낮은 영역을 담당하는 D3, D4의 비율은 증가한다.

후기

본 논문은 과학기술부의 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발) 및 국가지정연구실 사업으로 지원되어 수행하였습니다.

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," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.11, 2000, pp180-190.
- (2) Harrison, G.A., Koren, I., Lewis M., and Taylor F.J., "Application of wavelet and Wigner analysis to gas turbine vibration signal processing", Proc. Of SPIE on Wavelet Applications V, Vol.3391, 1998, pp.490-501.
- (3) C. S. Hong, H. J. Bang, H. K. Kang, and C. G. Kim, "Real-time damage detection for smart composite materials using optical fiber sensors," *Proc. of the 13th International Conference on Composite Materials*, Beijing, China, ID. 1509, June 25-29, 2001.