

Wavelet 변환을 이용한 스마트 복합재 구조물의 저속 충격 손상 검출 연구

성대운* · 오정훈 · 김천곤 · 홍창선

한국과학기술원

1. 서론

일반적으로 복합재료는 금속 재에 비해 취성이 높고, 뛰어난 면내 특성에 비해 횡 방향 인장이나 층간 전단강도는 매우 낮은 특성이 있다. 따라서 복합 적층 구조물은 적층 용력이나 환경적인 반복, 조작에 의한 손상 그리고 외부 물체에 의한 충격(impact)등의 다양한 원인에 의해서 층간분리가 쉽게 일어날 수 있다.

스마트 복합재 구조물에서 충격에 의한 위험성을 감소시키기 위하여 충격을 감지하고 충격에 의한 손상을 평가할 수 있는 시스템을 구성하는 것은 스마트 복합재 구조물을 연구하는데 중요한 부분을 차지한다. 항공기의 조정면이나 정밀도를 요하는 인공위성 구조물에 센서를 부착하고 운용 중에 센서 신호를 모니터링 하여, 충격 하중이 가해진 위치와 충격 하중의 크기를 운행 중에 실시간으로 검출하고, 또한 충격에 의한 손상의 발생 여부와 손상 발생 시 손상의 위치와 정도를 검출하는 것이 가능하다.

본 연구의 최종 목적은 스마트 복합재 구조물의 충격 검출 및 손상 발생, 손상 정도 검출이며, 여기에서 논하려는 연구 내용은 그 중에서 저속 충격에 의해 발생하는 손상의 발생 여부와 손상의 정도를 검출하는 것이다.

지금까지의 연구에서 충격 하중이 가해진 위치와 충격 하중의 크기를 평가하는 연구[1]를 수행하였다. 현재 알루미늄 사각형 평판과 복합재 적층 평판에 대한 충격 위치 검출 연구가 수행되었다.

복합재 적층판에 가해지는 저속 충격 현상과 그에 의해 발생하는 손상에 대한 많은 연구[2]가 수행되었다. 이러한 연구는 주로 충격에 의한 복합재 적층판의 반응을 유한요소법으로 해석하고 층간분리 손상을 비파괴 검사하는 연구가 있었으나 충격 손상을 실시간으로 검출하려는 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 스마트 구조물의 센서로 일반적으로 많이 사용되는 압전 센서를 이용하였다. 지난 연구에서 센서의 신호 처리를 위하여 시간-주파수 분석법 중에서 STFT(Short-Time Fourier Transform)을 이용하였으며[5], 본 연구에서는 시간-주파수 분석 방법 중에서 Wavelet 분석법을 이용하였다. 이 방법을 이용하여 저속 충격에 의해 발생하는 손상의 실시간 검출에 대한 연구를 수행하였다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1. 저속 충격에 의해 발생한 손상 검출

본 연구는 복합재 구조물에 대한 저속 충격 손상 검출에 대한 것이다. 지금까지의 연구는 저속 충격에 의해 발생한 층간분리 손상에 대하여 구조물의 운용 후의 비파괴 검사 방법에 대한 연구였다. 이러한 비파괴 검사 방법으로는 초음파를 이용한 C-Scan 법이나 X-Ray 검사법 등이 사용되고 있다. 그러나 기존의 방법은 스마트 구조물에 적용하여 운용 중에 사용하는 것은 불가능하며 많은 검사 시간과 비용을 요구한다.

압전 센서와 광섬유 센서 등이 부착된 스마트 복합재 구조물에 저속 충격이 발생한 경우 과도한 충격 하중에 의하여 센서로부터 진동 응답과 손상이 발생할 때 발생하는 음향파 방출 신호를 동시에 얻을 수 있다. 이 때 진동 응답의 주파수 스펙트럼으로부터 구조물의 고유주파수를 얻고, 이미 알고 있는 건전한 구조물의 고유주파수와 손상에 의해 감소된 굽힘 강성으로 감소된 고유주파수를 비교하여 손상 발생 및 손상 정도 검출이 가능하다. 그러나 저속 충격 현상은 실험실에서 가하는 화이트 노이즈 스펙트럼에 가까운 이상적인 충격 하중이 아니므로 깨끗한 주파수 응답을 얻는 것이 매우 어렵고 고유주파수를 고르는 것이 매우 어

렵다. 또한 어느 정도 큰 손상이 있을 경우에만 고유주파수가 많이 변하게 되며 작은 손상에 대해서는 고유주파수 변화가 매우 작아 차이를 알아내기 쉽지 않은 단점이 있다. 이와 같이 고유주파수 변화를 이용하여 손상을 검출하는 방법 외의 다른 신호 처리 방법이 필요함을 알 수 있다.

본 연구에서는 충격이 발생하는 순간 순간에 대한 주파수 응답 즉, 시간-주파수 응답을 이용하여 손상 검출을 시도하였다. 본 연구 내용에서는 그 중에서 가장 최근에 개발된 신호 처리 방법인 Wavelet 변환을 이용하여 손상 신호를 분석하였다.

2.2. Wavelet Transform

일반적으로 신호 처리 기법은 일관성 있는 신호(stationary signal)를 대상으로 주파수 응답이나 스펙트럼 분석을 수행하는 것이 보통이다. 이러한 신호 처리 방법으로 간단한 구조물이나 진동 중인 기계 구조물에 대하여 이상이 발생할 경우 이를 진단하기 위하여 신호를 취득하고 고유주파수 변화 등을 측정하여 이상 유무를 진단할 수 있다.

그러나 이러한 신호 처리 방법으로 일관성이 없는 신호(non-stationary signal)나 계속적인 변화가 있는 신호(transitory characteristics), 순간적으로 변하는 신호를 처리하는 것은 어려운 단점을 가지고 있다. 이러한 신호에 대한 특성을 파악하기 위하여 주파수 특성 뿐만 아니라 시간에 따른 주파수 특성을 구함으로써 분석이 가능할 수 있다.

Wavelet 해석은 지금까지의 다른 신호 해석 방법이 분석하지 못했던 신호의 특성인 신호의 경향성(trends), 신호의 단절(breakdown points), 신호의 고차미분치의 불연속성(discontinuities in higher derivatives), 유사성(self similarity)과 같은 신호의 과도기적 특성을 분석하는 장점을 가지고 있다. 이 해석의 오래되지 않은 역사에도 불구하고 빠른 속도로 위의 응용 연구가 진행 중이다. 복합재 구조물의 파손과 손상이 발생할 때의 신호는 위와 같은 과도기적 성질의 신호이므로 위의 해석법은 매우 유용하다.

Fourier 변환의 기본 함수인 Sine 함수는 음의 무한대에서 양의 무한대까지 연장된 형태이지만, wavelet 기본 함수는 평균 값이 영이며 국

부 구간에 존재하는 파형이다. Sine 파는 부드러우며 예측 가능하나, wavelet은 불연속적(irregular)이며 불균형(asymmetric)한 함수이다. 아래 그림 1에서처럼 Fourier 변환은 신호를 분해하여 여러 주파수와 위상의 Sine 파로 분해하는 것이며, 이와는 다르게 wavelet 변환은 원형의 wavelet 기본 함수의 스케일되고(scaled) 수평이동된(shifted) 형태의 함수로 분해하는 것이다.

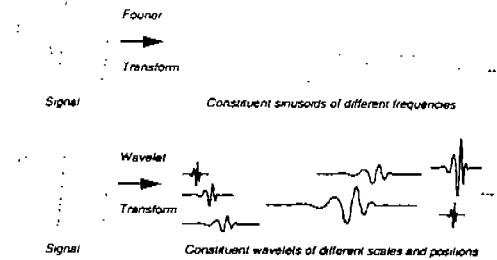


그림 1. Fourier 변환과 Wavelet 변환의 비교

CWT(Continuous Wavelet Transform)는 다음과 같이 정의되며,

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

여기서, $a > 0$, $b \in \mathbb{R}$ 는 각각 스케일(scale, dilation)과 수평이동(translation)을 나타내는 파라미터이다. $\Psi(t)$ 는 wavelet 해석 함수이고 *는 공액복소수(complex conjugate)를 나타낸다. 식 (1)의 결과값은 스케일과 수평이동 파라미터에 대한 wavelets 계수이다.

실제 계산을 위하여 DFT(Discrete Fourier Transform)의 경우에서처럼 DWT (Discrete Wavelet Transform)에서도 스케일 파라미터 a 와 수평이동 파라미터 b 는 나뉘어져야(discretization) 한다. DWT에서 $x(t)$ 의 wavelet 전개와 wavelet 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sum_j \sum_k \alpha_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

$$\alpha_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt = \langle x(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle \quad (3)$$

여기서, $\alpha_{j,k}$ 는 $x(t)$ 의 wavelet 계수이고 $\Psi_{j,k}$

는 해석 wavelet 함수 Ψ 의 스케일과 수평 이동에 의하여 만들어진 이산 기본 함수이다. 정수 j 와 k 는 각각 스케일과 수평이동의 파라미터이다. 이산화된 wavelet은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k) \quad (4)$$

Wavelet 해석에서 신호 $x(t)$ 는 높은 스케일의 저주파수 성분을 나타내는 근사 성분(approximations)과 낮은 스케일의 고주파수 성분을 나타내는 세부 성분(detail)으로 표현된다. 다른 이진 스케일(dyadic scales)을 선택함으로써 신호는 여러 낮은 해상도의 성분으로 분해될 수 있으며, 이를 wavelet 분해 구조(wavelet decomposition tree)라고 부른다. 그림 2에서 신호 S 를 4단계로 분해한 것을 보여준다. 신호 S 는 낮은 스케일의 세부성분 D_1 과 그 보다 큰 스케일의 세부성분 D_2, D_3, D_4 와 높은 스케일의 근사 성분 A_4 로 분해된다.

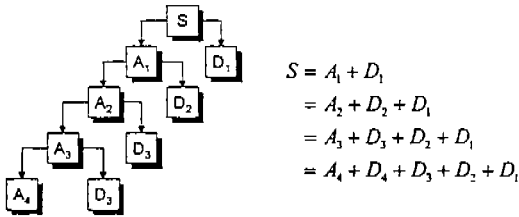


그림 2. Wavelet Decomposition Tree (4th Level)

2.3. 저속 충격 실험 및 결과

저속 충격 실험을 수행하였다. 우선 문헌[2]에서 사용된 자유 낙하식 저속 충격 시험기를 이용하였으며, 문헌에서 사용된 적층판인 한국화이하의 Gr/Ep 프리프레그(prepreg)를 이용한 $[0_2/90_4]_S$ 적층각을 갖는 직교 적층판을 사용하였다. 복합재 적층판에 압전 세라믹 센서를 부착하였다. 여기에 사용된 압전 세라믹 센서가 감지할 수 있는 최고 주파수는 360 kHz이다.

문헌에서처럼 저속 충격을 3.7 J로 가하였을 경우 문헌에서와 같은 땅콩 모양의 4 cm x 2 cm 정도의 충격분리가 발생하였음을 C-Scan으로 확인하였다. 6 J로 충격을 가하였을 경우는 시편의 밑면이 완전히 파손되어 최종 파단 형태

를 나타내었다.

파손이 발생할 때 생기는 음향파는 기존의 문헌 [3]에서 모재균열 시는 45~100 kHz의 주파수 영역을 가지고 충격분리, 섬유파단 형태일 경우 210~260 kHz의 주파수 영역을 발생시킨다. 그러므로, 샘플링 주파수를 500 kHz로 하여 관심 주파수 밴드폭을 250 kHz 내로 하였다.

0.1 J, 3.7 J, 6 J의 에너지로 저속 충격을 가하였다. 압전 세라믹 센서의 신호를 디지털 오실로스코프와 PC를 이용하여 취득하였다. 이 신호를 MATLAB을 이용하여 신호 처리하였다.

0.1 J의 에너지로 충격을 가하였을 때의 wavelet 변환 결과를 그림 3에서 보였다. Db4 wavelet 해석 함수를 이용하였으며, 그림 2에서처럼 4단계에 걸쳐 분해하였다. 그림 3의 맨 위의 S는 원래의 압전 세라믹 신호를 나타낸다. 단계별 고주파수 성분인 세부 성분(Detail)은 $D_1 \sim D_4$ 에 나타내었으며, 근사 성분은 A_4 에서 나타내었다.

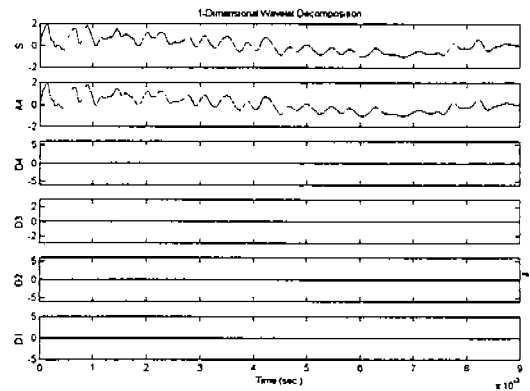


그림 3. 0.1J 충격 시 압전세라믹 센서신호의 Wavelet Decomposition 결과.

0.1 J의 적은 에너지로 충격을 가한 경우는 손상이 발생하지 않았으므로 손상에 의한 음향파 신호 성분을 포함하지 않으므로 낮은 스케일의 고주파수 성분인 $D_1 \sim D_4$ 에서 wavelet 계수가 나타나지 않음을 알 수 있다.

3.7 J로 충격을 가한 경우에는 문헌 [2]에서처럼 모재균열과 충격분리 손상이 발생함을 알 수 있으며, 문헌[5]에서 40 kHz와 160 kHz를 중심으로 고 주파수 영역이 발생함을 볼 수

있으며, 손상의 발생 시점도 2 msec 정도임을 볼 수 있다. 그림 4에서 모재 균열과 층간분리에 의한 고주파수 세부 성분이 D1~D4에서 나타남을 볼 수 있으며, 시간에 따른 wavelet 계수를 감지하면 손상 발생 시점을 검출할 수 있게 된다.

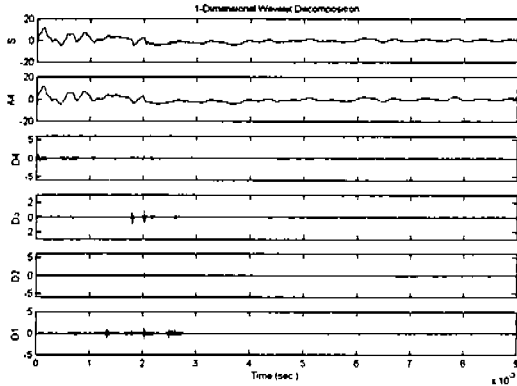


그림 4. 3.7J 충격 시 압전세라믹 센서신호의 Wavelet Decomposition 결과.

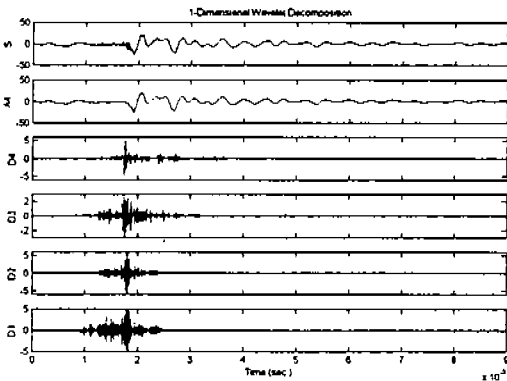


그림 5. 6 J 충격 시 압전세라믹 센서신호의 Wavelet Decomposition 결과.

6 J일 경우는 적층판의 뒷면이 완전히 파손되는 경우로 문헌 [5]에서처럼 40 kHz와 200 kHz 영역에서 큰 고 주파수 영역을 볼 수 있으며, 그림 5에서 고 주파수 세부 성분이 크게 나타남을 알 수 있다. 모재균열과 층간분리와

최종 파단 현상인 섬유파단 현상이 나타남에 따라 비교적 큰 wavelet 계수를 보여주고 있다. 기존의 신호 처리 방법인 FFT만을 하게 되면 높은 주파수 영역은 손상의 발생 여부를 구분하기 어려우며, 손상 발생 시점도 검출하기 어려운 단점을 가지고 있었다.

3. 결론 및 고찰

지금까지의 연구 결과 압전 센서를 이용하여 저속 충격 시에 손상 발생을 검출하는 방법으로 시간-주파수 분석법 중에서 wavelet 변환 방법을 이용하였다. 그 결과 손상의 발생 여부와 정도, 그리고 손상 발생 시점을 운용 중 검출할 수 있는 가능성을 보여주었다.

앞으로의 연구 방향은 실시간으로 센서 신호를 처리하여 손상 발생 여부를 검출할 수 있는 시스템을 구성할 것이다. 또한 스마트 복합재 구조물의 충격 발생 시 충격의 위치, 크기와 동시에 손상의 발생 여부와 발생 시점, 손상의 종류와 정도를 검출할 수 있는 시스템에 대하여 연구를 계속할 것이다.

4. 후기

본 연구는 한국과학재단의 연구지원(KOSEF 96-0200-05-01-3)에 의하여 이루어 졌으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

5. 참고 문헌

- [1] 오정훈, 성대운, "신경회로망을 이용한 복합재 적층판의 충격위치 검출," 한국 복합재료학회 논문집, 1998. 4. 24.
- [2] 최익현, "저속충격을 받는 복합적층판의 거동과 손상에 대한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1994.
- [3] 이강용, "열가소성 복합재료의 층간 파괴에서의 AE 특성," 한국복합재료학회지, 제 6 권 제 1 호, 1993.
- [4] D.E. Newland, *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis*, Longman, 1995
- [5] 성대운, 오정훈 "시간-주파수 응답을 이용한 저속 충격 손상 검출 연구," 1998년 추계복합재료학회 초록집.