

論文

웨이블릿 변환을 이용한 스마트 복합적층판의 충격 손상 검출 연구

성대운* · 오정훈* · 김천곤* · 홍창선*

Impact Damage Detection of Smart Composite Laminates
Using Wavelet Transform

D.U. Sung*, J.H. Oh*, C.G. Kim* and C.S. Hong*

ABSTRACT

The objective of this research is to develop the impact monitoring techniques providing impact identification and damage diagnostics of smart composite laminates susceptible to impacts. This can be implemented simultaneously by using the acoustic waves by the impact loads and the acoustic emission waves from damage. In the previous research, we have discussed the impact location detection process in which impact generated acoustic waves are detected by PZT using the improved neural network paradigm. This paper describes the implementation of time-frequency analysis such as the Short-Time Fourier Transform (STFT) and the Wavelet Transform (WT) on the determination of the occurrence and the estimation of damage.

초 록

지속 충격과 같은 충격 하중은 복합재 구조물에 중요한 손상의 요인이 되며, 충격에 의해 발생한 층간분리와 같은 손상은 쉽게 검출하기 힘들며 구조물의 큰 위험 요인이 될 수 있다. 본 연구에서 이러한 충격 하중을 계속적으로 감시할 수 있는 스마트 복합재 구조물의 충격 모니터링 시스템 개발의 기초 연구를 수행하였다. 충격 모니터링이란 충격이 발생하였을 때 충격 하중이 발생한 위치를 검출하고, 충격에 의하여 구조물에 손상이 발생하였는지 판단하고, 발생하였다면 어느 정도의 손상인지를 평가할 수 있는 시스템을 말한다. 본 연구에서는 이 시스템의 첫 단계인 복합적층 평판에 대한 충격 위치 검출 연구에 이어서 두 번째 단계로 충격 손상의 발생 여부를 실시간으로 검사할 수 있는 방법을 연구하였다. 본 연구에서는 충격에 의한 PZT 신호를 시간-주파수 해석 방법인 웨이블릿 변환을 이용하여 손상 모니터링 하는 연구를 수행하였다.

1. 서 론

본 연구는 스마트 복합재 구조물의 안전 진단 시스템(structural health monitoring system)에 관한 것

이다. 구조물에 일어나는 여러 외란 중에서 복합적층판에 층간분리(delaminations)와 같은 심각한 내적 손상(internal damage)을 일으킬 수 있는 충격 하중(impact loads)에 대한 연구를 수행하였다. 충격을 감

시하는 것을 충격 모니터링(impact monitoring)이라고 정의하였다. 충격 모니터링이라는 의미는 안전 진단 시스템이 구조물에 가해지는 급격한 하중(exceeding loads), 급격한 착륙(hard landings), 충격 하중 등을 계속적으로 감시하고, 구조물의 상태(변형률, 가속도, 온도 및 습도 등)를 측정하는 전반적인 구조물 모니터링 중에서 충격 하중에 중점을 둔 것을 의미한다. 이는 두 가지 부분으로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 충격 검출에 관한 것이며, 두 번째는 충격 손상 검출 및 손상 평가에 관한 것이다. 이 시스템은 충격이 발생하는 동시에 두 가지 평가가 동시에 이루어지는 시스템을 의미한다. 이에 대한 개념적인 개략도를 Fig. 1에서 나타내었다. 충격 하중에 의해 발생하는 음향파를 이용하여 신경회로망으로부터 충격 위치를 검출하고, 동시에 시간-주파수 해석 기법을 이용하여 충격 하중에 의하여 손상이 발생하였는지 검출하고, 만약 층간분리와 같은 손상이 발생하였다면 어느 정도의 크기를 갖는 손상인지 평가하는 것이 가능하다. 여기서는 두 번째 단계인 충격 손상 검출 및 손상 평가에 관한 내용을 설명할 것이다.

최근에는 구조물에 부착된 센서로부터 실시간으로 얻은 신호를 처리하여 유용한 정보(구조물의 동적 특성 변화, 시스템 ID, 패턴 인식, 자동화된 의사 결정, 필터링 및 예측 등)를 얻을 수 있는 신호 및 정보 처리 방법이 스마트 구조물 연구에서 중요한 부분을 차지하며,

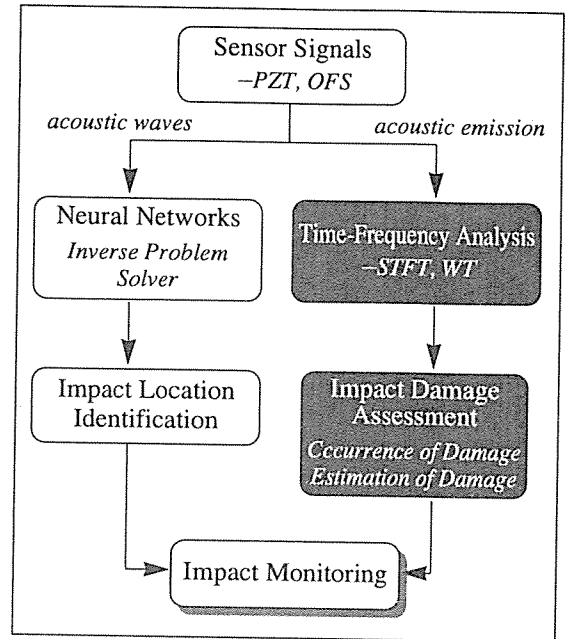


Fig. 1. Block diagram of the impact monitoring procedures

이러한 새로운 신호 및 정보 처리 방법을 Table 1에서 정리하였다[1]. 지금까지의 연구에서 신경회로망 기법을 충격 모니터링의 첫 번째 단계인 충격 위치 검출에 적용하였으며[2], 본 연구에서는 충격 모니터링의 두 번째 단계인 실시간 충격 손상 모니터링 시스템을 위하여 웨이블릿 변환(Wavelet Transform ; WT)과 같은 시간-주파수 분석 방법(time-frequency analysis)을 적용하였다.

본 논문에서는 충격 모니터링의 두 번째 단계인 외부의 물체에 의하여 저속 충격이 가해졌을 경우에 대하여 충격 하중이 가해지는 동안 충격에 의하여 손상이 발생하였는지 검출하고 그 손상 정도를 평가할 수 있는 연구를 수행하였다. 지금까지 시간-주파수 해석을 이용한 구조물 건전성 모니터링에 관한 연구는 다음과 같다. Loh [3] 등은 지진에 의해 발생하는 구조물의 진동 신호를 WT하여 지진 모드를 구별하였고, Alkhaidy [4] 등은 1 DOF 진동 시스템을 모델링하고 이 시스템에 여러 번의 충격을 가하고 그 반응을 WT하여 충격이 가해지는 시점을 검출하는 연구를 수행하였다. Harrison [5] 등은 WT와 Wigner 변환을 이용하여 가스터빈 엔진의 진동 신호를 시간-주파수 해석하여, 가스터빈의 이상 유무를 모니터링할 수 있는 연구를 수행하였다. Wang [6] 등은 WT를 이용하여 기

Information Processing Functions	Key Technologies
Nonlinear Modeling	Neural Networks
System Identification	Bayesian Estimation, ARMA Modeling, Kalman Filtering, Neural Networks
Filtering and Prediction	Kalman Filtering, Neural Networks
Feature Extraction	Fourier and Wavelet Transform, Statistical Feature Analysis
Pattern Recognition	Bayesian Decision Theory, Expert/Fuzzy Systems, Neural Networks, Classical Clustering
Automated Decision Making	Bayesian Decision Theory, Expert/Fuzzy System, Neural Networks
Data Fusion	Neural Networks, Kalman Filtering, Expert/Fuzzy Systems

Table 1. Information processing functions and associated key technologies

어박스 진동 신호를 해석하여 기어의 손상 여부를 검출하는 연구를 수행하였다.

지금까지의 연구에서 볼 수 있듯이 시간-주파수 해석을 이용한 손상 검출 연구는 주로 복잡한 경향을 가지는 기계류의 진동 신호 모니터링에 대하여 적용되어져 왔다. 작동하는 기어박스와 같은 구조물은 계속적인 진동으로 그 기계 구조의 고유주파수에 해당하는 신호를 계속적으로 출력하게 된다. 만약 기계의 어느 한 부분에 이상이 발생하게 되면 구조물 자체의 고유주파수가 변화하여, 시간에 따라 고유주파수 대역을 조사하게 되면 시간에 따른 고유주파수 변화를 측정할 수 있게 된다. 또한 복합적층판의 손상 및 파손처럼 복잡한 메커니즘을 가지는 현상에 대하여 적용이 가능하며, 이는 복합재 구조물에 충격과 같은 원인으로 손상이 발생하면서 전파되는 고주파수의 음향 방출 신호를 시간-주파수 해석을 이용하여 모니터링 하는 것이 가능하게 된다. 이러한 시간-주파수 해석이 복합적층판의 충격 손상 모니터링에 적용된 경우는 아직 없었다. 지금까지의 복합재 구조물의 손상 검출에 관한 연구는 저속 충격에 의해 발생한 층간분리 손상에 대하여 구조물의 운용 후의 비파괴 검사 방법에 대한 연구가 대부분이었다. 이러한 비파괴 검사 방법으로는 초음파를 이용한 C-Scan 방법이나 X-Ray 검사 방법 등이 사용되고 있다. 그러나 기존의 검사 방법은 스마트 구조물에 적용하여 운용 중에 사용하는 것은 불가능하며 많은 검사 시간과 비용이 요구하는 단점이 있다.

WT는 시간에 따라 급격하게 변화하는 신호에 대한 시간-주파수 분석에 매우 적합하다고 알려져 있으며, 본 연구에서는 저속 충격에 의하여 발생하는 손상에 따른 음향 방출 신호를 시간-주파수 분석하여 손상의 발생 시점을 검출하는 연구를 수행하였다. 다음으로 웨이블릿 변환된 세부 신호의 크기를 이용한 손상 정도에 대한 분석 가능성을 연구하였다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1. 저속 충격 손상 검출

지금까지 구조물의 운용 중 안전 검사 연구가 많이 이루어졌지만, 대부분 어떤 원인에 의하여 발생한 손상에 대하여 구조물의 동적 특성, 변형을 변화 등을 측정하여 손상을 검출하는 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 압전센서와 광섬유 센서 등이 부착된 스마트 복합재

구조물에 저속 충격이 발생한 경우 과도한 충격 하중에 의하여 센서로부터 진동 응답과 손상이 발생할 때 발생하는 음향과 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[7]. 그러나 저속 충격 현상은 실험실에서 가하는 화이트 노이즈 스펙트럼에 가까운 이상적인 충격 하중이 아니므로 깨끗한 주파수 응답을 얻는 것이 매우 힘들고 고유주파수를 고르는 것이 쉽지 않다. 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.

저속 충격에 의하여 발생하였을 지도 모르는 손상을 검출하기 위하여 PZT 신호를 시간-주파수 분석하였다. PZT는 구조물의 진동 응답에 해당하는 주파수와 복합재 구조물의 충격하중에 의한 음향과 전파와 손상 발생 시 발생하는 탄성파인 고주파의 음향 방출 신호를 검출할 수 있는 광대역 센서로의 장점을 가지고 있다. 이 센서 시스템을 이용하여 구조물의 충격 하중을 모니터링하여 충격 하중의 위치를 검출할 수 있으며, 다음으로 충격에 의한 손상 발생을 모니터링할 수 있다.

복합적층판에서 발생하는 손상의 모드에는 모재 파손에 의한 모재균열, 층간분리 손상과 섬유 파단 손상으로 구분할 수 있다. 이러한 손상 발생에 따라 탄성파인 음향 방출 신호가 전파되며, 여러 문헌에 의하면 손상의 종류와 파손 모드에 따라 여러 형태의 다른 주파수 대역 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. Gr/Ep 적층판의 경우에는 모재균열과 층간분리가 지배적일 경우는 대략 20 kHz~80 kHz 대역이 지배적이고, 섬유 파손일 경우 더 높은 120 kHz~200 kHz 대역에서 지배적인 주파수가 검출된다. 즉 어느 특정 주파수가 검출되는 것이 아니라 어느 대역의 주파수 대역에서 주파수가 검출된다. 또한 파손 모드에 따라 다른 형태의 주파수 대역을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 저속 충격 모드에서 발생하는 손상에 따른 주파수 대역 특성을 시간에 따라 측정하였다. 일반적으로 층간분리와 모재균열에 의한 음향 방출 주파수 대역인 20 kHz~200 kHz 대역을 측정할 수 있는 PZT를 선택

하여 실험에 사용하였다.

본 연구에서는 충격이 발생하는 순간 순간에 대한 주파수 응답 즉, 시간-주파수 응답을 이용하여 손상 검출을 시도하였다. 이러한 분석법 중에서 기존에 많이 사용된 STFT(Short-Time Fourier Transform)을 이용하였으며, 최근에 개발된 신호 처리 방법인 WT를 이용하여 손상 신호를 분석하였다. WT는 FFT와 같은 빠른 계산 속도를 가지고 있으며, 시간에 따라 급격히 변화하는 신호를 분석할 수 있는 최적의 방법으로 알려져 있으며, 매우 높은 시간, 주파수 해상도를 가지고 있다.

Fig. 1에서처럼 충격에 의하여 발생한 음향파 진파를 이용하여 충격의 위치를 검출한 후, 충격에 의하여 손상이 발생하였다면 음향방출에 의한 고주파수 신호를 검출할 수 있을 것이다. WT를 이용하여 시간에 따른 신호의 저주파수 진동 신호와 고주파수 손상 신호를 단계별로 분리할 수 있다. 이로부터 손상이 발생한 시점을 검출하는 것이 가능하다. 주파수 특성의 정도를 나타내는 웨이블릿 계수를 이용하여 손상의 정도를 평가하는데 이용할 수 있다.

2.2. 시간-주파수 분석법(STFT, WT)

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 적용하여, 구조물에 이상이 발생할 경우 진동 응답 신호를 취득하여 고유주파수 변화 등을 측정하여 이상 유무를 진단할 수 있다. 그러나 이러한 신호 처리 방법으로 일관성이 없는 신호(non-stationary signal)나 급격히 변화하는 신호(transitory characteristics)를 처리하는 것은 적절치 못한 단점을 가지고 있다. 이러한 신호에 대한 과도기적 특성을 파악하기 위하여 시간에 따른 주파수 특성을 구함으로서 분석이 가능할 수 있다. 시간에 따른 주파수 응답을 구하기 위하여 세 가지 신호처리 방법이 존재한다. 첫 번째로 STFT가 있다. 이 방법은 시간 t 를 중심으로 짧은 데이터 윈도우(short data window) $g(t)$ 를 이용하는 것으로 스펙트럼 계수가 이 짧은 영역의 데이터에서 계산된다. 계산된 국부 스펙트럼 계수(local spectral coefficients)가 중심 시간 t 에서의 주파수 성분을 나타내게 된다.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

이 방법의 단점은 시간 영역과 주파수 영역 모두에서 높은 해상도를 가지기 어렵다는데 있다. 그 이유는 윈도우의 크기 T 에 대해 주파수 밴드폭은 $1/T$ 의 관계가 있기 때문에 시간 영역 대한 해상도를 높이기 위해 T 를 줄이면 주파수 밴드폭이 커지게 된다. 그러므로, 세밀한 시간 해상도와 정밀한 주파수 해상도를 모두 만족시킬 수 없는 단점이 있다. 두 번째는 위그너-빌 변환(Wigner-Ville transform)으로 시간 영역과 주파수 영역의 두 해상도를 높이기 위하여 개발되었다. 이 방법으로 해상도를 높일 수는 있지만, 많은 계산 시간이 요구되는 단점이 있다. 또한 전 시간 영역에서 계속되는 조화 함수의 기본적인 성질 때문에 완전히 국부적인 스펙트럼 분포를 얻는 것이 불가능하다는 단점이 있다.

WT는 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 방법의 오래되지 않은 역사에도 불구하고 빠른 속도로 응용 연구가 진행 중이

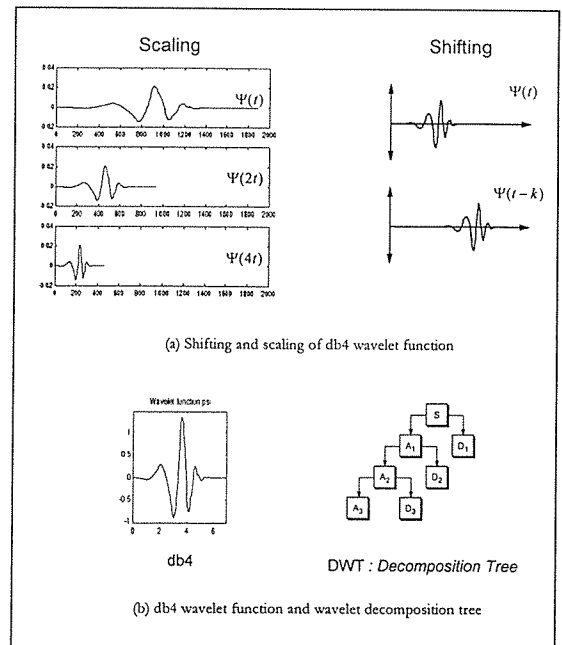


Fig. 2. Scaling and shifting of db4 wavelet function ; Wavelet decomposition tree

다. 복합재 구조물의 파손과 손상이 발생할 때의 음향 방출 신호는 위와 같은 과도기적 성질이 강한 신호이므로 이 분석 방법은 매우 유용하다.

푸리에 변환(Fourier transform)의 기본 함수인 sine함수는 음의 무한대에서 양의 무한대까지 연장된 형태이지만, 웨이블릿 기본 함수는 평균값이 영이며 국부 구간에 존재하는 파형이다. 푸리에 변환은 신호를 분해하여 여러 주파수와 위상의 sine파로 분해하는 것이며, 이와는 다르게 Fig. 2(a)에서처럼 WT는 원형의 웨이블릿 기본 함수의 스케일 되고, 수평 이동된 형태의 함수를 이용하여 신호를 분해하는 것이다.

CWT(Continuous Wavelet Transform)는 다음과 같이 정의되며,

$$CWT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

여기서, $a > 0$, $b \in \mathbb{R}$ 는 각각 스케일(scale, dilation)과 수평이동(translation)을 나타내는 파라미터이다. $\Psi(t)$ 는 웨이블릿 해석 함수이고 Ψ^* 는 공액복소 함수(complex conjugate)를 나타낸다. 식(2)의 결과는 스케일과 수평이동 파라미터에 대한 웨이블릿 계수이다. 실제 계산을 위하여 이산화된(discretized) 스케일 a 와 수평이동 b 를 이용하는 DWT(Discrete Wavelet Transform)를 사용한다. DWT에서 $x(t)$ 의 웨이블릿 전개와 웨이블릿 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sum_j \sum_k \alpha_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (3)$$

$$\alpha_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\Psi_{j,k}(t)} dt = \langle x(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle \quad (4)$$

여기서, $\alpha_{j,k}$ 는 $x(t)$ 의 웨이블릿 계수이고 $\Psi_{j,k}$ 는 해석 웨이블릿 함수 $\Psi(t)$ 의 스케일과 수평 이동에 의하여 만들어진 이산 기본 함수이다. 정수 j 와 k 는 각각 스케일과 수평이동의 파라미터이다. 이산화된 웨이블릿은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k) \quad (5)$$

웨이블릿 해석에서 신호 $x(t)$ 는 높은 스케일의 저주파수 성분을 나타내는 근사 성분(approximations)과 낮은 스케일의 고주파수 성분을 나타내는 세부 성분

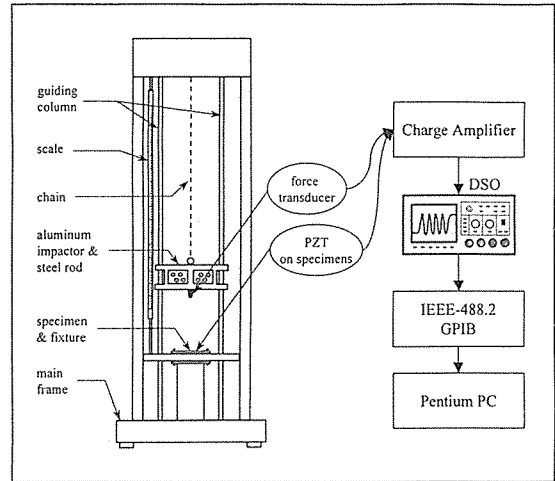


Fig. 3. Experimental setup

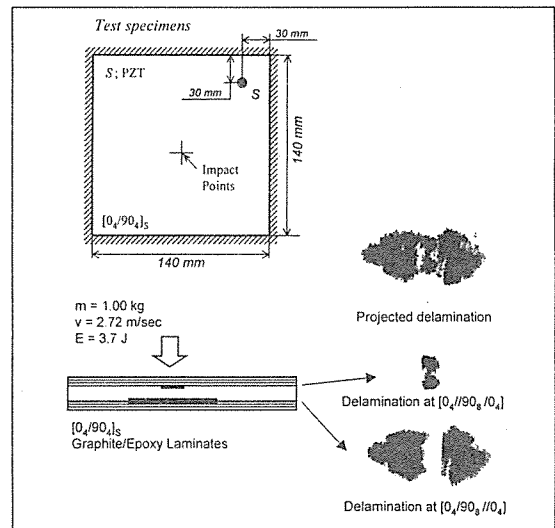


Fig. 4. Test specimens and the investigation of delaminations in 3.7J impacted plate using C-Scan

(details)으로 표현된다. 다른 이진 스케일(dyadic scales)을 선택함으로써 신호는 여러 낮은 해상도의 성분으로 분해될 수 있으며, 이를 웨이블릿 분해 구조(wavelet decomposition tree)라고 부른다. Fig. 2(b)에서 신호 S 를 세 단계로 분해한 것을 보여준다. 신호 S 는 낮은 스케일의 세부성분 $D1$ 과 그 보다 큰 스케일의 세부성분 $D2, D3$ 과 근사 성분 $A3$ 으로 분해된다.

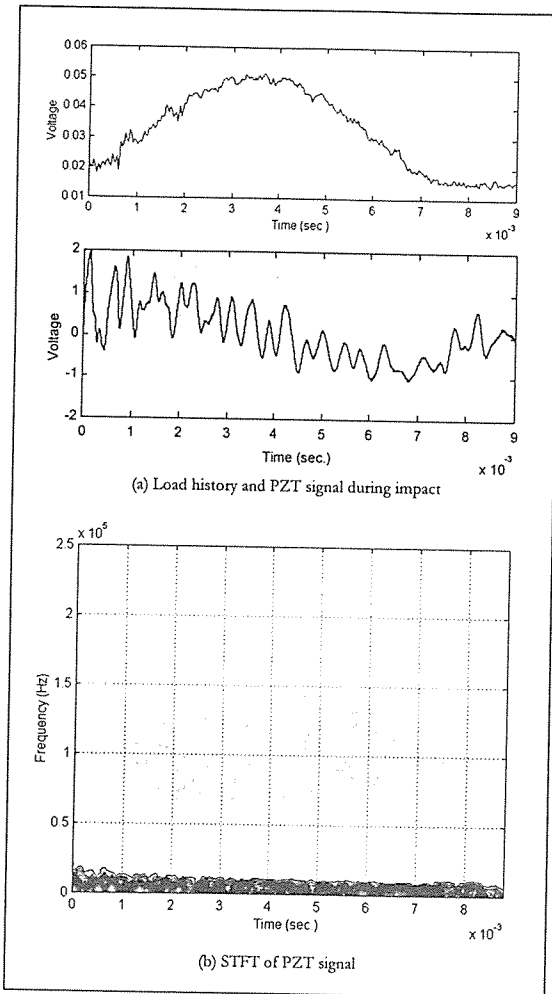


Fig. 5. Impact load history, PZT signal and the STFT of the signal during 0.1J impact

2.3. 저속 충격 실험 및 결과

저속 충격 시의 PZT 신호의 모니터링을 위하여 저속 충격 실험을 수행하였다. 저속 충격 현상과 충격 손상에 대한 연구를 참조하여 저속 충격 실험을 수행하였다[8]. 이 연구에서 사용된 자유 낙하식 저속 충격 시험기를 이용하였으며, 사용된 시편은 (주) 한국화이바 사의 Gr/Ep 프리프레그(prepreg)를 이용한 $[0/90_4]_s$ 적층각을 갖는 $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ 직교 적층판을 사용하였다. 사각 평판의 경계 조건은 고정 지지로 하였다. 시편의 끝단에 (주) Fuji Ceramics 사의 PZT를 부착하여 충격 시의 신호를 Tektronix 사의 TDS 420 디지털 오실로스코프와 펜티엄 PC를 이용

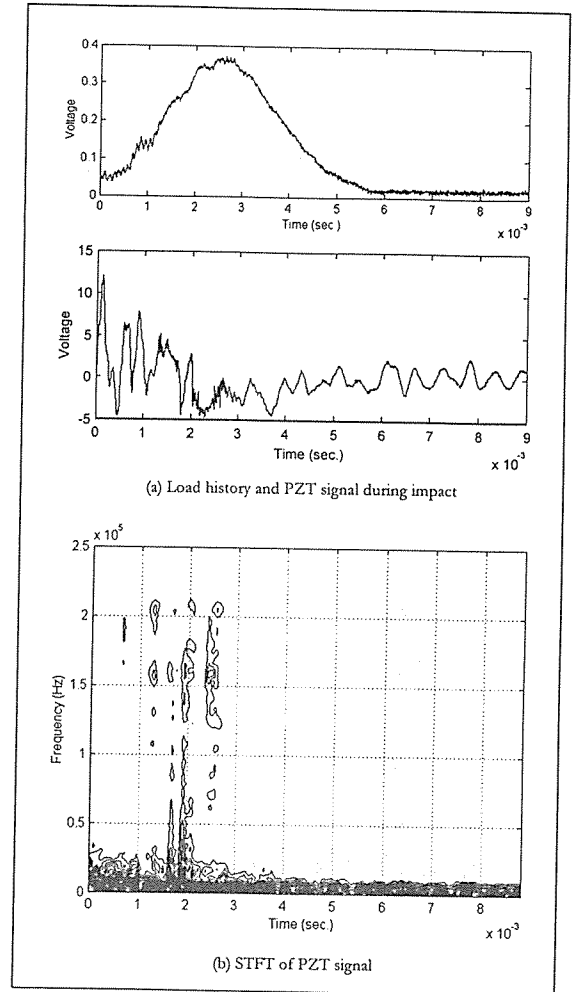


Fig. 6. Impact load history, PZT signal and the STFT of the signal during 3.7J impact

하여 취득하였다. Gr/Ep 복합적층판의 모재 및 섬유 손상 발생에 따른 음향방출 신호의 주파수 대역은 $20\text{kHz} \sim 200\text{kHz}$ 이므로, 이 영역까지 측정 가능한 PZT로 취득 주파수를 500kHz 로 충격 시의 신호를 취득하였다. 이 신호를 MATLAB을 이용하여 충격 시의 신호를 처리하였다. 저속 충격 실험 장치를 Fig. 3에서 보았다.

기존의 연구로부터 층간분리 손상을 일으키는 충격 에너지를 선택하여 저속 충격을 가하였다. 0.1J, 3.7J, 6J의 세 가지 종류의 에너지로 저속 충격을 가하였다. 문헌에서와 같이 저속 충격을 3.7J로 가하였을 경우 문헌에서와 같은 땅콩 모양의 $35\text{mm} \times 20\text{mm}$ 정도의

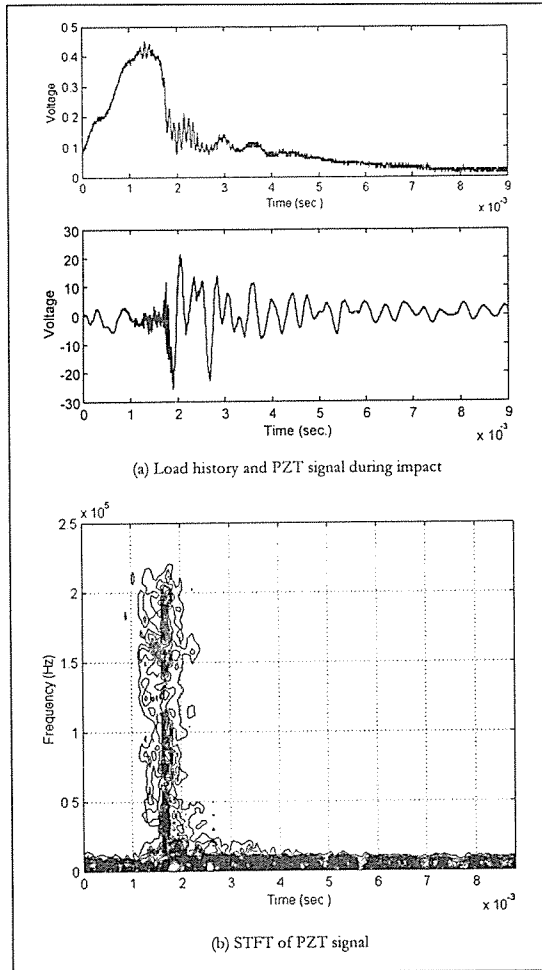


Fig. 7. Impact load history, PZT signal and the STFT of the signal during 6.0J impact

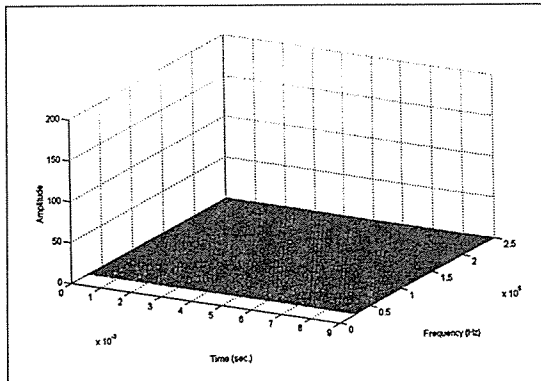


Fig. 8. 3D plot of STFT of PZT signal during 0.1J impact

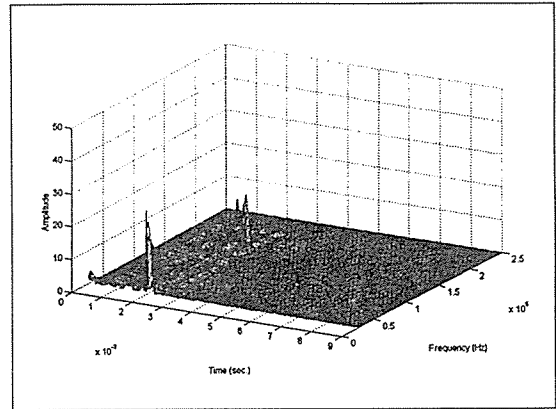


Fig. 9. 3D plot of STFT of PZT signal during 3.7J impact

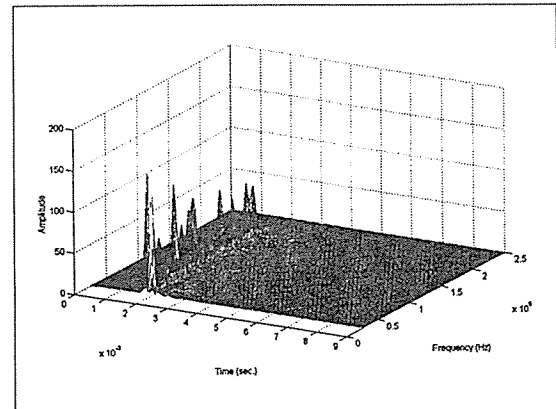


Fig. 10. 3D plot of STFT of PZT signal during 6.0J impact

충간분리가 발생하였음을 C-Scan으로 확인하였다. 이를 Fig. 4에서 보였다. 6J로 충격을 가하였을 경우는 시편의 밑면에 섬유 파손을 육안으로 확인할 수 있는 최종 파손 형태를 나타내었다.

충격 시 취득한 신호를 STFT와 WT 분석법을 사용하여 시간-주파수 분석하였다. 충격을 가하였을 때의 충격 하중 이력(impact load history), PZT 신호와 이 신호의 STFT 결과를 Fig. 5, 6, 7에서 나타내었다. STFT의 결과는 시간-주파수 영역에서의 주파수의 크기를 등고선으로 나타낸 것이다. 이해를 돕기 위하여 2차원의 등고선 그림을 3차원 등고선 형태로 Fig. 8, 9, 10에서 나타내었다. STFT 분석 결과의 시간 해상도는 대략 0.08msec 이었으며, 주파수 해상도는 0.98 kHz 이었다.

손상이 발생하지 않는 0.1J의 적은 에너지로 충격을

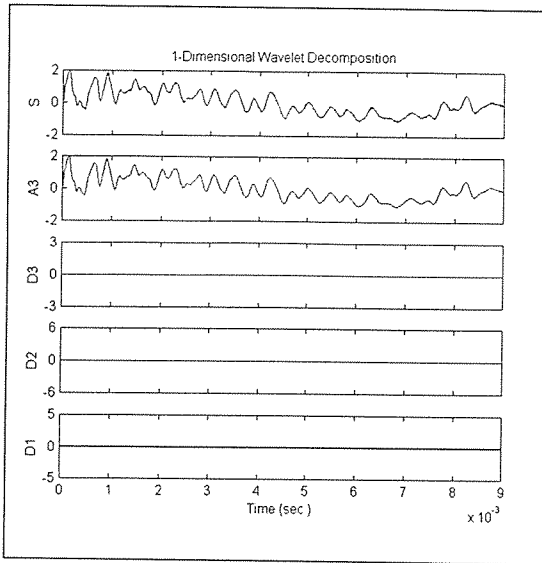


Fig. 11. PZT signal S, the detail signal $D1 \sim D3$, the approximation signal A3 by DWT during 0.1J impact

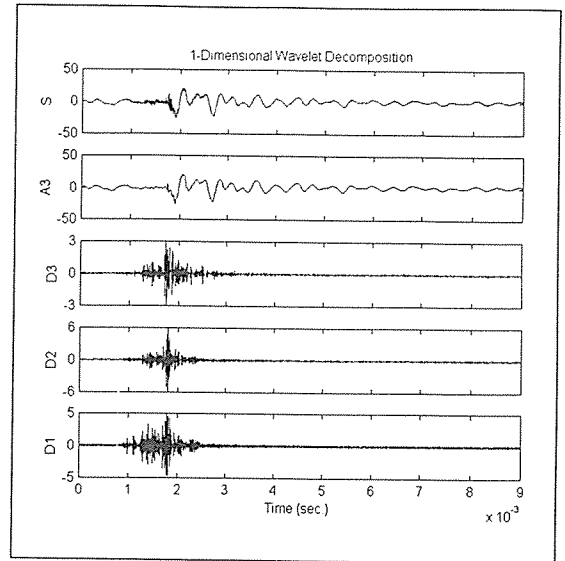


Fig. 13. PZT signal S, the detail signal $D1 \sim D3$, the approximation signal A3 by DWT during 6.0J impact

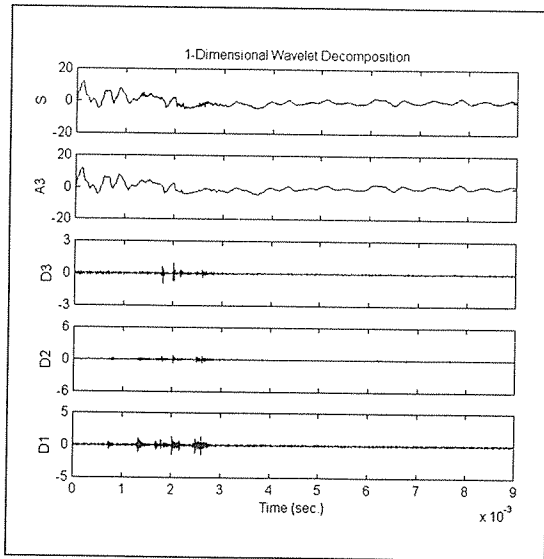


Fig. 12. PZT signal S, the detail signal $D1 \sim D3$, the approximation signal A3 by DWT during 3.7J impact

가했을 경우 Fig. 5에서 보이는 것처럼 낮은 주파수 영역에서만 신호가 발생함을 볼 수 있다. 이는 충격이 발생할 때 손상에 의한 음향 방출 신호가 나타나지 않았음을 보여주고 있으며, 구조물의 진동 신호인 저주파수 영역만 나타나는 것을 볼 수 있다. 3.7J로 충격을

가하였을 때를 Fig. 6에서 보았다. 3.7J의 경우는 모재 균열과 층간분리 손상이 발생함에 따라 30 kHz와 80 kHz, 150 kHz 주파수 대역을 중심으로 음향 방출에 의한 고주파수 영역이 발생함을 볼 수 있으며, 손상의 발생 시점은 1msec~3msec 정도임을 볼 수 있다. 6J일 경우는 적층판의 뒷면의 섬유 파단 현상을 관찰할 수 있는 경우로 대략 30 kHz, 80 kHz, 150 kHz 근처의 주파수 대역에서 더 높은 크기의 고주파수 영역을 볼 수 있으며, 그 크기도 3.7J 경우에 비해서 매우 높은 것을 Fig. 7에서 볼 수 있다. 그리고, 손상의 발생 시점도 더 앞 당겨져서 1.5msec~2.5msec 정도임을 알 수 있다. 분석 결과 저속 충격에 의하여 발생하는 손상에 의한 음향 방출 신호의 주파수 대역을 볼 수 있었으며, 이 주파수 특성으로부터 저속 충격에 의하여 급격히 발생하는 손상은 모재 손상뿐만 아니라 섬유 손상도 포함하는 것을 알 수 있다.

0.1J의 에너지로 충격을 가하였을 때의 WT 결과를 Fig. 11에서 보았다. Db4 웨이블릿 함수(4th Daubechies wavelet function)를 사용하였으며, 그림 2에서처럼 세 단계에 걸쳐 분해하였다. 그림에서 S는 원래의 PZT 신호를 나타낸다. 분해된 단계별 고주파수 성분인 세부 성분 $D1 \sim D3$ 에 나타내었으며 근사 성분은 A3에서 나타내었다. 0.1J의 적은 에너지로 충격을 가한 경우는 손상이 발생하지 않았으므로 손상에 의한

음향파 신호 성분을 포함하지 않고 낮은 스케일의 고주파수 성분인 $D1 \sim D3$ 에서 매우 낮은 웨이블릿 계수를 볼 수 있다. 3.7J로 충격을 가한 경우에는 Fig. 12에서처럼 모재균열과 층간분리 손상이 발생하는 경우로 고주파수 성분인 $D1 \sim D3$ 에서 어느 정도 큰 세부 웨이블릿 계수를 볼 수 있으며, 손상의 발생 시점도 1 msec~3 msec 정도임을 볼 수 있다. 6J일 경우는 모재균열, 층간분리와 최종 파손 현상인 섬유파단 현상이 나타남에 따라 Fig. 13에서 고주파수 성분인 $D1 \sim D3$ 에서 3.7J의 경우보다 더 큰 세부 웨이블릿 계수를 볼 수 있으며, 손상의 발생 시점도 1.5 msec~2.5 msec 정도임을 볼 수 있다.

WT와 STFT 모두 시간-주파수 해석이 가능하며 센서 신호를 계속적으로 시간-주파수 분석하여 손상의 발생 시점과 정도를 평가할 수 있음을 볼 수 있었다. 두 결과 모두 복합적층판의 손상 발생에 따른 음향 방출 신호의 발생 시간과 정도를 시간에 따라 정확히 측정할 수 있음을 보여주었다. WT를 이용한 방법이 STFT를 이용한 결과에 비하여 시간에 대한 해상도가 매우 높음을 볼 수 있으며, 많은 단계의 스케일 a 을 이용하게 되면 주파수 해상도도 높일 수 있다. 이렇게 얻은 여러 단계의 세부신호, 웨이블릿 계수의 크기를 이용하여 손상의 정도를 평가할 수 있는 가능성을 보였다. 기존의 신호 처리 방법인 푸리에 변환만으로는 전 시간 영역의 주파수 특성의 합이 표현되므로, 음향 방출과 같은 신호로부터 손상의 발생 여부를 구분하기 어려우며 손상 발생 시점도 검출하기 어려운 단점을 가지고 있었다. 이와 같은 시간-주파수 분석을 이용하여 센서 신호를 시간에 따라 감시함으로써 손상의 발생과 정도를 감시할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에는 스마트 복합적층판의 충격 모니터링 연구 중에서 두 번째 단계인 충격 손상 검출 연구에 관한 것이었다. 이 방법은 충격에 의한 음향파 전달과 손상에 따른 음향 방출을 동시에 모니터링하고, 충격의 위치와 손상에 대한 정보를 동시에 얻을 수 있음을 보였다. PZT를 이용하여 저속 충격 시에 손상 발생을 검출하는 방법으로 시간-주파수 분석법 중에서 STFT와 WT를 이용하였으며, 과도기 성격이 매우 큰 손상 신호를 처리하는 데는 WT가 더 많은 장점을 가지는

것을 알 수 있었다. 그 결과 손상의 발생 여부와 정도, 그리고 손상 발생 시점을 운용 중 검출할 수 있는 가능성을 보여주었다.

향후 연구 방향은 WT에 대한 보다 심도 깊은 연구를 바탕으로 여러 가지의 웨이블릿 기본 함수에 따른 신호 처리의 차이점, 웨이블릿 변환된 신호를 기존의 주파수 특성으로 비교 분석하는 방법 등에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다. 차후에는 이러한 시간에 따른 계수들을 입력으로 시간에 따라 연속적으로 손상의 정보를 판단할 수 있는 프로세서로서 신경회로망 기법 중에서 ART(Adaptive Resonance Theory)를 이용하는 방법을 이용한 실시간 손상 모니터링 연구도 필요할 것이다.

충격 모니터링의 첫 번째와 두 번째 단계를 서로 결합하는 연구가 진행 중이다. 또한 스마트 구조물의 운용 중 안전 검사 시스템 개발을 위하여 실시간 데이터 취득 보드와 MATLAB 프로그램을 연계하여 실시간으로 센서 신호를 취득하고 처리하여 손상 정보를 얻을 수 있는 시스템과 스마트 복합재 구조물의 충격 발생 시 충격의 위치, 크기와 동시에 손상의 발생 여부와 발생 시점, 손상의 종류와 정도를 검출할 수 있는 시스템에 대한 연구들이 이 분야의 효율성을 증대시키리라 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다. (과제 번호 : KOSEF 96-0200-05-01-3)

참고문헌

1. Lichtenwalner, P.F., White, E.V., and Baumann, E.W., "Information Processing for Aerospace Structural Health Monitoring", Proceedings of SPIE, Vol. 3326, 1998, pp.406-417.
2. 성대운, 오정훈, 김천곤, 홍창선, "신경회로망을 이용한 스마트 복합적층 평판의 충격 검출 연구", 한국한공우주학회, 투고 심사중.
3. Loh, C.H., and Lee, Z.K., "Substructural Identification of a Bridge - A FFT Based Spectral

Analysis", Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring, 1997, pp.111-121.

4. Alkhaidy, A., Noori, M., Hou, Z., Yamamoto, S., Masuda A., and Sone, A., "Health Monitoring Systems of Linear Structures Using Wavelet Analysis", Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring, 1997, pp.164-175.

5. Harrison, G.A., Koren, I., Lewis M., and Taylor F.J., "Application of wavelet and Wigner analysis to gas turbine vibration signal processing", Proceeding of SPIE on Wavelet Applications V, Vol. 3391, 1998, pp.490-501.

6. Wang W.J., and McFadden, P.D., "Application of Wavelets to Gearbox Vibration Signals for Fault Detection", Journal of Sound and Vibration, Vol. 192, No. 5, 1996, pp.927-939.

7. 성대운, 주상건, 김천곤, 홍창선, "신경회로망을 이용한 복합적층 보의 층간 분리 손상 검출", 한국한공우

주학회지, 제26권 제3호, 1998, pp.62-71.

8. Choi, I.H., and Hong, C.S., "Low-velocity Impact Response of Composite Laminats Consisdering Higher-order Shear Deformation and Large Deflection", Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 1, 1994, pp.157-170.

9. Newland, D.E., An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, 3rd Ed., Longman Group Lim, 1993.

10. Rao, R.M., and Bopardikar, A.S., Wavelet Transforms ; Introduction to Theory and Application, Addison-Wesley Inc., 1998.

11. Swami, A., Mendel J.M., and Nikias C.L., Higher-Order Spectral Analysis Toolbox, The Math Works, Inc., 1998.

12. Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., and Poggi, J.M., Wavelet Toolbox, The Math Works, Inc., 1999.