

## 論文

## 고분자 압전 필름 센서를 이용한 복합재 적층판의 고속 충격 손상 탐지

김진원\*, 김인걸\*\*\*

## Detection of High-Velocity Impact Damage in Composite Laminates Using PVDF Sensor Signals

Jin-Won Kim\*, In-Gul Kim\*\*\*

## ABSTRACT

The mechanical properties of composite materials may severely degrade in the presence of damage. Especially, the high-velocity impact such as bird strike, a hailstorm, and a small piece of tire or stone during high taxing, can cause considerable damage to the structures and sub-system in spite of a very small mass. However, it is not easy to detect the damage in composite plates using a single technique or any conventional methods. In this paper, the PVDF(polyvinylidene fluoride) film sensors were used for monitoring high-velocity impact damage initiation and propagation in composite laminates. The WT(wavelet transform) and STFT(short time Fourier transform) are used to decompose the sensor signals. A ultrasonic C-scan and a digital microscope are also used to examine the extent of the damage in each case. This research shows how various sensing techniques, PVDF sensor in particular, can be used to characterize high-velocity impact damage in advanced composite.

## 초 록

손상이 발생할 경우 복합재료의 기계적 물성치는 급격한 저하를 유발한다. 특히, 조류충돌, 우박, 지상 이착륙 상황에서의 타이어 조각이나 돌조각 등과 같은 작은 질량에 의한 고속충격은 구조물과 서브시스템에 심각한 손상을 유발한다. 이런 복합재 적층판에서의 손상은 기존의 전통적인 방법으로 감지하기가 어려우며, 단일 감지 기술만을 이용하여 믿을 만한 손상평가 결과를 얻을 수 없다. 본 논문에서는 고분자 압전필름 센서를 이용하여 복합 적층판에서의 충격에 의한 손상의 개시 시점 및 확장을 탐지하였다. 획득한 센서신호는 시간-주파수 분석법인 웨이블릿 변환과 단시간 푸리에 변환을 적용하였으며, 초음파 C-scan과 전자현미경을 이용하여 시편에서의 손상 확장을 검사하였다. 이 연구에서는 다양한 감지기술, 특히 고분자 압전 필름 센서를 이용하여 복합재 적층판에서의 고속충격 손상 특성을 확인하였다.

**Key Words** : 고속충격(high-velocity impact), 손상탐지(damage detection), 복합재 적층판(composite laminates), 고분자 압전 필름 센서(PVDF sensor)

## 1. 서 론

높은 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)을 가지는 복합재료(composite materials)는 항공우주, 자동차, 해

양, 전기전자, 기반산업 뿐만 아니라 스포츠용품과 의학 산업에 까지 다양한 분야에서 점점 사용이 증가되고 있다. 그러나 복합재료는 외부 물체의 충격에 의한 구조적 특성이 급격히 저하하는 단점이 있으며 이러한 문제점을 개선하려는 연구가 여러

\* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

\*\*\* 충남대학교 항공우주공학과, 교신저자(E-mail: igkim@cnu.ac.kr)

분야에서 진행되고 있다. 특히, 조류충돌(bird collisions), 타이 어의 파손 조각에 의한 충격, 지상 이착륙 상태에서의 튕겨져 나온 돌조각과의 충돌, 우주왕복선의 내열 타일에 의한 충격, 부서진 엔진의 팬 블레이드에 의한 충격, 우박 등에 의한 충격과 같은 고속 충격은 충격체의 질량이 비교적 작지만 빠른 속도( $\times 10^1 \sim \times 10^2$  m/s)로 충돌하기 때문에 복합재 구조물의 손상 메커니즘이 저속충격의 경우와 다르고 구조물과 서브시스템에 치명적일 수 있다. 이러한 고속충격으로부터 기지균열(matrix cracking), 층간분리(delamination), 섬유파손(fiber breakage), 표면파쇄(surface spallation) 및 적층관통(laminate penetration)과 같은 다양한 파괴모드가 발생한다. 저속충격은 충격체에 의한 층간분리로 인하여 먼저 국부적인 굽힘강성을 저하시켜 굽힘과 좌굴에 영향을 미치며, 국부좌굴은 다시 층간분리의 확장을 유발하여 구조물이 전체적으로 취약하게 함으로써 정적 및 피로 강도를 감소시킨다. 충격속도가 증가하면 즉, 고속충격인 경우 층간분리는 표면파쇄 및 적층관통과 함께 발생한다. 적층판이 뒤틀면을 관통시키기 위해 충격체가 필요한 에너지를 탄도한계(ballistic limit)라 하는데 이 범위를 넘는 높은 에너지의 충격은 탄공(crater hole)과 뒤틀면파쇄를 발생시킨다.

여기서 고속충격과 저속충격을 구분하는 속도의 범위를 살펴보면, Abrate[1]는 충격체의 속도가 100m/s 이하인 경우를 저속충격이라 하고, 충격체의 속도가 1km/s 이상인 경우를 고속충격으로 구분하였다. 하지만, Ruiz[2]는 충격지점으로부터 응력파(stress wave)가 발생하여 동적해석이 필요한 50~300m/s 이상을 고속이라고 하고, 경계지점에서 다중파(multiple wave)가 반사되어 준정적평형(quasi-static equilibrium)에 이르는 50m/s 이하를 저속충격이라 구분하였다. 또한, Abrate[3]는 충격속도와 복합재료의 횡방향으로의 음속비( $\epsilon = V/c$ )가 0.5~1.0% 변형을 범위한 경우를 저속과 고속충격의 천이속도로 정의하였다. 일반적으로 고속충격에 의한 손상은 전통적인 방법으로 감지하기가 어려우며, 기존의 연구들도 한 가지 기술만을 이용하여 신뢰할만한 손상평가 결과를 제시할 수 없음을 보여 주고 있다[4-5].

복합재의 고속충격에 관한 연구는 충격체의 초기 고속운동을 위한 고속충격기의 필요성과 안전성 때문에 저속충격보다 적은 편이다. 또한 운동하는 충격체에 센서를 부착하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 충격체와 시편(target)의 초기 및 마지막 단계에서의 충격이벤트 데이터를 측정하며, 충격이력(history of impact)은 고속카메라를 이용하지만 측정이 쉽지 않다[6].

따라서 본 연구에서는 적절한 고속충격 실험 장치를 제작하고, 20~120m/s의 속도범위에서 강구(steel sphere) 충격체에 의한 고속충격을 수행하였다. 그리고 동적충격을 감지할 수 있음을 기존의 저속충격 실험[7-8]에서 확인하였던 PVDF센서를 이

용하여 복합재 적층판의 충격신호를 획득하고 시간-주파수 분석법인 단시간 푸리에변환(STFT)과 웨이블릿변환(WT)을 이용하였다. 비파괴 검사인 육안검사, 표면검사 및 C-scan, 파괴검사인 단면검사를 통하여 센서신호와 손상모드 및 손상크기에 대한 상관관계를 고찰하였다.

## 2. 고속 충격 손상 탐지 기법

### 2.1 충격 손상 진단법과 손상 평가

충격손상진단법은 실시간 구조 건전성 모니터링 기법의 한 방법으로 외부의 충격을 받았을 경우 복합재료의 손상 여부를 진단할 수 있는 방법으로써 충격 확인, 충격 손상 진단 및 손상 평가에 관한 것이다. 일반적으로 충격에 의한 복합적층판의 손상은 크게 층간분리, 모재균열 및 섬유파단의 세 가지 주요 파괴모드의 혼합으로 구성되는데 섬유강화 복합재에서 정확한 손상평가의 중요성은 파괴와 비파괴의 의미로 구분되어지는 실험기술의 발전을 이끌어왔다. 이런 파괴검사에는 de-ply, 단면검사 등이 있고, 비파괴검사에는 손상상태의 크기 및 위치를 측정하고 감지하는 광학현미경, X-ray, 초음파, 음향방출, 레이저광학 등이 있다.

### 2.2 고분자 압전 센서(PVDF, polyvinylidene fluoride)

고분자압전필름(PVDF)센서는 압전세라믹(PZT)센서와 더불어 지능구조물의 센서와 작동기로 쓰이고 있는데, 고분자 압전 센서는 성형의 용이성, 넓은 주파수 응답성, 우수한 선형성 및 높은 출력 전압 등으로 감지기로 많이 이용되고 있다. 강성이 크고 깨지기 쉬운 PZT 센서에 비해 PVDF센서는 유연하고 질긴 기계적 특성을 가지고 있으며, 두께(10~760  $\mu$ m)가 얇은 필름 형태로 생산되므로 사용 용도에 따라 여러 형태와 크기로 자유롭게 조절할 수 있다. 특히, PVDF센서는 사용 가능한 주파수 영역이 넓고( $10^{-3} \sim 10^9$  Hz), 미세한 동적 변형부터 큰 동적 변형까지 폭 넓은 범위의 신호를 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 실험에 사용한 PVDF센서의 주요 특성 값들은 Table 1에 나타났다.

### 2.3 손상 신호 분석

충격을 감시하는 충격 모니터링(impact monitoring)은 구조물의 상태(변형률, 가속도, 온도 및 습도 등)를 측정하는 전반적인 구조물 모니터링 중에서 충격하중에 중점을 둔 것으로 이를 두 가지로 분류하면, 첫째는 충격 검출에 관한 것이며, 둘째는 충격 손상 검출과 손상 평가에 관한 것이다.

Table 1 Typical properties of PVDF sensor

Properties	Symbol(Unit)	Value
Density	$\rho_p(\times 10^{-3} \text{kg/m}^3)$	1.78
Young's modulus	$E_1(\text{GPa})$	2.1
	$E_2(\text{GPa})$	1.22
Poisson's modulus	$\nu_p$	0.33
	$\nu_d$	0.192
Piezo strain constants (Laterally Clamped)	$d_{31}(\times 10^{-12} \text{(m/m)/(V/m)})$	23.0
	$d_{32}(\times 10^{-12} \text{(m/m)/(V/m)})$	3.0
	$d_{33}(\times 10^{-12} \text{(m/m)/(V/m)})$	33.0
Permittivity	$\chi_{33}(\times 10^{-12} \text{F/m})$	103(at 10 kHz)
Dimension	$a_p(\text{mm})$	15
	$b_p(\text{mm})$	10
	$A(\text{mm}^2)$	375
	$t_p(\mu\text{m})$	28
Sensor constant	$28\mu\text{m}$	$C_x(\text{V}/\epsilon)$ 14,369
		$C_y(\text{V}/\epsilon)$ 3754

여기서 충격손상검출은 충격 하중에 의해 발생하는 손상신호를 이용하여 충격하중에 의한 손상이 발생하였는지를 검출하고, 동시에 시간-주파수 해석 기법을 사용하여 충격하중에 의하여 손상이 발생하였는지 검출하고, 만약 층간분리와 같은 손상이 발생하였다면 어느 정도의 크기를 갖는 손상인지 평가하는 것이다.

일반적으로 신호 처리 기법은 일관성 있는 신호(stationary signal)를 대상으로 주파수 응답이나 스펙트럼 분석을 수행하는 것이 보통이다. 구조물에 이상이 발생할 경우 진동 응답 신호를 취득하여 고유주파수 변화 등을 측정하여 이상 유무를 진단할 수 있는데 이러한 신호분석에 많이 사용하는 것으로 푸리에변환(Fourier transform)이 있다. 그러나 푸리에변환은 비정상 신호에 적용하기는 적합하지 않으며 변환된 정보는 손상개시 시점과 같은 시간영역의 정보를 잃어버리는 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 시간-주파수영역을 동시에 해석가능한 방법으로 위그너-빌 변환(Wigner-Vill transform), 단시간 푸리에변환(STFT, short time Fourier transform), 웨이블릿변환(WT, wavelet transform) 등의 방법이 이용되고 있다[9].

단시간 푸리에변환은 기존의 푸리에변환의 결점을 보완하기 위해 일정한 크기를 가진 창함수(window)를 푸리에변환과 결합시켜 창함수의 주파수에 해당하는 성분을 추출하여 시간-주파수영역에서 신호의 특성을 표현하는 방법으로 시간 변화에 따른 신호의 주파수 특성을 분석할 수 있다. 그러나 단시간 푸리에변환의 주파수해상도는 사용되는 창함수의 크기에 의존하고 신호에서 분리하고자 하는 주파수 성분에 따라 그 크기를 결정해야 하므로, 한 번 결정된 해상도는 변환시간 동안 시간-주파수영역에서 동일하여 이에 따라 주파수 해상도와 시간 해상도를 동시에 만족하는 적절한 창함수의 크기를 선택

해야 한다. 대체적으로 고주파 성분을 분리하기 위해서는 창함수의 크기를 작게 해야 한다. 단시간 푸리에변환의 이론식은 센서신호  $f(t)$ 에 대하여 다음과 같이 정의된다[10].

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

식 (1)에서 단시간 푸리에변환 결과는 시간  $\tau$ 에 창함수  $g(t)$ 에 의해 분할되어진 입력신호  $f(t)$ 를 푸리에 변환한 것과 같다. 이 때 계산된 국소 스펙트럼계수가 시간  $\tau$ 에서 창함수 구간의 주파수성분을 나타내게 되는데 창함수를 시간축에 따라 연속적으로 움직이면 시간에 따른 주파수 특성의 변화를 계속 관찰할 수 있다.

웨이블릿변환은 신호의 주기적인 패턴이 급격히 변화하는 특이점, 전이영역 및 미분 불가능한 신호를 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 웨이블릿은 매우 적은 연산을 필요로 하는데 푸리에변환이  $O(M \log_2 N)$ 의 연산을 요구하는 반면 이산 웨이블릿변환은 단지  $O(N)$ 의 연산만을 요구한다. 따라서 빠른 실시간 처리를 필요로 하는 응용분야에서 웨이블릿변환은 매우 유용하며 특히 신호처리에 있어서 시간과 주파수 영역에서의 정보를 균형적으로 국소화시킬 수 있는 장점도 있다. 푸리에변환의 기본함수인 사인함수(sine)는 음의 무한대에서 양의 무한대까지 연장된 형태이지만, 웨이블릿함수는 불규칙하며, 대칭성이 없는 경우가 많고 시간영역에서 국소구간을 갖는 파형으로 정의된다. 웨이블릿변환은 사용된 웨이블릿 함수의 크기(scale)와 수평이동(shift)으로 신호를 분해하는데 연속 웨이블릿변환은 식 (2)와 같이 정의된다.

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

여기서  $a$ 와  $b$ 는 각각 크기와 수평이동을 나타내며  $\Psi^*$ 는 사용한 웨이블릿함수  $\Psi(t)$ 의 공액복소함수이다. 이 변환에서 센서신호  $S(t)$ 의 웨이블릿 전개와 웨이블릿 계수  $a_{j,k}$ 는 다음과 같다.

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

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

여기서 정수  $j, k$ 는 크기와 수평이동에의 매개변수이다. 이 산웨이블릿은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

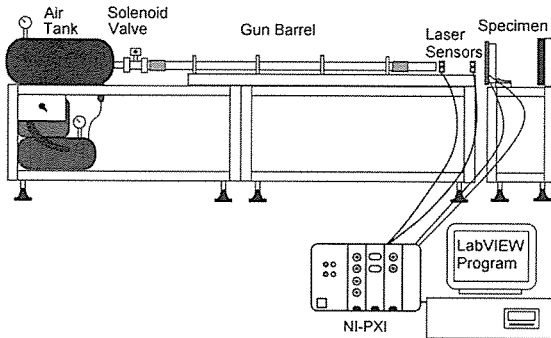


Fig. 1 Schematic diagram of the pneumatic gun facility.

웨이블릿 변환에서 신호  $S(t)$ 는 저주파 성분을 나타내는 1차 근사성분(approximation)과 가장 높은 고주파 성분을 나타내는 1차 세부성분(detail)으로 분해할 수 있고, 다시 1차 근사성분을 2차 근사성분과 2차 세부성분으로 분해하며, 계속하여 분해가 진행됨에 따라 다음단계의 저주파와 근사성분과 다음 단계의 고주파와 세부성분으로 계속하여 분해되어 웨이블릿 분해 구조(wavelet decomposition tree)를 구성하게 된다.

### 3. 고속 충격 실험

#### 3.1 고속충격 실험 장치 및 센서

특별히 제작된 압축공기총 형태의 고속충격장치를 살펴보면, 2개의 압축공기(air tank), 솔레노이드 밸브(solenoid valve), 총관(gun barrel), 2개의 레이저 센서(laser sensor), 강구(steel sphere), 강구운반체(carrier), 시편(specimen), 지그(jig) 및 신호취득시스템(DAQ system)으로 구성되어 있다(Fig. 1). 운용방법을 보면 최대압력이  $15\text{kgf/cm}^2$  인 압축공기탱크에 원하는 강구속도를 얻기 위한 공기를 압축시킨 후 강구를 담고 있는 강구운반체(carrier)를 발사관에 장착하고 솔레노이드 밸브를 열면 운반체가 총관을 따라 이동하고, 총관의 끝에서 운반체에 담겨 있는 강구가 발사되는 원리이다. 발사된 강구는 강구속도를 측정하기 위한 레이저센서를 지나고 강철지그(jig)에 설치된 시편에 고속충돌하고, 이 때 시편에 부착된 센서에서 얻어진 충격신호를 신호취득시스템을 통해 실시간으로 저장된다. 사용되는 강구의 지름은 10mm로서 무게는 4.08gr이고, 실험에 사용된 시편은 Gr/Ep 프리프레그(HFG HT145/RS1222, (주)한국화이버)를 사용하여 폭과 너비가 각각 150mm, 두께가 2.5mm인  $[0/90]_4s$  직교 적층판(cross ply laminate)으로 충격시험시편의 물성치는 Table 2와 같고, 크기와 센서의 위치는 Fig. 2와 같다.

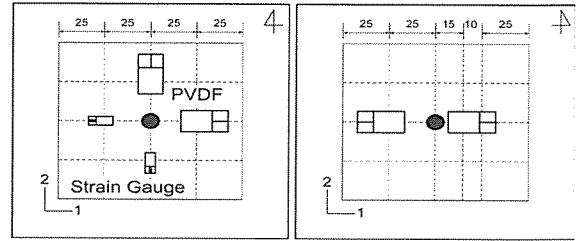


Fig. 2 Dimensions of specimen and the position of sensors on front and rear surface.

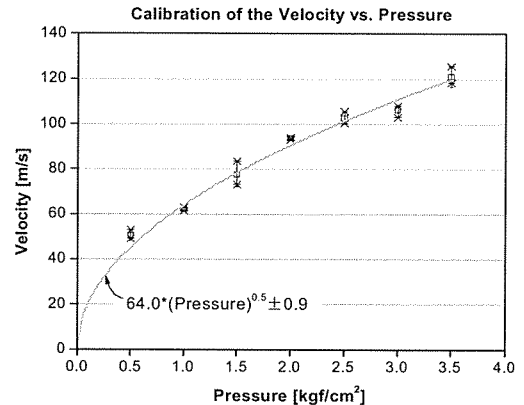


Fig. 3 Calibration of the velocity vs. pressure.

Table 2 Properties of Gr/Ep(HFG HT145/RS1222)

Property	Symbol	Unit	Value
Young's modulus along the fiber direction	$E_{11}$	GPa	124.6
Young's modulus along the transverse direction	$E_{22}$	GPa	8.7
Axial shear modulus	$G_{12}$	GPa	3.6
Axial Poisson's ratio	$\nu_{12}$		0.33
Thickness	$h$	mm	0.125
Density	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	1542

[0n] unidirectional laminate

#### 3.2 고속충격 실험 방법

고속으로 운동하는 물체의 속도측정을 위한 센서로 측정 정확도와 고속충격기에의 적용성을 만족하는 레이저 센서를 선택하였다. 동일 특성을 가지는 2개의 레이저 센서를 총구전방에 길이방향으로 간격 50mm 이격시켜 설치하고 강구가 각각의 센서를 통과하기 시작하면서 발생하는 센서의 출력력을 이용하여 두 센서간의 이동시간을 측정하고 이로부터 고속의 강구속도를 측정하였다. Fig. 3는 충격시험을 위해 필요한 충격

Table 3 High-velocity impact test matrix

Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pressure(kgf/cm <sup>2</sup> )	0.32	0.56	0.76	1.2	1.6	1.9	2.5	3.6	3.8
Velocity(m/s)	20	26	56	70	84	90	105	110	122
Energy (J)	0.8	4.9	6.4	10	14.4	16.5	22.5	24.7	30.4
Energy Ratio	1	6	8	13	18	21	28	31	38

에너지 정도를 얻기 위해 보정 시험한 결과로써, 압력 범위가 1kgf/cm<sup>2</sup> ~ 3.5kgf/cm<sup>2</sup>인 경우 측정된 속도 분포로 속도가 압력의 제곱근과 비례관계가 있음을 볼 수 있다. 시편은 복합재 적층판의 섬유방향과 섬유수직방향에 PVDF센서(LDT0-028K, Measurement Specialties, Inc.)를 각각 부착하고 사변 고정지지(C-C-C-C) 경계조건을 구성한 후 시편의 중앙에 충격을 가하였다. PVDF신호는 내셔널인스트루먼트사(National Instrument Co.)의 NI-PXI를 통해 디지털변환한 후 PC의 LabVIEW<sup>®</sup> 프로그램을 통해 신호를 획득하고 실시간 저장하였다. 센서신호는 샘플링속도를 2MHz로 10ms동안 20,000개의 데이터를 취득하였으며 실험은 Table 3와 같이 20~120m/s의 속도범위에서 9단계로 나눠 수행하였다.

실험을 통해 얻은 신호는 STFT와 WT를 이용하여 분석하였고, 비파괴검사인 C-scan과 표면검사, 파괴검사인 단면검사를 수행하여 신호분석결과와 비교하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

고속충격실험을 수행한 후 결과적으로 에너지 레벨(energy level)이 0.8J, 6.4J, 10J, 22.5J에서 다른 형태의 손상모드를 확인할 수 있었다. 따라서 Table 3에서 선택된 4개의 에너지 레벨에서의 결과를 중점적으로 기술하였다.

##### 4.1 PVDF 센서 신호

Fig. 4은 시편의 앞면에서 섬유방향(1-direction)으로 설치된 PVDF 센서로부터 얻은 4개의 에너지레벨에 대한 파형들이다. 에너지가 증가할수록 센서신호의 크기인 진폭은 증가하지만, 신호파형의 변화가 크게 변화하지 않음을 확인할 수 있고, 시편 앞면과 뒷면의 같은 위치에 섬유방향 방향으로 부착한 센서로부터 얻은 신호를 분석해 보면 극성이 바뀐 것을 확인할 수 있는데, 이것은 충격에 의해 복합재 시편의 중심부에서 굽힘이 발생했음을 알 수 있다. 또한, Fig. 5에서 에너지가 증가할수록 앞면에 부착한 섬유방향의 센서신호(Ch.1)와 같은 위치의 뒷면에 설치된 센서신호(Ch.3)의 진폭 변화를 보면 앞면 센서의 변화폭이 훨씬 크게 증가하는데, 이것은 충격 에너지가 증가할수록 굽힘응력보다는 압축응력에 의해 손상유발이 발생한다는 것을 짐작하게 하고 저속충격의 경우와 다른 거동을 함을 관찰하였다.

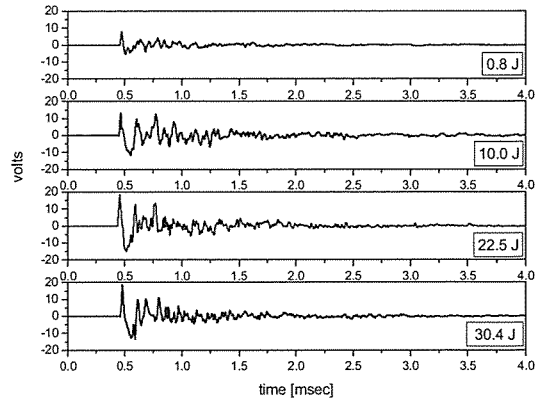


Fig. 4 PVDF sensor signals (front, 1-direction).

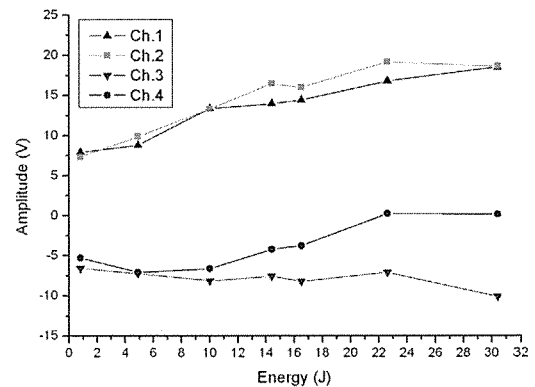


Fig. 5 Impact energy vs. maximum peak value.

##### 4.2 단시간 푸리에변환(STFT)과 웨이블릿변환(WT)

Fig. 6은 고속충격실험을 통해 얻은 PVDF센서신호를 이용하여 단시간 푸리에변환을 수행한 결과이다. PVDF센서 중에서 진동에 의한 저주파의 변형을 영향을 최소화하기 위하여 10kHz의 고주파 통과필터(high-pass filter)를 이용하여 제거한 후 충격에 의한 손상정보를 가지고 있을 것이라 예상되는 고주파에 대해서 밴드폭(bandwidth)은 256포인트(points)이고 중첩은 224포인트인 단시간 푸리에변환을 수행하였다. 손상이 없는 0.8J에서의 변환 결과를 보면 대략 100kHz 부근에서 진폭이 큰 신호들이 분포함을 볼 수 있는데 이것은 손상신호 보다는 고속의 강구에 의한 충격진동신호로 보인다. 섬유파단과 층간분리가 일어나는 에너지 10J이상에서의 결과를 보면 300~500kHz 부근의 신호들이 분포함을 확인할 있다.

주파수 영역에서의 좀 더 나은 해상도를 얻을 수 있는 웨이블릿변환 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 웨이블릿변환은 2차 다우비치(Daubechies, 'db2')웨이블릿을 가지고 Matlab<sup>®</sup>의 이산 웨이블릿함수(dwt)를 적용하여 레벨(level) 6까지 계산하였다.

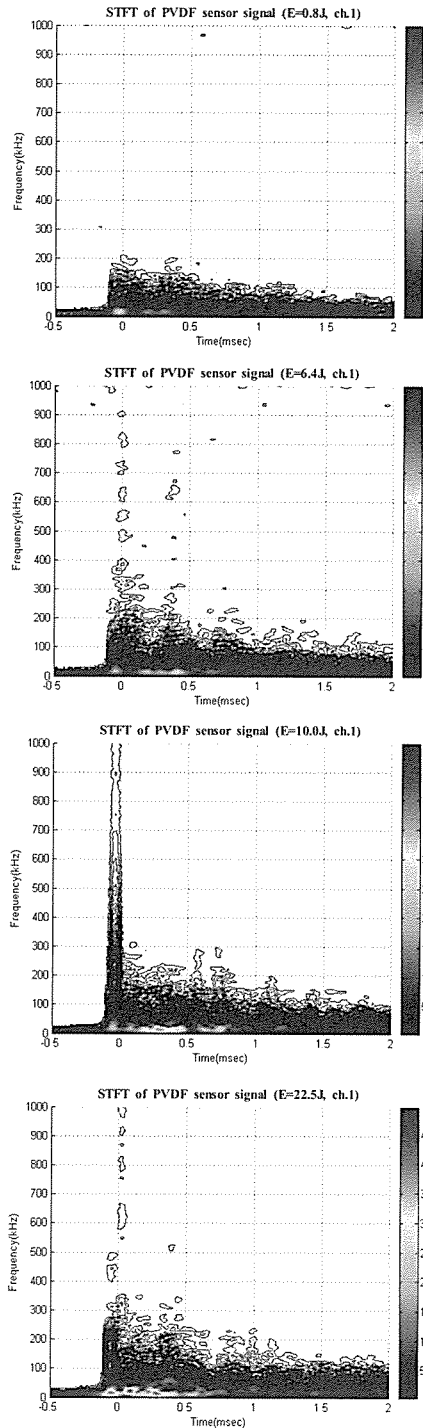


Fig. 6 Short time Fourier transform for PVDF sensor signals(10kHz high-pass filtered).

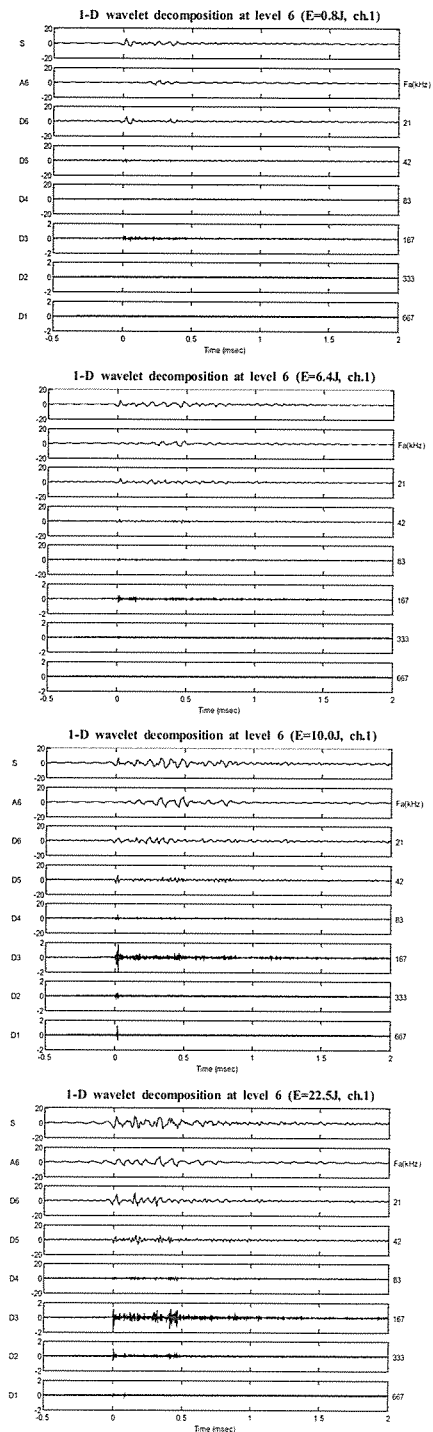


Fig. 7 Wavelet transform for PVDF sensor signals (10kHz high-pass filtered).



Fig. 8 Photographs of specimens for different impact energies.

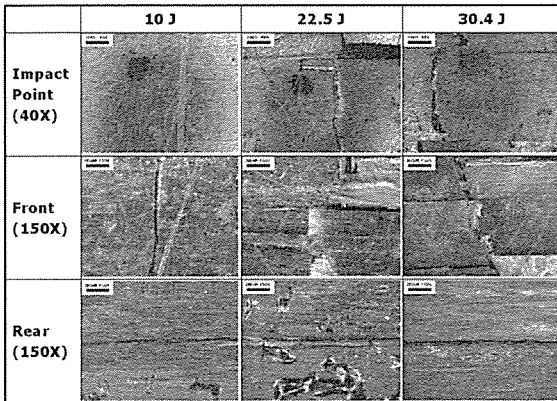


Fig. 9 Digital microscope photographs of specimens.

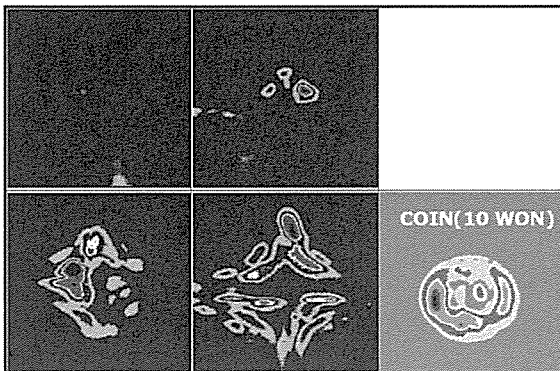


Fig. 10 C-scan images of specimens(sensor:5MHz, 0.25" Dia., sampling rate:100MHz).

웨이블릿변환 결과는 시간-스케일이기 때문에 스케일(scale)을 중심주파수(center frequency)로 계산하였으며[11], STFT와 마찬가지로

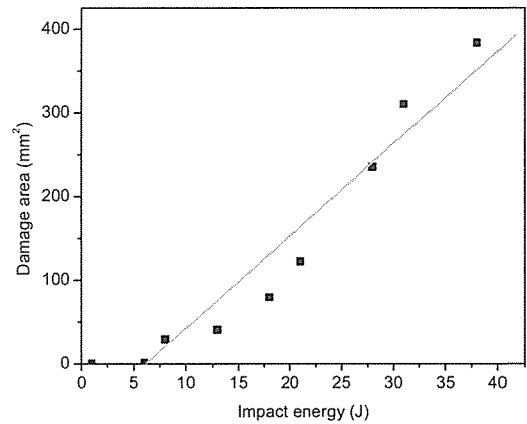


Fig. 11 Damage area as a function of impact energy.

가지로 손상이 없는 낮은 에너지레벨에서는 고속충격신호로 보이는 100kHz부근의 신호만이 나타나지만, 층간분리가 발생하기 시작한 10J에서는 100~350kHz부근에서 신호가 포착되었다. 표면파쇄(spallation)가 일어난 22.5J 이상인 경우 200~500kHz 부근에서 많은 신호들이 분포함을 확인할 수 있다. 고주파 신호를 통해 충격시간을 살펴보면 손상이 없는 경우에는 에너지가 증가할수록 충격체가 시편에 접촉한 순간부터 대략 1ms 동안 임을 관찰되는 반면, 손상이 발생하는 10J 이상부터는 0.5ms로 줄어들음을 확인할 수 있다.

#### 4.3 비파괴검사 및 파괴검사

고속충격 후 시편에 대해 육안검사 결과(Fig. 8)를 보면, 에너지레벨이 0.8J인 경우에는 손상을 발견할 수 없고, 6.4J인 경우부터 앞면에 영구압입이, 10J부터 섬유파단, 22.5J부터 표면파쇄가 발생함을 관찰할 수 있었으며, 뒷면의 경우는 높은 에너지에서도 기지균열만을 확인할 수 있었다. 디지털 현미경을 이용하여 뒷면의 표면검사를 수행한 결과(Fig. 9) 육안검사와 마찬가지로 에너지 증가함에 따라서 영구압입, 섬유파단, 표면파쇄가 발생되고 증가함을 확인할 수 있다.

육안식별이 불가능한 시편내부의 결함을 알아보기 위하여 비파괴검사인 C-scan을 수행하였다. 사용한 초음파 센서는 5MHz이고 탐촉자의 직경은 0.25인치이며 샘플링은 100MHz로 하였다. Fig. 10과 Fig. 11에서 알 수 있듯이 충격에너지가 증가할수록 내부 손상면적이 선형에 가깝게 증가함을 볼 수 있다. Fig. 10에서 오른쪽에 있는 이미지는 참고로 동전(10원)을 C-scan한 것이다.

Fig. 12은 단면검사를 위해 시편을 수압절단(water-jet)한 후 디지털 현미경을 이용하여 배율 150X로 찍은 단면사진이다. 10J에서 처음으로 밀 부분에서 층간분리가 발생함을 볼 수 있는데, 에너지가 증가할수록 윗부분에서도 층간분리를 확인할 수 있으며 더불어 밀 부분보다 윗부분에서의 층간분리에 의한

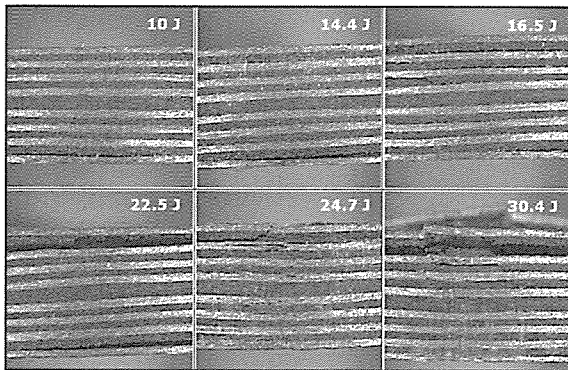


Fig. 12 Cross sectional photographs of specimens.

손상면적이 증가함을 관찰할 수 있었다. 이것은 저속충격과는 비교되는 것으로, 일반적으로 저속충격의 경우 층간분리는 에너지가 증가할수록 정삼각형의 형태로 진전되는데, 본 실험에서는 윗부분의 층간분리가 증가하는 역삼각형 형태로 확장됨을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 PVDF 센서를 이용하여 복합재 적층판에서의 고속충격손상의 특성과 탐지 가능성에 대하여 고찰하였다.

자체적으로 제작한 고속충격기를 이용하여 수행한 고속충격 실험에서 육안검사, 표면검사, C-scan과 같은 비파괴검사와 파괴검사인 단면검사를 수행하여 손상개시시점을 파악하였으며 또한, 충격에너지가 증가함에 따라 C-scan을 통한 손상면적을 정량적으로 계산할 수 있었는데 에너지가 증가할수록 선형에 가깝게 손상면적이 증가함을 알 수 있었다. PVDF센서 신호를 통해 얻어진 고주파 신호의 시간-주파수 분석 기법인 단시간 푸리에 변환과 웨이블릿 변환을 적용한 결과를 통하여 고속충격에 의한 손상 개시 및 진전으로 판단되는 신호를 손상이 없는 신호와 분리하여 관찰할 수 있었으며, 각 손상모드에 따른 주파수대역을 확인하였다. 또한, 단면검사에서는 저속충격과 다른 층간분리에 의한 손상면적의 진전 양상을 확인할 수 있었다.

실험결과를 통해 저속충격과 고속충격에 의한 손상특성이 함께 발생함을 알 수 있었고, 이를 통해 본 실험에서의 속도 영역은 저속과 고속의 천이 속도영역에 해당함을 짐작할 수 있었다.

본 연구의 방법과 결과들을 통하여 PVDF센서를 이용하여 고속충격을 받는 복합재 적층판의 섬유파손, 기지균열 및 층간분리 등의 손상정보를 감지할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었고, 더 나아가 복합재 구조물의 실시간 구조진전성 모니터링 연구의 기초로 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2003-000-10880-0)의 지원과 2003년도 충남대학교 자체연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) S. Abrate, "Impact on lamina composite materials," *Applied Mechanics Review*, 1991, Vol. 44, No. 4, pp. 155-190.
- 2) C. Ruiz and J. Harding, "Modelling impact of composite structures using small specimens," in *Impact Behaviour of Fiber-reinforced Composite Materials and Structures*(S.R. Reid and G. Zhou, eds), Woodhead Publishing Ltd., 2000.
- 3) S. Abrate, *Impact on composite structures*, Cambridge University Press. 1998.
- 4) S. L. Gao and J. K. Kim, "Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterisation of damage in CFRPs," *Composite Sci Technol*, 1999, Vol. 59, pp. 345-54.
- 5) A. C. Okafor, A. W. Otieno, A. Dutta and V.S. Rao, 2001, "Detection and characterization of high-velocity impact damage in advanced composite plates using multi-sensing techniques," *Composite Structures*, Vol. 54, pp. 289-297.
- 6) Y. Tanabe, M. Oki, K. Fujii, H. Kasano and E. Yasuda, "Fracture behavior of CFRPs impacted by relatively high-velocity steel sphere," *Int. J. Impact Eng.*, 2003, Vol. 28, pp. 627-642
- 7) 김인걸, 정석모, "전하증폭기를 사용하지 않은 고분자 압전센서 신호를 이용한 복합재 평판의 저속충격 탐지" 한국 복합재료학회지, 제13권, 제6호, 2000, pp.47-54.
- 8) 박찬익, 김인걸, 이영신, "압전필름센서를 이용한 복합재료 평판의 저속 충격 손상 개시 모니터링," 한국복합재료학회지, 제15권, 제2호, 2002, pp. 11-17.
- 9) 성대운, 오정훈, 김천곤, 홍창선, "웨이블릿 변환을 이용한 스마트 복합적층판의 충격 손상 검출 연구," 한국복합재료학회지, 제13권, 제1호, 2000, pp. 40-49.
- 10) D.E. Newland, *Random vibrations, spectral & wavelet analysis*, Longman Scientific & Technical. 1993.
- 11) M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J.M. Poggi, *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB®*, The MathWorks Inc., 2002