

압전필름센서 신호를 이용한 Gr/Ep 복합재 적층판의 고속충격 손상탐지

김진원*·김인걸**

High-Velocity Impact Damage Detection of Gr/Ep Composite Laminates Using Piezoelectric Thin Film Sensor Signals

Jin-Won Kim* and In-Gul Kim**

Abstract

The mechanical properties of composite materials may degrade severely 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 taxiing, can cause severe 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 and strain gages were used for monitoring 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 demonstrate how various sensing techniques, PVDF sensor in particular, can be used to characterize high-velocity impact damage in advanced composites.

Key Words: high-velocity impact, composite laminates, PVDF sensor, wavelet transform

1. 서론

복합재료(composite material)는 높은 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness) 때문에 항공우주, 자동차, 해양, 전기전자, 기반산업뿐만 아니라 스포츠용품과 의학에까지 다양한 분야에서 점점 사용이 증가하고 있다. 그러나 외부 물체의 충격에 의한 구조적 특성이 급격히 떨어 진다는 복합재료의 단점이 해결해야 할 중요한 관심사로 증가되고 있다. 특히, 조류충돌, 지상 활주시 타이어의 파손 조각 및 돌조각의 충돌, 우박에 의한 충격 등과 같은 고속 충격은 충격체의

질량이 비교적 작지만 빠른 속도($\times 10^1 \sim \times 10^2 \text{m/sec}$)로 충돌하기 때문에 복합재 구조물의 손상 메커니즘이 저속충격의 경우와 다르고 구조물과 서브시스템에 치명적일 수 있다. 이러한 고속충격으로부터 기지균열, 층간분리, 섬유파손, 표면파쇄 및 적층판통과 같은 다양한 파괴모드가 발생한다. 저속충격의 특성은 충격체에 의한 층간분리로 인하여 먼저 국부적인 굽힘강성을 저하시켜 굽힘과 좌굴에 영향을 미치며, 국부좌굴은 다시 층간분리의 확장을 유발하여 구조물이 전체적으로 취약하게 함으로써 정적 및 피로강도를 감소시키는 반면, 충격속도가 증가하면 즉, 고속충격인 경우 층간분리는 표면파쇄 및 적층판통과 함께 발생한다.

여기서 고속충격과 저속충격을 구분하는 속도의 범위를 살펴보면, Abrate[1]는 충격체의 속도가 1km/sec 이상인 경우를 고속충격으로 구분하였고,

* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

** 충남대학교 항공우주공학과

Ruiz[2]는 충격지점으로부터 응력파가 발생하여 동적해석이 필요한 50~300m/sec를 고속이라고 하였다. 또한, Abrate[3]는 충격속도와 복합재료 횡방향 소리의 속도비($\epsilon = V/c$)가 0.5-1.0% 변형을 범위일때를 저속과 고속충격의 천이 속도로 정의하였다. 이런 고속충격에 의한 손상은 전통적인 방법으로 감지하기가 어려우며, 연구들도 한 가지 기술만을 이용하여 믿을 만한 손상평가 결과를 제시할 수 없음을 보여주고 있다.[4]

본 연구에서는 동적충격을 감지할 수 있는 고분자 압전 필름센서(PVDF, polyvinylidene fluoride)와 스트레인게이지를 통해 고속충격신호를 획득한다. 얻어진 신호는 국소 푸리에 변환(STFT)과 웨이블릿 변환(WT)과 같은 시간-주파수 분석법을 적용하여 복합재료 구조의 초기 손상을 규명한다. 또한, 고속 충격을 받은 적층판에 대하여 육안으로 확인이 어려운 초기손상은 비파괴검사인 C-scan과 단면검사를 통해 손상영역을 정량적으로 탐지하며 운동에너지 변화에 따른 손상모드 및 크기를 확인한다. 이러한 일련의 연구과정을 통하여 PVDF센서 신호를 이용한 복합재 구조물의 고속충격 손상탐지의 가능성을 확인하고 나아가 복합재 구조물의 건전성 모니터링의 가능성도 입증하려고 한다.

2. 실험 및 결과

2.1 고속충격시험기

고속충격 시험장치는 Fig.1과 같이 제작하였다. 압축공기를 이용하여 구경이 10mm인 강구(4.08gr)를 운반체(carrier)에 실어 강구를 발사시킨다. 속도측정을 위해 레이저 센서(M5L/50, MEL) 신호를 측정하고, 이 신호를 기준 신호로 하여 지그(Jig)에 고정된 시편에 부착된 PVDF센서와 스트레인게이지로부터 고속충격신호를 획득하였다. 얻은 신호는 NI-PXI(National Instrument 사)와 LabVIEW 프로그램의 신호취득시스템을 통하여 저장 하였다.

2.2 고속충격시편

실험에 사용된 시편은 Gr/Ep 프리프레그(HFG HT145/RS1222)를 사용한 폭과 너비가 150mm이고 두께가 2.0mm인 직교적층판([0/90]_{4s})이며 (주)

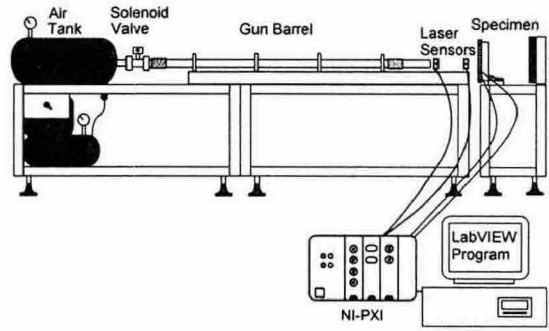


Fig. 1 Schematic diagram of the high-velocity impact pneumatic gun facility

한국화이바에서 제작하였다. 복합재료의 물성치는 Table 1와 같다. 충격시험시편의 크기와 센서의 위치는 Fig.2와 같다. 경계조건은 네변 고정지지(C-C-C-C)이다.

Table 1 Material properties of Gr/Ep, unidirectional lamina

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	ν_{12}		0.33
Thickness	h	mm	0.125
Density	ρ	kg/m ³	1,542

2.3 고분자압전센서

복합재에서의 고속충격신호를 얻기 위해 사용한 PVDF 센서(LDT0-028K, Measurement Specialties)는 변형을 가하면 전압이 발생하고, 반대로 전압을 가하면 변형이 발생하여 센서와 액츄에이터의 역할을 모두 할 수 있는 센서로, 내피로성, 내마모성이 강하고 유연하며 넓은 주파수 영역($10^3\text{Hz} \sim 10^9\text{Hz}$)의 측정이 가능하며 고속충격에 의해 발생하는 고주파 신호를 감지하는데

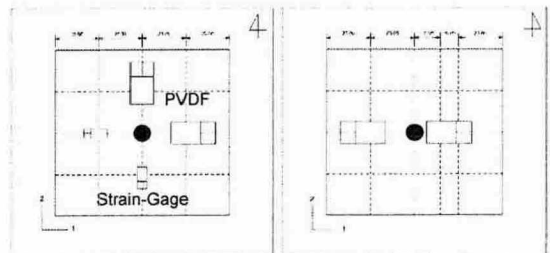


Fig. 2 Dimensions of specimen and the position of sensors on front and rear surface

적합하며, 정적 및 동적 변형을 측정도 가능하다. 본 실험에서는 샘플링속도를 0.5 μ sec로 10msec 동안 20,000개의 데이터를 취득하였으며 실험은 Table 2와 같이 20~122m/sec의 속도 범위에서 8단계로 나뉘어 수행하였다.

Table 2 Test Matrix

Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Pressure(bar)	0.32	0.56	1.2	1.6	1.9	2.5	3.3	3.8
Velocity(m/s)	20	49	70	84	90	105	111	122
Energy (J)	0.8	4.9	10	14.4	16.5	22.5	25.1	30.4
Energy Ratio	1	6	13	18	21	28	31	38

2.4 표면 검사 및 C-scan

충격시험을 한 뒤 시편의 육안검사결과 4.9J이하에서는 압입흔적을 확인할 수 없었다. Fig. 3은 10.0J과 22.5J 및 30.4J에서의 디지털 현미경을 이용한 표면검사 사진들이다. 150배율로 10.0J에서 처음 섬유파단을 확인할 수 있었으며, 에너지가 22.5J과 30.4J인 경우 시편의 앞면에서 층간분리와 표면파쇄를, 뒷면에서 층간분리와 기지균열을 확인할 수 있었다.

Fig.4는 손상면적을 정량적으로 확인하기 위하여 초음파센서(1MHz)를 이용하여 C-scan을 수행한 결과이다. 에너지가 증가할수록 결함폭에 비해 결함길이가 크게 증가함을 볼 수 있으며, 결함면적도 109mm²에서 217mm², 389mm²로 점점 크게 측정되었다.

2.5 STFT와 WT를 통한 신호분석

고속충격일 경우 아주 짧은 시간에 매우 큰 충

Fig. 3 Digital microscope images

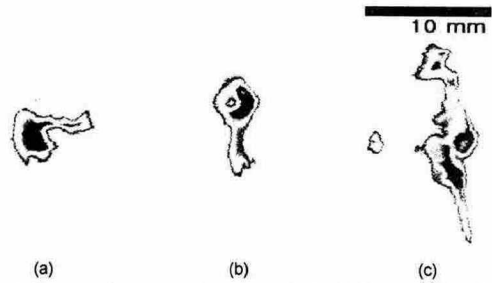
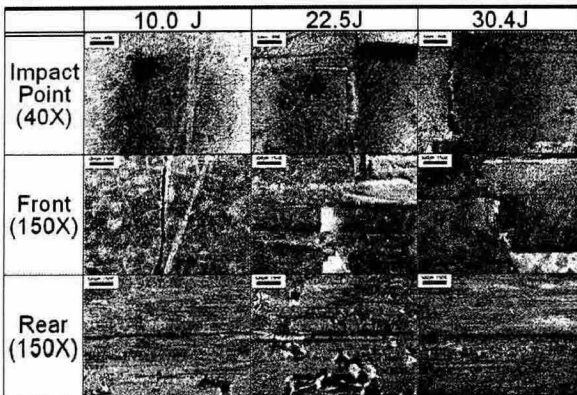


Fig. 4 C-scan images (a) 10.0J (b) 22.5J (c) 30.4J

격하중이 작용하므로 복합재판은 단순 진동뿐만 아니라 응력파를 발생시킨다. Fig.5는 시편의 앞면에 섬유방향으로 부착된 PVDF센서로부터 얻은 신호파형이다. 가장 낮은 에너지레벨인 0.8J에서부터 단순 진동신호가 나타남을 볼 수 있다. Gr/Ep 대칭적층판에서의 고속충격 파손특성에 의한 신호분석을 위해 국소푸리에변환과 웨이블릿 변환을 수행하였다. 이때 취득된 PVDF 센서 신호에서 단순진동에 의한 신호를 제거하기 위해 10kHz high-pass filter를 적용한 후, 국소푸리에변환은 MATLAB의 스펙트로그램 함수(specgram)를 이용하여 창 함수는 직사각형 창 함수를, 밴드폭은 64포인트, 중첩폭은 32포인트로 설정하였다. 웨이블릿변환은 2차 다우비치(Daubechies) 웨이블릿 함수 'db2'를 사용하여 MATLAB의 연속웨이블릿(cwt) 함수를 적용하였다.

Fig.6은 국소푸리에변환을 적용한 결과로서, 낮은 에너지 레벨이며 손상이 없었던 0.8J에서는 200kHz이하의 신호만 나타나는 데 반해, 에너지가 증가할수록 500kHz~1000kHz 범위의 고주파도 보이기 시작한다. Fig.7은 웨이블릿변환 결과로서, 신호 스케일의 크기 차이가 존재하면 전체적인

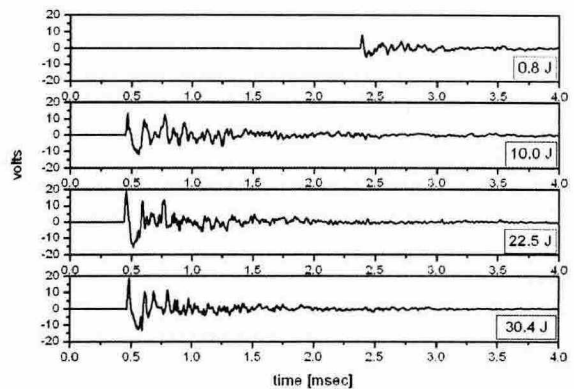


Fig. 5 PVDF sensor signals(front, 1-direction)

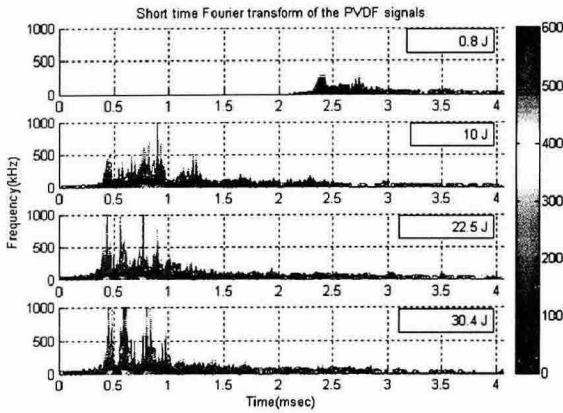


Fig. 6 Short time Fourier transform for PVDF sensor signals(10kHz high-pass filtered)

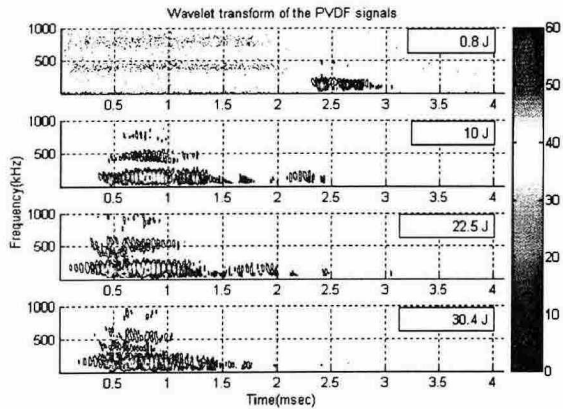


Fig. 7 Wavelet transform for PVDF sensor signals (10kHz high-pass filtered)

정보를 한 번에 분석할 수 없는 국소푸리에변환 결과보다 시간-주파수 영역에서 보다 나은 해상도를 보여주고 있다. 0.8J의 에너지레벨에서는 200kHz 이하의 신호가 보이며, 10.0J에서는 초기 충격 0.5msec동안 주로 500kHz근처의 주파수가 포착된다. 또한, 22.5J과 30.4J에서는 충격 후 1msec 이내에서 1MHz에 가까운 고주파 신호가 나타나며 충격시간이 줄어들음을 볼 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 고속충격에 의한 Gr/Ep 복합재 판에서의 손상 탐지를 위해서 PVDF 센서로부터 얻은 신호를 국소푸리에변환과 웨이블릿변환을 통하여 신호를 분석하고, 충격시험후 비파괴검사

인 C-scan과 전자현미경을 통한 내부검사와 표면 검사를 수행하여 센서신호와 충격손상 사이의 상관관계를 비교하였다. C-scan상으로 결함면적이 측정되지 않았던 에너지 레벨인 0.8J에서는 단순 진동에 의한 신호로 주로 200kHz이하의 신호가 나타났으며, 에너지가 커지면서 섬유파손 및 기지균열이 발생하고 층간분리가 유도되며, 속도가 100m/sec이상인 22.5J 부근에서는 층간분리와 더불어 시편의 앞면에서 표면파쇄를 확인할 수 있었고 1MHz 부근의 고주파 신호도 발생하였다. 이상의 결과로부터 PVDF센서 신호를 이용한 고주파 영역의 신호처리를 통해, 고속충격을 받은 적층판에서의 표면 및 내부의 파손모드를 분석할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2003-000-10880-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) S. Abrate, "Impact on lamina composite materials", Applied Mechanics Review, Vol. 44, No.4, 1991, 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 characterization of damage in CFRPs", Composite Sci. Tech., Vol.59, 1999, pp.345-54.
- (5) D.E. Newland, *Random vibrations, spectral & wavelet analysis*, Longman Scientific & Technical, 1993.