

論文

다양한 센서 신호를 이용한 복합적층판의 고속충격 손상 특성 연구

조상규*, 김인걸***, 이석제*, 유원영*

Study on the Damage Characteristics Under the High-Velocity Impact of Composite Laminates Using Various Sensor Signals

Sang-Gyu Cho*, In-Gul Kim***, Seokje Lee*, and Won-Young You*

ABSTRACT

The use of advanced composite materials in main structures of military and civil aircraft has been increased rapidly because of their considerable metals in high specific strength and stiffness. However, the mechanical properties of composite materials may severely degrade in the presence of damage. Especially, the high-velocity impact such as 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 sensor or any conventional methods. In this paper, the PVDF sensors and AE sensors were used for monitoring high-velocity impact damage initiation and propagation in composite laminates. The WT(wavelet transform) is used to decompose the sensor signals. In the PVDF sensor and AE sensor signal analysis, amounts of high-frequency signals are increased when the impact energy is increased. PVDF sensor and AE sensor signal appeared similar results. This study shows how various sensing techniques can be used to characterize high-velocity impact damage of advanced composite laminates.

초 록

복합재는 금속보다 높은 비강성과 비강도를 갖는 장점 때문에 군용기와 민항기의 주요 구조물로 사용이 증대되고 있다. 하지만 복합재의 기계적인 특성은 충격에 의해 심각하게 저하된다. 특히, 우박, 고속 택싱에 의한 파편과의 고속 충격은 작은 질량임에도 불구하고 구조물과 서브시스템에 심각한 손상을 줄 수 있다. 그러나 한 가지 센서 또는 기존의 기법을 사용하여 복합재의 손상을 탐지하기는 쉽지 않다. 본 논문에서는 복합적층판의 고속충격에 의한 손상 개시와 전파를 모니터링하기 위해 PVDF 센서와 AE 센서를 사용하였다. 센서 신호를 분석하기 위해 웨이블릿 변환을 사용하였다. 충격에너지가 증가할수록 고주파 신호가 증가하였고 PVDF 센서와 AE 센서 신호에서 유사한 경향을 알 수 있었다. 결과적으로 복합적층판의 고속충격 손상을 감지하고 특성화하는 다양한 센싱 기법을 제시하였다.

Key Words : 고속충격(high velocity impact), 복합적층판(composite laminate), 웨이블릿변환(wavelet transform), 음향방출센서(AE sensor), 고분자압전센서(PVDF sensor)

1. 서론

항공우주용 비행체의 성능 향상 요구에 따라 비행체 구조

물의 경량화가 요구되고 있으며 구조물의 경량화에 효율적인 복합재 구조물의 사용은 날로 증대되고 있다. 따라서 복합재 구조물의 사용 증대는 구조물의 안전성 확보에 대한 중요성

접수: 2011년 10월 6일, 수정: 2011년 12월 8일, 게재승인: 2011년 12월 12일

* 충남대학교 항공우주공학과 대학원

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

또한 증대시키고 있으며 새로운 재료의 비행체 구조물에서의 적용 여부에 제한을 줄 수 있는 충격에 의한 복합재 구조물의 거동에 대한 규명이 선행되어야 한다.

고속충격의 경우, 충격체의 질량은 비교적 작지만 빠른 속도로 충돌하기 때문에 복합재 구조물의 손상 메커니즘이 다르고 구조물에 치명적이며 관통할 경우, 구조물 안쪽에 위치한 주요장비, 폭발성 있는 연료탱크, 승무원들에 대하여 즉각적으로 위협을 줄 수 있다.

고속충격과 저속충격을 구분하는 속도의 범위를 살펴보면, Abrate[1]는 충격체의 속도가 100m/sec이하인 경우를 저속충격이라 하고, 1km/sec 이상인 경우를 고속충격으로 구분하였다. 하지만 Ruiz[2]등은 충격지점으로부터 응력파(stress wave)가 발생하여 동적해석이 필요한 50~300m/sec를 고속이라고 하고, 경계지점에서 다중파(multiple wave)가 반사되어 준정적 평형(quasi-static equilibrium)에 이르는 50m/sec 이하를 저속충격이라 구분하였다. 또한, Abrate[3]는 충격속도와 복합재료의 횡방향응속비($\epsilon=V/c$)가 0.5~1.0% 변형을 범위한 경우를 저속과 고속충격의 천이속도로 정의하였다.

고속 충격의 경우, 고속충격 손상 메커니즘을 규명하여 방탄, 방충격 구조설계와 충격에 의한 손상을 탐지하고 감시할 수 있는 구조건전성 모니터링 기술 도입으로 안전성을 증대시키려는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 PVDF 센서와 AE 센서를 이용하여 복합재 적층판의 고속충격 손상을 탐지하고 신호의 비교를 통해서 PVDF센서의 고속충격 손상탐지 활용 가능성을 알아보았다 [4,5]. 측정된 센서 신호를 WT(Wavelet Transform)을 적용하여 손상신호와 실험적 결과의 상관관계를 연구하였다.

2. 실험 방법 및 절차

2.1 고속충격실험장치

본 논문에 사용된 고속충격실험 장치는 Fig. 1과 같으며, 고속충격장치를 살펴보면, 2개의 압축공기탱크(air tank), 총관(gun barrel), 4개의 마그네틱 센서(magnetic sensor), 강구(steel ball), 시편(specimen), 시편고정지그(jig) 및 신호취득시스템(DAQ system)으로 구성되어 있다. 총열의 길이는 500mm, 마그네틱 센서 사이의 거리는 90mm, 마그네틱 센서와 시편 사이의 거리는 70mm 이다.

압축 공기탱크에서 원하는 강구속도를 얻기 위한 총관에 붙은 소형 공기탱크공기로 압축 공기를 보내고 강구를 총관에 넣은 후 압축 공기 탱크를 열어 발사된다. 강구의 속도는 압축공기 탱크의 압력조정으로 조절한다.

발사된 강구는 강구속도를 측정하기 위한 마그네틱 센서를 지나고 고정지그에 설치된 시편에 고속충격을 주면, 이 때 시편에 부착된 센서에서 얻어진 충격신호를 신호취득시스템을 통해 저장한다. 여기서 사용된 강구의 직경은 6.35mm이고 무게는 1.044gram 이다.

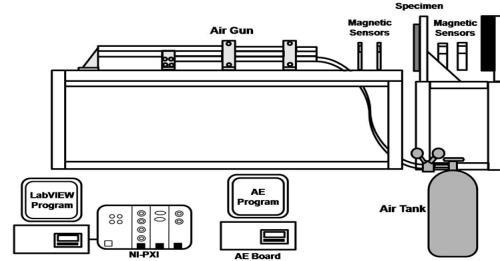


Fig. 1 Schematic diagram of the pneumatic gun facility.

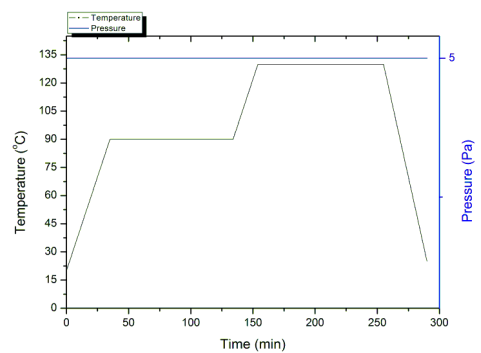


Fig. 2 Cure cycle for the specimen fabrication.

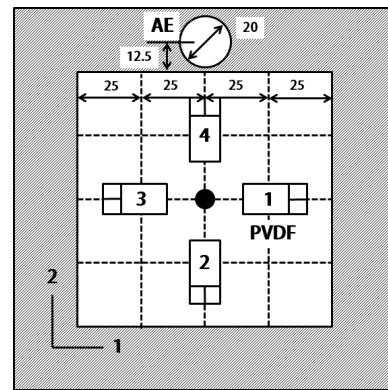


Fig. 3 Dimensions of specimen and the position of a strain gage and specimen fixed by clamps.

2.2 시편제작

실험에 사용된 시편은 graphite/epoxy prepreg(USN 150B, SK케미칼)를 [45/0/-45/90]_{2s}로 적층하였고 Fig. 2와 같은 제조사의 성형사이클로 복합재료 전문 제작업체에서 제작하였다. 시편의 폭과 너비는 각각 150mm이다. 시편의 총 두께는 약 2.3mm이며 센서의 위치는 Fig. 3과 같다. 유효면적은 100x100mm이고, 경계조건은 네 변 고정지그(C-C-C-C)이며 Table 1은 실험에 사용된 시편의 물성치이다.

Table 1 Material properties of Gr/Ep prepreg(USN 150B, SK케미칼)

	Symbol	Unit	Value
Young's modulus along the fiber direction	E ₁₁	GPa	129.1
Young's modulus along the transverse direction	E ₂₂	GPa	8.1
Axial shear modulus	G ₁₂	GPa	3.6
Axial Poisson's ratio	ν ₁₂		0.28
Thickness	h	mm	0.125

2.3 신호취득시스템(DAQ system)

고속충격 실험장치에는 강구의 속도측정을 위한 마그네틱 센서가 설치되었고, 시편에는 충격에 의한 손상신호를 얻기 위한 PVDF 센서, AE 센서가 부착되었다. PVDF 센서는 시편표면에 직접 부착하였고, AE 센서는 시편의 진동에 의한 영향을 최소화하고 센서의 보호를 목적으로 고정지그에 센서 장착을 위한 구멍을 뚫어 AE 센서를 시편에 장착하였다. 마그네틱 센서는 발사관의 총구에서 떨어진 곳에 두 개의 마그네틱 센서를 90mm 간격으로 위치시켰다. 그리고 시편 관통 후의 속도를 측정할 수 있도록 지그 뒤에도 마그네틱 센서를 설치하였다.

강구가 마그네틱 센서를 지나가면서 생긴 신호는 NI-PXI의 오실로스코프 모듈에 전달한다. 또한, 시편 표면에 부착된 PVDF 센서로부터 충격손상신호들을 NI-PXI의 고속의 A/D 변환 모듈을 통해 디지털신호로 변환하여 획득하였다. 관통 후에는 시편 뒤에 위치한 마그네틱 센서로 강구의 관통 후 잔류속도(residual velocity)를 측정한다. 이 신호들은 신호분석을 위하여 PC의 LabVIEW 프로그램을 통해 저장장치에 저장된다. 그리고 AE 센서 신호는 전용 DAQ 보드가 설치된 컴퓨터로 신호를 동시에 저장한다.

2.4 고속충격실험

압력 대 속도보정을 통해 얻고자 하는 충격에너지에 대한 압력의 공기를 압축한 후 강구를 발사하여 고속충격을 수행하였다[6]. 시편으로 사용한 복합적층판의 섬유방향과 섬유수직방향에 각각 Measurement Specialties, Inc.의 PVDF센서 LDT0-028K를 부착하고 4번 고정지그(C-C-C-C) 경계조건을 구성한 후 시편의 중앙에 고속충격을 가하였다. PVDF 센서 신호는 National Instrument사의 NI-PXI를 통해 PC의 LabVIEW 프로그램을 통해 신호를 취득하고 저장하였다. PVDF센서 신호는 샘플링속도를 2MHz로 10msec동안 20,000개의 데이터를 취득하였으며, A.E.센서 신호는 Physical Acoustics사의 센서 UT-1000과 PC 보드를 이용하여 샘플링 속도 2MHz로 데이터를 취득하였다. Fig. 4는 압력과 속도에 대한 관계를 알아보기 위해 압력별 속도 분포를 나타낸 그래프이다. 위 결과를 바탕으로 압력을 조정하여 30~320m/sec의 속도 범위에서 8개의 다른 충격속도로 실험을 수행하였다.

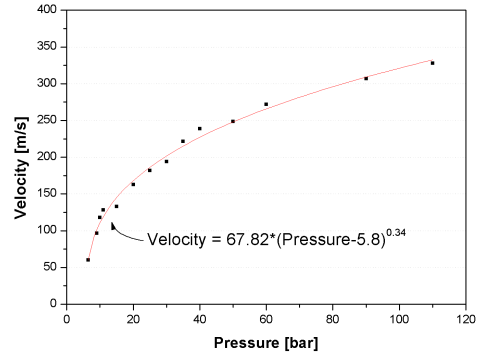


Fig. 4 Calibration of the velocity and pressure.

Table 2 High velocity impact test result

Test no.	[45/0/-45/90] _{2S}			
	Initial velocity (m/s)	Initial energy (J)	Residual velocity (m/s)	Residual energy (J)
1	31.4	0.5	0	0.00
2	83.5	3.6	0	0.00
3	141	10.4	0	0.00
4	196	20.1	113	6.67
5	240	30.1	171.7	15.39
6	270	38.1	208	22.58
7	307	49.2	-	-
8	171	15.3	48.7	1.24

3. 결과 및 고찰

고속충격실험을 수행한 후 PVDF 센서와 AE 센서 신호의 분석을 수행하였다.

Table 2는 실험 전/후의 속도와 에너지를 나타내었다. 7회의 실험을 한 후 관통되는 에너지를 조금 더 명확히 알아내기 위해 추가 실험을 수행 하였다. 7번째 실험의 경우 실험과정상의 오류로 인해 관통 후 잔류속도는 측정하지 못하였다.

3.1 센서 신호 및 FFT

Fig. 5는 고속충격실험을 통해 얻은 PVDF 센서 신호에서 충격에 따른 채널 3(3번 위치)의 신호를 나타내었다[7,8]. 관통이 생기기 전까지의 에너지 레벨인 10.4J까지는 진폭이 증가함을 알 수 있으나 관통 후에는 진폭의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 충격 속도가 빨라질수록 관통으로 인하여 급히 진동에 의한 진폭이 줄어들었기 때문이라고 생각한다.

Fig. 6은 PVDF 신호를 고속 푸리에 변환한 결과로서 충격에너지가 증가할수록 200kHz 전후에서 손상 신호가 탐지되는 것을 알 수 있다.

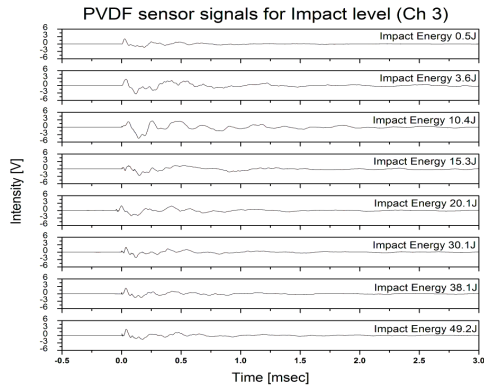


Fig. 5 PVDF sensor signals of each impact energy level.

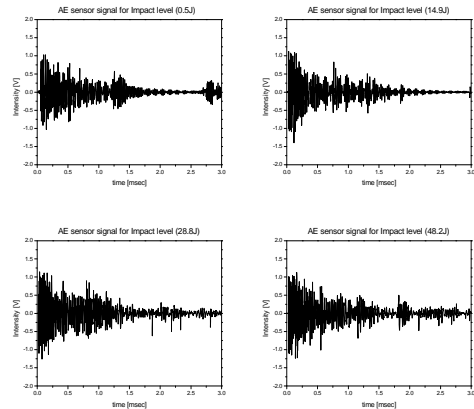


Fig. 7 AE sensor signals for impact energy levels.

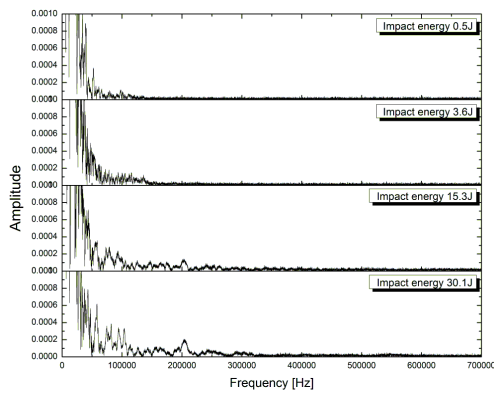


Fig. 6 FFT plots of selected PVDF sensor signals.

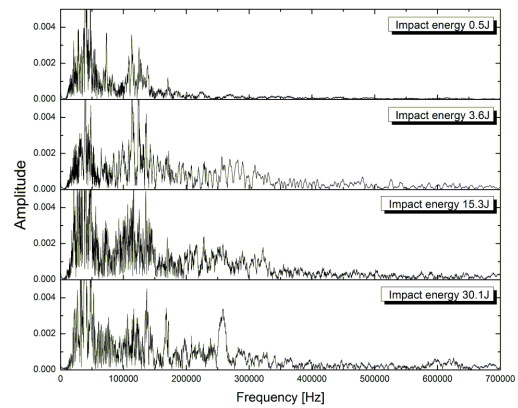


Fig. 8 FFT plots of selected AE sensor signals.

고속충격실험을 통해 얻은 시편의 AE 센서 신호를 Fig. 7에 나타내었다. PVDF 센서와는 다르게 충격에너지에 따라 진폭의 변화는 거의 없다. 이것은 AE 센서의 pre-amp.에서 고대역 통과 필터를 통해 진동에 의한 저주파 성분은 제거되었기 때문이다.

Fig. 8은 AE 센서 신호를 고속 푸리에 변환한 결과로서 충격에너지가 증가할수록 300kHz 전후에서 손상 신호가 탐지 되는 것을 알 수 있다.

3.2 웨이블릿변환(WT)

주파수 영역에서 좀 더 나은 해상도를 얻기 위하여 웨이블릿 변환을 수행하였으며, PVDF 센서와 AE 센서에 대한 결과를 각각 Fig. 9와 10에 나타내었다. 웨이블릿 변환은 2차 다우비치(daubechies, 'db2')웨이블릿을 가지고 Matlab의 이산 웨이블릿함수(Discrete Wavelet Transform, DWT)를 적용하여 레벨 6까지 계산 하였다[9]. 또한 웨이블릿변환의 결과인 시간-스케일(scale)영역을 시간-주파수 영역으로 나타내기 위하여 Matlab 함수를 이용하여 유사주파수(pseudo frequency)를 표시하였다. 다우비치 웨이블릿 함수를 이용하여 6단계 분해된 세부성분의

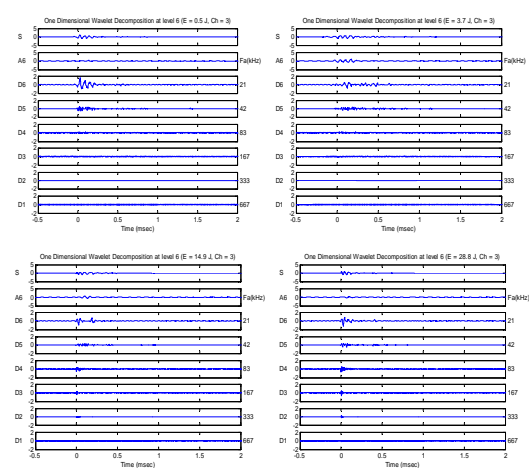


Fig. 9 Wavelet transform for PVDF sensor signals.

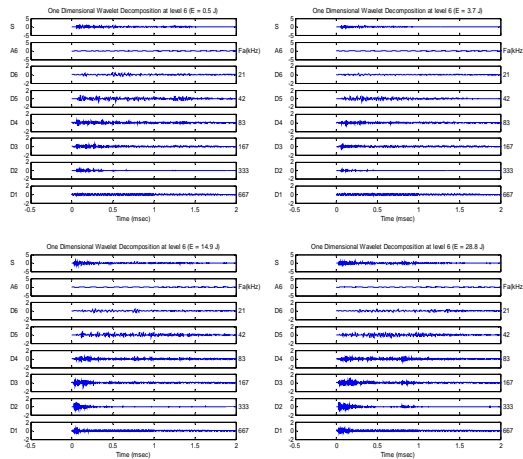


Fig. 10 Wavelet transform for AE sensor signals.

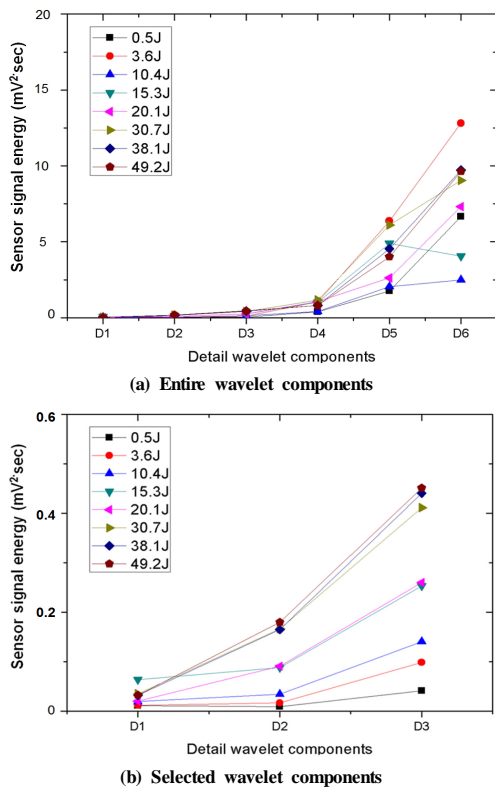


Fig. 11 Detailed wavelet components of PVDF sensor signal.

유사주파수는 D1=600kHz, D2=300kHz, D3=200kHz, D4=100kHz, D5=50kHz 그리고 D6=10kHz 근처의 범위를 가진다.

Fig. 9는 PVDF 센서 신호를 웨이블릿 변환한 그래프이고 Fig. 10은 AE 센서 신호를 웨이블릿 변환한 그래프이다. PVDF

센서의 경우 충격에너지가 10.4J부터는 D4 성분의 신호가 나타나기 시작하였으며, AE 센서의 경우는 D1, D2, D3, D4 성분의 신호 크기가 증가됨을 관찰하였다.

이러한 센서 신호 크기의 변화를 좀 더 정량적으로 분석하기 위하여 각 유사주파수에 해당되는 그래프에서 전압 신호를 제공하여 적분한 값을 센서 신호에너지라고 정의하였고 충격 에너지와 유사주파수의 센서 신호에너지를 비교하였다.

$$Sensor\ signal\ energy = \int_{t_s}^{t_e} V^2 dt \quad (1)$$

Fig. 11에 PVDF 센서 신호 웨이블릿 변환의 유사주파수와 충격에너지를 그래프로 나타내었다. FFT의 신호 분석에서 알 수 있듯이 손상이 없을 때도 80kHz 부근까지 손상 신호가 보임을 알 수 있다. 따라서 그 이상의 주파수인 D1, D2, D3을 확대하여 살펴보면 충격에너지 크기가 증가할수록 대체적으로 센서 신호에너지가 커짐을 알 수 있다.

Table 3은 충격에 따른 주파수 분포를 나타낸다. 마찬가지로 시편의 손상으로 인해 발생할 것으로 예상하는 주파수 영역인 D1, D2, D3의 센서 신호에너지는 충격에너지가 증가할수록 커짐을 알 수 있다.

Table 3 Energy distribution with detail component for each impact energy of PVDF sensor signal

Impact energy (J)	Energy distribution (%)					
	D1 600kHz	D2 300kHz	D3 200kHz	D4 100kHz	D5 50kHz	D6 10kHz
0.5	0.13	0.10	0.46	4.49	19.88	74.94
3.6	0.06	0.08	0.48	5.07	31.31	63.00
10.4	0.37	0.66	2.73	7.86	39.97	48.40
15.3	0.61	0.85	2.44	9.78	47.23	39.09
20.1	0.17	0.80	2.29	9.28	23.00	64.46
30.1	0.21	0.98	2.43	6.89	36.07	53.42
38.1	0.20	1.05	2.81	5.11	28.94	61.89
49.2	0.21	1.19	2.99	5.31	26.54	63.76

Fig. 12에 AE 센서 신호 웨이블릿 변환의 유사주파수와 에너지를 도시하였다. FFT신호에서 알 수 있듯이 손상이 없을 때도 120kHz 부근까지 신호가 나타남을 알 수 있다. 따라서 그 이상의 주파수인 D1, D2, D3을 확대하여 살펴보면 충격에너지 크기가 증가할수록 대체적으로 적분값이 커짐을 알 수 있지만 그렇지 않는 경우도 있다. 이것은 AE 센서에 반사된 신호가 불규칙적으로 유입되기 때문으로 판단된다.

Table 4는 충격에 따른 주파수 분포를 나타낸다. PVDF 센서의 결과와 같이 손상으로 인해 나타났을 것으로 예상하는 D1, D2, D3의 센서 신호에너지가 에너지가 증가할수록 커짐을 알 수 있다.

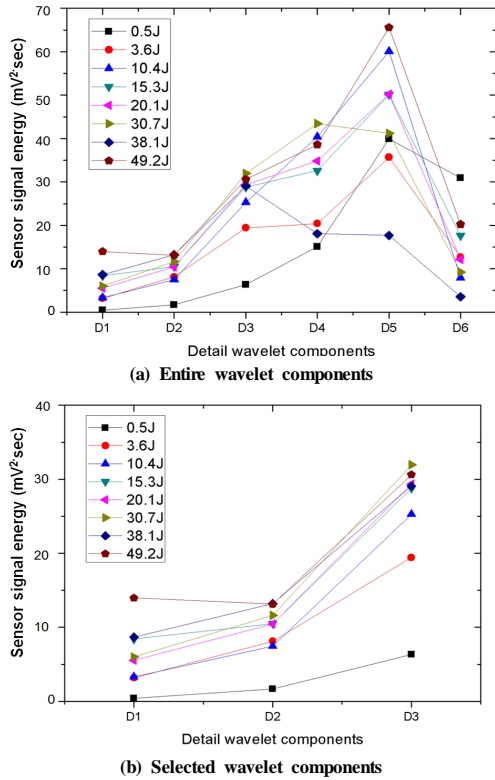


Fig. 12 Detailed wavelet components of AE sensor signal.

Table 4 Energy distribution with detail component for each impact energy of AE sensor signal

Impact energy (J)	Energy distribution (%)					
	D1 600kHz	D2 300kHz	D3 200kHz	D4 100kHz	D5 50kHz	D6 10kHz
0.5	0.45	1.76	6.74	15.98	42.32	32.76
3.6	3.19	8.16	19.53	20.51	35.85	12.77
10.4	2.29	5.16	17.49	27.97	41.60	5.49
15.3	5.68	7.09	19.44	22.02	33.89	11.88
20.1	3.87	7.33	20.60	24.44	35.24	8.51
30.1	4.18	8.10	22.29	30.29	28.71	6.43
38.1	9.59	14.64	32.24	20.04	19.58	3.91
49.2	7.67	7.21	16.81	21.19	36.02	11.11

3.3 육안검사 및 비파괴 검사

Fig. 13은 시편의 단면검사를 수행한 결과이다. 관통되기까지는 충격에너지가 증가할수록 단면의 손상이 커지고 관통 후에는 충격에너지가 증가하더라도 손상이 대체적으로 일정한 것을 알 수 있었다.

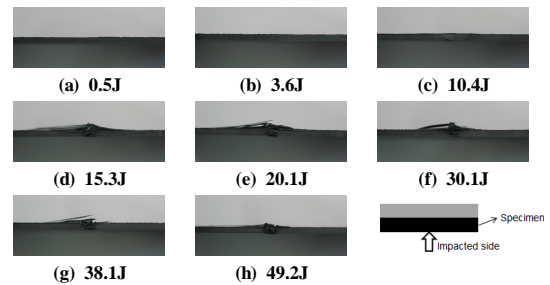


Fig. 13 Cross section photographs of each impact energy.

Fig. 14는 충격에너지에 따른 내부 손상을 비파괴검사(c-scan)를 이용해 알아 본 결과이다. 관통 전까지는 내부손상 영역이 증가하다가 관통 후에는 감소함을 보인다. 이것은 충격 속도가 증가할수록 급힘에 의한 층간분리, 기지재료 균열 파손 보다는 관통을 주로 하는 압축과 전단에 의한 보강섬유의 파손 등의 국부적 손상 유발이 주요 원인이라고 판단된다.

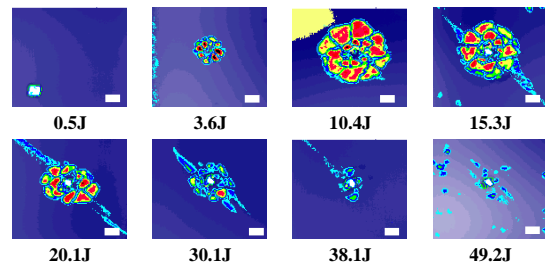


Fig. 14 C-scan photographs of each impact energy.

4. 결론

본 논문에서는 복합적층판에 PVDF 센서와 AE 센서를 부착한 후 고속충격에 의한 손상 특성을 분석하였다. 또한 육안검사 및 비파괴검사를 이용하여 손상정도를 확인하였다.

PVDF 센서와 AE 센서 신호를 분석한 결과, 모두 충격에너지가 증가하여 손상이 심해질수록 고주파의 에너지가 증가함을 알 수 있다. 하지만, 충격에너지가 클수록 고주파 성분의 센서 신호에너지가 반드시 증가하는 것은 아니라는 것을 알 수 있었다. 또한 PVDF 센서는 관통이 되기 전후에서, AE 센서는 손상 발생 전후에서 고주파 성분의 센서 신호에너지가 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 손상 발생 전의 고주파 성분 에너지와 손상되었을 때의 고주파 성분 에너지의 관계를 이용하여 관통 유무 또는 손상 개시 시점을 알 수 있다.

고속충격 손상 탐지에 대한 PVDF 센서와 AE 센서 모두 유사한 결과를 나타냈기 때문에 상대적으로 가격이 저렴한 PVDF 센서의 활용 가능성은 충분할 것으로 판단된다. 그러나

AE 센서에 비하여 고주파 신호에 둔감하고 SNR(signal to noise ratio)이 작기 때문에 향후 이의 보상 방안에 대한 연구가 필요하며, 복합재 구조물의 실시간 구조 건전성 모니터링 연구의 기초자료로 활용될 수 있다고 생각된다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-521- D00081)과 국방과학연구소의 지원(과제번호 : 10-01-08-17)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Abrate, S., "Impact on lamina composite materials," *Applied Mechanics Review*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 155-190.
- 2) Ruiz, C., and Harding, J., *Modelling impact of composite structures using small specimens*, Woodhead Publishing Ltd., 2000.
- 3) Abrate, S., *Impact on composite structures*, Cambridge University Press, 1998.
- 4) Okafor, A.C., Otieno, A.W., Dutta, A., and Rao, V.S., "Detection and characterization of high-velocity impact damage in advanced composite plates using multi-sensing techniques," *Composite Structures*, Vol. 54, 2011, pp. 289-297.
- 5) Jones, R.T., Sirkis, J.S., Friebele, E.J., and Kersey, A.D., "Location and magnitude of impact detection in composite plates using neural networks," *Proc. SPIE*, No. 2444, 1996, pp. 469-480.
- 6) 김진원, 고분자 압전센서를 이용한 복합적층판의 고속충격 탐지, 석사학위논문, 충남대학교, 2006.
- 7) 박찬익, 고분자 압전(PVDF) 센서 신호를 이용한 복합적층판의 저속충격 손상 탐지 연구, 박사학위논문, 충남대학교, 2003.
- 8) 성대운, 오정훈, 김천근, 홍창선, "웨이블릿 변환을 이용한 스마트 복합적층판의 충격 손상 검출 연구," *한국복합재료 학회지*, 제13권 제1호, 2000, pp. 40-49.
- 9) 이종오, 지현섭, 주노희, 음향방출(AE)시험의 원리와 응용, 재료연구소, 2009, pp. 156-164.