

복합적층판의 저속충격손상에 따른 PZT 센서와 PVDF 센서의 신호 분석

이홍영*, 김진원*, 최정민*, 김인걸*

Investigation on PVDF & PZT Sensor Signals for the Low-Velocity Impact Damage of Gr/Ep Composite Laminates

Hong-Young Lee, Jin-Won Kim, Jung-Min Choi and In-Gul Kim

Key Words : low-velocity impact, PVDF, PZT, wavelet transform, health monitoring

ABSTRACT

Low-velocity impact damage is a major concern in the design of structures made of composite materials, because impact damage is hidden inside and cannot be detected by visual inspection. The piezoelectric thin film sensor can be used to detect variations in structural and material properties for structural health monitoring. In this paper, the PVDF and PZT sensors were used for monitoring impact damage initiation in Gr/Ep composite panel to illustrate this potential benefit. A series of impact test at various impact energy by changing impact mass and height is performed on the instrumented drop weight impact tester. The wavelet transform(WT) is used to decompose the piezoelectric sensor signals in this study. Test results show that the particular waveform of sensor signals implying the damage initiation and development are detected above the damage initiation impact energy. And it is found that both PZT and PVDF sensors can be used to detect the impact damage.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 가볍고 높은 강성을 가지고 있으나 저속충격에 의해 손상이 발생하기 쉽다. 이러한 손상은 복합재료의 압축 잔류강도를 크게 저하시킬 수 있다. 이에 따라 복합재 평판이 저속 충격을 받을 때, 센서 신호를 이용한 충격력 복원, 손상개시 및 손상진전에 대한 충격손상정보를 모니터링 할 수 있는 기법 개발에 대한 필요성과 가능성이 대한 요구가 점점 증대되었다. 그래서 현재까지 이와 관련하여 국내외적으로 많은 연구가 수행되고 있으며, 최근 국내에서도 압전재료와 광섬유 등과 같은 센서를 이용하는 손상 모니터링 연구가 수행중이다 [1-4].

본 논문에서는 저속충격 손상에 대한 모니터링 연구의 일환으로 Gr/Ep 복합재 평판에

PVDF(polyvinylidene fluoride) 센서와 PZT 센서를 부착하여 저속충격실험을 수행하여 각 센서의 신호들을 비교 분석하였다. 한편, 센서 신호를 분석하는 여러 가지 방법 중에서 본 논문에서는 시간영역과 주파수 영역 모두에서 고분해능의 제약을 최소화할 수 있는 웨이블렛 변환(Wavelet Transform) 해석법을 이용하여 신호를 분석하였다 [5-7].

2. 이 론

2.1 센서신호와 변형률 관계

센서내 1, 2 방향 평면 변형률이 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 이고, 센서 전극판의 유효면적이 $A_p(a_p \times b_p)$ 이고, 두께가 t_p 인 압전센서에 생기는 개화로 전압 $V(i)$ 는 (1)과 같이 표현된다.

* 충남대학교 항공우주공학과

$$\begin{aligned}\bar{V}(t) &= \frac{Q(t)}{C_p} (C/F) \\ &= \frac{t_p}{A_p x_{33}} \int_{A_p} (e_{31} \varepsilon_x + e_{32} \varepsilon_y) dx dy \\ &= \frac{1}{A_p} \int_{A_p} (C_x \varepsilon_x + C_y \varepsilon_y) dx dy \\ &= C_x \bar{\varepsilon}_x + C_y \bar{\varepsilon}_y\end{aligned}\quad (1)$$

이 때, $\bar{\varepsilon}_x$, $\bar{\varepsilon}_y$ 는 센서의 유효 면적내에서 x 방향 및 y 방향 평균 변형률이며, C_p 와 센서상수 C_x , C_y 는 (2)와 같고, x_{33} 은 압전재료의 두께방향 유전률이다.

$$C_p = \frac{x_{33} A_p}{t_p}, \quad C_x = \frac{t_p e_{31}}{x_{33}}, \quad C_y = \frac{t_p e_{32}}{x_{33}}. \quad (2)$$

본 논문에서는 사용된 센서가 횡동방성 재료이고 평면 응력 조건 ($\sigma_3 = 0$)을 만족하여, 전기장이 없다고 가정할 경우 e_{31}, e_{32} 는 (3)과 같다.

$$\begin{pmatrix} e_{31} \\ e_{32} \end{pmatrix} = \frac{1}{1 - v_{12} v_{21}} \begin{pmatrix} E_1 & v_{12} E_2 \\ v_{21} E_1 & E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2 웨이블렛 변환(Wavelet Transform)

신호의 특성을 파악하는데 많이 쓰이는 퓨리에 변환은 신호를 각각의 진동수를 가진 여러 삼각함수로 쪼개어 나타냄으로써 신호를 분석하기 때문에, 신호들의 시간에 대한 정보를 잃게 된다. 따라서, 손상에 의해 야기되는 신호들을 진단하기 위해 시간과 주파수를 모두 볼 수 있는 진단법이 제안되었다.

이에 대한 대안으로 STFT(Short Time Fourier Transform) 분석법이 많이 사용되었다. STFT는 신호의 작은 구간을 windowing 기술을 사용하여 분석함으로써 신호가 발생했을 때 지배적인 주파수가 언제 발생하는지를 표현할 수 있다. 그러나, STFT에 의한 정보는 window의 크기에 의해 정밀도가 제한되며, 시간과 주파수 영역에서 동시에 고해상도를 나타내는 것이 불가능하다. 그래서, STFT analysis의 이러한 단점을 보완하기 위해 Wavelet analysis를 고려하게 되었다.

웨이블렛 변환(Wavelet Transform)은 STFT와는 달리 한번의 연산으로 신호가 지난 모든 스케일 성분을 하나의 공간에 표현한다. 각각의 웨이블렛 모함수인 $\psi(t)$ 로부터 압축계수(contraction Coeff.) a 와 전이계수(transient coeff.) b 와의 합성을 통해 (4)와 같이 웨이블렛 집합이 정의된다 [6, 7].

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

여기서, 압축계수 a 는 웨이블렛의 크기를 변화시키고 전이계수 b 는 시간상에서의 웨이블렛의 전위를 나타낸다.

연속 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Transform)은 (5)식과 같다.

$$\psi^f(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*(\frac{t-b}{a}) dt \quad (5)$$

이 때, $f(t)$ 는 분석하려는 신호이며 웨이블렛 함수의 공액복소수 형태이다.

WT의 실재적인 계산을 위해서, a 와 b 는 이산화되어야 하고 이것을 이산 웨이블렛 변환(Discrete Wavelet Transform)이라고 한다.

3. 저속 충격 실험

충격실험은 낙하식 충격실험기(Drop Weight Impact Tester)를 이용하였으며, 125g, 503g, 1,170g의 3 가지 충격체 질량에 대하여 여러 낙하 높이를 설정해 실험을 하였다. 실험 장치도는 그림 1과 같고, 충격실험시 하중신호, PVDF, PZT 신호를 동시에 측정, 분석하였다.

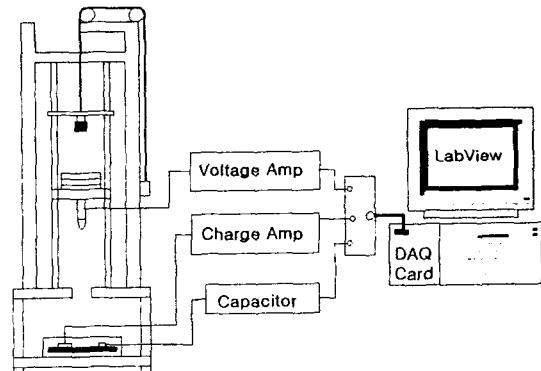


Fig. 1 Test Setup

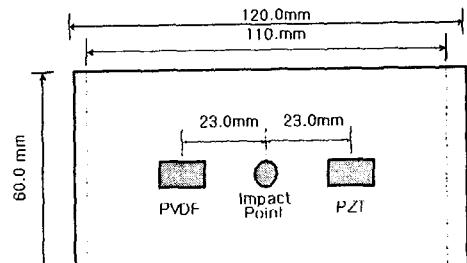


Fig. 2 Specimen Property and Sensor Location

저속 충격 시험기의 최대 충격 높이는 약 1.5m, 최대 충격 속도는 약 5m/s이다. 충격체의 질량은 최소 125gr이며, 최대 5kg까지 조정할 수 있다.

충격체에는 PCB 사의 M208A33 하중 센서를 장착하였으며, 팁은 PCB 사의 0.5 인치 반구형상을 가진 084A19 충격 팁을 사용하였다.

실험에 사용된 시편은 Gr/Ep 프리프레그 (HFG

HT145/RS1222)를 사용하여 만든 직교적층판 [0/90]_{4s}이다. 시편의 길이와 폭 및 두께는 각각 120mm, 60mm, 2.5mm이다. 충격 위치는 시편의 중앙이며, PVDF 와 PZT는 시편의 윗면에 부착하였다. 압전필름(PVDF) 센서와 압전세라믹(PZT) 센서로 사용된 모델의 종류와 특성값이 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1 Typical Properties of PVDF and PZT sensor

Property	Symbol'	PVDF (DT1-028K)	PZT (C-82)
Young's Modulus	E ₁ (Gpa)	2.1	59
	E ₂ (Gpa)	1.22	59
	E ₃ (Gpa)	1.22	52
Poisson's Ratio	v ₁₂	0.33	0.34
	v ₂₁	0.192	0.34
Piezo Strain Constants	d ₃₁ (C/N)	23.0×10 ⁻¹²	260.0×10 ⁻¹²
	d ₃₂ (C/N)	3.0×10 ⁻¹²	260.0×10 ⁻¹²
	d ₃₃ (C/N)	-33.0×10 ⁻¹²	-540.0×10 ⁻¹²
Permittivity	x ₃₃ (F/m)	103×10 ⁻¹²	31000×10 ⁻¹²
Piezo Sensor Constants	C _x (C/F)	14.4×10 ⁻³	346.0×10 ⁻³
	C _y (C/F)	3.75×10 ⁻³	346.0×10 ⁻³
	C _z (C/F)	10.9×10 ⁻³	383.0×10 ⁻³

4. 결과 및 고찰

질량이 125g인 물체는 100, 300, 600, 900, 1,200mm에서, 503g의 질량체는 100, 600mm에서, 1170g의 질량체에 대해서는 100, 300, 600mm에서 각각 충격을 가하였다. 이때 각각의 충격에너지에 대한 손상 여부를 육안으로 관찰하였고 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Impact Test Matrix

Test No.	Mass (gr)	Height (mm)	Energy (J)	Remarks
1	125	100	0.123J	×
2		300	0.368J	×
3		600	0.735J	×
4		900	1.103J	×
5		1,200	1.470J	Dent 발생
6	503	100	0.493J	×
7		600	2.958J	Dent 발생
8	1,170	100	1.147J	Dent 발생
9		300	3.440J	Dent 확장
10		600	6.880J	Dent 확장 crack 발생

위 Table 3에서 볼 때, 에너지가 1.147J이 넘어서면서부터 Dent 가 발생한다는 것을 알 수가

있었다. 그리고, 6.880J에서는 Crack 까지 발생하게 됨을 알 수가 있었다. 이것으로 보아 에너지가 1.147J 안팎에서 손상이 시작된다고 추측할 수가 있었다. 각 충격량에 대한 PVDF 와 PZT 센서의 신호 응답은 아래와 같다.

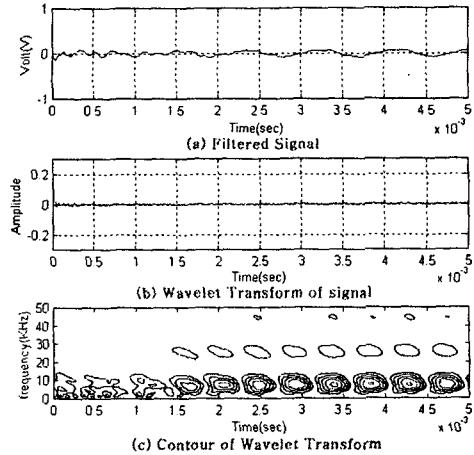


Fig. 3 Wavelet Transform of PVDF Signal (0.123J)

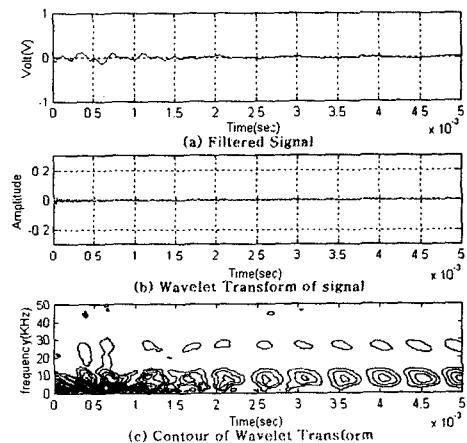


Fig. 4 Wavelet Transform of PVDF Signal (1.147J)

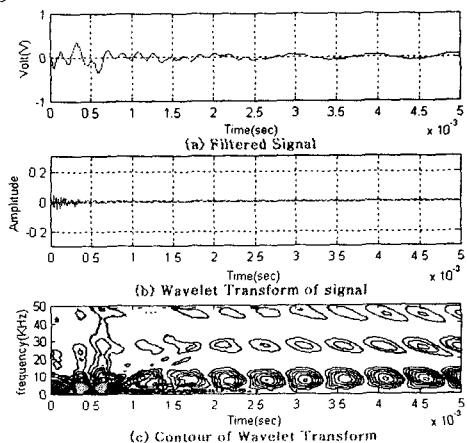


Fig. 5 Wavelet Transform of PVDF Signal (6.880J)

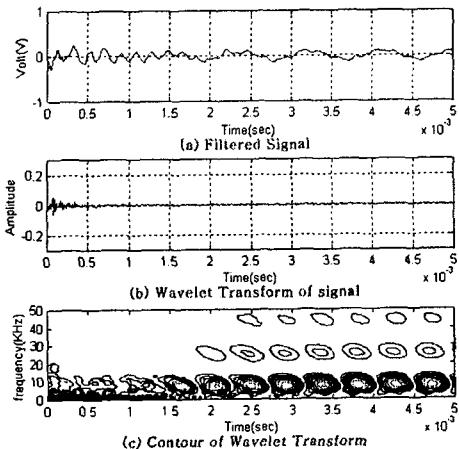


Fig. 6 Wavelet Transform of PZT Signal (0.123J)

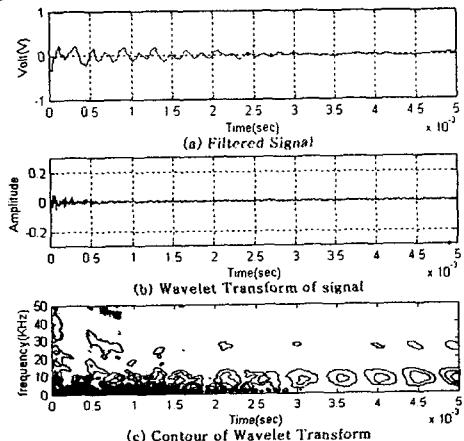


Fig. 7 Wavelet Transform of PZT Signal (1.147J)

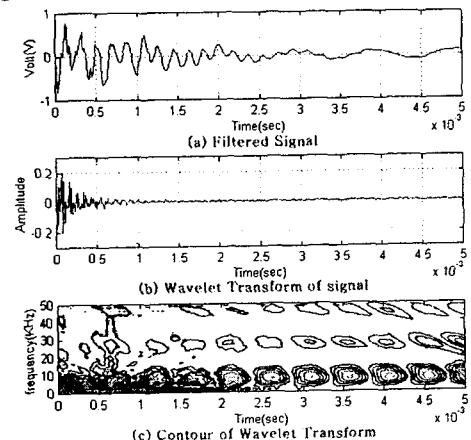


Fig. 8 Wavelet Transform of PZT Signal (6.880J)

Fig. 3, 4, 5 는 각 에너지에서의 PVDF 신호에 대한 웨이블렛 변환이고, 마찬가지로 Fig. 6, 7, 8 은 PZT 신호에 대한 웨이블렛 변환을 나타낸 것이다. Fig. 3(c)와 6(c)에서 손상이 없을 때는 접촉이 일어나는 동안 특별한 고주파 성분이 거의 나타나지 않고 있다. 그러나 Fig. 4(c)와 7(c)과 같이

에너지가 1.147J 이상에서는 손상이 생기는 시점에서 고주파 성분들이 많이 나타남을 관찰할 수 있다. 그리고 Fig. 5 와 8 은 에너지가 6.880J 일 때 dent 와 crack 이 발생한 것으로 고주파 성분들이 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 PZT 와 PVDF 센서 모두 복합재료의 초기 손상을 감지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 압전 필름(PVDF)센서와 PZT 센서가 부착된 탄소섬유 복합재 평판의 저속 충격손상 모니터링에 대해서 고찰하였다. 충격에너지를 초기 손상이 발생할 수 있는 크기까지 증가시키면서 충격시험을 수행하고 웨이블렛 분석법(Wavelet Analysis)을 이용하여 PVDF 와 PZT 신호를 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

하중센서 및 PVDF 와 PZT 센서로부터 복합재 평판의 손상 진전으로 판단되는 신호를 같은 시간에 관찰할 수 있었으며 손상의 정도에 따라 그 신호가 변화하였다. 그리고 PZT 센서와 PVDF 센서 모두 손상의 발생 및 정도를 감지할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 김인결, 김준, “저속충격을 받는 복합충판의 역함수 문제에 대한 실험적 상관관계”, 한국복합재료학회지, 11권 3호, 1998, pp.24-38.
- (2) 박찬익, 김인결, 이영신, “고분자 압전센서 신호를 이용한 Gr/Ep 복합재 적층판의 손상유발 충격하중의 복원”, 한국복합재료학회지, 15권 5호, 2002, pp.7-13.
- (3) 성대운, 오정훈, 김천곤, 홍창선, “웨이블렛 변환을 이용한 스마트 복합적층판의 충격손상 검출 연구”, 한국복합재료학회지, 13권 1호, 2000, pp.40-49.
- (4) 박찬익, 김인결, 이영신, “압전필름센서를 이용한 복합재료평판의 저속충격 손상개시 모니터링”, 한국복합재료학회지, 15권 2호, 2002, pp.11-17.
- (5) 김윤영, 김용훈, “웨이블렛을 이용한 보의 결합 진단”, 대한기계학회논문집 A권, 제 24권 제 2호, 2000, pp.518-525
- (6) Newland, D. E., 1993, *An Introduction to Random Vibration and Spectral & Wavelet Analysis*
- (7) 이승훈, 윤동한, 2002, 알기쉬운 웨이브렛 변환 (*Introduction to the Wavelet Transform*)