

PVDF 센서신호를 이용한 Gr/Ep 적층판의 저속충격 손상탐지

박찬익^{*}·김인걸^{**}·이영신^{***}

Low-Velocity Impact Damage Detection for Gr/Ep Laminates Using PVDF Sensor Signals

Chan Yik Park, In-Gul Kim and Young-Shin Lee

Abstract

The PVDF(polyvinylidene fluoride) film sensor as one of smart sensors has good characteristics to detect the impact damages of composite structures. The capabilities of the PVDF film sensor for evaluating impact behaviors and damages of Gr/Ep laminates subjected to low-velocity impact were examined. From sensor signals, the specific wave-forms implying the damage were detected. The wavelet transform(WT) and Short Time Fourier Transform(STFT) were used to decompose the piezoelectric sensor signals in this study. The impact behaviors of Gr/Ep laminates were simulated and the impact forces were reconstructed using the sensor signals. Finally, the impact damages were predicted by finite element analysis with the reconstructed forces. For experimental verification, a series of low-velocity impact tests from low energy to damage-induced energy were carried-out. The extent of damage in each case was examined by means of ultrasonic C-scan and the measured damage areas were agreed well with the predicted areas by the F.E.A.

Key Words: PVDF, Gr/Ep, Low-Velocity Impact

1. 서 론

복합재 구조물은 금속재료와 비교하여 비강도와 비강성이 뛰어나 B-2, F-22 및 T-50과 같은 최신예 항공기의 주 구조로 적용되고 있다. 그러나 복합재 구조물은 운용 중에 발생하는 저속충격에 취약하고, 이러한 저속충격은 구조의 손상을 유발하여 압축강도를 현저히 저하시킬 수 있다.

저속충격 문제에 대한 복합재 구조의 건전성을 입증하기 위해서는 충격에 따른 손상모드, 손상 크기뿐만 아니라 구조물의 변위 및 변형률 등과 같이 손상과 거동을 동시에 평가할 수 있어야 하며, 또한 충격하중을 복원할 수 있어야 한다. 저

속충격을 받는 구조의 건전성을 평가하기 위한 방법으로는 현재까지 스트레인게이지와 함께 압전 센서 및 광섬유를 이용하여 충격을 받는 구조물의 거동을 모니터링하는 연구가 수행되어 왔다 [1-3]. 이러한, 연구는 주로 손상이 없는 조건에서 하중을 복원하거나, 특정 손상신호로부터 손상개시와 전개를 모니터링하는 연구가 수행되었다.

복합재 구조물에 손상을 유발하는 저속충격에 대하여 하중을 복원하는 연구는 아직 큰 성과가 없다. 단지 국부적인 충격손상이 구조의 전체적인 응답에 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다[4]. 따라서 국부적인 손상을 유발하는 충격에너지 부근에서는 손상에 대한 모델링 없이 구조 거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 대칭 직교차 Gr/Ep 적층판을 사용하여 손상이 발생하지 않는 조건에서부터 국부적인 손상을 유발하는 충격조건까지 일련의 16가지 저속충격시험을 수행하였다. 충격하중에 대한

* 국방과학연구소

** 충남대학교 항공우주공학과

*** 충남대학교 기계설계공학과

적층판의 거동은 충격응답함수(impact response function)[4]를 사용하여 모사하였다. 손상이 발생한 조건에서 손상 개시 및 전개와 관련된 신호는 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform)과 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 사용하여 모니터링하였다. 또한, 손상이 발생한 조건에서 측정된 센서신호와 반복 Tikhonov 조정법(Iterative Tikhonov regularization method)을 사용하여 충격 하중을 복원하였다. 복원된 하중은 비선형 유한요소 프로그램인 MSC/DYTRAN을 사용하여 적층판의 손상을 예측하였으며, 이를 비파괴 검사 결과와 비교하였다.

2. 이론 해석

2.1 충격응답함수

본 연구에서는 충격응답함수를 이용하여 적층판에 부착된 PVDF 센서와 스트레인계이지 신호를 모사하였다. 충격하중을 받는 적층판의 운동 방정식은 Mindlin 관이론과 가정모드법(assumed mode method)을 적용하여 유도하였다. 적층판 임의의 지점(x_0, y_0)에 충격하중 $p(t)$ 가 작용할 때 적층판 임의의 지점(x_1, y_1)에서의 변형률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\xi}(x_1, y_1, t) &= \int_0^t p(t-\tau) G_{\varepsilon_{\xi}}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0) d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\varepsilon_{\xi}(x_1, y_1, t)$ 는 시간 t 일 때 임의의 지점(x_1, y_1)에서 표면의 $\xi(x$ 또는 y)방향 변형률을 의미한다. 또한 $G_{\varepsilon_{\xi}}$ 는 변형률에 대한 충격응답함수이고, 본 연구에서는 국부적인 손상으로 가정하여 손상에 따른 강성저하를 고려하지 않았다.

2.2 PVDF 센서신호와 변형률과의 관계

PVDF 센서로부터 측정된 전압신호, $\{V\}$ 와 변형률 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{Q(t)}{C_p} \\ &= C_x \bar{\varepsilon}_x + C_y \bar{\varepsilon}_y \\ C_p &= \frac{x_{33}A_p}{t_p}, \quad C_x = \frac{t_p e_{31}}{x_{33}}, \quad C_y = \frac{t_p e_{32}}{x_{33}} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\bar{\varepsilon}_x$ 와 $\bar{\varepsilon}_y$ 는 센서의 유효 면적 내에서 x 방향 및 y 방향 평균 변형률이며, C_p 는 정전 용량이고, x_{33} 은 압전재료의 두께방향 유전률이다.

2.3 반복 Tikhonov 조정법

식(1)의 적분방정식은 수치적분하면 센서신호와 충격력 관계를 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\{V\} = [G]\{p\} \quad (3)$$

식(3)에서 $[G]$ 는 행렬식 형태의 충격응답함수이다. 측정된 센서 신호로부터 충격하중 $\{p\}$ 를 복원하려면 $[G]$ 의 역행렬을 구하여야 한다. 그런데, 역행렬 $[G]^{-1}$ 은 ill-posed 상태가 되어 해를 구하기 어렵다. 본 논문에서는 조정된 해를 반복 Tikhonov 조정법[1]을 사용하여 구하였다.

$$\{P_{\alpha, \delta}\} = ([G]^T [G] + \alpha [I])^{-1} [G]^T \{V_\delta\} \quad (4)$$

식(4)에서 충격하중은 조정매개변수 α 를 반복 조정하여 수렴시켜 계산하게 된다.

2.4 단시간 푸리에 변환과 웨이블릿 변환

PVDF 센서 신호는 동적감지 특성이 뛰어나 구조의 거동신호뿐만 아니라 손상의 개시와 전개에 따른 고주파 신호를 감지할 수 있다. 본 연구에서는 손상의 개시와 전개와 같은 비정상 신호를 단시간 푸리에 변환과 웨이블릿 변환을 사용하여 손상신호를 모니터링하였다.

단시간 푸리에 변환과 웨이블릿 변환은 센서신호 $S(t)$ 에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) g(t-\tau) e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

$$W^S(a, b) = \frac{1}{\sqrt(a)} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

식에서 $g(t)$ 는 창함수를 의미하며 Ψ^* 는 웨이블릿 함수의 공액복소함수이다.

3. 충격 실험

실험적 검증을 위하여 수행한 실험 조건은 총 16가지로 Table 1과 같다. 이들 조건 중 Test 14, 15, 16은 눈으로 확인 가능한 기지균열이 발생하

였고 C-scan을 통하여 충간분리를 확인하였다. 실험은 낙하식 충격시험기(drop weight impact tester)를 이용하여 수행하였다.

사용된 시편은 Gr/Ep 프리프레그(HFG, HT145/RS1222)를 사용하여 두께 2.5mm인 직교 적층판 [0/90]as을 제작하였다. 시편은 길이와 폭이 250mm × 125mm인 치구에 단순지지 되었으며, 시편의 표면에 두 개의 스트레이인게이지와 한 개의 PVDF 센서가 부착되었다. 실험에 사용된 시편 형상, 물성치, 센서의 종류, 센서의 위치, 충격위치, 실험 치구 및 실험장치의 자세한 내용은 참고문헌[3]에 수록되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 충격거동해석 및 실험결과 비교

16개 실험조건에 대하여 PVDF 센서 및 스트레이인게이지의 거동을 모사하고 이를 실험결과와 비교하였다. 비교결과 손상이 발생하여도 충격응답 함수로 계산된 센서신호는 실험에서 측정된 신호와 잘 일치하였다. Fig. 1은 손상이 발생한 Test 14조건에서 PVDF 센서의 모사신호와 측정신호를 비교한 것이다. 제하중부위에서 일부 오차가 보이지만 전반적으로 잘 일치하고 있다.

4.2 충격하중복원 및 실험결과 비교

Fig. 2는 반복 Tikhonov 조정법을 사용하여 복원된 충격하중과 측정하중을 비교한 그림이다. PVDF 센서신호와 스트레이인게이지로 복원된 하중이 측정된 신호와 잘 일치하고 있다. 나머지 실험조건에서도 유사한 결과를 나타내었다. 본 연구의 해석과 실험 결과를 살펴보면, 손상이 발생하여도 손상의 크기가 국부적이어서 강성의 저하가 적은 경우, 선형 모델만으로 구조의 거동을 모사할 수 있으며, 또한 충격하중을 복원할 수 있음을 확인하였다.

4.3 손상신호 모니터링

본 연구에서는 PVDF 센서를 이용하여 구조의 거동을 측정함과 동시에 손상이 개시되고 전개되는 신호를 모니터링하였다. 손상이 발생함에 따라 PVDF 센서 신호에서는 구조의 변형을 나타내는 저주파 신호이외에 손상의 개시와 전개를 의미하는 고주파 신호가 관측되었다. 이러한 고주

파 신호의 분석은 단시간 퓨리에 변환과 웨이블릿 변환을 사용하였다. Fig. 3은 Test 16조건의 PVDF 센서신호를 단시간 퓨리에 변환한 것이다. 그림에서 보듯이 약 2msec 부근에서 5kHz 이상의 고주파 신호가 급격히 발생함을 알 수 있다. Fig. 4는 같은 신호를 웨이블릿 변환한 그림이다. 고주파수를 나타내는 상세성분신호에서 급격한 고주파수가 2msec부터 나타남을 알 수 있다.

4.4 센서신호를 이용한 손상영역 예측 및 비교

본 연구에서는 PVDF 센서 신호로 복원된 하중으로 비선형 유한요소해석을 수행하여 적층판의 손상 영역을 예측하고 이를 비파괴 검사 결과와 비교하였다. 비선형 유한요소해석은 MSC/DYTRAN을 사용하였으며, 기지균열에 의한 강성 저하를 고려하였다. 이때 사용한 파손 판별식은 기지균열의 경우 Hashin[5]이 제안한 식을 사용하였으며, 충간분리는 Choi와 Chang[6]이 제안한 식을 사용하였다.

손상이 발생한 조건에서는 Fig. 5와 같은 후면 기지균열과 Fig. 6과 같은 C-scan상의 손상영역이 나타났다. 일반적으로 C-scan상의 손상영역은 충간분리 영역으로 볼 수 있다. 예측된 손상 영역과 측정된 손상영역을 비교한 결과 손상 모드별 크기에는 오차가 있었다. 그러나 전체적인 손상의 크기는 비교적 잘 일치하였다. Fig. 7은 PVDF 센서신호만을 이용하여 예측한 Test 15의 손상영역이다. Fig. 6과 비교하여 손상의 크기가 유사함을 알 수 있다. 따라서 PVDF 센서신호만으로 손상의 유무뿐만 아니라 손상의 크기를 예측할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 PVDF 센서를 사용하여 초기손상이 유발된 조건에서 센서신호를 모사하고, 하중을 복원하였으며, 동시에 손상의 발생에 따른 손상신호를 모니터링하고 복원된 하중과 비선형 유한요소법을 사용하여 손상 영역을 예측하였다. 또한, 실험 및 비파괴검사를 통하여 해석결과와 비교하여 양호한 결과를 얻었다. 따라서 PVDF 센서를 이용하여 국부적인 손상이 유발된 충격에 대하여 구조의 거동뿐만 아니라 하중을 복원하고 손상을 탐지할 수 있음을 확인하였다.

Table 1. Impact test matrix and impact energy

Test ID	Energy (J)	Mass (g)	Height (mm)	Remarks
Test 1	0.123	125	100	
Test 2	0.368	125	300	
Test 3	0.735	125	600	
Test 4	1.103	125	900	
Test 5	1.470	125	1200	
Test 6	0.493	503	100	
Test 7	1.479	503	300	
Test 8	2.958	503	600	
Test 9	4.436	503	900	
Test 10	5.915	503	1200	
Test 11	1.275	1301	100	
Test 12	3.825	1301	300	
Test 13	7.650	1301	600	
Test 14	11.475	1301	900	damage
Test 15	15.300	1301	1200	damage
Test 16	17.675	2004	900	damage

Low-Velocity Point Impact," Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 14, 1992, pp. 2134-2169.

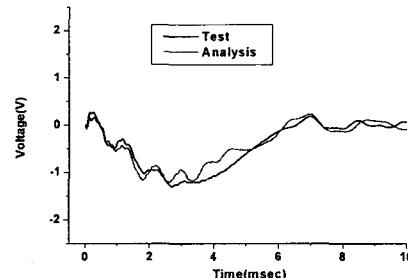


Fig. 1 Comparison of the measured PVDF sensor signal with the simulated signals of Test 14

참고문헌

- (1) Kim, I. and Hahn, H.T., "Prediction of Low-Energy Impact Based on Piezoelectric Sensor Signals," ASME, AD-Vol.35, 1993, pp. 433-439.
- (2) 성대운, 오정훈, 김천곤, 홍창선, "웨이블릿 변환을 이용한 스마트 복합적층판의 충격 손상 검출 연구," 한국복합재료학회지, 제13권, 제1호, 2000, pp.40-49.
- (3) 박찬익, 김인걸, 이영신, "압전필름 센서를 이용한 복합재료 평판의 저속충격 손상 개시 모니터링," 한국복합재료학회지, 제15권, 제2호, 2002, pp.7-13.
- (4) Olsson, R., Asp, L.E., Nilsson, S. and Sjogren, L., "A review of some key developments in the analysis of the effects of impact upon composite structures," Composite Structures; Theory and Practice, ASTM STP 1383, 2000, pp.12-28.
- (5) Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, 1980, pp. 329-334.
- (6) Choi, H.Y. and Chang, F.K., "A model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from

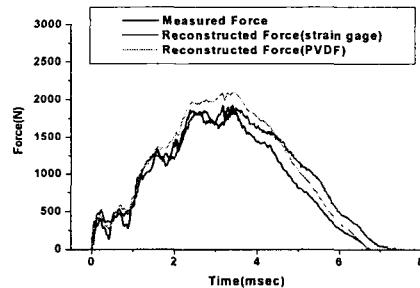


Fig. 2 Comparison of the measured force with the reconstructed forces by the strain signal and the PVDF sensor signal of Test 15

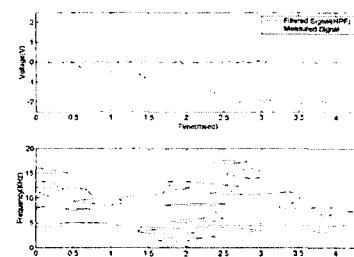


Fig. 3 Sensor signal & its STFT result using the PVDF sensor signal processed by the 5kHz high-pass filter of Test 16

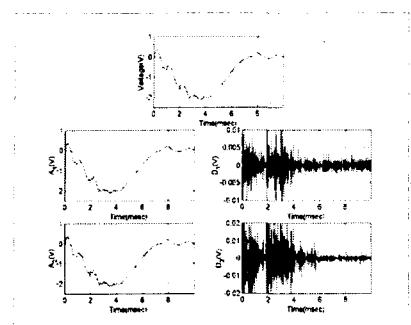


Fig. 4 Wavelet transform result of the PVDF sensor signal using Daubechey 2 function for Test 16



Fig. 5 Photo of matrix crack in the back face of Test 16 (size : 28×8 mm)

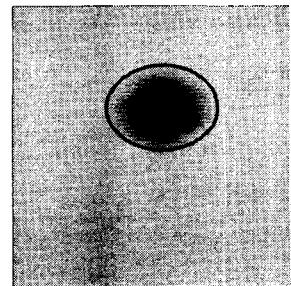


Fig. 6 Back-face C-scan image of Test 15
(Damage area : 24×18 mm)

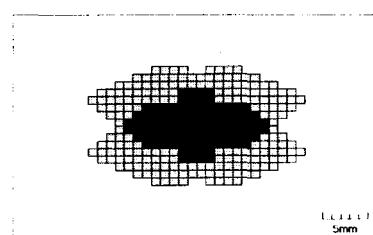


Fig. 7 Damage configuration predicted using the non-linear FEM and the reconstructed force by the PVDF sensor signals of Test 15
(matrix crack:22×16 mm, delamination=16×10 mm)