

압전필름센서를 이용한 복합재 펠트판의 저속충격 손상개시 모니터링

이관호*·박찬익*·김인걸**·이영신**

Monitoring of Low-velocity Impact Damage Initiation of Gr/Ep Panel Using Piezoelectric Thin Film sensor

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

Key Words: low velocity impact, carbon composite, PVDF, piezoelectric film sensor

Abstract

The piezoelectric thin film sensor can be used to interpret variations in structural and material properties, e.g. for structural integrity monitoring and assessment. To illustrate one of this potential benefit, PVDF film sensors are used for monitoring impact damage initiation in Gr/Ep composite panel. Both PVDF film sensors and strain gages are surface mounted to the Gr/Ep specimens. 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 sensor responses are carefully examined to predict the onset of impact damage such as matrix cracking, delamination, and fiber breakage, etc. Test results show that the particular waveforms of sensor signals implying the damage initiation and development are detected above the damage initiation impact energy. As expected, the PVDF film sensor is found to be more sensitive to impact damage initiation event than the strain gage.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 가볍고 높은 강성을 가지고 있으나 저속충격에 쉽게 손상이 유발될 수 있으며 눈에 보이지 않는 손상이라도 복합재의 압축 잔류강도를 크게 저하시킬 수 있다. 이에 따라 최근에는 구조물의 건전성을 확보하기 위하여 구조물에 센서를 부착하여 실시간으로 구조물의 안전성을 진단하여 능동적으로 대처하는 스마트

구조에 대한 연구가 많이 시도되고 있다. 특히, 복합재 구조물은 저속충격 모니터링에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 저속충격을 모니터링하는 방법으로 초기에는 주로 스트레인게이지가 센서로 사용되었다. Doyle[1]은 스트레인게이지 신호를 주파수 분석하여 충격하중을 복원하였다. Yen등[2], Park[3]과 Kim등[4]은 구조의 거동과 충격하중 관계를 Green's Function으로 정의하고, 구조물의 거동에 해당하는 센서신호를 이용하여 충격하중 및 충격위치를 계산하였다. 최근 국내에서는 압전재료와 광섬유등을 이용하여 저속충격 모니터링 연구가 수행중인데, Kim등[5,6]은 압전필름센서를 이용하여 충격하중의 복원 가능성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 그러나, 센서신호를 이용한 충격력 복원에 대한 대부분의

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교

연구는 손상이 발생하지 않을 정도의 저에너지 충격시에 대하여 고찰하였다.

복합재 평판에 손상이 생길 정도의 충격에너지가 작용했을 때, 구조물에 부착된 센서신호로부터 섬유절단, 모재균열, 층간분리 같은 손상개시 및 손상진전에 대한 충격손상정보를 실시간으로 모니터링할 수 있는 기법에 대한 필요성과 가능성에 대한 요구가 증대되었다. 본 논문에서는 이러한 기법에 대한 가능성을 확인하기 위하여, 압전필름(PVDF: polyvinylidene fluoride)센서와 스트레인게이지가 부착된 Gr/Ep 복합재 평판의 저속충격실험을 통하여 충격손상개시 모니터링에 대하여 고찰하였다. 충격실험은 다양한 충격체 질량의 교체가 용이한 낙하식 충격실험기(Drop Weight Impact Tester)를 제작하여, 3종류의 충격체 질량 각각에 대하여 5가지 낙하높이에 대하여 수행하였다. 충격실험시 하중신호, 변형률게이지 신호, 압전필름센서 신호를 동시에 측정, 분석하였다.

2. PVDF 센서의 변형률과 신호관계

센서내 1, 2방향 평면 변형률이 ϵ_x , ϵ_y 이고, 센서 전극판의 유효면적이 $A_p(a_p \times b_p)$ 이고, 두께가 t_p 인 압전센서에 생기는 개회로 전압 $\bar{V}(t)$ 는 (1)식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{V}(t) &= \frac{Q(t)}{C_p} \\ &= \frac{t_p}{A_p \chi_{33}} \int_{A_p} (e_{31} \epsilon_x + e_{32} \epsilon_y) dx dy \\ &= \frac{1}{A_p} \int_{A_p} (C_x \epsilon_x + C_y \epsilon_y) dx dy \\ &= C_x \bar{\epsilon}_x + C_y \bar{\epsilon}_y \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_x$ 와 $\bar{\epsilon}_y$ 는 센서의 유효 면적 내에서 x방향 및 y방향 평균 변형률이며, C_p 와 센서 상수 C_x , C_y 는 다음 식으로 표현되고 χ_{33} 은 압전재료의 두께방향 유전율이다.

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

본 연구에서는 사용된 PVDF 센서가 횡등방성

재료이고 평면응력조건($\sigma_3=0$)을 만족하며, 전기장이 없다고 가정할 경우, e_{31} , e_{32} 는 (3)식과 같이 표현된다.

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

탄성계수 E_1 , E_2 와 푸와송비 ν_{12} , ν_{21} 은 제조업체의 제원[7]을 사용하였다. 사용된 PVDF 센서의 길이와 폭, 두께는 각각, 30mm, 12mm, 28 μ m이다.

3. 실험장치 및 실험

다양한 충격체 질량으로 교체가 용이한 저속충격실험기와 측정장비는 Fig. 1과 같이 구성되었다. 실험기의 높이는 약 2m이고 최대 충격 높이는 약 1.5m이다. 실험기에서 얻을 수 있는 최대 속도는 약 5m/s이다. 충격체의 최대 질량은 부가 질량에 따라 5kg까지 조절할 수 있게 하였으며, 500g 이하의 충격체 질량인 경우에는 2단계 낙하 가이드 시스템을 채택하여 충격체 최소질량을 125g까지 구현하였다. 충격체에는 PCB사의 M208A33 하중센서를 장착하였으며, 텃은 PCB사의 0.5인치 반구형상을 가진 084A19 충격 텃을 사용하였다. 또한, 충격체의 낙하속도는 상용 광섬유 센서를 오실로스코프에 연결하여 이용하여 측정하였다.

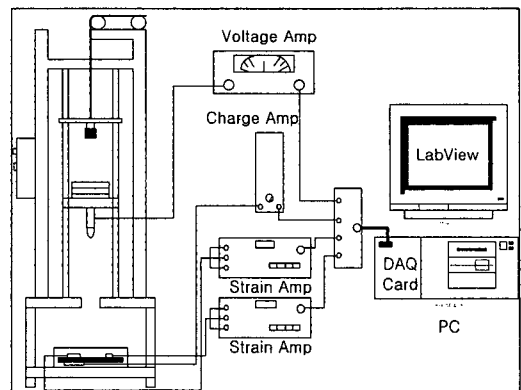


Fig. 1. Experimental set-up

사용된 시편의 재료는 Table 1과 같은 Gr/Ep 프리프레그(HFG HT145/RS1222)를 사용하여 두께 2.5mm인 직교적층판 [0/90]_{3S}을 제작하였다. 시편은 길이와 폭이 250mm×125mm인 치수에 단순지지 되었으며, Fig. 2와 같이 두 개의 스트레인게이지와 한 개의 PVDF 센서가 부착되었다. 충격 위치는 시편의 중앙이며, 센서는 중앙에서 길이 방향으로 ±60mm에 위치하였다. 실험은 3개의 충격체 질량에 대하여 5개 높이로 실험을 수행하였는데, 충격실험은 Table 2와 같이 15조건에 대하여 수행하였다.

Table 1. Material properties of carbon composite

Material	$E_1=124.6\text{GPa}$, $E_2=8.7\text{GPa}$, $\nu_{12}=0.33$,
Properties	$G_{12}=3.6\text{GPa}$, $\rho=1542\text{kg/m}^3$

Table 2. Test matrix and impact energy

Test No	Mass Height Energy	Test No	Mass Height Energy	Test No	Mass Height Energy			
1	125g 100mm 0.123 J	6	503g 100mm 0.493 J	11	1301g 100mm 1.275 J			
	2		7		12	125g 300mm 0.368 J	503g 300mm 1.479 J	1301g 300mm 3.825 J
						3	8	13
4	9	14	125g 900mm 1.103 J	503g 900mm 4.436 J	1301g 900mm 11.475 J			
			5	10	15	125g 1200mm 1.470 J	503g 1200mm 5.915 J	1301g 1200mm 15.300 J

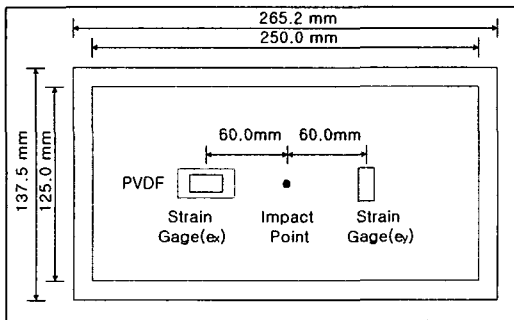


Fig. 2. Geometries of the test specimen

4. 실험결과

Fig. 3은 15가지 경우의 충격실험에 대한 최대 충격하중과 에너지의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 충격체의 질량이 변하여도 충격에너지와 최대하중의 관계는 계속 유지되고 있음을 알 수 있다. 이것은 본 연구의 실험에서 나타난 손상의 크기가 판의 크기에 비하여 상대적으로 작기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 한편, 눈으로 식별 가능한 영구 압입은 충격에너지가 2.958J (Test 8)이상인 조건에서 발생하였으며, 에너지가 증가할수록 압입의 크기와 깊이는 증가하였다. 또한, 11.475J(Test 14)이상의 충격에너지에서는 후면에 땅콩 모양의 영구변형과 길이방향의 기지 크랙이 확인되었다.

낙하높이가 일정하고 충격체의 질량이 증가하면, 충격접촉시간(impact duration)이 증가하며, 센서 신호의 형태도 변화한다. 그러나, 503g과 1301g의 경우 충격체의 질량을 고정시키고 낙하높이를 증가시키면, Fig. 4와 같이 하중 신호의 형태는 유사지만, 충격접촉시간이 변화하였다. 또한, 뚜렷한 손상이 있는 경우(Test 14, Test 15)에는 충격하중이 최대가 되는 지점 부근에서 하중신호에 고주파성분의 파형이 관찰되었다.

충격을 받은 판의 거동은 스트레인게이지와 PVDF 신호를 이용하여 분석하였다. 충격체의 질량이 125g인 경우 충격접촉시간 동안 판의 진동은 판의 여러 개 고유 주파수가 포함되어 나타났다. 그러나, 충격체의 질량이 503g이상인 경우는 저주파성분이 상대적으로 크게 나타났다. 이 경우에는 국부적인 고주파수 성분의 진동을 관찰할 수 있었는데, 스트레인게이지 신호보다는 PVDF 신호가 뚜렷이 확인할 수 있었다(Fig. 5). 이것을 근거로 판의 손상과 연계하여 PVDF 신호를 분석하여 보았다. 우선 503g과 1301g의 경우 저주파 성분이 다른 진동성분에 비하여 크므로, 전체 실험의 신호에 대하여 1kHz이하의 저대역 신호를 제거하였다. 저대역 신호가 제거된 신호는 다시 STFT(Short Time Fourier Transform)을 수행하여 시간에 따라 변화하는 주파수특성을 분석하였다. Fig. 6은 Test 15의 STFT 결과를 나타낸 것이다. 1.5 msec에서 3.5 msec 사이에 5kHz-15kHz 고주파 성분이 나타나고 있다. 이러한 고주파 성분은 충격체 질량이 503g 이상의 손상이 없는 조건에서는 잡음수준으로 거의 나타나지 않는 진동 성분이다. 그러나, 손상이 발생하고, 진전함에 따

라 최대하중 부근에서 이와 같은 고주파 성분이 관찰되었다. 이러한 고주파 성분은 충격에너지 및 손상의 형태에 따라서 변화하였는데, 이는 영구 압입, 모재 균열 및 층간분리등의 파손모드에 따라 변화하는 것으로 판단된다. 현재까지 파손 모드에 따른 센서신호를 명확히 구분할 수 없지만 센서신호를 이용하여 충격손상을 모니터링 할 수 있는 가능성을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 압전필름(PVDF)센서와 스트레인게이지가 부착된 탄소섬유 복합재 평판의 저속 충격손상 모니터링에 대하여 고찰하였다. 충격에너지를 초기 손상이 발생할 수 있는 크기까지 증가시키면서 충격시험을 수행하고 결과를 분석한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 하중센서 및 PVDF 센서로부터 복합재 판의 손상진전으로 판단되는 신호를 관찰할 수 있었으며 손상의 정도에 따라 그 신호가 변화하였다. 층간분리 손상이 확실히 발생한 경우 하중센서에서 고주파 성분의 신호가 관찰되었다.

2) 복합재 평판의 저속충격실험에서 판의 거동은 구조물의 진동에 의한 진폭이 큰 저주파 진동 신호와 국부적인 파손에 의한 응력과 전달에 의한 고주파 성분의 신호가 혼합되어 나타날 수 있으며, PVDF센서가 스트레인게이지 신호에 비하여 고주파 성분의 주파수 감지에 민감한 특성을 보여주었다. 이러한 신호의 변화를 파손 모드와 구분시킬 수 있다면 충격손상 모니터링에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 장기기초연구사업(과제명 : 스마트 스킨 구조 연구)의 연구비를 일부 지원 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

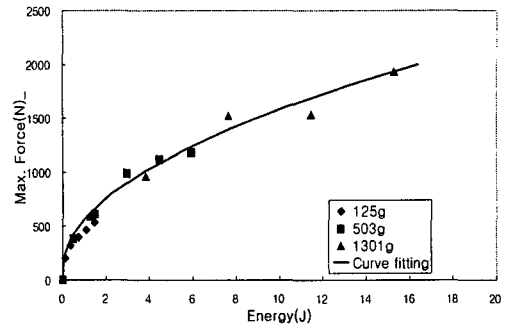


Fig. 3. Max. contact force with energy levels and different impact weights

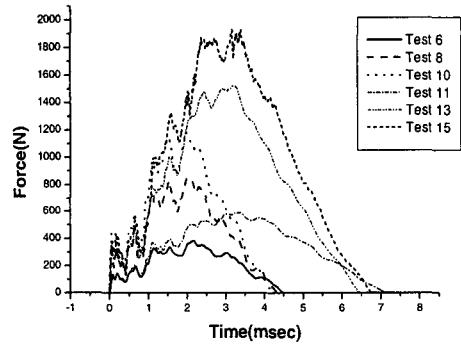


Fig. 4. Force history of 503g & 1301g impact mass

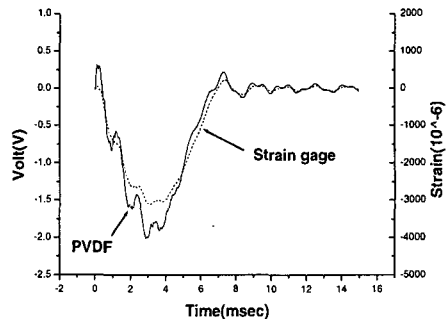


Fig. 5. PVDF signal & strain gauge signal of Test 15(15.300J)

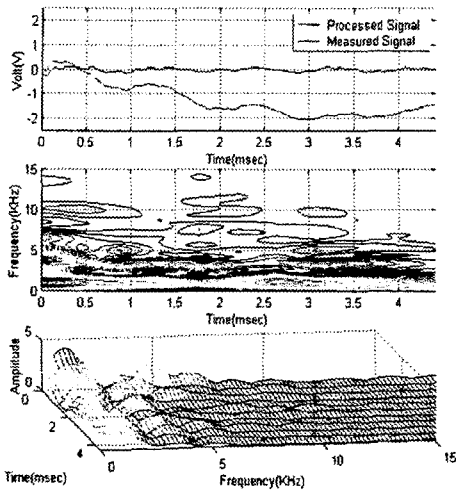


Fig. 6. Measured signal & its STFT of Test 15(15.300J)

참고문헌

(1) Doyle, J. F., 1984, "An Experimental Method for Determining the Dynamic Contact Law," *Experimental Mechanics*, Vol. 24, pp.10-16.

(2) Yen Ching-Shih and Wu Enboa, 1995, "On the Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part II: Experimental Verification and Further Applications," *Trans. of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 62, pp.699-705.

(3) 박형순, 1993, "횡방향 충격을 받는 보의 초기 거동해석 및 충격력 복원에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원.

(4) Kim, I. and Hahn, H. T., 1993, "Prediction of Low-Energy Impact Based on Piezoelectric Sensor Signals," *ASME, AD-Vol.35*, pp. 433-439.

(5) 김인걸, 김 준, 1998, "저속충격을 받는 복합층판의 역함수 문제에 대한 실험적 상관관계," *한국복합재료학회지*, 11권3호, pp.24-38.

(6) 김인걸, 정석모, 2001, "고분자압전센서신호를 이용한 저속충격 탐지 해석모델의 개선," *한국항공우주학회지*, 제29권, pp.70-76.

(7) Atochem Sensors Inc., Technical Manual, 1991.