

論文

압전필름센서를 이용한 복합재 평판의 저속충격 손상개시 모니터링

박찬익*, 김인결**, 이영신***

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

C. Y. Park*, I. Kim**, Y. S. Lee***

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 (polyvinylidene fluoride) film sensors are used for monitoring impact damage initiation in Gr/Ep composite panels. Both PVDF film sensors and strain gages are attached to the surface of Gr/Ep specimens. A series of impact tests at various impact energy by changing impact mass and height are performed on the instrumented drop weight impact tester. The sensor responses are carefully examined to predict the onset of impact damage such as indentation, matrix cracking, and delamination, 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.

초 록

우수한 동적 감지특성을 갖는 압전필름센서는 구조 건전성 모니터링이나 평가와 같은 구조물과 재료의 변화를 분석하는데 사용될 수 있다. 압전필름센서의 이러한 특성을 이용하여 Gr/Ep 복합재 평판의 충격 손상개시를 모니터링하였다. 압전필름센서와 스트레인게이지를 Gr/Ep 복합재 평판에 부착하여 다양한 조건의 에너지에 대한 충격시험을 나하식 충격시험기를 사용하여 수행하였다. 충격시험을 수행하는 동안 영구압입, 기지균열, 층간분리와 같은 충격 손상개시를 예측하기 위하여 센서신호를 분석하였다. 충격에너지를 초기 손상이 발생할 수 있는 크기 이상으로 증가시키면 손상의 개시와 진전에 대한 정보를 포함하는 특정 센서 신호를 관찰할 수 있었다. 특히, 압전필름센서는 스트레인게이지 보다 충격 손상개시 및 진전에 대한 좋은 감지 특성을 보여주었다.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 가볍고 높은 강성을 가지고 있으나 저속충격에 쉽게 손상이 유발될 수 있으며 눈에 보이지 않는 손상이라도 복합재의 압축잔류강도를 크게 저하시킬 수 있다. 이러한 손상이 적절한 시간에 탐지되어 수리되지

않으면 구조물의 건전성에 치명적인 위협을 줄 수 있다. 이에 따라 최근에는 구조물의 건전성을 확보하기 위하여 구조물에 센서를 부착하여 실시간으로 구조물의 안전성을 진단하여 능동적으로 대처하는 스마트 구조물과 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring)에 대한 연구가 많이 시도되고 있다. 특히, 복합재 구조물의 저속충격 모니터

*+ 국방과학연구소, 교신저자(E-mail: pcy1216@chollian.net)

** 중남대학교 항공우주공학과

*** 중남대학교 기계설계공학과

링에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 저속충격을 모니터링하는 방법으로 초기에는 주로 스트레인게이지가 센서로 사용되었다. Doyle[1]은 스트레인게이지 신호를 주파수 분석하여 충격하중을 복원하였다. Yen 등[2], Park[3]과 Kim 등[4]은 구조물의 동적 거동과 충격하중 관계를 Green's Function으로 정의하고, 구조물의 동적 거동에 해당하는 센서신호를 이용하여 충격하중 및 충격위치를 계산하였다. 최근 국내에서는 압전재료와 광섬유 등을 이용하여 저속충격 모니터링에 대한 연구가 수행중인데, Kim 등[5,6]은 압전필름센서를 이용하여 충격하중의 복원 가능성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Sung 등[7]은 압전세라믹센서(PZT)를 이용하여 4변이 고정된 정사각형 복합재 평판의 충격 손상 신호를 모니터링하고 고찰하였다.

충격하중에 의하여 생성되는 변형률 신호는 크게 2가지로 구분할 수 있는데, 하나는 일반적인 구조물의 진동에 의한 구조물의 고유진동모드와 관련된 변형률 신호이고 다른 하나는 충격하중의 지속시간이 아주 짧거나 또는 구조물의 손상에 의하여 발생할 수 있는 응력파에 의한 특정 고주파 영역의 변형률 신호이다. 복합재의 손상개시와 진전에 관련된 중요한 정보를 포함하고 있는 여러 종류의 응력파·횡파, 종파, 표면파, 음향방출신호 등-신호들을 적절한 센서를 사용하여 감지하고 진동신호와 구분하여 추출한 후 분석해 낼 수 있다면 저속충격과 관련된 복합재 구조물의 건전성 모니터링에 활용할 수 있으리라 생각된다.

본 논문에서는 복합재 평판에 손상이 생길 정도의 충격 에너지가 작용했을 때, 구조물에 부착된 센서신호로부터 섬유절단, 모재균열, 층간분리 같은 손상개시 및 손상진전에 대한 충격손상정보를 실시간으로 모니터링할 수 있는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 이러한 기법에 대한 가능성을 확인하기 위하여, 압전필름(PVDF: polyvinylidene fluoride)센서와 스트레인게이지가 부착된 단순지지 Gr/Ep 복합재 평판의 저속충격실험을 통하여 충격손상 개시 모니터링에 대하여 고찰하였다. 충격실험은 다양한 충격체 질량의 교체가 용이한 낙하식 충격시험기(drop weight impact tester)를 제작하여, 3종류의 충격체 질량 각각에 대하여 5가지 낙하높이에 대하여 수행하였다. 충격실험시 하중신호, 스트레인게이지 신호, 압전필름센서 신호를 동시에 측정하였으며 STFT(Short Time Fourier Transform)을 이용하여 측정 신호들을 처리 분석하였다.

2. PVDF 센서의 변형률과 신호관계

스트레인게이지는 게이지의 유효면적내의 특정 방향의

평균변형률에 해당하는 출력을 나타내지만 PVDF 필름센서는 센서의 유효면적내의 서로 직교하는 방향의 평균변형률에 각각의 방향에 해당하는 특정 상수를 곱하여 더한 형태로 다음과 같이 표현된다.

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 센서상수 C_x, C_y 는 다음 식으로 표현되고 χ_{33} 은 압전재료의 두께방향 유전률이다.

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

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[8]을 사용하였다. 사용된 PVDF 센서의 길이, 폭, 그리고 두께는 각각, 30mm, 12mm, 28 μ m이다.

본 논문에서는 식(1)의 관계를 이용하여 충격 하중을 받은 판의 구조 응답을 PVDF 센서 출력 신호로 변환하여 판의 거동분석에 이용하였다. 특히 PVDF 센서는 고주파 신호 특성이 뛰어나므로, 손상에 의하여 발생하는 고주파 신호를 모니터링하고자 하였다.

3. 저속충격시험

다양한 충격체 질량으로 교체가 용이한 저속충격시험기

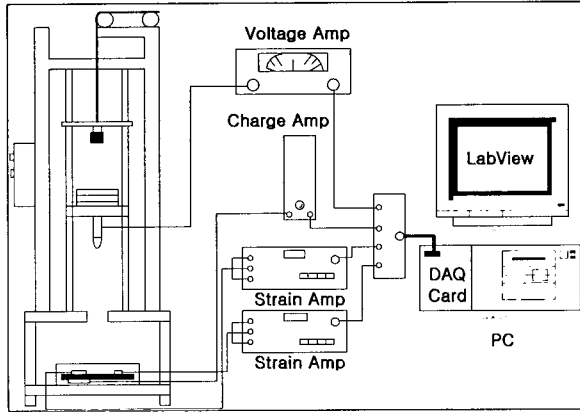


Fig. 1 Experimental set-up.

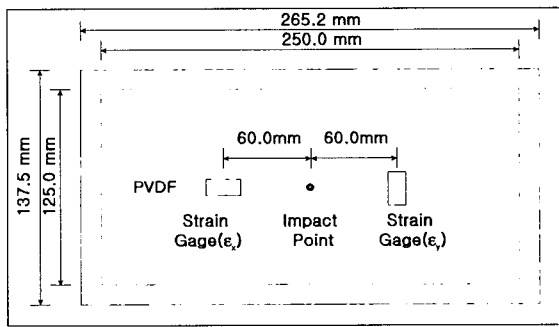


Fig. 2 Specimen geometry and sensor locations.

와 측정장비는 Fig. 1과 같이 구성되었다. 시험기의 높이는 약 2 m이고 최대 충격 높이는 약 1.5 m이다. 시험기에서 얻을 수 있는 최대 속도는 약 5 m/s이다. 충격체의 최대 질량은 부가 질량에 따라 5 kg까지 조정할 수 있게 하였으며, 500 g 이하의 충격체 질량인 경우에는 2단계 낙하가이드 시스템을 채택하여 충격체의 최소 질량을 125 g까지 구현하였다. 충격체에는 PCB사의 M208A33 하중센서를 장착하였으며, 팁은 PCB사의 0.5인치 반구형상을 가진 084A19 충격 팁을 사용하였다. 또한, 충격체의 낙하속도는 상용 광섬유 센서를 오실로스코프에 연결하여 측정하였다.

사용된 시편의 재료는 Table 1과 같은 Gr/Ep 프리프레그 (HFG HT145/RS1222)를 사용하여 두께 2.5 mm인 직교적층판 [0/90]₁₆을 제작하였다. 시편은 길이와 폭이 250 mm×125 mm인 치구에 단순지지 되었으며, Fig. 2와 같이 두 개의 스트레인게이지와 한 개의 PVDF 센서가 부착되었다. 충격 위치는 시편의 중앙이며, 센서는 중앙에서 길이 방향으로 ± 60mm에 위치하였다. 충격실험은 3개의 충격체 질량에 대해

Table 1 Material properties of Gr/Ep Prepreg

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

Table 2 Impact test matrix and impact energy

Test No	Mass	Test No	Mass	Test No	Mass
	Height		Height		Height
	Energy		Energy		Energy
1	125g	6	503g	11	1301g
	100mm		100mm		100mm
	0.123 J		0.493 J		1.275 J
2	125g	7	503g	12	1301g
	300mm		300mm		300mm
	0.368 J		1.479 J		3.825 J
3	125g	8	503g	13	1301g
	600mm		600mm		600mm
	0.735 J		2.958 J		7.650 J
4	125g	9	503g	14	1301g
	900mm		900mm		900mm
	1.103 J		4.436 J		11.475 J
5	125g	10	503g	15	1301g
	1200mm		1200mm		1200mm
	1.470 J		5.915 J		15.300 J

여 5개의 다른 높이에서 수행하였으며 15가지 실험조건은 Table 2에 나와 있다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 15가지 경우의 충격실험에 대한 최대 충격하중과 에너지의 관계를 나타낸 것이다. 충격체의 질량이 변하여도 충격에너지와 최대하중의 관계는 손상이 발생하지 않을 정도의 저에너지 충격에서처럼 계속 유지되고 있음을 알 수 있다. 이것은 본 연구의 실험에서 나타난 손상의 크기가 판의 크기에 비하여 상대적으로 작은 국부적 손상이기 때문이라고 판단된다. 한편, 눈으로 식별 가능한 영구압입은 충격에너지가 2.958 J(Test 8)이상인 조건에서 발생하였으며, 에너지가 증가할수록 압입의 크기와 깊이는 증가하였다. 충격에너지가 증가함에 따라 11.475 J(Test 14)이상의 충격에너지에서는 Fig. 4와 같이 후면에 땅콩 모양의 영구변형과 길이방향의 기지 균열(matrix crack)이 확인되었

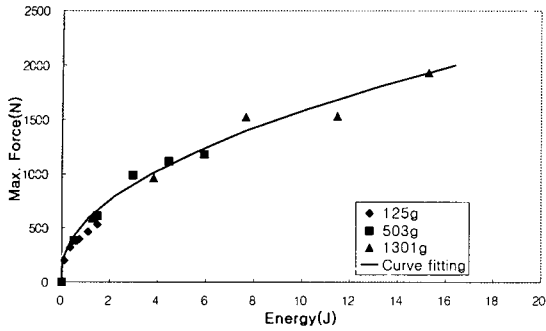


Fig. 3 Max. contact forces vs. energy levels with different impact mass.

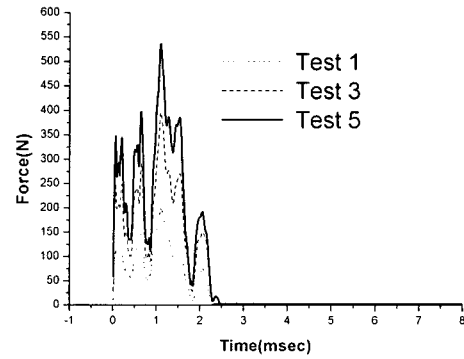


Fig. 6 Impact force time histories of impact mass=125g.

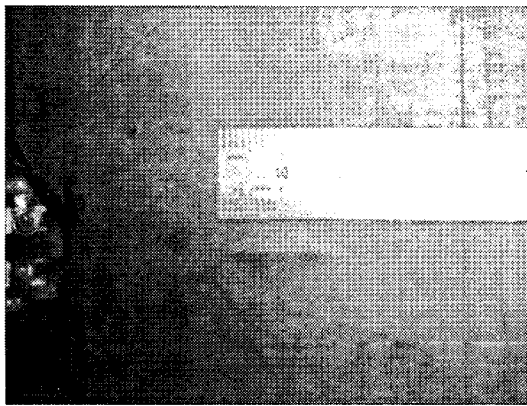


Fig. 4 Matrix crack of test 14 at the backface (crack size : 22×5 mm).

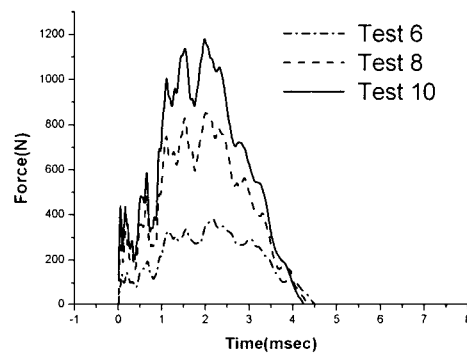


Fig. 7 Impact force time histories of impact mass=503g.

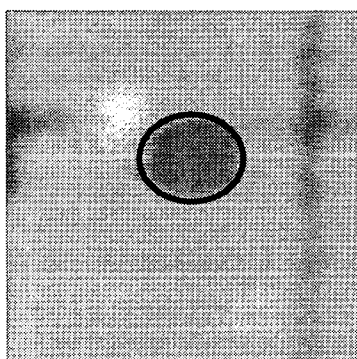


Fig. 5 C-scan image of test 14(damage size: 22×17 mm).

다. 또한, 기지 균열이 있는 시편에 대하여는 C-scan 장비를 사용하여 층간분리 영역을 검토하였다.

Fig. 5는 Test 14의 C-scan 촬영 사진으로 사진을 이용한 대략적인 측정 결과 길이방향의 크기는 육안으로 관찰된 기지 균열의 길이 22mm와 같았으며, 폭방향의 길이는 17mm의 타원형상을 보여주었다. 이 타원형상은 층간분리 영역으로 판단되며, 층간분리는 대부분 후면에서 발생되었다.

낙하높이가 일정하고 충격체의 질량이 증가하면, 충격접촉시간(impact duration)이 증가하며, 센서 신호의 형태도 변화한다. 그러나, 충격체의 질량을 고정시키고 낙하높이를 증가시키면, Fig. 6, 7, 8과 같이 하중신호의 형태는 유지하며, 신호의 크기가 변화하였다. 또한 503 g과 1301 g의 경우는 충격에너지에 따라 충격 접촉시간이 조금씩 변화하였다. 이 조건에서 손상이 없는 경우, 충격체의 질량이 일정하면 충격 접촉시간은 거의 일정하였으며, 충격속도가 증가할수록 미세하게 감소하는 경향을 나타내었으나, 기지 균열 등의 손상이 발생함에 따라 접촉시간이 다시 증가하였다. 또한, 뚜렷한 손상이 있는 경우(Test 14, Test 15)에는

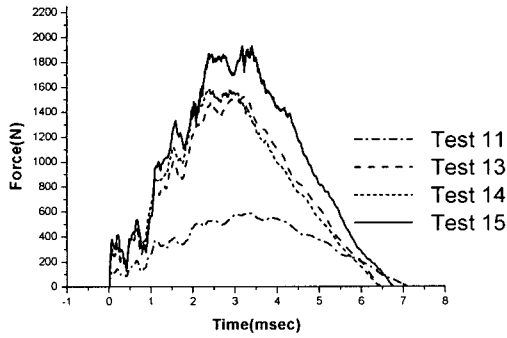


Fig. 8 Impact force time histories of impact mass=1,301g.

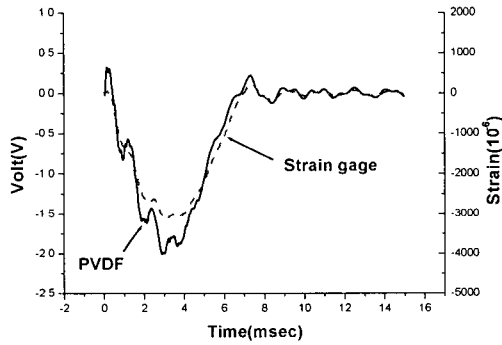


Fig. 9 Responses of strain gage and PVDF sensor (Test 15).

충격하중이 최대가 되는 지점 부근에서 하중신호에 고주파 성분의 파형이 관찰되었다.

이러한 손상신호는 충격에너지가 높은 추가적인 시험 (Fig. 13)에서 더욱 뚜렷한 고주파 성분으로 일관되게 관찰되었다. 지금까지의 실험결과로는 파손 모드에 따른 응력파의 종류와 감지된 센서신호를 명확히 연관시킬 수는 없지만 센서신호를 이용하여 충격손상을 모니터링할 수 있는 가능성을 확인하였다.

충격을 받은 판의 거동은 스트레인게이지와 PVDF 센서 신호를 이용하여 분석하였다. 손상이 없는 경우, 충격체의 질량이 503g과 1,301g인 경우에는 충격체 질량이 125 g인 경우에 비하여 저주파 성분의 주파수가 상대적으로 크게 관찰되었으나, 손상이 발생할 정도의 충격에너지에서는 국부적인 고주파 성분의 주파수를 관찰할 수 있었다. 이 경우, 스트레인게이지 신호보다는 PVDF 신호에서 뚜렷하게 확인할 수 있었다(Fig. 9). 이것을 근거로 판의 손상과 연계하여 PVDF 신호를 분석하여 보았다. 우선 503g과 1,301g의

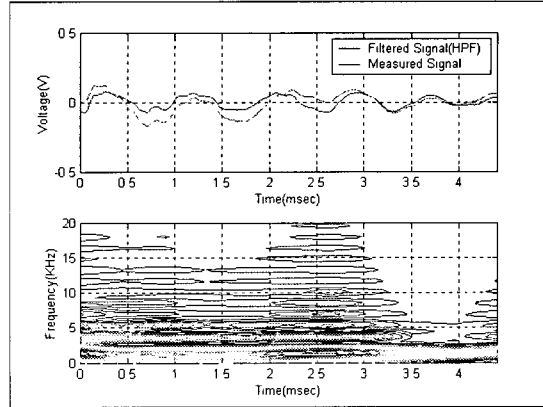


Fig. 10 Measured PVDF sensor signal and its STFT of Test 1.

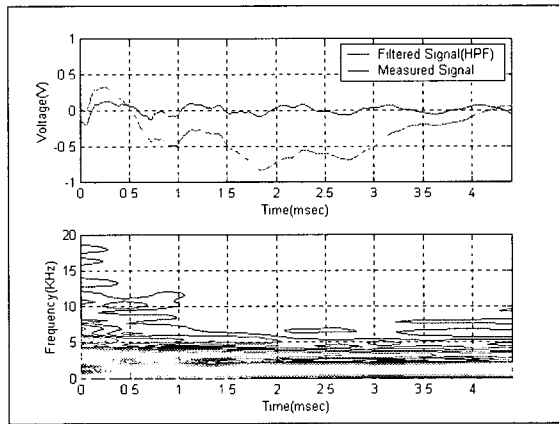


Fig. 11 Measured PVDF sensor signal and its STFT of Test 8.

경우 저주파 성분이 다른 진동 성분에 비하여 크므로, 측정된 신호에 대하여 1kHz이하의 저대역 신호를 제거하였다. 저대역 신호가 제거된 신호는 다시 STFT[9]을 수행하여 시간에 따라 변화하는 주파수 특성을 분석하였다. Fig. 10은 Test 1의 STFT 결과를 나타낸 것이다. 충격 개시부터 충격 접촉시간 동안 일정한 주파수의 신호가 일정하게 나타나고 있으며, 이는 계산된 판의 고유주파수와 유사하게 나타났다. 그러나 충격체의 질량이 증가함에 따라 측정된 신호의 형태도 변화하였다. Fig. 11은 Test 8의 STFT 결과를 나타낸 것이다. 충격 접촉시간 동안 5kHz이상의 주파수 성분이 없어진 것을 알 수 있다. 즉, 충격체 질량이 증가함에 따라 충격 지속시간동안 판의 고차 모드의 진동보다는 충격하중에 의한 저차 모드의 진동모드가 지배적임을 알 수 있다.

그러나 손상이 발생하는 충격에너지 조건에서는 이러한 신호에 변화가 발생하였다. Test 15의 STFT 결과가 Fig. 12에 나와있다. 충격 개시후 1.5msec에서 3.5msec 사이에 5kHz-20kHz 고주파 성분이 나타나고 있다. 이러한 고주파 성분은 충격체 질량이 503g 이상이고 손상이 없는 조건에서는 잡음수준으로 거의 나타나지 않았던 진동 성분이다. 그러나, 손상이 발생하고, 진진함에 따라 충격 접촉시간동안 이와 같은 고주파 성분이 관찰되었는데, 주로 최대 하중 부근에서 발생하였다. 이러한 고주파 성분은 충격에너지 및 손상의 형태에 따라서 변화하였는데, 이는 영구 압입, 모재 균열 및 층간분리 등의 파손모드에 따라 변화하는 것으로 판단된다. C-scan상의 층간분리의 손상 면적이 시편의 면적에 비하여 최대 1.5%정도(Test 15)의 국부적인 초기손상이고,

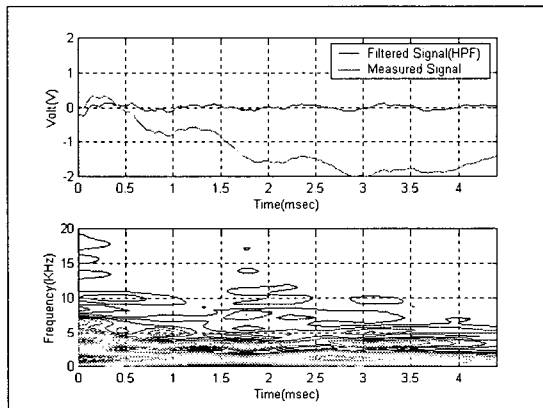


Fig. 12 Measured PVDF sensor signal and its STFT of Test 15.

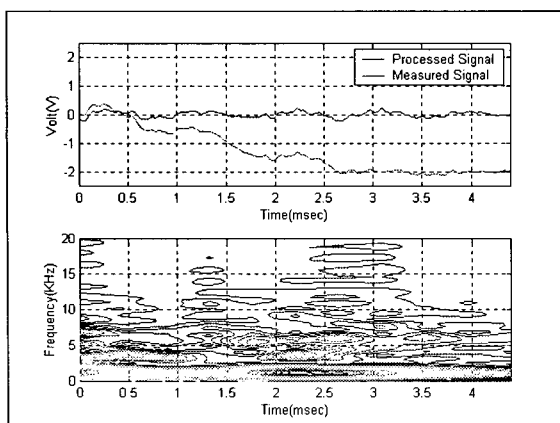


Fig. 13 Measured PVDF sensor signal and its STFT with impact energy=17.675J, impact mass=2,004g.

특히 경계조건이 단순지지조건으로 된 시편의 진동신호가 손상신호에 대하여 절대적으로 크게 나타났지만 진동신호와 손상신호를 구별할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 압전필름(PVDF)센서와 스트레인게이지가 부착된 탄소섬유 복합재 평판의 저속충격 손상 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 평판의 손상개시 및 진진으로 판단되는 신호를 관찰할 수 있었으며 손상의 정도에 따라 그 신호가 변화하였다. 층간분리 등의 손상이 확실히 발생한 경우, 하중센서와 PVDF 센서신호에서 고주파 성분의 신호가 관찰되었다.
- 2) 복합재 평판의 저속충격실험에서 센서신호는 구조물의 진동에 의한 진폭이 큰 저주파 진동신호와 국부적인 파손에 의한 응력과 전달에 의한 고주파 성분의 신호가 혼합되어 나타날 수 있으며, PVDF센서가 스트레인게이지에 비하여 고주파 성분의 주파수 감지에 민감한 특성을 보여주었다. 이러한 신호의 변화를 진동 신호와 구분하여 파손 신호를 추출하여 특정 파손 모드와 연관시킬 수 있다면 복합재 구조물의 충격 손상 모니터링에 PVDF 센서를 활용할 수 있으리라 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Doyle, J. F., "An Experimental Method for Determining the Dynamic Contact Law," *Experimental Mechanics*, Vol. 24, 1984, pp. 10-16.
- 2) Yen Ching-Shih and Wu Enboa, "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, 1995, pp. 699-705.
- 3) 박형순, “횡방향 충격을 받는 보의 초기 거동해석 및 충격력 복원에 관한 연구,” 박사학위논문, 1993, 한국과학기술원.
 - 4) Kim, I. and Hahn, H. T., “Prediction of Low-Energy Impact Based on Piezoelectric Sensor Signals,” *ASME, AD-Vol.35*, 1993, pp. 433-439.
 - 5) 김인걸, 김 준, “저속충격을 받는 복합층판의 역함수 문제에 대한 실험적 상관관계,” *한국복합재료학회지*, 제 11권, 제3호, 1998, pp. 24-38.
 - 6) 김인걸, 정석모, “고분자압전센서신호를 이용한 저속충격 탐지 해석모델의 개선,” *한국항공우주학회지*, 제29권, 제1호, 2001, pp. 70-76.
 - 7) 성대운, 오정훈, 김천근, 홍창선, “웨이블릿 변환을 이용한 스마트 복합적층판의 충격 손상 검출 연구,” *한국복합재료학회지*, 제13권, 제1호, 2000, pp. 40-49.
 - 8) Atochem Sensors Inc., *Technical Manual*, 1991.
 - 9) 임제탁, 이두수, *이산신호처리*, 대영사, 1998, pp. 772-780.