

## 論文

고분자 압전센서 신호를 이용한 Gr/Ep 복합재 적층판의  
손상유발 충격하중의 복원박찬익<sup>+</sup>, 김인걸<sup>+</sup>, 이영신<sup>\*\*\*</sup>Reconstruction of Damage-Induced Impact Force of Gr/Ep Composite Laminates Using  
Piezoelectric Thin Film Sensor SignalsC. Y. Park<sup>+</sup>, I. Kim<sup>+</sup>, Y. S. Lee<sup>\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

The piezoelectric thin film sensor has good characteristics to observe the impact responses of composite structures. The capabilities for monitoring impact behavior of Gr/Ep laminates subjected to damage-induced impact using the PVDF(polyvinylidene fluoride) film sensor were examined. For a series of low-velocity impact tests from low energy to damage-induced energy, simulated sensor signals were compared with measured signals of the PVDF film sensor. Local impact damages(matrix cracking and delamination) were found at three impact tests, but the measured signals agreed well with the simulated sensor signals based on the linear relationship between the impact forces and the PVDF film sensor signals. And the inverse technique was applied to reconstruct the impact forces using the PVDF film sensor signals. Most of reconstructed impact forces had good agreement with the measured forces. The comparison results showed that the local damage due to low-velocity impact didn't disturb the global impact responses of composite laminates and the reconstruction of impact forces from PVDF sensor signals wasn't affected by the local damage.

## 초 록

압전필름센서는 복합재 구조물의 저속충격응답을 관측하기에 우수한 특성을 지니고 있다. 본 연구에서는 Gr/Ep 복합재 적층판이 손상이 발생할 수 있을 정도의 충격에너지를 받았을 때 압전필름센서 신호를 이용하여 충격거동을 모니터링할 수 있는 가능성에 대하여 고찰하였다. 손상이 발생하지 않는 저에너지 충격조건부터 국부적인 손상을 유발할 수 있는 충격조건까지 압전필름센서가 부착된 Gr/Ep 복합재 적층판에 대하여 16가지의 저속충격시험을 수행하였다. 세 가지 조건의 충격시험에서 기지균열 및 층간분리 등의 국부적인 손상이 발생하였으나, 충격력과, 변위, 변형률, 압전센서 신호와의 관계를 이용한 선형해석 모델을 사용하여 충격하중에 의한 복합재 적층판의 응답을 예측하는 정방향 문제와 압전센서 신호로부터 충격력을 복원하는 역방향 문제에서 시험과 해석 결과는 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다. 복원된 충격력으로부터 국부적인 손상이 발생할 정도의 충격에너지까지는 압전필름센서 신호를 이용하여 충격력을 정확히 복원할 수 있음을 확인하였다.

## 1. 서 론

복합재 구조물은 금속재료와 비교하여 비강도와 비강성이 뛰어나 B-2, C-17 및 F-22와 같은 최신헌 비행기의 구

<sup>+</sup> 국방과학연구소, 교신저자(E-mail:pcy1216@chollian.net)

<sup>\*\*</sup> 충남대학교 항공우주공학과

<sup>\*\*\*</sup> 충남대학교 기계설계공학과

조로 적용되고 있다. 그러나 복합재 구조물은 운용 중에 발생하는 저속충격에 취약하고, 이러한 저속충격은 층간분리, 기지균열, 섬유파손 등의 손상을 유발하여 구조의 압축강도를 현저히 저하시킬 수 있다. 따라서, 이러한 저속충격 손상에 대한 복합재 구조의 저항성 평가 및 손상허용 평가는 개발 항공기 인증의 주요 항목이 되었다[1]. 현재까지 충격하중을 받은 복합재료 구조의 건전성을 평가하는 방법으로는 주로 X선이나 초음파를 이용한 비파괴 검사(NDI)가 수행되었다. 그러나 이러한 비파괴 검사는 많은 시간과 장비 및 숙련된 기술자를 필요로 한다. 따라서, 효율적인 구조 건전성을 평가하기 위한 방법으로 여러 가지 센서를 이용하여 충격을 받은 구조물의 거동을 모니터링하는 연구가 수행되어 왔다[2-6]. 이러한 충격 모니터링 연구는 손상이 발생하는 조건과 손상이 발생하지 않는 조건으로 나눌 수 있는데, 손상이 발생하지 않는 저에너지 충격조건에서는 측정된 충격하중으로 구조물의 거동을 계산하는 정방향 문제와 역으로 센서신호로부터 충격하중을 복원하는 역방향 문제에 대한 연구가 수행되어 왔다[2-4]. 손상이 발생할 수 있는 조건에서는 손상의 개시와 전개과정에서 발생하는 신호를 탐지하여 손상 개시 및 손상 모드를 모니터링하려는 연구가 시도되고 있다[5,6].

복합재 구조물에 손상을 유발하는 저속충격 조건에 대한 역방향 문제의 연구는 아직 큰 성과가 없다. 단지 국부적인 충격손상이 구조의 전체적인 응답에 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다[7-9]. Lagace[7] 등은 구조의 전체적인 응답이 충격하중에 대한 구조의 동적 응답이며, 이 응답은 접촉면에 발생하는 국부적인 손상 유무에 영향을 받지 않음을 확인하였다. Tracy[8] 등은 국부적인 충격 손상이 고차 굽힘 진동 모드의 고유진동수를 국부적으로 변화시킬 뿐이며, 판의 전체적인 특성에 큰 영향을 주지 않는다고 하였다. 또한, Olsson[9] 등은 층간분리와 기지크랙은 구조강성에 큰 영향을 주지 않으나, 섬유의 파손이 발생한 얇은 복합재 적층판의 경우에는 심각한 강성저하가 유발됨을 확인하였다.

따라서, 섬유파손이 없고 단지 국부적인 손상을 유발하는 충격 에너지 부근에서는 손상에 대한 모델링 없이 구조 거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 만약, 국부적이고 육안으로 확인 가능한 손상을 유발하는 저속충격 조건에서 구조물의 거동을 평가하고, 또한 측정된 센서 신호로부터 충격하중을 큰 오차 없이 복원할 수 있다면, 복합재 구조물의 충격저항성 설계를 수행하고, 저속충격 설계요구 조건을 정립하는데 있어 큰 도움을 줄 수 있다. 즉, 저속충격 저항성과 관련된 구조 설계 요구조건은 규정된 충격 조건에서 손상의 한계를 평가하는 것으로, 이를 시험과 더불어 신뢰성 있는 해석방법으로 예측 평가하면, 저속충격과 관련된 설계개발시험(design development test)의 경비를 절감하고, 설계의 타당성을 입증할 수 있게 된다.

본 논문에서는 대형 직교차 복합재 적층판을 사용하여 손상이 발생하지 않는 조건에서부터 국부적인 손상을 유발하는 충격조건까지 일련의 16가지 저속충격시험을 수행하였다. 충격하중과 변형률, 압전센서 신호에 대한 관계식은 손상을 고려하지 않은 선형관계식을 이용하였다[10]. 충격하중으로부터 복합재 적층판의 거동을 예측하는 정방향 문제와 적층판에 부착된 PVDF 센서신호로부터 충격하중을 복원하는 역방향 문제에 대하여 실험 값과 해석 값을 비교 분석하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 충격력과 변형률, 센서신호 관계

충격하중을 받는 판의 운동방정식은 Mindlin 판이론과 Rayleigh-Ritz 법을 적용하여 유도하였다. 적층판의 임의의 지점( $x_0, y_0$ )에 충격하중  $p(t)$ 가 작용할 때 적층판의 임의의 지점( $x_1, y_1$ )에서의 변위와 변형률은 다음과 같이 표현할 수 있다[10,11].

$$w(x_1, y_1, t) = \int_0^t p(t-\tau) G_w(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0) d\tau \quad (1)$$

$$\epsilon_\epsilon(x_1, y_1, t) = \int_0^t p(t-\tau) G_{\epsilon_\epsilon}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0) d\tau \quad (2)$$

여기서  $w(x_1, y_1, t)$ 는 시간  $t$ 일 때 임의의 지점( $x_1, y_1$ )에서  $z$ 방향 변위이고,  $\epsilon_\epsilon(x_1, y_1, t)$ 는 시간  $t$ 일 때 임의의 지점( $x_1, y_1$ )에서 표면의  $\epsilon$ ( $x$  또는  $y$ )방향 변형률을 의미한다. 또한  $G_w$  및  $G_{\epsilon_\epsilon}$ 는 각각 변위 및 변형률에 대한 충격응답 함수(Green function)이며, 식(3)과 (4)로 표현된다.

$$G_w(x_1, y_1, t; x_0, y_0) = \sum_{i=1}^{2n} \frac{(\{ \Gamma \}_w^T \{ e_i \})(\{ e_i \}^T \{ Y \})}{m_i} s_i(t) \quad (3)$$

$$G_{\epsilon_\epsilon}(x_1, y_1, t; x_0, y_0) = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^{2n} \frac{(\{ \Gamma \}_{\epsilon_\epsilon}^T [K_{11}]^{-1} [K_{12}] \{ e_i \})(\{ e_i \}^T \{ Y \})}{m_i} s_i(t) \quad (4)$$

본 논문에서는 Kim[4,10] 등이 유도한 것과 같이 적분방정식으로 표현된 적층판의 거동을 수치적분법을 도입하여 관심있는 시간영역을  $L$ 개의 등 간격( $\Delta t$ )으로 나누어 충격하중과 구조응답과의 관계를 다음과 같은 행렬식으로 표현하였다.

$$\{V\} = [G]\{p\} \quad (5)$$

여기서  $[G]$ 는  $L \times L$  크기의 행렬이며,  $\{V\}$ 와  $\{p\}$ 는  $L$ 개의 열벡터이다. 식(5)에서  $V_i$ 와  $p_i$ 는  $i \times \Delta t$  시간에서의 구조 응답과 충격하중이 된다. 식(5)에서  $[G]$ 는 복합재료 판의 물성, 경계조건, 충격위치 및 구조응답의 위치 정보를 포함하는 충격응답함수이다. 또한,  $\{V\}$ 는 PVDF센서로부터 측정된 전압신호가 되는데, 판의 구조응답과 PVDF센서로부터 측정되는 전압과의 관계는 다음과 같다[10,11].

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{Q(t)}{C_p} \\ &= \frac{t_p}{A_p \chi_{33}} \int_{A_p} (e_{31} \varepsilon_x + e_{32} \varepsilon_y) dx dy \\ &= \frac{1}{A_p} \int_{A_p} (C_x \varepsilon_x + C_y \varepsilon_y) dx dy \\ &= C_x \bar{\varepsilon}_x + C_y \bar{\varepsilon}_y \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\bar{\varepsilon}_x$ 와  $\bar{\varepsilon}_y$ 는 센서의 유효 면적 내에서 x방향 및 y방향 평균 변형률이며,  $C_p$ 와 센서상수  $C_x$ ,  $C_y$ 는 다음 식으로 표현되고  $\chi_{33}$ 은 압전재료의 두께방향 유전률이다.

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

한편, 센서에서 측정된 변형률 신호로부터 충격하중  $\{p\}$ 를 계산하는 것이 역방향 문제인데, 이때 역행렬  $[G]^{-1}$ 이 ill-posed 상태가 되어 해를 구하기 어렵다. 본 논문에서는 조정된 해를 Iterated Regularization Method[4,10,12]를 사용하여 구하였다.

### 3. 실험방법 및 장치

실험적 검증을 위하여 수행한 실험 조건은 총 16가지로 Table 1과 같다. 이들 조건 중 test 14, 15, 16은 눈으로 확인 가능한 기지균열이 발생하였고 C-scan을 통하여 층간분리를 확인하였다. 실험은 낙하식 충격시험기(drop weight impact tester)를 이용하여 수행하였으며, 충격체에는 지름이 0.5인치인 반구형 팁에 하중센서(PCB사의 M208A33)를 장착하였다.

사용된 시편은 Gr/Ep 프리프레그(HFG, HT145/ RS1222)를 사용하여 두께 2.5mm인 직교 적층판  $[0/90]_{16}$ 을 제작하였다. 시편은 길이와 폭이 250mm×125mm인 치구에 단순지지되었으며, 시편의 표면에 두 개의 스트레인게이지와 한 개의 PVDF 센서가 부착되었다. 실험에 사용된 시편 형상, 물

Table 1 Impact test matrix and impact energy.

Test No	Energy (J)	Mass (g)	Height (mm)	Remarks
1	0.123	125	100	
2	0.368	125	300	
3	0.735	125	600	
4	1.103	125	900	
5	1.470	125	1200	
6	0.493	503	100	
7	1.479	503	300	
8	2.958	503	600	
9	4.436	503	900	
10	5.915	503	1200	
11	1.275	1301	100	
12	3.825	1301	300	
13	7.650	1301	600	
14	11.475	1301	900	damage
15	15.300	1301	1200	damage
16	17.675	2004	900	damage

성치, 센서의 종류, 센서의 위치, 충격위치 실험치구 및 실험장치의 자세한 내용은 참고문헌[6]에 수록되었다.

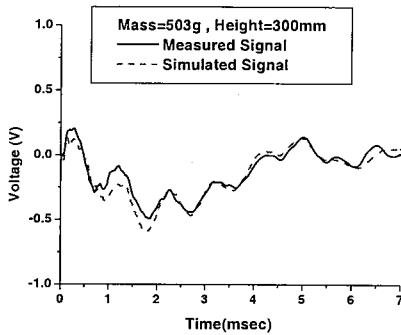
## 4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 복합재 적층판의 저속충격에 대한 시험과 이론의 비교를 정방향과 역방향 문제에 대하여 모두 수행하였다. 정방향 문제에서는 저속충격실험으로부터 획득한 충격하중을 이용하여 적층판에 부착된 PVDF 센서의 신호를 계산하고 실제 측정신호와 비교하였다. 또한 역방향 문제에 대하여는 PVDF 센서의 신호로부터 충격하중을 복원하고 실제 충격하중과 비교하였다.

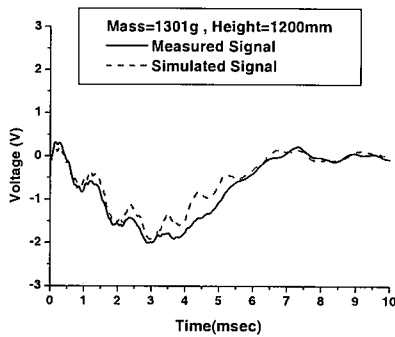
### 4.1 정방향 문제

Fig. 1은 Table 1의 16가지 실험조건 중 3가지 조건에 대하여 식(5)을 적용하여 계산한 PVDF센서의 모사신호를 측정신호와 비교한 것이다. Fig. 1에서와 같이 실험 값과 예측치가 잘 일치하였으며, 나머지 실험조건 모두 유사한 결과를 나타내었다. 충격에너지가 적은 조건은 물론 충격에너지가 증가하여 기지 크랙 등의 손상이 발생한 시험조건에서도 측정된 PVDF센서 신호를 손상 모델의 도입없이 비교적 정확히 모사하였다.

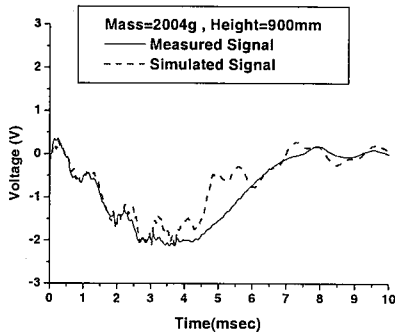
시험에서 16가지 하중 조건에서 충격에너지가 약 3J 이상인 경우 충격지점에 영구압입이 나타났으며, 약 11.5J 이상에서 기지크랙과 층간분리가 발생하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 test 15와 test 14의 C-scan 그림과 후면에서의 영구변형 형상을 나타낸 것이다. C-scan상의 층간분리의 손상면적이



(a) Impact mass=503g, height=300mm



(b) Impact mass=1301g, height=1200mm



(c) Impact mass=2004g, height=900mm

Fig. 1 Measured and simulated PVDF sensor signals.

시편의 면적에 비하여 1.5%정도(Test 15)의 국부적인 손상이었으며, test16의 경우도 2%를 넘지 않는 국부적 손상을 나타내었다. Fig. 1의 (b)와 (c)를 살펴보면, 충격시험에서 손상이 발생하여도 PVDF센서 신호를 유사하게 모사할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 영구 압입이 발생한 3J 이상의 실험조건에서 비교곡선의 일부 구간에서 약간의 오차를 보여주었다. 이러한 오차는 충격에너지가 증가하고, 손상이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보여주었는데, 이는 손상의

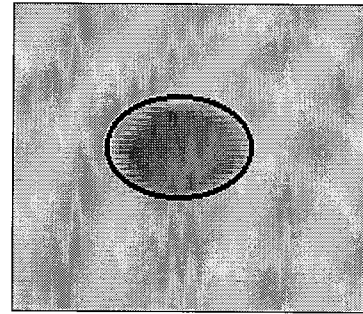


Fig. 2 C-scan image of test 15.

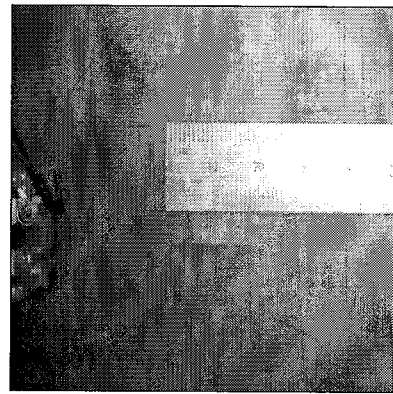


Fig. 3 Matrix crack at the backface of specimen(test 14).

크기에 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한, 기지균열 이상의 손상이 발생한 시험조건에서 측정된 하중신호와 PVDF 센서신호에서 국부적인 고주파수의 신호가 관측되었다(Fig. 4, Fig. 5). 손상이 발생한 충격시험에서의 고주파수 신호는 충격체 질량이 작은 경우에 발생하는 진동 응답과는 달리 5 kHz 이상의 국부적인 고주파수 신호로 나타났다. 이러한 고주파 신호가 발생할 수 있는 이유는 두 가지로 추정 가능하다. 하나는 손상이 발생하면서 적층판이 충격에너지를 일부 흡수하고 이로 인하여 고주파 성분을 포함하는 충격체와 적층판과의 접촉력에 의한 구조물의 강제진동을 센서가 감지할 수도 있고 다른 하나는 충격손상의 개시 및 진전과 관련된 응력파의 영향에 의한 압전센서 신호의 함으로 추정할 수 있지만 이러한 신호를 정량적으로 아직까지 구분할 수 없었다. 일반적으로 충격체의 질량이 일정할 경우, 손상이 발생하지 않는 충격에너지 이하인 경우에는 센서 신호의 진폭이 충격력에 비례한다. 즉, 자유낙하인 경우에는 신호의 진폭은 낙하높이의 제곱근에 비례한다. Fig. 5에서 손상이 발생하지 않는 600mm 까지는 이러한 관계가 잘 유지되나 손상이 발생하는 낙하높이가 900mm 이상인

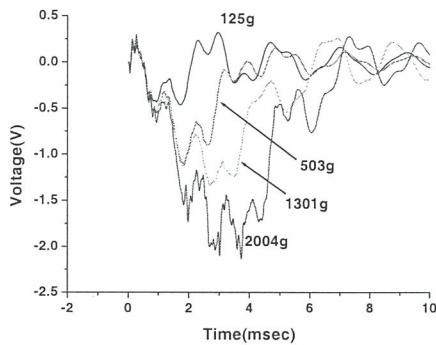


Fig. 4 Measured PVDF sensor signals for different impactor mass at impact height=900mm.

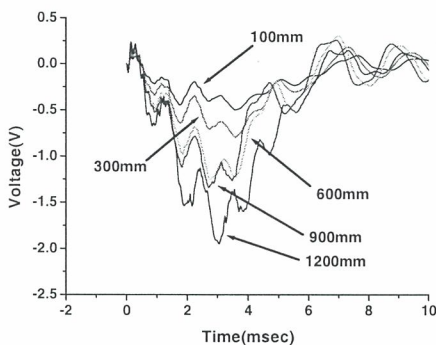


Fig. 5 Measured PVDF sensor signals of impact mass=1301g for different height.

경우에는 충격에 의한 손상이 발생하고 이로 인한 충격력의 감소로 센서 신호가 낙하높이의 제공근에 비례하지 않음을 알 수 있다.

## 4.2 역방향 문제

Fig. 6은 Table 1의 6가지 실험조건에 대하여 PVDF 센서 신호를 이용하여 복원한 하중을 측정된 하중과 비교한 것이다. 일부 저에너지 충격실험에서 오차가 있으나, 대부분의 복원된 충격하중은 측정 하중과 잘 일치하고 있다. 저에너지 구간에서의 오차는 PVDF센서 신호에 내재한 잡음의 영향으로 판단된다. 즉, 저에너지 충격 실험의 경우 PVDF센서 신호에서 내재한 잡음의 크기가 이상적인 신호에 비하여 상대적으로 크므로, 이와 같이 잡음의 영향이 큰 PVDF센서 신호를 이용하여 복원한 하중신호는 측정된 충격하중과 비교하여 오차가 커지게 된다. 반면, 손상이 없으며, PVDF센서 신호의 잡음이 원 신호에 비하여 상대적으로 작은 조건에서는 오차가 줄어드는 경향을 보여 주었

다.

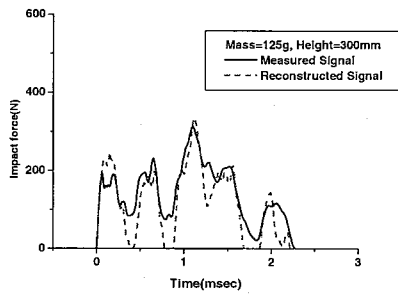
손상이 발생한 조건에서도 PVDF센서 신호를 이용하여 충격하중을 비교적 정확하게 복원하였다. 복원된 충격하중은 전체 하중곡선의 일부 구간에서 오차가 발견되었으나, 하중곡선의 형태, 최대 하중 및 충격 접촉시간은 비교적 정확히 일치하였다. 하중 곡선에 나타난 일부 구간의 오차는 손상의 발생으로 인한 고주파 성분의 충격력이 작용하지만 실제 해석적 모델에서는 모드 수에 대한 제한으로 이러한 고주파 성분의 충격력에 대하여 해석적 모델이 응답하지 못하기 때문에 발생한 오차라고 생각한다. 그러나, 오차 구간이 작고, 모사된 PVDF센서 신호가 충격 접촉시간 이후에 측정된 신호와 비교적 잘 일치하고 있으므로 손상이 적층판의 진동응답에 큰 영향을 주고 있지 않음을 의미한다. 그러나, 손상이 커짐에 따라 판의 비선형 거동의 영향은 증가될 것으로 판단된다. 따라서, 저속충격에 의하여 손상이 발생하여도 손상의 크기가 국부적인 경우, 충격손상은 판의 전체적인 응답에 영향을 주지 않는 것을 확인하였다. 또한, 이 경우 PVDF센서 신호를 이용하여 충격하중을 비교적 정확히 복원할 수 있었다.

한편, 복원된 충격하중을 이용하여 손상이 없는 시편의 거동을 계산하였다. Fig. 7과 8은 복원된 충격하중을 사용하여 계산한 복합재료 판의 중심점 변위를 나타낸 것이다. 변위 계산은 MSC/NASTRAN과 식(1)을 사용하여 구하였다. 측정된 충격하중은 MSC/NASTRAN을 이용한 변위 계산에 사용하였으며, 복원된 하중은 식(1)을 이용한 변위 계산에 사용하였다. 계산 결과 중심점 변위는 접촉시간 동안 잘 일치하고 있다. 따라서, 충격하중의 측정이 없어도, PVDF센서 신호만을 이용하여 충격하중을 복원할 수 있으며, 또한 복원된 충격하중을 이용하여 적층판의 거동을 계산할 수 있었다. 이 방법을 파손이론과 연계하면, PVDF센서 신호를 이용하여 복합재 판의 손상 정도를 정량적으로 추측할 수 있을 것으로 판단된다.

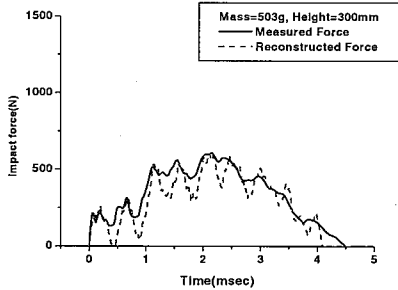
## 5. 결 론

본 논문에서는 압전필름(PVDF)센서가 부착된 탄소섬유 복합재 적층판의 저속충격에 대한 정방향 문제와 역방향 문제에 대하여 고찰하였다. 충격에너지를 저에너지 충격에서 초기 손상이 발생할 수 있는 충격 에너지까지 증가시키면서 충격시험을 수행하고 결과를 분석하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

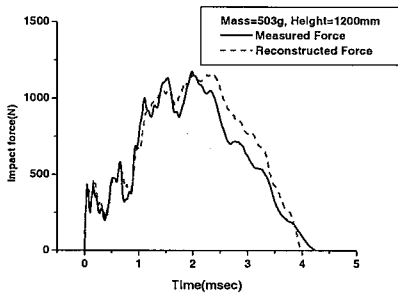
- 1) 저속충격에 의하여 유발된 손상의 크기가 판의 크기에 비교하여 국부적인 경우, 손상 모델에 대한 도입이 없어도 측정된 충격하중을 이용하면, 복합재 판에 부착된 PVDF센서 신호를 비교적 정확히 예측할 수 있었다.
- 2) 저속충격 시에 유발된 손상영역이 국부적인 경우, 손상



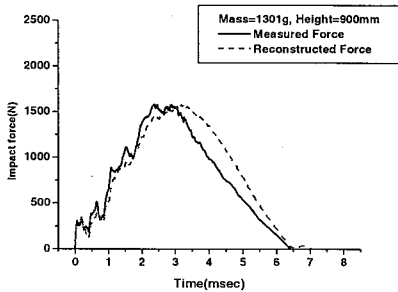
(a) Impact mass=125g, height=300mm



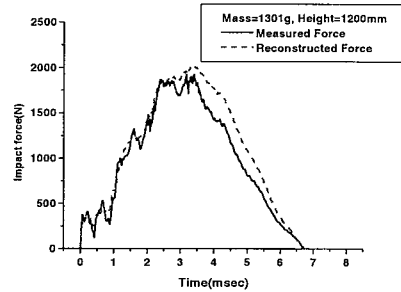
(b) Impact mass=503g, height=300mm



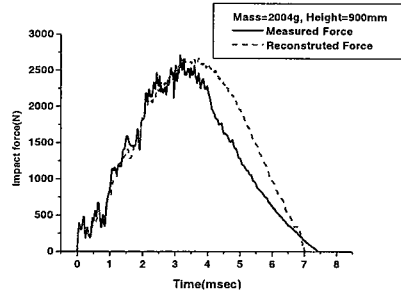
(c) Impact mass=503g, height=1200mm



(d) Impact mass=1301g, height=900mm



(e) Impact mass=1301g, height=1200mm



(f) Impact mass=2004g, height=900mm

Fig. 6 Measured and reconstructed impact force.

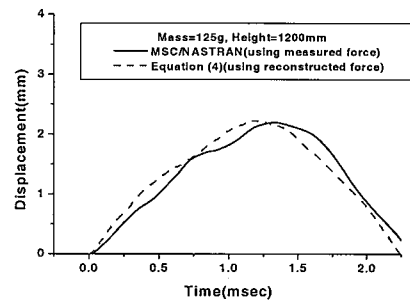


Fig. 7 Plate center deflection using the reconstructed impact force of test 5.

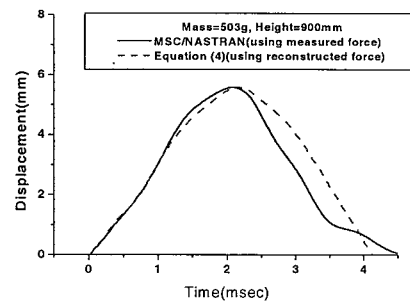


Fig. 8 Plate center deflection using the reconstructed impact force of test 9.

- 은 판의 전체응답에 영향을 주지 않는 것으로 판단되며, PVDF센서 신호를 이용하여 충격하중을 정확히 복원할 수 있었다.
- 3) 복원된 충격하중으로 복합재 적층판의 거동 계산이 가능하고 이러한 방법을 복합재 파손이론과 연계하면, PVDF센서 신호만을 이용하여도 복합재 적층판의 손상 정도를 정량적으로 예측할 수 있으므로 구조건전성 모니터링 기술에의 활용가능성을 확인하였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- 1) Lincoln, J. W., "USAF Experience in the Qualification of Composite Structures," *Composite Structures; Theory and Practice*, ASTM STP 1383, 2000, pp. 3-11.
- 2) Doyle, J. F., "An Experimental Method for Determining the Dynamic Contact Law," *Experimental Mechanics*, Vol. 24, 1984, pp. 10-16.
- 3) Wu, E., Yeh, J. C. and Yen, C. S., "Identification of Impact Forces at Multiple Locations on Laminated Plates," *AIAA Journal*, Vol. 32, 1994, pp. 2433-2439.
- 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) 성대운, 오정훈, 김천근, 홍창선, "웨이블릿 변환을 이용한 스마트 복합적층판의 충격 손상 검출 연구," *한국복합재료학회지*, 제13권, 제1호, 2000, pp. 40-49.
- 6) 박찬익, 김인걸, 이영신, "압전필름센서를 이용한 복합재료 평판의 저속충격 손상 개시 모니터링," *한국복합재료학회지*, 제15권, 제2호, 2002, pp. 11-17.
- 7) Lagace, P. A., Ryan, K. F. and Graves, M. J., "Effect of Damage on the Impact Response of Composite Laminates," *Proceedings of AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 32nd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference Part 2*, 1991, pp. 1137-1143.
- 8) Tracy, J. J., Dimas, D. J. and Pardon, G. C., "The Effect of Impact Damage on the Dynamic Properties of Laminated Composite Plate," *Proceedings of the Fifth International Conference on Composite Materials, ICCM-V*, 1985, pp. 111-125.
- 9) Olsson, R., Asp, L. E., Nilsson, S. and Sjogren, A., "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.
- 10) 김인걸, 김준, "저속충격을 받는 복합적층판의 역함수 문제에 대한 실험적 상관관계," *한국복합재료학회지*, 제11권, 제3호, 1998, pp. 24-38.
- 11) 김인걸, 정석모, "전하증폭기를 사용하지 않은 고분자 압전센서 신호를 이용한 복합재 평판의 저속충격탐지," *한국복합재료학회지*, 제13권 제6호, 2000, pp. 48-54.
- 12) Engl, H. W., "On the Choice of Regularization Parameter for Iterated Tikhonov Regularization of Ill-posed Problem," *Journal of Approximation Theory*, Vol. 49, 1987, pp. 55-63.