

## 論文

전하증폭기를 사용하지 않은 고분자 압전센서 신호를 이용한  
복합재 평판의 저속충격 탐지

김인걸\* · 정석모\*\*

**Low-Velocity Impact Detection of Composite Plate Using  
Piezopolymer Sensor Signals without Charge Amplifier**

Kim, In-Gul\* and Jeong, Seok-Mo\*\*

**ABSTRACT**

One promising method for impact detection of composite structures is based on the use of piezopolymer thin film (PVDF) sensor. In this paper, the relationship between the contact force and the signals of the attached strain gage and PVDF sensor to the composite plate subjected to low-velocity impact were derived. The relation for the open circuit and short circuit voltage of PVDF sensor was derived based on the equivalent circuit model of the piezoelectric sensor. The work was then extended to include experimental investigation into the use of short circuit voltage of PVDF sensor without using charge amplifier to detect low-velocity impact. The natural frequencies and damping ratio of the composite plate obtained from the vibration test were used to modify the analytical model and therefore the differences between measured and simulated signal of the modified analytical model in both forward and backward problem were considerably reduced. The reconstructed contact force and simulated sensor signals agreed well with the measured contact force, strain gage signal, and PVDF sensor signal.

## 초 록

복합재 구조물의 저속충격탐지 방법 중의 하나는 고분자 압전센서를 이용하는 것이다. 본 논문에서는 저속충격을 받는 복합재 평판에 대한 충격력과 부착된 스트레인 게이지, 고분자 압전센서 신호와의 관계를 유도하였다. 압전센서의 등가회로도를 통해서 고분자 압전센서의 개회로 신호와 폐회로 신호와의 관계를 유도하여 전하증폭기를 사용하지 않은 고분자 압전센서 신호를 이용하여 복합재 평판의 충격력 복원 가능성에 대한 연구로 확장하였다. 진동실험을 통하여 얻은 복합재 평판의 고유진동수와 감쇠비를 이용하여 해석적인 모델을 수정하여 정방향 문제와 역방향 문제에 있어서 오차를 줄일 수 있었다. 복원된 충격력과 해석적인 센서 신호는 실제 저속 충격 실험을 통하여 측정된 충격력, 스트레인 게이지 신호, 그리고 고분자 압전센서 신호와 잘 일치하였다.

\* 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

\*\* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

## 1. 서론

복합재 구조물은 저속충격에 있어서 금속재료보다 상대적으로 취약하고 외관상으로는 손상이 없어 보이지만 적층된 복합재료의 내부에서 생기게 되는 층간분리, 섬유절단, 모재균열등의 손상영역이 일어날 수 있다. 이러한 복합재 구조물의 구조적 건전성을 모니터링 하는데 있어서 X선이나 초음파(Ultrasonic)등을 이용한 비파괴 검사(NDI)가 행해지고 있으나 이런 비파괴 검사는 많은 검사비용과 시간, 그리고 검사자의 숙련도에 의존해야 하는 어려움이 있다. 따라서 구조물의 건전성 확보를 보다 효율적으로 하기위하여 구조물에 센서를 부착하여 생명체의 신경망 조직과 같이 실시간으로 자체 진단이 가능하고 능동적인 대처를 할 수 있는 스마트 구조 개념에 대한 연구가 국내외적으로 많이 시도되고 있다[1,2].

구조적 건전성 모니터링에 사용되는 대표적인 센서로는 광섬유 센서, 압전재료 센서, 스트레인게이지 등이 현재 주목받고 있으나 전기적 신호를 얻기 위하여 부가적인 고가의 장비가 필요하며 이것은 구조물의 중량 증가 뿐 만 아니라 경제적으로도 불리하다.

특히, 변형률에 의한 고분자 압전센서에서 발생한 전하량은 계측기에 직접 연결된 경우, 센서의 시간상수(time constant) 특성에 따라서 신호의 크기와 위상이 실제 변형률 신호와는 다르다. 이러한 유한한 시간상수로 인해서 고분자 압전센서는 고주파 성분 신호 측정에는 유리하나 저주파 성분 신호는 실제 변형률 신호와는 다를 수 있다. 일반적으로 긴 시간상수를 얻기 위하여 높은 입력 정전용량을 사용하고 감소된 출력 전압을 전하증폭기를 사용하여 증폭한다.

본 논문에서는 복합재 평판에 대해서 충격력에 대한 스트레인 게이지 신호와 전하증폭기를 사용한 고분자 압전센서의 개회로 전압신호, 그리고 기존의 전하증폭기를 사용하지 않고 직접 계측기에 연결한 고분자 압전센서의 출력 전압신호와와의 관계에 대한 해석적 식들을 유도하였다. 실제 저속충격 실험을 통하여 얻은 실험치와 각 센서의 해석치를 비교하는 정방향 문제와 충격실험에서 얻은 센서 신호들로부터 충격력을 예측해 보는 역방향 문제를 실험적으로 검증하여 전하증폭기를 사용하지 않은 고분자 압전센서 신호를 이용한 저속충격 탐지 가능성에 대하여 고찰하였다. 역방향 문제에서는 잡음에 의한 센서신호의 작은 오차나 해석적 모델과 실제 구조물의 차이에서 오는 모델링 오차가

충격력 예측시 큰 오차를 유발할 수 있으므로 진동실험을 통한 실제 복합재 평판의 고유진동수 및 감쇠 효과를 고려하여 해석적 모델의 수정 보완을 통하여 모델링 오차를 최소화하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 충격력과 변형률 신호와의 관계

본 논문에서는 역함수 문제를 다루는데 편리한 외력(충격력)과 응답(센서신호)을 외재적 형태(explicit form)로 표현할 수 있는 고유모드 확장법(eigenmode expansion method)을 사용하였다.[3,4,5] 충격위치가  $(x_0, y_0)$ 일 때 복합재 평판 임의의 지점  $(x_1, y_1)$ 에서 변형률은 (1)식과 같이 표현할 수 있으며 평균 변형률은 센서의 유효면적 내에서 변형률을 적분하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_a(x_1, y_1, t; x_0, y_0) \\ = \int_0^t f(t-\tau) G^{(a)}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0) d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $f(t)$ 는 충격력이며  $\phi$ 는  $x$  또는  $y$ 를 의미한다. Green function,  $G^{(a)}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G^{(a)}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0) \\ = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^L \frac{(\{F_\phi\}^T [K_{11}]^{-1} [K_{12}] \{e_i\}) (\{e_i\}^T \{Y\})}{m_i} s_i(\tau) \end{aligned} \quad (2)$$

비감쇠 모델인 경우,  $s_i(\tau)$ 는

$$s_i(\tau) = \frac{\sin(\omega_i \tau)}{\omega_i}, \quad (\text{if } \omega_i \neq 0) \quad (3)$$

이고 감쇠를 고려할 경우에는 평판의 경계조건에 의한 감쇠와 평판 자체의 감쇠를 하나의 감쇠로 고려하고 질량 행렬(M)과 강성 행렬(K)에 비례한다고 가정하면  $s_i(\tau)$ 는 (4)식과 같이 표현할 수 있다.

$$s_i(\tau) = \frac{e^{-\zeta_i \omega_i \tau} \sin(\omega_{di} \tau)}{\omega_{di}}, \quad (\text{if } \omega_i \neq 0) \quad (4)$$

여기서  $\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$  이다.

본 논문에서는 Kim[3,6]에서 유도한 것과 같은 식 (1)의 적분식을 관심 있는 시간영역에서  $n$ 개의 같은 간격으로 나누어 충격력과 센서 신호와의 관계를 (5) 식과 같은 행렬형태의 식을 사용하였다.

$$V_{(k)} = G_{(k)} f \quad (5)$$

여기서  $V_{(k)}$ 는  $k$ 번째 센서 신호를 의미하며,  $G_{(k)}$ 는 복합재 평판의 물성치, 경계조건, 그리고 충격 위치 및 센서 위치의 함수인 구조물의 충격 응답함수이다. 충격 위치와 충격력  $f$ 가 주어지면  $G_{(k)}$ 와  $f$ 가 결정되어 센서 신호  $V_{(k)}$ 를 구하는 정방향 문제가 되고, 반대로 센서 신호  $V_{(k)}$ 가 주어지면 충격 위치와 충격력  $f$ 를 구하는 역방향 문제가 된다. 특히, 충격력  $f$ 를 구하는 역방향 문제에 있어서  $G$ 행렬의 역행렬  $G^{-1}$ 이 ill-posed 상태가 되어 측정된 신호  $V$ 의 작은 오차는 충격력 복원에서 큰 변동을 야기할 수 있어서 정확한 해를 구하기는 어렵다. 본 논문에서는 조정된 해를 Iterated Tikhonov Regularization Method[6,7]를 이용하여 구하였다.

## 2.2 변형률과 고분자 압전센서 신호의 관계

### 2.2.1 고분자 압전센서의 개회로 신호

고분자 압전센서의 개회로 전압신호  $\bar{V}(t)$ 는 센서 전극판의 유효면적  $A_p$  내에서의 평균 변형률  $\bar{\epsilon}_x$ 와  $\bar{\epsilon}_y$ 에 각각 센서 상수  $C_x$ 와  $C_y$ 를 곱하여 더해준 형태가 된다.[6]

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

여기서,  $C_p$ 와 센서상수  $C_x, C_y$ 는

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

이고  $\chi_{33}$ 는 압전 재료의 두께방향 유전률이다. 본 논문에서 사용된 고분자 압전센서의 센서상수를

구하면  $C_p$ 는  $375 \times 10^{-12}$ (F),  $C_x$ 는 20,227(V/strain), 그리고  $C_y$ 는 8,027(V/strain)이다. 계산에 사용된 고분자 압전센서의 특성값은 참고문헌[9]에서 사용된 값을 이용하였다.

### 2.2.2 고분자 압전센서의 폐회로 신호

고분자 압전센서가 계측기기 등에 연결됐을 경우 계측기기와 센서와의 인터페이스(interface)를 Fig. 1과 같이 나타낸 등가회로에서 입력 개회로 전압(open circuit voltage)  $\bar{V}$ 와 폐회로 전압(short circuit voltage)  $V$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$I(t) = (C_p + C_i) \frac{d}{dt} (\bar{V}(t) - V(t)) = \frac{V(t)}{R_i} \quad (7)$$

여기서  $I$ 는 발생된 전하량  $Q$ 에 의한 회로에 흐르는 전류이고,  $C_p$ 는 센서의 정전용량(capacitance),  $R_i$ 와  $C_i$ 는 각각 계측기기의 입력 저항과 입력 정전용량이며,  $C_i$ 에는 케이블(cable)의 정전용량이 포함되어 있다.

(7)식의 양변을 라플라스 변환(Laplace transform)하고 초기조건을 적용하면,

$$V(t) = \bar{V}(t) - \frac{1}{RC} \int_0^t e^{-\frac{t-\tau}{RC}} \bar{V}(\tau) d\tau \quad (8)$$

이다. 여기서  $RC$ 는 압전센서와 계측기기의 시간상수(time constant)이며  $R_i(C_p + C_i)$ 이다. 본 논문에서는  $C_p$ 와 계측기기의 입력 정전용량 및 케이블의 정전용량을 포함한  $C_i$ 를 고려하여 보정(calibration)을 통해 구한 0.15(ms)을  $RC$  값으로 사용하였다.[8] 식(8)의 적분식을 관심 있는 시간영역에 대해서  $n$ 개의 같은 간격으로 나누어 정리하면  $V(t)$ 와  $\bar{V}(t)$ 는 (9)식과 같은 형태로 표현되고

$$V(t_s) = \bar{V}(t_s) - \sum_{i=1}^n [\bar{H}(t_s - i\Delta\tau) \bar{V}(i\Delta\tau) \Delta\tau] \quad (9)$$

여기서,

$$\bar{H}(t) = \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}, \quad H_i = \sum_i \bar{H}(t_s - i\Delta\tau) \Delta\tau$$

이다. (9)식을 정리하여 행렬형태로 나타내면

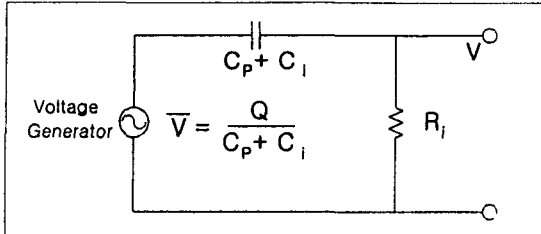


Fig. 1 Equivalent circuit of piezoelectric sensor with input impedance of electronic interface

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dot{V}_n^{(k)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-H_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -H_2 & 1-H_1 & 0 & \dots & 0 \\ -H_3 & -H_2 & 1-H_1 & \dots & 0 \\ -\dot{H}_n & -\dot{H}_{n-1} & -\dot{H}_{n-2} & \dots & 1-H_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ \dot{\bar{V}}_n^{(k)} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

이 되고  $H_i$ 들을 원소로 갖는 행렬을  $[H]$ 라고 하면,

$$\{V\}_{(k)} = [H]_{(k)} \{\bar{V}\}_{(k)} \quad (11)$$

이다. 전하증폭기 없이 계측기에 직접 연결하여 측정된 폐회로 전압 신호  $V(t)$ 와 충격력과의 관계는 (1)식, (5)식, 그리고 (11)식에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.[8]

$$\begin{aligned} \{V\}_{(k)} &= [H]_{(k)} \{C_x[G]_{(k)}^{(x)} + C_y[G]_{(k)}^{(y)}\} \\ &= [\bar{G}]_{(k)} \{f\} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, 새로운 응답함수  $[\bar{G}]_{(k)}$ 는

$$[\bar{G}]_{(k)} = [H]_{(k)} \{C_x[G]_{(k)}^{(x)} + C_y[G]_{(k)}^{(y)}\} \text{ 이다.}$$

### 3. 실험방법 및 장치

저속충격 시험에 사용된 복합재 평판(Gr/Ep, [0/90]<sub>2s</sub>)은 참고문헌[6]에서 사용한 것과 동일하며 크기, 충격 위치, 그리고 센서 위치는 Fig. 2에 나와있다. 복합재 평판의 네 변은 단순지지 되었으며 스트레인 게이지와 고분자 압전 센서의 유효 크기는 각각 7.0×3.6 mm 와 15×10 mm 이다. 저속 충격 실험에서 충격체로는 질량 103.1 gr의 반구형 Tip을 가진 하중변환기를 사용하였고 낙하 가이드(guide)를 이용하여 충격체

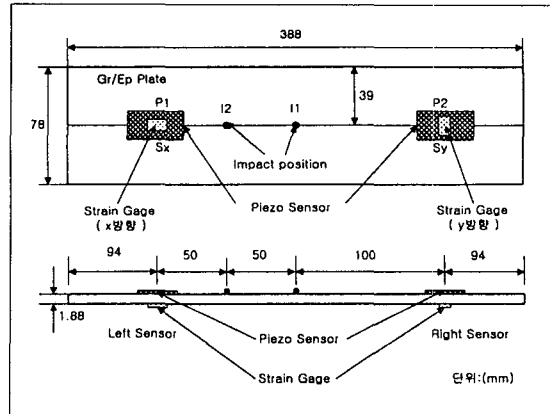


Fig. 2 Gr/Ep plate with the attached strain gages and PVDF sensors

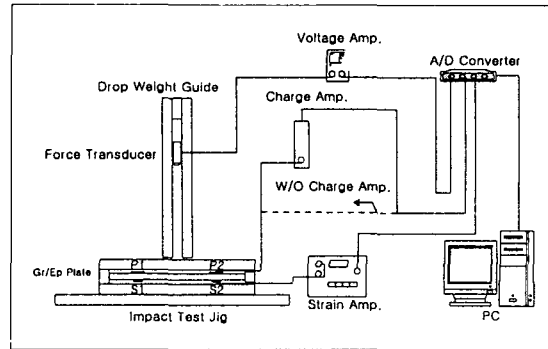


Fig. 3 Experimental set-up

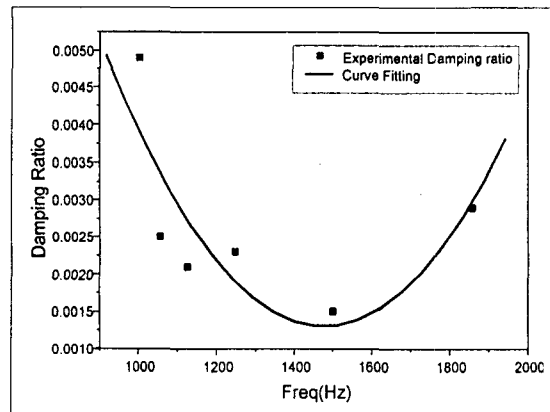


Fig. 4 Experimental damping ratio of the composite plate

인 하중변환기를 20 cm 높이에서 자유낙하 시켰다.

저속 충격시험 장치는 Fig. 3과 같으며 하중변환기는 전압증폭기, 스트레인 게이지는 스트레인 증폭기를

통하여 A/D 변환기에 연결되어 충격력과 변형률 신호가 컴퓨터로 전송된다. 고분자 압전센서의 개회로 전압 신호,  $\bar{V}$ 는 전하증폭기를 사용하여, 그리고 폐회로 전압 신호,  $V$ 는 전하증폭기를 사용하지 않고 직접 A/D 변환기를 통해 PC로 전송하여 분석하였다.

가진망치(Impact Hammer)와 가속도계를 사용하여 복합재 평판의 진동실험을 수행하여 고유진동수와 감쇠비를 구하였다. Fig. 4는 측정가능한 저차 모드에서의 감쇠비를 측정하여 이 값들을 커브 피팅(curve fitting)한 것이다.

이렇게 구한 이차함수 형태의 식(13)을 해석적인 모델 수정에 이용하고 고차모드의 최대 감쇠비는 2%로 가정하였다.[8]

$$\zeta_i = (2.935 \times 10^{-10})\omega_i^2 - (5.446 \times 10^{-6})\omega_i + 0.02656 \quad (13)$$

#### 4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 복합재 평판의 저속충격 탐지에 대한 실험적 검증은 크게 두 부분으로 나누어 수행하였다. 첫번째는 충격위치와 충격력을 알고 변형률 응답, 압전센서의 개회로 전압 신호, 그리고 전하증폭기를 이용하지 않고 직접 계측기에 연결하여 나오는 압전센서의 폐회로전압 신호같은 센서 신호를 구하는 정방향 문제이고, 두번째는 변형률 응답, 압전센서의 개회로 전압 신호, 그리고 전하증폭기를 이용하지 않고 직접 계측기에 연결하여 나오는 압전센서의 출력 전압을 알고 충격력을 구하는 역방향 문제이다.

##### 4.1 정방향 문제(센서 신호)

Fig. 5에서는 충격이 중앙위치 I1에 가해졌을 때 고분자 압전센서 P2에서의 해석적인 폐회로 전압신호와 실제로 전하 증폭기를 사용하지 않고 측정된 고분자 압전센서의 폐회로 전압신호를 비교한 결과가 나와 있다. Fig. 5의 (a)처럼 감쇠의 효과를 고려하지 않은 경우에는 비교적 초기에는 두 신호가 일치하였지만 시간이 지남에 따라 두 신호간의 차이가 커짐을 볼 수 있었다. 그러나 감쇠의 영향을 고려한 해석적인 모델을 사용할 경우 Fig. 5의 (b)에서 볼 수 있듯이 오차를 어느 정도 개선 할 수 있었다.

평판의 중앙에 충격이 가해졌을 경우 스트레인 게이

지  $S_x$ 에서  $x$  방향의 해석적인 변형률 신호와 실제 측정된  $x$  방향 변형률 신호가 Fig. 6에 나와있다. Fig. 7에는 충격 위치가 I2일 때 스트레인 게이지  $S_y$ 에서  $y$  방향의 해석적인 변형률 신호와 실제 측정된  $y$  방향 변형률 신호가 나와있다. 전체적으로 두 신호들은 비교적 일치함을 보였으나  $x$  방향의 변형률의 경우보다는  $y$  방향의 변형률의 경우에서의 두 신호간의 크기 차이가 감쇠를 고려했음에도 불구하고 시간이 지남에 따라 커졌다. 이것은 복합재 평판의 너비 방향( $y$  방향)으로의 크기가 길이 방향( $x$  방향)으로의 크기의 약 0.2배 정도로 작기 때문에 적용된 이상적인 단순지지 경계조건이 평판의 너비 방향으로 실제 경계조건과 차이가 크기 때문이라고 생각된다.

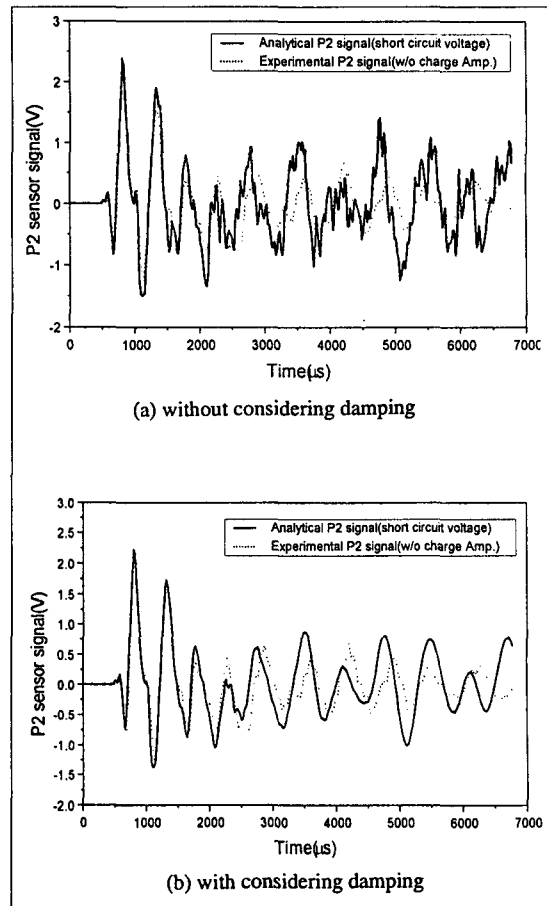


Fig. 5 Comparisons between analytical short circuit voltage and measured voltage of PVDF sensor without charge amp. (Impact location : I1, Sensor location : P2)

충격 위치가 I1일 경우 센서 위치 P1에서 해석적인 고분자 압전센서의 개회로 전압 신호와 실제 전하증폭기를 연결하여 측정된 신호가 Fig. 8에 나와있다. 해석적인 신호와 측정 신호는 앞에서의 변형률 신호일 때와 마찬가지로 비교적 근사한 일치를 보이고 있었다. Fig. 5와 Fig. 8을 통해 전하 증폭기 유무에 따른 고분자 압전센서의 해석적인 모델의 타당성을 알 수 있었다.

고분자 압전센서의 개회로 전압 신호와 변형률 신호와의 관계식(6)의 유효함을 확인하기 위하여 x, y 방향으로 변형률  $\epsilon_x$ 와  $\epsilon_y$ 를 평판에 부착된 스트레인 게이지로부터 측정하여 센서상수를 곱하여 얻은 결과와 전하 증폭기를 이용하여 측정한 고분자 압전센서의 개회로 전압 신호가 Fig. 9에 나와 있다. 각각의 센서 면적의

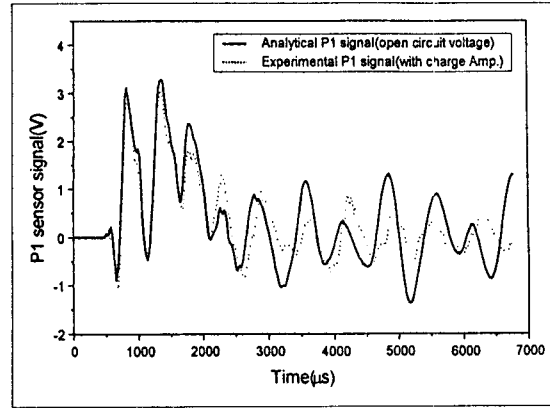


Fig. 8 Comparisons between analytical open circuit voltage and measured voltage of PVDF sensor with charge amp. (Impact location : I1, Sensor location : P1)

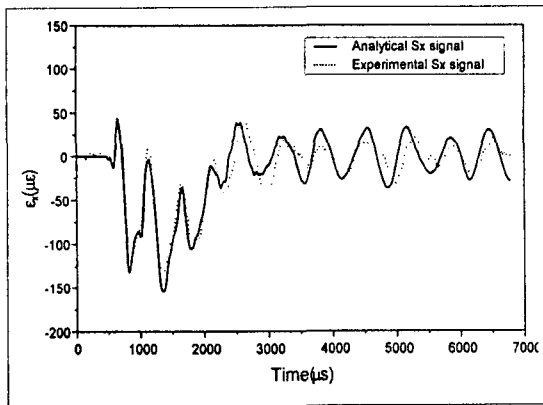


Fig. 6 Comparisons between analytical and experimental x-directional strain gage signal (Impact location : I1, Sensor location : Sx)

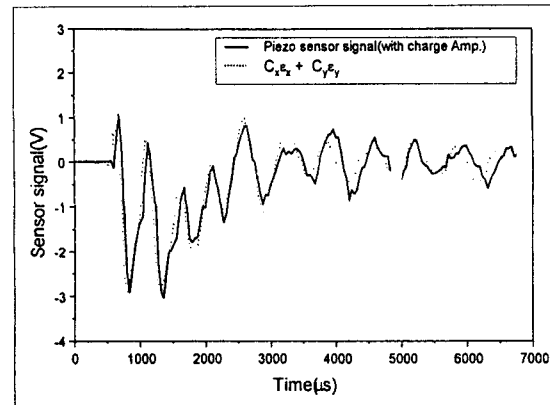


Fig. 9 Comparisons of the measured PVDF sensor signal with charge amp. and simulated signal using strain gage signals. (Impact location : I1, Sensor location : Sx, Sy)

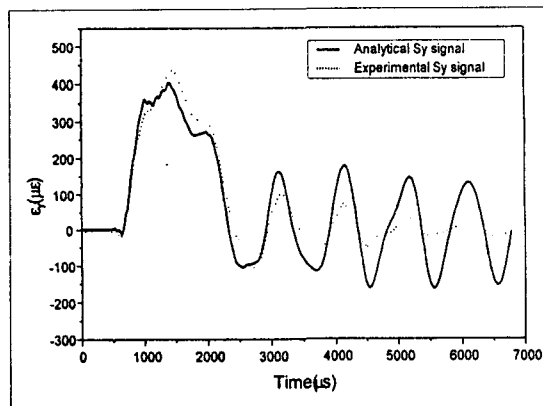


Fig. 7 Comparisons between analytical and experimental y-directional strain gage signal (Impact location : I2, Sensor location : Sy)

차이에도 불구하고 변형률 신호와 개회로 전압 신호가 매우 잘 일치함을 볼 수 있었다.

#### 4.2 역방향 문제(충격력 복원)

충격력 복원은 Iterated Tikhonov Regularization Method[6,7]을 사용하여 수행하였다. 해석적 모델링에서 식(4)처럼 근사된 감쇠효과를 고려하였을 경우에 각각의 실제 스트레인 게이지 신호들로부터 복원한 충격력이 Fig. 10과 Fig. 11에 나와 있다. Fig. 10은 충격 위치가 I1일 때 스트레인 게이지, Sx에서 측정된 변형률 신호를 이용하여 복원한 충격력과 하중 변환기로부터 직접 측정된 충격력을 나타낸 것이며 Fig. 11은 충격 위치가 I2일 때 스트레인 게이지, Sy

로부터 측정된 변형률 신호를 이용하여 복원한 충격력을 나타낸 것이다. 두가지 경우 모두 실제 하중변환기로부터 측정된 충격력과 복원된 충격력이 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

고분자 압전센서 신호를 이용하여 충격력을 복원한 경우는 Fig. 12와 Fig. 13에 나와 있다. Fig. 12는 충격 위치가 I1일 때 센서 위치 P1에서 전하증폭기를 사용하여 측정된 고분자 압전센서 신호를 이용하여 복원한 충격력이며, Fig. 13은 충격 위치 I2에 대해 센서 위치 P1에서 전하증폭기 사용없이 직접 계측기에 연결하여 측정된 고분자 압전센서 신호를 이용하여 복원한 충격력이다. 스트레인 게이지 신호를 이용한 경우와

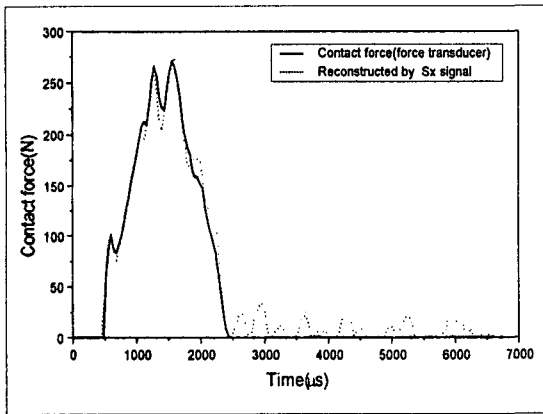


Fig. 10 Contact force reconstructed from x-directional strain gage signal(Impact location : I1, Sensor location : Sx, experimental verification)

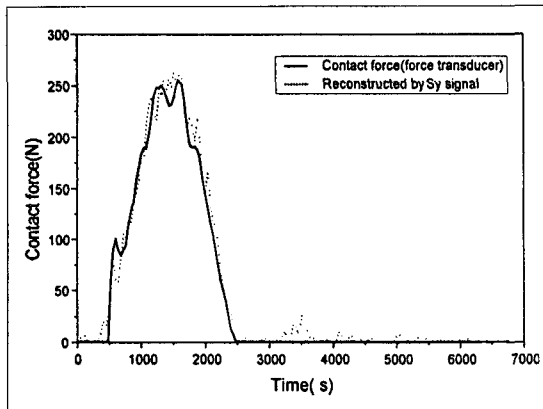


Fig. 11 Contact force reconstructed from y-directional strain gage signal(Impact location : I2, Sensor location : Sy, experimental verification)

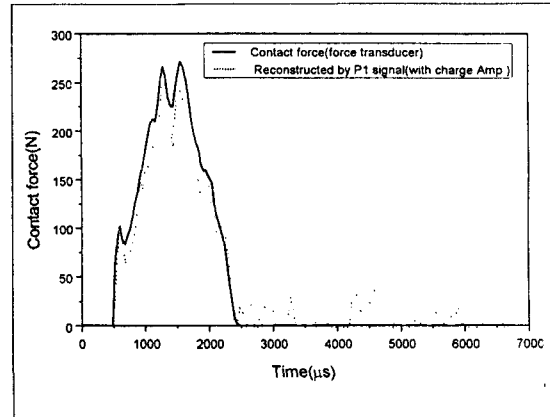


Fig. 12 Contact force reconstructed from PVDF sensor signal with charge amp.(Impact location : I1, Sensor location : P1, experimental verification)

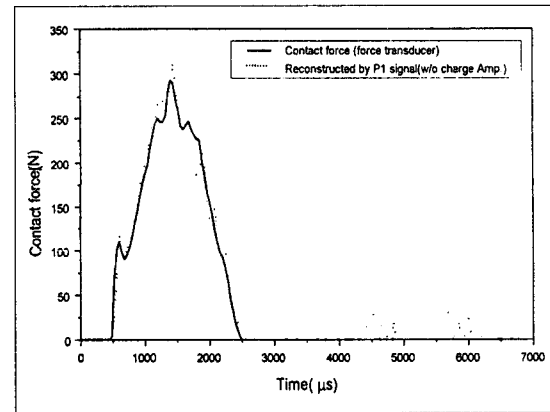


Fig. 13 Contact force reconstructed from PVDF sensor signal without charge amp.(Impact location : I2, Sensor location : P1, experimental verification)

마찬가지로 압전센서 신호를 이용하여 복원한 충격력은 실제 하중변환기로부터 측정된 충격력과 좋은 일치를 보이고 있었다. 이러한 결과를 통해서 고분자 압전센서 사용시 부가적인 전하증폭기 사용없이도 충격력 복원이 가능함을 확인할 수 있었다.

실제 모델에서의 전기적 잡음의 최소화와 좀더 정밀한 진동 실험을 통해 모드들간의 고유 진동수 및 감쇠비를 구하여 해석적인 모델에 적용시킨다면 오차를 좀더 줄일 수 있으리라 생각된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 복합재 평판에 대해서 스트레인 게이지 신호와 압전센서 사용시 전하증폭기를 이용한 경우와 이용하지 않고 직접 계측기기에 연결한 경우의 신호들을 해석적인 모델을 개발하여 예측하였고 또 이들 신호들을 이용하여 충격력을 복원하였으며 실제 저속 충격 실험을 통하여 실험적 검증을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실험에서 얻은 변형률 응답 및 전하증폭기를 연결한 압전센서의 개회로 전압 신호, 그리고 전하증폭기를 통하지 않은 압전센서의 출력 전압 신호들과 해석치는 약간의 차이가 있었으나 비교적 근사한 일치 모습을 보이고 있었으므로 해석적 모델링이 유효함을 알 수 있었다.

2) 고분자 압전센서 사용시 기존의 전하증폭기를 사용하지 않고 직접 계측기기에 연결하여 측정된 센서 신호를 이용한 충격력 복원 결과는 전하증폭기를 사용했을 때의 압전센서 신호와 스트레인 게이지 신호를 이용하여 복원했을 경우, 그리고 실제 하중변환기에서 측정된 값들과 잘 일치하였으며 이를 통해 전하증폭기를 이용하지 않은 고분자 압전센서를 이용한 복합재 평판의 저속충격 탐지가 가능함을 확인하였다.

3) 복합재 평판의 진동 실험을 통해 얻은 고유진동수 및 감쇠비를 이용하여 해석적인 모델을 개선하여 충격력과 센서 신호에 대한 정방향 문제와 역방향 문제에 있어서 오차를 줄일 수 있었다.

### 참고문헌

1. Rogers, C.A., Baker, D.K., and Jaeger, C.A., "Introduction to Smart Materials and Structures", ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop Proceedings,

Blacksburg, VA, 1988, pp.17-28.

2. Mazur, C.J., Serdeckyj, G.P., and Stevens, D.M., "Air Force Smart Structures/Skin Program Overview", SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins, Vol.986, 1988, pp.19-29.

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

4. Yen Ching-Shih and Wu Enboa, "On the Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part I : Method Development and Numerical Verification", Journal of Applied Mechanics, Vol.62, 1995, pp.692-698.

5. Yen Ching-Shih and Wu Enboa, "On the Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part II : Experimental Verification and Further Applications", Transactions of the ASME Vol.62, 1995, pp.699-705.

6. 김인걸, 김 준, "저속충격을 받는 복합층판의 역할 수 문제에 대한 실험적 상관관계", 한국 복합재료 학회지 논문집, 11권3호, 1998, pp.24-38.

7. 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.

8. 정석모, "전하증폭기를 사용하지 않은 고분자 압전 센서 신호를 이용한 저속충격탐지", 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 2000.

9. Atomchem Sensors Inc., Technical Manual, 1991.