

論文

저속충격을 받는 복합적층판의 역함수 문제에 대한 실험적 상관관계

김인걸* · 김준**

Experimental Correlation for the Inverse Problem of Laminated Plate Subjected to Low-Velocity Impact

In-Gul Kim* and Joon Kim**

ABSTRACT

The present study describes the results of research effort to develop a method of impact detection for the composite plate subjected to low-velocity impact. Initial-boundary value problem was solved to predict impact location and force from the strain gage signal and piezopolymer sensor signal due to low-velocity impact. In this model, sensor responses can be expressed in terms of impact force and location by a convolution type integral equation.

The system operator was derived by combining the piezoelectric constitutive equation of the piezopolymer sensor with the approximate closed-form solution for the impact event of the composite plate based on assumed-mode method.

A linear algebraic equation for the sensor responses was obtained by discretizing the integral equations into an approximate summation form which included two unknowns, impact force and location. Also, inverse problem was solved by the optimization method to identify impact location and the Iterated Tikhonov Regularization Method to reconstruct the impact force. The numerical and experimental verification were performed for the forward and inverse problems. The predicted impact locations agreed well with the actual impact locations. The reconstructed impact forces based on the Iterated Tikhonov Regularization Method agreed well with the force transducer signals.

The analytical model for predicting impact location and force has been shown to work well in the range of moderate impact energies.

초 록

저속 충격을 받는 항공기용 복합재료 외피를 단순 지지된 복합재료 평판으로 가정하고 적층판에 장착된 센서의 신호를 이용한 충격 탐지 방법에 대하여 고찰하였다. 복합적층판에 부착된 스트레인 게이지의 변형률 신호와 충격력과의 관계, 압전 재료의 구성 방정식을 이용한 고분자 압전센서의 개회로 전압과 충격력과의 관계에 대한 해석적 식을 초기치 문제로 유도하였다. 저속 충격에 의한 스트레인 게이지의 변형률 신호와 압전센서의 개회로 전압 신호를 이용하여 충격력과 충격 위치를 구할 수 있는 역방향 문제에 대한 알고리즘의 개발과 이에 대한 실험적 검증을 수행하였다. 충격 위치 예측은 최적화 알고리즘을 이용하였고 충격

*충남대학교 공과대학 항공우주공학과

**충남대학교 대학원 항공우주공학과

력 예측은 Iterated Tikhonov Regularization Method를 이용하였다. 센서 신호로부터 예측한 충격 위치와 복원된 충격력은 실제 위치, 충격력과 비교적 잘 일치하였다. 고분자 압전센서 신호를 이용하여 예측한 충격 위치와 충격력은 스트레인 게이지 신호에 의한 예측값과 유사한 결과를 보여주었으며 저속 충격 탐지 센서로서 고분자 압전센서의 응용 가능성을 확인하였다.

1. 서 론

고분자 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 많은 장점을 갖고 있어 항공우주 분야에서의 수요는 급증하고 있으나 저속충격에 의한 손상에 대한 많은 취약성을 갖고있다. 특히, 저속충격을 받은 복합재료 구조물은 외형상으로는 전혀 손상이 없어 보이지만 내부에는 손상영역이 생길 수 있다. 이러한 손상은 정기적인 지상 점검이나 정비 과정에서 비파괴 검사를 통하여 발견될 수도 있지만 검사자의 숙련도에 크게 좌우되며 경제적인 측면에서 불리하다. 손상영역이 항공기 운용 중에 커진다면 치명적인 구조적 파괴를 유발하여 커다란 인명 및 재산피해를 야기할 수도 있다.

이러한 문제의 해결방법으로 재료분야에서는 저속충격에 보다 강한 고분자 기지재료와 보강섬유의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 항공/기계 분야에서는 외부환경에 의한 자극(여기서는 저속충격)에 대하여 생명체의 신경조직과 같은 센서를 구조물에 부착시켜 구조물의 이상유무를 연속적으로 자체 진단하고 이에 대처할 수 있는 능력을 가진 새로운 개념의 구조물에 대한 연구가 국내외적으로 시도되고 있다[1-5].

저속충격에 대한 복합재료의 약점을 보완하기 위해 저속충격을 감지하고 이에 대해 실시간으로 운용자에게 경고하거나 이상유무를 자체적으로 진단하여 저속충격의 크기에 따라 운용중인 항공기의 조종사에게 실시간에 전달되거나 지상 점검시 정비사에게 정확한 충격위치 및 충격량에 대한 정보를 제공하여 보다 정확한 손상부위와 크기를 찾아낼 수 있는 구조물에 대한 연구가 이루어지고 있다.

이러한 연구는 기존의 비파괴 검사에 의하여 탐지할 수 있는 균열의 크기보다 작은 균열의 탐지 가능성과 손상에 대한 실시간 구조물의 건전성 감시를 가능하게 할 수 있다. 그러므로 이러한 기술의 개발은 손상 허용 구조물 설계시 구조물의 허용 잔여 강도를 증가시킬 수 있으므로 구조물의 안전성 증대 뿐만 아니라 경량화에 기여할 것이다.

저속충격이 가해진 복합재료 평판의 거동에 대한 정

방향 문제의 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었다[6-9]. 그러나 센서 신호를 이용한 충격탐지 복합재료 판재를 개발하기 위하여는 센서를 구조물에 장착하여 저속충격에 의한 센서의 전기적 신호로부터 저속 충격의 위치 및 충격력을 예측할 수 있는 역방향 문제에 대한 알고리즘의 개발과 실험적 검증이 이루어져야 한다. 역방향 문제에 대한 연구로 Doyle[10,11]은 자유-자유 경계 조건을 갖는 특별 직교이방성 평판에 부착된 스트레인 게이지의 신호를 사용하여 응력과 이론을 이용한 주파수 분석법을 통해 충격력을 계산하였으며, Wang[12]은 접근할 수 없는 지점의 변위를 측정 가능한 진동 변위 데이터로부터 구하였으며, Park[13]은 등방성 보에 대해 충격 응답함수를 구하여 이를 이용하여 역승적(deconvolution)과정을 통해 충격력을 복원하고, 충격력 모델을 유도하였다. 그리고, Yen과 Wu[14-16]는 등방성 평판에 부착된 스트레인 게이지를 이용하여 최적화 기법을 이용하여 역방향 문제를 수행하였다.

본 논문에서는 높은 신뢰성을 요구하는 항공기의 구조물 중 하나인 프레임과 스트링거로 지지된 동체의 복합재료 외피를 단순 지지된 복합재료 평판으로 모델링 한 후 해석적인 식을 구성하였다. 해석적 식의 적합성을 검증하기 위해 복합재료 평판에 부착된 스트레인 게이지의 변형을 신호와 충격력과의 관계, 압전 재료의 구성 방정식을 이용하여 압전센서의 개회로 전압과 충격력과의 관계에 대한 해석적 식을 유도하였다. 저속 충격 실험에서 획득한 변형율과 개회로 전압의 실험치와 해석치를 비교하는 정방향 문제를 수행하였다. 저속 충격 실험을 통하여 구조물에 부착된 스트레인 게이지의 변형을 신호와 압전센서의 개회로 전압 신호를 이용하여 충격력과 충격 위치를 구할 수 있는 역방향 문제에 대한 알고리즘의 개발과 이에 대한 실험적 검증을 수행하였다. 그리고 저속충격에 의한 스트레인 게이지의 변형율 값과 압전센서의 출력 전압과의 관계를 비교 고찰하여 저속충격 탐지 센서로서 고분자 압전센서가 스트레인 게이지 센서를 대체할 수 있는지에 대한 가능성도 검토하였다.

2. 이론 해석

2.1 저속충격 해석

2.1.1 복합재료 평판의 운동방정식

복합재료 평판의 지배 방정식은 다음과 같은 Reissner-Mindlin 평판 이론과 Hamilton 원리를 적용하여 유도하였다. 변위에 대한 3개의 독립변수들은 보 함수

(beam function) 급수에 의해 식 (1)과 같이 표현된다[14].

$$u_1(x, y, z, t) = z\bar{\alpha}(x, y, t) = z \sum_i \sum_j \alpha_{ij}(t) \xi_i(x) \eta_j(y) \dots (1.a)$$

$$u_2(x, y, z, t) = z\bar{\beta}(x, y, t) = z \sum_i \sum_j \beta_{ij}(t) \xi_i(x) \eta'_j(y) \dots (1.b)$$

$$u_3(x, y, z, t) = w(x, y, t) = \sum_i \sum_j w_{ij}(t) \xi_i(x) \eta_j(y) \dots (1.c)$$

여기서 u_1 , u_2 , u_3 는 각각 x방향, y방향, z방향의 변위 성분이며, $\xi_i(x)$ 와 $\eta_j(y)$ 는 적절한 경계조건 하에서 보의 모드형상(mode shape)이다. 네 변이 단순지지된 평판의 경우, 모드형상은 평판의 x방향 길이가 a이고 y방향 길이가 b일 때 x방향과 y방향에 대해 각각 다음과 같이 정의할 수 있다[17].

$$\xi_i(x) = \sin\left(\frac{i\pi x}{a}\right), \quad \eta_j(y) = \sin\left(\frac{j\pi y}{b}\right) \dots (2)$$

그리고 α_{ij} , β_{ij} , w_{ij} 는 각각의 모드형상에 해당하는 모드크기(modal amplitude)이다. 운동에너지는 평판의 두께가 얇으므로 회전 관성효과를 무시할 수 있다고 가정하여 다음과 같이 나타내었다.

$$T = \frac{\rho h}{2} \int_0^b \int_0^a w^2 dx dy \dots (3)$$

여기서 ρ 와 h 는 각각 평판의 밀도와 두께이고, a 와 b 는 x와 y방향 길이이다.

횡하중에 의한 일과 휨 변형을 에너지로 이루어진 포텐셜 에너지는 다음과 같이 표현된다[18].

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} \iint_A \left[D_{11} \left(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \right)^2 + 2D_{12} \left(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} \right) \right. \\ & + 2D_{16} \left(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right) + D_{22} \left(\frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} \right)^2 \\ & + 2D_{26} \left(\frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right) + D_{66} \left(\frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right)^2 \Big] dA \\ & + \frac{1}{2} \iint_A \left[\bar{A}_{44} \left(\bar{\beta} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2\bar{A}_{45} \left(\bar{\beta} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(\bar{\alpha} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \bar{A}_{55} \left(\bar{\alpha} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dA - \iint_A q(x, y, t) w(x, y, t) dA \dots (4) \end{aligned}$$

여기서, D_{ij} 는 굽힘 강성행렬이고 \bar{A}_{ij} 는 횡전단 강성행렬이다.

따라서, 앞에서 구한 평판의 운동 에너지와 변형률 에너지를 Hamilton 원리를 적용하여 모드크기 α_{ij} , β_{ij} , w_{ij} 를 미지수로 갖는 평판의 운동방정식을 구하면 질량행렬, $[M]$ 과 강성행렬, $[K]$ 를 포함한 행렬식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_2 \end{Bmatrix} \dots (5)$$

여기서 $\{q_1\}$ 은 x방향 모드 수가 N_1 개 이고 y방향 모드 수가 N_2 개 일 때 $N_1 N_2$ 개의 α_{ij} 와 $N_1 N_2$ 개의 β_{ij} 를 포함한 $2N_1 N_2 \times 1$ 크기의 행렬이고, $\{q_2\}$ 은 $N_1 N_2$ 개의 w_{ij} 를 포함한 $N_1 N_2 \times 1$ 크기의 행렬이다.

$$\begin{aligned} \{q_1\}^T &= \{\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1N_2}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{N_1 N_2}, \\ & \quad \beta_{11}, \beta_{12}, \dots, \beta_{1N_2}, \beta_{21}, \dots, \beta_{N_1 N_2}\} \\ \{q_2\}^T &= \{w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1N_2}, w_{21}, \dots, w_{N_1 N_2}\} \dots (6) \end{aligned}$$

충격력을 판재의 (x_0, y_0) 지점에 작용하는 집중하중이라고 가정하면 횡하중 $p(x, y, t)$ 는 다음과 같이 델타함수(delta function)를 포함한 형태로 표현할 수 있다.

$$p(x, y, t) = \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) f(t) \dots (7)$$

따라서, 식 (5)의 우변에 있는 $\{P_2\}$ 는

$$\begin{aligned} \{P_2\}^T &= f(t) \{\xi_1 \eta_1, \dots, \xi_2 \eta_1, \dots\}_{(x_0, y_0)} \\ &= f(t) \{Y\} \dots (8) \end{aligned}$$

처럼 표현되고 식 (5)는 (9)식과 같이 정리할 수 있다.

$$[M_{22}]\{\ddot{q}_2\}+[K^*_{22}]\{q_2\}=\{P_2\} \cdots \cdots (9.a)$$

$$\{q_1\}=-[K_{11}]^{-1}[K_{12}]\{q_2\} \cdots \cdots (9.b)$$

여기서, $[K^*_{22}]$ 는

$$[K^*_{22}]=[K_{22}]-[K_{21}][K_{11}]^{-1}[K_{12}]$$

이다.

본 논문에서는 역함수문제를 다루는데 편리한 가한 하중과 응답을 외재적 형태(explicit form)로 표현할 수 있는 고유모드 확장법(eigenmode expansion method)을 사용하였다[19]. 미지의 벡터 $\{q_2\}$ 는 고유 벡터 $\{e_i\}$ 의 선형 중첩으로 (10)식과 같이 표현될 수 있으며

$$\{q_2\}=\sum_{i=1}^L a_i \{e_i\}=[X]\{a\} \cdots \cdots (10)$$

여기서 a_i 는 시간의 함수이고 초기 조건을 적용하면 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$a_i(t)=\frac{\{e_i\}^T\{Y\}}{m_i} \int_0^t f(t-\tau) s_i(\tau) d\tau \cdots \cdots (11)$$

$s_i(\tau)$ 는

$$s_i(\tau)=\begin{cases} \frac{\sin(\omega_i \tau)}{\omega_i} & \text{if } \omega_i \neq 0 \\ \tau & \text{if } \omega_i = 0 \end{cases}$$

이다.

따라서, (11)식에서 $a_i(t)$ 를 구한 후 (10)식에 대입 하면 $\{q_2\}$ 를 얻을 수 있고, 다시 이 $\{q_2\}$ 를 식 (9.b)에 넣어 $\{q_1\}$ 을 구하여 모드크기 α_{ij} , β_{ij} , w_{ij} 를 계산해 낼 수 있다. 또한, α_{ij} , β_{ij} , w_{ij} 를 (1)식에 대입하면 각 방향의 변위값을 알아낼 수 있으며, 변위-변형을 관계로부터 변형을 값을 알아 낼 수 있다. 예를 들어, z 좌표가 $-h/2$ 인 평판 표면의 어떤 점 (x_1, y_1) 에서의 변형율은 다음과 같이 표현할 수 있으며 평균 변형율은 센서의 유효 면적내에서 (12)식을 적분하여 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{\zeta\zeta}(x_1, y_1, t; x_0, y_0) = \int_0^t f(t-\tau) G^{(\zeta)}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0) d\tau \cdots (12)$$

여기서, ζ 는 x 또는 y를 나타낸다.

Green 함수 $G^{(\zeta)}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0)$ 는 경과한 시간 τ 에 대해 (x_0, y_0) 지점에 가해진 단위 충격력에 의한 (x_1, y_1) 지점에서의 과도 변형을 응답을 나타내며 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$G^{(\zeta)}(x_1, y_1, \tau; x_0, y_0) =$$

$$\frac{h}{2} \sum_{i=1}^L \frac{(\{\Gamma_i\}^T [K_{11}]^{-1} [K_{12}]\{e_i\})(\{e_i\}^T \{Y\})}{m_i} s_i(t) \cdots (13)$$

여기서

$$\{\Gamma_x\}^T = \{\xi_1'' \eta_1, \xi_1'' \eta_2, \cdots, \xi_{N_s}'' \eta_{N_s}, \xi_2'' \eta_1, \cdots, \xi_{N_s}'' \eta_{N_s}, 0, 0, \cdots, 0\}_{(x_1, y_1)}$$

$$\{\Gamma_y\}^T = \{0, 0, \cdots, 0, \xi_1 \eta_1'', \xi_1 \eta_2'', \cdots, \xi_1 \eta_{N_s}'', \xi_2 \eta_1'', \cdots, \xi_{N_s} \eta_{N_s}'', 0\}_{(x_1, y_1)}$$

이다.

충격력과 충격위치가 주어졌을 때 임의의 지점에서 의 응답을 구하는 문제를 정방향 문제(forward problem)라고 한다. 이와는 반대로 본 논문에서 다루게 될 역방향 문제는 충격위치와 충격력을 구하기 위해 충격에서 유도된 변형을 응답을 이용하는 것이다. 이런 역방향 문제에서 해석적 해는 이용할 수 없으므로, 근사된 수치적 해를 찾기 위해 윗식의 적분식을 관심있는 시간영역에 대해서 n개의 같은 간격으로 나누었다.

우선 n개로 나눈 각 구간의 충격력을 선형보간법에 의하여 다음과 같이 나타내었다.

$$f(t) = f_{i-1} + \frac{t-t_{i-1}}{t_i-t_{i-1}} (f_i - f_{i-1}) \quad (t_{i-1} < t < t_i) \cdots (14)$$

여기서 $t_i = i\Delta t$, $f_i = f(t_i)$ 이며 Δt 는 분할된 시간간격이다. 식 (14)를 (12)식에 대입하고 시간에 대하여 적분을 실행하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_{\zeta\zeta}(x_1, y_1, t; x_0, y_0) = \sum_{i=1}^k G_{k+1-i} f_i \cdots \cdots (15)$$

여기서,

$$G_1 = \frac{h}{2} \{ \Gamma \}^T [K_{11}]^{-1} [K_{12}] [X] [T] [X]^T \{ Y \}$$

$$G_{i+1} = \frac{h}{2} \{ \Gamma \}^T [K_{11}]^{-1} [K_{12}] [X] [S] [X]^T \{ Y \} \quad (i \geq 1) \dots (16)$$

이다. 식 (15)를 정리하면

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_n \end{Bmatrix}_{(k)} = \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ G_2 & G_1 & 0 & \dots & 0 \\ G_3 & G_2 & G_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_n & G_{n-1} & G_{n-2} & \dots & G_1 \end{bmatrix}_{(k)} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \dots (17)$$

(17)식과 같은 행렬 형태가 되며, 다음처럼 간단하게 표현 할 수 있다.

$$V_{(k)} = G_{(k)} f \dots (18)$$

여기서 $V_{(k)}$ 는 k번째 센서와 관련된 센서 신호를 의미하고, v_i 와 f_i 는 시간 $t = i\Delta t$ 에서 센서신호와 충격력의 양이다.

식 (18)에서 충격위치와 충격력이 주어지면 $G_{(k)}$ 와 f 가 결정되어 센서 신호 $V_{(k)}$ 를 구하는 정방향 문제가 되고, 반대로 $V_{(k)}$ 가 주어지면 충격지점과 충격력 f 를 구하는 역방향 문제가 된다.

2.1.2 고분자 압전센서의 구성방정식

고분자 압전센서는 강성이 작기 때문에 스트레인 게이지처럼 센서가 부착된 지점에서의 구조물 변형율과 센서의 변형율이 같으며, 센서의 임계 주파수보다 높은 동적 하중에 의한 변형율을 감지할 때는 별도의 신호 변환 장치 없이도 변형율을 감지할 수 있다는 장점이 있다.

압전재료의 변형율, 응력, 전기장과 전기장 변위는 여러 형태의 한 쌍의 전기-역학적 방정식으로 표현될 수 있으며, 본 논문에서는 Kino[20]가 사용한 형태의 선형 압전재료에 대한 구성 방정식을 사용하였다.

$$\varepsilon_p = S_{pq}^E \sigma_q + d_{pi} E_i \quad (p, q = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \dots (19.a)$$

$$D_i = d_{iq} \sigma_q + \chi_{ik}^E E_k \quad (i, k = 1, 2, 3) \dots (19.b)$$

여기서 S_{pq}^E 는 일정한 전기장에서의 순응도 행렬(elastic compliance matrix)이고, χ_{ik}^E 는 일정 응력 조건에서의 유전율 행렬(dielectric permittivity matrix)이고, d_{iq} 는 압전변형율 상수(piezoelectric strain constant)이다. σ_p 는 응력, ε_p 는 변형율, 그리고 E_i 는 i 방향의 전기장과 D_i 는 전기적 변위이다. 사용된 고분자 압전센서의 두께는 매우 작으므로 평면 응력조건($\sigma_3 = 0$)으로 가정할 수 있고 외부에서 가한 전기장이 없다고 가정할 경우, 단위 변형율에 대한 생성 전하량 상수인 압전전하상수, e_{31} , e_{32} 와 변형율, ε_1 , ε_2 로 전기장 변위 D_3 는 (20)식과 같이 표현할 수 있다.

$$D_3 = e_{31} \varepsilon_1 + e_{32} \varepsilon_2 \dots (20)$$

압전센서를 등방성 재료(isotropic material)로 가정할 경우 e_{31} , e_{32} 는 다음과 같으며

$$\begin{pmatrix} e_{31} \\ e_{32} \end{pmatrix} = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_p \\ \nu_p & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{pmatrix} \dots (21.a)$$

압전센서를 횡등방성 재료(transversely isotropic material)로 가정할 경우는 다음과 같다.

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

본 논문에서는 고분자 압전센서를 횡등방성 재료로 가정하고 탄성계수 E_1 , E_2 와 푸아송비 ν_{12} , ν_{21} 은 제조업체의 제원[21]을 사용하였다. 실험시 사용된 고분자 압전센서의 주요 특성값들은 Table 1과 같다.

식 (20)에서 변형율 ε_1 , ε_2 를 ε_x , ε_y 로 대체하고 정리하면 센서 전극판의 유효면적이 $A_p(a_p \times b_p)$, 두께가 t_p 인 압전센서에 생기는 개회로 전압 $V(t)$ 는

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C_p} = \frac{t_p}{A_p \chi_{33}^E} \int_{A_p} (e_{31} \varepsilon_x + e_{32} \varepsilon_y) dx dy$$

$$= \frac{1}{A_p} \int_{A_p} (C_x \varepsilon_x + C_y \varepsilon_y) dx dy$$

$$= C_x \bar{\varepsilon}_x + C_y \bar{\varepsilon}_y \dots (22)$$

이다. 여기서 $\bar{\varepsilon}_x$ 와 $\bar{\varepsilon}_y$ 는 각각 센서의 유효면적 내에서

Table 1. Typical properties of PVDF piezopolymer sensor

Properties	Symbol (Unit)	Value
Density	$\rho_p (\times 10^3 \text{ kg/m}^3)$	1.78
Young's Modulus	$E_1 \text{ (GPa)}$	2.1
	$E_2 \text{ (GPa)}$	1.22
Poisson's Ratio	ν_{12}	0.33
	ν_{21}	0.192
Piezo Strain Constants	$d_{31} (\times 10^{-12} \text{ (m/m)/(V/m)})$	23.0 (Laterally Clamped)
	$d_{32} (\times 10^{-12} \text{ (m/m)/(V/m)})$	3.0 (Laterally Clamped)
	$d_{33} (\times 10^{-12} \text{ (m/m)/(V/m)})$	33.0 (Laterally Clamped)
Permittivity	$\chi_{33} (\times 10^{-12} \text{ F/m})$	103 (at 10kHz)
Dimension	$a_p \text{ (mm)}$	15
	$b_p \text{ (mm)}$	10
	$t_p \text{ (}\mu\text{m)}$	28

의 x방향 평균 변형율과 y방향 평균 변형율이다. 여기서 C_p 와 센서상수 C_x, C_y 는

$$C_p = \frac{\chi_{33} A_p}{t_p}, C_x = \frac{t_p e_{31}}{\chi_{33}}, C_y = \frac{t_p e_{32}}{\chi_{33}} \dots \dots (23)$$

이고, χ_{33} 는 압전재료의 두께방향 유전율이다.

본 실험에서 사용된 고분자 압전센서의 센서상수를 위와 같은 과정들을 거쳐 구하면 C_p 는 $567 \times 10^{-12} \text{ (F)}$, C_x 는 $13,947 \text{ (V/strain)}$ 이고 C_y 는 $5,521 \text{ (V/strain)}$ 이다.

사용된 압전센서의 개회로 전압은 (22)식과 같이 센서 전극판의 유효면적 내에서의 평균 변형율 $\bar{\epsilon}_x, \bar{\epsilon}_y$ 에 센서상수 C_x, C_y 를 곱하여 더한 형태가 되며, 스트레인 게이지의 신호가 각각의 평균 변형율 $\bar{\epsilon}_x, \bar{\epsilon}_y$ 를 나타내는 것과는 다른 형태임을 주목할 필요가 있다.

2.2 충격탐지 알고리즘

2.2.1 충격위치 예측

G 행렬은 충격지점과 응답지점이 포함되어 있고, 정의된 센서의 위치들과 변형율 신호들에 대해서 단지 충격위치 (x_0, y_0) 만이 미지수이므로 충격위치를 구할 수 있다. 그러나, Green 함수의 복잡한 형태 때문에 충격위치를 해석적 방법으로 구하기 어려우므로, 이 문제를 해결하기 위해 최적화 기법을 이용하였다. 최적화 기법의 사용을 위해 (24)식과 같은 형태의 목적 함수를 이용하였다[14].

$$F(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} \|G_{(i)} V_{(j)} - G_{(j)} V_{(i)}\|^2 \dots (24)$$

여기서, g_{ij} 는 단순지거나 고정지지된 경계조건 하에서 $G_{(i)}$ 의 모든 성분은 0이 되기 때문에 도입한 가중치이고 첨자 i, j 는 i 또는 j 번째 센서를 의미한다.

충격위치를 찾는 것은 평판 전 영역안의 많은 국부적인 F 함수의 최소값 중에서 전체 영역에 대해서 최소값을 갖는 F 함수의 위치인 (x_0, y_0) 를 구하는 것이다.

2.2.2 충격력 예측

충격력 예측을 위해서는 역변환하는 과정을 거쳐야 한다. 즉, 주어진 센서 신호 V 로부터 충격력 f 를 구하는 것이다. 그렇지만, 이런 역변환 문제는 G 행렬의 역행렬 G^{-1} 이 ill-posed 상태이므로, 측정된 신호 V 의 작은 오차는 충격력에서 큰 변동을 야기할 수 있어서 정확한 해를 구하기는 어렵다. 그러므로, 본 논문에서는 조정된 해를 Iterated Tikhonov Regularization Method[22,23]를 이용하여 구하였다.

• 반복적 Tikhonov 조정법(Iterated Tikhonov Regularization Method)

우선 잡음(noise)이 섞인 실제 신호인 V_δ 이 이상적 신호 V 와 약간의 차이가 있다고 가정하고 신호의 잡음 크기, δ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\|V - V_\delta\| \leq \delta \dots \dots \dots (25)$$

한편, 해석시 사용하기 위해 이상적인 신호 V 에 잡음의 백분율 오차 P %가 섞인 신호 V_δ 를 다음과 같이 정의한다.

$$V_\delta = V(1 + \theta_i \times 0.01 \times P \%) \dots \dots \dots (26)$$

여기서, θ_i 는 -1과 1 사이 임의의 수이다.

Tikhonov 조정법에서 f 는 다음 식의 유일한 최소 f_α 로써 근사된다.

$$F_\alpha(f) = \|Gf - V_\delta\|^2 + \alpha \|f\|^2, \alpha > 0 \dots \dots \dots (27)$$

여기서 α 는 조정 매개변수(regularization parameter)이다. $\nabla F_\alpha(f) = 0$ 을 만족하는 f 에서 F_α 는 최소값

을 갖게되므로, f_n 는 (28)식과 같이 조정 매개변수 α 의 함수 형태로 된다.

$$f_{\alpha,\delta} = (G^T G + \alpha I)^{-1} G^T V_{\delta} \dots (28)$$

Tikhonov 조정법에서의 문제는 신호의 잡음 크기, δ 에 따라 바뀌는 적절한 조정 매개변수 α 를 해의 정확성과 안정성 사이에서 최적의 값을 선택하는 것이다.

- 조정 매개변수 선택(Selection of the Regularization Parameter)

조정 매개변수 α 를 선택하기 위해 우선 $f'_{\alpha,\delta} = 0$ 으로 놓고, j 차(order j) 반복 조정법의 결과인 $f'_{\alpha,\delta}$ 를 다음 (29)식의 유일한 해로 생각한다.

$$(G^T G + \alpha I) f'_{\alpha,\delta} = G^T V_{\delta} + \alpha f'_{\alpha,\delta} \dots (29)$$

$f'_{\alpha,\delta}$ 가 근사해로 사용될 때, $\rho_j(\alpha)$ 를 방정식 $Gf=V$ 에 대한 잉여값의 제곱으로 (30)식과 같이 정의한다.

$$\rho_j(\alpha) = \| G^T G f'_{\alpha,\delta} - G^T V_{\delta} \|^2 \dots (30)$$

Engl[22]에 의해 제안된 $\rho_j(\alpha)$ 를 이용하여, 주어진 δ 에 대한 조정 매개변수 α 를 다음 식의 유일해로써 선택한다.

$$\rho_j(\alpha) = \delta^e \alpha^{-e} \quad (d, e > 0, \frac{d}{2}(1+2j) - 2j = e) \dots (31)$$

식 (31)은 전 구간에서 수렴하는 Newton 법으로 풀 수 있으며, 함수 $g(\alpha)$ 를 (32)식과 같이 정의하였다.

$$g(\alpha) = \alpha' \rho_j(\alpha) - \delta^e \dots (32)$$

α 를 구하기 위한 반복적인 방법은 (33)식과 같이 주어지고

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} - g(\alpha_{n-1}) / g'(\alpha_{n-1}) \dots (33)$$

g' 은 다음과 같다.

$$g'(\alpha) = (e+4)\alpha^{e+1} \| f'_{\alpha,\delta} - f^j_{\alpha,\delta} \|^2 + 2\alpha^{e+1} (f'^{j-1}_{\alpha,\delta} - f^j_{\alpha,\delta})^T (f'^{j+1}_{\alpha,\delta} - f^j_{\alpha,\delta}) \dots (34)$$

3. 수치적 검증

복합재료 평판에 가해지는 저속충격에 대한 충격위치와 충격력 예측의 수치적 검증은 역방향 문제에 대해서 수행하였다. 수치적 검증은 실제 실험에서 사용되는 복합재료 평판과 동일한 크기 및 물성치를 사용하였다.

3.1 수치적 검증 모델

수치적 검증의 모델링에 사용된 복합재료 평판의 크기와 물성치 등은 Fig.1과 Table 2와 같다. Fig. 1의 복합재료 평판은 Gr/Ep fabric prepreg (T650/35-5HS/ERL-1902; Amoco)를 사용하여 $[0/90]_{2S}$ 로 적층하여 제작된 것이다. 네 변이 모두 단순지지 되었으며, 크기는 354×76 mm이고, 두께는 1.88 mm(0.235 mm/layer)이다. 각각 센서의 좌표와 충격위치인 I1~I7의 좌표는 Table 3에 나와 있다.

해석시에는 20×4 (x방향으로 20개, y방향으로 4개) 모드가 사용되었다. 수치적 검증시 사용한 충격력은 최대 크기 250 N과 250 μ s의 지속 시간을 갖는 반정현파 형태이다. 주어진 충격 위치와 충격력에 의한 센서 신호를 수치적으로 생성하였으며 생성된 센서 신호를 갖고 본 논문에서 사용된 역함수 알고리즘을 사용하여 충격위치와 충격력을 복원하여 주어진 값과 비교 검증하였다.

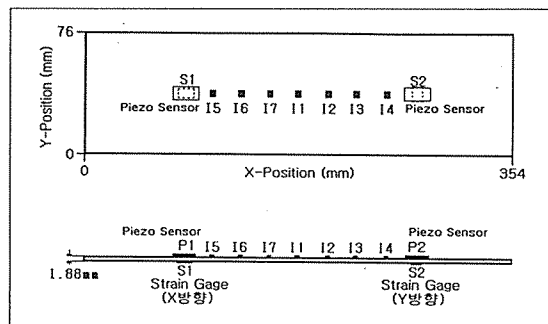


Fig. 1. Gr/Ep Composite plate with strain gages and piezopolymer sensors

Table 2. Mechanical properties of Gr/Ep composite plate

Gr/Ep fabric prepreg, [0/90] _{2S}	$D_{11} = 42.1$ N/m
	$D_{22} = 42.1$ N/m
	$D_{66} = 3.05$ N/m
	$D_{12} = 2.10$ N/m
	$\rho_p = 1570$ kg/m ³

Table 3. Coordinates of impact and sensor locations

Impact Locations	I1 (177mm, 38mm)
	I2 (202mm, 38mm)
	I3 (227mm, 38mm)
	I4 (252mm, 38mm)
	I5 (102mm, 38mm)
	I6 (127mm, 38mm)
	I7 (152mm, 38mm)
Sensor Locations	S1, P1 (77mm, 38mm)
	S2, P2 (277mm, 38mm)

3.2 충격위치 검증

스트레인 게이지를 사용한 경우에 S1은 x방향으로 부착된 스트레인 게이지이고, S2는 y방향으로 부착된 스트레인 게이지이므로, 충격위치를 I1~I7로 변화시키면서 각각의 변형율을 측정하였으며, 압전센서는 P1과 P2 모두 x방향을 센서의 가로 방향과 같게 부착하였다. 압전센서를 사용한 경우에는 평판의 x방향 중앙에 대해 대칭이므로 충격위치를 I1~I4까지만 변화시키면서 측정한 값과 해석치를 비교하였다. 단, y방향은 38 mm로 고정하고 x방향 대해서만 충격위치 예측에 대한 수치적 검증을 수행하였다. 충격위치 예측시에는 목적함수 $F(x_0, y_0)$ 의 값이 최소가 되는 지점을 찾았으며, 수렴 한계는 0.1 mm로 설정하였다.

수치적 검증시 스트레인 게이지를 이용한 경우의 위치 예측 결과는 최대 오차가 0.67 mm로 실제 충격위치와 잘 일치하고 있으며, 압전센서를 이용한 경우의 위치 예측 결과도 스트레인 게이지를 이용한 경우와 마찬가지로 최대 오차가 0.14 mm로 실제 충격위치와

잘 일치하고 있다. Table 4에는 수치적 센서 신호를 이용한 충격위치의 예측 결과가 나와 있다.

3.3 충격력 검증

충격력을 해석적으로 구할 때는 Iterated Tikhonov Regularization Method를 이용하였으며 복합재료 평판의 x방향 중앙 위치인 I1에 떨어뜨린 경우와 중앙 위치가 아닌 I4에 떨어뜨린 경우에 대해서 스트레인 게이지를 이용한 경우에는 S1 지점에서의 x방향 변형률과 S2 지점에서의 y방향 변형률을 이용하여 충격력을 복원해 보았으며, 동일한 경우에 대해 압전센서를 이용하는 경우에는 P2 지점에 x방향으로 부착된 압전센서를 이용하여 복원하였다.

실제 실험에서는 센서 신호에 잡음(noise)이 섞이는 경우가 많고, 충격력 복원은 잡음의 영향을 많이 받을 것으로 예상되므로 잡음 백분율 오차 P%가 5, 10, 20%인 경우에 대해서도 충격력을 복원하여 실제 실험시의 상황에 대한 예측을 해 보았다.

스트레인 게이지를 이용한 경우, 잡음이 없는 경우는 중앙 위치인 I1이나 중앙 위치가 아닌 I4에 충격이 가해진 경우 모두, 그리고 x방향 스트레인 게이지를 이용한 경우나 y방향 스트레인 게이지를 이용한 경우 모두 실제 충격력과 잘 일치하고 있으며, Fig. 2와 같이 백분율 오차, P%가 5, 10, 20%인 경우에도 실제값에 근사한 충격력을 얻을 수 있었다.

압전센서를 이용한 경우, 잡음이 없는 경우 중앙 위치인 I1이나 중앙 위치가 아닌 I4에 충격이 가해진 경우 모두, 실제 충격력과 잘 일치하고 있으며, Fig. 3과 같이 백분율 오차, P%가 5, 10, 20%인 경우에도 실제값에 근사한 충격력을 얻을 수 있었다.

Table 4. Impact locations predicted from strain gage signals and PVDF sensor signals (numerical verification)

Impact location	Strain gage			PVDF sensor	
	Actual x_0 (mm)	Predicted x_0 (mm)	Error(mm)	Predicted x_0 (mm)	Error(mm)
I1	177	177.7	0.7	177.0	0.0
I2	202	201.9	0.1	201.9	0.1
I3	227	226.9	0.1	226.9	0.1
I4	252	252.0	0.0	252.0	0.0
I5	102	102.0	0.0	—	—
I6	127	127.1	0.1	—	—
I7	152	152.1	0.1	—	—

($y_0=38\text{mm}$)

4. 저속충격 실험

저속충격 실험에 사용된 복합재료 평판은 3장에서 수치적 검증시 모델링 된 것과 동일하며 센서 위치도 동일하다. 스트레인 게이지인 S1과 S2는 유효면의 크기가 7.0×3.6 mm이며, 압전센서인 P1과 P2는 유효면의 크기가 15×10 mm이다.

한편, 복합재료 평판은 네 모서리가 모두 단순지지되어있으며 충격위치는 복합재료 평판의 y방향 중심선을 따라 I1~I7으로 정의되었다. 충격체(impactor)로는 총 무게 103.1g의 하중변환기가 사용되었다. 낙하

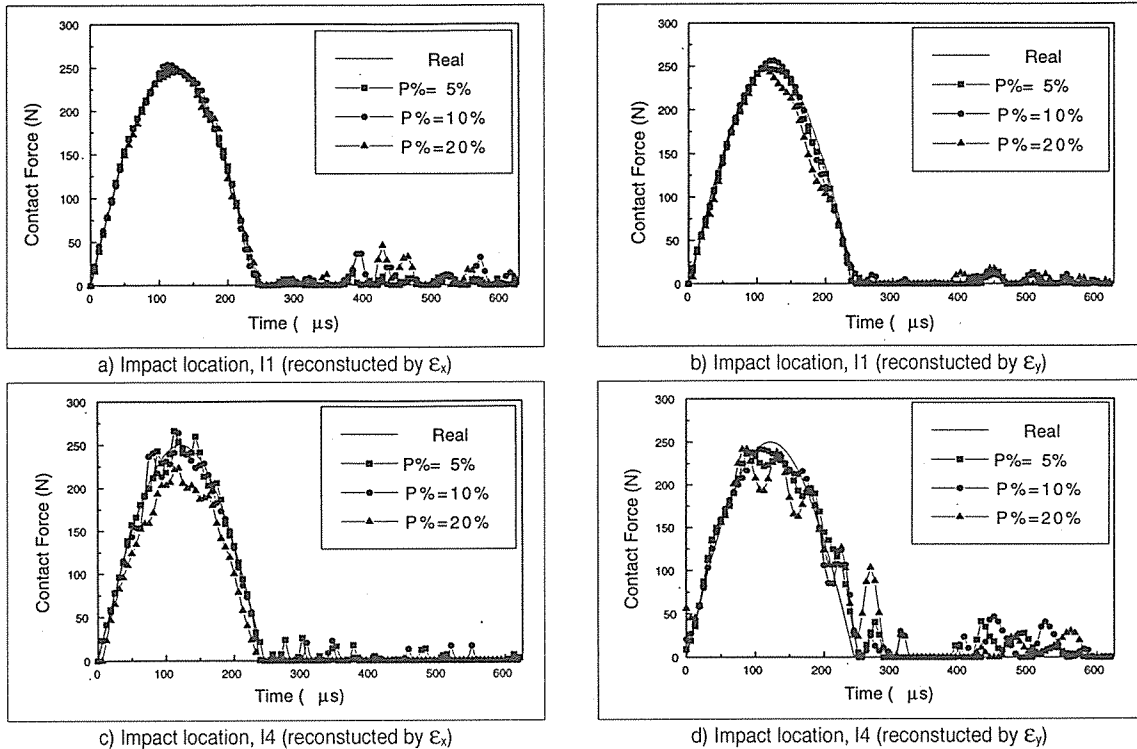


Fig. 2. Contact forces reconstructed from strain gage signal (numerical verification, percent error, P%:5, 10, 20)

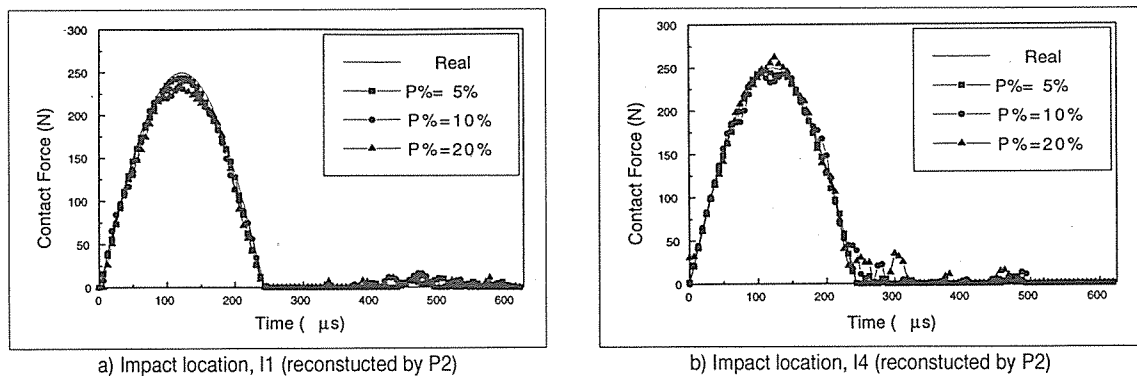


Fig. 3. Contact forces reconstructed from PVDF sensor signals (numerical verification, percent error, P%:5, 10, 20)

가이드(guide)를 이용하여 충격체인 하중변환기를 20cm 높이에서 떨어뜨렸으며, 낙하 속도의 일관성(consistency)은 광센서를 이용한 10번의 반복적 속도 측정을 통해 확인하였다.

저속 충격시험장치는 Fig. 4와 같이 하중변환기는

전압증폭기, 스트레인 게이지는 스트레인 증폭기, 압전 센서는 전하증폭기를 통하여 충격력, 변형율, 그리고 압전 센서의 개회로 전압 신호를 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS 340)를 거쳐 RS232를 통하여 PC로 전송하여 분석하였다. 해석시에는 20×4 (x방향으로

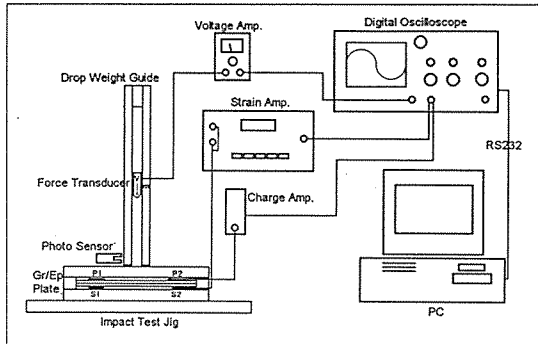


Fig. 4. Experimental Set-up

20개, y방향으로 4개) 모드가 사용되었다.

5. 결과 및 토의

본 논문에서는 복합재료에 가해지는 저속충격의 위치 및 크기를 예측하기 위하여 스트레인 게이지 신호와 압전센서의 신호를 사용하는 방법과 이에 대한 수치적 검증 및 실험적 검증을 수행하였다. 수행한 연구는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫째는 충격위치 및 충격력을 알고 변형을 응답 또는 압전센서의 개회로 전압과 같은 센서 신호를 구하는 정방향 문제와 둘째로 변형을 응답 또는 압전센서의 개회로 전압을 알고 충격위치 및 충격력을 구하는 역방향 문제이다.

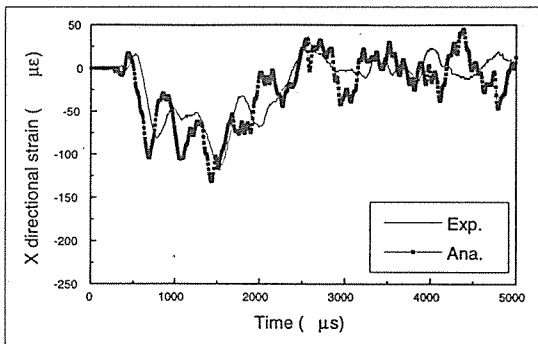
5.1 센서신호

스트레인 게이지를 이용한 경우, I1에서 I4까지의 충격위치에 충격을 가하고, S1, S2 위치에서 각각 x와 y

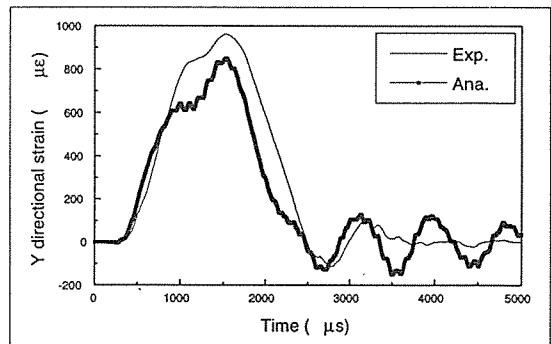
방향 스트레인 게이지를 이용하여 변형을 측정하였다. Fig. 5는 각각의 충격 위치에서 하중변환기로 측정된 충격력에 의한 해석적 변형율과 실제 측정된 변형율을 비교한 결과가 나와 있다. 해석적 변형율과 측정치는 비교적 잘 일치하였으나 고주파 성분의 신호와 시간이 지남에 따른 차이가 커짐을 알 수 있었다. 압전센서를 이용한 경우, 압전센서의 유효면적에 대해 평균 변형률 $\bar{\epsilon}_x$, $\bar{\epsilon}_y$ 를 해석적으로 계산하여 얻은 해석적 개회로 전압과 측정된 압전센서의 개회로 전압을 비교한 결과가 Fig. 6에 나와 있으며, 충격 초기의 저주파 성분의 센서 신호는 해석치와 실험치가 비교적 잘 일치하였으나 스트레인 게이지 신호처럼 고주파 성분의 신호와 시간이 지남에 따른 차이가 커짐을 알 수 있었다. 이것은 사용된 평판의 경계조건인 이론적인 단순 지지 조건을 실험적으로 구현하는데 어려움과 감쇠 특성을 고려하지 않은 모델링, 그리고 신호 취득장치의 고주파 신호 취득의 한계에서 오는 오차라고 생각된다.

5.2 충격위치

스트레인 게이지와 압전센서 신호를 이용한 충격 위치 예측 결과가 Table 5에 나와 있다. 판재의 중앙 근처의 I1, I2, I7 지점에 대한 예측위치는 실제위치와 잘 일치하고 있다. 그러나 중앙으로부터 멀리 떨어진 I3, I4, I6 지점에 대한 예측 위치와 실제 위치와의 오차는 수치적 검증에서 예측한 충격 위치 오차 보다 증가하였다. 이러한 원인은 충격 지점에서 멀리 떨어진 스트레인 게이지의 신호대 잡음비가 상대적으로 낮기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 여기서의 잡음은 판재 모델링시 고려하지 못한 감쇠 특성 모델링 오차, 이론적인 단순지지 조건의 실험적 구현의 어려움, 그리고 테

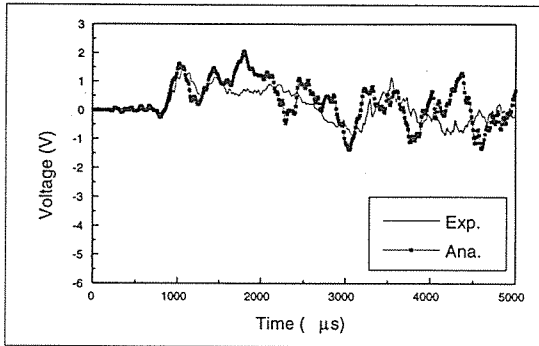


a) Impact location, I1 (ϵ_x at S1)

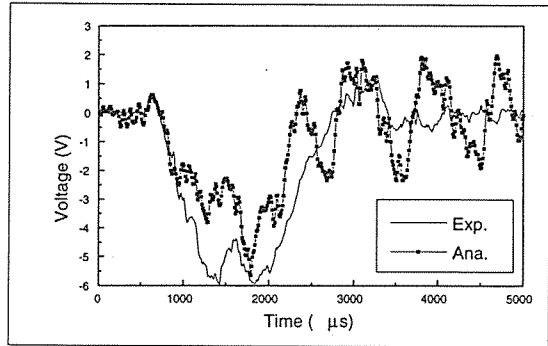


b) Impact location, I4 (ϵ_y at S2)

Fig. 5. Comparisons between analytical and experimental strain responses for different impact locations



a) Impact location, I1 (PVDF sensor voltage at P2)



b) Impact location, I4 (PVDF sensor voltage at P2)

Fig. 6. Comparisons between analytical open circuit voltage and measured voltage of PVDF sensor for different impact locations

Table 5. Impact locations predicted from strain gage signals and PVDF sensor signals (experimental verification)

Impact location	Strain gage			PVDF sensor	
	Actual x_0 (mm)	Predicted x_0 (mm)	Error(mm)	Predicted x_0 (mm)	Error(mm)
I1	177	176.9	0.1	176.9	0.1
I2	202	201.5	0.5	203.9	1.9
I3	227	222.9	4.1	233.8	6.8
I4	252	259.8	7.8	259.8	7.8
I5	102	109.9	7.9	—	—
I6	127	120.1	6.9	—	—
I7	152	150.1	1.9	—	—

(y₀=38mm)

이더 획득시 센서 신호가 전기적 잡음에 노출로 인한 복합적인 요인이라고 생각된다. 그러나 충격체인 하중 변환기 튜브의 직경이 5mm인 점을 고려하면 허용 가능한 오차 수준이라 생각되며, 개선된 모델링과 전기적 잡음의 최소화를 통해 충격위치 예측 오차를 충분히 줄일 수 있다고 생각된다.

5.3 충격력

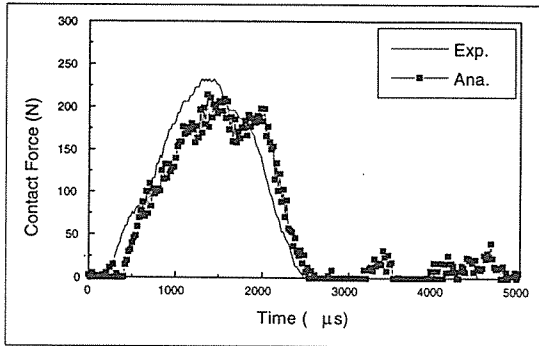
충격위치를 I1부터 I4까지 변화 시키면서 가해진 충격력에 대하여 x방향 변형율은 스트레인 게이지, S1을 이용하여 측정하였고 y방향 변형율은 스트레인 게이지, S2를 이용하여 측정하였다. 각각의 스트레인 게이지 신호로부터 복원한 충격력과 실제 측정된 충격력이 Fig. 7에 나와 있다. 압전센서 신호를 이용한 경우에는 충격위치 I1부터 I4에 가해진 충격력과 압전센서 P2를 이용하여 복원된 충격력이 Fig. 8에 나와 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 Exp.는 하중변환기 신호를 이용하여 구한 실제 충격력을 의미하고, Ana.는 역방향 알고리즘에 의해 구한 복원된 충격력을 의미하며, P%는 잡음의 백분율 오차 P%를 의미한다.

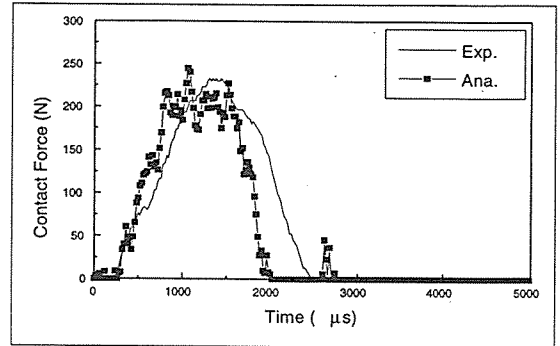
압전센서 신호를 이용한 충격력 복원 결과 충격위치와 압전센서가 가장 가까운 경우인 I4에 충격을 가하고 P2 센서 신호로 충격력을 복원한 경우의 충격력이 제일 정확하였다. 충격위치와 센서 위치가 서로 가깝기 때문에 감쇠의 영향을 거의 받지 않았기 때문인 것으로 분석되었으며, 그 외의 경우, 오차는 감쇠의 영향과 x방향 변형율과 y방향 변형율 각각에 일정 상수가 곱해져 더한 형태로 표현되는 개회로 전압이 출력되는 압전센서의 특징 때문에 즉, 스트레인 게이지 신호를 이용하는 경우의 충격력 복원시에는 x방향 변형율 또는 y방향 변형율 중 하나만을 사용하여 충격력을 복원하므로 경계조건의 불완전성으로 인한 영향을 x나 y방향의 한 방향으로만 받으나, 압전센서 신호를 이용하는 경우 x방향과 y방향 경계조건의 불완전성으로 인한 영향이 서로 더해지므로 복원된 충격력의 오차가 스트레인 게이지 신호를 이용하는 경우에 비해 더욱 커진 것으로 생각된다.

5.4 조정 매개변수 α 와 복원된 충격력의 관계

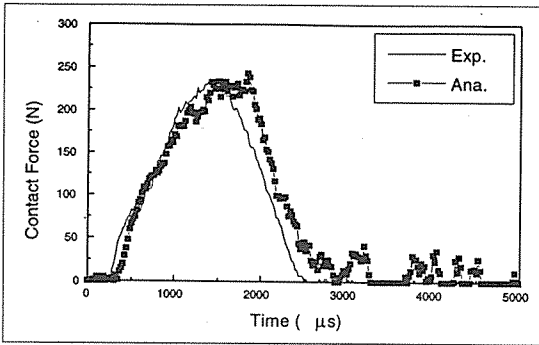
Iterated Tikhonov Regularization Method를 사용하여 충격력 복원에 대한 백분율 오차 P%의 영향을 알아내기 위해 I4 지점에 충격을 가하고 압전센서 P2를 이용하여 충격력을 복원한 경우의 실험 데이터를 예로 사용하여 각각의 백분율 오차 P%에 대해 복원된 충격력을 구한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 실제 측정된 센서 신호를 이용하여 충격력을 예측한 경우 잡음



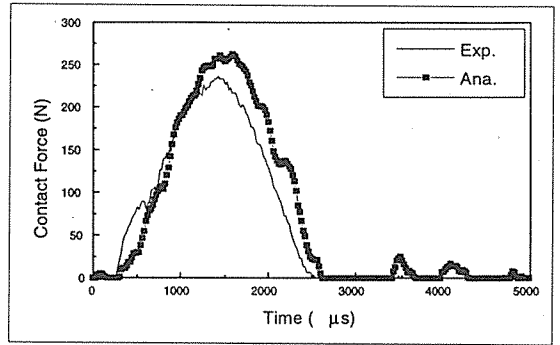
a) Impact location, I1 (reconstructed by ϵ_x ; $P\% = 0$)



b) Impact location, I1 (reconstructed by ϵ_y ; $P\% = 0$)

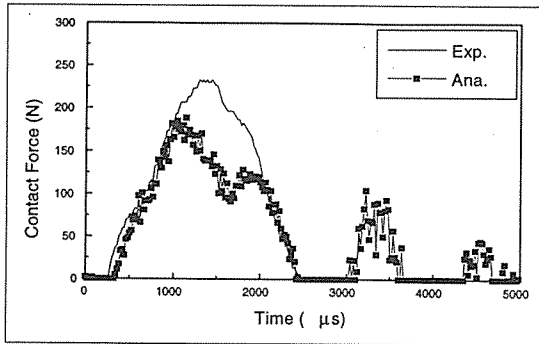


c) Impact location, I3 (reconstructed by ϵ_x ; $P\% = 0$)

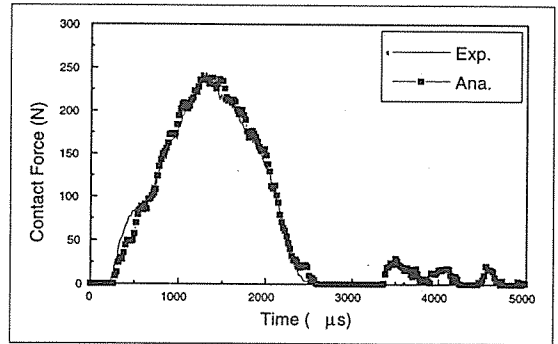


d) Impact location, I3 (reconstructed by ϵ_y ; $P\% = 0$)

Fig. 7. Contact forces reconstructed from strain gage signals (experimental verification)



a) Impact location, I1 (reconstructed by P_2 ; $P\% = 1$)



b) Impact location, I4 (reconstructed by P_2 ; $P\% = 1$)

Fig. 8. Contact forces reconstructed from PVDF sensor signals (experimental verification)

의 백분을 오차 $P\%$ 를 너무 작게 잡으면 충격력의 요동이 심하여 수치적 불안전성을 보이고, 너무 크게 잡으면 안정성은 증대되나 최고치가 매우 낮아져 정확도가 떨어지므로 적절한 값을 선택해야 한다. 그리고 조정 매개변수 α 가 이상적인 값으로 수렴하기 위해 α 의

초기값을 잘 설정하는 것이 중요한데 G 행렬의 norm 값을 이용하는 것이 현재로서는 가장 유용한 방법으로 생각된다. Tikhonov 조정법에서 $f_{\alpha,\delta}$ 는 (28)식과 같으므로 $(G^T G + \alpha I)$ 의 역행렬을 구하기 위해서는 $G^T G$ 와 αI 가 비슷한 크기 즉 $\|G^T G\|$ 와 α 가 일정한 크기의

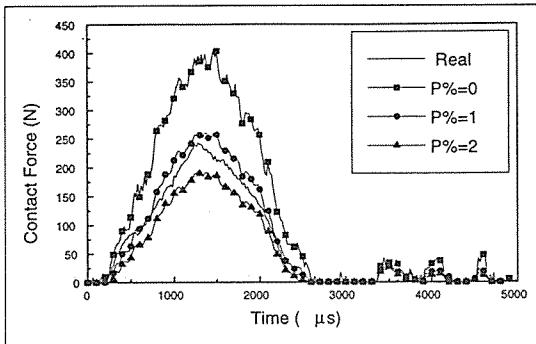


Fig. 9 The effects of percent error, P% on the prediction of impact force (Impact location, I4, reconstructed by P2 sensor signals)

비율을 갖게하는 초기치를 설정하는 것이 중요하다고 생각된다.

G 행렬의 크기 뿐만 아니라 백분율 오차 P% 만큼의 잡음이 포함된 센서 신호의 크기에 대한 고려도 조정 매개변수의 초기치를 선택하는 기준에 포함되어져야 한다고 생각된다. 이것은 조정 매개변수를 찾는 데 제시된 알고리즘이 초기치를 어느 범위내에서 선택해야만 해가 수렴하고 적절하게 충격력을 복원할 수 있는 제약이 있다고 추정되어 앞으로 이에 대한 연구가 심도 있게 진행되어져야 한다고 생각된다.

충격위치 예측을 수치적으로 검증할 때는 스트레인 게이지를 이용한 경우나 압전센서를 이용한 경우 모두 실제위치와 거의 정확히 일치하였으며, 충격력 예측을 수치적으로 검증할 때도 스트레인 게이지 신호를 이용한 경우나 압전센서 신호를 이용한 경우 모두 원래의 충격력과 거의 일치하였다. 실험시 상황을 예측하기 위한 5, 10, 20%의 잡음이 섞인 경우에도 실제값과 비교적 잘 근사하였다.

그러나 충격위치 예측을 실험적으로 검증할 때는 스트레인 게이지 신호를 이용한 경우나 압전센서 신호를 이용한 경우 모두 평판의 길이 방향 중앙 근처에 충격을 가한 경우는 1mm 안팎의 매우 작은 오차를 가지나 중앙에서 벗어난 지점에 충격을 가한 경우에는 오차가 커졌다. 전반적으로 충격위치에 가까운 센서 신호를 이용할 경우 충격력 복원이 정확하였으며 멀수록 부정확해졌다. 이것은 이론적 경계조건의 불완전성과 감쇠를 고려하지 않은 모델링, 그리고 전기적 잡음에 의한 센서 신호의 변형에 기인한다고 생각된다. 그리고 압전센서 신호에 의한 충격위치 예측 및 충격력 복원 특성은 스트레인 게이지와 경쟁성이 있고 고분자 압전센서가

충격탐지 센서로서 활용 가능성이 매우 큼을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 스트레인 게이지 신호와 압전센서 신호를 이용하여 충격위치와 크기를 예측할 수 있는 역함수 알고리즘의 개발과 저속 충격 실험을 수행하여 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 실험에서 구한 변형을 응답 및 압전센서의 개회로 전압은 해석치와 약간의 차이는 있으나 거의 일치하므로 해석적 모델링이 유효함을 알 수 있었다.

2) 충격위치와 충격력을 구하는 역방향 문제에서 최적화 기법과 Iterated Tikhonov Regularization Method를 사용하여 구한 충격위치와 충격력은 실제 값과 비교적 잘 일치하였다.

3) 충격위치와 센서위치가 서로 멀리 떨어진 경우 충격위치 및 충격력 복원에 오차가 많이 발생하였으며, 이것은 센서 신호 대 잡음비가 감소한 것으로 추정된다.

그리고 감쇠의 영향 및 실제 경계조건을 고려 할 수 있는 모델링에 대한 보완과 전기적 잡음의 최소화가 필요하다고 생각된다.

4) 고분자 압전센서의 개회로 전압은 센서의 유효면적 내에서 각 방향의 평균 변형률에 센서 상수를 곱하여 합한 형태로 표현할 수 있음을 확인하였고, 이것은 기존의 스트레인 게이지를 대체할 가능성을 보여주었다.

5) 고분자 압전센서 신호를 이용하여 예측한 충격위치와 충격력은 스트레인 게이지 신호에 의한 예측값과 유사한 결과를 보여주었으며 고분자 압전센서의 저속충격 탐지 센서로의 응용 가능성을 확인하였다.

6) 충격력을 Iterated Tikhonov Regularization Method를 이용하여 복원할 때 조정 매개변수의 초기치 설정 기준은 G 행렬의 크기 뿐만 아니라 센서의 신호와 잡음의 크기 정도를 고려하여 결정하여야 하고 이에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 96년도 자유공모과

제 연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

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, Sep. 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. Hagood, N.W., Crawley, E.F., de Luis, J., and Anderson, E.H., "Development of Integrated Components for Control of Intelligent Structures," ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop Proceedings, Blacksburg, VA, Sep. 1988, pp. 80-104.
4. Lee, C.-K. and Moon, F. C., "Laminated Piezopolymer Plates for Torsion and Bending Sensors and Actuators," Journal of Acoustic Society of America, Vol. 85, No. 6, pp. 1989, 2432-2439.
5. Crawley, E.F. and de Luis, Javier, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, 1987, pp. 1373-1385.
6. Sun, C. T. and Chattopadhyay, S., "Dynamic Response of Anisotropic Laminated Plates Under Initial Stress to Impact of a Mass", Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 42, 1975, pp. 693-698.
7. Whitney, J. M. and Pagano, N. J., "Shear Deformation in Heterogeneous Anisotropic Plates", Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 37, 1970, pp. 1031-1036.
8. Qian, Y. and Swanson, S. R., "A Comparison of Solution Techniques for Impact Response of Composite Plates," Composite Structures, Vol. 14, 1990, pp. 177-192.
9. 김 인걸, "저속충격을 받는 스마트 복합적층판에 부착된 압전센서의 특성에 관한 연구" 충남대학교 공과대학 부설 산업기술연구소 논문집, 11권 2호, December, 1996, pp. 155-163.
10. Doyle, J. F., "An Experimental Method for Determining the Dynamic Contact Law", Experimental Mechanics, Vol. 24, 1984, pp. 10-16.
11. Doyle, J. F., "Further Developments in Determining the Dynamic Contact Law", Experimental Mechanics, Vol. 24, 1984, pp. 265-270.
12. Wang, J.-H., "Prediction of Vibration at Inaccessible Points Using Measurable Data", Journal of Sound and Vibration, Vol. 138, 1990, pp. 305-319.
13. 박 형순, "횡방향 충격을 받는 보의 초기 거동해석 및 충격력 복원에 관한 연구" 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993.
14. Yen, C.-S. and Wu, E., "On the Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part 1: Method Development and Numerical Verification", Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, Vol. 62, 1995, pp. 692-698.
15. Yen, C.-S. and Wu, E., "On the Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part 2: Experimental Verification and Further Application", Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, Vol. 62, 1995, pp. 699-705.
16. Wu, E. and Yeh, J. C., "Identification of Impact Forces at Multiple Locations on Laminated Plates", AIAA Journal, Vol. 32, 1994, pp. 2433-2439.
17. Hearman, R. F. S., "The Frequency of Flexural Vibration of Rectangular Orthotropic Plates with Clamped or Supported Edges," Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, 1959, pp. 537-549.
18. Whitney, J. M., Structural Analysis of Laminated Anisotropic Plates, Lancaster, Technomic, 1987.
19. Craig, R. R. Jr., "Structural Dynamics", John Wiley and Sons, New York, 1981.
20. Kino, G. S., "Acoustic Waves: Devices,

Imaging and Analog Signal Processing", Eaglewood Cliffs, Prentice-Hall, 1987.

21. Atochem Sensors Inc., Technical Manual, 1991.

22. Engl, H. W., "On the Choice of Regularization Parameter for Iterated Tikhonov Regulariza-

tion of Ill-posed Problem", Journal of Approximation Theory, Vol. 49, 1987, pp. 55-63.

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