

# PZT 액추에이터와 PVDF센서를 이용한 외팔보의 손상 진단에 관한 연구

권대규<sup>#</sup>, 임숙정<sup>\*</sup>, 유기호<sup>\*\*</sup>, 이성철<sup>\*\*</sup>

## Study on the Damage Diagnosis of an Cantilever Beams using PZT Actuator and PVDF Sensor

Tae-Kyu Kwon<sup>#</sup>, Suk-Jeong Lim<sup>\*</sup>, Kee-Ho Yu<sup>\*\*</sup> and Seong-Cheol Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

This paper presents the study on damage diagnosis of an intelligent cantilevered beams using PZT actuator and PVDF sensor. This study provides the theoretical and experimental verification to examine structural damage. Time domain analysis for the non-destructive detection of damage is presented by parameterized partial differential equations and Galerkin approximation techniques. The time histories of the vibration response of structure were used to identify the presence of damage. Furthermore, this systematic approach permits one to use the piezomaterials to both excite and sense the vibration of structures. We also carried out the experimental verification about reliability of theoretical methods for detecting the damage of a composite beam with PZT actuator and PVDF sensor. Experimental results are presented from tests on cantilevered composite beams which is damaged at different location and different dimensions. The results were compared with the simulation results. Good agreement between the results was found for the time shifts and amplitude difference in transients response of the cantilevered beam.

**Key Words** : Structural damage(구조적 손상), Time domain(시간 영역), Cantilevered composite beams(외팔 복합재 보), Piezoelectric sensor(압전 센서), Damping coefficient(감쇠 계수)

### 1. 서론

구조물의 손상을 판별하는 방법은 기계공학, 우주항공, 구조공학 등의 분야에서 많은 연구자들의 관심을 받아왔다. 이러한 구조물에 발생한 손상은 고유진동수, 모드형상과 같은 구조물의 동특성에 영향을 미친다.<sup>1,4</sup> 이는 구조적 손상의 결과로써 국부적인 부재의 강성행렬의 감소가 나타나고, 강성

행렬의 감소는 고유진동수의 감소나 모드 형상의 변화를 초래한다. 따라서 손상 전후의 강성행렬의 차이가 구조물의 손상상태를 진단할 수 있으며, 구조물의 동특성을 추정하는 것은 손상의 위치 및 크기를 진단하고, 구조물의 손상도를 평가하는데 활용될 수 있다. 이러한 손상진단에 관한 연구는 대부분 모드해석을 기본으로 하여 위치와 크기를 검출한다.<sup>5-8</sup> 이에 대한 연구로써 Adams<sup>3</sup>와 Cawley<sup>4,5</sup>

<sup>1,4</sup> 2003년 1월 14일 접수, 게재승인일 : 2004년 2월 20일  
<sup>#</sup> 교신저자, 전북대학교 생체정보공학부  
Email kwon10@chonbuk.ac.kr Tel (063)270-4066  
<sup>\*</sup> 전북대학교 기계공학과 대학원  
<sup>\*\*</sup> 전북대학교 기계항공시스템공학부 교수

는 구조물의 손상상태를 파악하기 위하여 비파괴 방법으로 슬롯 손상에 대한 진동데이터의 적용에 대해서 고찰하였고, Stubbs<sup>6</sup>과 Osegueda<sup>7</sup> 그리고 Saunders<sup>8</sup> 등은 측정된 모달 데이터 즉, 감쇠율, 고유진동수, 모드형상으로부터 복합재 구조물의 손상 정도를 검출하였다. 그러나 모드 데이터에 기초한 구조물 손상진단은 간접적으로 측정된 모드 데이터의 측정 오차뿐만 아니라 모드 추출 시 오차가 포함되는 등의 단점이 있다.

최근 이러한 문제점을 개선하기 위해서 시간영역에서의 구조물 상태를 진단하는 방법<sup>9-10</sup>이 연구되고 있는데, Bank<sup>9</sup>등은 구조물 진단을 결정하는데 있어 공간적으로 다양한 물리적 매개변수의 시간영역 예측방법에 대해 연구하였고, Inman<sup>10</sup>등은 스마트 구조물을 이용하여 시간영역에서의 Beat method를 이용한 손상검출에 관한 연구를 수행하였다. 이 진단법은 신호계측이 용이하고 실시간이나 원거리에서도 구조물 상태의 모니터링이 가능하며, 매우 작은 주파수 변화도 감지할 수 있고, 또한 원하는 주파수 대역에서 많은 양의 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 시간영역 기법으로 기성 재료를 적용하여 전체적인 구조물의 손상 판별 기법에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 논문은 PVDF 센서와 PZT 액추에이터가 부착된 복합재 외팔보에서 PZT 액추에이터로 가지는 입력과 PVDF 센서로 계측되는 응답신호를 이용하여 손상위치에 따른 시간영역에서의 특성을 고려함으로써 손상위치 및 크기를 진단하는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 PVDF 필름특성

본 연구의 모델링에는 유리섬유가 강화된 열가소성 복합재 보에 감지기로써 PVDF, 작동기로써 PZT 세라믹을 사용하였다. PVDF 센서 및 PZT 액추에이터는 압전소자에 압력이나 힘을 가했을 때 압전소자 표면에 전압이 발생하며 또한 반대로 전압을 가했을 때 압전소자의 크기에 변형을 일으키는 압전효과(piezoelectric effect)를 가진 재료이고, 또한 압전소자 주위의 온도가 변할 경우, 이에 비례하는 압전소자 표면에 전압이 발생하는 초진효과(Pyroelectric effect)를 가지고 있다. 이러한 압전효과를 가진 소재로써 최근 개발된 것이 압전필름

(Piezo film 또는 PVDF)으로 여러 가지 장점을 지니고 있다.

압전재료의 구성방정식은 압전체의 압전효과를 정식화한 것으로 기계적 변위, 응력, 자기장 그리고 전기적 변위와 연성된 압전상수의 항으로 나타낼 수 있다. IEEE 표준 176-1987의 표기법<sup>11</sup>에 의하면 전기-기계적 관계는 식 (1)~(4)과 같이 두 쌍의 등가식으로 표현된다.

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (1)$$

$$D_i = D_{ikl} T_{kl} + \epsilon_{ik}^T E_k \quad (2)$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} + e_{kij} E_k \quad (3)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik}^s E_k \quad (4)$$

여기서,  $i, j, k, l$ 은 1, 2, 3( $x, y, z$ ),  $S_{ij}$ 는 변형률 텐서,  $T_{kl}$ 는 응력 텐서,  $s_{ijkl}^E$ 는 컴플라이언스 텐서,  $d_{kij}$ 와  $e_{ikl}$ 는 압전상수이며,  $E_k$ 는 전기장,  $D_i$ 는 전기적 변위,  $\epsilon_{ik}^T$ 는 유전율이다. 압전재료는 등방성으로 가정하고, 복합재 보를 균형을 받는 Bernoulli-Euler 외팔보로 가정하면 전기장과 전기적 변위로  $y$  방향으로 작용하고, 응력은  $x$  방향에서의 수직응력으로 제한되어 식 (1), (2)은 아래와 같이 단순화된다.

$$S_1 = \frac{1}{Y_p} T_1 + d_{31} E_3 \quad (5)$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_{33} E_3 \quad (6)$$

여기서,  $1/Y_p = s_{31}^E$ ,  $Y_p$ 는 PVDF의 Young's Modulus이다. 한편, PVDF의 순방향 압전효과에 의하여 감지식을 유도할 수 있다. 극화방향이  $z$ -축인 감지기에서는 변형률에 의하여 감지기에 발생하는 출력전하를 계산해야 한다. 여기서, 응력은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$T_1(x, y) = -\frac{y_c Y_p}{r} \quad (7)$$

여기서,  $r$ 은 곡률반경,  $y_c$ 는 보의 중립축으로부터 압전필름의 중립축까지 거리,  $Y_p$ 는 압전필름의

탄성계수이다. 따라서 변위가 매우 작다고 가정하면 곡률은 식 (8)과 같다.

$$\frac{1}{r} = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \quad (8)$$

식 (6)을 식 (7)에 대입하고 정리하면,

$$D_3(x, t) = d_{31} \frac{y_c Y_p}{r} \quad (9)$$

이 된다.

일반적으로 압전 재료식을 적용하고 식 (9)을 적분하여 정리하면 전하량에 관한 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} q(t) &= \int_A D_i n_i dA = \int_{x_1}^{x_2} Y_p y_c d_{31} b \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} dx \\ &= Y_p y_c d_{31} b [y'(x_2) - y'(x_1)] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $q(t)$  는 압전요소에 발생하는 전하량,  $b$  는 압전재료의 폭,  $n_i$  는 전극면적에 수직한 단위벡터,  $y'(x)$  는 정규화된 빔의 모드함수이다. 식 (10)을 이용하여 전압에 관한 식으로 유도하면 다음과 같다.

$$v_p(t) = \frac{q(t)}{C_p^*} = K_s [y'(t, x_2) - y'(t, x_1)] \quad (11)$$

여기서  $K_s = Y_p d_{31} b y_c / C_p^*$  이고,  $v_p(t)$  는 감지기 출력전압이고  $C_p^*$  는 감지기의 정전용량이다. 이와 같이 보의 굽힘각과 변형은 비례 관계에 있기 때문에 발생 전압은 변형에 비례하는 것이 가능하다.

다음으로 작동기에 관한 식에서 작동기가 구조물 일부에 부착될 때, 인가된 전압  $v_a(t)$  에 관한 보 전체의 전압분포  $V(x, t)$  는 식 (12)와 같다.

$$V(x, t) = [H(x-x_2) - H(x-x_1)]v_a(t) \quad (12)$$

여기서,  $H(\cdot)$  는 Heaviside 함수이다. 굽힘 중심축면 거리의 계산에서 구조물의 일부분에 부착된 압전체의 영향은 무시하였다. PZT 액추에이터는 Fig. 2에

서와 같이  $x=x_1$ 과  $x=x_2$ 의 위치에 부착되어 있으며 PZT에 인가되는 입력전압  $v_a(t)$  에 의해 발생하는 굽힘 모멘트는 식 (13)과 같다.

$$M(x, t) = \int_{t_a/2}^{t_s/2+t_a/2} \sigma_1 b z dz \quad (13)$$

여기서,  $t_a$  는 PZT 액추에이터의 두께,  $t_s$  보의 두께이다. 액추에이터에 의해서 발생하는 모멘트는  $u(t)$  와  $M(t, x)$  와의 사이에서 식 (14)와 같이 비례관계가 성립한다.

$$M(x, t) = K_a v_a(t) [H(x-x_1) - H(x-x_2)] \quad (14)$$

여기서,  $K_a = \frac{1}{2} b d_{31} Y_p (t_a + t_b)$  이다. 즉 식 (14)로부터  $M(t, x)$  가 보의 공간적 위치  $x$  에는 의존하지 않기 때문에 이후부터는  $M_p$  로 표기한다.

### 2.2 시스템 모델링

본 연구에 사용한 시스템은 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 [(90)2/0]s로 적층한 복합재 외팔보에 PVDF 센서와 PZT세라믹 액추에이터를 부착하였으며, 이에 대한 전체적인 개략도는 Fig. 1과 같다.

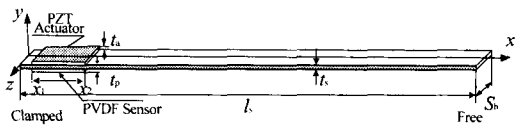


Fig. 1 Configuration of a cantilevered composite beam with piezo-film sensor and piezo-ceramic actuator

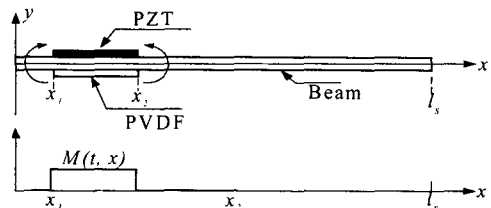


Fig. 2 Moment applied through PZT actuator

시스템에 사용된 보의 길이가  $l$  인 외팔보 ( $x=0$ 은 고정단,  $x=l$ 은 자유단)로 압전세라믹 (PZT)과 압전필름(PVDF)은 외팔보 양면  $x_1 < x < x_2$  부분에 부착되었고,  $\rho$ 는 밀도,  $E$ 는 Young's 계수,  $c_D$ 는 감쇠계수,  $A$ 는 단면적 그리고,  $I$ 는 단면적 관성모멘트이다. 급힘을 받는 Bernoulli-Euler 외팔보로 가정하면 횡방향 변위  $y = y(t, x)$ 는 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 M_p}{\partial x^2} \quad 0 < x < l \quad (15)$$

외팔보의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y(t, 0) = 0 \quad \frac{\partial y}{\partial x}(t, 0) = 0 \\ M(t, l) = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial x}(t, l) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Bernoulli-Euler와 Kelvin-Voigt 모델에서 내부 관성모멘트  $M_x$ 는 급힘 강성계수,  $EI$ 와 댐핑계수,  $c_D I$ 의 항으로 나타낼 수 있다.

$$M_x(t, x) = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(t, x) + c_D I \frac{\partial^3 y}{\partial x^2 \partial t}(t, x) \quad (17)$$

Kelvin-Voigt 감쇠 모델로 가정하고, 식 (15)에 액추에이터 입력 모멘트 식 (17)을 대입하면 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(t, x) + c_D I \frac{\partial^3 y}{\partial x^2 \partial t}(t, x) \right) \\ = K_a \{ \delta(x-x_2) - \delta(x-x_1) \} v(t) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,  $\delta$ 는 Dirac함수이고  $\delta' = \frac{\partial}{\partial x}$ 이며,  $K_a$ 는 압전 상수이다.

진동모드는 보의 전형적인 변형형태이며 임의의 변형도 진동모드의 선형합으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 모달해석 방법을 적용하면, 식 (18)의 해는 식 (19)과 같이 모달 함수의 곱으로 표현할 수 있다.

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \eta_i(t) \quad (19)$$

여기서,  $n$ 은 주요 작동 진동모드 수를 나타내며,  $\eta_i(t)$ 는 일반화된 모드좌표 (generalized modal coordinate)이고,  $\phi_i(x)$ 는 모드 함수이다. 모드 해석을 이용해서 구한 운동방정식에 유연 구조물 시스템에 존재하는 감쇠를 나타내기 위해 비례 감쇠항을 첨가하면 시스템의 운동방정식은 식 (20)과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\rho y_{tt} + D^2(EIy'' + c_D I y_i'') + \gamma y_t = K_a(H_2 - H_1)' v(t) \quad (20)$$

$y(x, t)$ 와  $\phi$ 를 식 (18)에 대입하면 식 (21)과 같이 표현할 수 있다. Galerkin 형태 계수 행렬은 식 (21)의 각 항목을 적분함으로써 유도된다.

$$[M^n] \ddot{w}(t) + [C^n] \dot{w}(t) + [K^n] w(t) = [F^n] u(t) \quad (21)$$

여기서, 각각 계수행렬  $[M^n]$ ,  $[C^n]$ ,  $[K^n]$ ,  $[F^n]$ 은

$$\begin{aligned} [M^n]_{i,j} &= \int_0^l \rho(x) \phi_i^n(x) \phi_j^n(x) dx, \\ [C^n]_{i,j} &= \int_0^l c_D I(x) \frac{d^2 \phi_i^n}{dx^2} \frac{d^2 \phi_j^n}{dx^2} dx + \int_0^l \gamma \phi_i^n(x) \phi_j^n(x) dx \\ [K^n]_{i,j} &= \int_0^l EI(x) \frac{d^2 \phi_i^n}{dx^2} \frac{d^2 \phi_j^n}{dx^2} dx \\ [F^n]_i &= K_a \int_0^l \frac{d^2 \phi_i^n}{dx^2} dx \end{aligned}$$

이다.

각각의 계수행렬은 식 (22)~식 (24)과 같이 손상과 PZT 액추에이터, PVDF 센서, 그리고 손상에 관한 항을 모두 포함하고 있으며 각각의  $EI$ ,  $c_D I$ ,  $\rho$  항은 손상 항을 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI(x) = E_s I_s + \{ E_p I_p + E_v I_v \} \chi_p(x) - E_s S(x) \chi_d(x) \quad (22)$$

$$c_D I(x) = c_{D_s} I_s + \{c_{D_p} I_p + c_{D_v} I_v\} \chi_p(x) - c_{D_s} S_f(x) \chi_d(x) \quad (23)$$

$$\rho(x) = \rho_s t_s w_s + \{\rho_p t_p w_p + \rho_v t_v w_v\} \chi_p(x) - \rho_s S_A(x) \chi_d(x) \quad (24)$$

여기서, 하첨자  $s$ 는 외팔보,  $p$ 는 압전세라믹,  $v$ 는 압전필름의 첨자를 나타낸다.  $\chi_p(x)$ 는 PZT/PVDF 부착위치,  $\chi_d(x)$ 는 손상 위치를 나타내는 특성함수이고  $S_A(x)$ ,  $S_f(x)$ 는 손상 형상함수로  $S_A(x)$ 는 손상에 의한 손실된 단면적을 나타내며,  $S_f(x)$ 는 손상을 포함한 외팔보의 관성모멘트를 나타낸다. 식(22)-식(24)에서 손상형상함수  $S_A(x)$ ,  $S_f(x)$ 는 식(25)과 같이 보의 모달함수와 형상 위치를 파악할 수 있는 항으로 구성된다.

$$S_A(x) = t_b S(x) = \sum_{i=1}^{M_A} \alpha_i \Phi_i(x), \quad 0 < x_{d_1} \leq x \leq x_{d_2} < l,$$

$$S_f(x) = \frac{1}{12} t_b^3 S(x) = \sum_{j=1}^{M_f} \beta_j \Psi_j(x), \quad 0 < x_{d_1} \leq x \leq x_{d_2} < l. \quad (25)$$

$$S(x) = 2\sqrt{(r^2 - (x - x_c)^2)} \quad (26)$$

여기서,  $r$ 은 원형손상의 반경,  $x_c$ 는 원형손상의 중심 위치이다. 본 논문에서는 형상 크기에 따른 손상정도를 검출하기 위해 식 (26)과 같이 형상함수  $S(x)$ 을 정의하고, 이 조건으로부터 손상정도를 파악한다.

### 2.3 정상 상태 방정식

식 (21)으로부터 시간영역안에서의 식 (27)과 같은 운동방정식 연성으로 인한 상사변환을 적용한다. 시스템의 운동방정식을 상태 공간 형태의 방정식으로 나타내면 다음과 같다

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \eta(t) + \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\xi_2 \omega_2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 2\xi_n \omega_n \end{bmatrix} \eta$$

$$+ \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix} \eta(t) = \phi^T F^n(t) \quad (27)$$

여기서, 상태변수를 다음과 같이 고려하자.

$$X(t) = [\eta_1 \dots \eta_n(t), \dot{\eta}_1 \dots \dot{\eta}_n(t)]^T \quad (28)$$

구조적 응답에 대한 정상 상태 동적 방정식은 식 (34)과 같이 한 개의 입력  $U(t)$ 로부터 생성되는 한 개의 출력  $y(t)$ 는 시스템 상태의 항목으로 표현된다.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t)$$

$$y(t) = CX(t) + DU(t) \quad (29)$$

여기서,  $X(t)$ 는 상태 벡터,  $U(t)$ 는 가진 입력 전압이고  $y(t)$ 는 센서 출력,  $C$ 는 PVDF 감지기로부터의 센서 전압이다. 식 (29)에서 상태 행렬  $A \in R^{2n \times 2n}$ ,  $B \in R^{2n \times 1}$ ,  $C \in R^{1 \times 2n}$ ,  $D \in R^{1 \times 1}$ 은 식 (30)과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \text{diag}[-\omega_n^2] & \text{diag}[-2\xi_n \omega_n] \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$B = [0 \quad I(x_p)]^T$$

$$C = [I(x_s) \quad 0]$$

$$D = [0]$$

## 3. 손상검출 실험

### 3.1 시편

시편은 길이 450 mm, 너비 15.4 mm, 두께 1 mm의 복합재 외팔보로 압전센서/액추에이터는 고정단 부분에서 보 전체길이의 5.56% 위치에 부착하였다. 액추에이터는 디지털 예코(주) 제품으로 40×10×0.4 mm이고, PVDF센서는 AMP(주) 제품으로 액추에이터와 동일한 크기를 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 재료의 물성치를 나타내고 있다.

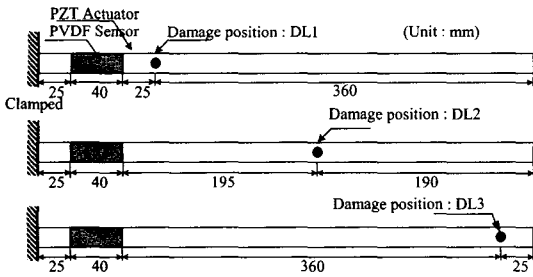


Fig. 3 Location and shape of the damage(mm)

Table 1 Properties of material

Properties	PVDF	PZT	Beam
$\rho(\text{kg/m}^3)$	1.78	7.75	1.57
$d_{31}(\text{pC/N})$	23.0	260.0	-
$g_{31}(10^{-3})(\text{Vm/N})$	21.6	-	-
$E_1(\text{GPa})$	2.0	63.0	130.0
$\nu_{12}$	-	0.34	0.31

손상은 피로(fatigue), 층리(delamination), 크랙(crack), 부식(corrosion)등에 의해서 발생할 수 있으며 그 형태는 다양하다. 그러나, 본 연구에서 구조물의 모든 손상 형태를 가공의 용이성에 따라 원형으로 하였으며 손상위치 DL1, DL2, DL3는 고정단으로부터 90 mm, 260 mm, 425 mm에 위치하고, 원형손상의 지름  $\phi 2$ ,  $\phi 3$ ,  $\phi 4$ ,  $\phi 5$ ,  $\phi 6$ 의 5가지의 원형손상 크기에 따라 손상 검출실험을 수행하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 시편의 손상위치와 형태를 보여주고 있다. 이러한 구조물의 결함 검출문제에서 시간응답을 이용하여 손상진단을 하는 방법은 구조물에 발생하는 손상이 구조물의 질량, 감쇠, 강성과 같은 특성을 변화시킨다는 것을 전제로 한다.

### 3.2 실험장치 및 방법

Fig. 4는 실험장치의 전체적인 개략도를 표시하고 있다. 실험은 PC상의 MATLAB / SIMULINK에서 발생된 Schroeder-phased(SP) 가진 신호를 dSPACE 1103 제어보드와 전압증폭기(PI Co. E-663)를 거쳐 PZT로 지능 외팔보를 5초 동안 가진시킨 후 PVDF센서로 과도응답 신호를 8초 동안 계측하였

다. 계측된 신호는 1 ms 간격의 샘플링으로 모니터링 하였다.

실험은 처음 지배적인 두 개의 진동모드를 연속으로 가진하여 수행하였다. 원하는 주파수 대역의 동일한 입력을 반복적으로 가하기 위해 SP 신호를 사용하여 다차모드 가진을 하였다. 각각의 신호는 PZT(압전세라믹)를 이용하여 5초동안 외팔보를 가진시켰다. 각기 신호의 주파수 범위는 외팔보의 특정모드를 가진시키기 위해서 선택되었다. 본 실험에서는 작은 주파수 변화를 신뢰성있게 측정해야 하기 때문에 손상구조물과 비손상 구조물의 입력값이나 고정단의 경계조건 등의 실험상태가 동일하게 유지되도록 하였다.

본 연구에서는 원하는 주파수 대역의 반복적인 입력을 주기 위해서 SP 신호를 채택하였다. Table 2는 실험에 사용된 SP 입력신호의주파수 대역을 나타내고 있다.

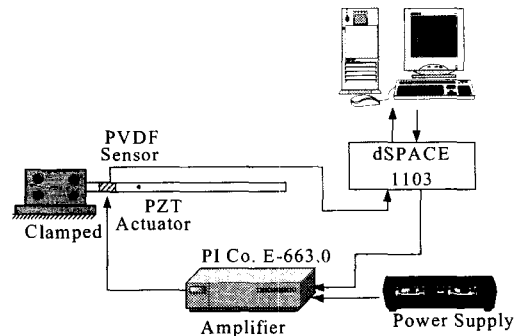


Fig. 4 Over-all experimental set-up

Table 2 Frequency contents of the Schroeder-phased(SP) signal input

Signal type	Frequency range(Hz)
SP 1	0 ~ 10
SP 2	25 ~ 35
SP 3	0 ~ 50

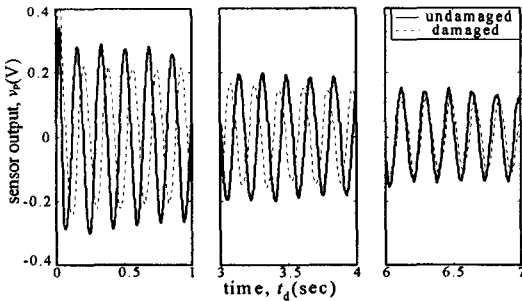
Table 2에서 SP1, SP2 신호는 각각 1차 및 2차 모드를 가진시키기 위한 주파수 범위이며, SP3 신

호는 1, 2차 모드를 모두 포함하는 주파수 범위이다. 실험은 동일한 조건에서 손상이 없는 경우와 서로 다른 5가지의 손상이 있는 경우에 대해서 SP1, SP2, SP3 신호로 가진시킨 후 8초 동안의 과도 응답 신호를 측정하였다.

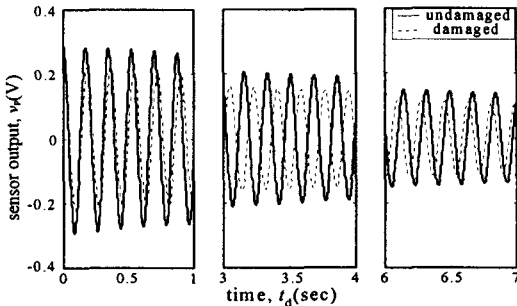
#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 손상크기에 따른 검출 결과

Fig. 5는 보의 1차 고유진동수 대역인 SP1 신호로 가진한 상태에서 비손상의 경우와, 구조물의 고정단으로부터 90 mm 떨어진 위치에 6 mm의 원형 손상이 있는 경우의 PVDF 센서 출력을 비교하고 있다. Fig. 5와 같이 PZT 액추에이터 가진 후의 과도 응답 신호에서 검출시간이 경과할수록 시간 쉬프트(shift)가 발생하고, 또 손상이 있을 경우 내부강성의 감소로 인한 외팔보의 진폭이 감소하는 경향을 보이고 있다.

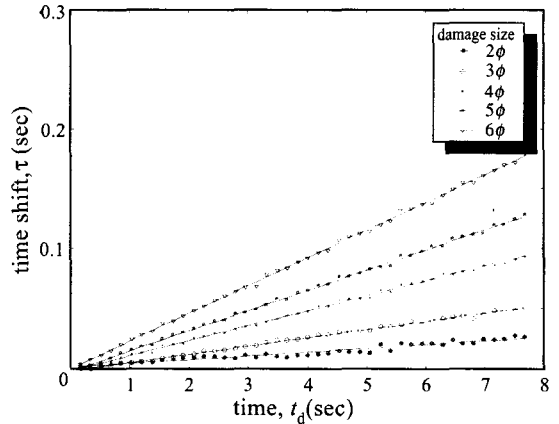


(a) Experimental results

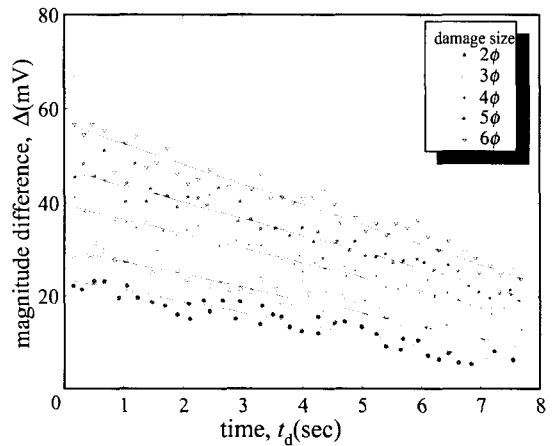


(b) Simulation results

Fig. 5 Transient response of undamaged and damaged beams(6 mm) to excitation SP1, location of damage DL 1



(a) Time shifts



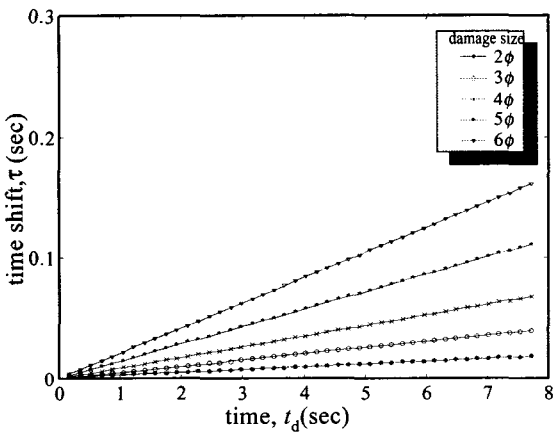
(b) Magnitude difference

Fig. 6 Experiment results of the damage detection test of a composite beam(1st bending mode)

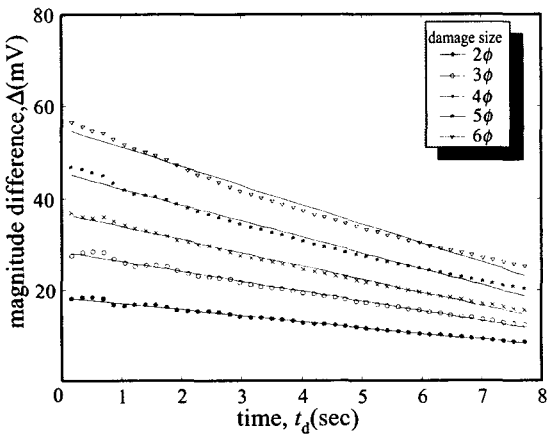
Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)와 동일한 조건에서의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과에서도 마찬가지로 시간 쉬프트가 발생하며 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있고 이론치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 복합재 외팔보를 SP1로 가진시켰을 경우 손상의 크기에 따른 8초동안 얻은 과도응답에서 시간 쉬프트와 진폭차의 변화정도를 1 차식  $Y = a_i X + b_i$ 로 근사한 실험 결과이다. 여기서, 횡축은 검출시간  $t_d$ (sec), 종축은 시간 쉬프트  $\tau$ (sec)이

며 이들 관계는 거의 선형적인 특성을 나타내고 있다. 또한 기울기  $\alpha_d$ 가 검출시간과 손상크기에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 6 (b)는 손상크기에 따른 진폭 차를 1차식으로 근사한 결과를 비교한 것이다. 검출시간이 경과함에 따라 진폭차가 음(-)의 기울기를 나타내는데, 이는 감쇠 초기에 큰 진폭차를 나타내고 시간이 경과함에 따라 진폭의 차가 점점 줄어든다는 것을 의미한다. 또한 손상크기가 증가할수록 질량 및 내부 국부강성의 감소로 진폭차가 점점 증가하고 진폭차의 기울기도 증가함을 알 수 있다.



(a) Time shifts



(b) Magnitude difference

Fig. 7 Simulation results of the damage detection test of a composite beam(1st bending mode)

Fig. 7은 복합재 외팔보를 SP1로 가진시켰을 경우, 손상의 크기에 따른 시간 쉬프트의 변화에 대한 시뮬레이션 값을 표시하고 있다. 시뮬레이션에서도 시간 쉬프트가 발생하며 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있고 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6~7에서 나타낸 검출시간에 대한 시간 쉬프트의 변화율인 기울기  $\alpha_d$ 를 손상 크기별로 나타내고 있다. 손상의 크기가 증가함에 따라 시간 쉬프트 변화율이 증가하고, 거의 선형적인 특성을 보여주고 있다. 따라서 이러한 특성 그래프를 이용하여 임의의 손상크기를 판별할 수 있다.

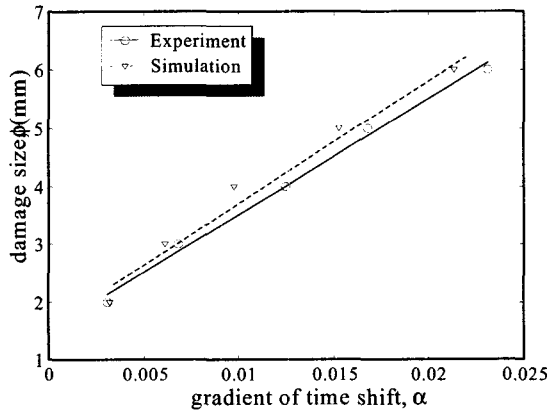
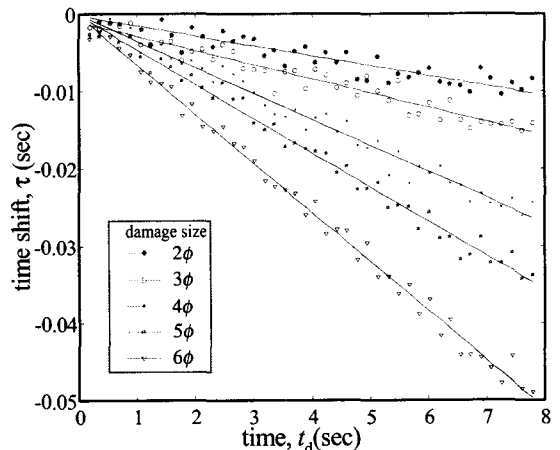
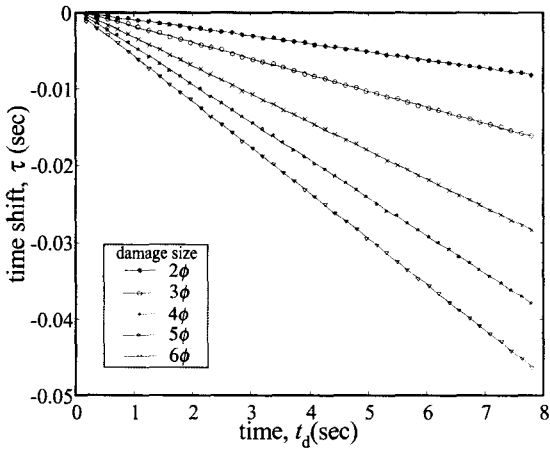


Fig. 8 Gradients of the time shifts on the damage size : location of damage DL 1



(a) Experimental results





(b) Simulation results

Fig. 9 Time shifts between the damage and undamaged of a composite beam : location of damage DL 3

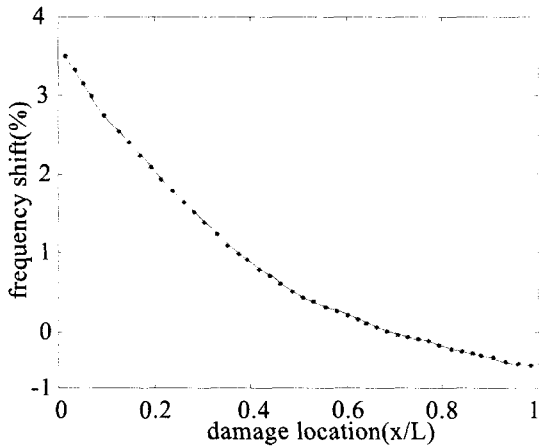


Fig. 10 Frequency reduction of the 1st mode for circle damage at  $x/l_s$  position (diameter of circle-type damage: 6 mm)

Fig. 9는 DL 3 손상위치에서의 결과로써 복합재 외팔보를 1차 고유진동수 대역인 SP1 신호를 PZT로 가진시킨 경우, 손상크기에 따른 시간 쉬프트 실험값과 시뮬레이션 결과이다. 기울기가 1차 모드에서와 같이 검출시간과 손상크기에 따라 일정한 경향으로 감소하고 있으며 손상크기에 따라 점점 더 큰 음의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이는 손상크기가 증가할수록 1차 고유진동수의 주파수가 증가하고 있음을 의미한다.

Fig. 10은 손상의 크기가 전체 복합재 보의 너비의 40%를 차지하고 있는 6 mm일 경우의 각 손상위치에 따른 주파수 저감을 보여주고 있다. 1차 굽힘 모드의 경우, 고유진동수가 손상위치가 고정단에서 가장 크게 감소하고 있고, 자유단으로 갈수록 음(-) 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 DL 3 손상위치에서와 같이 복합재 보의 끝단 방향으로 손상의 진행이 이루어짐으로써 비손상일 경우의 고유진동수보다 증가한다는 것을 의미하며, 이는 복합재 보 끝단에서 강성감소에 관하여 질량 감소에 따른 상대적인 강성값이 증가하기 때문이다.

### 5. 결론

본 연구는 PVDF센서/PZT액추에이터가 부착된 구조물을 이용하여 시간영역에서 진동정보를 얻고 복합재 보의 손상상태를 진단하는 실험적 연구를 수행하였다. 손상 크기가 증가함에 따라 1, 2차 모드에서 질량 및 국부강성의 감소로 시간 쉬프트와 진폭의 차가 모두 일정한 경향으로 증가하고 있음을 알 수 있었다. 1차 굽힘 모드에서 각각의 손상위치에서 복합재 외팔보 끝단으로 갈수록 주파수 감소율은 감소하고, 손상의 진폭차도 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같이 시간영역에서 강성, 감쇠, 그리고 질량 밀도와 같은 물리적인 동적 매개변수의 변화로부터 각 손상위치 및 크기와 같은 물리적인 변화를 판별하는데 본 연구의 접근방법이 용이하다는 것을 증명하였고, 손상보와 비손상보에 대한 과도응답의 시간 쉬프트 및 진폭차의 기울기를 검출함으로써 임의의 손상크기를 판별할 수 있는 정보로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

1. Lee, J. Y., Lee, J. W. and Lee, J. H., "Analysis of a Structural Damage Detection using the Change of Dynamic Characteristics," Proceedings of the KSPE Spring Annual Conference, pp. 760-763, 2003.
2. Cho, K. L. and Lee, U. S., "Experimental Verification of a Structure Damage Identification Method for Beam Structures," Proceedings of the KSPE Fall Annual Conference, pp. 837-840, 2001.

3. Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J. and Stone, B. J., "A vibrational technique for non-destructively assessing the integrity of structures," *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 20, pp. 93-100, 1978.
4. Cawley, P. and Adams, R. D., "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 14, pp. 49-57, 1979.
5. Cawley, P. and Ray, R., "A comparison of the natural frequency changes produced by cracks and slots," *ASME Journal Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 110, pp. 366-370, 1988.
6. Stubbs, N., "A general theory of non-destructive damage detection in structures," *Proceedings 2nd International Symposium on Structural Control*, Martinus Nijhoff, Dordrecht, Netherlands, pp. 694-713, 1987.
7. Stubbs, N. and Osegueda, R., "Global damage detection in solids-experimental verification," *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 5, pp. 13-23, 1990.
8. Saunders, D. R., Kim, Y. I. and Stubbs, N., "Non-destructive evaluation of damage in composite structures using modal parameters," *Experimental Mechanics*, Vol. 32, pp. 240-251, 1992.
9. Banks, H. T., Wang, Y., Inman, D. J. and Slater, J. C., "Approximation and parameter identification for damped second order systems with unbounded input operators," *Control: Theory and Advanced Technology*, Vol. 10, pp. 873-892, 1994.
10. Kwon, T. K., Lim, S. J., Pang, D. Y. and Lee, S. C., "Structural diagnosis in time domain on damage size," *Proceedings of the KSPE Spring Annual Conference*, pp. 259-262, 2002.
11. An American National Standard IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE Ultrasonics, Ferro-electrics, and Frequency Control Society. pp. 1-54, 1987.