

## 구조물의 손상크기에 따른 시간영역에서의 손상검출

권대규<sup>#</sup>, 유계형<sup>\*</sup>, 이성철<sup>\*\*</sup>

## Damage Detection in Time Domain on Structural Damage Size

Tae-Kyu Kwon<sup>#</sup>, Gye-Hyoung Yoo<sup>\*</sup> and Seong-Cheol Lee<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

A non-destructive time domain approach to examine structural damage using parameterized partial differential equations and Galerkin approximation techniques is presented. The time domain analysis for damage detection is independent of modal parameters and analytical models unlike frequency domain methods which generally rely on analytical models. The time history of the vibration response of the structure was used to identify the presence of damage. Damage in a structure causes changes in the physical coefficients of mass density, elastic modulus and damping coefficients. This is a part of our ongoing effort on the general problem of modeling and parameter estimation for internal damping mechanisms in a composite beam. Namely, in detecting damage through time-domain or frequency-domain data from smart sensors, the common damages are changed in modal properties such as natural frequencies, mode shapes, and mode shape curvature. This paper examines the use of beam-like structures with piezoceramic sensors and actuators to perform identification of those physical parameters, and detect the damage. Experimental results are presented from tests on cantilevered composite beams damaged at different locations and different dimensions. It is demonstrated that the method can sense the presence of damage and obtain the position of a damage.

**Key Words** : Structural damage(구조적 손상), Time domain(시간 영역), Cantilevered composite beams(의팔 복합재 보), Piezoceramic sensors(압전 센서), Damping coefficients(감쇠계수), Modal parameters(모달변수)

## 1. 서론

구조물의 손상을 판별하는 기법은 수십 년 동안 기계공학, 우주항공 및 토목·건축분야에서 각별한 관심을 받아왔다.<sup>1-3</sup> 이러한 분야의 구조물들은 사용 중에 여러 원인에 의해 구조적 손상을 받기 쉬운데, 과도한 처짐과 진동 등은 구조물의 피로를

가중시키는 주된 요인이 되어왔다. 특히, 구조물의 안전한 사용에 대한 관심의 증대로 인하여 구조물의 보수 및 유지관리의 중요성이 점차 강조되고 있다. 따라서 구조물의 동적 신호를 측정하고 이를 분석하여 이상 여부 및 손상 정도를 파악하는 기계·구조물의 손상 진단에 관한 연구는 구조물의 안전성을 확보하고 보수 및 보강에 대한 적절한 시기를

접수일: 2005년 6월 29일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

# 교신저자: 전북대학교 헬스케어기기과 교수

E-mail kwon10@chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-4066

\* (주) KCR

\*\* 전북대학교 기계공학과 교수

제공할 수 있다는 점에서 점차 그 중요성이 커지고 있다.

구조물의 손상 검출과 관련된 연구는 매우 오래 전부터 여러 공학분야에서 연구되어 왔으나 구조물의 동특성을 이용한 손상 판별 기법은 미비한 실정이다.<sup>4,7</sup> 그러나, 이러한 손상진단에 관한 연구는 대부분 모드 해석을 기본으로 하여 손상위치와 크기를 검출하였다. 그러나, Banks<sup>8,9</sup> 등에 의하면, 모드 데이터에 기초한 구조손상 검출기법은 몇 가지 결점이 있다고 보고되고 있다. 첫째, 모드 데이터는 간접적으로 측정된 실험 데이터이기 때문에 측정오차뿐만 아니라 모드 추출 시의 오차가 포함될 수 있다. 둘째, 실제 구조물의 모드 데이터를 얻기 위해서는 많은 양의 센서가 필요하기 때문에 완전한 모드 데이터를 얻기 어렵다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위하여 시간영역에서 구조물 상태를 진단하는 새로운 방법이 연구되고 있다.<sup>8-12</sup>

본 논문은 압전센서와 액츄에이터의 응답신호를 이용하여 손상을 감지하고, 물리적인 변수를 인식함으로써 구조적인 손상을 검출하는 방법에 대한 것이다. 손상의 크기 및 위치에 따른 손상된 보와 손상되지 않은 보의 과도응답을 비교하여 시간 천이(shift)와 진폭 변화에 따른 특성을 고찰함으로써 구조물에 발생된 손상을 검출하는 연구를 수행하였다. 또한, 손상의 위치와 크기를 검출하기 위해 원형 손상을 갖는 지능형 복합재 외팔보의 고유진동수 감소를 고찰하였다.

## 2. 시스템 모델링

본 연구에 사용된 시편은 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 [(90)2/0]<sub>s</sub>로 적층한 복합재 외팔보이다. 보의 과도응답 신호를 검출하고, 보에 가진신호를 입력하기 위해 PVDF 센서와 PZT 세라믹 액츄에이터가 부착된 형태로, 이에 대한 전체적인 개략도는 Fig. 1과 같다.

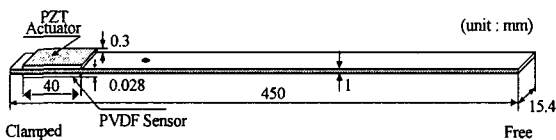


Fig. 1 Configuration of a composite beam

보를 Bernoulli-Euler 보로 가정하면, 손상 크기에 관한 항을 포함하는 외팔보의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M^M]_{i,j}\ddot{w}(t) + [C^M]_{i,j}\dot{w}(t) + [K^M]_{i,j}w(t) = [F^M]_{i,j}v(t) \quad (1)$$

여기서 계수행렬  $[M^M]_{i,j}$ ,  $[C^M]_{i,j}$ ,  $[K^M]_{i,j}$ ,  $[F^M]_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$[M^M]_{i,j} = \int_0^l \rho(x)\phi_i^N(x)\phi_j^N(x)dx, \quad (2)$$

$$[C^M]_{i,j} = \int_0^l c_D I(x) \frac{d^2\phi_i^N}{dx^2} \frac{d^2\phi_j^N}{dx^2} dx + \int_0^l \gamma\phi_i^N(x)\phi_j^N(x)dx, \quad (3)$$

$$[K^M]_{i,j} = \int_0^l EI(x) \frac{d^2\phi_i^N}{dx^2} \frac{d^2\phi_j^N}{dx^2} dx, \quad (4)$$

$$[F^M]_{i,j} = -2\kappa_B \int_0^l EI(x) \frac{d^2\phi_i^N}{dx^2} dx. \quad (5)$$

식 (2)~(5)에서  $\rho$ 는 밀도,  $c_D$ 는 감쇠계수,  $E$ 는 보의 유효 탄성계수,  $I$ 는 관성모멘트, 아래첨자  $i, j$ 는 모드 수,  $\gamma$ 는 점성감쇠계수, 그리고  $\phi_i$ 는 모드함수이다. 각각의 계수행렬은 식(6)과 같이 PVDF와 PZT에 관한 항과 손상 항을 포함하고 있다.

$$\begin{aligned} \rho(x) &= \rho_b t_b w_b + (\rho_p t_p w_p + \rho_v t_v w_v) \chi_p(x) - \rho_b S_A(x) \chi_d(x) \\ c_D I(x) &= \frac{1}{12} t_b^3 w_b c_{D_b} + \frac{1}{3} (a w_p c_{D_p} + b w_v c_{D_v}) \chi_p(x) - E_b S_f(x) \chi_d(x) \\ EI(x) &= \frac{1}{12} t_b^3 w_b E_b + \frac{1}{3} (a w_p E_p + b w_v E_v) \chi_p(x) - E_b S_f(x) \chi_d(x) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 아래첨자  $d, p, b, v$ 는 각각 손상, 압전 액츄에이터, 외팔보, 압전필름 항을 표시하고 있다. 식

(6)에서 손상 형상함수  $S_A(x), S_I(x)$  는 식 (7)~(8)과 같이 보의 모드함수와 형상 위치를 파악할 수 있는 항으로 구성된다.

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

$$S_I(x) = \sum_{j=1}^{M_I} \beta_j \Psi_j(x), \quad 0 < x_{d_1} \leq x \leq x_{d_2} < l. \quad (7)$$

본 논문에서는 형상 크기에 따른 손상정도를 검출하기 위해 식 (8)과 같이 형상함수  $S(x)$  를 정의하고, 식 (8)로부터 손상정도를 파악한다.

$$S(x) = 2\sqrt{(r^2 - (x - x_c)^2)} \quad (8)$$

여기서,  $r$  은 원형손상의 반경,  $x_c$  는 원형손상 중심의 위치이다. 방정식 안에서의 2는 대칭성질에 기인하고, 이 경우 형상함수는  $S_A(x), S_I(x)$  은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_A(x) = t_b S(x),$$

$$S_I(x) = \frac{1}{12} t_b^3 S(x). \quad (9)$$

식(1)로부터 시간영역 안에서 식(10)과 같은 운동방정식 연성으로 인한 상사변환을 적용한다. 시스템의 운동방정식을 상태 공간 형태의 방정식으로 나타내면 다음과 같다

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \ddot{\eta}(t) + \begin{bmatrix} 2\zeta_1 \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\zeta_2 \omega_2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 2\zeta_n \omega_n \end{bmatrix} \dot{\eta} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix} \eta(t) = \phi^T F^m(t) \quad (10)$$

여기서, 상태변수를 다음과 같이 고려하자.

$$X(t) = [\eta_1 \dots \eta_n(t), \dot{\eta}_1 \dots \dot{\eta}_n(t)]^T \quad (11)$$

구조적 응답에 대한 정상 상태 동적 방정식은 식(12)과 같이 한 개의 입력  $U(t)$  로부터 생성되는

한 개의 출력  $y(t)$  는 시스템 상태의 항목으로 표현된다.

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

$$y(t) = CX(t) + DU(t) \quad (12)$$

여기서,  $X(t)$  는 상태 벡터,  $U(t)$  는 가진 입력 전압이고  $y(t)$  는 센서 출력,  $C$  는 PVDF 감지기로부터의 센서 전압이다. 식(12)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 (13)과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \text{diag}[-\omega_n^2] & \text{diag}[-2\zeta_n \omega_n] \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \quad \Gamma(x_j)]$$

$$C = [\Gamma(x_i) \quad 0]$$

$$D = [0] \quad (13)$$

### 3. 손상검출 실험

#### 3.1 시편

시편은 길이, 너비, 두께가 각각 450 mm, 15.4 mm, 1 mm의 복합재 외팔보로 압전센서와 액추에이터는 고정단에서 보 전체 길이의 5.56% 위치에 부착하였다. 액추에이터는 디지털에코(사) 제품으로 40×10×0.5 mm이고, PVDF센서는 AMP(사) 제품으로 액추에이터와 동일한 크기를 사용하였다. Table 1은 실험에 사용한 압전센서와 액추에이터 및 복합재 보의 물성치를 표시하고 있다.

손상은 피로(fatigue), 박리(delamination), 균열(crack), 부식(corrosion)등에 의해서 발생될 수 있으며 그 형태는 다양하다. 본 연구에서 손상의 형태는 가공이 용이한 원형 손상을 이용하였고, 손상의 크기는 직경이  $\phi 2$  mm,  $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 6$  mm인 5가지의 경우에 대해 손상 검출 실험을 수행하였다. 또한 손상의 위치 DL1, DL2, DL3는 각각 고정단으로부터 90 mm, 260 mm, 425 mm에 위치하도록 하였다. Fig. 2은 실험에 사용된 시편의 손상 위치와 형상을 보여주고 있다.

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

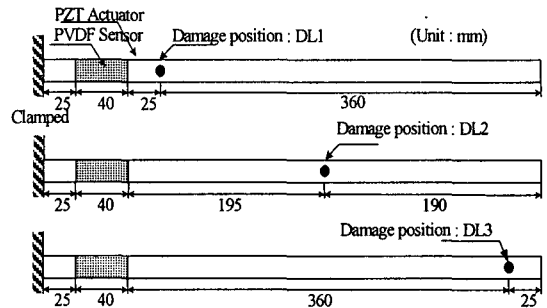


Fig. 2 Location and shape of the damage(mm)

### 3.2 실험장치 및 방법

Fig. 3는 실험장치의 전체적인 개략도로 고정단 경계조건을 부여하기 위하여 시편의 한쪽 끝을 고정 기구로 고정하였고, 시편 자체만의 감쇠와 고유진동수 등을 측정하기 위해 고정 기구를 방진고무 위에 고정시키고 시편과 고정구 사이의 마찰이 없도록 하였다. PC상의 MATLAB / SIMULINK에서 발생된 Schroeder-phased(SP) 가진신호를 dSPACE(사) 1103제어보드와 전압 증폭기(PI E-663)를 거쳐 PZT로 복합재 보를 5초 동안 가진시킨 후, PVDF센서로부터 과도응답 신호를 8초 동안 계측하였다. 계측된 신호는 1ms 간격으로 샘플링을 하였다. 센서 출력신호는 입력 임피던스가 높기 때문에 버퍼 역할을 할 수 있는 Voltage-follower를 통과시켰다.

실험은 처음 지배적인 두 개의 진동모드를 연속으로 가진하여 수행하였는데, 원하는 주파수 대역의 동일한 입력을 반복적으로 가하기 위해 SP 신호를 사용하여 다차모드 가진을 하였다. 본 실험에서는 작은 주파수 변화도 신뢰성 있게 측정되어야 하므로 손상 및 비손상 구조물의 입력값이나 고정단의 경계조건 등의 실험상태가 동일하게 유지되도록 하였다.

일반적으로 다차 모드로 가진시키기 위해서는 충격해머(impact hammer)나 랜덤 가진력(random force)을 이용한다. 그러나 이러한 방법들은 입력의 재현성이 없으므로 본 연구에서는 원하는 고유진동수 범위의 반복적인 입력을 주기 위해 SP 신호를 채택하였다. Table 2는 실험에 사용된 SP 입력신호 주파수 대역을 나타내고 있다.

Table 2에서 SP1, 2는 1차 및 2차 모드를 가진시

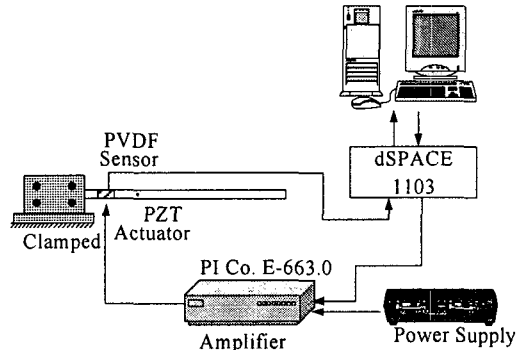


Fig. 3 Overall experimental set-up

Table 2 Frequency content of the Schroeder-phased signal input

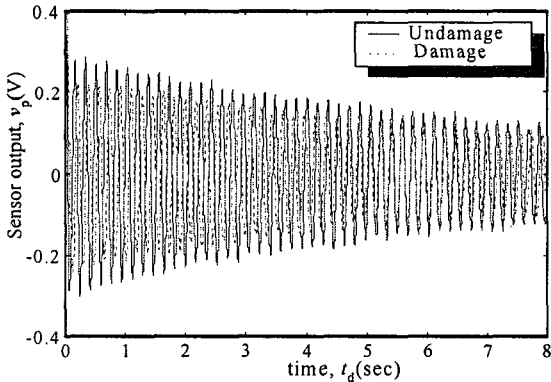
Signal Type	Frequency Range(Hz)
SP 1	0 ~ 10
SP 2	25 ~ 35
SP 3	0 ~ 50

키기 위한 주파수 범위이고, SP3은 1, 2차 모드를 모두 포함하는 주파수 범위이다. 실험은 동일한 조건에서 손상이 없는 경우와 서로 다른 5가지의 손상이 있는 경우에 대해서 SP 1, 2, 3 신호로 초기 5초 동안 50V의 크기로 Table 2와 같은 3가지 형태의 SP 신호를 PZT에 인가시킨 후 8초 동안 과도응답을 계측하여 비손상 경우와 손상이 있는 경우에 대해 각각의 크기별로 비교 분석하였다.

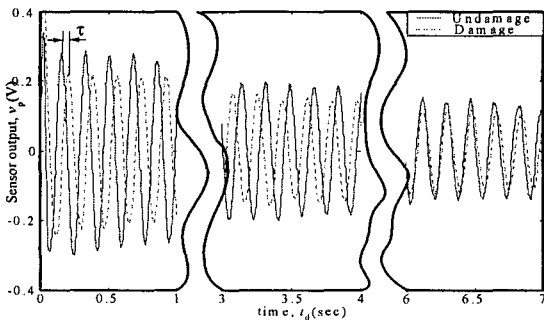
#### 4. 결과 및 고찰

본 연구는 구조물의 상태를 결정하기 위해 시간 영역에서의 주파수 계측방법을 사용하였다. 이를 이용하여 손상이 없는 경우와 서로 다른 세 위치 DL1, DL2, DL3에 각각 다섯 종류의 원형 손상이 존재할 경우의 구조적 손상에 대한 검출 방법에 관한 연구를 수행하였다. 실험은 외팔보의 지배적인 첫 번째와 두 번째 진동모드에 대하여 수행되었으며 비손상 경우와 서로 다른 손상 크기에 따른 결과를 비교하였다. 실험과 시뮬레이션 모두 샘플링 간격은 0.001초이다.

Fig. 4는 보의 1차 고유진동수 대역을 포함하고 있는 SP 1 신호로 가진한 상태에서 비손상의 경우와 구조물의 고정단에서 90 mm 떨어진 위치에 지

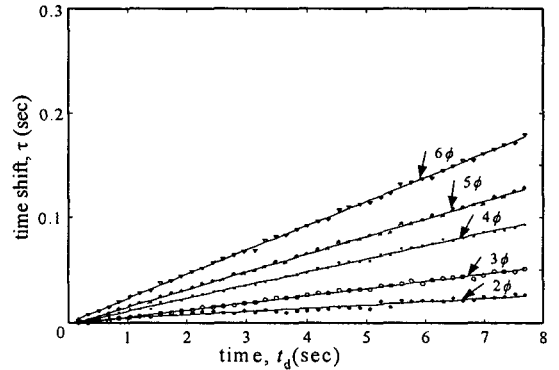


(a) Total response of tra

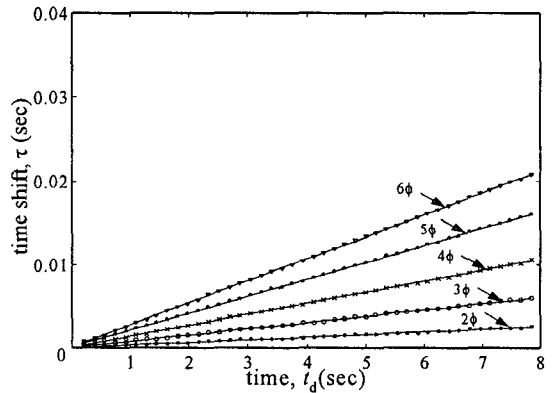


(b) Selected response

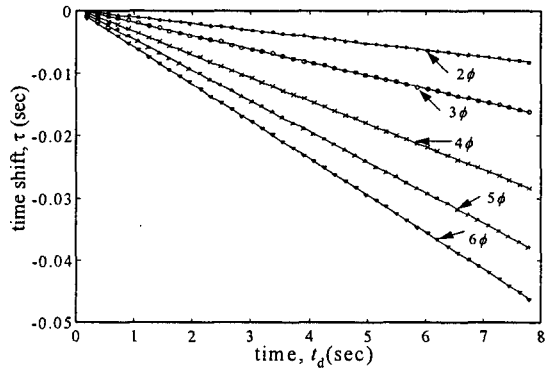
Fig. 4 Response of an undamaged and damaged beam to excitation signal SP 1



(a) Location of damage DL 1

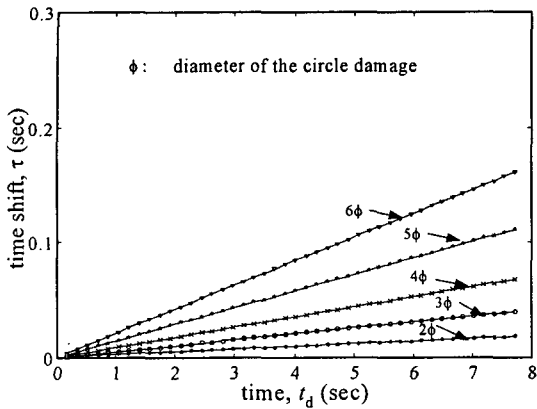


(b) Location of damage DL 2

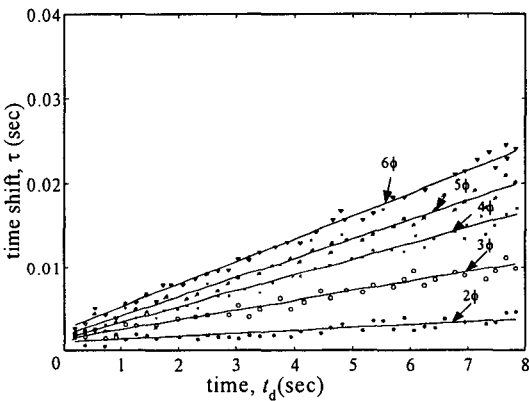


(c) location of damage DL 3

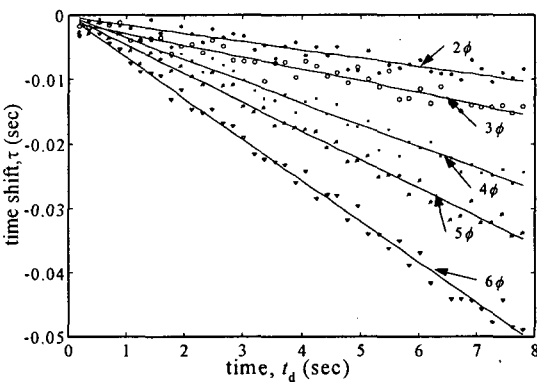
Fig. 5 Simulation results of time shifts between the damage and undamage of a composite beams(1st bending mode)



(a) Location of damage DL 1



(b) Location of damage DL 2



(c) location of damage DL 3

Fig. 6 Experimental results of time shifts between the damage and undamage of a composite beams(1st bending mode)

름이 6 mm인 원형 손상을 갖는 경우의 PVDF센서 출력을 비교한 것이다. 이 그림에서와 같이 0-10 Hz 대역의 Schroeder-phased(SP) 가진신호를 인가하였을 때, 1차 공진 모드인 5.70 Hz에서 공진이 되어 5 초 후의 과도응답에서는 1차 공진 모드의 과도응답만이 나타나고 있다. PZT 가진 후의 과도응답 신호에서 검출시간이 경과할수록 시간 쉬프트  $\tau$ 가 발생하고, 손상이 있을 경우, 내부강성의 감소로 인해 외팔보의 진폭이 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 비손상의 경우와 서로 다른 5가지의 손상이 있을 때, SP 1 신호로 가진시킨 후 각각의 DL1, DL2, DL3의 위치별로 시간영역에서의 시간 쉬프트를 비교한 시뮬레이션 결과이다. 이 결과 데이터는 비손상의 경우에 대한 손상크기에 따른 시간 쉬프트의 값을 1차식  $Y = a_i X + b_i$ 로 근사하여 비교한 것이다. 여기서, 횡축은 검출시간  $t_d$ (sec), 종축은 시간 천이  $\tau$ (sec)이며 이들 관계는 거의 선형적인 특성을 나타내고 있다. 또한, 기울기  $a_i$ 가 검출시간과 손상크기에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있다.

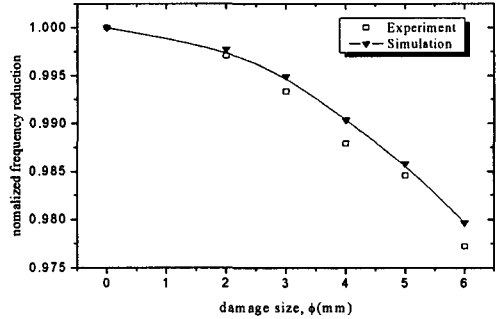
Fig. 6에서 검출시간에 대한 시간 쉬프트의 기울기는 실험에서도 같은 경향을 나타내고 있으며, 기울기도 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 전체 복합재 보의 너비의 40%를 차지하고 있는 원형 손상의 지름이 6mm일 경우의 각 모드에서 손상 위치에 따른 주파수 감소를 나타내고 있다. 1차 굽힘 모드의 경우, 손상위치가 고정단에서 가장 큰 주파수 감소를 보이고 있고, 자유단으로 갈수록 주파수 감소가 음(-) 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 DL3 손상위치에서와 같이 복합재 보의 끝단 방향으로 손상의 진행이 이루어짐으로써 비손상일 경우의 주파수보다 증가한다는 것을 의미하며, 이는 복합재 보 끝단에서 강성감소에 관하여 질량 감소에 따른 상대적인 강성값이 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 Fig. 5(a), Fig. 6(a)에서 나타난 검출시간에 대한 시간 쉬프트의 변화율인 기울기를 손상 크기별로 나타낸 것이다. 시간 변화율이 증가함에 따라 원형 손상의 지름 크기가 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 따라서 이러한 특성 그래프를 이용하여 손상의 위치를 안다면 그 위치에서 원형의 손상 크기를 판별해 낼 수 있다.

Fig. 9는 DL1의 손상 위치에서 복합재 보의 손상 크기에 따른 정규화된 고유진동수를 표시하고 있다. 즉 손상 위치 DL1에서 복합재 보의 과도응답

에 의해 일어나는 1차 모드의 고유진동수와 2차 모드의 고유진동수의 손상 크기에 대한 고유진동수의 저감을 손상이 없을 경우의 각각 모드의 고유진동수로 정규화하여 표시하고 있다. 손상위치 DL1에서 원형 손상의 지름 크기가 커질수록 점차적으로 고유진동수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고, 고유진동수 저감은 2차 모드에 비해서 1차 모드에서 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 10은 DL3의 손상위치에서 복합재 보의 손상 크기에 따른 정규화된 고유진동수를 표시하고 있다. 손상위치 DL3에서 원형 손상의 지름 크기가 커질수록 DL1의 위치의 경향과는 반대로 점차적으로 고유진동수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 복합재 보 끝단에서 강성 감소로 인하여 질량 감소에 따른 상대적인 강성값이 증가하기 때문이다.



(a) 1st mode domain, location of damage DL 1

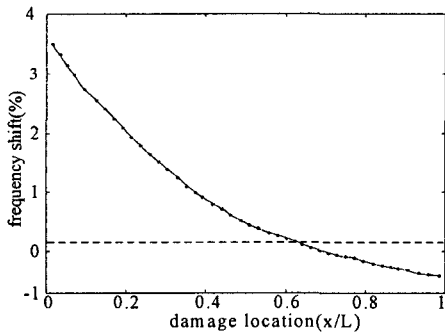
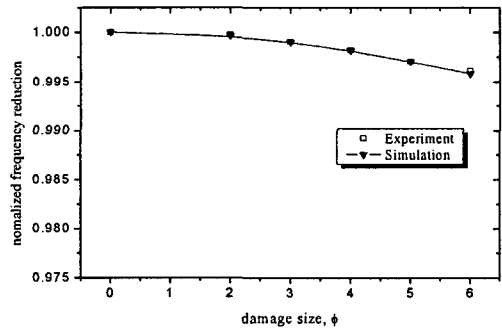


Fig. 7 Frequency reduction of the 1st mode for circle damage at  $x/l$  position (damage size : 6 mm)



(b) 2nd mode domain, location of damage DL 1

Fig. 9 Normalized natural frequencies on the damage size of a composite beam

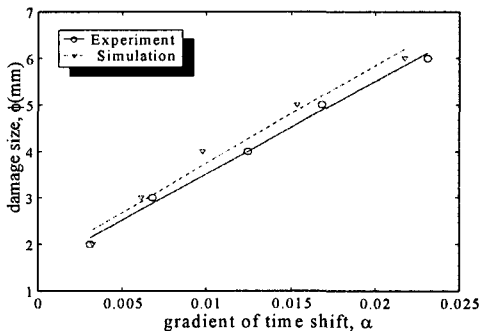
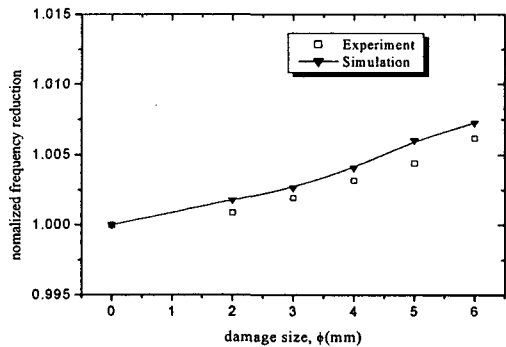
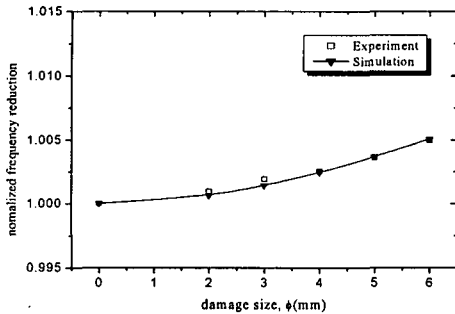


Fig. 8 Gradients of the time shift on the damage size : 1st bending mode, location of damage DL 1



(a) 1st mode domain, location of damage DL 3



(b) 2nd mode domain, location of damage DL 3

Fig. 10 Normalized natural frequencies on the damage size of a composite beam.

또한, 실험 값과 시뮬레이션 값이 잘 일치하고 있어서, 이론해석의 신뢰성을 얻었고, 손상크기에 따른 고유진동수의 저감을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 PVDF 센서와 PZT 액추에이터가 부착된 원형의 손상이 존재하는 구조물을 이용하여 시간영역에서 진동정보를 얻고 복합재 보의 손상상태를 진단하였다. 과도진동 상태에서 비손상의 경우와 원형 손상이 존재하는 경우의 시간 쉬프트 정도의 변화량을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 각각의 손상크기가 증가함에 따라 시간 쉬프트의 기울기는 증가하는 것을 알 수 있었고, 이러한 시간 쉬프트의 기울기를 검출함으로써 원형의 손상크기를 판별 할 수 있는 정보로 활용 할 수 있다.

2. 손상의 크기가 증가함으로써 손상의 위치가 고정단 부근인 DL1의 위치에서 1, 2차 고유진동수는 감소한다. 그러나, 복합재 보의 끝단 부근인 DL3에 손상이 발생하였을 경우 손상크기가 증가함에 따라 1, 2차 고유진동수가 증가하였다. 이는 복합재 보 끝단에서 강성 감소에 관하여 질량 감소에 따른 상대적인 강성값이 증가하기 때문이다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부 주관, 핵심기술개발사업의 지원으로 이루어진 것임.

## 참고문헌

- Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J. and Stone, B. J., "A Vibrational Technique for Non-destructive ly Assessing the Integrity of Structures," *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 20, pp. 93-100, 1978.
- Bawley, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Doebbling, S. W., "Minimum-Rank Optimal Update of Elemental Stiffness Parameters for Structural Damage Identification," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 12, pp. 2615-2621, 1996.
- Schulz, M. J., Thyangrajan, S. K. and Slater, J. C., "Inverse Dynamic Design Technique for Model Correction and Optimization," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 8, pp. 1486-1491, 1995.
- 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.



9. Banks, H. T., Wang, Y., Inman, D. J. and Slater, J. C., "Variable Coefficient Distributed Parameters System Models for Structures with Piezoceramic Actuators and Sensors," Proceedings of the 31st IEEE Conference, Vol. 2, pp. 1803-1808, 1992.
10. Kwon, T. K., Lim, S. J., Yu, K. H. and Lee, S. C., "Fault Detection of an Intelligent Cantilever Beam with Piezoelectric Materials," Int. Conf. on Control, Automation and Systems, pp. 1800-1805, 2002.
11. 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.
12. 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.