

손상크기에 따른 시간영역에서의 구조물 진단

권대규*(전북대 연구원), 임숙정**, 방두열**(전북대 원), 이성철*** (전북대, 공업기술연구센터)

Structural Diagnosis in Time Domain on Damage Size

Tae-Kyu Kwon*(Chonbuk U.), Suk-Jeong Lim**, Du-Yeol Pang**(Graduate School, Chonbuk U.),
and Seong-Cheol Lee*** (Chonbuk U. RIIT)

ABSTRACT

This paper provides the experimental verification of a non-destructive time domain approach to examine structural damage. Time histories of the vibration response of structure were used to identify the presence of damage. Damage in a structure cause changes in the physical coefficients of mass density, elastic modulus and damping coefficient. This paper examines the use of beam like structures with PVDF sensor and PZT actuator to perform identification of those physical parameters, and hence to detect the damage. Experimental results are presented from tests on cantilevered composite beams damaged at different location and with damage of different dimensions. It is demonstrated that the method can sense the presence of damage, and characterize the damage to a satisfactory precision.

Key Words : Structure damage(구조물 손상), Time domain(시간 영역), Cantilevered composite beam(복합재 외팔보), Piezoceramic(압전 세라믹), Damping coefficient(감쇠 계수), Damage size(손상 크기)

1. 서 론

바람의 하중이나 지진을 받는 구조물, 열차, 항공기, 동하중을 받는 각종 플랜트 등과 같은 기계는 피로 및 과도진동으로 손상이 발생한다. 이러한 구조물의 손상을 판별하는 방법은 기계공학, 우주항공, 구조공학 등의 분야에서 많은 연구자들의 관심을 받아왔다.^[1] 구조물에 발생한 손상은 고유진동수, 모드형상과 같은 구조물의 동특성에 영향을 미친다.^[1,2] 그러므로 구조물의 동특성 변화는 구조물에 발생한 손상의 위치 및 크기를 진단하는데 활용될 수 있다. 이러한 손상진단에 관한 연구는 대부분 모드해석을 기본으로 하여 위치와 크기를 검출한다. 그러나 모드 데이터에 기초한 구조물 손상진단은 간접적으로 측정된 모드 데이터의 측정 오차뿐만 아니라 모드 추출 시 오차가 발생하는 등의 단점이 있다.

최근 이러한 문제점을 개선하기 위해서 시간영역에서의 구조물 상태를 진단하는 방법이 연구되고 있다.^[3-5] 이 진단법은 신호계측이 용이하고 실시간이나 원거리에서도 구조물 상태의 모니터링이 가능하며, 매우 작은 주파수 변화도 감지할 수 있고, 또한 원하는 주파수대역에서 많은 양의 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 논문은 PVDF 센서와 PZT 액츄에이터가 부착된 복합재 외팔보를 이용하여 PZT로 가진하는 입력과 PVDF로 계측되는 응답신호를 이용하여 손상에 따른 동특성을 고려함으로 그 손상을 진단하는 실험적 연구를 수행하였다.

2. 시스템 모델링

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

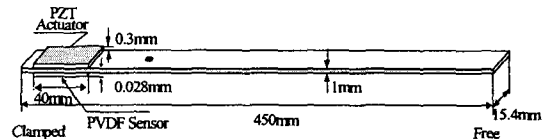


Fig. 1 Configuration of a composite beam

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

$$M^N \ddot{w}(t) + C^N \dot{w}(t) + K^N w(t) = F^N v(t) \quad (1)$$

여기서, 계수행렬 $[M^N]$, $[C^N]$, $[K^N]$, $[F^N]$ 는 다음과 같다.

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

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

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

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

식(2)~(5)에서 ρ 는 밀도, c_D 는 감쇠계수, E 는 보의 유효 탄성계수, I 는 관성모멘트, 아래첨자 i, j 는 모드 수, ϕ 는 모달함수이며, 각각의 계수행렬은 식(6)과 같이 손상과 PVDF와 PZT에 관한 항을 포함하고 있다.

$$\rho(x) = \rho_b t_b w_b + (\rho_p t_p w_p + \rho_v t_v w_v) \chi_p(x) - \rho_b S_a(x) \chi_d(x)$$

$$c_D I(x) = \frac{1}{12} t_b^3 w_b c_{Db} + \frac{1}{3} (a w_p c_{Dp} + b w_v c_{Dv}) \chi_p(x) - E_b S_f(x) \chi_d(x)$$

$$EI(x) = \frac{1}{12} t_b^3 w_b E_b + \frac{1}{3} (a w_p E_p + b w_v E_v) \chi_p(x) - E_b S_f(x) \chi_d(x) \quad (6)$$

식(6)에서 손상형상함수 $S_A(x)$, $S_f(x)$ 는 식(7)~(8)과 같이 보의 모달함수와 형상 위치를 파악할 수 있는 항으로 구성된다.

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

$$S_f(x) = \frac{1}{12} t_b^3 S(x) = \sum_{j=1}^{M_f} \beta_j \Psi_j(x), \quad 0 < x_{d_1} \leq x \leq x_{d_2} < l. \quad (7)$$

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

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

3. 손상검출 실험

3.1 시편

시편은 길이 450mm, 너비 15.4 mm, 두께 1mm의 복합재 외팔보로 압전센서/액츄에이터는 고정단 부분에서 보 전체길이의 8% 위치에 부착하였다. 액츄에이터는 독일 디지털에코(주)사제품으로 40 × 10 × 0.4(mm)이고, PVDF센서는 AMP사 제품으로 액츄에이터와 동일한 크기를 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 재료의 물성치를 나타내고 있다. 손상 형상

은 가공의 용이성에 따라 원형으로 하였으며 고정단으로부터 65mm에 위치하고, 2φ, 3φ, 4φ, 5φ, 6φ의 5가지의 손상 크기를 갖게 했다. Fig.2는 실험에 사용된 시편의 손상위치와 형상을 보여주고 있다.

Table 1. Properties of material

Properties	PVDF	PZT	Beam
ρ (kg/m ³)	1.78	7.75	1.57
d_{31} (pC/N)	23.0	260.0	-
g_{31} (10 ⁻³)(Vm/N)	21.6	-	-
E_t (GPa)	2.0	63.0	130.0
ν_{12}	-	0.34	0.31

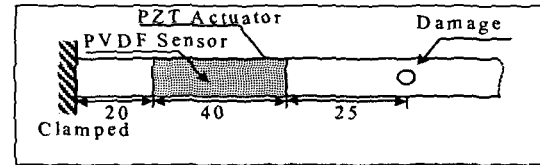


Fig. 2 Location and shape of damage(mm)

3.2 실험장치 및 방법

시간응답을 이용하는 구조물 진단은 손상이 구조물의 질량, 감쇠, 강성과 같은 동특성을 변화시킨다는 것을 전제로 한다. 본 실험에서는 작은 주파수 변화도 신뢰성 있게 측정되어야 하기 때문에 손상 및 비손상 구조물의 입력값이나 고정단의 경계조건 등의 실험상태가 동일하게 유지되도록 하였다.

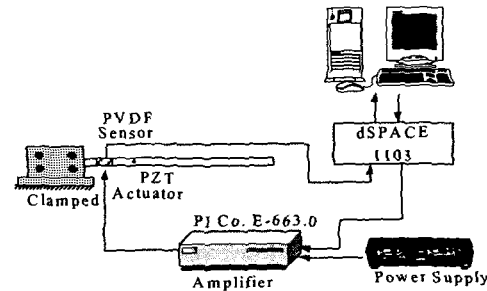


Fig 3 Overall experimental set-up

Fig.3은 실험장치의 전체적인 개략도로 시편의 한쪽 단은 기구로 고정하였고, 시편 자체만의 감쇠와 고유진동수 등을 측정하기 위해 방진고무에 고정시키고, 시편과 고정구 사이의 마찰이 없도록 하였다.

실험은 PC상의 MATLAB/SIMULINK에서 발생된 Schroeder-phased 가진신호를 dSPACE사 1103 제어보드와 전압증폭기(PI E-663)를 거쳐 PZT로 보를 5초 동안 가진시킨 후 PVDF센서로 과도응답 신호를 8초 동안 계측하였다. 계측된 신호는 1ms 간격의 샘플

플럼으로 ADC를 통하여 모니터링 하였다. 센서 출력신호는 입력 임피던스가 높기 때문에 버퍼 역할을 할 수 있는 Voltage-follower를 통과시켰으며, 전원 노이즈와 EMI 제거를 위하여 노치 필터를 사용하였다.

Table 2. Frequency content of the Schroeder-phased signal input

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

실험은 처음 지배적인 두 개의 진동모드를 연속으로 가진하여 수행하였다. 다차모드 가진은 원하는 주파수대역의 동일한 입력을 반복적으로 가하기 위해 Schroeder-phased 신호를 사용하였다. Table. 2는 실험에 사용된 Schroeder-phased 입력신호 주파수 대역을 나타내고 있다.

표에서 Signal 1, 2는 1차 및 2차모드를 가진시키기 위한 주파수 범위이며, signal 3은 1, 2차 모드를 모두 포함하는 주파수 범위이다. 실험은 동일한 조건에서 손상이 없는 경우와 서로 다른 5가지의 손상이 있는 경우에 대해서 Signal 1, 2, 3으로 가진한 후 8초 동안의 과도응답 신호를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

초기 5초 동안 50V의 크기로 Table 2와 같은 3개 타입의 Schroeder-phased 신호를 PZT로 가진시킨 후 8초 동안 과도응답을 계측하여 비손상 경우와 손상이 있는 경우에 각각의 크기별로 비교 분석하였다.

Fig. 4는 보의 1차 고유진동수 대역인 Signal 1로 가진한 상태에서 비손상의 경우와, 구조물의 고정단으로부터 65mm 떨어진 위치에 6mm의 원형 손상이 있는 경우의 PVDF센서 출력을 비교하고 있다. 그림과 같이 PZT 가진 후의 과도응답 신호에서 검출시간이 경과할수록 시간 Shift가 발생하고, 또 손상이 있을 경우 내부강성의 감소로 인한 외팔보의 진폭이 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 비손상의 경우와 서로 다른 5가지의 손상 경우를 Signal 1로 가진시킨 후 시간영역에서의 과도응답을 비교한 결과이다. Fig. 5(a)는 비손상의 경우에 대한 손상크기에 따른 시간 Shift의 값을 1차식 $Y = a_i X + b_i$ 로 근사하여 비교 분석한 것이다. X축은 검출시간(sec), Y축은 시간 shift(sec)이며 이들 관계는 거의 선형적인 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 기울기 a_i 가 검출시간과 손상크기에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig.5(b)는 손상크기에 따른 양(+)의 피크값 차이,

즉 진폭의 차를 1차식 $Y = a_i X + b_i$ 로 근사한 결과를 비교한 것이다. 검출시간 경과에 따른 진폭차감(-)의 기울기를 나타내는데, 즉 감쇠 초기에는 큰 진폭차를 나타내고 시간 경과에 따라 진폭의 차가 점점 줄어드는 것을 의미한다. 또한 손상크기가 증가할수록 질량 및 내부 강성의 감소로 진폭차가 점점 증가하나 음(-)의 기울기는 거의 유사하게 일정한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

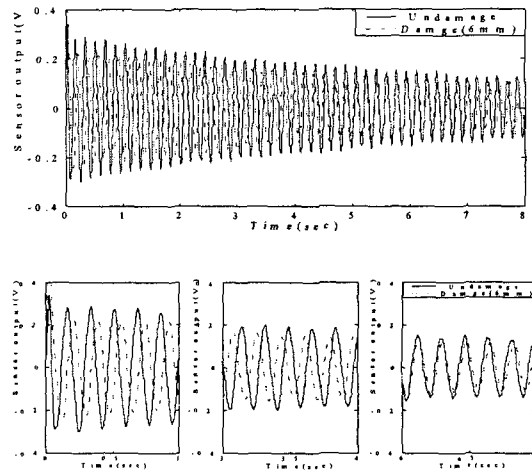
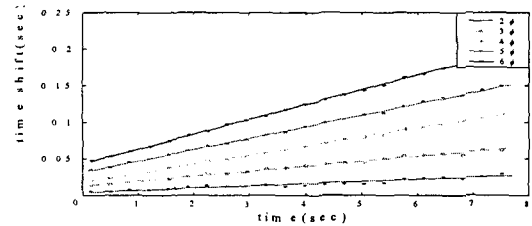
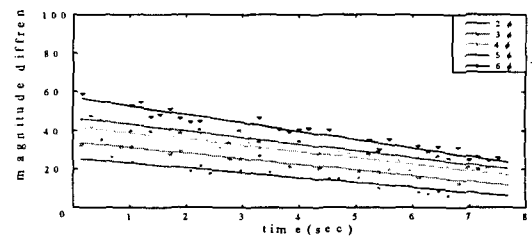


Fig. 4 Response of an undamaged and damaged beam (6mm) to excitation signal 1



(a) Time Shift



(b) Magnitude difference

Fig. 5 Experiment results of the damage detection test of a composite beam(1st bending mode).

Fig. 6은 Fig. 5(a)에서 나타난 검출시간에 대한 시간 shift의 변화율인 기울기 a_i 를 손상크기별로 나타낸 것으로, 손상 크기의 증가에 따라 시간 shift 변화율이 증가하고, 거의 선형적인 특성을 보여주고 있

다. 따라서 이러한 특성 그래프를 이용하여 임의의 손상크기를 판별해 낼 수 있을 것으로 사료된다.

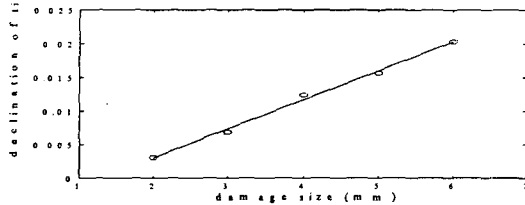


Fig. 6 Time shift declination on damage size : 1st bending moment

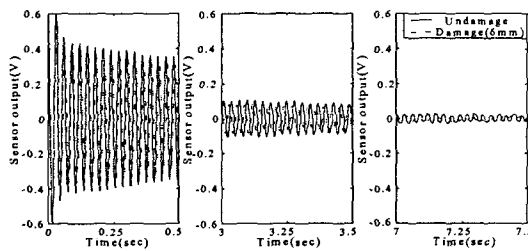
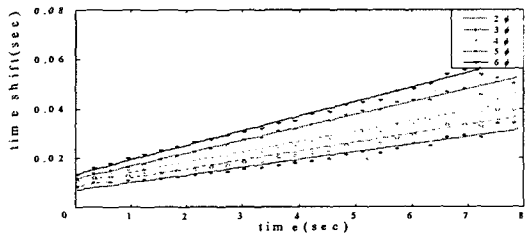
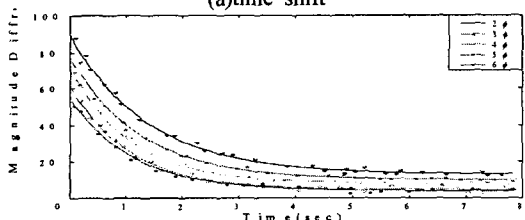


Fig. 7 Response of an Undamaged and damaged beam(6mm) to excitation signal 2

Fig. 7은 보의 2차 가진 주파수 대역의 Schroeder-phased 신호로 가진한 상태에서 비손상의 경우와 구조물에 6mm의 손상이 있는 경우의 시간 이력을 나타내고 있다.



(a) time shift



(b) Magnitude difference

Fig. 8 Experiment results for the damage detection test of a composite beam: 2st bending mode

Fig. 8은 5가지 손상의 경우에 대한 Fig. 7의 비교결과를 근사하여 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 비손상의 경우에 대한 손상크기에 따른 시간 Shift의 정도를 1차식 $Y = a_i X + b_i$ 로 근사한 결과이다. 기울기 a_i 가

1차 모드에서와 같이 검출시간과 손상크기에 따라 일정한 경향을 보이며 증가하고 있으나 그 정도가 1차 모드에 비해서 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 이는 손상이 1차모드에 큰 영향을 주는 고정단 부근에 위치하기 때문이다.

Fig. 8(b)는 비손상의 경우에 대한 손상크기에 따른 진폭차를 $y = c_1 e^{-\lambda t} + c_2 e^{-\lambda t}$ 함수로 근사한 결과를 비교한 것이다. Fig. 8(b)에서와 같이 내부강성과 감쇠의 변화로 초기 응답신호의 진폭차가 크게 발생하며 기울기는 2차 모드의 감쇠형태와 유사한 것을 알 수 있다. 위 실험에서 얻어진 각 손상크기에 따른 1, 2차 고유진동수 변화를 Table 4에서 비교하였다.

Table. 4 Natural Frequency for a composite beam with damage

State of damages		Mode	
		1st freq(Hz)	2nd freq(Hz)
Undamaged		5.7074	33.2981
Damage size	2mm	5.6902	33.2594
	3mm	5.6691	33.1872
	4mm	5.6379	33.1589
	5mm	5.6192	33.1214
	6mm	5.5770	33.0887

5. 결론

본 연구는 PVDF센서/PZT액츄에이터가 부착된 구조물을 이용하여 시간영역에서 진동정보를 얻고 복합재 보의 손상상태를 진단하는 실험적 연구를 수행하였다. 과도진동 상태에서 비손상의 경우에 대한 손상크기에 따른 시간 Shift 정도와 진폭 차의 변화량을 검출하였다.

손상 크기가 증가함에 따라 1, 2차 모드에서 질량 및 내부강성의 감소로 시간 shift와 진폭의 차가 모두 일정한 경향으로 증가하고 있음을 알 수 있었다. 또 시간 Shift는 양(+)의 기울기를, 진폭의 차는 음(-)의 기울기를 나타내고 있어, 이러한 시간 Shift 및 진폭 차의 기울기를 검출함으로써 임의의 손상크기를 판별 할 수 있는 정보로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Salawu OS. Engineering Structure, Vol.19, pp. 718-723, 1997.
2. 조국래, 이우식, 한국정밀공학회 2001년도 추계 학술대회논문집, pp.837-840.
3. H. T. Banks, et al., J. of Sound and Vibration, Vol.191, pp.859-880, 1996.
4. J. Cattarius, and D. J. Inman, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.11, pp.409-423, 1997.
5. H. T. Banks, et al., Proc. of the 31st IEEE Conf. on Decision and Control, pp.1803-1808, 1992.