

<논 문>

복합재료내의 계면 접착 특성에 따른 지능형 구조물의 진동제어에 관한 연구

Studies on the Vibration Controllability of Smart Structure Depending on the Interfacial Adhesion Properties of Composite Materials

한 상 보* · 박 종 만** · 차 진 훈***

Han Sangbo, Park Joung-Man and Cha Jin-Hoon

(1998년 8월 1일 접수 : 1998년 10월 23일 심사완료)

Key Words : PZT(압전세라믹), Interfacial Bond Layer(계면접착층), Perfect Bonding(완전결합), Curvature(곡률), Actuator(구동기), Virtual Work(가상일), Thickness Ratio(두께비), Strain Constant(변형률상수)

ABSTRACT

The success of controllability of smart structures depends on the quality of the bonding along the interface between the main structure and the attached sensing and actuating elements. Generally, the analysis procedures neglect the effect of the interfacial bond layer or assume that this bond layer behaves like viscoelastic material. Three different bond layers, two modified epoxy adhesives, and one isocyanate adhesive were prepared for their toughness and moduli. Bond layer of the chosen adhesive provides an almost perfect bonding condition between the composite structure and the PZT while bended significantly like arrow-shape. The perfect bonding condition is tested by considering various material properties of the bond layers, and based on this perfect bonding condition, the effects of the interfacial bond layer on the dynamic behavior and controllability of the test structure is experimentally studied. Once the perfect bonding condition is achieved, dynamic effects of the bond layer itself on the dynamic characteristics of the main structure is negligible, but the contribution of the attached PZT elements on the stiffness of the multi-layered structure becomes significant when the thickness of the bond layer increased.

기 호 설 명

\bar{c} : 분포계의 단위길이 당 감쇠계수

* 정회원, 경남대학교 공과대학 기계공학부

** 경상대학교 공과대학 고분자공학과

*** 경남대학교 대학원

c : 일반화 감쇠계수

E : Young 률

I : 보의 단면 2차 모멘트

k : 일반화 강성

m : 일반화 질량

\bar{m} : 분포계의 단위길이 당 질량

T : 계의 운동에너지

- V : 계의 포텐셜에너지
- d_{31} : PZT의 변형률상수
- l : 보의 길이
- q : 일반화 변위 좌표
- t : 두께
- u : 인가 전압
- v : 구조물의 진동 변위
- x : 길이방향 좌표
- ε : 변형률
- φ : 진동 모드 함수
- ξ_1 : 부착된 PZT의 좌단위치
- ξ_2 : 부착된 PZT의 우단위치

첨 자

- s : 구조물
- p : 구동기로 사용된 PZT 판
- ps : 센서로 사용된 PZT 판
- b : 계면 접착층

1. 서 론

기계 및 구조물의 소음 및 진동 수준을 저감하기 위한 방법 중 능동제어의 개념을 활용한 기법이 최근 각광을 받고 있다. 이는 공진 가능성의 회피를 위한 대상 구조물의 설계 변경 등과 같은 수동적 개념의 진동제어에 비하여 보다 정확한 진동응답 수준을 유지할 수 있으며, 또한 소형, 경량 정밀 기계요소들의 정확한 동적 거동 제어에 탁월한 효과가 있다. 최근, 재료기술의 발달에 힘입어 이러한 능동제어에 효과적으로 이용될 수 있는 스마트 재료들이 많이 등장하고 있으며 그 중 PZT(Lead Zirconite Titanite) 계열의 압전재료들은 높은 구조강도, 뛰어난 성형성, 상온에서의 불변성, 적용의 용이함과 같은 장점에 의해 진동제어에 사용되는 센서 및 구동기(Actuator)로서 널리 채택되고 있다. PZT를 사용하여 구조물의 진동을 제어하기 위해서는 구조물의 거동과 일치하는 신호를 발생시킬 수 있는 센서와 제어신호에 해당하는 동적 거동을 구조물에 전달시킬 수 있는 구동기가 구조물과 일치되도록 결합을 시켜야 한다. 일반적으로 이러한 센서 및 구동기를 구조물과 결합시키는 방법은 고분자복합재료의 경우와 같이 센서용 PZT와 구동기용 PZT를 하나의 적층판으로 이식시키든지^(1~3), 제어 대상 구조물의 표면에 센서용 PZT와 구동기용 PZT를 접착제를 사용하여 부착시키는 방법^(2~6) 등이 있다. 이 중, 접착제를 사용하여 구조물의 표면에 부착시키는 방법은 그 제어대상 구

구조물의 재질에 구애를 받지 않기 때문에 그 적용범위가 훨씬 넓다고 할 수 있다.

최근 진동 제어에 사용되고 있는 스마트 재료들에 대하여 결합에 사용되는 접착제의 물성과 계면적 성질을 고려하지 않았을 경우 제어성능에 문제점이 있을 수 있다는 결과들이 보고되고 있으며^(6~10), 이는 제어대상 구조물의 제어 모형에 접착제의 특성을 고려해 주어야 보다 완전한 제어모형이 얻어진다는 것을 의미한다. 기존의 연구 결과들 중 접착제 자체의 물성치와 그 계면의 상태를 제어 모형에 고려한 경우는 거의 없는데, 이는 구조물과 PZT사이의 층이 박판이므로 재료물성이 접합부에서 불연속이 되는 것을 무시할 수 있다고 가정하였기 때문이며 이러한 접합부 모형의 불완전성을 계의 모형이 불완전하더라도 제어성능이 발휘되는 적응제어와 같은 제어 법칙의 적용으로 이를 해결하려고 해 왔다.

압전재료를 주 구조물에 부착시켰을 때 접착 계면의 효과를 기계적 측면에서 고찰한 연구로는 박판의 접착층에서는 1차원 전단변형만이 가능하다고 가정하고 주 구조물-계면접착층-압전재료로 구성되는 복합적층판의 응력-변형률 관계식을 고려한 Crawley 등⁽²⁾의 연구결과와 계면 접착층과 압전재료의 두께가 주 구조물의 두께에 비하여 상대적으로 작을 경우 계면 접착층은 완전결합의 조건을 제공해 주며 압전재료 내의 응력분포는 두께방향으로 균일하다고 가정한 Kwak 등^(4,5)의 연구결과가 있다.

한편, 이와는 별도로 점탄성 성질을 가진 재료를 샌드위치형상의 복합구조물로 제작하여 이것을 하나의 독립된 부품으로 주 구조물에 부착시킨 뒤 진동 제어 장치를 구성하고자 하는 연구결과들^(11~13)도 있으나 이 경우, 역시 점탄성 재질과 압전소자로 구성된 제어기를 주 구조물에 완전 결합시킨다는 단순한 가정을 출발점으로 하고 있다.

본 논문에서는 유한한 두께를 가지며 주 구조물과 압전재료 사이에 완전한 접착상태를 제공할 수 있는 계면 접착제를 개발하고 이러한 계면 접착제를 사용할 경우 계면접착층과 주 구조물, 압전재료 사이에 변형률의 불연속이 없다고 가정할 수 있으며 이러한 가정 하에 구조물의 동역학적 모형을 설정하고 그에 대한 검증 실험을 수행하였다.

2. 표면에 압전소자가 부착된 보의 진동 모형

구조물 표면에 부착된 PZT판과 계면접착제층이 보의 횡방향 변위와 변위적합성을 유지하는 완전 결

합상태가 되어 주 구조물인 보와 유한한 두께를 가진 계면접착제, PZT층 모두가 굽힘 곡률이 일치한다고 가정한다. 이는 Crawley 등⁽²⁾의 논문에서와 같이 주 구조물과 PZT사이에서 유한한 두께를 갖는 접착층은 1차원 전단 변형만을 한다고 가정한 것에 비해 복합 구조물의 횡방향 진동에 기여하는 계면접착층의 점탄성 성분을 보다 더 적극적으로 고려할 수 있다.

복합층들의 굽힘 곡률이 일정하고 보의 중립축과 복합구조물의 중립축이 일치할 경우 복합층 단면의 변형률은 Fig. 1과 같이 분포되며 이 경우 복합층 내의 임의점의 변형률은 단순보 이론에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon = y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, y 는 중립축으로부터의 거리, v 는 구조물의 진동변위, x 는 길이방향 좌표를 나타낸다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = 0 \quad (2)$$

식 (2)로 주어지는 Hamilton 원리와 보의 횡방향 진동변위에 대하여 단일 모드 $v = \varphi q$ 만을 고려한 가정모드를 적용하여 보의 운동방정식을 유도한다

구조물과 접착제층, PZT로 단면이 구성된 결합구조물의 운동에너지는 각각

$$T_s = \frac{1}{2} \int_0^l m_s \dot{v}^2 dx \quad (3)$$

$$T_b = \frac{1}{2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} m_b \dot{v}^2 dx \quad (4)$$

$$T_p = \frac{1}{2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} m_p \dot{v}^2 dx \quad (5)$$

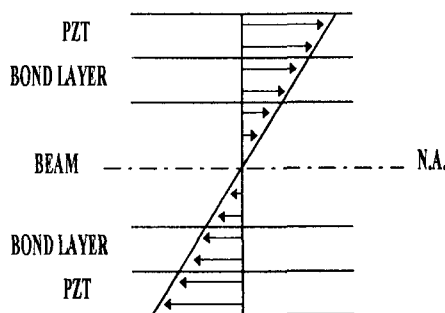


Fig. 1 Strain distribution along the thickness of the beam-bond layer-PZT structure

로 주어지고 탄성변형에 의한 보와 계면접착층의 포텐셜에너지는

$$V_s = \frac{1}{2} E_s I_s \int_0^l \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (6)$$

$$V_b = \frac{1}{2} E_b I_b \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (7)$$

와 같이 주어진다.

여기서, I_b 는 중립축에 대한 계면접착층만의 단면 2차 모멘트를 나타낸다.

한편, PZT층에서의 변형률과 곡률 사이의 관계식이 보의 경우와는 달리 표현되므로, PZT층의 포텐셜에너지는

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{1}{2} E_p \int_V (\epsilon_p)^2 dV \\ &= \frac{1}{2} E_p \int_{h_1}^{h_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \epsilon_p^2 dA dx \end{aligned} \quad (8)$$

로 주어지고, 여기서

$$\epsilon_p = \left(y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{d_{31}}{t_p} u_i \right)$$

이며, y 는 중립축으로부터의 거리, d_{31} 은 PZT의 변형률상수, t_p 는 PZT의 두께, u_i 는 PZT에 인가된 전압을 나타낸다.

변형률의 제곱 항을 정리하면

$$\begin{aligned} \epsilon_p^2 &= \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 y^2 - \left\{ 2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \frac{d_{31}}{t_p} u_i \right\} y \\ &\quad + \left(\frac{d_{31}}{t_p} u_i \right)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)와 같이 되므로, PZT 판의 포텐셜에너지는

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{1}{2} E_p \left[\int_{h_1}^{h_2} y^2 dA \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \right. \\ &\quad - 2 \frac{d_{31}}{t_p} u_i \int_{h_1}^{h_2} y dA \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) dx \\ &\quad \left. + \left(\frac{d_{31}}{t_p} u_i \right)^2 t_p l_p w_p \right] \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)과 같이 표현된다.

위의 식에서 두 번째 항에 포함된 $\int_{h_1}^{h_2} y dA$ 항에 대해서 잠시 언급하기로 한다. 이 항은 PZT층 단면의 중립축에 대한 1차 모멘트를 나타낸다. 만일 부착된 PZT층이 보의 한쪽면만에 부착된 경우에는 이 항의 효과가 당연히 고려되는데 PZT가 보의 양면에 부착된 경우에는 양쪽면이 보의 중립축에 대하

여 대칭이므로 이 항이 사라지게 된다. 그러나 일반적으로 센서 또는 구동기로 작동되는 PZT는 보의 양면에 대칭적으로 부착된다 하더라도 Bimorph형으로 구성되어 반대의 극성을 갖도록 설치되는 경우에는 이 항의 효과가 계속적으로 남게된다.

따라서, Bimorph형의 PZT가 부착된 경우에는 각각의 PZT가 서로 상쇄되지 않는 일정크기의 단면 1차 모멘트를 가진 효과를 보이게 된다.

그러므로, PZT 판의 포텐셜에너지는 다음과 같이 주어지게 된다.

$$\begin{aligned}
 V_p &= \frac{1}{2} E_p I_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \\
 &\quad - \frac{E_p}{2} 2 d_{31} u_i w_p \bar{y}_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) dx \\
 &\quad + \frac{1}{2} E_p \left(\frac{d_{31}}{t_p} u_i \right)^2 t_p l_p w_p \\
 &= \left\{ \frac{1}{2} E_p I_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)^2 dx \right\} q^2 \\
 &\quad - \left\{ \frac{E_p}{2} 2 d_{31} u_i w_p \bar{y}_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right) dx \right\} q \\
 &\quad + \frac{1}{2} E_p \left(\frac{d_{31}}{t_p} u_i \right)^2 t_p l_p w_p
 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서, \bar{y}_p 는 중립축으로부터 PZT 단면의 도심까지의 거리, l_p 는 PZT판의 길이, w_p 는 PZT판의 폭을 나타낸다.

PZT 자체의 감쇠성분을 무시할 수 있다고 가정하면 보와 계면 접착층의 감쇠성분에 의한 가상일은

$$\begin{aligned}
 \delta W_{nc} &= - \int_0^l c_s \dot{v} \delta v dx - \int_{\xi_1}^{\xi_2} c_b \dot{v} \delta v dx \\
 &= \left\{ -c_s \int_0^l \varphi^2 dx \right\} \dot{q} - \left\{ c_b \int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi^2 dx \right\} \dot{q}
 \end{aligned} \tag{12}$$

와 같이 표현되며 위식을 바탕으로 최종적으로 결합 구조물에 대하여 다음과 같은 형태의 운동방정식을 도출할 수 있게 된다.

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = au_i \tag{13}$$

여기서,

$$m = m_s + m_b + m_p$$

$$k = k_s + k_b + k_p$$

$$c = c_s + c_b$$

$$c_s = \bar{c}_s \int_0^l \varphi^2 dx$$

$$c_b = \bar{c}_b \int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi^2 dx$$

$$m_s = \bar{m}_s \int_0^l \varphi^2 dx$$

$$m_b = \bar{m}_b \int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi^2 dx$$

$$m_p = \bar{m}_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi^2 dx$$

$$k_s = E_s I_s \int_0^l \varphi''^2 dx$$

$$k_b = E_b I_b \int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi''^2 dx$$

$$k_p = E_p I_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi''^2 dx$$

$$a = E_p d_{31} w_p \bar{y}_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi'' dx$$

로 주어진다.

3. 실험

3.1 계면접착제의 제조

본 연구에서 PZT를 구조물에 접착시키기 위한 계면 접착제는 극도화학의 YD-128이라는 상품명인 bisphenol-A의 diglycidylether(DGEBA)가 기저 물질로 되어 있는 polyoxypropylenediamine인 Jeffamine D400과 D2000을 경화제로 하여 제조하였다. 에폭시 수지와 경화제의 양을 적절히 조절함으로써 다양한 기계적 물성을 가질 수 있는 계면접착제를 만들 수 있는데 그 중 대표적인 3 종류의 계면접착제 즉, D400만 3g 사용한 것(type B), D400 : D2000이 2.5 g : 0.5 g의 비율로 제조된 것(type C) 그리고, 시중에서 널리 이용되고 있는 isocyanate 계열의 순간 접착제 Super Pegamento Gel(3M)(type A)를 대상으로 실험을 하였다.

3.2 계면접착제의 인장강도 및 3점 굴곡강도 시험

계면접착제의 인장강도 및 강성도를 측정하기 위하여 실험에 사용된 계면접착제를 표준 인장 시험용 시편으로 제작하였다. 인장강도는 UTM(Lloyd LR10)을 사용하여 측정하였으며 cross head speed는 분당 1 mm로 하였고 인장하중은 10 kN을 사용하였다.

한편 3점 굴곡 강도 시험용 시편은 KS M 3008 규격에 의하여 제작하였으며 UTM의 하중은 10 kN, cross head speed는 분당 5 mm, span length는 50 mm로 하였다.

이상과 같은 실험을 통하여 얻어진 계면접착제들

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of the epoxy resins used for interfacial bond layer

	Curing agents	Number of specimen (EA)	Max. flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Deformation at Max. flexural strength (mm)	Deformation at fracture (mm)
Type B	D400 : D2000 = 3g : 0g	3	87.0 (2.0)	2592 (250.4)	6.4(0.4)	41.0(7.0)
Type C	D400 : D2000 = 2.5g : 0.5g	3	58.0 (6.4)	1838 (586.9)	7.2(0.8)	52.2(8.2)

* Parentheses are standard deviation.

의 물성치들이 Table 1에 정리되어 있다.

3.3 진동제어 실험 구조물 및 제어기의 제작

유리 섬유 복합 재료 (300×30×1.3 mm)로 제작된 3개의 외팔보에 대한 진동제어 효과를 살펴 보기 위하여 각각의 보에 25×25×0.4 mm PZT 2개를 Bimorph 형으로 구성하여 보의 양면에 작동기로 부착하였다. 작동기로부터 5 mm 떨어진 점에 한 개의 PZT로 된 센서를 부착하여 보의 일차 모드만을 제어하도록 하였으며 PZT와 전극을 연결하기 위해 사용한 copper tape 사이에는 좀더 나은 전도성을 부여하기 위하여 silver paste를 사용하였다. PZT 제어기법을 적용하기 위한 제어회로는 간단한 전자소자인 OP-Amp를 사용하여 2차 저역 필터로 표현되어지는 동일한 Analog제어기를 독립적으로 구성하여 각각의 보에 연결하였다. 능동 진동 제어의 효과적 수행을 확인하기 위해서 적절한 가진 시스템이 선정되어야 하는데 가진기를 사용한 가진 시스템의 경우 지지부에 대한 반작용력을 받는 등의 결점을 가지고 있으므로, 본 연구에서는 일정한 크기의 정적 하중을 준 뒤 이 하중을 갑자기 제거하는 Sudden Release 방법을 사용하였다.

감지기와 작동기의 신호는 Dual Channel FFT 분석기 (Onosoki CF-350)를 사용하여 분석하였다.

Table 2와 Fig. 2는 센서 및 작동기로 사용된 PZT의 물성치와 실험의 개략적인 장치도를 나타낸 것이며, Fig. 3은 실험장치들의 실물사진을 나타낸다

4. 결과 및 고찰

4.1 보의 진동 특성에 대한 계면접착층의 영향

본 연구의 가장 큰 목적은 주 구조물과 주 구조물에 부착되는 압전재료와의 변형거동이 일치될 수 있

Table 2 Material properties for Navy Type PZT used as sensors and actuators

Description	Units	Values
Lateral strain coefficient	m/V	1.8×10^{-10}
Young's modulus	GPa	63.0
Shear modulus	GPa	23.4
Poisson's ratio		0.35

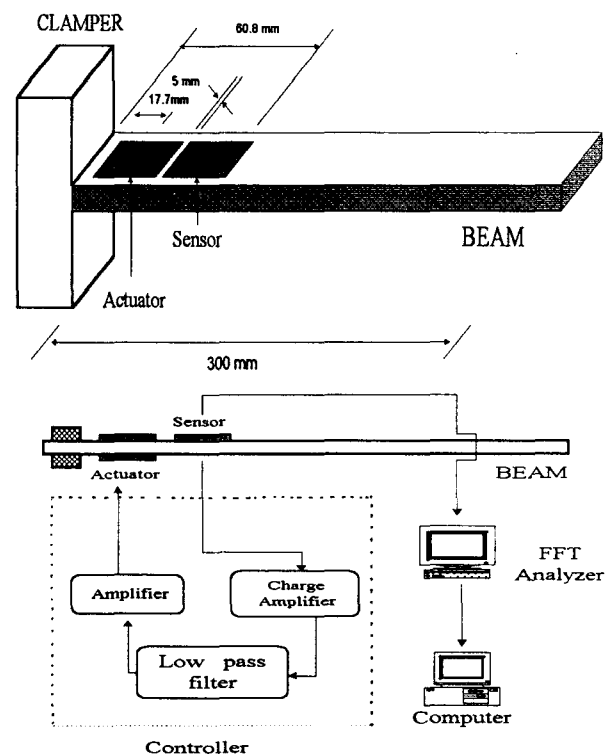


Fig. 2 Dimensions and layout of the test beams and controllers

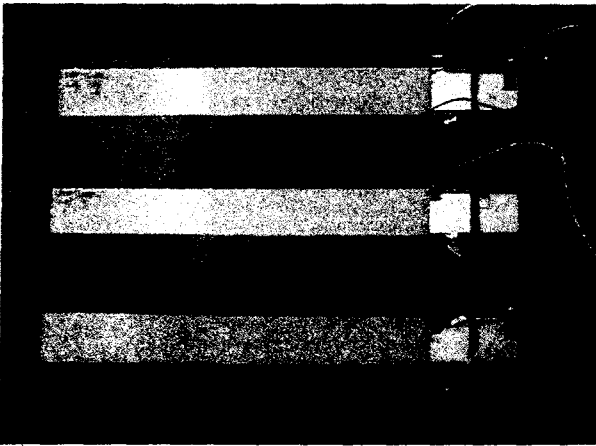


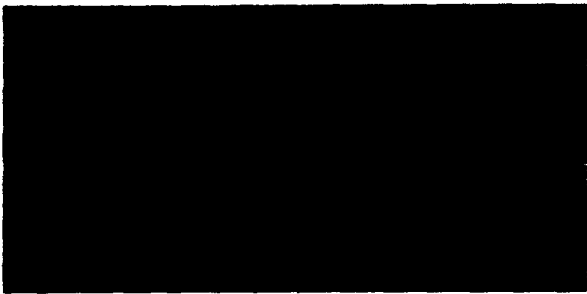
Fig. 3 Photo of experimental system



Type A bond layer



Type B bond layer



Type C bond layer

Fig. 4 Microscopic pictures of the section of the beam-bond layer-PZT structure in bending with excessive curvature (Magnification ratio 30)

도록 완전 접촉상태를 보장해 주는 계면 접촉제의 개발에 있다. 본 연구에서 사용된 3가지 계면접착제를 이용하여 압전재료를 주 구조물과 결합시킨 후 미소 변위라고 볼 수 없을 정도의 과도한 크기의 곡률로 정적 굽힘을 가한 복합구조물의 단면 사진이 Fig. 4이다. Fig. 4에 주어진 단면을 제공하는 보들은 모두 곡률이 $x = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0.2975} = 3.3613$ 이 되도록 하였을 경우의 단면으로 계면접착제 A와 B를 사용한 보는 계면에서 파단이 일어난 것을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 계면접착제 C를 사용한 경우 곡률이 상당히 큰 값을 가짐에도 불구하고 계면 접착층의 변형 상태는 주 구조물 그리고 압전재료의 변형 상태와 동일하다는 것을 보여주고 있다. 이 사

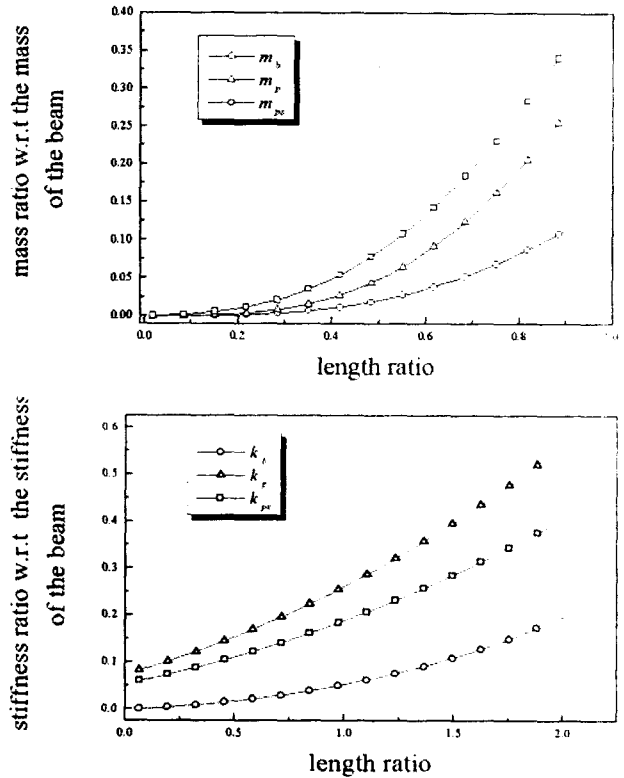


Fig. 5 Mass and stiffness ratios of each element of the sensors and actuators and bond layer to the mass and stiffness of the original beam with different position of the attachment along the beam

- : Mass and stiffness ratio of bond layer to the mass and stiffness of the beam
- △ : Mass and stiffness ratio of PZT actuator to the mass and stiffness of the beam
- : Mass and stiffness ratio of PZT sensor to the mass and stiffness of the beam

진이 보여주는 변형상태는 이상적인 계면접착제를 사용할 경우 구조물-계면접착층-압전재료로 이루어진 복합층이 동일한 곡률의 굽힘 변형을 한다고 가정된 모형의 타당성을 보장해 주는 것을 나타낸다.

실험에 사용된 계면접착층과 PZT 판이 보의 진동시 일반화 질량 및 일반화 강성 그리고 일반화 감쇠에 기여하는 크기를 보에 부착된 PZT 판의 위치에 대하여 나타낸 것이 Fig. 5이다. 이들 그림에서 가로축은 PZT의 부착위치를 보의 길이에 대하여 무차원화하여 표시한 것으로 최대 곡률이 나타나는 점으로부터의 상대적 거리를 나타내며, 세로축은 각각의 요소들이 기여하는 질량, 강성의 크기를 보 자체의 질량, 강성의 값으로 무차원화시킨 값들이다.

위의 그림에 의하면 질량효과는 최대곡률이 나타

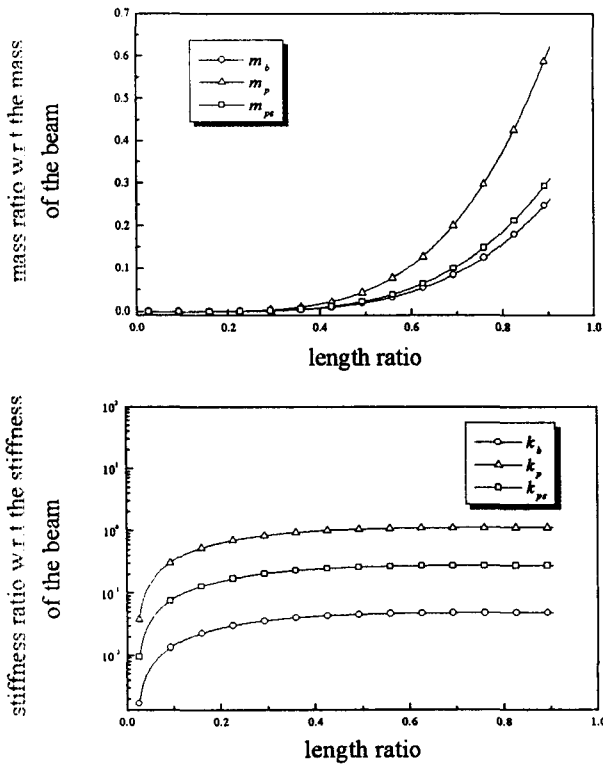


Fig. 6 Mass and stiffness ratios of each element of the sensors and actuators and bond layer to the mass and stiffness of the original beam with different length of the coverage along the beam

- : Mass and stiffness ratio of bond layer to the mass and stiffness of the beam
- △ : Mass and stiffness ratio of PZT actuator to the mass and stiffness of the beam
- : Mass and stiffness ratio of PZT sensor to the mass and stiffness of the beam

나는 위치로부터 멀어질수록, 강성과 감쇠 효과는 최대 곡률이 나타나는 위치로부터 가까울수록 그 크기가 커진다는 것을 알 수 있다. 이는 진동제어 목적을 위해 압전요소들을 해당 진동 모드의 최대 곡률 점에 해당하는 위치에 부착시키는 것이 일반적인 방법이라는 점을 생각할 때 부착된 PZT판의 효과는 일반적으로 구조물의 강성을 크게 향상시킨다는 것을 알 수 있다. 그러나, 그러한 경향에도 불구하고 계면접착층 만의 질량, 강성에 기여하는 효과의 절대 값은 상당히 미미하다는 것을 알 수 있다.

보의 길이에 대한 부착된 PZT판의 상대적인 길이 변화에 대한 질량 및 강성의 기여 효과를 살펴본 결과가 Fig. 6에 주어져 있다. 이 그림 역시 가로축은 보의 길이에 대한 PZT 판의 길이를 무차원

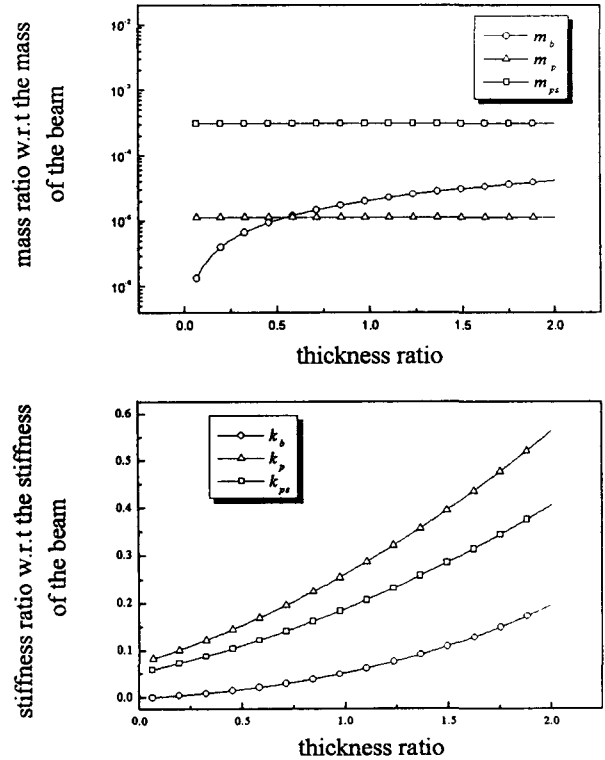


Fig. 7 Mass and stiffness ratios of each element of the sensors and actuators and bond layer to the mass and stiffness of the original beam with different thickness of the bond layer

- : Mass and stiffness ratio of bond layer to the mass and stiffness of the beam
- △ : Mass and stiffness ratio of PZT actuator to the mass and stiffness of the beam
- : Mass and stiffness ratio of PZT sensor to the mass and stiffness of the beam

화하여 표시한 것으로, 세로축은 각각의 요소들이 기여하는 질량, 강성의 크기를 보 자체만의 질량, 강성의 값으로 무차원화시켰다.

위의 그림에 의하면 질량효과는 센서 및 구동기로 작용하는 PZT의 길이가 짧을 경우에는 미미하다가 길이가 길어질수록 그 효과가 현저하게 나타나는 반면, 강성효과는 길이가 짧을 때에는 그 효과가 급격히 커지다가 길이가 길어질수록 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 센서 및 구동기를 복합구조물 속에 함침시켜 지능형 구조물을 제작할 경우, 이러한 압전요소들의 길이가 주 구조물의 길이에 근접하게 되면 복합구조물은 원래의 구조물에 비하여 상대적으로 유연해지게 된다는 것을 알려주고 있다.

실험에 사용된 계면접착층의 두께 변화가 보의 진동시 질량 및 강성에 기여하는 정도를 나타내는 그림이 Fig. 7에 주어져 있다. 이들 그림에서 가로축은 주 구조물의 두께에 대한 계면접착층의 두께로 무차원화하였으며, 세로축은 각각의 요소들이 기여하는 질량, 강성의 크기를 보 자체만의 질량, 강성의 값으로 무차원화시킨 값들이다.

위의 그림에 의하면 계면접착층의 두께가 질량에 증대에 기여하는 정도는 예상대로 그 효과가 경미하나 강성의 증대에 미치는 영향은 상당하다는 것을 나타내고 있다. 특히 계면접착층의 두께가 증가할수록 계면접착층 자체의 강성 기여분은 무시할 수 있으나, PZT 요소들의 강성 기여분은 상당히 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제시한 모형대로 계면접착층이 주 구조물과 PZT 사이에 완전 결합상태를 보장할 경우 PZT 요소의 위치가 보의 중립축으로부터 멀어지고 따라서 단면 2차모멘트의 값이 커지게 되기 때문이다. 그러나, 현실적으로 계면접착층이 일정한 값 이상의 두께를 가질 경우 비록 완전 결합상태는 유지한다고 하더라도 계면접착층 자체의 변형 거동이 전단효과를 무시할 수 있을 정도로 작다는 보장을 할 수 없을 것으로 판단됨으로 이 경우에는 전단변형의 영향을 고려하는 모형을 적용하는 것이 타당하리라 생각된다.

4.2 진동 제어 특성에 대한 계면접착층의 효과

동일한 형태의 보와 동일한 규격의 PZT를 서로 다른 3가지의 계면접착제를 사용하여 결합시킨 뒤 이 구조물들을 사용하여 동일한 제어기의 작동에 따른 진동제어의 특성을 살펴보았다. 따라서, 이들 3 구조물의 제어 효과의 차이는 사용된 계면접착제의 특성에 의한 것이라는 조건을 충족한다고 볼 수 있다.

구조물의 진동제어 특성 파악은 일정한 정하중을 가한 상태에서 그 하중을 갑자기 제거시키는 이른바 Sudden Release 방법을 사용하여 단위 충격함수 형태의 입력에 대한 구조물의 진동 제어 결과를 파악하도록 구현하였다. 제어기는 단일 모드제어에 있어 가장 안정적이고 응답 속도가 신속하며 비교적 설치가 용이한 PPF 제어기를 사용하였다. Fig. 8에 주어진 응답은 세 가지 구조물의 단위충격함수형 입력에 대한 open loop 응답을 센서가 감지한 정압의 형태로 나타낸 것이며, Fig. 9는 제어기가 작동된 closed loop 응답을 나타낸다. 우선 open loop 응답

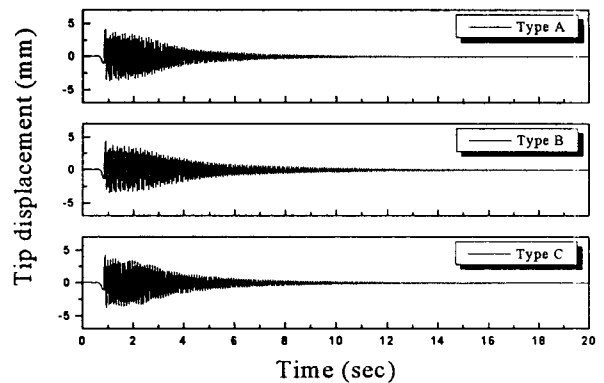


Fig. 8 Time response of beams with different type of bond layers with controller off
From top to bottom (A),(B),(C)
(A) Beam with Type A bond layer
(B) Beam with Type B bond layer
(C) Beam with Type C bond layer

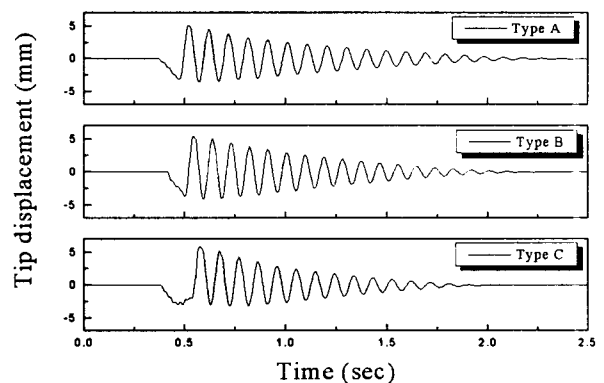


Fig. 9 Time response of beams with different type of bond layers with controller on.
From top to bottom (A),(B),(C)
(A) Beam with Type A bond layer
(B) Beam with Type B bond layer
(C) Beam with Type C bond layer

은 세 가지 구조물의 사이에서 뚜렷한 차이를 발견할 수 없는데 이는 실험에 사용된 계면접착제의 효과가 구조물의 진동 특성에 미치는 영향이 그리 크지 않음을 보여 주고 있다고 할 수 있다. 그러나, closed loop 응답을 살펴보면 open loop 응답에서는 미미한 효과밖에 나타나지 않는 계면접착층의 영향이 응답속도에 어느 정도 기여함을 볼 수 있다.

우선 본 실험에서 개발한 계면접착제 C를 사용한 경우가 가장 응답속도가 빠른 것을 알 수 있는데, 이것은 이 계면접착제를 사용할 경우 보와 PZT 사이의 완전 결합이 상대적으로 보장된다는 것을 의미한다. 계면접착제 A와 B의 경우 보와 구조물 간의 완전결합 상태가 상대적으로 떨어지며, 따라서 이러한 경우에는 계면접착층의 거동이 수직응력뿐만 아니라 전단응력의 영향을 받고 있다고 할 수 있으며 구조물-계면접착층-PZT로 구성된 복합 적층의 굽힘에서 각 층이 동일한 곡률을 가지고 굽힘 운동을 하지 않는다는 것으로도 해석할 수 있다. 따라서, 본 실험의 결과로부터 계면접착제 C가 기능성 구조물의 제작에 필요한 최대의 표면 결합력과 기계적 요구사항을 만족시키는 재료임을 알 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 두께를 무시할 수 없는 계면접착층의 전단변형을 고려한 복합구조물의 진동해석에 대한 실험은 수행하지 못하였다.

5. 결 론

제어 대상 구조물과 기능소자들간의 완전 결합 상태를 보장하는 것이 압전소자를 사용한 지능 구조물의 제작에 있어 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 계면접착층에서의 완전 결합이 보장되지 않으면 우수한 제어기법과 뛰어난 성능의 기능소자들의 효과가 반감되기 때문이다.

본 연구에서는 서로 다른 물성을 가진 두 구조물 간에 기계적 완전 결합상태를 보장해 줄 수 있는 계면접착제를 개발하고 이러한 계면접착제를 사용한 복합구조물의 진동특성을 파악해 보았다.

계면접착층과 구조물에 부착된 기능소자는 일반적으로 최대 곡률이 발생하는 지점에 부착하게 되므로 제어대상 구조물의 강성이 증가하는 효과를 주게 된다. 본 실험에서와 같이 계면접착층의 두께가 주 구조물에 비하여 상대적으로 크지 않을 경우에는 그 자체로써 보의 진동 특성에 미치는 영향은 무시해도 좋다고 볼 수 있다. 그러나 계면접착층의 두께가 커지게 되면 부착된 PZT 층의 강성효과가 계면접착

층 두께의 세제곱에 비례하여 커지므로 원래 구조물이 가지고 있던 진동특성과는 상당히 다른 특성을 갖는 복합구조물이 만들어 질 수 있고 이는 제어 모형의 해석시 주의해야 할 사항이다. 또한, 구조물과 부착된 PZT 사이에 완전 결합이 보장될 수 있는 계면접착제를 사용할 경우 적용하고자 하는 제어기법이 가장 효과적으로 발휘된다는 사실을 알 수 있다.

본 실험에서 제조된 계면접착제 C는 이중재질 사이의 접착력을 최대로 보장하는 화학적 성질과 구조물의 탄성거동을 충실히 전달하는 기계적 성질을 동시에 갖춘 계면접착제로 향후 기능성 구조물의 제작에 많이 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단의 지방대 육성과제 연구비(과제번호:997-002-E00038)에 의해 수행되었으며, 지원에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Huang, S. C., Inman, D. J., and Austin, E. M., 1996, "Smart Viscoelastic Damping Treatment," Proceeding of IMAC 14, pp. 39~43.
- (2) Crawly E. F. and Luis de Javier, 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Element of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, pp. 1373~1385.
- (3) Peng, X. Q., Lam, K. Y., and Liu, G. R., 1998, "Active Vibration Control of Composite Beams with Piezoelectric: A Finite Element Model with Third Order Theory," Journal of Sound and Vibration, Vol. 209, pp. 635~650.
- (4) Kwak, M. K., and Sciulli, D., 1996, "Puzzy-Logic Based Vibration Suppression Control Experiments on Active Structures," Journal of Sound and Vibration, Vol. 191, pp. 15~28.
- (5) Denoyer, K. K., and Kwak, M. K., 1996, "Dynamic Eodelling and Vibration Suppression of A Slewing Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators," Journal of Sound and Vibration, Vol. 189, pp. 13~31.
- (6) Akella, P., Chen, X., Cheng, W., Hughes, D., and Wen, J. T., 1994, "Modeling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric

- Sensors and Actuators," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 3, pp. 344~353.
- (7) Prakah-Asante, K. O., and Crag, K. C., 1994, "The Application for Multi-Channel Design Methods for Vibration Control of an Active Structure," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 3, pp.329-343.
- (8) Burke, S. E. and Clark, R. L., 1995, "Transducer Tolerance Theory for Structural Control," *Proc. SPIE 2443*, pp. 410~421.
- (9) Crawly E. F. and Anderson E. H., "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams, 1990, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* Vol. 1, pp. 5~25.
- (10) 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭, 1995, "압전 세라믹 감지기/작동기가 부착된 복합적층보의 모드감쇠해석," *대한기계학회 95년도 추계 학술대회 논문집*, pp. 407~411
- (11) Nakra, B. C., 1998, "Vibration Control in Machines and Structures Using Viscoelastic Damping," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 211, pp. 449~465.
- (12) Baz, A., 1998, "Robust Control of Active Constrained Layer Damping," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 211 pp. 467~480.
- (13) Sullivan, J. M., Hubbard, J. E, Jr. and Burke, S. E., 1997, "Distributed Sensor/Actuator Design for Shape and Shading as Design Parameters," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 203, pp. 473~493.