

지능형 복합재료 구조물의 진동제어에 대한 계면접착 특성의 영향에 관한 연구

박종만[†] · 김대식 · 한상보*

경상대학교 고분자공학과, 항공기부품기술연구소, *경남대학교 기계공학부
(1998년 9월 16일 접수)

Studies on the Effects of Interfacial Adhesion on Vibration Controllability for the Smart Structure of Composite Materials

Joung-Man Park[†], Dae-Sik Kim, and Sang-Bo Han*

Department of Polymer Science & Engineering, Regional Research Center for Aircraft Parts Technology,
Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea

*Division of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Masan 630-701, Korea

[†]e-mail : jmpark@nongae.gsnu.ac.kr

(Received September 16, 1998)

요약: 지능형 구조물의 성능은 구조물과 부착된 압전 (PZT) 센서 및 구동기간의 계면결합 상태에 중요하게 의존하므로, 이들간에 최적 결합상태를 제공해 줄 수 있다고 고려되는 계면접착제를 사용하여 센서 및 구동기가 부착된 복합재료 보의 진동특성을 조사하였다. 서로 다른 세가지 접착제들, 즉, ethyl-2-cyanoacrylate계 순간접착제 (Type A)와, 인성과 강성도가 조절된 두가지 에폭시계 접착제 (Type B, C)를 대상으로 기계적 물성과 젖음성 등을 상대적으로 비교한 후 최적 조건의 계면접착제를 선택하였다. 이들 중에 에폭시계인 Type C는 시편이 심한 굴곡하중을 받는 조건에서도 Type A와 B에 비하여 계면접착층의 변형 상태는 복합재료 보/계면접착층/PZT 재료로 이루어진 복합층이 동일한 곡률의 굽힘 변형을 한다고 가정한 진동구조 모델에 적합하고, 기능성 구조물의 제조에 필요한 최적의 계면결합력과 구조물의 탄성거동을 충실하게 전달하는 기계적 요구 사항을 만족시켜 주었다. 또한, 계면접착제 C를 사용한 경우가 진동제어에 대한 응답속도가 가장 빠르다는 것을 알 수 있는데, 이것은 이 계면접착제를 사용할 경우 복합재료 보와 PZT 사이의 상대적인 완전결합이 형성되었다는 것을 의미한다.

ABSTRACT: The controllability of the performance of smart structures depends on the quality of the bonding along the interface between the main structure and the attached sensing and actuating elements. Using interfacial adhesives providing optimum bonding conditions between them, vibrational properties of the composite beams with attached sensor and actuator were investigated. Three different adhesives, i.e., ethyl-2-cyanoacrylate adhesives (Type A), toughness and stiffness controlled epoxy adhesives (Type B, C) were compared with each other. An optimal type adhesive was chosen based on their mechanical and wetting properties. Under a severe flexure loading condition epoxy-Type C was found to be most suitable for the vibrational structure model assuming that the composite beam/adhesive layer/PZT system deforms with the same curvature. In addition, Type C adhesive provided the optimized bonding for manufacturing the smart structure and transfer the elastic behavior precisely. In addition, the beam with Type C adhesive provided the fastest response time for the vibration control. This means that the optimized bonding between composite beam and PZT was formed relatively using this interfacial adhesive.

Keywords: interfacial adhesive, wettability, perfect bonding, PZT, sensor, actuator, damping ratio.

서 론

기계 및 구조물의 소음 및 진동 수준을 절감하기 위한 방법 중 능동제어의 개념을 활용한 기법이 최근 각광 받고 있다. 이는 공진 가능성의 회피를 위한 대상 구조물의 설계변경 등과 같은 수동적 개념의 진동 제어에 비하여 보다 정확한 진동응답 수준을 유지할 수 있으며, 또한 소형, 경량 정밀 기계요소와 정교한 동적 거동 제어에 탁월한 효과가 있다. 최근, 재료기술의 발달에 힘입어 이러한 능동제어에 효과적으로 이용될 수 있는 기능성 재료들이 많이 등장하고 있으며, 그 중 lead zirconite titanite로 만든 PZT (piezoelectric) 계열의 압전재료들은 높은 구조강도, 뛰어난 성형성, 상온에서의 불변성, 적용의 용이함과 같은 장점 때문에 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 고분자 복합재료의 경우와 같이 센서용 PZT와 구동기용 PZT를 하나의 적층판으로 이식시키든지,¹⁻³ 제어 대상 구조물의 표면에 센서용 PZT와 구동기용 PZT를 접착제를 사용하여 부착시키는 방법^{2,4-6} 등이 있다. 이 중, 접착제를 사용하여 구조물의 표면에 부착시키는 방법은 그 제어대상 구조물의 재질에 구애를 받지 않기 때문에 그 적용범위가 훨씬 넓다고 할 수 있다.

최근 진동 제어에 사용되고 있는 기능성 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 모형을 접착제의 특성을 고려해 주어야 보다 완전한 제어모델이 얻어진다는 것을 의미한다. 기존의 연구결과들 중 접착제 자체의 물성치와 그 계면의 상태를 제어 모형에 고려한 경우는 거의 없는 데, 이는 구조물과 PZT사이의 층이 박판이므로 재료물성이 접합부에서 불연속이 되는 것을 무시할 수 있다고 가정하였기 때문이며, 이러한 접합부 모형의 불완전성을 계의 모형이 불완전하더라도

제어성능이 발휘되는 적용제어와 같은 제어 법칙의 적용으로 이를 해결하려고 해 왔었다.

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-변형 관계식을 고려한 Crawley 등의 연구결과와² 계면접착층과 압전재료의 두께가 주 구조물의 두께에 비하여 상대적으로 작을 경우 계면접착층은 완전결합의 조건을 제공해 주며 압전재료 내의 응력분포는 두께방향으로 균일하다고 가정한 Kwak 등의 연구결과가^{4,5} 있다.

한편, 이와는 별도로 점탄성 성질을 가진 재료를 샌드위치 형상의 복합구조물로 제작하여 이것을 하나의 독립된 부품으로 주 구조물에 부착시킨 뒤 진동제어 장치를 구성하고자 하는 연구결과들도¹¹⁻¹³ 있으나 이 경우, 역시 점탄성 재질과 압전소재로 구성된 제어를 주 구조물에 완전 결합시킨다는 단순한 가정을 출발점으로 하고 있다.

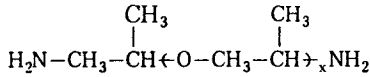
본 연구는 일정한 두께를 가지며 주 구조물과 압전재료 사이에 최적의 일체형 접착상태를 제공할 수 있는 세 종류의 계면 접착제, 즉, ethyl-2-cyanoacrylate계 순간접착제 (Type A)와 두 종류의 인성과 강성도가 조절된 에폭시계 계열접착제 (Type B, C)를 대상으로 기계적 물성과 젖음성 등을 상대적으로 비교한 후 최적 조건의 계면접착제를 선택하여, 계면접착층과 주 구조물인 유리섬유/에폭시 복합재료 보와 압전재료인 PZT사이의 변형도의 불연속이 없이 두 구조물간에 완전 결합을 구현한 복합구조물의 진동특성을 비교 조사하였다.

실 험

재 료.

계면접착제: 본 연구에 사용된 접착제는 국도화학의 YD-128이라는 상품명으로 에폭시 수지를 사용하였다. YD-128은 bisphenol-A의 diglycidylether (DGEBA)가 기저 물질로 되어 있다. 경화제로는 polyoxypropylene diamine인 Jeffamine D400과 D2000이 사용하였는데, D400과 D2000의 혼합비율을 달리하여 유연성을 조절하였다. Jeffamine 경화

제의 화학구조식은 다음과 같다.



여기서, x 는 D400의 경우 약 5.6이며, D2000의 경우는 약 33.1 정도이다. 경화조건은 수지와 경화제를 비율에 따라 교반한 후 상온에서 5일간 경화시켰다. mPDA 경화제도 에폭시 물성 비교를 위해 사용하였는데 이는 고온경화의 경우 열에 의해 PZT sensor에 영향을 미칠 수 있기 때문에 사용하지 않았다. 그 중 대표적인 2종류의 계면접착제 즉, D400만 3g을 사용한 것을 Type B라 하고, D400 : D2000이 2.5g : 0.5g의 비율로 제조된 것인 Type C를 사용하였다. 그리고, 상용적으로 많이 이용되고 있는 ethyl-2-cyanoacrylate로 만들어진 순간 접착제 (Super Pegamento Gel, 3M)를 사용한 Type A를 비교 목적으로 이용하였다. 단일방향의 2mm 두께의 유리섬유로 강화된 에폭시 laminate 보 (beam)는 한국화이버로부터 제공되었다. 이들을 적정 크기로 절단하여 제진용 복합재료 시편으로 사용하였다. 그리고, 센서 및 구동기로 사용하는 Navy-type PZT는 lead zirconite titanite로 구성되어 있으며, 표면에 접착을 좋게 하기 위해 수지로 표면처리되어져 있다. Table 1은 사용된 PZT 재료의 물성치를 나타낸다.

실험.

접착제 수지의 인장, 굴곡, 및 전단시험: 에폭시계 접착제의 인장특성을 측정하기 위하여, 4가지 조성의 경화제에 따라서 dog-bone형태의 시편을 제조하여, UTM (universal testing machine, Lloyd LR10)을 사용하여 측정하였다. Cross head speed는 분당 1mm로 하였고, load cell은 10kN을 사용하였다.

Table 1. Material Properties for Navy-Type PZT Used as Sensor and Actuator

description	values (units)
lateral strain coefficient	1.8×10^{-10} m/V
Young's modulus	63.0 GPa
shear modulus	23.4 GPa
Poisson's ratio	0.35

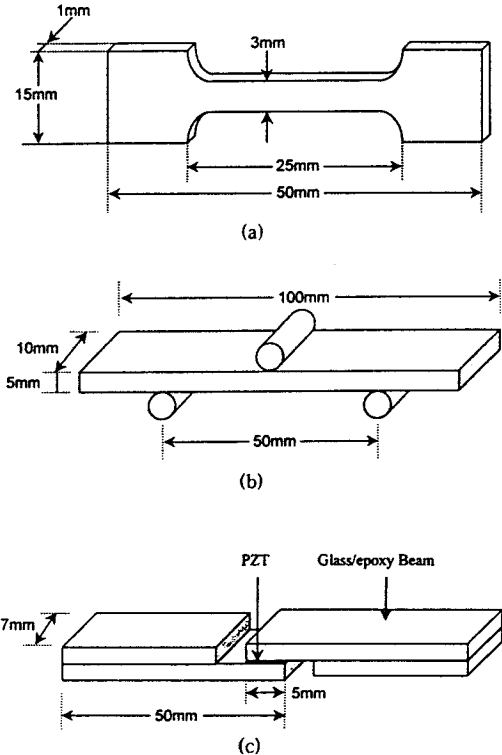


Figure 1. Specimen shapes for (a) tensile and (b) flexural test.

인장시편 형태는 Fig. 1(a)에 표시되었으며, 3점 굴곡강도 시험에서 시편은 KS M 3008의 규격에 의해서 Fig. 1(b)에 나타내었다. UTM의 load cell은 10kN, cross head speed는 분당 5mm, span length는 50mm로 하였다. 굴곡 강성도 (flexural modulus)는 아래의 식에 의해서 측정하였다.

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \cdot \frac{F}{Y} \tag{1}$$

여기서, L 은 span length, b 는 시편의 두께, h 는 시편의 나비, F 는 하중-휨 곡선의 임의로 선택한 지점의 하중, Y 는 하중 F 에서의 휨이다. 최대 굴곡강도 (flexural strength)는 다음 식을 사용하여 측정하였다.

$$\sigma_{f \max} = \frac{3F_{\max} \cdot L}{2bh^2} \tag{2}$$

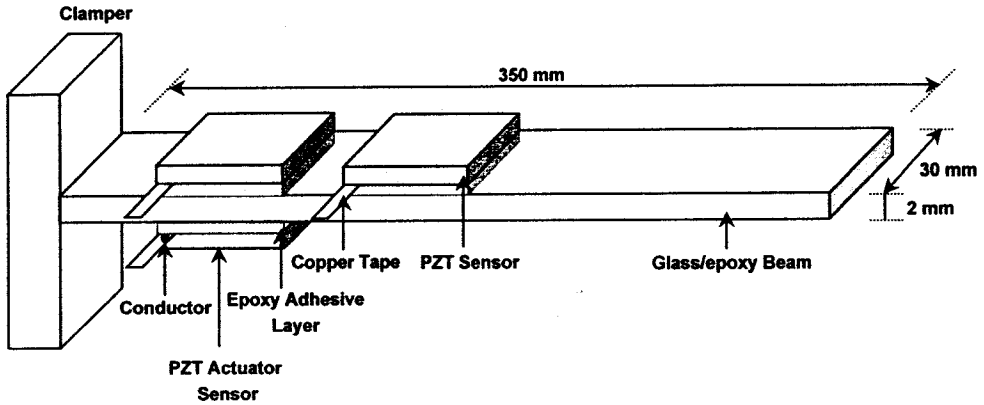


Figure 2. Dimensions and layout of the test beams and controllers.

시편은 한 조건당 3개씩을 측정하였다. Lap 전단 (shear) 시험은 Fig. 1(c) 형태의 시편을 사용하여, 4종류의 에폭시계에서 선택된 2종류와 통상 센서 접착용으로 많이 사용되고 있는 cyanoacrylate 접착제를 포함한 3종류를 상대 비교하였다.

시험용 Laminate 시편의 제조: Fig. 2에 측정시편의 형상을 나타낸 바와 같이, 길이 350 mm, 너비 30 mm, 두께 2 mm의 유리섬유/에폭시 복합재료 보 위에 센서로 작용하는 PZT를 한쪽 면에 에폭시계열 접착제로 접착시키고, 구동기 (actuator)로 작용하는 PZT를 같은 극의 방향으로 측정하는 보 양쪽에 접착시켜 측정시편을 제조하였다. 그리고, PZT와 전극을 연결하기 위해 사용한 copper tape 사이에는 좀 더 나은 전도성을 부여하기 위해서 silver paste를 사용하였다. 시편은 위의 각기 다른 3가지 접착제들 (Type A, B와 C)을 사용하였으며, 이들 접착제와 PZT센서 사이의 계면상태는 실물현미경을 사용하여 관찰하였다.

젖음성 (Wettability) 측정: 접착제와 피착제간의 젖음성이 구조물의 강도와 관련이 되는 것은 이미 잘 알려져 있다. 피착체인 PZT 센서와 사용되는 에폭시 접착제의 젖음성 측정은 KSV사의 Sigma 70을 사용하였으며, 동적 접촉각 (dynamic contact angle), 임계표면장력 (critical surface tension), 그리고 표면에너지 (surface free energy)를 polar 항과 dispersive 항으로 분리하여 측정하였다. 임계표면장력 측정을 위해 사용된 용매는 이중으로 증류된 물, formamide, ethyleneglycol, 그리고 dimethylforma-

midide이다. 접촉각은 아래의 Wilhelmy식을 이용하여 측정하였다.

$$F = mg + P\gamma_{LV} \cos \theta - F_b \quad (3)$$

여기서, F 는 전체 힘, m 은 plate의 무게, g 는 중력가속도, F_b 는 부력, P 는 plate의 perimeter, γ_{LV} 는 액체의 표면장력이다. $F - mg$ 는 측정된 힘과 같고, 측정표면에서의 부력은 0이 되기 때문에 위 식은 다음과 같이 전환할 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{M \cdot g}{\pi D \gamma_{LV}} \quad (4)$$

여기서, M 은 측정된 힘이다. 임계표면장력 값은 $\cos \theta$ 가 1이 되는 값으로 γ_{LV} 와 $\cos \theta$ 를 도식한 Zisman 도식을 이용하여 측정하였다. Polar와 dispersive 표면에너지 값을 구하기 위하여 Young-Dupre 식인 식 (5)와 geometric mean을 이용한 Owens-Wendt 방법을¹⁴ 이용한 식 (6)과 같다.

$$W_a = \gamma_l ((1 + \cos \theta)) \quad (5)$$

$$\frac{W_a}{2\sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_s^p} \left(\frac{\sqrt{\gamma_l^p}}{\sqrt{\gamma_l^d}} \right) + \sqrt{\gamma_s^d} \quad (6)$$

$$W_a^l = 2 \{ \sqrt{\gamma_1^d \gamma_1^d} - \sqrt{\gamma_1^p \gamma_1^p} - \sqrt{\gamma_2^d \gamma_1^d} - \sqrt{\gamma_2^p \gamma_1^p} + \sqrt{\gamma_1^d \gamma_2^d} + \sqrt{\gamma_1^p \gamma_2^p} \} \quad (7)$$

위 식에서 W_a 는 일함수(work of adhesion), γ_1 , γ_2 그리고 γ_3 는 이미 사용하는 용매의 알려진 값이며, $\cos \theta$ 값은 식 (4)를 이용하여 측정할 수 있다. 고유한 polar와 dispersive 값을 가지는 세 번째 물질이 존재할 때, 좀 더 복잡한 (7)의 식으로 표시할 수 있다.¹⁵ 여기서, γ_1 는 중간에 들어가는 물질의 표면에너지 값이다. 따라서 각각의 용매에 따라 식 (6)을 이용하여 $(\sqrt{\gamma_1}/\sqrt{\gamma_1})$ 와 $W_a/2\sqrt{\gamma_1}$ 를 도시한 그래프의 기울기로부터 polar 표면에너지를 구하며, 절편으로부터는 dispersive 표면에너지를 구할 수 있으며 두 재료로부터 일함수 W_a 를 구할 수 있다. 그리고, 접합하는 두 재료와 사이에 제 3의 물질이 들어갈 경우, 그 물질에 대한 polar 값과 dispersive 값들을 알면 세 물질간의 변형된 일함수 값인 W_a' 를 또한 구할 수 있다.

시험 구조물 복합재료의 제조 및 진동제어 시험. 유리섬유 복합재료 (300×30×1.3 mm)로 제작된 3개의 외팔보에 대한 진동제어 효과를 살펴보기 위하여 각각의 보에 25×25×0.4 mm PZT 2개를 Bimorph 형으로 구성하여 보의 양면에 작동기로 부착하였고 작동기로부터 5 mm 떨어진 점에 한 개의 센서를 부착하여 보의 일차 모드만을 제어하도록 하

였으며, PZT와 전극을 연결하기 위해 사용한 copper tape 사이에는 좀 더 나은 전도성을 부여하기 위하여 silver paste를 사용하였다. PPF 제어기법을 적용하기 위한 제어회로는 간단한 전자소자인 OP-Amp를 사용하여 2차 저역 필터로 표현되어지는 동일한 아날로그제어기를 독립적으로 구성하여 각각의 보에 연결하였다. 능동 진동제어의 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. Fig. 2는 센서 및 작동기로 실험의 개략적인 시편모양을 나타낸 것이며 Fig. 3은 실험측정에 대한 장치도를 나타낸다.

결과 및 고찰

계면접착제의 기계적 물성 및 젖음성. Fig. 1(a)

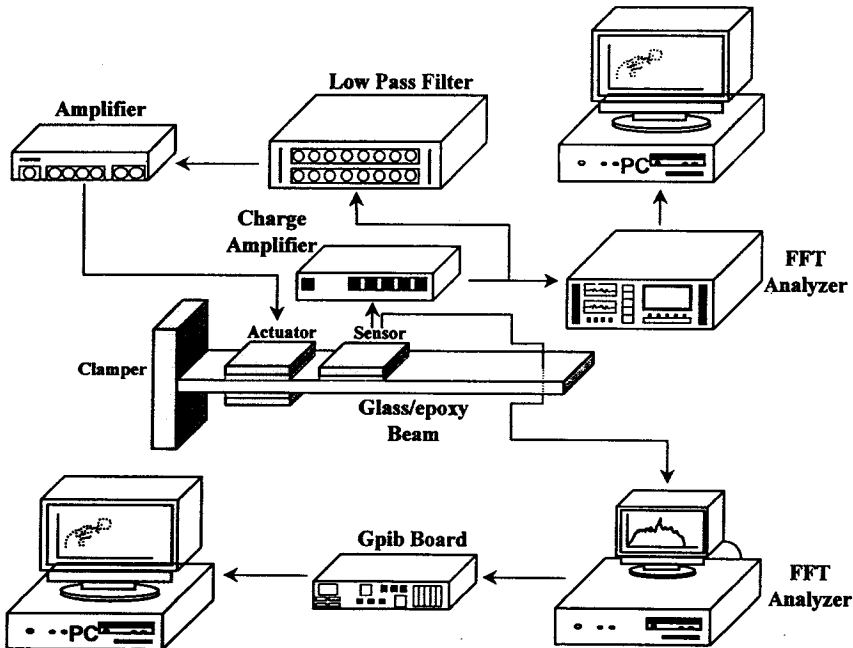


Figure 3. Schematic plot of vibration experimental system.

Table 2. Mechanical Properties of the Epoxy Specimens on Various Curing Agents via Tensile Test

curing agents	tensile strength (MPa)	tensile modulus (GPa)	strain at breakage (%)
mPDA ^a	84.2(7.0) ^c	2.52(0.4)	5.5(0.8)
D400 ^b	41.4(3.8)	2.00(0.2)	8.8(2.6)
D400+D2000 ^c	35.8(6.6)	1.76(0.2)	46.6(1.9)
D400+D2000 ^d	24.6(1.9)	1.56(0.2)	66.6(5.2)

* Test conditions: Cross head speed=1 mm/min and 4 specimens were used.

^a mPDA: Brittle resin; ^b D400 : D2000 = 3 g : 0 g; ^c D400 : D2000 = 2.7 g : 0.3 g; ^d D400 : D2000 = 2.5 g : 0.5 g; () : Standard deviation.

Table 3. Mechanical Properties of the Epoxy Specimens on Various Curing Agents via Three-point Bending Test

curing agents	max. flexural strength (MPa)	flexural modulus (GPa)	deformation at max. flexural strength (mm)	deformation at fracture (mm)
mPDA ^a	139.7(4.3) ^e	2.90(0.13)	11.1(0.2)	14.0(0.9)
D400 ^b	87.0(2.0)	2.59(0.25)	6.4(0.4)	41.0(7.0)
D400+D2000 ^c	84.4(4.2)	2.45(0.28)	6.3(0.7)	- ^f
D400+D2000 ^d	58.0(6.4)	1.84(0.59)	7.2(0.8)	-

* Test conditions: Cross head speed=5 mm/min, Span length=50 mm.

^a 3 specimens were used ^a mPDA: Brittle resin; ^b D400 : D2000 = 3 g : 0 g; ^c D400 : D2000 = 2.7 g : 0.3 g; ^d D400 : D2000 = 2.5 g : 0.5 g; () : Standard deviation; ^f No breaking.

형태의 시편을 사용한 에폭시계 접착제들의 인장시험 결과를 Table 2에 나타내었고, 그들의 응력-변형 곡선을 Fig. 4에 표시하였다. mPDA를 사용한 조건이 가장 큰 강도와 강성도를 보였고, D400 : D2000을 조절된 조성의 Type C 시편에서 가장 낮은 값을 보였다. 그리고, mPDA와 D400만 사용한 Type B의 시편은 낮은 연신율을 보이므로 센서용 접착제로 사용할 경우 취성이 강해 굴곡 시에 계면파단이 쉽게 일어날 것으로 생각된다.

Table 3과 Fig. 5는 Fig. 1(b)에서 보여주는 형태의 시편을 사용한 3점 굽힘시험의 결과와 위의 응력-변형 곡선을 도시한 것이다. 인장시험의 결과와 유사한 경향을 보였으며, 대체로 좀 더 큰 강도와 강성도를 보였는데 이는 3점 굽힘시험의 경우가 인장

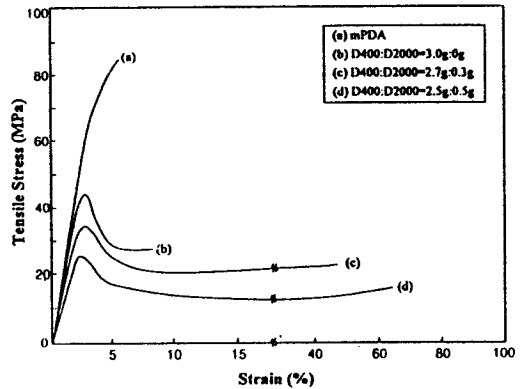


Figure 4. Stress-strain curve of tensile test of various epoxy matrix.

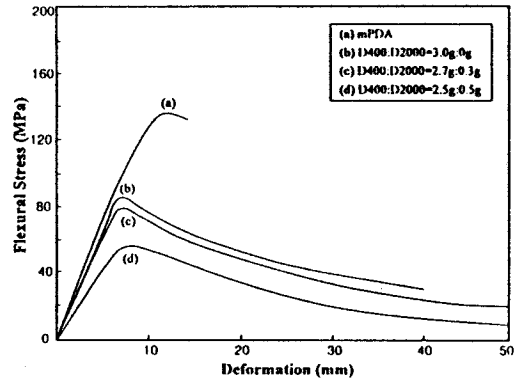


Figure 5. Stress-strain curve of flexural test of various epoxy matrix.

시험의 경우보다 시편에 표면과 내부에 존재하는 결함의 영향을 덜 받기 때문으로 고려된다. mPDA와 D400만을 첨가한 시편들만이 파단되었고, D400과 D2000을 적절하게 조절하여 넣은 시편은 파단되지 않고 휘어짐을 보였다. 기준 하중 하에서 (a) D400만 첨가한 것 (Type B), (b) D400 : D2000의 비를 조절하여 첨가한 시편 (Type C)의 휨 상태를 비교하였다. 좀 더 취성이 강한 Type B 시편이 휨 정도가 적은 것을 나타내었다. 즉, Type C가 가장 큰 인성을 보여주므로 본 실험에 대한 계면접착제로써 역할을 잘 할 수 있을 것으로 예상되었다.

Table 4와 Fig. 6은 Fig. 1(c) 형태의 시편을 사용하여, 위의 인장 및 굽곡시험에서 선택된 에폭시계 접착제 2종류와 실용적으로 많이 사용되고 있는

Table 4. Mechanical Properties of 3 Types Adhesive on Epoxy Beam via Lap Shear Strength

adhesive	lap shear strength (MPa)	lap shear modulus (GPa)	strain at max. lap shear strength (%)
cyanoacrylate (Type A)	7.4(1.42) ^a	2.8(0.33)	9.4(1.19)
epoxy (Type b)	9.3(0.10)	2.2(0.32)	15.1(0.20)
epoxy (Type C)	4.4(0.77)	1.5(0.07)	9.9(0.73)

* Test conditions : Cross head speed=0.5 mm/min. ^a () : Standard deviation.

Table 5. Surface Free Energies and Critical Surface Tension for 3 Adhesives and 2 Adherents

surface free energy (mJ/m ²)	adhesive			adherent	
	cyanoacrylate (Type A)	epoxy (Type B)	epoxy (Type C)	epoxy*	PZT
polar surface free energy (γ_s^p)	4.0	5.1	7.2	5	12.2
dispersive surface free energy (γ_s^d)	25.7	28.9	23.8	41.2	20.8
total surface free energy (γ_s)	29.7	33.0	31.0	46.2	33.0
critical surface tension (γ_c) (dyn/cm)	26.4	33.5	30.5	43	25.7

* Values are cited from Ref. 14.

cyanoacrylate계 순간접착제를 포함한 3 Types 접착제를 사용한 lap 전단시험의 결과와 이의 응력-변형 곡선을 나타낸 것이다. Type A와 B의 경우에 전단강도와 전단강성도가 각각 큰 값을 보였으며, Type C는 가장 작은 값을 보였으며 시편은 파단되지 않았다. 이는 Type C 계면접착제가 적절한 인성이 Type A, B 경우보다 훨씬 더 크며, 본 실험에 가장 적합하다는 것을 의미한다.

Table 5에는 순간접착제인 Type A와 두 종류 에폭시계인 Type B, C의 임계표면장력과 표면에너지를 나타내었고, Table 6에는 그들의 PZT와 에폭시 보에 대한 일함수 및 변형된 일함수의 값들을 나타내었다. Fig. 7은 Type B에 대한 표면장력 값이 서로 상이한 4가지 용매를 사용하여 측정한 동적 접촉각에 대한 그림을 보여준다. 용매의 표면장력 값이 작

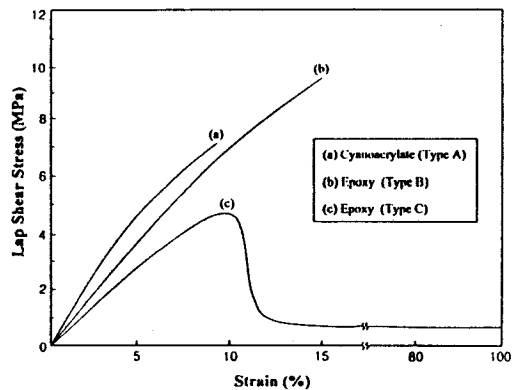


Figure 6. Stress-strain curve of lap shear test for 3 Type adhesives.

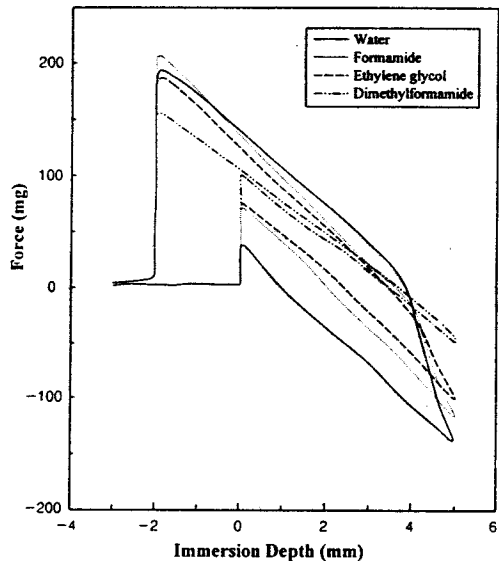


Figure 7. Dynamic contact angles of Type B adhesive in 4 different solvents.

아질수록 advancing과 receding 값의 차인 hysteresis가 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 PZT에 대한 임계표면장력을 구하기 위한 Zisman plot을 도시한 것이며, Fig. 9는 PZT와 에폭시에 대한 주어진 표면장력의 값들에서 각 용매에서, Wilhelmy 시험법을 사용한 동적접촉각의 값들을 Owens-Wendt식으로 도시한 것이다. 한 고분자 표면에 대한 임계표면장력 (γ_c) 값이 작을수록 표면에 methylene (-CH₂-)이나 methyl기 (CH₃-) 같은 소

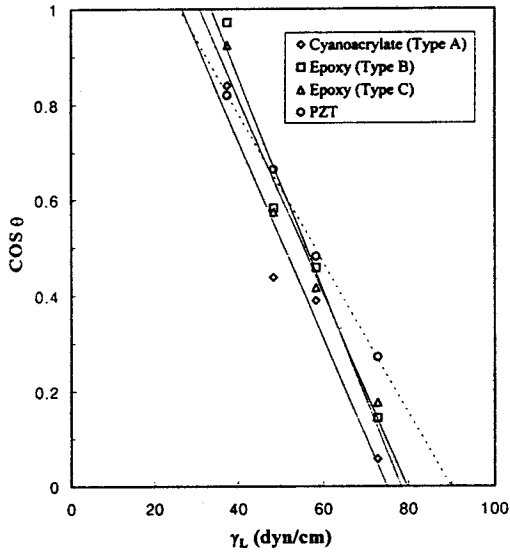


Figure 8. Zisman plot of critical surface tension for PZT and epoxy.

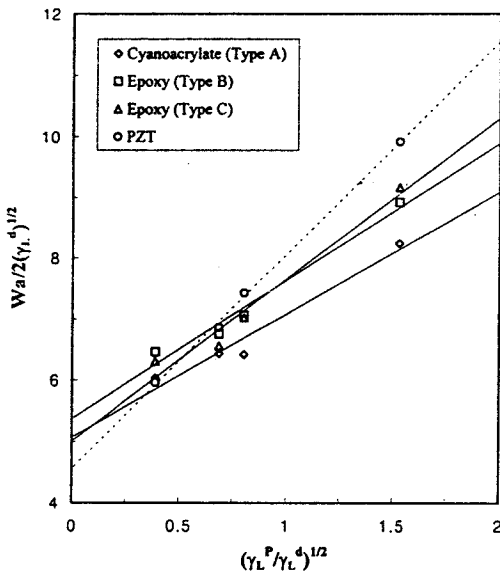


Figure 9. Owens-Wendt plot of surface energies for PZT and epoxy.

수성기가 많이 존재하는 것으로 알려져 있으며, 이 반면에 임계표면장력 값이 큰 경우는 hydroxyl (OH-)이나 amine (NH₂-) 같은 친수성 성분이 많이 존재하는 것으로 알려져 있다.¹⁶ 같은 에폭시계열의

Table 6. Work of Adhesion (W_a) and Modified Work of Adhesion (W'_a) for 3 Adhesives and 2 Adherents

work of adhesion (mJ/m ²)	adhesive	adherent		
		cyanoacrylate (Type A)	epoxy (Type B)	epoxy (Type C)
W_a	PZT	60.2	64.7	63.2
	Epoxy	73.9	79.1	74.6
W'_a	PZT and Epoxy	70.1	68.3	61.6

수지라고 할지라도 경화제의 종류 등에 따라 표면의 화학적 성질이 다르게 영향을 주기 때문에 상이한 표면에너지의 물성을 보여 주었다. PZT 표면의 polar 항의 값은 에폭시의 경우보다 훨씬 더 큰 값을 보였다. 이는 PZT의 전체표면에너지 값 중에서 polar 항이 12.2 dyn/cm으로 상대적으로 상당히 큰 값을 가지므로 에폭시 보와 에폭시계 접착제 (Type B, C) 나 cyanoacrylate 접착제 (Type A)와의 결합력이 양호할 것으로 생각된다.

Table 6에서 에폭시 보와 PZT 각각간의 일함수 W_a 는 에폭시 Type B가 다소 큰 값을 보였으며, 그 반면에 변형된 일함수인 W'_a 는 cyanoacrylate 순간 접착제 Type A가 가장 큰 값을 보였다. Type C는 Type A와 B의 W_a 나 W'_a 값보다는 다소 작지만, Table 2~4와 Fig. 4~6에서 나타난 물성으로부터 유추할 수 있는 인성도를 고려할 때는 굽힘하중이 중요시되는 진동실험에 대한 계면접착제로 최적이라고 생각된다. 또한, Table 4에서의 전단응력에서도 가장 작은 값을 보여준 것과 상호관련성을 볼 수 있었다. 재료의 젖음성의 특성 중에서 표면에너지, 일함수, 및 변형된 일함수 그리고 임계표면장력 중에서 어느 하나가 lap 전단강도와 같은 기계적 특성과 직접적으로 관련이 있는 것이 아니라, 전체적으로 다소 다르게 계면결합력에 기여한다고 생각된다.

복합재료 보의 진동 특성에 대한 계면접착제의 영향. 본 연구의 주된 목적은 주 구조물과 주 구조물에 부착되는 압전재료와의 변형거동이 일치될 수 있도록 완전 접착상태를 보장해 주는 계면접착제의 효과를 진동실험을 통하여 확인하는데 있다. 3가지 형태의 계면접착제를 이용하여 압전재료인 PZT를 주 구조물과 결합시킨 후 미소 변위라고 볼 수 없을 정도의 과도한 크기의 곡률로 정적 굽힘 (static bending)을



(a)



(b)



(c)

Figure 10. Photographs of adhesive layers using 3 different adhesives.

준 복합재료 보의 단면 사진이 Fig. 10에 있다. Fig. 10은 최대 처짐 50 mm의 휨 상태에서 3가지 접착제 수지를 접착한 PZT와의 계면접착 상태를 나타내었다. Type A의 순간접착제를 사용한 경우는 초기 휨 상태에서 접착면이 떨어졌으며, Type C의 D400과 D2000을 조절한 상태가 가장 접착상태가 뛰어났으

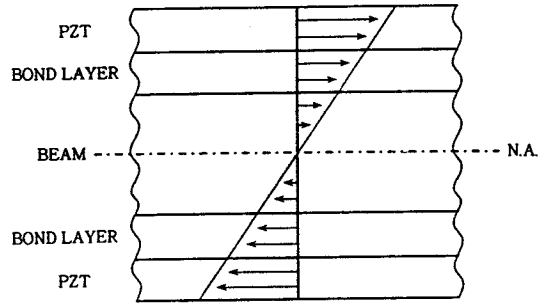


Figure 11. Strain distribution along the thickness of the beam-bond layer-PZT structure.

며, Type B의 D400만을 사용한 경우는 접착력이 Type C의 경우보다 작아서 계면이 떨어져 있는 것을 볼 수 있었다. 이 결과는 보에서 발생하는 진동의 신호를 센서에 전달하는 과정에 있어서 불완전한 결합상태를 제공하는 것으로 간주될 수 있다. Fig. 10에 주어진 단면을 제공하는 보들은 모두 곡률이 $\chi = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0.2975} = 3.3613$ 이 되도록 하였을 경우의 단면인데 계면접착제 A와 B를 사용한 보는 계면에서 파단이 일어난 것을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 계면접착제 C를 사용한 경우 곡률이 상당히 큰 값을 가짐에도 불구하고 계면 접착층의 변형상태는 주 구조물 그리고 압전재료의 변형상태와 동일하다는 것을 보여주고 있다. 이 사진이 보여주는 변형상태는 이상적인 계면접착제를 사용할 경우 복합재료 보/계면접착층/압전재료로 이루어진 복합층이 동일한 곡률의 굽힘 변형을 한다는 가정의 타당성을 보장해 준다. 복합층들의 굽힘곡률이 일정하고 보의 중립축과 복합구조물의 중립축이 일치할 경우 복합층 단면의 변형도는 Fig. 11과 같이 분포될 것이다. 이 경우 복합층 내의 임의점의 변형도는 단순보 이론에 의해 구할 수 있으며 구조물과 접착제층, 그리고 PZT로 단면이 구성된 보의 운동 방정식을 구하여 진동모형의 모델을 설정할 수가 있을 것이다.

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 3가지 구조물의 제어 효과의 차이는 사용된 계면접착제의 특성에 의한 것이라는 조건을 충족한다고 볼 수 있다.

구조물의 진동응답 특성 파악은 일정한 정하중을 준 상태에서 그 하중을 갑자기 제거시키는 이른바 Sudden Release 방법을 사용하여 단위 충격함수 (unit impulse function) 형태의 입력에 대한 구조물의 진동 응답을 알아보면 아래와 같은 식의 충격 응답함수의 형태로 주어짐을 알 수 있다.

$$\chi(t) = g(t) = \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{m\omega_d} \sin \omega_d t \quad (8)$$

여기서, ζ 는 감쇠비, ω_d 는 감쇠고유진동수, 그리고 ω_n 는 고유진동수이며, 충격응답함수의 주기는 $2\pi/\omega_d$ 가 된다. 제어기는 단일 모드제어에 있어 가장 안정적이고 응답 속도가 신속하며 비교적 설치가 용이한 PPF 제어기를 사용하였다. Fig. 12에 주어진 응답은 세 가지 구조물의 단위 충격함수형 입력에 대한 제어기가 작동되지 않는 open loop 응답이며, 이에 반해 Fig. 13은 제어기가 작동된 closed loop 응답을 나타낸다. 우선 open loop 응답은 세 가지 구조물의 사이에서 뚜렷한 차이를 발견할 수 없는데 이는 실험에 사용된 계면접착제의 효과가 구조물의 진동 특성에 끼치는 영향이 그다지 크지 않음을 보여 주었다. 그러나, closed loop 응답을 살펴보면 open loop 응답에서는 미미한 효과밖에 나타나지 않는 계면접착층의 영향이 응답속도에 어느 정도 기여함을 볼 수 있다.

시간영역에서의 그래프에서 각 peak point의 연장 곡선 (peak point을 서로 이은 곡선)의 기울기는 ζ 값에 의해 변화되어 표현되는데 제시한 접착제들을 비교하면 접착제들 중에서 C의 경우가 가장 큰 것을 알 수 있다. 시간 영역에서의 peak point을 이은 곡선은 지수 곡선 형태로 표시됨을 알 수 있다. 이 곡선은 $Xe^{-\zeta\omega_n t}$ 으로 표현되는데, 여기서 X 는 최대진폭, ω_n 는 고유진동수, ζ 는 감쇠비를 나타낸다. 결국, ω_n 는 고정된 값인 고유진동수를 나타내므로 ζ 값에 의해 기울기가 변화됨을 알 수 있다. 복합재료 보의 자유진동 응답과 제어기를 작동시킨 후의 보의 응답에 대한 최대진폭, 고유진동수, 감쇠비의 값들을 비교한 결과가 Table 5에 주어져 있다.

Fig. 12와 Fig. 13, 그리고 Table 7의 결과에서와 같이 시간 영역에서의 진동응답에서, 계면접착제 C

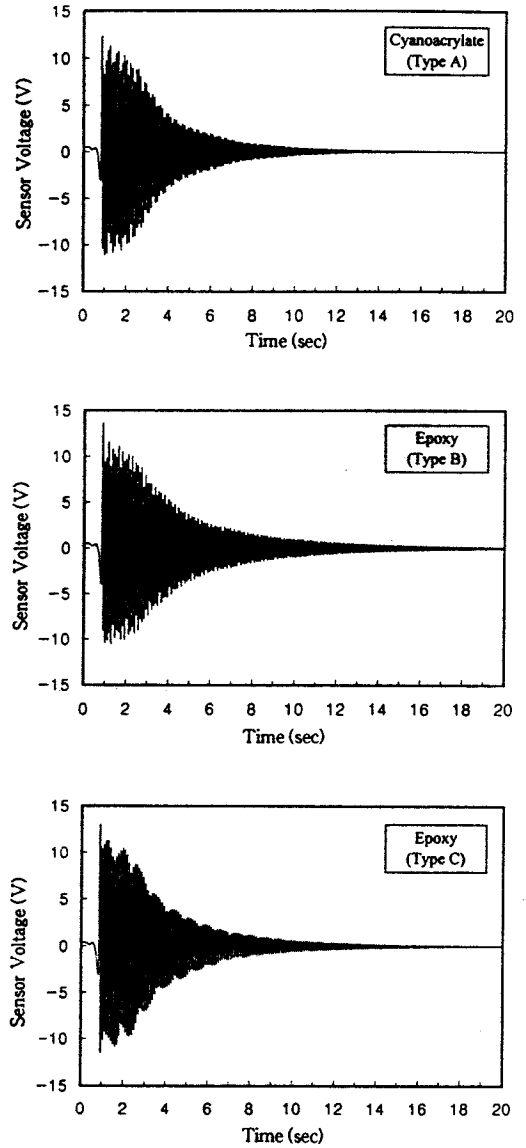


Figure 12. Time responses of beam with different type of bond layers with controller off: (a) Type A; (b) Type B; (c) Type C.

를 사용한 경우의 응답속도가 가장 빠른 것을 알 수 있는데 이것은 이 계면접착제를 사용할 경우 보와 PZT사이의 완전결합이 상대적으로 보장된다는 것을 의미한다. 계면접착제 A와 B의 경우 보와 구조물간의 완전결합 상태가 상대적으로 덜하며, 따라서 이러한 경우에는 계면접착층의 거동이 수직응력뿐만 아니

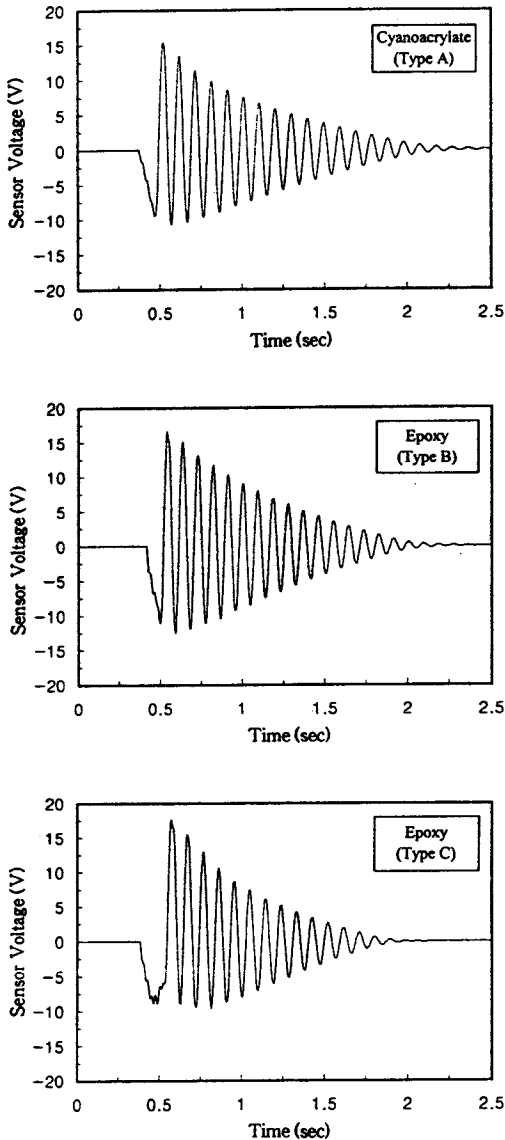


Figure 13. Time responses of beam with different type of bond layers with controller on: (a) Type A; (b) Type B; (c) Type C.

라 전단응력의 영향을 받고 있다고 할 수 있다. 또한, 구조물/계면접착층/PZT로 구성된 복합 적층의 굽힘에서 각 층이 동일한 곡률을 가지고 굽힘 운동을 하지 않는다는 것으로도 고려할 수 있다. 따라서, 본 실험의 결과로부터 계면접착제 C가 기능성 구조물의 제작에 필요한 최적의 표면결합력과 기계적 요구사항

Table 7. Single Degree of Freedom Response of Composite Beams with Different Adhesives

controller variation parameters	actuator off			actuator on		
	natural frequency (Hz)	damping ratio (ζ)	decay time (sec)	natural frequency (Hz)	damping ratio (ζ)	decay time (sec)
cyanoacrylate (Type A)	10.625	7.3×10^{-4}	19.3	10.375	6.6×10^{-2}	2.18
epoxy (Type B)	10.875	7.3×10^{-4}	19.3	10.875	6.7×10^{-2}	2.09
epoxy (Type C)	10.375	9.7×10^{-4}	19.2	10.625	6.7×10^{-2}	1.82

을 만족시키는 재료임을 알 수 있었다.

Fig. 14는 Fig. 12와 13에 주어진 시간 영역의 진동응답을 주파수 영역으로 변환한 PSD (power spectral density)를 보여 주고 있는데, 각 피크점은 보의 고유진동수를 나타낸다. 먼저, 제어기가 작동되지 않는 open loop의 경우를 살펴보면, Type A의 경우 보의 고유진동수 외에 복잡한 주파수 응답이 존재하며, 그 반면에 Type C의 경우는 보의 고유진동수에 해당하는 주파수 성분만 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 완전 결합상태를 이룬 접착제 C의 경우와 달리 접착제 A의 경우에는 보와 PZT 사이의 결합이 완전하지 못하여 보 구조물과 부착된 PZT 사이에 간섭운동이 발생하여 복잡한 성분의 주파수를 가진 운동이 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 주파수 영역에서 파악한 보의 진동응답을 통해서도 Type C의 경우가 복합구조물의 안정한 접착상태를 유지하여 구조물과 PZT간의 진동 특성 전달에 있어서 가장 효과적이라는 것을 알 수 있다. 제어기가 작동된 closed loop의 경우 고유진동수를 나타내는 피크점의 경사도가 open loop의 경우에 비해 훨씬 완만하게 나타나는 것은 본 실험에서 사용한 PPF 제어기를 통하여 구동기에 전달되는 제어신호의 역할이 보의 감쇠성분을 증가시키는 것과 같은 효과가 있다는 것을 나타내며 그 결과는 Fig. 13에서 보듯이 진동응답이 감소되는데 소요되는 응답시간의 단축으로 나타나게 된다.

계면접착층과 구조물에 부착된 기능재료는 일반적으로 최대 곡률이 발생하는 지점에 부착하게 되므로 제어대상 구조물의 강성도가 증가하는 효과를 주게 되며 본 실험에서의 같이 계면접착층의 두께가 주 구

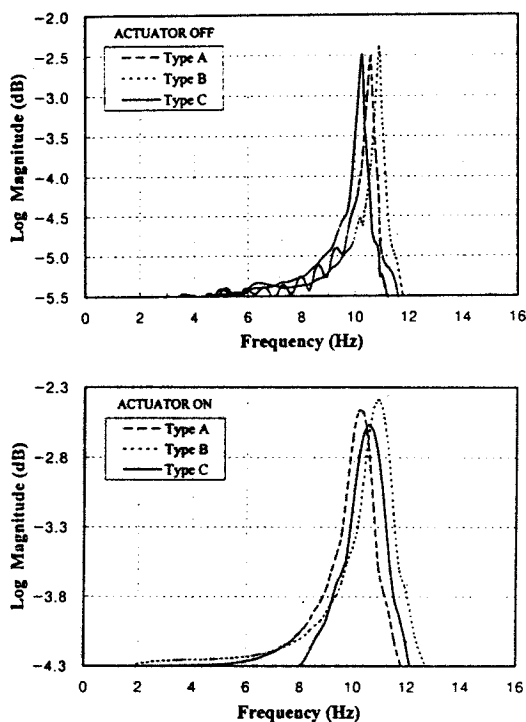


Figure 14. FFT spectrum of controller off and on for 3 Type adhesives.

조물에 비하여 상대적으로 크지 않을 경우에는 그 자체로써 보의 진동 특성에 미치는 영향은 무시해도 좋다고 볼 수 있다. 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 사용된 계면접착제 C는 이종재질 사이의 접착력을 최대한으로 보장하는 화학적 성질과 구조물의 탄성거동을 충실히 전달하는 기계적 성질을 동시에 갖춘 계면접착제로 향후 기능성 구조물의 제작에 많이 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

결 론

본 연구는 서로 다른 물성을 가진 복합재료 보와 PZT 센서 및 구동기간에 최적 결합상태를 보여 줄 수 있는 계면접착제를 사용하여 복합구조물의 진동특성을 조사하였다. 3가지 다른 접착제들인, ethyl-2-

cyanoacrylate인 순간접착제 (Type A)와 인성과 강도가 조절된 두 변형된 에폭시 계열접착제 (Type B, C)가 상대적으로 기계적인 특성과 계면 젖음성이 비교되었다. 제어 대상 복합재료 구조물과 부착되는 압전재료들간의 최적 결합상태를 보장하는 것이 지능 구조물의 제작에 있어 가장 중요한 문제 중의 하나이며, 그렇지 않으면 우수한 제어기법과 뛰어난 성능의 기능소자들의 효과가 반감되기 때문이다.

계면접착제 Type C를 사용한 경우 곡률이 상당히 큰 값임에도 계면접착층의 변형 상태는 주 구조물 그리고 압전재료의 변형 상태와 동일하다는 것을 보여주며, 복합재료 보/계면접착층/압전재료로 이루어진 복합층이 동일한 곡률의 굽힘 변형을 한다고 가정된 모델에 적합하고, 기능성 구조물의 제작에 필요한 최적의 계면결합력과 구조물의 탄성거동을 충실하게 전달하는 기계적 요구 사항을 만족시키는 것을 알 수 있었다. 또한, 계면접착제 Type C를 사용한 경우가 가장 시간에 따른 응답속도가 빠르며, 주파수 곡선이 안정된 것을 알 수 있는 데, 이것은 이 계면접착제를 사용할 경우 보와 PZT 사이의 최적 결합을 상대적으로 보장한다는 것을 의미한다.

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

참 고 문 헌

1. S. C. Huang, D. J. Inman, and E. M. Austin, *Proceeding of IMAC*, **14**, 39 (1996).
2. E. F. Crawly and Luis de Javier, *AIAA J.*, **25**, 1373 (1987).
3. X. Q. Peng, K. Y. Lam, and G. R. Liu, *J. Sound and Vibration*, **209**, 635 (1998).
4. M. K. Kwak and D. Sciuilli, *J. Sound and Vibration*, **191**, 15 (1996).
5. K. K. Denoyer and M. K. Kwak, *J. Sound and Vibration*, **189**, 13 (1996).
6. P. Akella, X. Chen, W. Cheng, D. Hughes, and J. T. Wen, *Smart Mater. Struct.*, **3**, 344 (1994).
7. K. O. Prakah-Asante and K. C. Crag, *Smart Mater.*

- Struct.*, **3**, 329 (1994).
8. S. E. Burke and R. L. Clark, *Proceeding of SPIE*, **2443**, 410 (1995).
 9. E. F. Crawly and E. H. Anderson, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **1**, 5 (1990).
 10. Y. K. Kang, H. C. Park, W. B. Hwang, K. S. Han, *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*, 407 (1995).
 11. B. C. Nakra, *J. Sound and Vibration*, **211**, 449 (1998).
 12. A. Baz, *J. Sound and Vibration*, **211**, 467 (1998).
 13. J. M. Sullivan, J. E. Jr. Hubbard, and S. E. Burke, *J. Sound and Vibration*, **203**, 473 (1997).
 14. D. K. Owens and R. C. Wendt, *J. Appl. Polym. Sci.*, **13**, 1971 (1969).
 15. A. J. Kinloch, W. A. Dukes, and R. A. Gledhill, in "Adhesion Science and Technology", ed. by L. H. Lee, Plenum Press, New York, 1975.
 16. A. V. Pocius, in "Adhesion and Adhesives Technology", Hanser Publishers, Cincinnati, 1997.