

論文

이방성 압전재료를 이용한 복합재료 평판의 진동 제어에 관한 연구

유정열* · 강우영** · 김승조***

A Study on the Vibration Control of Laminated Composite Plate by Using the Anisotropic Piezoelectric Materials

Jeoung Yeol Yu*, Woo Young Kang** and Seung Jo Kim***

ABSTRACT

By utilizing the fact that piezo polymers(PVDF) have anisotropic properties, a study on adaptive design of the integrated structure was carried out when PVDF was used as distributed actuator on laminated composite plate. In this study, a theory which not only considers the composite laminated plate but also treats piezo material as another laminated layer was developed. On the basis of theory developed, vibration control of the integrated structure was carried out. An apriori-modal controllability index which measures the effectiveness of actuator to a specific vibration mode of the structure was suggested. This index shows the correlation between inherent structure mode and deformed shape induced by the actuator. Linear optimal control theory was applied in order to control the specific vibration mode of structure and the open-loop and the closed-loop time responses of the tip displacement were examined. The results show that the control effectiveness of PVDF actuator can be predicted by the apriori-modal controllability index suggested. Furthermore the torsional mode and bending-torsion coupling mode can be controlled effectively by appropriate combination of both composite and PVDF ply angle which was not possible in conventional usage of distributed piezo actuator.

초 록

압전재료인 PVDF의 이방성을 이용하여 PVDF를 복합재 적층판에 분포 작동기로 사용할 경우 혼합 구조물 설계기법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 복합재 적층판뿐 아니라 앞전 필름도 하나의 층(lamina)으로 간주하여 평판의 운동방정식을 유도하였으며 혼합 구조물의 진동 제어가 수행되었다. 압전 작동기의 효율성을 고찰하기 위해 전 모달 제어성 지수를 제시하였다. 이 지수는 구조물의 고유 진동 모드와 압전 작동기에 의한 변형 형상간의 상관관계를 보여준다. 선형 최적 제어기법을 적용하여 구조물의 특정 진동 모드에 대한 제어를 수행하였으며 그 결과로

* 통상산업부, 회원

** 공군사관학교, 회원

*** 서울대학교 항공우주공학과, 회원

시스템의 개회로 및 폐회로 반응을 살펴보았다. 진동 제어 결과, 압전 작동기의 효율성을 제시된 전 모달 제어성 지수를 이용하면 적절히 예측할 수 있었다. 또한 일반적인 압전 작동기 이용법으로는 불가능했던 비틀림 모드와 굽힘과 비틀림이 연성된 모드를 복합재와 압전 필름의 적층각을 적절히 조합함으로써 제어할 수 있었다.

1. 서 론

최근 공학, 특히 항공 우주 분야에서는 구조물의 대형화, 경량화 추세에 따라 그 유연성(flexibility)이 증가하여 구조물의 진동 억제에 대한 관심이 고조되고 있다. 경량화로 인한 유연성의 증가는 기대하지 않았던 외란에 직면했을 때 구조물의 안정성이 위협받는 경우를 발생시킬 수 있으며 비록 위험하지는 않지만 지속적인 미세 진동의 잔류로 구조물의 성능에 영향을 줄 수 있다[1~2]. 이와 아울러 기계 및 구조물의 기능을 향상시키고 기대하지 않았던 외란에 안정적인 작동을 유지하도록 구조물에 지능성(intelligence)을 부여하고자 하는 시도가 매우 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구의 관심은 최근 '지능 구조물'(intelligent structure)이란 학문 분야로 발전하였다[3~5].

지능 구조물의 응용 분야는 매우 광범위하다. 예를 들면, 구조물의 능동 소음 억제, 능동 진동 억제, 가변 형상 구조물 등이 모두 지능 구조물의 연구 분야에 속한다. 이렇게 최근 지능 구조물 분야가 급격히 발전할 수 있었던 요인으로는 여러 가지가 있다. 그 요인으로는 설계시 중복되어 투자되는 경비와 시간, 이로 인한 동시 설계의 필요성 증가, 컴퓨터 성능의 발전, 수치 해석기법의 발달로 인한 보다 정확한 구조 해석, 제어 기법의 발전 등을 들 수 있다. 이러한 요인들 외에 지능 구조물 발전에 가장 크게 기여하고 있는 요인 중에 하나는 지능 재료(intelligent material)의 발달을 들 수 있다.

현재 구조물에 사용되고 있는 대표적인 지능 재료는 압전재료(piezoelectric material)라고 말할 수 있으며 이는 압전재료의 매우 빠른 반응 속도와 넓은 주파수 영역에 걸친 효과적 진동 억제 및 소음 억제가 가능하며 기존의 구조물에 쉽게 부착되어 사용될 수 있기 때문이다.

최근 들어 압전재료를 구조물에 이용한 연구가

활발히 수행되고 있다. 압전 분포 제어를 이용한 연구는 Hubbard et al.[6] 이후 활발히 진행되고 있으며 Hwang과 Park[7]은 복합재료 평판에 압전재료가 부착되어 있는 구조 모델을 2차원 DKQ 요소를 이용하여 각 모드의 감쇠를 해석하였다. Choi 등[8]은 압전 필름을 분포형 감지기/작동기로 사용하여 다양한 형태의 제어를 이용 등방성 외팔보의 능동 진동 억제를 실험으로 구현한 바 있다. Lee et al.[9]은 압전 변형률 속도 감지기와 작동기를 개발하였는데 여기서 처음으로 압전 폴리머의 이방성을 이용하여 등방성 재료의 비틀림 형상을 구현하였다. 그리고 Barret[10]은 등방성 판 구조물에 압전 세라믹을 여러 가지 부착 방법을 통해 방향성을 갖도록 하여 구조물의 반응에 관한 연구를 수행하였다. 현재까지 압전 재료를 이용한 구조물의 진동 억제에 관한 대부분의 연구에서는 압전재료의 특성 및 장점을 충분히 활용하지 못하고 이산 제어기(discrete actuator)로서의 역할을 하거나 분포 제어기(distributed actuator)로서의 역할을 하더라도 제어하고자 하는 구조물의 모델이 제한적이다.

이상과 같은 연구 배경을 토대로 본 논문에서는 지능 구조물 해석의 전 단계로 지능 재료들 중 압전 폴리머(PVDF)의 특성을 충분히 살리고자 압전 폴리머의 이방성을 고려하여, 복합재료 구조물에 부착되어 분포 작동기로써의 역할을 수행할 때 복합재료 평판의 적층각과 압전 폴리머의 각도와와의 상호 관계를 살펴보고 복합재료 판형 구조물의 특정한 진동 모드(specific vibration mode)의 제어에 관한 연구를 수행하였다. 아직까지 압전 폴리머의 이방성을 복합재료에 적용하여 특정한 진동 모드 제어에 관한 연구는 수행된바 없으며, 연구 결과를 토대로 구조물 설계 시작부터 구조 분야와 제어 분야의 연계를 고려하는 적응 설계(adaptive design)의 기술을 마련하고자 한다.

2. 운동방정식과 유한요소법의 적용

일반 등방성 재료에 비해 복합재료는 전단 탄성 계수대 섬유방향 탄성계수의 비가 매우 크므로 상대적으로 중요한 두께 방향의 전단 변형을 허용하는 1차 전단 변형 이론(first order shear deformation theory)[11]을 혼합 구조물(Fig.1)에 적용하였다.

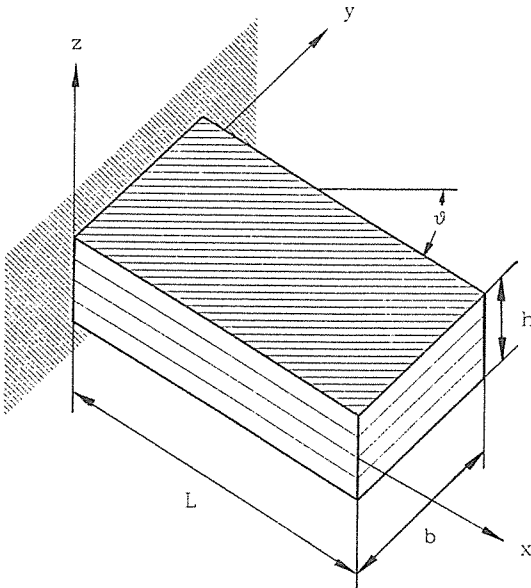


Fig. 1. Configuration of cantilevered integrated composite plate

변위 벡터 $u = u_1 e_1 + u_2 e_2 + u_3 e_3$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$u_1(x, y, z, t) = u(x, y, 0, t) + z \phi_1(x, y, t)$$

$$u_2(x, y, z, t) = v(x, y, 0, t) + z \phi_2(x, y, t)$$

$$u_3(x, y, z, t) = w(x, y, 0, t)$$

주 구조물인 복합재료 평판의 구성 방정식은 직교 이방성 응력-변형도 관계식으로부터 각 층(Lamina)별로 좌표변환을 통하여 적층각 효과를 고려하였으며, 압전 필름에 대해서는 탄성장과 전기장을 연계시키는 압전 선형 관계식에 좌표변환을 통하여 압전 필름이 가지는 이방성 효과를 고려하도록 하였다. 혼합 구조물의 각 층에 대한 탄성장과 전기장을 연결하는 선형 작동식을 형상 주축에 대해 표현하면 아래와 같이 표현된다.

$$\sigma = T^{-1} c T (\epsilon - d E)$$

여기서 T 는 텐서 변환행렬이며, c 는 탄성계수 행렬, d 는 압전 변형도/전하 상수(piezo strain/charge constants) 행렬이고 E 는 전기장 벡터이다. 혼합 구조물의 구성 방정식은 복합재료 층과 압전 필름 층에 대해 고전 적층 이론(Classical Lamination Theory)을 적용하여 이끌어 내었다. 여기서 횡전단 변형과 관련된 탄성계수는 전단보정계수(Shear Correction Factor)를 이용하여 보정하였으며 일반적인 값인 5/6를 보정계수로 사용하였다. 압전재료 작동기가 혼합 구조물(integrated structure)에서 하나의 단층을 이루고 있을 때, 복합재료와 압전 폴리머의 방향성을 동시에 고려하여 변분이론을 이용하여 지배 방정식을 구성하였다[11]. 지배 방정식에서 압전재료에 의한 작동력은 혼합 구조물의 두께 방향으로 적분함으로써 면내 인장 작동력과 작동 모멘트로 나타난다.

현재까지 정립된 이론을 바탕으로 평판의 평형 방정식에 가상변위를 적용하고 발산정리를 적용하여 약형을 얻었다. 본 연구에서는 각 절점에서 5개의 자유도를 가지는 9절점 요소를 이용하여 약형을 이산화하고 이에 유한요소법을 적용하여 프로그램을 개발하였다. Shear Locking을 해결하기 위하여 선택적 감소 적분을 이용하였다[11].

3. 정적 실험 및 유한요소 해석 결과

3-1. 실험의 준비

본 실험을 위해 구입한 압전필름(PVDF)은 쉽게 구할 수 있고, 표면에 은(Ag)이 증착되어 전극(electrode)을 쉽게 부착할 수 있는 미국 Pennwalt사의 Kynar Piezo Film으로 두께는 110 μm 이다 [12]. 복합재 평판은 한국 화이바(주)에서 제조된 두께 0.125mm의 탄소 섬유 프리프레그를 이용하여 tmp사(Technical Machine Products Corp., USA)의 hot press를 사용하여 제작하였다.

시편의 제작과정을 살펴보면 먼저 압전 필름을 실험 목적에 맞추어 잘라 내고, 잘라 낸 필름의

전극을 뽑아 낸 후, 주 구조물과 압전 필름을 접착 필름(adhesive film)을 이용하여 hot press에서 적절한 경화 주기를 통해 접착시켜 혼합 구조물 시편을 완성한다. 제작된 시편에서 주 구조물인 복합재료를 실험시 접지 전극으로 사용하였다.

3-2. 실험과 유한요소 해석 결과의 비교

개발한 유한요소 코드를 이용해 해석 결과와 정적 실험의 결과를 비교하여 보았다. 실험에 사용된 시편은 외팔 보로 길이(L) 160mm, 폭(b) 20mm이다. PVDF는 복합재료의 상하 면에 부착되어 작동기로서의 역할을 수행한다.

본 연구에서는 두 가지의 실험을 수행하였는데 그 첫 번째는 평판이 $[45_p/\theta_c/\theta_c/-45_p]$ 의 적층각을 가지는 경우와 두 번째는 $[0_p/\theta_c/\theta_c/0_p]$ 의 경우이다. 여기서 하첨자 p는 압전재료의 각을 나타내는 것이며 c는 복합재료의 적층각을 나타낸다. 압전재료의 물성치는 탄성계수 2.0×10^9 (N/m²), 두께 110 μ m, 밀도 1780 Kg/m³, 그리고 변형도/전압상수는 $d_{31} = 23. \times 10^{-12}$ (m/V), $d_{32} = 3. \times 10^{-12}$ (m/V)이다. 복합재료의 물성치는 탄성계수 $E_1 = 131.0 \times 10^9$ (N/m²), $E_2 = 7.84 \times 10^9$ (N/m²), $G_{12} = 3.9 \times 10^9$ (N/m²), 두께 125 μ m, 그리고 밀도 1500 Kg/m³이다. 복합재료의 적층각 θ_c 가 0°, 30°, 45°, 90°인 시편을 제작하여 복합재료의 적층각의 변화에 따른 구조물의 정적 변형 특성을 살펴보았다. 압전 폴리머가 주 구조물의 상하 면에 $[0_p/0_p]$ 로 부착되어 있는 경우는 굽힘을 일으키도록 서로 다른 방향으로 전압을 가해 주었으며, $[45_p/-45_p]$ 인 경우는 비틀림이 일어나도록 서로 같은 부호의 전압을 가해 주었다. 실험 결과 나타나는 시편의 변형은 비접촉 광학계(ORIENTEC Co., Japan)를 이용하여 시편 끝단의 변위를 측정함으로써 구하였다.

1) $[45_p/\theta_c/\theta_c/-45_p]$ 의 경우

복합재료의 적층각이 $\theta_c = 0^\circ, 90^\circ$ 일 경우 구조물에 순수한 비틀림 변형만 유도됨을 관찰할 수 있었다. $\theta_c = 30^\circ, 45^\circ$ 일 경우는 굽힘 변형과 비틀림 변형이 서로 연계되어 나타남을 알 수 있었다. 만약

복합재료 대신 등방성 재료를 사용하였을 경우에는 단지 순수한 비틀림 형상만이 나타났을 것이 예상된다. 그러나 복합재료의 적층각이 0°와 90°의 경우를 제외하면 굽힘과 비틀림 형상이 복합적으로 나타나는 것을 관찰하였다. 예상대로 순수 비틀림 각도는 $\theta_c = 45^\circ$ 일 경우가 나머지의 경우 보다 더욱 작게 나타남을 알 수 있었는데, 이는 일반적으로 복합재료의 비틀림 강성이 $\theta_c = 45^\circ$ 인 경우에 가장 크므로 물리적으로 타당함을 알 수 있다. 본 실험에서 측정된 끝단의 순수 비틀림 각도와 유한요소 해석 수행 후 얻은 결과를 Fig.2에 나타내었으며 실험 결과와 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

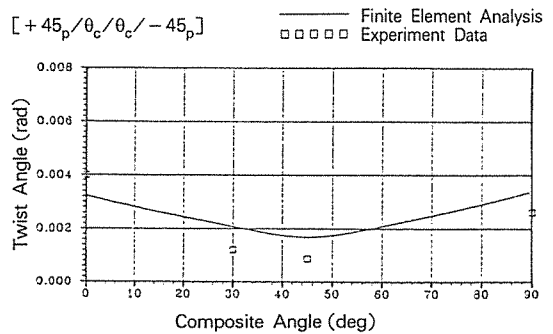


Fig.2. Experimental results and FEM results of tip twist angle of the test specimen vs. variation of composite layer angle(input voltage = 293 volt).

2) $[0_p/\theta_c/\theta_c/0_p]$ 일 경우

이와 같은 적층 상태에서는 순수한 비틀림 형상은 나타나지 않았다. 순수 굽힘 변형은 $\theta_c = 0^\circ, 90^\circ$ 인 경우에 나타났으며, $\theta_c = 45^\circ$ 인 경우 굽힘-비틀림이 연계된 변형 형태를 얻었다. 이 경우 역시 주 구조물(host structure)이 등방성이라면 순수 굽힘 형상만이 관측될 것이나 복합재료의 사용으로 인해 굽힘과 비틀림이 연계되어 나타남을 알 수 있다. 비록 순수한 비틀림 변형 형상은 나타나지 않았으나 상대적인 비틀림 각도의 크기는 $[45_p/\theta_c/\theta_c/-45_p]$ 의 경우 보다 크게 나타났다. 이는 복합재료의 섬유 방향의 계수 E_1 이 E_2 나 G_{12} 에 비해 크기 때문에 나타나는 현상이라 할 수 있다. 끝단 변위의 복합 적층각에 대한 변위는 Fig.3에 나타내었다.

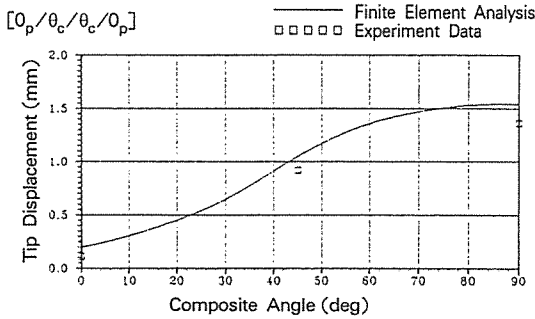


Fig. 3. Experimental results and FEM results of tip displacement of the test specimen vs. variation of composite layer angle(input voltage = 293).

4. 이방성 압전재료를 이용한 진동제어

본 연구에서는 특정한 구조물의 진동 모드 제어 및 여러가지 형태의 초기 형상에 대한 진동 제어를 위하여 선형 최적 제어 기법인 LQR법을 이용하여 제어된 구조물 끝단 변위의 반응을 살펴보았다.

4-1. 상태 방정식

혼합 구조물의 유한요소 지배 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$M \ddot{u} + Ku = Fq \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서 M 은 질량행렬, K 는 강성행렬, u 는 변위 벡터, F 는 유한요소 작동계수행렬이며, q 는 제어 입력이다. 이 운동방정식을 모달 행렬, ϕ , 을 이용하여 모달 좌표계로 변환한다.

$$\begin{aligned} u &= \Phi \eta \\ \ddot{\eta} + \Lambda \eta &= \bar{F} q \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

이제 이 식을 상태 방정식으로 변환하면

$$\dot{z}(t) = A(t) z(t) + B(t) q(t) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

이며, 여기서

$$z(t) = \begin{bmatrix} \eta(t) \\ \dot{\eta}(t) \end{bmatrix}$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Lambda & 0 \end{bmatrix} \quad B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{F} \end{bmatrix}$$

이다. 최적 제어기 설계를 위해 모델의 저차원화를 실행하였는데 본 연구에서는 10개의 저차모드를 선정하여 제어기를 설계하였다. LQR 법에서 가중 행렬 Q 와 R 은 아래와 같이 선택하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} \Lambda_{10} & 0 \\ 0 & I_{10} \end{bmatrix} \quad R = \tau I_{20}$$

여기서 $\Lambda_{10} = \text{diag} \{ \omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_{10}^2 \}$ 로 ω_n 은 혼합 구조물의 n 번째 고유진동수이다. 그리고 τ 는 조정 계수로서 0.01의 값을 갖는다.

4-2. 전 모달 제어성 지수(Apriori-Modal Controllability Index)

제어기를 설계하기 전 단계에서 압전 작동기 적층각에 따른 각 모드에 대한 효율성을 판단하기 위한 기준으로 실제 구조물의 각 모드를 고유치 벡터와 압전 작동기의 적층각에 따라 유도되는 구조물의 변형 벡터와의 각도를 측정하여 보았다. 각 모드에 대한 작동기의 효율성을 미리 예측하여 볼 수 있는 지수로 전-모달 제어성 지수를 다음과 정의하였다.

$$\cos \chi_{ij} = \frac{|\phi_i \cdot u_j|}{\|\phi_i\| \|u_j\|}$$

여기서 ϕ_i 는 구조물의 i 번째 고유진동모드이며, u_j 는 압전 작동기 j 에 의해 유도되는 구조물의 변위 벡터이다.

4-3. 진동 제어 해석 결과

앞서의 해석 방법을 적용하여 압전 필름과 복합 재료의 적층을 달리하는 몇 가지 혼합 구조물에 대한 수치 해석을 수행하였다. 작동기로 사용되는 압전 폴리머는 주 구조물의 윗면, 아래 면에 각각 2장씩 부착되어 분포 제어기로서의 역할을 하게 된다. 제어를 위해 압전 폴리머에 가해진 전압은 1000V로 제한하였으며, 이는 110 μm 의 두께를 가진 압전 폴리머에 최대로 가해 줄 수 있는 1100V의 약 91%에 해당하는 전압이다. 압전 폴리머가 주 구조물

상하면에 $[0_p/0_p]$ 로 부착되어 있는 경우는 굽힘을 일으키도록 서로 다른 방향으로 전압을 가해 주었으며, $[45_p/-45_p]$ 인 경우는 비틀림이 일어나도록 서로 같은 부호의 전압을 가해 주었다.

1) $[0_p/0_p/0_c/0_c/0_p/0_p]$ 경우

이 경우 정규화된 끝단 변위(normalized tip displacement)의 개회로 및 폐회로 반응을 Fig. 4~ Fig. 5에 나타내었다.

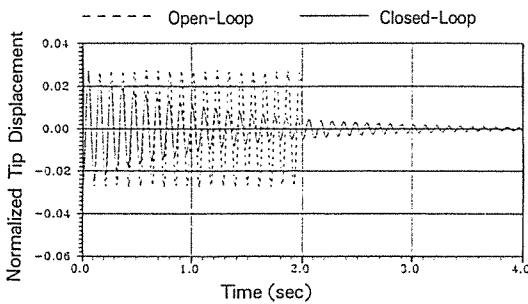


Fig. 4. Open-loop and closed loop normalized tip response of 1st mode of $[0_p/0_p/0_c/0_c/0_p/0_p]$ layer angle.

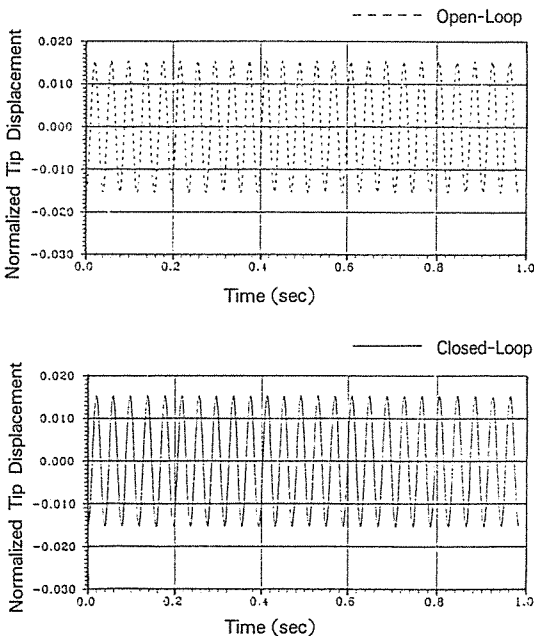


Fig. 5. Open-loop and closed loop normalized tip response of 2nd mode of $[0_p/0_p/0_c/0_c/0_p/0_p]$ layer angle.

이와 같은 혼합 구조물의 적층에서는 굽힘 방향의 진동 모드에 대해서 제어 효과가 효율적인데 반해 비틀림과 관련된 진동 모드에 대해서는 제어 효과가 거의 나타나지 않았다. 이것은 $[0_p/0_c/0_c/0_p]$ 의 경우 구조물의 순수 굽힘 변형만이 일어나기 때문이다. 첫 번째 굽힘 모드는 진동 억제가 잘되고 있으나 두번째 비틀림에 대한 진동 모드 제어는 전혀 효과적이지 못함을 알 수 있다. 이는 Table 1에 나타낸 각 제어기의 모달 제어성 측정 결과로도 확인할 수 있다. Table 1에서 Piezo #n은 n번째 적층된 압전 필름 단층을 가리킨다. 비틀림과 관련된 진동 모드에 대해서는 그 측정값이 나머지 진동 모드에서의 값과 약 4차수 이상의 차이가 있다. 이는 물리적으로 비틀림과 관련된 진동 모드에서 굽힘 방향으로 작동하는 압전 작동기가 아주 작으나 진동 에너지를 감소시키는 역할을 하는 것으로 생각되지만, 그 상대적인 크기로 보아선 효율적인 비틀림 모드 제어를 기대하기는 어렵다고 판단된다.

Table 1. Modal Controllability Measure for the Case of $[0_p/0_p/0_c/0_c/0_p/0_p]$

Mode	Piezo #1 $[0_p]$	Piezo #2 $[0_p]$	Piezo #3 $[0_p]$	Piezo #4 $[0_p]$
1 (1B)	1.0153e-03	1.0152e-03	1.0153e-03	1.0152e-03
2 (1T)	2.6034e-08	2.6030e-08	2.6024e-08	2.6030e-08

2) $[0_p/0_p/45_c/45_c/0_p/0_p]$ 경우

이 경우 굽힘과 비틀림 모드 전부가 효과적으로 제어되었다. 이것은 $[0_p/0_p/45_c/45_c/0_p/0_p]$ 로 적층되어 있는 경우 전체적인 혼합 구조물의 변형은 비틀림과 굽힘이 연계되어 나타나 굽힘 모드뿐만 아니라 비틀림과 관련된 진동 모드도 효과적으로 제어하게 된다. 이때 정규화된 끝단 변위의 개회로 및 폐회로 반응을 Fig. 6~Fig. 7에 나타내었다. Table 2에 표시한 모달 제어성 측정 결과에서도

Table 2. Modal Controllability Measure for the Case of $[0_p/0_p/45_c/45_c/0_p/0_p]$

Mode	Piezo #1 $[0_p]$	Piezo #2 $[0_p]$	Piezo #3 $[0_p]$	Piezo #4 $[0_p]$
1 (1B)	1.7192e-03	1.7209e-03	1.7109e-03	1.7139e-03
2 (1T)	6.6656e-04	6.6686e-04	6.6315e-04	6.6415e-04

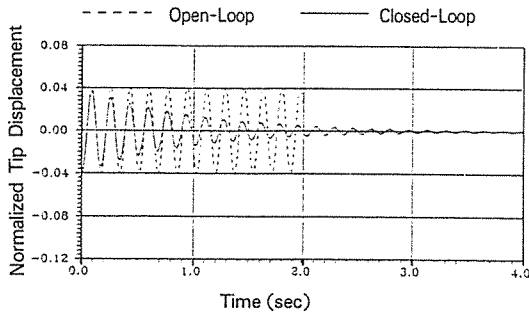


Fig. 6. Open-loop and closed loop normalized tip response of 1st mode of $[0_p/0_p/45_c/45_c/0_p/0_p]$ layer angle.

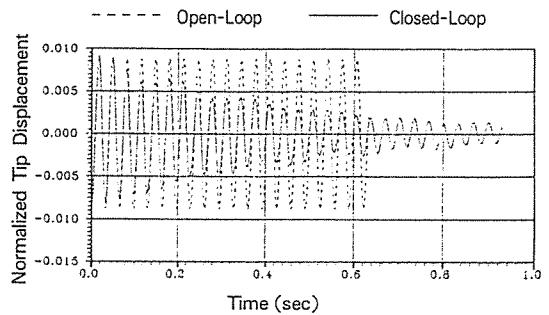


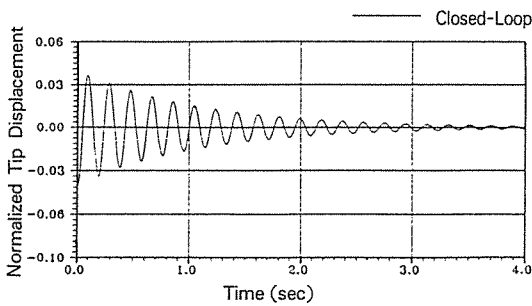
Fig. 7. Open-loop and closed loop normalized tip response of 2nd mode of $[0_p/0_p/45_c/45_c/0_p/0_p]$ layer angle.

알 수 있듯이 각 모드에 대해 압전 작동기 4개가 모두 효과적으로 진동 억제력을 하고 있다.

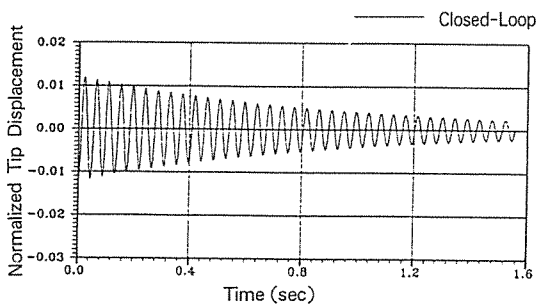
3) $[0_p/45_p/90_c/90_c/-45_p/0_p]$ 경우

압전 작동기를 주 구조물 윗면에 $[0_p/45_p]$, 아래면에 $[-45_p/0_p]$ 로 각각 부착하여 $[0_p/0_p]$ 층에서는 굽힘을, $[45_p/-45_p]$ 층에서는 비틀림 형상이 일어나도록 전압을 가재 주었다. 그 결과, 복합재

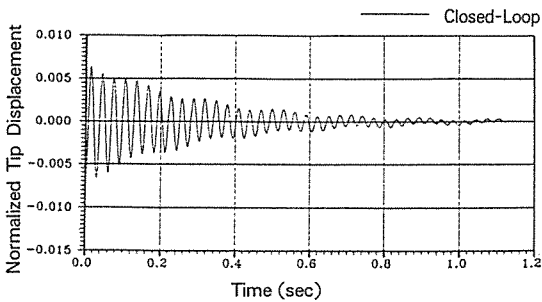
료의 적층각이 90° 의 경우에도 굽힘과 비틀림 변형을 동시에 일으키게 되어 각 모드에 대한 효과적인 제어가 가능하게 되었다. $[0_p/0_p/0_c/0_c/0_p/0_p]$ 경우에는 제어 효과가 나타나지 않았던 비틀림 모드와 굽힘-비틀림이 연계된 모드들도 제어가 되고 있음을 Fig.8에 나타내었다. 모달 제어성의 측정 결과를 Table 3에 표시하였다. 그 결과, 비틀림에는 $[45_p/-45_p]$ 의 작동기, 굽힘 모드에는 $[0_p/0_p]$



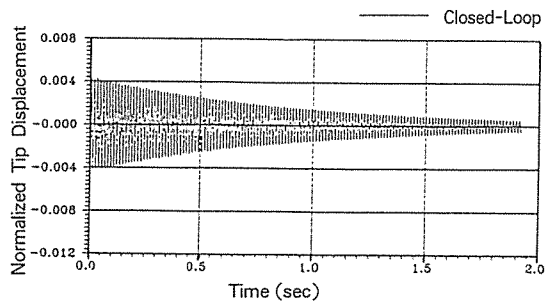
(a) 1st mode(bending)



(b) 2nd mode(torsion)



(c) 3rd mode(bending)



(d) 4th mode(bending/torsion)

Fig. 8. Closed loop normalized tip response of vibration mode of $[0_p/45_p/90_c/90_c/-45_p/0_p]$ layer angle.

Table 3. Modal Controllability Measure for the Case of $[0_p/45_p/90_c/90_c/-45_p/0_p]$

Mode	Piezo #1 $[0_p]$	Piezo #2 $[45_p]$	Piezo #3 $[-45_p]$	Piezo #4 $[0_p]$
1 (1B)	1.9703e-03	1.8692e-09	1.8549e-09	1.9710e-03
2 (1T)	3.7040e-09	3.0031e-03	2.9792e-03	3.7738e-09
3 (2B)	1.6093e-03	9.2175e-09	8.9220e-09	1.0690e-03
4 (1B/ 1T)	1.9008e-08	1.0456e-03	1.0375e-03	1.8992e-08

작동기가 효과적으로 진동을 제어하는 것으로 나타났다. 이 경우에 굽힘 모드 제어시 작용하는 제어 입력은 굽힘을 유발하는 $[0_p/0_p]$ 작동기가 담당하고 $[45_p/-45_p]$ 작동기는 제어에 전혀 영향력을 발휘하지 못하고 있으며, 비틀림 진동 모드에 대해서는 앞의 경우와 반대로 $[45_p/-45_p]$ 작동기가 비틀림 진동 모드를 제어하게 되고 굽힘을 유발하는 압전 작동기 $[0_p/0_p]$ 는 작동기의 역할을 하지 못하고 있음을 알 수 있다.

4) 구조물의 초기 형상 제어

Fig.9와 같이 $[\theta_p/\theta_p/90_c/90_c/\theta_p/\theta_p]$ 의 혼합 구조물의 순수한 비틀림 형상을 만들기 위하여 구조물 양쪽 끝단에 $\pm 1.0 \times 10^{-2}$ N의 외력을 z 방향으로 가해 주었으며 이때 양쪽 끝에서 $\pm 0.57 \times 10^{-3}$ m의 횡방향 변위가 일어났다. 이것을 초기 형상으로 하여 $[0_p/0_p/0_p/0_p]$ 와 $[0_p/45_p/-45_p/0_p]$ 의 두 가지 경우에 대한 횡방향 변위의 폐회로 반응을 살펴보

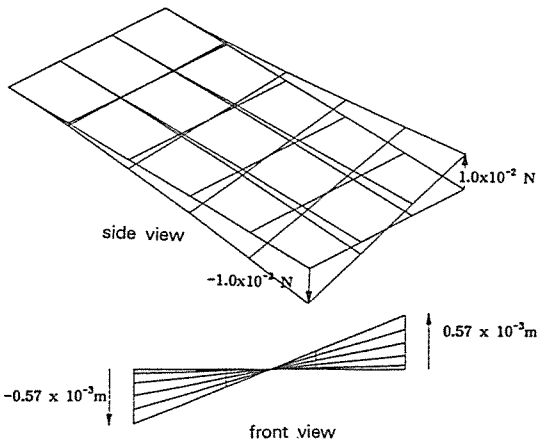


Fig. 9. Pure torsional load and initial displacement of $[\theta_p/\theta_p/90_c/90_c/\theta_p/\theta_p]$ laminate.

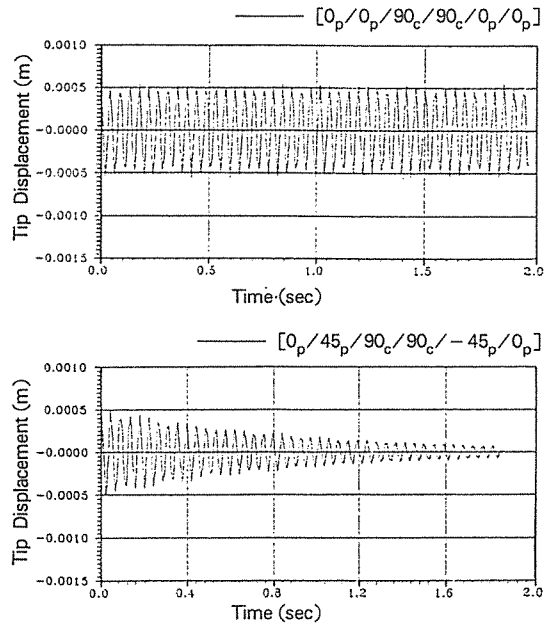


Fig. 10. Comparison of closed-loop tip responses of pure torsional load of $[\theta_p/\theta_p/90_c/90_c/\theta_p/\theta_p]$ laminate.

았다. 그 결과 Fig. 10에 나타난 바와 같이 압전 폴리머가 $[0_p/45_p/-45_p/0_p]$ 일때 효과적으로 진동을 억제시키며, $[0_p/0_p/0_p/0_p]$ 는 진동을 제어하지 못함을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 11과 같이 비틀림과 굽힘이 동시에 일어나도록 외력을 가해 주었다. $[0_p/0_p/0_p/0_p]$ 의 경우는 굽힘 모드만 효과적으로 제어하기 때문에 시간이 지나도 나머지 모드에 의한 잔류 진동이 남아 있게 된다. 반면 $[0_p/45_p/-45_p/0_p]$ 의 경우에는 $[0_p/0_p/0_p/0_p]$ 에 비해 더 효율적으로 진동이 제어됨을 알 수 있다(Fig. 12).

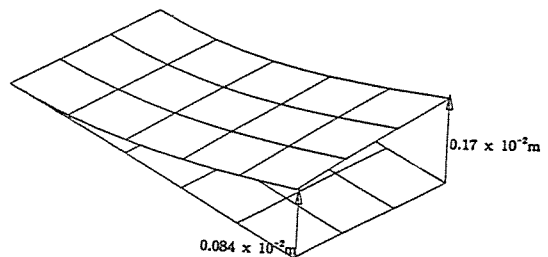


Fig. 11. Initial configuration of bending-torsion coupling of $[\theta_p/\theta_p/90_c/90_c/\theta_p/\theta_p]$ laminate.

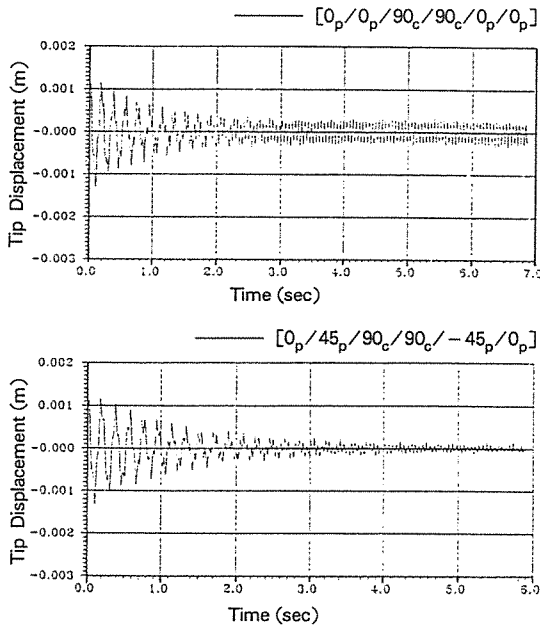


Fig. 12. Comparison of closed-loop tip responses of bending-torsion coupling load of $[0_p/90_c/90_c/0_p/0_p]$ laminate.

5. 결 론

이상의 연구 결과를 토대로 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압전재료와 복합재료의 적층각을 동시에 고려하여 그 변화에 따른 혼합 구조물의 변형을 실험과 유한요소 해석을 통하여 살펴 본 결과 적층각 변화에 따라 순수 굽힘, 순수 비틀림, 그리고 굽힘과 비틀림이 연성된 변형을 얻을 수 있었다.
- (2) 선형최적제어 이론을 적용하여 혼합 구조물의 진동 억제 해석을 수행한 결과 압전 폴리머의 적층각이 굽힘만을 일으키는 0_p 일때, 복합재료 적층각이 0_c 나 90_c 일 경우 압전 작동기로는 비틀림과 관련된 모드에 대한 제어가 불가능했다. 그러나 45_c 의 경우는 굽힘과 비틀림이 연성되므로 각 진동 모드에 대한 효과적인 진동 억제가 가능했다.
- (3) 압전 폴리머 작동기를 $[0_p/45_p/-45_p/0_p]$ 로 적

층하면 혼합 구조물의 굽힘과 비틀림을 각각 유도할 수 있어 굽힘과 비틀림 모드 모두에 대해 효과적인 진동 억제가 가능하다. 이와 같은 방법은 압전 폴리머의 이방성을 고려함으로써 비틀림과 관련된 진동 모드 제어에 대해 효과적으로 대처할 수 있는 방안이 될 수 있다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부지원 학술연구조성비 (기계공학 ME94-D-03)에 의하여 연구되었으며, 교육부의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Rogers, C. A., "Intelligent Material Systems and Structures," *U. S.-Japan Workshop on Smart/Intelligent Material and Systems*, Honolulu, Hawaii, Technomic Publishing Co., March, 1990, pp.11-33.
2. Wada, B. K., Fanson, J. L., and Crawley, E. F., "Adaptive Structures," *Adaptive Structures*, edited by B. K. Wada, ASME, 1989, pp.1-8.
3. Rao, S. S. and Pan, T. S., "Modeling Control, Design of Flexible Structures : A Survey," *Appl. Mech Rev.* Vol.43, No.5, 1990, pp.99-117.
4. Atluri, S. N. and Amos, A. K., *Large Flexible Structures : Dynamics and Control*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1988.
5. Rogers, C. A., "An Introduction to Intelligent Material Systems and Structures," *Intelligent Structures*, edited by Chong., K. P., Liu, S. C., and L. I., J. C., Elsevier Applied Science, NY, 1990, pp.3-41.
6. Bailey, T. and Hubbard, J. E. Jr., "Distributed Piezoelectric Polymer active Vibration Control of a Cantilever Beam," *J. Guidance Control*, Vol.8, No.5, 1985, pp.606-610.
7. Hwang, W. S. and Park, H. C., "Finite

Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA J.*, Vol.31, No.5, 1993, pp. 903-937.

8. 김승한, 최승복, 정재천, "압전필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어," 한국항공우주학회지, 제 21권, 제5호, 1993, pp.76-87.

9. Lee, C. K., O'Sullivan, T. C., and Chiang, W. W., "Piezoelectric Strain Sensor and Actuator Designs for Active Vibration Control," *Proceedings of the AIAA/ASME/AHS, 32nd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA, New York, 1991, AIAA Paper No. 91-1064-CP.

10. Barret, R., "Active Plate and Missile Wing Development Using Directionally Attached Piezoelectric Element," *AIAA J.*, Vol.32, No.3, 1994, pp.601-609.

11. J.Y. Yu, W. Y., Kang, and S. J. Kim, "Elastic Tailoring of Laminated Composite Plate by Anisotropic Piezoelectric Polymers-Theory, Computation, and Experiment," *J. Composite Materials*, Vol.29, No.9, 1995, pp.1201-1221.

12. *Kynar Piezo Film, Technical Manual*, Pennwalt. Corp. 1987.
