

압전 작동기가 포함된 스마트 복합재 평판의 유한 요소 해석

⁰한 재홍*, 이인**

Finite Element Analysis of Smart Composite Plates Containing Piezoelectric Actuator

Jae-Hung Han* and In Lee**

ABSTRACT

Recently, distributed piezoelectric actuators have drawn attention due to their potential applicability within smart structures. Because they serve not only as active components but also passive components, it is difficult to estimate their characteristics accurately. In this study a finite element method based on layerwise theory has been formulated to analyze the characteristics of the distributed piezoelectric actuators. The present method has the capability to describe more refined strain distribution and more realistic boundary conditions.

1. 서 론

미래의 고부가가치 구조물인 우주구조물이나 대형 항공기, 해양 구조물에 응용될 것으로 기대되는 스마트 구조물에 대한 관심이 높아지고 있다. 스마트 구조물은 구조물 자체에 고밀도로 분포된 감지기, 작동기 및 지능 구조를 갖춰 생명체와 마찬가지로 환경 변화에 적절히 적응해 나가는 성질을 지니고 있어야 한다. 스마트 구조물의 구체적 적용 목표는 진동 및 소음 제어, 구조물의 건전성 자체 진단 및 자가 수리, 형상 제어 등 여러 분야가 있으나 본 연구에서는 능동 진동 제어 특성이 주된 관심사이다. 이러한 스마트 구조물을 구현하기 위해서는 새로운 형태의 작동기가 필요한데, 특히 분포된 압전 작동기에 관한 연구가

활발하다[1]. 판형으로 가공된 압전 작동기는 기존의 작동기에 비해 구조물에 삽입이나 부착의 방법을 통해 설치하기가 쉽고, 가벼우며, 에너지 소모도 작은 여러 장점을 지니고 있다. 이와 같이 분포된 압전 작동기를 이용하여 많은 연구자들이 진동 제어 실험 등을 수행하고 있으나[2] 진동 제어 실험에 필요한 시스템의 특성, 즉 고유진동수, 모달제어력 등을 실험적으로 구하여 사용하고 있다. 그러나 압전 작동기는 시스템에 능동 소자로만 작용하는 것이 아니라 그 자체가 구조물의 하중 지지 역할을 함께 수행하는 수동 소자의 역할을 함께 하며, 설계 시 작동기 자체가 구조물의 일부분으로 고려되어야 한다. 그러므로 실제 구조물의 제작 이전에 압전 작동기를 포함한 전체 구조물의 여러 거동을 해석할 수 있는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 이유로 압전 작동기를 포함하는 구조, 특히 복합재 구조물에 대한 이론 및 수치 해석적 연구가 매

* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 교수

우 활발히 진행되어져 오고 있다[3-9]. Lee[3]는 고전 적층판이론을 사용하여 압전 작동기를 포함한 복합 재 평판의 운동방정식을 제시하였다. Hwang 등[4]은 Lee[3]의 운동방정식을 유한 요소 정식화하였다. Ha 등[5]은 3 차원 요소를 이용하여 압전체 포함 구조물의 유한 요소 해석을 수행하였다. 그러나 판 이론을 사용한 해석은 복합재 판 구조의 면내 변위를 정확히 기술하지 못하는 단점이 있으며, 3 차원 요소 사용 시에는 너무 많은 자유도가 필요한 단점이 있다. 그러므로 층별 변위 적층판 이론을 이용한 유한 요소 해석 결과들이 발표되기 시작했다[6-8]. 본 연구에서는 층별 변위 이론을 사용하여 압전 작동기가 포함된 복합재 판 구조물의 동특성 및 작동 특성을 효율적으로 파악할 수 있는 유한 요소 정식화를 수행하였으며, 추후 스마트 구조의 진동 제어 시스템 설계에 응용될 수 있다.

2. 이 론

본 장에서는 압전재료의 선형 구성 방정식, 층별 변위 적층판 이론을 이용하여 유한 요소 정식화를 수행한다. 판형으로 가공된 압전 작동기의 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{Bmatrix}_m = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} & 0 & 0 \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} & 0 & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yz} \\ S_{zz} \end{Bmatrix}_m - E_{z,m} \begin{Bmatrix} \hat{\epsilon}_{31} \\ \hat{\epsilon}_{32} \\ 0 \\ \hat{\epsilon}_{36} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 \bar{C}_{ij} 는 변환된 강성행렬, $\hat{\epsilon}_{ik}$ 는 변환된 압전 상수, $E_{z,m}$ 은 두께방향으로 가해진 전기장이며, σ , S 는 각각 응력 및 변형률이다. 층별 변위 적층판 이론에 의한 변위장은 다음과 같다.

$$u(x, y, z, t) = \sum_{J=1}^N U^J(x, y, t) \Phi^J(z)$$

$$v(x, y, z, t) = \sum_{J=1}^N V^J(x, y, t) \Phi^J(z)$$

$$w(x, y, z, t) = W(x, y, t) \quad (2)$$

여기서 U^J 와 V^J 는 면내 변위를 결정짓는 미지수, $\Phi^J(z)$ 는 두께방향의 라그랑지 보간 함수, N 은 두께 방향으로의 미지수의 갯수이다. 외력을 무시하면 해밀턴의 원리는 다음과 같다.

$$\int_0^T \int_{\Omega} \left[\sum_{J=1}^N \left\{ N_x^J \frac{\partial \delta U^J}{\partial x} + N_y^J \frac{\partial \delta V^J}{\partial y} + N_{xy}^J \left(\frac{\partial \delta U^J}{\partial y} + \frac{\partial \delta V^J}{\partial x} \right) + Q_y^J \delta V^J + Q_x^J \delta U^J \right\} + Q_z \frac{\partial \delta W}{\partial z} + Q_x \frac{\partial \delta W}{\partial x} + \sum_{J=1}^N \sum_{K=1}^N \left\{ I^{JK} (\ddot{U}^J \delta U^K + \ddot{V}^J \delta V^K) \right\} + I^0 \ddot{W} \delta W \right] dAdt = 0 \quad (3)$$

여기서

$$(N_x^J, N_y^J, N_{xy}^J) = \int_{h/2}^{-h/2} (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}) \Phi^J(z) dz$$

$$(Q_y, Q_x, Q_z) = \int_{h/2}^{-h/2} (\sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}) \frac{d\Phi^J(z)}{dz}, \sigma_{xz} \frac{d\Phi^J(z)}{dz} dz$$

$$(I^0, I^{JK}) = \int_{h/2}^{-h/2} \rho (1, \Phi^J(z) \Phi^K(z)) dz \quad (4)$$

변위장 (W, U^J, V^J) 는 형상함수 $\hat{\psi}_i$ 와 절점 변수 (W_i, U_i^J, V_i^J) 의 선형 조합으로 다음과 같이 보간된다.

$$(W, U^J, V^J) = \sum_{i=1}^{NPE} (W_i, U_i^J, V_i^J) \hat{\psi}_i \quad (5)$$

여기서 NPE 는 요소당 절점 갯수이다. 식 (5)를 식 (3)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \sum_{L=1}^M \mathbf{F}_L E_{z,L}(t) \quad (6)$$

식 (6)을 모달 영역으로 변환하면 다음과 같은 모달 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\eta}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{\eta}_j + \omega_j^2 \eta_j = \sum_{L=1}^M B_{jL} V_L(t) \quad (7)$$

여기서 η_j , ω_j , ζ_j 는 각각 모달 좌표, 고유 진동수, 감쇠비이며, V_L 은 L 번째 작동기에 가해지는 전압, B_{jL} 은 L 번째 작동기에 가해지는 단위 전압에 의해 유기되는 j 번째 모드의 모달 제어력이다.

3. 결 과

본 연구에서 개발된 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 기존의 여러 연구결과들과 충분한 검증을 거쳤으나 지면 관계상 생략하기로 하고 본 논문에서는 보 형태와 판 형태 스마트 구조물의 대표적인 해석 결과만을 정리하였다.

Fig. 1 과 같이 상하대칭으로 압전 세라믹이 부착된 보 형태의 구조물을 고려하기로 하자. 사용된 재료의 물성치는 Table 1 에 보인 바와 같고, 복합적층보의 적층각은 $[0/\pm\theta/90]_S$ 이며, $100\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 의 크기를 갖는다. 실제 구조물 제작 시 압전 세라믹은 매우 취성이 강해 경계에서 고정시키기가 어렵으므로 Fig. 1 에 보인 바와 같이 복합재 구조부분만 고정시켜 사용하는데, 본 연구에서 제시한 해석 방법으로 쉽게 모델링 가능하다. 해석 결과 중 시스템의 동

적 특성 값, 즉 고유진동수, 감쇠비, 및 모달 작동력 B_{j1} 이 주된 관심사이다. 해석에는 10×19 절점 요소가 사용되었으며 면내 변위는 두께 방향으로 13 개의 자유도를 가지고 모델링되었다. 적층각 θ 의 변화에 따른 시스템의 특성값 변화는 Fig. 2-4 에 정리되었다. 감쇠비는 참고문헌 [10]에서 소개된 바와 같이 모달 변형률 에너지법(Modal strain Energy method)을 사용하여 구하였다. Fig. 2-4 에서는 1 차 횡전단 변형 판 이론에 기초한 해석(FSDT) [9], 고정 경계 조건을 적용

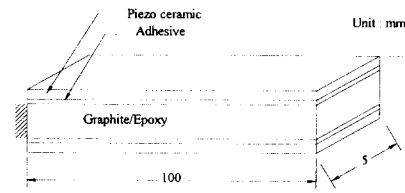


Fig. 1 Composite beam with bonded piezo ceramics.

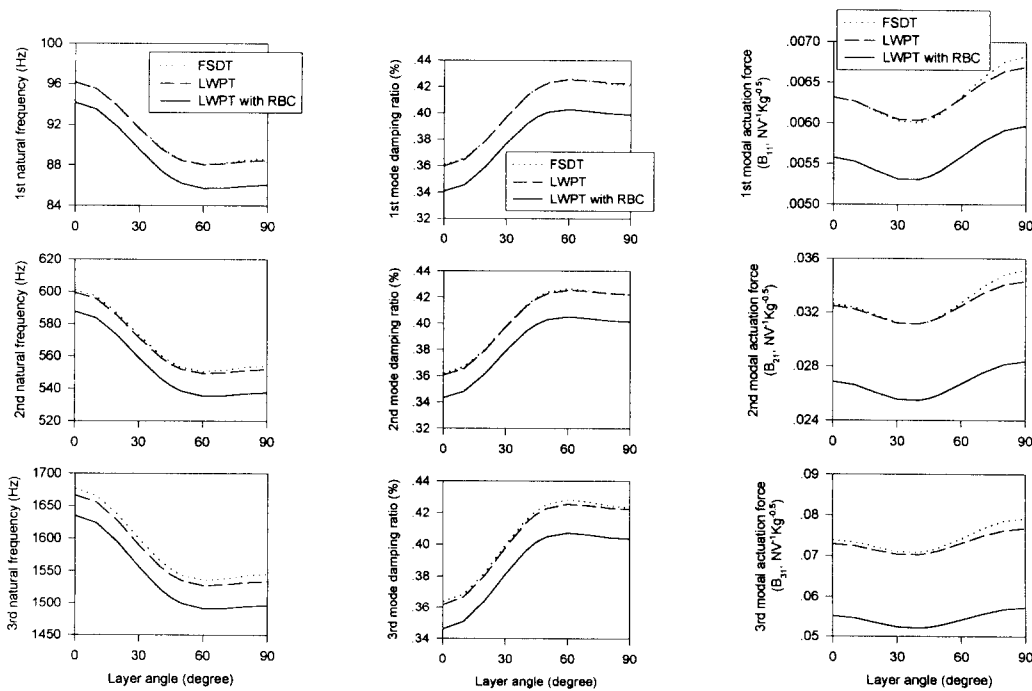


Fig. 2 Natural frequency variations. Fig. 3 Inherent damping variations. Fig. 4 Modal actuation force variations.

한 층별 적층판 이론을 이용한 해석(LWPT), 그리고 실제 경계 조건을 적용한 층별 적층판 이론을 이용한 해석(LWPT with RBC) 결과를 각각 정리하였다. θ 가 90도에 근접할수록, 고차 모드일수록 기존의 판 이론에 기초한 해석 결과와 LWPT에 기초한 해석이 차이를 보이고 있다. 그리고 판 이론의 경우 정확한 경계 조건 묘사가 불가능하나, LWPT 적용 시에는 실제적인 경계 조건 적용이 용이하며 해석 결과에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

다음 해석 예제는 압전 세라믹이 상하대칭으로 부착된 복합재 평판 구조이며 Fig. 5에 도시하였다. 적층각이 $[0/\pm 45/90]_s$ 일 때 처음 세 모드에 대한 시스템 특성 값을 Table 2에 정리하였다. 실제적인 경계 조건 적용이 고유진동수와 감쇠비의 계산에 매우 큰

영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 고정 경계 조건을 적용하여 해석하는 경우 처음 5개 모두 가진할 수 없는 것처럼 보이나, 실제로는 첫번째, 네번째, 다섯번째 모드가 가진됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 층별 변위 적층판 이론에 기초하여 압전재료를 포함하는 스마트 구조물의 동특성 및 작동 특성 즉 고유진동수, 모드형상, 감쇠비, 모달 작동력 등을 효율적으로 파악할 수 있는 유한 요소 정식화를 수행하였다. 본 방법은 3차원 요소를 사용할 때처럼 면내 변위의 두께 방향으로의 변화를 정확히 모델링할 수 있으며, 보다 실제적인 경계 조건의 적용도 용이하다. 보 형태 및 판 형태의 해석 예제를 통해 판 이론에 기초한 해석에 비해 본 방법이 보다 타당성을 지님을 확인할 수 있었다.

Table 1 Material properties.

Properties	Graphite/ Epoxy	Adhesive	Piezo Ceramic
E_1 (GPa)	130	1.78	59
E_2 (GPa)	9.6	1.78	59
$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	4.8	-	-
G_{23} (GPa)	3.2	-	-
ν_{12}	0.31	0.3	0.34
ρ (Kg/m ³)	1570	1050	7400
ψ_1 (%)	0.5698	4.912	7.486
ψ_2 (%)	3.895	4.912	7.486
$\psi_{12} = \psi_{13}$ (%)	5.101	4.912	10.62
ψ_{23} (%)	5.313	4.912	10.62
ply thickness (mm)	0.1	0.05	0.2

후 기

본 연구는 한국과학재단 지원으로 수행된 연구 (과제번호: 96-0200-05-01-3)의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Crawley, E.F., and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385.
- (2) 류근호, 한재홍, 이 인, 1997, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 평판의 최적 진동 제어 실험," 한국소음진동공학회지, 제 7권 제 1호, pp. 161-168.

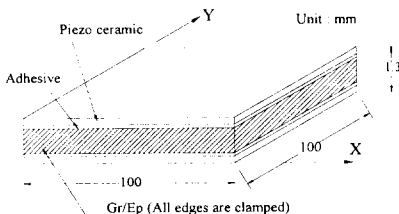

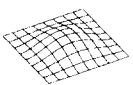
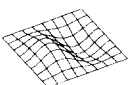


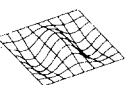


Fig. 5 Composite plate with bonded piezo ceramics.

- (3) Lee, C.-K., 1990, "Theory of Laminated Piezoelectric Plates for the Design of Distributed Sensors/Actuators. Part I: Governing Equation and Reciprocal Relationships, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 87, No. 3, pp. 1144-1158.
- (4) Hwang, W.-S., and Park, H.C., 1993, "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," AIAA Journal, Vol. 31, No. 5, pp. 930-937.
- (5) Ha, S.K., Keilers, C., and Chang, F.-K., 1992, "Finite Element Analysis of Composite Structures Containing Distributed Piezoceramic Sensors and Actuators," AIAA Journal, Vol. 30, No. 3, pp. 772-780.
- (6) Robbins, D.H., and Reddy, J.N., 1991, "Analysis of Piezoelectrically Actuated Beams Using a Layer-Wise Displacement Theory," Computers and Structures, Vol. 41, No. 2, pp. 265-279.
- (7) Saravanos, D.A., and Heyliger, P.R., 1995, "Coupled Layerwise Analysis of Composite Beams with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, pp. 350-363.
- (8) Lee, I., and Han, J.-H., 1996, "A Refined Analysis of Piezo-Laminated Composite Structures: Natural Modes, Damping, Electro-Mechanical Coupling," 3rd ICCE, New Orleans, Louisiana.
- (9) 한재홍, 이인, 1995, "유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰," 한국항공우주학회지, 제 23 권 제 1 호, pp. 85-96.
- (10) 조기대, 한재홍, 이인, 1997, "압전 세라믹이 부착된 복합재 구조물의 진동 및 감쇠 특성," 한국소음진동공학회 춘계발표회, 경주.

Table 2 System parameters for the composite plate with distributed piezoelectric actuator.

Mode Number		1st	2nd	3rd	4th	5th
Mode Shapes						
	Frequency (Hz)	FSDT: 890.97 LWPT: 886.82 RBC** : 832.30	1735.2 1722.2 1570.4	1885.2 1869.1 1774.8	2649.9 2620.8 2449.1	3075.5 3040.8 2837.3
Inherent Damping Ratio (%)	FSDT	0.515	0.548	0.477	0.528	0.550
	LWPT	0.504	0.542	0.463	0.520	0.543
	RBC	0.464	0.494	0.427	0.481	0.513
Modal Actuation Force* ($N/V\sqrt{Kg}$)	FSDT	0	0	0	0	0
	LWPT	0	0	0	0	0
	RBC	0.2028	0	0	0.0287	0.5550

* : Modal actuation force for fully covered piezoelectric actuator

** : LWPT with RBC