

지능 복합재 구조의 진동제어 특성에 관한 유한요소 해석

Finite Element Analysis of Vibration Control Characteristics of Smart Composite Structures

한재홍*, 이 인(한국과학기술원)

1. 서론

최근들어 항공우주 분야에서는 강성과 강도가 높고 무게가 가벼운 복합재 구조물의 사용이 늘고 있다. 그러나 경량화에 따른 구조물의 유연성 증가로 구조물의 진동량이 커지면서, 이를 능동적으로 제어하려는 연구가 많이 이루어지고 있다. 지난 십수년간 이산 감지기와 작동기를 이용하여 구조물의 진동을 능동적으로 제어하려는 시도가 많이 있었으나 이산 감지기/작동기를 분포 시스템인 구조물에 적용하면, 진동 모우드의 가관 속성과 가제어성의 문제, 제어되지 않는 잔류 모우드의 진동에 의해 시스템이 불안정해지는 잉여(spillover)현상 등의 문제점이 보고되고 있다[1].

그러므로 감지기/작동기를 자체에 포함하고 있으며, 자기 진단, 능동 대처 등의 특성을 가지는 지능 구조물에 대한 관심이 커지고 있다[2]. 특히 능동 진동 제어 구조중 상당수가 압전재료의 순방향, 역방향 효과를 각각 압전 감지기와 작동기의 기초 원리로 활용하고 있다.

Bailey와 Hubbard, Jr. [3]는 보에 압전 필름 작동기를 부착하여 진동제어 실험을 수행하였다.

Crawley 와 Luis[4], Wang과 Rogers[5], Lee 등[6]은 압전 재료가 부착된 판형 구조물의 운동방정식을 유도하였다. Tzou와 Tseng [7]은 압전 작동기가 부착된 구조물의 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 최근들어 국내에서도 이 분야에 대한 연구가 활발한 실정이다. Hwang과 Park[8]는 압전 재료가 부착된 적층판의 진동 제어에 관한 유한요소 해석을 수행하였으며, 남 창호 등[9]은 지능 복합재 구조의 최적 설계에 관한 연구를 수행하였다. 윤 풍준 등[10]은 PD제어기를 이용하여 외팔보의 진동 억제 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 압전재료를 사용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 해석을 위해, 횡단면형 판이론에 기초한 유한 요소 정식화를 수행하고, 해석 프로그램을 개발하였으며, 압전재료가 부착 또는 삽입된 각 요소에 대해 '작동(감지) 효율성'의 개념을 도입하여, 여러 파라미터 변화에 따른 지능 복합재 구조의 특성을 고찰하였다.

2. 이론

압전현상이란 어떤 결정물이 압력(기계적 응

력)을 받았을 때 그 재료가 압력에 비례하여 전기장을 발생시키고, 반대로 전기장이 가해질 때 변형을 일으키는 현상으로 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$\{\hat{\sigma}\} = [Q]\{\hat{\varepsilon}\} - [d]^T \{E\} = [Q]\{\hat{\varepsilon}\} - \{\hat{\varepsilon}\}_p \quad (1)$$

$$\{D\} = [e]\{\hat{\varepsilon}\} + [\varepsilon]\{E\} \quad (2)$$

(1), (2) 식을 판형 구조의 기하좌표축에 대한 식으로 나타내면, k번째 단층의 작동식 및 감지식은 다음과 같다.

$$\{\sigma\}^k = [\bar{Q}]^k \{\varepsilon\}^k - E_3^k [\hat{Q}]^k \{d\} \quad (3)$$

$$D_3^k = \{d\}^T [\hat{Q}]^k \{\varepsilon\}^k \quad (4)$$

여기서,

$$[\bar{Q}]^k = [R]^{-1} [Q]^k [R]^T \quad (4)$$

$$[\hat{Q}]^k = [R]^{-1} [Q]^k \quad (5)$$

$$[\hat{Q}]^k = [Q]^k [R]^T \quad (6)$$

k번째 감지기층에 모이는 전하는 표면전극 S에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \int_S \{d\}^T [\hat{Q}]^k \{\varepsilon\}^k dA \quad (7)$$

압전재료가 기존 복합재료에 상하 대칭으로 부착 또는 삽입된 판구조를 고려해보자. 횡전단 변형판이론에 의한 변위장은 다음과 같이 정의된다[11].

$$u(x, y, z, t) = u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t)$$

$$v(x, y, z, t) = v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \quad (8)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t)$$

복합적층판의 진동문제에 대한 해밀톤(Hamilton)의 원리는 다음과 같이 표현된다.

$$\int_0^T \int_\Omega [N_x \frac{\partial \delta u_0}{\partial x} + M_x \frac{\partial \delta \phi_x}{\partial x} + N_y \frac{\partial \delta v_0}{\partial y} + M_y \frac{\partial \delta \phi_y}{\partial y} + N_{xy} (\frac{\partial \delta u_0}{\partial y} + \frac{\partial \delta v_0}{\partial x}) + M_{xy} (\frac{\partial \delta \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \delta \phi_y}{\partial x}) + Q_x (\delta \phi_x + \frac{\partial \delta w_0}{\partial x}) + Q_y (\delta \phi_y + \frac{\partial \delta w_0}{\partial y}) + I_0 (\ddot{u}_0 \delta u_0 + \ddot{v}_0 \delta v_0 + \ddot{w}_0 \delta w_0) + I_2 (\ddot{\phi}_x \delta \phi_x + \ddot{\phi}_y \delta \phi_y) + I_1 (\ddot{u}_0 \delta \phi_x + \ddot{\phi}_x \delta u_0 + \ddot{v}_0 \delta \phi_y + \ddot{\phi}_y \delta v_0) - q \delta w_0] dAdt = 0 \quad (9)$$

여기서 적층판에 작용하는 합력들은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N^c \\ M^c \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{x4} & \bar{A}_{x5} \\ \bar{A}_{y4} & \bar{A}_{y5} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{yz}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{Bmatrix} N^c \\ M^c \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k [\hat{Q}]_k \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ d_{36} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} M^c \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{n_{act}} z_k^0 (V_3)_k [\hat{Q}]_k \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ d_{36} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{n_{act}} z_k^0 (V_3)_k \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

(10)식에서 $\{N^c\}$, $\{M^c\}$ 는 각각 압전재료층에 가해진 전기장에 의해 유기되는 면내 힘성분과 굽힘 모멘트이다. 식 (10)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같다.

$$\int_0^T \int_\Omega [\delta \varepsilon^{*T} (A\varepsilon^0 + B\kappa - N^c) + \delta \kappa^T (B\varepsilon^0 + D\kappa - M^c) + \delta \gamma^T \bar{A}\gamma + \delta \Delta^T \bar{I}\Delta - q \delta w] dAdt = 0 \quad (12)$$

식 (12)의 유한요소식을 얻기 위해 임의의 요소에 대해 변위를 다음과 같이 보간하면, 식 (14)와 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$(u, v, w, \phi_x, \phi_y) = \sum_{i=1}^n (u_i, v_i, w_i, \phi_{xi}, \phi_{yi}) \hat{\psi}_i \quad (13)$$

$$[M_e]\{\ddot{\Delta}_e\} + [K_e]\{\Delta_e\} = \{F_e^{ext}\} + \{F_e^c\} \quad (14)$$

여기서 각 요소의 강성 및 질량 행렬에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [11]을 참조하기 바란다. 여기서는 압전 작동기에 의한 힘과 모멘트 성분에 대한 유한요소 정식화 결과만을 식 (15)에 정리하였다.

$$\begin{aligned} \{F^1\}^e &= \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial x} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k d_1 dA + \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial y} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k d_6 dA \\ \{F^2\}^e &= \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial y} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k d_2 dA + \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial x} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k d_6 dA \\ \{F^3\}^e &= 0 \\ \{F^4\}^e &= \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial x} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k z_k^0 d_1 dA + \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial y} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k z_k^0 d_6 dA \\ \{F^5\}^e &= \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial y} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k z_k^0 d_2 dA + \int_{\Omega} \frac{\partial \psi^n}{\partial x} \sum_{k=1}^{ac} (V_3)_k z_k^0 d_6 dA \end{aligned} \quad (15)$$

각 요소식을 조합하여 동적 방정식을 만들면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{\Delta}\} + [K]\{\Delta\} = \{F^{ext}\} + \{F^e\} \quad (16)$$

운동방정식 (16)의 고유치 해석을 수행하고, 모달좌표로 변환하면,

$$\ddot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = \sum_{j=1}^{n_{mode}} \phi_i^T \bar{F}_j (V_3)_j \quad (i=1,2,\dots,n_{mode}) \quad (17)$$

식 (17)에서 $\phi_i^T \bar{F}_j$ 와 ω_i 는 적층각, 적층순서, 압전 재료의 위치, 경계조건 등의 파라미터에 의해 결정되는 값으로, 지능복합적층판의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 특히 입력전압 $(V_3)_j$ 에 대한 모달좌표 η_i 의 거동은 $\frac{\phi_i^T \bar{F}_j}{\omega_i^2}$ 의 크기에 따라 반응하

게 되며, 본 연구에서 이 물리량을 '작동효율성 (actuation effectiveness)' 이라고 부르기로 한다. 즉 작동효율성이란 j번째 전극에 입력되는 전압이 i번째 모우드를 얼마나 효율적으로 가진하는가 하는 척도이다. '감지효율성(sensing effectiveness)'도 마

찬가지로 i번째 모우드에 의한 j번째 감지기의 감지전하의 효율성으로 정의될 수 있으며, 대칭성이 있는 경우 작동효율성과 수치적으로 같은 값이 나오게 된다.

3. 계산결과 및 검토

Fig. 1에 보인 바와 같은 의팔 평판 형태의 지능 복합재 구조의 특성을 해석하였다. 사용된 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 압전재료는 표면전체에 부착되어 있으나, 전극은 임의로 부착할 수 있다고 가정한다. 적층판의 적층순서는 $[A/0/\pm\theta/90]_s$ 이고, 여기서 A는 압전재료층을 의미한다. 각 압전재료의 위치에 따른 감지 및 작동 효율성을 알아보기 위해 앞 절에서 제안한 작동 효율성을 계산해보았다. 전극의 위치는 Fig. 1의 (1)-(5)까지로 대각선 방향으로 선정하였다. Fig. 2에 첫번째, 두번째 모우드의 각 전극의 위치와 적층각의 변화에 따른 작동효율성의 변화를 도시하였다. 먼저 첫번째 모우드의 경우 예상대로 고정단 부근의 전극 (5)가 모든 적층각에 대해 대단히 효율적임을 쉽게 알 수 있었고, 적층각이 커짐에 따라 효율성이 떨어짐을 알 수 있다. 두번째 모우드의 경우 첫번째 모우드와는 달리 전극 (1), (2), (4)의 작동 효율은 비슷비슷하며 (5)에 비해서는 매우 떨어짐을 알 수 있다. 전극 (3)의 경우는 평판의 한복판에 위치하여 비틀림 모우드의 경우 대칭성으로 말미암아 작동성능이 떨어지며 특히 적층각이 0도나 90도의 경우는 전혀 작동할 수 없음을 알 수 있다. 여기서 특기할 사항은 두번째 모우드의 경우 전극 (1), (2)의 위치와 (4), (5)의 위치에

서 치짐은 서로 위상이 반대이나 작동력은 위상이 같게 나타난다. 그러므로 변위에 비례하는 기존의 자기변환기와 같은 작동기의 경우 (1), (2)의 위치와 (4), (5)의 위치에서 같은 위상으로 작동시에 작동력은 위상이 반대로 서로 상쇄효과가 있으나, 압전작동기의 경우는 오히려 같은 위상으로서 작동력을 증가시킨다. 그러므로 비틀림 모우드의 제어에는 Fig. 3의 Type C와 같은 전극 형태가 이상적임을 알 수 있다. 나머지 모우드의 작동 효율성의 경우는 적층각이 변함에 따라 모우드 형상이 바뀌는 커어브비어링 현상등으로 인해 더욱 복잡한 양상을 띠게된다.

4. 결론

압전재료를 포함한 지능 복합 적층판의 동적 거동 해석을 위한 유한 요소 정식화를 수행하였다. 압전재료가 부착된 요소들의 각 모우드에 대한 작동 및 감지 효율성을 계산하면, 압전재료가 전체 구조의 동적 거동에 미치는 영향을 효율적으로 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 계산시에도 모달 공간에서 이들의 효과가 선형조합으로 나타나므로 효율적으로 계산이 가능함을 알 수 있었다.

[참고문헌]

1. Balas, M. J., "Active Control of Flexible Systems," *Journal of Optimization Theory and Application*, Vol. 25, No.3, 1978, pp. 415-436.
2. Rogers, C. A., Barker, D. K., and Jaeger, C. A., "Introduction to Smart Materials and Structures," *U.S. ARO Workshop on Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues*, VPI&SU, Virginia, Technomic Publishing Co., September, 1988.

3. Bailey, T., and Hubbard Jr., J. E., "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance and Control*, Vol. 8, No. 5, 1985, pp. 605-611.
4. Crawley, E. F., and de Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *ALAA Journal*, Vol. 25, No. 10, 1987, pp. 1373-1385.
5. Wang, B. T., and Rogers, C. A., "Laminate Plate Theory for Spatially Distributed Induced Strain Actuators," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, 1991, pp. 433-452.
6. Lee, C.-K., and Moon, F. C., "Modal Sensors/Actuators," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, 1990, pp. 434-441.
7. Tzou, H. S., and Tseng, C. L., "Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator Design for Measurement/Control of Distributed Parameter Systems: A Piezoelectric Finite Element Approach," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 138, No. 1, 1990, pp. 17-34.
8. Hwang, W.-S., and Park, H. C., "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *ALAA Journal*, Vol. 31, No. 5, 1993, pp. 930-937.
9. 남창호, 황재혁, 오승민, "압전재료가 있는 복합재 평판의 진동제어를 위한 구조/제어 최적설계," *한국항공우주학회지*, 제 21권 제 4호, 1993, pp. 49-59.
10. 윤광준, 이영재, 김현수, "압전 폴리머 센서와 압전 세라믹 작동기를 이용한 복합재료 외팔보의 능동 진동 억제," *한국항공우주학회 춘계 초록집*, 1993, pp. 61-64.
11. Reddy, J. N., *Energy and Variational Methods in Applied Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1984, pp. 449-463.

Table 1. Material properties.

	Graphite/Epoxy	PZT G1125
E_1	130.0 GPa	63.0 GPa
E_2	10.0 GPa	63.0 GPa
G_{12}	4.85 GPa	24.6 GPa
G_{23}	3.29 GPa	24.6 GPa
ν_{12}	0.31	0.28
t	0.1125 mm	0.1 mm
ρ	1480 Kg/m ³	7600 Kg/m ³
d_{31}		180 pC/N

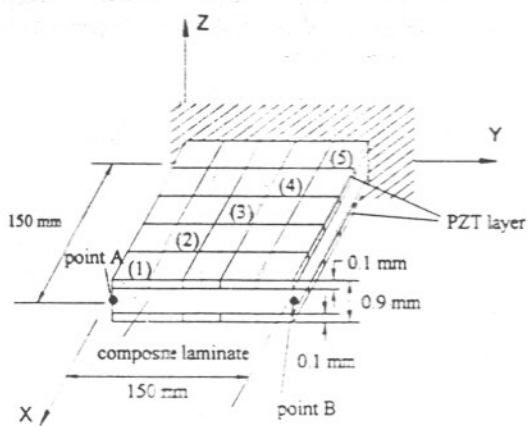


Fig. 1 Configuration of the piezolaminated plate.

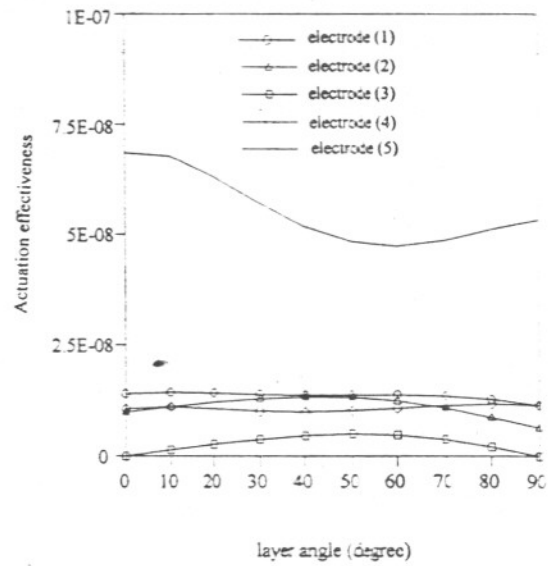


Fig. 2 (b) Actuation effectiveness variation (2nd mode).

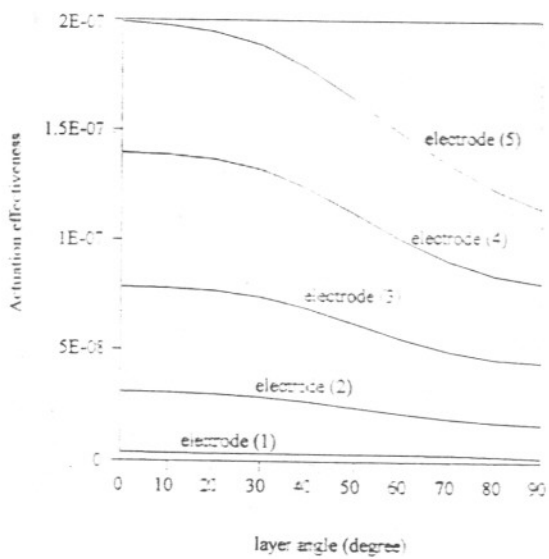


Fig. 2 (a) Actuation effectiveness variation (1st mode).

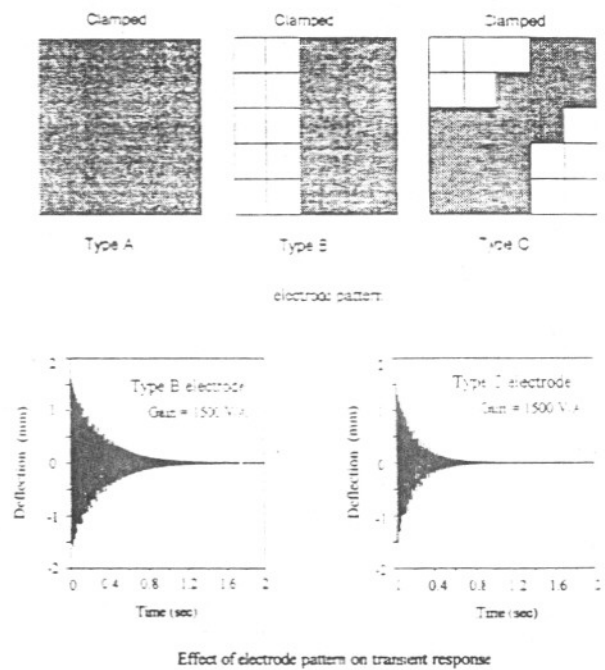


Fig. 3 Electrode selection for torsional mode suppression.

1994年度

秋季學術發表會 論文集

Proceedings of the KSAS Fall Annual Meeting '94

日時：1994年 11月 12日(土)

場所：서울 大 學 校



主 催

社團 韓 國 航 空 宇 宙 學 會
法 人
The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences

後 援

韓 國 科 學 技 術 團 體 總 聯 合 會
大 宇 重 工 業 株 式 會 社

초음속 화학반응유동의 수치적 연구

.....정동규*, 장근식(한국과학기술원) ... 302

내재적 기법을 이용한 무단물체 주위의 화학적 비평형 유동장 수치해석

.....안민주*, 정인석, 조경국(서울대학교) ... 308

제 6 발표장

좌장 : 윤광준(건국대학교)

항공기 브레이크 디스크의 열탄성 연구

.....손현우*, 홍창선, 김천곤(한국과학기술원) 김광수(대우중공업) ... 315

분포형 압전필름 작동기를 특징으로하는 단일링크 유연 머니플레이터의 위치제어

.....이태훈*, 최승복, 정재천(인하대학교) ... 320

플랩을 갖는 2차원 날개에 대한 초음속 공탄성 해석

.....양성모*, 이 인(한국과학기술원) ... 325

QFT를 이용한 단일 링크 유연 트보트팔의 강건제어

.....김우철*, 최승복(인하대학교) ... 330

좌장 : 김기욱(인하대학교)

항공기 착륙 장치의 완충기 최적설계

.....김두란, 이현준*, (한국항공대학교), 권재춘(국방과학연구소), 김동재(기아자동차) ... 334

이상적인 접합부를 이용한 구조물내의 파동제어

.....허명규*, 이우성(인하대학교) ... 339

정지비행시의 복합재료 헬리콥터 로우터 블레이드의 공탄성 해석

.....전성민*, 이 인(한국과학기술원) ... 344

좌장 : 염찬홍(한국항공우주연구소)

외팔보의 비선형 진동추경

.....이영재*, 윤광준(건국대학교) ... 348

복합재 탄성판을 이용한 착륙장치

.....김동민*, 허명규, 이기범(국방과학연구소) ... 353

지능 복합재 구조의 진동제어 특성에 관한 유한요소 해석

.....한재홍*, 이 인(한국과학기술원) ... 358