

# 압전 세라믹이 부착된 복합재 구조물의 진동 및 감쇠 특성

0조 기대\*, 한 재홍\*, 이 인\*\*

## Vibration and Damping Characteristics of Composite Structures with Piezo Ceramics

Ki-Dae Cho\*, Jae-Hung Han\* and In Lee\*\*

### ABSTRACT

A numerical computation and experimental test have been performed for the investigation of dynamic behavior of composite beams with bonded piezo ceramics. The present finite element method based on layerwise approach can effectively evaluate the characteristics of the composite beams with bonded piezo ceramics. The natural frequencies and damping values were measured by fitting the frequency response function obtained from FFT analyzer. The frequency-dependent damping properties of composite material were measured to utilize them for the finite element analysis of the composite beams with bonded piezo ceramics. The experimental results are in good agreement with those of finite element analysis.

### 1. 서 론

최근들어 생명체와 마찬가지로 환경 변화에 적절히 적응해 나갈 수 있는 스마트 구조물에 대한 연구가 활발하다. 이러한 스마트 구조물을 구성하는 매체로 많이 알려진 압전재료는 외부에서 전기장을 받으면 변형율이 발생하고 응력을 받으면 진하를 발생하는 재료로서 특히 판형으로 가공된 압전재료가 작동기로 사용될때 구조물에 삽입이 쉽고 가벼우며, 에너지 소모가 작은 여러 장점을 가진다. 이러한 압전재료의 특성을 이용한 능동 진동제어에 대한 연구가 활발하다[1]. 그런데 압전 작동기는 시스템에 능동 소자로

만 작용하는 것이 아니라 그 자체가 구조물의 하중 지지 역할을 하면서 동시에 수동 소자의 역할을 하기 때문에 설계시 작동기 자체가 구조물의 일부분으로 고려되어야 한다. 그러므로 실제 구조물의 제작 이전에 압전 작동기를 포함한 전체 구조물의 여러 거동을 해석할 수 있는 것이 매우 중요하다. 특히 자체 감쇠비는 능동 진동 시스템이 동작하지 않는 경우에 기저 감쇠(base line damping)를 제공한다. 이와 같은 이유로 압전 작동기가 부착된 복합재 구조물의 동특성을 이해하기 위한 연구가 이론 및 실험적으로 수행된 바 있다[2]. 본 연구에서는 압전 세라믹이 부착된 구조물을 보다 정확히 모델링 하기 위해 진동 및 감쇠 해석을 위한 층별 변위 이론에 근거한 유한요소 해석 프로그램[3]을 개발하였다. 압전 세라믹이 부착된 복합재 보의 유한요소 해석에 물성치 자료로 활용하기 위해 진

\* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

\*\* 정희원, 한국과학기술원 항공우주공학과 교수

동수에 따른 복합재료의 겹보기 동적특성을 탄소/에폭시로 된 0°와 90° 복합 적층보를 제작하여 측정후 이에 대한 보정을 실시 하였다. 보정된 복합재료의 동적 물성치를 이용하여 직교적층보(Cross-Ply Beam)의 고유진동수 및 감쇠비를 유한 요소 해석을 통하여 구하였으며, 직교적층보를 제작하여 동적실험을 수행하여 상호 비교하였다. 그리고 보정된 복합재료 동적 물성치와 별도로 측정된 세라믹의 동적 물성치를 활용하여 압전 세라믹이 부착된  $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_S$ ,  $[0_4/90_4]_S$ ,  $[90]_{16T}$  복합 적층보에 대해 해석한 결과와 동적 실험 결과를 비교하였다.

## 2. 이 론

층별 변위 적층판 이론에 의한 복합 적층판의 변위장은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= \sum_{j=1}^N U^j(x, y, t) \Phi^j(z) \\ v(x, y, z, t) &= \sum_{j=1}^N V^j(x, y, t) \Phi^j(z) \\ w(x, y, z, t) &= W(x, y, t) \end{aligned} \quad (1)$$

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. Fig. 1 과 같이 압전 세라믹으로 인해 계단 모양의 구조를 갖게 되는 구조물의 경우 각 평면 요소마다 식 (1)에서  $N$ 의 값을 변화시킴으로써 효과적으로 모델링 할 수 있다. 단순 조화운동으로 자유진동하는 복합 적층보에 대한 유한요소 정식화를 수행하면 다음과 같은 일반화된 고유치 문제가 된다.

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 는 고유진동수이고  $\phi$ 는 고유벡터이다.

감쇠는 측정방법에 따라 다양하게 정의될 수 있는데 감쇠가 작은 경우에 각 모우드의 감쇠는 모우드 형상으로부터 소산에너지  $\Delta E$ 와 변형률 에너지  $E$ 의

비를 계산하게 되는데 이 방법을 모우드 변형률에너지(Modal Strain Energy : MSE)법이라고 한다. MSE에 의해 구해지는 비감쇠 용량 (Specific Damping Capacity ; SDC)는 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \frac{\Delta E}{E} \quad (3)$$

복합적층판의 소산에너지는 5 개의 성분으로 표현된다

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{1}{2} \int_A \int_{-h/2}^{h/2} (\psi_x \sigma_x \epsilon_x + \psi_y \sigma_y \epsilon_y + \psi_{xy} \sigma_{xy} \gamma_{xy} + \\ &\quad \psi_{yz} \sigma_{yz} \gamma_{yz} + \psi_{xz} \sigma_{xz} \gamma_{xz}) dz dA \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K}_d \mathbf{u} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $K_d$ 는 감쇠 강성행렬(damped stiffness matrix)이다. 각 모드에 대한 SDC는 다음과 같다.

$$\psi_i = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\phi_i^T \mathbf{K}_d \phi_i}{\phi_i^T \mathbf{K} \phi_i} \quad (5)$$

## 3. 실험 방법

시편은 한쪽 끝이 고정이고 다른쪽 끝은 자유인 외팔보의 형태를 갖도록 하였으며 실험장치는 Fig. 1 과 같이 구성하였다. 시편의 가진은 가격당치(Imapct Hammer, PCB 086 B01)를 이용하였고 비접촉식으로 압전식 가속도계에서처럼 부가적 질량을 보정해줄 필요가 없는 정전용량형 변위 센서(Gap Sensor, Ono Sokki VE 133)를 이용하여 변위를 측정하였다. 압전 세라믹 시편에 대한 동적 실험시는 응력을 받으면 전하를 발생하는 압전재료의 특성상 정전용량형 변위 센서를 교란시킬 우려가 있으므로 레이저 센서(Laser Sensor, Keyence, LC-2320)를 사용하여 변위를 측정하였다. FFT 분석기(FFT Analyzer, HP 3567A)에 입력된 가진력과 응답변위는 신호 처리되어 주파수 응답함수로 변환된다. 이때 가진력은 힘 검출기(Force Transducer)의 잔류 진동 신호를 포함하고 있으므로 윈도우잉(Windowing)을 이용하여 제거하고 주파수 응답함

수는 0.125 Hz의 해상도를 가지면서 3번의 산술 평균을 실시하여 구하였다. 고유진동수와 감쇠비를 정확히 예측하기 위해 SMS사의 STAR MODAL 소프트웨어[4]를 이용하여 주파수 응답함수를 다항식 커어브 피팅하여 고유진동수와 감쇠값을 얻었다. 이때 얻어지는 고유진동수 및 감쇠값의 3번의 산술평균 값을 최종 실험치로 표시하였다.

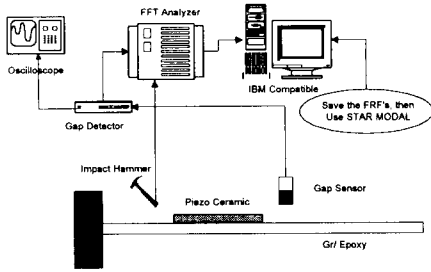


Fig. 1 Configuration of overall system

#### 4. 진동수에 따른 복합재료 및 압전 세라믹의 물성치 측정

복합재료의 수지(Resin)는 점탄성 거동을 하기 때문에 진동수에 따라 물성치가 변하게 되는데 동적 탄성계수의 변화는 그다지 심하지 않으나 감쇠량의 변화는 매우 심하게 나타난다[5]. 본 연구에서는 진동수에 따른 동적 물성치를 구하기 위해 탄소/에폭시 일방향 프리프레그(unidirectional prepreg) 16장을 적층하여 0°, 90° 시편을 제작한 후 적층보의 길이를 변화시켜가며 가력 시험을 수행하였다.  $\psi_1$ 과  $\psi_2$ 는 각각 폭 10 mm의 0° 시편과 90° 시편의 첫번째 휨 모우드로부터 측정되었고  $\psi_{12}$ ( $\psi_{13}$ )과  $\psi_{23}$ 는 각각 폭 20 mm의 0° 시편과 90°의 첫번째 비틀림 모우드로부터 측정되었다. Fig. 2와 Fig. 3에 길이 대 두께비에 따른 겉보기 탄성계수(Apparent Elastic Modulus)와 진동수에 따른 겉보기 탄성계수를 도시하고, 해석시 임의의 진동수에서의 값을 이용하기 위해 진동수에 따른 겉보기 탄성계수를 지수함수로 피팅하여 도시하였다. 겉보기 탄성계수는 측정된 외팔보의 고유진동수로부터 오일

러 보이론을 이용하여 계산할 수 있다. Fig 4에 나타난 것과 같이 섬유방향으로의 겉보기 탄성계수  $E_{A1}$ 이 진동수에 따라 감소하는 이유는 복합재료의 점탄성 거동 때문이 아니고 0° 시편의  $E_1 / G_{12}$ 의 비가 크기 때문에 보의 길이가 짧아질수록 횡전단 변형효과가 현저히 증가하기 때문이다. 반면에 90° 시편을 이용하여 측정된  $E_{A2}$ 는 진동수에 따라 거의 변화가 없음을 Fig. 3에서 볼 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5에는 길이 대 두께비 및 진동수에 따른  $\psi_{A1}$ 과  $\psi_{A2}$ 의 변화를 보여주고 있는데 이들 값에는 횡전단 변형효과를 포함하고 있는 겉보기 값이므로 이에 대한 보정이 필요하다.  $\psi_{12}$ 는 비틀림 모우드로부터 측정하였으므로 횡전단 보정이 필요없고 0°와 90° 외팔보로 측정된 감쇠량은 특성치와 모우드 형상을 결정하는 함수들을 이용하여 보정하였다[6]. 또한 압전 세라믹(Fuji C-82)의 동적 물성치를 구하기 위해 150 mm × 20.0 mm × 0.4 mm 크기를 가진 압전 세라믹 보에 대한 가력시험을 수행하여 고유진동수 및 SDC를 구하였다. 길이를 120 mm으로 고정된 휨시험에서는 13.543 Hz 및 2.6088 %를, 비틀림 시험에서는 146.240 Hz 및 4.2485 %를 얻었고 길이를 100 mm으로 고정된 휨시험에서는 19.486 Hz 및 2.7843 %를, 비틀림 시험에서는 176.579 Hz, 4.0801 % 값을 얻었다

#### 5. 결 과

보정된 복합재료의 동적 물성치를 이용한 복합재 보 구조물의 유한요소 해석의 타당성을 검증하기 위해 150 mm × 20.25 mm × 1.81mm 크기를 가진 직교 적층보에 대해 해석한 결과, 첫번째 모우드의 고유진동수 및 SDC는 각각 108.03 Hz, 0.315 %이다. 동적 실험 결과인 104.441 Hz, 0.3215 %에 상당히 일치함을 알 수 있다. 본 유한요소 해석의 타당성을 바탕으로 압전 세라믹이 부착된 보 형태 구조물의 해석 및 실험을 위한 구조물 형상 및 세부 치수는 Fig. 6 및 Table 1과 같다. 보정된 복합재료의 동적 물성치와 측정된 압전 세라믹의 감쇠비를 이용한 여러 적층 형태의 복합

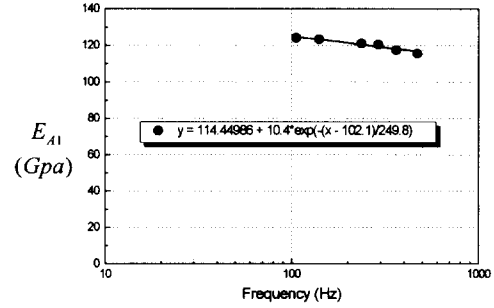
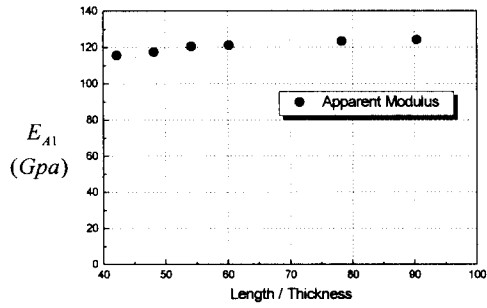


Fig. 2 Frequency dependence of apparent elastic modulus in longitudinal direction

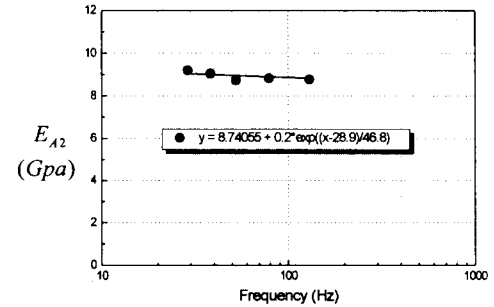
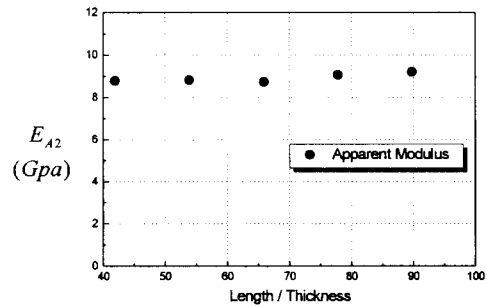


Fig. 3 Frequency dependence of apparent elastic modulus in transverse direction

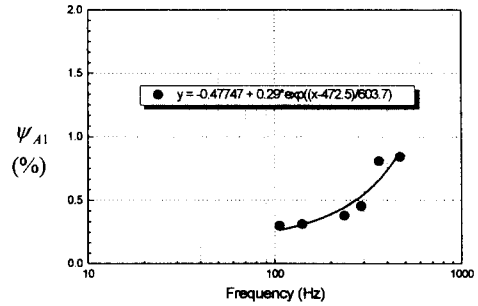
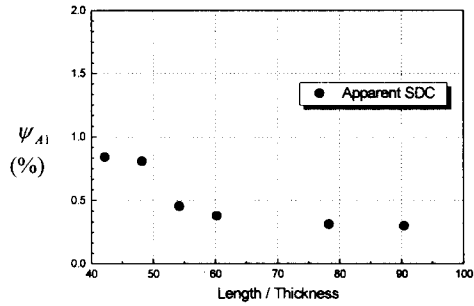


Fig. 4 Frequency dependence of apparent SDC in longitudinal direction

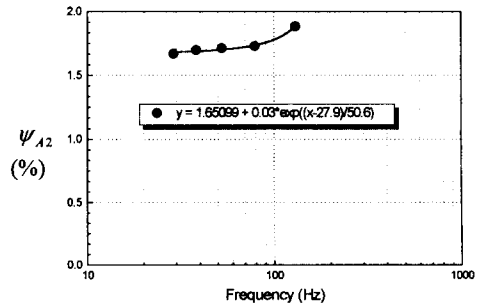
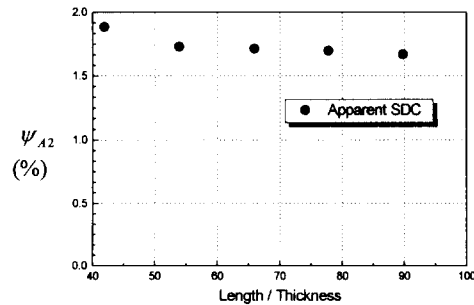


Fig. 5 Frequency dependence of apparent SDC in transverse direction

재 보 구조물의 첫번째 모우드에 대한 해석 및 실험 결과를 Table 2에 정리하였다. 실험 및 해석 결과는 잘 일치함을 보여주고 있다.

## 6. 결 론

분포된 압전 세라믹이 실제 구조물에서 능동 진동제어를 위한 능동소자 이면서 그 자체가 구조물의 하중지지 및 수동감쇠 역할을 담당하므로 실제 구조물 설계시 압전 세라믹이 부착된 전체 구조물의 동적 거동을 이해하는 것이 필수이다. 따라서 본 연구에서 층별 변위 적층판 이론에 기초한 유한요소 해석은 압전 세라믹이 부착된 복합재 보 구조물의 동적 특성을 효율적으로 파악할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

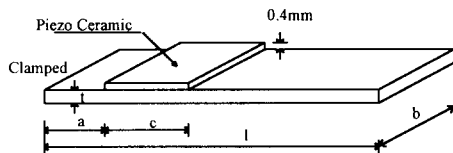


Fig. 6 Configuration for beam with piezo ceramics

Table 1 Dimensions for beams with piezo ceramics

Properties	$l \times b \times t (mm^3)$	a (mm)	c (mm)
$[0_2 / 45_2 / -45_2 / 90_2]$	150×19.15×1.78	29	30.5
$[0_4 / 90_4]_S$	150×19.88×1.76	30	30
$[90]_{16T}$	140×19.00×1.70	20	29.5

Table 2 Results for beams with piezo ceramics

Properties	Analysis		Experiment	
	Freq. (Hz)	SDC (%)	Freq. (Hz)	SDC (%)
$[0_2 / 45_2 / -45_2 / 90_2]$	96.68	0.66	89.113	0.7085
$[0_4 / 90_4]_S$	110.52	0.49	104.255	0.5490
$[90]_{16T}$	38.37	1.82	38.269	2.2008

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (1) 류근호, 한재홍, 이 인, 1997, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 평판의 최적 진동 제어 실험," 한국소음진동공학회지, 제 7권 제 1호, pp. 161-168.
- (2) Young Kyu Kang, Hyun Chul Park, Woonbong Hwang and Kyung Seop Han, 1996, "Prediction and Measurement of Modal Damping of Laminated Composite Beams with Piezoceramic Sensor/Actuator," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 7, pp. 25-32.
- (3) 한재홍, 이 인, 1997, "압전 작동기가 포함된 스마트 복합재 평판의 유한요소 해석," 한국소음진동 공학회 춘계발표회, 경주.
- (4) The STAR System, 1990, "Theory and Application, Structural Measurement Systems"
- (5) K. N. Koo and Lee, 1995, "Dynamic Behavior of Thick Composite Beams," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 14, pp 196-210
- (6) B. E. Read and G. D. Deam, 1985, "The Determination of Dynamic Properties of Polymers and Composites", Halsted Press