층간 분리가 있는 복합재 적층판의 진동제어 Vibration Control of Laminated Composite Structure with Delamination

손정우†·김흥수* Jung Woo Sohn and Heung Soo Kim

1. 서 론

적층 복합재 구조물은 뛰어난 비강성 및 비강도로 인해 금속 재료의 30% 정도의 무게만으로도 같은 등급의 강도와 강성을 낼 수 있기 때문에, 에너지 효율 향상을 위한 구조물로 많이 사용되고 있다. 하 지만, 이러한 뛰어난 성능을 지닌 적층 복합재 구조 물도 횡 방향 충격하중에 취약하여 층간 분리나 섬 유 파단 등 충격에 의한 손상을 입기 쉽다. 그리고 이렇게 생긴 층간 분리나 손상은 복합재 구조물의 강도를 크게 떨어뜨리고 수명을 단축시키는 효과를 가져오기 때문에 이를 예측하고 진단하는 기술이 필수적이다. 하지만 많은 연구들이 층간 분리의 진 행이나 구조물의 압축 강도의 감소를 예측하는 분 야에 집중되어 있다. 또한 최근에는 압전 재료를 이 용하여 구조물의 동적 특성에 따른 층간 분리를 예 측하는 분야에 많은 연구가 진행되고 있다[1,2].

본 연구에서는 압전 재료를 포함하는 스마트 복합 재 적층 구조물에 능동 제어 기법을 적용하여 층간 분리 효과를 감소시키고 구조물의 진동을 효과적으 로 제어하였다.

2. 모델링

비등방성 재료인 복합재 적층판을 모델링하기 위해서는 구조물의 변형을 정확하게 묘사하는 것이 중요하다. 층간 분리가 존재하는 경우, 층간 전단응력이 중요한 역할을 하게 되는데 변위장은 이러한 응력들을 정확하게 묘사할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 향상된 층간 변위장 모델을 적용하여 구조물의 모델링을 수행하였다. 향상된 층간 변위장은 일차 전단 변위장과 지그재그

 + 교신저자; 정회원, 금오공과대학교 기계설계공학과

 E-mail: jwsohn@kumoh.ac.kr

 Tel: 054-478-7378, Fax: 054-478-7319

* 동국대학교 기계로봇에너지공학과

타입의 층간 변위장의 선형 중첩으로 이루어져 있다. 일차 전단 변위장은 복합재 적층판의 전체적인 거동을 묘사하며, 층간 변위장은 두께 방향으로의 층간 전단 응력의 경계 및 연속 조건을 만족시킴으로써 지그재그 형태의 면내 변위장을 잘 묘사한다. 층간 분리를 묘사하기 위해서, 층간 분리부에서 독립적인 변위장을 도입하고, Heaviside unite step function을 이용하여 층간 분리부를 중심으로 윗면과 아래면에서 독립적인 변위를 가능하게 하였다. 여러 개의 층간 분리가 있는 복합재 적층판의 임의의 좌표 (x,v,z)에서의 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$U_{1}^{k}(x, y, z, t) = u_{1} + A_{1}^{k}(z)\phi_{1} + B_{1}^{k}(z)w_{,x} + \overline{C}_{1}^{j}(z)\overline{w}_{,x}^{j} + \sum_{j=1}^{N-1}\overline{u}_{1}^{j}H(z-z_{j})$$

$$U_{2}^{k}(x, y, z, t) = u_{2} + A_{2}^{k}(z)\phi_{2} + B_{2}^{k}(z)w_{,y} + \overline{C}_{2}^{j}(z)\overline{w}_{,y}^{j} + \sum_{j=1}^{N-1}\overline{u}_{,j}^{j}H(z-z_{j})$$
(1)

 $U_{3}^{k}(x, y, z, t) = w(x, y, t) + \sum_{j=1}^{N-1} \overline{w}^{j}(x, y, t)H(z - z_{j})$

본 연구에서 고려한 복합재 적층 구조물의 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 구조물의 가운데 면에 1개의 층간 분리가 있는 경우를 고려하였다. 카본 복합재 적층판을 대상으로 하였고, 적층 배열은 [0/90]4s이며 물성치는 다음과 같다.

E1= 380 GPa, E2=16.6 GPa, G12=4.2 GPa,

ρ=1800 Kg/m3, v12=0.31, v23=0.42

구조물에는 1개의 압전 작동기와 1개의 압전 센서가 부착되어 있으며, 압전재료의 물성치는 다음과 같다



Fig. 1 Configuration of laminated composite structure with delamination

E= 63 GPa, ρ =7700 Kg/m3, ν =0.28, d₃₁=d₃₂=250 pm/V

유한요소 정식화를 통하여 제안된 구조물에 대한 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수가 있다.

$$\begin{split} M\ddot{d}_{u} + C\dot{d}_{u} + K_{uu}d_{u} + K_{u\phi}d_{\phi} = F_{u} \\ K_{\phi u}d_{u} + K_{\phi\phi}d_{\phi} = F_{\phi} \end{split}$$
(2)

여기서, d_u 는 유한요소의 절점 변위, d_{ϕ} 는 압전층의 절점 전기장을 나타낸다. 매트릭스 M 과 C 는 질량과 감쇠행렬을 나타낸다. 매트릭스 $\mathbf{K}_{u\phi}$ 와 $\mathbf{K}_{\phi u}$ 는 압전-탄성 연성효과에 의해서 나타나는 강성 행렬이다. 매트릭스 \mathbf{K}_{uu} 는 강성행렬, $\mathbf{K}_{\phi\phi}$ 는 압전 강성행렬을 나타낸다. 그리고, 벡터 \mathbf{F}_{u} 와 \mathbf{F}_{ϕ} 는 기계적, 전기적 외력을 나타낸다.

3. 능동 제어

본 연구에서는 모든 상태변수들이 측정 가능하고 되먹임 할 수 있다고 가정하고, 극점배치기법(Pole Placement Technique)을 적용하였다. 구조물이 건강한 상태, 층간 분리가 있는 상태, 제어된 상태의 극점을 Fig. 2에 각각 표시하였다. 제어를 통하여 원하는 위 치에 극점을 위치시킬 수 있음을 확인하였다. 구조 물의 진동 제어를 위하여 첫 번째 극점은 건강한 구조물의 극점보다 좌측에 위치하도록 하였다. 각 구조물의 impulse 응답을 Fig. 3에 나타내었다. 제어 를 통하여 건강한 상태의 구조물과 동일한 주파수 로 회복되는 것을 확인할 수 있으며, 구조물의 진동 도 효과적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 구조 물의 고유진동수 변화는 Table 1에 나타내었다.



Fig. 2 Location of system poles for healthy structure, delaminated structure and controlled structure

4. 결 론

본 연구에서는 압전 재료를 포함하는 스마트 복합재 구조물에 층간 분리가 있는 경우에 대한 모델링을 수행하고 능동 제어 기법을 적용하여 층간 분리 효과를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 층간 분리가 있는 경우에도 구조물의 진동을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

(1) Kim H. S., Chattopadhyay A. and Ghoshal A., "Dynamic Analysis of Composite Laminates with Multiple Delamination using Improved Layerwise Theory," AIAA Journal, Vol. 41, No. 9, 2003, pp. 1771-1779.

(2) Kim H. S, Ghoshal A., Kim J. and Choi S.B., "Transient Analysis of Delaminated Smart Composite Structures by Incorporating Fermi-Dirac Distribution," Smart Materials and Structures, Vol. 15, No. 2, 2006, pp. 221-231.

후 기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으 로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0021720)

	Table 1	Change	of natural	frec	uencies
--	---------	--------	------------	------	---------

Mode	Healthy	Delaminated	Controlled
1st Bending	40.6	39.3	40.6
1st Twisting	125.6	114.0	125.6



Fig. 3 Impulse response of the structure