

복합재 적층판의 동적 특성 회복을 위한 상태 관측기 설계

State Observer Design for Dynamic Characteristics Recovery of the Laminated Composite Plate

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

1. 서 론

일반적으로 복합재 적층판을 이용한 구조물은 높은 비강성과 비강도를 가지고 있어, 금속 재료를 이용한 구조물보다 작은 무게를 가지면서도 우수한 강도와 강성을 가질 수 있다. 따라서 경량 구조물의 설계가 중요한 분야에서는 이러한 복합재 적층판을 이용한 구조물의 설계에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 하지만, 이러한 복합재 적층판 구조물은 횡 방향 충격 하중에 취약한 단점을 가지고 있어, 충격에 의하여 층간 분리나 섬유 파단 등의 의한 손상을 입기 쉽다. 그리고 이렇게 생긴 층간 분리나 손상은 복합재 구조물의 강도를 크게 떨어뜨리고 수명을 단축시키는 효과를 가져오게 된다. 또한 구조물의 강도 저하는 전체 시스템의 고유 진동수를 변화시키게 되는데, 변화된 고유 진동수가 시스템의 작동 주파수와 가깝게 이동하게 된다면 시스템의 파괴가 발생하는 등의 대형 사고가 발생할 수도 있다. 이에 최근에는 구조물의 동적 특성 변화를 압전 재료와 능동 제어 기법을 적용하여 원래의 건강한 상태로 회복시키고자 하는 연구가 진행되었다 [1]. 그러나 기존 연구에서는 시스템의 모든 상태가 측정가능하고, 되먹임이 가능하다는 가정이 필요하였으나, 이는 실제 물리적 시스템에 적용하기는 한계가 있다.

본 연구에서는 측정할 수 없는 시스템의 상태를 추정할 수 있는 관측기를 설계하여 되먹임 제어 시스템을 구성하였다. 이를 통하여 손상된 복합재 구조물의 동적 특성이 건강한 상태로 효과적으로 회복될 수 있는 것을 확인하였다.

2. 모델링

본 연구에서 고려된 복합재 적층판 구조물을 Fig. 1에 나타내었다. 카본 복합재를 대상으로 하였으며, 적층 배열은 [0/90]4s이다. 한 쪽이 고정된 형태의 평판을 고려하였으며, 구조물의 크기는 길이 30cm, 폭 5cm, 두께 0.2cm이다. 복합재 구조물의 두께 방향 가운데 면에 층간 분리의 손상이 있는 것으로 가정하였고, 손상된 부분의 길이는 10cm, 폭은 5cm이며, 고정된 끝 단으로부터 10cm 떨어진 곳에 위치한다. 길이 3cm, 폭 3cm, 두께 0.025 cm의 압전 작동기가 구조물의 표면에 부착되어 있는 것으로 가정하였다. 압전 작동기와 구조물은 완벽하게 접촉된 것으로 가정하였고, 접촉체의 두께는 무시하였다. 또한 하나의 압전 재료를 센서와 작동기로 모두 사용할 수 있는 것으로 고려하였다.

유한요소 정식화를 통하여 제안된 구조물에 대한 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수가 있다 [2].

$$M\ddot{u}_u + C\dot{u}_u + K_{uu}d_u + K_{u\phi}d_\phi = F_u \quad (1)$$

$$K_{\phi u}d_u + K_{\phi\phi}d_\phi = F_\phi$$

여기서, d_u 는 유한요소의 절점 변위, d_ϕ 는 압전층의 절점 전기장을 나타낸다. 매트릭스 M 과

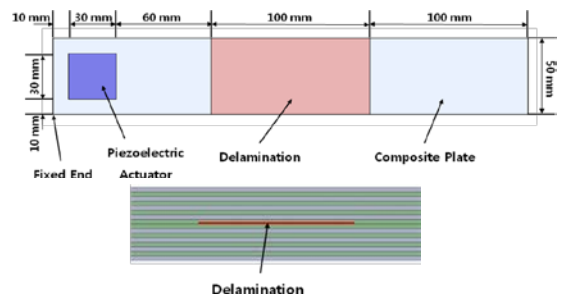


Fig. 1 Configuration of laminated composite plate with delamination

† 교신저자: 정희원, 동국대학교 기계로봇에너지공학과
 E-mail : heungsoo@dgu.edu

Tel : 02-2260-8577, Fax : 02-2263-9379

* 정희원, 금오공과대학교 기계설계공학과

C 는 질량과 감쇠행렬을 나타낸다. 매트릭스 $K_{u\phi}$ 와 $K_{\phi u}$ 는 압전-탄성 연성효과에 의해서 나타나는 강성 행렬이다. 매트릭스 K_{uu} 는 강성행렬, $K_{\phi\phi}$ 는 압전 강성행렬을 나타낸다. 그리고, 벡터 F_u 와 F_{ϕ} 는 기계적, 전기적 외력을 나타낸다.

3. 능동 제어

제어를 위한 시스템의 상태 공간 모델을 식 (1)의 운동방정식으로부터 다음과 구성하였다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{A} 는 시스템 행렬, \mathbf{B} 는 입력 행렬, \mathbf{C} 는 출력 행렬 \mathbf{u} 는 제어 입력 행렬이다. 시스템의 모든 모드를 제어하는 것은 불가능하므로 식 (2)는 제어 모드와 그 밖의 모드로 구분하여 다음과 같이 표현할 수 있다 [3].

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_c &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{x}}_r &= \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{u} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 아래첨자 c 는 제어 모드, r 은 그 밖의 모드를 의미한다. 관측기 설계에서는 제어 모드뿐만 아니라 나머지 모드 중에 관측이 가능한 모드를 고려하여 설계하였고, 출력 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{C}_{r_o} \mathbf{x}_{r_o} \quad (4)$$

여기서 아래첨자 r_o 는 제어 모드는 아니지만 관측될 수 있는 모드를 나타낸다. 식 (3)과 (4)로부터 전체 시스템의 상태 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{c-r} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_c & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{c-r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_c \\ \mathbf{x}_{c-r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_c \\ \mathbf{B}_{c-r} \end{bmatrix} \mathbf{u} \\ &= \mathbf{A}_{c-r} \mathbf{x}_{c-r} + \mathbf{B}_{c-r} \mathbf{u} \end{aligned} \quad (5)$$

제어 입력은 pole placement 기법을 활용하여 다음과 같이 결정된다 [1].

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{K} 는 제어 이득이고, $\hat{\mathbf{x}}$ 은 추정된 상태이다. 관측기는 다음과 같은 형태로 결정된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_{c-r} &= \mathbf{A}_{c-r} \hat{\mathbf{x}}_{c-r} + \mathbf{B}_{c-r} \mathbf{u} + \mathbf{L}[\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}] \\ \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C}_{c-r} \hat{\mathbf{x}}_{c-r} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\hat{\mathbf{y}}$ 은 예측 출력을 나타내고, \mathbf{L} 은 관측기의 이득을 나타낸다.

제안된 시스템의 성능 평가를 위하여 특정 모드로 초기 변위를 설정하고 구조물을 가진 한 후 제어기를 실행하여 구조물의 주파수 응답변화를 관찰하였으며 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 첫 번째와 두 번째 고유 진동수가 회복된 것을 확인할

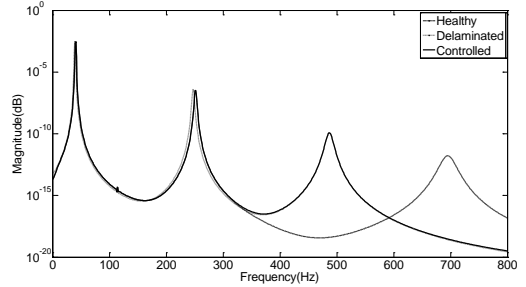


Fig. 2 Frequency response of first and second mode control

수 있으며, 제안된 관측기와 제어기를 적용하여 손상이 있는 복합재 구조물의 동적 특성을 건강한 상태로 회복시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 손상이 있는 복합재 적층판 구조물의 동적 특성 회복을 위하여 압전 재료를 사용하였으며, 관측기를 포함하는 되먹임 제어 시스템을 설계하고 적용하였다. 손상으로 인한 동적 특성 변화가 발생할 경우에도 제안된 제어 기법을 적용하여 건강한 상태의 동적 특성으로 회복할 수 있는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Sohn, J. W. and Kim H. S., "Dynamic Characteristics Modification of Damaged Composite Structure Using MFC and Active Control Algorithm," Transactions of the KSNVE, Vol. 23, No. 12, 2013, pp. 1066-1072.
- (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.
- (3) Balas, M., "Feedback Control of Flexible Systems," IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-23, No. 4, 1978, pp. 673-679.

후 기

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