

MFC 를 이용한 손상된 복합재의 능동제어

Active Control of Damaged Composite Structure Using MFC Actuator

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

Key Words : Active Control (능동 제어), Laminated Composite (적층 복합재), Delamination (층간 분리), Piezoelectric Actuator (압전 작동기), Macro-Fiber Composite Actuator (MFC 작동기)

ABSTRACT

In this work, active control algorithm is adopted to reduce delamination effects of the damaged composite structure and control performance with MFC actuator is numerically evaluated. Finite element model for the damaged composite structure with piezoelectric actuator is established based on improved layerwise theory. In order to achieve high control performance, MFC actuator, which has increased actuating force, is considered as a piezoelectric actuator. Mode shapes and corresponding natural frequencies for the damaged smart composite structure are studied. After design and implementation of active controller, dynamic characteristics of the damaged smart composite structure are investigated.

1. 서 론

지구 온난화에 따른 에너지 이용 효율 증가와 이산화탄소 배출량 감소를 위한 연구가 전세계적으로 진행되고 있다. 작은 질량을 가지면서도 우수한 강도와 강성을 가지는 경량 구조물에 대한 연구는 그 중 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 일반적으로 적층 복합재 구조물은 뛰어난 비강도와 비강성을 가지는 것으로 알려져 있어 경량 구조물의 설계에 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 잘 알려진 바와 같이 미국 보잉사의 787 기종의 경우 전체의 50% 이상의 구조물에 복합재료가 사용되어 전체 구조물의 무게를 상당히 줄였으며, 디자이너 고든 머레이가 설계한 전기 자동차인 T.27 의 경우 전체 구조물을 모두 복합재를 사용하여 차량의 경량화를 통한 에너지 효율 향상을 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 적층 복합재 구조물은 횡 방향 충격하중에 취약하여 층간 분리와 같은 구조물의 손상이 발생

할 수 있으며, 층간 분리와 같은 손상은 구조물의 강도를 크게 떨어뜨리고 수명을 단축시킬 수 있다. 이에 층간 분리와 같은 구조물의 손상을 예측하거나 실시간으로 파악하는 구조 건전성 평가 기술 등에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. Giuriutiu 등은 압전 재료와 표면 탄성파를 이용한 적층 복합재 구조물의 구조 건전성 평가에 대한 연구를 수행하였다^(1,2). Cho 등은 층간 지그재그 변위장을 이용한 적층 구조물의 층간 분리 거동에 대한 연구를 수행하였다⁽³⁾.

또한 구조물에 발생한 손상이 구조물의 동적 특성 변화에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. Chattopadhyay 등은 고차변위장을 이용하여 복합재 적층판의 정확한 응력 해석 기법을 도입하면서 층간 분리가 있는 복합재 구조물의 모델을 개발하고 손상이 있는 복합재 구조물의 특성 변화에 대해 고찰하였다^(4~6). Campanelli는 복합재에 발생하는 층간 분리가 구조물의 모드 특성에 미치는 영향을 고찰하였다⁽⁷⁾. Saravanos는 층간 분리에 의한 복합재 적층판의 진동 감쇠 특성의 변화에 대해 보고하였다⁽⁸⁾. Lee는 층간 변위장 모델을 바탕으로 층간 전단 응력의 효과를 모델링하고 적층 보구조물의 진동 특성을 해석하였다⁽⁹⁾. Kim 등은 압전 재료를 이용하여 층간 분리가 있는 복합재 구조물

† 교신저자: 정회원, 동국대학교 기계로봇에너지공학과
E-mail : heungssoo@dgu.edu

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

* 금오공과대학교 기계설계공학과

의 동적 특성 변화를 관찰하였다^[10]. 그러나 발생된 손상이 구조물의 특성 변화에 미치는 효과를 감소시키기 위한 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 손상이 있는 적층 복합재에 MFC 작동기와 능동 제어 알고리즘을 적용하여, 손상이 구조물의 특성 변화에 주는 영향을 줄이고, 구조물의 성능을 유지할 수 있는지 평가하였다. 향상된 충간 변위장 모델을 이용하여 손상이 있는 복합재 구조물에 대한 유한요소 모델을 구축하고, 이를 바탕으로 구조물의 모드 특성을 확인하였다. 구조물의 제어를 위해 향상된 작동력을 갖는 압전 작동기인 MFC 작동기를 고려하였다. 능동 제어기를 설계하고 이를 적용하여 손상에 의한 구조물의 특성 변화 효과를 능동적으로 감소시킬 수 있는지 확인하였다.

2. 시스템 모델링

본 연구에서 고려된 충간 분리가 있는 적층 복합재 구조물을 Fig. 1에 나타내었다. 구조물은 한 쪽 끝 단이 고정된 외팔보 형태이며 길이는 30cm, 폭은 5cm, 두께는 0.2cm이다. 구조물의 표면에는 길이 3cm, 폭 3cm, 두께 0.3cm의 MFC 작동기가 고정된 끝 단으로부터 1cm 떨어진 위치에 부착되어 있으며, 완벽하게 부착되어 있다는 가정을 통하여 접착제의 두께 등에 의한 영향은 고려하지 않는다. 구조물의 두께 방향 가운데 면에 충간 분리 형태의 손상이 존재하는 것으로 가정하였으며, 충간 분리 면의 크기는 길이 10cm, 폭 5cm 이고, 고정된 끝 단으로부터 10cm 떨어진 곳에 위치한다. 복합재의 적층 배열은 0와 90로 8층을 교차 적층하고, 가운데 면을 중심으로 상하 대칭을 이루는 [0/90]4s 형태이다. 복합재의 재료인 carbon cyanate와 MFC 작동기의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

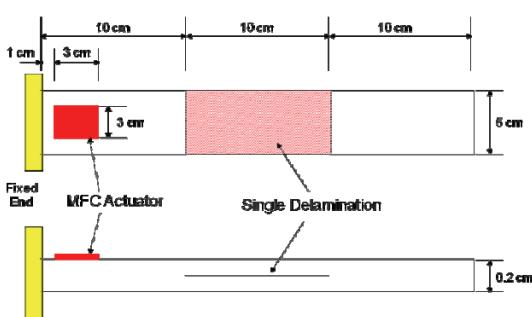


Fig. 1 Configuration of the proposed composite structure

비등방성 특성을 가지는 적층 복합재 구조물의 모델링에서는 구조물의 변형을 정확하게 표현할 수 있어야 한다. 충간 분리가 존재하는 경우에는 변위장이 충간 전단응력을 정확하게 나타낼 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 향상된 충간 변위장 모델을 사용하여 충간 분리 모델을 개발하였다. 향상된 충간 변위장 모델은 적층 복합재의 전체적인 거동을 묘사하는 1 차 전단 변위장 모델과 두께 방향의 충간 전단응력의 경계 조건과 연속 조건을 만족하는 지그재그 충간 변위장 모델의 선형 중첩으로 이루어져 있다. 충간 분리가 있는 복합재의 임의의 좌표 (x, y, z)에서의 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} U_1^k(x, y, z, t) &= u_1 + A_1^k(z)\phi_1 + B_1^k(z)w_{,x} \\ &\quad + \bar{C}_1^j(z)\bar{w}_{,x}^j + \sum_{j=1}^{N-1} \bar{u}_1^j H(z - z_j) \\ U_2^k(x, y, z, t) &= u_2 + A_2^k(z)\phi_2 + B_2^k(z)w_{,y} \\ &\quad + \bar{C}_2^j(z)\bar{w}_{,y}^j + \sum_{j=1}^{N-1} \bar{u}_2^j H(z - z_j) \quad (1) \\ U_3^k(x, y, z, t) &= w(x, y, t) \\ &\quad + \sum_{j=1}^{N-1} \bar{w}^j(x, y, t)H(z - z_j) \end{aligned}$$

Table 1 Material properties

Carbon Cyanate			
Young's Modulus E_1	380 GPa	Young's Modulus E_2	16.6 GPa
Shear Modulus G_{12}	4.2 GPa	Density ρ	1800 Kg/m^3
Poisson Ratio ν_{12}	0.31	Poisson Ratio ν_{23}	0.42
MFC (poling direction: 1)			
Young's Modulus E_1	30 GPa	Young's Modulus E_2	15.86 GPa
Shear Modulus G_{12}	5.52 GPa	Density ρ	7750 Kg/m^3
Poisson Ratio ν_{12}	0.31	Poisson Ratio ν_{21}	0.16
Piezoelectric Constant d_{11}	400 pC/N	Piezoelectric Constant d_{12}	-170 pC/N
Permittivity $\epsilon_{11} / \epsilon_0$	0.31	Permittivity $\epsilon_{22} / \epsilon_0$	0.16

여기서 U_1^k , U_2^k 는 면내 방향 변위를, U_3^k 는 두께 방향 변위를 나타낸다. 위 첨자 k 는 k 번째 적층판을 나타낸다. 그리고, u_1 , u_2 , w 는 기준면에서의 변위를 나타내고, ϕ_1 , ϕ_2 는 기준면에서 수직인 방향에 대해서 x , y 방향으로의 회전을 나타낸다. 충간 분리를 묘사하기 위해서 독립 변위인 \bar{u}_1^j , \bar{u}_2^j , \bar{w}^j 가 도입되었으며, 이 항들은 충간 분리부 사이에서 나타나는 미끄러짐이나 급작스러운 분리를 나타내고, z_j 는 충간 분리부의 위치를 나타낸다. 함수 $H(z - z_j)$ 는 Heaviside unit step function이다. 충간 합수인 $A_i^k(z)$, $B_i^k(z)$, $\bar{C}_i^k(z)$ 는 전단 응력과 변위의 연속 조건 그리고 적층판의 윗면과 아래면에서의 전단 응력의 경계조건을 이용해서 구할 수가 있고, 이 함수들은 재료의 기하학적인 형상과 물성치의 정보를 가지고 있다($i=1, 2$ ⁽¹¹⁾). 식 (1)의 향상된 충간 변위장 모델과 유한요소법을 이용하여 다음과 같은 행렬 형태의 운동방정식을 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_u + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_u + \mathbf{K}_{uu}d_u + \mathbf{K}_{u\phi}d_\phi &= \mathbf{F}_u \\ \mathbf{K}_{\phi u}d_u + \mathbf{K}_{\phi\phi}d_\phi &= \mathbf{F}_\phi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, d_u 는 유한요소의 절점 변위, d_ϕ 는 압전충의 절점 전기장을 나타낸다. 매트릭스 \mathbf{M} 과 \mathbf{C} 는 질량과 감쇠행렬을 나타낸다. 매트릭스 $\mathbf{K}_{u\phi}$ 와 $\mathbf{K}_{\phi u}$ 는 압전-탄성 연성효과에 의해서 나타나는 강성 행렬이다. \mathbf{K}_{uu} 는 구조물의 강성행렬, $\mathbf{K}_{\phi\phi}$ 는 압전 강성행렬을 나타낸다. 그리고, 벡터 \mathbf{F}_u 와 \mathbf{F}_ϕ 는 기계적, 전기적 외력을 나타낸다. MFC 작동기는 면내 방향으로 d_{33} 효과를 사용하므로 일반적인 압전 세라믹과 달리 등가 전기장 모델을 적용하였다⁽¹²⁾.

모드 해석을 통해 Fig. 1에서 제안된 구조물의 모드 형상과 고유진동수를 확인하였다. 모드 해석은 구조물에 충간 분리가 존재하지 않는 건강한 상태(Healthy Structure)와 충간 분리가 존재하는 손상된 상태(Delaminated Structure)에 대해서 각각 수행하였다. 모드 형상은 두 경우 모두 동일하게 나타났으며, Fig. 2에 나타난 바와 같이 첫 번째와 세 번째는 굽힘 모드가, 두 번째와 네 번째는 비틀림 모드가 발생하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 손상이 있는 경우에는 건강한 상태보다 고유 진동수가 낮아지는 경향을 가지는 것을 확인하였다. 이는 구조물에 존재하는 충간 분리로 인해 전체 구조물의 강성이 낮아짐에 따라 발생한 것으로 판단되며 주파수가 높은 고차 모드에서 주파수의 변화량이 커지는 특성을 나타내었다.

Table 2 Change of the natural frequencies

Mode	Healthy	Delaminated
1st	40.5 Hz	39.2 Hz
2nd	125.3 Hz	113.8 Hz
3rd	251.3 Hz	247.1 Hz
4th	432.9 Hz	406.8 Hz

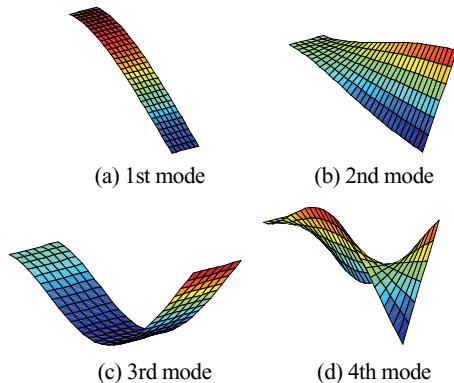


Fig. 2 Mode shapes of the proposed composite structure

3. 제어 성능 평가

제어를 위한 시스템의 상태 공간 모델을 식 (2)의 운동방정식으로부터 다음과 구성하였다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{A} 는 시스템 행렬, \mathbf{B} 는 입력 행렬, \mathbf{u} 는 제어 입력 행렬이다. 본 연구에서는 모든 상태 변수는 측정 및 피드백이 가능하고, 제어 입력은 제한되어 있지 않다는 가정을 바탕으로 Pole Placement 제어 알고리즘을 적용하였다. 제어 입력 \mathbf{u} 는 다음과 같이 Ackermann의 공식으로부터 결정되었다.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{Kx} \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ \dots \ 1] \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{AB} \\ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \phi(\mathbf{A}) \quad (5)$$

$$|s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK})| = (s - \mu_1) \cdots (s - \mu_n) \quad (6)$$

$$= s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \cdots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0$$

$$\phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + \alpha_1 \mathbf{A}^{n-1} + \cdots + \alpha_{n-1} \mathbf{A} + \alpha_n \mathbf{I} \quad (7)$$

손상이 없는 건강한 상태의 구조물과 손상이 있는 구조물의 초기 상태의 극점의 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 건강한 상태의 구조물의 극점은 O로, 손상

이 있는 구조물의 극점은 X로 나타내었으며, 4개 모드에 대한 극점을 나타내었다. 구조물에 손상이 있는 경우 극점의 위치가 오른쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있으며, 이는 Table 2에 나타난 바와 같이 구조물의 고유진동수가 감소한 것을 나타낸다. 첫 번째 모드의 경우 건강한 상태와 손상이 있는 상태의 극점이 같은 위치에 있는 것처럼 보이지만, 실제로는 다른 위치에 존재한다. 이는 Table 2에 나타난 바와 손상된 구조물의 첫 번째 모드의 경우 고유진동수 변화량이 작아서 생긴 현상이다.

제안된 시스템의 제어 성능을 평가하기 위하여 특정 모드로 초기 변위를 설정하고 구조물을 가진한 후 제어기를 실행하여 구조물의 주파수 응답을 관찰하였다. 첫 번째 모드로 가진하고 첫 번째 모드만 제어를 수행한 경우의 주파수 응답 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 건강한 상태 구조물의 응답을 파선(dashed line), 손상이 있는 구조물의 응답을 점선(dotted line), 손상이 있는 구조물을 제어한 경우의 응답을 실선(solid line)으로 나타내었다. 손상이 있는 구조물의 응답은 건강한 상태의 응답보다 고유진동수가 낮아졌으며, 이는 Table 2에 나타난 결과와 일

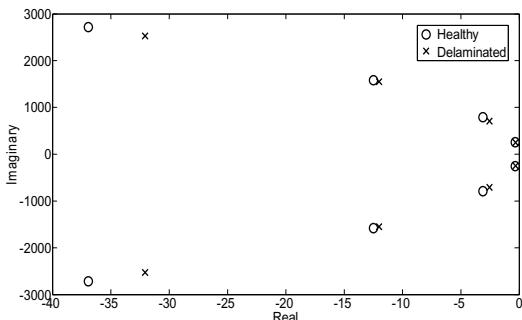


Fig. 3 Pole locations for healthy and delaminated structure

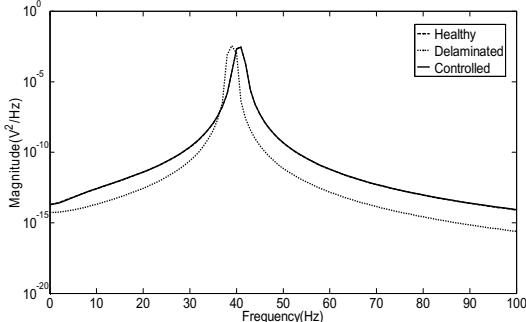


Fig. 4 Frequency response: first mode excitation and first mode control

치한다. 또한 손상이 있는 구조물에 제어를 수행한 후에는 건강한 상태의 구조물 응답과 완벽히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 모드와 세 번째 모드로 동시에 가진하고 첫 번째 모드와 세 번째 모드를 제어한 경우에 대한 구조물의 응답은 Fig. 5에 나타내었다. 구조물에 손상이 있는 경우, 첫 번째와 세 번째 모드 모두 고유진동수가 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 제어를 수행한 경우 손상이 없는 건강한 상태의 구조물 응답과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 모드부터 네 번째 모드까지 동시에 모두 가진하고 첫 번째 모드와 세 번째 모드

Table 3 Recovery of the pole locations

Mode	Healthy	Delaminated	Controlled
1st	-0.0000 ± 0.0255i	-0.0000 ± 0.0247i	-0.0000 ± 0.0255i
2nd	-0.0003 ± 0.0789i	-0.0003 ± 0.0717i	-0.0003 ± 0.0717i
3rd	-0.0012 ± 0.1580i	-0.0012 ± 0.1553i	-0.0012 ± 0.1580i
4th	-0.0037 ± 0.2717i	-0.0033 ± 0.2557i	-0.0033 ± 0.2557i

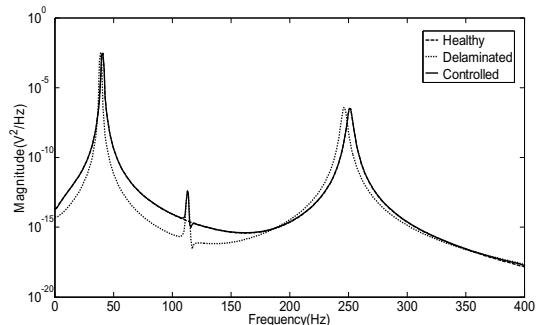


Fig. 5 Frequency response: first and third mode excitation, first and third mode control

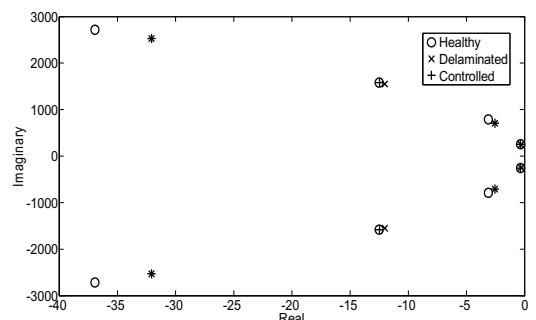


Fig. 6 Change of the pole locations

를 제어한 경우에 대한 시스템의 극점을 Fig. 6에 나타내었고, 극점의 위치를 Table 3에 표시하였다. 구조물에 손상이 발생한 경우 각 모드에 대한 극점이 오른쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있으며, 제어를 수행하여 건강한 상태의 극점으로 복원된 것을 확인할 수 있다. 제어를 수행하지 않은 두 번째와 네 번째 모드의 극점은 손상된 구조물 극점 위치에서 이동하지 않았다. 이러한 경우에 대한 구조물의 주파수 응답 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 각 모드에서 손상에 의하여 고유진동수가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 제어를 수행하여 첫 번째 모드와 세 번째 모드의 고유진동수가 건강한 상태의 고유진동수로 회복되는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 모드와 네 번째 모드의 고유진동수는 제어를 수행하지 않아 손상된 상태에서 복원되지 않은 것을 확인할 수 있다. 건강한 구조물, 손상이 있는 구조물, 제어를 수행한 구조물에 대한 고유진동수 변화를 Table 4에 나타내었다. 첫 번째 모드와 세 번째 모드의 고유진동수가 건강한 상태와 동일하게 복원된 것을 확인할 수 있다. 이 때 MFC 작동기에 인가된 제어 입력을 Fig. 8에 나타내었다. 제어 초기 최대 400V의 전압이 인가되었으나, 200V 이하의 전압으로 제어가 효과적으로 수행되었다. 본 연구에서는 하나의 MFC 작동기가 폭 방향의 가운데에 부착되어 있어 두 번째와 네 번째의 비틀림 모드는 제어하지 않고, 첫 번째와 세 번째 굽힘 모드만 제어를 수행하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 충간 분리와 같은 손상이 적층 복합재 구조물의 동적 특성을 변화에 주는 영향을 MFC 작동기와 능동제어 알고리즘을 이용하여 감소시키고 구조물의 동적 특성을 유지할 수 있는지 평가하였다. 향상된 충간 변위장 모델을 바탕으로 손상이 있는 복합재 구조물의 유한요소 모델을 구축하고, 건강한 상태와 손상이 있는 상태의 구조물에 대한 모드 해석을 통하여 손상이 구조물의 모드 특성 변화에 주는 영향을 확인하였다. 제어 알고리즘을 바탕으로 MFC 작동기에 적절한 제어 입력을 인가하여 충간 분리와 같은 손상이 구조물에 주는 영향을 줄이고 건강한 상태의 구조물의 동적 특성을 유지할 수 있는 것을 확인하였다. 향후 두 개 이상의 작동기를 사용하여 비틀림 모드에 대한 제어도 함께 수행할 것이며, 다양한 위치와 크기의 손상에 대한 연구도 수행할 계획이다.

Table 4 Recovery of the natural frequencies

Mode	Healthy	Delaminated	Controlled
1st	40.5 Hz	39.2 Hz	40.5 Hz
2nd	125.3 Hz	113.8 Hz	113.8 Hz
3rd	251.3 Hz	247.1 Hz	251.3 Hz
4th	432.9 Hz	406.8 Hz	406.8 Hz

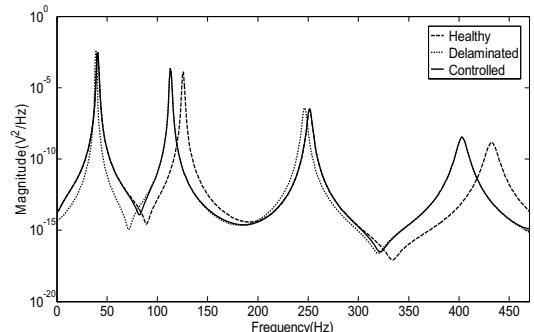


Fig. 7 Frequency response: from first to fourth mode excitation, first and third mode control

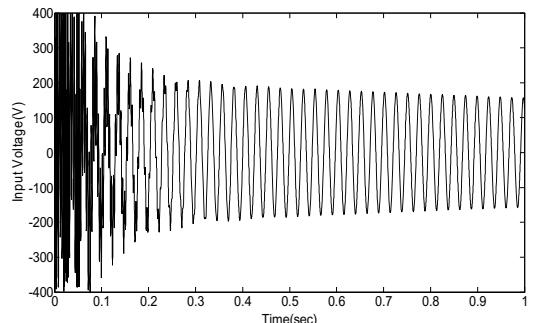


Fig. 8 Control input histories

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Giurgiutiu, V., Bao, J. and Zhao, W., 2003, Piezoelectric wafer active sensor embedded ultrasonics in beams and plates, Experimental Mechanics, Vol. 43, No. 4, pp. 428-449.
- (2) Giurgiutiu, V. and Zagrai, A., 2005, Damage detection in thin plates and aerospace structures with

the electro-mechanical impedance method, Structural Health Monitoring-an International Journal. Vol. 4, No. 2, pp. 99-118.

(3) Cho, M. and Kim, J. S., 2001, Higher-order zig-zag theory for laminated composites with multiple delaminations, Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME. Vol. 68, No. 6, pp. 869-877.

(4) Chattopadhyay, A., peralta, P., Papandreou-Suppappola, A. and Kovvali, N., 2009, A multidisciplinary approach to structural health monitoring and damage prognosis of aerospace hotspots, Aeronautical Journal. Vol. 113, No. 1150, pp. 799-810.

(5) Radu, A. G. and Chattopadhyay, A., 2002, Dynamic stability analysis of composite plates including delaminations using a higher order theory and transformation matrix approach, International Journal of Solids and Structures. Vol. 39, No. 7, pp. 1949-1965.

(6) Swann, C. and Chatopadhyay, A., 2006, Optimization of piezoelectric sensor location for delamination detection in composite laminates, Engineering Optimization. Vol. 38, No. 5, pp. 511-528.

(7) Campanelli, R. W. and Engblom, J. J., 1995, The effect of delaminations in graphite/PEEK composite plates on modal dynamic characteristics, Composite Structures. Vol. 31, No. 3, pp. 195-202.

(8) Saravanos, D. A. and Hopkins D. A., 1996, Effects of delaminations on the damped dynamic characteristics of composite laminates: Analysis and experiments, Journal of Sound and Vibration. Vol. 192, No. 5, pp. 977-993.

(9) Lee, J., 2000, Free vibration analysis of delaminated composite beams, Computers and Structures. Vol. 74, No. 2, pp. 121-129.

(10) Kim, H. S., Kim, J. and Choi, S. B., 2005, Study on Dynamic Characteristics of Delaminated Smart Composite Laminates, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 15, No. 4, pp. 395~403.

(11) Kim, H. S., Chatopadhyay, A. and Ghoshal, A., 2003, Dynamic analysis of composite laminates with multiple delamination using improved layerwise theory, AIAA Journal, Vol. 41, No. 9, pp. 1771-1779.

(12) Sohn, J. W., Kim, H. S. and Choi, S. B., 2007, Vibration Suppression of Hull Structure Using MFC Actuators, Vol. 17, No. 7, pp. 587-595.