

PZT 액츄에이터를 이용한 유연한 보의 강제 진동제어

윤여홍* (한국과학재단 인턴, 전북대 MRC), 임숙정**(전북대원),
권대규*** (전북대 국제사업단), 이성철**** (전북대, 자동차신기술 연구소)

The Forced Vibration Control of a Flexible Beam using PZT Actuator

Yeo-Hung Yun*(KOSEF, Chonbuk Univ. MRC), Suk-Jeong Lim**(Graduate School Chonbuk Univ.),
Tae-Kyu Kwon*** (NAHTEC, Chonbuk Univ.), and Seong-Cheol Lee**** (Prof. Chonbuk Univ. AHTRI)

ABSTRACT

Research on the forced vibration control of a flexible GFR composite beam using μ -synthesis is performed on this paper. Modal analysis method and modal coordinates are introduced to obtain the state equations of the structural system. Using these equations, Robust control algorithm using μ -synthesis is adopted to suppress the forced vibration of a flexible beam since the designed controller can considered plant uncertainty and external disturbance. Constant disturbance which is generated by shaking the flexible beam as 1's natural frequency is effectively rejected by a PZT actuator. Simulations and experiments are carried out with the designed controller and effectiveness of forced vibration suppression strategy is verified by results.

Key Words . Robust Control(강인 제어), μ -synthesis(μ -합성법), Composite beam(복합재 보), Structured Uncertainty(구조화된 불확실성)

1. 서 론

최근, 항공기, 우주 분야에서는 구조물의 중량이 그 성능에 미치는 영향이 크기 때문에 끊임없이 경량 구조의 개발이 이루어지고 있다. 이로 인하여 강성과 강도가 크고 가벼운 무게를 지닌 복합재 구조물의 사용이 늘고 있다^[1]. 그러나 경량화로 인하여 복합재 구조물의 유연성 증가는 외부의 하중에 대한 진동량을 증가시켜 많은 문제를 야기하게 되었다. 즉 예상치 못한 외란이 주어지거나 계속된 진동으로 인하여 사용자에게 불안감을 주고, 뿐만 아니라 복합재 구조물의 피로 파괴를 유발시켜 자체의 안정성에도 큰 위협이 되기도 한다.

다양한 저능형 재료를 작동기와 감지기로 이용한 유연 구조물의 연구 중 현재 압전재료를 이용한 진동 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 PZT는 압전재료 중, 단위 전압 당 작동력이 커서 작동기로써 정보 저장장치인 HDD, CD-ROM, DVD 등에서 많이 이용되고 있다. 이러한 정보 저장장치는 고밀도, 고성능화가 되어감에 따라 이에 대한 강제

진동제어에 관한 많은 연구가 행해지고 있다.^[4]

본 논문은 PVDF 압전 필름과 PZT 압전 세라믹을 각각 센서와 액츄에이터로 이용하여 유연한 열가소성 복합재 보의 강제 진동제어에 관한 연구를 수행하였다. 복합재 보의 지배 방정식은 모달 방정식을 바탕으로 한 상태 방정식으로 유도하였다.

모델링 시 고려되지 않은 모델링 오차 또는 외란이나 센서 잡음에 강한 제어기로 구조화된 불확실성을 고려한 구조화 특이치(structured singular value, μ)를 이용한 μ -합성법을 적용하였다. 이와 같이 설계된 강인 제어기의 성능을 검증하기 위하여, 가진기로 1차 고유진동수로 가진한 강제진동에 대한 제어 결과를 모의실험과 실험을 통하여 고찰하였다.

2. 모델링

본 연구의 모델링에는 유리섬유가 강화된 열가소성 복합재 보에 압전센서로써 PVDF 필름, 액츄에이터로 PZT 압전세라믹을 사용하였으며, 보의 전체 개

략도는 Fig.1과 같다

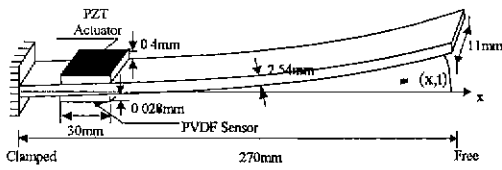


Fig. 1 Configuration of a flexible beam

압전재료는 등방성으로 가정하고, 복합재 보를 순수 굽힘을 받는 Bernoulli-Euler 보로 가정하면, PVDF 센서의 순방향 압전효과에 의하여 전하량에 관한 식을 유도할 수 있다.

$$q(t) = Y_p y_c d_{31} b [y'(x_2) - y'(x_1)] \quad (1)$$

여기서, Y_p 는 PVDF의 영률이며, b 는 압전 재료의 폭, y_c 는 보의 중립 축으로부터 압전 필름의 중립축까지 거리, $y'(x)$ 는 정규화된 빔의 모달함수이다. 식 (1)를 이용하여 전압에 관한 식을 유도하면,

$$v_p(t) = \frac{q(t)}{C_p} = K_a [y'(t, x_2) - y'(t, x_1)] \quad (2)$$

여기서, $v_p(t)$ 는 PVDF 센서의 출력 전압이고, K_a 는 PZT 압전상수이다. 액츄에이터가 보 구조물 일부에 부착될 때, 액츄에이터에 인가되는 전압 $v_a(t)$ 에 관한 보 전체의 전압분포 $V(x, t)$ 는 식 (3)과 같다.

$$V(x, t) = [H(x - x_1) - H(x - x_2)]v_a(t) \quad (3)$$

여기서, $H(\cdot)$ 는 Heaviside 함수이며, 굽힘 중심축면 거리의 계산에서 구조물의 일부분에 부착된 압전체의 영향은 무시하였다. 식(3)과 같은 전압이 보에 작용될 때에 발생하는 모멘트는 다음과 식과 같다.

$$M(t, x) = K_a v_a(t) [y'(x_2) - y'(x_1)] \quad (4)$$

다음, PVDF 센서와 PZT 압전세라믹 액츄에이터를 포함한 복합 재 보의 운동 방정식은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = M \quad (5)$$

여기서, E 는 복합재 보의 영률이며, I 는 관성모멘트, ρ 는 복합재 보의 밀도이다.

Fig. 1과 같은 외팔 보의 경계조건을 적용하고

모드 해석을 이용해서 구한 운동방정식에 비례 감쇠 항을 첨가하면 식(6)과 같은 비연성 상미분 방정식이 유도된다.

$$\ddot{q} + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = K_a v_a(t) [y'(x_2) - y'(x_1)] \quad (6)$$

위에서 유도한 상미분 방정식에서 고차모드를 무시하면, 다음과 같은 상태공간 형태의 방정식 (7)으로 모델링할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bv(t) \quad (7)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

식 (7)에서 출력행렬 C 는 PVDF 센서로부터의 출력 전압을 나타낸다.

3. 제어기 설계

μ -합성법은 Fig. 2에 보이는 것처럼 공칭 모델 G_{nom} , 모델 오차 Δ , 제어기 K , 모델 불확실성에 대한 가중함수 W_{del} , 제어기 성능에 대한 가중함수 W_p 로 구성되어 있다.

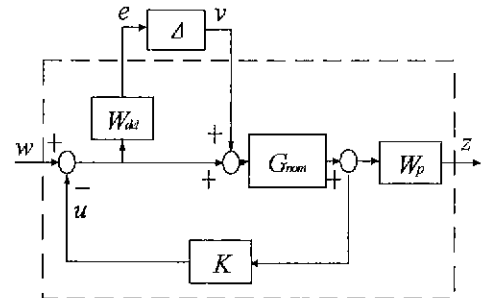


Fig. 2 Block diagram of closed-loop system

G_{nom} 은 상태방정식 형태로 표시된 유한한 자유도의 이론적인 공칭 모델이며, Δ 은 실제 시스템과 공칭 모델 사이의 전체 오차를 나타낸 값이다. 실제의 Δ 값은 알고 있지 않지만, $\|\Delta\|_\infty < 1$ 조건을 만족한다고 가정한다. Fig. 2를 기본으로 하여 가중함수 W_{del} , W_p 에 의해서 정의된 강인 제어 성능을 만족시키는 제어기 K 를 설계하였다.

본 논문에서는 가중 함수와 H_∞ 제어이론에 의해서 얻어진 제어기는 γ 가 1을 초과하여 원하는 강인 성능을 만족시키지 못한다. 그러나, μ 합성법을 이용한 $D-K$ 반복법을 이용하면 제어기에 의해 $\gamma=1.3$ 였던 γ 를 Fig. 3에서와 같이 $\gamma=0.98$ 로 떨어뜨려서 강

인한 성능조건을 만족한다

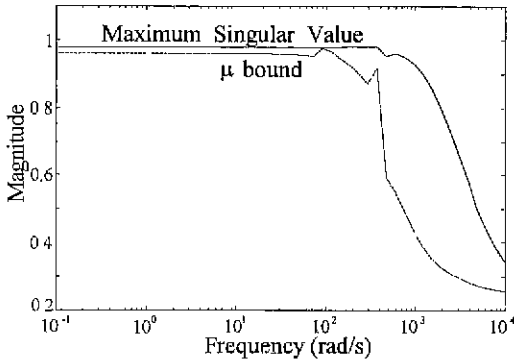


Fig. 3 Robust performance

4. 진동제어 실험

본 연구에서 사용한 시편은 유리섬유가 40% 함유된 폴리프로필렌(polypropylene) 복합재료로 이 복합재료는 직경이 11 μ m, 길이가 12.7mm인 유리섬유가 임의의 방향으로 폴리프로필렌에 강화된 재료이다.

실험에 사용한 PZT 압전세라믹 액츄에이터는 독일 PI사 제품으로 26 \times 10 \times 0.4mm 크기이고, PVDF 센서는 미국 AMP사 제품으로 액츄에이터와 동일한 크기이다. 유연한 복합재 보의 가진을 위해 사용된 가진기는 TIRA사 제품의 vib.S511이고, 가진신호는 HP33120A 함수발생기를 사용하였다.

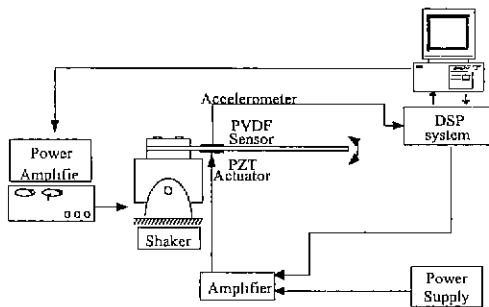


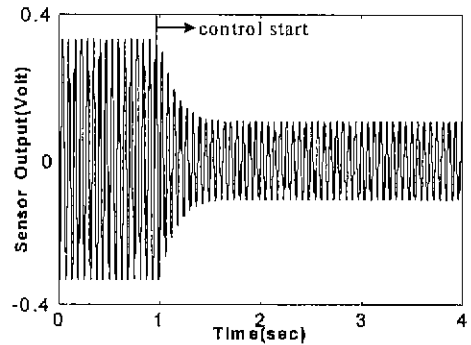
Fig. 4 Experimental apparatus for forced vibration control of a flexible beam

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 강제진동제어 시스템의 개략도를 나타내고 있다. 가진기로 1차 고유진동수를 가하여 유연한 복합재 보를 가진시켰다. 제어기는 dSPACE사 1103 제어보드(TMS 320C40 DSP)를 이용하여 제어 입력을 생성하였고, 전압 증폭기를 이용하여 PVDF 센서/PZT 액츄에이터가 독립적으로 제어될 수 있도록 구성하였다. A/D 변환기를 통한

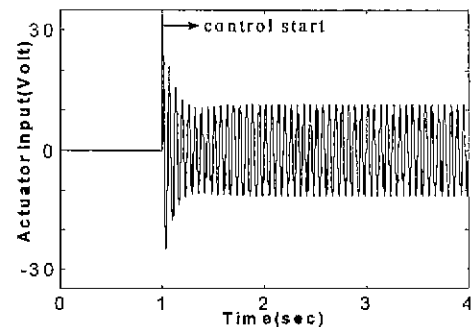
센서 입력은 1ms 간격의 샘플링으로 제어보드로 인가되고, μ -제어기로 계산된 제어 입력이 D/A변환기 및 전압 증폭기를 통하여 PZT 압전세라믹 액츄에이터에 인가하여 복합재 보의 진동을 제어하는 피드백 시스템을 구성하였다. 또한 PVDF 센서에서 나온 신호는 입력 임피던스가 높기 때문에 버퍼 역할을 할 수 있는 Voltage-follower를 통과시켰으며, 60Hz의 전원 노이즈와 EMI(Electro Magnetic Interference)를 제거하기 위하여 노치 필터를 사용하였다.

5. 실험결과 및 고찰

시뮬레이션과 실험은 함수발생기를 이용하여 1차 고유진동수로 가진기를 가진시킨 후 1초 후에 제어력을 인가시켜 강제진동 상태가 제어되는 과정을 고찰하였다. 제어기 설계 시 지배적인 첫 번째 및 두 번째 진동모드를 고려하였으며, 모델변수는 모달 해석을 통하여 $\omega_1 = 15.4\text{Hz}$, $\omega_2 = 60\text{Hz}$, $\zeta_1 = 0.01$, $\zeta_2 = 0.008$ 와 같이 얻었다. 시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK로 실행했으며 1차 고유진동수인 15.4Hz로 유연한 보를 강제진동시의 제진결과 분석하였다



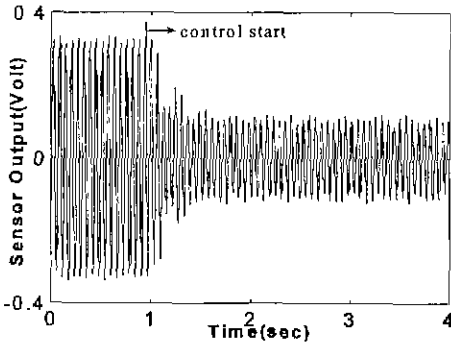
(a) Sensor output of a composite beam



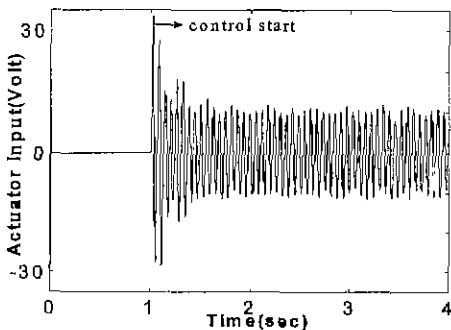
(b) Control input of a composite beam

Fig. 5 Simulation results for forced vibration control of a composite beam: 1st bending mode

Fig. 5(a), 5(b)는 μ -합성법을 적용한 경우의 제어 시와 무제어시의 시뮬레이션에 의한 강제진동 응답 특성과 제어입력 결과를 보여주고 있다. 이 강제진동의 진폭은 제어입력을 0.1초부터 적용했을 경우에 약 70% 감소하는 것을 알 수 있었고, 복합재 보의 강제진동이 설계된 제어기로부터 피드백 시킴으로써 효과적으로 제어성능이 얻어지는 것을 알 수 있었다.



(a) Sensor output of a composite beam



(b) Control input of a composite beam

Fig. 6 Experimental results for forced vibration control of a composite beam: 1st bending mode

Fig.6(a)는 0.1초부터 제어입력을 압전세라믹에 인가했을 경우 μ -합성법을 이용한 강인제어 실험결과를 보여주고 있다. 압전센서로부터의 전압 진폭은 Fig.6(b)과 같이 제어입력을 PZT 압전세라믹 액츄에이터에 인가함으로써 복합재 보 구조물의 강제진동 진폭을 실험에서도 매우 잘 감소하는 것을 알 수 있었고, 또한 실험과 시뮬레이션이 잘 일치되고 있음을 알 수 있다

6. 결 론

본 연구는 유연 구조물 시스템의 강제진동 제어

를 위해 μ -합성법을 이용하여 진동 억제를 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

구조화 특이치 평가에 의한 μ -합성법을 적용함으로써 유연한 구조물의 강제 진동제어와 같은 외란에 좋은 제어성능이 얻어졌고, 제한된 제어기의 효율성 및 제어성능을 입증하였다. 그리고, PVDF센서와 압전세라믹 액츄에이터를 사용한 열거소성 복합재 보의 강제 진동제어 문제에도 제진효과가 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안된 제어기법 및 구조물은 구조물의 소형화 고성능화에 많은 응용이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] R. Chandra and I. Chopra, "Structural Modeling of Composite Beams with Induced-Strain Actuator." J. AIAA Vol.31, No.9, pp.1692-1701, 1993.
- [2] H.S. Tzou and J.P. Zhong, "Electromechanics and Vibration of Piezo Shell Distributed Systems." J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp.506-517, 1993.
- [3] S. S. Rao and M. Sunar, "Piezoelectricity and its use in disturbance sensing and control of flexible structures: A survey," Appl. Mech. Rev., Vol 47 No.4, pp.113-123, 1994.
- [4] 이승엽, "정보저장 기기용 광 디스크의 기계적 진동," 한국정밀공학회지, Vol.18, No. 4, pp.19-24, 2001.
- [5] Seong Cheol Lee, Tae Kyu Kwon, and Yeo Hung Yun, "Robust Control of Glass Fiber Composite Beam using μ -Synthesis Algorithm," Int. J. of KSPE, Vol.1, No.2, pp.76-83, 2000
- [6] 윤여홍, 권대규, 이성철, " μ -합성법을 이용한 스마트 보의 강인제어," 한국정밀공학회 2000년도 춘계 학술대회 논문집, pp.514-517. 2000.
- [7] 권대규, 윤여홍, 이성철, "유리섬유를 함유한 열거소성 복합재 보의 진동제어," 한국정밀공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp.11-14, 2000