

유리섬유를 함유한 열가소성 복합재 보의 진동제어

권대규*(전북대 국제지원사업단), 윤여흥(전북대 대학원), 이성철(전북대, 공업기술연구소)

Vibration Control of a Glass-Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Beam

Tae-Kyu Kwon*(NAHTEC, research assistant), Yeo-Hung Yun(Graduate student),
and Seong-Cheol Lee*** (RIIT, Dept. of Mechanical Engineering, Chonbuk University)

ABSTRACT

This paper presents the vibration control of a glass-fiber reinforced thermoplastic composite beam with a distributed PVDF sensor and piezo-ceramic actuator. The three types of different controllers which are PID, H_∞ , and μ -synthesis controller are employed to achieve vibration suppression in the transient vibration of composite beam. In the H_∞ controller design, 1st and 2nd natural frequencies are considered in the modeling, because robust control theory which has robustness to structured uncertainty is adopted to suppress the vibration. If the controller designed by H_∞ theory does not satisfy control performance, it is improved by μ -synthesis method with $D-K$ iteration so that the μ -controller based on the structured singular value satisfies the nominal performance and robust performance. Simulations and experiments were carried out with the designed controllers in order to demonstrate the suppression efficiency of each controller.

Key Words: Vibration Control(진동제어), μ -synthesis(μ -합성법), Composite beam(복합재 보), Structured uncertainty(구조화된 불확실성), PVDF sensor(압전필름 센서)

1. 서론

유리섬유가 보강된 고분자 복합재료는 가볍고, 높은 강도와 강성을 가지고 있어 항공기, 조선 및 자동차 산업에서 기존의 금속성 재료를 대체할 수 있는 가장 유망한 재료 중 하나로 등장하게 되었다^[1,2]. 이로 인해 최근에는 많은 연구자들이 이러한 복합재료에 관심을 가지게 되었다^[3-4].

최근, 항공기나 우주 분야에서는 구조물의 증량이 그 성능에 미치는 영향이 크기 때문에 끝임없이 경량 구조의 개발이 이루어지고 있다. 이로 인하여 강성과 강도가 크고 가벼운 무게를 지닌 복합재 구조물의 사용이 늘고 있다. 그러나 경량화로 인하여 복합재 구조물의 유연성 증가는 외부의 하중에 대한 진동량을 증가시켜 많은 문제를 야기하게 되었다. 즉 예상치 못한 외란이 주어지거나 위험하지는 않지만 계속된 진동으로 인하여 사용자에게 불안감을 주고, 뿐만 아니라 복합재 구조물의 피로 파괴를 유발시켜 자체의 안정성에도 큰 위협이 되기도 한다. 이러한 방법을 해결하기 위하여 다양한 구조물 제어의

방법이 대두되고 있다.^[5]

본 논문은 압전 필름과 압전 세라믹을 각각 감지기와 작동기로 사용하여 유리섬유를 함유한 열가소성 복합재 보의 진동제어에 관한 연구를 수행하였다. 복합재 보의 지배 방정식은 모달 방정식을 바탕으로 상태 방정식을 유도하였고, 제어기로는 PID 제어기, H_∞ 제어기, μ -합성법을 적용하여 시스템의 제어성능을 simulation과 실험에서 비교하였다.

2. 모델링

본 연구의 모델링에서 사용한 압전 감지기는 PVDF, 작동기는 PZT 세라믹을 사용했다. 감지기와 작동기는 보 전체 길이에 10%의 길이를 가지고 있으며 최적의 부착 위치는 진동의 진폭이 큰 첫 번째와 두 번째 고유 진동수를 고려했을 때 한쪽 고정단 부분이 된다. 이를 바탕으로 범의 전체 개략도는 Fig. 1 과 같다. 사용된 복합재 구조물은 유리섬유가 40%함유된 열가소성 복합재료를 적용하였다.

Table 1. Properties of Material

Property	PVDF	PZT	Beam
$\rho(\text{kg/m}^3)$	1.78	7.75	1.48
$d_{31}(\text{pC/N})$	23	260	-
$g_{31}(10^{-3})\text{Vm/N}$	21.6	-	-
$E_1(\text{GPa})$	2	63	5.0
$E_2(\text{GPa})$	2	63	5.0
ν_{12}	-	0.34	0.31

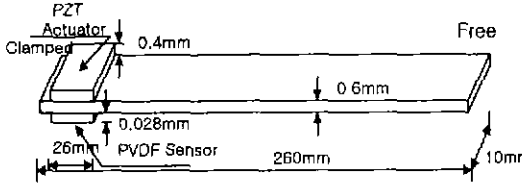


Fig. 1 Configuration of a cantilevered composite beam with piezo-film sensor and piezo-ceramic actuator

일반적인 압전재료 식을 적용하고 압전재료는 등방성으로 가정하고, 복합재 보를 순수 굽힘을 받는 Bernoulli-Euler 보로 가정하여 보의 응력을 구하고, 압전센서 방정식에서의 전하량에 관한 식을 적용하여 전압에 관한 식으로 유도하면 다음과 같다.

$$v_p(t) = \frac{q(t)}{C_p} = K_s[y'(t, x_2) - y'(t, x_1)] \quad (1)$$

여기서, $K_s = Y_p d_{31} b v_c / C_p$ 이고, $v_p(t)$ 는 감지기 출력전압이며, C_p 는 감지기의 정전용량이다.

다음으로 작동기에 관한식을 유도하자 작동기 가보 구조물 일부에 부착될 때, 인가된 전압 $V_a(t)$ 에 관한 보 전체의 전압분포 $V(x, t)$ 는 아래와 같다.

$$V(x, t) = [H(x-x_1) - H(x-x_2)]V_a(t) \quad (2)$$

여기서, $H()$ 는 Heaviside 함수이다. 굽힘 중심축면 거리의 계산에서 구조물의 일부분에 부착된 압전체의 영향은 무시하였다. 다음으로 Bernoulli-Euler 보의 식을 유도한다.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = M, \quad (3)$$

$$w(0, t) = 0 \quad \frac{\partial w(0, t)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^3 w(l, t)}{\partial x^3} = 0 \quad \frac{\partial^2 w(l, t)}{\partial x^2} = 0, \quad (5)$$

여기서, E 는 보의 탄성계수, I 는 관성 모멘트, ρ 는 밀도이다. 모달 해석 방법을 적용하면, 식(3)의 해는 식 (6)과 같이 모달 함수의 곱으로 표현할 수 있다.

$$W(x, t) = \sum_1^n \phi_n(x) \eta_n(t) \quad (6)$$

여기서, n 은 주요 작동 진동 모드수를 나타내며, $\eta_n(t)$ 는 일반화된 모달 좌표(generalized modal coordinate)이고, $\phi_n(x)$ 는 모달 함수이다. 공감함수 $\phi_n(x)$ 에 주어진 경계 조건을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\phi_n(x) = \cosh \beta_n x - \cos \beta_n x - \frac{\sinh \beta_n L - \sin \beta_n L}{\cosh \beta_n L + \cos \beta_n L} \times (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x) \quad (7)$$

이때, β_n 는 $\beta_n^4 = \frac{\rho A \omega_n^2}{EI}$ 를 만족하는 상수이며, ω_n 는 외팔 보의 고유 진동수이다.

모드 해석을 이용해서 구한 운동 방정식에 비례 감쇠항을 첨가하면 식 (8)과 같은 비연계(uncoupling) 상미분 방정식으로 유도된다.

$$\ddot{q} + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = K_a v_a(t) [y'(x_2) - y'(x_1)] \quad (8)$$

위에서 유도한 상미분 방정식은 식 (9)과 같이 상태 공간 형태의 방정식으로 바꿀 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bv(t) \quad (9)$$

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

여기서, $X = [q_1 \dot{q}_1 \dots q_n \dot{q}_n]$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & \dots \\ -\omega_1^2 & -2\xi_1 \omega_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 & 1 \\ & & \dots & -\omega_n^2 & -2\xi_n \omega_n \end{bmatrix}$$

$$B = [0, b_1, \dots, 0, b_n]^T$$

$$C = [c_1, 0, \dots, c_n, 0]$$

$$D = [0, \dots, 0]^T$$

여기서, 출력행렬 C 는 PVDF 센서의 전압을 나타낸다.

3. H_∞ 와 μ 제어기 설계

μ -합성법은 Fig. 2에 보이는 것처럼 공칭 모델 G_{nom} , 모델 에러 Δ , 제어기 K , 모델 불확실성에 대한 가중 함수 W_{del} , 제어기 성능에 대한 가중 함수 W_p 로 구성되어 있다. 공칭 모델 G_{nom} 은 상태 방정식 형태로 표시된 유한한 자유도의 이론적인 모델이며, Δ 은 실제 시스템과 공칭 모델 사이의 전체 에러를 나타낸 값이다. 실제의 Δ 값은 알고 있지 않지만, $\|\Delta\|_\infty < 1$ 조건을 만족한다고 가정한다.

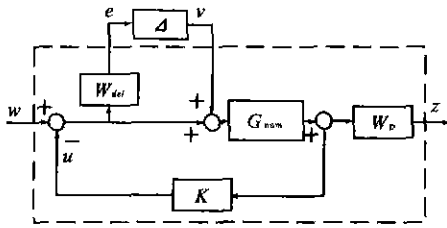


Fig. 2 Block diagram of closed-loop system

Fig. 2를 기본으로 하여 가중 함수 W_{del} , W_p 에 의해서 정의된 강인 제어 성능을 만족시키는 제어기 K 를 설계했다. 본 논문에서는 가중 함수와 H_∞ 제어 이론에 의해서 얻어진 제어기는 $\gamma = \|K\|_\infty < 1.3$ 이 되어 원하는 강인 성능을 만족시키지 못한다. μ -합성법을 이용한 D-K 반복법을 이용하면 γ 값이 0.98 까지 감소한다. 주어진 가중 함수 W_{del} , W_p 에 대해, 구조화된 불확실성을 고려한 μ -합성법을 이용한 제어기를 설계하여 γ 값이 1보다 적게 되었다. 이는 강인 제어 성능을 만족시킴을 의미한다. 그러나 D-K 반복법을 수행하게 되면 제어기의 차수가 증가하게 되므로 이를 다시 optimal norm approximation을 이용하여 제어기의 차수를 감소시켜서 얻은 최종 제어기는 아래와 같다.

$$K(s) = \frac{4655400(s+5.2)(s+4.2+407.2j)}{(s+132180)(s+8.4+4.1j)(s+8.4-4.1j)} \times \frac{(s+4.2-407.2j)(s+3.8+109.9j)(s+3.8-109.9j)}{(s+49.5+184.8j)(s+49.5-184.8j)(s+4.3)} \quad (10)$$

4. 진동 제어 실험

4.1 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 시편은 유리 섬유를 40%를 함유한 열가소성 복합재 보를 적용하였다.

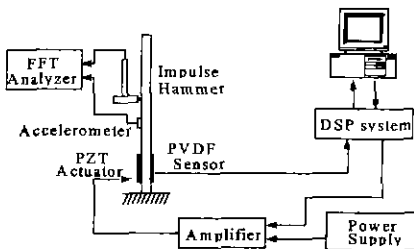


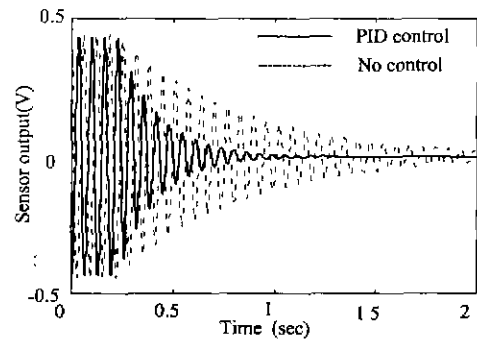
Fig. 3 Overall experimental set-up

Fig. 3는 전체 실험장치 개략도를 표시하고 있다. 압전 감지기는 전압 신호를 이용할 경우 변형률 속도 감지기로 작동하므로 감지된 신호와 압전 작동기에 가해 주는 제어력 사이에 180도의 위상 차이를

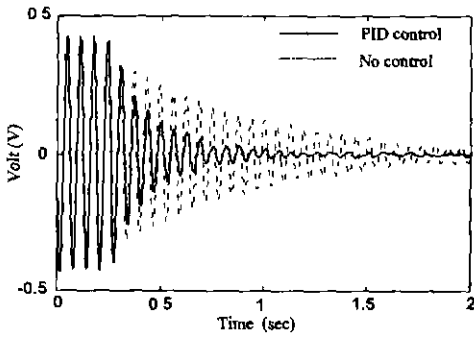
유지하고 속도에 이득을 더하여 되먹임 제어를 적용하였다. 본 연구에서는 이러한 능동 제어를 위하여 이러한 PID제어기, H_∞ 제어기, μ 제어 기법이 이용되었으며, 제어는 dSPACE사의 DSP보드(DSP1103)를 이용하여 제어 입력을 생성하였고, 전압 증폭기를 이용하여 감지기/작동기가 독립적으로 제어할 수 있도록 구성하였다. 샘플링 주파수가 제어하고자 하는 구조물의 고유 진동수보다 약 30배 정도로 해상도를 가지고 있고, 60Hz의 감지기로부터 전원 노이즈를 제거하기 위하여 노치 필터를 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

본 연구는 진동계의 모달 해석과 PID제어기, H_∞ 제어기, μ -합성법을 이용하여 진동 요소를 효과적으로 제어하는 보상기를 설계하고, 제어기 시스템을 적용하여 비교 분석하였다. 우선, Fig. 4는 PID 제어기의 방법중에 Ziegler-Nichols의 두 번째 방법으로 K, T_i, T_d 를 각각 90, 0.2, 0.05를 인가했을 경우의 모의시험 및 실제 실험에 의한 제어 성능을 나타내고 있다. 우선 복합재 보의 진동을 감소시키기 위해서, Ziegler-Nichols방법이 적용되었으나 기대했던 것만큼 크게 진폭이 감소하지 않고, 약간의 Spillover현상이 검출되었다. Fig. 5는 H_∞ 제어기에 의한 결과를 나타내고 있다. 모의 시험 결과는 센서 노이즈, 액츄에이터의 히스테리시스 및 모델링의 불확실성으로 인하여 정확하게 일치하지 않았다. 그러나, PID제어기보다는 좀 더 개선된 점을 발견할 수 있었다. Fig. 6는 μ 제어기에 의한 제어 성능을 보여주고 있다. 복합재 보의 진동 성분이 제어기를 인가했을 경우, 0.02 안에 95% 정도 감소되는 것을 알 수 있었다. 이로부터 설계된 μ 합성법 제어기의 제어 결과가, 복합재 보의 진동을 억제하는 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었고, 실험적 결과가 모의실험 결과와 매우 잘 일치하는 것을 보였다.

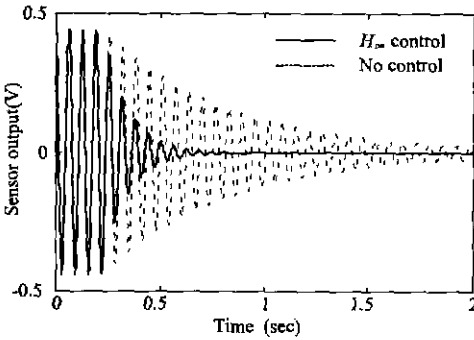


(a) Simulation result for PID control

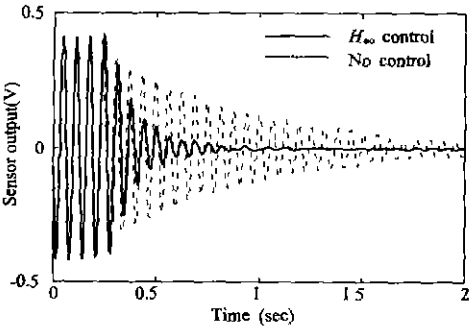


(b) Experimental result for PID control

Fig. 4 Transient vibration control result of a composite beam with PID control



(a) Simulation result for robust control



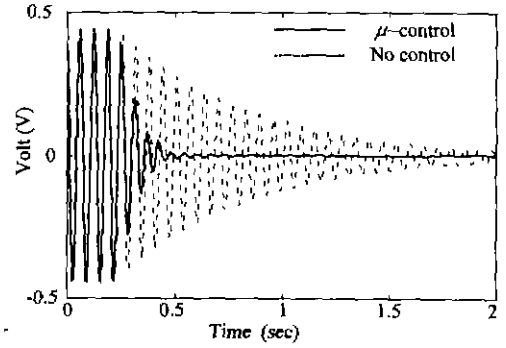
(b) Experimental result for robust control

Fig. 5 Transient vibration control result of a composite beam with H_∞ control

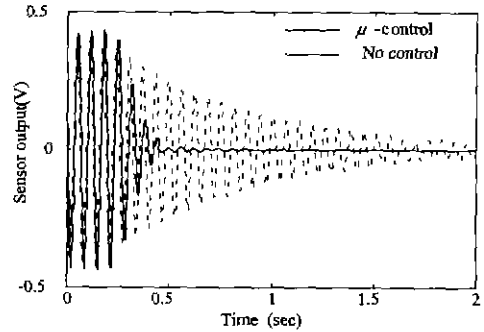
4. 결론

본 연구에서는 시스템의 변수 변동 및 외란이 존재하는 유연 구조물 시스템의 진동 제어를 수행하기 위해 PID 제어기, H_∞ 제어기와 μ 제어법을 이용하여 그 진동 성분의 억제를 상호 검토하였다

구조화 특이치 평가에 의한 μ 합성법을 적용하



(a) Simulation result for μ -control



(b) Experimental result for μ -control

Fig. 6 Transient vibration control result of a flexible beam with μ -synthesis control

는 것으로부터 제어계의 공칭 제어 성능과 안정성이 달성되고, 강인 제어 성능도 만족하게 되었고, 복합 제어의 진동 성분이 μ 제어를 안가했을 경우, 0.02안에 95% 정도 감소되는 것을 알 수 있었다. 결과적으로, 설계된 μ 합성법 제어기의 제어 결과가 복합제어의 진동을 억제하는데 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었고, 실험적 결과가 모의실험 결과와 매우 잘 일치하는 것을 보였다.

참고문헌

1. M. R. Fallon, Plastic Technology, pp. 95-103, 1989.
2. M. Ericson, and L. Berglund, Composite Science and Technology, Vol.43, pp.127-132, 1992
3. Gnani, M. V., Thompson, B. S., and Choi, S. B., Composites Engineering Vol.2, No.5-7, pp. 534-559, 1992.
4. D. M. Bigg, D. F. Histock, J. R. Preston, and E. J. Bradbury, Polymer Composite, Vol.9, No.3, pp. 222-228, 1988.
5. H. S. Tzou, and J. P. Zhong, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.115, pp.506-517, 1993.