

유연 외팔보의 능동 진동 제어를 위한 실험적 연구

최 수영*, 정 준 홍*, 강 기원**, 박 기현*
 *성균관 대학교, **정보통신연구진흥원

An Experimental Study for Active Vibration Control of Flexible Cantilever Beam

Sooyoung Choi*, Joonhong Jung*, Kiwon Kang**, Kiheon Park*
 *Sungkyunkwan University, **Institute of Information Technology Assessment

Abstract - This paper is concerned with the active vibration control of flexible cantilever beam system using electromagnetic force actuator. The main objective of this paper is to propose the control algorithms and implement the experimental setups for active vibration control. Several control algorithms are proposed and implemented on the experimental setups to show their efficacy. These include a PID control design, an optimal H_2 control design, and a fuzzy PID control design. Effectiveness and performance of the designed controller were verified by both simulation and experiment results.

beam)에 대하여 능동 진동 제어 실험을 수행한다. 외팔보 시스템에서는 작동기로 전자석을 사용하고, 감지기로는 레이저 감지기를 이용하여 능동 진동 제어 실험을 한다. 효과적인 능동 진동 제어를 위해 여러 제어 기법들 중에서 고전 제어 방법 중의 하나이며 실제 산업현장에서 가장 보편적으로 널리 쓰이는 PID 제어 기법과 기준입력의 추종, 외란 및 측정잡음의 영향 제거에 효율적인 최적 제어 기법인 H_2 제어 기법을 제안하고 실험에 적용하며, 비선형성이나 큰 지연시간을 갖는 시스템에서 다른 제어기들에 비하여 보다 강인하고 매개변수의 변화에 덜 민감한 반응을 보이는 퍼지 PID 제어 기법을 적용한다. 또한 외팔보 시스템의 능동 진동 제어를 위해 제안한 각 제어기의 성능을 실험 결과로부터 서로 비교하여 분석하고, 가장 효율적인 진동 제어 알고리즘을 제시하고자 한다.

1. 서 론

2. 진동 제어 시스템의 모델링 및 제어기 설계

인공 위성체나 우주 정거장과 같은 우주 구조물이나 자동차, 세탁기, 항공기와 같은 기계시스템에 대한 경량화 추세 증가로 구조물의 유연화를 수반하여 큰 진폭의 진동을 발생시켜 구조적 불안정을 초래할 수 있으므로 과도한 진동과 구조물의 변형에 대한 능동적인 제어가 요구된다. 능동 진동 제어는 구조물 감지기(sensor)로부터 획득한 환경 및 자극에 대한 정보를 제어부에서 해석, 분석하여 작동기(actuator)를 통해 적절한 대응을 함으로서 구조물 설계의 목적인 안정성, 정속성, 정확성 등을 유지하는 것을 충족하는 것이다. 지금까지 능동 진동 제어를 유연 구조물에 적용한 많은 연구[1][2][3][4][5][6][7]가 이루어져 왔으며, 비접촉식 형태의 대표적인 재료로 전자석이 주로 이용되었다. 일반적으로 전자석은 철심의 재질과 코일의 두께에 따라 자기 전자기력을 발생시키며 유도 전류 손실(eddy current loss), 자화력(magnetic field intensity)과 자속 밀도(magnetic flux density)에 의한 히스테리시스(hysteresis) 등의 비선형성이 존재 하지만 제한된 영역에서 동작하는 경우 이러한 비선형 요소들은 선형화를 통하여 시스템의 분석과 제어에 적용할 수 있다. 전자석을 이용한 연구는 Ellis[8]가 원형 톱의 횡진동의 감쇠에 관한 연구를 수행하였고, Hong Su[9]는 시스템의 절대 위치, 절대 속도 및 상대 위치 등의 제어 변수에 대하여 전자식 작동기의 동적 특성이 진동절연 성능에 미치는 영향에 관한 연구를 하였다. Matsuda[5]와 Okada[6]는 전자식 작동기를 사용하여 강철판의 능동 진동 제어에 대하여 다루었다. 또한 신용수[10]는 전자기력으로 작동되는 저가의 방진 시스템을 개발하여 PID제어와 최적제어를 적용하고 동시에 비선형 제어법칙인 퍼지 제어와 모델 추종 제어를 적용하여 응답을 구하였으며, 손태규[11]는 지반 가진을 받는 1자유도 진동계의 능동 제어를 위하여 전자식 작동기를 이용하고 최적제어와 피드포워드(feedforward) 제어 이론을 적용하여 이론적인 결과와 실험적인 결과를 비교 분석하였다. 본 논문에서는 유연 구조물에 효율적인 능동 진동 제어 방법들을 연구하고 가장 기본적인 유연 구조물의 형태인 외팔보(cantilever

2.1 모델링

능동 진동 제어를 위한 전체 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 본 실험의 제어 목적은 전자석 작동기의 입력 전류를 제어하여 외팔보의 감쇠를 증가시켜 주는 데 있으며, 외팔보의 굽힘 변위를 레이저(Laser) 감지기로 측정하였다.

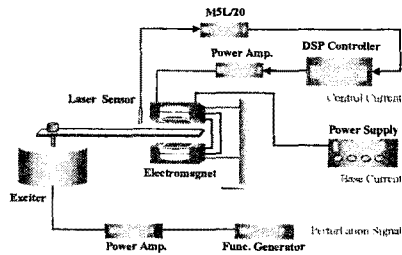


그림 1. 능동 진동 제어 시스템
 Fig. 1. An active vibration control system

먼저 보(beam)에 가해지는 힘 $f(t)$ 로부터 굽힘 변위 $y(t)$ 까지의 전달함수 $P_f(s)$ 를 구하고, 다음으로 전자석 구동기의 입력 전압으로부터 보에 가해지는 전자력까지의 전달함수 $P_m(s)$ 를 구하여 최종적으로 $P_v(s)P_m(s)$ 로서 전달함수 $P(s)$ 를 구한다. 전체 전달함수 $P(s)$ 를 구하면 다음과 같으며, 모델링에 대한 구체적인 내용은 참고문헌[12]를 참조하기 바란다.

$$P(s) = 581.795 \cdot \frac{1.4925}{s + 334.3} \cdot \left(\frac{1.3072}{s^2 + 10.178s + 41445} + \frac{-1.4451}{s^2 + 63.27s + 1601200} \right) \quad (1)$$

여기서 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.025$, $\omega_1 = 203.58(\text{rad/sec})$,
 $\omega_2 = 1265.39(\text{rad/sec})$ 이다.

2.2 제어기 설계

본 논문에서는 구조가 간단하고 건설성이 우수하며 현장 운전자에게 익숙하다는 장점 때문에 현재 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있는 PID 제어기와 외부 섭동에 의해 진동이 발생하는 경우에 진동을 효과적으로 억제할 수 있으며, 기준입력의 추종, 외란 및 측정잡음의 영향 제거에 효율적인 H_2 제어기를 설계한다. 또한 PID 제어기의 이득값을 시행착오적인 방법에 의하여 찾는 기존의 방법에 퍼지 제어 기법을 도입하여 출력값에 따라 실시간적으로 동조시킴으로써 기존 PID 제어기의 응답 성능을 개선한 퍼지 PID 제어기를 설계한다. 제어기 설계에 대한 자세한 설명은 참고문헌[12]를 참조하기 바란다.

3. 설계된 제어기의 실험 결과 비교

본 논문에서는 실험을 크게 2가지로 나누어 수행을 하였다. 첫 번째는 지속적인 부하 외란 형태의 가진기 입력이 발생하는 경우로 외팔보에 가장 크게 영향을 미치는 1차 모드 주파수($f_1 = 32.4\text{Hz}$)의 정현파 신호를 가진기에 가한 상태에서 플랜트에 제어기가 동작하는 경우에 대한 진동 감쇠 효과를 확인하는 것이다. 두 번째는 순간적인 외부의 힘에 의해 진동이 발생할 때 진폭의 크기와 안정화 시간이 자유 진동 때보다 제어기를 동작시키는 경우에 효과적으로 줄어드는지에 대해 알아보는 것으로 0.01초 동안의 임펄스 전압을 전자식 작동기에 가하였다. 그림 2,3,4는 1차 모드 주파수의 정현파 가진기 입력에 대하여 PID 제어기, H_2 제어기, 퍼지 PID 제어기가 응답한 실험 결과이다. 그림 5는 외팔보 시스템에 임펄스를 가했을 때 제어기가 없는 개루프에서의 임펄스 응답이다. 그림 6,7,8은 PID 제어기, H_2 제어기, 퍼지 PID 제어기의 임펄스 응답 실험 결과이다. 자유 진동 때의 경우인 개루프에서 안정화 시간이 0.76초 걸리던 것이 PID 제어기와 H_2 제어기는 0.08초 걸리며, 퍼지 PID 제어기는 0.06초 걸렸다. 또한 개루프의 경우 진폭의 최대 크기가 0.36(V)이던 것이 PID 제어기는 0.26(V), H_2 제어기는 0.34(V), 퍼지 PID 제어기는 0.2(V)로 줄었다.

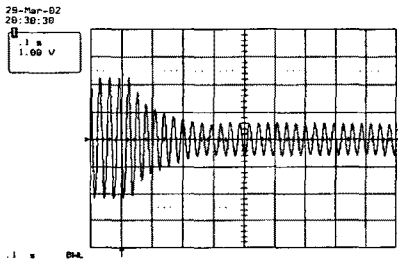


그림 2. 1차 모드 주파수의 정현파 가진기 입력 응답 (PID 제어기가 $t=0.12$ 초에서 동작한 경우)
 Fig. 2. The response to the sinusoidal exciter input of the first mode frequency(The PID controller is switched on at $t=0.12\text{sec}$)

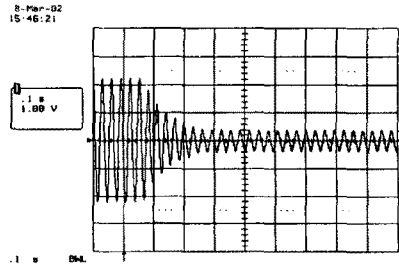


그림 3. 1차 모드 주파수의 정현파 가진기 입력 응답 (H_2 제어기가 $t=0.16$ 초에서 동작한 경우)
 Fig. 3. The response to the sinusoidal exciter input of the first mode frequency(The H_2 controller is switched on at $t=0.16\text{sec}$)

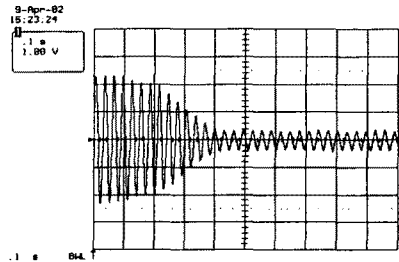


그림 4. 1차 모드 주파수의 정현파 가진기 입력 응답 (퍼지 PID 제어기가 $t=0.1$ 초에서 동작한 경우)
 Fig. 4. The response to the sinusoidal exciter input of the first mode frequency(The PID controller is switched on at $t=0.1\text{sec}$)

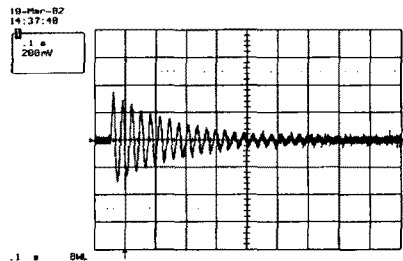


그림 5. 개루프에서의 임펄스 응답
 Fig. 5. Impulse response at open loop

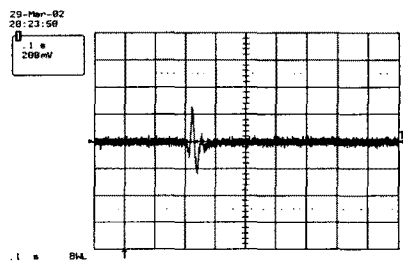


그림 6. PID 제어기의 임펄스 응답
 Fig. 6. Impulse response of the PID controller

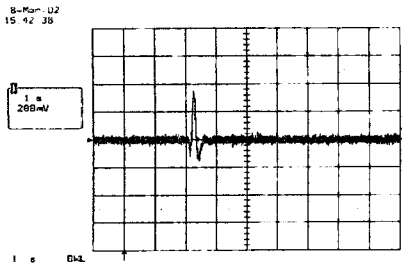


그림 7. H_2 제어기의 임펄스 응답
Fig. 7. Impulse response of the H_2 controller

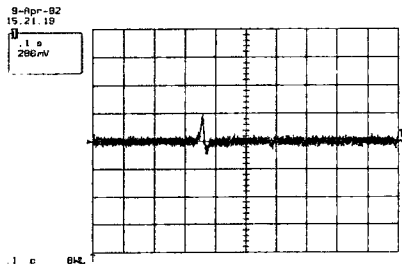


그림 8. 퍼지 PID 제어기의 임펄스 응답
Fig. 8. Impulse response of the Fuzzy PID controller

4. 결 론

본 논문에서는 대표적인 유연 구조물의 형태인 전자석을 작동기로 이용한 유연 외팔보 시스템에 대하여 능동 진동 제어를 위한 제어 기법을 제안하고 실험하였다. 본 연구에서 다른 외팔보 시스템은 5개의 극점 중에서 4개가 iw 축에 근접해 있으며, 2개의 영점 중 한 개가 양의 실수 축에 위치하고 있는 비동위치 진동 제어 시스템의 특별한 형태로 일반적으로 제어하기가 어려운 시스템으로 알려져 있으나 이를 실험을 통하여 능동 진동 제어를 효율적으로 수행하였다. PID 제어기를 설계하여 외팔보의 진동 감쇠를 효과적으로 개선하였다. 최적 제어 기법의 하나인 H_2 제어기를 설계하여 외팔보의 능동 진동 실험에 적용하였는데, H_2 제어기는 일반적으로 기준 입력의 추종이나 외란 및 측정잡음의 영향 제거에 효율적인 것으로 알려져 있다. 특히 H_2 제어기 설계 시에 s 항을 플랜트에 첨가시켜 제어기를 설계하였는데 진동 제어를 위해 제어기를 설계하는 경우에 매우 중요하게 고려하여야 할 것이며, 이를 통해 발생하는 진동을 효율적으로 감쇠시킬 수 있었다. 기존의 능동 진동 제어에 있어 많은 연구에서 퍼지 제어기를 유연 구조물에 적용하였지만, 본 논문에서는 퍼지 제어기의 비선형 시스템에 대한 강인한 특성을 도입하고 PID 제어기의 이득값을 실시간적으로 동조시키기 위해 퍼지 PID 제어기를 제안하였다. 제안한 제어기를 비선형성이 강한 전자석을 작동기로 이용한 외팔보의 능동 진동 제어 실험에 적용하여 퍼지 PID 제어기의 강인한 성능을 확인하였으며, PID 제어기의 이득값을 실시간적으로 동조시켰다. 또한 제안한 PID 제어기, H_2 제어기, 퍼지 PID 제어기를 외팔보 시스템의 능동 진동 제어 실험에 적용하여 진동 감쇠 효과와 제어기의 성능을 검증하였으며, 설계된 제어기를 서로 비교 분석하였다. 퍼지 PID 제어기는 시스템에 순간적인 외부 힘에 의해 발생하는 진동에 대해 강인한 성능을 보였으며, H_2 제어기는 지속적으로 외부에

서 시스템에 가장 크게 영향을 미치는 1차 모드 고유주파수의 외란이 시스템에 가해져 진동이 발생하는 경우에 이를 효과적으로 배제시켰다. 본 논문과 관련하여 앞으로 더 연구되어야 할 내용으로는 시스템의 외부 진동에 대하여 강인하게 대처할 수 있는 강인 제어 기법인 H_∞ 제어기나 진동 외란의 출처를 아는 경우에 폭 넓은 외란 제거에 매우 효과적으로 알려진 피드포워드(feedforward) 제어기에 대한 연구들이 계속적으로 연구되어야 할 과제로 생각된다. 그리고 이후에 전자석을 작동기로 사용하는 비접촉식 형태의 보 구조물에 대한 응용 연구나 보 구조물보다 형상이 좀 더 복잡한 유연 구조물의 능동 진동 제어에 본 연구의 결과들이 좋은 자료로 활용되리라 본다.

- 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000252-0)지원으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] Dosch, J. J., Inman, D. J., and Garcia, E., "A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control," *Journal of intelligent Material Systems and Structures*, vol. 3, pp.166-185, Jan 1992.
- [2] Hagood, N. W., and Von Flotow, A., "Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks," *Journal of Sound and Vibrations*, vol. 146, no. 2, pp.243-268, 1991.
- [3] Kar, I. N., Miyakura, T., and Seto, K., "Bending and torsional vibration control of a flexible plate structure using H_∞ based robust control law," *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol. 8, no. 3, pp.545-553, May 2000.
- [4] Khorrami, F., Zeinoun, I. J., Bongiorno, J. J. Jr., and Nourbakhsh, S., "Application of H_2 design for vibration damping and pointing of flexible structures with embedded active materials," *Proceedings of American Control Conference*, Seattle, WA, pp.4178-4182, June 1995.
- [5] Matsuda, K., Yoshihashi, M., Okada, Y., and Tan, A. C., "Self-sensing active suppression of vibration of flexible steel sheet," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 118, pp.469-473, July 1996.
- [6] Okada, Y., Matsumoto, K., and Matsuda, K., "Vibration control of thin steel sheet using flux feedback magnetic actuator," *MOVIC '98*, Zurich, Switzerland, vol. 3, pp.1057-1062, August 1998.
- [7] Abreu, G. L. C. M., and Ribeiro, J. F., "Active Control of Flexible Structures Using Adaptive Fuzzy Controller and Piezoelectric Patches," *IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*, vol. 3, pp.1764-1769, 2001.
- [8] Ellis, R. W., and Mote, C. D., "A feedback vibration controller for circular saws," *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, vol. 107, pp.14-48, 1979.
- [9] Hong, Su., Rakheja, S., and Sankar, T. S., "Vibration-isolation characteristics of an active electromagnetic force generator and the influence of generator dynamics," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 112, pp.8-15, 1990.
- [10] 신용수, 정규원, 이용호, 박종성, "전자석 작동기를 이용한 미소진동의 능동제어," *충북대학교 생산 과학 기술연구소 논문집*, 제 12권, 제 1호, pp.297-304, 1998.
- [11] 손태규, 김용규, 유원필, 박영필, "전자기력을 이용한 능동제어에 관한 연구," *대한 기계학회 논문집*, 제 18권, 제 5호, pp.1169-1181, 1994.
- [12] 최수영, "전자석과 압전체를 이용한 유연 구조물의 능동 진동 제어에 관한 연구," *성균관대학교 공학 박사 학위 논문*, 2002.