

Fuzzy 제어를 이용한 외팔보의 능동진동제어

*김진태, *최수영, *정준홍, *박기현
*성균관대학교 정보통신공학부

Active Vibration Control of a Cantilever Beam using Fuzzy Controller

*Jintae Kim, *Sooyoung Choi, *Joonhong Jung, *Kiheon Park
*SungKyunKwan University

Abstract - This paper presents the fuzzy PID controller for active vibration control systems. Simulation result are represented to demonstrate the efficacy of control design approach and utilization of electromagnets as actuators in active structural damping.

1. 서 론

전자기력을 이용한 능동 진동제어는 1979년 Ellis 및 Mote가 원형 톱의 횡 진동 감쇠에 관한 연구를 수행 하였다. 1990년 Hong Su 및 T.S. Sankar 등은 시스템의 절대위치, 절대속도 및 상대위치등의 제어 변수에 대하여 전자식 작동기의 동적 특성이 진동 절연 성능에 미치는 영향에 관한 연구를 하였다. 또한 전자기력으로 작동되는 저가의 방진 시스템을 개발하여 PID제어와 최적제어를 적용하고 동시에 비선형 제어법칙인 퍼지제어와 모델 추종제어를 적용하여 응답을 구한 연구와 지반 가진을 받는 1자유도 진동계와 능동제진을 위하여 전자식 작동기를 이용하고 최적제어와 피드 포워드제어이론을 적용한 연구등이 있었다[1-4]. 본 논문에서는 먼저 전자식 작동기로서 외팔보(cantilever beam)의 감쇠를 개선하는데 사용되었으며, 레이저 감지기를 이용하여 보의 굽힘 변위를 측정하였다. 또한 작동기와 감지기의 물리적 제한 때문에 실험 시스템이 비동위치(non-collocated)형태가 되었으며 1차모드 진동(32.4Hz)에 대한 진동감쇠 효과를 알아보고자 한다. 모델해석을 통하여 모델링하여 전달함수를 구하였고, PID제어의 응답성능을 향상시키기 위하여 PID제어의 이득은 과도상태와 정상상태에 알맞게 Fuzzy 규칙으로써 동조시키는 Fuzzy PID 제어를 사용하였으며 그 결과를 비교하였다.

2. 모델링

능동 진동 제어를 위한 전체 시스템의 실험적 구성도를 그림 1에 나타내었다.

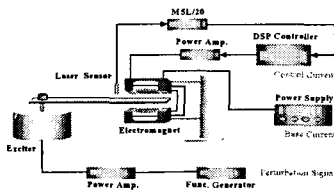


그림 1. 능동 진동 제어 시스템

Fig. 1. An active vibration control system
본 실험의 제어목적은 전자식 작동기의 입력 전류를 제어하여 외팔보의 감쇠를 증가시켜 주는 데 있으며, 외팔

보의 굽힘 변위를 레이저 감지기로 측정하였다.

먼저 보(beam)에 가해지는 힘 $f(t)$ 로부터 굽힘 변위 $y(t)$ 까지의 전달함수 $P_c(s)$ 를 구하고, 다음으로 전자식 구동기의 입력 전압으로부터 보에 가해지는 전자기력까지의 전달함수 $P_m(s)$ 를 구하여 최종적으로 $P_c(s)P_m(s)$ 로서 전달함수 $P(s)$ 를 구한다.

2.1 보의 전달함수 $P_c(s)$

단위길이 당 가해지는 횡방향의 힘을 $f(x, t)$, 굽힘 변위를 $y(x, t)$ 로 표기하는 그림 2와 같은 한쪽은 고정되어 있고 다른 끝단은 자유로운 외팔보를 고려하자.

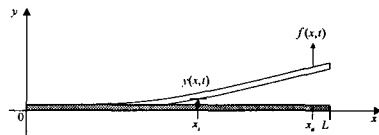


그림 2. 고정-자유단의 보

Fig. 2. The clamped-free beam

제1차 모드와 2차 모드에 대해서만 고려된 보의 전달함수 $P_c(s)$ 는 다음과 같다.

$$P_c(s) = \frac{Y_1(x_o)Y_1(x_s)}{s^2 + 2\xi_1\omega_1s + \omega_1^2} + \frac{Y_2(x_o)Y_2(x_s)}{s^2 + 2\xi_2\omega_2s + \omega_2^2} \quad (1)$$

2.2 전자식의 전달함수 $P_m(s)$

히스테리시스(hysteresis)의 비선형 현상을 피하기 위하여 푸시-풀(push-pull) 형태의 전자식[5]을 직접 제작하였으며, 효과적인 제어를 위해서 그림 3에서 보이는 것처럼 코일(coil)을 기준 코일과 제어 코일로 분리하여 감았다.

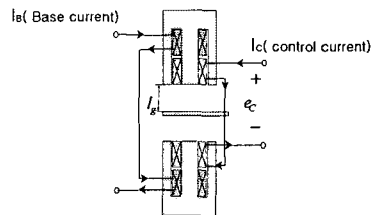


그림 3. 푸시-풀 형태의 전자식

Fig. 3. The push-pull type electromagnet
또한 2개의 전자식 양쪽의 기준 코일의 연결 방향은 같

으며, 제어 코일의 연결 방향은 반대 방향이다. 제어 입력 전류 $i_c(t)$ 와 보에 작용하는 전자기력 $f_0(t)$ 사이의 입출력 관계식을 얻기 위해 okada 논문[5]을 참조하였으며 전달함수 $P_m(s) = F_0(s)/E_c(s)$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_m(s) = k \cdot \frac{2 \mu_0 S_g N_B I_B}{I_g^2} \cdot \frac{1}{L_c s + R_c} \quad (2)$$

여기서 k 는 모델링의 불확실성을 조절하는 상수이며 실험적으로 결정하였다.

2.3 전체 시스템의 전달함수

방정식 (1)과 (2)를 조합하여, 전체 전달함수 $F(s)$ 를 구하면 다음과 같으며

$$F(s) = k \cdot k_L \cdot \frac{2 \mu_0 S_g N_B N_c I_B}{I_g^2} \cdot \left(\frac{Y_1(x_o) Y_1(x_i)}{s^2 + 2 \xi_1 \omega_1 s + \omega_1^2} + \frac{Y_2(x_o) Y_2(x_i)}{s^2 + 2 \xi_2 \omega_2 s + \omega_2^2} \right) \cdot \frac{1}{s + \frac{R_c}{L_c}} \quad (3)$$

여기서 k_L 은 레이저 감지기의 이득을 나타낸다. 위의 방정식에서 대부분의 매개변수들은 실제 실험 시스템으로부터 측정하여 구하였다.

중요한 매개변수 $\omega_1, \omega_2, \xi_1, \xi_2$ 과 k 는 식(3)의 전달함수를 이용하여 시스템을 시뮬레이션 한 신호와 실제 시스템의 신호를 비교하여 실험적으로 결정하였다. 계단 함수(step function)와 정현파(sinusoidal) 신호가 과도상태와 정상상태 응답을 비교하기 위한 시험 입력으로 각각 사용되었으며, 이러한 과정을 거쳐 우리가 최종적으로 얻은 전달함수는 다음과 같다.

$$F(s) = 581.795 \cdot \frac{1.4925}{s + 334.3} \cdot \left(\frac{1.3072}{s^2 + 10.178s + 41445} + \frac{-1.4451}{s^2 + 63.27s + 1601200} \right) \quad (4)$$

여기서 $\xi_1 = \xi_2 = 0.025, \omega_1 = 203.58(\text{rad/sec}),$

$\omega_2 = 1265.39(\text{rad/sec})$ 이다.

3. 외팔보의 진동제어를 위한 FuzzyPID제어기 설계

3.1 퍼지화

본 연구에서는 외팔보의 진동변위를 레이저 센서로 측정하여 진동을 하지 않을때와의 오차(E)와 오차의 변화량(DE)을 퍼지 집합으로 사용하였으며 우선 이 값들은 -10~10사이의 값으로 양자화(quantization) 하였으며 7개의 언어변수를 사용하였다.

$$M_2 = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

진동제어	M_2	NB	Negative Big
		NM	Negative Medium
		NS	Negative Small
		ZO	Zero
		PS	Positive Small
		PM	Positive Medium
		PB	Positive Big

표 1. 언어변수

Table 1. Linguistic variables

PID Gain 조절을 위한 소속함수는 다음과 같다.

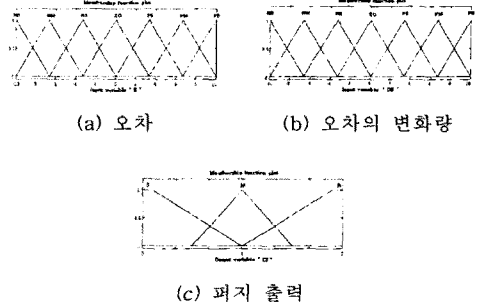


그림 4. PID Gain 조절을 위한 소속함수

Fig. 4. Membership function for PID gain tuning

3.2 퍼지규칙

PID제어기의 자기 동조를 위한 퍼지제어 규칙은 과도 상태에서의 응답을 개선하기 위하여 P gain을 크게 설정하여 주고 I gain D gain을 적게 설정하여, 초기응답속도를 보다 빠르게 개선하고 오버슈트를 감소시키거나 억제하도록 설계되었다.

그리고 정상상태에 도달할수록 P gain을 감소시키고 I gain과 D gain을 서서히 증가시켜 정상상태오차의 감소효과를 기존의 PID제어기 보다 빠른 응답속도와 정확한 제어가 되도록 설계하였다.

3.3 퍼지 추론 및 규칙기반 시스템

본 연구에서는 일반적으로 많이 이용되고 있는 맘다니(E. H. Mamdani)가 제안한 Min-Max 직접법(Direct Method)에 의하여 추론을 수행하였다.

3.4 비퍼지화

비퍼지화는 퍼지 추론에 의하여 계산된 값을 시스템의 입력으로 사용하기 위하여 하나의 결정적인 실수 값으로 만드는 과정을 말하며 퍼지 추론에 의한 출력 값의 소속함수 값으로부터 가장 유연한 결과값을 가지는 것으로 알려져 있는 무게 중심법(center of gravity)을 사용하여 제어기 출력값을 구하였다. 실제 입력값은 이러한 비퍼지화 과정에서의 출력값에 출력이득을 곱하여 사용하였다. 또한 무게 중심법은 전체 소속함수의 무게 중심이 되는 곳을 제어기 출력값으로 취하는 방법으로 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$CI_0 = \frac{\sum_{i=1}^n CI_i \cdot \mu_A(CI_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_A(CI_i)} \quad (5)$$

(여기서, CI_0 는 결정된 제어출력을 의미하며 $\mu(CI_i)$ 는 CI_i 의 소속함수값을 나타낸다.)

3.5 PID Gain의 계산

일반적인 PID 제어기는 식 6과 같이 표현할 수 있고

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (6)$$

시간영역으로 표현하면 식 7과 같다.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (7)$$

(단, $T_i = \frac{K_p}{K_i}, T_d = \frac{K_d}{K_p}$)

PID 제어기의 비례이득(K_p)과 미분이득(K_d) 그리고 적분이득(K_i)은 퍼지 제어기에서 계산되는 퍼지출력을 이용하여 다음과 같은 계산을 통하여 동조(tuning)되게 된다. 퍼지출력 비례이득 K_p' 와 미분이득 K_d' , 그리고 적분이득

K_i 를 이용하여 실제 PID제어기의 동조에 사용되는 비례이득 K_p 와 미분이득 K_d 그리고 적분이득 K_i 는 다음의 식으로 조정된다.

$$K_p = K_{pmin} + K_p' K_{pref} \quad (8)$$

$$K_i = K_{imin} + K_i' K_{iref} \quad (9)$$

$$K_d = K_{dmin} + K_d' K_{dref} \quad (10)$$

IV. 시뮬레이션

2장에서 모델링된 외팔보의 식(4)로 표현되는 전달함수를 이용하여 다음과 같이 MATLAB SIMULINK상의 블록으로 구성하였다.

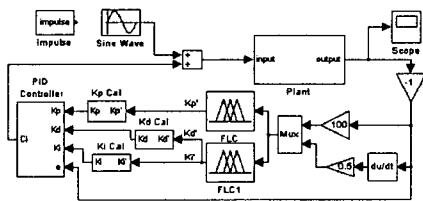
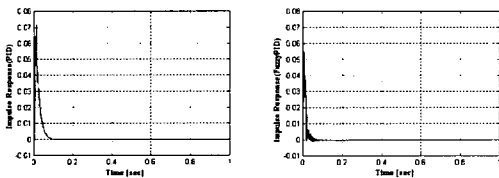


그림 5. 시뮬레이션 블록도
Fig. 5. Block diagram for simulation

시뮬레이션에 사용된 변수는 다음과 같다.

- ◎ 샘플링시간 : 0.001 sec
- ◎ $K_{pmin}=0.1$, $K_{pref}=1$, $K_{imin}=0.01$, $K_{iref}=0.1$
 $K_{dmin}=0.004$, $K_{dref}=0.003$

그림6에는 각각 임펄스응답에 대한 PID제어기와 FuzzyPID제어기를 사용했을때의 출력을 나타내었다.

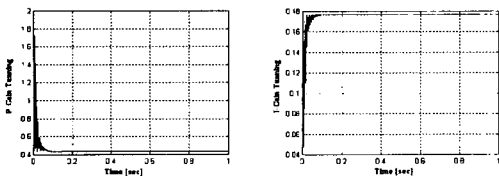


(a) PID 제어기 (b) Fuzzy PID 제어기

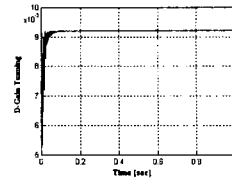
그림 6. 임펄스 응답
Fig. 6. Impulse response

그림7에는 PID제어기의 비례이득 (K_p)과 미분이득 (K_d) 그리고 적분이득 (K_i)이 Fuzzy제어기에 의하여 동조되는 모양을 나타내고 있다.

그림7과 그림8에는 1차 모드 주파수 $f_1 = 32.4 \text{ Hz}$ 의 정현파 신호를 가진기(exciter)에 가했을 경우의 PID제어기와 Fuzzy제어기를 사용했을 때의 출력을 각각 나타내었다.

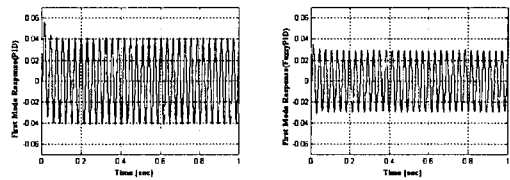


(a) P-gain tuning (b) I-gain tuning



(a) D-gain tuning

그림 7. PID 이득의 자기동조
Fig. 7. Self tuning of PID gain



(a) PID 제어기 (b) Fuzzy PID 제어기

그림 8. 1차 모드 응답
Fig. 8. First mode response

5. 결 론

본 논문에서의 능동 진동 제어 시스템은 비동위치 진동 제어 시스템의 특별한 형태를 취하고 있으나 FuzzyPID 제어기를 이용하여 외팔보의 능동 감쇠 효과를 효율적으로 수행하였다. 또한 PID 제어기를 Fuzzy 규칙을 이용하여 동조시켜 줌으로써 과도상태와 정상상태응답을 개선할수 있었다. 시뮬레이션에서 보듯이 PID제어기를 이용하였을 때 보다 Fuzzy PID제어기를 이용하였을때 외팔보의 능동 진동제어에도 보다 효과적임을 알 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1]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.
- [2]Hong Su, S. Rakheja and T.S. Sankar, "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.
- [3]신용수, 정규원, 이용호, 박종성, "전자식 작동기를 이용한 미소진동의 능동제어," 생산과학 기술연구소 논문집 제 12 권 제 1호, pp.297-304, 1998.
- [4]Dosch J.J., Inman D.J., and Garcia E., "A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control", J. of intell. Mater. Syst. and Struct., vol. 3, pp.166-185, Jan. 1992.
- [5]Okada Y., Matsumoto K., and Matsuda K., " Vibration control of thin steel sheet using flux feedback magnetic actuator", MOVIC '98, Zurich, Switzerland, August, Volume 3, pp.1057-1062, 1998.
- [6]Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems:Fuzzy Logic Controller-Part I,II", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cyber, Vol 20, No. 2, pp 404-435, 1990
- [7]Z.Y. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controller", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cyber, No. 5, pp 1392-1398, 1993