

병렬 퍼지 제어기와 기준궤적신호를 이용한 유연한 빔의 진동제어신호 분석에 관한 연구

정회원 최수열,* 박윤명**

A study on the Vibration Control Signal Analysis of Flexible Beam using Parallel Fuzzy controller and Reference Trajectory Command

Su-Yeol Choi*, Yoon-Myung Park** *Regular Members*

요 약

본 논문은 비선형 시스템인 유연한 빔의 진동제어신호를 분석하기 위하여 병렬퍼지 제어기와 기준궤적신호를 이용한 알고리즘을 제안하였다. 유연한 빔의 진동 제어신호 분석대상은 끝단위치(각도)와 탄성 변형(진동)이다. 제어성능평가방법은 제안된 기준궤적 신호를 혼합 이용한 병렬퍼지제어기 알고리즘과 기존의 단순퍼지제어기와 비교 분석하였다. 이를 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과 본 논문에서 설계한 알고리즘이 기존의 단순퍼지제어기와 병렬퍼지 제어기보다 진동제어신호의 응답특성이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : Flexible Beam, Parallel Fuzzy, FLC, Tip Position, Tip Deflection

ABSTRACT

In the study, we are proposed algorithm by parallel fuzzy controller and reference trajectory command for the analysis vibration controller control signal of the flexible beam. in the nonlinear system. Control signal analysis object of the flexible beam is tip position (the joint angle) and tip deflection(vibration). Evaluation method of the control performance to the proposed algorithm using parallel fuzzy controller and reference trajectory command was analysis control system compare to parallel fuzzy controller and conventional simple fuzzy controller. As a result of the study by using computer simulation, we identified that characteristics response of the vibration control signal was developed more in case of the connecting proposed algorithm than conventional simple fuzzy controller and parallel fuzzy controller.

1. 서 론

유연한 빔은 생산성 증대를 위한 산업현장 및 미래의 우주공간 작업에 중요한 역할을 할 것이다. 특히 우주공간에서는 매니플레이터가 적은 에너지 소모를 필요로 하고 이를 운반하는 우주로켓의 수용량이 한정되어 있기 때문에 유연한 빔의 구조가 가능한 한 가

볍게 구성되어야 한다. 이러한 빔은 구조상의 유연성 때문에 바람직하지 않은 저주파진동이 발생하게 된다. 이러한 진동은 빔의 정밀한 작업과 안정성을 보장할 수 없게 할 것이다. 따라서 이러한 진동을 제어할 수 있는 제어기의 개발이 요구 된다.

이러한 제어기를 개발하기 위해서는 탄성을 고려한 시스템의 모델을 개발하여 보다 정밀한 동역학 방정

※ “본 논문은 2009년도 서일대학 연구비에 의해 연구되었음.”

* 서일대학 정보전자과 (semisan@seoil.ac.kr) **창신대학 항공메카트로닉스과(ympark@csc.ac.kr)

논문번호: 10003-0122, 접수일자: 2010년 1월 22일

식과 효율적인 제어 알고리즘이 필요하게 된다.^[1] 유연한 빔의 진동 감소에는 피드백 제어, 기준궤적신호 제어 등 여러 가지 방법으로 얻어질 수 있으나 수식적 복잡성과 부담감을 안고 있는 단점을 가지고 있다.^[3,4,7,9] 그러므로 본 논문에서는 끝단의 진동을 억제하기 위한 수식적 부담을 줄인 단순한 기준입력을 미리 설정하여 구동기의 출력을 진동이 억제되도록 하는 방법인 기준궤적신호와 시스템의 피드백 제어로써 지능형 제어 알고리즘인 퍼지 제어를 이용하여 비선형 특성을 갖는 유연한 빔의 탄성과 위치를 능동적으로 제어하는 것을 목적으로 하는 새로운 시스템을 설계하고자 한다.^[2,5,8]

II. 유연한 빔의 모델

가정모드방법(assumed mode approach)을 이용하여 고정 자유단(clamped free) 구조를 갖는 유연한 빔을 간단히 모델링하고 제안된 동역학 방정식에서 상태공간 방정식을 구하고자 한다. 수학적 모델을 구하기 위하여 유연한 빔의 좌표를 그림 1에 보인다. 유연한 빔의 한쪽 끝은 모터에 고정되어 있고 다른 한쪽 끝은 자유로운 고정 자유단 구조의 상태공간 방정식을 유도한다. 빔은 관성모멘트 I , 길이 l 을 가지며, 빔의 각 변형은 $\theta(t)$ 로서 표시되고 모터가 $\theta(t)$ 만큼 회전할 경우 유연한 빔은 $w(x, t)$ 의 빔의 휨 즉 탄성변형이 발생한다. 임의의 점 x 에 대한 탄성변형 $w(x, t)$ 는 가정된 모드 방법을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(x) q_i(t) \quad (i=1,2,\dots,n-1) \quad (1)$$

여기서 $\Phi_i(x)$ 는 빔의 i 번째 가정된 모드 형태로

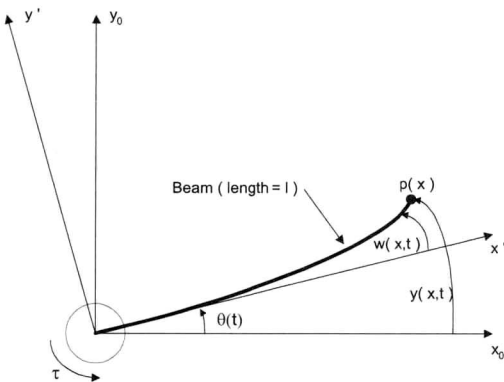


그림 1. 유연한 빔

써 고정 자유단의 고유함수이며 다음 식으로 주어진다.^[1,6]

$$\begin{aligned} \Phi_i(x) &= (\sin\beta_i x - \sinh\beta_i x) \\ &- \frac{\sin\beta_i l + \sinh\beta_i l}{\cos\beta_i l + \cosh\beta_i l} (\cos\beta_i x - \cosh\beta_i x) \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 β_i 는 다음식에 대한 해이다.

$$1 + \cos\beta_i l \cosh\beta_i l = 0 \quad (3)$$

유연한 빔의 고유 진동수는 다음과 같이 나타낸다.^[1]

$$\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (4)$$

여기서 EI 는 유연한 빔의 굽힘 강성이고, ρ 는 밀도이다. 상태 공간 방정식을 유도하기 위해 유연한 빔의 전체변위 $y(x,t)$ 는 길이가 l 일 경우 다음과 같이 나타낸다.^[1]

$$y(l,t) = \theta(t)l + w(l,t) \quad (5)$$

위식을 근거로 유연한 빔의 운동에너지 K 와 위치 에너지 V 를 구하고, Lagrangian 함수 $L=K-V$ 와 식(6), (7) Euler-Lagrange 방정식을 이용하면 식(8), (9)와 같은 유연한 빔의 최종 출력 미분 방정식이 유도된다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (7)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau + \sum_{i=1}^n q_i \omega_i^2 \int_0^l \Phi_i x \, dm}{I_h} \quad (8)$$

$$\ddot{q}_i = -\frac{\tau}{I_h} \int_0^l \Phi_i x \, dm - q_i \omega_i^2 \left[1 + \frac{(\int_0^l \Phi_i x \, dm)^2}{I_h} \right] \quad (9)$$

$$a_i = \int_0^l \Phi_i x dm \quad (10)$$

식(8),(9)에 식(10)을 대입하여 정리하면 식(11), (12)가 유도된다.

$$\ddot{\theta} = \frac{\omega_i^2 a_i}{I_h} q_i + \frac{1}{I_h} \tau \quad (11)$$

$$\ddot{q}_i = -\omega_i^2 \left[1 + \frac{a_i^2}{I_h} \right] q_i - \frac{a_i}{I_h} \tau \quad (12)$$

식(11)을 식(12)에 대입하여 풀면 기준궤적신호 제어에 사용될 원하는 결과(13)식이 유도된다.

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -a_i \ddot{\theta} \quad (13)$$

식(11),(12)에서 다음 수식으로 치환하면 상태공간 방정식이 구해진다.

$$K_1 = \frac{\omega_i^2 a_i}{I_h}, K_2 = \frac{1}{I_h}, K_3 = \omega_i^2 \left[1 + \frac{a_i^2}{I_h} \right], K_4 = \frac{a_i}{I_h}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{q}_1 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & K_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ q_1 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_2 \\ 0 \\ -K_4 \\ 0 \end{bmatrix} \tau \quad (14)$$

$$y = [0 \quad l \quad 0 \quad \Phi] \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ \dot{q}_1 \\ q_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

III. 기준궤적신호의 공식화

앞에서 다룬 유연한 빔의 상태 공간 방정식에서 모터 각 $\theta(t)$ 가 0 도에서 D 도 까지 움직 이고, 유한 시간 T_f 에서 끝단의 진동 성분을 감소시킬 수 있는 기준 궤적 신호 $\theta_r(t)$ 를 구하기 위해서 변형된 Fourier 급수식을 이용한 식(16)과 같이 신호 성분의 합성식으

로 가정 한다.

$$\theta_r(t) = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j \cos(2j-1)rt \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (16)$$

여기서 $r = \frac{\pi}{T_f}$, b_0 와 b_j 는 상수이고, T_f 는 진동을 제거할 수 있는 유한시간이다.

동작각도에 대한 초기치 최종치 조건에서 다음과 같이 된다.

$$\theta_r(0) = 0, \theta_r(T_f) = D \quad (17)$$

식(17)을 (16)에 대입하면 풀면 식(18)이 구해진다.

$$b_0 = \frac{D}{2}, \sum_{j=1}^n b_j = -\frac{D}{2} \quad (18)$$

$\theta(t) = \theta_r(t)$ 라고 가정하면 식(16)에서 식(19)가 유도된다.

$$\ddot{\theta}_r(t) = \ddot{\theta}(t) = -\sum_{j=1}^n (2j-1)^2 r^2 b_j \cos(2j-1)rt \quad (19)$$

식(13)에 식(19)을 대입하면 다음과 같이 q_i 대한 상미분방정식이 구해진다.

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -a_i \ddot{\theta} = \sum_{j=1}^n (2j-1)^2 r^2 a_i b_j \cos(2j-1)rt \quad (20)$$

식(20)의 미분방정식을 풀면 (일반해=보조해+특수해)공식에서 보조해는

$$q_{ih}(t) = A \cos \omega_i t + B \sin \omega_i t$$

(A, B는 상수) 특수해는

$$q_{is}(t) = \sum_{j=1}^n \frac{a_i b_j (2j-1)^2}{(\omega_i/r)^2 - (2j-1)^2} \cos(2j-1)rt \quad (21)$$

그러므로 일반해는 다음과 같다.

$$q_i(t) = A \cos \omega_i t + B \sin \omega_i t + \sum_{j=1}^n \frac{a_i b_j (2j-1)^2}{(\omega_i/r)^2 - (2j-1)^2} \cos(2j-1)rt \quad (22)$$

$$C_j^{(i)} = a_i b_j \frac{(2j-1)^2}{(\omega_i/r)^2 - (2j-1)^2} \quad (23)$$

$q_i(t)$ 에 대한 초기조건 $q_i(0) = \dot{q}_i(0) = 0$ 에서

$$q_i(0) = A + \sum_{j=1}^N c_{\pm}^{(i)} = 0, \quad A = C_0^{(i)}$$

$$\dot{q}_i(0) = \omega_i B = 0, \quad B = 0$$

위 과정에서 식(22)는 다음과 같이 나타낸다.

$$q_i(t) = C_0^{(i)} \cos \omega_i t + \sum_{j=1}^N C_j^{(i)} \cos (2j-1) r \quad (24)$$

$q_i(t)$ 에 대한 연속조건 $q_i(T_f) = \dot{q}_i(T_f) = 0$ 을 식(24)에 대입하면

$$C_0^{(i)} \cos \omega_i T_f - \sum_{j=1}^N C_j^{(i)} = 0 \quad (25)$$

$$C_0^{(i)} \omega_i \sin (\omega_i T_f) = 0 \quad (26)$$

식 (26)에서 $c_{\pm}^{(i)} = 0$ 이고,

식 (25)에서 위 결과를 대입하면 식(27)이 된다.

$$\sum_{j=1}^N c_{\pm}^{(i)} = 0 \quad (27)$$

식(23)을 식(27)에 대입하면 다음과 같은 최종식이 유도 된다.

$$\sum_{j=1}^n \frac{(2j-1)^2}{(\omega_i/r)^2 - (2j-1)^2} b_j = 0 \quad (28)$$

식(18)과 식(28)에서 b_j 계수를 구할 수 있고 결과적으로 식(16)의 기준궤적신호 방정식은 유연한 빔의 운동 방정식과 연관됨을 알 수 있다. 그리고 식(28)에서 기준궤적신호를 계산하는데 필요한 파라미터는 원하는 결합각도 D , 동작주기 T_f , 그리고 유연한 빔의 고유주파수로서, 특징적인 것은 시스템의 고유주파수 파라미터로 기준궤적신호를 변형시킬 수 있다는 것이다.

IV. 궤환 제어시스템의 구성

4.1 유연한 빔의 블록선도 구현

앞 장에서 유연한 빔의 모델링을 통한 상태방정식을 도출하였다. 본 절에서는 상태방정식을 통한 시스

템의 블록선도를 나타내고 이 블록 선도를 바탕으로 제어시스템을 구현하고자 한다.

4.2 퍼지 제어를 이용한 제어시스템 구성

본 절에서는 유연한 빔의 hub 각도 성분에 퍼지제어를 이용한 제어시스템에 대해서 고찰하고자 한다. 그림 3에서 오차 e 를 보상하기 위해 퍼지제어를 이용하고, 제어기의 입력으로 오차 e 와 오차의 변화량 \dot{e} 에 이득계수를 곱하여 사용한다.

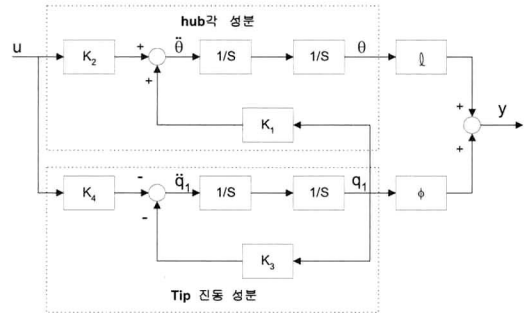


그림 2. 유연한 빔의 블록선도

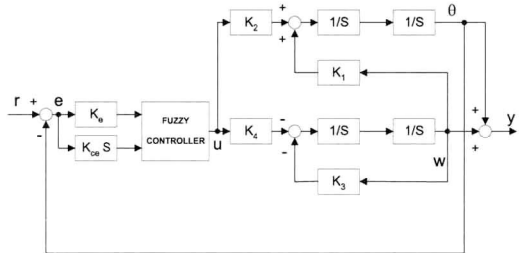


그림 3. 퍼지 제어를 이용한 제어시스템 구성

4.3 병렬 퍼지 제어를 이용한 제어시스템 구성

본 절에서는 4.2절에서 구성한 제어시스템을 기본으로 그림4와 같이 유연한 빔의 끝단 진동성분을 직접 제어하는 퍼지2 제어기(FUZZY 2 CONTROLLER)를

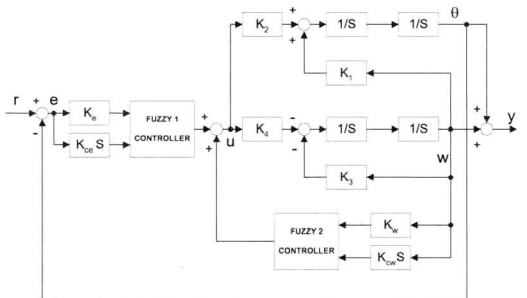


그림 4. 병렬퍼지 제어를 이용한 제어시스템 구성

추가한 제어시스템에 대해서 고찰하고자 한다.

위 그림에서 퍼지2 제어기는 진동성분 변위분 w 와 진동성분의 변화량 즉 기울기 \dot{w} 를 입력으로한다. 또한 제어기의 출력신호 u 는 다음식과 같이 표현 할 수 있다.

$$u = FUZZY1(e, \dot{e}) + FUZZY2(w, \dot{w}) \quad (29)$$

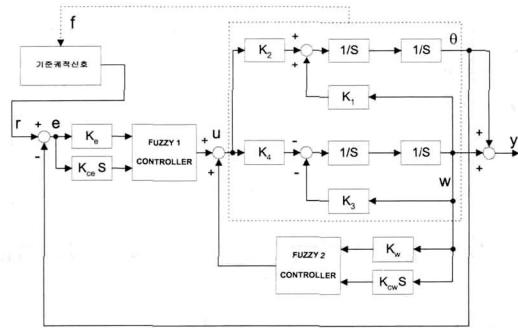


그림 5. 기준계적신호와 병렬(다중) 퍼지 제어기를 이용 제어시스템 구성

4.4 기준계적신호와 병렬(다중) 퍼지 제어기를 이용한 제어시스템 구성

본 절에서는 4.3절에서 구성한 제어시스템을 기본으로 입력신호를 비선형 시스템인 유연한 빔의 고유 주파수 f 와 연관된 기준계적신호를 생성함으로써 앞 절에서 구성한 단위 계단함수를 입력으로 한 제어시스템의 응답특성과 비교하여 고찰한다.

V. 퍼지 논리 제어(FLC)

본 장에서는 4.2절에서 소개한 hub 각도 성분을 제어하는 퍼지1 제어기와 끝단 진동성분을 제어하는 퍼지2 제어기로 구분하여 설계기법에 대해서 소개한다.

위 그림에서 입력 퍼지변수의 퍼지화에서 두 입력 변수 값을 -1에서 1사이의 값으로 정규화하고, 언어 퍼지집합의 종류는 다음과 같다.

퍼지1 제어기의 e, \dot{e} 와 퍼지2 제어기의 w, \dot{w} 입력퍼지 변수의 소속함수는 그림 7, 퍼지2 제어기의 w 입력퍼지 변수의 소속함수는 그림 8과 같이 삼각함수를 사용



그림 6. 퍼지 제어기 시스템의 블록선도

하여 퍼지화 한다. 또한 퍼지1 제어기 출력퍼지변수는 그림 9, 퍼지2 제어기의 출력퍼지변수는 그림10과 같이 싱글톤 소속함수를 사용하기로 한다. 퍼지규칙추론에서는 전형적인(IF - THEN 규칙)형식으로 표 1, 2와 같이 사용하였으며, 추론방법은 Mamdani가 제안한

| | | | |
|----|--------------------|----|-----------------|
| PB | Positive big | PM | Positive medium |
| PS | Positive small | PZ | Positive zero |
| AZ | Approximately zero | NS | Negative small |
| NZ | Negative zero | NB | Negative big |
| NM | Negative medium | N | Negative |
| P | Positive | | |

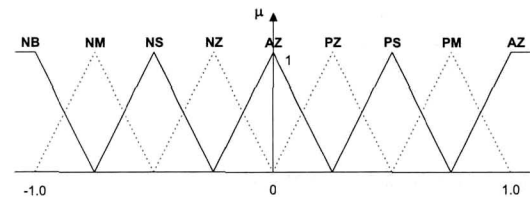


그림 7. e, \dot{e}, w 의 퍼지 소속함수

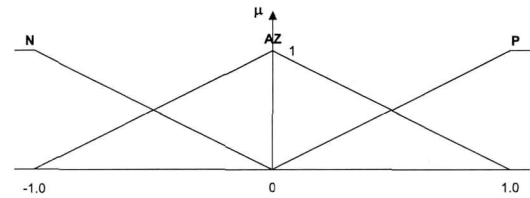


그림 8. \dot{w} 의 퍼지 소속함수

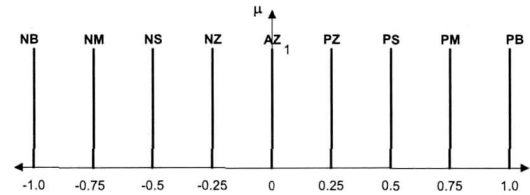


그림 9. 퍼지1의 출력 소속함수

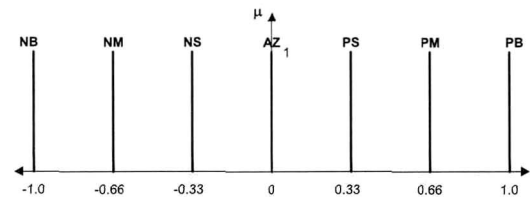


그림 10. 퍼지2의 출력 소속함수

표 1. 퍼지1의 rule base

| | | | | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| ce \ e | NB | NM | NS | NZ | AZ | PZ | PS | PM | PB |
| NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NM | NZ |
| NM | NB | NB | NB | NB | NM | NB | NM | NS | AZ |
| NS | NB | NB | NM | NM | NS | NS | NS | NZ | PM |
| NZ | NM | NM | NS | NS | NZ | NZ | PZ | PS | PM |
| AZ | NZ | NS | NS | NZ | AZ | PZ | PS | PS | AZ |
| PZ | NM | NS | NZ | PZ | PZ | PS | PS | PM | PM |
| PS | NM | NZ | PS | PS | PS | PM | PM | PB | PB |
| PM | AZ | PS | PM | PB | PB | PB | PB | PB | PB |
| PB | PZ | PM | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB |

표 2. 퍼지2의 rule base

| | | | | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| cw \ w | NB | NM | NS | NZ | AZ | PZ | PS | PM | PB |
| N | PB | PB | AZ | AZ | AZ | AZ | AZ | AZ | AZ |
| AZ | NM | NS | AZ | AZ | AZ | AZ | AZ | PS | PM |
| P | AZ | AZ | PM | PS | AZ | NS | NM | NB | NB |

Max-Min 방법을 이용하였다. 또한 비퍼지화 방법으로는 무게 중심법을 사용하였다.

VI. 시뮬레이션 및 결론

시뮬레이션에서 사용된 유연한 빔의 파라미터는 다음과 같고, 유연한 빔의 모드 수는 1차 모드로 한다.

$$l = 1.2 [m], \quad \rho = 0.2332 [Kg/m]$$

$$EI = 6.715 [N.m^2] \quad I_h = 0.005 [Kg/m^2]$$

그림 11은 퍼지 제어기, 병렬퍼지 제어기, 기준계적 신호(Tf=0.1)와 병렬퍼지 제어기 각각의 Tip position

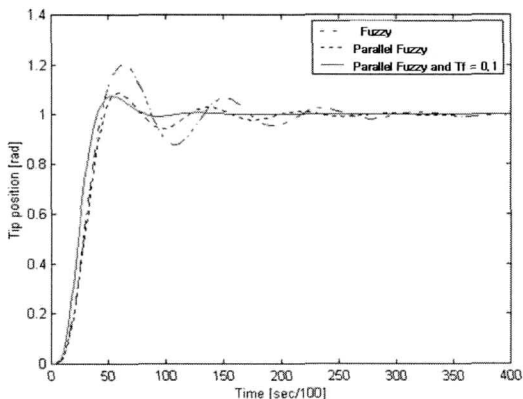


그림 11. 제어기 차이에 따른 끝단 위치응답특성

(각도)에 따른 응답특성이고, 그림 12는 Tip deflection 대한 응답 특성을 나타내고 있다. 모두 기준계적신호 (Tf=0.1)와 병렬퍼지제어기를 사용한 경우가 모든 응답 특성에 있어 우수함을 알 수 있다.

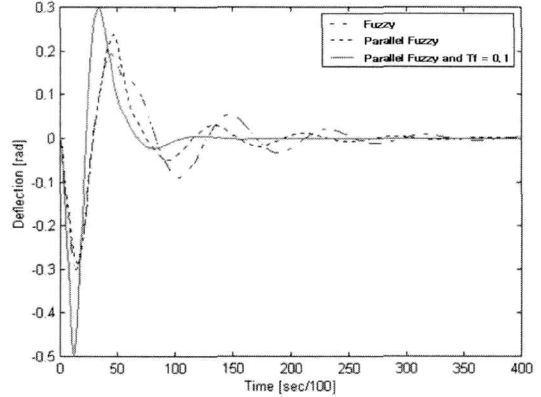


그림 12. 제어기 차이에 따른 탄성변형

참고 문헌

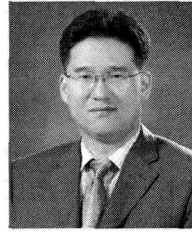
- [1] Wang, D. and Vidyasagar, M. 1991. Transfer functions for a single flexible link. The International Journal of Research Vol.10, No5, pp.540-549. 1991.8.
- [2] H.Yang, H.Krishnan and M.H.Ang Jr. 1997. A simple rest to rest control command for a flexible link robot, In proc, IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp.3312-3317. 1994.4.
- [3] Wang, D. and Vidyasagar, (Cincinnati, May). Passive control of a single flexible link. In proc, IEEE Conf. on Robotics and Automation, IEEE computer Society press, silver Spring, Md., pp. 1432-1437, 1990.5.
- [4] Wang, D. and Vidyasagar, M. 1992. Passive control of a Stiff Flexible Link. The International Journal of Robotic Vol.11, No6, pp.572-578, 1992.12.
- [5] Eric Kubica and Wang, A Fuzzy Control Strategy for a Flexible Single Link Robot, In proc, IEEE Conf. on Robotics and Automation, 1993.2.
- [6] V.Feliu and K.S.Rattan 1992. Modeling and Control of Single Link Flexible Arms with Lumped Masses. Journal of Dynamic Systems,

Measurement, and Control Vol.114, pp.59-69, 1992.5.

- [7] 박양수 “신경회로망을 이용한 유연한 관절의 선단위치 제어기에 관한 연구”, 동아대학교, 박사학위논문, 1997.
- [8] 임영도, 이 상부 “퍼지 신경망 유전진화” 도서출판 영과 일, pp.107-216, 1992
- [9] 박양수, 박윤명, 최부귀, “로봇 매니퓰레이터를 위한 신경회로망을 이용한 슬라이딩모드제어”, 한국신호처리시스템학회, 제2권, 2호, pp.89-94, 2001.

박 윤 명 (Yoon-Myung Park)

정회원



1992년 2월 동아대학교 전자공학
학과

1997년 2월 동아대학교 전자공
학과 공학석사

2003년 2월 동아대학교 전자공
학과 공학박사

1991년 11월~1997년2월 LG전자
(주) 설계실 근무(주임연구원)

2002년 3월~2010년 2월 현재 창신대학 항공정비
과 교수

<관심 분야> 로봇제어, 지능형제어, 마이컴응용

최 수 열 (Su-Yeol Choi)

정회원



1984년 8월 한양대학교 전자공
학과

1993년 2월 연세대학교 전기공
학전공 공학석사

2000년 2월 동아대학교 전자
공학과 공학박사

1986년1월~1991년2월 쌍용양
회공업(주) 기술부 근무

1991년 3월~1994년 2월 동도공업고등학교 전자과
교사

1994년 3월~2010년 2월 현재 서일대학 정보전자
과 교수

<관심 분야> 신경회로망, 퍼지, 유전알고리즘, 로봇
제어