

# 파라미터 불확실성 및 시간지연을 갖는 레이더 김벌 안정화 시스템의 지연종속 퍼지 $H_\infty$ 제어

## Delay Dependent Fuzzy $H_\infty$ Control of Radar Gimbal Stabilization System with Parameter Uncertainty and Time Delay

이 갑 래\*, 김 태 식, 이 해 창  
(Kap Rai Lee, Tae Sik Kim, and Hae Chang Lee)

**Abstract** : This paper presents controller design method for nonlinear radar gimbal system with parameter uncertainty and time delay. In order to consider nonlinearity of gimbal bearing frictional torque, we firstly represent fuzzy model for the nonlinear gimbal system, which is achieved by fuzzy combination of linear models through nonlinear fuzzy membership functions. And secondly we propose a delay dependent fuzzy  $H_\infty$  controller design method for the delayed fuzzy model with parameter uncertainty and design radar gimbal controller. The designed controller stabilize gimbal system and guarantee  $H_\infty$  performance. A computer simulation is given to illustrate stabilized control performances of the designed controller.

**Keywords** : nonlinear radar gimbal systems, parameter uncertainty, time delay, fuzzy  $H_\infty$  controller.

### I. 서론

레이더 김벌 안정화 장치는 레이더 안테나가 탑재된 항공기로부터 들어오는 외란과 장착부위의 진동의 영향을 받음에도 불구하고 안테나의 시선을 표적방향으로 유지하기 위한 안정화 기능을 수행해야한다. 기존의 시선안정화 시스템은 PID 제어를 근간으로 위상 보상기를 사용하고 있지만 성능을 개선시키기 위한 많은 연구들을 하고 있다. 쿨롱 마찰력을 추정해내고 이를 제어입력의 계산에 반영시키는 마찰 추정보상제어[1-3]와 쿨롱 마찰과 관성 모멘트를 동시에 추정하여 보상한 적응마찰보상제어[4] 등이 있으며, 제어대상 시스템의 모델을 유전 알고리즘을 이용하여 추정하고 추정된 모델을 기반으로 최적 상태제어기를 설계한 연구[5]와 지능제어를 이용한 마찰 보상제어 연구[6] 등이 있다. 안정화 장치의 장착부위의 진동신호는, 운동학적 결합과 김벌 베어링의 마찰을 통해, 시선의 흔들림을 초래하는 주요 오차요인이며 마찰력은 불규칙 진동신호의 비선형 특성을 보인다[1,2]. 따라서 마찰토크의 비선형성을 고려한 제어기 설계 기법은 안정화 성능 향상에 기여 할 수 있다. 또한 김벌 안정화 장치는 제작 오차 등에 의하여 파라미터 불확실성이 존재하며, 제어컴퓨터의 계산 시간지연 등에 의한 시간지연이 필연적으로 존재하게 된다. 따라서 파라미터 불확실성과 시간지연을 고려한 비선형 제어기 설계기법이 요구된다.

시간지연을 갖는 비선형 시스템에 대한 체계적인 제어기 설계 연구로, 시간지연 비선형 시스템을 T-S(Takagi-Sugeno)

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 11. 2., 채택확정 : 2005. 9. 6.

이갑래 : 평택대학교 정보통신학과(krlee@ptu.ac.kr)

김태식, 이해창 : 항공우주연구원 비행신그룹

(kts@kari.re.kr/hclee@kari.re.kr)

※ 본 논문은 산업자원부에서 시행한 민군겸용 기술개발사업 지원비에 의하여 연구되었음.

형태의 퍼지 모델로 나타내고 제어기 설계는 병렬분산보상기 개념을 이용하여 퍼지 제어기를 설계하는 것이다. 이에 대한 연구결과로는 시간지연의 크기에 상관없이 시스템을 안정화 시키는 지연독립적인 방법[7,8]과 지연종속적인 방법이 있다[9,10]. 시간 지연의 크기가 크지 않는 경우 지연 독립적 안정화 방법보다 지연 종속적인 안정화 방법이 더 적당한 방법으로 알려져 있다[11,12].

본 연구에서는 먼저 시간지연 뿐만 아니라 파라미터 불확실성을 갖는 퍼지 모델에 대해서 안정성과  $H_\infty$  성능을 보장하는 지연 종속적인 퍼지  $H_\infty$  제어기 설계방법을 제시한다. 이어서 마찰토크의 비선형성을 갖는 김벌 안정화 시스템을 시간지연과 파라미터 불확실성을 갖는 다중 선형모델의 결합된 퍼지 모델로 나타내고, 퍼지 모델에 대하여 안정성과  $H_\infty$  성능을 만족하는 지연종속 퍼지 제어기를 설계한다. 본 논문의 구성은 2장에서 안정화 시스템의 구성요소(김벌기구부, 모터, 서보증폭기) 모델과 파라미터 불확실성에 대해 알아보고 외란모델 식을 선정한다. 3장에서는 시간지연과 파라미터 불확실성을 갖는 퍼지 시스템에 대한 안정성과  $H_\infty$  성능을 만족하는 제어기 존재조건을 선형행렬 부등식으로 나타내어 제어기 설계알고리즘을 제시한다. 4장에서는 지연종속 퍼지  $H_\infty$  제어기를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션으로 성능을 확인한다.

### II. 김벌 안정화시스템의 수학적 모델

레이더 김벌 안정화 시스템은 그림 1과 같이 항공기용 밀리미터 레이더 시스템의 부시스템으로서 안테나의 기구적인 지지뿐만 아니라 레이더가 탑재되는 항공기로부터 유입되는 외란의 영향을 받음에도 불구하고 안테나의 시선을 고정시키는 안정화 기능을 수행한다. 김벌안정화 시스템은 김벌제어기(안정화제어 컴퓨터, 서보증폭기), 모터, 센서(엔코더, 자이로) 그리고 기구부로 구성되며 그림 2와 같다.

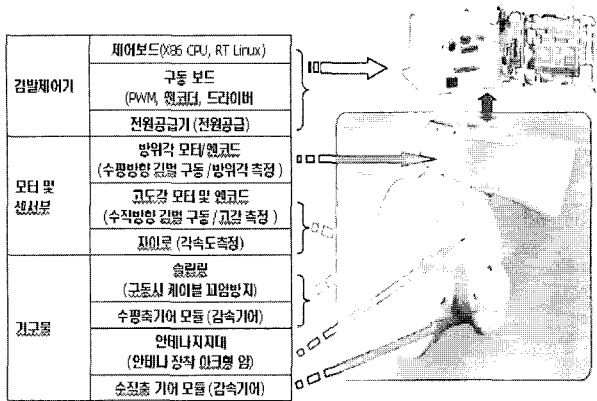


그림 1. 레이더 김벌 안정화 시스템.

Fig. 1. Radar gimbal stabilization system.

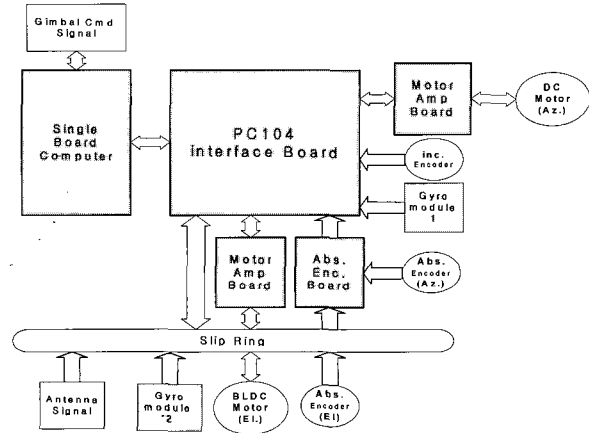


그림 2. 김벌 안정화 시스템의 구성.

Fig. 2. The configuration of gimbal stabilization system.

1. 김벌 기구부 및 모터

김벌 기구부의 토크 균형방정식을 유도하면

$$T_p = J_p \frac{dw_p}{dt} + B_p w_p + T_f + T_d \tag{1}$$

이다. 여기서  $T_p$ 는 부하에 공급되는 토크이며,  $w_p$ 는 김벌 축의 각속도,  $J_p$ 는 관성 모멘트,  $B_p$ 는 점성 마찰 계수이며  $T_f, T_d$ 는 마찰토크 및 외부토크이다.

서보 모터에 대한 전압방정식 및 토크방정식은

$$e_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{emf} \tag{2}$$

$$T_m = J_m \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + \frac{1}{N} T_p \tag{3}$$

$$w_m = N w_p \tag{4}$$

이다. 여기서  $e_a$ 는 전기자 전압,  $i_a$ 는 전기자 전류,  $V_{emf}$ 는 역기전력,  $R$ 는 전기자 저항,  $L$ 은 전기자 인덕턴스,  $T_m$ 은 모터에서 발생하는 토크,  $J_m$ 은 모터 관성모멘트,

$B_m$ 은 모터 점성마찰계수,  $w_m$ 은 모터의 각속도이다. 토크  $T_m$ 은 전기자 전류  $I_a$ 와 자속  $\phi$ 의 곱에 비례하고, 공기축 자속  $\phi$ 는 계자전류에 비례한다. 계자전류가 일정하면 자속은 일정한 값을 가진다. 따라서 모터에서 발생하는 토크  $T_m$ 은

$$T_m = K_t i_a \tag{5}$$

이다. 여기서  $K_t$ 는 모터 토크상수이다. 전기자가 회전할 때, 자속과 각속도의 곱에 비례하는 역기전력이 전기자에 유도된다. 자속이 일정하면 역기전력  $V_{emf}$ 은 각속도  $w_m$ 에 비례하므로

$$V_{emf} = K_b w_m \tag{6}$$

이다. 여기서  $K_b$ 는 역기전력 상수이다.

2. 외란 모델링

제어대상에 유입되어 시선의 흔들림을 유발하는 주요 외란원으로는 각속도 진동  $w_{vh}$ 에 의해 유기되는 베어링 마찰토크  $T_f$  및 바람에 의한 외부 토크  $T_d$ 을 들 수 있다. 제어대상에 존재하는 마찰력은 쿨롱마찰력과 정마찰력 그리고 점성마찰력 등이 있다. 안정화 구동기에 있어 정마찰력과 점성마찰력은 쿨롱마찰력과 비교하여 무시할 정도로 적은 양이다. 쿨롱마찰력 모델은 아래 식과 같은 비선형 특성을 보인다[1,2].

$$T_f = \frac{2}{\pi} T_0 \tan^{-1} \left( \frac{w_p - w_{vh}}{C_m} \right) \tag{7}$$

여기서  $T_0$ 는 1.5(Nm)이며,  $C_m$ 은 곡선의 기울기를 결정하는 상수로서 0.1이다. 각속도 진동  $w_{vh}$ 는 0.1rad/sec 크기의 유색 진동신호로 가정한다.

외부 토크는 항공기용 레이더가 강풍에 노출되어 있거나 장착 차량의 속도가 증가할 때 안정화 구동기의 성능에 영향을 미치는 요소로서 시간에 따라 변하는 구형과 형태의 신호로 모델링 하였다. 설계된 김벌 기구물의 외형도는 그림 1과 같이 안테나 포함하여 회전체의 전체무게는 20kg 정도이며, 크기는 400×390mm 정도이다. 김벌에 작용하는 외부 외란 토크의 최대 크기는 무게중심의 치우침(offset)에 따른 토크와 장착비행체의 최대 속도와 측풍(side wind)에 의한 토크를 아래 가정 하에 계산 하였으며 최대크기는 1.5Nm 정도이다.

- 김벌 장착 비행체의 최대속도 : 200km/hr
- Cd (Drag Coeff.) : 0.7
- 압력 중심점 : Pivot point에서 40-60mm 하향점으로 가정
- 면적 : 0.08m<sup>2</sup>
- 측풍 속도(XXX 항공기 측풍규격) : 30knots(10.23m/s)

그림 3은 외부외란토크 및 마찰토크가 개-루프 시스템의 안정화에 미치는 영향을 나타내었다.

3. 서보증폭기 및 전류제어기

사용된 서보 증폭기는 전류구동 방식의 상용 앰프 모듈이다. 전류구동 방식의 경우 서보 모터의 토크 응답은 개선

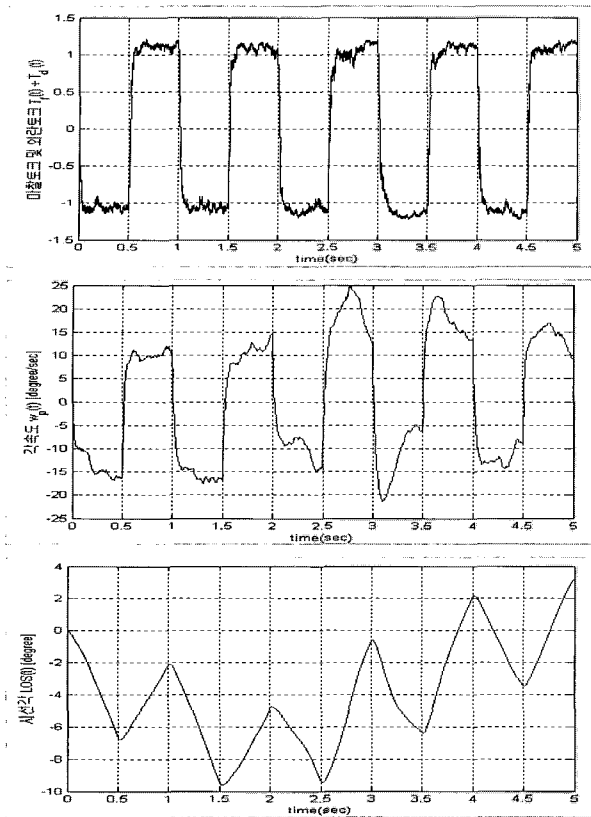


그림 3. 외란토크에 대한 개-루프시스템의 안정화 영향분석.  
Fig. 3. Sensitivity of gimbal system via disturbance torque.

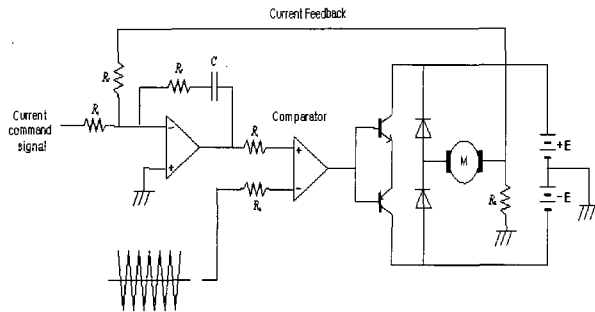


그림 4. 전류제어용 PWM 서보 증폭기.  
Fig. 4. PWM servo amplifier.

되지만 모터의 인덕턴스가 큰 경우 전류지연에 의한 불안정 현상을 보일 수 있다. 따라서 제동이 약한 극점을 원하는 위치에 옮기기 위한 진상 보상기가 추가되어야 한다. 서보증폭기 회로도도 그림 4와 같다.

그림 4의 회로도로부터 입력전압  $u$ 에 대한 아마추어 전압  $e_a$ 로의 전달함수는

$$G_A(s) = \frac{A_0}{\tau_a s + 1} \quad (8)$$

이다. 여기서  $A_0$ 는 증폭기이득,  $\tau_a$ 는 시정수를 의미한다. 전류제어기 전달함수

$$G_i(s) = \frac{\tau_p \cdot s}{\tau_f \cdot s + 1} \quad (9)$$

이며

$$u = K_c \cdot i_a \quad (10)$$

이다. 여기서  $K_c$ 는 전류제한 이득이다.

#### 4. 파라미터 불확실성 및 시간지연

관성모멘트  $J_b$  및 점성마찰계수  $B_p$ 는 김벌 안정화 장치의 무게, 형상, 운행각속도 등에 의하여 결정되지만 제작 오차 등에 의하여 파라미터 불확실성이 존재한다. 따라서 제어기 설계 시 파라미터 불확실성을 고려한 제어기 설계 기법이 요구된다.

각속도 측정센서인 자이로는 대역폭이 김벌 안정화 시스템의 5배 이상이므로 제어기 설계 시는 상태변수에 제외시키며 컴퓨터 시뮬레이션 시 고려한다. 2차 시스템으로 모델링하며 대역폭이 100Hz,  $\zeta = 0.707$ 이며 측정 잡음  $v$ 의 분산은 25 rad/sec 이다. 자이로가 실제 각속도를 측정하여 김벌 안정화 컴퓨터에 전달되고, 제어컴퓨터에서 제어입력이 계산되어 갱신되기까지는 시간지연이 존재하므로 시간지연 항을 고려한 제어기 설계기법이 요구되어진다.

### III. 지연종속 퍼지 $H_\infty$ 제어

T-S 퍼지모델은 비선형 시스템을 모델링하는데 효과적인 방법으로 알려져 있다[13]. 불확실성 및 시간지연을 갖는

T-S 퍼지 모델의  $i$ 번째 규칙

Plant Rule  $i$ :

IF  $z_i(t)$  is  $M_{i1}$  and ... and  $z_g(t)$  is  $M_{ig}$

$$\text{THEN } \dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i(t))x(t) + B_{ui}u(t) + B_{di}u(t - \tau) + (B_i + \Delta B_i(t))w(t) \quad (11)$$

$$e(t) = C_i x(t) + D_i u(t), \quad i = 1, 2, \dots, r$$

$$x(t) = 0, \quad t \leq 0$$

을 고려한다. 여기서  $M_{ij}$ 는 퍼지 집합이고,  $x(t) \in R^n$ 는 상태변수  $u(t) \in R^m$ 은 입력,  $w(t) \in R^b \in L_2(0, T)$ 는 제한된 에너지를 갖는 외부외란,  $e(t) \in R^q$ 는 제어할 변수,  $r$ 은 IF-THEN 규칙의 수,  $z_1 \sim z_g$ 는 측정 가능한 시스템 변수, 즉 전건부 변수이며,  $A_i, B_i, B_{ui}, B_{di}, C_i, D_i$ 는 공칭시스템을 나타내는 적절한 차원을 갖는 상수행렬이다.  $\tau$ 는

$$0 \leq \tau \leq \bar{\tau} \quad (12)$$

을 만족하는 미지의 상수 시간지연이라고 가정한다. 시변 파라미터 불확실성

$$[\Delta A_i(t) \ \Delta B_i(t)] = HF(t)[E_{xi}, E_{wi}] \quad i = 1, 2, \dots, r(13)$$

와 같이 가정하면,  $H, E_{xi}, E_{wi}$ 는 적절한 차원을 갖는 상수행렬이고,  $F(t)$ 는

$$F(t) \in \Omega = \{F(t) | F^T(t)F(t) \leq I\} \quad (14)$$

로 크기가 제한된 모르는 행렬함수이다.

퍼지 시스템의 추론된 최종 출력은

$$x(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{ (A_i + HF(t)E_{xi})x(t) + (B_i + HF(t)E_{wi})w(t) + B_{ui}u(t) + B_{di}u(t-\tau) \} \quad (15)$$

$$e(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{ C_i x(t) + D_i u(t) \}$$

$$x(t) = 0, \quad t \leq 0$$

이다. 여기서

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^k M_{ij}(z_j(t))$$

$$h_i(z(t)) = w_i(z(t)) / \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \quad (16)$$

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_n(t)]^T$$

이며,  $M_{ij}(z_j(t))$ 는  $z_j(t)$ 의 멤버십 등급이다. 모든 시간  $t$ 에 대하여

$$w_i(z(t)) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,r$$

$$\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0 \quad (17)$$

을 가정하면

$$h_i(z(t)) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,r$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1 \quad (18)$$

이다. 퍼지 시스템 (1)에 대한 상태회환 퍼지  $H_\infty$  제어기로 Control Rule i:

IF  $z_1(t)$  is  $M_{i1}$  and  $\dots$  and  $z_g(t)$  is  $M_{ig}$

$$\text{THEN } u(t) = K_i x(t), \quad i=1,2,\dots,r \quad (19)$$

을 고려한다. 여기서  $K_i$ 는 설계되어질 제어기의  $i$ 번째 이득행렬이다. (19)의 각 제어 규칙은 T-S 퍼지 모델의 상응하는 규칙으로부터 설계되기 때문에 퍼지 제어기의 전건부는 퍼지 모델과 같은 퍼지 집합을 사용한다. 따라서 퍼지 제어기의 최종 출력은

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_i x(t) \quad (20)$$

이다. 퍼지 제어기 (20) 및 퍼지 시스템 (15)로부터 폐루프 시스템은

$$\dot{x}(t) = (\mathcal{A}(z) + HF(t)E_x(z))x(t) + \mathcal{A}_d(z)x(t-\tau) + (\mathcal{B}(z) + HF(t)E_w(z))w(t)$$

$$x(t) = 0, \quad t \leq 0$$

$$e(t) = \mathcal{C}x(t) \quad (21)$$

이다. 여기서

$$\mathcal{A}(z) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) \mathcal{A}_{ij}$$

$$\mathcal{A}_d(z) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) B_{di} K_i$$

$$\mathcal{B}(z) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) B_i$$

$$\mathcal{C}(z) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(x(t)) h_j(x(t)) \mathcal{C}_{ij}$$

$$E_x(z) = \sum_{i=1}^r h_i(x(t)) E_{xi} \quad (22)$$

$$E_w(z) = \sum_{i=1}^r h_i(x(t)) E_{wi}$$

이며

$$\mathcal{A}_{ij} = A_i + B_{ui} K_j, \quad \mathcal{A}_{di} = B_{di} K_j$$

$$B_i = B_i, \quad \mathcal{C}_{ij} = C_i + D_i K_j \quad (23)$$

이다. 주어진  $\gamma$ 에 대해서  $H_\infty$  제어 성능

$$J_\infty = \int_0^T \|\bar{e}(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|w(t)\|^2 dt \quad (24)$$

을 고려한다. 여기서  $T > 0$ ,  $w \in L_2[0, T]$ 이며  $\|\cdot\|$ 는 Euclidean norm 이다.

본 연구에서는 시간지연을 갖는 퍼지 시스템 (15)에 대해서 폐루프 시스템 (21)을 안정화 할뿐만 비용함수 (24)를 만족하는 지연 종속적인 제어기 (20)의  $K_i$ 를 설계하고자 한다.

정리 1: 시간지연을 갖는 시스템 (15)을 고려한다. 선형 행렬 부등식

$$\Phi_{ii} < 0, \quad i=1,2,\dots,r, \quad (25)$$

$$\Phi_{ij} + \Phi_{ji} < 0, \quad i < j < r, \quad i=1,2,\dots,r \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ * & X^T + X - S^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (27)$$

을 만족하는 행렬  $X > 0$ ,  $S > 0$ ,  $H$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $Y_i$ ,  $i=1,2,\dots,r$ , 및 상수  $\lambda > 0, \tau > 0$ 가 존재하면, 퍼지 제어기 (20)은 시스템 (15)을 점근적으로 안정화할 뿐만 아니라  $H_\infty$  제어성능 (24)를 만족시키는 제어기이다. 여기서

$$\Phi_{ij} = \begin{bmatrix} (1,1) & B_{di} Y_j - L_2 & B_i & \lambda^{-1} H & (1,5) & (1,6) & X E_{xi}^T \\ * & -L_3 & 0 & 0 & \bar{\tau} Y_j B_{di}^T & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & \bar{\tau} B_i^T & 0 & E_{wi}^T \\ * & * & * & -\lambda^{-1} I & H^T & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\bar{\tau} S^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\lambda^{-1} I \end{bmatrix} \quad (28)$$

이며 (1,1), (1,5) 및 (1,6)는

$$(1,1) = A_i X + X A_i^T + B_{ui} Y_j + Y_j^T B_{ui}^T + \bar{\tau} L_1 + 2L_2 + L_3$$

$$(1,5) = \bar{\tau} [X A_i^T + Y_j^T B_{ui}^T] \quad (29)$$

$$(1,6)^T = [C_i X + D_i Y_j]$$

이다. 또한 제어기 이득 값은

$$K_i = Y_i X^{-1}, \quad i=1,2,\dots,r \quad (30)$$

로 구해진다.

증명: (21)은  $q(t) = E(z)x(t)$ ,  $p(t) = F(t)q(t)$  로 치환하면

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(z)x(t) + A_d(z)x(t-\tau) + B(z)w(t) + Hp(t) \\ e(t) &= C(z)x(t) \end{aligned} \quad (31)$$

로 나타낼 수 있다.  $P > 0$ ,  $S > 0$  및  $R > 0$ 을 만족하는 Lyapunov 함수

$$V(x, t) = V_1(x, t) + V_2(x, t) + V_3(x, t) \quad (32)$$

을 고려한다. 여기서

$$V_1(x, t) = x^T(t)Px(t) \quad (33)$$

$$V_2(x, t) = \int_{-\tau}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s)S\dot{x}(s)dsd\theta \quad (34)$$

$$V_3(x, t) = \int_{t-\tau}^t x^T(s)Rx(s)ds \quad (35)$$

이다. Lyapunov 함수로부터

$$\delta_1 \|x(t)\|^2 \leq V(x, t) \leq \delta_2 \sup_{\theta} \|x(t+\theta)\|^2 \quad (36)$$

을 만족하는 양수  $\delta_1$  및  $\delta_2$  는 항상 존재한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 따라서  $w(t) = 0$  인 시스템 (21)의 모든 궤적에 대해  $V(x, t) \leq 0$  을 만족하면 Lyapunov-Krasovskii 정리[14]로부터 시스템 (21)은 점근적으로 안정하다.  $H_\infty$  성능 (24)을 고려하기 위하여

$$J_a(t) := V(x, t) + e^T(t)e(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) \quad (37)$$

을 고려한다. 시간지연 항

$$x(t-\tau) = x(t) - \int_{t-\tau}^t \dot{x}(s)ds \quad (38)$$

및

$$\sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^r \sum_{m=1}^r h_i h_k h_m X_{ij}^T S X_{ki}^T \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j X_{ij}^T S X_{ij} \quad (39)$$

을 이용하여, 파라미터 불확실성을 갖지 않는 시스템에 대한 설계 방법인 [10]의 정리 2의 증명방법과 유사하게 전개하면

$$p^T(t)p(t) \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r [x^T \ w^T] \begin{bmatrix} E_{xi}^T \\ E_{wi} \end{bmatrix} [E_{xi} \ E_{wi}] \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \quad (40)$$

을 만족하는  $x(t)$ ,  $p(t)$ ,  $w(t)$ 에 대해서는

$$J_a \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-d) \\ w(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (1,1) + \bar{\tau} A_{ij}^T S A_{ij} & (1,2) & (1,3) \\ * & (2,2) & (2,3) \\ * & * & (3,3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-d) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (41)$$

을 만족한다. 여기서

$$\begin{aligned} (1,1) &= A_{ij}^T P + P A_{ij} + \bar{\tau} R + 2R' + R + C_{ij}^T C_{ij} \\ (1,2) &= P A_{li} - R' + \bar{\tau} A_{ij}^T S A_{li} \\ (1,3) &= P B_{ij} + \bar{\tau} A_{ij}^T S B_{ij} \\ (2,2) &= -R + \bar{\tau} A_{li} S A_{li} \\ (2,3) &= \bar{\tau} A_{li} S B_{ij} \\ (3,3) &= -\gamma^2 I + \bar{\tau} B_{ij}^T S B_{ij} \end{aligned} \quad (42)$$

이며  $R, R', S$ 는

$$\begin{bmatrix} R & R' \\ * & S \end{bmatrix} \geq 0 \quad (43)$$

을 만족해야한다. S-과정(S-procedure)과 Schur 보수를 이용하면

$$J_a \leq \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) h_i(z(t)) \Omega_{ii} + \sum_{i < j}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) (\Omega_{ij} + \Omega_{ji}) \quad (44)$$

이다. 여기서

$$\Omega_{ij} = \begin{bmatrix} (1,1) & P A_{di} - R' & P B_i & P H & A_{ij}^T & C_{ij}^T & E_{xi}^T \\ * & -R & 0 & 0 & A_{di}^T & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & B_{ij}^T & 0 & E_{wi}^T \\ * & * & * & -\lambda I & H^T & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -(\bar{\tau} S)^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & 0 & -\lambda^{-1} \end{bmatrix} \quad (45)$$

이며 \*는 대칭행렬의 주 대각 아래 성분을 나타낸다. (45)로부터

$$\begin{aligned} \Omega_{ii} &< 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \\ \Omega_{ij} + \Omega_{ji} &< 0, \quad i < j \leq r, \quad i, j = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (46)$$

이 만족되어지면 시스템 (21)은 지수 함수적으로 안정하며,  $V(\zeta, T) > 0$ 이기 때문에

$$\int_0^T \|e(t)\|^2 dt - \gamma^2 \int_0^T \|w(t)\|^2 dt \leq 0 \quad (47)$$

이다.  $P^{-1} = X$ 로 두고 (46) 좌측항 앞뒤에  $\text{Diag}\{X X I I I\}$ 을 각각 곱하고

$$\begin{aligned} K_i X &= Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, r \\ X R X &= L_1 \\ X R' X &= L_2 \\ X R X &= L_3 \end{aligned} \quad (48)$$

로 두면 (25), (26)이 얻어진다. 또한 (43) 좌측 항 앞뒤에  $\text{Diag}\{X, X\}$ 을 곱하면

$$\begin{bmatrix} X R X & X R' X \\ * & X S X \end{bmatrix} \geq 0 \quad (49)$$

이다.  $X^T S X \geq X^T + X - S^{-1}$  를 이용한 후 (48)를 이용하면 (27)이 얻어진다. ■

정리 1의 모든 부등식은 변수에 대해서 선형 행렬 부등식(LMI)으로 나타나 있으므로 LMI Toolbox를 이용하면 모든 변수의 해는 바로 구할 수 있다[15,16].

**IV. 제어기 설계 및 결과**

**1. T-S 퍼지 모델구성**

김별 기구부의 토크 방정식 (1)를 다시 나타내면

$$\frac{dw_p}{dt} = \frac{1}{J_p} B_p \cdot w_p + \frac{1}{J_p} N \cdot K_t \cdot I_a + \frac{1}{J_p} (T_f + T_d) \quad (50)$$

이다. 여기서 마찰토크

$$T_f = \frac{2}{\pi} T_0 \tan^{-1} \left[ \frac{w_p - w_{vh}}{0.1} \right]$$

이다. 각속도 진동  $w_{vh}$ 을 0.1rad/sec 크기의 유색신호로 간주하였으므로  $w_p - w_{vh}$ 는

$$(w_p - w_{vh}) \in [-0.31 \ 0.31] \quad (51)$$

을 만족한다고 가정할 수 있다.  $10(w_p - w_{vh}) = w'$  로 두고 비선형함수  $\tan^{-1} w'$ 를 선형함수  $w_p - w_{vh}$ 와  $0.4(w_p - w_{vh})$ 의 조합으로 나타내면

$$\tan^{-1} w' = M_{11}(w') \cdot w' + M_{21}(w') \cdot 0.4w' \quad (52)$$

로 표현할 수 있다. 여기서

$$\begin{aligned} M_{11}(w'), M_{21}(w') &\in [0 \ 1] \\ M_{11}(w') + M_{21}(w') &= 1 \end{aligned} \quad (53)$$

이다. (52)로부터 퍼지 함수

$$M_{11}(w') = \frac{1}{0.6w'} (\tan^{-1} w' - 0.4w') \quad (54)$$

로 들 수 있으며 그림 5와 같다.

따라서 모델링 (1)-(10)의 비선형 시스템을 2개 규칙의 T-S 퍼지 모델로 근사화 하면

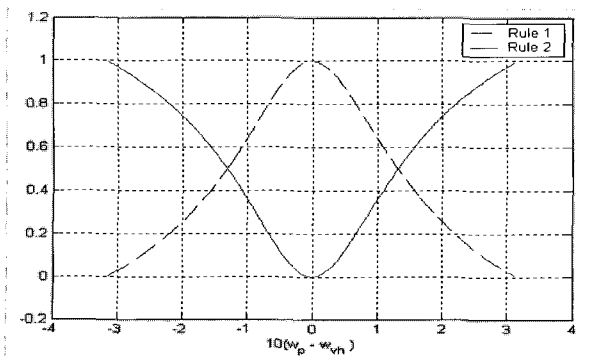


그림 5. 퍼지 모델의 멤버십 함수.

Fig. 5. Membership functions of fuzzy model.

Plant Rule 1:

IF  $(w_p - w_{vh})$  is  $M_{11}$

THEN  $\dot{x}(t) = (A_1 + \Delta A_1)x(t) + B_{a1}(t)u(t) + B_{d1}u(t - \tau) + (B_1 + \Delta B_1)w(t)$

$$e(t) = C_1x(t) + D_1u(t), \quad (55)$$

Plant Rule 2:

IF  $(w_p - w_{vh})$  is  $M_{21}$

THEN  $\dot{x}(t) = (A_2 + \Delta A_2)x(t) + B_{a2}(t)u(t) + B_{d2}u(t - \tau) + (B_2 + \Delta B_2)w(t)$

$$e(t) = C_2x(t) + D_2u(t) \quad (56)$$

이다. 여기서  $x = [w_p \ i_a \ e_a \ i_c \ \theta]$ ,  $w = [w_{vh} \ T_d]$ 이며

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{J_p} (\frac{20}{\pi} T_0 + B_p) & \frac{K_t}{J_p} N & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_b}{L_a} N & \frac{-R_a}{L_a} & \frac{1}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-A_0 K_c}{\tau_a} & \frac{-1}{\tau_a} - \frac{\tau_p A_0}{\tau_a \tau_f} & \frac{\tau_p A_0}{\tau_f \tau_a} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_f} & \frac{-1}{\tau_f} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{J_p} (\frac{8}{\pi} T_0 + B_p) & \frac{K_t}{J_p} N & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_b}{L_a} N & \frac{-R_a}{L_a} & \frac{1}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-A_0 K_c}{\tau_a} & \frac{-1}{\tau_a} - \frac{\tau_p A_0}{\tau_a \tau_f} & \frac{\tau_p A_0}{\tau_f \tau_a} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_f} & \frac{-1}{\tau_f} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_p} \frac{20}{\pi} T_0 & \frac{-1}{J_p} \\ \frac{K_b N}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_p} \frac{8}{\pi} T_0 & \frac{-1}{J_p} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$B_{a1} = B_{a2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_0 / \tau_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{d1} = B_{d2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.02(A_0 / \tau_a) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = C_2 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 250], \quad D_1 = D_2 = 1$$

이다.  $\theta$ 는  $w_p$ 의 적분 값이다. 개발 대상 시스템에 사용된 파라미터 값을 이용하여 모델을 구하면

$$\begin{aligned} A_1 &= 10^2 * \begin{bmatrix} -0.7834 & 0.2577 & 0 & 0 & 0 \\ -62.2222 & -22.8889 & 22.2222 & 0 & 0 \\ 0 & -3.5663 & -0.6875 & 0.1875 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & -100 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A_2 &= 10^2 * \begin{bmatrix} -0.3426 & 0.2577 & 0 & 0 & 0 \\ -62.2222 & -22.8888 & 22.2222 & 0 & 0 \\ 0 & -3.5663 & -0.6875 & 0.1875 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & -100 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (58)$$

$$B_1 = 10^2 * \begin{bmatrix} 0.7345 & 0.0769 \\ 62.2222 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = 10^2 * \begin{bmatrix} 0.0294 & 0.0769 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{a1} = B_{a2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 7500 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{d1} = B_{d2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 75 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

이다. 파라미터 불확실성을 갖는  $J, B$ 는 (55)의  $A_1, A_2$  행렬에는 (1,1) 및 (1,2) 요소에 나타나고 (56)의  $B_1, B_2$  행렬에는 (1,1) 및 (1,2) 요소에 나타난다. 따라서 파라미터 불확실성 구조는

$$[\Delta A_i(t) \ \Delta B_i(t)] = HF(t)[E_{x_i}, \ E_{w_i}], \quad i=1,2$$

$$H^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{x1} = E_{x2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$E_{w1} = E_{w2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다. 측정센서와 제어컴퓨터 사이의 인터페이스 시간과 제어컴퓨터의 계산 시간 등으로 인한 제어 입력의 시간지연의 상한치  $\bar{\tau} = 20msec$ 로 가정한다.

2. 김벌 퍼지  $H_\infty$  제어기 설계 및 성능분석

상태 궤환 형태의 제어는 일반적으로 입력 추적이 필요 없는 레귤레이터 시스템에 유용하며, 신호가 추종되도록 되어있는 제어시스템이나 외란이 존재하는 시스템에서는 상태궤환과 함께 적분제어를 도입해야한다. 따라서 본 연구에서는 시선각속도에 대한 적분요소를 시스템 모델에 포함시켜 확장된 시스템에 대하여 제어기를 설계한다. 정리 1을 이용하여 제어기를 설계하면

$$K_1 = [k_1^1 \ k_1^2 \ k_1^3 \ k_1^4 \ k_1^5]$$

$$= [0.0578 \ -0.0572 \ -1.2047 \ 1.2188 \ 12.6385]$$

$$K_2 = [k_2^1 \ k_2^2 \ k_2^3 \ k_2^4 \ k_2^5]$$

$$= [0.0648 \ -0.0572 \ -1.2044 \ 1.2186 \ 13.9015] \quad (60)$$

이며, 퍼지 제어기의 최종 출력은

$$u(t) = \sum_{i=1}^2 h_i [k_i^1 \ k_i^2 \ k_i^3 \ k_i^4 \ k_i^5] \begin{bmatrix} w_p \\ i_a \\ e_a \\ i_c \\ \int w_p dt \end{bmatrix} \quad (61)$$

이다. 여기서  $h_1 = M_{11}$ 이며  $h_2 = M_{21}$ 이다.

본 연구에서 설계된 제어기(시간지연 퍼지  $H_\infty$  제어기)와 시간지연과 파라미터 불확실성을 고려하지 않고  $H_\infty$  성능만 고려하여 설계된 제어기(퍼지  $H_\infty$  제어기)를 비교분석한다. 수학적 모델과 설계된 제어기를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하며, 제어갱신 주기는 10 KHz(0.1msec)로 수행하였다.

2.1 시간지연에 대한 성능분석

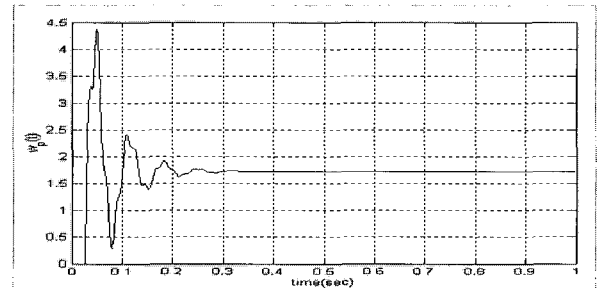
시간지연 퍼지  $H_\infty$  제어기의 경우 시간지연의 상한치 크기를 변화 시키면서 제어기를 설계하였다. 시간지연의 크기에 따른  $H_\infty$  성능의  $\gamma$ 크기는 <표 1>과 같다.

시간 지연에 대한 제어 성능을 알아보기 위하여 각속도 진동은 영으로 하고, 각속도 명령을 1.72도로 주고 시간지연의 크기에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6에 나타난 것과 같이 시간지연 크기의 간격으로 응답이 튀는 것을 알 수 있으며 점차적으로 오차가 사라짐을 알 수 있다

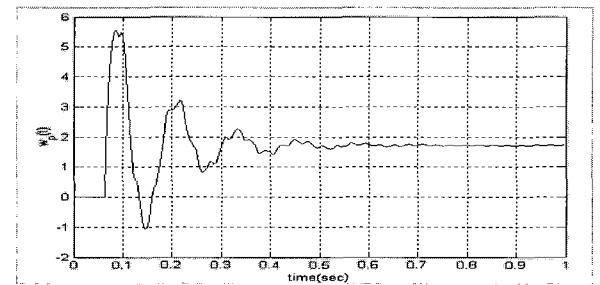
표 1. 시간지연 크기에 따른  $H_\infty - \gamma$  성능.

Table 1.  $H_\infty - \gamma$  performance via time delay.

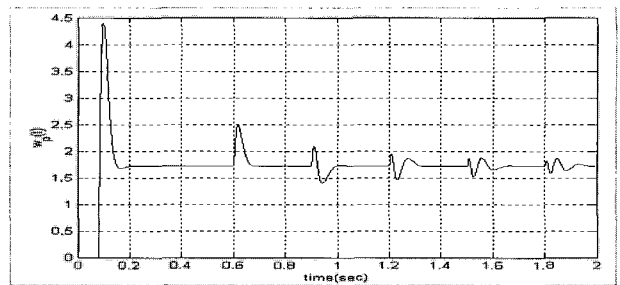
| 제어기                    | 시간지연 상한치( $\bar{\tau}$ ) | $\gamma$ 크기 |
|------------------------|--------------------------|-------------|
| 시간지연 퍼지 $H_\infty$ 제어기 | $\bar{\tau} = 0.01$      | 2,461       |
|                        | $\bar{\tau} = 0.02$      | 2,949       |
|                        | $\bar{\tau} = 0.03$      | 26,343      |
|                        | $\bar{\tau} = 0.04$      | 해 존재하지 않음   |
| 퍼지 $H_\infty$ 제어기      |                          | 244         |



(a)  $\bar{\tau} = 0.02$



(b)  $\bar{\tau} = 0.03$



(c)  $\bar{\tau} = 0.3$

그림 6. 시간 지연에 따른 각속도 응답.

Fig. 6. Time response of angular velocity via time delay.

2.2 시간지연을 갖는 김벌시스템의 안정화성능 분석

시간지연을 갖는 김벌 시스템의 각속도 진동에 대한 안정화 성능을 알아보기 위하여 각속도 명령을 영(0)으로 하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시간지연은 0.02초로 주고, 각속도 진동  $w_{vh}$  은 유색진동신호로서 크기가 100 mrad/sec 이다. 마찰토크는 (7)에 나타낸 것과 같이 각속도 진동신호로 결합되고 그림 7과 같다.

그림 8에서 보논바와 같이 시간지연 퍼지  $H_{\infty}$  제어기 및 퍼지  $H_{\infty}$  제어기 모두 안정화 성능(시선각 0.05도 이내)을 만족함을 알 수 있으며, 각속도 응답은 시간지연 퍼지 제어가 떨림 현상이 작음을 알 수 있다.

2.3 시간지연 및 파라미터 불확실성을 갖는 김벌시스템의 성능분석

시간지연과 파라미터 불확실성을 갖는 김벌시스템에 대하여 안정화 성능을 알아보기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 9의 (a)는 파라미터 불확실성으로 관성모멘트  $J_b$ 와 점성마찰계수  $B_p$ 의 오차를 80% 정도로 주고 시간지연 퍼지  $H_{\infty}$  제어기에 대하여 시뮬레이션을 한 결과이다. 퍼지  $H_{\infty}$  제어기의 경우 파라미터 오차가 50% 이상이면 불안정한 현상을 보였으며, 그림 4의 (b)는 파라미터 오차가 48%일 경우의 시뮬레이션 결과이며 각속도는 매우 큰 떨림 현상을 보이고 있음을 알 수 있다.

2.4 마찰토크 및 외부외란 토크에 대한 안정화 성능분석

마찰토크 뿐만 아니라 외부외란 토크에 대한 성능을 알아보기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10과 같이 외부외란토크는 1.5Nm 크기의 구형파가 0.5초주기로 정(+)의 값 및 부(-)의 값으로 교대로 인가되고 있는 것으로 하였다. 마찰토크 뿐만 아니라 외부외란 토크 시에도 설계된 제어기는 안정화 성능을 만족함을 알 수 있다.

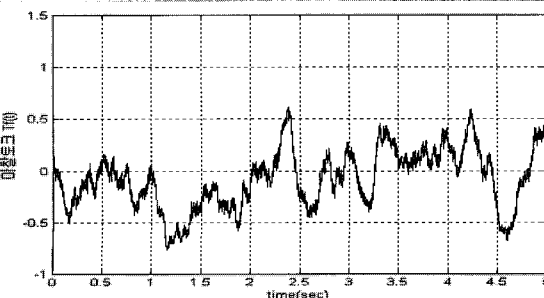
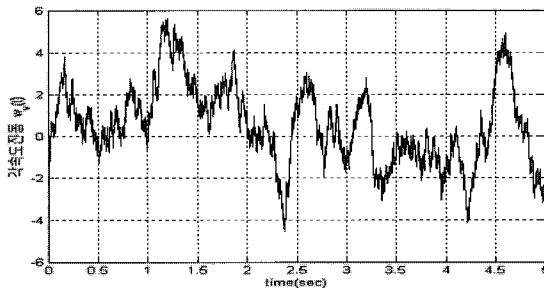
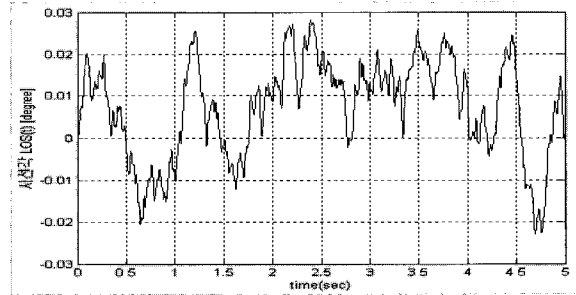
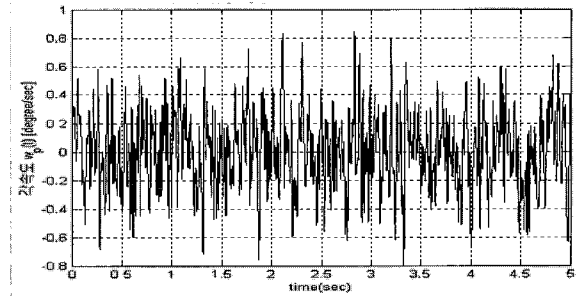
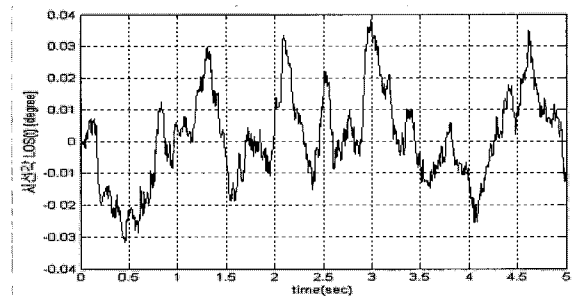
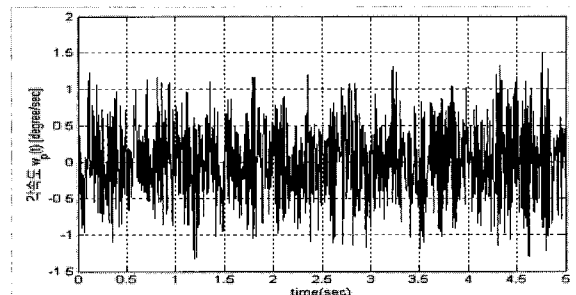


그림 7. 김벌 시스템의 각속도 진동 및 마찰토크 신호.  
Fig. 7. Friction torque and vehicle vibration of gimbal system.

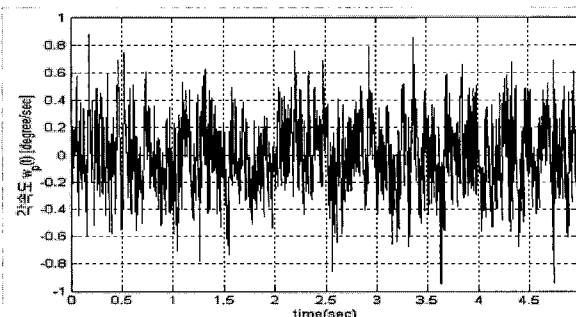


(a) Delayed fuzzy  $H_{\infty}$  controller

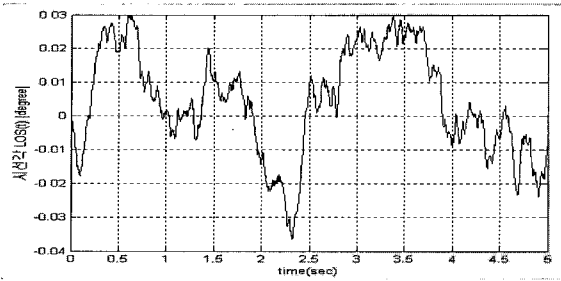


(b) Fuzzy  $H_{\infty}$  controller

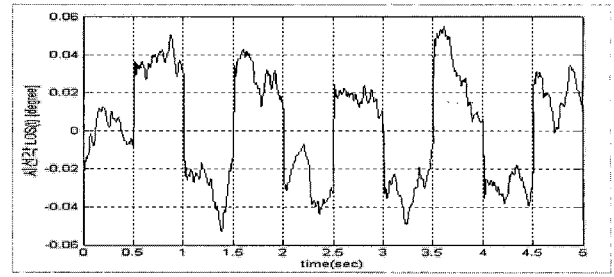
그림 8. 시간지연 시스템의 시뮬레이션 결과.  
Fig. 8. The simulation results of delayed system.



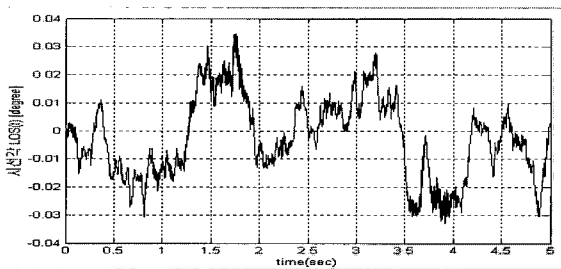
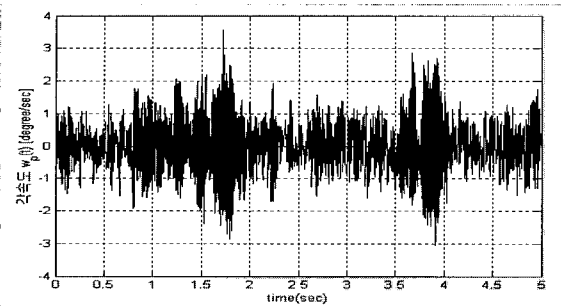




(a) Delayed fuzzy  $H_{\infty}$  controller(error of  $J=0.8\%$ ,  $B=0.8\%$ )



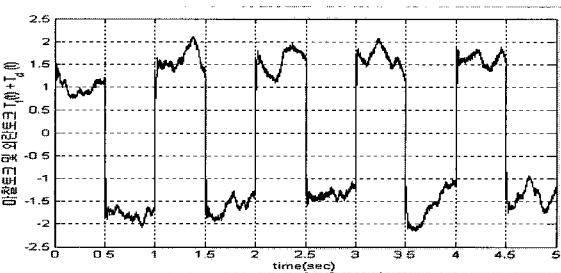
(b) Delay fuzzy  $H_{\infty}$  controller



(b) Delayed fuzzy  $H_{\infty}$  controller(error of  $J=0.8\%$ ,  $B=0.8\%$ )

그림 9. 파라미터 불확실성을 갖는 시간지연 시스템의 시뮬레이션 결과.

Fig. 9. The simulation results of delayed system with parameter uncertainty.



(a) Friction torque and disturbance torque

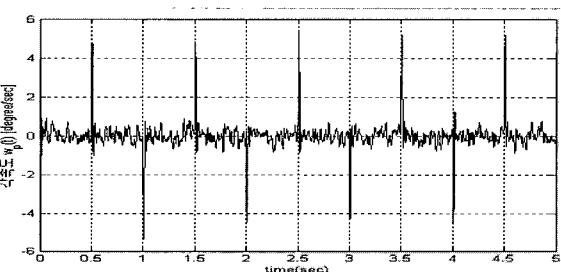


그림 10. 마찰토크 및 외부외란토크에 대한 시간지연 시스템의 시뮬레이션 결과.

Fig. 10. The simulation results of delayed system via disturbance torque.

V. 결론

레이더 감별 안정화 제어기는 레이더가 탑재되는 항공기로부터 유입되는 외란의 영향을 받음에도 불구하고 안테나의 시선을 지정된 방향으로 향하게 하는 안정화 기능을 수행해야한다. 레이더 감별 안정화 시스템의 주요 외란 원인은 헬기 로터의 진동으로 인한 마찰토크 및 외부바람 등으로 인한 외부토크이다.

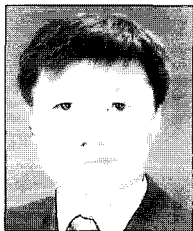
본 연구에서는 항공기용 레이더 감별 안정화 시스템의 안정화 제어성능을 개선하기 위하여 시스템에 존재하는 파라미터 불확실성과 시간지연, 그리고 마찰토크의 비선형성을 고려한 제어기 설계 방법을 제시하였다. 마찰토크의 비선형성을 고려하기 위하여 대상 모델을 시간지연과 파라미터 불확실성을 갖는 다중 선형모델의 퍼지 함수로 결합한 비선형 퍼지 모델로 나타내었다. 비선형 퍼지 모델에 대해 안정성과  $H_{\infty}$  성능을 보장하는 지연 종속적인 퍼지  $H_{\infty}$  제어기 설계방법을 제시하고, 이를 이용하여 레이더 감별 안정화 시스템에 대한 퍼지 제어기를 설계하였다. 설계한 제어기는 외란에 대한 감쇄효과를 갖는  $H_{\infty}$  성능과 안정성을 만족하는 제어기이다. 설계된 제어기의 성능분석을 위하여 시간지연 및 파라미터 불확실성이 존재하는 감별 시스템에 대하여 마찰토크 및 외부 외란토크에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 성능을 비교 분석하여 설계된 제어기의 성능을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. M. Hilker and D. A. Hullender, "Adaptive control system techniques applied to inertial stabilization systems," *Proc. SPIE 1304*, pp. 190-206,1990.
- [2] C. D. Walrath, "Adaptive bearing friction compensation based on recent knowledge of dynamic friction," *Automatica*, vol. 20, pp. 717-727, Nov. 1984.
- [3] B. Friedland and Y. J. Park, "On adaptive friction compensation," *IEEE Transaction On Automatic Control*, vol. 37, no. 10, pp. 1609-16125, Oct. 1992.
- [4] W. Li and X. Cheng, "Adaptive high precision control of positioning tables theory and experiments," *IEEE*

*Transaction On Control Systems Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 265-270, Sept. 1994.

- [5] J. O. Jang, B. G. Jeon and G. J. Jeon, "Neuro controller design for the line of sight stabilization system containing nonlinear friction," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 139-148, April, 1997.
- [6] W. Y. Koh, S. W. Hwang, Y. S. Ha and G. G. Jin, "Stabilization and tracking algorithms of a shipboard satellite antenna system," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 67-73, Jan. 2002.
- [7] Y. Y. Cao and P. M. Frank, "Analysis and synthesis of nonlinear time-delay systems via fuzzy control approach," *IEEE Trans Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 200-211, April. 2000.
- [8] K. R. Lee, J. H. Kim, E. T. Jeung and H. B. Park, "Output feedback robust  $H_\infty$  control of uncertain fuzzy dynamic systems with time-varying delay," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 6, pp. 657-664, Decem. 2000.
- [9] E. T. Jeung, D. C. Oh and H. B. Park, "Delay-dependent control for time-delayed fuzzy systems using description representation," *Int. J. of Control. Automation, and Systems*", vol. 2, no. 2, pp. 182-188, June. 2004.
- [10] K. R. Lee, "Delay-dependent  $H_\infty$  filter design for delayed fuzzy dynamic systems," *Journal of control, automation, and systems engineering of korea*, vol. 10, no. 7, pp. 618-624, July. 2004.
- [11] X. Li and C. E. de Souza, "Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems : a linear matrix inequality approach," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 42, no. 8, pp. 1144-1148, August. 1997.
- [12] Y. S. Moon, P. Park, W. H. Kwon and Y. S. Lee, "Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems," *Int. J. Control.*, vol. 74, no. 14, pp. 1447-1455, 2001.
- [13] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [14] J. Hale. *Theory of Functional Differential Equations*. NewYork: Springer-Verlag, 1997.
- [15] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM, 1994.
- [16] P. Gahinet, A. Nemirovski, A. J. Laub, and Ghilali, *LMI Control Toolbox For Use with MTLAB*, The Math Works Inc., 1995.



이 갑 래

1964년 11월 22일생. 1987년 경북대학교 전자공학과 학사. 1990년 경북대학교 전자공학과 석사. 1999년 경북대학교 전자공학과 박사. 1990년~1995년 국방과학연구소 연구원. 1997년~2001년 두원공과대학 조교수. 2001년~현재

평택대학교 정보통신학과 조교수. 관심분야는 지능제어, 필드버스 네트워크, 임베디드 시스템 등임.



김 태 식

1966년 5월 26일생. 1989년 경북대학교 전자공학과 학사. 1991년 경북대학교 전자공학과 석사. 2005년 현재 충남대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 1991년~2001년 국방과학연구소 연구원. 2001년~현재 한국항공우주연구원 선임연구원. 관심분야는 데이터링크, 레이더시스템 등임.

원 선임연구원. 관심분야는 데이터링크, 레이더시스템 등임.



이 해 창

1961년 9월 21일생. 1988년 인하대학교 항공공학과 학사. 1990년 인하대학교 항공공학과 석사. 2002년 인하대학교 항공공학과 박사. 1990년~현재 한국항공우주연구원 책임연구원. 관심분야는 비행제어, 항공전자시스템 등임.