

6 자유도를 갖는 능동 자기베어링 시스템의 강인 퍼지 제어기

Robust Fuzzy Controller for Active Magnetic Bearing System with 6-DOF

성화창* · 박진배* · 주영훈**†

Hwa Chang Sung, Jin Bae Park and Young Hoon Joo[†]

*연세대학교 전기전자공학과

**군산대학교 제어로봇공학과

요 약

본 논문에서는 6 방향 자유도를 지닌 능동 자기베어링 시스템의 강인 디지털 퍼지 제어에 대한 내용을 다루고자 한다. 6방향 자유도에 대한 기본 모델은 회전자 구조와 원뿔형의 능동 자기베어링 시스템의 자기력 간의 상관관계에 의해 결정된다. 구성된 모델은 비선형 동적방정식으로 구성되기 때문에, 제어 목적을 달성하기 위한 제어 입력 신호의 설계가 어려우며, 외부 환경의 영향에 따른 시스템 파라미터 변화율에도 많이 민감한 편이다. 이를 보완하기 위하여, 획득한 동적방정식을 기반으로 TS 퍼지 모델에 기반 한 디지털 제어 목적에 적합한 구조로의 변환이 이루어진다. 여기서 말하는 제어 목적이란, 회전자의 회전을 외부의 물리적 접촉 없이 자기장의 힘만으로 동작하도록 베어링의 위치를 최대한 센터에 위치케 하는 것을 말한다. 본 논문에서는 6자유도를 지닌 능동 자기베어링 시스템의 비선형성에 대한 해석 방안으로 퍼지 모델링을 통해 시스템을 재해석하게 되며, 외부 파라미터 변화에 따른 대응을 위하여 강인 제어기 설계를 목적으로 한다. 제안된 강인 제어 알고리즘은 시뮬레이션 과정을 통해 검증된다.

키워드 : 능동 자기베어링 시스템, 6 자유도, 비선형성, 선형행렬부등식, TS 퍼지 모델, 강인 안정성.

Abstract

This paper propose the implementation of robust fuzzy controller for controlling an active magnetic bearing (AMB) system with 6 degree of freedom (DOF). A basic model with 6 DOF rotor dynamics and electromagnetic force equations for conical magnetic bearings is proposed. The developed model has severe nonlinearity and uncertainty so that it is not easy to obtain the control objective. For solving this problem, we use the Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model which is suitable for designing fuzzy controller. The control object in the AMB system enables the rotor to rotate without any physical contact by using magnetic force. In this paper, we analyze the nonlinearity of the active magnetic bearing system by using fuzzy control algorithm and desing the robust control algorithm for solving the parameter variation. Simulation results for AMB are demonstrated to visualize the feasibility of the proposed method.

Key Words : Active magentic bearing (AMB) system, 6 degree of freedom (DOF), nonlinearity, linear matrix inequality (LMI), Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model, robust stability.

1. 서 론

자기베어링 시스템은 동작 방식에 따라 크게 수동형 (passive)과 능동형 (active)으로 구분될 수 있으며, 실제 산업현장에서 많이 이용되고 있는 방식은 후자이다.

접수일자: 2011년 11월 19일

심사(수정)일자: 2012년 6월 11일

게재확정일자 : 2012년 6월 11일

† 교신 저자

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2009-220-D00034)

일반적인 능동형 자기베어링 (AMB)의 경우 릴럭턴스 힘을 이용하여 동작하며, 투자성이 다른 재료에 수직으로 작용하는 전자기력을 이용하게 된다. 이 경우, 투자율이 다른 두 매질을 통하여 자속이 흐를 때, 그 표면에 수직인 방향으로 힘이 발생하게 되며, 투자율의 차이가 클수록 릴럭턴스 힘도 증가하게 된다. 릴럭턴스 힘은 항상 인력으로 작용하여 음의 강성을 유발하기 때문에 귀환제어가 필수적이다. 이와 같은 현상은 능동형에만 해당되며, 수동형에는 해당되지 않는다.

기본적으로 수직인 방향으로 발생하는 힘과 회전자에 미치는 자기력에 대한 분석을 토대로 하여 AMB 시스템의 여러 동적방정식이 구성될 수 있는데, 기본적으로 회전자의 움직임 방향에 따라 3방향과 6방향으로 구분

될 수 있다. 후자의 경우 전자에 비해 AMB 시스템에 대한 세부적인 움직임 분석이 가능하지만, 시스템적으로 구성될 경우 기본 상태변수가 6개가 존재하고, 입/출력 역시 다중으로 구성되기 때문에 제어에 있어 어려움이 있다는 단점을 지니고 있다. 특히, AMB의 경우 회전체가 고속으로 회전하는데 있어 자이로효과에 의한 직교 제어 축 간의 자기력 간섭현상으로 인해 제어 축 간의 연성이 증가하게 되며, 이는 시스템 불안정성(unstability)으로 이어진다. 이를 해결하기 위해 여러 제어 알고리즘이 적용되고 있으며, 뉴턴-네트워크 접근 [1], 퍼지 모델 제어 접근 [2], 강인 H_∞ 접근 [3], 선형 모델로의 해석 [5], 슬라이딩 모드 해석 [6] 등이 제안되었다. 그러나 AMB를 제어하기 위한 해당 제어 기법들은 대부분 3방향 자유도 혹은 그 이하의 자유도에서 해석된 것이기 때문에 모델 정확도에 있어 떨어지는 것이 현실이다. 논문 [7]의 경우 6방향 자유도를 지닌 AMB에 대해 타카키-수게노 (T-S) 퍼지 모델을 기반으로 한 제어 모델 설계를 수행 하였으며, 선형행렬부등식 (Linear matrix inequality: LMI)을 기반으로 한 제어 입력 설계 방안을 제안하였다. 그러나 해당 논문에서는 AMB 시스템에서 중요한 이슈 중 하나인 파라미터 변동에 대한 언급을 하지 않았다는 한계를 지니고 있으며, 제어 설계 기법 또한 일반 동적방정식 기반으로 하여 구성되었다는 한계가 있다.

본 논문에서는 앞서 살펴본 내용을 바탕으로 하여, AMB 시스템의 강인 퍼지 제어 방안에 대한 분석을 목적으로 한다. AMB 시스템을 표현하는 동적 방정식의 각 파라미터들은 비선형성을 지닌 구조체로 나타내어지며, 본 논문에서는 이를 T-S 퍼지 모델로 해석된 후, 부분적 선형 모델로 변환하는 과정을 수행하게 된다. 이를 통해 AMB 시스템은 퍼지 제어기 설계에 적합한 형태로 변환되며, 주어진 T-S 퍼지 모델 기반 AMB 시스템은 리아푸노프 (Lyapunov) 안정도 분석에 의거한 해석을 수행하게 된다. 또한, 강인 안정도 증명을 위해 시스템 파라미터의 변환 범위를 주게 되며, 전체 제어 알고리즘과 연관된 식은 LMI 형태로 표현된다. 실제 모델에 기반 한 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하게 된다.

2. 능동 자기베어링 시스템 구성 및 강인 퍼지 모델링

서론에서 언급했듯이, AMB 시스템은 인력으로 작용한 리덕턴스에 대한 힘을 통해 동작하게 된다. 능동형 자기베어링은 동작 유무에 있어 수동형에 비해 우위를 점하고 있으나 시스템의 복잡성이 수동형에 비해 심각하게 드러난다. 특히, 일반 논문에서 분석된 3 자유도를 지는 AMB 시스템과는 달리 본 논문에서 분석하게 될 6 자유도 기반 AMB 시스템의 경우 동적 방정식 구성이 훨씬 복잡하기 때문에 이를 제어 접근을 통해 해결해야 한다. 그림 1에서 나타난 것이 6 자유도 기반 능동 자기 베어링 시스템의 움직임이며, 그림 2는 각 방향에 따라 작용하는 자기력 및 그에 따른 외란을 표현한 것이다 [7]. 해당 모델을 기반으로 하여 동적 방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + f_g = Q \quad (1)$$

여기서 '0'은 자기력이 없다는 것을 의미하며, M 은 6개의 변수를 지닌 대칭 양한정 관성 행렬, F_g 는 중력 토크에 대한 벡터로 $F_g = [f_{g1}, \dots, f_{g6}]^T$ 이며, Q 는 일반 토크를 나타내는 행렬로 $Q = [Q_{x0}, Q_{y0}, Q_{z0}, Q_{\psi}, Q_{\theta}, Q_{\phi}]^T$ 이다. 여기서 Q 행렬이 가지는 6개의 파라미터가 각각의 자유도를

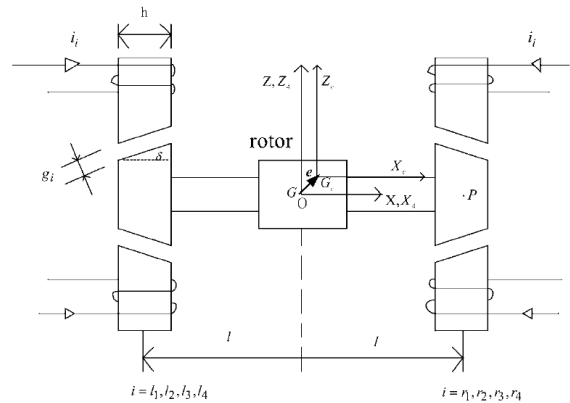


그림 1. 6 자유도 기반 능동형 자기 베어링
Fig 1. Active magnetic bearing system with 6 degree of freedom

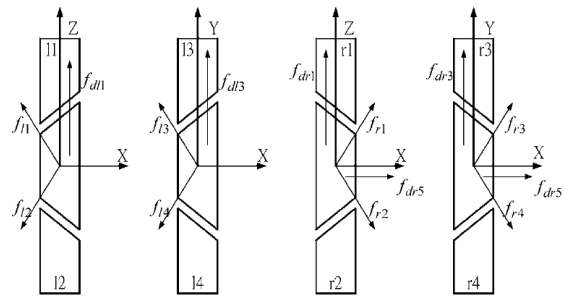


그림 2. 자기력 및 외란
Fig 2. Magnetic and disturbance forces

의미하게 되며, 각 상태 변수를 다음과 같은 식으로 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0, x_2 = y_0, x_3 = z_0, x_4 = \psi, x_5 = \theta, x_6 = \phi \\ x_7 &= \dot{x}_0, x_8 = \dot{y}_0, x_9 = \dot{z}_0, x_{10} = \dot{\psi}, x_{11} = \dot{\theta}, x_{12} = \dot{\phi} \end{aligned}$$

구해진 식과 상태변수를 기반으로 하여 아래와 같은 4개의 규칙을 가진 퍼지 모델을 구성할 수 있다 [7].

$$\begin{aligned} R^i: & \text{IF } z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } z_2(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ \text{THEN } & \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $A_i = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \\ 0_{6 \times 6} & A_{i,22} \end{bmatrix}$, $i = 1, 2, 3, 4$,

그리고 $A_{i,22} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A'_{i,22} \end{bmatrix}$, $i = 1, 2, 3, 4$,

$$\begin{aligned} A'_{1,22} &= \begin{bmatrix} 0 & -I_r \omega_{\max} & 0 \\ I_r \omega_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & I_r \beta_{\max} & 0 \end{bmatrix}, \\ A'_{2,22} &= \begin{bmatrix} 0 & -I_r \omega_{\max} & 0 \\ I_r \omega_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & I_r \beta_{\min} & 0 \end{bmatrix}, \\ A'_{3,22} &= \begin{bmatrix} 0 & -I_r \omega_{\min} & 0 \\ I_r \omega_{\min} & 0 & 0 \\ 0 & I_r \beta_{\max} & 0 \end{bmatrix}, \\ A'_{4,22} &= \begin{bmatrix} 0 & -I_r \omega_{\min} & 0 \\ I_r \omega_{\min} & 0 & 0 \\ 0 & I_r \beta_{\min} & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

입력 벡터 B 의 경우 다음과 같이 구성된다.

$$B_1 = [0_{9 \times 6}, B_2^T]^T, \\ B_2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} & b_{18} & 0 \\ 0 & 0 & b_{23} & b_{24} & 0 & 0 & b_{27} & b_{28} & 0 \\ b_{31} & b_{32} & 0 & 0 & b_{35} & b_{36} & 0 & 0 & 0 \\ b_{41} & b_{42} & 0 & 0 & b_{45} & b_{46} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{53} & b_{54} & 0 & 0 & b_{57} & b_{58} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{69} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} b_{1j} &= \sin \delta / M_c, \quad j = 1, 2, 3, 4; \quad b_{1j} = -\sin \delta / M_c, \quad j = 5, 6, 7, 8, \\ b_{2j} &= \cos \delta / M_c, \quad j = 3, 7; \quad b_{2j} = -\cos \delta / M_c, \quad j = 4, 8, \\ b_{3j} &= \cos \delta / M_c, \quad j = 1, 5; \quad b_{3j} = -\cos \delta / M_c, \quad j = 2, 6, \\ b_{4j} &= -l \cos \delta / I_d, \quad j = 1, 6; \quad b_{4j} = l \cos \delta / I_d, \quad j = 2, 5, \\ b_{5j} &= l \cos \delta / I_d, \quad j = 3, 8; \quad b_{5j} = -l \cos \delta / I_d, \quad j = 4, 7, \\ b_{69} &= 1 / I_{crr}. \end{aligned}$$

구성된 T-S 퍼지 모델 기반 AMB 시스템의 경우 총 12개의 상태변수를 지니고 있다. 그러나 서론에서 언급했듯이, AMB 시스템이 가지고 있는 파라미터들은 외란에 취약한 형태를 지니고 있기 때문에 이를 보정하기 위한 제어기 설계가 필요하며, 자세한 내용은 다음장에서 소개될 예정이다. 본격적인 내용 전개에 앞서, 강인 제어기 설계를 위한 파라미터 변동에 관한 가정을 다음과 같이 나타낸다.

가정 1 : 식 (6)의 불확실성을 나타내는 두 행렬 ΔA_i 와 ΔB_i 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$[\Delta A_i \quad \Delta B_i] = D_i F_i(t) [E_{1i} \quad E_{2i}]$$

여기서 D_i , E_{1i} 와 E_{2i} 는 이미 알고 있는 실수 행렬이며, $F_i(t)$ 는 모르는 행렬로 $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 와 같은 특성을 지니고 있다.

본 논문에서 다루게 되는 불확실성은 AMB 시스템이 가지고 있는 A 에서 I_r 파라미터이며, 각각 10% 만큼의 variation을 두고 시스템을 설계하게 된다.

3. 강인 퍼지 제어기 설계

일반적인 비선형 시스템은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (3)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 상태 벡터를 $u(t) \in R^m$ 는 입력 벡터를 의미한다. 위의 식 (4)는 다음의 퍼지 모델 식으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} R^i: & \text{IF } z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and ... and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ \text{THEN } & \dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) \quad (4) \end{aligned}$$

여기서 R^i 는 i 번째 퍼지 규칙을, $z_h(t)$ 는 h 번째 전건부 변수를 의미하며, A_i 는 상태 벡터, B_i 적절한 크기를 지닌 입력 벡터이며, ΔA_i 와 ΔB_i 는 시스템에 포함된 파라미터 불확실성을 의미한다. 그리고 Γ_h^i , i 번째 규칙에서 h 번째 전건부 변수의 퍼지 집합이다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 식 (4)는 다음과 같은 전역 동특성 식으로 나타내게 된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) ((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t)) \quad (5)$$

여기서 ,

$$\omega_i(z(t)) = \prod_{h=1}^n \Gamma_h^i(z_h(t)), \quad \mu_i(z(t)) = \frac{\omega_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))}$$

시스템의 강인 제어를 위해 다음과 같은 퍼지 제어기가 제안된다.

$$\begin{aligned} R^i: & \text{IF } z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and ... and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ \text{THEN } & u(t) = K_i x(t). \quad (6) \end{aligned}$$

여기서 비퍼지화 출력 값은 다음과 같다.

$$u(t) = - \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) K_i x(t). \quad (7)$$

제어기 (7)은 병렬 분산 제어기 (parallel distributed control: PDC) 형태이며, 불확실 파라미터 ΔA_i 와 ΔB_i 는 다음의 가정 1을 통해 재구성 된다. 본 논문에서는 각 변수에 해당하는 파라미터에 특정 변화값을 줌으로써 전체 시스템이 가지고 있는 불확실성을 표현하게 되며, 이를 해결하기 위해 (7)과 같은 제어기를 설계하게 된 것이다. 식의 원활한 정리를 위해 다음 보조정리를 고려하자.

보조정리 1 [4]: 어떤 적절한 공간을 지닌 실수 행렬

$A_1 = A_1^T$, A_2 , $A_3(t)$, 그리고 A_4 에서 다음의 부등식을 가정하자.

$$A_1 + A_2 A_3(t) A_4 + A_4^T A_3(t) A_2^T < 0$$

여기서 $A_3(t)$ 는 $A_3(t)^T A_3(t) \leq I$ 를 만족할 때, 어떤 $\varepsilon > 0$ 에 대해 필요충분 조건으로 다음을 만족한다.

$$A_1 + [\varepsilon^{-1} A_4 \quad \varepsilon A_2] \begin{bmatrix} \varepsilon^{-1} A_4 \\ \varepsilon A_2^T \end{bmatrix} < 0$$

앞서 살펴본 내용을 바탕으로 하여, 우리는 다음과 같은 정리를 이끌어 낼 수 있다.

정리 1: 행렬 $Q = Q^T > 0$, M_i 그리고 상수 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 에 대해 다음의 선형 행렬 부등식이 만족한다면, 전체 구성된 식은 점진적으로 안정하다.

$$\begin{bmatrix} -4Q + \chi_{ij} & * & * & * \\ G_i Q + H_i M_j & \sigma_{ij} \rho_{ij} - Q & * & * \\ + G_j Q + H_j M_i & 0 & -\sigma_{ij} I & * \\ \epsilon_{1i} Q + \epsilon_{2i} M_j & 0 & 0 & -\sigma_{ij} I \\ \epsilon_{1j} Q + \epsilon_{2j} M_i & 0 & 0 & -\sigma_{ij} I \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

위 식 (8)에서, $\theta_{ij} = \hat{\delta}_{ij} \hat{\delta}_{ij}^T + \delta_i \delta_i^T$, $\rho_{ij} = \delta_i \delta_i^T + \delta_j \delta_j^T$ 이며 주어진 LMI가 만족한다면, 원점에 대해 안정하게 된다. 또한, 퍼지 제어 이득 값은 $K_d^i = M_i Q^{-1}$ 로 표현된다.

증명: 우선, 시스템의 안정도에 대해 검토하게 된다. 다음과 같은 리아푸노프 (Lyapunov) 식을 고려해보자.

$$V(x_d(t)) = x_d^T(t) P x_d(t) \quad (9)$$

여기서 P 는 양한정 행렬이다. 보조 정리 1에 의하여 $V(x_d(t))$ 의 시간에 대한 미분 함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_d(t)) = & \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \mu_i(z(kT)) \mu_j(z(kT)) (G_i + H_i K_d^j + G_j \\ & + H_j K_d^i + \Delta G_i + \Delta H_i K_d^j + \Delta G_j + \Delta H_j K_d^i)^T P \\ & (G_i + H_i K_d^j + G_j + H_j K_d^i + \Delta G_i + \Delta H_i K_d^j + \\ & + \Delta G_j + \Delta H_j K_d^i) - 4P + P \chi_{ij} P < 0 \end{aligned}$$

위의 식은 Schur complement에 의해 다음과 같은 행렬 부등식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} -4Q + P \chi_{ij} P & * \\ G_i Q + H_i K_d^j + G_j + H_j K_d^i & -P^{-1} \\ + \Delta G_i Q + \Delta H_i K_d^j + \Delta G_j + \Delta H_j K_d^i & \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

식 (10)과 보조정리 1을 이용하면 LMI (8)을 구해낼 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

2장에서 구성한 6자유도 능동형 자기베어링 시스템의 퍼지 모델에 3장에서 제안된 강인 디지털 퍼지 제어기 설계 기법을 적용하여 이번 장에서는 해당 시스템의 안정도 결과를 나타내보고자 한다. 10% 불확실성에 대한 강인 안정도 해석을 위해 비선형 행렬을 다음과 같이 정의하게 된다.

$$D_{i,22} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & D'_{i,22} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

$$D'_{i,22} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$E_{i,22} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E'_{i,22} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad E'_{i,22} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b \end{bmatrix},$$

$$E_{2i} = [0]_{12 \times 1}$$

행렬식을 구성하는 각 파라미터 값은 다음과 같이 정의 된다.

$$l = 0.27m, \quad Mc = 10.2667kg, \quad I_d = 0.333kg - m^2, \\ d = 5.5 * 10^{-4}m, \quad I_{cxx} = 0.0113kg - m^2, \quad I_r = I_{cxx} / I_d$$

그리고 수행된 퍼지 모델링에 대한 파라미터 값은 다음과 같이 나타낸다 [7].

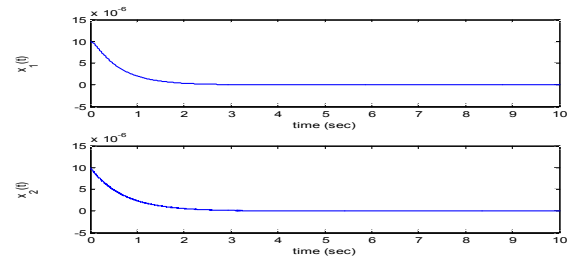


그림 3. 6 자유도 능동 자기베어링 x_1, x_2 궤적.
Fig. 3 Trajectory of x_1 and x_2 in 6 DOF active magnetic bearing.

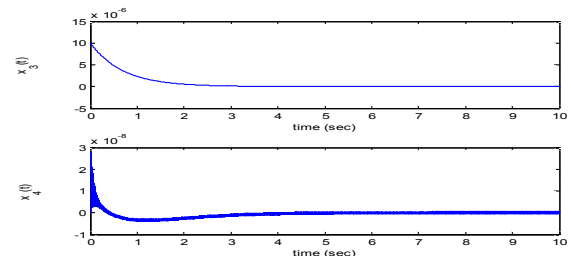


그림 4. 6 자유도 능동 자기베어링 x_3, x_4 궤적.
Fig. 4 Trajectory of x_3 and x_4 in 6 DOF active magnetic bearing.

$$K_1 = \begin{bmatrix} -48935 & 23 & -5620 & 35929 & -2503 & 134 & -33211 & 12 & -3940 & 25221 & -854 & 98 \\ -48939 & 32 & -4540 & 44080 & -3744 & 198 & -33214 & 18 & -3185 & 30918 & -1404 & 122 \\ -48938 & 14064 & -47 & 895 & 2371 & -195 & -33213 & 9870 & -25 & 503 & 1754 & -58 \\ -48926 & 20703 & -47 & 5400 & -52023 & 3813 & -33205 & 14519 & -25 & 2188 & -36411 & 942 \\ 48934 & -20 & -3356 & -16034 & 1169 & -32 & 33210 & -10 & -2347 & -11304 & 400 & -25 \\ 48937 & -32 & -4221 & -7951 & 961 & -65 & 33212 & -18 & -2955 & -5626 & 410 & -35 \\ 48928 & -1112 & -13 & -832 & 9747 & -658 & 33206 & -772 & -7 & -324 & 6799 & -139 \\ 48940 & -7536 & -10 & 4711 & -44766 & 3223 & 33215 & -5275 & -5 & 1912 & -31417 & 770 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -5 & 1 & 0 & 0 & 1 & -3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -52573 & 23 & -14640 & -914 & 1783 & -73 & -34613 & 11 & -10345 & -484 & 957 & 3 \\ -52592 & 28 & -12843 & 13163 & -127 & 43 & -34625 & 15 & -9091 & 9361 & 108 & 55 \\ -52575 & -11765 & -114 & 6170 & -19508 & 1363 & -34614 & -8219 & -57 & 3023 & -13612 & 323 \\ -52588 & -12859 & -101 & 4769 & -9367 & 632 & -34623 & -8990 & -47 & 2418 & -6515 & 146 \\ 52584 & -156 & 9885 & -85743 & 10878 & -558 & 34620 & -83 & 6824 & -60065 & 4649 & -231 \\ 52577 & -162 & -8319 & -71734 & 10026 & -536 & 34615 & -87 & 5722 & -50238 & 4367 & -210 \\ 52586 & 7219 & -227 & 1621 & 12761 & -857 & 34622 & 5051 & -122 & 1028 & 9314 & -178 \\ 52578 & 8545 & -240 & 1284 & 22780 & -1700 & 34616 & 5974 & -131 & 991 & 16359 & -435 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} -52584 & 589 & -642 & -19310 & 3397 & 134 & -34620 & 354 & -428 & -12647 & 1604 & 138 \\ -52587 & 503 & -2040 & -31907 & 4058 & 201 & -34622 & 293 & -1412 & -21487 & 1702 & 175 \\ -52580 & 667 & 151 & 9323 & 41209 & -2978 & -34617 & 241 & 129 & 5219 & 28329 & -684 \\ -52581 & 2532 & 425 & 11728 & 26542 & -1958 & -34618 & 1543 & 321 & 6485 & 18072 & -455 \\ 52583 & 1670 & 6897 & 12818 & 8757 & -588 & 34620 & 935 & 4780 & 8091 & 4875 & -79 \\ 52577 & 1243 & 8527 & 186 & 10096 & -854 & 34616 & 636 & 5916 & -755 & 5455 & -252 \\ 52584 & 7607 & -1100 & 3034 & -7401 & 726 & 34620 & 5280 & -672 & 1403 & -4645 & 240 \\ 52578 & 5973 & -861 & 6118 & -22157 & 1712 & 34616 & 4130 & -505 & 3148 & -14943 & 444 \\ 0 & 1 & 0 & 10 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 7 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_4 = \begin{bmatrix} -52584 & 402 & -1312 & -38812 & 2016 & -8 & -34620 & 270 & -965 & -26161 & 494 & -50 \\ -52586 & 402 & -1074 & -37696 & 732 & 247 & -34621 & 271 & -803 & -25413 & -381 & 89 \\ -52579 & -3870 & -65 & 16607 & 25701 & -1961 & -34617 & -2789 & 38 & 9194 & 17323 & -449 \\ -52579 & 1344 & -167 & 18429 & -16600 & 633 & -34617 & 859 & -33 & 9251 & -12405 & 191 \\ 52585 & 1719 & 4767 & -11640 & 15428 & -636 & 34621 & 866 & 3345 & -9228 & 7981 & 66 \\ 52581 & 1889 & 4761 & -10740 & 16810 & -1591 & 31618 & 985 & 3336 & -8556 & 8986 & -555 \\ 52579 & -765 & -553 & 3398 & 11843 & -974 & 34617 & -287 & -354 & 2067 & 9921 & -293 \\ 52580 & -5748 & -622 & 7876 & -30732 & 2205 & 34617 & -3783 & -403 & 3988 & -19922 & 521 \\ 0 & 0 & 3 & 34 & 5 & 1 & 0 & 0 & 2 & 24 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

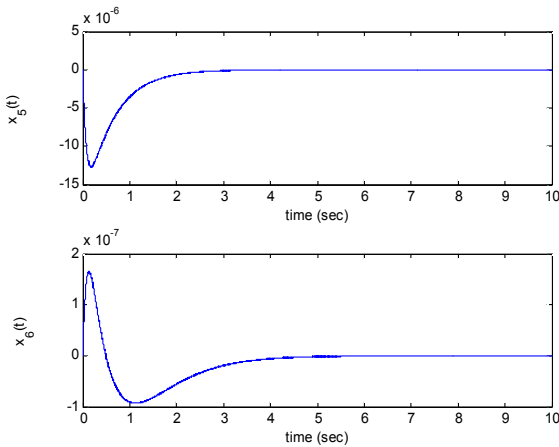


그림 5. 6 자유도 능동 자기베어링 x_5 , x_6 궤적.

Fig. 5 Trajectory of x_5 and x_6 in 6 DOF active magnetic bearing.

$$[\omega_{\min} \ \omega_{\max}] = [-104.72 \ 4188.8](rad/s)$$

$$[\beta_{\min} \ \beta_{\max}] = \left[-\frac{\pi}{100} \ \frac{\pi}{100}\right](rad)$$

정리 1에서 언급된 LMI 식 (8)에 대한 활용을 통해 6 자유도 능동형 자기베어링 시스템에 적용함으로써 우리가 목표로 한 강인 안정도 문제를 해결 할 수 있다. $x_0(t) = [1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-5}, 0_{1 \times 9}]^T$ 로 초기 값을 설정하였으며, 제어 입력 값은 위의 4가지 식과 같다. 얻어진 입력 값들을 통해 시스템의 강인 안정도 결과를 분석하였으며, 자유도에 관계하는 6 변수에 대한 안정도 그래프를 아래와 같이 얻을 수 있었다. 그림 3-5를 통해 볼 수 있듯이, 설계된 제어기는 6자유도 능동형 자기베어링 시스템의 안정도 보장을 위해 정상적으로 작동하였음을 알 수 있다. 이는 시스템을 구성하고 있는 파라미터들의 해석을 T-S 퍼지 모델로 수행함과 동시에 각 값에 대한 변화폭을

10%로 고려한 결과로, 이전과는 다른 비선형성이 고려된 강인 안정도 해석이라는 점을 주목할 필요가 있다.

5. 결론

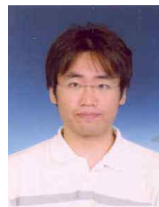
본 논문에서는 6 자유도를 지닌 능동형 자기베어링의 시스템 해석 및 강인 안정도 분석에 대해 다루어 보았다. 비선형적 구조를 가지고 있는 자기베어링 시스템을 해석하기 위해 T-S 퍼지 모델링 기법을 적용하였으며, 시스템의 강인 안정도 해석 방안을 LMI 형태로 나타내었다. 6 자유도 능동형 자기베어링 시스템을 구성하고 있는 파라미터에 외부 불확실성으로 인한 변화를 고려해 10% 만큼의 변화율을 주어 시스템을 재구성하였으며, 설계된 퍼지 모델에 적합한 제어기를 접목을 통해 시스템의 안정도를 증명해 보았다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하였다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Hong, H. Zhu, Q. Wu, J. Chen, and D. Zhu, "Dynamic decoupling control of AC-DC hybrid magnetic bearing based on neural network inverse method," *Electrical Machine and Systems on ICEMS*, pp. 3940-3944, 2008.
- [2] H. C. Sung, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Robust switching-type fuzzy control for active magnetic bearing system," *Proc. the IASTED International Conference. Intelligent Systems and Control (ISC2011)*, Cambridge, United Kingdom, July 11-13, 2011.
- [3] D. H. Lee, J. B. Park, Y. H. Joo, K. C. Lin, and C. H. Ham, "Robust H_{∞} control uncertain nonlinear active magnetic bearing system via Takagi-Sugeno fuzzy models," *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, pp. 636-646, 2010.
- [4] H. C. Sung, D. W. Kim, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Robust digital control of fuzzy systems with parametric uncertainties," *Fuzzy Set & System*, vol. 161, pp. 919-933, 2010.
- [5] L. C. Lin and T. B. Gau, "Feedback linearization and fuzzy control for conical magnetic bearings," *IEEE Trans. Control Systems Tech.*, vol. 5, no. 4, pp. 417-426, 1997.
- [6] R. D. Smith and W. F. Weldon, "Nonlinear control of a rigid rotor magnetic bearing system: modeling and simulation with full state feedback," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, pp. 973-980, 1995.
- [7] S. J. Huang and L. C. Lim, "Fuzzy modeling and control for conical magnetic bearings using linear

matrix inequality," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 37, pp. 209-232, 2003.

저 자 소 개



성화창(Hwa Chang Sung)

2005년 8월 : 연세대학교 공학사
 2007년 2월 : 연세대학교 공학석사
 2012년 2월 : 연세대학교 공학박사
 현재 : 연세대학교 BK21 박사 후 연구원

관심분야 : 제어 이론, 지능제어, 퍼지 제어
 Phone : 02-2123-2773
 Fax : 02-362-4539
 E-mail : casfirspear@yonsei.ac.kr



박진배(Jin Bae Park)

1977년 : 연세대학교 전기공학과 공학사
 1985년~1990년 : Kansas State University
 전기 및 컴퓨터 공학과
 졸업 공학박사
 1990년~1991년 : Kansas State University
 전기 및 컴퓨터 공학과
 조교수

2012년 1월 ~ 현재 : 제어로봇시스템학회 차기회장
 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

관심분야 : 제어 이론, 지능제어, 로봇틱스, 신재생에너지
 Phone : 02-2123-2773
 E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr



주영훈(Young Hoon Joo)

1982년 : 연세대학교 전기공학과 졸업
 1984년 : 연세대학교 대학원 전기공학과
 졸업
 1995년 : 동대학원 전기공학과 졸업 박사
 1986년~1995년 8월 : 삼성전자(주) 생산기술
 센터 자동화연구소
 책임연구원

2009년 : 한국지능시스템학회 회장
 2011년 1월~현재 : 대한전기학회 정보제어부문 부회장
 1995년 9월~현재 : 군산대 공대 제어로봇공학과 교수

관심분야 : 퍼지 모델링, 유전자 알고리즘, 퍼지 웨이블릿
 시스템, TS 퍼지 시스템, 지능형 디지털 재설계
 Phone : 063-469-4706
 E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr