

# 스마트 스페이스 구축을 위한 강인 지능형 디지털 제어기 개발

## Development of Robust Intelligent Digital Controller for Smart Space

주영훈

Young Hoon Joo

군산대학교 전자정보공학부

### 요약

본 논문에서는 강인 디지털 제어기를 통한 스마트 스페이스의 안정도에 대해 논의하고자 한다. 제안된 제어기 설계 방법은 지능형 디지털 재설계 기법을 적용하는 것이다. 좀 더 구체적으로, 불확실성 및 비선형성이 포함된 아날로그 시스템을 Takagi-Sugeno 퍼지 모델을 사용하여 나타낸다. 그리고 전역적 지능형 디지털 재설계를 위하여 해당 문제를 볼록 최적화 관점으로 변환 한 후, 에러가 가질 수 있는 놈의 영역을 최소화 하여 상태 정합을 이루고자 하였다. 전역적 접근을 통해 정리된 식은 선형 행렬 부등식으로 나타나게 된다. 마지막으로, 설계된 제어기를 HVAC (Heating, ventilating, and air conditioning) 시스템에 적용함으로써 효율성을 입증하고자 한다.

### Abstract

In this paper, we concern the stability of smart space by using the robust digital controller. The proposed methodologies are based on the intelligent digital redesign (IDR). More precisely, we represent the nonlinear and uncertain analog system as the Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model. Then the IDR problem can be reduced to find the digital gains minimizing the norm distance between the closed-loop states of the analog and digital control. Its constructive conditions are expressed as the linear matrix inequalities (LMIs). At last, a numerical example, HVAC system, is demonstrated to visualize the feasibility of the proposed methodology.

Key Words : 스마트 스페이스, 지능형 디지털 재설계, 퍼지 모델링, Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지 모델, HVAC 시스템

### 1. 서론

일반적으로 스마트 스페이스 환경은 유/무선 네트워크 기반과 다중 센서 기반으로 구성되어 진다 [1], [12-16]. 제어의 관점에서 볼 때, 각 네트워크 및 센서는 하나의 플랜트로 볼 수 있으며, 이들의 조합으로 구성되는 전체 시스템 역시 하나의 플랜트로 고려될 수 있다. 이런 특성으로 비추어 볼 때, 스마트 스페이스 시스템의 구성 및 제어를 위해서는 많은 수의 제어기가 필요하며, 각 파트별 제어를 담당할 수 있는 제어 알고리즘이 요구된다. 분산 제어 시스템의 경우 peer-to-peer 방식, 네트워크 기반 환경, 다중 센서 및 액츄에이터 기반의 장점을 지니고 있기 때문에 스마트 스페이스의 제어에 적합한 방법이라 할 수 있다 [13]. 그러나 지금까지 연구되어 왔던 분산 제어 시스템은 전력 계통 및 공장 자동화 시스템에 한정되어 왔으며, 아직 [12]를 제외하고는 스마트 스페이스의 제어에 이용되었던 연구 결과물이 없다. 또한, 스마트 스페이스 환경 자체는 네트워크 및 센서 기반, 다

시 말해서 디지털 디바이스 기반으로 구축된 시스템이기 때문에 기존의 아날로그 제어기만을 가지고 제어하는 데에는 큰 한계 점을 지니고 있다. 이를 극복하고자 논문 [1]에서는 지능형 디지털 재설계 (Intelligent Digital Redesign: IDR) 방안을 이용하여 스마트 스페이스 구축하고자 하였다. 그러나 상기 논문에서는 스마트 스페이스를 구성하는 각 파라미터들의 불확실성에 대해서는 아무런 언급을 하지 않았다.

IDR이란, 잘 설계된 아날로그 제어기를 등가의 디지털 제어기로 변환시키는 효과적인 방안으로써 최근에 많은 연구가 이루어졌다 [2-7]. 이는 스마트 스페이스 환경을 비롯한 많은 플랜트의 효율적인 제어를 위하여 값싸고 성능이 우수한 디지털 제어기의 활용이 권장되어져 왔으며, 디지털 제어기 설계 방안이 있어 IDR 방법의 효율성은 이미 입증되어져 왔기 때문에 이루어진 결과이다. 여기서 지능형이라는 말은 비선형 시스템에서의 디지털 제어기 설계 방안을 의미하며, Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델로 명명되는 비선형 제어 기법을 디지털 재설계 기법과 결합 시켜 이루어낸 결과이다. 최근에 논문 [3-4]에서는 파라미터 불확실성을 고려한 지능형 재설계 방안이 연구되었으며, 논문 [6]에서는 관측기 기반 시스템에 관한 IDR이 연구되었다. 그리고 이를 활용해 논문 [1]에서는 스마트 스페이스 구축을 위한 지능형 디지털 분산 제어 시스템을 개발하였으며, 효율적인 성능을 보여줌으로써,

접수일자 : 2007년 11월 15일

완료일자 : 2008년 1월 25일

감사의 글 : 본 연구는 한국학술진흥재단(R05-2004-000-10498-0) 프로젝트에 의해 일부 지원 받았습니다.

IDR 기법이 스마트 스페이스 구축에 적합함을 증명하였다.

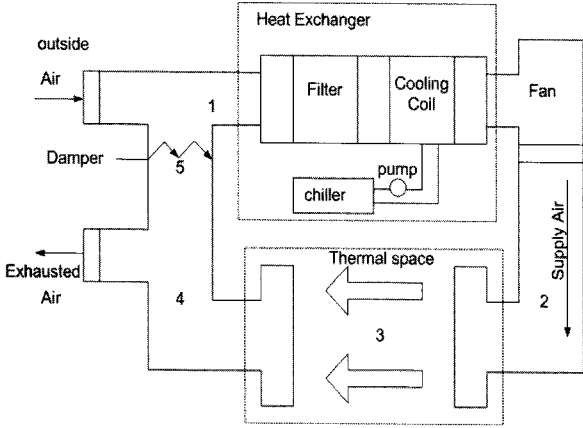


그림 1. HVAC 시스템의 모델  
Fig. 1. The model of HVAC system

본 논문에서는 스마트 스페이스 구축을 위한 제어 시스템 개발에 있어 IDR기법을 이용하고자 한다. 특히, 스마트 스페이스를 구축하는 각 파라미터들의 불확실성을 고려한 IDR 기법을 개발함으로써, 실제 생활에 적용할 수 있는 가능성을 높이고자 하였다. 즉, T-S 퍼지 모델로 나타내어진 스마트 스페이스 환경의 불확실성을 고려한 디지털 제어 이득을 얻기 위해, 주어진 문제를 강인 아날로그 제어 시스템과 디지털 제어 시스템의 놈 거리 최소화 문제 (norm minimization problem)로 간주하고 이를 선형 행렬 부등식 (linear matrix inequality: LMI)로 나타내하고자 하였다. 제안된 기법의 우수성을 검증하기 위하여 스마트 스페이스에서 널리 사용되는 그림 1의 HVAC (Heating, ventilating, and air conditioning) 시스템 [9]에 대한 모의실험 결과를 제시하게 된다.

## 2. 강인 지능형 디지털 재설계

불확실성이 포함된 비선형 동적 방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_c(t) = f(x_c(t), u_c(t)) \quad (1)$$

여기서  $x_c(t) \in R^n$ 는 상태 벡터를,  $u_c(t) \in R^m$ 는 입력 벡터를 나타낸다. 그리고 첨자 'c'는 아날로그 제어를 의미하며, 반면 'd'는 디지털 제어를 의미한다. 식 (1)에서 나타내어진 비선형성을 효율적으로 고려하기 위하여 다음의 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지시스템을 고려해보자. 퍼지 시스템은 일반적으로 다음과 같은 IF-THEN 규칙의 결합으로 구성되어 있다.

$$R^i: \text{IF } z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } F_n^i \\ \text{THEN } \dot{x}_c(t) = (A_i + \Delta A_i)x_c(t) + (B_i + \Delta B_i)u_c(t) \quad (2)$$

여기서  $R^i$ 는  $i$  번째 규칙,  $z_h(t)$ 는  $h$ 번째 전건부 변수를 의미하며,  $A_i, B_i$ 는 일반 행렬을  $\Delta A_i$ 와  $\Delta B_i$ 는 불확실 행렬을 나타낸다. 불확실 해  $(A, B)$ 는 제어 가능하고  $(A, C)$ 는 관측 가능하다고 가정하게 된다. 또한 우리는 불확실성을 나타내는 벡터  $(\Delta A, \Delta B)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다고 가정한다.

가정 1 [3]: 불확실성을 나타내는 두 식,  $\Delta A$  와  $\Delta B$  는 다음과 같이 놈(norm) 바운드 되어 있다.

$$[\Delta A \ \Delta B] = DF(t)[E_1 \ E_2] \quad (3)$$

여기서  $D, E_1$ , 와  $E_2$  는 불확실성을 나타내는, 충분한 공간을 가진 결정된 행렬이며,  $F(t)$  는 불확실성을 내포한 Lebesgue-measurable 값으로  $F^T(t)F(t) \leq I$  를 만족하게 된다.

중심 값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글 퍼지화를 사용하면 시스템 (13)의 전역 동특성은 다음과 같이 표현 된다:

$$\dot{x}_c = \sum_{i=1}^q h_i(z(t))((A_i + \Delta A_i)x_c(t) + (B_i + \Delta B_i)u_c(t)) \quad (4)$$

여기서

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^q F_{j_i}(z_j(t)), h_i(x) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^q w_i(z(t))}$$

$$h_i(x) \geq 0, \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) = 1$$

시스템의 안정화를 위해 다음과 같이 IF-THEN 규칙으로 재구성 된 퍼지 시스템의 각 규칙에 해당하는 제어를 설계하게 된다.

$$R^i: \text{IF } z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } F_n^i \\ \text{THEN } u_c(t) = K_c^i x_c(t) \quad (5)$$

여기서  $K_c^i$ 는 아날로그 이득을 의미한다. 비퍼지화 된 결과는 다음과 같다.

$$\dot{x}_c = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q h_i(z(t))h_j(z(t))((A_i + \Delta A_i) + (B_i + \Delta B_i)K_c^j)x_c(t) \quad (6)$$

한편, 디지털 T-S 퍼지 제어 시스템은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{x}_d = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q h_i(z(t))h_j(z(t))((A_i + \Delta A_i)x_d(t) + (B_i + \Delta B_i)u_d(t)) \quad (7)$$

여기서 디지털 이득  $u_d(t) = u_d(kT)$ 는 다음의 샘플링 구간  $[kT, kT+T)$ ,  $k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  에서 결정되어야 할 값이며,  $T > 0$ 는 샘플링 주기를 의미한다. 디지털 퍼지 모델 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R^i: \text{IF } z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } F_n^i \\ \text{THEN } u_d(t) = K_d^i x_d(t) \quad (8)$$

IDR은 매 샘플링 순간마다 아날로그 폐루프 시스템 (5)와 식 (7), (8)로 구성된 디지털 폐루프 시스템을 최대한 근사화시키는 것으로, 일반적인 이산 시간에서 논의된다. 식의 효율적인 전개를 위해 다음 가정을 도입하자.

가정 2 [5-6]: 모든 샘플링 구간에서 퍼지 시스템의  $i$ 번째 규칙의 발화정도  $\mu_i(z(t))$ 는 구간  $[kT, kT+T)$ ,  $k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  에서  $\mu_i(z(t)) \approx \mu_i(z(kT))$ 로 근사화 될 수 있다.

가정 2를 통해 식 (7)과 (8)은 다음과 같은 형태로 이산화될 수 있다.

$$\dot{x}_d = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q h_i(z(t))h_j(z(t))(\widehat{G}_i + \widehat{H}_i K_d^i)x_d(kT) \quad (9)$$

여기서

$$\widehat{G}_i = \exp(A_i + \Delta A_i)T,$$

$$\widehat{H}_i = (G_i - I_n)(A_i + \Delta A_i)^{-1}(B_i + \Delta B_i)$$

이다. 식 (5) 역시 다음과 같은 이산화 된 시스템으로 변환 가능하다.

$$\dot{x}_c = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q h_i(z(t))h_j(z(t))\widehat{\Phi}_{ij}x_c(kT) \quad (10)$$

여기서,  $\widehat{\Phi}_{ij} = \exp((A_i + \Delta A_i) + (B_i + \Delta B_i)K_c^i)T$  이다. 식 (9)와 (10)을 통해 지능형 디지털 재설계가 이루어지며, 그 구체적인 문제 설정은 다음과 같다.

문제 1 [7]: 아날로그 이산 시스템 (9)와 디지털 이산 시스템 (10)의 지능형 디지털 재설계는 다음 두 조건의 만족으로 요약될 수 있다.

1) 전역 상태 정합 (Global State-Matching): 식 (9)에서의  $\widehat{G}_i + \widehat{H}_i K_d^i$  와 식 (10)에서의  $\widehat{\Phi}_{ij}$  는 전역 상태 접합을 이루어야 한다.

2) 안정도 (stability): 디지털 시스템 (9)는 안정도 조건을 만족해야 한다.

주어진 문제 1을 해결하기 위해서는 식 (9)와 (10)이 지니고 있는 복잡한 식  $\widehat{G}_i, \widehat{H}_i$  그리고  $\widehat{\Phi}_{ij}$  를 좀 더 구체화 시켜야 한다. 이를 위해 다음 정리를 고려해보자.

정리 1 [17]: 식  $\widehat{G}_i, \widehat{H}_i$  는 다음과 같이 근사화 된다.

$$\widehat{G}_i = G_i + \frac{T}{2}(I_n - \frac{1}{2}A_i T)^{-1} \Delta A_i (G_i + I_n) \quad (11)$$

$$\widehat{H}_i \cong (G_i - I_n)A_i^{-1}B_i + (G_i - I_n)A_i^{-1}\Delta B_i + \frac{1}{2}(G_i - I_n)A_i^{-1}\Delta A_i(G_i - I_n)A_i^{-1}B_i \quad (12)$$

증명: 논문 [17]를 참고하라. □

따름정리:  $\widehat{\Phi}_{ij}$  의 경우는 다음과 같다.

$$\widehat{\Phi}_{ij} = \Phi_{ij} + \frac{1}{2}(\Phi_{ij} - I_n)(A_i + B_i K_c^i)^{-1}(\Delta A_i + \Delta B_i K_c^i)(\Phi_{ij} + I_n) \quad (13)$$

여기서  $\Phi_{ij} = \exp[(A_i + B_i K_c^i)T]$  이며,  $(i, j) \in I_Q \times I_Q$  이다. 정리 1과 따름 정리를 활용하면 다음의 상태 정합 문제는 아날로그 제어 이득과 디지털 제어 이득과의 놈 거리 최소화 문제로 변환될 수 있다. 변환된 식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\|\widehat{\Phi}_{ij} - \widehat{G}_i - \widehat{H}_i K_d^i\| < \gamma, \quad (i, j) \in I_Q \times I_Q \quad (14)$$

두 번째로 안정도 문제를 해결하기 위하여, 다음의 리아푸노프 함수를 고려하자.

$$V(t) = x(t)^T P x(t) \quad (15)$$

식 (15)를 풀게 되면 IDR 의 두 번째 문제인 안정도 해결을 위한 식을 얻게 된다. 앞서 언급한 상태 정합 문제와 안

정도 문제를 해결한 정리는 다음과 같이 주어진다.

정리 2 (전역 강인 IDR): 이산화 된 디지털 폐루프 시스템 (9)에서 주어진 아날로그 게인  $K_c^i$  와 구하고자 하는 디지털 제어 이득  $K_d^i$  사이의 상태 접합 및 안정도 문제는 다음의 LMI 식으로 나타내어진다. 다음 행렬들의 식  $Q = Q^T > 0, M_i, \epsilon_{ij}$  와  $\epsilon_{ij}$  에 대해 최적의 해를 찾기 위한 LMI 조건은 아래와 같다.

Minimize  $\gamma$  subject to

$$Q, M_i, \epsilon_{ij}, \epsilon_{ij} \begin{bmatrix} -\gamma Q & * & * & * \\ \widehat{G}_{ij}Q - G_i Q - H_i M_j & \epsilon_{ij} \overline{D}_{ij} - I & * & * \\ \zeta_{ij} Q & 0 & -\epsilon_{ij} I & * \\ -\xi_{1i} Q - \xi_{2i} M_j & 0 & 0 & -\epsilon_{ij} I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} -4Q & * & * & * \\ G_i Q + H_i M_j + G_j Q + H_j M_i & \epsilon_{ij} \overline{D}_{ij} - Q & * & * \\ \xi_{1i} Q + \xi_{2i} M_j & 0 & -\epsilon_{ij} I & * \\ \xi_{1j} Q + \xi_{2j} M_i & 0 & 0 & -\epsilon_{ij} I \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

여기서  $\forall (i, j) \in I_r \times I_r | 1 \leq i \leq j \leq r$  이며,  $M_i = K_d^i Q, \overline{D}_{ij} = \widehat{D}_{ij} \widehat{D}_{ij}^T + D_i D_i^T$  그리고  $\widetilde{D}_{ij} = D_i D_i^T + D_j D_j^T$  이다.

증명: 지면 관계상 생략한다. □

### 3. 스마트 스페이스 모델의 퍼지 모델링

본 논문에서는 그림 1과 같은 단일 지역 HVAC 시스템의 분석을 하게 된다. 시스템의 기본적인 운영은 다음과 같다 [9]: 첫 번째, 25%의 신선한 공기가 시스템에 허용되며 75%의 재순환 공기와 혼합된다 (위치 5); 두 번째, 혼합된 공기 (위치1) 는 열 혼합기 (heat exchanger)에 들어간다; 세 번째, 열 혼합기로부터 방출된 공기는 열공간 (thermal space)에 들어간 준비를 하며, 이것을 공급 공기 (위치 2)라 명명한다; 네 번째, 공급 공기는 시스템에 적정 공기 온도 및 습도에 맞추기 위해서 열공간으로 들어간다; 마지막으로, 팬을 통해 나온 열공간의 공기(위치 4)는 그것의 75%는 재순환 되면 나머지 25%는 시스템 밖으로 방출된다.

일반적으로 HVAC는 다음의 동적 미분 방정식으로 표현될 수 있다 [9]:

$$\dot{x} = Ax + \sum_{i=1}^3 x_i B_i u + B_0 u \quad (18)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -u_1^e \alpha_1 60 & u_1^e \alpha_2 60 & u_1^e \alpha_1 60 \\ 0 & -u_1^e \alpha_1 60 & 0 \\ u_1^e \beta_1 60 - u_1^e \beta_1 15 - u_1^e \beta_3 45 - u_1^e \beta_1 60 \end{bmatrix},$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} \alpha_1 60(x_3^e - x_1^e) - \alpha_2 60(W_s - x_2^e) & 0 \\ \alpha_1 60(W_s - x_2^e) & 0 \\ \beta_1 * 60 * (x_1^e - x_3^e) + 15 * \beta_1 * (85 - x_1 e) \\ -\beta_3 * 60 * (0.25 * 0.018 + 0.75 * x_2^e - w_s) - \beta_2 6000 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -\alpha_1 60 & 0 \\ 0 & 0 \\ \beta_1 45 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} \alpha_2 60 & 0 \\ -\alpha_1 60 & 0 \\ -\beta_3 45 & 0 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} \alpha_1 60 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\beta_1 60 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\alpha_1 = 1/V_s, \alpha_2 = h_{fg}/C_p V_s, \alpha_3 = 1/\rho C_p V_s, \alpha_4 = 1/\rho V_s, \\ \beta_1 = 1/V_{he}, \beta_2 = 1/\rho C_p V_{he}, \text{ 그리고 } \beta_3 = h_w/C_p V_{he}.$$

표 1에서 주어진 값은 모의실험에 사용된 파라미터 값이며 표 2에는 동작 점이 제시되어 있다. 효율적인 제어기 위하여 주어진 HVAC 시스템 (18)을 두 개의 규칙으로 이루어진 퍼지모델로 변환한다. 그러기 위해서 비선형 요소  $x_1 u$ ,  $x_2 u$ , 그리고  $x_3 u$  다음과 같이 표현 된다:

$$x_1 u = \Gamma_{11}(x_1) \cdot x_{1\min} u + \Gamma_{21}(x_1) \cdot x_{1\max} u \quad (19)$$

$$x_2 u = \Gamma_{12}(x_2) \cdot x_{2\min} u + \Gamma_{22}(x_2) \cdot x_{2\max} u \quad (20)$$

$$x_3 u = \Gamma_{13}(x_3) \cdot x_{3\min} u + \Gamma_{23}(x_3) \cdot x_{3\max} u \quad (21)$$

식 (19)-(21)를 이용해서 다음과 같은 퍼지 모델 기반 HVAC 시스템을 얻을 수 있다 [1]:

$$\begin{aligned} R_1: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{11}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{21}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{31}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \\ R_2: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{12}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{21}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{31}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t) \\ R_3: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{11}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{22}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{31}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 u(t) \\ R_4: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{12}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{22}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{31}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_4 x(t) + B_4 u(t) \\ R_5: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{11}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{21}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{32}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_5 x(t) + B_5 u(t) \\ R_6: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{12}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{21}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{32}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_6 x(t) + B_6 u(t) \\ R_7: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{11}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{22}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{32}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_7 x(t) + B_7 u(t) \\ R_8: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_{12}, x_2(t) \text{ is } \Gamma_{22}, x_3(t) \text{ is } \Gamma_{32}, \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_8 x(t) + B_8 u(t) \end{aligned}$$

여기서,

$$\Gamma_{11}(x_1(t)) = \frac{-x_1(t) + x_{1\max}}{x_{1\max} - x_{1\min}}, \quad \Gamma_{12}(x_1(t)) = \frac{x_1(t) - x_{1\min}}{x_{1\max} - x_{1\min}},$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{21}(x_2(t)) &= \frac{-x_2(t) + x_{2\max}}{x_{2\max} - x_{2\min}}, & \Gamma_{22}(x_2(t)) &= \frac{x_2(t) - x_{2\min}}{x_{2\max} - x_{2\min}} \\ \Gamma_{31}(x_3(t)) &= \frac{-x_3(t) + x_{3\max}}{x_{3\max} - x_{3\min}}, & \Gamma_{32}(x_3(t)) &= \frac{x_3(t) - x_{3\min}}{x_{3\max} - x_{3\min}}, \end{aligned}$$

$i \in I_3$ 이다.

참고 1: 각 시스템의 입력행렬은 지면 관계상 일부분만 상기 페이지하단에 제시되어 있다. 또한 실험에 사용된 각 파라미터 값은 논문 [1]에 명시된 값을 사용하였으므로 참고 바란다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

지금까지 2절에서는 강인 IDR에 대해 소개하였으며, 3절에서는 HVAC 시스템의 퍼지 모델링에 대해 연구하였다. 이번 절에서는 2절에서 설계한 제어기를 이용하여 3절의 HVAC 시스템에 관한 제어를 수행하고자 한다. 특히, HVAC 시스템이 지니고 있는 파라미터의 불확실성을 고려하여 제어를 수행하게 되며 각 파라미터가 지니는 불확실 정도는 5%로 가정한다. 즉, 행렬  $A$  와  $B$  가 지니고 있는 파라미터  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$ , 그리고  $\beta_3$ 의 각 변화 정도를 고유값의 5%로 가정하고 시뮬레이션을 수행하게 된다. 잘 설계된 아날로그 제어 이득은 [11]로부터 다음과 같이 주어진다:

$$\begin{aligned} K_{c1} &= \begin{bmatrix} -0.0262 & 0.0096 & 0.0268 \\ 2.2611 & -0.0938 & -3.0158 \\ 0.0171 & 0.0054 & -0.0176 \end{bmatrix} \\ K_{c2} &= \begin{bmatrix} 2.2611 & -0.0938 & -3.0159 \end{bmatrix} \\ K_{c3} &= \begin{bmatrix} -0.0277 & 0.0099 & 0.0283 \\ 2.2611 & -0.0938 & -3.0158 \end{bmatrix} \\ K_{c4} &= \begin{bmatrix} 0.0147 & 0.0058 & -0.0151 \\ 2.2611 & -0.0938 & -3.0159 \end{bmatrix} \\ K_{c5} &= \begin{bmatrix} -0.1320 & 0.0220 & 0.1352 \\ 2.2610 & -0.0938 & -3.0157 \end{bmatrix} \\ K_{c6} &= \begin{bmatrix} 0.0812 & 0.0156 & -0.0832 \\ 2.2611 & -0.0938 & -3.0158 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} -u_1^e \alpha_1 60 & u_1^e \alpha_2 60 & u_1^e \alpha_1 60 \\ 0 & -u_1^e \alpha_1 60 & 0 \\ u_1^e \beta_1 60 - u_1^e \beta_1 15 & -u_1^e \beta_3 45 & -u_1^e \beta_1 60 \end{bmatrix}, \dots, A_8 = \begin{bmatrix} -u_1^e \alpha_1 60 & u_1^e \alpha_2 60 & u_1^e \alpha_1 60 \\ 0 & -u_1^e \alpha_1 60 & 0 \\ u_1^e \beta_1 60 - u_1^e \beta_1 15 & -u_1^e \beta_3 45 & -u_1^e \beta_1 60 \end{bmatrix} \\ B_1 &= \begin{bmatrix} \alpha_1 60(x_3^e - x_1^e) - \alpha_2 60(W_s - x_2^e) - \alpha_1^* 60^* x_{1\min} + \alpha_2^* 60^* x_{3\min} + \alpha_1^* 60^* x_{5\min} & 0 \\ \alpha_1 60(W_s - x_2^e) - \alpha_1^* 60^* x_{3\min} & 0 \\ \beta_1^* 60^*(x_1^e - x_3^e) + 15^* \beta_1^*(85 - x_1^e) - \beta_3^* 60^*(0.25^* 0.018 + 0.75^* x_2^e - w_s) \\ \quad + \beta_1^* 45^* x_{1\min} - \beta_3^* 45^* x_{3\min} - \beta_1^* 60^* x_{1\min} & -6000 \beta_2 \end{bmatrix}, \dots \\ B_8 &= \begin{bmatrix} \alpha_1 60(x_3^e - x_1^e) - \alpha_2 60(W_s - x_2^e) - \alpha_1^* 60^* x_{1\max} + \alpha_2^* 60^* x_{3\max} + \alpha_1^* 60^* x_{5\max} & 0 \\ \alpha_1 60(W_s - x_2^e) - \alpha_1^* 60^* x_{3\max} & 0 \\ \beta_1^* 60^*(x_1^e - x_3^e) + 15^* \beta_1^*(85 - x_1^e) - \beta_3^* 60^*(0.25^* 0.018 + 0.75^* x_2^e - w_s) \\ \quad + \beta_1^* 45^* x_{1\max} - \beta_3^* 45^* x_{3\max} - \beta_1^* 60^* x_{1\max} & -6000 \beta_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$K_{c7} = \begin{bmatrix} -0.1350 & 0.0226 & 0.1383 \\ 2.2610 & -0.0938 & -3.0157 \end{bmatrix}$$

$$K_{c8} = \begin{bmatrix} -0.0828 & 0.0160 & 0.0849 \\ 2.2611 & -0.0938 & -3.0158 \end{bmatrix}$$

샘플링 타임  $T=0.01(h)$  로 주어지며, 정리 1을 적용하면 다음과 같은 디지털 제어 이득 값을 얻을 수 있다:

$$K_{d1}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} -0.0002 & 0.0003 & -0.0003 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

$$K_{d2}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} -0.0003 & 0.0002 & -0.0006 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

$$K_{d3}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} -0.0002 & 0.0003 & -0.0003 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

$$K_{d4}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} -0.0003 & 0.0002 & -0.0006 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

$$K_{d5}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} 0.0004 & 0.0002 & 0.0007 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

$$K_{d6}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} 0.0004 & 0.0002 & 0.0006 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

$$K_{d7}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} 0.0004 & 0.0002 & 0.0007 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

$$K_{d8}^{(0)} = 10^{-006} \begin{bmatrix} 0.0004 & 0.0002 & 0.0006 \\ -0.1387 & 0.0000 & -0.1385 \end{bmatrix}$$

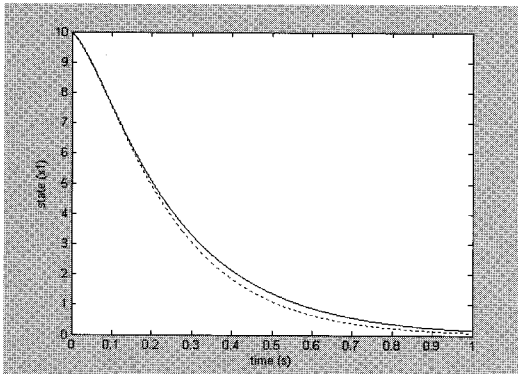


그림 2.  $x_1$ 의 궤적  
Fig. 2. The state trajectory of the  $x_1$

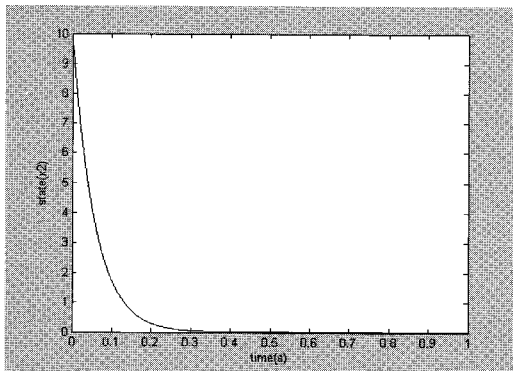


그림 3.  $x_2$ 의 궤적  
Fig. 3. The state trajectory of the  $x_2$

정리 1을 활용한 디지털 제어 이득을 HVAC 시스템에 적용한 결과가 바로 그림 2-4 이다. 각 그림은 HVAC 시스템을 구성하는 세 상태 변수  $x_1 \sim x_3$  까지의 변화를 나타낸 것이며, 굵은 선으로 표시된 것이 아날로그 상태 변화, 점선으로 표시된 것이 디지털 제어 이득에 따른 상태 변화이다. 그림에서 보여 지듯이, 아날로그 상태 변화에 따른 디지털 궤적이 거의 동일하게 움직이는 것을 확인할 수 있으며, 설계된 디지털 제어기가 잘 작동 되고 있음을 확인할 수 있다.

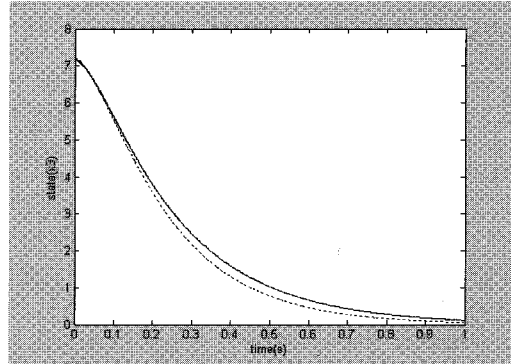


그림 4.  $x_3$ 의 궤적  
Fig. 4. The state trajectory of the  $x_3$

### 5. 결론

본 논문에서는 강인 디지털 제어를 통한 스마트 스페이스의 안정도에 대해 논의해 보았다. 디지털 재설계 기법을 통해 제어를 설계하였으며, T-S 퍼지 모델을 사용하여 나타난 아날로그 및 디지털 시스템에 대한 안정도 증명 및 상태 정합에 대해 다루어 보았다. 또한 제안된 기법은 선형 행렬 부등식으로 나타내어 질 수 있음을 알아보았다. 마지막으로 설계된 제어를 Heating, ventilating, and air conditioning (HVAC) 시스템에 적용함으로써 설계된 제어기의 우수성 및 응용 가능성을 확인하였다.

### Reference

- [1] 주영훈, "스마트 스페이스 구축을 위한 지능형 디지털 제어기 개발," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, vol. 11, pp. 1-7, 2005.
- [2] Y. H. Joo, L. S. Shieh, and G. Chen, "Hybrid state-space fuzzy model-based controller with dual-rate sampling for digital control of chaotic systems," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 7, no. 4, pp. 394-408, 1999.
- [3] W. Chang, J. B. Park, Y. H. Joo, and G. Chen, "Design of sampled-data fuzzy-model-based control systems by using intelligent digital redesign," IEEE Trans. Circ. Syst. I, vol. 49, no. 4, pp. 509-517, 2002.
- [4] W. Chang, J. B. Park, and Y. H. Joo, "GA-based intelligent digital redesign of fuzzy-model-based controllers," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 11,

- no. 1, pp. 35-44, 2003.
- [5] W. Chang, J. B. Park, H. J. Lee, and Y. H. Joo, "LMI approach to digital redesign of linear time-invariant systems," IEE Proc., Control Theory Appl., vol. 149, no. 4, pp. 297-302, 2002.
- [6] H. J. Lee, J. B. Park, and Y. H. Joo, "An efficient observer-based sampled-data control: Digital redesign approach," IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 50, no. 12, pp. 1595-1601, 2003.
- [7] H. J. Lee, H. Kim, Y. H. Joo, W. Chang, and J. B. Park, "A new intelligent digital redesign for T-S fuzzy systems: global approach," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 12, no. 2, pp. 274-284, 2004.
- [8] T. Chen and B. Francis, "Optimal Sampled-Data Control Systems," Springer, 1995.
- [9] B. A. Serrano and M. V. Reyes, "Nonlinear control of a heating, ventilating, and air conditioning system with thermal load estimation," IEEE Trans. Contr. syst. Tech., vol. 7, no. 1, 1999.
- [10] C. A. R. Crusius and A. Trofino, "Sufficient LMI conditions for output feedback control problems," IEEE Trans. Automatic Contr. vol. 44, no. 55, 1999.
- [11] H. J. Lee, J. B. Park, and G. Chen, "Robust fuzzy control of nonlinear systems with parameteric uncertainties," IEEE Trans. Fuzzy Syst, vol. 9, pp. 369-379, no. 2, 2001.
- [12] J. R. Luo, H. Z. Wang, Z.S. Ji, L. Zhu, F. Wang, and Y. Shu, "The distributed control and data system in HT-7 tokamak," IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 49, pp. 496-500, 2002.
- [13] N. C. Scott, D. J. Atkinson, J. E. Morrell, "Use of load control to regulate voltage on distribution networks with embedded generation," IEEE Trans. Power Systems, vol 17, pp. 510-515, 2002.
- [14] C. S. Chen, Y. L. Ke, J. S. Wu, and M. S. Kang, "Application of Petri nets to solve distribution system contingency by considering customer load patterns," IEEE Trans. Power Systems, vol 17, pp 417-423, 2002.
- [15] S. J. Huang and C. C. Lin, "Application of ATM-based network for an integrated distribution SCADA-GIS system," IEEE Trans. Power Systems, vol. 17, pp. 80-86, 2002.
- [16] R. S. Weissbach, G. G. Karady, and R. G. Farmer, "A combined uninterruptible power supply and dynamic voltage compensator using a flywheel energy storage system," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, pp. 265-270, 2001.
- [17] L. S. Shieh, J. Gu, and W. Sunkel, "Model conversions of uncertain linear systems using the bilinear and inverse-bilinear approximation model," Proc. 36th Midwest Symposium, vol. 1, pp. 514-517, Aug. 1993.

## 저 자 소 개



주영훈(Young Hoon Joo)

제 17권 6호(2007년 12월호) 참조