

☒ 응용논문

## Estimation of Temperature Distribution in the Refrigerator-Room Using Fuzzy Adaptive Model

- 퍼지적응모델을 이용한 냉장실 온도분포 추정 -

김 지 관  
Kim, Jiekwon

### Abstract

Estimating the temperature distribution of a refrigerator-room is important for preventing the over-refrigeration and improving its operating efficiency. It is also necessary in the realization process of the concentrated refrigeration function which has been provided recently as a generalized function in many refrigerator models. In this paper, we investigate the estimation problem of temperature in refrigerator-room and propose a fuzzy adaptive model. The model is unique in that it employs the concept of the fuzzy dead zone in order to improve the accuracy of estimation. The obtained results are then used for determining the optimal position of a temperature sensor.

### 1. 서론

냉장고는 냉장실내의 온도를 일정하게 유지함으로써 식품들을 신선하게 보관한다는 목적을 가지고 있으나, 실제로 냉장실 내부의 온도분포를 측정해 보면, 선반에 의한 구역분리, 냉기의 정체등에 의해 그 분포가 일정치 않음을 쉽게 확인할 수가 있다. 이러한 온도분포의 편차는 과냉현상의 원인을 제공하며, 에너지 효율을 나쁘게 하는 요인이 되고 있다. 또한 최근에는 새로운 냉장물의 인입에 의해 온도가 상승하는 지역에 냉기를 집중시켜, 저장물의 빠른 냉각효과 및 냉장실내의 빠른 온도평형을 유도해 에너지 효율을 좋게하는 집중냉각방식을 채택한 제품들도 출시되고 있어 냉장실내의 온도분포측정의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

따라서, 이러한 과냉현상의 방지 및 집중냉각방식에 있어서 냉장실내 온도분포의 추정은 필수적인데, 지금까지의 연구에서는 냉장실 내부벽면에 부착된 센서로부터 얻어진 측정데이터의 현재값 및 과거값과의 차분을 이용하여 냉장실내의 온도분포를 추정하는 TSK(Takagi-Sugeno -Kang) 퍼지 모델이 제안되어 있는 정도이다(장근택외[2]). 그러나, 이 퍼지모델은 정적시스템(Static System)으로 구성되어 있고, 냉장실의 온도분포에 직접적인 영향을 미치는 압축기 및 냉기팬의 운전상황을 고려하고 있지 않다. 즉, 센서의 측정치만을 이용하여 미리 선정된 영역의 온도를 추정하고 있으나, 이것은 온도를 변화시키는 요인이 모델에 포함되어 있지 않기 때문에 온도추정에 있어서의 오차가 크다는 단점이 있다. 또한 오프라인으로 파라미터를 결정하기 때문에 냉장고 개개의 특성에 대응할 수 없다.

\* 한서대학교 컴퓨터학과

본 연구에서는 냉장실 내부를 6개의 부공간으로 나누어, 각 공간에 대하여 압축기 및 냉기팬의 운전상황을 입력값으로 갖는 퍼지적응시스템(Fuzzy adaptive system)을 이용한 온도모델을 제안한다. 이 퍼지적응시스템에는 불감대내에서도 적응동작이 이루어지는 퍼지불감대를 도입하여, 시스템의 특성을 결정하는 파라미터의 추정정도(精度)와 동정모델(Identification Model)의 안정성을 향상시키고 있다는 특징이 있다. 이러한 온도모델을 이용한 냉장실내 온도분포의 추정과정을 통하여 가장 추정정도가 좋은 파라미터 추정치가 얻어지는 공간벽면을 추출함으로써 온도센서의 최적위치를 결정지을 수 있다.

이하 2절에서는 퍼지적응 동정알고리즘에 대해서 논하고, 3장에서는 실측데이터를 얻기위한 실험환경과 파라미터 동정과정에 대해서, 4장에서는 얻어진 결과를 이용한 온도센서 위치선정에 대해서 설명한다. 마지막으로 5장에서는 앞으로의 연구방향에 대해서 간단히 논하고 있다.

## 2. 퍼지적응 동정알고리즘(Fuzzy Adaptive Identification Algorithm)

냉장실내  $i$ 번째 센서위치의 온도분포를 다음과 같은 비선형 시스템으로 가정하자[3].

$$\begin{aligned}
 y_i(k+1) &= f(y_i(k), u(k)) \\
 &\cong a_{1i}y_i(k) + a_{2i}y_i(k-1) + b_{1i}u(k) + b_{2i}u(k-1) + \omega_i(k) \\
 &= \theta_i^T \phi_i(k) + \omega_i(k)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $y_i(k)$ 는  $k$ 시점에 있어서의 센서  $i$ 의 측정값(온도),  $u(k)$ 는 냉장실내부의 냉기의 입력을 의미하며, 본 논문에서는 압축기 및 냉기팬의 운전상황을 정규화시켜 그 값을 결정하고 있다. 또한,  $\theta_i$ 는 시스템의 파라미터 벡터,  $\phi_i$ 는 회귀벡터,  $T$ 는 벡터의 전치를 의미하며,  $\omega_i(k)$ 는 비선형시스템을 선형화하는 과정에서 발생하는 오차를 포함한 주위 부하등에 의한 외란을 의미한다.

위와 같은 미지시스템에 대한 동정모델(Identification Model)로 다음과 같은 선형시스템을 정의한다(그림1 참조).

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_i(k+1) &= \hat{a}_{1i}y_i(k) + \hat{a}_{2i}y_i(k-1) + \hat{b}_{1i}u(k) + \hat{b}_{2i}u(k-1) \\
 &= \hat{\theta}_i^T \phi_i(k)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $\hat{\theta}_i$ 는  $a, b$ 를 요소로 갖는 미지시스템(unknown)의 시스템 파라미터벡터  $\theta_i$ 에 대한 추정벡터를 의미한다.

이 시스템에 대한 입력  $u(k)$ 는 압축기 및 냉기팬의 운전상황을 고려하여 다음과 같이 정규화하였다.

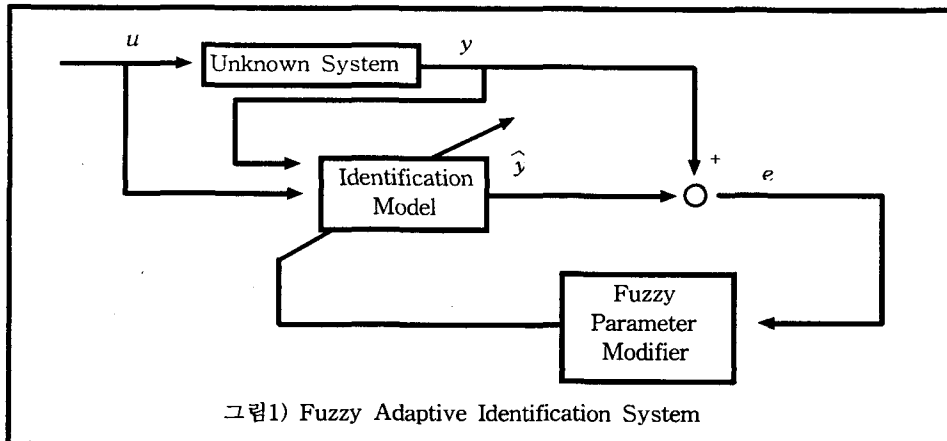


그림1) Fuzzy Adaptive Identification System

$$u(k) = \begin{cases} 1.0 & \text{Comp. On, R-fan On} \\ 0.4 & \text{Comp. On, R-fan Off} \\ 0.2 & \text{Comp. Off, R-fan On} \\ -0.2 & \text{Comp. Off, R-fan Off} \end{cases} \quad (3)$$

온도센서  $i$ 의 실측치와 동정모델의 출력치와의 오차를 다음과 같이 정의한다(그림1참조).

$$e_i(k) = y_i(k) - \hat{y}_i(k) = (\theta_i - \hat{\theta}_i(k))^T \phi_i(k) \quad (4)$$

일반적으로,  $\lim_{k \rightarrow \infty} |e_i(k)| \leq \delta$ 를 만족하도록 동정모델의 파라미터를 수정해 나감으로써 실제시스템과 유사한 거동을 하는 모델을 얻을 수가 있게 되는데, 여기서  $\delta$ 은 설계자가 설정하는 오차의 허용범위로 선형화 오차 및 외란등을 고려하여 결정된다.

시스템의 외란(선형화 오차를 포함)  $\omega_i(k)$ 가  $\omega_i(k) \leq \delta$ 를 만족한다고 가정할 때, 퍼지불감대를 이용한 적응 알고리즘에서는 다음과 같은 퍼지집합을 정의한다.

$$D = \{x/\mu_D(x)\} \quad x \in R \quad (5)$$

$$\mu_D(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \delta \\ 0 & |x| \geq 2\delta \\ \frac{2\delta - |x|}{\delta} & \delta < |x| < 2\delta \end{cases} \quad (6)$$

이때, 실측치와 모델 출력간의 오차가 이 퍼지 집합에 속하는 정도를 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha_i(k) = \mu_D(e_i(k)) \quad (7)$$

위의 멤버쉽값을 이용하여 다음과 같은 함수를 정의한다.

$$p_i(k) = 1.0 - \alpha_i(k) \quad (8)$$

여기서,  $p_i(k)$ 는 구간  $[0,1]$ 의 값을 취하는 연속함수임을 알 수 있는데, 이 점이 일반적인 불감대를 이용하는 적응알고리즘과 다른 점이다.

이때, 위의 함수를 이용한 파라미터 수정 알고리즘은 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(k-1) + p_i(k) G_i(k) e_i(k) \quad (9)$$

$$G_i(k) = \frac{\phi_i(k-1)}{(\lambda + \phi_i^T(k-1) \phi_i(k-1))} \quad (10)$$

여기서,  $\lambda$ 는 분모가 0이 되는 것을 방지하기 위하여 도입한 작은 실수이다.

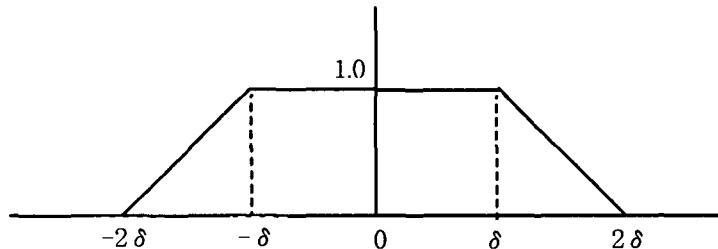


그림2) 퍼지불감대 집합

위의 파라미터 수정알고리즘은 다음과 같은 특성을 만족하게 되며, 따라서, 외란에 대해서도 강건한 적응알고리즘이라 할 수 있다[1].

- i)  $\|\hat{\theta}_i(k) - \theta_i\| \leq \|\hat{\theta}_i(k-1) - \theta_i\| \leq \|\hat{\theta}_i(0) - \theta_i\|$
- ii)  $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\hat{\theta}_i(k) - \hat{\theta}_i(k-1)\| \leq \frac{\delta}{\sqrt{\lambda}}$
- iii) if  $\phi_i(k)$  is bounded,  $\lim_{k \rightarrow \infty} |e_i(k)| \leq \delta$

여기서,  $\|\cdot\|$  는 Euclidean Norm을 나타낸다.

여기서 제시된 퍼지 적응알고리즘은 일반 불감대를 이용한 적응알고리즘이 설계자가 설정한 오차의 유의수준의 두배 ( $\pm 2\delta$ )가 불감대로 설정되어, 그 영역안에서는 적응동작이 이루어지지 않는다는 단점을 개선한 것이다. 즉, 퍼지 불감대를 이용한 적응 알고리즘에서는 동정모델의 안정성을 확보하면서 불감대내에서도 적응동작이 이루어지도록 하여 허용오차의 범위가 실질적으로 적어지게 되며, 따라서, 좀더 안정적으로 실시스템에 가까운 추정값을 얻어낼 수가 있게 된다. 또한, 외란의 상계를 명확히 결정하기 어려운 경우에 있어서도, 설계의 자유도를 높혀 줄과 동시에 강건한 적응알고리즘을 설계할 수 있다는 장점이 있다.

### 3. 세트실험을 통한 냉장실 온도 모델링

냉장실 내부의 온도분포를 실측해보기 위해 다음과 같은 실험환경을 준비하였다.

#### A) 실험환경

- 실험용 세트 : 2대(570리터급)  
온도센서(Thermo-couple) : a) 냉장실 내부 : 51ch(channel)/set  
b) 압축기(1ch/set), 냉기팬(1ch/set)
- 실험종류  
a) 무부하실험  
b) 부하실험(6Area, 25°C물이 담긴 용기(용량 300cc))
- 실험시간 : 20 - 60분/조건
- 샘플링시간 : 30sec

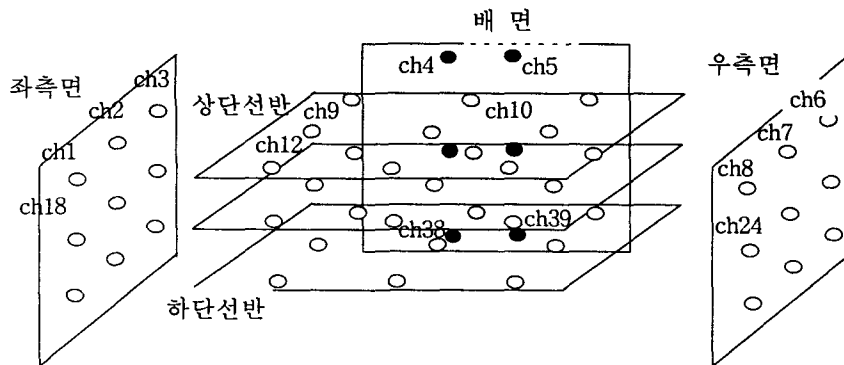


그림3) 실험세트 센서 설치도

우선 무부하실험에 의해 얻어진 실측데이터를 이용하여 냉장고내 온도분포를 추정하는 온도모델의 파라미터 동정을 실시하였다. 이때, 외란의 상계는  $\delta=0.2^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다.

이에앞서, 냉장실 벽면에 부착한 3개의 센서로부터의 실측값을 이용하여 냉장실내 6개 공간의 온도분포를 추정해 내는 문제에 대한 하나의 해결방법으로 신경회로망을 이용한 학습을 시도해 보았다(입력층 3, 중간층(3-6), 출력층 6, Simulation Package "Neuralware"를 이용). 중간층의 개수를 변화시켜가면서 학습을 시행해 보았지만, 신경회로망의 학습정도를 나타내는 RMS(root mean square) 오차가 학습횟수의 경과와 함께 수렴하지 않고 일정한 범위내에서 변동하고 있었다. 이것은 학습이 잘 이루어지지 않고 있다는 것을 의미하며, 따라서 3곳의 센서의 측정값을 이용하여 냉장실내 온도분포를 추정해 내기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 그 원인으로 생각할 수 있는 것은, 냉장실 벽면온도와 냉장실내 공간의 온도분포간에 일대다 대응(One-to-Multi Mapping)관계가 성립하고 있을 수 있다는 것이다. 즉, 벽면센서로부터 입력되는 온도가 동일한 경우에도 냉장실내 공간온도로서는 여러 가지 분포가 존재할 수 있다는 것이다. 따라서, 이러한 현상이 신경회로망이 갖고 있는 Pattern Classification, Nonlinear Function Approximation등의 특징을 살릴 수 없게 하는 학습방해 요소로서 작용하고 있는 것으로 유추되며, 벽면센서 3개의 데이터값을 가지고 냉장실내의 주요공간의 온도분포를 추정하기란 어렵다고 판단하게 되었다.

**B) 파라미터 동정과정(Parameter Identification Process)**

무부하실험에 의해 얻어진 데이터를 이용해 먼저 냉장실 내부의 6개 영역의 공간온도를 모델링하였다. 이때 90샘플링 시간동안의 적응학습에 의해 결정된 적응모델의 파라미터는 표1과 같다.

여기서, 오차의 합계는 90샘플링 시간 이후 온도모델의 적응동작을 정지시킨 상태로 120샘플링 시간까지 30샘플링 시간동안의 센서의 측정치와 모델의 추정치와의 오차를 합계한 것이다.

이상의 실험결과에서 1샘플링 시간당 오차는 ch38을 제외하고 약  $0.03\text{--}0.07^{\circ}\text{C}$ 임을 알 수가 있다.(ch38의 경우는  $0.3^{\circ}\text{C}$ 정도). 이것은 우리가 설정한 오차의 허용범위( $\delta=0.2$ )를 만족함은 물론, 냉장고의 온도 해상도(냉장고에서 사용하는 온도의 해상도는  $0.1^{\circ}\text{C}$ 임)를 밀도는 수치로, 퍼지적용모델이 냉장실 내부의 온도모델로서 충분히 유의하다는 것을 보여주고 있다.

표 1 추정된 파라미터와 추정오차

	$a_{11}$	$a_{12}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$\text{SQRT}(\sum_{k=90..120} \{e_i(k)\}^2)$
ch02( $\theta_1$ )	0.820	0.153	0.209	0.129	0.282
ch07( $\theta_2$ )	0.521	0.465	0.366	0.220	1.232
ch19( $\theta_3$ )	0.617	0.355	0.280	0.170	0.355
ch24( $\theta_4$ )	0.770	0.203	0.240	0.162	1.238
ch38( $\theta_5$ )	0.453	0.494	0.537	0.406	2.927
ch39( $\theta_6$ )	0.799	0.165	0.235	0.162	0.901

#### 4. 온도센서 위치 선정에의 응용

냉장실 내부의 온도를 면밀히 파악하기 위해서는 온도 센서를 가능한 많이 사용하는 것이 좋을 것이라는 것은 명백한 사실이다. 하지만, 센서추가에 따른 원가상승들을 고려하면 사용 개수에는 한계가 있고, 이러한 한계를 고려해 한정된 센서를 이용해 냉장실의 온도분포를 추측하기 위해서는 센서를 온도분포 추측에 적합한 곳에 위치하도록 하는 등의 연구가 필요하겠다. 여기서는, 상기의 퍼지적응모델을 이용하여 이와같은 온도센서의 위치선정문제에 대해 생각해 보기로 한다.

일반적으로 냉장실에는 2개 또는 3개의 센서가 냉장실 온도분포를 추정하기 위하여 장착되어 있다. 여기서는 냉장실 내부에 3개의 센서를 위치시키는 경우를 대상으로하여 일반적인 조건을 정리해 보면 다음과 같다.

- ▶ 냉장실내 각 단에 최소한 한 개의 센서는 존재해야 함.
- ▶ 인접하는 상하단 사이에는 대각선으로 센서를 위치를 시키는 것이 바람직함.
- ▶ 하단은 좌/우 벽면쪽이 아니라 배면쪽(ch38, ch39)으로 위치하도록 함.

이러한 조건을 만족하는 센서위치의 조합으로는 다음과 같은 4개 그룹이 존재할 수 있다.

표 2 냉장실내 센서위치의 조합

	상 단	중 단	하 단
그룹 1	좌측(ch2)	우측(ch24)	좌측(ch38)
그룹 2	좌측(ch2)	우측(ch24)	우측(ch39)
그룹 3	우측(ch7)	좌측(ch19)	좌측(ch38)
그룹 4	우측(ch7)	좌측(ch19)	우측(ch39)

이러한 각 그룹에 대해 실험용 데이터를 이용해 표1의 파라미터로 구성된 온도모델의 추론능력을 검증하였다.

이 실험에서는 실험용 데이터로 100샘플링 시간동안의 입력과 실측값을 이용하였고, 약 50 샘플링 시간 전후에서 냉장고문을 1회 개폐하여 외란을 발생시켰다. 또한, 하나의 파라미터 계열을 가지고 두 영역의 추론을 하도록 해 다른 파라미터 계열과의 추론결과를 비교하였다. 그림4)는 ch2의 센서가 측정한 냉장실내의 시간에 따른 온도 변화와 온도모델이 추정한 ch2 영

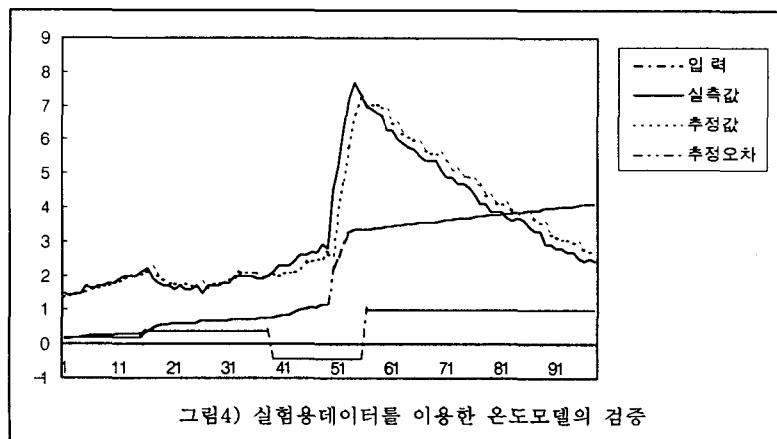


그림4) 실험용데이터를 이용한 온도모델의 검증

역(상단 좌측)의 추정값을 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 추정오차는  $\sqrt{\sum_{i=1}^k (e(i))^2}$  의 값으로 하였다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 외란에 의해 추정오차가 일시적으로 증가하는 현상을 제외하면, 온도모델의 추정값이 실측값에 근사하고 있음을 알 수 있다.

이러한 시뮬레이션을 각 그룹의 파라미터계열에 대하여 실시하여 추정치와 실측치와의 추정 오차를 표2에 정리하였다. 표2에서는 파라미터 계열  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 에 대해 ch02영역과 ch07영역을 각각 추론하여 서로 비교하는등 같은 단에 위치하는 온도모델 사이의 서로 다른 영역에 대한 온도분포도 추정하게 하여 그때의 추정오차도 비교하고 있다.

표 3 실험데이터를 이용한 파라미터 계열의 검증

	ch02	ch07	ch19	ch24	ch38	ch39
$\theta_1$	4.118	7.040				
$\theta_2$	7.040	9.350				
$\theta_3$			5.071	6.101		
$\theta_4$			4.627	5.565		
$\theta_5$					9.288	9.524
$\theta_6$					6.143	6.356

이 표에서 온도모델로서 추정능력이 좋게 판단되는 파라미터 계열로는 상단좌측( $\theta_1$ )과 중단우측( $\theta_4$ ), 하단 배면 우측( $\theta_6$ )의 조합으로 이는 표2의 그룹2에 해당된다. 따라서, 냉장실 내부의 온도를 추론하는데 있어서 센서를 그룹2와 같은 형태로 위치시킴으로써 좀 더 정확한 온도추론이 가능하다고 할 수 있겠다. 이와 같은 결과는 부하 실험시에도 부하에 대한 감도가 다른 센서 위치의 조합보다 좋을 것으로 기대되어 부하위치 판정시에도 유효할 것으로 보인다.

### 5. 결론

본 연구에서는 냉장실의 온도분포를 추정하는 온도모델로서 퍼지적용시스템을 제안하고 있다. 본 시스템은 퍼지 불감대를 갖는 동적선형시스템(Dynamic Linear System)으로, 다른 연구에서는 고려되지 않았던 압축기와 냉기팬의 운전상황을 냉장실 내부 온도분포에 대한 입력으로 하여 냉장실 내부의 온도분포를 추론하고 있다. 또한, 이 모델을 온도센서의 위치 선정문제에 적용하여, 온도추정정도가 좋은 센서위치의 조합을 도출해 내었다. 이러한 온도모델은 냉장실의 과냉현상의 방지, 최근 많이 채택되고 있는 냉기의 집중제어에 응용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 쾌적한 실내온도를 만들기 위한 공조시스템에 있어서의 풍향 및 풍속제어에도 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

[1] J.K. Kim and K. Hagino, "Adaptive Hybrid Control Using Fuzzy Set Theory", SOFT, Vol.6-2, pp378-401, 1994.  
 [2] 장근택외 4명, "감성공학기법을 이용한 냉장고 온도제어", '96한국퍼지 및 지능시스템학회 춘계학술대회, pp160-164, 1996.

- [3] 김지관외 5명, “ 퍼지동정알고리즘을 이용한 냉장실 온도분포추정에 관한 연구”, ‘96한국퍼지 및 지능시스템학회 추계학술대회, pp194-197, 1996.
- [4] G. C. Goodwin and K. S. Sin, Adaptive Filtering, Prediction and Control, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984.
- [5] H. Tanaka, S. Uejima and K. Asai, “Linear regression analysis with fuzzy model”, IEEE Trans. Syst. Man and Cyber., SMC-12-6, pp903-907, 1982.
- [6] T. Takagi, M. Sugeno, “ Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control”, IEEE Trans. Syst. Man and Cyber., SMC-15-1, pp116-132, 1985.
- [7] B.B. Peterson and K.S. Narendra, “Bounded error adaptive control,” IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-27, Dec. 1982.
- [8] C. Samson, “Stability analysis of adaptively controlled systems subject to bounded disturbances”, Automatica, Vol. 19-1, pp81-86, 1983.