

퍼지동정알고리즘을 이용한 냉장실 온도분포추정에 관한 연구

김 지관*, 안 이승*, 이 정용*, 이 유신*, 김 재인**, 이홍원**

*삼성전자 기술총괄 기반기술센터

** 삼성전자 가전본부 냉장고사업부

442-742 수원시 팔달구 매탄3동 416

jkim@rnd.sec.samsung.co.kr

A Study on Estimation of Temperature Distribution in Refrigerator-Room Using Fuzzy Adaptive Identification Model

Jiekwan Kim, Leeseng Ahn, Jungyong Lee, Yu-shin Yi, Jaein Kim and Hongwon Lee

Core Technology Research Center, Corporate Technical Operation

SAMSUNG Electronics Co.,LTD.

416, Maetan-3dong, Paldal-Gu, Suwon City,442-742

Abstract

냉장실내의 온도분포의 추정은 냉장고의 과냉현상 방지, 운전효율 향상을 위해 필요할 뿐만 아니라, 최근 많은 제품에서 제공하고 있는 집중냉각기능을 실현하는데 있어서도 필수불가결한 과정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 냉장실내 온도분포추정에 있어서의 문제점을 개관하고, 온도분포추정을 위한 퍼지불감대(Fuzzy Dead Zone)를 갖는 퍼지동정모델(Fuzzy Identification Model)을 제안한다. 또한, 얻어진 모델을 이용하여 냉장실내 온도센서의 최적위치에 관하여 고찰한다.

1. 서론

냉장고는 냉장실내의 온도를 일정하게 유지함으로써 식품들을 신선하게 보관한다는 목적을 가지고 있으나, 실제로 냉장실내부의 온도분포를 측정해보면, 선반에 의한 구역분리, 냉기의 정체등에 의하여 그 분포가 일정치 않음을 쉽게 확인할 수있다. 이러한 온도분포의 편차는 과냉현상의 원인을 제공하며, 에너지효율을 나쁘게하는 요인이 되고있다. 또한 최근에는 부하가 발생한 지역에 냉기를 집중시켜 저장물의 빠른 냉각효과 및 온도평형을 빠르게함으로써 에너지 효율을 좋게하는 집중냉각방식을 채택한 제품들이 많이 나오고 있다.

이러한 과냉현상의 방지 및 집중냉각방식에 있어 냉장실내 온도분포의 추정은 필수적인데, 지금까지의 연구에서는 냉장실 내부벽면에 부착된 센서로부터 얻어진 샘플링데이터의 현재값 및 과거값과의 차분을 이용하여 냉장실내의 온도분포를 추정하는 TSK 퍼지 모델이 제안되어 있는 정도이다[2]. 그러나, 이 모델은 정적시스템으로 구성되며, 냉장실의 온도분포에 직접적인 영향을 미치는 압축기 및

냉기팬의 운전상황을 고려하고 있지 않다는 단점이 있다.

본 연구에서는 냉장실 내부를 6개 공간으로 나누고, 각 공간에 대하여 압축기 및 냉기팬의 운전상황을 입력값으로 갖는 온도모델을 구축하였다. 온도 모델에 있어서는 퍼지 불감대를 갖는 적응시스템을 이용하여 강건성을 갖도록 하였으며, 시스템의 파라미터 동정과정을 통하여 가장 추정정도가 높은 파라미터 추정치가 얻어지는 공간벽면에 센서를 위치하게 함으로 온도분포의 추정도를 높힐 수 있게 하였다.

2. 퍼지 적응 동정 알고리즘

n번째 공간의 온도분포 s 를 다음과 같은 비선형 시스템으로 가정하자.

$$\begin{aligned} s_i(k+1) &= f(s_i(k), u(k)), \\ &\cong a_{i1}s_i(k) + a_{i2}s_i(k-1) + b_{i1}u(k) + b_{i2}u(k-1) + \omega_i(k) \\ &= \theta_i^T \phi_i(k) + \omega_i(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $u(t)$ 로는 압축기 및 냉기팬의 운전상황을 상징하며, $\omega_i(k)$ 는 선형화 오차를 포함한 주위부하등에 의한 외란을 의

미한다. 상기 시스템에 대한 동정모델(Identification Model)로 다음과 같은 선형시스템을 정의한다.

$$\hat{s}_i(k+1) = \hat{a}_{i1}(k)s_i(k) + \hat{a}_{i2}(k)s_i(k-1) + \hat{b}_{i1}(k)u(k) + \hat{b}_{i2}(k)u(k-1) = \hat{\theta}_i^T(k)\phi_i(k) \quad (2)$$

여기서, θ 는 a, b 를 요소로 갖는 미지(unknown)의 시스템 파라미터 벡터이며, $u(k)$ 는 압축기 및 냉기팬의 운전상황을 고려하여 다음과 같이 정규화하였다.

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

공간 i 의 실측치와 동정모델의 출력치와의 오차를

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

로 정의하면, 우리는 $\lim_{k \rightarrow \infty} |e_i(k)| \leq \epsilon$ 를 만족하도록 동정모델의 파라미터를 수정해 나감으로서 실제 시스템과 유사한 거동을 하는 모델을 얻을 수가 있다. 여기서 ϵ 는 설계자가 설정하는 오차의 허용 범위로 선형화 오차 및 외란등을 고려하여 결정된다.

시스템의 외란(선형화 오차를 포함)이 $w(k) \leq \delta$ 를 만족한다고 가정할때 퍼지 불감대를 이용한 적응 알고리즘에서는 다음과 같은 퍼지집합을 정의한다.

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

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

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.

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

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

이때, 위의 함수를 이용한 적응 알고리즘은 다음과 같이 정의된다.

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

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

여기서 λ 는 작은 실수로 분모가 0로 되는 것을 방지하기 위해서 도입된다. 이때 동정 알고리즘은 다음과 같은 성질을 만족하게되며, 따라서, 외란에 대해서도 강건한 적응알고리즘이라 할 수 있다.

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

여기서, $\|\cdot\|$ 는 Euclidean Norm 을 나타낸다.

여기서 제시된 퍼지 적응알고리즘의 경우, 일반 불감대를 이용한 적응알고리즘이 설계자가 설정한 오차의 유의 수준의 두배($\pm 2\delta$)가 불감대로 설정되어, 이 영역안에서는 적응동작이 이루어 지지 않는다는 단점을 개선한 것이다. 즉, 퍼지 불감대를 이용한 적응알고리즘에서는 불감대내에서도 적응동작이 이루어져 허용오차의 범위가 실질적으로 적어지게 되며, 따라서, 좀더 실시스템에 가까운 거동을 하게 되는 것이다. 또한, 외란의 상계를 명확히 결정하기 어려운 경우에 있어서도, 설계의 자유도를 높혀줌과 동시에 강건한 적응알고리즘을 설계할 수 있다는 장점이 있다.

3. 세트실험을 통한 온도 모델링

A) 실험환경

■ 실험용 세트 : 2대 (570리터급)

온도센서 : a. 냉장실 내부 : 5 kh/set(Thermo-couple)

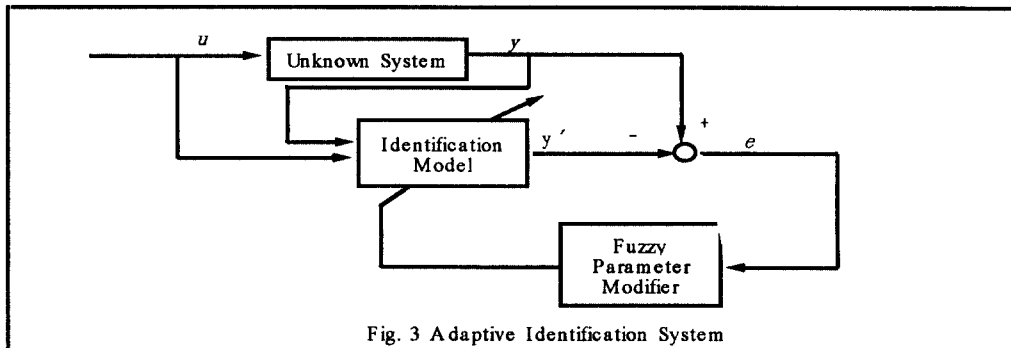


Fig. 3 Adaptive Identification System

b. 압축기(1ch/set), 냉기팬(1ch/set)

■ 실험 종류 :

a. 무부하 실험

b. 부하실험 (6 Area, 25℃ 물이 담긴 얼음그릇)

■ 실험시간 : 20-60분/조건

■ 샘플링시간 : 30sec

이러한 실험환경하에서의 무부하실험에 의해 얻어진 데이터를 이용하여 냉장고내 온도분포를 추정하는 온도모델의 파라미터 동정을 실시하였다($\delta=0.2^\circ\text{C}$).

이제앞서, 냉장실 벽면에 부착한3개의 센서로부터의 실측값을 이용하여 냉장실내 6개 공간의 온도분포를 추정해 내는 문제의 한 해결방법으로 신경회로망을 이용한 학습을 시도해 보았다(입력층 3, 중간층(3-6),출력층 6, Simulation Package "Neuralware" 를 이용). 중간층의 개수를 변화시켜 가며 학습을 시행한 결과 신경회로망의 학습정도를 나타내는 RMS(Root Mean Square) 오차가 학습횟수의 경과와 함께 수렴하지 않고 일정한 범위내에서 변동하고 있었다. 이것은 학습이 이루지고 있지 않다는 것을 의미하며, 따라서 3곳의 센서의 측정값을 이용하여 냉장실내 온도 분포를 추정해 내기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 그 원인으로는, 냉장실 벽면 온도와 냉장실내 공간의 온도분포간에 일대다 대응(One-to-Multi mapping) 관계가 있는 것으로 유추해 볼 수 있다. 즉, 벽면 센서로부터 입력되는 온도가 동일한 경우에도 냉장실내 공간온도로는 여러 가지 분포가 존재하는 것이다. 따라서, 이러한 현상이 신경회로망이 갖고 있는 Pattern Classification, Nonlinear Function Approximation 등의 특징을 살릴수 없게 하는 학습방해 요소로서 작용하고 있는 것으로 유추되며, 벽면센서 3개의 데이터값을 가지고 냉장실내의 주요공간의 온도분포를 추정하기란 어렵다는 것을 알수 있었다.

B) 파라미터 동정과정

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

표1: 추정된 파라미터와 추정오차

	a_1	a_2	b_1	b_2	$\sum \{\epsilon(k)\}^2$ k=90..120
CH02(θ_1)	0.820	0.153	0.209	0.129	0.282
CH07(θ_2)	0.521	0.465	0.366	0.220	1.232
CH19(θ_3)	0.617	0.355	0.280	0.170	0.355
CH24(θ_4)	0.770	0.203	0.240	0.162	1.238
CH38(θ_5)	0.453	0.494	0.537	0.406	2.927
CH39(θ_6)	0.799	0.165	0.235	0.162	0.901

여기서, 오차의 합계는 90샘플링 시간이후 적응알고리즘을 정지시킨 상태로 120샘플링 시간까지 30샘플링 시간동안의 센서의 측정치와 모델의 추정치와의 오차를 합계한 것이다.

이상의 실험결과에서 1샘플링 시간당 오차는 CH38을 제외하고 약 0.03-0.07℃임을 알 수가 있다(CH38의 경우는 0.3℃정도). 이것은 우리가 설정한 오차의 허용범위($\delta=0.2$)를 만족한은 물론, 냉장고의 온도해상도(냉장고에서 사용하는 온도의 해상도는 0.1℃)를 밑도는 수치로, 퍼지적응모델이 냉장실 내부의 온도모델로서 충분히 유의하다는 것을 나타내고 있다.

C) 온도센서 위치 선정에의 응용

냉장실 내부의 온도를 면밀히 파악하기 위해서는 온도센서를 많이 사용하는 것이 좋을 것이라는 것은 명백한 사실이다. 하지만 센서추가에 따른 원가상승등을 고려하면 사ంగ켓수에는 한계가 있고, 이러한 한계를 고려해 한정된 센

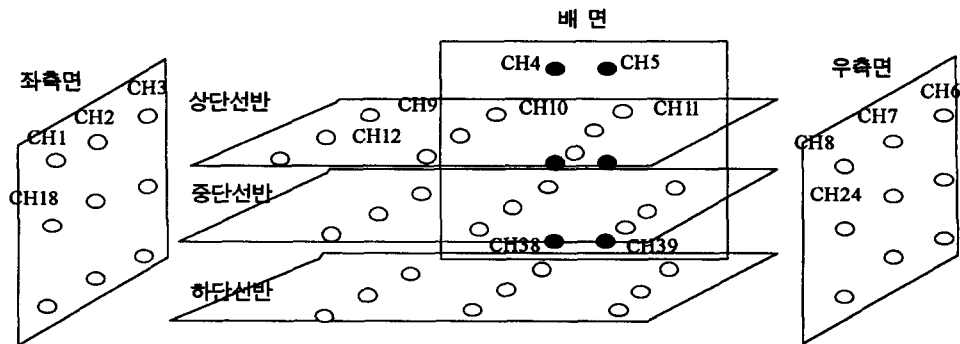


Fig. 2) 실험세트 센서 설치도

서를 이용해 냉장실의 온도분포를 추측하기 위해서는 센서를 온도분포 추측에 적합한 곳에 위치하도록 하는 등의 연구가 필요하겠다. 여기서는, 상기의 퍼지적용모델을 이용하여 이와같은 온도센서의 위치선정 문제에 대해 생각해 보기로 한다. 여기서, 냉장실 내부에 3개의 센서를 위치시키는 경우를 생각하면,

- ▶ 냉장실내 각단에서 최소한 한개의 센서는 존재해야 함.
- ▶ 인접하는 상하단 사이에는 대각선으로 위치하는 것이 바람직함.
- ▶ 하단은 좌/우 측면쪽이 아니라 배면쪽(CH38, CH39)에서 선정함.

이러한 조건을 만족하는 센서위치의 조합으로는 다음과 같은 4개그룹이 존재한다.

	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 각그룹의 모델에 대해 표1의 파라미터를 이용하여 실험용 데이터로 모델의 추론정도를 검정하여 표2와 같은 결과를 얻었다.

표2 : 실험데이터를 이용한 파라미터의 검증

	CH02	CH07	CH19	CH24	CH38	CH39
θ_1	4.18	7.040				
θ_2	7.040	9.350				
θ_3			5.071	6.101		
θ_4			4.627	5.565		
θ_5					9.288	9.524
θ_6					6.143	6.356

이 실험에서는 하나의 파라미터 계열을 가지고 두영역의 추론을 하도록 해 다른 파라미터 계열과 비교하고 있다. 표2에서 파라미터 계열 θ_1 과 θ_2 는 CH02영역과 CH07영역을 각각 추론하여 서로 비교하고 있다. 이표에서는 온도 모델로서 추정정도가 좋게 나온 파라미터 계열로 상단좌측(θ_1)과 중단우측(θ_4), 하단중앙우측(θ_6)의 조합으로 이는 그룹2에 해당된다. 따라서, 냉장실 내부의 온도를 추론하는데 있어서 센서를 그룹2와 같은 형태로 위치시킴으로서 좀 더 좋은 정도의 온도 추론이 가능하다고 할 수 있겠다. 이와 같은 결과는 부하실험시에도 부하에 대한 감도가 다른

센서 위치의 조합보다 좋은 것으로 나타나 부하 위치 판정 시에도 유효하였다.

4. 결론

본 연구에서는 냉장실의 온도분포를 추정하는 온도모델로서 퍼지적용시스템을 제안하고 있다. 본 시스템은 퍼지 불감대를 갖는 등적선형시스템으로, 다른 연구에서는 고려되지 않았던 압축기와 냉기팬의 운전상황을 입력으로 하여 냉장실 내부의 온도분포를 추론하고 있다. 또한 이 모델을 온도센서의 위치 선정문제에 적용하여, 온도추정정도가 좋은 센서위치 조합을 도출해 내었다. 이러한 온도모델은 냉장실의 과냉현상의 방지, 당사에서 채용하고 있는 회전날개에 의한 집중제어에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김지관외 2명, "퍼지등정모델에 의한 미지시스템의 등정", '96한국퍼지 및 지능시스템학회 춘계학술대회, pp156-159, 1996.
2. 강운석외 4명, "감성공학기법을 이용한 냉장고 온도 제어", '96한국퍼지 및 지능시스템학회 춘계학술대회, pp160-164, 1996.
3. J.K. Kim and K. Hagino, "Adaptive Hybrid Control Using Fuzzy Set Theory", *SOFT*, Vol.6-2, pp378-401, 1994.