

## PI 제어 VAV 시스템에 대한 공조공간의 열응답특성 실험

문 정 우, 박 강 순, 김 서 영<sup>†</sup>

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

### Experiments on Thermal Response of Space Conditioned by a PI-Controlled VAV System

Jeong Woo Moon, Kang Soon Park, Seo Young Kim<sup>†</sup>

Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 139-791, Korea

(Received August 24, 2001; revision received January 2, 2002)

**ABSTRACT:** The present study concerns an experiment on the supply-air control in variable air volume (VAV) system with a PI control logic. A thermal chamber with a PI control logic is constructed to verify the previously suggested multi-zone model. The stratified thermal model is adopted in the control logic for a thermal chamber cooling test. The effects of thermal parameters and control parameters such as supply air temperature and PI control factor are investigated by implementing the thermal chamber cooling test. The experimental results obtained show that the transient behavior of the air-conditioned space temperature are in good agreement with the simulation results of the stratified thermal model.

**Key words:** VAV system(변풍량 시스템), Stratified thermal model(성층화 모델), PI control(PI 제어), Thermal response(열응답)

#### 기 호 설 명

$F_0$  :  $F_0$  수,  $(UA)_j td / (MC)_j$

$F_{O_2}$  :  $F_{O_2}$  수,  $(UA)_{j,j+1} td / (MC)_j$

$min$  : 최소 허용 급기조절량

$PB$  : 온도변화 범위 [ $^{\circ}C$ ]

$PIF$  : PI 제어변수

$Q_g$  : 실내 열발생률 [W]

$R$  : R 수,  $\rho c V_{max} / (UA)_j$

$t$  : 시간 [sec]

$td$  : 지연시간 [sec]

$T$  : 공간 대표온도 [ $^{\circ}C$ ]

$T_i$  : 공간 초기온도 [ $^{\circ}C$ ]

$T_o$  : 외기온도 [ $^{\circ}C$ ]

$T_r$  : 공간 설정온도 [ $^{\circ}C$ ]

$T_s$  : 급기온도 [ $^{\circ}C$ ]

$(UA)$  : 열전달계수 [W/ $^{\circ}C$ ]

$V_{max}$  : 급기의 체적유량 [ $m^3/sec$ ]

$x$  : 급기조절량

#### 그리스 문자

$\theta$  : 무차원 온도,  $(T - T_r) / PB$

$\rho c$  : 급기의 열용량 [ $J/m^3 \cdot ^{\circ}C$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-568-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

#### 상첨자

$i$  : 시간순서

하첨자

$j$  : 존(zone)의 위치  
 $t - td$  : 현재 시간보다  $td$  전의 시간

1. 서론

공조시스템의 설계와 운영에 있어서 가장 중요한 인자는 공조공간의 쾌적성 유지와 시스템의 에너지 효율성이다. 현재 VAV 시스템은 이 두 가지 인자의 효율성을 인정받아 빌딩의 공조시스템으로 널리 보급되어 사용되고 있다. 그러나 VAV 시스템을 포함한 공조시스템은 비선형적인 공조 공간 열적 동특성과 공조시스템의 많은 제어변수로 인하여 효율적인 운전제어가 어려운 실정이다.

효율적인 공조시스템의 운영을 위해서는 실제 공조공간의 열·유동적인 특성을 선형 시스템으로 모델링하고 시뮬레이션을 통한 충분한 성능평가와 검증결과를 바탕으로 공조시스템을 구축·운전하는 것이 필수적이다. 이를 위해 Kim et al.<sup>(1)</sup>은 공조공간의 에너지 평형으로부터 실내 공간의 평균온도와 그에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 간의 관계식을 유도하였다. Lu et al.<sup>(2)</sup>과 Zaheer-Uddin<sup>(3)</sup>은 개별 공간이나 공조시스템을 하나의 영역으로 하는 다중영역모델에 대해 해석하였다. Zhang and Nelson<sup>(4)</sup>은 공조공간을 균일한 집중 열용량계로 가정한 단일영역모델(1-zone)을 제안하여 급기제어에 의한 온도분포의 시간변화를 시뮬레이션하였다. Moon et al.<sup>(5)</sup>은 써모스탯의 위

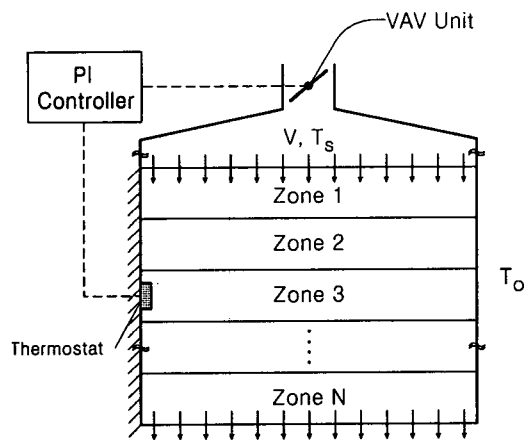


Fig. 1 Schematic of an air-conditioned space.

치에 따른 급기제어의 부정확성을 개선하기 위하여 단일영역모델을 확장시킨 성층화 모델을 제안하여 공간계의 특성을 선형화시키고, 선형화된 공간모델을 바탕으로 VAV 시스템 급기제어 시뮬레이션을 수행하였다. 성층화 모델을 이용한 VAV 시스템의 급기제어 시뮬레이션을 통해 공간의 국부적 열응답특성을 보였다.

본 연구에서는 Moon et al.<sup>(5)</sup>이 제안한 성층화 모델을 사용하여 VAV 시스템 급기제어기를 구성하고, 이를 실제 냉방전용 공조시스템에 적용하여 실험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 성층화 모델의 타당성을 검토하고 공간의 열응답특성을 밝히고자 한다.

2. 공조공간 모델링

공조공간의 열적동특성을 선형화시키기 위하여 Moon et al.<sup>(5)</sup>은 Fig. 1과 같은 공간에 대하여 성층화 열용량 모델을 제시하였다.

$$\theta_j^i - \theta_j^{i-1} = \frac{Fo}{n} (\theta_o - \theta_j^{i-1}) - \frac{Fo}{n} xR (\theta_j^{i-1} - \theta_{j-1}^{i-1}) + \frac{Fo_2}{n} (\theta_{j+1}^{i-1} - 2\theta_j^{i-1} + \theta_{j-1}^{i-1}) \quad (1)$$

여기서,

$$\theta = \frac{(T - T_r)}{PB} \quad (2)$$

$$Fo = \frac{(UA)_j}{(MC)_j} td, \quad Fo_2 = \frac{(UA)_{j,j+1}}{(MC)_j} td \quad (3)$$

$$R = \frac{\rho c V_{max}}{(UA)_j} \quad (4)$$

$$x = (1 - min) \left[ \theta_j^{i-n} + PIF \Delta t \sum_{k=0}^{i-n} \theta_j^{k-n} \right] \quad (5)$$

$$n = \frac{td}{\Delta t} \quad (6)$$

이다. 여기서,  $PIF$ 는 PI 제어변수이다.

본 연구에서 열환경 챔버의 냉방실험을 수행하기 위하여 성층화 모델에 식(5)의 PI 제어 로직을 추가하여 VAV 시스템의 급기제어기를 구성하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

Fig. 2는 VAV 시스템의 급기 제어 실험을 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 열환경 챔버와 이를 냉방하기 위한 공조기, 급기량을 조절하는 VAV 유닛으로 구성하였다. 실험에 사용되는 열환경 챔버는 3m×1.7m×2.75m 크기의 직육면체 방으로 사무실 공간을 모형화하였다. 성층화 모델을 적용하기 위하여 내부공간을 4개의 영역(존)으로 구분하였다. 냉방에 의한 열환경 챔버 내의 온도변화와 분포를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 T-type 열전대를 각 존별로 15개, 총합 60개를 설치하였다.

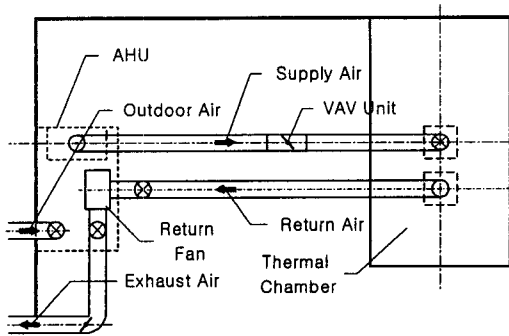


Fig. 2 Schematic of experimental setup.

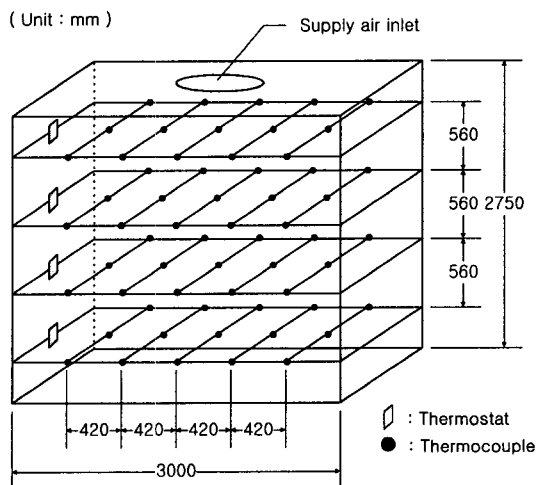


Fig. 3 Temperature measuring locations in the thermal chamber.

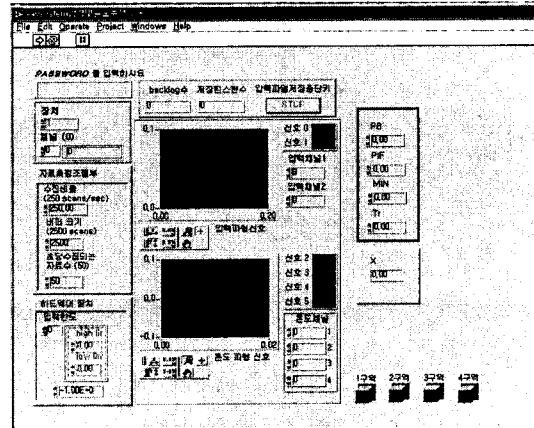


Fig. 4 VAV system control panel.

실험을 위하여 3RT급 냉방전용 공기조화기를 설계·제작하였다. 급기 송풍기의 최대 풍량은 40 CMM, 최대 정압은 40 mmAq이다. 공조기와 열환경 챔버는 직경 250 mm의 원형 덕트로 연결되어 있다. 실험에 사용된 VAV 유닛은 댐퍼형 유닛으로 최대 정압 손실은 20 mmAq이다.

공기조화기로부터 토출된 급기는 덕트를 지나 열환경 챔버 천장의 토출구를 통해서 공간으로 공급되어 공간을 냉방한다. 공간을 식힌 공기는 환기구를 통해서 환기되어 일부는 공조기로 다시 환급되고 일부는 외부로 버려진다. 버려진 환기를 보완하기 위해서 외기 덕트를 통해서 신선 외기가 도입된다. 외기 덕트와 환기 덕트에 댐퍼를 설치하여 외기와 환기 혼합비율을 조정하였고 외기 댐퍼와 환기 댐퍼의 개도량은 측정된 AHU 도입 공기의 온도를 이용하여 조절된다. 이때 VAV 유닛은 성층화 모델의 식(5)를 이용하여 구성된 제어기에 의하여 PI 제어된다.

공간 내의 온도는 열환경 챔버 내의 4개의 각 영역에 설치된 Pt 1000Ω의 써모스텝으로부터 제어기로 입력된다. 구현된 PI 제어기는 이 온도와 공간 설정온도를 비교하여 VAV 유닛의 댐퍼 위치를 변환시키게 된다. VAV 유닛의 제어기와 측정된 온도는 Fig. 4와 같이 PC에 구현된 제어패널에 의해 작동·측정된다.

#### 3.2 실험방법

VAV 시스템의 급기 제어 실험을 수행하기 전에 공기를 냉각코일에 통과시킨 상태에서 냉동기를

가동시켜 급기의 온도를 12°C로 일정하게 유지시켰다. 공간의 설정온도, PIF값을 정하고 최대 급기량을 각각 500 CMH, 600 CMH, 800 CMH, 1000 CMH으로 설정한 후 VAV 유닛 제어시스템과 공조기를 가동시켜 VAV 시스템의 급기 제어실험을 수행하였다. 공간이 냉각되어 일정하게 유지되는 정상상태까지 각 존에서의 온도를 열환경 챔버 내에 설치된 열전대를 통하여 1초 간격으로 수집, 저장하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 성층화 모델에 대한 검증

성층화 모델의 타당성을 검증하기 위하여 급기 온도, 열환경 챔버 내 초기온도와 외기온도를 각각 12°C, 20°C, 16°C로 설정하고 내부 발열량을 1000 W, 급기량을 1000 CMH으로 고정시키고 실험을 수행하였다. 실험조건과 동일한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 공간의 물성치를 다음과 같이 설정하였다. 공조공간의 열용량은 열환경 챔버 내 공기의 질량  $M$ 과 20°C 공기의 비열  $c=1008$  [J/kg°C]와 밀도를 이용하여 구하면 16647 [J/°C]이고, 성층화 모델의 경우 각 영역의 열용량  $(MC)_j$ 는 전체 공간의 열용량을 영역의 개수  $N$ 으로 나눈 166475/N [J/°C]이고,  $(UA)_j$ 는 각 영

역에서 외부로부터의 열투과도로 43.23/N [W/°C]이다. 이는 외기로부터의 열유입이 열전도계수가 1.38 [W/m°C]인 유리벽면과 나무판을 통하여 이루어진다고 가정하고 공간 내의 열전달과 외기로부터의 열전달은 혼합 대류열전달에 의해 이루어진다고 설정하여 구하였다.<sup>(6)</sup> 또한  $(UA)_{j,j+1}$ 은 영역들간의 공기의 전도열전달계수와 공간의 대류열전달을 혼합대류열전달로 설정하여 구한 대류열전달계수를 대상으로 계산하였을 때 0.07 [W/°C]의 값을 가진다.<sup>(6)</sup>

열환경 챔버 내의 평균 온도의 변화를 성층화 모델과 단일영역모델과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 열환경 챔버를 이용한 실험결과와 성층화 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교할 때 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 단일영역모델을 사용하였을 때의 시뮬레이션 결과는 실제 공간의 온도변화와 많은 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 공조공간 내의 온도분포에 대하여 열환경 챔버의 냉방 실험결과와 성층화 모델에 의한 시뮬레이션 결과를 비교하고 있다. 성층화 모델을 사용하여 공간의 온도 성층화 정도를 실제의 경우와 거의 유사하게 모사할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 성층화 모델을 사용하여 VAV 시스템의 급기제어 시뮬레이션을 수행하여 얻은 결과를 보면 공조공간의 온도가 평균적으로 4~6°C

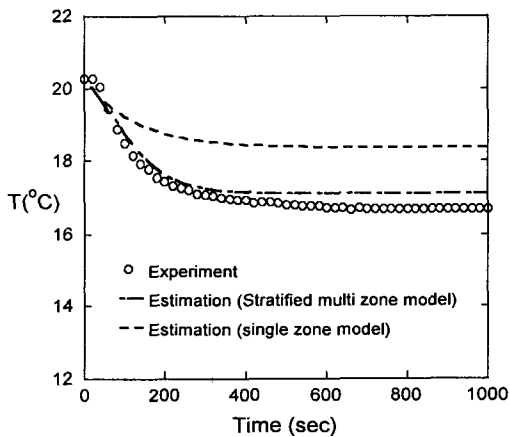


Fig. 5 Transient behavior of mean temperature.  $T_i=20^\circ\text{C}$ ,  $T_o=16^\circ\text{C}$ ,  $Q_g=1000$  W,  $V_{\max}=1000$  CMH,  $Fo=2.59 \times 10^{-2}$ ,  $Fo_2=4.2 \times 10^{-5}$ , and  $R=7.46$ .

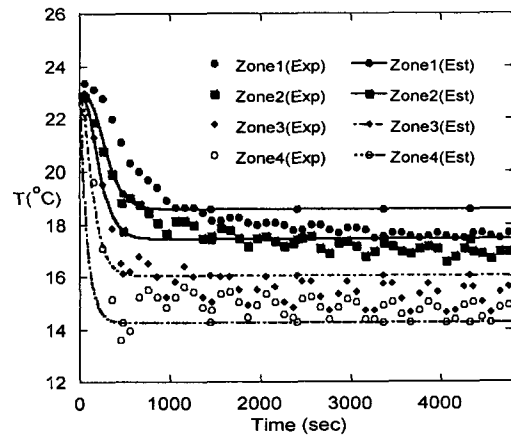


Fig. 6 Transient behavior of space temperature.  $T_s=12^\circ\text{C}$ ,  $T_r=17^\circ\text{C}$ ,  $V_{\max}=500$  CMH,  $Fo=2.59 \times 10^{-2}$ ,  $Fo_2=4.2 \times 10^{-5}$ ,  $R=4.66$ .  $PB=5^\circ\text{C}$ . and  $PIF=0.05$ .

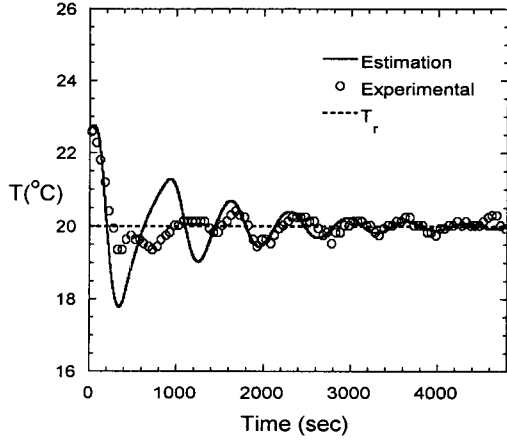


Fig. 7 Transient behavior of third zone temperature.  $T_s=12^\circ\text{C}$ ,  $T_r=20^\circ\text{C}$ ,  $V_{\max}=600$  CMH,  $F_o=2.59 \times 10^{-2}$ ,  $F_{o_2}=4.2 \times 10^{-5}$ ,  $R=4.66$ ,  $PB=5^\circ\text{C}$ , and  $PIF=0.01$ .

정도의 성층화를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 급기온도와 공간 설정온도가 각각  $12^\circ\text{C}$ 와  $20^\circ\text{C}$ 이고 최대 급기량이 600 CMH,  $PIF$  수가 0.01일 때 공간 내의 온도변화에 대한 실험결과와 성층화 모델을 사용하여 예측한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 VAV 시스템 급기 제어실험을 통하여 나타난 공간의 온도변화 결과는 성층화 모델을 사용하여 예측한 결과와 유사한 온도변화 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션을 통하여 예측된 결과를 살펴보면 초기에 온도변화 폭이 실험결과보다 다소 크게 나타나고 있다. 실제 공조공간으로 유입되는 공기는 내부에서 발생하는 이차 유동에 의한 상호 혼합으로 더욱 복잡한 양상을 띠게 된다. 이러한 이차 유동의 유체혼합효과로 실제의 온도변화는 성층화 모델에 의해 얻어진 온도변화보다 그 폭이 다소 작게 된다. 그러나 공간의 온도분포가 어느 정도 균일해져 공간 설정온도에 도달한 후의 온도변화는 실험결과와 예측결과가 잘 일치하는 함을 보이고 있다.

Fig. 8는 최대 급기량이 1000 CMH로 증가하였을 때 공간의 온도변화를 나타낸 그림이다. 급기량이 1000 CMH로 늘어나면 유체혼합의 증가로 인해 초기 온도변화 경향이 시뮬레이션 결과와 다소 차이를 보이게 된다. 그러나 실제 같은 체적의 공조공간에서의 풍량은 대개 1000 CMH

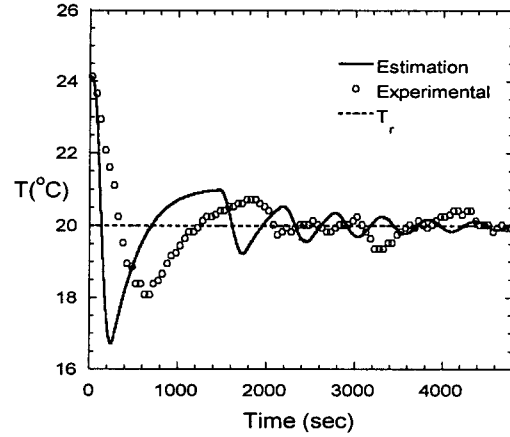


Fig. 8 Transient behavior of third zone temperature.  $T_s=12^\circ\text{C}$ ,  $T_r=20^\circ\text{C}$ ,  $V_{\max}=1000$  CMH,  $F_o=2.59 \times 10^{-2}$ ,  $F_{o_2}=4.2 \times 10^{-5}$ ,  $R=7.46$ ,  $PB=5^\circ\text{C}$ , and  $PIF=0.01$ .

보다 낮은 풍량이므로 시뮬레이션 결과는 충분한 정확도를 제공할 것으로 사료된다. 또한 제어 초기에 심한 온도변화 경향을 보이는 것은 공조시스템의 용량이 공조공간에 비하여 과다하게 설정되어 있어 발생하는 것이다.<sup>(5)</sup> 따라서 공간의 특성에 맞는 적절한 풍량의 공조시스템 결정이 중요하다. 성층화 모델을 사용한 시뮬레이션의 결과 역시 비슷한 경향을 보이고 있다.

#### 4.2 제어변수에 따른 공간온도 변화의 영향

Fig. 9는 최대 급기량이 800 CMH일 때  $PIF$ 에 따른 공간의 온도변화를 나타낸 것이다.  $PIF$  수가 커질수록 공조공간 내의 온도분포는 불안정해지는 것을 알 수 있다. 이는 적분 제어가 실제 공간온도와 설정온도 간의 차를 적분하여 정상상태를 찾아가는데  $PIF$  값이 부적절하여 설정온도와의 오차를 보정하지 못하기 때문에 발생한다.<sup>(5)</sup>

급기온도  $T_s$ 가 공간의 온도변화에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타내었다.  $T_s$ 가 낮을수록 공간의 온도변화가 불안정해져 초기에 과냉각되는 현상이 발생한다. 이러한 현상은  $T_s$ 가 낮을수록 조그만 풍량의 변화에도 공간의 온도변화 폭이 커지게 되어 시스템이 불안정해지기 때문이다. 이전의 Zhang and Nelson,<sup>(4)</sup> 그리고 Moon et al.<sup>(5)</sup>

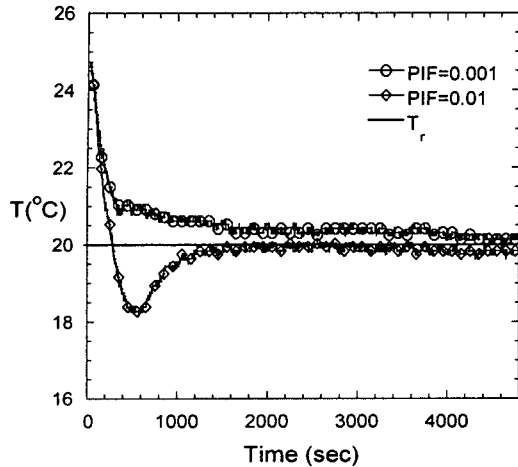


Fig. 9 Effect of  $PIF$  on temporal variation of third zone temperature.  $T_s=12^\circ\text{C}$ ,  $V_{\max}=800$  CMH.  $Fo=2.59 \times 10^{-2}$ ,  $Fo_2=4.2 \times 10^{-5}$ ,  $R=4.66$ , and  $PB=5^\circ\text{C}$ .

은 급기온도를 공간의 온도변화 범위인  $PB$ 를 이용하여  $\theta_s$ 로 무차원화하였는데, 이는 급기온도의 영향이 공간의 온도변화 범위와 연관이 되어 있다는 것을 나타낸다. 공간의 변화 범위  $PB$ 가 커지면, 즉 공간의 냉방수용 능력이 커지면 급기온도  $T_s$ 가 낮아져도 공간의 온도변화는 안정적으로 변화한다.<sup>(5)</sup>

## 5. 결론

공조공간에 대한 VAV 시스템 급기제어 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 성층화 모델을 이용하여 비선형적인 실제 공조공간의 열적 동특성을 선형성을 유지하면서 비교적 정확하게 모사할 수 있다.

(2) 성층화 모델이 기존의 단일영역모델에 비하여 공조공간 내의 국부적인 열적 동특성을 잘 예측하였다.

(3) 성층화 모델이 나타내는 공간온도 분포의 성층화는 실제 냉방되는 공조공간에서도 발생함을 실험적으로 확인하였다. 그러므로 써모스탯의 설치위치에 따라 실내 온열쾌감도는 크게 달라질 수 있다.

(4) VAV 시스템의 급기제어에 있어서 PI 제어

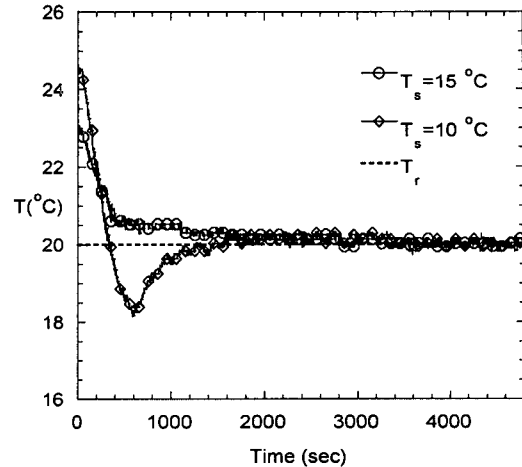


Fig. 10 Effect of  $T_s$  on temporal variation of third zone temperature.  $V_{\max}=600$  CMH,  $Fo=2.59 \times 10^{-2}$ ,  $Fo_2=4.2 \times 10^{-5}$ ,  $R=4.66$ ,  $PB=5^\circ\text{C}$ , and  $PIF=0.001$ .

변수인  $PIF$  수와 급기온도  $T_s$ 는 공조공간의 열적 응답특성에 큰 영향이 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

1. Kim, W. N., Kim, S. Y., Kang, B. H. and Hyun, J. M., 1998, A Numerical simulation on room temperature measurement method for VAV system control, Proceedings of the SAREK'99 Summer Annual Conference, pp. 379-383.
2. Lu, W., Howarth, A. T., Adams, N. and Riffat, S. B., 1999, CFD modeling and measurement of aerosol particle distributions in ventilated multi-zone rooms, Vol. 106, pp. 116-127, ASHRAE Transaction.
3. Zaheer-Uddin, M., 1993, Energy start-stop and fluid flow regulated control of multi-zone HVAC systems, Vol. 18, pp. 289-302, Energy.
4. Zhang, Z. and Nelson, R. M., 1992, Parametric analysis of a building space conditioned by a VAV system, ASHRAE Transaction, Vol. 98, pp. 43-48.

5. Moon, J. W., Kim, S. Y., Kim, W. N. and Cho, H. H., 2000, Simulation of supply air control in a VAV system using a stratified lumped thermal model, Journal of SAREK, Vol. 12, pp. 632-641.
6. Mills, A. F., 1995, Basic Heat and Mass Transfer, 1st ed., Richard D. Irwin, INC., pp. 274-279.