

## PMV, TS 기준 건물 열 환경 제어법의 성능 및 적용성 분석

문 진 우<sup>†</sup>

전남대학교 바이오하우징연구사업단

### Performance and Applicability of PMV-based and TS-based Building Thermal Controls

Jin Woo Moon<sup>†</sup>

Biohousing Research Institute, Chonnam National University University, Gwangju 500-757

(Received May 9, 2011; revision received May 17, 2011)

**ABSTRACT:** The purpose of this study was to investigate the interactions between the thermal factors in existing thermal control methods and to find out the control logic that can create more comfortable thermal conditions. For it, four thermal control logics were developed : conventional temperature-based control; temperature-based and humidity-based control; PMV-based control; and TS-based control. Their performance was comparatively tested in the U.S. typical 5-story office building in two climate zones (Detroit, Michigan and Miami, Florida) for two seasons (winter and summer) incorporating IBPT (International Building Physics Toolbox) and Matlab/Simulink. Analysis on the thermal conditions and energy efficiency revealed that each control logic created comfortable conditions for their respective target, i.e., temperature, humidity, PMV or TS, but uncomfortable for others (e.g., temperature-based control logic maintained PMV or TS uncomfortably or vice versa). In addition, energy efficiency was significantly different by logics. In conclusion, it can be said that the overall thermal comfort can be improved by the adoption of the PMV and TS as a target variable and their economical benefits are expected in the hotter climate zones with the reduced cooling and dehumidifying energy consumptions.

**Key words:** Thermal controls(열 환경 제어), Predicted mean vote(예상 평균 온열감), Thermal sensation(온열감), Control logic(제어 로직)

#### 기호설명

$f_{cl}$	: 나체일 경우의 표면적에 대한 의복으로 둘러싼 표면적 비
$h_c$	: 대류열전달 계수 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{k}$ ]
$I_{cl}$	: 의복의 단열값 [ $\text{m}^2\text{k}/\text{W}$ ]
$M$	: 활동량 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$p$	: 수증기압 [kPa]

$p_a$	: 수증기분압 [Pa]
$t_a$	: 공기온도 [°C]
$t_{cl}$	: 의복의 표면온도 [°C]
$t_r$	: 평균복사온도 [°C]
$v$	: 공기속도 [m/s]
$W$	: 외부 일, 대부분의 활동에서 0 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

#### 1. 서 론

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-62-530-0639; fax: +82-62-530-1639

E-mail address: gilerbert73@gmail.com

건물 열 환경 조절의 가장 일반적인 방법은 실내 공기 온도 조절에 의한 것이며, 이를 위해 온도조절

기(thermostat)의 설치를 통해 재실자의 열적 요구를 바탕으로 열 환경 제어 시스템을 제어함으로써 쾌적한 실내 온도 조건을 유지하였다. 최근, 다양한 열적 요소의 고려에 대한 필요성을 바탕으로 습도가 제어를 위한 목적 요소에 점차 포함되어지고 있으며, ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers)와 ISO(International Organization for Standardization) 7730 스탠다드를 통해 인정된 PMV(Predicted Mean Vote) 및 TS(Thermal Sensation : 열감각) 등을 고려한 종합적 열 쾌적 제어법의 적용 가능성에 관한 연구가 진행 중이다.<sup>(1, 2)</sup>

이러한 배경하에 PMV의 측정 및 계산법에 관한 연구가 진행되어, 온도, 습도, 공기속도 등 열적 요소의 통합된 측정 및 마이크로 컨트롤러에 의한 PMV 계산법이 개발되었으며, 이를 바탕으로 최근에는 광범위하게 분포된 스마트 센서 네트워크(Distributed Smart Sensor Network)를 적용한 PMV 측정법이 소개되었다. 특히, 네트워크에서 생산된 PMV 결과값이 컨트롤 알고리즘의 입력값으로 적용되어 실내 열 환경의 종합적인 제어가 가능하게 되었다.<sup>(3)</sup> 그 외에 인공지능(AI : Artificial Intelligence)의 적용을 통해 단순화된 실내 PMV 예측법이 개발되어, PMV를 통한 실내 열 환경 조절이 가시화 되었다.<sup>(4, 5)</sup> 이러한 실내 PMV의 적용은 재실자 개개의 의복에 의한 단열(Clothing Insulation, CLO)과 활동량(Activity level, MAT)을 고려한 개인의 최적화된 조절을 통해 보다 세밀한 제어를 가능하게 하였다.<sup>(6)</sup> 또한 TS의 열 환경 제어 요소로써의 적용을 위한 배경연구가 활발히 진행 중이며, 최근 TS와 열쾌적간의 관계 분석을 통해, 쾌적한 열 환경 조성을 위한 새로운 모델 및 TS 쾌적 영역이 제시되고 있다.<sup>(7, 8)</sup>

이와 같이 현재 PMV 및 TS를 통한 실내 열 환경 조절 방법은 그 적용 가능성 및 효용성에 대한 연구가 진행되는 단계이다. 하지만 PMV 혹은 TS를 목적으로 한 제어법의 도입 시, 건구온도, 상대습도 등 기준의 열 환경 요소에 대한 영향 및 상관관계 등에 관한 연구가 부족한 상황이다. 이러한 열 환경 요소들 간의 불충분한 상관관계 분석에 기인하여 한 가지 열 환경 요소를 목적 요소로써 적용 시 다른 열 환경 요소의 측면에선 쾌적하지 않을 가능성이 존재한다. 예를 들어 ASHRAE에서 제시한 쾌적 조건은 실내 온도 20.0~23.5°C(겨울철), 22.5~26.0°C(여름철), 습도 30~60%, TS -0.5~0.5, 그리고 PMV -0.5~0.5이다.<sup>(1, 9, 10)</sup> 이 때 예로써 겨울철 실내 건구온도

20°C, 상대습도 30%일 경우, 온도와 습도 측면에선 쾌적한 조건임에도 불구하고, PMV의 경우 계산을 통해 -1.2(COLD)로써 불편한 조건임을 알 수 있다.<sup>1)</sup> 이러한 예는 건구온도 및 상대습도를 목적으로 열 환경을 제어할 경우 PMV 혹은 TS의 측면에선 쾌적한 조건이 형성되지 않을 수 있으며 이는 반대의 경우 또한 발생할 수 있음을 의미한다. 즉, 온도, 습도, PMV, TS 등의 조절을 위한 제어 로직의 개발 및 적용 시 상호간 영향에 대한 심도 있는 분석이 선행되어야 할 것으로 예상된다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구의 목적은 현재 일반적으로 사용되고 있는 온도 기준 제어법과 새로이 도입되어지고 있는 습도, PMV, TS를 기준으로 한 제어법의 비교를 통해 (1) 각 목적 요소간 상관관계 분석, (2) 쾌적 측면에서의 열 환경 분석, (3) 에너지 효율 분석 등을 진행하며, 이를 바탕으로 보다 적합한 열 환경 제어 방법을 제시하는 것에 있다. 이를 위하여 일반적 온도 조절 방법을 포함한 네 가지의 열 환경 조절방법을 계획하였으며, 이들을 2 가지 기후(한랭, 고온 다습)로의 적용을 통하여 연구 결과의 일반성 확보 및 제어법의 각 기후대에 대한 적용 가능성을 분석하였다. 본 연구의 결과물은 건물의 열 환경 및 에너지 성능 측면에서 효율적인 제어법을 도입함에 있어 유용한 기초 자료로 사용될 것으로 기대되며, 특히 PMV 제어법의 도입 시 오피스 빌딩 등에서 개인적으로 구분된 공간의 세밀하고 개인화된 열환경 조성에 효과적일 것으로 판단된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 열 환경 제어 로직의 개발

열 환경 조절을 위한 방법으로 일반적 방법 한가지와 새로이 제시되는 세 가지 방법 등 네 종류의 컨트롤 로직을 계획했다. 일반적 방법은 현재 가장 보편적으로 적용되어지고 있는 온도에 의한 열 환경 조절법으로써(온도 조절 로직), 실내온도가 열 쾌적을 위한 유일한 목적 요소로써 작동하며 온도조절기 등의 센서를 이용하여 측정된 값이 냉난방기기의 작동을 위한 결정 요소로 작용하게 된다. Fig. 1은 온

1) 건구온도, 상대습도의 쾌적 영역 산정 시와 같은 조건  
도입 : 0.9CLO(겨울철), 1.0 Mat, 평균복사온도는 건  
구온도와 동일, 0.0 m/s 공기 속도.

도 조절을 위한 일반적 방법의 로직을 나타내며, 현재 온도, 냉난방기기의 현재 작동 상태 및 설정된 쾌적 범위 등의 고려를 통해 기기의 작동 여부를 결정한다.

새로이 제시되는 세 가지 방법은 온도/습도 조절로직, PMV 조절로직, 그리고 TS 조절로직이다. 온도/습도 조절로직은 Fig. 1의 기준의 온도 조절을 위한 로직 외에 Fig. 2의 습도 조절을 위한 로직을 독립적으로 도입하여, 실내 온도 및 습도를 각각 조절하도록 계획되었다. 온도 조절로직과 마찬가

지로, 습도 조절을 위하여 현재 습도, 감가습기기의 현재 작동 상태 및 설정된 쾌적 범위 등이 결정 요소로 작용한다.

PMV 조절로직과 TS 조절로직을 위한 로직은 Fig. 3에 나타나 있다. 이 두 로직은 동일한 구조의 알고리즘을 적용하고 있으며, 각각 현재 PMV 및 TS 상태, 이를 상승 혹은 하강시키기 위한 작동 상태, 그리고 각각의 쾌적 범위 등이 시스템 작동 결정 요인으로 작용한다. 특히 PMV 및 TS의 상승 및 하강을 위한 작동은 난방/가습과 냉방/감습으로

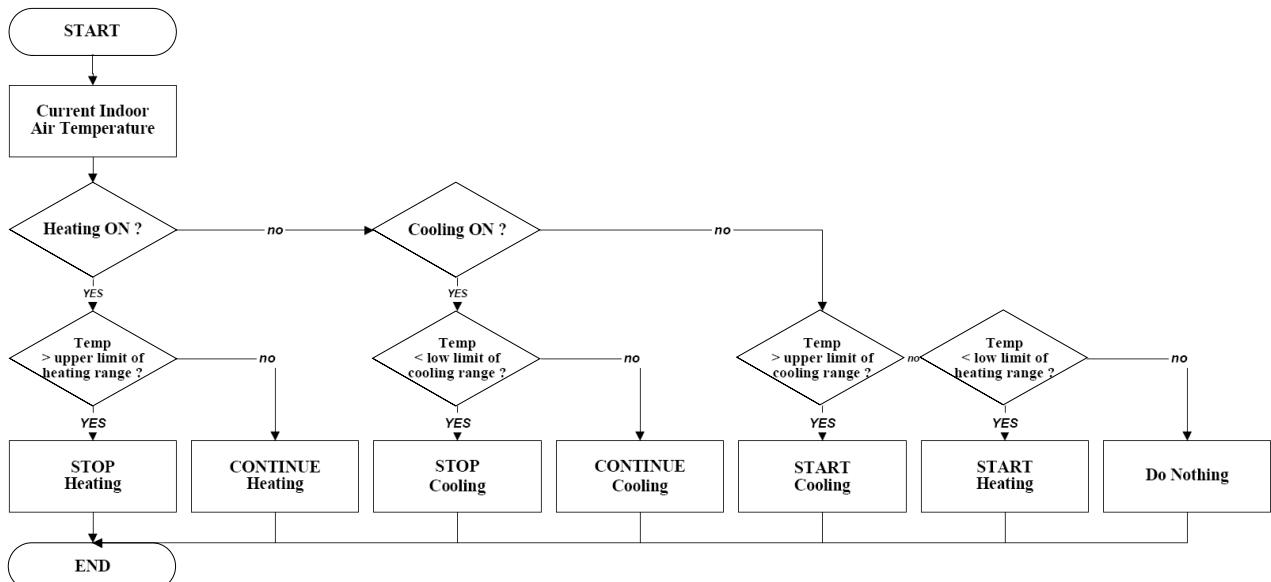


Fig. 1 Logic for air temperature controls.

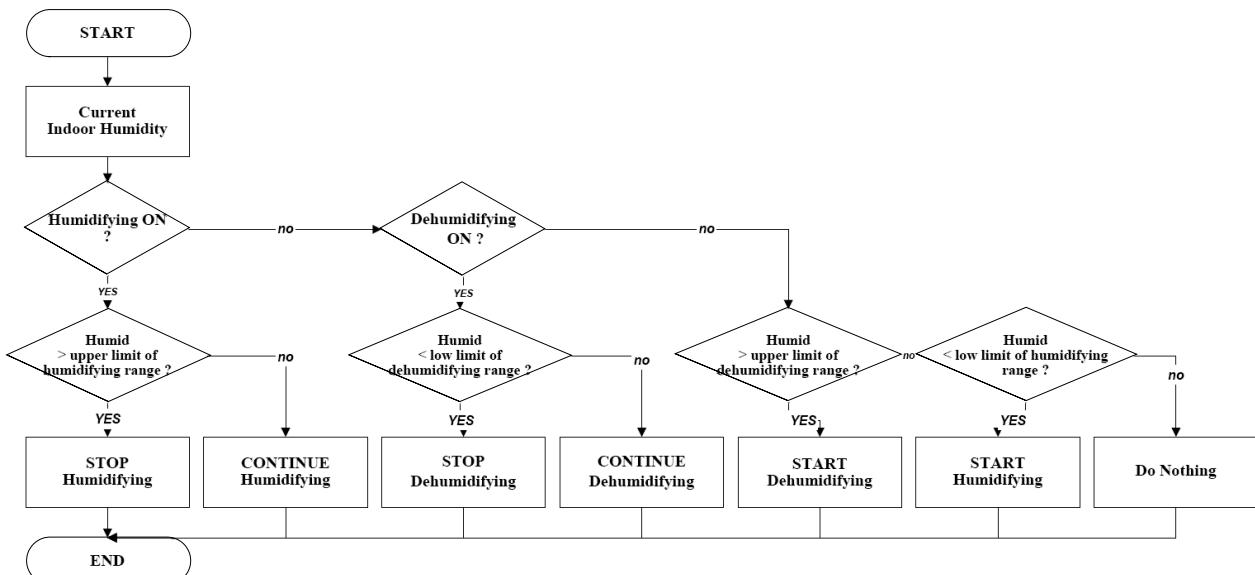


Fig. 2 Logic for humidity controls.

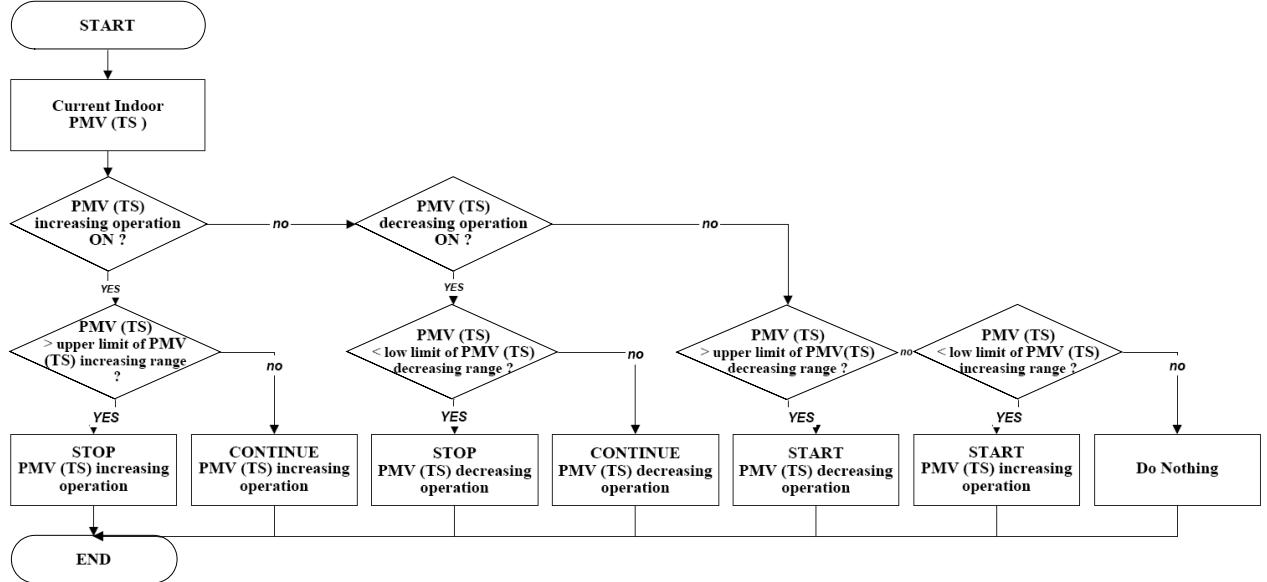


Fig. 3 Logic for PMV or TS controls.

구성된다. 두 로직의 가장 큰 차이점은 적용 가능성 분야에 있으며, 이는 PMV 조절로직의 경우 산출과정에서 주변 열 환경 요소들 뿐만 아니라 재설자 개개의 의복상태 및 활동량 등 개인적 요소를 고려함으로써 온도와 수증기압만을 고려한 TS와 달리 개인화된 요구를 만족시키기 위한 미세 환경 조절이 가능할 것으로 예상된다. PMV 및 TS 산출을 위한 과정이 아래의 식(1)~식(5)에 나타나 있다.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times \left\{ \begin{array}{l} (M-W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99 \\ \times (M-W) - p_a] - 0.42 \times [(M-W) - 58.15] \\ \times 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) \\ - 0.0014 \times M \times (34 - t_a) \\ - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \\ \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\ + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} \pm t_a) \end{array} \right\} \quad (1)$$

여기서,

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \times (M - W) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & - I_{cl} \times (3.96 \times 10^{-9} \times f_{cl} \\ & \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\ & + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)) \end{aligned}$$

$$h_c = 2.38 \times (t_{cl} - t_a) 0.25 \text{ 혹은} \quad (3)$$

$$= 12.1 \times v^{0.5} \text{ 중 큰 값}$$

$$\text{if } I_{cl} \leq 0.078m^2k/W, \quad (4)$$

$$f_{cl} = 1.00 + 1.29 \times I_{cl}$$

else

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645 \times I_{cl}$$

$$TS = 0.243t_a + 0.278p - 6.802$$

(젊은 성인, 3시간 공간 노출, 착석,  
0.5 CLO, 평균 복사 온도 = 공기 온도,  
공기 속도 < 0.2 m/s)

## 2.2 성능 평가

개발된 4가지 로직의 성능 평가를 위해 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 이를 위해 Building Physics Department, Chalmers University of Technology, Sweden과 Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark의 공동 개발을 통해 MATLAB/Simulink 환경과 통합적으로 작동하여 건물 열 환경 시뮬레이션에 효과적으로 적용 가능한 IBPT(International Building Physics Toolbox)와 MathWorks 사에서 개발, 공학적 계산에 필요한 다양한 툴을 제공하고 특히 Simulink 상의 라이브러리와의 연동을 통해 산술적 계산 적용에 용이한 MATLAB(Matrix Laboratory)을 통합적으로 사용하였으며,<sup>(11, 12)</sup> 시뮬레이션 툴의 유효성은 기존에 실시한 실험 결과와의 비교를 통해 열 환경 조성 및 에너지 사용량의 유사성으로 입증되었다.<sup>(13)</sup> IBPT는 (1) 건물외피, 침기 및 환기량, 실내 발열, 열 환경 제어 시스템, 초기 열 환경 조건, 기후 데이터 적

용 등 건물 열 환경과 관련된 요소의 모델링, (2) 열 환경 컨트롤 시스템의 작동에 따른 실내 열 환경 변화의 계산 등을 위해 작동하며, MATLAB은 (1) 제어 로직의 개발, (2) 로직을 이용한 시스템 작동 여부 결정의 역할을 수행한다. MATLAB 상의 로직에 의해 결정된 시스템 작동 여부는 IBPT로 전달

Table 1 Descriptions of a test building

Area	1,500 m <sup>2</sup> (300 m <sup>2</sup> each floor)
Envelope	Walls R1.43
	Roof R2.79
	Floor R2.02
	Windows R0.61
	Doors R0.2
	Window Wall Ratio 0.25 (South : 0.3, North : 0.2, East : 0.3, West : 0.2)
Internal loads	People : 9,340 Watt (115 Watt/인×82인)
	Lightings : 93,600 Watt (62.4 Watt/m <sup>2</sup> ×1,500 m <sup>2</sup> )
	Appliances : 15,000 Watt (9.5~12.6 Watt/m <sup>2</sup> ×1,500 m <sup>2</sup> )
	Latent heat 4.1 Kg/hr (0.04~0.06 Kg/hr×인×82인)
Ventilation/ Infiltration	0.35 ACH (tight construction)
Systems applied	Convective heating and cooling : 80,000 Watt heat supply, 95,000 Watt heat removal (Detroit, Michigan, USA) 142,000 Watt heat supply, 51,000 Watt heat removal (Miami, Florida, USA)
	Humidifying and dehumidifying : 12.5 Kg/hr moisture supply 20.9 Kg/hr moisture removal (Detroit, Michigan, USA) 5.0 Kg/hr moisture supply 21.0 Kg/hr moisture removal (Miami, Florida, USA)
	TMY2 (Detroit, Michigan and Miami, Florida, USA)
	Initial air temperature : 23°C Initial humidity : 45% MRT = air temperature Air movement : 0.0 m/s Activity level : 1.0MET Clothing level : 0.9CLO(winter), 0.5 CLO(summer)
Assumptions	

되어 모델링된 시스템을 작동하게 되며, 이를 통해 변화된 실내 열 환경은 다시 MATLAB 상 로직의 입력값이 되는 반복적인 과정을 가진다.

로직의 성능평가를 위해 미국 사무소 건물의 일반적 형태를 가지는 5층의 대상 건물을 계획하였으며, 면적, 외피 성능, 창 면적비, 실내 부하, 환기/침기량, 적용 시스템, 기후 데이터 및 가정 등이 Table 1에 정리되어 있다.<sup>(14-19)</sup>

성능테스트는 2가지 기후(한랭 : 디트로이트, 미시건, 미국과 고온다습 : 마이애미, 플로리다, 미국)의 겨울철(각각 1월 22일~26일, 1월 1일~1월 5일 : 최대 난방 기간) 및 여름철(각각 7월 2일~7월 6일, 6월 25일~6월 29일)에 대하여 실시하였으며, 각 기간은 최대 난방 및 냉방부하 발생 기간을 의미한다. 이 중 겨울철의 경우 TS 조절 로직은 비교 평가 대상에서 제외되었는데, 이는 TS 계산과정에서 의복 단열값을 연중 0.5 CLO로 가정함으로써 온도, 습도, PMV(여름철 : 0.5 CLO, 겨울철 : 0.9 CLO)에서의 가정과 다르기 때문이다.

열 환경 조절 시스템의 작동 범위는 ASHRAE에서 제시한 쾌적범위에 근거하여 난방 시스템 : 20~23°C, 냉방 시스템 : 23~26°C, 가습 시스템 : 30~45%, 감습 시스템 : 45~60%, TS 상승 시스템(난방/가습) : -0.5~0.0, TS 하강 시스템(냉방/감습) : 0.0~0.5, PMV 상승 시스템(난방/가습) : -0.5~0.0, PMV 하강 시스템(냉방/감습) : 0.0~0.5로 설정하였다. 불필요한 에너지 소모를 방지하기 위해 Zero-Band법을 적용하여 냉/난방 시스템과 감/가습 시스템 간에 작동 범위가 중첩되지 않도록 하였다.

### 3. 결과 분석

#### 3.1 열 환경 요소의 변화 상태

각 로직들에 의해 조성된 온도, 습도, PMV 및 TS 등의 상태가 한랭기후(디트로이트, 미시건, 미국) 여름철에 대하여 예로써 Fig. 4에 나타내었다. 온도를 제어 목적 요소로 가진 두 가지 로직에 비해 PMV 및 TS를 목적으로 가진 로직들에 의해 실내 온도가 높게 형성되는 것으로 Fig. 4의 첫 번째 차트에 나타났으며, 이는 PMV와 TS를 쾌적하게 하기 위해 온도 조건을 높게 형성할 필요성이 있기 때문이다. 이러한 사실은 Fig. 5~Fig. 7에도 나타나 있는데, 30%, 45%, 60%의 상대습도 조건일 때 PMV

및 TS의 쾌적 조건(겨울철 : -0.5~0.0, 여름철 : 0.0~0.5)을 유지하기 위해 온도는 계절별 쾌적 요건인 20~23°C와 23~26°C 이상으로 유지될 필요성이 있는 것으로 분석되었다. 다시 말해, 온도를 쾌적하게 유지할 경우 PMV 및 TS는 쾌적 조건 이하로 유지되어 춥게 형성될 수 있다는 것을 의미한다.

습도의 경우, 온도만을 목적요소로 가지는 일반적 로직에 의해 쾌적 범위를 벗어나며, 이는 Fig. 4의 두 번째 차트에 나타나 있다. 이는 일반적 로직의 경우 습도를 조절하기 위한 작동을 고려하지 않기 때문인 반면, 온/습도를 동시에 고려하는 PMV, TS 제어법의 경우 습도조건이 향상되는 것을 확인

할 수 있다. 차트에서 작은 규모의 습도 변화는 온도변화에 의한 상대습도의 반응에 기인한다.

PMV와 TS의 경우 온도 조절 로직, 온/습도 조절 로직에 의해 낮게 형성되며, 이는 위에서 설명한 것과 같은 이유였다. 한편, PMV, TS 제어 로직은 비슷한 결과를 나타내고 있으나, TS 제어 로직에 의해 약간 상승된 결과를 보이는 것으로 Fig. 4의 세 번째, 네 번째 차트에 나타나 있다. 이는 Fig. 8의 PMV와 TS의 상호관계 비교에서 알 수 있듯, 같은 조건에 대하여 TS 값이 PMV 값보다 작기 때문이다. 다시 말해, TS 값을 쾌적하게 유지하기 위해선 PMV는 약간 높게 형성될 가능성이 있다.

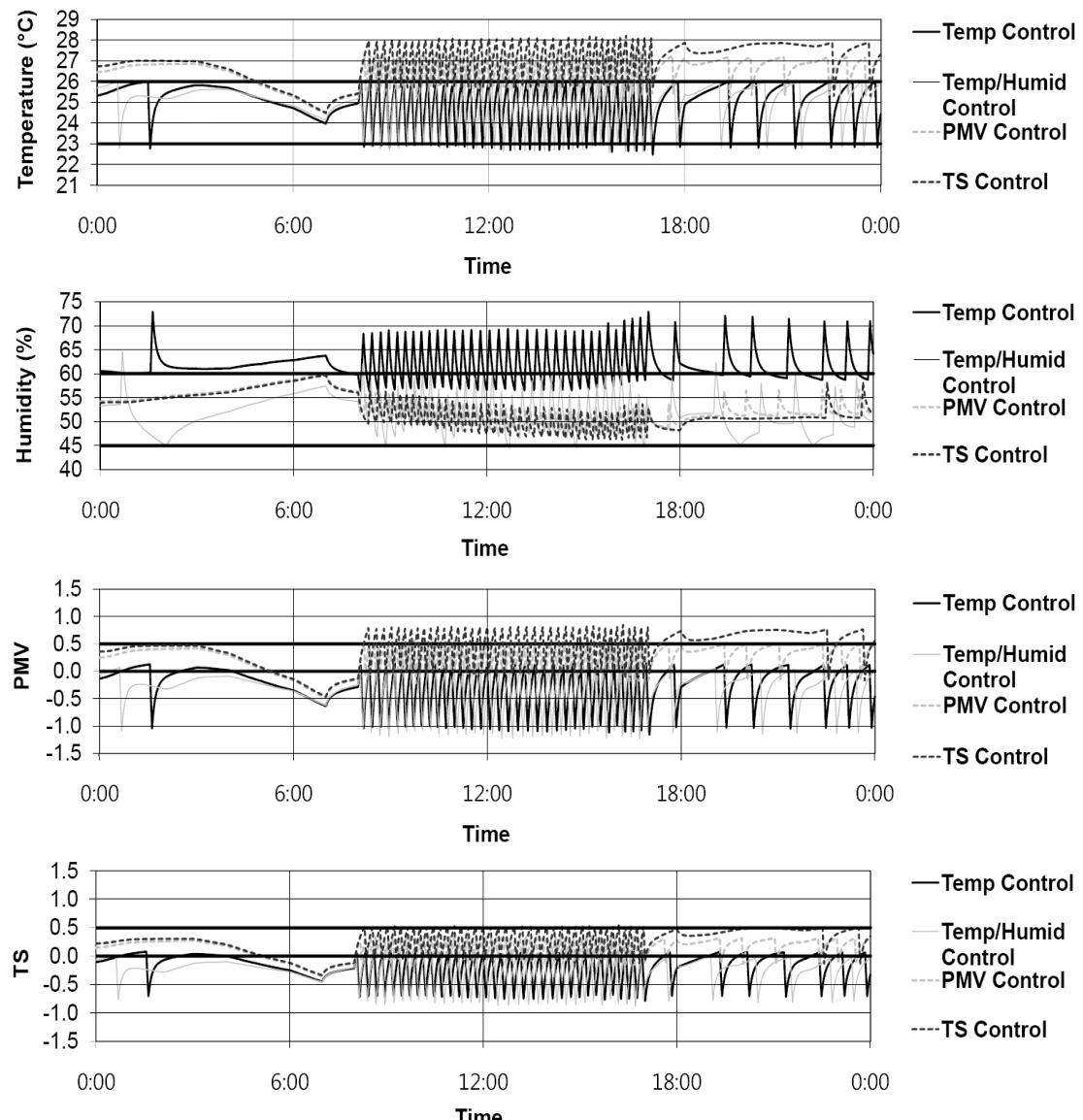


Fig. 4 Profiles of air temperature, humidity, PMV and TS of developed logics (Jul. 03, Detroit, Michigan, USA).

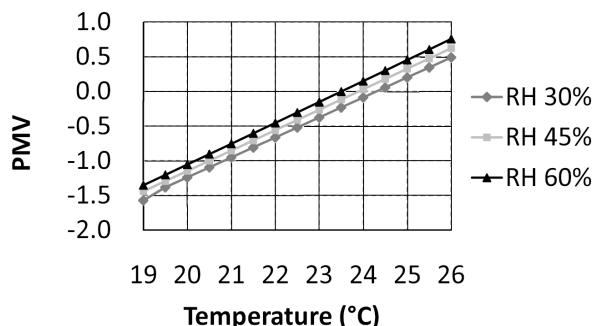


Fig. 5 Relations between PMV and air temperature in winter.

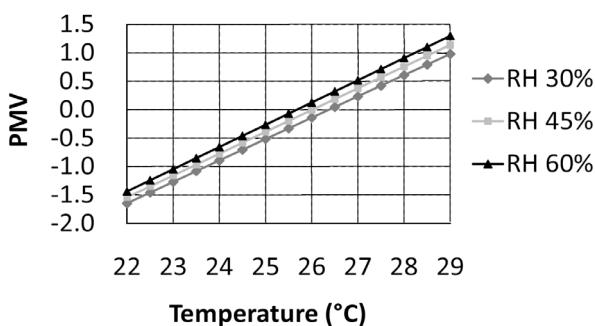


Fig. 6 Relations between PMV and air temperature in summer.

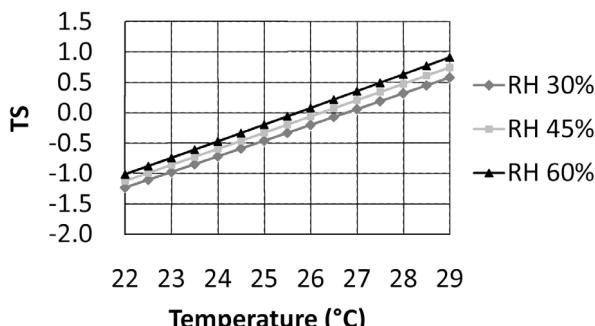


Fig. 7 Relations between TS and air temperature in summer.

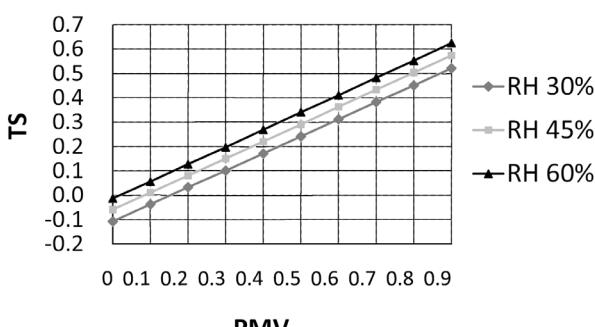


Fig. 8 Relations between PMV and TS in summer.

### 3.2 열 쾌적

#### 3.2.1 한랭 기후

겨울철의 경우, 온도 및 온도/습도 조절로직은 PMV 조절로직에 비하여 쾌적한 실내 온도 조건을 유지하는 것으로 Fig. 9에 나타나 있다. 쾌적기간은 각각 88.1%와 88.2%로 PMV 조절로직에 의한 40.0%보다 현저히 증가된 값은 나타냈으며, 이는 PMV 조절로직의 경우 PMV 쾌적을 위해 온도를 쾌적 범위 이상으로 유지해야 하기 때문이다. 실내 습도의 경우, 온/습도 조절로직(99.3%) 및 PMV 조절로직(93.7%)에 의해 테스트기간 대부분이 쾌적하게 형성되었으나, 온도조절로직을 통해서는 16.1%의 낮은 쾌적기간을 나타냈으며, 이는 온도조절로직 상에서 습도가 목적요소로 고려되지 않았기 때문이다. PMV의 경우 PMV 조절로직에 의해 77.7%의 쾌적기간을 나타냈으나, 다른 두 방법에 의해서는 각각 13.2%와 24.1%로 낮게 나타났다. 이는 PMV와 온/습도의 쾌적영역이 일치하지 않은 것에 기인한다. 특히, PMV 조절로직에 의한 낮은 PMV 쾌적기간(77.7%, 다른로직의 경우 각각의 목적요소에 대하여 88.1%, 99.3%의 쾌적기간유지)의 이유는 테스트기간(최대난방부하기간) 중 이를 새벽에 난방 및 가습장치의 최대작동에도 불구하고 낮게 형성되는 PMV 조건 때문이었다.

여름철의 경우 온도 및 온도/습도 조절로직에 의한 온도쾌적기간은 각각 86.7%와 86.8%로써, PMV조절로직(13.1%) 및 TS조절로직(19.0%)에 비해 큰 값을 나타냈으며, 이는 여름기간 중 PMV, TS쾌적범위가 온/습도쾌적범위보다 높기 때문이다. 습도의 경우 온/습도조절로직(98.7%), PMV조절로직(97.8%), TS조절로직(96.1%)의 순으로 나타났으며, 온도조절로직에 의해선 26.9%로써 낮은 값을 나타내었다. 그리고 PMV쾌적기간은 PMV조절로직에 의해 현저히 증가된 값(72.1%)을 나타낸 반면, TS쾌적기간은 TS조절로직(77.2%)과 PMV조절로직(75.6%)에 의해 비슷한 수준을 보이는 것으로 Fig. 10에 나타나 있다. 이는 Fig. 8에 나타나 있듯이 PMV쾌적범위가 상대적으로 좁으며, 대부분의 경우 TS쾌적범위에 포함되기 때문으로 예상된다. 예를 들어 습도 45%일 경우, 0.3이상의 TS조건은 0.5이상의 PMV조건을 형성함으로써 TS는 쾌적하나 PMV는 불쾌적(더움)한 조건을 형성할 가능성이 있다.

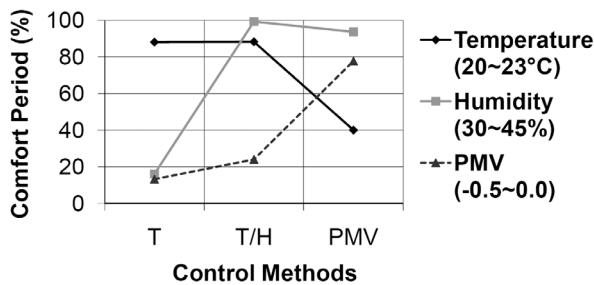


Fig. 9 Comfort periods in winter  
(Detroit, Michigan, USA).

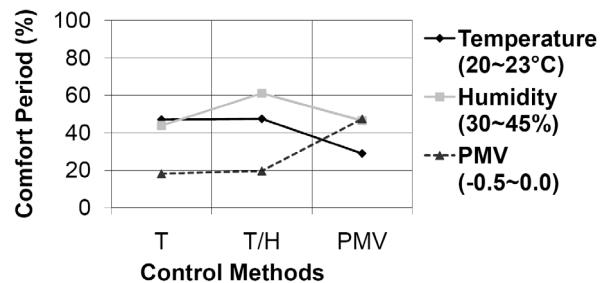


Fig. 11 Comfort periods in winter  
(Miami, Florida, USA).

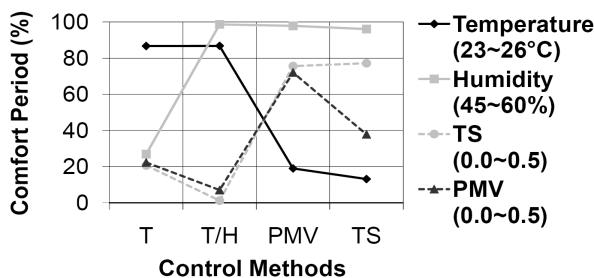


Fig. 10 Comfort periods in summer  
(Detroit, Michigan, USA).

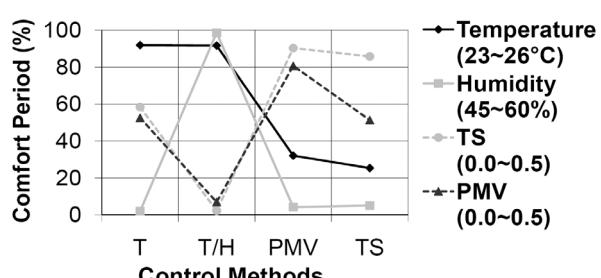


Fig. 12 Comfort periods in summer  
(Miami, Florida, USA).

### 3.2.2 고온 다습 기후

고온 다습 기후 지역의 각 로직에 의한 열 환경 조성 결과는 한랭 기후 지역의 결과와 비슷한 것으로 Fig. 11에 나타났다. 겨울철 온도 및 온도/습도 조절 로직의 온도 쾌적 기간은 47.0%와 47.4%로써, 28.9%인 PMV 조절 로직에 비해 크게 나타났다. 하지만, 이 두 로직에 의한 온도 쾌적 기간은 한랭 기후 지역에 비해 현저히 낮은 값은 나타냈는데, 이는 고온 다습 지역의 경우 온화한 외부 공기로 인해 난방 작용 없이도 쾌적 범위 이상으로 존재하는 기간이 발생하기 때문이었다. 습도 및 PMV 쾌적 기간의 경우 각각 온도/습도 조절 로직(61.0%) 및 PMV 조절 로직(47.4%)에 의해 증가된 결과를 보여주었다. 한랭 기후 지역에 비해 감소한 습도 및 PMV 쾌적 기간 역시, 온화한 외기로 인한 실내 열 환경이 쾌적 범위 이상으로 형성되기 때문이다.

Fig. 12의 여름철 역시, 온도 및 온도/습도 조절 로직의 온도 쾌적 기간은 각각 91.9%와 91.7%였으며, 이는 PMV 및 TS 조절 로직에 의한 32.0%와 25.3%보다 현저히 증가된 결과이다. 습도 쾌적 기간 역시 온도/습도 조절 로직에 의해 최대의 쾌적 기간(98.6%)을 유지하였으며, PMV 쾌적 기간 또한 PMV 조절 로직에 의해 가장 큰 값(80.7%)을 나타내었다. 하지만 TS 쾌적 기간의 경우 TS 조절 로직(85.7%) 보

다 PMV 조절 로직(90.3%)에 의해 증가된 결과가 도출되었는데 이는 TS 쾌적 범위에 비해 좁은 PMV 쾌적 범위로 인해 PMV 조절 로직을 통해 보다 안정적인 TS 형성이 가능한 것에 기인한다.

두 지역의 열 환경 쾌적 기간의 분석을 통해, 개발된 로직은 각각의 목적 요소를 적절히 조절하는 것으로 나타났으며, 종합적 열 쾌적 지표인 PMV 및 TS의 경우 PMV, TS 제어 로직에 의해 증가된 쾌적 기간을 나타내었다. 특히, PMV 조절 로직의 경우 PMV 및 TS를 동시에 적절히 제어하며, 이는 PMV 쾌적 범위가 TS의 것보다 좁게 형성, TS 쾌적 범위에 포함되기 때문에 예상된다.

## 3.3 에너지 효율

에너지 효율 분석을 위해 현열(열) 및 잠열(수분)의 공급 및 제거량을 비교하였으며, 추후 각 조절 장치의 효율을 적용함으로써 실제 에너지 사용량을 계산할 수 있다.

### 3.3.1 한랭 기후

겨울철의 경우 Fig. 13에 정리되어 있으며, PMV 조절 로직이 5,109.3 KWh로써 최대의 현열을 공급하였고, 이는 온도/습도 조절 로직(4,644.0 KWh)에

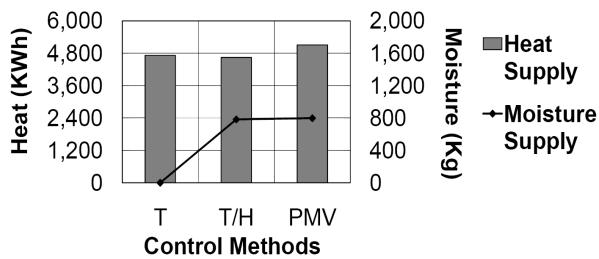


Fig. 13 Heat and moisture supply in winter (Detroit, Michigan, USA).

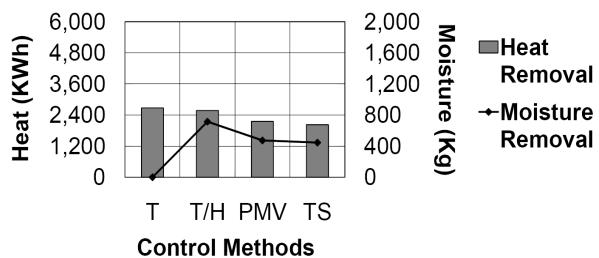


Fig. 14 Heat and moisture removal in summer(Detroit, Michigan, USA).

비해 10.0% 증가된 값이다. 이는 높은 PMV 쾌적 범위에 기인한 것으로써, 동일한 이유로 인해 PMV 조절 로직에 의한 잠열 공급량(798.3 Kg)이 온도/습도 조절로직의 공급량(782.5 Kg)에 비해 증가된 값을 나타내었다.

반면, Fig. 14에 나타난 PMV 및 TS 제어 로직의 여름철 현열(각각 2,151.8 KWh, 2,025.1 KWh) 및 잠열(473.4 Kg, 445.5 Kg) 제거량은 온도/습도 조절로직에 비해 16.4%, 21.3%(현열) 및 33.8%, 37.7%(잠열) 감소한 결과를 보여주었으며, 이 또한 여름철 PMV, TS의 설정된 쾌적 범위가 온도/습도의 범위 보다 높기 때문이다.

### 3.3.2 고온 다습 기후

고온 다습 기후에서도 유사한 결과를 나타내어, 겨울철 PMV 제어 로직이 1,581.3 KWh의 현열을 공급함으로써 온도/습도 조절로직에 비해 17.6% 증가됨이 Fig. 15에 나타났다. 반면, 잠열 공급의 경우 PMV 제어로직에 의해 감소된 결과를 나타냈는데, 이는 온화한 외기에 기인한다. 즉, 온화한 외기에 의해 PMV 상승을 위한 작동(난방 및 가습)의 절대 기간이 감소되어 잠열(수분)의 공급이 감소한 것이다. 다시 말해 한랭 기후의 경우 PMV 조절로직에 의한 가습 기간은 3,832분으로 온도/습도 조절로직에 의한 3,756분에 비해 76분 증가되었으나, 고온

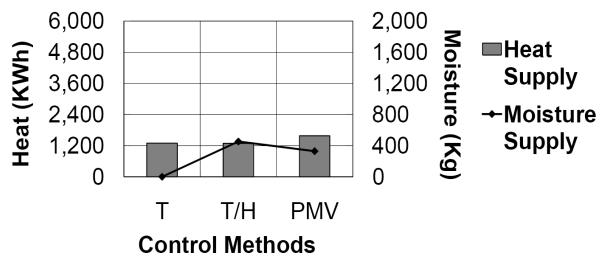


Fig. 15 Heat and moisture supply in winter (Miami, Florida, USA).

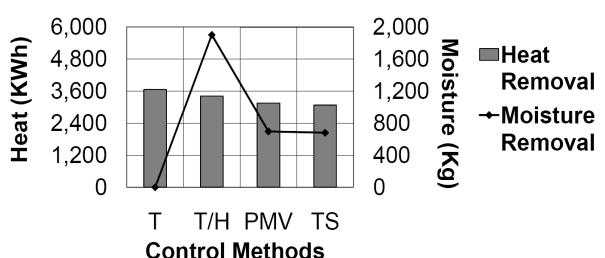


Fig. 16 Heat and moisture removal in summer(Miami, Florida, USA).

다습 기후의 경우 1,186분으로 온도/습도 조절로직에 의한 1,633분 보다 447분 감소되었다.

여름철의 경우, PMV 및 TS 조절로직에 의해 각각 3,150.8 KWh와 3,078.0 KWh의 현열이 제거되었으며, 이는 온도/습도 조절로직에 비해 각각 7.7%, 9.9% 감소한 결과이다. 잠열 제거량 또한 PMV, TS 조절로직에 의해 63.4%, 64.2% 감소되었으며, 이는 Fig. 16에 나타나 있다.

에너지 효율 분석을 통해 PMV 및 TS 조절로직은 일반적으로 겨울철 현열 및 잠열 공급량을 증가시키며, 여름철 제거량을 감소시키는 것으로 밝혀졌다. 특히, 고온 다습한 지역의 경우 PMV 및 TS 조절로직을 통해 겨울철 잠열 공급량 또한 감소시킬 수 있음이 밝혀졌다. 이를 통해 PMV 및 TS를 근간으로 한 열 환경 조절 방법은 고온 다습한 지역에서 보다 에너지 효율적으로 적용될 수 있음을 추론할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구의 목적은 현재 가장 널리 사용되고 있는 온도 기준 제어법과 새로이 도입되어 지고 있는 습도, PMV, TS를 기준으로 한 제어법의 비교를 통해 각 목적 요소간 상관관계, 쾌적 요건 및 에너지 효율 분석 등을 진행하며, 이를 바탕으로 보다 적합한

열 환경 제어 방법을 제시하는 것이었다. 이를 위하여 일반적 온도 조절 방법을 포함한 네 가지의 열 환경 조절 방법을 계획하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션 법을 이용하여 2가지 기후(한랭, 고온 다습)로의 적용을 통한 성능 테스트를 실시하였다. 분석을 통해 밝혀진 사실은 다음과 같다.

(1) 각 로직들은 그들의 목적 요소에 대한 제어를 적절히 수행했다. 그 결과 실내 온도의 경우 온도를 제어 목적 요소로 가진 두 가지 로직에 의해 PMV 및 TS를 목적으로 가진 로직들에 의해 높게 형성되었으며 이는 종합적 열 쾌적 지표인 PMV 및 TS의 쾌적 범위가 온도/습도의 쾌적 범위보다 높게 설정되어있기 때문이다. 같은 이유로 PMV와 TS의 경우 온도 조절 로직, 온/습도 조절 로직에 의해 낮게 형성되었다. 습도의 경우, 온도만을 목적요소로 가지는 일반적 로직에 의해 온도/습도, PMV, TS 조절 로직에 의해 보다 쾌적하게 유지되는 것으로 나타났다.

(2) 특히, PMV 쾌적 기간은 PMV 조절 로직에 의해 현저히 증가된 반면, TS 쾌적 기간은 TS 조절 로직과 PMV 조절 로직이 비슷한 수준을 나타냈다. 즉, PMV 조절 로직의 경우 PMV 및 TS를 동시에 적절히 제어하는 것으로 판단할 수 있으며, 이는 PMV 쾌적 범위가 TS의 것보다 좁게 형성, TS 쾌적 범위에 대부분 포함되기 때문이다.

(3) 현열 및 잠열의 공급 및 제거량 비교를 통해, 겨울철 PMV 조절 로직이 최대의 현열 및 잠열을 공급하였으며, 이는 높게 설정되어 있는 쾌적 범위에 기인한다. 같은 이유로 인하여 여름철의 경우, PMV 및 TS 제어 로직은 온도, 온도/습도 조절 로직들에 의해 감소된 열 제거량을 나타냈다. 특히, 고온 다습한 지역의 경우 PMV 및 TS 조절 로직을 통해 겨울철 잠열 공급량 또한 감소시킬 수 있음이 밝혀졌다. 이를 통해 PMV 및 TS를 근간으로 한 열 환경 조절 방법은 고온 다습한 지역에서 보다 에너지 효율적으로 적용될 수 있음을 추론할 수 있다.

결론적으로, 온도 기준으로 제어된 실내 열 환경은 종합적 지표인 PMV 혹은 TS 측면에서 쾌적하지 않을 가능성이 있으며, 에너지 측면에서 PMV 및 TS를 기준으로 한 제어법이 고온 다습한 기후에서 보다 효율적일 수 있음이 밝혀졌다. 본 연구의 연구 결과는 실제 건물로의 PMV 및 TS 기준 열 환경 조절 법 적용 등의 추후 연구 결과와의 비교 분석을 통해 건물의 열 환경 및 에너지 성능 측면에서 효율적

인 제어법을 도입함에 있어 유용한 기초 자료로 사용될 것으로 기대되며, 특히 PMV 제어법의 도입 시 오피스 빌딩 등에서 개인적으로 구분된 공간의 세밀하고 개인화된 열 환경 조성에 효과적일 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2011년 교육과학기술부(지역거점연구단 육성사업/바이오하우징연구사업단) 및 바이오하우징연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고문헌

- ASHRAE, 2004a, Thermal Environmental Conditions for human occupancy, (ANSI/ASHRAE Standard 55-2004), Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- ISO, 1994, Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, ISO-7730, International Organization for Standardization.
- Tse, W. L. and Chan, W. L., 2008, A distributed sensor network for measurement of human thermal comfort feelings, Sensors and Actuators A : Physical, Vol. 144, pp. 394-402.
- Atthajariyakul, S. and Leephakpreeda, T., 2005, Neural computing thermal comfort index for HVAC systems, Energy Conversion and Management, Vol. 46, pp. 2553-2565.
- Liu, W., Lian, Z. and Zhao, B., 2007, A neural network evaluation model for individual thermal comfort, Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 1115-1122.
- Conceição, E. Z. E., Lúcio, M. M. J. R., Rosa, S. P., Custódio, A. L. V., Maria, R. L., and Meira, M. J. P. A., 2009, Evaluation of comfort level in desks equipped with two personalized ventilation systems in slightly warm environments, Building and Environment, Vol. 45, pp. 601-609.
- Zhang, Y. and Zhai, R., 2008, Overall thermal

- sensation, acceptability and comfort, *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 44–50.
- 8. Zolfaghari, A. and Maerefat, M., 2011, A new predictive index for evaluation both thermal sensation and thermal response of the human body, *Building and Environment*, Vol. 46, pp. 855–862.
  - 9. ASHRAE, 1997, ASHRAE Handbook–Fundamentals, Chapter 8. Thermal Comfort, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
  - 10. ASHRAE, 1992, Thermal Environmental Conditions for human occupancy, (ANSI/ASHRAE Standard 55–1992), Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
  - 11. IBPT, 2008, International Building Physics Toolbox in Simulink, Available from : <http://www.ibpt.org>.
  - 12. MathWorks, 2005, MATLAB 14, Available from : <http://www.mathworks.com>.
  - 13. Moon, J. W. and Kim, J. J., 2010, ANN-based thermal control models for residential buildings, *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 1612–1625.
  - 14. Express HVAC, 2009, Available from : [http://www.expresshvac.com/hvac\\_sizing.asp](http://www.expresshvac.com/hvac_sizing.asp).
  - 15. U. S. Department of ENERGY, 2008, BUILDINGS ENERGY DATA BOOK, U. S. Department of ENERGY, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
  - 16. HVAC Equipment Size Finder, 2008, Available from : <http://www.hvacopcost.com/equipsize.html>.
  - 17. Kosonen, R. and Tan, F., 2005, A feasibility study of a ventilated beam system in the hot and humid climate : a case-study approach, *Building and Environment*, Vol. 40, pp. 1164–1173.
  - 18. ASHRAE, 2004b, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, (ANSI/ASHRAE Standard 90.1–2004), Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
  - 19. Bradshaw, V., 1993, *Building Control Systems*, 2nd ed, John Wiley and Sons, Inc.