

## 태양 일사를 고려한 실내 열쾌적성 평가 연구

김 세 현, 노 광 철, 오 명 도\*

서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, \*서울시립대학교 기계정보공학과

### Evaluation of the Indoor Thermal Comfort in Consideration of the Solar Radiation

Se-Hyun Kim, Kwang-Chul Noh, Myung-Do Oh†

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, University of Seoul, Seoul 134-743, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, University of Seoul, Seoul 134-743, Korea

(Received March 19, 2004; revision received October 12, 2004)

**ABSTRACT:** Recently the Predicted Mean Vote (PMV) has been used as an important index to evaluate the degree of the indoor thermal comfort in modern residential buildings. It is known that the PMV is mainly affected by four major factors, which are the air temperature, the air velocity, the humidity and the mean radiant temperature (MRT). Through the numerical calculation of the temperature and the modeling of the mean radiant temperature considering the solar radiation, we proposed the new modeling strategies of the mean radiant temperature and investigated the PMV index and evaluated the MRT. Also, we compared the numerical results with the experimental values. As the results, we found out that the MRT is affected by the wall temperature and the solar radiation. We also knew that the new modeling strategies of the mean radiant temperature is a more correct way of PMV calculation. Especially, the new modeling is necessary for the spaces like an atrium and large rooms with windows mainly influenced by solar radiation.

**Key words:** Thermal comfort(열쾌적성), Predicted mean vote(온열쾌적감), Mean radiant temperature(평균복사온도)

### 1. 서 론

생활수준의 향상으로 쾌적한 실내 환경의 중요성이 과거 어느 때보다 강조되고 있다. 실내 환경을 평가하는 요소 중 열환경지표는 인체가 느끼는 온열감을 평가하기 위한 것으로 PMV(Predicted Mean Vote)를 통한 평가가 대표적이다<sup>(1-3)</sup> PMV는 인간의 온열환경에 대한 반응을 정량화

한 것으로 인체의 대사율, 의복의 열저항치 등과 건구온도, 평균복사온도, 기류, 습도 등을 종합적으로 고려하여 인체가 느끼는 열쾌적도를 이론적으로 나타낸 것이다.

PMV에 영향을 미치는 요소 중 평균복사온도는 실내의 불균일한 복사장에서 재실자가 주위 환경과 복사 열교환을 행하는 것과 같은 양의 열교환을 하는 균일한 주위 온도를 말한다. 이제까지의 대부분의 연구는 벽면의 온도를 균일하게 가정하고 이를 재실자의 위치에 따라 계산하는 방법으로 평균복사온도를 계산하여 열쾌적성을 평가하였다.<sup>(4,5)</sup> 그러나 아트리움 등과 같이 태양 일

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2756; Fax: +82-2-2248-5110

E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

사 유입이 많은 공간에서는 일사가 평균복사온도 변화에 미치는 영향이 매우 크다.<sup>(6-8)</sup>

따라서 본 연구에서는 태양일사에 따른 평균복사온도 변화 및 PMV 평가에 미치는 영향에 대하여 수치해석적인 방법과 실험을 통하여 살펴보았다. 또한 태양의 일사를 평균복사온도 계산에 적용하기 위하여 적절한 모델링식을 제안하였다. 이를 통하여 최종적으로 일사량을 고려한 PMV 값을 계산하고, 이를 측정을 통한 값과 비교하여 보다 엄밀한 열쾌적성 예측을 시도해 보았다.

## 2. 열쾌적성 평가방법

### 2.1 PMV 관계식

열쾌적성을 평가하기 위하여 ISO Standard 7330<sup>(3)</sup>에서 규정하고 있는 PMV 계산법을 사용하였다. PMV 지표는 식(1)을 이용하여 계산하고 Table 1에서와 같이 7단계로 예상온도 척도를 사용한다.

$$PMV = (0.303e^{-0.0036M} + 0.28) \times [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 인체의 신진 대사율을 나타내고,  $W$ 는 외부로 행하는 일을 나타내며,  $H$ 는 현열을 통한 열손실,  $E_c$ 는 피부를 통한 증발 열전달,  $C_{res}$ 는 호흡을 통한 대류 열전달,  $E_{res}$ 는 호흡을 통한 증발 열전달을 각각 나타낸다. 각각의 변수들에 대한 계산식은 다음과 같다.

$$H = 3.96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c(t_{cl} - t_a)$$

$$E_c = 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - p_a] + 0.42 \times [(M - W) - 58.15]$$

$$C_{res} = 0.0014 \times M \times (34 - t_a)$$

$$E_{res} = 1.72 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \cdot (3.96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c(t_{cl} - t_a))$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0.078 \\ 1.05 + 0.645 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.078 \end{cases}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V_{ar}} \\ 12.1\sqrt{V_{ar}} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V_{ar}} \end{cases}$$

여기서,  $t_{cl}$ 은 의복 표면에서의 온도를 나타내고,  $h_c$ 는 대류 열전달계수를 나타내며,  $f_{cl}$ 은 착의상태에서 인체의 표면적과 알몸상태의 표면적의 비를 각각 나타낸다.

PMV는 수치해석을 통하여 계산한 온도 및 기류분포와 평균복사온도 모델링을 적용하여 계산한 값을 이용하여 구하였고 최종적으로 측정값과 비교하였다. 이때 인체의 신진대사량은 일반적인 휴식상태인 1.2 met(70 W/m<sup>2</sup>)을 사용하였고, 착의상태는 가을철 평상복 차림으로 가정하여 0.72 clo(0.112 m<sup>2</sup>°C/W)를 사용하였다.<sup>(9,10)</sup>

### 2.2 평균복사온도

평균복사온도는 열쾌적성 평가에 큰 영향을 미치는 요소로 정확한 평균복사온도를 계산하는 것이 열쾌적성 평가에 매우 중요하다. 평균복사온도는 주위 벽면온도와 각요소(angle factor)를 알고 있을 때 계산할 수 있다. 이때 벽면온도는 직접적인 측정이나 열전달법칙을 이용하여 구할 수 있으며, 각 요소는 재실자와 주위 벽면온도로부터 Fanger<sup>(2)</sup>가 제시한 방법으로 구할 수 있다.

본 연구에서는 일사량이 고려된 평균복사온도를 계산하기 위하여 실제 측정값과 기존 Fanger의 방법에 의한 계산값을 비교하고 일사량을 적용하여 계산한 평균복사온도를 각각 비교하였다. 이때 벽면온도 측정은 비접촉식 적외선 온도계(model 42525, EXTECH)를 사용하여 측정하였다.

Table 1 The PMV index

PMV index	-3	-2	-1	0	1	2	3
	Cold	Cool	Slightly cool	Neutral	Slightly warm	Warm	Hot

### 3. 태양일사가 고려된 평균복사온도

#### 3.1 태양의 일사

일사량을 열쾌적성 평가에 반영하기 위해서는 실내로 유입하는 태양일사에 대한 분석이 필요하다. 태양에 의한 일사는 크게 태양광이 실내로 직접 유입되는 직달일사, 외부 공기로부터의 확산에 의한 확산일사, 주위건물이나 지면을 통한 반사일사로 구분할 수 있다. 이때 건물의 창문을 통한 일사 에너지 흐름의 개략도는 Fig. 1과 같다.

일반적으로 창문을 통한 실내외의 에너지 평형식은 식(2)와 같다.

$$q_i = F_s \tau_D I_D + \tau_d I_d + \tau_r I_r + h_{in}(t_{g,i} - t_{in}) \quad (2)$$

식(2)에서  $q_i$ 는 실내로 유입되는 총 일사량을 나타내며, 하첨자  $D$ 는 직달일사,  $d$ 는 확산일사,  $r$ 은 반사일사를 나타낸다.  $F_s$ 는 유리의 차폐계수를 나타내며,  $I$ 는 일사에 의한 취득열량을 나타낸다.  $\tau$ 는 태양일사의 전달계수,  $h_{in}$ 는 실내 대류 열전달계수를 각각 나타내며  $t_{in}$ ,  $t_{g,i}$ 는 실내 온도와 유리면의 실내측 온도를 나타낸다. 식(2)와 유리면의 열전달을 고려하여 실내로 유입되는  $q_i$ 를 최종적으로 나타내면 식(3)과 같다.

$$q_i = (F_s \tau_D I_D + \tau_d I_d + \tau_r I_r) + \frac{F_s \alpha_D I_D + \alpha_d I_d + \alpha_r I_r}{1 + (h_{in}/h_{out})} + U(t_{out} - t_{in}) \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{(1/h_{in}) + (1/h_{out})}$$

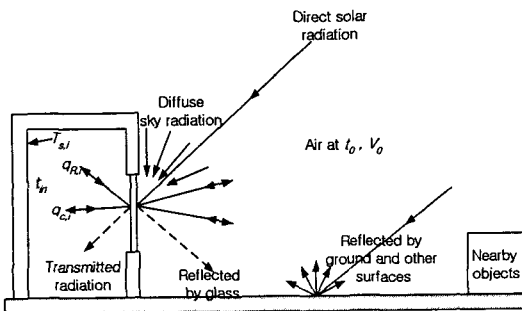


Fig. 1 Radiation energy exchanges through window glass.

여기서  $\alpha$ 는 유리의 흡수계수를 나타내고,  $h_{out}$ 는 실외 대류 열전달계수를 각각 나타내며,  $t_{out}$ 는 실외 온도를 나타낸다.

식(3)에서 유리의 태양열 흡수계수 및 실내 대류 유동해석을 연관하여 계산되는 우변의 두번째와 세번째 항은 실내 대류 유동을 수치해석방법으로 해석한 후 이를 PMV 평가에 이용하였다. 또한 실내로 유입하는 직달, 확산, 반사 일사량을 계산하기 위하여 ASHRAE Clear Day Model과 기상청 측정 자료와 서울시립대학교와 인접한 한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터에서 측정된 시간대별 일사량을 이용하여 계산하였다. Clear Day model을 사용하여 측정시간대의 태양 고도각을 계산하고 전방향 확산일사로 계산 한 후, 수직인 면에 유입되는 일사량을 계산하였다. 최종적으로 유리면의 전달계수를 사용하여 실내로 유입되는 열량을 계산하였다.

#### 3.2 일사량을 고려한 평균복사온도의 모델링

본 연구에서는 기존의 평균복사온도 계산식을 이용하여 일차적으로 평균복사온도를 계산하고, 실내로 유입하는 일사량 계산을 통한 일사량 값을 적용하여 최종적으로 일사가 고려된 평균복사온도를 계산하였다. 기존 평균복사온도 계산식에서 일사량을 모델링하기 위하여 작용온도( $t_o$ , operative temperature)의 정의를 이용하였다. 식(4)는 작용온도의 정의를 나타낸다.

$$t_o \equiv \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_c + h_r} \quad (4)$$

여기서,  $\bar{t}_r$ 는 평균복사온도이고,  $t_a$ 는 주변공기 온도이다.  $h_c$ 는 대류 열전달계수를 나타내고,  $h_r$ 는 복사 열전달계수를 각각 나타낸다.

식(4)은 복사에 의한 열전달과 대류에 의한 열전달이 인체 표면에서 균형을 이루고 있다는 가정에서 유도된 식이다. 식(4)에서 일사에 의한 영향을 고려한 실내 복사량을 대입하면 식(5)와 같다.

$$h_r(\bar{t}_r - t_o) + q_r = h_c(t_a - t_o) \quad (5)$$

식(5)는 일사량이 고려된 작용온도 정의식으로

일사량이 고려되지 않은  $t_a$ 와  $t_r$ 값에 일사량  $q_r$ 을 더하여 태양복사가 고려된  $t_o$ 를 계산하는 식이 된다. 일사량이 고려되기 전과 고려된 후의 각 항들의 혼동을 피하기 위하여 일사량이 고려되기 전의 상태를 *old*로, 일사량이 고려된 상태를 *new*로 구분하여 식(5)를 작용온도 식으로 정리하면 식(6)과 같다.

$$t_{o,new} = \frac{h_r \bar{t}_{r,old} + h_c t_{a,old}}{h_c + h_r} + \frac{q_r}{h_c + h_r} \quad (6)$$

일사량이 고려되기 전의 평균복사온도를 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{t}_{r,old} = \frac{h_c}{h_r} (t_{o,old} - t_{a,old}) + t_{o,old} \quad (7)$$

또한, 식(5)에서 일사량이 고려된 평균복사온도를 나타내면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{t}_{r,new} = \frac{h_c}{h_r} (t_{o,new} - t_{a,new}) + t_{o,new} \quad (8)$$

따라서 식(8)과 식(7)의 차는 일사량에 의하여 증가된 평균복사온도의 증가분이다.

$$\begin{aligned} \bar{t}_{r,new} - \bar{t}_{r,old} = & \\ & \frac{h_c}{h_r} [(t_{o,new} - t_{o,old}) - (t_{a,new} - t_{a,old})] \quad (9) \\ & + (t_{o,new} - t_{o,old}) \end{aligned}$$

식(9)에서 일사량이 고려되기 전과 고려된 후의 작용온도 차이는 식(5)와 식(4)의 차이에 의하여 식(10)과 같다.

$$t_{o,new} - t_{o,old} = \frac{q_r}{h_c + h_r} \quad (10)$$

식(10)을 이용하여 식(9)를 정리하고 일사에 의하여 증가된 실내 공기온도 차이는 무시할 수 있다고 가정하여 최종적으로 식(9)을 정리하면 식(11)과 같이 간략히 정리할 수 있다.

$$\bar{t}_{r,new} - \bar{t}_{r,old} = \frac{2 \cdot q_r}{h_c + h_r} \quad (11)$$

본 연구에서는 식(11)을 이용하여 증가된 온도를 계산한 후, 이 값을 기존의 방법 즉 벽면의 온도와 각 요소를 고려하여 계산하는 방법을 이용하여 계산한 평균복사온도에 그 증가된 온도를 더하여 최종적으로 일사량이 고려된 평균복사온도를 계산하였다. 대류 및 복사 열전달계수는 같다고 가정하였다.<sup>(9,10)</sup>

## 4. 실험 및 수치해석방법

### 4.1 열쾌적성 평가실험

평균복사온도 및 PMV 계산결과를 실측값과 비교하기 위하여 실내 공간에서 실험을 실시하였다. Fig. 2는 본 연구의 대상공간으로 세미나 및 강의를 목적으로 하고 있고 그 구조는 가로 3.7 m, 세로 6.4 m, 높이 2.4 m의 직사각형 모양으로 출입문과 하나의 창으로 구성되어 있다. 창문은 서쪽을 향하고 있으며 창의 크기는 가로 1.6 m, 세로 1.75 m의 직사각형 모양이다. 하루 중 태양 직달일사가 유입하는 시간은 오후 2~5시 사이로 계절에 따라 변동이 있다. 실내는 여름철 냉방과 난방을 위한 팬코일 유닛이 설치되어 있으며 추가적으로 냉방을 위한 에어컨이 설치되어 있으나 본 실험에서는 자연대류 이외의 인위적인 유동에 의한 영향을 배제하기 위하여 두 가지 모두 사용하지 않았다.

실험은 오후 3~5시 사이 실시하였으며, 대상



Fig. 2 Photography of the target place.

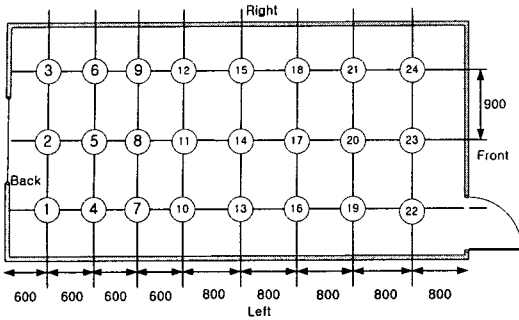


Fig. 3 The measuring points in the target space.

공간 바닥에 Fig. 3과 같이 측정점을 일정 간격으로 위치시켰다. 측정 높이는 인체를 기준으로 바닥으로부터 1.5m 지점으로 설정하였다. 각각의 측정점에서 열쾌적성 분석장비(model 1221, IN-NOVA)로 2분씩 샘플링하여 공기온도( $t_a$ ), 작용 온도(operative temperature), 상대습도, 기류속도, PMV 값을 각각 측정하였다.

#### 4.2 수치해석방법

이론적인 PMV 값을 계산하기 위해서 상용 전산 열·유동 해석 프로그램인 STAR-CD를 이용하였다. STAR-CD를 통하여 실내 온도분포 및 기류분포를 계산한 후 그 결과를 PMV 계산에 이용하였다. 최종적으로 PMV는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산하였다.

Fig. 4는 수치해석에 사용한 STAR-CD 격자를 보여준다. 격자는 약 100,000개로 비균일 격자계

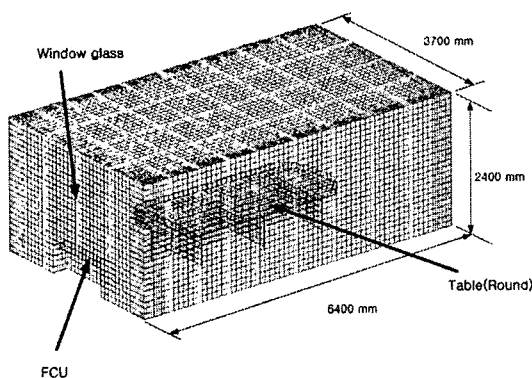


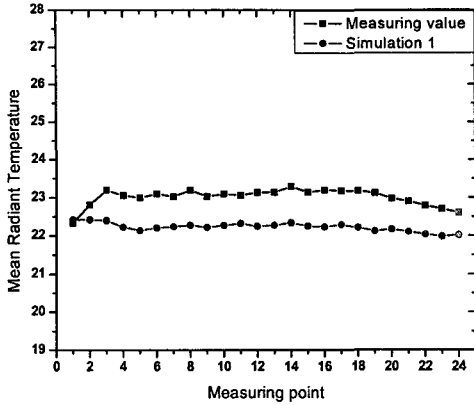
Fig. 4 Mesh structure for 3-D numerical calculation.

를 사용하였고 내부 유동은 표준  $k-\epsilon$  model을 사용하여 수치해석을 실시하였다. 벽면 근처에서의 온도를 정확히 계산하기 위하여 벽면 근처에 격자를 밀집시켰다. 수치해석에서 계산된 온도는 최종적으로 PMV 계산에 공기의 온도로 사용되었다. 경계조건은 벽면온도를 이용하였다. 일사량이 고려된 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하기 위하여 확산일사를 고려했을 경우, 확산일사 및 직달일사를 고려한 경우로 각각 구분하여 경계조건을 사용하였다.

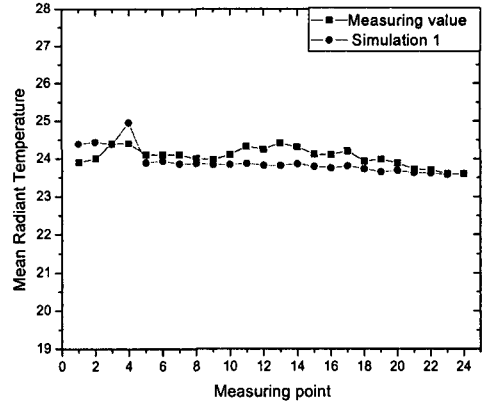
## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 확산일사를 고려한 평균복사온도 및 PMV 분포

확산일사 유무에 따른 평균복사온도 변화를 살펴보기 위하여 확산일사만이 있는 경우와 창문을 차폐하여 일사에 의한 영향을 제거한 경우의 평균복사온도 및 PMV 분포를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에서 x축은 Fig. 3에서의 측정위치를 나타내고 y축은 평균복사온도를 나타낸다. 측정값(measuring value)은 열쾌적성 분석장비를 이용하여 측정된 실측값이며, 수치계산 1(simulation 1)은 비접촉식 적외선 온도계를 이용하여 측정된 벽면온도를 사용하여 기존의 평균복사온도 계산방법으로 계산된 평균복사온도를 각각 나타낸다. 전체적으로 측정값과 벽면온도를 측정하여 계산한 값은 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 측정위치에 따라 온도변화가 급격하게 나타나는 부분이 존재하는데 이는 전체 온도범위에서 고려하면 0.5℃, 상대오차 2% 정도로서 큰 오차가 아니기 때문에 무시할 수 있다고 판단된다. 확산일사를 차단한 Fig. 5(a)의 경우에는 벽면의 온도를 실측하여 계산한 평균복사온도와 실제 측정값의 차이는 약 0.8℃의 차이를 나타내었고, 일사가 고려된 Fig. 5(b)의 경우에는 약 0.2℃의 차이를 나타내어 비교적 실측값과 잘 일치되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6의 결과를 바탕으로 실제값에 근접한 벽면온도 적용만으로도 기존의 평균복사온도 계산방법을 이용하여 평균복사온도의 근사치를 계산할 수 있다고 판단된다. 벽면온도를 측정하여 평균복사온도를 계산한 경우 확산일사를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 측정값과

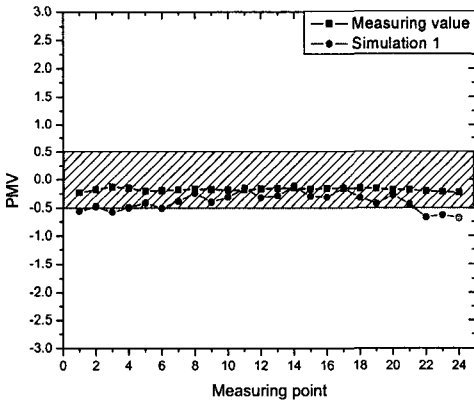


(a) When the solar radiation is not considered

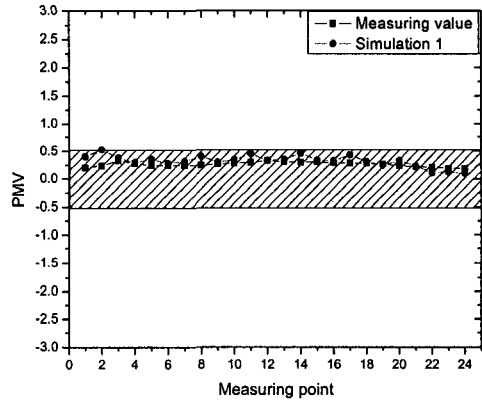


(b) When the diffuse solar radiation is only considered

Fig. 5 The mean radiant temperatures at the measuring points in the target space.



(a) When the solar radiation is not considered



(b) When the diffuse solar radiation is only considered

Fig. 6 PMV values at the measuring points in the target space.

더 잘 일치하였는데 이것은 측정된 벽면온도 자체가 일출 이후 지속적으로 태양일사의 영향을 받아 온도가 상승하는 현상에 기인한 것으로 예상된다. Fig. 5에서 측정위치에 따라 온도변화가 급격하게 나타나는 부분이 존재하는데 이는 전체 온도범위에서 고려하면 0.5°C 정도로 큰 오차범위가 아니기 때문에 무시할 수 있다고 판단된다.

평균복사온도를 이용한 PMV 값은 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 x축은 측정위치를 나타내며, y축은 PMV 값을 각각 나타낸다. PMV 분포는 실측값과 벽면의 온도를 측정하여 평균복사온도를 계산한 경우 모두 쾌적범위를 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

정확한 벽면온도를 이용하여 기존 평균복사온도 계산방법을 사용하는 경우는 평균복사온도와 PMV 값이 비교적 실제 측정값과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 벽면의 온도를 PMV 측정시 공기의 온도인 24.2°C로 가정하고 평균복사온도를 기존의 방법으로 계산하여 이를 실측값과 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 수치계산 2(simulation 2)은 PMV 측정시 공기의 온도를 벽면온도로 가정하여 계산한 경우를 나타낸다. 실제로 PMV 측정시 벽면과 공기의 온도차이는 0.5°C 이내로 일치됨을 알 수 있었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 공기의 온도를 벽면온도로 사용한 경우에는 실제 측정값과 1°C

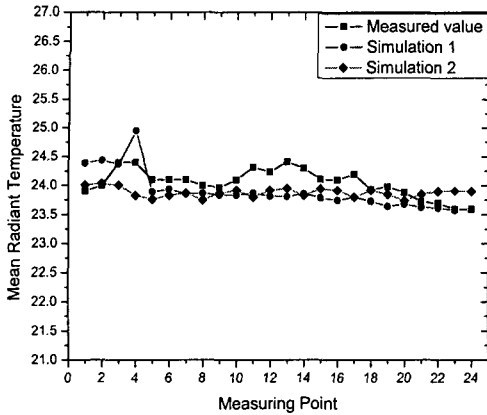


Fig. 7 Mean radiant temperature at the measuring points in the target space using the different wall temperature.

범위 내에서 비교적 잘 일치되고 있음을 알 수 있다. 따라서 확산일사만 존재하는 공간이나 직달일사가 유입되지 않는 시간에 PMV를 평가하는 경우에는 실측된 벽면온도를 공기의 온도로 가정해도 타당할 것이라 판단된다.

5.2 직달일사 및 전일사를 고려한 평균복사온도 PMV 분포

실제 아트리움이나 창 의 면적이 넓은 대공간 등과 같이 직달일사의 영향이 큰 경우<sup>(4)</sup>에는 적절한 평균복사온도 모델링이 필요할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 평균복사온도 모델링 식(11)을 적용하여 직달일사 및 실내로 유입하는 전체 일사량을 고려한 평균복사온도를 계산하고 이를 실측값과 비교하여 분석을 수행하였다.

태양의 일사량은 ASHRAE에서 제시한 Clear day model과 실측된 기상데이터(기상청, 한국과학기술연구원)를 이용하여 계산하였다. Table 2는

Table 2 The solar radiation through the window glass

Day	Total solar radiation	Directed solar radiation
28, October	44.4 W/m <sup>2</sup>	40.87 W/m <sup>2</sup>
30, October	22.2 W/m <sup>2</sup>	20.44 W/m <sup>2</sup>
4, November	63.9 W/m <sup>2</sup>	58.21 W/m <sup>2</sup>
6, November	22.2 W/m <sup>2</sup>	20.22 W/m <sup>2</sup>

각 날짜별로 계산된 직달일사 및 전체 일사량을 나타낸다. 일사량을 계산한 기준시간은 직달일사가 유입하는 오후 4~5시 사이를 기준으로 하였다. 유리의 차폐계수 및 전달계수는 참고논문<sup>(8)</sup>을 이용하였으며, 대류 열전달계수는 실내 공기유속이 0.2 m/s 이하이므로 복사 열전달계수와 같다고 가정하여 PMV 계산식에서 대류 열전달계수 계산방법을 이용하여 계산하였다.

직달일사의 경우 확산일사와 다르게 대상공간의 특정위치에만 조사되는 특징이 있다. 따라서 전체 공간에 대한 해석보다는 직달일사가 조사되는 부분에서만 증가된 평균복사온도를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 본 연구의 대상이 된 공간에서는 오후 4~5시 사이에 직달일사가 유입되므로 그 부분에만 직달일사를 고려하였다.

Table 3은 각 날짜별로 모델링을 적용하여 계산한 평균복사온도와 실제 측정값을 나타낸다. 표에서 계산된 평균복사온도는 직달일사 및 확산일사를 모두 포함한 값으로 전체 일사량을 나타낸다. Table 3에서 알 수 있듯이 대부분의 경우에 복사모델을 적용한 경우의 값이 실측값보다 높게 나타났다. 이는 본 연구에서 제시한 모델링 식이 평균복사온도를 가정할 때에, 일사에 의하여 증가된 실내 공기온도 차이를 무시하였고 의복 표면의 전달 및 반사에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문에 발생한 오차라고 생각된다.

Fig. 8은 Table 3에서 계산한 평균복사온도를 이용하여 계산한 PMV 분포를 나타낸다. 그래프에서 x축은 직달일사가 적용되는 부분인 측정 위치 ⑥에서 각각의 측정 일자를 나타내며 y축은 PMV 값을 나타낸다. 확산일사와 마찬가지로 쾌적범위를 사선으로 표시하여 쾌적 여부를 판별하였다. 수치계산 3(simulation 3)은 전체 일사를 고려한 경우를 나타내고 있으며, 이를 확산일사만 고려한 경우(simulation 2)와 실측된 경우(measured)

Table 3 The mean radiant temperature difference between the measuring value and calculation value when the total solar radiation is considered

	28, Oct	30, Oct	4, Nov	6, Nov
$t_{r,m}$ (measured)	20.6	23.6	19.6	22.9
$t_{r,c}$ (calculated)	21.1	24.9	20.6	24.4
$t_{r,c} - t_{r,m}$	0.5	1.3	1.0	1.5

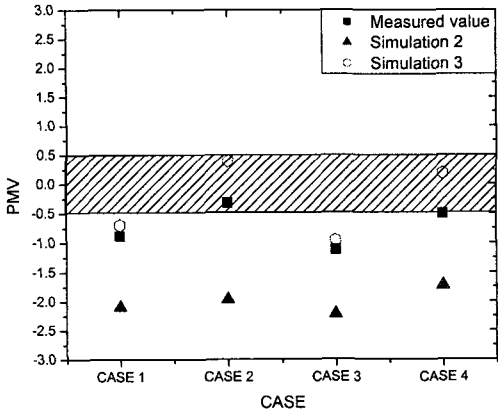


Fig. 8 PMV differences between measuring value and calculation value at the measuring point 6.

sured)의 PMV 값과 각각 비교하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 PMV 분포는 평균복사온도 분포의 영향으로 전체 일사를 고려한 경우가 실측값보다 높게 나타났다. 이것은 앞서 Table 3에서 평균복사온도가 실측값보다 높게 나타난 원인과 동일하다고 판단된다. 전체 일사량을 고려한 PMV 값은 확산일사를 고려한 PMV 값보다 +1 정도 높게 나타났으며 이는 직달일사의 영향 때문인 것으로 판단된다. 또한 직달일사를 고려하기 전보다 오차범위 0.4 이내에서 실측값과 일치됨을 볼 수 있었다. 따라서 창이 넓은 대공간이나 아트리움 같이 태양의 일사량이 많은 공간에서는 직달일사 및 확산일사에 대한 고려가 필요하다고 판단되며, 본 연구에서 제시한 평균

복사온도 모델링은 비교적 실측값과 잘 일치될 것으로 예상된다.

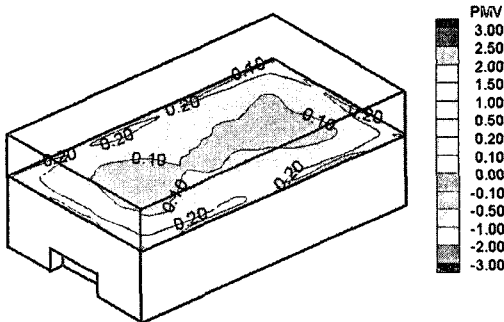
### 5.3 수치해석 결과

Fig. 9는 대상 공간 전체에 걸친 PMV 분포를 나타낸다. Fig. 9(a)는 확산일사를 고려하여 벽면의 온도를 PMV 측정시 공기의 온도인 24.2°C로 가정하여 계산한 PMV 분포를 나타낸다. (b)는 확산일사 및 직달일사를 고려했을 때 PMV 분포를 나타낸다. 직달일사의 경우 유입되는 영역이 시간에 따라 변화되는 영역이므로 창호 아래 부분에서 직달일사가 유입된다고 가정하여 일사량 계산에서 얻은 실내 유입 일사량을 바닥면에 열플럭스 향으로 처리하여 계산하였다.

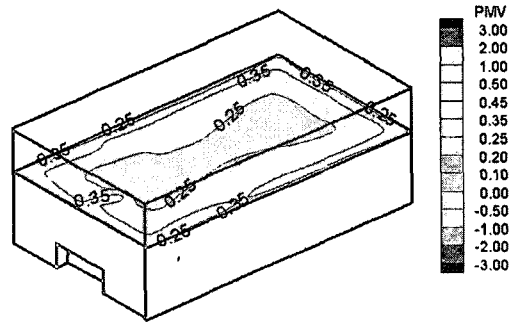
전체 PMV 분포 또한 특정 위치에서 계산한 PMV 분포와 유사한 분포를 나타내었다. 확산일사가 고려된 경우 평균 0.1 정도의 PMV를 나타내었다. 직달일사를 함께 고려하여 전체 일사를 반영한 경우 평균 0.3 정도의 값으로 확산일사만을 고려한 경우보다 약간 높은 값을 나타내었다. 하지만 직달일사의 경우 가을철 일사량을 고려하여 계산한 경우이므로 상대적으로 일사량이 많은 여름철에는 일사량 고려 유무에 따라 PMV 값의 변동이 심할 것으로 판단되며, 특히 직달일사에 의한 PMV 변화가 매우 클 것으로 예상된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 태양일사가 고려된 평균복사온



(a) When the diffuse solar radiation is only considered



(b) When the diffuse and direct solar radiation is considered

Fig. 9 PMV distribution of the horizontal plane at z=1.5m.



도를 계산하기 위하여 실내 유입 태양 일사량에 대한 해석과 일사에 따른 벽면온도 변화가 평균 복사온도 및 PMV 평가에 미치는 영향에 대하여 수치해석적인 방법과 실험을 통하여 살펴보았고 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 확산일사만을 고려하여 PMV를 평가하는 경우 실측된 벽면온도나 공기의 온도를 이용하여 평균복사온도를 계산하는 것이 실제 측정된 평균 복사온도와 1℃ 범위에서 잘 일치하므로 타당한 PMV 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 직달일사를 고려할 경우, 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 수정된 평균복사온도는 실측값보다 0~2℃ 정도 높은 값을 나타내었다. 이는 본 연구에서 제시한 평균복사온도식이 일사에 의하여 증가된 실내 공기온도 차이를 무시하였고 의복 표면의 전달 및 반사에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문에 발생한 것이라 판단된다.

(3) 전체 일사량을 고려한 경우의 PMV 값은 일사량을 고려하기 전 보다 실측값과 오차범위 0.4 이내에서 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 창이 넓은 대공간이나 아트리움 같이 태양의 일사량이 많은 공간에서는 태양에 대한 일사량을 고려해 줘야 정확한 PMV를 평가할 수 있을 것으로 예상되며, 본 연구에서 제시한 평균복사온도 모델링은 PMV 계산시 그 타당성을 가진다고 판단된다.

### 참고문헌

- ASHRAE, 1997, Fundamentals Handbook, Chapter 8.
- Fanger, P.O., 1970, Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.
- ISO Standard 7330, 1998.
- Lee, S.C., Cho, Y.J. and Kim, D.S., 2003, Analysis on thermal environment in the rotunda of new national museum of Korea, SAREK, Vol. 15, No. 1, pp. 32-39.
- Kim, S.H., Noh, K.C. and Oh, M.D., 2003, The evaluation of the thermal comfort in a two-stored high-rise apartment building, Proceeding of the SAREK, pp. 1011-1016.
- Kim, T.Y., Shinsuke Kato and Shuzo Murakami, 2001, Indoor cooling/heating load analysis based on coupled simulation of convection and HVAC control, Building and Environment, Vol. 36, pp. 901-908.
- Shuzo Murakami, Shinsuke Kato and Kim, T.Y., 2001, Indoor climate design based on CFD coupled simulation of convection, radiation, and HVAC control for attaining a given PMV value, Building and Environment, Vol. 36, pp. 701-709.
- Guohui Gan, 2001, Analysis of mean radiant temperature and thermal comfort, Building Service Engineers, Vol. 22, No. 2, pp. 95-101.
- INNOVA AirTech Instruments, Thermal Comfort, 2003, INNOVA AirTech Instruments.
- Kuehn, T.H., Ramsey, J.W. and Threlkeld, J.L., 1998, Thermal Environmental Engineering, Prentice Hall.
- Roh, J.W., 1998, A study on analysis of thermal environment in atrium, Architectural Institute of Korea, Vol. 14, No. 11, pp. 341-349.
- Kim, S.S. and Kim, Y.I., 2002, Standard weather data of seoul for energy simulation, SAREK, Vol. 14, No. 11, pp. 897-906.