

## 실내 온열환경 제어를 위한 PMV 센서의 개발 및 적용성 평가연구

윤 동 원<sup>†</sup>, 강 효 석, 안 병 욱<sup>\*</sup>  
경원대학교 건축설비학과, \*충청대학 건축학부

### Development and Evaluation of a PMV Sensor for the Control of Indoor Thermal Environment

Dong-Won Yoon<sup>†</sup>, Hyo-Seok Kang, Byung-wook Ahn<sup>\*</sup>

*Department of Architectural Equipment, Kyungwon University, Kyunggi 461-701, Korea*  
*\*Department of Architectural Engineering, Chungcheong College, Chungbuk 363-890, Korea*

(Received April 8, 2003; revision received September 15, 2003)

**ABSTRACT:** The maintenance of thermal equilibrium between the human body and its environment is one of the primary requirements for health, wellbeing and comfort. For the effective control of indoor thermal environment, thermostat or humidistat is used. But, it is not sufficient to control the indoor thermal environment using only one or two parameters as human response for the indoor comfortable environment. So an environmental thermal index is required for the control of indoor thermal environment effectively.

In this study, a PMV sensor has been developed which has integrated from various kinds of individual sensors for temperature, humidity, air velocity, radiant temperature. After applying the PMV and PPD equation, it is possible to monitor the indoor thermal environment with the sensor system, which is adopted to the circuit for optimization according to the human response with the metabolic rate and activities. The measurement was carried out to verify the performance of the integrated sensor system in comparison with existing measurement system, the PMV meter. As a result, the possibility of applying the PMV sensor to control the indoor thermal environment simultaneously was examined.

**Key words:** PMV(predicted mean vote, 예상온열감), Indoor thermal environment(실내 열환경), PMV sensor(PMV 센서)

#### 기 호 설 명

$A$  : 면적 [ $m^2$ ]

$F, f$  : 형태계수

$f_{cl}$  : 착의시의 피부노출면적비 [-]

$h_c$  : 인체 표면의 대류열전달률 [ $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ]

$h_r$  : 인체 표면의 복사열전달률 [ $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ]

$I_{cl}$  : 의복의 열저항 [ $m^2\text{ }^\circ\text{C}/W$ ]

$M$  : 체표면적당 대사량 [1 Met= $58 W/m^2$ ]

$P_a$  : 수증기분압 [Pa]

$t$  : 온도, 평균 복사온도 [ $^\circ\text{C}$ ]

$T$  : 온도, 평균 복사온도 [K]

$t_{cl}$  : 의복 표면온도 [ $^\circ\text{C}$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5460; Fax: +82-31-750-5314

E-mail address: dwyoon@kyungwon.ac.kr

$v$  : 풍속 [m/s]  
 $W$  : 외부일 [ $W/m^2$ ]

### 그리스 문자

$a_b$  : 가중계수 [-]  
 $\epsilon$  : 복사율 [-]

### 하첨자

$a$  : 공기  
 $b$  : 미소면  
 $i$  : 벽면  
 $p$  : 인체

## 1. 서 론

일반적으로 일반인은 하루 일과 중 80% 이상을 실내에서 생활하므로 실내 환경조건은 사람의 건강, 쾌적 및 작업능률에 많은 영향을 미치게 된다. 실내 환경은 온도, 습도, 기류, 복사열 등의 온열환경과 CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, 먼지 및 냄새 등과 관련된 공기환경, 빛환경, 음환경 등으로 나눌 수 있다.

온열환경의 관점에서는 출입도 덜지도 않은 쾌적한 조건으로 실내 환경을 제어해 줄 필요가 있으며, 에너지 절약과 지구온난화 방지를 위한 에너지 유효이용이란 관점에서 연구가 활발하게 진행되고 있다.

실내 온열환경을 제어하기 위한 방법으로는 현재 써머스태트와 휴미디스태트에 의한 온도와 습도 제어방법이 널리 이용되고 있다. 그러나, 실내 열환경은 온도만이 아닌 습도, 기류속도, 복사열 등이 복합적으로 관계되므로 이와 같은 요인을 종합적으로 고려하여 제어할 필요가 있다.

즉, 보다 종합적인 열환경지표를 실내 열환경 제어요소로 설정하고 인체가 느끼는 온·냉감과 유사하도록 실내 온열환경을 제어할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 온도, 복사열, 기류속도, 습도와 같은 물리적 환경인자뿐만 아니라 활동량, 착의량을 고려하여 예상온열감반응을 계산하고 인체가 느끼는 온열감을 예측하여 실내 환경을 쾌적하게 제어할 수 있는 실내 열환경 통합조절센서(가칭 PMV 센서, 이하 PMV 센서라 표기)

를 개발하고 그 적용성을 평가하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실내 온열환경 제어

### 2.1 열환경 평가지표인 PMV의 개념

인간이 느끼는 열적 쾌적감이나 불쾌감의 정도는 개인마다 다르며, 추위나 더위에 대한 감각도 다소 차이가 있다. 인간이 느끼는 열적 쾌적상태란 열에 의해 재실자가 스트레스나 긴장감을 받지 않는 환경을 의미하며 인간이 열적인 상태에서 느끼는 쾌적 정도를 열쾌적감이라 한다. ASHRAE의 Comfort Standard 55와 ISO 7730에 의하면 “열쾌적감이란 열환경에 만족을 나타내는 기분의 상태”라고 정의하고 있다. 온열환경을 평가하는 지표는 여러 가지가 있으나 덴마크의 Fanger는 1,300여명의 피험자를 대상으로 하여 작업량, 착의량, 건구온도, 평균 복사온도(MRT), 기류속도, 습도, 수증기분압 등을 측정하고 정리하여, 예상온열감반응(Predicted Mean Vote, PMV; 이후 PMV로 표기)과 예상불만족도(Predict Percentage of Dissatisfied, PPD; 이후 PPD로 표기)를 제안하였다. PMV는 대상집단의 반응을 다음과 같이 7단계로 나누어 양(+)의 값은 더운 범위(warm side), 음(-)의 값은 추운 범위(cold side)로 표시하였다.

(cold side) -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3 (warm side)

실내 온열환경의 쾌적범위 설정에 관한 연구는 피험자에게서 온열감각을 응답하게 하여 얻은 주관적 반응에 관한 조사와 인체의 열평형을 바탕으로 한 생리적인 중성역에 관한 이론적 연구로 대별할 수 있다. 현재 국제적으로 널리 통용되고 있는 쾌적열환경에 관한 기준은 ASHRAE standard 55-1981, 1992와 ISO 7730이 있다.

ASHRAE 55-81은 환경지표로서 신유효온도 ET\*를 쓰고 ISO 7730은 PMV·PPD 지표를 쓰는 차이가 있으나 PMV에 해당하는 작용온도를 계산할 수가 있으며, 두 기준의 내용은 비슷하다. 즉, 두 기준은 모두 열환경의 요소를 인체의 측면에서 작업량(met 치), 착의량(clo 치), 환경 측면에서 온도, 습도, 기류속도, 복사열로 정하고, 주어진 활동량과 착의량에 대한 환경인자의 조합에

Table 1 Comfort range of indoor thermal environment

Factors		ASHRAE 55-81	ISO 7730
Comfort zone (OT)	Summer	22.8~26℃ (ET*)	23~26℃ (24.5±1.5℃)
	Winter	20~23.6℃ (ET*)	20~24℃ (22±2℃)
Metabolism rate		<1.2 met	
Clothing	Summer	0.5 clo	0.5 clo
Humidity		-	
Air velocity	Summer	<0.25 m/s	
Vertical temp. difference		<3℃	
Vector radiant temperature		vertical<5℃, horizontal<10℃	
Floor surface temperature		<29℃	

따른 온열감을 표현하고 있다.

Table 1은 실내 온열환경의 쾌적범위를 ASHRAE 55-81과 ISO 7730을 비교하여 나타낸 것이다.

2.2 열환경 평가지표 PMV의 계산

2.2.1 인체와 각 벽면의 형태계수

Nakamura는 Fig. 1과 같은 미소입방체와 각 벽면 간의 형태계수를 이용하여 인체와 각 벽면 간의 형태계수를 근사적으로 구하는 방법을 제안하고 있다.<sup>(1)</sup> 이때 인체와 주위벽면의 형태계수는 식(1)과 같다. 식(1)에서 가중계수  $\alpha_b$ 는 Table 2와 같다.

$$F_{p-i} = \sum_{b=1}^6 \alpha_b \cdot f_{bi} \tag{1}$$

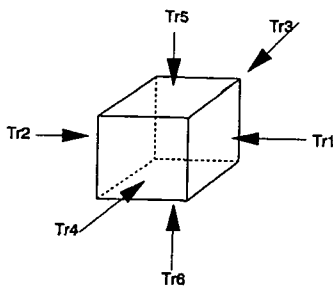


Fig. 1 Elemental cubic.

Table 2 Weighting factor for shape factor

-	$\alpha_1 \sim \alpha_4$	$\alpha_5 \sim \alpha_6$
Seated person	0.199	0.102
Standing person	0.238	0.024

2.2.2 평균 복사온도

인체에 대한 주위벽면의 평균 복사온도(Mean Radiant Temperature, MRT)  $t_{pmrt}$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다.<sup>(1)</sup> 실내 공간의 경우 면적가중 평균 표면온도(Average Surface Temperature, AST)로 약산하는 경우도 있다.

$$t_{pmrt} = \sum_{i=1}^N F_{p-i} \left( \epsilon_i \cdot T_i^4 + \frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^N \epsilon_j \cdot B_{ji} \cdot T_j^4 \cdot \frac{A_j}{A_i} \right)^{1/4} \tag{2}$$

2.2.3 작용온도

작용온도(Operative Temperature) OT는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$OT = \frac{h_c \cdot t_R + h_r \cdot t_{pmrt}}{h_c + h_r} \tag{3}$$

2.2.4 예상온열감반응

PMV는 Fanger에 의해 제안된 지표로, 주위환경에 대한 인체의 열적 반응을 열평형식에 기초하여 나타낸 것이다.

$$PMV = (0.352e^{-0.042M} + 0.032) \times [(M - W) - 0.35(43 - 0.061(M - W) - P_a) - 0.42(M - W - 50) - 0.0023M(44 - P_a) - 0.0014M(34 - t_{air}) - 3.4 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_{air})] \tag{4}$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.032(M - W) - 0.18I_{cl} [3.4 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \} + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_{air})] \quad (5)$$

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad (2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v} \text{ 일 때}) \quad (6)$$

$$12.1\sqrt{v} \quad (2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v} \text{ 일 때})$$

$$f_{cl} = 1.0 + 1.29I_{cl} \quad (I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2\text{C/W의 경우}) \quad (7)$$

$$1.05 + 0.64I_{cl} \quad (I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2\text{C/W의 경우})$$

3. PMV 센서의 기본구성

현재 실내 온열환경 제어는 온도와 습도에 의해 이루어지고 있다. 그러나 실내 온열환경은 온도와 습도만이 아니라 기류속도, 복사열 등이 관계하며, 나아가 착의량과 작업량등 여러 가지 요소에 의해 변화된다. 단순히 온도와 습도의 조절에 의해 조절되는 실내 온열환경은 재실자가 불쾌하게 느낄 수도 있다. 그러나, 실내 온습도를 포함한 기류속도, 주위벽면온도를 모두 제어하는 것은 현실성 또는 경제성이 없으며, 본 연구에서는 습도, 기류속도, 주위벽면온도(MRT)에 따른 필요 건구온도의 개념을 고려하고 이를 역으로 계산할 수 있는 Fig. 2와 같은 PMV 센서를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 PMV센서는 마이크로프로세서를 탑재하여 PMV-PPD와 같은 열환경 지표를 계산할 수 있으며, 시리얼 통신방식을 통하여 상세한 정보를 실시간으로 주고 받을 수 있다. 즉, PMV 센서는 실내 온열환경 요소들을

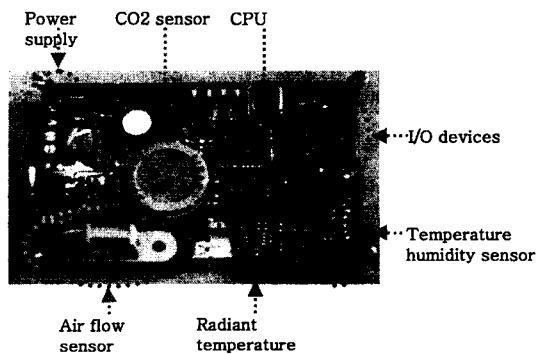


Fig. 2 Developed PMV sensor.

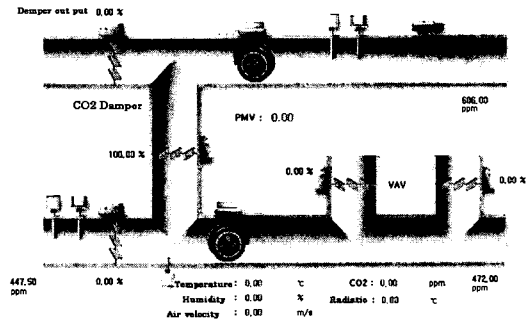


Fig. 3 Monitoring diadram at various location.

센서에서 측정하고 계산하여 PMV와 PPD 수치로 변환, 이를 실내 온열환경의 쾌적치인  $-0.5 < PMV < +0.5$  범위 안에 들도록 실내 건구온도를 조절하여 재실자의 온열환경을 쾌적하게 유지하는 시스템이다.

Fig. 3은 PMV 센서에서 측정된 값을 모니터링하는 다이어그램이다.

4. 실험장치의 구성과 측정방법

PMV 센서의 실내 온열환경 제어성능 평가실험은 Fig. 4와 같은 실험실을 이용하여 수행하였다. 실험대상 공간에 실내 온도, 습도, 복사열, 기류속도 등 온열환경요소를 측정할 수 있는 PMV 센서를 설치하고, 이것과 연동되는 VAV 유닛을 급기·배기 덕트부분에 설치하여 풍량을 조절하며, 급기웁 토출부의 정압센서를 통하여 웁의 회전수를 제어하도록 하였다.

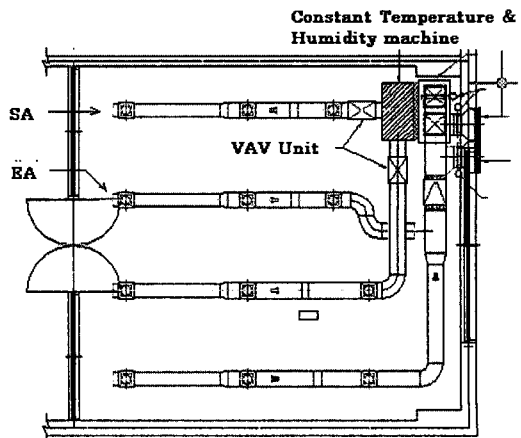


Fig. 4 Floor plan of experimental room.

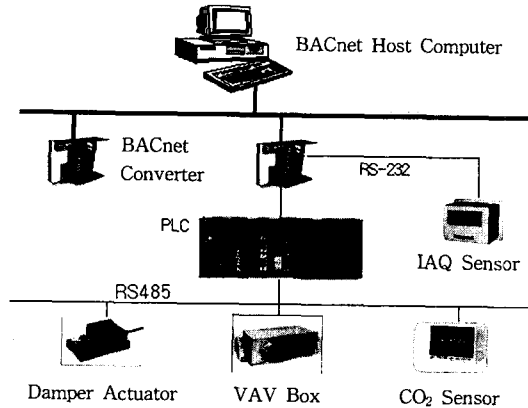


Fig. 5 Schematic diagram of control system.

실험에 사용되어진 PMV 센서의 정밀도를 비교하기 위해 Innova 사의 PMV 측정기와 본 연구에서 개발한 PMV 센서를 동일 위치에 설치하고 비교·평가할 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 실험장치구성도를 나타낸 것이다. PMV 센서에서 측정된 각 온열환경 요소들은 BACnet을 통해 컴퓨터에 모니터링되며 이 값들은 공조기와 각 기기의 값들을 조정하여 실내 온열환경을 조절하게 된다.

실내의 공조설비시스템은 냉각코일(cooling coil), 가열코일(heating coil), 가습기(humidifier)가 내장된 공조기(향온향습기)와 VAV 유닛, 풍량조절댐퍼, 급·배기 팬 등으로 구성되어 있다.

Fig. 6은 실험에 사용되어진 PMV 센서의 신뢰성을 검증하기 위해 사용되어진 Innova 사의 PMV

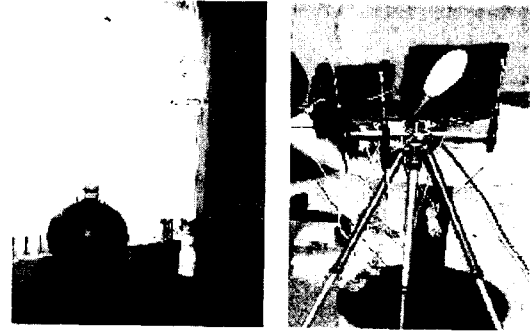


Fig. 6 Globe thermometer and PMV meter made in Innova Co.

측정기와 글로브 온도계, 아스만 온도계를 나타낸 것이다.

### 5. 실험결과 및 분석

본 실험은 실내 온도 22℃, 상대습도 50%의 동계 실내 쾌적조건을 기준으로 유지시키며 진행하였다. Innova 사의 PMV 측정기와 개발되어진 센서를 동일 위치에 놓고 실측한 후 비교 분석하였다.

Fig. 7은 착의량을 0.8 clo, 활동량(또는 운동량)을 1.6 met로 설정한 뒤 측정된 PMV 변화량이다. 측정결과 개발 센서와 Innova 사에서 개발한 PMV 측정기기의 PMV 값과 평균값의 차이는 PMV 0.02로 매우 작게 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 실내 열환경은 쾌적하다고 생각되는  $-0.5 < PMV < 0.5$ 의 범위 안에 포함됨을 알 수 있다. 이

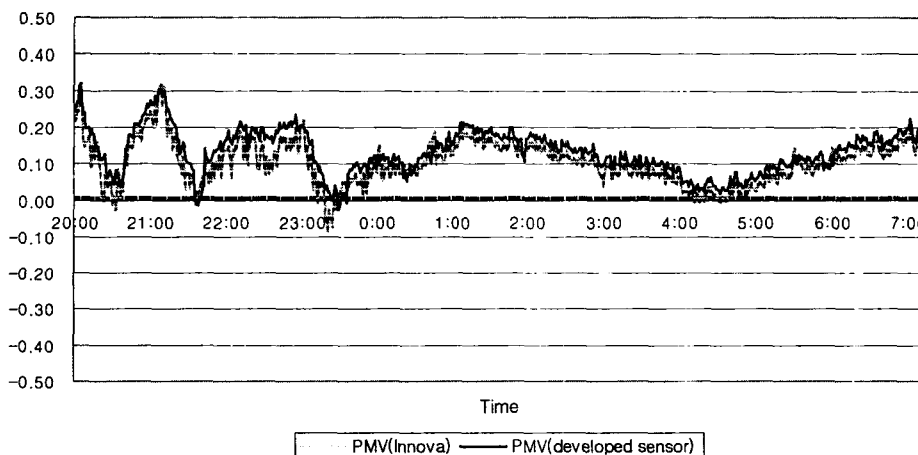


Fig. 7 PMV distribution (0.8 clo, 1.6 met).

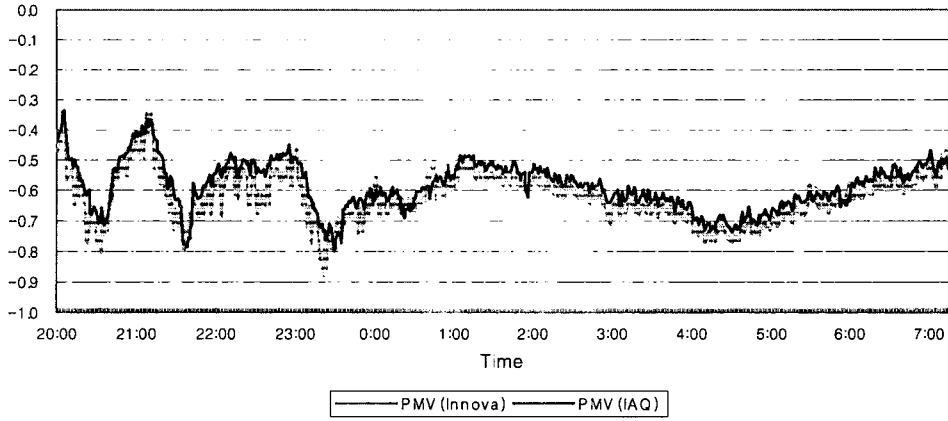


Fig. 8 PMV distribution (0.8 clo, 1.2 met).

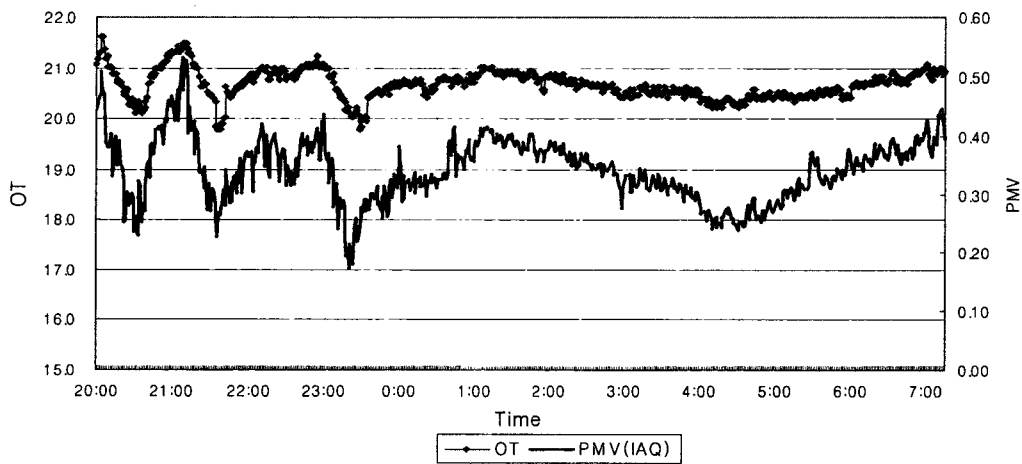


Fig. 9 Operative temperature and PMV (1.0 clo, 1.6 met).

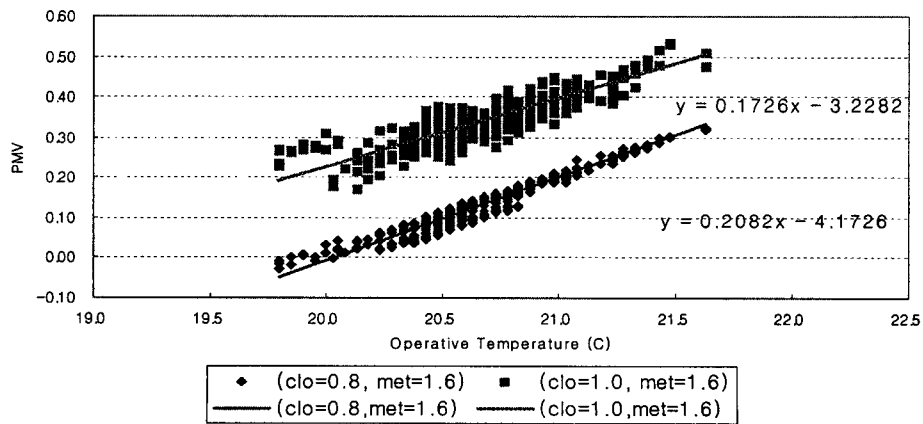


Fig. 10 PMVs according to clothing (1.2 met).

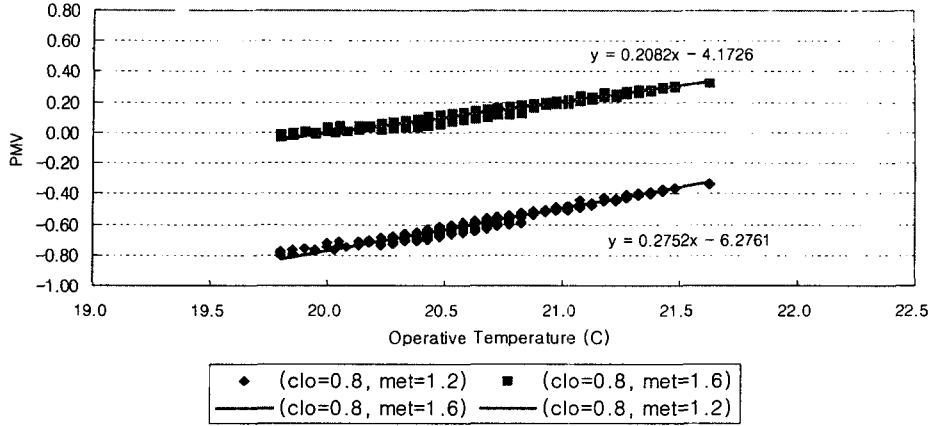


Fig. 11 PMV according to activity (0.8 clo).

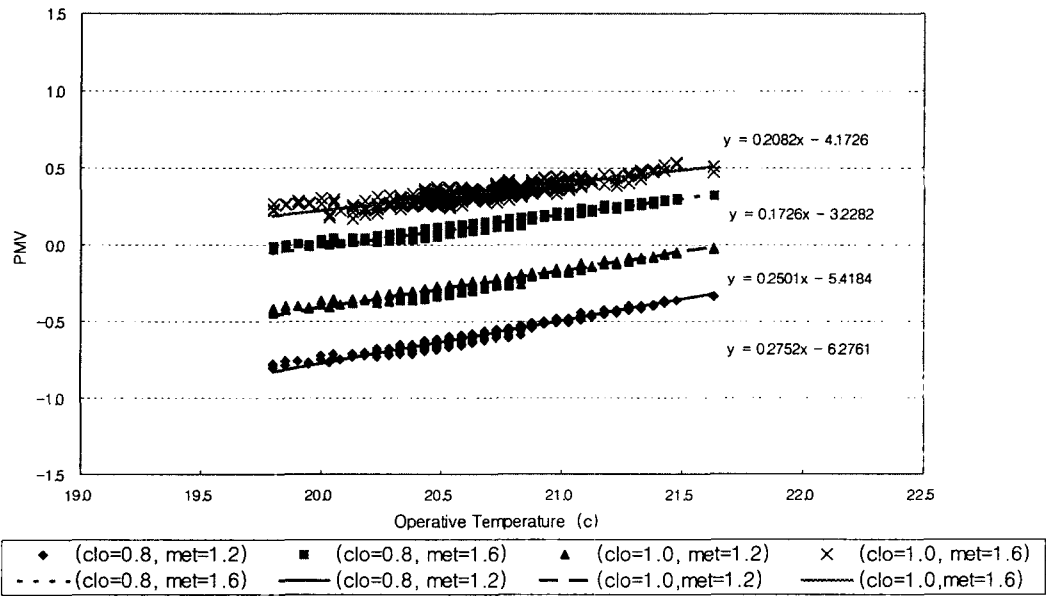


Fig. 12 PMV and OT according to clothing and activity level.

때의 실내 온도와 습도는 평균적으로 건구온도 22℃, 상대습도 43.9%를 나타내었다. 착의량 0.8 clo는 실내 거주자가 소매를 걷은 정도이다. 또한, 활동량 1.6 met는 서 있는 상태와 쇼핑, 연구실 등에서 작업하는 경우 정도이다. 즉, PMV 센서는 실내 거주환경을 쾌적하게 유지시키는 범위 내에서 작동하고 있었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 동일한 조건에서 활동량만 1.2 met로 변화시킨 결과이다. 즉, 동일한 착의량에 활동량만 서서 쉬고 있는 상태인 1.2 met로 변화시킨 것

이다. 이때의 재실자가 느끼는 실내는 당연히 약간 서늘한 정도로 느끼게 된다.

이 경우에도 본 연구에서 개발한 개발 센서와 Innova 사의 PMV 측정기로 부터 얻은 측정값의 차이는 평균 PMV 0.04 정도로 근소하였다.

Fig. 9는 작용온도 OT와 PMV 값을 비교하여 나타낸 것이다. OT는 기온, 기류 및 주변면온도의 3요소의 조합과 체감과의 관계를 나타내는 지표이다. OT의 쾌적범위는 동계 18.3~24℃, 하계 23.8~28.9℃이다. 실험결과 OT는 19.7~21.7℃의

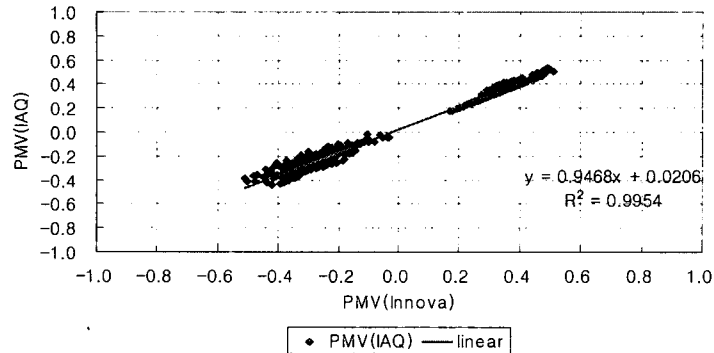


Fig. 13 Comparison of PMV between developed PMV sensor and PMV meter.

범위를 나타내었다. 실험기간이 동계임을 감안할 때 PMV 센서에 의한 실내 온열환경은 OT의 쾌적범위에 포함되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 착의량의 변화에 따른 PMV와 OT를 비교·분석한 것이다. 활동량은 1.6 met로 동일한 조건이며 착의량은 0.8 clo, 1.0 clo로 나누어 측정하고 이를 OT와 비교한 것이다.

착의량이 0.8 clo일 때 PMV 값은  $-0.03 \sim 0.32$ 로 나타났고, 이때의 OT 범위는  $19.8 \sim 21.6^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 또, 착의량이 1.0 clo일 때 PMV 값은  $0.17 \sim 0.51$ 의 범위를 나타냈고, 이때의 OT의 범위는  $19.8 \sim 21.6^{\circ}\text{C}$ 로 0.8 clo와 같은 범위를 나타내며 재실자가 쾌적함을 느끼는 범위( $-0.5 < \text{PMV} < +0.5$ ) 안에 포함되었다.

Fig. 11과 Fig. 12는 활동량 변화에 따른 PMV 변화량을 OT와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 OT와 PMV는 매우 상관성이 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 개발 PMV 센서와 Innova사의 PMV 측정기로부터 얻은 PMV 값을 비교한 것으로, 개발 PMV 센서의 정밀도를 검증하기 위한 것이다. 비교한 결과 그림에서 보는 바와 같이 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었으며, PMV 값은 평균 0.04의 차이를 나타내 매우 정확함을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

산업기술의 발달과 더불어 인간은 자신을 둘러싸고 있는 주위환경을 보다 쾌적하게 형성하기 위하여 부단히 노력하여 왔다. 현대인은 대부분의 시간을 실내의 한정된 공간에서 생활하기 때문에 환경조건의 좋고 나쁨은 상당히 중요한 문

제로 부각되고 있다. 그중에서도 열환경과 공기환경은 가장 기본이 되는 사항이며, 과거부터 실내 공간을 쾌적환경으로 제어하기 위한 여러 가지 방법들이 고안되고 적용되어 왔다. 아울러, 어떻게 하면 소비되는 에너지 사용을 최소화하면서 최적환경에 도달하느냐 하는 것이 추구하는 기본 목표라 할 수 있다.

본 연구에서는 건축물에 편리하게 적용할 수 있는 PMV 센서를 개발하고 그 적용성을 평가하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 온열환경의 6가지 인자(기온, 기류, 습도, 평균 복사온도, 활동량, 착의량)에 의한 영향을 종합하여 인간이 느끼는 열적 쾌적감을 제어할 수 있는 PMV 센서를 개발하고 이를 토대로 실내환경을 제어할 수 있는 제어시스템을 구성하였으며, 구성된 시스템은 컴퓨터를 통하여 실시간 모니터링을 할 수 있도록 하였다.

(2) 실험에 사용되었던 PMV 센서의 성능을 검증·평가하기 위하여 Innova사에서 개발한 PMV 측정기와 동일한 조건에서 비교·측정한 결과 본 연구에서 개발한 PMV 센서와 Innova사의 PMV 측정기 사이의 최대오차는 2.8% 이내로 나타나 상당히 신뢰성이 있는 것으로 평가되었다.

(3) 또한, PMV 센서를 통한 실내 온열환경 제어는 착의량과 활동량에 따라 적절하게 반응하여 재실자의 온열환경을 쾌적하게 유지시키는 것으로 나타났다. 즉, 기존의 온도, 습도센서와 같이 단일인자에 의하여 실내의 온·습도 제어에 국한되었던 냉·난방 공조설비의 제어환경을 거주자의 쾌적지표를 기준으로 하여도 실내 열환경의 제어가 가능함을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.



현재까지 많은 연구에 의하여 재실자에게 적합한 최적의 실내 온열환경을 창출하기 위한 노력이 계속되고 있다. 본 연구를 통해 실내 온열환경의 제어가 가능하게 됨으로써 실내 환경의 질을 한층 높일 수 있을 것으로 예상되며, 추후에는 본 연구에서 개발된 PMV 센서와 인체의 반응을 직접 비교·분석함으로써 PMV 센서의 적정성에 대해 심층 검토하고 보완하고자 한다.

### 참고문헌

1. Masamizu, K. and Shizuo, I., 1987, A numerical calculation on distribution of surface temperature and thermal comfort index caused by radiation iteration in a heated room, *Trans., SHASE*, 33(2), pp. 103-112.
2. Fanger, P. O., 1970, *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, p. 156.
3. Mats Sandberg, 1983, The use of moments for assessing air quality in ventilation rooms, *Building and Environment*, Vol. 18. No. 4, pp. 181-197.
4. Mats Sandberg and Mats Sjöberg, 1992, Ventilation effectiveness and purging flow rate-A review, *International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness*, July 22-24.
5. Kunio Mizutani, 1996, Model experiment and numerical simulation of air change efficiency in a room using different air conditioning configurations, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, ROOMVENT '96, July 17-19.
6. Takashi Akimoto, 1997, Experimental study on indoor thermal environment and ventilation performance of floor-supply displacement ventilation system, *Japan Archit. Plann. Environ. Eng.*, Architectural Institute of Japan, No. 499, Sep., pp. 17-25.
7. ASHRAE, Standard 62-1989, Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
8. ASTM, 1993, E741 Standard test method for determining air change in a single zone by means of tracer gas dilution, American Society for Testion and Materials, Philadelphia.
9. Dols, W. S. and Persily, A. K., 1992, A study of ventilation measurement in an office building, NISTIR 4905, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.