여름철 사무실내 온열환경 특성 및 쾌적성 평가
Characteristics of Thermal Environments and Evaluation of Thermal Comfort in Office Building in Summer

이 철 희*, 배 귀 남**, 최 항 철**, 이 춘 식**
C. H. Lee, G. N. Bae, H. C. Choi, C. S. Lee

Key words : Thermal Comfort(열적 쾌적성), Neutral Temperature(중성점 온도), New Effective Temperature(신유효온도), Comfort Sensation Vote(쾌적감), Predicted Mean Vote(예상온열감), Predicted Percentage of Dissatisfied(예상불만족률), Thermal Sensation Vote(응답온열감)

Abstract

In this study, indoor thermal parameters were measured to investigate the characteristics of thermal environments and 212 occupants were questioned to evaluate Korean thermal comfort in office building in summer. Thermal and comfort sensations were estimated using PMV(Predicted Mean Vote) and ET*(New Effective Temperature) which are most widely used nowadays. Comparing this experimental result with international standards and that of other research, Korean thermal responses were discussed. It was found that TSV(Thermal Sensation Vote) is more sensitive than PMV to the variation of temperature and that the measured percentage of dissatisfied is higher than PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied) in real office building environments. By regression analysis, the following regression equation has been obtained : TSV=0.461ET*−11.808 and neutral temperature is 25.6℃ in this case. Thermal comfort range based on 80% satisfaction is also 24.0~26.8℃, which is about 1℃ higher than that of ANSI/ASHRAE Standard.

1. 서 론

현대인이 주택, 사무실, 지하공간 등의 실내공간에서 생활하며 지내는 시간은 하루 시간의 80% 정도에 이른다. 이처럼 실내에서 대부분의 시간을 보내는 현대인에게 있어 쾌적한 실내환경은 일의 효율성을 증대시키고 나아가 건강을 유지하는데 매우 중요하다. 최근 정보화 시대로의 급속한 변화에 따른 사무 자동화와 지가 상승에 따른 조밀화로 인해 사무실내 열부하가 급속히 증가되고 있으며, 인간의 생활수준도 향상되어 보다 쾌적한 실내환경에 대한 요구가 높아지고 있는 추세이다. 따라서, 사무실내 근무자에게 더욱 쾌적한 환경을 제공하기 위하여 실내의 기온, 습도 등을 제어할 수 있는 공조 시스템이 사용되고 있다. 그런데, 인간은 주위 열환경으로부터 상당히 복잡한 열교환 과정을 거쳐 쾌적한 상태를 느끼므로, 공조 시스템을 통하여 쾌적한 실내환경을 구현하기 위해서는 먼저 인간이 가장 직접적으로 느끼는 실내의 기온, 습도, 기류속도, 복사온도와 같은 물리적 환경과 인간의 온열감 사이의 상관성을 밝혀내는 것이 매우 중요하다.[1,2]

* 한국과학기술연구원 기전연구부
** 정회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

인간의 온열감과 주위 온열환경간의 관계를 파악하기 위한 연구는 일찌기 19세기 말부터 미국, 유럽 등지에서 시작되었으며,[3] 현재 쾌적한 실내 공간에 대한 계측 및 평가에 관한 연구가 세계적으로 활발히 수행되고 있다.[4, 5, 6] 국내에서는 1970년대 후반부터 일부 대학, 연구소에서 실내 온열환경의 쾌적성에 대한 연구를 시작하였는데, 이들은 주로 아파트나 단독 주택과 같은 주거시설을 대상으로 연구를 수행하였다.[7, 8, 9] 최근에는 환경 실험실을 사용하여 한국인의 온열감을 밝혀내려는 연구도 수행되고 있다.[10, 11, 12, 13] 그러나, 빌딩의 사무실내 온열환경에 대한 연구는 매우 드물게 수행되었다.[14, 15, 16]

한편, 온열환경의 복합적인 요소가 인체에 미치는 영향을 정량적으로 표현하고, 이를 통해 간단하고 정확하게 쾌적한 온열환경의 범위를 제시하기 위하여 많은 온열환경 지표들이 개발되어 사용되고 있다.[3] 이 중에서 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)를 중심으로 미국에서 사용되고 있는 신유효온도(New Effective Temperature, ET*)와 ISO(the International Organization for Standardization)7730으로 채택되어 유럽에서 사용되는 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV)및 예상불만족률(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)이 대표적인 온열환경 지표이며,[17, 18, 19] 국내에서도 이들 평가지표를 이용한 연구가 많이 수행되고 있다.[11, 12, 16]

따라서, 본 연구에서는 여름철 사무실내 온열환경 특성과 한국인의 온열감 특성을 규명하기 위하여 실내 온열환경 요소를 측정하였고, 212명의 재실자에 대해 온열감과 쾌적감에 관한 설문조사를 실시하였다. 그리하여 대표적인 온열환경 평가지표인 ET*와 PMV-PPD를 사용하여 사무실내 근무자의 온열감과 쾌적감을 평가하였고, 본 연구결과를 외국 기준 및 다른 실험결과와 비교하여 한국인의 온열감 특성을 고찰하였다.[4, 5, 17, 18, 19]

2. 온열환경 평가지표

주위 열환경에 대한 인간의 온열감과 쾌적감은 인체와 주위 열환경간의 밀접한 상호작용에 따라 정해진다. 인간의 감각을 고려한 쾌적한 온열환경을 구현하기 위해서는 먼저 인간의 온열감각에 영향을 미치는 인자를 정확히 파악할 필요가 있다. 온열환경 요소들은 크게 환경측의 물리적 인자(기온, 습도, 평균복사온도, 기류속도 등)와 인체측의 인적인자(착의량, 대사량 등)로 나눌 수 있다. 열환경이 인체에 미치는 영향을 복합적이면서도 알기 쉽게 파악하기 위하여 온열환경 요소를 2가지 이상 결합하여 단일한 지표로 나타내려는 연구들이 많이 수행되었다. 지금까지 개발된 온열환경 평가지표는 크게 물리적 지표, 생리적 지표, 열평형 지표 및 주관적 지표로 분류된다. 여기에서는 주관적 지표로서 등온감각을 나타내는 ET*와 쾌적감각을 나타내는 PMV-PPD에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

2.1 신유효온도(ET*)[2, 5, 20]

1923년 Houghten과 Yaglou가 제안한 유효온도(Effective Temperature, ET)는 습도의 영향이 저온영역에서 과대 평가되고, 반대로 고온영역에서 과소 평가되는 것으로 지적되어 왔다. ET의 단점을 보완하여 1971년 Gagge 등이 개발한 ET*는 ASHRAE를 중심으로 온열환경을 평가하는 데 많이 사용되고 있다. ET*는 온도(기온, 평균복사온도)와 습도의 영향을 결합하여 열환경을 단일한 온도지표로 나타낸 것이다. 동일한 ET*값은 일정한 생리적 스트레인과 온열감을 나타내므로 ET*가 같은 두 환경은 동일한 열적 반응을 일으킨다고 볼 수 있다. 그러므로, ET*를 이용하여 온열환경이 다른 곳에서 수행된 연구결과들을 쉽게 비교할 수 있다. ET*는 수학적으로 식 (1)과 같이 정의되며, 50% 상대습도에서 재실자가 실제 환경에서와 동일한 쾌적감, 생리적 스트레인 및 피부로부터의 열교환을 느끼는 흑체복사공간의 균일한 온도를 의미한다.

$$ET^* = t_o + w\ i_m\ LR(p_a - 0.5p_{ET^*,s}) \quad (1)$$

여기서, t_o는 작용온도, w는 피부젖음률, i_m은 투습지수(moisture permeability index), LR은 *Lewis* 상수, p_a는 대기압, $p_{ET^*,s}$는 ET*에서의 포화수증기압이다. ET*를 구하기 위해서는 실제 환경과 동일한 기류속도를 사용하고, 피부젖음률과 투습지수를 알아야 한다. 피부젖음률과 투습지수는 주어진 환경조건

에서 동일한 ET*값에 대해 일정하다.

ET*는 ANSI/ASHRAE Standard 55-1981 및 55-1992에서 쾌적범위의 경계조건으로 사용된다.

2.2 예상온열감-예상불만족률(PMV-PPD)[1, 2, 5]

인간은 주위 열환경과 끊임없는 열교환을 하면서 살아가는데, 식 (2)에 나타낸 바와 같이 인체가 생성하는 열과 호흡이나 체표면을 통하여 손실되는 열이 같게 되면 열평형 상태를 유지하게 되어 인간은 춥거나 덥게 느끼지 않는 열적으로 중립 상태가 된다. 그러나, 신체가 생성하는 열과 손실되는 열이 같지 않는 열환경에 존재하는 인간은 춥거나 덥게 느끼면서 신체의 열조절 기구를 통하여 열평형 상태에 도달하려고 한다.

$$M-W=(C+R+E_{sk})+(C_{res}+E_{res}) \quad (2)$$

여기서, M은 대사에 의한 열생성률, W는 수행된 기계적인 일률, (C+R)은 체표면으로부터의 현열 손실률, E_{sk}는 체표면으로부터의 총증발열손실률, C_{res}는 호흡을 통한 대류열손실률, E_{res}는 호흡을 통한 증발열손실률이다. 모든 항은 단위 면적당 에너지량의 단위이고, 나체시의 체표면적을 기준으로 한다.

1970년 Fanger는 식 (2)로부터 인체의 정상상태 열평형 모델을 이론적으로 개발하고, 식 (3)과 같이 인체의 열부하(L=열생성률−열손실률)를 약 1,300명의 미국과 덴마크의 대학생 및 노인에 대한 환경실험실에서의 실험결과와 결합하여 인간이 느끼는 온열감을 예측할 수 있는 평가지표인 PMV를 개발하였다. PMV는 인간과 주위 환경의 6가지 온열환경 요소들을 측정하여 인체의 열평형에 기초한 쾌적 방정식에 대입함으로써 인간의 온열감을 이론적으로 예측하는 지표이다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 PMV는 주어진 활동량에서 중립 온열감을 갖게 하는 체표면 온도와 땀 증발률에 의해 계산된 인체 열부하의 함수로 표현된다.

$$PMV=\{0.303exp(-0.036M)+0.028\}L \quad (3)$$

PMV값은 ASHRAE의 온열감 7단계 척도를 기준으로 설정되었다.[1] 일반적으로 PMV의 적용범위는 중립점을 중심으로 쾌적 환경의 근방에 한정되어 있으므로(−2<PMV<2), 극한 환경에는 적용할 수 없으며, 통상의 사무실 및 주거환경에서의 온열감 평가에 많이 사용되고 있다.

한편, PPD는 온열감 척도에서 따뜻하다 및 덥다(2, 3)와 서늘하다 및 춥다(−2, −3)라고 반응하는 것이 불만족을 의미한다는 가정하에 주어진 환경에 대해 만족하지 않는 사람의 예상비율을 나타낸 것이다.[1] 약 1,300명의 피험자에 대한 실험결과로부터 구한 PMV와 PPD의 상관관계는 식 (4)로 표현되므로, 주어진 환경에 대해 PMV가 결정되면 PPD는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$PPD=100-95exp[-(0.03353PMV^4+0.2179PMV^2)] \quad (4)$$

3. 측정 및 설문 조사

3.1 측 정

여름철 사무실내 온열환경 특성과 한국인의 온열감 특성을 규명하기 위하여 서울 시내에 위치한 K건물을 대상으로 온열환경에 대한 실험을 수행하였다. K건물의 특성은 Table 1과 같으며, 대상층의 전체 평면도를 Fig.1에 나타냈다. 실험결과가 특정한 시간과 방위에 치우치지 않고, 사무실내 온열환경의 일반적인 특성을 나타낼 수 있도록 하기 위하여 실험은 공간적으로는 4방위에 대해서, 시간적으로는 사무실 근무시간을 대표하는 세 시점에서 수행하였다. 측정기간은 1993년 8월 12일부터 8월 25일까지이며, K건물 3층의 각 방위별로 1방을 선택하여 하루에 1방씩, 4방에 대해 각각 2회 측정하였다. 측정시각은 10시, 13시 30분, 16시로 하루에 3회이며,[21] 측정항목은 기온, 상대습도, 흑구온도, 기류속도 등의 실내 온열환경 요소이었다. 이 때

Table 1 Description of the K building

No. of Stories	4
Measured Story	3rd Story
Area of Room	About 80m^2
Structure	Reinforced Conc.
Air-Conditioning Type	Air Handling Units

측정공간의 한 방당 평균 재실인원은 9명 정도였다. 실내온열환경 요소를 측정하는데 사용된 측정기기의 특성을 Table 2에 나타내었다. 여러가지 온열환경 요소를 측정하기 위해 다양한 측정기기들이 사용되었으므로, 실험용 클린룸 내에서 온도와 상대습도를 각각 20~29℃, 45~75%로 변화시키면서 측정기기들의 측정값을 비교하여 측정기기들간의 편차를 보정하였다.[3, 22]

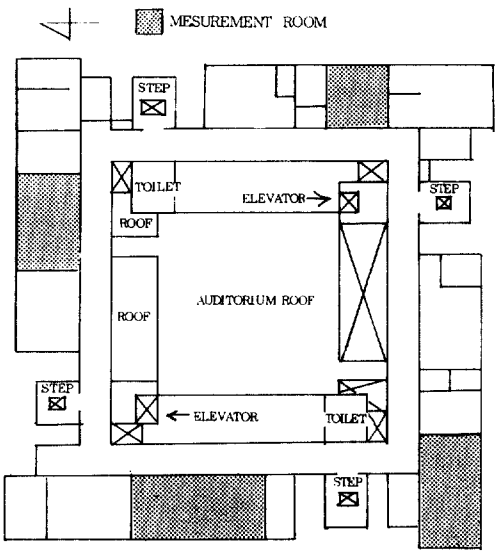

Fig.1 The plan view of the third story in the K building.

각 방에서 측정점은 사무기기의 배치 및 재실자의 위치를 고려하여 0.6m 높이에서 수평면상의 3점을 선정하였다. 또한, 수평면상의 중앙점에서 바닥으로부터 수직으로 0.1m, 0.6m, 1.1m, 1.7m 높이의 4점을 선정하였는데, 각각 발목, 착석시 인체의 중심, 착석시 인체의 머리 및 서 있을 때의 머리에 해당하는 높이이다.[17, 18, 21] 단, 흑구온도는 1.7m 높이에서 측정하지 못하였다. 이때 센서 주위 공기의 순환 및 열복사에 영향을 주지 않게 장애물이나 표면에서 충분히 떨어진 곳을 측정점으로 선정하였다.

3.2 설문조사

실내환경에 대한 재실자의 온열감 특성을 파악하고, 그 결과를 이론식에 의해 예측한 PMV와 비교, 평가하기 위하여 온열감, 착의량, 대사량 및 재실

Table 3 Scales for the thermal comfort rate

Thermal Sensation	Comfort Sensation
−3 Cold	
−2 Cool	
−1 Slightly Cool	0 Comfortable
0 Neutral	−1 Slightly Uncomfortable
+1 Slightly Warm	−2 Uncomfortable
+2 Warm	−3 Very Uncomfortable
+3 Hot	

Table 2 Instrumentation description

Quantity		Model	Measuring Range	Resolution
Outdoor	Air Temperature	August Thermometer	−20~50℃	0.5℃
	Relative Humidity		0~97%	−
Transient (Indoor)	Air Temperature	Hygrodig 2010	−10~80℃	0.1℃
	Relative Humidity		0~100%	0.1%
	Dew-point Temperature		−20~80℃	0.1℃
Air Temperature		Vaisala HMI 31	−40~115℃	0.1℃
Relative Humidity			0~100%	0.1%
Globe Temperature		Globe Thermometer	0~100℃	0.5℃
Air Velocity		Kanomax Anemomaster 24-6111	0~5m/s	0.1m/s

Table 4 Anthropometric data for the subjects

Quantity	Total(212 persons)		Male(177 persons)		Female(35 persons)	
	Mean±S.D.	Min.~Max.	Mean±S.D.	Min.~Max.	Mean±S.D.	Min.~Max.
Age[years]	37.7±8.9	21~58	38.6±7.7	22~58	33.9±12.8	21~50
Height[cm]	168.0±6.8	153~182	170.1±5.5	160~182	158.5±3.3	153~163
Weight[kg]	63.3±9.3	46~87	65.8±7.6	54~87	51.9±7.5	46~70
Body Surface Area[m^2]	1.66±0.15	1.40~2.00	1.71±0.11	1.50~2.00	1.44±0.10	1.40~1.70

Table 5 Distribution of the measured data

Date	Time	Sample Size	Clothings [clo]	Air Temp. [℃]	Globe Temp. [℃]	Relative Humidity [%]	Air Velocity [m/s]	ET* [℃]	PMV	TSV
12	10 : 00	10	0.51	23.8	24.5	67.1	0.12	24.1	−0.037	−0.10
	13 : 30	9	0.52	24.0	24.4	66.7	0.10	24.4	0.018	−0.11
	16 : 00	10	0.51	23.9	24.5	66.7	0.11	24.2	−0.004	−0.40
16	10 : 00	8	0.48	24.0	24.6	61.4	0.15	24.2	−0.206	−0.38
	13 : 30	8	0.46	26.2	26.0	65.8	0.11	26.7	0.425	0.38
	16 : 00	7	0.48	25.9	25.8	68.4	0.10	26.5	0.413	0.43
17	10 : 00	7	0.45	23.6	23.7	66.8	0.23	23.9	−0.685	−1.00
	13 : 30	5	0.47	25.8	25.4	71.8	0.11	26.5	0.266	0.40
	16 : 00	6	0.46	26.6	26.4	62.3	0.15	27.0	0.406	0.50
18	10 : 00	9	0.49	27.4	27.1	65.2	0.11	28.2	0.803	1.44
	13 : 30	10	0.49	27.9	27.9	58.5	0.12	28.3	0.967	1.60
	16 : 00	9	0.49	28.5	28.5	57.9	0.13	29.0	1.133	1.44
19	10 : 00	12	0.52	26.7	27.3	64.6	0.11	27.2	0.765	1.33
	13 : 30	8	0.52	28.0	28.0	55.4	0.10	28.2	0.999	1.63
	16 : 00	9	0.53	28.8	28.6	56.1	0.11	29.2	1.230	2.00
23	10 : 00	11	0.49	25.1	25.1	61.4	0.11	25.4	0.142	−0.18
	13 : 30	12	0.49	25.1	25.4	61.1	0.10	25.4	0.250	−0.33
	16 : 00	12	0.49	25.7	25.4	69.7	0.14	26.3	0.228	0.33
24	10 : 00	6	0.47	25.9	25.5	68.6	0.11	26.5	0.305	0.00
	13 : 30	7	0.47	26.1	25.7	77.9	0.12	27.1	0.405	1.14
	16 : 00	7	0.47	26.2	26.1	85.6	0.11	27.8	0.602	0.29
25	10 : 00	9	0.55	26.0	26.3	71.8	0.17	26.7	0.535	0.00
	13 : 30	11	0.55	25.7	25.8	71.1	0.13	26.3	0.467	0.50
	16 : 00	10	0.56	25.7	25.7	71.6	0.12	26.4	0.474	−0.10
Average		9	0.50	25.9	26.0	66.4	0.12	26.5	0.410	0.45

자의 인적사항에 대한 설문조사를 실시하였다. 설문지는 재실자에게 설문의 목적과 방법에 대하여 이해시킨 후 하루 3회, 측정 시작 30분 전에 배부하였다. 대사량과 착의량은 ANSI/ASHRAE Standard 55-1992에 따라 조사하였다.[18] 실내환경에 대한 재실자의 온열감은 ASHRAE에서 제시한 심리·생리학적 반응척도인 7단계 척도를 사용하였고,[2] 쾌적감은 4단계 척도를 사용하였다.[6] 재실자가 응답해야 하는 온열감과 쾌적감의 척도를 Table 3에 나타내었다. 현재 통계 분석에 널리 쓰이고 있는 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)/PC+를 사용하여 설문조사 내용을 처리하였다.

설문응답 인원은 남자가 177명, 여자가 35명으로 총 212명이었고, 평균 연령은 35세였다. 평균 착의량은 0.50clo, 평균 대사량은 1.2met이었다. 전체 설문응답자의 특성을 정리하여 Table 4에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 온열환경 요소의 분포

사무실내 온열환경 요소의 측정값을 각 측정시각별로 평균하여 Table 5에 나타내었다. 주요 온열환경 요소의 분포를 보면, 기온이 23.6~28.8℃(평균 : 25.9℃)이고, 흑구온도는 23.7~28.6℃(평균 : 26.0℃)이며, ET*는 23.9~29.2℃(평균 : 26.5℃)이다. 상대습도는 55.4~85.6%(평균 : 66.4%)이고, 기류속도는 0.10~0.23m/s(평균 : 0.12m/s)이다. 따라서, 평균적으로 보면 측정기간 중 대상공간은 약간 고온다습하였고, 실내의 기류는 거의 정지상태이었다.

Fig.2는 측정기간(8월 12일~8월 25일) 동안 실험을 수행한 날의 외기 및 실내 기온의 시간경과(오전 9시~오후 7시)에 따른 변화를 보여주고 있다. 이때 실내 기온은 각방의 대표점에서 5분 간격으로 측정하였고, 외기의 기온은 1시간 마다 측정하였다. 냉방을 하지 않은 날이 많았으므로 인체 및 사무기기의 열부하로 인해 실내의 평균 기온이 25.6℃로 외기의 평균 기온인 25.3℃보다 약 0.3℃ 높았다.

냉방을 한 날과 하지 않은 날의 측정시각별 수직높이에 따른 실내 기온의 변화를 Fig.3에 나타내었다. 냉방을 할 때는 천정에서 찬 바람이 나오는

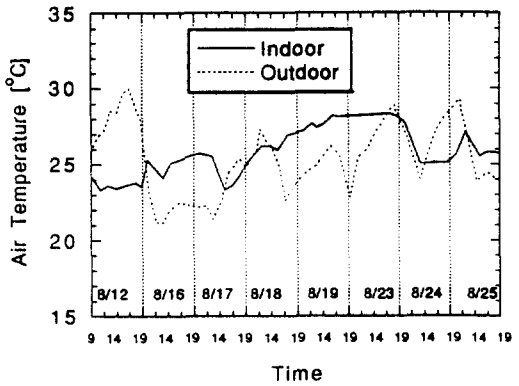

Fig.2 Transient variation of the indoor and outdoor air temperatures during the experiment.

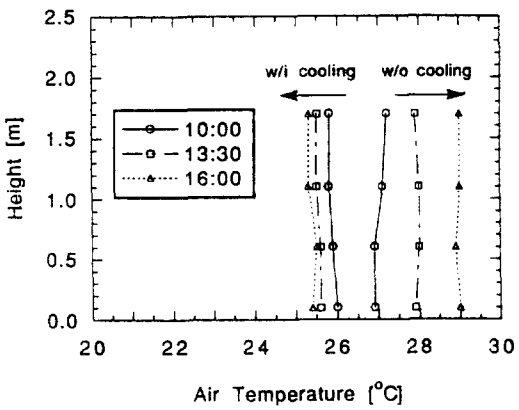

Fig.3 Variation of the indoor temperature with respect to height and time.

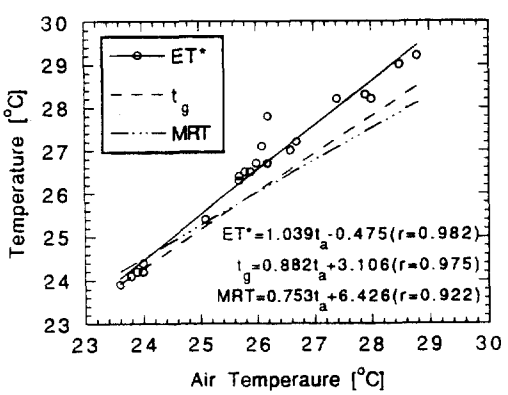

Fig.4 Correlation between t_a and ET*, t_g & MRT.

대류냉방이므로 높이가 높을수록 실내 기온이 약간 낮아지는 경향을 보인다. 냉방을 할 경우 시간이 지날수록 실내 기온이 떨어지나 냉방을 하지 않을 경우에는 반대로 시간이 지날수록 실내 기온이 증가한다.

한편, 온도지표들간의 상관성을 살펴보기 위하여 흑구온도(t_g), 평균복사온도(Mean Radiant Temperature, MRT) 및 ET^*를 기온(t_a)과 비교하여 Fig.4에 나타내었다. MRT는 다음 식에 의해 구하였다.[3]

$$MRT=[(t_g+273)^4+C\sqrt{v_a}(t_g-t_a)]^{1/4}-273,$$

$$C=0.247\times10^9 \quad (5)$$

여기서, v_a는 기류속도이다.

Fig.4를 보면, 습도의 영향으로 기온이 높을수록 ET^*는 다른 온도지표들에 비해 약간 높게 나타난다. 회귀분석에 의한 상관계수(r)는 모두 0.9 이상으로 이들 온도지표들이 기온과 큰 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

4.2 PMV-PPD 지표의 적합성

측정값을 통해 구한 PMV와 재실자의 반응을 통해 얻은 응답온열감(Thermal Sensation Vote, TSV) 사이의 상관관계를 Fig.5에 나타내었다. Fig.5에 나타낸 실험값은 0.5℃ 간격의 ET^*를 기준으로 모든 측정값을 분류하여 일정한 ET*에서 PMV와 TSV값을 재실자 수에 따라 가중평균하여 구한 것이다. Fig.5를 보면, PMV에 대한 TSV의 기울기가 1(Fig.5의 점선)보다 크다. 이것은 재실자가 사무실내 온열환경에서 이론적으로 예측된 온열감보다 더욱 민감하게 반응함을 의미한다. 유럽을 중심으로 사용되는 ISO 7730이 한국의 사무실내 온열환경의 평가에 얼마나 적합한 지를 검토하기 위하여 본 연구결과를 ISO 7730과 비교하여 Table 6에 나타내었다. ISO 7730에서 권장하는 실내환경의 쾌적조건은 $-0.5<PMV<0.5$인데, 이러한 PMV 범위에서 TSV는 $-0.96<TSV<0.58$로 보다 넓게 변하며, 특히 저온 쾌적영역에서 차이가 많이 남을 알 수 있다.

Table 6 Comparison of present experimental result with ISO Standard

	ISO 7730	Present
Regression Equation		TSV=1.540PMV −0.194
Neutral Point	PMV=0	TSV=−0.19
Comfort Range	−0.5<PMV<0.5	−0.96<TSV<0.58

설문조사를 통해 얻어진 응답온열감-응답불만족률의 분포를 미국인의 경우 및 이론적인 모델로서 널리 쓰이고 있는 PMV-PPD 관계식과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Schiller 등은 샌프란시스코 연해에 있는 10개의 빌딩을 대상으로 여름철과 겨울철에 총 2342회의 측정을 하여 사무실내 미국인의 온열감을 평가하였는데, 본 연구에서는 여름철 측정값만 인용하여 본 실험결과와 비교하였다.[4,5] Fig.6을 보

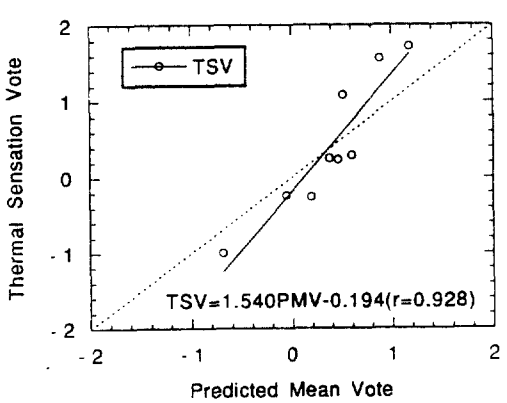

Fig.5 Comparison of TSV with PMV.

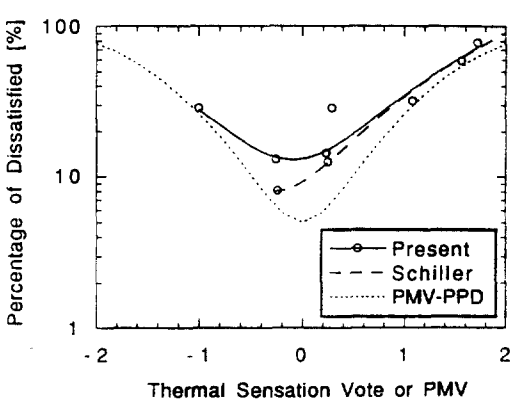

Fig.6 Comparison of TSV-Percentage of Dissatisfied and PMV-PPD distributions.

면, 사무실 환경에서의 불만족률이 환경 실험실 연구를 토대로 Fanger가 예측한 값(PPD)보다 전반적으로 약간 높게 나타난다. 특히, 최적점(불만족률이 최소가 되는 점) 근처에서 차이가 많이 나며, 이 영역에서 불만족률은 예상값보다 완만하게 변한다. 그러나, 응답온열감-응답불만족률의 전체적인 경향은 PMV-PPD 모델에 의한 예측값과 비슷하다. 온열환경에 대한 만족률이 80% 이상인 쾌적범위를 비교해보면, 본 연구의 경우 $-0.85<PMV<0.85$, $-0.73<TSV<0.52$로, 사무실 환경에서의 쾌적범위가 예측보다 더 좁게 나타난다. Schiller 등이 구한 응답불만족률은 최적점보다 더운 반응에서 본 연구결과와 거의 비슷하고, 전체적으로 PMV-PPD에 의해 예측된 불만족률보다 높게 나타난다. 이러한 비교로부터 환경 실험실에서 개발된 PMV-PPD 지표를 실제 사무실 환경의 평가에 적용하기 위해서는 약간의 보정이 필요할 것으로 여겨진다.

4.3 신유효온도(ET*)와 응답온열감(TSV)

Fanger의 쾌적방정식에 의한 PMV와 재실자 응답에 의한 TSV를 동일한 ET*에 대해 비교한 결과를 회귀직선과 함께 Fig.7에 나타내었다. Fig.7에서 Schiller 등의 연구결과는 회귀식을 이용하여 나타낸 것이다. 본 연구에서 ET*와 TSV의 상관식은 다음과 같다.

$$TSV=0.461ET^{*}-11.808(r=0.91) \quad (6)$$

회귀직선의 기울기를 비교해 보면, ET^{*}의 변화에 대해 TSV가 PMV보다 더 민감하게 변함을 알 수 있다. 중성점보다 약간 높은 온도에서 예측값과 측정값이 일치하므로, 중성점 근처의 온도범위에서는 TSV와 PMV가 비슷하고 측정범위의 양쪽 끝에서는 약 0.4 단위의 온열감 차이가 난다.

TSV=0 및 PMV=0인 중성점에서 ET*는 각각 25.6, 25.2℃로, TSV에 의한 중성점이 0.4℃정도 높게 나타난다. ANSI/ASHRAE Standard 55-1992의 쾌적 온도범위인 23~26℃에서 $-1.21<TSV<0.18$, $-0.64<PMV<0.24$로, PMV는 대체로 쾌적범위($-0.5<PMV<0.5$)에 해당하는 데 비해 사무실 환경에서의 반응은 서늘한 느낌으로 약간 치우쳐 있다. 즉, 사무실에 근무하는 한국인은 ASHRAE 쾌적범위의

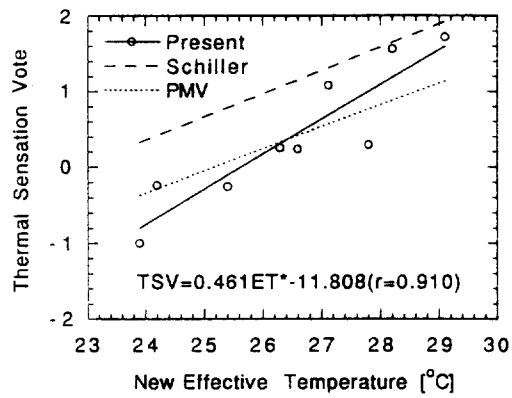

Fig.7 TSV distribution with ET*.

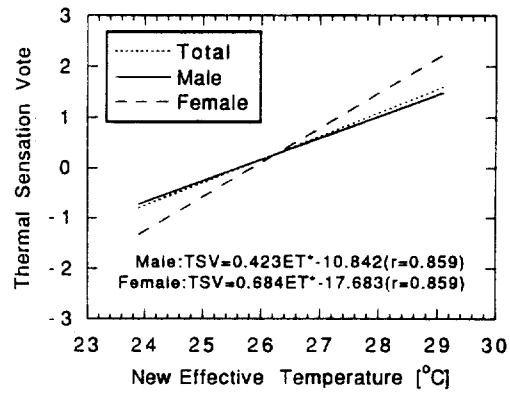

Fig.8 TSV difference with respect to sex.

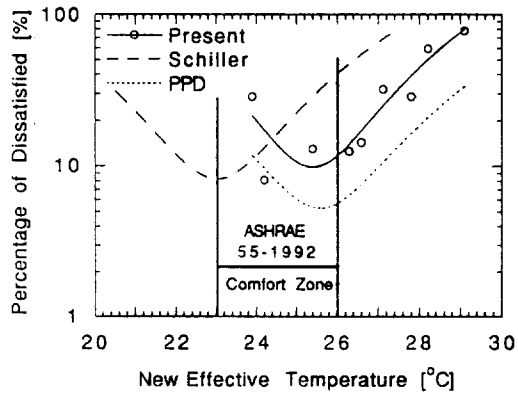

Fig.9 Comparison of Percentage of Dissatisfied distributions with ET*.

하한온도에서 약간 서늘하게 느끼게 됨을 의미한다.

미국인에 대한 Schiller 등의 연구결과는 중성점(TSV=0)이 22.9℃, ASHRAE 쾌적영역에서 TSV가 0.04~0.97로, 본 연구결과와는 반대로 더운 느낌으로 약간 치우쳐 있다. 특히, 저온 영역으로 갈수록 본 연구결과와 차이가 커서 24℃에서 Schiller 등의 연구결과가 약 1.0 단위 이상 더 덥게 느낌을 보여준다.

*ET**에 따른 남자와 여자의 TSV의 변화를 비교하여 Fig.8에 나타내었다. 일반적으로 알려진 바와 같이 여자가 남자보다 온도변화에 더 민감하게 반응함을 알 수 있다.[2] 중성점 온도를 비교해 보면, 남자는 25.6℃, 여자는 25.9℃로 여자가 남자보다 약 0.3℃ 높다. 그리고, ASHRAE 쾌적영역에서 남자의 경우 $-1.11<TSV<0.16$, 여자의 경우 $-1.95<TSV<0.10$으로 쾌적영역의 하한에서 여자가 남자보다 약 0.8단위 이상 더 춥게 느낌을 알 수 있다.

*ET**에 따른 재실자의 불만족률 분포를 Fig.9에 나타내었다. 응답불만족률이 PMV-PPD식에 의한 예측값보다 높게 나타났다. 최소 불만족률이 약 10%로 예측모델의 5%에 비해 2배 가량 높다. 이러한 차이의 원인으로 복사, 기류속도, 착의량, 대사량 등을 생각할 수 있는데, 본 연구에서는 평균복사온도와 기온의 차이가 대부분 1℃이하로 매우 작고, 기류속도도 0.10~0.23m/s로 매우 작으며, 대사량도 1.2met가 대부분이므로 착의량과 관련이 있을 것으로 생각된다. 본 실험에서 착의량은 0.34~0.73 clo로 사무실내 통상 착의량인 0.5clo를 중심으로 변화폭이 큰데, 이것이 온열감 및 불만족률에 상당히 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 또한, 측정기간 동안 습도가 평균 66.4%로 약간 높았던 것도 쾌적영역에서의 불만족률에 어느 정도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

불만족률이 최소가 되는 최적점의 온도는 25.4℃인데, 이것은 PPD로 예측한 25.6℃보다 0.2℃ 가량 낮다. 만족률 80% 이상인 쾌적영역의 온도범위는 측정의 경우 24.0~26.8℃, PPD 모델의 경우 23.0~28.2℃로 측정에 의한 쾌적 범위가 예측보다 좁게 나타난다. 이것은 PPD가 실내 온열환경에 대해 실제보다 좋게 예측함을 의미한다. Schiller 등의 측정결과는 저온부에 비해 고온부에서 불만족률이 PPD보다 높게 나타난다. 최적점의 불만족률은 8%로 역시 PPD보다 높고, 최적온도는 23.1℃로 낮다. 이러한 원인으로 Schiller는 착의량과 대사량이 낮게 평가된 점을 들고 있다.[5] 만족률 80%인 쾌적범위는 21.2~24.8℃로 본 연구에 비해 고온부는 2.0℃, 저온부는 2.8℃ 가량 낮다. 따라서, 한국인은 서구인에 비해 저온에서 불만족률이 높고, 쾌적온도 범위도 미국인에 비해 높게 형성됨을 알 수 있다.

본 연구결과를 미국의 온열환경 기준인 ANSI/ASHRAE Standard 55-1981과 비교하여 Table 7에 나타내었다.[17] 본 연구결과에 의하면, 한국인의 쾌적조건은 미국 기준에 비해 중성점 온도는 약 1.2℃, 쾌적영역은 0.7~1.2℃ 가량 높다.

Table 7 Comparison of present experimental result with ANSI/ASHRAE Standard

	ANSI/ASHRAE 55-1981	Present
Neutral Temperature[℃]	24.4	25.6
Comfort Range[℃] (80% Satisfaction)	$22.8<ET^*<26.1$	$24.0<ET^*<26.8$

본 연구결과를 미국인에 대한 Schiller 등의 실측결과 및 Fanger의 PMV-PPD모델에 의한 예측값과 비교하여 Table 8에 나타내었다.[1, 4, 5] PMV-PPD 모델에 의한 중성점 혹은 최적점 온도의 예측값은 실험에 의한 측정값과 상당히 비슷하였으며, Schiller 등의 결과는 예측값 및 본 연구결과보다 2.3~2.7℃ 정도 낮다. 온열감이 −0.5~0.5 범위인 쾌적조건에서의 온도범위를 비교하면, PMV-PPD 모델에 의한 쾌적영역의 상한은 사무실에 대한 본 연구결과와 거의 비슷하지만 하한은 1.0℃ 가량 낮다. Schiller 등의 측정에 의한 미국인의 쾌적범위는 본 연구에 비해 상한은 2.2℃, 하한은 3.3℃ 가량 낮다. 그러므로, 한국인의 쾌적온도 범위가 서구인에 비해 전반적으로 높으며, 특히 쾌적영역의 하한이 서구인에 비해 더욱 높을 것으로 추정된다.

4.4 응답온열감(TSV)과 쾌적감(CSV)

온열감은 주위 환경의 쾌적성을 평가하는 간접적인 척도이며, 쾌적감(Comfort Sensation Vote,

CSV)은 직접적인 척도라고 말할 수 있다. 즉, 사람에 따라 온열적으로 중립인 환경에서 쾌적하지 않다고 느낄 수도 있다. TSV와 CSV를 비교하여 Table 9에 나타내었다. 온열 중립감(TSV=0)을 느끼는 사람의 67%가 쾌적, 33%가 약간 불쾌적, 온열 만족감(TSV=−1, 0, 1)을 느끼는 사람의 47%가 쾌적, 51%가 약간 불쾌적하다고 느낀다. 따라서, 온열 만족감을 느끼는 사람의 98% 이상이 쾌적 혹은 약간 불쾌적을 느끼므로 온열 만족감은 쾌적성을 판단하는 중요한 지표라고 할 수 있다. 여기서, 약간 서늘하게(TSV=−1) 느끼는 사람의 52%가 쾌적하다고 느끼는 데 반해 약간 따뜻하게(TSV=1) 느끼는 사람은 9%만이 쾌적하다고 느끼므로 여름철의 특성을 잘 나타내 준다고 생각된다. 한편, 확실히 춥게(TSV=−2, −3) 느끼는 사람의 50%가 쾌적, 50%가 약간 불쾌적하다고 느끼며, 확실히 덥게(TSV=2, 3) 느끼는 사람의 55%가 약간 불쾌적 정도라고 느끼므로 온열적으로 불만을 느끼는 사람이 반드시 불쾌적하게 느낀다고 할 수는 없다.

응답온열감 척도의 각 단계별로 재실자의 쾌적감을 평균하여 TSV와 CSV의 상관관계를 Fig.10에 나타내었다. 쾌적감을 평가하기 위해 본 연구에서는 Tanabe 등 및 국내 연구자들이 많이 사용하고 있는 Table 3의 4단계 척도를 채택하였고,[6, 11, 12, 13, 16] Schiller 등은 6단계 척도를 이용하였다.[5] 6단계 척도는 1, 2, 3이 각각 매우, 보통, 약간 불쾌적을 나타내고, 4, 5, 6은 각각 약간, 보통, 매우 쾌적을 나타낸다.

온열 중성점을 기준으로 더운 느낌에서는 쾌적감이 급격하게 떨어져 TSV=1, 2에서 CSV가 각각 −1.0, −1.5이나, 추운 느낌에서는 쾌적감이 바로 떨어지지 않아 TSV=−1, −2에서 CSV는 모두 −0.5이다. Schiller 등의 결과도 데이터 수가 적은 TSV=−3, 3을 제외하면 역시 비슷한 경향을 나타낸다. 이것은 여름철의 경우 재실자들이 약간

Table 8 Comparison of present experimental result with other's

Researcher		Schiller et al. (1990)	Present	
Method		Field Study	Field Study	PMV-PPD Model
Regression Equation		TSV=0.308ET*−7.04	TSV=0.461ET*−11.808	PMV=0.291ET*−7.328
Neutral Temperature[℃]		22.9	25.6	25.2
Optimal Temperature[℃]		23.1	25.4	25.6
Comfort Condition	80% Satisfaction	21.2℃<ET*<24.8℃	24.0℃<ET*<26.8℃	23.0℃<ET*<28.2℃
		−1.16<TSV<0.60	−0.73<TSV<0.52	−0.85<PMV<0.85
	23℃<ET*<26℃	0.04<TSV<0.97	−1.21<TSV<0.18	−0.64<PMV<0.24
	−0.5<TSV(PMV)<0.5	21.2℃<ET*<24.5℃	24.5℃<ET*<26.7℃	23.5℃<ET*<26.9℃

Table 9 Correlation between TSV and CSV

Thermal Sensation Vote (TSV)		Comfort Sensation Vote(CSV)			Row Total
		Moderately, Very Uncomfortable (−3, −2)	Slightly Uncomfortable (−1)	Comfortable (0)	
Cool, Cold(−2, −3)		0(0%)	4(50%)	4(50%)	8(4%)
Neutral	−1	1(3%)	14(45%)	16(52%)	31(15%)
	0	0(0%)	26(33%)	52(67%)	78(37%)
	1	3(7%)	38(84%)	4(9%)	45(21%)
Warm, Hot(2, 3)		22(45%)	27(55%)	0(0%)	49(23%)
Column Total		26(12%)	109(52%)	76(36%)	211(100%)

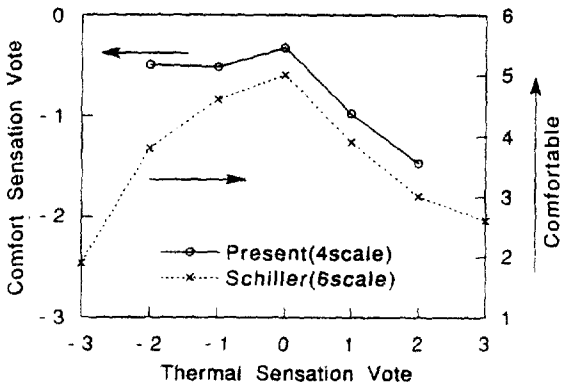

Fig.10 Correlation between TSV and CSV.

서늘한 온도에서도 쾌적하게 느끼기 때문이라고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 서울시내에 위치한 사무실을 대상으로 실내 온열환경 요소의 측정 및 설문조사를 실시하여 여름철 사무실내 온열환경 특성을 파악하였고, 한국인의 온열감 특성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 밝혀진 여름철 사무실내 한국인의 온열감 특성은 다음과 같다.

1) 실제 사무실 환경에서의 TSV는 PMV에 비해 온도변화에 민감하고, 응답불만족률이 PPD보다 높게 나타난다. 이러한 차이가 나는 원인은 이론 모델에 비해 착의량의 범위가 넓고, 측정기간 중 습도가 높았으며, 한국인이 여름철 무더위에 익숙해져 있기 때문인 것으로 추정된다.

2) TSV와 ET^*의 상관 관계식은 TSV=0.461 ET^* −11.808이고, 중성점 온도는 25.6℃이다. 재실자의 만족률이 80% 이상인 쾌적온도범위는 24.0~26.8℃이다. PMV-PPD 모델은 중성점 온도와 최적점 온도를 비슷하게 예측하지만 쾌적범위가 실제 반응보다 상당히 넓게 나타난다. ANSI/ASHRAE 기준과 비교하면 중성점 온도와 쾌적온도 범위가 1℃ 가량 높다. 또한 Schiller 등의 실측결과와 비교하면, 본 연구의 중성점 및 쾌적 범위가 2~3℃ 가량 높고 낮은 온도에서 추위에 더 민감함을 알 수 있었다. 따라서, 한국인의 중성점 및 쾌적온도범위가 서구인에 비해 전반적으로 높으며, 특히 쾌적영역의 하한온도가 상대적으로 더욱 높을 것으로 추정된다.

3) 온열 중성점을 기준으로 더운 영역에서는 쾌적감이 급격히 낮아지나 추운 영역에서는 쾌적감이 별로 낮아지지 않음을 알 수 있었다. 이것은 여름철의 경우 재실자들이 약간 서늘한 온도에서도 쾌적하게 느끼기 때문이라고 생각된다. 온열적으로 만족(TSV=−1, 0, 1)을 느끼는 사람은 거의 모두가 쾌적 혹은 약간 불쾌적하다고 느끼므로 온열 만족감은 쾌적성을 판단하는데 유용함을 알 수 있었다. 그러나, 확실히 춥게 혹은 덥게 느끼는 사람이 반드시 불쾌적하게 느끼는 것은 아님을 알 수 있었다.

이상의 연구결과로부터 서구인에게 맞게 개발된 온열환경 평가지표들을 한국인의 온열감 특성에 맞게 보정하고, 한국인의 온열감 평가기준을 설정하는 연구가 향후 수행되어져야 할 것으로 생각된다. 또한, 응답 온열감 척도와 쾌적감 척도의 온도변화에 따른 상관성 및 인간의 쾌적감을 잘 반영하는 척도의 합리적 설정에 대한 검토가 필요하다고 여겨진다. 본 연구에서는 여름철 현장조사의 특성상 저온영역을 측정할 수 없었으므로, 겨울철 현장조사를 통하여 한국인의 겨울철 온열감 특성에 관한 연구를 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

1. Fanger, P.O., 1970, Thermal Comfort−Analysis and Application in Environmental Engineering−, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.
2. ASHRAE, 1993, *ASHRAE Handbook−1993 Fundamentals*−, pp.8.1-8.29.
3. 한국과학기술연구원, 1993, 실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구(Ⅰ)−온열 및 공기질에 대해서−, 과학기술처, KIST UCN998-4939-2.
4. Schiller, G.E., Arens, E.A., Bauman, F.S., Benton, C., Fountain, M., Doherty, T., 1988, "The Field Study of Thermal Environments and Comfort in Office Buildings", ASHRAE Transactions, Vol.94, Part 2, pp.280-308.
5. Shiller, G.E., 1990, "A Comparison of Measured and Predicted Comfort in Office Buildings", ASHRAE Transactions, Vol.96, Part 1, pp.609-622.

6. Tanabe, S., Kimura, K., Hara, T., 1987, "Thermal Comfort Requirements During the Summer Season in Japan", ASHRAE Transactions, Vol.93, Part 1, pp.564-577.
7. 송장복, 전경배, 손장열, 1988, "주거건축의 온열환경평가와 쾌적범위에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제4권, 제6호, pp.177-184.
8. 손장열, 백용규, 공성훈, 박상동, 1991, "종합적 환경평가지표에 의한 온열중성점 온도도출방법에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제7권, 제3호, pp.253-260.
9. 대한주택공사, 1990, 실내온열환경조사연구, 연구 90-30.
10. 성시풍, 심민섭, 고범석, 금종수, 1992, "여름철 한국인의 온열 쾌적조건에 관한 실험적 연구(제1편 : 온도, 습도 조합에 의한 영향)", 공기조화·냉동공학회 하계학술발표논문집, pp.102-106.
11. 최진영, 박종한, 금종수, 고범석, 성시풍, 심민섭, 1993, "동계 체감 실험에 의한 온냉감 평가와 PMV, SET*의 적용성 검토", 공기조화·냉동공학회 하계학술발표회 강연 및 논문집, pp.170-174.
12. 금종수, 최진영, 박종한, 변일수, 성시풍, 심민섭, 1993, "하계 체감 실험에 의한 온냉감 평가와 PMV, SET*의 적용성 검토", 공기조화·냉동공학회 동계학술발표회 강연 및 논문집, pp.193-197.
13. 윤정숙, 최윤정, 이성하, 1992, "여름철 실내온열환경의 중성온도 설정에 관한 실험 연구", 대한건축학회논문집, 제8권 제4호, pp.73-80.
14. 김성완, 장해진, 박상동, 1983, "실내 열환경에 관한 실측조사 연구－냉방기 사무소 건물을 중심으로－", 공기조화·냉동공학, 제12권, 제3호, pp.189-197.
15. 공성훈, 박상동, 손장열, 1989, "종합적 지표에 의한 실내온열환경의 특성과 온열쾌적범위에 관한 연구－겨울철 사무소 건물을 중심으로－", 대한건축학회논문집, 제5권, 제3호, pp.159-167.
16. 손장열, 백용규, 서기석, 1990, "PMV 지표에 의한 건물에서의 온열환경 특성에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제6권, 제6호, pp.213-219.
17. ASHRAE, 1981, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-1981.
18. ASHRAE, 1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-1992.
19. ISO, 1984, Moderate Thermal Environments－Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort－, ISO Standard 7730.
20. Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J. and Nishi, Y., 1971, "An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response", ASHRAE Transactions, Vol.77, Part 1, pp.247-257.
21. 建設省 建築研究所, 1990, 室内環境の最適化システムの開發, 官民連帶共同研究報告書, 日本.
22. Lee, C.S., Myong, H.K. and Shin, H.T., 1992, "KIST Cleanroom Laboratory", In Proceedings of the 11th Meeting, International Confederation of Contamination Control Societies, September 21～25, London, U.K., pp.549-550.