

여름철 사무실내 한국인의 온열감 평가

Evaluation of Korean Thermal Sensation in Office Buildings During the Summer Season

배 귀 남*, 이 철 회**, 이 춘 식*
G. N. Bae, C. H. Lee, C. S. Lee

Key words : Predicted Mean Vote(예상온열감), Standard New Effective Temperature(표준신유효온도), Thermal Sensation Vote(응답온열감), Comfort Sensation Vote(쾌적감)

Abstract

In this study, thermal parameters were measured and 213 occupants were also questioned in three office buildings located in Seoul during the summer season. Predicted mean vote-predicted percentage of dissatisfied(PMV-PPD) and standard new effective temperature(SET*) were used for evaluating Korean thermal sensation. The distribution of thermal sensation vote(TSV) and percentage of dissatisfied(PD) is very similar to that of PMV and PPD. By regression analysis, the following regression equation was obtained; $TSV = 0.339SET^* - 8.583$. In this case, neutral temperature and comfort range are 25.3°C, 23.8~26.8°C respectively. Present experimental results obtained from the field study is less sensitive to the temperature change than those obtained from the climate chamber study in Korea. But, thermal sensations are similar to each other near the neutral point. The neutral temperature and comfort range obtained by this experiment are higher than those of ANSI/ASHRAE Standard 55-1974 about 1.4~1.8°C.

1. 서 론

인간은 주위 열환경으로부터 상당히 복잡한 열교환 과정을 거쳐 쾌적한 상태를 느끼므로, 물리적 환경과 인간의 온열감 사이의 상관성을 밝혀내려는 연구가 활발히 수행되고 있다. 덴마크의 Fanger는 환경 실험실에서 남녀 대학생과 노인 등 256명의 덴마크인을 대상으로 물리적 온열환경 변화에 대한 인간의 온열감을 조사하였다.¹⁾ 그는 미국인에 대한

Nevins 및 Rhoads 등의 실험결과를 자신의 실험 데이터와 종합하여 6가지 온열환경 요소(기온, 습도, 기류속도, 평균복사온도, 착의량, 대사량)로부터 인간이 느끼는 평균적인 온열감을 열전달 이론과 생리학적 경험식들을 이용하여 모델링하였으며, 주어진 온열감에서 재실자들이 느끼는 불만족률을 예측할 수 있는 식을 개발하였다.

Fanger의 실험방법과 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV) 및 예상불만족률(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) 지표를 토대로 여러 연구자들은 자기나라 사람들을 대상으로 환경 실험실에서 위 지표의 적용 가능성을 연구하였으

*정회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

**한국과학기술연구원 기전연구부

며, 이러한 환경 실험실에서의 연구는 온열환경 기준 설정의 기초가 되었다.²⁾ 일본의 Tanabe는 Fanger의 실험과 동일한 절차와 방법에 의해 수정 온도(Modified Temperature, MT)를 사용하여 일본인에 대해 여름철과 겨울철의 온열환경에 대한 인간의 반응을 연구하였다.³⁾ 일본의 Fukai 등은 비슷한 절차와 평가방법에 입각해서 표준신유효온도(Standard New Effective Temperature, SET*)를 사용하여 일본인에 대한 실험을 수행하였다.^{4,5)} 국내에서도 금중수 등이 환경 실험실에서 남녀 대학생을 대상으로 하여 한국인의 온열감각에 관한 연구를 수행하였다.^{6,7)}

환경 실험실에서 온열감을 조사하는 방법은 일관되고 정확한 온열환경 조건을 다양하게 변화시키면서 쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 환경 실험실의 피험자들은 실험기간 동안 자신들이 평소에 익숙한 혹은 일상적인 업무를 수행하는 환경에 있지 않기 때문에 데이터가 측정되는 조건이 인위적이라는 단점이 있다.

재실자들이 거주하는 실제 건물에서 수행되는 현장 실험은 평소의 업무공간에서 재실자들의 온열감 반응을 직접 조사함으로써 이러한 내재적인 문제점을 해결할 수 있다. 또한, 환경 실험실에서의 실험 결과와 현장 조사에 의한 결과를 비교함으로써 올바른 온열환경 평가법을 도출하는 데 기여할 수 있으며, 환경 실험실에서 개발된 온열감 예측 모델이 현실적으로 얼마나 적합한지를, 그리고 지금 제시되어 있는 온열환경 기준들이 유효한지를 검토할 수 있다. 미국의 Schiller 등은 샌프란시스코 연해에 있는 10개의 사무실 빌딩에서 2,342회의 측정을 한 후 여러가지 예측 모델들과 비교하여 미국인의 온열감을 평가하였다.^{8,9)} 국내의 경우 주택의 온열환경에 대한 연구는 많이 수행되었으나, 사무실 내 온열환경에 대한 연구는 매우 드물게 수행되었다.^{10,11,12,13,14)}

따라서, 본 연구에서는 서울 시내에 위치한 3개의 사무용 건물을 대상으로 여름철에 온열환경 요소들에 대한 측정과 213명(남자 131명, 여자 82명)의 재실자를 대상으로 한 설문조사를 병행하는 현장 실험을 수행하였다. 종합적 온열환경 평가지표인 PMV-PPD와 SET*를 이용하여 실험결과를 해석하였으며, 이를 통해서 사무실내 한국인의 온

열감을 평가하였다. 온열환경 해석 모델을 이용하여 주위 열환경에 대한 인체의 열조절 반응의 변화도 살펴보았다.¹⁵⁾ 또한, 실험결과를 바탕으로 온열감 예측 모델 및 온열환경 기준을 검토하였고, 환경 실험실에서 수행된 국내외 연구결과와도 비교하였다.

2. 온열환경 평가지표

2.1 인체와 주위 환경간의 열교환 모델

인간은 주위 환경과 끊임없는 열교환을 하면서 살아가는데, 인체의 대사량과 체표면이나 호흡을 통한 방열량이 같게 되면 열평형 상태를 유지하게 되어 인간은 춥거나 덥게 느끼지 않는 열적인 중립 상태가 된다. 그러나, 인체의 대사량과 방열량이 같지 않는 열환경에 존재하게 되면 인간은 더위나 추위를 느끼면서 인체의 열조절 기구를 통하여 열평형 상태에 도달하려고 한다. 이와 같은 인체와 주위 환경간의 열교환 관계를 열전달 이론과 생리학 적 모델을 이용하여 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S = [M - W] - [(C + R + E_{diff} + E_{rsw}) + (C_{res} + E_{res})] \\ = [M - W] - [H_{sk} + H_{res}] \quad (1)$$

여기서, S는 인체내 축열량, M은 대사량, W는 작업에 의한 방열량, C와 R은 각각 체표면에서의 대류 및 복사 방열량, E_{diff} 와 E_{res} 는 각각 체표면에서 수분의 확산 및 땀 조절에 의한 증발 방열량, C_{res} 와 E_{res} 는 각각 호흡을 통한 대류 및 증발 방열량, H_{sk} 와 H_{res} 는 각각 체표면에서의 방열량 및 호흡에 의한 방열량이다.

이러한 열교환 모델을 기초로 하여 온열환경에 대한 인간의 반응을 올바르게 평가하기 위해서 다음과 같은 점들을 고려하여 온열환경 평가지표가 개발되고 있다.¹⁶⁾

① 인체의 체표면과 주위 환경 사이의 열교환에 대한 합리적인 모델인가.

여기서, 주위 환경은 작용온도(t_0), 노점온도(t_{op}) 및 이와 관련된 열 및 물질 전달 계수로 표현된다.

② 인간이 땀, 혈관 운동 및 몸의 떨림에 의해 인체의 내부 온도를 어떻게 일정한 수준으로 조절하는가.

③ 인체 표면에 관련된 두가지 중요한 물리적 요소인 평균 체표면 온도(t_{sk})와 발한작용에 의한 피부 젖음률(w)이 어떻게 '더위와 추위' 및 '쾌적과 불쾌적'감각에 영향을 미치는가.

본 연구에서는 온열환경의 평가에 널리 쓰이고 있는 지표 중에서 열평형 지표인 표준신유효온도(SET^*)와 주관적 지표로서 쾌적감을 나타내는 예상온열감-예상불만족률(PMV-PPD)을 사용하였다. PMV-PPD에 대해서는 이전 논문에서 소개하였으므로, 본 고에서는 SET^* 에 대해서만 간략히 소개하고자 한다.¹³⁾

2.2 표준신유효온도(SET^*)

식(1)과 같은 인체와 주위 환경 사이의 열교환 모델을 이용하여 온열환경을 합리적으로 평가하면서도 여러가지 요소들의 종합적인 영향을 간단하고 쉽게 표현하기 위하여 열환경을 인간에게 익숙한 온도로 환산하여 나타내는 평가지표들이 많이 있다.

SET^* 는 주어진 대사량에서 표준적인 착의량을 한 재실자가 체표면에서 실제 열환경에서와 동일한 열스트레스(피부 방열량, H_{sk})와 열스트레인(피부 젖음률, w)을 경험하게 되는 상대습도 50%에서의 가상적인 등온 열환경의 기온으로 정의되며, 수학적으로는 식(2)와 같이 표현된다.¹⁶⁾

$$SET^* = t_{so} + (w h'_{es} / h'_s) (p_{so} - 0.5 p_{SET^*,s}) \quad (2)$$

여기서, t_{so} 는 표준작용온도, h'_{es} 는 유효 증발 열전달 계수, h'_s 는 유효 현열전달 계수, p_{so} 는 표준작용 수증기압, $p_{SET^*,s}$ 는 SET^* 에서의 포화 수증기압이다.

SET^* 를 구하기 위해서는 다음과 같은 값이 표준화되어야 한다.

- ① 대사량에 따른 착의량(I_{cls})
 - ② 표준 환경에서 착의량과 유효 기류속도에 따른 현열 및 증발열의 유효 열전달 계수(h'_s , h'_{es})
- 대사량과 표준 착의량의 관계는 다음과 같다.

$$I_{cls} = 1.33 / (M - W + 0.74) - 0.095 \quad (3)$$

여기서, I_{cls} 의 단위는 clo이고, M과 W의 단위는 met이다.

식(2)에서 ($w h'_{es} / h'_s$)는 더운 환경에서 땀에 의해 체온을 조절하는 동안 착의 상태인 재실자의 체표면에서 증발열과 현열이 열교환되는 유효 비율이다. 종축이 온도(기온 또는 작용온도)이고, 횡축이 수증기압인 습공기 선도상에서 SET^* 등온선은 상대습도 50%인 곡선과의 교점의 종축 온도와 같고, 피부 젖음률이 동일한 점들의 궤적이다. 땀에 의한 피부 젖음률이 고온부로부터 갈수록 증가함에 따라 SET^* 등온선에서 (-)기류속도의 유효 열교환율($w h'_{es} / h'_s$)도 증가한다. 반대로 저온부로부터 갈수록 SET^* 등온선은 횡축과 평행하게 되어 습도의 영향을 받지 않게 된다.

3. 측정 및 설문조사

3.1 측 정

본 연구에서는 서울 시내에 위치한 3개의 사무용 건물을 온열환경 측정대상으로 하여, 1994년 8월 2일부터 8월 17일까지의 기간중 5일 동안 실험을 수행하였다. 측정대상인 세 건물은 각각 저, 중, 고층이며, 측정기간중 세 건물 모두 냉방가동 중이었고, 창은 모두 닫혀져 있어 직접적인 외기의 유입은 없는 상태였다. 각 건물의 개요와 측정현황을 Table 1에 나타내었다.

사무실내 온열환경을 평가하기 위해 가장 중요한 4가지 물리적 온열환경 요소인 기온(t_a), 흑구온도(t_g), 상대습도(R.H.), 기류속도(v_a)를 측정하였으며, 사용된 측정기기의 특성을 Table 2에 나타내었다. 각 건물을 영역별로 나누어 각 영역의 대표 층에서 4방위의 일반 사무실에 대해 가능한 모두 측정하였다. 각 방에서는 방의 크기에 따라 1~3곳의 대표점을 선정하여 온열환경 요소를 측정하였다. 측정위치를 선정할 때는 측정작업이 재실자의 평소 업무활동에 영향을 주지 않고, 측정기기가 인체나 주위 장애물에 의해 측정에 방해를 받지 않도록 하기 위해 충분한 거리를 유지하도록 고려하였다. 측정높이는 앉아있을 때 인체의 중심에 해당하는 0.6m이었다.¹⁷⁾

Table 1 Description of buildings

Building	K Building	L Building	M Building
# floors	4F	B4, 17F	B2, 54F
Air-conditioning type	A.H.U.	A.H.U.	A.H.U.
Constitution date	1969. 9.	1987. 11.	1988. 6.
Measuring date	1994. 8. 2~3	1994. 8. 17	1994. 8. 9~10
Measured floors	2, 3F	4, 8, 15F	7, 15, 26, 43, 48F
# participants	56	62	95

Table 2 Instrumentation description

Quantity	Model	Measuring range	Resolution
Air temperature	Mercury Thermometer	-10~50°C	0.1°C
Relative humidity	Asman Thermometer	1~100%	1%
Globe temperature	Globe Thermometer	0~100°C	0.5°C
Air velocity	Kanomax Anemomaster 24-6111	0~5m/s	0.1m/s

실험기간중 측정된 실내 온열환경 요소를 각 방별로 분류하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 TSV와 CSV는 각각 재실자의 반응을 통해 얻은 응답온열감과 쾌적감이다. 본 연구에서는 종합적인 온열환경을 표준온도로 환산해 주는 SET*를 기준으로 모든 값을 재분류하여 각 방별 재실자 수에 따라 가중평균하여 구한 값을 그 영역에서 각 항목의 대표값으로 하였다. PMV-PPD 모델의 계산에는 ISO 7730의 프로그램을 이용하였고, SET*는 Tanabe의 프로그램을 이용하여 구하였다.^{2,3)}

본 실험에서 측정된 흑구온도(t_g), 평균복사온도(Mean Radiant Temperature, MRT) 및 표준신유효온도(SET*)와 기온(t_a)간의 상관관계를 Fig. 1에 나타내었다. Fig.1을 보면, 실내의 모든 내표면으로부터의 평균적인 복사온도만을 나타내는 MRT는 기온에 비해 0.5~2.2°C 가량 높고, 기온과 평균복사온도의 종합적인 영향을 나타내는 t_g 는 기온보다 약 0.3~1.0°C 높다. SET*는 기온에 비해 0.5~1.6°C 정도 높게 나타나며, 기온의 변화와 기울기가 거의 같다.

3.2 설문조사

실내 온열환경에 대한 재실자의 온열감을 조사하여 그 결과를 예측 모델에 의한 온열감과 비교, 평

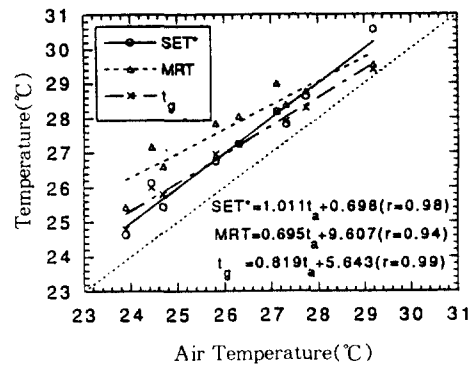


Fig.1 Correlation between t_a and SET*, MRT, and t_g

가하기 위하여 측정과 병행하여 설문조사를 실시하였다. 설문조사에 사용된 설문지에는 질문에 응하는 응답자가 설문내용을 충분히 이해한 후 응답할 수 있게 하기 위해 온열환경 연구의 개념, 목적, 필요성 및 설문지 작성시의 주의사항을 간략히 정리하여 앞면에 제시하였다. 그리고, 온열환경중 인체측 요소에 해당하는 착의량과 대사량을 ANSI/ASHRAE Standard 55-1992에 근거하여 조사하였으며,¹⁷⁾ 응답자의 인적사항을 기입하게 하였다. 주위 온열환경에 대해서는 현재의 온열감, 습도감,

Table 3 Distribution of the measured data

Room	#	Activities [met]	Clothing [clo]	v_a [m/s]	R.H. [%]	t_a [°C]	t_g [°C]	MRT [°C]	SET* [°C]	PMV	PPD [%]	TSV	CSV
1	8	1.08	0.46	0.16	70	27.6	28.2	28.7	28.5	0.85	20.3	1.00	-1.00
2	7	1.11	0.46	0.13	70	27.0	27.4	27.7	27.6	0.68	14.6	1.00	-0.17
3	4	1.13	0.41	0.15	68	27.9	28.3	28.7	28.4	0.90	22.3	1.25	-0.25
4	7	1.10	0.47	0.12	67	27.9	28.4	28.8	28.7	1.04	27.8	1.14	-0.71
5	4	1.00	0.45	0.14	65	27.3	28.3	29.1	27.7	0.72	15.9	1.00	-0.25
6	4	1.03	0.44	0.12	65	27.4	27.4	27.4	27.2	0.53	10.8	1.00	0.25
7	8	1.09	0.46	0.12	64	27.2	28.0	28.6	27.9	0.81	18.8	1.43	-0.86
8	5	1.08	0.46	0.12	65	27.1	28.0	28.7	28.0	0.80	18.5	0.60	0.00
9	9	1.07	0.49	0.12	71	29.2	29.4	29.6	30.6	1.46	49.0	1.44	-1.89
10	10	1.08	0.48	0.10	68	27.2	27.9	28.4	28.2	0.89	21.8	1.11	-0.44
11	6	1.08	0.43	0.14	70	26.2	27.1	27.9	27.0	0.40	8.3	0.17	0.33
12	11	1.09	0.42	0.15	73	26.3	27.3	28.2	27.4	0.46	9.5	0.50	-0.30
13	17	1.15	0.41	0.12	74	27.0	27.9	28.6	28.1	0.86	20.7	1.63	-1.06
14	7	1.07	0.50	0.16	68	26.9	27.9	28.8	28.1	0.75	16.9	1.00	-0.71
15	9	1.04	0.58	0.19	64	27.8	28.1	28.4	27.8	0.88	21.3	1.11	-0.44
16	12	1.07	0.51	0.09	68	23.9	24.8	25.4	24.6	-0.17	5.6	-0.17	0.83
17	8	1.04	0.50	0.10	61	24.7	25.8	26.6	25.4	0.01	5.0	0.00	0.63
18	7	1.06	0.45	0.12	77	24.7	26.0	27.0	26.0	0.06	5.1	0.29	-0.57
19	8	1.30	0.53	0.10	67	26.0	26.6	27.0	27.0	0.84	19.7	0.88	-0.25
20	16	1.10	0.56	0.11	50	26.0	26.9	27.6	26.6	0.51	10.4	0.13	0.60
21	6	1.10	0.66	0.12	47	27.3	27.7	28.0	27.8	0.89	21.8	0.67	-0.60
22	15	1.05	0.57	0.11	51	27.1	28.5	29.5	28.3	0.97	24.9	0.33	-0.40
23	5	1.25	0.54	0.12	49	27.1	29.0	30.5	28.2	1.23	36.6	1.00	-0.60
24	5	1.10	0.51	0.12	54	25.1	27.5	29.4	27.0	0.55	11.4	0.40	-0.80
25	6	1.02	0.68	0.10	51	25.7	27.3	28.5	27.3	0.69	15.0	0.83	-1.17
26	4	1.30	0.61	0.12	50	25.6	27.3	28.6	27.0	0.90	22.0	0.00	-0.75
27	5	1.02	0.69	0.10	56	24.1	26.0	27.4	26.3	0.30	6.8	-0.25	0.50

복사감 및 쾌적감을 조사하였다. 온열감 척도는 ASHRAE Handbook에서 추천한 생리-심리학적 반응척도인 7단계 척도를 사용하였다.¹⁸⁾ 또한, 습도감, 복사감 및 쾌적감 척도도 유럽의 온열환경 연구방법에서 제시된 기본 척도인 7단계 척도를 사용하였다.¹⁹⁾ 재실자가 응답한 설문 데이터 분석에는 통계 분석용 소프트웨어인 SPSS(Statistical Package for the Social Science) for Windows를 사용하였다. 설문조사시 재실자가 응답해야 하는 온열감 및 쾌적감 척도를 Table 4에 나타내었다.

설문응답 인원은 남자가 131명, 여자가 82명으로 총 213명이었으며, 평균 연령은 31세였다. 재실자들의 평균 착의량은 0.51clo, 평균 대사량은 1.1met였다. 전체 설문응답자의 특성을 Table 5에 정리하여 나타냈다.

Table 4 Thermal sensation and comfort sensation scales

Thermal sensation scale	Comfort sensation scale
-3 Cold	-3 Very uncomfortable
-2 Cool	-2 Uncomfortable
-1 Slightly cool	-1 Slightly uncomfortable
0 Neutral	0 Neutral
+1 Slightly warm	+1 Slightly comfortable
+2 Warm	+2 Comfortable
+3 Hot	+3 Very comfortable

4. 결과 및 고찰

4.1 온열환경에 대한 인간의 열조절 반응

인체와 주위 환경 사이의 열교환 과정과 이에 따른 인체의 열조절 반응은 식(1)에 나타난 열평형 방정식으로 모사할 수 있다. 본 연구에서는 여름철 사무실내 재실자의 열환경에 대한 열조절 반응 메카니즘을 살펴보기 위하여 대표적인 현장 실험조건에서 열평형 방정식을 구성하는 각 항의 크기 및 시간 경과에 따른 변화를 구하였다.

열평형 방정식의 해석에는 인체를 중심과 체표면으로 이원화하여 발한작용에 의한 증발 열교환을 비정상 상태로 고려한 Gagge의 2 node 모델을 적용하였다.¹⁶⁾ 초기 조건은 열적으로 중립 상태에 있는 표준 체형의 인체이며, $t=0$ 일때 측정공간에 들어가는 것으로 가정하여 1분 간격으로 각 항의 변화를 구하였다. 식(1)의 모든 항들은 1시간이 경과하면 거의 평형 상태에 도달하므로, 1시간 동안의 변화만을 살펴보았다. 따라서, 본 연구의 사무실내 온열환경 평가에서는 1시간일 때 구한 SET* 값을 정상 상태의 값으로 가정하여 설문조사와 결부시켜 고찰하였다.

본 연구에 의한 중성점 온도인 25.3°C에 가장 근접한 SET*=25.4°C인 현장 실험에서의 측정조건을 그대로 이용하여 쾌적한 온열환경에서 인체가 열적으로 어떻게 반응하는지 살펴보기 위하여 인체에 대한 열평형 방정식에서 가장 기초적인 항들을 Fig.2에 나타내었다. 주위 열환경이 매우 쾌적한 온도이므로 인체는 10분 이내에 거의 평형 상태에 도달한다. 쾌적 온도라고 할지라도 주위 기온은

Table 5 Anthropometric data for the subjects

		Total(213 persons)		Male(131 persons)		Female(82 persons)	
		Mean ± S.D.	Min. ~ Max.	Mean ± S.D.	Min. ~ Max.	Mean ± S.D.	Min. ~ Max.
Age	[year]	31.2 ± 8.1	17 ~ 56	34.6 ± 7.7	18 ~ 56	25.7 ± 5.2	17 ~ 41
Height	[cm]	167.4 ± 6.5	155 ~ 183	171.5 ± 4.4	160 ~ 183	161.0 ± 3.4	155 ~ 172
Weight	[kg]	60.1 ± 10.4	38 ~ 90	66.4 ± 7.6	49 ~ 90	50.2 ± 5.2	38 ~ 73
Body surface area	[m ²]	1.67 ± 0.16	1.30 ~ 2.09	1.77 ± 0.10	1.53 ~ 2.09	1.50 ± 0.08	1.30 ~ 1.79
Clothing	[clo]	0.51 ± 0.15	0.29 ~ 1.35	0.52 ± 0.13	0.32 ~ 0.99	0.48 ± 0.18	0.29 ~ 1.35
Activities	[met]	1.09 ± 0.16	1.0 ~ 2.1	1.08 ± 0.18	1.0 ~ 2.1	1.11 ± 0.13	1.0 ~ 2.1

24.7°C이므로 인체와의 온도차가 10°C 이상 되므로, 복사 방열량(R)이 약 30W/m²으로 가장 크고, 대류 방열량(C)이 약 12W/m²으로 두번째로 크다. 중립 온도 범위에서는 땀이 거의 나지 않으므로 체표면에서 수분의 확산 및 땀 조절에 의한 증발 방열량(E_{diff}, E_{rew})이 약 8W/m²으로 중간 정도에 해당된다. 또한, 1.0~1.2met 정도의 표준적인 사무 대사량에서는 많은 호흡량이 필요하지 않으므로, 호흡을 통한 증발 및 대류 방열량(E_{res}, C_{res})은 각각 4.1, 0.8W/m²으로 가장 낮다.

측정조건 중에서 고온, 중립온, 저온에 해당하는 SET*=30.6, 25.4, 24.6°C일 때의 온열환경 요소를 이용하여 온도 변화에 따른 대류 및 복사 방열량과 증발 방열량을 Fig.3에 나타내었다. 여기서, 대류 및 복사 방열량은 (C+R+C_{res})이고, 증발 방열량은 (E_{diff}+E_{rsw}+E_{res})이다. SET*=24.6°C인 저온에서는 대류 및 복사 방열량이 약 45W/m²이나 되지만, SET*=30.6°C인 고온에서는 약 25W/m²으로 절반으로 줄어든다. 그러나, 증발 방열량은 저온에서 약 18W/m², 고온에서는 약 36W/m²으로 2배로 증가한다. 따라서, 온도가 높아질수록 체온과 주위 온도의 차이가 작아져 대류 및 복사 방열량은 적어지고, 반면에 땀이 많이 남에 따라 증발 방열량은 많아짐을 알 수 있다. 또한, 온도가 높아지더라도 대류 및 복사 방열량이 평형에 도달하는데 걸리는 시간은 약 10~15분으로 비슷하다. 그러나, 증발 방열량의 경우 저온에서는 약 10분

이 걸리고, 고온에서는 땀을 흘리면서 증발 방열량이 급격히 커져 평형에 도달하는데 30~40분 정도 걸린다.

Fig.3과 동일한 측정조건인 고온, 중립온 및 저온에서 주위 열환경에 대한 인체의 열조절 반응의 변화를 열평형 방정식의 각 항의 분포를 통해 Fig.4에

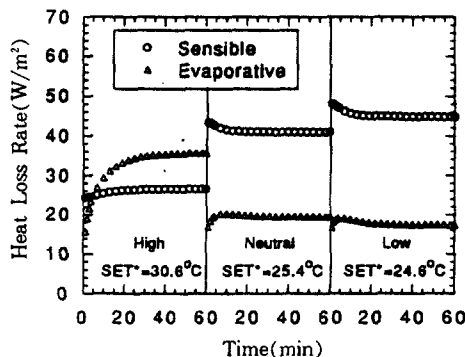


Fig.3 Sensible and evaporative heat loss rate with thermal condition (High:M=1.07met, I_{cl}=0.49clo, v_a=0.12m/s, R.H.=71%, t_a=29.2°C, t_g=29.4°C, Neutral:M=1.04met, I_{cl}=0.50clo, v_a=0.10m/s, R.H.=61%, t_a=24.7°C, t_g=25.8°C, Low:M=1.07met, I_{cl}=0.51clo, v_a=0.09m/s, R.H.=68%, t_a=23.9°C, t_g=24.8°C)

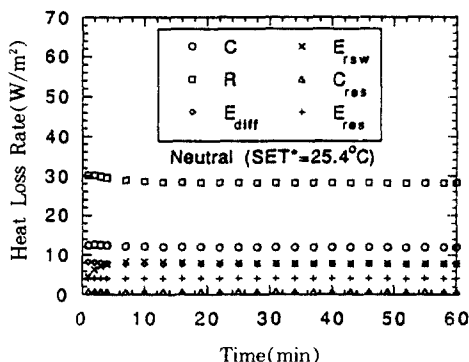


Fig.2 Thermoregulatory response of human body at neutral temperature (M=1.04met, I_{cl}=0.50clo, v_a=0.10m/s, R.H.=61%, t_a=24.7°C, t_g=25.8°C)

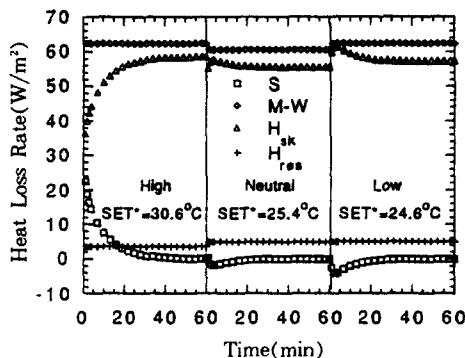


Fig.4 Thermoregulatory response of human body with thermal condition (High:M=1.07met, I_{cl}=0.49clo, v_a=0.12m/s, R.H.=71%, t_a=29.2°C, t_g=29.4°C, Neutral:M=1.04met, I_{cl}=0.50clo, v_a=0.10m/s, R.H.=61%, t_a=24.7°C, t_g=25.8°C, Low:M=1.07met, I_{cl}=0.51clo, v_a=0.09m/s, R.H.=68%, t_a=23.9°C, t_g=24.8°C)

나타내었다. 세 조건 모두 대사량은 약 1.0met로 비슷하므로 (M-W)는 온도에 무관하게 거의 비슷하고, 호흡에 의한 방열량(H_{res})도 온도에 무관하게 거의 비슷하다. 다만, 습도와 기온이 높아지면 E_{res} 와 C_{res} 가 각각 적어지므로 H_{res} 가 고온에서 조금 적어진다. 저온에서는 대류 및 복사 방열량이 많으므로 체표면에서의 방열량(H_{sk})은 약 55~60W/m²에서 시작해 빨리 평형에 도달한다. 그러나, 고온에서는 대류 및 복사 방열량이 적으므로 약 35W/m²에서 시작해 땀을 흘리면서 증발 방열량이 많아져 천천히 평형 상태인 60W/m² 정도에 도달한다. 그러나, 일정한 대사량에서 H_{sk} 는 평형 상태에 이르면 온도에 별 상관없이 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다. 인체의 대사량과 방열량의 차이인 축열량(S)은 저온의 경우 처음에는 대사량보다 방열량이 많아 인체가 외부로 열을 방출하지만, 대류 및 복사 방열량이 대부분이므로 10~20분만에 평형 상태(S=0)에 도달한다. 그러나, 고온에서는 오히려 방열량이 대사량보다 매우 적어 초기에는 인체가 열을 계속 축적하게 되나, 땀을 흘리면서 증발 방열량이 서서히 많아지면서 30~40분이 경과하여 평형 상태에 도달한다.

4.2 PMV-PDD 모델과의 비교

현장 실험을 통해 측정한 온열환경 요소로부터 예측한 평균 온열감인 PMV와 재실자의 반응을 통해 얻은 응답온열감(Thermal Sensation Vote, TSV)을 비교하여 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 TSV와 PMV는 거의 비슷한 분포를 보이고 있다. PMV 모델은 매우 춥거나 매우 더운 극한적인 온열환경보다는 대부분의 사람들이 실제로 거주하는 일상적인 온열환경을 대상으로 하여 재실자들이 평균적으로 느끼는 쾌적 범위를 찾는 데 주로 사용된다. 따라서, 실제 환경에 PMV 모델을 적용하기 위해서는 중성점 근처에서 실제

거주하는 사람들의 온열감과 얼마나 잘 일치하느냐가 중요하다. Fig.5는 본 연구결과가 특히 쾌적 영역인 $-0.5 < TSV < 0.5$ 에서 잘 일치하고 있음을 보여준다. 금종수 등은 여름철에 환경 실험실에서 온열환경 요소를 여러가지로 변화시키면서 남녀 각각 6명에 대하여 온열감 반응을 조사하였다.⁷⁾ Fig.5에서 보듯이 환경 실험실 연구로부터 구한 금종수 등의 TSV 회귀식이 본 연구결과에 비해 PMV에 약간 더 민감하지만, 중성점 부근에서는 역시 예측값과 잘 일치하고 있다.

국제 온열환경 기준인 ISO 7730이 한국의 사무실내 온열감 반응의 예측에 얼마나 적합한 지를 검토하기 위하여 Fig.5의 결과와 비교하여 Table 6에 나타내었다. 회귀식에서 보듯이 TSV가 PMV에 비해 약간 더 민감하지만, TSV=0인 온열 중성점에서 PMV=0.06으로 기준치인 PMV=0과 거의 일치하고 있다. 또한, 본 연구의 쾌적 영역은 $-0.38 < PMV < 0.50$ 으로 기준치인 $-0.5 < PMV < 0.5$ 와 유사하다. 한편, PMV 모델이 계절의 영향을 종합한 지표이므로 쾌적 영역이 좌우대칭인 것에 비해, 여름철 온열감 반응을 조사한 본 연구결과는 쾌적 영역의 하한값이 기준보다 약간 높아 쾌적 영역의 아래쪽 부분이 약간 좁게 나타나고 있다.

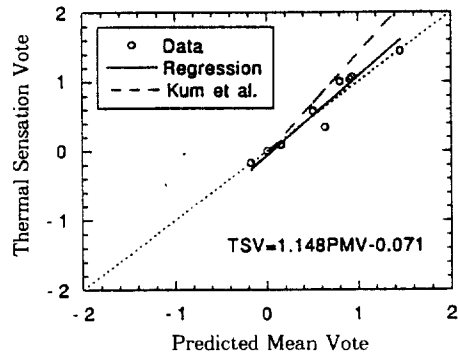


Fig.5 Comparison of TSV with PMV

Table 6 Comparison of present experimental results with ISO Standard 7730

	ISO 7730	Present
Regression equation		$TSV = 1.148PMV - 0.071$
Neutral point(TSV=0)	PMV=0	PMV=0.06
Comfort range($-0.5 < TSV < 0.5$)	$-0.5 < PMV < 0.5$	$-0.38 < PMV < 0.50$

Fig.6은 응답온열감(TSV)과 응답불만족률(Percentage of Dissatisfied, PD) 사이의 관계를 PMV-PPD 분포와 비교하여 나타낸 것이다. 응답 데이터를 2차식의 회귀곡선으로 나타내었고, 이때 2차 회귀식에 의해 PD가 1% 이하인 데이터(매우 만족)는 1%로 나타냈다. 그림을 보면, PD가 PPD에 비해 대체로 약간 낮은 값이고 전체적인 경향은 비슷하지만, 종축이 로그(log) 척도이므로 불만족률이 낮은 쾌적 영역에서 PD와 PPD간의 차이가 확대되어 보인다. 또한, 본 연구의 실험 범위가 여름철 현장 조사의 한계로 쾌적 영역보다 상당히 낮은 저온 영역에서는 실험을 하지 못하였으므로, 중성점 이하의 온도에서 높은 불만족률을 나타내는 경향을 포함할 수 없었다. 금중수 등의 결과도 위와 같은 방법으로 데이터를 처리하였으며, 역시 PD가 PPD에 비해 약간 낮으나 전체 분포는 비슷하다.

4.3 SET*와 응답온열감(TSV)

Fanger의 쾌적 방정식에 의한 PMV와 재실자의 응답에 의한 TSV를 동일한 SET*에 대해 비교한 결과를 환경 실험실에서 조사한 금중수 등의 결

과와 함께 Fig.7에 나타내었다.⁷⁾ 또한, 9단계 온열감 척도를 사용한 일본의 Fukai 등의 환경 실험실 결과도 비교하여 함께 나타내었다.⁵⁾ 본 연구결과와 가중 선형 회귀식은 측정값들과 상관관계가 매우 높고, SET*에 대한 TSV의 회귀식은 다음과 같다.

$$TSV = 0.339SET^* - 8.583 \quad (4)$$

측정값은 대체로 PMV와 비슷하지만 회귀직선은 약간 더 SET*에 민감하게 나타난다. 그러나, 중성점보다 약간 높은 온도에서 예측값과 측정값이 일치하므로, 중성점 근처의 온도 범위에서는 TSV와 PMV가 비슷하다. 금중수 등의 회귀식은 SET*의 변화에 대해 본 연구보다 전체적으로 더 민감하게 나타난다. 그러나, 온열 중성점 부근의 쾌적 영역에서는 본 실험 및 PMV와도 일치하는 분포를 보여주고 있다. 비록 온열감 척도가 달라 직접적인 비교는 어렵지만, Fukai 등이 9단계 온열감 척도를 사용하여 구한 회귀직선의 기울기는 한국인에 대한 연구결과와 비슷함을 알 수 있다.

Fig.7의 결과를 미국의 온열환경 기준인 ANSI/

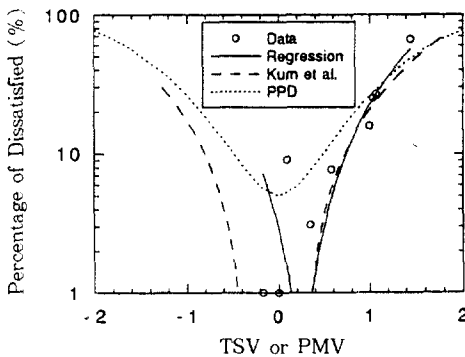


Fig.6 Comparison of TSV-PD and PMV-PPD distributions

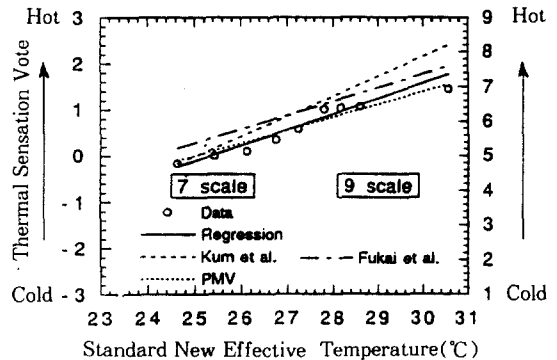


Fig.7 TSV distribution with SET*

Table 7 Comparison of present experimental results with ANSI/ASHRAE Standard 55-1974

	ASHRAE 55-1974	Present
Neutral temperature[°C]	23.7	25.3
Comfort range(-0.5 < TSV < 0.5)	22.0 < SET* < 25.4	23.8 < SET* < 26.8

ASHRAE Standard 55-1974와 비교하여 Table 7에 나타내었다.²⁰⁾ ANSI/ASHRAE Standard 55-1974에서는 쾌적 범위를 $22.2^{\circ}\text{C} < \text{SET}^* < 25.6^{\circ}\text{C}$ 로 규정하였지만, 1986년에 개정된 SET* 계산 프로그램에 의하면 쾌적 범위가 $22.0^{\circ}\text{C} < \text{SET}^* < 25.4^{\circ}\text{C}$ 로 바뀐다. 본 연구에서는 개정된 SET* 계산 프로그램을 사용하여 SET*를 구하였으므로, ANSI/ASHRAE Standard 55-1974의 쾌적 범위로 $22.0^{\circ}\text{C} < \text{SET}^* < 25.4^{\circ}\text{C}$ 를 사용하였다.⁴⁾ 이번 사무실 실험에 의한 한국인의 중성점 온도는 25.3°C 로, 미국인의 중성점 온도인 23.7°C 에 비해 1.6°C 가량 높게 나타났다. 이러한 사실은 금중수 등이 환경 실험실에서 구한 중성점 온도가 25.0°C 로 미국 기준에 비해 1.3°C 정도 높은 것과는 일치한다. $-0.5 < \text{TSV} < 0.5$ 인 쾌적 온도 범위는 $23.8 \sim 26.8^{\circ}\text{C}$ 로, ASHRAE의 쾌적 온도 범위인 $22.0 \sim 25.4^{\circ}\text{C}$ 에 비해 $1.4 \sim 1.8^{\circ}\text{C}$ 정도 역시 높게 나타났다. 그리고, 쾌적 온도의 하한 온도가 상대적으로 더욱 높게 나타남을 알 수 있다.

한편, SET*에 따른 남자와 여자의 TSV 변화를 비교하여 Fig.8에 나타내었다. 일반적으로 알려져

바와 같이 여자가 남자에 비해 온도 변화에 더 민감하게 반응하고 있다. 중성점 온도를 비교해 보면, 남자는 24.3°C , 여자는 26.1°C 로 여자가 남자에 비해 1.8°C 높다. $-0.5 < \text{TSV} < 0.5$ 인 쾌적 온도 범위의 경우 남자는 $22.3 \sim 26.3^{\circ}\text{C}$ 이고 여자는 $25.1 \sim 27.0^{\circ}\text{C}$ 로, 여자가 남자에 비해 쾌적 온도 범위가 $0.7 \sim 2.8^{\circ}\text{C}$ 정도 높으며, 특히 쾌적 온도의 하한이 매우 높게 나타남을 알 수 있다.

본 실험결과 및 금중수 등의 결과를 PMV-PPD 모델 및 온열환경 기준과 비교하여 Table 8에 종합하여 나타내었다.

4.4 쾌적감(CSV)과 온열감(TSV)

온열감은 주위 환경의 쾌적성 여부를 평가하는 간접적인 척도이며, 쾌적감(Comfort Sensation Vote, CSV)은 직접적인 척도라고 말할 수 있다. 따라서, 온열감 척도의 각 단계별로 재실자의 쾌적감을 평균하여 TSV와 CSV의 상관관계를 미국인 304명을 대상으로 1,308회의 측정을 수행한 Schiller등의 실험결과와 비교하여 Fig.9에 나타내었다.⁸⁾

⁹⁾ 쾌적감을 평가하기 위하여 본 연구에서는 대칭

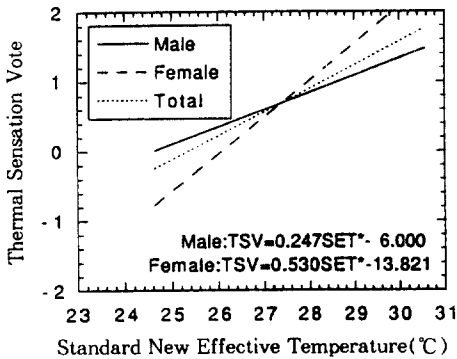


Fig.8 TSV difference with respect to sex

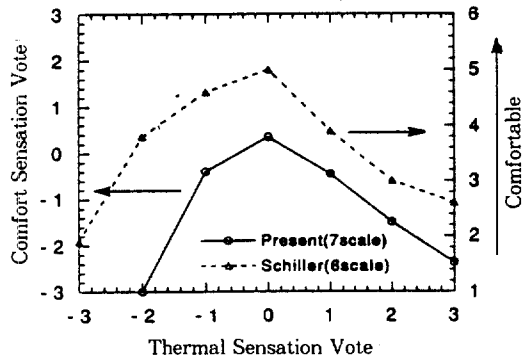


Fig.9 Correlation between TSV and CSV

Table 8 Comparison of present experimental results with other's

Researcher	Kum et al.(1993)	Present	
Method	Climate chamber	Field study	PMV-PPD model
Regression equation	$\text{TSV} = 0.433\text{SET}^* - 10.84$	$\text{TSV} = 0.339\text{SET}^* - 8.583$	$\text{PMV} = 0.279\text{SET}^* - 6.97$
Neutral temperature[$^{\circ}\text{C}$]	25.0	25.3	25.0
Comfort range	$22.0 < \text{SET}^* < 25.4$	$-1.13 < \text{TSV} < 0.03$	$-0.83 < \text{PMV} < 0.12$
	$-0.5 < \text{TSV} < 0.5$	$23.9 < \text{SET}^* < 26.2$	$23.8 < \text{SET}^* < 26.8$

적인 척도로서 평가하기에 용이한 Fanger의 7단계 척도를 사용하였고, Schiller등은 여기서 중립 척도가 하나 없는 6단계 척도를 채택하였다.

중립 척도에서 쾌적감이 최대로 나타나고, 출거나 더운 영역에서는 쾌적감이 떨어지고 있다. Schiller등의 결과와 비교해 보면, 전반적으로 동일한 온열감 척도에서 본 연구결과에 의한 쾌적감이 더 낮게 나타나고 있다. 그리고, 덥게 느끼는 영역보다 차갑게 느끼는 영역에서 미국인을 대상으로 한 Schiller 등의 결과와 쾌적감 차이가 많이 난다. 이러한 결과는 위에서 언급한 미국인에 비해 한국인의 여름철 쾌적 온도 범위가 높다는 사실 및 쾌적 온도의 하한이 더욱 높다는 사실과 일치한다.

5. 결 론

본 연구에서는 서울 시내에 위치한 3개의 사무용 건물을 대상으로 여름철에 온열환경 요소들에 대한 측정과 재실자를 대상으로 한 설문조사를 병행하는 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 표준적인 대사량과 착의량 상태의 여름철 온열환경에서는 호흡에 의한 방열량이 적으므로 인체의 대사량은 대부분 체표면에서의 방열량에 의해 평형을 이루게 된다. 중립 온도 이하에서는 대류 및 복사 방열량이 지배적이므로 체내 축열량이 (-)에서 시작하여 빨리 평형 상태에 도달하고, 땀을 많이 흘리게 되는 고온부에서는 증발 방열량이 지배적이 되어 축열량이 (+)에서 시작하여 평형 상태에 늦게 도달한다.

둘째, PMV-PPD 모델은 온열환경에 대한 한국인의 온열감 반응 분포를 잘 예측하며, 특히 중성점과 쾌적 영역의 예측은 실험결과와 상당히 잘 일치한다. 이러한 점은 실제 사무용 건물 뿐만 아니라 환경 실험실의 연구결과와도 부합된다. 따라서, 한국에서도 실제 온열환경의 평가 및 재실자의 온열감을 예측하는데 PMV-PPD 모델이 유용하게 사용될 수 있으리라고 생각된다. 단, 계절적 영향을 고려하고, 보다 한국인에 맞게 약간의 보정을 할 필요는 있다고 생각된다.

셋째, SET*에 대한 TSV의 회귀식은 $TSV = 0.339SET^* - 8.583$ 이고, 중성점 온도와 쾌적 온도

범위는 각각 25.3°C, 23.8~26.8°C로 나타났다. ANSI/ASHRAE Standard 55-1974와 비교해 보면, 중성점 온도와 쾌적 온도 범위가 1.4~1.8°C 가량 높으며, 환경 실험실에서의 다른 연구결과도 중성점 온도가 약 1.3°C 높다. 따라서, 미국의 온열환경 평가기준을 한국에 그대로 적용하면 잘 맞지 않을 것이므로, 이러한 연구결과를 토대로 우리 실정에 맞는 온열환경 기준을 합리적으로 제정하는 일이 필요하다고 생각된다.

넷째, 여자가 남자에 비해 온도 변화에 민감하고, 중성점 온도는 남자가 24.3°C, 여자는 26.1°C로 여자가 남자에 비해 1.8°C 높다. 또한, 여자가 남자에 비해 쾌적 온도 범위가 0.7~2.8°C 정도 높으며, 특히 쾌적 온도의 하한이 남자에 비해 매우 높게 나타났다.

후 기

본 논문은 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 일환으로 수행하여 얻은 연구결과임을 밝혀 두며, 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. Fanger, P.O., 1970, Thermal Comfort-Analysis and Application in Environmental Engineering-, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.
2. ISO, 1984, Moderate Thermal Environments -Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort-, ISO Standard 7730.
3. Tanabe, S., 1988, Thermal Comfort Requirements in Japan, Ph. D. thesis, Waseda University.
4. Fukai, K., Gotoh, S., Saito, J., and Ito, H., 1992, "Experimental Study on Correlation between Standard New Effective Temperature(SET*) and Japanese Thermal Sensation: Part 1-Analysis of Subjective Judgment in Winter Experiment", Transactions of the Society of Heating, Air-Conditioning

- and Sanitary Engineers of Japan, No. 48, pp. 21~29.
5. Fukai, K., Gotoh, S., Saito, J., Ito, H. and Akui, S., 1993, "Experimental Study on Correlation between Standard New Effective Temperature(SET*) and Japanese Thermal Sensation: Part 2-Comparison of Thermal Sensation in Winter and Summer Seasons", Transactions of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No. 51, pp.139~147.
 6. 최진영, 박종한, 금종수, 고범석, 성시풍, 심민섭, 1993, "동계 체감실험에 의한 온냉감 평가와 PMV, SET*의 적용성 검토", 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 강연 및 논문집, pp. 170~174.
 7. 금종수, 최진영, 박종한, 변일수, 성시풍, 심민섭, 1993, "하계 체감실험에 의한 온냉감 평가와 PMV, SET*의 적용성 검토", 공기조화 냉동공학회 동계학술발표회 강연 및 논문집, pp. 193~197.
 8. Schiller, G.E., Arens, E.A., Bauman, F.S., Benton, C., Foutain, M. and Doherty, T., 1988, "A Field Study of Thermal Environments and Comfort in Office Buildings", ASHRAE Transactions, Vol. 94, Part 2, pp. 280~308.
 9. Schiller, G.E., 1990, "A Comparison of Measured and Predicted Comfort in Office Buildings", ASHRAE Transactions, Vol. 96, Part 1, pp.609~622.
 10. 김성완, 장해진, 박상동, 1983, "실내 열환경에 관한 실측조사 연구-냉방기 사무소 건물을 중심으로-", 공기조화 냉동공학, 제12권, 제3호, pp.189~197.
 11. 공성훈, 박상동, 손장열, 1989, "종합적 지표에 의한 실내 온열환경의 특성과 온열쾌적범위에 관한 연구-겨울철 사무소 건물을 중심으로-", 대한건축학회 논문집, 제5권, 제3호, pp. 159~167.
 12. 손장열, 백용규, 서기석, 1990, "PMV 지표에 의한 건물에서의 온열환경 특성에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제6권, 제6호, pp.213~219.
 13. 이철희, 배귀남, 최항철, 이춘식, 1994, "여름철 사무실내 온열환경 특성 및 쾌적성 평가", 공기조화 냉동공학 논문집, 제6권, 제3호, pp. 206~217.
 14. 배귀남, 이철희, 이춘식, 최항철, 1995, "겨울철 사무실내 온열환경 특성 및 쾌적성 평가", 공기조화 냉동공학 논문집, 제7권, 제2호, pp. 310~318.
 15. Jones, B.W., Ogawa, Y., 1992, "Transient Interaction between Human and the Thermal Environment", ASHRAE Transactions, Vol. 98, Part 1, pp.189~195.
 16. Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L.G., 1986, "A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment", ASHRAE Transactions, Vol. 92, Part 2, pp.709~731.
 17. ASHRAE, 1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-1992.
 18. ASHRAE, 1993, ASHRAE Handbook-1993 Fundamentals-, pp.8.1~8.29.
 19. Clausen, G., Pejtersen, J., Bluysen, P.M., 1993, Research Manual of European Audit Project to Optimize Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings, Contract JOU2-CT92-0022.
 20. ASHRAE, 1974, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-1974.