Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 17, No. 3 1998

중온 고습 환경조건에서 부분적으로 냉방되는 실내의 열쾌적성에 대한 분석 : 인체반응에 대한 PPD 기준의 평가

Analysis on the Thermal Comfort Aspect of a Locally-Cooled Room in Warm and Humid Environments : PPD-Based Evaluation of Human Responses

김 봉 훈* · 서 승 록*

ABSTRACT

Thermal comfort aspect of a locally-cooled target space in warm and humid environments(typically in the rainy summer season) was studied in view of PPD index. First, theoretical analyses were conducted to examine the effect of the governing parameters(such as air temperature, relative humidity and air velocity, etc.) using a computer model. Secondly, experimental investigations were also performed in a climatic room designed to simulate corresponding thermal conditions of outdoor environments. During the tests, temporal variation of PPD was recorded as functions of climatic variables(outdoor and indoor temperatures, relative humidity and air velocity) for the given human factors(metabolic heat generation and clothing).

From both theoretical and experimental investigations, air temperature and air velocity were found to be the most dominant parameters affecting PPD of the target space. Results were summarized as:

1. Relative humidity of the locally-cooled target space tends to approach that of outdoor's as the space is subjected to an ON-OFF mode of cooling, since moisture potential of the two rooms reaches an equalized state as a result of moisture diffusion.
2. It was recognized that changes in relative humidity did not show any significance in view of thermal comfort as was reported in the previous studies, while variations of both temperature and air velocity caused relatively large changes in the degree of thermal comfort.
3. In-door environment should be evaluated in terms of PPD instead of relative humidity commonly recognized as an important climatic variable particularly in warm and humid environments.

* 대구대학교 자동차.산업공학부

기 호 설 명

f_{cl} 의복면적계수
h_c 대류열전달계수($W/m^2.℃$)
I_{cl} 착의량($m^2.℃/W$)
M 대사량(W/m^2)
p_a 수증기분압(Pa)
t_a 공기온도(℃)
t_{cl} 의복표면온도(℃)
t_r 평균복사온도(℃)
V 공기유속 또는 풍속(m/s)
W 수행된 기계적인 일(W/m^2)

1. 서 론

열환경에 대한 인체반응은 동일한 조건에서도 연령과 성별에 따라서 다른 체감현상을 보여 줄 뿐만 아니라 작업의 종류나 의복의 착용상태에 따라서도 큰 차이를 나타낸다. 따라서 실내의 열환경을 제어하는 장치 또는 시스템들은 단순히 공기의 온.습도를 조절한다는 차원을 넘어서, 인간의 생리적 특성에 가장 잘 부합될 수 있는 쾌적한 열환경을 제공하는 시스템으로 발전하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 측면에서 대형 사무실을 대상으로 하여 실내의 열환경 평가 및 한국인의 인체에 대한 온열감 연구는 이미 국내에서도 많은 진전이 있었으며 대부분 Fanger(1982)의 PMV(PPD) 또는 ASHRAE의 유효온도(Effective temperature) 개념의 열쾌적지수를 적용하여 사무실 공간의 열환경을 분석 및 평가하였다(김승완과 장해진등, 1983; 이철희와 배귀남 등, 1994).

한편으로 Spot-cooling 시스템 또는 룸에어컨의 보급이 확대되면서 상대적으로 작은 목표공간에 대한 최적제어 및 설계를 통한 에너지절약과 아울러 인체의 생리학적인 측면에서 최적의 열환경조건을 구현함으로써 더위로 인한 열스트레스를 제거함은 물론 과냉방으로 유발될 수 있는 냉방병(또는 인체 온도조절기능의 저하등)을 사전에 예방할 수 있도록 다양한 제어기능들(PMV 기준 자동운전, 퍼지운전, 제습운전 등)이 제시되고 있다.

따라서 근래에 있어서는 사무실과 같은 넓은 공간에서의 등온온도제어(Isothermal temperature control)개념과는 다른 것으로서 냉방 시 실내의 국부적인 공간에서의 열쾌적성에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 국부적 열쾌적성에 대한 영향인자(온도, 습도, 풍속 및 풍향, 복사온도, 대사량, 착의량 등)들 중에서 특히 풍속 및 풍향은 인체의 생리적 측면에서 중요한 변수로 취급되면서 관련특성에 관한 많은 연구가 실시되었다(Rohles et al., 1974; Azer et al., 1972; Fanger et al., 1974; Melikov et al., 1994)

이러한 연구들의 시험방법은 대부분 유사하며 근래 연구로서 Melikov et al.(1994)는 단일 환경시험실을 사용하여 수평 또는 수직방향으로 찬 공기를 목표공간에 분사 시켜서 인체의 온열감에 대한 반응을 심리반응실험(Subject test)형식 및 Thermal manikin(Madsen, 1986)을 이용하여 분석하고 결과를 Fanger(1970) 또는 Gagge(1986) 등이 제시한 기존 이론적인 결과와 비교하였

다. 실내온도는 28~38℃, 습도는 50%, 목표공간의 온도는 20~28℃이고 평균 유속은 최대 2m/s까지 변화 시켜서 정상상태(Steady-State)에서 각 열환경 조건에서의 선호 공기유속(Preferred air velocity)대한 실험식을 제시하고자 했다. 그러나 심리반응실험(Subject test)에서 나타난 각 개인별 생리적인 반응에 있어서 큰 차이가 나타남에 따라서 각 열환경 조건과 선호 공기유속간에 상관관계를 제시하는 것이 현실적으로 난이하다는 것을 발견하였다(Melikov et al., 1994; Foutain et al., 1994; Fanger et al., 1974; Fanger and Langkilde, 1975). 특히 실내온도영역이 Melikov et al.(1994)이 시험한 온도보다 낮은 천이영역(Transition zone) (Fountain et al., 1994)에서는 불쾌한 드래프트의 영향을 파악하는 것이 한층 더 어려운 것으로 보고되고 있다.

이러한 천이영역에서 냉방이 요구되는 시기는 여름 장마철 기후조건을 들 수 있다. 온도는 25~29℃정도로 상대적으로 낮으나 습도가 80~95%로 냉방운전에 따른 인체의 온열감 평가가 어려운 영역으로 많은 연구가 요구되고 있으며 Spot cooling이나 룸에어컨의 경우 실내의 쾌적제어가 가장 힘든 기후조건에 해당된다.

따라서 본 연구에서는 천이온도영역에서 찬 공기가 일정방향으로 분사될 경우 지정된 목표공간의 열환경의 변화거동을 비정상상태에서 시간에 따라서 기록하고 분석하였다. 여기서 비정상상태라고 하는 것은 분사되는 찬 공기의 유속과 온도가 시간에 따라서 일정한 Melikov et al.(1994)의 실험과는 달리 설정온도에서 룸에어컨의 ON/OFF에 따라서 분사공기의 온도가 주기적으로 가변되는 상황을 설명한다. 기존의 많은 연구들이 특정 열환경 조건에서 심리반응실험을 통한 인체의 온열감 평가에 주안점을 두었다면(Melikov et al., 1994; 심부자, 1997 등), 본 연구에서는 열쾌적성에 대한 객관적이고 수치적인 평가를 위하여 목표공간의 열환경 자체를 Fanger(1982)의 PMV(PPD)모델을 도입하여 분석 및 평가했다. 연구목적은 천이온도영역에서 찬 기류에 의한 실내 열환경의 변화거동에 대한 비정상상태의 측정 및 분석으로 ISO 7730(ISO, 1984)의 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV) 및 예상불만족률(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) 모델을 적용하여 목표공간의 열환경에 영향을 미치는 온도, 상대습도, 풍속 등의 인자들을 조합한 종합적 쾌적성 평가와 아울러 쾌적환경 구현을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 이론적 모델

2.1 PMV 및 PPD 전산모델

Fanger(1970)는 인체와 주위환경과의 열평형 개념을 도입하고 정상상태에서 인체의 열발생율은 열손실율과 동일하다는 가정으로부터 인체에 대한 열평형식을 도입하였다. 그러나 이 식은 인체의 활동량(또는 신진대사량)의 증가로 발생하는 땀과 피부온도와의 생리학적 및 물리적 현상에 대한 규명이 미흡했으나 ASHRAE HANDBOOK 8장(ASHRAE, 1993)에서 언급된 것처럼 발한율과 피부온도에 관한

Rohles and Nevins(1971)의 실험식을 도입하고 의복의 수분투과율(Clothing moisture permeability)을 상수로 처리함으로써 낮은 대사량의 영역에서 Fanger(1982)는 다음과 같은 단순화된 6개의 환경 및 인체측 변수(공기온도, 습도, 풍속, 평균복사온도, 대사량, 착의량)로 구성된 인체의 열평형방정식을 제시하였다.

$$(M-W)=3.96\times10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-(t_r+273)^4]+f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)+3.05[5.73-0.007(M-W)-p_a]+0.0173M(5.87-p_a)+0.0014M(34-t_a)+0.42[(M-W)-58.15] \quad (1)$$

좌측항은 인체내부의 열생산율이며 우측항들은 인체로부터의 열손실율을 나타내는 것으로 대표적인 열손실기구로는 복사열손실, 대류열손실, 증발열손실, 호흡열손실 등을 들 수 있다(ASHRAE, 1993). Fanged(1970)는 식(1)에 있어서 좌우측의 차를 인체에 대한 열부하, L이라고 정의하고 Roles and Nevins(1971)의 온열감척도(Thermal sensation scale)를 도입한 PMV값과 대사량, M 및 열부하, L과의 상관식은 다음과 같다.

$$PMV=\{0.303\exp(-0.036M)+0.028\}L \quad (2)$$

$$L=Y_2+Y_3+Y_4 \quad (3)$$

$$Y_2=M-W-3.05\times10^{-3}(5730-7(M-W)-p_a) \quad (4)$$

$$Y_3=-0.42(M-W-58.15)-1.73\times10^{-5}M\times(5870-p_a) \quad (5)$$

$$Y_4=-0.0014M(34-t_a)-3.96\times10^{-8}f_{cl}\times((t_{cl}+273)^4-(t_r+273)^4)-f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)) \quad (6)$$

$$t_{cl}=35.7-0.028(M-W)-I_{cl}\{3.96\times10^{-8}f_{cl}\times[(t_{cl}+273)^4-(t_r+273)^4]+f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)\} \quad (7)$$

대류 열전달계수, h_c는 공기유속의 크기에 따라서 다음과 같이 구분된다.

$$h_c=2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25}\leftarrow 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25}>12.1\sqrt{V} \quad (8)$$

$$h_c=12.1\sqrt{V}\leftarrow 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25}<12.1\sqrt{V} \quad (9)$$

의복면적계수(Clothing area factor), f_{cl}은 McCullough and Jones(1984)의 방법과 같이 의복의 단열정도에 따라서 아래와 같이 서로 다른 보정식을 적용한다.

$$f_{cl}=1.0+0.2I_{cl}\leftarrow I_{cl}<0.5(\text{clo}) \quad (10)$$

$$f_{cl}=1.05+0.1I_{cl}\leftarrow I_{cl}>0.5(\text{clo}) \quad (11)$$

PMV값은 ASHRAE의 온열감 7단계 척도를 기준으로 설정되었으며 -0.5<PMV<+0.5인 경우가 쾌적영역에 해당된다. 한편, PPD는 주어진 환경에 대해 만족하지 않는 사람의 예상비율을 나타낸 것으로 쾌적한 영역은 PPD값이 10%이내가 되어야 하며 양 지수는 식(12)와 같은 상관관계로 표현될 수 있다. (ISO 7730).

$$PPD = 100 - 95 \times \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] \quad (12)$$

Table 1. Constants for PMV-PPD calculation

인적변수	적 응
대사량	1.2met=69.84 (W/m^2)
착의량	0.5clo=0.078(m^2.℃/W)
외부일	0(W/m^2)

2.2 PMV-PPD 계산

PMV-PPD 계산을 위하여 식(1)-(12)를 이용한 전산프로그램을 작성하였다. 식(7) 및 (8)에 표시된 의복표면온도(t_{cl})와 대류 열전달계수(h_c)는 Bisection 및 Secant 반복법을 사용하여 계산되었다.

계산에 필요한 인적입력변수는, M=대사량 또는 활동량(met:W/m^2), W=외부일(W/m^2), I_{cl}=의복단열계수(clo: m^2℃/W)이며 환경변수로는 t_a=공기온도(℃), t_r=평균복사온도(℃), V=공기유속(m/s), φ=상대습도(%) 등이다. 평균복사온도 $t_r = t_a + 1$이라고 가정하였다. 이 가정은 본 환경시험실의 하절기의 냉방 실험결과들을 토대로 하며 평균복사온도를 계산하기 위한 흑구온도가 평균적으로 공기온도보다 0.3-0.8도 정도 높게 나타나므로 김승완과 장해진등(1983)의 평균온도 계산식을 적용 시 공기온도보다 대략적으로 1도 정도 높게 산정된다. 그리고 나머지 3가지 변수를 가변 시키면서 계산을 실시했고 인체측 변수들은 하절기의 앉아 있는 인체를 기준으로 Table 1과 같이 1.2(met)의 대사량, 0(W/m^2)의 외부일, 0.5clo의 착의량(f_{cl}을 계산할 경우 식(10)을 적용)을 가정하였다. PPD에 미치는 인체측 변수의 영향을 파악하기 위하여 공기유속을 일정하다고 가정하고 대사량과 공기온도를 변화 시키면서 계산을 실시하였다.

Fig.1은 0.1m/s의 공기유속, 공기온도+1℃의 평균복사온도 및 위에서 가정된 인체측 변수 조건하에서 공기온도와 상대습도를 변화시킨 경우의 식(1)-(12)를 통한 계산 결과로 각 상대습도에 대하여 온도에 따른 PPD 값의 변화를 보여준다. 전체적으로 볼 때 상대습도가 커짐에 따라서 쾌적영역의 온도가 낮아지는 방향(상대습도30%: 23.1℃~26.3℃ → 상대습도90%: 21.9℃~24.9℃)으로 이동하며 상대습도가 30에서 90%로 증가할 때 쾌적영역은 1.2℃~1.4℃정도 낮아지는 방향으로 평행이동하는 것을 볼 수 있다. 쾌적온도보다 높으면 상대습도의 증가에 따라서 PPD는 상승하는 반면, 쾌적온도보다 낮으면 감소한다.

상대습도의 증가가 인체의 쾌적성에 미치는 영향은 앞에서 언급한 바 있는 증발 열손실과 호흡 열손실의 측면에서 분석해 볼 수 있다. 증발 열손실은 피부 및 의복의 수증기분압과 대기의 수증기분압과의 차이에 비례하여 발생되며 땀의 증발로 인한 잠열손실(Latent heat loss)이다. 상대습도가 증가되면 대기의 수증기분압이 상승되고 결과적으로 식(1)의 우측항인 증발 열손실은 감소되어 인체에 가해지는 열부하(L)은 증가된다. 다른 측면으로 호흡 열손실을 중에서도 잠열성분은 인체로부터 폐출되는 공기의 습기량(일반적으로 인체의

Core온도에 근접하며 포화상태로 가정, 상대습도 100%)과 흡입되는 공기의 습기량(즉 대기의 습기량)간의 차에 비례하며, 대기의 상대습도가 높아지면 폐출공기와 흡입공기 사이의 잠열손실율이 감소되어 인체에는 열부하의 증가를 초래한다. 이러한 생리학적인 특성은 Fig. 1에서 나타나는 상대습도의 증가에 의한 쾌적온도영역의 감소현상과 상호 관련되어 있다고 볼 수 있다.

Fig. 2는 Table 1의 인체측 변수조건에서 평균복사온도를 공기온도+1℃라고 가정하고 일정한 상대습도(90%)에서 공기온도와 공기유속을 변화 시킨 경우의 계산결과로 쾌적영역을 나타내는 온도구간이 공기유속이 증가됨에 따라서 쾌적영역의 온도는 높아지는 방향으로 이동하며, 온도구간의 폭은 작아지는 경향(공기유속 0.1m/s: 22℃~25℃(3℃) → 공기유속 0.5m/s: 24.3℃~26.7℃(2.4℃))을 보인다.

하한쾌적온도는 2.5℃ 상승한 반면 상한쾌적온도는 1.8℃ 정도 상승했다. 이것은 하한쾌적온도가 공기유속의 증가에 좀 더 민감하게 변화하는 것을 의미하는 것으로 공기유속의 증가에 따라서 쉽게 추위를 느끼는 인체의 생리적인 특성과 부합된다고 볼 수 있다. 이론적인 측면에서 볼 때 공기유속의 증가는 식(1)의 우측에 있는 대류 열전달계수를 증가 시킴으로써 피부로부터의 대류 열손실율을 촉진시킨다. 대기온도가 상승하여 의복온도와의 차이가 줄어도 열전달계수의 증가로 인하여 열손실율은 감소되지 않고 결과적으로 쾌적온도영역이 증가된다.

Fig. 3은 0 W/m^{2}의 외부일, 0.5clo의 착의량, 90%의 상대습도, 0.1m/s의 공기유속, 공기온도+1℃의 평균복사온도 조건하에서 공기온도와 대사량을 변화 시킨 경우의 계산 결과이다.

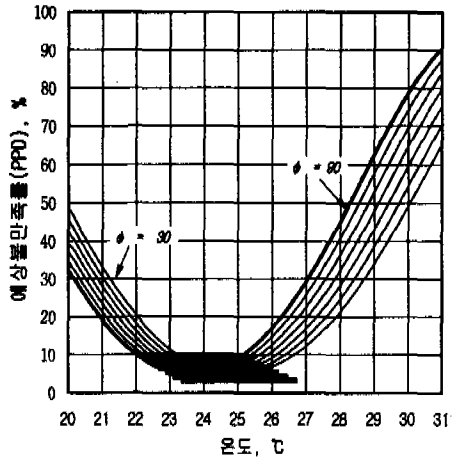


Fig. 1. PPD as functions of temperature and relative humidity

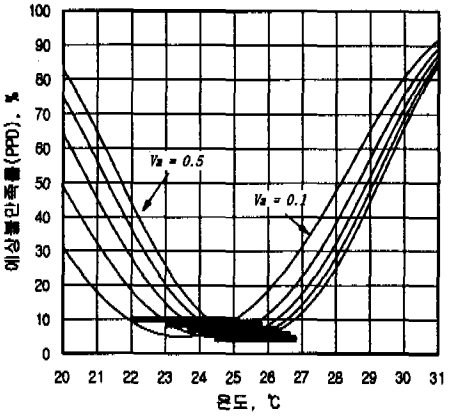


Fig 2. PPD as functions of temperature and air velocity

쾌적영역을 나타내는 온도구간이 대사량(또는 활동량)이 커짐에 따라서 현격하게 낮아지면서 온도구간의 폭은 공기유속과는 달리 증가되는 방향(대사량 1.0met: 23.6℃~26℃(2.4℃) → 대사량 1.4met: 20.4℃~24℃(3.6℃))으로 이동하며, 하한쾌적온도는 약 3℃, 상한쾌적온도는 대략 2℃ 정도 하강함을 알 수 있다. 대사량의 증가로 인하여 더위를 느끼는 상한쾌적온도는 낮아짐으로써 쉽게 더운 불쾌감을 느끼나 반대로 추위를 느끼는 하한쾌적온도는 더욱더 낮아져 쉽게 추운 불쾌감을 느끼지 않는다는 것을 인체의 생리특성과 결부시켜 설명할 수 있다. 식(1)을 통하여 산술적으로 검토해 볼 때 좌측의 대사량(M)의 증가는 직접적으로 인체에 대한 열부하의 상승을 유발시킨다. 그렇다고 대사량의 증가가 전부 열부하의 증가를 초래하지는 않는다. 대사량의 증가는 식(1)의 우측에 있는 발한으로 인한 증발 열손실율을 동시에 증가 시킴으로써 열부하의 증가를 억제한다. 그러나 이 열손실율은 Rohles and Nevins(1971)의 연구에 의하면 그 크기가 신진대사에 의한 열생산율의 42%이내로 궁극적으로 대사량이 과도하지 않은 범위 이내에서 열부하를 억제할 수는 있다고 볼 수 있다.

이론적인 계산결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 일정한 인체측 변수조건에서 환경변수를 변화 시킨 경우 상대습도의 변화에 따른 쾌적온도영역의 변화는 크지 않으나 공기유속에 대해서는 보다 민감한 상관관계가 있음을 보여주는 데 이는 Melikov et al.(1994)의 연구결과와 일치된다고 볼 수 있다.

(2) 인체측 변수 중에서 대사량의 변화(0.5~1.4met)에 대한 영향을 본 연구의 목적상 90%정도의 상당히 고습영역에서 예측해본 결과 쾌적온도영역이 대사량에 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 이것은 Fanger(1982)의 열평형에 근거한 쾌적성 예측모델이 작은 활동량(M 〈 3met)을 전제로 하는 데 이는 발생된 땀이 의복을 통하여 완전히 증발된다고 하는 가정과 관련되어 있다고 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서와 같은 고습조건에서는 낮은 대사량에도 불구하고 땀의 증발이 원활하지 않기 때문에 실제로는 Fig. 1에서 나타나는 것보다 더 큰 영향력을 줄 수 있는 가능성이 있다.

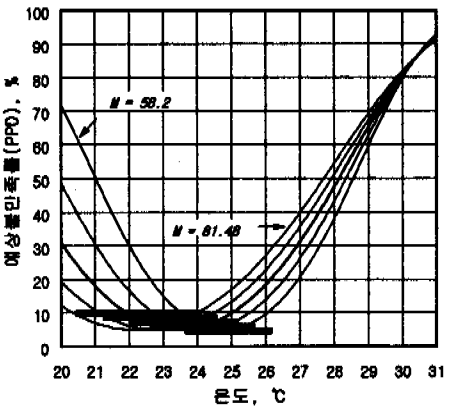


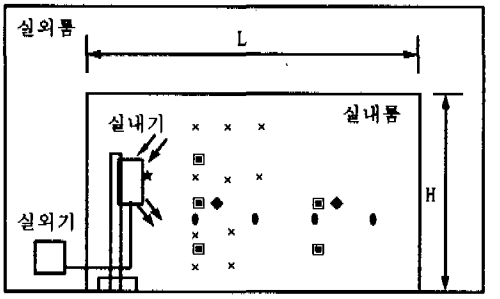
Fig 3. PPD as functions of temperature and rate of metabolic heat production

3. 실험장치 및 측정방법

3.1 구조 및 측정위치

본 연구는 내실과 외실의 이중구조를 갖는 환경시험실(Climatic room)에서 수행되었다. 외실의 벽 구조물은 우레탄 발포 단열재로 되어 있으며 내실의 경우에는 목재, 단열재 및 유리창의 복합구조로 되어 있다. 외실의 열환경조건은 냉동기, 히터 및 가습기로 조합된 PID제어시스템에 의하여 제어된다. 내실에는 실 거주환경을 고려하여 2개소의 유리창과 1개소의 출입문이 설치되어 있다. 실내기 후면의 유리창은 이중창의 구조로 1.5m×1.8m이며, 측면 벽에는 1m×1.2m의 단일 창이 설치되어 있고 목재로 만든 출입문(1.2m×2m)이 실내기에서 4m 떨어진 측면 벽에 설치되어 실 거주 상황에서의 열과 습기의 침투 및 이동현상을 반영시켰다. Fig. 4에서 표시된 것과 같이 내실은 통상적인 거주공간에 해당된다고 볼 수 있고 약 30 m^2 (약9평)의 면적을 갖고 있다. 외실은 각 시험별 기후조건에 해당되는 온도와 습도를 조절할 수 있도록 설계되어 있다. 찬 공기에 의한 실내의 국부적인 열환경 변화를 조사하기 위하여 실내룸의 열부하에 해당되는 적정용량의 룸에어컨(9평형: 3550 kcal/hr)을 높이 2m로 벽면 근처에 설치하여 거주공간의 열 환경변수들을 변화 시켰다.

각종 센서의 상대적 위치는 Fig.4에 표시된 것과 같이 거주공간을 가상한 목표공간을 중심으로 배열되어 있다. 목표공간의 중심은 실내기 전면에서 2m, 높이 1m되는 지점이다. 이 점을 중심으로 전후 1m, 좌우 1m 그리고 상하 1m의 정육면체 공간을 목표공간으로 설정했다. 온도측정을 위하여 총 288개의 K-type 열전대 중에서 목표공간 내부에 속해 있는 48개를 사용했다(1m의 높이의 평면에서 시작하여 위로 333mm 간격으로 각 평면에16개의 열전대를 설치함 : 열전대 간격은 250 mm). 습도는 중심에서 실내기 방향으로 1m 지점에 최저위치 1m에서 상하 0.5m간격으로 3개소 그리고 후방 1m 지점에 최저위치 1m에서 상하 1m 간격으로 2개소에서 측정되었다. 공기유속은 중심과 동일한 높이(1.5 m)에서 좌우방향으로 0.5m 간격으로 설치된 4개의 Sensor Array를 전후방향으로 1m 씩 이동하면서 측정하였다. 복사온도를 산정하기 위하여 중심과 같은 높이(1.5m)로 전후 1m에 2개의 흑구온도계(좌우 1m 간격)가 설치되었다. 기타 실내기에 의한 습기제거 특성을 분석하기 위하여 실내기 내부의 열교환기 표면의 온도와 실내기에 흡입되는 공기의 노점온도를 흡입그릴 부위에서 1개소 측정했다. 시험간 제습량을 측정하기 위하여 실내기의 배수구를 통하여 누적되는 물의 양을 디지털저울로 측정했다. 모든 센서들은 5대의 Hybrid Recorder (HR2500E: 60 CH)를 통하여 데이터 획득장치의 GPIB모듈에 접속되어 실시간으로 목표공간 내부에서 측정된 열 환경변수들의 평균 및 표준편차를 기록 및 분석했다. 그리고 목표공간의 중심에는 에어컨 제어용 써미스터(Thermistor)가 위치하여 목표공간의 온도가 Table 2의 설정온도에 도달할 경우 ±0.4℃의 진폭으로 ON-OFF가 발생되도록 하여 목표공간의 시간적 평균온도가 설정온도로 유지되도록 했다.



W× H× L = 4875× 2300× 6000 ㎜
× : 온도 센서(K-TYPE 열전대) 288개소
● : 풍속 센서
▣ : 습도 센서
◆ : 복사온도 센서
★ : 노점온도 센서

Fig. 4. A schematic diagram of the climatic room and experimental test set-up

3.2 측정방법

시험은 크게 초기화단계와 열환경변수 측정 단계로 나눌 수 있다. 초기화는 실내 및 실외의 전 공간을 Table 2의 외기조건으로 안정시키는 과정으로 시험의 재현성과 신뢰성 측면에서 중요하며 약 2시간 이상 총 288개소의 공기온도 및 실내.외측의 12개소의 벽면온도를 측정하여 변화량이 0.05도 이하인 경우 온도측면에서 초기화가 완료된 것으로 판정한다. 상대습도의 경우에는 계측기의 정밀도를 고려하여 ±2%이내로 2시간 이상 유지되는 경우를 초기화 완료상태로 판정했다.

Table 2. Test conditions for experimental measurements

외기온도(℃) (상대습도) (90%)	설정온도 (℃)	공기유속 (m/s)	토출방향
29 27	27 25 23	미풍 : 0.1 약풍 : 0.3 강풍 : 0.8	수평

실내와 실외가 동일한 열환경 조건으로 안정화되면 열 및 습기의 출입을 최소화 시키기 위하여 창문 및 출입문을 닫고 Table 2의 설정온도(목표공간의 시간적 평균온도)로 에어컨을 운전 시키면서 열환경 변수들의 시간에 따른 변화를 20초 간격으로 측정하여 공간적인 평균값을 목표공간에 대한 해당 시점에서의 측정값으로 산정했다. 목표공간에 대한 PMV 및 PPD값의 시간에 따른 변화를 산정하기 위해서 4개의 환경변수에 즉 공기온도, 습도, 유속 및 복사온도에 대한 평균값을 식(1)-(12)에 입력했으며 인적변수는 Table 1과 같이 가정했다. 이중에서 복사온도는 흑구온도계의 측정값으로부터 산정되었다(김성완과 장해진 등, 1983). 이러한 열 환경변수들을 측정하는데 사용된 측정기기들의 사양은 Table 3에 요약되어 있다.

Table 3. Specifications of instruments

항 목	측정범위	정밀도	비고
상대습도계	0-100(%)	±2-3%Rh	Vaisala
풍속계	0-2.5 (m/s)	±3%	TSI
복사온도계	0-100(℃)	<0.05	Sato
공기온도계	<+260(℃)	<0.2(℃)	K-type
노점온도계	-40-+60(℃)	<0.2(℃)	General Eastern

4. 실험결과 및 분석

실험결과는 Table 2에 표시된 시험조건의 조합별로 목표공간을 다음의 두 가지 측면에서 분석했다.

1) 목표공간의 열환경 분석
2) 열쾌적성 평가 및 분석

4.1 목표공간의 열환경 분석

목표공간의 열환경을 분석하기 위하여 Table 2의 각 시험조건에서 온도, 상대습도, 공기유속을 측정했다. Fig. 5에는 외기 온도를 27℃, 실내 설정온도는 25℃인 경우의 실외평균온도와 실내 목표공간의 평균온도의 시간에 대한 변화가 나타나 있다. 실외온도의 대표적인 변화경향은 시간이 경과되어 실내의 열환경 조건이 변화하여도 설정온도에서 일정한 진폭(±0.4℃)이내로 제어되고 있다. 목표공간의 온도변화는 초기화상태(27℃)에서 설정온도(25℃)에 도달할 때까지의 연속운전구간과 그 이후의 에어컨의 ON-OFF에 의한 단속운전구간으로 나누어진다. 연속운전시간 은 실.내외의 온도차에 비례적으로 좌우되며 단속운전구간에서는 Fig. 5에서 보이는 것처럼 설정온도(25℃)에서 약 ±0.4℃의 진폭을 가지고 유지되고 있고 이 구간에서의 온도의 진폭과 주기는 마찬가지로 실.내외의 온도차에 관계없이 거의 일정하다고 볼 수 있다. 이러한 양상은 본 연구의 모든 시험에서 공통적으로 나타나므로 Fig. 5의 시험조건 이외에서도 온도변화 양상은 유사하다.

상대습도도 온도와 거의 동일하게 연속운전 및 단속운전 구간으로 나누어진다. 연속운전구간에서는 온도의 하강과 더불어 상대습도도 초기습도(90%)로부터 감소되는 경향을 보이며 온도가 설정온도에 도달하여 단속운전을 하는 경우 상대습도도 진폭은 다르나 온도와 동일한 주기로 변화한다.

Fig. 6-(a), (b), (c) 및 7은 시간의 변화에 따른 각 시험조건별 목표공간의 평균적인 상대습도의 변화를 나타낸 것이다. 실외측의 열환경 조건을 보면 Fig. 6-(a), (b), (c)는 29℃/90%이며 실내측 목표공간의 온도를 27, 25, 23℃로 변화 시키면서 각 설정온도에서 공기유속의 크기를 0.1m/s에서 0.8 m/s까지 변화 시켰다.

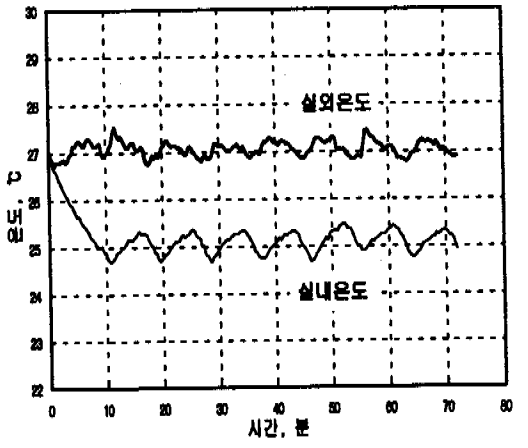


Fig 5. Variation of temperature of the target space at the given out-door condition (27℃/90%)

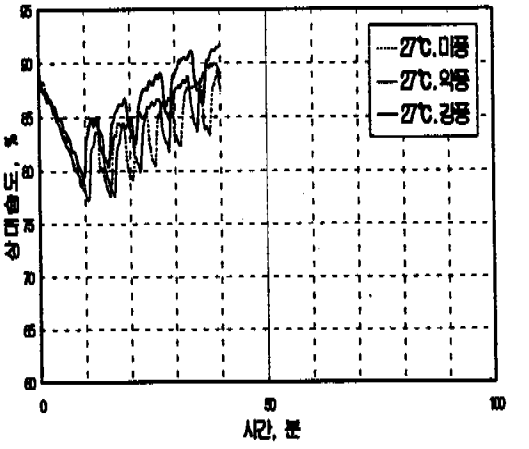


Fig 6-(a). Variation of relative humidity for differe air velocity(29℃/90%)

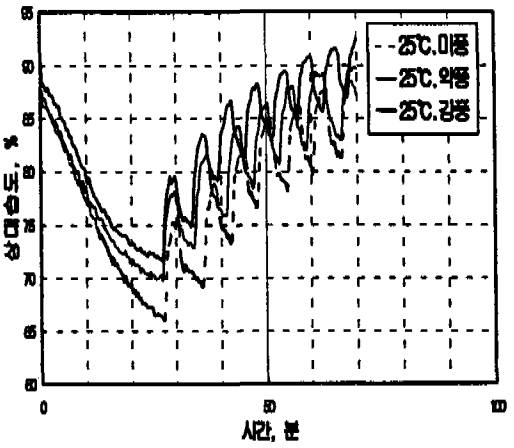


Fig 6-(b). Variation of relative humidity for different air velocity(29℃/90%)

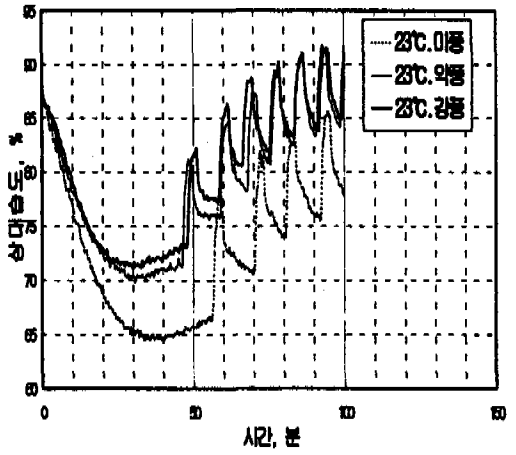


Fig 6-(c). Variation of relative humidity for different air velocity(29℃/90%)

Fig. 7의 경우 실외조건은 27℃/90%로 더욱 낮은 외기 조건이며 따라서 목표공간의 온도도 낮추어 25, 23℃로 설정했으며 공기유속은 위와 동일하게 변화 시켰다.

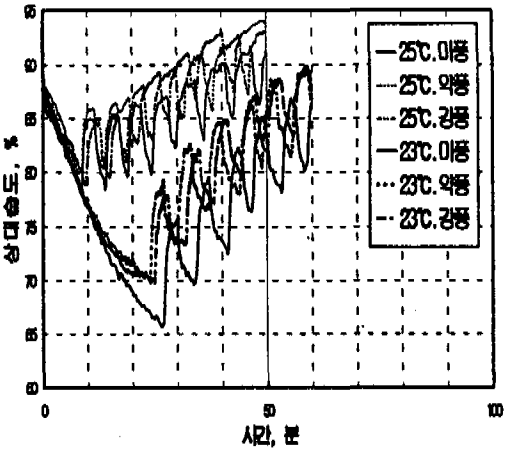


Fig. 7. Variation of relative humidity for different air velocity(27℃/90%)

Fig. 6-(a), (b), (c)에서 상대습도의 변화를 보면 동일한 공기유속에서 ON-OFF가 발생되기 이전의 연속운전 영역에서는 습도가 초기 상태인 90%에서 시간에 따라서 거의 직선적으로 하강하는 경향을 보이며 설정온도에 도달하여 단속운전 영역에서는 상대습도의 시간평균은 시간상의 차이가 있을 뿐 점진적으로 증가되는 경향을 보여준다. 이러한 현상은 Fig. 7에서와 같이 외기 온도가 약간 더 낮은 경우에도 동일하게 발생됨을 볼 수 있다.

그러나 세부적인 경향을 보면 외기 온도와 설정온도 사이의 온도차에 따라서 연속운전에서의 상대습도상의 변화거동과 단속운전시의 상승율 및 진폭과 주기 등이 달라짐을 알 수 있다. 외기 온도와 설정온도간의 차이가 클수록 연속운전 시간이 길어짐으로써 설정온도에 도달되기 직전의 상대습도는 더욱 낮아지나 단속운전에서의 상승율은 더욱더 크게 나타났다. 이러한 현상은 에어컨이 동작(ON)되는 상태에서의 제습량과 OFF상태에서의 실내.외의

수증기분압의 차이로 인한 습기 침투량 그리고 실내기의 FAN을 작동 시 젖은 열교환기에서 토출되는 습기량에 따라서 좌우된다고 추정할 수 있다. 연속운전 시에는 제습량이 습기침투량과 습기토출량보다 상대적으로 커서 목표공간의 습도는 감소되나 단속운전 시에는 역으로 됨을 알 수 있다. 단속운전시의 제습량의 감소는 열교환기의 표면온도와 실내기로 흡입되는 공기의 노점온도(Dew point temperature)를 비교해 봄으로써 원인을 파악할 수 있다. Fig. 8에서 보면 연속운전 영역에서는 열교환기의 표면온도가 흡입공기의 노점온도보다 5℃이상 낮기 때문에 흡입공기의 수분이 응축되면서 제습기능이 연속적으로 원활히 일어난다. 그러나 단속운전 영역에서는 열교환기의 표면온도가 노점온도보다 높은 구간이 주기적으로 발생함으로써 단위 시간당의 제습량보다 습기의 침입량 및 토출량을 합한 것이 더 크게 되어 결과적으로 상대습도는 시간에 따라서 증가된다고 판단된다.

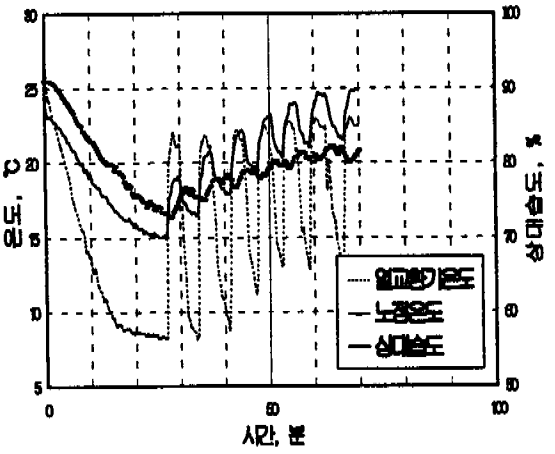


Fig 8. Variation of relative humidity, dew point and evaporator temperatures(27℃/90%)

결국 에어컨이 ON-OFF를 반복하면서 목표공간의 시간평균온도가 설정온도에 도달하면 실내.외의 수증기분압상의 평형이 이루어지는 시점에 접근하게 된다. 즉, 단속운전 개시시점으로부터 평형습도 도달 시까지 시간상의 차이가 있을 뿐 시간이 충분히 지나면 실내.외 온도차에 상관없이 평형습도에 도달할 것으로 추정된다.

또한 이러한 상대습도의 변화거동은 공기유속 또는 실내기 FAN의 회전속도와 밀접하게 관련되어 있음을 볼 수 있다. Fig.6-(a),(b),(c) 및 7에서 보면 목표공간의 공기유속이 감소될수록(즉 FAN의 회전속도가 감소할수록) 목표공간의 상대습도가 낮게 유지되고 있다. Fig. 6-(a)에서는 공기유속이 0.8m/s에서 0.1 m/s로 감소되면서 단속운전 영역에서 상대습도가 전반적으로 2-3%정도 감소되었으나 실내.외의 온도차가 증가됨에 따라서 Fig. 6-(c)와 같이 15%이상으로 감소된다.

공기유속의 감소로 인한 목표공간에서의 상대습도의 하강현상은 앞에서 언급된 것처럼 공기유속의 감소가 직접적으로 제습량을 증가 시키는 요인과 간접적으로 실내.외를 통한 물질전달계수를 감소시켜 수증기분압이 높은 실외로부터 목표공간으로 유입되는 습기침입량을 감소 시키고 또한 OFF시 습기토출량을 줄여서 목표공간으로 유입되는 습기량을 감소시킨다는 등의 여러 가지 원인을 고려해 볼 수 있지만 그래도 이 중에서 가장 큰 영향을 주는 것으로는 직접적인 제습량의 증가요인을 들 수 있다.

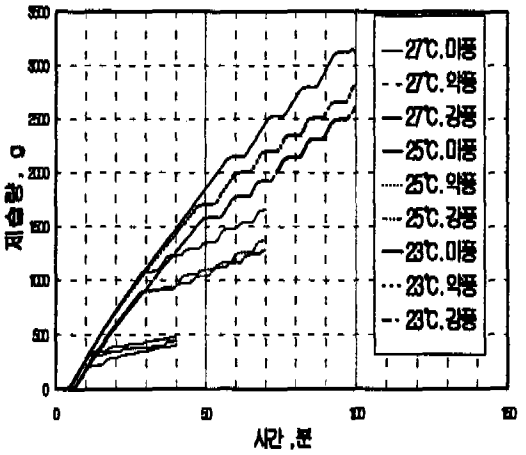


Fig. 9. Variation of moisture removal amount for different operating conditions(29℃/90%)

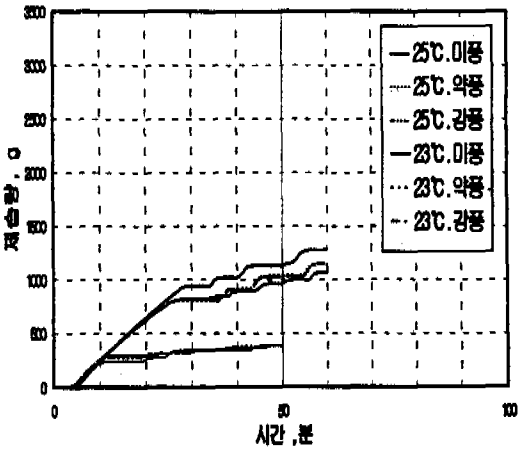


Fig 10. Variation of moisture removal amount for different operating conditions(27℃/90%)

Fig. 9와 10에서 보면 동일한 설정온도에서 공기유속이 감소될수록 누적 제습량의 증가율은 상승함을 알 수 있다. 따라서 Fig.6 -(a),(b),(c)와 Fig. 9 그리고 Fig. 7과 Fig. 10을 대응시켜 볼 때 공기유속의 감소로 인한 상대습도의 하강현상은 결국 제습량의 증가에 기인한다고 볼 수 있다. 즉 공기유속의 감소로 인하여 증발 열교환기의 표면온도가 현격히 낮아짐으로써 찬 표면과 공기사이의 온도차에 비례하여 응축율이 증가된 결과로 볼 수 있다.

4.2 열쾌적성 평가 및 분석

앞에서 언급된 설정온도와 상대습도 및 공기유속을 갖는 목표공간의 열환경에 대해 인체가 느끼는 온열감을 식(1)-(12)를 적용하여 ISO7730의 열쾌적지수 PPD측면에서 평가했다. Fig. 11-(a), (b), (c) 및 Fig. 12-(a), (b)는 Table 2의 각 설정온도에서 Fig. 6-(a), (b), (c) 및 Fig. 7의 상대습도와 공기유속에 대응되는 PPD지수의 시간에 따른 변화를 기록했다.

Fig. 11-(a), (b), (c)는 외기 29℃/90%에서 목표공간의 온도를 27℃에서 23℃까지 변화 시키고 실.내외의 각 시험조건의 조합에서 공기유속을 0.1 에서 0.8m/s로 변화 시킨 경우의 PPD값을 나타낸 것으로 0.1m/s의 공기유속에서 목표공간의 온도가 25℃로 설정된 경우(Fig. 11-(b)) 연속운전구간에서 PPD값이 60%에서 5%까지 감소되고 단속운전구간의 경우 전반적으로 PPD가 5-10%사이에서 변화되며 쾌적한계인 10%이내의 값을 갖는다고 볼 수 있다. 동일풍속에서 설정온도를 27℃로 높인 경우(Fig. 11-(a)) 단속운전 시 OFF상태에서 최대치 30%까지 상승하여 인체가 더위를 느끼는 상태이며 ON시에는 쾌적영역에 해당된다. 설정온도를 23℃로 낮추면

단속상태에서 27℃ 설정할 경우와는 반대로 ON상태에서 PPD의 최대치 55%로 상승하며 OFF시에도 20%정도로 인체가 추위를 느끼는 상태가 된다. PPD에 미치는 상대습도의 영향을 파악하기 위하여 Fig. 6-(b)에서 보면 공기유속이 0.1m/s인 경우 단속운전의 개시단계의 OFF상태인 (29분경)에서 상대습도가 약75%에서 대략63분 경에는 약 87%정도까지 상승했다. 이에 대응되는 PPD값을 보면 Fig. 11-(b)의 단속운전구간에서 OFF시의 피크치의 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 온도나 풍속의 고저에 관계없이 단속운전구간에서 거의 동일한 피크치를 갖는 것을 볼 때 이런 경향은 본 연구의 전 실험조건에서 공통적 양상으로 볼 수 있었다. 결론적으로 동일한 온도, 공기유속에서 상대습도의 변화가 PPD에 미치는 영향은 그렇게 크지 않다는 PPD에 대한 이론적인 계산결과(Fig. 1) 및 다른 연구결과(Rohles et al., 1974; Fanger et al., 1974; Melikov et al., 1994)와 일치된다고 볼 수 있다. 이것은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이

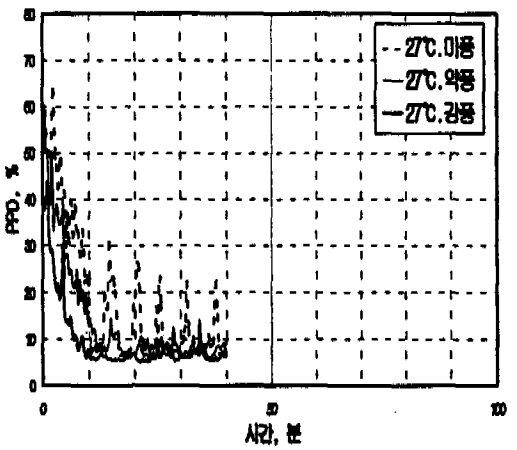


Fig 11-(a). Variation of PPD for different air velocity(29℃/90%)

동일한 공기유속(0.1m/s)에서 높은 상대습도에서도 상부쾌적온도는 25℃를 중심으로 목표공간의 환경변수의 변화에 따라서 상승하거나 하강하게 되며 쾌적온도 영역은 크게 변화되지 않는 양상으로부터 이해할 수 있다.

상대습도와는 달리 공기유속의 변화는 PPD의 시간적 변화에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. Fig. 11-(a)에서는 공기유속의 증가에 의하여 열쾌적성이 향상되는 양상을 잘 보여준다. 목표공간의 온도가 27℃이고 습도가 80-90%인데 공기유속이 0.1m/s인 경우 단속운전시 OFF 구간에서는 PPD가 10%이상으로 더위를 느끼는 상태이나 공기유속의 증가로 인하여 ON-OFF에 관계없이 전반적으로 쾌적영역에 해당되게 된다. 이것은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 공기유속의 증가로 인하여 쾌적온도영역이 상승한다는 계산결과와 일치된다. 즉 온도에 따른 선호공기유속의 측면에서 보면 설정온도가 23℃에서 27℃로 상승 시 선호공기유속은 0.1m/s이하에서 0.3~0.8m/s로 변화된다. 그러나 공기유속에 의한 쾌적성을 향상시키는 효과는 더위를 느끼는 높은 온도영역(27℃ 이상)에 나타나며 온도가 낮아져서 25℃ 이하의 영역에서는 반대로 역효과를 나타낸다. Fig. 11-(b)에서 보면 동일한 온도(25℃)에서 공기유속의 증가는 목표공간의 PPD값을 임계값인 10%보다 크게 만든다. 즉 공기유속이 0.1m/s에서는 쾌적한 열환경이 공기유속이 0.2m/s이상으로 상승 시 인체가 추위를 느끼는 열환경으로 변화된다. 이러한 현상은 목표공간의 온도가 23℃인 경우 Fig. 11-(c)에서 볼 수 있듯이 ON상태에서 PPD가 급격히 증가하여 0.8m/s의 경우 70%정도까지 도달하게 되는데 이 조건에서는 10명 중 7명정도가 추위를 느낀다고 평가할 수 있다.

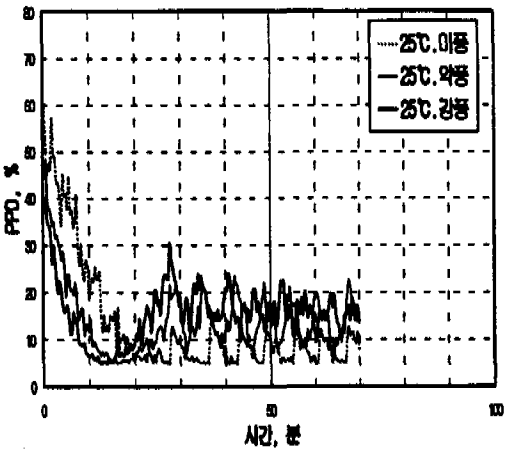


Fig 11-(b). Variation of PPD for different air velocity(29℃/90%)

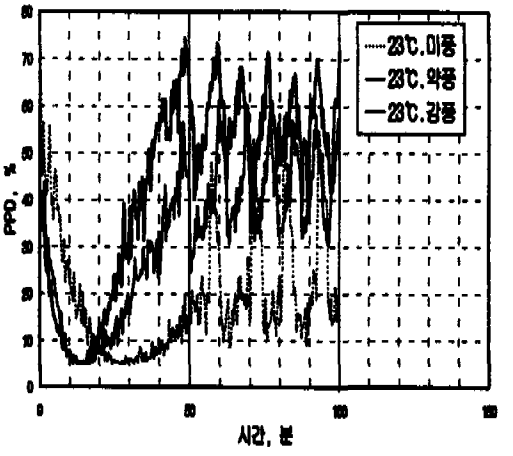


Fig 11-(c). Variation of PPD for different air velocity(29℃/90%)

단속운전구간에서 위에서 나타난 양상과는 달리 연속운전구간에서는 Fig. 11-(a), (b), (c)에서 나타나 있는 것처럼 공기유속의 증가에 따라서 각각의 초기 열환경에 해당되는 PPD값들로부터 쾌적한계인 10%에 도달하는 시간이 단축되는 것을 알 수 있다. Fig. 11-(b)에서 볼때 0.8m/s의 경우가 0.1m/s보다 PPD 10%도달 시간에 있어서 10분 정도 단축되는 현상을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 11-(b) 및 (c)에 나타나 있는 것처럼 10%에 도달한 후에도 온도는 설정온도까지 계속 하강함으로 인하여 PPD는 반대로 추위를 느끼는 방향으로 증가하게 되어 단속운전구간으로 진입한다. 이것은 목표공간의 열환경이 기존의 가장 대표적인 온도기준의 제어방식을 적용함으로써 발생되는 과냉방현상으로 향후 PPD를 기준으로 한 새로운 제어개념을 도입한 열환경 제어가 필요하다고 생각된다(MacArthur, 1986; Spain, 1986).

실.내외의 온도차가 PPD의 변화에 미치는 영향을 보기 위하여 Fig. 12-(a), (b)를 Fig. 11-(a), (b), (c)와 비교했다. 목표공간의 온도가 25℃로 동일한 경우 실외온도가 달라도 단속운전구간에서의 PPD값은 크게 차이가 나지 않고 실외온도가 29℃인 경우가 온도진폭이 약간 증가되고 주기가 길어짐으로 말미암아 OFF시 PPD의 피크치가 약간 증가되는 것을 제외하고는 거의 동일한 양상을 갖는다. 그러나 연속운전구간에서는 실.내외의 온도차에 따라서 단속운전의 개시시점 및 PPD의 시간적 변화양상에 있어서 큰 차이를 보인다.

상대습도와 공기유속간의 복합적인 상호작용이 PPD의 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 6-(a)와 Fig. 11-(a)를 상호 대

응시켰다. Fig. 6-(a)에서 보면 앞에서도 언급한 바 있지만 공기유속의 증가로 인하여 상대습도가 상승되는 양상을 보이나 Fig. 11-(a)의 PPD는 단속운전구간에서 낮아져 쾌적영역으로 진입하는 것을 볼 수 있다. 이것은 상대습도의 상승에 의한 PPD의 증가량(Fig. 1)이 공기유속의 증가에 의한 하강량(Fig. 2)보다 작아서 쾌적온도 보다 높은 온도영역에서는 PPD값은 공기유속의 증가에 따라서 감소한다. 그리고 Fig. 6-(c)와 Fig. 11-(c)에서 보면 목표공간의 온도가 낮아지면서 25℃로부터는 상대습도의 증가로 인한 PPD 값의 감소(Fig. 1)가 공기유속의 증가로 인한 PPD값의 상승(Fig. 2)을 조금은 억제하나 그 효과가 공기유속에 비하여 상대적으로 작다는 것을 보여준다.

앞서 토의된 상대습도와 제습량과의 관계를 고려해 볼 때 제습량이 많을수록 상대습도는 낮아진다는 것을 알았다. 상대습도를 낮추기 위해 제습량만을 증가 시키는 것은 큰 실내.외의 온도차를 요구하며, 실내온도가 낮은 경우에 반드시 쾌적하다고 할 수 없으며(Fig. 6-(c), Fig. 9, Fig. 11-(c)) 제습량이 작아도 실내온도와 풍량을 조절하여 PPD값을 10%±2 이내에서 유지하는 것이 가능하다(Fig. 9, Fig. 11-(a)). 즉, 실내의 상대습도가 높고 실.내외의 온도차가 크지 않으며, 인체가 쉽게 더위 또는 추위를 나타내는 천이영역(Transition zone)에서도 실내온도와 공기유속을 변화 시킴으로써 쾌적환경을 구현할 수 있다.

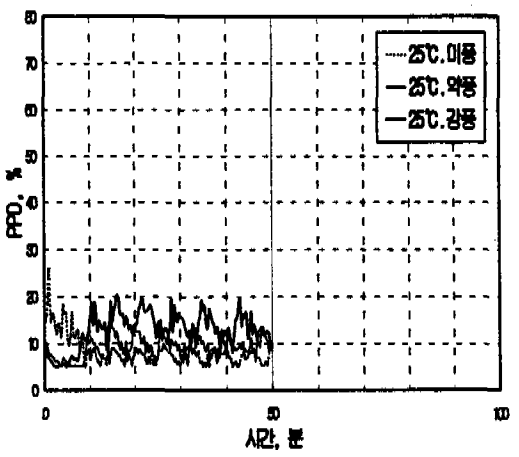


Fig 12-(a). Variation of PPD for different air velocity(27℃/90%)

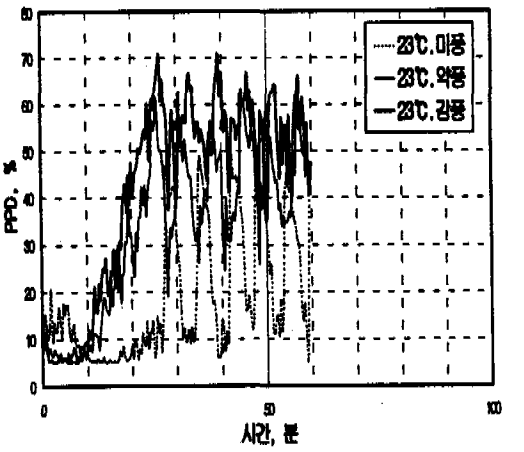


Fig 12-(b). Variation of PPD for different air velocity(27℃/90%)

결 론

본 연구에서는 천이온도영역에서 목표공간의 열환경 자체를 Fanger(1982)의 PMV(PPD)모델을 도입하여 평가했다. 환경시험실을 사용하여 여름 장마철 기후조건을 모사하여 찬 공기가 일정방향으로 분사될 경우 지정된 목표공간의 열환경의 변화거동을 비정상상태에서 시간에 따라서 기록하고 분석하였다.

앞 절에서 언급된 목표공간의 열환경에 대한 분석을 종합해 보면 연속운전 영역에서는 목표공간의 상대습도가 실.내외의 온도차에 크게 좌우되나 일단 단속운전 영역에서는 시간이 경과 됨에 따라서 일정한 값(전반적으로 90% 이상)에 수렴한다는 사실과 그리고 공기유속의 감소로 인한 상대습도의 하강은 연속 및 단속의 전 운전영역에서 실.내외의 온도차가 클수록 더욱 현저하게 발생된다는 것이다.

각 환경변수가 목표공간의 PPD에 미치는 영향을 분석해본 결과 온도가 가장 큰 영향을 미치며 다음으로는 공기유속이며 상대습도의 영향은 크지 않음을 알 수 있었다(단 본 연구에서의 상대습도의 영향은 열환경적인 측면에서 분석된 것으로 인체의 감성과 결부된 쾌적성의 측면에서는 좀 더 깊은 연구가 요망됨). 구체적으로 설정온도 25℃인 경우에는 미풍(0.1 m/s)으로 운전한 경우와 설정온도 27℃인 경우에는 강풍(0.3~0.8 m/s)으로 운전한 경우의 PPD값이 다른 조건들보다 낮은 PPD값을 유지하여 쾌적한 열환경을 구현할 수 있다는 결과를 얻었으며, 설정온도 23℃인 경우에는 낮은 공기유속에서도 이미 PPD값은 쾌적한계를 넘어 추위를 느끼는 열환경 상태가 되기 때문에 공기유속의 증가로 인한 쾌적성의 향상은 기대할 수 없었다.

상대습도를 낮추기 위해 제습량만을 증가시키는 것은 큰 실내.외의 온도차를 요구하여 결국은 과냉방 상태가 된다. 실내의 상대습도가 높고 실내외의 온도차가 크지 않으며, 인체가 쉽게 더위 또는 추위를 나타내는 천이영역(Transition zone)에서도 실내온도와 공기유속을 변화 시킴으로써 쾌적환경을 구현할 수 있다. 이러한 천이영역에서는 온도만을 기준으로 하는 기존의 제어방식으로는 민감한 인체의 열감성에 대응하여 쾌적환경을 구현할 수가 없으므로 PPD를 기준으로 한 새로운 제어개념을 도입한 열환경제어가 필요하다고 생각된다.

끝으로 본 연구의 대상으로 지정된 고습의 천이온도영역에 대해서 앞에서 언급된 바 있지만 열환경 자체의 정량적 평가만으로는 대사량의 증가로 인한 발한과 이로 인한 인체의 복잡한 생리적 및 심리적인 반응의 변화를 규명하기에 부족하므로 향후 관련분야에 대한 지속적인 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

[1] 김성완, 장해진, 박상동 "실내 열환경에 관한 실측조사 연구", 공기조화 냉동공학, 12권 3호, 189~197, 1983.

[2] 심부자, "각 환경기온하에서의 성인 남녀의 피부온 비교", 대한인간공학회지, 16권 2호, 1997.

[3] 이철희, 배귀남, 최항철, 이춘식, "여름철 사무실내 온열환경 특성 및 쾌적성 평가", 공기조화 냉동공학 논문집, 6권3호, 206~217, 1994.

[4] ASHRAE, ASHRAE Handbook, Fundamentals, chapter 8.1~8.29, 1993.

[5] Azer, N. Z., Nevins, R. G., Olsen, S. and Leung, H. C., "Improvements in sensory votes and their associated physiological responses by localized ventilation in hot environments", Symposium on Thermal Comfort and Moderate Heat Stress, Watford, England, Sept. 13-15, pp. 149-163, 1972.

[6] Gagge, A. P., Fobelets, A. P. and Berglund, L. G., "A standard predictive index of human response to the thermal environment", ASHRAE Transactions, Vol. 92, No. 2, pp. 709-731, 1986.

[7] Fanger, P.O., Thermal Comfort analysis and applications in environmental engineering, McGraw-Hill, New York, 1970.

[8] Fanger, P. O., Ostergaard, J., Olesen, S. and Madsen, T. L., "The effect of man's comfort of a uniform air flow from different directions", ASHRAE Transactions, Vol. 80, part II, pp. 142-157, 1974.

[9] Fanger P. O. and Langkilde, G., "Interindividual differences in ambient temperatures preferred by seated persons", ASHRAE Transactions, Vol. 81, part II, pp. 140-147, 1975.

[10] Fanger, P.O., Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, FL, 1982.

[11] Fountain, M., Arens, E., deDear, R., Baumen, F. and Miura, K., "Locally controlled air movement preferred in warm isothermal environments", ASHRAE Symposium Papers, Vol. 100, partII, pp. 937-952, 1994.

[12] ISO, Standard 7730, Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort Geneva: International Organization for Standardization, 1984.

[13] MacArthur, J. W., "Humidity and predicted-mean-vote-based (PMV based) comfort control", ASHRAE Transactions, Vol. 92, part IB, pp. 5-17, 1986.

[14] Madsen, T. L., Description of second generation thermal manikin model, Lyngby Thermal Insulation Laboratory, Technical Unversity of Denmark, 1986.

[15] McCullough, E. A. and Jones, B. W., "A comprehensive data base for estimating clothing insulation", IER Technical Report 84-01, 1984.

[16] Melikov, A. K., Halkjaer, L., Arakelian, R. and Fanger P. O., "Spot cooling-part 1 : Human responses to cooling with air jets", ASHRAE Transactions, Vol. 100, part II, pp. 476-499, 1994.

[17] Melikov, A. K., Halkjaer, L., Arakelian, R. and Fanger P. O., "Spot cooling-part 2 : Recommendations for design of spot-cooling systems", ASHRAE Transactions, Vol. 100, part II, pp. 500-510, 1994.

[18] Rohles, and Nevins, R. G., "The nature of thermal comfort for sedentary man", ASHRAE Transactions, Vol. 77, pp. 239-246, part I, 1971.

[19] Rohles, F. H., Woods, J. E. and Nevins, R. G., "The effect of air movement and temperature on the thermal sensations of sedentary man", ASHRAE Transactions, Vol. 81, part I, pp. 101-119, 1974.

[20] Spain, S., "The upper limit of human comfort from measured and calculated PMV values in a National Bureau of Standards and Test House", ASHRAE Transactions, Vol. 92, part IB, pp. 27-37, 1986.