혼합환기와 하향 압출환기시스템이 동반된 KBS공개홀의 온열환경 평가

Thermal environment evaluation of KBS open hall with mixing ventilation and downward displacement ventilation systems

권 용 일*, 권 순 석**
Y. I. Kwon, S. S. Kwon

Key words : Downward displacement ventilation(하향압출환기), Mixing ventilation(혼합환기), Thermal comfort(열쾌적), Ventilation efficiency(환기효율)

Abstract

This study was carried out for evaluating the interior thermal environment in KBS Open hall with large ceiling height and large space. Ventilation systems of KBS Open hall have combined mixing ventilation and downward displacement ventilation system. Temperature and velocity was measured 130 locations with low level(0.1m), mid level(0.6m) and high level(1.1m). But relative humidity was measured at 15 locations. The subjective thermal sensation was made an inquiry of occupancy at the location measured physical elements.

기 호 설 명

A : 벽체면적
L : 인체발열부하
M : 인체활동량
PMV : predicted mean vote
PPD : predicted percentage dissatisfied
T : 건구온도
TSV : thermal sensation votes

하첨자

b : 인체
i : 미소면적개소
m : 평균
mrt : 평균복사온도

1. 서 론

환기를 위해 설치된 급배기구의 위치에 따라 환기시스템은 혼합환기, 압출환기시스템으로 분류된다. 압출환기시스템은 혼합환기시스템보다 쾌적한 온열환경과 실내의 공기질을 향상시키는 장점이 있다.[1]

* 신흥전문대학 건축설비과
** 동아대학교 공과대학 기계공학과

1970년대 초에 층고가 높은 공장의 쾌적환경을 조성하기 위해 처음 적용되기 시작한 압출환기(displacement ventilation)시스템은 환기효율이 높은 반면 draft발생없이 제거할 수 있는 부하(30w/m² 이하)가 적다는 문제점을 동반하고 있다.[2]

석유파동이후, 1970년대 말부터 건축물의 냉·난방에 사용되는 에너지의 소비량을 줄이기 위해 건물외피의 단열효율을 향상시켰고, 침입외기(infiltration)가 감소되어 sick building이 점차 증가하게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 1980년대 초부터 층고가 낮은 사무소도 쾌적환경을 유지하는 측면에서 압출환기시스템을 적용하기 시작하였다.

새로 적용되는 환기시스템의 타당성을 검증하기 위하여 이용되는 인자는 환기 효율 및 재실자의 온열감으로써 재실자의 온열감에 대한 반응은 6가지의 인자에 의해 복합적으로 영향을 받으나, ASHRAE 표준에서 PMV모델을 7단계로 분류하였다.

현재 ASHRAE표준에서 규정하고 있는 PMV모델은 인체가 정지된 상태에서 균일한 열환경에 노출되어 있는 실험실에서 구한 데이터이므로 동적으로 활동하는 인체의 쾌적(중성점)상태를 PMV모델에 적용하여 평가하면 인체가 느끼는 쾌적(중성점)상태의 온도가 높게 평가된다고 알려져 있다.[3]

이에 관련된 연구로 Fisk등[4]은 DOE-2를 이용하여 압출환기시스템과 혼합환기시스템의 차이점을 에너지소비량과 실내의 온열환경측면에서 비교하였다. 압출환기시스템이 혼합환기시스템보다 환기횟수를 증가시켜 거주영역의 공기질을 향상시키지만 에너지소비량은 유사함을 나타내었다. 그러나 냉방부하가 40w/m²을 초과하는 경우는 냉각 panel 등을 추가로 설치하여야 하므로 초기투자비가 많이 든다고 발표하였다. Andersson등[5]은 측정을 통하여, 압출환기시스템이 혼합환기시스템보다 환기효율을 향상시키므로 실내의 쾌적을 쉽게 유지시킬 수 있는 시스템으로 보고하였다. 그러나 압출환시스템중 천정급기는 부력과 반대방향으로 공기유동을 유인시키므로 바닥급기의 경우보다 불안전한 유동형태를 나타낸다.[1]

본 연구의 목적은 혼합환기와 압출환기시스템이 동반된 KBS공개홀에서 재실자들의 온열환경에 대한 주관적 반응을 설문조사를 통해 평가하고, 동시에 실측으로 측정된 물리적 인자를 PMV모델에 적용시켜 구한 온열환경과 비교 평가하는데 있다.

2. KBS공개홀의 개요

2.1 KBS공개홀의 환기설비

본 연구의 온열환경평가를 위해 선정된 KBS공개홀의 열원장비선정을 위한 내부부하 및 평면도는 Table 1 및 Fig.1에 나타내었다.

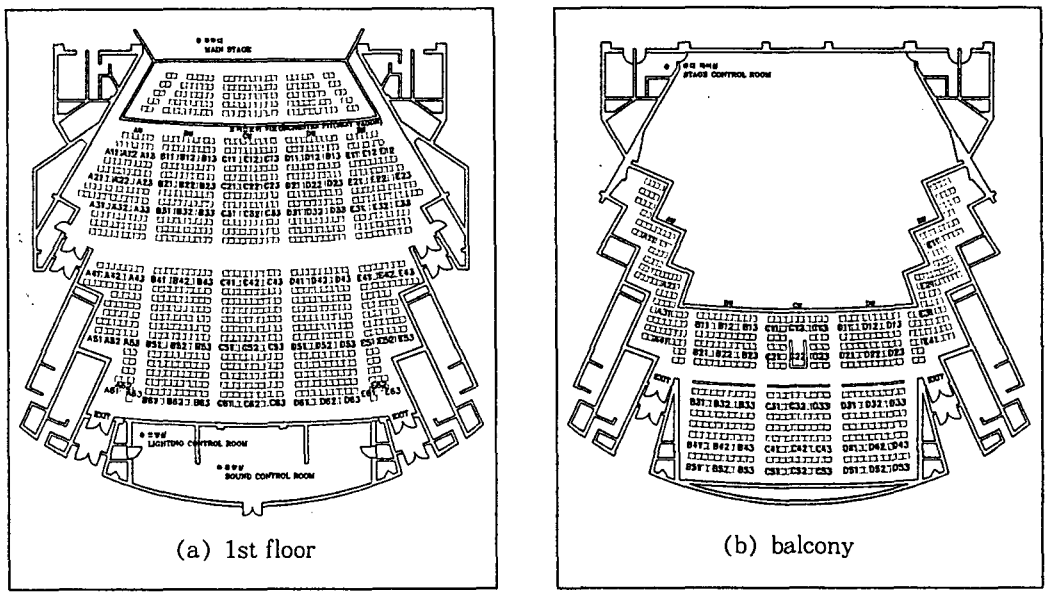
Fig.2는 KBS공개홀의 급기 및 배기구의 위치를 나타내고 있다. 천정고가 높은 무대부근의 객석은 하향압출환기방식을 적용하였고 중2층의 상부와 하부는 혼합환기방식을 적용한 단일덕트 정풍량방식의 공조를 수행하고 있었다. 실내의 부하는 310,000 kcal/hr이고, 실내현열비(RSHF)가 0.59이며 급기풍량은 63,000CMH이다. 환기구는 무대부를 기준으로 좌·우대칭으로 설치되어 있다.

2.2 KBS공개홀 공조기 운전조건

온열환경 요소의 측정을 실시한 1997년 5월 3일의 외기최대온도는 31℃였으나, 측정시간인 오후 5시의 공조기 운전은 중간기의 운전방식인 전외기방식을 취하고 있었고, 공조기운전을 위해 설정된 환기온도는 24℃이다.

Table 1 Interior load and buiding outline of KBS open hall

Item	Specification	
floor area	1st floor	676m²
	balcony	254m²
typical ceiling height	1st floor	15m
	balcony	5m
number of seats	1st floor	1,300
	balcony	616
lights	500W/m²	
power	300W/m²	
people	1st floor	1.9c/m²
	balcony	2.4c/m²



(a) 1st floor (b) balcony

Fig.1 A plan and measurement location of KBS open hall

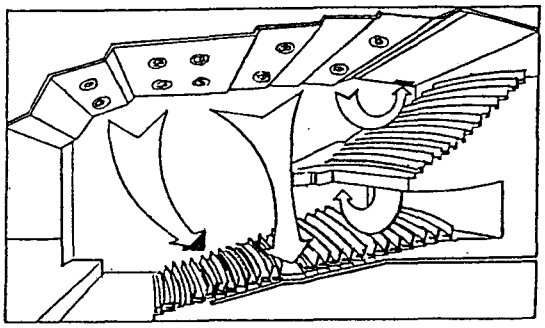


Fig.2 Perspective view of the supply and extract device

3. 온열환경 측정 및 측정방법

KBS공개홀의 온열환경을 평가하기 위해서 요구되는 물리적 인자(건구온도, 평균복사온도, 상대습도, 기류속도)와 인체인자(의복착의량 및 활동량)를 구하기 위해 Fig.1에 표기된 130지점에 대해 측정 및 설문조사를 동시에 실시하였다.

3.1 측정방법 및 장비

온열환경 요소의 측정은 재실자가 모두 착석하여 30분이 경과된 후부터 실시하였다. 실내온도 및 기류속도의 측정은 ASHRAE표준[6]에서 권장하는 착석시 온열환경 요소의 측정높이인 바닥면으로부터 0.1m(발목), 0.6m(가슴) 및 1.1m(머리)의 높이에서 실시하였다. 단, 공개홀과 같은 대공간의 온열환경요소 측정은 공간이 큰 관계로 각 지점에서의 측정이 동시에 이루어지기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 측정치의 시간에 대한 오차를 최소한으로 줄이기 위해 A, B, C, D 및 E열의 앞좌석으로부터 후면으로 5인이 동시에 측정을 진행하였으며 모든 측정지점의 측정을 완료하는 시간은 2시간정도 소요되었다. 측정을 위해 사용된 장비 및 측정으로 구한 측정값은 다음과 같다.

3.1.1 건구온도

건구온도의 측정을 위해 온도와 기류속도가 동시에 측정되는 열선풍속계를 사용하였다. 측정장비별 온도차 보정은 실험실에서 실시하였으며 보정치는

최대 ±0.5℃이다. 측정장비의 보정은 신뢰성을 가지기 위해 최근에 보정을 실시한 열선풍속계를 기준으로 실시하였으며 측정된 온도는 평균값을 기록하였다.

3.1.2 기류속도

기류속도를 측정하기 위해 사용한 열선풍속계는 감지부의 방향에 따라 감도가 다른 지향성을 가지므로 이러한 지향성을 최소화하기 위해 측정지점에서 감지부를 회전시켜 최대속도가 측정되는 방향에서 측정을 실시하였다. 측정된 기류속도는 평균값을 기록하였다. KBS공개홀에서 측정된 기류속도는 0.1~0.9m/sec의 분포를 보였는데, 대부분 공조기의 운전시간에는 중2층의 후면부를 제외하곤 대부분의 지점에서 0.1~0.3m/sec의 안정된 분포를 나타내었다.

3.1.3 상대습도

상대습도를 구하기 위해서 아스만 통풍식 건습구 온도계를 사용하였다. 상대습도는 위치에 따라 크게 차이가 없을 것으로 판단하여 1층에 9개소, 중2층에 6개소에 대해 측정을 하였고 각 층의 상대습도는 평균치를 사용하였다. 측정결과 1층의 평균상대습도는 40%, 중2층의 평균상대습도는 39%로 나타났다.

3.1.4 평균복사온도

KBS공개홀의 경우, 벽체의 형상이 불규칙하고 인체와 면하는 6면의 평균온도가 큰 차이가 없으므로 형상계수를 고려하지 않고 식(1)을 사용하여 구한 면적평균 가중온도를 본 연구의 평균복사온도로 가정하였다. 벽체온도는 적외선표면온도측정기(X-R Gun)를 이용하여 측정지점에서 6면의 벽체온도를 각각 구하였다. 각 층의 벽면에서 측정된 평균온도는 Table 2 및 Table 3과 같으나 바닥의 평균온도가 높으므로 인체의 복사영향이 바닥면에서 큼을 알 수 있다.

$$T_{mrt} = \frac{\sum_{i=1}^{n}}{A_i T_i} \quad (1)$$

식(1)을 사용하여 구한 1층과 2층의 평균복사온도는 각각 16.21℃와 20℃로 나타났다.

3.2 재실자의 주관적 반응 평가를 위한 설문조사

설문조사는 Fig.1에 표기된 측정지점에 대해 설문지를 배포하여 실시하였다. 설문지의 내용은 재실자의 주관적 쾌적감을 판단하기 위해 좌석의 위치, 설문지의 작성시 착석후 경과시간, 개인적인 사항, 국소적인 불쾌감, 전체 쾌감요인 등으로 구분하여 작성하였다. 설문지 작성은 착석후 30분 경과한 뒤 작성토록 유도하였으나 실제 작성된 평균시간은 착석후 28분이다. 배포된 설문지는 1층에서만 43부가 회수되었고, 이중 타당하지 않게 응답한 5부의 설문지를 제외한 37매의 설문응답을 바탕으로 설문조사결과를 분석하였다. 설문응답자의 구성을 살펴보면 여자(56%)가 남자(44%)에 비해 약간 높은 분포를 보였다. 연령분포는 20대에서 60대까지 분포되어 있으며, 30대(40%), 20대 이하(27%), 60대(20%), 40대(13%) 순이었고 평균연령은 38세로 나타났다. 외복착의량(clo)은 연령층이 다양한 분포를 보임에 따라 0.34~0.83의 다양한 분포를 보였으며 평균의복착의량은 0.57clo이다. 그러나 착석의자의 재질이 두껍고 푹신하여 신체가 접하는 부분이 단열 및 축열의 역할

Table 2 Average temperature of walls for 1st floor($\triangle T_m$(℃)=5.6)

location	front wall	rear wall	left wall	right wall	ceiling	floor
temperature	17.3	15.9	13.1	13.5	16.6	18.7

Table 3 Average temperature of walls for balcony($\triangle T_m$(℃)=3.8)

location	front wall	rear wall	left wall	right wall	ceiling	floor
temperature	18.8	19.2	18.8	18.8	21.1	22.6

을 하므로 재실자의 외피를 얇은 경우와 두꺼운 경우의 중간값을 의복착의량으로 선택하여 평균의복착의량에 0.19clo의 가중치를 더하였다. 또한 KBS 공개홀은 공연장이어서 간헐적으로 노래 및 박수를 치게 되므로 활동량은 1.3met로 설정하였다.

3.3 PMV모델

측정과 설문조사로 구한 물리적인자 및 인체인자를 조합하면 재실자의 온열민감도를 이론적으로 예측할 수 있다. 본 연구에서는 설문조사를 통하여 응답한 주관적 쾌적감을 이론식과 비교하기 위해 Fanger[7]에 의해 제안된 PMV모델을 적용하였다.

$$PMV=(0.303\exp(-0.036m)+0.028)L_b \quad (2)$$

$$PPD=100-95\exp(-0.03353PMV^4 +0.2179PMV^2) \quad (3)$$

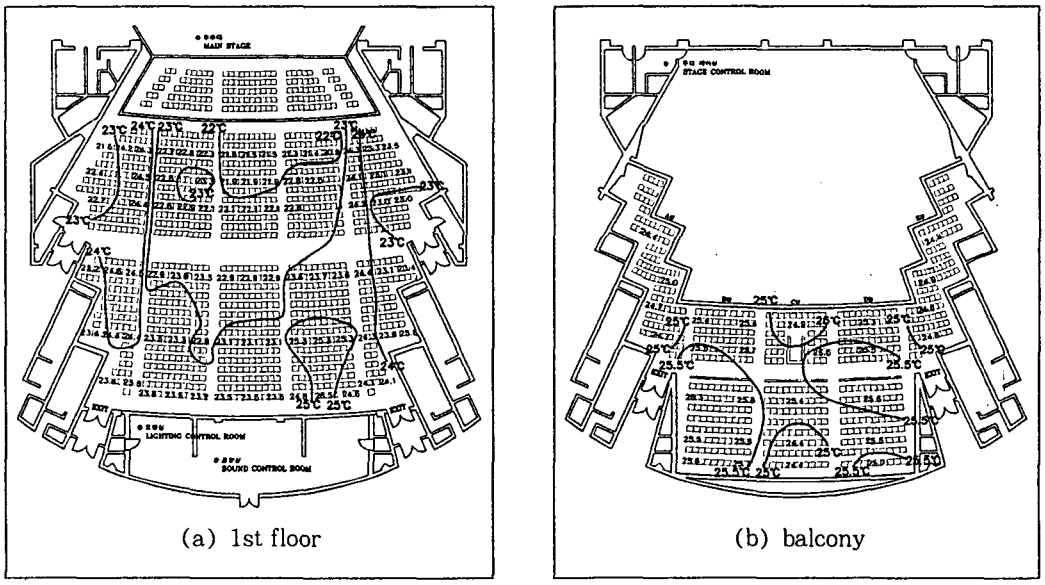
본 연구에서 적용한 PMV모델에서 쾌적영역의 판단근거는 ISO에서 온열환경지표로 추천하는 PPD $<10\%$, $-0.5<PMV<0.5$인 경우를 쾌적(중성점)한 상태로 판단하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 KBS공개홀의 온열환경을 평가하기 위해 물리적인자 4가지와 인체인자 2가지를 측정하여 구한 PMV값과 재실자가 응답한 쾌적감과 비교하였다.

Fig.3(a), B(b)는 측정위치가 바닥으로부터 1.1m 높이일 때 KBS공개홀 1층과 중2층에서 측정한 등온선분포를 나타내고 있다. 1층의 객석중앙부근의 온도는 무대부근이 20.9~22.8℃이고 음향실에 근접한 부근은 22.9~26.5℃로써 뒷부분의 미소하게 높은 온도를 나타낸다. 1층과 중2층의 온도분포는 거의 좌·우대칭형태를 나타내고 있다. 좌측과 우측온도분포의 국소불균형은 급기와 환기덕트의 풍량발란싱이 균등하지 않기 때문이다.

Fig.4는 바닥면으로부터 1.1m 높이인 경우에 B열, C열 및 D열 중앙부의 거리변화에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 무대부근의 온도분포가 음향실이 위치하는 후면의 온도보다 낮은 온도를 나타냈으며, 최대 온도차는 5.1℃이다. 또한, 중2층의 온도분포가 1층의 온도분포보다 약간(2℃) 높



(a) 1st floor (b) balcony

Fig.3 Isotherms of 1st floor and balcony for KBS open hall at the 1.1m over floor

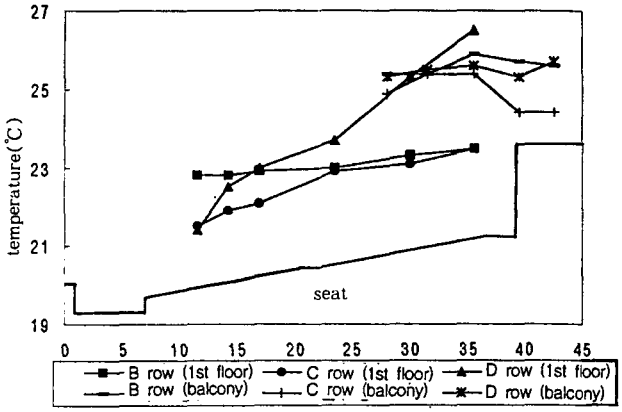


Fig.4 Air temperature versus distance for the the center of B, C and D row at the 1.1m above floor

Table 4 Air temperature of the low and high level for 1st floor at A_{13}, C_{23} and E_{33}

location / height(m)	A_{13}	C_{23}	E_{33}
0.1	22.2	22.1	22.9
1.1	22.7	22.1	23.0

Table 5 Air temperature of the low and high level for balcony at B_{15}, C_{25} and E_{35}

location / height(m)	B_{15}	C_{25}	E_{35}
0.1	25.4	23.8	25.4
1.1	25.5	24.4	25.5

게 나타났다. 이는 압축환기시스템으로 설계된 1층 무대부근을 제외한 1층 후면과 중2층은 급기구와 환기구가 천장에 존재하는 혼합환기시스템이므로 재순환영역을 발생되어 환기효과를 감소시키기 때문이다.

Table 4와 Table 5는 측정지점중 1층의 3행과 2층의 5행에 있는 좌석에서 수직온도차를 나타내고 있다. 측정된 대부분의 좌석에서 수직거리 0.1m와 1.1m 지점의 상하최대온도차는 0.7℃로써 1.1m 지점의 온도가 전체적으로 높게 나타나며 ASHRAE에서 권장하는 상하온도차 3℃내에 존재하고 있다. 또한 1층의 경우, C열보다 측면환기구가 인접한 A열과 E열의 좌석이 1.1m 지점의 온도가 0.1m 지점보다 높게 나타나고 있으나 중2층은 전체적으로 1.1m 지점이 높게 나타나고 있다.

Table 6은 설문조사에 의해 얻은 주관적인 국소 온열감의 비율을 재실자가 노출된 온도에 대해 나타낸 것으로 발목부분의 온열감은 쾌적(중성점)하다(82%), 약간춥다(12%), 약간덥다(6%) 순서로 응답하였으며, 얼굴의 온열감은 쾌적(중성점)하다(88%), 약간덥다(12%) 순서로 응답하였다. 이중 얼굴부분과 발목부분에서 모두 쾌적감을 느끼는 재실자는 전체의 70%인 것으로 나타났다. 실온이 22.6~23.5℃ 범위에서 약간덥다고 응답한 경우는 발목부분이 6%(중성점 : 58%), 얼굴부분이 9%(중성점 : 82)이지만 25.1~26.6℃ 범위에서 약간 덥다고 응답한 경우는 얼굴부분이 3%(중성점 : 6%)이다. 이는 재실자가 높은 온도에 불쾌적한 반응을 많이 보임을 알 수 있다.

Fig.5는 측정으로 구한 물리적인자 및 인체인자

Table 6 Ratio of the thermal sensation votes versus air temperature

Temp.(℃) / TSV	22.1-22.5	22.6-23.0	23.1-23.5	23.6-24.0	25.1-25.5	26.1-26.5	합 계
−1	face / ankle	6	6				12
0	9	38 / 35	44 / 23	6	3 / 6	3 / 3	88 / 82
1		3 / 6	6		3		12 / 6

TSV : −1(slightly cold), 0(neutral), 1(slightly warm)

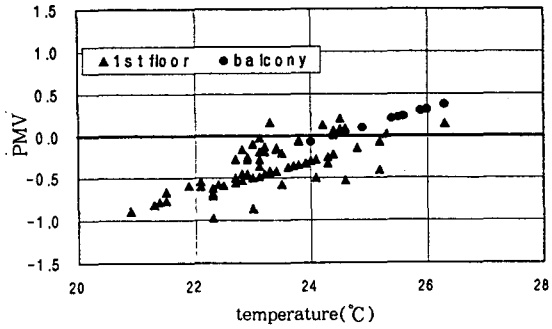


Fig.5 PMV values versus air temperature

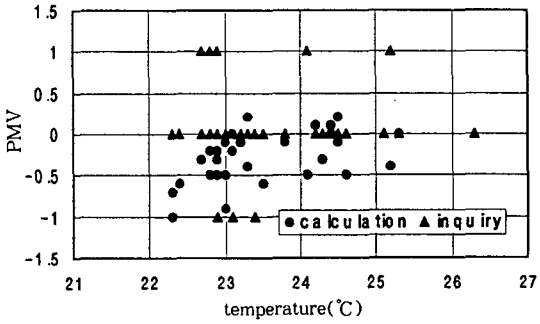


Fig.6 Comparison of PMV values between calculation and inquiry

를 PMV모델에 적용시켜 계산한 PMV분포를 나타내고 있다. PMV분포는 1층의 경우, 재실자의 67%가 쾌적감을 나타내고 있으나 2층의 경우는 100%가 쾌적감을 나타내고 있다. 실온이 23℃이하에서는 쾌적영역을 벗어나 약간 추운 온열감(PMV<−0.5)을 나타내고 있다.

Fig.6은 설문지가 회수된 지점의 주관적 온열감과 이와 동일한 지점에서 측정된 물리적인자를 이용하여 이론적으로 계산된 PMV값과 비교한 것이다. 설문조사에 의해 7단계로 구분되어져 응답한 온열감은 쾌적(중성점)하다고 응답한 경우가 대부분이었고, 약간 덥다고 응답한 경우가 조금 많았다. 그러나 PMV모델에 의해 산정된 온열감도 쾌적(중성점)범위인 −0.5<PMV<0.5사이에 대부분 포함되지만, 23℃이하에서는 약간 춥다고 느끼는 온열감도 존재하고 있다. 이처럼 설문응답결과와 예상 PMV값간의 차이가 발생하는 것은, PMV모델이 열부하의 증감에 따른 인체의 부하적응성을

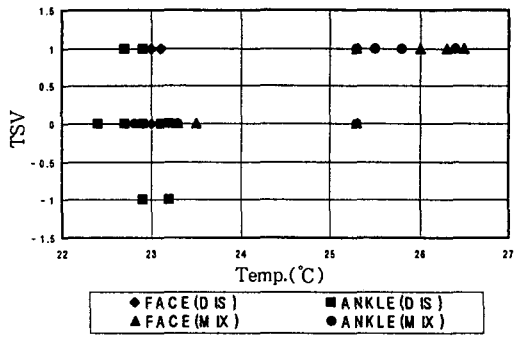


Fig.7 Comparison of TSV values between displacement and mixing ventilation system

고려하지 않았기 때문으로 사료된다.

Fig.7은 설문조사를 통해 평가된 국소온열감을 압출환기시스템과 혼합환기시스템의 영향을 받는 지점에 대해 비교하였다. 재실자가 노출된 곳의 온도는 혼합한기시스템인 경우가 대부분 25℃이상이며 압출환기시스템의 경우는 24℃이하로 나타났다. 압출환기시스템이 설치된 위치에서 발목부위가 춥다고 응답한 재실자가 존재한다. 이는 압출환기시스템이 혼합환기시스템보다 환기횟수를 향상시켰기 때문이다.

5. 결 론

대공간인 KBS공개홀에서 쾌적감에 영향을 주는 물리적인자 및 인체인자를 측정하고 설문조사를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 홀의 온도분포는 홀의 중심을 기준으로 하여 1층 및 중2층에서 좌·우대칭인 온도분포를 나타내고 있다.

(2) 객석에서의 상하온도차는 최대 0.7℃를 나타내고 있다.

(3) 무대부근(앞)과 음향실부근(뒤)의 최대온도차이는 5.1℃를 나타내고 있다.

(4) 1층의 경우, PMV모델로 구한 쾌적(중성점)은 67%로 나타났으나, 설문조사로 얻은 주관적 전체쾌적감은 70%이다.

(5) 설문조사로 얻은 1층의 국소적인 불쾌감은 약간덥다고 응답한 경우가 발목부분이 6%, 얼굴부

분이 12%를 나타내고 있으며 약간춥다고 응답한 경우는 발목부분만 12%로 나타났다. 이는 높은 온도에서 불쾌감을 많이 느끼는 것으로 판단된다.

(6) 23℃이하에서는 PMV모델로 구한 온열감이 설문조사로 얻은 주관적 온열감보다 약간 춥다고 나타내고 있다.

(7) 압출환기시스템이 혼합환기시스템보다 환기횟수를 향상시켜 재실자에게 낮은 온도를 제공하고 있다.

참 고 문 헌

1. Awbi, H.B., 1991, "Ventilation of buildings", Great Britain, E&F SPON.
2. Svensson, A.G.L., 1989, "Nordic experience displacement ventilation systems", of ASHRAE Trans., Vol. 95, Part 2, pp. 1013~1017.
3. Benton, C.C., Bauman, F.S., and Fountain, M.E., 1988b, "A field measurement system for the study of thermal comfort.", Final Report, ASHRAE Research Project Rp-462, pp. 623~633.
4. Fisk, W.J., Seppanen, O.A., Eto, J. and Grimsrud, D.T., 1989, "Comparison of conventional mixing and displacement air conditioning and ventilating systems in U.S. commercial buildings", ASHRAE Trans., Vol 95, Part 2, pp. 232~238.
5. Andersson, R., Boman, C.A. and Sandberg, M., 1984, "Indoor climate problems in a kindergarten and how they were solved", Proceedings Indoor Air 1984, Vol 3, pp. 1012~1019.
6. ASHRAE, 1992, ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, "Thermal environmental conditions for human occupancy", Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditing Engineers, INC.
7. Fanger, P.O., 1982, "Thermal comfort", Robert E. Krieger Publishing Company, Florida.