공기조화 냉동공학회 '97하계학술발표회 논문집 pp.672~677

97-S-107

혼합환기와 하향 압출환기시스템이 동반된 KBS공개홀의 온열환경 평가

(Thermal Environment Evaluation of KBS Open Hall Combined Mixing Ventilation and Downward Displacement ventilation systems)

권용일*, 홍민호, 정차수, 권순석
(신흥전문대), (한일엠이씨), (동아대)

Keywords
downward displacement ventilation(하향압출환기), mixing ventilation(혼합환기),
air exchange efficiency(공기회전효율), 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 heights and spaces. Mixing ventilation and downward displacement ventilation system were used for the ventilation system in KBS open hall. For evaluating the thermal environment, temperature and velocity in the hall were measured at 130 locations at low level(0.1m), mid level(0.6m), high level(1.1m) and relative humidity was measured at 15 locations. The subjective thermal sensation of the occupant was got from the questionnaire survey at the location measured physical elements.

1. 서 론

환기를 위해 설치된 급·배기구의 위치에 따라 환기시스템은 혼합환기, 압출환기 시스템으로 분류되며, 압출환기시스템은 혼합환기 시스템에 비해 온열환경과 실내의 공기질을 향상시키는 장점이 있다.

압출환기(displacement ventilation)시스템은 1970년대초 층고가 높은 공장의 쾌적환경을 조성하기 위해 처음 도입되었다. 압출환기시스템은 환기효율이 높은 반면 draft발생없이 제거 할 수 있는 부하(30w/m^{2}이하)가 적다는 문제점을 동반하고 있다.[1)]

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

새로 도입되는 환기시스템의 타당성을 검증하기 위해 이용되는 세가지 요소는 공기회전효율, 환기효율 및 열쾌적이고, 재실자의 열쾌적에 대한 반응은 6가지의 인자에 의해 복합적으로 영향을 받으며, ASHRAE standard에서는 표준 PMV모델을 7단계로 분류하였다.

현재 ASHRAE에서 규정하고 있는 PMV모델의 경우 사람이 정지된 상태에서 균일한 열환경에 노출되어 있는 실험실에서 구한 데이터이므로, 동적으로 활동하는 인체의 쾌적(중립)상태를 PMV모델에 적용하여 평가하면 인체가 느끼는 쾌적(중립)상태보다 온도가 높게 평가된다고 알려져 있다.[2)]

이에 대한 관련 연구로 Fisk등[3)]은 DOE-2를 이용하여 압출환기시스템과 혼합환기시스템의 차이점을 에너지소비량과 실내의 온열환경측면에서 비교하였다. 압출환기시스템이 혼합환기시스템보다 환기횟수를 증가시켜 거주영역의 공기질을 향상시키지만 에너지소비량은 유사함을 나타내었다. 그러나 냉방부하가 40w/m^{2}을 초과하는 경우는 냉각 panel 등을 추가로 설치하여야 하므로 초기투자비가 많이 든다고 발표하였다. Andersson등[4)]은 측정을

통하여, 압출환기시스템이 혼합환기시스템보다 환기효율을 향상시키므로 실내의 쾌적을 쉽게 유지시킬수 있는 시스템으로 보고하였다. 그러나 압출환기시스템중 천정급기는 부력과 반대방향으로 공기유동을 유인시키므로 바닥급기보다 불안전한 유동형태를 나타낸다.[5]

본 연구는 혼합환기와 압출환기시스템이 동반된 KBS공개홀에서 재실자들의 온열환경에 대한 주관적 반응을 설문조사를 통해 파악하고, 실측으로 측정된 물리적 인자를 PMV모델에 적용시켜 온열환경을 비교 평가하는데 있다.

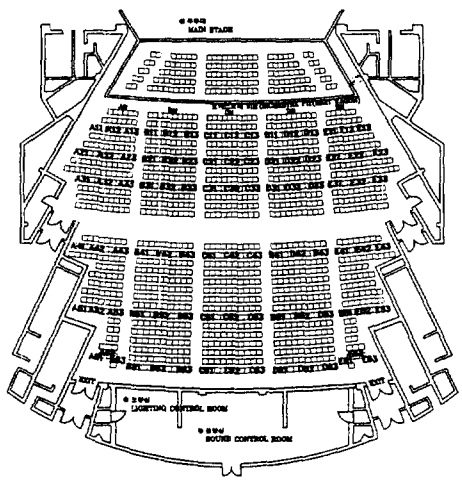
2. KBS공개홀 개요.

2.1 KBS공개홀의 환기설비

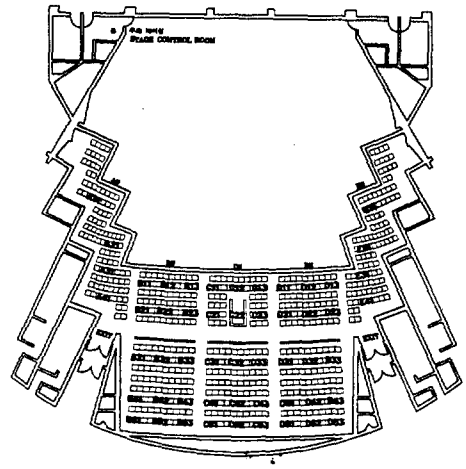
본 연구의 온열환경평가를 위해 선정된 KBS공개홀의 개요 및 평면도는 표1 및 Fig.1에 나타내었다.

Table1 Interior load in KBS open hall

면 적	1 층	676m²	조명발열	500w/m²	
	2 층	254m²			
대 표 천정고	1 층	15m	기기발열	300w/m²	
	2 층	5m			
객석수	1 층	1300석	재실인원	1층	1.9인/m²
	2 층	616석		2층	2.4인/m²



(A) 1st floor plan



(B) balcony plan

Fig.1 A plan and measuring points in KBS open hall

Fig.2에는 KBS공개홀의 급배기구의 위치가 나타나 있다. 천정고가 높은 무대부근의 객석은 하향압출환기방식을 채택하였고 중2층의 상부와 하부는 혼합환기설비방식을 채택하였다. 환기구는 무대부를 기준으로 좌, 우대칭으로 설치되었다.

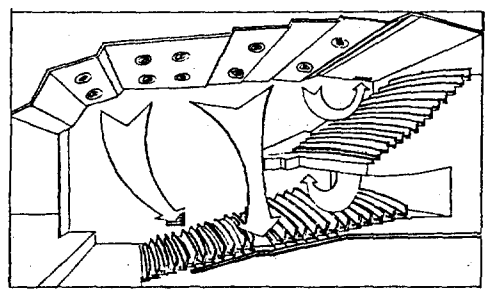


Fig.2 Perspective view of the supply and extract device

2.2 KBS공개홀의 공조기 운전조건

온열환경 요소의 측정을 실시한 1997년 5월3일의 외기최대온도는 31℃였으나, 중간기의 운전방식인 전외기방식을 취하고 있었고, 공조기운전을 위한 실내의 설정온도는 24℃이다.

3. 온열환경요소 측정 및 재실자의 주관적 반응조사

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 실시하였다.

3.1 측정방법 및 장비

온열환경 요소의 측정은 재실자가 모두 착석한 이후부터 실시하였다. 온도 및 기류속도의 측정은 ASHRAE standard[6]에서 권장하는 착석시 온열환경 요소의 측정높이인 바닥면으로부터 0.1m(발목), 0.6m(가슴) 및 1.1m(머리)높이에서 실시하였다. 단, 공개홀과 같은 대공간의 온열환경요소 측정은 실험실조건과는 달리 재실자의 활동이 지속적으로 이루어지고, 공간이 큰 관계로 각 지점에서의 측정이 동시에 이루어지기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 측정기간내의 시간에 의한 오차를 최소한으로 줄이기 위해 A, B, C, D, E열의 앞좌석으로부터 뒷편으로 5인이 동시에 측정을 진행하였다. 측정을 위해 사용된 장비 및 측정으로 구한 측정값은 다음과 같다.

3.1.2 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.

3.2 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 공조기 가동시작시의 2층 후면부를 제외하곤 대부분의 지점에서 0.1~0.3m/s의 안정된 분포를 나타냈다.

3.1.3 상대습도

상대습도를 구하기 위해서 아스만 통풍식 건습구 온도계를 사용하였으며, 상대습도는 위치에 따라 크게 차이가 없을 것으로 판단하여 1층에 9개소, 2층에 6개소에 대해 측정을 하였고, 각 층의 상대습도는 평균치를 적용하였다. 측정결과 1층의 평균 상대습도는 40%, 2층의 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 적외선 표면온도측정기(X-R Gun)를 이용하여 측정지점에서 6면의 벽체온도를 각각 구하였다.

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

식(1)을 사용하여 구한 1층과 중2층의 평균복사온도는 각각 16.2℃와 20.0℃이다.

3.2 재실자의 주관적반응 평가를 위한 설문조사

설문조사는 Fig.1에 표기된 측정지점에 대해 설문지를 배포하여 실시하였다. 설문지의 내용은 재실자의 주관적 쾌적감을 판단하기 위해 좌석의 위치, 설문지 작성시 착석후 경과시간, 개인적인 사항, 국소불쾌적, 전체 쾌적요인 등으로 구분하여 작성하였다. 설문지 작성은 착석후 30분 경과한 뒤 작성토록 유도하여, 실제 작성된 평균시간은 착석후 28분인 것으로 나타났다. 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%)의 순이었고, 평균연령은 38세로 나타났다. 의복착의량(clo값)은 연령층이 분포를 보임에 따라 0.34 - 0.83의 분포를 보였으며 평균 의복착의량은 0.57clo이

다. 그러나 착석의자의 재질이 두껍고 푹신하여 신체가 접하는 부분에 단열 및 축열의 역할을 하므로 재실자의 외피를 얇은 경우와 두꺼운 의복착의량의 중간값을 선택하여 평균 의복착의량에 0.19clo의 가중치를 더하였다. 또한 KBS공개홀은 공연장이어서 간헐적으로 노래 및 박수를 치게 되므로 활동량은 1.3met로 설정하였다.

3.3 PMV모델

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

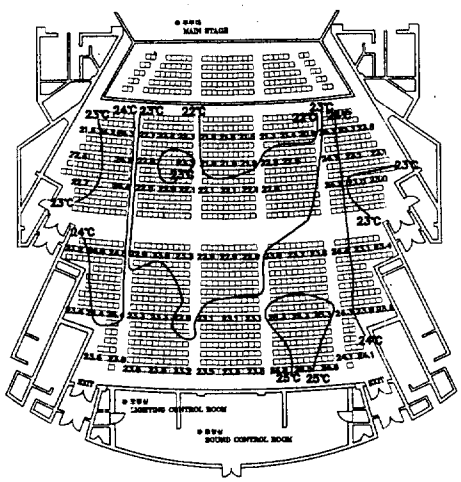
$$PMV=(0.303\exp(-0.036M)+0.028)L_b \quad (2)$$

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

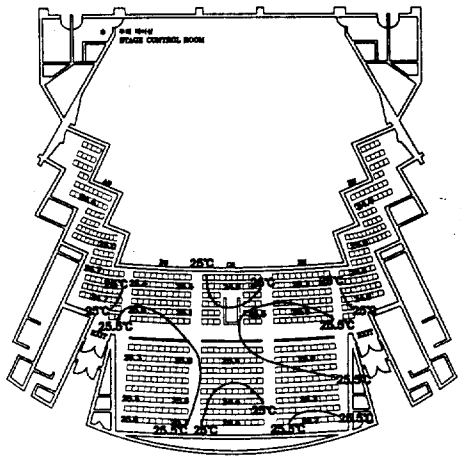
본 연구에서 구한 PMV-PPD값중, ISO에서 온열환경 지표로 추천하는 PPD<10%, -0.5<PMV<0.5인 경우를 쾌적(중립)한 상태로 판단하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig.3(A), (B)는 측정위치가 바닥으로부터 1.1m 높이일때 KBS공개홀 1층과 중2층에서 측정한 등온선분포를 나타내고 있다. 1층과 중2층의



(A) 1st floor



(B) balcony

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

온도분포는 국소불균형을 나타내지만 거의 좌, 우대칭형태를 나타내고 있다. 좌측과 우측 온도분포의 국소불균형은 급기와 환기덕트의 풍량balancing이 균일하지 않기 때문이다.

Fig.4는 B열, C열 및 D열 중앙부에서의 거리변화에 따른 온도분포를 나타낸 것으로 1.1m 높이에서 측정한 값을 적용하였다.

무대부근의 온도가 음향실이 존재한 뒷부분의 온도보다 낮은 온도를 나타내며 최대온도차는 5.1℃정도로 나타나고 있다. 또한 중2층의 온도분포가 1층의 온도분포보다 미소하게 높게 나타났다.

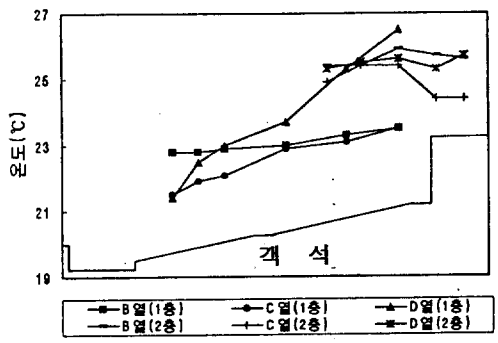


Fig.4 Air temperature versus distance for the center of B, C and D column at the 1.1m above floor

이는 압출환기시스템으로 설계된 1층 무대 부근을 제외한 1층 뒷부분과 중2층의 급기구와 환기구가 천정에 존재하는 혼합환기시스템이기 때문이다.

표2와 표3은 측정지점중 1층의 3행과 2층의 5행에 있는 좌석에서의 수직온도차를 나타내고 있다. 측정된 대부분의 좌석에서 수직거리 0.1m와 1.1m지점의 상하 최대온도차는 0.7℃로써 1.1m지점의 온도가 전체적으로 높게 나타나며 ASHRAE에서 권장하는 상하온도차 3℃내에 존재하고 있다.

Table2 Air temperature for low and high level at A_{13}, C_{23} and E_{33} of 1st floor

locat. / height	A_{13}	C_{23}	E_{33}
0.1m	22.2	22.1	22.9
1.1m	22.7	22.1	23.0

Table3 Air temperature for low and high level at B_{15}, C_{25} and E_{35} of balcony

locat. / height	B_{15}	C_{25}	E_{35}
0.1m	25.4	23.8	25.4
1.1m	25.5	24.5	25.5

표4는 설문조사에 의해 얻은 주관적 국소온열감의 비율을 재실자가 노출된 온도에 대해 나타낸 것으로 발목부분의 온열감은 쾌적(중립)하다(82%), 약간춥다(12%), 약간덥다(6%)순서로 응답하였으며, 얼굴의 온열감은 쾌적(중립)하다(88%), 약간 덥다(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%(중립:58%), 얼굴부분이 9%(중립:82%)이지만 25.1~ 26.6℃범위에서 약간덥다고 응답한 경우는 얼굴부분이 3%(중립:6%)이다. 이는 재실자가 높은 온도에 불쾌적한 반응을 많이 보임을 알 수 있다.

Table4 Ratio of the thermal sensation votes of occupancy versus air temperature

temp. \ TSV	-1	0	1
22.1 ~ 22.5	face / ankle	/ 9	
22.6 ~ 23.0	/ 6	38 / 35	3 / 6
23.1 ~ 23.5	/ 6	44 / 23	6 /
23.6 ~ 24.0	/	/ 6	/
25.1 ~ 25.5	/	3 / 6	3 /
26.1 ~ 26.5	/	3 / 3	/
summation	/ 12	88 / 82	12 / 6

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

Fig.5는 측정으로 구한 물리적인자를 PMV모델에 적용시켜 구한 PMV분포를 나타내고 있다. PMV분포는 1층의 경우, 재실자의 67%가 쾌적감을 나타내고 있으나 2층의 경우는 100%가 쾌적감을 나타내고 있다. 쾌적(중립)

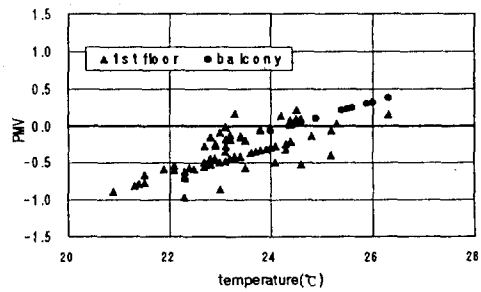


Fig.5 PMV values versus air temperature

영역을 벗어나 약간추운 온열감(PMV<-0.5)은 23℃이하에서 대부분을 차지하고 있다.

Fig.6은 설문지가 회수된 지점의 주관적온열감과 이와 동일한 지점에서 측정된 물리적인자를 이용하여 이론적으로 계산된 PMV값을 비교한 것이다. 7단계의 온열감으로 구분된 온열감에 대한 응답은 쾌적(중립)하다고 응답한 경우가 대부분이었고, 약간덥다고 응답한 경우가 약간춥다고 응답한 경우보다 조금 많다. 그러나, PMV모델에 의해 산정된 온열감

도 쾌적(중립)범위인 -0.5<PMV<0.5사이에 대부분 포함되지만, 23℃이하에서는 약간춥다고 느끼는 온열감도 존재한다. 이처럼 설문응답 결과와 예상PMV값간의 차이가 발생하는 것은 PMV모델이 열부하의 증감에 따른 인체의 부하적응성을 고려하지 않았기 때문이다.

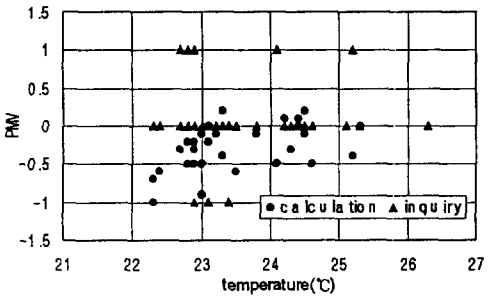


Fig.6 Comparison of PMV values between calculation and inquiry

5. 결 론

대공간인 KBS공개홀에서 쾌적감에 영향을 주는 물리적인자 및 인체인자를 측정하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 홀의 온도분포는 홀의 중심을 기준으로 하여 1층 및 중2층에서 좌, 우대칭인 온도분포를 나타내고 있다.
2) 객석에서의 상하 온도차는 최대 0.5℃를 나타내고 있다.
3) 무대부근(앞)과 음향실부근(뒤)의 최대온도차는 5.1℃를 나타내고 있다.
4) 1층의 경우, PMV모델로 구한 쾌적(중립)은 67%로 나타났으나, 설문조사로 얻은 주관적 전체쾌적감은 70%이다.
5) 설문조사로 얻은 1층의 국소불쾌적감은 발목부분은 6%가 약간덥고, 12%가 약간춥다고 응답하였다. 그러나 얼굴부분은 12%가 약간덥다고 응답하여, 높은 온도에서 불쾌적감을 많이 느끼는 것으로 나타났다.
6) 23℃이하에서는 PMV모델로 구한 온열감이 설문조사로 얻은 주관적 온열감보다 약간춥다고 나타나고 있다.

6. 참고문헌

1. Svensson, A.G.L., 1989, "Nordic Experience Displacement Ventilation Systems", of ASHRAE Trans., Vol.95, Part 2.
2. 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.
3. 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, part2.
4. 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.
5. Awbi, H.B., 1991, "Ventilation of Buildings", Great Britain, E& F SPON.
6. ASHRAE, 1992, ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, " Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy", Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, INC.
7. Fanger, P.O., 1982, "Thermal Comfort", Robert E. Krieger Publishing Company, Florida.