

냉방시 천장분출 및 바닥분출 공조방식에 따른 열환경 평가

이기섭, 김영일

한국과학기술연구원 기전연구부

서울시 성북구 하월곡동 39-1

kislee@kistmail.kist.re.kr, yikim@kistmail.kist.re.kr

Analysis of Thermal Comfort for Ceiling and Floor Supply Air-conditioning Systems

Kiseop Lee and Youngil Kim

Div. of Mechanical/Control Systems, KIST

39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

kislee@kistmail.kist.re.kr, yikim@kistmail.kist.re.kr

요약

생활수준이 향상됨에 따라 인간의 감성을 생활환경에 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 감성에 영향을 미치는 요인은 다양하나 이 중에서도 열환경은 인간에게 미치는 정도가 어떠한 요인보다도 큰 것으로 알려져 있다. 열환경이라 함은 온도, 습도, 기류, 복사열을 말하며 이 요소들은 인간의 감성과 밀접한 관련을 지닌다. 실내의 열환경은 공조방식에 따라 크게 달라지며 본 연구에서는 천장분출과 바닥분출 공조방식에 따른 실내의 열환경을 평가한다. 두 공조방식을 여름철 사무실 공간에 적용하여 실내의 온도, 기류, 복사온도, PMV의 분포를 수치해석적으로 계산한다. 해석 결과 바닥분출 공조방식이 쾌적성과 에너지 절약면에서 우수함을 알 수 있었다.

기호 설명

Ar	Archimedes수
C_i	난류식과 관련된 상수
cmh	cubic meter per hour
\sqrt{g}	metric tensor의 determinant
p	압력
PMV	예상온열감(predicted mean vote)
Re	Reynolds수

S_i	운동량 source tensor
STD	표준편차
T	온도
t	시간
x_i	좌표 성분 ($i = 1, 2, 3$)
u_i	x_i 성분의 속도
ρ	밀도
τ_{ij}	응력 tensor

서론

실내의 온도, 기류, 복사온도 분포는 급기 및 배기 방식, 부하의 종류 및 위치, 벽체 조건, 외기의 침입 등 여러 요인의 영향을 받는다^(1,2). 그 중 급기 및 배기 위치는 실내의 열유동에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 본 연구에서는 급기 방식에 따른 영향을 고찰한다.

일반적인 사무실의 급배기 방식은 천장에 설치된 급기구에서 분출되어 천장에 설치된 배기구로 배기된다. 반면 바닥분출 공조방식은 바닥으로부터 공조된 공기가 급기된다. 이 경우 재실자나 작업 환경 주변에 대한 국부적인 부하 처리가 가능하므로 열효율은 물론 제어 측면에서 유리하고 거주 지역을 대상으로 집중적으로 공조하므로 재실자가 느끼는 쾌적감이 높다. 이 방식은 필요

한 거주공간만을 공조하므로 에너지 절약에 효과적이다. 또한 급기구의 위치 변경이 용이하므로 실내 구조 변경과 부하 특성 변화에 대한 유연성이 우수하다.

본 연구에서는 여름철 사무실 공간에 천장분출과 바닥분출 공조방식을 적용하여 수치해석적으로 실내의 열환경 분포를 구한다. 이 결과는 열환경 쾌적성 평가지수인 PMV로 환산하여 각 방식의 특성을 비교한다.

열환경 평가지표

열환경의 복합적인 요소가 인체에 미치는 영향을 정량적으로 제시하기 위하여 많은 열환경 평가지표들이 개발되어 왔다^(3,4,5). Fanger⁽⁶⁾는 인체와 주위 환경간의 열평형 방정식으로부터 인체에 대한 정상 상태 열평형 모델을 이론적으로 개발하고, 인체의 열부하를 약 1,300명의 서구인에 대한 환경 실험실에서의 실험결과와 결합하여 인간이 느끼는 온열감을 예측할 수 있는 평가지표인 예상온열감(predicted mean vote, PMV)을 개발하였다. PMV는 인간과 주위 환경의 6가지 열환경 요소들(기온, 습도, 기류속도, 평균복사온도, 대사량, 착의량)을 측정하여 인체의 열평형에 기초한 쾌적 방정식에 대입하여 구한다. PMV 값은 온열감 7단계 척도를 기준으로 -3은 춥다, -2는 서늘하다, -1은 약간 서늘하다, 0은 중립, 1은 약간 따뜻하다, 2는 따뜻하다, 3은 덥다를 의미한다.

평균복사온도는 실제의 불균일한 복사장에서 재실자가 주위 환경과 복사 열교환을 행하는 것과 같은 양의 열교환을 하는 균일한 주위온도를 말한다. 평균복사온도는 평면복사온도와 위상계수를 이용하여 구한다.

수치해석 프로그램

본 연구에서는 상용 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 실내의 열유동을 해석한다. 이 코드는 비조각 격자계를 사용하며 형상이 복잡한 공간에서의 유동해석에 적합하다. 자세한 설명은 사용 설명서 STAR-CD Version 2.3 Manuals⁽⁷⁾에 잘 서술되어 있으

며 여기서는 간단히 지배방정식 및 난류모델에 대해 설명한다. 질량과 운동량 보존법칙을 tensor 형태로 표기하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{(g)}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{(g)}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_i + \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial t} + S_i \quad (2)$$

비정상 상태의 불규칙적인 유동현상인 난류유동 해석은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하며 난류 운동에너지 k 와 소산을 ϵ 은 다음 두 식으로부터 구해진다.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial (\sqrt{g}\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \mu_t (P + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[u_i (P + C_{\epsilon 3} P_B) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

P 및 P_B 는 다음과 같이 정의된다.

$$P = s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad P_B = \frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (5)$$

계산은 비정상으로 가정하여 2400초까지 수행하였으며, 상수의 값들은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.219,$$

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_{\epsilon 3} = 1.44,$$

$$C_{\epsilon 4} = -0.33$$

모사된 사무실 조건

모사 대상 공간은 여름철의 일반적인 사무실로 Figure 1에서 보여주는 바와 같이 가로 6.0m, 세로 4.8m, 높이 2.4m이다. 면적은 28.8m² (약 8.7평), 체적은 69.1m³이다. 내부에는 사람 4인과 컴퓨터가 4대 있으며 사람은 100W/인, 컴퓨터는 400W/대의 열을 발생

시킨다고 가정한다. 천장에는 6.0m 길이의 조명이 2개 설치되어 있으며 각각 320W의 열을 발생시킨다. 벽체는 외부에 접한 한 면(y=4.8m)만 온도 30°C로 유지되며 다른 3면은 실내의 다른 실과 접하고 있으므로 단열 조건을 부여한다. 벽체의 대류열전달계수를 10W/(m²·°C), 실내온도 25°C라고 가정하면 대류열전달식으로부터 외부로부터의 열전달량은 720W이 된다. 컴퓨터, 사람, 조명의 열부하 합은 2640W이다. 따라서 실내에서 처리해야 할 총부하는 3360W이며 단위면적당 열부하는 117W/m²이다. 일반적인 사무실의 냉방부하 설계조건은 120W/m²이므로 모사된 사무실은 보편적인 경우라고 볼 수 있다.

천장분출에서는 천장에 설치된 8개의 급기구, 바닥분출에서는 바닥에 설치된 8개의 급기구를 통하여 실내로 공기가 급기된다. 두 방식 모두 천장에 설치된 8개의 배기구를 통하여 실내의 공기가 배기된다. 수치해석 모사는 천장분출 1가지와 바닥분출 2가지 총 3가지 조건에 대하여 수행되었으며 각각의 급기 공기의 조건이 Table 1에 요약되어 있

다. 여기서 Re는 점성력에 대한 관성력의 비, Ar은 관성력에 대한 부력의 비를 나타내는 무차원수이다. 기타 조건으로는 절대습도 0.01kg/kg, 공기 순환량은 800cmh로 가정한다. 개구를 50%로 가정했을 경우 급기구에서의 초속도는 1.39m/s가 되며 시간당 순환되는 공기량은 실내 체적의 11.6배가 된다.

Table 1 Supply air condition

	ceiling	floor 1	floor 2
Tsupply [C]	18	18	20
Re	17809	17809	
Ar	0.4921	-0.4921	

인체의 대사량은 보통 메트(met)라는 단위로 나타낸다. 1met는 열적으로 쾌적한 상태에서 의자에 앉아 안정을 취하고 있을 때의 대사량으로, 1met=58.2W/m²이다. 모사조건으로는 앉아서 사무일을 할 때의 대사량인 1.2met 또는 70W/m²를 적용한다.

착의량은 clo 단위로 표시하며 1clo는 기온 21C, 상대습도 50%, 기류속도 0.05m/s 이하에서 인체 표면으로부터의 방열량이 1met의 활동량과 평형을 이루는 착의상태에서의 피부표면으로부터 착의표면까지의 열저항값

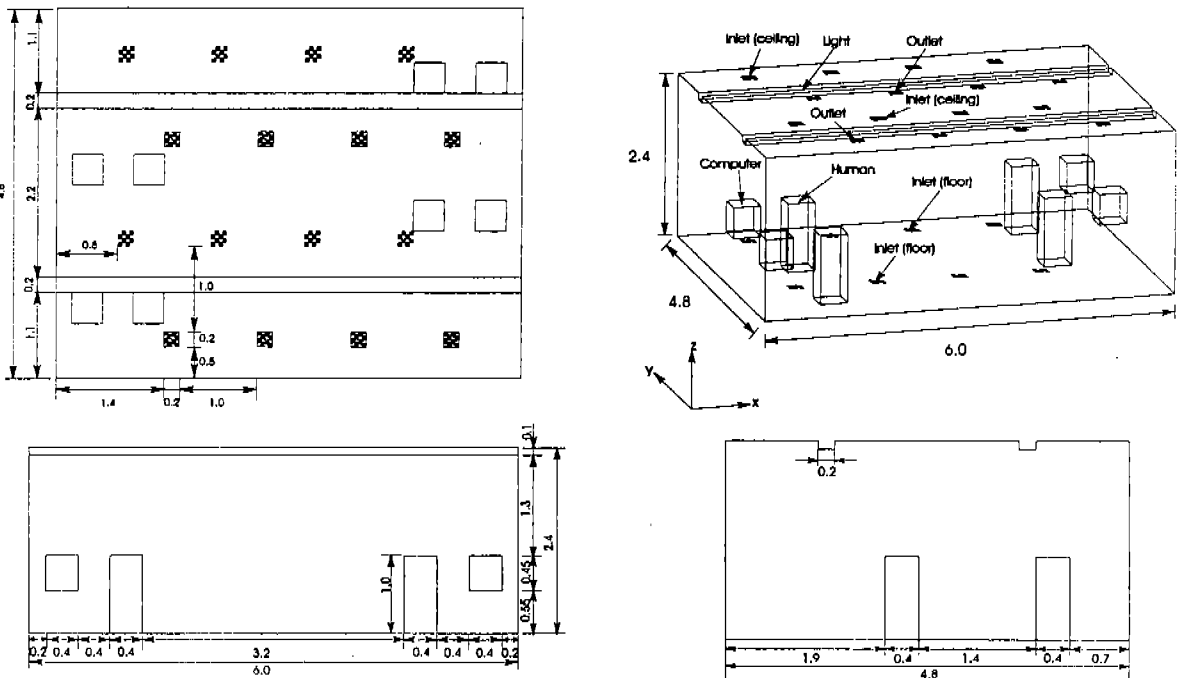


Figure 1 모사된 사무실 공간 (단위: m)

으로, 보통의 열저항치로 환산하면 $1clo = 0.155m^2C/W$ 가 된다. 여기서는 여름철의 가벼운 옷차림으로 가정하여 ISO(1984)에서 권장하는 값 $0.5clo$ 를 사용한다.

결과

높이에 따른 해석 결과를 Table 2에 정리하였다. 높이 0.1~1.7m 사이의 상하온도차는 천장분출은 $1.5^{\circ}C$ 바닥분출은 $3.5^{\circ}C$ 를 보인다. ISO(1984)에서는 쾌적감을 위한 상하온도 차이를 $3^{\circ}C$ 이내로 명시하고 있어, 이 측면에서 보면 천장분출이 유리하다. 속도 분포는 두 공조 방식 모두 $0.15m/s$ 이하로 쾌적성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로, 바닥분출이 약간 낮은 값을 나타낸다. 복사온도도 온도 분포와 비슷한 경향을 보이나, 그 차이는 조금 감소한다. PMV는 바닥에서는 낮은 값을 나타내나 천장으로 갈수록 커지며 바닥분출 방식이 바닥면에서는 약 0.5, 높이 1.8m에서는 0.2 정도 낮다.

높이 1.8m 이하의 거주공간에서 두 방식의 평균치를 비교하면, 온도는 약 $2.2^{\circ}C$, 복사온도는 약 $1.3^{\circ}C$, PMV는 0.4 정도 바닥분출이 낮다. PMV는 두 공조 방식 모두 $-0.5 \sim 0.5$ 사이에 있어 쾌적한 환경임을 알 수 있다. 거주공간이 아닌 1.8~2.4m 공간에서

는 천장분출의 PMV가 더 양호하다.

바닥면에서는 바닥분출 변수값들의 표준편차가 크고 천장으로 갈수록 천장분출의 표준편차가 크다. 이는 급기구의 영향으로 급기구 근처의 값들은 편차가 크기 때문이다.

천장분출보다 $2^{\circ}C$ 높게 급기한 바닥분출의 경우 사람이 거주하는 높이 0~1.8m 공간에서의 실내온도는 천장분출보다 $0.2^{\circ}C$ 정도 낮고, 복사온도는 $0.3^{\circ}C$ 높은 결과를 보이며 PMV는 거의 같다. 따라서 냉방시 바닥분출을 적용할 경우 $2^{\circ}C$ 높은 공기를 급기하여도 천장분출방식과 비슷한 쾌적성을 유지할 수 있어 에너지 절약 측면에서 유리하다. 급기온도를 $2^{\circ}C$ 올릴 경우, 증발온도 $0^{\circ}C$, 응축온도 $35^{\circ}C$ 기준인 냉동기의 성능은 약 6.4% 상승하여 소비동력이 감소한다.

Figure 2, 3, 4는 급기구의 영향이 적은 가로축의 중심단면($x=3.0m$)에서의 y 방향에 따른 온도, 복사온도, PMV의 분포를 나타낸다. 천장분출은 바닥분출에 비하여 높은 온도를 유지하며 상하온도차가 작고, 바닥분출은 낮은 온도를 유지하나 온도의 성층화 현상이 뚜렷이 나타난다. 두 방식 모두 $30^{\circ}C$ 의 벽면에 가까워질수록 상하 온도차는 커지나 바닥면에서는 벽면의 영향을 크게 받지 않고, 약 2.1m에서는 두 방식의 값이 교차한다. 복사온도는 그 차이가 온도에 비해 작

Table 2 T, V, Trad and PMV distributions

z [m]	type	T [$^{\circ}C$]		V [m/s]		Trad [$^{\circ}C$]		PMV	
		mean	STD	mean	STD	mean	STD	mean	STD
0.1	ceiling	25.14	0.35	0.16	0.06	26.07	0.52	0.13	0.16
	floor 1	22.27	0.88	0.12	0.22	24.29	0.46	-0.45	0.52
0.6	ceiling	25.54	0.86	0.12	0.09	26.29	0.54	0.33	0.20
	floor 1	22.89	1.03	0.08	0.09	24.83	0.68	-0.23	0.27
1.1	ceiling	25.90	1.32	0.12	0.10	26.44	0.53	0.41	0.24
	floor 1	23.74	1.51	0.08	0.08	25.21	0.71	-0.05	0.26
1.7	ceiling	26.66	0.78	0.10	0.11	26.61	0.48	0.57	0.24
	floor 1	25.77	0.68	0.08	0.05	25.86	0.75	0.37	0.14
2.1	ceiling	27.84	0.90	0.13	0.10	26.58	0.40	0.68	0.28
	floor 1	27.31	0.51	0.09	0.05	26.34	0.68	0.64	0.18
0-1.8	ceiling	25.71	0.99	0.12	0.09	26.35	0.56	0.36	0.25
	floor 1	23.46	1.54	0.08	0.12	25.01	0.85	-0.12	0.41
	floor 2	25.49	1.55	0.08	0.12	26.70	0.69	0.42	0.39
1.8-2.4	ceiling	28.16	1.93	0.18	0.18	26.59	0.41	0.66	0.56
	floor 1	28.31	1.95	0.10	0.07	26.44	0.66	0.76	0.33
0-2.4	ceiling	26.32	1.67	0.13	0.12	26.41	0.54	0.43	0.38
	floor 1	24.58	2.62	0.09	0.11	25.34	1.01	0.08	0.54

고 상부에서 큰 값을 보인다. PMV 분포도 전체적으로 비슷한 경향을 가지며 30°C 벽면 근처(y=4.2m)에서는 두 공조 방식이 거의 같은 값을 가진다. 이는 실내온도와 복사온도는 바닥분출이 낮으나 이 지점에서의 유속이 바닥분출의 경우 거의 정지상태임에 반해 천장분출은 부하와 벽면 온도에 의해 상승한 공기가 천장에 닿은 후 급기되는 공기와 함께 하부로 하강하면서 0.2~0.3m/s의 유속을 발생시키고 있기 때문이다.

중심단면에서의 온도 등고선을 Figure 5에 나타내었다. 천장분출은 거주공간(0~1.8m)에서 대체로 균일한 값을 보이고 바닥분출방식에서는 성층화가 뚜렷이 나타나고 있다. 천장분출의 경우 30°C 벽면에서 먼 지점의 온도가 넓은 영역에 걸쳐 낮게 유지되지만 바닥분출에서는 이러한 현상이 보이지 않고 균일한 분포를 이룬다. 두 방식 모두 조명 부근에서는 온도가 높다.

급기구 부근에서의 속도장을 Figure 6에 나타내었다. 천장분출방식은 급기된 공기의 관성력과 부력이 같은 방향으로 작용하여 기류가 바닥면에 닿은 후 4개의 순환구역을 형성하고, 바닥분출은 부력이 관성력에 역방향으로 작용하여 기류가 천장에 닿지 못하고 약 1.8m까지 상승한 후 다시 바닥면에 가라앉는 특성을 보인다. 따라서 천장분출은 실내 전체를 균일하게 유지시키는 면에서 유리하나 비거주공간(1.8~2.4m)의 공조도 수행하고 있어 에너지의 낭비가 많다.

결론

실내 열환경은 급기방식에 따라 많은 차이를 보이며 본 연구에서는 수치해석을 통하여 천장분출 및 바닥분출 공조방식을 여름철 사무실 공간에 적용하여 비교하였다.

바닥분출은 상하온도차가 천장분출에 비하여 높으나 열적 쾌적성을 나타내는 PMV 값은 유리하다. 특히 거주공간만을 대상으로 비교할 경우 바닥분출의 PMV 값은 -0.12인데 반해 천장분출은 0.36이다. 천장분출의 열적 쾌적성과 같게 유지하기 위하여 바닥분출의 경우 급기온도를 2°C 올릴 수 있

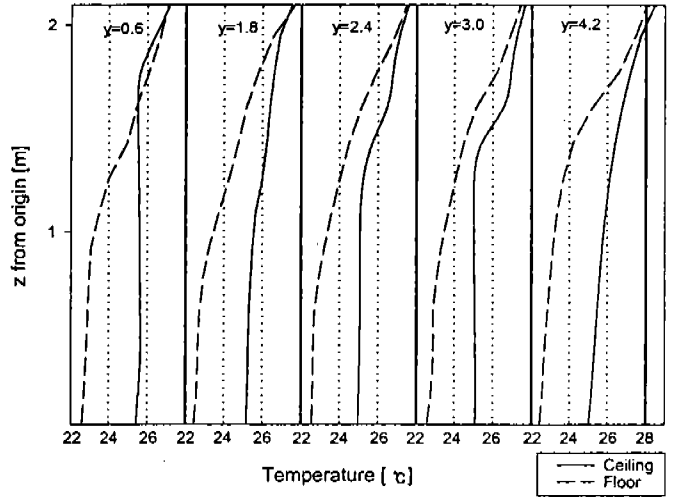


Figure 2 x=3.0에서의 실내온도 분포

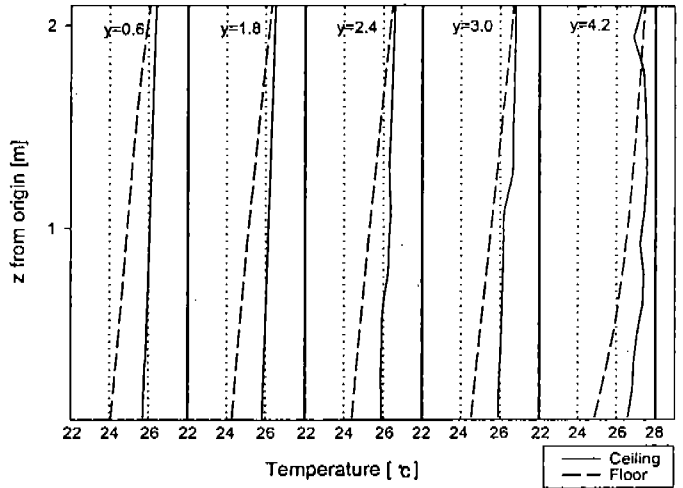


Figure 3 x=3.0에서의 복사온도 분포

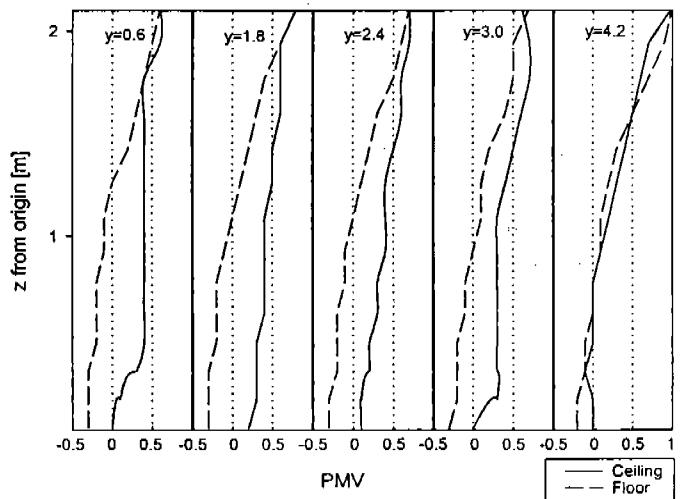
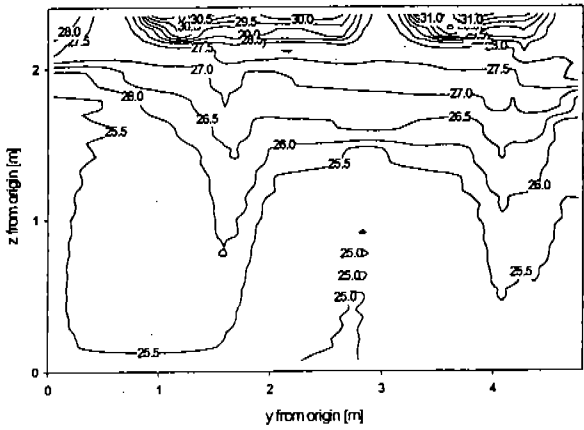
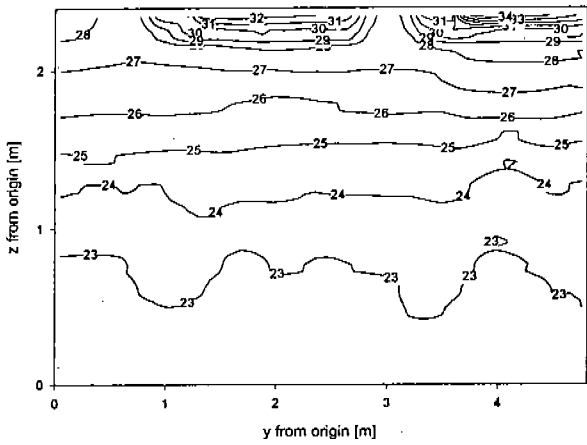


Figure 4 x=3.0에서의 PMV 분포

으므로 에너지 절약 측면에서 바닥분출 방식이 유리하다.



(a)



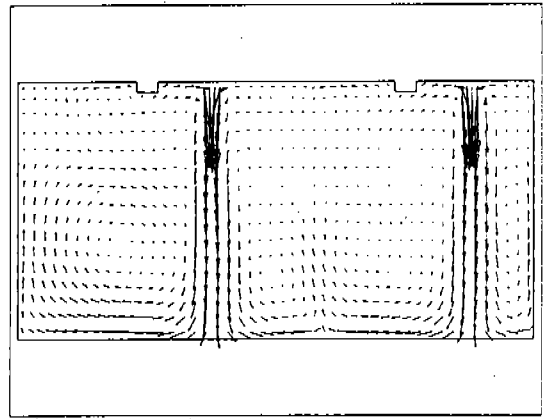
(b)

Figure 5 $x=3.0$ 에서의 온도 분포 [°C]

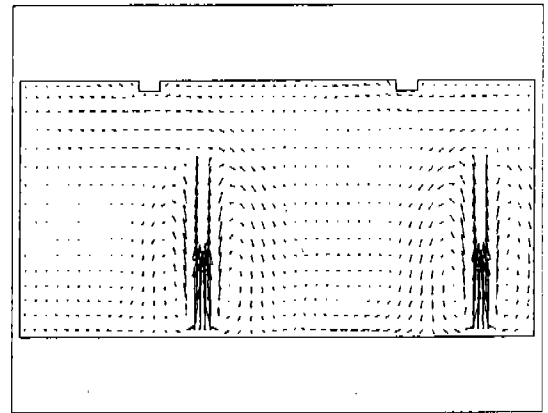
(a) 천장 분출 (b) 바닥 분출

참고문헌

- [1] Clifford, G., 1990, Modern Heating, Ventilating, and Air Conditioning, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [2] ASHRAE, 1993, ASHRAE Handbook, Fundamental, Georgia, USA.
- [3] ASHRAE, 1992, ANSI/ASHRAE 55-1992, ASHRAE Standard, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- [4] ISO, 1984, ISO 7730, Moderate Thermal Environments - Determination of the



(a)



(b)

Figure 6 급기구 주변의 속도장

(a) 천장 분출 (b) 바닥분출

- PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort.
- [5] 이춘식 외, 1993, 실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구 (I), 온열 및 공기질에 대해서, 과학기술처 보고서, UCN998-4939-2.
- [6] Fanger, P.O., 1970, Thermal Comfort - Analysis and Application in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.
- [7] Adapco, 1995, STAR-CD Version 2.3 Manuals, Computational Dynamics Ltd., London.