

## 냉방시 천장분출 및 바닥분출 공조방식에 따른 열환경 평가실험

조용, 권혁승, 김성현(동아건설산업(주) 기술연구소),  
김영일(한국과학기술연구원 열유동제어연구센터)  
경기도 용인시 기흥읍 고매리 413-5, 서울시 성북구 하월곡동 39-1  
yongcho@hanimail.com, yikim@kistmail.kist.re.kr

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

Yong Cho, Hurkseung Kwon, Sunghyun Kim(Dongah Construction Industrial Co., Ltd), Youngil  
Kim(Thermal/Flow Control Research Center, KIST)  
413-5 Gmae-ri, Kiheng-eup, Yongin-si, Kyungki-do 449-900, Korea,  
39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea  
yongcho@hanimail.com, 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 공조방식의 비교실험을 수행하여 실내의 열환경을 평가한다. 두 공조방식을 여름철 사무실 공간을 모사하는 열환경챔버에 적용하여 실내의 온도, 기류, 복사온도, PMV의 분포를 측정한다. 실험 결과 바닥분출 공조방식이 쾌적성과 에너지 절약면에서 우수함을 알 수 있었다.

#### 서론

실내의 온도, 기류, 복사온도 분포는 급기 및 배기 방식, 부하의 종류 및 위치, 벽체

조건, 외기의 침입 등 여러 요인의 영향을 받는다<sup>(1,2)</sup>. 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 필요한 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 실험적으로 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<sup>(3,4,5)</sup>. Fanger<sup>(6)</sup>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 7 단계 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 흑구온도를 측정하여 구한다.

### 실험장치

실험장치는 공기조화시스템, 열환경챔버, 덕트시스템, 측정 및 제어시스템 등으로 구성되어 있다.

공기조화 시스템은 열환경챔버로 공급되는 공기의 풍량, 온도, 습도를 제어하며, 공기조화기와 냉동기, 가스보일러, 가슴기 등으로 구성되어 있는데, 풍량은 inverter로 공조기 팬(fan)의 회전수를 조절함으로써 제어하며, 급기공기의 가열은 가스보일러와 전기히터가 동시에 사용된다. 냉각과 제습을 위해 사용하는 냉동기는 압축기와 응축기 팬의 회전수를 inverter로 조절함으로써 제어한다.

열환경챔버는 임의의 공조방식 적용이 가능하며 계절에 관계없이 냉난방 실험을 모두 수행할 수 있도록 제작되었으며 실내공간의 내부 크기는 4.5W×5.5D×2.4H(단위 m)이다. 챔버 내부의 천장에는 300 mm×300 mm 그릴을 8개 설치하였고, 바닥에는 면적 500 mm×500 mm, 두께 25 mm, 무게 11.5 kg의 바닥패널을 설치하였고 패널 위에는 타일카펫을 설치하였다. 챔버내부의 벽체에는 벽체온도 제어가 가능하도록 방열판을 부착하였는데 방열판 내부에 매입되어 있는 동관을 통하여 온도가 제어된 축열조의 작동유체를 순환시켜 온도제어가 가능하도록 하였다.

덕트 시스템은 열환경챔버 임의의 면에서 급기 및 배기가 가능하도록 덕트 및 댐퍼를 설치하였다. 덕트 시스템에 설치한 댐퍼의 개폐 조합을 변경함에 따라 천장분출/천장배기, 천장분출/바닥배기, 바닥분출/천장배기, 바닥분출/바닥배기 등 다양한 방식의 공조실험을 수행할 수 있다.

온도 및 습도 측정은 data logger를 이용

Table 1 Test and measurement conditions

공조방식	급기풍량 (cmh)	급기공기 온도 (°C)	벽체온도 (°C)	목표실내온습도		풍속측정 높이 (mm)	온도측정 높이 (mm)	흑구온도 측정높이 (mm)	평면에서의 측정위치 (Fig. 1의 측정점 참조)
				건구온도(°C)	상대습도(%)				
바닥분출/천장배기	720	18	37	26	50	100, 300, 600, 900, 1100, 1400, 1700, 2100	0, 100, 300, 600, 900, 1100, 1400, 1700, 2100, 2400	300, 600, 1100, 1400, 1700, 2100	A,B,C,D,E,F,G,H
천장분출/천장배기	720								
바닥분출/천장배기	610, 900								A,B,C,D,E
천장분출/천장배기	610, 900								

하였으며 풍속은 multichannel anemomaster 를 사용하였다.

제어 시스템은 센서 입력부, 제어부, 처리부로 나누지는데, 센서 입력부는 multi-channel anemomaster를 통해 급기유량과 챔버내부의 풍속 측정값을 읽어 들이고, data logger를 통해 열환경챔버내의 공기온도를 비롯한 덕트시스템의 공기온도 및 공조기 등의 작동유체의 온도 등을 읽어들인다. 이 두 계측기를 통해 읽어들인 값은 GPIB 통신을 통해 서버 PC에서 받아 들여져서 제어부로 넘어가게 된다.

제어부에서는 GPIB 통신을 통해 들어온 각종 데이터들을 저장하고, 화면을 통해 표시하며, 실험자가 원하는 제어값과 PID 제어를 통해 나온 출력값을 처리부로 넘기게 된다.

처리부에서는 TCP/IP 통신을 통해 전달 받은 여러 설정값과 제어값들을 실제 시스템으로 신호를 보내 AHU(air handling unit), 냉동기, 가스보일러, 전기히터, 가습기, 탱크 히터, 펌프 등을 제어하게 된다.

## 실험방법 및 조건

### 가. 실험방법

챔버내의 기류, 온도 및 흑구온도를 측정하는 위치는 챔버의 1/2단면에서 Fig. 1과 같이 대표적인 8점을 결정하여 각 점에서 수직으로 풍속은 8점, 온도는 10점, 흑구온도는 6점에 대하여 측정하였다

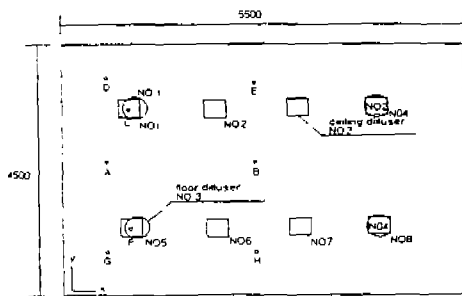


Fig. 1 Measurement points and locations of diffuser

풍속 측정은 바닥면과 수직으로 설치한 8개의 센서를 챔버 내부에 설치한 센서이송 장치를 사용하여 수평 측정위치별로 이동하면서 풍속을 측정하여 데이터를 저장하였다.

온도측정은 수직으로 설치한 줄에 열전대(thermocouple)를 10개의 측정위치에 고정하여 풍속을 측정한 수평위치별로 이동시켜 가면서 온도를 측정하였다. 흑구온도의 측정은 측정하고자 하는 6개의 수직위치 중 3개의 지점에 흑구온도계를 수직으로 설치하고 수평의 위치별로 측정 후 나머지 3개의 수직위치에 수정, 설치한 후 다시 수평의 측정위치별로 이동하면서 측정을 하였다.

천장 급기구의 수량은 8개를 설치하여 바닥분출 공조방식의 실험시에는 4개를 배기구로 사용하였으며, 천장분출 공조방식의 실험시에는 4개는 급기구, 4개는 배기구로 사용하였다. 벽체온도를 측정하기 위하여 방열판의 표면에 바닥으로부터 수직으로 1 m 지점의 4면 벽체에 하나씩 4개의 온도센서를 부착하였다.

### 나. 실험조건

일반적으로 냉난방 부하처리를 위한 급기풍량은 처리하여야 하는 냉난방 부하 및 급기환기 온도차에 따라 결정된다. 그러나 본 실험에서는 급기풍량을 결정하기 위하여 급기구의 수량과 급기구 1개당의 급기풍량을 먼저 결정하고 그에 따라 전체 실험풍량을 결정하였다. 급기구의 수량은 바닥면적 2평당 1개를 상정하여 4개로 결정하였으며, 본 실험에 사용한 급기구는 연구과정에서 개발한 급기구로서, 급기구 1개당 급기풍량은 급기구의 크기와 개구율을 검토하여 180 cmh로 결정하였다. 따라서 전체 실험풍량은 720 cmh를 기준으로 하였고 풍량 610 cmh와 900 cmh에 대한 실험도 수행하였다.

실험조건은 Table 1에 나열되어 있다. 벽체온도는 Table 1에 나타낸 실내온도 및 급기온도 조건을 충족시킬 수 있는 값으로 결정하였다.

Table 2 T, V, Trad and PMV distributions (풍량 720 cmh)

z [m]	type	T [°C]		V [m/s]		Trad [°C]		PMV	
		mean	STD	mean	STD	mean	STD	mean	STD
0.3	ceiling	25.93	0.25	0.08	0.04	27.57	0.35	0.57	0.12
	floor	24.48	1.84	0.37	0.56	27.72	1.04	0.60	0.05
0.6	ceiling	26.07	0.15	0.06	0.03	28.32	0.28	0.74	0.09
	floor	24.72	1.15	0.21	0.29	27.54	0.58	0.40	0.36
1.1	ceiling	26.20	0.27	0.06	0.03	27.87	0.31	0.69	0.11
	floor	24.95	0.78	0.14	0.13	28.69	0.79	0.44	0.33
1.4	ceiling	26.26	0.31	0.05	0.03	28.53	0.35	0.81	0.10
	floor	25.40	0.80	0.10	0.08	28.47	0.68	0.56	0.25
1.7	ceiling	26.56	0.43	0.08	0.04	28.00	0.46	0.74	0.15
	floor	26.57	0.71	0.09	0.04	29.21	0.53	0.89	0.16
2.1	ceiling	26.94	1.00	0.13	0.05	28.90	0.50	0.82	0.25
	floor	28.62	0.33	0.06	0.03	29.25	0.47	1.23	0.11
0.3-1.7	ceiling	26.20	0.25	0.07	0.03	28.06	0.25	0.72	0.11
	floor	25.22	0.90	0.18	0.21	28.33	0.45	0.56	0.18
0.3-2.1	ceiling	26.33	0.37	0.08	0.03	28.20	0.26	0.74	0.13
	floor	25.79	0.73	0.16	0.18	28.48	0.40	0.68	0.12

Table 3 T, V, Trad and PMV distributions (풍량 610 cmh)

z [m]	type	T [°C]		V [m/s]		Trad [°C]		PMV	
		mean	STD	mean	STD	mean	STD	mean	STD
0.3	ceiling	27.02	0.23	0.08	0.03	28.97	0.16	0.95	0.08
	floor	24.57	1.89	0.30	0.51	28.23	1.01	0.70	0.04
0.6	ceiling	27.27	0.25	0.06	0.02	28.93	0.16	1.01	0.06
	floor	25.09	1.42	0.19	0.26	27.89	0.84	0.69	0.03
1.1	ceiling	27.30	0.30	0.07	0.03	29.01	0.17	1.01	0.08
	floor	25.23	1.16	0.13	0.10	28.96	0.45	0.56	0.36
1.4	ceiling	27.28	0.28	0.06	0.02	29.17	0.19	1.05	0.05
	floor	26.57	0.99	0.07	0.02	29.02	0.73	0.92	0.18
1.7	ceiling	27.32	0.34	0.10	0.03	29.27	0.46	1.01	0.10
	floor	28.39	0.16	0.04	0.02	29.83	0.21	1.31	0.04
2.1	ceiling	27.54	0.67	0.13	0.05	29.18	0.53	0.96	0.22
	floor	30.12	0.23	0.03	0.02	30.20	0.38	1.59	0.06
0.3-1.7	ceiling	27.24	0.28	0.07	0.02	29.07	0.20	1.01	0.07
	floor	25.97	1.09	0.15	0.17	28.78	0.24	0.83	0.10
0.3-2.1	ceiling	27.29	0.34	0.08	0.03	29.09	0.25	1.00	0.09
	floor	26.66	0.91	0.13	0.15	29.02	0.26	0.97	0.07

Table 4 T, V, Trad and PMV distributions (풍량 900 cmh)

z [m]	type	T [°C]		V [m/s]		Trad [°C]		PMV	
		mean	STD	mean	STD	mean	STD	mean	STD
0.3	ceiling	25.16	0.22	0.11	0.04	27.31	0.24	0.38	0.13
	floor	24.09	1.81	0.44	0.77	27.30	0.79	0.47	0.05
0.6	ceiling	25.35	0.28	0.09	0.02	27.35	0.25	0.49	0.07
	floor	24.48	1.34	0.31	0.46	27.42	0.74	0.47	0.06
1.1	ceiling	25.40	0.35	0.09	0.02	27.57	0.23	0.53	0.09
	floor	24.53	0.71	0.21	0.19	28.16	0.46	0.21	0.45
1.4	ceiling	25.46	0.40	0.09	0.02	27.41	0.26	0.52	0.10
	floor	24.57	0.52	0.16	0.12	27.72	0.56	0.26	0.30
1.7	ceiling	25.52	0.50	0.15	0.04	27.93	0.49	0.46	0.16
	floor	24.75	0.62	0.15	0.07	28.07	0.54	0.33	0.30
2.1	ceiling	25.50	0.78	0.17	0.05	27.42	0.53	0.37	0.27
	floor	25.44	1.07	0.15	0.06	27.94	0.61	0.42	0.26
0.3-1.7	ceiling	25.38	0.34	0.10	0.02	27.51	0.20	0.49	0.10
	floor	24.49	0.95	0.26	0.32	27.73	0.22	0.29	0.32
0.3-2.1	ceiling	25.40	0.40	0.12	0.03	27.55	0.18	0.46	0.12
	floor	24.64	0.95	0.21	0.27	27.77	0.24	0.32	0.27

## 결과

PMV의 계산에는 온도, 풍속, 평균복사 온도, 습도, 인체의 대사량과 착의량이 입력값으로 요구된다. 온도, 풍속, 습도는 실험시의 측정값을 그대로 사용하였다.

평균복사온도는 실험시 측정된 흑구온도와 풍속을 사용하여 계산하였다. 인체의 대사량은 사무실에 앉아서 일할 때의 값인 1.2 met를 적용하였으며 착의량은 0.5 clo를 사용하였다. 습도의 측정값은 챔버내의 한점에서 측정된 값을 챔버 전체의 평균값으로 가정하여 사용하였다.

실험결과를 Table 2, 3, 4에 정리하였다. 급기풍량이 720 cmh인 경우를 보면, 높이 0.3~1.7m 사이의 상하온도차는 천장분출은 0.6 °C 바닥분출은 2.1 °C이다. ISO (1984)에서는 쾌적감을 위한 상하온도 차이를 3°C 이내로 제시하고 있어, 두 방식 모두 이 범위 내에 들어온다. 속도분포는 천장공조방식의 경우 0.15 m/s 이하로 높이에 따른 변화가 나타나지 않으나 바닥분출 방식의 경우 0.3 m 높이에서 0.37 m/s로 최대값을 나타내며 높이가 높아질수록 감소하는 경향을 나타낸다. 복사온도도 온도 분포와 비슷한 경향을 보이나, 그 차이는 조금 감소한다. 높이 0.3~1.7 m 사이의 상하 PMV 차이는 천장분출의 경우 약 0.2, 바닥분출의 경우 약 0.3 정도의 차이를 보인다.

높이 1.8 m 이하의 거주공간에서 두 방식의 평균치를 비교하면, 온도는 약 1.0 °C, PMV는 약 0.2 정도 바닥분출이 낮고 복사온도는 약 0.3 °C 정도 바닥분출이 높다. PMV는 두 공조 방식 모두 쾌적한 환경범위인 -0.5 ~ 0.5 사이를 약간 벗어나고 있다. 거주공간이 아닌 1.8~2.4 m 공간에서는 천장분출의 PMV가 더 양호하다.

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

Fig. 2는 천장분출과 바닥분출 두 공조방식의 측정위치별 상하온도분포 비교를 나타낸다. 1.7 m 이하 범위에서는 바닥분출방식에서 온도가 낮게 나타나고 1.7 m 이상에서는 천장분출방식의 온도가 낮게 나타난다. 따라서 천장분출은 실내 전체를 균일하게 유지시키는 면에서 유리하나 비거주공간 (1.8~2.4 m)의 공조도 수행하고 있어 에너지의 낭비가 많다. 그리고 측정점 C와 F의 바닥부근의 온도구배가 크게 나타나는 것은 측정위치가 바닥급기구 상부에 위치하고 있기 때문이다.

Fig. 3, 4는 두 공조방식의 풍량별 상하온도분포를 나타낸다. 천장분출의 경우 풍량이 증가할수록 실내온도가 전체적으로 감소하는데 상하분포는 풍량에 관계없이 같은 경향을 나타내고 있으며, 바닥분출의 경우 풍량이 증가하였을 때 천장분출의 경우와 같이 온도가 감소하는데 바닥으로부터 1 m 정도까지의 변화는 잘 나타나지 않으나 그 이상의 높이에서는 뚜렷한 감소 추세를 나타내고 있다.

Fig. 5는 천장분출과 바닥분출 두 공조방식의 측정위치별 상하 PMV 분포를 나타내며, Fig. 6, 7은 두 공조방식의 풍량별 상하 PMV 분포를 나타낸다. PMV도 온도분포와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 바닥분출의 경우 측정점 C와 F의 바닥 부근 값이 표시되지 않은 것은 바닥 급기구 상부의 속도값이 커 PMV 계산 범위를 벗어나고 있기 때문이다. 그리고 바닥 급기구 주위에서는 드래프트에 의한 국부적인 불쾌감이 발생할 우려가 있으므로 바닥 급기구의 설치위치가 상시 체제구역에 설치되지 않도록 할 필요가 있다.

급기풍량이 720 cmh인 바닥분출의 경우와 급기풍량이 25% 많은 900 cmh인 천장분출과 비교하여 보면, 사람이 거주하는 높이 0~1.8 m 공간에서의 실내온도는 천장분출보다 약 0.2 °C 낮고 복사온도는 약 0.8 °C 높

은 결과를 보이며 PMV는 약 0.1 높은 결과를 보인다. 따라서 냉방시 바닥분출을 적용할 경우 급기풍량을 25% 정도 적게 하여도 천장분출방식과 비슷한 쾌적성을 유지할 수 있어 에너지 절약 측면에서 유리하다.

**결론**

실내 열환경은 급기방식에 따라 많은 차이를 보이며 본 연구에서는 실험을 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 천장분출보다 세 가지의 풍량에 대하여 각각 약 0.2 작게 나타난다. 천장분출의 열적 쾌적성과 같게 유지하기 위하여 바닥분출의 경우 급기풍량을 25% 적게 할 수 있으므로 에너지 절약 측면에서 바닥분출방식이 유리하다.

**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 PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort.
- [5] 이춘식 외, 1993, 실내환경 쾌적성 평가 방법에 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.

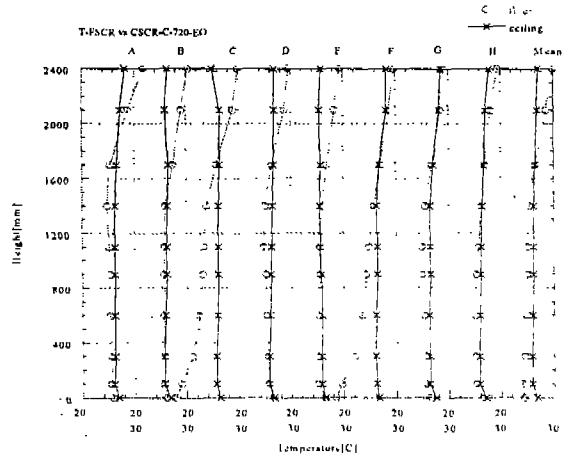


Fig. 2 Temperature distribution

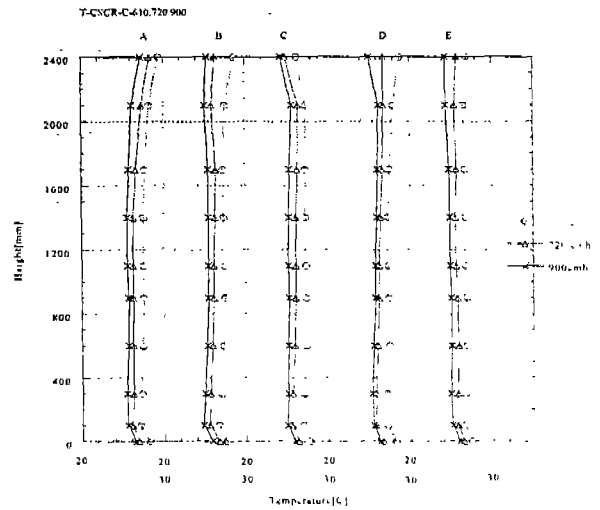


Fig. 3 T distribution of ceiling supply

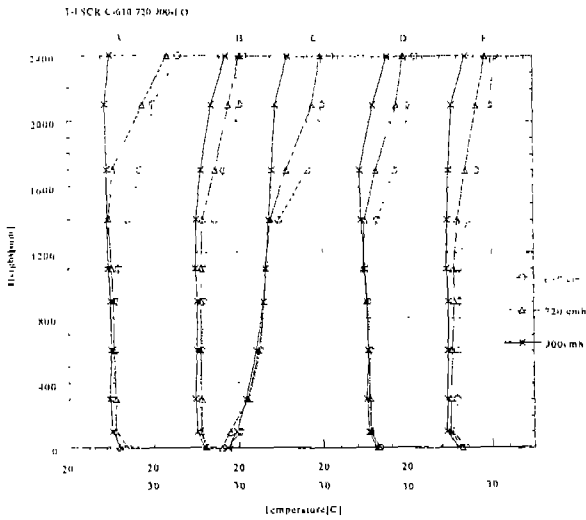


Fig. 4 T distribution of floor supply

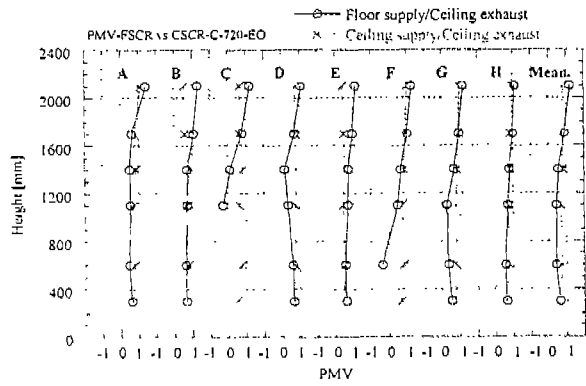


Fig. 5 PMV distribution

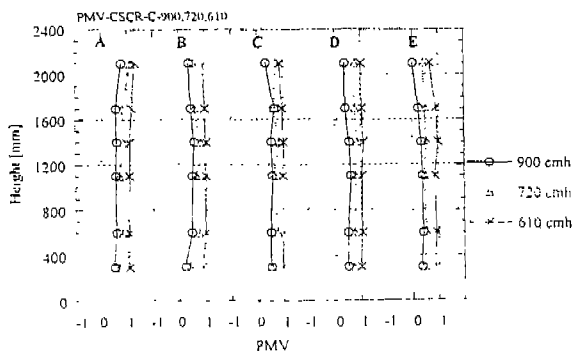


Fig. 6 PMV distribution of ceiling supply

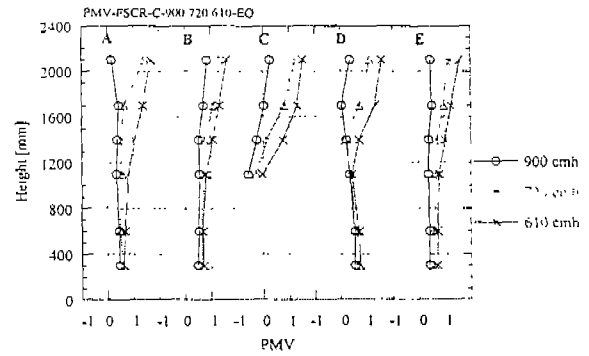


Fig. 7 PMV distribution of floor supply