

강제대류 · 복사판넬 병용냉방방식을 채용한 거실의 온열환경에 관한 모형실험

최 동 호*

Experimental Study on Thermal Environment in a Room with Cooling Jet and Cooling Panel

Dong-Ho Choi*

ABSTRACT

Uncomfortable cooling due to down draft of cooling air have sometimes occurred in the conventional air cooling systems. This problem is particularly serious in hospital rooms since patients are staying still and thus they are more sensible and weak for cold draft. Full scale model experiments are carried out precisely in order to examine the performance of the panel cooling system in hospital room. Three types of cooling systems are examined, i.e. panel cooling only, cooling air supply only and combination of cooling air and cooling panel. Through analyzing these three cooling systems, the most appropriate cooling system that can avoid serious downdraft problem, is examined. The result of the panel cooling system shows that it is not effective to decrease the effect of the large heat load transferred from the outer wall to the occupied zone. Cooling jet system also does not perform well from the view point for reducing the effect of down draft near the bed. The combination of cooling jet and cooling panel is proved to be the most useful system from the view point of reducing down draft and minimizing the effect of large heat load from the window.

Key words : Panel cooling system, Cold draft, Cooling jet system

1. 서 론

본 연구는 냉풍과 냉각판넬을 병용한 냉방실

내의 온열공기환경을 상세히 검토하여 그 특성을 명확하게 파악하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 냉방된 실내의 한 예로서 병원의 병실을 상정하였다. 병실에서는 환자가 장시간 동안 침대위에 있으면서 자유로이 장소를 변경하기 어려운 경우가 많으므로 위치 변경이 곤란한

* 제주대학교 건축공학과
Dept. of Architectural Eng., Cheju Nat'l Univ.

것을 고려한다면, 특히 코올드 드래프트(cold draft)나 온도의 불균일성이 적은 환경을 제공하는 것이 필요하다고 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 냉풍과 냉각판넬을 병용한 강제대류·복사 판넬 병용냉방이 상술한 점들의 만족 여부에 대해서 축소하지 않은 실물크기의 모형실험에 의하여 상세히 검토한다.

강제대류식 냉방방식을 채용한 거실이나 복사 난방을 갖춘 거실의 복사현상 및 온열 공기환경을 검토한 예는 많이 있지만, 복사를 이용한 냉각효과를 고려한 냉방시의 실내 복사 및 온도 및 기류분포를 상세히 해석·검토한 예는 많지 않다.^{(1)~(7)}

본 연구에서는 천정면을 냉각함으로써 실내로의 냉풍급기 뿐만 아니라 냉각판넬의 복사흡열 효과를 고려한 냉방방식(강제대류·복사판넬병용냉방)을 갖춘 실내의 복사와 열, 공기환경을 모형실험에 의해서 상세히 검토한다. 그리고 복사판넬을 냉방에 이용하는 공조시스템에서는 판넬면에서의 결로와 관련하여 잠열에 대한 검토도 필요하게 된다. 그러나 본 연구에서 실내공기의 노점온도는 실내에 도입되는 제습된 신선 외기에 의해 냉각판넬 표면온도보다 충분히 낮게 조정된 것으로 가정하여 잠열에 대해서는 검토하지 않도록 한다. 본 연구에서는 천정복사판넬 단독냉방방식과 냉각급기공기에 의한 강제대류냉방 및 강제대류·복사판넬병용냉방의 3가지 공조방식에 대하여 실제 크기의 거실모형을 이용한 모형실험에 의해 검토한다. 실내에서의 코올드 드래프트 경감과 외벽과 창으로 부터의 관류열부하가 실내온열공기환경에 미치는 영향에 대하여 검토한다.

II. 실험개요

2.1 거실모델

거실모델의 개략도를 Fig. 1에 나타내고 있다. 모형은 축소시키지 않은 실사이즈로 제작하였으며 거실의 용도로서는 병실(개실)을 상정하였다. 천정복사판넬의 냉각은 천정 챔버(chamber)에

냉각공기를 송풍함으로써 천정판넬면이 냉각되도록 하였다. 네 벽면 중 한쪽 벽면은 외기 및 창이 있는 외벽을 상정하여 관류열부하를 각각에 대응하는 양 만큼 전기히터로서 제어하도록 하였다(Table 1 참조). 모형외벽벽은 모두 10cm 두께의 발포스티렌판으로 외부와 단열시켰다. 실내측은 모두 흑색 페인트(적외선 복사율 0.96)로 마감하였다. 공조시스템은 각 실험 Case에 따라 다르며 천정냉각판넬에 의한 복사냉방과 외벽 대향벽 상부에 공조급기구를 설치하여 실내를 냉방한다. 외벽 상부에 슬롯(slot)형 공조배기구를 설치하였다. 실내에는 내부발열(인체 등) 시뮬레이트용 히터가 설치되어 있다. 본 연구에서 잠열에 대해서는 고려하지 않는다. 따라서 공조시스템은 실내모형내에 결로가 발생되지 않도록 충분한 제습능력을 갖추고 있다. 단, 습도제어는 행하지 않는다.

2.2 측정

실내공기온도, 벽면온도, 평균풍속을 측정한다. 또한 벽면 온도분포를 이용하여 벡터 복사온도, 평균복사온도(MRT) 분포를 산출함과 동시에 온열환경지표로서 예측평균신고(PMV), 표준신유효온도(SET*)를 산출한다. 온도측정은 T(C-C)형 열전대(thermocouple)와 적외선 복사온도계를, 풍속측정은 3차원 초음파풍속계(span 5cm)를 사용하였다. 본 연구에서는 5cm/s 이상의 풍속을 드래프트로 정의하여 실험결과를 고찰하도

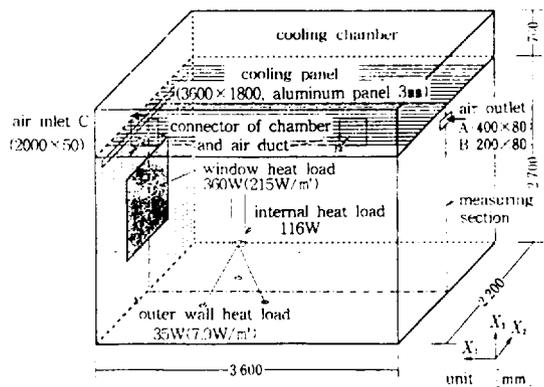


Fig. 1 Room Model

Table 1 Specification of cases analyzed

Cases	Item	Heat load (W)	Position	Cooling panel					Cooling air							
				Size (m ²)	Surface temperature (°C)	Chamber air		Discharge of heat capacity	Temperature (°C)	Difference of temperature between exhaust and supply (°C)	Air volume (m ³ /h)	Velocity (m/s)	Ar number	Combination of air outlet and inlet	Discharge of heat capacity (W)	Loss heat load (W)
1	Cooling air supply system	Internal heat load	-	0	-	-	-	-	-7.5	9.8	150	1.4	0.025	AC	500	-11.6
2	Panel cooling system	Panel heat load 116	Ceiling	6.5	-7.0	-15	430	500	-	-	-	-	-	-	-	-11.6
3	Combination of cooling air and cooling panel	External heat load 385	Ceiling	6.5	-3.2	-7.4	430	221	-7.4	9.8	83	1.6	0.013	BC	279	-11.6

Note : temperature means difference of each measuring point temperature and standard point temperature.

록 한다. 실험은 실내바닥위 1m 높이를 기준으로 하며 기준점의 평균공기온(7점의 평균)을 기준온도로 하여 해석결과는 이 기준온과의 차를 표시한다. 기준온도가 가능한한 26°C가 되도록 조정하여 실험을 실시하였다.

2.3 복사환경의 해석

측정된 온열물리환경을 인체의 온열환경지표에 의해 평가한다. 여기서는 복사환경은 벽면온도, 실내의 복사열 수송을 해석하여 벡터복사온도 및 인체모델에 대한 평균복사온도(MRT: 선 위치, 앉은 위치)를 산출하였다. 산출에 있어서 벽, 바닥, 천정을 80cm×40cm 그리드로 분할하여, 벽면온도는 이 그리드 중심온도를 대표치로 하여 복사계산을 하였다. 또한, 벽면의 복사율은 0.96이지만 복사해석에서는 각벽면을 흑체(복사율 1.0)로 간주하였다. 평균복사온도의 산출은 각 해석지점에 있어서 미소입방체 각면 형태계수에 인체형태계수 환산용 수정계수(선 위치의 수평면: 0.024, 수직면: 0.238, 앉은 위치의 수평면: 0.102, 수직면: 0.199)를 곱하여 그 합에 의해서 구하는 간편법을 이용하였다.⁽⁸⁾

2.4 온열환경지표분포 해석

경작업시의 건강한 사람을 대상으로 한 온열환경지표 PMV, SET*를 산출한다. 즉 0.6clo, 1met, 상대습도 50%, 기준실온은 26°C의 조건으로 MRT(선 위치: 바닥위 1m, 앉은 위치: 바닥

위 0.6m)와 실내 풍속분포의 측정치를 이용하여 PMV, SET*를 산출한다. 해석결과는 거주역을 대상으로 하여 바닥위 1m와 0.6m 위치의 값으로 나타낸다.

2.5 실험종류 및 설정조건

실험Case 및 설정조건을 Table 1에 나타내고 있다. 강제대류냉방(Case 1), 천정복사판넬 단독냉방(Case 2), 강제대류·복사판넬병용냉방(Case 3)의 3 Case에 대하여 실험하였다. 실험조건은 강제대류·복사병용냉방을 기본으로 하여 복사판넬이 없는 강제대류냉방 및 냉각공기를 실내에 급기하지 않는 천정판넬 단독냉방시의 실내온열환경에 대하여 검토한다.

III. 온열환경지표

본 연구에서는 벽면온도분포를 이용하여 실내의 평균복사온도 및 벡터복사온도를 산출하였다. 그리고 온열환경 평가지표로서 예측평균신고(PMV), 표준신유효온도(SET*)를 산출하였다. 이하에 본 연구에 사용된 온열환경 지표들의 산출법에 대하여 정리하였다.

3.1 평균복사온도(Mean Radiant Temperature, MRT)^(1,3)

총수 N개의 분할면을 가진 폐쇄공간에 있어서 벽면요소와 미소입방체상의 면 i의 복사열

이동만을 생각하도록 한다. i 면이 받는 복사열량 Q_r 은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_r = q_r \cdot S_i = \epsilon_i \cdot \sigma \cdot \sum_{j=1}^N B_{ij} \cdot (T_j^4 - T_i^4) \cdot S_i \quad (1)$$

- q_r : 물체표면이 실질적으로 받는 단위면적당 복사열량 [W/m²],
- S_i : i 면의 면적 [m²],
- ϵ_i : i 면의 복사율 [-],
- σ : Stefan-Boltzmann 정수,
- B_{ij} : i 면, j 면간의 Gebhart 흡수계수 [-],
- T_i : i 면의 절대온도 [K].

여기에서

$$\bar{T}_r^4 = \sum_{j=1}^N B_{ij} \cdot T_j^4 \quad (2)$$

라고 하면, 식(1)은 다음식과 같이 된다.

$$Q_r = q_r \cdot S_i = \epsilon_i \cdot \sigma \cdot (\bar{T}_r^4 - T_i^4) \cdot S_i \quad (3)$$

식(2), (3)내의 \bar{T}_r 을 면 i 에서의 평균복사온도(MRT)라고 한다. 그리고 이 미소면 i 에 있어서 MRT는 일반적으로 면복사온도(plane radiant temperature, PRT)라고 한다.⁽³⁾ 폐쇄공간내에 놓여진 입체표면의 평균복사온도는 입체 각 표면 i 의 MRT를 그 표면적으로 가중평균하여 구할 수 있다. 미소 입방체인 경우는 6면 단순평균으로 한다. 본 논문에서는 인체형상을 모사한 입체의 MRT를 산출하므로 中村이 제안한 가중계수를 각면 형태계수에 곱한 후 그 합으로 MRT를 산출한다.⁽⁸⁾

3.2 벡터복사온도(Vector Radiant Temperature, VRT)⁽⁹⁾

벡터복사온도는 미소입방체가 주위로 부터 받는 복사에 대해서 서로 마주보는 2면의 평균복사온도(MRT, 정확하게는 면복사온도 PRT)의

차를 성분으로 하는 벡터로서 표시하여 복사환경의 지향성을 나타내는 것이다. 각 방향의 평균복사온도를 $\bar{t}_{r_x}^+, \bar{t}_{r_x}^-, \bar{t}_{r_y}^+, \bar{t}_{r_y}^-, \bar{t}_{r_z}^+, \bar{t}_{r_z}^-$, 단위벡터를 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 라고 하면 벡터복사온도는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$VRT = (\bar{t}_{r_x}^+ - \bar{t}_{r_x}^-) \vec{i} + (\bar{t}_{r_y}^+ - \bar{t}_{r_y}^-) \vec{j} + (\bar{t}_{r_z}^+ - \bar{t}_{r_z}^-) \vec{k} \quad (4)$$

3.3 예측평균신고(Predicted Mean Vote, PMV)^(9,11)

Fanger에 의해 제안된 것으로서 인체열부하와 인간의 온냉감을 결부시킨 온열환경지표인 PMV는 실내공기온도 t_a , 환경의 수증기압 P_a , 평균복사온도 \bar{t}_r , 기류속도 V , 대사량 M , 기계적인 일로 변환된 열량 W , 착의표면적율 f_{cl} 의 관수이다. 본 논문에서는 PMV를 식(5)를 이용하여 산출하였다.

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \times [(M - W) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) - 3.05(5.73 - 0.007(M - W) - p_a) - 0.42 \{ (M - W) - 58.15 \} - 0.0173M(5.87 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a)] \quad (5)$$

- f_{cl} : 인체의 착의 표면적율(=착의 표면적 ÷ 나체 표면적) [-],
- t_{cl} : 착의 외표면온도 [°C],
- h_c : 대류열전달율 [W/(m² · K)].

여기서 t_{cl} (착의 외표면온도)은 식(6)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 t_{cl} &= 35.7 - 0.0275(M - W) \\
 &- R_{cl}[(M - W) - 3.05(5.73 \\
 &- 0.007(M - W) - p_a) \\
 &- 0.42((M - W) - 58.15) \\
 &- 0.0173M(5.87 - p_a) \\
 &- 0.0014M(34 - t_a)]
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 R_{cl} : 의복의 현열저항 [$m^2 \cdot K/W$]

본 논문에서는 대류열전달을 h_c 를 Fanger와 같이 식(7)을 이용하여 산출하였다.

$$\begin{aligned}
 h_c &= 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \\
 &: 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V} \text{인 경우} \\
 h_c &= 12.1\sqrt{V} \\
 &: 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V} \text{인 경우}
 \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 V : 풍속 [m/s]

착의표면적을 f_{cl} 은 인체표면적에 대한 착의면적의 비로서 식(8)에 의해서 정해진다.

$$\begin{aligned}
 f_{cl} &= 1.0 + 0.2I_{cl} : I_{cl} < 0.5 \text{clo인 경우} \\
 f_{cl} &= 1.05 + 0.1I_{cl} : I_{cl} > 0.5 \text{clo인 경우}
 \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 I_{cl} : 피부에서 착의 외표면으로의 열저항(착의 clo치) [clo]

IV. 실험결과

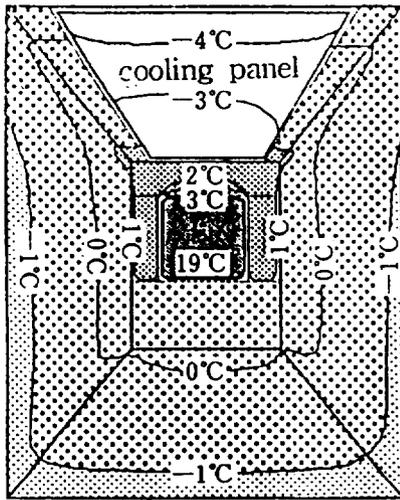
4.1 강제대류냉방 (Case 1)

실험결과를 Fig. 2에 나타내고 있다. 벽면온도는 외벽부를 제외하고 거의 실온과 같은 분포를 나타내고 있다(Fig 2(a) 참조). 창으로 부터의 열상승류가 천정면 부근에 체류하고 있다. 수평 급기채트는 이 고온층 밑으로 깔려 들어가 밀도차에 의해 실내중앙부근에서 하강한다. 기준면(바닥위 1m) 아래부분에서도 확연하게 드래프트

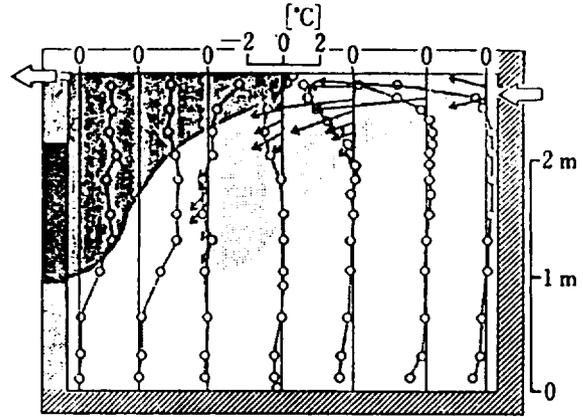
트를 관찰할 수 있다. 중심단면의 급기채트가 지나는 곳과 외벽 부근을 제외하면 공기온은 균일한 분포를 나타내고 있으며 연직방향에 대해서도 온도차는 크지 않다(Fig. 2(b) 참조). 벡터 복사온도는 전반적으로 외벽에서 대향벽측으로 향하는 것을 볼 수 있다(Fig. 2(d) 참조). 창과 외벽으로 부터의 관류열량이 상승하여 천정면은 이 열에 의해 온도가 상승하여 천정면과 바닥면의 온도차가 크게 되므로 거주역의 벡터복사온도는 다소 아래쪽으로 향하고 있지만 비교적 고온인 창과 외벽에서 실내쪽으로 향하는 경향이 현저하다. 즉 이것은 창과 외벽으로 부터의 복사가 실내복사환경에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 나타내는 것이라 할 수 있다. 벡터복사온도의 크기는 창부근에서는 현저하여 2.5℃ 정도이지만 나머지 실내에서는 0.5℃ 정도를 나타내고 있다. 거주역의 MRT는 다른 Case에 비해 높게 나타나 평균 27.3℃로서 실온보다 1℃ 이상 높은 값을 나타내고 있다. 창 부근에서는 29.6℃를 나타내고 있다. PMV, SET*도 타Case에 비해 높은 거주역 평균이 각각 +0.3, 27.1℃를 나타내고 있다. ①, ⑥의 위치에서는 MRT, PMV, SET*는 물론, 실내온도도 높은 분포를 나타내고 있다. ①, ⑥에서 이처럼 높은 것은 다른 Case에서도 나타나는 공통되는 경향이라 할 수 있다. ②, ⑦의 위치는 급기기류의 드래프트가 관찰되기 때문에 실온이 낮으며 PMV는 -0.1, 0.0 으로서 다른 곳에 비해 낮은 값을 나타내고 있다(Fig. 2(c) 참조).

4.2 천정복사판넬 단독냉방 (Case 2)

실험결과를 Fig. 3에 나타내고 있다. 냉각열량을 확보하기 위해서는 판넬면을 기준실온보다 7~9℃ 낮게 제어할 필요가 있다(Fig. 3(a) 참조). 바닥, 벽면온도는 판넬면으로 부터 냉복사를 받아서 대부분의 곳에서 기준실온보다 1~2℃ 낮은 분포를 나타냄으로서 간접적으로 공기를 냉각시키고 있다. 기온은 외벽부근을 제외하고 거의 균일한 온도를 나타내고 있으며, 연직방향의 온도차도 작다. 코올드 드래프트는 전



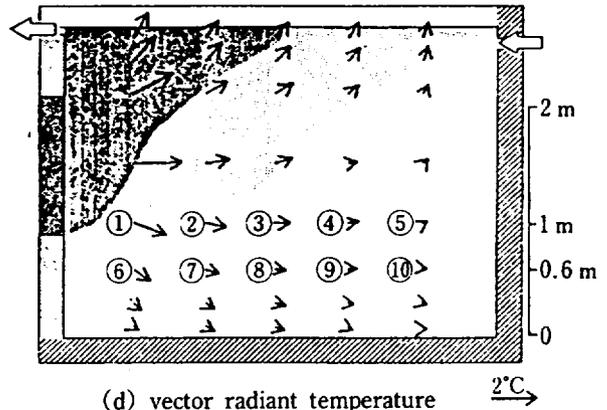
(a) surface temperature



(b) air temperature and velocity vector

position	①	②	③	④	⑤	aver- age
	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
MRT [°C]	29.0	27.3	26.5	26.0	25.8	26.7
	27.4	26.9	26.3	25.9	25.7	
PMV [-]	+0.7	+0.4	+0.3	+0.2	+0.2	+0.3
	+0.5	+0.4	+0.3	+0.2	+0.1	
SET* [°C]	27.7	26.8	26.5	26.2	25.0	26.5
	27.0	26.7	26.4	26.0	25.0	

(c) MRT, PMV, SET*



(d) vector radiant temperature 2°C

Fig. 4 Results of combination of cooling air and cooling panel (Case 3)

어 바닥위 1.5m 이하의 거주역에서는 드래프트가 계속되지 않았다. 바닥, 벽면온도는 천정복사판넬 단독냉방(Case 2)에 비해 높지만 기준면온도보다 낮은 곳이 많다(Fig. 4(a) 참조). 공기온도는 외벽부를 제외하고 거의 일정한 온도를 나타내고 있으며 연직방향의 온도차도 적다(Fig. 4(b) 참조). 백터복사온도는 천정복사판넬 단독냉방(Case 2)과 같이 창, 외벽으로 부터의 열복사와 천정면 냉복사의 영향으로 창에서 천정으로 향하는 양상을 나타내고 있다(Fig. 4(d) 참조). 천정복사판넬 단독냉방(Case 2)에 비하여 천정판넬온도가 상승한 만큼 거주역의 MRT도

상승하여, 평균 26.7°C를 나타내고 있다. PMV, SET*도 Case 2에 비하면 드래프트를 거의 관찰할 수 없으며 MRT가 상승함에 따라 높아져 각각 거주역평균(실내대표점 10점의 평균)온도는 +0.3, 26.5°C를 나타내고 있다(Fig. 4(c) 참조).

V. 결 론

1) 강제 대류식 냉방의 경우, 급기제트가 천정면에 체류해 있는 창으로 부터의 열상승류(난기) 밑으로 하강하여 바닥위 1.5m 이내의 거주

역에 드래프트를 발생시킨다.

2) 천정복사판넬 단독식냉방의 경우, 연직온도분포는 거의 볼 수 없는 균일한 온도분포를 나타내고 있다.

3) 강제대류·복사판넬병용냉방은 천정면 부근의 열상승류를 냉각시켜 급기제트의 하강정도를 완화시키는데 효과가 있으며 급기풍량도 강제대류식 냉방보다 적으므로 거주역내의 드래프트 경감에 효과적이다.

4) 거주역 복사환경에는 창과 외벽으로 부터의 열복사가 크게 영향을 미치고 있다. 천정면 냉복사판넬을 유효하게 활용하기 위해서는 창으로 부터의 열복사를 차단하는 것이 효과적이다.

5) 건강한 사람을 대상으로 한 PMV, SET* 해석에서는 각 냉방방식에 따른 실내복사환경의 현저한 차이는 관찰되지 않았다.

6) 검토한 모든 냉방방식에서 PMV, SET*는 외벽, 창부근에서 현저하게 상승하여 본 연구에서 검토한 3가지 냉방방식 모두 페리미터부(perimeter zone) 환경조정에 개선의 여지가 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 貝塚正光·岩本靜男, 1985年9月, 暖房室内の溫冷感指標分布の計算例, 空氣調和·衛生工學會學術論文集
2. 貝塚正光·岩本靜男, 1989年2月, 放射授受を含めた周期定常室内の熱環境の數値豫測, 空氣調和·衛生工學會學術論文集
3. 大森敏明·谷口博·工藤一彦, 1990年2月, 室内輻射環境の解析法の開發と床暖房への適用, 空氣調和·衛生工學會學術論文集
4. 寒河江昭夫, 1981年9月, 輻射冷暖房システムに關する實驗的研究(その1), 日本建築學會大會學術講演梗概集
5. 寒河江昭夫, 1982年10月, 輻射冷暖房システムに關する實驗的研究(その2), 日本建築學會大會學術講演梗概集
6. 石川幸雄·木村建一, 1984年10月, 屋根散水と自然換氣による自然冷房複合效果の檢討, 空氣調和·衛生工學會學術論文集
7. 西津衛助·吉田康敏, 1978年10月, 窓側天井面部に自然對流式空氣冷却·加熱ユニットを設置した年間冷暖房方式に關する研究(第2報), 空氣調和·衛生工學會學術論文集
8. 中村泰人, 1979年, 生氣象學的建築學の方法に關する基礎的研究, 京都大學學位論文
9. P. O. Fanger, 1982, Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company
10. 1980, 建築學 使覽(I, 計劃), 丸善,
11. 1993, Physiological Principles and Thermal Comfort (Chapter8), ASHRAE Handbook fundamentals