

## 천장복사냉방의 온열쾌적성 평가에 관한 연구

이 주 연<sup>†</sup>

LG전자 디지털 어플라이언스 연구소

### Evaluation of Thermal Comfort in Ceiling Cooling System

Ju-Youn Lee<sup>†</sup>

Digital Appliance Research Lab. LG Electronics Inc., Seoul 153-802, Korea

(Received February 13, 2008; revision received March 24, 2008)

**ABSTRACT:** The purpose of this study was to clarify the effects of air and ceiling temperatures on a type of ceiling cooling system that involves cool water circulation. The experiment is conducted in summer. The subjects (11 young females) are exposed to the following conditions : combinations of air temperatures (27 °C, 29 °C, 31 °C) and ceiling temperature of (22.7 °C, 23.7 °C, 24.7 °C) in still air and RH 50%. The following results were obtained ; the thermal sensation vote is neutral at a mean skin temperature of 34.5 °C. The ceiling temperature affected different parts of the body. For example, the forehead, scapula and abdomen produced different skin temperatures. Thermal comfort vote was rated as comfortable at high temperature environment. The satisfaction from the ceiling temperature was valued comfortable zone in this experiment. Mean skin temperature showing higher thermal neutrality temperature than existing studies for floor and wall radiation cooling results.

**Key words:** Mean skin temperature(평균 피부온도), Thermal sensation vote(온열감), Operative temperature(작용온도), Angle factor(형태계수)

#### 기 호 설 명

$hc$  : convective heat transfer coefficient  
 $hr$  : radiative heat transfer coefficient  
 $T_a$  : air temperature  
 $MRT$  : Mean Radiant Tempertaure  
 $F_{s-t}$  : angle factor between person (s) and surface i  
 $T_t$  : surface temperature of surface I

#### 1. 서 론

겨울철의 쾌적한 난방방식으로는 바닥복사난방

이 인체에 쾌적한 난방방식으로 보고되어지고 있다. 그러나 여름철의 복사냉방에 관한 연구는 충분히 검토되어지지 않고, 냉방 설비로서 주류를 이루고 있는 것은 통상 에어컨이 사용되어지고 있다. 그러나 에어컨에 의한 냉방은 실내의 온도분포가 바닥은 낮고 천장 면은 약 3°C가량 높아, 인체에 쾌적하다고 하는 두한족열(頭寒足熱)의 반대가 된다. 또한, 기류가 직접 인체에 폭로됨으로 인한 드래프트의 문제가 해결되지 않고 있다. Franc<sup>(1)</sup>의 논문에 의하면, 낮은 기류속도, 상하온도분포, 저소음, 유지보수의 관점에서 복사 냉방이 경제적 가치가 있다고 보고하고 경제적 가치에 대해 simulation을 통해서 설명하고 있다. 그 외에도 여러 연구자들에 의해 천장 복사냉방의 Simulation 결과들이 발표되고 있고, Metal을 사용한 냉

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-19-9144-7695; fax: +82-2-6915-1069

E-mail address: leejuyoun@paran.com

방방식. 여러 가지 자세에서의 인체 영향의 검토되고 있다.<sup>(2-6)</sup> 그 결과들에서도 천장복사 냉방은 천장 면에서 냉복사로 인해 실온이 거의 균일하게 유지됨으로 여름철에 가장 쾌적한 냉방방식으로 대두되고 있고 냉방부하가 작고, Energy Saving에 기여한다고 보고되고 있다.<sup>(2, 3)</sup> 또한, 바닥복사난방, 천장복사냉방의 경우, 장시간 재실하는 주택, 병실, 고령자를 위한 장소, 도서관, 연구실, 음악실, 레스토랑등 공조소음 및 기류감이 문제가 되는 공간의 냉난방에 적합한 것으로 알려져 있다. 실제로 일본에서는 병원에 적용한 사례를 측정하여 보고하여 그 쾌적성 평가가 이루어지고 있다.<sup>(4, 5)</sup>

본 논문에서는 Polypropylene Capillary Tubes ( $\Phi 3.4$  mm)를 이용한 냉수 순환식 천장 복사 냉방 시스템이 설치되어 있는 실험실 조건하에서 피험자 실험을 통해 천장 복사표면온도의 변화에 따른 피부온의 변화, 온열감의 변화를 검토하였다.

2. 실험계획

2.1 실험실 및 장치

실험은 Fig. 1에서와 같이 나타낸 일본 나라여자 대학 인공 기후실에서 실시되었다. 실험실은 전실(Pretest Chamber)과 실험실(Test Chamber)로 구성되었으며, 실험실에는 바닥 냉방장치(W3.7 m×D3.55 m)가 바닥에 설치되어 있고, 천장 냉난방 설비(W4 m×D2.56 m)는 Fig. 2와 같이 Flexible한 물 순환식 천장냉방장치를 부착한 아크릴 판을 천장에 매달아 설치하였다. 아크릴 판 사이에는 Polypropylene Capillary Tubes( $\Phi 3.4$  mm)를 이용하여 냉수를 공급해 냉방하였다. 위의 냉방 장치의 특징은 가늘고 Flexible하여 발(簾)처럼 벽면에 설치할 수 있는 설치성이 뛰어난 설비이다.

2.2 설정조건

2.2.1 온열환경조건

실험실 설정조건은 겨울철의 실내조건을 상정하여, Table 1과 같이 실온을 27℃, 29℃, 31℃로 하고, 천장온도는 공급 수온을 예비실험에서 결과가 생기지 않는 온도 범위인 15℃로 하여 각 천장 표면온도가 22.7℃, 23.7℃, 24.7℃로 3조건이

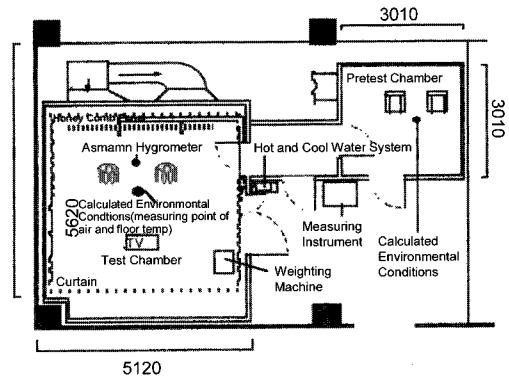


Fig. 1 Plan of climate chamber.

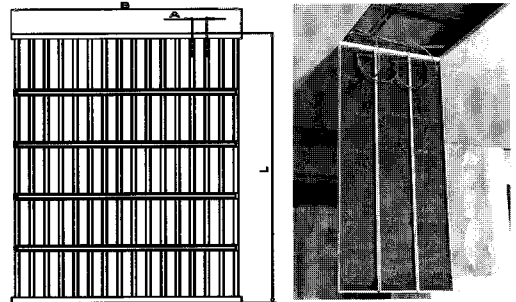


Fig. 2 Typical types of Panel. (material : polypropylene Capillary tubes :  $\Phi 3.4$ mm)

Table 1 Conditions of experiment

Air Temp. [℃]	Ceiling Temp. [℃]	Water Temp. [℃]	Globe Temp. [℃]	Relative Humidity [%]	Air Velocity [m/s]
27℃	22.7℃	15℃	26.4℃	50%	less than 0.1
29℃	23.7℃	15℃	28.5℃		
31℃	24.7℃	15℃	29.7℃		

되도록 하였다. 실험실의 상대습도는 50%, 기류속도는 0.1 m/s으로 설정 하였다. 또한, 실험 60분후에는 기온을 조절하지 않고 천장표면 온도만을 조절하여 3분간 실험을 실시하였다.

2.2.2 인체측 조건

① 피험자 : 피험자는 개개인의 열적 선호도를 평가하는 선택 기온실험에서 중온군을 선택한 일본나라여자대학의 건강한 여자 대학생 11명으로 하였다. 피험자의 신체적 특징은 Table 2와 같다.

Table 2 Physical condition and characteristics of subjects

subject	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	As (m <sup>2</sup> )	BMI (kg/m <sup>2</sup> )
AVG	23.1	158.2	49.8	1.50	19.9
STD	±1.89	±4.70	±4.17	±0.07	±1.60

인체의 체표면적(Body Surface Area)은 일본인의 체형에 맞춘 Kurazumi식<sup>(7)</sup>에 의해 산출했다. 선택기온실험은 먼저 피험자의 피부온도를 일정 온도에서 일정 시간동안 안정시킨 후, 기온이 실험실내에서 자유롭게 조절 되는 인공기후실에 입실하여, 피험자 자신이 열적으로 선호하는 온도를 선택하도록 하여 각 개인에 따른 선호하는 온도(Preferred Temperature)가 어느 정도 차이가 있는지 파악하는 실험이다. 실험에서 고온군은 선호하는 온도에서 고온측의 온도를 설정한 피험자 집단을 고온군이라 하고, 중온군은 선호하는 온도에서 중간 온도측의 온도를 설정한 피험자 집단이다. 저온군은 선호하는 온도에서 저온측의 온도를 선택한 피험자 집단이다. 본 연구에서는 데이터의 정확성을 위해서 Sassa<sup>(8)</sup>의 선택기온 실험에서 중온군의 평균 피험자를 선정하여 실험하였다.

② 자세 : 피험자는 착석상태에서 실험에 임하였다. 피험자는 기온 27℃ 상대습도 50%의 전실 환경에서 의자에 앉아 30분간 안정을 취하고, 본 실험실에 입실하여 천장 냉방환경에 노출되도록 하였다.

③ 착의량 : 피험자의 착의량은 Hanada<sup>(9)</sup>의 의복 중량법에 따라 반 소매 T-shirt, 반바지, 속옷착용으로 약 0.32 clo였다.

2.2.3 측정항목 및 방법

① 온열환경요소 : 기온은 실내 중앙 지점의 바닥으로부터 0.1 m, 0.6 m, 1.1 m 높이에서 측정되었으며, 글로브 온도는 바닥에서 0.6m 지점에서 측정되었다. 측정은  $\Phi 0.1\text{mm}$  열전대(Thermo-couple)를 이용하여 12ch Hybrid Recorder로 30초 간격으로 연속 측정하였다. 바닥온도와 천장 온도는 바닥과 천장 표면 3곳에 열전대를 부착하여 측정하고, 상대습도는 대형 아스만(Asmann) 통풍건습계로 측정하였다. 기류속도는 0.1 m/s 이하로 안정시켰다.

② 생리적 반응 : 인체 반응으로 피부온도(Skin

Temperature)는  $\Phi 0.1\text{mm}$  열전대를 피부 표면 14곳에 부착하고 30초 간격으로 측정하였다. 직장온도(Rectal Temperature)는 피부온도와 같이 30초 간격으로 측정하였다. 평균 피부온도(Mean Skin Temperature)는 Hardy and Dubois<sup>(10)</sup>의 12점법으로 산출하였다. 그밖에, 혈압, 심박수, 체중이 실험 전후로 측정되었다.

③ 심리적 반응 : 심리적 반응은 온열환경 평가 지표에 따른 진신 및 부위별 온열감(Thermal Sensation Vote-9단계), 쾌적감(Thermal Comfort Vote-7단계), 천장 온도에 대한 만족감등의 평가를 10분 간격으로 실시했다.

2.2.4 형태계수(Angle Factor)

건축공간에 있어서 열 복사환경이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위한 인체와 주변환경과의 복사 열 교환량과 평균복사온도의 산출에는 인체의 유효복사면적과 인체와 공간 구성면 사이의 형태계수의 산출이 필요하게 된다. Fanger<sup>(11)</sup>의 인체와 공간구성 면과의 형태계수 산출방법을 이용해서 형태계수를 구하면, 천장에 대하여 0.138[ND]의 결과가 나타났으나, Fanger가 제안한 방법은 투사 면적을 이용하여 측정했기 때문에 비교적 좁은 공간에서 적용하기에는 문제가 있다. 본 논문에서는 Tsuzikawa<sup>(12)</sup>의 의자에 앉은 상태에서의 형태계수의 측정 방법을 이용하여 형태계수를 구한 결과, 천장 면에 대하여 0.12[ND]의 결과를 나타냈다.

2.3. 실험 순서

피험자를 먼저 기온 27℃, 상대습도 50%의 전실에 입실시켜 설정착의를 착의 시킨 후, 피부온도 및 직장온도의 안정을 위하여 약 30분간의 의자에 앉은 자세로 안정을 취한 후, 천장 냉방설비를 갖춘 인공 기후실에 60분간 노출시켰다. 실험은 냉방실험으로 여름철 인체 적응력을 고려하여 여름철(7~8월)에 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인체 생리 반응의 영향

3.1.1 온도조건별, 부위별 피부온도의 평균 분포 Fig. 3은 온도조건별, 부위별 피부온도의 평균 분

포를 나타낸 것이다. 평균 피부온도는 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Mean Skin Temperature} \quad (3) \\
 & = \{(T_{\text{forehead}} \times 7) + (T_{\text{upper chest}} \times 35/4) \\
 & \quad + (T_{\text{scapula}} \times 35/4) + (T_{\text{abdomen}} \times 35/4) \\
 & \quad + (T_{\text{lower back}} \times 35/4) + (T_{\text{forearm}} \times 14) \\
 & \quad + (T_{\text{back of hand}} \times 5) + (T_{\text{thigh(a.)}} \times 19/2) \\
 & \quad + (T_{\text{thigh(p.)}} \times 19/2) + (T_{\text{calf}} \times 13/2) \\
 & \quad + (T_{\text{shin}} \times 13/2) + (T_{\text{instep}} \times 7)\} \times 100
 \end{aligned}$$

피부온도는 전체적으로 30~36.5 °C의 범위 내에서 변동하고, 손·발의 말초부에서 넓은 변동폭을 나타냈다. 실험실 기온이 27 °C의 경우에는 다른 조건에 비하여 피부온도가 낮은 분포를 나타내고, 천장 냉 복사의 영향을 크게 받고 있었다. 특히, 등과 배 부분에 유의차가 크게 나타나 인체 상부가 천장복사의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 또한, 직장온도에서도 약간의 유의차가 나타났다. 실험 60분후 공조를 정지시킨 후(Ta27 off, Ta29off, Ta31off)부터는 천장 냉복사의 영향이 크게 나타나 더 낮은 피부온 분포를 나타내었다. 이는 실험실 공조가 off됨으로 인해 천장냉방의 영향이 커짐으로 인해 인체에 더 크게 영향을 미친 것으로 생각된다. 평균 피부온은 약 34~35

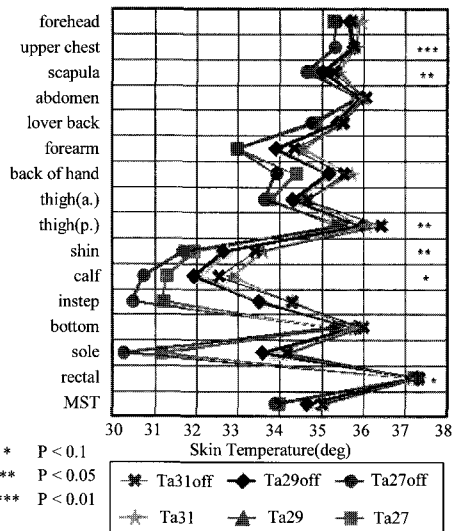


Fig. 3 Changes in skin temperature with air and ceiling temperature.

°C로, 직장 온도는 약 37.2~37.3 °C의 값을 나타내었다.

3.1.2 구간부의 부위별 피부온도와 온열감 평가와의 관계

Fig. 4은 천장복사냉방의 경우, 인체 상부에 대한 복사열의 영향이 크다고 생각되어 인체 상부의 피부온도와 온열감과의 상관관계를 나타낸 것이다. 피부온도가 높을수록 온열감도 높은 추의 평가를 나타내고, 이마, 가슴, 등 부위에서 평균 피부온도와 0.9이상의 높은 상관관계를 나타내었다.

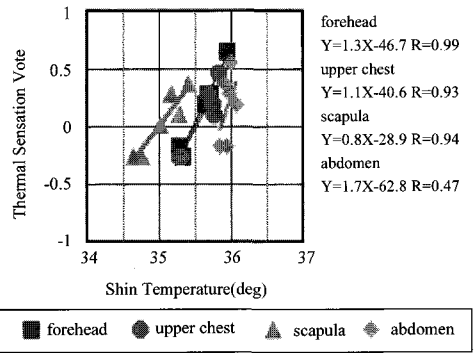


Fig. 4 Relation between upper body skin temperature and thermal sensation vote.

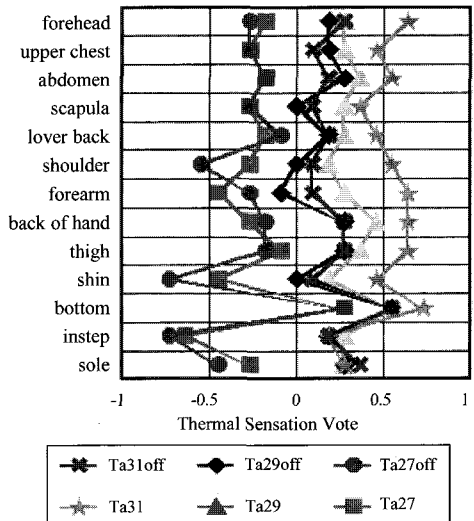


Fig. 5 Changes in thermal sensation vote with air and ceiling temperature.

3.2 인체 심리 반응의 영향

3.2.1 각 온도조건에 따른 부위별 온열감 평가

Fig. 5에 각 온도 조건별의 온열감과의 관계를 나타내었다. 온열감은 전반적으로 -1(약간 서늘하다)~+1(약간 따뜻하다)의 범위이고, 기온이 높아도 온열감의 평균치는 더운 측의 평가를 나타내지 않았다. 또, 각 부위에서도 거의 동일한 온열감 평가를 나타내고 있고 인체 모든 부위에 천장 냉복사가 균일하게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 기온이 27℃의 경우에는 엉덩이 부위외에는 모두 -1(약간 서늘하다)의 평가를 나타내고 공조를 정지시킨 후에는 머리, 등, 하퇴부에서 보다 낮은 온열감을 나타냈다. 기온이 29℃, 31℃의 경우에는 0(어느 쪽도 아니다)~+1(약간 따뜻하다)측의 평가를 나타냈다. 기온이 31℃의 경우에는 높은 기온에도 불구하고 공조 정지후에는 기온 29℃보다도 서늘한 쪽의 온열감을 나타내 천장 냉 복사가 인체에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

3.3 생리적 반응과 심리적 반응과의 관계

Fig. 6에 평균 피부온도와 전신 온열감, 쾌적감과의 관계를 나타내고 있다.

평균 피부온도와 전신 온열감, 쾌적감과의 사이에 높은 상관관계를 나타내었다. 평균 피부온도는 약 33.5~35.5℃의 범위에서 -1(약간 서늘하다)~+1(약간 따뜻하다)의 온열감 평가를 나타내고, 약 34.5℃에서 열적 중립상태에 이르렀으며, 그때 쾌

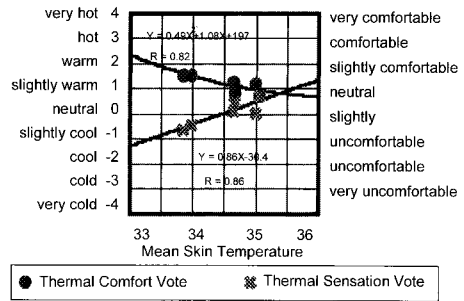


Fig. 6 Relation between mean skin temperature and thermal sensation/thermal comfort vote.

적감은 +1(약간 쾌적하다)의 평가를 나타내 기준의 바닥, 벽 복사냉방의 결과와 비교해 약간 높은 피부온도에서도 열적으로 쾌적한 것으로 나타났다.

3.4 천장온도에 대한 평가

Fig. 7에 작용온도와 천장온도에 대한 온열감·만족감과의 관계를 나타내었다. 작용온도와 평균 복사온도는 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$OT = \frac{h_c \cdot T_a + h_r \cdot MRT}{h_c + h_r} \quad (1)$$

$$MRT = \sum_{t=1}^n F_{s-t} \cdot T_t \quad [^\circ\text{C}] \quad (2)$$

작용온도와 천장 온도에 대한 온열감과의 관계

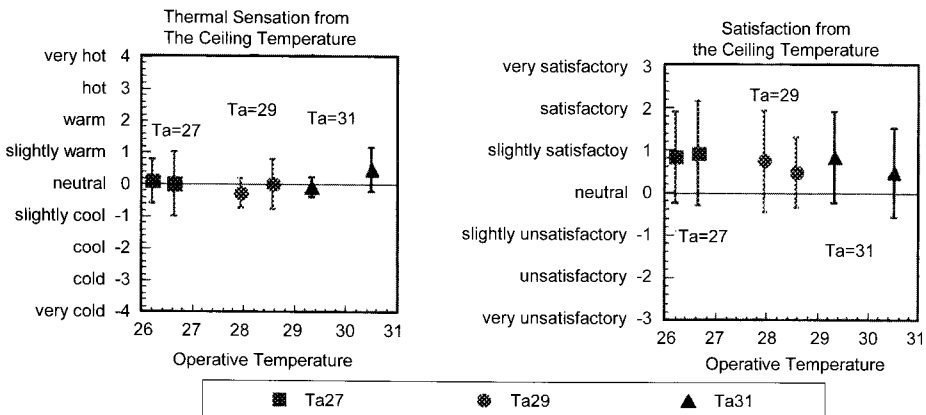


Fig. 7 Relation between operative temperature and thermal sensation/thermal comfort vote.

에서 천장온도의 영향은 거의 나타나지 않고 전체적으로 0(어느 쪽도 아니다)의 평가를 나타내고, 천장 온도에 대한 만족감 평가에서는 전 조건에 대해서 만족이라고 평가하였다. 또한, 기온 29℃, 31℃에서는 공조를 정지 시킨 후에 더 높은 만족감을 나타냈다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 냉수를 이용한 천장 냉방시스템을 이용하여, 천장 복사냉방온도가 인체 온열감, 쾌적감에 미치는 영향을 인체 생리실험을 통해 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피부온도의 경우, 천장으로부터의 복사가 인체의 인체 상부에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 인체 상부중에서도 이마, 가슴, 등 부위에서 0.9이상의 높은 상관관계를 나타내었다.

(2) 전신 온열감 평가에서는 신체 각 부위에서 -1(약간 서늘하다)~+1(약간 따뜻하다)측의 평가를 나타내었으며, 전신에 거의 균등하게 복사열이 영향을 미친 것으로 나타났다.

(3) 평균 피부온도는 약 34.5℃에서 열적 중립감을 나타내고, 평균 피부온도 약 33.5~35.5℃의 범위에서 -1(약간 서늘하다)~+1(약간 따뜻하다)의 온열감 평가를 나타낸 것으로 보아 약간 높은 온도조건에서도 천장 냉방의 경우 넓은 범위의 쾌적 온도 범위를 나타낼 수 있다. 또한, 기존의 바닥, 벽 복사 냉방의 연구보다도 약간 높은 피부온도에서 열적 중립감을 나타내었다.

(4) 천장 온도에 대해서는 전 조건에서 만족하다는 평가를 나타내었다. ASHRAE handbook에서는 기온과 천장온도의 차이가 13℃ 이하이면 PPD (Predicted percentage of dissatisfied) 5%의 불만족율을 나타낸다고 했지만, 본 연구 결과에서는 기온과 천장 온도와의 차이가 4.3℃~6.3℃에서 약간의 개인차는 있지만 만족한다는 결과를 얻었다.

이상의 결과에서, 천장 복사냉방시스템의 경우 천장으로부터의 냉 복사가 바닥까지 영향을 미침으로 인해 거의 균일한 실내 환경을 조성하고, 약간 높은 피부온도에서도 쾌적감을 느낄 수 있으므로 서열 환경을 완화시키며, 인체에 쾌적한 냉방 시스템이라고 할 수 있다.

본 연구에 사용한 polypropylene Capillary 튜

브의 경우 너무 가늘어서 냉수에 사용해야하는 물의 수질을 고려해야하는 특성으로 인해 국내에서는 적용하기 어려운 점이 있어 냉수 튜브 두께의 검토와 아울러 냉수를 이용한 바닥, 벽, 천장 냉방시의 온열 쾌적성에 대해 검토할 예정이다.

#### 후 기

The author thanks to Dr. Norio Isoda, Nara Women's University for his valuable comments on this study.

A part of this paper was presented at *The 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (2002 Indoor Air)*, Monterey California June 30~July 5 2002.

#### 참고문헌

1. Franc Sodec, 1999, Economic viability of cooling ceiling systems, *Energy and Buildings*, Vol. 30, No. 2, pp.195-201.
2. Niu, J., Kooi, J. V. D., and Rhee, H. V. D., 1995, Energy saving possibilities with cooled-ceiling systems, *Energy and Buildings*, Vol. 23, No. 2, pp.147-158.
3. Jae-Weon Jeong and Stanley A. Mumma, 2007, Practical practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 9, pp.3176-3185.
4. Nagano, K. and Mochida, T., 2004, Experiments on thermal environmental design of ceiling radiant cooling for supine human subjects, *Building and Environment*, Vol. 39, No. 3, pp.267-275.
5. Senuma, H., 1998, Experimental operation and indoor thermal environment of the ceiling radiant cooling and heating system, *Building Mechanical and Electrical Engineer*, Vol. 6, pp.41-46.
6. Peter, Höpfe, 1988, Comfort requirements in indoor climate, *Energy and Buildings*, Vol. 11, No.1-3, pp.249-257.
7. Kurazumi, Y. et al., 1999, The effective ra-

- diation area and configuration factor for the person sitting on a floor, *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, No. 479, pp. 27-33.
8. Sassa Naomi, 2001, Experimental study on individual variation of thermal physiological and psychological response, *Journal of Archit. Plann. Environ. Engng.*, No. 542, p. 35.
  9. Hanada, Y., Mihira, M., and Ohhata, K., 1981, Studies on the Thermal Resistance of Women's Underwear, *Japan Res. Assn. Test. End-Uses.*, Vol. 22 No. 10, pp. 31-41.
  10. Hardy, J.D. and DuBois, E.F., 1938, The Technic of Measuring Radiant and Convection, *Journal of Nutrition*, Vol. 15, No. 5.
  11. Fanger, P. O., 1970, *Thermal Comfort*, McGraw-Hill Book.
  12. Tsuzikawa and Horikoshi et al., 1991, The Effective Radiation Area and Configuration Factor for the Person Sitting on a Floor, *Journal of Archit. Plann. Environ. Engng.*, No. 428, pp. 67-75.
  13. Bjarne W. Olesen, 1995, International standards and the ergonomics of the thermal environment, *Applied Ergonomics*, Vol. 26, No. 4, pp. 293-302.
  14. Bjarne W. Olesen, 2007, The philosophy behind EN15251 : Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 7, pp. 740-749.
  15. McIntyre, D. A. and Ph.D MIHVE, M. A., 1976, Overhead Radiation and Comfort, *The Building Services Engineer*, Vol. 44, pp. 226-232.
  16. Nevins, P. G. and Feyerherm, A. M., 1967, The effect of floor surface temperature on comfort, Part 4 Cold floors, *ASHRAE Trans*, Vol. 73, pp. 21-28.
  17. Lee, J. Y. et al., 2000, The Evaluation of Thermal Comfort Affected by Conduction from water Heated Floor to Contacted Body Surface, *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, No. 536, pp. 43-48.
  18. Lee, J. Y. et al., 2000, New Weighting Coefficients for Calculating Mean Skin Temperature in Relation to the Posture with Consideration to Heat Conduction, Vol. 19, No. 2, pp. 63-74.
  19. Kato, H. et al., 1993, Experimental study of the influence of cold radiation on thermal comfort in summer condition, Part2 Study on thermal sensation and comfort in steady state, *Summaries of technical papers of annual meeting architectural of Japan*.
  20. *Handbook of Physiological Science 1987, Physiology of Energy Exchange and Ther-mo-regulation*, Igaku-Shoin, Vol. 22.
  21. *Handbook of Physiological Science, 1987, Physiology of Biological Rhythm*, Igaku-Shoin, Vol. 13.
  22. ASHRAE 55-1992, *Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy*, ASHRAE, Atlanta.