

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 27, No. 3, 2007

대공간의 바닥 복사 난방 적용에 관한 연구

안민희*, 최창호**

*광운대학교 대학원 건축공학과(belteshazzar@kw.ac.kr), **광운대학교 건축공학과(choi1967@kw.ac.kr),

A Study on Application of Radiant Floor Heating in Large Space

Ahn, Min-Hee*, Choi, Chang-Ho**

*Dept. of Architecture Eng., Graduate School, Kwangwoon University(belteshazzar@kw.ac.kr),

**Dept. of Architecture Eng., Kwangwoon University(choi1967@kw.ac.kr)

Abstract

This paper addresses the indoor air quality when radiant floor heating is applied in large space. Radiant heat exchange between surfaces depends on the orientation and the temperature of the surfaces. Also, the temperature and the radiant characteristic of the wall and the roof that face the floor have great influence on the indoor air environment due to the largeness of the wall and the roof in large spaces. In this study, we simulate a test-cell(25X20X10) using a ies VE. And using a CFD(microflo in VE), an indoor air environment was investigated to establish the optimum temperature of floor.

At the first time of the heating, high floor temperature is demanded. At the middle of the heating, however, the temperature of the residential space was formed appropriately, although the temperature of the floor was set low.

Keywords : 대공간(Large space), 바닥복사난방(Radiant floor heating), 실내공기환경(Indoor air environment), ies VE, 바닥온도(Floor temperature)

기호 설명

dW : 복사량(W/m²)
ε : 표면 방사량(W/m²)
σ : Stefan-Boltzmann 상수
(=5.6697×10⁻⁸ W/m²K⁴)
T : 표면 절대온도 (K)

θ : 수직 표면으로부터 측정된 방향각
dω : 미소 입체각
dA : 표면의 미소면적

1. 서론

최근 국제 공항, 스포츠 시설, 아트리움, 컨벤션

접수일자 : 2007년 7월 5일, 심사완료일자 : 2007년 9월 19일
교신저자 : 최창호(choi1967@kw.ac.kr)

센터 등 대공간 건축물이 증가하고 있다. 이러한 대공간 건축물은 사용공간이 바닥 근처로 한정되어 있어 전체 공간에 비해서 아주 일부분만이 거주공간으로 사용된다. 또한 바닥면적에 비해 천장이 높기 때문에 수직방향으로 심한 상하 온도차를 발생 시킬 수 있다. 그러므로 전공기 방식에 의해 이루어지는 난방방식은 많은 양의 공기를 제어해야 하기 때문에 큰 에너지 소비를 유발시킨다.

따라서 과도한 에너지 소비를 방지하고 쾌적한 실내공간을 만들기 위해 공기의 흐름 및 온도분포는 거주 공간을 대상으로 해야 한다.

따라서 본 연구에서는 거주 공간의 적절한 온도 분포 및 공기흐름을 제어하기 위해 바닥 복사 난방 방식을 제안하고자 한다. 바닥 복사 난방 방식은 실내 상하 온도차가 거의 없고, 인체의 피부에 저온복사열선을 방출하여 인체에도 비교적 양호한 감각을 준다. 또한 쾌적한 실내 열환경을 조성할 수 있을 뿐만 아니라, 에너지 면에서도 유리하다.

2. 바닥 복사 난방 기초

2.1 복사 이론

건물의 표면은 표면의 절대온도에 따른 복사열을 방출한다. Lambertian 방사체가 미소면적(dW)으로부터의 작은 입체각($d\omega$)과 수직을 이루는 표면으로의 복사량은 식 (1)과 같다.

$$dW = \frac{1}{\pi} \epsilon \sigma T^4 \cos\theta d\omega dA \quad (1)$$

넓이 A 인 표면으로부터 방출되는 전체 복사(W)는 식 (2)와 같다.

$$W = \epsilon A \sigma T^4 \quad (2)$$

또한 표면은 복사의 일부분을 흡수한다. Kirchhoff의 법칙에 따르면 표면에 흡수된 입사된 복사의 비

율은 표면의 방사량 ϵ 와 같다.

이것으로 볼 때 복사 열전달은 표면의 온도 및 복사 특성뿐만 아니라 표면의 방향에 따라 달라진다. 대공간에서는 벽 및 지붕의 면적이 크기 때문에 바닥 표면과 면하는 벽체 및 지붕의 온도 및 복사 특성이 실내 공기 환경에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

2.2 바닥 복사 난방

바닥 복사 난방은 공간의 평균 표면온도를 상승 시킴으로 인체에서 빼앗기는 복사열을 줄이기 때문에 낮은 실내 온도로도 쾌적감을 높일 수 있으며 에너지를 절감할 수 있으며, 이상적인 실내 수직 온도 곡선과 거의 일치하여, 대공간에서의 성층화를 없앨 수 있다.

전형적인 바닥 복사 난방 방식은 열복사로 50~70%의 열을 내고, 나머지는 공기의 흐름에 의한 대류로 이루어지기 때문에 실내기류를 전공기 방식보다 온화하게 형성할 수 있다.

3. 연구방법

바닥 복사 난방은 건물의 표면 온도가 큰 영향을 미친다. 정확한 표면온도 및 실내 온도 환경을 위해서 에너지 시뮬레이션 프로그램을 이용해 실제와 비슷한 실내환경을 조성하였다. 그리하여 CFD의 경계조건(실내온도, 습도, 표면온도 등)을 설정하였다. CFD 시뮬레이션을 통해 바닥 난방 초기와 중간의 실내 온도 분포 및 기류분포를 통해 사람이 느끼는 쾌적감을 알아보고자 한다.

3.1 해석모델

본 연구에서의 대상공간은 국내 초등학교 5개를 기초로 한 평균 크기로 바닥면 길이 25m, 폭이 20m, 높이가 10m인 단일 공간이다. 표 1은 대상공간의 형태와 지붕, 벽체의 구성을 나타낸 것이다.

표 1. 대공간의 형태

구분	조건
형태	직방형 (25m × 20m × 10m)
층고	10m
벽체 구성	Concrete 200mm Insulation 65mm
지붕 구성	Concrete 150mm Insulation 110mm

대상공간의 설계 온도 및 단열 성능은 표 2와 같이 국내의 건축물 에너지절약 설계 기준을 기초로 하였다.

표 2. 단열 및 실내 온도 조건

구분	조건
외벽 (외기에 직접 면하는 경우)	0.47 W/m ² ·K
바닥 (바닥 난방일 경우)	0.52 W/m ² ·K
지붕 (외기에 직접 면하는 경우)	0.29 W/m ² ·K
실내 온도	20~22℃

대공간의 경우 냉방보다는 난방의 경우에 성층화로 인한 실내 상하온도차가 커지고 쾌적감이 떨어지기 때문에 본 연구에서는 난방의 경우만 대안을 제시하였다.

3.2 해석방법

에너지 시뮬레이션 프로그램으로는 esp-r을 엔진으로 영국의 ies4D에서 만든 VE(virtual Environment)를 사용하였다. 모듈의 구성은 열환경은 Apache, 빛환경은 Suncast와 Radiance, 환기환경은 Microflo로 이루어져있다. 또한 ApHVAC를 통해 냉난방장치를 설계할 수 있어 건물의 실제 에너지 소비량 및 실내온도를 구할 수 있다.

본 연구의 순서는 그림 1과 같다.

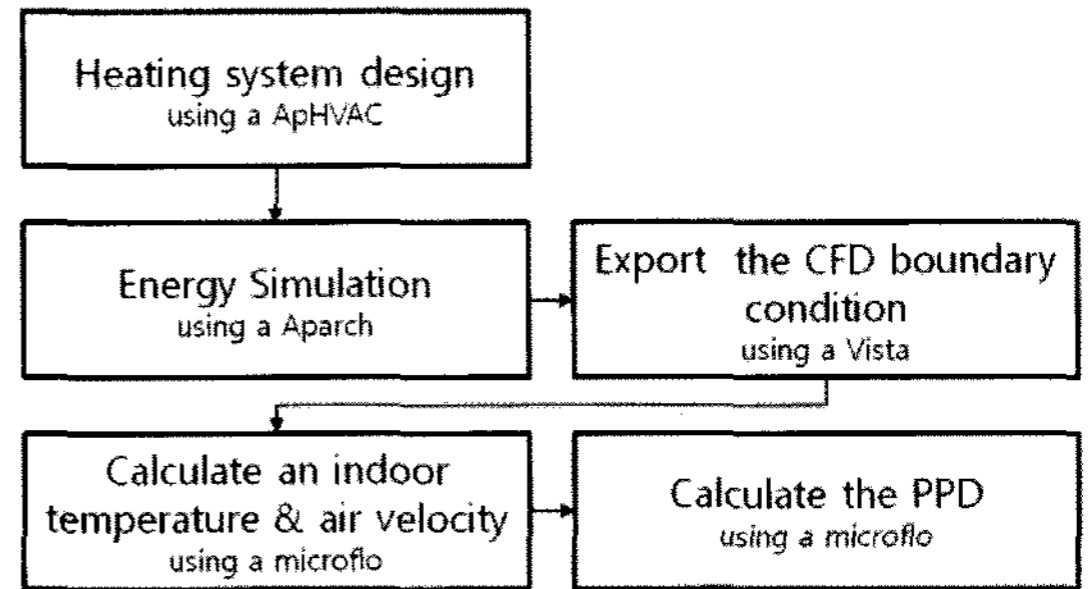


그림 1. 연구 방법

먼저 ApHVAC를 이용하여 바닥 복사 난방 시스템을 설계하여 대상건물에 적용하였다. Apache를 통해 대상건물의 실내온도, 표면온도 및 난방부하를 계산하였고, Vista를 이용해 CFD 경계조건을 추출하였다. 이 경계조건을 Microflo에 적용하여 실내 온도 분포 및 기류 흐름을 계산하였다. 그 후에 온열쾌적감(PPD)를 계산하였다.

시뮬레이션에 사용된 난방시스템 설계 조건 및 적용 식은 표 3과 표 4에 나타내었다.

표 3. 난방 시스템 조건

구분	조건
난방 방식	바닥 난방 방식
최대출력	40kW
난방시간	16 ~ 22
설정온도	20℃

표 4. 에너지 시뮬레이션 조건 및 적용 식

구분	조건
기상데이터	Seoul2000
시뮬레이션 기간	10월~3월
External Convection model	McAdams
Internal Convection model	Alamdari&Hammond
Long-wave radiation model	CIBSE
CFD scheme	Power Law scheme

기상데이터는 2000년도 서울 표준 기상데이터를 사용하였고, 시뮬레이션 기간은 한국의 난방기간인 10월부터 3월까지로 정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 에너지 시뮬레이션 결과(CFD 경계조건)

경계조건 설정은 난방기 중 가장 추운 날인 1월 31일로 정하였다. 그림 2은 CFD 경계조건 인 1월 31일에 대상공간의 실내온도, 벽체 및 지붕의 온도 변화이다.

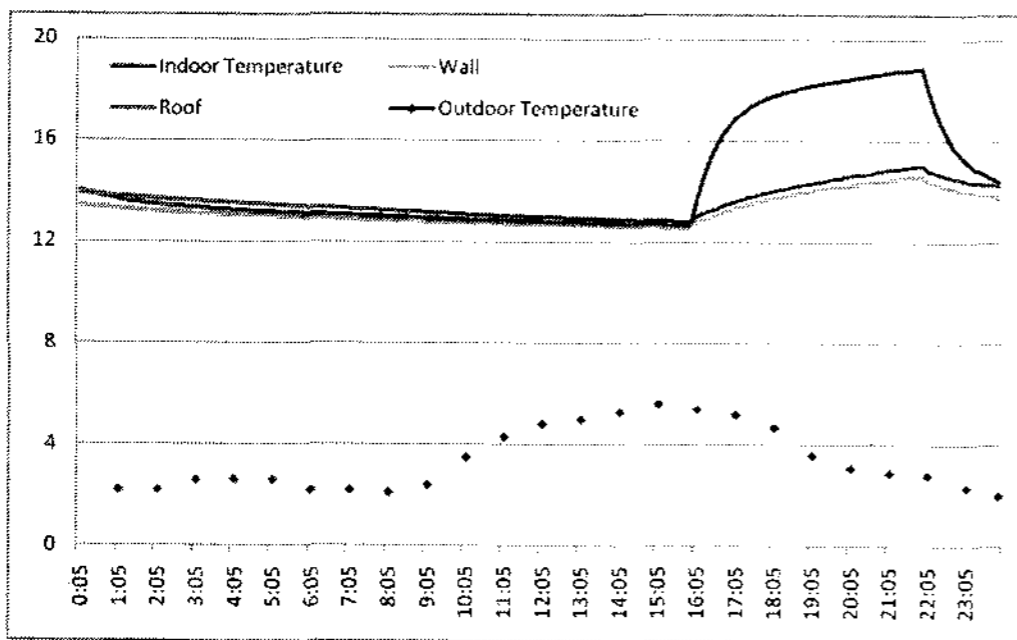


그림 2. 온도 변화(실내, 벽체, 지붕)

CFD 경계 조건은 난방 시작 시인 16시와 난방 중간인 21시로 하여 바닥 온도에 따른 실내 온도 분포 및 기류 속도를 계산하였다. 그리고 PPD를 계산하였다.

4.2 CFD 결과

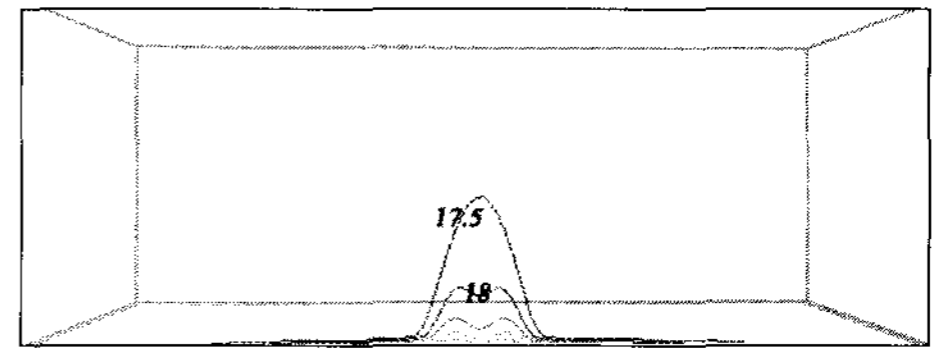
바닥온도(26°C, 30°C, 35°C)에 따른 실내 공기 환경을 살펴보았다. 이를 위하여 중앙수직단면을 점검단면으로 설정하였다. 이 점검단면에서의 기류 분포, 온도분포, 그리고 PPD 분포를 살펴보았다.

4.2.1 난방초기

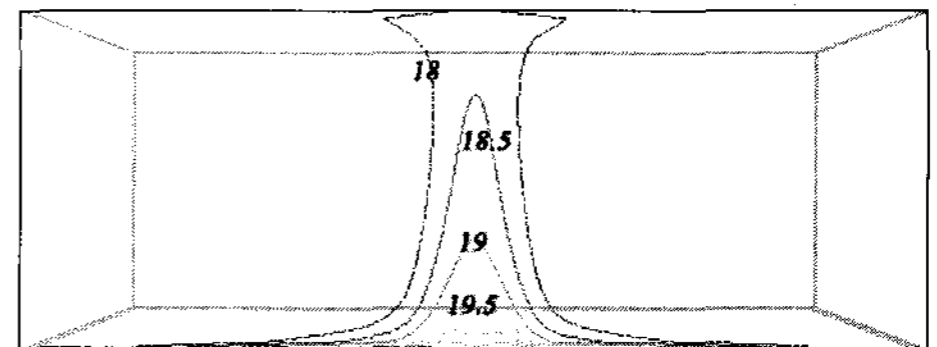
바닥 난방 온도에 따른 실내 온도분포를 살펴보기 위해 바닥온도에 따른 실내온도분포를 그림 3에 나타내었다.

그림 3과 같이 바닥온도 26°C일 때는 실내온도가 17.5°C이하의 온도 분포를 보였다. 바닥온도 30°C일 때는 18°C 이상의 온도분포를 보였으며 실 중앙에 19°C의 온도를 나타냈다. 바닥온도 3

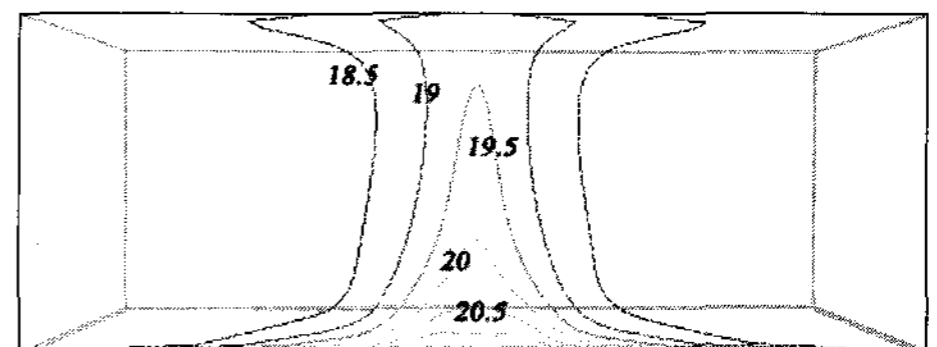
5°C일 때는 18.5°C이상의 온도분포를 보이며 실 중앙에 20°C 이상의 온도를 나타내었다. 실 중앙보다 벽 주위에서 낮은 온도를 나타내는 것은 벽체의 낮은 온도로 인한 냉복사로 인한 것으로 사료된다.



(a) 바닥 온도 26°C



(b) 바닥온도 30°C



(c) 바닥온도 35°C

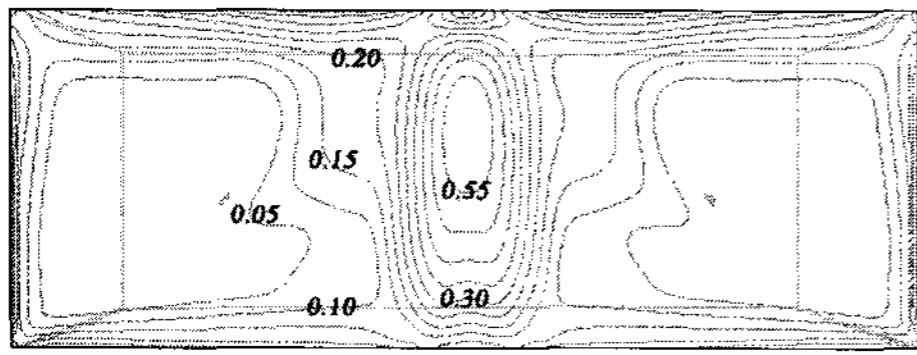
그림 3. 바닥온도에 따른 실내 온도 분포(단위 : °C)

실내 기류분포는 그림 4에 나타내었다.

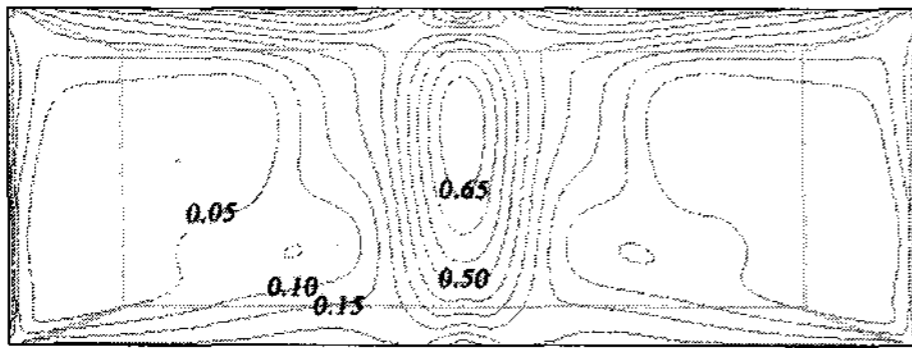
바닥온도와 상관없이 거주역 부근에서는 0.05~0.5m/s의 기류속도를 나타내었고, 대체적으로 비슷한 기류곡선을 나타내었다. 바닥온도가 높아질수록 기류의 속도가 미세하게 빨라졌으며, 중앙상층부로 갈수록 기류속도가 빨라졌다.

바닥난방온도에 따른 실내 쾌적감을 알아보기 위해 PPD 분포를 그림 5에 나타내었다.

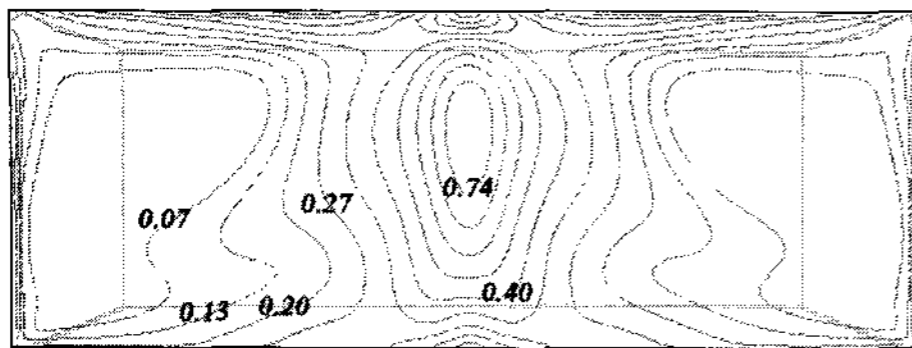
거주역의 PPD분포는 바닥온도 26°C일 때는 5.0~7.5, 30°C일 때는 5.0~6.5, 35°C일 때는 5.0~5.5의 분포를 보였다. 바닥난방온도가 낮아도 10%미만의 PPD로써 쾌적한 실내 공기 환경이 예상된다.



(a) 바닥 온도 26°C



(b) 바닥 온도 30°C



(c) 바닥 온도 35°C

그림 4. 바닥온도에 따른 실내 기류 분포(단위 : m/s)

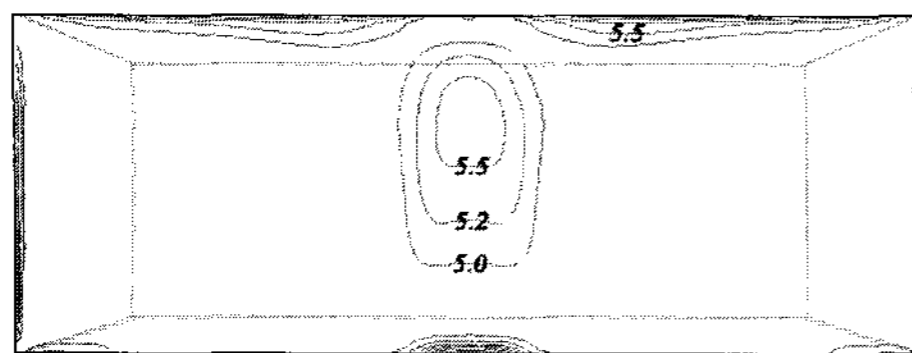
4.2.2 난방 중간

난방 중간에 적절한 바닥난방온도를 알아보기 위해 바닥온도에 따른 실내 공기 환경을 계산하였다.

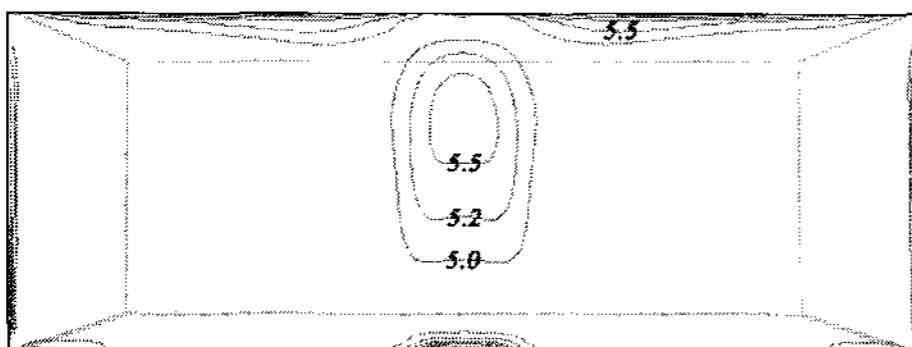
그림 6은 바닥온도에 따른 실내 온도분포를 나타낸 것이다. 바닥온도 26°C에서는 19°C, 30°C에서는 19~20°C, 35°C에서는 20°C 이상의 온도 분포를 나타내었다. 바닥온도가 높을수록 안정된 실내 온도 분포를 보였다. 난방초기와 같이 벽 주위에서는 낮은 온도분포를 보였다.

바닥 온도에 따른 실내 기류 분포는 그림 7에 나타내었다. 거주역의 기류는 0.05~0.4m/s로 비슷한 분포를 보였다. 바닥온도가 높을수록 높은 기류 속도를 보였으며, 넓은 기류 분포를 나타내었다.

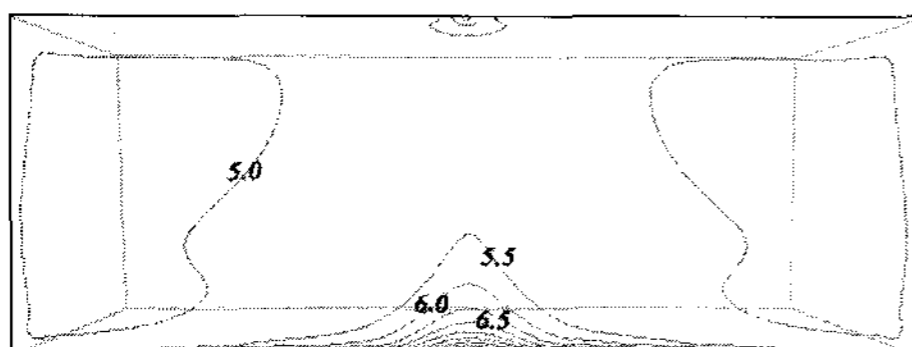
PPD는 그림 8에 나타내었다. PPD 분포는 바닥온도 30°C에서 제일 안정적인 분포를 보였다. 바닥온도와 상관없이 대체적으로 5%의 분포를 보였으나 바닥온도 35°C에서는 실 중앙에서 6%를 나타내었다.



(a) 바닥 온도 26°C

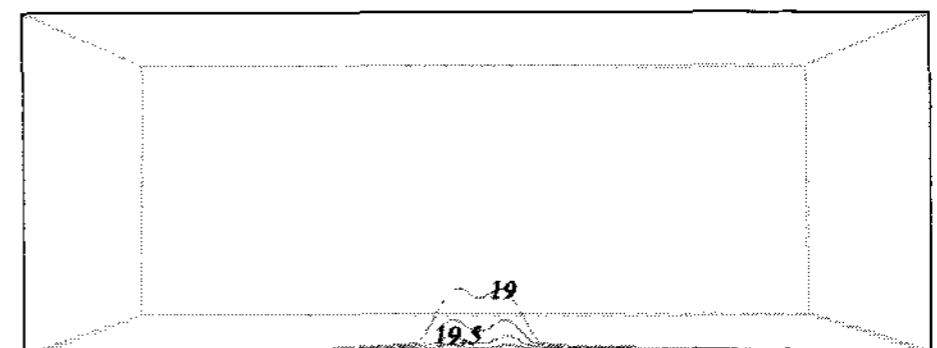


(b) 바닥 온도 30°C

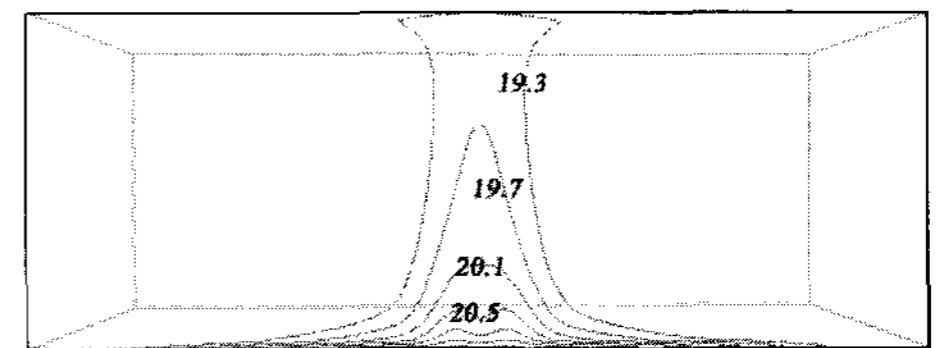


(c) 바닥 온도 35°C

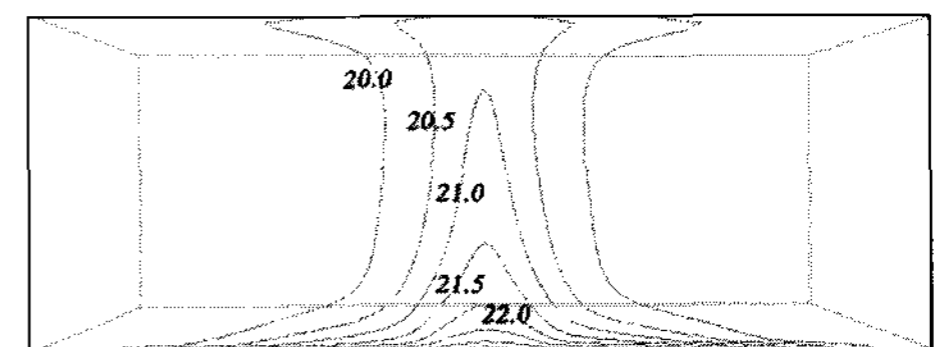
그림 5 바닥온도에 따른 실내 PPD 분포(단위 : %)



(a) 바닥 온도 26°C

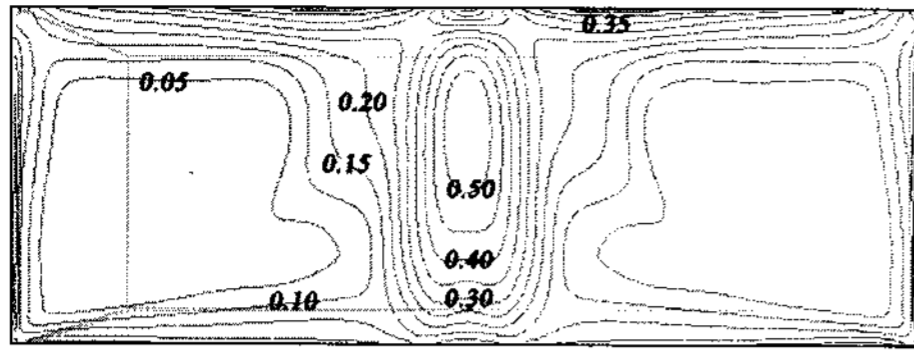


(b) 바닥 온도 30°C

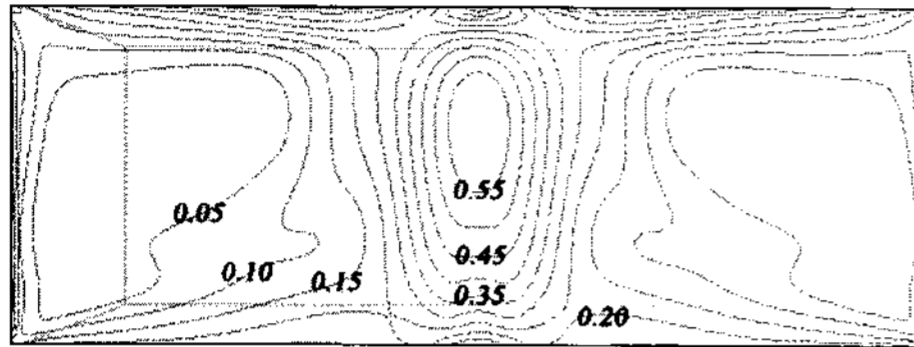


(c) 바닥 온도 35°C

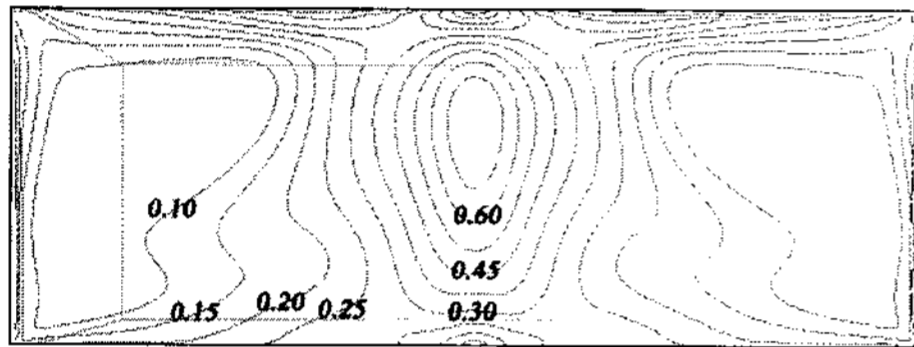
그림 6. 바닥온도에 따른 실내 온도 분포(단위 : °C)



(a) 바닥온도 26°C

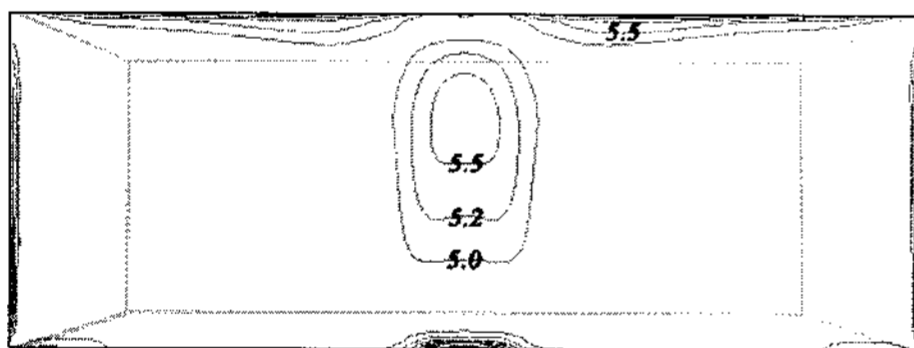


(b) 바닥온도 30°C

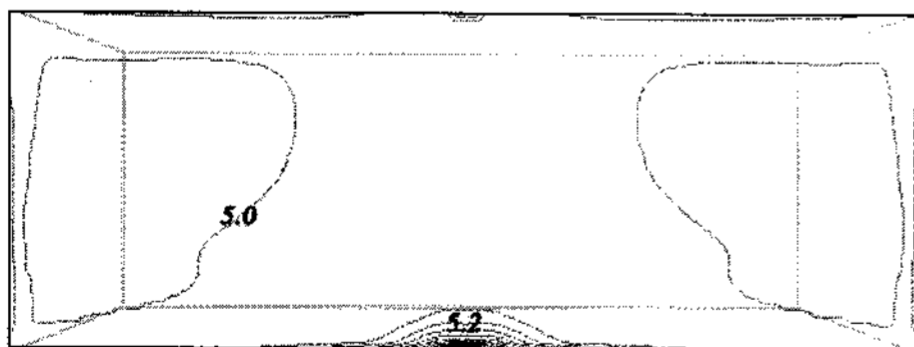


(c) 바닥온도 35°C

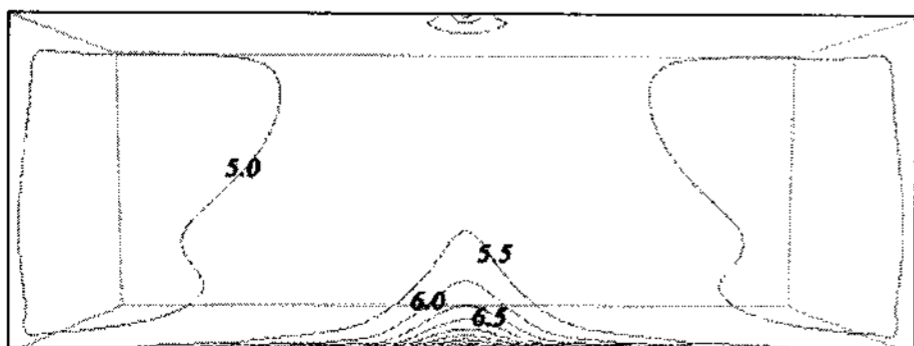
그림 7. 바닥온도에 따른 실내 기류 분포(단위 : %))



(a) 바닥 온도 26°C



(b) 바닥온도 30°C



(c) 바닥온도 35°C

그림 8. 바닥온도에 따른 실내 PPD 분포(단위 : %))

5. 결론

대공간의 간헐적인 난방환경을 고려하여 바닥복사난방의 효과를 알아보기 위해 난방초기와 난방중간의 실내환경에 각각의 바닥온도(26°C, 30°C, 35°C)를 적용하여 실내 온도분포, 기류분포, PPD분포를 알아보았다.

- (1) 난방초기에는 바닥온도가 35°C에서 비교적 적절한 19~21°C의 온도분포를 보였으며, 바닥온도와는 상관없이 벽의 냉복사로 인해 벽 주변이 실 중앙보다 낮은 온도를 나타냈다. 기류와 PPD도 비슷한 경향을 보였다.
- (2) 난방중간에는 바닥온도가 30°C에서 19~21°C로 적절한 온도분포를 보였다. 기류는 낮은 온도인 26°C에서 안정된 기류속도를 보였으며, PPD는 모든 케이스에서 5%로 안정되게 나타났다.
- (3) 난방초기에는 높은 바닥온도가 필요하나, 난방중간에는 낮은 바닥온도로도 쾌적한 실내 공기 환경을 조성할 수 있었으며, 모든 케이스에서 대공간의 문제점인 성층화 현상이 일어나지 않았다.
- (4) 본 연구에서는 바닥복사난방으로 대공간의 적절한 실내 공기 환경을 조성할 수 있었다. 하지만 벽체의 냉복사로 인해 벽 주위의 온도저하가 나타났다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 실 중앙과 벽 주위로 존을 형성하여 바닥온도를 각각 설정하는 방법으로 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. 김동호, 육인수, 송두삼, 김재민, 건물 내 열/공기환경 통합시뮬레이션 기법에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 27권 1호, 2006.10.
2. 박명식, 이대우, 김상민, 박영우, 김경환 대공

- 간 실내경기장에서 공조방식에 따른 수치해석, 공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 1999.6.
3. 김건우, 박태신, 박진철, 대공간의 실내 기류 분포에 관한 사례 연구, 한국태양에너지학회 춘계학술발표회 논문집, 2006.4.
4. 이승철, 기류유인팬을 이용한 새 국립중앙박물관 로툰다에서의 열환경 평가, 설비공학논문집, 16권 3호, 2004.3.
5. ASHRAE, ASHRAE Handbook 2005 Fundamentals, ASHRAE, 2005.
6. Richard D. Watson, Kirby S. Champman, Radiant Heating and Cooling Handbook, McGraw-Hill, 2002.
7. Yunus A. Çengel, Heat Transfer ; A Practical Approach, McGraw-Hill, 2003.