

바닥공조시스템에서 복사온도가 열적 쾌적성에 미치는 영향

정재동[†], 홍희기^{*}, 유호선^{**}

세종대학교 기계공학과, ^{*}경희대학교 기계산업시스템공학부, ^{**}승실대학교 기계공학과

Effect of Radiative Mean Temperature on Thermal Comfort of Underfloor Air Distribution System

Jae Dong Chung[†], Hiki Hong^{*}, Hoseon Yoo^{**}

Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

^{}School of Mechanical and Industrial System Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea*

*^{**}Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea*

(Received July 11, 2008; revision received September 1, 2008)

ABSTRACT: Despite the fact that UFAD(Under Floor Air Distribution) systems have many benefits and are being applied in the field in increasing numbers, there is a strong need for an improved fundamental understanding of several key performance features of these systems. This study numerically investigates the effect of supplied air temperature and supplied flow rate on the performance of UFAD, especially focused on thermal comfort. Also this study has compared UFAD with conventional overhead air distribution system. In contrast to the well-mixed room air conditions of the conventional overhead system, UFAD system produces an overall floor-to-ceiling airflow pattern that takes advantage of the natural buoyancy produced by heat sources in the occupied zone and more efficiently removes heat loads and contaminants from the space. Thermal comfort parameters were evaluated by CFD approach and then PMV was computed to detect the occupants' thermal sensation. Results show that radiative mean temperature plays crucial role on the evaluating PMV. Until now, the radiative temperature has been the missing link between CFD and thermal comfort, but the present study paves the way for overcoming this weakness.

Key words: UFAD(바닥공조시스템), Radiative Mean Temperature(평균복사온도), Thermal Comfort(열적쾌적성), Stratification(성층)

기 호 설 명

F : 형상계수
 k : 난류운동 에너지 [m^2/s^2]
 T_{mrt} : 평균복사온도 [K]
 V : 속도 [m/s]

그리스 문자

ϵ : 난류운동에너지 소산율 [m^2/s^3]

하첨자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-3408-3776; fax: +82-2-3408-4333

E-mail address: jdchung@sejong.ac.kr

in : 유입구

i, j : 면 (patch)

1. 서 론

바닥공조시스템(Underfloor air distribution system, UFAD)⁽¹⁻⁴⁾은 조화공기(conditioned air)를 바닥플리넘(plenum)을 통하여 공조기로부터 거주 영역으로 직접 이송하는 시스템을 지칭한다. 바닥공조시스템은 1970년대에 사무소건물에 도입되기 시작하면서 지금은 유럽과 남아프리카, 일본, 미국, 홍콩 등 선진국을 중심으로 새로운 공기조화시스템으로 각광을 받고 있으며 우리나라에도 소개되어 몇몇 사무소 건물에 적용된 바 있다. 최근에는 미국 ASHRAE를 중심으로 관련 기술에 대한 소개와 활발한 연구가 진행되고 있어 향후 비약적인 발전이 예상된다. 2004년 기준으로 미국 내 신규 사무실의 35%가 들뜸바닥(raised floor)을 사용하고, 그중 50%는 바닥공조시스템을 적용할 것으로 예측되기도 하였다.⁽⁵⁾

바닥공조시스템은 쾌적한 온열환경, 실내 공기질 향상, 에너지절약, 건물의 라이프사이클 비용 감소, 층고의 절감, 재실자의 만족도와 생산성 향상 등의 많은 장점이 있다고 보고되어 있다.⁽¹⁻²⁾ 하지만 비록 점차 그 적용이 확대되고 있지만 아직은 새롭고 덜 익숙한 기술이기에 자료가 많지 않으며 설비지침 등이 충분히 갖추어져 있지 않았고 초기비용의 증가라는 측면에서 쉽게 접근하기에는 다소 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석 방법을 통해 바닥공조시스템의 설계인자의 영향을 살펴보고자 한다. 특히 열적 쾌적성에 중점을 두어 실내환경을 평가하는 객관적인 인자와 인간이 느끼는 주관적인 인자를 조합한 지표인 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV)을 이용하여 실내 공간에서의 쾌적성을 평가하였다. 이를 위해 실내 기류속도와 온도는 전산유체역학에 의해 구하고 별도의 프로그램에 의해 각 위치에서의 형상계수를 계산하여 평균복사온도를 구한 후, 예상온열감(PMV) 계산식을 이용하였다.

바닥공조시스템에 대한 구체적인 설계인자의 영향을 체계적으로 연구한 사례가 드문 실정이고, 특히 복사온도는 열적쾌적성 평가지표의 인자이면서도 그 영향은 엄밀히 고려되지 않았다. 본 연구는 특히 복사온도의 영향에 관심을 가지고 바닥공조시스템에서 급기속도, 급기온도(SAT), 급·배기 위치 등의 설계인자가 열적쾌적성에 미치는 영향을 살펴본다.

2. 해 석

2.1 수치해석방법

실내의 열환경은 건구온도, 습도, 기류 및 내부 표면 사이의 열복사에 의해 결정되며, 이러한 인자들은 급·배기 위치, 벽면의 조건, 부하의 종류 등에 따라 변화한다. 천장공조시스템(Over head system, OH)과는 달리 바닥공조시스템의 경우 아직은 새롭고 덜 익숙한 기술로서 해석 자료가 많지 않으며 체계적인 설계인자에 대한 영향 해석이 이루어져야 한다. 다양한 설계인자에 대한 고려를 위해서는 실험적인 접근보다는 검증된 수치해석 방법에 의한 접근은 많은 장점을 가진다. 본 연구에서는 상용 열·유동해석 프로그램인 STAR-CD⁽⁶⁾를 사용하여 실내공간의 열(공기온도), 유동(공기속도)을 해석하고, 별도의 프로그램을 작성하여 평균복사온도(Mean Radiative Temperature)를 구하고 이에 의한 열적 쾌적성 지표인 예상온열감을 결정하였다. 그 결과는 다시 STAR-CD의 후처리(post processing) 기능을 이용하여 처리되었다.

해석은 기존 연구결과와 현장에서의 경험에 근거하여 해석모델을 선정하고, 전산해석 상용 프로그램인 STAR-CD로 해석하였다. $Re \approx O(10^9)$ 으로 난류영역에 속하며 해석모델은 Reynolds 수가 대략 10^4 , $Gr/Re^2 \sim 10$ 으로 자연대류가 주도적인 현상임을 알 수 있다. 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였으며 압력과 속도항의 연성(coupling)은 PISO 알고리즘에, 자연대류의 효과를 고려하기 위한 부력항은 이상기체 상태방정식에 각각 의존하였다. 수렴 판정은 각각의 방정식의 유수의 합이 1×10^{-3} 이하일 때로 정하였다.

STAR-CD에 의한 해석결과는 해석 모델 실내공간의 열, 유동에 대한 정보만을 제공한다. 하지만 평균복사온도가 열적 쾌적성에 매우 큰 영향을 미친다는 사실이 정성적인 측면에서는 알려져 있고 따라서 이를 고려한 정량적인 해석이 필요하다. 기존 연구에서 평균복사온도를 구하기가 어려워 많은 경우 공기온도와 동일한 것으로 취급하여 열적쾌적성 지표인 PMV를 계산하였다. 이럴 경우 PMV 분포는 전혀 다른 양상을 보인다. 최근 몇몇 연구에서 평균복사온도를 고려한 시도가 이루어지고 있으나⁽⁷⁾ 아직 접근에 제한이 많

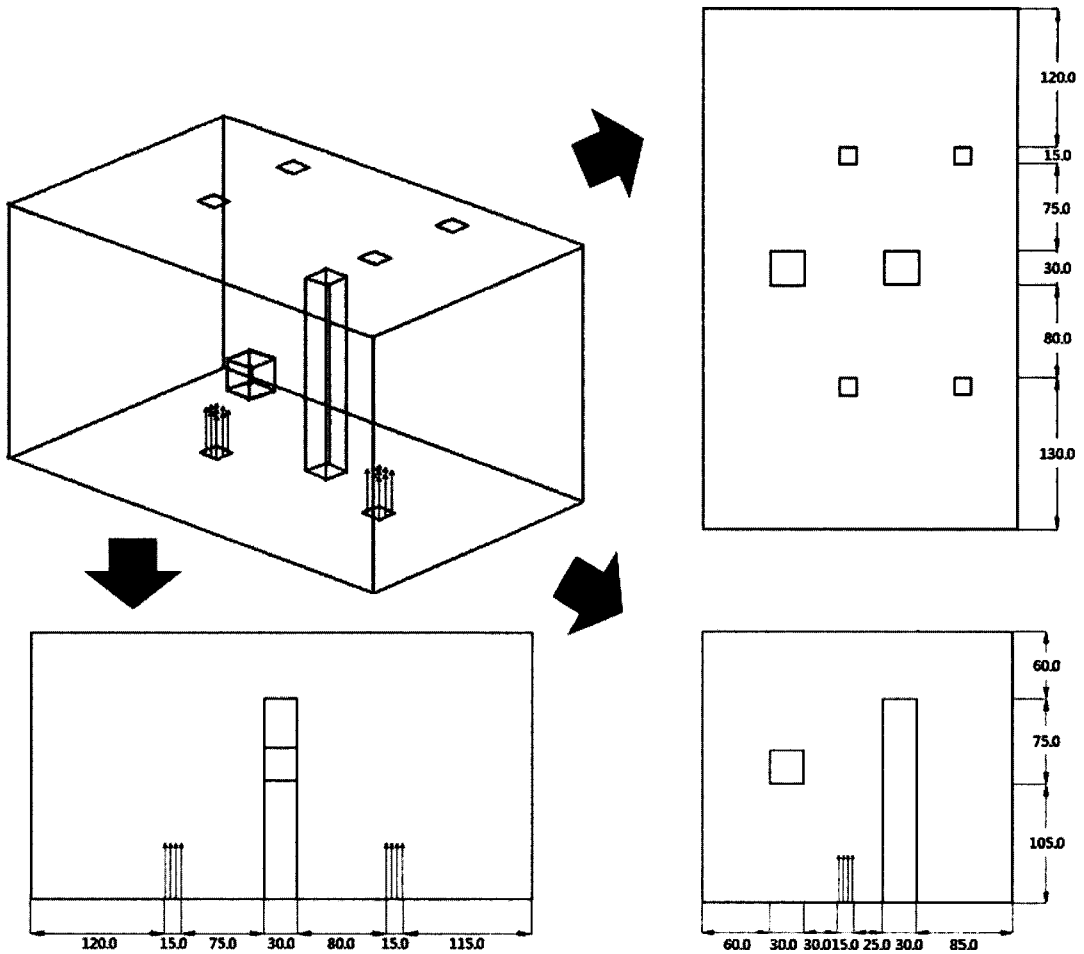


Fig. 1 Schematics of simulation model.

은 측면이 있고 그 결과도 다양한 설계인자에 대한 체계적인 해석이 이루어지지 않는 것이다.

평균복사온도는 실제의 불균일한 복사장에서 재실자가 주위와 복사 열교환을 하는 것과 같은 양의 열교환을 하는 균일한 주위온도를 의미하며 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{mrt} = \left[\sum_i T_i^4 F_{ij} \right]^{1/4} \quad (1)$$

여기서 하첨자 i, j 는 각각의 면을 의미한다.

열적쾌적성 지표인 PMV 분포를 살펴보기 위해 내부 거주자의 호흡 높이인 단면(높이 1.5m)에서 평균복사온도를 구하기 위하여 단면을 여러 개의 면(patch, 0.2m×0.2m)으로 나누고 각각의 면에

서 주위 모든 벽면의 형상계수를 구하는 단계가 우선 필요하다.

2.2 해석조건

기존 연구결과와 현장에서의 경험에 근거하여 보통의 사무실을 모사하기 위해 폭 4.5m, 깊이 5.5m, 높이 2.4m 공간에 대해 급배기구가 각각 4개로 하여 Fig. 1에 개략적으로 도시된 형상에 대해 시뮬레이션이 수행되었다. 해석공간에 발열원으로 내부 거주자(0.3m×0.3m×1.8m) 2명과 2개의 200W급의 발열원(0.3m×0.3m×0.3m)이 있는 것으로 하여 수치해석이 수행되었다. 인체의 신진대사량은 일반적인 휴식 상태인 1.2met(70 W/m²)을 적용하였다. 형상의 대칭성으로 인해 해

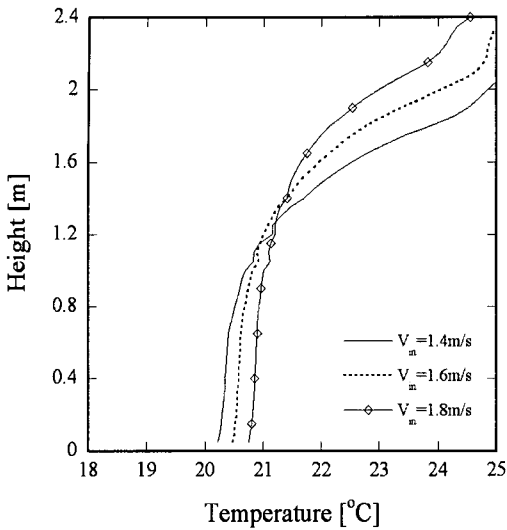


Fig. 2 Effect of supply air velocity on the thermal stratification.

석영역은 모델의 반쪽에 대해서만 수행되었다.

급기온도는 천장공조 시스템의 경우 일반적으로 적용되는 13°C~14°C로 하였으며 바닥공조시스템의 경우 16°C를 적용하였다. 문헌에 의하면 바닥공조시스템의 유량은 대략 $0.7 \sim 5.1 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ 로 보고되고 있으나⁽⁸⁾ Fig. 2에서 보이는 바와 같이 $5.09 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ (급기속도 1.4 m/s에 해당)에 대한 해석결과 온도성층화가 보다 강하며 높이에 따른 온도차가 크게 된다. ISO 7730과 ASHRAE standard 55~1992에서는 열적쾌적성을 위한 지표로서 바닥면 0.1 m에서 1.7 m사이의 온도차가 3°C 미만으로 제한된 상하온도차 규정을 제시하고 있다. 따라서 급기속도 1.4 m/s는 실내 쾌적온도 범위를 벗어나고 있으므로 모든 계산에서 보다 큰 유량 $6.545 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ (급기속도 1.8 m/s에 해당)으로 해석하였다.

천장과 바닥면은 단열로 가정하였으며 나머지 벽은 태양열을 받는 한 벽면만 40°C로 하고 나머지 3면은 모두 30°C로 일정 온도 조건을 부여하였다.

2.3 열환경 평가방법

ASHRAE의 Comfort standart 55와 ISO 7730⁽⁹⁾에 의하면 “열적 쾌적감이란 열환경에 만족을 나타내는 기준의 상태”라고 정의하고 있다. 열환경

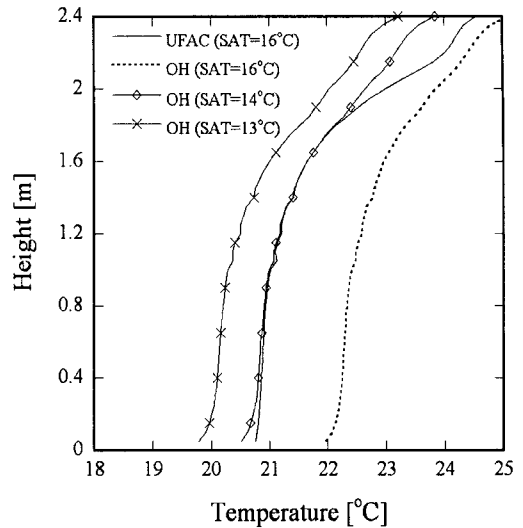


Fig. 3 Comparison of the vertical averaged air temperature of UFAC and OH system.

인자가 재실자에게 미치는 영향을 합리적으로 정량화하기 위하여 다양한 지수들이 제안되어 있다. 이 중에는 평균온도, 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV) 및 예상불만족률(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) 등이 많이 사용된다. PMV는 덴마크의 Fanger에 의해 정립되었다.⁽¹⁰⁾ 이것은 인체와 주위 환경과의 정상상태 열평형 모델에 근거하여, 약 1,300명의 서구인을 대상으로 실시한 실험으로부터 인간이 느끼는 온열감을 -3에서 +3까지의 7단계로 지수화한 것이다. 중립인 0에서 멀어질수록 불쾌감도 증가한다. 온도, 습도, 평균 복사온도, 기류속도와 같은 환경적 인자와 착의량, 대사량(metabolism)과 같은 개인적 인자를 포괄하며, 피험자에 대한 직접적인 실험에 기초하였기 때문에 PMV는 다른 지수보다 널리 사용되고 있다. 예측된 유동 및 온도장으로부터 PMV를 계산하는 과정은 ISO 7730⁽⁹⁾에 구체적으로 제시된 프로그램에 의존하였으며, 구체적인 내용은 생략한다.

3 결과 및 고찰

3.1 천장공조시스템과 비교

동일한 냉방부하에 대해 바닥공조시스템에서의 급기구와 배기구를 천장공조 시스템에서 배기구와

급기구로 대체하여 상호 비교하였다. 바닥공조시스템의 경우 급기온도가 설계 지침에 따르면 15℃~19℃로 제시되어 있으므로 16℃를 선택하였다. 보통 천장공조시스템의 경우 보다 낮은 온도의 공기를 공급하나 비교를 위해 바닥공조시스템과 동일한 급기온도의 경우도 비교하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 천장공조시스템의 경우 실내 공간의 온도가 바닥공조시스템에 비해 높은 결과를 보이며 이를 통해 바닥공조시스템의 상대적인 우월성을 확인할 수 있다. 동일한 냉방효과를 얻기 위해 천장공조시스템에서 급기온도를 14℃로 낮추었을 경우 거주역의 온도분포는 급기온도 16℃인 바닥공조시스템과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 이럴 경우 냉방효과는 동일할지라도 바닥공조시스템이 보다 높은 온도의 공기를 공급한다는 사실에서 비용측면에서 유리함은 당연할 것이다. 이러한 사실은 바닥공조시스템의 일반적인 장점으로 알려진 사실이며, 냉동기의 효율뿐만 아니라 보다 높은 급기온도를 가진다는 사실은 특히 외기를 이용할 수 있는 기간이 늘어남으로써 경제적인 장점이 더욱 부각될 수 있다.

천장공조시스템에서 급기온도 13℃에서 높이에 따른 평균 공기온도는 급기온도 14℃ 또는 16℃와 동일한 경향을 보이며 모든 높이에서 전체적으로 비슷한 온도만큼이 강화된 결과를 보인다. 급기온도에 따른 정성적인 변화는 무시할 수 있으며 정량적으로는 급기온도차만큼 전체적인 온도변화를 보인다고 할 수 있다. 이러한 사실은 바닥공조시스템에서도 동일한 결과를 보이며 이는 기존 연구⁽⁸⁾에서의 결과와 일치한다.

공기온도뿐만 아니라 공기속도도 열적쾌적성에 미치는 중요한 영향을 미친다. Fig. 4는 높이에 따른 평균 공기속도를 보여주고 있다. 천장공조시스템에 비해 매우 안정적이며 낮은 속도의 유동을 보여주며 이는 실내 쾌적성측면에서 장점으로 평가된다. 급기온도가 속도분포에 미치는 영향은 무시할 수준으로 평가된다.

Fig. 5는 바닥공조시스템(Fig. 5의 왼쪽)과 천장공조시스템(Fig. 5의 오른쪽)의 비교를 위해 거주자의 호흡 높이인 높이 1.5m에서의 (a) 공기온도, (b) 평균복사온도와 공기온도의 온도차 (c) PMV를 보여준다. 급기온도를 16℃로 고정하여 비교하였다. Fig. 3에서 확인하였듯이 바닥공조시

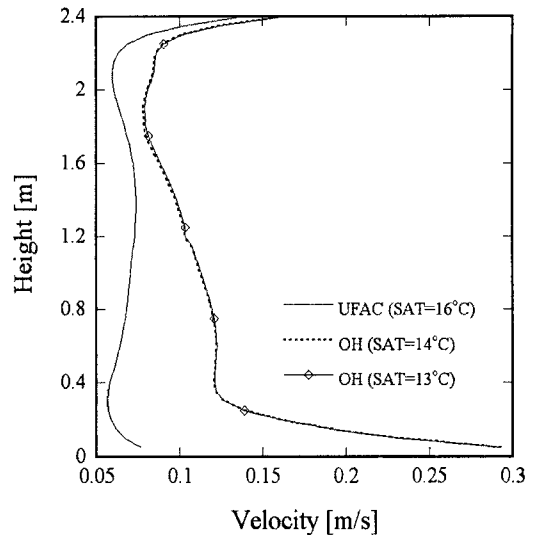
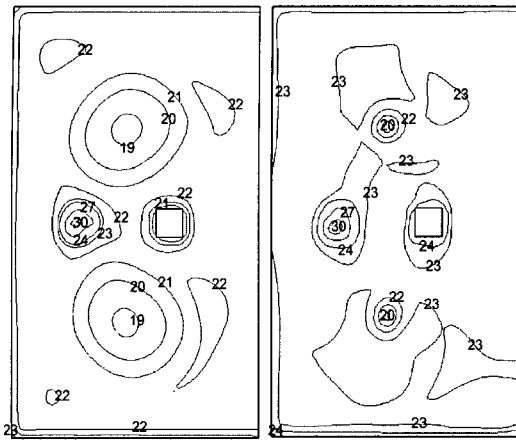


Fig. 4 Comparison of the vertical averaged air velocity of UFAC and OH system.

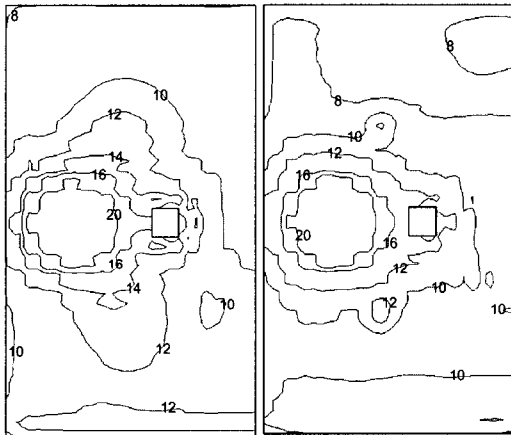
스템의 경우 평균 공기온도가 보다 낮은 경향을 보인다. 또한, 천장공조방식은 단면 전체에서 상대적으로 균일한 온도분포를 보임에 반해 바닥공조방식은 서로 다른 온도 영역이 있음을 보이며 이는 바닥공조방식이 국부적인 냉방에 활용될 수 있음을 시사한다. Fig. 5(b)에서 보여주듯이 평균 복사온도와 공기온도의 온도차는 무시할 수 없는 수준이며 이러한 이유로 기존 연구에서 주로 가정되는 공기온도를 사용한 PMV 평가는 열적 쾌적성 결과를 왜곡시키게 될 것이다. 구체적인 영향은 3.2에서 살펴본다. 바닥공조시스템의 경우 국부적인 차이는 있지만 단면 평균 PMV가 0.54로 쾌적한 열환경에 놓여있음을 알 수 있고, 공기온도가 상대적으로 높은 천장공조시스템의 경우 단면 평균 PMV가 0.77로 약간 더운 영역에 있음을 알 수 있다. 따라서 천장공조시스템의 경우 $-0.5 < PMV < +0.5$ 인 쾌적한 환경을 위해서는 보다 낮은 급기온도로 공급해주어야 하기에 바닥공조시스템보다 추가의 에너지 소비가 있게 될 것이다. 이상의 논의에서, 고려한 해석조건에서 바닥공조방식이 천장공조방식보다 우수한 것으로 평가된다.

3.2 열적쾌적성에 미치는 복사온도의 영향

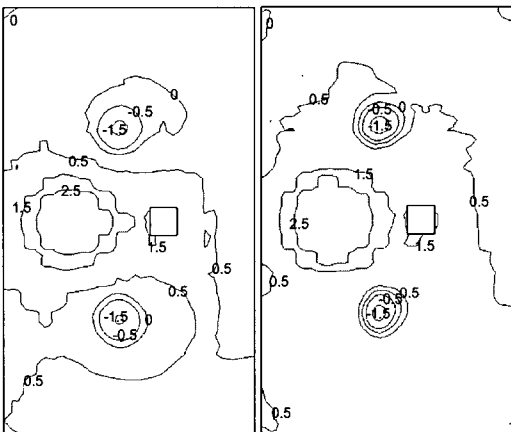
평균 복사온도가 열적쾌적성 지표인 PMV에 미



(a) air temperature



(b) difference between air temperature and radiative mean temperature



(c) PMV

Fig. 5 Comparison of UFAD and OH systems.

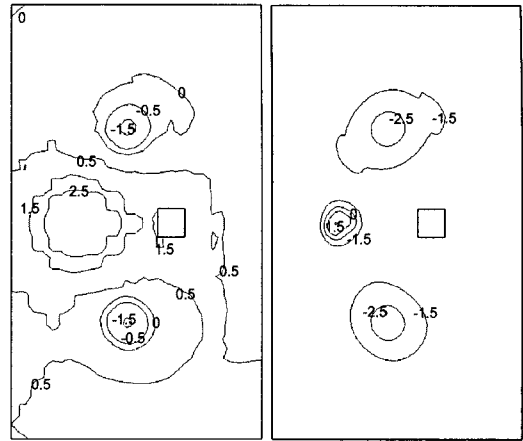


Fig. 6 Effect of radiative mean temperature on PMV using (a) radiative mean temperature and (b) air temperature.

치는 영향은 큰 것으로 알려져 있다. 하지만 많은 기존 연구에서는 평균복사온도를 구하기가 어려워 공기온도와 동일한 것으로 취급하여 PMV를 계산하였다. 하지만 Fig. 5에서 살펴보았듯이 평균복사온도와 공기온도의 온도차는 무시할 수 없는 수준이다. 하지만 이러한 취급이 얼마나 결과를 왜곡하고 있는지는 아직까지 구체적으로 언급된 적이 없다. 최근 몇몇 연구에서 평균 복사온도를 고려한 시도가 이루어지고 있으나⁽⁷⁾ 아직 접근에 제한이 많은 측면이 있고 그 결과도 다양한 설계인자에 대한 체계적인 해석이 이루어지지 않았다. Fig. 6는 평균 복사온도가 PMV에 미치는 영향을 살펴보기 위해 기준 경우에 대해서 (a) 공기온도를 평균 복사온도와 동일하다고 하여 구한 PMV와 (b) 평균 복사온도를 사용한 PMV의 결과를 제시하였다. 평균 복사온도는 공기온도보다 높은 분포를 가지며 이러한 평균 복사온도는 해석 공간에서 국부적인 변화는 있지만 $-0.5 < PMV < +0.5$ 로 쾌적한 환경으로 평가된다(단면 평균 $PMV = 0.54$). 하지만 공기 온도만으로 평가된 열적 쾌적성은 대부분의 단면에서 $-1.5 < PMV < -1.0$ 정도를 보이고 있어(단면 평균 $PMV = -1.09$) 춥다고 느껴지는 것으로 잘못 평가하고 있다. 내부열원, 조명, 외부 열유속 등에 의한 고온 단면을 가지는 경우 이러한 차이는 더욱 커질 것이며, 평균복사온도를 고려한 열적쾌적성 평가가 중요함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석 방법을 통해 바닥공조 시스템의 설계인자의 영향을 살펴보았다. 특히 평균복사온도가 열적쾌적성에 미치는 영향에 중점을 두어 실내 기류속도와 온도를 전산유체역학(CFD)에 의해 구하고, 별도의 후처리 프로그램에 의해 각 위치에서의 형상계수를 계산하여 평균복사온도를 구한 후 PMV 계산식을 이용하여 실내 공간에서의 쾌적성을 평가하였다.

설계인자, 즉 급기온도와 급기 속도에 대해 비교한 결과 천장공조 시스템에 비해 바닥공조시스템의 장점이 확인되었고, 각 설계인자가 온도성층화에 미치는 방향성을 얻을 수 있었다. 바닥공조시스템의 경우 설계 지침에 따라 급기온도 16℃를 적용할 경우 동일한 온도성층화를 얻기 위해 천장공조 시스템에서는 14℃의 급기온도를 공급해야 하며, 높이에 따른 평균 공기속도도 천장공조 시스템에 비해 매우 안정적이며 낮은 속도의 유동을 보여준다. 복사평균온도는 열적쾌적성 평가에 중요한 인자로서 기존연구에서 주로 적용하였듯이 이를 공기온도로 가정할 경우 PMV 평가는 열적 쾌적성 결과를 왜곡시킴을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Bausman, F. and Webster, T., 2001, Outlook for Underfloor Air Distribution, ASHRAE Journal, Vol. 43, pp. 18-25.
2. Daly, A., 2002, Underfloor air distribution : Lessons learned, ASHRAE Journal, Vol. 44, pp. 21-24.
3. Kim, J., Kim, Y. and Yoo, H., 2000, Thermal comfort of the floor supply air conditioning system for different supply-return locations during cooling, Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 12, pp. 476-485.
4. Kim, S.-H. and Park., J.-I., 2005, Evaluation of indoor air environment by changing diffuser location and air temperature with under floor air conditioning system, Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 17, pp. 397-403.
5. Krepchin, I., 2001, Underfloor air systems gain foothold in North America, E. Source Report, ER-01-1. Boulder, Colo. : Financial Times Energy, Inc., January.
6. STAR-CD, User's Guide, 2001, Version 3.15.
7. Meyer, C., 2004, Being comfortable with STAR-CD, CD adapco Dynamics, Vol. 22, pp. 21-22.
8. Bauman, F. S., 2003, Underfloor air distribution (UFAD) design guide, ASHRAE, Inc.
9. ISO Standard 7730, 1990, Moderate thermal environments-Determination of PMV and PPD indices and specification of the condition for thermal comfort, International Standards Organization, Geneva.
10. Fanger, P. O., 1970, Thermal comfort-Analysis and application in environmental engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.