

바닥공조시스템에서 복사온도가 열적쾌적성에 미치는 영향

정재동[†] · 홍희기 · 유호선

세종대학교 기계공학과·경희대학교 기계공학과·승실대학교 기계공학과

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

Jae Dong Chung · Hiki Hong · Hoseon Yoo

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 design parameters on the performance of UFAD, especially focused on thermal comfort. The design parameters considered in this study include supplied air temperature, supplied flow rate, diffuser shape, swirl, diffuser location, and floor-to-floor height. Also this study has compared UFAD with over head system, on the point of thermal comfort by evaluating PMV using radiative mean temperature, which shows how inadequate the evaluation of thermal comfort can be when radiation is neglected. 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)

1. 서론

바닥공조시스템(Underfloor air distribution system, UFAD)⁽¹⁻⁴⁾은 조화공기를 바닥플리넘을 통하여 공조기로부터 거주영역으로 직접 이송하는 시스템을 지칭한다. 바닥공조시스템은 1970년대에 사무소건물에 도입되기 시작하면서 지금은 유럽과 남아프리카, 일본, 미국, 홍콩 등 선진국을 중심으로 새로운 공기조화 시스템으로 각광을 받고 있으며 우리나라에도 소개되어 몇몇 사무소건물에 적용된 바 있다. 최근에는 미국

ASHRAE를 중심으로 관련 기술에 대한 소개와 활발한 연구가 진행되고 있어 향후 비약적인 발전이 예상된다. 최근 통계에 의하면 일본에서 건설되는 신축 업무용 건물의 3.3% 정도가 바닥공조시스템을 채택하고 있는 것으로 나타났다.

바닥공조시스템은 쾌적한 온열환경, 실내 공기질 향상, 에너지절약, 건물의 라이프사이클 비용 감소, 층고의 절감, 재실자의 만족도와 생산성 향상 등의 많은 장점이 있다고 보고 되어 있다⁽¹⁻²⁾. 하지만 비록 점차 그 적용이 확대되고 있지만 이러한 많은 장점에도 불구하고 초기비용의 증가라는 측면과 더불어 아직은 새롭고 덜 익숙한 기술로서 자료가 많지 않으며 설비지침 등이 충분히 갖추어져 있지 않은 이유로 쉽게 접근하기에는 다소 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 수치

[†]Corresponding author

Tel.: +82-2-3408-3776; fax: +82-2-3408-3333
E-mail address: jdchung@sejong.ac.kr

해석 방법을 통해 바닥공조시스템의 설계인자의 영향을 살펴보고자 한다. 특히 열적쾌적성에 중점을 두어 실내환경을 평가하는 객관적인 인자와 인간이 느끼는 주관적인 인자를 조합하여 최적의 쾌적도를 얻기 위해 실내 기류속도와 온도를 전산유체역학에 의해 구하고 별도의 프로그램에 의해 각 위치에서의 형상계수를 계산하여 평균복사온도를 구한 후 예상온열감 (PMV) 계산식을 이용하여 실내 공간에서의 쾌적성을 평가하였다. 구체적인 설계인자의 영향을 체계적으로 연구한 사례가 드문 실정이고, 특히 열적쾌적성에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 복사온도를 고려하여 해석한 사례는 거의 없는 실정에서 본 연구에서 접근하고 있는 해석기법은 차후 매우 유용한 해석도구가 될 것으로 기대된다.

2. 해석

2.1 수치해석방법

실내의 열환경은 건구온도, 습도, 기류 및 내부 표면 사이의 열복사에 의해 결정되며, 이러한 인자들은 급배기 위치, 벽면의 조건, 부하의 종류 등에 따라 변화한다. 천장공조시스템과는 달리 바닥공조시스템의 경우 아직은 새롭고 덜 익숙한 기술로서 해석 자료가 많지 않으며 따라서 설비 지침 등이 충분히 갖추어져 있지 않은 상태이므로 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-CD를 사용하여 실내공간의 열 (공기온도), 유동 (공기속도)을 해석하고, 별도의 Fortran 프로그램에 의해 평균복사온도를 구하고 이에 의한 열적 쾌적성 지표인 PMV를 결정하였다. 그 결과는 다시 STAR-CD의 후처리 (post processing) 기능을 이용하여 처리되었다.

해석은 기존 연구결과와 현장에서의 경험에 근거하여 해석모델을 선정하고 이를 지배하는 아래 식으로 표현되는 지배방정식을 STAR-CD 로 해석하였다. 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였으며 압력과 속도항의 연성 (coupling)은 PISO 알고리즘에, 자연대류의 효과를 고려하기 위한 부력

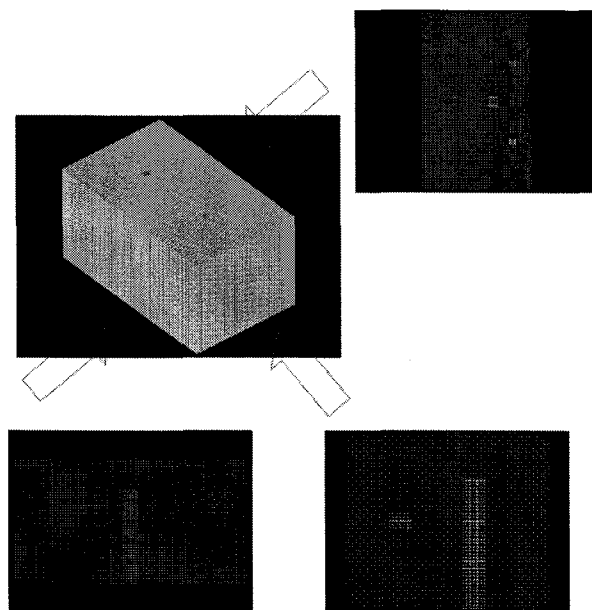


Fig. 1 Schematics and grid system

항은 이상기체 상태방정식에 각각 의존하였다. 수렴 판정은 각각의 방정식의 유수의 합이 1×10^{-3} 이하일 때로 정하였다.

STAR-CD에 의해 해석결과는 해석 모델 실내공간의 열 (공기온도), 유동 (공기속도)에 대한 정보만을 제공한다. 하지만 평균복사온도가 열적 쾌적성에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있고 따라서 이를 고려한 해석이 필요하다. 기존 연구에서 평균복사온도를 구하기가 어려워 많은 경우 공기온도와 동일한 것으로 취급하여 열적쾌적성 지표인 PMV를 계산하였다. 이런 경우 PMV분포는 전혀 다른 양상을 보인다. 최근 몇몇 연구에서 평균복사온도를 고려한 시도가 이루어지고 있으나 아직 접근에 제한이 많은 측면이 있고 그 결과도 다양한 설계인자에 대한 체계적인 해석이 이루어지지 않는 실정이다.

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

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

열적쾌적성 지표인 PMV 분포를 살펴보기 위해 내부 거주자의 호흡 높이인 단면 (높이 1.5m)

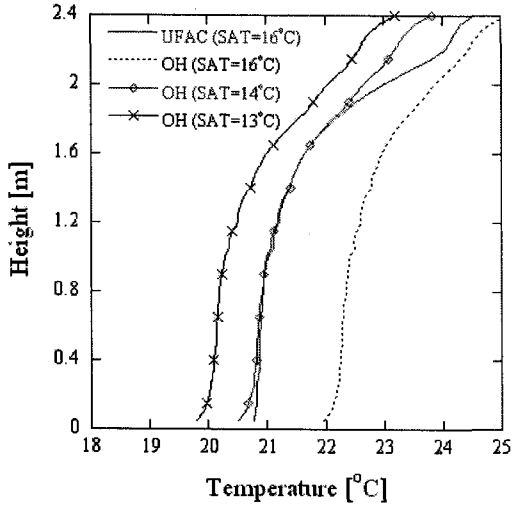


Fig. 2 Comparison of the vertical averaged air temperature of UFAC and OH system

에서 평균복사온도를 구하기 위하여 단면을 여러 개의 patch로 나누고 각각의 patch에서 주위 모든 벽면의 patch로의 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 급배기구각 각각 4개로 하여 Fig. 3.1에 개략적으로 도시된 형상에 대해 시뮬레이션이 수행되었다. 해석공간에 발열원으로 내부 거주자 2명과 2개의 200W 급의 발열원이 있는 것으로 하여 수치해석이 수행되었다. 인체의 신진대사량은 일반적인 휴식 상태인 1.2met ($70W/m^2$)을 적용하였다. 형상의 대칭성으로 인해 해석영역은 모델의 반쪽에 대해서만 수행되었다.

급기온도는 천장공조시스템의 경우 일반적으로 적용되는 13°C~14°C로 하였으며 바닥공조시스템의 경우 16°C를 적용하였다. 문헌에 의하면 유량은 대략 0.7~5.1 $l/s\cdot m^2$ 로 보고 되고 있으나 이 범위 안의 유량 5.09 $l/s\cdot m^2$ (급기속도 1.4m/s에 해당)에 대한 해석결과 ASHRAE 기준 실내 쾌적온도 범위를 벗어나고 있으므로 모든 계산에서

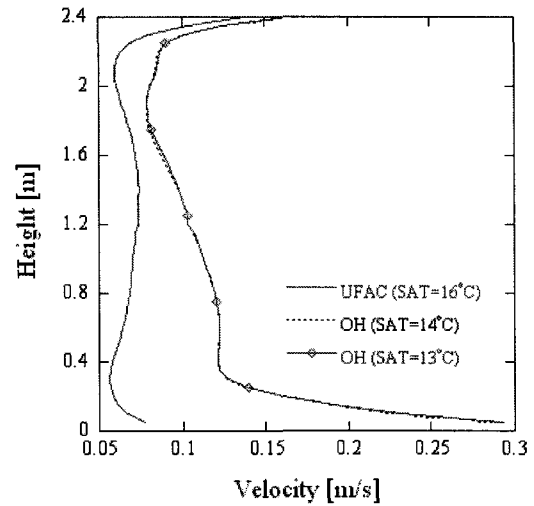
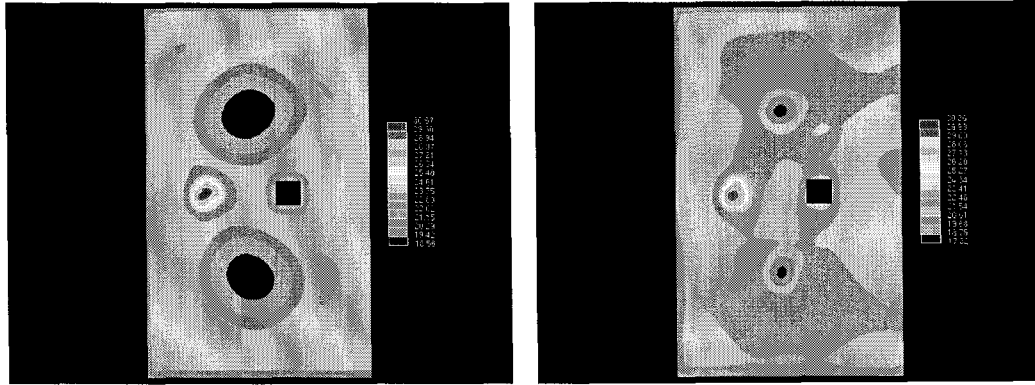


Fig. 3 Comparison of the vertical averaged air velocity of UFAC and OH system

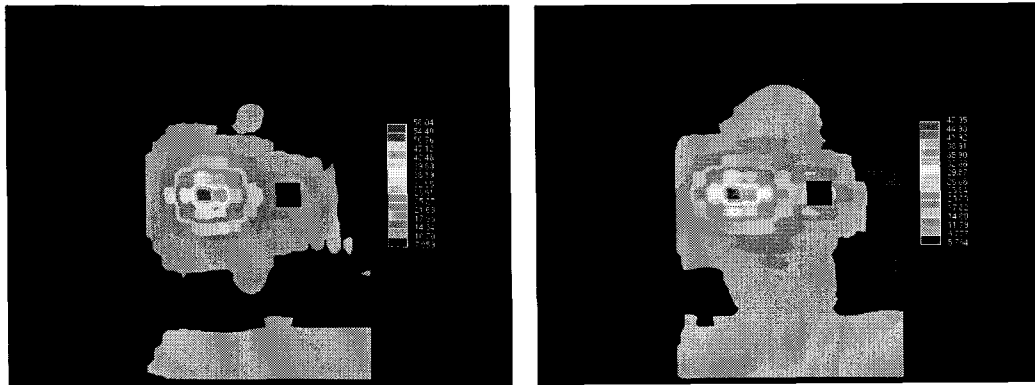
보다 큰 유량 6.545 $l/s\cdot m^2$ (급기속도 1.8m/s에 해당)로 해석하였다. 천장과 바닥면은 단열로 가정하였으며 나머지 벽은 한 벽면만 40°C로 하고 나머지 3면은 모두 30°C로 일정 온도 조건을 부여하였다.

2.3 열환경 평가방법

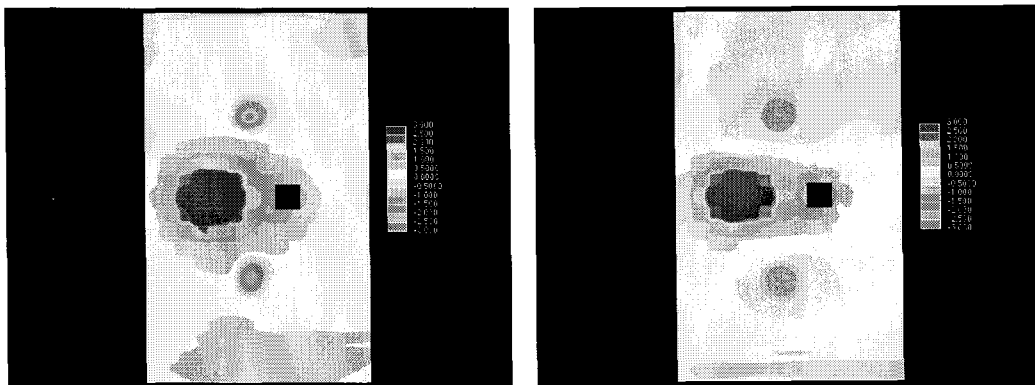
ASHRAE의 Comfort standart 55와 ISO 7730⁽⁵⁾에 의하면 “열적 쾌적감이란 열환경에 만족을 나타내는 기준의 상태”라고 정의하고 있다. 열환경 인자가 재실자에게 미치는 영향을 합리적으로 정량화하기 위하여 다양한 지수들이 제안되어 있다. 이 중에는 평균온도, 예상온열감 (Predicted Mean Vote, PMV) 및 예상불만족률 (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) 등이 많이 사용된다. 예상온열감 (PMV)은 덴마크의 Fanger에 의해 정립되었다. 이것은 인체와 주위 환경과의 정상상태 열평형 모델에 근거하여, 약 1300명의 서구인을 대상으로 실시한 실험으로부터 인간이 느끼는 온열감을 -3에서 +3까지의 7단계로 지수화한 것이다. 중립인 0에서 멀어질수록 불쾌감도 증가한다. 온도, 습도, 평균복사온도, 기류속도와 같은 환경적 인자와 착의량, 대사량 (metabolism)과 같은 개인적 인자를 포괄하며, 피험자에 대한 직접적인 실험에 기초하였기



(a) air temperature



(b) temperature difference between air and radiative mean temperatures



(c) PMV

Fig. 4 Comparison of UFAC and OH system: (a) air temperature, (b) temperature difference between air and radiative mean temperatures and (c) PMV

때문에 PMV는 다른 지수보다 널리 사용되고 있다. 예측된 유동 및 온도장으로부터 PMV를 계산하는 과정은 ISO 7730⁽⁵⁾에 구체적으로 제시된

프로그램에 의존하였으며, 구체적인 내용은 생략한다.

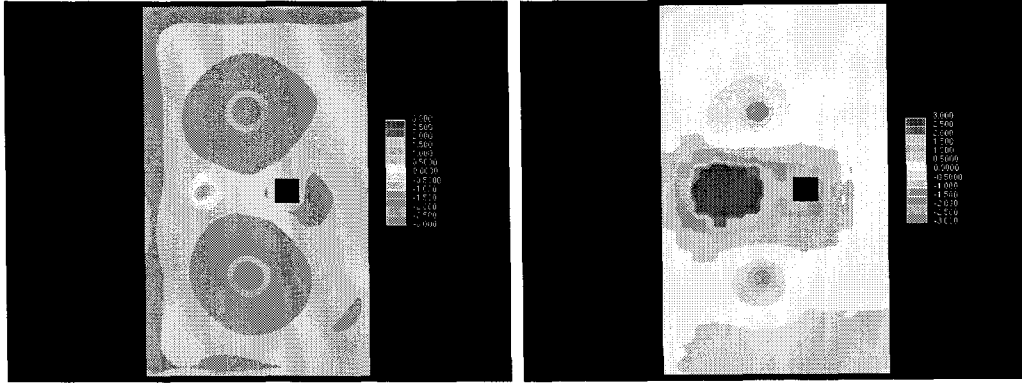


Fig. 5 Effect of radiative mean temperature on PMV (a) using air temperature and (b) radiative mean temperature

3 결과 및 고찰

3.1 천장공조시스템과 비교

동일한 냉방부하에 대해 바닥공조시스템에서의 급기구와 배기구를 천장공조시스템에서 배기구와 급기구로 대치하여 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. 예측할 수 있는 바와 같이 이러한 경우 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 실내 공간의 온도가 바닥공조시스템에 비해 높은 결과를 보이며 바닥공조시스템의 상대적인 우월성을 확인할 수 있다. 동일한 냉방효과를 얻기 위해 천장공조시스템에서 급기온도를 14℃로 낮추었을 경우 거주역의 온도분포는 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.

온도 13℃에서 높이에 따른 평균공기온도는 단

지 급기온도 14℃와 16℃와 동일한 경향을 보이며 전체적으로 비슷한 온도만큼이 강하된 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 연구에서도 보고된 사실이다.

공기온도뿐만 아니라 공기속도도 열적쾌적성에 미치는 중요한 영향을 미친다. Fig. 3은 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. 4는 바닥공조시스템 (Fig. 4의 왼쪽, 이후 논의에서 기준 조건으로 취급하기로 함)과 천장공조시스템 (Fig. 4의 오른쪽)의 비교를 위해 거주자의 호흡 높이인 높이 1.5m에서의 (a) 공기온도, (b) 평균복사온도와 공기온도의 온도차 (c) PMV를 보여준다. 전혀 다른 형태의 공기온도분포를 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig. 2에서 살펴본 것처럼 높이 1.5m에서의 단면 평균 공기온도는 비록 거의 같은 값을 가질지라도 국부적으로는 전혀 다른 온도 경향을 보인다. 확인할 수 있는 사실은 천장공조방식은 단면 전체에서 상대적으로 균일한 온도분포를 보임에 반해 바닥공조방식은 서로 다른 온도 영역이 있음을 보이며 이는 바닥공조방식이 국부적인 냉방에 활용될 수 있음을 시사한다. 평균복사온도와 공기온도의 온

도차는 무시할 수 없는 수준이며 이러한 이유로 3.2절에서 보이는 바와 같이 공기온도를 사용한 PMV 평가는 열적 쾌적성 결과를 왜곡시키게 될 것이다. 국부적인 변화가 있지만 단면 전체의 공기온도는 평균 21.5℃로 다소 추운 (음수의 PMV) 경향이 예측되나 이보다 높게 예측된 평균복사온도로 인해 PMV 분포는 전체적으로 $-0.5 < PMV < +0.5$ 정도로 쾌적한 영역에 들어 있음을 알 수 있다.

이상의 논의에서 제한된 조건에 대한 해석결과이지만 바닥공조방식이 천장공조방식보다는 우수한 것으로 평가된다.

3.2 열적쾌적성에 미치는 복사온도의 영향

평균복사온도가 열적쾌적성 지표인 PMV에 미치는 영향은 큰 것으로 알려져 있다. 하지만 많은 기존 연구에서는 평균복사온도를 구하기가 어려워 공기온도와 동일한 것으로 취급하여 PMV를 계산하였다. 이러한 취급이 얼마나 결과를 왜곡하고 있는지는 아직까지 구체적으로 언급된 적이 없다. 최근 몇몇 연구에서 평균복사온도를 고려한 시도가 이루어지고 있으나 아직 접근에 제한이 많은 측면이 있고 그 결과도 다양한 설계인자에 대한 체계적인 해석이 이루어지지 않는 상태이다. Fig. 5는 평균복사온도가 PMV에 미치는 영향을 살펴보기 위해 기준 경우에 대해서 (a) 공기온도를 평균복사온도와 동일하다고 하여 구한 PMV와 (b) 평균복사온도를 사용한 PMV의 결과를 제시하였다. 공기 온도만으로 평가된 열적 쾌적성은 대부분의 단면에서 $-1.5 < PMV < -1.0$ 정도를 보이고 있어 다소 춥다고 느껴진다. 하지만 앞에서 살펴보았듯이 평균복사온도는 공기온도보다 높은 분포를 가지며 이러한 평균복사온도는 해석 공간에서 $-0.5 < PMV < +0.5$ 로 쾌적한 환경으로 평가한다.

4. 결 론

바닥공조시스템은 비록 점차 그 적용이 확대되고 있지만 많은 장점에도 불구하고 아직은 새롭고 덜 익숙한 기술로서 자료가 많지 않으며 설비 지침 등이 충분히 갖추어져 있지 않은 이유로 쉽게 접근하기에는 다소 어려움이 있었다. 따라서

본 연구에서는 수치해석 방법을 통해 바닥공조시스템의 설계인자의 영향을 살펴보았다. 특히 열적쾌적성에 중점을 두어 실내 기류속도와 온도를 전산유체역학 (CFD)에 의해 구하고 별도의 프로그램에 의해 각 위치에서의 형상계수를 계산하여 평균복사온도를 구한 후 PMV 계산식을 이용하여 실내 공간에서의 쾌적성을 평가하였다. 구체적인 설계인자의 영향을 살펴보고자 바닥공조시스템과 천장공조시스템 비교하였고 평균복사온도가 열적쾌적성에 미치는 영향을 살펴보았다. 각각의 설계인자에 대해 바닥공조시스템의 장점이 확인되었고 각 설계인자의 온도성증화에 미치는 방향성을 얻을 수 있었다.

구체적인 설계인자의 영향을 체계적으로 연구한 사례가 드문 실정이고, 특히 열적쾌적성에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 복사온도를 고려하여 해석한 사례는 거의 없는 실정에서 본 연구에서 접근하고 있는 해석기법은 차후 매우 유용한 해석도구가 될 것으로 기대된다.

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. ISO, 1984, ISO 7730, Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Condition for Thermal Comfort.