

가압식 바닥급기 시스템의 여름철 성층화 경향에 관한 실험적 연구

김 동 희[†], 유 기 형, 조 동 우, 서 정 석*, 한 성 필
한국건설기술연구원 건축도시환경 연구실, (주)한일엠이씨*

An Experimental Study on Thermal Stratification of Pressurized Plenum Underfloor Air Distribution System during Cooling

Dong-Hee Kim[†], Ki-Hyung Yu, Dong-Woo Cho, Jung-Seok Seo*, Sung-Phil Han

ABSTRACT: The underfloor air distribution system has been attracting to architects and building owners as one of valuable system for the renovated and newly office building. In this paper, we discussed the thermal stratification profile of pressurized plenum underfloor air distribution(UFAD) according to indoor setting temperature, diffuser number, diffuser type. For this, the space of office building(H corp.) is selected for measuring the air volume of underfloor diffuser and vertical temperature profile. As a result, the thermal stratification profile is influenced by the number and type of the underfloor diffuser and thermal storage character of the underfloor. Whereas indoor setting temperature have a lower significant impact on thermal stratification.

Key words: Pressurized plenum underfloor air distribution system(가압식 바닥급기 시스템), Thermal stratification(온도성층화), Cooling(냉방)

1. 서 론

건물의 인텔리전트화가 진행됨에 따라 액세스 플로어 하부공간의 유효활용, 사무실 OA기기 발열부하의 원활한 처리, 공조 설비 시스템의 부분 운전 및 근무자의 개인 취향에 따른 퍼스널 제어 등의 관점에서 바닥급기 시스템은 사용이 늘고 있는 상황이다.¹⁾ 이러한 바닥급기 시스템의 가장 큰 특징은 완전혼합을 가정하여 실 전체를 공조하는 천장급기 방식과 달리, 공기의 부력효과에

의해 바닥에서 천장까지 일정치 않은 수직온도 분포인 온도 성층화가 존재한다는 점이다. 온도 성층화는 대개 거주역에서 이루어지며, 온도 성층화 이외의 구역에서 발생하는 대류에 의한 열 획득을 고려할 필요성을 없애준다. 이 때문에 전체 공간을 공조공간으로 가정하는 천장급기 시스템에 비해 에너지 절약적이며, 온도 성층화에 따른 공기의 부력효과로 인해 환기측면에서 유리하다. 따라서 이러한 온도 성층화의 적정 형성 조건을 도출하는 것은 바닥급기 시스템의 운영 및 디자인에 있어 중요한 요소가 된다.

이에 본 연구에서는 온도 성층화 경향에 대한 설계기준 연구의 일환으로, 가압식 바닥급기 시스템이 설치된 H사옥 기술연구소의 실내 설정온도,

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-910-0285; fax: +82-31-910-0361
E-mail address: mugadang@kict.re.kr

디퓨저 개수, 디퓨저 타입에 따른 여름철 온도 성층화 경향에 대한 실험을 실시하였다. 이때, 각 조건별 풍량 및 위치별 수직온도 분포를 측정하였으며, 이를 분석, 평가하였다.

2. 실험

2.1 실험 개요 및 대상공간

가압식 바닥급기 시스템의 여름철 온도 성층화 경향을 살펴보기 위해 2007년 8월 13일~8월 28일 동안 실험이 실시되었다. 실험은 가압식 바닥급기 시스템이 설치된 H사옥의 기술연구소를 대상으로 하였으며 대상공간의 개요는 Table 1과 같다. 대상공간은 전체 12층 중 8층에 위치한 15.6m×9.6m의 단일 실이며 시스템 구성은 향온향습기(AHU)에서 토출된 공기가 바닥의 역세스 플로어 하부를 통해 급기되며, 바닥에 설치된 44개의 풍량 조절이 가능한 스월형(Swirl) 급기구를 통해 재실공간으로 토출되는 시스템이 적용되었다. 급기구 외형은 Fig. 1과 같으며, 대상공간의 가압식 바닥급기 시스템의 개요는 Fig. 2와 같다. 실의 위치는 동북측에 위치하고 있으며 발코니가 설치되어 외피부하의 영향을 거의 받지 않고, 실내공기는 측벽에 설치된 그릴을 통하여 향온향습기로 리턴되는 방식이다. 실에는 13명이 재실하고 있으며, 각 좌석에는 컴퓨터가 설치되어 있고, 조명 밀도는 4.3W/m²이다.

2.2 실험 내용 및 방법

대상공간의 온도 성층화 경향에 영향을 미치는 요소로서 실내 설정온도, 급기구 개수, 급기구 타입을 선정하여 실험을 실시하였다. 실험 Case별 조건은 Table 2와 같으며, Case별 외기 온도는 BaseCase는 32.0℃, Case 1은 31.7℃, Case 2는 31.2℃, Case 3은 33.3℃, Case 4는 30.3℃, Case 5는 32.7℃로 측정되었다. 실험은 BaseCase(설정 온도 26℃, 급기구 개수 44개, 스월형 디퓨저)을 기준으로, 설정온도는 24℃(Case1), 급기구 개수는 33개, 22개(Case2,3)로 변화시켜 실험을 진행하였으며, 급기구 타입은 기존의 스월형(Swirl) 급기구에 부착되어 있는 날개를 제거하여 공조공기가 수직으로 토출되는 일반형(Plate) 급기구로 설정

하고 실험을 진행하였다. 주요 측정 항목으로는 급기구 개수 및 타입 변화(CASE 2, 3, 4, 5)에 따른 급기구 토출풍량과 CASE별 실내 수직온도 분포를 측정하였다. 이때 실내 수직온도 분포는 향온향습기로부터 각각 10m, 15m 떨어진 위치 1, 위치 2에서 급기구로부터 40cm 떨어진 지점에서 이루어졌다. 또한 수직 온도 측정 높이는 -25(바닥하부표면), -10(급기온도) 0(바닥면), 10, 60, 110, 160, 210, 235(천장표면)cm에 각각 thermocouple을 설치하여 측정하였다. 실험 전경은 Fig. 3과 같으며, 대상공간의 평면 및 측정점은 Fig. 4와 같다.

Table 1 Conditions of the test bed

Class	Description
Area	149.76m ²
Direction	Northeast
Ceiling height	2.35m(Plenum:0.25m)
AHU	8.4RT, 4800CMH



Fig. 1 Diffuser view

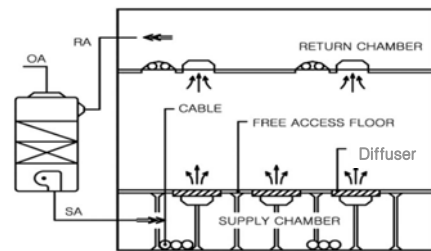


Fig. 2 Pressure underfloor air distribution system concept

Table 2 Experimental cases

Cases	Parameter	Temp	Diffuser Number	Diffuser Type
Base*	-	26℃	44ea	Swirl
Case 1	Setting Temp	24℃	44ea	Swirl
Case 2	Diffuser Number	26℃	33ea	Swirl
Case 3			22ea	
Case 4	Diffuser Type	26℃	44ea	Plate
Case 5			22ea	

* BaseCase Test



Fig. 3 Test view

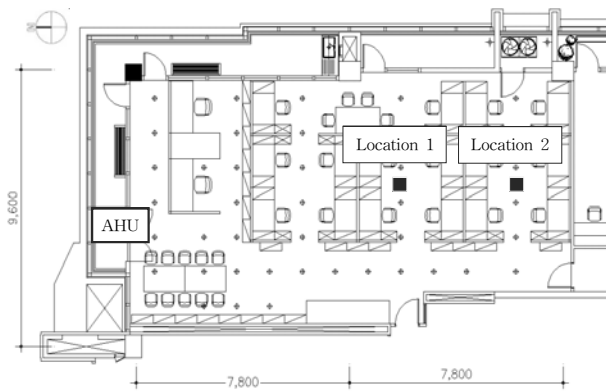


Fig. 4 Measurement points

3. 실험결과 및 고찰

3.1 풍량 측정결과

3.1.1 급기구 개수 변화에 따른 풍량

급기구 개수변화에 따른 풍량 분포는 Table 3 과 같다. BaseCase에 경우 급기구 1개당 평균 61.7CMH의 풍량이 토출되었으며, 대상공간에 총 2,715CMH의 풍량이 급기된 것으로 파악되었다.

위치별로 살펴보면 위치 1에 경우 급기구 1개당 65~68CMH의 풍량이 토출되었으며, 위치 2는 65~70CMH로 나타나, 위치별 토출 풍량에는 거의 차이가 없는 것으로 파악되었다. 또한 급기구 개수를 44개에서 11개씩 감소시킴에 따라 전체 토출풍량은 7.8%, 9.5%씩 감소하였으며, 급기구 1개당 평균 토출 풍량은 22.9%, 35.7%씩 증가하는 것으로 나타났다. 이는 급기구 개수가 감소함에 따라 바닥 하부 압력이 증가하여 급기구당 토출 풍량을 증가시키기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.2 급기구 타입변화에 따른 풍량

급기구 타입변화에 따른 풍량 분포는 Table 4 와 같다. 급기구 개수가 44개인 경우, 급기구 타입을 일반형으로 변경함에 따라 전체 토출풍량 및 급기구 1개당 평균 토출풍량이 2.5% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 스월형 급기구에 부착되어 있는 날개를 제거하여 일반형 디퓨저를 설정하면서, 급기구 압력손실이 감소하여 공급되는 풍량이 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 또한 급기구 개수가 22개인 경우, 급기구 타입변화에 따라 전체 토출풍량 및 급기구 1개당 평균 토출풍량이 4.6% 증가하는 것으로 나타났다.

Table 3 Diffuser air volume according to diffuser number(CMH)

Class	Base (44ea)	Case2 (33ea)	Case3 (22ea)
Min/ea	55	65	90
Max/ea	70	85	115
Average/ea	61.7	75.85	102.95
Total	2,715	2,503	2,265

Table 4 Diffuser air volume according to diffuser type(CMH)

Class	Swirl		Plate	
	Base (44ea)	Case3 (22ea)	Case4 (44ea)	Case5 (22ea)
Min/ea	55	90	50	90
Max/ea	70	115	80	120
Average/ea	61.7	102.95	63.27	107.68
Total	2,715	2,265	2,784	2,369

3.2 수직온도 측정결과

3.2.1 설정온도 변화에 따른 수직온도분포

실내 설정온도 변화에 따른 위치별 수직온도 분포는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5의 (a)는 위치 1에서의 14:00~15:00 피크 시간대 실내설정온도 변화에 따른 수직온도 분포를 나타낸다. BaseCase 조건에서 높이 110cm를 기준으로 온도가 1.7℃정도 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 10~170cm 사이의 온도차는 약 2.69℃로 분석되었다. 이는 ISO의 수직온도차 기준인 3℃를 초과하지 않는 값으로 수직온도차에

의한 불쾌적감이 발생하지 않는다는 것을 보여준다. 또한 바닥하부 표면온도(-25cm)는 23.91℃, 급기온도(-10cm)는 20.51℃로 측정되었으며, 거주역(10~160cm)의 평균 온도는 25.63℃로 나타났다. 설정온도가 2℃ 감소함에 따라 수직온도 프로파일은 왼쪽으로 약 1.5~1.63℃ 이동하는 것을 나타냈으며, 바닥급기 시스템의 성층화 프로파일은 설정온도 상관없이 거의 동일한 것으로 파악되었다.

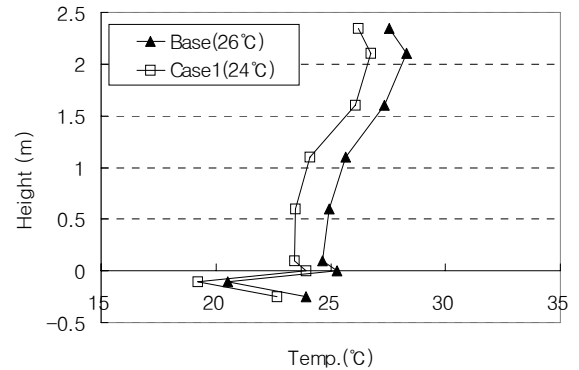
Fig. 5의 (b)는 위치 2에서의 동일시간대 실내 설정온도 변화에 따른 수직온도 분포를 나타낸다. BaseCase 조건에서 수직온도 분포는 위치 1과 비교해 성층화 경향이 감소하였으며, 160cm 이상 높이에서 천장의 조명부하에 의해 온도가 약 1.7℃ 증가하는 것으로 나타났다. 또한 10~170cm 사이의 수직온도차는 0.72℃으로 측정되었으며 위치 1과 비교해 수직온도차에 의한 재실자의 불쾌적감은 감소하였으나, 거주역 온도가 약 0.7℃ 증가하여 전체적인 온열감은 감소한 것으로 나타났다. 이는 바닥플래넘 하부의 콘크리트 슬래브 축열 성능에 의해 공조기를 통해 급기된 공기가 데워지면서, 위치 2의 바닥표면온도 및 급기 온도가 상대적으로 높게 형성(+약 2.8℃)되었기 때문인 것으로 판단된다. 설정온도가 2℃ 감소함에 따라 수직온도 프로파일은 왼쪽으로 1.27~1.59℃ 이동하는 것으로 나타났다.

이를 통해 바닥급기 시스템의 성층화 경향은 설정온도에 영향을 받지 않으며, 바닥급기 시스템의 온도 성층화에 따른 에너지 효율성을 높이기 위해서는 바닥 하부의 축열성능을 고려한 위치별 설계가 요구된다는 것을 파악할 수 있었다.

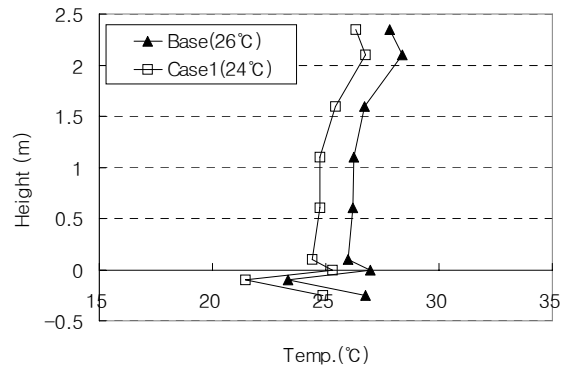
3.2.2 급기구 개수 변화에 따른 수직온도분포

급기구 개수 변화에 따른 위치별 수직온도 분포는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6의 (a)는 위치 1에서의 14:00~15:00 피크 시간대 급기구 개수에 따른 수직온도 분포를 나타낸다. 급기구 개수가 가장 많은 BaseCase에 경우 110cm 지점에서 1.7℃ 급격히 온도가 증가한 데 반해, Case 2는 0.94℃, Case 3은 0.05℃ 증가했으며, 10~170cm 사이의 수직 온도차는 각각 2.69℃(BaseCase), 1.71℃(Case2), 0.2℃(Case3)로 나타나 급기구 개수를 증가시킬수록 급기구 풍량이 감소하면서, 온도 성층화 경향이 뚜



(a) Location 1

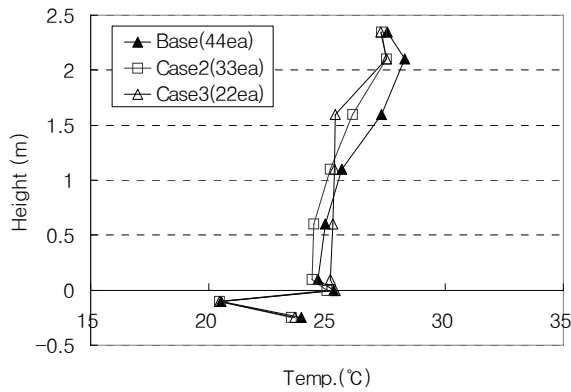


(b) Location 2

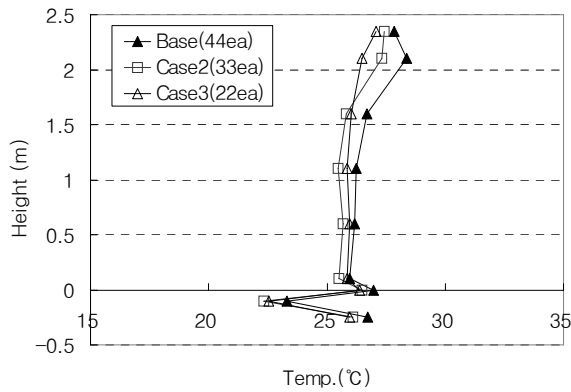
Fig. 5 Temperature profile of according to setting temp.

렷해진다는 것을 파악할 수 있었다. 이때 Case 3에 경우, 급기구를 통해 평균 102.9CMH의 높은 풍량이 급기되면서 수직온도차에 의한 재실자의 불쾌적감은 감소하였으나 성층화 경향은 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다. 또한 BaseCase, Case 2, 3의 바닥하부 표면온도 및 급기온도, 거주역 평균온도는 거의 차이가 없었으며, 각각 평균 23.68℃, 20.47℃, 25.3℃로 측정되었다.

Fig. 6의 (b)는 위치 2에서의 동일시간대 급기구 개수 변화에 따른 수직온도 분포를 나타낸다. 위치 1과 비교하여 Case별 성층화 경향이 감소한 것으로 나타났으며, 급기구 개수가 감소함에 따라 10~170cm 사이의 수직 온도차는 0.45℃(BaseCase), 0.37℃(Case2), 0.19℃(Case3)로 측정되었다. 이때 위치 2의 Case별 거주역 평균온도는 거의 차이가 없었으며, 위치 1에 비해 평균 0.64℃정도 높은 것으로 나타났다. 이는 위치 2의



(a) Location 1



(b) Location 2

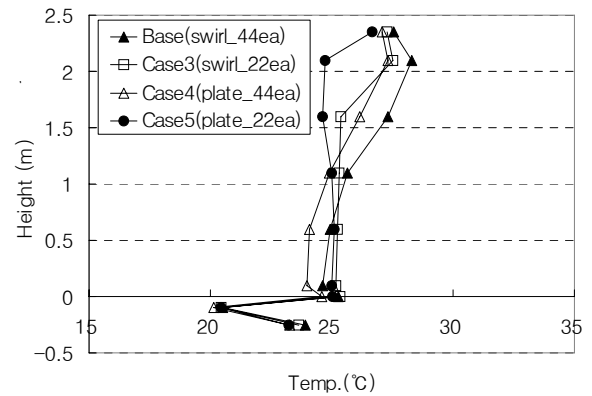
Fig. 6 Temperature profile according to diffuser number

바닥하부 표면온도 및 급기온도가 위치 1에 비해 평균 2.83°C, 2.81°C 정도 높기 때문인 것으로 분석되었다. 이를 통해 바닥급기 시스템의 성층화 경향은 급기구 개수에 따른 급기 풍량에 영향을 받으며, 급기구 풍량이 감소할수록 성층화 경향이 증가한다는 것을 파악할 수 있었다. 또한 바닥급기 시스템의 온도성층화에 따른 에너지 효율성을 높이기 위해서는 적정 바닥 급기구 풍량 및 개수 산정이 요구된다는 것을 파악할 수 있었다.

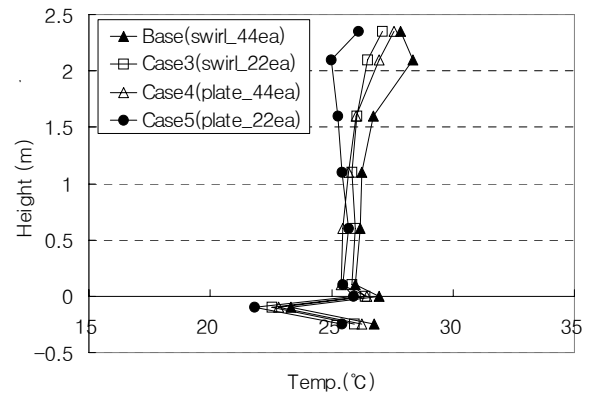
3.2.3 급기구 타입 변화에 따른 수직온도분포

급기구 타입 변화에 따른 위치별 수직온도 분포는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 (a)는 위치 1에서의 14:00~15:00 피크 시간대 급기구 타입 변화에 따른 수직온도 분포를 나타낸다. 급기구 개수를 44개로 설정한 경우, 급기구 타입을 일반(Plate)형으로 변경함에 따라



(a) Location 1



(b) Location 2

Fig. 7 Temperature profile according to diffuser type

10~170cm 사이의 수직 온도차는 2.69°C (BaseCase), 2.18°C(Case4)로 나타났으며, 거주역 평균온도는 각각 25.63°C, 24.77°C로 나타났다. 이를 통해, 온도 성층화 경향은 스윙형이 뚜렷한데 반해, 거주역 온열감은 일반형이 보다 우수한 것을 파악할 수 있었다. 이는 스윙형 급기구가 일반형에 비해 급기구 날개에 의한 선회류를 토출하면서 실내 부하와 보다 빠르게 섞이기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 급기구 개수가 22개인 경우, 급기구 타입을 일반형으로 변경함에 따라 10~170cm 사이의 수직 온도차는 0.2°C(Case3), -0.37°C(Case5)로 나타났으며, 거주역 평균온도는 각각 25.27°C, 24.94°C로 나타났다. 이때 Case 5에 경우, 급기구를 통해 107.68 CMH의 높은 풍량의 기류가 수직으로 토출되면서 1.6m 이상의 구역에 영향을 주어, 거주역에 비해 낮은 온도 분포를 나타냈다.

Fig. 7의 (b)는 위치 2에서의 동일시간대 급기구 타입 변화에 따른 수직온도 분포를 나타낸다. 급기구 개수를 44개로 설정한 경우, 급기구 타입을 일반형으로 변경함에 따라 10~170cm 사이의 수직 온도차는 0.72°C(BaseCase), 0.62°C(Case4)로 나타났으며, 평균 거주역 온도는 각각 26.28°C, 25.64°C로 나타났다. 위치 1과 비교하여, 급기구 타입변경에 따른 수직온도차가 거의 나지 않았으며, 이는 위치 2의 바닥하부 표면 온도 및 급기온도가 위치 1에 비해 각각 2.90°C, 2.75°C 정도 높게 형성되어 급기구 타입에 따른 실내 수직온도 분포에 차이를 나타내지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 이를 통해, 바닥급기 시스템의 설계시 바닥 급기구 개수 및 타입을 선정하기에 앞서 바닥 하부 특성에 대한 고려가 요구된다는 것을 파악할 수 있었다. 또한 급기구 개수가 22개인 경우, 급기구 타입을 일반형으로 변경함에 따라 10~170cm 사이의 수직 온도차는 0.19°C(Case3), -0.19°C(Case5)로 나타났으며, 거주역 평균온도는 각각 25.92°C, 25.46°C로 나타났다

4. 결 론

본 연구에서는 여름철 가압식 바닥급기 시스템의 온도 성층화 경향을 살펴보기 위해, 대상건물을 선정하고 설정온도, 급기구 개수, 급기구 타입에 따른 풍량 및 수직온도 분포를 측정하였다. 주요 측정결과는 다음과 같다.

(1) 급기구 개수를 44개, 33개, 22개로 변화시킴에 따라 전체 토출풍량은 7.8%, 9.5%씩 감소하는데 반해, 급기구 1개당 평균 토출 풍량은 22.9%, 35.7%씩 증가하는 것으로 나타났다. 또한 급기구 타입을 스월형에서 일반형으로 변경함에 따라, 전체 토출풍량 및 급기구 개당 평균 토출 풍량은 급기구 개수가 44개인 경우 2.5%, 22개인 경우는 4.6% 증가한 것으로 나타났다.

(2) 설정온도 변화에 따른 수직온도분포를 측정한 결과, 설정온도 변화에 따른 수직온도 프로파일은 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 위치 1에 경우 110cm를 기준으로 온도가 1.7°C 증가한데 반해 위치 2는 바닥하부 축열에 의한 급기 온도상승으로 인해 거의 수직한 온도 분포를 나타냈다.

(3) 급기구 개수 변화에 따른 수직온도분포를 측정한 결과, 급기구 개수를 증가시킬수록 급기구 토출 풍량이 감소하면서 성층화 경향이 뚜렷해지는 것으로 나타났으며, Case3(22개)으로 설정한 경우 거의 수직한 온도 분포를 나타내, 적정 바닥급기구 풍량 및 개수 산정의 필요성이 파악되었다.

(4) 급기구 타입 변화에 따른 수직온도분포를 측정한 결과, 스월형에서 일반형으로 타입을 변경함에 따라 성층화 경향은 감소하는데 반해 거주역 온열감은 증가하는 것으로 나타났다.

위의 측정결과를 통해 바닥급기 시스템의 적정 온도 성층화 설계를 위해서는 급기구 풍량 및 타입, 바닥하부의 축열성능에 대한 고려가 요구된다는 것을 파악할 수 있었다. 향후에는 보다 다양한 설계 인자에 대한 연구가 수행되어야 할 것이며, 실제 적용된 건물의 Case Study를 통해 이를 검증하고 실무에 적용가능한 설계 가이드라인이 도출되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 김용식 외, 2002, 바닥급기 공조시스템용 선회·경사기류 복합형 바닥급기구의 기류분포 및 온도분포 특성, 대한건축공학회 논문집, 18권 3호, pp. 145-151.
2. 김요셉 외, 바닥급기 공조시스템에서 배기위치에 따른 난방성능 예측, 대한설비공학회 동계 학술발표회 논문집 II, 1998.12.
3. 조동우, 1999, “공조 취출방식에 따른 공기 나이 및 환기효율 비교” 대한설비공학회 논문집.
4. 이상엽 외, 2003, “플레넘을 이용한 가압식 바닥급기 시스템의 에너지 성능평가”, 대한설비공학회 동계 학술발표대회 논문집, pp. 603-608.
5. 유기형 외, 2004, “바닥공조 시스템과 천장공조 시스템의 실내환경 비교 평가”, 대한건축학회 논문집, 제 20권 5호.
6. 신동민 외, 2004, “시뮬레이션을 통한 바닥급기 시스템 설계인자에 대한 연구”, 대한설비공학회 동계 학술발표회 논문집, pp. 371-379.
7. 한국건설기술연구원, 2003, 건축설계실무자를 위한 바닥공조시스템 디자인 가이드라인.