

바닥공조 시스템이 적용된 사무공간의 거주후 성능평가

윤성훈*, 장향인**, 정해권*, 최선규***, 유기형*

*한국건설기술연구원 그린빌딩연구실(aquila@kict.re.kr/hkjung@kict.re.kr/raytrace@kict.re.kr),
**인하대학교 건축공학과(jhiaesl@inha.ac.kr)
***에스케이건설 건축기술본부(skchoi@sk.com)

Post Occupancy Evaluation for Office Building with An Underfloor Air Distribution System

Yoon, Seong-Hoon* Jang, Hyang-In** Jung, Hae-Kwon* Choi, Sun-Kyu*** Yu, Ki-Hyung*

*Green Building Research Division. KICT
(aquila@kict.re.kr/hkjung@kict.re.kr/raytrace@kict.re.kr),
**Dept. of Architectural Eng., Graduate School, Inha University(jhiaesl@inha.ac.kr),
***Architectural Technology Group, SK E&C(skchoi@sk.com)

Abstract

In this study, an underfloor air distribution(UFAD) system installed on the S. office building was evaluated for its indoor environmental quality performance. Field measurement and survey were conducted for the overall POE(Post Occupied Evaluation). PMV(including temperature, humidity, air velocity and globe temperature) and several environmental components were measured while thermal comfort, thermal sensation, acoustical environment and others. were investigated through survey.

Except for the direct upper part of the air supply diffuser on the floor, the indoor velocity was less than 0.25m/s, which has been suggested by ASHRAE Standard 55 as the limit for thermal comfort. MRT of the perimeter zone of the room showed a higher value than that in the interior because of the introduced solar radiation through the building envelope.

PMV was generally maintained in the range of thermal comfort (from -0.5 to +0.5), though it weighted to the warm side. It was reported to have 61% positive response on thermal comfort and 55% on neutral thermal sensation. The results of each survey item showed some gender-based differences. Specifically, female respondents had higher degree of dissatisfaction with indoor air cleanness and acoustical privacy. The working surface showed more than 400 lux and the equivalent noise level showed less than 50 dB(A).

In conclusion, the results of the measurement and survey showed good agreement. Indoor environmental quality of the subject office room where the UFAD system was installed showed an overall excellent performance.

Keywords : 바닥공조 시스템(Under Floor Air Distribution System), 거주후 성능평가(Post Occupancy Evaluation), 실내환경성능(Indoor Environmental Quality), 설문조사(Survey)

1. 서 론

Task & Ambient 공조방식인 바닥공조 시스템은 천장공조 시스템에 비하여 상대적으로 작은 급기 온도차와 적은 풍량으로 공조가 가능하여 냉난방 에너지 저감에 유리한 것으로 알려져 있다. 또한 층고의 감소로 인한 경제성 증대, 급기 디퓨저 배치의 유연성 제고 및 온열 쾌적성 향상 등 다양한 장점을 지니고 있어 적용 사례가 점차 증가하고 있는 추세이다.

국외의 경우 바닥공조 시스템의 다양한 적용 조건에 따른 실내 환경과 에너지저감효과에 대한 연구들¹⁾을 통하여 바닥공조 시스템의 특성을 고려한 설계 가이드라인²⁾이 제시되고 있다.

국내에서도 1990년대 이후부터 바닥공조 시스템의 급기 디퓨저 종류, 배치 조건 등에 따른 실내 온열환경 특성과 관련하여 실측 또는 수치해석을 통한 연구가 주로 이루어져 왔다. 그러나 아직까지는 거주역 공조의 특성을 반영한 설계 기준 및 운영 지침이 없어 천장공조 시스템과 동일한 설계와 운영방식을 적용하고 있는 실정이다. 이로 인해 바닥공조 시스템의 장점인 에너지절약 효과에 대한 의문이 제기되며, 낮은 급기온도 등으로 인해 오히려 콜드드래프트로 인한 불만도 보고되고 있다³⁾.

본 연구에서는 바닥급기 시스템이 적용된 업무용 건축물을 대상으로 실내환경성능(IEQ ; Indoor Environmental Quality) 및 거주자 만족도를 포함한 종합적인 거주후 평가(POE ; Post Occupancy Evaluation)를 실시함으로써 설계 및 운영 관련 가이드라인의 정립을 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

- 1) Webster, T. et al., Underfloor air distribution/Thermal stratification performance of UFAD systems, ASHRAE Journal, Vol.44, No.5, 2002.
- 2) Fred S. Bauman, Underfloor Air Distribution(UFAD) Desing Guide, ASHRAE, 2003.
- 3) 유기형 외, 바닥공조 시스템과 천장공조 시스템의 실내환경 비교 평가, 대한건축학회논문집 계획계 20권 5호, 2004

2. 연구 방법 및 범위

2.1 연구 방법

바닥급기 시스템이 적용된 사무공간의 IEQ에 대한 종합적인 거주후 평가를 위하여, 우선 하절기의 거주자 사용 조건에 대한 현장측정 및 설문조사를 실시하였다.

2.2 건물 개요

표 1, 그림 1은 각각 건물의 개요 및 조사대상 층이 위치한 업무동 5층 평면도를 나타낸다(점선으로 표시한 부분이 조사대상 층).

2.3 현장측정 개요

2011년 8월 9일~12일에 걸쳐 실시된 현장측정과 관련하여, 주요 측정항목별 측정기기 및 측정위치를 표 2, 그림 2에 나타내었다.

표 1. 대상 건물 정보

구분	내용
위치	경기도 성남시
규모	지하5층/지상9층 (조사대상 : 업무동 5층 일부)
구조	RC조+S조
연면적	47,512.91㎡
열원	지역난방+흡수식냉동기, 빙축열시스템
공조설비	바닥공조 시스템(VAV방식)
가동시간	06:00 ~ 22:00
조명밀도	평균 9.5W/㎡



그림 1. 조사대상 플로어 평면도 (업무동 5층)

표 2. 항목별 측정기기 및 측정위치

구분	측정기기 및 측정위치
외기온습도	THT-B121(Sinyei社) 옥상
수평면 전일사량	LI-200SA(LI-COR社) 옥상
PMV	온습도 : THT-B121(Sinyei社) 흑구온도 : T-type 열전대, Globe 기류속도 : 6332D,0964-1(Kanomax社) T, T2(바닥면 1.2m, 연속측정) D1~D15(바닥면 1.2m)
수직 온도분포	T-type 열전대 T, T2 (바닥에서 천장까지 10개소)
수직 기류속도분포	6332D, 0964-1(Kanomax社) P1~P4 (높이 : 바닥에서 천장까지 10개소)
디퓨저 토출온도	T-type 열전대 D3, D7, D10, D13, FCU
디퓨저 급기풍량	Testo-417(Testo社) 및 Hood D1~D15
플레넘 압력분포	DG-700(BSRIA Instrument Solutions社) D1~D15 하부(플레넘)
등가 소음레벨	SVAN957(Svantek社) S1~S8
작업면 조도	Testo-540(Testo社) L1~L10(바닥면 0.8m)
플레넘 압력분포	DG-700(BSRIA Instrument Solutions社) D1~D15 하부(플레넘)

(1) 온열환경 관련

실내 온도 및 기류속도의 수직 분포, 급기 디퓨저의 토출 풍량 및 온도, 플레넘 하부 차압 등을 측정하였다.

ISO 7730에서 제시된 PMV의 6가지 결정인자 가운데 건구온도, 상대습도, 기류속도, 평균복사온도를 측정하여 PMV를 산출하였다(평균복사온도는 흑구온도 및 기류속도 측정결과로 환산하였으며, 착의량=0.5, 대사량=1.2로 설정하였다).

(2) 음환경/빛환경

음환경과 관련하여, 실내외 소음 및 급배기 디퓨저의 등가소음레벨을 측정하였다.

빛환경과 관련하여 바닥면으로부터 0.8m 높이의 작업면 조도를 측정하였다.

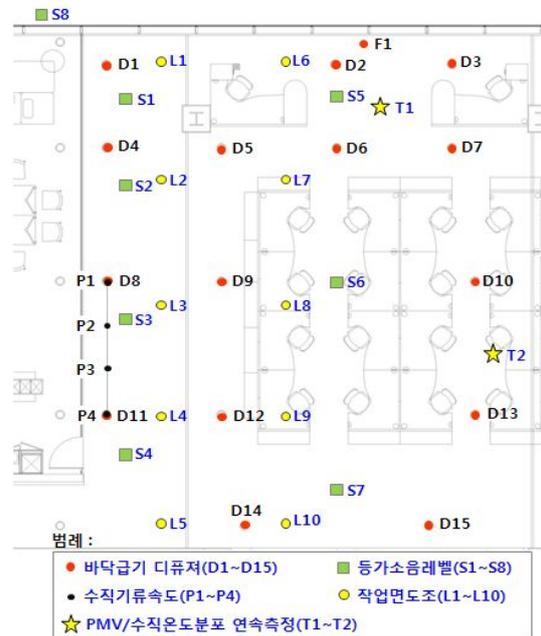


그림 2. 측정 위치

2.4 설문조사 개요

재실자의 성별, 연령, 근무 위치 등에 따른 IEQ의 만족도, 온열감 등에 대하여 표 3과 같이 설문조사를 실시하였다.

표 3. 설문조사 개요

구분	내용
조사기간	2011년 8월 9일 ~ 25일 (근무시간 : 08시 ~ 21시)
조사대상	S사 사옥 업무동 5층 근무자
배포수	100부 (33부 회수)
조사방법	7점 리커드 척도, 선다형 문항(총 16문항)
조사항목	· 기본정보 : 성별, 연령, 외부창/디퓨저와의 거리
	· 온열감 : 온열만족도, 온열감, 상하부 온열감, 바닥급기 디퓨저의 풍속 및 온도
	· 공기질 : 공기 청정도의 만족도, 먼지/냄새 관련 만족도
	· 음 환경 : 음환경 만족도, 음 프라이버시 만족도, 소음에 대한 영향인자
	· 급기 디퓨저의 조정 : 바닥급기 디퓨저의 조정빈도, 이유

3. 조사 결과

3.1 현장측정

(1) 외기 온습도 및 일사량

측정기간 중의 외기온도는 24~36℃, 상대습도는 47~97%, 10시~17시 사이의 수평면 전일사량은 평균 412W/m²로 관측되었다.

(2) 실내 온습도

그림 3에서 실내온도는 내외주부의 편차가 거의 없이 25℃ 정도로 유지되었으며, 상대습도는 평균 75% 정도로 다소 높게 나타났다 (외기냉방을 위해 06시~08시에 전외기 운전을 실시하여 상대습도가 높아짐).

그림 4는 내외주부의 평균복사온도(MRT) 산출결과를 나타낸다. 외주부는 평균 26.2℃, 내주부는 24.3℃로 외주부가 다소 높게 나타났다. 이는 외부창을 통해 유입된 일사량과 건물외피로부터의 복사에너지의 영향 때문으로 사료된다.

(3) 수직온도분포

그림 5는 내외주부의 평균 수직온도분포를 나타낸 것으로, 외주부에서는 유입된 일사의 영향으로 바닥표면 및 거주역(높이 1.7m 이하)의 온도가 비거주역 보다 전반적으로 높게 형성된 반면, 내주부에서는 인체, 기기, 조명 발열 등에 의한 영향으로 온도 성층화의 경향이 나타났다.

한편, ISO 7730에 제시된 상하 온도차에 따른 불만족율(PD) 예상식에 측정결과를 대입한 결과 내외주부 모두 1% 미만으로 나타나 상하 온도차에 의한 불쾌적감은 발생하지 않는 것으로 판단된다.

$$PD = 100 / [1 + \exp(5.76 - 0.856 \times \Delta t_h)] \quad (1)$$

(단, 상하온도차 $\Delta t_h < 8^\circ\text{C}$)

(4) 수직기류속도분포

그림 6은 바닥급기 디퓨저 주변(P1~P4)의

기류속도에 대한 수직분포를 나타낸다. 대부분의 측정점에서 ASHRAE standard 55-1992에 따른 실내 기류속도 허용범위인 0.25m/s를 만족하는 결과를 나타내고 있으나, 디퓨저 직상부(P1, P4, 바닥면에서 0.9m 이하)에서는 다소 높은 기류속도를 나타내었다. 이는 조사대상 공간의 규모에 비하여 디퓨저가 적게 배치되어 급기 풍속이 높아졌기 때문인 것으로 사료된다.



그림 3. 내외주부 온도 및 상대습도 (8/10~11)

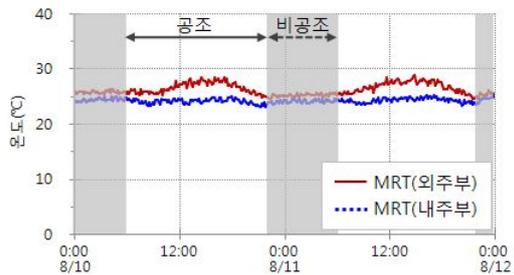


그림 4. 내외주부 평균복사온도 (8/10~11)

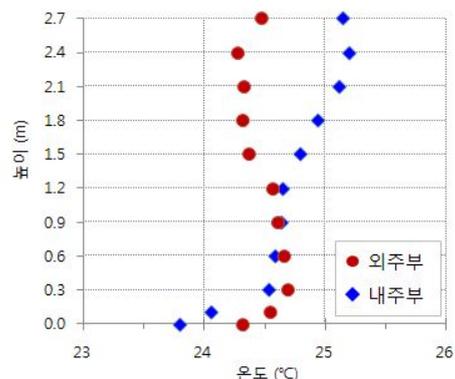


그림 5. 내외주부 수직온도분포

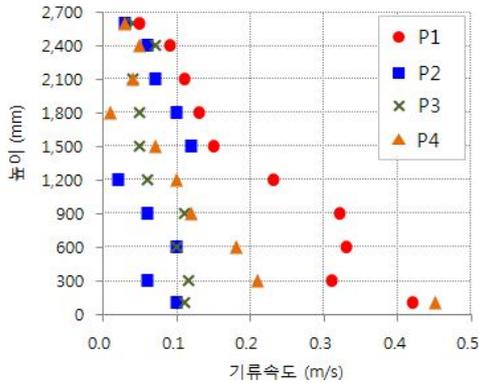


그림 6. 수직기류속도분포(P1~P4)

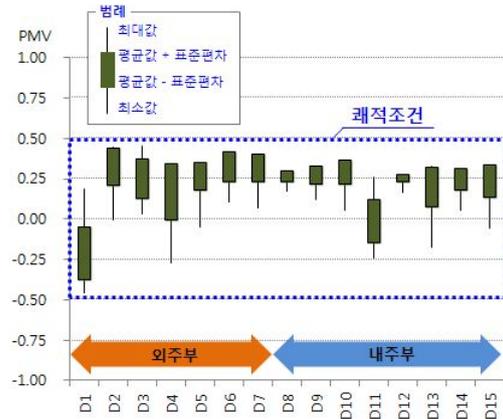


그림 7. 실 전체의 PMV 분포

(5) PMV

그림 7은 바닥급기 디퓨저를 중심으로 측정한 실 전체의 PMV 분포를 나타낸다. 전체적으로 중립(0)에 비해 다소 (+)쪽에 치우친 값을 보이고 있으나, ISO 7730에서 제시하는 온열 쾌적 조건인 $-0.5 \sim +0.5$ 를 벗어나지 않는 범위에서 유지됨을 알 수 있다.

그림 8은 내외주부의 대표점에서 연속으로 PMV를 측정한 결과를 나타낸다. 내주부의 경우 전체적으로 쾌적 범위 내에서 변동하고 있으나, 외주부의 경우 그림 4에서 살펴본 바와 같이 주간에는 복사에너지의 영향으로 일부 쾌적 범위를 상회하는 구간도 나타나고 있다.

따라서 냉방시 외주부에서의 PMV를 보다 쾌적한 범위로 유지하기 위해서는 실내 유입 일사량을 적절하게 차단하기 위한 기술(루버, 차양장치, SHGC 저감 유리, Air-barrier system 등)의 적용에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

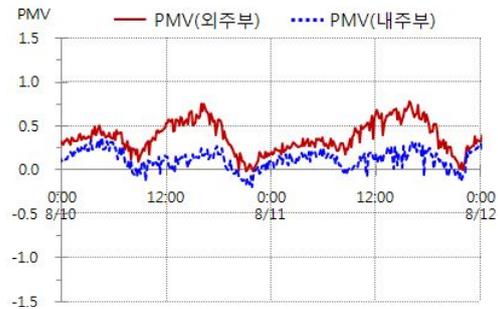


그림 8. 내외주부의 PMV 변화(8/10~11)

(6) 디퓨저 풍량/토출온도, 플레넘 차압

그림 9는 디퓨저별 급기 풍량 및 토출온도, 플레넘 하부와 실내와의 차압을 나타낸다. 평균 급기 풍량은 $225\text{m}^3/\text{h}$, 평균 급기온도는 $2\text{ }^\circ\text{C}$, 평균 차압은 8.3Pa 로 나타났으며, 상대적으로 정압이 많이 작용하는 외주부(D1~D7)의 풍량 및 차압이 내주부(D8~D15)보다 다소 높게 나타났다.

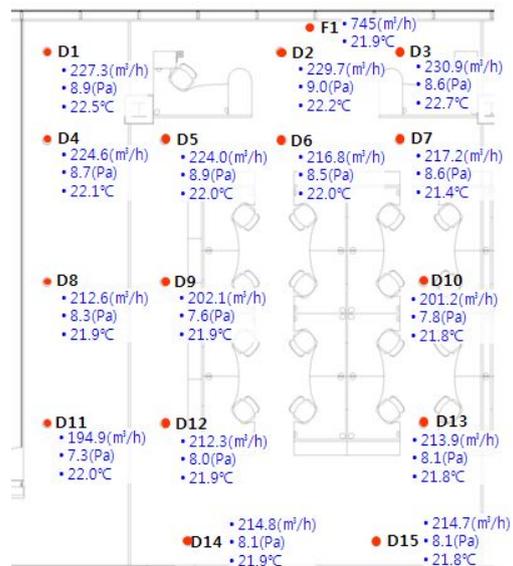


그림 9. 디퓨저 토출 풍량/온도, 플레넘 차압

(7) 음환경

표 4, 5는 각각 디퓨저 소음, 실내의 소음도에 대한 측정결과를 나타낸다. 디퓨저 소음과 관련해서는, 각 측정점의 평가 소음도가 50dB(A) 미만으로 나타나, 공조 설비 및 디퓨저 소음이 거주자에게 미치는 영향은 수인한도 이내인 것으로 판단된다.

실내 소음 역시 재실자의 유무와 상관없이 50dB(A) 미만으로 조사되었다. 또한, 실내와 외부의 소음도 차이가 20dB(A) 이상 발생하고, 외주부(S5)보다 내주부(S6, S7)에서의 소음도가 상대적으로 높은 것으로 보아 건물 내부에서 발생하는 소음이 외부에서 발생하는 소음보다 실내 음환경에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것으로 사료된다.

표 4. 디퓨저 소음 측정결과

구 분	S1	S2	S3	S4	압소음 (S3)
등가소음도 Leq.dB(A)	42.6	40.3	39.7	39.7	29.1

표 5. 실내외 소음 측정결과

구 분	S5	S6	S7	비거주시 (S6)	외부 (S8)
등가소음도 Leq.dB(A)	46.0	47.4	48.8	40.4	68.4

(8) 빛환경

그림 10은 작업면 조도의 측정결과를 나타낸 것으로, 대부분의 측정점에서 측정시간과 상관없이 400Lux(KS A 3011의 사무공간 조도 기준) 이상으로 쾌적한 수준을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

3.2 설문조사

(1) 응답자 관련 정보

그림 11은 응답자 33명에 대한 성별 및 연령 비율, 응답자와 외부창 및 바닥급기 디퓨저와의 거리를 나타낸다.

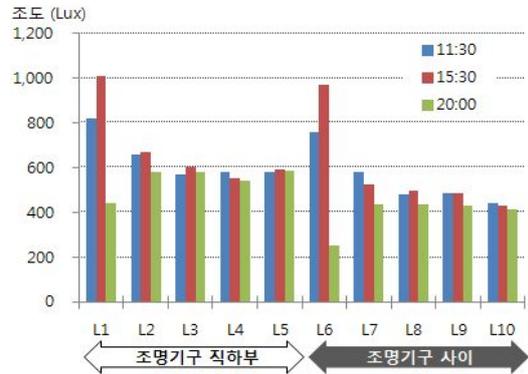


그림 10. 작업면 조도

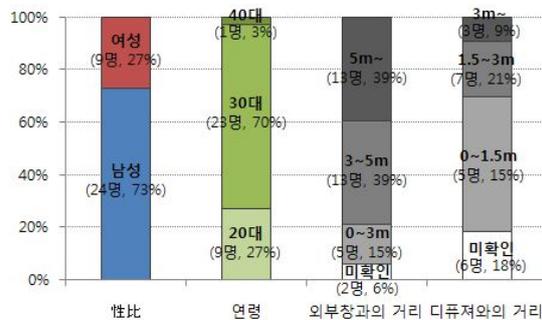


그림 11. 응답자 관련 정보

이 외에 여성 재실자의 1일 평균 재실시간은 9.9시간으로, 남성(4.1시간)에 비해 2배 이상 긴 것으로 조사되었다.

(2) 온열환경

그림 12는 온열 만족도에 대한 조사 결과를 나타낸 것으로, -3은 '매우 만족', 0은 '중립', +3은 '매우 불만족'을 의미한다. 긍정적인 답변 비율이 61%로 비교적 높게 나타났으며, 남성의 71%가 긍정적으로 답변한 반면 여성의 경우 44%가 부정적으로 답변하였다.

그림 13은 전반적인 온열감에 대한 조사 결과를 나타낸 것으로, -3은 '매우 덥다', 0은 '중립', +3은 '매우 춥다'를 의미한다. 전체적으로 중립적인 답변이 가장 많았으며, 응답자의 30%는 다소 따뜻하게 느끼는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 PMV 측정결과가 쾌

적 범위 내에서 다소 따뜻한 편에 치우친 것
과도 일치하고 있다.

온열감에 대한 성별 비교에서는 남성의 38%
가 따뜻한 느낌이라고 답변한 반면, 여성은 33%
가 서늘한 느낌이라고 답하여 상반된 결과를 보
였다. 특히 무릎 아래쪽의 온열감 및 기류감에
대한 조사에서 여성의 56%가 ‘서늘하다’, 33%가
‘기류감이 강하다’고 답변하였는데, 이는 여성의
재실 시간이 남성에 비해 길고 상대적으로 신체
노출이 많은 착의조건 때문으로 사료된다.

(3) 공기질

각각 실내 공기의 청정도에 대한 만족도
(그림14)에서는 53%, 먼지 및 냄새 발생정도
에 대한 만족도(그림15)에서는 각각 56%,
47%가 긍정적으로 답변하였다.

(4) 음환경

그림 16은 실내 음환경 및 음 프라이버시에
대한 만족도 조사결과를 나타낸다. 음환경 전
반에 대해서는 77%가 긍정적으로 답변한 반
면, 음 프라이버시에 대해서는 52%가 불만족
스럽다고 답변하였다. 이러한 결과는 실내가
정온한 음환경을 유지하고 있기 때문에 주변
에서 발생하는 소음 보다 오히려 응답자 본인
이 발생시키는 소음이 주변에 전달되는 것에
대해 민감해지기 때문으로 추정된다.

기타, 실내 음환경을 악화시키는 인자에 대한
선다형 문항에서는 주로 재실자의 행위나 사무
기기 등에서 발생하는 소음이 선택되었으며, 건
물 외부에서 유입되는 소음의 비중은 상대적으
로 작게 나타났다. 또한 바닥급기 디퓨저에서
발생되는 소음은 원인으로 지적되지 않았다.

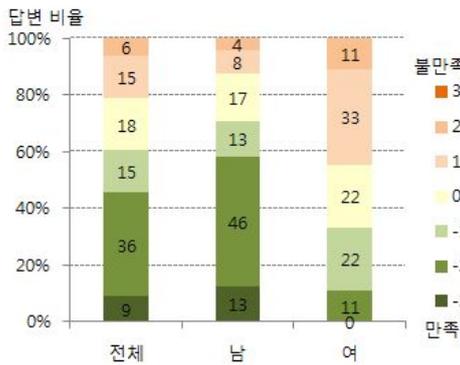


그림 12. 실내 온열환경의 만족도

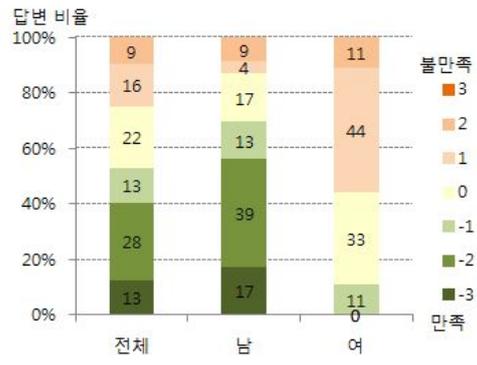


그림 14. 실내 공기 청정도의 만족도

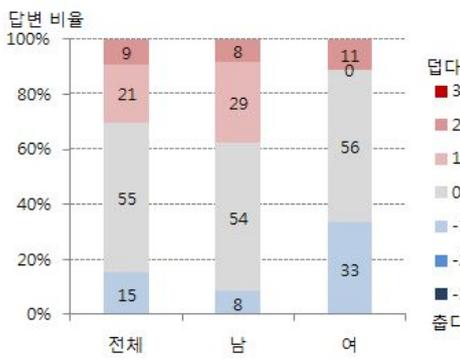


그림 13. 전반적인 실내 온열감

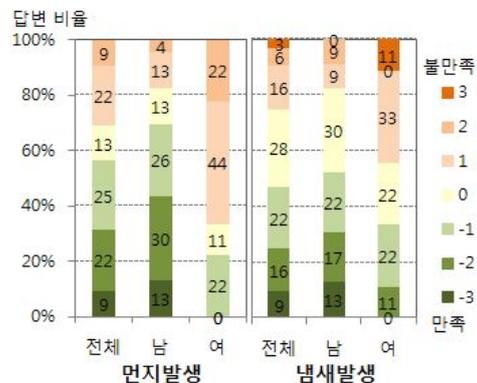


그림 15. 먼지 및 냄새 발생 관련 만족도

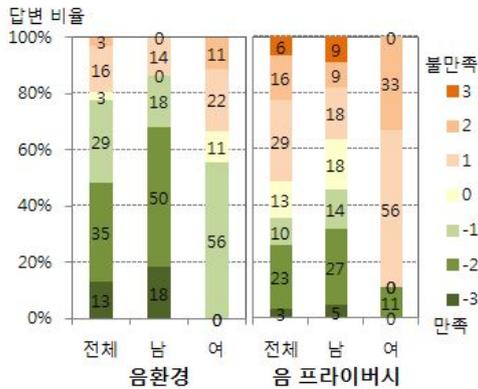


그림 16. 실내 음환경 및 음 프라이버시 만족도

(5) 급기디퓨저의 조정

바닥급기 디퓨저의 토출 방향이나 개구율을 직접 조정할 빈도와 관련한 문항에 대해서는 대부분 조정할 적이 없다고 답변하였으며, 그 이유로는 ‘조정 가능한 사실을 알지 못했음(58%)’ 또는 ‘조정의 필요성을 느끼지 못했음(26%)’이 대부분을 차지하였다. 이러한 결과는 전반적으로 실내 온열환경에 대한 만족도가 높기 때문으로 사료된다.

다만 대상 건물의 경우 바닥 마감재 모듈이 역세스 플로어 모듈 4개를 더한 정도의 크기로 설치되어 바닥급기 디퓨저의 위치를 자유롭게 조정하기 어려우며, 디퓨저 1개가 담당하는 공조면적이 비교적 넓게 배치된 부분은 재실자에 의한 실내 온열환경의 능동적 제어 측면에서 개선이 필요한 것으로 보여진다.

4. 결 론

- (1) 실내 각 지점의 PMV는 온열 쾌적 범위 내로 측정되었으며, 상하온도차 및 기류속도와 관련해서도 온열 쾌적감과 관련한 허용기준을 만족하는 것으로 조사되었다. 설문조사에서도 응답자의 61%가 만족스럽다고 답변하였으며, 55%가 중립적인 온열감을 느끼는 것으로 나타났다.
- (2) 실내 공기질에 대한 설문조사 결과 응답

자의 절반 정도가 긍정적으로 답변하였으나, 여성의 불만족도가 상대적으로 높게 나타났다.

- (3) 작업면 조도는 대부분 400Lux 이상 확보되었으며, 실내 소음도 역시 50dB(A) 미만으로 나타나 빛 환경, 음 환경 모두 쾌적한 수준으로 조사되었다.

결과를 종합하면, 바닥공조 시스템이 적용된 사무공간의 실내환경성능에 대한 측정 및 설문조사 결과는 대체적으로 일치하였으며, 종합적인 실내환경성능이 우수한 것으로 조사되었다.

차후에는 본 연구결과를 토대로 건물 에너지 상세해석 툴을 이용하여 부하조건에 따른 바닥공조 시스템의 적용 및 에너지절감을 위한 운용상의 최적 제어조건에 대한 후속 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Webster, T. et al., Underfloor air distribution /Thermal stratification performance of UFAD systems, ASHRAE Journal, Vol.44, No.5, 2002.
2. Fred S. Bauman, Underfloor Air Distribution(UFAD) Desing Guide, ASHRAE, 2003
3. 유기형 외, 바닥공조 시스템과 천장공조 시스템의 실내환경 비교 평가, 대한건축학회논문집 계획계 20 권 5호, 2004
4. ISO 7730-2005, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005
5. ANSI/ASHRAE Standard 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 1992