14 설비공학논문집 제 25 권 제 1 호(2013)/pp. 014-019
Korean J. Air-Conditioning and Ref. Eng. 2013. 1.: 25(1)
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2013.25.1.014

실내 부하조건에 따른 바닥공조 시스템의 에너지 성능 평가

윤 성 훈†, 장 향 인*, 김 경 아, 유 기 형, 서 승 직*
한국건설기술연구원 그린빌딩연구실, *인하대학교 건축공학과

An Energy Performance Evaluation of UFAD System under the Various Conditions of Thermal Load

Seong-Hoon Yoon†, Hyang-In Jang*, Kyung-Ah Kim, Ki-Hyung Yu, Seung-Jik Suh*
Green Building Research Division, KICT, Goyang-Si 411-712, Korea
**Dep. of Architectural Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea*

(Received October 15, 2012; revision received December 10, 2012)

ABSTRACT: The present study has been conducted for evaluating and comparing the performance of the underfloor air distribution system(UFAD) and the ceiling based air distribution system(CBAD) under cooling condition. Simulations and experiments were carried out for verifying the model by TRNSYS program about UFAD and CBAD. The results of simulation for various conditions of thermal load are summarized as followings. UFAD had an advantage for making thermal comfort because of lower temperature of the floor surface. Moreover, UFAD showed lower fan power about 30~50% than CBAD under the same conditions of thermal load. The energy saving rates of UFAD were increased to 17.7% in proportion to the thermal load on unoccupied zone(lighting). Ultimately, additional investigations should be done for analyzing optimized operating conditions of UFAD with considering the thermal performance of building envelop and the thermal load.

Key words: UFAD(바닥급기시스템), CBAD(천장급기 시스템), Energy performance evaluation (에너지성능평가)

1. 서 론

기후변화 위기대응을 위하여 제정된 저탄소 녹색성장 기본법에 따라 2020년의 국가온실가스 배출전망치 대비 30%의 감축 목표가 설정되었다. 이를 위해 건물 부문에서도 2025년까지 제로에너지 건물 의무화와 같은 녹색건물 활성화 방안이 제시되는 등, 에너지 효율화를 위한 정부 및 관련 업계의 관심이 어느 때보다 고조되고 있다.

† Corresponding author
Tel.: +82-31-910-0285; fax: +82-31-910-0728
E-mail address: aquila@kict.re.kr

건물의 에너지 효율화 기술 가운데 하나인 바닥공조 시스템은 Task and Ambient 공조방식을 적용함으로써 천장공조 시스템에 비하여 상대적으로 높은 급기 온도 또는 적은 반송 동력으로 냉방운전이 가능하여 에너지 저감에 유리한 것으로 알려져 있다. 또한 층고 감소 및 리모델링시 융통성 제고로 인한 경제성 증대, 급기 디퓨져 배치의 유연성 및 온열 쾌적성 향상 등 다양한 장점을 지니고 있어 1990년대 이후 관련 연구 및 적용 사례가 증가하고 있다.[1-3] ASHRAE에서는 Underfloor Air Distribution Design Guide를 통해 바닥급기 시스템에 대한 설계지침을 제공하였으며,[4] 최근의 해외 연구사례로는 바닥급기 시스템 적용시 층고 및 급기 온도

에 따른 에너지절감 효과에 대한 연구[5] 등이 소개된 바 있다.

국내에서는 주로 실내의 온열 쾌적성과 관련하여 바닥급기 디퓨져의 종류 및 배치, 천장공조 방식과의 비교 등에 대한 연구가 수행되었으며,[6-7] 최근에는 실내 평균복사 온도의 고려 여부에 따른 영향이 소개되었다.[8] 또한 바닥공조 시스템의 에너지절감 효과에 대한 비교와 더불어, 건물의 냉난방 에너지 해석시 바닥공조 방식의 특성을 고려한 부하산정 방법론들에 대한 비교 연구가 수행된 바 있다.[9-11] 그러나 거주역 공조의 설계 및 운용에 있어 건물의 다양한 부하특성을 고려한 구체적인 가이드가 마련되지 않고 있어, 전반공조 시스템과 동일한 장비용량 산정 및 운전 방식을 채택하고 있는 실정이다.

본 연구는 실내 부하조건의 차이에 따른 천장급기 및 바닥급기 방식의 냉방시 에너지성능을 비교분석함으로써, 부하특성을 고려한 에너지절약적 공조 시스템의 선정시 참고할 수 있는 기초 자료를 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 방법

2.1 시뮬레이션 및 실험

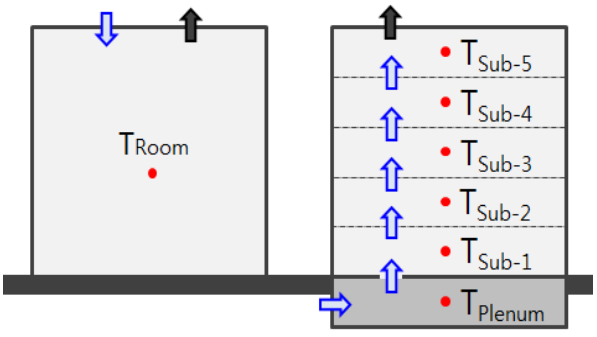
조명, 기기 등 다양한 실내 부하조건에 따른 바닥급기 및 천장급기 시스템의 에너지성능 비교를 위해 TRNSYS를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 항온항습챔버를 대상으로 시뮬레이션 모델에 대한 비교 실험을 선행함으로써 바닥급기 시스템에 대한 모델링 방법론의 타당성을 검토하였다.

2.2 모델링 개요

기상 조건 등 외부의 영향을 최소화한 상태에서 공조방식의 차이에 따른 에너지 소요량에 주안점을 두기 위하여, 동일한 공조 조건의 실들로 둘러싸인 내주부를 해석 대상 존으로 설정하고 단열경계조건을 적용하였다.

Fig. 1은 건물 모델링의 개념을 나타내는 것으로, 천장급기 시스템(이하 CBAD : Ceiling Based Air Distribution)에서는 실내 전체의 온도 및 습도가 동일하다고 가정하고 급기 온습도/풍량을 제어하여 실내온습도 설정 조건(26℃, 50%)을 확보하도록 하였다.

한편 거주역 공조 방식인 바닥급기 시스템(이하



(1) CBAD (2) UFAD

Fig. 1 Building model concept.

UFAD : Under Floor Air Distribution)에 대해서는 해석 대상 존을 일정 높이의 서브존으로 수직 분할하고, 각각의 서브존에 실내 발열부하가 균일하게 분포(조명발열은 실 전체, 기기/인체 발열은 서브존1~3에 분배)한다고 가정하였다. 실내 온습도에 대해서는 바닥면에서 1.5 m 높이 서브존에서 설정조건을 확보하도록 급기 온습도/풍량을 제어하였다. 서브존 간의 경계조건에 대해서는 TRNFLow(다수실 환기해석 프로그램)를 이용하여 열전달 및 공기 유동이 동시에 고려되도록 모델링하였다.

3. 시뮬레이션 모델 검증

3.1 시뮬레이션 및 실험 조건

본격적인 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 소형 항온항습챔버를 대상으로 모델링을 실시하였으며, 또한 이에 대한 검증 실험을 병행하였다.

모델링 및 실험에 사용된 항온항습챔버(Fig. 2)는 3.6 m×3.6 m×2.7 m 규모로, 별도의 냉난방 설비를 갖춘 사무용 공간 내부에 설치되어 있다. Fig. 3, Table 1은 항온항습용 공조시스템의 구성 및 사양을 나타내는 것으로, 급기 덕트에 설치된 전동댐퍼를 개폐함으로써 CBAD 또는 UFAD(챔버 방식) 시스템을 선택적으로 이용하는 것이 가능하다.

Table 2는 실험 조건을 나타내는 것으로, 조명 밀도는 20 W/㎡가 되도록 디밍제어를 실시하였으며, 기기/인체 발열에 대해서는 600 W(100 W 백열전구 6개)로 적용하였다. 공조 방식별로 동일한 급기온도(18℃) 조건에서 실내 온도가 26℃로 유지되도록 풍량을 제어한 상태에서, 실내 수직온도분포, 상대습도, 흑구온도, 기류속도 등 온열환경요소 및 냉방에너지 사용량을 측정하였다.

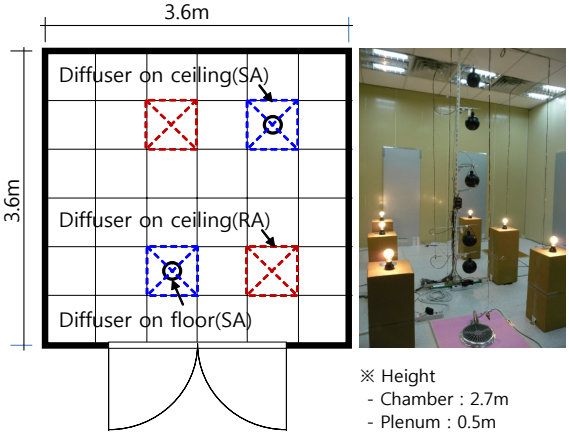


Fig. 2 Floor plan/Photograph of Chamber.

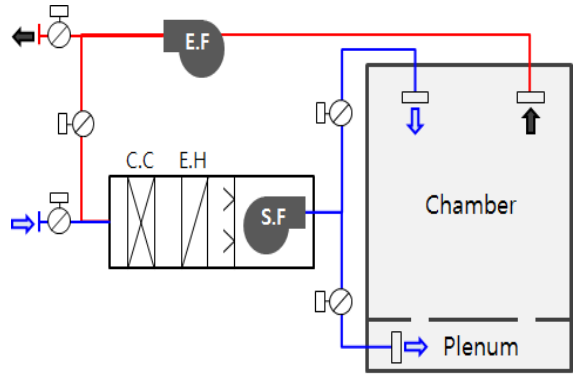


Fig. 3 Diagram of AHU system.

Table 1 Information of AHU

Item	Discription
Cooling system	Air cooled chiller(6.5 kW)
Heating system	Electric heater(2 kW)
Humidifier	Electrode bar type (8 kg/h, 3kW)
Fan and circulation pump	S.F(0.75 kW), E.F(0.4 kW)
	Cooled water pump (0.58 kW)
Air supply system	CBAD/UFAD
Air exhaust system	Ceiling based air exhaust
Diffuser on the floor	Mixed type(200 Φ), 2 EA

Table 2 Conditions of measurement

Item	Discription
Measurement period	2012. 11. 5~11. 6(CBAD) 2012. 11. 6~11. 7(UFAD)
Set temperature	Room center : 26℃, SA : 18℃
Operation time	24 hours
Thermal load	Upper 260 W+Lower 600 W

3.2 실험 및 시뮬레이션 결과

Fig. 4는 급기방식별 평균 실내온도분포에 대해 실험과 계산 결과를 비교한 것으로, UFAD의 경우 바닥 플레넘 및 거주역의 온도는 실험과 비교적 일치하나 비거주역(상부)의 온도는 1℃ 정도 높게 산출되었다. 이는 실험 조건에서는 비거주역의 조명 발열 중 일부가 실내온도에 영향을 미치기 전에 배출되는 부분이 발생하나, 시뮬레이션에서는 전체 발열량이 서브존의 온도에 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

Fig. 5는 급기방식에 따른 1일간의 냉방 에너지를 비교한 것으로, 실험 및 계산에서 UFAD가 CBAD에 비해 각각 20%, 8% 정도 적게 산출되었다.

4. 부하조건에 따른 에너지 성능 평가

4.1 계산 조건

실내 부하조건의 변동에 따른 급기방식별 에너지

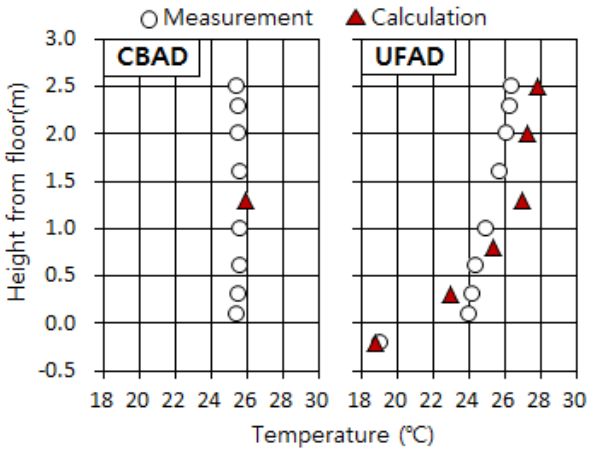


Fig. 4 Vertical temperature distribution.

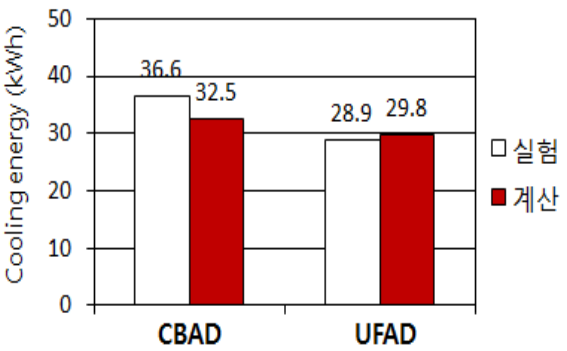


Fig. 5 Comparison of cooling energy.

성능 비교를 위하여 가상의 사무공간을 대상으로 모델링을 실시하였다. Table 3은 모델링 조건을 나타내는 것으로, 열원 및 반송 설비는 최대부하를 고려한 용량으로 동일하게 적용하였으며, 급기온도는 일정하게 유지하고 풍량을 조절하여 실내 설정온도를 확보하도록 모델링하였다. 외기도입량은 급기풍량의 30%로 설정하였으며, 외기온습도는 서울지역 표준년 기상데이터(한국태양에너지학회 제공)를 적용하였다.

Table 3 Information of simulation model

Item	Discription
Room size	10 m×10 m×2.7 m (Plenum height 0.5 m)
Sub zoning(UFAD)	Plenum+5 sub zones
Boundary condition	Adiabatic
Target conditions	26℃, 50%
SA temperature	16℃
Operation time	24 hours
Chiller	3 RT, COP 3.0
Cooled water circulation pump	33 LPM, 0.3 kW
Supply fan	3,000 CMH, 700 Pa, 1.0 kW
Exhaust fan	2,700 CMH, 300 Pa, 0.4 kW
Electric heater	2 kW

Table 4 Simulation cases

Case No.		Upper	Lower	
		Lighting (W/㎡)	Equipment (W/㎡)	Occupant (Person)
A	1	10	20	10
	2	15		
	3	20		
	4	25		
B	1	15	15	5
	2		20	10
	3		25	15
	4		30	20

Note) ※ Total heat gain from a person = 120 W (ISO7730, Seated and Very light writing).
※ Ratio of radiation to convection = 1 : 1 (Heat gain from lighting and equipment).

Table 4는 상부(조명) 및 하부(기기, 인체)의 실내 발열부하에 따른 계산 조건을 나타내는 것으로, CBAD 및 UFAD에 대하여 총 14개 Case에 대한 분석을 실시하였다(B-2는 A-2와 중복됨). 총 시뮬레이션 기간은 6월 1일부터 9월 30일까지이며, 결과 분석에는 6월 16일부터 9월 15일까지 3개월간의 데이터를 사용하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

4.2.1 실내 온열환경

Fig. 6은 UFAD에 대한 Case별 수직온도분포를 나타낸다(CBAD의 실내온도는 모두 26℃로 산출됨). Case A에서는 조명 발열이 증가하거나 바닥면에서의 높이가 올라감에 따라 온도가 상승하여 Case A-4의 상부에서는 28.6℃까지 나타났다. Case B에서는 기기/인체 발열이 증가할수록 상부의 온도가 다소 낮아지는 경향을 나타내는데, 이는 거주역의 온도가 설정조건을 만족하도록 급기 풍량이 증가한 반면 상부의 발열은 동일한 조건으로 적용되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 Case별 MRT 및 바닥 표면온도를 나타낸다. UFAD에서는 바닥면의 표면 온도가 낮게 형성되어 MRT 또한 CBAD에 비해 약 2℃ 정도 낮게

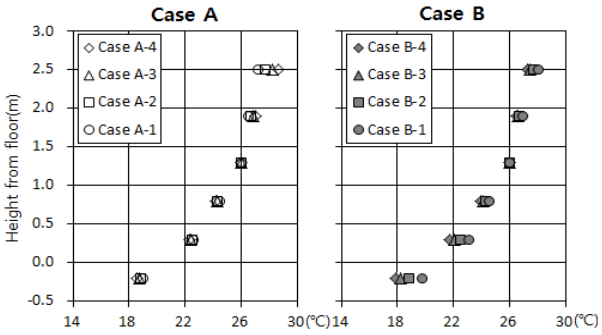


Fig. 6 Vertical temperature distribution.

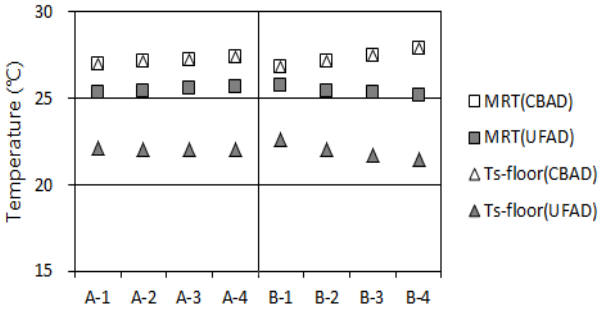


Fig. 7 MRT and surface temperature of floor.

산출되었다.

또한, Case별 PMV를 산출하여 비교한 결과, UFAD에서 바닥면 높이 1.5 m 서브존의 PMV는 0.43~0.45로 CBAD(PMV = 0.55~0.66)에 비해 다소 서늘한 온열감이 확보되었다. PMV 산출시 실내기류 속도는 별도의 실험을 실시하여 측정된 평균값(CBAD : 0.03 m/s, UFAD : 0.08 m/s)을 적용하였으며, MET = 1.2, CLO = 0.5로 설정하였다.

4.2.2 송풍기 에너지

Fig. 8, Fig. 9는 Case별 급기풍량 및 송풍기의 에너지소요량을 나타내는 것으로, UFAD의 경우 CBAD에 비해 약 10~20% 정도 적은 풍량으로 실내온도 설정조건을 만족함을 알 수 있다. 또한, UFAD에서의 송풍기 에너지 소요량은 CBAD에 비해 약 30~50% 정도 적게 나타났다. 즉, 실내부하가 증가할수록 바닥급기 방식이 반송에너지 측면에서 상대적으로 유리함을 알 수 있다.

4.2.3 냉방에너지

Fig. 10, Fig. 11은 Case별 냉방에너지(열원 및 공조)와 CBAD에 대한 UFAD의 에너지절감율을 나타낸다. 부하의 위치(상부/하부) 및 크기에 따른 차이는 있으나, UFAD가 CBAD에 비해 약 10~15% 정도 냉방에너지가 적게 산출되었다. 한편, Case A에서는 상부의 조명 발열량에 비례하여 UFAD의 에너지절감율도 증가하였으나, Case B에서는 부하량 증가와 에너지절감율 사이에 상관관계가 나타나지 않았다. 이는 거주역공조방식의 경우 비거주역(상부)의 발열에 대해서는 혼합손실이 상대적으로 적은 반면, 거주역(하부)에서의 발열에 대해서는 전반공조방식과의 차별성이 상대적으로 줄어들기 때문으로 사료된다.

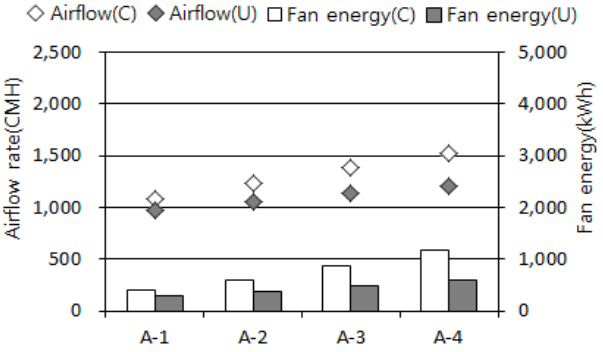


Fig. 8 Airflow rate and fan power(Case A).

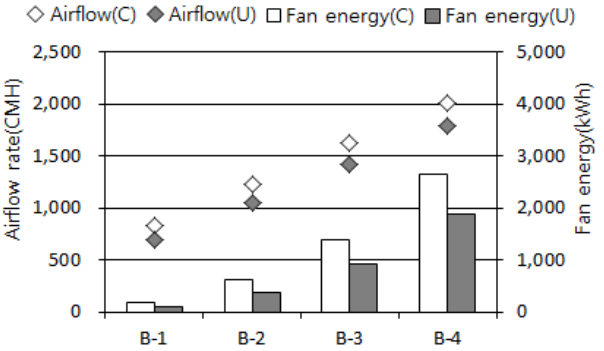


Fig. 9 Airflow rate and fan power(Case B).

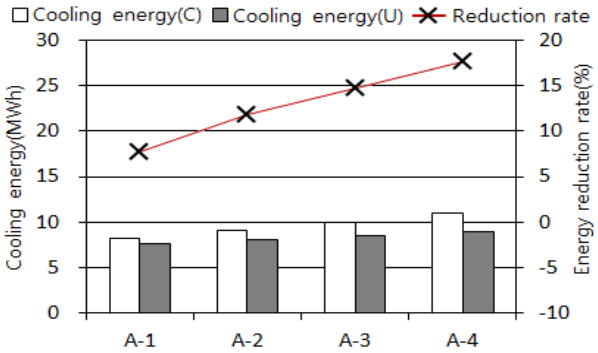


Fig. 10 Cooling energy and energy reduction rate(Case A).

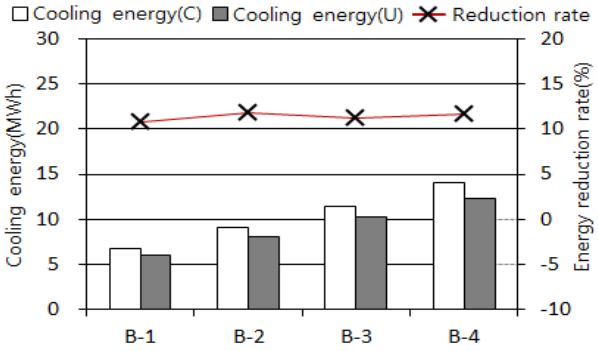


Fig. 11 Cooling energy and energy reduction rate(Case B).

이상의 결과를 종합하면, 실내 부하의 조건에 관계없이 에너지절감 측면에서 바닥급기 방식이 유리하며, 특히 상부 부하(조명 밀도)가 상대적으로 높은 조건 하에서는 바닥급기 방식의 에너지절감 효과가 증대됨을 알 수 있다.

5. 결 론

바닥공조 시스템의 에너지성능을 분석한 결과, 실

내 발열 조건에 따라 에너지절감 효과에 차이가 발생함을 확인하였으며, 이를 아래와 같이 요약하였다.

(1) CBAD, UFAD에 대한 시뮬레이션 결과를 실험과 비교하였으며, 공조방식에 따른 실내온도분포 및 에너지 사용량의 차이를 비교적 유사하게 재현 가능함을 확인하였다.

(2) UFAD의 경우 바닥면의 표면온도가 상대적으로 낮게 형성 가능하여 냉방시 실내 온열환경을 쾌적하게 유지하는데 유리하였다.

(3) 송풍기 에너지와 관련하여, 부하량의 증가에 따라 UFAD의 급기 풍량은 최대 20%, 팬동력은 50%까지 감소하였다.

(4) UFAD에서는 부하 조건에 관계없이 CBAD 대비 평균 12% 정도 냉방에너지가 감소하였다. 특히, 조명 발열에 대해서는 부하가 증가할수록 UFAD의 에너지절감율도 상승하여 최대 17.7%까지 절감되었다.

이상의 연구는 업무용 건물의 내부존을 대상으로 냉방부하에 따른 바닥급기 시스템의 에너지 소요량의 특성을 검토한 것으로, 후속 연구에서는 건물외피의 열성능, 실내발열 및 공조운전 스케쥴을 고려한 연간 에너지성능 분석을 통하여 바닥급기 시스템의 최적 운용 조건에 대해 제시하고자 한다.

후 기

이 논문은 한국에너지기술평가원의 'MPC-BEMS 기반 스마트빌딩 건물에너지 최적 운영 시스템(2011T100100511)'에 의해 수행된 연구의 일부분임.

참고문헌

1. Bauman, F. and Webster, T., 2001, Outlook for underfloor air distribution, ASHRAE Journal, Vol. 43, pp. 18-25.
2. Webster, T., Bauman, F., and Reese, J., 2002, Underfloor air distribution : Thermal stratification, ASHRAE Journal, Vol. 44, pp. 28-36.
3. Research group of underfloor HVAC system, 1993, Design and practice of underfloor HVAC system, Gizutsushoin Inc., Tokyo.
4. Bauman, F., 2003, Underfloor Air Distribution (UFAD) Desing Guide, ASHRAE Inc.
5. Ali Alajmi and Wid El-Amer, 2010, Saving energy by using underfloor-air-distribution (UFAD) system in commercial buildings, Energy conversion and management, pp. 1637-1642.
6. Yu, K. H., Cho, D. W., Yu, J. Y., Lee, J. Y., and Lee, S. Y., 2004, Comparative evaluation of indoor environment of office buildings with an underfloor air distribution system and a ceiling based air conditioning system, Journal of AIK, pp. 185-192.
7. Cho, Y., Kwon, H. S., Kim, S. H., and Kim, Y. I., 2000, Experimental analysis of thermal comfort of an office space for ceiling and floor supply air conditioning systems, Journal of SAREK, pp. 810-816.
8. Chung, J. D., Hong, H. K., and Yoo, H. S., 2010, Analysis on the impact of MRT for the thermal comfort of UFAD, Energy and Buildings, pp. 2353-2359.
9. Chae, Y. T., Moon, H. J., Sohn, J. Y., Ahn, B. W., and Park, B. Y., 2000, Comparative Evaluation of Indoor Thermal Environment and Energy Consumption between Ceiling-Based System and Floor-Based System in Cooling Period, Journal of AIK, pp. 101-108.
10. Yu, K. H. and Song, K. D., 2007, A Study on Design Techniques and Effectiveness in Energy Saving of Occupied Zone in UFAD System, Journal of the Korean Solar Energy Society, pp. 127-133.
11. Kim, J. H., Kim, D. E., Aum, T. Y., and Hong, M. H., 2011, Load Estimation and Energy Saving Potential in Underfloor Air Distribution(UFAD), Proceeding of SAREK Summer Annual Conference, pp. 198-201.
12. 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.