

외기 도입에 따른 바닥급기 시스템의 에너지 사용량 분석

김 동 희[†], 허 정 호, 조 동 우*, 유 기 형, 유 지 용**

서울시립대학교 건축학부, *한국건설기술연구원 건축·도시연구부, **(주)한일엠이씨 부설연구소

Analysis of the Energy Consumption in Underfloor Air Distribution System depending on Outdoor Air Intake Rates

Dong-Hee Kim[†], Jung-Ho Huh, Dong-Woo Cho*, Ki-Hyung Yu, Ji-Yong Yu**

ABSTRACT: In this paper, we discussed the energy performance of underfloor air distribution(UFAD) and overhead air distribution system according to outdoor air intake rates in a office building. For this, the laboratory(S lab.) is selected for measuring the thermal environments of UFAD system and overhead system. Based on the measured data, the TRNSYS simulation is used to evaluate the energy performance of UFAD system and the overhead system according to outdoor air intake rates. By increasing outdoor air intake rates from required outdoor air intake rates(100CMH) to maximum air intake rates, the energy savings of UFAD system comparing with overhead system are varied 15%~25.6% in summer, 12.8%~19% in fall/spring and not varied in winter(8%). As results of simulations on stratification height and cooling set temperature, the lower the stratification height and the higher cooling set temperature, the larger cooling energy savings of UFAD comparing with overhead system according to outdoor air intake rates.

Key words: UFAD(바닥급기 시스템), Outdoor air intake rates(외기 도입량), Energy Consumption(에너지 사용량), Energy Simulation(에너지 시뮬레이션)

1. 서 론

오피스 건물은 1970년대 석유 파동이 이후 에너지 절약을 위해 밀폐화, 무창화 되어가고 있으며, 이는 실내 공기질 측면에서 공조시스템에 의존도를 높이고 있다. 하지만 공조 시스템은 에너지 절약을 이유로 최소 외기량만을 실내로 공급하며, 실내 공기질 악화 문제를 대두시키고 있다. 이러한 최근의 상황에서 건물의 쾌적성, 융통성, 효율성 측면에서 바닥급기 시스템은 최근 사용이

늘고 있으며, 미국, 일본을 중심으로 바닥급기 시스템의 실내 환경 및 설계 인자 평가 등의 연구가 진행 중이다. 연구의 결과는 바닥급기 시스템이 온도 성층화에 의한 공조 구역의 감소와 외기 도입 가능성 증대로 인해 높은 에너지 절감 가능성 및 개선된 실내 공기환경을 제공한다는 것을 보여준다. 하지만 바닥급기 시스템의 외기 도입에 따른 에너지 절감가능성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 서울에 소재한 S대학 실험 공간의 하계 실내환경을 측정·분석하고, 이를 바탕으로 에너지 시뮬레이션을 수행하여, 외기 도입에 따른 바닥급기 시스템의 에너지 소비량을 천장급기 시스템과 비교하였다. 또한 외기 도입량에 따른 에너지 소비량에 영향을 주는 변수로서, 성

[†]Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0285; fax: +82-31-910-0361

E-mail address: mugadang@hotmail.com

층화 높이와 실내 냉방 설정온도를 선정하여 이를 비교·분석하였다.

2. 실험

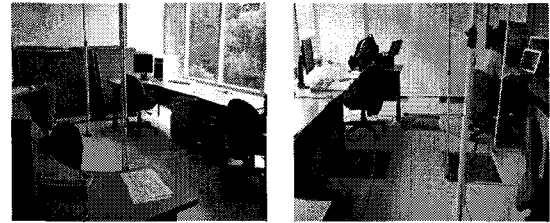
2.1 실험 개요

완전혼합을 가정하여 실 전체를 공조하는 천장급기 방식과 달리, 바닥급기 시스템은 온도 성층화를 이용해 거주역만을 공조하는 방식이다. 따라서 온도 성층화 높이에 따라 바닥급기 시스템의 냉난방 부하가 결정되며, 이는 재순환 공기온도에 영향을 주어 외기 도입에 따른 바닥급기 시스템의 에너지 절감 가능성을 변화시킨다. 이에 본 실험에서는 바닥급기 시스템의 온도 성층화 구역을 결정하기 위해, S대학에 구축한 실험 공간을 대상으로 2005년 8월 24일~9월 5일 동안 하계 실험을 수행하였다. 실험 공간은 4.8m×5.8m의 2개의 실로 구성되어 있으며, 각각 천장급기/천장환기, 바닥급기/천장환기 시스템이 설치되어 있다. 실험실 개요는 Table 1과 같다. 천장급기 실험실은 VAV+FPU 방식이며, 바닥급기 실험실은 가압식+등압식(FTU)방식으로 구성되어 있다. 이때 바닥급기 실험실의 바닥 디퓨저는 선화(Swirl)형 급기구가 아닌 비선화형 급기구로 취출 공기가 수직으로 도달하는 타입이다. 각 실험실의 전경은 Fig. 1과 같으며, 바닥급기 실험실의 바닥 디퓨저와 FTU 외형은 Fig. 2와 같다.

주요 실험 항목은 공조시스템별 실내 수직온도 분포(0.1, 0.7, 1.3, 1.9, 2.5, 2.7m)이며, 12:00~14:00의 피크 시간대 수직온도 분포를 분석하였다. 측정 위치는 Fig. 3과 같으며, 이때 실내 설정온도는 24℃이며, 실내 발열체로는 각 실마다 컴퓨터 4대를 설치되었다.

Table 1 Conditions of the test bed

Class	Description
Location	Seoul
Area	Each 69.12m ²
Direction	South
Ceiling height	2.7m (Plenum:0.3m)
AC system	Overhead/UFAD system



(a) Overhead system (b) UFAD system
Fig. 1 Test bed view

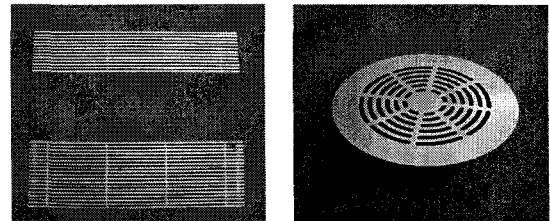


Fig. 2 Fan terminal unit & underfloor air diffuser

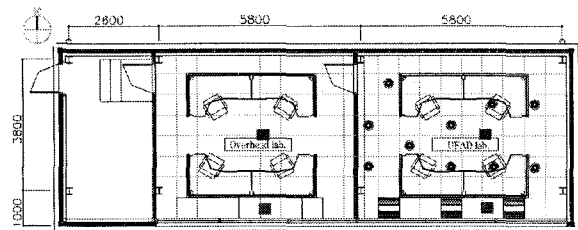


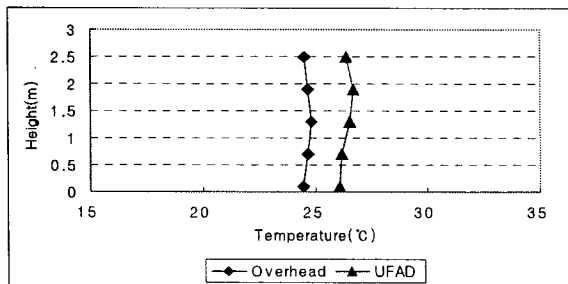
Fig. 3 Measurement points

2.2 실험 결과 및 분석

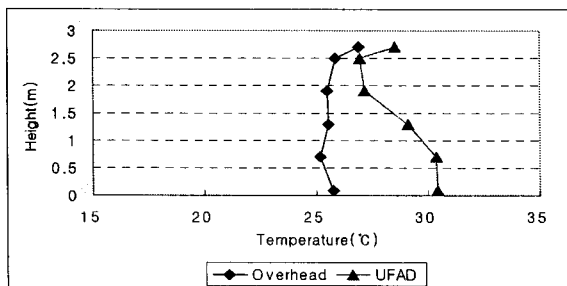
Fig. 4의 (a)는 최대 풍량 조건(바닥급기 실험실 풍량 : 920CMH)에서 각 실험실의 내부 수직온도 분포이다. 천장급기 실험실은 일정한 수직온도 분포를 보였으며, 바닥급기 실험실은 190cm를 기준으로 약간의 성층화 경향을 나타냈다. Fig. 4의 (b)는 동일 조건에서 각 실험실의 창가측 수직온도 분포이다. 천장에서 들어오는 일사에 의해 실내부 보다 큰 온도 구배를 보였으며, 역시 190cm를 기준으로 온도 성층화를 나타냈다. 이때, 내부와 창가측의 부하 차이에도 불구하고 동일한 성층화 높이가 나타난 것은 본 실험에 사용된 급기구가 최대 풍량 조건에서 비선화형 기류로 토출되어 빠른 속도로 수직으로 이동하여 부하의 영향을 거의 받지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 바닥급기 실험실의 급기 온도는 22.95℃이며, 천장급기 실험실은 20.28℃로 측정되었다. 이를 통해 바닥급기 시스템이 높은 급기 온도에 의한 에너지 절약가능성을 가지는

것을 파악할 수 있었다. 또한 바닥급기 실험실의 재순환 공기 온도는 26.2℃, 천장급기 실험실은 24.09℃로 나타나, 바닥급기 시스템의 높은 재순환 공기 온도에 의해서 외기 도입시 에너지 절감 가능성이 천장급기 시스템에 비해 클 것이라는 것을 예측할 수 있었다.

Fig. 5는 (a)와 (b)는 풍량을 750CMH로 감소시킨 경우, 각 실험실의 내부-창가측 수직온도 분포이다. 일반적으로 풍량을 감소시킴에 따라 성층화 높이도 감소해야 하나, 실내 발열체 부족과 수직으로 토출되는 바닥급기구 외형으로 인해 풍량변화에 따른 성층화 높이 변화는 파악할 수 없었다. 하지만, 풍량을 감소시킴에 따라 부하가 큰 창가측에 경우 성층화 높이인 190cm를 근거로 상하 온도차가 약 0.5℃증가한 것으로 나타나 성층화 경향이 보다 뚜렷해 진 것을 파악할 수 있었다. 또한 동일 조건에서 바닥급기 실험실의 재순환 공기 온도는 26.9℃, 천장급기 실험실의 재순환 공기 온도는 25.2℃로 나타나 풍량을 감소시킴에 따라 재순환 공기 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

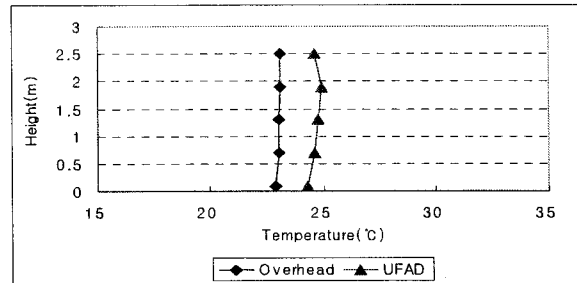


(a) Vertical temperature in the inside location

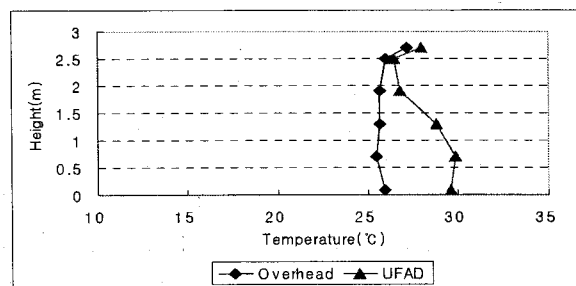


(b) Vertical temperature in the window side location

Fig. 4 Temperature profile under the maximum supply air volume(920CMH)



(a) Vertical temperature in the inside location



(b) Vertical temperature in the window side location

Fig. 5 Temperature profile under the middle supply air volume(750CMH)

3. 에너지 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 개요

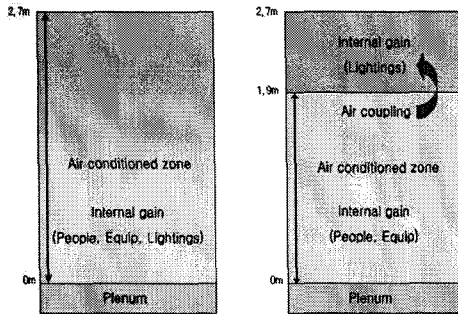
3.1.1 대상공간 모델링

실험결과를 바탕으로 천장급기 시스템은 Fig. 6의 (a)와 같이 완전 혼합을 가정하여 1개의 존으로 구성하였다. 바닥급기 시스템에 경우 부하에 상관없이 0cm~190cm 사이에서 온도 성층화를 나타냈으며, 이를 근거로 Fig. 6의 (b)와 같이 성층화가 일어나는 거주역(공조존)과 비거주역(비공조존)으로 구분하여 2개의 수직존으로 구성하였다. 이때 하부의 거주역 존은 상부의 비 거주역 존으로 커플링되며, 수직존을 통한 대류이동이 가능하도록 하였다. 시뮬레이션 경계조건으로는 사람이 재실한 경우를 가정하여 재실시간 8:00~18:00을 기준으로 하였으며, 재실인원 4인(필요의 기량:25CMH×4인), 컴퓨터 80W 4대, 조명 부하 25W/m²를 입력하였다.

3.1.2 시뮬레이션 시스템 모델링

외기 도입에 따른 바닥급기 시스템의 에너지 소

비량을 분석하기 위해, 여름철은 20℃, 겨울철은 25℃를 기점으로 최대 냉난방 부하를 TRNSYS 프로그램을 이용하여 분석하였다. 이때, 바닥급기 시스템은 190cm를 기준으로 거주역 부분까지의 부하를 산정하고, 천장급기 시스템은 전체 공간을 대상으로 부하를 산정하였다. 이를 기초로 산정된 바닥급기 시스템의 급기 풍량은 1120CMH, 천장급기 시스템은 1500CMH이며, 급기 방식별 세부적인 시스템 용량은 Table 2와 같다.



(a) Overhead system (b) UFAD system
Fig. 6 System zoning

Table 2 System set-up

Class		EA	Capacity/Comment
AHU	Cooling	2	5usRT(DX Coil)
	Heating		12kW(Elec. Coil)
VAV(Overhead)		1	Interior
FPU(Overhead)		1	Perimeter
FTU(UFAD)		2	Perimeter

3.1.3 시뮬레이션 변수

외기 도입량에 따른 바닥급기 시스템과 천장급기 시스템의 에너지 소비량을 비교하기 위해 필요 외기량 권고치인 100CMH를 기준으로 100CMH 씩 외기 도입량을 증가시켰다. 또한 외기 도입량 변화에 따른 바닥급기 시스템의 에너지 절감가능성에 영향을 주는 변수로서 성층화 높이와 냉방 설정온도를 선정하였다. 성층화 높이에 경우 성층화 높이를 변수로 거주역 공조(성층화 구역)에 필요한 풍량을 산정하는 경우, 앞서 실험결과와 같이 풍량이 재순환 공기 온도에 영향을 주어 외기 도입에 따른 바닥급기 시스템의 에너지 소비량의 변수로 작용한다. 이에 1.9m를 기점으로, 1.6m, 1.75m, 2.05m, 2.2m로 성층화 높이를 변화시켰으며, 각 성층화 높이별 풍량 및

설비 용량을 재산정하여 시뮬레이션 입력값으로 사용하였다. 또한 설정온도에 경우 동일한 성층화 높이(1.9m)에서 설정온도를 달리해 부하를 산정하는 경우, 풍량 및 급기 온도변화에 의해 재순환 공기 온도에 영향을 주게 된다. 이에 특히 바닥급기 시스템의 에너지 소비량에 영향을 주는 냉방 설정온도를 24℃, 25℃, 26℃로 변화시켰으며, 설정온도별로 풍량 및 설비 용량을 재산정하여 시뮬레이션 수행하였다.

3.2 시뮬레이션 결과값

3.2.1 외기도입량 변화에 따른 에너지 비교

Fig. 7은 필요환기량 기준인 100CMH(25CMH/인×4)에서 외기도입량을 100CMH 씩 변화시켰을 때의 계절별 에너지 소비량 및 바닥급기 시스템의 절감율을 나타낸다.

Fig. 7의 (a)는 외기량 변화에 따른 여름철 시스템별 에너지 소비량을 나타내며, 필요 환기량(100CMH) 도입시 바닥급기 시스템은 천장급기 시스템에 비해 총 15%의 에너지를 절감하는 것으로 나타났다. 이때, 바닥급기 시스템은 천장급기 시스템에 비해 냉방에너지는 8.4%, 펌프 동력은 18.8%, 공조기 팬에 경우 12.3%를 절감하여, 냉동기 및 반송동력의 에너지 절감율이 큰 것을 파악할 수 있었다. 또한 100CMH 씩 외기 도입량을 증가시킴에 따라 약 1.1배씩 에너지 소비량이 증가했으며, 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 절감율은 15%~25.6%으로 변화한 것으로 나타났다. 이는 바닥급기 시스템이 천장급기 시스템에 비해 외기도입량을 증가시킬수록 더 높은 에너지 절감율을 가진다는 것을 보여준다.

Fig. 7의 (b)는 외기량 변화에 따른 겨울철의 시스템별 에너지 소비량을 나타낸다. 필요환기량(100CMH) 도입시 바닥급기 시스템은 천장급기 시스템에 비해 총 8%의 에너지를 절감하는 것으로 나타났다. 이때, 난방에너지는 7%, 펌프와 팬 에너지는 각각 12.5%와 25%를 절감하는 것으로 나타났다. 또한 외기량을 증가시킴에 따라 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 에너지 절감율은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 부력 효과에 의해 상승한 공기가 겨울철 차가운 구조체를 만나면서 거주역 온도와 비슷하거나 낮은 재순환 공기 온도를 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

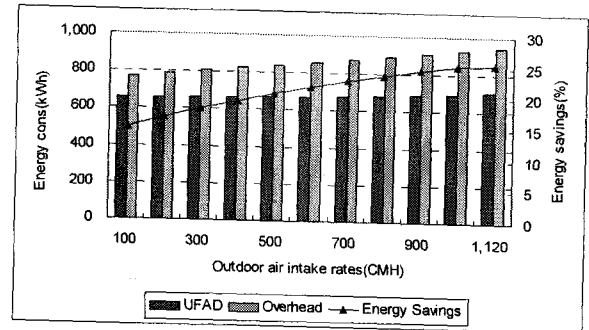
Fig. 7의 (c)는 중간기의 시스템별 에너지 소비량을 나타내며, 필요 환기량 도입시 바닥급기 시스템은 천장급기 시스템에 비해 총 12.8%의 에너지를 절감하는 것으로 나타났다. 외기량을 변화시킴에 따라 총 에너지 절감율은 12.8%~19%로 변화한 것으로 나타났으며, 이때 중간기 냉방에너지에 의한 절감율은 약 6%~30%로 나타나, 중간기에 경우 외기 도입에 따른 냉방에너지 절감 가능성이 큰 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 성층화 높이에 따른 에너지 비교

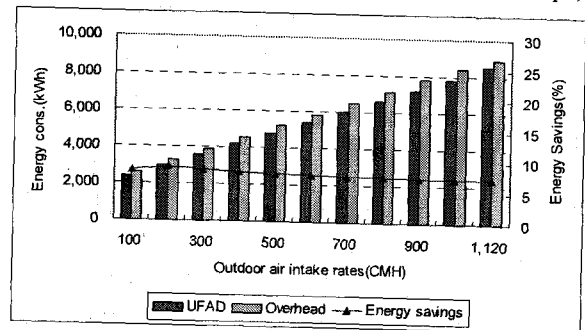
Fig. 8은 성층화 높이별 외기 도입량 변화에 따른 여름철 에너지 소비량을 나타낸다. 동일한 외기량에서 성층화 높이를 15cm씩 증가시킴에 따라 에너지 소비량은 1.1배씩 증가하였다. 이는 성층화 높이를 증가시킴에 따라 공조해야 하는 거주역의 체적이 증가했기 때문이다. 또한 1.6m의 성층화 높이에서 외기 도입량을 100CMH씩 증가시킨 경우 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 절감율은 16.8%~28.3%로 변화하였으며, 15cm씩 성층화 높이를 증가시킴에 따라 절감율은 약 0.7%~1.2%씩 감소하는 것으로 나타났다. 이는 성층화 높이를 증가시킴에 따라, 거주역에 비해 높은 온도를 갖는 비거주역의 체적이 감소하게 되어 점차 낮은 재순환 공기 온도를 형성했기 때문인 것으로 판단된다.

겨울철에 경우, 외기 도입량과 상관없이 성층화 높이별 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 에너지 절감율은 약 10%(1.6m), 9%(1.75m), 8%(1.9m), 6%(2.05m), 5%(2.2m)로 나타났다.

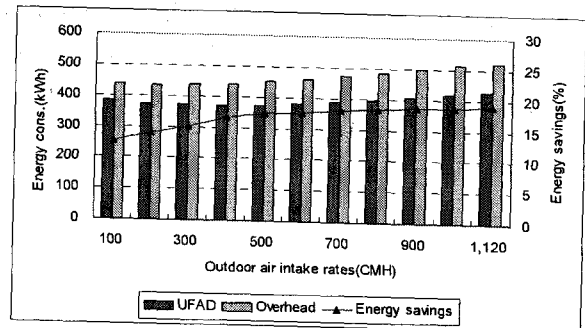
Fig. 9는 성층화 높이별 외기 도입량 변화에 따른 중간기 에너지 소비량을 나타낸다. 성층화 높이별로 외기 도입량을 증가시킴에 따라 오히려 에너지 소비량이 감소하는 변곡점이 나타났다. 이는 우리나라 중간기 외기온이 여름철에 비해 외기 도입에 보다 유리하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 1.6m의 성층화 높이에서 외기 도입량을 100CMH씩 증가시킨 경우 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 절감율은 28.2%~33.9%로 나타나, 여름철 보다 5.6%~11.4%정도 에너지 절감 가능성이 큰 것을 파악할 수 있었다. 또한 성층화 높이를 1.6m에서 15cm씩 증가시킴에 따라 절감율은 약 10%, 7%, 4%, 2%씩 감소하는 것으로 나타났다.



(a) Summer energy consumption (June ~ Sept)



(b) Winter energy consumption (Nov ~ March)



(c) Fall, spring energy consumption (April, May, Oct)

Fig. 7 Energy consumption according to outdoor air intake rates

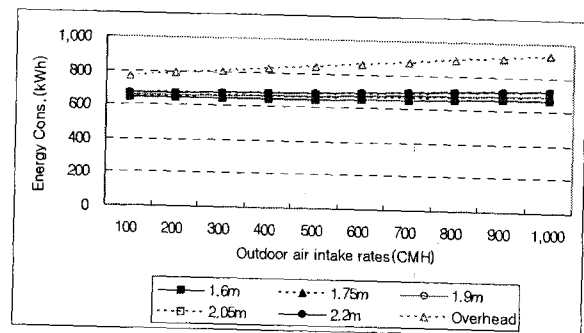


Fig. 8 Energy consumption according to stratification height in summer (June ~ Sept)

3.2.3 냉방 설정온도에 따른 에너지 비교

Fig. 10은 냉방 설정온도별 외기 도입량을 변화에 따른 여름철 에너지 소비량을 나타낸다. 동일한 외기량에서 냉방 설정온도를 1℃ 낮춤에 따라 두 시스템 모두 에너지 소비량은 약 1.1배씩 증가하는 것으로 나타났다. 설정온도 24℃에서 외기 도입량을 100CMH씩 증가시킴에 따라 동일조건인 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 절감율은 14.1%~22.7%로 변화하였으며, 설정온도를 1℃씩 증가시킴에 따라 절감율은 15%~25.6%(25℃)와 15.6%~25.87%(26℃)로 변화하였다. 이는 설정온도가 높을수록 보다 높은 계순환 공기 온도를 형성하여 외기 도입에 유리해졌기 때문인 것으로 판단된다.

겨울철에 경우, 냉방설정온도와 상관없이 동일한 에너지 절감 가능성(8%)을 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 냉방 설정온도별 외기 도입량을 변화에 따른 중간기 에너지 소비량을 나타낸다. 설정온도 24℃에서 외기 도입량을 100CMH씩 증가시킴에 따라 동일조건인 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 절감율은 13.1%~16.7%로 변화하였으며, 설정온도를 1℃씩 증가시킴에 따라 절감율은 외기도입량을 12.8%~19%(25℃), 13.8%~20.3%(26℃)로 변화하였다.

5. 결론

(1) 최대 풍량 조건에서 S실험실의 천장급기 실험실은 완전 혼합에 가까운 실내 온도 분포를 보이며, 바닥급기 실험실은 부하에 상관없이 약 0cm~190cm에서 온도성층화를 나타냈다.

(2) TRNSYS 프로그램을 통해서, 필요 외기량을 최대 설계풍량까지 증가시킴에 따라 천장급기 시스템과 비교한 바닥급기 시스템의 여름철 에너지 절감율은 15%~25.6%, 중간기는 12.8%~19%로 변화하였으며 겨울철은 약 8%로 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

(3) 바닥급기 시스템의 성층화 높이 및 냉방 설정온도를 변수로 외기 도입량을 변화시켜 시뮬레이션을 수행한 결과, 성층화 높이가 낮을수록, 냉방 설정온도가 높을수록, 바닥급기 시스템의 외기도입량 변화에 따른 에너지 절감가능성이 큰 것으로 나타났다.

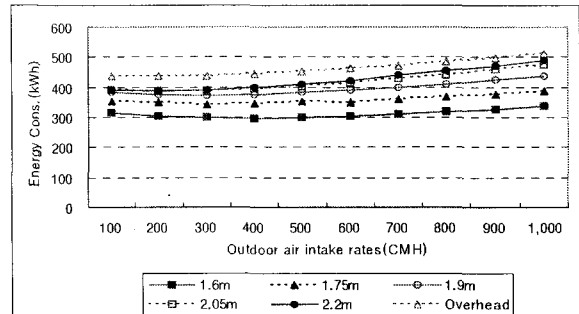


Fig. 9 Energy consumption according to stratification height in fall, spring (April, May, Oct)

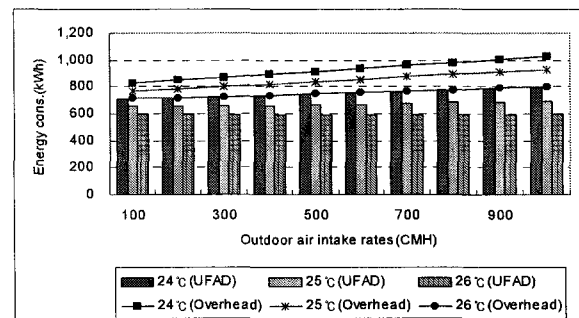


Fig. 10 Energy consumption according to cooling setting temperature in summer (June ~ Sept)

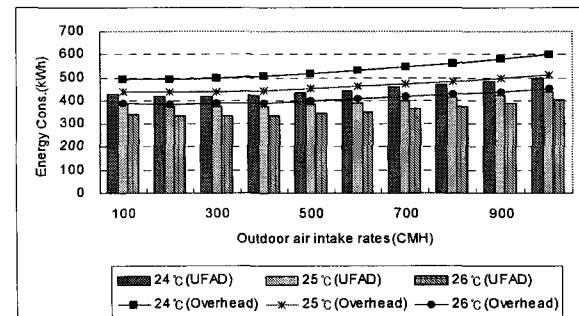


Fig. 11 Energy consumption according to cooling setting temperature in fall, spring (April, May, Oct)

참고문헌

1. McCarry, B. T., 1995, "Underfloor air distribution system ; benefits and when to use the system in building design", ASHRAE Transaction, vol. 101(2), pp. 902-911.
2. Tom Webster, 2002, "Thermal stratification performance of underfloor air distribution systems", Center for the building environment, University of california, Berkeley, CA.