

시뮬레이터를 이용한 바닥급기시스템의 성능에 관한 연구

서 정 석[†], 유 지 용, 정 차 수, 조 동 우, 유 기 형, 김 동 희

(주)한일엠이씨, 한국건설기술연구원 건축연구부 [†]서울시립대학교 건축학부 대학원 석사과정

The Study on Performance in Underfloor Air Distribution(UFAD) Systems using Simulator.

Jung-Seok Seo[†], Ji-Yong Yu, Cha-su Jeong, Dong-Woo Cho, Ki-Hyung Yu,
Dong-Hee Kim

ABSTRACT: The authors carried out experiment, Computer Fluid Dynamics(CFD) and energy simulation of simulator. As a results of experiment and CFD, diffuser velocity is very important design factor for occupied zone air conditioning in Under Floor Air Distribution(UFAD) system. Then, in contrast to energy consumption of the Overhead system, the UFAD system could reduce 6.4% of the total energy because of occupied zone air conditioning. It concluded that the UFAD system is more effective in energy performance than the Overhead system.

Key words: UFAD system(바닥급기 시스템), Energy performance(에너지 성능), CFD(전산유체역학), Energy Simulation(에너지 시뮬레이션), Occupied Zone(거주역)

기 호 설 명

u_i : 속도텐서(Velocity tensor) [m/s]

x_i : 방향텐서(Direction tensor) [m]

P : 압력 [Pa]

T : 온도 [°C]

그리스 문자

α : 열확산계수 [$\frac{k}{\rho c_v}$]

ϵ : 난류 소산율 [m^2/s^3]

k : 난류 운동량 에너지 [m^2/s^2]

μ : 점성계수 [$kg/m \cdot s$]

μ_t : 난류점성계수 [$kg/m \cdot s$]

ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

21세기에 들어서서 오피스 빌딩의 개념이 생산성의 향상, 효율화를 지향한 OA화가 진행되며 건물의 쾌적성, 융통성, 경제성 등이 강조되고 있다. 위와 같은 배경을 근거로 집무 환경, 실의 용도변경 및 부분공조와 집중발열 처리를 통한 쾌적 공간의 형성과 에너지소비 절감을 가능하게 하는 바닥급기시스템에 대한 우리나라 여건에 맞는 기술 개발 필요성이 대두되고 있다.

특히, 바닥급기시스템이 에너지절약적으로 운영되기 위해서는 거주역 공조가 이루어져야 하며 이를 위하여 바닥급기시스템 설계시 적절한 설계기준 등을 적용해야한다. 그러나 아직 우리나라는 물론 바닥급기시스템이 많이 보편화 된 유럽, 일본, 미국 등에도 이에 대한 정확한 설계기준이 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 S-대 옥상에 설치된 시뮬레이터를 토대로 실측값과 전산유체시뮬레이션을 이용해 거주역 공조를 위한 설계기준 등에 대해 알아보고 에너지 시뮬레이션을 통해 천장급기

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-709-4817; Fax. +82-2-709-4813

E-mail address: jungseok.seo@himec.co.kr

시스템과 바닥급기시스템의 에너지 사용량 분석을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 실험실 측정 개요

본 연구는 천장급기시스템과 바닥급기시스템의 실내공조환경 특성을 파악하기 위하여 S대학교 옥상에 설치된 시뮬레이터를 대상으로 하계실험을 수행하였다.

대상건물은 4.8m×5.8m 모듈의 두개 실험실로 구성되어 바닥급기시스템(실험실A)과 천장급기시스템(실험실B)이 설치되었다. 천장급기시스템은 VAV+FPU 방식이며 바닥급기시스템은 가압식 + 등압식(FTU)으로 구성되어 있다.

주요 실험 항목은 공조시스템별 실내 수직온도분포(0.1m, 0.7m, 1.3m, 1.9m, 2.5m)이며 이를 토대로 바닥급기시스템의 거주역 형성을 위한 방안에 대해 기류해석 시뮬레이션과 연동하여 연구하였다.

Table 1 Outline of the simulator

Simulator	
Direction	South
Height	2.7m(Plenum : 0.3m)
Air Conditioning System	A : Overhead System B : UFAD System



(a) Interior of the simulator



(b) Under floor diffuser & fan terminal unit
Fig. 1 Test room view and diffuser type

Table 1은 시뮬레이터의 개요를 나타내며, Fig.

1의 (a)와 (b)는 각각 시뮬레이터 내부와 바닥 디퓨저 및 FTU의 외형을 보여준다.

대상건물의 실험은 2005년 8월 24일부터 9월 5일까지 13일간 연속적으로 수행되었으며 실험실A와 실험실B의 수직온도를 측정하여 피크부하 시간대인 12:00~14:00의 온도값을 분석하였다.

다음 Fig. 2는 측정위치를 나타낸다.

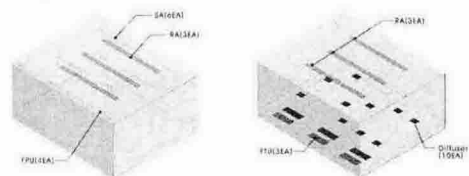


Fig. 2 The measurement point

2.2 전산유체 시뮬레이션 개요

2.2.1 계산형상과 격자계

본 연구에서 사용된 시뮬레이터의 형상은 Fig. 3과 같다. 격자계는 해석영역의 형상을 정확하게 묘사하며, 해석 영역내의 열 및 유체 유동의 물리적인 현상이 고려된 격자계가 구성되었다. 해석 결과의 정확성을 높이기 위해서 총 170,000여개의 정렬 격자계가 사용되어 실험실의 물리적 형상 및 공조 시스템이 모델링 되었다. 구성된 격자계는 Fig. 4와 같다.



(a) Test room A (b) Test room B

Fig. 3 Geometry for CFD analysis.

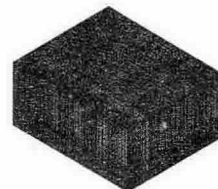


Fig. 4 Grid for CFD analysis.

2.2.2 지배방정식

계산영역 내의 정상상태 유동현상을 지배하는 연속방정식(식(1))과, 운동량방정식(식(2))이 사용되었으며, 난류 거동의 해석을 위하여 표준 k-ε 난류 모델(식(3),(4))이 사용되었다. 열전달 현상을 지배하는 에너지방정식(5)이 사용되었다. 또한, 자연대류 현상의 모사를 위하여 운동량방정식 부력항의 밀도만이 온도에 따라 변화된다고 가정하는 boussinesq의 근사가 사용되었다.

● Continuity equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

● Momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\text{Where } \tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

● Standard k-ε turbulence model

turbulent kinetic energy, k

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

turbulent dissipation rate, ϵ

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

where

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{1\mu} = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

● Energy equation

$$\alpha \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (5)$$

2.2.3 경계조건

본 연구에서는 실내 공조조건이 최대 냉방부하일 때를 경계조건으로 사용되었다. 각각의 경계조건(유동, 열)이 Table 2에 제시되었다. 경계조건은 부하계산서와 T.A.B 측정결과를 기초로 하여 결정되었다.

Table 2 Boundary conditions

		Flow	Thermal
Inlet	A	velocity inlet	3.85 m/s
	B	velocity inlet	3.85 m/s
Outlet		velocity inlet	-3.85 m/s
Wall	Ceiling ^{*)}	no-slip	5.84 W/m ²
	Desk ^{**)}		55.56 W/m ²
	Chair ^{***)}		631.58 W/m ²
	Window		214.02 W/m ²
	Wall EAST		2.03 W/m ²
	Wall NORTH		1.46 W/m ²
	Partition	8.61 W/m ²	

^{*)}Heat gain from light and roof

^{**)}Heat gain from equipment

^{***)}Heat gain from human

2.2.4 해석 방법

계산영역내의 속도장 및 온도장 해석을 위하여 전산유체역학 상용프로그램인 STAR-CD 3.150A가 사용되었다. 이 프로그램은 완전암시기법을 사용된 유한체적법(finite volume method) 코드다. 수렴의 안정성과 해의 정확성을 기하기 위해 운동량, k-ε 난류 방정식은 상류차분 도식(upwind differencing scheme)이, 에너지 방정식은 MARS 도식(monotone advection and reconstruction scheme)이 사용되었다. 또한 압력보정을 위해서 PISO(pressure implicit with splitting of operators) 알고리즘이 사용되었다. 수렴 판정조건은 각각 방정식 유수의 합이 1×10^{-3} 이하 일 때로 정하였다.

팬 터미널 유닛은 해당 셀(cell)의 운동량 source term 형태로 장치의 실제거동과 유사하게 모델링 되었다.

시뮬레이션은 아래와 같은 조건에 대해 수행하였다.

- 실측값 : 실험실에서 측정된 값(인체부하없음)
- 예측값 : 실험실조건과 동일한 경계조건으로 전산유체해석된 결과값(인체부하없음)
- 설계값 : 설계시 적용된 부하조건을 경계조건으로 전산유체해석된 결과값
- 조정값 : 설계값에서 디퓨저 풍량을 30% 줄인

상태에서 전산유체해석된 결과값

2.3 에너지 시뮬레이션

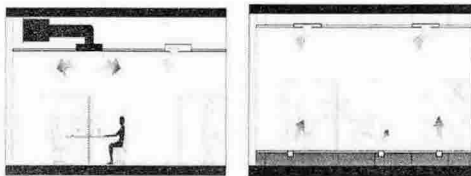
2.3.1 예비적 고찰

일반적인 천장급기 시스템은 Fig. 5, Fig.6 (a)와 같이 상부에서 토출되어 실내 공기를 완전 혼합하여 실내 전 공간에 대해 공조하는 방식이고 바닥급기 시스템은 Fig. 5, Fig. 6 (b)와 같이 바닥 하부 플레넘을 이용해 토출한 후 온도 성층화를 이용해 거주역 공간만 공조하는 방식이다.

따라서, 거주역만 공조를 하는 바닥급기시스템이 천장급기시스템에 비해 냉난방 부하가 적게 발생한다.

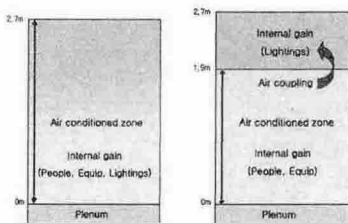
여름철을 예로 들 경우, 냉방설정온도가 26℃라면 천장급기시스템은 실내 전 공간을 26℃로 유지하여야 하나 바닥급기시스템에서는 거주역은 26℃로 유지하고 비거주역은 이보다 높은 온도로 유지되므로 냉방 부하가 그만큼 작아지게 된다.

따라서, 본 시뮬레이션에서는 Fig.4와 같이 바닥급기 시스템은 온도 성층화를 고려하여 2개의 존으로 구분하여 거주역과 비거주역으로 구성하였으며, 천장급기 시스템은 완전 혼합을 가정하여 하나의 존으로 구성하였다.



(a) Overhead system (b) UFAD system

Fig. 5 Air distribution system



(a) Overhead system (b) UFAD system

Fig. 6 Air conditioned zone

2.3.2 TRNSYS

건물 상세해석 프로그램으로써의 TRNSYS는 원래 미국 Wisconsin 대학의 Klein 등이 태양에너지 응용 시스템에 대한 비정상 시뮬레이션 (transient simulation)을 위해 1975년 개발하였다. 그 후 해석의 범위를 태양에너지 뿐 아니라 건물에서의 다양한 태양열 요소 설비를 포함시키는 등 여러 차례 수정 등을 거치면서 전 세계적으로 널리 애용되는 시스템 시뮬레이션 프로그램이 되었다.

본 연구에서 사용된 Version은 최신판인 16으로 여기에 추가적으로 Tess Library의 컴포넌트 등을 이용해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 주요 컴포넌트는 Table 3과 같다.

Table 3 Energy Simulation Components

Type	Components Name
89	Weather Data(TMY)
56	Multi-Zone Building
655	Air-Cooled Chiller
682	Flow-stream Load

2.3.3 시뮬레이션 모델링

시뮬레이션 모델링은 시뮬레이터 건물 물성치와 시뮬레이터에 설치된 설비 장비들을 토대로 작성되었다. Table 4는 시뮬레이션에 사용된 시스템 사양을 보여준다.

공조기 풍량은 시뮬레이터의 양쪽 실험실 모두 천장급기시스템이 설치되어 있어, 천장급기시스템에 맞추어 2,600CMH로 설치하였으나 바닥급기시스템의 경우 부하가 천장급기시스템보다 작아 실제 운전 풍량은 2,000 CMH이다.

Table 4 System set-up

Class		EA	Capacity/Comments
AHU	Cooling	2	5usRT (DX Coil)
	Heating		12kW (Elec. Coil)
	SA Fan		26.00CMH (Invertor)
	RA Fan		26.00CMH (Invertor)
VAV (Overhead)		1	Interior
FPU (Overhead)		1	Perimeter
FTU (UFAD)		2	Perimeter

3. 결과 및 토의

3.1 전산유체 시뮬레이션

3.1.1 Test Room A 결과 분석

천장급기시스템의 실내 환경 특성을 분석하기 위하여 실험실A 내에서 측정된 수직온도 실험값과 전산유체 시뮬레이션을 이용하여 실험실과 동일한 조건의 예측값 및 부하계산서를 근거로 한 설계값을 동일위치에서 비교 분석하였다.

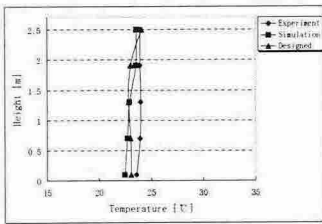


Fig. 7 Vertical temperature

Fig.7은 각각의 결과값에 대한 수직온도분포로 실험실A에서 측정된 실측값과 실험실 조건으로 동일하게 시뮬레이션된 예측값은 유사한 온도분포를 보이고 있다. 이는 실 전체의 균일한 온도조건을 요구하는 천장급기시스템 특성을 보이는 것으로 판단된다.

인체부하를 적용한 설계값의 온도분포도 실측값이나 예측값과 마찬가지로 실내 전반적으로 유사한 온도분포를 보이고 있다.

다음 Fig. 8은 전산유체 시뮬레이션을 통해 분석된 예측값과 설계값의 온도분포(Y-Z)를 나타낸다.

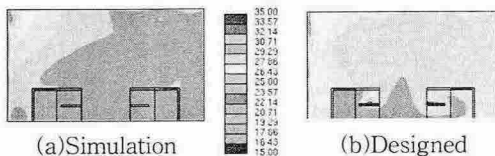


Fig. 8 Temperature contours

3.1.2 Test Room B 결과 분석

바닥공조시스템의 온도 성층화에 의한 거주역 공조 특성을 파악하기 위하여 실험값, 예측값, 설계값과 풍속을 감소시킨 조정값을 비교 분석하였다.

Fig. 9는 각각의 결과에 대한 수직온도분포를 나타낸다.

Fig. 9를 살펴보면 실험실B에서 측정된 실측값과 시뮬레이터를 모델링한 예측값은 온도 성층화가 나타나지 않는 수직온도분포를 나타내고 있다.

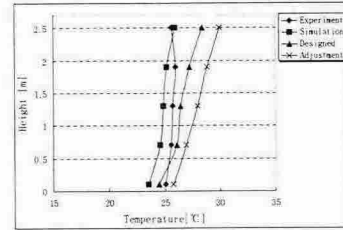


Fig. 9 Vertical temperature

이는 기본적으로 실내에 부하가 거의 없어 부하제거에 의한 온도 성층화가 잘 나타나지 않았다. 또한 실측값과 예측값 모두 디퓨저 취출 유속이 2.1m/s로 빠르고 디퓨저 타입이 소용돌이형이 아닌 수직 방향으로 취출하는 디퓨저 타입으로 취출된 공조 공기가 부하를 제거하기 전에 상부에 도달했기 때문으로 고려된다. 이에 대한 검증으로, 인체부하를 적용한 설계값의 결과에서는 1.9m 이상 상부의 온도가 1.3m 이하의 하부온도보다 높게 형성되고 있었으며 거주역 공조를 위한 적정 취출 속도를 알아보기 위해 시행한 조정값에서는 디퓨저 풍속이 1.5m/s로 줄어들면서 공조 공기가 저속으로 취출되어 온도 성층화를 보이고 있다.

따라서 바닥공조시스템을 통한 거주역 공조를 위해서는 디퓨저의 취출 유속을 적정하게 유지해야 할 것으로 사료된다.

다음 Fig. 10은 전산유체 시뮬레이션을 통해 분석된 예측값과 설계값의 온도분포(Y-Z)를 나타낸다.

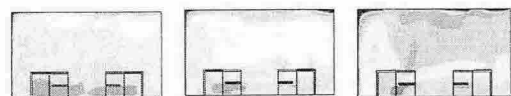


Fig. 10 Temperature contours

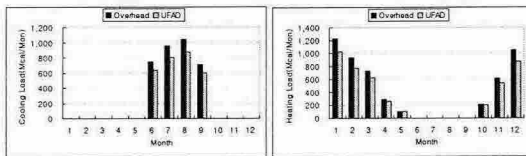
3.2 에너지 시뮬레이션

3.2.1 건물 부하

Fig. 11은 에너지시뮬레이션을 통해 구한 천장급기시스템과 바닥급기시스템의 냉난방 부하이다.

시뮬레이션 결과, 거주역 공조를 하는 바닥급기 시스템이 천장급기시스템에 비해 냉난방 부하가 적게 나타났다.

냉방 부하는 천장급기시스템이 연간 3,465 Mcal/year, 바닥급기시스템이 2,932 Mcal/year로 바닥급기시스템이 약 15.4% 적게 나타났고 난방 부하는 천장급기시스템과 바닥급기시스템이 각각 5,184 Mcal/year, 4,413 Mcal/year로 바닥급기시스템이 약 14.9% 적게 나타났다.



(a) Cooling Load (b) Heating Load
Fig. 11 Cooling & Heating Load

3.2.2 에너지 사용량

Fig. 12는 에너지시뮬레이션으로 구한 천장급기 시스템과 바닥급기시스템의 연간 에너지 사용량이다. 시뮬레이션 결과, 냉난방 부하가 작은 바닥급기시스템이 천장급기시스템에 비해 연간 에너지 사용량이 적은 것으로 나타났다. 냉방에너지는 천장급기시스템이 바닥급기시스템에 비해 약 15.0% 적은 것으로 나타났으며 난방에너지는 14.9% 적은 것으로 나타났다. 반송동력인 급기, 환기 팬 에너지는 바닥급기시스템이 약 27.6% 많은 것으로 나타났는데 이는 천장급기시스템의 경우 VAV 방식으로 부하가 줄면 팬동력이 같이 줄기 때문에 CAV 방식인 바닥급기시스템에 비해 에너지 사용량이 적은 것으로 고려된다.

냉난방 에너지 및 반송 동력을 고려한 전체 에너지 사용량은 바닥급기시스템이 약 6.4% 적은 것으로 나타났다.

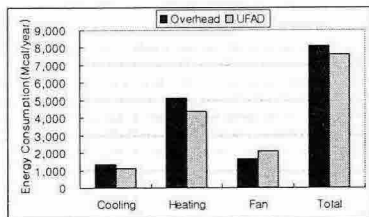


Fig. 12 Energy Consumption

4. 결론

본 연구에서는 시뮬레이터를 통해 바닥급기 시스템의 에너지 성능에 대해 알아보았다.

본 연구 결과는 아래와 같이 요약 할 수 있다.

- (1) 실험 및 기류해석 시뮬레이션 결과, 바닥급기 시스템에서 디퓨저 취출 유속이 빠를 경우 온도 성층화에 의한 거주역 공조가 어려우며 거주역 공조를 위해선 적정 취출 유속을 유지하여야 한다.
- (2) 에너지 시뮬레이션 결과, 거주역 공조를 하는 바닥급기시스템이 천장급기시스템에 비해 냉방 및 난방 부하가 각각 약 15.4%, 14.9% 적은 것으로 나타났다.
- (3) 연간 에너지 사용량의 경우, 바닥급기시스템이 천장급기시스템에 비해 냉방에너지는 15.0%, 난방에너지는 14.9% 적게 나타났으며 반송에너지는 27.6% 많은 것으로 나타나 총 에너지 사용량은 6.4% 적은 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 2002년 건설기술연구개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim, Y. S., 1998, The installation of UFAC system for an Office Building & Evaluation on the Indoor Thermal Environment in winter, Korea Journal of AIK, Vol. 14, No. 11, pp 363-370
2. Chae, Y. T., Sohn, J. Y., et al., 2000, Comparative Evaluation of Indoor Thermal Environment and Energy Consumption between Ceiling-Based System and Floor-Based System in Cooling Period, Korea Journal of AIK, Vol. 16, No. 4, pp 101-1084.
3. Song, K. Y., Kim, S. H., 2002, A study on the Indoor Environment Characteristics in office Building with UFAC System, Proceedings of the SAREK, pp 484-489