

## EnergyPlus를 이용한 바닥공조시스템의 모델링 방법에 따른 에너지 성능 비교

장 향 인, 윤 성 훈\*, 이 현 수, 서 승 직\*\*†

인하대학교 대학원 건축공학과, \*한국건설기술연구원 그린빌딩연구소, \*\*인하대학교 건축공학과

### Comparison on the Energy Performance of Underfloor Air Distribution System According to Modeling Method Using EnergyPlus

Hyang-In Jang, Seong-Hoon Yoon\*, Hyun-Soo Lee, Seung-Jik Suh\*\*†

Department of Architectural Eng., Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

\*Green Building Research Division, KICT, Goyang-Si 411-712, Korea

\*\*Department of Architectural Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received July 6, 2012; revision received August 30, 2012)

**ABSTRACT:** The purpose of this study is to propose modeling method of Underfloor Air Distribution System with reliability and validity by comparing characteristics of modeling methods. For this, the modeling methods of UFAD were selected by investigating various modeling methods of previous researches. Then, simulations were conducted by using EnergyPlus which is dynamic analysis program of building energy. Annual energy consumption for each method was compared with a wide range of indoor thermal loads. As a result, the methodology of reducing internal gains can cause under sizing of the system. It suggests modeling methods to reflect occupied zone air-conditioning, temperature stratification and supply plenum which are the main characteristics of UFAD.

**Key words:** Underfloor Air Distribution System(바닥공조시스템), Energy Performance(에너지성능), Modeling Method(모델링방법), EnergyPlus(에너지플러스)

### 1. 서 론

바닥공조시스템은 기후 변화에 대응한 건물 에너지 소비 저감 기술의 하나로 액세스 플로어를 급기 경로로 활용해 상대적으로 작은 급·배기온도차와 공급 풍량으로 실내 온도를 유지할 수 있는 공조방식이다. 이러한 바닥공조시스템은 에너지 저감 효과 이외에도 층고의 감소로 인한 경제성 증대, 거주자 온

열 쾌적성 향상, 디퓨저 배치의 유연성 제공 등의 다양한 장점으로 인해 국내에서도 1990년대 후반부터 도입되어 적용 사례가 증가하고 있다. 바닥공조시스템의 적용 증가에 따라 바닥공조시스템의 실내 온열환경과 에너지 소요량을 예측 및 평가할 수 있는 시뮬레이션 방법에 대한 필요성이 제기되고 있다.

국외의 경우 온도 성층화와 공급 플레넘의 열손실 등을 고려한 바닥공조시스템의 냉방부하 산정법을 개발하거나, 바닥 급기를 통해 공조된 실의 수학적 모델을 실험을 통해 검증하는 등 관련 연구들이 다양하게 진행되고 있다.<sup>(1, 2)</sup> 국내의 경우에도 최근 바닥공조시스템의 다양한 부하 산정방법에 대한 비교 연

† Corresponding author

Tel.: +82-32-873-5277; fax: +82-32-876-3544

E-mail address: energeti@inha.ac.kr

구가 일부 수행된 바 있으나,<sup>(3)</sup> 대부분은 외기 도입, 디퓨저의 종류와 배치, 플레넘의 높이 등과 같이 바닥공조시스템의 구성 및 조건에 따른 효과를 분석하는 시뮬레이션 연구들이 수행되었다. 하지만 대부분의 경우 시뮬레이션 방법에 대한 신뢰성 검증 없이 연구가 수행되었고, 천장공조방식을 기준으로 부하를 낮게 획일적으로 감산하는 방식이 주를 이루고 있어 바닥공조시스템의 주요 특징인 거주역 공조, 실내 온도 성층화, 공급 플레넘을 통한 열손실 등을 종합적으로 반영하진 못한 것으로 사료된다.

시뮬레이션이 합리적 결과를 도출하기 위해서는 분석 대상 시스템의 특징을 최대한 반영할 수 있는 형태로 모델링이 구현되어야 한다. 이는 시스템의 성능을 실제와 최대한 유사하게 예측하기 위함이며 나아가 평가자의 자의적 판단에 의한 시뮬레이션 오차를 줄이기 위함이다.

따라서 본 연구에서는 모델링 방법에 따른 특징을 비교하기 위해 바닥공조시스템을 해석할 수 있는 다양한 모델링 방법을 분석·고찰하여 모델링 방법을 선정하고, 건물 에너지 동적 해석 프로그램인 Energy Plus를 이용해 시뮬레이션을 수행하였다. 다양한 실내 부하 조건에서 각 모델링 방법에 따른 실내 온도 환경과 에너지 성능을 비교해 보다 합리적인 바닥공조시스템의 모델링 방법을 제시하는데 본 연구의 목적이 있다. 이를 통해 이와 유사한 공조설비의 모델링에 활용이 가능한 방법론을 제시하는 한편 나아가 바닥공조방식의 에너지 절약적 특성이 반영된 설계 및 평가 방법 정립을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 바닥공조시스템 모델링 방법에 대한 고찰

### 2.1 실내 열취득 감산 방법

바닥공조시스템을 모델링하는 가장 간단한 형태는 전실 완전혼합공기를 가정하는 천장공조시스템에 비해 바닥공조시스템은 온도 성층화를 가정해 실내 부하를 입력하는 것이다. 즉 거주역에서 상층부(비거주역)로 이동하는 실내 열취득(인체 및 기기)의 대류 성분과 상부에서 발생하는 열취득(조명)의 일부는 거주역에 영향을 미치지 않는다는 개념 하에 실내 부하의 일정 부분을 감산하여 계산하는 방법이다.

일본의 건축설비종합협회는 바닥공조 설계 시 실내 열취득의 65%만을 부하로 산정하는 방법을 제시

했다. 또한 Kenneth J. Loudermilk는 열취득 요소를 대류와 복사 성분으로 구분해 산정하는 EHGF(Effective Heat Gain Factor)를 바닥공조시스템의 부하 계산에 이용하는 방법을 제안하였고, 이는 국내 연구에서도 활용된 바 있다.<sup>(4)</sup>

### 2.2 Plenum 객체와 적외선 투과 재료를 이용한 모델링 방법

EnergyPlus는 존과 HVAC 시스템의 각 구성요소 간의 열 이동을 질점(Node)간의 열량과 유량의 평형으로 계산한다. EnergyPlus에서 제공되는 Plenum 객체(Object)는 건물 요소인 존인 동시에 공조 시스템의 경로가 되는 구성 요소로서 건물의 열평형과 시스템의 열평형이 동시에 계산되는 특징을 가진다. 이러한 HVAC 시스템의 공기 유동 경로를 벽과 창호로 구성할 수 있는 특징을 이용해 바닥공조시스템의 하부 플레넘과 상부 비거주역을 구현할 수 있다. 또한 낮은 열저항을 가진 비축열 재료(NoMass Material) 또는 벽체 사이의 장파장을 투과함으로써 존 간의 복사 열전달이 가능하게 하는 적외선 투과 재료(IRT Material)를 이용해 거주역과 비거주역 사이에 열전달이 큰 경계면을 구현할 수 있다.<sup>(5)</sup>

### 2.3 Room Air Model을 이용한 모델링 방법

미국 CBE(Center for the Built Environment)를 중심으로 바닥공조시스템이 설치된 실에 적용할 수 있는 Room Air Model이 연구되었다. 이 연구에서는 바닥공조시스템이 설치된 존의 온도 분포를 성층화 높이와 온도차에 영향을 미치는 무차원 매개변수를 이용한 실험상관식 형태로 도출하고 이를 Energy Plus에 모듈로 추가하였다. 해당 모델은 공조 존을 거주역과 비거주역(상층부)의 두 개의 하위 존으로 구분해 온도를 계산한다. 인체와 기기발열은 거주역에, 조명발열은 비거주역에 적용되는 것으로 가정하며 하위 존 사이의 자연 대류로 인한 열전달을 고려한다.<sup>(5)</sup>

## 3. 바닥공조시스템의 모델링 방법 제안

### 3.1 바닥공조 시뮬레이션 방법 선정

바닥공조시스템의 모델링 방법에 따른 열부하 특

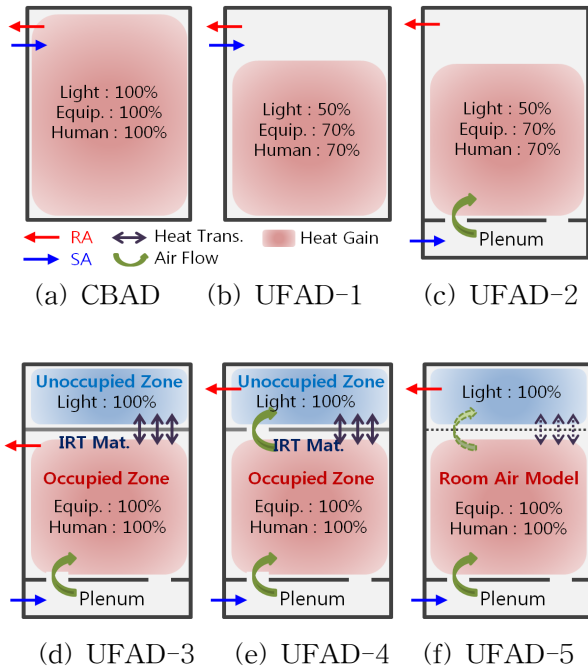


Fig. 1 Conceptual diagram of modeling.

성을 비교하기 위해 지금까지 살펴본 바닥공조시스템의 모델링 방법에 따라 Fig. 1과 같이 6가지 대안(Alternative)을 선정하였다.

CBAD는 비교를 위해 천장공조 방식을 모델링한 것이다. UFAD-1은 천정공조 방식에서 열취득을 감소하는 방법으로 EHGf를 반영해 인체 및 기기 발열의 70%, 조명 발열의 50%를 존에 적용하였다. UFAD-2는

Table 1 Alternative of modeling

Alt.	Explanation	O. Z.	P. L.	T. S.	A. F.
CBAD	Ceiling Based Air Distribution	×	×	×	×
UFAD-1	Apply Reduction of Heat Gain (Human and Equip. 70%, Light 50%)	○	×	×	×
UFAD-2	UFAD-1+Apply Supply Plenum	○	○	×	×
UFAD-3	Apply IRT material and Supply Plenum	○	○	○	×
UFAD-4	UFAD-3+Air Flow	○	○	○	○
UFAD-5	Apply to Room Air Model	○	○	○	○

Note) O. Z. : Occupied Zone.  
 P. L. : Plenum Heat Loss.  
 T. S. : Thermal Stratification.  
 A. F. : Air Flow.

Table 2 Simulation Cases

Case	Light(W/m <sup>2</sup> )	Equipment(W/m <sup>2</sup> )
Case 1	12.0	10.8
Case 2	16.0	10.8
Case 3	20.0	10.8
Case 4	12.0	16.2
Case 5	12.0	21.6

UFAD-1과 동일하지만 플레넘을 통해 공조된다. UFAD-3은 거주역과 비거주역을 복사의 투과가 가능한 적외선 투과 재료로 구획하고, 발열을 실제 위치에 따라 인체와 기기는 거주역에 조명은 비거주역에 적용했다.

UFAD-4는 거주역과 비거주역을 적외선 투과 재료로 구획하고 거주역의 공기가 비거주역을 통해 배기되도록 하였다. UFAD-5는 EnergyPlus에서 제공하는 Room Air Model을 이용하여 존을 모델링하였다. 디퓨저 개수는 25개, 타입은 Swirl로 지정하였다. 바닥공조의 주요 특징인 거주역 공조, 공급 플레넘, 온도 성층화, 상하부 공기 유동에 대한 각 대안별 특징은 Table 1과 같다.

각 모델링 방법의 특징을 면밀하게 분석하기 위해 다음 Table 2와 같이 실내 부하 조건을 다르게 Case를 구성하여 각 대안별로 시뮬레이션을 수행하였다.

### 3.2 시뮬레이션 입력 조건

본 연구는 바닥공조시스템의 모델링 방법에 따른 실내 열부하 특성 분석에 초점을 둔 것으로 HVAC 시스템과 건물 구성은 최대한 단순화하여 분석을 수행하였다. HVAC 시스템의 구성은 다음 Fig. 2와 같다.

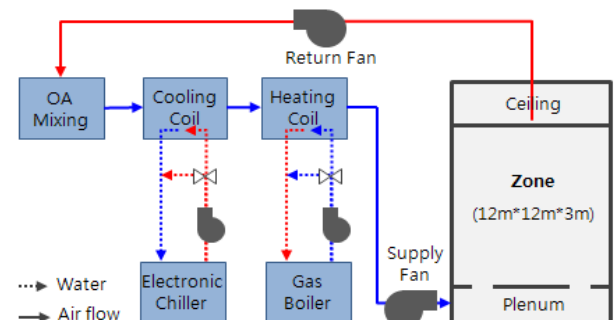


Fig. 2 HVAC System Component.

해석 모델은 바닥공조시스템이 주로 이용되는 업무용 건물의 내부 존으로 12 m(W)×12 m(D)×3.0 m(H)인 정방형의 단층 공간으로 가정하였다. 모델링 방법에 따라 필요시 하부 플레넘은 0.45 m, 거주역의 높이는 1.8 m로 설정하였다. 모델링은 하부 플레넘, 분석 대상 존(거주역, 비거주역), 상부 천장으로 구성하였으며 벽체, 천장의 지붕, 하부 플레넘 바닥은 단열(Adiabatic) 조건으로 설정하여 인접 존과 열교환은 없는 것으로 가정하였다. 내부 열취득은 ASHRAE Handbook Fundamentals(2009)의 기준을, 재실밀도 및 외기도입량은 ASHRAE Standard 62.1(2007)의 기준을 사용하였다.<sup>(6, 7)</sup> 시뮬레이션 조건과 재료의 물성은 다음 Table 3, Table 4와 같다.

Table 3 Simulation conditions

Item	Condition	
Set point	Heating : 21°C, RH 50% Cooling : 26°C, RH 50%	
Operation Time	Weekday : 08 : 00 ~ 20 : 00 Weekend : Off	
Metabolic	130 W/person	Moderately Office Work
Light	12 W/m <sup>2</sup>	Office enclosed
Equipment	10.8 W/m <sup>2</sup>	Office Medium
Occupant Density	0.05 person/m <sup>2</sup>	Office Space
Outdoor Air Rate	28.88 CMH/person	Office Space
Infiltration	0.2 ACH	
HVAC	AHU : VAV System	
	Chiller : Elec., Air-Cooled, 12 kW	
	Boiler : Gas, 6.5 kW	
	Fan : SA-100Pa, RA-100Pa	
	Pump : Variable Speed, 0.25 kW Supply Temp. : 16°C	
Weather Data	Incheon, Korea(epw)	

Table 4 Material properties

Surface	THK. (mm)	Cond. (W/mK)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Spec.heat (J/kgK)
Access Floor	40	0.09	450	1300
Ceiling	12	0.16	800	1090

#### 4. 시뮬레이션 결과의 분석 및 고찰

이상의 입력 조건을 이용하여 각 모델링 방법별로 연간 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 벽체가 단열 경계조건인 내부 존이고 열취득이 커 연간 냉방 부하만 발생하는 것으로 나타났다.

##### 4.1 조명발열 변화에 따른 에너지소요량 비교

Table 5는 다양한 조명 발열 밀도에서 모델링 방법에 따른 에너지 소요량, 대안별 에너지 소요량비(각 UFAD/CBAD), 케이스별 에너지 소요량비(각 Case/Case 1)를 나타낸 것이다.

부하 감소 방법으로 모델링한 UFAD-1은 천정공조방식(CBAD)에 비해 65.4~66.4%의 에너지 소요량을 보였다. 공급 플레넘을 구현한 UFAD-2는 UFAD-1에 비해 다소 작은 에너지 소요량을 보였고, 이는 연간 냉방인 실내 조건에서 플레넘의 침기가 외기 냉방으로 작용했기 때문으로 판단된다. 거주역과 비거주역 사이의 공기 유동까지 구현한 UFAD-4는

Table 5 Energy consumption(Case 1~3)

Alt.	Case	Energy Consump. (GJ)	UFAD-#/CBAD (%)	Case #/Case 1 (%)
CBAD	Case 1	7.84	100.0	100.0
	Case 2	9.18	100.0	117.1
	Case 3	10.46	100.0	133.4
UFAD-1	Case 1	5.13	65.4	100.0
	Case 2	5.99	65.3	116.8
	Case 3	6.95	66.4	135.5
UFAD-2	Case 1	5.04	64.3	100.0
	Case 2	5.94	64.7	117.9
	Case 3	6.79	64.9	134.7
UFAD-3	Case 1	6.26	79.9	100.0
	Case 2	7.25	79.0	115.8
	Case 3	8.15	77.9	130.2
UFAD-4	Case 1	6.94	88.5	100.0
	Case 2	7.88	85.8	113.5
	Case 3	8.72	83.4	125.7
UFAD-5	Case 1	6.82	87.0	100.0
	Case 2	7.85	85.5	115.1
	Case 3	8.83	84.4	129.5

Note) UFAD-# : Each UFAD Alt.,

Case # : Each Case.

공기 유동이 없는 UFAD-3과 6.5~9.8%의 에너지 소요량 차이를 나타냈다. UFAD-4와 UFAD-5의 경우 에너지 소요량의 차이는 1.5% 이하로 계산되었으며, 변화 패턴도 유사하게 나타났다.

바닥공조의 주요 특징을 구현한 UFAD-4, 5의 경우 천정공조방식에 비해 에너지 소요량이 83.4~88.5%인 것에 비해 단순 부하 감소 방법으로 모델링한 UFAD-1, 2는 64.3~72.9%로 매우 낮게 나타났다. 또한 UFAD-4, 5의 경우 조명 밀도의 증가에 따라 천장공조방식에 비해 에너지 소요량의 증가폭이 작아지는 반면, 단순부하 감소 방법으로 모델링한 UFAD-1, 2는 거의 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이는 단순 부하 감소 방법의 경우 사용자가 입력한 열취득 비율이 에너지 소요량에 미치는 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 기기발열 변화에 따른 에너지소요량 비교

거주역에 직접 작용하는 기기 발열 변화에 대한 에너지 소요량 결과는 다음 Table 6과 같다.

Table 6 Energy consumption(Case 4~5)

Alt.	Case	Energy Consump. (GJ)	UFAD-# /CBAD (%)	Case # /Case 1 (%)
CBAD	Case 1	7.84	100.0	100.0
	Case 4	9.48	100.0	120.9
	Case 5	11.08	100.0	141.3
UFAD-1	Case 1	5.13	65.4	100.0
	Case 4	6.64	70.0	129.4
	Case 5	8.08	72.9	157.5
UFAD-2	Case 1	5.04	64.3	100.0
	Case 4	6.53	68.9	129.6
	Case 5	8.06	72.7	159.9
UFAD-3	Case 1	6.26	79.9	100.0
	Case 4	7.96	84.0	127.2
	Case 5	9.54	86.1	152.4
UFAD-4	Case 1	6.94	88.5	100.0
	Case 4	8.75	92.3	126.1
	Case 5	10.4	93.9	149.9
UFAD-5	Case 1	6.82	87.0	100.0
	Case 4	8.64	91.1	126.7
	Case 5	10.41	94.0	152.6

Note) UFAD-# : Each UFAD Alt., Case # : Each Case.

단순 부하 감소 방법으로 모델링한 UFAD-1과 UFAD-2의 경우 천정공조방식에 비해 에너지 소요량이 64.3~72.9%로 계산되었고, UFAD-3의 경우도 UFAD-4에 비해 8.3~9.8%의 차이를 보여 조명 발열 변화 시와 비슷한 경향을 보였다. 하지만 기기 발열 변화에 따른 케이스별 에너지 소요량의 변화 패턴과 증가폭은 모델링 방법에 상관없이 거의 유사하게 나타났다.

4.3 실내온도 및 기기별 에너지소요량 비교

바닥공조의 특징이 모두 구현된 UFAD-4와 UFAD-5의 차이를 살펴보기 위해 7월 17일~23일 일주일 동안, Case 1(조명 12.0, 기기 10.8 W/m<sup>2</sup>) 조건에서, UFAD-4와 UFAD-5의 거주역 및 비거주역 온도와 열원기기(Plant) 및 공조기기(System)의 에너지 소요량을 평균해 Table 7에 정리했다. 공조 시간 중 비거주역의 평균 온도는 UFAD-4는 27.03°C, UFAD-5는 27.38°C로 0.35°C의 차이를 보였으며, 열원기기(칠러)와 공조기기(팬) 사이의 에너지 사용량 비율도 다소 차이를 보였다. 이는 UFAD-5의 모델링 방법인 Room Air Model이 부력에 의한 열전달을 크게 계산하기 때문으로 사료된다. 각 시간대별 실내 온도는 Fig. 3과 같다.

Table 7 Temperature and energy consumption

Alt.	Occupied Temp. (°C)	Unoccup. Temp. (°C)	Plant (MJ/day)	System (MJ/day)
UFAD-4 (Case 1)	26.01	27.04	39.95	3.03
UFAD-5 (Case 1)	25.97	27.38	40.22	2.40

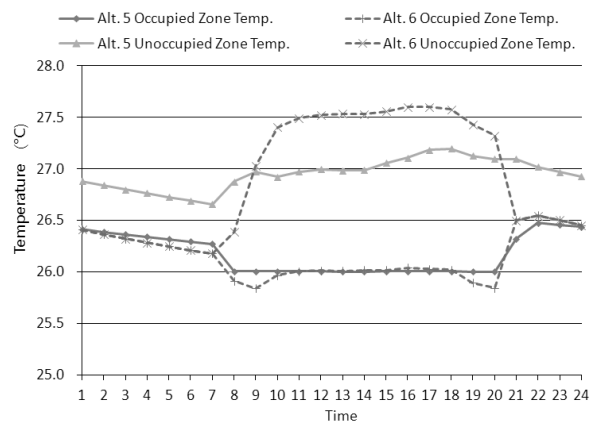


Fig. 3 Zone temperature(UFAD-4, UFAD-5).

## 5. 결 론

본 연구는 바닥공조시스템의 모델링 방법에 따른 특성을 비교하기 위해 실내 온열 환경과 연간 에너지 소비량을 중심으로 분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 단순 부하 감산 방법에 의해 모델링한 경우 에너지 소요량이 천장공조방식(CBAD)에 비해 64.3~72.9%에 불과한 것으로 계산되었다. 다른 모델링 방법에 비해 단순 부하 감산 방법은 열원 및 공조 시스템의 용량을 과소 설계(Under Sizing)할 가능성이 있는 것으로 사료된다.

(2) 단순 부하 감산 방법으로 모델링을 수행한 경우 조명 밀도가 높아질수록 에너지 소요량의 증가폭이 줄어드는 거주역 공조의 특징을 나타내지 못하였으며, 이는 에너지 소요량 계산에 있어 사용자가 입력한 열취득 비율의 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 기기 발열 변화에 따른 케이스별 에너지 소요량의 증가폭은 모델링 방법에 상관없이 거의 유사하게 나타났다. 이는 조명 발열과는 다르게 기기 발열은 거주역에 직접 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 거주역과 비거주역의 공기 유동을 지정하지 않은 UFAD-3의 경우 공기 유동이 지정된 UFAD-4에 비해 부하 조건에 따라 6.5~9.8%의 에너지 소요량의 차이를 보였다.

(5) 적외선 투과 재료와 Plenum 객체(object)를 이용한 UFAD-4와 EnergyPlus에서 제공하는 Room Air Model을 이용한 UFAD-5는 바닥공조시스템의 주요 특징인 공급 플레넘을 통한 열손실, 거주역 공조, 온도 성층화, 상하부 공기 이동의 특징을 모두 구현할 수 있었다.

(6) UFAD-4와 UFAD-5의 경우 에너지 소요량 패턴에서 매우 비슷한 경향을 보였으며, 그 값의 차이도 1.5% 이하로 나타났다. 다만 조명 발열이 증가함에 따라 에너지 소요량의 증가폭이 감소하는 특성은 UFAD-4가 더 잘 반영하는 것으로 나타났다. 이는 거주역과 비거주역 사이의 열전달을 처리하는 방식의 차이에서 기인한 것으로 판단되나 그 크기가 크진 않았다.

이상의 연구를 통해 확인한 바와 같이, 바닥공조시스템의 모델링에 있어 바닥공조의 주요 특징이 반

영되지 않고 사용자가 입력하는 내부 열취득 비율의 영향이 큰 단순 부하 감산 방법은 지양해야 할 것이며, 다양한 바닥공조의 특성을 반영할 수 있는 UFAD-4 또는 UFAD-5의 모델링 방법으로 시뮬레이션을 수행해야 할 것이다.

이후 다양한 부하 조건에서 거주역과 비거주역의 온도차에 대한 후속 실증 실험 연구를 수행하여 제한한 모델링 방법을 추가 분석하고, 바닥공조시스템의 설계와 적용을 위한 기초 자료를 구축할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 인하대학교의 연구비 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. Stefano, S. et al., 2011, Simplified calculation method for design cooling loads in underfloor air distribution(UFAD) systems Energy and Buildings, Vol. 43, No. 2, pp. 517-528.
2. Lin, Y. J. P. and Linden, P. E., 2005, A model for an under floor air distribution system, Energy and Buildings, Vol. 37, No. 4, pp. 399-499.
3. Kim, J. H. et al., 2011, Load Estimation and Energy Saving Potential in Underfloor Air Distribution(UFAD), Proceeding of SAREK Summer Annual Conference, pp. 198-201.
4. Kenneth, J. L., 1999, Underfloor Air Distribution Solutions for Open Office Applications, ASHRAE Transactions, Vol. 105, No. 1, pp. 605-613.
5. DOE, 2010, EnergyPlus 6.0 Engineering Reference, US Department of Energy.
6. ASHRAE, 2009, ASHRAE Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
7. ASHRAE, 2007, ANSI/ASHRAE Standard 62.1 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.