

## 시험공간에 대한 냉방부하 실증실험 및 계산

유 호 선, 현 석 균\*, 김 용 식\*\*, 홍 희 기\*\*\*\*

송실대학교 기계공학과, \*(주)ATES CFD솔루션사업부, \*\*청운대학교 건축환경설비학과,  
\*\*\*경희대학교 기계산업시스템공학부

### Verification Experiment and Calculation of Cooling Load for a Test Space

Hoseon Yoo, Suk Kyun Hyun\*, Yong-Shik Kim\*\*, Hiki Hong\*\*\*\*

Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

\*CFD Solution Division, Advanced Technology Engineering Service LTD., Seoul 157-030, Korea

\*\*Dept. of Architectural Environment Eng. and Building Services, Chungwoon Univ., Hongsung 350-701, Korea

\*\*\*School of Mechanical and Industrial System Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

(Received March 28, 2003; revision received June 10, 2003)

**ABSTRACT:** In order to assess the reliability of a building energy simulation program (TRNSYS) from the standpoint of user, a set of verification experiment and calculation of cooling load for a test space is carried out. This work is a complement of the previous study that dealt with heating load for the same space. The test space is kept airtight to eliminate the source of uncertainties in modeling. A window-mounted, on/off controlled air-conditioner is used for cooling, whose performance has been established *a priori*. The calculation encompasses two models for evaluating cooling load in TRNSYS: energy rate control and temperature level control. Comparison of the total cooling loads obtained from different sets of experimental data enables to validate the measurements. The experimental result shows that the latent load is fairly large even in the absence of apparent air change in the space, which needs to be clarified. Each of hourly and daily accumulated sensible loads is compared between the experiment and two calculation models. Despite an inconsistency associated with solar irradiation, both of the models agree favorably with the experiment within a tolerance, illustrating their capability of properly predicting space thermal loads.

**Key words:** Cooling load(냉방부하), Verification experiment(실증실험), TRNSYS, Building energy simulation(건물 에너지 시뮬레이션)

#### 기 호 설 명

$C_p$  : 공기의 정압비열

$h$  : 공기의 엔탈피

$M$  : 실내공기 질량

$\dot{P}$  : 냉·난방기에서 제거/공급되는 열

$Q, \dot{Q}$  : 열량, 단위시간당 열량

$T$  : 온도

$t$  : 시간

$V$  : 증발기 통과 체적유량

$\dot{W}$  : 냉방기 소비전력

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-2625

E-mail address: hhong@khu.ac.kr

## 그리스 문자

$\rho$  : 공기의 밀도

## 하첨자

$r$  : 실내

sensible : 현열

set : 설정상태

total : 전열

## 1. 서 론

국내 총 에너지소비에서 건물부문이 차지하는 비율은 약 24%이다.<sup>(1)</sup> 에너지원의 수입의존도가 절대적인 국가임을 감안할 때, 타 선진국 비해서는 다소 낮은 비율이지만, 건물 에너지관리는 전체 에너지의 절약과 효율적 이용에 있어서 중요한 역할을 한다. 건물 에너지관리의 핵심은 신축 또는 개조(remodeling)를 위한 설계단계에서 설비의 방식과 용량, 운전조건, 실내환경의 쾌적성, 초기 및 운전비용 등을 합리적으로 조정하는 데 있다. 이러한 공학적 과정에서 실험은 비용과 시간이 과다하고 제한된 경우만을 취급하여야 하는 등 많은 제한을 수반하기 때문에 의사결정은 적절한 해석방법을 통한 예측에 의존하는 것이 보다 효율적이다.

냉난방 부하계산을 비롯한 건물에서의 에너지 해석은 수(手)작업으로 시작하여 건물 에너지 시뮬레이션(Building Energy Simulation, BES)으로 발전하였으며, 현재 다양한 프로그램이 널리 보급된 상태이다. 국내외에서 사용되거나 개발이 진행되고 있는 대표적 BES 프로그램의 개요와 특징에 관해서는 문헌<sup>(2,3)</sup>을 참조하기 바란다. 여러 프로그램 가운데 특정한 것을 선정할 때 개발자와 사용자 모두에게 중요한 고려사항은 예측결과와 타당성이다. 개발자는 당연히 프로그램의 검증 또는 인증을 위한 다각적인 노력을 기울여 왔으며, 그 결과 최근에는 상이한 모델 간의 비교 검증에 관한 표준화도 시도되고 있다.<sup>(4)</sup> 반면 사용자로서는, 일단 검증된 BES 프로그램이라도 경우에 따라 예측결과와 신뢰성에는 차이가 있을 수 있기 때문에, 자신의 목적에 부합하는가를 나

름대로 평가할 필요가 있다. 같은 대상 및 조건에 대하여 여러 동적 열부하계산 프로그램으로 계산한 결과 사이에 큰 편차가 나타난 사실<sup>(5)</sup>이 독자적인 평가의 필요성을 뒷받침한다.

다양한 검증방법 중에서 경험적 검증(empirical validation)은 잘 정의된 공간을 대상으로 측정된 자료와 프로그램에 의한 계산결과를 직접 비교·검토하는 방법으로서, 사용자 입장에서 채택하기에 적합하다. 이런 맥락에서 본 연구진은 어떤 시험공간에 대한 난방부하의 실험 및 계산을 통하여 대표적 BES 프로그램의 하나인 TRNSYS (TRAnSient SYstem Simulation)의 신뢰성을 평가하고자 일차적으로 시도한 바 있다.<sup>(6)</sup> 프로그램의 종합적인 평가를 위해서는 난방뿐만 아니라 냉방에 대한 실험 및 계산이 병행되어야 하므로, 본 연구에서는 냉방부하를 취급하고자 한다. 선행연구의 경우<sup>(6)</sup> 잠열의 변화와 무관한 난방이었고 제어가 용이한 전열기를 난방열원으로 사용하였기 때문에 실험과 계산이 조건은 물론 결과에 있어서도 비교적 잘 일치하였다. 이에 비하여 냉방의 경우 냉방기만 고려하더라도 현열과 잠열의 변화가 동시에 일어나고 외기조건에 따라 그 성능이 달라지는 등 실험과 계산 모두가 난방에 비하여 상대적으로 까다롭다.

선행연구의 후속으로 수행되는 본 연구의 성격상 난방과 냉방의 불가피한 차이를 제외한 다른 조건은 가급적 일치시키고자 한다. 이에 따라 난방에서와 동일한 시험공간을 대상으로 유사한 방식으로 측정과 계산을 수행한다. 특히 난방에서 처럼 환기, 침입공기(infiltration), 사람의 출입 등으로 인한 일체의 공기교환(air change)을 배제하고자 한다. 재현이 곤란하고 본질적으로 큰 불확실성을 내포하는 공기교환은 별도의 연구를 통하여 취급되어야 할 주제이다. BES 프로그램의 경우 선행연구의 TRNSYS 14.2 대신 TRNSYS 15로 대체하였으나, 몇몇 기능만 추가되었을 뿐 본질적인 차이는 없다.

연구의 목적인 TRNSYS에 대한 사용자 관점에서의 신뢰성 평가에 더하여, 비교적 잘 정의된 시험공간, 성능자료가 구비된 냉방기, 기상청 제공 외기조건 등 알려진 실험조건 하에서 측정된 자료는 다른 BES 프로그램의 검증을 위해서도 활용될 수 있으리라 기대된다.

2. 실 험

2.1 시험공간

실험대상 시험공간은 전술한 이유로 난방의 경우<sup>(6)</sup>와 같다. 시험공간과 그것에 영향을 미치는 인접공간의 평면을 Fig. 1에 도시하였다. 시험공간의 크기는 5,540×3,385×3,500 mm로서, 천장 전체와 크기가 1,485×1,820 mm인 이중유리 창문을 포함하는 남쪽 벽은 외기와 접하고, 나머지 벽면은 복도 혹은 다른 공간과 접하고 있다. 복도, 계단, 창고 및 아래층 일부(Fig. 1의 ㉑, 바닥면적의 40%)는 비공조공간이다. 다만 아래층의 일부(Fig. 1의 ㉒, 바닥면적의 60%)는 공조공간이므로 시험

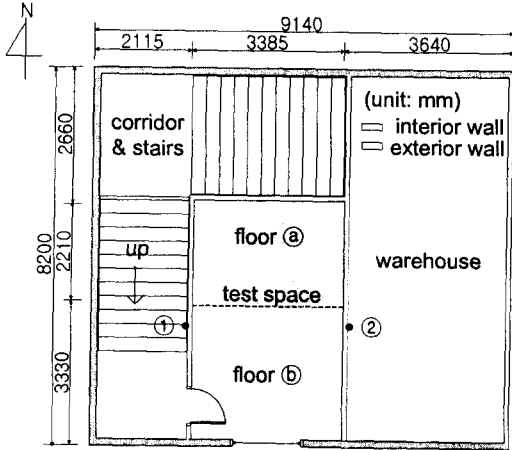


Fig. 1 The plan view of the present test space and its vicinity.

공간과의 상호작용이 고려되어야 하며, 실측된 실내온도를 계산에 사용하였다. 시험공간 주위의 구조물로 인한 일사의 방해는 전혀 없는 상태이다.

시험공간 및 인접공간의 경계를 이루는 벽체는 구조가 상이하므로 외벽, 내벽, 바닥면 및 천장면으로 구분되며, Fig. 2에 각각의 구조를 구체적으로 도시하였다. 계산에 필요한 벽체재료에 대한 열물성, 공기층의 열저항 및 창문을 통한 총합 열전달계수는 Table 1에 정리되어 있다.

내벽으로 표시된 창고의 동쪽 벽(Fig. 1에서 최

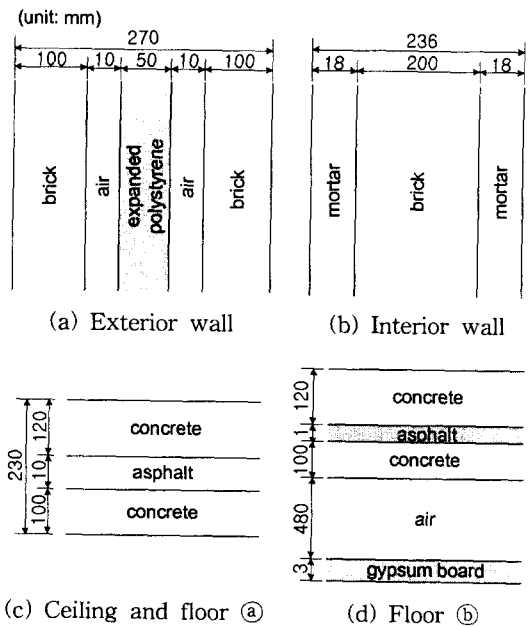


Fig. 2 Detailed wall compositions.

Table 1 Thermophysical properties for wall materials, air gap and window

Material	Thermal conductivity W/mK (kcal/mh°C)	Specific heat kJ/kgK (kcal/kg°C)	Density kg/m <sup>3</sup>
Brick	0.640(0.550)	0.84(0.20)	1660
Expanded polystyrene	0.034(0.030)	1.25(0.30)	28
Mortar	1.510(1.300)	0.79(0.19)	2000
Asphalt	0.110(0.095)	0.92(0.22)	1000
Concrete	1.390(1.200)	0.88(0.21)	2200
Gypsum board	0.170(0.150)	0.31(0.27)	910
Air gap	Thermal resistance		
	Horizontal (10~500 mm)	0.17 m <sup>2</sup> K/W	
	Vertical (10~20 mm)	0.13 m <sup>2</sup> K/W	
Double-window	Overall heat transfer coefficient: 2.8 W/m <sup>2</sup> K		

우측 벽)은 다른 창고와 접하고 있다. 시험공간을 냉방하지 않을 때 두 창고의 온도차는 거의 없다. 그러나 냉방할 때는 온도차가 발생함으로써 경계를 이루는 내벽을 통하여 열전달이 일어날 가능성이 있기 때문에 상호작용의 확인을 위하여 두 창고의 온도를 측정하였다.

## 2.2 냉방기 성능

적정한 용량의 냉방기를 선정하기 위하여 대한 설비공학회가 제공하는 표준기상자료를 이용하여 시험공간에 대한 최대냉방부하를 미리 계산하였다. 이에 따라 호칭용량 2,000 W이고, 설치를 위해 시험공간을 변형할 필요가 별로 없는 창문형 냉방기(window-mounted air-conditioner)를 냉방 열원으로 선택하였다. 선정된 냉방기는 on/off식으로 제어된다.

후술되듯이 냉방기가 운전중인 공간에 대한 부하계산을 위해서는 조건에 따른 냉방기의 성능자료가 필요하다. 시판되는 냉방기의 경우 호칭용량 이외의 성능은 사실상 불명이므로 본 연구에서는 공인기관인 한국생산기술연구원에 의뢰하여 구체적인 성능을 측정하였다. 현실적인 제약으로 냉방기의 성능시험은 외기온도, 실내온도 및 상대습도 각각을 3단계씩 변화시킨 총 27개 조건에 국한하여 시행하였으며, 결과는 전열 냉방능력 및 성능계수(COP)의 향으로 정리하였다. 다른 연구에서도 냉방기 성능자료를 이용할 수 있도록 Table 2에 정리된 시험결과를 수록하였다. 여기서 전열 냉방능력은 시물레이션에서 조건에 따른 냉방기의 성능으로 입력되며, COP는 시험에서 측정된

자료의 처리에 적용될 수 있다. 실제 계산에서는 냉방기 성능자료의 보간이 필요하다.

냉방기의 증발부를 통과하는 공기의 체적유량(풍량)은  $5.2(\pm 0.35) \text{ m}^3/\text{min}$ 로 측정되었으며, 이 값을 실험자료의 처리에 사용하였다.

## 2.3 실험방법

시험공간의 냉방온도는 예비실험과 기상예보 등을 참고하여 냉방기의 전원이 1시간에 1~3회 on/off되는  $25.5^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. 높은 천장고(3,500 mm)로 인한 수직 기온분포와 냉방기의 편재(창문)로 인한 수평 기온분포 등을 고려하여  $\pm 1.2^\circ\text{C}$  범위에서 설정온도의 편차를 허용하였다. 서론에서 언급한 공기교환을 방지하기 위하여 환기는 하지 않고, 사람의 출입을 금지하였으며, 침입공기를 차단하고자 창문, 출입문 등의 틈새를 테이프로 밀봉하였다. 시험공간 외부의 복도와 계단은 실험기간 동안 완전한 통제가 불가능했던 관계로 실험자료와의 합리적인 비교를 위하여 계산에서는 측정된 각 인접공간 및 벽체의 온도(Fig. 1의 ①과 ② 지점)를 시험공간을 위한 경계 조건으로 부여하였다.<sup>(6)</sup> 시험공간 내부온도가 균일하도록 선풍기로 공기를 강제 순환시켰음에도 높은 천장고로 인하여 냉방기 운전 및 정지시 각각  $1.2^\circ\text{C}$  및  $0.5^\circ\text{C}$  정도의 수직편차는 피할 수 없었다.

냉방기, 선풍기 등에서의 전력사용량은 1일 단위의 적산전력량과 36초 간격으로 측정된 전압에서 환산한 순시값을 비교하여 확인하였다. 순시값의 적분과 적산량 사이에는 미소한 차이가 있

Table 2 Measured performance data of the present air-conditioner

Outdoor temperature	24°C			28°C			32°C			
Indoor conditions	Temperature									
	24°C	26°C	28°C	24°C	26°C	28°C	24°C	26°C	28°C	
Relative humidity	Total cooling capacity [W]									
	40%	2018	2108	2281	1886	2037	2119	1843	1865	2094
	55%	2227	2311	2486	2093	2193	2336	1909	2099	2218
	70%	2367	2462	2614	2317	2492	2533	2085	2303	2371
	COP									
	40%	3.61	3.73	4.01	3.16	3.38	3.49	2.93	2.90	3.23
	55%	3.93	4.05	4.35	3.45	3.86	3.86	3.28	3.24	3.47
70%	4.17	4.30	4.56	3.81	4.07	4.15	3.56	3.63	3.73	

을 뿐이다. 조명(형광등 80 W)과 기기(PC 및 선풍기 267 W)는 실험기간 내내 가동되며, 여기서 발생하는 열은 계산에서 실내획득열량으로 고려된다. 적산전력을 제외한 모든 자료는 36초 간격으로 측정되었다.

시험공간의 공기교환이 없고 벽체가 비투과성이라면, 이론적으로 습도의 변화가 없고 잠열부하는 0이다. 그러나 실제 실험에서는 냉방기 증발부에서 계속 응축수가 발생하는 사실만으로도 잠열부하가 존재함을 알 수 있다. 본 실험에서는 잠열부하의 정도를 확인하고 계산과의 비교를 위하여 전열 냉방부하 및 현열 냉방부하를 모두 구하였다.

시험공간의 순간 전열 냉방부하는, 실내온도가 설정값을 유지한다면, 냉방기 증발부를 순환하는 실내공기의 입·출구 엔탈피 차이의 항으로 표현될 수 있다.

$$\dot{Q}_{total} = \rho V \Delta h \quad (1)$$

이를 위하여 입·출구에 각각 2개씩의 건습구온도계를 설치하고, 위치별로 측정된 온도가 1℃ 이내의 편차를 보이는 기간에 대한 자료만을 취하였다. 다른 방법으로서, 전열 냉방부하는 냉방기의 성능시험에서 얻은 Table 2의 COP와 측정된 냉방기 소비전력의 곱으로 얻어질 수도 있다.

$$\dot{Q}_{total} = COP \cdot \dot{W} \quad (2)$$

한편, 순간 현열 냉방부하는 입·출구의 건구온도 차이로부터 쉽게 결정된다.

$$\dot{Q}_{sensible} = \rho V C_p \Delta T \quad (3)$$

필요시 잠열 냉방부하는 전열과 현열의 차이 또는 증발기 입·출구 절대습도의 항으로 구할 수 있다.

신뢰성 있는 자료를 확보하기 위하여 예비실험을 진행하면서 시험공간 및 인접공간의 온도변화를 추적하였다. 그 결과 냉방기 증발부의 온도편차가 일치하는 2일간(2002년 9월 7일 오전 6시부터 9일 오전 6시까지)의 자료가 프로그램의 검증용으로 가장 적합하다고 판단되었다.

### 3. 부하계산

#### 3.1 TRNSYS의 개요

본 연구에 사용된 TRNSYS는 미국 Wisconsin 대학이 태양열시스템 설계를 위하여 개발을 시작한 후 지속적인 확장과 갱신을 거쳐 현재에는 대표적인 BES 프로그램의 하나로 발전하였다. 동적 부하계산을 위한 비정상 에너지방정식 해석에 전달함수법을 사용하므로 수치해법보다는 계산이 간편하고 신속하다. 프로그램이 TYPE으로 불리는 독립적 구성요소(component)의 연결구조이므로 사용이 편리하고 EnergyPlus와 같은 타 프로그램과의 호환성도 좋다. 구체적인 구성, 기능, 사용방법 등은 문헌<sup>(7,8)</sup>에 소개되어 있으므로 여기서는 본 연구와 직접 관련된 부분만을 간략히 기술한다.

부하계산과 관련된 구성요소 가운데 본 연구에서는 TYPE 56(multi-zone building)을 사용한다. 다구역(multi-zone) 건물에서 구역 사이의 상호작용을 원활하게 해석하기 위하여 개발된 알고리즘으로서, 벽체 안쪽과 바깥쪽의 모든 복사열전달(태양으로부터의 단파장, 다른 벽체와 천공으로부터의 장파장 등)을 포함한다. 건물제원, 계산조건 등 외부자료는 별도의 인터페이스 프로그램인 PreBID와 IISiBat를 통하여 입력할 수 있다.

#### 3.2 부하산정방식

TRNSYS에서 동적 부하계산은 대상공간의 열원기기 성능을 해석에 반영하는 방식에 따라 에너지율제어(energy rate control) 및 온도수준제어(temperature level control)로 구분된다.<sup>(7)</sup>

에너지율제어는 대상공간에 대한 비정상 에너지방정식에서 정해진 시간간격 동안 실온의 변화를 계산하고, 변화된 실온과 일정한 설정온도와의 차이를 부하로 산정하는 방식이다. 즉, 시간간격 동안의 현열 냉방부하는

$$MC_p \frac{dT_r}{dt} = \sum_k \dot{Q}_k \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{sensible} = MC_p (T_{set} - T_r) \quad (5)$$

로부터 계산된다. 여기서 식(4) 우변은 벽체 내표

면과의 열교환, 침입공기, 환기, 내부발열, 인접공간과의 열교환을 망라한다. 이 방식은 공간 자체의 부하특성을 파악하기에 적합하고 반복계산이 불필요하지만, 이상적인 열원기기(다음 시간간격이 시작될 때 이전에 계산된 부하만큼의 열량을 공급/제거)를 가정하기 때문에 실제 거동과는 차이가 있을 수 있다. 전열기를 사용한 난방의 경우 측정값과 에너지율제어에 의한 계산결과는 비교적 양호한 일치치를 보였다.<sup>(6)</sup>

온도수준제어는 같은 에너지방정식에 정해진 시간간격 동안 공간을 유출입하는 열뿐만 아니라 열원기기를 통하여 공급/제거되는 열까지 대입하여 실온의 변화를 계산하고, 그 실온이 설정온도를 중심으로 허용범위 이내에 있으면 열원기기의 열량을 부하로 간주하는 방식이다. 따라서 식(4) 우변에  $-\dot{P}$  항이 추가된다. 만일 계산된 실온이 설정온도 허용범위를 벗어나면 열원기기의 제어 방법에 따라 공급/제거되는 열량을 조정하여 만족할 때까지 반복 계산한다. 당연히 설정온도는 일정한 값을 중심으로 허용범위를 갖는 형태로 부여된다(Table 3 참조). 온도수준제어는 열원기기의 실제 운전상태를 고려하기 때문에 공간과 설비가 결합된 에너지해석을 가능하게 한다.

본 연구에서는 에너지율제어와 온도수준제어 모두를 적용하여 냉방부하계산을 수행하고 결과를 비교·고찰한다. 공기교환이 없는 것으로 취급한 본 연구의 경우 현열 냉방부하만을 계산한다. 만일 공기교환이 있는 경우라면, 대상공간의 수분함량(절대습도)에 대한 성분방정식을 추가로 해석하여 잠열 냉방부하를 별도로 구하여야 한다.

Table 3 Input data for the load calculations

Item	Value	
Set temperature	Model A	25.5±0.5°C
	Model B	25.5°C
Imposed condition	Room under ⑥ Corridor surface ① Warehouse surface ②	Measured temperatures
Heat gain	Lighting	80 W
	Machinery	267 W
Surface conductance	Interior	8.3 W/m <sup>2</sup> K
	Exterior	22.7 W/m <sup>2</sup> K
Time step	Model A	0.01 h
	Model B	1 h

물론 전열 냉방부하는 양자의 합이다.

### 3.3 계산방법

온도수준제어 및 에너지율제어 방식을 적용한 부하계산을 각각 Model A 및 B로 명명하기로 한다. Model A에서 냉방기는 실온과 설정온도에 따라 on/off되고, 냉방능력은 Table 2와 같이 조건에 따라 변화하도록 모사된다. TRNSYS에서 냉방기와 같은 열원기기의 성능자료는 TYPE 42 (conditioning equipment)를 사용하여 편리하게 해석에 반영된다. 이때 TYPE 42의 출력은 TYPE 56으로 입력되어 실내상태를 결정하는 데 참여한다(후술될 Fig. 4 참조).

부하계산을 위해서는 기상자료가 필요하다. 건물 열부하에 영향을 미치는 기상인자는 기온, 습도, 일사량, 풍속 등이다. 시험공간과 기상대 사이 거리가 약 10 km에 불과함을 감안하여, 실험 기간 동안 외기온도와 일사량을 측정은 하였으나 실제 계산에서는 공신력이나 재현성 제고를 위하여 기상대에서 제공하는 자료를 사용하였다. 외기온도 측정은 비교적 용이하지만, 일사계 보정 등의 문제로 일사량의 측정에는 상당한 불확실성이 수반되기 때문이다.

기상자료를 제외한 입력자료를 Table 3에 정리하였다. 실내 설정온도의 허용범위는, 실험의 경우 수직 및 수평 온도분포가 존재하므로 다소 크지만(±1.2°C), 시험공간이 하나의 구역으로서 균일한 실온을 가정하는 계산(Model A)에서는 ±0.5°C로 부여하였다. 이외에도 계산을 위해서는 열전달계수, 방사율, 복사형상계수 등이 입력되어야 한다. 내·외벽 표면의 방사율은 모두 일반적인 벽면조건인 0.6을 취하였다. 천공과의 복사열교환 계산에 필요한 형상계수는 주위에 장애물이 없으므로 수직면의 경우 0.5, 수평면의 경우 1.0을 사용하였다. 외기와 접하는 벽면의 열전달계수는 여름철 평균풍속 3.4 m/s에 대응하는 22.7 W/m<sup>2</sup>K, 실내 벽면의 열전달계수는 8.3 W/m<sup>2</sup>K가 합리적인 값으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup>

실제 계산에 사용된 기상자료와 측정된 온도(Table 3)를 Fig. 3에 정리하였다. 참고로 측정된 일사량도 기상대 자료와 함께 도시하였다. 벽면 ①과 ②의 온도는 주변공간의 열용량과 벽체의 축열효과 등으로 외기온도에 비하여 변화의 폭이 작고 시간적으로 평행이동된 형태를 나타낸다. 아

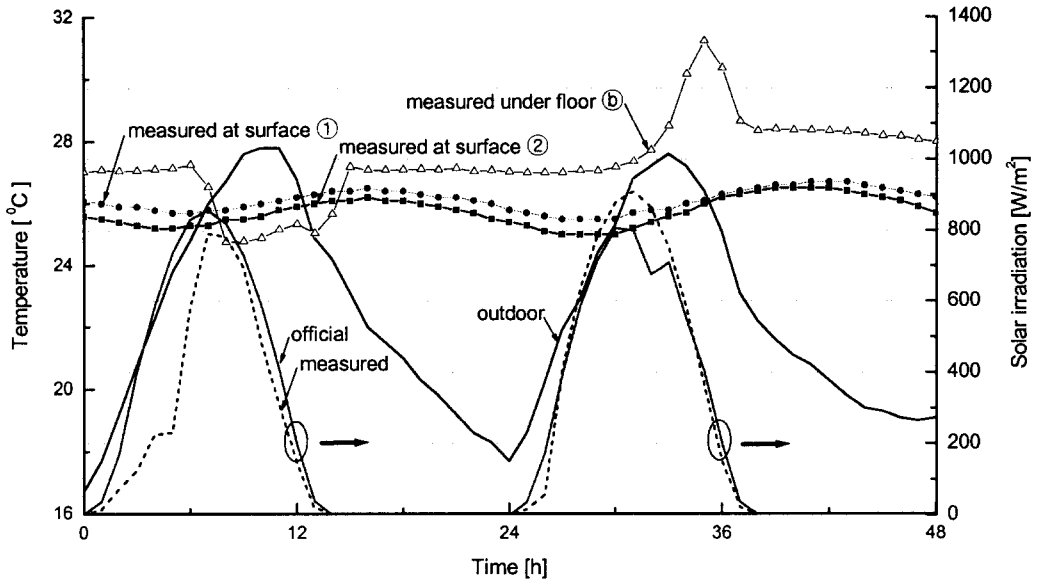


Fig. 3 Weather and measured data for the load calculations.

래층 공간(바닥 ③ 아래)은 제 1 일은 공조상태로, 제 2 일은 비공조 상태로 유지되었음을 알 수 있다. 시험공간과 기상대가 근거리에 위치함에 비해 두 일사량 사이에는 상당한 차이가 있는데 일사계 자체나 측정에 따른 오차로 유추될 뿐 그 원인은 분명하지 않다. 일사량에 관해서는 뒤에서 다시 언급할 것이다. 별도로 도시하지 않았지만, 외기온도 측정값은 기상대 자료와 거의 일치한다.

계산의 첫 단계는 Fig.1과 2, Table 1에 정리

된 건물관련 정보와 Table 3과 Fig.3에 정리된 수치자료를 PreBID에 입력하는 것이다. 이것이 끝나면 IISiBat에서 해석에 참여하는 구성요소들을 유기적으로 연결하고, 필요한 정보를 추가로 입력한다. 전술하였듯이 온도수준제어를 적용하는 경우(Model A) 열원기기 해석용 구성요소인 TYPE 42가 추가된다. 이러한 과정을 거쳐서 입력파일이 생성되면 본격적인 계산을 수행할 수 있다. 이러한 TRNSYS 내의 정보흐름 체계를 Fig. 4에 개략적으로 도시하였다.

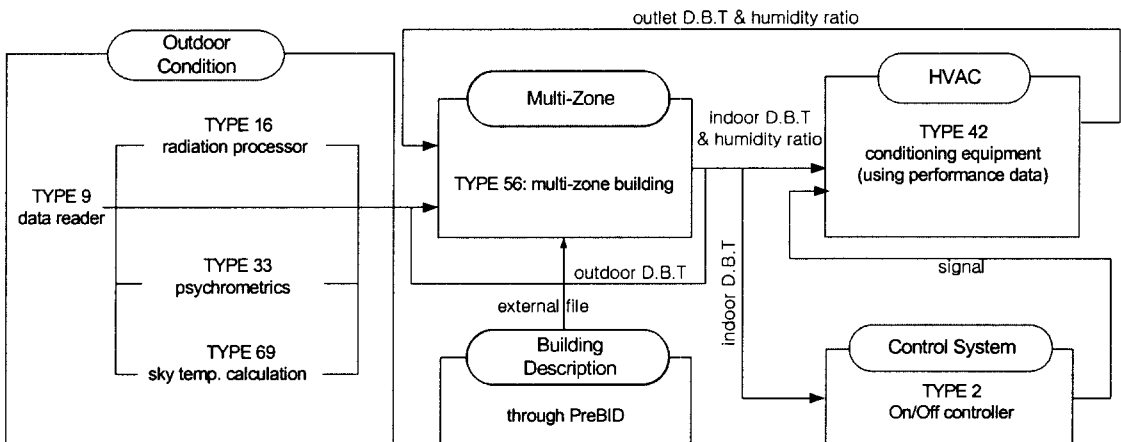


Fig. 4 Information flow diagram in the present calculation.

#### 4. 결과 및 고찰

먼저, 본 실험의 신뢰성에도 연관된 문제로서 2.3절에서 언급한 전열 냉방부하 결정방법에 관하여 고찰하기로 한다. 식(1) 및 (2)에 대응하는 방법을 각각  $\Delta h$ 법 및 COP법이라 부르기로 하고, 양자에 의한 시간별 전열 냉방부하를 Fig. 5에서 비교하였다. 이들은 실험기간 전반에 걸쳐 정성적은 물론 정량적으로도 양호하게 일치한다. 이러한 일치는 냉방기 증발부 입·출구에서 건습구온도가 허용 가능한 오차범위 이내로 측정되었을 뿐만 아니라 별도로 확립된 냉방기의 성능자료도 타당하다는 것을 함축한다. 크지는 않지만 주로 후반부에 나타난 양자의 차이는 냉방기 성능자료가 제한된 수의 운전조건에 국한되었기 때문(Table 2)으로 보인다.

실험자료의 정리나 측정의 용이성 관점에서 두 방법은 각각의 특징을 갖는다. 일반적으로는 상당한 측정기술이 요구되지만, 건습구온도의 정밀한 측정이 가능한 경우 냉방기의 성능자료와 무관하게 전열 냉방부하를 직접 계산할 수 있는  $\Delta h$ 법이 유리하다. 반면 COP법은 온도보다는 전력의 측정이 용이하다는 점에서 냉방기의 운전조건에 따른 성능이 알려진 경우 매우 편리하다. 또한 본 연구와 같이 양자 모두가 가용한 경우 상호비교를 통하여 측정의 신뢰성을 간접적으로 평가할 수 있을 것이다.

전술하였듯이 잠열부하는 공기교환이 없는 경

우 이론적으로는 0이지만 실제로는 존재한다. 이것을 확인하기 위하여 식(3)에 의한 시간별 현열 냉방부하를 Fig. 5에 함께 도시하였다. 전열 냉방부하와 비교하여 정성적인 변화형태는 흡사하지만 정량적인 값은 70~90% 정도이다. 작지 않은 크기의 잠열부하가 지속적으로 발생하는 원인은 시험공간 기밀유지의 불완전, 벽체를 통한 투습 등으로 보이나, 습구온도 측정에 수반되는 수분 증발도 하나의 요인이 될 수 있다. 계산에서는 실내 수분함량의 변화가 없는 것으로 간주되므로 Fig. 5의 실험결과 중에서 계산과의 비교에 적합한 것은 현열 냉방부하이다. 공기교환이 없도록 시험공간의 기밀유지를 위하여 노력하였음에도 상당한 정도의 잠열부하가 발생한 사실은 향후 냉방부하 실험에 있어서 실내 습도변화를 추적함은 물론 습구온도계의 수분증발량이나 냉방기 증발부의 응축수량을 별도로 측정할 필요가 있음을 보여준다.

다음으로, 실험 및 두 가지 계산(Model A와 B)을 통하여 구한 시험공간의 시간별 및 일별 적산 현열 냉방부하를 각각 Fig. 6 및 Table 4에서 비교하였다. 두 계산결과 모두 전반적인 변화형태에 있어서는 실험자료와 흡사한 경향을 보인다. 양자는 정량적으로도 비교적 좋은 일치를 보이지만(Fig. 6), 일별 적산 현열부하에 있어서는 분석이 필요한 문제를 포함하고 있다(Table 4). 실험에서는 제 1일의 부하가 제 2일의 부하보다 작음에 비하여 계산에서는 Model A와 B 모두

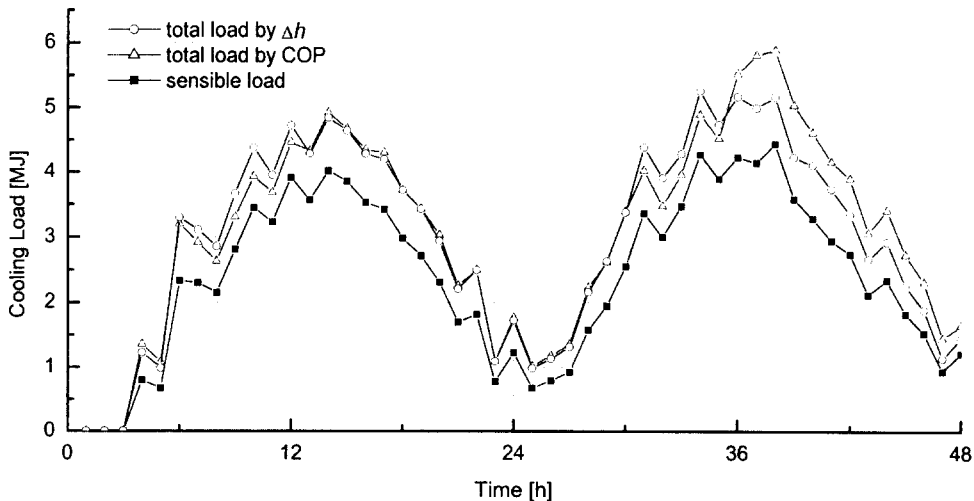


Fig. 5 Time variation of the experimentally obtained, hourly accumulated cooling loads.



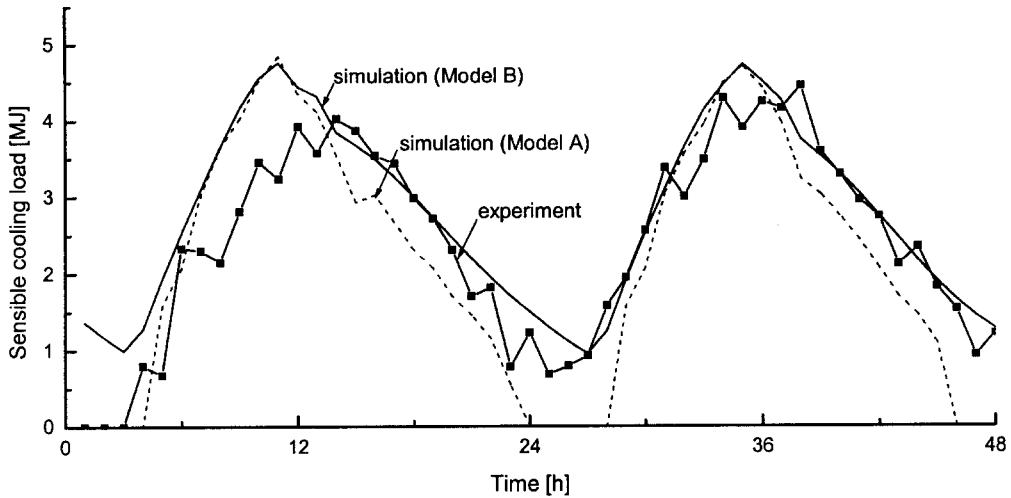


Fig. 6 Comparison of the hourly accumulated sensible cooling load between the experiment and calculations.

Table 4 Comparison of the daily accumulated sensible cooling load between the experiment and calculations (unit: MJ)

Period (h)	Experiment	Simulation (Model A)	Simulation (Model B)
0~24	54.29	52.39	66.46
25~48	62.01	48.99	63.50
Total	117.30 (Reference)	101.38 (-13.6%)	129.96 (+10.8%)

크기가 반전되었다는 점이다. 모델에 무관하게 같은 추이를 보다는 사실은 이 문제가 계산에서의 부하산정방식이 아니라 외부 부여조건에서 비롯되었음을 시사한다. 부하계산에 있어서 부여조건에 따른 민감도해석(sensitivity analysis)은 별개의 연구주제이므로<sup>(10)</sup> 여기서는 계산결과에 영향이 큰 입력자료만을 개략적으로 검토하는 방법으로 원인을 규명하고자 한다. 검토대상은 부하에 가장 직접적인 영향을 미치는 일사량과 외기 온도로서, 전술하였듯이 계산에서는 기상대 자료를 사용하였으나, 실험기간 동안 이들을 참고로 측정하였다. 외기온도는 측정값과 기상대 자료가 거의 일치하므로 논외이다. 일사량의 경우, Fig. 3에 도시되어 있듯이, 기상대 자료는 제 1일이 제 2일보다 약간 크지만, 측정값은 상대적인 크기가 역전되었을 뿐만 아니라 그 차이가 매우 크다. 본 연구에서 일사량의 기상대 자료와 측정값

이 상이한 구체적인 이유를 알 수는 없다. 다만 분명한 것은 부하 실험자료는 측정 일사량과, 부하 계산결과는 기상대 일사량과 각각 변화경향이 일치한다는 점이다. 따라서 일별 적산 현열부하에 있어서 계산결과와 실험자료의 불일치는 실제 일사량과 계산에 사용된 일사량의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 다만 3.3절에서 언급한 이유로 측정된 일사량을 계산에 적용하는 것은 타당하지 않다.

이제 부하산정 방식에 관하여 고찰하기로 하자. 다소 복잡한 온도수준제어를 적용한 Model A에 비하여 보다 간단한 에너지율제어를 적용한 Model B가 시간별 부하의 변화형태에 있어서 실험자료에 보다 근접한다(Fig. 6). 또한 거의 전 실험기간에 걸쳐 일관되게 Model B가 Model A보다 부하를 과대 예측한다. 이 두 사실은 실험기간 동안의 총 현열부하에서도 확인된다(Table 4). 즉, 총 현열부하는 실험자료와 비교할 때 Model A는 13.6% 작고, Model B는 10.8% 크다. 종합적으로, Model B가 Model A에 비하여 실험자료에 정성적뿐만 아니라 정량적으로도 보다 잘 일치한다. 그러나 전술한 일사량과 연관된 문제를 포함하여 실험 및 계산 모두에 수반된 수많은 불확실성을 고려한다면, 위의 차이는 모델을 우열을 논하기에 충분한 정도는 아니며, 오히려 두 모델 모두 실험과 허용 가능한 오차범위 이내로 일치한다고 판단하는 것이 합리적이다. 만일 냉방기

의 성능곡선이 구비되는 등 두 개의 부하산정 방식을 모두 적용할 수 있는 여건이라면, 본 연구의 결과로 미루어 Model A 및 B의 결과를 각각 부하의 하한 및 상한으로 취하고 그 사이에서 공학적 판단을 하는 것이 타당해 보인다.

## 5. 결 론

사용자의 관점에서 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램의 신뢰성을 종합적으로 평가하기 위하여 난방부하의 후속연구로서 소형 시험공간을 대상으로 48시간 동안 냉방부하 실증실험을 실시하고 TRNSYS 15를 이용한 동적 부하계산과 비교·고찰하였다. 시험공간은 난방부하 연구에서와 같으며, 형상과 벽체구조 등이 비교적 잘 정의된 공간이다. 실험의 재현성을 높이고 계산에서의 불확실성을 최소화하기 위하여 시험공간의 공기교환은 배제하였다. 조건에 따른 냉방기의 성능은 공인기관에 시험을 의뢰하여 확보하였다. 부하산정방식이 서로 다른 에너지유체제어와 온도수준제어 각각을 적용하여 냉방부하 계산을 수행하고 실험과 비교함으로써 계산모델에 따른 예측능력의 차이를 확인하고자 하였다.

(1) 실험의 타당성은 서로 다른 측정자료로부터 얻은 2종류의 부하를 비교함으로써 간접적으로 검증하였다. 냉방기 증발부 입·출구의 엔탈피 차이 및 전력사용량과 성능계수에 각각 근거한 전열 냉방부하 사이의 양호한 일치는 건습구 온도 측정 및 냉방기 성능자료에 큰 오차가 없음을 의미한다. 공기교환이 없는 경우 잠열부하는 이론적으로 0이지만 실제 실험에서는 전열부하 대비 10~30%의 크기로 지속적으로 발생하였으며, 시험공간 기밀유지의 불완전 등에 기인한 것으로 보인다. 이러한 잠열부하의 존재는 냉방부하 실험시 실내 습도변화, 습구온도계의 증발량, 냉방기 증발부의 응축수량 등 습도관련 물리량을 동시에 측정할 필요가 있음을 보여준다.

(2) 실험과 계산 사이에 직접적인 비교가 가능한 것은 현열 냉방부하로서 시간별 또는 일별 적산값을 사용하였다. 에너지유체제어 및 온도수준제어 각각에 의한 계산결과는 상호간에 다소의 편차가 있지만, 실험자료와 정성적뿐만 아니라 정량적으로도 허용 가능한 오차범위 이내의 수준으로 일치하였다. 일별 적산값에 있어 두 계산결과

가 공통적으로 실험자료와 경향이 상반되는 것은 일사량의 측정값과 기상대 자료 사이 차이로써 설명될 수 있었다. 실험 및 계산 모두에 내포된 수많은 불확실성 인자를 고려한다면 두 계산모델 모두 실험을 양호하게 추종한다는 결론에 도달할 수 있다. 만일 두 모델을 모두 적용할 수 있는 여건이라면, 본 연구의 결과로 미루어 두 결과를 각각 부하의 하한 및 상한으로 취할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 공기교환이 없는 경우를 대상으로 하였으나, 실제 공간의 공기조화를 고려한다면 향후 연구에서는 환기 등을 고려한 실험 및 계산이 요구된다. 아울러 공기교환이 없는 냉방부하 실험에서 발생한 습도변화의 원인을 정확히 규명할 필요가 있음을 강조한다.

## 참고문헌

1. Ministry of Commerce, Industry and Energy, 2002, Mid- and Long-Term Policy Improvements for Efficient Utilization of Energy in Building Sector, Korea, p. 2.
2. Hong, T., Chou, S. K. and Bong, T. Y., 2000, Building simulation: an overview of developments and information sources, Building and Environment, Vol. 35, pp. 347-361.
3. Hong, H. and Cho, S. H., 2001, Analysis of dynamic thermal energy analysis for building and LCC, Journal of the Korean Association of Air Conditioning, Refrigerating and Sanitary Engineers, pp. 44-54.
4. Judkoff, R. D. and Neymark, J. S., 1999, Adaptation of the BESTEST intermodel comparison method for proposed ASHRAE Standard 140P: Method of test for building energy simulation programs, ASHRAE Transactions, Vol. 105(2), pp. 721-736.
5. Lee, J. H., Choi, Y. D. and Cho, S. H., 1999, A comparison on simulation results of load analysis program, Air Conditioning Seminar of SAREK, pp. 51-64.
6. Hyun, S. K., Hong, H. and Yoo, H., 2002, Verification experiment and calculation of heating load for a test space, Korean Jour-

- nal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, pp. 153-160.
7. Solar Energy Laboratory, 1994, TRNSYS Reference Manual, University of Wisconsin at Madison.
  8. Hong, H., 2001, An introduction of TRNSYS program, Journal of Korean Association of Air Conditioning, Refrigerating and Sanitary Engineers, pp. 54-59.
  9. ASHRAE, 1993, Fundamentals of ASHRAE Handbook, p. 22.1.
  10. Thornton, S. B., Nair, S. S. and Mistry, S. I., 1997, Sensitivity analysis for building thermal loads, ASHRAE Transactions, Vol. 103 (2), pp. 165-174.