

시험공간에 대한 냉방부하 실증실험 및 계산

현 석 균, 홍 희 기*, 유 호 선**

경희대학교 대학원, *경희대학교 기계산업시스템공학부, **숭실대학교 기계공학과

Verification Experiment and Calculation of Cooling Load for a Test Space

Suk Kyun Hyun, Hiki Hong*, Hoseon Yoo**

Graduate School, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

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

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

ABSTRACT: Lots of building energy simulation program are developed continually and used widely in R&D field. This study is an attempt to verify those by measured thermal cooling load. We obtain both sensible and latent cooling load removed from a test space by actual air conditioner. Not only did dynamic load calculation using TRNSYS rely on energy rate control, but temperature level control. Comparison of the hourly accumulative load between the experiment and calculations shows a close agreement within a engineering tolerance. In order to enhance the completeness of this work, a complementary study on other air conditioning equipments is highly recommended.

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

1. 서 론

건물 에너지 시스템의 최적 디자인과 효율적인 에너지 관리를 위하여 다수의 열성능 소프트웨어가 개발되어 그 정도와 해석영역을 확장해오고 있으며, 이들의 장단점을 분석하고 분류하는 형태의 연구도 다수 보고되었다.^(1,2) 관련 프로그램을 통한 연구 및 개발이 일반화되고 있는 실정에서 예측능력의 정도를 파악하는 것은 필수적인 과정이며, 각 개발주체 또한 이런 문제를 인식하고 검증(validation)과 인증(accreditation)을 거쳐 소프트웨어를 선보이고 있다. 그러나 사용자나 용도 등에 따라서 개발주체의 의도와 상이한 결과가 초래될 수 있으며, 이와 관련하여 그 정도

를 파악함과 동시에 문제점을 분석하여 향후 개발방향에 반영될 수 있도록 여러 형태의 검증이 독립적으로 병행되어 왔고 검증작업의 표준화에 까지 도달하였다.⁽³⁾

검증의 방법론적인 문제에 있어 해석적 검증(analytical validation), 경험적 검증(empirical validation), 모델간 비교(intermodel comparison) 등 다각적인 분석이 요구된다. 부하계산의 표준화를 위하여 국내외 부하계산의 프로그램을 동일한 조건에서 서로 다른 계산결과를 그 평균치로부터 비교·검증한 바가 있다.⁽⁴⁾ 이로부터 발생하는 상대적 편차에 대한 한계를 극복하기 위하여 실제건물을 대상으로 온도 및 난방부하를 실측하고, 동일한 기간에 대한 기상데이터를 기상청으로부터 입수하여 상용프로그램을 이용한 동적열 부하계산을 통해 절대적으로 비교하기도 하였다.⁽⁵⁾

전술한 바와 같이 해석 프로그램에 대한 검증

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-8106

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

은 다양한 형태로 진행되어 왔고 그 기준과 결과를 제시하였으나, 온돌모델이나 새로운 설비계통에 대한 모사 등 독자적인 분야에서의 계속적인 검증을 필요로 한다. 난방실험과 달리 냉방실험의 경우 에어컨에서 제거된 현열과 잠열을 정확히 계측하기 어려워, 시뮬레이션의 결과를 평가할 수 있는 기준 데이터가 드문 상황이다. 본 연구에서는 난방 열부하에 대한 검증의 후속으로 냉방 열부하를 실측하고 TRNSYS 15 (TRaNsient SYstem Simulation)를 사용한 계산과 비교하여 동적열부하계산의 정도와 신뢰성을 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험공간

실증실험의 대상이 되는 시험공간은 기하학적 형상과 벽면재료 등 관련자료가 명확히 알려져 있어야 하며, 이런 조건을 만족하는 대상공간 중 선행연구⁽⁵⁾인 난방부하 실증실험과의 연속성을 유지함과 동시에 비교·검토가 용이하도록 동일한 시험공간(경기도 수원시 소재)을 선택하였다. 냉방열원의 선택을 위해 대한설비공학회가 제공하는 표준기상자료를 이용하여 시험공간에 대한 하계 냉방부하를 미리 예측하였으며, 선정된 시험공간의 변형을 최소화할 수 있는 냉방능력이 2000 W(실내조건: 27℃, 50%; 실외조건: 35℃, 40%)로 출시된 일체형 에어컨을 사용하였다.

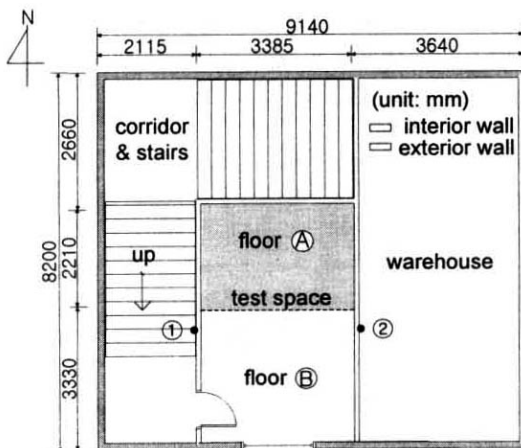


Fig. 1 The plan view of the present test space and its vicinity.

선정된 시험공간과 인접한 공간의 평면도를 Fig. 1에 도시하였으며, 벽체구조 및 재료의 물성치를 각각 Fig. 2와 Table 1에 정리하였다.⁽⁶⁾ 시험공간(5540×3385×3500 mm)은 외기와 직접 접하는 천장과 유리창(1485×1820 mm의 복층유리, 단일창)이 있는 남쪽 벽을 제외하면 복도 혹은 다른 공간과 접하고 있다. 복도, 창고 및 아래층 일부(Fig. 1의 ㉠, 바닥면적의 40%)는 비공조공간이기 때문에 특별히 주의할 사항이 없다. 반면 아래층의 일부(Fig. 1의 ㉡, 바닥면적의 60%)는 공조공간이므로 이론적으로는 시험공간과의 상호작용이 고려되어야 하며, 실측된 실내온도가 계산에 사용될 수 있도록 하였다.

내벽으로 표시된 창고의 동쪽 벽(Fig. 1에서 우측 벽)은 다른 창고와 접하고 있다. 실제 측정결과 냉방이 가동하지 않을 때 두 창고의 온도차는 거의 없었으므로 비냉방시에는 이 벽을 통한 열교환은 없는 것으로 간주될 수 있으므로 계산에서도 동쪽 벽에 단열 경계조건을 줄 수 있다.

2.2 실험방법

실험에 사용한 에어컨의 냉방능력을 산출하기 위하여 칼로리미터에서 외기·실내조건을 변화시켜가면서 관련되는 성능치를 측정하였다. 목표가

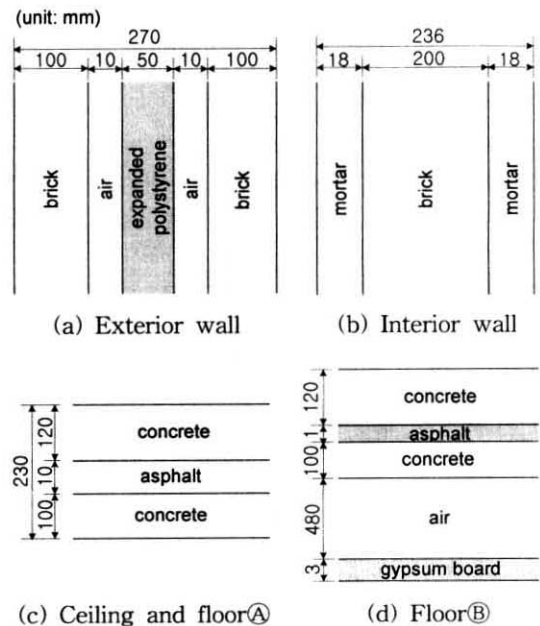


Fig. 2 The wall composition.

Table 1 The properties of wall materials

Material	Thermal conductivity W/mK (kcal/mh °C)	Specific heat kJ/kgK (kcal/kg °C)	Density kg/m ³
Brick	0.64(0.55)	0.84(0.2)	1660
Expanded polystyrene	0.034(0.03)	1.25(0.3)	28
Mortar	1.51(1.30)	0.79(0.19)	2000
Asphalt	0.11(0.095)	0.92(0.22)	1000
Concrete	1.39(1.20)	0.88(0.21)	2200
Gypsum board	0.17(0.15)	0.31(0.27)	910
Air space	Thermal resistance		
	Horizontal (10~500 mm)		0.17 m ² K/W
	Perpendicular (10~20 mm)		0.13 m ² K/W
Double windows	Overall heat transfer coefficient 2.8 W/m ² K		

되는 실험결과는 냉방부하로서, 냉방열원 증발부의 입출구 엔탈피 차이로 전열 냉방부하를 나타내었다. 이를 위하여 에어컨의 입출구에 각각 2개씩 건습구 온도를 측정하였으며, 측정기간 동안 대부분의 구간에서 각각 1°C 이내의 차이를 보였다. 현열 및 잠열 냉방부하는 각각 입출구의 건구온도와 절대습도의 차이를 이용하였으며, 풍량은 성능실험 데이터를 참조하여 그 편차(최대 0.35 m³/min)가 크지 않음을 확인하고 평균치인 5.2 m³/min을 적용하였다. 열부하는 일사량, 외기 온도 등 기상조건뿐만 아니라 인접한 공간과의 열교환에도 관련되므로 계산과의 합리적인 비교를 위해 각 공간 및 벽체의 온도변화를 동시에 측정하였다.

본 실험의 실내 설정온도는 예비실험과 기상예보를 참고하여 1시간에 1~3회의 ON·OFF가 이루어지도록 25.5°C(±1.2°C)로 설정하였다. 실증실험의 성격상 가능하면 재현하기 용이한 조건이 요구되므로, 환기는 하지 않고 사람의 출입도 금지하였다. 같은 맥락에서, 계산에서 불확실성이 큰 침입공기를 차단하기 위하여 창문 및 출입문을 테이프로 밀봉하였다. 반면에 복도 및 계단의 경우에는 실험기간에 걸쳐 완전한 통제가 불가능하여 불확실성을 최소화하기 위하여 측정된 각 공간 및 벽체의 온도(Fig. 1의 ①, ②)를 계산시 경계조건으로 부여하였다.

가능하면 실내의 온도분포가 균일하도록 선풍기를 설치하여 공기를 강제로 순환시켰으나, 냉방열원 가동시 1.2°C, 비가동시 0.5°C 내외의 온도분포가 확인되었다. 에어컨 등의 전력사용량은 1일 단위의 적산전력량과 36초 간격으로 전압을

측정하여 구한 순시값을 모두 기록하였다. 순시값의 적분과 적산값 사이에는 약간의 차이가 있으나 쉽게 보정될 수 있다. 조명(형광등 : 80 W)과 기기(PC 및 선풍기 : 267 W)는 전 실험기간에 걸쳐 가동되며, 발생하는 열은 해석시 실내획득 열량에 포함시켰다.

신뢰성 있는 자료를 확보하기 위하여 2002년 8월초부터 실험을 진행하면서 시험공간 및 인접한 공간의 온도변화를 추적한 결과 냉방열원 증발부의 온도편차가 안정화되고 전술한 두 창고의 온도가 일치하는 3일간(2002년 9월 6일 오전 6시부터 8일 오전 6시까지)의 자료가 해석 프로그램의 검증용으로 가장 적합하다고 판단되었다.

3. 부하계산

3.1 해석 프로그램 및 기상자료

건물의 열에너지를 평가하는 프로그램은 미국과 유럽 등지에서 주축이 되어 개발되고 있으며, 종합적인 평가로 볼 때 DOE와 BLAST의 장점을 결합하여 최근에 출시한 EnergyPlus와, EU에서 자연형 태양열 건물해석 표준프로그램으로 지정한 ESP-r 및 태양열 시스템 설계를 목적으로 출발해 건물 열에너지의 종합적인 해석과 평가가 가능한 수준으로 발전한 TRNSYS 등이 대표적이다. 특히 TRNSYS는 후술하게 될 temperature level control을 적용할 수 있는 몇 안되는 프로그램으로서 본 연구의 해석에 채택하기로 한다. 구체적인 구성, 기능, 해석방식 및 사용방법 등에 관해서는 문헌^(5,8-9)을 참조하기 바

라며, 여기서는 본 연구와 직접 관련된 특징적인 부분만을 간략히 기술하기로 한다.

기본적으로 TRNSYS는 동적부하계산이지만, 해석에 설비 및 제어시스템의 포함 여부에 따라 energy rate control과 temperature level control로 구별된다. 전자는 공간을 유출입하는 열량으로부터 실온의 변화를 계산하고 설정온도와의 차이로부터 부하를 계산하는 해석방법으로서, 공간 자체의 부하특성을 파악하는 데 적합하다. 후자는 실내 온도 변화의 허용범위 이내로 설비가 운전중인 실제 상태를 모사하여, 공간과 설비가 결합된 종합적인 열에너지 해석에 유용하다. 이때 냉난방설비의 성능데이터(예를 들어 외기온도 변화에 따른 에어컨의 냉방능력과 COP의 변화)를 활용할 수 있다면, TYPE 42(conditioning equipment)를 사용하여 해석하기가 용이하며 성능데이터는 독립변수로 최대 3개까지 적용이 가능하다. Type 42로부터의 출력은 Type 56의 입력으로 들어가 실내의 공기상태를 결정하는 변수가 된다. 본 연구에서는 일정한 설정온도에 대한 energy level control을 이용하여 대략적인 경향을 파악하여 참고자료로 활용하고, temperature level control을 적용하여 실제적인 분석을 하기로 한다.

동적부하계산을 위해서는 기상자료가 필요하다. 건물 열부하에 영향을 미치는 기상인자는 기온, 습도, 일사량, 풍속 등이다. 실험기간 동안 외기온도와 일사량을 측정하였으나, 공신력이나 재현성을 감안하여 기상대에서 제공하는 자료에 전적으로 의존하였다. 일사량의 직산분리에 관한 내용 등은 기존의 문헌⁽⁵⁾을 참고하기 바란다.

3.2 계 산

본 연구에서는 전술한 해석방식이 상이한 두 모델에 대하여 동적 열부하계산을 수행하였다. Model A는 실제 에어컨의 성능을 모사하기 위해 temperature level control를 적용하였고, Model B는 이상적인 기기로 가정하는 energy rate control을 적용하였다. 구체적으로 전자는 실온의 조건에 따라 ON 혹은 OFF를 반복하며, 후자는 실온과 설정온도의 차이로부터 공간자체의 열부하 특성을 파악하게 된다.

계산에 사용된 주요 수치자료를 Table 2에 정리하였다. 실험에서의 실내설정온도는 $25.5^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 로 온도폭을 다소 크게 취하였으나, 시험공

Table 2 Input data for calculations

Item	Value	
Set temperature	Model A	$25.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
	Model B	25.5
Temperatures	Room under ⑥	measured data
	Surface of corridor ①	
	Surface of warehouse ②	
Gains	Lighting	80 W
	Machinery	267 W
Surface conductances	Interior surface	$8.3 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Exterior surface	$22.7 \text{ W/m}^2\text{K}$
Time step	Model A	0.01 hr
	Model B	1 hr

간의 천장고(3500 mm)가 다소 높아 상하간의 온도 불균일이 발생하였으며 이에 따른 차이를 반영하여 temperature level control을 통한 계산(Model A)에서는 $25.5^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 하였다. 이외에도 열전달계수, 방사율, 형상계수 등이 필요한데, 이 중 내외벽 표면의 방사율은 일반적인 벽체조건인 0.6으로 설정하였다. 천공과의 복사열교환의 계산을 위해 필요한 형상계수는 주위의 장애물이 없으므로 수직벽 0.5, 수평벽 1.0으로 하였다. 바깥쪽 벽의 열전달계수는 여름철 평균풍속 3.4 m/s 일 때의 값인 $22.7 \text{ W/m}^2\text{K}$, 안쪽면의 열전달계수는 $8.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 사용하였다.⁽¹⁰⁾ Fig. 2에서 벽체사이의 공기층은 자연대류효과를 고려해 주어야 하므로 단위 열저항값을 Table 1과 같이 부여하였다.

계산순서는 먼저 건물관련 정보와 필요한 수치자료를 TRNSYS의 부속 프로그램인 PreBID에 입력하는 것으로 시작된다. 계산에 적용한 건물관련 정보는 Fig. 1과 2, Table 1에 나타내었다. 자료입력이 끝나면 IISiBat에서 구성요소들을 연결하고 필요한 정보를 추가한다. temperature level control를 적용한 Model A의 계산시 열원에 해당하는 구성요소가 추가되어야 하며, 본 연구에서는 에어컨의 성능데이터(실외 건구온도, 실내 건구온도 및 실내습도에 따른 냉방열량)를 활용하여 Type 42(conditioning equipment)에 적용하였다. 이와 같은 작업을 거쳐서 계산에 필요한 입력파일이 생성되고 이를 이용하여 본격적인 계산으로 들어간다.

4. 결과 및 고찰

실험 및 두 가지 계산을 통하여 구한 시험공간의 시간 및 일별 적산 현열 난방부하를 각각 Fig. 3 및 Table 3에서 비교하였다. 실험과 temperature level control을 적용한 Model A의 시간별 적산치의 변동을 보인 Fig. 3에서 부하가 0인 구간은 이 시간 동안 실제 에어컨이 OFF상태를 유지하였음을 나타내며 이상적인 기기를 가정한 Model B에서는 이 시간 동안 설정온도(25.5℃)보다 계산된 실내온도가 다소 높았던 것으로 파악할 수 있다. 실제 36초 간격으로 ON·OFF를 판단하므로 그 주기는 단위공간의 공기온도를 균일하게 취급하는 해석 프로그램의 접근방법과, 36초 간격의 기상데이터, 에어컨의 성능데이터 및 기타 물성치의 정도 등을 감안할 때 정확한 예측은 힘들며, 매 시간별 적산치는 상당한 차이를 보임에도 불구하고 전반적인 경향은 Model A의 예측치와 실험치가 유사하다. 한편 Model A와 Model B에 의한 예측치 사이에는 부하량이 작은 심야에서 일출까지의 구간에서 약간의 차이는 있으나 전 기간을 통하여 정성적으로 잘 일치한다.

3일 동안의 적산 현열 냉방부하(Table 3)에 있어서는 일관되게 예측값이 실험값보다 크지만, 일별 적산값에 있어서는 역전되기도 하였으며, 전 실험기간에 걸친 총 부하의 경우 Model A에 의한 계산값이 실험값에 비하여 3.1% 정도 크다.

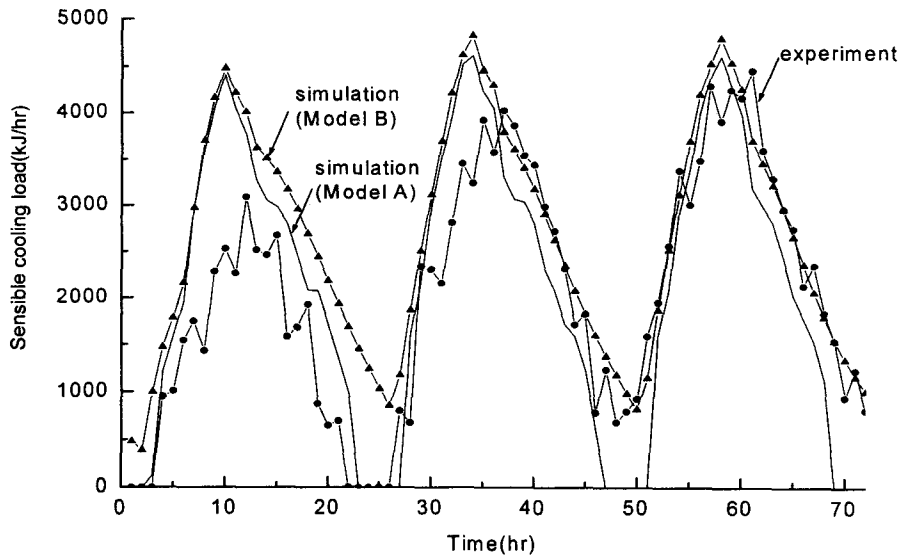


Fig. 3 Comparison of the hourly sensible cooling load between by the experiment and calculations

Table 3 Comparison of the accumulative sensible cooling load between by the experiment and calculations (unit: MJ)

Period (hr)	Experiment	Simulation (Model A)	Simulation (Model B)
0~24	31.84	50.45	61.02
24~48	54.29	52.39	66.46
48~72	62.01	48.99	63.50
Total	148.14	152.73 (+3.1%)	190.98 (+28.9%)

정도가 높은 것으로 판단될 수 있으나 실험기간에 따라 다소 차이가 있으며, 그럼에도 불구하고 허용할 수 있는 범위의 오차수준임을 알 수 있다. 종합적으로 판단할 때 계산결과는 경향을 적절하게 반영한 것으로 판단된다.

시간별 적산 전열 냉방부하를 Fig. 4에서 비교하였다. 잠열 냉방부하에 있어서는 습도에 대한 제어조건이 주어지지 않았으며 실험기간 동안 습구 온도를 측정하는 과정에서의 증발로 인하여 전 실험기간 동안 약 1350 kJ의 가습부하가 발생하는 등 실험 자체의 불완전함이 존재하였고, Model A의 계산시 사용되어진 에어컨의 성능데이터 중 상대습도의 범위인 40~70%를 벗어나면 출력의 불확실성 등으로 비교가 용이하지 않다. 그러나 실험과 계산에서 실험기간에 걸쳐 현열비는 0.7~0.9로 잠열의 비율이 낮았기 때문에 Fig. 4의 전열 냉방부하는 Fig. 3의 전열냉방부하와 유사한 경향을 보인다.

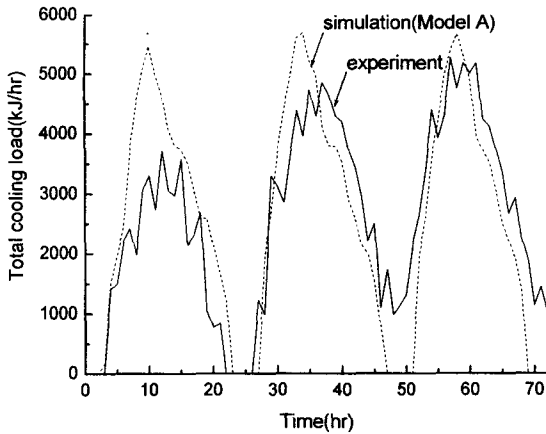


Fig. 4 Comparison of hourly total cooling load between by the experiment and calculation

5. 결 론

사용자의 관점에서 건물 열에너지 해석 프로그램의 신뢰성을 평가하기 위해 적절히 선정된 소형 시험공간에 대하여 냉방 실증실험을 실시하고 TRNSYS 15를 이용한 동적 열부하 계산과 비교하였다. 형상과 벽면재료 등 관련자료가 명확히 정의된 시험공간에 대하여 3일간 냉방부하를 측정하였고 계산은 기본적으로 실제 냉방 기기의 운전특성에 초점을 맞춘 실증실험과 부합되도록 temperature level control에 의존하였다. 여기에 이상적인 기기로 가정한 모델을 채용하여 그 경향을 참고하는 데 활용하였다.

냉방부하 실증실험에 있어 실내공간의 온도 불균일을 해소하고 완전히 밀폐된 공간에 대한 이상적인 잠열부하의 형태를 보이는 결과를 얻기 위해서는 상당한 주의가 요구된다. 특히 벽체 등을 통해 수수되는 현열과는 달리 잠열은 완전히 밀폐된 구조에서 냉방열원을 통해 제습만 이루어질 뿐 가습은 이루어지지 않고 벽체의 완충효과에 의해서 극히 미소량만의 변화가 있기 때문에 일정 시간이 지나면 더 이상 잠열부하가 거의 발생하지 않음이 이상적이라 할 수 있지만, 이런 조건을 충족하기란 쉽지 않으며 실질적으로 별도의 연구과제가 될만한 성격이라 하겠다. 그럼에도 불구하고 양자의 전반적인 거동은 매우 유사하여 해석이 실험을 비교적 잘 추종하는 것으로 보이며 공학적인 허용오차범위 이내에서 일치한

다. 향후 적절한 잠열부하 해석을 위해 환기 등을 도입하는 모델과 더불어 온도에 의한 복사난방 및 태양열 설비 등 독립적인 분야에 대한 실험과 계산도 속행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Hong, T. et al., 2000, Building simulation: an overview of developments and information sources, Building and Environment, Vol. 35, pp. 347-361.
2. Hong, H. and Cho, S. H., 2001, Analysis of dynamic thermal energy analysis for building and LCC, J. Korean Association of Air Conditioning, Refrigerating and Sanitary Engineers, pp. 44-54.
3. 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.
4. Lee, J. H. et al., 1999, A Comparison on simulation results of load analysis program, Air Conditioning Seminar of SAREK, pp. 51-64.
5. Hyun, S. K. et al. 2002, Verification experiment and calculation of cooling load for a test space, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 14, pp. 153-160.
6. Kim, Y. H. and Park, J. W., 1999, The newest air conditioning equipment, Bomundang, pp. 462-463.
7. Lomas, K. J. et al., 1997, Empirical validation of building energy simulation programs, Energy and Buildings, Vol. 26, pp. 253-275.
8. Solar Energy Lab., 1994, TRNSYS reference manual, University of Wisconsin-Madison.
9. Hong, H., 2001, An Introduction of TRNSYS program, J. of Korean Association of Air Conditioning, Refrigerating and Sanitary Engineers, pp. 54-59.
10. ASHRAE, 1993, Fundamentals of ASHRAE Handbook, p. 22.1.