

건물의 열에너지 해석에 대한 실증실험

현 석 균, 유 호 선*, 홍 회 기†

경희대학교 대학원 기계공학과, *숭실대학교 기계공학과, † 경희대학교 기계산업시스템공학부

Verification Experiment for Thermal Energy Analysis of Building

Suk Kyun Hyun, Hoseon Yoo*, Hiki Hong†

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

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

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

ABSTRACT: Lots of programs for calculating the dynamic thermal load of building are developed and used practically. To predict more accurately the energy use of buildings, studies including the comparison of existing computer programs have been performed. In this study, we measured actual temperatures and thermal loads, and compared them with results using TRNSYS in the same condition. The results of simulation is in good accord with those of the experiment by 6%. These data will be important role as basis data of other programs in future.

Key words: Thermal load(열부하), Verification experiment(실증실험), Thermal energy analysis(열에너지 해석), TRNSYS

1. 서 론

국내 전체 소비에너지의 25% 정도가 건물 부분에서 차지하고 있어, 건물에서의 에너지절약은 에너지 해외의존도가 97%를 넘는 국내의 실정에서 대단히 중요하다. 이를 위해서는 효율적인 에너지사용과 관리도 중요하나, 초기설계단계에서 정확한 설비용량 예측과 최적설계가 선행되어야 한다. 설비용량 예측을 위해서는 최대열부하계산을, 설비의 최적설계를 위해서는 동적열부하계산을 통해 에너지소비량, 실내환경(온습도 등)의 쾌적성 등을 파악하게 된다. 여기에 건물의 설비가

지 포함시킬 수 있는 열성능평가 소프트웨어의 경우에는 건설회사나 설계회사뿐 아니라 냉동기, 공조기 제조업체도 자사 제품의 성능평가를 위해 적용할 필요가 있다.

현재 선진국뿐만 아니라 국내에서도 열부하계산 및 건물의 열성능평가를 위한 다수의 소프트웨어가 개발되어 실용화된 상태이다. 프로그램의 구성도 건물에너지의 전반적 해석이 가능한 범용 프로그램부터 건물의 특성 및 에너지원 등에 따른 특성 프로그램에 이르기까지 다양한 형태의 프로그램으로 개발하거나 이미 개발이 완료되었다. 그러나 국내외에서 개발되어 활발하게 활용 중인 건물 부하해석 프로그램들이 어느 정도의 정확도를 가지고 있는지 또는 어떤 문제점을 가지고 있는지 등에 대해 강연회 및 보고서를 통해 각 프로그램들의 계산결과를 상대비교한 적은 있지만, 실제 실험을 통해 얻어진 데이터와 비교된

† Corresponding author
Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-8106
E-mail address: hhong@khu.ac.kr

적은 거의 없는 것이 사실이다⁽¹⁾.

한국에서는 부하계산의 표준화를 위하여 국내 외 부하계산의 프로그램을 동일한 조건에서 비교·검증한 바가 있다^(2,3). 그러나 서로 다른 계산 결과의 평균치로부터 각각의 결과가 얼마나 벗어났는지로 계산의 정확도를 파악하려는 시도는 타당성이 없는 것은 아니나 절대적인 평가로서는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 비교적 단순한 건물을 대상으로 온도 및 열부하를 실측하고, 동일한 기간에 대한 기상데이터를 기상청으로부터 입수하여 상용 프로그램을 이용한 동적열 부하계산을 수행하였다.

이로부터 동적열부하계산에 의한 결과가 실측치와 얼마나 차이 나는지 등을 검토하고 분석함으로써 이러한 계산의 신뢰성 및 유효성을 보이기로 한다. 또한 실측치에 대해서는 유사 프로그램에 대한 표준모델 및 검증자료로 활용할 수 있도록 한다.

2. 실험

2.1 실험조건

실증실험을 위한 대상건물은 건축자재 등이 명백히 정의되어 있어야 하고, 원하는 조건을 자유롭게 만족시킬 수 있는 상황에 있어야 한다. 이와 같은 요건을 거의 충족하는 대상공간(태양열 실험실)을 확보하였으며, 가능하면 이상적인 실험 조건이 될 수 있도록 고려하였다. 예를 들면, 북

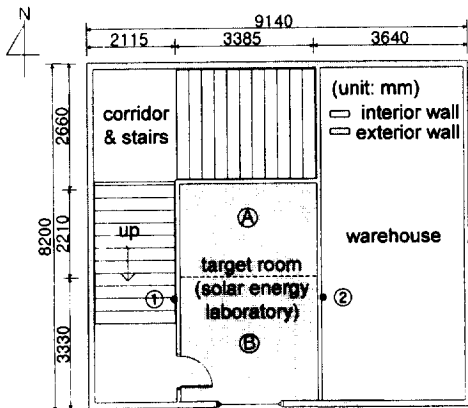


Fig. 1 The plan of target room

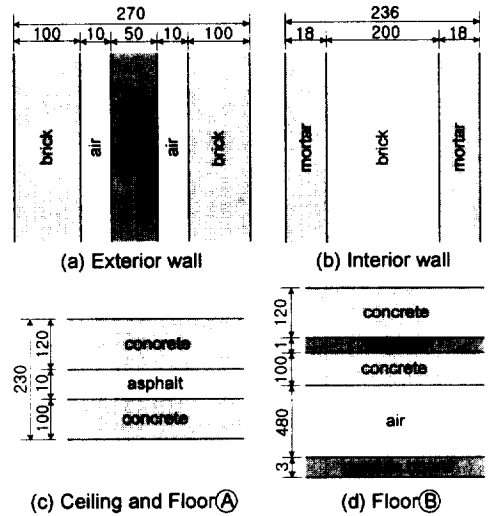


Fig. 2 The wall composition

사식 전기히터에서 발생하는 열의 일부는 바로 실내의 공기를 가열하나, 일부는 벽체 등을 가열하였다가 시간지연을 두고 서서히 실내 공기에 방출되기도 한다. 이러한 경우 완전히 동일한 조건으로 계산 및 시뮬레이션을 수행하기는 대단히 곤란하며 계산 오차의 직접적인 원인이 된다. 따라서 실내설정온도의 유지를 위한 열원으로는 거의 100% 실내공기를 직접 가열할 수 있는 대류식 팬히터를 사용하였다. 대상공간에 대한 평면도를 Fig. 1에, 벽체조건을 Fig. 2 및 Table 1에 나타내었다.

실내높이가 3500 mm인 실험 대상공간은 Fig. 1과 같이 외부와 직접 접하는 천장과 유리창(1485×1820 mm의 단층유리, 단일창)이 있는 벽을 제외하고는 북도 혹은 다른 방에 인접한 상태이다. 북도, 창고 및 아랫층 일부(Fig. 1의 A)의 경우에는 비공중공간이므로 특별히 고려할 사항이 없으나, 아랫층의 일부(정확히는 바닥면적의 60%, Fig. 1의 B)가 타 연구실과 인접하고 있어 실험 기간 동안 일정한 온도의 유지가 용이하지 않았다. 그러나 Fig. 2(d)와 같이 벽체의 단열조건이 우수하여 아랫층공간의 온도변화에 큰 영향을 받지 않으나, 이에 대해서는 결과에서 다시 다루기로 한다.

2.2 실험방법

Table 1 The properties of each wall

material	thermal conductivity W/mK (kcal/mh℃)	specific heat kJ/kgK (kcal/kg℃)	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
air	0.023(0.02)	1.00(0.24)	1.3
gypsum board	0.17(0.15)	0.31(0.27)	910
single windows	overall heat transfer coefficient 5.8 W/m ² K (5.0 kcal/m ² h℃)		

대상공간의 열원이 균일하지 않고 층고가 높기 때문에 위치에 따른 온도분포는 존재할 수밖에 없다. 대상공간의 실내온도분포 및 평균온도를 구하기 위해 내부를 가상의 16구역으로 분할하고, K-Type 열전대를 설치하였다. 예비실험을 통해 다소의 온도분포(1℃ 이내)가 있음을 확인하였으며 서로 다른 온도분포를 보이는 세 지점을 선택하여 가중치를 부여한 후 평균값을 취하였다. 그리고 실내설정온도의 제어를 위해 평균온도에 가장 근접하는 지점의 열전대를 디지털 온도조절기에 연결하여 히터는 온·오프 방식으로 제어할 수 있도록 하였다.

인접한 공간 및 대상공간의 각 벽체에도 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 특히 Fig. 1의 ①, ②지점의 벽체온도는 시뮬레이션 TYPE 2의 입력자료가 되므로 정확한 측정이 될 수 있도록 만전을 기하였다.

실내설정조건은 24시간 연속난방으로 설정온도를 20℃, 환기는 없는 것으로 하여 유동인원을 통제하였다. 건물 열부하 측정에서 예측할 수 없는 오차의 가장 큰 원인은 침입공기에 의한 것이므로, 침입공기의 유입을 막기 위해 창문 및 출입문을 테이프로 밀봉처리하였다.

가열원으로 2대의 팬히터(2 kW, 1.8 kW)를 사

용하였으며, 그 앞에 선풍기를 설치하여 강제순환에 의해 가능하면 실내가 균일한 온도분포를 갖도록 하였다. 한편 조명(형광등: 160 W)과 기기(PC와 선풍기: 320 W)에서 발생하는 열량은 실내획득열량으로 처리하였다.

각 지점의 온도, 일사량 및 히터의 전압과 온·오프 상태를 측정하기 위하여 데이터로거(HP3852A)를 사용하였다. 30초마다 데이터의 측정 및 저장이 가능하도록 그래픽언어인 HP-VEE를 이용하여 프로그래밍하였다.

히터 등의 전력사용량은 1일 단위의 적산전력량과 30초 간격으로 전압을 측정하여 구한 순시값 모두 기록하였다. 순시값을 적산한 값과 적산값을 비교하면 미소한 차이가 있는데, 순시값의 경우 저항과 전압을 측정하여 계산한 것이다. 또한 이를 30초마다 구한 것을 적산하는 과정에서 생기는 오차 등을 감안하면 직접 측정된 적산값을 기준으로 하는 것이 타당하며, 결과에 사용된 전력량의 순시값은 모두 보정한 것이다.

안정된 결과를 확보하기 위해 2000년 12월초부터 실험을 진행하면서 대상공간 및 인접공간의 변화를 모니터링하였다. 그 결과 아랫층(Fig. 1의 ③)의 온도가 거의 일정온도로 균일하고, 창고가 완전히 비공조로 유지되는 4일간(2000년 12월 14일 8시부터 18일 8시까지)의 데이터를 확보하였다.

3. 부하계산

3.1 TRNSYS의 개요

국내에서 개발되었거나 이용되고 있는 대다수의 동적열부하계산법은 응답계수법과 가중계수법을 기본으로 하고 있다. 본 연구에서 평가프로그램으로 사용된 TRNSYS 역시 이와 유사한 형태로 ASHRAE에서 제시한 전달함수(transfer function)법을 근거로 하고 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

TYPE 19와 TYPE 56은 ASHRAE의 전달함수법을 토대로 하여 벽체, 천장, 바닥 등을 모델링한 서브루틴이다. 벽체의 안쪽과 바깥쪽을 대상으로 모든 복사열교환(태양으로부터의 단파장 및 다른 벽체, 천공으로부터의 장파장 등)을 포함한다. 둘 이상의 구역(zone)으로 구성된 건물에서 구역 사이의 상호작용까지 구하는 데 번거로움을

피하기 위하여 개발된 TYPE 56은 역행렬 기법을 이용하여 결합된 형태의 미분방정식을 풀기 때문에 본 계산에는 이를 사용하였다.

동적열부하계산만을 수행할 것인지 실제의 설비 및 제어계통을 포함한 시스템의 동적시뮬레이션을 수행할지에 따라 energy rate control과 temperature level control로 대별할 수 있다⁽⁷⁾. energy rate control의 경우에는 설비 및 제어 특성과 무관하게 건물 자체만에 의해 열부하가 결정되므로 건물의 열성능을 비교하는 데 적합하다. 즉 실내를 원하는 조건으로 유지하기 위해 이상적인 공기조화기가 있어 매 순간 필요한 열량 및 습도를 공급 혹은 제거할 수 있는 제어로서, 실제의 설비열부하와는 차이를 보이게 된다.

3.2 기상데이터

동적열부하계산을 위해서는 입력자료로 기상데이터가 필요하다. 건물의 열부하에 영향을 미치는 요소로는 온도, 습도, 일사량, 풍속 및 풍향이 있다.

기상청에서 제공하는 데이터(Fig. 3)는 일반적으로 1시간 간격으로 측정된 것이 발표되나, 일사량(엄밀히는 수평면 전천일사량)의 경우에는 1시간 동안의 적산값 형태로 제공된다. 실제의 계산에 사용하기 위해서는 임의의 경사면에 대한

순시값 형태의 일사량이 필요하므로 이를 직달일사량과 천공일사량의 순시값 형태로 가공해야 한다(이를 직산분리라고 부름). 대한설비공학회에서 발표된 표준기상데이터의 일사량은 직산분리를 거친 것이다. 그러나 TRNSYS를 비롯한 많은 동적열부하계산 프로그램은 자체적으로 직산분리 기능을 내장하고 있으므로 원래의 적산값을 입력해주는 것이 바람직하다.

3.3 계산

계산에 사용된 값들을 Table 2에 정리하였다. 실험에서 설정한 실내온도는 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이었으나 시간 및 공간에 따른 변동으로 4일간 평균한 값은 20.2°C 이었다. 계산대상인 Fig. 1의 태양열 실험실과 주변 공간과의 열이동이 있으므로, Fig. 1의 평면도 전체를 계산영역으로 취한 TYPE 1과 실험에서 측정된 벽체의 평균온도를 부여하여 태양열실험실만을 계산영역으로 단순화시킨 TYPE 2로 구분하였다.

4. 결과 및 토론

계산은 인접공간을 모두 고려하여 상호 열교환을 포함한 본격적인 시뮬레이션인 TYPE 1과

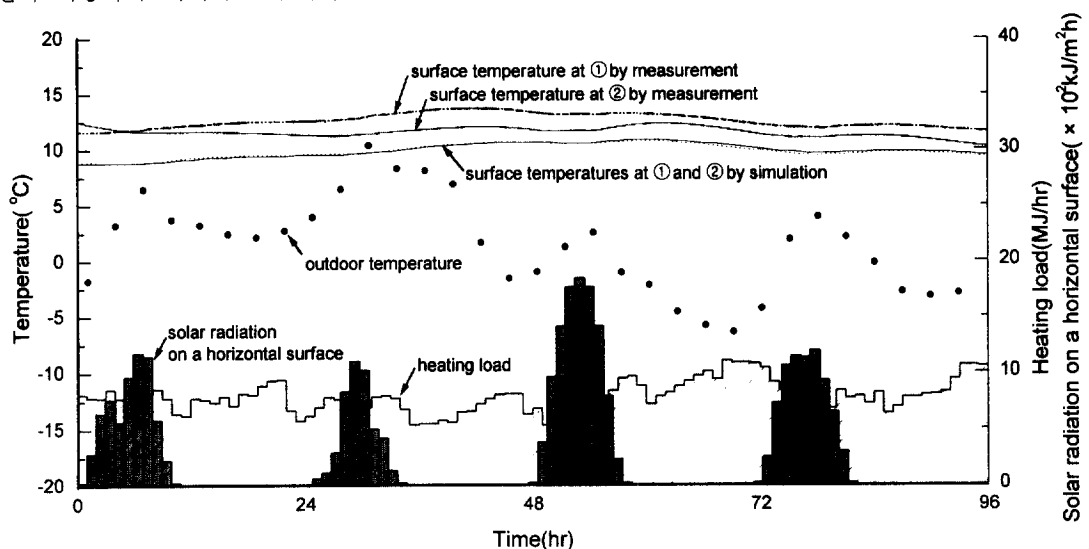


Fig. 3 Meteorological data and related results

Table 2 Values used in simulation

item	value	
temperatures	target room	20.2°C
	room under ㉞	31.4°C
	surface of corridor ①	12.6°C
	surface of warehouse ②	11.5°C
gains	lighting	160 W
	machinery	320 W
heat transfer coefficient	interior surface	30 kJ/hm ² K
	exterior surface	120 kJ/hm ² K

실측한 벽체의 평균온도를 경계조건으로 부여한 참고 시뮬레이션인 TYPE 2로 나누어 수행하였다. Fig. 3에 실측한 결과를 나타내었으며 Table 2와 같이 설정온도, 벽체온도, 내부발열 등을 고려하였고 인접 구역인 창고 및 복도는 비공조 공간으로 설정하여 계산하였다.

기상대로부터 입수한 외기온도(3시간 간격) 및 수평면 전천일사량(1시간 누계값)과 히터로 공급

Table 3 Loads by experiment and simulation

period (hr)	experiment	simulation (TYPE 1)	simulation (TYPE 2)
0~24	183.0	179.4	170.0
24~48	162.7	155.5	153.5
48~72	180.1	155.0	160.9
72~96	194.0	185.1	184.7
total	719.8	675.0	669.2

(unit: MJ)

한 난방부하를 Fig. 3에 보이며, 외기온도 및 일사량이 증가할수록 난방부하가 감소함을 쉽게 알 수 있다.

Fig. 3에는 TYPE 2의 입력으로 사용될 벽체표면온도(Fig. 1의 ①과 ②)의 실측치와 TYPE 1의 계산에서 구해진 벽체표면온도도 같이 비교하였다. 창고가 비공조상태를 유지하면 시뮬레이션(TYPE 1)을 통해 얻어진 복도측과 창고측의 표면온도 ①, ②는 거의 같은 값을 갖는다. 반면에 실측을 통해서 얻은 결과는 계산보다 다소 높은 값(2~3°C 정도)을 보인다.

TYPE 2의 계산에는 실측치의 평균치(Table 2에 정리)가 사용되나, 벽체표면의 온도가 1°C 달라짐에 따라 난방부하값은 약 4% 달라지므로 그

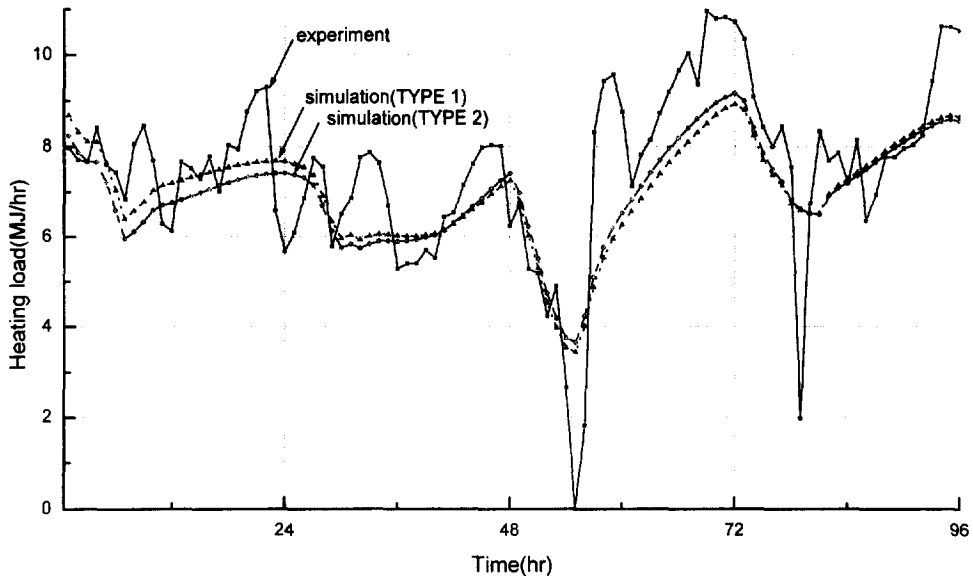


Fig. 4 Comparison of loads by experiment and simulation

영향은 작지 않다고 볼 수 있다. 따라서 전달함수법에 의한 시뮬레이션은 부하의 예측 정확도와는 별도로, 벽체온도까지 정확히 계산하는 데는 한계가 있는 것으로 볼 수 있다.

실험 및 계산을 통해 구한 난방부하를 Fig. 4와 Table 3에 정리하였다. 4일간의 합계로는 실험값이 TYPE 1의 계산값에 비해 6.2% 정도 큰 값을 보이거나 날에 따라서는 역전되기도 하고 그 차이의 변화도 적지 않다. 그러나 전반적인 경향은 매우 잘 일치하고, 특히 계산결과인 TYPE 1과 TYPE 2는 0.8% 차이로 매우 접근한 결과를 보인다. TYPE 1의 계산에서 우려하였던 아랫층 공간의 온도변화에 대한 영향은 1°C 변화에 총부하가 0.5% 변함으로써 무시할 만큼 작았다.

Fig. 4에서 주목되는 결과중의 하나는 실험에 의한 결과의 변동폭이 계산에 비해 훨씬 크다는 점이다. 이는 계산모델로서 이상적인 히터를 전제로 한 energy rate control을 사용했기 때문으로서 계산결과가 비교적 부드러운 변동을 보이는 반면, 실험의 경우 실제의 히터는 온·오프 제어를 통해 난방부하를 공급함으로써 상당히 큰 변동폭을 보이게 된다. 이에 대해서는 동일한 난방기기 및 제어방식을 적용한 temperature level control 방식에 의한 시뮬레이션을 통해 분석할 필요가 있다.

본 연구에서 소개하는 동적열부하계산에 대한 검증실험은 국내에서 처음 시도한 것으로 계산과 실험의 차이 중 상당부분은 계산모델의 적합성은 물론 검증실험시의 이상적인 조건의 유지 등에 기인한다. 이러한 제약에도 불구하고 10% 이내의 일치는 시뮬레이션을 통해 대단히 좋은 부하예측이 가능하다는 것을 보인 결과라 할 수 있다. 이로부터 전달함수법을 비롯한 계산 알고리즘이 거의 동일한 국내의 동적열부하계산 프로그램의 우열을 논하는 것은 그다지 큰 의미가 없다. 즉 동일한 공간을 대상으로 서로 다른 프로그램을 통하여 분석한 결과는 평균치에서 $\pm 10\%$ 정도로 공학적인 범위에서 큰 차이가 있다고 보기는 어렵다고 판단된다⁽³⁾.

5. 결론

부하계산의 표준화를 위하여 국내외 부하계산의 프로그램을 동일한 조건에서 비교·검증한 바

가 있다. 그러나 서로 다른 계산결과와 평균치로부터 각각의 결과가 얼마나 벗어났는지로 계산정도를 파악하려는 시도는 타당성이 없는 것은 아니나 절대적인 평가로서는 적합하지 않다.

본 연구에서는 비교적 단순한 대상공간을 설정하여 온도 및 열부하를 실측하고, 동일한 기간에 대한 기상데이터를 기상청으로부터 입수하여 전달함수법을 기본으로 하는 동적열부하계산을 수행하였다. 그 결과 시뮬레이션에 의한 계산치가 실측치보다 6.2% 정도 작게 나오는 것으로 나타났다. 그러나 실측치에도 이상적인 실험조건을 유지하지 못한 점 등의 오차의 여지는 있는 것으로 판단된다. 이는 동일한 실험공간에서 냉방부하 데이터 등 보다 많은 실험을 통해서 검증할 필요가 있으며, 향후 다른 조건의 실험데이터도 다양하게 확보할 필요가 있다.

많은 제약에도 불구하고 공학적으로 의미있는 범위에서 비교할 수 있는 실험데이터의 확보를 본 연구의 의의로 자리매김할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Judkoff, R. and Neymark, J., 1995, International Energy Agency Building Energy Simulation Test(BESTEST) and Diagnostic Method, NREL.
2. Y. H. KIM et al., 1993, Announcement for standardization of calculation load and meteorological data, Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea.
3. J. H. LEE et al., 1999, A Comparison on Simulation Results of Load Analysis Program, Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea, pp. 51-64.
4. McQuiston, F. C. and Spitler, J. D., 1992, Cooling and heating load calculation manual, 2nd ed., ASHRAE.
5. McQuiston, F. C. and Parker, J. D., 1994, Heating, ventilating and air conditioning, 5th ed., Wiley.
6. J. H. Yoon, 1999, The state of the art in the field of dynamic building energy simulation, Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea, pp. 39-50.
7. Solar Energy Lab., 1994, TRNSYS reference manual, University of Wisconsin-Madison.