

시험공간에 강제환기를 고려한 난방부하의 실증실험 및 시뮬레이션

김 동 혁, 최 봉 수, 유 호 선*, 홍 희 기**†

경희대학교 대학원 기계공학과, *숭실대학교 기계공학과, **경희대학교 기계산업시스템공학부

Verification Experiment and Simulation of Heating Load for a Test Space with Forced Ventilation

Dong-Hyuk Kim, Bong Su Choi, Hoseon Yoo*, Hiki Hong**†

ABSTRACT: Lots of building energy simulation programs have been developed and are used in order to predict building load and capacity of facilities. The present study is to experiment and predict heating load with forced ventilation in a test space. In the test space, convection-type heaters were installed and forced ventilating facility were operated as 2.0 ACH between 8:30 to 21:00. Heating loads by the experiment and simulation show a close agreement within an engineering tolerance.

Key words: Heating Load(난방부하), TRNSYS, Dynamic load calculation(동적열부하계산), Forced Ventilation(강제환기), Verification Experiment(실증실험)

1. 서 론

최근 실내 쾌적성에 대한 관심이 높아지고 주택법, 학교 보건법 등과 같은 환기와 관련된 법규가 강화되면서 실내 환경을 쾌적하게 유지하는데, 환기에 의한 영향이 보다 크게 작용하게 되었다. 이로 인해 공조공간에서 단순히 에너지 비용의 절감만이 아닌 환기와 같은 실내 쾌적성이 중요한 관리 요소로 대두되어, 환기부하의 증가에 따른 보다 효율적인 건물 에너지 관리가 절실하다.

현재 일정한 환기 조건에 대한 건물 에너지 소비 패턴 분석에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 하

지만, 실제 공조공간에서의 환기장치는 실외 기압, 온도 등과 같은 외적 요인으로 인해 환기량이 시시각각 바뀌기 때문에 이에 따른 환기 부하 변화로 건물 에너지 소비에도 적지 않은 영향을 미칠 수 있다.⁽¹⁾

이에 따라 본 연구에서는 선행연구^(2,3)에서 실증 실험 대상이었던 경희대학교 공학관 6층 실험실에 강제환기 장치를 추가로 설치하여 환기가 고려된 난방부하 실증실험을 수행하였다. 또한 동적 열부하 해석용 프로그램인 TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation)를 이용한 시뮬레이션을 통해 강제환기가 고려된 대상공간의 모델링 및 검증 작업을 수행하였다.

2. 실 험

2.1 시험공간

† Corresponding author

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

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

실증실험의 시험공간은 벽체의 재료 및 물성치 등이 명확히 정의되어 있어야 하며, 열원이나 측정기기 등 실험을 위한 조건을 구비하여야 한다. 본 연구에서는 선행 연구^(2,3)에서 충분히 검증된 바 있는 경희대학교 공학관 6층 시험공간을 대상 공간으로 선정하였다.

Fig. 1은 시험공간과 인접공간의 평면도를 도시한 것으로, 시험공간(5540×3385×3500 mm)은 천장과 유리창(1485×1820 mm)의 단층유리, 단일창)을 포함한 남쪽 벽만이 외기와 접하고 있고, 이를 제외한 나머지 부분은 복도와 다른 인접공간에 접해있다. Fig. 2와 Table 1에 벽체의 구조 및 물성치⁽⁴⁾를 표시하였다.

시험공간과 접해있는 복도, 창고 및 ㉠부분(Fig. 1, 바닥면적의 40%)에 인접한 아래층은 비공조공간으로 특별히 주의할 사항이 없는 반면 시험공간의 ㉡부분(Fig. 1, 바닥면적의 60%)과 인접해 있는 아래층은 공조공간으로서 시험공간과의 상호작용이 고려되어야 한다. 이에 따라 시험공간에 대한 보다 정확한 모델링을 위해 아래층의 실내온도를 실측하여 이를 시뮬레이션에 적용하였다.

내벽으로 표시되어 있는 창고의 동쪽 벽은 다른 비공조공간과 인접해 있으나 두 공간의 온도차가 거의 없어 난방을 하지 않을 경우 두 공간 사이의 열교환이 없는 것으로 간주할 수 있어 시뮬레이션에서는 동쪽 벽에 단열 경계조건을 부여하였다.

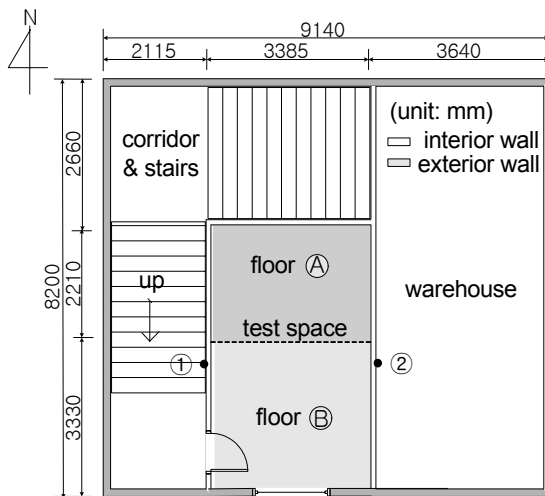


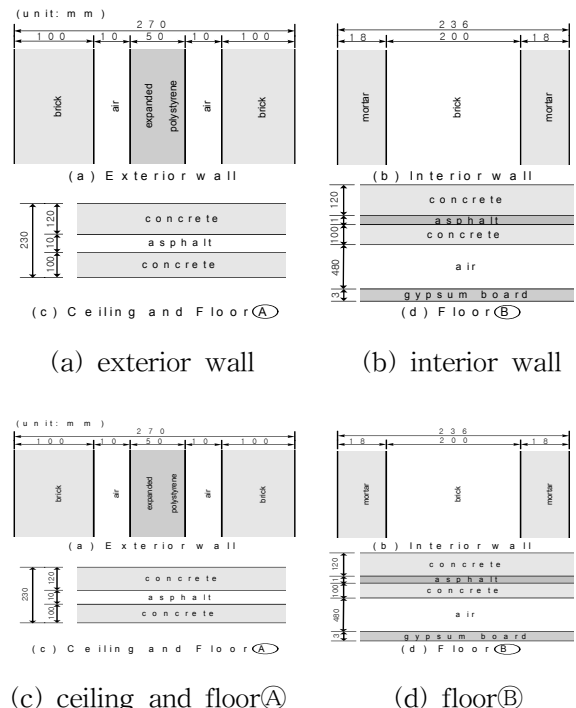
Fig. 1 The plan view of the present test space and its vicinity.

2.2 실험방법

실험은 사무실 용도로 모델링하여 오전 8시 30분부터 오후 9시까지 스케줄을 적용하였다. 설정 온도는 외기온도를 고려하여 $24^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며, 난방열원으로는 열원의 전체가 실내공기를 데우는 데 사용되는 대류식 팬히터 2대(2 kW, 1.8 kW)를 사용하였으며, 난방부하를 고려하여 실제로는 3.15 kW로 가동하였다.

본 연구에서는 인접공간과의 상호작용을 포함시키기 위해 시험공간의 벽체 및 인접공간의 온도를 측정하여 기록하였다. 측정된 데이터는 시험공간의 보다 정확한 모델링 및 시뮬레이션을 위해 Fig. 1의 ①(복도측 외벽온도)과 ②(창고측 벽체온도)에 각각 입력치로 적용하였다.

시험공간은 층고가 높아 온도분포가 불균일해질 수 있으므로 대류식 팬히터 전·후에 선풍기를 설치하여 실내공기를 강제로 순환시켜 최대한 균일한 분포를 이루도록 하였다. 또한 시험공간을 84등분으로 나누어 각 지점의 온도를 측정해 본 결과 최대 1°C 의 차이를 보여 실험에서의 실내온도 측정점이 전체 시험공간의 온도를 대표할 수 있음을 확인하였고, 특히 대표성이 인정되는 위치에 센서를 설치하였다.



(c) ceiling and floor(A) (d) floor(B)

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(0.20)	1,660
expanded polystyrene	0.034(0.03)	1.25(0.30)	28
mortar	1.51(1.30)	0.79(0.19)	2,000
asphalt	0.11(0.10)	0.92(0.22)	1,000
concrete	1.39(1.20)	0.88(0.21)	2,200
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	
single windows	overall heat transfer coefficient 5.8 W/m ² K (5.0 kcal/m ² h°C)		

환기는 최대 풍량이 2.7 m³/min인 송풍기를 이용하여 제 2종 환기방식으로 수행하였다. 공급된 공기가 가능한 시험공간 전체로 퍼질 수 있도록 고려하여 덕트장치를 설치하였다. 송풍기는 난방 열원이 가동되는 오전 8시 30분부터 오후 9시까지 12.5시간 동안 연속적으로 작동하였다. 환기량은 난방실험 이전 및 이후 시간에 덕트 내의 유속 및 비닐주머니를 이용한 체적법을 이용하여 측정하였으며, 측정결과 시간당 평균 2 회 정도 환기가 됨을 확인할 수 있었다.

조명(형광등)과 기기(PC와 선풍기)는 실험이 수행된 전 기간 동안 가동하였으며, 해석시 이를 실내 획득열량으로 포함시켰다.

온도, 습도, 팬히터의 소비전력과 열원의 온·오프 상태는 그래픽언어(HP-VEE)를 사용하여 36초 간격으로 측정·저장할 수 있도록 작성하여 자료획득장치(34970A)에 기록하였다. 팬히터의 소비전력은 신뢰성 확보를 위하여 36초 간격으로 측정한 순시전력과 하루 단위로 측정한 적산전력을 기록하였으며, 두 측정값의 차이는 4% 이내에서 일치함을 확인하였다.

3. 시뮬레이션

3.1 TRNSYS의 개요

해석프로그램으로는 미국 Wisconsin 대학에서 개발된 동적 열부하 해석 프로그램인 TRNSYS를 이용하였다. TRNSYS는 ASHRAE의 전달함

수법⁽⁵⁻⁷⁾에 기초하며, 현재는 건물 열에너지의 종합적인 해석이 가능한 수준으로 발전하여 ver. 16.0에 이르고 있다.

시험공간은 PreBID를 이용하여 다중구역으로 구성된 시험공간(Multi-zone building)의 정보 및 데이터를 입력하고, 구역 사이의 상호작용을 원활하게 해석하기 위해 개발된 Type 56을 이용하여 IISiBat에 적용하게 되며, 이렇게 입력된 값들은 IISiBat에서 정보의 흐름에 따라 계산이 수행된다.

TRNSYS의 부하산출방식은 설비 및 제어시스템의 포함여부에 따라 energy rate control과 temperature level control로 구분된다.(8) 전자는 공간을 유출입하는 열량을 에너지방정식에 대입하여 실내온도의 변화를 계산하고 설정온도와의 차이로부터 부하를 계산하는 해석방법으로 공간 자체의 부하특성을 파악하는 데 적합하다. 후자는 실내온도가 일정범위 내에서 유지되도록 하여 열원기기에서 공급·제거되는 열량을 부하로 산출하는 방법으로 건물과 기기의 특성이 모두 적용된 실제상태에 대한 해석방법이다. 본 연구에서는 대류식 팬히터를 일정 범위 내에서 온·오프 되도록 설정하여 설비와 제어시스템의 영향 및 향후 환기의 일변화량에 의한 해석을 위해 temperature level control을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 기상데이터

Table 2 Values used in simulation

item	value	
temperatures	test space	$24 \pm 1^\circ\text{C}$
	room under ㉞	measurement data
	surface of corridor ㉠	
	surface of warehouse ㉡	
gains	lighting	160 W
	machinery	270 W
heat transfer coefficient	interior surface	$30 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$
	exterior surface	$120 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$

건물의 열부하에 영향을 미치는 기상인자로는 기온, 습도, 일사량, 풍속, 풍향 등이 있다. 실험 기간동안 기온과 습도, 일사량을 측정하였으나 공신력과 재현성을 감안하여 수원 기상청에서 제공하는 기상데이터를 적용하였다. 온도 및 습도 등 실측한 데이터는 기상청의 데이터와 거의 일치하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

기상데이터는 1시간 간격으로 측정하여 제공되고 있으나, 일사량의 경우에는 1시간 동안의 적산값으로 제공된다. 기온, 습도 등의 데이터는 보간을 통하여 계산에 적용되며 일사량의 경우에는 TRNSYS에서 자체적으로 직산분리를 통하여 계산에 사용된다.

3.3 시뮬레이션

본 연구에서는 시험공간에 대한 두 가지의 모

델을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. Model A는 시험공간과 인접한 공간 전체를, Model B는 시험공간만을 고려한 모델로, Model A의 해석시 전술한 바와 같이 동쪽 벽을 통한 열전달은 무시하였다. Model B의 경우에는 Fig. 1의 ㉠과 ㉡ 지점에서 측정된 온도를 경계조건으로 부여하였으며, Fig. 3에 이 온도를 함께 도시하였다. 또한 계산에 적용된 열획득량, 외기 조건 등을 Table 2에 정리하였다. 실험에서와 마찬가지로 설정온도는 $24^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 로 하였으며, ㉠과 ㉡, 바닥 ㉞의 경우에는 시험공간에 대한 모델링의 검증을 위해 실측한 데이터를 적용하였다.

벽 표면의 방사율은 일반적인 벽체조건인 0.6, 형상계수는 수직벽 0.5, 수평벽 1.0으로 하였고, 열전달계수는 내벽과 외벽에 각각 $8.3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $34 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 부여하였다.^(2,3,9) 난방열원의 용량은 실제로 실내공기를 데우는 데 사용되는 난방열원

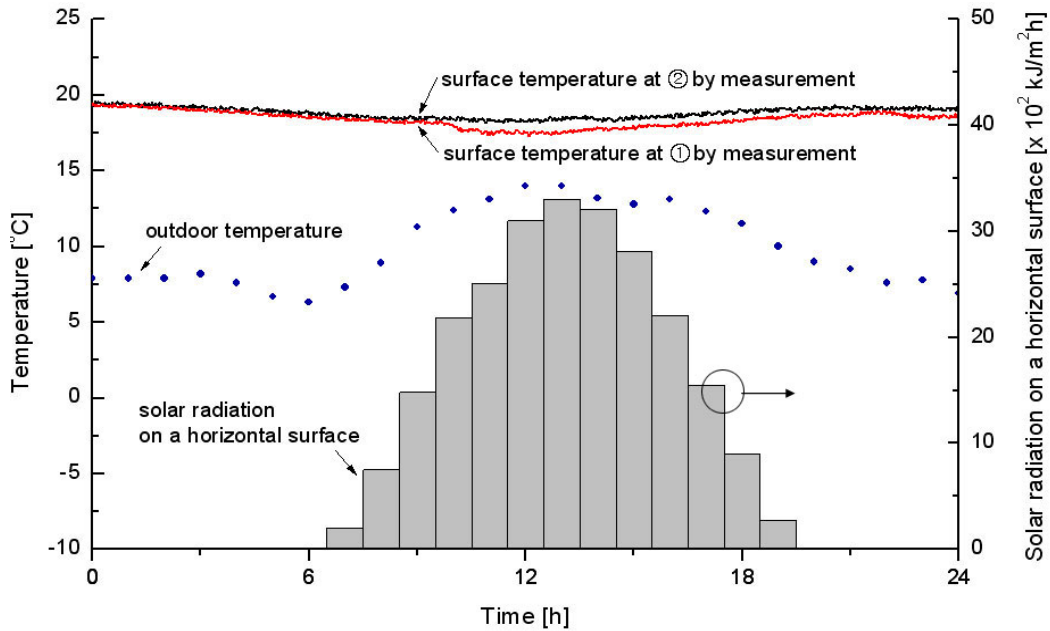


Fig. 3 Weather data and measurement data

의 용량인 8.42 MJ/h(현열 100%)을 적용하였다.

시뮬레이션을 수행하는 과정에서 환기량 측정의 불확실성을 고려하여 Model A와 B에 환기량을 각각 1.8, 2.0, 2.2 ACH를 적용하여 환기 부하에 의한 에너지 변화를 해석하였다. 외부의 풍속 변화가 크지 않은 날에도 시간에 따라 환기량이 $\pm 10\%$ 변화하는 것을 확인하였으며 이를 고려한 것이다. Model A 해석시, 시험공간의 동쪽에 인접한 창고는 환기가 이루어지지 않아 환기횟수를 0으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

Model A와 B에 대하여 환기횟수를 각각 1.8, 2.0, 2.2 ACH를 고려하여 계산을 수행하였다. 계산결과는 Fig. 4와 Table 3에 정리하였다. Model A의 계산 결과 환기횟수와 관계없이 난방시간 내내 가동상태에 있어 10% 내외의 환기횟수 변화는 에너지 소비량에 별다른 영향이 없음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 이는 1.8 ACH의 경우에는 실내 설정온도가 $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 상한치 근방에, 2.2 ACH에서는 하한치 근방에서 유지되며, 히터가 연속적으로 작동하였기 때문에 공급한 열량이 동일하게 나타난 것이다. 또한 Fig. 4 (a)를 통해 실험에서는 오후가 되면서 외기온도가 떨어짐에도 불구하고 난방 에너지 소비량이 감소함을 확인할 수 있다. 건물의 축열효과 등으로 어느 정도 설명은 가능하나 이 부분에 대해서는 향후 환기량 등에 대한 추가 실험을 통해 원인을 분석하고 시뮬레이션을 수행할 계획이다.

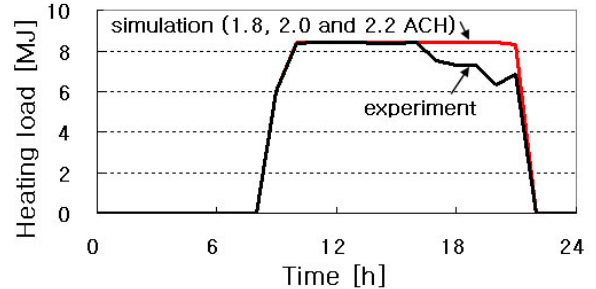
Model B의 경우에는 환기회수 1.8 ACH일 경우를 제외하고는 Model A와 같은 경향을 보였다. Model A와 마찬가지로 이유로 Model B에서도 오후시간대에 난방 에너지 소비량에 차이가 있음을 확인할 수 있다. Model B의 환기회수 1.8 ACH의 경우에는 실험과 5.38%의 차이를 보였으며, 나머지의 경우에는 6.89%의 차이를 보였다. 오후시간대 난방부하의 차이는 실험(실외의 풍속, 침기 등)과 시뮬레이션에 입력하는 물성치 등의 불확실성으로 인한 결과라 판단되며, 향후 추가 연구 및 실험을 통해 원인을 보다 명확하게 구명해야 할 것이다. Model B의 경계조건으로 실험 데이터가 포함되어 실험결과에 접근한 것으로 예상되나, Model A는 인접공간에 대한 불확실성이

Table 3 Supplied heat by experiment and simulation (unit: MJ)

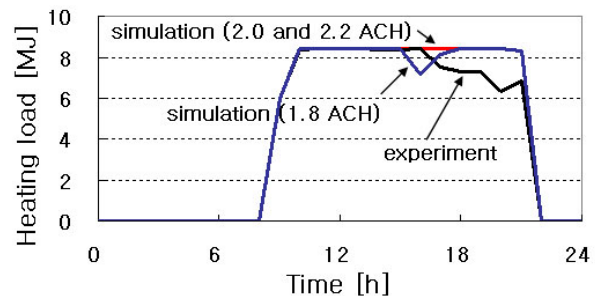
air change (ACH)	experiment	simulation (model A)	simulation (model B)
1.8	-	106.93 (+6.89%)	105.42 (+5.38%)
2.0	100.04	106.93 (+6.89%)	106.93 (+6.89%)
2.2	-	106.93 (+6.89%)	106.93 (+6.89%)

보다 많이 내포되었음에도 불구하고 비교적 좋은 예측이 가능했다.

종합적으로 판단해 볼 때 이러한 불확실성에도 불구하고 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 실험과 시뮬레이션의 온도 경향이 상당히 일치하고 난방 에너지 소비량의 차이도 10% 이내로 나타나 TRNSYS를 이용한 예측이 신뢰성을 가지는 것으로 보이며, 향후 환기에 대한 추가 연구를 통

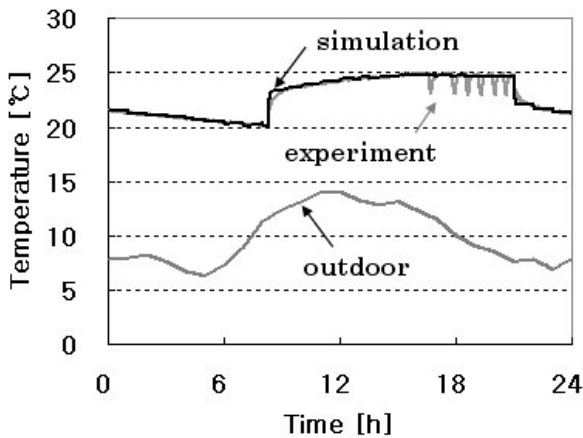


(a) model A

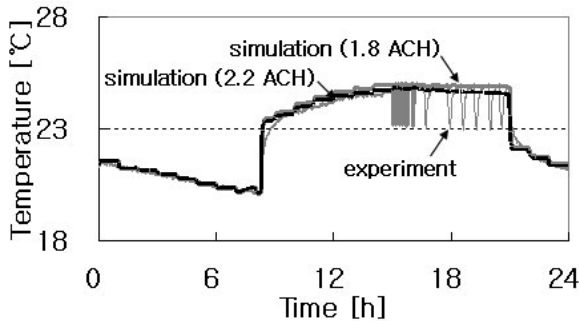


(b) model B

Fig. 4 Comparison of the instantaneous heating load between by the experiment and calculations.



(a) 2.0 ACH (model B)



(b) 1.8 and 2.2 ACH (model B)

Fig. 5 Comparison of the indoor temperature between by the experiment and calculation.

해 강제환기가 고려된 보다 신뢰성있는 난방부하 시뮬레이션이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

강제환기가 난방부하에 미치는 영향을 분석하기 위해 소규모의 시험공간을 대상으로 강제환기를 고려한 실험을 수행한 후, TRNSYS를 이용하여 시험공간 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 인접공간까지 고려한 Model A와 시험공간만을 고려한 Model B에 환기횟수를 변화시켜가며 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 결과, 시간당 2회를 기준으로 10% 정도의 환기량 차이는 실내 난방 에너지 소비량에 큰 영향을 끼치지 않음을 확인할 수 있었다. 하지만, 동일한 용량의 강제환기 장치라 하더라도 외적 요인에 의해 성능이 상당부분 변할 수 있으며(최소 10% 이상)

그에 따라 난방 에너지 소비에도 적잖은 영향을 끼칠 수 있음을 예측할 수 있다.

추후 동일한 시험공간을 대상으로 환기와 같은 에너지 소비에 영향을 끼칠 수 있는 불확실성 요인을 보다 명확하게 규명한 후, 강제환기를 고려한 냉방부하에 대한 실증실험과 시뮬레이션을 통해 환기가 에너지 소비에 미치는 영향을 보다 면밀하게 분석할 계획이다.

참고문헌

1. SAREK, 2001, SAREK Handbook, Vol. 2, pp. 3.5.
2. Hyun, S. K., Yoo, H. and Hong, H., 2001, Verification experiment for thermal energy analysis of building, Proceeding of the SAREK 2001 Summer Annual Conference, pp. 975-980.
3. Hyun, S. K., Hong, H. and Yoo, H., 2002, Verification experiment and calculation of heating load for a test space, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 153-160.
4. Kim, Y. H. and Park, J. W., 1999, The newest air conditioning equipment, Bomundang, pp. 462-463.
5. McQuiston, F. C. and Spitler, J. D., 1992, Cooling and heating load calculation manual, 2nd ed., ASHRAE.
6. McQuiston, F. C. and Parker, J. D., 1994, Heating, ventilating and air conditioning, 5th ed., Wiley.
7. Yoon, J. H., 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.
8. Soral Energy Lab., 1994, TRNSYS reference manual, University of Wisconsin-Madison.
9. ASHRAE, 1993, Fundamentals of ASHRAE Handbook, pp. 22.1.