

시험공간에 강제환기를 고려한 냉방부하의 실증실험 및 시뮬레이션

김 동 혁, 유 호 선*, 홍 희 기**†

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

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

Dong-Hyuk Kim, Hoseon Yoo*, Hiki Hong**†

ABSTRACT: Building energy consumption according to the ventilation has been considered to be an important subject. The purpose of this study is to investigate the cooling loads in a test space with a forced ventilating system. In the test space, on/off controlled air-conditioning and forced ventilating facility were operated between 8:30 to 21:00 during 4 days and some important data like temperatures and energy consumption were measured to obtain actual cooling loads. The simulation was carried out in a mode of temperature level control using a TRNSYS 15.3 with a precisely measured air change amount and performance data of air-conditioner. Cooling loads including sensible and latent were compared between by experiment and by simulation. Both of cooling loads associated with ventilation show a close agreement within an engineering tolerance.

Key words: Cooling Load(냉방부하), TRNSYS, Dynamic Load Calculation(동적열부하계산), Forced Ventilation(강제환기), Verification Experiment(실증실험)

1. 서 론

실내에서 생활하는 시간이 길어지고 생활의 질이 향상됨에 따라 실내 쾌적성에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 환경부에서는 2003년 5월 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”을 공포하였고, 2004년 4월과 2005년 5월에 각각 관련법을 개정함으로써⁽¹⁾ 제도적으로 실내공기질을 향상시키기 위해 노력하고 있다.

그러나 실내 쾌적성만을 고려하는 경우 환기량의 증가에 따른 건물에너지의 손실이라는 결과를 가져올 수 있어 환기부하의 증가에 따른 보다 효율적인 건물에너지 관리가 요구된다. 현재 환기 조건에 대한 건물에너지 소비 패턴에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나 풍속, 기압, 온도 등과 같은 실외 요인으로 인해 변동되는 환기량을 고려한 연구는 아직 미흡하다.

이에 따라 본 연구에서는 선행연구^(2,3)에서 냉방부하 실증실험을 수행한 시험공간에 창문형 에어컨을 이용하여 환기가 고려된 냉방부하 실증실험을 수행하였다. 또한 동적 열부하 해석용 프로그램인 TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation)를 이용한 시뮬레이션을 통해 강제환기가 고려된 시험

† Corresponding author

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

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

공간의 모델링 및 검증 작업을 수행하였다.

2. 실험

2.1 시험공간

실증실험을 수행하기 위한 시험공간은 해석의 용이성을 위해 벽체의 재료 및 물성치 등이 명확히 정의되어 있어야 하며, 열원이나 측정기기 등 실험을 위한 조건을 구비하여야 한다. 본 연구에서는 선행연구에서 충분히 검증된 시험공간을 대상으로 하여 실험을 수행하였다.

시험공간과 인접공간을 Fig. 1에 도시하였다. 시험공간(5,540×3,385×3,500 mm)의 천장과 유리창(1,485×1,820 mm)의 단층유리, 단일창)을 포함한 남쪽벽은 외기와 접하고 있으며, 나머지 벽은 복도와 창고 등 다른 인접공간과 접해있다. Fig. 2와 Table 1에는 각 벽체의 구조와 재료의 물성치⁽⁴⁾를 정리하였다.

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.

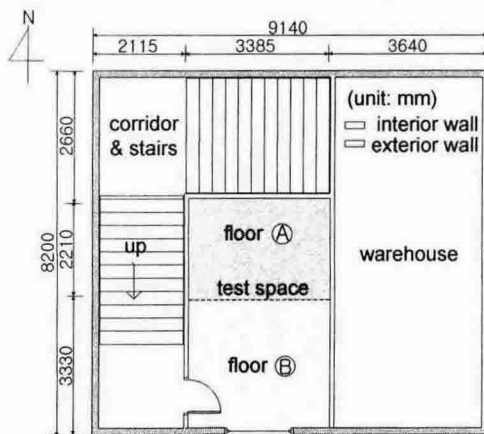


Fig. 1 The plan view of the present test space and its vicinity.

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

2.2 실험방법

실험조건은 사무실의 경우를 모델로 하여 오전 8시 30분부터 오후 9시까지 냉방기가 작동하도록 하였다. 실내온도는 예비실험, 외기온도와 냉방기의 성능데이터를 고려하여 27°C로 설정하였다. 냉방열원으로는 선행연구에서 사용되었고 상세한 성능데이터가 확보된 호칭용량 2000 W의 창문형 에어컨을 이용하였다.

실험을 통해 에어컨에서 제거한 냉방부하를 구하게 되며, 이를 위해 에어컨의 입구와 출구에 열전대와 습도계를 설치하여 건구온도와 상대습도를 측정하였고 순시치 전력량계를 설치하였으며 이로부터 현열 및 잠열부하를 산출하였다.

시험공간은 층고가 높아 온도분포가 불균일해질 수 있으므로 실내 공간에 선풍기를 설치하여 실내공기를 강제로 순환시켜 최대한 균일한 분포

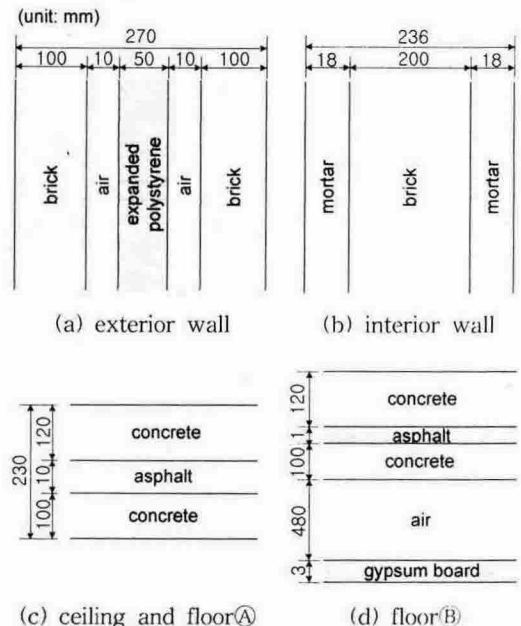
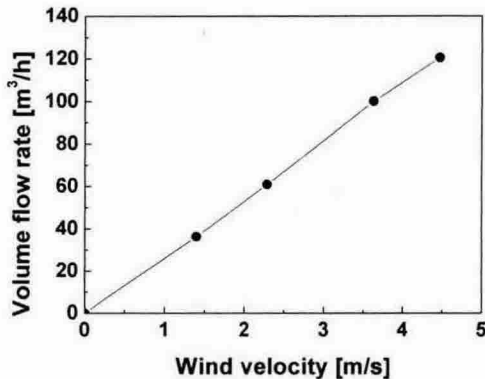


Fig. 2 The wall composition.

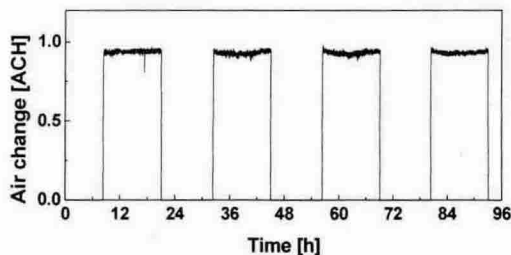
Table 1 The properties of wall materials

material	thermal conductivity W/mK (kcal/mh ⁰ C)	specific heat kJ/kgK (kcal/kg ⁰ 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 ⁰ C)		

를 이루도록 하였다. 또한 시험공간을 84등분으로 나누어 각 지점의 온도를 측정해 본 결과 1°C 이내의 차이를 보여 실험에서의 실내온도 측정점이 전체 시험공간의 온도를 대표할 수 있음을 확인하였고, 특히 대표성이 인정되는 위치에 센서



(a) Relation of between the wind velocity and the volume flow rate.



(b) air change

Fig. 3 Air change for the period of experiment.

를 설치하였다.

열부하는 일사량, 외기온도 등 기상조건뿐만 아니라 인접한 공간과의 열교환에도 관련되므로 계산과의 합리적인 비교를 위해 각 공간 및 벽체의 온도변화를 동시에 측정하였다.

환기는 최대 풍량이 2.7 m³/min인 송풍기를 이용하여 제2종 환기방식으로 수행하였다. 공급된 공기가 가능한 한 시험공간 전체로 퍼질 수 있도록 덕트장치를 설치하여 시험공간의 중앙부에 분사하도록 하였다. 송풍기는 에어컨이 가동되는 오전 8시 30분부터 오후 9시까지 12.5시간 동안 연속적으로 작동하였다. 환기는 0.5 ACH, 0.95 ACH, 1.8 ACH의 3가지의 경우로 실험을 수행하였으나 본 논문에서는 0.95 ACH의 경우만을 대상으로 시뮬레이션과 비교하였다. 또한 비공조시간 동안에는 침기를 고려하여 0.1 ACH로 고려하였다.

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

온도, 습도, 냉방열원의 소비전력과 온·오프 상태는 36초 간격으로 측정·저장할 수 있도록 하여 데이터로거(34970A)에 기록하였다. 냉방열원의 소비전력은 신뢰성 확보를 위하여 36초 간격으로 측정된 순시전력과 하루 단위로 측정된 적산전력을 기록하였으며, 두 측정값의 차이는 5% 이내에서 일치함을 확인하였다.

2.3 환기횟수 측정

Table 2 Values used in simulation

item	value	
temperatures	test space	27 ± 1°C
	room under ②	measurement data
gains	lighting	160 W
	machinery	270 W
heat transfer coefficient	interior surface	30 kJ/hm ² K
	exterior surface	120 kJ/hm ² K

전술한 바와 같이 환기는 송풍기를 이용하여 실내에 강제적으로 급기하는 제2종 환기를 적용하였다. 송풍기를 외부에 설치하고 설치 및 구조 변경이 용이하도록 입·출구측에 플렉시블덕트를 연결하여 실내로 강제송풍을 실시하였다.

실내로 공급되는 공기량은 체적법과 속도법을 이용하여 측정하였다. 체적법은 두께가 0.01 mm, 지름이 450 mm, 길이가 5 m인 원통형 비닐주머니를 이용하여 시간에 따른 체적을 측정하였다. 속도법은 플렉시블덕트 중간에 직관을 설치하고 직관에 터빈식 속도프로브를 설치하여 속도를 측정(testo454)하였다. 두 방법은 적지 않은 차이를 보이므로 보다 신뢰성이 있다고 판단되는 체적법을 기준으로 하였다. 그러나 연속측정에는 속도법이 적합하므로 이를 환산하기 위해 측정된 속도와 체적법에 의한 풍량의 관계를 Fig. 3 (a)에 도시하였다. 풍속은 시험기간 동안 36초 간격으로 측정·기록하였으며(Fig. 3 (b)) 풍량을 산출한 후, 시뮬레이션에서 환기횟수의 입력값으로 사용하였다.

3. 시뮬레이션

3.1 TRNSYS의 개요

시뮬레이션은 미국 Wisconsin 대학에서 개발된 동적 열부하 해석 프로그램인 TRNSYS를 사용하였다. TRNSYS는 ASHRAE의 전달함수법^(5,7)에 기초하고 있으며, 현재 건물 열에너지의 종합적인 해석이 가능한 수준으로 발전하여 ver. 16.0에 이르고 있다.

TRNSYS의 부하산출방식은 설비 및 제어계통의 포함여부에 따라 에너지유체와 온도수준제

어로 구분된다.⁽⁸⁾ 기존의 연구에서 부하산출방식에 대한 자세한 내용이 있으므로 본 논문에서는 언급하지 않았다.

본 연구에서는 창문형 에어컨을 일정 범위 내에서 온·오프 되도록 설정하고 설비와 제어계통의 영향 및 향후 환기의 일반화함에 의한 해석을 위해 온도수준제어를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 기상데이터

건물의 열부하에 영향을 미치는 기상인자로는 기온, 습도, 일사량, 풍속, 풍향 등이 있다. 실험기간 동안 외기온도와 습도, 일사량을 측정하였으며 Fig. 4에 온도와 습도를 기상청데이터와 비교하여 도시하였다. 또한 Fig. 4 (c)는 실험기간 동안의 기상청으로부터 제공받은 일사량을 나타내고 있다. 건구온도와 습도의 경우 양자의 차이는 극히 미세하나 시뮬레이션시 입력데이터로 변환이 용이하면서도 공신력있는 기상청 데이터를 이용하였다.

기상청 데이터는 1시간 간격으로 측정하여 제공되고 있으나, 일사량의 경우에는 1시간 동안의 적산값의 형태이다. 기온, 습도 등의 데이터는 보간을 통하여 계산에 적용되며 일사량의 경우에는 TRNSYS에서 자체적으로 직산분리를 통하여 계산에 사용된다.

3.3 시뮬레이션

본 연구에서는 실제 시험공간과 동일한 조건으로 인접공간까지 모두 포함하여, PreBID에 다중구역으로 구성된 시험공간(Multi-zone building)의 정보 및 데이터를 입력하였고, 구역 사이의 상호작용을 원활하게 해석하기 위해 개발된 Type 56을 이용하여 시뮬레이션하였다. 해석시 전술한 바와 같이 동쪽 벽을 통한 열전달은 무시하였다.

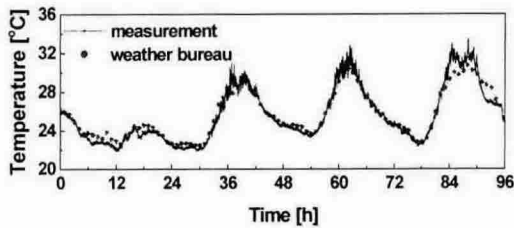
에어컨의 성능데이터는 선행연구⁽³⁾에서 사용한 것과 동일하게 TYPE 42(conditioning equipment)를 통해 해석에 반영된다. TYPE 42에서의 출력값은 TYPE 56(Multi-zone building)의 입력값으로 사용되며 실내상태를 결정하는 데 사용된다.

시뮬레이션에 사용되는 입력값들을 Table 2에

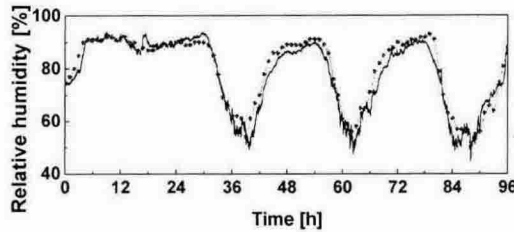
정리하였다. 실제 운전상황을 고려하여 실내 설정온도를 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 적용하였다. 이 외에도 벽 표면의 방사율은 일반적인 벽체조건인 0.6, 형상계수는 수직벽 0.5, 수평벽 1.0으로 하였고, 열전달계수는 내벽과 외벽에 각각 $8.3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $34 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 부여하였다.^(2,3)

4. 결과

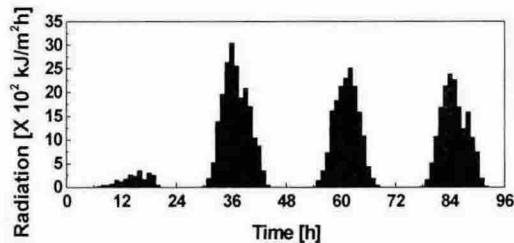
2005년 7월 28일 0시부터 31일 24시까지 수행한 실험과 시뮬레이션 결과를 Fig. 5 및 Table 3에 정리하였다. Fig. 4에 보인 바와 같이 제1일은 일사가 거의 없고 습도가 높은 흐린 날이며, 나머지 사흘간은 일사상태도 좋은 전형적인 여름날씨를 보인다. 다만 제2일은 외기온도가 다소 낮고, 에어컨이 실온에 의해서만 제어되기 때문에 작동되는 시간이 상대적으로 짧고 on·off가 빈



(a) temperature



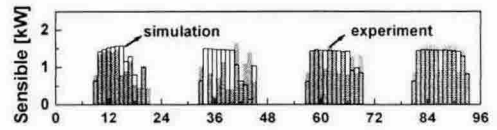
(b) relative humidity



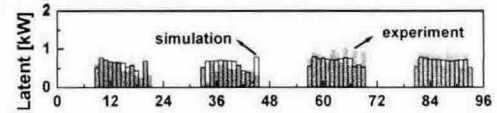
(c) solar radiation on a horizontal surface

Fig. 4 In the experiment period weather data.

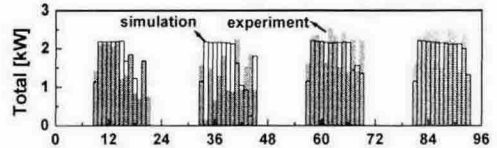
번한 편이어서 실측과 시뮬레이션의 현열부하가 상당히 차이가 난다. 그러나 제1, 3, 4일의 경우에는 정량적, 정성적으로 대단히 좋은 일치율을 보인다. 에어컨의 작동 on·off가 빈번한 경우에는 일반적으로 설비의 특성을 정확히 반영하기 어려워 시뮬레이션이 실제상황을 추종하기 곤란하다. 즉 Fig. 5 (g)에서 36 sec 간격으로 계산을 수행



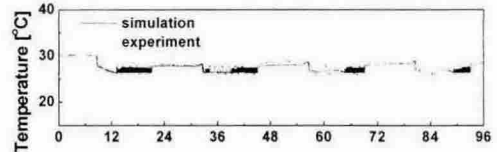
(a) sensible cooling load



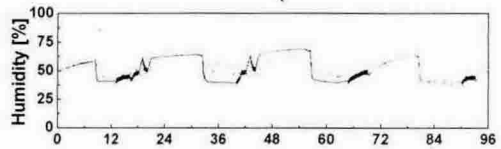
(b) latent cooling load



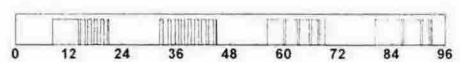
(c) total cooling load



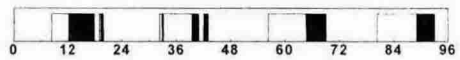
(d) temperature



(e) relative humidity



(f) on·off status of experiment



(g) on·off status of simulation

Fig. 5 Comparison of results between the experiment and simulation.

Table 3 Comparison of the daily accumulated sensible, latent and total cooling load between the experiment and simulation (unit: kW)

Period (h)	sensible cooling load		latent cooling load		total cooling load	
	experiment	simulation	experiment	simulation	experiment	simulation
0-24	13.2	13.4	7.0	7.4	20.2	20.8
25-48	10.0	13.6	6.1	7.8	16.1	21.4
49-72	15.5	15.1	10.5	8.9	26.0	24.0
73-96	17.5	16.3	10.0	9.0	27.6	25.3
total	56.3 (-9.6%)	58.4	33.6 (+4.5%)	33.6	89.9 (-4.3%)	91.6

한 시뮬레이션에서는 실제보다도 매우 빈번하게 on·off 상태가 반복된다.

한편 실측 및 계산된 실내 온도와 습도는 비교적 좋은 일치율을 보인다. 여러 가지 제약에도 불구하고 에어컨의 정확한 성능데이터가 제공된 상태에서 시뮬레이션을 통해 상당히 정확한 성능예측이 가능함을 확인할 수 있었다. 특히 환기에 의한 실내환경개선과 에너지절약의 문제가 상충되고 있는 현실에서, 환기와 냉방기기의 성능을 고려한 정밀 시뮬레이션의 최적의 운전조건 설정을 위해 대단히 중요하다.

보다 정확한 시뮬레이션을 위해서는 환기횟수의 정확한 계측과 냉방기기의 신뢰성 있는 성능데이터가 전제되어야 함을 강조하고자 한다.

5. 결론

냉방부하 실증실험의 후속연구로서 실제 상황과 같도록 환기를 고려한 동일 시험공간을 대상으로 96시간동안 냉방부하 실증실험을 실시하고 TRNSYS 15.3을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

비교적 정확한 환기와 침기횟수의 계측 및 공기관에서 제공된 에어컨의 성능데이터를 이용한 시뮬레이션은 실험결과에 정성적·정량적으로 대단히 좋은 일치율을 보였다. 그러나 외기온도가 낮아 에어컨의 작동이 빈번한 경우에는 다소 차이를 보이며 이에 대한 모델링의 개선 및 보완은 향후 해결해야 할 과제이다.

참고문헌

1. <http://me.go.kr/>
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. Solar Energy Lab., 1994, TRNSYS reference manual, University of Wisconsin-Madison.