

碩士學位論文

건물 냉난방 에너지의
동적 성능 시뮬레이션

**Dynamic Performance Simulation
of Building Energy for Heating and Cooling**

指導教授 洪 熙 基

慶熙大學校 大學院
機械工學科

玄 碩 均

2003年 2月 日

요 약

건물에 적용되는 HVAC 시스템 설계의 용량산정을 위한 최대부하계산이나 연간 에너지 소비량을 산출하는 동적 열부하계산을 목적으로 다수의 건물 에너지 해석 프로그램들이 출시되어, 이를 통한 연구 및 개발이 일반화 되고 있으나 건물과 HVAC 시스템을 통합하는 종합적인 건물의 동적 성능 시뮬레이션은 국내에서 아직 그 사례를 찾아보기 힘들다.

본 연구는 이에 주목하여 건물에 적용된 HVAC 설비의 부하 추종성 예측 및 적합성 여부를 파악할 수 있는 건물의 동적 성능 시뮬레이션의 가능성을 검토하고 그 활용방안을 모색하고자 하였다. 우선 소형 에어컨을 적용하여 시험공간에서의 냉방부하를 실측하고 성능데이터를 확보하여 동적 성능 시뮬레이션을 통해 해석 프로그램인 TRNSYS(TraNsient System Simulation Program)¹⁵을 검증하였다. 이를 바탕으로 동일 공간에 대해 가스 보일러와 팬코일 유닛을 적용한 난방 시스템을 모사하여 그 활용 가능성을 검토하였다. 연구 결과 계산은 공학적 오차범위내에서 실측값에 추종하는 것으로 확인되었다.

신뢰성이 확보된 동적 성능 시뮬레이션을 통해, 용량이 충분함에도 부하를 추종하지 못했던 냉동기 상류배치형 빙축열 시스템의 사례 등 각각의 구성 기기나 그 조합의 적합성 여부와 부하 추종성을 예측하는 데 활용범위가 클 것으로 기대된다. 또한 LCC분석 등 시스템의 경제성 평가에도 보다 합리적인 접근방법을 제시할 수 있을 것이다.

요 약.....	ii
목 차.....	iii
List of Figures.....	v
List of Tables.....	vii
Nomenclature	viii
1. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적.....	1
1.2 건물 에너지 시뮬레이션의 검증	2
2. 건물 에너지 해석 프로그램	4
2.1 해석기법	4
2.1.1 정적 해석법.....	4
2.1.2 동적 해석법.....	5
2.2 주요 해석 프로그램	9
2.2.1 DOE-2.....	9
2.2.2 EnergyPlus.....	9
2.2.3 ESP-r	10
2.2.4 TRNSYS	13
2.3 부하산출방식.....	15
2.3.1 Energy rate control.....	15
2.3.2 Temperature level control	16

3. 난방부하 실증실험 및 계산	18
3.1 실험	18
3.1.1 시험공간	18
3.1.2 난방열원	21
3.1.3 실험방법	25
3.2 부하 계산	29
3.2.1 해석 프로그램 및 기상자료	29
3.2.2 계산	29
3.3 결과	33
4. 난방의 동적 성능 시뮬레이션	37
4.1 난방부하 실증실험의 개요	37
4.2 동적 성능 시뮬레이션	39
4.2.1 해석모델	39
4.2.2 계 산	41
4.3 결 과	43
5. 결 론	46
참고문헌.....	49
Abstract	51

List of Figures

Fig. 1 Structure of EnergyPlus	11
Fig. 2 Total simulation manager.....	11
Fig. 3 Structure of ESP-r	12
Fig. 4 IIsiBat (linked module for simulation)	14
Fig. 5 PreBID (the interface for building description).....	14
Fig. 6 The plan view of the present test space and its vicinity	19
Fig. 7 The wall composition	19
Fig. 8 Total cooling capacity according to outdoor and indoor temperature (indoor relative humidity: 55%)	23
Fig. 9 COP according to outdoor and indoor temperature(indoor relative humidity: 40%)	23
Fig. 10 Mesurment of dry and wet bulb temperature for air conditioner input and output	27
Fig. 11 Circulation using fan	27
Fig. 12 Data aqusiton unit	28
Fig. 13 Information-flow diagram.....	32
Fig. 14 Comparison of the hourly sensible cooling load between by the experiment and calculations.....	35
Fig. 15 Comparison of hourly total cooling load between by the experiment and	

calculation.....	36
Fig. 16 Comparison of the instantaneous heating load between by the experiment and calculations.....	38
Fig. 17 3-D figure of simulation model with hypothetical HVAC system.....	40
Fig. 18 Information-flow diagram.....	42
Fig. 19 Comparison of hourly heating load.....	45

List of Tables

Table 1	The properties of wall materials	20
Table 2	the example result of performance experiment for air conditioner	22
Table 3	Total cooling capacity and COP of air conditioner(independent variable: out door temperature, indoor temperature and relative humidity)	24
Table 4	Input data for calculation.....	31
Table 5	Comparison of the accumulative sensible cooling load between by the experiment and calculations (unit: MJ).....	34
Table 6	Comparison of the accumulative heating load between preceding and pre- sent study	44

Nomenclature

Q	:	Heat transfer
T	:	Temperature
t	:	Time
ρ	:	Density
V	:	Air flow rate
h	:	Enthalpy
ω	:	Absolute humidity
C	:	Heat capacity
M	:	Mass

Subscript

r	:	Room
v	:	Ventilation
inf	:	Infiltration
z	:	Zone
int	:	Internal space
$surf$:	Surface

1.

1.1

전세계적으로 1차 에너지 공급량의 약 1/3이 건물에서 소비되고 있으며, 직간접적으로 건물 에너지 소비는 세계적인 이슈인 지구온난화와 오존층 파괴의 주요 원인이라 할 수 있다. 70년대 석유파동을 거치며 국제 사회는 건물 에너지의 절약과 에너지 효율 개선이라 공동의 과제에 직면하게 되었고 국제 에너지 기구(IEA)와 DOE(Department of Energy, USA) 등을 포함한 관련 기관들은 이를 위한 핵심기술의 하나인 건물 에너지 시뮬레이션의 R&D분야에 투자하였다. 그 산물로 건물 에너지 성능에 대한 동적 해석은 컴퓨터 등 기반산업의 발전과 함께 지난 30여년 동안 혁신적인 발전을 거듭하여 그 정도와 해석영역을 확장해오고 있다[1, 2].

건물에서의 에너지 소비는 공기조화를 위한 에너지와 조명에 의한 에너지 소비가 주류를 이루며 본 연구는 전자에 초점을 두었다. 이에 대한 사용량 파악과 관련설비의 용량산정 및 성능파악에 활용되는 건물 에너지 시뮬레이션은 최대 열부하계산과 동적 열부하계산으로 대별할 수 있으며, 전자는 정해진 외기조건(난방시 혹은, 냉방시 혹은를 가정)에 대해 설비의 규모를 산정하는 용도에 국한되지만, 후자는 기간부하를 산출하는 방식으로 에너지 소비량 파악과 더불어 감도분석 등을 통해 각 인자가 에너지 소비에 미치는 영향 등을 고찰할 수 있다. 이런 결과는 사용자와 관리자에게 에너지 절약 지침으로 활용할 수 있으며, 설계자에게는 에너지 절약과 쾌적한 환경을 위한 조건으로 반영될 수 있다. 더불어 관련 법규의 타당성을 검증하고 합리적인 대안을 제시하여 통합적인 에너지 절약 정책과 사업에 기여하는 기초

가 될 수 있다.

건물의 냉난방 에너지는 건물의 벽체조건, 창호 등 건물자체의 열성능과 적용된 설비의 제원 및 운전방식에 의해 결정된다. 대부분의 건물 에너지 시뮬레이션은 실내온도와 설정온도의 차이를 보상하는 방식(**energy rate control**)에 기초하여 건물 자체의 열성능을 파악하거나, 부하를 고정한 상태에서 설비의 조합에 대해 성능데이터와 **energy balance, mass balance** 등 열역학적 혹은 열전달 법칙이나 상관식에 기초하여 각 구성요소의 운전특성을 고려하고 있다[3]. 이와 같은 방식만으로는 건물에 적용된 **HVAC** 설비의 부하 추종성 예측 및 적합성 여부를 파악하는 데 한계가 따른다. 그러나 이런 문제들을 해결해 줄 것으로 기대되는 부하측과 설비를 포함한 건물의 동적 열성능 시뮬레이션은 국내에서 아직 그 사례를 찾아보기가 힘들다.

본 연구에서는 부하측과 **HVAC**설비를 포함하는 건물의 동적 열성능 시뮬레이션의 적용에 대한 타당성을 검토하고자 한다. 우선 에어컨의 성능데이터를 활용하여 얻은 시뮬레이션 계산 결과를 실증실험을 통해 해석 프로그램(**TRNSYS 15**)를 검증하고, 이를 토대로 가스 보일러와 **FCU(Fan coil unit)**를 적용한 난방 시스템을 모사하여 신뢰성을 검토한 후 그 활용영역을 확장하는 기초를 마련하고자 하였다.

1.2

지난 30여년 동안 건물 에너지의 동적 해석영역의 발전은 컴퓨터의 하드웨어와 소프트웨어의 발전과 궤를 같이하며 많은 해석 프로그램을 선보였으며, 이들의 장단점을 분석하고 분류하는 형태의 연구도 다수 보고되고 있다[4]. 관련 프로그램을

통한 연구 및 개발이 일반화되고 있는 실정에서 예측능력의 정도를 파악하는 것은 필수적인 과정이며, 각 개발 주체 또한 이런 문제를 인식하고 검증(validation)과 인증(creditation)을 거쳐 소프트웨어를 선보이고 있다. 그러나 사용자나 용도 등에 따라서 개발 주체의 의도와 상이한 결과가 초래될 수 있으며, 이와 관련하여 그 정도를 파악함과 동시에 문제점을 분석하여 향후 개발방향에 반영될 수 있도록 여러 형태의 검증이 독립적으로 병행되어 왔고 검증작업의 표준화에까지 도달하였다[5].

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 여러 프로그램을 동일한 조건에서 계산하여 그 평균치로부터 비교·검증한 연구가 있었다[6]. 이로부터 발생하는 상대적 편차에 대한 한계를 극복하기 위하여 실제건물을 대상으로 온도 및 난방부하를 실측하고, 동일한 기간에 대한 기상데이터를 기상청으로부터 입수하여 상용프로그램을 이용한 동적열부하계산을 통해 절대적으로 비교하기도 하였다[7].

전술한 바와 같이 해석 프로그램에 대한 검증은 다양한 형태로 진행되어 왔고 그 기준과 결과를 제시하였으나, 온돌모델이나 새로운 설비계통에 대한 모사 등 독자적인 분야에서의 지속적인 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 실 공간에 대하여 소형 에어컨을 적용하여 냉방 열부하를 실측하고 TRNSYS 15 (TRaNsient SYstem Simulation)를 사용한 계산과 비교하여, 건물 에너지의 동적 열성능 시뮬레이션의 정도와 신뢰성을 확인하고 평가하고자 한다.

2.

건물의 열부하 계산방법으로는 난방부하와 냉방부하의 각각에 대하여 연간을 통해 기후에 따라 끊임없이 변화하는 일정 기간동안의 부하를 계산하는 기간부하계산법과 특정시간대의 최대부하를 계산하는 최대부하계산법이 있다. 먼저 기간부하는 합리적인 공조설비의 계획과 연간 운전비를 산출하기 위해 각 지역별 난방도일 또는 표준기상자료를 사용하여 계절 또는 1년 동안에 발생하는 총 부하를 의미한다. 최대부하는 공조설비의 용량을 결정하기 위해 연중 가장 추운 날 또는 더운 날로 가정된 외기온도를 이용하여 계산한다. 여기서는 건물 에너지의 산정을 위한 다양한 해석기법을 분류하고 대표적인 해석 프로그램을 소개한다.

2.1

2.1.1

정적 해석법에서는 실내외 조건을 정상상태로 가정하여 건물에서의 열이동을 계산하게 된다. 많은 방법이 있으나 기본적인 몇 가지 방식에 대해서만 간략하게 소개한다.

(1) 냉난방도일법(Degree-day method)

에너지 소비량이 추정기간 중의 도일에 비례한다는 것을 나타내는 장기간의 평균치 개념으로 경험적인 방법에 기초하고 있어 신뢰성을 확보하기 힘들다

(2) 전부하상당시간법(Equivalent full load hours method)

최대부하시 용량에 의해 연간부하를 처리할 수 있는 운전시간 및 에너지소비량을

계산하는 방법으로 시스템의 종류와 운전조건을 고려하기에는 한계가 있다.

(3) 수정빈법(modified BIN method)

종래의 빈법에 평균부하 또는 다변부하(**diversified load**)의 개념을 도입한다. 태양 열취득과 내부 발생열을 기상조건과 발생 정도에 맞도록 가중계산된 평균값을 적용하여 계산하는 방식이다. 또한 냉방부하 계수(**cooling load factor**)를 사용하여 구조체의 축열성능도 동시에 고려하고 있으며, 정적 해석법 중에서 비교적 정밀한 연간 냉난방부하를 산정하는 방법이다.

2.1.2

건물의 열부하를 계산할 때 시시각각 변화하는 외기조건을 정상상태로 가정하는 것만으로는 실내에서 발생하는 열부하를 정확히 파악하기 어렵다. 즉, 실제로 건물의 실내외 조건은 수시로 변화하는 비정상상태(**unsteady state**)이기 때문에 정확한 열부하를 계산하기 위해서는 각각의 변화요소들을 시간의 함수로 처리하는 동적 계산이 필요하게 된다.

벽체를 통해서 유출입되는 열량은 결국 에너지 방정식

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

에 수시로 변화하는 실내외 경계조건을 반영함으로써 정확하게 산출할 수 있게 된다. 이 방정식의 해법에는 라플라스 변환을 통한 해석적인 방법과 차분 등의 수치적인 방법이 있으나 계산량이 방대하므로 어느 쪽도 컴퓨터를 이용하게 된다.

(1) 해석적인 방법

해석적 방식에서 건물의 과도 열전달을 모델링하는 기본적 도구는 전달행렬방식

(**transmission matrix method**)이다. 시간과 공간에 대해 2차 편미분방정식 형태로 표현되는 열전도 기본방정식을 라플라스 변환(**laplace transformation**)을 이용하여 가상공간(**imaginary space**)으로 변환하면 실공간(**real space**)에서의 미분방정식이 순수히 대수적 형태로만 처리할 수 있게 된다. 라플라스 공간으로 변환된 기본방정식에 대해 해석적 해를 도출하고 이를 행렬식 형태로 표현하면 출력과 입력 및 전달행렬로 정리된다. 이 때, 전달행렬내의 각 원소(**element: A(s) -D(s)**)를 전달함수(**transfer function**)라 하며 벽체재료의 두께와 물리적 특성에 의해 결정된다. 경계조건에 따라 행렬식 각 요소의 재배치가 가능한데 예를 들어 표면의 열류를 표면온도의 자극에 대한 반응으로 표현하면 시간계(**time-domain**) 응답함수 형태로 표현된다. 다층(**multi-layer**)구조벽의 전달행렬은 벽체 각층의 행렬을 곱함으로써 얻을 수 있으며 전체벽체의 열적해석은 단일층의 경우와 동일하게 처리될 수 있다. 가상공간에서 도출된 해는 실공간으로의 역변환(**inverse transform**)을 통해 실질적인 시스템의 응답을 얻을 수 있으며 이 역변환의 방식에 따라 주기계(**frequency-domain**)와 시간계(**time-domain**) 방식으로 구분된다.

Stephenson and Mitalas는 온도를 중첩된 삼각펄스로 변환하고 다층 벽체는 집중 열용량 방식이 아닌 정확한 해석식으로 모델링하는 열응답계수(**thermal response factor; TRFs**)를 개발하였고 다시 이를 개선한 **Z**전달함수(**Z-transfer function**)방식을 제시하였다. 전달함수방식의 기본개념은, 현재의 출력은 현재의 입력과 과거시간의 입출력 값들로부터 결정될 수 있다는 것이다. **Z**전달함수는 열응답계수(**TRFs**)와 같이 벽체의 열적 성능을 특성화시킨 것이지만 응답계수방식보다 작은 수의 계수가 요구되기 때문에 효율성을 높인 방식이라 할 수 있다. 전달함수는 일반적으로 열전달 방식 중 전도현상이 주된 성분인 벽체나 지붕을 모델링하는 데

이용되며, 이 방식의 가장 중요한 특성은 입력과 출력이 시간축 내에 균일하게 분배된 일련값 형태를 가진다는 것이다. 따라서 외기온, 일사량과 같은 기후데이터를 복잡한 변환과정없이 입력값으로 사용할 수 있다. **ASHRAE**에서는 건물외피성분을 통한 과도열전도를 계산하는 기준방식으로 전달함수법을 채택하였으며 복합된 실내외 열전달계수와 구성재료의 여러 유형에 따라 전달함수의 계수값을 제시하고 있다. 그러나 이 계수의 응용은 상당외기온과 외표면 열전달계수의 계산조건에 따라 일부 제약을 받으며 전달함수의 기본가정은 다층 벽체를 구성하는 각 층의 재료가 순수한 물질(**homogenous**)로 구성되며 공간상에 **x**축 열류만을 가정하는 1차원 열전달만을 고려하고 있다.

현재 국내에서 이용되고 있는 대다수의 동적(**dynamic**)해석방식이 이 부류에 포함된다. 응답계수법(**response factor**)과 가중계수법(**weighting Factor**)을 적용한 미국의 **DOE-2** 및 일본의 **HASP**, **AHSRAE**의 전달함수(**transfer function**)법에 의한 **TRNSYS** 등이 예이며 최근 국내에서 개발된 동적 시간별 해석 프로그램의 대다수가 여기에 해당한다.

(2) 수치적인 방법

수치적인 방법의 발전은 컴퓨터 산업의 급속한 성장과 관계된다. 유한차분법과 같은 수치해석에 근간을 두고 있으며, 선형 및 비선형 모델을 모두 포함하여 시스템 구성에 유연성이 큰 장점을 가진 반면 요구되는 계산량이 방대하여 비용과 연산 시간면에서 비효율적인 것으로 간주되어 왔다. 그러나 최근의 컴퓨터 환경을 고려할 때 이러한 문제는 더 이상 제약사항이 될 수 없으며 오히려 그 활용범위가 더욱 더 확대되고 있다. 수치해법의 기본개념은 미분방정식을 대수방정식으로 변환시키는 이산화방정식 또는 차분방정식을 수립함으로써 컴퓨터를 이용하여 계산하는 것

을 가능하게 하는 것으로, 실험 측정값과 유사하게 한정된 개수의 위치(**nodes**)에서 해를 구하게 된다.

수치해법의 종류는 이산화 방법에 따라 일반적으로 유한차분법(**FDM: finite difference method**), 유한요소법(**FEM: finite element method**) 및 유한체적법(**FVM: finite volume method**)으로 구분하고 있다.

임의의 물리적 시스템을 표현하기 위해 차분화된 검사체적에 직접 에너지밸런스(**heat-balance**)를 적용하는 기법이 유한체적법(**FVM**)이다. 외형상으로는 **FDM**과 유사하나 실질적인 알고리즘의 내용은 **FEM**의 아이디어와 유사하며, **FVM**에 의한 결과는 검사체적이 작은 경우라도 항상 에너지 보존 법칙을 만족시킨다.

HVAC이 시뮬레이션을 위해 일부의 구성기기에선 지배방정식이 미분방정식의 형태로 구성되며, 매 시간간격마다 풀어야 하고, 특히 반복적인 계산이 필요한 경우 수치적인 방법과 조화를 이루게 된다.

ESP-r, **BLAST**, **EnergyPlus**가 여기에 포함되며, 해석적인 방법의 장점이 사라지고 있는 상황에서 향후 완전히 대체하게 될 가능성도 충분히 있다.

2.2

2.2.1 DOE-2

DOE-2 프로그램은 미국 **Lawrence Berkeley Laboratory**에서 지속적인 검증과정을 통해 개발되었고 현재 전세계적으로 건물의 에너지 성능 평가를 위해 광범위하게 사용되고 있다. 또한 이 프로그램은 건물의 모든 부분 즉 건물 외피, 조명, 기계 설비 시스템 등을 포함하여 에너지 성능을 평가할 수 있는 도구이다. 시간별로 기록된 표준기상 데이터(**TMY, TRY, CTZ, WYEC** 등)를 이용하여 건물의 시간별 열성능을 계산하게 된다. 이 프로그램의 데이터 입력시 국제 표준 단위(**SI units**)를 사용할 수 있고, 이 프로그램은 일반에 자유로이 공개되는 프로그램으로 계산에 사용된 알고리즘을 확인할 수 있는 장점이 있다. 이것은 사용자 스스로 알고리즘을 만들고 기존의 것을 대체하거나 삽입하여 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 이 프로그램의 또 다른 장점은 반복적인 작업을 줄일 수 있는 매크로와 파라미터를 이용하는 기능이다. 또한 다양한 형태의 결과 보고서를 도출할 수 있는 기능이 있어 결과 분석 목적에 따라 여러 가지 형태의 보고서를 출력할 수 있다.

DOE-PLUS, VisualDOE, EZ-DOE 등 다양한 버전이 있지만 해석 알고리즘은 동일하고 데이터 입출력에 해당하는 인터페이스만 다르다. 단점으로 **TRNSYS**나 **EnergyPlus**와 달리 **time-step**을 사용자가 임의로 조정할 수 없고 차세대 프로그램으로 추진된 **EnergyPlus**가 출시됨에 따라 사실상 개발이 종료된 상태이다.

2.2.2 EnergyPlus

차세대 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램으로 개발부터 주목을 받아오던

EnergyPlus가 베타테스트를 완료하고 2001년 4월에 ver. 1로 공식 발표되었다. 개발초기부터 DOE-2와 BLAST의 장점만을 취한다고 하여 화제가 되었던 프로그램이다. BLAST(Building Loads Analysis and System Thermodynamics)는 미국의 국방성의 지원을 받아 일리노이 대학에서 개발해왔던 것으로서 건물 부하계산에 지금까지 보편적으로 사용해왔던 전달함수법이 아니고 수치해석방식을 적용한 에너지 밸런스 알고리즘을 적용한 프로그램이다.

Fig. 1과 같이 **EnergyPlus**는 시뮬레이션 엔진이며, 다양한 계층의 사용자가 서로 다른 목적과 용도로 사용할 수 있도록 제3의 개발자가 사용자 인터페이스를 개발하여 제공할 수 있는 방식을 유도하고 있다. 즉 **EnergyPlus**의 입출력파일은 텍스트 형식으로서 다른 개발자가 이 입출력 파일을 구성하기 용이한 구조만을 취하고 있을 뿐이다.

Fig. 2에 보인 바와 같이 가장 상위레벨에 위치하는 시뮬레이션 매니저는 사용자가 정한 **time step**으로 원하는 기간을 대상으로 모든 시뮬레이션 모듈 사이의 상호작용을 제어하게 된다. 또한 각각의 모듈에게 초기화, 시뮬레이션, 기록의 유지, 결과보고 등을 지시하는 역할을 하며, 모든 개체지향이 될 수 있도록 하고, 손쉽게 추가가 가능하게 된다.

여러 기관에서 사용자 인터페이스를 개발하고 있으며 2003년 초에 선을 보일 계획으로 아직은 사용자층 확보를 위한 기반이 부족한 상태이다.

2.2.3 ESP-r

현재 유럽공동체(EU)에서 자연형 태양열 건물해석 표준프로그램으로 지정한 ESP-r은 수치적인 방식(유한체적법)으로 열부하를 계산하며, 주로 유럽을 중심으로

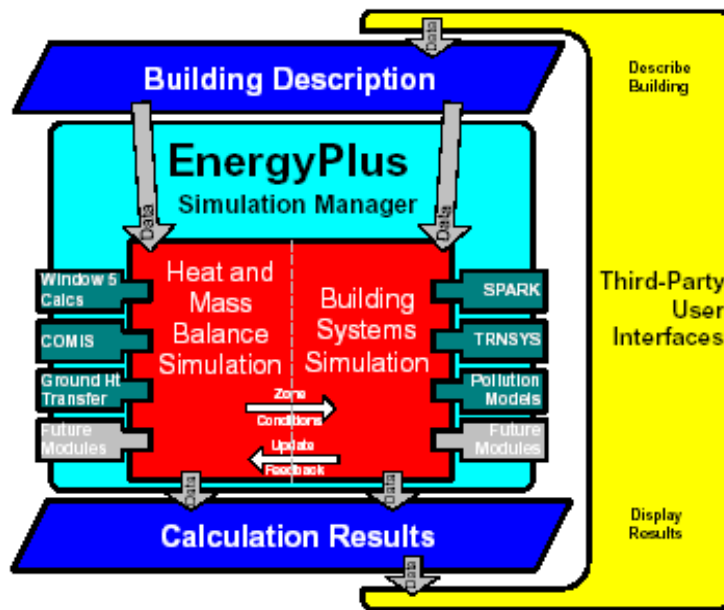


Fig. 1 Structure of EnergyPlus

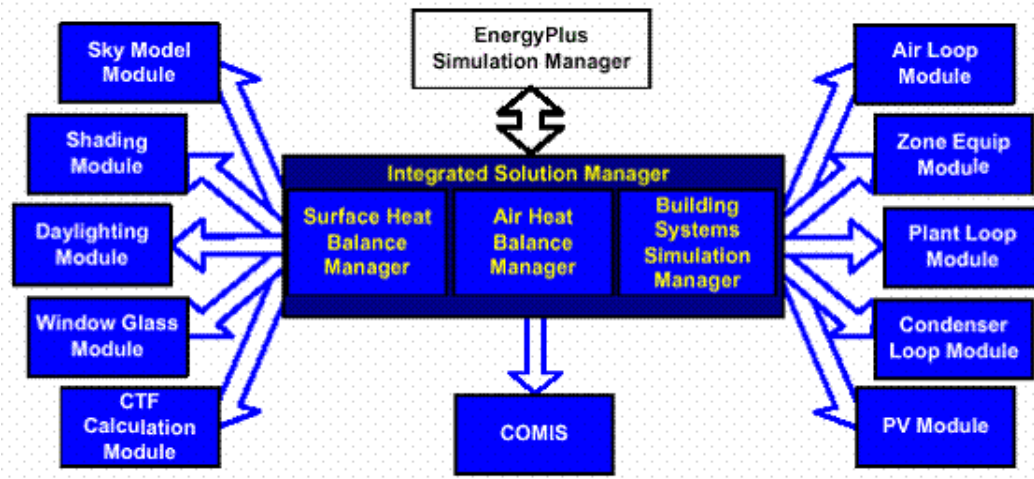


Fig. 2 Total simulation manager

수백 명의 사용자가 있는 것으로 알려져 있다. 상업용이 아닌 연구를 목적으로 사용하는 경우 무료의 라이선스를 얻을 수 있다. 앞선 개념으로 작성된 프로그램이나, **Windows** 환경을 지원하지 못하는 것이 단점이며, 아직도 일반사용자가 아닌 전문가를 대상으로 개발이 진행되고 있는 편이다. 1974년부터 개발된 **ESP-r**은 해석 알고리즘의 유연성으로 인해 다양한 분야의 각종 해석을 모두 수행할 수 있는 특징을 가지고 있으며, 특히 소스코드가 공개되어 사용자의 요구에 따라 언제든지 구체적인 모델을 개발 적용시킬 수 있다. 특히 **ESP-r**은 유럽연합의 대규모 자연형 건축 프로젝트인 **PASSYS**를 통해 국가간 실증실험을 통한 검증 모델로 최근까지 이용되고 있다.



Fig. 3 Structure of ESP-r

2.2.4 TRNSYS

1975년에 상용 프로그램으로 처음 발표된 TRNSYS(TRaNsient SYstem Simulation)는 지속적인 버전업으로 현재 ver. 15.2에 이르고 있으며 HVAC를 포함한 건물의 종합적인 열에너지 해석이 가능한 수준으로 발전하였다. 이 프로그램은 태양열 시스템의 동적인 시뮬레이션 및 설계를 위한 것이었다. 미국의 Wisconsin 대학의 SEL(Solar Energy Lab.)에서 개발되기 시작하였으나, 독일의 Transsolar, 프랑스의 CSTB, 미국의 TESS 등 공동개발그룹의 참여로 세계 각국에서 편리한 사용자 인터페이스와 하위 모듈을 개발하고 있다.

부하측과 HVAC를 포함한 시뮬레이션을 수행하기 위한 Fig. 4에 보인 IISiBat (the Intelligence Interface for the Simulation of Building)에서 입력파일을 만들어야 한다. 연결된 결과는 설비계통의 배관을 연상시키는데, 펌프와 열교환기같이 실제로 그런 경우도 있으나 주로 정보의 흐름을 의미하게 된다. 다중구역으로 구성된 건물 (multi-zone building)에 대한 정보 및 데이터를 표현하고 입력하는 것은 대단히 복잡하나, TRNSYS에서는 별도로 제공되는 프로그램인 PreBID(Fig. 5)에 의해 비교적 쉽게 작성할 수 있다.

GUI를 도입하여 Windows에서의 사용환경이 대폭 개선되고 안정화되었으며 해석가능한 설비의 구성요소가 강화되고 있는 추세로, 수치적인 방식을 적용한 프로그램의 등장에도 불구하고 계속적으로 사용자 층을 넓히며 발전하고 있다.

개발주체의 신뢰성이나 지속적인 관리를 통하여 관련 연구 개발 분야에서 폭 넓은 사용자 층을 형성하고 있거나, 새롭게 관심이 집중되고 있는 프로그램 중에서, 본 연구에서는 사용자 인터페이스가 안정화되고 해석 가능한 HVAC설비의 영역을 확장하기 위해 전문개발그룹에 의해 하위모듈의 개발이 활성화되고 있는 TRNSYS

를 해석 프로그램으로 선정하였다.

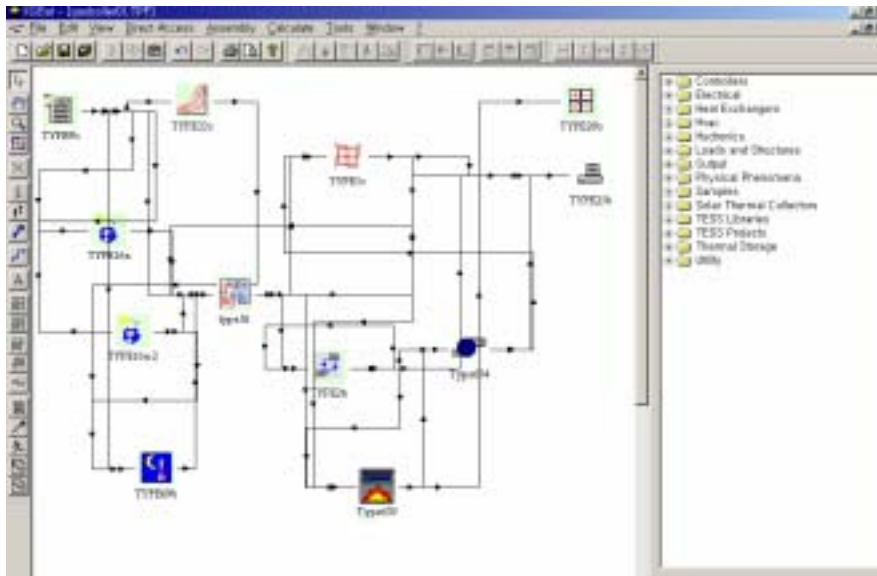


Fig. 4 IISIbat (linked module for simulation)

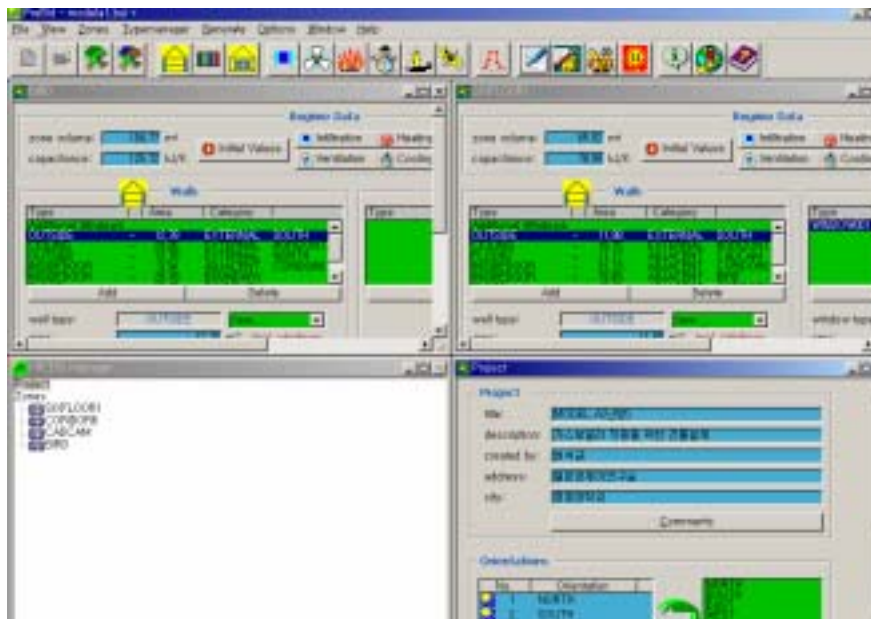


Fig. 5 PreBID (the interface for building description)

2.3

동적열부하를 계산하는 경우 설비를 포함시킬 것인지 여부에 따라 **energy rate control**과 **temperature level control**로 대별할 수 있다. **energy rate control**의 경우에는 설비 및 제어 특성과 무관하게 건물 자체만에 의해 열부하가 결정되므로 건물의 열성능을 비교하는 데 적합하다. 그러나 여기에 사용되는 냉난방설비는 이상적인 것을 사용하고 있으므로 실제의 열부하와는 차이를 보이게 된다. 반면에 **temperature level control**의 경우에는 실제 냉난방기기에서 공급 혹은 제거할 수 있는 열량이 직접적으로 반영되므로 건물에 설비의 영향이 포함되는, 실제 상황의 열부하 및 운전모사가 얻어진다.

2.3.1 Energy rate control

동적 열부하계산과 관련하여 어떤 **timestep**에서 실내를 냉난방하지 않은 상태로 두었다고 가정하고 이로부터 외부 열손실로 인해 계산된 실내온도가 설정된 온도범위를 벗어나는 경우 계산된 온도가 설정온도까지 상승(또는 하강)시키는 데 필요한 열량을 열부하로 취한다. 이러한 방식으로 실내온도를 유지시키는 제어방식을 **energy rate control**이라 한다.

$$C_r \frac{dT_r}{dt} = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{inf} + 0.3\dot{Q}_{spepl} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_z \quad (2)$$

$$Q_{heating} = MC_p (T_{set} - T_r) \quad (3)$$

C_r : 실내의 열용량 ($C_r = V_r \cdot \rho \cdot c_p = M \cdot c_p$: V_r 실내체적, ρ 실내공기밀도, M 실내공기의 총 질량)

T_r : 실내온도

\dot{Q}_{surf} : 벽체 및 창문을 통한 열손실(열취득)

\dot{Q}_v : 환기에 의한 열손실(열취득)

\dot{Q}_{inf} : 침입공기에 의한 열손실(열취득)

\dot{Q}_{spepl} : 인체발열에 의한 열취득

\dot{Q}_{int} : 내부기기발열에 의한 열취득

\dot{Q}_z : 인접세대와의 열교환

난방부하량의 산출방법은 식 (2)에 의해 구한 현재의 실내온도 T_r 이 설정온도 T_{set} 보다 낮은 경우 식 (3)를 이용하여 설정온도 T_{set} 까지 상승시키는 데 필요한 열량 $Q_{heating}$ 을 구할 수 있으며 $Q_{heating}$ 이 난방부하량이 된다.

2.3.2 Temperature level control

이 경우에는 어떤 timestep에 대해 열원기기(보일러, 열펌프, 태양열, 보조히터, 보조 냉동기 등)를 작동시킨다고 생각하고, 열손실량과 열공급량에 대한 열평형식을 세워 이로부터 실내온도를 계산한다.

$$C_r \frac{dT_r}{dt} = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{inf} + 0.3\dot{Q}_{spepl} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_z - P_i \quad (4)$$

P_i : 냉난방기기에서 제거 또는 공급되는 열량

식 (3)에 냉난방기기에서 공급 또는 제거되는 열량 P_i 를 포함 시킨 식 (4)에 의해 계산된 현재온도 T_r 이 제어기에서 설정된 온도범위(난방의 경우 20~22℃) 내에 포함되는 경우 이 상태에서 공급한 열원기기의 열량이 열부하가 되나, 포함되지 않는 경우에는 열원기기의 상태를 바꾸어 (ON이면 OFF, OFF 이면 ON) 만족한 상태가 될 때까지 계산을 반복해서 수행한다[8].

본 연구에서는 부하측과 HVAC설비의 통합적인 동적 성능 시뮬레이션을 목적으로 부하산출에 있어 **temperature level control**을 적용하였고 참고자료로 **energy rate control**을 통한 부하산출을 병행하였다.

3.

3.1

3.1.1

실증실험의 대상이 되는 시험공간은 기하학적 형상과 벽면재료 등 관련자료가 명확히 알려져 있어야 하며, 주위의 구조물에 의해 일사의 방해를 받지 않아야 한다. 또한 인접한 공간에 대한 통제가 가능하여야 한다. 이런 조건을 만족하는 대상공간 중 선행연구인 난방부하 실증실험과의 연속성을 유지함과 동시에 비교·검토가 용이하도록 동일한 시험공간(경기도 용인시 경희대학교 태양열실험실)을 선택하였다.

선정된 시험공간과 인접한 공간의 평면도를 Fig. 6에 도시하였으며 벽체구조 및 재료의 물성치를 각각 Fig. 7과 Table 1에 정리하였다[9]. 시험공간(5540×3385×3500mm)은 외기와 직접 접하는 천장과 유리창(1485×1820mm의 복층유리, 단일 창)이 있는 남쪽 벽을 제외하면 복도 혹은 다른 공간과 인접하고 있다. 복도, 창고 및 아래층 일부(Fig. 6의 ㉑, 바닥면적의 40%)는 비공조공간이기 때문에 특별히 주의할 사항이 없다. 반면 아래층의 일부(Fig. 6의 ㉒, 바닥면적의 60%)는 공조공간이므로 이론적으로는 시험공간과의 상호작용이 고려되어야 하며, 실측된 실내온도가 계산에 사용될 수 있도록 하였다.

내벽으로 표시된 창고의 동쪽 벽(Fig. 6에서 우측 벽)은 다른 창고와 접하고 있다. 실측 결과 냉방이 가동하지 않을 때 두 창고의 온도차는 거의 없었으므로 비냉방시에는 이 벽을 통한 열교환은 없는 것으로 간주하고 단열 경계조건을 줄 수 있다.

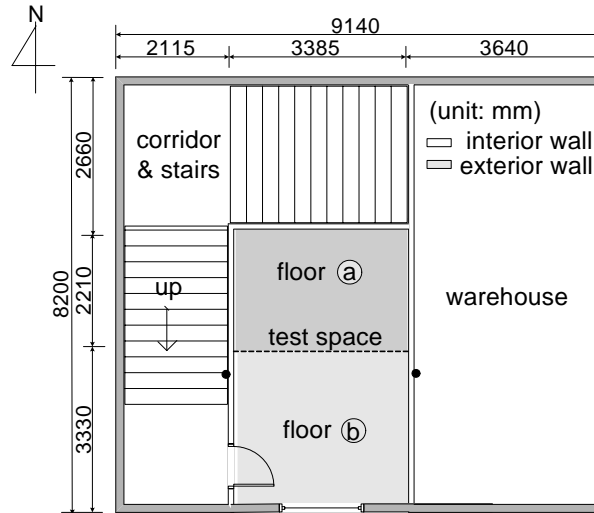


Fig. 6 The plan view of the present test space and its vicinity

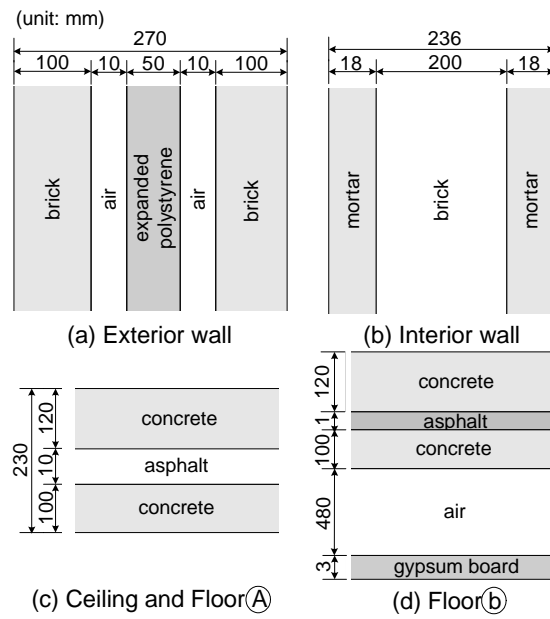


Fig. 7 The wall composition

Table 1 The properties of wall materials

Material	Thermal conductivity [W/mK]	Specific heat [kJ/kgK]	Density [kg/m³]
Brick	0.64	0.84	1660
Expanded polystyrene	0.034	1.25	28
Mortar	1.51	0.79	2000
Asphalt	0.11	0.92	1000
Concrete	1.39	0.88	2200
Gypsum board	0.17	0.31	910
Air space	Thermal resistance		
	Horizontal (10~500 mm)	0.17 m²K/W	
	Perpendicular (10~20 mm)	0.13 m²K/W	
Double window	Overall heat transfer coefficient 2.8 m²K/W		

3.1.2

실험에 적용될 냉방열원의 선택을 위해 대한설비공학회에서 제공하는 표준기상자료를 이용하여 하계 냉방부하를 예측하였으며, 선정된 시험공간의 변형을 최소화할 수 있는 냉방능력이 **2000 W**(실내조건: **27°C,50%**, 실외조건: **35°C,40%**)로 출시된 일체형 에어컨을 사용하였다.

에어컨의 냉방능력은 조건에 따라 현열과 잠열의 제거량과 그 비가 변하기 때문에 전열냉방능력 역시 일정하지 않다. 이에 대한 모사를 위해 생산기술연구원에 있는 공기 엔탈피식 칼로리미터를 사용하여 세부적인 성능데이터를 확보하였다. **Table 2**는 성능실험의 결과를 보여주고 있으며 조건에 따른 현열과 잠열의 제거량, 현열비, 소모전력 등을 측정할 수 있다.

에어컨의 성능데이터에 있어 가장 일반적인 외기 건구온도를 독립변수로 선정하였고, 실내조건은 증발부에서 현열과 잠열이 동시에 교환되는 데 주목하여 실내 건구온도와 상대습도를 독립변수에 추가하였다. 각 독립변수의 범위는 실제 운전상황을 고려해 외기온도 **24~30°C**, 실내온도 **24~28°C**, 상대습도 **40~70%**로 설정하여 각각 **3**지점씩 총 **27**지점에 대해 추출하였다. **Table 3**에 각 조건에 따른 전열냉방능력과 **COP**를 보여주고 있다.

Fig. 8은 실내습도가 **55%**일 때 외기온도와 실내온도 변화에 따른 전열냉방능력의 변화를 보여주고 있으며, 외기가 낮을수록 실내온도가 높을수록 냉방능력이 높은 전형적인 경향을 보이고 있다. **Fig. 9**는 실내습도가 **55%**일 때 외기온도와 실내온도 변화에 따른 **COP**의 변화를 보여주고 있다. 조건의 변화에 따라 소모전력도 변하기 때문에 전열냉방능력과 증가·감소의 경향은 일치하지만 변화 비율은 다소 차이를

보인다.

획득한 성능데이터 중 냉방능력은 시뮬레이션에서 에어컨의 모사에, COP는 증발부의 엔탈피 차이로 정리한 실험값과 비교를 위한 참고자료로 실험 데이터로부터 냉방능력을 산출하는 데 각각 적용된다.

Table 2 The example result of performance experiment for air conditioner

Psychrometric Calorimeter Data Sheet			[MK3 Unit]							
No.	ITEM	UNIT	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	Avg
1	Total Capacity [R]	kcal/h	1,792.537	1,806.235	1,801.893	1,799.043	1,787.812	1,792.772	1,794.985	1,795.012
2	Total Capacity [R]	Btu/h	7,195.306	7,175.537	7,150.370	7,139.058	7,083.699	7,114.173	7,083.315	7,123.066
3	RAC Total Power Input [R]	W	636.778	644.000	650.133	645.112	647.157	640.119	650.391	646.086
4	E.E.R	kcal/Wh	2.800	2.806	2.772	2.789	2.762	2.901	2.745	2.783
5	Rated Capacity Ratio	%	111.909	113.015	112.618	112.440	111.726	112.048	111.562	112.188
6	Rated Power Input Rat	%	0.259	0.260	0.260	0.259	0.259	0.259	0.259	0.259
7	Rated Efficiency Ratio	%	9,369.537	9,452.245	9,429.081	9,414.142	9,354.327	9,381.327	9,340.636	9,353.054
8	RAC Power Source Vol	V	220.583	220.500	220.560	220.500	220.493	220.400	220.547	220.508
9	RAC Power Source Cu	A	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
10	RAC Power Source Ing	W	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
11	RAC Power Source Freq	Hz	126.327	126.400	126.500	126.300	126.313	126.400	126.373	126.345
12	Power Factor	%	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
13	Atmospheric Press.	mmHg	749.420	749.500	749.493	749.500	749.507	749.500	749.493	749.488
14	RAC Entering Air [R]	°C	23.987	24.010	23.990	23.940	23.923	23.950	23.969	23.967
15	RAC Entering Air [R]	°C	20.068	20.070	20.017	20.000	20.019	20.050	20.030	20.036
16	RAC Leaving Air [R]	°C	13.698	13.693	13.645	13.630	13.679	13.700	13.719	13.670
17	RAC Leaving Air [R]	°C	13.154	13.130	13.063	13.030	13.093	13.120	13.131	13.103
18	R. Chamb. Press [R]	mmHg	-0.037	-0.050	-0.025	-0.030	-0.028	-0.030	-0.033	-0.034
19	Velocity Press. a [R]	mmHg	1.561	1.570	1.559	1.550	1.546	1.560	1.561	1.554
20	Atmospheric Pres [R]	mmHg	749.423	749.504	749.495	749.502	749.509	749.502	749.495	749.493
21	Specific Volume [R]	ft ³ /min ³	0.842	0.842	0.842	0.841	0.842	0.842	0.842	0.842
22	D.B.T at Nozzle [R]	°C	15.540	15.600	15.580	15.500	15.627	15.700	15.630	15.587
23	RAC Air Volume	ft ³ /min ³	5.085	5.117	5.069	5.082	5.077	5.084	5.085	5.090
24	RAC Entering Air [R]	g/kg ³	13.307	13.302	13.256	13.236	13.269	13.300	13.277	13.278
25	RAC Leaving Air [R]	g/kg ³	9.347	9.318	9.255	9.227	9.272	9.292	9.295	9.287
26	RAC Entering Air [R]	kcal/kg ³	13.873	13.875	13.832	13.818	13.833	13.859	13.843	13.848
27	RAC Leaving Air [R]	kcal/kg ³	8.902	8.918	8.874	8.854	8.889	8.910	8.917	8.899
28	Sensible Heat [R]	kcal/h	917.890	926.081	917.887	915.951	908.343	910.094	907.714	914.653
29	Latent Heat [R]	kcal/h	872.678	883.144	884.006	883.391	879.269	882.746	877.282	880.360
30	Sensible Heat Ra	-	0.513	0.512	0.509	0.509	0.508	0.508	0.509	0.510
31	Heat Leakage [R]	kcal/h	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
32	Drain Weight [R]	g/h	1,433.136	1,452.328	1,453.608	1,452.808	1,449.048	1,451.740	1,442.752	1,447.805
33	RAC REF. High Press	kg/cm ² G	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150
34	RAC REF. Low Press	kg/cm ² G	-0.030	-0.030	-0.031	-0.030	-0.030	-0.030	-0.030	-0.030
35	RAC Entering Air [D]	°C	32.347	32.340	31.803	31.730	31.834	31.850	31.869	31.953
36	RAC Entering Air [D]	°C	26.135	26.140	26.154	26.720	26.119	26.390	26.381	26.143
37	RAC Entering Air [D]	%	62.251	62.828	66.218	62.985	64.636	66.152	66.235	64.358

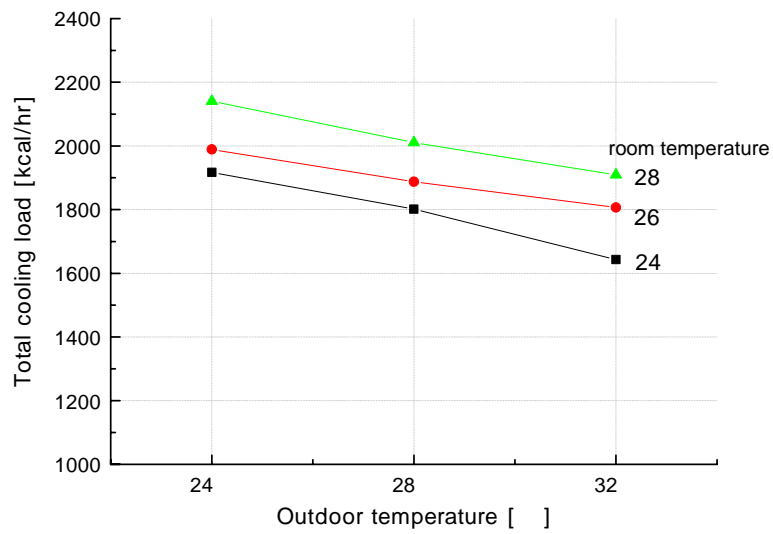


Fig. 8 Total cooling capacity according to outdoor and indoor temperature(indoor relative humidity: 55%)

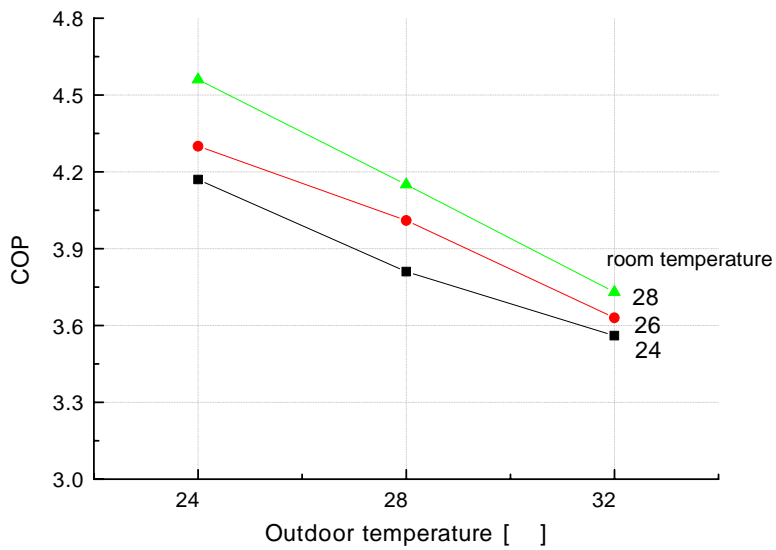


Fig. 9 COP according to outdoor and indoor temperature(indoor relative humidity: 40%)

Table 3 Total cooling capacity and COP of air conditioner(independent variables: out door temperature, indoor temperature and relative humidity)

Outdoor temperature	24 °C			28 °C			32 °C			
	Indoor condition									
Indoor condition	temperature									
	24 °C	26 °C	28 °C	24 °C	26 °C	28 °C	24 °C	26 °C	28 °C	
Relative humidity	total cooling capacity [kcal/hr]									
	40%	1,737.2	1,815.0	1,963.5	1,623.9	1,753.5	1,823.8	1,586.3	1,605.3	1,802.9
	55%	1,917.1	1,989.0	2,140.4	1,801.3	1,887.5	2,010.6	1,642.9	1,806.6	1,909.1
	70%	2,037.3	2,119.5	2,250.1	1,994.9	2,144.8	2,180.6	1,795.0	1,982.2	2,041.2
	COP									
	40%	3.61	3.73	4.01	3.16	3.38	3.49	2.93	2.9	3.23
	55%	3.93	4.05	4.35	3.45	3.86	3.86	3.28	3.24	3.47
	70%	4.17	4.3	4.56	3.81	4.07	4.15	3.56	3.63	3.73

3.1.3

실험은 계산과의 합리적인 비교에 중점을 두었다. Fig. 10과 같이 에어컨 증발부의 입출구에 각각 2개씩 건습구 온도를 측정을 위해 K-Type 열전대를 설치하였으며, 측정기간 동안 대부분의 구간에서 각각 1℃ 이내의 차이를 보였다. 에어컨은 기상예보와 예비실험 결과를 고려하여 1시간에 2~3회의 ON/OFF가 이루어지도록 25.5 ± 1.2 ℃로 설정하여 ON/OFF 제어하였다. 가능하면 실내의 온도분포가 균일하도록 Fig. 11과 같이 팬을 설치하여 공기를 강제로 순환시켰으나, 냉방열원이 가동 시 1.2℃, 비가동 시 0.5℃ 내외의 온도분포가 확인되었다.

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 각 공간 및 벽체의 온도(Fig. 6의 ①, ②)를 측정하여 계산시 경계조건으로 부여하였다. 에어컨 등의 전력사용량은 1일 단위의 적산전력량과 전압을 측정하여 구한 순시값을 모두 기록하였다. 순시값의 적분과 적산값 사이에는 미소한 차이가 있으나 쉽게 보정될 수 있다. 조명(형광등 : 80W)과 기기(PC 및 선풍기 : 267W)는 전 실험기간에 걸쳐 가동되며, 발생하는 열은 해석시 실내획득열량에 포함시켰다. 적산 전력을 제외한 모든 측정치는 36초 간격으로 측정하여 자료수집장치(Fig. 12)에 저장하여 활용하였다.

목표가 되는 실험결과는 냉방부하로서, 냉방열원 증발부의 입출구 엔탈피 차이로 식 (4)와 같이 전열부하를 나타내었다. 현열 및 잠열 냉방부하는 각각 입출구의 건구온도와 절대습도의 차이를 이용하였으며 식 (5)와 식 (6)과 같이 정리하였다. 풍

량은 성능실험 데이터를 참조하여 그 편차(최대 **0.35 m³/min**)가 크지 않음을 확인하였고 계산에는 평균치인 **5.2 m³/min**을 적용하였다.

$$Q_{\text{total}} = (\rho \cdot V) \cdot \Delta h \quad (4)$$

Q_{total} : 전열부하 (kW)

ρ : 공기의 밀도 (kg/m³)

V : 풍량 (m³/s)

Δh : 입출구의 엔탈피 차 (kJ/kg)

$$Q_{\text{sensible}} = (\rho \cdot V) \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

Q_{sensible} : 현열부하 (kW)

C_p : 공기의 정압비열 (kJ/kg·°C)

ΔT : 입출구의 온도 차(°C)

$$Q_{\text{latent}} = (\rho \cdot V) \cdot \Delta \omega \cdot h_{fg} \quad (6)$$

Q_{latent} : 잠열부하 (kW)

$\Delta \omega$: 입출구의 절대습도 차 (kg/kg DA)

h_{fg} : 증발잠열 (kJ/kg)

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



Fig. 10 Mesurment of dry and wet bulb temperature for air conditioner input and output



Fig. 11 Circulation using fan



Fig. 12 Data acquisition unit

3.2

3.2.1

실측된 계산 결과와 비교할 시뮬레이션에 적용된 해석 프로그램은 **TRNSYS 15**이다. 선정 배경과 프로그램의 개요는 **2.2**절에 이미 언급하였다.

부하측의 동적 부하계산을 위해서는 기상자료가 필요하며 이 중 건물 열부하에 영향을 미치는 기상인자는 기온, 습도, 일사량, 풍속, 풍향 등이다. 실험기간 동안 외기온도와 일사량을 측정하였으나, 공신력이나 재현성을 감안하여 기상대에서 제공하는 자료에 전적으로 의존하였다. 일반적으로 기상청에서 제공하는 자료는 1시간 간격으로 측정된 것이지만, 일사량(엄밀히는 수평면 전천일사량)의 경우에는 1시간 동안의 적산값 형태이다. 실제 계산에서 필요한 것은 임의의 경사면에 대한 순일사량이므로 제공된 적산 전천일사량을 직달일사량과 천공일사량의 순시값으로 분리(이른바 직산분리)해야 한다. 대한설비공학회에서 발표되는 표준기상자료의 일사량은 직산분리를 거친 것이다. 그러나 **TRNSYS(Type 16: Radiation processor)**를 비롯하여 대부분의 동적열부하계산 프로그램은 직산분리기능을 내장하고 있으므로 적산값을 그대로 입력해 주면 된다.

3.2.2

2.3절에 언급한 부하산출방식이 상이한 두 모델에 대하여 동적 열부하계산을 수행하였다. **Model A**는 실제 에어컨의 성능을 모사하기 위해 **temperature level control**를 적용하였고, **Model B**는 이상적인 기기로 가정하는 **energy rate control**을 적용하였다.

계산에 사용된 주요 수치자료를 **Table 4**에 정리하였다. 실험에서의 실내설정온도

는 $25.5^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 로 온도폭을 다소 크게 취하였으나, 시험공간의 천장고(3500 mm)가 다소 높아 상하간의 온도 불균일이 발생하였으며 이에 따른 차이를 반영하여 **temperatur level control**을 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 **0.6**으로 설정하였다. 천공과의 복사열교환의 계산을 위해 필요한 형상계수는 주위의 장애물이 없으므로 수직벽 **0.5**, 수평벽 **1.0**으로 하였다. 바깥쪽 벽의 열전달계수는 **ASHRAE**에서 추천하는 여름철 평균풍속 **3.4 m/s**일 때의 값인 **22.7 W/m²K**, 안쪽 면의 열전달계수는 **8.3 W/m²K**를 사용하였다. **Fig. 7**에서 벽체 내부의 공기층은 내부의 자연대류가 지배하기 때문에 계산의 신뢰도를 높이기 위하여 정확한 열전달계수가 고려되어야 하며 역시 **ASHRAE**에서 수직 및 수평구조의 각 두께에 대해 추천하는 단위 열저항을 **Table 1**과 같이 적용하였다[9].

계산순서는 먼저 건물관련 정보와 필요한 수치자료를 **TRNSYS**의 부속 프로그램인 **PreBID**에 입력하는 것으로 시작된다. 계산에 적용한 건물관련 정보는 **Fig. 6**과 **7**, **Table 1**에 나타내었다. 자료입력이 끝나면 **IISiBat**에서 구성요소들을 연결하고 필요한 정보를 추가한다. **Temperature level control**를 적용한 **Model A**의 계산시 정보 흐름도를 **Fig. 13**에 나타내었다.

부하측의 외란에 해당하는 외기조건은 결정하는 것은 **Type 9(Data reader)**를 통하여 입력하게 되며, **Type 16(Radiation processor)**에서 전술한 것처럼 직달일사량과 확산일사량의 순시값으로 분리(직산분리)된다. **Type 33(Psychrometrics)**은 공기선도를 모사한 것으로 건습구 온도, 절대습도, 상대습도, 엔탈피, 노점온도 등의 데이터 중에서 **2**가지를 넘겨받아 나머지 값들을 모두 계산한다. 지표면에서 대기로의 장파복사는 **Type 69(Sky temperature calculation)**에서 처리된다.

이렇게 결정된 외기조건은 다구역 모델에서 구역 사이의 상호작용을 해석하는 데 효율적인 **Type 56(Multi-zone building)**에 넘겨지며, 여기에는 벽체의 축열효과는 물론 벽면 안쪽과 바깥쪽의 모든 복사열전달이 고려된다. 실내온도의 결정을 위해 건물정보나 외기조건외에도 열원에 해당하는 구성요소가 추가되어야 한다. TRNSYS는 성능데이터를 활용할 수 있는 구성요소(component)로 **Type 42 (Conditioning equipment)**를 제공하고 있으며 본 연구에서는 에어컨의 성능데이터 (실외 건구온도, 실내 건구온도 및 실내습도에 따른 냉방열량)를 활용하였다. 이렇게 계산된 실내온도는 제어부에 해당하는 **Type 2(ON/OFF controller)**에 넘겨져 제어판단을 한 후 설비에 해당하는 **Type 42**에 신호를 준다. 이와 같은 작업을 거쳐서 계산에 필요한 입력파일이 생성되고 이를 이용하여 본격적인 계산으로 들어간다.

Table 4 Input data for calculation

Item	Value	
Set Temperature	Model A	25.5±0.5℃
	Model B	25.5℃
Temperature	Room under ⑥	Measured data
	Surface of corridor ①	
	Surface of warehouse ②	
Gains	Lighting	80 W
	machinery	267 W
Surface conductance	Interior surface	8.3 W/m²K
	Exterior surface	22.7 W/m²K
Time step	Model A	0.01 hr
	Model B	1 hr

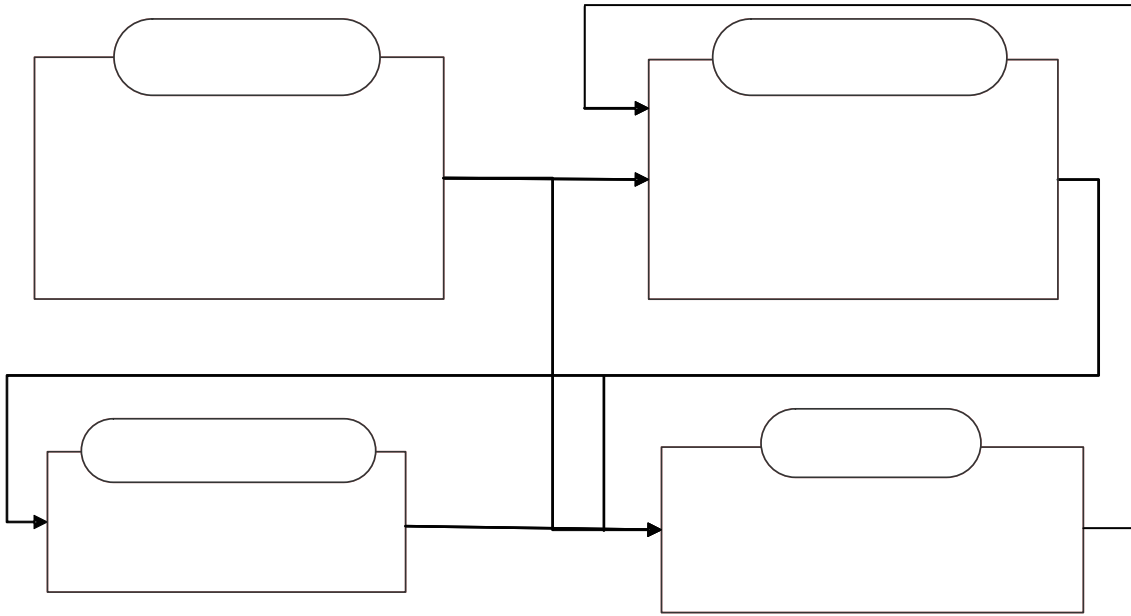


Fig. 13 Information-flow diagram

outdoor condi

type 9: Data reader

type 16: Radiation

type 33: Psychrome

type 69: Sky tempe

3.3

실험 및 두 가지 계산을 통하여 구한 시험공간의 시간 및 일별 적산 현열 냉방부하를 각각 Fig. 14 및 Table 5에서 비교하였다. 시간별 적산 현열 냉방부하를 보이는 그래프에서 적색은 실험값이며 청색은 model A, 녹색은 model B의 계산값을 나타낸다. 실험과 temperature level control을 적용한 Model A의 시간별 적산치의 변동을 보인 Fig. 14에서 부하가 0인 구간은 이 시간 동안 실제 에어컨이 OFF상태를 유지하였음을 나타내며, 이상적인 기기를 가정한 Model B에서는 이 시간 동안 설정 온도(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 5)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. 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.

실험 및 두 가지 계산을 통하여 구한 시험공간의 시간별 적산 전열 냉방부하를 Fig. 15에서 비교하였다. 청색선은 증발부 입출구의 엔탈피 차이로 정리된 실험값이며 적색선은 소모전력과 COP 성능데이터로 정리된 실험값이다. 흑색선은 temperature level control을 적용한 Model A의 계산값을 나타낸다. 엔탈피 차이를 이용한 실험값은 COP를 적용한 실험값과 상당히 유사한 경향을 보이며 특히 몇 시간을 제외하고는 정량적으로도 잘 일치하고 있다. 이는 측정된 건습구온도의 오차가 상당히 작았음을 증명하고 있다.

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 계산 시 사용되어진 에어컨의 성능 데이터 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. 15의 전열 냉방부하는 Fig. 14의 현열 냉방부하와 유사한 경향을 보인다.

Table 5 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%)

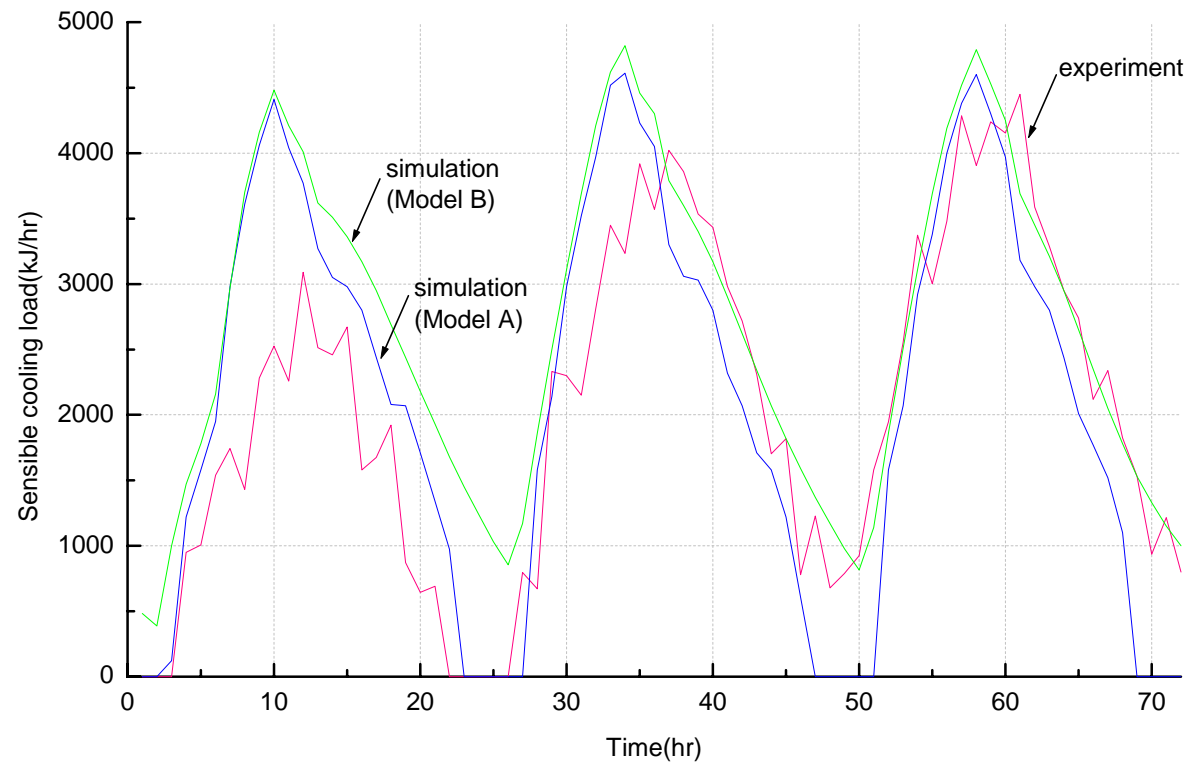


Fig. 14 Comparison of the hourly sensible cooling load between by the experiment and calculations

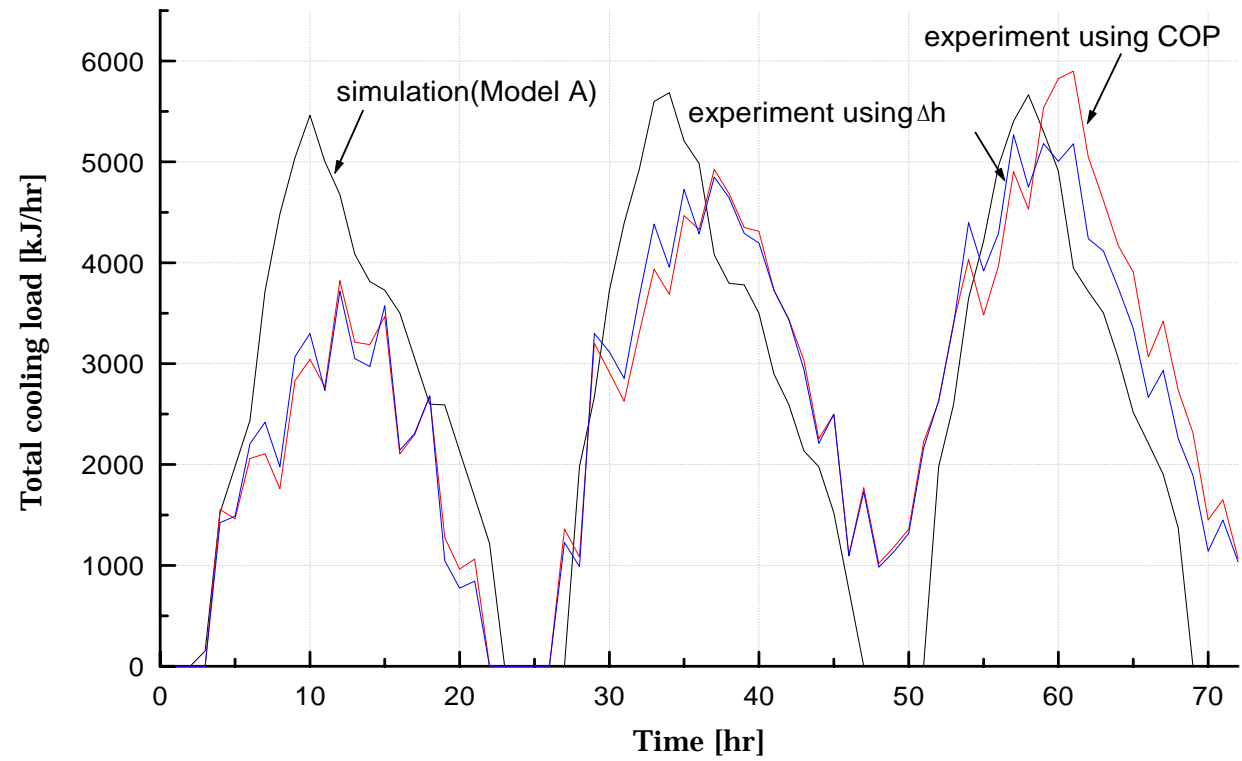


Fig. 15 Comparison of hourly total cooling load between by the experiment and calculation

4.

시험공간에 대한 냉방부하 실증실험을 통하여 예측성의 정도를 검증하였다. 본 장에서는 활용영역을 확장하는 기초를 마련하기 위하여 가스 보일러를 열원설비로 FCU를 통해 실내에 열을 공급하는 시스템을 모사하여 그 가능성을 제시한다. 계산의 신뢰성을 확보하기 위하여 선행연구인 난방부하 실증실험 및 계산의 결과와 비교·검토하였다.

4.1

난방부하 실증실험과 동일한 시험공간에 대하여 난방 열부하를 실측하고 TRNSYS 14.2를 이용한 계산값과 비교한 연구가 시도된 바가 있었다[7]. 그 결과를 이하 요약하면 다음과 같다. 난방열원은 발열량 거의 전부가 실내공기를 가열하는데 기여하는 대류식 팬히터를 적용하였고, 실험방법은 본 연구에서 제시한 냉방부하 실증실험과 유사하다. 설정온도는 $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이고 실험을 통한 난방부하는, 팬히터에서 손실된 열량 역시 실내로 편입되기 때문에 측정한 전력량으로 정리하였다. 실험 대상기간은 2000년 12월 14일 8시부터 18일 8시까지이다.

계산은 **energy rate control**을 적용하여 난방부하를 산출하였고, 인접공간을 모두 고려한 **Model A**와 벽체의 온도 등을 경계조건으로 고려한 **Model B**로 나누어 수행하였다. 설정온도는 실험기간 동안의 평균온도인 20.2°C 를 적용하였다. 실측값과 계산값을 비교한 **Fig. 16**에서 **Model A**와 **Model B**는 거의 일치하여, 두 모델간의 차이는 거의 없는 것으로 간주할 수 있다. 실측값은 계산값과 정성적 일치는 물론 정량적으로도 공학적 오차범위내에서 추종하였다.

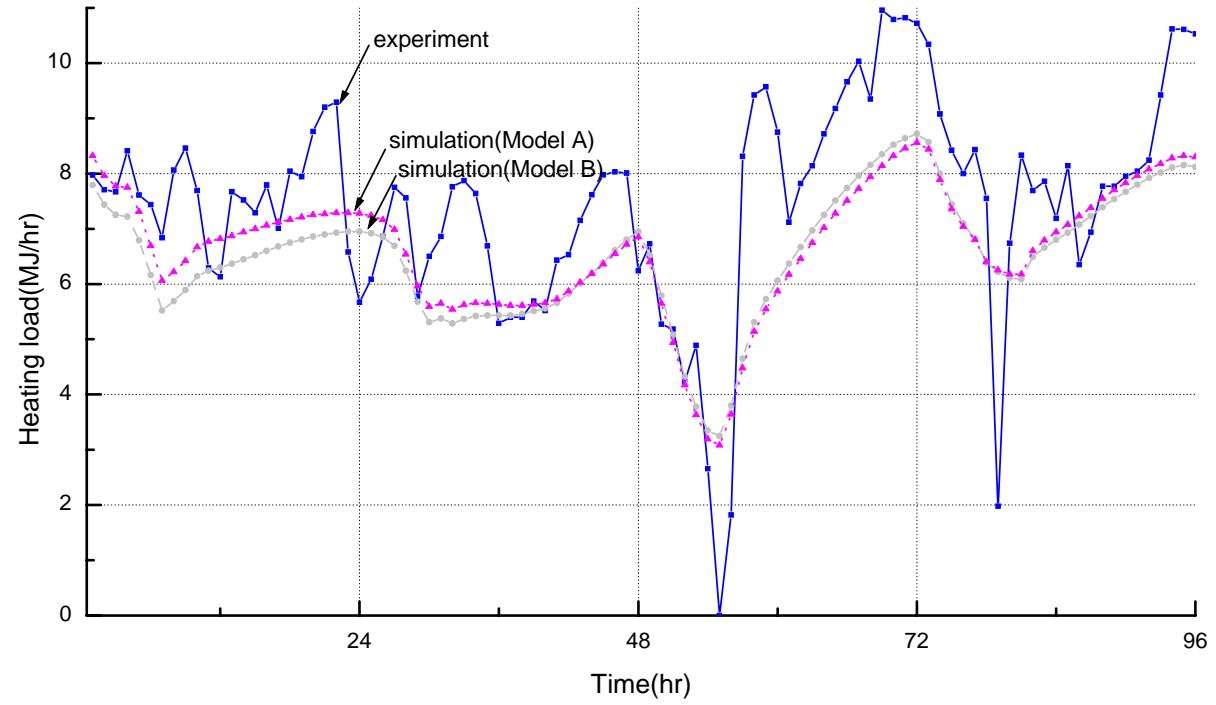


Fig. 16 Comparison of the instantaneous heating load between by the experiment and calculations

4.2

4.2.1

동적 성능 시뮬레이션을 적용할 설비 시스템은 **Fig. 17**과 같이 보일러를 난방열원으로 **FCU**를 통해 실내로 열을 공급하는 가상의 시스템이다. 부하측인 건물은 선행 연구인 난방부하 실증실험의 결과와 비교하기 위해 동일한 해석공간(**Fig. 6**)을 대상으로 하였다. 적용된 보일러는 **LNG**(도시가스)를 연료로 사용하는 온수 보일러로 정격출력이 **10200 kJ/hr**이며 효율이 **85%**이다. 정격출력은 공급된 연료의 환산열량이 아닌 연소시 전열면을 통해 유체에 공급하는 열량으로 입구온도와 운전유량에 의해 보일러의 출구온도가 결정된다. 보일러의 용량은 시판되는 최소 사양보다 다소 낮게 설정하였는데 그 이유는 용량으로 계산조건(환기량 **0**)에서 실증실험과 가능한 동일한 조건을 적용하고자 할 때 예상되는 부하가 낮았기 때문이다. 실내측과 열을 교환하는 **FCU**의 풍량은 **325 kg/hr**이며 결정된 시스템의 난방수 운전유량은 **480 kg/hr**이다. 운전조건은 보일러가 난방수 **70±5℃**로 버너가 **ON·OFF**되며, 실내온도가 **20.2±1℃**로 송풍기와 펌프의 운전이 제어된다.

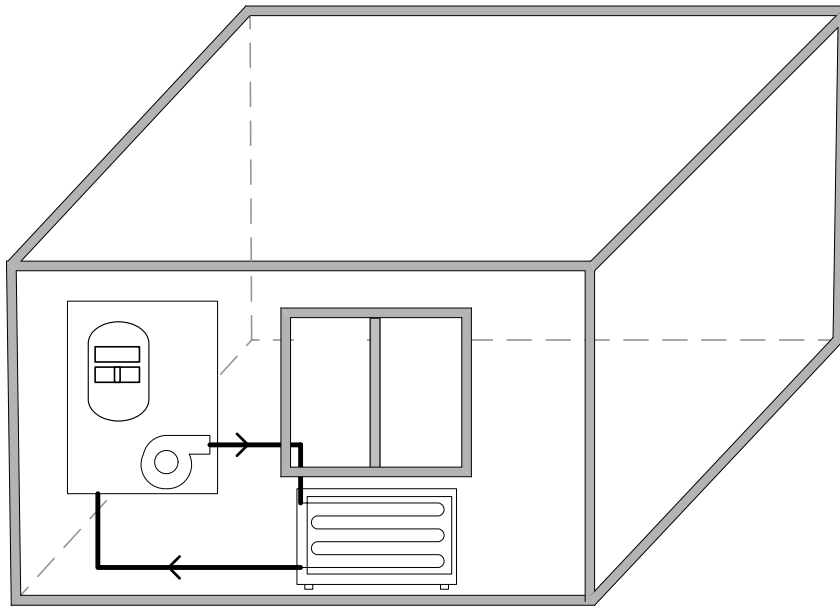


Fig. 17 Schematic diagram of simulation model with HVAC system

boile

4.2.2

계산은 난방부하 실증실험을 수행한 동일한 기간을 적용하여 기상청이 제공한 데이터를 적용하였다. 부하측 계산을 위한 조건은 냉방부하 실증실험을 모사한 계산과 유사하며, 외표면의 열전달계수를 겨울철 평균풍속 **6.7 m/s**일 때 **ASHRAE**에서 추천하는 **34 W/m²K**를 적용하였다. 또한 난방부하 실증실험과 냉방부하 실증실험의 사이에 창호가 복층유리로 교체되었으나, 과거의 결과와 비교를 위해 단층유리의 열관류율인 **5.8 W/m²K**를 적용하였다. 그 외, 계산을 위한 건물의 조건은 3절에 제시한 냉방부하 실증실험과 동일하다. 선행연구에서 **Model A**와 **B**로 나누어 계산을 수행하였으나, 실내의 온도범위가 **20±0.5℃**(본 연구에서 설정온도 **20.2±1℃**)로 실측된 벽체온도를 경계조건으로 부여하기에는 다소 무리가 따를 것으로 판단되어, **Model A**와 같이 인접공간을 모두 고려하였다. 이렇게 결정된 부하측과 연결되는 설비는 보일러와 **FCU**이나, 계산을 위해 내장형 송풍기와 순환펌프를 함께 고려하였다.

Fig. 18에 보인 정보흐름도에서 외기조건은 **Fig. 13**과 동일하기 때문에 생략하고 제어와 설비측 모듈간의 정보흐름을 상세히 표시하였다. 보일러에서 주위로의 열손실이나 배관에서의 열손실 및 펌프의 소모전력에서 유체로의 열획득은 고려하지 않았다. 구현한 가상의 시스템은 소형 설비로 배관이 짧고 손실된 열량은 대부분이 실내로 편입되는 구조이다. 적색과 청색으로 표시된 루프는 각각 난방수의 온도와 유량의 정보흐름이다. 실제 상황에서는 같은 루프를 가져야 하나, 표시된 루프는 단지 정보의 흐름을 나타내는 것이다. 녹색 루프는 **FCU**로 들어와 송풍기에 의해 반송되는 실내온도의 흐름이다. 보일러는 최근 **TRNSYS**의 공동 개발그룹인 **TESS(Thermal energy system specialists)**에서 출시한 **TESS component library** 중

Type 659(Boiler)를 사용하였고, 순환펌프와 송풍기는 각각 Type 3d(Pump)와 Type 3a(Fan)을 사용하여 운전 유량을 결정한다. FCU는 열교환기 component 중 Type 5e(Heat exchanger-cross flow)를 적용하였다. UA 값은 운전 유량과 풍량이 각각 480 kg/hr, 325 kg/hr이고 난방수의 온도차가 약 5℃일 때 실내 공기가 20℃ 내외의 범위에서 약 50℃의 출구 온도를 가질 수 있도록 800 kJ/hr·K를 가정하였다.

Type 56에서 계산된 실내온도는 Type 5e에 입력치(input)로 주어지고 계산된 출구온도에 의해 열량으로 환산되어 다시 Type 56의 입력치로 주어져 다음 time step의 실내온도를 결정한다.

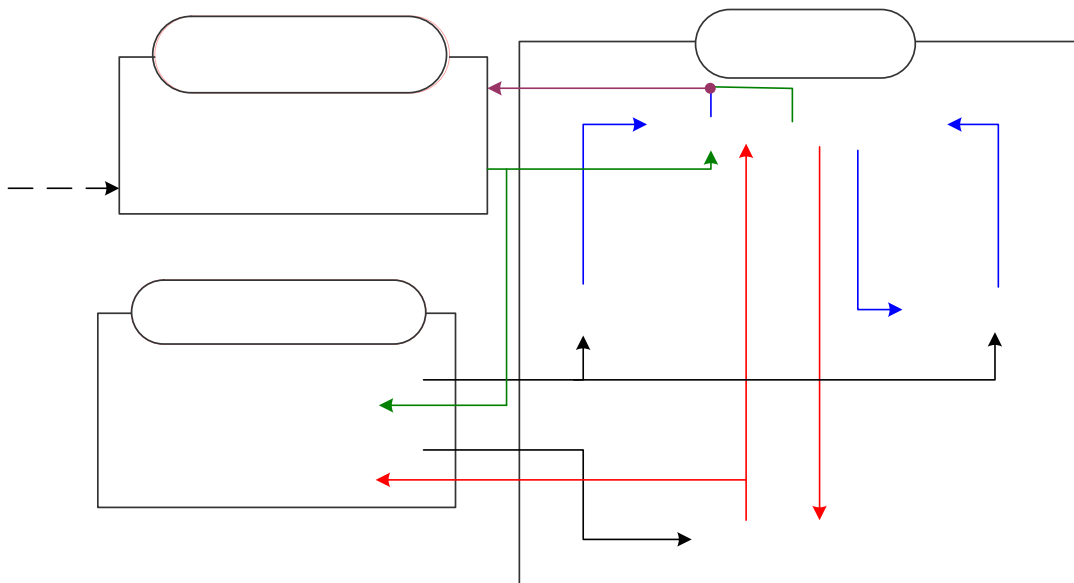


Fig. 18 Information-flow diagram

4.3

시간 및 일별 적산 난방부하를 각각 Fig. 19와 Table 6에서 비교하였다. 시간별 적산값을 보인 그래프에서 보일러 난방 시스템을 **temperature level control**을 적용하여 모사한 계산값(흑색)은 **energy rate control**을 적용한 선행연구의 계산결과(청색)와 전 기간에 걸쳐 유사한 경향을 보이고 있으며 Table 6에서와 같이 정량적으로도 잘 일치한다. 직선의 형태를 보이는 구간은 이 시간동안 난방시스템이 계속 가동되었음을 의미한다. 양자의 차이는 시뮬레이션의 **time step**(각각 36s와 1hr)과 설정온도(각각 $20.2 \pm 1^\circ\text{C}$ 와 20°C) 등의 차이를 포함한 부하 산출방식의 차이에 기인한다. 또한 해석 프로그램의 버전간의 차이(각각 15.2와 14.2)도 배제할 수 없다. 보일러 난방시스템의 계산값은 선행연구의 실측값과도 정성적으로 잘 일치한다. 선행연구에서 실증실험의 실험값은 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 설정하여 실측한 결과로 비록 난방열원이 틀리나, $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 실내온도를 설정하여 FCU를 통해 열원을 공급하는 시스템을 모사한 계산값의 신뢰성을 평가할 수 있는 좋은 자료가 될 수 있다. 보일러에서 소비된 연료를 열량으로 환산한 값을 녹색으로 표시하였으며 계산값과의 차이는 보일러 효율(85%)에 기인한다. 이는 LCC(Life cycle cost) 분석 등의 경제성 평가에 활용될 수 있는 자료이다.

Table 6 Comparison of the accumulative heating load between preceding and present study (unit: MJ)

Period (hr)	Simulation (present study)	Simulation (preceding study)	Experiment
0 ~ 24	144.8	170.5	183.0
24 ~ 48	133.8	146.0	162.7
48 ~ 72	160.5	146.1	180.1
72 ~ 96	195.4	176.8	194.0
Total	634.6	639.4 (+0.8%)	719.8 (13.4%)

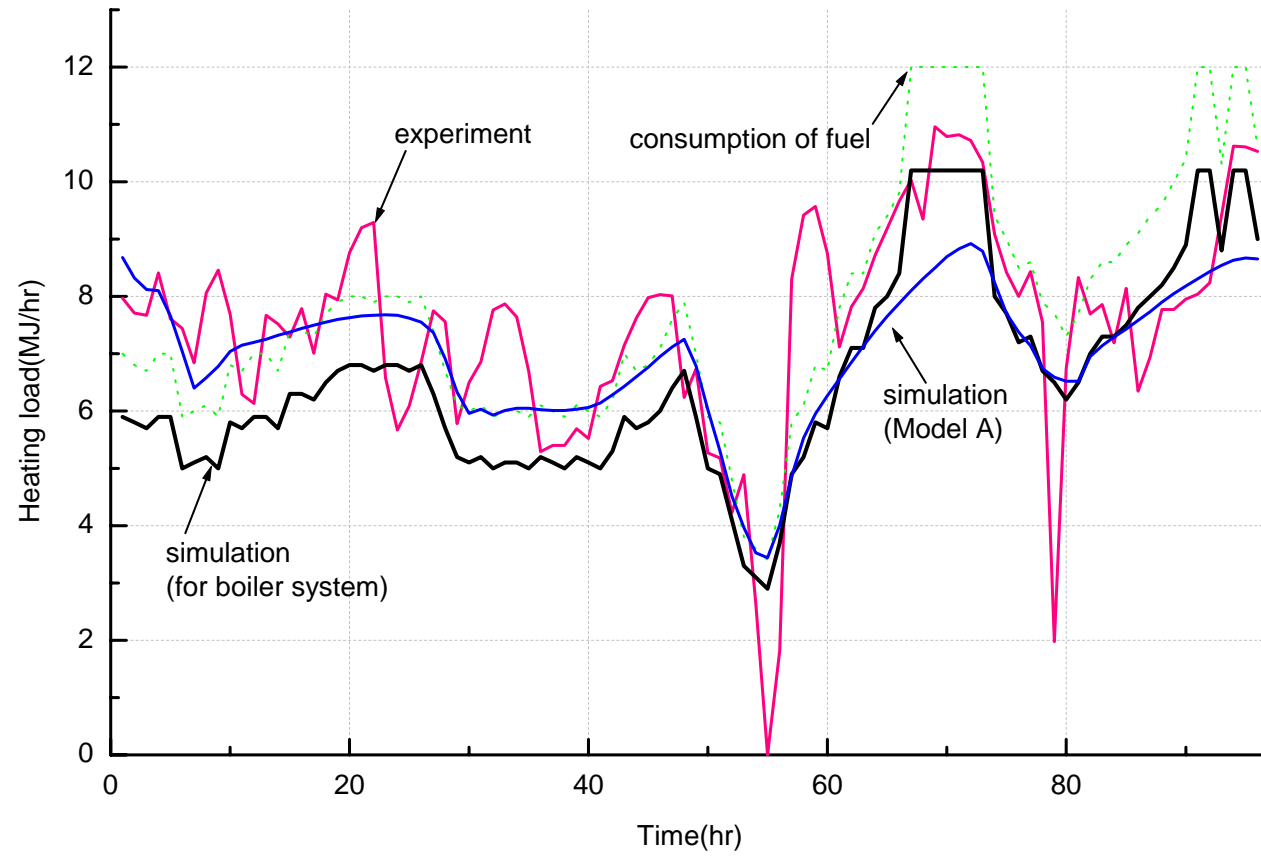


Fig. 19 Comparison of hourly heating load

5.

본 연구는 건물과 HVAC설비를 포함하는 건물에너지의 동적 열성능 시뮬레이션의 적용에 대한 타당성을 확보하고 활용방안을 모색하고자 하였다. 첫 단계로 사용자의 관점에서 관련 프로그램의 신뢰성을 평가하기 위해 적절히 선정된 소형 시험공간에 대하여 냉방 실증실험을 실시하고 TRNSYS 15를 이용한 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 control**에 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 일치한다.

검증한 해석 프로그램을 기반으로 가스 보일러와 팬코일 유닛을 통하여 실내에 열을 공급하는 형태를 **temperature level control**를 적용하여 계산하고, 선행연구인 난방부하 실증실험과 비교하여 그 신뢰성을 검토하여 그 활용영역을 확장하는 기초

를 마련하고자 하였다. 검토대상은 선행연구의 실험값과 계산값으로 난방기기의 운전 및 제어특성이 모두 상이하나, 동일한 건물에 대하여 동일한 기간(기상 데이터)을 가정하여 열적균형이 유사할 것으로 예상되었다. 분석결과 전반적인 거동이 상당히 유사하였으며 건물과 HVAC를 포함한 동적 성능 시뮬레이션의 확장 가능성을 확인하였다.

건물의 동적 열성능 시뮬레이션은 열역학적, 유체역학적 혹은 열전달적 이론적 상관식이나 실험식에 근거한 모듈을 활용하거나, 구성기기의 거동이 복잡하여 적절한 상관식을 확보하지 못하는 경우 성능데이터를 활용하여 거동을 예측할 수 있다. 이를 통한 결과는 다양한 분야에 활용될 수 있다. 예를 들어 냉동기 상류배치형 빙축열 시스템의 경우 빙축열조 내부의 얼음이 충분함에도 불구하고 부하추종이 이루어지지 않아 제 성능을 발휘하지 못하는 사례가 있다. 이 사안에 대해서는 빙축열조와 냉동기의 성능데이터를 활용하여, 건물을 통합하여 해석하는 동적 시뮬레이션을 통해 부하에 대한 추종성을 확인하는 것을 검토할 수 있다. 또한 기기의 다양한 제어조건을 반영하여 운전 특성을 확인하는 데 반영할 수 있으며, 냉난방 공조 시스템의 연료 공급량 등에 대한 결과를 확보하여 LCC분석 등 경제성 평가에도 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

끝으로 해석 프로그램의 검증의 분야에 있어서 향후 적절한 잠열부하 해석을 위해 환기 등을 도입하는 모델과 더불어 온도에 의한 복사난방 및 태양열 설비 등 독립적인 분야에 대한 실험과 계산도 수행되어야 할 것이다. 개발주체의 신뢰성과 이런 검증절차의 결과로 사용자 층을 확보하며 압축되고 있는 관련 해석 프로그램들은 전 세계적인 공동개발 그룹을 형성하여 계속적으로 다양한 버전과 인터페이스를 출시하고 있고, 이에 대한 비교연구도 이루어져야 할 것이다. 최근 출시되어 화제가

되고 있는 수치적인 방법을 적용한 **EnegyPlus**는 **GUI(Graphic User Interface)**를 개발하는 데 박차를 가하고 있으며, 기존에 출시된 해석적 방법에 의존하는 다수의 프로그램과 비교를 통해 해석방식의 차이를 검증할 수 있는 적절한 평가도구가 될 수 있을 것으로 기대된다. 이 결과는 향후 전반적인 개발동향과 방향을 결정지을 주요한 연구가 될 것으로 예상된다.

- [1] 홍희기, 2001, 건물의 동적 열에너지 해석 및 LCC분석, 설비 2001년 6월호, pp.44-54
- [2] 윤종호, 2002, 건축물 에너지 소비량 평가 프로그램의 최근 기술동향, 설비저널 2002년 4월호, 7-11
- [3] W. F. Stoecker, 1989, Design of Thermal System 3rd edition, McGraw-Hill, pp.111-142
- [4] Tianzhen Hong, S. K. Chou, T. Y. Bong, 2000, Building Simulation: an overview of development and Information Sources, Building and Environment 35, pp.347-361
- [5] 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
- [6] 조성환, 2001, 국내외 부하해석 프로그램의 해석결과 비교, 설비 2001년 3월호, 60-68
- [7] 현석균, 홍희기, 유호선, 2002, 시험공간에 대한 난방부하 실증실험 및 계산, 설비공학논문집 14권 2호, pp. 153-160
- [8] TRNSYS, 1994, Solar Energy Lab. Rep., University of Wisconsin-Madison.
- [9] 김영호 외, 1998, 최신 공기조화설비, 보문당, pp.75-213

- [10] ASHRAE, 1993, **Fundamentals of ASHRAE Handbook**, p. 22.1
- [11] 김윤한 외, 1999, 난방설비, 기문당
- [12] Yunus A. Cengel, 1999, **Heat Transfer: A Practical Approach**, McGraw-Hill
- [13] W. F. Stoecker, 1987, **Refrigeration and Air Conditioning**, Mc-Graw-Hill
- [14] 김무근 외, 2002, 냉동 및 공기조화, 진영사
- [15] SEL, TRNSYS manual

Abstract

Dynamic Performance Simulation of Building Energy for Heating and Cooling

Hyun, Suk Kyun

Dept. of Mechanical Engineering

The Graduate School

Kyung Hee Univ., Korea

Approximately one third of primary energy supply is consumed in buildings. Consequently, buildings are a primary contributor to global warming and ozone depletion. Since the oil embargo experience in 1973, achieving better energy efficiency in buildings has become one of the world's major challenges.

The energy requirements in building depend on not only its own performance, but also HVAC system. But few attempts at dynamic performance simulation using temperature level control are found in the domestic literature. So this study is simultaneously evaluated dynamic performance of building and HVAC system using simulation program and is proposed interesting practical use in R&D field. As a way to get the reliability of programs for dynamic performance analysis, verification experiment of cooling load is conducted for a well-defined space and prediction using TRNSYS 15.2 is performed for the same condition from the users'

standpoint. Experimental conditions are carefully set to minimize uncertainties associated with air-change, infiltration, room to room interaction and measurement of temperature. Comparison of the accumulative load between the experiment and calculation shows a close agreement within the engineering tolerance. Secondly, dynamic performance on building with imaginary heating system is predicted with TRNSYS 15.2. To get public confidence, results of load calculation are compared with the previous study by similar condition.

Finally, this paper presents feasible method solving trouble of disagreement with cooling load in spite of full ice-storage and practical use for life cycle cost analysis and so on.

어느날 문득 당신을 느꼈을 때
이미 당신은 향기가 되고 양분이 되어
질 윤택하고 건강하게 해주고 있었습니다.
그런 당신이기에 지탱할 수 있었던
저의 이 불완전함을 사랑하며
그런 당신과 함께 호흡할 수 있어 행복했습니다.

짧은 2년 동안 저를 일깨워준 열환경제어연구실 식구들에게 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 먼저 이제는 저의 은사가 되실 지도 교수님께 진심으로 감사드립니다. 과정중에 교수님께서 보여주고자 하신 큰 밑그림을 다 보지 못했지만, 직접적으로 느낀 사소한 부분까지도 다시는 얻기 힘든 소중한 경험이었습니다. 또 다른 안목으로 논문을 공동지도하여 주신 숭실대학교 유호선 교수님과 꿈을 이루어내신 강채동 교수님, 여러 가지로 도움주신 생산기술연구원의 백종현 선임연구원님께 감사드립니다.

처음부터 끝까지 함께 하며 불평없이 굶은 일을 도맡아 해준 경용이와 적응하지 못하고 포기하려 했던 1기 시절 나를 붙잡아 준 창현이, 졸업뒤에도 귀찮은 질문에 자상하게 응해준 용승이형, 많은 짐을 혼자 지고 가 마음이 아픈 권이형, 도움 드린 것 없이 받기만 한 언제나 자상한 상담자가 되어주신 김성수 선배님께 감사하단 말보다는 차라리 죄송하다는 말을 드리고 싶습니다. 함께 생활하면서 보여준 여러분의 개성은 모두가 저의 편협한 사고의 틀을 깰 수 있었던 소중한 재산이었습니다. 모두 이루고자 하는 길을 성취하시길 기원합니다.

경용이와 나의 뒤를 이어줄 유원이와 진홍이, 만물박사 윤석이, 열혈남아 봉진이,

재간동이 동렬이와 짧은 시간 함께 했던 경만이와 종민이에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 지금은 선후배 사이로 만났지만 몇 년이 지나면 같은 분야를 걷는 동반자가 될 수 있도록 성장해주길 하는 바램입니다.

자상하게 상담을 해주시던 청렬이형, 우울할 때 활력을 불어주던 동민이와 특묘, 삼두, 자신의 길을 뚜렷하게 가고 있는 진이와 무성이, 전산열유체연구실 식구들에게 감사드립니다. 날카로운 안목을 지닌 현철이, 꿈을 쫓아 나아가고 있는 정환이, 항상 무언가를 찾고 있는 희정이와 진경이, 스타상현, 에너지물질순환연구실 식구들에게 감사드립니다. 경용이와 제가 웃음을 잃지 않도록 활력소가 되어준 국환이와 민수형, 자동제어연구실 식구들에게도 감사드립니다. 외대조교생활을 즐겁게 마무리할 수 있도록 도와주신 진과장님과 진훈, 미연 누님, 혜선 AV식구들에게 감사드립니다. 평소 감사의 글에 꼭 올리겠다고 약속하고 혹시나 제가 순간 잊어버렸을지 모를 모든 분들께 감사드립니다.

다른 길을 가고 있지만 부담없이 만나 서로를 격려하고 이끌어주며 평생을 함께 하고픈 나의 고향 친구들 현식이, 배근이, 홍규, 상부, 병수, 성규, 수민이와 석준이에게도 감사의 말을 전합니다. 각자의 개성을 만들어가고 있는 둘째 석규와 막내 석민이, 안식처가 되어준 나의 든든한 후원자 민주에게 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 못난 장남 때문에 이국땅에서 고생하시는 아버님과 고향에 홀로 계시는 어머니님, 어떤 길을 가더라도 믿음으로 후원해주시는 부모님께 형용할 수 없는 무한한 감사를 드립니다.

함께 이루어가는 법을 배워가고 있는

석 규