

동적건물, 난방환기공조 (HVAC) 및 제어시스템 시뮬레이션

A Dynamic Building HVAC Control System Simulation. (HVAC SIM⁺)

미국 상무성 국립표준 및 공학연구소(NIST)
 건물환경부 기계시스템 및 제어실
 공학박사 박 철
 Cheol Park

1. 머릿 말

건물, HVAC 장치 그리고 제어장치 등의 시스템 요소 사이에서 일어나는 동적 상호작용에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 비전유권의 건물시스템 시뮬레이션 프로그램을 미국의 국립표준 및 공학연구소(NIST)에서 개발하였다. 이 프로그램은 HVACSIM⁺으로 명명하였으며 HVAC(Heating, Ventilation & Air-Conditioning) 시스템과 아울러 HVAC Controls, 건물외피 그리고 건물의 난방방열원장치(heating and cooling plant)등을 모델링하였다. 이 프로그램은 ANSI Standard Fortran 77로 작성하였으며 주로 연구용 도구로 활용하도록 개발하였다.

HVACSIM⁺ 프로그램은 주시뮬레이션(main simulation) 프로그램, HVAC 요소의 모델링, 건물외피 그리고 주변장치용 자료발생프로그램(interactive front and data generation program)으로 구성되고 있다. 주 프로그램은 MODSIM이라 부르며 분류체계적 모듈식 접근법(hierarchical modular approach) 그리고 방정식특해법(advanced equation solving technique)을 사용하며 건물, HVAC 및 제

어시스템의 동적인 시뮬레이션을 수행하여 준다. 모듈식 접근은 TRNSYS 프로그램¹⁾에서 쓰고 있는 방법의 연장이다. 건물외피의 모델에서는 사용자가 선택할 수 있는 고정시간증분법(fixed time step method)을 사용하는 반면에, HVAC 과 제어시스템 과 건물구역모델(building zone model)에서는 가변시간증분법(variable time step)을 사용하고 있다.

HVACSIM⁺의보다 더 중요한 몇가지 특징은 앞서 공표^{2,3)}한 바 있으며 몇가지 사례연구의 결과도 발표하였다.^{4,5)} 참고용 교재(reference manual)⁶⁾와 사용안내서(user's guide)⁷⁾도 나왔다. HVACSIM⁺의 전반적인 개요도 또한 발표된 바 있다.⁸⁾ 그 이후에 HVACSIM⁺ 프로그램은 특히 건물부하계산 루우틴에서 계속해서 개선되어 왔다.

여기서는 HVACSIM⁺의 구성을 살펴보고 모듈식 시뮬레이션 프로그램(MODSIM)의 가장 중요한 핵심을 제시하고 HVACSIM⁺에서 사용한 수치해법의 간략한 요약을 하고 최근에 추가한 건물부하계산법들을 기술하고자 한다. HVACSIM⁺의 건물 및 구역시뮬레이션 특징들의 사용법을 보여주는 표본시뮬레이션을 소개하여 앞서의 논문과 보고서²⁻⁸⁾에서 주어

진 HVAC 및 제어시스템과 기기시물레이션 예제들을 보충한다.

2. HVACSIM⁺ 프로그램의 구성

HVACSIM⁺ 프로그램은 크게 예비과정 (preprocessing), 시물레이션 및 사후과정 (postprocessing) 등의 세가지의 부분으로 나

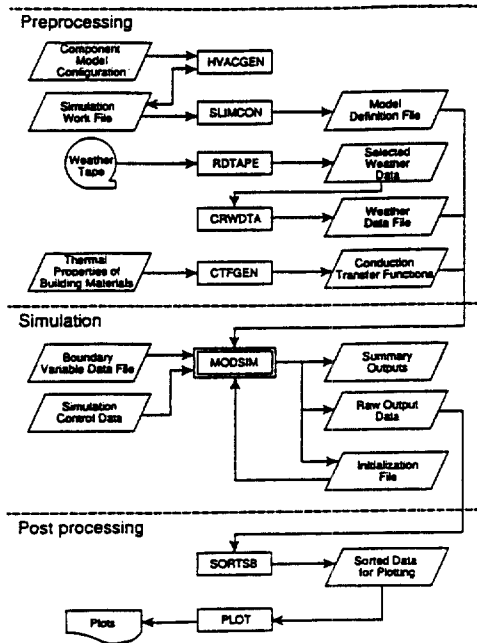


Fig.1 The Flow diagram of programs and data files of HVACSIM⁺

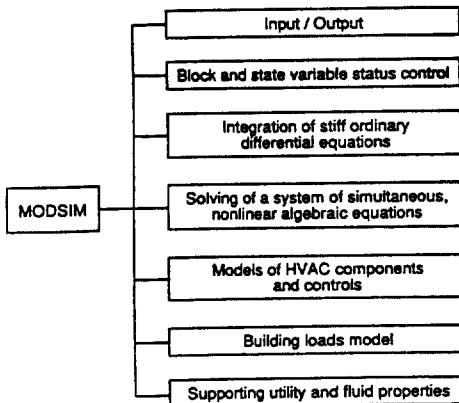


Fig.2 The structure of the drive program, MODSIM

뉘어진다. HVACSIM⁺ 프로그램 패키지내에 들어 있는 프로그램들과 데이터 파일의 흐름을 Fig.1에서 보여 주고 있다. 예비과정에서는 시물레이션을 위한 작업파일(work file)이 만들어지고 이 작업파일은 주변장치용 프로그램인 HVACGEN⁷⁾으로 편집할 수 있다. 그리고 나서 이 작업파일은 SLIMCON 프로그램으로 모델정의파일(model definition file)로 바뀌어진다. 시물레이션내에 건물외피가 관여하게 될 때에는 기상자료와 다층구조물의 전도전달함수도 만들어야 한다. RD-TAPE 프로그램은 기상자료테이프(SOLMET, TMY, TRY 및 WYEC 등의 테이프) 혹은 이와 동등한 테이프를 읽고 관련이 있는 부분의 기상자료를 선정한다. 이같이 해서 선정된 기상자료는 CRWDTA 프로그램에 의하여 MODSIM이 요구하는 형태로 바뀌어진다. CRWDTA 프로그램이 인위적으로 설계일의 기상자료를 만들 수 있으므로 기상데이터를 사용하는 것은 임의선택 사항이다.

다층의 건물구조체에 대한 전도전달함수는 CTFGEN 프로그램으로 만들어진다. CTFGEN 프로그램의 주변기기용 루우턴부분을 제외하고는 CTFGEN내의 주요 루우턴들은 TARP 프로그램¹²⁾에서 온 것이다. CTFGEN 프로그램을 사용해서 추가되는 건물재료의 열적인 물성치를 기존의 데이터파일에 첨가시킬 수 있으며 다층구조체에 대한 것을 Interactive 하게 구성할 수 있다.

MODSIM 프로그램은 HVACSIM⁺의 심장부에 속한다. Fig.2에서 보는 바와 같이 MODSIM은 주프로그램, 입력/출력을 위한 부프로그램, 블럭과 상태변수의 상태조절, 까다로운 상미분방정식(常微分方程式)의 적분, 비선형 연립미분방정식의 해, HVAC시스템의 요소모델들, 제어, 건물모델 그리고 보조프로그램 등으로 구성되어 있다.

시물레이션 프로그램인 MODSIM은 모델정의파일, 전도전달함수파일, 기상자료파일 그리고 경계데이터파일을 부른다. MODSIM을 수행하는 동안에 시물레이션 제어 입력데이터는 터미널을 통하여 입력시킬 수 있다. 시물

레이션이 성공적으로 끝나면 세개의 파일이 만들어진다. 이들은 요약파일, 생자료(raw data) 파일 그리고 초기작업(initialization) 데이터파일의 이름을 바꾼 후에 이것을 MODSIM의 입력데이터로 사용하여 앞서의 시물레이션이 끝난 곳에서 다시 시물레이션을 속행할 수 있다.

만일 생출력데이터를 도표로 보고자 한다면 사후과정이 필요하다. SORTSB 프로그램은 필요하다면 생출력데이터를 분류(sorting)해 주고 이 출력으로부터 모든 제목(label)들을 열거해 준다. HVACSIM⁺에는 데이터도면화용 소프트웨어가 포함되어 있지 않다.

3. MODULAR 시물레이션 프로그램, MODSIM

MODSIM은 MODULAR 시물레이션을 나타낸 것으로서, MODSIM의 설계개념은 위스컨신대학교의 태양에너지연구소에서 개발한 TRNSYS 프로그램¹⁾에서 온 것이다. 최초의 MODSIM은 HILL³⁾이 Fortran IV로 작성하였다. 그후에 MODSIM은 조직적인 Fortran 77로 고쳐 쓰여져 상당히 수정되었다. 현재의 MODSIM 프로그램의 주요 골자를 아래 기술하고자 한다.

3.1 계통적인 모듈식 접근방법

HVACSIM⁺의 계통구조는 슈퍼블럭, 블럭 및 유닛 등으로 구성되고 있다. Fig.3에 나타낸 바와 같이, 여러개의 유닛이 블럭을 구성하고 이들 여러 블럭이 슈퍼블럭을 구성한다. 한개 또는 여러개의 슈퍼블럭이 하나의 시물레이션을 이룬다. Fig.3에는 8개 유닛과, 4개의 블럭을 나타내고 있다. 한 블럭내 또는 한 슈퍼블럭내에 있는 방정식들은 연립해서 푼다. 슈퍼블럭간의 연결은 상태 변수들을 통해서 이루어진다.

모듈식 접근법을 사용해서, MODSIM내의 한 유닛은 HVAC 시스템, 제어 또는 건물외피 등 한요소의 요소모델을 대표하고 있다. 각 실제적인 요소는 TYPEn 서브루틴 안에서 모델링되어 있는데 이 서브루틴에서 n은

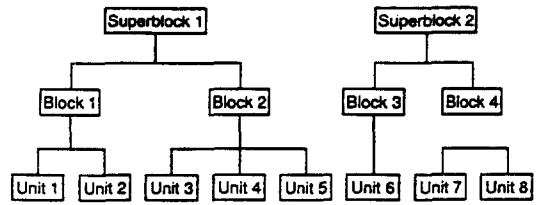


Fig.3 A hierarchical simulation setup for the HVACSIM⁺ program

특정요소에 지정된 형태의 인덱스 수를 나타낸다. 같은 요소모델을 한번 이상 사용하면 한개 이상의 유닛이 같은 TYPEn 서브루틴을 부를 수 있다. 한 요소모델의 각 서브루틴에서는 중간결과를 감춰(save)두기 위한 입력, 출력, 변수들 그리고 한개의 작업공간 벡터를 가지고 있다. HVACGEN 프로그램에 대한 입력파일인 요소모델형상 데이터 파일에는 감춘(save) 작업공간 벡터내의 입력, 출력, 변수들 및 각 성분의 수에 대한 정보와 입력, 출력 및 변수들의 내용을 담고 있다.

이 계통적인 모듈식 접근법은 시물레이션 모델을 세우는데 있어서 상당한 신속성을 준다. 한 건물시스템을 블럭 및 슈퍼블럭으로 쪼개는 것은 사용자에게 맡겨지며 또한 이것은 시스템의 종류와 그 안의 여러 요소간의 상호작용의 형태에 따라 달라진다. 좋은 시물레이션 결과를 얻기 위해서는 또한 계산시간을 단축하기 위해서도 적절한 블럭분할을 하여야 한다.

3.2 상태변수 및 블럭의 제어

한 시물레이션을 하는 동안에 연립방정식을 푸는데 상당한 시간이 소비된다. 한 블럭 또는 한 슈퍼블럭 내에서 연립으로 풀어야 되는 방정식의 수를 줄이면 상당한 계산절약을 얻을 수 있다. MODSIM에서는 몇몇 상태변수들이 정상상태에 도달하게 되면, 이 변수들을 제거하고 정상상태치로부터의 편차를 가져올 때까지 제껴 놓는다(또는 동결시킨다). 같은 방법으로 한 블럭에 대한 모든 입력변수들이 동결된다면 그 블럭은 비활동이 될 수

있다(또는 동결된다). 한 블록의 입력중의 하나가 해동하자마자 그 블록은 다시 작용중인 것으로 표시된다. 한 블록이 동결될 때 그 블록내의 동결된 상태변수들을 더 이상 지켜볼(모니터링) 필요가 없다.

3.3 시물레이션 시간간격의 혼용

MODSIM 프로그램은 서로 다른 두가지의 시간간격의 형태를 지니고 있다. 하나는 고정적인 시간간격이고 또 다른 하나는 변동하는 시간간격이다. 건물구조체의 전도전달함수는 균일하게 분할된 시간간격을 가지고 계산하고 있으므로 건물외피 모델에서는 사용자가 선정하는 고정시간간격을 사용하고 있다. 그밖의 모든 요소모델에서는 일정하지 않은 시간증분을 사용하고 있다. 한 시물레이션에서 각 수퍼블럭은, 이것이 자신의 시간간격을 가지고 독립적으로 시간에 따라 전진하고 있다는 점에서 독립된 부시스템(subsystem)이다. 일정치 않은 시간간격은(건물외피에 대한 수퍼블럭을 제외한) 각 수퍼블럭에 대하여 연립미분방정식을 푸는데 사용하는 적분루우틴으로 구한다. 그러나 수퍼블럭에서 허용하는 최대의 시간간격은 건물외피모델에서 사용되는 고정시간간격으로 한정된다.

3.4 시간증속의 경계조건

시물레이션을 하고 있는 시스템이 결정해 주지 않는 상태변수를 경계조건 또는 경계변수라고 부른다. 시물레이션 작업파일이 진행될 때 경계조건은 시간증속의 경계조건으로 명시될 수 있다. 이 변수들의 값은 경계자료파일에 저장하여야 한다. 이 경계자료파일은 시물레이션 진행이라고 읽어들인다. 이 데이터 파일에서 시간간격은 값을 필요는 없다. 왜냐하면, 여기서 3차의 라그랑지보간법을 사용하기 때문이다.

4. MODSIM에서의 수치해석

MODSIM 프로그램에서 사용하고 있는 수치해석법에는 연립비선형 대수방정식의 해법,

까다로운 상미분방정식의 적분기법 그리고 일정기간이나 또는 변동하는 시간간격에서 취한 데이터등에 적용한 보간법등이 있다. MODSIM에 있는 대다수의 부프로그램등은 이러한 수치적인 알고리즘과 연관되어 있다.

4.1 비선형 방정식의 해법

서브루우틴 SNSQ는 이속의 관련 부프로그램과 더불어 MODSIM에서 사용되고 있다. 이 루우틴은 CMLIB 패키지내에 있는 수학적인 소프트웨어 패키지인 SNLSE의 한 부분이며 이것은 샌디아 국립연구소의 Hiebert가 아알콘노국립연구소에서 개발한 MIN-PACK Code¹¹⁾내의 HYBRD와 HYBRDJ를 합쳐서 작성한 것이다. SNSQ 프로그램에서 사용한 방법은 Powell의 혼합법¹²⁾에 기초를 두고 있다. HVACSIM⁺와 함께 보다 좋은 시물레이션을 얻고자 SNSQ 루우틴을 다소 수정을 가하였다.

4.2 까다로운 상미분방정식의 적분

연립미분방정식을 푸는데 변동하는 시간간격과 변동하는 Order의 적분기법을 사용하여 동적 시물레이션에 소요되는 전산시간을 엄청나게 단축시킬 수 있다. 사용한 알고리즘은 Brayton, Gustavson 및 Hachtel¹³⁾ 등이 개발한 알고리즘이다. 이것은 DIFSUB¹⁴⁾라고 부르는 유명한 Gear 알고리즘의 한 연장으로서 이 DIFSUB에서는 Nordsieck의 방법¹⁵⁾와 관련해서 후방미분공식을 사용하고 있다.

4.3 데이터의 보간

MODSIM 프로그램에서는 라그랑지 및 스플라인의 보간기법을 사용하고 있다. 시간증속경계변수에 대한 데이터점들의 보간법계산은 3차의 라그랑지 보간법을 적용하고 있다. 매시간의 기상자료에 대한 보간법적용을 위해서는 Ferziger¹⁶⁾가 한 3제곱 스플라인 보간법의 컴퓨터 프로그램을 MODSIM에서는 사용하고 있다.

5. 건물부하계산

HVACSIM⁺에서는 건물의 열부하의 산정을 위하여 건물의 외피모델과 빌딩의 구역모델을 사용하고 있다. 이 모델들은 Kusuda¹⁷⁾ 및 Walton⁹⁾의 연구를 바탕으로 해서 개발하였다. 건물외피의 모델은 사용자가 선정하는 고정시간간격을 필요로 하는 한편, 구역모델에서는 변동시간간격을 사용할 수 있다.

5.1 응답계수법

건물부하계산을 위한 모델에서는 각종 외피재료의 종류, 공기온도, 습도, 조명, 기기, 재실계획, 태양복사, 풍속, 건물바깥표면의 방위 그리고 그들의 영향 등을 포함한다. 너무 많은 요인들이 게재되어 있으므로 간이화를 위한 가정을 세워야만 하였다. HVACSIM⁺ 프로그램내의 주요 가정중에는 (1) 건물표면상의 온도분포는 균일하다(벽을 가로지르는 열전달은 1차원). (2) 지중온도분포는 균일하다. (3) 풍향, 비 및 눈의 영향은 받지 않는다.

사용한 접근법은 건물외피를 통한 전도열전달율을 계산하는 표준적인 응답계수법을 사용하고 있다. 전도전달함수는 한번 계산하고 시뮬레이션에 앞서 저장된다. 건물구조체의 전도전달함수의 계산에 사용한 같은 시간간격을, 건물표면을 통한 전도열유속은 불변적이라고 가정하는 주기로서 적용한다.

건물부하를 구하기 위한 기본적인 루우틴들은 건물표면온도와 구역부하의 계산에 관련되는 것들이다. 벽 및 구역은 요소모델로 삼으며 TYPEn 부프로그램으로서 작성된다. 고정시간간격을 사용하는 관계로 건물표면을 나타내는 유닛들은 변동시간간격을 사용하는 유닛을 포함하고 있는 슈퍼블럭들과 분리된 한 개의 슈퍼블럭내에 있어야 한다. 비교해 본다면, 구역모델은 변동시간간격을 기초로 해서 공기의 건구온도와 습도비를 계산하여 HVAC 시스템의 동적인 운전 및 그 제어 그리고 열부하등을 고려하고 있다.

5.2 전도전달함수의 계산

벽, 바닥, 지붕 및 창문 등의 전도전달함수들은 건물표면에 대한 서브루우틴(TYPE 51)

에서 필요로 한다. 이 서브루우틴은 또한 구조물의 내외양표면상의 전도열유속에 관련되는 한 기간을 필요로 한다. CTFGEN 프로그램(Fig.1 참조)은 전도전달함수와 유소전달함수를 계산한다. 건물재료의 열물성(두께, 열전도율, 밀도, 비열 및 열저항 등)은 데이터파일(THERM. DAT)에 저장한다. CTFGEN을 사용해서 그밖의 건물재료의 열물성을 이 데이터파일에 추가할 수 있다. 사용자가 선정한 건물재료도 집어넣어 전달함수를 필요로 하는 다층건물구조를 구성할 수 있다.

TARP에 근원을 두고 있는 주계산루우틴은 BLAST로부터 약간 수정된 것이었다. 계산순서에 대한 상세는 참고문헌^{18, 19)}에서 볼 수 있다.

5.3 기상자료

시뮬레이션이 건물열부하에 관여될 때에는 MODSIM내의 서브루우틴 RDENV는 매 시간의 외기건구온도, 습도비, 대기압, 풍속, 직달수직태양복사열, 천공확산복사열 및 총수평태양복사열 등을 읽어드린다. 이들 한 시간별의 기상자료는 4.3절에서 언급한 스프라인보간법루우틴을 사용해서 한 시간의 몇분의 1에 대한 값으로 보간한다.

프로그램 RDTAPE은 기상테이프(Fig.1 참조)을 읽어들이며 출력데이터파일(WTPOUT. DAT)상에 선정한 기상자료를 써준다. 파일내의 기상자료는 프로그램 CRWDAT로 RDENV가 요구하는 적절한 입력포맷으로 전환된다. 만일 기상테이프로부터의 어떤 정보가 빠진다면 CRWDAT가 인공적인 자료를 만들어서 이 빠진 부분에 채워준다. 기상테이프와 RDTAPE 프로그램의 사용은 임의선택사항이다. 선택적으로 CRWDAT를 사용해서 사용자가 명시한 특징을 가지고 매끄럽고 인공적인 기상자료를 발생시킬 수 있다.

6. HVAC 요소와 제어모델

HVACSIM⁺ 프로그램에는 HVAC 요소와 제어의 모델이 포함되어 있어 짧은 시간간격으

로 동적 시뮬레이션을 해준다. Table 1에 보여준 바와 같이 요소라이브러리에 30개의 TYPEn 서브루틴이 포함되어 있고 또한 덕트나 배관내에서 수송지연 밸브나 댐퍼의 히스테리시스의 영향 그리고 열교환기의 환효율을 구하는 루우틴이 들어 있다. 이 밖에도 공

Table 1. Component Models in HVACSIM⁺ Program

Type 1	Fan or Pump
Type 2	Duct or Pipe
Type 3	Inlet Duct or Pipe
Type 4	Flow Merge
Type 5	Damper or Valve
Type 6	Flow Split
Type 7	Temperature Sensor
Type 8	Proportional-Integral Controller
Type 9	Linear Valve with Pneumatic Actuator
Type 10	Hot Water to Air Heating Coil (Simple)
Type 11	Hot Water to Air Heating Coil (Detailed)
Type 12	Cooling Coil or Dehumidifying Coil
Type 13	Three-way Valve with Actuator
Type 14	Evaporative Humidifier
Type 15	Room
Type 16	'Sticky' Proportional Controller
Type 17	Mixing Dampers and Merge
Type 18	Plenum
Type 19	Flow Balance Control
Type 20	High or Low Limit Controller
Type 21	'Grounded' Flow Split
Type 22	Steam Spray Humidifier
Type 23	Steam Nozzle
Type 24	Ideal Gas Nozzle
Type 25	Steam to Air Heat Exchanger
Type 26	Control Signal Invertor
Type 50	Zone Envelope
Type 51	Building Surface
Type 52	Zone Model
Type 53	Weather Input

기, 수증기, 물 그리고 냉매의 물성을 계산해주는 루우틴이 들어 있다. Hill⁴⁾이 작성한 실 모델은 공기질량, 실내질량 및 벽질량 등을 고려하고 있으며 벽을 통한 열유동율은 이미 정하여진 일정치를 사용한다. 이 밖에도 여러 가지 요소모델들을 여러 사용자들이 개발하였으나 NIST에서 사용자에게 HVACSIM⁺를 보낼 때에는 이들을 포함시키지 않는다.

7. 대형 사무용 건물의 시뮬레이션

미국 Maryland 주 Gaithersburg 소재의 NIST 단지내에 있는 11층의 사무용 건물용 시뮬레이션의 대상으로 삼았다. 이 빌딩은 건물높이 49.7m, 폭 15m이고 길이가 67m이다. 이 철근콘크리트구조물은 회색의 전면벽들과 보온을 한 포우슬린 강판과 유리창으로 둘러싸여 있다. 남쪽 및 북쪽의 바깥벽에 위치한 알루미늄 덩개는 콘크리트 기둥과 공급 공기덕트를 덮어주고 있다.

각 층의 바닥넓이는 867m²이고 천장높이는 3.1m이다. 네개의 에어핸들링유닛이 2층에서부터 11층까지를 맡고 있다. 공급공기의 분배에 따라 건물은 네가지의 사용구역으로 나누어지고 있다. 공급공기는 공급공기덕트를 통해서 온수재열유닛을 지난 후 구역안으로 들어간다.

AHU는 공급공기팬, 리터언공기팬, 댐퍼, 수증기, 예열코일, 칠드워터 냉각코일, 덕트 그리고 부속제어장치로 이루어지고 있다. 코일과 댐퍼제어요소는 지관공기압으로 조절되고 있다. 이 지관공기압력은 종래의 공기압제어기로 조정되거나 디지털제어 압력조정기로 제어한다. 실험목적은 제외하고는 평소의 운전은 종래의 공기압제어기로 하고 있다. 감시업무, 자료수집 그리고 직접디지털제어(DDC)를 위하여 다량의 센서를 에어핸들링 시스템의 각 요소에 부착하였다. 이들 센서는 multiplexer (MUX)에 연결하고 이 MUX는 다시 field intelligence device (FID)에 연결되었다. 각 에어핸들러에 FID가 연결되고 네개의 FID는 중앙제어유닛(CCU)에 연결되고 있다. CCU는 하나의 미니컴퓨터이다. Fig.4는

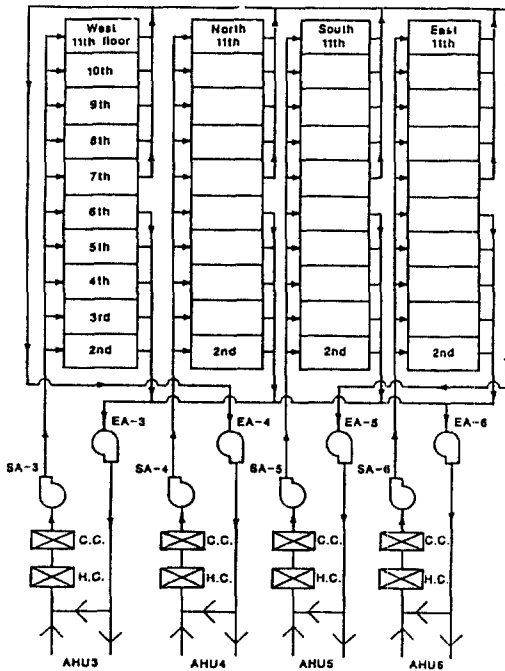


Fig. 4 Air Distribution System of NIST office Building

NIST 사무용 빌딩의 공기분배시스템을 보여 주고 있다.

7.1 시뮬레이션의 간이화

대형의 빌딩시스템에 HVACSIM⁺ 프로그램을 적용해서 시뮬레이션 하는데 있어서는 공학적인 간이화와 가정이 필요하다. 모델링하는 일은 컴퓨터라던지 인적 자원의 제한성하에 수행하여야 한다. 컴퓨터에 있어서는 컴퓨터의 계산시간과 입력/출력장치가 중요한 문제가 된다. 시뮬레이션에 앞서서 빌딩의 외피부분을 간이화하였다. 어느 기준층(예컨대 7층)을 선정하고 이 층을 네개의 AHU가 공급공기를 분배하는 상태에 따라서 네개의 구역으로 나누었다. 각 구역은 6.35cm의 유리솜 보온재를 씌운 강철판으로 막았다고 가정하였다. 에어핸들러에서 나온 1/10의 공급공기가 각 층에 공급되고 있다고 가정하였다. 또한 문제를 보다 더 단순화 시키기 위하여 리터언공기의 유량이 공급유량과 같다고 처리하였다. 혼합상태를 시뮬레이션 하기 위하여

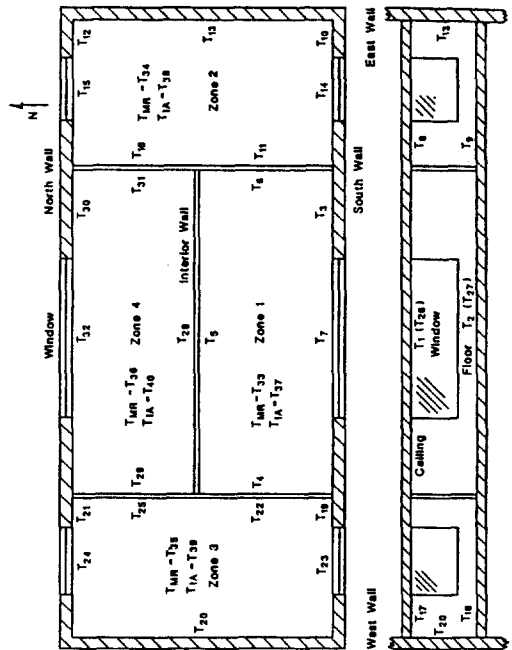


Fig. 5 Simplified building zones of a typical floor

공급공기유량의 가중계수를 써서 리터언공기 온도와 습도비를 구하였다. 같은 구조를 가지고 있는 모든 표면(예컨대, 유리창, 칸막이 벽 및 밖으로 노출된 외벽)은 하나의 표면이 되도록 합쳤다. Fig.5는 어느 층의 간이화시킨 빌딩구역을 보여 준 것이다.

7.2 모델의 검증

NIST의 사무용 건물의 모델을 검증하기 위하여 실제로 측정된 기상자료를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 기상자료에는 대기온도, 습도비, 풍속, 수평면 총태양복사열 등의 측정치를 포함하였다. 그리고 조명에서 오는 감열취득량과 잠열취득량을 조사하였다. 재실자는 NIST의 전화번호부에 기록된 사람들이 각 층에 분포되어 있는 상태를 기준으로 정하였다.

검증시뮬레이션에서 사용한 제어스키임은 야간 피어징이 없는 발/정 제어다. 주중에는 아침 일찍 공급공기팬 및 리터언공기팬을 가동시키고 저녁에는 일과시간이 끝난 후에 중지시킨다. 각 AHU에서 팬의 전속도회전에서

작동될 때 냉각코일이 작용한다. 공기압식 컨트롤러가 냉각코일밸브를 조절하는데 이 냉각코일이 작용한다. 공기압식 컨트롤러가 냉각코일밸브를 조절하는데 이 냉각코일밸브는 냉수(chilled water)의 유량을 조정한다.

냉각코일밸브를 제어하는 공기압식 컨트롤러의 설정점은 구역의 냉방수요에 의하여 재설정하였다. 여름철의 재설정의 스케줄은 다음과 같다. 구역온도가 25.3 °C보다 높으면 컨트롤러에 의하여 공급공기온도를 5.5 °C에 놓는다. 구역공기온도가 24.2 °C보다 낮을 때에는 설정점을 14.5 °C로 하였다. 구역온도가 상한 및 하한의 중간에 있을 때에는 구역온도의 일차함수관계로 설정점을 정하였다.

시뮬레이션에서 간단한 건구온도 예코노마 이저알고리즘을 사용해서 댐퍼를 제어하였다. 외기건구온도가 16.7 °C보다 높거나 또는 5.5 °C보다 낮을 때는 댐퍼를 최소한으로 열어주고 공기온도가 14.5 °C와 16.7 °C 사이에 있

으면 댐퍼를 최대한으로 열어주었다. 한편, 외기온도가 5.5 °C이상에서 14.5 °C보다 낮으면 댐퍼를 열어주는 것이 외기온도의 일차함수관계로 하였다.

많은 시뮬레이션을 수행하여 실험측정결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 모델이 필요로 하는 많은 수의 입력자료를 추정하였으므로 시뮬레이션과 실험결과가 비슷해질 때까지 시뮬레이션을 반복하였다. Fig. 6은 AHU 3의 측정결과와 구역 3의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. Fig.7에서는 네 개의 AHU의 공급공기온도의 시뮬레이션과 측정의 결과를 비교한 것이다.

7.3 발/정 제어와 연속운전시뮬레이션

검증시에 사용한 시뮬레이션 모델을 사용해서 두가지 제어스키임에 의한 에너지 소비량을 비교하였다. WYEC(Wether Year for Energy Calculation) 테입으로부터 Washing-

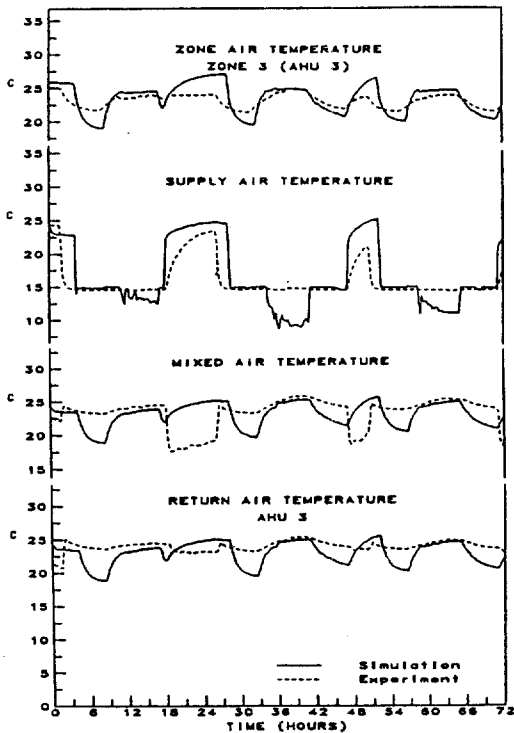


Fig.6 Air temperatures of AHU, 3 and Zone 3

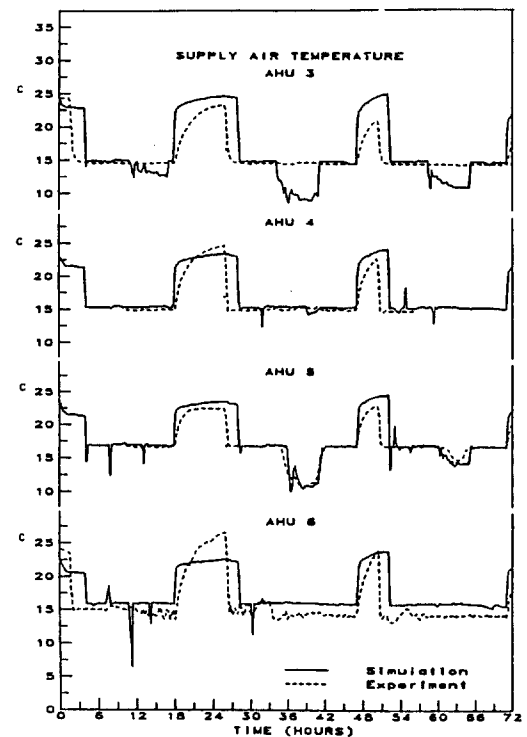


Fig.7 Supply Air Temperatures of air handling units

ton, DC. 의 기상자료를 발췌하였다. 냉방계절 (3월에서 10월까지) 중에서 매월의 대표적인 하루를 선정하였다. 기상자료를 발췌하는데는 Nall, Arens 및 Flynn²²⁾ 방법을 사용하였다. Fig.8은 두가지의 제어스키임을 사용하였을 때 네 AHU의 냉각코일과 팬이 소비한 에너지를 보여 주고 있다. 발/정 제어에서 가동시간은 아침 6시에서 오후 6시까지이다. 연속운전이 발/정 제어보다 훨씬 많은 에너지를 소요하고 있음이 명시되고 있다.

7.4 야간피어징 시뮬레이션

야간피어징에 따른 에너지 소비량을 살펴 보았다. 야간피어징은 오전 1시에 시작하여 오전 6시에 끝났다. 이 피어징사이클 중에는 외기덤퍼를 전개하고 환은 전속력으로 작동시키며 냉각코일밸브는 닫았다. 피어징시와 피어징하지 않을 때의 에너지 소비량 비교를 Fig.9에 보여주고 있다. 냉각코일의 운전시간은 오전 6시에서 오후 6시까지이다. 피어징 사이클의 활용으로 봄가을에는 냉각코일의 에너지가 덜 드는 것을 볼 수 있다. 그러나 환이 소비하는 전력소모로 결과적으로 피어징하지 않는 것보다 에너지가 더 소모되었다. 따라서 야간피어징을 NIST의 사무용 빌딩의 HVAC 시스템에 적용시킨다면 에너지 절약이 되지 않는다고 볼 수 있다.

8. 에뮬레이터/테스터

1983~1984년 사이에 EMCS에서는 최초라고 보아지는 비전유권의 emulator/tester를 개발하였다.²³⁾

최근에는 국제에너지기구(IEA) Annex 17 위원회와 협조하여 차세대의 에뮬레이터/테스터를 개발중에 있다. NIST emulator/tester는 Fig.10에서 보여주는 바와 같이 자료취득/제어시스템(data acquisition/control system), DACS와 두개의 386급 개인용 컴퓨터를 사용하고 있다. 두개의 컴퓨터중 하나에는 HVACSIM⁺ 프로그램을 돌리며 데이터 통신을 위하여 특별한 형태의 요소를 사용하

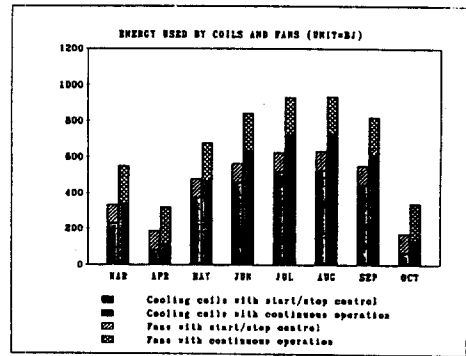


Fig.8 Energy consumptions by cooling coils and fans

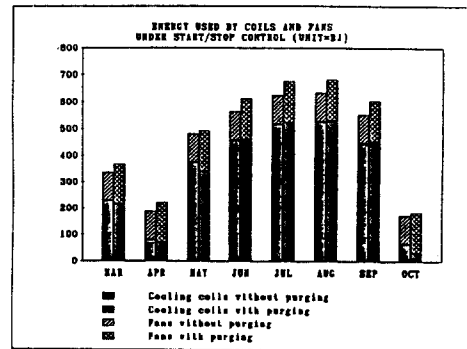


Fig.9 Energy consumptions by cooling coils and fans with and without purging cycle

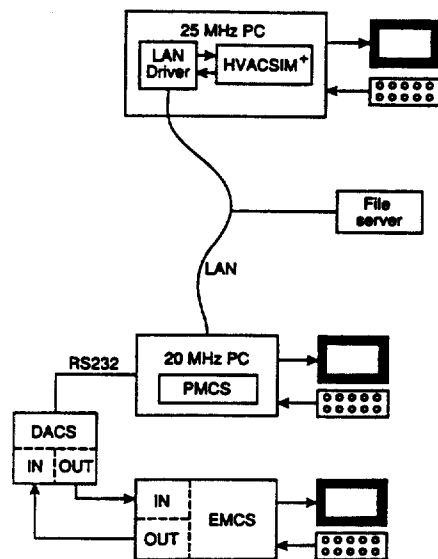


Fig.10 The NIST emulator/tester

고 있다. 이 Fortran Type의 루우틴은 C언어로 작성한 루우틴을 부르기도 한다.

HVACSIM⁺ 프로그램은 빌딩/HVAC 시스템을 real time으로 시뮬레이션 해준다. EMCS와 HVACSIM⁺ 사이에 인터페이스로 구입가능한 소프트웨어를 사용하고 있다. EMCS 터미널로부터 DACS 터미널까지는 각각의 채널이 두개의 전선으로 연결되어 있고 DACS와 인터페이스 소프트웨어를 돌리고 있는 컴퓨터 사이는 RS-232 케이블도 연결되고 있다. 두 컴퓨터간은 LAN(Local Area Network)으로 연결되고 있다.

이 에뮬레이터/테스터는 real time으로 빌딩과 기계장치를 시뮬레이션 해주며 EMCS의 센서와 액추에이터 대신에 EMCS에 직접 연결된다. 그러면 EMCS는 실제 빌딩에서와 같이 시뮬레이션 된 건물을 제어하고 한편으로는 에뮬레이터/테스터가 EMCS의 성능을 측정한다. NIST의 에뮬레이터/테스터¹¹⁾와 영국의 Oxford 대학에서 개발한 에뮬레이터/테스터²⁴⁾는 HVACSIM⁺ 프로그램을 사용하고 벨지움에서는 TRNSYS 프로그램을 그들의 에뮬레이터/테스터에 적용시키고 있는 것으로 알고 있다.

8.1 에뮬레이터/테스터의 확인

에뮬레이터/테스터 작동의 타당성을 확인하기 위하여, EMCS를 에뮬레이터/테스터에 연결하는 경우와 지금까지 언급한 모든 것을 시뮬레이션 하는 경우를 비교하였다. 시뮬레

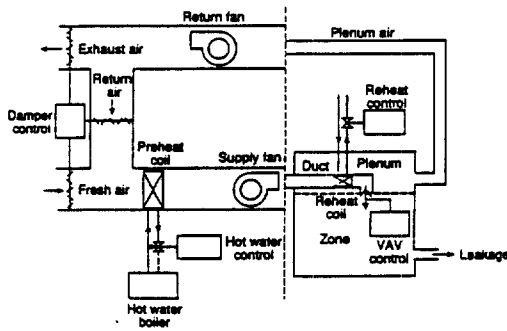


Fig.11 The Collins building system model simplified by NIST

이션만을 한 경우는 EMCS에 있는 제어알고리즘을 Fortran으로 작성하여 HVACSIM⁺ 프로그램의 한 수퍼블럭에 두었다. 소규모 사무용 빌딩의 모델을 확인하기 위하여 사용하였다. 이 빌딩모델은 Politecnico di Torino에서 개발한 것으로서 NIST에서 간소화시켰다. Fig.11은 이 간소화시킨 Collins 빌딩시스템 모델을 보여주고 있다.

에뮬레이터를 하는데 있어서 모든 컨트롤러의 루우틴을 시뮬레이션 프로그램에서는 제외시키고 적절한 제어알고리즘을 EMCS에 작성(coding) 하였다. EMCS의 PID컨트롤러의 비례컨트롤러의 루우틴만을 적용하였다. HVACSIM⁺ 프로그램에 최초의 시뮬레이션 시간간격을 0.1초로, 한편 최대시간간격을 5초로 하였다. 시뮬레이션이 real time보다 빠를 때는 real time과 같아질 때까지 기다리게 하였다. Fig.12는 예열코일밸브의 제어신호를 시뮬레이션과 에뮬레이션의 경우로 비교하였다. Fig.13에서는 3일간의 에너지 소비량을 보여주고 있다. 예열코일과 공급공기팬과 리터언공기팬에 의하여 소비된 에너지

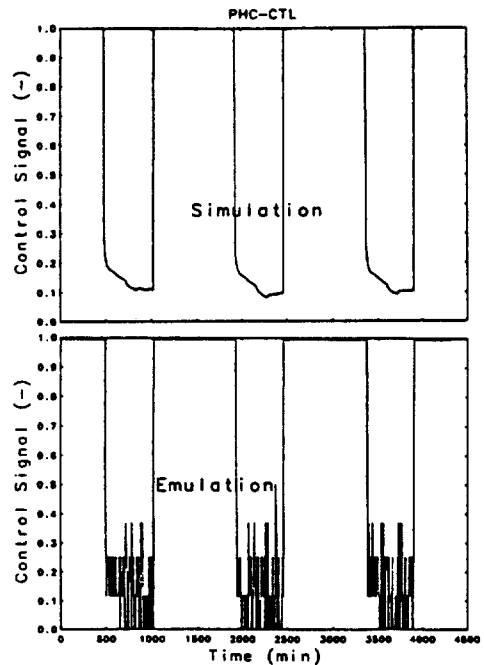


Fig.12 The preheat coil valve control signals

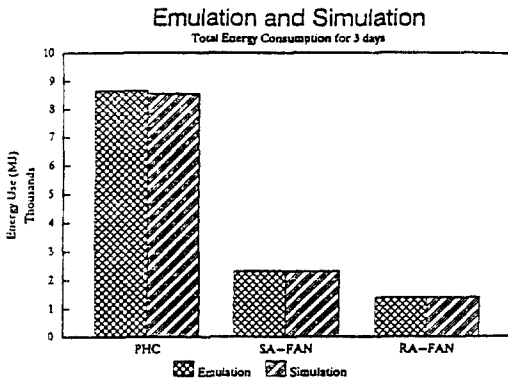


Fig.13 The total energy consumption for three days. PHC denotes the preheat coil, SA-FAN the supply air fan, and RA-FAN the return air fan

지다. 시뮬레이션과 에뮬레이션이 상당히 근사하다는 것을 볼 수 있다.

9. 맺음말

건물, HVAC 시스템 그리고 이에 따른 제어 시스템을 시뮬레이션 하기 위한 도구로서 HVACSIM⁺ 프로그램에 대하여 설명하였다. 이 프로그램은 연구용 도구이기 때문에 사용자에게 편리하지 못한 점도 있다. window 라던지 mouse 의 사용이라던지 온라인 그래픽 디스플레이를 할 수는 없지만 모듈식으로 되어 있기 때문에 상당한 융통성을 가지고 있다. 에뮬레이터/테스터에서 건물, 기계적 장치 그리고 센서를 시뮬레이션 하여 주고 있다. 어떠한 도구이던간에 사용자가 이것을 어떻게 사용하느냐에 따라 그 성과가 나타나는 것은 주지의 사실이라는 것을 강조하고 싶다.

참고 문헌

1. Klein, S.A., et al., 1983 "TRANSYSS, A Transient System Simulation Program", Report 38-12, University of Wisconsin, Dec.
2. Kelly, G.E., Park, C. Clark, D.R., and May, W.E., 1984 "HVACSIM⁺, A Dynamic

- Building/HVAC/Control Systems Simulation Program", Proc. of Workshop on HVAC Controls Modeling & Simulation, Georgia Inst. of Tech., Atlanta,
3. Hill, C.R., 1984 "Simulation Techniques for Building Systems", Proc. of Workshop on HVAC Controls Modeling of Simulation, Georgia Inst. of Tech., Atlanta,
4. Hill, C.R., 1985 "Simulation of a Multi-zone Air Handler," ASRAE Trans., Vol. 91, Part 1.
5. Clark, D.R., Hurley, C.W., and Hill, C.R., 1985 "Dynamic Models for Hvac System Components", ASHRAE Trans., Vol. 91, Part 1, 1985.
6. Clark, D.R., 1985 "HVACSIM⁺ Building Systems and Equipment Simulation Program Reference Manual", NBSIR 84-2996, NBS.
7. Clark, D.R., and May, W.B., 1985 "HVACSIM⁺ Building Systems and Equipment Simulation Program: User's Guide", NBSIR 85-3243, NBS.
8. Park, C., Clark, D.R., and Kelly, G.E., 1986 "HVACSIM⁺ Building Systems and Equipment Simulation Program: Building Land Calculation", NBSIR 86-3331, NBS.
9. Park, C., Clark, D.R. and Kelly, G.E., 1981 "An Overview of HVACSIM⁺, A Dynamic Building/HVAC/Control Systems Simulation Program", 1st Annual Building Energy Simulation Conference, Seattle, WA.
10. Park, C., Bushby, S.T., and Kelly, G.E., 1989 "Simulation of a Large Office Building System Using the HVACSIM⁺ Program", ASHRAE Trans., Vol. 95, Part 1.
11. Kelly, G.E., Park, C., and Barnett, J.P., 1991 "Using Emulator/Tester for Commissioning EMCS Software, Operator Training, Algorithm Development, and Tuning Local Control Loops", ASHRAE Trans., Vol. 97, Part 1.

12. Walton, G.N., 1983 "Thermal Analysis Research Program Reference Manual", NBSIR 83-2655, NBS.
13. Hiebert, K.L., 1982 "An Evaluation of Mathematical Software that Solves Systems of Nonlinear equations", ACM Trans. Math. Software, Vol. 8, No. 1.
14. Powell, M.J.D., 1970 "A Hybrid Method for Nonlinear Equations", in Numerical Methods for Nonlinear Algebraic Equations, Edited by P. Rabinowitz, Gordon and Breach, London.
15. Brayton, R.K., Gustavson, F.G., and Hachtel, G.D., 1972 "A New Efficient Algorithm for Solving Differential-Algebraic Systems Using Implicit Backward Differential Formulas", Proc. IEEF Vol. 60, No. 1.
16. Gear, C.W., 1971 "The Automatic Integration of Ordinary Differential Equations", Comm. ACM. Vol. 14.
17. Nordsieck, A., 1962 "On Numerical Integration of Ordinary Differential Equations", Math. Comp., Vol. 16.
18. Ferziger, J.H., 1981 Numerical Methods for Engineering Application, John Wiley.
19. Kusda, T., 1976 "NBSLD, The Computer Program for Heating and Cooling Loads in Building, BSS 69, NBS
20. Kusuda, T., 1969 "Thermal Response Factors for Multilayer Structure of Various Heat Conduction Systems", ASHRAE Trans. Vol. 75.
21. Hittle, D.C., 1981 "Calculating Building Heating and Cooling Loads Using the Frequency Response of Multilayered Slats", Report CERL-TM-E-169, Construction Engineering Research Lab., Champaign, IL.
22. Nall, D.H., Arens, E.A., and Flynn, L.E., 1981 "Abbreviation of Climate Data for Building Thermal Analysis Programs Using Representation Samples of Various Lengths", ASHRAE Trans., Vol. 87, Part 1.
23. May, W.B. and Park, C., 1985 "Building Emulation Computer Program for Testing of Energy Measurement and Control Systems Algorithms", NBSIR 85-3291, NBS.
24. Haves, P., et al., 1991 "Use of a Building Emulator to Evaluate Techniques for Improved Commissioning and Control of HVAC Systems", ASHRAE Trans., Vol. 97, Part 1.
25. Liebecq, G.A., Nusgens, P.J., and Wang, S., 1991 "Technical Aspects of the Design of an Emulator for Building Energy Management Systems", ASHRAE Trans., Vol. 97, Part 1.