

## 제어시스템 개수에 따른 건물의 에너지 절감효과

### A Case Study for Identifying Energy Savings through Controls Retrofit Using EMCS

이 승 복  
S. B. Leigh  
성균관대학교 건축공학과



- 1957년생
- 건축환경공학을 전공하였으며, 에너지 효율적인 건물의 설계 및 운전에 관심을 가지고 있음.

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

상업용 건물에서 소모되는 에너지는 미국내 전체 에너지 사용량의 14.4%에 해당되며, 그 중 60%가 연면적 2,500m<sup>2</sup> 이상의 대형건물에서 소모되고 있다.(DOE/EIA-0318, 1989) 에너지원별로 보면, 상업용 건물에서 소모되는 에너지의 약 70%가 전기에너지이며, 이는 미국의 전기에너지 사용량의 거의 3분의 1에 해당된다. 또한 상업용 건물의 전기에너지 사용을 용도별로 보면, 약 40%가 실내 조명용, 20%가 냉방용, 15%가 난방용, 그리고 10%가 에너지 분배시스템을 통해 소모되는 것으로 밝혀졌다.(BNL, 1991) 이러한 관점에서, 상업용 건물의 조명 및 공기조화(HVAC) 설비 시스템의 성능을 향상시킴으로써 에너지 절약에 기여할 수 있는 가능성은 매우 클 것으로 판단된다.

그 일환으로써, 지난 80년대 급속도로 발전된 에너지 관리시스템(Energy Management and Control System, 이하 EMCS)을 이용함으로써 공기조화 설비시스템의 운전효율을 향상시키고자 하는 노력이 많은 상업용 건물에서 이루어져 왔다.

에너지 관리시스템(EMCS)이란 건물의 관리자가 모든 건물 설비시스템의 운전상태를 감시하고, 이를 토대로 건물의 에너지 관련 시스템을 제어하도록 함으로써 최소한의 운영비로 최적의 건축환경을 유지하고자 도입된 첨단 제어시스템을 말한다. 최근에 들어서는, 지능적인 제어장치, 빠른 속도의 정보 처리망, 그리고 효율적인 소프트웨어의 개발을 통하여 건물의 에너지 성능을 향상시킬 수 있는 다양한 제어개념을 실현하기에 이르렀으며, 또한 에너지 관리시스템의 감시(monitoring) 및 제어(control) 기능을 활용함으로써 건물의 에너지 사용모델(baseline energy model)을 개발하기에 이르렀다. 이 모델을 근거로 하여 건물의 비정상적인 에너지 소모를 자동으로 감지하고, 이를 보정함으로써 궁극적으로 에너지 사용량을 줄일 수 있는 소위 전문가 시스템(Expert System)의 개발이 가능하게 되었다.

MacDonald는 에너지 절약과 관련한 에너지 관리시스템의 활용실태 조사를 통해서, 기존의 공조설비 시스템에 내재된 미비점을 보완하고 효율적인 시스템의 운전을 위해 건물관리자가 에너지 관리시스템의 감시기능을 활용함으로써 전문가 시스템을 개발, 사용하고 있음을 밝혔다.(MacDonald and Gettings, 1988) 특히, 건물관리

\* 이 논문 원고는 저자가 미국 오크리지국립연구소(ORNL)에 재직 중 수행한 연구과제에 발췌, 요약한 것임.

자가 실제 운전경험을 토대로 다양한 제어 소프트웨어의 성능을 파악하게 됨으로써 시간스케줄에 따른 가동/정지제어(time-of-day control)가 가장 에너지 절약적임을 알게 되었으며, 따라서 가동/정지제어가 기타의 제어개념(control algorithm)에 비해 폭넓게 활용되고 있음을 밝혔다. 이와 같이, 새로운 제어기술을 통해 건물의 에너지 사용을 절감할 수 있다는 개념적 평가가 있기는 하지만, 아직도 건물관리자의 관련지식 미흡으로 효율적인 건물의 운전이 이루어지지 못하고, 제어시스템의 설치비용이 비싸며, 각 제어기능의 에너지 절약효과에 대한 정량화된 자료가 없는 실정이어서 새로운 제어기술을 통해 얻을 수 있는 에너지 및 운전비용 절감의 제한된 편익만이 이루어지고 있다.

### 1.2 연구의 목적

본 연구에서는 지난 80년대에 조명시스템, 공조설비 및 에너지 관리시스템 등의 개수를 통하여 건물의 에너지 절약을 도모해 온 미국의 Washington, DC에 소재한 United Unions Building을 대상으로 사례연구를 함으로써 건물의 에너지 절약을 위한 운전조건에 대하여 비교, 분석하였다. 상기의 건물을 연구 대상으로 선정한 이유는 개수 이전 및 이후의 건물에너지 데이터가 활용 가능하고, 제어기능을 바꾸어 가면서 실제로 건물을 운전해 봄으로써 이에 따른 에너지 소모상태를 추적할 수 있으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 요구되는 기상데이터를 현장실험 시기에 맞추어 제공 받을 수 있었던 점 등을 들 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 제어시스템의 개수(controls retrofit)를 통한 에너지 절약효과에 대하여 정량화된 자료를 제시함으로써 새로운 에너지 관리기술의 보급을 확대하고자 하는 데 그 목적이 있다.

### 1.3 연구의 내용 및 방법

에너지 관리시스템을 이용함으로써 얻을 수 있는 에너지 절약효과를 정량화하기 위하여, 건물의 사용조건 및 열적 특성에 따라 운전하는 소위 가동/정지제어와 기존의 상업용 건물에서

많이 활용되고 있는 자동온도제어 사이의 에너지 성능을 비교, 평가하였다. 이를 위해서, 각각의 제어개념을 이용하여 실제로 건물을 운전해 봄으로써 현장실험 데이터를 수집하였으며, 이 데이터는 각 제어기능의 에너지효율을 측정하기 위해 직접적으로 사용되었을 뿐 아니라 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 모델 개발의 자료로도 활용되었다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써 연간 에너지 사용량, 최대 전력부하, 그리고 운전비용의 관점에서 각 제어방식에 대하여 비교, 분석하였다.

기존의 EMCS를 이용하여 현장 실측데이터가 수집되었으며, 컴퓨터 모델링을 위하여 건물데이터가 수집되었다. 현장 실측데이터로는, 건물의 시간별 에너지 사용량, 외기온 및 습도 등을 측정하였으며, 건물데이터로는, 사용시간 및 재실스케줄, 연면적, 외피설계 및 구조, 냉/난방 설비시스템, 제어시스템 및 조-닝, 조명시스템, 그리고 각종의 장비에 대하여 수집하였다. 실측데이터의 경우 건물의 최적 운전상태를 조사하기 위하여 1992년 5월부터 10월까지 6개월간 한시간 간격으로 수집하였으며, 특히, 가동/정지제어 기능이 없는 소위 자동온도제어의 에너지 성능을 평가하고, 이에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하기 위하여 1992년 9월 13일부터 19일까지 일주일간 현장실험이 실시되었다.

현장실험과 더불어, 개수후(post-retrofit) 상태에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 모델이 개발되었으며, 일년 동안의 실제 월별 에너지 사용량(utility data)과 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 모델을 보정하였다. 이를 토대로, 두개의 다른 제어기능에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 모델이 작성되었고, 단기 현장실험을 통한 시간별 데이터와 비교함으로써 재차 보정하였다. 이와 같이, 각각의 제어기능에 대한 시뮬레이션 모델을 실제값에 근접하게 보정한 후 공통의 기후데이터를 사용하여 시뮬레이션 함으로써 연간 에너지 절약효과를 분석하였다. 또한, 연간 운전비용의 경우 시뮬레이션을 통한 에너지 감소 및 최대부하의 변화를 근거로 산출되었으며, 제어기능의 개수를 통한 연간 편익이 예측되었다.

## 2. 사례연구 대상건물의 개요

본 연구를 위해 선정된 건물은 미국의 Washington, DC에 소재한 United Unions Building으로서 연면적 약 15,800m<sup>2</sup>, 8층 높이의 사무소용 건물이다.(그림 1)

공조공간 중 85%가 사무소 공간, 10%가 복도 및 코어 공간, 그리고 5%가 식당, 오락 및 휴식 공간으로 구성되어 있다. 건물의 입면은 각 방향 모두 동일하며, 평면은 내주부와 네개의 외주부로 구성되어 있다. 또한, 건물은 철골구조에 콘크리트 바닥 슬라브로 이루어져 있으며, 외벽체로는 프리캐스트 콘크리트가 사용되었다. 유리로는 바깥유리의 내측에 반사막이 있는 복층유리가 사용되었다. 건물 전체에는 450개의 작업공간이 있으며, 건물의 사용시간은 월요일부터 금요일까지는 오전 8시부터 오후 6시까지이고, 토요일은 오전 9시부터 오후 3시까지이다.

United Unions Building은 1973년에 최초로 지어졌으며, 1988년에 조명시스템 및 공조설비의 개선, 그리고 에너지 관리시스템을 이용한 제어 성능 향상 등 에너지 절약을 위한 개수가 이루어졌다. 조명시스템으로는 180W 출력의 형광등이 사용되었으나, 개수시 반사판(silver film reflector)을 설치함으로써 약 650-850lux의 작업조도를 유지하는 범위내에서 2-4개의 램프가 제거되었다. 또한, 60-300W 출력의 백열등을 5-13W의 에너지 절약형 형광등(compact fluorescent lamp)으로 대체하였다. 공조설비 시스템으로는 이중덕트방식의 냉/난방 공기를 분배하기 위한 공기조화기가 있었으나, 개수시 이를 가변풍량방식(variable air volume)으로 대체하였다. 제어시스템의 개수로는 새로이 설치된 에너지 관리시스템(EMCS)을 통하여 운전시간의 조정, 온도 제어기능의 향상, 부하에 따른 기기의 용량 및 최대 전력수요 제어 등을 포함하고 있으며, 에너지 관리시스템은 32개 센서로부터 감지된 정보를 받아 56개의 현장 기기를 제어하고 있다.

DOE-2.1D 건물 에너지 해석용 컴퓨터 프로그램을 이용하여 평가한 바에 의하면, 개수 이전 연간 에너지 사용량은 6,995MWh였으며, 개수 후



그림 1 United Unions Building(북동측)

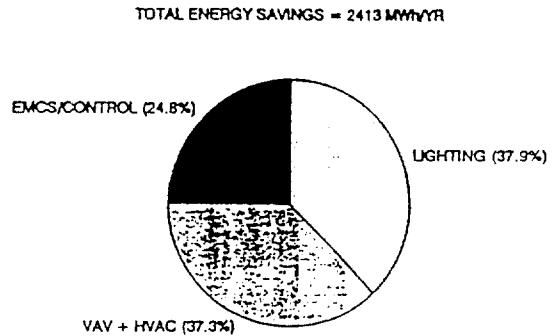


그림 2 개수후 각 요소별 에너지 절약비율

연간 에너지 사용량은 4,582MWh로 나타났다. 그림 2에 나타난 바와 같이, 연간 전체 에너지 절감량은 2,413MWh에 이르며, 이 중 38%는 조명시스템, 37%는 공조설비, 그리고 나머지 25%는 제어시스템의 개수를 통해 각각 절약됨을 보여주고 있다. 또한, 개수를 통한 연간 운전비용의 절감은 약 \$163,000에 이르며, 전체 개수비용은 \$675,000가 소요됨으로써 회수기간이 약 4.3년 정도 걸리는 것으로 나타났다.

## 3. 제어기능에 관한 현장실험

현장실험 데이터는 건물에 설치된 에너지 관리시스템의 기존 센서를 통해 1992년 5월부터 6개월간에 걸쳐 수집되었으며, 건물의 시간별 에너지 사용량(kWh), 평균외기온(°F), 그리고 상대습도(%)등에 대하여 측정하였다. 또한, 각 제

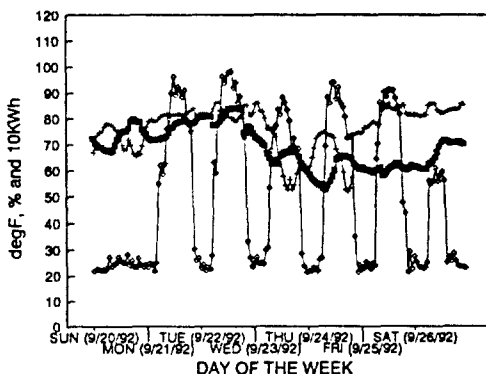
어기능에 따른 에너지 소모량을 조사하기 위하여, 가동/정지제어에 대하여는 9월 20일부터 26일까지, 그리고 자동온도제어에 대하여는 9월 13일부터 19일까지 건물의 실제 운전방법을 달리함으로써 각각 일주일간씩 실험을 실시하였다.

### 3.1 가동/정지제어의 현장실험

‘가동/정지제어’란 건물의 비사용시간대에 공기조화와 관련된 설비시스템의 작동을 중단함으로써 사용시간대의 적정 쾌적수준은 유지하면서 비사용시간대의 에너지 사용을 극소화하고자 EMCS의 등장과 더불어 개발된 제어개념의 일종이다. 가령, 건물의 사용시간대에 따라서, 즉, 하루중 시간, 일주일중 요일, 그리고 휴일 및 계절적 차이에 따라 각종의 기기를 제어하는 방식을 말하며, 시간스케줄에 따른 제어(scheduled start/stop)라고도 부른다. 가동/정지제어란 결국 사전에 계획된 시간스케줄에 따라 제어기능을 수행하게 되며, 따라서, 가동/정지제어에 있어서 가장 중요한 것은 각기 다른 날, 각기 다른 시간대에 생기는 건물의 사용형태 및 이에 따른 실내환경의 요구도에 대하여 먼저 파악함으로써 연중 건물의 사용 및 열환경 특성에 근거한 운전스케줄을 작성하는 일이다.

본 연구에서는 건물의 사용스케줄 및 열환경 특성과 관련한 최적 운전스케줄을 설정하기 위하여 6개월간에 걸쳐 건물의 운전상태 및 에너지사용과 관련한 현장데이터를 수집함으로써 월별, 요일별 최적 가동/정지 시간대를 추정하였으며, 이에 따른, 가동/정지제어의 실험결과는 그림 3에 나타난 바와 같다.

처음 3일간 일평균 외기온은 약 23.9°C였으며, 하루중 평균 온도변화폭은 2.8°C를 보였다. 그 후 나머지 4일간은 평균 외기온이 약 15.6°C를 유지함으로써 낮은 온도분포를 보였다. 건물의 비사용시간 중 시간당 최저 에너지 사용량은 약 240kWh에 이르며, 최대 전력부하는 약 1,000kW에 이르는 것으로 나타났다. 또한, 월요일과 화요일에 일주일 중 최대 전력부하가 나타나며, 하루중 최대 전력부하가 수요일에는 떨어지다가 낮아진 외기온으로 인해 목요일과 금요일에 다시금



■ TEMPERATURE (degF) · HUMIDITY (%) · ENERGY USE (10KWh)

그림 3 가동/정지제어의 현장실험 결과

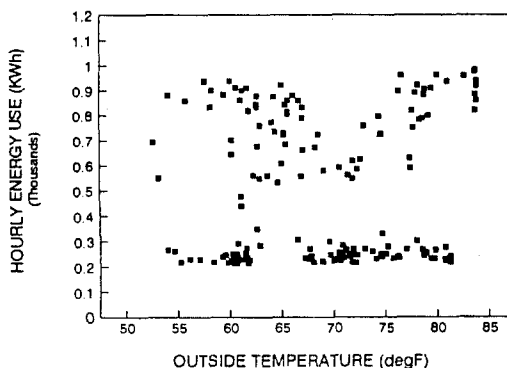


그림 4 가동/정지제어의 에너지 소비형태

증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 가동/정지제어의 시간당 에너지 소비량과 외기온과는 상관관계를 보여주고 있는데, 대략 3종류의 군으로 분류할 수 있다. 하나는 건물의 비사용시간 중 에너지 사용량, 그리고 나머지는 난방 및 냉방을 위한 에너지 소비형태를 나타내고 있다. 각 데이터 그룹에서 점선은 에너지 소비량과 외기온의 상관관계를 나타내며, 약 21.0°C의 외기온을 기점으로 난방곡선과 냉방곡선이 구분되어 있다. 외기온이 21°C이상 증가하거나 21.0°C이하로 떨어질 때 에너지 소비량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 자동온도제어의 현장실험

‘자동제어’란 소위 사람에 의해 수동으로 제

어하는 방식(manual control)의 반대개념으로서 상대적으로 높은 인건비 및 에너지 다소비 성향이 있는 미국의 경우, EMCS의 등장 이전까지, 제어의 정밀도에 있어서나 경제성 측면에서 일반적으로 많이 활용되어 왔다. '자동제어'의 경우 온도, 습도 및 실내의 기압 등 제어의 목적 및 설비시스템의 종류에 따라 그 제어시스템의 구성이 달라지게 되며, 최근에 DDC(Direct Digital Control) 시스템이 개발되기 이전까지는 유압식 제어(Pneumatic Control)가 그 주류를 이루어 왔다. 본 연구에서는 자동온도제어만을 대상으로 하였으며, 난방과 냉방의 목적에 따라 설정온도(setpoint)를 각각 지정함으로써 부하변동에 상응하도록 24시간 연속적으로 시스템을 운전하는

방식을 말한다.

24시간 건물을 운전하는 자동온도제어의 실험 결과는 그림 5에 나타난 바와 같다. 실험기간 중 일평균 외기온은 약 21.0°C를 나타냈으며, 일교차는 2.8°C 내지 4.4°C로 전형적인 온도변화(sinusoidal temperature variation)를 보였다. 최저 에너지 소비량은 가동/정지제어의 두배에 가까운 약 500kWh를 보였으며, 최대부하에 있어서는 가동/정지제어와 거의 비슷한 수준을 보였다. 주말동안의 계속적인 운전으로 인하여 월요일과 화요일의 에너지 소비량은 가동/정지제어와 비교해 볼 때 상대적으로 적게 나타났다.

그림 6은 자동온도제어의 시간별 에너지 소비량과 외기온의 관계를 나타내고 있으며, 두개의 데이터 그룹으로 대별해 볼 수 있다. 하나는 건물의 비사용시간 중 최저 에너지 소비량을 나타내며, 다른 하나는 외기조건에 따른 냉방 에너지 사용량을 나타내고 있다. 또한, 평균 외기온이 21.0°C 이상을 유지함으로써 실험기간 중 난방은 요구되지 않았으며, 외기온이 증가함에 따라 건물의 냉방 에너지 사용량이 증가하는 것만을 보여주고 있다.

가동/정지제어와 자동온도제어의 에너지 소비량을 직접적으로 비교해 볼 때, 비록 각기 다른 기후조건에 대하여 보정되지는 않았지만, 가동/정지제어를 통한 에너지 절감효과는 건물의 비사용시간대에 시스템의 운전을 중단함으로써 실내온도조건의 변화에 따라 발생함을 알 수 있다. 또한, 두 제어방식의 일일 최대에너지 사용량이 유사함을 볼 때, 대부분의 에너지 절감효과는 건물의 비사용 시간대와 주말에 최저에너지 사용량이 낮아짐에 따른 것임을 알 수 있다. 이러한 분석은 소형 은행건물의 에너지 성능 측정에 관한 연구(Sharp and MacDonald, 1989)에서 나타난 대로 영업시간외에 설정온도를 낮춤으로써 에너지를 절약할 수 있다고 밝힌 바와도 일치한다.

#### 4. 제어기능에 대한 시뮬레이션 모델

각기 다른 제어기능의 에너지성능을 비교, 분석하기 위하여 DOE-2.1D 컴퓨터 시뮬레이션 모

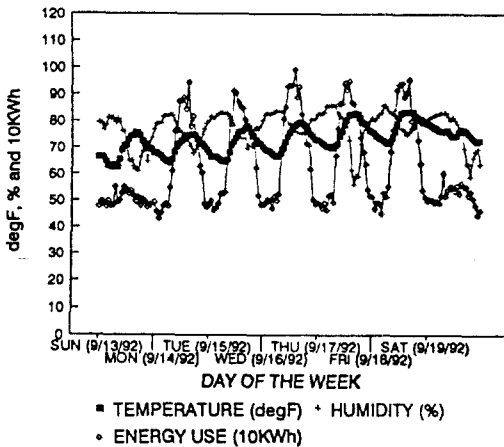


그림 5 자동온도제어의 현장실험 결과

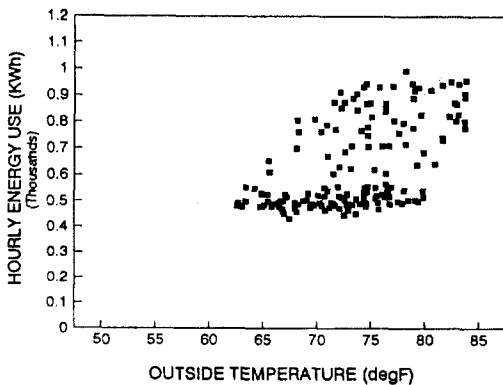


그림 6 자동온도제어의 에너지 소비형태

넬을 개발하였다. 시뮬레이션 모델은 일차적으로 일년동안의 월별 에너지 사용량에 대하여 보정하였으며, 각 제어기능의 성능평가를 위한 일주일간의 단기 현장실험 결과에 따라 재차 보정함으로써 시뮬레이션 기법의 근거를 마련하였다.

4.1 시뮬레이션 모델의 초기검증

시뮬레이션 모델의 검증을 위하여 일차적으로 시뮬레이션 결과와 개수후 건물에서 사용된 전체 에너지(MWh) 및 최대 전력부하(kW)를 각 월별로 비교하였다. 에너지 사용량의 측정이 매월 초부터 말까지 이루어지지 않았으므로 시뮬레이션을 통해 하루중 에너지 사용량을 구하고, 이를 각 월별로 에너지 사용량 측정기간에 따라 합산함으로써 실제 에너지 사용량과 비교하였다. 1989년도를 기준으로 월별 에너지 사용량과 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 그림 7에 나타난 바와 같으며, 시뮬레이션 모델은 월별 에너지 사용량을 추정하는 데 있어 최대 8.1%(7월)의 오차를 보임으로써 실제 측정값과 매우 근사하게 일치함을 알 수 있다.

4.2 가동/정지제어의 베이스라인 모델

그림 8에서는 가동/정지제어의 1992년 9월 20일부터 26일까지 일주일간 시간별 에너지 사용량을 실제 측정값과 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해 보여주고 있다. 건물의 사용시간 중에는 시간별 에너지 사용량에 있어서 시뮬레이션 결과가 다소 낮게 산정되었음을 보여주고 있으며, 건물의 비사용시간 중에는 시뮬레이션에 의한 최저 에너지 사용량이 약 240kWh로 나타남으로써 실제 측정데이터와도 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 9에서는 실제 측정값과 시뮬레이션 결과와의 시간별 에너지 사용량에 대한 편차(variance)를 보여주고 있다. 실측값과 시뮬레이션의 상관관계를 잘 나타내고 있는 데, 약 300kWh 미만의 낮은 에너지 소비영역(건물의 비사용시간대)에서는 시뮬레이션이 다소 과다하게 산정된 데 비하여 약 700kWh 이상의 높은 에너지 소비영역(건물의 사용시간대)에서는 상대적으로 작

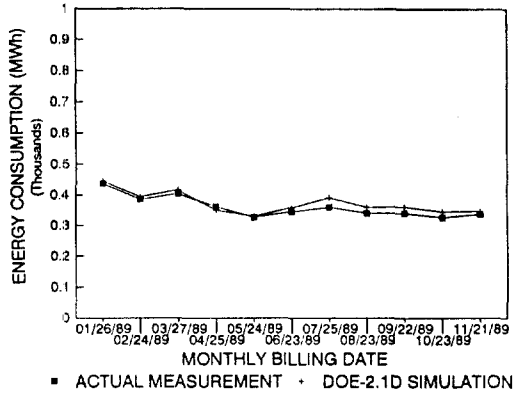


그림 7 개수후 월별 에너지 사용량 비교

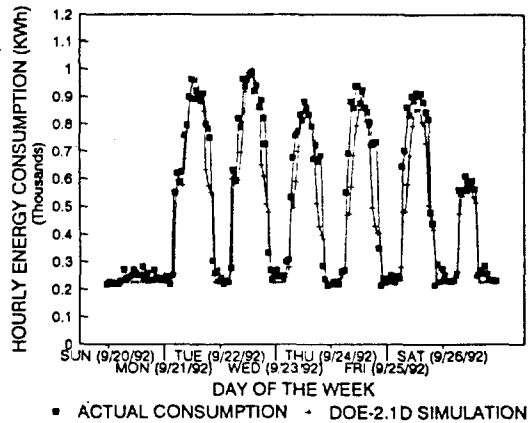


그림 8 가동/정지제어의 베이스라인 모델검증

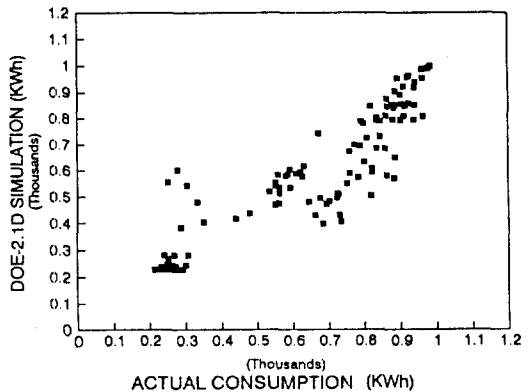


그림 9 가동/정지제어의 경우 실측값과 시뮬레이션 결과와의 상관관계

게 산정되었음을 알 수 있다.

### 4.3 자동온도제어의 베이스라인 모델

자동온도제어의 에너지와 관련한 제어성능을 평가하기 위해 DOE-2.1D 모델을 개발, 보정하였으며, 시뮬레이션 결과와 실제 측정값을 비교하였다. 먼저 건물에 이미 설치되어 있는 EMCS를 통하여 건물내의 모든 존(zone)에 대하여 난방과 냉방기간으로 구분하여 24시간 동안 일정한 설정온도(setpoint)로 실내 온도를 유지하는 자동온도제어의 기능을 수행할 수 있도록 제어 프로그램을 수정한 후, 1992년 9월 13일부터 19일까지 일주일간 현장실험을 시행하였다. 실험 및 시뮬레이션 결과를 토대로 시계열도표가 작성되었으며, 이는 그림 10에 나타난 바와 같다. 주말(토요일 및 일요일)의 경우, 시뮬레이션 결과가 실제 측정값에 비하여 다소 낮게 산정되었으며, 최대 전력부하에 있어서는 주말에 가까워지면서 목요일과 금요일에 시뮬레이션 결과가 실제 측정값에 비해 다소 높게 산정되었으나 대체적으로 시뮬레이션 결과와 실험결과는 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 건물의 비사용시간 중 최저 에너지 사용량은 평균 약 470kWh를 나타내고 있으며, 최대부하의 경우 실험 및 시뮬레이션 결과에서 모두 약 950kW를 나타내고 있다.

그림 11에서는 시간별 에너지 사용량에 대한 실측값과 시뮬레이션 결과와의 상관관계를 보여 주고 있으며, 중심선으로부터 떨어져 있는 점(outlier)들이 상대적으로 훨씬 적게 나타남으로써 자동/정지제어의 경우에 비해 시뮬레이션 및 측정결과 사이에 더욱 밀접한 관계가 있음을 보여 주고 있다. 시뮬레이션에 의한 시간별 에너지 사용량에 있어서는 대체로 낮게 산정되었고, 최대부하에 있어서는 다소 높게 산정되었지만, 자동/정지제어에 비해 편차가 작게 나타남으로써 상대적으로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서, 자동온도제어의 경우 시뮬레이션을 통한 에너지 사용량 산정에 있어 그 타당성을 입증할 수 있었다.

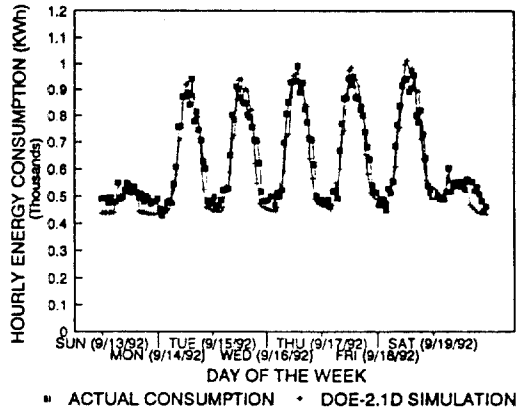


그림 10 자동온도제어의 베이스라인 모델검증

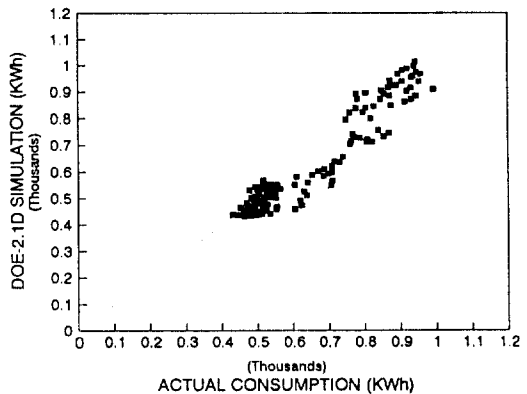


그림 11 자동온도제어의 경우 실측값과 시뮬레이션 결과와의 상관관계

## 5. 시뮬레이션에 대한 비교·분석

각 제어기능에 따른 베이스라인 모델을 개발하고 단기 현장실험에 의해 보정함으로써 각기 다른 제어기능의 에너지 성능에 대하여 시뮬레이션을 통한 평가가 가능하며, 공통의 기상자료를 토대로 제어기능에 따른 잠재적인 연간 에너지 절감효과를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 1989년 9월의 전형적인 한주간 동안을 기준으로 시간별 에너지 사용량을 비교하였으며, 각 제어기능의 단기분석으로서 일일 에너지 사용량에 대한 요일별 평가를 통하여 건물의 사용형태에 따른 에너지 절감효과를 비교, 분석하였다. 또한, Wa-

shington, DC의 표준기상자료(TMY)를 사용함으로써 가동/정지제어 및 자동온도제어의 에너지 성능을 연간 월별 에너지 사용량, 최대부하, 그리고 운전비용의 관점에서 비교, 분석하였다.

### 5.1 요일별로 본 에너지 사용량 비교

그림 12에서는, 1989년도 기상자료를 사용하여 DOE-2.1D 시뮬레이션을 실시한 결과, 가동/정지제어 및 자동온도제어의 일주일간 시간별 에너지 사용량을 보여주고 있다. 건물의 비사용시간대를 보면, 자동온도제어의 경우 에너지 사용량이 가동/정지제어에 비해 약 두배 가량 소모하는 것으로 나타났으며, 일요일에 나타난 가동/정지제

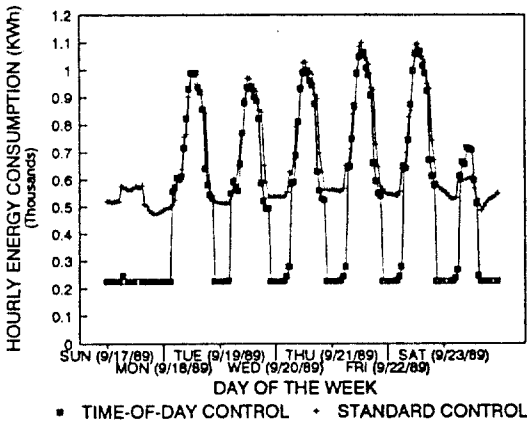


그림 12 시뮬레이션에 의한 가동/정지제어 및 자동온도제어의 에너지 사용량 비교

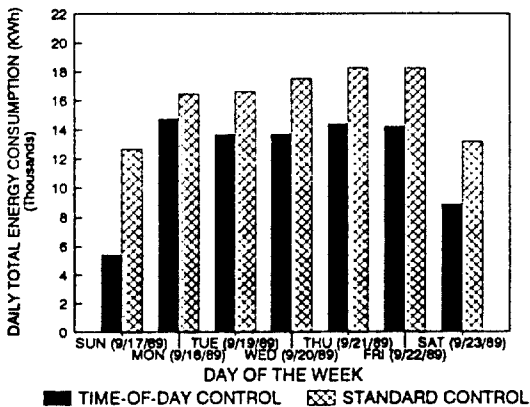


그림 13 가동/정지제어 및 자동온도제어의 요일별 에너지 사용량 비교

어의 에너지 절감효과가 그 전형적인 예라고 할 수 있다. 건물의 사용시간대를 보면, 월요일의 경우 가동/정지제어에 있어서 높은 최대부하 및 시스템의 조기가동 현상을 볼 수 있는데, 이것은 주말에 시스템의 설정온도를 낮춤으로써 건물자체의 축열효과가 달라졌기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로, 건물의 사용시간대에서는 에너지 사용량이 서로 유사한 것으로 나타난 반면, 건물의 비사용시간대에서는 에너지 사용량에 있어서 큰 차이를 보임으로써 가동/정지제어의 에너지 절감효과가 주로 건물의 비사용시간대에서 이루어짐을 보여주고 있다.

그림 13에서는 하루 중 에너지 사용량을 요일별로 보여주고 있는 데, 가동/정지제어의 경우 자동온도제어에 비해 전반적으로 적은 에너지 사용량을 보임으로써 많은 에너지의 절약 가능성을 나타내고 있다. 또한, 대부분의 에너지 절약은 건물의 비사용시간대에 달성됨을 알 수 있으며(그림 12), 일요일에 가장 큰 폭으로 에너지를 절약할 수 있고, 월요일에 절약할 수 있는 에너지가 가장 적은 것으로 나타났다.(그림 13) 이것은 자동온도제어의 경우 건물의 비사용시간대인 주말에도 연속적으로 운전함으로써 운전을 중단하는 가동/정지제어에 비해 최대부하의 감소면에서는 다소 유리하나 전체 에너지 사용량에서는 비효율적임을 보여주고 있다.

### 5.2 에너지 사용에 따른 제어성능 평가

각 제어기능의 에너지 절감효과를 비교, 평가하기 위하여 Washington, DC 지역의 표준기상자료(TMY)를 공통으로 사용함으로써 가동/정지제어 및 자동온도제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며, 그림 14, 15 및 16에서는 연간 월별 에너지, 최대부하, 그리고 운전비용의 관점에서 가동/정지제어의 절감효과를 보여주고 있다.

그림 14에서는 가동/정지제어 및 자동온도제어의 월별 에너지 사용량을 보여주고 있으며, 가동/정지제어의 매월 상대적으로 절약 가능한 에너지량이 막대 그래프로 나타나 있다. 연간 에너지 절약은 1,624MWh에 이르며, 이것은 자동온도제어에 비해 26%에 해당하는 연간 에너지



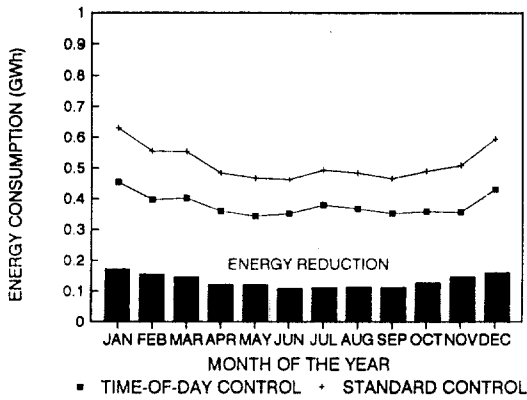


그림 14 가동/정지제어 및 자동온도제어의 월별 에너지 사용량 비교

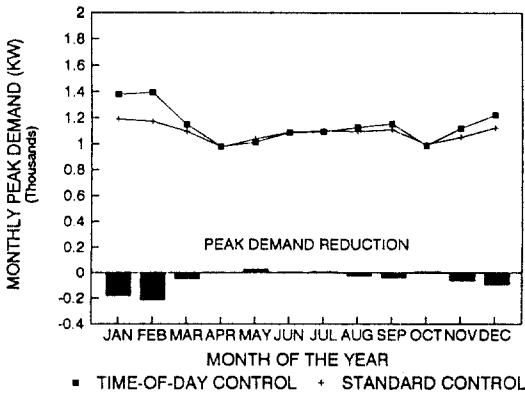


그림 15 가동/정지제어 및 자동온도제어의 월별 최대 전력부하 비교

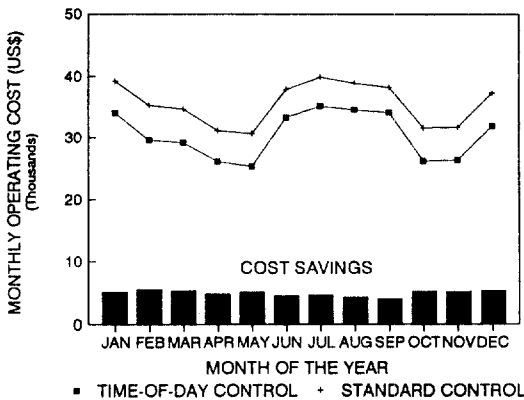


그림 16 가동/정지제어 및 자동온도제어의 월별 운전비용 비교

절감효과를 의미한다. 월별 에너지 절약량은 110 MWh부터 170MWh에 달하며, 여름철 냉방기간에 비해 겨울철 난방기간에 절약 가능성이 큰 것으로 나타났다. 이것은 지역 기후의 특성상 냉방보다는 난방이 차지하는 비중이 더욱 크기 때문에 절대 에너지 사용량에 있어서도 난방의 경우가 냉방에 비해 상대적으로 많은 것에 기인한다.

그림 15에서는 가동/정지제어 및 자동온도제어의 매월별 최대부하의 변화를 보여주고 있다. 가동/정지제어의 경우, 겨울철 난방기간 중, 건물의 비사용시간에 공조시스템의 운전을 중단함으로써 실내온도가 낮게 유지되며, 따라서 공조시스템의 재가동시 일정한 시간내에 실내온도를 설정온도까지 높이기 위하여 각종의 기기를 최대용량으로 운전하게 되어, 이에 따른 최대부하의 증가를 초래하게 된다. 반면에, 자동온도제어의 경우, 실내온도를 계속해서 설정온도에 맞추어 유지함으로써 최대부하를 감소시키는 효과는 있으나, 부분부하의 상태에서 시스템이 낮은 효율로 운전됨에 따라 전체 에너지 사용면에서는 불리한 것으로 나타났다. 이를 최대전력사용량에 따라 전기 사용료의 부과비율이 달라지는 전력수요제어(Demand Side Management, DSM)의 측면에서 보면, 최대 전력부하를 줄일 수 있는 자동온도제어의 경우 다소 유리한 것으로 나타났지만, 각종 기기의 효율저하 등으로 인한 전체 에너지 사용량 및 운전비용의 측면에서 종합적으로 볼 때 가동/정지제어가 상대적으로 유리하게 평가되었다.

그림 16에서는 1989년도 해당지역의 에너지 사용료를 근거로 두 제어기능의 월별 운전비용을 비교하였으며, 가동/정지제어의 비용 감소효과를 보여주고 있다. 월별 운전비용의 절감은 약 \$4,000에서 \$5,500에 이르며, 연간 절감비용은 \$60,582로서 자동온도제어에 비해 약 14.2%에 해당하는 비용절감이 가능한 것으로 나타났다. 두 제어기능 모두 환절기인 봄과 가을에 운전비용이 줄어드는 것은 냉/난방부하가 상대적으로 줄기 때문인 것으로 판단되며, 겨울철의 과다한 운전비용은 그림 14에 나타난 바와 같이 기후 특성상 난방부하가 크기 때문이며, 여름철의 운전비용이 증가하는

것은 최대전력 사용료(peak demand charge)가 계절별로 달리 적용되기 때문이다.

## 6. 결 론

상업용 건물에 있어서 에너지 절약 노력은 미국내 전체 건물부문에서의 에너지 효율 향상에 지대한 영향을 미칠 것으로 사료된다. 최근의 몇몇 연구결과에 따르면, EMCS를 통한 건물의 운전방식을 개선함으로써 얻을 수 있는 에너지 절약효과가 막대할 것으로 분석하고 있다. 오늘날, 다양한 수준의 EMCS가 이미 건물의 규모 및 운전특성에 따라 사용할 수 있도록 상품화되어 있으며, 전체의 HVAC 시스템을 교체하지 않고도 기존의 제어시스템만을 교체함으로써 건물의 효율적인 운전을 위한 개수가 가능하여 그 경제성이 높게 평가되고 있다.

본 연구에서는 미국의 Washington, DC에 소재한 United Nations Building을 대상으로 사례연구를 함으로써 제어시스템의 개수에 대한 경제적 편익을 검토하고, 이를 근거로 EMCS를 이용한 효율적인 에너지 관리의 효과를 평가하고자 하였다. 이를 위하여, 현장실험을 통하여 건물의 시간별 에너지, 평균 외기온, 그리고 상대습도 등을 측정하였으며, DOE-2.1D 컴퓨터 프로그램을 이용하여 가동/정지제어 및 자동온도제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시함으로써 각 제어기능의 장/단점 및 에너지, 운전비용 등의 절감효과에 대하여 분석하였다.

연구 결과에 따르면, 가동/정지제어는 자동온도제어에 비해 에너지 및 운전비용의 절감면에서 유리한 것으로 나타났다. 가동/정지제어의 경우,

연간 1,624MWh의 에너지를 절약할 수 있으며, 운전비용에 있어서는 연간 \$60,582가 절약 가능한 것으로 나타났다. 대부분의 절감효과는 건물의 비사용시간대에 얻어지는 것으로 밝혀졌고, 요일별로 볼 때 일요일에 그 절약효과가 가장 크며 월요일에 얻을 수 있는 효과가 가장 적은 것으로 나타났다. 또한, 최대부하의 감소에 있어서는 자동온도제어가 다소 유리한 것으로 평가되었다.

## 참 고 문 헌

1. Gettings, M.B. and J.M. MacDonald, Energy Monitoring and Control System(EMCS) at Army Installation-Initial Effectiveness Evaluation, ORNL/CON-259, August 1988.
2. Heinemeier, K.E. and H. Akbari, "Proposed Guidelines for Using Energy Management and Control System for Performance Monitoring," Proceedings of ACEEE 1992 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 1992.
3. Koran, W.E. and et al, "DOE-2.1C Model Calibration with Short-Term Tests versus Calibration with Long-Term Monitored Data," Proceedings of ACEEE 1992 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 1992.
4. Leigh, S.B. and et al, Analysis of Savings Due to Multiple Energy Retrofits in a Large Office Building, ORNL/CON-363, 1993.
5. Sharp, T.R. and J.M. MacDonald, Measurement of Energy Performance in a Small Bank Building, ORNL/CON-297, April 1990.