

시스템의 動的解析과 에너지節約

- 컴퓨터를 이용한 에너지 관리제어 시스템의 에너지절약 성능평가 -

System Dynamics And Energy Use⁺

- EVALUATION OF ENERGY-SAVING EFFECTIVENESS OF COMPUTER TECHNOLOGY WHEN LINKED WITH COMMERCIAL BUILDING ENERGY MANAGEMENT CONTROL SYSTEM -

柳 海 星*, 李 壽 淵*共譯
Hae Seong Ryu, Soo Youn Lee

기	호			
<i>m</i>	질	량	유	량
<i>P</i>	압			력
<i>T</i>	온			도
<i>CHWR</i>	냉	수	환	수
<i>CHWS</i>	냉	수	공	급
<i>CWR</i>	냉	각	수	환
<i>CWS</i>	냉	각	수	공
<i>RA</i>	환			기
<i>refr.</i>	냉			매
<i>SA</i>	급			기
<i>stat.</i>	정			압
<i>WB</i>	습	구	온	도

일반상업용 건물에 있어서 컴퓨터를 이용한 에너지관리 및 제어시스템의 주요목적으로는 건물냉난방설비의 제어와 냉난방 프로세스(process)의 최적화를 들 수 있다. 本稿는 제어시스템의 성능을 평가하기 위한 ASHRAE, IBM, 위스콘신-매디슨대학의 공동연구 결과를 제시한다. 이 프로젝트는 ASHRAE RP 321로 "냉난방시스템의 동적해석과 기존건물의 에너지소비"라 명명하였으며 그 목적은 아래와 같다.

(1) 수집된 시험데이터와 컴퓨터모델을 이

용한 빌딩냉난방시스템의 동적해석연구

(2) 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 냉난방시스템의 동적제어에 있어서 제어결정과 시간사이의 관계 파악.

(3) 컴퓨터 시뮬레이션을 이용, 냉난방시스템의 에너지소비를 줄이기위한 효과적인 운전방법의 모색.

맨 먼저 기기의 동적성능과 컴퓨터모델 설정작업이 시행되었으며 시험대상건물의 중요한 과도특성으로 Fan Speed 변화에 따른 냉각탑의 반응, 배관계통의 냉수순환시간(Flush time), 건물구조의 열용량으로 인한 효과 등이 파악되었다. 중요하지않은 과도특성으로는 냉수공급온도의 설정변화에 따른 냉동기의 반응과 급기온도 설정변경에 따른 공기조화기의 반응등으로 파악되었다. 上述한 주된 특성을 포함하여, 시스템구성요소의 컴퓨터모델을 설정하기 위해 ASHRAE 표준Algorithm(stoecker, 1971)''을 기초로 하였고 또 모델의 특성변수를 결정하기 위해 시험시설에서 측정된 데이터를 사용하였다. 최종적인 결과는 本稿에 보고하는 바와 같으며 냉방운전을 위한 최적 제어방법을 개발하였다. 또 시스템시뮬레이션을 실행하여 제어계와 관련한 시스템의 동적 특성을 파악할 수 있었으며, 동적제어(dynamic control)를 이용한 에너지절약효과에 대

+ (ASHRAE JOURNAL VOL. 27, No. 6, 1985/6:

Richard J. Hackner, John W. Mitchell, Willian A. Beckman)

* 正會員, 韓一技術研究所

해 평가하였다. 실내온열환경의 동적특성에 대해서는 실내온열환경지표의 제어와 감시가 용이하지 않았기 때문에 특별히 언급하지 않는다.

1. 시스템의 개요

본 실험의 대상으로는 조지아주 아틀랜타에 소재한 상업용 빌딩을 채택하였으며 냉난방시스템의 주요구성을 그림 1에 나타낸다. 이 시스템은 5대의 냉동기, 4대의 정풍량 외주부용 공조기와 2대의 변풍량 내주부용 공조기 및 2Cell 형 냉각탑 1대로 구성되어있다. 2대의 定速形 550 RT 원심냉동기에 의해 냉방을 위한 냉수가 공급된다. 냉각탑은 응축기로부터의 발생열을 제거하며 2개의 Cell에는 각각 2-Speed 형 송풍기가 설치되어 있다. 빌딩내 4개의 외주부존(SW SE, NW, NE)의 냉방부하는 정풍량공기조화기로 감당하며 운전방법은 냉각 또는 재순환공기를 외주부존을 통해서만 순환시킨다. Core 부(S, N)의 공조는 2대의 변풍량 공기조화기로 감당한다. 거주시간대의 공조기운전은 전외기 냉방, 냉수냉방 또는 증발식냉각중의 하나로 작동된다. 전외기냉방에서는 외기와 환기를 적절히 혼합하여 Core 부의 냉방용 급기로 사용한다. 냉수냉방방식에서는 냉동기에 의해 공조기에 냉수가 공급된다. 증발냉각방식에서는 습도가 낮은 외기를 도입하여 증발냉각시켜 급

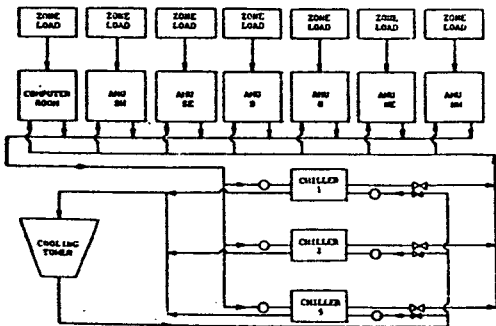


그림 1 애틀랜타시의 한 상업용빌딩의 냉난방시스템 개요도.

기한다. (기타 건물과 기기에 관한 상세한 정보는 Hackner Et Al.(1984)³⁾과 Hackner(1984)²⁾를 참조)

냉난방시스템은 각각 고유의 동작 특성과 자체제어기구를 가진 여러가지 기기로 구성된다. 에너지관리제어시스템(EMCS)이 효과적인 것으로 되기 위해서는 각각의 시스템구성기기에 대한 정확한 자료를 알아야 한다. 또한 EMCS에서 효율적인 제어판단을 결정하기 위해서는 각 구성요소사이의 상호작용도 정확히 파악할 필요가 있다.

그림 2는 본 설비의 개략적인 제어계통도를 나타낸 것이다. 여기서 제어시퀀스를 파악하기 위해 실내 Thermostat의 설정치를 낮춘 경우의 일련의 제어과정을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 터미널유니트의 급기밸브가 열려 급기송풍량을 증가시킨다. 이에 따라 덕트내의 정압이 감소되고 변풍량송풍기의 Blade의 Pitch가 조정되어 급기풍량이 증가한다. 급기풍량의 증가에 따라 급기온도는 그 설정치를 넘게 되며 이 신호를 받아 냉수밸브를 열어주게 된다. 냉방부하의 증가때문에 냉수환수온도가 상승하고 이것은 냉동기압축기의 흡입측 베인의 개도를 크게 하며 냉매를 증가시킨다. 이에 따른 증발기부하와 압축기동력의 증가는 응축기부하를 증가시켜 냉각수 공급온도가 상승하고 에너지관리제어시스템은 이것을 감지, 냉각탑 송풍기의 속도를 조정하게 된다. 한편 에너지관리제어시스템은 그림 2에

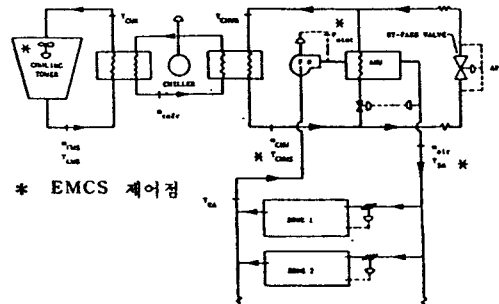


그림 2 냉난방시스템의 개략적인 자동제어 계통도

서 보는 바와같이 유량, 온도, 압력등의 감시를 행하며 또한 주요구성기기의 작동상태도 제어한다. 공기조화기 제어의 주요기능은 기기의 ON-OFF 상태, 급기온도의 설정점, 환기와 외기덤퍼의 설정치등(그림 2에는 나타나지 않음) 세 가지를 들 수 있다. 현재의 운전방식은 평일에 있어서 공기조화기는 오전 7시 30분에 작동개시되고 오후 6시에 정지된다. 주말과 휴일에는 공기조화기는 보통 정지상태로 있다. 급기온도 설정은 외기온도에 따라 다른데, 외기온도가 10F (-12℃) 이하에서는 65F (18℃)로 하고, 외기온도 55F (12℃) 이상의 경우에는 55F (12℃)로 하고 있다. 그리고 이 사이의 온도구간에서는 직선적으로 변화시킨다. 55F (12℃)를 선택한 이유는 쾌적성에 기초를 둔 것으로 55F (12℃)는 거주자들이 Cold Draft에 대해 불평하지 않는 범위내에서 이용될 수 있는 최저급기온도이다. 공기조화기의 환기 및 외기덤퍼 위치는 환기와 외기의 엔탈피를 기준으로하여 조정된다. 에너지관리제어시스템은 또한 냉수공급 설정온도를 제어한다. 현재의 제어방식에서는 냉수환수온도를 기준으로하여 냉수공급온도 설정치를 변화시킬 필요가 있는지의 여부를 결정한다. 냉수환수온도를 사용하기로 한 것은 운전관리요원의 결정에 따른 것인데 냉수환수온도는 비교적 안정되어있기 때문에 냉수공급온도설정치를 변화시키기 위한 판단기준으로 적당하다고 생각한 때문이다. 58F (14℃)를 Base-Line으로 선정한 것은 운전관리요원의 실험결과에 따라 이 온도가 설정온도변화의 기준치로 최적이라고 판단했기 때문이다. 냉각탑 송풍기의 회전수조정은 Approach 온도, 즉 외기습구온도와 냉각수 공급온도의 차이를 기준으로 한다. 냉각수온도의 설정은 외기습구온도를 기준으로 하였는데 외기습구온도가 58F (14℃)이하일 때는 65F (18℃)로 고정하고 외기습구온도가 58F (14℃) 이상일 때는 직선적으로 증가시킨다. 냉각탑 송풍기의 운전상태는 냉각수환수온도와 설정점온도의 차이에 따라 조정된다. 본 건물에는

EMCS에 포함되지 않은 현장제어회로가 많이 있는데 이러한 것들로써는 거주자에 의해 조정되는 실내온도조절기에 따라 변풍량터미널 유니트가 제어되는 것이라든지, 덕트의 정압을 감지하여 송풍기회전수를 제어한다든지, 급기온도설정신호에 따라 각 공조기의 냉수공급에 공급되는 냉수량을 밸브로 제어하는 것 등이다. 냉수배관중의 바이패스회로에 의해 냉동기의 증발기에는 항상 일정한 냉수 유량이 흐르도록 되어있다. 이러한 제어회로등에 대해서는 시스템모델에는 포함시켰지만, 본 연구에서는 이와같은 현장제어계의 변화에 대해서는 평가하지 않았다.

2. 운전방법에 대한 代案

본 연구의 주요목적 가운데 하나는 냉난방 시스템에 있어서 쾌적성을 유지하면서 가능한 한 시스템의 에너지소비량을 감소시킬 수 있는 운전방법을 모색하자는 것이다. 이러한 운전방법에 대한 代案을 전술한 냉난방기기의 컴퓨터모델을 근거로 1983 Klem⁵ 등에 의해 개발된 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 연구하였다. 새로운 운전방법의 시도범위는 각각의 냉난방구성기기의 특성 및 거주자의 쾌적요구에 따라 어느 정도의 한계가 있었다.

3. 냉동기 운전상태

냉동기를 1대 운전하다가 2대 운전으로하는 대수조절의 최적점은 냉동기부하와 외기습구온도에 관계가 있다. 그림 3에 냉동기 운전 대수별로 냉동기부하에 따른 성적계수(COP.)를 나타내었다.

그림 3은 제조회사의 데이터를 이용한 것인데 위에 있는 2개의 곡선은 냉수측 부하를 냉동기입력으로 나눈 값이고 밑에 있는 2개의 곡선은 냉수펌프 및 냉각수펌프동력을 모두 고려한 것이다. 따라서 後者は 실질적인 시스템에서의 에너지소비량을 나타내는 값이다. COP (성적계수)를 계산함에 있어서 냉동기입

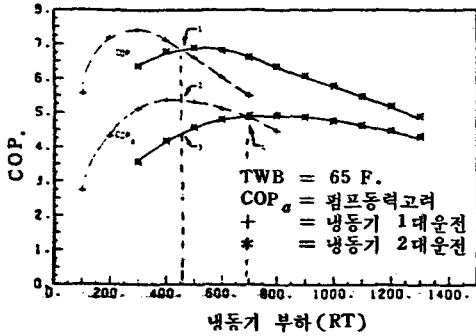


그림 3 COP대 냉수부하 (CHWS = 46 F의 경우)

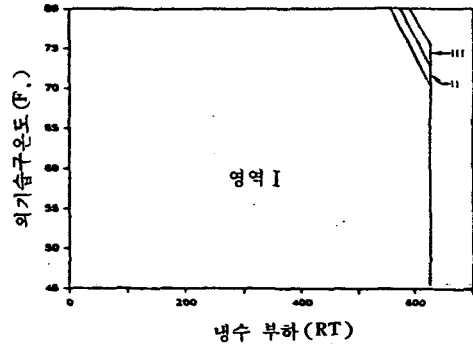


그림 6 냉각탑 송풍기 운전의 적정영역 (영역 I은 MODE 2, 영역 II는 MODE 3, 영역 III는 MODE 4, 냉동기 1대 운전의 경우)

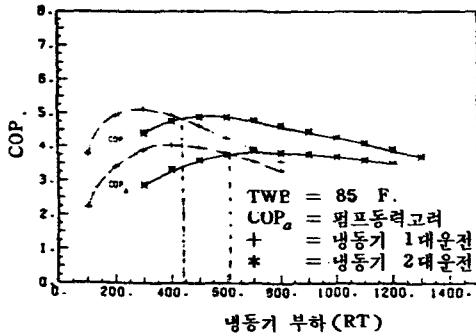


그림 4 COP대 냉수부하 (CHWS = 46 F의 경우)

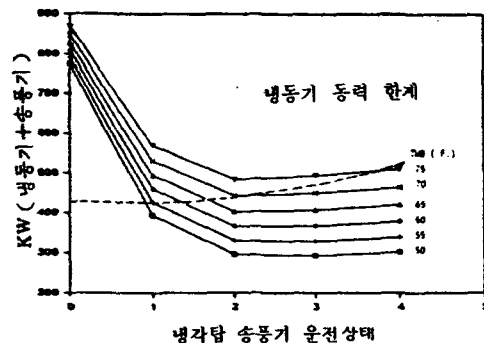


그림 5 냉각탑 송풍기의 최적운전상태, (냉동기부하 = 625 RT, 냉동기 1대 운전의 경우)

690RT (점 4)로 된다. 즉 만일 펌프동력을 고려하지 않고 냉동기운전대수를 조정하면 상당한 에너지손실을 초래하게 된다. 460RT 용량에서 실제의 시스템운전상태는 점 2인데 여기서 전환시키면 운전상태는 점 3으로 되고 COP는 약 20%정도 저하한다. 그리고 이러한 성적계수 저하상태는 부하가 점 4로 될때 까지 계속된다. 따라서 제어결정과정에서 COP를 계산할 때 펌프동력을 고려에 넣는 것이 보다 정확하다고할 것이다. 그림 4는 최적냉동기대수 전환점에 대한 외기습구온도의 영향을 나타낸 것이다. 외기습구온도 85F (29℃)에서 최적전환점은 690RT에서 610RT로 감소한다. 이때의 곡선은 비교적 평탄한 모양을 나타내고 있으며 또한 최적전환점은 외기습구온도에 따라 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 이상의 고찰로 보아 냉동기의 최적대수전환점은 냉동기 1대의 최대출력치 한계 이상에서 나타난다. 실제 운전에서 최적 제어방법은 냉동기 1대로 감당할 수 있는 최대부하한계까지 운전하고 건물부하가 더욱 증가하면 나머지 1대를 더 운전하는 것이다. 운전관리자는 대수전환점 직전의 냉수측 부하를 반드시 기억하였다가, 부하가 감소되면 냉동기 1대로 운전이 가능한가 어떤가를 정확히 판단하여야 할 것이다. 현재 본 건물은 이러한 운전방법을 사용하고 있다.

역만을 기준으로 하는 경우 대수운전전환점은 점 1이 되고 이때의 부하는 대략 460RT이다. 그러나 펌프동력을 고려하게 되면 전환점은 약

4. 냉각탑 송풍기의 운전상태

현재 본 건물에서 사용되고 있는 냉각탑 송풍기제어는 어프로치 (Approach) 제어방식이다. 이러한 제어방식은 냉각탑과 냉동기의 상호작용을 본질적으로 무시한 것인데, 냉동기/냉각탑 계통의 운전을 최적화하여 에너지 소비를 최소로 할 수 있는 보다 적절한 제어방법이 있을 것으로 생각된다. 냉동기와 냉각탑의 컴퓨터모델을 사용하여 최적제어방법을 결정하기 위한 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션의 입력자료로는 냉동기부하, 외기습구 온도, 냉각탑송풍기회전수, 냉동기 운전대수 등을 여러가지 경우로 조합하여 사용하였다. 각 운전조건에서 냉각탑 송풍기의 운전상태 Level 에 따라 동력소비량을 계산하고, 최소치를 확인하였다. 여러가지 운전조건에서 계산된 소비동력의 최소치를 냉각탑 2-Speed 송풍기의 운전Mode (표 1 참조) 별로 그림 5에 나타낸다.

표 1 냉각탑 송풍기의 운전상태

Mode	Fan #1	Fan #2
0	off	off
1	off	low
2	low	low
3	low	high
4	high	high

냉동기 1대 운전의 경우 냉각탑 송풍기의 최적운전상태는 Mode 2로 거의 모든 조건에서 최소동력을 나타내고 있다. 이 상태는 2대의 송풍기가 모두 회전수가 저속의 상태이다. 그러나 외기 습구온도가 70F (21℃) 보다 높아지면 최대 냉동기 동력한계곡선을 초과하게 되므로 Mode 2의 상태로는 운전이 불가능하게된다. 이런 상태하에서는 냉동기를 2대 운전하거나 또는 냉동기를 1대 운전하면서 송풍기 운전Mode 를 바꾸든가 해야한다. 그러나 냉동기 운전대수를 늘리는데 따르는 높은 에너지비용(그림 3.4) 때문에 냉방부하가

아주 큰 경우를 제외하고는 송풍기 운전Mode 를 바꾸는 쪽이 유리하다. 냉동기/냉각탑 시뮬레이션의 결과에서 송풍기Level 에 대한 최적운전영역도표가 작성되었다. 그림 6은 냉수 공급온도 설정치가 48F (9℃), 냉동기 1대 운전상태의 도표이며 I영역은 Mode 2, II, III영역은 각각 Mode 3, 4이다. 영역II, III은 냉동기 동력한계에 기인한다. 냉수공급온도 설정치를 낮게하면 영역II, III은 그림의 왼쪽으로 팽창하며 동력한계는 냉수부하와 외기습구 온도가 더 낮은 상태에서 나타나게 된다. 즉 48F (9℃)미만의 냉수공급온도에서는 보다 빨리 송풍기 운전Mode 의 Level 을 바꾸는 것이 필요하게 된다. 그림 7은 냉수온도 48F (9℃), 냉동기 2대 운전 상태에서의 최적인 냉각탑 송풍기의 운전Mode 를 나타낸다. 영역I은 Mode 2, 영역II는 Mode 3 Level 이며, Mode 4의 운전은 전혀 필요하지 않다. 이러한 도표를 최적제어방식을 찾아내기 위한 시뮬레이션에 이용하였다. 예를들면 외기습구온도가 65F (18℃)이고 200 RT의 부하에서는 1대의 냉동기와 Mode 2의 송풍기 상태(그림 3.6)로 운전하고 이 상태는 최대허용부하 620 RT에 도달할 때까지 계속되며 그 이상의 부하에서는 2대의 냉동기를 운전한다 또한 Mode 2의 송풍기운전은 690 RT의 부하에 이를때 까지 계속되며 그 이상에서는 한

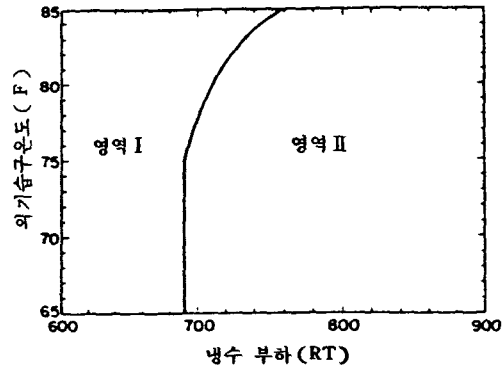


그림 7 냉각탑 송풍기 운전의 적정영역 (영역 I은 MODE 2, 영역II는 MODE 3, 냉동기 2대 운전의 경우)

대의 송풍기가 고속으로 전환된다. 이러한 예는 최적운전 제어개념에 의해 결정된 하나의 보기이다.

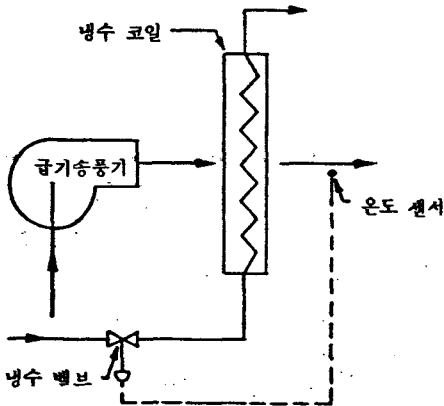


그림 8 공기조화기의 냉수코일과 송풍기간의 개략적인 자동제어 계통도

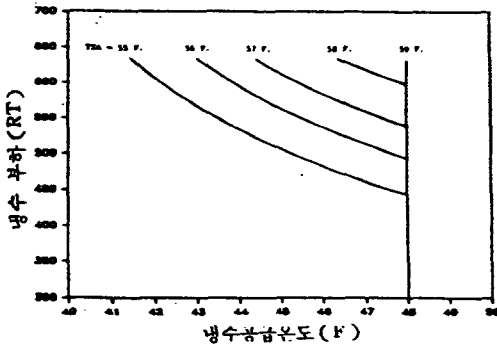


그림 9 냉수부하와 공조기급기온도 변화에 따른 냉수공급온도의 한계

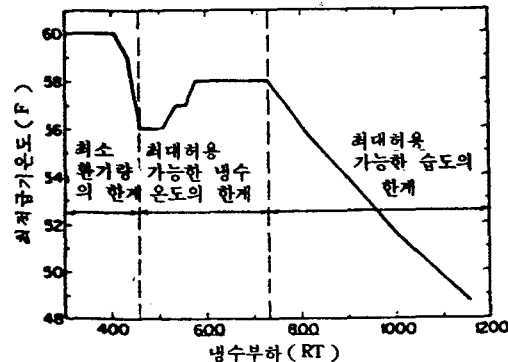


그림 10 냉수부하 변화에 따른 최적 급기온도 (각 구획이 형성된 결정요인이 화살표위에 설명되어 있다)

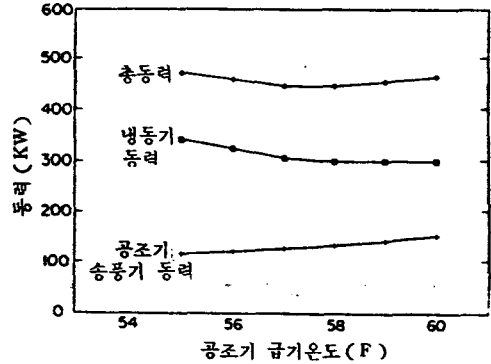


그림 11 공조기 급기온도 변화에 따른 동력 사용과 구성비율 (부하 = 550 RT, TWB = 65 F의 경우)

5. 공조기 급기온도

현재의 제어방식에서 냉수공급온도 설정치 제어는 냉수환수온도와 미리 설정된 원하는 값과의 차이를 조정하는 것이다. 그리고 공기조화기 급기온도 설정치는 외기건구온도를 기준으로 결정된다. 설비운영관리자는 이 제어방법이 안정되고 쾌적기준을 만족시킨다고 생각하고 있으나 이 방식은 공기조화기 급기온도와 냉수공급온도와의 상호작용을 무시하고 있는 것이다. 이 2 가지 설정치제어의 최적온도결정에는 이러한 상호작용을 감안하여야만 한다. 공기조화기의 냉수코일과 송풍기의 간단한 계통도를 그림 8에 나타낸다.

여기서 요구되는 급기온도를 얻기 위해서는 어느 한도의 범위에 대해 코일을 통과하는 냉수유량을 조절하도록 독립적인 현장제어 Loop를 채택하고 있다. 이 제어방식 때문에 우선 공기조화기 운전에서 하나의 한계가 발생한다. 그것은 주어진 풍량과 냉수공급온도에서 코일을 통과시켜 얻을 수 있는 급기온도에는 한계가 있기 때문이다. 냉수공급유량의 조절범위는 냉수배관시스템과 냉수밸브의 특성에 영향을 받는다. 최대유량을 공급했는데도 부족하다거나, 또는 설정된 급기온도가 아주 낮은 경우에는 실제의 급기온도는 제어범위를 벗어나게 되고 요구되는 급기온도로까지

냉각할 수 없게 되는 것이다. 또한 최적냉수 공급온도와 공기조화기 급기온도에 있어서의 고려해야 할 다른 제한요소들도 있다. 냉동기 증발기에서의 부분적인 동결을 방지하기 위해서 냉수공급온도는 42F (5℃) 이상으로 유지해야 하며, 전산실공조기를 위한 냉수시스템을 만족시키는 냉수공급온도 상한선은 48F (9℃) 이하이다. 또한 거주자의 쾌적성을 유지하기 위한 (Cold Draft 방지를 위한) 공기조화기 급기온도의 하한선은 55F (12℃)이며 필요한 습도 수준을 유지하기 위한 급기온도의 상한선도 있다. 급기온도는 외기도입에 의하거나 실내에서 발생하는 잠열을 제거할 수 있을만큼 충분히 낮아야 하며, 최소 외기도입량은 실내에서 필요로 하는 외기량을 충족시켜야 한다. 이와같은 구속조건을 고려하면서 최적의 냉수공급온도와 공기조화기 급기온도를 결정하기 위하여 단계적인 검토를 하였으며 다양한 부하 범위와 외기조건하에서 TRNSYS를 이용한 시뮬레이션을 행하였다. 건물의 냉동기 부하는 300~1,200RT, 외기습구온도는 45F (7℃)~75F (24℃), 냉수공급온도는 42F (5℃)~48F (9℃), 급기온도는 55F (12℃)~60F (15℃)의 범위내에서 조건을 변화시켜 모두 40,000 가지 이상의 운전상태에 대해 시뮬레이션을 행하였으며, 각 외기온도와 부하조건에 대해 최소 에너지 소비상태량을 확인하였다. 그리하여 최소에너지 소비상태에서의 분석결과를 토대로 최적제어 설정점이 결정되었다. 이러한 일련의 과정을 건물제어용 컴퓨터에서 on-Line 상태로 실행하는 것은 비실용적이다. 그러나 이러한 최적화의 결과를 응용하여 EMCS에서 적용할 제어Algorithm을 개발하는 것은 매우 유용할 것이다. 시뮬레이션 결과를 정리하는 첫번째 작업은 여러가지 급기온도조건에 대해 가능한 냉수공급온도의 범위를 결정하는 것이다. 즉 냉수코일을 통과하는 냉수유량에는 제한이 있기 때문에 어떠한 설정 급기온도조건을 유지하기 위한 최대냉수공급온도의 한계를 그림 9에 나타낸다. 예를들면 냉수부하 550RT와 요구급기

온도 56F (13℃)에서 최적냉수온도는 45F (7℃)이다. 부하가 500RT로 감소되면 최적냉수온도는 47F (8℃)로 된다. 그림 10은 건물냉방부하의 변화에 따른 최적의 급기온도를 나타낸 것이다. 450RT 이하의 저부하시에는 최소환기량이 최적급기온도를 결정하는 가장 지배적인 요인이며 최소한 어느 정도의 급기량은 계속 공급되어야 하므로 급기온도를 보다 높게할 수 있다. 450~600RT 사이의 냉방부하에서는 최적급기온도는 그림 9에 나타난 바와 같이 냉수공급온도의 한계에 의해 결정된다. 450~500RT 사이에서는 48F (9℃)의 냉수로 56F (13℃)의 급기온도를 만들어 낼수 있다. 건물부하가 500RT를 초과하면 냉수온도를 상한선으로 유지하면서 보다 많은 급기량으로서 부하에 대처하는 것이 유리하다. 어떠한 냉방부하상태에 있어서도 냉동기동력과 공기조화기 송풍기동력사이에는 운전방법의 변경에 따라 상호손익 (Trade-off)이 발생한다. 그림 11은 급기설정온도가 상승함에 따라 송풍기동력과 냉동기동력간의 상호손익상태를 보여주고있다. 냉수부하 550RT일 경우에 최적급기온도는 57F (14℃)이며 총동력은 급기온도의 변화에 대해 그렇게 민감하지않다. 최적제어의 결과를 보면 급기온도를 보다 높게하고 송풍량을 증가시킴에 따른 추가송풍기동력은 급기온도를 낮게 함으로써 냉수온도를 낮추기 위해 필요한 추가 냉동기 동력보다는 더 적다는 것을 나타내고 있다. 600RT 이상의 부하에서는 또 하나의 중요한 제한조건이 발생한다. 건물에 대한 습도 수준의 제한이 이용가능한 급기온도를 결정하는데 있어서 영향을 미치게 되는 것이다. 급기온도 결정에 작용하는 이러한 제한조건을 파악하기 위해 다음과 같은 가정하에서 여러가지 냉방부하 조건에 대해 많은 계산을 실행해 보았다. 어떤 Zone의 공조조건을 76F (24℃), 60%RH 상태로 유지하고 이 Zone의 잠열부하는 거주자의 인원밀도와 기타 잠열발생을 감안하여 약 40RT로 일정하다. 외기조건은 최소량의 외기만을 도입한다. 코일에서의

기타 부하증가를 고려해서 혼합공기에 에탈피를 계산하기 위한 환기 에탈피에 1 Btu/lbm. D.A의 부하를 추가하여 계산한다. 또한 냉각 코일의 Bypass 비는 10%로 가정했다. 위와 같은 가정하에서 공기조화기의 급기송풍기가 최대용량일 때를 기준으로 한계급기온도가 결정되었다. 건물부하 725 RT에서는 급기온도를 58F(14℃)로 하고 송풍량을 최대로 공급하면 부하를 충족시킬 수 있다. 725 RT 이상에서는 부하증가에 대처하기 위해서 급기온도를 낮게해야하고 이에 따라 냉수공급온도도 낮게 유지하여야 한다. 이리하여 냉난방시스템을 제어하기 위한 최적 방안이 결정되었다. 이 장의 결과는 다음 장에서 나타낸 바와 같이 장기적인 빌딩시뮬레이션 제어에 이용되었다.

6. 최적제어의 결과

각종 제어방법하에서의 시스템의 에너지소비량을 비교하기 위해 전체 냉난방시스템의 시뮬레이션을 행하였다. 이것은 설정점을 고정시킨 상태의 제어방식과, 설정점변경이 가능한 현재의 제어방식, 그리고 항상 최소에너지 사용점에서 시스템을 운전하도록 하는 최적제어방식에 대한 비교이다. 이 지

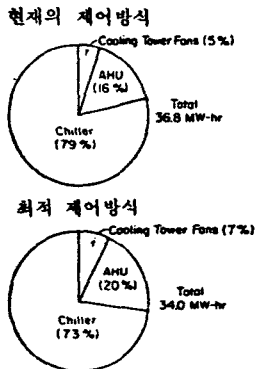


그림 12 시뮬레이션을 통한 최적제어방식대 현재의 제어방식의 에너지 사용 비율(5월중 어느 한 주간의 경우)

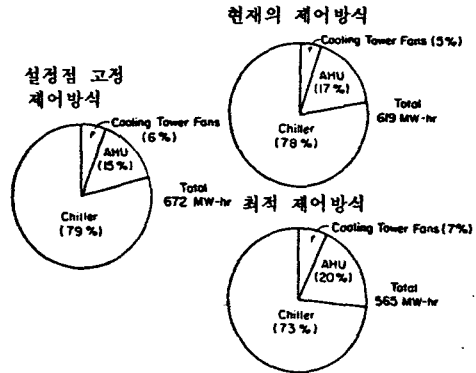


그림 13 시뮬레이션을 통한 최적제어방식대 현재의 제어방식의 에너지 사용 비율(5월중순에서 9월중순까지의 경우)

역의 실제기상자료는 적용할 수 없었고, 대표 기상년(Typical Meteorological Year) 데이터가 입력자료로서 이용되었다. 이 데이터는 1년분의 자료이며 매시간별 태양복사와 평균기상년에 대한 데이터로 구성되었다. 이용된 입력자료는 외기건구 및 습구온도와 수평면 태양복사 측정치였다. 현재의 제어 방법 및 최적제어방법에서 실행된 시뮬레이션 결과를 그림 12에 나타낸다. 그림 12에 사용된 데이터는 5월중의 어느 한 주간의 자료이며 이것은 평균적인 기상상황을 대표하고 있다. 제어의사결정을 하는데 사용된 시간증분(Time Increment)은 1/8 시간 이었다. 최적제어방식은 약 8%정도의 에너지소비량을 절약할 수 있었으며 두가지 경우에 있어서 모두 냉동기가 소비하는 에너지가 가장 큰 비중을 차지하고 있으므로 냉동기는 에너지절약제어에 있어 주안으로 고려해야 할 구성요소라는 것을 알 수 있다. 또한 이 두 제어방법사이에는에너지 사용비율에 있어서 차이가 있으며 최적제어방식의 경우 냉각탑과 공기조화기 급기송풍기에서의 동력이 상대적으로 또한 절대치로도 증가한다. 그러나 이 추가에너지는 냉동기에너지 사용의 감소에 의해 보상되고도 남는다. 그림 13은 냉방기간동안의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 현재제어방식 및 최적제어방식에 대

한 시물레이션을 주된 냉방기간인 5월 중순에서 9월 중순까지의 기간을 대상으로 실행하였으며 최적제어의 이용에 의해 약 9%의 에너지절약을 얻을 수 있었다. 전력소비량 1 Kwh당의 비용을 0.06 \$로 보면 이 기간 동안에 최적제어를 통해 얻을 수 있는 에너지 절감액은 3,240 \$이다.

표 2 각 제어방식에서의 에너지 사용

제어방식	총 에너지 MWh	냉동기 (%)	공조기 송풍기 (%)	냉각탑 송풍기 (%)
설정점 고정제어방식	672	79	15	6
현재의 제어방식	619	78	17	5
최적 제어방식	565	73	20	7

7. 설정점 고정제어의 결과

현재의 제어방식과 최적제어방식을 효과적으로 비교하기 위하여 또 다른 제어방식 즉, 설정점을 고정한 제어방식에 대한 시물레이션을 통해 하나의 기준선을 제시하였다. 설정점 고정 제어방식의 설정치는 통상적인 냉난방시스템의 실용치를 선택하였으며 이러한 시물레이션의 결과를 기준으로 보다 개선된 제어기술의 경제성을 검토할 수 있었다. 급기온도를 확보하기 위한 냉수공급온도는 현재의 실용적인 범위값인 52F (11 °C)로 일정하게 하였다. 냉각탑의 송풍기 회전수제어는 Approach 온도를 기준으로 했으며 이것은 현재 애틀랜타빌딩에서 취하고 있는 것과 같은 제어방법이다. 일정속도로 송풍기를 제어하는 방식은 불합리하게 높은 송풍기동력이 소모되고 어떤 운전 상태에서는 불합리하게 높은 냉각수환수온도를 야기시킨다는 것을 알게 되었다. 나머지 제어변수들은 다른 시물레이션에서와 같은 값을 취하도록 하였다. 이 시물레이션은 5월 중순에서 9월 중순까지의 기간에 대해 실행하였으며 냉각탑, 공기조화기 급기송풍기, 그리고 냉동기에 대한 총에너지소비량을 다른 시물레이션의 결과와 비교하여 다음에 설명한다. 설정점 고정운전의 에너지소비량은 현재의 제어

방식보다 8.5%정도 높게 나타나며, 최적제어방식보다는 무려 19%가 높다. 이 3가지 제어방식에 대한 에너지사용량은 놀랍게도 서로 상당히 근접한 값을 나타내었다. 처음에는 설정점 고정운전이 다른 제어방식보다 상당한 에너지를 더 소비할 것이라 예측되었는데 서로 상당한 근접을 나타낸 이유로는 구성기간에 상당한 에너지소비량의 손익관계가 발생하여 총사용량의 관점에서 보면 별로 큰 차이가 나지 않았기 때문이다. 예를들면 설정점 고정 운전하에서는 냉수공급설정온도는 동적제어방식에서의 설정온도보다 낮고 따라서 냉동기동력은 증가한다. 그러나 냉수공급온도가 낮으면 같은 부하에 대처하기 위한 급기풍량을 작게 할 수 있으므로 공기조화기 송풍기동력은 감소된다. 설정점은 가변할 수 있는 제어방식에서는 시스템을 보다 유리하게 운전될 수 있으나 그 변화에 따른 다른 부분에서의 보상작용은 계속 발생한다. 에너지사용비율분포를 보면 설정점 고정운전방식에서는 냉동기에서의 에너지사용비율이 다른 제어방식 보다 높다는 것을 알 수 있다. 그것은 냉수공급온도가 다른 제어방식보다 평균적으로 낮게 되기 때문이다. 아울러, 냉수공급온도가 낮기 때문에 같은 부하를 감당하기 위한 급기풍량을 감소시킬 수 있어서 공기조화기 급기송풍기의 에너지소비량은 다른 제어방법보다 감소된다. 결국 전체적인 에너지사용비율은 다른 제어방법보다 크게 달라지지 않게 되는 것이다.

8. 동적상태 제어의 결과

이 프로젝트의 중요한 목적은 냉난방시스템에서 동적제어방식이 에너지소비량에 미치는 영향을 입증하는 것이었다. 여기서 말하는 동적제어방식이란 냉방부하와 외기온도 조건의 변화에 따라 제어값을 계속 재설정하는 방식을 의미한다. 이 효과를 연구하기 위해서, 부하계산을 위해 1/64 시간 간격으로 전체 냉난방시스템에 대한 시물레이션을 행하였다. 그리고 현재의 IBM제어방식에서 제어의사결

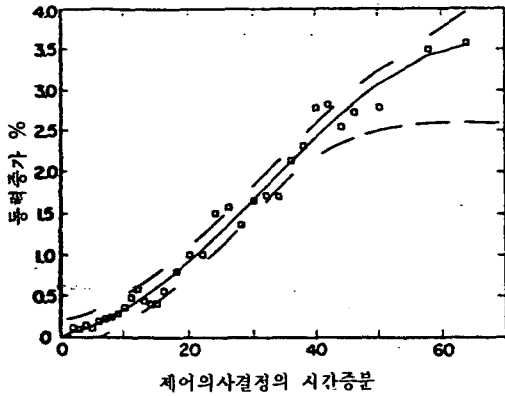


그림 14 동력증가 %와 제어의사결정의 시간 증분과의 관계

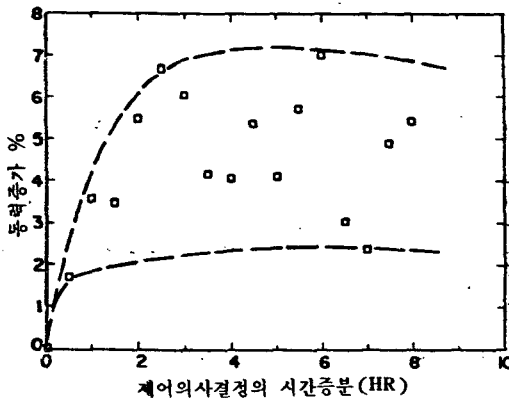


그림 15 시뮬레이션을 통한 현재의 제어방식과 최적제어방식간의 에너지 사용 비율

정을 위해 사용된 시간증분 (Time Increment) 을 1/64 시간에서 8시간까지로 변화시켰다. 각 데이터를 산출하는데 아주 많은 계산시간이 필요했기 때문에 시뮬레이션은 1주간 단위로 실행되었다. 제어의사결정을 위한 시간증분이 1시간이 될때 까지의 시뮬레이션 결과를 그림 14에 나타낸다. 동력증가퍼센트는 1/64 시간의 시간증분을 사용한 시뮬레이션에서의 에너지소비량을 기준으로 정의되고 있다. 점선은 시뮬레이션의 오차범위가 약 ± 0.2%라는 것을 나타내고 있다. 제어의사결정에서의 시간증분을 좀 더 길게한 경우의 시뮬레이션결과를 그림 15에 나타낸다. 데이터점은

더 이상 어느 특정한 패턴을 따르지 않으며 이것은 다음 2가지 요인때문이라 생각된다. 첫째는 제어의사결정의 시간증분이 증가할 수록 점점 덜 동적제어로 된다. 즉 다음 제어의사결정이 이루어질 때까지의 동안에 시스템의 운전상태가 변화한다 하더라도 제어의사결정은 시스템의 현재 상태를 기준으로 이루어지고 있다. 둘째 요인은 운전개시 시점이 언제인가에 따라서 제어의사결정에 관계되는 사항이 영향을 받는 점이다. 공기조화기는 오전 7시 30분에 운전을 시작해서 오후 6시에 운전을 정지한다. 제어의사결정이 이루어진 시점이 언제인가에 따라 불합리한 제어의사상태가 오랜 시간동안 지속되기 때문이다. 이러한 이유때문에 그림 15에 있어서 데이터점 주변에서 불확정성의 양상을 갖는 영역이 나타나고 있다. 비동적제어로 인한 동력증가는 2~7% 범위로 나타날 수 있다. 일반적인 1시간 간격의 설정점조정에 대해서는 동력증가가 3~4%정도이나, 20분간격이 되면 동력증가는 1%미만으로 줄어든다. 이 프로젝트의 궁극적인 목적은 시스템의 동적특성 및 상호영향과 에너지절약 가능성을 파악하여 냉난방시스템의 최적운전제어방법을 유출해내는 것으로 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 냉난방시스템의 동적제어방법으로 에너지소비량을 절약할 수 있다는 점을 시뮬레이션기법을 통해 확인하였다.

(2) 제어의사결정에 필요한 시간증분의 효과를 평가하였다. 동적제어방식에서는 1시간 간격으로 제어의사결정을 하는 일반시스템보다 시스템운전에 필요한 에너지소비량을 3~4%정도 절약할 수 있으며 제어의사결정시간 간격이 늦어지면 최대 7%정도의 에너지증가가 발생할 수 있다.

(3) 각 운전조건에서 에너지소비량을 최소화하기 위한 최적제어방법을 사용하면 현재의 제어방법보다 8.7%정도의 에너지절약이 가능하며 설정점고정제어방식과 비교하면 19%의 에너지절약이 가능하다.

(4) 냉난방시스템의 운전방법에 대해 에너지

절약 가능성을 확인하였으며 신뢰할 수 있는 기기에 대한 컴퓨터모형을 개발하였다.

이것은 건물의 운전관리요원, 냉난방시스템 제어기술자, 그리고 앞으로의 연구자에게 유용하리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. Carrier, W.H. 1911. "Rational psychrometric formulate," ASME Transactions, V. 33, p. 1005.
2. Hackner, R.J. 1984. "HVAC system dynamics and energy use in existing building." MS thesis, University of Wisconsin-Madison.
3. Hackner, R.J., Mitchell, J.W., and Beckman, W.A. 1984. "HVAC system dynamics and energy use in existing buildings—Part 1." ASHRAE Transactions, Vol. 90, 2B, pp. 523-530.
4. Klein, S.A. et al. 1981. "TRNSYS A transient simulation program." University of Wisconsin-Madison, Engineering Experiment Station Report 38-11, Version 11. 1, April.
5. Klein, S.A. et al. 1983. "TRNSYS A transient simulation program." University of Wisconsin-Madison, Engineering Experiment Station Report 38-12, Version 12. 1, December.
6. Marley Cooling Tower Company, 1982. "Cooling tower energy and its management." Marley Technical Report h-001A, October.
7. Stoecker, W.F., ed. 1971. Proposed procedures for simulating the performance of components and systems for energy calculations. 2nd ed. New York: ASHRAE.
8. Stoecker, W.F., and Jones, J.W. 1966. Refrigeration and air conditioning. New York, McGraw-Hill Book Company.
9. Tuve, G.L., Domholdt, J.C. 1966. Engineering experimentation. New York, McGraw-Hill Book Company.
10. Whiller, A. 1967. "A fresh look at the calculation of performance of cooling towers." ASHRAE Transactions, Vol. 82, Pt. 1, p. 269.