



# 건물 공조 시스템의 에너지 절감을 위한 최적 제어 기술 적용 방안 연구

김진, 백승재  
(주)나라컨트롤 산업사업본부

## 1. 서론

건물에서의 효과적인 에너지 절감은 건물소유주 및 사용자에게 경제적 이익을 주는 것과 동시에 더 나아가 국가 전체적으로 기간산업 등에 직접적으로 연관되는 중요한 요소이다. 또한 우리나라는 외국으로부터 수입에 의존하는 에너지 자원 빈국이기도 하며 현재 에너지의 외국 의존도가 매우 큰 국내실정을 감안하여 볼 때 에너지 절약 및 대체 에너지의 개발에 대한 연구는 우리의 현실에서 매우 중요하며 국가 장래의 존망이 달려 있는 커다란 과제라고 볼 수 있다. 건물에서의 에너지 소비는 빌딩 내 건축설비의 비효율적인 운전 및 관리와 관련되어 있다고 볼 수 있으며, 특히 하절기 전력수요의 20% 가량이 건물의 총 부하 중에서 냉방부하의 몫이라는 결과는 냉방부하가 피크전력과 전력 예비율에 상당한 영향을 준다는 것을 알 수 있으며, 동절기 또한 난방부하가 상당 부분을 차지하고 있다.

이러한 건물에서의 에너지 절약방법으로는 건축 계획적 접근방법과 에너지 사용기기 및 시스템의 운전효율을 향상시키는 설비적 접근방법이 있다. 이러한 방법들과 관련이 있는 요소들을 나열하면

표 1과 같다.

특히, 설비적 에너지 절약방법 중에 있어서 단기 간의 연구개발로 에너지를 절감할 수 있는 방안으로는 제어(건물에너지 관리 및 제어)기술의 발전이라 할 수 있는데, 기기의 무절제한 운전으로 야기되는 기기의 잔고장 및 노후성의 가속화 그리고 필요이상의 전력이 사용됨으로 나타나는 에너지 낭비 등을 제어기술을 도입하여 기기 및 전체적인 시스템의 효율을 향상시킴으로서 상당한 에너지를 절감시킬 수 있다.

일반적으로 건물 공조시스템에 있어서 에너지 소비량에 영향을 주는 주요 제어변수들로는 냉수 및 냉각수 유량, 보일러 순환펌프의 유량, 냉각탑 팬 및 공조기 팬의 공기유량, 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도(혹은 냉각탑 공기유량), 난방수 온도 등을 들 수 있으며 이러한 제어변수들의 운전은 일반적으로 하절기와 동절기로 나누어 부하에 따라 변화없이 유지되고 있다. 하지만 이러한 공조 시스템의 에너지 소비량에 영향을 끼치는 제어변수들의 값들을 부하에 따라 최적점을 찾아 변화시킨다면 건물 에너지절감에 큰 효과를 볼 수 있을 것이다.

이러한 제어방법의 관련 연구로는 국외에서는 Boyens 등은 중앙난방시스템의 최적화를 위해 Braun 등이 개발한 최적제어개념을 급기 팬과 가스 버너로 구성되어 있는 난방시스템에 적용한 실험을 수행함으로써 에너지 절감효과를 관찰하고 혼합제어방법을 고안하여 최적의 운전 방법을 제시하였다. Zaheer-uddin 등은 기존에 공조시스템에서 많이 적용하는 정풍량 방식과 가변 풍

<표 1> 대상 모델링과 실제와의 에너지 비교

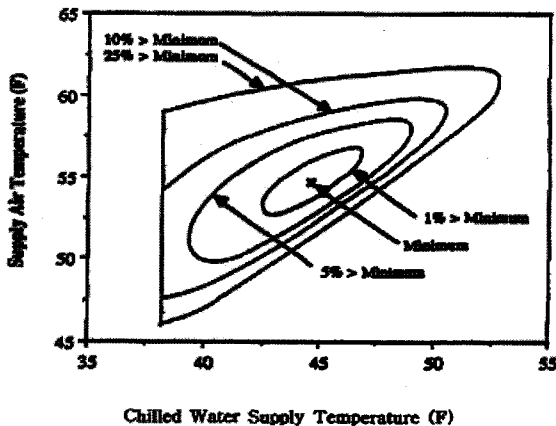
건축적요소	설비적요소
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 건물현상</li> <li>• 건물의 방위</li> <li>• 개구율(창, 문 등)</li> <li>• 일사</li> <li>• 단열</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설비의 시스템 효율</li> <li>• 기기효율</li> <li>• 제어방법</li> <li>• 자연에너지 이용</li> </ul>

량 방식을 혼합한 새로운 다단계 최적화(multi-stage optimization) 방식을 제안하였으며 이 방식이 다른 방식보다 에너지 절감 효과를 25% 이상 얻을 수 있음을 보여주었다. 그러나 이러한 방법들은 최적 설정치를 구하기 위해서 환경 및 제어변수의 변화에 대한 에너지 소모량을 표현하는 2차함수의 계수를 실험 또는 통계적인 처리방법을 통해 구해야 하거나 복잡한 계산방법을 사용하기 때문에 실시간 제어에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 이에 따라 Kaya는 준정상상태(quasi steady state) 부하 조건에서 에너지 소비량을 구성요소들에 기초하여 구하고자 하였고 이로부터 얻은 최적의 알고리즘은 실시간에 적용함에 있어 용이함을 보였다.

본 연구는 중앙 공급 방식의 건물 공조 시스템을 대상으로 실시간 최적제어알고리즘을 통해 제어 변수들의 최적설정치를 구하고 과도 시뮬레이션 해석 프로그램을 활용하여 이에 따른 에너지 절감효과를 확인하고 실제 건물에 대한 적용 방안을 연구하고자 한다.

## 2. 제어 알고리즘

### 2.1 건물 공조시스템의 운전특성

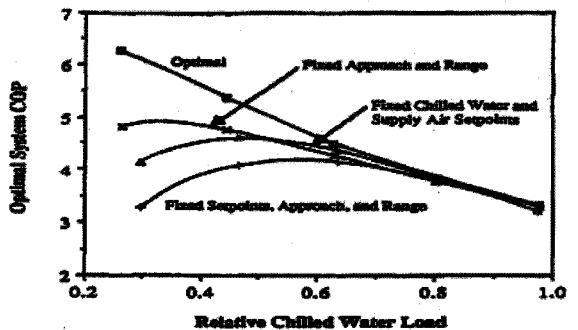


[그림 1] 냉수 및 급기온도와 전체 에너지 소모량과의 관계

그림 1은 종래의 제어방법과 최적제어방법과의 냉동기의 성능지수를 비교한 그림이다. 그림에서 살펴볼 때 상대적인 냉수부하가 최고일 경우는 냉동기의 성능지수가 거의 비슷하나 상대적으로 작은 냉수부하일 경우는 최적제어의 냉동기 성능지수가 설정온도, 냉수와 급기온도, Approach(냉각수 온도와 습구온도의 차) 및 Range(응축기의 입출구온도 차) 등을 고정하여 제어 하였을 경우 보다 높게 나타나 더욱 효율적임을 알 수 있다.

그림 2는 일정한 조건에서 냉수온도와 급기온도가 전체 시스템의 에너지 소비량에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 그림에서 살펴보면 적절한 냉수공급온도와 급기온도를 설정해 줌으로 인하여 에너지가 최소가 되는 제어설정온도가 존재함을 알 수 있으며, 각 온도의 최적 설정치의 2 내에서는 에너지가 최소에너지 소비량의 1% 증가내에 있게 된다. 그러나 급기 및 냉수온도의 설정치의 크기가 그 범위를 벗어나게 되면 에너지 소모는 급격하게 늘어나는 것을 알 수 있다. 또한, 두 온도의 차가 감소하게 됨에 따라 냉각수 펌프의 유량은 증가시켜 주어야 하며, 이로 인하여 펌프의 전력소비량은 증가하게 된다.

이와 같은 결과는 부하를 포함한 환경 변수들의 변화에 따라 전체시스템을 적절히 최적제어하면 성능향상 및 이를 통한 커다란 에너지의 절감을 이룰 수 있음을 보여준다.



[그림 2] 종래의 제어방법과 최적제어방법과의 냉동기 성능지수 비교

## 2.2 제어 알고리즘

중앙 공조 시스템의 경우 총 에너지소모량은 열원의 전력량과 순환펌프 전력량, 공조기 급배기팬의 전력량 등 각 설비기기의 에너지의 총 합이라 할 수 있으며 이는 다음의 식 (1)과 같다.

$$E_{Total} = E_{Chiller\ or\ Boiler} + E_{Pump} + E_{Fan} \quad (1)$$

식 (1)에서 열원의 에너지 소비량 및 순환펌프의 전력량은 냉방코일에 공급되는 냉수의 온도차에 관한 수식으로 식 (2), 식 (3)과 같이 표현이 되며, 냉방부하를 고려한 팬의 전력소모량은 냉난방코일의 입출구 공기 온도차에 관한 수식으로 나타내어지며 식 (4)와 같다.

$$E_{Boiler} = K_{Chiller\ or\ Boiler} \cdot \Delta T_w \quad (2)$$

$$E_{Pump} = K_{Pump} \cdot \Delta T_w^3 \quad (3)$$

$$E_{Fan} = K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_a} \quad (4)$$

위의 식들을 이용하여 공조시스템에서의 총 에너지소모량을 식으로 나타내면 다음 식 (5)와 같다.

$$E_{Total} = K_{Chiller\ or\ Boiler} \cdot \Delta T_w + K_{Pump} \cdot \Delta T_w^3 + K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_a} \quad (5)$$

이 식을 미분하여 근을 구하면 총 에너지소모량이 최소가 되는 최적의 냉온수온도차 및 최적의 급기온도차를 구할 수 있으며, 이 값들은 실시간 제어를 통해 구해진 냉온수 입출구 온도 및 전력량 등의 에너지소모량을 통해 구해지게 되며 이 값들을 통해 구해지는 최적의 냉온수 온도차는 최적의 냉온수 설정온도를 결정하게 되며 이를 통해 열교환 특성식을 이용하면 최적의 급기설정 온도를 구할 수 있으며 이는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} T_{w,opt} &= T_{w,r} \pm \Delta T_{w,opt} \\ T_{a,opt} &= T_{a,r} \pm \Delta T_{a,opt} \end{aligned} \quad (6)$$

## 3. 시스템 모델링

본 연구에서는 열원 및 공조설비, 실내부하모델 등의 구성 요소, 각종 제어기 및 센서들로 구성된 냉난방시스템의 특성을 연구하는데 과도 시뮬레이션 해석 프로그램인 TRNSYS를 사용하였으며, 적용 대상 건물의 공기조화시스템은 다음과 같이 구성된다. 대상 건물은 동물 사육실로 대부분이 전외기 방식으로 이루어져 있다. 전외기 방식을 운용하면 공조기가 감당할 부하가 커지기 때문에 외기는 제습코일을 거쳐 환기와 현열교환을 하고, 실내 설정온도에 맞게 공조되어 실내로 공급된다. 공조설비의 냉방 열원은 CDU(Condensing Unit)로 직접 팽창식 코일(DX Coil)을 통해 공기와 열교환을 하며, 온열원은 증기보일러를 사용한다.

대상 건물의 시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 대상 건물은 경기도 평택에 위치하고 있어 지리적으로 가까운 수원 지역의 기상 데이터를 적용하였으며 하절기는 6 ~ 7월, 동절기는 11 ~ 12월의 각 2개월 동안의 외기데이터를 적용하였다. 또한 실내에는 사육되는 동물들을 위하여 실내 적정 온도는 22℃, 습도는 50%로 연중 일정하게 유지하도록 하였다.

시뮬레이션 모델은 그림 3과 같다. 공조 시스템의 시뮬레이션을 위해 그림에서와 같이 각 설비를 구성하는 모델들이 적용되었으며 각 구성요소들의 모델에 대한 정보는 프로그램 내에서 시스템 매개변수로 주어지며, 이것은 대상 시스템 구성요소의 기준설정 조건, 용량, 성능을 나타낸다.

구성된 프로그램은 실제 시스템과 같이 건물내로 도입되는 외기는 절대 습도량에 따라 작동되는 CDU의 직접 팽창식 코일을 지나고 실내에서 환기되는 공기와 현열 교환을 한다. 다음으로 현열교환기 출구 공기온도와 실내부하에 따라 냉방시에는 3대의 CDU가 교번운전을 하며 직접 팽창

식 코일을 통해 급기온도를 냉각시키고, 난방시에는 실내 온도에 따라 증기보일러에서 공급되는 증기량을 PI 제어하여 실내온도를 유지하게 된다.

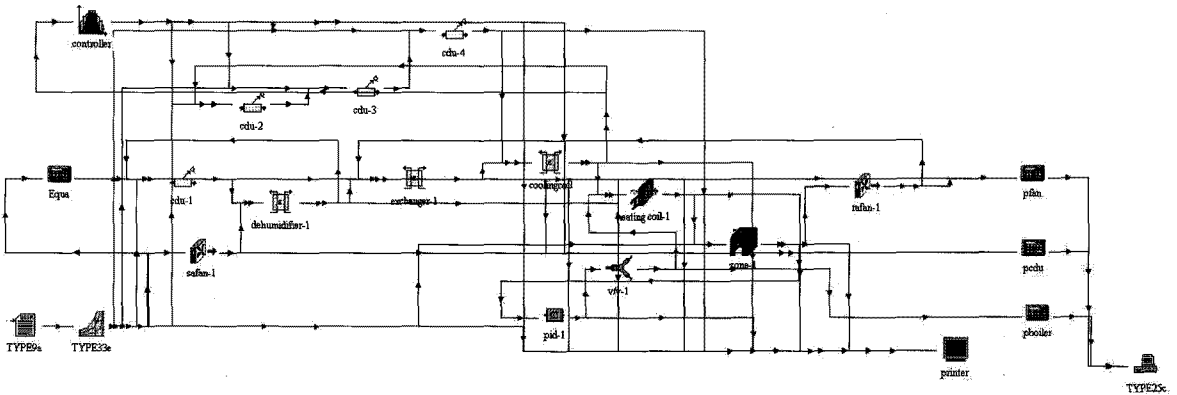
대상 건물의 모델링을 이용하여 냉방시 2개월, 난방시 2개월간 시뮬레이션을 수행하였고, 실제 이 기간 동안의 에너지 사용량에 대한 시뮬레이션 모델의 검증은 위하여 실제 건물에서 사용된 에너지 사용량과 시뮬레이션 결과를 표 2에 나타내었다. 하절기는 전력사용량, 동절기는 보일러 가스사용량을 비교하였으며 시뮬레이션 결과 실제 에너지 사용량과 시뮬레이션의 차이가 하절기 약 1.6%, 동절기 약 4%로 나타나 개발된 시뮬레이션 모델이 제어 알고리즘 개발을 위한 분석 도구로 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 최적제어 알고리즘 적용 결과

최적제어 알고리즘은 냉온수온도, 급기온도, 냉각수 온도의 설정점을 변화하는 부하에 따라 적

절하게 변화시켜 에너지소모량의 절감을 목적으로 한다. 그러나 모델링 된 존의 경우 냉열원이 CDU이어서 코일에 공급되는 유체가 냉수가 아닌 냉매이기 때문에 온도제어가 쉽지 않고, 공급되는 풍량은 실내 환기량과 실내 차압을 유지하기 위하여 거의 일정하다. 온열원 또한 증기보일러이기 때문에 증기보일러에서 공급되는 증기의 온도는 일정하다. 이에 본 연구에서는 실제 시스템의 개선을 최소화 하여 최적 제어 알고리즘을 적용하는 방안으로 공조기의 급기 온도만을 최적 제어하는 방안과 개선비용이 많이 소요될 것으로 예상되는 CDU를 터보 냉동기로 개보수하여 급기 온도와 냉수 온도를 제어하는 방안의 2가지로 구분하여 제어 알고리즘을 적용하였으며 전자의 경우를 Case 1, 후자를 Case 2로 구분하였다.

Case 1의 시뮬레이션 동특성 결과를 그림 4에 나타내었다. 제어는 냉수온도를 제어하는 대신, 세 대의 CDU를 On/Off 제어하여 코일을 지난 후의 공조기의 급기 온도의 설정점을 제어하였다.



[그림 3] 대상건물의 시뮬레이션 모델링

<표 2> 대상 모델링과 실제와의 에너지 비교

	하절기 전력 사용량 (kwh)	동절기 가스 사용량 (m³)
실제 사용량	423,183.9	30,582.0
시뮬레이션 결과	429,816.0	31,781.6
차이	1.57 %	3.92 %

그림에서와 같이 변화하는 외기 조건에 따라 급기온도 설정점이 변화하고 그 설정점에 맞게 급기온도가 추종하는 것을 확인할 수 있다.

그에 따른 에너지소비량의 비교를 표 3에 나타내었다. 표에서와 같이 급기온도를 최적 제어하였을 경우 기존의 시스템과 비교하여 냉방시 전력소비량은 약 5.73%, 난방시 가스소비량은 약 6.20% 감소하였다. 최적 제어 기술의 예상 에너지 절감효과가 더 크게 나타나지만 Case 1에서는 급기설정온도의 설정점만을 제어했고, 부하에 따라 CDU를 On/Off 제어 하는 시스템이기 때문에 에너지절감 효과가 차이를 보이는 것으로 판단된다.

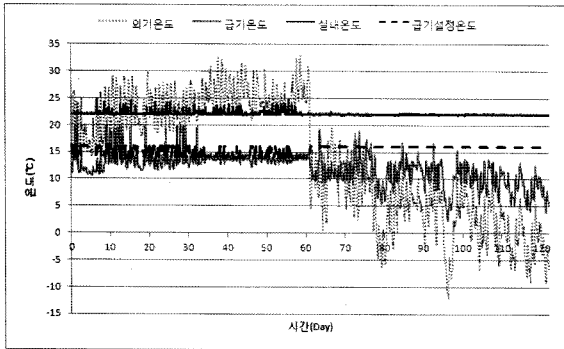
Case 1의 경우 기존의 열원 및 공조 설비 시스템은 변경하지 않고 최적제어알고리즘에 맞추어 제어가 가능한 부분만 적용한 반면, Case 2의 경우에는 전술한 바와 같이 공조 시스템을 제어 알

고리즘에 맞게 변경하는 것으로 가정하여 여러 대의 CDU를 부하에 따라 적응성이 강한 한 대의 터보식 냉동기로 대체하는 것으로 가정하였고, 그에 따라 변유량 펌프를 추가하였다. 변유량 펌프는 냉수량을 PI 제어하는 것으로 가정하였다.

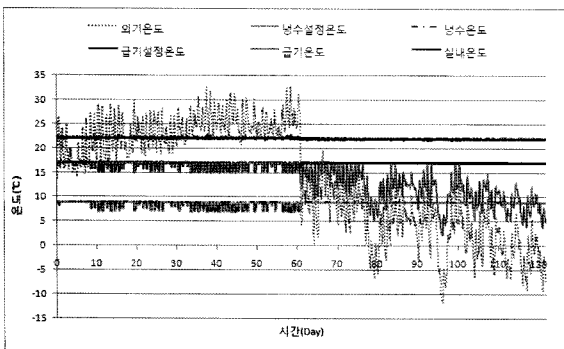
이렇게 변경된 시스템의 동특성 시물레이션 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 냉수온도 및 급기온도의 설정값이 외기온도에 맞게 변화하고 그에 따라 냉수온도 및 급기온도가 잘 추종해가는 것을 확인할 수 있다.

그에 따른 에너지소비량의 비교를 표 4에 나타내었다. 표에서와 같이 냉수온도와 급기온도를 최적 제어하였을 경우 기존의 시스템과 비교하여 냉방시 전력사용량이 약 9.06% 절감되는 것을 확인할 수 있었다.

Case 1의 결과와 비교하여 볼 때, Case 2처럼 기존의 설비나 시스템을 개량 또는 교체하는 것이 기존의 시스템에서 제어부분만 변경하는 것보다 두 달 기준으로 하절기 약 3.33%의 전력사용량을 절약 할 수 있을 것으로 예상되었다.



[그림 4] 외기온도 변화에 따른 최적제어 동특성(Case 1)



[그림 5] 외기온도 변화에 따른 최적제어 동특성(Case 2)

<표 3> 대상 모델링과 최적제어의 에너지 소모 비교(Case 1)

	하절기 전력 사용량(Kwh)	동절기 가스 사용량 (m <sup>3</sup> )
기준 모델링결과	429,816.0	31,781.6
최적제어결과(Case1)	405,189.8	29,812.1
차이(에너지 비용)	-5.73 % (₩ 2,017,165)	-6.20 % (₩ 1,213,350)

<표 4> 대상 모델링과 최적제어의 에너지 소모 비교(Case 1)

	하절기 전력 사용량(Kwh)	동절기 가스 사용량 (m <sup>3</sup> )
기준 모델링결과	429,816.0	31,781.6
최적제어결과(Case1)	390,866.7	29,538.33
차이(에너지 비용)	-9.06 % (₩ 3,190,390)	-7.06 % (₩ 1,382,011)



## 5. 결론

중앙 공조시스템에는 에너지 소모에 영향을 끼치는 여러가지 제어변수들과 환경변수들이 존재한다. 그러나 계속적인 부하변동이 따르는 환경에서 고정된 값의 제어변수로 중앙 공조시스템을 제어했을 경우에는 불필요한 에너지 손실을 초래하게 된다. 이에 따라 에너지의 소모를 줄이기 위해서는 외기부하 등의 환경변수들의 변동에 따라 제어변수들을 적절히 조절해야 함을 알 수 있다.

또한 중앙 공조시스템의 경우 외기온도의 증가에 따라 실내 쾌적성을 위한 실내공기온도 유지와 에너지 절감을 위해 냉온수 및 급기온도의 설정값이 낮아져야 하고 반대로 외기온도가 감소하면 설정값이 상대적으로 증가해야 함을 알 수 있다. 또한 이러한 설정점의 변화는 에너지 소모의 변화에도 커다란 영향을 끼침에 따라 최적 제어기술의 적용을 통하여 중앙 공조시스템에 있어서 에너지 절감이 가능하도록 하여야 할 것이다. ●