

열원 및 공조설비의 최적제어시스템 현장 적용성에 관한 연구

백 승 재[†], 김 진^{*}, 안 병 천^{**}, 송 재 엽^{**}

^{*}(주)나라컨트롤, ^{**}경원대학교 건축설비공학과

A Study on the Application of the Optimal Control System for Heat Source and HVAC System

Seung-Jae Baek[†], Jin Kim^{*}, Byung-Cheon Ahn^{**}, Jae-Yeob Song^{**}

[†] Nara Controls Inc., Seoul 135-100, Korea

^{**}Department of Building Equipment System Engineering, Kyungwon University, 461-701, Korea

ABSTRACT: The optimal control system for heat source and HVAC system has been developed for minimizing energy consumption while maintaining the comfort of indoor thermal environment in terms of the environmental variables such as time varying indoor load and outdoor temperatures. The optimal set-points of control parameters are supply air temperature and chilled or hot water temperatures. The optimal control study has been implemented for biosafety laboratory by using TRNSYS simulation program in order to investigate energy performance for heat source and HVAC system.

Key words: Heat source and HVAC system(열원 및 공조설비), Optimal control system(최적 제어 시스템), Set-point temperature(설정온도), Biosafety laboratory(생물안전실험실), Energy saving(에너지 절약)

1. 서 론

최근 유가의 급격한 상승과 에너지 자원의 해외 의존도가 큰 우리나라 실정에서 건물에서의 에너지 소비가 폭발적으로 증가하고 있어 건물 에너지 절약에 대한 연구 개발 및 적용은 큰 관심을 받고 있다.

건물에서의 에너지 절약방법으로는 단열, 건물 방위 및 형상 등을 통한 건축 계획적 접근방법과 에너지 사용기기 및 시스템의 운전효율을 향상시키는 등의 설비적 접근방법이 있으며, 특히, 설비적 에너지 절약방법 중에 있어서 단기간의 연구

개발로 에너지의 커다란 절감을 실현시킬 수 있는 방법은 시스템의 효율을 극대화 할 수 있도록 하는 건물에너지 관리 및 최적제어 기술의 도입이다.

현재 대부분의 열원 및 공조시스템에서 사용되고 있는 제어 알고리즘은 변화하는 실내부하 및 환경조건에 대한 최적의 운전이 이루어지지 않음으로써 많은 전력소비 및 가스, 기름 등의 낭비를 초래하고 있는 실정이다. 따라서 환경조건의 변화에 대해 전체시스템의 총 에너지 소비량이 최소가 되는 냉운수온도 및 급기온도 등의 제어변수들의 최적설정치의 선정을 위한 최적제어 알고리즘에 대한 연구가 점차 증가하고 있는 실정이다.

이전 연구에서 개발된 최적제어 알고리즘⁽¹⁾은 일반적 부하 대상 건물에 대하여 실험적 연구가 수행되었으나, 알고리즘의 범용화 및 실용화를 위

[†] Corresponding author

Tel.: +82-02-3440-3366; fax: +82-02-3440-3099

E-mail address: sjbaek@naracontrols.co.kr

해서는 다양한 공기조화시스템에의 적용연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 최적제어 알고리즘을 이용하여 실험용 동물을 사육하는 생물안전 실험실을 대상으로 냉수 또는 온수 및 급기온도의 최적 설정치를 구하고, 시뮬레이션을 통하여 실제 에너지 사용량과 비교하여 에너지 절감 효과를 관찰하여 개발된 최적제어 알고리즘이 기존의 제어방식에 비해 보다 효과적임을 확인하고자 한다.

2. 제어 알고리즘

본 연구에서 적용된 최적 제어알고리즘은 다음과 같다.

냉난방시스템에 있어서 총 에너지 소모량은 냉동기 및 보일러의 에너지 소모량과 냉수 순환펌프의 전력량, 공조기 급배기 팬의 전력량의 합으로 다음 식(1)과 같이 표현된다. 여기에서, P_{tot} , $P_{comp \text{ and boiler}}$, P_{pump} , P_{fan} 은 중앙공조시스템의 총 에너지 소모량, 냉동기 또는 보일러의 에너지 소모량, 냉온수 순환펌프의 에너지 소모량 및 급배기 팬의 에너지 소모량을 의미한다.

$$P_{tot} = P_{comp \text{ and boiler}} + P_{pump} + P_{fan} \quad (1)$$

식(1)에서 보일러의 에너지 소비량 및 냉온수 순환펌프의 전력량은 냉수코일에 순환하는 냉수의 온도차에 관한 수식으로 식(2), 식(3)과 같이 표현할 수 있으며, 냉난방부하를 고려한 팬의 전력소모량은 코일과 열교환이 이루어지는 공기의 코일 전후 온도차에 관한 수식으로 나타내어지며 이는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ΔT_w 는 열 교환 코일을 지나는 순환수의 입출구 온도차, ΔT_{air} 는 코일을 통과하는 순환공기의 전후 온도차, K 값은 각 기기들의 특성계수이다.

$$P_{comp \text{ or boiler}} = K_{comp \text{ or boiler}} \cdot \Delta T_w \quad (2)$$

$$P_{pump} = K_{pump} \cdot \Delta T_w^3 \quad (3)$$

$$P_{fan} = K_{fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_{air}^3} \quad (4)$$

냉난방시스템의 각 구성요소들의 특성식 (2)~(4)를 식(1)에 적용하여 정리하고 식(5)와 같이 물

과 공기의 열교환 특성관계식을 적용하면 식(6)과 같은 코일 순환수의 입출구 온도차에 관한 함수로 표현될 수 있다. 여기서 A, M, C_w, m_w 은 각각 공기의 특성치, 공기유량, 물의 비열, 물의 유량이다.

$$A \cdot M \cdot \Delta T_{air} = C_w \cdot m_w \cdot \Delta T_w \quad (5)$$

$$P_{tot}(\Delta T_w) = K_{comp \text{ or boiler}} \cdot \Delta T_w + K_{pump} \cdot \Delta T_w^3 + K'_{fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_w^3} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 냉난방시스템의 총 에너지 소모량이 최소가 되는 코일을 순환하는 순환수의 냉온수온도차를 구해낼 수 있으며 이는 냉방시스템의 구성요소들의 $K_{comp \text{ or boiler}}$, K_{pump} , K'_{fan} 등과 같은 특성 상수들로부터 결정되어 진다.

이렇게 구해진 최적의 온도차를 식(7)에 적용함으로써 실시간으로 측정되어지는 코일의 출구 냉온수온도와 코일전의 순환공기온도 값을 통해 코일을 통과하는 최적의 냉온수설정온도와 급기설정온도가 정해지게 된다. 여기서, $T_{w,s,opt}$, $T_{w,r}$, $\Delta T_{w,opt}$, $T_{c,discharge}$, $T_{c,inlet}$, $\Delta T_{air,opt}$ 는 최적 냉온수설정온도, 열 교환 코일을 지나는 순환수의 환수온도, 최적 냉온수 입출구 온도차, 최적급기 설정온도, 순환공기의 코일 전 입구온도 및 최적 순환공기 코일 전후 온도차를 말한다.

$$T_{w,s,opt} = T_{w,r} \pm \Delta T_{w,opt} \quad (7)$$

$$T_{c,discharge} = T_{c,inlet} \pm \Delta T_{air,opt}$$

식 (7)에 의해 냉온수온도 및 급기온도의 최적 설정값이 결정이 되면, 냉온수설정온도의 경우 냉동기 압축기 혹은 보일러를 On/Off 제어 또는 비례 제어하여 설정온도를 유지할 수 있도록 하며, 급기 설정온도의 경우는 유량 제어가 가능한 냉수 펌프를 제어함으로써 유지 할 수 있도록 한다.

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 사용하였다.

본 연구 대상 건물의 공기조화시스템은 다음과

같이 이루어져 있다. 대상 건물은 공조 구역이 대부분 동물 사육실이기 때문에 많은 부분이 전외기 방식으로 이루어져 있다. 전외기 방식을 운용하면 공조기가 감당할 부하가 커지기 때문에 외기는 제습코일을 거쳐 환기와 현열교환을 하고 실내 설정온도에 맞게 공조되어 실내로 공급된다. 공조 설비의 냉방 열원은 CDU(Condensing Unit)로 직접 팽창식 코일(D.X Coil)을 통해 공기와 열교환을 하며, 온열원은 증기보일러를 사용한다.

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

시뮬레이션 모델은 Fig. 1과 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 팽창식 코일을 통해 급기온도를 냉각시키고, 난방시에는 실내 온도에 따라 증기보일러에서 공급되는

증기량을 PI 제어하여 실내온도를 유지하게 된다.

Fig. 2는 개발된 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 대상 공조 구역의 냉방시 2개월, 난방시 2개월 동안의 시뮬레이션을 실시한 결과 그림에서와 같이 설정된 실내 온도로 적절히 제어하고 있는 결과를 나타내고 있으며 실제 이 기간 동안의 에너지 사용량에 대한 시뮬레이션 모델의 검증은 위하여 실제 건물에서 사용된 에너지 사용량과 시뮬레이션 결과를 Table 1에 나타내었다. 표에서 같이 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.

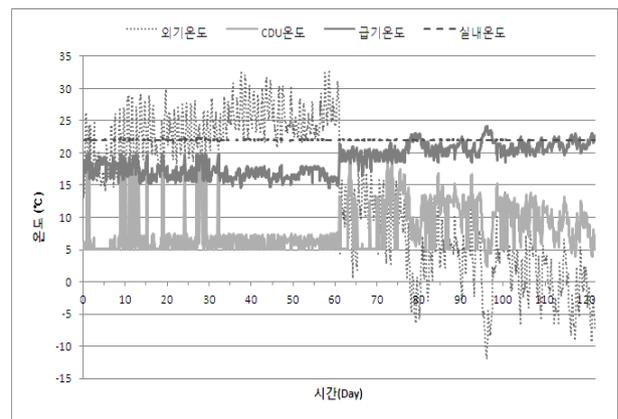


Fig. 2 The responses of optimal control system with time varying outdoor temperature (zone modeling).

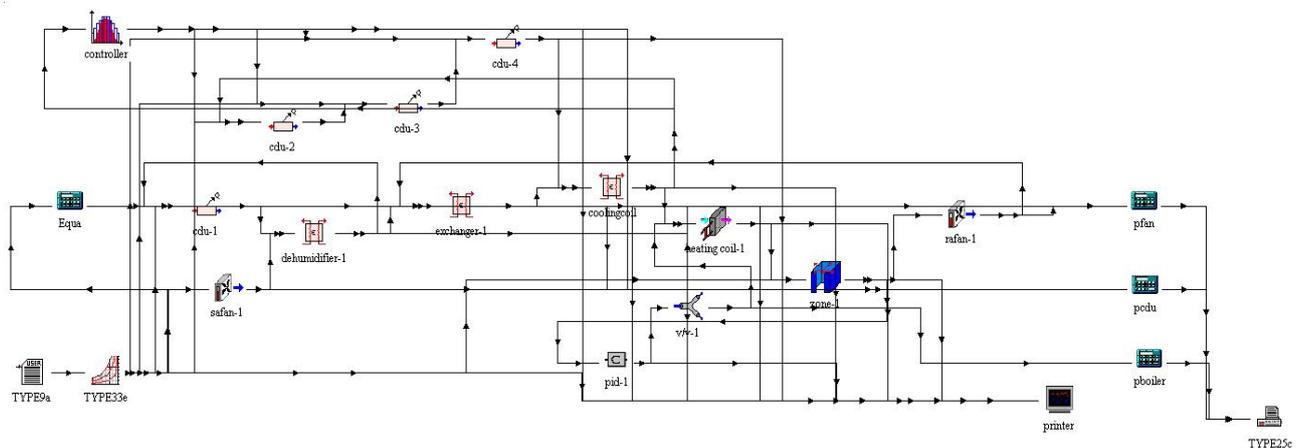


Fig. 1 Trnsys program for building modeling.

Table 1 Comparison of energy consumptions with real and zone modeling.

	하절기 전력 사용량 (Kwh)	동절기 가스 사용량 (m ³)
실제 사용량	423,183.9	30,582.0
시뮬레이션 결과	429,816.0	31,781.6
차이	1.57 %	3.92 %

4. 최적제어 알고리즘 적용 결과

최적제어 알고리즘은 냉수온도, 급기온도, 냉각수 온도의 설정점을 변화하는 부하에 따라 적절하게 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 개선 비용이 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 결과를 Fig. 4에 나타내

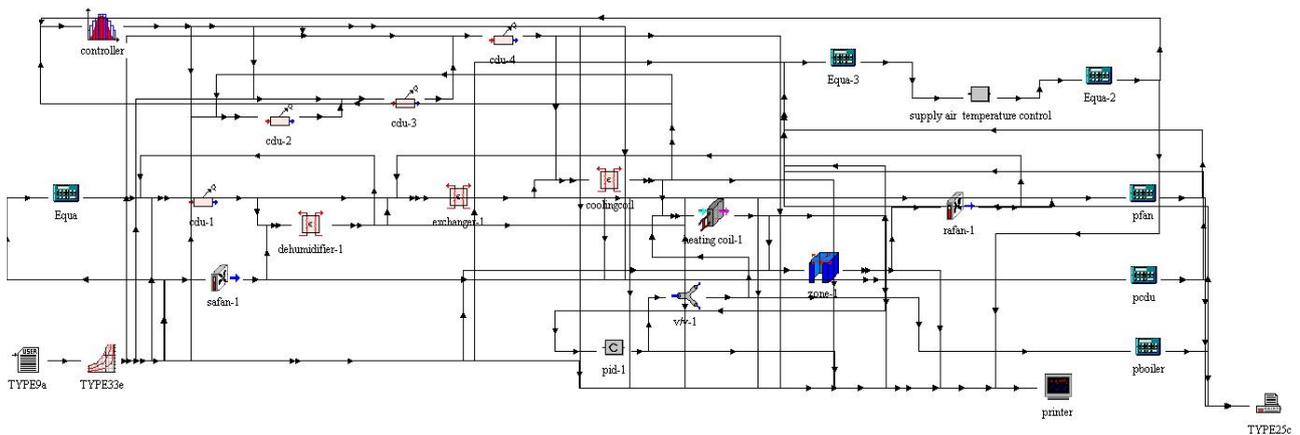


Fig. 3 Trnsys program for optimal control system(case 1).

었다. 제어는 냉수온도를 제어하는 대신, 세 대의 CDU를 On/Off 제어하여 코일을 지난 후의 공조기의 급기 온도의 설정점을 제어하였다. 그림에서와 같이 변화하는 외기 조건에 따라 급기온도 설정점이 변화하고 그 설정점에 맞게 급기온도가 추종하는 것을 확인 할 수 있다.

그에 따른 에너지소비량의 비교를 Table 2에 나타내었다. 표에서와 같이 급기온도를 최적 제어하였을 경우 기존의 시스템과 비교하여 냉방시 전력소비량은 약 5.73%, 난방시 가스소비량은 약 6.20% 감소하였다. 기존의 전형적인 공조 시스템을 대상으로 한 연구결과⁽²⁾에서는 에너지 절감효과가 더 크게 나타나지만 본 연구에서는 급기설정온도의 설정점만을 제어했고, 부하에 따라 CDU를 On/Off 제어 하는 시스템이기 때문에 에너지 절감 효과가 감소하는 것으로 고려된다.

Table 2 Comparison of energy consumptions with zone modeling and optimal control system (Case 1).

	하절기 전력 사용량 (Kwh)	동절기 가스 사용량 (m ³)
기준 모델링 결과	429,816.0	31,781.6
최적제어결과 (Case 1)	405,189.8	29,812.1
차이 (에너지 비용)	-5.73 % (₩ 2,017,165)	-6.20 % (₩ 1,213,350)

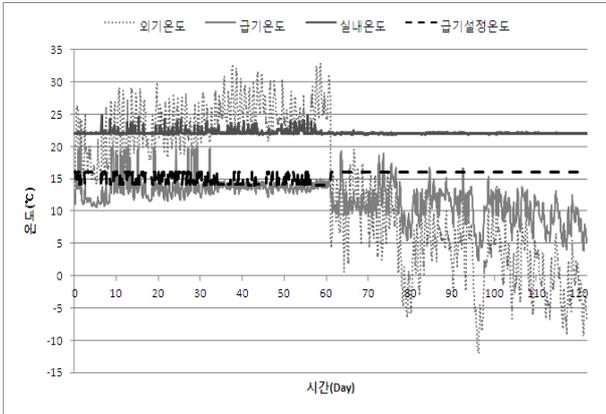


Fig. 4 The responses of optimal control system with time varying outdoor temperature(Case 1)

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 알고리즘에 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 시뮬레이션 모델을 Fig. 5에 나타내었으며 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 냉수온도 및 급기온도의 설정값이 외기온도에 맞게 변화하고 그

에 따라 냉수온도 및 급기온도가 잘 추종해가는 것을 확인 할 수 있다.

그에 따른 에너지소비량의 비교를 Table 3에 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.

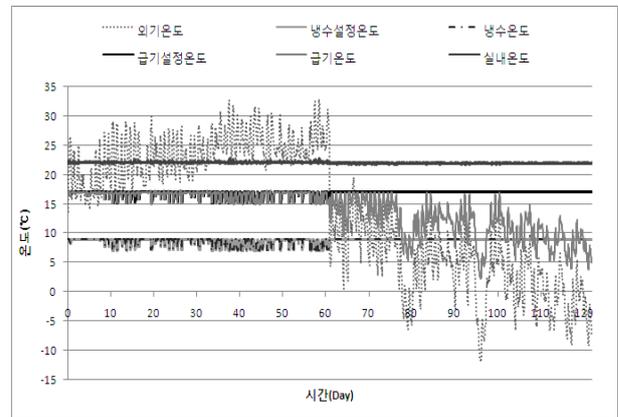


Fig. 6 The responses of optimal control system with time varying outdoor temperature (Case 2)

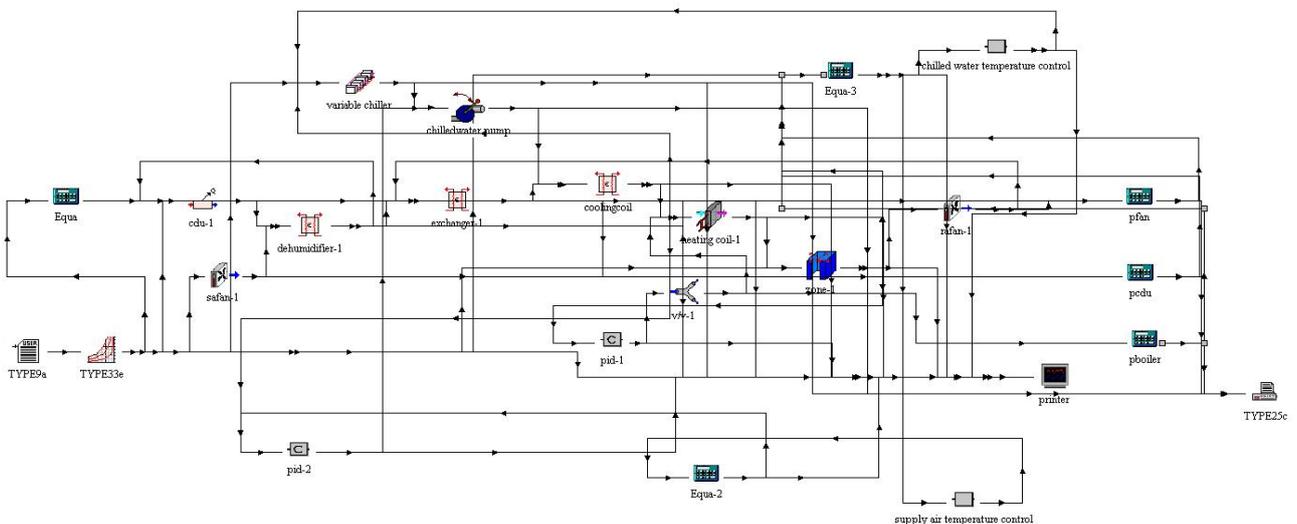


Fig. 5 Trnsys program for optimal control system(case 2).

Table 4 Comparison of energy consumptions with zone modeling and optimal control system(case 2).

	하절기 전력 사용량 (Kwh)	동절기 가스 사용량 (m ³)
기준 모델링 결과	429,816.0	31,781.6
최적제어결과 (Case 2)	390,866.7	29,538.33
차이 (금액)	-9.06 % (₩ 3,190,390)	-7.06 % (₩ 1,382,011)

5. 결론

본 연구에서는 기존 건물을 대상으로 열원 및 공조 설비에 대한 최적제어 시스템의 적용 가능성을 검토해 보고자, TRNSYS 프로그램을 사용하여 대상 건물을 모델링하고 최적 제어 알고리즘⁽¹⁻³⁾을 적용하는 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 일반적인 정풍량 또는 변풍량 공기조화 시스템이 아닌 전외기 방식의 실험동물 사육실을 대상으로 대상물의 시스템 특성, 공조방식, 열원 설비의 특성 등의 조건을 이용하여 시뮬레이션 모델을 개발하였으며 유사한 외기 조건 데이터를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 하절기 및 동절기의 특정 기간 에너지 사용량 대비 약 4% 정도의 오차가 발생하여 개발된 시뮬레이션 모델이 대상 건물의 에너지 분석에 활용될 수 있음을 확인하였다.

(2) 기존 시스템을 보수하지 않고 급기 설정 온도만을 대상으로 최적 제어 시스템을 적용한 결과 기존 제어 방식 대비 하절기의 경우 약 5.73%, 동절기의 경우 약 6.20%의 에너지 절감효과를 나타내었다.

(3) 기존 시스템에서 냉열원 장비를 교체하는 것으로 가정하여 급기 설정 온도와 냉수 설정 온도를 대상으로 최적 제어 시스템을 적용한 결과 기존 제어 방식 대비 하절기의 경우 약 9.06%의 에너지 절감 효과를 나타내어 위에서 서술한 설비의 개선없이 최적 제어 시스템을 적용한 방식에 비하여 약 3.33%의 추가적인 에너지 절감효과

를 나타내었다.

참고 문헌

1. Baek, S. J, Song, J. Y, Ahn, B. C, Joo, Y. D and Kim, J, "An Implementation for Near-Optimal Set Point Control for Central Cooling Systems", Proceedings of the SAREK 2007, Winter Annual Conference, pp.46-51.
2. Song, J. Y, Ahn, B. C, Joo, Y. D and Kim, J, "Real Time Near Optimal Control Application Strategy for Heat Source and HVAC System", Proceedings of the SAREK 2008, Summer Annual Conference, pp.60-65
3. Ahn, B. C, Choi, S. G and Cho, S. H 2005, On - line Optimal Control Technology for Central Heating System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, pp. 140-147.
4. M. A. Cascia, "Implementation of a near-optimal global set point control method in a DDC controller, ASHRAE Transaction, Vol. 106, pp.249-263, 2000.
5. Kaya, A., Enterline, L.L and Sommer, A.C., 1983, Chiller optimization by distributed control to save energy, Proceedings of the instrument Society of America Conference, Houston, TX.