

중앙냉방시스템의 준최적 설정점제어기법 구현에 관한 연구

백 승 재^{*}, 송 재 엽^{*}, 안 병 천, 주 영 덕^{**}, 김 진^{**}

*경원대학교 건축설비공학과 대학원, 경원대학교 건축설비 공학과, ** (주)나라 컨트롤

An Implementation for Near-Optimal Set Point Control for Central Cooling Systems

Seung-Jae Baek^{*†}, Jae-Yeob Song^{*}, Byung-Cheon Ahn, Yong-Duk Joo^{**}, Jin Kim^{**}

ABSTRACT: The near-optimal control algorithm for central cooling 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 cooling load and outdoor temperatures. The optimal set-points of control parameters with near-optimal control are supply air temperature and chilled water temperature. This study has been done by using LapVIEW program with PID control in order to analyze the central cooling system energy saving.

Key words: Energy saving(에너지 절감), Central cooling system(중앙냉방시스템), optimal control algorithm(최적제어 알고리즘), Set-point temperature(설정온도)

1. 서 론

에너지 자원의 해외 의존도가 크고 최근 건물 부문에서 고급연료의 선호경향으로 특히 수입에너지 소비가 폭발적으로 증가하고 있는 우리나라 실정을 감안하여 볼 때, 건물 에너지 절약에 대한 연구 개발 및 적용은 매우 중요하다. 건물에서의 효율적인 에너지 절약은 건물주는 물론 국가 기간산업에도 직·간접적인 영향을 주는 중요한 요소이며, 따라서 이에 대한 연구개발 및 투자가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 건물에서의 에너지 낭비는 빌딩 내 건축설비의 비효율적인 운전 및 관리와 관련되어 있다고 볼 수 있으며, 특히 하절기 전력수요의 20% 가량이 건물의 총 부하 중에서 냉방부하의 몫이라는 결과는 냉

방부하가 피크전력과 전력 예비율에 상당한 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 건물 에너지시스템인 중앙 열원 및 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), 공조기 팬의 정압 등이 있다. 이러한 제어변수들의 최적 설정치들에 대한 조합을 구하는 것은 시스템 구성요소들의 상호 관계를 고려해 볼 때 쉬운 문제는 아니다.

각각의 제어변수들의 크기에 따라 시스템 구성요소들의 전력소비량은 증가하거나 감소하는 등의 복잡한 영향이 나타나기 때문에 전체시스템의 총 에너지 소비량이 최소가 되는 제어변수들의 최적 설정치의 선정을 위해서는 열원 및 공조시스템에 적합한 최적제어 알고리즘의 개발을 요구

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-750-5314; fax: +82-31-750-5314
E-mail address: baeksj81@hanmail.net

하게 된다.

최근에 안⁽¹⁾ 등은 공기조화 시스템의 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도 등의 제어변수들의 최적 설정치들을 구하기 위한 최적제어기법에 관하여 연구를 하였다.

이에 본 연구에서는 실시간 제어 알고리즘으로 구현이 용이한 준최적제어 알고리즘을 이용하여 제어변수들의 최적설정치를 구하였고, LapVIEW 프로그램과 공기조화 실험장치를 활용하여 이에 따른 에너지절감효과에 대한 연구를 수행하였다.

2. 제어 알고리즘

전체 중앙냉방시스템의 에너지소비량에 관련하여 비용함수를 나타내면 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있으며⁽¹⁾, 이 식을 이용하여 제어변수들과 환경변수들에 따른 에너지소비량을 예측할 수 있게 된다.

$$P = P(T_{chw,set}, T_{spa,set}, T_{cond,set}, Load, T_{wb}, SHR) \quad (1)$$

식 (1)의 모든 계수들은 최소자승선형회귀기법을 사용하여 결정되어질 수 있다. 여기서 P는 에너지 소비량, $T_{chw,set}$ 은 냉수설정온도, $T_{spa,set}$ 은 급기설정온도, $T_{cond,set}$ 은 냉각수설정온도, Load는 냉방부하, T_{wb} 는 습구온도, SHR은 현열비를 각각 나타낸다.

따라서, 식(1)을 제어변수들에 관한 1차 도함수 (derivative)를 취하여 정리하면 식 (2)와 같이 환경변수 들에 대한 함수로 제어변수들을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{chw,set,opt} &= G_1(Load, T_{wb}, SHR) \\ T_{spa,set,opt} &= G_2(Load, T_{wb}, SHR, T_{chw,set,opt}) \\ T_{cond,set,opt} &= G_3(Load, T_{wb}, SHR, T_{chw,set,opt}, T_{spa,set,opt}) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 $T_{chw,set,opt}$, $T_{spa,set,opt}$, $T_{cond,set,opt}$ 은 각각 냉수, 급기, 냉각수의 최적설정온도를 나타낸다. 여기서 제어변수들의 최적설정치들은 1차함수식으로 나타내지는데, 냉수온도의 최적설정치는 환경변수들만의 함수로 급기온도의 최적설정치는 환경변수들 뿐만 아니라 냉수온도의 최적설정치의 함수로 표현된다. 그리고 최적의 냉각수온도는 환경변수들과 급기 및 냉수온도들의 설정치

등으로 표현된다. 그러나 본 실험에서는 실험장치의 특성상 냉각수온도의 적용이 불가능함에 따라 냉각수 제어변수의 영향은 고려하지 않았다.

냉방 총 에너지 소모량은 냉동기 압축기의 연료 및 전력량과 순환펌프 전력량, 공조기 급배기 팬의 전력량을 모두 더하면 식(3)과 같이 냉방 시 필요한 총 에너지가 된다.

$$P_{Tot} = P_{Compressor} + P_{Pump} + P_{Fan} \quad (3)$$

식(3)에서 냉동기, 압축기의 에너지 소비량 및 순환펌프의 전력량은 냉난방코일에 공급되는 냉수의 온도차에 관한 수식으로 식(4), 식(5)와 같이 표현이 되며, 냉방부하를 고려한 팬의 전력소모량은 냉난방코일의 입출구 공기 온도차에 관한 수식으로 나타내어지며 식(6)과 같다.

$$P_{Compressor} = K_{Compressor} \cdot \Delta T_w \quad (4)$$

$$P_{Pump} = K_{Pump} \cdot \Delta T_w^3 \quad (5)$$

$$P_{Fan} = K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_a^3} \quad (6)$$

공조시스템의 총에너지 소모량은 다음과 같이 냉방코일의 입출구 공기온도차와 실내에 공급되는 공기와 실내의 온도차(이하 급기온도차라 함)의 함수로 다음 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{Tot}(\Delta T_w, \Delta T_a) &= K_{Compressor} \cdot \Delta T_w \\ &+ K_{Pump} \cdot \Delta T_w^3 + K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_a^3} \end{aligned} \quad (7)$$

배기와 환기되는 공기사이의 열교환 특성관계 식인 식(8)으로 난방코일의 입출구 공기온도차와 급기온도차의 관계를 구하여 총에너지 소모량을 급기온도차로 표현하면 다음 식(9)와 같다. 여기서 K_a 는 공기의 비열, CFM은 유량(ft³/min)이다.

$$K_a \cdot CFM \cdot \Delta T_{air} = c_{chw} \cdot m_{chw} \cdot \Delta T_{chw} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_{Tot}(\Delta T_w) &= K_{Compressor} \cdot \Delta T_w \\ &+ K_{Pump} \cdot \Delta T_w^3 + K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_w^3} \end{aligned} \quad (9)$$

이 식을 미분하고 Newton-Raphson 방법으로 근을 구하면 총에너지소모량이 최소가 되는 최적

의 급기온도차를 얻을 수 있으며 이는 $K_{Compresso}$, K_{pump} , K_{Fan} 등과 같은 특성상수들로부터 결정되어진다. 이 값들은 실시간 제어를 통해 구해진 냉운수 입출구 온도 및 전력량 등의 에너지소모량을 통해 구해지게 되며 이 값들을 통해 구해지는 최적의 냉수 온도차는 최적의 냉수 설정온도를 결정하게 되며 이를 통해 열교환 특성식을 이용하면 최적의 급기설정온도를 구할 수 있으며 이는 식(10)과 같다.

$$T_{w,cpt} = \Delta T_{w,cpt} + T_{w,out} \quad (10)$$

$$T_{a,cpt} = \Delta T_{a,cpt} + T_{a,out}$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 제어장치

실제 중앙 공조시스템을 구성한 후 준최적제어 알고리즘을 적용하여 실험을 통해 구성기기들의 동작특성 및 에너지 변화특성을 관찰하기 위하여 실험장치를 다음과 같이 구성하였다.

Fig. 1은 실험실 내에 위치한 기계실의 상세 사진이다. ①번은 최대풍량 20CMM, 냉방능력 10000Kcal/h의 AHU(공조기)이다. ③번은 표준 풍량 20CMM, 최대정압 15MMAq의 송풍기 이고, 이 송풍기는 급기와 배기 두 대가 설치되어 제어 신호를 인버터를 통해 비례적으로 회전수를 제어하는 방식을 사용하고 있다. ④번은 실내로 공급되는 공기온도 조절을 위하여 냉수코일로 공급되는 냉수량을 조절해주는 3-Way 밸브이다. 3-Way 밸브를 통하여 By-pass된 냉수는 공조기로 들어가지 않고 다시 냉동기로 들어가게 된다.

Fig. 2는 실험실 외부에 설치되어 있는 냉동기의 모습을 나타낸 모습이다. 냉동기는 15000 Kcal/h의 냉방능력을 가지고 있으며 팬 두개와 유량 46LPM, 양정 19M의 1HP펌프를 내장하고 있으며 소비전력은 6.4KW이다.

3.2 제어용 프로그램

LabVIEW는 그래픽한 아이콘을 이용하여 프로그램을 작성하는 프로그래밍 언어로서 다른 Text기반의 언어들, 예를 들어 요즘 많이 사용되고 있는 Visual C++, Visual Basic, Boland C,



Fig. 1 Experimental apparatus of central cooling system.



Fig. 2 Inside appearance of Chiller.

Delphi같은 언더들과 비교하여 가장 큰 차이점은 User Interface뿐만 아니라 Source 코드 또한 그래픽한 환경으로 이루어져 있어 다루기 쉽고 PC를 이용하여 자동제어와 계측시스템을 구축할 때 빠른 프로그래밍이 가능한 최적화된 언어이다.

이에 따라 냉방실험은 National Instrument의 LabVIEW v7.2를 사용하여 제어알고리즘 프로그램을 구성하였으며 PC에 장착되어진 보드를 통하여 Analog Input/Output 및 Digital 신호를 처리하여 프로그램을 통한 제어가 이루어지게 된다. LabVIEW프로그램 상에서는 실시간으로 데이터 값들을 확인해 볼 수 있으며 실내공기온도, 외기 온도, 급기온도, 냉수온도 등의 각 지점들의 데이터와 각 기기들에서 출력되는 전력량 값, 급배기 팬 및 냉동기 압축기 등을 제어하기 위한 신호값들을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 하였으

며 LabVIEW의 화면 모습은 다음 Fig. 3과 같으며, LabVIEW로그그램을 이용한 프로그램의 구성은 Fig. 4와 같다.

3.2 실험방법

본 연구에서는 총 에너지 소비를 최소화 할 수 있는 준최적제어 알고리즘이 적용된 중앙냉난방 시스템의 실제 모형실험 장치를 구성하여 실험을 통하여 준최적제어 알고리즘의 적용가능 여부와 타당성을 살펴보았다. 준최적제어 알고리즘을 이용하여 실외의 환경변화에 따라 급기온도와 냉수 공급온도의 최적 설정값을 실시간으로 계산하며, 냉수코일의 냉수라인에 설치된 3-Way 밸브를 이용하여 급기온도가 최적설정값에 유지될 수 있도록 제어가 이루어진다.

또한, 실내공기온도를 일정하게 유지하기 위하여 급배기 팬을 PID제어를 통하여 인버터로 풍량을 조절하였으며, 3-way 밸브개도를 통하여

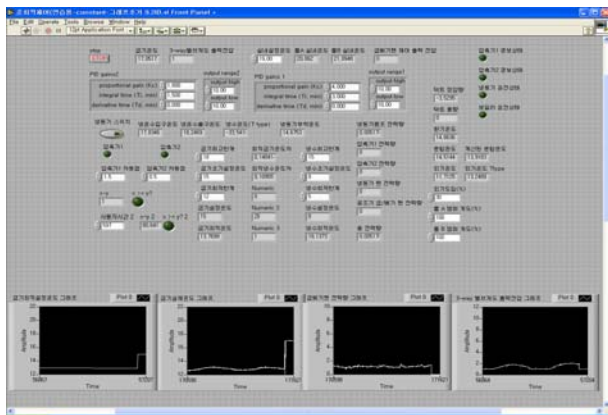


Fig. 3 Monitoring Screen of LapVIEW S/W.

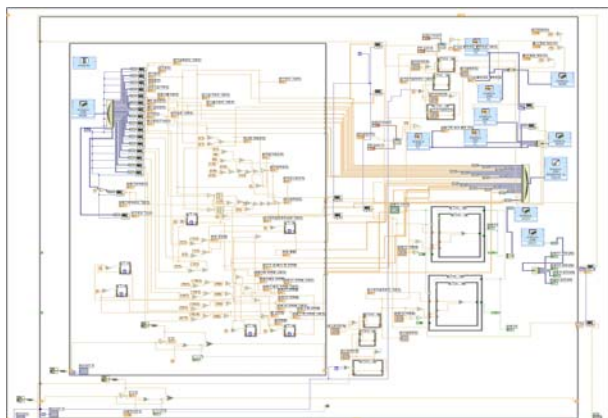


Fig. 4 LapVIEW based near-optimal program.

냉수순환량을 이용해 급기온도를 설정온도에 맞게 유지하도록 PID제어를 하였으며, 냉동기의 경우 냉수설정온도에 따라 차동값을 두어 압축기를 On-Off제어를 하여 일정한 범위의 냉수온도를 유지하도록 하였다.

이러한 시스템을 통하여 외기부하 변화에 따른 급기온도와 냉동기의 공급냉수온도의 설정값들의 변화에 대해 급기온도, 냉수온도 및 실내공기온도의 응답특성 및 에너지 소비량의 변화특성을 비교 고찰 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 예비실험으로 변풍량 방식의 냉방실험을 한 그래프이다. 실내설정온도는 19℃로 설정하였고, 급기설정온도, 냉수설정온도는 준최적제어알고리즘을 적용한 설정결과를 고려하여 각각 14℃, 7℃로 설정하였다. 실내온도, 급기온도, 냉수온도는 설정값에 따라 양호한 추종성을 보였고, 시간의 흐름에 따라 변화를 보이지 않아 그래프는 12시간의 결과를 표현하였다.

Fig. 6은 준최적제어 알고리즘을 사용하여 실내설정온도를 19℃로 설정하고 외기온도의 변화에 따른 최적냉수설정온도 및 최적급기설정온도의 변화에 따라 대상온도의 변화를 48시간 동안 나타낸 그림이다. 그래프를 살펴보면 외기온도의 변화에 따라 최적냉수설정온도 및 최적급기설정온도가 적절히 변화하고 있으며 이것은 제어알고리즘의 구성에서 알 수 있듯이 급기온도 설정값을 계산하고 공기와 냉수의 열교환을 고려한 최적의 냉수온도의 설정값을 계산함으로써 나타

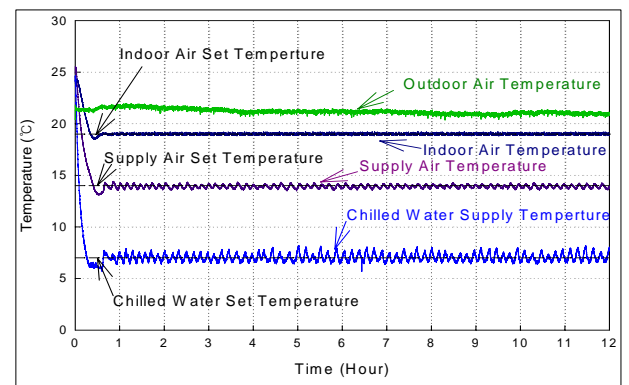


Fig. 5 The responses of VAV control system with time varying outdoor temperature.

나는 현상이다. 대상온도는 설정온도에 큰 차이를 보이지 않으며 양호하게 추종하고 있는 것을 알 수 있다. 단, 냉수온도는 압축기를 제어함에 있어 두 대의 압축기를 차동값을 설정하였기 때문에 냉수설정온도보다 약 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 의 진동이 발생하였다. 냉수온도의 변화폭은 약 $5^{\circ}\text{C} \sim 9^{\circ}\text{C}$ 정도로 나타났고 급기온도는 약 $12.5^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 까지 변화하였다. 또한 외기부하가 증가함에 따라 급기 및 냉수설정온도가 하강하는 모습을 나타내었으며 반대로 외기부하가 증가하면 설정온도가 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 총 전력량 중 가장 많은 비중을 차지하는 급배기팬이 PID제어됨에 따라 총 전력량의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 살펴보면 변풍량 방식보다 준최적제어 시스템의 급배기팬

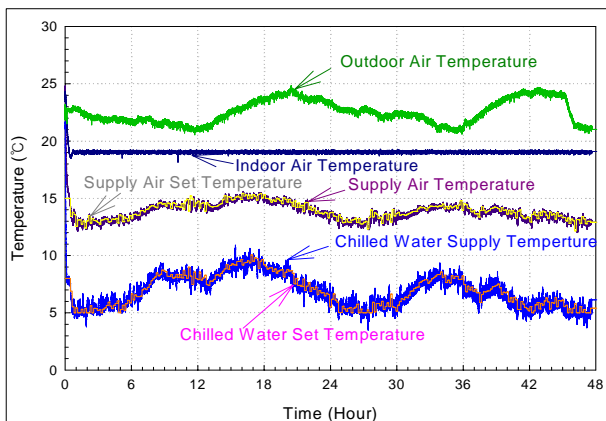


Fig. 6 The responses of near-optimal control system with time varying outdoor temperature.

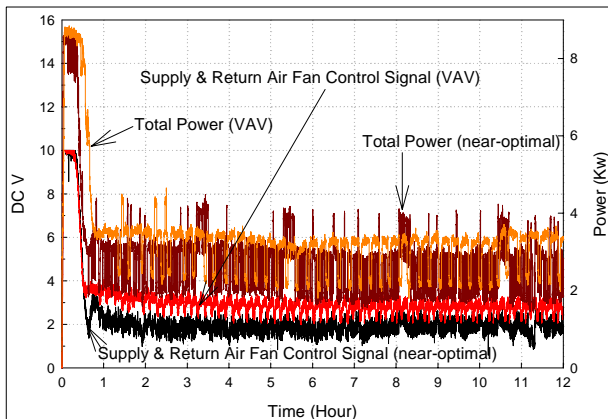


Fig. 7 Total energy variation with system control including fans.

제어 신호가 적게 출력 되고 있고, 그에 따라 총 전력량 또한 적게 소비됨을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 변풍량시스템과 준최적제어 시스템의 총에너지소량의 비교를 한 24시간 동안의 그래프이다.

Fig. 8은 총에너지 소모량을 시간에 따른 누적 데이터로 나타낸 그래프로 초기 3시간 이후에는 10.3%의 총에너지 소모량의 차이가 나지만 24시간 이후에는 14.9%의 총에너지 소모량의 차이를 보이는 것을 알 수 있듯이 시간이 흐를수록 준최적제어 시스템이 더 많은 에너지를 절감시킨다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 구성요소별 에너지 소모량 및 총에너지 소모량을 비교한 그래프이다. 그림에서 살펴보면 급배기 팬 전력량의 경우 최적제어방법이 변풍량 방식보다 약 21.6%정도 에너지 절감 효율을 보였으며, 냉수순환펌프는 냉동기가 가동하였을 경우에 특별한 제어없이 운전하도록 되어 있어 에너지 차이를 거의 보이지 않았다. 압축기의 경우 최적제어가 변풍량 방식보다 약 13.4%정도 에너지 절감을 나타내었고, 냉동기 팬의 경우 다른 구성요소들보다 에너지 소모가 극히 작은 관계로 차이를 찾아보기 힘들었다. 이러한 각 구성요소들의 에너지의 총 에너지 합을 살펴본 결과 준최적알고리즘을 이용한 제어방법이 변풍량 방식보다 약 14.9%의 에너지 절감률을 나타내었으며, 이로써 미루어볼 때 준최적제어 알고리즘을 적용한 방법이 에너지절감 면에서 종래의 방식보다 유리함을 알 수 있었다.

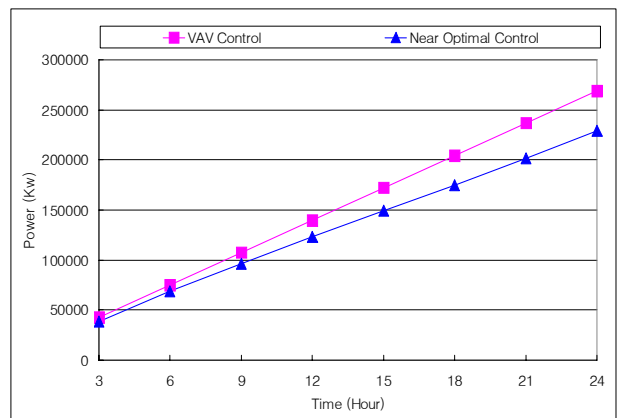


Fig. 8 Accumulated total energy consumptions with VAV and near-optimal control systems.

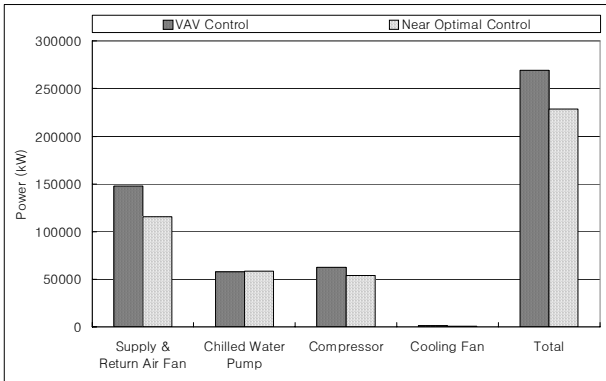


Fig. 9 Total energy consumptions each equipment with VAV and near-optimal control systems.

5. 결론

본 연구에서는 중앙냉방시스템에 관하여 급기, 냉수의 제어변수들에 대한 준최적제어 알고리즘을 구성하였으며, 실시간으로 변화하는 건물부하 및 환경조건의 변화에 대해 LapVIEW 프로그램과 실험장비를 활용하여 변풍량시스템과 준최적제어시스템과 비교 실험을 함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실내냉방부하의 실시간 변화에 따라 퍼지 제어를 통한 급기 및 냉수의 최적 설정 온도 값이 적절히 변화됨을 알 수 있었으며, 부하가 증가함에 따라 급기 및 냉수 최적설정온도가 감소하고 부하가 감소함에 따라 급기 및 냉수최적설정온도는 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 변풍량방식을 이용한 냉방실험과 준최적제어 알고리즘을 적용한 준최적시스템 냉방실험의 에너지소모량을 비교해 본 결과 약 14.9%의 에너지 절감률을 나타내었으며 이로서 미루어 볼 때 준최적제어 알고리즘을 이용한 냉방시스템을 사용할 경우 에너지 절약적 측면에서 유리함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Ahn, B.C. and J.W. Mitchell, 2001, Optimal control Development for Chilled Water Plant Using a Quadratic Representation, Energy and Buildings 33, 371-378.
2. Braun, J.E., S.A. Klein, W.A. Beckman, and J.W. Mitchell, 1989, Methodologies for Optimal Control of Chilled Water Systems without Storage, ASHRAE Transactions, Vol.95, Part 1: 652-662.
2. Draper, N.R. and H. Smith, 1981, Applied Regression Analysis, Second Edition, John Wiley & Sons, New York
4. Ahn, B.C. and J.W. Mitchell, 1999, Optimal Set-point Control for Central Cooling Plants, Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Summer Association Conference, pp 1031-1036.