Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 6 pp. 4260-4266, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.4260
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

# 외기온도 변화특성을 고려한 중앙냉방시스템의 에너지 절감 최적제어에 관한 연구

박기태[1], 안병천[2*]
[1]가천대학교 건축설비공학과 대학원, [2]가천대학교 기계공학과

# Optimal Control Strategies for Energy Saving of Central Cooling System with Outdoor Air Temperature Changes

**Ki-Tae Park[1], Byung-Cheon Ahn[2*]**
[1]**Department of Building Equipment & System Engineering, Graduate School of Gachon University**
[2]**Department of Mechanical Engineering, Gachon University**

**요 약** 본 연구는 외기의 변화에 대해 쾌적성을 유지함과 동시에 열원 및 공조설비의 총 전력소비량을 최소화할 수 있는 최적 제어방법에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 최적제어방법은 외기 건구 및 습구온도 등의 환경변수가 변할 경우 냉각수온도, 급기온도, 냉수온도 등의 제어변수 최적 설정값들이 결정되도록 함으로써 환경 변화에 따라 최대 및 부분부하운전을 적절히 수행하도록 한 것이다. TRNSYS 프로그램을 이용하여 시스템을 모델링하였으며, 본 연구에서 제시한 최적제어방법과 고정 설정값으로 운전한 기존의 방식의 제어성능을 비교 분석하였다. 연구결과로는 본 연구에서 제시한 최적제어방법이 기존 운전방식에 비해 에너지 절감 성능이 양호함을 알 수 있었다.

**Abstract** In this study, the optimal control method for minimizing of energy consumption for central cooling system with proper occupant comfort level is researched by simulation. The optimal control method is that the optimal set temperatures such as the condenser water temperature, supply air temperature, and chilled water temperature with environment variable change such as outdoor air dry-bulb and wet-bulb temperatures are obtained by suggested optimal control algorithm with maximum and part building load. The TRNSYS program is used for system modeling and the control performances with the suggested optimal control method are compared with the existing control method of fixed set points. The suggested optimal control method shows better responses in energy consumption in comparison with existing control ones.

**Key Words :** Central Cooling System, Control variables, Environment variables, Optimal Control, Optimal Set Temperatures

## 1. 서론

에너지 자원의 해외 의존도가 크고 최근 건물부문에서 고급연료의 선호경향으로 특히 수입에너지 소비가 폭발적으로 증가하고 있는 우리나라 실정을 감안하여 볼 때 건물 에너지 절약에 대한 연구 개발 및 적용은 매우 중요하다. 일반적으로 건물의 에너지 절약방법에는 건물의 형상, 방위, 개구율(창, 문), 단열 등을 고려한 건축계획적 접근방법과 설비의 기기 및 시스템 효율 개선, 제어방법 및 신재생에너지 이용 등의 설비적 접근방법이 있다. 특히 설비적 접근방법에서 단기간의 연구 개발로 에너지의 커다란 절감을 실현시킬 수 있는 방법은 시스템의 효율을 극대화할 수 있도록 하는 건물 에너지 운영관리 및 최적화된 제어기술의 도입이라고 할 수 있다[1].

건물의 냉방시스템에는 거주 공간의 열적 환경 및 에너지 소비량에 관계된 다양한 시스템 제어변수들이 존재

*Corresponding Author : Byung-Cheon Ahn(Gachon Univ.)
Tel: +82-31-750-5309 email: bcahn@gachon.ac.kr
Received April 29, 2015 Revised (1st May 20, 2015, 2nd June 2, 2015)
Accepted June 11, 2015 Published June 30, 2015

한다. 이러한 제어 변수의 선정은 매우 중요하며, 에너지 소비량이 최소가 되도록 함과 동시에 건물내 쾌적한 환경의 유지가 전제되는 조건내에서 선정되어야 한다.

이에 관련된 연구로서 Kim[2]은 사무소용 빌딩의 냉방부하의 전력소비특성과 수용률을 분석하였고 이를 바탕으로 사무용 빌딩의 규모별 설계시 부하용량 추정표와 비교분석한 결과 냉방부하에 사용되는 전력량이 전체의 50~66%까지 차지함을 보여주었다.

Hwang[1] 등은 중앙냉방 시스템에 대해 디맨드 응답제어 및 외기보상제어 등을 동시에 적용함으로써 에너지 및 전력사용요금 절감이 가능함을 보여주었다.

또한, Ahn[3] 등은 중앙냉방시스템에 대해 외기온도와 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도 등의 상관관계를 고려하여 최적제어기법를 적용함으로써 에너지 절감이 가능함을 보였다. 그러나 이 논문은 환경조건에 따라 최적운전을 위한 제어변수 값이 존재함을 보여주었으나 종래의 운전방식에 비해 최적제어방법을 적용함에 따른 에너지 절감성능 및 제어특성에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구는 외기의 변화에 대해 쾌적성을 유지함과 동시에 열원 및 공조설비의 총 전력소비량을 최소화할 수 있는 최적 제어방법을 연구하기 위하여 TRNSYS 프로그램을 이용하여 시스템을 모델링하고, 환경변수들과 제어변수들과의 상관관계를 MINITAB 통계처리 프로그램을 이용하여 도출하였으며, 종래의 운전방식에 비해 최적제어방법을 적용함에 따른 에너지 절감성능 및 제어특성에 대한 연구가 이루어졌다.

## 2. 최적제어 알고리즘

본 연구는 중앙냉방시스템의 최적제어 알고리즘 적용을 위하여 전체 에너지 소비량인 비용함수 J를 식 (1)과 같이 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도 등의 제어변수들 u와 외기건구온도, 습구온도 등의 환경변수들 f의 2차함수로 나타내었다.[3]

$$J(f,u) = u^T Au + b^T u + f^T Cf + d^T f + f^T Eu + g \quad (1)$$

여기서 $A$는 Hermitian 행렬로서 대칭행렬이며, $C$와 $E$는 계수행렬, $b$와 $d$는 계수벡타, $g$는 스칼라를 각각 의미한다.

각 제어변수들의 최적치는 식 (1)이 2차함수라는 특성을 고려하여 각 제어변수에 대한 1차 도함수가 0이 될 때($\partial J/\partial u = 0$) 결정되어지며 그 결과는 다음식으로 표현된다.

$$u = -\frac{1}{2}A^{-1}b - \frac{1}{2}A^{-1}Ef \quad (2)$$

식 (1)의 비용함수가 최소가 되기 위한 이 제어법칙은 Hermitian 행렬이 정부호 행렬(positive definite matrix)일 때만 가능하다. 그리고 계수들은 다양한 환경조건과 운전(제어변수)조건에 영향을 받으며 실험 및 경험적으로 결정되어야 하고, 이를 위해 최소자승 선형회기기법이 적용될 수 있다. 이러한 제어법칙은 비용함수 및 시계를 선정한 뒤 시계마다 환경변수의 변화에 따라 비용함수를 최소화하는 제어변수를 찾는 구배법(gradient based method)보다 현장적용에 있어 구현하기가 용이하다는 장점이 있다[4].

본 연구는 위의 최적제어개념을 이용하여 중앙냉방시스템의 제어알고리즘을 도출하였는데, 중앙냉방시스템의 에너지 소비량를 3개의 제어변수(냉수온도, 급기온도, 냉각수온도)와 2개의 환경변수(외기 건구온도, 습구온도)로 나타내어 주었으며, 중앙냉방시스템을 모델링한 TRNSYS프로그램을 활용하여 제어변수들과 환경변수들의 다양한 조건에 대해 시뮬레이션을 수행한 후 결과 데이터를 활용하여 최소자승 선형회귀 기법을 사용하여 MINITAB 통계처리 프로그램을 이용하여 식 (2)의 계수들을 결정하였다. 먼저 식 (3)은 식 (1)과 같은 비용함수를 중앙냉방시스템의 에너지 소비량으로 하여 제어변수와 환경변수의 함수임을 나타낸 것이다.

$$P = P(T_{ch.set}, T_{ao.set}, T_{co.set}, T_{out}, T_{wb}) \quad (3)$$

여기서 $T_{ch.set}$은 냉수온도 설정값, $T_{ao.set}$은 급기온도 설정값, $T_{co.set}$은 냉각수(콘덴서)온도 설정값, $T_{out}$은 외기건구온도 그리고 $T_{wb}$은 외기습구온도를 각각 나타낸다. 일반적으로, 제어변수들은 최소 허용온도 또는 최대 허용유량과 같은 제한을 가질 수 있으며, 거주 공간에서의 온도와 습도한계와 같은 기준이 만족되도록 하여야 한다. 또한 본 연구에서는 제어변수인 냉수온도의 경우 충분한 제습효과를 고려하였으며 또한 증발기에서의 결빙을 피하기 위해 온도조건을 5~13℃로 제약을 주었으며, 급기온도는 실내공간의 과냉 및 과습을 고려하여 10~18℃

로 하였고, 냉각수온도의 경우는 냉동기 압축기의 윤활 문제 및 서징(surging) 등을 고려하여 22℃ 이상이 되도록 제약조건을 설정하여 주었다.

그리고 식 (3)은 3개의 제어변수에 대한 1차 도함수가 0이 되도록 하여 구하면 식 (2)와 같이 각 제어변수들의 최적 설정점들이 결정되며 그 결과식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{ch.set.optimal} &= G_1(T_{out}, T_{wb}) \\ T_{ao.set.optimal} &= G_2(T_{out}, T_{wb}, T_{ch.set.optimal}) \\ T_{co.set.optimal} &= G_3(T_{out}, T_{wb}, T_{co.set.optimal}, T_{ao.set.optimal}) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서의 제어변수들의 최적 설정치들은 환경변수 및 다른 제어변수에 대한 1차함수식으로 도출되며, 이렇게 구해진 제어변수의 최적 설정값들은 현장의 피드백제어기의 목표값으로 되고, 제어를 위한 샘플링 시간마다 환경변수의 변화된 값을 고려하여 새로운 제어변수 설정값들을 구하게 된다. 최적제어를 위한 블록선도를 나타내면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

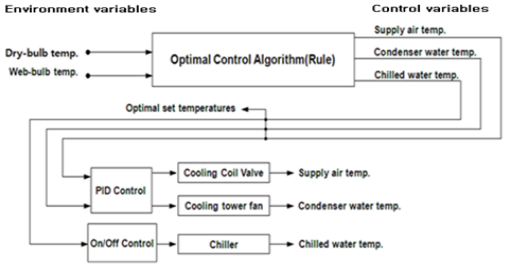


Fig. 1. Block diagram for optimal control.

## 3. 컴퓨터 시뮬레이션

### 3.1 시스템 모델링

본 연구에서는 TRNSYS 프로그램을 사용하여 에너지 성능 예측용 프로그램을 구성하였으며, Fig. 2는 각 구성 요소들의 제어와 전체 시스템의 최적제어 알고리즘 등을 위한 프로그램을 작성 모듈화하여 전체 중앙냉방시스템의 시뮬레이션 프로그램을 구성한 그림이다.[5]

이와 같이 에너지 성능예측 프로그램을 구성하여 중앙냉방시스템에 대하여 열원 및 공조시스템의 에너지 소모량을 살펴 기존시스템의 에너지 소모량과 최적제어 알고리즘을 적용한 시스템의 에너지 소모량 특성을 비교 고찰하였다.

중앙냉방시스템 구성 기기의 사양은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

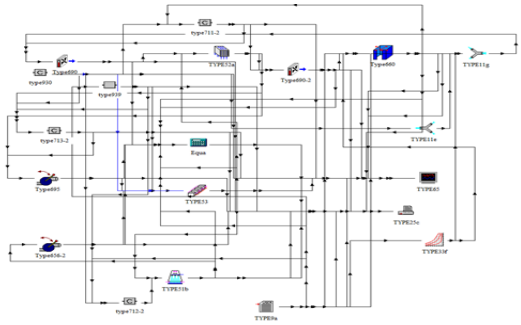

Fig. 2. TRNSYS program for optimal control method.

Table 1. Simulation model parameters for TRNSYS

| Model | Specifications |
|---|---|
| Building load(Type660) | Overall heat-transfer coefficient = 86,450(kJ/h·K)<br>Heat capacity = 24,000(kJ/K)<br>Initial room temp. = 25℃<br>Specific heat for air = 1.0(kJ/kg·K)<br>Volume = 76,680.8($m^3$) |
| Chiller(Type53) | Overall motor efficiency = 0.95<br>Max cooling capacity =<br>= 587,290(kJ/hr)<br>Power = 353(kW) |
| Cooling coil (Type52a) | No. of heat exchangers rows = 4<br>No. of parallel tubes = 52<br>Thermal conductivity of tube = 1443.6(kJ/hr·m·K)<br>Thermal conductivity of fin = 852.9(kJ/hr·m·K) |
| Fan(Type690) | Max flow rate = 72,580(kg/hr)<br>Rated power = 21.3(kW) |
| Chilled water pump(Type695) | Max flow rate = 86,000(kg/hr)<br>Specific heat of fluid = 4.19(kJ/kg·K)<br>Rated power = 16.9(kW) |
| Cooling tower pump(Type656) | Max flow rate = 111,800(kg/hr)<br>Rated power = 21.97(kW) |
| Cooling tower (Type51b) | Total no. of tower cells = 2<br>Max air flowrate for each cell = 105,500($m^3$/hr)<br>Rated power for each fan = 16.8(kW)<br>Initial temp. of sump = 29.4℃ |

### 3.2 시뮬레이션 방법

먼저 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 식 (1)의 비용함수가 최소가 되기 위해서는 Hermitian 행렬인 A행렬이 정부호 행렬(positive definite matrix)인지를 검토할 필요가 있으며, 이를 위해 A행렬의 행렬식(determinant)을 계산한 결과 다음과 같이 만족함을 알 수 있었다.

시뮬레이션에 사용된 환경조건의 데이터는 기상청 자료를 활용하였으며, 서울의 여름철 온도데이터로써 평균건구온도 29.07℃, 평균습구온도 21.12℃로 이른 새벽부터 밤까지 건구온도 26℃ 이상을 유지하는 무더운 날씨인 Case1(2012년 8월 7일)과 평균건구온도 26.13℃, 평균습구온도 22.69℃로 상대적으로 습도가 높은 날인 Case2(2012년 7월 29일)로 선정하였다.

$$|a_{11}| = 1.247 > 0 \quad , \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = 1.286 > 0,$$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 0.476 > 0 \qquad (5)$$

에너지 소모량에 관해서는 최적제어를 하지 않고 실내공기온도, 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도 등의 제어변수들을 고정하여 제어한 기존 제어 방법과 최적제어알고리즘에 의해 환경에 대응하여 제어변수 값들을 변화시켜 운전된 경우를 각각 시뮬레이션하여 열원 및 공조시스템의 총에너지 소모량을 비교 고찰하였다. 또한 시뮬레이션을 위한 각 해석 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Operating conditions for simulation

| Parameters | Temperatures(℃) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Conventional control | | | | Optimal control |
| Tch | 7 | 9 | 7 | 7 | |
| Tao | 15 | 15 | 18 | 15 | |
| Tco | 32 | 32 | 32 | 30 | |
| Indoor set temperature | 25 | | | | |

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 환경변수 변화에 따른 특성

본 연구에서는 도출된 최적제어 알고리즘을 이용하여 환경변수인 외기의 건구온도(Tout)와 습구온도(Twb)의 변화에 따른 제어변수인 냉수온도 설정값(Tch), 냉각수온도 설정값(Tco), 급기온도 설정값(Tao)의 변화특성을 살펴보았다.

Fig. 3은 환경변수인 습구온도를 고정시킨 뒤 건구온도를 변화시켰을 때의 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도의 설정값의 변화를 나타낸 것이다. 건구온도가 올라감에 따라 총 에너지 사용량은 점차 증가하고 급기온도와 냉수온도의 설정점은 감소한다. 그러나 냉각수온도의 설정값은 소폭 상승할 뿐 급기온도와 냉수온도에 비해 큰 영향을 받지는 않았다. 여기서 급기온도와 냉수온도의 경우 건구온도 변화에 따라 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 환경변수인 건구온도를 고정시킨 뒤 습구온도를 변화시켰을 때의 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도의 설정값의 변화를 나타낸 그래프이다. 건구온도와 마찬가지로 습구온도를 변화시켜 주었을 때 에너지 사용량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 건구온도에 변화를 주었을 때와 마찬가지로 냉각수온도의 설정값이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 건구온도의 변화를 주었을 때는 소폭 상승하였지만 습구온도의 변화를 주었을 경우 온도차가 약 7℃가 상승한 것으로 보아 냉각수온도는 습구온도의 변화에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 그러나 냉수온도와 급기온도는 각각 소폭 상승하고, 소폭 감소하였지만 변화량이 크지 않아 습구온도 변화에 영향을 크게 받지 않는 것을 알 수 있다.

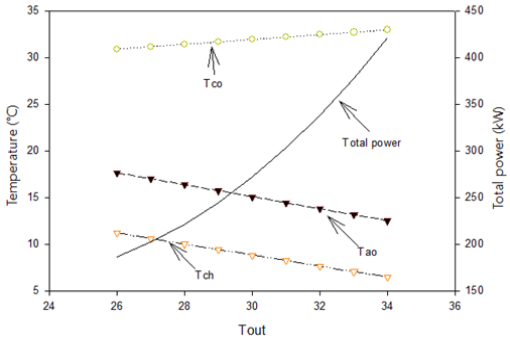


Fig. 3. Control variables and total energy consumptions with dry-bulb temperature(Tout) changes.

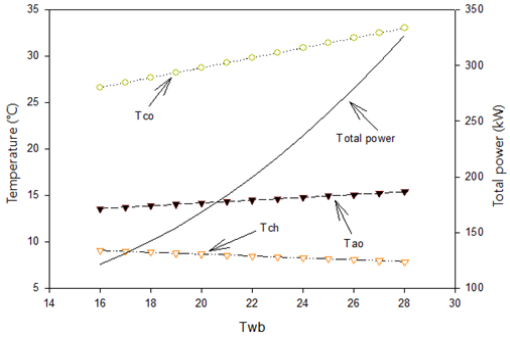


Fig. 4. Control variables and total energy consumptions with wet-bulb Temperature(Twb) changes.

### 4.2 최적제어 알고리즘 비교 분석

최적제어 알고리즘을 적용한 상태에서 실제 외기 데이터에 따른 제어변수의 설정온도의 변화특성을 살펴보고 기존 방식으로 운전하였을 때와의 에너지 사용량을 비교 분석하였다.

Fig. 5는 평균온도 최고인 날(Case1)을 대상으로 시뮬레이션을 수행한 그림으로써 건구온도와 습구온도의 변화에 따라 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도가 변화하는 것을 볼 수 있고 실내 온도 또한 냉방운전 시간인 9시에서 17시까지는 설정온도인 25℃를 추종하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 최적제어 알고리즘 사용한 경우와 기존 제어방식으로 고정 설정점으로 제어한 경우의 하루 총 에너지 사용량을 비교한 그래프이다. 여기서 총 에너지 사용량은 냉동기, 냉수순환펌프, 공조기 급배기팬, 냉각탑 팬 그리고 냉각수펌프들의 에너지 소비량을 합한 것을 의미한다. 그리고 본 연구에서 적용된 공조시스템의 경우 VAV시스템을 적용하였으며, 이에 따라 공조기 급배기팬에 대한 전력량도 포함시켜 주었다. 기존 제어방식의 경우의 고정 설정값은 현장에서 주로 사용하고 있는 설정값으로 하고자 하였다.

그림에서 나타낸 X축의 숫자는 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도의 고정 설정값을 나타낸다. 최적제어 알고리즘을 사용한 경우가 고정 설정값으로 운전하였을 경우보다 최대 약 12.65%, 최소 약 6.67%의 에너지 절감량을 나타내었다.

Fig 7은 습도가 높고 낮 시간에 기온이 많이 올라가는 날(Case2)을 대상으로 시뮬레이션을 수행한 그림으로 Case1과 마찬가지로 외기의 변화에 따라 각 설정점들이 실시간으로 변화하는 것을 알 수 있다. 냉각수온도의 경우 외기 습구온도의 변화의 폭이 작아 큰 변화를 나타내지 않지만 냉수온도와 급기온도의 경우 외기 건구온도가 상승하는 10시경부터 설정온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다.

Case1과 마찬가지로 냉각수온도의 경우 건구온도와도 상관관계가 있지만 습구온도와의 상관관계가 더 크기 때문에 온도변화의 특성이 습구온도의 영향을 많이 받는 것을 볼 수 있고, 급기온도와 냉수온도의 경우 건구온도의 영향을 더 많이 받아 외기의 건구온도가 상승하면 낮아지고, 건구온도가 낮아지면 설정온도가 올라가는 것을 볼 수 있다. Case1 보다 Case2가 외기 건구온도 및 습구온도의 하루 중 변화크기가 작게 나타나서 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도의 설정값들의 변화 폭이 Fig. 5에 비해 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 외기데이터 Case2에서의 총 에너지 사용량을 비교한 그래프이다. 그림을 살펴보면 최적제어 알고리즘을 사용한 경우가 기존 방법인 고정 설정값으로 운전하였을 경우보다 최대 약 16.59%, 최소 약 10.07%의 에너지 절감량을 나타내었다.

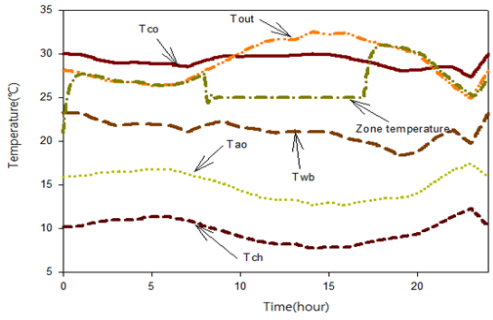


Fig. 5. Control variables and responses with outdoor air temperature changes(Case1).

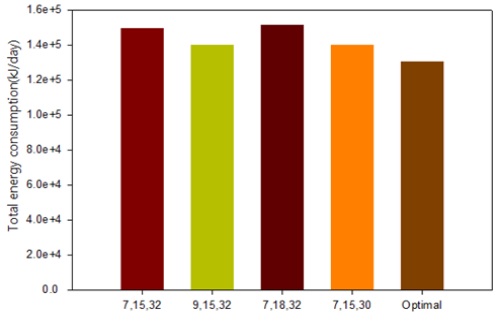


Fig. 6. Total energy consumptions(Case1).

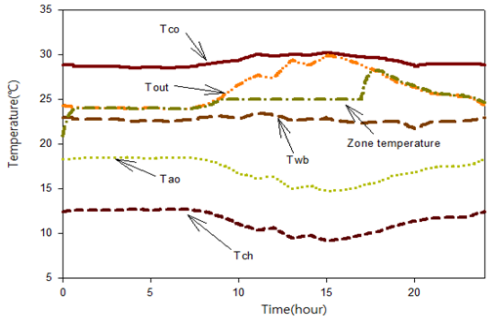


Fig. 7. Control variables and responses with outdoor air temperature changes(Case2).

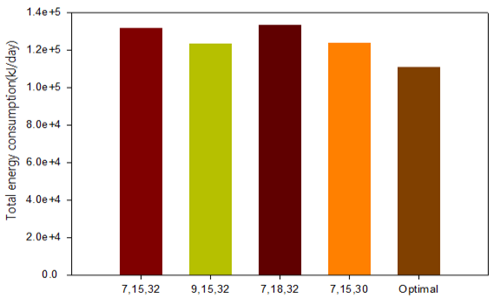


Fig. 8. Total energy consumptions(Case2).

Table 3과 Table 4는 두 외기 조건에 따른 기존방식인 일정한 제어변수의 값을 설정하였을 때와 최적제어를 하였을 때의 에너지 총 사용량과 에너지 절감율을 나타낸 표이다. 표에서 설정온도는 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도의 순서이다.

기존 운전방식으로 선정된 온도들의 설정값들을 일반적으로 현장에서 운전되는 조건들이며, 만약 이러한 운전조건을 벗어나 잘못된 온도조건을 선정할 경우와 비교한 경우 에너지 절감량은 최대 20%이상이 될 것으로 사료된다.

Table 3. Total energy consumptions for different set temperatures of control variables(Case1)

| Set temperature(℃) | | Total energy consumptions (kJ/day) | Energy saving (%) |
|---|---|---|---|
| Conventional control | 7/15/32 | 149,364 | 12.65 |
| | 9/15/32 | 139,936 | 6.76 |
| | 7/18/32 | 151,390 | 13.81 |
| | 7/15/30 | 139,807 | 6.67 |
| Optimal control | | 130,475 | 0 |

Table 4. Total energy consumptions for different set temperatures of control variables(Case2)

| Set temperature(℃) | | Total energy consumptions (kJ/day) | Energy saving (%) |
|---|---|---|---|
| Conventional control | 7/15/32 | 131,819 | 15.79 |
| | 9/15/32 | 123,424 | 10.07 |
| | 7/18/32 | 133,081 | 16.59 |
| | 7/15/30 | 123,643 | 10.23 |
| Optimal control | | 110,998 | 0 |

## 5. 결론

본 연구는 중앙냉방시스템의 최적제어를 위해 외기 건구 및 습구온도 등의 환경변수가 변할 경우 냉각수온도, 급기온도, 냉수온도 등의 제어변수 최적설정값들이 결정되도록 함으로써 환경 변화에 따라 최대 및 부분부하운전을 적절히 수행토록 함으로써 에너지 절감이 가능토록 하였으며, 이에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 평균 외기 건구온도가 가장 높았던 Case1의 경우 최적제어 알고리즘을 사용한 경우가 고정 설정값으로 운전하였을 경우보다 최대 약 12.65%, 최소 약 6.67%의 에너지 절감량을 나타내었다.
2. 상대적으로 평균 외기습구온도가 높았던 Case2의 경우 최적제어 알고리즘을 사용한 경우가 고정 설정값으로 운전하였을 경우보다 최대 약 16.59%, 최소 약 10.07%의 에너지 절감량을 나타내었다.
3. 본 연구를 통해 제시한 최적제어 알고리즘의 시뮬레이션 검증을 위해 실제 외기 건구온도 및 외기 습구온도의 변화 데이터를 적용하였을 경우에 대해 외기건구 및 습구온도의 변화에 따라 냉각수공급온도, 급기온도 및 냉수공급온도의 최적설정온도가 적절하게 변화되는 것을 알 수 있었으며, 제안된 최적제어방법이 기존의 고정값 제어방식에 비해 커다란 에너지절감이 가능함을 알 수 있었다.

## References

[1] J.W.Hwang and B.C.Ahn, “Experimental Study on Optimal Operation Strategies for Energy Saving in Building Central Cooling system”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vo1.14, No.9, pp4610-4615, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4610

[2] S.D.Kim and J.Lee, “Recommended Practice for a Reasonable Design Demand Factor and Analysis of Power Consumption Characteristics by Loads in Office Building”, Journal of the Korean Institute and Electrical Installation Engineers, Vol. 19, No.3, pp. 111-118, 2005.
DOI: http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2005.19.3.111

[3] B.C.Ahn and J.W.Mitchell, “Optimal control development for chilled water plants using a quadratic representation”, Energy and Buildings 33 No. 4, pp.371-378, 2001.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00119-5

[4] J.E.Braun, S.A.Klein, W.A.Beckman, J.W.Mitchell

"Methodologies for optimal control of chilled water systems without storage, ASHRAE Transactions 95 (1), pp. 652-662, 1989.
[5] Minitab Inc., MINITAB User's Guide Release 16, 2013.

**박 기 태**(Ki-Tae Park) **[준회원]**

- 2014년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 건축설비공학과 대학원 석사과정

<관심분야>
건물에너지 관리 및 제어(BEMS), 빌딩자동제어시스템(BAS), 설비시스템 에너지해석

**안 병 천**(Byung-Cheon Ahn) **[정회원]**

- 1986년 8월 : 고려대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1991년 12월 ~ 1995년 2월 : 현대중공업(주) 중앙연구소
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
건물에너지 관리 및 제어(BEMS), 빌딩자동제어시스템(BAS), 열원 및 공조시스템 해석 및 제어