

중앙냉방시스템의 최적제어에 관한 연구

안 병 천[†]

경원대학교 건축설비학과

Optimal Control for Central Cooling Systems

Byung-Cheon Ahn[†]

Department of Building Equipment System Engineering

(Received October 15, 1999; revision received December 20, 1999)

ABSTRACT: Optimal supervisory control strategy for the set points of controlled variables in the central cooling system has been studied by computer simulation. A quadratic linear regression equation for predicting the total cooling system power in terms of the controlled and uncontrolled variables was developed using simulated data collected under different values of controlled and uncontrolled variables. The optimal set temperatures such as supply air temperature, chilled water temperature, and condenser water temperature, are determined such that energy consumption is minimized as uncontrolled variables, load, ambient wet bulb temperature, and sensible heat ratio, are changed. The chilled water loop pump and cooling tower fan speeds are controlled by the PID controller such that the supply air and condenser water set temperatures reach the set points designated by the optimal supervisory controller.

The influences of the controlled variables on the total system and component power consumption was determined. It is possible to minimize total energy consumption by selecting the optimal set temperatures through the trade-off among the component powers. The total system power is minimized at lower supply, higher chilled water, and lower condenser water set temperature conditions.

Key word: Optimal supervisory control(최적감시제어), Control variable(제어변수), Quadratic linear regression equation(2차선형회귀함수), Predicted power(예측된 전력소비량)

기 호 설 명

A : Hermitian 행렬
 B_i : 회귀함수의 계수
 N_{coeff} : 계수의 총 갯수

N_f : 환경변수의 갯수
 N_u : 제어변수의 개수
 $P_{chiller}$: 냉동기의 전력소모량 [kW]
 $P_{fan, ct}$: 냉각탑 팬의 전력소모량 [kW]
 $P_{fan, s}$: 급기 팬의 전력소모량 [kW]
 $P_{pump, ct}$: 냉각탑 펌프의 전력소모량 [kW]
 $P_{pump, mw}$: 냉수펌프의 전력소모량 [kW]
 $P_{tot, pred}$: 예측된 총 전력소모량 [kW]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-342-750-5309; fax: +82-342-750-5314

E-mail address: bcahn@mail.kyungwon.ac.kr

- $P_{tot, sim}$: 계산된 총 전력소모량 [kW]
- $T_{chw, set}$: 냉수온도의 설정치 [°C]
- $T_{cond, set}$: 냉각수온도의 설정치 [°C]
- $T_{spa, set}$: 급기온도의 설정치 [°C]

1. 서론

건물의 냉방시스템에 있어서는 거주공간의 열적환경 및 에너지 소비량에 관계된 다양한 시스템 제어변수들이 존재한다. 이러한 제어변수의 선정은 매우 중요하며, 에너지 소비량이 최소가 되도록 함과 동시에 건물내 쾌적한 환경의 유지가 전제되는 조건내에서 선정되어야 한다. 최근 각 제어변수들의 운전점이 구성요소 및 전체시스템의 에너지 소모량에 많은 영향을 끼침을 고려하여, 건물의 열원 및 공조시스템에 대하여 최적 제어개념을 도입하여 환경변화에 따라 적절한 시스템의 운전조건을 결정하고자 하는 연구가 진행되어 오고 있다.

관련연구로서, 건물의 냉방시스템에서 소비되는 에너지의 절약을 위해 80년대 중반에는 Sud⁽¹⁾, Lau et al⁽²⁾와 Johnson⁽³⁾에 의해 최적제어에 관한 연구가 수행되었는데, 그들은 종래의 제어방식과 비교하여 최적제어방식을 사용함으로써 에너지 절감이 가능함을 보여주었다. 그러나, 그들은 온라인(on-line) 제어에 적합한 일반적인 알고리즘으로는 발전시키지는 못했다. Braun et al⁽⁴⁾은 냉방시스템의 최적제어를 위한 전략을 결정하는 방법론을 제시하였고 시스템에 직접 적용해 줌으로써 10~20%의 에너지절감이 가능하다는 것을 보여주었다. 또한 온라인제어의 적용이 가능한 알고리즘을 제시하고자 하였는데, 냉방시스템의 전력소모량을 제어변수와 환경변수의 2차함수(quadratic function)로 나타내어 환경변수의 변화에 따른 전력소모량이 최소가 되는 적절한 제어변수의 선정이 가능하도록 하였다. 여기서 고려된 제어변수로는 응축기 출구수온(냉각수 온도)과 증발기 출구수온(냉수온도) 사이의 온도차이며, 환경변수는 냉방부하이다.

Pape et al⁽⁵⁾은 Braun et al⁽⁴⁾의 최적제어 개념을 이용하여 냉방시스템의 총 전력소모량에 대한 최적제어의 소비함수(cost function)를 제시하였다. 이들의 연구에서는 급기온도와 냉수온도를

제어변수로 선정하였으며, 환경변수로는 냉방부하, 습구온도 및 현열비등을 고려하였다. 그러나 냉각탑의 냉각수온도와 냉각탑에서의 팬 및 펌프 등의 운전에 관한 최적화는 고려되지 않았다. Ulleberg⁽⁶⁾는 Pape et al⁽⁵⁾의 연구결과를 활용하여 실시간(real time)제어를 위한 알고리즘을 개발하였으며 에뮬레이터(emulator)상에서 적용연구를 수행하였다. 그리고, Boyen et al⁽⁷⁾은 Braun et al⁽⁴⁾ 최적제어 개념을 가스보일러와 팬 등으로 구성된 중앙난방시스템에 적용코자하였다.

일반적으로, 냉방시스템 내의 전력사용량에 영향을 주는 제어변수로는 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도, 냉수유량, 냉각수유량, 냉각탑의 팬풍량, 급기풍량 및 정압 등을 고려할 수 있으며, 이러한 제어변수들은 냉동기, 냉수펌프, 냉각수펌프, 냉각탑 팬, 급기팬 등의 전력소모량에 영향을 미치게 된다. 따라서, 펌프나 팬 등의 동력부하에 대해 전력소모량이 최소가 될 수 있도록 제어변수의 설정점제어가 이루어져야 되나, 현재까지는 공조기부분에서 부분적으로 피드백(feedback)제어를 이용하여 제어변수의 설정점제어를 수행하고자 하는 정도이며, 냉각탑의 냉각수 순환펌프나 팬에 있어서는 회전속도를 개회로(open loop) 제어방식에 의해 일정속도를 유지하는 방식을 채택하고 있다. 전체 시스템의 에너지 소모량을 줄이기 위해서는 제어변수의 크기를 환경의 변화에 따라 적절히 선정해 주어야 하며, 설정치의 유지를 위해서도 시스템의 성능 및 에너지 소모량을 고려하여 적절한 피드백제어 시스템의 구성이 이루어져야 한다.

본 연구의 목적은 냉방부하를 포함한 환경조건들의 변화에 대해 건물내의 쾌적성을 유지함과 동시에 냉방시스템의 총 전력소모량을 최소화할 수 있는 최적제어방법을 연구하는 것이다. 이를 위해 제어변수로서 급기, 냉각수 및 냉수등의 온도를 고려하였으며, 냉방부하와 습구온도 및 현열비를 환경변수로 선정하였다. 본 연구에서는 Braun et al⁽⁴⁾의 최적제어개념을 이용하여 총 전력소모량은 제어변수와 환경변수들의 2차함수로 나타내었으며, 이 함수를 활용하여 환경변수의 변화에 따른 각 제어변수들의 최적 설정치를 구하였다. 또한, 급기와 냉각수 및 냉수의 온도가 최적설정온도에 도달되어 유지되도록 냉수 순환펌프, 냉각탑 팬, 그리고 냉동기의 압축기등을 각

각 피드백 제어하였다. 여기서 고려된 총 전력소모량은 냉동기의 압축기, 냉각탑 팬, 냉각탑 펌프, 냉각수 펌프, 그리고 공조기 팬 등이다.

2. 최적제어 알고리즘

먼저, 최적화를 위해 해석적으로 결정될 수 있는 최적조건이 존재하기 위한 간단한 함수는 2차 함수로서, 불연속 제어변수 M 와 연속 제어변수 u 로 구성된 제어변수와 제어할 수 없는 강제함수(forcing function)인 환경변수 f 들로서 비용함수(cost function) J 를 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$J(f, M, u) = u^T A u + b^T u + f^T C f + d^T f + f^T E u + g \quad (1)$$

여기서, A 는 Hermitian 행렬(matrix)으로서 대칭(symmetric)행렬, C 와 E 는 계수행렬, b 와 d 는 계수벡터, g 는 스칼라를 각각 의미한다. 일반적으로, 제어변수들은 최소 허용온도 또는 최대 허용유량과 같은 제한을 가질 수 있으며, 거주 공간에서의 온도와 습도한계와 같은 기준이 만족되도록 하여야 한다. 이러한 한계들은 불연속제어 변수들로서 최적화 과정에서 고려되어야 한다. 각 제어변수들의 최적치는 식(1)이 2차함수라는 특성을 고려하여 각 제어변수에 대한 1차도함수가 0 이 될 때 $(\partial J / \partial u = 0)$ 결정되며 그 결과는 다음식으로 표현된다.

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

식(1)의 비용함수가 최소가 되기 위한 이 제어법칙은 Hermitian행렬이 positive definite 행렬일 때만 가능하다. 그리고, 이 제어법칙은 연속 제어변수에 대한 것으로, 제한치를 갖지 않는다. 만약 시스템이 불연속적 변수를 갖고 있으면, 이 변수들의 적정조합을 통한 최적제어방법이 필요하게 된다. 다양한 환경조건 및 운전방식에 영향을 받는 식(1)의 계수들은 실험 및 경험적으로 결정되어야 하고, 이를 위해 최소자승 선형회귀기법(least square linear regression technique)⁽⁸⁾이 적용될 수 있다. 식(1)에 있어서 결정되어야 하는

계수들의 숫자는 다음과 같다.

$$N_{coeff} = N_u^2 - \frac{N_u(N_u-1)}{2} + N_u + N_f^2 - \frac{N_f(N_f-1)}{2} + N_f + N_f N_u + 1 \quad (3)$$

여기서, N_u 는 제어변수의 갯수를 의미하며, N_f 는 환경변수의 갯수를 의미한다. 본 연구에서는 3개의 제어변수(급기온도, 냉각수온도, 냉수온도)와 3개의 환경변수(냉방부하, 습기온도, 현열비)를 선정하였으며, 이를 고려하면 28개의 계수가 회귀기법에 의해 결정되어야 한다. 식(1)과 같은 2차함수의 모델은 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

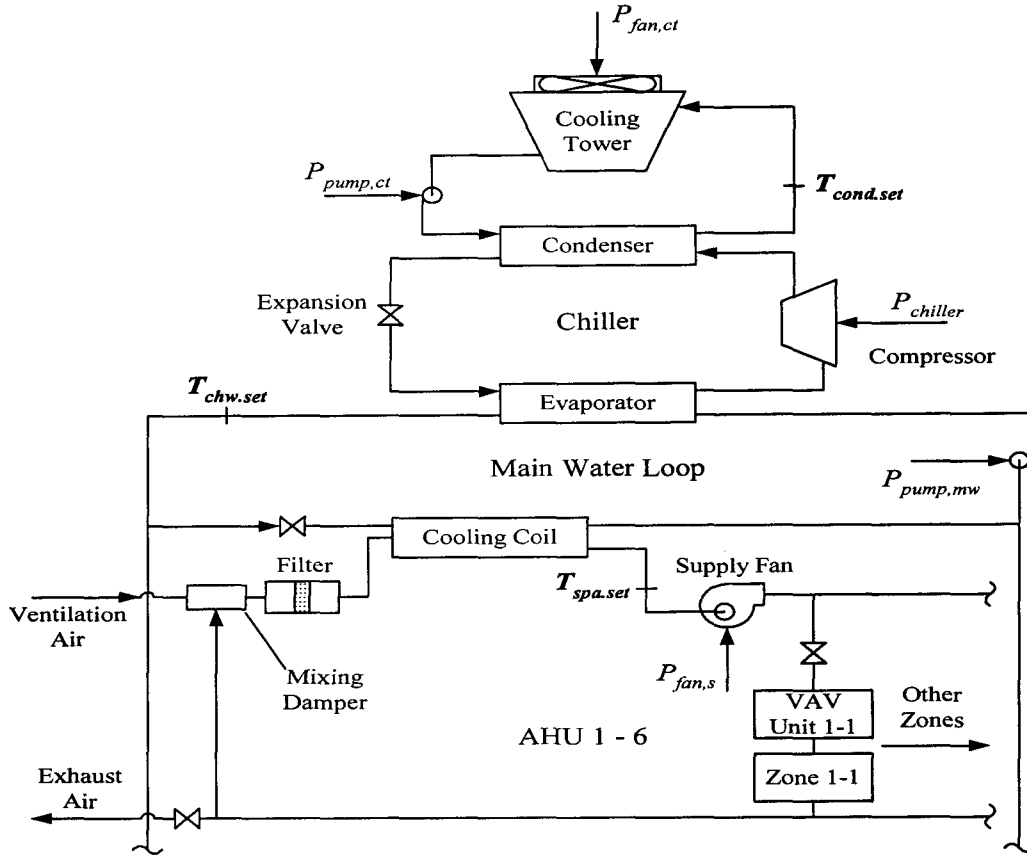
$$y = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_{n+1} x_1^2 + \dots + B_{2n+1} x_1 x_2 + \dots \quad (4)$$

여기서, y 는 응답, x_i 는 제어 및 환경변수, B_i 는 계수, 그리고 n 은 변수의 수(본 연구에서 $n=6$)를 각각 나타낸다. 따라서, 2차 최소자승회귀기법을 통해 계수들을 추정하고, 응답 y 를 예측할 수 있게 된다. 예측값의 정확성을 판단하기 위해 각 계수들의 표준편차(standard deviation)와 응답 y 에 대한 결정계수(coefficient of determination)등이 이용되어 진다. 회귀함수에서 사용되는 데이터를 충분히 확보한 경우 이들 통계학적인 변수들의 적정치를 얻을 수 있다.

3. 중앙냉방시스템에의 응용

Fig. 1은 본 연구에 사용된 중앙냉방시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 중앙냉방시스템은 급기팬 회전수, 냉각탑의 팬 회전수, 냉각수와 냉수의 펌프 회전수, 급기온도, 냉각수온도, 그리고 냉수온도등을 포함한 다양한 변수들에 대한 적절한 제어를 통해 건물 각 존의 실내 온열환경을 조절하게 된다.

본 연구에서는 3 개의 제어변수, 즉 냉각수온도($T_{cond, set}$), 급기온도($T_{spa, set}$), 그리고 냉수온도($T_{chw, set}$) 등을 고려하였으며, 그림에 나타내었다. 환경변화에 따라 에너지소비량을 최소화할 수 있



$$P_{tot} = P_{chiller} + P_{fan,ct} + P_{pump,ct} + P_{pump,mw} + P_{fan,s} \times 6$$

Fig. 1 Schematic of a typical central cooling plants.

는 제어변수들의 설정치를 구하였다. 여기서 고려된 환경변수들로는 냉방부하, 외기의 습구온도, 그리고 현열비 등이며, 건구온도의 경우는 냉방시스템의 총 전력소비량에 거의 영향을 끼치지 못하기 때문에⁽⁴⁾ 본 연구에서는 건구온도의 변화 특성은 고려하지 않았다. 제어변수들이 최적의 운전점에서 유지되도록 하기 위한 피드백제어시스템 구성이 필요하게 되는데, 이를 위해 급기온도가 일정하게 유지되도록 냉각코일내의 냉각수량을 조절하는 냉수 펌프의 회전수를 피드백제어하며, 냉각수온도는 냉각탑 팬의 회전속도를 제어하여 설정치에 유지하도록 한다. 또한 냉동기의 압축기용량을 제어하여 냉수온도가 설정된 운전점에 유지되도록 한다. 냉각코일내의 급

기량은 실내의 설정온도와 급기설정온도, 그리고 현열비를 고려하여 구할 수 있다. 그리고, 냉각탑내 펌프 회전속도는 일정하다고 가정한다.

본 연구를 위한 중앙냉방시스템의 해석용 프로그램의 작성은 TRNSYS Ver. 14.2 프로그램⁽¹⁰⁾패키지를 사용하였으며, 이 프로그램은 냉동기와 냉각탑 및 냉수코일등의 시스템요소들이 모듈화되어 있어 해석이 편리하다. 따라서, 요소들의 제어와 전체시스템의 최적제어 알고리즘 등을 위한 프로그램을 작성 모듈화하여 전체 중앙냉방시스템의 시뮬레이션용 프로그램을 구성하였다. 또한, 본 연구의 시뮬레이션을 위한 대상 시스템은 Pape et al⁽⁵⁾이 사용한 모델을 이용하였다.

해석적 연구를 위하여, 넓은 범위의 제어변수

들과 환경변수들의 변화를 고려하여 각 변수들과 에너지소비량과의 관계를 얻고자 하였다. 전체 시스템의 에너지 소모량은 제어 및 환경변수들의 2차함수로 반드시 표현되지는 않는다. 그러나, 최적운전조건 근처에서는 시스템 에너지가 변수들의 2차함수로 근사화가 가능하다.⁽⁵⁾ 따라서, 보다 정확한 식을 얻기 위해서는 최적조건근처의 충분한 데이터가 필요하게 되며, 그 데이터를 이용하여 제어변수 및 환경변수들의 에너지소모량에 대한 2차함수식을 얻게 된다. 본 연구에서는 각 변수들의 변화에 따른 특성해석 결과를 MINITAB release 11 통계처리프로그램 데이터로 활용하여 2차함수의 계수들을 구하였다.

식(1)과 같은 최적화를 위한 비용함수를 전체 중앙냉방시스템의 에너지소비량에 관련하여 나타내면 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이식을 이용하여 제어변수들과 환경변수들에 따른 에너지 소비량을 예측할 수 있게 된다.⁽¹¹⁾

$$P = P(T_{chw.set}, T_{spa.set}, T_{cond.set}, Load, T_{wb}, SHR) \quad (5)$$

식(5)의 모든 계수들은 최소자승선형회귀기법을 사용하여 결정되어질 수 있다.

환경변수들에 대해 에너지가 최소화 되는 제어변수를 얻기 위해서는 식(5)를 식(1)과 같이 나타내었을 경우 Hermitian행렬 A가 positive definite행렬이어야 한다. 본 연구에서는 이를 평가하기 위해 Sylvester 표준⁽¹²⁾을 사용하였다. 먼저, 각각의 계수, 제어변수, 그리고 환경변수들은 회귀기법을 적용한 후, 행렬 연산과 정리를 통해 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1.124 & -1.145 & 0.013 \\ -1.145 & 2.025 & -0.028 \\ 0.013 & -0.028 & 0.511 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.002 & -0.035 & -0.795 \\ -0.035 & 0.039 & -13.259 \\ -0.795 & -13.259 & 70.58 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0.007 & 0.011 & -0.006 \\ 0.168 & -0.111 & -0.665 \\ 1.246 & 21.695 & -0.732 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$b = [-1.800 \quad -42.264 \quad -9.373]^T$$

$$d = [-0.469 \quad 10.998 \quad -192.670]^T$$

$$g = 317.69$$

$$u = [T_{chw.set} \quad T_{spa.set} \quad T_{cond.set}]^T$$

$$f = [Load \quad T_{wb} \quad SHR]^T$$

여기서, Hermitian행렬 A에 대해 다음과 같은 행렬값을 계산한 결과 각각이 양의 실수값으로 나타났으며, 따라서 Sylvester표준을 만족함을 알 수 있다.

$$|a_{11}| = 1.124 > 0$$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = 1.147 > 0 \quad (7)$$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 0.586 > 0$$

따라서, 식(5)를 제어변수들에 관한 1차 도함수(derivative)를 취하여 정리하면 식(8)과 같이 환경변수들에 대한 함수로 제어변수들을 나타낼 수 있게 된다.

$$T_{chw.set, optimal} = G_1(Load, T_{wb}, SHR)$$

$$T_{spa.set, optimal} = G_2(Load, T_{wb}, SHR, T_{chw.set, optimal}) \quad (8)$$

$$T_{cond.set, optimal} = G_3(Load, T_{wb}, SHR, T_{chw.set, optimal}, T_{spa.set, optimal})$$

여기서, 제어변수들의 최적설정치들은 1차함수 식으로 나타내지는데, 냉수온도의 최적설정치는 환경변수들만의 함수로, 급기온도의 최적설정치는 환경변수들 뿐만 아니라 냉수온도의 최적설정치의 함수로 표현된다. 그리고, 최적의 냉각수온도는 환경변수들과 급기 및 냉수온도들의 설정치 등으로 표현된다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 식(5)의 2차 회귀함수식으로부터 얻어진 예측된(predicted) 에너지 소모량과 TRNSYS를 이용한 시뮬레이션 결과의 에너지 소모량을 비교 도시한 그림이다. 예측된 결과치에 대한 통계적 처리결과로서 표준편차는 S=3.166 (대략 2%이내)이고, 측정계수는 R2=99.4%이었다. 그림에서 볼 수 있듯이 예측치와 시뮬레이션 결과치

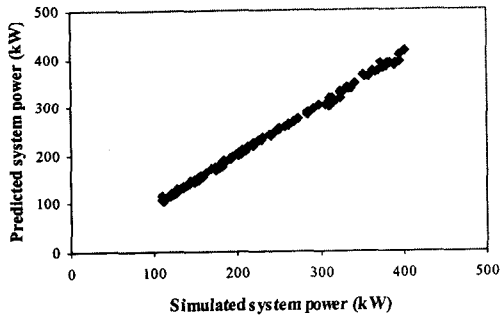


Fig. 2 Predicted versus simulated total system powers.

가 거의 일치되어 나타남을 알 수 있는데, 이것은 식(5)로부터 구한 에너지소모량의 예측치의 정확성을 보여주고 있으며, 이를 이용한 최적제어 알고리즘의 적합성을 보여주고 있다 하겠다.

본 연구에서는 3개의 제어변수들을 부적절한 운전점의 선정으로 인한 시스템의 문제점 발생을 피하기 위해 운전점에 대해 제약조건을 주었다. 냉수온도는 충분한 제습을 제공하고, 증발기 튜브(tube)에서의 동결을 막기 위해 11℃와 3℃ 사이로 제한되며, 급기온도는 공조공간이 과냉각 또는 너무 습하게 되는 것을 피하기 위해 15℃에서 8℃ 사이로 제한되도록 하였다. 또한, 냉각수 온도의 경우는 압축기의 윤활(lubrication)문제와 서지발생(surging)의 우려를 피하기 위해 19℃ 이상이 되도록 제한되었다.

Fig. 3과 Fig. 4, 그리고 Fig. 5 등은 냉방부하의 변화, 습구온도의 변화, 그리고 현열비의 변화 등에 따른 냉각수온도, 급기온도 및 냉수온도들의 최적설정치의 크기의 변화를 각각 나타낸 그림이다. 그리고 각 환경변수의 변화에 따른 총 전력소모량의 예측치를 각각의 그림에 나타내었다. 각각의 그림에서 볼 수 있듯이 각 온도의 최적설정치들은 환경변수들의 변화에 따라 1차함수적으로 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 전력소모량이 식(1)처럼 2차식으로 나타내지고, 이식의 1차 도함수로부터 환경변수들에 대한 각 온도의 최적설정치를 구한 식(8)이 1차 선형함수로 표현되어지기 때문이다.

환경의 변화에 따라 실제적인 상황에서는 냉방부하, 주변습구온도, 그리고 현열비등이 동시에

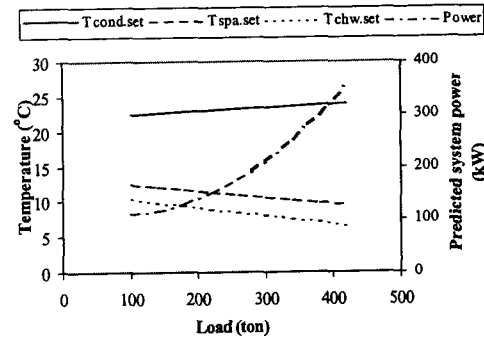


Fig. 3 Optimal setpoint temperatures and predicted system power for different load.

변화되어 나타날 수 있겠으나, 본 연구에서는 각각의 환경변수들이 시스템에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 두 환경변수들의 값을 고정한 상태에서 하나의 환경변수만을 변화시켰을 때의 특성을 고찰하였다.

먼저, Fig. 3은 주변 습구온도(18℃)와 현열비(0.8)를 고정한 상태에서 냉방부하의 변화를 고려한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 부하가 증가함에 따라 최적의 급기($T_{spa,set}$) 및 냉수 설정온도($T_{chw,set}$)는 감소시켜 주어야 하고, 반면에 냉각수 최적설정온도($T_{cond,set}$)는 오히려 증가시켜 주어야 함을 알 수 있다. 또한 냉방부하의 증가에 따라 총 전력소모량은 증가하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 냉방부하(300 ton)와 현열비(0.8)를 고정한 상태에서 주위의 습구온도를 변화시켰을 때의 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 습구온도가 증가함에 따라 최적 급기 및 냉수의 설정온도들은 미소하게 감소하고 있으며, 반면에 냉각수 최적설정온도는 상대적으로 크게 변화시켜 주어야 함을 알 수 있다. 이러한 습구온도는 제어변수로서의 냉각수의 설정온도크기에 커다란 영향을 미치고는 있으나, 급기 및 냉수온도에는 거의 영향을 미치지 않았다. 대체적인 경향은 Fig. 3의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있으며, 총 전력소모량은 습구온도의 증가에 따라 1차함수적으로 증가함을 알 수 있다.

현열비의 변화에 따른 특성은 Fig. 5에 나타내었는데, 여기서 냉방부하와 주변 습구온도는 각

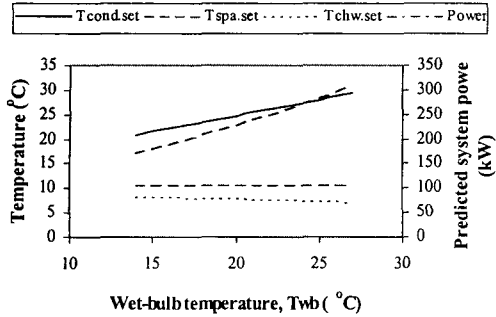


Fig. 4 Optimal setpoint temperatures and predicted system power for different ambient wet bulb temperature.

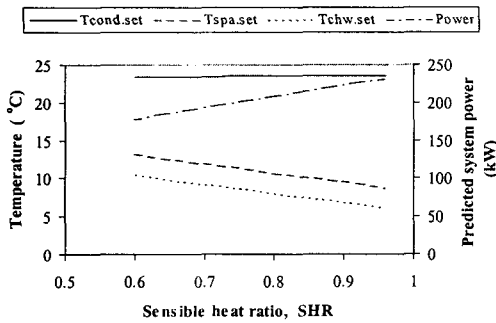


Fig. 5 Optimal setpoint temperatures and predicted system power for different SHR.

각 300ton과 18°C로 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 현열비의 변화는 급기온도 및 냉수온도에 커다란 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, 현열비가 증가함에 따라 급기온도 및 냉수온도의 설정값의 최적치가 크게 감소되어 나타나고 있다. 그러나 이러한 현열비의 변화는 냉각수의 최적설정치에 대해서는 거의 영향을 미치지 않고 있다. 현열비의 증가에 따른 총 전력소모량은 Fig. 4와 같이 선형적으로 증가하여 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7, 그리고 Fig. 8은 급기온도와 냉수온도, 그리고 냉각수온도 등의 설정치를 각각 달리 선정하였을 때 시스템 각 요소들로서 급기팬($P_{fan,s}$), 냉수펌프($P_{pump,mw}$), 냉각탑 팬($P_{fan,ct}$), 냉동기의 압축기($P_{chiller}$) 등의 전력소모량들과 전

체 총 전력소모량의 계산치($P_{tot,sim}$), 그리고 식(5)로부터 얻은 총 전력소모량의 예측치($P_{tot,pred}$)등을 각각 나타낸 그림이다. 총 전력소모량과 냉동기 전력소모량은 좌측 y축에, 그 외의 구성요소들의 전력소모량은 우측 y축에 나타내었다. 냉각탑 펌프($P_{pump,ct}$)는 정속도 운전을 하도록 함에 따라 전력소모량은 항상 일정하다고 가정하여 그림에 나타내지 않았다. 그러나 총 전력소모량은 냉각탑 펌프의 전력 소모량을 포함한 값이다. 환경변수들의 기준조건으로는 냉방부하($Load$)는 300ton, 주위 습구온도(T_{wb})는 18°C, 그리고 현열비(SHR)는 0.8 등으로 하였다. 각각의 그림에서 공통된 결론으로서 총 전력 소모량에 있어서 계산된 값과 예측치는 거의 일치되어 나타나고 있음을 볼 수 있다.

먼저, Fig. 6은 급기설정온도의 변화에 따른 구성요소들과 전체시스템의 전력소모량의 변화특성을 나타낸 것으로써, 냉수 및 냉각수 설정온도는 각각 7°C와 26°C로 고정된 상태에서 급기온도만을 변화시켜 주었다. 급기 설정온도가 증가함에 따라 냉방부하를 처리하기 위해 공기유량이 증가되어야 하기 때문에 급기팬 전력 소모량은 증가하며, 냉수펌프 전력 소모량은 급기 설정온도의 증가에 따라 오히려 빠르게 감소되어 나타남을 볼 수 있다. 그리고, 냉동기 및 냉각탑 팬 전력소모량은 급기 설정온도가 증가함에 따라 미소한 감소를 나타내고 있다. 각 요소들의 전력소모량의 총합인 총 전력소모량은 급기 설정온도가 11°C에서 최소가 되었으며, 급기 설정온도를 15°C로 하였을 경우에 비해 총 전력소모량을 15.7% 정도 절감할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 냉수 설정온도의 변화에 따른 구성요소들과 전체시스템의 전력소모량의 변화특성을 나타낸 것으로써, 급기 및 냉각수 설정온도는 각각 11°C와 26°C로 고정된 상태에서 냉수온도만을 변화시켜 주었다. 냉수의 설정온도를 크게함에 따라 냉수펌프의 전력소모량은 증가하는 반면에 냉동기의 전력소모량은 감소함을 알 수 있다. 또한 급기팬과 냉각탑 팬의 전력소모량에 있어서는 상대적으로 냉수온도 설정크기의 변화에 커다란 영향을 받지 않았다. 전체 총 전력소모량의 크기에 있어서는 냉동기와 냉수펌프의 전력소모량의 변화특성으로 냉수 설정온도가 7°C인 경우에 최소가 되었으며, 냉수온도를 3°C로 운전한 경우에

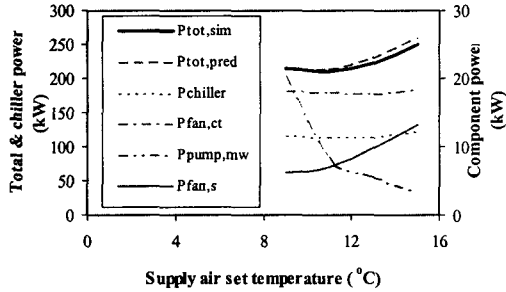


Fig. 6 Predicted, simulated total system, and component powers for different supply air set temperature.

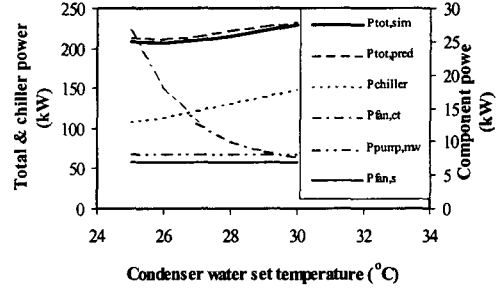


Fig. 8 Predicted, simulated total system, and component powers for different condenser water set temperature.

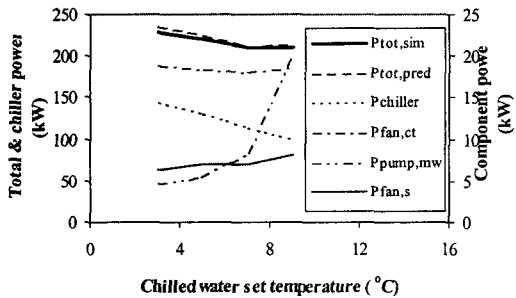


Fig. 7 Predicted, simulated total system, and component powers for different chilled water set temperature.

비해 7°C로 운전한 경우는 전력소모량을 약 10% 정도 절감할 수 있음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 냉각수 설정온도의 변화에 따른 구성요소들과 전체시스템의 전력소모량의 변화특성을 나타낸 것이다. 여기서, 급기 및 냉수 설정온도는 각각 11°C와 7°C로 고정된 상태에서 냉각수 온도를 변화시켜 주었다. 냉각수의 설정온도를 증가 시켜줌에 따라 냉각탑 팬의 전력소모량은 커다란 감소를 나타내고 있으나, 냉동기의 전력소모량은 오히려 증가함을 볼 수 있다. 이 결과로 냉각수의 온도가 26°C인 경우 총 전력소모량이 최소가 되었으며, 30°C로 설정한 경우에 비해 전력소모량을 약 9% 정도 절감할 수 있음을 알 수 있다. 그리고, 냉수펌프 및 급기팬의 전력소모량에 있어서는 냉각수의 설정온도 변화에 따른 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

5. 결론

냉방부하와 습구온도 및 현열비 등의 환경변수들의 변화에 따라 중앙냉방시스템의 에너지소비량이 최소가 되도록 급기, 냉각수, 그리고 냉수 온도 등의 제어변수들의 최적설정치들을 구하기 위한 최적제어기법에 관하여 연구를 수행하였다. 이를 위해 2차 최소자승회귀기법을 적용하여 전체시스템의 전력소모량을 환경변수 및 제어변수들로 나타내었으며, 이 식을 통해 전체 전력소모량을 예측할 수 있었고, 또한 각 제어변수들의 최적설정치를 환경변수들에 대한 선형함수식으로 나타내어 환경변수의 변화에 따른 각 제어변수들의 최적 설정치를 구할 수 있었다.

또한, 환경변수들과 제어변수들의 변화특성을 연구하였는데, 연구결과로서, 급기 및 냉수의 최적설정온도에 대하여 냉방부하 및 현열비는 상대적으로 큰 영향을 나타냈으며, 습구온도는 미소한 영향을 나타냄을 알 수 있었다. 냉각수의 최적설정온도에 대해서는 습구온도가 커다란 영향을 주었으며, 냉방부하의 영향은 미소하고 현열비는 거의 영향을 주지 않았다. 또한, 주어진 환경조건에 대해 전체 에너지 소비량이 최소가 되는 제어 변수들의 최적 설정치의 조합을 구할 수 있었으며, 이러한 최적 설정치에서의 운전은 전체 에너지의 커다란 절감을 이룰 수 있음을 알 수 있었다.

그리고, 본 연구에서 제시한 최적제어기법의 경우 환경변수들의 변화에 따른 제어변수들의 최적설정치들을 용이하게 구할 수 있는 방법임을 알 수 있었으며, 실시간 최적제어알고리즘으로의

확장이 가능하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 경원대학교 교내 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Sud, I., 1984, Control Strategies for minimum energy usage, ASHRAE Transactions, Vol. 90, Part 2, pp. 247-277.
2. Lau, A.S., Beckman, W.A., and Mitchell, J.W., 1985, Development of computer control routines for a large chilled water plant, ASHRAE Transactions, Vol. 91, Part 1, pp. 766-780.
3. Johnson, G.A., 1985, Optimization techniques for centrifugal chiller plant using a programmable controller, ASHRAE Transactions, Vol. 91, Part 2, pp. 835-847.
4. Braun, J.E., Klein, S.A., Beckman, W.A., and Mitchell, J.W., 1989, Methodologies for optimal control of chilled water systems without storage, ASHRAE Transactions, Vol. 95, Part 1, pp. 652-662.
5. Pape, F.L.F., Mitchell, J.W. and Beckman, W.A., 1991, Optimal control and fault detection in heating, ventilating, and air-conditioning systems, ASHRAE Transactions, Vol. 97, Part 1, pp. 729-745.
6. Ulleberg, O., 1993, Emulation and control of heating, ventilation, and air-conditioning systems, Master thesis, University of Wisconsin-Madison.
7. Boyen, A. and Mitchell, J.W., 1994, Experimental validation of a methodology for determining heating system control strategies, ASHRAE Transactions, Vol. 98, pp. 24-30.
8. Draper, N.R. and Smith, H., 1981, Applied regression analysis, Second Edition, John Wiley & Sons, New York
9. Ahn, B.C. and Chang, H.W., 1996, The energy analysis and control characteristics of a hot of a hot water heating system for apartment houses, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 76-87.
10. Klein, S.A., et al., TRNSYS : A transient system simulation program version 14.2, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
11. Ahn, B.C. and Mitchell, J.W., 1999, Optimal set-point control for central cooling plants, Proceedings of the SAREK'99 Summer Annual Conference, pp. 1031-1036.
12. Ogata, K. 1967, State space analysis of control systems, Prentice Hall E-Series.