

최속 강하법을 이용한 흡수식 냉동공조시스템 제어

한도영[†], 김진^{*}

국민대학교 기계·자동차공학부, *국민대학교 기계공학과 대학원

Control of the Absorption Air Conditioning System by Using Steepest Descent Method

Doyoung Han[†], Jin Kim^{*}

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received December 20, 2002; revision received April 25, 2003)

ABSTRACT: Control algorithms for the absorption air conditioning system may be developed by using dynamic models of the system. The simplified effective dynamic models, which can predict the dynamic behaviors of the system, may help to develop effective control algorithms for the system. In this study, control algorithms for an absorption air conditioning system were developed by using a dynamic simulation program. A cooling water inlet temperature control algorithm, a chilled water outlet temperature control algorithm, and a supply air temperature control algorithm, were developed and analyzed. The steepest descent method was used as an optimal algorithm. The simulation results showed energy savings and the effective controls of an absorption air conditioning system.

Key words: Absorption air conditioning system(흡수식 공조시스템), Energy conservation(에너지 절약), Dynamic models(동적 모델), Steepest descent method(최속 강하법), Optimal control algorithms(최적 제어 알고리즘)

기호설명

C : 제어기 신호 [-]
 J : 비용함수 [-]
 Q_{cd} : 시간대별 냉방부하 [kW]
 Q_{ep} : 부분부하 냉동용량 [kW]
 T : 온도 [°C]

하첨자

a : 공기

chw : 냉동기 냉수
 ct : 냉각탑
 $ctrl$: 제어기
 cw : 냉각탑 냉각수
 fan : 팬
 i : 입구
 o : 출구
 r : 환기
 wb : 습구온도

1. 서론

흡수식 냉동기를 이용한 공조시스템은 높은 전력부하를 요구하는 압축식 냉동기에 비하여 하절

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4675; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: dyhan@kookmin.ac.kr

기 주간의 전력수요를 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있어 정부의 에너지 정책에 의하여 사용이 확대되고 있다.⁽¹⁾ 이와 관련하여 흡수식 냉동 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 시스템 성능향상과 에너지 절약을 위해 시뮬레이션 기술을 이용한 제어 알고리즘의 연구에 대한 관심이 증가하고 있다.

흡수식 냉동기와 관련된 시뮬레이션 기술에 관한 연구는 시스템의 정적 모델을 바탕으로 한 시뮬레이션에서 시스템의 동적 반응을 나타낼 수 있는 동적 모델을 기반으로 한 시뮬레이션으로 발전되고 있다. 정적 모델을 사용한 연구로 Goodheart et al.⁽²⁾은 단효용(single effect) 방식과 반효용(half effect) 방식의 흡수식 냉동기의 성능해석을 위해 흡수식 냉동기의 물리적인 현상을 활용한 수학적인 모델을 사용하였으며, 동적인 시뮬레이션 기술개발을 위하여 최근 Han and Lee⁽³⁾는 흡수식 냉동기를 대상으로 시스템의 동적 현상을 고려한 동적 시뮬레이션 프로그램에 대한 연구를 수행한 바 있다.

냉동시스템의 제어기술 개발을 위하여 기존에는 고정된 설정값을 기준으로 이를 만족시키기 위한 제어기법을 대상으로 한 연구가 수행되어 왔으나, 최근 시스템의 물리적인 특성과 운전효율을 고려한 최적화 기술을 적용한 제어 알고리즘의 개발에 관심이 집중되고 있다. Braun et al.⁽⁴⁾은 냉동시스템의 실측 데이터를 기초로 한 동적

시뮬레이션 프로그램을 이용하여 구성요소에 기반을 둔 알고리즘을 개발하고 시스템 제어시험을 수행한 후 기존의 고정온도 설정값 제어와 비교하였으며, Cadicia⁽⁵⁾는 시뮬레이션을 통해 개발된 준최적 설정값을 실제 건물 빌딩 자동제어 시스템의 DDC(Direct Digital Controller)에 적용하여 그 우수성을 확인하였다. 또한 Han and Lee⁽⁶⁾는 전축열 방식의 병축열시스템을 대상으로 전체 시스템의 동적 특성을 고려한 최적 제어 알고리즘의 개발 가능성을 제시한 바 있다. 하지만 이러한 연구들의 대부분은 제어 알고리즘의 개발을 위하여 정적 모델만을 사용하거나 동적 모델을 사용한다 하더라도 알고리즘 개발의 대상인 냉동기와 열교환기 등의 일부 구성요소들에만 제한적으로 사용하여 시스템 전체의 동적 현상을 고려한 최적 제어 알고리즘의 개발에는 한계를 보여주었다.

따라서 본 연구에서는 흡수식 공조시스템의 동적 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 시스템의 주요 구성요소인 냉각탑, 냉동기, 공조기의 최적 알고리즘을 개발한 후 개발된 제어 알고리즘의 유효성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 흡수식 공조시스템

제어 알고리즘의 개발대상으로 선택된 흡수식 공조시스템은 Fig.1과 같이 흡수식 냉동기, 냉각탑, 변풍량 공조기, 보일러 등으로 구성되어 있

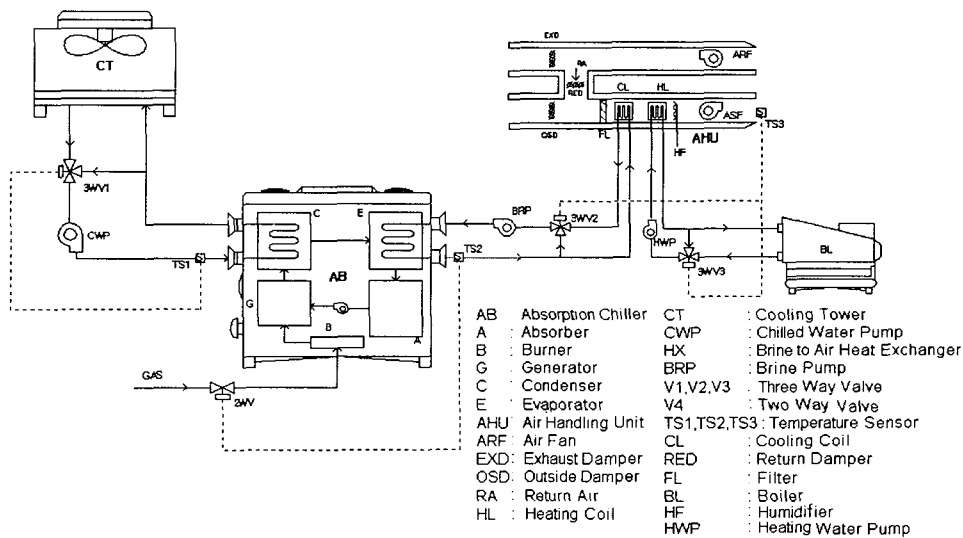


Fig. 1 Absorption air conditioning system.

다. 각 구성요소의 동적 현상을 고려하여 직화식 흡수식 냉동기의 동적 모델, 대항류 방식 냉각탑의 동적 모델, 냉수 코일, 온수 코일, 덕트, 댐퍼, 팬 등으로 구성된 변풍량 공조기의 동적 모델, 그리고 공조시스템의 부속요소로서 삼방 밸브, 관, 펌프, 온도센서, 비례적분 제어기 등의 동적 모델을 개발하였으며 개발된 모델들을 이용하여 각 모델들의 동적 상호작용을 시뮬레이션할 수 있는 모듈화된 형태의 동적 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다.^(3,7)

3. 제어 알고리즘

흡수식 공조시스템의 제어 알고리즘은 냉동기 냉각수 입구온도 제어 알고리즘, 냉동기 냉수 출구온도 제어 알고리즘, 공조기 급기온도 제어 알고리즘으로 구성되어 있다.

각 제어 알고리즘의 설정 알고리즘을 개발하기 위하여 비용함수 $J_k(X_k)$, 구속함수 $G_{k,j}(X_k)$ 와 경계조건을 선정할 수 있으며 테일러 급수를 사용하여 선형화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_k(X_k) \cong J_k(X_k^0) + \nabla J_k(X_k^0) \delta X_k$$

$$G_{k,j}(X_k) \cong G_{k,j}(X_k^0) + \nabla G_{k,j}(X_k^0) \delta X_k \leq 0 \quad (1)$$

$j = 1, m$

$$X_{k,min} \leq X_k^0 + \delta X_k \leq X_{k,max} \quad (2)$$

여기서 X_k 는 설계변수로서 냉동기 냉각수 입구온도 설정 알고리즘에서는 시간대별 냉각수 입구온도 $T_{cwi,k}$, 냉동기 냉수 출구온도 설정 알고리즘에서는 시간대별 냉수 출구온도 $T_{chwo,k}$, 공조기 급기온도 설정 알고리즘에서는 공조기 환기온도 $T_{ar,k}$ 를 선택하였으며, X_k^0 는 설계변수의 수렴을 위한 초기선정값, $X_{k,min}$ 과 $X_{k,max}$ 는 최적 설계변수의 하한값과 상한값, δX_k 는 $X_k - X_k^0$ 를 나타낸다.

선형화된 비용함수를 최소화시키는 X_k 를 구하기 위하여 Fig. 2와 같은 알고리즘을 사용하였다. 먼저 $\|\nabla J_k(X_k^n)\|$ 를 계산한 후 주어진 ϵ_G 보다 작으면 X_k^n 를 X_k 로 선택하고, ϵ_G 보다 크면 탐색방

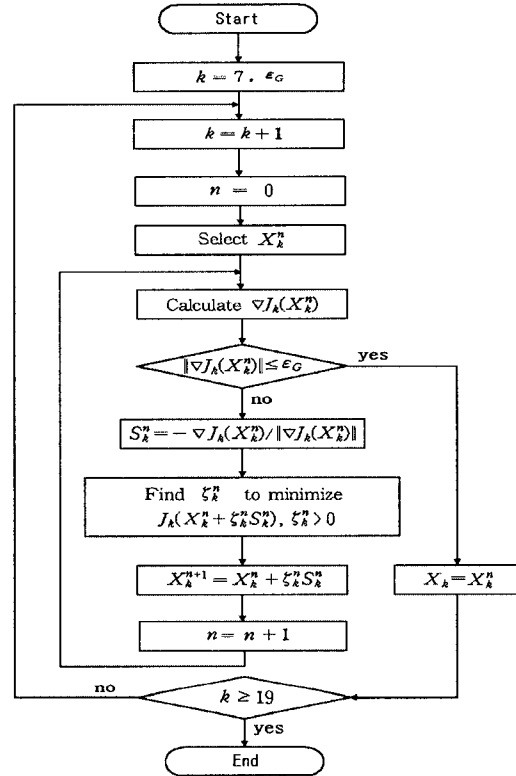


Fig. 2 Control algorithm.

향 S_k^n 을 최속 강하법(steepest descent method)에 의해 다음 식을 사용하여 결정하며

$$S_k^n = -\nabla J_k(X_k^n) / \|\nabla J_k(X_k^n)\| \quad (3)$$

주어진 X_k^n 과 S_k^n 에 대하여 $J_k(X_k^n + \zeta_k^n S_k^n)$ 을 최소로 하는 이동거리 ζ_k^n 을 다항식에 의한 근사법(polynomial approximation)에 의해 결정한 후 X_k^{n+1} 을 다음 식에 의하여 새로 결정한 후 계산을 반복한다.^(8,9)

$$X_k^{n+1} = X_k^n + \zeta_k^n S_k^n \quad (4)$$

3.1 냉동기 냉각수 입구온도 제어 알고리즘

냉동기 냉각수 입구온도 제어 알고리즘은 냉각탑, 삼방밸브, 펌프, 제어기, 센서 등으로 이루어진 시스템을 제어하기 위한 알고리즘으로서 냉각

수 입구온도를 부하에 적응할 수 있도록 적절히 설정하는 냉각수 입구온도 설정 알고리즘과 설정된 온도로 제어하기 위한 냉각탑 삼방밸브 제어 알고리즘으로 구성되어 있으며, 냉각수 입구온도를 설정하기 위하여 최속 강하법을 이용하였다.

냉각탑 시스템의 비용함수를 다음과 같이 선택하였고

$$J_{cfan,k} = (\alpha_1 + \alpha_2 T_{wb,k} + \alpha_4 T_{wb,k}^2) + (\alpha_3 + \alpha_6 T_{wb,k}) T_{cwi,k} + \alpha_5 T_{cwi,k}^2 \quad (5)$$

구속조건은 선택된 냉각탑의 설계조건에 따라 냉각탑의 최대 용량과 냉각탑의 운전조건 범위를 고려하여 아래와 같이 선택하였으며

$$J_{cfan,k} \leq 22, \quad 25 \leq T_{cwi,k} \leq 40 \quad (6)$$

여기서 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 은 성능곡선에 의해 주어지는 상수, $T_{wb,k}$ 는 시간대별 외기 습구온도, $T_{cwi,k}$ 은 최속 강하법에 의해 결정되는 설계변수로서 주어진 구속조건에 대하여 Fig. 2의 과정에 의해 최적값을 계산한다.

냉각탑 삼방밸브 제어 알고리즘은 설정 알고리즘에 의해 설정된 온도로 삼방밸브를 제어하기 위하여 비례적분 제어 알고리즘을 사용하였으며, 제어기 출력신호 C_{ctrl} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$C_{ctrl} = K_P \left(Er + \frac{1}{T_I} \int Er dt \right) \quad (7)$$

여기서 Er 은 설정신호와 센서를 통한 출력신호의 오차, T_I 는 K_P/K_I 로 적분시간, K_P 는 비례게인, K_I 는 적분게인을 나타낸다.

3.2 냉동기 냉수 출구온도 제어 알고리즘

냉동기 냉수 출구온도 제어 시스템은 냉동기, 삼방밸브, 펌프, 제어기, 센서 등으로 이루어진 시스템을 제어하기 위한 알고리즘으로서 냉동기의 효율을 고려하여 냉동기의 냉수온도를 설정하여 주는 냉수 출구온도 설정 알고리즘과 설정된

온도로 제어하기 위한 냉동기 용량 제어 알고리즘으로 구성되어 있으며, 냉동기 냉수 출구온도를 설정하기 위하여 최속 강하법을 이용하였다.

냉동기 소비열량을 식(8)과 같이 비용함수로 선택하였고

$$J_{ch,k} = (b_1 + b_2 T_{cwi,k} + b_4 T_{cwi,k}^2) + (b_3 + b_6 T_{cwi,k}) T_{chwo,k} + b_5 T_{chwo,k}^2 \quad (8)$$

구속조건은 선택된 냉동기의 설계조건에 따라 냉동기의 최대 용량과 냉동기의 운전조건 범위를 고려하여 아래와 같이 선택하였고

$$Q_{cld,k} - Q_{ep,k} \leq 0, \quad 0 \leq T_{chwo,k} \leq 12 \quad (9)$$

여기서 $b_1 \sim b_6$ 은 성능곡선에 의해 주어지는 상수, $Q_{cld,k}$ 는 외기온도 및 거주인원 변화에 따른 냉방부하 예측 알고리즘⁽¹¹⁾에 의해 결정되는 시간대별 냉방부하, $T_{chwo,k}$ 는 최속 강하법에 의해 결정되는 설계변수로서 주어진 구속조건에 대하여 Fig. 2의 과정에 의해 최적값을 계산한다.

냉동기 용량 제어 알고리즘은 설정 알고리즘에 의해 설정된 온도로 흡수식 냉동기의 연료공급밸브를 제어하기 위하여 비례적분 제어 알고리즘을 사용하였다.

3.3 공조기 급기온도 제어 알고리즘

공조기 급기온도 제어 시스템은 공조기, 삼방밸브, 펌프, 제어기 등으로 이루어진 시스템을 제어하기 위한 알고리즘으로서 실내온도 조건을 고려하여 공조기의 급기온도를 최적으로 설정하는 공조기 급기온도 설정 알고리즘과 설정된 온도로 제어하기 위한 냉수 코일 삼방밸브 제어 알고리즘으로 구성되어 있으며, 공조기 급기온도를 설정하기 위하여 최속 강하법을 이용하였다.

공조기 급기온도 설정 알고리즘을 위해 공조기 시스템의 팬의 동력소모를 비용함수로 선택하였으며

$$J_{afan,k} = (c_1 + c_2 T_{chwo,k} + c_4 T_{chwo,k}^2) + (c_3 + c_6 T_{chwo,k}) T_{ar,k} + c_5 T_{ar,k}^2 \quad (10)$$

구속조건은 실내온도 조건을 고려하여 다음과 같이 선정하였으며

$$25 \leq T_{ar,k} \leq 29 \quad (11)$$

여기서 $c_1 \sim c_6$ 은 성능곡선에 의해 주어지는 상수, $T_{ar,k}$ 는 최속 강하법에 의해 결정되는 설계변수로서 주어진 구속조건에 대하여 Fig.2의 과정에 의해 최적값을 계산한다.

냉수 코일 삼방밸브 제어 알고리즘은 설정 알고리즘에 의해 설정된 온도로 공조기의 냉수 코일 삼방밸브를 제어하기 위하여 비례적분 제어 알고리즘을 사용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

개발된 제어 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해서 흡수식 공조시스템의 동적 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다. 시뮬레이션 프로그램은 냉동기 냉각수 입구온도 제어 시스템, 냉동기 냉수 출구온도 제어 시스템, 공조기 급기온도 제어 시스템으로 구성되어 있으며, 시뮬레이션 대상으로는 450 RT급의 2중 효율 흡수식 냉동기, 700 RT의 냉각능력을 가진 대향류형 냉각탑, 600 CMM급의 변풍량 공조기를 선정하였고 Table 1과 같

Table 1 Data used for simulation

Unit	Variable	Value	Variable	Value
Cooling tower	a_1	1.493×10^3	a_5	5.093×10^{-1}
	a_2	4.021×10^2	a_6	-2.139×10^{-1}
	a_3	-6.161×10^1	K_P	1.500×10^0
	a_4	-1.886×10^1	K_I	5.000×10^{-2}
Absortion chiller	b_1	-3.373×10^2	b_5	-1.670×10^{-3}
	b_2	5.329×10^2	b_6	1.803×10^{-3}
	b_3	-5.229×10^0	K_P	1.620×10^0
	b_4	-2.961×10^1	K_I	2.000×10^{-2}
Air handling unit	c_1	1.619×10^{-1}	c_5	-1.000×10^{-4}
	c_2	-4.896×10^{-3}	c_6	-1.250×10^{-2}
	c_3	1.395×10^0	K_P	1.070×10^0
	c_4	-2.000×10^{-4}	K_I	1.000×10^{-2}

Table 2 Outside wet bulb temperature

Time	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	17~18	18~19
$T_{wb,k}$ (°C)	24.3	23.5	23.5	22.8	24.6	24.2	24.8	23.7	23.5	23.5	24.7

은 성능 데이터를 사용하였다.

8시부터 19시까지를 공조시간으로 선택하였으며 이때의 건물의 공조부하는 Fig.3과 같이 가정하였고, 시간대별 습구온도는 Table 2와 같이 가정하였다.

Fig.4는 실내온도를 27°C로 설정하였을 때 냉동기의 냉수 출구 설정온도를 7°C, 냉각수 입구 설정온도를 32°C, 공조기 공급 공기온도를 17°C로 고정한 경우와 개발된 제어 알고리즘을 사용한 경우의 실내온도 제어 결과를 보여준다. 그림에서와 같이 개발된 알고리즘을 적용한 경우와 고정된 설정온도를 적용한 경우 모두 실내온도를 설정온도에서 정상상태 오차 4% 미만으로 유지하고 있어 두 알고리즘 모두 실내온도 제어에 적절히 사용할 수 있음을 확인할 수 있다.

개발된 알고리즘의 효과를 확인하기 위하여 냉동기 냉각수 입구온도에 대한 시뮬레이션 결과를

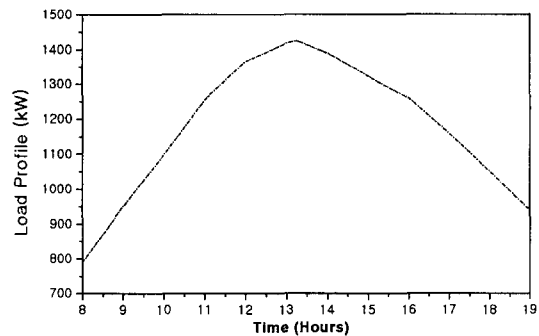


Fig. 3 Cooling load profile.

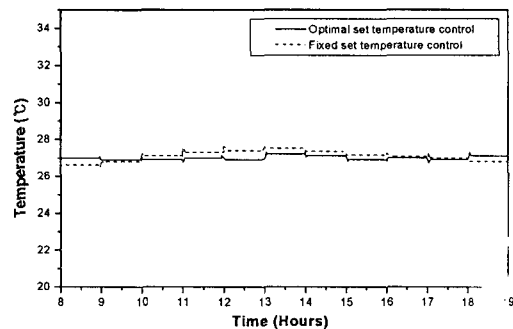


Fig. 4 Room temperature control.

Fig. 5에 보여주었으며 그때의 냉각탑 팬의 소요 동력을 Fig. 6에 보여주었다. 그림에서와 같이 개발된 제어 알고리즘을 적용한 경우와 32°C로 고정된 경우 모두 냉각수 입구 설정온도로 적절히 제어되었고, 개발된 제어 알고리즘을 적용한 경우 습구온도의 변화가 크지 않아 냉각탑 팬의 소요 동력을 최소화하는 냉각수 입구 온도 $T_{cwi,k}$ 가 큰 변화를 나타내지 않았으며 냉각탑 팬의 소요 동력은 448.3 kWh로서 온도를 32°C로 설정한 경우의 471.1 kWh에 비하여 4.8%의 에너지 절감효과를 나타내었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 냉동기 냉수 출구온도 제어 알고리즘을 적용한 경우와 냉수 출구온도를 7°C로 설정한 경우를 비교한 결과를 나타내었다. Fig. 7에서와 같이 두 경우 모두 냉수 출구온도가 설정된 온도에 대하여 적절히 제어됨을 알 수 있으나 Fig. 8에 보여주듯이 출구온도를 고정된 경우는 냉동기 소비열량이 10,635.1 kWh인데 비하여 설정 알고리즘을 적용한 경우는 9,824.8 kWh로 나타나 개발된 설정 알고리즘을 적용한 경우 7.6%의 에너지 절감효과가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 공조기 급기온도 설정 알고

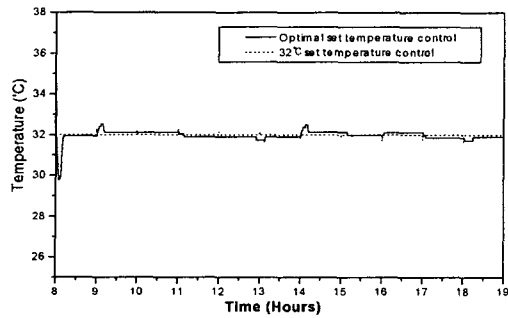


Fig. 5 Cooling water temperature control.

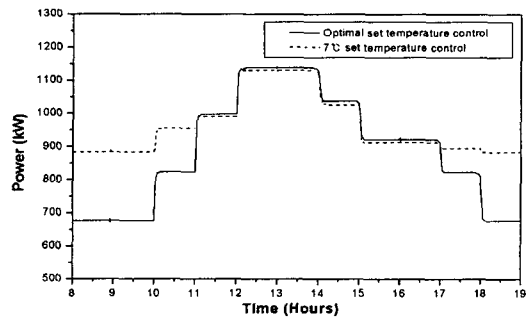


Fig. 8 Absorption chiller power consumption.

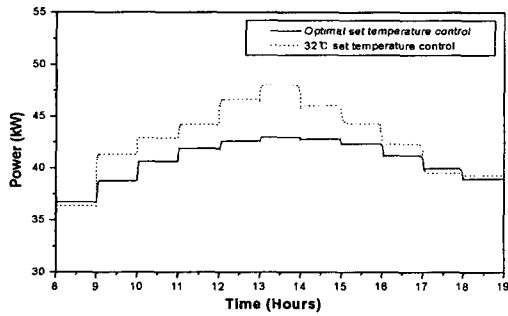


Fig. 6 Cooling tower power consumption.

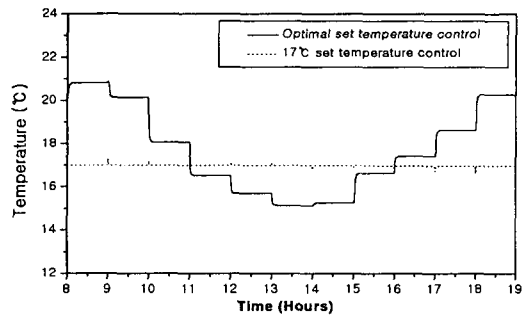


Fig. 9 Supply air temperature control.

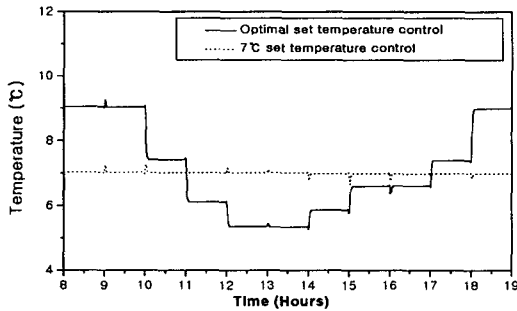


Fig. 7 Chilled water temperature control.

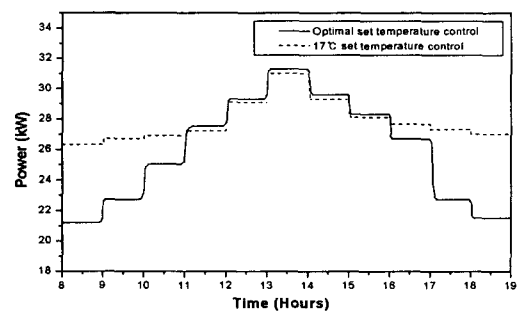


Fig. 10 Air handling unit power consumption.

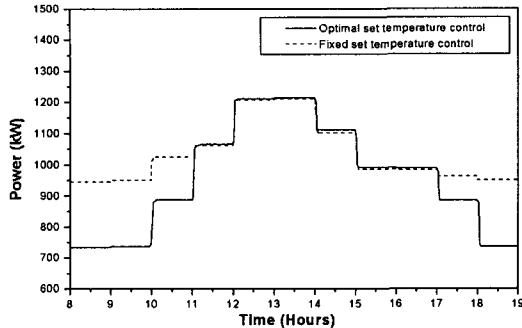


Fig. 11 Total power consumption.

리즘을 적용한 경우와 공조기 급기 설정온도를 17℃로 설정한 경우를 비교한 결과를 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 두 경우 모두 공급 공기온도는 설정된 온도로 적절히 제어되고 있으나, Fig. 10에 보여주듯이 공급 공기온도를 17℃로 고정한 경우 공조기 팬의 소비동력이 323.2 kWh인데 비하여 개발된 설정 알고리즘을 적용한 경우 291.7 kWh로서 9.7%의 에너지를 절약할 수 있었다.

따라서 개발된 제어 알고리즘을 모두 적용한 경우의 전체 시간대별 에너지 소비량은 Fig. 11에서 비교한 것과 같이 냉각탑, 냉동기, 공조기의 설정온도를 각각 고정한 경우의 11,429.4 kWh에 비하여 10,564.8 kWh로 나타나 전체 에너지 소비량의 7.6%가 절감됨을 알 수 있었다.

5. 결론

흡수식 공조시스템의 효과적인 운용을 위하여 냉동기 냉각수 입구온도 제어 알고리즘, 냉동기 냉수 출구온도 제어 알고리즘, 공조기 급기온도 제어 알고리즘을 개발하였다. 개발된 제어 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여 흡수식 공조시스템을 구성하고 있는 각종 구성요소의 동적 모델을 적용한 동적 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 적용한 결과 주어진 부하에 적절히 반응하는 제어 시스템의 성능향상을 관찰할 수 있으며, 개발된 알고리즘을 적용할 경우 전체 에너지 사용량의 7.6%가 절약됨을 알 수 있었다. 따라서 개발된 제어 알고리즘은 흡수식 냉동공조시스템의 시스템 성능향상과 에너지 절약을 위하여 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Dorgan, C. B., Dorgan, C. E. and Leight, S. P., 1995, ASHRAE's new application guide for absorption cooling/refrigeration using recovered heat, ASHRAE Transactions, Vol. 101, Pt. 2.
2. Goodheart, K. A., Klein, S. A. and Schults, K., 2002, Economic assessment of low firing temperature absorption chiller systems, ASHRAE Transactions, Vol. 108, Pt. 1.
3. Han, D. and Lee, S., 1999, Dynamic simulation of the absorption air conditioning system, Proceedings of Winter Annual Conference, SAREK.
4. Braun, J. E., Klein, S. A. and Beckman, W. A., 1989, Methodologies for optimal control of chilled water system without storage, ASHRAE Transactions, Vol. 95, pp. 652-662.
5. Cadicia, M. A., 2000, Implementation of a near optimal global set point control method in a DDC controller, ASHRAE Transactions, Vol. 106, Pt. 1.
6. Han, D. and Lee, J., 2002, Optimal control algorithms for the full storage ice cooling system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 14, No. 4, SAREK.
7. Clark, D. R., 1984, HVACSIM+ Building System and Equipment Simulation Program; Reference manual, NBSIR 84-2996, NIST.
8. Vanderplaats, G. N., 1984, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill.
9. Belegundu, A. D. and Chandrupatla, T. R., 1999, Optimization Concepts and Applications in Engineering, Prentice Hall.
10. Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A., 2001, Feedback Control of Dynamic Systems, Addison Wesley.
11. Han, D. and Lee, J. M., 2000, Real-time building load prediction by the on-line weighted recursive least square method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 12, No. 6, SAREK.