

# 실시간 부하예측 기술을 이용한 빙축열 냉방시스템의 최적제어

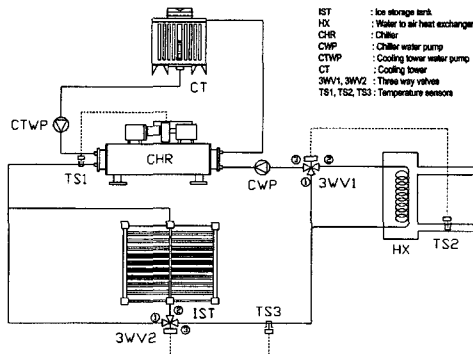


**최** 근 경제성장과 생활수준의 향상으로 냉방기기의 설치가 보편화되면서 하절기 냉방부하 증가에 따른 전력 에너지 공급상의 위기를 맞고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 한국전력공사에서는 심야 전력 공급 시간에 냉동기를 가동하여, 얼음의 형태로 냉열을 저장하였다가 주간 냉방에 활용하는 빙축열 냉방 시스템을 보급하여 주간전력 사용을 우회시키는 방법으로 전력수급의 안정화에 기여하고 예비율을 높이려는 노력을 하고 있다. 이러한 빙축열 냉방 시스템을 좀더 효율적으로 사용하기 위해서는 빙축열 냉방 시스템에 대한 연구가 필요하며 특히 빙축열 부하예측 기술과 시스템 최적제어 기술의 개발은 최대순간 요구부하의 개선은 물론 시스템의 성능향상과 에너지 소비감소에도 효과적으로 쓰일 수 있다. 따라서 본고에서는 야간에 빙축조에 저장시킨 축열만으로 주간의 냉방부하를 감당하게 하는 전부하 축열 방식을 선택하여 시스템 각 구성요소의 동적현상을 고려한 효과적인 수학적 모델을 제시하고 이를 사용하여 빙축열 냉방시스템의 최적제어 알고리즘을 개발하고 시뮬레이션을 통해 그 효율성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

한 도 영  
볼 수 있듯이 냉동기의 효율을 고려한 냉동기 상류방식으로써 빙축조, 냉동기, 열교환기, 삼방밸브, 관, 펌프, 온도센서, 제어기 등으로 구성되어 있다.

본고에서 선택된 빙축조는 관외차빙형 빙축조로써 빙축조내 임의 지점에서의 브라인 온도는 현열 결빙구간, 불구속잠열 결빙구간, 구속잠열 결빙구간과 불구속잠열 해빙구간, 구속잠열 해빙구간, 현열 해빙구간으로 구분하여 모델을 개발하였고, 총 열전달량은 유효계수를 사용하여 개발하였으며 빙축조의 브라인 입구온도변화와 유량변화에 대한 열전달량 변화는 일차 동적모델로 가정하였다.

냉동기의 냉동용량과 소요동력은 증발온도와 응축온도의 2차함수로 가정하였고 냉동기의 부분 냉동용량과 부분 소요동력은



<그림 1> 빙축열 냉방 시스템

## 수학적 모델

선택된 빙축열 냉방 시스템은 그림 1에서

## 집중 기획 제어기술을 통한 에너지 절약

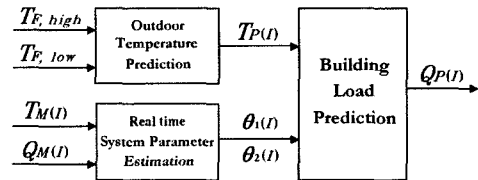
슬라이딩 밸브 위치의 2차함수로 가정하여 주어진 성능곡선에 의해 정적모델을 개발하였다. 슬라이딩 밸브 위치는 제어신호에 대하여 일차함수로, 냉동기 브라인 출구온도는 브라인의 정상상태 출구온도에 대하여 일차함수로 가정하여 동적모델을 개발하였다. 시스템 유량을 제어하기 위하여 사용되는 삼방밸브의 유량과 온도는 질량보존의 법칙과 에너지 보존의 법칙에 의하여 유도되었으며 삼방밸브 엑츄에이터의 위치는 제어신호에 대하여 일차함수로 가정하였고 이력현상(hysteresis)을 고려하여 모델링 하였다.

건물의 물대공기 열교환기에서의 공기온도는 열교환기를 건식코일과 습식코일로 구분하여 대수평균 온도차(LMTD)와 대수평균 엔탈피차(LMHD)를 사용하여 에너지 보존의 법칙으로부터 정적모델을 유도하였으며 열교환기의 출구 공기 온도는 정상상태 출구 공기온도에 대하여 일차함수로 가정하여 동적모델을 구성하였다. 냉수 펌프의 효율은 펌프 성능곡선에 의해 얻을 수 있는 압력수두계수와 무차원 유량계수의 함수로 나타내었으며, 유체 흐름에 따른 압력 강하, 온도 변화, 펌프의 소요동력등을 계산할 수 있도록 수학적 모델을 구성하였다. 시스템 배관의 정상상태 출구온도는 배관에서의 열교환을 고려하여 유도하였고 배관에서의 출구온도는 정상상태 출구온도의 일차함수로 가정하여 동적모델을 구성하였다. 온도센서의 출력신호는 입력신호에 대한 일차 함수로 동적모델을 가정하여 사용하였다.

### ■ 실시간 부하 예측알고리즘

익일 건물의 시간대별 부하  $Q_b(I)$ 를 예측할 수 있는 건물부하 예측시스템은 그림 2와 같이 구성되었으며 건물부하 예측시스템은 외기온도 예측과 실시간 시스템 파라미

터 추정, 그리고 건물부하 예측으로 구성되어 있다. 선택된 외기온도  $T_M(I)$ 와 건물부하  $Q_M(I)$ 는 매시간 측정되며 다음날의 외기 최고 예상온도  $T_{F, high}$ 와 외기 최저예상온도  $T_{F, low}$ 는 외부로부터 예보되어 입력된다고 가정하였다.



〈그림 2〉 실시간부하 예측시스템

익일 시간대별 외기온도  $T_F(I)$ 는 예보된 익일 외기 최고 온도와 최저 온도를 사용하여, 각 지역에서 수집된 수년간의 측정 데이터로부터 통계적인 방법으로 얻어진 시간대별 온도 보정 계수를 사용하여 예측하였으며, 매시간 측정되는 외기 온도와 건물 부하를 이용하여, 실시간 가중 회귀최소자승법으로 매시간 시스템 파라미터  $\theta_1(I)$ ,  $\theta_2(I)$ 를 추정하여 익일 시간대별 건물부하  $Q_b(I)$ 를 예측하였다.

### ■ 최적제어 알고리즘

빙축열 냉방 시스템의 최적제어 알고리즘은 결빙시 최적제어 알고리즘과 해빙시 최적제어 알고리즘으로 구성되어 있으며 결빙시 최적제어 알고리즘은 냉동기 출구온도 설정 알고리즘과 냉동기 용량 제어 알고리즘으로 구성되어 있다. 냉동기 출구온도 설정 알고리즘은 빙축량 예측 알고리즘으로부터 예측된 익일 냉방 부하량을 최소의 에너지를 소비하여 빙축조에 결빙하기 위하여 냉동기의 출구온도 설정값을 시간에 따라 재설정하는 알고리즘으로써 예측된 외기온도와 냉각탑,

## 집중 기획

### 제어기술을 통한 에너지 절약

냉동기의 성능곡선을 사용하여 시간에 따른 냉동기 출구온도를 설정하였으며, 냉동기 용량 제어알고리즘은 냉동기 출구온도 설정알고리즘으로부터 설정된 설정온도로 냉동기 출구온도를 유지하기 위하여 과도응답과 정상상태오차를 고려하여 비례적분 반와인드업 제어알고리즘을 사용하였다.

해빙시 최적제어 알고리즘은 모드선정 알고리즘, 빙축조 단독모드 제어알고리즘, 빙축조우선 냉동기공유모드 제어알고리즘으로 구성되어 있다. 모드선정 알고리즘은 빙축조 단독모드 제어알고리즘이나 빙축조우선 냉동기공유모드 제어알고리즘을 선정할 때 사용하며 보통 빙축조 단독모드로 운용하다가 빙축조측 삼방밸브의 개도가 97%에서 100% 사이에서 일정시간이상 유지될 경우에 빙축조우선 냉동기공유모드 제어알고리즘으로 전환하여 빙축조만으로 부족한 냉방부하를 냉동기가 담당하게 하며, 빙축조우선 냉동기공유모드에서 냉동기의 슬라이딩 밸브의 개도가 0%에서 10%사이에서 일정시간이상 유지하게 되면 다시 빙축조 단독모드 제어알고리즘으로 전환하게 된다. 빙축조 단독모드 제어알고리즘은 빙축조측 삼방밸브 출구온도 설정알고리즘, 빙축조측 삼방밸브 제어알고리즘, 열교환기측 삼방밸브 제어알고리즘으로 구성되어 있다. 빙축조측 삼방밸브 출구온도 설정알고리즘은 삼방밸브 출구온도를 적절한 온도로 설정하는 것을 목적으로 하며, 빙축조측 삼방밸브 제어알고리즘은 설정알고리즘을 통해 설정된 온도를 설정치로 유지하는 것을 목적으로 하고, 열교환기측 삼방밸브 제어알고리즘은 건물급기 온도를 에너지 중앙관리 시스템으로부터 설정된 설정치로 유지하는 것을 목적으로 하며 비례적분 반와인드업 제어알고리즘을 사용하였다. 빙축조만으로 부족한 냉방부하를 냉동기가 감당하는 빙축조우선 냉동기공유모드

제어알고리즘은 해빙시 냉동기 출구온도 설정알고리즘, 냉동기 용량 제어알고리즘, 열교환기측 삼방밸브 제어알고리즘으로 구성되어 있다. 해빙시 냉동기 출구온도 설정알고리즘은 냉동기 출구온도를 적절한 온도로 설정하는 것을 목적으로 하며, 냉동기 용량 제어알고리즘은 설정알고리즘을 통해 설정된 설정치로 유지하는 것을 목적으로 하고, 열교환기측 삼방밸브 제어알고리즘은 건물급기 온도를 에너지 중앙관리 시스템으로부터 설정된 설정치로 유지하는 것을 목적으로 하며 비례적분 반와인드업 제어알고리즘을 사용하였다.

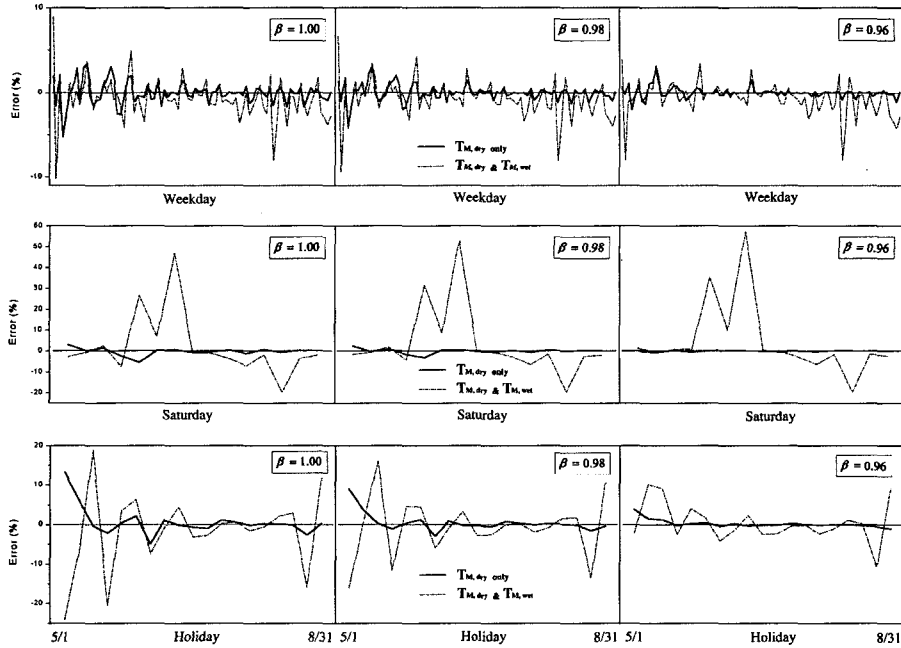
#### 실시간 부하예측 알고리즘 분석

건물 부하 예측 시스템으로부터 예측된 건물부하의 정확성을 확인하기 위하여 임의의 건물을 선택하고 주어진 재실 패턴과 외기온도에 대한 시간대별 건물부하를 측정 한 후 그 결과를 사용하여 시스템파라미터를 추정하였으며 추정된 시스템파라미터와 예측된 익일 시간대별 예측온도를 사용하여 익일 시간대별 건물의 부하를 예측하였다. 그림 3은 평일, 토요일, 휴일에 대해 추정된 시스템 파라미터를 사용하여 예측된 건물부하와 측정 건물부하를 비교한 결과를 나타낸 것으로 그림에서 보듯이 외기 건구온도  $T_{M, dry}$ 만을 사용하였을 경우 망각계수  $\beta$ 가 0.96일 때 평일, 토요일, 휴일의 예측 건물부하 오차가 각각  $\pm 1.5\%$ ,  $\pm 0.4\%$ ,  $\pm 1.1\%$  이내로 잘 예측되었으나 외기 습구 온도  $T_{M, wet}$ 항을 추가 변수로 사용할 경우 상대적으로 많은 오차가 있음을 확인할 수 있었다.

#### 결빙시 최적제어 알고리즘 분석

결빙시 최적제어 알고리즘을 확인하기 위

## 집중 기획 제어기술을 통한 에너지 절약



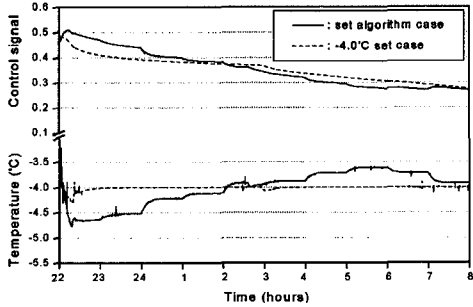
〈그림 3〉 실시간 부하예측 오차

하여 심야전력 공급시간을 오후 22시에서 오전 8시까지로, 예측된 부하량을 1720Ton-hours로, 축열 시작시 빙축조내 물의 온도를 2°C로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 외기온도 예측 알고리즘을 통해 예측된 야간의 외기온도와 설정알고리즘을 통해 설정된 냉동기 출구 설정온도를 보여 준다. 그림 5는 설정알고리즘을 적용한 경우와 냉동기 출구 설정온도를 -4.0°C로 고정한 경우의 냉동기 출구온도와 슬라이딩 밸브개도 위치신호를 나타내며 설정알고리즘을 통해 설정된 냉동기 출구온도는 외기온도가 낮은 시간대에서 높은 온도로 설정되어 냉동기의 효율이 향상됨을 알 수 있었다. 그림 6은 결빙시 냉동기 소비동력을 보여주며 설정알고리즘을 적용한 경우의 총 소비동력은 417.02kWh로 출구온도를 -4.0°C로 고정한 경우 455.44kWh에 비해 8.4%의 소비동력이

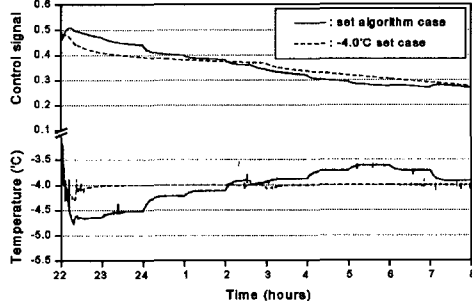
절약됨을 알 수 있었다.

냉동기 용량 제어알고리즘으로 사용된 비례적분 반와인드업 제어알고리즘을 비례적분 제어알고리즘을 사용한 경우와 비교 분석하였다. 그림 7과 같이 비례계인  $K_p$ 가 4.0, 적분계인  $K_i$ 가 0.1인 비례적분 제어알고리즘을 적용한 경우 냉동기 출구설정온도를 계단 변화시켰을 때  $\pm 1\%$  오차범위내 정착시간 6.8분, 정상상태오차 6.0%, 오버슈트 4.2%이었으나,  $K_p$ 가 4.0,  $K_i$ 가 0.1이며 보상계인  $K_d$ 가 2.0, 포화기 상한값이 1.0, 하한값이 0인 비례적분 반와인드업 제어알고리즘을 적용한 경우  $\pm 1\%$  오차범위내 정착시간 4.5분, 정상상태오차 5.5%, 오버슈트 1.9%로 오버슈트가 줄고 제어신호도 안정되었으므로 냉동기 용량 제어알고리즘으로 비례적분 반와인드업 제어알고리즘 사용이 더 적절함을 확인하였다.

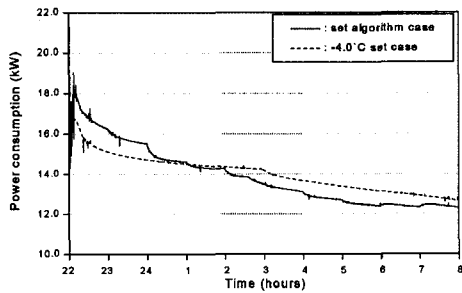
## 집중기획 제어기술을 통한 에너지 절약



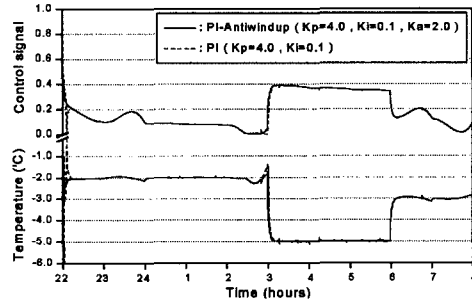
〈그림 4〉 외기온도와 냉동기 출구 설정온도



〈그림 5〉 냉동기 출구온도와 슬라이딩 밸브 제어신호



〈그림 6〉 냉동기 소비동력



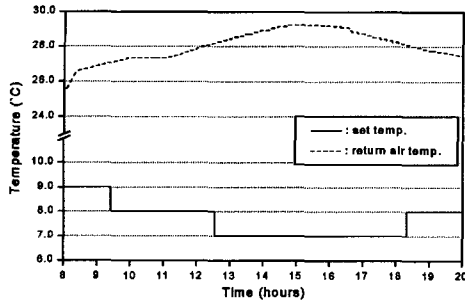
〈그림 7〉 설정값의 계단 변화에 따른 냉동기 출구온도 제어

### ■ 해빙시 최적제어 알고리즘 분석

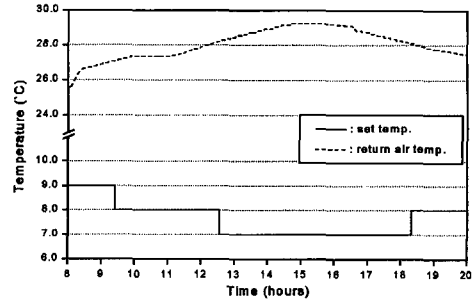
해빙시 최적제어 알고리즘을 확인하기 위하여 냉방부하를 빙축조만으로 담당하는 전 부하 축열방식을 채택하고 냉방시간을 오전 8시부터 오후 20시까지 12시간으로 가정하였다. 빙축조 단독모드 제어알고리즘에서 그림 8은 건물 냉방부하에 따른 열교환기축 환기온도와 빙축조축 삼방밸브 출구온도 설정알고리즘을 통해 설정되는 빙축조축 삼방밸브 출구 설정온도를 나타낸다. 그림 9은 빙축조축 삼방밸브 출구온도를 보여주며 설정알고리즘을 적용한 경우에는 안정적으로 제어되고 설정온도를 8.0°C로 고정하는 경우에는 12시에서 15시 사이에서 냉방부하를 감당하지 못하여 현탕하는 현상이 나타나지만 나머지 냉방시간동안에는 안정적으로 제어

되며 설정온도를 7.0°C로 고정한 경우에는 8시부터 16시 사이에서 안정적으로 제어되고 있지만 16시 이후에는 빙축조의 해빙율이 떨어져 7.0°C의 설정온도를 유지하지 못하여 상승하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 10은 건물 급기 설정온도를 에너지 중앙관리 시스템으로부터 15.0°C로 주어진 경우의 제어 결과를 보여주며 빙축조축 삼방밸브 출구온도 설정 알고리즘을 적용한 경우에는 안정적으로 제어되나, 설정온도를 8.0°C로 고정한 경우에는 13시부터 17시 사이에서 설정온도로 제어하지 못하여 온도가 상승하지만 나머지 냉방시간동안에는 안정적으로 제어되고 있으며, 설정온도를 7.0°C로 고정한 경우에는 설정온도로 안정적으로 제어되고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 11은 빙축조의 해빙율을 나타내며 빙축조축 삼방밸브 출구

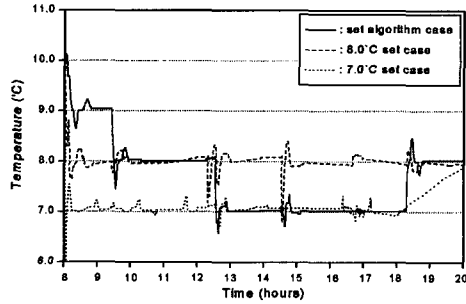
## 집중 기획 제어기술을 통한 에너지 절약



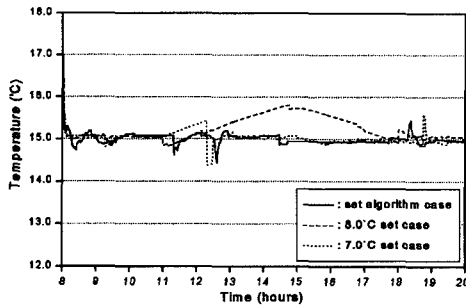
〈그림 8〉 환기온도와 빙축조축 삼방밸브 출구 설정온도



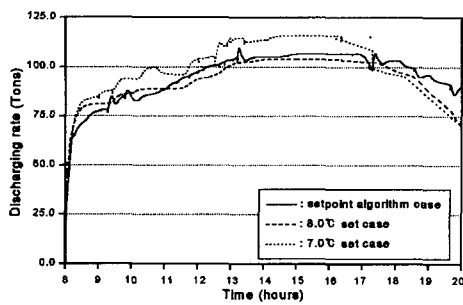
〈그림 12〉 빙축조 우선-냉동기 공유 모드



〈그림 9〉 빙축조축 삼방밸브 출구 온도



〈그림 10〉 열교환기측 급기온도



〈그림 11〉 빙축조 해빙율

온도 설정알고리즘을 적용한 경우에는 전체 냉방시간 동안 건물로 공급되는 열교환기측 급기온도와 빙축조축 삼방밸브 출구온도를 설정온도로 유지할 수 있도록 냉방부하 변동에 대하여 적절하게 조절되고 있는 것을 볼 수 있으며, 빙축조축 삼방밸브 출구 설정온도를 8.0°C로 고정한 경우에는 19시 이전까지는 냉방부하에 대하여 적절하게 조절되지만 19시 이후부터는 해빙율이 감소함을 알 수 있고, 빙축조축 삼방밸브 출구 설정온도를 7.0°C로 고정한 경우에는 설정온도를 8.0°C로 고정한 경우보다 초기 해빙율이 과다하여 18시 이후부터 해빙율이 감소함을 알 수 있었다.

빙축조 우선 냉동기 공유모드 알고리즘을 확인하기 위하여 전날 예측된 냉방부하가 다음날 실제 냉방부하와 다를 경우, 실제 냉방부하에 따른 환기온도가 그림 12와 같을 때 주간 냉방시 빙축조 단독모드 알고리즘만으로는 냉방부하를 감당할 수 없기 때문에 처음에는 빙축조 단독모드 알고리즘이 적용되고 모드선정 알고리즘을 통해 빙축조 우선 냉동기 공유모드 알고리즘으로 전환되어 적용되는 경우의 시뮬레이션을 수행하였다. 그림에서 보듯이 해빙시 빙축조축 삼방밸브 출구온도와 냉동기 출구온도를 보여주며 18시 이전에는 빙축조 단독모드 알고리

## 집중기획 제어기술을 통한 에너지 절약

즘이 적용되는 구간으로 빙축조축 삼방밸브 출구온도가 9.0°C, 8.0°C, 7.0°C로 설정되어 제어되고 냉동기는 가동되지 않고 있는 것을 볼 수 있으며 18시 이후에서는 빙축조 우선 냉동기 공유모드 알고리즘이 적용되는 구간으로 냉동기가 가동되어 냉동기 출구온도가 11.0°C로 설정되어 빙축조축 삼방밸브 출구 설정온도가 8.0°C로 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

### ■ 결론

빙축열 냉방 시스템의 각 구성요소에 대한 효과적인 동적 모델을 제시한 후 동적 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 빙축열 시스템의 최적제어 알고리즘을 개발하는데 사용하였다. 실시간 가중 회기최소자승법을 적용한 건물 부하 예측 알고리즘을 사용하여

익일의 건물 부하량을 예측함으로써 결빙시 빙축열 냉방 시스템을 효과적으로 운전하는데 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 또한, 전부하 축열방식 빙축열 냉방 시스템의 결빙시 최적제어 알고리즘으로 결빙시 냉동기 출구온도 설정알고리즘과 냉동기 용량 제어알고리즘을 개발하였으며 해빙시 최적제어 알고리즘으로 모드선정 알고리즘과, 빙축조축 삼방밸브 출구온도 설정알고리즘, 빙축조축 삼방밸브 제어알고리즘, 열교환기축 삼방밸브 제어알고리즘으로 구성되어 있는 빙축조 단독모드 제어알고리즘과, 해빙시 냉동기 출구온도 설정알고리즘, 열교환기축 삼방밸브 제어알고리즘, 냉동기 용량 제어알고리즘으로 구성되어 있는 빙축조 우선 냉동기 공유모드 제어알고리즘을 개발하였으며 그 유효성을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. ●