

## 예측 냉방부하를 이용한 빙축열시스템의 최적 운전계획

이 경 호<sup>†</sup>, 최 병 윤, 주 용 진, 이 상 렬, 한 승 호

한국전력공사 전력연구원

### Optimal Scheduling of Ice Storage System with Prediction of Cooling Loads

Kyung-Ho Lee, Byoung-Youn Choi, Yong-Jin Joo, Sang-Ryoul Lee, Seung-Ho Han

Korea Electric Power Research Institute(KEPRI), Korea Electric Power Corporation(KEPCO),  
Taejon 305-380, Korea

(Received May 21, 2000 ; revision received September 22, 2000)

**ABSTRACT:** This paper describes an optimal control scheduling of an encapsulated ice storage system with a chiller of nominal chiller 34 RT (103,200 kcal/hr) and an ice storage tank of 170 RT-hrs (514,080 kcal). The optimization technique used in the study is dynamic programming. The objective function is summed cost during a day including charge and discharge periods. Control strategies being used commercially are chiller priority and storage priority control. In chiller priority control, the chiller is allowed to run at full capacity during the day, subject to limitations of the building load, and the ice is only melted when and if the load exceeds the chillers full capacity. In contrast to chiller priority control, the aim in storage priority control is to melt as much as ice as possible during the day time period. The system simulation calculates the operation costs for the three control strategies in the condition of the same cooling load and the same ice storage system. The simulation period is a day, assuming that initially the tank is stored fully and the cooling load is perfectly predicted for the scheduling. Also Final state of the tank is to be charged fully.

**Key words:** Ice storage system(빙축열시스템), Optimal operation(최적운전), Dynamic programming(동적계획법), Energy saving(에너지절약), Cost saving(비용절감)

#### 기 호 설 명

$COP$  : 냉동기의 성적계수  
 $COP_{nom}$  : 냉동기의 공칭 성적계수  
 $H$  : 하루 중 건물 냉방시간 [hour]  
 $IPF$  : 빙축열조의 빙층전율  
 $J$  : 목적함수  
 $k$  : 계산에 있어서 임의의 단계

$min$  : 최소화  
 $N$  : 계산에 있어서 마지막 단계  
 $PLR$  : 냉동기의 부분부하율  
 $Q_{ch}$  : 냉동기의 냉각부하 [RT, kcal/hr]  
 $Q_{ch,nom}$  : 냉동기의 공칭냉각용량 [RT, kcal/hr]  
 $Q_f$  : 냉동기의 최대냉각부하 [RT, kcal/hr]  
 $Q_L$  : 건물 냉방부하 [kcal/hr]  
 $Q_{st}$  : 빙축열조로부터의 방냉률 [kcal/hr]  
 $Q_{st,cap}$  : 빙축열조의 축열용량 [RT-hrs, kcal]  
 $T_{ch,out}$  : 냉동기 출구 브라인 온도 [°C]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-865-5983; fax: +82-42-865-5804

E-mail address: seagull@kepri.re.kr

- $T_{ch, outset}$  : 냉동기 냉각모드 출구 하한 설정온도 [°C]
- $r$  : 전기요금 [won/kWh]
- $t$  : 임의의 시간 [hour]
- $u_{ch}$  : 냉동기 제어변수 ( $= Q_{ch} / Q_t$ )
- $u_{st}$  : 총 브라인 유량에 대한 빙축열조로의 유량분율에 대한 제어변수
- $W_{bp}$  : 브라인 펌프의 전력소비 [kW]
- $W_{ch}$  : 냉동기 전력소비 [kW]
- $W_{cp}$  : 냉각수펌프 전력소비 [kW]
- $W_{ct}$  : 냉각탑 전력소비 [kW]
- $W_{pinat}$  : 냉동시스템의 전체 전력소비 [kW]
- $x$  : 빙축열조의 축열상태량

**상첨자**

- \* : 최적상태

**하첨자**

- min : 최소

**1. 서 론**

빙축열시스템은 심야전력을 이용하여 냉방에 사용할 열을 생산하여 저장하여 두고, 여름철 전력수요가 높은 시간대에 저장한 열을 이용하여 냉방에 이용함으로써 낮시간대의 전력수요를 심야시간대로 이전하는 데 기여할 수 있는 냉방 설비이다. 빙축열시스템의 운전방식으로는 냉동기우선 운전방식과 빙축열우선 운전방식의 두 가지가 있으며, 냉동기우선 운전방식이 그 제어의 편의성에 의하여 많이 채택되어 이용되고 있다. 냉동기우선 운전방식이란 냉방운전 중에 냉동기는 최대한의 냉각부하로 운전을 하고, 나머지 냉방부하를 빙축열조에 의하여 담당하도록 하는 운전방식이다. 빙축열우선 운전방식은 빙축열조에 저장된 열을 냉방시간대에 최대한 소비하여 활용하는 것을 목적으로 하는 운전방식으로 다음날 냉방부하의 정확한 예측에 의하여 안정되게 이루어질 수 있다. 이러한 운전기법은 값싼 심야전력

을 이용하므로 비축열식 냉방시스템에 비하여 운전비를 크게 절감할 수 있지만, 냉방부하를 예측하고 이에 따라 비용을 최소화할 수 있는 최적화 기법을 적용함으로써 더욱 운전비 절감을 꾀할 수 있을 것이다.

Braun<sup>(1)</sup>은 냉동기우선 운전, 빙축열우선 운전을 최적운전방식과 시뮬레이션을 통하여 비교한 결과를 발표한 바 있다. 이 연구에서 최적운전을 최소에너지 그리고 최소전력수요 관점에서 다루었으며, 동일한 냉동시스템에 대하여 3가지 유형의 냉방부하조건에 대하여 검토하였다. 또한 냉방시간대이면서 건물 최대전력수요가 발생하지 않는 시간대에는 냉동기우선으로 운전하도록 하고, 최대전력수요가 발생하는 시간대에는 냉동기 출력을 감소하고, 빙축열조로부터의 방냉물은 방냉말기에 완전히 고갈시킬 수 있도록 운전하도록 하는 '수요억제형 제어'(load-limiting control)을 준최적제어(near-optimal control)기법으로 정의하였으며, 시간에 따라 전기요금이 달라지는 환경에서도 최적의 운전상태를 나타내었다. 한편, 전기요금이 시간에 따라 변하지 않는 경우에는 냉동기우선 운전이 최적이라고 볼 수 있다고 발표하였지만, 설계 냉방부하보다 작은 경우의 날에는 냉동기우선 운전방식이 빙축열우선 운전방식이나 최적운전방식에 비하여 더욱 큰 운전비용을 나타낸다고 하였다. 단, 이 연구는 그다지 많이 이용되지 않는 방식의 빙축열시스템에 대하여 연구하였다는 단점을 갖고 있다.

Rupanagunta et al.<sup>(2)</sup>은 현대 제어이론을 축냉시스템의 운전제어에 적용하였다. 여기에서 축냉시스템은 수학적으로 상태변수적 시스템(state-variable system)으로 보고, 이러한 시스템의 운용을 시간에 대하여 이산화한 최적제어문제로 설정하였다. 최적시스템 운전전략을 24시간에 걸친 운전비용을 최소화하는 것으로 정의하였으며, 시스템에 주어지는 냉각요구량과 개개의 시스템 구성요소에 대한 용량을 제한조건으로 만족하여야 한다고 하였다. 사용한 최적화 기법은 generalized reduced gradient 알고리즘이며, 이 알고리즘에서는 초기의 제어변수를 가정하여야 한다. 축냉시스템의 최적운전을 통한 성능은 빙축열우선 전략과 비교되었다. 냉방부하예측이 정확히 이루어지는 것을 가정하여 연간 4.3%의 요금절감을 기대하였다.

Braun<sup>(3)</sup>은 빙축열시스템에 대한 준최적제어 전략을 개발하고 평가하였다. 간단한 경험학습법(heuristics)을 토대로 하여 하루 단위 그리고 한 달 단위의 시뮬레이션으로부터 개발된 이 기법은 내용형 빙축열시스템을 대상으로 하였다. 동적계획법(dynamic programming)을 이용하여 하루 그리고 한달간의 시뮬레이션에 의하여 적산된 에너지 그리고 비용합수를 최소화하는 최적제어경로를 구하였다.

Henze<sup>(4)</sup>는 다양한 빙축열시스템 유형, 전기요금제도, 운전조건에 대하여 최적제어를 냉동기우선과 빙축열우선방식에 대해 비교하였다. 빙축열시스템의 최적제어문제를 에너지비용 및 수요비용을 포함한 비용을 최소화하는 문제로 설정하였다. Braun<sup>(1)</sup>의 연구와 유사하게 결론적으로 심야 시간대와 낮시간대의 에너지비용과 수요비용의 차이가 큰 경우, 수요제한방식인 빙축열우선 운전방식이 준최적제어의 성능을 가지고 있다고 보았다. 하지만 최적제어는 시간에 따른 전기요금이 달라지지 않는 경우에도 우수한 운전성적을 나타낼 수 있으며, 일반적으로 냉동기우선 운전방식이 가장 큰 운전비용을 나타낸다고 하였다. 그러나 시간에 따라 냉방전기요금이 일정하고 월 중 최대부하보다 하루 최대부하가 작은 경우에는 냉동기우선 운전기법은 우수한 운전성적을 나타낸다고 하였다.

한편, 국내에서는 Jung et al.<sup>(5)</sup>이 관외착빙형 빙축열시스템에 대하여 냉방부하의 예측기법에 의존하지 않고, 기존의 축열조 우선방식과 냉동기 우선방식의 장점을 취합한 새로운 운전방식을 제안하였다. 이 방식에서는 변동하는 냉방부하에 대하여 빙축열시스템의 운전비용이 최소가 되는 운전방식을 도출하기 위한 이론적 접근방법을 제시하여, 냉동기의 최적운전율이 존재함을 보였다. 또한 냉동기우선방식과 축열조우선방식에 대하여 냉방기간 동안의 운전 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 운전비용을 비교하였다. 축열과정의 비용은 축열운전비용을 주간 냉방시에 지불하는 개념으로 적용하여 빙축열시스템의 순간 운전비용을 야간에 축열하기 위한 축열운전비와 주간 냉동기 운전비로 하였다.

위와 같이 빙축열시스템의 최적운전에 대한 다양한 검토와 연구가 국내외적으로 이루어져 왔다. 그러나, 대부분의 경우는 외국의 전기요금제

도에 대한 것으로 우리나라와는 실정이 상이하다. 그리하여 본 연구에서는 국내의 전기요금제도 조건을 고려하고, 국내에서 시판되는 냉동기의 성능을 측정하여 그를 토대로 모델을 수립한 빙축열시스템에 대하여 최적운전 기법을 개발하였다. 고려된 빙축열조는 캡슐형 빙축방식이며, 사용된 냉동기는 스크류압축식 냉동기이다. 이와 같은 시스템에 대한 모델로부터 냉방부하예측을 가정하고, dynamic programming 기법을 적용한 최적운전계획을 제안하였다.

## 2. 시스템 주요 구성요소 모델

### 2.1 빙축열조

본 연구에서 적용대상으로 한 빙축열조는 캡슐형 빙축열조이며, 이에 대한 수학적 모델은 Lee et al.<sup>(6)</sup>이 발표한 빙축열조 모델을 이용하였다. 최적제어에 이 모델을 이용하기 위해서 우선 빙축열조 통과 유량 및 축열량을 파라메타로 한 냉방 시뮬레이션을 수행하고, 전유량을 통한 축열 시뮬레이션을 통한 성능계산 자료를 이용하였다.

### 2.2 냉동기

본 연구에서 적용대상으로 한 냉동기는 스크류압축식 냉동기이다. 냉동기의 냉각모드에서 공칭 냉각용량은 103,200 kcal/hr(34 RT)이며, 전력소비는 30.2 kW로서 공칭성적계수  $COP_{nom}$ 은 3.87이다. 또한 제빙모드에서의 냉각용량은 68,000 kcal/hr이며, 전력소비는 30.2 kW로서 성적계수는 2.61이다. 냉동기의 성능에 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 부분부하에 따른 성능변화를 고려하여 부분부하-전력소비모델 기법을 이용하였다.<sup>(7)</sup> 또한 냉동기의 가능한 최대냉각능력은 냉동기 입구 브라인 온도의 함수로 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{Q_f}{Q_{ch,nom}} = (a_0 + a_1 T_{ch,in} + a_2 T_{ch,in}^2) \quad (1)$$

위 식에서 계수  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ 는 실험적으로 결정하였다.

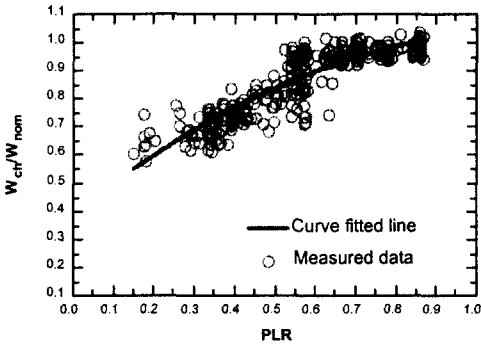


Fig. 1 Chiller power input at part load.

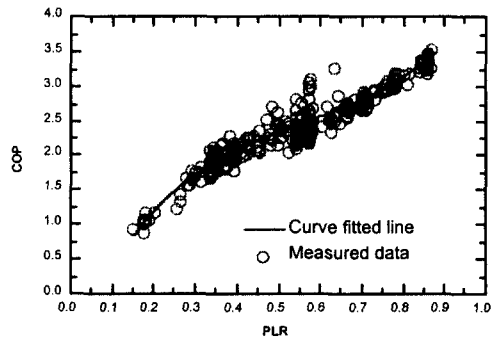


Fig. 2 Chiller COP at part load.

냉동기의 부분부하율에 대한 전력소비를 구하기 위하여 냉동기의 부하를 25%에서 100%로 달리하여 전력소비를 측정하였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 냉동기 성능 결과는 다소 데이터의 편차를 보이는데, 이것은 냉동기의 성능에 영향을 미치는 많은 요소들에 기인한 것으로 보이며, 본 논문에서는 이들 요소를 모두 정확히 고려하기는 불가능하고, 본 논문의 목적은 냉동기 모델개발이 아닌 최적운전방안을 제안하는 것이므로, 이들 영향을 종합적으로 고려하기 위하여 부분부하에 따른 성능만을 적용하기로 하였다. 냉동기의 부분부하 성능실험을 위하여 부하를 생성시키기 위한 보일러를 설치하였으며, 온수를 저장하기 위한 온수저장조 그리고 열교환기를 설치하였다. 부하조절은 열교환기를 지나는 온수의 입구온도를 조절함으로써 이루어지고, 열교환기를 지나는 온수의 출구온도를 일정하게 유지하도록 열교환기 브라인측 3방밸브를 제어하였다.

실험으로부터 구한 부분부하와 전력소비 관계를 이용하여 다음과 같이 수식화하였다.

먼저 부분부하율  $PLR$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$PLR = \frac{Q_{ch}}{Q_{ch,nom}} \quad (2)$$

냉동기의 전력소비는 다음과 같이  $PLR$ 의 함수로 표현한다.

$$W_{ch} = \frac{Q_{ch,nom}}{COP_{nom}} [A + B(PLR) + C(PLR)^2] \quad (3)$$

위 식에서 계수  $A, B, C$ 는 Fig. 1의 Curve-fitting된 식으로부터 구할 수 있다.

냉동기의 부분부하에서의  $COP$ 는 다음과 같이 표현이 된다.

$$COP(PLR) = \frac{Q_{ch}}{W_{ch}} \quad (4)$$

위식의 분모항은 주어진  $Q_{ch}$ 에 대하여 식(2)에서 구할 수 있다. 식(3)과 식(4)를 조합하여 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$COP(PLR) = \frac{COP_{nom} PLR}{[A + B(PLR) + C(PLR)^2]} \quad (5)$$

### 3. 최적운전 기법

#### 3.1 운전 최적화 개요

빙축열시스템을 건물냉방에 최적으로 운전하기 위해서는 이미 냉방운전이 시작되기 이전에 운전계획을 수립하여야 한다. 이것을 위해서는 냉방운전기간에 해당하는 시간 동안의 냉방부하가 미리 예측이 되어야 한다. 본 연구에서는 냉방부하는 정확하게 예측이 되어 있다고 가정된 상태에서 운전계획을 세우는 것으로 하였다. 최적운전계획을 위해서 모든 시스템의 시뮬레이션은 임의의 시간간격으로 분할한 상태에서 계산하며, 건물 냉방부하는 독립변수로 고려한다. 시스템의 상태변수는 빙축열조에 저장되어 있는 축열량으로 하며, 시스템의 제어변수는 냉동기의 부분부

하에 따른 냉각용량과 빙축열조로부터의 방냉률 또는 방냉률을 제어하는 3방밸브 제어로서 빙축열조의 유량분율이다.

### 3.2 상태방정식

시스템의 구성요소 중 동적상태량을 갖는 것은 빙축열조로 한정하였으며, 이로 인한 시스템의 상태방정식은 에너지평형식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x(k) = x(k-1) - \frac{Q_{st}(k)\Delta t}{Q_{st, cap}} \quad (6)$$

위 식에서 방냉과정 중 임의의 계산단계에서의 빙축열조로부터의 방냉률  $Q_{st}(k)$ 는 양의 값을 취하도록 하고, 축냉과정에서는 음의 값을 가지며,  $\Delta t$ 는 임의의 시간간격이다. 상태변수  $x$ 는 빙축열조내의 축열량을 설계 총축열량으로 나누어 준 무차원수이다. 식(6)의 물리적인 의미는 어떤 시간에서의 빙축열조내 축열상태량은  $\Delta t$ 만큼의 그 이전의 시간에서의 축열상태량으로부터 순간방냉량  $Q_{st}(k)$ 만큼을  $\Delta t$  동안 방냉한 양을 뺀 것과 같다는 것이다.

### 3.3 제한조건

시스템의 운전에 필요한 제한조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$Q_{ch}(k) + Q_{st}(k) = Q_L(k) \quad (7)$$

$$0 \leq x(k) \leq 1 \quad (8)$$

$$0 \leq u_{st}(k) \leq 1 \quad (9)$$

$$u_{ch, min}(k) \leq u_{ch}(k) \leq 1 \quad (10)$$

$$T_{ch, out}(k) \geq T_{ch, outset} \quad (11)$$

식(7)의 의미는 어떤 순간  $k$ 에서의 냉방부하  $Q_L(k)$ 은 냉동기 담당부하  $Q_{ch}(k)$ 와 빙축열조 담당 방냉률  $Q_{st}(k)$ 의 합과 같아야 한다는 것이며, 식(8)은 빙축열조내 저장량의 무차원변수인  $x(k)$ 의 가능범위가 0부터 1까지라는 것이며, 이

때 0일 때는 빙축열조내 축열량이 없는 상태이고, 1일 때는 빙축열조의 최대축열량인  $Q_{st, cap}$ 만큼 100% 축열량이 저장되어 있는 상태를 나타내는 구속조건이다. 위 식(9)의  $u_{st}(k)$ 에 의하여 빙축열조로부터의 매 시간간격마다의 방냉률이 결정이 된다.

위 식(10)에서 냉동기의 운전용량 제어의 하한치는 냉동기 제작사에서 제시하는 값을 이용할 수 있다. 그리고 식(11)의 냉동기 출구온도 하한치는 적절히 시스템에 맞추어 운전자가 가변할 수 있다.

### 3.4 목적함수

시간에 따라 일정간격으로 분할한 형태로서 하루 중 운전비용을 최소화시키려는 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

Minimize:

$$J = \sum r(k)W_{plant}(k)\Delta t, \text{ for } 0 \leq k \leq N \quad (12)$$

위 식에서  $W_{plant}(k)$ 는 임의의 계산단계  $k$ 에서의 냉동시스템의 총 전력소비로서 식(13)과 같이, 냉동기, 브라인 펌프, 냉각수펌프, 냉각탑 등을 포함한다. 위 식에서  $r(k)$ 는 전력량 전기요금으로서 심야요금(을)을 적용한다.

$$W_{plant} = W_{ch} + W_{bp} + W_{cp} + W_{ct} \quad (13)$$

### 3.5 동적계획법(Dynamic programming)의 적용

본 연구에서 사용된 Dynamic programming 기법으로부터 최적운전경로인 최소비용을 갖도록 하는  $u_{st}(k)$ 와  $u_{ch}(k)$ 값들이 매 계산간격에 모든 가능한 범위의 상태변수에 대하여 결정이 된다. 결국 그 다음과정으로는 초기 상태변수로부터 물리적으로 가능한  $u_{st}^*(k)$ 와  $u_{ch}^*(k)$ 값들을 다시 찾아감으로써 최종적인 운전계획이 수립이 되는 것이다.

계산절차상의 첫 단계는 최종단계 운전에서의 최적치를 찾는 것이다. 이것은 기본적으로 최종 시간단계에서 모든 가능한 상태변수에 대하여 모

든 가능한 제어변수들을 다루는 문제가 된다. 각각의 상태변수에 대한 최적제어변수는 최소비용을 갖도록 하는 것을 선택하여 결정한다. 이러한 과정은 반복계산에 의하여 가능하며, 계산횟수를 제한하기 위해서는 상태변수와 제어변수는 어떠한 간격으로 분할시켜 놓아야 한다.

일반적으로  $N$  단계를 갖는 전과정에서 임의의  $k$  단계에서의 시간  $t = k\Delta t$ 에서의 최적운전값을 결정하는 것을 다음과 같이 표현한다.

$$C_{k,N}^*(x(k), u(k)) = J_{k,k+1}(x(k), u(k)) + J_{k+1,N}^*(x(k+1)) \quad (14)$$

$$u(k) = [u_{st}(k), u_{ch}(k)] \quad (15)$$

위 식(14)에서  $C_{k,N}^*(x(k), u(k))$ 는  $k$ 와  $N$  단계 사이에서, 임의의 어느 한  $x(k)$ 에 대하여 여러 제어변수 중 한 제어변수  $u(k)$ 에 의한 최소비용을 나타낸다. 그리고  $J_{k,k+1}(x(k+1))$ 의 의미는  $k$ 와  $k+1$ 을 거치는 동안에 특정한  $x(k)$ 와  $u(k)$ 에 대한 시스템 운전비용을 나타낸다. 그리고 우측 마지막 항의  $J_{k+1,N}^*(x(k+1))$ 은 상태변수  $x(k+1)$ 의 함수로서  $k+1$ 를 포함하는 그 후반의 단계에 대한 최적경로에 의한 비용이다.

결국, 최적경로에 의한 비용은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_{k,N}^*(x(k)) = \min_{u(k)} [C_{kN}^*(x(k), u(x))] \quad (16)$$

위 식(16)에서  $J_{kN}^*(x(k))$ 는  $k$ 부터  $N$  단계에 대하여 특정한  $x(k)$ 에 대하여 어떤  $u(k)$ 에 의한 최소비용을 나타낸다.

그러므로, 결국 초기의  $k=1$ 부터  $N$ 까지의 모든 계산 단계에 대하여, 모든 가능한 분할되어져 있는 상태변수들에 있어서 최소비용을 나타내는 제어변수들이 결정지어지게 된다. 이러한 상태변수와 제어변수의 조합은 식(7)과 식(11)까지의 제한조건을 모두 만족하여야 한다. 마지막 과정으로는 초기에 상태변수값이 주어진다면, 이로부터 다음 단계의 상태변수들을 찾아야 하며, 그 다음 단계의 상태변수에 해당하는 최적 제어변수들의 조합이 최적운전 계획이 되는 것이다.

### 3.6 기존제어기법에의 적용

본 연구에서는 기존의 냉동기우선 운전 및 빙축열우선 운전방식의 계산에 있어서도 동적계획법을 적용하였다. 각 운전방식에 있어서의 목적함수는 각각 다음과 같이 다르게 적용함으로써 가능하다.

Minimize:

$$J = \sum (Q_t(k) - Q_{ch}(k))^2, \text{ for } 0 \leq k \leq N \quad (17)$$

Minimize:

$$J = \sum \left[ \alpha \frac{Q_{st, cap}}{H} - Q_{st}(k) \right]^2, \text{ for } 0 \leq k \leq N \quad (18)$$

위 목적함수들 중에서 식(17)은 냉동기우선 운전을 위하여 적용이 되며, 식(18)은 빙축열우선 운전에 적용이 되는데, 이것은 빙축열조로부터의 방냉률을 일정하게 냉방시간  $H$  동안 유지시켜 운전종료시점까지 저장된 축열량을 모두 다 사용하겠다는 운전전략을 나타내는 것이다. 이 식에서  $\alpha$ 는 방냉률 조정계수로서  $\alpha=1$ 로서 방내운전을 하게 되면, 방냉말기의 시점에 접근할수록 축열조내 저장된 얼음의 양이 감소함으로 인하여 일정한 방냉률을 유지할 수 없게 되므로,  $\alpha$ 값을 도입하여  $\alpha=1$ 일 때의 일정 방냉률보다 작은 값으로 방냉을 유지하도록 하여 방냉말기까지 일정한 방냉이 이루어질 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 0.9를 적용하였다.

## 4. 최적운전 시뮬레이션 case study

빙축열시스템의 운전비용을 최소화시킬 수 있도록 동적계획법을 이용한 최적운전계획의 운전효과를 분석하기 위하여 시스템 운전 시뮬레이션에 의하여 냉동기우선 운전 및 빙축열우선 운전 방식에 대해 비교하였다.

### 4.1 냉방부하 조건

운전 시뮬레이션에 사용한 냉방부하 조건은 두 가지의 경우를 고려하였다. 아주 더운 여름철에도 설계냉방부하가 발생하는 날은 그리 많지는 않을 것이므로, 이 두 종류 냉방부하는 설계부하

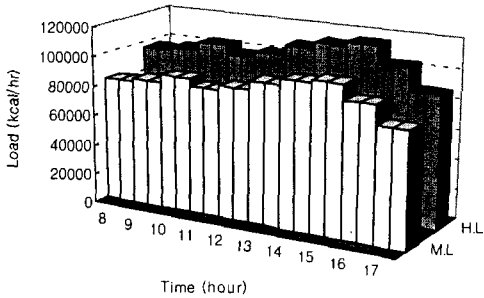


Fig. 3 Representative cooling loads for a hot day (H.L.) and a warm day (M.L.).

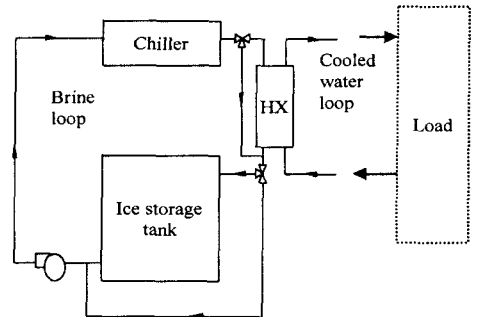


Fig. 4 Schematic of ice storage system.

보다는 작은 부하를 선택하였다. 두 냉방부하 중 하나는 ‘고부하’(Higher load, H.L.)라고 하고, 다른 하나는 ‘중부하’(Lower load, L.L.)로 여기에서는 이름붙이기로 한다. 고부하의 최대 냉방부하 값은 오후 3시에 발생하여 116 Mcal/hr(38.4 RT)의 값을 나타내며, 하루 중 냉방시간대는 오전 8시부터 10시간 동안으로 하였으며, 총 냉방부하는 10,292 Mcal로서 부하율은 89%이다. 한편, 중부하 조건은 최대 100 Mcal/hr(33.1 RT)이며, 하루 중 총 부하는 890 Mcal이다. 이 두 가지 종류의 냉방부하 분포도를 Fig. 3에 나타내었다.

4.2 빙축열시스템

본 연구에서는 냉방부하 조건에 맞추어 Table 1에 나타낸 바와 같은 빙축열시스템을 대상으로 하였으며, 개요도를 Fig. 4에 나타내었다. 구성방식은 캡슐형 빙축열시스템에서 일반적으로 많이 적용되고 있는 냉동기하류방식(Chiller downstream

configuration)이다. 냉동기하류방식은 열교환기를 통과한 브라인의 온도가 냉동기상류방식에 비하여 높아서 빙축열조의 이용 가능한 냉열분이 더 많으며, 단점으로는 냉동기로 유입하는 브라인 온도가 4~7℃ 정도로 낮아서 냉동기 효율이 다소 낮아진다는 점이다.

운전최적화에 있어서 제한조건으로서의 냉동기 최소제어용량은 25%로 조건을 설정하였으며, 냉동기 출구브라인의 최저설정온도는 2.4℃로 하였다.

4.3 결과 및 분석

고부하와 중부하의 두 가지 냉방부하조건을 갖는 하루 중 냉방시간에 대한 시스템 운전계획결과를 Fig. 5부터 Fig. 10까지에 나타내었다. 계산에서 고려한 운전시간범위는 24시간의 하루동안이다. 고부하에 대한 경우를 Fig. 5부터 Fig. 7에 나타내었고, 중부하에 대한 경우를 Fig. 8부터 Fig. 10까지에 나타내었다.

냉동기우선방식으로 시스템을 운전하였을 경우의 빙축열조가 담당하는 부하와 냉동기가 담당하는 부하를 Fig. 5와 Fig. 8에 나타내었으며, 빙축열우선방식과 최적운전계획에 의한 것을 Fig. 6과 Fig. 9, 그리고 Fig. 7과 Fig. 10에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 냉동기우선방식에서는 항상 냉동기 냉각부하가 냉방부하보다 작은 범위에서는 최대냉각용량으로 운전하게 되므로, 빙축열조가 담당하는 부분이 가장 작음을 알 수 있다. 빙축열우선방식에서는 빙축열조의 총 축열량을 방냉시간으로 나누어준 방냉률로 운전을 하게 되면, 방냉말기에 축열량이 많이 고갈됨으로써 방냉능력의 저하로 일정 방냉률을 유지하

Table 1 Specification of components of the ice storage system

Component	Capacity	Value	
Chiller	Cooling	Nominal capacity	103,200 kcal/hr
		Power input	31 kW
	Ice making	Nominal capacity	68,000 kcal/hr
		Power input	30.2 kW
Ice tank	Storage IPF	170 RT-hr 43.7%	
Brine pump	Power input	11.9 kW	
C/T fan	Power input	3.5 kW	
C/T pump	Power input	2.5 kW	

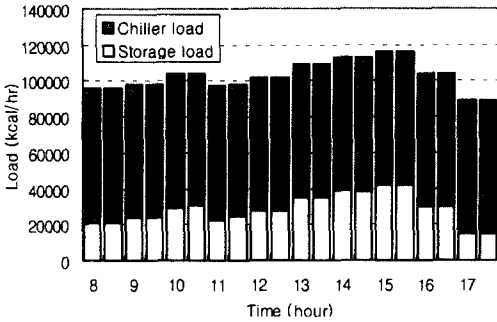


Fig. 5 Load meets in chiller priority for a day of higher loads.

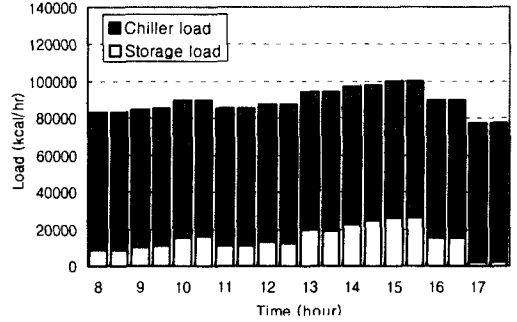


Fig. 8 Load meets in chiller priority for a day of lower loads.

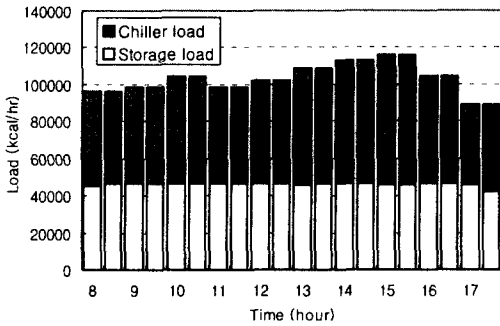


Fig. 6 Load meets in storage priority for a day of higher loads.

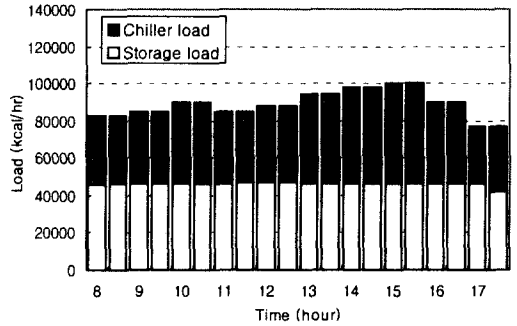


Fig. 9 Load meets in storage priority for a day of lower loads.

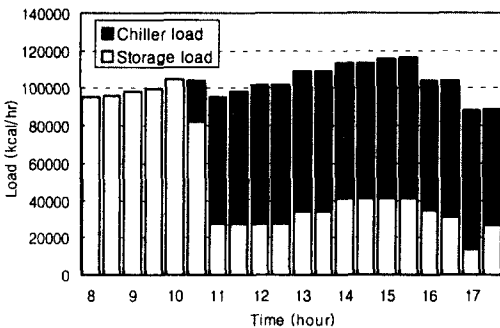


Fig. 7 Load meets in optimal scheduling for a day of higher loads.

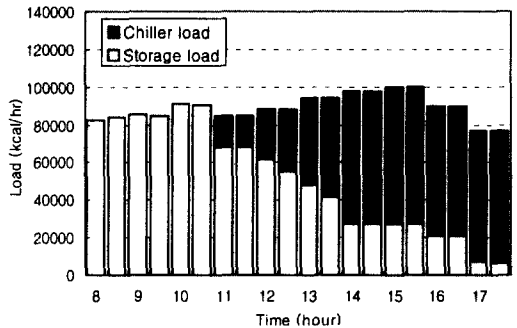


Fig. 10 Load meets in optimal scheduling for a day of lower loads.

기 어려우나, 방냉률을 조정계수를 통하여 약 90%로 감소함으로써 방냉시간 동안 항상 일정하게 방냉량을 유지시킬 수 있도록 운전할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 10에 나타낸 최적운전에 있어서는 냉방운전 초기에는 빙축열조 단독으로 냉방부

하를 담당하다가 어느 시점이 지나면 냉동기와 빙축열조를 동시에 운전하도록 계획이 되었다. 이러한 동시운전모드에서도 냉동기가 부분부하로 운전되는 상태가 먼저 시작이 되고, 어느 시점이 지나면, 냉동기는 최대냉각용량으로 운전하도록 나타났다. 이러한 결과는 축냉과 방냉의 과정에



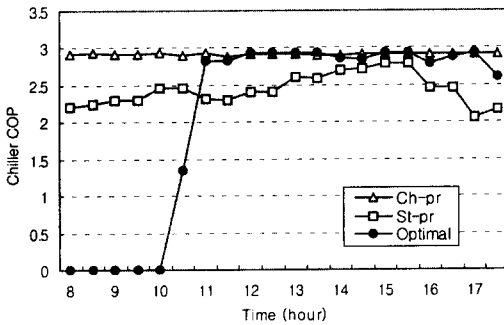


Fig. 11 Variation of chiller COP during cooling operation for higher-load day.

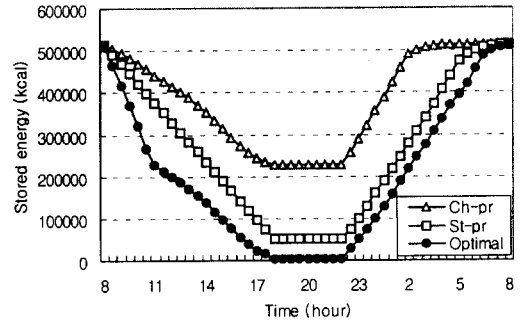


Fig. 13 Variation of cool energy in the tank for a day of higher-load.

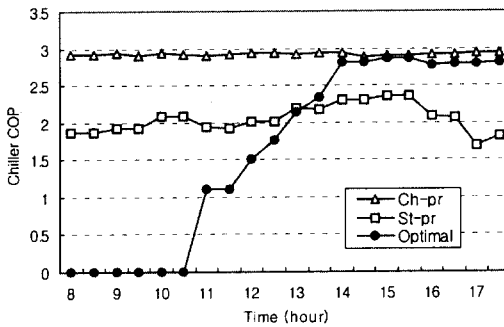


Fig. 12 Variation of chiller COP during cooling operation for lower-load day.

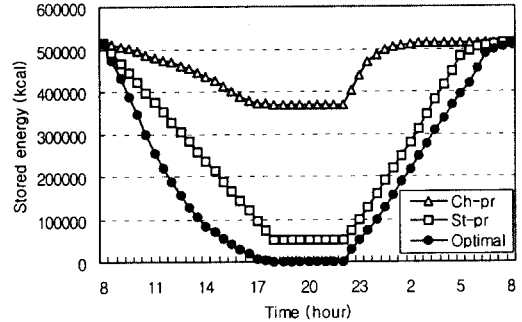


Fig. 14 Variation of cool energy in the tank for a day of lower-loads.

결친 총 비용이 최소로 나타날 수 있는 운전경로를 선정하는 과정에서, 빙축열조내에 저장량이 충분한 초기에는 빙축열조 단독으로 운전이 되도록 계산이 된 것이며, 빙축열조 단독으로 부하를 담당하기 어려운 정도로 빙축열량이 감소하면, 냉동기를 부분부하운전시키고, 빙축열조로부터 최대한 방냉을 시키는 것으로 보인다. 그리고 어느 시점 이후에서는 냉동기가 최대용량으로 운전되어 고효율운전이 가능하도록 계획이 된 것인데, 이 어느 시점이란 냉동기를 최대용량으로 운전하면서 빙축열조의 축열량을 최대한 활용할 수 있는 시점에서 결정이 될 것이다. 냉방운전기간 동안에 운전방식에 따른 냉동기의 성적계수의 변화를 Fig. 11과 Fig. 12에 고부하와 중부하에 대하여 각각 나타내었다. 냉동기우선방식의 경우 냉동기는 가장 높은 성적계수로 운전되어 냉동기운전 측면에서 가장 효율적인 운전이 될 것으로 보이며, 빙축열우선방식에서 가장 냉동기운전효율

이 낮게 나타났다. 최적운전방식에서는 일부 부분부하구간이 존재하며, 냉동기우선방식과 유사한 효율로서 운전되는 구간이 장시간 나타난다.

두 가지 냉방부하조건과 각각의 운전방식에 따른 빙축열조의 축열량의 시간에 따른 변화를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 냉방운전의 종료시점에서 가장 많은 축열량을 보인 것은 냉동기우선 운전방식이며, 가장 작은 축열량은 최적 운전계획에 의한 방식이다. 빙축열우선은 앞서 설명했던 바와 같이 항상 총 축열량을 냉방시간만큼으로 나누어 준 양으로 일정하게 운전이 된다면, 냉방종료시점에서 완전방냉이 가능하지만, 이 일정한 방냉률이 시간이 지남에 따라 빙축열조의 가능한 최대순간 방냉량의 값이 감소함에 따라 일정방냉이 이루어지지 않으므로, 방냉초기부터 약간 감소시켜 축열조 방냉운전을 행하도록 하였다. 그러므로, 방냉기간 동안의 완전방냉은 일정 방냉률 운전으로는 달성하기 어렵다고 볼

Table 2 Energy consumption and operating costs for a day with higher loads

	Period	Energy consumptions (kWh)	Operating costs (won)
Ch-pr	Day	475.07	36,485
	Night	324.41	8,500
	Total	799.47	44,985
St-pr	Day	447.73	34,385
	Night	443.82	11,628
	Total	891.55	46,013
Cost optimal	Day	378.71	29,084
	Night	444.44	11,644
	Total	823.15	40,729

Table 3 Energy consumption and operating costs for a day with lower loads

	Period	Energy consumptions (kWh)	Operating costs (won)
Ch-pr	Day	475.28	36,501
	Night	225.91	5,919
	Total	701.19	42,420
St-pr	Day	420.25	32,274
	Night	441.46	11,567
	Total	861.71	43,841
Cost optimal	Day	341.50	26,227
	Night	461.60	12,094
	Total	803.10	38,321

수 있다. 최적운전계획에 있어서는 최종시점에서의 상태변수를 0으로 지정하지 않았지만, 거의 완전방냉이 이루어질 수 있도록 계획이 되었다.

각 운전방식에 따른 전기 에너지소비량과 운전비용을 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 운전비용은 운전 시물레이션으로부터 계산하였다. 시스템 모델로부터의 dynamic programming 결과에 의한 냉동기우선, 빙축열우선 및 최적운전계획에 대한 빙축열조 제어변수  $u_{st}(k)$ 들과 냉동기제어변수  $u_{ch}(k)$ 를 시스템 모델을 이용한 운전 시물레이션에 적용하여 전력량을 적산하였으며, 매 시간대마다 심야전력요금(을)제도의 기타 시간대인 오전 8시부터 오후 10시까지의 전기요금단가 76.8원/kWh와 심야시간대인 오후 10시부터 다음날 오전 8시까지의 단가인 26.2원/kWh를 적용하여 적산하였다. 심야시간대의 축열운전에 따른 전력량과 운전비용은 냉방말기로부터 남아 있는 축열량을 100% 축열이 될 때까지 제빙운전하는 조건으로 계산하였다.

주어진 두 가지 유형의 부하에 대하여 운전비용은 고부하와 저부하 경우의 모두에서 빙축열우선방식이 가장 컸으며, 전기 에너지소비량 역시 빙축열우선의 경우가 가장 큰 값을 보였다. 한편, 최적운전에 의한 운전이 비용과 전기 에너지소비량 모두에서 가장 작게 나타났다. 고부하의 조건에서는 최적운전으로 운전하였을 경우, 냉동기우선운전에 대한 운전비용에 비하여 약 9.5% 정도로 작으며, 빙축열우선운전에 비하여는 11.5% 정도로 절감될 것으로 계산되었으며, 저부하의 조

건에서는 각각 9.7%, 13%로써 운전비용이 절감될 것으로 나타났다.

한편, 기존운전방식에 있어서 에너지소비량을 비교하여 보면, 빙축열우선 운전방식이 가장 크게 나타났으며, 이것은 냉방시간대에는 빙축열조의 축열량으로부터 냉방부하를 많이 담당하므로써 얼음의 사용을 냉동기우선에 비하여 증가시켰으나, 냉동기의 부분부하운전에 의한 비효율성과 냉방시간대에 많이 사용한 얼음을 다시 저장시키기 위한 심야전력시간대에 축열운전에 따른 소비전력이 더 많아졌기 때문이다. 결국 냉방종료시점에서의 축열량이 다르다는 것은 축열운전에서의 운전비용과 에너지소비량이 달라질 수 있다는 것을 의미하며, 냉방시간대의 부분부하운전은 운전효율적인 측면에서 바람직하지 않다고 볼 수 있다. Fig. 13과 Fig. 14에서 알 수 있듯이 빙축열우선방식으로 운전할 경우와 최적운전방식으로 운전할 경우에 냉방종료시점의 빙축열조내 축열잔량은 비슷한 정도로 소비하면서 빙축열조를 최대한 활용하였으나, 운전비용을 비교하면 최적운전방식이 더 낮게 나타난다. 이것으로부터 빙축열조를 최대한 활용하는 것만이 비용을 최소로 운전할 수 있는 전략일 수는 없으며, 이와 함께 냉동기를 효율적으로 운전할 수 있도록 하여야 한다는 것을 알 수 있다. 즉 빙축열시스템에서는 냉동기를 효율적으로 운전하면서, 빙축열조를 최대한 활용하는 것이 운전비용을 절감할 수 있는 최적의 운전방안이 될 것이다.

최적운전계획을 요약하면 냉방초기에는 빙축열

단독운전이 나타나며, 냉방말기에는 동시운전모드이면서 냉동기를 최대냉각용량으로 운전하는 방식으로 볼 수 있고, 그 사이의 기간에는 냉동기 부분부하운전을 수반하는 동시운전모드이다. 이 중간기간은 비용을 최소화 하기 위한 경로로서 최적화계산에 의하여 결정이 된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초기설치비는 비축열식 냉방시스템에 비하여 다소 많이 들지만, 값 싼 심야전력을 이용함으로써 운전비용이 절감되는 빙축열시스템에 있어 운전비용을 최소화시킬 수 있는 방안으로서 냉방부하를 정확히 예측한다는 가정하에 dynamic programming을 이용하여 최적인전을 계획하고 시스템 운전 시뮬레이션을 수행하였다. 계산조건으로서 냉방부하는 최대냉방부하가 각각 116 Mcal/hr와 100 Mcal/hr인 두 가지 유형으로서 부하율 89%, 냉방시간 10시간에 대한 것이며, 빙축열조와 냉동기의 용량은 각각 514,080 kcal, 103,200 kcal/hr의 냉동시스템으로 하였다.

계산결과, 운전비용은 빙축열우선방식이 가장 크게 나타났으며, 에너지소비량 역시 빙축열우선방식이 가장 크게 나타났고, 최적인전방식의 비용과 에너지소비량이 가장 작게 나타났다. 최적인전방식에 의한 운전비용 및 에너지소비량은 고부하의 경우 냉동기우선의 약 90.5%, 빙축열우선의 약 88.5%, 중부하의 경우 냉동기우선의 약 90.3%, 빙축열우선의 약 87% 정도로 낮은 비용으로 운전이 가능할 것으로 계산되었으며, 냉방부하가 낮은 시간대에 절감효과가 더욱 커질 수 있을 것이다. 그러나, 실제로 빙축열시스템의 현상운전은 냉방부하가 큰 기간에는 운전자의 경험에 의하여 냉동기를 최대부하로 운전하고, 나머지를 빙축열조로 담당하는 방식에 의하여 운전을 하고, 냉방부하가 작은 기간에는 빙축열조 단독운전을 우선 시행하다가 빙축열조 축열량이 냉방부하를 담당하기 어려운 정도로 감소하는 시점을 경험적으로 인식하여 냉동기를 가동하는 방식으로 운전되고 있어, 본 최적인전방식을 실제운전방식과 비교하는 경우에는 현장의 실제운전방식에 따라 달라질 수 있다.

빙축열시스템의 최적인전에 있어서 영향을 미치는 것은 냉동기 및 빙축열조의 모델링 기법,

상태변수 및 제어변수의 분할개수 결정, 냉방부하의 유형 및 시간, 냉방부하예측에 따른 오차등을 들 수가 있으며, 특히 시스템의 에너지소비량에 있어서는 영향을 가장 크게 미치는 냉동기의 전력소비모델이 매우 중요하며, 운전계획을 구성하는 데 있어서는 빙축열조의 축방냉 성능모델이 가장 중요한 요소이므로, 이들 모델의 성능특성에 따라 운전계획이 달라지게 된다. 또한 본 연구는 냉방부하를 100% 정확하게 예측한 경우에 운전계획을 수립하는 것이므로, 실제로 이러한 운전방식을 적용함에 있어서 기본적으로 확립되어야 할 기술은 냉방부하예측의 정확도를 높이는 것이 될 것이다.

## 참고문헌

1. Braun, James E., 1992, A Comparison of Chiller-priority, Storage-priority, and Optimal Control of an Ice-storage System, ASHRAE Transactions: Symposia, pp. 893-902.
2. Rupanagunta, Paresh, Baughman, Martin L. and Jones, Jerold W., 1995, Scheduling of Cool Storage Using Non-linear Programming Techniques, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1279-1285.
3. Drees, Kirk H. and Braun, James E., 1996, Development and Evaluation of A Rule-based Control Strategy for Ice Storage System, HVAC&R Research, Vol. 2, No. 4, pp. 312-336.
4. Henze, Gregor P., 1995, Evaluation of Optimal Control for Ice Storage Systems, Ph.D. thesis, University of Colorado, Boulder, Colorado, U.S.A.
5. Jung, S. H., Lee, D. Y., Kang, B. H. and Kim, W. S., Control Strategy for Economic Operation of an Ice-storage System Considering Cooling Load Variation, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigerating Engineering - Journal of the SAREK, Vol. 12, No. 2, pp. 140-149.
6. Lee, K. H., Joo, Y. J., Choi, B. Y. and Kim,

S. J., 2000, Model of Encapsulated Ice Storage Tanks Using Charge and Discharge Characteristics of Single Ice Capsule, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering - Journal of SAREK, Vol. 12, No. 4, pp. 33-344.

7. Kredier, Jan F. and Rabl, Ari, 1994, Heating and Cooling of Buildings-Design Efficiency, McGraw-Hill, Inc.
8. Kirk, Donald E., 1970, Optimal Control Theory - An Introduction, Prentice-Hall Inc.