

빙축열 냉방시스템의 운전특성 및 비용 분석

안영환, 강병하*, 김석현*, 이대영**

국민대학교 대학원, *국민대학교 기계·자동차공학부, **한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

The Operation Characteristics and Cost Analysis of an Ice Thermal Storage System

Young Hwan Ahn, Byung Ha Kang*, Sukhyun Kim*, Dae-Young Lee**

Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

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

**Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology(KIST), Cheongryang P.O.Box 131, Seoul 136-791, Korea

(Received September 24, 2004; revision received December 16, 2004)

ABSTRACT: A comparative analysis of an ice storage system has been performed on the operation cost for the four control strategies, i.e., chiller priority and chiller downstream, chiller priority and chiller upstream, storage priority and chiller upstream, storage priority and chiller downstream. Main components of the ice storage system are an ice-on-coil storage tank and a screw compressor chiller. With the simulation program, the operation cost has been evaluated from the economics of an ice storage system. It is found that the operation cost of the ice storage system is strongly dependent on the control strategy, i.e., chiller priority or storage priority, but less affected by the arrangement method, i.e., chiller upstream or chiller downstream. In case of the maximum load day, the control strategy with chiller priority and chiller upstream is supposed to obtain the reduction of operation cost. However, it is found that the control strategy with storage priority and chiller downstream is the best economical operation for most summer seasons except the maximum load day.

Key words: Ice storage system(빙축열시스템), Operation strategy(운전방식), Operation cost(운전경비)

기호설명

Q : 열전달량 [kW]
 r : 전체유량에 대한 축열조 유입유량의 비율

T : 온도 [°C]

하첨자

ch : 냉동기
 eva : 증발기
 $full$: 전부하
 in : 입구

† Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

- load : 냉방부하
- min : 냉동기의 최소부하 운전
- out : 출구
- ret : 부하로부터의 순환유체 환수
- st : 축열조
- sup : 부하측으로의 순환유체 공급

1. 서론

빙축열 냉방시스템은 심야시간에 냉동기를 가동하여, 얼음의 형태로 냉열을 저장하였다가 주간 냉방에 활용하는 시스템으로, 주간 냉동기의 사용을 전력부하가 적은 심야시간으로 이전함으로써, 국가적으로는 전력수급의 안정화에 기여하고, 건물주로서는 냉방설비 운전비용 감소의 경제적 이득을 얻을 수 있다.⁽¹⁾

빙축열 냉방시스템은 축열조의 냉열저장량만으로 주간 냉방을 공급하는 전부하 축열방식과 냉동기와 축열조가 냉방부하를 분담하는 부분부하 축열방식으로 구분할 수 있는데, 국내에 보급되고 있는 빙축열시스템은 전부하 축열방식에 비해 축열조와 냉동기 용량을 줄여, 설치비용을 절감할 수 있는 부분부하 축열방식이 대부분이다.⁽¹⁾

한편 부분부하 축열방식은 냉방운전시 냉동기와 축열조의 제어방식에 따라 기저부하를 냉동기가 담당하고 변동부하를 축열조의 방냉을 이용하여 처리하는 냉동기우선 방식과, 그 반대인 축열조우선 방식으로 구분할 수 있다.⁽¹⁾ 두 가지 운전방식은 상이한 운전특성을 가지고 있어, 장단점 비교에 많은 연구가 이루어져 왔다.

Kintner-Meyer and Emery⁽²⁾, Carey et al.⁽³⁾과 Lee et al.⁽⁴⁾은 각각 전력요금체계, 냉방부하 변동패턴, 운전방식에 따라 빙축열 냉방시스템의 주요 구성요소인 냉동기와 축열조의 설계용량이 달라짐을 보였으며, 빙축열 냉방시스템의 최적설계에 대하여 논의하였다. Spethmann⁽⁵⁾은 빙축열 냉방시스템 운전방식 간의 경제성 비교에 있어서, 전력요금체계가 가장 큰 영향을 주는 요인임을 밝혔으며, 전력요금체계에 따라 가장 경제적인 운전방식이 달라짐을 보였다.

이들의 연구는 모두 빙축열 냉방시스템이 설계기준 냉방부하 즉 최대부하로 운전되는 경우에 대한 것으로, 빙축열 냉방시스템의 설계 및 운전

에 있어서 운전특성의 이해에 기여한 바가 크다. 그러나 빙축열 냉방시스템은 항상 설계기준인 최대 냉방부하 상태로 운전되는 것은 아니며, 설계기준보다 적은 부하에서 운전되는 경우가 많아서, 냉방기간 동안 냉방부하가 최대부하에 근접하는 날은 오히려 며칠밖에 되지 않는다. 따라서 최대 부하일의 운전특성만으로 빙축열 냉방시스템 운전방식간의 경제성을 비교하는 것은 냉방운전 기간동안 냉방부하의 변동이 거의 없는 특별한 경우에만 실용적인 의미를 가지며, 일반적으로는 냉방부하가 설계기준에 비하여 작아졌을 경우의 운전특성을 고려하여야 한다.

Braun⁽⁶⁾과 Simmonds⁽⁷⁾는 기존의 여러 가지 운전방식을 적용한 빙축열 냉방시스템에서 냉방부하가 최대부하보다 작아지는 경우를 시뮬레이션하고, 연중 운전경비가 운전방식에 따라 달라짐을 보였다.

본 연구에서는 관외차빙형 빙축열 냉방시스템에 대하여 4가지 방식으로 시스템을 구성하고, 한국전력에서 제시한 냉방기간 중 최대 피크 부하일의 부하를 100으로 하여 이를 기준으로 월별, 시간별 평균부하를 최대 피크부하일의 부하에 대한 비율로 나타낸 블록데이터를 이용하여⁽⁸⁾, 각 방식에 대한 운전특성 및 에너지비용을 분석하였다.

2. 시스템 모델

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 한 빙축열 냉방시스템의 개략도를 나타낸다. 이 시스템은 냉

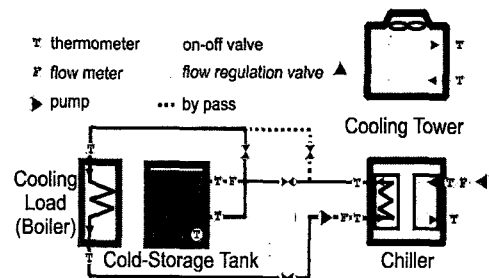


Fig. 1 Performance testing facility for an ice storage system in chiller upstream mode.

동기, 빙축열조, 열교환기, 순환펌프 등으로 구성되며, 냉동기상류 방식으로 운전될 경우의 유로 구성 및 유량제어 밸브의 개폐상황을 나타낸다. 그림에서 밸브를 나타내는 기호가 검게 칠해진 것이 열려진 상태에 있는 밸브이며, 밸브의 개폐 제어로 순환회로를 변경함으로써 냉동기하류 방식으로의 전환이 가능하다. 냉동기우선 방식과 축열조우선 방식의 운전은 축열조의 유입유량을 제어하는 방법에 따라 구분된다.

3. 시스템 시뮬레이션

본 연구에서는 Lee et al.⁽⁹⁾이 실험으로 구한 냉동기와 축열조의 열적특성을 이용하여 작성된 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 수정하여 빙축열 냉방시스템에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.⁽⁴⁾

냉동기우선 방식은 기저부하를 냉동기가 담당하며, 변동부하를 빙축열조가 담당하는 방식이며, 축열조우선 방식은 이와는 반대이다. 냉동기상류 방식과 하류방식의 구분은 시스템에서 냉동기의 위치에 의해 결정되며, 부하측으로부터 열교환된 브라인이 냉동기를 통하여 먼저 열교환 되고 나머지 부하에 대하여 빙축열조가 담당하면 냉동기상류 방식이라고 한다. 냉동기하류 방식은 빙축열조에 의해서 1차 열교환된 후 냉동기가 부하를 담당하는 방식이다. 이상 언급한 방식을 조합하면 다음과 같다.

냉동기우선 및 냉동기상류 방식

(Chiller Priority and Chiller Upstream)

냉동기우선 및 냉동기하류 방식

(Chiller Priority and Chiller Downstream)

축열조우선 및 냉동기상류 방식

(Storage Priority and Chiller Upstream)

축열조우선 및 냉동기하류 방식

(Storage Priority and Chiller Downstream)

편의상 각각 CPCU, CPCD, SPCU, SPCD로 표기한다.

3.1 배치방법

빙축열 냉방시스템은 배치방법에 따라 냉동기상류(Chiller upstream) 방식과 냉동기하류(Chiller downstream) 방식으로 구분할 수 있다. 냉동

기상류 방식의 경우, 냉동기의 증발기 입구온도 $T_{eva,in}$ 은 냉방부하로부터의 환수온도로 주어지며, 냉동기의 증발기 출구온도는 축열조의 입구온도가 된다.

$$T_{eva,in} = T_{ret} \quad (1)$$

$$T_{st,in} = T_{eva,out} \quad (2)$$

냉동기하류 방식의 경우는 다음과 같다.

$$T_{st,in} = T_{ret} \quad (3)$$

$$T_{eva,in} = r T_{st,out} + (1-r) T_{st,in} \quad (4)$$

3.2 제어방법

제어방법에 따라 냉동기우선(Chiller priority) 방식과 축열조우선(Storage priority)으로 구분될 수 있다. 냉동기우선 방식의 경우, 냉방부하가 냉동기의 최대 열전달량(최대 냉열출력)보다 클 경우에는 냉동기가 전부하로 운전되고, 나머지를 축열조가 담당하며, 냉방부하가 냉동기의 최대 열전달량 보다 작을 경우에는 냉동기를 부분 부하운전하여 냉동기만으로 냉방을 공급한다.

$$Q_{ch,full} < Q_{load} : Q_{ch} = Q_{ch,full} \quad (5)$$

$$Q_{ch,full} > Q_{load} : Q_{ch} = Q_{load} \quad (6)$$

축열조우선 방식의 경우, 축열조의 열전달량은 주어진 유입유량과 방열률에 의하여 결정되며, 냉동기는 부하율을 제어하여, 냉방부하에서 축열조의 열전달량을 제외한 만큼의 열량을 공급한다. 이때 냉동기의 부하율이 아주 작아지는 경우가 발생할 수 있는데, 통상적으로 냉동기의 최소 부하율이 존재하여, 부하율이 이 이하가 되면 냉동기가 정지하게 되므로, 축열조만으로는 냉방을 공급하지 못하게 되는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 이 경우에는 냉동기를 최소 운전율로 부분부하 운전하고, 축열조의 유입유량을 감소시켜

냉방부하를 공급하도록 하였다. 한편 주어진 유입유량에 대한 축열조의 열전달량이 냉방부하보다 클 경우에는 축열조 단독운전이 가능하므로

냉동기를 정지시키며, 축열조 유입유량을 감소시켜 냉방부하만큼의 열전달량을 공급한다.

전술한 제어방법을 수식화하면 다음과 같다.

$$Q_{d_0} < Q_{load} - Q_{ch, min} : Q_d = Q_{d_0} \quad (7)$$

$$Q_{load} - Q_{ch, min} \leq Q_{d_0} \leq Q_{load} : Q_r = Q_{r, min} \quad (8)$$

$$Q_{d_0} \geq Q_{load} : Q_d = Q_{load} \quad (9)$$

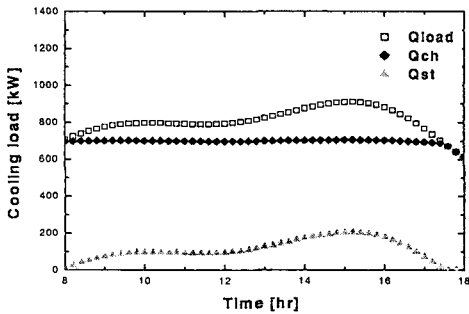
위식에서 Q_{d_0} 는 주어진 일정유량이 유입될 때의 축열조 열전달량으로, 방열이 진행됨에 따라 점차 작아지며, $Q_{ch, min}$ 은 냉동기가 최소 부하로 운전될 때의 냉동기 열전달량이다.

한편 본 연구의 시뮬레이션에서는 부하측으로의 냉수 공급온도 T_{sup} 를 일반적인 냉방시스템과 동일하게 7°C로 하였으며, 냉수유량은 냉방운전시간동안의 환수온도와 공급온도의 평균적인 차이

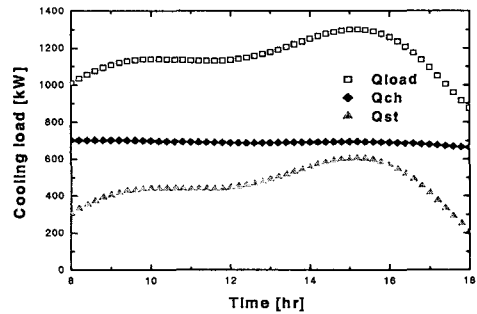
가 5°C가 되도록 결정하였다. 또한 냉동기의 운전가능한 최소 부하율은 25%로 하였다.

3.3 냉방부하

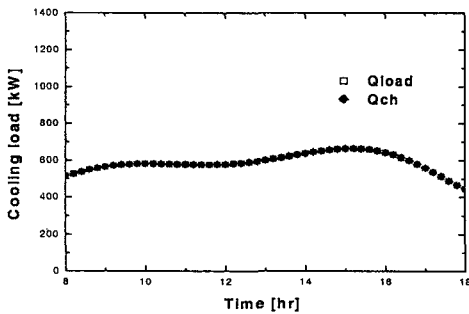
빙축열 냉방시스템은 항상 설계기준인 최대 냉방부하 상태로 운전되는 것은 아니며 오히려 설계기준 냉방부하보다 적은 부하상태에서 운전되는 경우가 많다. 냉방기간을 6월에서 9월까지로 보았을 때, 이 기간동안 냉방부하의 변화량은 최대부하에 대하여 40 ~ 100%사이에서 변동되며, 냉방부하가 최대부하에 접근하는 날은 오히려 며칠밖에 되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 최대 부하와 최대부하보다 작은 냉방부하에 대한 각 운전방식에 대한 비교를 위하여 한국전력에서 제시한 냉방기간 중 최대 피크 부하일의 부하를 100으로하여 이를 기준으로 월별, 시간별 평균부하를 최대 피크부하일의 부하에 대한 비율로 나타낸 블록데이터를 이용하여 시뮬레이션을 실시



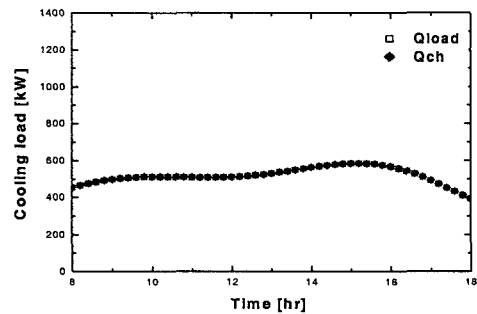
(a) June



(b) July(max)



(c) August



(d) September

Fig. 2 Load variation in chiller priority and chiller upstream.

하였다.⁽⁸⁾

냉방부하는 최대 125 kW이며, 일일 총부하는 1100 kWh이고, 부하변동은 일일 최대 냉방부하에 대한 평균부하의 비가 0.8로 일반적인 사무실 건물에 해당하며, 오후 3시에 최대부하를 가지는 경우에 대하여 고려하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 빙축열 냉방시스템의 운전특성

냉동기우선 및 냉동기상류(CPCU) 방식의 경우 시스템 운전특성을 Fig. 2에 나타내었다. Q_{load} 는 냉방부하, Q_{ch} 는 냉동기의 냉열출력, Q_{st} 는 축열조 열전달량이다. 6월 평균부하일의 경우 냉동기의 냉열출력보다 냉방부하가 작아 냉동기 단독운전이 나타나며, 7월 최대부하일의 경우 냉동기는 최대부하 운전을 하며 축열조는 나머지 냉방부하를 담당한다. 8월 평균부하일의 경우 냉동기와

축열조의 병렬운전이 이루어지며, 방열운전 말기 1시간전부터 냉방부하가 작아져 냉동기의 단독운전이 이루어지며, 9월 평균부하일의 경우 냉방부하가 작아 6월 평균부하일과 같은 운전특성이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3은 냉동기우선 및 냉동기하류(CPCD) 방식으로 시스템을 운전하였을 경우의 운전특성을 나타낸다. 냉동기우선 및 냉동기상류(CPCU) 방식과 유사한 운전특성으로 냉방부하가 작은 6, 9월 평균부하일의 경우 냉동기의 단독운전이 이루어지며, 냉방부하가 큰 7, 8월의 경우 냉동기와 축열조의 병렬운전이 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 축열조우선 및 냉동기상류(SPCU) 방식으로 운전하였을 경우 시스템 운전특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 6월 평균부하일의 경우 방열운전 초기에는 축열조내 저장량이 충분하여 축열조 단독운전이 이루어지며, 어느 시점 이후에는 축열조 단독으로 냉방부하를 담당하기 어려운 정도로 축열량이 감소하고, 또한 냉동기의

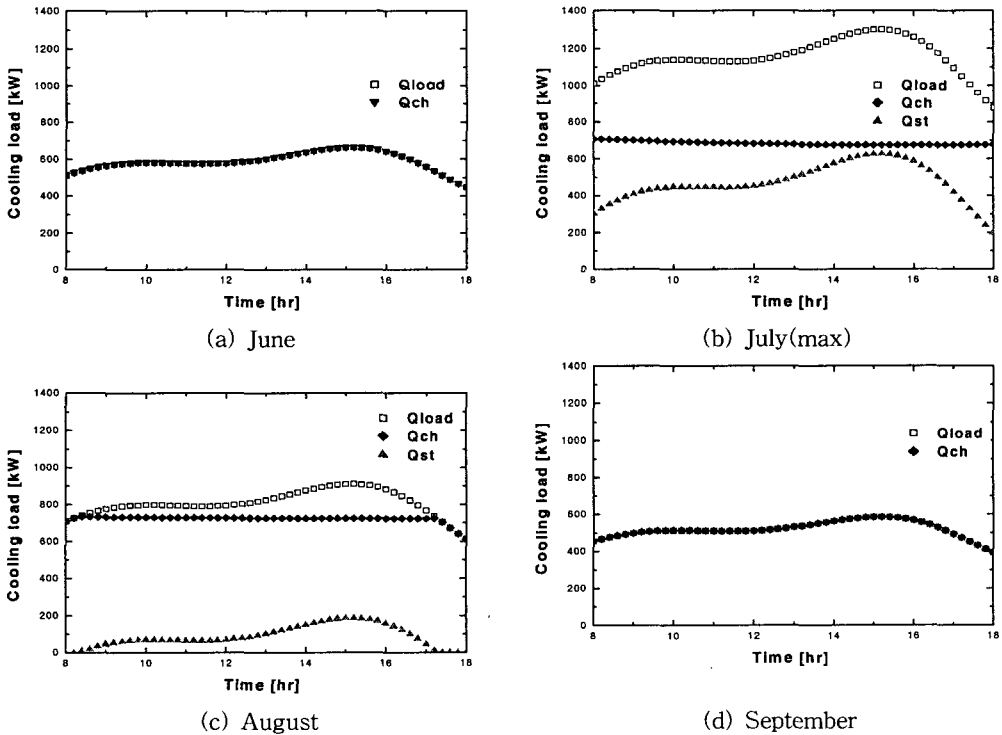


Fig. 3 Load variation in chiller priority and chiller downstream.

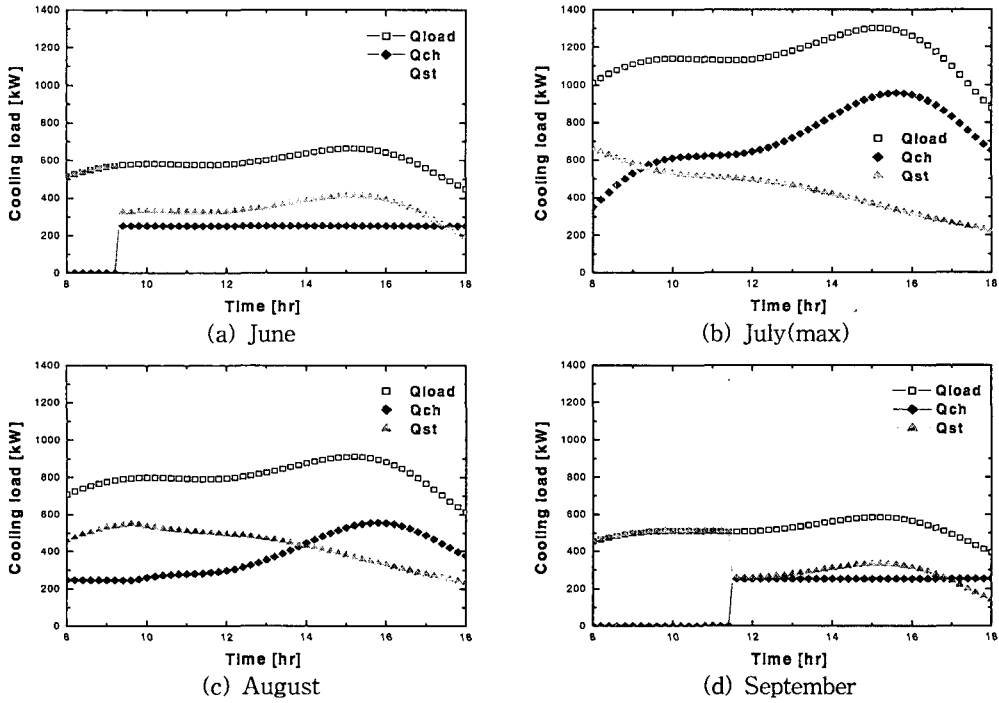


Fig. 4 Load variation in storage priority and chiller upstream.

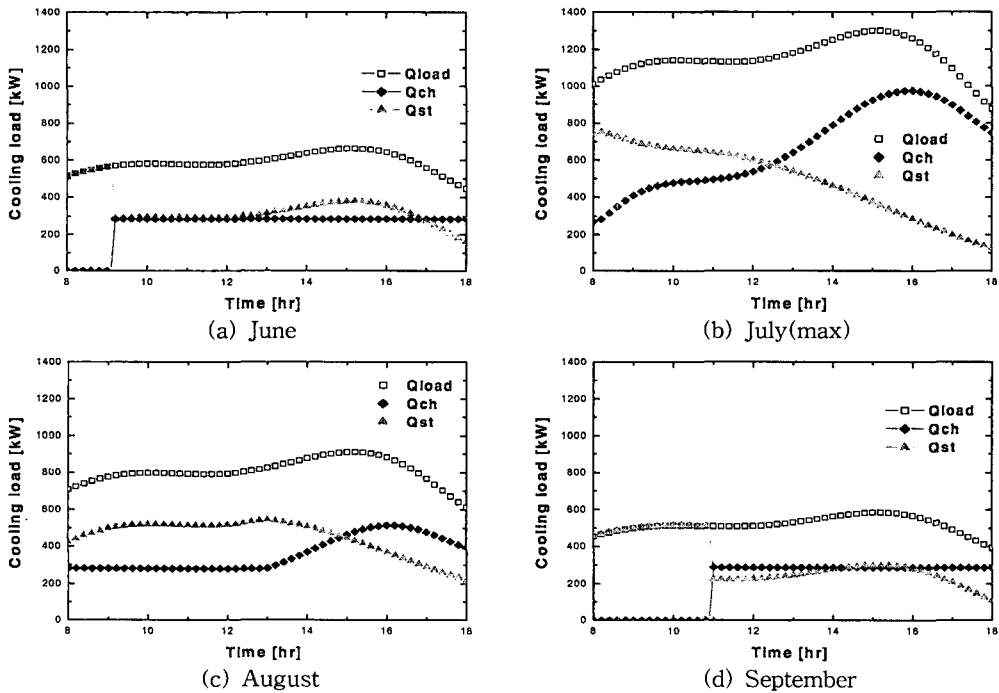


Fig. 5 Load variation in storage priority and chiller downstream.

부분 부하운전율이 최소 운전율보다 작아져 냉동기는 최소 부하운전율로 운전 되는 것을 알 수 있다. 이는 시스템 제어방법에 의한 것으로 축열조가 냉방부하를 담당하지 못하여 냉동기가 최소 부하운전율로 운전하게 되면 정지하게 되는 상황이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위한 제어 특성이 나타남을 알 수 있다. 7월 최대부하일의 경우 축열조는 축열조로의 유입유량을 제어하는 방법에 따라 운전되며, 냉동기는 축열조가 담당하는 부하를 제외한 나머지 변동부하에 대하여 운전됨을 알 수 있다. 8월 평균부하일의 경우 방열 운전 초기에 냉동기는 최소 부하운전율로 운전하게 되고, 축열조의 저장량이 충분치 못한 시점부터 축열조의 열교환량은 줄어들고, 냉동기의 부하 처리량은 증가하는 것을 알 수 있다. 9월 평균부하일의 경우 방열운전 시작 후 3시간까지는 축열조의 단독운전이 이루어지나, 3시간 이후부터는 축열조의 저장량이 충분하지 못하여 냉동기는 최소 부하운전율로 운전하게 되고 나머지 부하에 대해 축열조에서 담당하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 축열조우선 및 냉동기하류(SPCD) 방식의 운전특성을 나타낸다. 6월 평균부하일과 7월 최대부하일의 경우 축열조우선 및 냉동기상류(SPCU) 방식과 동일한 시스템 운전특성을 나타내며, 8월 평균부하일의 경우 축열조우선 및 냉동기상류(SPCU) 방식의 운전특성과 다른 특성을 나타낸다. 이는 배치방법에 따른 운전특성으로 냉동기상류 방식의 경우 냉동기에서 부하를 먼저 담당하게 되어 냉동기에서 냉방부하 처리율을 높일 수 있는 반면, 냉동기하류 방식의 경우 축열

조에서 먼저 열교환이 이루어지기 때문에 상대적으로 냉동기의 담당 부하량이 적어 냉동기는 방열운전 시작 후 약 5시간 최소 부하운전을 하게 됨을 알 수 있다. 9월 평균부하일의 경우 축열조우선 및 냉동기상류(SPCU) 방식과 동일한 운전 특성이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 운전모드에 따른 6월 평균부하일 ~ 9월 평균부하일까지의 시스템 주간 운전율을 나타낸다. 시스템 주간 운전율은 냉동기의 방열일에 대한 냉방부하의 비로 냉동기 주간 사용량의 비중을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 7월 최대부하일에는 냉동기우선 및 냉동기상류(CPCU) 방식이 5.25로 타방식에 비해 높음을 알 수 있고, 9월 평균부하일의 경우 축열조우선 및 냉동기하류(SPCD) 방식의 시스템 주간 운전율이 타방식에 비해 최대 45% 향상됨을 알 수 있다. 이는 축열조의 열전달량이 많고 냉동기의 주간 사용량이 상대적으로 적어 시스템 주간 운전율을 높일 수 있음을 알 수 있다.

4.3 빙축열 냉방시스템의 운전비용 분석

2003년 한국전력에서 제공하는 심야전력 요금 체계는 오후 10시부터 다음날 오전 8시까지의 심야시간대에 26.9 원/kWh, 그외의 시간대에는 73.4 원/kWh의 요금이 적용된다.

본 연구에서는 각 운전방식에 따른 운전비용 비교를 위해 현재 40% 이상의 축열률에 대한 축열식 냉난방 시스템에 적용되는 심야전력 요금을 적용하였다. 운전비용은 심야전력요금과 주간전

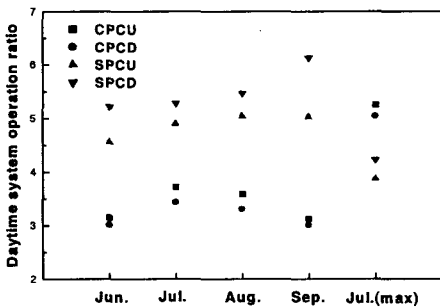


Fig. 6 Comparison of the daytime system operation ratio of each month.

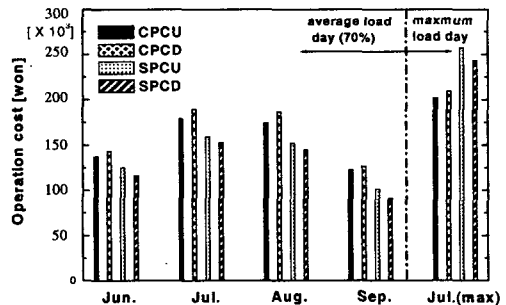


Fig. 7 Comparison of the operation cost of each month for four operation modes.

력요금의 합만으로 계산하였으며, 기본요금은 냉동기의 정격 소비전력에 의하여 결정되어 냉방부하의 감소와 관계없이 일정하므로 운전비용 계산에서 제외하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 7월 최대부하일(설계기준 부하일)의 경우 냉동기우선 및 냉동기상류(CPCU) 방식이 운전비용을 22% 절감할 수 있으며, 냉방부하가 70%이하인 6월~9월 평균부하일에 대해서는 축열조우선 및 냉동기하류(SPCD) 방식이 작은 운전비용으로 시스템을 운전 할 수 있다. 이는 냉동기의 주간 사용량과 부분부하 운전율에 의해 운전비용이 결정되어 상대적으로 냉동기의 주간 사용량과 부분부하 운전의 변동이 많은 방식에서 운전비용은 크게 나타났다. 배치방법에 따른 운전비용의 차이는 10%미만으로 나타나, 배치방법의 영향은 미미함을 알 수 있다.

5. 결론

성능실험에 근거한 냉동기와 축열조의 열적특성을 고려한 빙축열 냉방시스템의 운전 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 여름철 계절성능과 운전비용을 분석하였다.

냉동기우선 및 냉동기상류(CPCU) 방식과 냉동기우선 및 냉동기하류(SPCD) 방식의 시스템 운전특성은 6월, 9월 평균부하일의 경우 냉방부하가 작아 냉동기 단독운전이 가능함을 볼 수 있으며, 7월, 8월 부하일의 경우 냉동기 냉열출력보다 냉방부하가 상대적으로 커 축열조와 냉동기의 병렬운전이 이루어 진다.

축열조우선 및 냉동기상류(SPCU) 방식과 축열조우선 및 냉동기하류(SPCD) 방식은 6월, 9월 평균부하일의 경우 방열운전 초기에는 축열조내 저장량이 충분하여 축열조 단독운전이 이루어지나, 어느 시점 이후에는 축열조 단독으로 부하를 담당하기 어려운 정도로 빙축열량이 감소하고, 또한 냉동기의 부분 부하운전율이 최소 부하운전율보다 작아져 냉동기가 최소 부하운전율로 운전되는 것을 알 수 있다.

각 제어 방식간의 운전비용은 7월 최대부하일의 경우 냉동기우선 및 냉동기상류(CPCU) 방식이 운전비용을 22% 절감할 수 있으며, 7월 최대부하일을 제외한 6월 ~ 9월 평균부하일의 경우

축열조우선 및 냉동기하류(SPCD) 방식이 운전비용 절감 효과가 있는 것으로 보인다. 반면 배치방법에 따른 운전비용의 차이는 10% 미만으로 제어방법에 의한 차이보다 상당히 작게 나타났다. 따라서, 냉방부하가 큰 기간에는 냉동기우선 및 냉동기상류(CPCU) 방식을 이용하며, 부하가 작은 기간에는 축열조우선 및 냉동기하류(SPCD) 방식을 이용한 제어 방식을 채택함이 바람직할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국민대학교 2004년도 교내연구비의 지원에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌

1. Jung, C. S., 1993, Ice storage system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 101-108.
2. Kintner-Meyer, M. and Emery, A. F., 1995, Cost optimal analysis and load shifting potentials of cold storage equipment, ASHRAE Trans., Vol. 101, part 2, pp. 539-548.
3. Carey, C. W., Mitchell, J. W., and Beckman, W. A., 1995, The control of ice-storage systems, ASHRAE Trans., Vol. 101, part 1, pp. 1345-1352.
4. Lee, D.-Y., Jung, S.-H., and Kang, B. H., 1999, Comparative analysis of the minimum capacity of an ice-on-coil thermal storage system for various operation strategies, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 401-413.
5. Spethmann, D. H., 1993, Application considerations in optimal control of cool storage, ASHRAE Trans., pp. 1009-1015.
6. Braun, J. E., 1992, A comparison of chiller-priority, storage-priority, and optimal control of an ice-storage system, ASHRAE Trans., Vol. 98, part 1, pp. 893-902.
7. Simmonds, P., 1994, A comparison of energy consumption for storage priority and chiller

- priority for ice-based thermal storage systems, ASHRAE Trans., Vol. 100, part 1, pp. 1746-1753.
8. Kim, S., 1994, Development on the ice storage system using the night electric power, Report of KEPRI, KRC-90D-J03.
 9. Lee, D.-Y., Kang, B. H., and Kim, M. S., 1999, Prediction of practically chargeable cold energy in an ice storage system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 133-146.