

운전비 절감을 위한 빙축열시스템 냉동기 운전기법 평가

이 경 호[†], 최 병 윤^{*}, 이 상 렬^{**}

한국전력공사 전력연구원, ^{*}(주)HP시스템테크, ^{**}(주)리우스

An Evaluation of Chiller Control Strategy in Ice Storage System for Cost-Saving Operation

Kyoung-Ho Lee[†], Byoung-Youn Choi^{*}, Sang-Ryoul Lee^{**}

Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), KEPCO, Daejeon, Korea

^{*}HP system tech Co., Seoul, Korea

^{**}Leewoos Co., Yongin, Korea

(Received September 20, 2007; revision received November 23, 2007)

ABSTRACT: This paper presents simulated and experimental test results of optimal control algorithm for an encapsulated ice thermal storage system with full capacity chiller operation. The algorithm finds an optimal combination of a chiller and/or a storage tank operation for the minimum total operation cost through a cycle of charging and discharging. Dynamic programming is used to find the optimal control schedule. The conventional control strategy of chiller-priority is the baseline case for comparing with the optimal control strategy through simulation and experimental test. Simulation shows that operating cost for the optimal control with chiller on-off operation is not so different from that with chiller part load capacity control. As a result from the experimental test, the optimal control operation according to the simulated operation schedule showed about 14 % of cost saving compared with the chiller-priority control.

Key words: Ice storage system(빙축열시스템), Optimal control(최적제어), Cost saving(비용절감)

기 호 설 명

$ch-pr$: 냉동기 우선제어
 J : 최적화의 목적함수
 G : 유량 [m^3/hr]
 k : 시간적 단계
 N : 시간적 단계의 총 수
 Q : 열전달율, 열부하 [$kcal/hr$]
 RT : 냉동톤 [$1RT = 3,024 kcal/hr$]
 r : 전력요금 [$원/kWh$]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]

t : 시간 [hour]
 u : 시스템 제어변수
 W : 소비전력 [kW]
 x : 시스템 상태변수

하첨자

b : 브라인
 ch : 냉동기
 chg : 축열(charge)
 $dischg$: 방열(discharge)
 hx : 열교환기
 in : 입구측
 L : 부하

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-865-7665; fax: +82-42-865-5904

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

- min* : 최소값
- mix* : 혼합
- max* : 전부하
- out* : 출구측
- plant* : 냉방시스템 전체 설비
- set* : 설정값
- st* : 빙축열조
- tot* : 총합
- w* : 냉수측

1. 서 론

여름철의 전력수요는 건물의 냉방수요가 많은 부분을 차지하고 있다. 우리나라 전력계통의 피크 부하는 여름철에 발생하고 있으며, 피크시간대 전력수급의 안정을 위하여 전력피크를 감소시키기 위해서는 냉방수요에 대한 제어가 매우 중요하다. 특히, 최근에는 전 세계적으로 수요반응(demand response)을 통한 피크부하 관리에 대한 관심이 높아지고 있다.⁽¹⁾ 수요반응이란 요금이나 지원금에 따른 전력수요 반응의 특성을 이해하여 피크 부하를 줄이려는 목적 등으로 전력수요를 관리 및 제어하는 것을 의미한다.

빙축열시스템은 심야전력을 이용하여 얼음을 저장하여 두고, 여름철 전력수요가 높은 시간대에 냉방에 이용함으로써 낮 시간대의 전력수요를 심야시간대로 이전할 수 있는 냉방설비이다. 지금까지 빙축열시스템의 운전제어기법에 대한 많은 연구가 이루어졌다.^{(2-3), (5-7)} 하지만, 빙축열시스템을 피크시간대 부하를 줄이기 위한 직접부하제어⁽⁸⁾에의 이용 등에 대한 연구가 진행된 바가 없다. 심야시간의 전기를 이용한 빙축열조의 저장열량은 전력회사의 원격 on-off식 직접제어 방식으로 최대한 피크부하 절감에 이용하여 전력부하 안정화를 위하여 활용할 수 있을 것이다. 이러한 방식으로 빙축열시스템을 이용하여 피크부하 절감을 피하는 프로그램에 있어서 운전비용을 절감할 수 있는 부가적인 서비스 형태로의 제어기법이 개발되어 피크절감이 필요치 않은 시기에 이용할 수 있을 것이다. 한편, 시스템 사용자측면에서는 on-off제어에 의하여 냉동기의 부분부하 운전을 회피함으로써 보다 효율적인 냉동기의 운전이 가능할 것이며, 현장 적용측면에서 더욱 용이한 제어기법이 될 것이다.

본 논문은 빙축열시스템의 냉방운전에 대하여 냉

동기운전을 on-off로 제어하면서 냉동기 가동시에는 전부하(full capacity)로 운전하도록 하여 부분부하운전에 의한 비효율성을 배제한 효율적 운전을 도모하고, 냉동기 가동시간을 결정함에 있어서 시스템의 운전비용을 최소화하기 위한 운전기법을 적용하여 시뮬레이션과 실험실 규모에서 적용 시험한 결과로부터 운전비 절감효과를 비교분석하고자 한다.

2. 빙축열 냉방시스템의 개요

빙축열 냉방시스템의 구성요소는 크게 빙축열조와 냉동기로 나누어 볼 수 있다. 빙축열시스템의 구분은 열교환기를 기준으로 한 빙축열조와 냉동기의 상대적 위치에 따라서 냉동기 상류방식과 냉동기 하류방식으로 나눌 수 있으며, 제빙방식에 따라서 정적 제빙형과 동적 제빙형으로 구분되어지고 정적 제빙형에는 캡슐형, 판외착빙형 등이 해당되며, 동적 제빙형에는 아이스 슬러리형이 사용되고 있다. 빙축열시스템의 운전방식으로는 냉동기 우선운전과 빙축열 우선운전 방식⁽²⁾ 등으로 나눌 수 있고, 운전모드별로는 냉동기 단독운전, 빙축열조 단독운전, 동시운전 모드가 있다. Fig. 1에 본 논문에서 대상으로 한 냉동기 하류방식의 빙축열시스템의 개략적인 구성을 나타내었다.

3. 운전최적화

본 논문에서의 빙축열시스템 운전최적화는 운

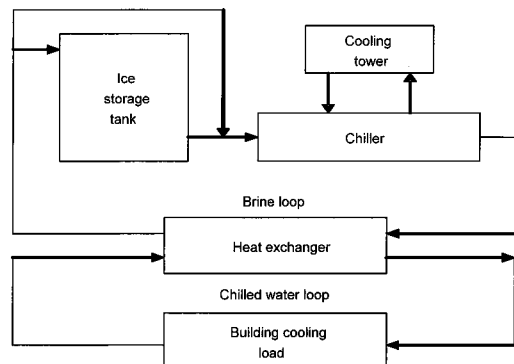


Fig. 1 Schematic of chiller-downstream ice storage system.

전하기 전에 이미 그날의 냉방부하를 예측한 후에 이 냉방부하를 만족하면서, 하루 중 운전비용을 최소화하기 위하여 냉동기와 빙축열조가 냉방부하를 어떻게 담당할 것인가를 계획하는 것으로 정의한다. 그러므로, 본 연구에서 건물의 다음날 냉방부하는 미리 정확히 예측된 것으로 가정한다. 냉동기는 용량제어를 하지 않고, 기동 및 정지를 통한 운전을 하는 것으로 하였다. 이러한 운전제어방식은 향후 시스템의 원격제어에 의한 제어에 활용이 가능할 것이며, 또한 냉동기 운전에서 있어 비효율적 요소인 부분부하 운전을 배제하기 위한 시도이다.

빙축열시스템의 상태방정식은 빙축열조에 대한 열평형으로부터 다음 식(1)과 같이 쓸 수 있다.⁽⁵⁾

$$x(k) = x(k-1) + u_{st}(k)\Delta t \quad (1)$$

위 식에서 빙축열조 제어변수 $u_{st}(k)$ 는 $Q_{st}(k)/Q_{st,max}$ 으로서, 건물 냉방을 위한 방냉시 방냉용 $Q_{st}(k)$ 는 음의 값을 갖으며, 심야시간대의 축열시에는 양의 값을 갖는다. Δt 는 임의의 시간간격이며, $x(k)$ 는 어떤 시간 k 에서의 빙축열조내 축열량을 총 축열량으로 나누어준 상태변수이다.

시스템의 운전에서 필요한 제한조건은 냉방운전에 대하여 다음과 같이 설정하였다.

$$Q_{ch}(k) + Q_{st}(k) = Q_L(k) \quad (2)$$

$$0 \leq x(k) \leq 1 \quad (3)$$

$$0 \leq u_{st} \leq 1 \quad (4)$$

$$u_{ch}(k) = 0 \quad \text{or} \quad 1 \quad (5)$$

$$T_{ch,out}(k) \geq T_{ch,out,set,dischg} \quad (6)$$

식(5)의 $u_{ch}(k)$ 는 냉동기에 대한 제어변수로서 냉동기는 on-off제어가 될 수 있도록 제어변수 $u_{ch}(k)$ 는 0 또는 1 중 한 값을 갖도록 한다.

축열운전에 있어서 축열완료 이전까지에 대하여 다음과 같은 조건이 적용된다.

$$Q_{ch}(k) + Q_{st}(k) = 0 \quad (2-1)$$

$$0 \leq x(k) \leq 1 \quad (3-1)$$

$$u_{st}(k) = 1 \quad (4-1)$$

$$u_{ch}(k) = 1 \quad (5-1)$$

$$T_{ch,out}(k) \geq T_{ch,out,set,chg} \quad (6-1)$$

식(2-1)과 같이 축열기간 중에 냉방부하는 없는 것으로 하였으며, 식(5-1)에서는 냉동기가 축열 완료조건까지 계속 가동되도록 하였으며, 식(4-1)에 나타낸 바와 같이 빙축열조 제어변수는 1로 두어 모든 브라인 유량은 빙축열조를 통과하도록 한다.

빙축열시스템의 운전비용을 최소화시키려는 최적화 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁵⁾

$$\text{Minimize} : J = \sum_{k=1}^N r(k) W_{plant}(k)\Delta t \quad (7)$$

위 식에서 $W_{plant}(k)$ 는 임의의 계산단계 k 에서의 냉동시스템의 총 소비전력으로서 냉동기, 브라인 펌프, 냉각수펌프, 냉각탑 등에 의한 소비전력의 합으로 구해진다. N 은 하루에 해당하는 시간단계의 총수(total number)로 하였다. 이러한 최적화 문제를 풀기 위하여 Lee et al.⁽⁵⁾이 적용한 바 있는 동적계획법(Dynamic programming)을 이용하였다.

4. 운전 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 모델

본 연구에서 적용대상으로 한 빙축열조는 캡슐형 빙축열조이며, 이에 대한 수학적 모델은 Lee et al.⁽⁶⁾이 발표한 빙축열조 모델을 이용하였다. 냉동기의 모델은 Lee et al.⁽⁵⁾에 의하여 실험적 데이터를 이용한 부분부하-전력소비모델을 사용하였다. 브라인펌프, 냉각탑, 냉각수펌프 등의 소비전력은 냉동기 작동과 함께 정격용량으로 소비되는 것으로 가정하였다.

본 논문에서의 운전 시뮬레이션에 사용된 시스템 구성요소의 용량과 냉방부하는 Lee et al.⁽⁵⁾의 연구에서와 동일한 시스템 용량과 냉방부하 유형 두가지의 경우를 고려하였다. 두 냉방부하 중 하나는 '고부하(Higher load)'라고 하고, 다른 하나는 '저부하(Lower load)로 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.

본 시뮬레이션에서 사용한 전력요금은 Lee et al.⁽⁵⁾의 연구결과와 비교하기 위하여 주간시간대의 76.8원/kWh와 심야시간대의 26.2원/kWh이 사용되었다.

4.2 시뮬레이션 결과

빙축열시스템에 대한 최소비용을 위하여 제3절에서 기술한 최적운전기법을 종래 운전방식이라고 할 수 있는 냉동기우선 운전기법과 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 고부하 냉방부하 조건에 대한 냉동기와 빙축열조 부하를 냉동기우선과 최적화 운전기법에 대하여 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 냉동기우선 운전에서는 항상 냉동기 부하가 냉방부하보다 작은 범위에서 최대냉각용량으로 운전된다. 최적운전방식에서는 냉방운전 초기에는 빙축열조 단독으로 냉방부하를 담당하다가 어느 시점에서부터 냉동기와 빙축열조가 동시운전하는 모드로 유지되도록 계획되었다. 이러한 결과는 최적화 알고리즘으로부터 운전비용이 최소가 될 수 있는 운전경로를 찾아내는 과정에서 빙축열조에 축열량이 충분한 초기에는 빙축열조를 최대한 활용토록 하고, 냉방부하를 만족하기 위하여 빙축열조 단독으로는 어렵게 되면 빙축열조 내에 남아있는 잔여 축열량을 최대한 활용하면서 냉방부하를 만족할 수 있도록 동시운전이 되도록 계획이 된 것으로 볼 수 있다. 한편, 이와는 반대로 초기에 동시운전으로 시작하여 어느 시점에서 빙축열조 단독운전과 같은 운전계획이 수립되지 않은 이유는 빙축열조 내 축열량에 따른 최대 방열가능량이 감소하는 특성에 의하여 냉방시간대 말기로 갈수록 냉방부하조건을 만족하기 어려워질 수 있기 때문으로 생각된다. 저부하 냉방부하조건에 대한 최적화운전 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 고부하 조건과 유사한 운전계획이 얻어졌으며, 냉동기 가동시간이 뒤로 늦추어져 빙축열조의 단독운전시간이 더 증가되었다.

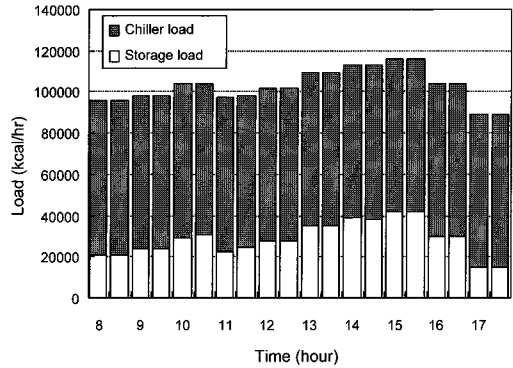


Fig. 2 Simulated loads of chiller and storage in chiller priority for a higher load day.

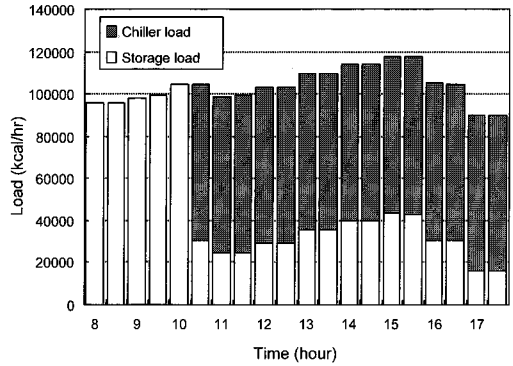


Fig. 3 Simulated loads for chiller and storage in optimal control for a higher load day.

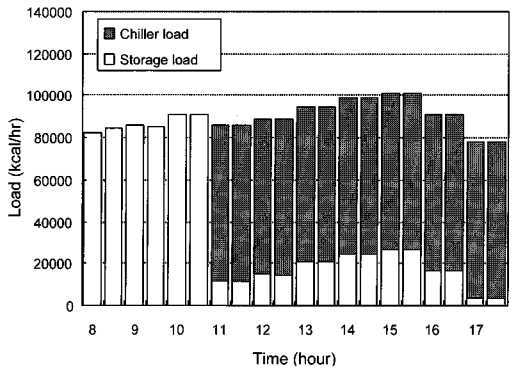


Fig. 4 Simulated loads of chiller and storage in optimal control for a lower load day.

이상의 결과로부터 냉동기의 가동이 시작되는 시간이 중요한 요소가 된다는 것을 짐작할 수 있을 것이다. 그러므로, 냉방부하를 만족하면서 비

용을 절감하기 위한 운전을 계획함에 있어서 냉방부하의 예측 정확도가 매우 중요함을 알 수 있으며, 냉방부하 총량 예측뿐만이 아니라 시간에 따른 냉방부하 예측 또한 중요하다고 할 수 있다.

냉동기우선과 최적운전의 각 방식에 대한 전력 사용량과 운전비용을 Table 1과 Table 2에 고부하와 저부하에 대하여 나타내었다. 이들 냉방부하 조건에 있어서 냉동기우선 방식에 대한 최적 운전방식의 운전비용 절감율은 약 8% 정도로 계산되었다. 이러한 운전비용 절감은 냉방부하의 패턴과 시스템의 설계 용량에 따라 달라질 수 있을 것이다.

운전비용 절감효과를 냉동기 부분부하 용량제어를 고려한 Lee et al.⁽⁶⁾의 최적운전비용 시뮬레이션 결과와 비교하면, 고부하와 저부하 조건에서 각각 1.3%와 1.8% 정도의 운전비용만이 증가했음을 알 수 있다. 즉, 냉동기의 부분부하운전제어를 배제한 가동-정지 방식에 의하여 구속조건이 더 강화되었지만, 냉동기 가동시간을 잘 이용함으로써 운전비용 절감에 큰 손실없이 비용효과적인 운전이 가능할 것으로 보인다.

5. 실험실 시험

5.1 운전제어 시스템

최적운전 제어시스템의 구성은 크게 최적운전 계획 프로그램과 MMI(Man-Machine Interface) 프로그램으로 이루어져 있다.

MMI 프로그램은 빙축열시스템 설비와 최적운전계획 프로그램을 상호연결하며, 센서 등으로부터 시스템 운전상태를 운전자에게 보여주는 기능을 한다.

최적운전계획 프로그램은 냉방운전이 시작되기 이전에 냉방운전계획을 수립하며, 30분 단위로 운전계획은 새로이 수정이 되도록 하였다. 최초에는 운전계획이 냉방기간 전체에 대하여 수립이 되며, 30분 운전 후에는 축열장량을 계산하여 남은 시간에 대하여 새로이 운전계획을 수립한다.

5.2 실험용 빙축열시스템

실험에 사용된 빙축열시스템의 주요 구성요소는 냉동기, 냉각탑, 캡슐형 빙축열조, 브라인 펌프, 냉수펌프, 열교환기 등이다. 본 실험용 빙축열시스템의 빙축열조와 냉동기 용량은 앞서 설명한 시뮬레이션에서 사용된 시스템에서의 빙축열조와 냉동기 용량과는 차이가 있다.

Table 1 Simulated energy consumption and operating costs for a day with higher loads

	Period	Energy (kWh)	Cost (won)
Chiller priority	Cooling	475.07	36,485
	Charging	324.41	8,500
	Total	799.47	44,985
Cost optimal	Cooling	385.95	29,640
	Charging	443.49	11,620
	Total	829.44	41,260

Table 2 Simulated energy consumption and operating costs for a day with lower loads

	Period	Energy (kWh)	Cost (won)
Chiller priority	Cooling	475.28	36,501
	Charging	225.91	5,919
	Total	701.19	42,420
Cost optimal	Cooling	386.15	28,273
	Charging	392.43	10,574
	Total	778.58	39,027

냉각탑의 형식은 스크류 압축식 냉동기로서 냉각운전에서의 냉동능력에 냉동기로 통하는 브라인 입구 및 출구온도 10℃, 6.5℃를 기준으로 하고, 냉각수 입구 및 출구온도 32℃, 37℃ 조건에서 130,100 kcal/hr이며, 소비전력은 40.1 kW이다. 축냉운전에서의 냉각출력은 86,000 kcal/hr, 소비전력은 38.7 kW이다. 캡슐형 빙축열조의 체적은 21.9 m³으로서 가로, 세로, 높이는 각각 2.5 m, 2.5 m, 3.5 m의 직육면체형 탱크이다. 총 축열량 설계치는 737 Mcal(243.8 RT-hrs)이며 잠열분은 635 Mcal(210 RT-hrs)이고, 빙축열조에 담겨진 캡슐의 총 개수는 17,000개이다. 냉각탑의 형식은 대향류형이며, 냉각능력은 120,960 kcal/hr(40 RT)으로 냉각탑 팬의 소비전력은 0.75 kW이다. 브라인 순환용 펌프 구동모터의 동력은 15마력이다.

5.3 측정 장치

개발된 최적운전계획 알고리즘은 실험실규모

빙축열시스템에 적용되어 운전을 시험하였다. 실험실규모 시험이므로 냉방부하는 보일러를 이용하여 온수를 저장하고 임의의 부하를 생성하기 위한 온수의 온도를 제어하여 열교환기를 통과시켜 브라인과 열교환되도록 하였다. 운전자는 밸브개도상태, 냉동기 On-off상태, 펌프 운전상태, 냉각탑 운전상태 등을 MMI 프로그램을 통하여 감시하고 제어할 수 있도록 구성하였다.

냉방부하는 판형 열교환기를 통하여 냉방시스템에 부가되며 설계 열교환용량은 151,200 kcal/hr 이다.

운전제어장치로서 시스템의 운전시에 시험데이터를 취득하고 기기의 작동상태를 감시하며 최종적으로 얻어진 최적제어기로 시스템의 운전을 제어할 수 있는 측정 및 제어 시스템을 구성하였다. 이러한 측정데이터, 기기의 작동상태 및 제어 신호의 송수신은 MMI 프로그램을 통하여 이루어진다.

각 위치의 유체 온도의 측정에는 Pt 100Ω 백금선 저항온도센서를 사용하였다. 온도센서는 냉동기 브라인의 입출구, 냉동기 냉각수 입출구, 빙축열조 입출구, 빙축열조 출구혼합위치, 열교환기 브라인측 입출구, 열교환기 브라인 측 출구혼합위치, 열교환기 부하측 입출구 등에 설치하였다. 측정 데이터의 신뢰성을 높이기 위하여, 측정시스템의 구성을 완성하고 센서를 웰(well)에 설치하기 전에 항온조를 이용하여 MMI에 표시되는 측정값을 기록하며 ± 0.1 °C의 정밀도로 보정시험을 수행하였다.

유량은 0~40 m³/hr의 유량범위의 오리피스 유량계를 사용하였다. 사용된 유량계는 국가교정검사기관에서의 보정시험을 수행하여 오차가 $\pm 0.5\%$ 이하임을 확인하였다. 유량계는 브라인의 총 유량, 브라인의 축열조 통과 유량, 브라인의 열교환기 통과유량, 냉동기의 냉각수 유량, 냉방부하용 냉수유량 등을 측정할 수 있는 각 위치에 설치하였다.

전력량은 전류변환기를 사용한 전력량계를 사용하여 냉동기의 소비전력과 시스템의 총 소비전력 데이터를 수집하였다.

빙축열조 내의 매순간 축열량은 축열조의 브라인 입출구 온도와 유량으로부터 계산한 방냉량의 누적값으로 구하였다.

5.4 시험방법

5.4.1 냉동기 운전

빙축열시스템 운전을 계획할 때, 운전모드는 기본적으로 냉동기 단독, 빙축열 단독 그리고 빙축열과 냉동기의 동시운전 모드로 구분 지을 수 있다. 냉동기가 가동상태이며 빙축열조 통과유량이 0%일 때 냉동기 단독모드가 되며, 냉동기 운전이 정지상태이고 빙축열조 통과유량이 0보다 클 때는 빙축열 단독모드이고, 냉동기가 가동상태이며, 빙축열조 통과유량이 0보다 크면 동시운전모드가 된다. 각각의 운전모드의 지정은 운전최적화의 계획결과에 따라 결정이 된다. 이러한 운전모드를 실제 운전에서 적용하기 위해서는 냉동기의 기동-정지를 위한 디지털 신호를 보내주어야 하고, 빙축열조 통과유량을 제어하는 밸브에 설정온도를 운전모드에 따라 달리 설정하여 주면 된다. 즉 냉동기 단독모드가 결정이 되면 냉동기를 가동하도록 하고, 빙축열조측 3방 밸브는 모두 바이패스 되도록 개폐를 제어하면 된다. 그리고 빙축열 단독모드를 위해서는 냉동기를 중지시키고 빙축열조측 3방 밸브는 출구혼합온도($T_{st,mix}$)를 설정값인 온도 3 °C정도가 되도록 하여 열교환기 냉수측 출구온도가 7 °C가 유지되기에 충분하도록 제어하여 준다. 동시운전모드에서는 냉동기를 가동시키고, 빙축열조측 3방 밸브는 출구혼합온도가 6 °C 정도가 되도록 설정하여 제어하도록 하여준다.

5.4.2 시험운전 조건

시스템의 배치방식은 냉동기하류 방식이다. 시험에 사용한 냉방부하는 설계냉방부하보다 작은 부하형태를 사용하였다. 전력회사의 입장에서는 설계냉방부하 수준의 더운 여름의 짧은 기간에는 피크부하관리를 위한 운전기법이 필요하고, 한편으로 건물주 입장에서는 그 외의 냉방기간에는 운전비용절감을 위한 운전기법이 요구될 것이다. 시뮬레이션에 사용된 시스템의 용량보다는 실험용 빙축열시스템의 용량이 다소 크므로, 냉방부하는 시뮬레이션에 사용하였던 부하보다 더 큰 값을 갖도록 하였다. 시스템의 운전은 30분 간격으로 제어되지만, 냉방부하는 1시간 간격으로 변화하는 것으로 설정하였으며, 실제로 건물의 냉방부하는 그다지 동적이지는 않으므로 1시간 간

격으로 변하는 것으로 보아도 무방할 것이다. 냉방부하 발생시간은 하루 중 9시부터 오후 6시까지 9시간으로 하였다.

운전시험의 시작은 시험 전날 빙축열조에 대하여 완전축열운전을 하여둔 상태에서 냉방운전이 시작되는 시점으로 하였고, 운전의 종료시점은 냉방운전 후 다시 축열운전을 하여 냉동기의 축열 종료조건에 의하여 제빙운전을 마치는 시각으로 하였다.

5.5 시험 결과

제 5.4절에서 설명한 실험용 빙축열시스템과 이에 대한 모델을 이용한 최적운전 알고리즘 및 냉동기우선 운전방식 등 두 가지의 운전계획을 적용한 운전제어 시험을 수행하였다. 냉동기 우선 방식과 최적운전 방식에 의한 운전시험에서의 측정된 냉동기 소비전력과 각종 기기에 대한 소비전력을 그에 합한 총 소비전력을 Fig. 5에 나타내었다. 소비전력의 값이 울퉁불퉁한 형상을 나타내는 것은 냉각탑의 가동정지에 따른 냉수의 온도변화에 따른 것으로 보인다. 냉동기 우선 운전방식의 경우 냉방기간 중 냉동기가 큰 변화없이 일정하게 전부하로서 운전이 되며, 최적운전 방식에서는 냉동기의 가동이 냉방시작 3시간 이후에 가동되는 것으로 운전알고리즘에 의하여 계획되었고, 이러한 계획에 따라 12시에 냉동기가 가동되어 그 이후로는 최대냉각용량으로서 운전이 되었다. 냉방운전 중의 주요 지점에 대한 온도변화를 냉동기우선과 최적운전의 경우에 대하여 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다.

열교환기입구 브라인온도는 3℃ 정도로 유지되었고, 열교환기 냉수측 온도 또한 7 내지 8℃가 유지되어, 주어진 냉방부하를 두 운전방식에서 모두 잘 만족시켰음을 알 수 있다.

축열조 통과유량변화와 총유량변화를 Fig. 8에 냉동기우선과 최적운전에 대하여 함께 나타내었다. 냉동기우선 방식에서 축열조 통과유량은 큰 변화가 없으나, 최적운전방식에서 초기의 3시간 가량은 빙축열조 단독으로 냉방부하를 만족시키기 위하여 급격하게 축열조 통과유량이 증가되었으며, 그 이후로는 동시운전모드로서 유량이 감소되어 유지되었다.

운전시험을 통한 빙축열시스템의 전기에너지

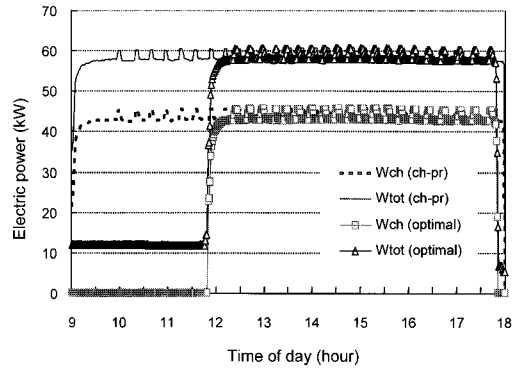


Fig. 5 Measured electric powers variation for chiller priority and optimal control during cooling period.

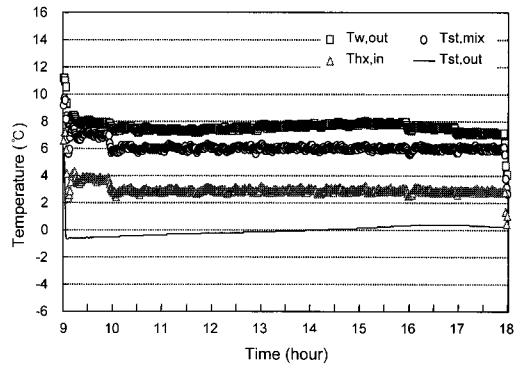


Fig. 6 Measured temperatures variation for chiller-priority control.

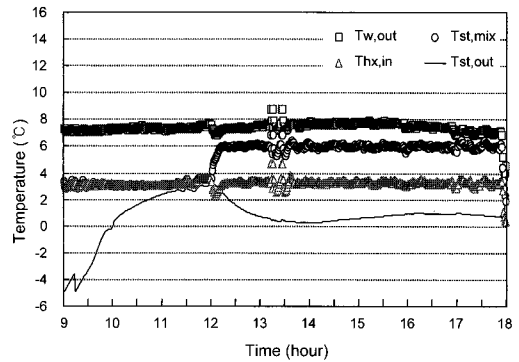


Fig. 7 Measured temperatures variation for optimal control test.

소비량과 운전비용을 Table 3에 비교하였다. 최적방식으로 운전한 경우에 냉방기간 중 전기에너지

Table 3 Comparison of measured energy consumption and operating cost a day for chiller-priority and optimal control

	Period	Energy (kWh)	Cost (won)
Chiller priority	Cooling	525.79	40,381
	Charging	475.48	12,458
	Total	1,001.27	52,839
Cost optimal	Cooling	386.22	29,662
	Charging	604.96	15,850
	Total	991.18	45,512

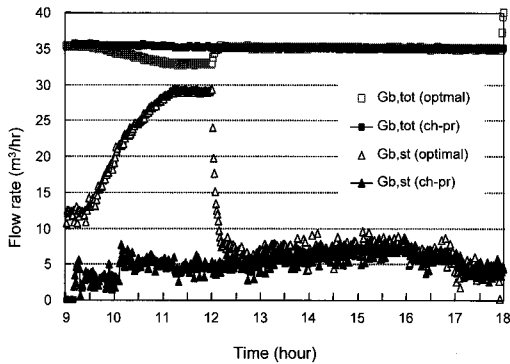


Fig. 8 Measured flow rates variation for chiller-priority and optimal control.

지 소비량은 축열기간에 비하여 더 낮지만, 전력 요금에 의하여 축열기간 운전비용이 더 낮게 나타났다. Table 3에 나타난 바와 같이 운전알고리즘에 의한 운전계획을 실험용 빙축열시스템에 적용한 결과, 운전비용 절감은 약 14%이었다. 전기요금단가는 Lee et al.⁽⁵⁾이 사용한 요금단가와 같은 값을 적용하였으며, 단가에 따라 운전비 절감은 다소 달라질 수 있다. 전력소비량과 운전비용 측면에서 보면, 낮 시간의 냉방시간대 전력사용량 측면에서는 최적운전기법에서 더 많은 소비량을 보였지만, 심야전기요금 단가가 냉방시간대에 비하여 더 낮기 때문에 축열과정 중 전력을 많이 소비하였지만, 전기요금단가가 더 높은 냉방시간대에 소비전력량을 절감할 수 있었다. 이와 같이 빙축열시스템의 운전비용 절감은 전기요금체계에 따라 크게 좌우되므로, 전기요금체계의 적절한 지원이 빙축열시스템에 의한 전력수요를 이전하는데 주요한 영향을 미치며, 이에 따른 수요반응

을 적절히 제어함으로써 피크부하 절감을 위한 운전과 운전비용 최적운전의 효과를 극대화할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 비교대상으로서 냉동기 우선 운전기법을 사용하였으나, 실제 빙축열 냉방시스템의 운전자는 중저부하의 덜 더운 여름의 날씨 조건하에서는 나름대로의 경험적인 운전기법을 사용할 것이므로, 운전절감효과는 이러한 운전자의 경험에 의한 기존운전방식에 따라 다소 달라질 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 실험실 규모의 빙축열 시스템에 대하여 냉동기의 전부하 가동-정지(on-off) 운전방식을 고려한 최적운전기법을 시뮬레이션하고, 시험설비에 적용 시험하여 냉동기우선 운전방식과 비교하였다. 시뮬레이션 결과에서는 냉동기의 부분부하운전을 고려한 최적운전기법에 비하여 냉동기 on-off제어에 의한 최적운전기법의 운전비용이 약 2% 미만 정도로 증가할 것으로 나타나 운전비용 효과적인 측면에서 비슷한 성능을 나타내어, 냉동기의 on-off운전에 의한 최적운전계획을 통하여 최적운전에 가까운 비용절감을 이룰 수 있을 것을 알 수 있었다. 실험용 빙축열시스템을 대상으로 하여 냉방 9시간 운전과 축열운전을 포함한 일일주기의 하루 운전시험결과, 최적운전기법으로 운전된 경우의 운전비용이 기존 냉동기우선운전에 비하여 총 운전비용 약 14% 정도가 절감됨을 보였다.

본 연구에서는 운전계획수립 이전에 이미 다음 날에 대한 건물의 냉방부하가 예측이 된 것으로 가정하였으므로, 개발된 운전알고리즘을 실제 건물의 냉방운전에 적용하기 위해서는 외기환경예측 및 냉방부하예측 프로그램⁽⁸⁻⁹⁾과의 통합된 적용이 필요하다.

빙축열시스템의 구성면에 있어서는 빙축열조의 방냉측면에서 효율적인 냉동기 하류방식에 대한 경우만 본 논문에서 검토되었으나, 냉동기 운전 효율측면에서 우수한 냉동기 상류방식에서의 빙축열 우선운전 방식에 대해서도 면밀한 비교검토가 필요할 것이다.

또한 매우 더운 여름철의 경우 설계부하에 근접하는 부하 발생시기에는 운전기법에 따라 운전

비용에 있어서 큰 차이는 없을 것으로 보이므로, 연간 표준기후 데이터와 건물에 대한 냉방부하모델 그리고 빙축열시스템 모델을 연계한 1년의 기간에 대한 냉방운전을 시뮬레이션하고, 이에 대한 운전비용 비교를 통하여 경제성 분석이 이루어진다면 매우 유용한 자료가 될 것이다.

향후에는 하계 피크부하절감을 위한 프로그램으로서 빙축열시스템을 이용하기 위한 시스템 구성이나 빙축열시스템 사용자의 수요반응(DR, demand response)을 이용한 제어시스템에 대한 연구를 통하여 운전비용절감과 피크부하절감의 통합적 제어시스템에 대한 연구가 필요할 것이다. 즉, 전력피크수요가 냉방부하에 의하여 매우 높게 나타나는 기간에는 부하관리형 운전기법을 적용함으로써 피크시간대 냉동기 전력소비를 최소화시키도록 할 수 있을 것이다. 또한 이러한 운전기법이 적용될 수 있도록 전력회사 또는 정부의 수요관리 프로그램에 의한 인센티브 등의 지원제도가 우선 마련되어야 할 것이다. 한편, 부하관리기간 이외의 기간에는 빙축열시스템의 냉방 운전비용을 절감할 수 있는 운전기법을 적용할 수 있다.

참고문헌

1. Demand response, Lawrence Berkeley Laboratory, <http://eetd.lbl.gov/ea/drlm-pubs.html>.
2. Braun, J.E., 1992, A comparison of chiller-priority, storage-priority, and optimal control of an ice-storage system, ASHRAE Transactions, Vol. 98, Pt. 1, pp.893-902.
3. Jung, S.H., Lee, D.Y., Kang, B.H. and Kim, W.S., 2000, Control strategy for economic operation of an ice-storage system considering cooling load variation, Korean Journal of Air-conditioning and Refriger-

- ating Engineering-Journal of the SAREK, Vol. 12, No. 2, pp.140-149.
4. 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.333-344.
5. Lee, K.H., Choi, B.Y., Joo, Y.J., Lee, S.R. and Han, S.H., 2000, Optimal scheduling of ice storage system with prediction of cooling loads, Korean Journal of Refrigerating and Air-Conditioning Engineering-Journal of the SAREK, Vol. 12, No. 11, pp.982-994.
6. Han, D. and Lee, J., 2005, Optimal control algorithms for the full storage ice cooling system, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering-Journal of SAREK, Vol. 14, No. 4, pp.350-358.
7. Ahn, Y.H., Kang, B.H., Kim, S. and Lee, D.Y., 2005, The operation characteristics and cost analysis of an ice thermal storage system, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering-Journal of SAREK, Vol. 17, No. 2, pp.156-164.
8. Shin, K.W. and Lee, Y.S., 2002, The study on cooling load forecasting using neural networks, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering-Journal of SAREK, Vol. 14, No. 8, pp.626-633.
9. Yoo, S.Y., Lee, J.M, Han, K.H. and Han, S.H., 2007, A study on prediction of temperature and humidity for estimation of cooling load, Vol. 19, No. 5, pp.394-402.