

부분축열식 빙축열시스템의 냉방에너지소비 절약을 위한 냉동기 On-off제어기법의 평가

이경호, 최병윤, 이상렬, 한승호
한국전력공사 전력연구원

Evaluation of Chiller On-off Control of Partial Ice Storage System for Energy Saving in Cooling Operation

Kyoung-Ho Lee, Byoung-Youn Choi, Sang-Ryoul Lee, and Seung-Ho Han
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI), KEPCO

Abstract

This paper describes an operation strategy of ice storage systems for energy saving during building cooling. In this study chiller is assumed not having function of part load control. Thus, it is needed to adopt on-off control with the objective function of summed energy consumption for minimum energy consumption. A conventional control strategy compared with the chiller on-off control is chiller-priority control. In this control chiller operates as its full capacity and ice storage meets the rest of the cooling load.

1. 서론

빙축열시스템은 여름철 피크 전력수요의 심야시간대로의 이전을 통한 부하 평준화를 위하여 이용되고 있다. 비축열식 냉방시스템에 비하여 초기 투자비용이 더욱 많이 소요되므로 주요 구성요소의 용량 감소를 위한 연구개발이 필요하다. 또한 운전 에너지비용 절감을 위해서는 경제적 운전전략에 대한 연구가 요구된다.

빙축열시스템의 주요 구성요소 중의 하나인 냉동기는 빙축열조와 함께 냉방부하를 담당하게 되는데, 부분부하 용량제어 기능은 냉동기의 선택사항으로 되어 있으므로, 이러한 용량제어 기능이 없는 냉동기에 대한 적절한 운전전략이 필요하게 된다.

본 논문에서는 빙축열시스템의 에너지소비 절약을 피하고, 냉동기의 용량제어 기능이 없는 시스템의 운전기법에 대한 검토를 통하여, 기존 냉동기우선 제어기법에 비하여 에너지소비량을 절감할 수 있는 운전전략을 소개한다.

2. 빙축열시스템 개요

본 논문에서 대상으로 한 빙축열시스템 구성에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 시스템은 빙축열조, 냉동기, 브라인 펌프, 냉각탑, 열교환기 등으로 구성이 되어있다. 이러한 방식은 냉동기가 열교환기를 기준으로 빙축열조의 하류에 위치한 냉동기하류 방식으로 구분되어진다. 작동유체인 에틸렌글리콜 브라인은 열교환기에서 건물을 순환하는 냉수와 열교환

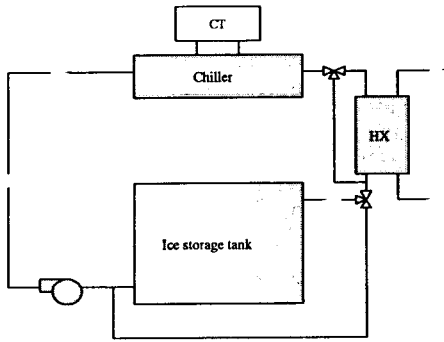


Fig. 1 Schematic of ice storage system

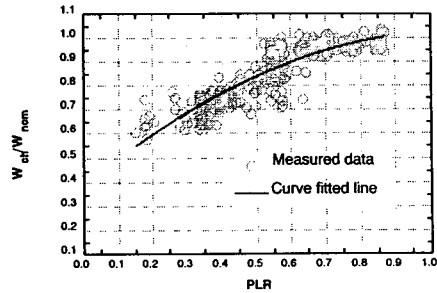


Fig. 2 PLR and electric power consumption of screw compressor chiller

하면서 부하를 공급하고, 빙축열조를 지나 온도가 낮아지고, 다시 냉동기를 거쳐 온도가 감소된 후, 열교환기로 흐르게 된다.

3. 시스템 모델

빙축열조의 주요 구성요소인 빙축열조는 캡슐형 빙축열 방식을 고려 대상으로 하였다. 빙축열조에 대한 방냉(discharge)모델은 Lee등[1]이 발표한 내용을 토대로 하였다. 이 모델에서는 빙축열조내부를 흐르는 브라인이 상단 분배관으로부터 균일하게 유동이 되도록 분배된다는 점을 고려하여 1차원적으로 단순화시켰으며, 단일캡슐의 방냉과정의 열전달계수값의 변화를 적용하였다. 이러한 모델을 운전제어 시뮬레이션에 이용하기 위하여 빙축열조를 통과하는 유량의 범위를 10%에서 100%까지 10%씩 달리하면서 출구온도변화를 계산하여 축열량의 변화에 따른 함수를 도출하였다.

냉동기는 스크류 압축식 냉동기를 대상으로 하였다. 냉동기는 냉동기 단독운전일 경우에는 부분부하운전이 가능하게 되는데, 다음과 같이 부분부하 운전에 따른 전력소비함수 모델을 수립하였다. 부분부하율 PLR 은 다음과 같이 정의하였다.

$$PLR = \frac{Q_{ch}}{Q_{ch, nom}} \quad (1)$$

냉동기의 전력소비는 다음과 같이 PLR 의 함수로 표현한다[2].

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

위 식에서 각 계수 A, B, C는 실험적으로 결정하였다. 냉동기의 부분부하에 따른 전력소비를 Fig. 2에 나타내었다. 여기에서 W_{nom} 은 공칭소비전력으로 $Q_{ch, nom}/COP_{nom}$ 으로 표현된다.

그외에 냉각수 및 브라인 펌프는 항상 정격으로 일정한 전력소비를 하는 것으로 가정하였다.

4. 운전제어 기법

4.1 운전 최적화 개요

빙축열시스템을 건물냉방에 최적적으로 운전하기 위해서는 이미 냉방운전이 시작되기 이전

에 운전계획을 수립한다. 그러기 위해서는 냉방운전기간에 해당하는 시간동안의 냉방부하가 미리 예측이 되어야 한다. 본 연구에서는 냉방부하는 정확하게 예측이 되어 있다고 가정한 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 부분부하에 따른 냉각용량과 빙축열조로부터의 방냉을 또는 방냉을 제어하는 3방밸브의 개도이다.

4.2 상태방정식

시스템의 상태방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x(k) = x(k-1) - \frac{Q_{st}(k)\Delta t}{Q_{st, cap}} \quad (3)$$

위 식에서 임의의 계산단계에서의 빙축열조로부터의 방냉을 $u(k)$ 는 양의 값을 취하도록 하고, Δt 는 임의의 시간간격이다. 상태변수 x 는 빙축열조내의 축열량을 설계 총 축열량으로 나누어준 무차원수이다.

4.3 제한조건

시스템의 운전에 필요한 제한조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$Q_{ch}(k) + Q_{st}(k) = Q_L(k) \quad (4)$$

$$0 \leq x(k) \leq 1 \quad (5)$$

$$0 \leq u_{st}(k) \leq 1 \quad (6)$$

$$Q_{ch, min}(k) \leq Q_{ch}(k) \leq Q_{ch, full} \quad \text{if } u_{st}(k) = 0 \quad (7-1)$$

$$u_{ch}(k) = 0, 1 \quad \text{if } u_{st}(k) \neq 0 \quad (7-2)$$

$$T_{ch, out}(k) \geq T_{ch, outset} \quad (8)$$

위 식(6)의 $u_{st}(k)$ 에 의하여 빙축열조로부터의 매 시간간격마다의 방냉율이 결정이 된다. 위 식(7-1)에서 냉동기의 운전용량 제어의 하한치는 냉동기 제작사에서 제시하는 값을 이용할 수 있다. 또한 냉동기는 빙축열조로부터 방냉이 이루어지는 동안에는 용량제어가 어려우므로, on-off제어가 될 수 있도록 제어변수를 0과 1로 설정한다. 그리고 식(8)의 냉동기 출구온도 하한치는 적절히 운전자가 가변할 수 있다.

4.4 목적함수

시간에 따라 일정간격으로 분할한 형태로서 하루 중 냉방운전에 소비되는 에너지를 최소화시키려는 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize : } J = \sum W_{plant}(k)\Delta t, \quad \text{for } 0 \leq k \leq N \quad (9)$$

위 식에서 $W_{plant}(k)$ 는 임의의 계산단계 k 에서의 냉동시스템의 총 전력소비로서 다음과 같이, 냉동기, 브라인 펌프, 냉각수펌프, 냉각탑 등을 포함한다.

$$W_{plant} = W_{ch} + W_{bp} + W_{cp} + W_{ct} \quad (10)$$

4.5 동적계획법(Dynamic programming)의 적용

본 연구에서 사용된 Dynamic programming 기법으로부터 최적운전경로인 최소 에너지소비량을 갖도록 하는 $u_{st}(k)$ 와 $u_{ch}(k)$ 값들이 때 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 최종시간단계에서 모든 가능한 상태변수에 대하여 모든 가능한 제어변수들에 다루는 문제가 된다. 각각의 상태변수에 대한 최적제어변수는 최소 에너지소비를 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.

$$C^*_{k,N}(x(k), u(k)) = J_{k,k+1}(x(k), u(k)) + J^*_{k+1,N}(x(k+1)) \quad (11)$$

$$u(k) = [u_{st}(k), u_{ch}(k)] \quad (12)$$

위 식(11)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 최소 에너지소비량을 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 에너지소비량을 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 비용함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J^*_{k,N}(x(k)) = \min_{u(k)} [C^*_{k,N}(x(k), u(x)))] \quad (13)$$

위 식에서 $J^*_{k,N}(x(k))$ 는 k 부터 N 단계에 대하여 특정한 $x(k)$ 에 대하여 어떤 $u(k)$ 에 의한 최소 에너지소비량을 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(4)과 식(8)까지의 제한조건을 모두 만족하여야 한다. 마지막 과정으로는 초기에 상태변수값이 주어진다면, 이로부터 다음 단계의 상태변수들을 찾아야 하며, 그 다음단계의 상태변수에 해당하는 최적 제어변수들의 조합이 최적운전 계획이 되는 것이다.

4.6 기존제어기법에의 적용

본 연구에서는 기존의 냉동기우선 운전에 있어서도 동적계획법을 적용하였다. 각 운전방식에 있어서의 목적함수는 각각 다음과 같이 다르게 적용함으로써 가능하다.

$$\text{Minimize: } J = \sum (Q_f(k) - Q_{ch}(k))^2, \quad \text{for } 0 \leq k \leq N \quad (14)$$

위의 목적함수 식(14)는 냉동기우선 운전을 위하여 적용이 된다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 냉방부하 및 시스템 용량

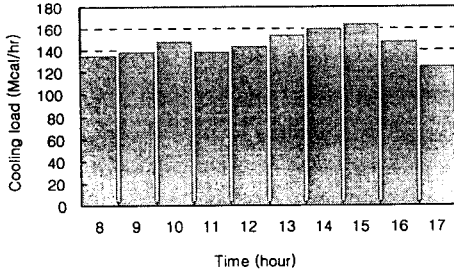


Fig. 3 Distribution of cooling loads for a design day during the period of building cooling

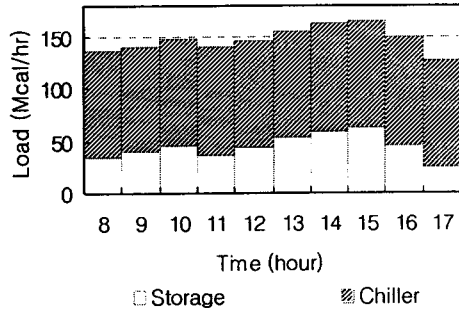


Fig. 4 Load meet in chiller-priority

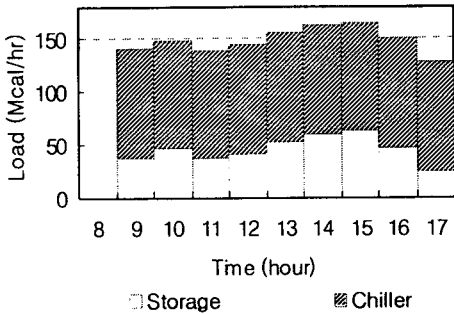


Fig. 5 Load meet in chiller on-off control

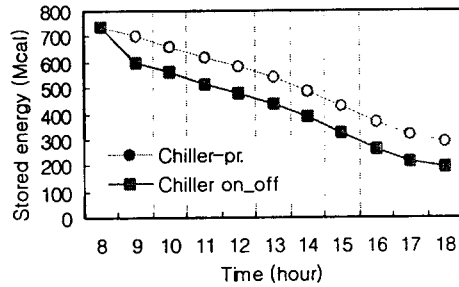


Fig. 6 Cool energy stored in the tank

계산에 사용된 냉방부하의 하루 중 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 최대부하는 161.7 Mcal/hr, 하루 적산부하는 1468.5 Mcal로서 부하율은 89%이다. 시스템의 용량은 냉동기의 공칭냉각용량 103,200 kcal/hr, 공칭 소비전력 31 kW, 빙축열조의 저장용량 737,251 kcal이며, 빙충전을 89%이다. 브라인 펌프는 공칭 전력소비가 11.9 kW, 냉각탑 팬 소비전력은 3.5 kW, 냉각탑 냉각수 펌프 소비전력은 2.5kW로 설정하였다.

5.2 결과 분석

계산결과를 Fig. 4부터 Fig. 6에 나타내었다. 냉동기와 빙축열조가 냉방부하를 만족시키는 각각의 부하를 기존제어기법인 냉동기우선에 대하여 Fig. 4에 나타내었고, 냉동기 on-off제어에 대하여는 Fig. 5에 나타내었다. 냉동기우선의 경우, 냉동기는 가능한 최대냉각용량으로서 운전되고, 나머지 냉방부하를 빙축열조를 이용하여 담당하고 있다. Fig. 5에서는 처음 1시간 동안은 냉동기를 정지시키도록 계획되었고, 나머지 9시간에는 냉동기가 최대냉각용량으로 운전되고 있으며, 나머지를 빙축열조로써 담당하도록 하고 있음을 알 수 있다. 그리고 두 가지 운전제어의 경우에 대하여 냉방시간에 걸쳐 빙축열조에 저장되어 있는 축열량의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 냉동기우선에 의한 운전보다 냉동기 on-off제어에 의한 운전의 경우가 냉방운전 종료 후 빙축열조에 남아있는 축열량이 더 작음을 알 수 있으며, 빙축열조

에 저장되었던 축열량을 더욱 많이 이용하였음을 알 수 있다.

한편, 냉동기우선과 냉동기 on-off제어기법에 의한 하루 냉방시간 중 에너지소비량은 각각 498.21 kWh와 460.36 kWh로서, 냉동기 on-off제어기법에 의한 운전이 냉동기우선에 의한 운전보다 에너지소비량을 절감시킬 수 있을 것으로 기대되며, 냉동기우선의 운전보다 약 7%정도 전기에너지 소비가 절감될 것으로 계산이 되었다.

6. 결론

본 논문에서는 부분부하 용량제어 기능이 없는 냉동기로 구성이 된 부분축열식 빙축열시스템에 대한 운전제어를 위하여 동적계획법을 적용함으로써 최적운전에 대한 계획을 시뮬레이션을 통하여 수립하는 것에 대하여 검토하였다. 계산의 범위는 하루 중 최대냉방부하 161.7Mcal/hr를 갖는 10시간의 냉방시간대만을 포함하였으며, 냉동기는 on-off제어가 될 수 있도록 하였고, 빙축열조는 캡슐형에 대하여 고려하였다.

이러한 냉동기 on-off제어의 유용성을 검토하기 위하여 최대 냉방부하 기존의 제어기법인 냉동기우선제어의 운전시뮬레이션 결과와 비교한 결과, 에너지소비량은 약 7% 절감이 가능할 것으로 계산되었다.

사용기호

H	: 하루 중 건물 냉방시간 [hour]	$T_{ch,outset}$: 냉동기 냉각모드 출구 하한 설정온도 [°C]
J	: 목적함수	t	: 임의의 시간 [hour]
k	: 계산에 있어서 임의의 단계	u_{ch}	: 냉동기 제어변수
N	: 계산에 있어서 마지막 단계	u_{opt}	: u_{st} 와 u_{ch} 의 최적조합
PLR	: 냉동기의 부분부하율	u_{st}	: 빙축열조 3방밸브 제어변수
Q_{ch}	: 냉동기의 냉각부하 [RT, kcal/hr]	W_{bp}	: 브라인 펌프의 전력소비 [kW]
$Q_{ch,nom}$: 냉동기의 공칭냉각용량 [RT, kcal/hr]	W_{ch}	: 냉동기 전력소비 [kW]
Q_f	: 냉동기의 최대냉각부하 [RT, kcal/hr]	W_{cp}	: 냉수펌프 전력소비 [kW]
Q_L	: 건물 냉방부하 [kcal/hr]	W_{ct}	: 냉각탑 전력소비 [kW]
Q_{st}	: 빙축열조로부터의 방냉율 [kcal/hr]	W_{plnat}	: 냉동시스템의 전체 전력소비 [kW]
$Q_{st,cap}$: 빙축열조의 축열용량 [RT-hrs, kcal]	x	: 빙축열조의 축열상태량
$T_{ch,out}$: 냉동기 출구 브라인 온도 [°C]		

참고문헌

1. K.H.Lee, Y.J.Joo, B.Y.Choi & S.J.Kim : "Model of encapsulated ice storage tanks using charge and discharge performance of single ice capsule", Korean Journal of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Journal of the SAREK, Vol.12, No.4, 2000
2. Jan F. Kredier and Ari Rabl : "Heating and cooling of building-design efficiency", McGraw-Hill, Inc., 1994
3. Donald E. Kirk : Optimal Control Theory - An Introduction, Prentice-Hall Inc., 1970