

캡슐형 빙축열 시스템의 운전특성에 관한 연구

하석용*, 김경환**, 조성우*, 최정민*

* 창원대학교 건축공학과, ** 창원대학교 시설과

A study on the Operating Characteristics of the Capsule-type Ice Storage System

Suk-Young Ha[†], Kyung-Hwan Kim^{**}, Sung-Woo Cho^{*}, Jeong-Min Choi^{*}

ABSTRACT: The decrease of summer peak electric load of our country is very important. The government is arranging a lot of support policies and statutes, etc. to decrease of peak electric load. And ice storage system is known as one of the alternatives. The purpose of this study is to collect basic data for operating characteristics to plan the most suitable operation of capsule-type ice storage system. The storing tank is designed to take charge 40% of total cooling load in building, In operation condition the storage tank took charge 50%. Coefficient Of Performance of daily screw refrigerator is around 4.

Key words: Capsule-type ice storage system(캡슐형빙축열시스템), Cooling load rate(냉방부하율), COP_c(성적계수), Electric power consumption(전력소비량)

기 호 설 명

c_p : 정압비열 [kJ/kg·°C]
 I : 전류 [A]
 \dot{m} : 질량유량을 [kg/s]
 $\dot{Q}_c(t)$: 냉방부하율 [kW]
 Q_c : 냉방부하량 [MJ]
 $\dot{Q}_c(t)$: 증발기부하율 [kW]
 T_w : 열교환기 온도 [°C]
 T_b : 냉동기 온도 [°C]
 t : 시간 [s]
 Δt : 시간간격 [s]
 V : 전압 [V]

$\dot{W}(t)$: 소비전력 [kW]
 W : 소비전력량 [kWh]
 ϕ : 동력 인자

하첨자

b : 브라인
 c : 냉동기
 i : 입구
 o : 출구
 p : 펌프
 f : 팬
 w : 물

1. 서 론

최근 생활수준의 향상과 더불어 하절기 냉방장치의 가동이 빈번해짐에 따라 전력수요량이 급격

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-55-276-7612; fax: +82-55-285-1120
 E-mail address: dihamond@hotmail.com

히 증가하고 있으며, 이에 따라 전력공급 예비율이 12.3%까지 떨어지는 경우도 발생한다. 이와 같이 하절기의 냉방전력소비를 해결하기 위해서는 발전설비를 건설해야 하나 건설비용, CO₂ 배출량의 규제, 발전설비 예정지의 주민집단반발 등으로 어려움을 겪고 있다.

현재 정부에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 전력수요기법을 유도하고 있다. 이러한 기법 중의 하나인 심야전력 요금제는 상대적으로 전기부하량이 낮은 심야시간대에 저렴한 전기요금을 적용시키고 있다. 빙축열시스템을 신축 건물에 적용시킬 경우에 주간 전력사용을 심야시간대로 이동시켜 최대수요억제와 전력부하를 평균화하여 전력공급의 효율화를 도모할 수 있다.

문헌조사에 의하면 Han et al.⁽¹⁾은 빙축열 시스템의 냉동기 출구온도 설정 알고리즘으로 소비동력의 감소를 증명하였으며, Lee et al.⁽²⁾는 캡슐형 축열조에 대한 열적특성 및 축열능력에 대한 수치해석과 실험결과를 비교하였다. Lee⁽³⁾와 Lee et al.⁽⁴⁾는 관외착빙형 빙축열 시스템의 최적운전에 대한 실험적 연구를 하였으며, 관외착빙형 빙축열 시스템에 대한 제빙 또는 해빙에 관한 실험적 연구들도 있다.^(5,6) 건물부하예측, 최적 운전계획 등에 관한 많은 연구가 있었으나, 캡슐형 빙축열 시스템에 대한 운전특성에 대한 연구자료는 많지 않다. 그러므로 본 연구는 2005년 8월 20일부터 30일까지 실험을 통하여 성적계수, 시스템의 운전방식, 소비전력량 등의 운전특성에 대한 자료를 확보하여, 캡슐형 빙축열 시스템의 최적운전을 하기 위한 기초 자료를 얻고자 한다.

2. 이론적 고찰

빙축열 시스템의 임의시간 t에서 냉방부하율과 스크류냉동기(screw chiller)의 증발기부하율은 식 (1)와 식 (2)로 각각 표현할 수 있다.

$$\dot{Q}_c(t) = \dot{m}_w c_{pw} (T_{wi} - T_{wo}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_e(t) = \dot{m}_b c_{pb} (T_{bi} - T_{bo}) \quad (2)$$

여기서, \dot{m}_w 과 c_{pw} 는 판형열교환기 2차측의 물의 질량유량율과 정압비열을 의미하며, T_{wi} , T_{wo} 는 판형열교환기 2차측의 물의 입구와 출구온도이

다. 그리고 \dot{m}_b 과 c_{pb} 는 스크류냉동기를 통과하는 브라인의 질량유량율과 정압비열을 의미하며, T_{bi} , T_{bo} 는 스크류냉동기 입구와 출구의 브라인 온도를 각각 의미한다.

시스템이 가동하고 있을 동안에 냉동기, 순환 펌프, 팬(fan)의 소비동력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{W}_i = \frac{\sqrt{3} V_i I_i \cos \phi}{1000} \quad (3)$$

여기서, 하첨자 $i = c, p$ 와 f 이며, c, p 와 f 는 각각 냉동기, 펌프와 팬(fan)을 나타낸다. I_i 와 V_i 는 전류와 전압을 그리고 ϕ 는 동력인자(power factor)를 의미한다.

임의시간 t에서 증기압축식 냉동기의 능력을 나타내는 성적계수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_c(t)}{\dot{W}_c(t)} \quad (4)$$

그리고 일정기간동안 적산된 냉방부하량 Q_c 와 소비전력량 W_c 는 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_c = \int_0^T \dot{Q}_c(t) dt \approx \sum_i \dot{Q}_{ci} \cdot \Delta t_i \quad (5)$$

$$W_c = \int_0^T \dot{W}_c(t) dt \approx \sum_i \dot{W}_{ci} \cdot \Delta t_i \quad (6)$$

여기서, T 는 시스템들의 가동기간을 의미하며 Δt_i 는 미소시간간격을 의미한다. \dot{Q}_{ci} 와 \dot{W}_{ci} 는 미소시간간격의 평균값들을 나타낸다.

3. 실험

3.1 시스템의 구성 및 특성

본 연구에 사용된 캡슐형 빙축열 시스템은 ○ ○ 대학교의 2005년 8월 준공된 공학관 (연면적 :

9029 m²)에 설치되어졌다. 본 건물의 최대 냉방 부하율은 1294 kW이며, 냉방부하율의 60%는 스크류냉동기가 부담하고 40%는 축열조가 부담하게끔 설계되어졌다.

Fig. 1은 빙축열 시스템의 계통도를 나타낸 것이며, 스크류냉동기(777 kW), 축열조(5175 kW-h), 직교류형 냉각탑(763 kW), 판형열교환기(950 kW), 3방향 버터플라이 밸브 2개, 브라인 펌프(2700 LPM) 2대로 구성된다.

캡슐형 빙축열 시스템은 건물의 냉방부하율에 대응하여 냉동기 단독방식, 축열조 단독방식 및 병렬운전방식으로 운영될 수 있다.

주간에 냉동기와 축열조의 출구에서 혼합된 브라인을 3°C로 순환시켜 판형열교환기 2차측의 냉수온도(D1)를 7°C까지 낮추어 냉방을 할 수 있도록 자동제어를 계획했다. 축열조 단독방식은 축열조 출구혼합온도가 3°C로 유지될 경우에 축열조 자체의 능력으로 냉방한다. 병렬운전방식은 판형열교환기 1차측을 통과한 브라인이 냉동기 입구(A0)에서 7°C 이상, 축열조 출구 혼합 온도와

냉동기 입구 브라인 온도차가 4°C이하의 차이가 나타날 때 작동하게 된다. 즉, 병렬운전방식은 건물의 냉방부하가 축열조 방냉능력을 넘어설 경우에 작동하고, 냉동기 입구 브라인 온도가 6°C에 도달할 때 다시 축열조 단독 방식으로 전환된다. 냉동기 단독방식은 축열조 출구온도(B)가 8°C가 되었을 때 작동하며, 축열조의 방냉으로 냉방능력이 소멸되면 냉동기 단독방식으로 냉방을 하게 된다.

3.2 실험방법

본 실험에서 축열조의 제빙은 심야전기가 공급되는 22시부터 시작하였고, 야간에 축열조를 완전히 제빙한 상태에서 냉방운전이 시작되는 시점으로 하였다. 빙축열시스템의 작동유체는 브라인(25% 에틸렌글리콜 수용액)이 사용되어지며 공급헤더와 환수헤더는 물이 작동유체로 사용되어지고, 초음파유량계(PF 300)로 각각의 작동유체의 체적 유량율(volumetric flow rate)을 측정하

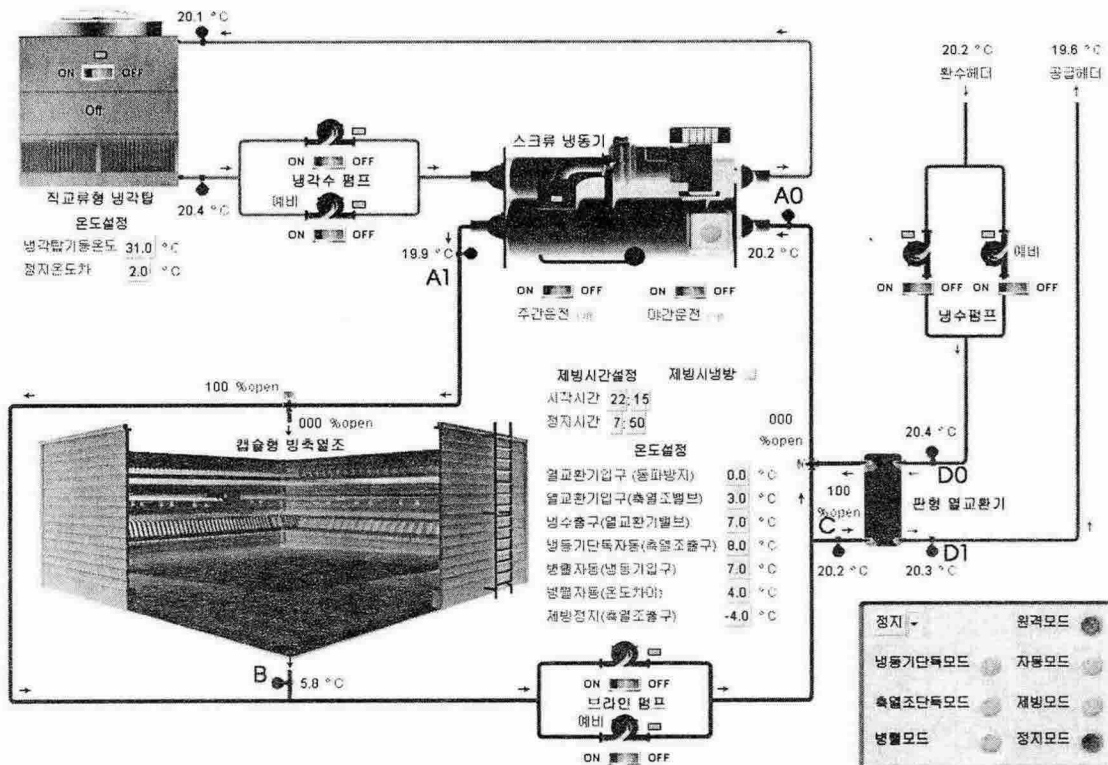


Fig. 1 Schematic of capsule-type ice storage system

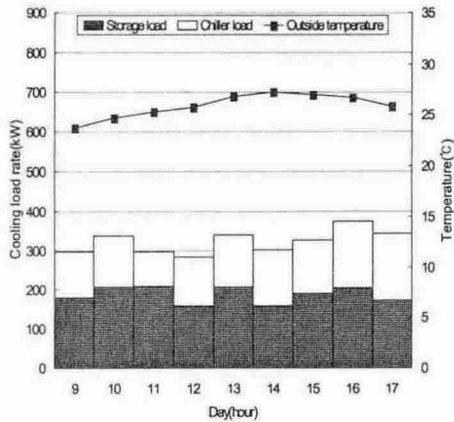


Fig. 2 The daily cooling load rate at 23th August.

였다.

Fig. 1에서 보면 빙축열시스템의 운전 상태를 알기 위하여 온도센서를 스크류냉동기 입·출구(A0, A1), 축열조 출구(B), 열교환기 1차측 입구(C) 및 열교환기 2차측 입·출구(D0, D1) 등에 설치하여 온도를 측정하였고, 전력계(watt-meter)로 빙축열시스템과 냉수펌프(3120 LPM)의 소비전력을 각각 측정하였다. 그리고 2분간격으로 측정된 위의 실험자료를 컴퓨터에 저장하였다. 또한 자동제어 프로그램(Web CTRL)으로 시스템 온도설정조건에 따라 빙축열시스템을 감시·제어하면서 축열조모드에서 병렬모드의 설정값, 작동시간 등의 운전데이터를 기록하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2(23일)와 Fig. 3(31일)은 2005년 8월 20일부터 30일까지 10일 동안의 실험결과 중 한 예를 나타내며, 2분 간격으로 측정된 자료를 이용하여 1시간 평균된 냉방부하율, 냉동기부하율, 축열부하율 및 외기온도를 각각 나타내고 있다.

Fig. 2는 8월 23일의 1시간 평균된 외기온도와 냉방부하율의 변화를 보여주고 있다. 8월 23일의 0시부터 9시까지의 평균 외기온도는 21.9°C이며, 방냉시간 동안의 평균 외기온도는 26°C이다.

동 그림에서 오전 9시에서 10시사이의 초기 냉

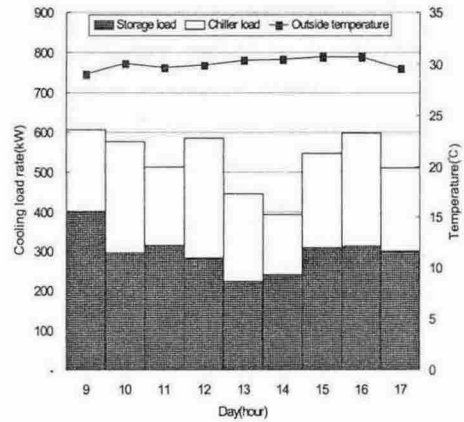


Fig. 3 The daily cooling load rate at 31th August.

방 부하율은 300 kW이며, 10시에서 11시사이의 냉방 부하율보다 작다. 방냉시간동안의 냉방부하율의 변화는 크지 않으며, 식(5)를 이용하여 방냉시간동안의 냉방부하량을 계산하면 10432 MJ이다. 23일에 건물의 냉방부하율 중 축열조가 시간별로 50.6% ~ 70.6%의 부하를 담당하며, 방냉시간동안 평균 부하 부담률은 냉방부하율의 58.2%를 나타낸다.

Fig. 3은 8월 31일의 1시간 평균된 외기온도와 냉방부하율의 변화를 보여주고 있다. 8월 31일의 0시부터 9시까지의 평균 외기온도는 25.9°C이며, 방냉시간동안의 평균 외기온도는 30.1°C이다. 동 그림에서 오전 9시에서 10시사이의 냉방부하율은 600 kW이며 23일 같은 시간대의 냉방부하율보다 큰 값이다. 이는 23일과 31일의 새벽녘의 외기온도, 풍속 등의 차에 의해 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 동 그림에서 보면 23일과는 달리 31일은 방냉시간동안 냉방부하율의 변화를 보이고 있다. 식 (5)를 이용하여 방냉시간동안의 냉방부하량을 계산하면 17288 MJ이다. 31일에 건물의 냉방부하율 중 축열조가 시간별로 48.6% ~ 66.3%의 부하를 담당하며, 방냉시간동안 평균 부하 부담률은 냉방부하율의 56.1%를 나타낸다.

빙축열 시스템은 축열조가 냉방부하율의 40%를 담당하도록 설계되었으나, 23일과 31일에 축열조 부하 부담률이 58.2%와 56.1%로 나온 이유

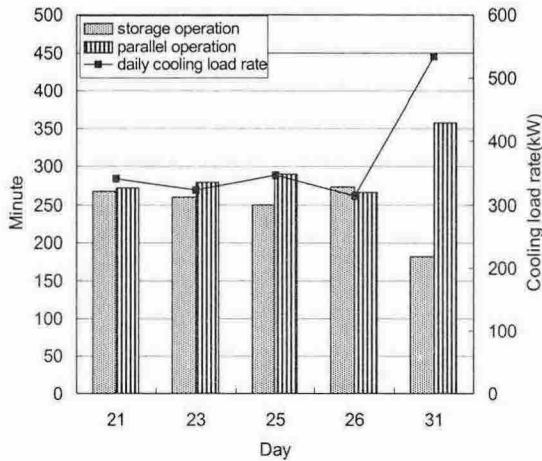


Fig. 4 Operating mode of the ice storage system for cooling load rate.

는 건물의 냉방 부하 계산시 최대부하법으로 계산한 결과가 23일과 31일의 냉방부하율보다 크기 때문이다.

Fig. 4는 빙축열 시스템의 운전방식인 축열조 단독방식과 병렬운전방식의 작동시간과 하루 평균된 냉방 부하율의 관계를 나타낸 것이다. 방냉 시간동안 냉동기와 축열조의 출구에서 혼합된 브라인 온도가 8°C를 넘지 않았으므로 냉동기 단독방식으로는 운전되지 않았다. 동 그림을 보면 평균 외기온도가 높은 날 즉, 하루 평균된 냉방 부하량이 많은 날에는 병렬운전방식으로 가동되는 시간이 많아지고, 축열조 단독방식으로 가동되는 시간이 줄어든다.

Fig. 5는 8월 23일과 8월 31일의 스크류냉동기의 성적계수 변화량을 그래프로 나타내고 있다. 동 그림에서 주간에는 성적계수가 약 4 전후의 분포를 가지고, 심야의 축냉운전중에는 성적계수가 약 2.3 전후의 값을 나타내고 있다. 주간에 비해 심야에 냉동기의 성적계수가 저하되는 원인은 주간의 냉방 운전시에 비해 야간에 증발온도가 훨씬 낮기 때문인 것으로 사료된다.⁽⁷⁾ 동 그림에서 제빙시간(22시부터 08시까지)동안에 수시로 냉동기가 멈춰서 성적계수가 ∞를 보인 주된 이유는 축열조 출구온도가 -4°C이하일 경우에 냉동기가 가동을 멈추고 -2°C에 다시 가동되는 시간적 편차 때문이라 추정된다. 위와 같은 시스템

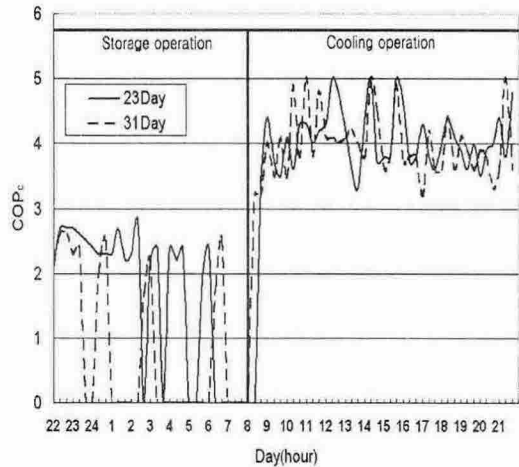


Fig. 5 The daily COP_c variation of chiller with ice storage system at 23rd and 31st August.

조건 때문에 23일과 31일 전날의 부하에 영향을 받아 축열조가 제빙이 완료되는 소요시간이 23일이 4시간 40분이고 31일은 1시간 40분이 소요되었다.

Table. 1은 10일간의 실험 중 5일간 전날 제빙시작 시각부터 당일 제빙시작 시각까지 24시간의 소비전력량을 나타내었다. Table. 1에서 MCC-C는 냉동기 소비전력량을, MCC-S는 냉각탑, 냉각수 순환펌프, 브라인 펌프의 합계 소비전력량을, MCC-N은 냉수 순환펌프의 소비전력량으로 나타내었다. 5일간의 주간평균냉방부하율은 21일 340 kW, 23일은 322 kW, 25일은 346 kW, 26일은 312 kW, 31일은 534 kW를 보였다. Table. 1에서 21일의 전체 소비전력량이 최대값을 나타내고, 31일에는 최저값을 나타낸다. 이는 31일에 주간평균냉방부하율이 최대이지만 축열조의 제빙시간과 냉수펌프의 가동시간이 다른날에

Table. 1 The electric power consumption of ice storage system

Date	Total	MCC-C	MCC-S	MCC-N
21	2250.2	912.0	877.6	458.0
23	2230.2	908.9	860.4	459.8
25	2147.9	827.3	858.5	459.1
26	2075.9	766.4	843.9	463.1
31	2063.9	993.9	714.2	352.5

비해 짧았기 때문에, 전체 소비전력량이 다른 날보다 낮게 나왔기 때문이다. 동 표에서 주간 평균 냉방 부하율이 증가하면 냉동기 소비 전력량이 증가함을 알 수 있으며, 주간 평균 냉방부하율의 변화에 따라 냉방시스템 중 냉동기가 차지하는 소비전력량의 비율은 36.9% ~ 48.2%를 차지한다. 동 표와 실험자료로 냉방부하계산을 하면, 앞에서 언급한 설계시 장비들의 소비동력과 실제 가동할 때의 소비동력이 차이가 남을 추측할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 2005년 8월 20일부터 30일까지 캡슐형 빙축열 시스템을 가동하여 성적계수, 시스템의 운전방식, 소비전력량 등을 구하였다.

(1) 설계시 축열조 냉방부하율의 부담률이 40%이나, 실제 시스템을 가동한 결과 50%범위의 부담율을 보이고 있다.

(2) 냉방부하율이 증가할수록 축열조 단독방식보다는 병렬운전방식으로 운전되는 시간이 증가하였다.

(3) 주간에는 스크류냉동기의 성적계수가 약 4전후의 분포를 가지고, 심야의 제빙운전 중에는 약 2.3전후의 값을 나타내고 있다.

(4) 냉방부하율의 변화에 따라 빙축열시스템에서 소요되는 전체동력 가운데 스크류냉동기가 차지하는 소비전력량의 비율은 36.9% ~ 48.2%이다.

참고문헌

1. Han, D. Y., Kim, Y. H., 1999, Optimal controls for the part-load ice storage system, Proceedings of the SAREK '99 Winter Annual Conference, pp. 592-597.
2. Lee, K. H., Joo, Y. J., Choi, B. Y. and Kim, S. J., 2000, Model of encapsulated ice storage tanks using charge and discharge performance of single ice capsule, Korean Journal of Air - Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 337-344.
3. Lee, D. Y., 1999, Optimal design and optimal operation of an ice on coil thermal storage system, 자동제어부문강연회, Air - Conditioning and Refrigeration Engineering, pp. 71-85.
4. Lee, S. Y., Lee, K. H., Choi, B. Y., 2000, Laboratory test of optimal control algorithm for ice storage system, Proceedings of the SAREK '2000 Winter Annual Conference, pp. 446-450.
5. Jang, Y. K., Heo, C. K., Kim, S. H., 2002, An experimental study on the ice making characteristics of an ice-on-coil type ice storage system, Proceedings of the SAREK '2000 Summer Annual Conference, pp. 84-88.
6. Kim, G. D., Oh, M. S., Kim, S. J., 2000, A study on melting type&cooling load pattern of ice storage cooling system, Proceedings of the SAREK '2000 Summer Annual Conference, pp. 810-815.
7. Yoo, S. Y., Lee, J. M., Han, S. H. and Yang, S. K., Lee, H. J., Kwon, S. C., Bae, Y. S., 1999, A study on operating characteristics and economical efficiency for the ice storage system of general hospital, Proceedings of the SAREK '2005 Summer Annual Conference, pp. 1131-1136.