

잠열축열식 냉동시스템의 제어방법에 따른 성능 비교 분석

김성진

국민대학교

(oo_oo_o@naver.com)

서론

최근 몇 년간 삶의 질의 증대와 쾌적한 공간의 요구로 인하여 에너지 사용량이 급증하고 있으며 지구 온난화에 따른 여름철 기온의 상승으로 인해 전력 소비량이 해마다 증가하고 있다.

전력난을 해소하기 위해서 심야전력으로 얼음이나 냉수를 생산하여 주간에 냉방을 수행하는 축열식 냉·난방 설비를 1993년부터 도입하여 사용하고 있다. 이러한 심야전력을 사용하는 기기들은 주간 피크부하시 냉동기의 사용을 전력부하가 적은 심야시간으로 옮겨 여름철 전력 수급의 안정화와 운전 비용 감소 효과의 이득을 얻을 수 있다.

소비전력을 줄이기 위해서는 축방열 방법과 축열재의 종류에 따라서 설치비용 및 시스템의 크기가 달라진다. 국내에 보급되고 있는 축열 시스템은 부분부하 축열방식이 대부분이다. 이러한 부분부하 축열방식은 냉동기와 축열조의 제어방법에 따라서 기저부하를 냉동기가 담당하고 변동 부하를 축열조가 담당하도록 하는 냉동기 우선 방법과 기저부하를 축열조가 담당하고 변동 부하를 냉동기

가 담당하도록 하는 축열조 우선 방법이 있다. 또한 냉동기와 축열조의 배치방법에 따라서 냉동기를 축열조 상류 측에 배치하는 냉동기 상류방식, 그 반대인 냉동기를 축열조 하류 측에 배치하는 냉동기 하류방식으로 구분된다. 이러한 4가지 방법에는 각기 다른 특성이 있으며, 제어방법에 따라서 많은 연구가 이루어져 왔다.

시스템의 성능 및 특성을 파악하기 위해 시스템 모델 개발이 우선적으로 필요하고, 축열 시스템의 기존의 제어방법 및 새로운 제어방법을 통한 시스템의 성능 및 비용 특성을 파악하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 잠열축열재를 이용한 잠열축열식 냉동시스템에 대하여 축열 및 방열 특성에 따른 성능 실험을 수행하여 성능 실험에 근거한 축열조와 냉동기 모델을 개발하였으며 운전방법에 따른 시스템의 운전 특성 및 운전 비용에 대한 분석을 하였다.

축열식 냉동기 제어방법

운전방식에 따라서 냉동기 우선 방법과 축열조 우선 방법으로 구분될 수 있다.

냉동기 우선 방법의 경우, 주간 냉방시 냉동기를 일정한 용량으로 운전하여 기저부하를 담당하고, 나머지 변동 부하를 축열조의 방열로 처리하는 방법이다. 냉동기 우선 방식은 최대 부하를 안전하게 처리할 수 있으나 일일 부하율이 작은 경우에는 축열량을 전부 사용하지 못하게 되므로 운전비가 상승할 수 있다.

축열조 우선 방식은 야간시간에 축열한 열량을 모두 사용할 수 있으므로 운전비가 절감될 수 있다. 하지만 최대 부하일 경우 축열량이 부족하면, 냉동기로 감당해야 할 부하량이 설계치보다 많아지게 되어 운전 비용이 상승할 수가 있다. 반대로, 냉동기의 부하율이 작아지게 되는 상황이 존재할 수도 있는데, 이때는 냉동기의 최소 부하율이 존재하여, 부하율이 이 이하가 되면 냉동기가 정지되므로, 축열조만으로 냉방을 공급하지 못하는 상황이 발생할 수도 있다.

구성 방식에 따라서 냉동기를 축열조 상류 측에 배치하는 방식인 냉동기 상류방식, 하류 측에 배치하는 냉동기 하류방식으로 구분할 수 있다. 냉동기 상류방식의 경우 열교환기를 통과한 유체가 바로 냉동기에 유입되므로 냉동기의 입구 온도가 높아 냉동기의 운전 효율이 높아진다. 그에 반해 축열조에 유입되는 유체의 온도가 낮아 축열조 방열 효율이 떨어진다. 냉동기 하류방식의 경우 그 반대로 열교환기를 통과한 유체가 축열조로 유입되어 축열조의 방열 효율이 높아져 축열조 용량을 줄일 수가 있으며, 냉동기의 입구온도가 낮아져 냉동기의 운전 효율이 나빠진다.

축열조 모델

축열조는 팩 형태의 잠열축열재를 사용하였고 축열조 하단에서 분배관을 통해 고르게 분배되어 상단으로 흘러나가는 구조이다. 축열조 모델은 유

동 방향으로 상태량이 변화하는 것으로 가정한 1차원화 모델을 만들었다. 여러 개의 가상의 층으로 구분하여 각 층에 동일한 수의 팩이 캡슐 형태로 적층되었다고 가정하였다. 각 검사체적에 대하여 임의의 시간 단계 k 에 대하여 적용할 지배방정식은 잠열축열재의 상태에 따라서 현열구간, 잠열구간, 현열구간의 3가지 과정으로 나누어 세웠다.

액체 상태 잠열축열재의 냉각 또는 가열의 현열 과정에서는 식 (1), 식 (2)의 에너지 평형식을 사용하였다.

$$\rho_{PCM} V_{PCM} C_{p, PCM} \frac{dT_{PCM}}{dt} = U_c n A_c (T_i - T_{PCM}) \quad (1)$$

$$\rho_w V_w C_{p,w} \frac{dT_w}{dt} = U_c n A_c (T_{pcm} - T_o) + \dot{m} C_{p,w} (T_i - T_o) \quad (2)$$

잠열축열재의 상변화가 일어나는 잠열 과정에는 식 (3), 식 (4)의 에너지 평형식을 이용하였다.

$$\rho_w V_w C_{p,w} \frac{dT_w}{dt} = U_c n A_c (T_{PCM} - T_o) + \dot{m} C_{p,w} (T_i - T_o) \quad (3)$$

$$h_{fg} \frac{dM_{solid}}{dt} = \dot{m} C_{p,PCM} (T_i - T_o) \quad (4)$$

고체 상태의 잠열축열재의 냉각 또는 가열의 현열 과정에서는 식 (5), 식 (6)의 에너지 평형식을 이용하였다.

$$\rho_w V_w C_{p,w} \frac{dT_{solid}}{dt} = U_c n A_c (T_i - T_{solid}) \quad (5)$$

$$\rho_w V_w C_{p,w} \frac{dT_w}{dt} = U_c n A_c (T_{solid} - T_o) + \dot{m} C_{p,PCM} (T_i - T_o) \quad (6)$$

잠열축열재 팩의 외부 대류열전달계수는 균일

한 유동이 흐르는 층류라 가정하고, 캡슐의 열전달 계수 U_c 의 값은 검증실험 결과 값을 이용하였다. 에너지 평형식과 경계조건을 이용하고, 각 방정식을 임의의 시간 단계에 따라 차분화하여 온도의 해를 도출하였다.

압축기 모델

압축기 모델은 polytropic exponent를 이용하여 토출 온도를 식 (7)을 사용하여 구하였고, 체적 효율은 압축기 회전수, 압축비를 이용하여 식 (8)을 이용하여 구했다. 질량유량은 압축기 회전수, 체적 효율로 식 (9)를 이용하여 구하고 기계 효율은 식 (10)으로 구했다. 실험값으로 각각의 미지 계수를 구하였다.

$$\frac{T_{dis}}{T_{suc}} = \left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (7)$$

$$\eta_v = 1 - a_o \left(a_1 \left(\frac{P_c}{P_e}\right)^{\frac{1}{n}} RPS^{a_2} - 1\right) \quad (8)$$

$$\dot{m} = \eta_v \rho_i V_d RPS \quad (9)$$

$$\frac{\dot{m}(h_{dis} - h_{suc})}{W} \quad (10)$$

열교환기 모델

열교환기 모델 중 응축기는 과열, 포화, 과냉의 3구간으로 나누어 식 (11)을 세우고, 식 (13)을 이용해 각 구간별 $LMTD$ 법을 이용하여 각 구간별 열량 비로 ΔT_m 을 구하였고, 응축기의 UA 값을 식 (12)을 이용하여 구하였다.

$$Q_c = Q_{c,sh} + Q_{c,sat} + Q_{c,sc} \quad (11)$$

$$Q_c = (UA_c) \Delta T_{m,c} \quad (12)$$

$$\frac{1}{\Delta T_{m,c}} = \frac{f_{sh}}{\Delta T_{LMTD,sh}} + \frac{f_{sat}}{\Delta T_{LMTD,sat}} + \frac{f_{sc}}{\Delta T_{LMTD,sc}} \quad (13)$$

같은 방법으로 증발기는 포화, 과열의 2구간으로 나누어 증발기의 UA 값을 구하였다.

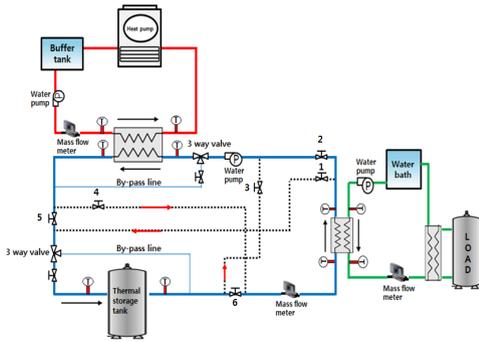
제어방법에 따른 성능 실험 조건

축, 방열 성능 실험 결과로 부분부하 운전 시 축 열량은 평균 부하의 40%를 담당하며 일평균 부하는 최대 부하의 78%로 설계를 하였다. 실제 10시간 동안 방열 운전을 수행해야 하지만 시스템의 특징상 유량과 축열조의 크기가 작기 때문에 하루 동안의 냉방 운전을 5시간 방열 운전으로 가정하였다. 유량은 4 lpm, 부하 측 냉수 공급 온도는 일반적인 냉동기의 기준에 따라 7°C로 하였으며, 부하 측 환수 온도와 공급 온도의 평균적인 차이는 5°C가 되도록 결정하였다. 기준 부하일은 최저 부하인 6월과 최대 부하인 8월을 기준으로 일반적인 사무용 건물에 발생하는 부하 패턴을 기준으로 설정하였다.

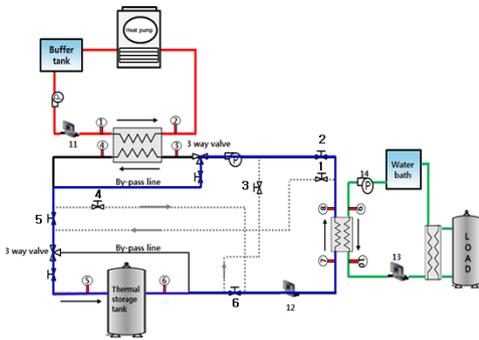
제어방법에 따른 성능 실험방법

제어방법에 따른 성능 실험은 각각 제어방법에 따라서 축열이 완료된 후 배관계통의 밸브를 조절하고 부하 측에 열량을 공급하면서 실험을 진행한다.

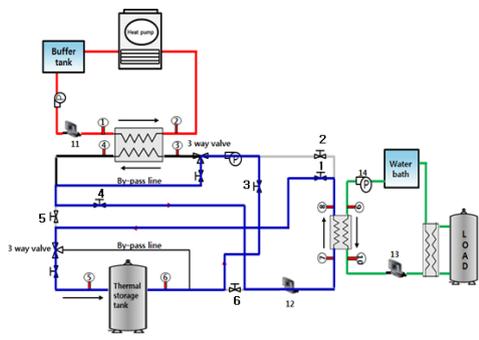
냉동기 우선 제어방법은 그림 1의 2, 5, 6 밸브를 열고 1, 3, 4 밸브를 닫아 그림 2와 같이 배관을 구성 후 축열 운전을 수행한다. 축열이 완료된 후 3방향밸브로 냉동기 측과 축열조 측의 유량을 조절하여 일반적인 사무용 건물에서 발생하는 부하 패턴에 맞게 제어한다. 냉동기 열량으로 기저부하를 담당하게 되며, 변동 부하에 대해서는 축열조 열량을 사용하며



[그림 1] 실험장치 개략도



[그림 2] 냉동기 우선 냉동기 상류방식



[그림 3] 축열조 우선 냉동기 하류방식

방열 운전을 수행하고, 방열 운전 시간조건에 따라 방열운전을 종료한다.

축열조 우선 제어방법은 그림 1의 1, 3, 4 밸브를 열고 2, 5, 6 밸브를 닫아 그림 3과 같이 배관을 구성 후 축열 운전을 수행한다. 축열이 완료된 후

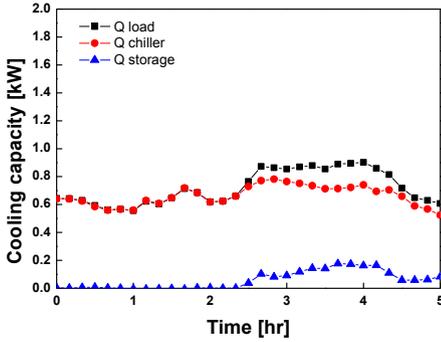
마찬가지로 3방향밸브를 이용하여 냉동기 측과 축열조 측의 유량을 조절해주며 부하 패턴에 맞게 제어한다. 이때는 축열조 열량으로 기저부하를 담당하게 되며, 변동 부하에 대해서는 냉동기 열량을 사용하며 방열 운전을 수행하고, 방열 운전 시간조건에 따라 방열 운전을 종료한다.

제어방법에 따른 성능 검증

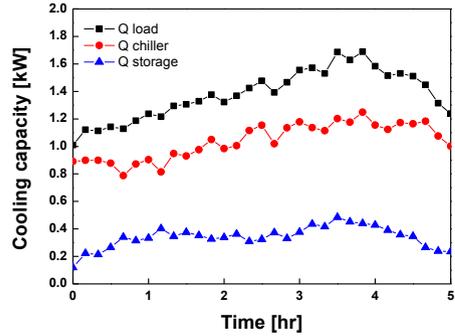
냉동기 우선 방법의 시스템 운전 특성을 그림 4에 나타내었다. Q load는 냉방부하, Q chiller는 냉동기의 냉열 출력, Q storage는 축열조 열전달량이다. 6월의 평균 부하일 경우에 처음 2시간 동안은 냉방부하가 냉동기의 냉열 출력보다 작아 냉동기 단독운전이 나타나며 피크부하가 나타나는 시간대에는 냉동기와 축열조의 병렬운전이 이루어진다. 8월의 평균 부하일 경우에는 냉동기와 축열조의 병렬운전이 이루어지며, 피크부하가 나타나는 시간대에는 냉동기와 축열조 둘 다 최대 부하 운전을 하게 된다.

축열조 우선 방법의 운전 특성을 그림 5에 나타내었다. 6월의 평균 부하일 경우에 처음 1시간 동안은 축열조 내 저장량이 충분하여 축열조 단독운전이 이루어지며 그 이후부터는 축열조 단독으로 냉방부하를 담당하기 어려운 정도로 축열량이 감소하고, 나머지 부하에 대해서는 냉동기를 운전하여 담당하는 것을 알 수 있다. 8월의 평균 부하일 경우에 처음 1시간 동안은 냉동기는 최소 부하 운전율로 운전하게 되고, 축열조 내 저장량이 충분치 못한 시점부터 축열조의 열교환량은 줄어들고, 나머지 부하에 대해 냉동기의 부하처리량이 증가하는 것을 알 수 있다.

축열조 이용률은 그림 6에서 알 수 있듯이 냉동기우선방법에서 부하량이 많은 8월에는 전체 축열량의 65.2%를 사용하였고, 부하량이 적은 6월에

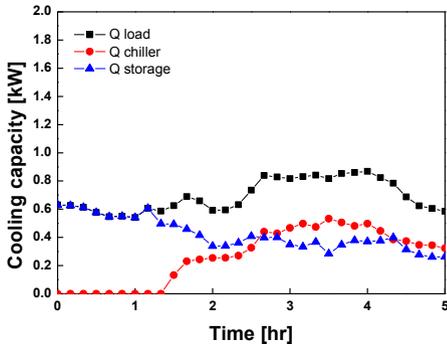


(a) 6월

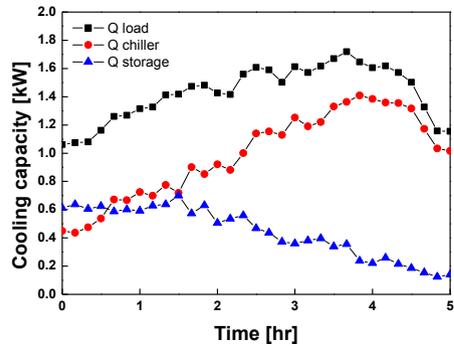


(b) 8월

[그림 4] 냉동기 우선 냉동기 상류방식 부하 변동



(a) 6월



(b) 8월

[그림 5] 축열조 우선 냉동기 하류방식 부하 변동

는 10.2%를 사용하였다. 축열조 우선 방법에서 8월은 76%를 사용하였고, 6월은 61%를 사용하였음을 알 수 있다.

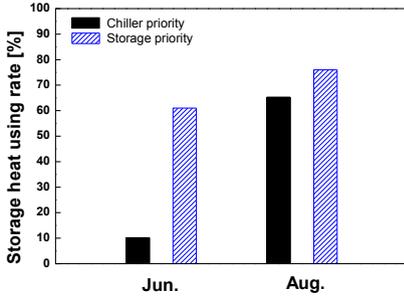
그림 7은 운전방법에 따른 6월과 8월의 시스템 주간 운전율을 나타낸다. 시스템 주간 운전율은 냉동기의 방열일에 대한 냉방부하의 비로 냉동기 주간 사용량의 비중을 나타낸다. 6월 최소 부하일 때는 축열조 우선방법의 시스템 주간 운전율이 13% 향상됨을 알 수 있고, 8월 최대 부하일 때는 냉동기 우선 방법이 1.5% 높음을 알 수 있다.

축열조 이용률과 시스템 주간 운전율을 보면 축열조의 열전달량이 많고 냉동기의 주간 사용량이 상대적으로 적으면 시스템 주간 운전율을 높일

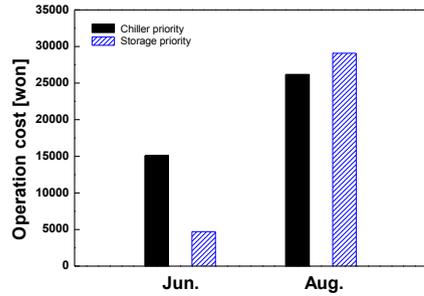
수 있음을 알 수 있다.

축열식 냉동기 시스템의 운전 비용 분석

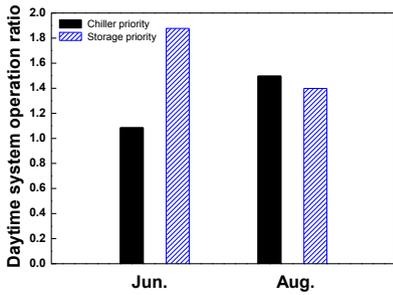
본 연구에서는 운전방법에 따른 운전 비용 비교를 위해 축열률이 40% 이상인 축열식 냉난방 시스템에 적용되는 심야요금을 적용하였다. 2014년 한국전력에서 제공하는 심야 전력 요금 체계는 매일 23시부터 다음 날 아침 9시까지의 시간대에 45.2원/kWh, 그 외의 시간대에는 88.4원/kWh의 요금이 적용된다. 운전 비용은 심야 전력 요금과 주간 전력 요금의 합만으로 계산하였으며, 기본요금은 냉동기의 정격 소비전력에 의하여 결정되어 냉방부하



[그림 6] 각 월별 축열조 이용률 비교



[그림 8] 운전방식에 따른 운전 비용 비교



[그림 7] 각 월별 시스템 주간 운전율 비교

의 감소와 관계없이 일정하므로 운전 비용 계산에서 제외하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 8월의 경우, 냉동기 우선 방법이 축열조 우선 방법에 비해 운전 비용을 10% 절감할 수 있으며, 냉방부하가 적은 6월의 경우에는 축열조 우선 방법이 적은 비용으로 시스템을 운전할 수 있다.

결론

본 연구에서는 잠열축열식 냉동시스템을 성능 실험을 통해 축열 및 방열 특성을 확인할 수 있는 축열조 모델과 냉동기 모델을 개발하였고, 이를 바탕으로 운전방법에 따른 시스템의 운전 특성 및 운전 비용을 분석하였다. 축열조 모델은 잠열축열재의 형상을 정확하게 반영한 열전달 모델을 사용하면 좀 더 정확한 축열조 모델이 될 것이라 예상된다. 제어방법에 따라서 냉동기 우선 방법은 6월 평

균 부하일 경우, 냉방부하가 작아 처음 2시간은 냉동기 단독운전이 나타나며 이후에는 축열조와 냉동기의 병렬운전이 이루어지며 8월의 평균 부하일 경우, 축열조와 냉동기의 병렬운전이 이루어진다. 축열조 우선 방법은 6월의 평균 부하일 경우, 초기에 축열조 내 저장량이 충분하여 축열조 단독운전이 이루어지다가 어느 시점 이후로는 축열조 단독으로 부하를 담당하기 어려운 정도로 축열량이 감소하여 나머지를 냉동기로 운전되는 것을 알 수 있다. 각 제어방법 간의 운전 비용은 6월 평균 부하의 경우에 축열조 우선 방법이 49% 절감할 수 있으며, 8월 평균 부하의 경우에는 10% 절감할 수 있음을 알 수 있다. 부하가 적은 기간에는 축열조 우선 방법을 택하고, 부하가 큰 기간에는 냉동기 우선 및 냉동기 상류 방식을 이용한 제어방법이 효과적이라 판단되며 부하 변동에 따라 축열조와 냉동기를 적절히 운전하는 새로운 제어방법을 적용하면 시스템의 운전율도 높이며 비용도 절감할 수 있을 것이라 생각한다.

참고문헌

1. 한국전력공사, 2014, 한국전력통계.
2. 정차수, 1993, 빙축열시스템의 개요, 대한설비공학회 설비저널, Vol. 22, No. 2, pp. 101-108.
3. Pere. M., Albert C., Cristian S., Gabriel Z. and Lusia F.C., 2014, PCM thermal energy storage

- tanks in heat pump system for space cooling, Energy and Buildings, Vol. 82, pp. 339-405.
4. 최병윤 외, 2005, 공기열원을 이용한 축열식 히트펌프시스템 적용사례, 대한설비공학회 학술대회논문집, pp. 41-47.
 5. 김경환 외, 2007, 밀폐식 빙축열시스템의 축열 및 방열과정에 관한 실험, 에너지공학논문집, Vol. 16, No. 4, pp. 164-169.
 6. 이대영 외, 1998, 운전방식에 따른 빙축열시스템 최소용량의 결정, 공기조화 냉동공학회 학술대회 논문집, pp. 192-197.
 7. 이경호 외, 2008, 운전비 절감을 위한 빙축열시스템 냉동기 운전기법 평가, 대한설비공학논문집, Vol. 20, No 2, pp. 97-105.
 8. 안영환 외, 2005, 빙축열 냉방시스템의 운전특성 및 비용 분석, 대한설비공학논문집, Vol. 17, No. 2, pp. 156-164.
 9. 유성연 외, 2008, 빙축열 시스템의 효율적인 제어 위한 냉방부하 예측에 관한 연구, 대한설비공학회 설비공학논문집, Vol. 20, No. 2, pp. 128-136.
 10. 정성훈 외, 2000, 냉방부하 변동을 고려한 빙축열시스템의 경제적 운전방식, 대한설비공학 학술대회논문집, Vol. 12, No. 2, pp. 140-149. 