

빙축열 시스템의 제어를 위한 냉방부하 예측

강대석†, 유성연*, 한승호**, 노관중**, 이제묘***

충남대학교 대학원, *충남대학교 기계설계공학과, **한국전력연구원, ***한국기초과학지원연구원

An Estimation of Cooling Load for Control of Ice Storage System

Tae-Seok Kang†, Seong-Yeon Yoo*, Seung-Ho Han**, Kwan-Jong No**, Je-Myo Lee***

ABSTRACT: Ice storage system stores cold energy using ice, which is used for cooling on next day. Ice storage system is the effective cooling system that uses cheap electric energy during a night, and also suppresses the peak load of electricity. In this study, the normalized temperature, relative humidity and specific humidity are analyzed using the weather data for past five years in order to estimate the cooling load for the control of ice storage system. The calculated cooling loads show fairly good agreement with the measured data of model hospital, especially at the outdoor design temperature of 25°C.

Key words: Ice storage system(빙축열시스템), Control (제어), Cooling load(냉방부하), Load estimation(부하예측), Weather data(기상데이터)

1. 서론

한국전력에서는 건축물의 냉방전력사용에 의해 주로 발생하는 하계 피크부하를 저감하고 저부하 시간대의 전력사용을 증대하여 전체적으로 일일 부하율 향상을 이루고자 심야전력 사용제도를 만들어 값싼 전력을 제공하고 있다. 그럼에도 불구하고 현장에서는 초기 설치비용을 더욱 줄이기 위해 축냉조 용량을 줄이고 주간시간대에 냉동기를 위주로 가동하는 경우가 많다. 그러므로 소비자에게 불편함을 주지 않고 기술적으로 축냉조를 피크부하 시간대에 최대한 활용하는 제어기술을 개발할 필요가 있다. 부분 축냉식 축냉시스템에서 하계 주간피크부하 시간대의 냉동기 가동을 통한 전력사용을 최소화하기 위하여 피크부하 시간 이전에 냉방 부하량의 예측, 잔여 축냉량의

측정, 방냉량 조절, 축냉조의 방냉량과 냉동기의 가동 비율을 자동 조절하는 제어장치의 개발이 절실히 필요하다.

이에 따라 빙축열시스템의 제어와 경제성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee⁽¹⁾ 등은 운전방식에 따른 빙축열시스템의 설계용량의 차이와 빙축열 냉방시스템의 최적설계에 대하여 논의하였다. 경제적 빙축열시스템의 운전 제어에 관한 연구로 Kintner-Meyer and Emery⁽²⁾, Carey et al.⁽³⁾ 은 각각 전력요금체계, 냉방부하변동패턴에 따라 빙축열 냉방시스템의 주요 구성요소인 냉동기와 축냉조의 설계용량이 달라짐을 보였다. Spethmann⁽⁴⁾은 최적제어기 개발에 대한 연구를 발표하여, 빙축열 냉방시스템 운전방식 간의 경제성 비교에 있어서, 전력요금체계가 가장 큰 영향을 주는 요인임을 밝혔다.

본 연구에서는 빙축열시스템의 최적화된 제어를 위한 효과적인 냉방부하 예측방법에 대해 연구하였다. 냉방부하의 예측을 위해 5년간 기상

† Corresponding author

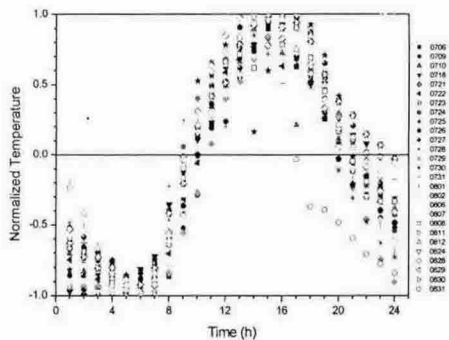
Tel.: +82-42-821-8901; fax: +82-42-821-8894

E-mail address: kts317@cnu.ac.kr

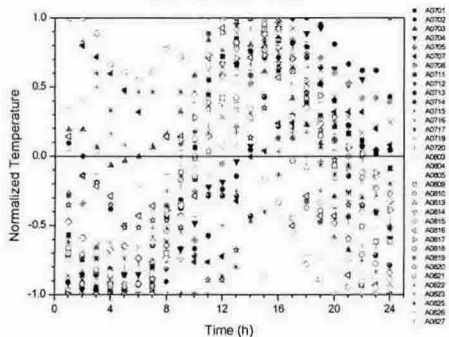
데이터를 분석하여, 온도를 normalize 시키고, 상대습도와 비습도의 평균을 산출하였다. 빙축열시스템의 제어에 필요한 냉방부하 예측에는 하루 동안 냉방부하의 변화 추세와 냉방기간 동안 1일 평균 냉방부하의 변화 등이 중요하다. 건물의 냉방부하 설계 데이터를 이용하여 ΣUA 와 Σm 을 계산하였으며, 이를 이용하여 실제 외기조건에서 시간별 냉방부하를 예측하였다.

2. 기상 데이터 예측

냉방부하를 예측하기 위해서 10년간 평균 기상 데이터를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 요즘과 같이 기상이변이 자주 나타나는 경우 월별 평균값은 실제와 비슷할지 모르지만 일별 평균값은 실제와 상당히 다를 수가 있다. 빙축열시스템의 축냉과 방냉 비율을 결정하기 위해서는 일별 평균값의 변화와 냉방부하의 시간별 변화를 알아야 한다. 본 연구에서는 위 방법 외에 최고

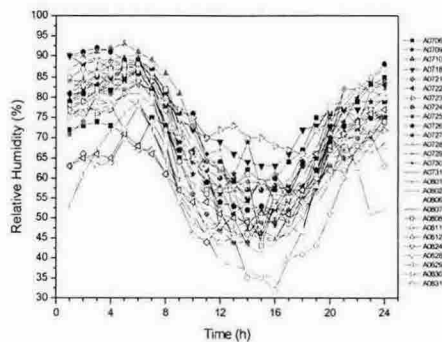


(a) sunny day

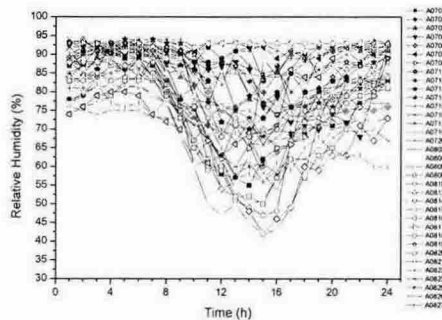


(b) rainy day

Fig. 1 Variation of outdoor temperature during a day



(a) sunny day



(b) rainy day

Fig. 2 Variation of relative humidity during a day

온도와 최저온도만으로 예측하는 방법을 사용하여 냉방부하를 구한 후 실측한 부하와 비교·검토하고자 한다.

Fig. 1은 하루 동안의 외기온도의 변화를 최고온도를 1로 최저온도를 -1로 무차원화하여 나타낸 것이다. 비가 오지 않는 날은 몇 날을 제외하고는 온도변화가 일정한 패턴을 유지하고 있지만, 비가 오는 날은 일정한 패턴에서 상당히 벗어나는 것을 알 수 있다. 14시부터 16시 사이에 최고온도를 나타내고, 새벽 4시부터 6시 사이에 최저온도를 나타내며 최고와 최저 온도사이에서 단조증가와 단조감소를 하고 있다.

Fig. 2는 하루 동안 상대습도의 변화를 나타낸 것으로, 외기온도가 높을 때는 상대습도가 낮고, 반대로 외기온도가 낮을 때는 상대습도가 높은 것을 알 수 있다. 온도와 마찬가지로 비가 오지 않는 날은 규칙적인 변화를 보이지만 비가 오는 날의 변화는 매우 불규칙적이다.

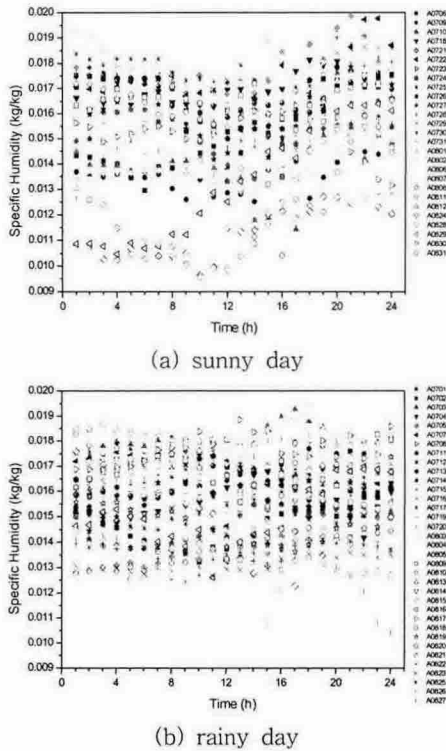
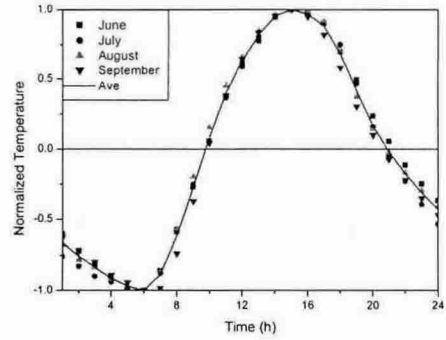


Fig. 3 Variation of specific humidity during a day

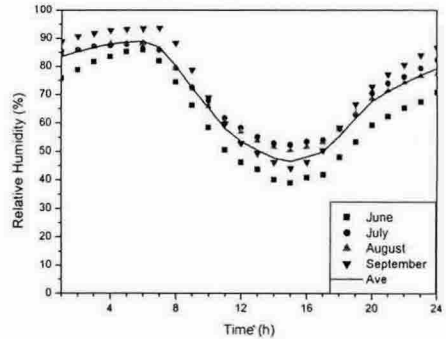
Fig. 3은 하루 동안 비습도의 변화를 나타낸 것으로 비가 오는 날과 오지 않는 날 모두 규칙적인 패턴을 찾을 수는 없지만, 하루 중 비습도의 변화는 매우 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 2000년부터 5년간 6월부터 9월까지의 기상데이터를 월별로 평균하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 보인 하루 동안의 온도변화는 모든 달에서 오후 15시에 최고온도와 새벽 6시에 최저온도를 보이는 일정한 패턴을 가짐을 알 수 있다. 또한 각 달의 무차원화된 온도값들과 모든 달의 평균값이 거의 완벽히 하나의 커브로 일치함을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 5년간 상대습도를 시간별로 평균한 값이다. 상대습도는 하루 중 온도가 가장 높은 14시에서 16시 사이에 최저값을 가지며, 최저온도가 포함된 새벽 5시에서 7시 사이에 최고 상대습도를 가짐을 알 수 있다. 각 달 별로는 6월이 다른 달에 비해 낮은 값을 보이고 있고, 7월과 8월은 거의 일치하며, 일교차가 다른 달에 비해 비교적 큰 9월이 다른 달의 평균값 보다 조금 높은 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 5년

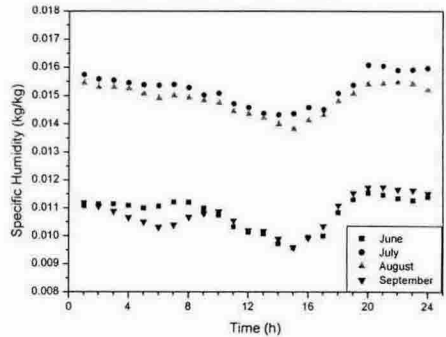
간 하루 동안의 비습도 평균을 나타낸 것이다. 하루 중 비습도의 값은 거의 일정한 값을 보이며, 모든 달에서 최고온도가 발생하는 15시경에 최저값을 보인다. 6월과 9월, 7월과 8월이 서로 비슷한 값을 보이고 있으며, 계절적 특성상 덥고 습한 7,8월이 6,9월 보다 상당히 높은 값을 가짐을 알 수 있다.



(a) temperature



(b) relative humidity



(c) specific humidity

Fig. 4 Analysis of weather data for five years

3. 냉방부하 예측

빙축열 시스템의 축냉과 방냉을 효과적으로 제어하기 위해서는 냉방부하의 예측이 매우 중요하다. 냉방부하의 계산방법은 연간을 통해 기후에 따라 끊임없이 변화하는 일정기간 동안의 부하를 계산하는 기간부하계산법과 특정시간대의 최대부하를 계산하는 최대부하계산법이 있다. 먼저 기간부하는 합리적인 공조설비의 계획과 연간 운전비를 산출하기 위해 각 지역별 난방도일 또는 표준기상자료를 사용하여 계절 또는 1년 동안에 발생하는 총 부하를 의미한다. 최대부하는 공조설비의 용량을 결정하기 위해 연중 가장 추운 날 또는 더운 날로 가정된 설계용 외기온도를 이용하여 계산한다. 냉방부하의 종류는 태양복사열, 온도차에 의한 전도열, 내부 발생열, 침입/도입 외기 등이 있으며, 열은 현열과 잠열로 구분된다. 냉방부하를 계산할 때 일사의 영향을 고려한 실내외 온도차를 구하는 방법에는 CLTD(Cooling Load Temperature Difference)법, TETD(Total Equivalent Temperature Difference)법, ETD(Equivalent Temperature Difference)법 등이 있다.

빙축열 시스템의 제어에 필요한 냉방부하 예측에는 정확하고 자세한 계산을 필요로 하지 않으며, 하루 동안 냉방부하의 변화 추세와 냉방기간 동안 1일 평균 냉방부하의 변화 등이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 단순한 방법으로 냉방부하를 예측하여 빙축열 시스템의 제어에 활용하고자 한다.

여러 가지 형태의 현열부하를 온도차에 의한 전도열의 형태에 포함시켜서 다음과 같이 간단하게 계산할 수 있다.

$$\dot{Q}_s = \Sigma UA(T_o - T_i) \quad (1)$$

여기서 U는 총합열전달계수, A는 전열면적, T_o 는 외기온도, T_i 는 실내온도를 나타낸다. 유사한 개념으로 모든 잠열부하를 도입외기의 형태에 포함시켜 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{Q}_l = \Sigma \dot{m}(h_o - h_i) \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 은 도입외기량, h_o 는 외기조건에서 공기의 엔탈피, h_i 는 외기온도와 실내 비습도가 만나는 점에서 공기의 엔탈피를 나타낸다. 식 (1)과 (2)에서 ΣUA 와 $\Sigma \dot{m}$ 을 건물의 냉방부하 설계

데이터로부터 계산한 후, 이 값을 이용하여 실제 외기조건에서 시간별 냉방부하를 계산하였다.

4. 냉방부하 비교

본 연구에서 모델로 사용한 병원건물의 총 냉방부하는 7,570,000kcal/h (현열부하 4,690,000kcal/h 잠열부하 2,880,000kcal/h)이며, 이때 실외의 온습도 조건은 Table 1에 나타나 있다.

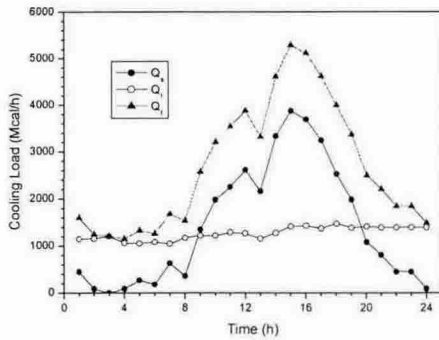
Table 1 Outdoor design conditions in Daejeon

조 건	건구온도 (°C)	습구온도 (°C)	상대습도 (%)	절대습도 (kg/kg)	TAC(%)
여름	31.2	29	85	0.0247	2.5
겨울	-9.9	-11.1	71.7	0.0011	2.5

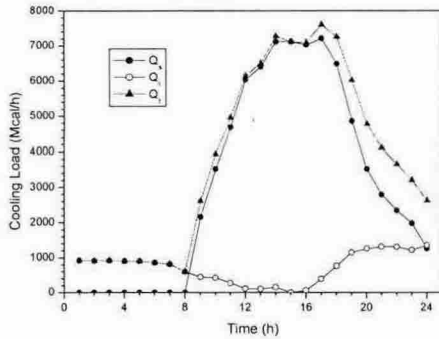
이와 같이 계산한 $\Sigma UA=901,000kcal/h \cdot ^\circ C$ 이고, $\Sigma \dot{m}=359,500kg/h$ 이다. 이 값을 사용하여 2004년 여름철의 실제 외기조건을 사용하여 냉방부하를 계산한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 현열부하는 14시부터 17시 사이에 최대값을 갖고, 잠열부하는 시간에 따라 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 특이한 사항은 설계조건에서는 잠열부하가 현열부하의 반 정도이지만 8월 12일의 경우는 잠열부하가 현열부하에 비해서 훨씬 작다. 그 이유는 인체나 실내기구에서 발생하는 잠열은 외기조건과 거의 무관한데 본 해석에서는 모든 잠열을 외기조건과 연계하여 계산한 결과 때문으로 생각되며, 잠열을 보다 정확하게 반영하기 위한 연구를 계속 수행할 예정이다.

Fig. 6은 냉방부하 실측치와 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로, 7월 20일의 경우는 실측치가 시뮬레이션 값보다 높으나 8월 12일의 경우는 두 값이 상당히 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 냉방부하 실측치는 터보식 냉동기, 흡수식 냉동기, 빙축열조에서 공급된 열량을 합한 것으로 브라인의 온도와 유량, 가스사용량으로부터 환산한 값이므로 정확한 값은 아니다.

Fig. 7은 2005년 9월 8일 모델병원의 총 냉방부하를 나타낸 것이다. 11시경과 18시경의 최고 점은 흡수식 냉온수기와 빙축열조의 방냉이 겹쳐지는 부분으로 실제 냉방부하라 볼 수 없으므로 냉방부하의 피크는 13시경에 발생하는 것을 알 수 있다. 새벽 0시부터 3시 사이에도 부하가 발



(a) July 20th



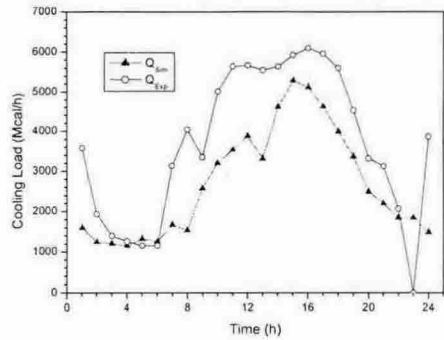
(b) August 12th

Fig. 5 Variation of calculated cooling load during a day

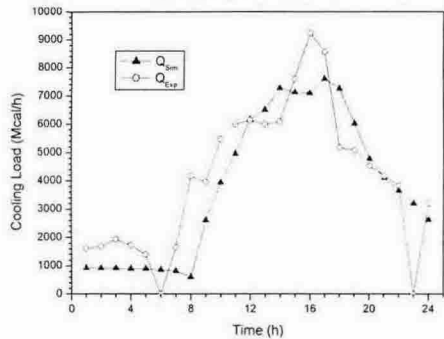
생하며, 이는 값싼 심야전력을 사용하여 빙축열 시스템의 터보냉동기를 사용하여 담당하였다. 8시부터는 흡수식 냉온수기를 가동하여 냉방부하를 담당하고, 오전 10시경 급격한 냉방부하의 증가로 빙축열조와 흡수식 냉온수기 1호기를 동시에 가동하였다. 빙축열조의 방냉과 흡수식 냉온수기의 동시 가동으로 12시부터 14시 사이의 주간 냉방부하 피크치를 담당하고, 빙축열조의 방냉이 끝나는 17시 30분경에 빙축열조 방냉을 중지하고 흡수식 1,2호기를 가동하였다. 그 후 흡수식 냉온수기 1호기를 운전정지하고 빙축열시스템의 터보냉동기를 가동하여 빙축열조에 축냉을 하면서 방냉을 실시하는 병렬운전을 실시하였다. 총 냉방부하 중 40%를 빙축열조가 담당하는 것을 알 수 있다. 주목할만한 것은 그 40%가 주간 냉방부하 피크시간의 냉방부하를 담당함으로써 주간 전력 사용의 억제에 이룰수 있었다는 점이며, 저녁부터 새벽사이에 발생하는 냉방부하도 값싼 심야전력을 사용하는 빙축열시스템의 터보냉동기를 사용하여 처리하여 에너지 활용도를 높

이는 결과를 가져왔다는 것이다.

Fig. 8은 9월 8일 모델병원의 총 냉방부하와 함께 설계온도를 24, 25, 26℃로 변화시켜가면서 예측한 냉방부하 시뮬레이션을 비교한 것이다. 그 중 설계온도 25℃일 때의 시뮬레이션 값이 실제 냉방부하와 가장 유사함을 알 수 있다.



(a) July 20th



(b) August 12th

Fig. 6 Comparison of calculated cooling load with measured value

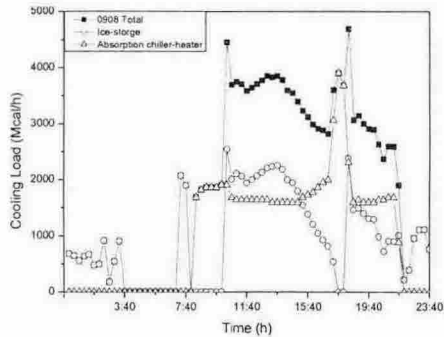


Fig. 7 Variation of measured cooling load during a day

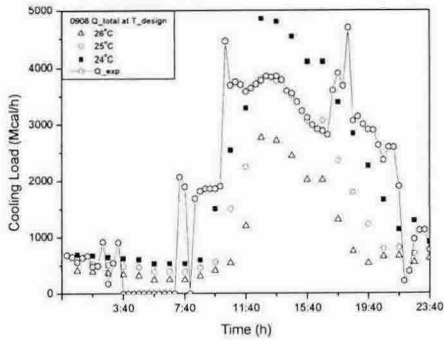


Fig. 8 Comparison of cooling load at various outdoor design temperatures

5. 결론

본 연구에서는 빙축열시스템의 제어를 위한 냉방부하의 예측을 위해 5년간 기상데이터를 분석하여, 온도를 normalize하고, 상대습도와 비습도의 평균을 산출하였다. 그 결과 하루 중 온도와 상대습도의 변화 커브를 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 계산된 온도와 예보된 최고온도, 평균온도 등으로 냉방부하의 예측에 활용하였다. 건물의 냉방부하 설계 데이터를 이용하여 $\sum UA$ 와 $\sum \dot{m}$ 을 계산하였으며, 이를 이용하여 실제 외기조건에서 시간별 냉방부하를 예측하였다. 예측된 냉방부하와 모델 병원의 냉방부하 실측치를 비교한 결과 상당히 잘 일치함을 보였고, 특히 설계온도 25°C, 상대습도 55%일 때 실측치의 추세를 잘 따라갔다.

후 기

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 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.
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. part 1, pp. 1345-1352.
4. Spethmann, D. H., 1993, Application considerations in optimal control of cool storage, ASHRAE Trans., pp. 1009-1015.