

외기조건에 따른 제습냉방시스템의 성능 특성

이 대 영† · 장 영 수

한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터

Performance Characteristics of the Desiccant Cooling System in Various Outdoor and Load Conditions

Dae-Young Lee · Young-Soo Chang

ABSTRACT: Desiccant based air conditioning system offers a promising alternative to conventional one using vapour compression refrigeration for energy saving and greenhouse gas reduction. It is a heat driven cycle which has high potential for the use of low grade heat source such as the waste heat from the cogeneration plant or the solar thermal energy. In this study, the cooling performance of a desiccant cooling system incorporating a regenerative evaporative cooler was characterized in various operation conditions through numerical simulation. The cooling capacity and COP were evaluated at various outdoor conditions, regeneration temperatures, and supply flow rates. Based on the performance characteristics, the optimal control scheme was discussed to minimize the cooling cost at part load condition.

Key words: Desiccant cooling system(제습냉방시스템), Low grade heat source(저온열원), Dehumidifier rotor(제습로터), Regenerative evaporative cooler(재생증발식 냉각기)

1. 서 론

집단에너지사업은 난방중심의 열공급과 계절적 특성에 의해 동고하저의 열수요 형태를 보이고 있어 열병합발전의 높은 효율에도 불구하고 하절기에는 열수요치가 적어 설비이용률이 낮다. 따라서 지역난방의 열병합발전 비중이 점차 증가하는 추세로 비추어 볼 때 하절기 열병합발전의 이용률을 높이고 향후 집단에너지사업의 손익구조 개선과 경쟁력 제고를 위하여 지역냉방 공급기술 개발 및 하절기 냉방수요 개발이 절실히 요구된다. 특히, 하절기 지역난방열의 특성상 상대적으로 저온의 열원을 활용한 냉방시스템이 요구되

며, 또한 지역난방 공급의 최말단인 단위세대에 냉방기기를 설치함으로써, 공동주택에 지역냉방을 공급할 수 있는 기술이 매우 효율적일 것이다.

이러한 목적으로 제습냉방 기술은 매력적인 대안이 될 수 있다. 제습냉방이란 제습기를 이용하여 공기 중의 습기를 제거하여 잠열부하를 처리하며, 건조한 공기 속에서 물 증발이 활발히 일어나는 원리를 이용, 공기 온도를 낮추어 냉방을 공급하는 방법이다. 제습기에 흡착/흡수된 수분을 날려 보내고 제습기를 재생할 때에 열이 소요되고 이 열은 상대적으로 저온이 활용될 수 있기에 지역난방열을 이용함으로써 전체 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 더욱이 요즈음 문제가 되고 있는 실내 공기질 문제나 환경 문제, 지구온난화와 관련하여도 많은 장점이 있는 냉방시스템으로 많은 주목을 받고 있다.⁽¹⁾ 이와 관련된

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5674; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: ldy@kist.re.kr

기존 연구로서 타당성조사^(2,3), 성능예측⁽⁴⁻⁶⁾, 제습제^(7,8), 제습로터 해석⁽⁹⁻¹¹⁾ 등의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 동 연구그룹의 선행 연구를 통해 얻은 결과로서 Fig. 1를 기준 시스템으로 선정하여 외기 온습도 조건, 부하조건 등이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 제습냉방시스템의 최적제어 방법에 대하여 논의한다.

2. 제습냉방시스템 개요

제습냉방시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 제습로터, 현열교환기, 증발식냉각기, 재생공기 가열기 등으로 구성된다.⁽¹²⁾ 공조공간으로 공급하기 위해 혼합된 공기는 (①+⑦)→(②) 제습로터를 지나며 고온건조해지고 (②)→(③), 재생을 위해 유입된 공기와 열교환하며 냉각된다 (③)→(④). 이때, 재생을 위해 혼합된 공기를 재생증발식 냉각기를 통과시켜 습도변화없이 냉각시키고 (④)→(⑤), 직접 증발식냉각기로 추가 냉각되어 (⑤)→(⑥) 공조공간으로 공급된다. 한편 외기는 현열교환기를 통과하여 열을 얻은 후 (⑦)→(⑧), 제습로터의 재생을 위해 고온으로 가열된다 (⑧)→(⑨). 제습로터의 재생부를 통과하면서 제습로터에 흡착된 수분을 증발시킨다 (⑨)→(⑩).

3. 제습냉방시스템 성능해석

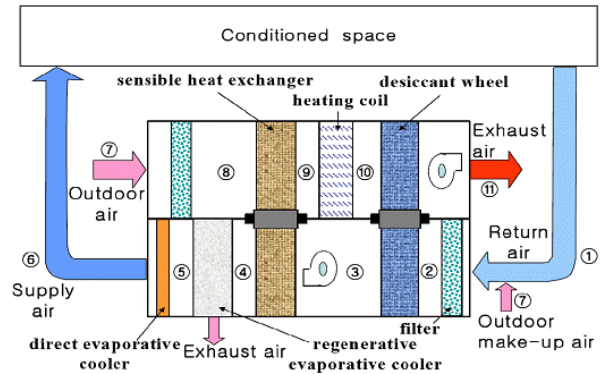
제습로터와 재생증발식 냉각기 등 각 구성요소에서의 열 및 물질전달 균형식을 수치해석하는 프로그램을 조합하여 작성한 제습냉방시스템 해석 프로그램을 이용하여 외기온도 및 부하조건이 변화할 때의 시스템 성능을 해석하였다.

시스템 성능은 시스템의 냉방용량과 (식(1)), 이 값과 재생공기를 가열하는데 필요한 열량(식(2))과의 비로 정의되는 COP (식(3))를 살펴봄으로써 판단한다.

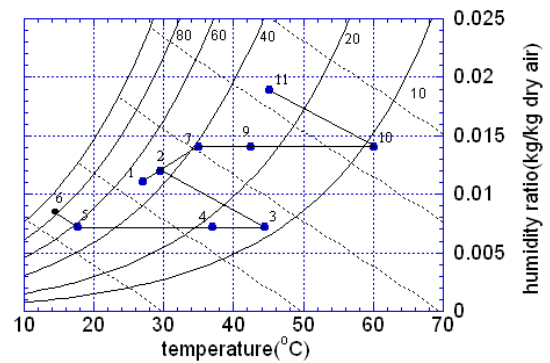
$$Q_{cool} = \dot{m}_6 (i_4 - i_6) \quad (1)$$

$$Q_{reg} = \dot{m}_7 (i_{10} - i_9) \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_{cool}}{Q_{reg}} \quad (3)$$



(a) System configuration



(b) Psychrometric chart

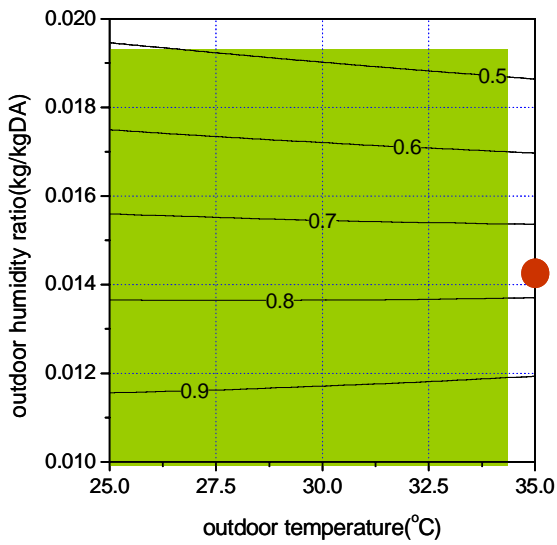
Fig. 1 Desiccant cooling system

본 연구의 대상이 된 제습냉방시스템은 ARI 조건에서 재생공기온도 60°C인 경우, COP 0.76, 냉방용량 4.2 kW를 나타낸다.

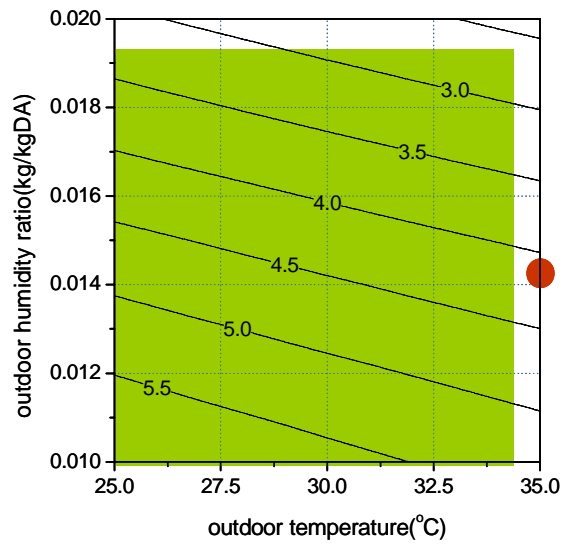
4. 제습냉방시스템의 성능특성

실내조건이 27°C, 50%RH, 재생온도가 60°C 일 때, 외기조건 변화에 따른 제습냉방시스템의 성능변화를 Fig. 2에 나타내었다. COP는 외기온도 변화에 거의 관계없이 일정한 반면, 외기습도에 따라 달라지며, 외기습도가 0.02 kg/kg인 경우에는 COP가 0.5 이하로 감소하게 된다. 냉방용량은 외기온도와 습도가 높아질수록 감소하는데, 외기온도보다는 외기습도의 영향을 크게 받는다. 외기온도가 30°C, 습도가 0.020 kg/kg인 경우, 냉방용량은 ARI 조건에서의 4.2 kW에 비하여 35%가량 감소한 2.7 kW를 나타낸다.

이 그림에서 붉은 점으로 표시된 지점은 ARI 외기조건이며, 음영처리된 영역은 서울지역 하절

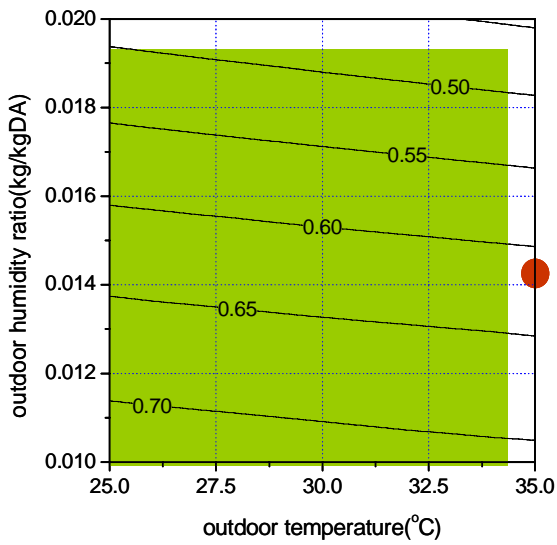


(a) COP

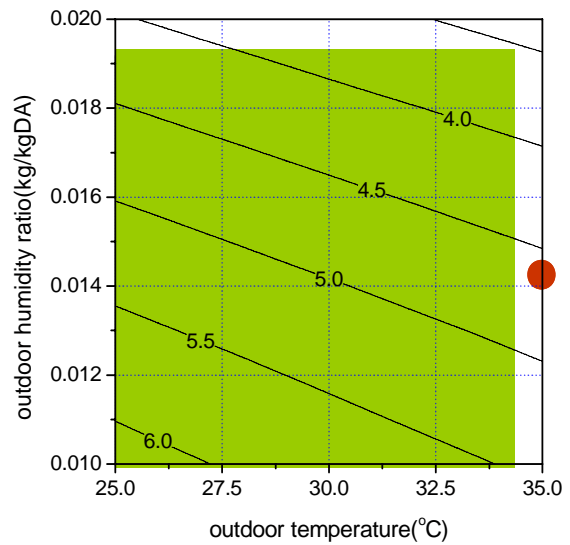


(b) Q_{cool}

Fig. 2 Cooling performance with respect to the outdoor condition. ($T_{reg}=60^{\circ}\text{C}$)



(a) COP



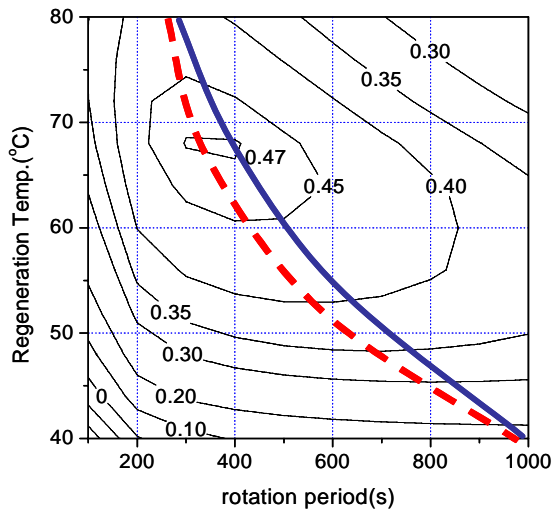
(b) Q_{cool}

Fig. 3 Cooling performance with respect to the outdoor condition. ($T_{reg}=70^{\circ}\text{C}$)

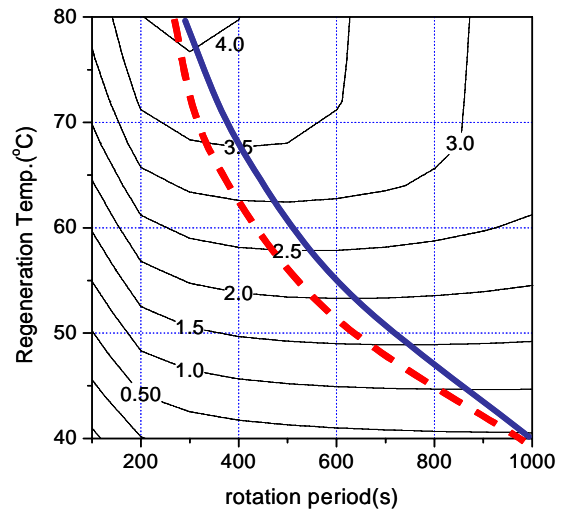
기 발생빈도가 높은 외기조건을 나타낸다. 외기 습도가 높은 경우 냉방용량이 감소하는 것은 환기부하가 증가하여 제습로터의 제습부하가 증가함에 따라 제습로터 출습습도가 증가하기 때문이다. 따라서 외기습도가 높은 경우에도 제습로터 출습습도를 충분히 낮게 유지할 수 있도록 하는 방안이 필요하며, 이를 위하여 습도가 높아지는 경우 재생온도를 높이는 것을 고려할 필요가 있다.

Fig. 3에 재생공기 온도가 70°C 인 경우의 외기

조건 변화에 따른 제습냉방시스템의 성능변화를 나타내었다. 재생공기 온도가 70°C 로 증가한 경우 냉방용량이 재생공기 온도가 60°C 인 경우에 비하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 고습도 조건에서 증가비율이 큰 것을 알 수 있다. 외기조건 30°C , 0.020 kg/kg 일 때, 냉방용량은 3.7 kW 로 재생공기 온도가 60°C 인 경우에 비하여 40% 가까이 냉방용량이 증가한다. 재생공기 온도가 증가하면 COP는 냉방용량과는 반대로 감소하지만, 고습도 영역에서는 감소정도가 미미하

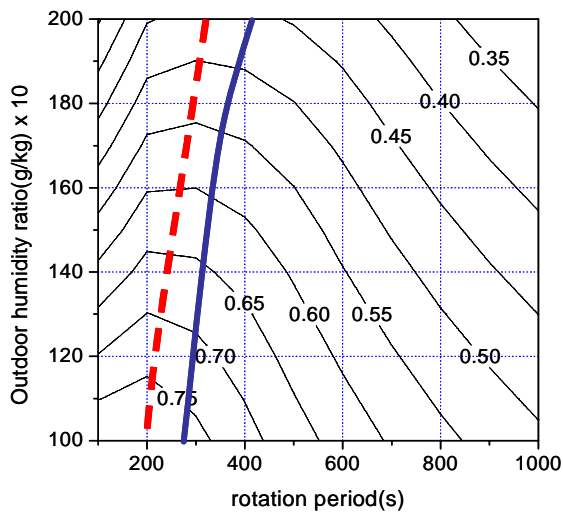


(a) COP

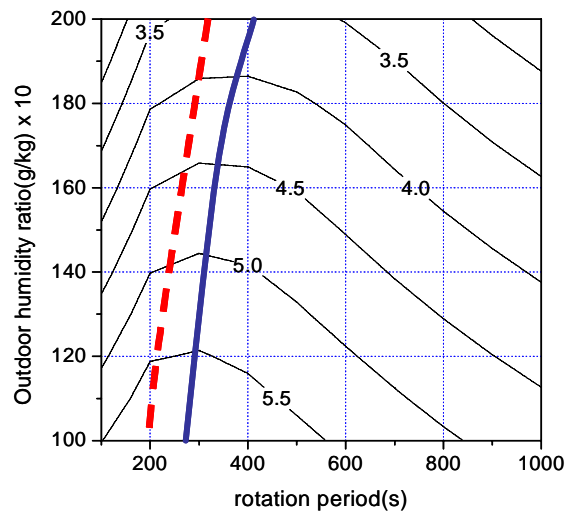


(b) Q_{cool}

Fig. 4 Optimal rotation period of the desiccant rotor with respect to the regeneration temperature. (T_{od} 30°C, w_{od} 0.020 kg/kg)



(a) COP



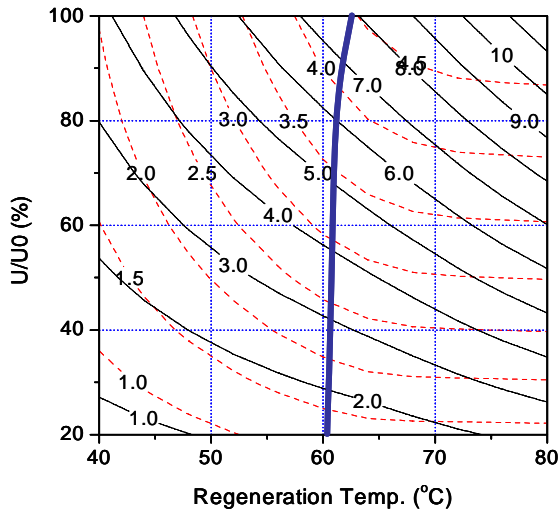
(b) Q_{cool}

Fig. 5 Optimal rotation period of the desiccant rotor with respect to the outdoor humidity ratio. (T_{reg} 70°C, T_{od} 30°C)

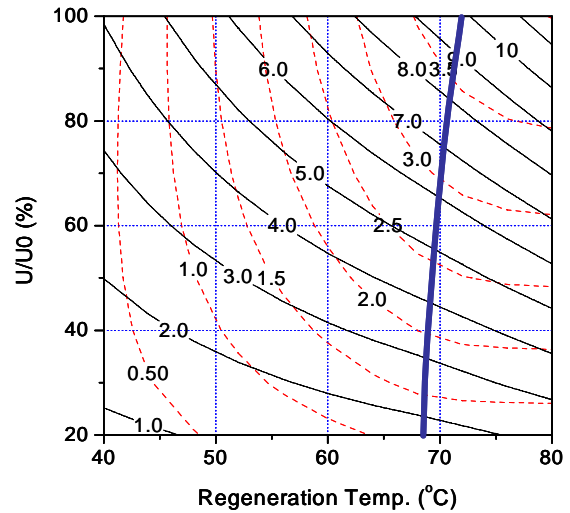
며, 저습도 영역에서는 큰 것을 알 수 있다. 따라서 고습도 영역에서는 냉방용량의 감소를 억제하기 위하여 재생공기 온도를 증가시키는 것이 필요하지만, 습도가 낮은 경우에는 에너지효율 측면에서 재생온도를 낮게 제어하는 것이 유리하다.

한편 제습로터의 제습성능은 특정한 제습로터 회전속도에서 최대가 되며, 이 최적 회전속도는 재생온도, 풍량 등 여러 가지 인자에 따라 달라

지는 것으로 알려져 있다. 재생온도가 60°C인 경우에는 제습로터의 최적회전주기는 400 s 정도인 것으로 실험 및 시뮬레이션을 통하여 확인되었으나, 재생온도가 달라지는 경우에는 회전주기의 영향을 다시 검토할 필요가 있다. 외기조건이 30°C, 0.02 kg/kg인 경우, 재생공기 온도와 제습로터 회전주기 변화에 따른 냉방성능의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 굵은 실선은 냉방용량이 최대가 되는 지점을 연결한 선이며,



(a) T_{od} 30°C, w_{od} 0.015 kg/kg



(b) T_{od} 30°C, w_{od} 0.020 kg/kg

Fig. 6 Effect of the regeneration temperature and the flow rate.

굵은 점선은 성적계수가 최대가 되는 지점을 연결한 선이다. 냉방용량이 최대가 되는 회전주기가 성적계수가 최대가 되는 회전주기보다 길지만, 그 차이는 크지 않다. 재생공기 온도가 높아질수록 최적 회전주기는 점차 짧아지지만, 재생 온도가 70°C 이하인 경우에는 400 s 근방에서 성적계수 및 냉방용량의 변화가 크지 않으며, 외기조건이 다른 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있다.

외기습도 변화에 따른 최적 회전주기의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 재생공기 온도는 70°C이며, 외기 온도는 30°C이다. 외기습도가 낮아질수록 최적 회전주기는 감소하지만, 외기습도가 0.015 kg/kg 이상인 경우에는 회전주기가 400 s인 경우에 비하여 회전주기의 최적화로 인한 성적계수와 냉방용량의 증가가 5% 미만이다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 고려할 때, 재생공기 온도가 60°C 이상이고, 외기습도가 0.015 kg/kg 보다 높은 경우에는 실용적인 측면에서는 재생 온도에 관계없이 회전주기를 일정하게 유지하여도 무방하다.

냉방부하가 제습냉방시스템의 최대냉방용량보다 작은 경우, 냉방용량 제어를 통하여 냉방출력을 감소시켜야 한다. 제습냉방시스템에서 냉방출력을 감소시키는 방법으로는 풍량을 감소시키는 방법과 재생공기 온도를 감소시키는 방법이 있으며, 부분부하 조건에서 에너지효율을 최대화할

수 있는 제어방법을 선택하여야 한다.

외기조건이 30°C인 경우, 외기습도가 0.015 kg/kg와 0.020 kg/kg인 두가지 경우에 대하여, 재생공기 온도와 풍량 변화에 대한 냉방출력과 에너지비용의 등고선을 중첩하여 Fig. 6에 나타내었다. 제습냉방시스템의 소비전력은 다음과 같이 계산하였다.

$$(W/W_0) = (U/U_0) \quad (4)$$

W_0 는 최대유량 경우의 소비전력으로 이 계산에서는 500 W를 적용하였다. 에너지비용 계산에서 전력량단가와 열량단가의 비율이 3인 경우 고려하여 나타내었다.

부하가 감소하는 경우 최적 제어방법은 동일한 냉방출력을 얻기 위해 필요한 에너지비용을 최소화할 수 있는 방법이며, 이는 Fig. 6에서 냉방출력의 등고선과 에너지비용의 등고선이 평행한 지점으로 나타난다. 이러한 지점을 연결한 경로를 굵은 실선으로 나타내었는데, 외기습도가 0.015 kg/kg인 경우에는 부하율에 관계없이 재생공기 온도를 60°C로 일정하게 유지하고, 부하율 감소에 따라 풍량을 감소시키는 방법이 최적 제어방법임을 알 수 있다.

외기습도가 0.020 kg/kg으로 높은 경우에도 재생공기 온도를 일정하게 유지하고 풍량을 감소시켜 냉방출력을 감소시키는 것이 최적제어 방법임

을 알 수 있다. 단 외기습도가 높은 경우에는 재생온도를 70°C로 높게 유지하는 것이 에너지비용 최소화에 유리하다.

5. 결 론

사이클 시뮬레이션을 통하여 제습냉방시스템의 최적제어와 관련한 연구를 수행하였다.

COP와 냉방용량은 외기온도보다는 외기습도의 영향을 크게 받으며, 외기습도가 높아질수록 감소하여, 외기습도가 0.015 kg/kg에서 0.02 kg/kg으로 증가할 때, COP와 냉방용량이 35% 정도 감소한다. 외기습도가 높아지는 경우, 재생온도를 증가시키면, 냉방용량을 외기습도에 관계 없이 거의 일정하게 유지할 수 있다.

부분부하 조건에서 냉방용량 제어방법으로는 공급풍량을 감소시키는 방법과 재생공기 온도를 감소시키는 방법이 있는데, 재생공기 온도를 일정하게 유지하고, 공급풍량을 조절하는 방법이 에너지비용 최소화에 유리하다.

참고문헌

1. Daou, K. Wang, R. Z. and Xia, Z. Z., 2006, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 10, pp. 55-77.
2. Jain, S. and Dhar, P. L., 1995, Int. J. Refrig., Vol. 18, pp. 287-296.
3. Halliday, S. P., Beggs, C.B. and Sleigh, P.A., 2002, Appl. Thermal Engng., Vol. 22, pp. 1129-1140.
4. Dai, Y.J., Wang, R.Z., Zhang, H.F. and Yu, J.D., 2001, Appl. Thermal. Engng., Vol. 21, pp. 1185-1205.
5. Mazzei, P., Minichiello, F. and Palma, D., 2002, Appl. Thermal Engng., Vol. 22, pp. 545-560.
6. Henning, H.-M., Erpenbeck, T., Hindenburg, C. and Santamaria, I.S., 2001, Int. J. Refrig., Vol. 24, pp. 220-209.
7. Aristov, Yu.I., Tokarev, M.M., Gordeeva, L.G., Snytnikov, V.N. and Parmon, V.N., 1999, Solar Energy, Vol. 66, 165-168.
8. Liu, Y.F. and Wang, R. Z., 2003, Sci. China, Vol. 46, pp. 551-559.
9. Zheng, W. and Worek, W.M., 1993, Numerical Heat Transfer, A23, pp. 211-232.
10. Dai, Y.J., Wang, R.Z. and Zhang, H.F., 2001, Int. J. Therm. Sci., Vol. 40, pp. 400-408.
11. Sphaier, L.A. and Worek, W.M., 2004, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 3415-3430.
12. 이재완, 이대영, 강병하, 2004, 설비공학논문집, 제 16권, pp. 566-573.