

실증 실험을 통한 하이브리드 제습냉방 시스템의 성능 분석

안 준* · 윤창호** · 강병하*†

*국민대학교 기계시스템공학부, ** 국민대학교 대학원 기계공학과

Performance Analysis of Hybrid Desiccant Chiller Based on Field Test

Joon Ahn*, Changho Yun** and Byung Ha Kang*†

* School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.,

** Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin Univ.

(Received September 26, 2012 ; Revised May 3, 2013 ; Accepted May 3, 2013)

Key Words: Hybrid Desiccant Chiller(하이브리드 제습냉방 시스템), Field Test(실증실험), District Cooling (지역 냉방)

초록: 2011년 7월과 8월에 걸쳐 하이브리드 제습냉방기의 실증 실험을 진행하였다. 계측 자료들은 인터넷 회선을 통해 원격 모니터링을 하며 및 취득하였다. 취득한 자료를 바탕으로 하여 하이브리드 제습냉방시스템의 실거주 환경에서 외기조건에 따른 성능을 분석하였다. 또한 실증실험에서 나타난 외기 조건에 대해 성능 시뮬레이션을 수행하여 실험값과 비교하였다. 실험과 시뮬레이션 결과는 대체로 일치하였다. 외기습도가 높은 경우 예측결과와 같이 실증 실험에서도 시스템 성능이 감소하는 것이 확인되었다.

Abstract: Field tests of hybrid desiccant cooling systems were conducted from July to August 2011. Data were monitored and transferred in real time over the Internet. The monitored variables were analyzed to determine the performance characteristics under outdoor conditions. A series of system simulations has been conducted for outdoor conditions of the field tests. The results agree well with the experimental data in general. The system performance has been shown to deteriorate for wetter conditions, as predicted by the simulation.

- 기호설명 -

$C_{p,a}$: 건공기비열	[kJ/kg℃]
$C_{p,hw}$: 온수비열	[kJ/kg℃]
$C_{p,v}$: 증기비열	[kJ/kg℃]
i_{\in}	: 시스템 흡입구 엔탈피	[kJ/kg]
i	: 시스템 토출구 엔탈피	[kJ/kg]
\dot{m}_{air}	: 공기 질량유량	[kg/s]
\dot{m}_{hw}	: 온수 질량유량	[kg/s]
P_a	: 건공기 분압	[Pa]
P_g	: 포화압력	[Pa]
ρ_{air}	: 공기 밀도	[kg/m ³]
ρ_{hw}	: 온수 밀도	[kg/m ³]
ϕ	: 상대 습도	

Q_{cool}	: 냉방용량	[kW]
Q_{ele}	: 소비전력	[kW]
Q_{reg}	: 재생열량	[kW]
$T_{in,hw}$: 온수코일 입수온도	[℃]
$T_{out,hw}$: 온수코일 출수온도	[℃]
\dot{V}_{air}	: 공기 체적유량	[m ³ /s]
\dot{V}_{hw}	: 온수 체적유량	[m ³ /s]
Y	: 절대습도	[kg/kg]

1. 서 론

최근 범국가적으로 발생했던 대형 정전 사태는 우리의 에너지에 대한 관심을 한 층 끌어주었고, 특히 우리나라의 하절기 냉방 에너지 소비구조에 문제가 있음을 시사해 주었다. 지구 온난화에 따른 기록적인 폭염과 더불어 생활수준이 향상되어 하절기 냉방 수요 증가는 거스를 수 없는 흐름이 되고 있다. 따라서 전기사용량과 탄소배출량은

† Corresponding Author, bhkang@kookmin.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

줄이면서, 냉방 및 습도조절이 가능한 기기의 개발이 필요하다.

전기 사용과 탄소 배출을 줄일 수 있는 방법으로는 열병합 발전을 들 수 있다. 국내의 열병합 발전 보급률은 꾸준히 증가하는 추세이지만 국가의 전력수급계획에는 미치지 못하고 있는데, 하절기 열수요가 마땅하지 않아 하절기 설비 가동률이 10% 정도에 머물고 있는 것도 주요 원인으로 꼽힌다. 따라서 열수요가 적은 하절기에 열을 이용하는 냉방 시스템의 확대가 필요하다.

열을 이용하는 대표적 냉방 방식으로 흡수식 냉동기가 있지만 90℃ 이상의 고온의 열원을 요구하므로 열병합 발전 배열을 주 열원으로 하는 지역에너지 망에 직접 연계해 사용하기에는 곤란하다. 지역난방에 연계하기 위해서는 보다 낮은 열원에서 구동이 가능한 냉방시스템이 요구되는데 이와 같은 조건에 맞는 시스템으로서 제습 냉방 시스템이 제안 및 개발 되고 있다.

제습냉방 시스템은 60℃의 저온 열원만 있으면 충분히 구동이 가능하며 국내에서는 1990년대 초 한국과학기술연구원에서 개발을 시작하여 현재는 상용화 단계에 있다.^(1,2) 해외에서의 연구는 더욱 일찍이 시작 되어 Macro 등⁽³⁾은 태양열을 이용하는 제습냉방기를 백화점에 설치하여 실증하는 연구를 진행한 바 있다. 제습냉방 시스템은 Fig. 1(a)와 같이 제습로터, 현열로터, 증발식 냉각기로 구성된다. 구성 요소 중에 현열로터는 가격이 비싸고, 부피가 커 단위세대용으로 사용하기에는 곤란하여 현열로터를 증기 압축식 냉동기로 대체하는 하이브리드 제습냉방 시스템이 제안되었다.^(4,5)

본 연구는 하이브리드 제습냉방 시스템의 상용화를 위한 현장 실험을 바탕으로 진행되었다. 수원 영통에 위치한 아파트 네 세대에 제습냉방기를 각 한 기씩 설치하여 2011년 하절기동안 가동하였다. 최대한 자유로운 사용을 유도하기 위하여 사용상에 제약을 두지 않아 야간 또는 비가 오는 날에도 운전 자료를 확보할 수 있었다. 이와 같은 자료를 바탕으로 외기 온·습도 변화에 따른 성능변화를 관찰하였다. 또한 한국과학기술연구원 제습냉방 연구 그룹의 시뮬레이션 코드⁽⁶⁻⁸⁾를 지원 받아 실증 실험이 수행된 외기 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 냉방능력과 성능계수를 실험결과와 비교 분석하였고 이를 바탕으로 모형의

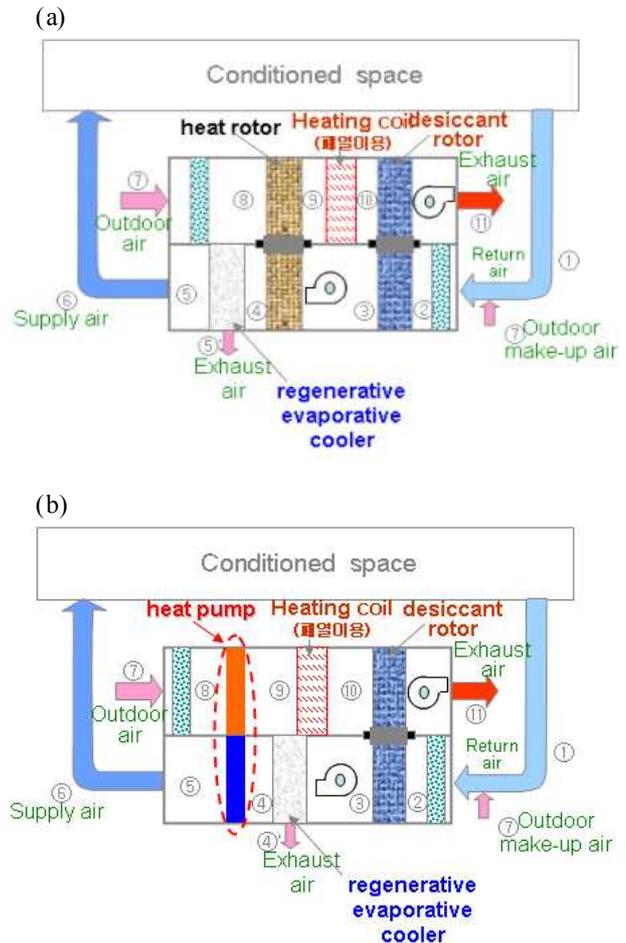


Fig. 1 Schematic diagram of desiccant cooling system; (a) Conventional desiccant cooling system; (b) Hybrid desiccant cooling system

타당성을 검증하고 실거주 환경 운전에서 나타난 시스템의 특성을 제시하였다.

2. 실증 실험 및 분석

2.1 제습냉방 시스템 및 실험 방법

기본적인 제습냉방 시스템은 Fig. 1(a)에 보인 것과 같이 제습로터, 현열로터, 증발식 냉각기로 구성된다. 본 연구에서는 Fig. 1(b)에 제시한 것과 같은 하이브리드 제습냉방 시스템을 실증하였다. 두 경우 모두 가운데를 경계로 하여 상부가 재생부이고, 하부가 제습부이다. 제습부에서는 실내기 70%와 외기 30%로 구성된 혼합기가 제습로터에서 건조 후, 현열로터에서 예냉이 되고, 증발식 냉각기에서 최종 냉각이 되어 실내로 공급된다.

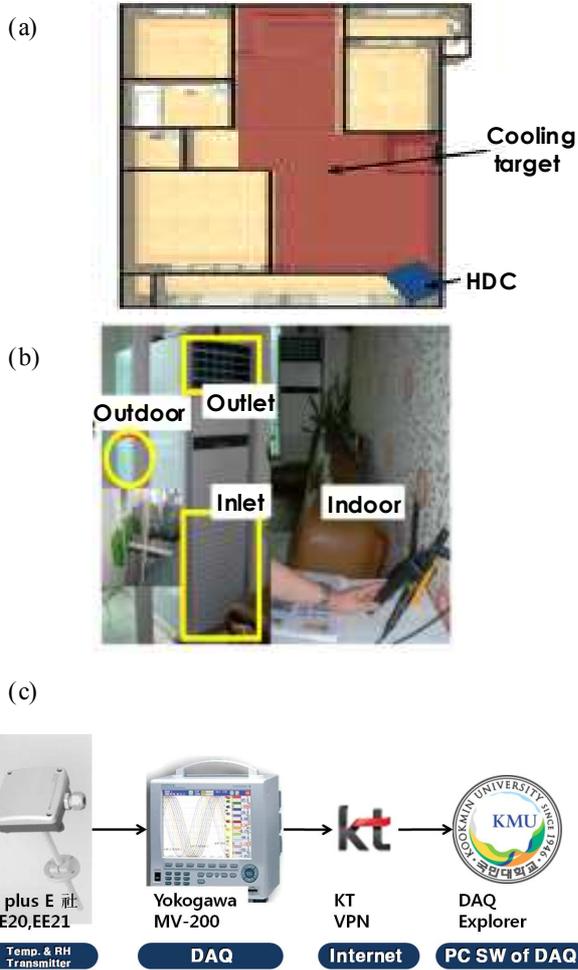


Fig. 2 Field test site; (a) Floor plan; (b) Measuring point; (c) Remote data monitoring

하이브리드 시스템의 경우 현열로터가 전기식 열펌프로 대체된다. 이때 증발식 냉동기와 열펌프의 설계 COP는 각각 0.64와 3이다.

실증은 수원 영통 K 아파트에서 4세대에 4기의 하이브리드 제습냉방 시스템을 각각 설치하여 진행하였다. 최대한 자유로운 사용을 유도하기 위해 사용자에게 사용시간 및 운전설정 등의 제약은 두지 않았다. 실험 장소가 되는 아파트는 Fig. 2(a)에 제시한 것처럼 공급면적 105 m²로 거실과 주방만을 냉방하였다. 제습냉방기의 형상은 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 스탠드 형 증기 압축식 냉방기와 유사하므로 거실 한쪽 면에 설치하였다.

설치된 기기에 대하여 공기의 온·습도를 Fig. 2(b)와 같이 흡입 및 토출구, 외기 흡입 덕트, 현관 옆 등 네 지점에서 측정하였다. 냉방기 흡입

및 토출구는 냉방기의 냉방 능력을 평가하기 위해서, 흡입덕트는 외기 습도와 냉방기 성능의 관계 관찰하기 위하여 측정하였다. 냉방 능력을 평가하기 위해 필요한 토출 공기의 유량은 외기조건에 민감하지 않으므로 실험실 환경에서 측정된 자료를 사용하였다. 현관에서 측정되는 온·습도 자료는 실제 사용자가 느끼는 공기의 상태를 평가하기 위해 이용된다. 또한 냉방기의 소비에너지를 측정하기 위하여 전력계와 열량계를 설치하였다. 실험에 사용된 열량계는 유량과 온수의 온도차를 별도로 측정하여 식 (1)과 같이 열량을 산출하는 방식이다. 질량유량은 체적유량으로부터 식 (2)를 통해 구한다.

$$Q_{reg} = \dot{m}_{hw} C_{p,hw} (T_{in,hw} - T_{out,hw}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{hw} = \rho_{hw} \times \dot{V}_{hw} \quad (2)$$

세대주가 실제로 거주하는 조건에서 실험을 수행하였으므로 실험은 원격모니터링을 통해 진행하였다. 데이터 취득기에서 신호를 수집하고, 데이터 취득기를 인터넷에 연결하여 연구실에서 모니터링 및 자료획득을 실시하였다. 모니터링 계통을 Fig. 2(c)에 나타내었다.

2.2 실증 자료 분석

각 데이터들은 시스템의 작동유무에 관계없이 매 30초마다 기록되었다. 운전 조건 파악을 위해 작동 신호를 취득하여 1시간 내내 온부하 상태로 가동한 데이터만을 분석에 활용하고, 안정화 시간을 고려하여 가동한지 두 시간이 지난 후 데이터만을 분석에 활용하였다. 데이터는 오차를 줄이기 위해 1시간 단위로 시간평균을 취하였다.

냉방시스템의 성능은 냉방능력과 성적계수(COP)로 평가하였다. 냉방능력은 식 (3)처럼 흡입구와 토출구의 공기 엔탈피 차에 공기의 질량 유량을 곱하여 산출한다. 공기의 질량유량 산출식은 공기의 밀도와 체적유량의 곱인 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$Q_{cool} = \dot{m}_{air} \times (i_{in} - i_{out}) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \times \dot{V}_{air} \quad (4)$$

식 (3)에서 엔탈피 i 는 식 (5)로 표현되는 습공기의 엔탈피이다.

$$i = i_a + i_v = C_{p,a}T + (i_{f,g,v} + C_{p,v}T)Y \quad (5)$$

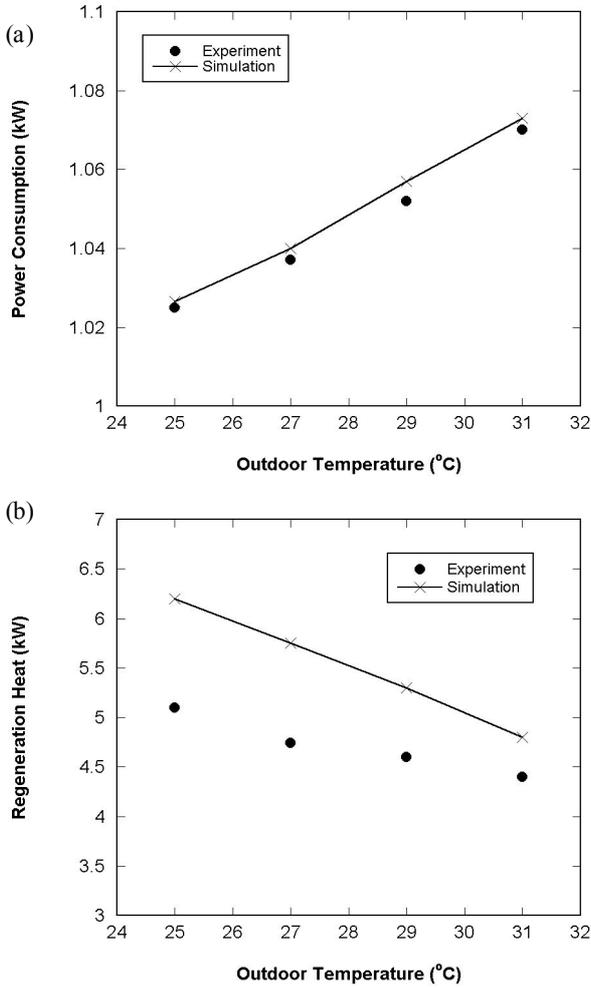


Fig. 3 Energy consumption according to the temperature of the outdoor air; (a) Power consumption (kW); (b) Regeneration heat (kW)

절대습도 Y 는 식 (6)으로 구할 수 있다.

$$Y = \phi \cdot 0.622 \frac{P_g}{P_a} \quad (6)$$

냉방능력과 함께 냉방시스템의 성능을 평가하는 기준이 성적계수(COP)이다. 일반적인 증기압축식 냉동 시스템의 경우 입력에너지로서 압축기를 구동하는 전기만 고려하지만 하이브리드 제습냉방 시스템의 경우, 냉방을 위해 재생열도 고려해야 하므로 새로운 COP를 정의해야 한다. 본 연구에서는 식 (7)에 나타난 것과 같이 냉방능력을 소비전력과 재생열량의 합으로 나눈 값으로 COP를 정의하였다.

$$COP = \frac{Q_{cool}}{Q_{ele} + Q_{reg}} \quad (7)$$

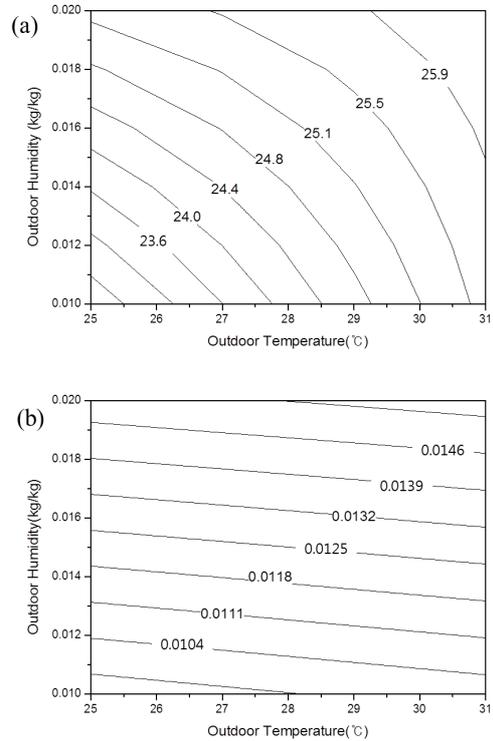


Fig. 4 Inlet air conditions subject to the change of the outdoor air conditions; (a) Temperature contours (°C); (b) Humidity ratio contours (kg/kg)

3. 결과 및 토의

하이브리드 제습냉방 시스템의 성능 변화 경향을 알아보기 위해 소비전력, 재생열량, 흡입기온·습도, 냉방능력 및 성능계수에 대한 분석을 실시하였다.

3.1 소비전력 및 재생열량

하이브리드 제습냉방 시스템의 소비전력량을 분석한 결과, 평균 1.04 kW의 소비전력량을 보였다. Fig. 3(a)를 보면 실험결과가 시뮬레이션 예측결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 두 결과 모두 외기 온도가 올라감에 따라 소비전력량이 상승하는 경향을 보인다. 이는 시스템 내에 있는 증기 압축식 냉동기의 영향으로 판단된다. 외기온도가 올라감에 따라 증기 압축식 냉동기의 응축 온도가 올라가는데 이는 체적효율 저하와 압축기 부하 증가로 이어지기 때문이다.

재생열량은 평균 4.8 kW를 보였다(Fig. 3(b)). 시뮬레이션 결과와 비교하면 외기 온도에 따라

정량적으로는 10~20% 작은 값을 보이거나 정성적으로는 두 결과 모두 소비전력과 반대로 외기온도가 올라감에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 외기 온도가 증가하면서 온수코일과 외기 간의 온도차가 감소하여 열교환량이 줄었기 때문이다. 실험과 시뮬레이션 값의 차이는 모델링 과정에서 증발냉각기 수막에 의한 열저항을 무시하여 실제보다 재생열량을 높게 예측한 것으로 생각된다.

3.2 흡입 온·습도

흡입 조건은 시뮬레이션의 입력 항에 해당하므로 시뮬레이션 결과는 의미를 갖지 않는다. 반면 실증 자료에서 흡입온도는 외기조건에 따라 실내온도의 변화를 나타낸다. 실외 온·습도에 따른 흡입온도 변화를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 외기온도가 올라갈수록, 그리고 외기습도가 올라갈수록 흡입 온도가 높아지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 제습냉방기 자체의 성능 변화보다는 외기 조건이 실내 조건에 더 많은 영향을 준 것으로 보인다.

흡입습도의 경우(Fig. 4(b)), 외기 절대습도가 올라 갈수록 흡입 습도가 올라감을 확인할 수 있다.

이는 제습냉방 시스템의 영향보다 외기에 영향을 많이 받는 것으로 간주할 수 있다. 흡입온도와는 달리 외기온도가 올라갈수록 흡입 절대습도가 낮아지는 경향을 보이거나 영향은 상대적으로 작아 Fig. 4(a)에서 등습도선이 수평선에 가깝게 분포하게 있다.

3.3 냉방능력

현장시험을 진행하는 동안 평균 냉방능력은 4.5 kW를 나타내었다. 냉방능력에 영향을 줄 수 있는 주요인자로는 외기 온·습도를 들 수 있다. 시스템 제습성능에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 인자이기 때문이다. 분석결과 외기 절대습도가 올라 갈수록 냉방능력이 낮아짐을 확인할 수 있다(Fig. 5(a)). 이는 시스템 내에서 가장 큰 냉방부하를 감당하는 증발식 냉각기에 습한 공기가 들어가면서 증발이 원활히 이루어지지 않아 냉방능력이 떨어졌기 때문이다. 외기온도의 경우 증가할수록 냉방능력이 증가하는 경향을 보인다. 이는 실내온도가 외기온도에 따라 동반상승하여 냉방기의 엔탈피 제거 잠재량이 높아졌기 때문이다.

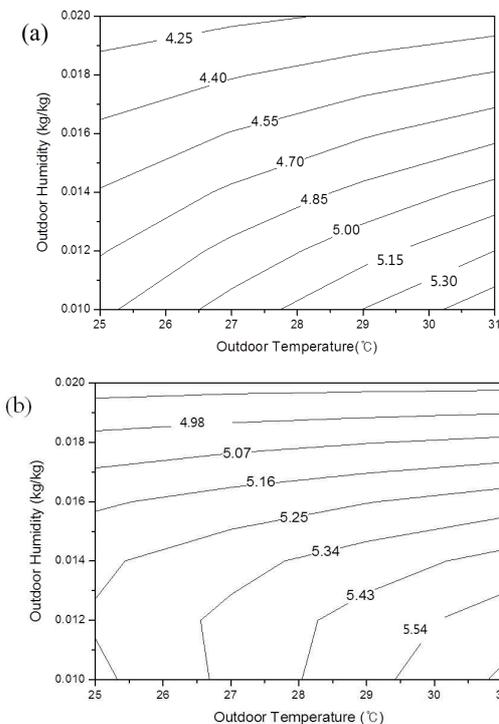


Fig. 5 Cooling capacity contours subject to the change of outdoor air conditions (kW); (a) Experiment; (b) Simulation

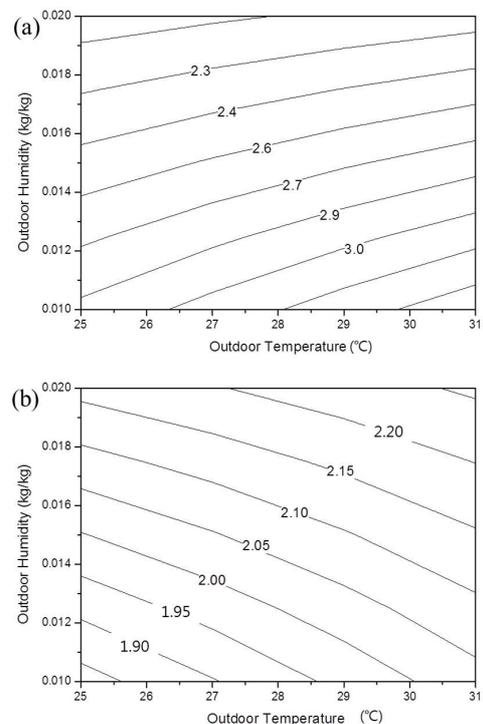


Fig. 6 Heat rejection contours subject to the change of outdoor air conditions(kW); (a) Sensible heat; (b) Latent heat

동일한 조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 5(b)에 제시하였다. 전체적으로 실제 얻은 결과에 비해 냉방능력을 높게 예측하고 있는데 이는 수막의 열저항을 무시하는 가정을 도입하여⁽⁸⁾ 증발냉각기의 성능을 과도하게 예측했기 때문인 것으로 생각된다. 실험 결과와 마찬가지로 온도와 습도가 증가함에 따라 냉방능력이 증가하는 경향을 보이나 외기 절대습도가 높은 경우 등고선의 기울기가 크게 낮아지면서 온도보다는 습도의 영향을 크게 예측하는 경향을 보인다.

엔탈피를 현열과 잠열로 나누어 분석하면(Fig. 6) 온도에 따라서는 상승한다는 같은 경향을 보이나, 습도에 따라서는 서로 다른 경향을 보인다. 현열의 경우(Fig. 6(a)), 고습조건에서의 성능저하로 인해 현열 제거량이 감소함을 볼 수 있다. 잠열의 경우(Fig. 6(b)), 고습 시에 잠열 제거 잠재량이 높아져 제거량이 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

3.4 성능계수 (COP)

실외 온·습도에 따른 성능계수 변화를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 성능계수는 외기 절대습도가 증가할수록 떨어지고 온도가 올라갈수록 올라가는 경향을 보이고 있다. 그 중에서도 외기 온도에

영향을 많이 받는데, 이는 외기 온도에 따른 재생열량 변화로 보인다. 온도가 올라감에 따라 냉방능력이 증가하나 그 변화는 크지 않았다. 하지만 외기온도가 올라감에 따른 소비전력 증가량보다 재생열량 감소량이 훨씬 커 온도 상승에 따른 성능계수 상승을 주도 한 것으로 보인다. 냉방능력 분석과 마찬가지로 시뮬레이션 결과를 Fig. 7(b)에 제시하였다. 실험 결과와 유사하게 온도가 증가함에 따라 성능계수가 증가하고, 습도가 증가함에 따라 성능계수가 감소하는 경향을 확인할 수 있고, 습도보다는 온도의 영향이 큰 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 주거 환경에서의 하이브리드 제습냉방 시스템의 외기 조건에 따른 성능변화를 관찰하였다. 외기 온·습도에 따른 냉방능력과 성적계수를 계산하고 시뮬레이션 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 외기온도가 상승하면 소비전력은 증가하고 재생열량이 감소하며 소비전력은 실험 결과와 시뮬레이션이 잘 일치하였고 재생열량은 시뮬레이션보다 10~15% 작은 것으로 나타났다.

(2) 흡입온도는 외기온도가 올라가고 외기습도가 올라갈수록 증가하고 흡입습도는 외기습도가 높을수록 상승함을 확인하였다. 이는 제습냉방기 자체 성능 변화 보다는 외기조건이 실내 조건에 더 큰 영향을 준 것을 의미한다.

(3) 시뮬레이션으로 예측한 결과와 마찬가지로 냉방능력은 외기온도가 높고 습도가 낮을수록 증가함을 확인하였으나 증발냉각기의 성능이 과도하게 예측되어 실제 운전 조건에서는 냉방 능력이 시뮬레이션보다 10%정도 저하되는 현상을 관찰하였다.

(4) 성능계수(COP)는 외기 절대습도가 증가할수록 감소하고 온도가 올라갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 중에서도 외기 온도에 영향을 많이 받는데, 온도 상승에 따른 소비전력 증가량보다 재생열량 감소가 훨씬 커 온도 상승에 따른 성능계수의 상승을 주도 한 것으로 보인다.

(5) 본 현장실험 성능분석을 통해 습도에 따른 시스템의 성능 저하를 확인 하였다. 따라서 성능 저하를 막기 위해 재생온도 또는 제습로터의 회

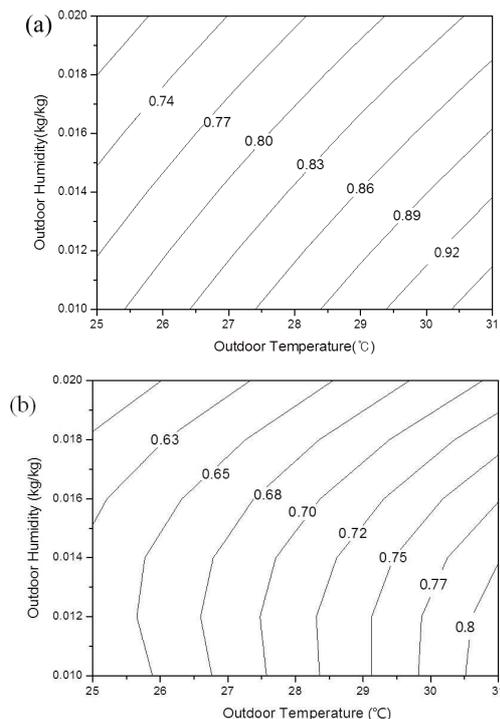


Fig. 7 COP contours ; (a) Experiment; (b) Simulation

전주기를 습도에 따라 바꿔주는 등 성능 저하를 막기 위한 대책이 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지·자원기술개발 사업(2010T100200183)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, D. Y. and Chang, Y. S., 2007, "Effects of Individual Components on the System Performance in a Desiccant Cooling System," *Trans. of the SAREK*, Vol. 10, No. 10, pp. 623~628.
- (2) Jeon, D.-S., Lee, S.-J., Kim, S.-C., Kim, Y.-L. and Chang, I.-K., 2010, "Optimization Design of Liquid Desiccant Cooling System," *Trans. of the SAREK*, Vol. 22, No. 7, pp. 419~428.
- (3) Marco, B., Pietro, F., Massimiliano, L. and Bettina, N., 2008, "Monitoring of a Solar Desiccant Cooling System in Palermo (Italy) First Results and Test Planning," *Proc. of Euro-Sun*, Paper No. 237, pp. 1~8.
- (4) Hwang, W.-B., Lee, D.-Y. and Kim, Y.-C., 2012, "A Study on the Performance Evaluation of a Hybrid Desiccant Cooling System," *Trans. of the SAREK*, Vol. 24, No. 2, pp. 722~726.
- (5) Hwang, W.-B., Lee, D.-Y., Kim, Y.-C. and Chang, I.-G., 2010, "Analytical Study on the Energy Consumption of Hybrid Desiccant Cooling System," *Proc. of KSME Fall Annual Meeting*, pp. 2542~2547.
- (6) Lee, K.-B., Lee, D.-Y. and Kim, M.-S., 2004, "Development of a Linearized Model and Verification of the Exact Solution for the Analysis of a Desiccant Dehumidifier," *Trans. of the SAREK*, Vol. 16, No. 9, pp. 811~819.
- (7) Song, C.-H., Lee, D.-Y. and Ro, S.-T., 2003, "Cooling Enhancement in an Air-cooled Finned Heat Exchanger by Thin Water Film Evaporation," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 1241~1249.
- (8) Choi, B. S., Hong, H. and Lee, D.-Y., 2008, "Study on the Counterflow Regenerative Evaporative Cooler with Finned Channel," *Trans. of the SAREK*, Vol. 20, No. 7, pp. 447~454.