

태양열 이용 소용량제습냉방시스템

(Small-Capacity Solar Cooling System by Desiccant Cooling Technology)

제습냉방기술을 이용한 가정용 소용량 태양열 냉방시스템 개발 현황을 소개한다.

이 대 영 / 편집위원

KIST 책임연구원 (ldy@kist.re.kr)

서론

세계기후변화협약에 대처할 수 있는 기술로서 화석연료를 대체할 수 있는 청정대체에너지의 발굴 및 보급의 필요성이 과거 어느 때 보다도 절실히 요구되고 있다. 대체에너지의 보급을 활성화하기 위해서는 정부차원의 지원도 필요하지만, 궁극적으로는 대체에너지 이용 설비의 경제성을 향상시켜 시장에서의 경쟁력을 확보하도록 하는 것이 관건이다.

태양열 이용시스템은 대체에너지 중 가장 먼저 보급이 시작되었으며 다른 대체에너지 시스템들에 비하여 상대적으로 높은 시장 경쟁력을 가지는 것으로 평가되고 있다. 그러나 태양열 이용시스템도, 태양열 온수기 시장이 97년에 연 7만대 이상에 이르는 등 급성장한 바 있었으나, IMF 이후 농업진흥청의 보급사업(농가생활개선사업)이 중단되고, 경쟁제품인 심야전기온수기의 보급이 확대됨에 따라 보급실적이 급격히 감소하여 2003년에는 연간 1,000여대 수준까지 감소하였다. 태양열 이용시스템의 경제성이 미흡한 주된 이유는 태양열에 의한 온수급탕의 수요가 동절기에만 한정되어, 정작 태양에너지의 밀도가 가장 높은 하절기에 이용률이 감소하여 설치비용 회수에 오랜 기간이 소요되기 때문이다. 따라서 태양열 이용시스템의 보급을 활성화하기 위해서는 태양열을 이용한 냉방시스템을 개발하는 것이 필요하다.

일반적으로 열에 의하여 구동되는 냉방시스템은

난방이나 급탕에 비하여 비교적 높은 온도의 열을 필요로 한다. 태양열 시스템은 집열온도가 높아질수록 집열효율이 감소하여 시스템 성능이 저하하며, 집열기나 축열조의 비용이 상승하게 된다. 그러므로 태양열 냉방시스템의 개발을 위해서는 가능한 한 저온 열원에 의하여 구동될 수 있는 시스템을 개발하여야 한다.

제습냉방기술의 원리 및 특성

제습냉방 기술은 제습기를 이용하여 공기 중의 습기를 제거하여 잠열부하를 처리하며, 건조한 공기 속에서 물 증발이 활발히 일어나는 원리를 이용, 공기 온도를 낮추어 냉방을 공급하는 기술로서 제습기에 흡착/흡수된 수분을 날려 보내고 제습기를 재생할 때에 열이 소요된다(그림 1).

제습제는 silical gel, zeolite 등의 고체 제습제와 LiCl(lithium chloride)등 액체 제습제로 대별될 수 있으며, 어떠한 형태의 제습제를 활용하느냐에 따라 제습기의 구조가 달라진다. 고체 제습제를 이용하는 경우 제습기는 그림 2에 나타낸 바와 같이 회전하는 로터(rotor)의 형태가 되어, 로터의 일부에서는 흡착/제습이 일어나며, 다른 부분에서는 탈착/재생이 일어난다.

제습냉방기술에서는 실내에 공급되는 공기가 제습제 및 증발식 냉각기가 직접 접촉하여 열/물질전달이 발생하므로 전달효율 측면에서 효과적이며, 이에 따



라 재생열원의 온도가 낮아도 냉각효과를 얻을 수 있다. 또한 제습냉방시스템은 개방형 기기로서 모든 부분이 대기압 상태이므로, 누설에 의한 문제가 없으며, 냉매가 물이므로 냉매 회수를 위한 응축기가 필요없이 구조가 간단하며 단순하여 소용량에 적합하다. 또한 직접 접촉식 열/물질 전달의 특징으로 60℃ 정도의 저온 열원으로도 작동이 가능하며, 일반 평판형 태양열 집열판을 적용할 수 있는 장점이 있다.

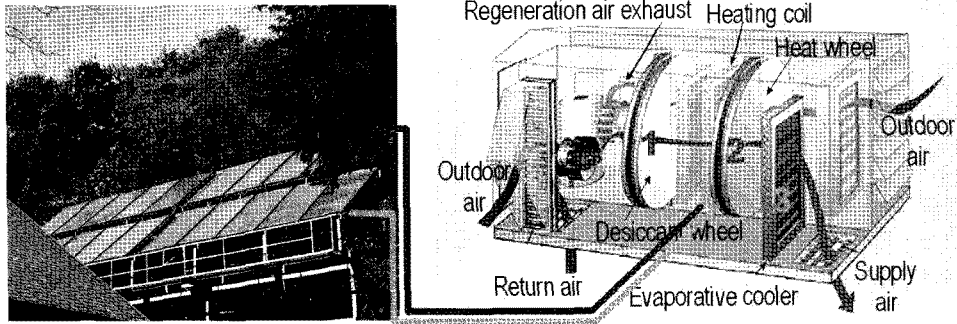
제습냉방기술 개발 현황

미국, 일본, 독일 등에서는 80년대부터 제습냉방시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지기 시작하여, 제습로터 등 주요 부품에 대한 개발이 지속적으로 이루어져 왔다. 미국에서는 이미 제습냉방시스템이 슈퍼마켓의 대형 냉장 display case의 습도조절, 호

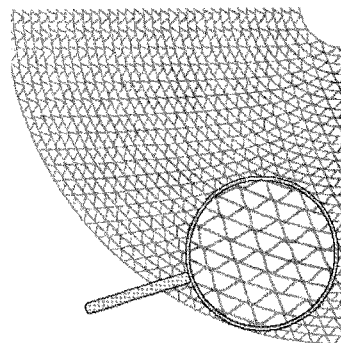
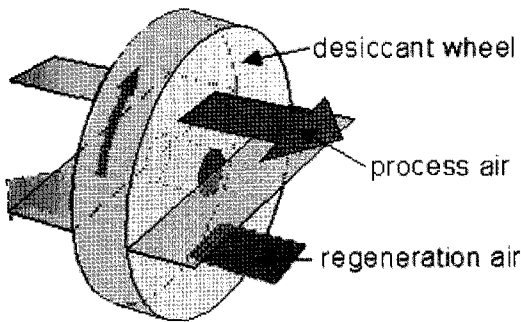
텔과 모텔 공조 등의 틈새시장에 진입한 상태이며, 제습제 물질개선, 제습로터 형상 및 성능개선, 다양한 재생열원 이용, 시스템 부피 및 비용감소 등의 기술이 발전됨에 따라, 기존의 냉동시스템에 대한 경쟁력을 높여 가고 있다.

일본에서는 우리나라 보다 더욱 습한 기후로 인해 제습부하가 상당히 커서 제습기의 활용이 일상화되어 있는데, 소형 제습로터를 이용한 가정용 건식 제습기가 최근 상용화되어 증기 압축식 제습기와 경쟁하고 있으며, 제습냉방기술을 적용한 제품이 점차 주요 공조기 시장에 진입하고 있다.

제습냉방시스템은 냉동기를 필요로 하지 않아 송풍기의 전기 입력을 제외하면, 전혀 전기에너지를 필요로 하지 않는다. 또한 온도와 습도의 독립적인 제어가 가능하며 잠열부하 처리가 용이하므로, 외기 도입량이 큰 경우에도 충분한 성능을 발휘할 수 있



[그림 1] 태양열 이용 제습냉방시스템



[그림 2] 제습로터

다. 더군다나 제습냉방시스템은 냉매를 사용하지 않으므로, CFC계열의 냉매에 의한 오존층 파괴, 온실 효과 등이 전혀 없어 환경친화적이며, 구동에너지로 전기에너지 대신 열에너지를 사용하므로, 하절기 냉방기 가동에 의한 전력수급 불균형 문제의 해결에 기여할 수 있다. 제습냉방기술의 이러한 여러 가지 장점들로 제습냉방기술의 적용범위가 점차 확대되어 갈 것으로 기대되고 있다.

그러나 제습냉방기술의 시장 현황은 상기한 기술적인 장점들에 비하면 상대적으로 미약한 실정으로, 저습도가 필요하거나 잠열부하가 매우 큰 특별한 경우에 한정되어 있으며, 아직 일반 냉방기 시장으로의 진입은 이루어 지지 않고 있다. 시장확대 지연의 주요 원인은 제습냉방시스템의 설비가격이 1 CMM 당 \$180 ~ \$300 정도로 기존의 냉방시스템(1 CMM 당 \$90 ~ \$150)에 비하여 고가이고, 부피가 상대적으로 크기 때문이다.

다음에는 제습냉방시스템의 가격인하와 소형화를 위한 기술개발 방향과 KIST의 관련연구 현황을 소개한다.

제습로터

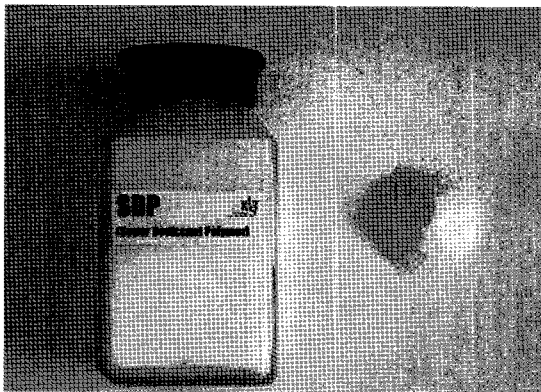
제습시스템의 가격이 높아지게 되는 주요 원인은 제습로터의 가격이 상당히 고가이기 때문이며, 기존의 시스템과 경쟁하여 실용화가 가능하기 위해서는 제습로터의 성능을 향상시키고 생산가격을 낮추는

것이 필요하다.

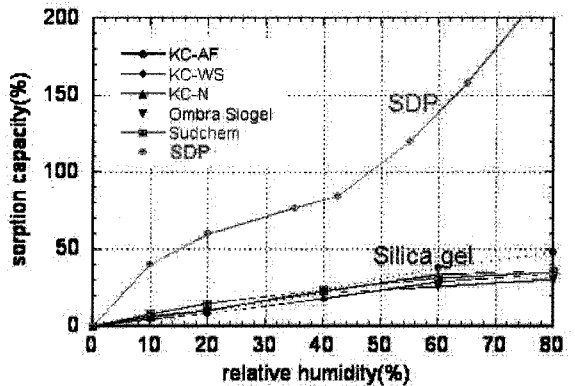
제습로터는 Munters, Seibu-Giken, Klingenburg, Nichias, DRI 등 5 ~ 6개의 업체가 세계시장에 대응하고 있는 독점성이 큰 시장으로, 주로 실리카겔 등의 무기질 흡착제를 제습제로 적용하고 있는데, 제습재료 제조, 제습로터 가공공정 등이 매우 복잡하여, 획기적인 공정개선 없이는 가격인하가 쉽지 않은 면이 있다.

또한 제습로터에서는 열 및 물질전달이 동시에 일어나는 특징으로 인하여 제습과정에 대한 이론적 접근이 상당히 어려워, 이미 일부 분야에 많이 적용되고 있음에도 불구하고, 제습제의 흡습특성, 제습로터의 구조, 운전조건 등 여러 가지 인자들이 제습로터의 성능에 미치는 영향에 대한 분석과 이에 근거한 최적설계 및 최적인전제어 기술이 상당히 미흡한 실정에 있다.

KIST에서는 제습로터의 성능향상 및 저가화를 위하여, 제습성능이 뛰어난 고분자 제습재료를 개발하였다. 이 제습재료는 그림 3에 나타난 바와 같이 실리카겔이나 제올라이트 등 기존의 고체 제습제보다 흡습성능이 4 ~ 5배 이상 크며, 낮은 온도(60℃)에서도 재생될 수 있는 장점이 있다. 이 고분자 제습재료는 초흡수성 고분자(SAP)를 이온치환하여 흡습성을 향상시킨 물질로, 초흡수성 고분자의 생산비용 수준으로 대량생산이 가능할 것으로 분석되고 있다. 이 제습재료는 재료 수준에서의 제습/재생 반복성

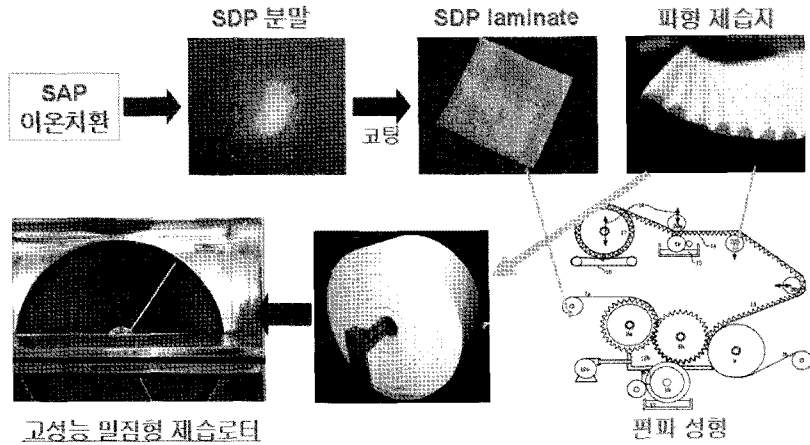
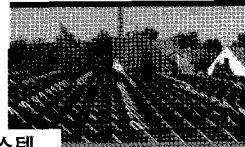


a) 초흡습성 고분자



b) 제습성능 비교

[그림 3] 초흡습성 고분자(SDP: Super Desiccant Polymer)



[그림 4] 초흡습성 고분자를 적용한 제습로터 제조과정

및 인체유해성 시험을 통과하였으며, 현재 이 제습 재료를 이용한 제습로터 시작품 제작이 진행되고 있다. 제습로터 제조과정 역시 그림 4에 나타난 바와 같이 일반 제지공정과 골판지 제조공정과 유사하여 대량생산에 매우 적합할 것으로 예상되고 있다.

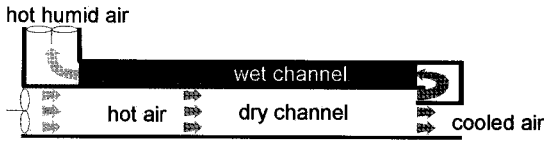
증발식 냉각기

기존의 제습냉방시스템은 제습 후 다시 가습하는 증발냉각 과정으로 인하여 제습로터의 제습부하가 공조공간에서 발생하는 잠열부하보다 상당히 커지게 된다. 이러한 시스템은 유럽에서 고안된 시스템으로, 유럽 대부분 지역은 하절기 습도가 낮아 잠열부하가 작으므로, 이러한 방식이 적합할 수 있다. 그러나 습도가 높은 지역에서는 잠열부하가 크므로, 제습부하처리를 위한 대용량 제습로터 채용이 불가피 해지고, 시스템 원가 및 크기의 증가, 또는 재생 온도 증가에 따른 에너지 효율 감소 등의 문제를 야기하게 된다.

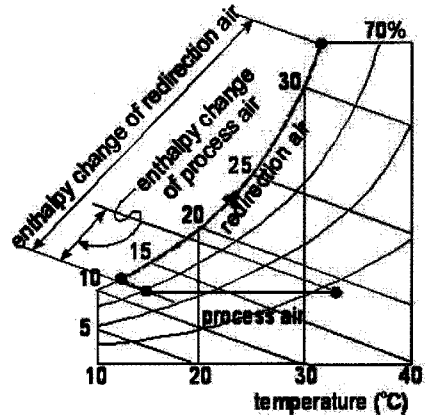
한편 KIST에서는 물의 증발냉각 효과를 이용하되, 공급공기의 습도증가가 없는 재생 증발식 냉각기술을 개발하였다. 이 기술을 적용한 제습냉방시스템은 기존의 직접 증발식 냉각기를 적용한 시스템과 달리 주된 냉각효과가 재생 증발식 냉각기를 통과하는 동안 일어나며, 이 과정에서 습도증가가 없으므로, 직접 증발식 냉각기를 적용한 경우처럼 제습기에서 제습한 후 다시 가습하는 비효율적인 과정을 필요로

하지 않는다. 따라서 직접 증발식 냉각기를 이용한 제습 냉방시스템에 비하여 제습부하가 크게 감소되며, 이에 따라 제습기의 재생열량 및 재생온도를 낮출 수 있어 시스템의 효율을 향상시킬 수 있으며, 습도가 높은 경우에도 좋은 성능을 기대할 수 있다. KIST에서는 두가지 제습냉방시스템의 사이클비교를 수행하였으며, 재생 증발식 냉각기술의 적용에 의하여, 직접증발식 냉각기를 적용한 제습냉방시스템에 비하여 시스템 크기를 1/2 이하, 냉방 COP를 2 배 이상 향상시킬 수 있음을 보인 바 있다.

재생 증발식 냉각기는 일종의 간접 증발식 냉각기로, 냉각된 공기의 일부를 이용하여 실내공급 공기를 간접 증발냉각하는 방식이다. 이 냉각방식의 개략도와 습공기 선도를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 고온의 흡입 공기는 건채널을 통과하며 온도가 낮아지며, 온도가 낮아진 저온 공기 중 일부는 추기되어 건채널과 평행하게 설치된 습채널을 주 공기의 유동방향과 반대로 이동한다. 습채널을 통과하는 공기는 습채널 표면의 물이 증발하면서 냉각되어, 건채널로부터 현열을 빼앗아 주공기의 온도를 감소시킨다. 이 장치에서 건채널과 습채널을 통과하는 공기의 상태변화를 그림 5 b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 습채널을 통과하는 공기의 비엔탈피(specific enthalpy) 변화가 건채널 공기의 비엔탈피 변화 보다 3 ~ 5배 정도 크므로, 에너지 평형을 맞추기 위한 추기 공기량

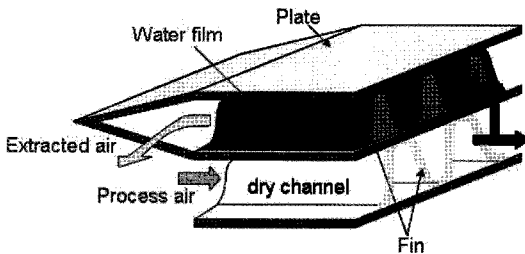


a) 재생 증발식 냉각기 구조

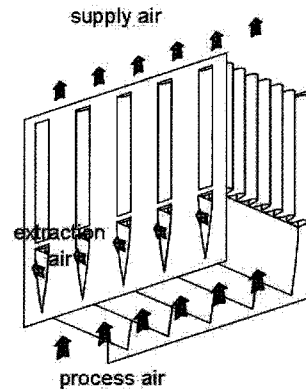


b) 습공기 선도

[그림 5] 재생 증발식 냉각기 냉각 원리

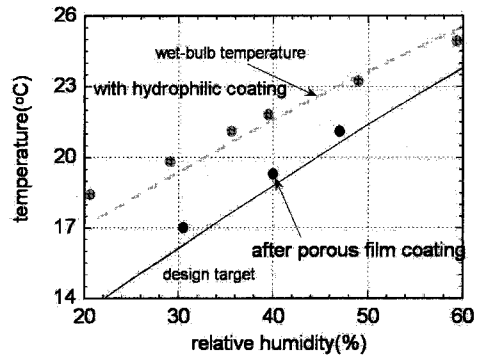


a) 재생 증발식 냉각기 단위 모듈

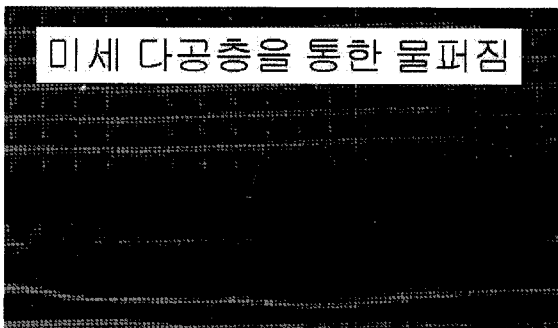


b) 재생 증발식 냉각기 개략도

Inlet temperature = 32°C

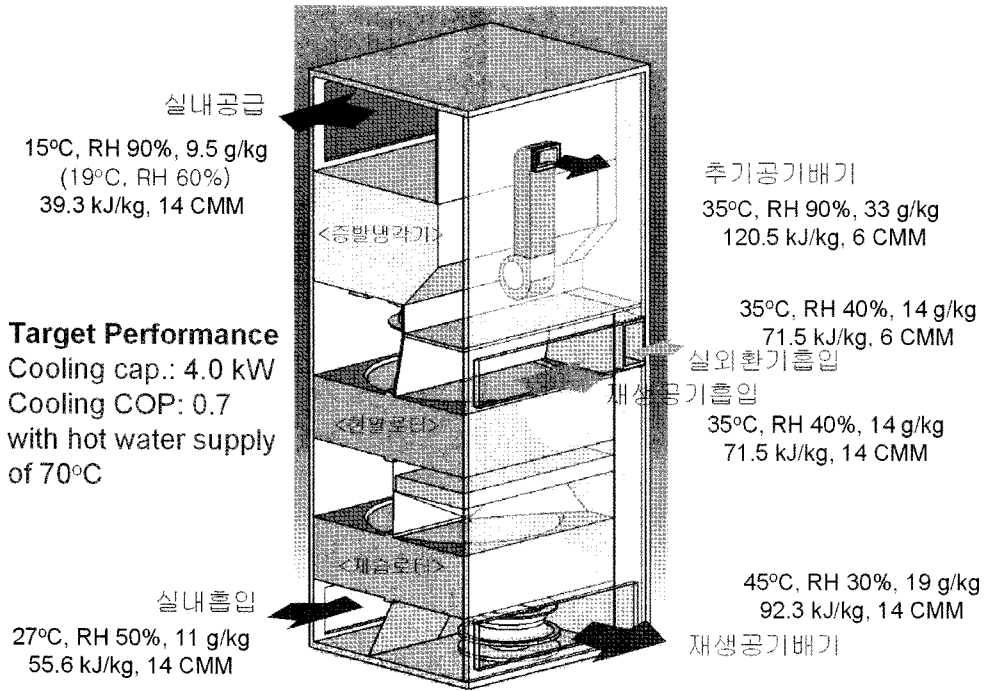


d) 냉각 효과



c) 미세 다공층 표면처리 효과

[그림 6] 재생 증발식 냉각기



[그림 7] 제습냉방시스템 시작품 개략도

은 주 유동공기의 1/3 ~ 1/5 정도이면 되므로, 공조 공간으로 저온의 공기 공급이 가능하며, 그림에서 예상할 수 있는 바와 같이 최대한 주유동 공기의 이슬점 온도까지 냉각이 가능하다.

KIST에서는 재생 증발식 냉각기를 소형화하기 위하여 핀 삽입 대향류형 재생 증발식 냉각기를 고안하고, 습채널에서의 증발수 퍼짐을 향상하기 위한 미세 다공층 표면처리 기술을 개발 적용하여 그림 6에 나타난 바와 같이 냉각효과를 실증하였다. 그림 6 d)에 나타난 바와 같이 입구공기가 32°C, RH40%일 때, 증발냉각 효과만으로 19°C까지 냉각할 수 있으며, 이는 습구온도보다도 3°C 정도 낮다. 이와 유사한 기술은 최근 유럽에서 실용화에 성공하여 재생 증발식 냉방기가 건물 냉방에 보급되기 시작하였다.

패키징(packaging)

제습냉방시스템은 실내기와 실외기 구분이 없는 일체형으로, 한 장치내에 실내 공급공기와 제습로터 제

습공기 통로가 모두 배치되어야 하므로, 시스템 소형화를 위해서는 부품배치 및 부품간 연결덕트 최적화, 누설방지 등이 매우 중요하다. 또한 소형화를 위하여 각 부품에서의 정압손실이 커지게 되므로 고정압 저소음 송풍기 개발도 매우 중요한 문제가 된다.

KIST에서는 앞에서 소개한 초흡습성 폴리머 제습제와 재생 증발식 냉각기를 적용하여, 증기 압축식이나 흡수식 등 여타의 기존 냉동기 없이 냉방을 공급할 수 있는 독립형 제습냉방시스템을 개발하였다. 그림 7에 이 시작품의 구조와 설계점에서의 운전조건을 나타내었다. 이 시스템은 태양열 집열판으로부터 70°C의 온수를 공급받아 운전되며, ARI 조건에서 냉방용량 4 kW, 냉방COP 0.7을 목표로 설계 제작되었다. 이 시스템은 환기율 30%를 기준으로 설계되어, 환기가 전혀 고려되지 않고 있는 기존 냉방시스템에 비하여 쾌적한 실내환경을 제공할 수 있으며, 온도와 습도를 개별적으로 제어할 수 있는 장점이 있다.

이 시작품은 ARI 조건에서 공급풍량 14.6 CMM, 냉

방용량 4.4 kW, 냉방COP 0.76의 냉방성능을 나타내어, 설계목표를 10% 정도 상회하는 결과를 보였다. 또한 내구성시험을 위하여, 총 520시간 동안 제습냉방시스템을 연속운전 후, 성능시험을 다시 실시하여 내구운전 전과 동일한 성능을 유지함을 확인하였다.

결론

태양열 등 저온열원을 이용하는 냉방기술 분야는 유럽, 미국, 일본 등에서 70년대 말부터 많은 연구가 수행되어 왔다. 연구 대상이 되고 있는 기술분야는 크게 흡수식 냉방과 제습냉방을 들 수 있으며, 현재까지의 연구 개발은 주로 흡수식 냉방시스템에 집중되어 왔다. 이는 가스를 열원으로 하는 흡수식 냉방시스템 기술이 이미 상용화되어 건물 냉방에 널리 적용되고 있어서 관련업체나 연구개발인력의 저변이 넓기 때문인 것으로 사료된다.

건물 냉방용 흡수식 냉방기의 재생온도는 150℃ 정도이며 COP는 1.0을 약간 상회하는 정도이다. 그러나 흡수식 냉방시스템은 열원온도가 낮아질수록 성능이 저하하여 적어도 80 ~ 100℃ 정도의 온도가 필요하며, 80℃ 이하의 열원온도에서는 운전이 불가능한 문제가 있다. 또한 흡수식은 구조가 복잡하여 주로 대용량에 적합한 시스템으로, 태양열 보급에서 큰 비중을 차지하는 소용량 시스템에 적합한 소용량 저온열원 구동 흡수식 냉방기를 개발할 경우 기기 생산비용이 상당히 높아질 것으로 예상된다.

한편 제습냉방기술은 실내 공급 공기가 제습로터와 직접 접촉 방식에 의하여 열 및 물질전달이 일어나므로 전달효율이 상당히 높은 장점이 있어, 60℃ 정도의 저온 열원으로도 냉방을 공급할 수 있으며, 흡수식과 달리 대기압 상태에서 운전되며 시스템 구성이 간단하므로 생산 비용을 크게 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제습냉방시스템에서는 온도와

습도의 독립적인 제어가 가능하여, 잠열부하가 크거나 외기 도입량이 큰 경우에도 쾌적한 냉방을 공급할 수 있다. 더군다나 제습냉방시스템은 냉매를 사용하지 않으므로, CFC계열의 냉매에 의한 오존층 파괴, 온실효과 등이 전혀 없어 환경친화적이며, 구동 에너지로 전기에너지 대신 열에너지를 사용하므로, 하절기 냉방기 가동에 의한 전력수급의 불균형 문제의 해결에 기여할 수 있다.

그러나 제습냉방 기술은 이러한 장점에도 불구하고, 현재까지 산업용이나 저습도가 필요하거나 잠열부하가 매우 큰 특별한 경우에 적용이 한정되어 있으며, 아직 일반 냉방기 시장으로의 진입은 이루어지지 않고 있다. 시장확대 지연의 주요 원인은 제습냉방시스템의 설비가격이 1 CMM 당 \$180 ~ \$300 정도로 기존의 냉방시스템(1 CMM 당 \$90 ~ \$150)에 비하여 고가이고, 부피가 상대적으로 크기 때문인데, 이는 주로 제습로터가 고가이며 부피가 큰 것에 기인한다. 따라서 저온열원 이용 냉방시스템의 실용화를 위해서는 제습로터의 성능을 향상시켜 소형화하고 생산가격을 낮추는 것과 제습냉방싸이클을 개선하여 제습부하를 경감하는 것이 필요하다.

이러한 문제를 해결하기 위한 연구의 일환으로 KIST에서는 평판형 집열판으로 공급가능한 70℃의 온수로 운전될 수 있는 소용량 제습냉방 시스템을 개발하였다. ARI 조건에서의 성능시험에서 냉방용량 4.4 kW, 냉방COP 0.76을 얻었으며, 520시간의 내구운전 후 성능변화가 거의 없음을 확인하였다. 이 시스템은 환기율이 30%로 운전되며, 온도와 습도를 개별적으로 제어할 수 있어 기존 냉방시스템보다 쾌적한 실내 환경을 제공할 수 있는 장점이 있다. 또한 핵심 재료 및 부품 기술을 모두 자체 개발하였으며, 대량생산에 적합하여 기존 냉방기에 대한 가격 경쟁력도 확보할 수 있을 것으로 기대된다. ㉠