

액체 제습 냉방 기술

■ 장영수 / 한국과학기술연구원, yschang@kist.re.kr

■ 이대영 / 편집이사, 한국과학기술연구원, ldy@kist.re.kr

열원 구동 냉방 기술로서, 액체 제습제를 이용하여 공기 중의 수증기를 흡수하여 냉방을 구현하는 기술에 대하여 소개하고자 한다.

기존의 압축식 냉방기술에 적용되는 HCFC, HFC 계열의 냉매가 오존층 파괴나 지구온난화 등 지구 환경 오염을 야기하고, 과도한 전력소비로 하절기 전력수요 폭증 및 전력수급의 불균형 문제를 유발함에 따라, 이들 기기를 대체할 수 있는 기술 개발에 관심이 집중되고 있다. 흡수식, GHP 등 열원 구동 냉방 기기들의 성능 향상이 지속적으로 이루어지고 있으며, 기존 전기식 냉방기기를 대체하거나 새로운 응용분야를 넓혀가고 있다. 다양한 열원 구동 냉방기술 중에서 최근 제습제를 활용한 냉방 (desiccant cooling) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다.

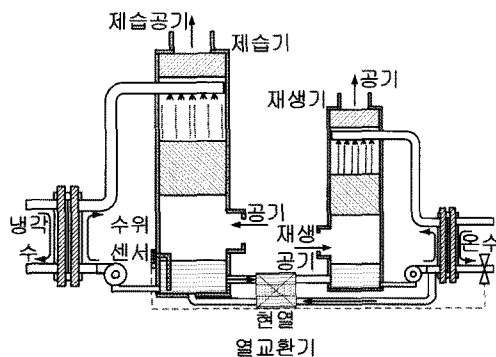
제습 냉방기술은 흡착식 또는 흡수식 제습기를 이용한 냉방 기술을 일컫는데, 제습제의 수분에 대한 흡착이나 흡수특성을 이용하여 낮은 온도에서 주위 공기로부터 수증기를 빨아들여 흡착 (adsorption) 또는 흡수(absorption)하고, 고온에서 이 습기를 공기에 방출하는 제습 사이클을 이용한 것이다. 공기 중의 수분을 응축이 아니라 직접 흡수에 의해 제거함에 따라, 처리공기를 노점온도 이하로 냉각시키지 않고 처리할 수 있어, 지나친 공기 냉각에 따른 재열이 필요하지 않다는 장점이 있다. 우리나라와 같이 하절기의 고온 다습한 기후에서 독립적인 잠열부하 처리가 가능하므로 효과적인 냉방시스템을 구성할 수 있다.

액체 제습 냉방기술의 원리

액체 제습 냉방기술은 액체 제습제를 이용하여 흡입공기의 수증기를 흡수하여 잠열부하를 처리

하고, 건조해진 공기를 증발 냉각 또는 냉수코일을 이용하여 온도를 떨어뜨려 현열부하를 처리하는 냉방기술이다. 특히 제습기와 증발 냉방기술이 결합하게 되면, 액체 제습기에서 건조해진 공기는 재생형 증발식 냉각기를 거쳐 온도와 습도가 실내공간에서 요구되는 쾌적한 수준이 되어 실내로 보내진다. 액체 제습 사이클의 작동은 저온에서 주위 공기로부터 수증기를 흡수하는 제습과정과 고온에서 이 습기를 공기로 방출하는 재생과정으로 이루어진다. 일반적인 액체 제습과정을 그림 1에 나타내었다.

제습기 상부에 액체 제습제가 공급되어 뿌려지면, 유입되는 공기 중의 수분을 흡수하게 된다. 공기와 제습제 사이의 수증기 교환은 공기 속의 수증기 분압과 제습제 표면에서의 수증기 압력 사이의 상대적 크기에 의존한다. 액체 제습제 표면의 수증기 압력은 제습제의 농도와 온도의 함수로 나타나며, 온도가 낮을수록 농도가 진할수록 수증기 압력이 낮아 제습과정이 활발하다. 따라서 가능한 낮은 온도와 고농도의 제습제 조건에서 제습기가 운전되는 것이 바람직하다.



[그림 1] 액체 제습시스템

공기 중 수증기를 흡수하는 제습제의 능력은 수분 함유량의 증가(제습제의 농도 감소)에 따라 감소하고, 제습제가 일정 농도이하로 묽어지게 되면 재생기에서 고농도의 제습제로 농축되어야 한다. 재생을 위해서는 제습과정과는 반대로 제습제에서 공기로의 수증기 교환이 일어나야 한다. 이를 위해 제습제 표면에서 수증기 압력을 높이기 위해 제습제를 가열하여 온도를 높여준다. 즉 탈습과정은 제습제에서 물을 분리하여 증발시킴으로써 제습제를 재생(regeneration)하기 위한 열입력을 필요로 하며, 덥고 습해진 재생용 공기는 외기로 배출되고, 농도가 높아진 제습제는 제습기에서 재사용할 수 있게 된다. 재생기의 제습제는 재생과정을 거치면서 농도뿐만 아니라 온도도 상승하게 되는데, 현열교환기에서 제습기에서 재생기로 이동되는 저온의 제습제와 열교환 과정을 거쳐 냉각되어 제습기로 공급된다. 이를 통해 제습 성능 향상과 재생에 필요한 열량을 줄일 수 있게 된다.

액체식 제습기술은 일종의 개방형 흡수식 사이클로서, 기존의 열구동 냉방 방식인 흡수식 냉방기술에 비하여 몇 가지 장점을 가진다. 모든 과정이 대기압 조건에서 이루어지므로, 불용축 가스에 의한 성능저하 문제가 없으며, 제작이 용이하다. 그리고 냉매인 물을 회수할 필요가 없으므로, 별도의 응축기가 필요 없다. 제습제와 공기가 직접 접촉하므로 열 및 물질전달이 효과적이며, 제습제의 살균효과로 공기 오염 제거 효과를 부가적으로 얻을 수 있다. 다양한 열원(태양열, 천연가스, 배열, 전기)을 활용하여 냉방 공급이 가능하며, 저온의 지역난방 공급수를 이용한 지역 냉방 공급도 가능하다.

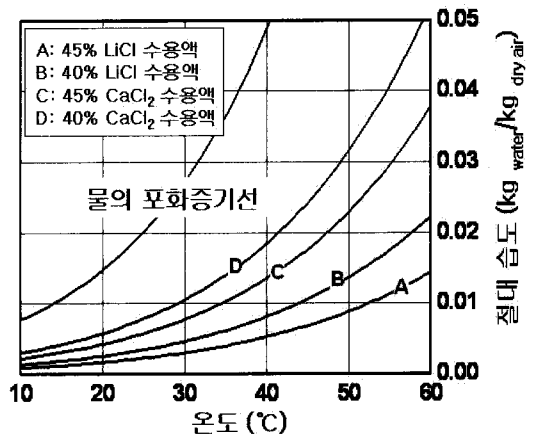
액체 제습제(Liquid desiccant)

제습제는 고체 또는 액체물질이며, 많이 사용되고 있는 고체 제습제로는 실리카겔, 활성알루미나, 제올라이트 등이 있고, 일반적인 액체 제습제로는 염화리튬과 트리에틸렌글리콜(triethylene glycol)이 있다. “제습제(desiccant)”라는 용어는 자기중량에 비해 큰 습기 보유용량을 가진 물질을 의미하며, 염화리튬과 같은 액체 제습제는 공기부유 오염 물질을 제거할 수 있으며, 공기 중의 박테리아와

바이러스를 없애는 멸균기능도 갖고 있다.

액체 제습제를 이용한 제습기의 성능은 사용된 제습제의 종류, 제습기의 외부형상에 따른 기-액 접촉면의 형태, 작동인자 등에 좌우된다. 특히 제습제의 선택은 제습기의 크기, 작동범위(온도, 습도), 효율, 비용, 서비스 수명 등에 영향을 미치므로, 시스템 성능과 냉각용량에 가장 큰 영향을 준다. 제습제의 수증기 압력은 가장 중요한 제습제의 특성으로 그림 2에 나타난 바와 같이 온도가 낮을수록 농도가 높을수록 낮은 수증기압을 가져 공기 중의 수분을 용이하게 흡수할 수 있다.

제습제의 온도를 높이면 제습제의 수증기압이 높아지게 되므로, 제습과정과 반대로 공기 중으로 수분이 증발하게 되어 재생과정이 가능하게 된다. 즉 제습제의 수증기 압력 특성이 요구 제습 성능과 경제적으로 이용 가능한 온도에서 재생에 적합해야 한다. 한편으로 재생시 제습제의 증발손실을 최소화할 만큼 제습제 자체의 증기압력은 충분히 낮아야 한다. 온도와 농도의 작동범위 안에서 결정이 발생해서는 안 되며, 낮은 점성과 좋은 열전달 성질을 가지는 것이 좋다. 또한 무독성과 부식성이 없고, 가연성이 없어야 하며, 싼 가격에 이용 가능해야 한다. 이 모든 조건을 모두 갖춘 제습제는 많지 않으며, 현재 많이 사용되는 액체 제습제는 염화리튬, 염화칼슘, 트리에틸렌글리콜 등이 있다.



[그림 2] 액체 제습제의 수증기압 특성



염화칼슘은 저가의 제습제로 손쉽게 사용할 수 있으나, 상대적으로 증기압이 높은 단점이 있다. 염화리튬은 낮은 수증기압을 가져 가장 안정적으로 사용되는 제습제이나 상대적으로 고가라는 단점이 있다. 트리에틸렌글리콜은 점도가 높고, 제습제의 낮은 표면 증기압으로 재생과정 중 증발하여 외부로 유출될 수 있다. 제습제를 적절한 비율로 혼합하거나 첨가물을 혼합하여 저비용으로 낮은 수증기압을 얻기 위한 연구도 진행되고 있다. 가장 대표적인 것은 염화리튬과 염화칼슘을 혼합한 제습제이며, 염화칼슘에 비해 수증기압을 낮출 수 있으며, 염화리튬에 비해 30%의 비용절감이 가능하다.

기존 액체 제습시스템의 문제점

공기의 효율적인 제습을 위해서는 공기와 제습제 사이에 큰 접촉면적과 긴 접촉시간이 필요하다. 충분히 큰 접촉면적과 충분히 긴 시간을 가지면 공기와 제습제의 조건들은 평형에 접근할 수 있다. 제습기의 성능은 제습기 출구에서 공기와 제습제의 수증기압이 평형에 도달했을 때 일어나는 최대 가능한 수분 흡수량에 대한 실제 흡수된 수분량의 비로 정의되는 물질전달 유용도에 의해 특성화될 수 있다.

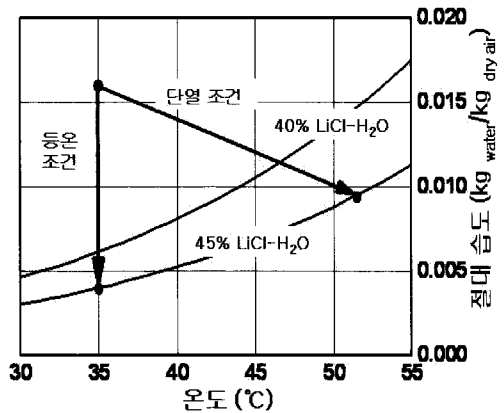
액체 제습제에 의해 공기 중의 수증기를 제습하는 과정에서 제습제 표면에 수증기의 응축에 의한 응축열뿐만 아니라 혼합열이 항상 발생하며, 이 열에 의해 제습제와 공기의 온도가 상승하게 되며, 제습성능의 저하와 공기의 현열부하 증가의 원인이 된다. 제습과정 중 열이 가해지거나 제거되지 않으면 그 과정은 그림 3과 같이 단열과정이 될 것이다. 그러나 제습과정 동안에 흡수열이 제거된다면 등온과정에 근접하게 되며, 등온과정에서는 제습제의 온도 및 수증기압은 단열과정에서보다 낮게 된다. 동일한 제습제 농도를 가정하면 단열조건에 비해 등온조건에서 출구공기의 절대습도가 더 낮음을 의미하므로 제습성능이 향상됨을 알 수 있다.

기존의 제습기 및 재생기는 주로 충전탑(packed-bed)이나 관군형(tube-bundle)이 적용되고 있으며, 흡수열에 의한 온도상승을 억제하고, 제습제와 공기의 접촉면적을 최대한 확보하기 위해 다량의

제습제를 제습기나 재생기 상부에 분사하여 공급하는 방식이 사용되고 있다. 이때 공급유량은 제습기와 재생기 사이에 이송되는 제습제 유량보다 훨씬 큰 값을 가지게 되므로, 제습기나 재생기 자체 순환펌프로 다량의 제습제가 제습기와 재생기에서 각각 순환되는 방식이 사용된다.

제습기 자체에서 순환하는 유량이 큰 경우, 제습제의 평균농도가 재생기에서 농축되어 제습기로 공급되는 농도보다 낮아지게 된다. 예를 들어 염화리튬 수용액의 농도가 40%에서 45%로 재생되는 제습 사이클을 가정하면, 재생기에서 제습기로 이송되는 제습제 농도는 45%이지만, 실제 제습기에서 순환하는 제습제 농도는 40%에 근접하게 된다. 이는 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 제습제의 수증기압의 상승과 제습효율의 감소를 의미한다. 재생기에서도 제습기와 유사한 현상이 발생하게 된다. 제습기에서 이송되는 제습제 농도에 비해 재생기에서 제습제의 평균농도가 높아져 재생효율이 낮아지게 된다.

한편 과도한 제습제 유량은 제습기 표면에 두꺼운 액막을 형성하여 열 및 물질전달 계수를 저하시키며, 공기측 유로를 막아 유동저항을 증가시킨다. 그리고 공기 유동 방향으로 액막 표면이 불안정한 파형을 형성하게 되어 제습제가 공기에 비산하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 데미스터(demister)를 설치하는 등, 장치가 커지고, 공기측 압력손실이 증가하는 문제점이 있다.



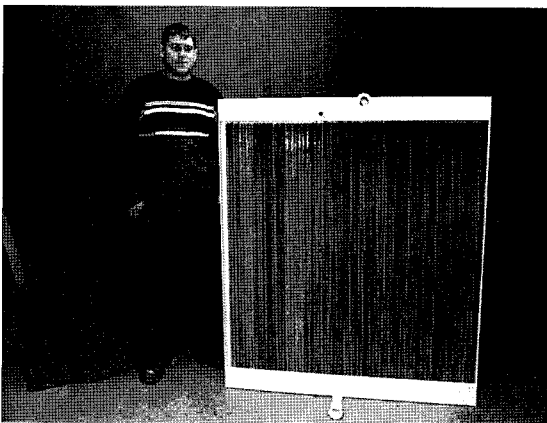
[그림 3] 단열과 등온조건에서 제습과정

액체 제습시스템의 개발동향

제습제 이용 제습 냉방시스템은 미국을 비롯하여 영국, 프랑스, 일본, 인도, 대만 등 각 나라에서 실용화 연구에 박차를 가하고 있다. 미국에서는 이미 몇 가지 제습냉방 시스템이 상용화되어 있으며, 슈퍼마켓의 대형 냉장 쇼케이스의 습도 조절, 호텔과 모텔 공조 등의 틈새시장에 이미 진입한 상태이며, DOE(Department of Energy), NREL(National Renewable Energy Laboratory), ORNL(Oak Ridge National Laboratory), 가스 공급회사, 제습기 제조 회사 등을 중심으로 제습 냉방 장치의 성능을 향상시키고 공급가격을 낮춰, 기존의 공조시장에 진출하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

유럽에서도 산업용으로 개발된 제습기를 공조용으로도 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이며, 태양열 등 미활용 에너지를 이용한 냉방 시스템의 개발에 관심을 집중시키고 있다. 일본에서는 우리나라 보다 더욱 습한 기후로 인해 제습부하가 상당히 커서 제습기의 활용이 일상화되어 있으며, 제습기의 일반 상용화가 가장 보편화되었다고 할 수 있다. 그러나 현재 외국에서 실용화가 진행되고 있는 제습기는 대부분 고체 제습제를 이용한 시스템으로 액체 제습제를 활용한 시스템은 앞서 기술한 문제점으로 인하여 상용화가 지연되고 있다.

국내에서는 생산기술연구원에서 액체 제습제를

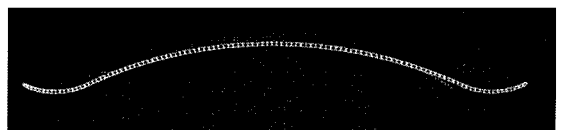


[그림 4] 저유량 제습기(AIL Research사)

이용한 충전탑식 제습기와 재생기로 이루어진 제습시스템을 연구한 바 있으며, 한국과학기술연구원에서는 고체 제습제와 재생형 중발식 냉방기를 이용한 독립형 흡착식 제습-중발 냉방시스템을 개발한 바 있으며, 최근 액체 제습제를 사용한 고효율 밀집형 제습시스템을 개발 중에 있다.

앞서 언급한 액체 제습시스템의 많은 문제점은 다량의 제습제의 분사에 기인한다. 제습제의 공급 유량을 줄이게 되면 제습기에서 공기와 접촉하는 제습제의 평균 농도를 높일 수 있으며, 공기측 압력손실과 열전달성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 제습제를 저유량으로 공급할 경우, 제습 과정 중 발생하는 흡수열에 의해 제습액의 온도가 상승하게 되므로, 이를 방지하기 위해 흡수와 동시에 제열을 할 수 있는 내부냉각 구조의 채용이 필요하다. 그리고 용액의 공급유량이 아주 작은 경우에도 공급된 용액이 대면적의 제습기 표면에 완전히 퍼져 얇은 액막을 유지할 수 있도록 하는 기술이 필요하다. 이로 인해 액막의 두께가 얇아 열 및 물질 전달 계수가 향상되고, 액막 경계면의 안정성이 증가되어 표면으로부터 용액의 비산이 일어나지 않게 되며, 용액순환에 따른 부가적인 손실이 감소하게 된다.

미국 AIL Research사에서 그림 4, 5와 같이 내부에 냉각수 유로가 있는 판형 열교환기가 수직으로 적층된 제습기를 개발하였다. 제습제로 사용된 염화리튬 수용액은 강한 부식성을 가지고 있으므로, 금속 재질 대신 플라스틱 재료가 사용되었다. 판형 열교환기 외부에는 제습액이 상부에서 아래로 흘러내리며, 교차하여 흐르는 공기 중의 수분을 흡수하게 된다. 발생한 흡수열은 열교환기 내부로 흐르는 냉각수에 의해 내부 냉각이 되게 된다. 열교환기 표면은 0.5 mm의 워구조를 접합하여 액체 제습제가 열교환기 외부표면을 완전히 적실 수 있도록 하였다. 그림 5의 판형 열교환기는 두께 2.5 mm,



[그림 5] 판형 열교환기 형상(AIL Research사)



폭 305 mm로 인발가공에 의해 제작되었으며, 내부에 110개의 유로가 나 있으며, 그림 4와 같이 198개의 판형열교환기가 적층되어 제습기로 제작되었으며, 170 mm의 공기를 처리할 수 있는 크기이다.

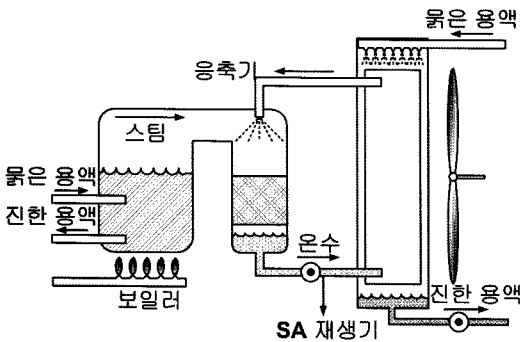
재생기는 제습기에서 이송된 물은 제습제를 이용한 정도로 농축하는 기능을 하게 된다. 이때 열원의 온도가 높을수록 손쉽게 농축과정을 진행할 수 있다. 보통 액체 제습시스템에서 재생기는 제습기와 유사한 구조로 제작된다. AIL Research사에서 흡수식 냉동사이클의 2중 효율과 유사한 개념의 1½효용 재생기를 채용하여 성능계수가 1에 근접할 수 있는 방안을 제안하였다. 액체 제습제 농축 보일러에서 고온의 열원을 이용하여 제습제를 가열, 농축하며 100℃의 스팀을 발생시킨다. 발생한 스팀의 열을 재이용하여 앞서 제안한 제습기

와 유사한 구조의 재생기에서 제습제를 농축하는 방법이다. 흡수식 사이클의 저압단에서 100℃보다 낮은 열원으로 흡수제를 농축하기 위해서는 진공 조건이 구현되어야 하나, 액체 재생기에서는 제습제와 공기가 직접 접촉방식으로 재생과정이 진행되므로 저온에서도 충분히 재생이 진행될 수 있다.

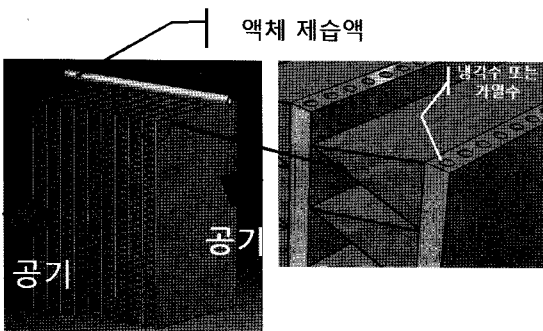
AIL Research사의 액체 제습시스템이 기존 충전탑 방식에 비해 제습성능이 크게 향상될 수 있는 방안이나, 여전히 널리 이용되기에는 기기의 크기가 크고, 제작공정이 복잡한 단점이 있다. 한국과학기술연구원에서는 그림 7과 같이 내부에 냉각을 위한 다중채널을 가지고 있는 판형 열교환기가 수직으로 적층되어 있는 구조를 기본으로, 평판과 평판 사이에 물질 전달 면적을 확대하기 위한 확장 표면을 채용한 제습기를 개발하고 있다.

제습기에서 열 및 물질전달과정을 분석해 보면 냉각수튜브 내 대류열전달, 튜브벽에서 전도열전달, 액막의 대류열전달 저항과 제습제와 공기와의 대류 물질전달저항으로 나타난다. 이 중 제습제와 공기사이의 물질 전달 저항이 가장 크므로, 제습기의 소형화를 위해서는 제습제와 공기 사이의 물질 전달 성능을 향상 시킬 수 있는 구조가 필요하다. 따라서 판형 열교환기 사이 공기유로에 열교환기의 원 구조와 같은 확장표면을 적용하고, 열교환기 표면뿐만 아니라 확장표면에도 액체 제습제가 액막 형태로 흐를 수 있도록 하여, 공기와의 물질전달 면적을 확대하는 방안을 제안하였다.

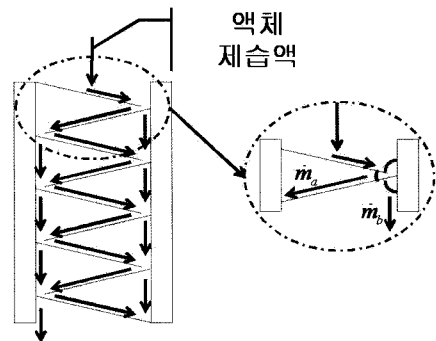
제습제의 부식성으로 열교환기와 확장표면 모두 플라스틱 재질을 채용하였기 때문에 열교환기 표



[그림 6] 1½ 효용 재생기(AIL Research사)



[그림 7] 확장표면 적용 제습기(한국과학기술연구원)



[그림 8] 액체 제습제의 분배

면의 제습제는 냉각이 되나, 확장표면의 제습제는 냉각이 되지 않아 수분의 흡수로 온도가 상승하게 되어 제습능력이 저하할 수 있다. 따라서 확장표면과 열교환기 표면이 만나는 지점에서 확장표면의 제습제와 열교환기 표면의 제습제가 혼합되었다가, 다시 하부의 확장표면과 열교환기 표면으로 적절한 유량비로 분배되는 구조를 적용하여 제습제의 온도 상승을 억제할 수 있는 방안을 제시하였으며, 이를 가시화 실험을 통해 실증하였고, 제습기의 크기를 소형화 할 수 있음을 보였다.

맺음말

제습 냉방기술은 열원 구동 방식의 냉방 기술로서, 기존 압축식 냉방기술의 문제점을 보완하거나 새로운 분야에 적용 가능성이 높은 기술이다. 우

리나라와 같이 하절기의 고온 다습한 기후여건에 적합하고, 환기 부하처리, 실내 공기질 개선을 위한 냉방기술로 많은 장점을 가진 기술이다. 현재 국내외에서 기존 액체 제습시스템의 문제점을 보완하고, 성능을 향상시키기 위한 다양한 시도들이 이루어지고 있으며, 일부 기술은 상용화에 근접한 수준을 보이고 있다. 액체 제습시스템은 증발 냉각기술이나 현열 냉각과 같이 다른 냉방기술과 결합한 하이브리드(hybrid)시스템으로 구성하면 매우 효율적인 냉방시스템 구현이 가능하다. 특히 다양한 열원(태양열, 천연가스, 배열, 전기 등)에도 운전이 가능하므로, 열원을 다양화한 고효율 시스템 기술을 개발하면 국가적인 에너지의 효율적 사용과 온실가스 대응기술로서 큰 역할을 할 것으로 기대한다. ●