

# 고체 흡착식 냉동기 기술 동향

■ 권오경 / 한국생산기술연구원 수석연구원, kwonok@kitech.re.kr

**고체 흡착식 냉동기의 작동원리, 구조, 특징, 성능, 국외 기술 동향, 개발 현안사항에 대해서 소개하고자 한다.**

## 머리말

흡착식 냉동기는 Faraday가 1848년에 그 원리를 최초로 제안한 이후 1900년대 초기에 상품화 되었다. 이 당시의 흡착식 냉동기의 흡착제/냉매제는 칼슘클로라이드/암모니아, 활성탄/메탄올이 사용되었다. 1920년대 후반에 온열·냉열 동시공급 가능한 실리카겔/이산화유황계를 이용한 흡착식 히트펌프가 개발되어 기차에 적용되었으나 증기압축식 냉동기의 개발로 연구개발 및 생산이 중단되었다.

이후 1980년대 초기에 들어서 흡착식 냉동시스템은 물, 알코올, 암모니아 등의 자연냉매와 실리카겔, 제올라이트, 활성탄 등의 흡착체를 이용하게 되었으며 공장폐열, 코제너레이션 폐열 등 저온폐열의 열회수기기로서 일본에서는 1986년에 실리카겔/물계를 사용한 17 kW급 흡착식 냉동기가 상품화 되었다. 현재 일본에서는 Nishiyodo사와 Mayekawa사에서 70 ~ 500 kW급의 흡착식 냉동기를 실용화하여 판매하고 있다. 최근에는 독일의 SorTech사에서 7.5 kW, 15 kW급의 두 모델을 개발하여 태양열 집열기와 연계하여 냉방하는 시스템을 판매하고 있다.

대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 에너지의 효율적 활용에 대한 연구가 더욱 시급하다고 할 수 있다. 산업현장에서 발생하는 산업폐열에 대한 조사에 따르면 산업폐열의 형태는 중저온수, 포화수증기 등으로 다양하고 국내 폐열원의 종류 및 온도범위를 살펴보면 온도별로는 70 ~ 90℃의 폐열이 가장 많지만 대부분 폐기하고 있는 실정이다.

이들 열에너지를 유효하게 이용하는 것을 목적으

로 흡착식 냉동기를 주목할 필요가 있다. 흡착식 냉동시스템은 각 공정에서 버려지는 폐열을 구동원으로 사용할 수가 있어 에너지를 유효하게 재활용할 수가 있으며(Energy cascading), 냉매로서 물을 사용함으로써 오존층 파괴와 관계없는 친환경적인 시스템이다. 상용화되고 있는 흡착식 냉동기에는 흡착제로 실리카겔이, 냉매에는 물이 일반적으로 사용된다.

흡착식 냉동기는 흡수식 냉동기와 거의 비슷한 사이클로 운전되며, 다만 흡수기 대신 흡착탑에서 냉매를 흡착한다는 점이 다르다. 흡수식의 경우 흡수용액이 냉매를 흡수하여 시스템 내를 같이 순환하나 흡착식의 경우 흡착탑에 고정되어 있는 고체상태의 흡착제에 냉매가 흡·탈착되어 시스템 내에서는 냉매만 순환하게 된다. 특히 흡착제로 실리카겔/물계를 사용하는 흡착식 냉동기는 기존의 흡수식 냉동기보다도 저온의 구동열원으로 운전이 가능하므로 열의 다단계 이용의 마지막 단계에 사용가능하다는 큰 장점이 있다.

국내의 경우 일부 연구소에서 기초 연구를 수행한 정도이며, 상품화를 위해서는 아직까지 많은 연구가 필요한 실정이다. 하지만 다른 냉방시스템과 비교했을 때 많은 장점(저온폐열 이용가능, 진동·소음이 적음, 용액결정 위험이 없음, 추가 불필요 등)을 가지고 있으므로 이에 대한 연구개발이 활발하게 진행되어야 할 시점이다.

본 고에서는 고체 흡착식 냉동기의 작동원리, 구조, 특징, 성능, 국외 기술 동향, 개발 현안사항에 대해서 알아보하고자 한다.

## 작동원리

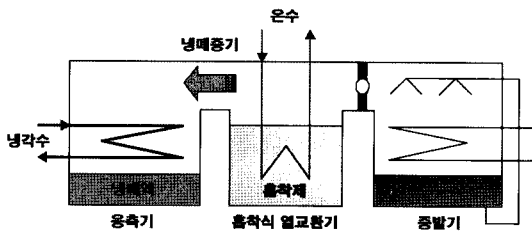
흡착식 냉동기는 고체흡착제와 냉매의 가역반응에 의해 흡발열현상을 이용하고 온수를 구동열원으로 하여 냉열을 발생시키는 열기관이다. 흡착식 냉

동기는 압축기 대신에 실리카겔, 제올라이트, 활성탄 등의 고체흡착제를 이용하지만 증발기나 응축기는 증기압축식 냉동기와 동일하다. 흡착은 물리흡착에서 행해지며, 흡착시(흡착공정)에 흡착열을 방출하고, 탈착시(재생공정)에는 열을 흡수한다.

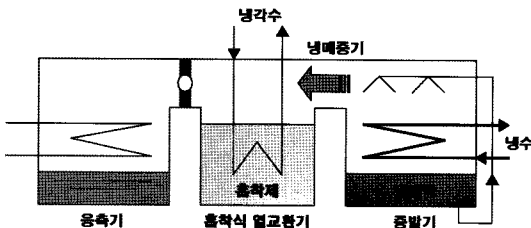
이 시스템은 증발기, 응축기, 흡착식 열교환기 2기(재생기, 흡착기)로 구성된 밀폐계의 고진공기로 계내에는 실리카겔과 물(냉매)만이 존재한다. 흡착식 냉동기의 재생공정과 흡착공정은 그림 1과 그림 2에 나타내었으며, 흡착식 냉동기의 사이클 선도는 그림 3에 나타내었다.

재생공정에서 흡착제는 온수로부터 열을 받아서 그 온도가  $T_a \rightarrow T_r$ 로 상승하고, 흡착식 열교환기 내에 흡착된 냉매는 수증기가 되어 탈착되고 응축기의 온도  $T_c$ (압력  $P_c$ )에서 물로 된다. 이 과정에 의해서 선도상에서는 흡착제의 함수율이  $q_b \rightarrow q_a$ 로 이동한다.

흡착공정에서 흡착제는 냉각수에 의해  $T_r \rightarrow T_a$ 로 냉각되고 냉매는 냉수로부터 열을 흡수하여 증발기의 증발온도  $T_e$ (압력  $P_e$ )에서 증발하고 흡착제에 흡착된다. 이 때 흡착제의 함수율이  $q_a \rightarrow q_b$ 로 증가하게 된다.



[그림 1] 흡착식 냉동기의 재생공정



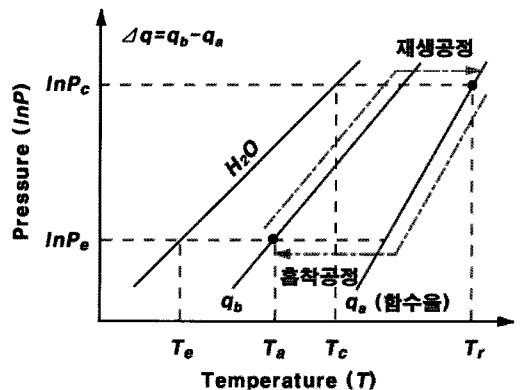
[그림 2] 흡착식 냉동기의 흡착공정

### 흡착식 냉동사이클

흡착식 냉동기는 진공상태에서 운전이 되며 2개의 열교환기를 1조로 하고 한쪽이 흡착공정일 때 다른 한쪽은 재생공정의 2개의 과정을 주기적으로 변화시키는 것이 가능하므로 연속적으로 냉수를 얻는 것이 가능하다. 여기서는 실리카겔/물계 흡착식 냉동사이클에 대해서 설명하고자 한다.

1단형(2Bed) 흡착식 냉동기는 그림 4에 나타낸 것과 같이 증발기, 열교환기 1·2(흡착기·재생기), 응축기 및 4개의 증기밸브로 구성되어 있다. 흡착제로서 실리카겔을 충전한 열교환기를 흡착기·재생기라 하고 냉매로는 물을 사용한다. 4개의 밸브의 개폐 및 2개의 열교환기에 흐르는 온수, 냉각수의 선택은 표 1의 운전모드에 따라 시간제어를 한다.

한 사이클을 크게 4가지로 나누어 각각의 과정을 A, B, C, D라 하면, 과정 A는 밸브 2, 3을 열고, 열교환기 1에 냉각수를 흘려 충전되어 있는 실리카겔의 온도를 내려 흡착공정을 진행한다. 또한 열교환기 2에는 구동열원인 온수를 흘려 충전되어 있는 실리카겔을 가열하여 재생공정을 진행한다. 사이클 B는 열교환기 1이 흡착공정에서 재생공정으로, 열교환기 2가 재생공정에서 흡착공정으로 이동하기 위한 준비과정이다. 모든 밸브를 닫아 흡·탈착에 의한 열 및 물질의 이동을 정지시킨 다음 열교환기 1에는 온수를 흘려 내부를 가열하고 열



[그림 3] 흡착식 냉동기의 사이클 선도



교환기 2에는 냉각수를 흘려 내부온도를 낮춘다. 따라서 과정 C로 이동하기 전에 실리카겔의 온도를 약간 조절할 수 있게 되어 다음 과정으로의 시작이 부드럽게 된다. 과정 A, B는 각각 과정 C, D의 역과정이다.

과정 C에서는 밸브 1, 4를 열고 열교환기 1에 온수를 흘려 재생공정을 진행한다. 이 과정에서 탈착된 증기가 응축기에서 응축하여 냉각수에 응축열을 주게 된다. 또한 열교환기 2에는 냉각수를 흘려 흡착공정을 진행한다. 이 과정에서 증발기내의 물이 기화하여 냉수를 얻는다. 그리고 흡착이 진행됨에 따라 냉각수가 열량을 얻는다. 과정 D에서는 열교환기 1이 재생공정에서 흡착공정으로, 열교환기 2가 흡착공정에서 재생공정으로 이행하는 준비

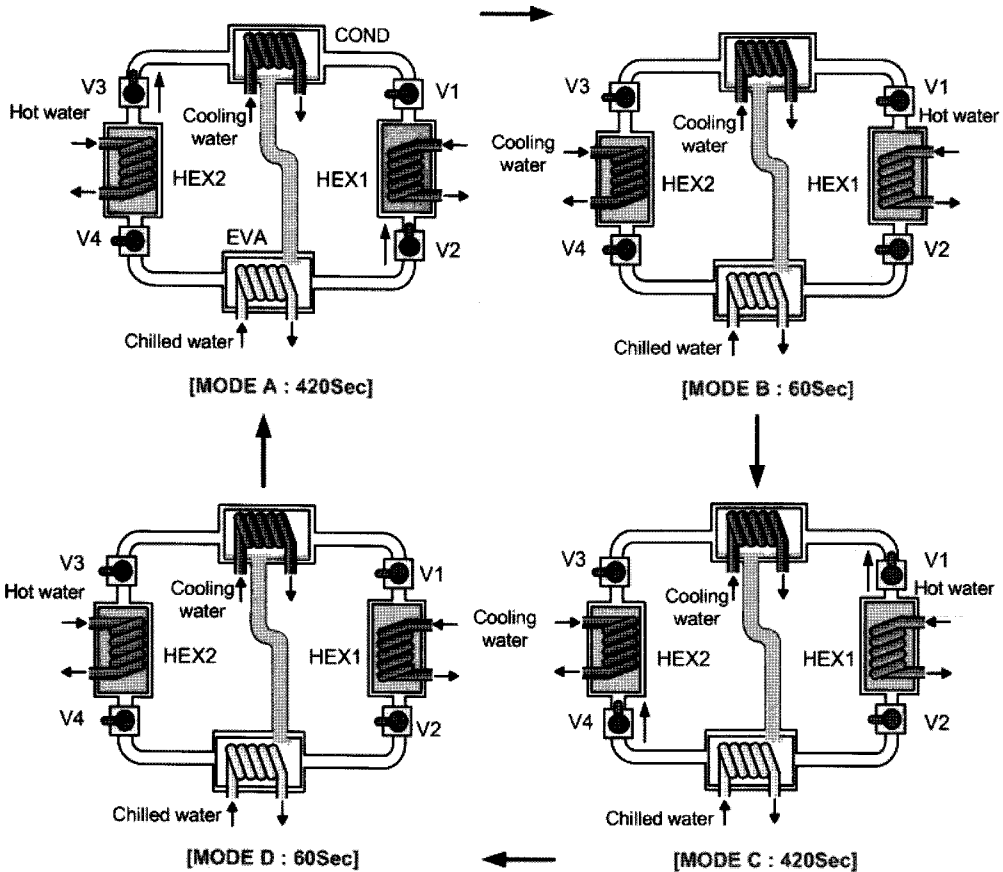
과정이며, 과정 D의 종료후는 다시 과정 A가 이루어진다.

<표 1> 흡착식 냉동기의 운전모드

Cycle	A	B	C	D
Time(Sec)	420	60	420	60
Valve	1	×	×	○
	2	○	×	×
	3	○	×	×
	4	×	×	○
Heat exchanger	1	Cw	Hw	Cw
	2	Hw	Cw	Hw

○ : Open, × : Closed

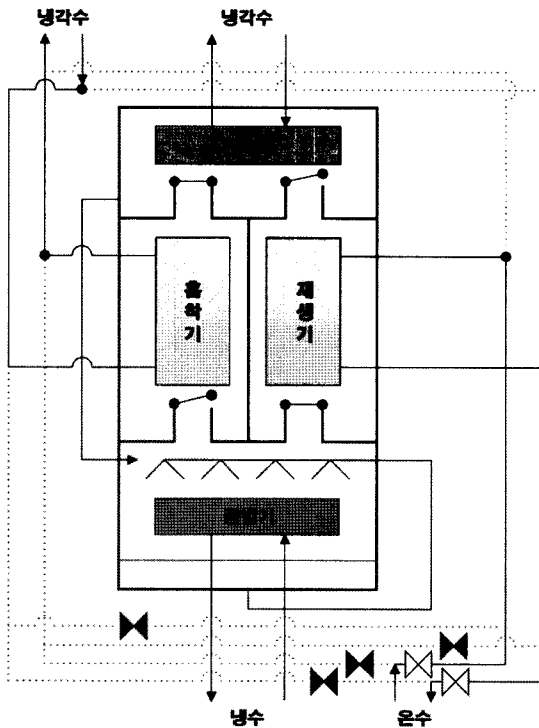
Cw : Cooling water, Hw : Hot water



[그림 4] 흡착식 냉동사이클

### 흡착식 냉동기의 구조

그림 5는 흡착식 냉동기의 구조를 나타낸 것이다. 흡착식 냉동기는 하부에서부터 증발기, 흡착기·재생기, 응축기 순으로 되어 있으며, 4개의 기기 각각에 냉매, 열원매체가 접속되어 있다. 응축기에는 냉각수, 증발기에는 냉수가 접속되어 있다. 또한 재생기(온수가 접속)와 흡착기(냉각수가 접속)는 온수와 냉각수의 유로가 바뀌면서 재생기와 흡착기가 바뀌게 된다. 상용화되어 있는 각 열교환



[그림 5] 흡착식 냉동기의 구조

<표 2> 흡착식 냉동기 장단점 비교

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 구동부분이 적음</li> <li>- 진동·소음이 적음</li> <li>- 독성·부식성·가연성이 없음(물을 냉매로 사용할 경우)</li> <li>- 흡수식과 같은 용액결정화 위험이 없음</li> <li>- 불응축가스(수소 등) 발생이 적음(추기조작 불필요, 진공유지 유리)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주기적 흡·탈착 전환에 의한 흡착탑 열팽창·수축으로 Leak 위험</li> <li>- 흡착탑 및 흡착제 간의 열 및 물질전달 향상 필요</li> <li>- 내구성있고 열화가 적으며 흡착성능이 뛰어난 흡착제 개발 필요</li> </ul>

기는 전열관의 열팽창, 수축을 고려하여 흡착 및 탈착이 용이하도록 Shell & Tube형태로 구성되어 있다. 또한 계내의 진공도를 유지하기 위해 진공펌프가 구비되어 있고 운전은 자동으로 행해진다.

### 흡착식 냉동기의 특징

표 2에서와 같이 흡착식 냉동기의 장단점을 비교해보면 장점으로는 구동부분이 적기 때문에 진동·소음이 적고, 물, 메탄올, 암모니아 등을 냉매로 사용하기 때문에 프레온계 냉매에 의한 오존층 파괴문제가 없으며, 흡수식에서의와 같은 흡수용액 결정화의 위험이 없으므로 각 요소의 온도, 압력 등의 운전조건 결정에 유연성이 있다. 또한 흡수식에 비해 불응축가스(수소 등)의 발생이 적기 때문에 진공유지를 위한 추기조작이 필요없다.

한편 단점을 살펴보면, 흡착탑은 주기적으로 흡·탈착 전환이 이루어지므로 열팽창·수축이 일어나 타요소기와 흡착탑과의 연결부위 등에서 리크가 발생할 위험이 있다.

흡착식 냉동기는 사용하는 흡착제와 냉매의 종류에 따라 몇 가지로 분류할 수 있는데 표 3에 각각의 흡착제의 종류 및 특성을 비교하였다. 실리카겔-물계 시스템의 특징은 70℃ 이상의 열원만 있으면 탈착이 가능하므로 저온폐열을 회수하여 사용할 수 있어 운전비 절감에 효과적이다. 제올라이트-물계 시스템은 냉매로 물을 사용하기 때문에 독성, 가연성이 없으며, 재생온도가 275℃ 정도이므로 천연가스 등을 연료로 하는 직화식으로 운전되며 가정 및 건물 냉난방에 적합한 시스템이다.

활성탄-메탄올계의 경우 메탄올을 냉매로 사용하므로 리크가 발생할 경우 독성, 가연성의 위험이 있으나, 저온생산이 가능하여 냉방 뿐 만이 아니라



냉동시스템으로도 활용이 가능하다.

### 흡착식 냉동기의 성능

그림 6과 그림 7은 흡착식 냉동기의 성능특성의 한 예를 나타낸 것이다. 그림 6은 온수온도와 냉동능력의 관계를 각 냉수온도별로 나타낸 그림이며, 그림 7은 온수온도와 COP의 관계를 각 냉수온도별로 나타낸 그림이다. 그림 6에서 온수 온도가 높고 냉수 온도가 높을수록 냉동능력이 상승함을 알 수 있다. 이러한 경향은 증온수 구동 흡수식 냉동기에서도 동일한 경향이 나타나지만 흡착식 냉동

기에서는 온수온도가 65℃ 이하에서도 경제적인 냉방운전이 가능하며 온수온도변동에 의한 냉동 출력비율이 작다는 특징이 있음을 알 수 있다.

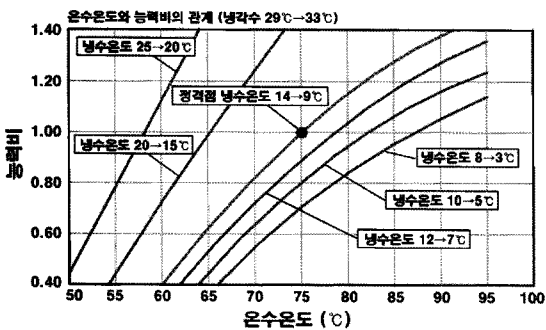
또한 그림 7에서 온수입구온도가 상승함에 따라 COP도 상승한다. 정격운전점에서 COP는 0.60으로 온수온도가 낮아져도 COP의 변동이 작음을 알 수 있다. 이것은 온수온도변동이 심한 폐열이용에 대단히 유리한 특징이라고 생각된다.

### 국외 기술 동향

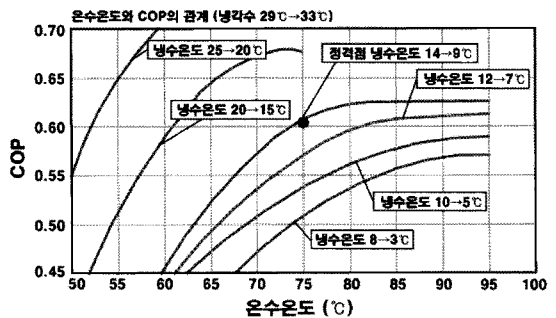
흡착식 냉동기는 일본, 독일, 중국 등에서 활발한

<표 3> 흡착제의 종류 및 특성

특성	흡착제	실리카겔	제올라이트	활성탄
냉 매		물	물	메탄올
냉매특성		무독성	무독성	독성, 가연성
세공크기		20-50 Å	4-15 Å	10-30 Å
재생온도(℃)		70	275	120
흡착온도(℃)		34	70	20
응축온도(℃)		34	65	20
증발온도(℃)		7	2	-10
냉매구동량 Δq(g/kg)		50	135	225
COP		0.6	0.45	0.49
흡착탑		2기 배치식	2기 배치식	1기
활용분야		냉방	냉난방	냉방, 냉동
특 징		저온폐열회수에 적합	천연가스 직화식	냉동시스템에 적합



[그림 6] 온수온도와 냉동능력과의 관계(Mayekawa사)



[그림 7] 온수온도와 COP와의 관계(Mayekawa사)

연구를 수행하고 있으며, 상품화된 시스템은 실리카겔/물계이다.

일본은 세계최초로 흡착식 냉동기를 상품화하였으며, 세계최고의 기술을 보유하고 있다. Nishiyodo사에서는 냉동능력 175 ~ 500 kW급을 판매하고 있

으며 COP는 0.60 ~ 0.68이다. Mayekawa사는 냉동능력 70 ~ 350 kW급을 판매하고 있으며 COP는 0.60 정도이다. 독일 SorTech사에서는 태양열 집열기와 연계하는 7.5 kW, 15 kW급 흡착식 냉동기를 판매하고 있으며, COP는 0.56이다. 중국에서

<표 4> 흡착식 냉동기 상용화 제품

냉매	흡착제	국가	업 체	냉동능력	비 고
물	실리카겔	일본	Nishiyodo A.C	175-500 kW	폐열회수, COP=0.60~0.68
			Mayekawa Co.	70-350 kW	폐열회수, COP=0.6
		독일	SorTech	7.5 kW, 15 kW	태양열회수, COP=0.56
		중국	Shanghai Jiao Tong University(SJTU)	10 kW	태양열회수, COP=0.39

<표 5> 흡착식 냉동기 사양(일본 Nishiyodo사)

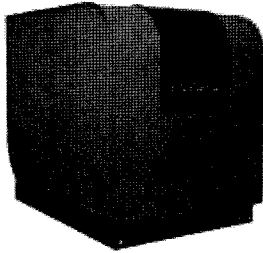

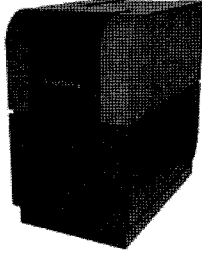
항목	NADAC 050		NADAC 080		NADAC 100		
	Standard Type		Standard Type		Standard Type		
냉동능력(kW)	250	175	395	280	500	350	
COP	0.68	0.60	0.68	0.60	0.68	0.60	
냉수	입출구온도(℃)	14/9	6/3	14/9	6/3	14/9	6/3
	순환량(m³/h)	43.2	50.4	68.4	80.4	86.4	100.8
	압력손실(kPa)	59	69	59	69	59	69
냉각수	입출구온도(℃)	31/35.4	31/34.4	31/35.4	31/34.4	31/35.4	31/34.4
	순환량(m³/h)	120		192		240	
	압력손실(kPa)	93		98		98	
온수	입출구온도(℃)	88/83.2	88/84.2	88/83.2	88/84.2	88/83.2	88/84.2
	순환량(m³/h)	66		105		132	
	압력손실(kPa)	23		29		29	

<표 6> 흡착식 냉동기 사양(일본 Mayekawa사)

항목	ADR-20	ADR-30	ADR-50	ADR-100
냉동능력(kW)	70	100	175	350
COP	0.6			
냉수	입출구온도(℃)	14.0/9.0		
	순환량(m³/h)	12.1	18.1	30.2
냉각수	입출구온도(℃)	29.0/33.0		
	순환량(m³/h)	40.3	60.5	100.8
온수	입출구온도(℃)	75.0/70.0		
	순환량(m³/h)	20.2	30.2	50.4



<표 7> 소형 흡착식 냉동기 사양

제조사	SorTech	SJTU	SorTech
제품명	chilli STC8 (ACS 08) 	SWAC-10 	chilli STC15 (ACS 15) 
작동매체	water/silica gel	water/silica gel	water/silica gel
냉동능력(kW)	7.5	10	15
온수 입출구온도(℃)	75/68	85/79	75/69
냉각수 입출구온도(℃)	27/32	30/36	27/32
냉수 입출구온도(℃)	18/15	15/10	18/15
COP	0.56	0.39	0.56

도 Shanghai Jiao Tong University(SJTU)를 중심으로 활발한 연구를 수행하고 있으며 냉동능력 10 kW급에서 COP는 0.39로 알려져 있다.

표 4는 일본, 독일, 중국에서 개발된 실리카겔/물계 흡착식 냉동기 상용화 제품을 정리한 것이다. 표 5와 표 6은 일본 Nishiyodo사와 Mayekawa사에서 판매되고 있는 흡착식 냉동기의 표준사양을 나타낸 것이며, 표 7은 독일의 SorTech사와 중국의 Shanghai Jiao Tong University에서 개발한 소형 흡착식 냉동기 사양을 나타낸 것이다.

### 개발 현안사항

흡착식 냉동기 개발에 있어서 가장 중요한 현안 문제는 고효율 흡착탑의 개발이다. 근래 다양한 사이클 개발로 효율은 많이 향상 되었으나 보다 콤팩트하고 신뢰성을 높이기 위해서는 각 요소기기, 특히 흡착탑의 고효율화가 필요하다. 흡착탑의 효율 향상 방안으로는 1) 흡착탑의 열교환기 형상개선,

2) 흡착탑의 표면처리를 통한 열전달 향상, 3) 흡착제에 특정한 결합재(다공성 금속, 금속 foam, expanded graphite 등)를 이용한 복합체의 구성을 통하여 열전도를 향상하는 기술로 대별할 수 있다. 또한 흡착제의 흡탈착중량차( $\Delta q$ )의 향상과 사이클 시간의 단축화, 흡탈착 절환시 열손실의 저감화 기술이 필요하다.

### 맺음말

흡착식 냉동기는 이미 일본, 독일 등에서 상용화가 되어 있고 증기압축식 냉동기, 흡수식 냉동기와 경쟁을 할 수 있는 가능성을 가지고 있는 기술이나 아직까지는 제품가격 경쟁력, 효율면, 중량면에서 많은 노력이 필요한 시점이다.

대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있는 우리나라로서는 다양한 산업체의 공정에서 버려지는 폐열 등을 효과적으로 활용할 수 있는 흡착식 냉동기의 개발이 절실히 요구되며, 특히 중온수 흡수식

냉동기의 운전이 곤란한 80℃ 이하의 저온배열을 활용한 새로운 시장의 개척이 필요하다고 보여진다. 흡착식 냉동기의 실용화를 위해서는 흡착제 자체에 대한 연구개발은 물론이고, 흡착탑의 구성, 흡착제 충전 방법, 흡착제와 전열면과의 접촉 등 흡착탑 고효율화 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

1. 권오경, 윤재호, 2006, 흡착식 냉동기 기술 개발 동향, 설비저널, 제35권, 제9호, pp.30~43.
2. 윤정인, 1999, 흡착식 냉동시스템의 기술 개발, 에너지관리, 제276호, pp.44~50.
3. 박윤철, 2005, 건물공조용 CHP 시스템의 흡착식 냉동기 적용, 설비저널, 제34권, 제2호, pp.28~32.
4. Wang, R. Z., Chen, C.J., Ge, T.S., Ma, Q. and Xiong, Z.Q., 2008, Solar sorption cooling systems for residential applications : options and guidelines, International Sorption Heat Pump Conference, 23~26 September, Seoul, KOREA
5. Saha, B.B., Alam, K.C., Hamamoto, T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 2001, Sorption refrigeration/heat pump cycles, Trans. of the JSRAE, Vol.18, No.1, pp.1~14.
6. Iwase, K., 2006, Adsorption refrigerating machine, Refrigeration, Vol.81, No.946, pp.18~21.
7. Yonezawa, Y., 1998, Adsorption chiller, Refrigeration, Vol.73, No.854, pp.41~44. ●