

흡착식 냉동시스템의 기술개발

윤정인 · 부경대학교 냉동공조공학과 교수



최 근 생활수준 향상에 따라 쾌적한 주거환경 및 근무환경을 추구하는 경향이 뚜렷해짐에 따라 냉방수요가 급격히 증가하고 있다.

그러나 현재 보급되어 있는 냉방기는 전기에너지를 이용하는 압축식 냉방기가 대부분이어서 냉방용 전기사용 급증으로 인한 하절기 전력예비율 감소가 심각한 문제로 대두되고 있다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로 가스를 연료로 하는 냉난방기 개발이 활발히 추진되고 있다. 가스의 경우 전기와는 반대로 겨울철에 높고 여름철에 낮은 수요패턴을 가지고 있으므로 가스냉난방기의 보급이 확대됨으로써 국가적인 차원에서 에너지의 효율적 이용이 가능하며, 발전소 및 LNG저장탱크 건설비 절감효과를 꾀할 수 있다. 또한 가스냉난방기의 경우 오존층 파괴물질인 CFC 냉매 대신 일반적으로 물을 냉매로 사용하므로 환경적인 측면에서도 큰 잇점을 가지고 있다.

가스를 연료로 사용하는 냉난방기에는 흡수식 냉난방기, 가스엔진 구동 히트 펌프, 흡착식 냉난방기 등이 있다.

흡착식 냉난방기는 흡수식 냉난방기와 거의 비슷한 사이클로 운전되며, 다만 흡수기 대신 흡착탑에서 냉매를 흡착한다는 점이 다르다. 흡

수식의 경우 흡수용액이 냉매를 흡수하여 시스템내를 같이 순환하나 흡착식의 경우 흡착탑에 고정되어 있는 고체상태의 흡착제에 냉매가 흡·탈착되어 시스템내에서는 냉매만 순환하게 된다.

흡착식 냉난방기는 Faraday가 1848년에 그 원리를 최초로 제안한 이후 1920년대에 실리카겔을 사용한 흡착식 냉방시스템이 개발되어 기차와 빌딩에 적용되었으나, 이후 전기압축식 냉방기의 개발로 연구개발 및 생산이 중단되었다.

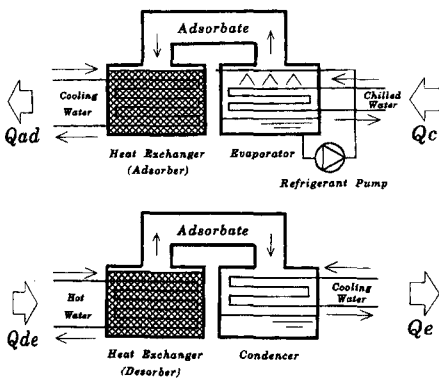
국내의 경우 일부 연구소에서 기초연구를 수행하는 단계이며 외국의 경우는 약 10년 전부터 연구 개발이 본격적으로 추진되어 초기의 냉방 COP 0.5수준에서 현재는 실험실 스케일로는 냉방 COP 1.0, 난방 COP 1.5정도의 수준까지 효율이 향상되었다. 그러나 연구개발 기간이 짧아 아직은 상품화 제품의 내구성, 성능의 신뢰성 등이 아직 입증되지 않아 생산 및 보급은 그다지 활성화되지 않은 상태이다. 하지만 다른 냉방시스템과 비교했을 때 나쁨대로의 장점(저온폐열 이용가능, 진동·소음이 적음, 용액결정 위험이 없음, 추가 불필요 등)을 가지고 있으므로 기술개발 및 보급의 확대가 가능하리라 생각된다.

1. 작동 원리

흡착식 냉동기는 흡착할 때 발생하는 흡착열에 착안하여, 중·저온 열원을 투입함으로써 냉열을 발생시키는 기기로서, 한 사이클을 흡착과정과 탈착과정으로 크게 나눌 수 있다. 흡착과정의 작동원리를 <그림 1(a)>에 나타내었다. 계내는 진공상태이며 흡착제와 흡착질이 조제한다. 먼저, 증기밸브를 열고, 냉각수로 흡착제의 온도를 낮추면, 포화 흡착량이 증가하기 때문에 증발기내에서의 흡착질이 냉수로부터 잠열 Q_e 를 얻고, 기화하여 흡착제에 흡착된다. 열교환기 내에서는 흡착열이 생기지만 냉각수가 흡착제로부터 열량 Q_{ad} 를 빼앗기 때문에 다시 흡착이 일어난다. 또 계내의 압력은 증발기 내의 압력 P_e 와 거의 동일하다.

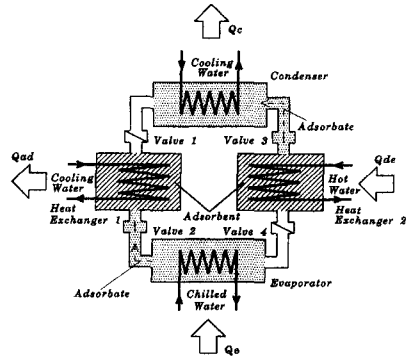
탈착과정은 <그림 1(b)>에 나타낸 것과 같이 온수에 의해 흡착제의 온도가 상승하여, 포화흡착량이 감소한다. 이에 따라 탈착이 생기며, 응축기에 있어서 냉각수에 잠열 Q_c 를 줌으로써 탈착질은 응축이다. 따라서 흡착량은 감소한다. 그리고 열교환기내에서 흡착제가 온수로부터 열량 Q_{de} 를 얻어 다시 탈착한다. 탈착과정에서와 같이 압력은 응축기내의 압력 P_c 와 거의 같다.

<그림 1> 흡착식 냉동기의 작동원리



그러나 이와 같은 경우에는 탈착과정에서 냉열이 얻어지지 않아 실용적이지 못하다. 따라서 2개의 열교환기를 1조로 하여, 한쪽이 흡착과정일 때 다른 한쪽은 탈착과정이 되게 하면 2개의 단단형 흡착식 냉동기는 <그림 2>와 같이 증발기, 응축기, 열교환기 1, 2(탈·흡착기) 및 증기밸브로 구성되어 있으며, 흡착제에는 실리카겔을, 흡착질에는 물을 사용한다.

<그림 2> 단단형 흡착식 냉동기(사이클 A)



밸브의 개폐 및 2개의 열교환기에 흐르는 온수, 냉각수의 선택은 표 1의 타임차트에 따라 시간제어를 한다. 한 사이클을 크게 4가지로 나누어 각각의 사이클을 A, B, C, D라 하면, 사이클 A는 우선 밸브 2, 3을 열고, 열교환기 1에 냉각수를 흘려 충전되어 있는 실리카겔의 온도를 내려 흡착과정을 진행한다. 이 과정에서 증발기내의 물이 기화하여 냉열 Q_e 를 얻는다. 그리고 흡착됨에 따라 냉각수가 열량 Q_{ad} 를 얻는다. 또,

<표 1> 단단형 흡착식 냉동기 타임 차트

사이클		A	B	C	D
시간(sec)		420	30	420	30
밸브	1	X	X	○	X
	2	○	X	X	X
	3	○	X	X	X
	4	X	X	○	X
열교환기	1	Cw	Hw	Hw	Cw
	2	Hw	Cw	Cw	Hw

열교환기 2에는 가동 열원인 온수를 흘려, 열량 Qde로 충전되어 있는 실리카겔을 가열하여 탈착과정을 진행한다. 이 과정에서 탈착한 증기가 응축기에서 응축하여, 냉각수에 응축 열 Qc를 주게 된다.

사이클 B는, 열교환기 1이 흡착과정에서 탈착과정으로, 열교환기 2가 탈착과정에서 흡착과정으로 이동하기 위한 준비과정이다. 우선 모든 밸브를 닫아 탈·흡착에 의한 열 물질 이동을 정지시킨 다음 열교환기 1에는 온수를 흘려 내부를 가열하고, 열교환기 2에는 냉각수를 흘려 내부온도를 낮춘다. 따라서 사이클 C로 이동하기 전에 실리카겔의 온도를 약간 조절할 수 있게 되어 다음 과정으로의 시작이 부드럽게 된다. 사이클 C, D는 각각 사이클 A, B의 역과정이다. 사이클 C에서는 밸브 1, 4를 열고, 열교환기 1에 온수를 흘려 탈착과정으로, 열교환기 2에는 냉각수를 흘려 흡착과정으로 한다. 사이클 D는 열교환기 1이 탈착과정에서 흡착과정으로, 열교환기 2가 흡착과정에서 탈착과정으로 이행하는 준비과정이며, 사이클 D의 종료 후에는 다시 사이클 A가 이루어진다. 한편 흡착식 냉난방기를 타 냉난방기와 비교했을 때의 장단점을 <표 2>에 요약한다.

흡착식 냉난방기는 구동부분이 적기 때문에 진동·소음이 적고, 물, 메탄올, 암모니아 등을

냉매로 사용하기 때문에 프레온계 냉매에 의한 오존층파괴문제가 없으며, 흡수식에서와 같은 흡수용액 결정화의 위험이 없으므로 각 요소의 온도, 압력등의 운전조건 결정에 유연성이 있다. 또한 흡수식에 비해 불응축가스(수소등)의 발생이 적기 때문에 진공유지를 위한 추가조작이 필요없다.

<표 2> 흡착식 냉난방기 장단점 비교

장 점	단 점
- 구동부분이 적음	- 주기적 흡·탈착 전환에 의한 흡착탑 열팽창·수축으로 Leak 위험
- 진동·소음이 적음	- 흡착탑 및 흡착제 간의 열 및 물질전달 향상 필요
- 독성·부식성·가연성이 없음(물을 냉매로 사용할 경우)	- 내구성 있고 열화가 적으며 흡착성능이 뛰어난 흡착제 개발 필요
- 흡수식과 같은 용액결정화 위험이 없음	
- 불응축가스(수소등) 발생이 적음(추가 조작 불필요, 진공유지 유리)	

한편 단점을 살펴보면, 흡착탑은 주기적으로 흡·탈착 전환이 이루어지므로 열팽창·수축이 일어나 타요소기기와 흡착탑과의 연결부위 등에서 리크가 발생 할 위험이 있으며, 시스템 콤팩트화 및 고효율화를 위해서는 현재보다 흡착성능이 뛰어난 고효율 흡착제 개발과 흡착탑 및 흡착제간의 열 및 물질전달 향상을 위한 연구개발이 필요하다.

2. 흡착제의 종류

흡착식 냉난방기는 사용하는 흡착제와 냉매의 종류에 따라 몇 가지로 분류할 수 있는데 <표 3>에 각각의 흡착식 냉난방기를 비교하였다. 제올라이트-물계 시스템은 냉매로 물을 사용하기 때문에 독성, 가연성이 없으며, 탈착온도가 250℃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 냉방뿐만 아니라 냉동시스템으로도 활용이 가능하다. 실리카겔-물계 시스템의 특징은 80°C 정도의 열원만 있으면 탈착이 가능하므로 저온폐열을 회수하여 사용할 수 있어 운전비 절감에 효과적이다.

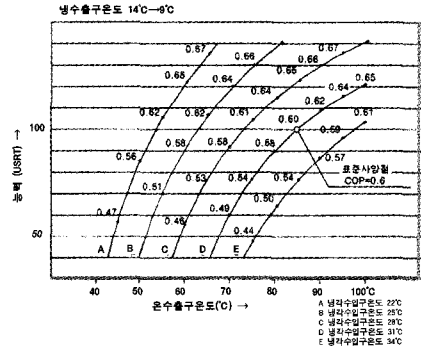
<표 3> 흡착식 냉난방기의 종류 및 특징

흡착제 특성	Zeoite	활성탄	실리카겔
냉매	물	메탄올	물
냉매특성	무독성	독성, 가연성	무독성
세공크기	4-15Å	10-30Å	20-50Å
흡착량	0.2-0.25kg/kg	0.25kg/kg	0.06-0.6kg/kg
탈착온도	250°C	120°C	80°C
냉수온도	-10°C이상	-10°C이상	0°C이상
활용분야	냉난방	냉방, 냉동	냉방
특징	천연가스 적화식	냉동시스템에 적합	저온폐열회수에 적합

3. 성능특성 및 경제성

흡착식 냉동기의 성능특성의 한 예를 <그림 3>에 나타내었다. 이것은 냉동능력 및 성능계수를 온수 입구온도를 파라메타로하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 흡착식 냉동기의 성능특성은 온수온도가 높을수록, 냉각수온도가 낮을수록 냉동능력 및 효율이 좋아진다. 이것은 흡수식 냉동기에 있어서도 같은 경향이지만 흡착식 냉동기는 열원이 65°C 이하에서도 경제적인 냉방운전이 가능한 것과 입력온도 변동에 따른 출력 변동비율이 작은 것인 큰 계수는 표준 사양점(온수입구온도 85°C, 냉각수 입구온도 31°C)에서 0.6으로 흡수식 냉동기보다 약간 낮으나, 열원 입구온도가

<그림 3> 흡착식 냉동기의 성능 곡선



70~100°C 범위에서 0.5~0.65로 변동폭이 작기 때문에 입력온도 변동이 심한 폐열 이용에는 전체적으로 생각해 유리하다. 열교환기 효율 및 준비운전 시간에서의 회수 효율향상, 작동온도 범위내에서 흡·탈착 냉매량차를 크게 할 수 있는 흡착제의 개발 등에 따라 저온열원에서 COP 0.7~0.8 정도의 냉동기 실현가능성은 충분히 있다. <표 4>는 온폐열을 이용하여 흡착식 냉동기를 작동시킨 경우의 운전비를 다른 냉동 시스템과 비교한 예를 나타낸 것이다.

<표 4> 운전비 비교(100RT 기준)

	흡착식 냉동기	가스흡수식 냉동기		동유 흡수식 냉동기		수 냉각기	
	전력 kW	전력 kW	도시가스 nm ³ /h	전력 kW	동유 kg/h	전력 kW	전력 kW
냉동기 본체	0.2	7.7	27.3	7.7	26.2	91.8	129.4
냉각탑(팬)	3.6	3.3	-	3.3	-	3.3	-
냉각수펌프	7.5	3.7	-	3.7	-	2.2	-
온수펌프	3.7	-	-	-	-	-	-
냉수펌프	2.2	2.2	-	2.2	-	2.2	2.2
합계	17.2	16.9	27.3	16.9	26.2	99.5	131.6

4. 시운사례 및 상용화 현황

여기서는 흡착식 냉동기의 이용 예를 살펴보고자 한다.

가. 엔진폐열의 이용

일반적인 코제네레이션 시스템에서는 엔진 폐가스 및 자켓 냉각수를 열원으로 하여 냉방용 냉수를 제조한다. 흡착식 냉동기는 독자적인 특징을 살려 자켓 냉각수만의 저온열원(60~70°C)을 회수하여 냉방과 공장의 프로세스 냉수(제품의 냉각·기기의 냉각)로 년중 풀 운전하는 경우가 많다.

나. 공장폐열의 이용

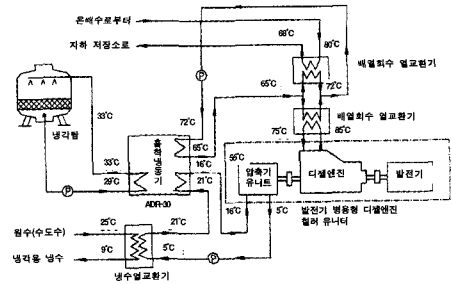
공장 공정에서의 냉각수나 기기에서 배출되는 열을 이용하여 프로세스 냉수를 얻는 시스템에도 실시 예가 있지만, 이 경우는 배출되는 열을 60~70°C로 회수하여 년중 풀로 냉수를 공급하기 때문에 가동시간이 길어 약 1~2년에 상각할 수 있다.

다. 식품공장의 적용사례

식품공장의 대부분은 하나의 제품을 만드는 과정에서 몇 번씩이나 가열과 냉각을 반복하는 예가 많다. 이때 냉각에 필요한 냉동기의 전력량은 상당한 것이 현실이다. 흡착식 냉동기는 이와같은 식품공장에 최적인 기기로서 일본에서는 몇몇 시스템이 설치 운전되고 있다. 이 시스템은 배열과 디젤엔진의 자켓에서 배출된 배열을 구동원으로하여 식품 냉각용의 예냉을 하는 시스템이다.

예냉된 냉수는 디젤엔진 구동의 냉동기에 의해 소정의 온도까지 냉각된다. 또, 냉동기의 반대측에는 발전기를 부착하여 기기에 필요한 전력량도 조달할 수 있는 시스템이다. 이 시스템의 큰 장점은 자체 전력으로 냉수제조 시스템을 구축할 수 있는 것과 소비연료의 삭감에 공헌할 수 있는 것을 들 수 있다.

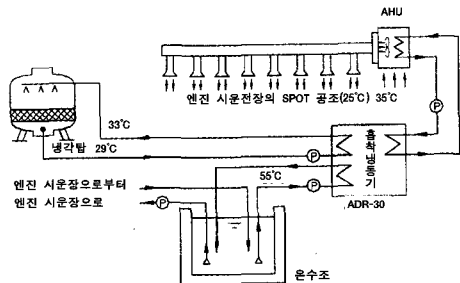
<그림 4> 식품공장 적용사례



라. 엔진 시운전장에서 적용사례

이 시스템은 각 엔진의 자켓에서 발생한 배열을 회수하여 엔진 시운전장의 스파트 공조(국소공조)를 하는 시스템이다. 이 시스템의 큰 특징은 냉수의 온도 조건을 약간 완만하게 할 수 있는 점과 온배열 온도가 50~60°C에도 구애받지 않고 운전이 가능한 점이다. 이 때의 냉풍 취출 온도는 약22°C로 보통의 공조조건 보다 높지만 엔진 시운전장(여름의 실내온도 35°C전후)이라는 점에서 문제되지 않는다.

<그림 5> 엔진 시운전장 적용사례



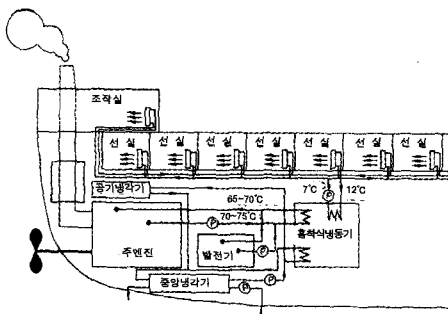
마. 선박에서 적용사례

선박에서는 엔진이나 발전기 등의 보조기기에서 대량의 온배열이 발생하지만, 현재 대부분이 바다로 버려지고 있다. 또한 공조기용 동력을

얻기 위해 발전기를 필요로 하는 것이 현재의 상황이다. 이 시스템은 엔진이나 보조기기(발전기)류에서 발생하는 저온배열(75°C~80°C)를 회수하여 이를 구동열원하는 냉열을 공조 등에 이용하는 것이다.

이 시스템을 적용함으로써 공조용 발전량이 불필요하게 되고, 연료감소에 따라 에너지가 절약될 뿐만 아니라 탄산가스의 배출량도 감소시킬 수 있다. 또 냉열량의 이용은 공조분야 뿐만 아니라 수요가 신장되고 있는 곡물 등의 운반선에도 적용할 수 있으리라 생각된다.

<그림 6> 선박 적용사례



바. 기타 적용사례

흡착식 냉동기는 기본적으로「75°C 전후의 온배수가 얻어진다.」 「발생하는 냉열을 유효이용할 수 있다」라는 두가지 점을 만족할 수 있으므로 어느 정도 시작에서도 적용할 수 있으리라 생각된다. 즉, 코제네레이션 시스템이나 공장배열을 구동원으로하여 공조나 제품냉각 등에 이용하는 것은 일반적으로 생각할 수 있는 시스템이다. 이 외에도 동결이나 제빙 등 0°C 이하의 냉각을 필요로 하는 업종에서도 온배열을 대량으로 버리고 있는 곳에서는 이 시스템을 채용하고 있는 곳이 있다. 이것은 여기서 발생하는 냉열에 의해 제품을 일

단 예냉하여 거기부터 냉동기로 소정의 온도까지 냉각하는 시스템으로 에너지 절약을 도모할 수 있기 때문이다.

사. 상용화 현황

앞으로 실용화가 기대되고 있는 연료전지의 온배수도 이용할 수 있는 온도범위가 있어, 이 분야에서의 이용도 크게 기대된다. 앞에서 살펴본 바와같이 흡착식 시스템은 이용하는 냉수온도가 높은 경우, 또는 저온의 냉각수가 얻어지는 경우는 50°C 정도의 온배열 이용이 가능하며, 저온수 흡수식 냉동기에서는 이용이 곤란한 50~80°C 정도의 넓은 온도범위에서 효율 좋게 이용할 수 있다. 흡착식 냉난방기의 상용화 현황을 <표 5>에 나타내었다.

<표 5> 흡착식 냉난방기의 상용화 현황

냉매	흡착제	국가	업체	목적	비고
물	Zeolite	미국	- Zeopower	상업용 20kW	가스직화 냉난방 COPc=1.0, COPh=1.8
		프랑스	- CNRS	시제품	태양열 열펌프
			- BLM	상업용	직화식냉난방, COPh=1.45
	실리카겔	독일	- Citergaz	Demo.용	냉동시스템
			- ZeoTech GmbH	상업용	가스직화 냉방, 기차냉방
		일본	- Univ. Munchen	Demo.용 2kW	열펌프용용, COPh=1.4
			- GIRI	Demo.용, 용	폐열회수 냉방
메탄올	활성탄	프랑스	- CNRS	시제품	폐열회수 냉동, COPc=0.5
		미국	- W.A.C	Demo.용	가스직화 냉방
			- GRI	상업용 10kW	COPc > 0.7

5. 제습식 냉각시스템

제습식 냉각시스템(desiccant type cooling system)은 건물 공조용 공기를 외부로부터 유입할 때 공기중 수분을 원하는 습도만큼 미리 제거함으로써 수분응축에 소용되는 잠열부하를 감

소시켜 기존 시스템에 비해 적은 냉방출력으로 냉방이 가능하고, 덕트내부가 건조한 상태로 유지되므로 습한 분위기에서 생성되는 각종 미생물을 발생을 억제하며, 대기중의 오염물질을 미리 제거할 수 있고 어떠한 온도조건하에서도 저습도 유지가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 기존 냉방방식의 경우 단순히 실내온도를 낮추는 형식이었으나 최근에는 실냉공기의 질 (IAQ: Indoor Air Quality)에 대한 관심이 고조되어 보다 쾌적한 실내환경을 유지하기 위한 연구개발이 미국, 유럽등 선진국을 중심으로 이루어지고 있다.

외부공기는 제습휠(desiccant wheel)을 통과하면서 수분이 제거되고 열교환휠(heat exchange wheel)에서 열교환 되어 예냉된 후 냉각기에 의해 냉방온도까지 온도가 낮아져 실내 냉방용 공기로 이용하게 된다. 한편 유입되는 공기와 같은 양의 실내공기가 외부로 배출되는데, 회전하는 열교환휠에 의해 유입공기와 열교환 된후, 천연가스에 의해 가열되는 히터를 통과하여 온도가 상승되어 회전하는 제습휠을 통과하면서 흡착제내의 외부공기중에서 흡착된 수분 및 기타 오염물질을 탈착시킨 후 외부로 배출된다.

6. 개발 현안사항

흡착식 냉난방기 개발에 있어서 가장 중요한 현안문제는 고효율 흡착탑의 개발이다. 근래 다양한 사이클 개발로 효율은 많이 향상되었으나 보다 콤팩트화하고 신뢰성을 높이기 위해서는 각 요소기기, 특히 흡착탑의 고효율화가 필요하다.

흡착성능을 향상시키기 위해서는 흡착제에서 냉매의 물질전달이 좋아야 하고, 흡착제 내부, 흡착제간 및 흡착제와 전열 핀간의 열전달이 뛰어나야 한다. 흡착제의 열전달 성능을 향상시키

기 위하여 프랑스에서는 기존 흡착제에 열전달 촉진물질을 적당한 비율로 혼합하여 제조한 흡착제를 테스트한 결과 기존에 비해 열전달 성능이 약 100배 가량 향상되었다고 보고하고 있다. 그러나 그와 동시에 물질전달 성능은 떨어지므로 이에 대한 보완이 필요하다. 국내의 경우에도 흡착식 냉난방기의 실용화를 위해서는 흡착제 자체에 대한 연구개발은 물론이고, 흡착탑의 구성, 흡착제 충전 방법, 흡착제와 전열면과의 접촉등 흡착탑 고효율화에 관한 연구개발이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

7. 맺음말

우리나라의 경우 하절기 냉방수요 급증에 따른 전력예비부족문제와 천연가스 수요패턴등 국가적 에너지 수급조절을 고려할 때 천연가스를 연료로 사용하는 냉난방시스템의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

천연가스 냉난방시스템의 하나인 흡착식 냉난방기의 경우 본격적인 연구가 수행된 기간이 흡수식 냉난방기, GHP(가스엔진수동 히트펌프)등 타 냉난방시스템에 비해 짧음에도 불구하고 성능면에서 대등한 수준까지 달성되었고 사용열원의 다양성, 환경친화성, 시스템 안정성등 나름대로의 장점을 가지고 있으므로 우리나라에서도 이에 대한 연구개발을 할 충분한 가치가 있다고 생각된다.

흡착식 냉난방기가 실용화되기 위해서 가장 중점적으로 연구개발해야 할 분야는 흡착탑의 고효율화 및 콤팩트이다. 흡착탑의 고효율화를 위해서는 열 및 물질전달이 뛰어난 흡착제 개발, 고효율 흡착탑 설계등이 필수적이다. 이러한 부분만 개선이 된다면 현재의 국내기술로도 빠른 시일내에 실용화가 가능하리라 생각된다.