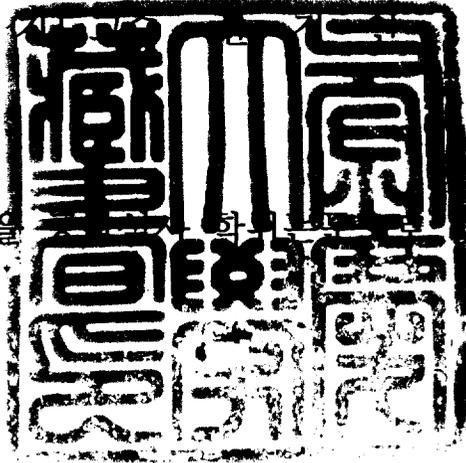


공 학 석 사 학 위 논 문

흡착식 냉동기용 흡착제의 유효열전도율
측정에 관한 연구



이 논문을 부경대학교 대학원 석사학위논문으로 제출함

2005 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

김 병 진

김병진의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월

주 심 공학박사 최 광 환



위 원 공학박사 정 석 권



위 원 공학박사 윤 정 인



목 차

Abstract	iii
Nomenclature	v
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 종래의 연구	2
1.2.1 흡착식 시스템에 관한 연구	2
1.2.2 유효열전도를 측정에 관한 연구	6
제 2 장 실험이론	8
2.1 흡착식 시스템의 작동원리 및 특징	8
2.1.1 흡착식 시스템의 작동원리	8
2.1.2 흡착식 시스템의 특징	16
2.2 비정상열선법의 원리	21
제 3 장 실험장치 및 방법	26
3.1 실험장치의 구성	26
3.2 실험방법	34
3.3 실험조건	36

제 4 장 실험결과 및 고찰	37
4.1 충전층 내 압력에 따른 유효열전도율	37
4.2 충전층 내 온도에 따른 유효열전도율	39
4.3 흡착제의 함수율에 따른 유효열전도율	44
4.4 흡착제 입자크기에 따른 유효열전도율	46
제 5 장 결 론	48
참고문헌	49
감사의 글	51

A study on the Measurement of Effective Thermal Conductivity of Adsorbent in Adsorption Refrigerator Packed bed

Byoung-Jin Kim

*Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering,
Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

Nowadays adsorption refrigerator that can utilize exhaust heat, having relatively low temperature (60~90°C), from factories is getting much attention. This refrigerator has an imperative component in it, which is a heat exchanger consisted of adsorbent packed bed. Therefore, the refrigerator's performance is greatly dependant on effective thermal conductivity. So when it comes to optimizing of designing a adsorbent refrigerator and improving its efficiency, developing a adsorbent whose packed bed's effective thermal conductivity is bigger than a conventional one is crucial(or a first task to be done). In this research, we had taken several tests to find out quantity of effective thermal conductivity of many conventional

packed bed (especially silica gel and zeolite), and performed experiments to see how various experimental variations (the adsorbent bed temperature, pressure, particle size and water content) can possibly influence on effective thermal conductivity.

In case of measuring effective thermal conductivity of adsorbent, embedded in packed bed, we used a transient hot wire method regarded as the most trusted one in terms of measuring effective thermal conductivity of liquid. From the findings, the greater value of water content of adsorbent, the greater effective thermal conductivity. This is because water, whose heat transfer rate is bigger than a particle of adsorbent was contained inside of adsorbent. Besides, variations of water content were the main factor among other experimental variations that greatly influenced on effective thermal conductivity. As inside temperature and pressure increased, effective thermal conductivity tends to get increased. this can be regarded as particles' active moving in flowing layer. Effective thermal conductivity related to size of a particle, that tends to have a bigger value as its size gets smaller. This result is revealed obviously especially from the size of particle range: in between 0.5 and 0.8 mm. Unlike other bead-type particles, a type of the particles is granular, having much more contact area. Under all the given conditions, effective thermal conductivity of silica gel is bigger than that of zeolite. This can be regarded as the fact heat transfer rate ($0.37 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) of a silica gel particle is slightly bigger than that ($0.18 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) of a zeolite particle.

Nomenclature

C	: Exp $\gamma = 1.781$	[-]
C_p	: Specific heat of constant pressure	[J/kg·K]
M	: mass	[kg]
P	: Pressure	[kPa]
q''	: Heat flux	[W/m ²]
q	: Heat capacity per length	[W/m]
Q	: Heat capacity	[W]
r	: Radius	[m]
t	: Time	[s]
T	: Temperature	[°C]
V	: Volume	[m ³]
Z	: Volume fraction	[-]

Greek letters

α	: Thermal diffusivity	[m ² /s]
ρ	: Particle density	[kg/m ³]
λ	: Thermal conductivity	[W/m·K]
γ	: Euler' number = 0.5772	[-]

Subscripts

c	: Condensation
e	: Evaporation

ad : Adsorption
de : Desorption
eff : Effective value

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 생활수준의 향상에 따라 쾌적한 주거환경 및 근무환경을 추구하는 경향이 뚜렷해지고 있다. 이로 인해 냉방수요가 급격히 증가하고 있는데 현재 보급되어 있는 냉방기는 전기에너지를 이용하는 압축식 냉방기가 대부분이어서 냉방용 전기사용 급증으로 인한 하절기 전력예비율 감소가 심각한 문제로 대두되고 있다.

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 LNG 저장탱크 건설비 절감효과를 꾀할 수 있다. 또한 가스냉난방기의 경우 오존층 파괴물질인 CFC계 냉매 대신 일반적으로 물, 메탄올 등의 자연 냉매를 사용하므로 환경적인 측면에서도 큰 이점을 가지고 있다. 이러한 가스를 연료로 하는 냉난방기 중 하나인 흡착식 냉동기가 최근 주목 받고 있는데 실리카겔-물의 경우 공장에서 버려지는 비교적 저온(60~90℃)의 폐열을 구동원으로 사용할 수 있기 때문에 미이용 에너지의 효율적 사용이라는 측면에서 장점을 가지고 있다.

흡착식 냉동기에서는 다공질의 흡착제 입자의 충전층을 가지는 열교환기가 시스템 전체의 성능을 지배하는 중요한 구성 요소가 되며, 흡착제에는 실리카겔(silica gel) 혹은 제올라이트(zeolite)가 흡착질에는 냉매 증기가 일반적으

로 사용된다. 흡착제가 충전되어 있는 열교환기에서는 흡착 시에는 발열반응이, 탈착 시에는 흡열반응이 동반되며 이때 냉각수와 온수가 교대로 순환하여 열교환을 하지만 그 열교환 성능은 충전층의 유효열전도율에 의해서 크게 좌우된다. 보통의 고체 입자를 충전한 층의 유효열전도율에 관해서는 지금까지는 다수의 측정이나 이론적 검토가 행해졌으며, 입자의 열전도율, 입자경 외에도 입자간 공극부의 기체의 열전도율이나 압력 등에 대한 연구가 수행되어졌다. 한편 흡착제는 입자 내에 다수의 세공을 가지고 흡착이 일어나면 입자자체의 열전도율이 변화하는 등 통상의 고체입자와 다른 점을 가지는데 지금까지 흡착제 입자를 충전한 층의 유효열전도율을 정량적으로 측정한 연구는 그리 많지 않다.

흡착제 열교환기의 설계를 최적화하고 성능을 향상시키기 위해서는 충전층의 유효열전도율이 큰 흡착제의 개발이 필요하다. 이에 앞서 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 흡착제(실리카겔, 제올라이트)의 충전층 내에서의 유효열전도율을 비정상열선법^[1]을 이용하여 측정하고 다양한 실험변수들(충전층 내 압력 및 온도, 입자크기, 함수율)이 유효열전도율에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 유효열전도율 측정 실험장치를 제작하여 실험을 수행하였다.

1.2 종래의 연구

1.2.1 흡착식 시스템에 관한 연구

Faraday(미국)가 1848년에 흡착식 냉방 이론을 제안한 이래 1920년대 기차 및 빌딩 냉방용으로 일부 적용된 예가 있으나, 전기 압축식 냉방기의 개발로 흡착식 냉방기의 연구개발은 중단된 상태였다. 이후 1970년대 후반에 미국, 프랑스 등에서 다시 연구가 시작되어 흡착제 및 사이클 성능개선이 이루어

어져 초기에는 0.5를 넘지 못하던 냉방 COP를 현재 0.7 수준까지 향상시켰다.

Oetel 등^[2]은 silica gel-methanol 시스템을 이용한 냉장 저장용 흡착식 냉각시스템에 대해서 연구하였고 시스템은 condenser, throttle valve, evaporator, sorption chamber 등으로 구성되었다.

Yamamoto 등^[3]은 silica gel-water 시스템을 적용하여 수증기 흡착반응에서 입자간의 열과 물질전달 특성에 관해 연구하였고 시스템은 vapor chamber(condenser), interconnecting valves, water chamber(evaporator), adsorber로 구성되었다. 흡착제는 Fuji Silysia Co., Ltd의 실리카겔 B type과 ID type을 사용하였다.

Wang 등^[4]은 activated carbon-methanol 시스템을 적용하여 열과 물질전달과 관련한 activated carbon-methanol 흡착시스템의 성능에 대해서 연구하였고 시스템의 흡착탑은 cylindrical adsorber(325×1400mm)와 rectangular adsorber (286×210×2100mm, 387×422×1539mm)를 사용하였다.

Restuccia 등^[5]은 zeolite-water 시스템을 적용하여 가정용 난방을 위한 제올라이트 열펌프에 관해 연구하였고 시스템은 adsorber(heat exchanger : vertical copper tube(external diameter 12mm), flexible helical stainless fins(external diameter 32mm))으로 구성되었으며 흡착제는 7kg of 4A zeolite pellet(4~8 mesh GRACE 512)를 사용하였다.

한편 국내에서는 1990년대 초에 한국에너지기술연구소에서 실리카겔-물계 및 제올라이트-물계 흡착식 시스템 연구를 수행하였으며, 현재는 한국생산기술연구원에서 냉각시스템의 고효율화에 대한 연구를 수행 중에 있다.

조 등^[6]은 흡착제를 이용한 에너지절약 시스템 개발 연구에서 저온 폐열원(85℃)을 사용하여 냉동, 냉방에 사용할 수 있는 시스템을 개발하여 냉방용이

나 공정냉수 제조에 사용할 수 있는 시험장치를 제작, 시운전하고 흡착식 냉동시스템의 컴퓨터 모사를 하여 결과를 비교하였다. 연구결과로서 시험장치를 통하여 85℃의 낮은 열원으로 4~7℃의 냉수를 1.2RT 생산하였고 사이클 시간은 344초였다. 시스템은 흡착탑 2기(silica gel 110kg/탑 충전, circular fin tube 열교환기 충전열면적 46.9m²), 증발기(충전열면적 8.147m²), 응축기(충전열면적 2.495m²), 온수 공급장치(내부에 전기히터 설치), 냉각수 공급장치, 밸브류, 밸브제어 및 측정장치, 계장공기설비등으로 구성되었다. 흡착제는 실리카겔-물(Fuji Davison Co. RD type, 8mesh up)의 조합을 선정하였다.

김 등^[7]은 흡착식 냉동공조시스템 개발 I 연구에서 저온 폐열원(60~90℃)을 회수하여 공정용 냉수나 냉방용 냉수(6~12℃)를 생산하는 흡착식 냉동 시스템을 개발하였다. 흡착제와 냉매로서 실리카겔-물을 선정하고 실험실 규모의 장치를 제작하여 실험하고 시스템의 해석과 설계에 필요한 정보를 얻고자 수치모사를 하여 결과를 비교하였다. 연구결과 실험실규모(0.2RT)의 장치를 제작하여 냉수 입구온도 13.4℃일때 출구온도가 8~10℃인 냉수를 0.18RT 생산하였고 사이클 시간은 15분이고 흡착탑의 총괄열전달계수는 84.7W/m²℃으로 일본의 Mayekawa MFG Co.의 110 W/m²℃에 77% 근접하였다. 시스템은 흡착탑 2기(silica gel 8.85kg/탑 충전, 충전열면적 8.0m²), 증발기(충전열면적 4.0m²), 응축기(충전열면적 4.0m²), 온수 공급 장치, 냉각수 공급 장치, 밸브류, 밸브제어 및 측정 장치, 계장공기설비 등으로 구성되었다. 흡착제는 silica gel(W.R. Grace & Co.-Conn Davison 408)을 선정하였는데 기공 크기가 작고 표면적이 크면서 탈착을 위해 기공부피가 커야하는 점을 고려 입경은 0.5mm 정도가 적절한 것으로 예상하였다.

김 등^[8]은 흡착식 냉동공조시스템 개발 II 연구에서 실리카겔-물계의 흡착식 냉동기 상업화 현황과 경제성을 평가하기 위하여 Bench scale 흡착식 냉동기

를 수정 보완하여 2USRT 규모의 Pilot plant를 설계하고 흡착탑 모듈을 제작하였다. 연구결과 1/2 사이클 시간이 900~1300초 사이에서 냉동능력이 최대가 되었고 COP는 사이클 시간이 길수록 증가하였다. 냉각수 온도가 낮을수록 온수의 온도가 높을수록 냉동능력이 증가하였고, 온수온도 80℃ 냉각수 온도 31℃에서 냉수를 13→9℃로 생산할 때 냉동능력 0.2USRT, COP 0.37이었다. 시스템은 흡착탑 2기(silica gel 8.85kg/탑 충전, 열교환기는 구리튜브와 알루미늄 Fin으로 구성된 Fin-Tube 충전열면적 8.0m², Fin pitch 4.5mm), 증발기(충전열면적 4.0m², Fin pitch 2.0mm), 응축기(충전열면적 4.0m², Fin pitch 2.0mm), 온수 공급장치, 냉각수 공급장치, 밸브류, 밸브제어 및 측정장치, 계장공기설비으로 구성되었다. 흡착제는 silica gel(W.R. Grace & Co.- Conn Davison 408)을 선정하였다.

김 등^[9]은 흡착식 냉동공조시스템 개발Ⅲ 연구에서 0.2 USRT 규모의 Bench scale 흡착식 냉동기의 흡착탑 부분의 현열손실을 보완설계하고 증발기의 성능을 향상시켜 흡착탑 규모를 6배 scale-up한 pilot plant 제작하였다. 연구결과 온수온도 72.7℃ 냉각수온도 23.2℃에서 냉수를 12→8.9℃로 생산할 때 냉동능력 1.66USRT, COP 0.38, 1/2 싸이클 시간이 600초로 나타났다. 탑의 현열손실은 bench scale 보다 많이 감소하여 열전도도가 큰 흡착 모듈 개발을 위해 팽창흑연과 실리카겔의 복합체(무게비 1 : 2, 1 : 6, 1 : 10)를 제조하여 사용했고 열전도도는 실리카겔보다 약 37배 증가한 6.53W/mK 이었다. 시스템은 흡착탑 2기(silica gel 53.9kg/탑 충전, 충전열면적 48.0m²), 증발기(충전열면적 4.8m²), 응축기(충전열면적 6.42m²), 온수공급장치, 냉각수 공급장치, 밸브류, 밸브제어 및 측정장치, 계장공기설비로 구성되었다. 흡착제는 팽창흑연과 실리카겔의 복합체(silica gel (W.R. Grace & Co.-Conn Davison 408), 가팽창흑연 사용)를 사용하였다.

김 등^[10]은 흡착식 냉동공조시스템 개발Ⅳ에서 실증사업으로 40냉동톤 규모의 전기압축식 냉동기를 흡착식 냉동기로 대체할 경우 장치비로 인해 투자회수기간이 4.3년으로 예상하였다. 그러나 저온폐열회수에 의한 에너지절약, 하절기 전력부하조절, Green Round에 대비하는 비후레온 냉동기술 등의 장점이 있을 것으로 판단하였다.

1.2.2 유효열전도율 측정에 관한 연구

Bjurström 등^[11]은 비정상열선법을 이용하여 수증기를 흡착한 실리카겔 충전층의 유효열전도율의 측정을 행하였으며 층의 공극율의 감소, 수증기 흡착량, 기체의 압력 및 온도의 증가에 의해서 층의 유효열전도율이 커진다고 보고하였다. 또한 보통의 고체 충전층의 유효열전도율의 예측 모델에 수증기 흡착의 효과를 고려해서 입자열전도율을 적용시켜 흡착제 충전층의 유효열전도율을 측정값과 비교하였다.

Mori 등^[12]은 정상열선법을 이용하여 수증기 또는 공기를 봉입한 실리카겔 A 및 제올라이트 13X의 흡착제 충전층과 제올라이트 13X의 결합층에 대해서 평균 유효열전도율을 측정하였으며, 압력의 저하와 입자크기의 감소에 따라 저하하였으며 온도의 영향은 거의 받지 않는다고 보고하였다. 한편 결합층의 유효열전도율은 충전층보다 크게 나타났으며, Bauer-Schlunder 및 Hayashi의 모델과 흡착에 의한 입자열전도율의 변화를 고려한 것에 의해 실험데이터와 비교적 잘 맞는다고 보고하였다.

Griesinger 등^[13]은 비정상열선법을 이용하여 수소, 아르곤, 헬륨, 질소와 공기를 봉입한 여러가지 제올라이트에 대해서 온도, 압력 및 입자크기의 영향을 파악하여 유효열전도율을 측정하였다.

김 등^[14]은 비정상열선법을 이용하여 공기를 봉입한 실리카겔 A 및 제올라

이트 13X에 대해서 온도, 압력, 입자크기, 함수율에 따른 유효열전도율의 변화를 실험을 통해 측정하였다.

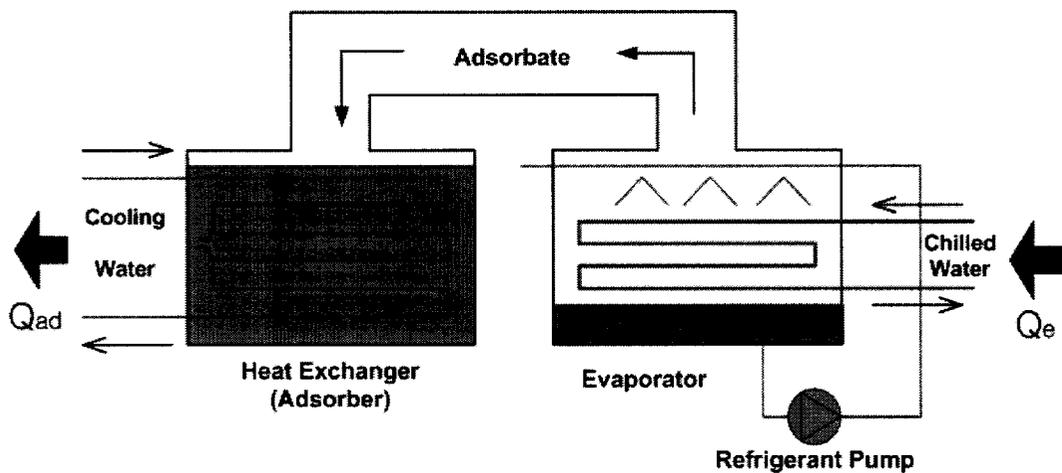
제 2 장 실험이론

2.1 흡착식 시스템의 작동원리 및 특징

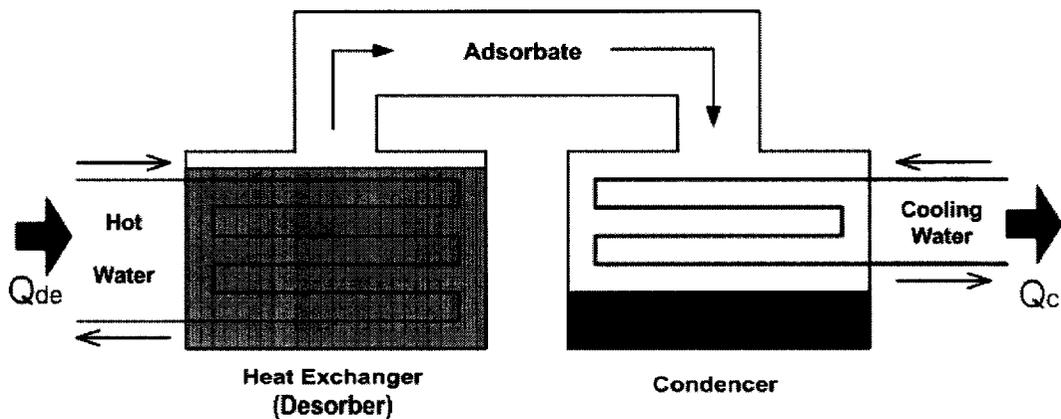
2.1.1 흡착식 시스템의 작동원리

흡착식 냉동기는 흡착할 때 발생하는 흡착열에 착안하여, 중·저온 열원을 투입함으로써 냉열을 발생시키는 기기로, 한 사이클은 흡착과정과 탈착과정으로 크게 나눌 수 있다. 흡착과정의 작동원리를 Fig. 2.1(a)에 나타내었다. 계 내는 진공상태이며 흡착제와 흡착질만이 존재한다. 먼저, 증기밸브를 열고 냉각수로 흡착제의 온도를 낮추면 포화 흡착량이 증가하기 때문에 증발기 내에서의 흡착질이 냉수로부터 잠열 Q_c 를 얻고, 기화하여 흡착제에 흡착된다. 열교환기 내에서는 흡착열이 생기지만 냉각수가 흡착제로부터 열량 Q_{ad} 를 빼앗기 때문에 다시 흡착이 일어난다. 또 계 내의 압력은 증발기 내의 압력 P_e 와 거의 동일하다.

탈착과정은 Fig. 2.1(b)에 나타낸 것과 같이 온수에 의해 흡착제의 온도가 상승하여 포화 흡착량이 감소한다. 이에 따라 탈착이 생기며, 응축기에 있어서 냉각수에 잠열 Q_c 를 줌으로써 탈착질은 응축된다. 따라서 흡착량은 감소한다. 그리고 열교환기 내에서 흡착제가 온수로부터 열량 Q_{de} 를 얻어 다시 탈착한다. 탈착과정에서와 같이 압력은 응축기내의 압력 P_c 와 거의 같다. 이러한 흡착공정과 탈착공정을 시스템으로 나타내어 보면 Fig. 2.2와 같으며, 이 상태를 선도로 나타내어 보면 Fig. 2.3과 같은 압력-온도-농도 선도인 P-T-X 선도로 나타낼 수 있다.



(a) Adsorption process



(b) Desorption process

Fig. 2.1 Principle of adsorption refrigerator

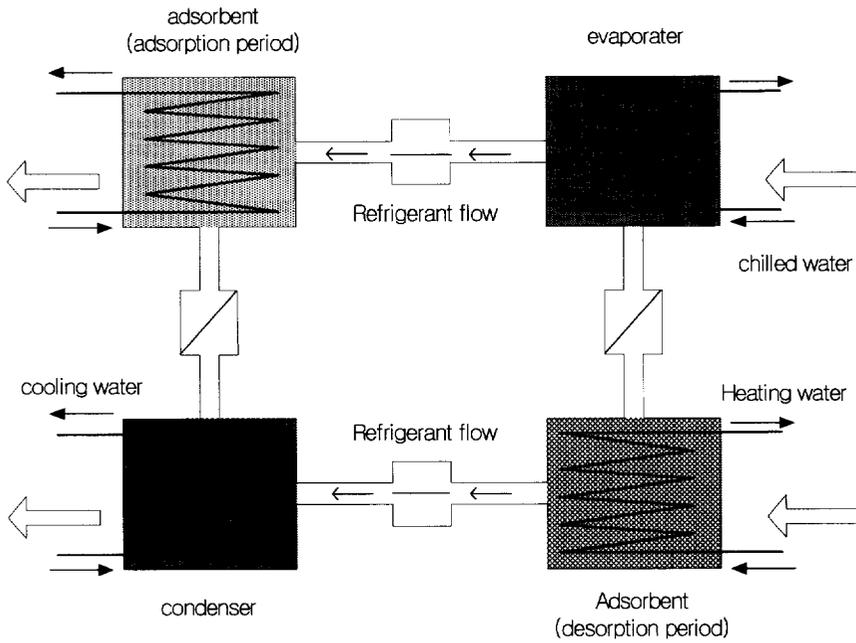


Fig. 2.2 Adsorption refrigeration system

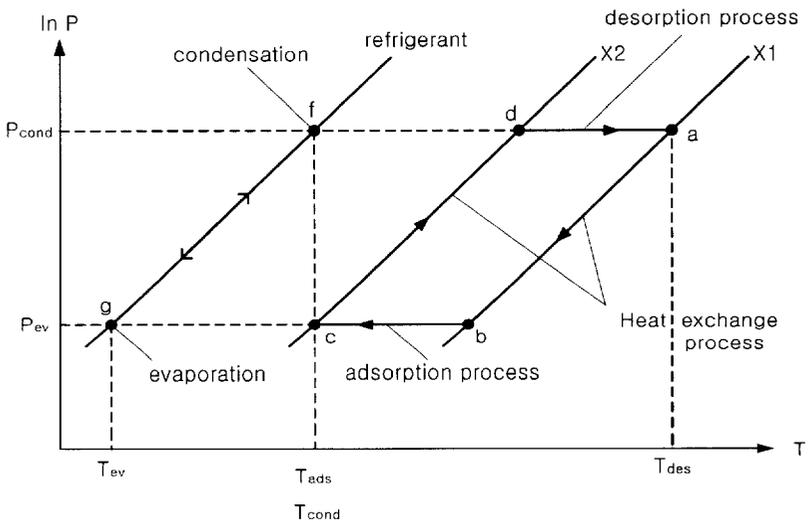


Fig. 2.3 P-T-X diagram

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 Fig. 2.4와 같이 증발기, 응축기, 열교환기 1, 2(탈·흡착기) 및 증기밸브로 구성되어 있으며, 흡착제에는 실리카겔, 흡착질에는 물을 사용한다. 밸브의 개폐 및 2개의 열교환기에 흐르는 온수, 냉각수의 선택은 Table 2.1의 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 충전되어있는 실리카겔의 온도를 내려 흡착과정을 진행한다. 이 과정에서 증발기 내의 물이 기화하여 냉열 Q_e 를 얻는다. 그리고 흡착됨에 따라 냉각수가 열량 Q_{ad} 를 얻는다. 또, 열교환기 2에는 가동 열원인 온수를 흘려, 열량 Q_{de} 로 충전되어 있는 실리카겔을 가열하여 탈착과정을 진행한다. 이 과정에서 탈착한 증기가 응축기에서 응축하여, 냉각수에 응축열 Q_c 를 주게 된다.

사이클 B는 열교환기 1이 흡착과정에서 탈착과정으로, 열교환기 2가 탈착과정에서 흡착과정으로 이동하기 위한 준비과정이다. 우선 모든 밸브를 닫아 탈·흡착에 의한 열 및 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.

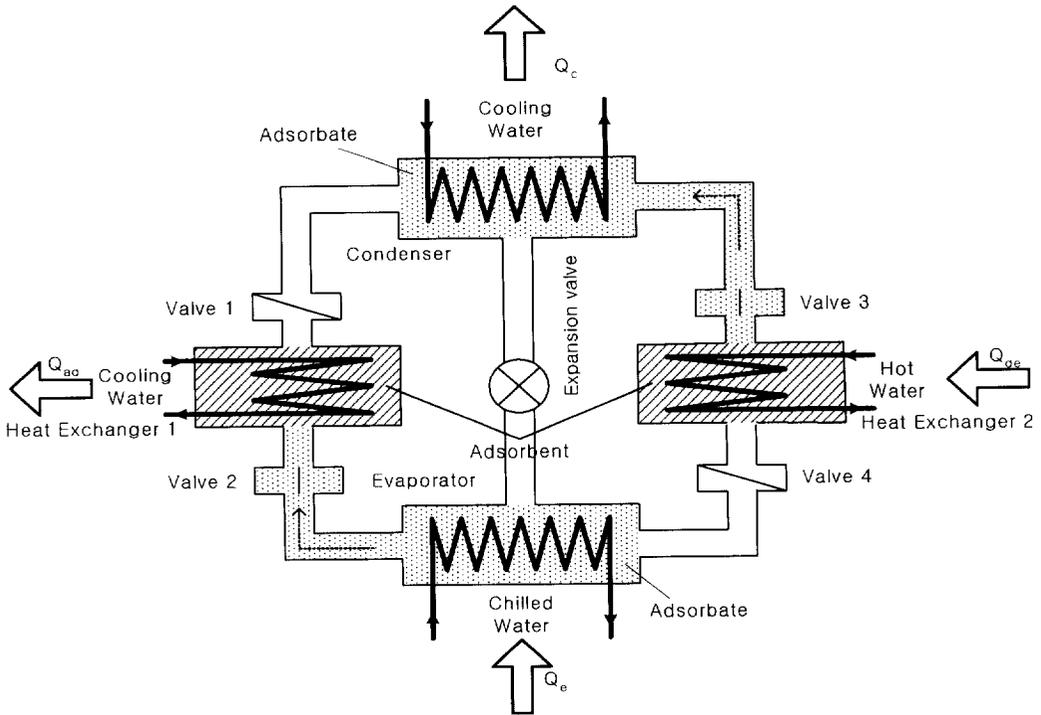


Fig. 2.4 Single stage adsorption refrigerator(Cycle A)

Table 2.1 Time chart of single stage adsorption refrigerator

Cycle		A	B	C	D
Time(sec)		420	30	420	30
Valve	1	×	×	○	×
	2	○	×	×	×
	3	○	×	×	×
	4	×	×	○	×
Heat Exchanger	1	C _w	H _w	H _w	C _w
	2	H _w	C _w	C _w	H _w

(○ : Open, × : Close, H_w : Hot water, C_w : Cooling water)

한편 삼단형의 구조는 Fig. 2.5에 표시한 것처럼 응축기·증발기·열교환기 1~6 및 8개의 밸브로 구성되어 있다. 작동공정은 Table 2.2의 타임차트에 따라서 시간제어를 하며, Fig. 2.5는 사이클 A의 상태이다. 우선 밸브 1·3·6·8을 열고 열교환기 2·4·6에는 냉각수를 흘려서 흡착공정으로, 그리고 열교환기 1·3·5에는 온수를 흘려 탈착공정으로 한다.

증발기 내의 흡착질은 내부를 흐르고 있는 냉수에서 잠열을 얻어 증발하고, 열교환기 6에 흡착된다. 열교환기 3·5의 흡착질은 탈착되어 각각 열교환기 2·4에서 흡착된다. 열교환기 1의 냉매는 탈착되어 응축기로 들어가서 내부를 흐르고 있는 냉각수에 잠열을 주고 물로 되돌아온다. 그리고 흡착질은 팽창밸브를 거쳐 증발기에 분무된다.

사이클에서는 열교환기 2·4·6이 탈착공정, 열교환기 1·3·5가 흡착공정으로 이행하기 위한 준비공정으로 모든 밸브를 닫아 흡·탈착은 하지 않는다. 사이클 C·D는 각각 사이클 A·B의 역 공정이며 사이클 D가 종료하면 다시 사이클 A가 반복된다.

단단형 및 삼단형 흡착식 히트펌프의 기본 사이클을 Fig. 2.6에 나타내었다. 단단형으로 하는 경우 ①→②에서는 흡착공정, ②→③에서는 흡착에서 탈착으로의 준비공정, ③→④에서는 탈착공정, ④→①에서는 탈착에서 흡착으로의 준비공정이다.

삼단형에서는 사이클 I·II·III이 각각 Fig. 2.6에서 상단(열교환기 1·4), 중단(열교환기 2·5), 하단(열교환기 3·6)에 나타내고 있다. 하나하나 단단형과 같이 흡착공정, 탈착공정, 준비공정으로 구성되어 있다. 또 탈착공정과 흡착공정과의 흡착량의 차는 사이클 I·II·III 모두 같지만 온도가 높게 되는 만큼, 압력이 낮게 되는 만큼 흡착력은 작게 되기 때문에 사이클은 상단

일수록 길게된다.

냉각수 입구온도를 T_2 로 설정하면, 단단형에서는 하나의 열교환기가 압력 P_1 에서 P_2 까지 변화하기 때문에 T_3 의 온수입구온도가 필요한 반면, 삼단형에서는 그것을 삼단계로 나누고 있으므로 온수 입구온도는 T_3 까지 저하시킬 수 있다. 따라서, 삼단형은 단단형보다 저온열원으로 할 수 있는 가능성이 있게된다.

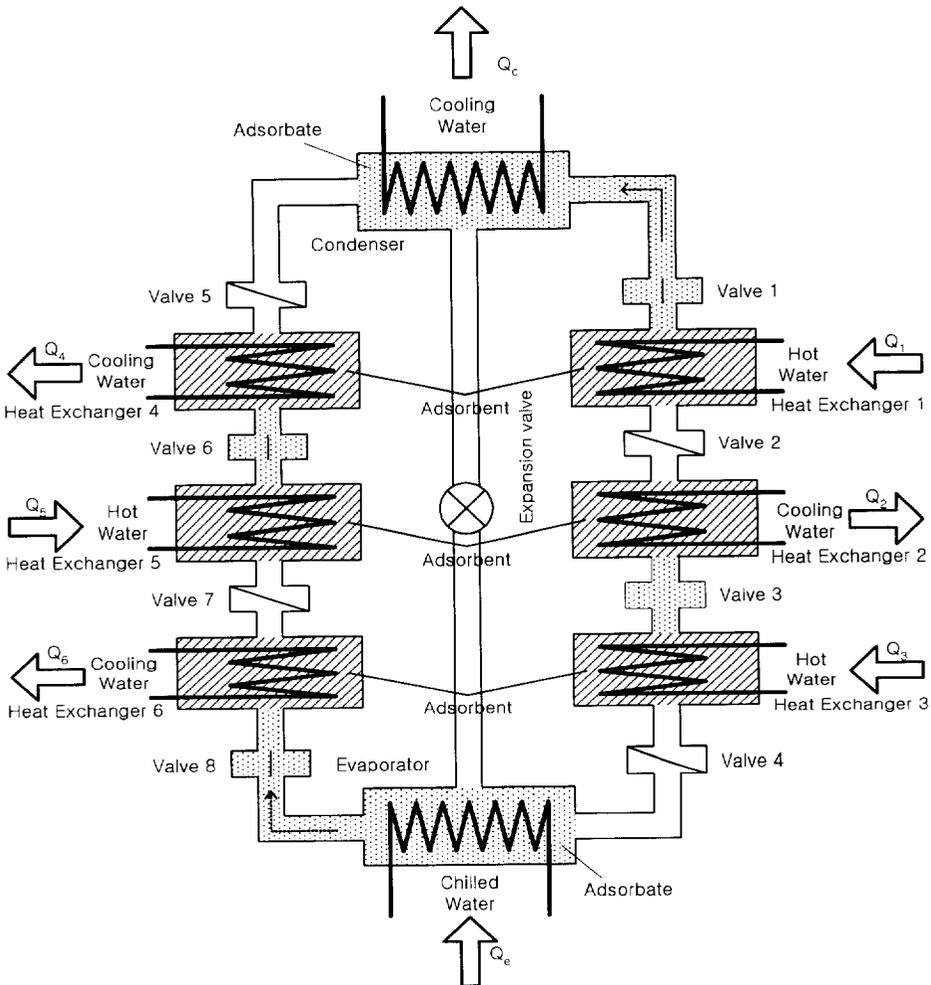


Fig. 2.5 Three stage adsorption heat pump

Table 2.2 Time chart of three stage adsorption heat pump

Cycle		A	B	C	D
Time(sec)		300	30	300	30
Valve	1,3,6,8	○	×	×	×
	2,4,5,7	×	×	○	×
Heat Exchanger	1,3,5	H _w	C _w	C _w	H _w
	2,4,6	C _w	H _w	H _w	C _w

(○ : Open, × : Close, H_w : Hot water, C_w : Cooling water)

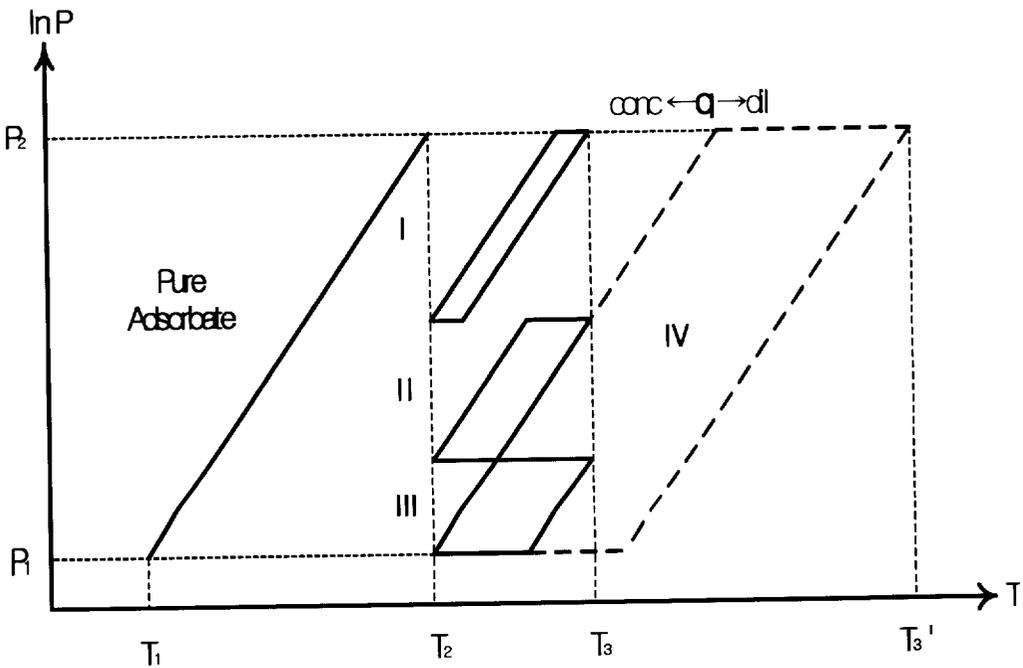


Fig. 2.6 Basic cycle of three stage adsorption heat pump

2.1.2 흡착식 시스템의 특징

흡착식 냉난방기는 구동부분이 적기 때문에 진동·소음이 적고 물, 메탄올, 암모니아 등의 자연냉매를 사용하기 때문에 프레온계 냉매에 의한 오존층 파괴문제가 없으며 흡수식에서와 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 추가조작이 필요 없다.

한편 단점을 살펴보면 흡착탑은 주기적으로 흡·탈착 전환이 이루어지므로 열팽창·수축이 일어나 타요소기기와 흡착탑과의 연결부위 등에서 리크가 발생할 위험이 있으며 시스템 콤팩트화 및 고효율화를 위해서는 현재보다 흡착 성능이 뛰어난 고효율 흡착제 개발과 흡착탑 및 흡착제간의 열 및 물질전달 향상을 위한 연구개발이 필요하다. 흡착식 냉난방기를 타 냉난방기와 비교했을 때의 장단점을 Table 2.3에 요약하였다.

Table 2.3 Characteristics of adsorption refrigerator

Strong points	Week points
<ul style="list-style-type: none"> - Less driving part - Less vibration · noise - No toxicity, corrosion, flammability (case of water as a refrigerant) - No risk like solution crystallization - Less generation of fresh gas (hydrogen etc.) (unnecessaries of additional driving, profitable vacuum maintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - Leak worry by heat expansion · contraction of packed bed from conversion of periodic adsorption · desorption - Necessity of improved heat · mass transfer of adsorbent - Necessity of adsorbent with good adsorption performance and strong sustenance

흡착식 냉동기의 성능특성의 한 예를 Fig. 2.7에 나타내었다. 이것은 냉동 능력 및 성적계수를 온수 입구온도를 파라미터로하여 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 온수 온도가 높을수록, 냉각수 온도가 낮을수록 냉동능력 및 효율이 좋아진다. 이것은 흡수식 냉동기에 있어서도 같은 경향이지만, 흡착식 냉동기는 열원이 65℃ 이하에서도 경제적인 냉방운전이 가능한 것과 입력온도 변동에 따른 출력 변동비율이 작은 것인 큰 계수는 표준 사양점(온수 입구온도 85℃, 냉각수 입구온도 31℃)에서 0.6으로 흡수식 냉동기보다 약간 낮으나, 열원 입구온도가 70~100℃범위에서 0.5~0.65로 변동폭이 작기 때문에 입력온도 변동이 심한 폐열 이용에는 전체적으로 생각해 유리하다.

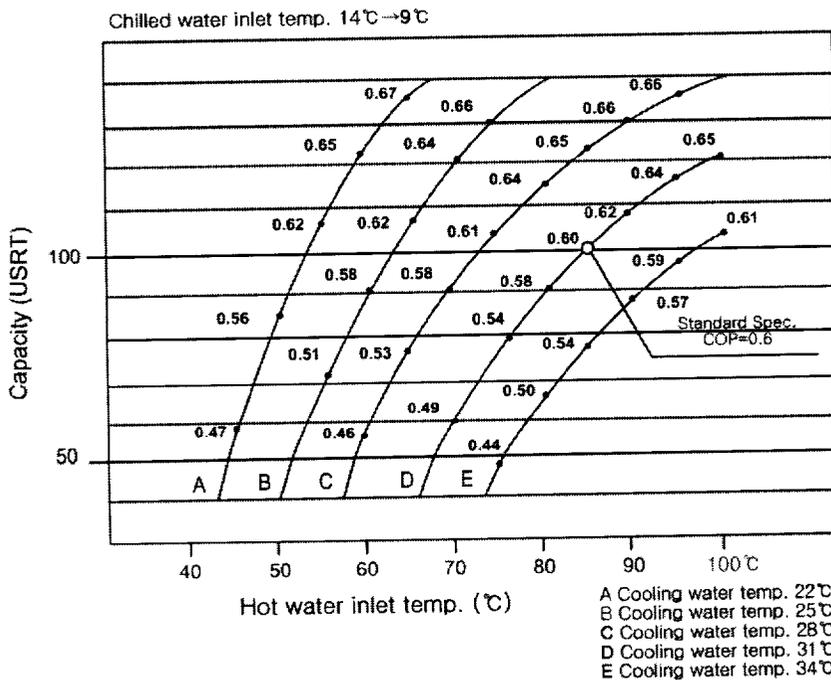


Fig. 2.7 Performance chart of adsorption refrigerator

열교환기 효율 및 준비운전 시간에서의 회수 효율향상, 작동온도 범위 내에서 흡·탈착 냉매량차를 크게 할 수 있는 흡착제의 개발 등에 따라 저온열원에서 COP 0.7~0.8정도의 냉동기 실현가능성은 충분히 있다. Fig. 2.8은 온수입구온도에 따른 냉동능력의 비교를 중온수 흡수식 냉동기와 비교한 것이며 이것을 정리한 것을 Table 2.4에 나타내었다. 가장 큰 차이점은 흡착식 냉동기는 구동온도가 80℃이상에서는 정격능력의 90%이상 출력이 가능하고, 70℃이상에서는 정격능력의 70%이상 출력이, 50℃이상에서도 구동가능하나, 중온수 흡수식 냉동기는 80℃이상에서는 정격능력의 50%이상 출력이 가능하고 70℃에서는 시스템이 구동이 안되므로 흡착식 냉동기는 저온 폐열구동에 탁월하다고 할 수 있다. 이외에도 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 냉동출력을 결정하는 파라메타는 재생·흡착종료시의 흡착제 온도이다. 따라서 온수유량이 설정량의 50%라도 재생시간 내에 흡착제 온도를 평형상태까지 가깝게 할 수 있어 냉동출력은 크게 저하되지 않는다.
- ② 구동부분이 적어 일상 관리 및 유지가 용이하다.
- ③ 깨끗한 고진공계 내에서의 흡·탈착 현상을 이용하기 때문에 흡착제의 열화가 없이 항상 안정된 출력을 얻을 수 있다.
- ④ 태양열, 공장폐열 등의 유효이용이 가능하다.
- ⑤ 냉열과 온열을 동시에 얻을 수 있어서 냉방과 난방 모두 가능하다.

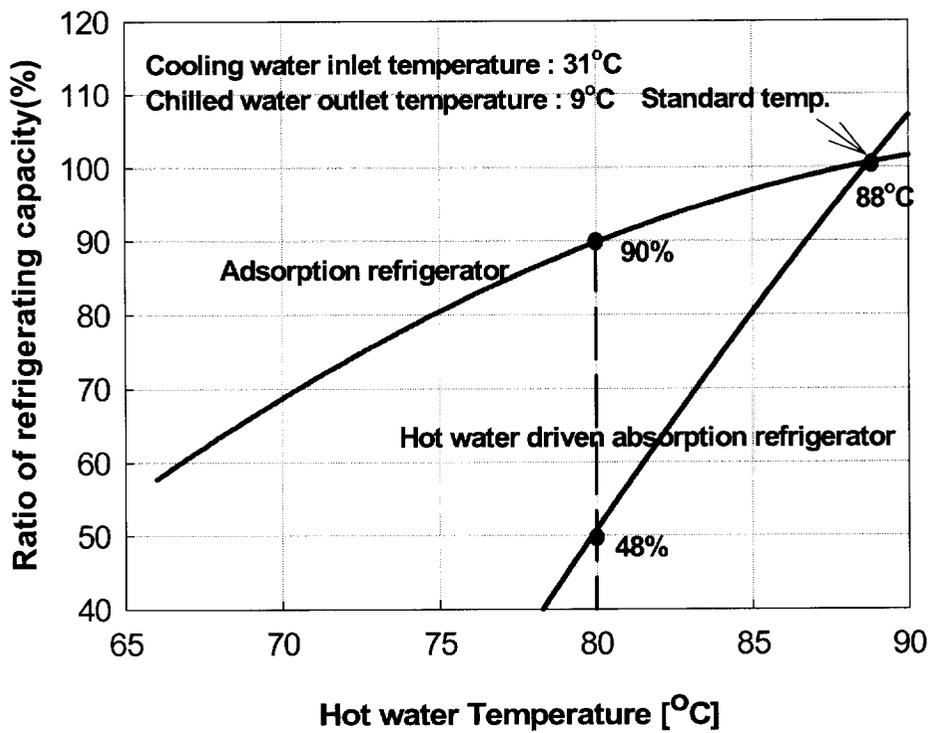


Fig. 2.8 Refrigeration capacity with hot water temperature

**Table 2.4 Adsorption refrigerator and hot water driven
absorption chiller**

	Adsorption refrigerator	Absorption refrigerator
COP	0.6~0.68 (chilled water temperature 7~9℃)	0.6~0.75 (chilled water temperature 7~9℃)
Price	Almost same with absorption refrigerator	
Outlet temperature	over chilled water temperature 3℃ (Min. 3℃)	over chilled water temperature 7℃
Regular hot water temperature	88℃ (driving at over 40℃ in case of 3th step)	88℃
Waste heat temperature (over 50% power)	<ul style="list-style-type: none"> - over 80℃(output over 90% of regular power) - over 70℃(output over 70% of regular power) - driving over 50℃ 	<ul style="list-style-type: none"> - over 80℃(output over 50% of regular power) - 0 of cycle output at 70℃
Variation of hot water flow rate	standard specification ±50%	standard specification ±30%
Temperature difference between inlet and outlet of waste heat	5-20℃(improvement to max. 20℃ if hot water tank is installed)	5-20℃
Cooling water temperature	no limitation, unnecessary of three-way valve)	22℃ (necessaries of three-way valve)
Driving start Driving end	generation of cooling capacity within 7 min. Instant Stop	20 min. (general starting time) 15 min. (general driving stop)
Maintenance	almost unnecessary maintenance because of solid adsorbent and non-crystallization	<ul style="list-style-type: none"> - periodic maintenance of absorption solution - crystallization in the apparatus, serious corrosion

2.2 비정상열전법의 원리

열전도율은 온도구배가 형성되었을 경우, 어떤 물질이 열확산 과정에 의해서 에너지를 전달하는 정도를 나타내는 전달물성의 하나이다. Fourier의 법칙에 따라 열전도율은 아래와 같이 정의된다.

$$q'' = -\lambda \nabla T \quad (2.1)$$

에너지 방정식을 위 식에 대입하면 아래와 같이 된다.

$$\lambda \nabla^2 T = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

식(2.2)는 열전도율을 측정하는데 가장 기초가 되는 식으로 위 식을 적용할 수 있는 적절한 실험조건을 만들고 위 식을 풀면 열전도율 λ 를 구할 수 있다. 식(2.2)를 이용하여 열전도율을 구하는 방법은 크게 정상상태 측정법과 비정상상태 측정법으로 나뉘는데 후자가 전 방정식을 다 이용하는 반면 전자는 시간에 따른 온도변화가 없는 경우 즉, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 인 경우에 대해서 식(2.3)을 풀고 주어진 기하학적 형상에 따라 적분을 수행하여 열전도율 λ 를 구하는 방법이다.

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.3)$$

비정상열선법은 비정상상태 측정법의 하나로서 이 열선에 순간적으로 전력이 공급되면서 열선의 온도변화가 일어나므로 측정방법이 비정상열선법으로 명명되었다.^[15] 이 비정상열선법은 Fig. 2.9와 같이 원통형 테스트섹션 가운데를 관통하는 열선에 일정한 열유속 q 를 공급하고 시간에 따른 열선의 온도변화를 측정하여 열전도율을 구하는 방법이다. 이 때 시료의 열전도율이 크면 히터에서 발생한 열은 빠르게 시료에 전달되어 히터 자신의 온도상승은 작게 된다. 역으로 열전도율이 작으면 히터의 온도상승은 크게된다. Fig. 2.9에서 $\lambda_1 < \lambda_2$ 이다. 비정상열선법에 식(2.2)를 적용하기 위한 이상적인 실험모델은 다음과 같다.

무한히 길고, 열용량이 0이고, 무한대의 열전도율을 갖는 선열원이 무한하고 등방성인 흡착제 충전층 안에서 초기에 열적 평형상태를 이루고 있다. 일정시간 이후 선열원으로부터 일정한 열유속 q 가 주위 흡착제 충전층으로 공급되면서 충전층의 온도가 상승하게 된다. 그리고 발생한 열은 전도에 의해서만 주위로 전달되고 충전층 내 흡착제의 물성은 온도의 변화에 무관하게 일정하다.

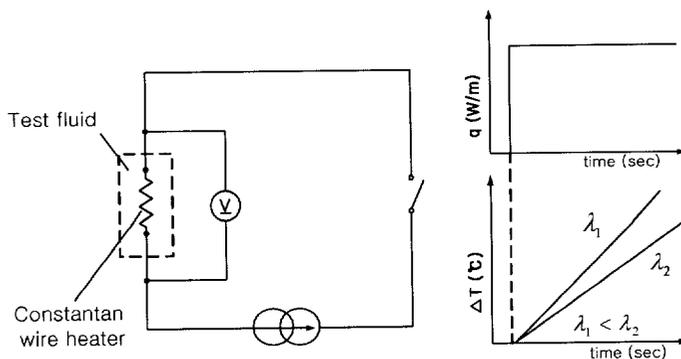


Fig. 2.9 Principle of transient hot wire method

위와 같은 이상적인 실험모델에 식(2.2)를 적용하면 지배방정식은 아래와 같이 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.4)$$

열선으로부터 r만큼 떨어진 곳의 온도상승을 나타내면

$$\Delta T = \Delta T(r, t) - T_0 \quad (2.5)$$

로 나타낼 수 있다.

경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$t=0 \text{ 일 때 } \Delta T(r, t) = 0 \quad (2.6a)$$

$$t>0 \text{ 일 때 } \lim_{r \rightarrow \infty} \Delta T(r, t) = 0 \quad (2.6b)$$

$$t>0 \text{ 일 때 } \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{q}{2\pi\lambda} \quad (2.6c)$$

열확산율 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ 가 일정하다는 가정하에서 식(2.4)의 해는 Carslaw와 Jaeger(1959)^[16]에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta T(r, t) = -\frac{q}{4\pi\lambda} \text{Ei}\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (2.7)$$

위 식에서 Ei는 exponential integral로 아래와 같이 정의된 함수이다.

$$\text{Ei}(x) = \int_x^{\infty} x^{-1} \exp(-x) dx \quad (2.8)$$

$r=a$ 인 경우 $\frac{a^2}{4at}$ 가 작은 값을 가지므로 식(2.7)을 무한급수로 전개하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta T(a,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4at}{a^2 C}\right) + \frac{a^2}{4at} + \dots \right] \quad (2.9)$$

여기서, $C = \exp \gamma = 1.781 \dots$

위 식에서 γ 는 0.5772... 인 Euler 상수이다. 열선의 반지름이 작은 경우 식(2.9)의 둘째항 이하를 무시할 수 있으며, 열선표면에서의 온도상승은 아래 식으로 표현된다.

$$\Delta T(a,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4at}{a^2 C}\right) \quad (2.10)$$

따라서 시간의 변화에 따른 온도상승 $\Delta T(a,t)$ 를 측정하면 $[\Delta T - \ln t]$ 그래프는 조건을 만족하는 범위 내에서 Fig. 2.10과 같이 직선이 되고, 그 기울기를 구하면 열전도율 λ 를 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{q}{4\pi} \Big/ \frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \quad (2.11)$$

식 2.11을 두 시간 t_1 , t_2 에 대해 적용하고 정리하면

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(\ln t_2 - \ln t_1)} \quad (2.12)$$

따라서 시간에 따른 열선의 온도상승 정도를 측정하면 충전층 내 흡착제의 유효열전도율을 계산할 수 있다.

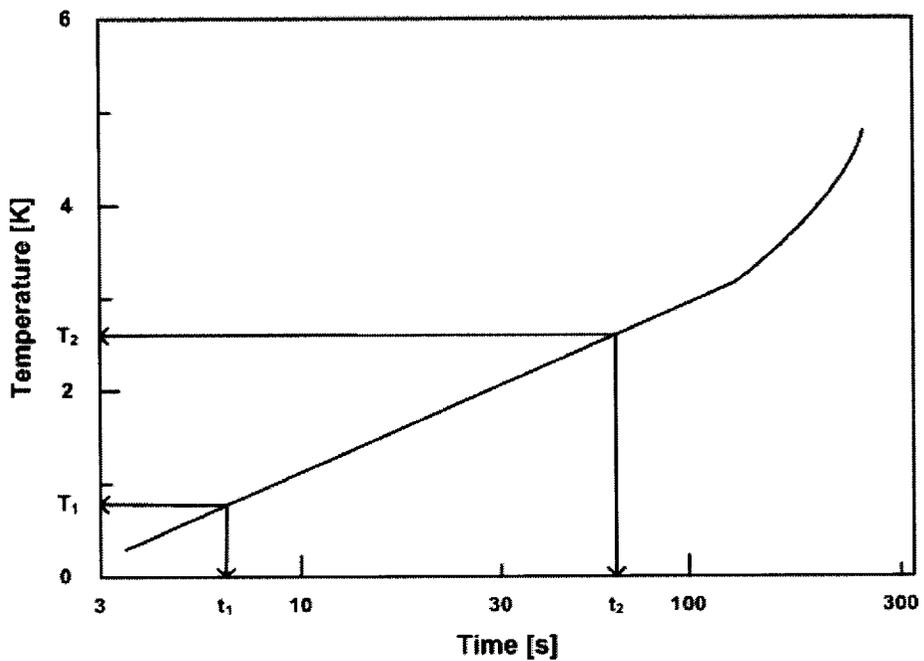


Fig. 2.10 Relation between temperature and time

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 유효열전도율 측정 실험장치의 전체 모습을 Fig. 3.1에, 그 시스템 구성의 개략도를 Fig. 3.2에 나타내었다.

실험장치는 흡착제가 충전되어 있는 원통형의 테스트 섹션, 충전층 내의 온도를 일정하게 맞춰 주기 위한 항온조, 실험장치 내로 유입되는 물유량을 측정하기 위한 유량계, 물펌프, 콘스탄탄 와이어 히터에 일정한 전력량을 주기 위한 자동전압조정기(Auto Voltage Regulator : AVR), 전력량을 측정하기 위한 파워메타, 전력량을 조절하기 위한 슬라이더다스, 열선의 온도와 충전층 내 온도를 측정하기 위한 T타입 열전대, 데이터를 저장하기 위한 컴퓨터와 데이터로거 등으로 구성되어 있다. 또한 충전층 내의 압력을 조정하기 위해서 진공펌프와 공기압축기를 사용하였으며 압력은 압력트랜스듀서를 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

테스트 섹션은 내부에 유로를 설치하여 항온조에서 공급하는 물을 통해서 충전층 내의 온도를 유지할 수 있도록 설계하였으며, 원통형의 테스트 섹션 가운데로 콘스탄탄 와이어 히터가 관통하고 있다. 전기통전을 방지하기 위해서 콘스탄탄 와이어 히터를 석면 피복하였다. 히터는 구경이 0.4mm, 길이가 600mm 이다.

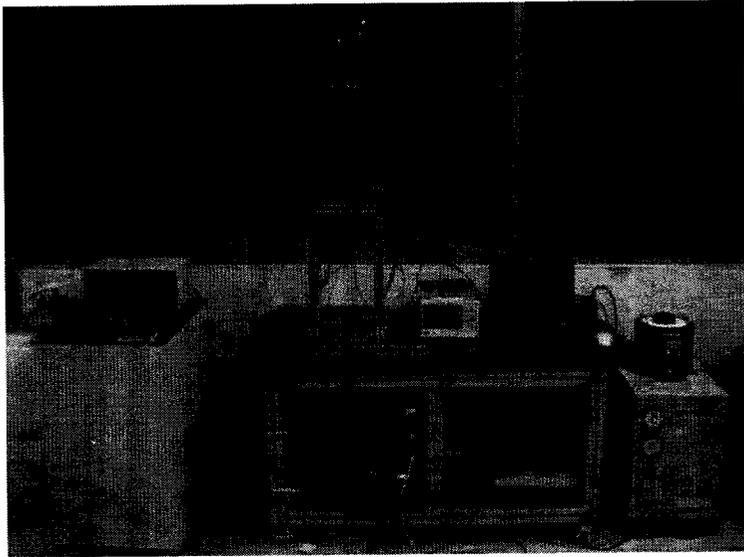


Fig. 3.1 Photograph of Experimental apparatus

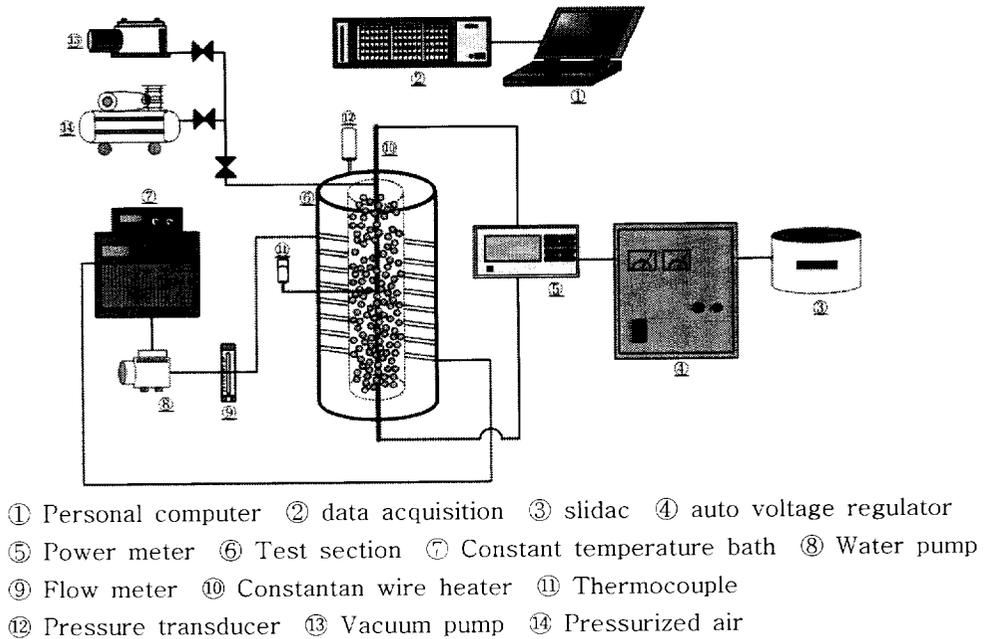


Fig. 3.2 Schematic diagram of Experimental apparatus

가. 테스트 섹션

흡착제를 충전하기 위한 테스트 섹션은 원통형 모양이고 재질은 STS304 이다. 전체 지름은 114.3mm, 전체 높이는 417.6mm 이고 내부 공간의 지름은 83.1mm, 높이는 400mm 이다. 내부 공간의 바깥부분에 충전층 내의 온도를 맞춰주기 위한 물의 유로가 나선형 모양으로 설계되어있다.

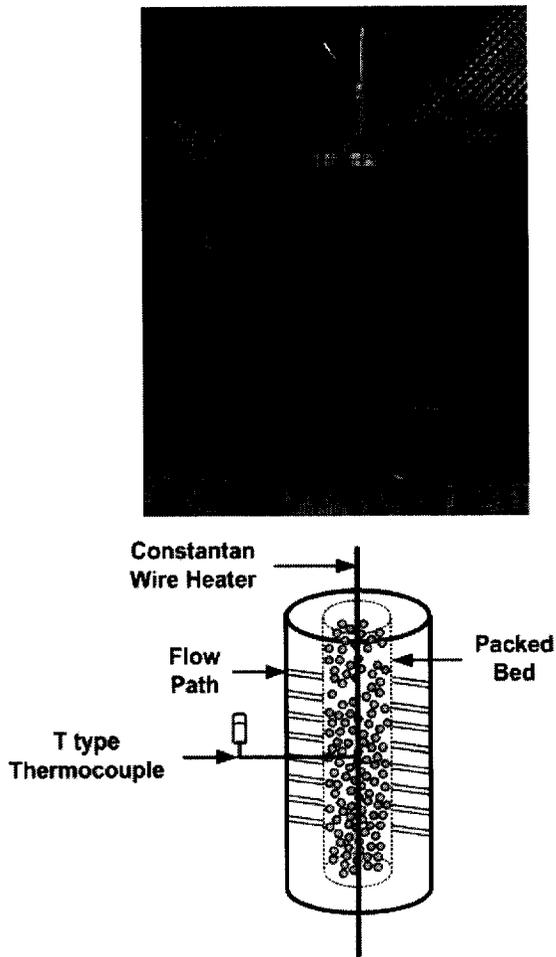
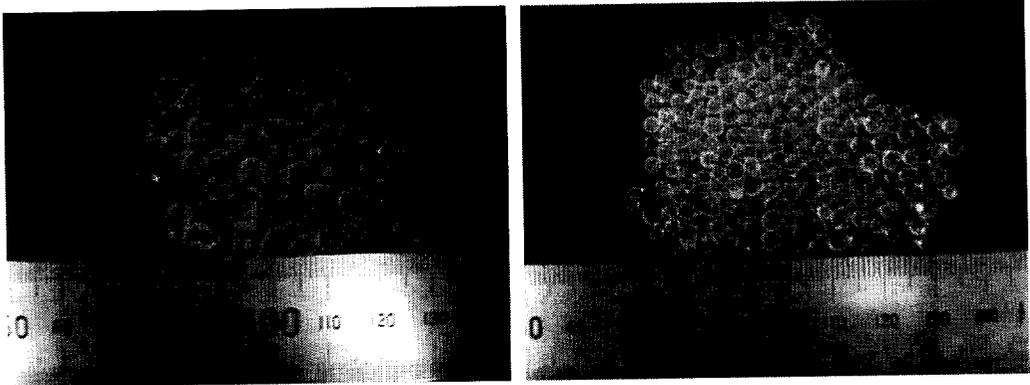


Fig. 3.3 Photograph and schematic diagram of Test section

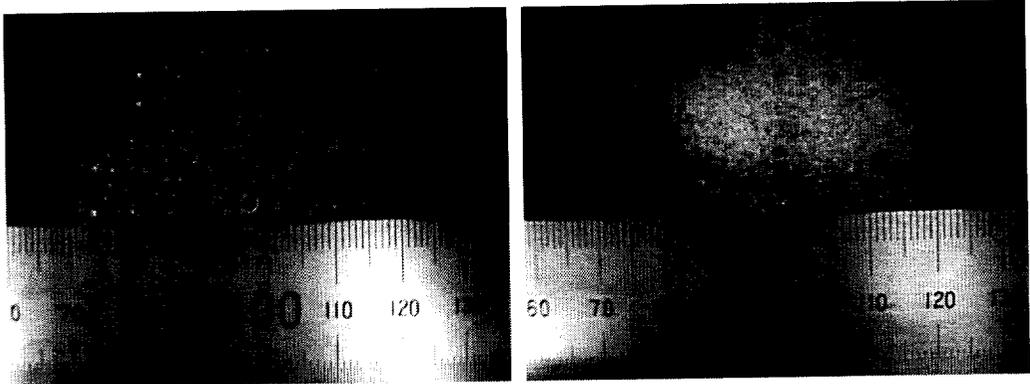
나. 흡착제

실험에 사용된 흡착제는 실리카겔 A type 4종류(일본 F사 3.35~3.9mm, 2.3~2.7mm, 0.5~0.8mm, 국내 K사 1.3~1.7mm)와 제올라이트 13X type 3종류(국내 C사 2.8~4.0mm, 1.4~2.0mm, 0.5~1.4mm)이다. 실리카겔과 제올라이트 입자를 크기가 큰 순서대로 각각 Fig. 3.4과 Fig 3.5에 나타내었다.



(a) 3.35~3.9mm

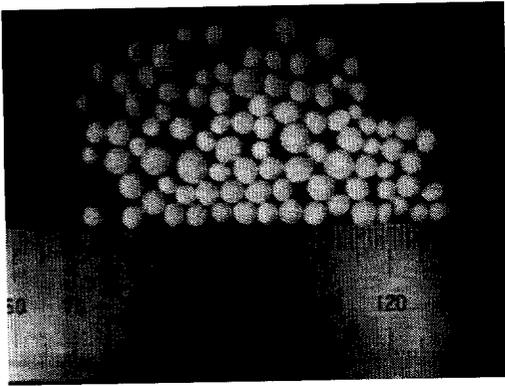
(b) 2.3~2.7mm



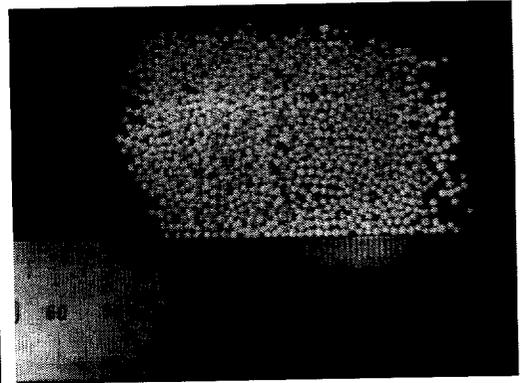
(c) 1.3~1.7mm

(d) 0.5~0.8mm

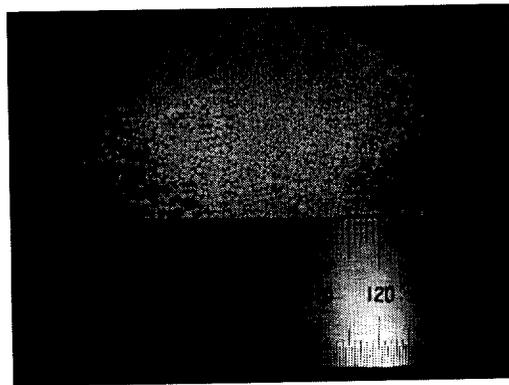
Fig. 3.4 Photograph of silica gel particle



(a) 2.8~4.0mm



(b) 1.4~2.0mm



(c) 0.5~1.4mm

Fig. 3.5 Photograph of Zeolite particle

Table 3.1은 실험에 사용된 실리카겔 입자크기별 분산분포를 나타낸 것이며, Table 3.2는 측정에 사용된 국내 K사와 일본 F사 A타입 실리카겔의 열물성치를 나타낸 것이다. 유효열전도율에 영향을 미치는 인자로 알려진 수분 흡착률(Moisture adsorption capacity), 겉보기 비중(Bulk density), 비표면적(Surface area), PH, 세공용적(Pore volume), 세공크기(Pore diameter)

등의 열물성치는 두 회사가 거의 유사하였다. Table 3.3은 측정에 사용된 제올라이트의 물성치를 나타낸 것이다.

Table 3.1 Distribution of particle size

Particle size	Distribution	Analytical value
0.5-0.8mm	0.5-0.8	99.7wt%
	below 0.5	0.3wt%
1.3-1.7mm	above 1.7	3.0wt%
	1.3-1.7	95.2wt%
	below 1.3	1.8wt%
2.3-2.7mm	above 2.3	2.9wt%
	2.3-2.7	96.7wt%
	below 2.7	0.4wt%
3.35-3.9mm	3.35-3.9	96.7wt%
	below 3.35	1.3wt%

Table 3.2 Thermal properties of silica gel

Properties		Domestic K company	Japan F company
Particle size(mm)		1.3-1.7	0.5-0.8 2.3-2.7 3.35-3.9
Moisture adsorption capacity (wt%)	20%R.H.	11.0 Min	12.0 Min
	50%R.H.	25.0 Min	25.0 Min
	90%R.H.	35.0 Min	35.0 Min
Bulk density(g/ml)		0.72~0.78	0.73
Surface area(m ² /g)		690	650
PH(at 5% slurry)		5.0~7.0	5.0
Pore volume(ml/g)		0.39	0.36
Pore diameter(nm)		2.2	2.3

Table 3.3 Properties of zeolite

Item	Contents	Remark
Appearance	Bead	
Type	13X	
Component	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Na ₂ O	
Bulk density(g/ml)	0.65~0.75	
Average particle size(mm)	1.1	0.5~1.4mm
	1.6	1.4~2.0mm
	3.5	2.8~4.0mm
Particle size(nm)	0.7~1.0	
Compression intensity(kg _f /cm ²)	min. 5.0	
Moisture adsorption capacity(wt%)	min. 22.8	R.H 60%, 24hrs

다. 열전대

본 연구에서 온도 측정 대상은 비교적 저온이고 고속의 응답성을 특별히 필요로 하지 않기 때문에 온도 측정용 센서로서 지름 1.6mm T형 열전대를 사용하였다. Fig. 3.6에 열전대를, Fig. 3.7에 테스트섹션 내 열전대의 위치를 나타낸 것으로 (a)는 정면도, (b)는 평면도이다. 충전층 내 온도를 구하기 위해 테스트섹션 내 열전대 9개소에서 측정하여 평균값을 사용하였다. 또한 constantan wire heater의 중심부의 온도를 측정하여 실험 시작 시와 종료 시의 온도차를 구하였다.

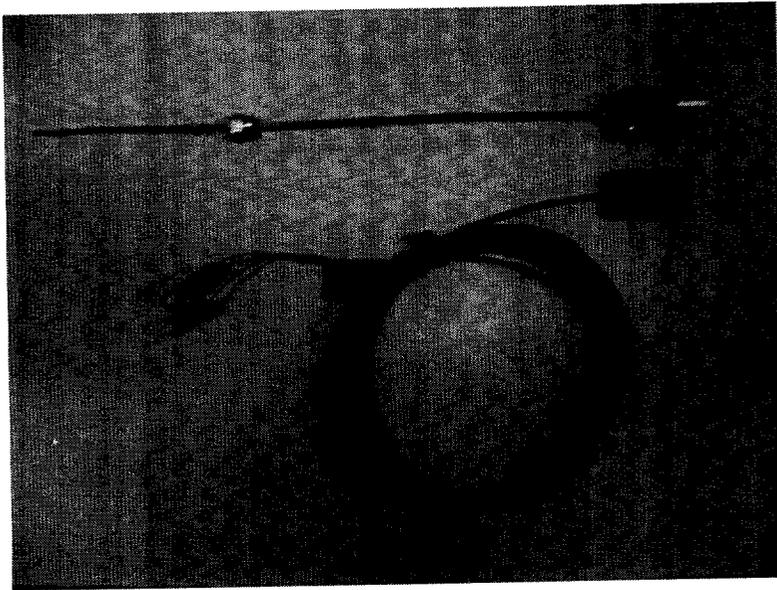
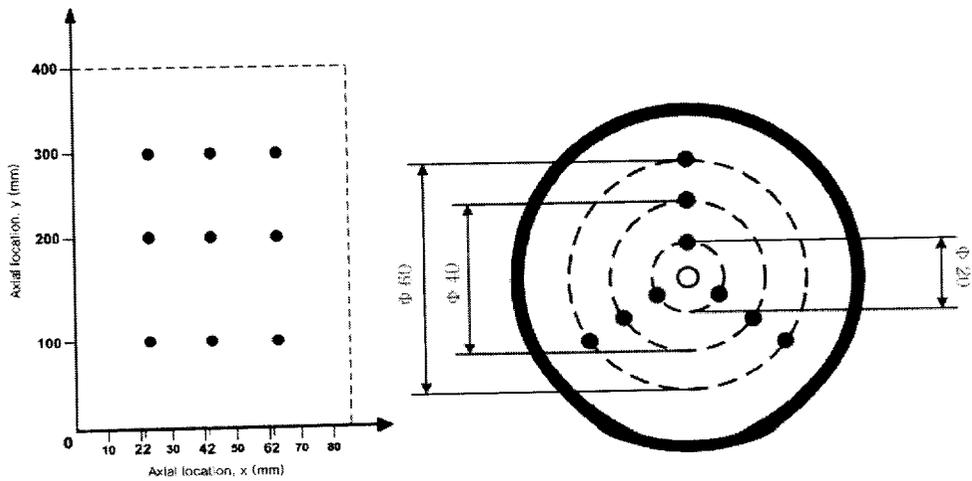


Fig. 3.6 T-type thermocouple



(a) Front view

(b) Plane view

Fig. 3.7 Position of thermocouple

라. 부속기기

Table 3.4에 실험에 사용된 부속기기의 사양을 나타내었다.

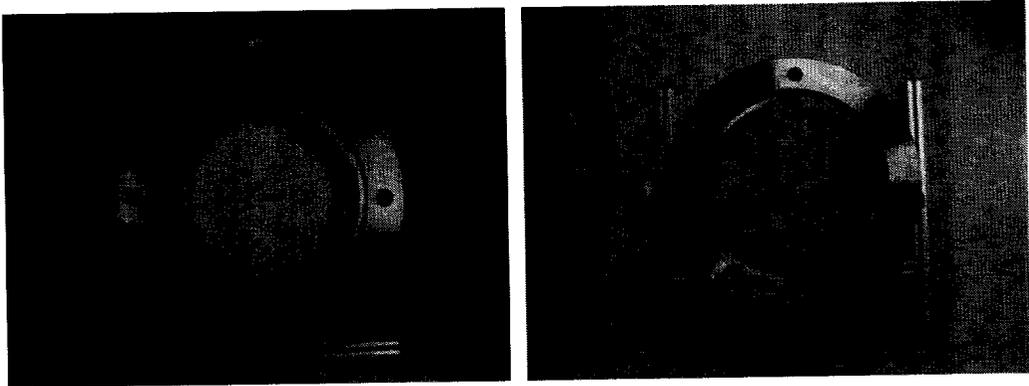
Table 3.4 Specification of Experimental Apparatus

Measuring Instrument	Specification	Maker	Model No.
Vacuum pump	0.75kW 5×10^{-4} Torr	Woovac	D20A
Pressure transducer	-100~100kPa	Copal Electronics	PG35
Constant temperature	-20~100°C	JEIO TECH	RBC-31
Auto Voltage Regulator	capacity 1Φ 5KVA 4kW electricity voltage 1Φ 2W 60Hz 210V±15% output voltage 1Φ 2W 60Hz 220V±0.5% output current 22.7A efficiency 90% ↗ (Full Load)	Taejin TECH	3A 5006

3.2 실험방법

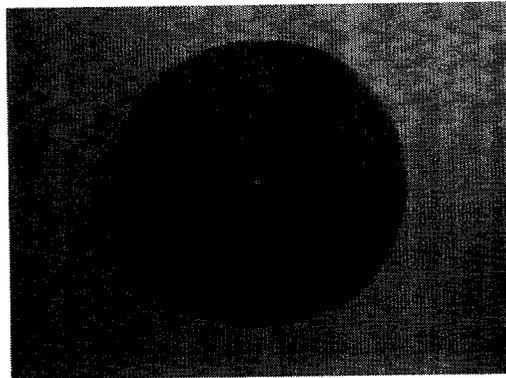
실험은 우선 실험조건의 함수율이 미리 설정된 흡착제(실리카겔, 제올라이트)를 원통형 테스트섹션에 가득 채우고 흡착제의 무게를 계측하였다. 다음으로 충전층 내의 온도를 항온조를 이용하여 실험온도로 맞추고 실험온도에 도

달하게 되면 원하는 실험압력을 공기압축기나 진공펌프 등을 이용해서 맞추었다. 그리고나서 슬라이더스에 의해 전압 및 전류를 조정하여 전력량이 15W/m가 되도록 히터를 가열함과 동시에 데이터로거에서 계측을 시작하였다. 일정한 시간이 경과한 후에 계측을 종료하였다. Fig. 3.8에 테스트섹션 내에 흡착제를 충전한 상태와 mesh망을 나타내었다. mesh망은 진공압을 맞출 때 흡착제 입자가 외부로 나오는 것을 방지하기 위해 삽입하였다.



(a) inside test section

(b) test section inserted mesh-net



(c) mesh-net

Fig. 3.8 Photograph of test section and mesh-net

3.3 실험조건

함수율(W)은 수분이 함유된 흡착제 질량에서 건조 흡착제 질량을 뺀 값을 건조 흡착제 질량으로 나눈 것으로 정의하였으며 체적분율은 충전된 흡착제의 질량 M_{ad} 과 입자밀도(Particle density) ρ_{ad} , 테스트섹션의 내부 체적 V를 이용하여 다음식으로 구하였다.

$$Z = \frac{M_{ad}}{\rho_{ad} \cdot V}$$

Table 3.5에 실험조건을 나타내었다.

Table 3.5 Experimental conditions

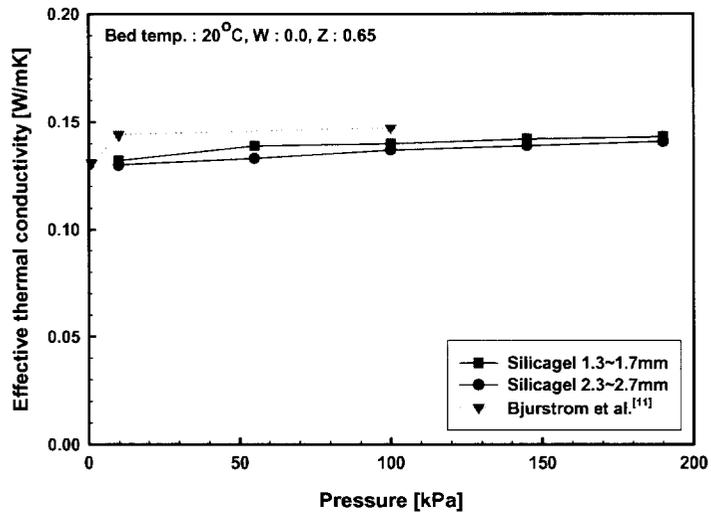
Variable	Criterion	Experimental Range
Particle size	A type	A타입, 3.35~3.9mm(Jap. Fuji Silysia) A타입, 2.3~2.7mm(Jap. Fuji Silysia) A타입, 1.3~1.7mm(Dome. Kukdong) A타입, 0.5~0.8mm(Jap. Fuji Silysia)
	13X type	13X타입, 2.8~4.0mm(Dome. CWT) 13X타입, 1.4~2.0mm(Dome. CWT) 13X타입, 0.5~1.4mm(Dome. CWT)
Pressure of packed bed	10kPa	45kpa, 100kpa, 145kpa, 190kpa
Temperature of packed bed	40℃	10℃, 20℃, 30℃, 50℃, 60℃
Water content	0	0.1, 0.2, 0.3[kg/kg]
Volume ratio	0.65	

제 4 장 실험결과 및 고찰

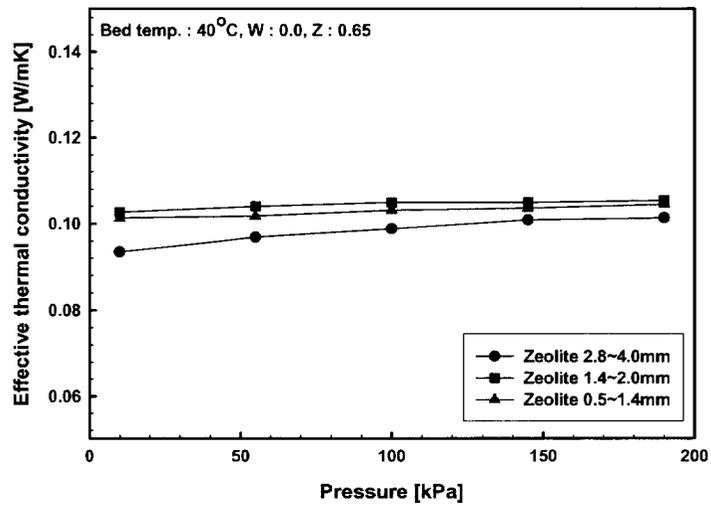
4.1 충전층 내 압력에 따른 유효열전도율

Fig. 4.1은 충전층 내 압력에 따른 유효열전도율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4.1(a)는 실리카겔, Fig. 4.1(b)는 제올라이트를 흡착제로 사용한 것이다. 실험에 사용된 실리카겔은 국내 K사 1.3~1.7mm와 일본 F사 2.3~2.7mm를 사용하였고 제올라이트는 국내 C사 0.5~1.4mm와 1.4~2.0mm를 사용하였다. 실리카겔의 경우 선행 실험결과와의 비교를 위해 충전층 내 온도 20℃, 함수율(W) 0, 체적분율(Z) 0.65인 상태에서 실험하였고 제올라이트의 경우 충전층 내 온도 40℃, 함수율(W) 0, 체적분율(Z) 0.65인 상태에서 실험하였다. 충전층의 압력이 증가할수록 유효열전도율은 약간 증가하는 경향을 보였으며 이러한 영향은 압력이 증가할수록 유동층 내에서 분자운동이 활발하게 일어나는 것과 압력증가에 따른 접촉면적이 증가하는 것에 의한 영향이라고 생각된다.

실험결과와 타당성을 확인하기 위해서 실험조건(실리카겔, 온도 22℃, 입자 크기 1~3mm, 함수율 0, 체적분율 0.675) 이 유사한 Bjurström et al.^[11]의 실험결과와 비교하였으며 그 경향은 수 %내에서 거의 정성적으로 유사하게 나타났다. 실험결과에 있어서 다소 차이가 나는 이유는 실험에 사용된 실리카겔의 물성이나 실험조건 등이 약간 다르기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Silica gel



(b) Zeolite

Fig. 4.1 Dependence of effective thermal conductivity on bed pressure

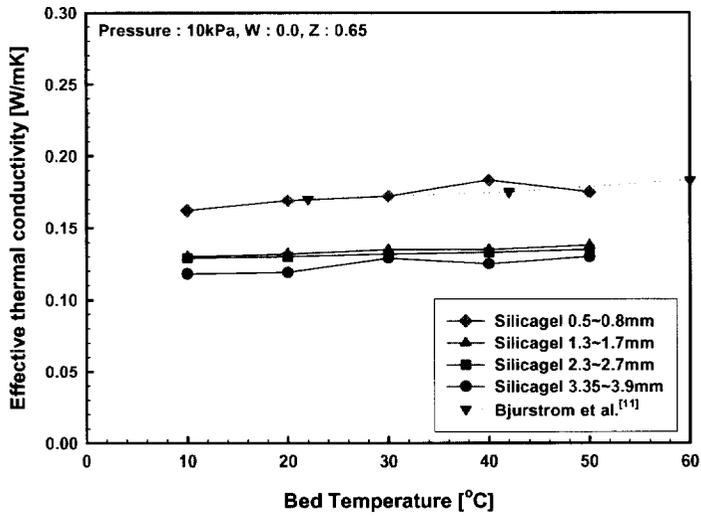
4.2 충전층 내 온도에 따른 유효열전도율

Fig. 4.2~5는 충전층 온도에 따른 유효열전도율의 변화를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 실리카겔의 입자크기는 0.5~0.8mm, 1.3~1.7mm, 2.3~2.7 mm, 3.35~3.9mm이며 제올라이트의 입자크기는 0.5~1.4 mm, 1.4~2.0 mm, 2.8~4.0mm이고 충전층 내의 압력은 10kPa 상태에서 실험한 결과이다. Fig. 4.2는 함수율이 0인 경우, Fig. 4.3는 함수율이 0.1인 경우, Fig. 4.4은 함수율이 0.2인 경우, Fig. 4.5은 함수율이 0.3인 경우이다.

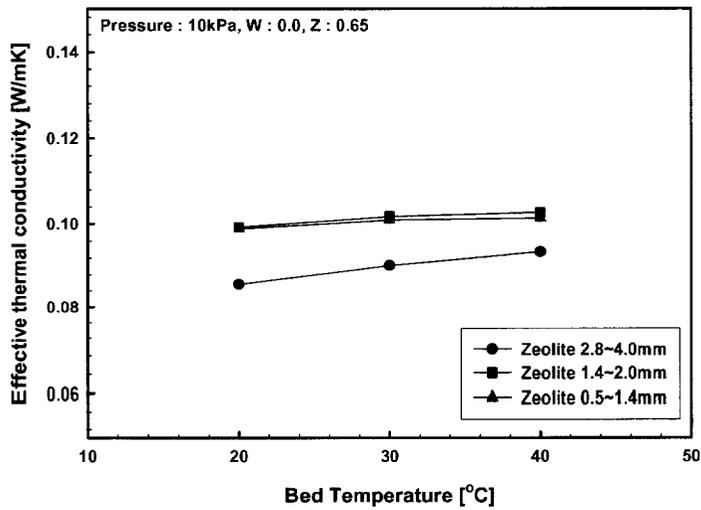
실험결과로는 충전층 온도가 증가할수록 유효열전도율은 약간 증가하는 경향을 보였으나 그 영향은 그리 크지 않았다. 이러한 영향은 압력변화에 따른 경향과 마찬가지로 온도가 증가할수록 유동층 내에서 분자운동이 활발하게 일어나기 때문이라고 생각된다.

실리카겔 입자와 제올라이트 입자의 열전도율은 함수율이 0인 경우에 각각 0.37, 0.18W/mK^[12]인데 실제로 흡착탑 내에서 이 흡착제들이 작동하는 온도 대인 40℃에서 측정된 충전층의 유효열전도율을 Fig. 4에서 보면 유효열전도율이 가장 크게 나타난 입자크기의 경우에 각각 0.183, 0.101W/mK이므로 49.5%, 56.1% 정도로 매우 낮은 상태이다. 따라서 흡착식 냉각시스템의 효율을 높이기 위해서는 열전도율이 높고 흡탈착을 빠르게 할 수 있는 고성능 흡착제의 개발이 절실함을 알 수 있다.

온도에 따른 유효열전도율 실험결과의 타당성을 확인하기 위해서 실험조건(입자크기 1~3mm, 함수율 0, 압력 11kPa)이 유사한 Bjurström et al.^[11]의 실험결과와 비교하였으며 그 경향은 수% 내에서 거의 정성적으로 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

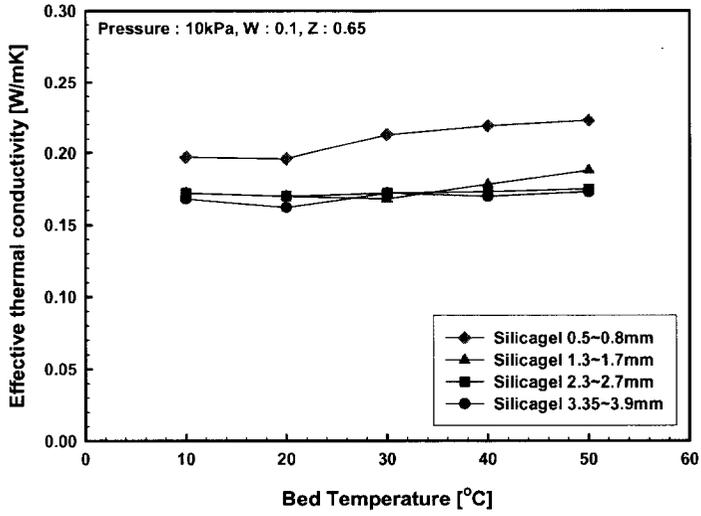


(a) Silica gel

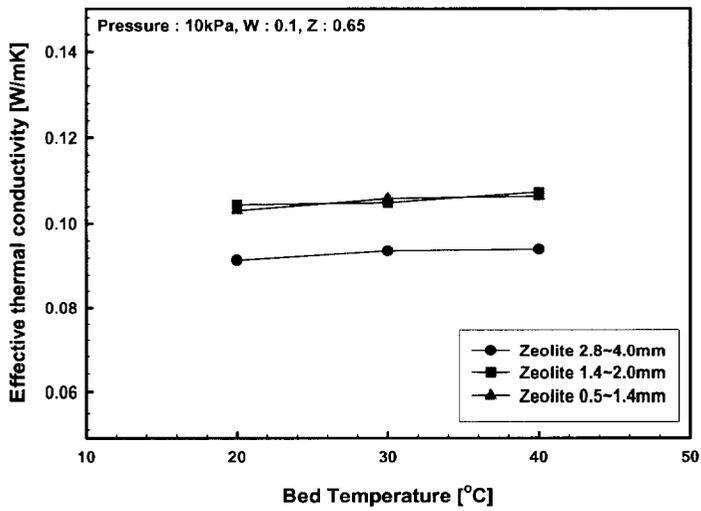


(b) Zeolite

Fig. 4.2 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature(W:0.0)

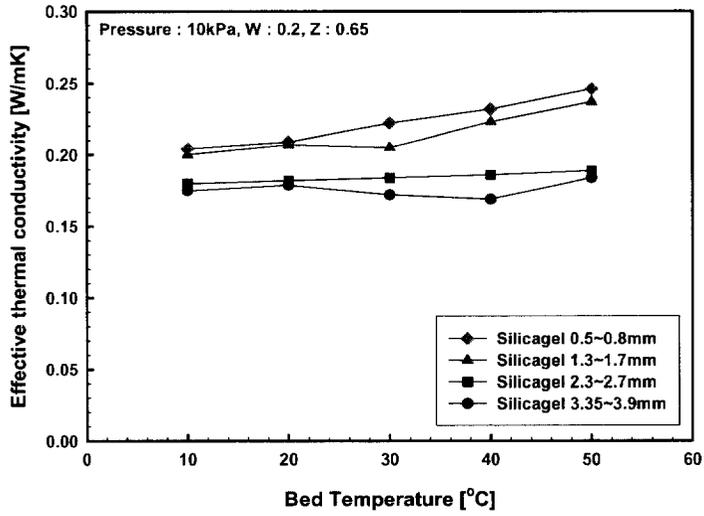


(a) Silica gel

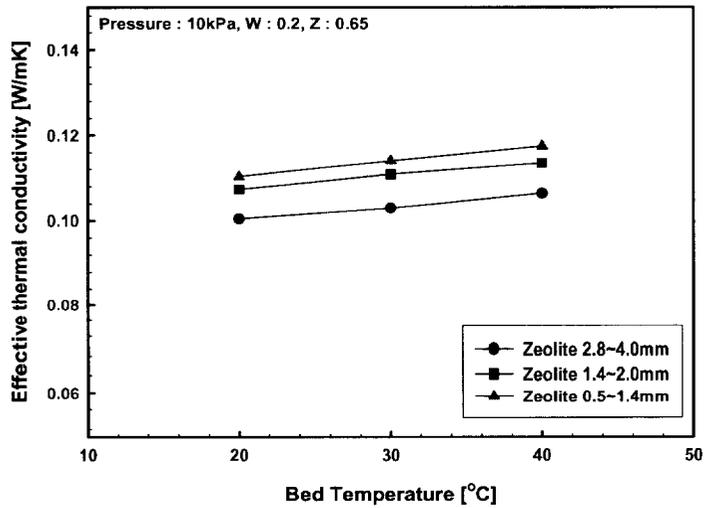


(b) Zeolite

Fig. 4.3 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature(W:0.1)

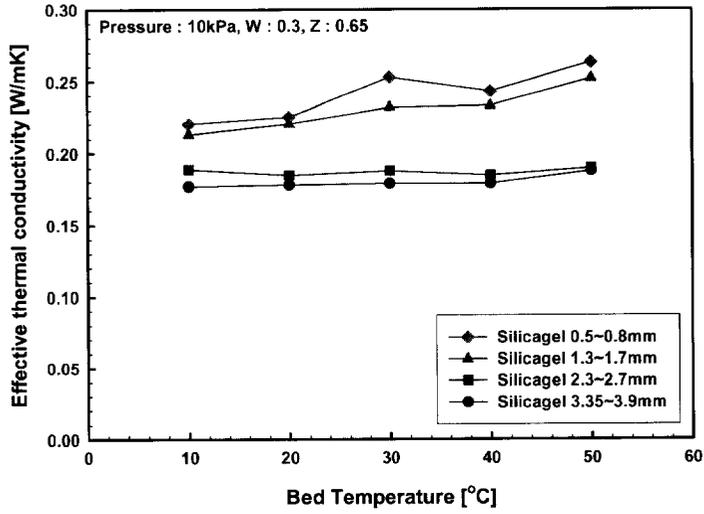


(a) Silica gel

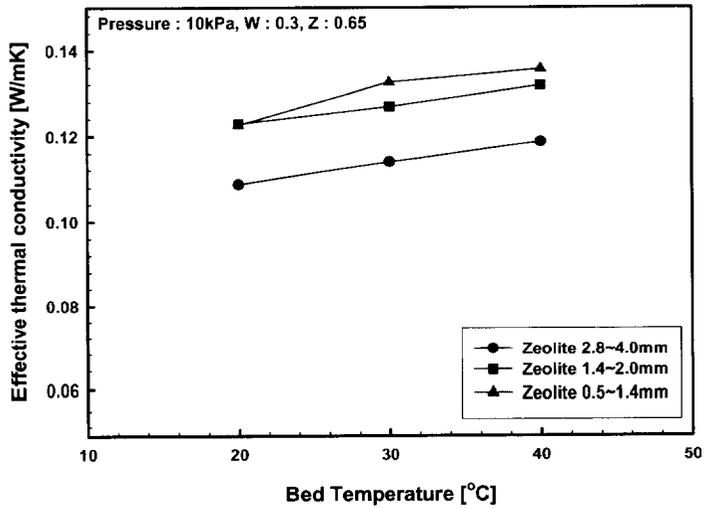


(b) Zeolite

Fig. 4.4 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature(W:0.2)



(a) Silica gel

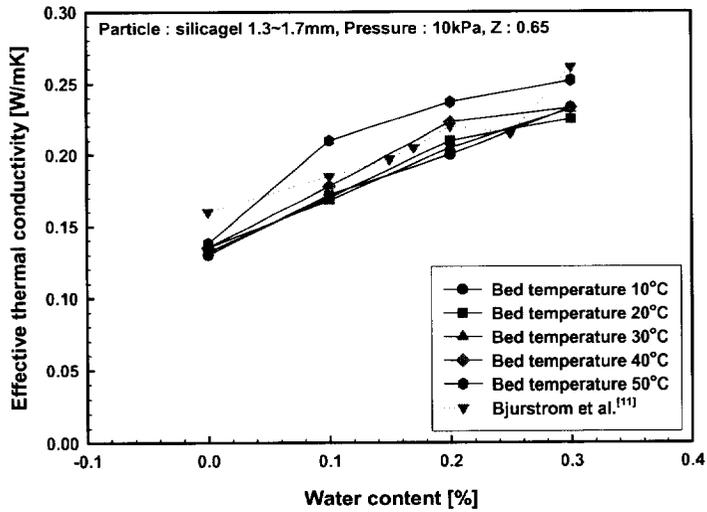


(b) Zeolite

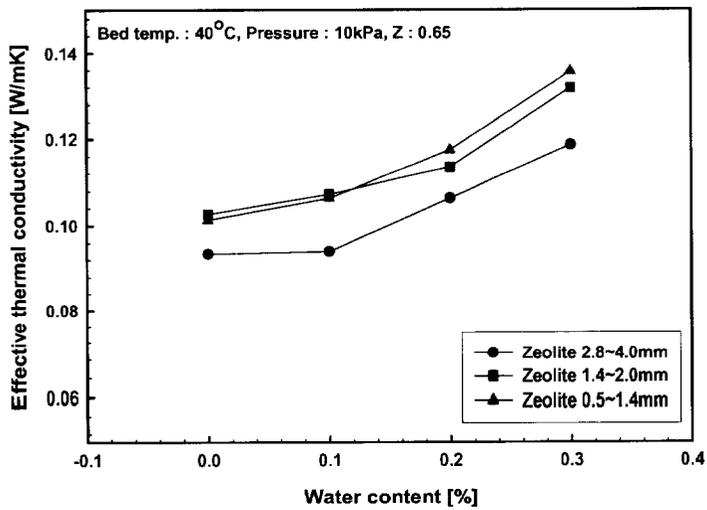
Fig. 4.5 Dependence of effective thermal conductivity on bed temperature(W:0.3)

4.3 흡착제 함수율에 따른 유효열전도율

Fig. 4.6은 함수율에 대한 유효열전도율의 영향을 나타낸 것이다. (a)는 실리카겔 입자크기가 1.3~1.7mm, 압력 10kPa인 경우이고 (b)는 제올라이트 충전층 내 온도 30℃, 압력 10kPa인 경우이다. 함수율이 높을수록(0.3>0.2>0.1>0.0) 유효열전도율이 크게 나타났으며 이는 흡착제 입자 자체(실리카겔 0.37, 제올라이트 0.18W/mK^[11])보다 열전도율이 큰 물(22℃에서 0.6W/mK)을 포함하고 있기 때문이라고 생각된다. 다른 실험변수에 비해 함수율 변화가 충전층 내 유효열전도율에 미치는 영향이 가장 크게 나타났다.



(a) Silica gel

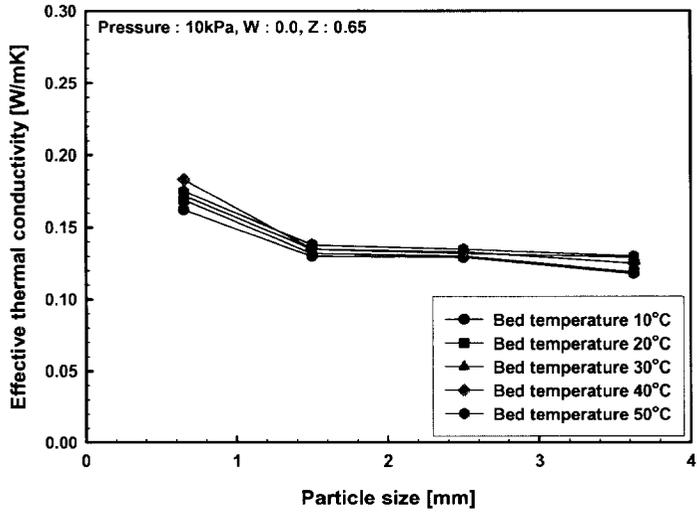


(b) Zeolite

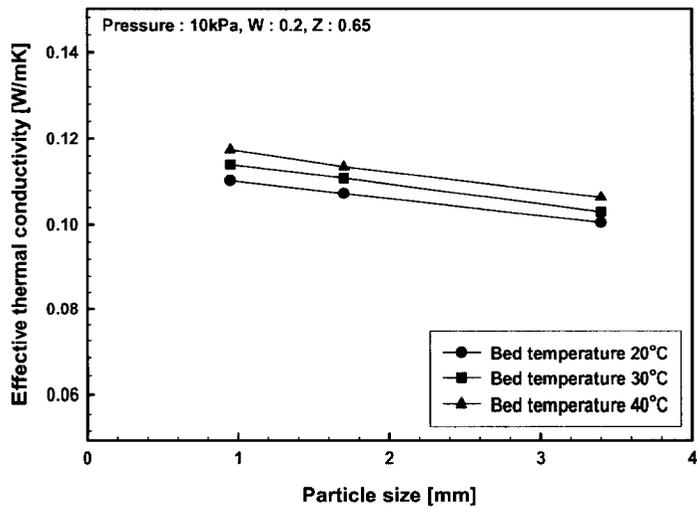
Fig. 4.6 Dependence of effective thermal conductivity on water content

4.4 흡착제 입자크기에 따른 유효열전도율

Fig. 4.7는 흡착제의 입자크기에 대한 유효열전도율의 영향을 나타낸 것이다. 측정에 사용된 실리카겔은 A타입으로 국내 K사 1.3~1.7mm, 일본 F사 0.5~0.8mm, 2.3~2.7mm, 3.35~3.9mm이고 제올라이트는 13X타입으로 국내 C사 0.5~1.4mm, 1.4~2.0mm, 2.8~4.0mm이다. 실험결과로는 각각 입자크기가 가장 작은 일본 F사 0.5~0.8mm와 국내 C사 0.5~1.4mm가 유효열전도율이 가장 크게 나타났고 입자크기가 작을수록 유효열전도율이 크게 나타났다. 이러한 경향은 입자크기가 커질수록 접촉저항이 증가되었기 때문이라고 생각된다. 나머지 입자의 형상이 구형(Bead)인데 비해 실리카겔 0.5~0.8mm의 경우 입상형(Granular)이기 때문에 접촉면적이 커서 유효열전도율 증가 경향이 두드러지게 나타난 것으로 판단된다. 전체적으로 실리카겔이 제올라이트보다 유효열전도율이 크게 나타났는데 이는 실리카겔 입자 자체의 열전도율(0.37W/mK)이 제올라이트 입자 자체의 열전도율(0.18W/mK)보다 크기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Silica gel



(b) Zeolite

Fig. 4.7 Dependence of effective thermal conductivity on particle size

제 5 장 결 론

본 연구에서는 흡착식 냉동기의 흡착제로 사용되고 있는 실리카겔 및 제올라이트를 대상으로 비정상열선법을 이용하여 충전층의 온도, 압력, 함수율, 입자크기 등이 유효열전도율에 미치는 영향을 파악하고 그 측정값을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 함수율이 높을수록($0.3 > 0.2 > 0.1 > 0.0$) 유효열전도율이 크게 나타났으며, 실험변수 중 유효열전도율에 미치는 영향이 가장 크게 나타났다.

(2) 실리카겔과 제올라이트에 대해서 충전층의 온도와 압력을 변화시켰을 경우 온도와 압력이 증가할수록 유효열전도율은 약간 증가되었으며 그 증가폭은 그리 크지 않았다.

(3) 실리카겔과 제올라이트 모두 입자크기가 작을수록 유효열전도율이 증가하였다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 흡착식 냉동기에 적합한 흡착제로 실리카겔 0.5~0.8mm, 제올라이트 0.5~1.4mm를 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

(4) 기준조건(10kPa, 40℃, W : 0, Z : 0.65)에서 충전층 내 흡착제의 유효열전도율은 실리카겔 0.5~0.8mm의 경우 0.183W/m·K, 제올라이트 0.5~1.4mm의 경우 0.101W/m·K로서 실리카겔과 제올라이트 입자 자체의 열전도율(0.37, 0.18W/m·K)의 49.5%, 56.1%를 보였다.

(5) 향후 흡착식 냉동기의 상용화를 위해서는 열전도율이 크고 내구성이 뛰어난 고성능 흡착제의 개발과 전열성능이 뛰어난 열교환기 형상개발이 중요하리라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] T. Yajima, and S. Morikawa, “Measurement of Thermal Conductivity and Evaluation of Isobaric Specific Heat Capacity of Ethanol-Water Mixture by the Transient Hot-Wire Method”, Trans. of the JSRAE, Vol. 17, No. 1, pp. 79~84, 2000.
- [2] K. Oertel et al., “Adsorption cooling system for cold storage using methanol/silica gel”, Applied thermal engineering Vol. 18, pp. 773~786, 1998
- [3] Eri Yamamoto et al., “Intraparticle heat and mass transfer characteristics of water vapor adsorption”, Journal of chemical engineering of japan, Vol. 35, No. 1, pp. 1~8, 2002
- [4] L. W. Wang et al., “Study of the performance of activated carbon-methanol adsorption systems concerning heat and mass transfer”, Applied thermal engineering Vol. 23, pp. 1605~1617, 2003
- [5] G. restuccia, “Zeolite heat pump for domestic heating”, Energy Vol. 13, No. 4, pp. 333~342, 1988
- [6] 조순행 외, “흡착제를 이용한 에너지절약 시스템 개발(Ⅰ)”, 한국동력자원연구소 연구보고서, 1990
- [7] 김종남 외, “흡착식 냉동, 공조 시스템 개발(Ⅰ)”, 한국에너지기술연구소 연구보고서, 1993
- [8] 김종남 외, “흡착식 냉동, 공조 시스템 개발(Ⅱ)”, 한국에너지기술연구소

연구보고서, 1994

- [9] 김종남 외, “흡착식 냉동, 공조 시스템 개발(Ⅲ)”, 한국에너지기술연구소 연구보고서, 1995
- [10] 김종남 외, “흡착식 냉동, 공조 시스템 개발(Ⅳ)”, 한국에너지기술연구소 연구보고서, 1996
- [11] H. Bjurström, E. Karawacki, and B. Carlsson, “Thermal conductivity of a microporous particulate medium : moist silica gel”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 11, pp. 2025~2036, 1984
- [12] H. Mori, Y. Hamamoto, and S. Yoshida, “Effective Thermal Conductivity of Adsorbent Packed Beds”, *Trans. of the JSRAE*, Vol. 17, No. 2, pp. 171~182, 2000
- [13] A. Griesinger, K. Spindler, and E. Hahne, “Measurements and theoretical modeling of the effective thermal conductivity of zeolites”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, 4363~4374, 1999
- [14] B. J. Kim, “A study on the Measurement of Effective Thermal Conductivity in adsorbent Packed Bed”, *Proceedings of the KOSME 2004 Autumn Conference*, pp. 15~20, 2004
- [15] S. P. Lee, “Measuring Thermal Conductivity of Ultrafine Particle-Fluid Mixture and Uncertainty Analysis”, *Inst. of Ind. Tech. Journal*, Vol. 17, 1999
- [16] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, “Conduction of Heat in Solids”, Oxford : Clarendon Press, 1959

감사의 글

부산수산대학교 냉동공학과에 합격했다고 기뻐하던 때가 엇그제 같은데 벌써 10년이 흘러 대학원 석사 졸업을 하기에 이르렀습니다. 그동안 졸업하기까지 도와주신 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 본 논문이 결실을 맺기까지 아낌없는 지도와 편달을 해주신 윤정인 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

그리고 본 논문을 심사해주시고 유익한 조언을 아끼지 않으신 오후규 교수님, 김종수 교수님, 금종수 교수님, 김영수 교수님, 최광환 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 또한 평소 애정어린 충고와 조언을 많이 해주신 동명대학 김재돌 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

본 논문이 완성될 수 있도록 실험장치 사용을 허락해주시고 학문적인 면에서나 생활적인 면에서 아낌없는 지도와 편달을 해주신 한국생산기술연구원의 윤재호 박사님, 권오경 박사님, 김종하 박사님께도 깊은 감사를 드립니다. 또한 같이 생활하면서 친동생처럼, 친구처럼, 친형처럼 잘 대해주고 격려와 도움을 아끼지 않았던 규진이형, 상일이, 영주, 두영이, 희택이, 규철이에게도 감사의 마음을 전합니다.

졸업을 앞둔 이 순간 5년동안 연구실 생활을 하며 함께 동고동락했던 선후배님, 동기를 한사람씩 떠올려봅니다. 연구실의 든든한 버팀목이신 춘근이형, 항상 밝은 미소로 대해주시던 만능컴퓨터맨 승문이형, 저를 연구실로 이끈 장본인이자 항상 친형처럼 대해준 호생이형, 만능기술자이자 자칭 꽃미남 경현이, 항상 웃는 모습으로 대해주던 분위기 메이커 근태, 조교하라 연구실 생활하라 바쁜 동훈이, 앞으로 연구실 주역이 될 능력있고 착한 광배와 철호, 연구

실 막내로서 굶은일 도맡아 하면서도 불평 한마디 않고 최선을 다하는 휘진이, 영어맨 실경이, 유학생 Tong, Sarker, 지금은 졸업했지만 함께하는 동안 많은 도움을 주었던 종극이형, 성호형, 동휘형, 용식이형, 동기 동안이형, 기석이 모두에게 진심으로 감사드립니다. 또한 설원실 박사님, 한인근 박사님, 최인수 박사님을 비롯한 ENSYS 선배님들께도 깊은 감사를 드립니다.

남아주시고 아들 뒷바라지 하시느라 고생하시고 눈물로서 기도하시던 부모님께 말로 형언할 수 없는 깊은 감사와 사랑은 전합니다. 아울러 선생님이 되기위해 노력하는 동생 민지에게도 고마움을 전하고 꿈을 이루기를 기원합니다.

즐거울 때나 힘들 때 언제나 항상 그 자리에서 묵묵히 지켜봐준 친구 병욱이, 용식이, 호종이, 재영이, 현철이에게도 고마움을 전합니다.

부족한 오빠 만나서 맘고생 많이했지만 앞으로 함께할 시간이 많기에 몇배로 잘해주고 싶은 사랑하는 지혜에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 작고 보잘 것 없는 결실이지만 완성될 수 있도록 보이지않는 곳에서 지켜 보호해주신 하나님께 영광을 돌리면서 감사의 글을 마치고자 합니다.