

[총설] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol.18, No.2, 1998

## 태양열 냉방 시스템

백남춘

한국에너지기술연구소 설비형태양열연구팀장

## Solar Cooling Technology

**Nam Choon Baek**

*Korea Institute of Energy Research*

### 요약

본 고에서는 지금까지 연구 개발된 제반 태양열 냉방시스템의 개요 및 원리와 기술현황에 대하여 소개하였다. 소개된 기술은 LiBr-H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub>을 이용한 태양열 흡수식 냉방시스템; 활성탄, 실리탄, 실리카겔 등을 이용하는 제습냉방(desiccant cooling)시스템; Ranking engine을 이용하는 증기압축식 냉방시스템; Zeolite-H<sub>2</sub>O, 실리카겔-H<sub>2</sub>O, 실리카겔-메탄을 활성탄-메탄을 등 “고체흡착제-냉매”를 이용한 태양열 흡착식 냉동시스템 등이다. 이들 기술들을 실용화 단계에 있거나 실용화 단계에는 못 미치나 상당한 기술개발이 되어있는 분야이다.

또한 각 시스템별 비교분석이 가능하도록 대략적인 효율과 장단점이 소개되었다.

## Abstract

Four main solar cooling technologies have been developed over the past twenty years are considered in this paper. These technologies include absorption, vapor compression, desiccant, adsorption, etc. All of these solar cooling technologies considered here are solar thermal ones. The details of the thermodynamic cycle of these solar cooling technologies are given. The general concept of these solar cooling and the relative advantages among them are also presented. At last, the status and outlook for each approach are summarized.

## 1. 머릿말

태양열에 의한 냉방은 난방 및 온수와는 달리 부하가 발생하는 시기(하절기)에 일사의 강도도 크고 또한 냉·난방(급탕)용으로 사용할 경우 태양열시스템을 년중 이용할 수 있다는 장점 때문에 전세계적으로 많은 연구의 대상이 되어왔다. 하지만 기존의 시스템에 비하여 복잡하고 고가이며 또한 여러 가지 기술개발의 미흡으로 인하여 태양열 급탕시스템 처럼 크게 보급은 되고있지 않은 실정이다. 그러나 태양열 난방 및 급탕시스템은 하절기에 열부하가 거의 없기 때문에 이 기간 중에 태양열을 냉열을 생산하는데 사용할 경우 태양열에 의한 에너지 절감효과가 더욱 커져서 시스템의 경제성도 크게 향상될 수 있을 것으로 본다. 태양열 냉방은 또한 전력수급상의 비효율적 요소인 첨두부하 감소에 기여할 수 있을 것으로 보며, 가스, 석유 등 수입 에너지의 소비를 줄일 수 있다.

최근 교토회담 이후 환경문제와 관련 CO<sub>2</sub> 발생량 감축을 위하여 전세계적으로 화석연료의 사용을 줄이기 위한 노력이 다각적인 측면에서 검토되고 있다. 그 중의 하나가 바로 청정에너지인 태양열을 효과적으로 이용하는 것이다. 그러기 위해서는 우리나라와 같은 기후

조건 하에서는 전술한 바와 같이 태양열 시스템의 년중 이용을 위해서 냉방에 대한 충분한 연구가 있어야 할 것으로 본다.

본 고에서는 지금까지 연구 개발된 태양열 냉방시스템에 대한 기술을 소개하고자 한다.

## 2. 태양열 냉방기술

태양열을 구동열원으로 해서 냉열을 생산하는 시스템은 크게 흡수식냉방 및 제습냉방(desiccant cooling)과 기타 증기압축식, 흡착식 등으로 구분할 수 있다. 좀 더 구체적으로 현재까지 연구 개발되었거나 개발 중에 있는 태양열 냉방 및 냉동 시스템은 다음과 같은 것들이 있다.

- LiBr-H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>, LiCl-H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub> 등을 이용한 태양열 흡수식 냉방시스템
- CaCl<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub>와 같은 고체흡수제를 이용한 흡수식 냉동시스템
- Zeolite-H<sub>2</sub>O, 실리카겔-H<sub>2</sub>O, 실리카겔-메탄올, 활성탄-메탄올 등 고체흡착제-냉매 쌍을 이용한 태양열 흡착식 냉동시스템

- Rankine engine을 이용한 증기압축식 냉동시스템
- Photovoltaic panels로부터 생산된 전기를 이용하여 기존의 냉동기(에어컨)를 구동하여 냉방을 하는 태양열 압축식 냉방 시스템

이와같이 여러종류의 시스템 개발에도 불구하고 태양열 냉방은 전세계적으로 보급 활성화가 되지 못하고 있는 실정이다. 이들 중 태양열 흡수식냉방과 제습냉방이 그래도 가장 활발하게 연구가 수행되어 왔으며, 앞으로 보급잠재력이 큰 것으로 평가되고 있다. 그 이외에 흡착식 냉동시스템은 전기가 없는 지역에서 의약품 및 식품 보관을 위한 냉동 및 저온창고용으로 상품화가 되었으나 경제성 확보를 위해서는 아직도 연구단계에 있다고 볼 수 있다.

대체적으로 열에 의해서 구동되는 냉방시스템은 난방이나 급탕에 비하여 비교적 높은 온도의 열을 필요로 한다. 그런데 태양열 시스템은 집열온도가 높아질수록 시스템 효율이 크게 저하될 뿐만 아니라 축열에 어려움이 있다. 따라서 집열기나 축열조의 비용이 고가가 될 수밖에 없으며 또한 시스템 효율이 저하될 수밖에 없다. 그래서 지금까지 태양열 냉방에 대한 연구는 가능한 한 저온에 의해서 구동될 수 있는 냉방사이클 및 시스템 개발에 초점이 맞추어져 왔다.

### 3. 태양열 흡수식 냉방시스템

#### 3.1 개요 및 원리

흡수식 냉동 cycle을 이용한 태양열 냉방 시스템은 LiBr-H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>를 용액으로 사용하는데, 85°C 이상의 비교적 중·저온 열에너지를 필요로 하므로 성능이 좋은 평판형 태양열 집열기로도 가능하기 때문에 태양열 냉·난방시스템으로 적정한 것으로 알려지고 있는 시스템이다. 특히 이 시스템은 비 냉방 기간에 난방이나 급탕용으로 효과적으로 사용할 수 있으며, 운전이 정숙하고, 대용량도 가능하며, 부분 부하에서도 성능저하가 거의 없다. 냉방 COP(여기서는 시스템 전체효율을 의미)는 집열면 일사량을 기준으로 했을 때 대략 0.1~0.2 정도가 된다.

태양열은 고농도의 용액(흡수제/냉매)으로부터 냉매를 증발 분리(용액의 재생이라 함)시키는데 필요한 열을 공급하는데 사용되는데, 냉매의 보존 여부에 따라서 밀폐형과 개방형으로 구분된다.

#### 3.1.1 밀폐형

밀폐형 태양열 냉동기는 일반적인 흡수식 냉동기와 동일하나 단지, 태양열에 의해서 가열된 온수가 구동열원이 되기 때문에 발생기(Generator) 부분이 다르며 또한 저온으로도 용액의 재생이 가능해야 하기 때문에 COP가 낮아 직화식에서는 거의 사용되지 않는 1중효용이 효과적으로 사용되고 있다.

태양열로 구동되는 1중효용 흡수식 사이클의 기본 개념도를 [그림 3.1]에 도시하였다. 크게 재생기, 응축기(Condenser), 증발기(Evaporator), 흡수기(Absorber), 용액 열교환기(Solution Heat Exchanger) 등 5개의 주요 부품으로 구성되어 있다. 재생기는 냉매/흡수

액 2개의 용액이 공존하며, 태양열에 의해서 용액 중 일부의 냉매가 비등하여 응축기로 보내지고 농도가 진해진 용액은 흡수기로 들어온다. 재생기로부터 증발된 냉매증기는 응축기에서 응축열을 외기로 방출하고 응축된다. 이 응축된 냉매는 팽창밸브를 통하여 압력이 낮아진 상태로 증발기로 들어가 증발된다. 이때 증발열을 흡수하게 되므로 증발기를 통과하는 냉수의 온도를 저하시켜 냉열을 얻게 된다. 증발된 냉매는 다시 흡수기로 들어가 고농도의 용액에 의해서 흡수된다. 이때 흡수열을 제거시켜 주어야 한다. 용액 열교환기는 COP를 높여주기 위해 흡수기로부터 재생기로 가는 저농도의 온도가 낮은 용액을 재생기로부터 오는 고온의 고농도 용액에 의해서 예열시켜주어 재생기에 공급되는 열을 줄여준다. 이 태양열 구동 흡수식 냉동사이클은 고온의 열이 온수형태로 재생기에 공급되며 응축기와 흡수기는 냉각수나 외기에 의해서 냉

그림 3.2 1중효용 태양열 구동 흡수식 냉동기의 성능

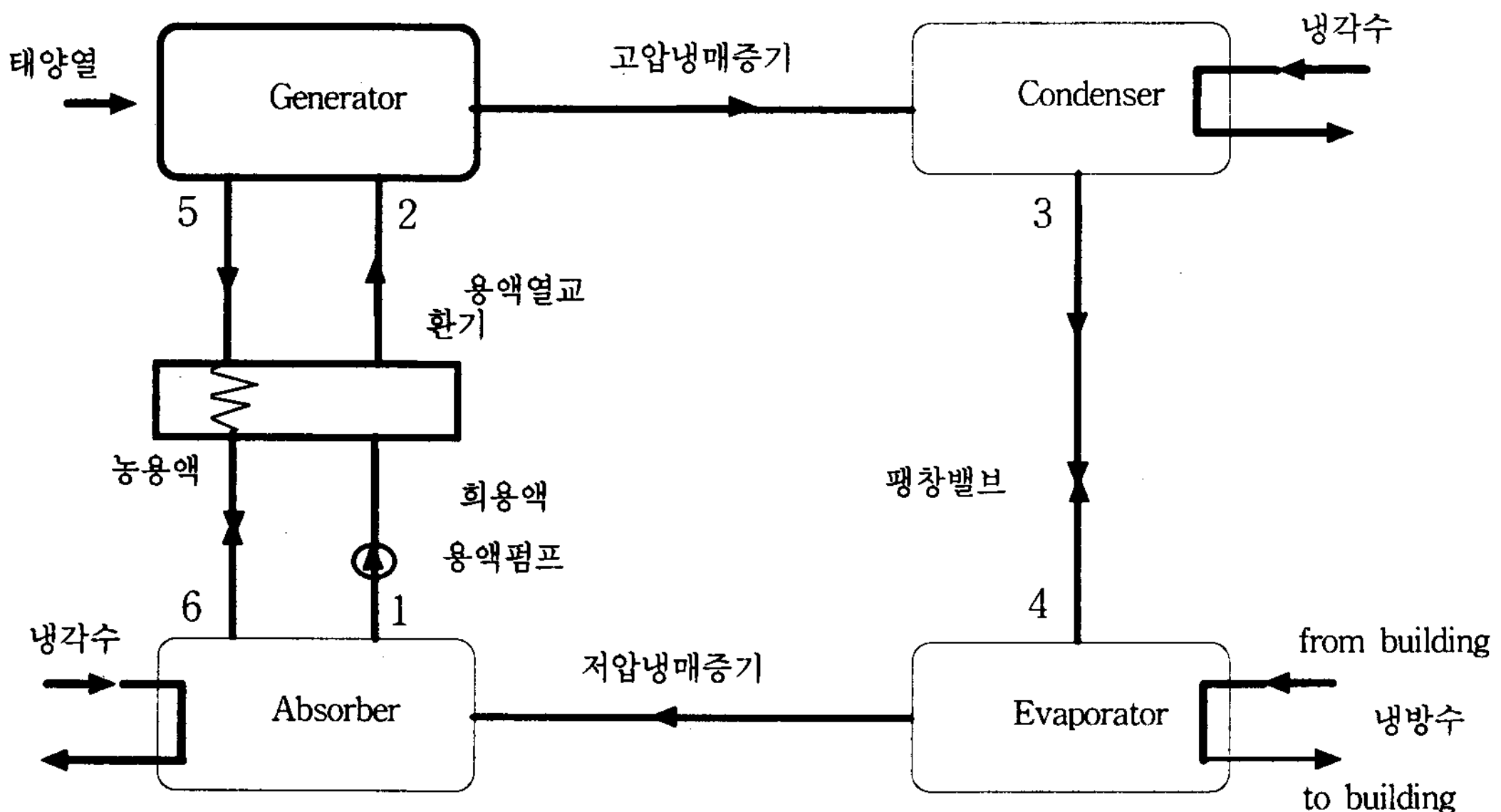
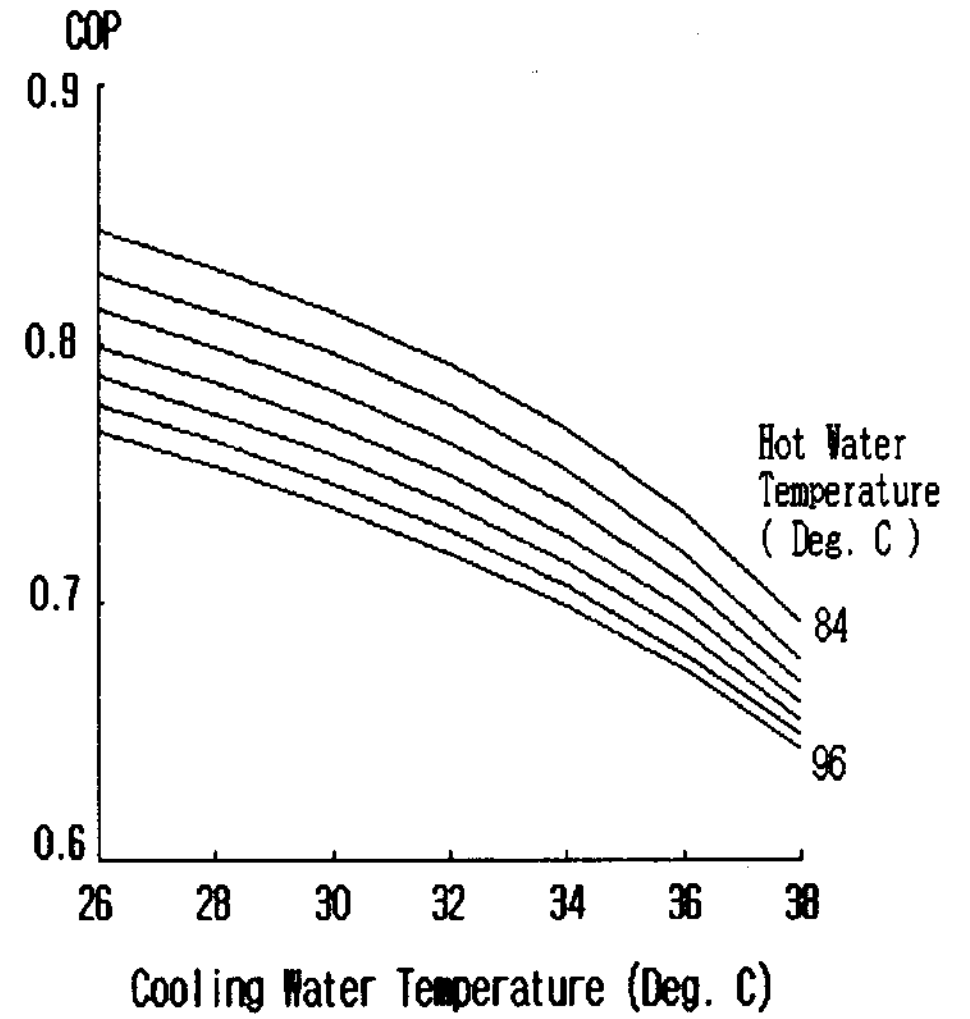


그림 3.1 1중효용(Single-effect) 태양열 구동 흡수식 냉동기

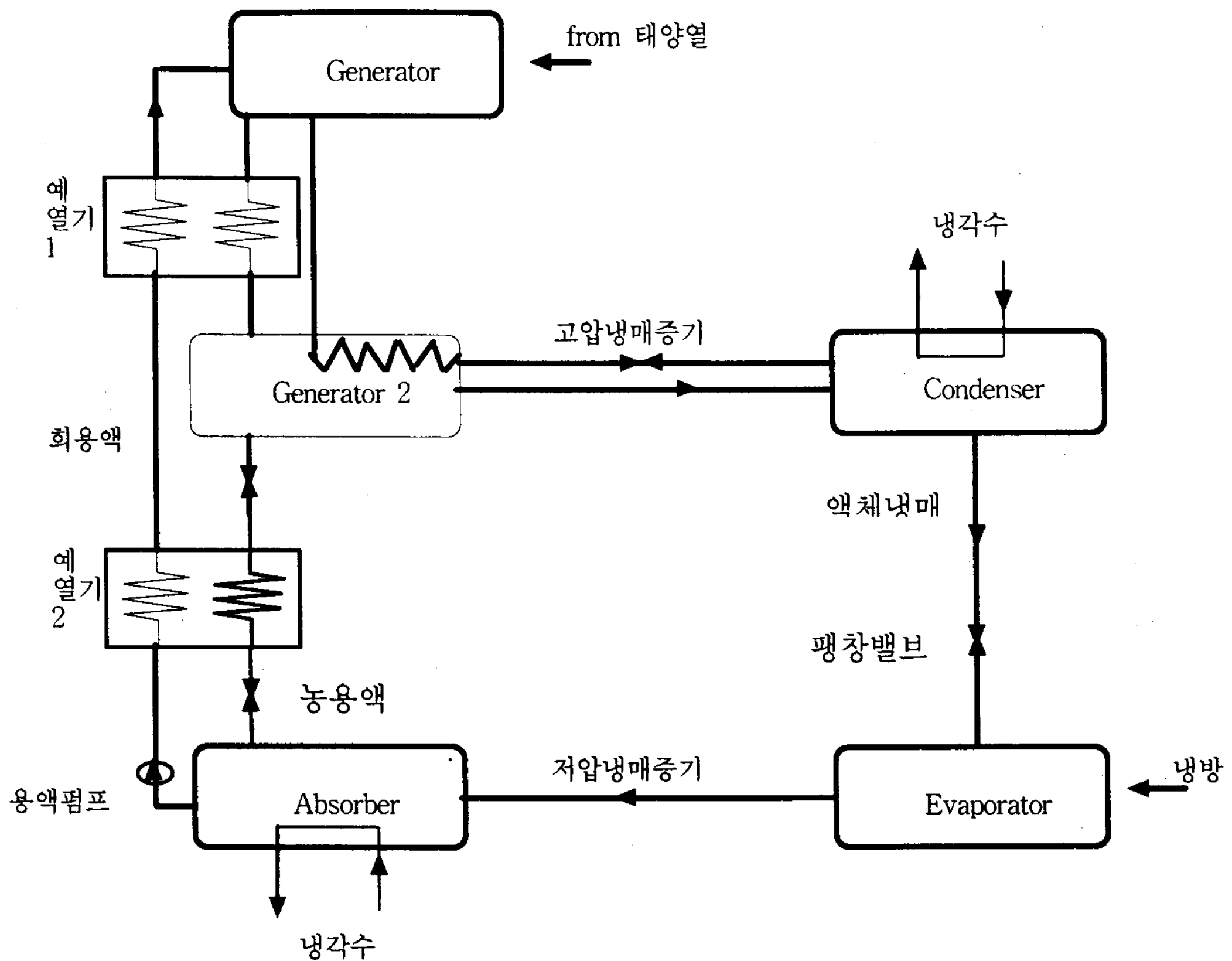


그림 3.3 2중효용 흡수식 냉동기

각되어진다.

1중효용의 냉동기의 COP는 태양열 온수온도와 냉각수 온도에 따라 [그림 3.2]와 같이 변하며 보통 작동범위에서 0.6~0.7로 2중효용에 비해 낮으나 낮은 온도의 열이 사용되므로 태양열로 구동되는 냉방시스템에 적용되어 왔다.

그러나 태양열의 효과적인 집열 및 저장이 140℃ 이상 가능할 때 태양열 구동 흡수식 냉동기는 COP가 1중효용 보다 1.5배 이상 높아 직화식으로 널리 사용되고 있는 2중효용[그림 3.3]이 가능하다. 2중효용은 1중효용과는 달리 저온재생기와 고온재생기 2개의 재생기가 있다. 그런데 태양열 고온집열 및 축열이 현 기

술로는 비 효율적이기 때문에 최근에는 1중-2중효용 혼합형이 미국에서 개발된바 있다.

이 냉동기는 태양열로 구동될 때는 1중효용으로, 그리고 보조열원으로 구동될 때는 2중효용으로 작동되기 때문에 1중효용이나 2중효용의 단점이 보완된 냉동기이다.

### 3.1.2 개방형

개방형은 밀폐형 흡수식 냉동기에서 응축기를 없애고 재생기에서 증발된 냉매증기를 외부(대기)로 방출하는 시스템으로 [그림 3.4]에 있는 바와 같다. 증발기와 흡수기 및 용액

열교환기는 밀폐형과 동일하다. 그러나 용액 재생기(Solution Regenerator)는 대기압하에서 작동되며, 여기서 증발되어 분리된 냉매증기는 외기로 배출되기 때문에(응축기 없음) 연속적으로 냉매가 보충되어야 한다. 그러므로 개방형에서 냉매는 값이 싸고 오염이 없는 물이 냉매로 사용되고 있다. 이 시스템에서 태양열 집열기는 직접 재생기로 이용되는 것이 보통이나 공기식 집열기로부터 얻어진 뜨거운 공기를 특수하게 만들어진 재생기를 직접 통과시켜 수분을 증발시키는 방법도 있다.

개방형은 저가의 집열기를 재생기로 사용하므로 시스템 가격이 저렴하며, 성능은 밀폐형과 유사하다. 특히 이 시스템은 최저 작동 온도를 밀폐형 보다 낮출 수는 있으나 대신 흡수기의 냉각수 온도가 낮아야 한다.

밀폐형의 흡수식 태양열 냉·난방 시스템의 전형적인 한 예를 [그림 3.5]에 표시하였다. 이 시스템은 크게 집열부, 축열부, 이용부, 보조열원, 흡수식 냉동기 및 기타 제어장치로 구성된다.

집열기에서 집열된 태양열은 일단 고온축열조에 저장된다. 냉동기가 작동조건이 되면 고온의 축열조에 저장된 열매체가 냉동기로 공급된다. 이 때 냉동기로부터 생산되는 저온의 냉수는 저온축열조에 저장되거나 건물로 공급된다. 이와 같이 태양열 집열기에 의해서 집열된 태양열은 1차적으로 흡수식 냉동기에 의해 냉열로 변환되어 냉열축열조에 저장되고, 냉수축열조가 원하는 온도까지 축냉이 되었을 경우 태양열은 고온축열조에만 저장이 된다.

이 때 흡수식 냉동기의 작동은 고온축

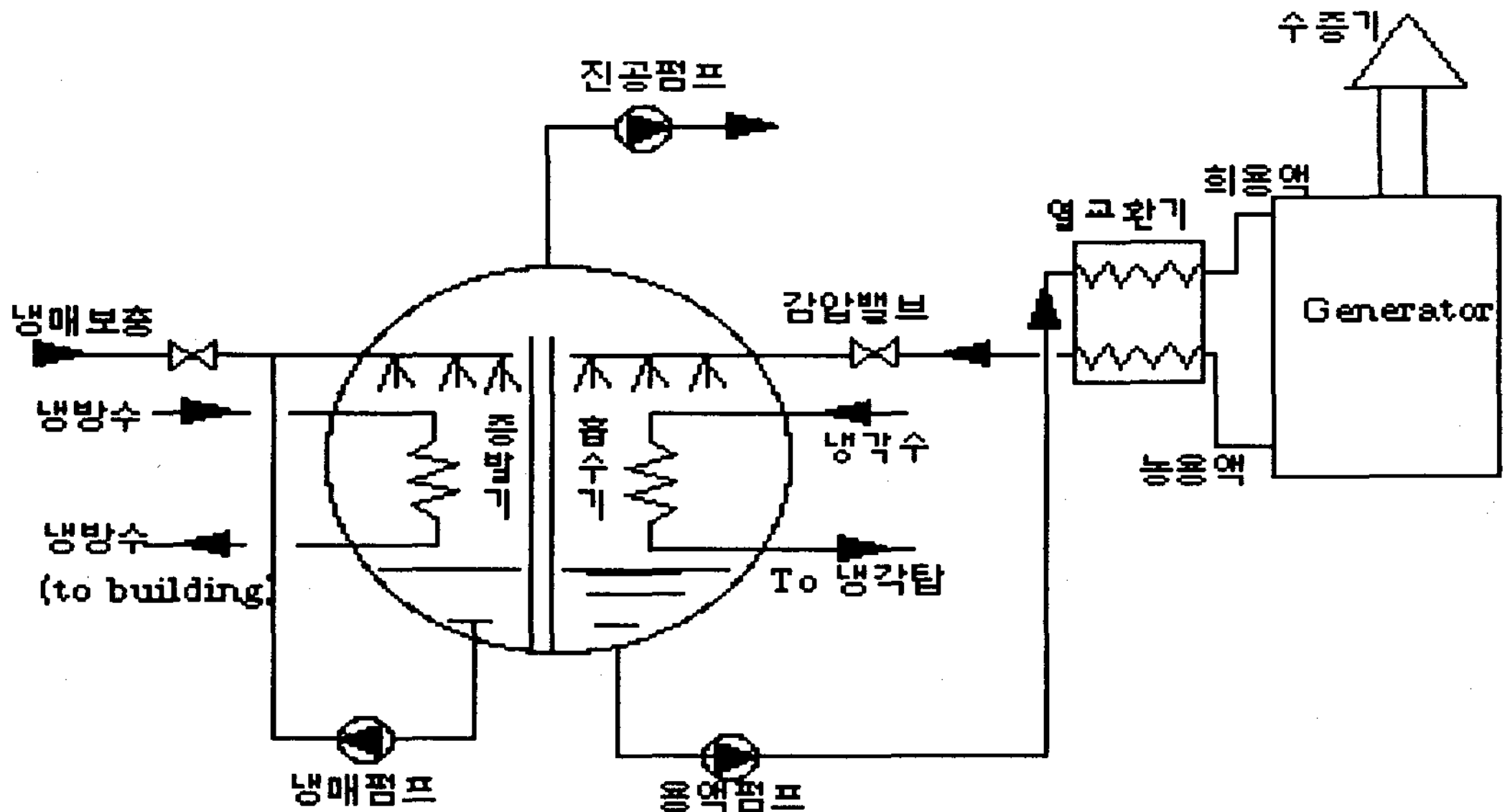


그림 3.4 개방사이클의 흡수식 냉동기

### 3.2 시스템 구성

열조의 상단부 축열매체 온도가 발생기 온수 공급온도(대략 85°C) 이상이 되었을 때만 가

능하며 그 이하 일 때는 보조열원에 의해서 열이 공급된다.

이러한 고온 및 냉열 저장조 모두를 갖는 축열방식은 태양열 흡수식 냉방시스템에서 비교적 효과적인 방법으로 평가되고 있으며, 냉

Polyethylene)

- 용액에 의한 축열방법 : 태양열 저장방법의 일환으로 흡수식 냉동기의 용액의 양을 많이 사용하여 태양열로 용액을 분리시

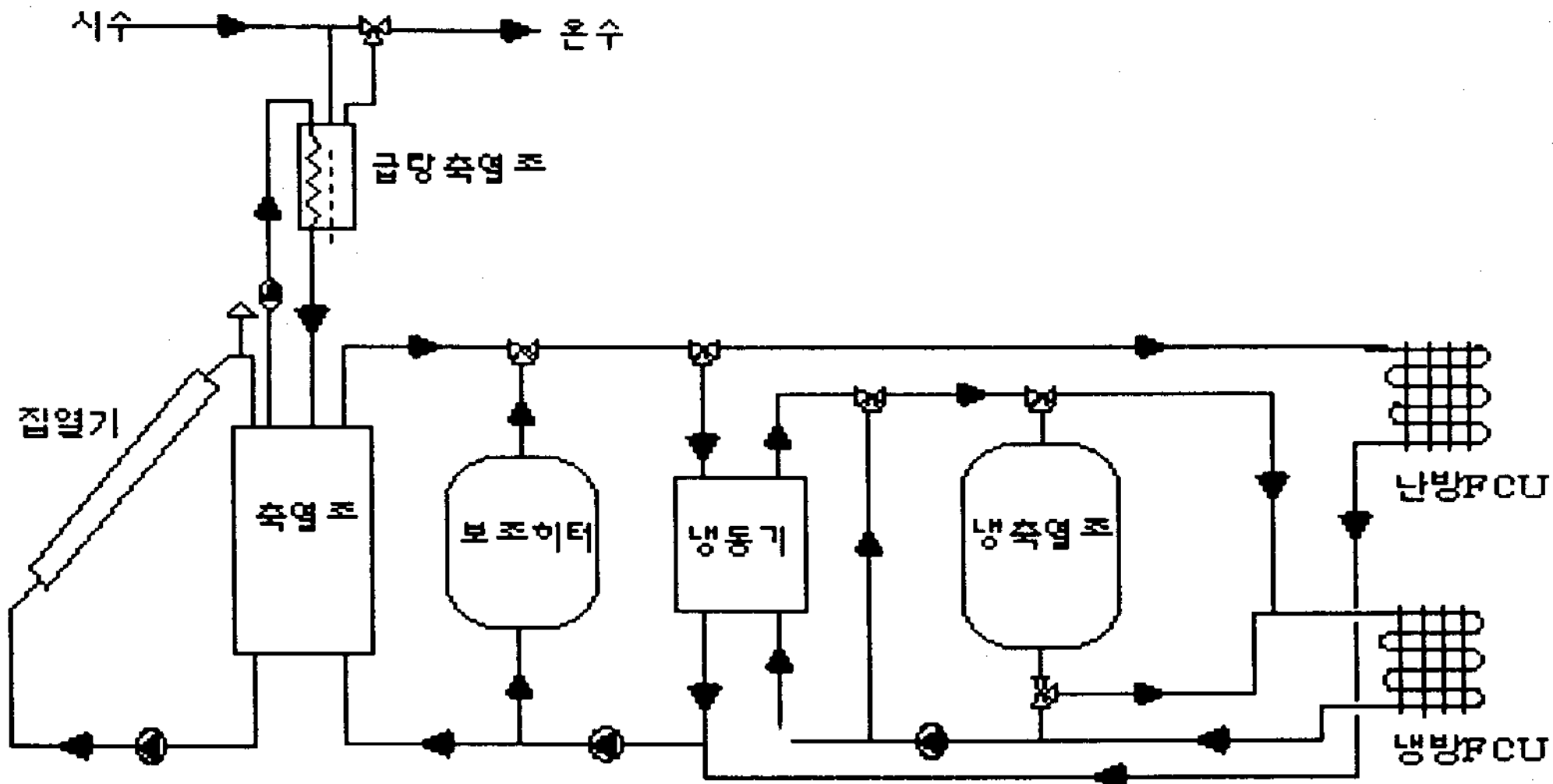


그림 3.5 태양열 냉·난방시스템

열을 축열하므로써 축열이 용이해지고 또한 순간부하 변화에 쉽게 대응할 수 있는 등 잇점이 있다. 냉방이 필요 없는 계절에는 고온 및 냉수축열조가 전부 태양열축열조로 이용되어 난방 및 온수를 공급할 수 있다.

집열기로는 집열온도 및 축열온도에 따라서 평판형, 진공관식, CPC, PTC 등이 사용될 수 있으며 축열은 다음과 같은 현열 또는 잠열에 의한 저장방법이 있다.

- 중(고)온 열저장을 위한 열매체 : Dowtherm 4000, Dowfrost HD, Caloria HT43, Hytherm 500 등

- 자갈/오일 열저장 시스템
- 잠열저장 : HDPE(High Density

켜 저장하였다가 냉매로 사용하는 방법으로 분리 가능한 용액의 농도변화 폭이 크지 않은데다가 비용이 증가하는 단점이 있음.

난방 및 온수용에 사용되고 가격이 싼 평판형 집열기를 냉방에 효과적으로 이용하기 위하여 [그림 3.7]과 같이 LiBr/H<sub>2</sub>O 흡수식 냉동기의 증발기와 흡수기 사이에 압축기를 두어 재생기의 발생온도를 낮추도록 하였다. 이 결과 발생온도를 낮출 수가 있었고, 압축기에 약 250W의 전력소모가 있는 반면에 3.52~0.81kW 정도의 용량 증가가 있었다.

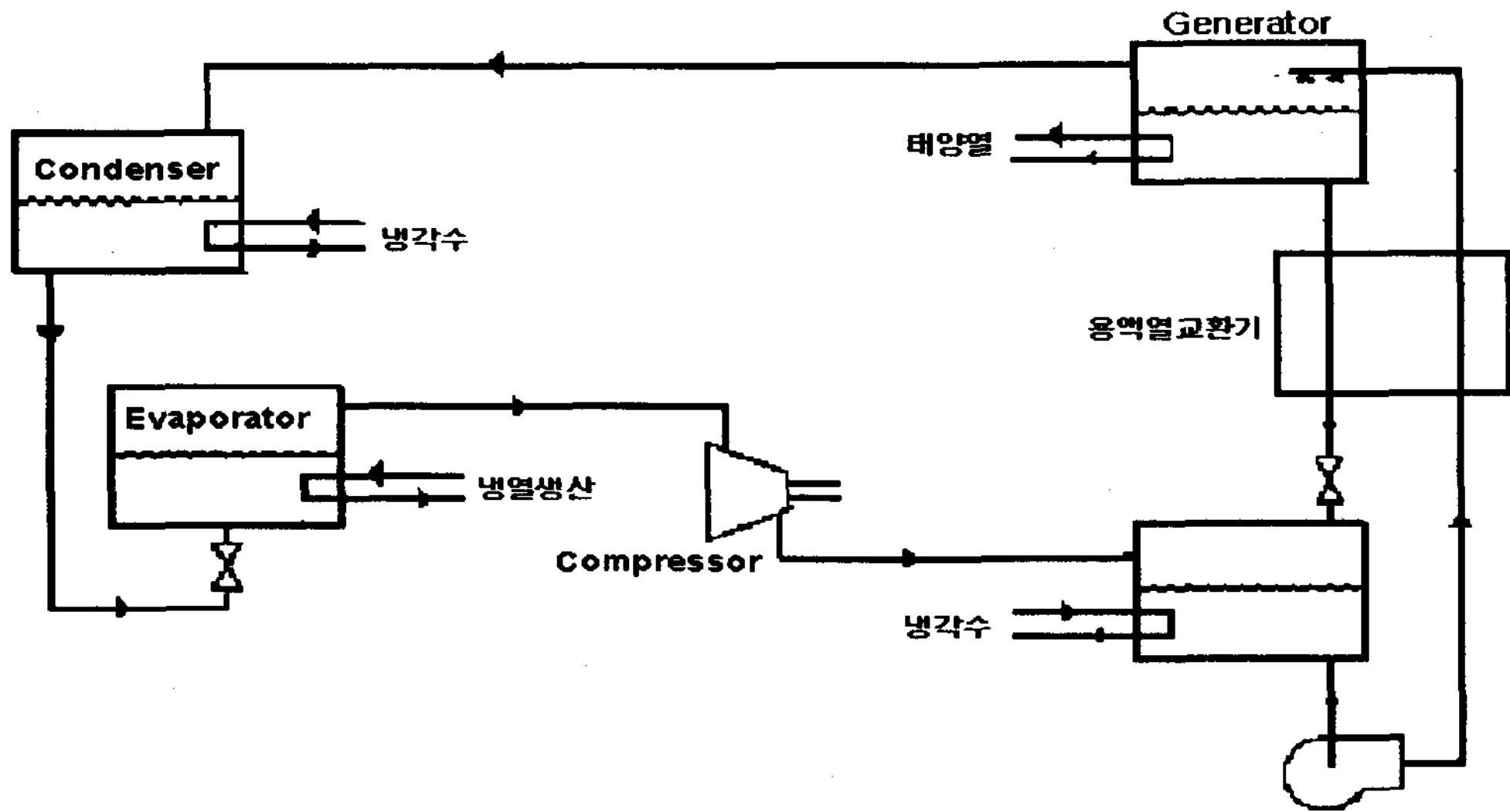


그림 3.7 태양열/전기 복합 흡수식 냉방시스템

## 4. 태양열 제습냉방 (Desiccant cooling)

### 4.1 원리

태양열 제습냉방시스템은 제습제를 사용하여 실내로 들어가는 공기로부터 제습하여 습도를 낮추고 그 후 증발냉각장치에 의해 적절한 온도로 냉각시켜서 실내로 공급하는 냉방 방식이다. 이 시스템에서 태양열은 제습제를 재생시키는데 사용되는데, 가능한 한 낮은 온도(60~80℃)로 재생가능하도록 하는 것이 중요하다.

제습냉방 시스템에서는 공기조화(제습 및 냉각)과정과 재생과정의 2가지 작동과정이 있으며 그 원리가 [그림 4.1]과 [그림 4.2]에 각각 도시되어 있다. [그림 4.1]은 실내로부터

오는 고온 다습한 공기가 우선적으로 제습제가 들어있는 제습기(Desiccant bed)를 통과하면서 제습된다. 이 과정에서 공기 온도는 증가하고 습도는 감소한다(점 1--->점2). 고온의 건조한 공기는 냉각기에 의해서 냉각되는 열교환기를 통과하면서 단순히 온도만 조금 냉각되고(점3) 일종의 증발냉각기인 물분사加湿기(Humidifier)에 의해 온도가 감소하고 습도는 높아져서(점4) 실내로 송풍된다. 제습기의 제습기능이 떨어지게 되면 적당한 때에 태양열에 의해 재생되는데 그 원리가 [그림 4.2]에 도시되었다. 열교환기를 통과한 외기는



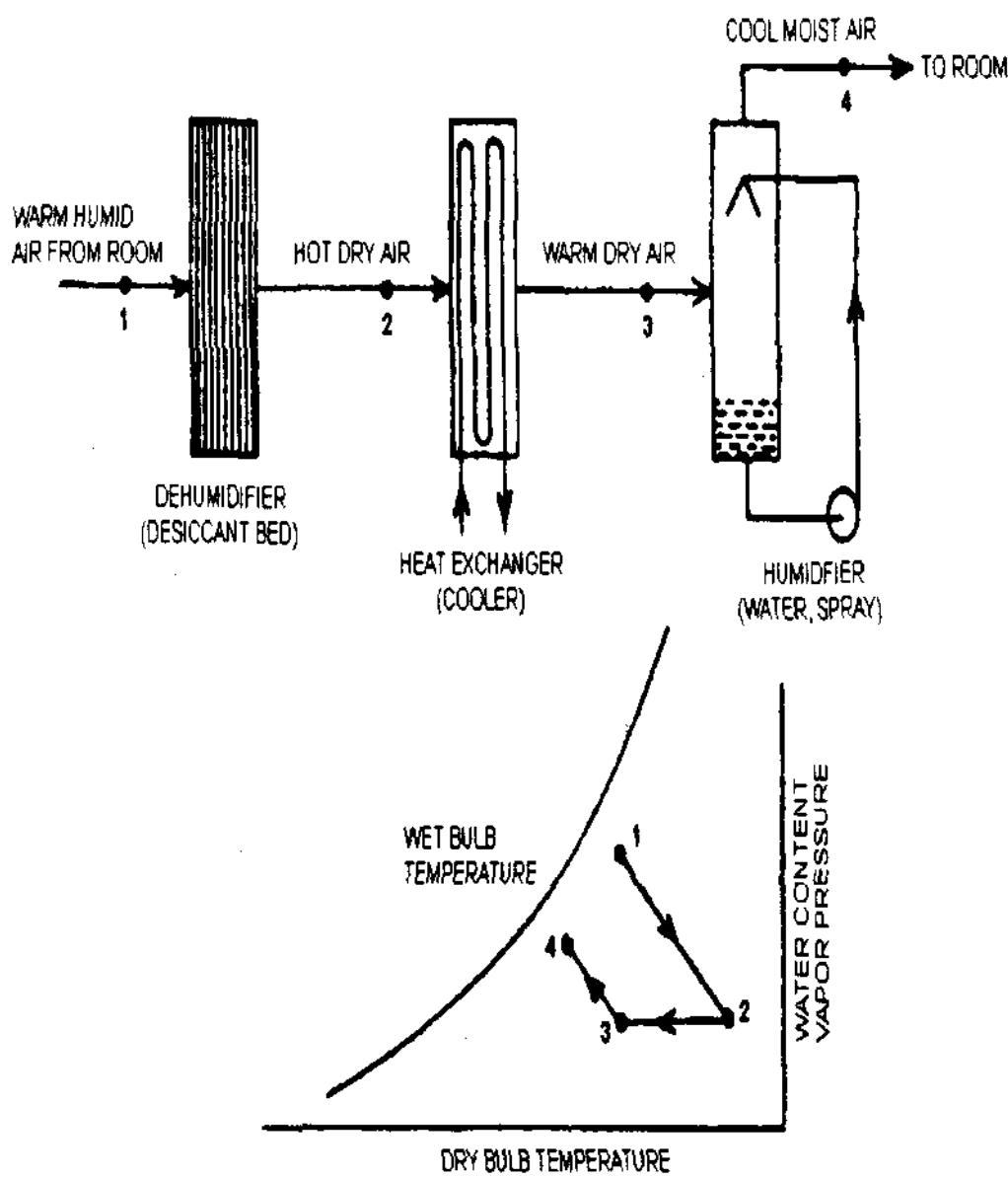


그림 4.1 공기조화(Air conditioning)원리

태양열 집열기를 통과하면서 승온되고(점3) 제습기를 통과하면서 습도가 높아진다(점4). 이 습한 공기는 열교환기를 통과하면서 집열기로 들어가는 외기를 예열시키고 외부로 배출된다(점5). 이렇게 해서 제습기는 다시 재생되어 제습기로의 기능을 갖게된다.

제습냉방 시스템은 실내로 들어가는 공기 및 습기의 교환이 외기와의 유무에 따라서 개방형과 밀폐형 사이클로 구분된다. 즉 밀폐형 사이클에서는 단지 외기와 열교환 만이 이루어지나 개방형에서는 물질교환까지도 이루어진다.

#### 4.2 제습제

개방형 시스템에서 제습제(흡착제라고도 함)는 실내로 들어가는 공기중 수증기를 흡착하게 되는데 이 때 수증기는 정상적인 포화증기압보다 낮은 압력에서 제습제 표면 및 세공에 응축되게 된다. 탈착시에는 제습제 주위를 지나는 뜨거운 공기에 의해서 제습제가 가열되면서 흡착되어 있던 수분이 탈착된다. 이 고체흡착제를 탈착시키기 위해서 필요한 고온의 공기가 바로 태양열이나 보조열원에 의해서 공급되는 것이다.

흡착제로는 실리카겔, 제오라이트, Molecular sives, CaCl, LiCl 등이 사용되고 있다.

수분을 제거시키는 제습제의 능력은 [그림 4.3]에 있는 바와 같이 제습제의 평형수분 흡착량과 그것과 접하고 있는 공기의 상대습도 간의 관계에 의해서 결정된다. 낮은 상대습도 하에서 많은 수증기를 흡착할 수 있는 제습제가 개방사이클에 좋다.

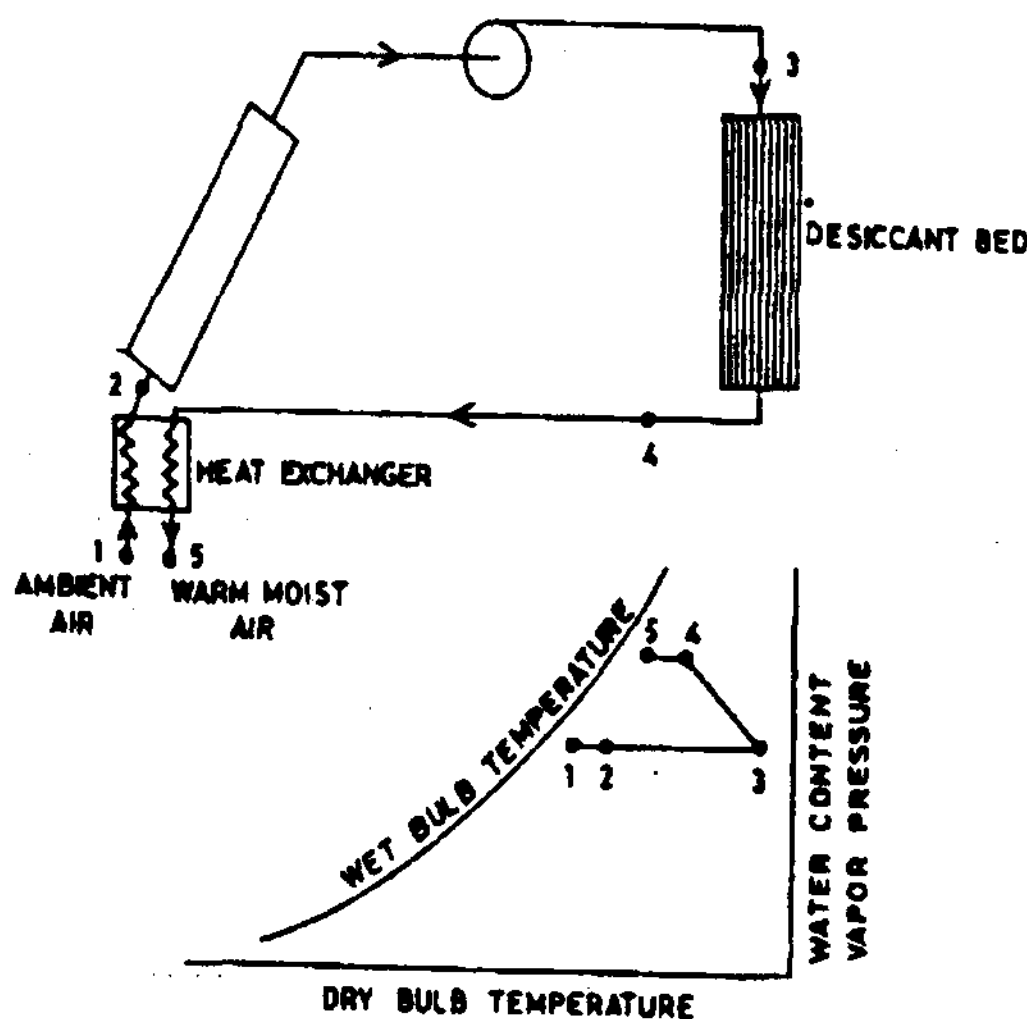


그림 4.2 재생(Regeneration)원리

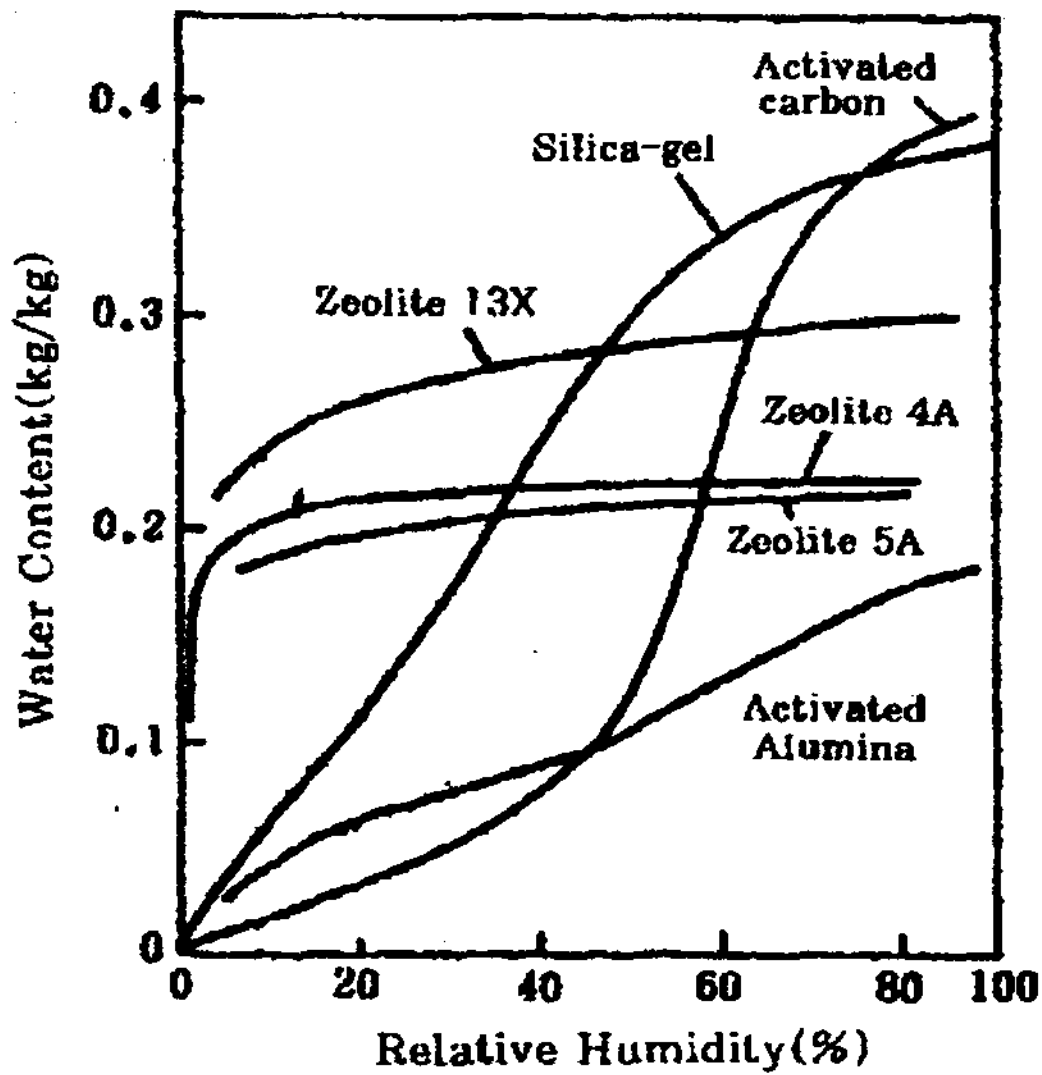


그림 4.3 제습제의 평형흡착량과 상대습도

### 4.3 제습냉방시스템

태양열 냉방 이전에 이미 [그림 4.4]와 같은 형태의 회전형 bed를 갖는 제습기들이 개발된바 있으며 다음과 같은 종류가 있다.

- 고온 철망에 실리카겔을 채운 것
- LiCl을 함유하고 있는 화이버그래스 매트(Fibergrass matrix)
- Molecular sieve를 함유하고 있는 Paper

이들은 주로 가스를 재생열원으로 하는 것들이다.

그러나 태양열을 재생열원으로 하기 위해서는 재생온도가 60~80°C 정도로 낮아져야 한다. 이 온도는 이 범위의 온도에서 작동되는 집열기 중 저렴하면서 가장 집열효율이 좋

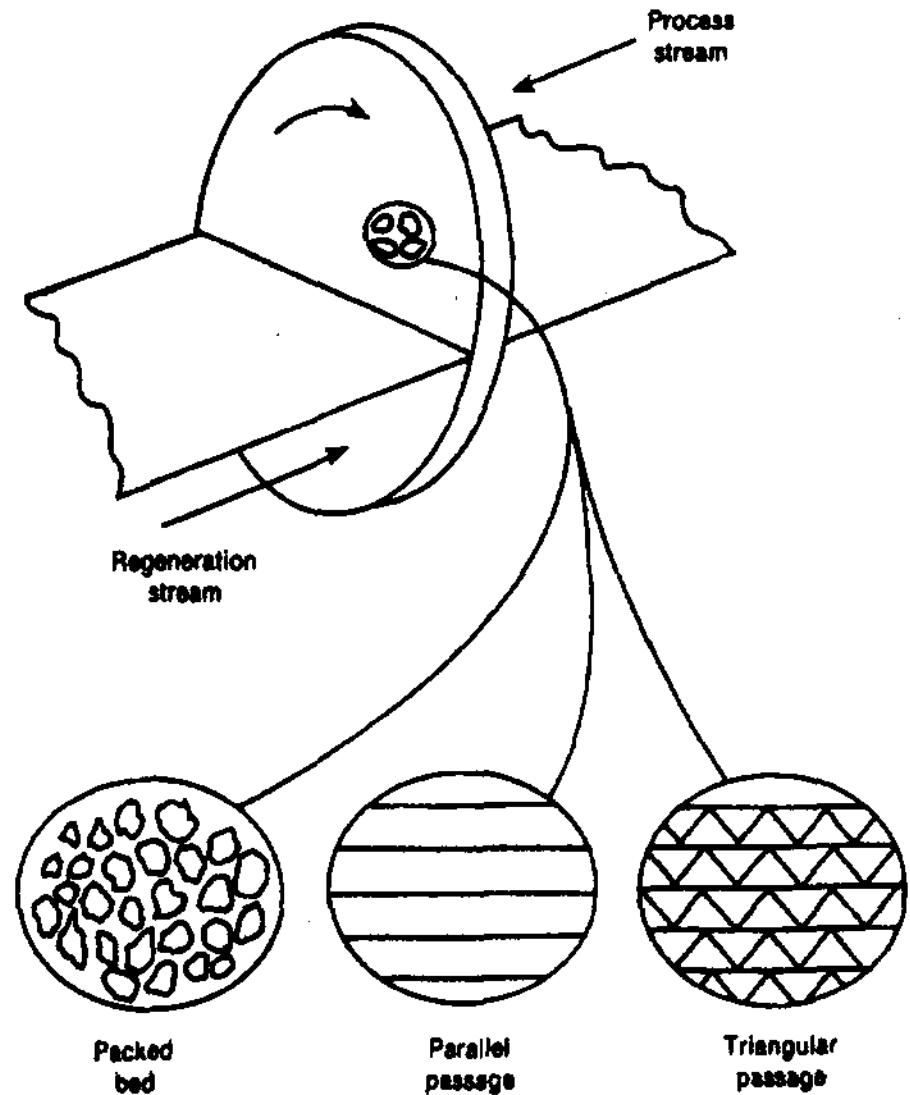
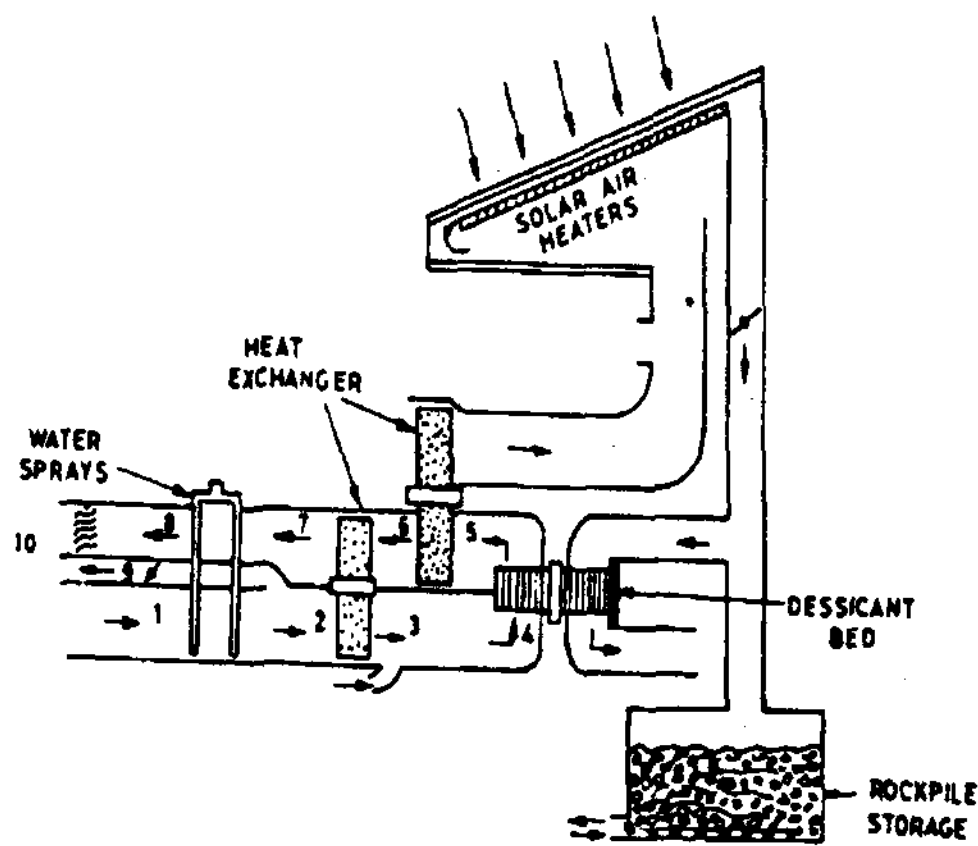


그림 4.4 Dehumidifier의 구조

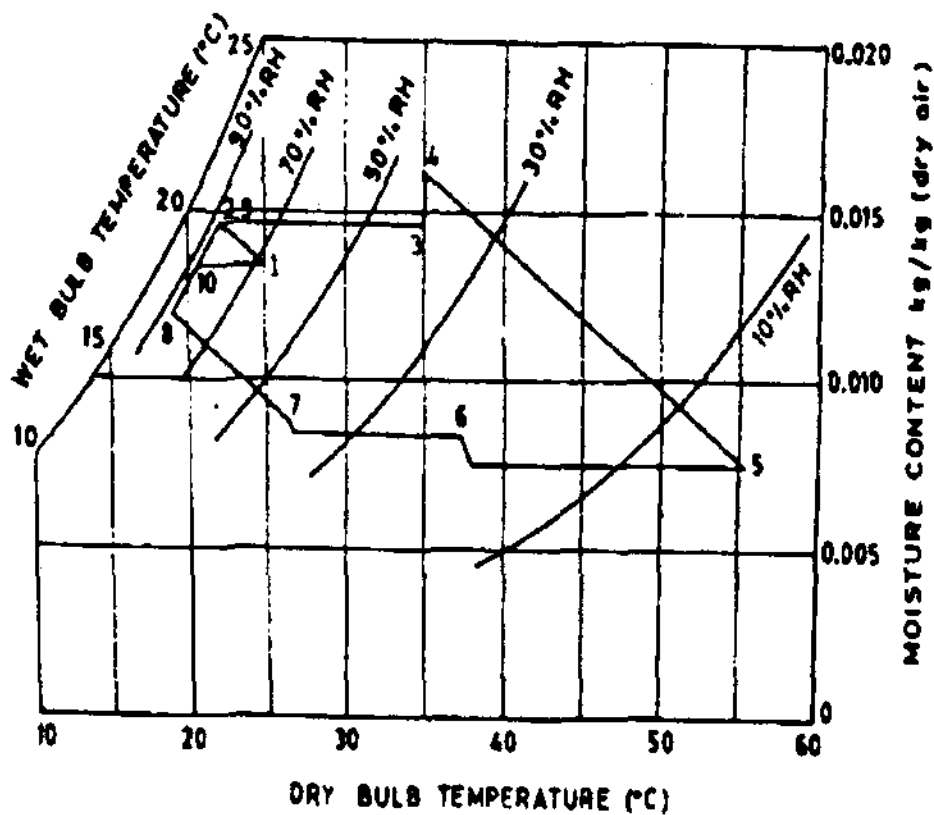
은 평판형 집열기로 얻어질 수 있는 온도이고 또한 열저장 및 시스템 구성이 간편하기 때문이다. 따라서 제습제 bed는 낮은 온도에서 재생될 수 있도록 열 및 물질 확산(Diffusion)저항을 줄이고, 높은 열전달 계수를 갖도록 설계되는 것이 필수적이다. 또한 bed를 지나가는 공기의 압력저하를 최대한 줄여야 한다. 지금까지는 주로 층류유동을 가지면서 열전달계수가 높고 낮은 압력손실을 갖도록 하는 [그림 4.4]에서 "parallel passage"를 갖는 얇은 층으로 구성된 bed가 연구되어왔다.

[그림 4.5]는 공기식 집열기와 자갈축열조를 갖춘 제습냉방 시스템의 일례이다. 외기 또는 실내로부터 오는 공기(점1)는 증발에 의해서 냉각되고 (점2), 일부는 회전식 재생열교환기를 통하면서 약간 가열된다. 여기서 외기와 혼합된 후 (점4) 제습제 bed를 지나면서 흡착제에 의해 제습되고 공기 온도는 상승된다(점5). 여기서 더운 건조공기는 일차로 외기

와 열교환되고(점6), 다시 실내로부터 오는 공기와 열교환되어 냉각된 후(점7) 증발냉각기를 거치면서 저온의 공기가 된다. 이 공기는 필요에 따라 실내로부터 배출되는 공기의 일부와 섞여 실내로 공급된다.



(A) Desiccant cooling system



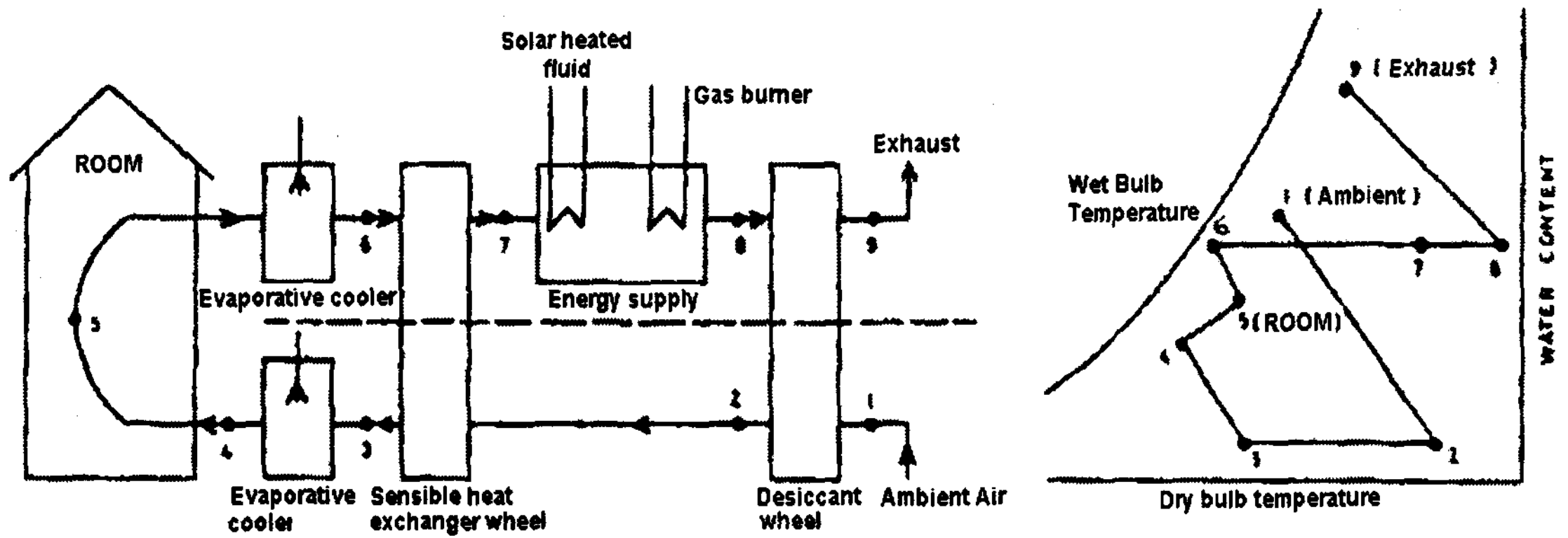
(B) Thermodynamic cycle

그림 4.5 공기식 집열기와 자갈축열조를 갖는  
제습냉방 시스템 개요 및 공기선도  
(흡착제 : 실리카겔)

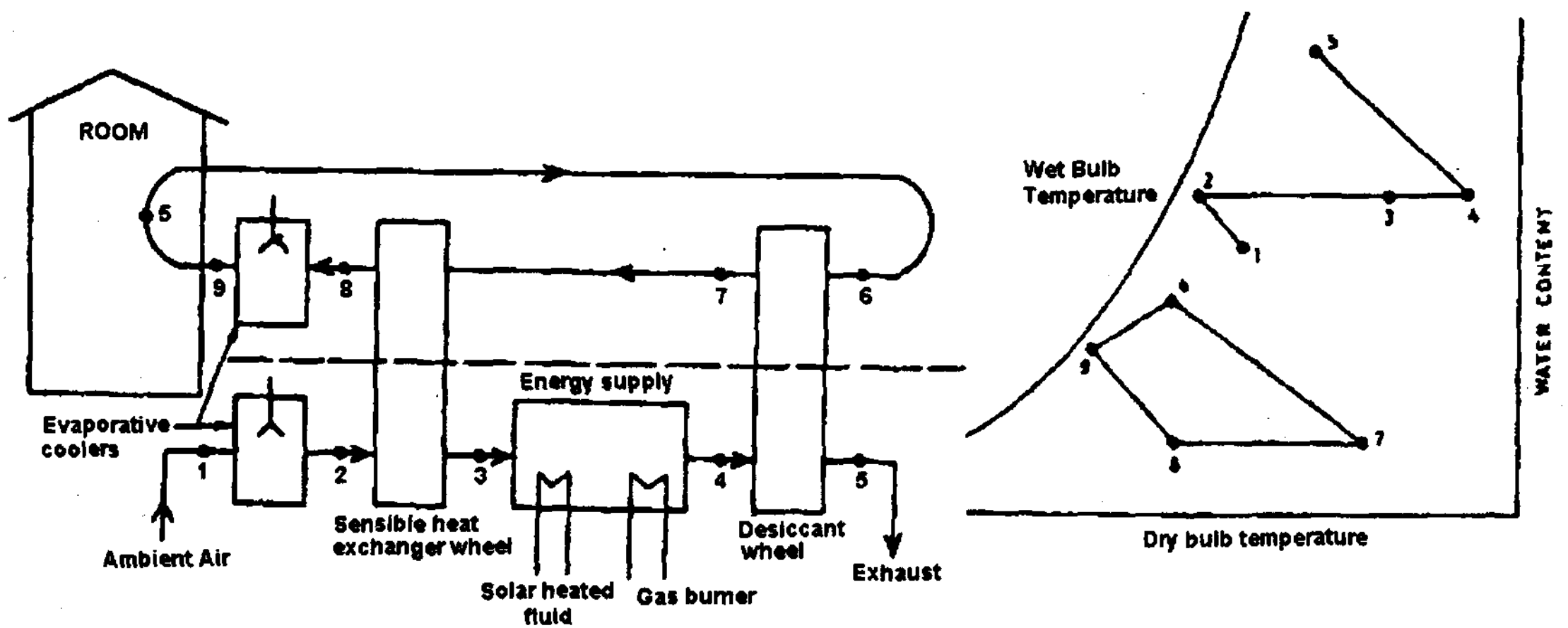
[그림 46]은 Solar-MEC (Munters Environmental Control)시스템이라고 알려진 제습냉방시스템으로 에너지 저장과 제습을 위해 2개의 실리카겔 bed를 갖으며 하나가 흡착과정에 있을 때 다른 하나는 재생과정(탈착과정)에 있게 된다. 환기모드에서는 [그림 46-A]에서 처럼 외기가 연속적으로 직접 실내로 들어가고, 재순환 모드에서는 [그림 46-B]에서 처럼 실내로부터 배출되는 공기가 냉방에 적합하도록 재 조절된다. 이와 같이 2개의 덕트중 하나는 공기조화(Air Conditioning)용이고, 다른 하나는 재생을 위한 것으로 회전식 제습제 wheel(재생/제습)과 회전식 전열 열교환기 wheel(Sensible heat exchanger wheel)의 한 쪽 부분이 각각 연결되어 있다. 각각의 덕트에는 1개씩의 송풍기가 부착되어 있다. 제습제 wheel은 Molecular Sieve가 제습제로 사용되고 알루미늄으로 된 벌집형의 구조로 만들어졌으며 현재 상용화되어 있다.

재생시에는 태양열 또는 보조히터로부터 가열된 유체가 열교환기를 통해 덕트내를 흐르는 공기의 온도를 승온시켜 흡착제에 흡착된 수분을 탈착시킨다.

[그림 46-A]에서 처럼 고온 다습한 외기(점1)는 회전되고 있는 제습제 wheel을 통하여 지나가면서 제습되고 승온된다(점2). 이 공기는 다시 전열열교환기를 거치면서 승온된다(점3).



A : 환기모드(Ventilation mode)



B : 순환모드(Recirculation mode)

그림 4.6 Solar-MEC 시스템 및 공기선도

환기모드일 때 각 경로에서의 기능은 다음과 같다.

- 1-2 : 제습제 bed에 의해 제습
- 2-3 : 전열열교환기 wheel에 의해 냉각 (배출 공기- fresh air)

- 3-4 : 증발 냉각기에 의해 냉각
- 5-6 : 증발 냉각기에 의해 냉각
- 6-7 : 전열열교환기 wheel의 냉각 (fresh air를 냉각키 위함)
- 7-8 : 태양열 또는 보조열원에 의해 가열

(제습제 bed를 재생시키기 위해)

#### 8-9 : 제습제 bed 재생

순환모드에서는 [그림 4.6-B]와 같이 실내 공기가 연속적으로 재 순환되면서 조절되고 외기는 제습제 bed의 재생용으로 사용하는 것 외에는 환기 모드에서와 동일하다.

이 외에도 제습제 bed의 흡착과 탈착능력을 향상시키기 위하여 bed와 bed 사이에 중간 냉각과 가열 장치가 있는 시스템, 태양열 제습냉방시스템과 압축식 냉방시스템의 장점을 이용하기 위해 태양열/전기 복합 제습냉방 시스템 등도 개발된 바 있다. 이들 모든 회전식 제습 wheel을 가진 제습냉방시스템의 냉방용량 제어는 제습제 wheel의 회전속도(재생 속도) 조절에 의해 제어된다.

### 4.3 시스템 성능

제습제가 습기를 흡수 또는 탈수할 때 공급 또는 발생되는 에너지량은 시스템 성능에 좌우되기 때문에 대단히 중요하다. 여기서 에너지는 제습제 자체의 현열과 응축잠열 및 흡수열이 포함된다. 이들 모두가 낮은 값을 갖는 것일수록 좋으며, 특히 낮은 흡수열을 갖는 것이 좋다. 태양열 제습냉방 시스템의 설계 및 제어는 가능한한 태양열 의존도를 높이고 전기에너지 및 보조열원의 사용량을 줄이도록 하는 것에 초점이 맞춰져야 한다. 그러므로 시스템 성능은 태양열에너지, 전기에너지, 보조열원과 이들 전체를 고려한 총 에너지 측면에서 평가되어야 하며 일반적으로 다음과 같이 정의되는 4가지 성능계수가 사용된다.

$$COP_{thermal} = \text{냉방공급열량/공급된 열량}$$

$$COP_{solar} = \text{냉방공급열량/집열면 일사량}$$

$$COP_{electric} = \text{냉방공급열량/전기에너지 사용량}$$

$$COP_{tot} = \text{냉방공급열량}/(\text{총 공급된 열량} + \text{전기에너지})$$

제습냉방 시스템의 성능 및 냉방용량은 제습제 Wheel의 두께, 회전속도, 유량, 재생온도 등과 같은 설계변수에 영향을 받으며, 또한 다음과 같은 작동 및 주위 여건에 의해서도 영향을 받는다.

- 회전식 제습bed가 있는 시스템은 외기의 습도가 낮고 실내의 온도차가 적을수록 COP는 높다.
- 재생온도에 의해서 영향을 받는다. 재생온도가 높으면 높을수록 COP는 감소되나 냉방용량은 증가된다. 미국의 한 연구기관인 IGT에서 Molecular sieve를 이용한 시스템에서 재생온도를 80°C에서 110°C까지 변화시켜 시험한 결과 COP 변화는 12% 감소하였으나 용량은 약 60% 증가하였다.
- 전열열교환기의 유효열전달계수에 의해서 좌우된다.

이 외에도 건물의 현열 및 잠열부하와 장기적 성능(Seasonal performance)측면에서 볼 때 축열조의 용량 등도 중요한 성능인자이다.

[그림 4.9]와 [그림 4.10]은 IGT에 의해 제시된 모델의 성능을 일반 증기압축식 냉동기와 비교를 위해서 환기모드와 재순환 모드로 작동하였을 때 앞에서 정의한  $COP_{thermal}$ 을  $COP_{electric}$ 에 따른 변화를 도시하였다. 참고로 도시된 증기압축식 냉동기의 COP는 2.5이고, Level I, II, III는 각각 초기 설계시스템, 시스템 I의 보완된 시스템, 최종설계 제품을 의미한다. 전술한 바와 같이 재생온도가 낮을수록

COP<sub>thermal</sub>은 높으나 냉방용량은 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 높은 재생온도에서는 용량이 증가하고, 유량도 적으며 또한 보조동력이 적게 소비되는 것으로 나타났다. 그러나 [그림 4.10]의 재순환모드에서는 COP<sub>thermal</sub>가 환기모드의 경우보다 약 40-70% 정도 감소하였으나 냉방용량은 같았다. 그러나 태양열 시스템의 도입으로 COP<sub>thermal</sub>은 약 35% 정도 감소에 그쳤다.

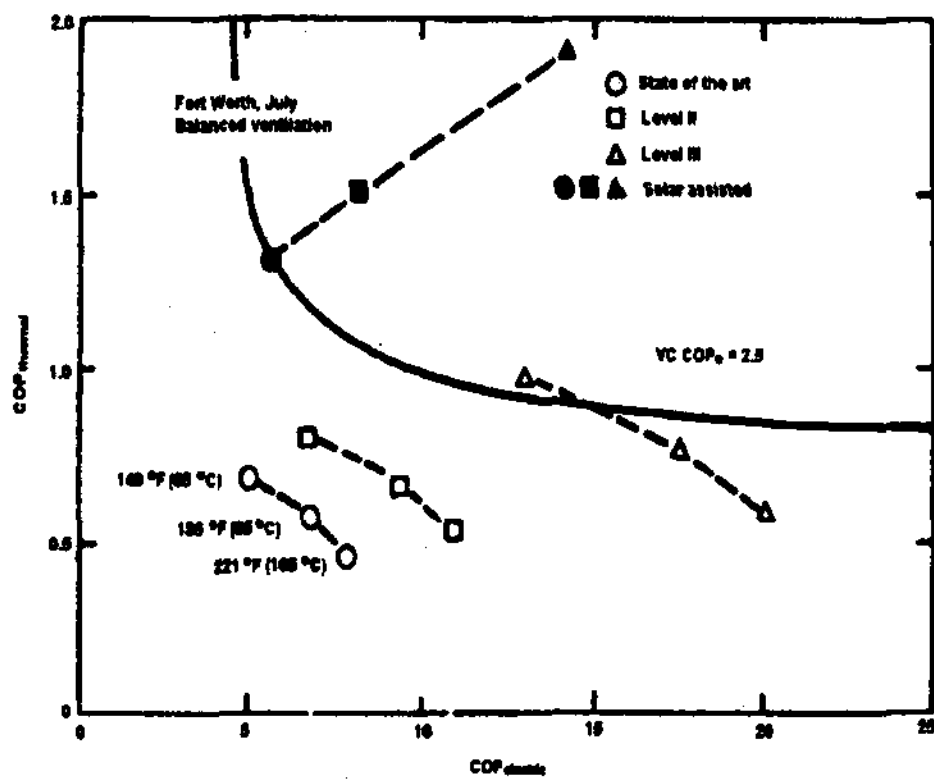
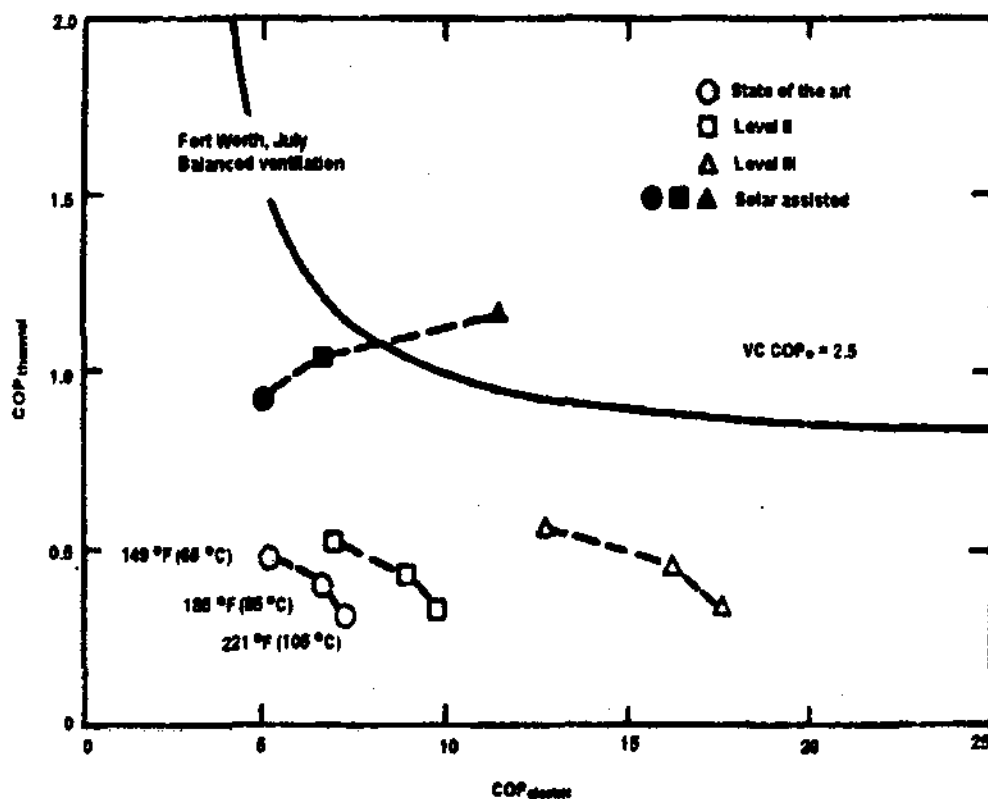


그림 4.9 환기모드에서의 성능



4.10 재순환모드에서의 성능

## 5. 태양열 흡착(Adsorption)식 냉동시스템

### 5.1 원리

흡착식 냉동장치는 [그림 4.3]에 있는바와 같이 고체 흡착제가 온도에 따라 기체분자(냉매증기)의 평형흡착량이 변하는 현상을 이용한 것으로서 온도가 높으면 높을수록 평형흡착량이 적어져서 흡착제에 흡착되어있던 일부의 냉매가 탈착(재생)되고, 다시 흡착제의 온도가 낮아지게 되면 다시 냉매증기를 흡착하게 된다.

[그림 5.1]에서 흡착탑에 있는 흡착제를 가열하면 흡착되어 있던 냉매가 탈착되어 증기압이 증가하여 응축기에서 응축하게 된다(재생과정 또는 탈착과정이라 함). 반대로 흡착탑에 있는 흡착제를 냉각시키면 흡착제의 평형흡착량이 증가하여 냉매증기를 흡착하여 증기압이 떨어져서 증발기에서 증발이 일어난다(흡착과정이라 함). 이 때 냉열이 발생한다. 이와 같이 흡착식 냉동기는 흡착제의 가열 또는 냉각에 의해서 구동된다. 이 시스템은 냉매증기가 흡착될 때 흡착열이 발생하므로 이 열을 제거시켜 주어야 하며, 탈착할 때는 탈착에 필요한 열을 공급해주어야 한다. 태양열 흡착식 냉동시스템은 재생시 흡착제를 재생온도까지 가열하는데 필요한 열을 태양열로 이용하는 것이다.

일반적으로 많이 사용되고 있는 다음과 같은 “흡착제/냉매” 쌍은 다음과 같다.

- 활성탄/메탄올(Activated carbon/Methanol)
- 제올라이트/물(Zeolite/Water)
- 활성탄/암모니아(Activated carbon/Ammonia)

- 제오라이트/메탄올(Zeolite/Methanol)
- 제오라이트/암모니아(Zeolite/Ammonia)

태양열 흡착식 냉동장치에 적합한 흡착제/냉매 쌍은 재생온도가 낮은 "활성탄(또는 실리카겔)/메탄올"이 비교적 좋은 것으로 보고되고 있다. 활성탄은 재생온도가 최대 140°C 미만이나 보통 100°C 전후에서 재생된다. 이 흡착제 쌍을 이용해서 만든 시스템에서 집열기 효율을 고려하지 않은 상태에서 COP는 약 0.4 정도가 된다.

상승되어 흡착제에 흡착된 냉매는 탈착되고 응축기에서는 응축이 일어나게 된다. 이때 집열기와 증발기는 밸브에 의해서 닫혀있고 응축된 냉매는 냉매 저장통에 저장된 후 탈착이 끝나면 증발기로 들어간다. 이 탈착(재생)기간 동안 집열기(흡착탑)에 공급된 태양열은 탈착에 필요한 증발잠열과 흡착제의 온도를 적정 온도까지 높이기 위한 현열로 이용된다.

야간에는 반대로 외기에 의해 흡착탑의 온도를 일정온도까지 강하시키면 흡착제는 다

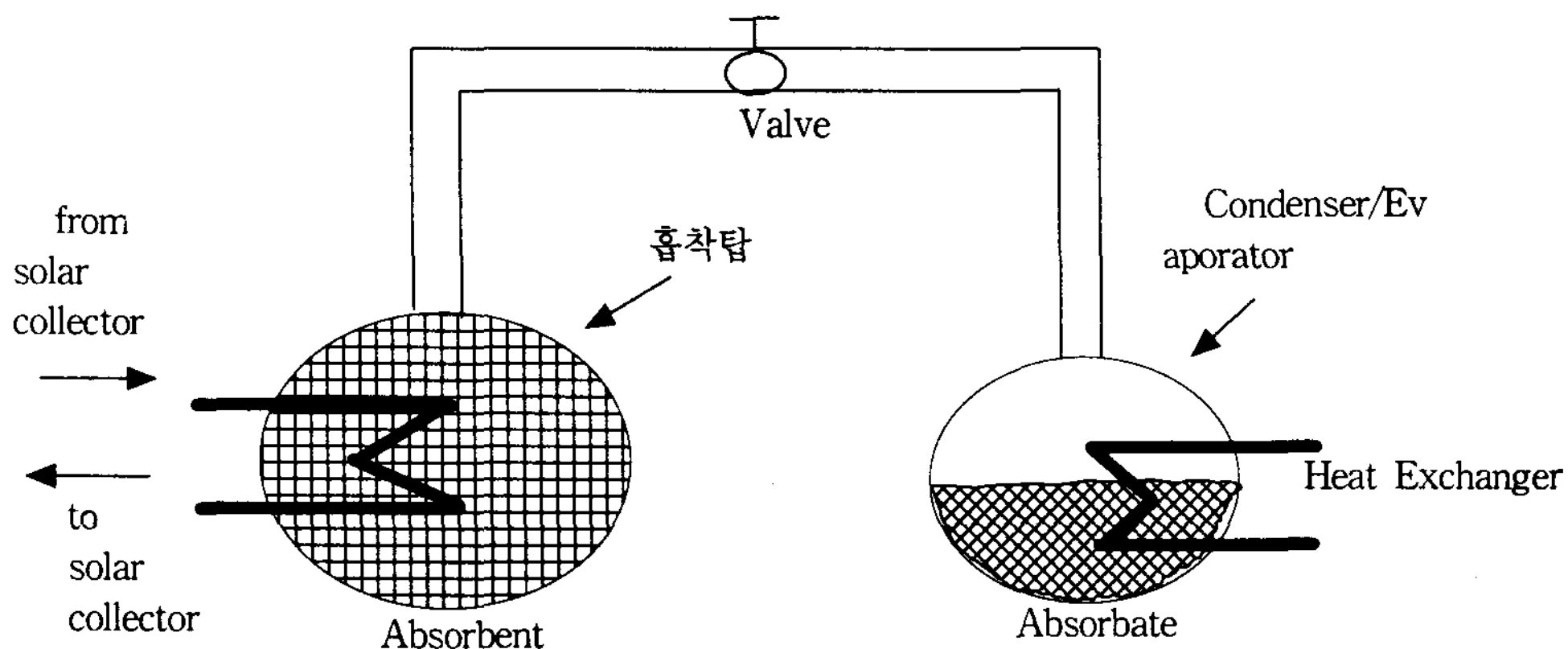


그림 5.1 태양열 흡착식 냉동장치의 개념도

## 5.2 시스템 구성

### 5.2.1 집열기를 흡착탑으로 이용하는 시스템

태양열 구동 흡착식 제빙장치 일례가 [그림 5.2]에 명시되었다. 이 장치는 집열기 내부에 흡착제가 충전되어 집열기가 태양열 집열 및 반응기(흡착 및 재생기) 기능을 갖도록 만들어 졌다.

흡착제가 충전된 집열기가 태양열에 의해 온도가 상승되게 되면 흡착제의 온도도 역시

시 냉매증기를 흡착하기 시작하고 증발기에서는 증발이 일어나게 된다. 이때 증발기에서 생산되는 냉열을 냉방 또는 냉동용으로 이용하게 된다. 이 시스템은 프랑스에서 상품화된 제품으로서 집열면적이 1m<sup>2</sup> 이고 얼음 생산량은 5kg/day 이다. 이 장치의 특징은 응축기가 집열기의 뒷면에 부착되어 있으며 야간의 흡착과정시 외기의 자연순환에 의한 집열부의 방열성능을 크게 향상시켰다고 한다.



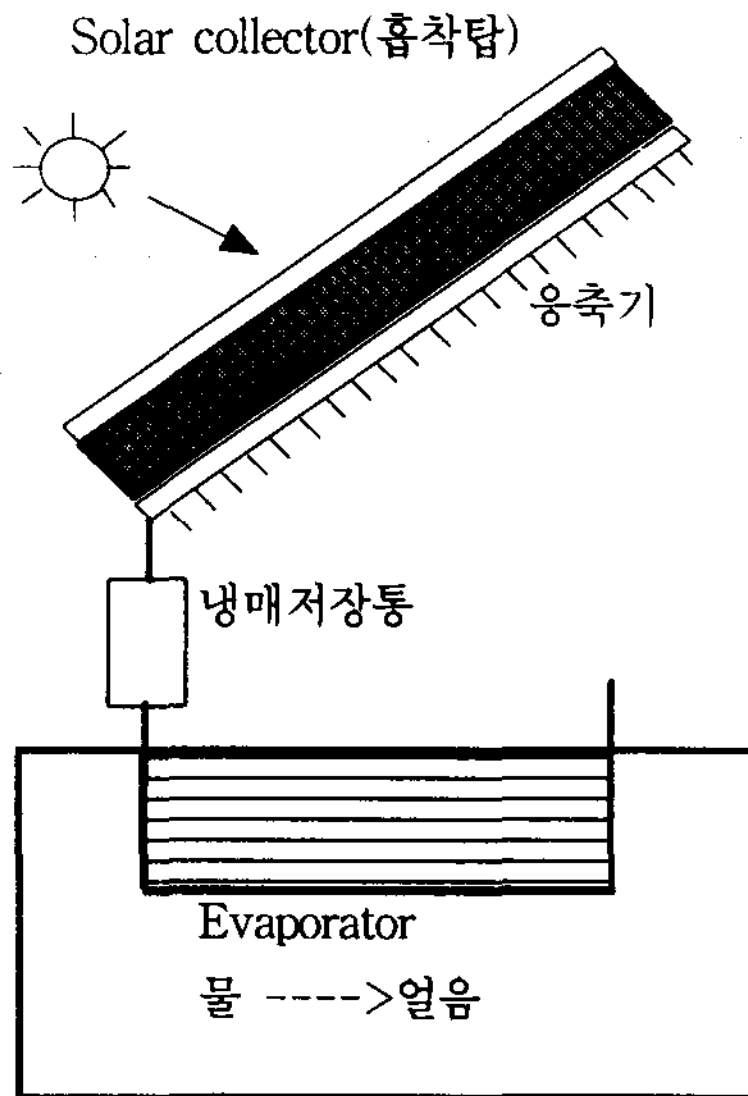


그림 5.2 흡착식 제빙장치

일반적으로 "활성탄/메탄올"쌍은 100mbar 정도의 압력 하에서 탈착은 60~70°C 이상 140°C 이하에서 탈착되는데 최적온도는 110°C 부근으로 알려지고 있다. 집열면적에 따른 흡착제의 적정 양은 일사량을 비롯한 외기조건, "흡착제/냉매" 쌍의 종류, 집열기의 성능 등에 따라 좌우되는데, 대략 태양열이 22,000 kJ/m<sup>2</sup> 정도인 여름철에 활성탄의 경우 집열면적당 20~26 kg 정도이고, 활성탄 입자의 평균 직경은 3mm가 적정한 것으로 보고되고 있다.

### 5.2.2 별도의 태양열 축열조 및 흡착탑을 갖는 시스템

이 시스템은 비 하절기에는 태양열 난방 및 온수시스템 겸용으로 사용하기에 적당한 시스템으로 태양열 집열 및 축열 시스템과 흡

착식 냉동기로 시스템이 구성된다. 태양열 집열기를 흡착탑으로 사용하는 시스템에서는 주간에 흡착제를 재생(탈착)하고 야간에 흡착에 의해 냉열을 생산하는 1일 1Cycle 만이 가능하다. 그러나 별도의 태양열 저장조를 갖는 태양열 흡착식 냉동시스템에서는 사이클 주기를 짧게하여 하루에 수~수십 사이클이 작동될 수 있으며, 사이클 주기가 짧아질수록 시스템 용량이 커지게 된다. 그 시스템의 일례를 [그림 5.3]에 명시하였다. 흡착식 냉동사이클은 흡착과정에만 냉열이 생산되는 간헐사이클이기 때문에 2개 이상의 흡착탑을 갖는 시스템으로 구성하여 작동과정이 서로 어긋나게 해서 연속적으로 냉열이 생산되도록 한다. 이러한 2개이상의 흡착탑을 갖는 시스템의 가장 큰 장점은 재생과정시 흡착탑으로부터 버려지는 고온의 배열을 다른 흡착탑을 예열하는데 사용될 수 있으므로 에너지를 크게 절약할 수 있고 또한 COP도 높아지게 된다. 집열기로부터 집열된 태양열은 고온축열조에 저장되고, 이 열은 흡착탑의 흡착제를 재생하는데 사용된다. 하나의 흡착탑이 재생과정에 있을 때 다른 흡착탑은 흡착과정에 있게 된다. 재생과정에 있는 흡착탑은 응축기와 연결되며 탈착된 냉매증기에 의해 압력이 높아져서 응축기에서 응축되고, 흡착과정에 있는 흡착탑은 증발기와 연결되며 냉매증기를 연속적으로 흡착하여 증발기의 포화압력 이하로 떨어져서 증발기에서 증발이 일어나게 된다. 이 과정이 끝나면 각각의 흡착탑은 반대상황으로 바뀌게 된다.

이 시스템의 성능은 배열회수 및 흡착제 및 구조물을 포함한 흡착탑의 열용량에 따라서 유동적이며, 이것이 적을수록 성능은 좋아진다. 태양열을 고려하지 않은 상태에서 냉방



COP는 약 0.5-0.6 정도가 된다.

한편 냉방용량은 전술한 바와 같이 사이클 주기에 반비례한다. 즉, 주기가 짧아질수록 용량은 커지게 된다. 주기를 짧게 하기 위해서는 흡착탑에서의 열 및 물질 전달 성능이 좋아야 한다. 그러나 흡착제의 열 및 물질전달 계수가 상당히 작고 작동압력이 낮기 때문에 흡착제 층에서의 열전달 속도가 느리며, 따라서 열전달 성능 향상이 현재까지는 연구의 초점이 되어왔다. 그래서 열용량이 작으면서 조밀한 편이 부착된 열교환기를 흡착제 층에 삽입하여 열교환 매체와 흡착제간의 열전달을 향상시켰다. 물질전달은 주기를 고려해서 적절한 흡착제 층의 두께 및 흡착제의 평균직경으로 조정될 수 있다.

## 6. 기타

### 6.1 Rankine cycle을 이용한 태양열 냉방 시스템

이 시스템은 열에너지를 기계적 에너지로, 기계적 에너지를 다시 열에너지로 변환하는 2개의 에너지 변환 단계가 있다. 각 단계마다 이론적으로 최대 10-20%의 효율손실이 있다. COP는 집열기의 효율에 따라 크게 변하며 대략 0.3-0.4 정도가 된다. 이 시스템은 냉방부하가 없을 때 히트펌프 형태로 작동되거나 전기를 생산할 수 있다는 장점은 있으나, 일사량 변화에 따른 시스템 제어가 문제가 된다. 이미 여러가지 형태 및 용량의 시스템이 시범 설치된 바 있으나 성능향상을 위해 아직도 많은 연구개발이 필요하다.

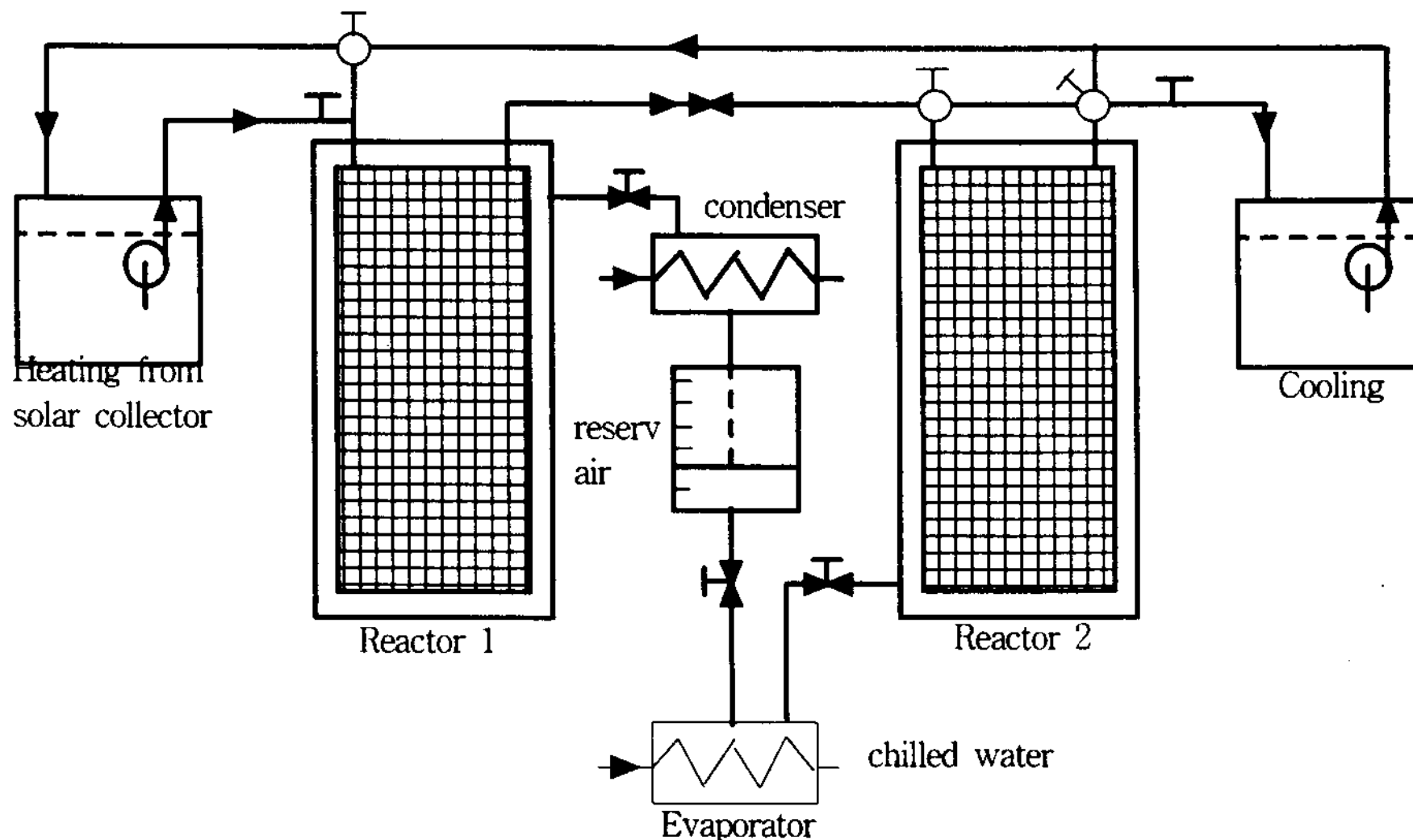


그림 5.3 태양열 축열식 흡착식 냉동시스템

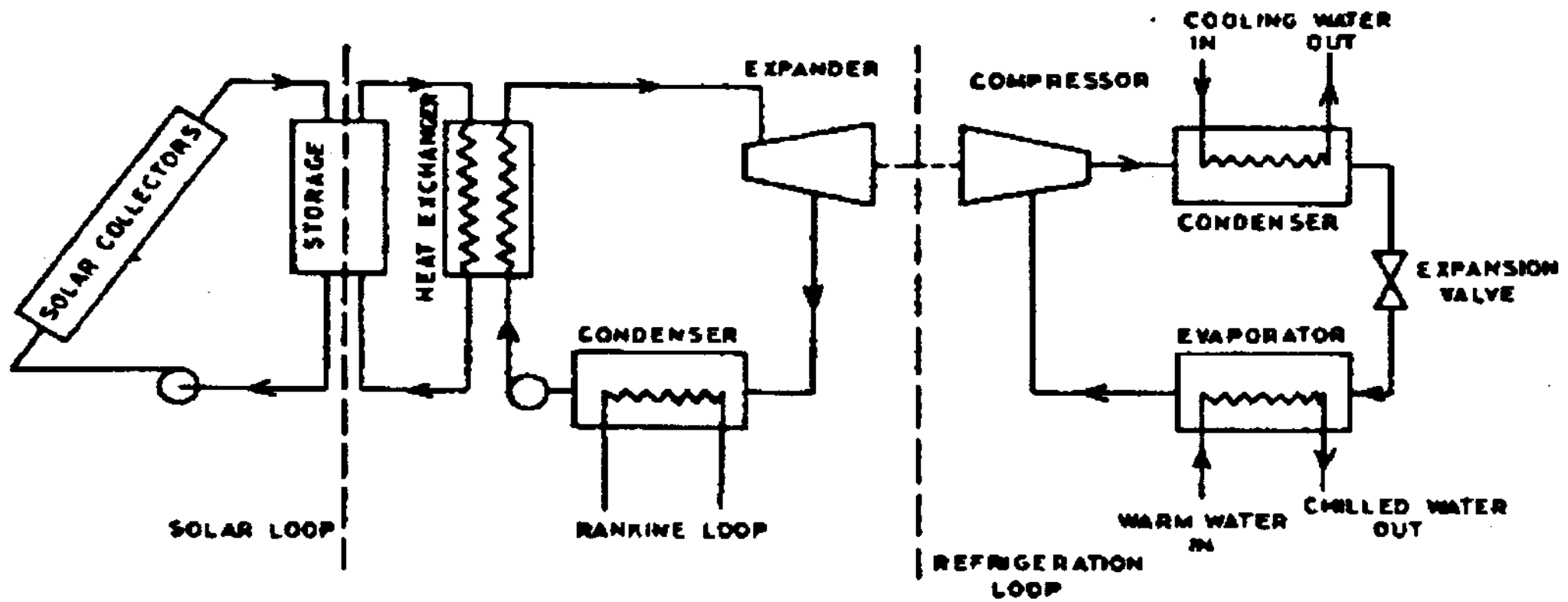


그림 6.1 Rankine cycle을 이용한 태양열 냉방시스템

## 6.2 태양전지(Solar cell)를 이용한 증기압 축식 냉방시스템

태양전지로부터 생산된 전기를 이용하는 증기압축식 냉방시스템은 태양전지의 효율이 낮기 때문에 냉방 COP는 0.25-0.35 정도에 불과하다. 이 시스템도 역시 냉방부하가 없을 때는 히트펌프형태로 작동될 수 있으며 생산되는 전기를 다른 용도로 사용할 수가 있다. 아직까지는 태양전지의 가격이 비싸고 축전시설이 필요하기 때문에 시스템 설치비가 많이 든다.

## 7. 맺음말

태양열시스템이 냉방 또는 난방(급탕 포함) 중 어느 한 용도로 사용될 경우 연중 사용기간이 짧기 때문에 비효율적이며, 비경제적이다. 따라서 태양열을 효과적으로 이용하기 위해서는 냉방 시스템의 개발이 절대적으로

로 필요하다. 본 고에서 지금까지 개발된 여러 가지 종류의 태양열 냉방시스템에 대해서 언급한 바와 같이 대부분의 태양열 냉방시스템은 저온의 열에너지로 작동시키는데 연구의 초점이 맞춰졌음을 알 수 있다. 아직은 효율이 낮고 작동온도가 높아서 상용화를 위해서는 좀더 연구를 필요로 하고 있으나, 일부 시스템은 100℃ 이하의 저온에서 작동된다는 것을 알 수 있으며, 따라서 태양열 시스템은 냉·난방 및 급탕용으로 년중 이용이 가능하여 시스템의 이용을 및 경제성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2차 유류파동 이후 90년대 중반까지 저유가로 인하여 태양열 냉·난방시스템의 개발 및 보급은 비교적 미진한 상태였다. 그러나 최근 전세계적으로 CO<sub>2</sub> 저감과 환경오염 규제가 크게 강화되면서 태양에너지 이용에 대한 관심이 다시 고조되고 있다. 게다가 문화생활 향상으로 사무실은 물론 주택에까지도 냉방의 필요성이 점차 늘어나고 있는 실정이며, 이러한 시점에 태양열 냉방에 대한 관심은 대단히 고무적이라 할 수 있다.

끝으로 태양열 냉방시스템은 아직은 기존의 냉방시스템에 비하여 경쟁력이 떨어지고는 있으나, 에너지 절약 및 대체측면과 청정에너지라는 측면에서 오는 적지 않은 혜택을 감안한다면 적극적인 연구개발 및 지원정책이 수반되어야 기술 개발 및 축적이 가능하며 또한 보급여건이 조성될 수 있을 것으로 본다.

### 참고문헌

1. H.P, Garg, "Advances in solar Energy Technology", D. REIDEL PUBLISHING CO., 1987
2. J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar Energy Thermal Process", Wiley, New York, 1974
3. "Active Solar System", Edited by George Lof, The MIT Press Cambridge London, 1993
4. M. Pons and J.J Guilleminot, "Design of an Experimental Solar-Powered Ice Maker Using Activated Carbon and Methanol Adsorption Pair", Trans. of the ASME, vol . 109, Nov., 1987
5. M. Pons and Ph. Grenier, "Experimental Data on a Solar-Powered, Solid-Adsorption Ice Maker", Trans. of the ASME, vol, 109, Nov., 1987.
6. R. E. Critoph and M. Inst. E, "Testing of an Activated Carbon-R114 Adsorption Cycle Solar Refrigerator", 1988
7. Bhavsar, V, C, and Balakrishnan, A. R., "Pebble Bed-Oil Thermal Energy Storage for Solar Thermo-Electric Power Systems", International J, of Energy Research, Vol. 14, pp233-240, 1990.
8. "Keith E. Herold R. S.A.Klein", Absorption chillers and Heat Pump", CRC Press, 1995.

# Solar Cooling Technology

**Nam Choon Baek**

*Korea Institute of Energy Research*

## **Abstract**

Four main solar cooling technologies have been developed over the past twenty years are considered in this paper. These technologies include absorption, vapor compression, desiccant, adsorption, etc. All of these solar cooling technologies considered here are solar thermal ones. The details of the thermodynamic cycle of these solar cooling technologies are given. The general concept of these solar cooling and the relative advantages among them are also presented. At last, the status and outlook for each approach are summarized.