

태양열에너지 저장 Storage of Solar Thermal Energy

송 현 갑*
Hyun Kap Song

I. 서 론

주기적이며 간헐적인 열원으로 지속적인 열이용 부하를 공급하는 경우, 공급열원과 부하간에는 시간적 및 양적 차이가 생긴다. 이와 같은 불연속적인 현상을 유연하게 완충해 주기 위해서는 열원과 이용부하간에 열저장 장치가 필요하다(Fig. 1 참조).

태양에너지도 주기적이며 간헐적인 열원이기 때문에 태양에너지를 이용하기 위해서는 열저장 장치가 필요하게 된다. 그러므로 경제성 있는 고농축, 장기 열저장 장치는 태양에너지 이용 위하여 개발되어야 할 중요한 과제이다.

열에너지저장 특히 태양에너지 저장에 관한 문제가 크게 제기된 것은 1973년 제1차 석유에너지 파동 이후이며, 이와 같은 에너지 파동은 에너지절약의 일환으로 자연에너지 및 폐열 이용의 필요성을 가져왔으며, 자연에너지와 폐열을 이용하기 위하여 현열축열은 물론 잠열축열, 화학 반응에 의한 축열과 태양연못 등 다양한 축열 방법은 중요한 연구 개발과제로 관심이 집중되기 시작하였다.

이와 같이 연구의 초점이 되고 있는 축열장치

의 열공학적 측면과 경제적 효과면에서의 의미는;

- 주기적이며 간헐적인 열원의 양적 및 질적 변동을 흡수 저장하여, 이용열부하를 안정된 상태에서 지속적으로 공급하고,
- 이용부하 측면에서 일시적으로 일어나는 과수요를 완화시키며,
- 열에너지 공급과 이용장치간에 생기는 시간차를 조절함은 물론이거니와,
- 폐열화된 열에너지를 흡수하여 이용 system에 유용에너지로 공급하면서 에너지 절약효과를 제공한다.

이상과 같은 축열 기능을 얻기 위한 성과는 태양에너지 저장 이용에 그치지 않고, 공업용, 가정용과 농어업용을 포함하는 열이용장치의 효율화와 자연에너지 이용 system 개발에 크게 기여하게 되므로 보다 많은 연구개발이 요구된다.

본고에서는 축열연구를 개관하고 여러 가지 축열 방법의 특성과 문제점을 제시함과 동시에 축열방법별 대표적인 실례를 통하여 축열 장치의 연구개발 현황을 살펴보면서 앞으로의 연구개발 방향을 전망하려 한다.

* 충북대학교 농기계과

II. 태양열 집열과 이용부하간의 관계

1. 태양열 저장과 보조열원의 필요성

태양열 집열은 주기적이며 간헐적인 반면에 이 용부하는 시간적 변화에 따라 기복이 있으나 계 속적이다.

어느 기간 동안에는 집열량이 이용부하를 초과하고, 그 다음에는 집열량이 전혀 없게 되어 이용부하에 대응하지 못하게 되므로 초과 집열량을 저장할 필요가 있게 된다. 그러므로 에너지 저장 system은 집열과 이용 system 중간에 존재하면서 태양열 이용을 위한 전 system의 규모와 작동을 결정해 주는 중요한 역할을 한다. 그런데 장기간동안 태양열 이용 system이 태양 에너지에만 의존한다는 것은 현재 기술 수준에 서는 경제성이 적기 때문에 어떤 형태의 보조열원이 필요하게 된다(Fig. 1(a) 참조).

어느 기간 동안 필요로 하는 전체 집열량과 보조열량에 관한 시간적 변화 추이는 Fig. 1 (b)와 같게 됨을 쉽게 알 수 있다.

2. 태양열 이용장치의 구성

시간에 따라 양적 및 질적 변화없이 지속적으 로 열에너지를 필요로 하는 이용부하에 주기적 이며 간헐적인 열원을 원활하게 이용하기 위하여 태양열 이용 system은 Fig. 2 와 같이 5개의 성분으로 구성되며, 특히 열저장 장치는 주기적 인 열원을 원활하게 완충시켜 주는 역할을 하므로서, 태양열 이용율을 증가시켜 주고 있다.

III. 열저장법의 분류

열에너지 저장은 크게 나누어 높은 온도의 열을 저장하는 온열축열과 낮은 온도(영하)의 열을 저장하는 냉열축열로 분류할 수 있다. 이를 실현하기 위한 열저장 방법에 따라 분류하면, 오래전부터 사용해 온 액체와 고체를 이용한 현



G_T = Incident solar Energy

Q_U = Collector useful gain

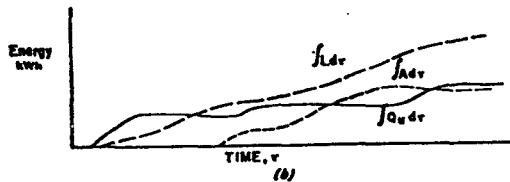
L = Energy load

■ = Excess energy to be added to storage

■ = Energy withdrawn from storage to meet loads

■ = Energy supplied during Collector operation

Fig. 1(a) Incident solar Energy, G_T , Collector useful gain, Q_U , and loads, L , as function of time for a 3-day period.



— : integrated useful gain from the collector ($\int Q_{ud}\tau$)

- - - : load ($\int L_d\tau$)

· · · : auxiliary Energy ($\int A_d\tau$)

Fig. 1(b) Integrated values of useful gain from the collector, load and auxiliary for the same 3-day period.

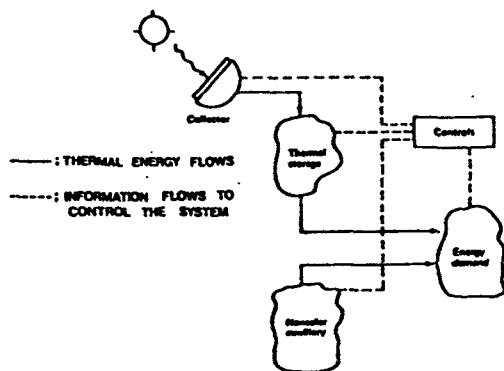


Fig. 2 The general Solar- thermal Conversion system.

열축열법, 고밀도 축열이 가능한 상변화로 이루어지는 잠열축열법, 가역화학 반응에 의한 반응열 축열법, 농축과 회석에 의하여 생기는 농도차 축열법과 소금농도 차에 의하여 가능한 태양열 못 축열법으로 분류할 수 있다.

현재 여러 선진국 학자들에 의하여 집중연구되고 있는 축열법은 잠열축열법과 화학반응 축열법 그리고 태양연못에 의한 축열법을 들 수 있다. 이와 같은 열저장법의 분류를 부릭다이야 그램으로 정리하면 Fig. 3과 같다.

IV. 태양에너지 저장 기술의 현황 고찰

태양에너지는 주기적이며 간헐적이기 때문에 태양열을 이용하기 위해서는 축열이 필요 불가결하다. 보다 경제적으로 대량, 양질의 열을 저장하기 위해서는 이용 목적에 따라 축열방법을 선택하고, 축열장치의 합리적 개발 이용을 위한 모델을 세우고 이를 근거로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 축열방법을 최적화하는 등 다양한 연구가 이루어지고 있다.

손을 하여 실험 결과와 비교하므로서, 보다 값 싸고 많은 양의 열을 저장할 수 있는 축열 기술을 개발할 수 있게 된다.

여러 가지 축열기술 개발의 현황을 살펴보면 다음과 같다.

1. 현역 축열

현열축열재는 액체와 고체로 구별되며, 이들 축열재를 매체로 온도차, ΔT 와 열용량, m, cp , 를 이용하여 축열하는 방법으로 이를 관계를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$Q = \text{축열량}$$

$m =$ 축열재의 질량

m.cp = 축열용량

CP = 축열재의 비열

T=축열 온도

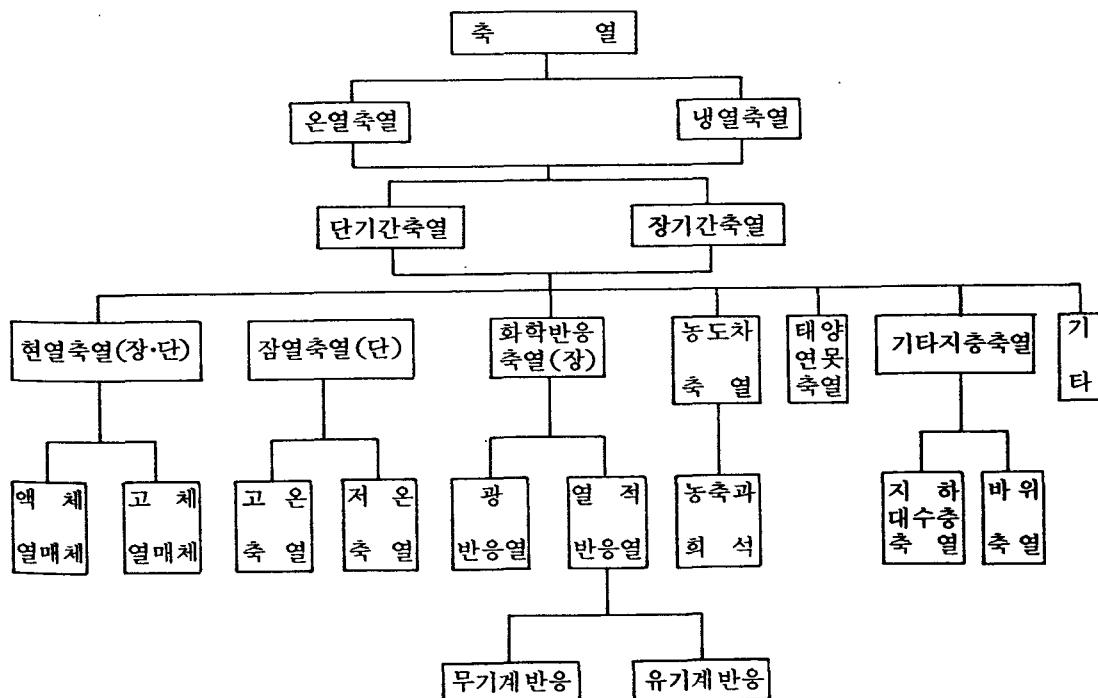


Fig.3 Block diagram for the classification of thermal storage method.

Table 1. Physical Properties of liquid Storage media

Material	specific heat Cp. (20~25 °C) (KJ/kg.K)	Density (20~25 °C) (kg/m³)	Boiling point (°C)	Heat Capacity $m \times CP$ (KJ/m³·K)
Ethanol	2.4	790	78	1,896
Propanol	2.5	800	97	2,000
Butanol	2.4	809	118	1,942
Isobutanol	3.0	808	100	2,424
Isopentanol	2.2	831	148	1,828.2
Octane	2.4	704	126	1,689.6
Water	4.2	1,000	100	4,200

1) 액체축열재

물은 비교적 저온에 사용되고 있는 가장 좋은 액체 혼열축열재로 지금까지 가장 많이 사용되어 왔다. 물은 축열재로 이용하는 기술적인 기본적 연구는 확립되었으나, 물탱크의 경제적 제작 방법은 아직도 중요 연구과제로 남아 있다.

Hudson과 Jones는 FRP 재료를 이용한 Sandwich 구조의 축열조에 관한 보고에서 물의 온도를 95°C로 축열하는 경우 20~30년간 사용할 수 있다고 하였다. 비교적 고온축열을 위한 액체 축열재로는 압력수, 비동점이 높은 기름류, 액체 금속 등에 관한 연구가 진행되고 있으나 상당히 고가인 것이 문제이다. 그리고 초산염계의 $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3/\text{NaNO}_2$ 은 비교적 값이 싸고 물성이 안정된 혼축열재로서 유망시 되고 있으나, 용접 이하에서의 고화방지에 유의해야 하는 결점이 있다.

물을 비롯한 액체 혼열축열재의 물리적 성질은 Table 1과 같으며, 이 표에서 보는 바와 같이 물의 열용량은 $4.200(\text{KJ}/\text{m}^3\cdot\text{K})$ 로 다른 축열재에 비하여 가장 큰 값을 갖는다.

이는 100°C 이하의 저온 축열의 경우 물은 가장 큰 축열용량을 가지고 있음을 입증해 주고 있는 것이다. 그러나 물은 축열조를 부식시키는 결점과 95°C 이상에서 높은 증기압을 갖는 등

불리한 점이 있다.

축열재로서의 물의 장·단점을 비교 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Advantages and disadvantages of water as a thermal storage material.

Advantages	Disadvantages
- Abundant	- High vapor pressure
- Low cost	- Difficult stratify
- Not toxic	- Low surface tension
- Not Combustible	leak easily
- Excellent transport	- Corrosive medium
- Properties	- Freezing and destructive expansion
- High specific heat	
- High density	

2) 고체축열재

고체 축열재로는 자갈(小石), 암석, 토양, 내화벽돌, 콘크리트부력, 금속 등이 이용되고 있으며, 균일한 크기의 덩어리로 형성된 고체 축열매체와 열교환기 역할을 동시에 할 수 있기 때문에 분리형 열교환기의 제작비용을 절약할 수 있어서 경제적이다.

고체 축열재는 액체 축열재보다 최대 허용 열저장은도 범위가 크기 때문에 저온 뿐만 아니라

라 고온 축열이 가능하다. 그러므로 평판형 태양열 집열기에 의하여 집열된 저온열을 저장할 수 있는 동시에 집광식 집열기에 의하여 집열된 고온열을 저장할 수 있다.

값싸고 열용량이 큰 고체 축열재의 물리적 특성을 정리하면 Table 3과 같으며 Cast iron 의 열용량이 가장 커 있으나 물의 열용량 4,200(KJ/m³K) 보다는 훨씬 적었다.

Table 3. Density and specific heat of solid phase Storage Materials(500~100°C)

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (KJ/K. kg)	Heat capacity (KJ/m ³ . K)
Aluminum	2,700	0.88	2,376
Aluminum oxide	3,900	0.84	3,276
Brick	1,698	0.84	1,426
Calcium choride	2,510	0.67	1,682
Earth-dry	1,698	0.84	1,426
Sodium Carbonate	2,510	1.09	2,736
Sodium sulfate	2,700	0.92	2,484
Cast iron	7,754	0.46	3,567
River rocks	2,245~2,566	0.71~0.92	1,594~2,361

2. 잠열 축열

잠열 축열의 경우 열에너지의 가역적인 상변화를 갖는 잠열재에 일정한 온도로 저장되며, 상변화 전후 상태에서는 혼열축열을 겪는다.

고체-액체 상변화가 가장 일반적으로 이용되고 있으나, 고체-고체 전이도 연구대상이 되고 있다.

액체-기체 혹은 고체-기체 상변화도 잠열축
열 방법으로 가능성이 있다. 그러나 기체상태에
서는 체적이 크기 때문에 어려움이 있다.

실제적으로 잠열축열은 현열축열을 동시에 겸하게 된다. 다시 말해서 상변하단 전후는 고체와 액체 부위로 존재하므로 상변화 단에서는 현열보다 훨씬 큰 잠열이 축열되고 고체와 액체 상태 부위에서는 현열축열이 된다. 이와 같은 관계를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$Q_s = Q_{La} + Q_{so} + Q_{Li}$$

$$= m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_i}^{T_m} m C_p s \, dT$$

$$+ \int_{T_m}^{T_2} m C_p l \, dT$$

$$= m [a_m \cdot \Delta h_m + \bar{C}_{p_s}(T_m - T_i) + \bar{C}_{p_l}(T_2 - T_m)] \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

여기서

$m =$ 축열재 질량

am = 전질 량에 대한 상변화된 질 량비

$$\Delta h_m = \text{단위 질량당 잠열량}$$

T_m =융해 온도

\bar{C}_{p_s} = 고체 부위의 평균비열

\bar{C}_{p_1} = 액체 부위의 평균비열

Q_s = 전축열량

$$Q_{La} = \text{잠열축열량}$$

Q_{so} = 고체부위의 현열축열량

Q_{Li} = 액체부위의 현열축열량

1) 잠열축열재의 장점

- 잠열축열재는 열저장 능력이 현열재보다 크기 때문에 축열조의 크기와 축열재의 무게를 감소시킬 수 있음.

- 낮은 온도의 열저장이 가능하고,
 - 일정온도에서 대부분의 열이 저장되기 때문

에 단열재를 절약할 수 있으며, 조절장치를 간단화 할 수 있다.

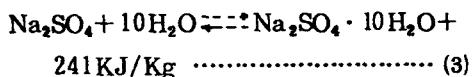
2) 잠열축열재의 단점

- 대부분의 잠열축열재는 상변화 사이클의 지속성이 부족하며,

• 냉각시 과냉현상과 상분리 현상이 일어나기 때문에 물성의 안정성이 부족하고,
 • 열전도율이 적기 때문에 축열조 내부구조가 복잡하게 되어 제작비가 많이 드는 단점이 있다.
 • 상변화 사이클의 지속성, 과냉현상, 상분리 현상을 개선하여야 실용화할 수 있기 때문에 잠재 개발이 어렵다.

3) 잠열축열 용량

저온 잠열축열재 중 6수 염화칼슘($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)과 망초($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)는 값이 싸고 잠열이 크기 때문에 지금까지 많은 연구대상이 되어 왔으며, 그 결과 실용단계에 와 있으나 아직도 개선의 여지가 많다. 수화 및 탈수에 의한 상변화 잠열의 축, 방열 현상을 화학방정식으로 표시하면 식(3)과 같으며, 가열 및 수화에 의한 잠열축열재의 물리적 특성은 Table 4와 같다.



여기서 현열재와 잠열재의 열저장 능력을 비교하기 위하여 많은 학자들의 연구대상이 되고

Table 4. Physical properties of hydration-dehydration materials for low-temperature storage.

Material	Melting point (°C)	Heat of fusion (KJ/Kg)	Specific heat (KJ/Kg·K)	
			Solid	Liquid
$\text{NaCl} \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	18	186	1.76	3.26
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	168	—	—
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32	241	1.76	3.30
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	33	267	—	—
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	47	153	—	—
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	45	95	1.46	2.38
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	90	167	—	—
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	115	165	—	—

있는 6수 염화칼슘($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)의 가열 및 냉각에 의한 상변화 잠열량을 대표적 현열재인 물과 암석의 축열용량과를 축열온도 변화에 따라 비교하면 Fig. 4와 같으며, 축열온도차, ΔT (°C)에 따라 현열재와 잠열재의 열용량을 비교하면 Fig. 5와 같다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 잠열재는 온도에서 축열량이 급격히 증가하였으며, 그 이상의 온도에서 완만한 증가를 보였다. 현열재인 물과 암석은 잠열재에 비하여 축열량이 훨씬 적었으며, $T = 20^\circ\text{C}$ 에서는 축열량이 거의 없는 것으로 나타났다.

온도차(ΔT)에 따라 축열량을 비교한 Fig. 5에서 보면 온도차, $\Delta T = 0$ 에서 현열재인 물과 흙의 축열량이 전혀 없는데 반하여 잠열재인 6수 염화칼슘($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)은 많은 축열용량을 갖는다. $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 에서 6수 염화칼슘의 축열용량이 물보다 8배나 커으며, 흙보다는 27배나

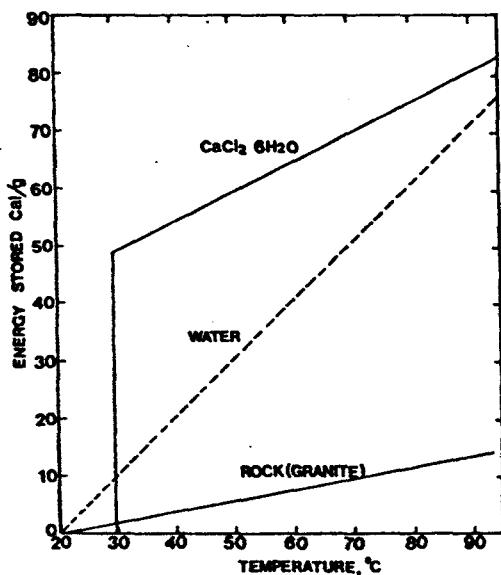


Fig. 4 Comparison of heat storage Capacity of PCM and sensible storage media for 20 °C airheating system (PCM=Phase Change Material).

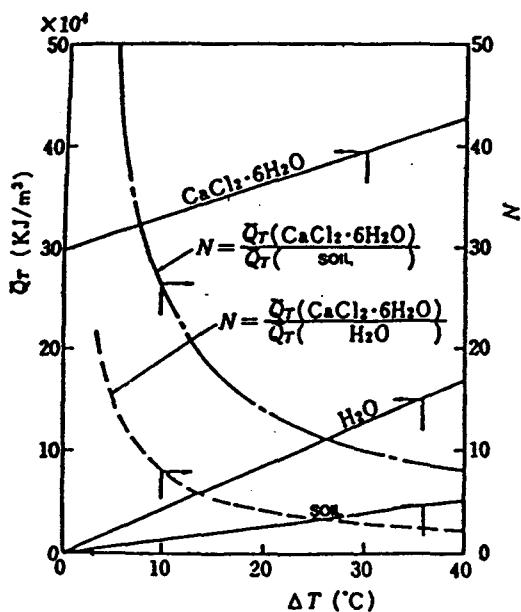


Fig.5 Comparison of heat storage Capacity between the sensible and latent heat storage material.

쳤다. 이는 축열조 규모를 $\frac{1}{8}$ 과 $\frac{1}{27}$ 로 축소할 수 있음을 시사해 주는 것이다.

4) 축열 시스템과 전열문제

물탱크와 자갈층을 이용한 축열장치를 잠열축열재를 이용한 축열 시스템으로 대치하면 태양열 이용 시스템을 개선할 수 있다. 잠열축열재는 저온에서 일정한 온도로 열을 흡수 방열하기 때문에 태양열 집열기의 열매체의 입구온도가 낮고, 일정하므로 집열기 효율을 증가시킨다.

잠열재를 이용한 축열시스템은 여러가지 형태가 있으나 몇 가지 예를 들면 Fig. 6, 7, 8, 9와 같다. Fig. 6은 축열용량을 증가시키기 위하여 자갈층을 이용한 축열조를 캡슐로 된 잠열축열재를 이용한 축열조로 대치한 공기가열 태양열 이용 시스템이며, Fig. 7은 물을 집열매체로 하는 태양열 이용 시스템의 축열조의 열저장 매체를 상변화 잠열재로 대치한 경우이다.

Fig. 6의 경우에는 캡슐로 된 잠열축열재를 사

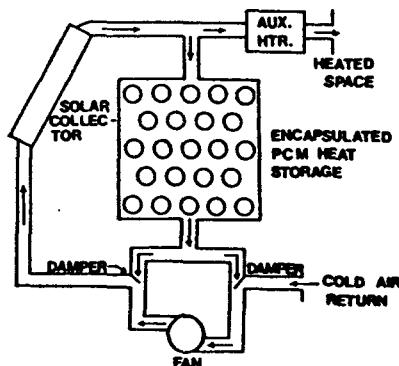


Fig.6 Solar system using encapsulated phase Change material for heat storage with air heat transfer medium.

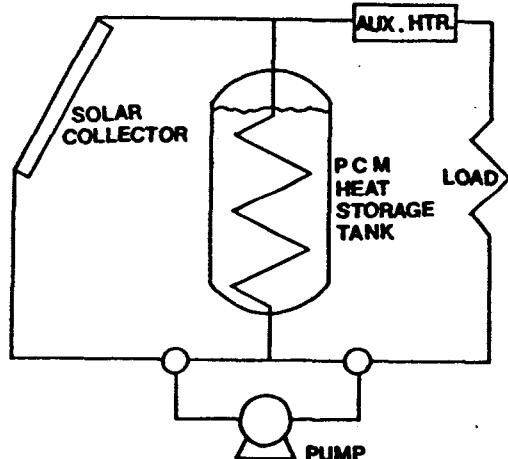


Fig.7 Solar system using phase change material for heat storage with liquid heat transfer medium and heat exchanger.

용하므로서 잠열재 열전달층이 얇아서 전도열전달 저항이 적기 때문에 상변화 속도가 빠르지만 Fig. 7의 경우에는 잠열축열조내의 온·냉수파이프 간격이 부적당하면, 잠열축열재의 열전도율이 적기 때문에 적시에 축열하기가 어렵게 된다. 그러므로 축열조내의 파이프 간격을 최적화하는 것은 잠열축열 효율 증가에 중요한 요인이 된다.

Fig. 8은 남향, 수직벽을 태양열 집열기겸 축열벽으로 이용하기 위하여 현재까지 혼열재인

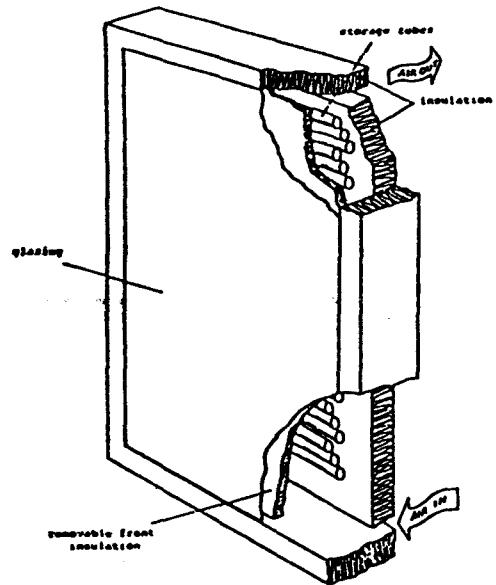


Fig. 8 Thermal wall panel Contained the latent heat material in small diameter tube.

물과 콘크리트를 이용한 축열층 대신에 잠열재로 충전된 가는 관속을 설치한 집열 및 축열벽이다. 벽 외측은 투명체로 그레이징 되어 있고, 잠열축열 파이프층과 그레이징 사이에는 가변단 열판을 설치하여 집열시에는 제거하고 열 이용시에는 다시 설치하여 벽 안쪽에서 순환하는 공기를 효율적으로 가열하도록 하였다.

현열축열재를 사용한 경우보다 훨씬 많은 양을 저장하고 일정한 온도로 열을 공급하는 장점을 갖는다.

Fig. 9는 잠열축열재를 이용하여 온실용 축열장치를 연구개발한 예이다. 온실에 인접해서 축열공간을 만들고 축열공간내에 동파이프를 수평으로 설치하고 Fig. 9에서 보는 바와 같이 축열매체로 충전된 폴리에지렌 튜브를 역 U자로 동파이프에 걸어 놓는다. 그러면 튜브내의 잠열재가 태양열을 흡수 저장하고 야간에는 온실내 공기를 축열공간에 순환시켜 축열 튜브내에 저장된 열을 온실내에 끌어들여 야간에 온실내 온도를 강화를 막는다.

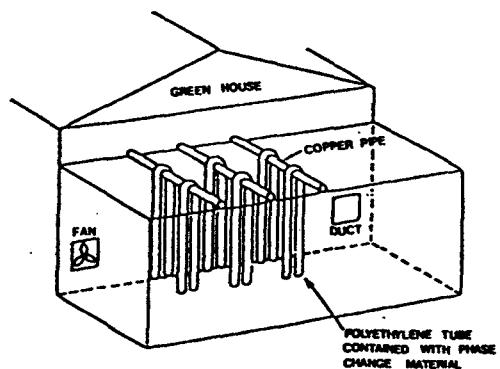


Fig. 9 Solar thermal storage system using phase change material in greenhouse.

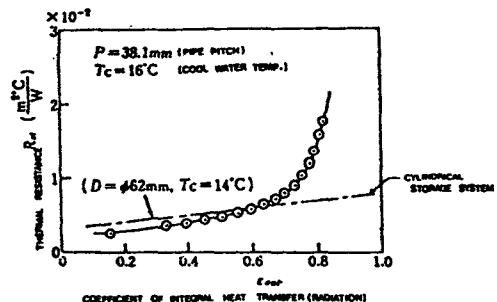


Fig. 10 Relation of R_{st} VS E_{out}(Radiation)

5) 잠열축열재의 열전도 문제점

잠열축열조는 현열축열조보다 소형화되는 단점은 있으나, 잠열재의 열전도율이 적기 때문에 축열조내의 열교환기 구조가 복잡해지는 단점이 있다.

Fig. 10은 축열조내의 열교환기에 냉수를 순환하여 잠열축열재를 응고시켜 방열할 때의 전열실험 결과이다.

종축에 표시한 R_{st}는, 전열저항이며, 횡축에 표시한 ε_{out}은 적산 방열율을 표시한다.

$$\text{적산방열율} = \frac{\text{같은 기간 동안의 축열재내의 방열개시부터 임의시간까지}}{\text{방열개시부터 임의시간까지}}$$

$$\frac{\text{이동된 전열량}}{\text{열교환기에 유입한 열량}}$$

로 정의된다.

적산방열율이 크다는 것은 열교환기 주위에 응고된 축열재의 량이 많다는 것을 의미한다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 ϵ_{out} 이 증가함에 따라 R_{st} 가 서서히 증가하다가, $\epsilon_{out} = 0.7$ 이상에서 R_{st} 가 급증하였다. 이는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 열교환기를 구성하고 있는 1개의 동파이프 주위에 응고된 고체축열재 경계면이 인접한 다른 동파이프 주위에 응고 축열재 경계면과 접촉하기 시작한 것을 의미하며, 그 다음 접촉 부위가 증가함에 따라 잠열발생원으로 존재하는 응고면이 급격히 감소하기 때문이다. 그러므로 해칭부분(사선부분)에 존재하는 응고경계면이 가능하면 크게 유지되도록 열교환 파이프 배열을 연구해야 할 것이며, 파이프 간격 P 와 전열저항 R_{st} 관계도 이론 및 실험적 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 10에서 일점 쇄선은 수직원통 파이프 축열조축 중심부에 한 개의 동파이프를 설치한 경우이다. 이 경우는 R_{st} 가 급증하는 현상이 없었다.

Fig. 12는 열교환기내에 온수를 순환하여 잠열축열재를 응해시켜 축열하는 경우의 ϵ_{in} 과 R_{mt} 관계에 대한 실험결과이다. 응고시와 유사한 경향을 보였으나 이 경우에는 적산축열율, $\epsilon_{in} = 0.6$ 에서 급증하였으며, $\epsilon_{in} = 0.6$ 이상에서 R_{mt} 의 증가는 응고시보다 크게 나타났다.

Fig. 13(a)는 응해하고 있는 상태인, $\epsilon_{in} < 0.6$ 에서의 상변화 경계면을 표시하고 있으며, Fig. 13(b)는 완전히 응해된 상태인 $\epsilon_{in} > 0.6$ 에서의 상태를 표시하고 있다.

3. 화학반응 축열

현열축열법보다 더 많은 열을 저장하기 위하여 잠열축열재 잇점을 이용한 것과 같이, 화학반응축열 방법은 잠열축열 방법보다 더 많은 열을 저장할 수 있는 축열법으로 연구되고 있다.

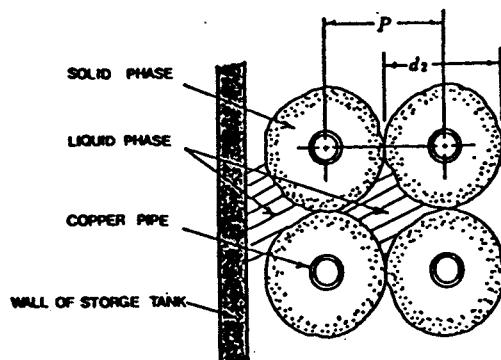


Fig. 11 Solidifying state of phase change storage material.

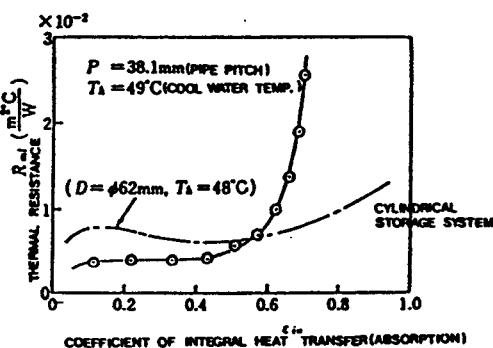


Fig. 12 Relation of R_{mt} VS ϵ_{in} .

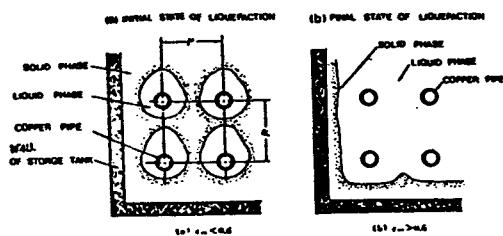


Fig. 13 Liquefying state of phase change storage material.

다시 말해서 현열재보다는 잠열재, 잠열재보다는 화학반응축열재가 보다 많은 잇점과 잠재력을 갖는다.

화학반응 축열장치는 완전 가역 화학반응에서 분자의 결합을 분리하거나 재결합하는데서 생기

는 흡수 또는 방출되는 열에너지에 의하여 이루어진다.

이 경우의 축열량은 저장재의 양에 비례하며,
그 관계식은 다음과 같다.

여기서.

α_r = 전질량에 대한 반응된 질량의 비

m =화학물질의 질량

$$\Delta h_r = \text{단위질량당 화학반응 열량}$$

1) 화학반응 축열법의 잊점

- 화학반응 축열장치는 다른 축열재를 이용하는 경우보다 소형화될 수 있는 잇점을 가지며,
 - 적은 손실로 장기축열이 가능하고, 단열없이 실내온도로 축열이 가능하다.

2) 화학반응 축열법의 단점

- 화학반응은 가스 등 불필요한 부산물이 생긴다.
 - 완전히 가역적이어야 하기 때문에 선택의 폭이 좁다.
 - 반응물질과 생성물질은 축열조를 부식시킬 가능성이 크다.
 - 화학반응 축열기술은 현열이나 잠열축열보다 어렵다.

그러나 만약 경제적인 장치나 작동 과정이 개발되면 수년내에 실용화될 가능성이 크다.

이상과 같은 특성을 갖는 화학축열반응은 무기계 반응과 유기계 반응이 있으며, 양자간의 큰 차이점은 촉매사용의 유무에 있다.

무기계 반응에는 주로 수증기계, 암모니아계, 수소계로 분리할 수 있다.

한편 유기계 반응에 있어서는 반응속도가 일 반적으로 늦기 때문에 촉매를 개발하여 첨가해야 한다.

3) 무기계 박음

(1) 탈수·수화반응

무기계 화학반응 축열방법 중 탈수·수화반응을 이용하는 수산화칼슘의 반응은 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2 + 104.5 \text{ KJ/mol}$ 가 되며 반응열이 비교적 크고 발열반응이 용이하기 때문에 현재까지는 유망한 축열재로 고려되고 있다.

더우기 CaO의 원료인 소석회는 풍부하며 값이 싸기 때문에 주목할만한 축열재라 할 수 있다.

Fig. 14는 $\text{CaO} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2$ 반응의 평형 관계를 표시하고 있으며, a, b 영역은 반응이 신속하게 진행되고 있는 영역을 표하며, c, d 영역은 반응 속도가 늦어서 현실적으로 이용하기 어려운 영역이다.

이와 같은 에너지 사이클의 문제점은 다음과 같다.

- 고온 폐가스중 H_2O , SO_2 , CO_2 의 발생이 예측된다.

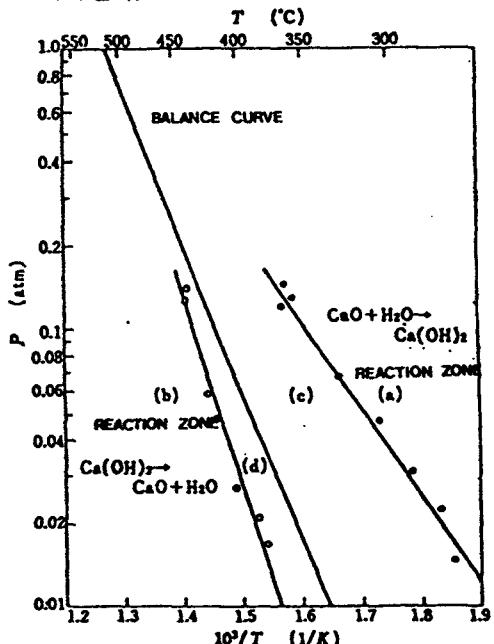


Fig.14 Chemical reaction Balance($\text{CaO} \rightleftharpoons \text{Ca(OH)}_2$)

- 태양에너지를 열원으로 한 간접열 교환의 경우 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 입자층의 전열속도의 크기가 문제된다.
- $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2$ 반응에서 고체구조 변화 때문에 축열재의 열적 강도가 저하된다.

(2) 금속수소화물에 의한 축열

금속수소화물에 의한 축열은, 금속수소화물이 수소를 흡수 분리하는 과정에서 흡열과 방열하는 현상을 이용한 것이다.

그 반응식은 일반적으로 다음과 같다.

$$\frac{2}{n} \text{M} + \text{H}_2 = \frac{2}{n} \text{MH}_n + Q(\text{KJ}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서,

M=금속

MH_n =금속수소화물

Q=반응열량

이 경우 화학반응 축열재로서의 잇점은 다음과 같이 요약된다.

- 반응의 가역성이 높으며,
- 반응속도가 크고,
- 반응열도 비교적 크기 때문에 유망한 축열 재로 고려되고 있다.

금속수소화물이 될 수 있는 대표적인 금속과 그 반응열량은 Table 5와 같다.

Table 5. Heat of Chemical reaction of metallic Hydride.

Material	Heat of Chemical reaction (Δh) · (Kcal/Kg)
Ti Mn _{1.5}	53.7
Ti Fe	64.4
MnNi _{4.5} Al _{0.5}	51.3
LaNi ₅	50.4
Mg ₂ Ni	275

(3) 금속 수소화물을 이용한 축열시스템

주택 난방과 급탕에 태양열을 원활하게 지속적으로 이용하기 위하여 금속 수소화물을 열저장 매체로 한 축열시스템을 설치한 태양열주택을 Fig. 15에 표시하고 있다.

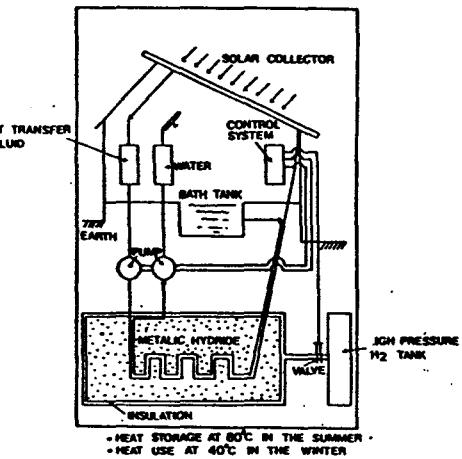
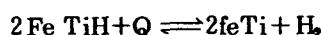


Fig.15 Heat Storage system Using Chemical reaction Heat of Metallic Hydride.

이 그림에서 보는 바와 같이 열저장 조내의 축열재의 화학반응을 위하여 고압수소실을 설치하여 수소를 공급하면서 열에너지를 얻고, 태양열로 화학반응 축열재를 가열하여 수소를 분리하면서 열을 저장할 수 있도록 하고 있다. 이 경우의 축열재와 그 화학반응식은,



로서 여름철에 태양열을 80°C로 저장하여, 겨울철에 40°C 정도의 온수를 만들어 쓰는 경우이다.

(4) 금속 수소화물 반응의 문제점

- 금속수소화물의 미분화 현상
- 낮은 열전도성과
- 폭발의 안정성 문제 등이다.

2) 유기계 반응

유기계 반응은 반응물질 자신이 일반적으로 기체 혹은 액체이기 때문에 열수송에 파이프라인

을 이용할 수 있어서 무기계에 없는 잇점을 가지고 있지만 유기화합물의 반응속도가 일반적으로 늦기 때문에 촉매를 사용하지 않으면 안되는 경우가 많다. 또한 유기화합물의 열에 대한 안정성과 경제성 문제 그리고 반응온도가 명확하지 못한 경우가 많아서 무기계 반응에 비하여 연구가 자연되고 있는 것이 사실이다.

유기계 측열반응의 한 예를 Fig.16에 표시한다. 메탄 합성 반응으로서 서독의 유리히 프로세스, 혹은 ADAM-EVA 프로세스로서 알려져 있다.

이 프로세스는 원자로부터 얻어지는 약 900~100°C의 열을 받아 메탄과 수증기의 혼합물로부터 생성된 CO와 H₂의 혼합ガ스를 파이프라인으로 열소비 장소에 수송한다(파이프 라인의 길이가 70km일 때 수송효율은 65%에 달한다).

그후 열소비지에서 고온의 메탄화 반응을 하여 발생한 반응열을 공업용 스팀, 발전등의 열원으로 사용하고 생성된 물은 응축시켜, 메탄(CH₄)만을 열원측에 반송한다.

이 반응에 사용된 촉매는 메탄 합성용 니켈(Ni) 촉매로서 사용온도는 700°C이며 반응압력은 27kg/cm²

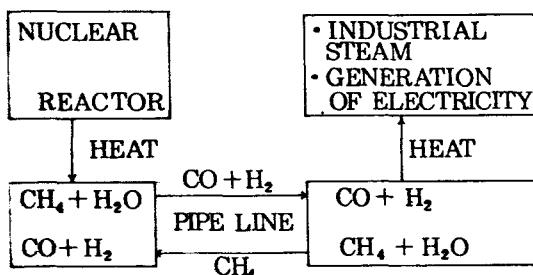


Fig.16 ADAM-EVA Process in west Germany.

4. 태양 연못 측열(Solar Pond)

태양연못은 비교적 값이 싼 실용적인 태양에너지를 집열 및 저장방법으로 농림수산업, 해수담

수화, 냉·난방용 그리고 공조용으로 유망시 되고 있다.

1) 태양연못 측열 원리

쏠라폰드의 원리를 설명하는 개략도는 Fig.17과 같다. 이 연못의 넓이는 수 100~수 1,000 m²이며, 깊이는 3m 정도이다. Fig.17에서 보는 바와 같이 연못물의 표면층 농도를 "0"로 억제하기 위하여 맑은 물을 연못 수면에 유입시켜 상부혼합층을 형성한다.

입사 태양광은 표면에서 몇 %만이 반사하고 대부분의 태양광은 물속으로 입사한다.

연못내에 입사한 태양광은 수심별로 파장에 따라 일부가 흡수되고, 단파장 성분의 태양광의 대부분은 염분농도 구배가 존재하는, 비대류층 부분을 투과하여 연못 밑부분의 균일 농도로 된 대류측열층에 도달하여 흡수된다. 이렇게 해서 대류측열층의 수온이 상승하여도 그 위에 존재하는 비대류층(농도 구배에 따라 염수의 비중차를 형성하며 이 염수 비중차에 의하여 비대류층을 형성한다)에 의하여 대류 열손실이 억제된다. 또한 대류측열층의 고온수(80~90°C)로부터 나오는 방사열의 파장은 장파장으로 되어 있기 때문에 그 위에 존재하는 비대류층을 통하여 외부로 방사할 수 없게 된다.

다시 말해서 태양복사광이 없는 야간이나 비오는 날에도 대류나 복사에 의한 열손실이 거의 없으며, 일단 입사한 태양열은 연못 주위의 전도 열손실 이외에는 대부분이 연못의 밑부분 대류층에 축열된다.

이와 같은 축열원리에 기초를 둔 쏠라폰드의 온도상승과 축열량 등에 관한 이론적 해석은 1958년경부터 이스라엘 국립 물리학 연구소의 Weinberger, Tabor 와 Elata에 의하여 최초로 시도되었다.

그후 1974년경 미국의 주립대학 Rabl, Nielsen이 이에 관한 연구를 시작하였으며, New

Mexico 대학교와 Utah 대학교에서도 이에 관한 연구를 착수하였다.

실용화된 경우는, 이스라엘의 사해연안에 있는 발전용 폰드와 미국의 마이아미스파크시에 있는 레크레이션 시설과 수영풀에 열을 공급하고 있는 $2,000\text{m}^3$ 의 폰드가 있을 정도이다.

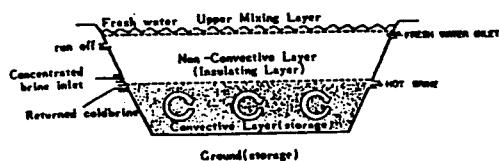


Fig.17 Solar Pond system using the brine.

5. 기타 지층을 이용한 장기 태양열 저장

지하 대수층, 지하암석, 자갈 그리고 점토 지층을 열저장 매체로 태양열을 장기간 지하에 저장할 수 있는 방법을 태양열 장기 지하축열이라 하며, 이에 관한 연구 개발은 태양강도가 비교적 약한 스웨덴이 가장 선진된 위치에 있다.

썬클레이 프로젝트(Sunclay Project)는 스웨덴에서 연구 개발되고 있는 태양열 지하축열법을 이용한 유망한 난방 및 온수 급탕계획이다. 미국에서도 이에 관한 연구가 활발하며, O.S.U. (Oklahoma state Univ.) 지열회수 히트펌프 시스템은 대표적인 예에 하나이다. 불란서 파리 근교 북부에 지하 대수층에 태양열을 저장하여 집합 주택의 난방급탕에 이용하려는 연구 개발계획은 지하축열의 전망을 밝게 해주는 좋은 본보기로 사료된다.

본장에서는 불란서의 대수층 축열 이용 시스템, 스웨덴의 sunclay project 그리고 미국의 O.S.U. 지중열회수 히트펌프 시스템에 관하여 개괄적인 소개를 하려 한다.

- 1) 불란서 파리 근교의 대수층을 이용한 집단 주택의 난방, 급탕시스템

불란서 파리 근교 북부에 12,000ha에 달하는 사질 대수층이 있으며 수온은 년중 13°C 를 유지하고 있다. 따라서 이를 열원으로 히트펌프(heat pump)를 이용한 열회수 방법으로 난방, 급탕 시스템을 계획하게 되었다. 제1차 계획으로 224호의 주택을 집단으로 건설하여 에너지 절약과 공해 방지 관점에서,

- ① 대수층 온수를 이용후 그대로 대수층으로 흘려 보내는 방법과,
- ② 겨울에는 온수정(Hot well)물을 양수하여

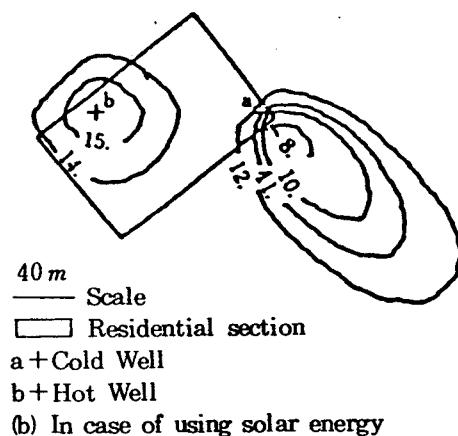
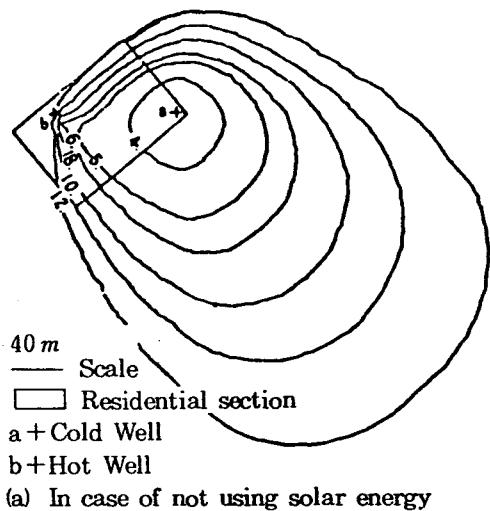


Fig.18 Temperature Distribution in the ground water layer after 20 years (Heliothermal Dondlent).

열을 이용한 후 냉각수를 냉수정(Cold well)를 통하여 대수층에 흘려보내고, 여름에는 냉수정(Cold water)물을 양수하여 태양열 집열기로 가열한 후 온수정(Hot well)을 통하여 대수층에 열을 저장하는 방법을 고려하였다.

그런데, Fig. 18(a)에서 보는 바와 같이 ①에서 제시한 방법은 장기적인 안목에서 온수정에 공급되는 수온이 점차 낮아지고 동시에 냉수정 주위에 냉수 영역이 확대되어 난방 대상이 되고 있는 건물부지 지하부위까지 번지게 된다. Fig. 18(b)에서 보는 바와 같이 ②에서 제시한 태양 열을 이용하여 가열하는 방법은 온수정 주위의 수온저하와 냉수정 주위의 냉수영역 확대 범위가 ①에서 제시한 방법보다 훨씬 적게 된다.

이상과 같은 점을 고려하여 태양열 이용방법을 채택하기로 결정하였다.

2) 태양열과 대수층 축열을 이용한 난방·급탕 시스템 구성

태양열과 지하대수층 축열을 이용한 난방·급탕 시스템은 Fig. 19와 같이 구성하였으며, 지하 대수층의 저온열을 이용하여 난방과 급탕에 맞는 온도의 열을 얻기 위하여 히트펌프(heat pump)을 시스템 속에 포함시켰다. 이 시스템의 열에너지의 공급, 저장 그리고 이용에 관한 년간 열평형은 Fig. 20과 같다.

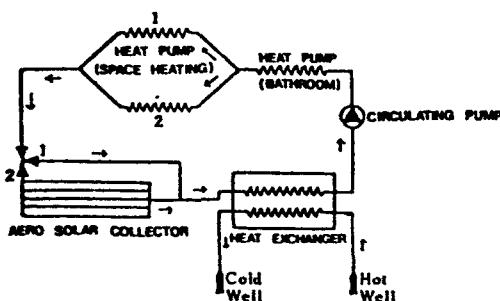


Fig. 19 Seasonal heat storage system using ground water layer(Heligeothermal Dondlet).

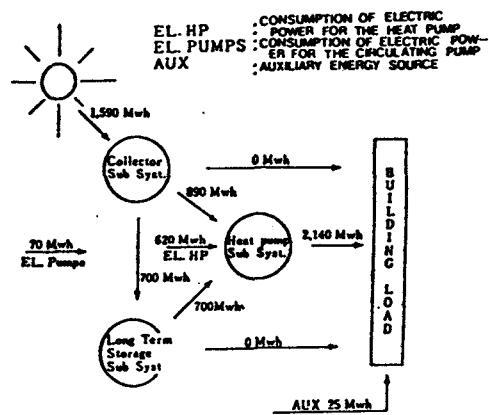


Fig.20 Heat Balance for a year(Heligeothermal Dondlet).

(1) 시스템의 구성과 작동방법 .

본 시스템은 태양열집열기(더운 공기와 태양 에너지로부터 집열하는 특수집열기), 지하 축열 시스템, 히트펌프(heat pump), 온·냉수정으로 구성되었다.

겨울철에는 태양열집열기와 지하 대수층으로부터 얻은 열로 히트펌프를 가동하여 난방·급탕을 해결한다(Fig. 19 참조).

이때, 집열기는 3°C 이상에서만 작동시키고 45°C의 급탕용 물은 야간에 히트펌프(heat pump)를 운전함으로써 확보한다.

여름에는 낮에 냉수정의 물을 양수하여 태양 열 집열기로 4°C에서 14°C로 가열해서 온수정을 통하여 지하 대수층에 축열한다(장기간 축열).

야간에는 집열기를 사용하여 공기로부터 열을 흡수하여 히트펌프를 운전 하므로서 급탕용 물을 확보한다.

- 본 시스템에서는 태양열 집열 면적을 보다 효율적으로 이용하기 위하여 동관에 망상핀(fin)을 붙여서 특수한 집열기(aero solar collector)를 여러 층으로 하여 건물 옥상에 배치하므로서 위에서 쏟아지는 태양열 뿐만 아니라 더운 공기로부터도 집열 가능하게 하였다. 이때 집열기 면

적은 1.275m^2 으로 17개 집열기로 구성되었으며 열매체 순환 유량은 $50\ell/\text{min}$ 이었다.

— 히트펌프는 3대의 전기식(물-물식)을 사용하고 있으며, 2대는 난방용으로 대당 출력은 248 KW(증발기축 평균온도 3°C , 응축기축 평균온도 45°C 로서 COP=3.7)이었다. 나머지 1대는 급탕용으로 그 출력은 160 KW(증발기축 평균온도 5°C , 응축기축 평균온도 57°C 로서 COP=2.8)이었다.

2) 스웨덴의 썬크레이 프로젝트(Sunclay Project)

스웨덴은 위도 58° 에 위치하여 년평균 기온과 태양강도가 낮은 지역에 속해 있으면서도 난방·급탕용 에너지를 태양에너지와 지층축열 방법을 이용하여 해결하려는 야심적 계획을 세워놓고 있다. 여기에 소개하는 스웨덴 Gothenburg에서 가동중인 Sunclay Project도 이 계획에 일환이다.

위도가 58° 인 스웨덴의 기후조건은 Table 6과 같다.

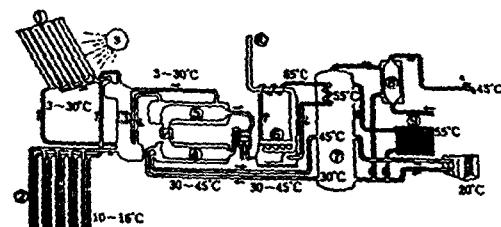
Table 6. Ambient mean temperature and insolation in sweden.

Item	Ambient Temperature ($^\circ\text{C}$)	Integrated Horizontal Insolation (MJ/m^2)
Yearly Avarage	7.6	3.700
Avarage Values in July	15.0	660
Avarage Values in December	1.0	45.0

Table 6에서 보는 바와 같이 겨울철 일사량이 여름철일사량의 $\frac{1}{15}$ 밖에 안되는 것이 특징이다.

(1) 시스템의 구성

썬크레이 시스템은 Fig. 21에서 보여주고 있는 바와 같이 태양열 집열기, 지하 축열조, 히트펌프, 보조열원으로 되어 있다.



- ① Solar Collector
- ② Heat Storage System Under Ground
- ③ Heat Storage Tank
- ④ Condenser ⑤ Evaporator
- ⑥ Auxiliary Heat Source
- ⑦ Stratified Heat Storage Tank
- ⑧ Bath Water Tank
- ⑨ Radiator for Space Heating
- ⑩ Exhaust Pipe

Fig.21 System diagram of sunclay project in Sweden.

— 태양열 집열기는 카바없이 아루미니움으로 제작되었으며 열매체는 동파 방지를 위하여 칼슘 크로라이드로 수용액을 사용하고 있다. 집열면적은 15.000 m^2 이고, 방위 및 경사각은 정남향, 14° 로 년평균 집열효율은 50%이었다.

— 지하 축열조의 축열용량은 88.000 m^3 이며, 축열 및 회수를 위한 지하매설 코일은 포리에이렌(polyethylene) 파이프(외경, 16mm, 내경 12.8mm)로 되어 있고, 지하 축열 단열을 위하여 축열조 지상부에 0.3 m 의 점토층을 두었다. 지하수위는 지표로부터 0.5 m 깊이에 있으며 지하수 유속은 거의 “0”이고 불역층 온도는 7.6°C 이다.

— 히트펌프(heat pump)(물-물식)은 디젤엔진으로 가동되는 출력이 200 KW인 4대가 사용되었다.

이 히트펌프의 COP는 1.9로서 응축기축 평균온도는 50°C 이고 증발기축 평균온도는 10°C 이었다.

— 썬크레이 프로젝트(sunclay project) 성능을 표시하고 있는 년간 히트 배란스는 Fig. 22

와 같으며, 지중코일의 열매체 온도는 2월(열화수시)에 6~11°C이고, 8월(축열시)에 15~27°C 이었다.

— 이 시스템에 의하여 이용 가능한 재생에너지량은 640 MWh(설계치)로 전력 가격으로 환산하여 약 2,450만원이 되었다(1980년 현재).

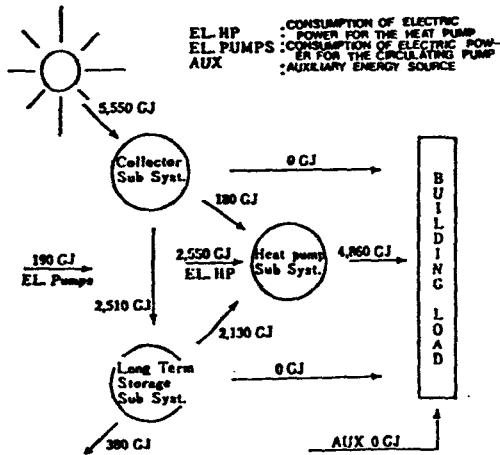


Fig.22 Heat Balance for a year (Sunclay Project in Sweden).

3) “O. S. U”(Oklahoma state Univ.) 지열회수 히트펌프 시스템

석유과동 아래 여름철 에너지 사용 피크에 대처하기 위하여 미국정부의 에너지 담당부서(D.O.E), 오크라호마 주립대학과 민간회사가 공동으로 지열회수 히트펌프 시스템을 개발하였다.

오크라호마 대학은 지하코일 개발과, 씨뮤레이션프로그램 개발 및 실험을 통한 데이터를 수집하였으며, 민간회사는 지하코일 매설을 위한 소마력 기계를 개발함과 동시에 지하코일 배관시 공법을 개발하였다.

이와 같이 분담 개발하여 완성한 지열회수 히트펌프 시스템은 Fig.23(a), (b)와 같으며, 이 시스템의 구성과 작동원리는 다음과 같다.

(1) O. S. U 시스템 구성과 작동원리

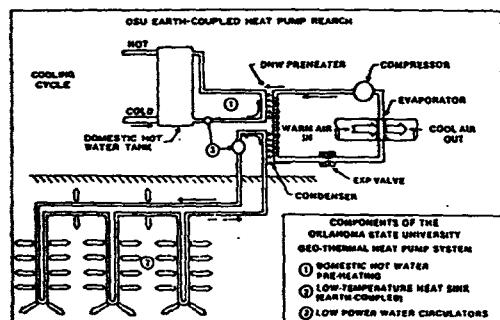
이 시스템은 냉·난방, 급탕을 겸용할 수 있도

록 하기 위하여 다음과 같은 3부분으로 구성되었다.

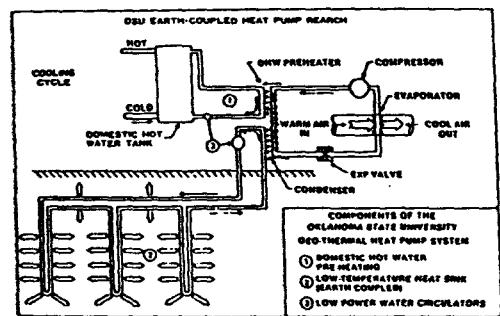
- 가정용 온수 예열시스템
- 지열회수 및 저장시스템(지하코일 시스템)
- 열펌프 시스템

이 시스템의 작동원리를 간단히 설명하면 다음과 같이 요약된다(Fig.23(a), (b) 참조).

• 여름철에는 지하코일 시스템을 통하여 회수된 비교적 저온열을 열펌프의 증발기에 공급하고 전기나 디젤로 열펌프의 압축기를 작동시켜 응축기에서 얻는 비교적 높은 온도의 열을 난방에 이용한다. 그리고 회수된 지열중 증발기에 이용하고 남는 열은 가정용 온수를 예열하는데 이용하여 온수 급탕에 필요한 열에너지를 절약한다.



(a) Summer Cycle



(b) Winter Cycle

Fig.23 OSU Heat Pump System using the Geothermal energy for space heating and Cooling.

• 본 시스템의 여름철 작동원리를 요약하면, 3~15°C의 저온 지열을 증발기를 통하여 열펌프에 공급하고 응축기를 통하여 30~45°C의 열을 얻는 것이 이 시스템의 중요한 기능이라고 할 수 있다(Fig. 23(a) 참조).

• 겨울철에는 Fig. 23(b)와 같이 전기나 디젤로 압축기를 작동하여 응축기에서 나오는 열을 지하에 저장하고 일부는 가정용 온수를 예열하는데 이용하여 온수 급탕에 필요한 열에너지를 절약한다(Fig. 23(b) 참조).

(2) 위도와 기후조건

O.S.U 시스템 설치장소의 위도는 36° 10'이며 그곳의 기후조건은 Table 7과 같다.

Table 7. Ambient mean temperature and solar incident at the installation of OSU system.

Item	Ambient Temperature (°C)	Integrated Horizontal Insolation (MJ/m ²)
Yearly Avarage	15.5	6.205
Avarage Values in July	24.9	753
Avarage Values in December	4.4	271

(3) 지하 축열조

지하코일이 매설된 지층 토양의 물성은 다음과 같다.

- 열 전도율(건조상태): 2.86 W/m°C
- 열 전도율(15% 습윤상태): 2.77 W/m°C
- 열 용량: 2.69 MJ/kg°C
- 밀도(건조상태): 1.681 kg/m³
- 밀도(15% 습윤상태): 1.938 kg/m³
- 불역층(20 m 깊이)의 온도는 16.7°C

(4) 개발성과

O.S.U 시스템을 개발하므로 다음과 같은 부수적 성과를 얻었다.

- 내구성과 내열성이 우수한 고밀도 포리에지

렌 파이프를 사용하였으며 새로운 접합법을 개발하므로서 지중 코일의 내구 연한을 50년 이상 기대할 수 있게 되었고,

• 정밀도 높은 지열회수 성능 예측에 대한 시뮬레이션 프로그램이 개발되었으며,

• 미국은 5년 이내로 설비 비용 상환이 가능한 지열 이용 난방, 급탕 시스템 설치 가능성을 확인하였다.

V. 결 론

주기적이며, 간헐적인 열원과 이용부하 사이에 있으면서 열원의 양적 및 질적 변동을 흡수 저장하여, 이용부하를 안정시켜 주는 축열장치는 폐열화된 열에너지를 태양에너지를 저장하여 이용 System에 유용 에너지로 공급하므로서 에너지 절약 효과를 제공한다. 이와 같은 축열기능을 얻기 위하여 지금까지 연구되어온 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 현열 축열 방법은 태양열 저장을 위하여 현재까지 가장 광범위하게 실용화되었으며, 그 물성에 관한 분석도 높은 수준에 와 있으나, 액체성충형 축열을 위한 최적 시스템 설계와 최적 활용 방법에는 아직 미해결된 문제가 많으며, 이론과 실험을 통하여 이에 관한 정밀한 분석이 필요하다.

2) 잠열 축열 방법은 실용화된 경우가 적으며, 고가이다. 장기간 사용시의 축열 성능 저하에 관해서는 해석되지 못한 부분이 많으며, 축열 특성에 관해서는 충분한 분석이 되지 못한 상태에 있다. 그러므로 잠열재의 열적, 화학적 성질 분석, 전열개선, 값싼 재료의 개발, 과냉과 상분리 현상의 개선 축열재와 공법 등에 관한 많은 연구가 필요하다.

3) 열화학적 반응에 의한 축열 방법에는 많은 문제가 제기되어 있다. 화학반응의 선택, 반응물질의 열화학적 성질 반응속도, 반응가역성,

그리고 측면 개발 및 수명 등은 많은 연구가 필요하다. 열저장 장치의 측면에서는 반응 제어법, 소요동력의 경감 그리고 전열 개선 등에 연구가 절실한 것으로 사료된다.

4) 장기축열법은 스웨덴에서 가장 발달했으며 저온열을 지하에 저장하였다가 열 펌프를 통하여 고온열로 이용하는 방법을 채택하고 있는 것은 위도가 높은 곳에서 타당한 방법으로 사료된다. 그런데, 설치 장소에 따라 달라지는 토양의 열적 성질, 기후, 지층구조, 지하수의 유동 등을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션 코드는 아직 충분하지 못한 것으로 사료된다. 장기 지하 축열을 위해서는 이론분석은 물론 많은 실험을 통하여 계산의 신뢰성을 높혀야 할 것으로 판단되었다.

5) 태양연못 축열법과 지하 축열법을 위해서는 토목공법의 비용절감 연구와 장기간 운용법에 관한 연구가 앞으로 중요한 과제로 제기된다.

6) 지금까지 고찰한 여러가지 축열방법에 따른 축열 용량과 비용을 비교하면 Table 8과 같으며, 현열 축열보다 잠열축열이, 잠열축열보다는 화학반응 축열이 고농축임을 알 수 있다.

参考文献

1. A. AkbarzaDeh, Effect of sloping Walls on Salt Concentration Profile in a Solar Pond, solar Energy VOL. 33. No. 2. pp.137~141 (1984)
2. Frank Kreith and Jan F. Kreider, Principles of Solar Engineering, pp. 321~327. McGraw-Hill Book Company(1978)
3. George A. Lane, Solar Heat storage; Latent Heat Material volume 1. pp. 3~30. CRc Press, Inc Boca Raton, Florida(1983)
4. G. DE Maria L, D'Alessio, and E. coffari, Thermochemical Storage of solar Energy With High-temperature Chemical Reaction, Solar Energy, VOL. 35. No. 5. pp. 409 ~416. (1985)
5. John A. Duffie and William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, pp. 326~330. John Wiley & sons. New York(1980)
6. S. I. GUC, ERI and S, F, Faunce, Modeling of a Thermal Wall panel using Phase change Materials, solar Energy VOL. 4. pp. 695~699. (1979)
7. 小坂岑雄, 蓄熱技術への展望, 日本太陽エネルギー, VOL. 9. No. 3. pp.2~7. (1983)
8. 安江進, 歐米諸國における地中蓄熱技術の現状, 日本太陽エネルギー, VOL. 9. No. 3. pp. 8~22. (1983)
9. 梅宮弘道, 地下帶水層による蓄熱, 日本太陽エネルギー, VOL. 9. No. 3. pp. 30~37.

Table 8. Comparison of heat storage Methods.

Method	Material	Heat storage Capacity (Kcal/kg)	Volume per 10^3 Kcal (m ³ /10 ³ Kcal)	Storage cost (S/25.2 × 10 ³ Kcal)
Sensible Heat	Water (H ₂ O)	27.75	359.6	0
Sensible Heat	Rocks	5.55	80.9	80
Laten Heat (Heat of fusion)	Na ₂ SO ₄ ·10 H ₂ O	55.51	12.25	100
Chemical Reaction	Mg(OH) ₂ /MgO	173.43	0.0025	225
Chemical Reaction	Ca(OH) ₂ /CaO	241.38	0.0018	24