

溫室 暖房을 위한 太陽熱-地下 潛熱 蓄熱 시스템 開發

Development of Solar Energy-Underground Latent Heat Storage System for Greenhouse Heating

宋鉉甲* 柳瑩善**
H. K. Song Y. S. Ryou

Summary

In this study, to maximize the solar energy utilization for greenhouse heating during the winter season, solar energy-underground latent heat storage system was constructed, and the thermal performance of the system has been analyzed to obtain the basic data for realization of greenhouse solar heating system.

The results are summarized as follows.

1. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ was selected as a latent heat storage material, its physical properties were stabilized and the phase change temperature was controlled at $13\sim 15^\circ\text{C}$.
2. Solar radiation of winter season was the lowest value in December, and Jinju area was the highest and the lowest value was shown in Jeju area.
3. The minimum inner air temperature of greenhouse with latent heat storage system(LHSS) was $4.0\sim 7.5^\circ\text{C}$ higher than that of greenhouse without LHSS and was $7.0\sim 11.2^\circ\text{C}$ higher than the minimum ambient air temperature.
4. Greenhouse heating effect of latent heat storage system was getting higher according to the increase of solar radiation and was not concerned with the variation of minimum ambient air temperature.
5. The relative humidity of greenhouse with latent heat storage system was varied from 50 to 85%, but that of greenhouse without LHSS was varied from 30 to 93%.
6. The heating cost of greenhouse with solar energy-latent heat storage system was about 24% of that with the kerosene heating system.

* 충북대학교 농업기계공학과

** 충북대학교 지역개발연구소

1. 서론

태양 에너지는 그 밀도가 낮으며, 공급이 간헐적이기 때문에 에너지의 수요와 공급간에 시차가 존재한다. 일반적으로 에너지의 수요와 공급간의 시차는 에너지의 저장을 통하여 극복될 수 있으며, 특히 태양열을 에너지원으로 하는 경우에는 열에너지 저장시스템이 중요하다.

열에너지의 저장 방법으로는 현열 축열법, 잠열 축열법, 화학적 반응열을 이용한 축열법 등이 있으나, 일정 온도의 열을 고밀도로 저장·이용하기 위해서는 상변화 물질을 이용한 잠열 축열법이 경제적이며 또한 효율적이다.

1950년대 중반부터 우리 나라 농가에 보급된 온실을 이용한 시설 원예 재배 면적은 비닐 재료 등 관련산업의 급속한 발달에 힘입어 1970년대 이후 급증하여 92년 현재 약 50,000 ha로서 75년에 비하여 28배 증가하였으며, 이는 농가 소득 증대에 크게 이바지하였다(그림 1 참고). 특히 UR협상으로 인한 국내 농산물 시장의 개방 압력에 적극 대응하기 위하여 시설 농업은 시스템화에 따른 省力化 및 자동화와 대형화에 직면하게 되었고, 겨울철 온실의 보온은 생산비 절감과 환경 오염 문제 해결을 위하여 화석 에너지 이용에서 탈피하지 않으면 안되게 되었다.

본 연구에서는 태양열 에너지의 잠열 축열 이

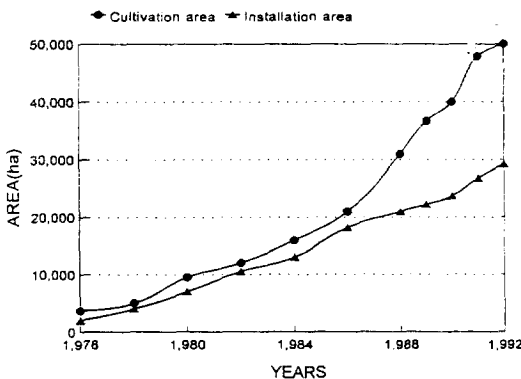


Figure 1 Installation and cultivation area of greenhouse in South Korea.

용 방법을 제안하였으며 시설 농업의 난방 시스템에 장기간 사용할 경우에 상당한 양의 난방비 절감 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 환경 오염을 방지하는 데도 크게 기여할 것으로 판단하여 태양에너지-잠열 축열 시스템을 개발하고, 이 시스템의 열특성과 성능을 분석함으로써 실용화에 접근하려 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

가. 온실 보온용 잠열 축열재 개발

열에너지 저장 개념은 강수기에 물을 저수지에 저장했다가, 갈수기에 그 저장된 수자원을 이용하는 것과 같다. 저장 용량이 큰 저수지는 긴 역사를 두고 발달하여 왔으나, 대량의 열에너지를 저장할 수 있는 축열 시스템은 개발 이용 수준이 미흡한 실정이다. 열용량이 큰 고농축 축열 시스템을 개발하기 위해서는 물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르듯이 열에너지도 고온체에서 저온체로 흘러가는 동적 개념의 에너지를 고농축으로 저장하여 정적개념의 에너지로 전환시켜야 하는 원론적 개념 정립에서부터 시작하여야 하며, 그 다음 단계로 동적 개념의 에너지를 정적 개념의 에너지로 전환해주는 축열 매체의 개발이 이루어져야 한다. 그러므로 본 연구에서는 열에너지를 고농축 저장할 수 있는 축열 매체로 잠열량이 크고, 가격이 저렴한 저온 상변화 잠열재가 바람직한 것으로 판단하여 이를 축열 매체 개발의 연구 대상으로 하였다.

대부분의 잠열재는 상변화 과정에서 과냉 현상, 상분리 현상, 상변화 사이클의 불연속성과 체적 변화 등 물성의 불안정성을 가지고 있다. 그러므로 잠열재를 안정된 고농축 열저장 매체로 개발·이용하기 위해서는 먼저 물성의 불안정성 문제를 해결하여야 한다.

물성이 안정된 잠열재를 축열 매체로 하는 잠열 축열은 상변화 온도 수준에서 축열 용량이 크고, 축열 효율이 높다. 그러나 하나의 잠열재는

일정한 잠열 온도 수준만을 가지고 있기 때문에 열원의 온도 수준과 사용 목적에 따른 다양한 저장 온도 수준에 대응할 수 없으므로, 상변화 온도 수준과 축열 이용 온도 수준이 다른 경우 잠열 온도(상변화 온도) 수준 축열이 갖는 고농축 축열 효과를 얻을 수 없게 된다. 그러므로 고농축 축열 효과를 얻기 위해서는 이용 목적과 열원의 온도 수준이 달라짐에 따라 잠열 온도 수준이 다른 잠열재를 다시 개발 이용하여야 하는 비능률적이며, 비경제적인 문제점이 도출된다.

이를 개선하기 위해서는 개발된 하나의 잠열재의 상변화 온도를 어느 범위내에서 다양하게 변화시켜 이용할 수 있는 잠열 온도 조절기법의 개발이 필요하다. 그리고 물성 안정과 잠열 온도 변화를 위하여 PCM에 다른 화합물을 첨가함으로써 잠열량이 감소되며 또한 상변화 사이클의 반복 횟수가 증가함에 따라 잠열량 감소현상이 나타난다. 이와 같은 현상은 축열 용량의 감소를 초래하므로 이를 해결하는 연구가 필요하게 된다.

본 연구에서는 온실용 잠열 축열재로 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (SSD)를 선택하였으며, SSD의 상세한 물성은 표 1에서 보는 바와 같다.

잠열 축열재로 선택된 SSD의 상분리 현상을 제거하기 위하여 A.A.P.를 이용하였으며, 과냉 현상을 최소화 하기 위하여 A.B.를 첨가하였다. 그리고 상변화 온도를 온실의 보온에 적합한 20℃ 이하로 조절하기 위하여 온도 강하제를 혼합하였으며, 첨가제 중량에 따른 잠열량의 감소를 최소화 하기 위하여 S.V.를 첨가하였다. 이상과 같이 물성이 안정된 SSD 혼합물을 그림 2와 같

은 실험 장치를 이용하여 상변화 사이클을 증가시켰으며, 상변화 사이클의 증가에 따른 상변화 온도 및 잠열량의 변화를 그림 3과 같은 DSC를 이용하여 분석하였다.

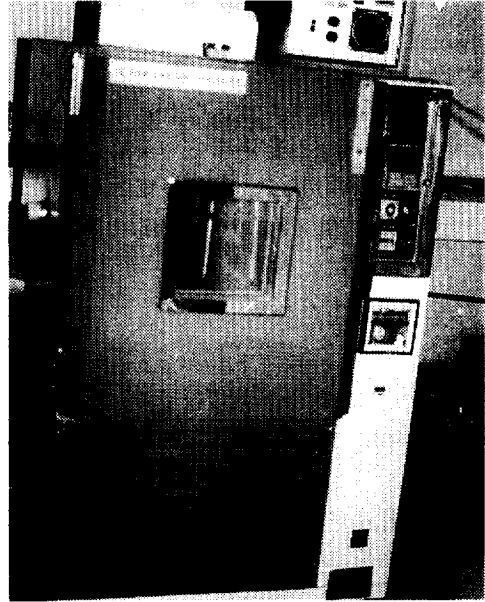


Figure 2 Phase change cycling tester.

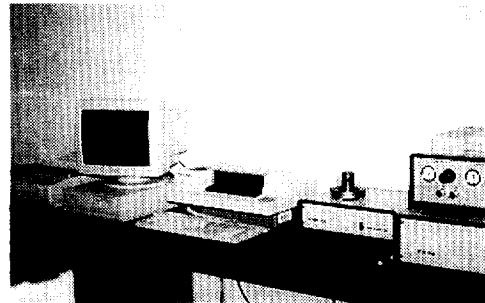


Figure 3 Differential scanning calorimeter(SE-TARAM-DSC92).

Table 1 Thermophysical properties of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (SSD)

Material	Melting Point (°C)	Latent Heat (kcal/kg)	Density (kg/m ³)		Specific Heat (kcal/kg°C)		Thermal Conductivity (W/m°C)	
			Solid	Liquid	Solid	Liquid	Solid	Liquid
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	31~32	60.5	1460	1330	0.459	0.780	0.544	0.811

나. Greenhouse-지하 잠열 축열 시스템의 구성 및 실험

온실 보온에 잠열 축열 시스템을 이용하기 위하여 그림 4와 같이 지하에 잠열 축열 시스템을 설치하고 송풍기에 의한 강제 대류 방식으로 온실내의 공기를 순화시키면서 주간과 야간의 방열 과정을 유도하였다. 온실은 주간의 태양 복사 에너지를 최대한 수용할 수 있도록 정남향으로 설치하였고, 잠열 축열 시스템은 그림에서 보는 바와 같이 온실의 지하에 설치하였다.

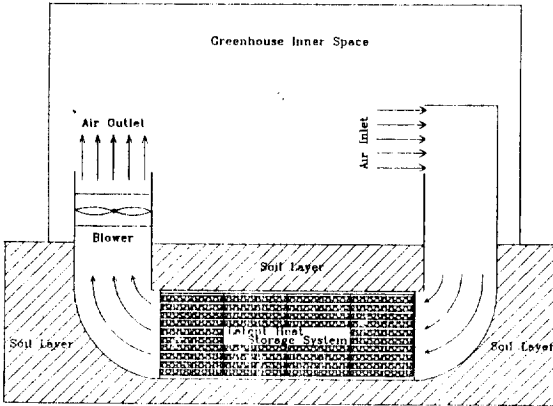


Figure 4 Longitudinal section of greenhouse-latent heat storage system.

그리고 지하에 설치된 잠열 축열 시스템의 단위 요소는 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 5층으로 구성된 강철 프레임 선반에 잠열 축열재로 충전된 튜브를 탑재하여 잠열 축열재의 자중에 의한 프레임의 변형을 방지하였으며, 프레임에 지지된 선반은 철망으로 제작하여 튜브의 4면(상, 하, 좌, 우)에서 동시에 대류 열전달이 일어나도록 하였고, 축열재로 충전된 튜브는 두께 0.4mm의 알루미늄층을 가진 PVC 필름을 이용하였다. 단위 요소의 치수는 500×500×500mm이며, 하나의 단위 요소가 온실 1.62㎡(0.5평)의 난방을 부담할 수 있도록 설계하였다.

Underground Latent Heat Storage Unit

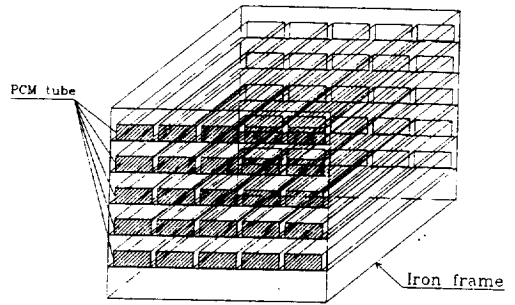


Figure 5 Schematic diagram of unit element of latent heat storage system.

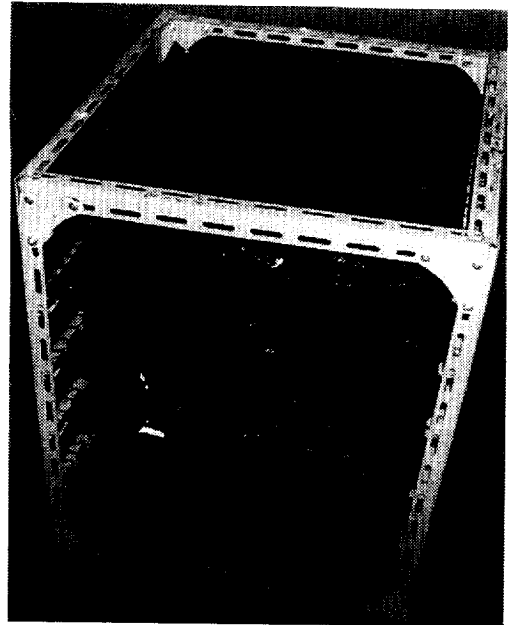


Figure 6 Photograph of unit element of latent heat storage system.

잠열 축열 시스템은 그림 7과 같다. 실험용 온실 6.48㎡(4평)의 난방을 위하여 8개의 단위 요소와 송풍기, 단열재로 구성하였다. 잠열 축열 시스템의 상부는 충분히 단열하고, 토양으로 덮였으며, 이때 토양층의 높이는 채소 작물의 재배가 가능하도록 50cm로 하였다.

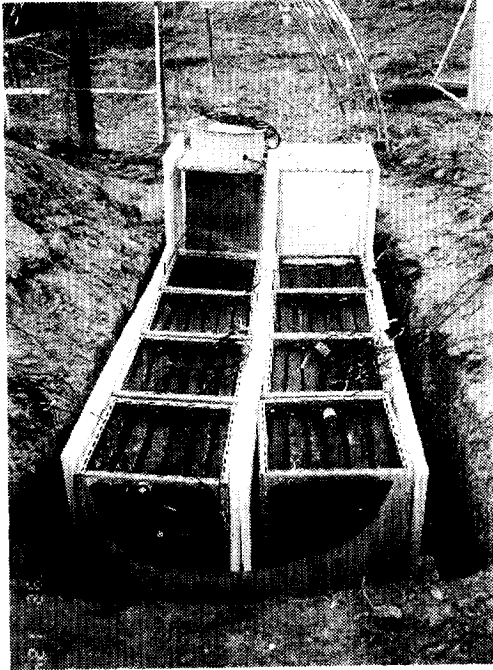
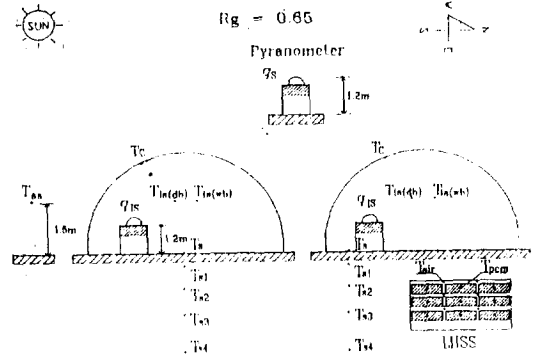


Figure 7 Photograph of latent heat storage system.

잠열 축열 시스템의 온실 보온 효과를 분석하기 위하여 그림 8에서 보는 바와 같이 난방 시스템을 설치하지 않은 온실과 비교 실험하였다. 실험용으로 제작된 2개의 동일 규모의 온실 중 하나에만 잠열 축열 시스템을 설치하고 내부 기온, 외기온, 토양층 온도, PCM 온도 등을 측정하여, 각 부위의 온도 변화를 비교·분석함으로써 잠열 축열 시스템의 온실 보온 효과를 증명하려 하였다.

3. 결과 및 고찰

상변화 물질을 이용하여 잠열 축열 시스템을 구성하기 위해서는 우선 이용 목적에 적합한 온도 수준에서 고농축 잠열 축열이 가능한 상변화 물질을 선택해야 하고, 잠열량 감소의 직접적인 원인이 되는 과냉 및 상분리 현상이 제거되어야 하며, 선택된 잠열 축열재의 상변화 온도가 이용



T_{aa} : Ambient Air Temperature($^{\circ}\text{C}$)

T_c : Greenhouse Cover Temperature($^{\circ}\text{C}$)

$T_{ia}(db)$: Greenhouse Inner Air Temperature of Dry Bulb($^{\circ}\text{C}$)

$T_{ia}(wb)$: Greenhouse Inner Air Temperature of Wet Bulb($^{\circ}\text{C}$)

T_s : Soil Surface Temperature of Greenhouse($^{\circ}\text{C}$)

$T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}$: Soil Layer Temperature of Greenhouse($^{\circ}\text{C}$)

T_{pcm} : Temperature of Phase Change Material($^{\circ}\text{C}$)

T_{air} : Air Temperature among PCM Tubes

R_g : Greenhouse Heating Ratio(Greenhouse Soil Surface Area/Greenhouse Wall Area)

Figure 8 Experimental equipment of greenhouse-latent heat storage system..

온도 수준에 적합하지 않을 경우에는 이용 온도 수준에 알맞게 조절하여 사용해야 한다. 그리고 잠열 축열재가 경제성을 가지려면, 장기간 사용을 위한 신뢰성이 보장되어야 한다. 본 연구에서는 잠열 축열 시스템의 구성을 위한 상변화 물질로서 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 를 선택하였고, 겨울철 태양에너지량을 분석하여 축열가능한 에너지량을 예측하였으며, 잠열 축열 시스템을 제작하여 플라스틱 온실에 설치하고 다음과 같이 실험 분석을 수행하였다.

가. 겨울철 태양복사에너지, 연속비청명일수 및 평균기온

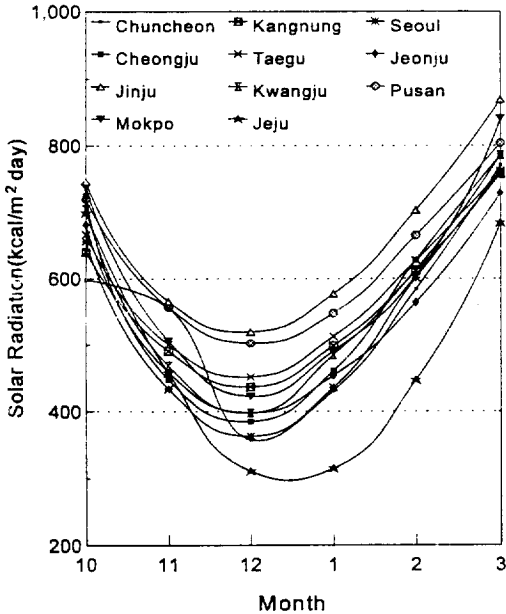


Figure 9 The monthly average daily global horizontal solar radiation of 11 areas in South Korea during last 10 years(1984~1993).

태양 복사 에너지는 재배 작물의 생육 뿐만 아니라 겨울철 온실의 보온을 위해서도 대단히 중요한 요인이다. 주간에 잉여 태양 에너지를 저장하여 온실의 야간 보온에 이용하기 위해서는 온실 재배 기간 동안의 태양 에너지와 난방이 필요한 외기온 7.0℃ 이하의 연속 비청명일수를 분석하여야 한다.

기상 관측소에서 수집한 지난 10년 동안 국내 11개지역의 월별 평균 일사량을 분석한 결과 그림 9와 같으며, 일사량의 최저값은 전지역에서 12월에 나타났고, 지역별로는 진주가 가장 높은 값을 보였으며, 제주 지방이 가장 낮은 값을 보였다.

태양 에너지 뿐만 아니라 외기온 7.0℃ 이하의

연속 비청명일수도 태양 에너지를 이용하는 축열 시스템을 설계하는 데 있어서 중요한 요인중의 하나이며, 전국 11개지역의 월별 연속 비청명일수를 분석한 결과는 그림 10에서 보는 바와 같다. 10월, 11월, 12월, 3월에는 7.0℃ 이하의 연속 비청명일수가 약 7일로 나타났으며, 1월과 2월에는 약 4~12일이었었다. 지역별로는 제주 지역이 가장 길게 나타났고, 진주 지역이 가장 짧게 나타났었다.

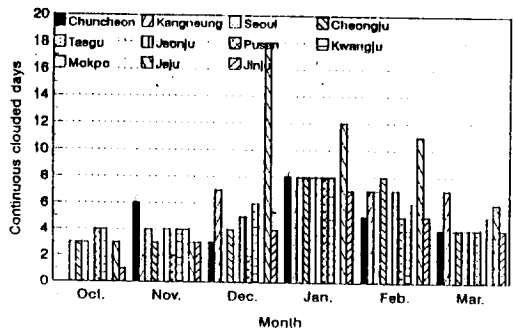


Figure 10 Monthly continuous clouded days of the greenhouse culture season.

축열이 가능한 잉여 태양 에너지량을 분석하기 위해서는 온실내의 공기 온도 분포를 측정할 필요가 있다. 겨울철 온실내의 평균 공기 온도를 분석하여 그림 11에 나타내었으며, 청명일과 비청명일로 나누어 분석하였다.

비청명일에는 외기온이 -5.7~3.7℃로 변하는 동안 온실 내부 기온은 최저 -5.5℃에서 최고 9.8℃까지 변화였으며, 청명일에는 외기온이 -3.5~14.4℃로 변하는 동안 온실 내부 기온은 최저 2.0℃에서 최고 24.0℃까지 변화였다. 청명일의 경우에는 온실의 실내 기온이 약 4시간 동안 20℃ 이상을 유지하므로 20℃ 이하의 상변화 온도를 갖는 잠열 축열재를 이용한 축열이 가능한 것으로 판단된다.

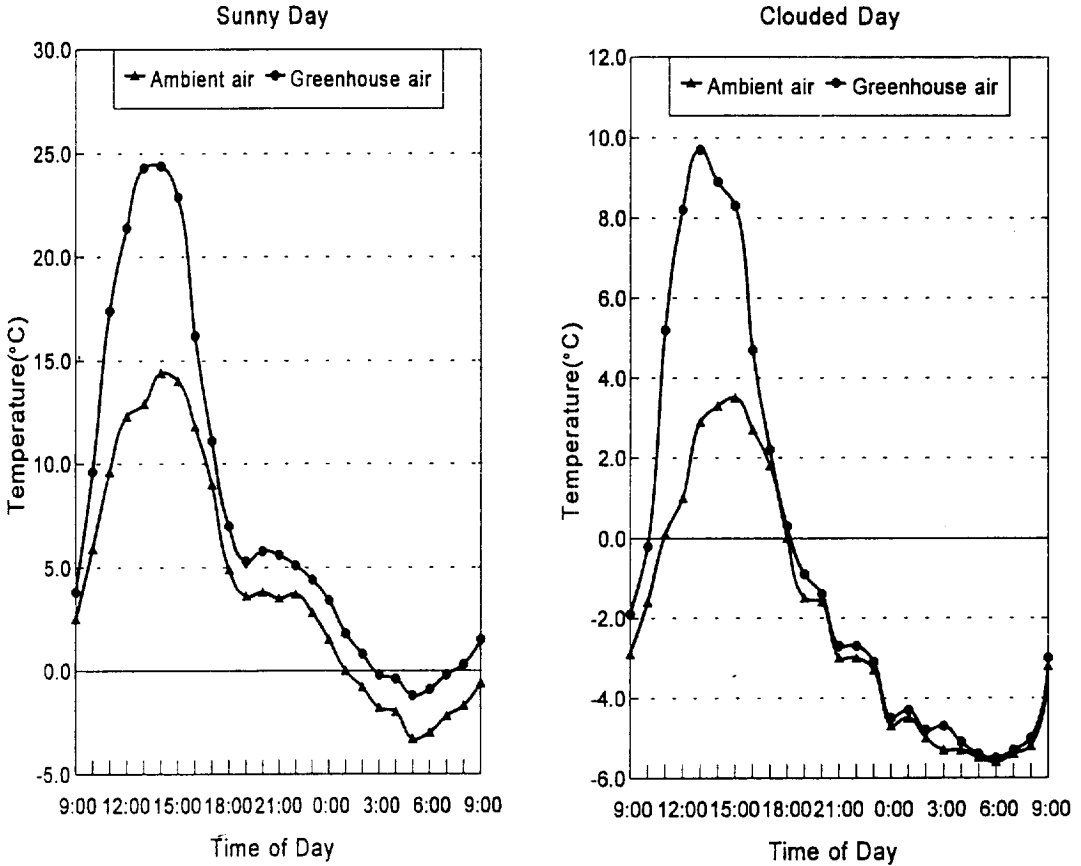


Figure 11 The air temperature variation in greenhouse corresponding to the ambient temperature variation on the sunny and clouded day during winter season.

나. 태양열-지하 잠열 축열 시스템의 온실 보온 효과

겨울철 온실 보온에 태양 에너지를 최대한 활용한다면 화석 에너지 의존도를 줄일 수 있고, 작물 재배 환경의 오염을 방지할 수 있다는 것은 주지의 사실이다. 이러한 목적을 실현하기 위하여 온실 보온을 위한 태양 에너지 잠열 축열 시스템이 개발되었고, 지하 잠열 축열 시스템의 온실 보온 효과를 다음과 같이 분석하였다.

태양 에너지 잠열 축열 시스템의 실험 결과를 청명일과 비청명일로 구분하여 분석하였으며, 그 결과를 그림 12와 13에 나타내었다.

청명일의 경우에는 그림 12에서 보는 바와 같이 주간의 최대 태양 강도는 13시에 647 W/m^2 이었으며, 하루동안의 태양 에너지 적산량은 $3,292 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{day}$ 였다. 최고 외기온은 10.3°C 였고, 최저 외기온은 -6.4°C 였다. 잠열 축열 시스템을 설치한 온실의 내부기온은 최고 26.5°C 였고, 최저 3.0°C 로서 최저 외기온에 비하여 9.4°C 높게 나타났다. 이에 비하여 잠열 축열 시스템을 설치하지 않은 온실의 내부기온은 최고 34.8°C , 최저 -3.1°C 로서 최저 외기온 보다 3.3°C 높게 나타났다.

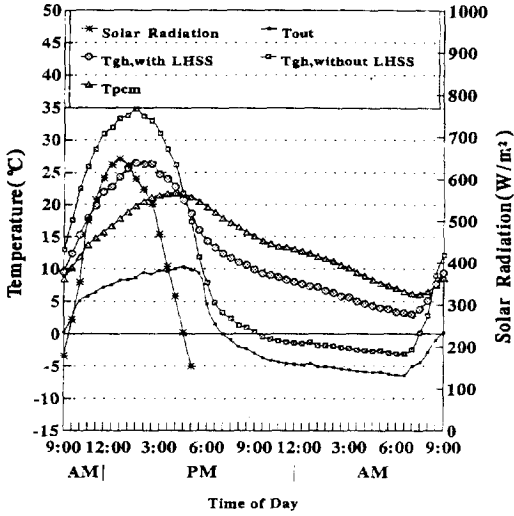


Figure 12 Temperature variation of ambient air, greenhouse inner air, and PCM and solar radiation during a sunny day and night.

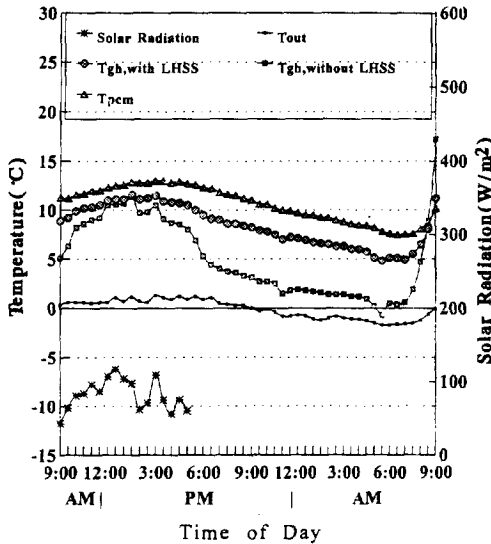


Figure 13 Temperature variation of ambient air, greenhouse inner air, and PCM and solar radiation during a cloudy day and night.

이와 같이 잠열 축열 시스템을 설치한 온실의 최저 실온은 최저 외기온 보다 9.4°C 높게 나타났으며, 잠열 축열 시스템을 설치하지 않은 온실의 최저 실온은 보다는 6.1°C 높게 나타났다. 그러나 주간에는 잠열 축열 시스템을 설치하지 않은 온실의 최고 실온이 잠열 축열 시스템을 설치한 온실의 최고 실온 보다 8.3°C 높게 나타났다.

이상의 결과로 보아 주간의 잉여 태양 에너지가 잠열 축열 시스템에 효과적으로 축열되어 야간의 보온에 이용되었다고 판단할 수 있다.

그림 13은 주간의 태양 강도가 43~17 W/m²이고, 외기온이 -1.7~1.3°C인 비청명일의 실험 결과이다. 잠열 축열 시스템을 설치한 온실의 최고 실온은 11.6°C였고, 잠열 축열 시스템을 설치하지 않은 온실의 최고 실온은 11.4°C로서 최고 실온의 차이는 거의 없었으나, 야간에는 잠열 축열 시스템을 설치한 온실의 최저 실온이 잠열 축열

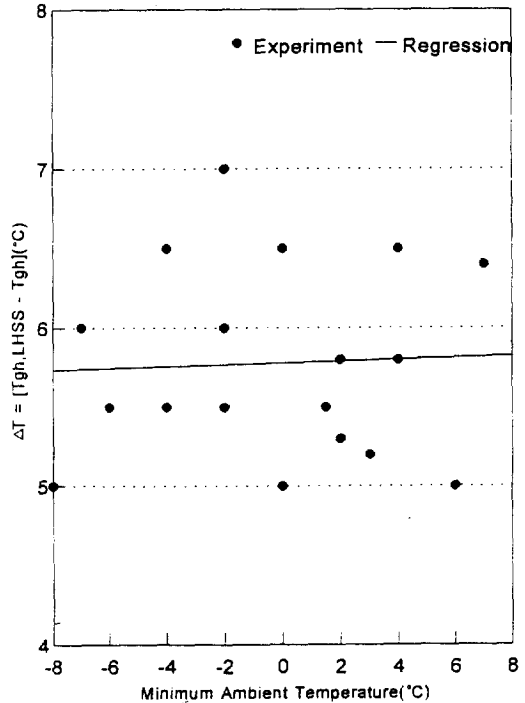


Figure 14 Minimum ambient air temperature effect on the greenhouse heating.

시스템을 설치하지 않은 온실의 최저 실온 보다 5.5°C 높게 나타났다. 즉, 태양 강도가 낮아서 온실의 실온이 PCM의 상변화 온도보다 낮은 경우에도 잠열 축열 시스템 내부에는 현열의 형태로 열이 저장되고 있음을 알 수 있으며, 비청명일에도 상당한 양의 에너지 절감이 기대되는 고무적인 결과를 얻었다.

그림 14는 잠열 축열 시스템을 설치한 온실과 잠열 축열 시스템을 설치하지 않은 온실의 내부 기온차를 온실 보온 효과(ΔT)로 하여 종축에 표시하고, 횡축은 실험 기간 동안의 최저 외기온을 표시한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 온실 보온 효과는 최저 외기온의 변화와 상관관계가 거의 없음을 알 수 있었다.

태양 강도가 온실 보온 효과에 미치는 영향을 분석한 결과는 그림 15에서 보는 바와 같다. 횡축에 표시된 태양 강도가 증가함에 따라 온실

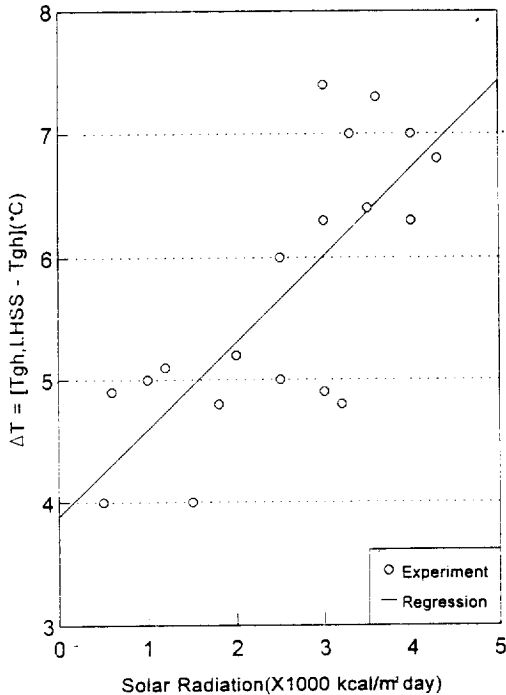


Figure 15 Solar radiation effect on the greenhouse heating at the minimum ambient air temperature.

보온 효과는 직선적으로 비례하는 경향을 보였으며, 실험 기간 중 최저 일사량은 500kcal/m²·day였고, 최대 일사량은 4,200 kcal/m²·day였다. 그리고 온실 보온 효과는 최저 4.0°C, 최고 7.5°C였다.

다. 태양열-지하 잠열 축열 시스템의 온실 습도 제어

잠열 축열 시스템을 설치한 온실과 설치하지 않은 온실의 상대 습도를 측정하여 그림 16에 나타내었다. 잠열 축열 시스템을 설치하지 않은 온실내의 상대 습도는 주간에는 최저 30% 이하로 급강하였다가 야간에는 급상승하여 최고 93%에 도달하였다. 주간의 지나친 습도 저하는 작물의 광합성에 영향을 주며, 야간에 90% 이상의 과습은 작물에 병해를 유발하게 된다. 지하에 설치한 잠열 축열 시스템은 주야간의 습도차를 현저하게 감소시켜 주간에는 최저 50%, 야간에는 최고 84%를 유지하였다.

잠열 축열 시스템을 이용하여 온실 난방에 활용한다면, 난방 뿐만이 아니라 인위적인 습도 조

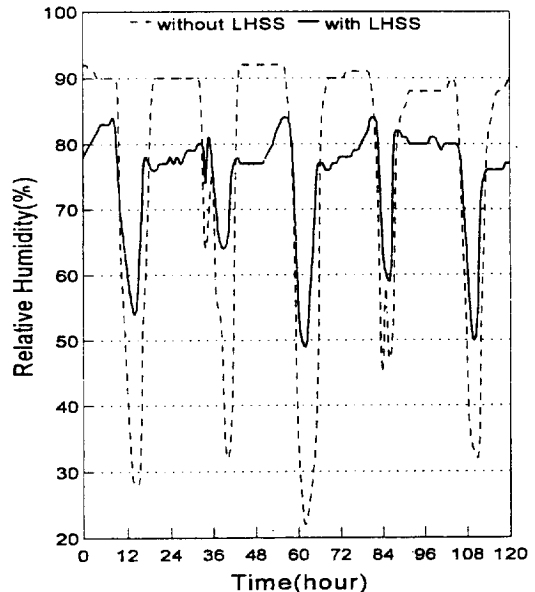


Figure 16 Relative humidity variation of greenhouse with and without LHSS.

철의 필요성도 배제할 수 있음을 알 수 있었다.

라. 경제성 분석

겨울철 온실 난방에 등유를 이용하는 경우와 본 연구에서 개발한 지하 잠열 축열 시스템을 이용하는 경우의 비용을 비교하여 태양열-지하 잠열 축열 시스템의 경제성을 다음과 같이 고찰하였다. 여기서 등유를 연료로 하는 경우와 지하 잠열 축열 시스템을 난방 열원으로 하는 경우 모두 그 설비에 필요한 비용은 서로 상쇄되므로 연료 구입 비용과 잠열 축열재 구입 비용만을 비교·분석하였으며, 잠열 축열 시스템의 수명이 10년이므로 10년간 소모되는 연료와 그 가격을 기준으로 태양열-지하 잠열 축열 시스템의 경제성을 분석하였다.

온실 피복재는 농업용 PVC Film(0.05mm)으로 하였고, 0.1mm의 보온 커튼이 있는 경우와 없는 경우의 난방 부하를 기준으로 온실난방에 필요한 등유 소요량을 결정하였으며, 등유가격은 1994년 7월 15일 기준 252원/ℓ로 하였다.

난방 기간 중 온실의 최저 설정 온도는 7.0℃로 하였고, 보온 커튼이 없는 경우의 난방 부하는 외기온 -8.0℃를 기준으로 1,624.2kcal/m²·night였으며, 보온 커튼이 있는 경우에는 962.0 kcal/m²·night였다. 그리고 겨울철 온실 재배 기간(10월~다음해 3월) 중 난방이 필요한 일수는 중부지방에서 최저 외기온이 0.0℃ 이하인 날을 기준으로 하여 122일로 정하였고, 10년 동안 난방이 필요한 일수는 1,220일이었으며, 이상과 같은 기준에 의하여 다음과 같이 비용을 계산하였다.

10년간 온실 보온에 필요한 등유 구입 비용(원/m²)

◦ 보온 커튼이 없는 경우 : 1,624.2(kcal/m²·night) × 1,220(일) × 252(원/ℓ) / 8000(kcal/ℓ) = 62,418(원/m²)

◦ 보온 커튼이 있는 경우 : 962.0(kcal/m²·night) × 1,220(일) × 252(원/ℓ) / 8000(kcal/ℓ) = 36,970(원/m²)

10년간 온실 보온에 필요한 잠열 축열재 구입 비용(원/m²)

◦ 보온 커튼이 없는 경우 : 370(원/kg) × 40.08(kg/m²) = 14,830(원/m²)

◦ 보온 커튼이 있는 경우 : 370(원/kg) × 23.74(kg/m²) = 8,784(원/m²)

위와 같은 비용 계산에 근거하여 태양열-지하 잠열 축열 시스템을 온실 난방에 이용하는 경우의 비용 절감 효과는 등유 난방 비용을 기준으로 하여 약 76%였다.

4. 요약 및 결론

온실 보온에 태양 에너지를 최대한 활용하여 화석 에너지의 소비를 줄이고, 작물 재배 환경의 오염을 방지하기 위하여 태양열-지하 잠열 축열 시스템을 설계·제작하였으며, 온실의 지하에 설치하고 난방 실험을 수행하였다. 잠열 축열재로는 Na₂SO₄·10H₂O를 선택하였고, 과냉각, 상분리 등의 불안정한 물성을 안정시켰으며, 겨울철 온실 재배 기간 동안의 잉여 태양 에너지를 지역별로 분석하였다. 잉여 태양 에너지량과 온실 보온에 필요한 난방 부하에 근거하여 잠열 축열 시스템의 규모를 결정하여 실험 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 잠열 축열재로 선택한 Na₂SO₄·10H₂O의 물성을 첨가제에 의하여 안정시킬 수 있었다.
2. Na₂SO₄·10H₂O의 상변화 온도(32℃)를 온도 조절제에 의하여 13~15℃로 조절하므로써 온실 보온에 적합한 축열 온도 수준을 얻을 수 있었다.
3. 온실 재배 기간 동안의 태양 강도는 12월에

최소값을 보였으며, 지역별로는 진주 지방이 가장 높았고, 가장 낮은 지역은 제주였다.

4. 잠열 축열 시스템을 설치한 온실의 최저 실온은 설치하지 않은 온실의 최저 실온보다 4.0~7.5°C 높게 나타났으며, 최저 외기온 보다는 7.0~11.2°C 높게 나타났다.
5. 잠열 축열 시스템에 의한 온실 보온 효과는 일사량의 증가에 비례하여 직선적으로 증가하였으나, 최저 외기온의 변화와는 무관하였다.
6. 잠열 축열 시스템을 설치하지 않은 온실내의 상대 습도는 30~93%로서 주야간의 격차가 심하게 나타났으나, 잠열 축열 시스템을 설치한 온실내의 상대 습도는 50~84%로 주야간의 격차가 작은 안정된 값을 보였다.
7. 등유를 온실 난방 에너지로 이용하는 경우와 비교하여 태양열-지하 잠열 축열 시스템의 비용 절감 효과는 76%였다.

참 고 문 헌

1. A. A. Ghoneim. 1989. Comparison of theoretical models of phase-change and sensible heat storage for air and water-based solar heating systems. *Solar Energy* Vol.42(3) : 209-220.
2. A. A. Ghoneim, S. A. Klein, J. A. Duffie. 1991. Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials. *Solar Energy* Vol.47(3) : 237-242.
3. A. A. Ghoneim, S. A. Klein. 1989. The effect of phase change material properties on the performance of solar air-based heating systems. *Solar Energy* Vol.42(6) : 441-447.
4. M. Sokolov, Y. Keizman. 1991. Performance indicators for solar pipes with phase change storage. *Solar Energy* Vol.47(5) : 339-346.
5. T. Boulard, E. Razafinjohany, A. Baille, A. Jaffrin, B. Fabre. 1990. Performance of a greenhouse heating system with a phase change material. *Agricultural and Forest Meteorology* Vol.52 : 303-318.
6. 日本施設園藝協會. 1988. 施設園藝新技術 實用化促進事業. 第3分冊 : 35-49.
7. 유영선. 1992. 그린하우스 보온을 위한 태양 에너지-잠열 축열 시스템의 개발. 충북대학교 박사 학위 논문.
8. Song, Hyun-Kap, Ryou, Young-Sun. 1993. Solar Energy - Latent Heat Storage System for Greenhouse Heating. *Proc. of I.C.A.M.P.E.* Vol.2 : 453-472.
9. 송현갑, 유영선, 김영복. 1993. 온실 보온을 위한 상변화 물질의 축열 특성 연구. *한국태양 에너지학회지* Vol.13(2) : 65-78.