

Greenhouse 保溫을 위한 太陽에너지 潛熱蓄熱 研究

Study on the Latent Heat Storage of Solar Energy for Greenhouse Heating

宋 鉉 甲*, 柳 瑩 善**
H. K. Song *, Y. S. Tyu **

Summary

In Korea, the cultivation area under the plastic greenhouse was 1,746 ha in 1975, and 36,656 ha in 1989, it shows that the greenhouse cultivation area was increased by 21 times during last 14 years. The greenhouse cultivation area of 90~93% has been kept warm with double layers of plastic film and thermal curtain knitted with rice straw, and the rest area of 7~10% has been heated by fossil fuel energy.

The use of rice straw thermal curtain is inconvenient to put it on and off, on the other hand the use of fossil fuel heating system results in the increase of production cost.

To solve these problems, at first the heating load and the storable solar energy in greenhouse during the winter season were predicted to design solar utilization system, secondly a solar thermal storage system filled with latent heat storage materials was developed in this study. And then finally the thermal performance of greenhouse-solar energy storage system was analyzed theoretically and experimentally.

1. 서 론

국내의 시설원에 농가에 보급되어 있는 Greenhouse의 재배면적은 1989년 현재 36,656ha로서 1975년의 1,746ha와 비교하여 14년만에 약 21배로 증가하였으며, 그 중에서 93%에 해당하는 34,090ha가 이중피복이나 짚으로 만든 덮개 등의 보온재를 사용하여 겨울철 야간의 Greenhouse 보온을 하고 있어서 많은 노동력이 소요

되므로 보다 간편한 보온시스템이 절실히 요구되고 있다.

이에 부응하여 본 연구에서는 잠열축열재에 태양에너지를 축열이용하는 잠열축열 보온시스템 개발을 위한 기초단계로서 다음과 같은 연구를 수행하였다.

1) Greenhouse 재배기간 중 우리나라 주요지역의 10년간 평균 태양강도 분석과 그 기간 중 Greenhouse내의 잉여 태양에너지를 분석하여 축열가능 에너지량과 설정 온도수준을 구명하였

* 忠北大學校 農業機械工學科
** 忠北大學校 大學院 農工學科 農業機械工學專攻

으며, 축열 system의 규모결정에 필요한 Greenhouse의 난방부하를 결정하는 이론을 정리하였으며,

2) 태양에너지를 고농축 저장할 수 있는 저온 잠열재를 개발하여 그 잠열재의 축열특성을 분석하였고,

3) Greenhouse 내의 열평형 이론을 정립하여 이에 알맞는 잠열축열장치를 만들어 Greenhouse 보온을 실험적으로 분석하였다.

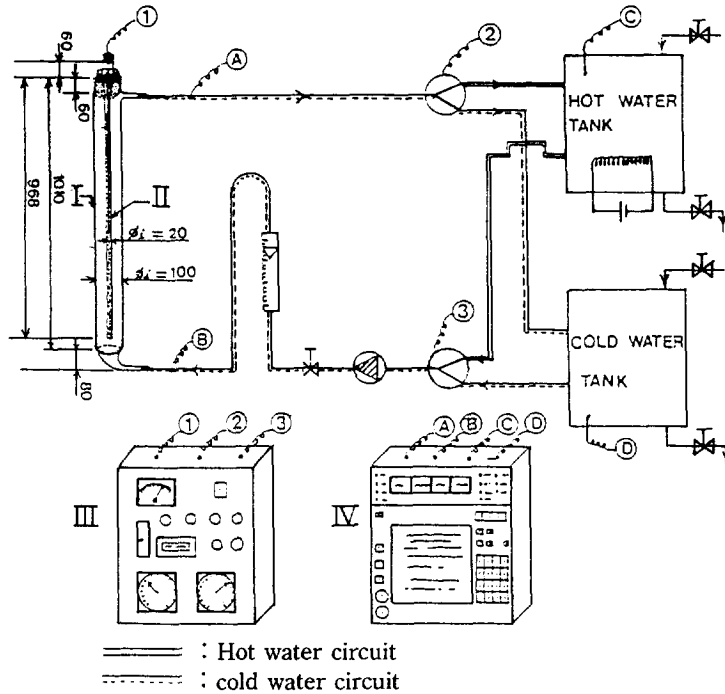
공업용 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 는 상변화 온도가 태양열 저장매체로서 알맞은 수준이며, 상변화시에 잠열량이 커서 Greenhouse-잠열축열시스템의 구성에 적합한 수화염이지만 축열재로 이용하기 위해서는 과냉현상, 상분리현상 등을 제어하여 안정한 물성을 유지시켜야 한다. 그림 1과 같은 실험장치를 이용하여 반복되는 상변화 사이클에서 과냉현상 및 상분리현상을 측정·분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

가. 잠열축열재의 상변화 안정성 실험

본 실험에서 저온 축열용 잠열재로서 선택한

나. Greenhouse-잠열축열시스템의 구성
실험용 Greenhouse의 보온비는 0.7로 하였고, 주간에 태양에너지를 최대로 받을 수 있도록 Greenhouse의 길이방향을 동서로 하여 설치하



- I : Vertical transparent exterior tube filled with hot and cold water
- II : Transparent interior tube filled with PCM
- III : Automatic control box of phase change cycle tester
- IV : Hybrid temperature measuring system
- ① : Thermocouple for sensing the phase change temperature of PCM.
- ② ③ : Connecting cord between the three way valves and control box, III
- ① ② ③ ④ : circulating water temperature measuring points

Fig. 1 Automatic phase change cycle tester.

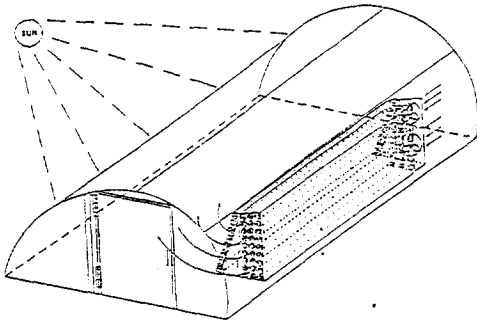


Fig. 2 Configuration of greenhouse-latent heat storage system.

였으며, 잠열축열시스템은 Greenhouse내부의 북쪽에 위치하도록 하여 작물재배에 영향이 없도록 하였다.(그림 2 참고)

3. 결과 및 고찰

가. 태양강도 및 저장가능에너지 분석

1) Greenhouse 재배기간중 태양강도

도

대부분의 Greenhouse는 겨울철에 채소원에 작물을 재배하고 있으며, 재배기간은 11월에서 이듬해 3월까지 하는 것이 보통이나 이외의 기간에도 온실재배를 하는 경우가 있으며, 난방이 필요한 온실재배기간인 11월에서 3월까지의 잉여태양에너지를 Greenhouse 보온에 이용하기 위하여 우리나라 태양강도를 10년간의 평균치로 분석하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 남부지방의 10년 평균태양강도는 10.80 MJ/m² · day였으며, 중부지방은 9.69 MJ/m² · day, 영동지방은 7.10 MJ/m² · day 그리고 전국평균태양강도는 9.20 MJ/m² · day였다.

2) Greenhouse 보온을 위한 난방부하

일정기간 동안에 필요한 Greenhouse의 난방부하(Q_q)를 결정하기 위하여 온도차와 시간을 동시에 고려하는 Degree-Hour 개념을 도입하였으며, 정립된 이론식은 다음과 같다.

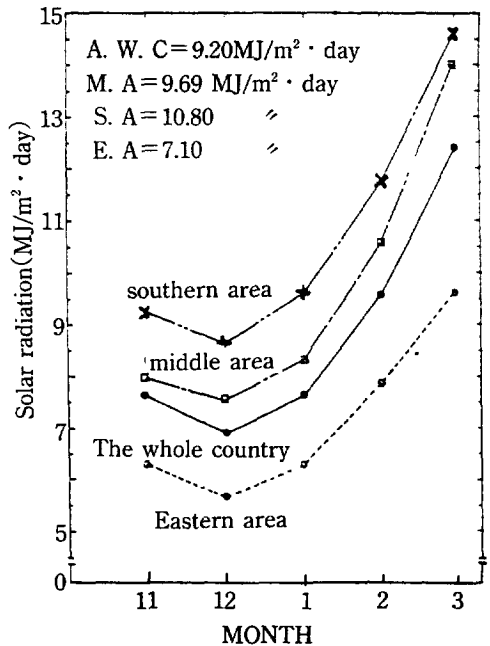


Fig. 3 Monthly average solar radiation during the greenhouse culture season in Korea.

$$Q_q = A_w h_h \left(1 - \frac{\Delta T_{soil}}{\Delta T_a} \right) DH, \dots \dots \dots (3-1)$$

$$[DH = \int (T_c - T_{out}) dt] \dots \dots \dots (3-2)$$

$$[DH = 2.18(T_c - T_{Low})^{1.66}] \dots \dots \dots (3-3)^{(3)}$$

where A_w = Greenhouse cover의 표면적(m²)

h_h = (h_i + h_{vent}) : Greenhouse의 전열 손실계수 (kcal/m² · hr °C)

h_i = Greenhouse cover를 통한 열전달 계수 (kcal/m² · hr °C)

h_{vent} = Greenhouse의 환기에 의한 열손실계수 (kcal/m² · hr °C)

ΔT_{soil} = (T_c - T_{out})_{soil} : Greenhouse 내의 토양 흡수에너지에 의한 실온상승 효과(°C)

T_c = Greenhouse 내부의 設定溫度(°C)

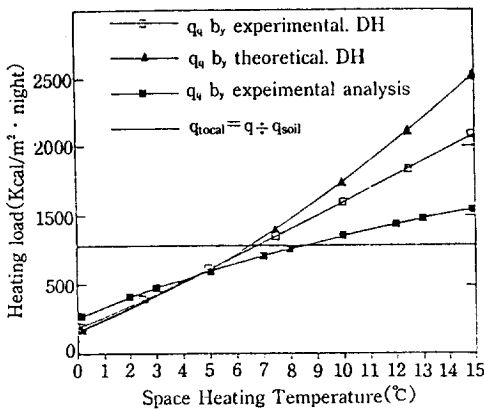
T_{out} = Greenhouse 외부의 大氣溫度(°C)

DH = Degree Hour : 온도 시간(°C)

T_{Low} = 日最低外氣溫(°C)

난방부하의 결정을 위하여 필요한 Degree Hour를 계산하기 위하여 이론식 (3-2)와 실험식 (3-3)를 이용하였고, 이를 실험치와 비교 분석한 결과 그림 4에서 보는 바와 같이 설정온도 5°C 이하에서는 실험치가 이론치보다 큰 값을 보였으며, 5°C 이상에서는 이론치가 실험치보다 점점 더 커지는 경향을 보였고, Thermal Curtain이 있는 경우 축열가능 태양에너지로 유지할 수 있는 실온은 7°C였다.

이상과 같은 결과로 보아 Greenhouse의 난방부하 결정에 관해서는 방열계수와 Degree Hour를 실험적으로 더 정확하게 분석, 규명하여야 할 것으로 사료된다.



*Greenhouse의 보온비: 0.70,
최저외기온: -6.0°C

Fig. 4 Comparison of theoretical and experimental values of heating load on the night in greenhouse with thermal curtain.

3) 축열가능 태양에너지

태양에너지를 이용하여 Greenhouse내의 야간난방을 하기 위해서는 우선 주간에 축열가능한 태양에너지량을 추정하여야 한다. 즉, 온실보온에 필요한 에너지(난방부하)를 축열가능 태양에너지로 충분히 부담할 수 없다면 보조에너지를 투입하여야 하므로 축열가능 태양에너지를 추정하여 축열시스템의 규모를 결정하는 것이 합리적이다. 지역과 계절에 따라 복잡하게 변하는 기상요인을 모두 고려하여 축열가능 태양에너지량을 예측한다는 것은 거의 불가능하며, 본

연구에서는 축열가능 태양에너지에 영향을 주는 요인을 간단화 하기 위하여 평균태양강도, 평균외기온, 온실의 태양에너지 투과량, Greenhouse의 열손실 그리고 토양층의 흡수율을 고려한 열평형식을 이용하여 축열가능 태양에너지(q)의 예측식을 다음과 같이 유도하였다.

$$q = q_s \times (\tau_c - \alpha_{soil}) - U \Delta T$$

$$= \beta \times \tau_c \times q_s - U \Delta T$$

(storable Energy) ... (3-4)

$$q_{soil} = R_s \times \alpha_{soil} \times q_s$$

(Energy Stored in Soil) ... (3-5)

$$q_p = q_s - (q + q_{soil} + U \Delta T) \dots \dots \dots (3-6)$$

여기서

$C - T_{out}$; q_s : Solar Energy, $\Delta T = T$

q_{soil} : 토양에 흡수된 Energy

q_p : Greenhouse내의 작물이 받는 Energy

$$U = (h_t + h_{vent}) \frac{A_f}{A_c} = 6.75 (\text{kcal/m}^2 \text{hr } ^\circ\text{C})$$

α_{soil} : Absorptivity of Soil

$$\beta = 1 - \frac{R_s \times \alpha_{soil}}{\tau_c} \div \text{온실내 투과된 태양에너지의 실온상승 기여율}$$

T_c : 設定溫度(20°C), T_{out} : 外氣溫度

h_t : 熱貫流率, h_{vent} : 換氣率

$\tau_c = 0.551$ (Transmissivity of Cover)

$$R_s = \frac{A_f - A_p}{A_f} = 0.2, A_c = \text{Area of Cover}$$

A_f = Area of Floor

A_p = Area of Plant Cover

Greenhouse를 중심으로 하여 열평형을 이루고 있는 항목별 에너지 분포를 분석한 결과 그림 5와 같으며, 태양강도가 가장 큰 13:30분을 기준으로 보면 작물이 받는 에너지(q_p)가 가장 컸으며, 그 다음으로 저장가능 잉여에너지(q), 손실에너지($U \Delta T$) 그리고 토양에 저장되는 에너지(q_{soil})의 순이었고, 온실보온을 위한 축열잠재력($q + q_{soil}$)은 전체태양에너지의 20.8%로서 태양에너지를 이용한 Greenhouse보온의 충분한 가능성을 시사해주고 있다.

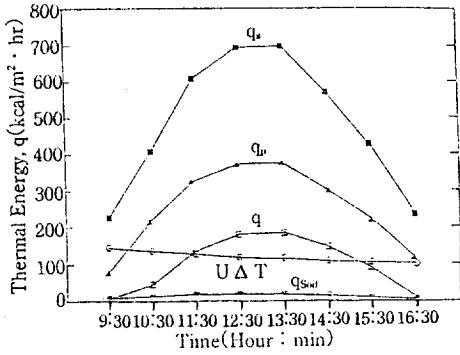


Fig. 5 Comparison of q_s , $U \Delta T$, q , q_{soil} and q_p .

4) 난방부하에 대응하는 전체축열 태양 에너지

전체축열 태양에너지는 토양축열에너지(q_{soil})와 축열가능 잉여태양에너지(q)와의 합으로 하였으며, 이와 같은 축열에너지의 난방부하부담율을 그림 6과 같이 표현하였다. 횡축을 보온해야 할 설정실온(T_c)으로 하고, 종축을 전체축열 태양에너지에 대한 난방부하의 비율($R = \{q_p / [q \times \eta_{th} + q_{soil}]\}$)로 하여 잠열축열시스템효율(η_{th}) 별로 이론적으로 분석한 결과 Thermal Curtain

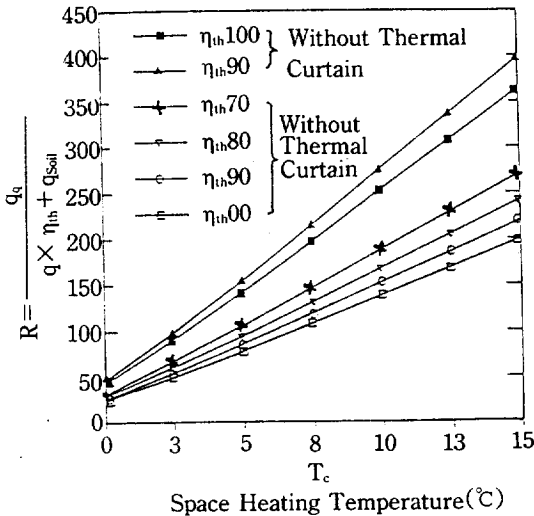


Fig. 6 Mutual relations between R and T_c in case of greenhouse with thermal curtain and without thermal curtain.

이 있는 경우에는 $\eta_{th} = 100\%$ 로 하고, $R = 100\%$ 로 활용할때 야간실온을 7.5°C 로 유지할 수 있게 되며, $T_c = 10^\circ\text{C}$ 를 유지하기 위해서는 $\eta_{th} = 100\%$ 일때 140%의 전체축열 태양에너지가 필요하므로 40%의 보조에너지가 필요하게 된다.

나. Greenhouse 보온을 위한 저온 잠열재의 물성안정 및 잠열량 분석

그림 7에서 보는 바와 같이 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 에 3~5wt%의 NaCl 을 첨가하여 냉각과정에서의 과냉도(ΔT)를 18°C 에서 1.5°C 이하로 감소시켜 과냉현상을 최소화 하였으며, 상분리현상은 3 wt%의 Thickenner를 첨가하여 해결하였다.

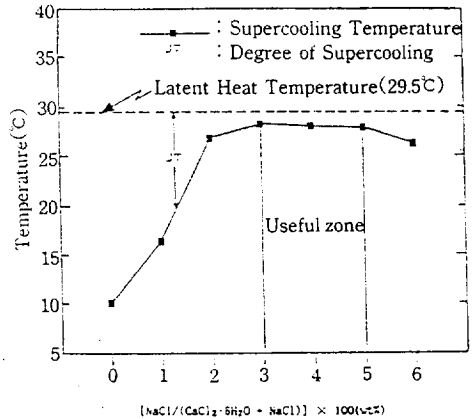


Fig. 7 Adjustment of supercooling by the nucleating agent(NaCl).

저장 가능 태양에너지의 축열이용을 위하여 Greenhouse 잠열축열시스템에 이용한 공업용 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 의 잠열량 변화를 상변화 사이클을 증가시키며 측정된 결과 그림 8에서 보는 바와 같이 초기에는 잠열량이 45kcal/kg 이었으며, 1000 cycle 이후에는 40kcal/kg 로서 약간 감소하였다.

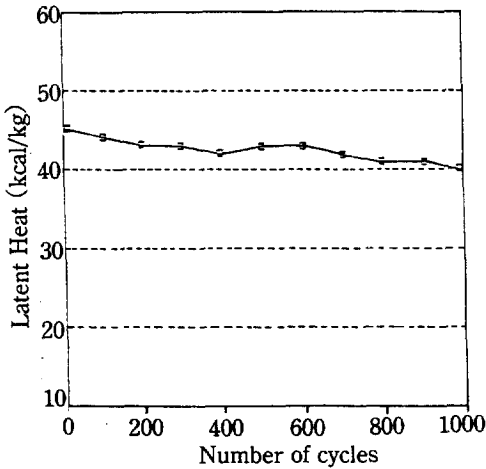


Fig. 8 Variation of latent heat in accordance with the increase of phase change cycles.

다. Greenhouse-잠열축열시스템의 열특성 분석

1) Greenhouse-잠열축열시스템의 열평형에 관한 이론분석

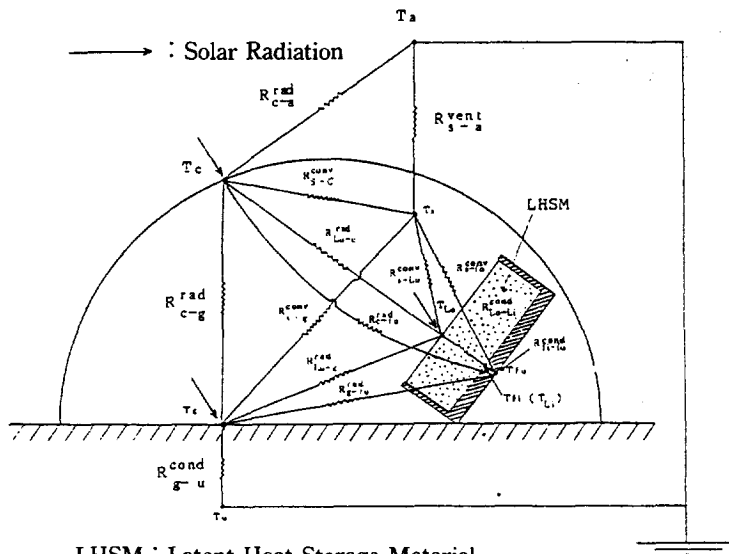
잠열축열 시스템을 포함하는 Greenhouse의 열평형을 분석하기 위하여 그림 9와 같이 각 지점에서의 열흐름을 Thermal Resistance Network을 이용하여 표현하였으며, 이를 근거로 다음과 같은 비선형 연립방정식을 구성하여 이를 Newton의 반복법에 의하여 풀었다.

- Greenhouse Cover를 中心으로 한 Energy Balance

$$Q_{Sun-C}^{SR} + Q_{C-Sky}^{rad} + Q_{C-agr}^{rad} + Q_{C-a}^{conv} + Q_{S-C}^{conv}$$

$$Q_{Lo-C}^{rad} + Q_{fo-C}^{rad} + Q_{C-g}^{rad} + Q_c + \alpha M_c = 0$$

(3-7)



- LHSM : Latent Heat Storage Material
- Ta : Ambient air temperature
- Tc : Greenhouse cover temperature
- Ts : Inside air temperature of green house
- Tp : plant temperature in green house
- Tg : soil surface temperature in green house
- Tb : Surface temperature of latent heat material
- Ti : Inside temperature of latent heat material
- Tu : Subsoil temperature in geenhouse

Fig. 9 Thermal network on the energy balance in greenhouse.

- Greenhouse 内部空氣를 中心으로 한 Energy Balance

$$Q_{S-C}^{conv} + Q_{S-g}^{conv} + Q_{S-Lo}^{conv} + Q_{S-fo}^{conv} + Q_{S-a}^{vent} = 0 \quad (3-8)$$

- 潛熱材表面을 中心으로 한 Energy Balance

$$Q_{Sun-Lo}^{SR} + Q_{Lo-C}^{rad} + Q_{Lo-Li}^{cond} + Q_{S-Lo}^{cond} + Q_s = 0 \quad (3-9)$$

- Frame 内面을 中心으로 한 Energy Balance

$$Q_{Lo-Li}^{cond} + Q_{fi-fo}^{cond} = 0 \quad (3-10)$$

- Frame 外面을 中心으로 한 Energy Balance

$$Q_{fi-fo}^{cond} + Q_{S-fo}^{conv} + Q_{fo-C}^{rad} + Q_{fo-g}^{rad} = 0 \quad (3-11)$$

- 溫室内部地表面(Greenhouse Floor)을 中心으로 한 Energy Balance

$$Q_{Sun-g}^{SR} + Q_{g-u}^{cond} + Q_{S-g}^{conv} + Q_{C-g}^{rad} + Q_{f-g}^{rad} + \alpha M_g = 0 \quad (3-12)$$

- Moisture Balance Equation

$$\rho_s V_s \frac{dW_s}{dt} = M_g - M_v - M_c \quad (3-13)$$

여기서, Q : Amount of Heat

- cond : Conduction, conv : Convection
- rad : Radiation, SR : Solar Radiation
- a, agr : Ambient air and ambient ground
- C : Greenhouse cover
- fi,fo : Frame surfaces(inside and outside)
- g : Greenhouse floor(soil surface)

Li,Lo : The surfaces of Latent Heat Material (inside and outside)

S : Inside air of greenhouse

u : Soil layer(underground)

αM_c : Latent heat by vapor condensation on cover
 M_g : Latent Heat by water vaporization on the greenhouse floor

$\rho_s V_s \frac{dW_s}{dt}$: The variance of water vapor in the inside air

M_v : The movement of water vapor by ventilation

물질 평형 방정식(3-13)을 이용하여 Greenhouse 내부 공기의 수분 이동량을 계산하였으며, Energy Balance Equation(3-7~3-12)에 의하여 Greenhouse 각 부위의 온도를 예측하였다.

2) Greenhouse-잠열축열시스템의 실험분석

Greenhouse-잠열축열시스템의 온실보온효과를 실험적으로 분석하기 위하여 태양강도, 외기온, Greenhouse 내부기온, 잠열축열체의 온도등을 오전 9시부터 다음날 오전 9시까지 7일간 반복해서 측정하였으며, 잠열축열시스템을 설치하지 않은 Greenhouse와 비교분석하였다.

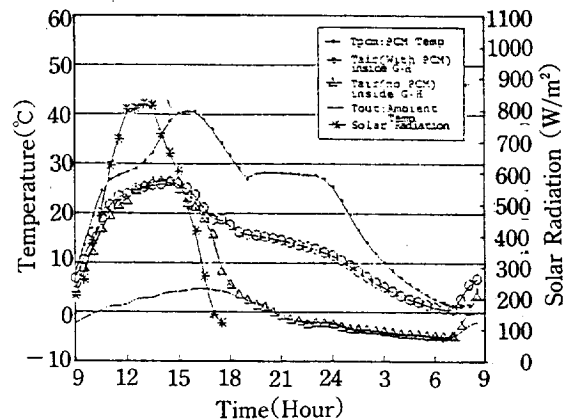


Fig. 10 Time-temperature profiles of greenhouse inner air, ambient air and latent heat storage material, and time-insolation profile.

그림 10은 1989년 3월 8일의 실험결과를 나타낸 것으로서 외기온이 4°C에서 -6°C까지 변하는 상황에서 잠열축열시스템을 설치하지 않은 Greenhouse의 내부기온은 오전 9시부터 15시까지는 잠열축열시스템을 설치한 Greenhouse보다 약간 높게 나타났고, 15시 이후에는 잠열축열시스템을 설치하지 않은 Greenhouse의 내부기온은 급강하하여 18시 이후에는 외기온과 거의 같은 수준을 유지하였으나, 잠열축열시스템을 설치한 Greenhouse의 내부기온은 잠열재료부터의 방열현상으로 인하여 오전 1시까지 10°C 이상을 유지하였으며, 오전 7시에 최저온도를 기록하였으나 잠열축열시스템을 설치하지 않은 Greenhouse보다는 6°C 높게 나타났다.

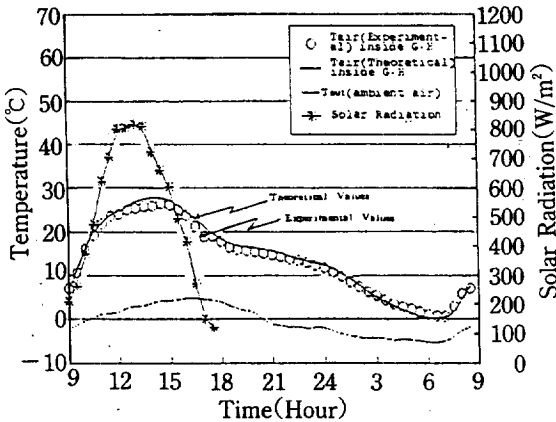


Fig. 11 Comparison of theoretical and experimental values of air temperature in greenhouse with latent heat storage system.

잠열축열시스템이 설치된 Greenhouse의 열평형방정식에 의하여 이론적으로 예측한 내부공기온도의 변화를 실험치와 비교한 결과 그림 11에서 보는 바와 같이 약 5~10% 범위의 오차를 보였으나, 비교적 잘 일치하였다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 개발한 이론 Model에 의한 Greenhouse-잠열축열시스템의 규모예측 및 설계의 기본자료를 제시할 수 있는 가능성을 시사해 주는 것이며, 이를 실용화 한다면 겨울철 Greenhouse 난방에 태양에너지 의존도를 극대

화하여 화석에너지의 절감에 크게 기여할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 주간의 잉여 태양에너지를 잠열재에 저장하여 夜間時間 동안의 暖房에 이용할 수 있는 Greenhouse-잠열축열시스템을 개발하기 위한 기초연구로서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) Greenhouse 재배기간(10월~3월)의 한국전지역의 10년 평균 태양강도는 2,201 kcal/m²·day 이었으며, 지역별로 보면 남부지방은 2,583.7 kcal/m²·day, 중부지방은 2,318.2 kcal/m²·day이고, 영동지방은 1,698.6 kcal/m²·day 이었다.

(2) Greenhouse의 난방부하 설정온도, T_c = 10°C를 기준으로 Thermal Curtain이 없는 경우, 2,028.5 kcal/m²·night 이었고, Thermal Curtain이 있는 경우에는 1,115.7 kcal/m²·night 이었다.

(3) Greenhouse 내부에서의 전체 축열가능 에너지는 801.6 kcal/m²·day이었으며, 이 중에서 토양중에 축열되는 에너지(q_{soil})는 103.8 kcal/m²·day이었고, 잠열축열재에 저장 가능한 에너지(q)는 697.8 kcal/m²·day이었다.

(4) 전체 축열가능 태양에너지(q + q_{soil})의 Greenhouse 난방부하 부담율을 R = {q_q / (q × η_{th} + q_{soil})} 로 표현하였으며, Thermal Curtain이 있는 경우 온실내 재배작물이 상면적을 80% 덮고 있는 상태에서, η_{th} = 100%, R = 100%로 할때 Greenhouse의 보온 가능 실온은 7°C 이었고, Thermal Curtain이 없는 경우 η_{th} = 100, R = 100%로 할때 보온 가능 실온은 3.5°C이었다.

(5) Greenhouse 내부에서의 잉여 태양에너지를 저온에서 고밀도로 저장할 수 있는 잠열축열재로서 본 실험에 이용된 C₆Cl₂·6H₂O의 상변화 사이클을 증가시켜가며 잠열량을 측정된 결과, 초기에는 45 kcal/kg 이었으나, 1000 사이클이 경과된 후에는 40 kcal/kg 으로서 약 11% 정도 감소하는 경향을 보였다.

(6) 태양에너지를 이용한 Greenhouse-잠열 축열 시스템을 구성하였으며, 이 시스템의 난방 효과를 실험적으로 분석한 결과 열저항 회로망을 근거로 한 이론 Model에 의한 결과와 잘 일치하였다.

(3) 施設園藝研究會, “暖房テグリアクーの算定法につで”, 農業氣象 39(2), PP. 91-95, 1983

(4) 박재복, “플라스틱 온실의 일사량 분석과 열적 환경의 시뮬레이션에 관한 연구”, (서울대학교 박사논문), 1986.

(5) 김용현, “플라스틱 온실의 열저장 시스템 개발에 관한 연구”, (서울대학교 박사논문), 1990.

(6) 權在永. 高倉直, “溫室期間 冷暖房 負荷の簡易算定法”, 農業氣象, 44(4), pp. 287-294, 1989.

參 考 文 獻

(1) 송현갑, “태양에너지의 농업이용”, 농촌열 에너지 연구보고 논문집 3(1), PP. 124-145.

(2) 高倉直, “農業利用”, 太陽エホルギー-PP. 34-37, 1985

학 회 광 고

한국농업기계학회지에 게재할 원고를 다음과 같이 모집하오니 많은 투고 있으시길 바랍니다.

-아 래-

1. 원고의 종류 : 논문, 자료, 신간소재, 강좌 등
2. 원고작성요령 : “아래한글” 또는 “보석글”을 사용하여 워드프로세스하여 디스켓에 수록하고 사용한 한글의 소프트웨어를 명기하여 우송함.
3. 원고접수 : 수시접수(원고 제출부수는 원본포함 3부와 디스켓. 17권 1호에 게재할 원고는 2월 20일까지)
4. 제 출 처 : 441-744, 경기도 수원시 권선구 서둔동 103
서울대 농대 농공학과대 한국농업기계학회.