

# 잠열축열요소의 열전달에 관한 컴퓨터 시뮬레이션

## Computer Simulation for Heat Transfer Analysis of Latent Heat Storage Units

柳 瑩 善\*      宋 鉉 甲\*\*      趙 漢 根\*\*  
Y. S. Ryou      H. K. Song      H. K. Cho

### Summary

In this study, to obtain basic information for the design of a latent heat storage system, ① the cylindrical type and the rectangular type of latent heat storage elements were designed, ② the finite element method was adopted for the prediction of temperature profile of phase change material in heating and cooling process, and ③ experiments were performed to verify the numerical solutions, and then ④ the optimum size of latent heat storage units was predicted by the computer simulation. The results could be summarized as follows : ① In cooling process, the predicted temperatures of latent heat storage units by computer simulation were in good agreement with measured. ② The effective diameter of cylindrical element was observed to be 28 mm and the effective thickness of rectangular element was observed to be 21 mm.

### 1. 緒 論

태양에너지의 잠열축열이용은 공간난방에 효과적이며, 특히 시설농업의 난방시스템에 대한 응용은 농촌열에너지 절약측면에서 바람직하다. 잠열축열시스템을 시설농업의 난방에 적용하기 위해서는 우선 잠열축열요소의 열전달특성을 분석·예측하여 시스템 설계를 위한 기초자료를 제공하여야 한다. 이와 같은 필요성에 부응하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- ① 저온 상변화 잠열재( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Additives}$ )로 충전된 원통형 및 평판형축열요소를 단위로 1차원 열전달에 의존하는 잠열축열장치를 제작하였다.
- ② 지배방정식으로 원통좌표계(원통형)와 직교좌표계(평판형)에서의 열전달을 지배하는 미분방정식을 유도하였으며, 유한요소법을 이용한 컴퓨터 프로그램에 의하여 미분방정식의 수치해를 구하였다.
- ③ 냉각과정에서 시간에 따른 잠열축열요소내

\* 충북대학교 대학원 농공학과 농업기계공학 전공

\*\* 충북대학교 농업기계공학과

의 온도변화를 추적하였으며, 검증실험을 수행하여 컴퓨터 시뮬레이션의 타당성을 입증하였다.

- ④ 겨울철 시설농업보온에 적합한 잠열축열요소의 규모를 예측하였다.

## 2. 시뮬레이션 모델링

잠열축열요소의 축열 및 방열을 유도하는 공급열원은 가열 혹은 냉각된 일정한 온도의 공기이며, 상변화 과정의 이론분석은 다음과 같은 가정하에서 수행하였다.

- ① 짧은 시간동안에 열전달면은 일정한 온도를 유지한다.
- ② 원통형의 경우 반경방향의 일차원 열전달만이 일어나는 것으로 한다.
- ③ 튜브 외피막의 전열저항은 무시한다.
- ④ 상변화 경계는 일정한 구간이 존재하는 것으로 한다.

### 가. 원통형 잠열축열요소의 시뮬레이션

#### 1) 원통형 잠열축열요소의 구성

원통형 잠열축열요소를 개략적으로 표현하면 그림 1에서 보는 바와 같다. 가열 혹은 냉각된

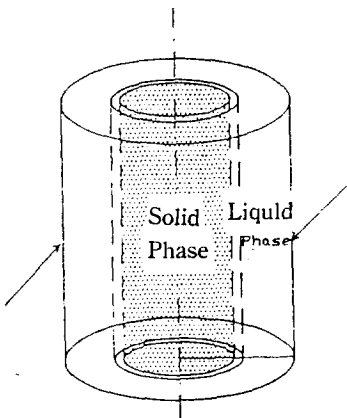


Fig. 1 Cylindrical type latent heat storage element.

공기를 열원으로 하여 원통형 튜브의 표면에서는 대류에 의하여 열이 전달되며, 튜브내에 충전된 잠열축열재에서는 1차원 비정상 열전도에 의하여 축열 및 방열현상이 일어나게 된다.

#### 2) 지배방정식의 유한요소해석

원통형 잠열축열요소의 수평단면은 그림 2와 같으며, 이 단면을 기준으로 상변화 물질의 열전달 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

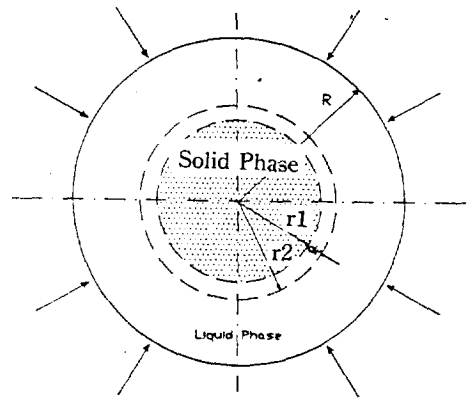


Fig. 2 Horizontal section of cylindrical type latent heat storage element.

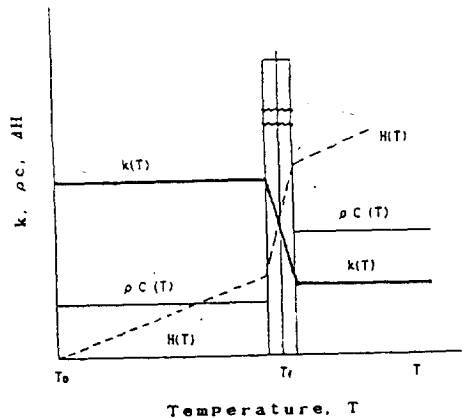


Fig. 3 Estimation of thermophysical properties in phase change process.

그림 2와 같은 원통좌표에서 일차원 비정상 열전달은 다음의 편미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots\dots\dots(1)$$

Phase change interface의 추적을 피하고, 프로그래밍을 간편하게 하기 위하여 Enthalpy model을 도입하였으며, 임의의 온도 T에서의 Enthalpy는 (2)식에 의하여 구할 수 있다.

$$H(T) = \frac{H_L - H_S}{\Delta T} T + C_{ps} \dots\dots\dots(2)$$

상변화 구간에서 온도변화에 따른 열특성(H(T), ρC(T), k(T)) 변화는 그림 3과 같이 추정되며, 엔탈피, H(T)와 열용량, ρC(T)관계는 ρC = dH/dT 로 표현된다.<sup>(2),(3),(5)</sup>

여기서,

$$\frac{\Delta H}{\Delta T} = C_{PH} : \text{상변화 구간에서의 비열(kcal/kg}^\circ\text{C)}$$

$$H = \text{Enthalpy(kcal/kg)}$$

H<sub>S</sub> = 액화초기의 Enthalpy(kcal/kg)

H<sub>L</sub> = 액화말기의 Enthalpy(kcal/kg)

ρC = 단위체적당 잠열재의 열용량(kcal/m<sup>3</sup>°C)

T = 온도(°C)

k = PCM의 thermal conductivity(kcal/sec · m °C)

C<sub>ps</sub> = 고체상태의 비열(kcal/kg°C)

(1)식을 적분하면,

$$\int_0^R \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \bar{T} dr + \int_0^R k \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} dr - \int_0^R \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \bar{T} dr = 0 \dots\dots\dots(3)$$

여기서,  $\bar{T}(0) = \bar{T}(R) = 0$

(3)식을 행렬의 형태로 변환하기 위하여 형태 함수를 도입하면 (4)식과 같이 쓸 수 있다.<sup>(2),(3)</sup>

$$\left\{ \bar{T}_i \right\}^T \left[ m_{ji}^e \right] \left\{ \frac{dT_i}{dt} \right\} + \left\{ \bar{T}_i \right\}^T \left[ k_{a,ji}^e \right] \left\{ T_i \right\} - \left\{ \bar{T}_i \right\}^T \left[ k_{b,ji}^e \right] \left\{ T_i \right\} = \left\{ \bar{T}_i \right\}^T \left\{ f_i^e \right\} \dots\dots(4)$$

여기서, 요소질량행렬, 요소강성행렬 그리고 부하벡터는 다음과 같다.

-요소질량행렬(Lumped formulation)<sup>(9)</sup>

$$m_{ji}^e = \begin{bmatrix} \frac{\rho C}{2} (r_2 - r_1) & 0 \\ 0 & \frac{\rho C}{2} (r_2 - r_1) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

-요소강성행렬

$$k_{ji}^e = \begin{bmatrix} \frac{k}{r_2 - r_1} & \frac{-k}{r_2 - r_1} \\ \frac{-k}{r_2 - r_1} & \frac{k}{r_2 - r_1} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{k}{(r_2 - r_1)^2} \left( r_2 \log \frac{r_2}{r_1} - (r_2 - r_1) \right) \\ \frac{-k}{(r_2 - r_1)^2} \left( r_2 \log \frac{r_2}{r_1} - (r_2 - r_1) \right) \\ \frac{k}{(r_2 - r_1)^2} \left( (r_2 - r_1) - r_1 \log \frac{r_2}{r_1} \right) \\ \frac{-k}{(r_2 - r_1)^2} \left( (r_2 - r_1) - r_1 \log \frac{r_2}{r_1} \right) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

-부하벡터

$$f_i^e = \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

나. 평판형 잠열축열요소의 시뮬레이션

1) 평판형 잠열축열요소의 구성

평판형 잠열축열요소를 개략적으로 표현하면 그림 4에서 보는 바와 같다.

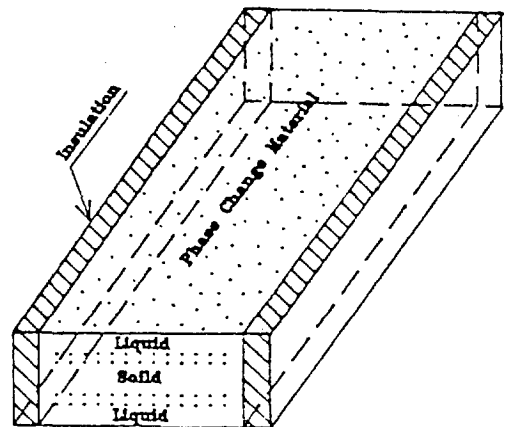


Fig. 4 Rectangular type latent heat storage element.

2) 지배방정식의 유한요소해석

평판형 잠열축열요소의 수직단면은 그림 5와 같으며, 이 단면을 기준으로 상변화 물질의 열전달특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

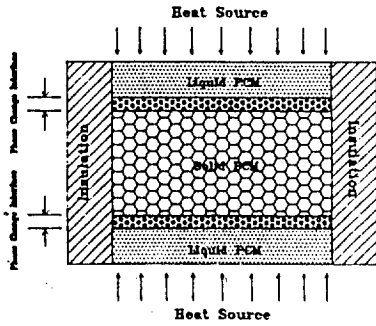


Fig. 5 Horizontal section of rectangular type latent heat storage element.

그림 5와 같은 직교좌표계에서 일차원 비정상 열전달은 다음의 편미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

평판형 잠열축열요소의 유한요소해석과정은 원통형 잠열축열요소의 경우와 같으며, 형태함수를 도입하여 (8)식을 행렬의 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$\sum_{e=1}^E \left\{ \bar{T}_1 \quad \bar{T}_2 \right\} \left[ m^e \right] \left\{ \begin{matrix} \frac{\partial T_1}{\partial t} \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} \end{matrix} \right\} + \sum_{e=1}^E \left\{ \bar{T}_1 \quad \bar{T}_2 \right\} \left[ k^e \right] \left\{ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \end{matrix} \right\} = \left\{ f^e \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

여기서, 요소질량행렬, 요소강성행렬 그리고 부하벡터는 다음과 같다.

- 요소질량행렬 (Lumped formulation)

$$m^e = \begin{bmatrix} \frac{\rho C}{2} (x_2 - x_1) & 0 \\ 0 & \frac{\rho C}{2} (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(10)$$

- 요소강성행렬

$$k^e = \begin{bmatrix} k & -k \\ x_2 - x_1 & x_2 - x_1 \\ -k & k \\ x_2 - x_1 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(11)$$

- 부하벡터

$$f^e = \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \right\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

다. 시간영역에 관한 차별화

유한요소해석에서 시간영역의 문제는 유한차분법을 이용하며, 본 연구에서는 중앙차분법( $\theta = 0.5$ )을 적용하여 (13)식과 같은 최종적인 연립방정식을 구하였다.

$$\left[ A_{ij}^e \right] \left\{ T_j^n \right\} = \left[ P_{ij}^e \right] \left\{ T_j^{n-1} \right\} + \left\{ f_i^e \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} A_{ij}^e &= \frac{1}{\Delta t} m^e + \theta k_{ij}^e \\ P_{ij}^e &= \frac{1}{\Delta t} m^e - (1-\theta) k_{ij}^e \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(14)$$

(13)식과 (14)식을 지배방정식으로 하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하면, 축열 및 방열과정에서 잠열축열요소의 시간에 따른 온도변화를 예측할 수 있게 된다.

라. 시간간격의 결정

1 차원 선형요소와 Lumped formulation을 이용하는 경우에 수치해의 안정을 위한 시간간격의 설정이 필요하며, 본 연구에서는 (15)식을 이용하였다.<sup>(9)</sup>

$$\Delta t \leq \frac{\rho C (\Delta x)^2}{4k(1-\theta)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

단위 잠열축열요소의 전열특성을 분석하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 위한 흐름도를 그림 6과 같이 구성하였으며, 프로그램은 C언어로 작성한 후 Turbo-C (Version 2.0)로 컴파일하였고, 실행

은 Coprocessor(80287)를 장착한 IBM-PC(AT) 호환기종에서 수행되었다.

마. 프로그램을 위한 흐름도

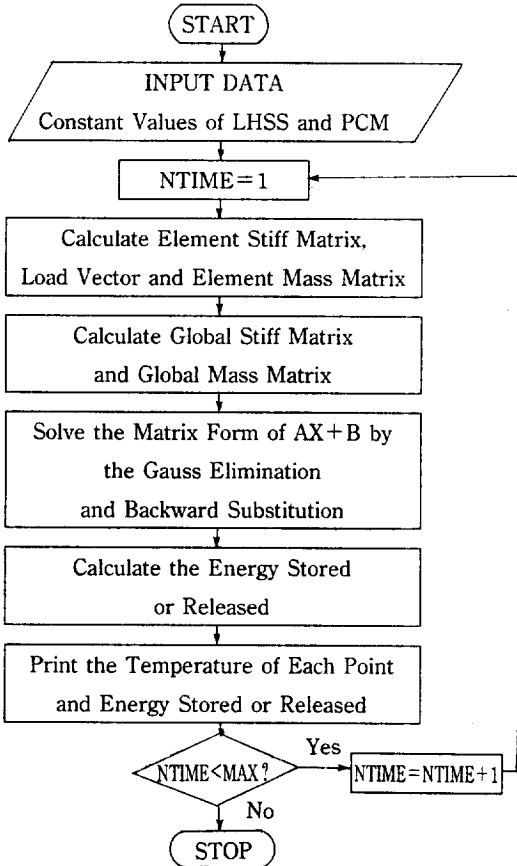


Fig. 6 Flow chart of computer program for heat transfer analysis of latent heat storage elements.

### 3. 실험장치 및 방법

컴퓨터 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 그림 1, 그림 3과 같은 형태로 제작된 원통형 및 평판형 잠열축열요소를 일정한 온도에서 가열과 냉각이 가능한 그림 7과 같은 실험장치내에서 냉각실험을 수행하였으며, 냉각과정동안의 온도 변화는 ANSI T type 열전대를 이용하여 측정하였다.



Fig. 7 Automatic cooling and heating device.

### 4. 결과 및 고찰

가. 원통형 잠열축열요소의 냉각과정에서의 온도변화

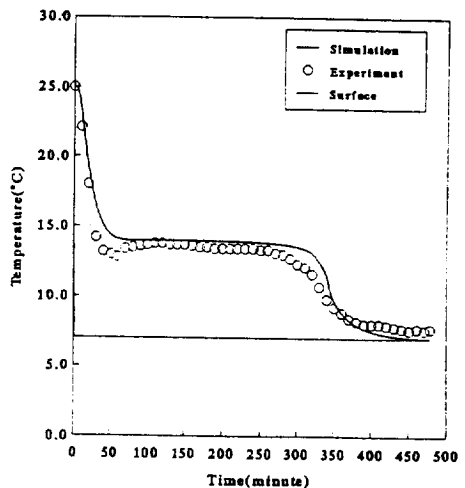


Fig. 8 Temperature profile of cylindrical type latent heat storage element by the simulation and experiment in cooling process (at R=0.0mm).

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과를 검증하기

위하여 반경,  $R=35\text{mm}$ 의 원통형 잠열축열요소를 구성하고, 25로 가열한 후 7로 냉각하는 과정에서 시뮬레이션과 실험을 수행한 결과, 그림 8에서 보는 바와 같이  $R=0.0\text{mm}$ 인 지점에서의 실험치는 시뮬레이션에 의한 예측치와 비교적 잘 일치하였으나, 실험치가 예측치 보다 냉각속도가 약간 빠르게 나타났으며, 이는 실험상의 불완전한 단열과 물성치의 부정확성에 의한 것으로 판단된다.

나. 평판형 잠열축열요소의 냉각과정에서의 온도변화

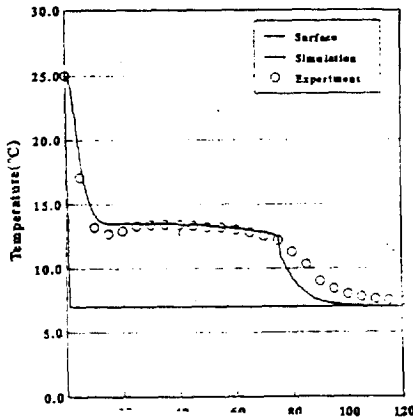


Fig. 9 Temperature profile of rectangular type latent heat storage element by the simulation and experiment in cooling process (at  $t=10\text{mm}$ ).

평판형 잠열축열요소는 두께를 10mm로 하였고, 원통형 잠열축열요소에서와 마찬가지로 25°C로 가열한 후 7°C로 냉각하는 과정에서 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며, 그 결과 그림 9에서 보는 바와 같이 두께( $t$ ) 10mm인 지점에서의 실험치와 예측치는 비교적 잘 일치하였다. 실험치에 있어서는 약간의 과냉현상을 관찰할 수 있었으며, 잠열구간 후의 고상에서 실험치가 예측치보다 높게 나타난 것은 시뮬레이션에 필요한 물성치의 부정확성에 의한 것으로 판단된다.

다. 원통형 잠열축열요소의 유효반경결정

원통형 잠열축열요소를 그린하우스의 보온시스템에 적용하기 위해서는, 잠열재의 상변화(고상 → 액상)가 주간의 그린하우스 내부기온에 의해 완료될 수 있도록 축열요소의 유효반경을 결정해야 한다.

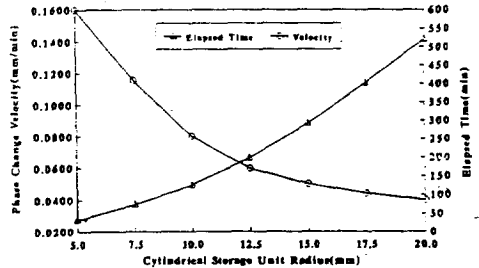


Fig. 10 Phase change velocity and elapsed time for perfect melting according to radius of cylindrical storage element.

유효반경의 결정을 위하여 단위축열요소의 반경을 5.0mm에서 20.0mm까지 변화시켜가며, 가열 과정에서 상변화가 완료되는 시간을 앞에서 수행한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 적용하여, 그림 10과 같이 단위축열요소의 반경변화에 따른 상변화 속도의 변화곡선을 구하였다. 이때 축열재의 초기온도는 7°C로 하였고, 가열온도는 20°C로 하였다. 겨울철 그린하우스 재배기간동안 평균 태양강도하에서 주간의 그린하우스 내부기온도는 약 240분동안 20°C 이상을 유지하며, 240분 동안에 액화가 가능한 축열요소의 최대반경은 그림 10에서 보는 바와 같이 14.0°C였다.

라. 평판형 잠열축열요소의 유효반경결정

평판형 잠열축열요소의 두께에 따른 상변화 속도와 상변화 완료시간은 그림 11에서 보는 바와 같으며, 그린하우스 보온시스템에 적용할 수 있는 축열요소의 최대두께는 약 21mm였다.

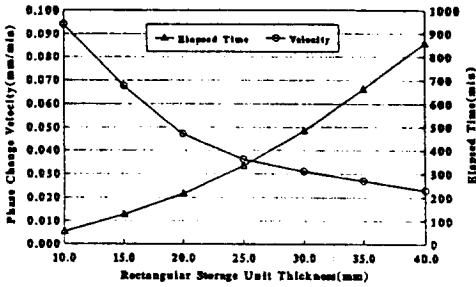


Fig. 11 Phase change velocity and elapsed time for perfect melting according to thickness of rectangular storage element.

### 5. 결론 및 요약

잠열축열시스템을 그린하우스의 야간난방에 이용하기 위해서는 잠열축열시스템을 구성하고 있는 단위 잠열축열요소의 전열특성을 분석하여 축열요소의 규모를 결정해야 한다. 본 연구에서는 원통형과 평판형 잠열축열요소의 축열 및 방열과정에서의 열전달특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- ① 원통형 잠열축열요소(R=35mm)를 25℃로 가열하여, 7℃로 냉각시킨 결과, 실험치와 예측치는 비교적 잘 일치하였으나, 실험치가 예측치 보다 냉각속도가 약간 빠르게 나타났다.
- ② 평판형 잠열축열요소(t=20mm)의 냉각과정(25℃→7℃)에서 예측치는 실험치와 잘 일치하였으나, 잠열구간 이후에는 실험치가 예측치 보다 약간 높게 나타났으며, 이는 물성치의 부정확성에 의한 것으로 판단된다.
- ③ 잠열축열요소의 규모결정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 그린하우스 보온을 위하여 적합한 원통형 잠열축열요소의 최대직경은 28mm였으며, 평판형 잠열축열요소의 최대두께는 21mm였다.

### 6. 참고 문헌

- (1) 김영복, 주은선, 윤여두, 나우정. 1991. 태양열저장을 위한 평판형잠열축열장치의 성능분석. 한국농업기계학회지 16(3) : 290-297.
- (2) 유영선. 1992. 그린하우스 보온을 위한 태양에너지-잠열축열시스템의 개발. 충북대학교 박사학위논문.
- (3) 조한근, 송현갑, 유영선. 1991. 온실용 잠열축열장치의 열전달분석(유한요소법에 의한 전열분석). 충북대학교 농촌에너지 연구보고 논문집 7(1) : 1-52.
- (4) Boulard, T. Razafinjohany, E. Baille, A. Jaffrin, A. Fabre, B. 1990. Performance of a greenhouse heating system with a phase change material. Agricultural and Forest Meteorology Vol.52 : 303-318.
- (5) Comini G. S. Del Giudice. 1974. Finite element solution of non-linear heat conduction problems with special reference to phase change. International Journal for Numerical Methods in Engineering Vol.8 : 613-624.
- (6) Ghoneim, A. A. 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.
- (7) Maher, M. J. Flaherty, T. O. 1973. An analysis of greenhouse climate. J. agric. Engng. Res. Vol.18 : 197-203.
- (8) Rieger, H. Projahn, U. Bareiss, M. Beer, H. 1983. Heat transfer during melting inside a horizontal tube. Transactions of the ASME Vol.105 : 226-234.
- (9) Segerlind, Larry J. 1984. Applied finite element analysis. The 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc.

(10) Vaccarino, C. Cimino, G. Frusteri, F. Barbaccia. A. 1985. A new system for heat

storage utilizing salt hydrates. Solar Energy Vol.34(2) : 171-173.

학 회 광 고

한국농업기계학회의 재정 자립과 학술발전을 위한 기금을 모금 하오니 적극적으로 호응하여 주시기 바랍니다.

온라인 계좌번호 :

국민은행(수원지점)	203-01-0463-136
농협중앙회(서둔동지점)	125-01-054226
우체국(수원서울대우체국)	104075-0001642

납입금액 : 제한없음

기금납입현황

납입자	납부금액	용도
조성인	150,000원	기금확대