[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 11, No. 2, 1991

상변화물질을 충전한 수평원통관 내에서 응고시 열전달특성

염 성 배 · 홍 창 식* · 이 재 성*

홍익대학교 산업대학 공업화학과
서울대학교 공과대학 화학공학과*

Heat Transfer Characteristics for Inward Solidification in a Horizontal Cylinder Packed with P.C.M.

Sung Bae Yum · Chang Shik Hong* · Chai-sung Lee*

Dept. of Chemical Technology, College of Industry and Art, Hongik Univ.
Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, S.N.U.*

요 약

본 연구에서는 용융된 파라핀을 채운 수평 원관의 관벽을 냉각할 때에 관 내에서 일어나는 열전달현상을 다루었다. 관내의 파라핀을 고상과 액상으로 구분하여 고상층에 대해서는 열전도 모델을, 그리고 액상층에 대해서는 자연대류를 고려한 열전달모델을 세워 수치해석하였고 이 과정에 대한 실험을 행하여 얻은 응고형태로부터 방열량을 계산하였다. 아울러 초기의 용융파라핀의 온도와 관벽의 냉각온도가 응고에 미치는 영향을 고찰하였다.

방열과정에서 액상파라핀의 응고속도를 결정하는 요인은 관벽의 냉각온도와 초기 액상온도이나 대부분의 액상현열이 응고 초기에 급속히 방출되기 때문에 관벽의 냉각온도가 지배적인 요인으로 작용하였다. 따라서 방열과정에서의 열전달은 고상층 내의 열전도에 의해서 이루어지게 된다. 실험에서 관찰한 응고형태에서는 상부에 빈 공간이 발견되었다. 이는 초기 액상온도가 응고초기에 급속히 떨어짐으로써 온도에 따른 액상의 밀도차로 인해 생긴 것이다. 고·액간의 밀도차로 인한 수축현상은 응고과정의 전반에 걸쳐서 고르게 일어나므로 그 영향을 응고형태에서 구별하여 파악하기는 어려웠다.

Fourier수와 고상의 Stefan수를 종속변수로 사용하면 관벽의 냉각온도와 초기액상온도에 무관하게 응고량을 단일곡선으로 표현할 수 있었다.

ABSTRACT

Heat transfer characteristics for heat retrieving processes in a paraffin–filled horizontal circular cylinder was studied. Theoretical and experimental analyses were carried out. In the theoretical analysis, solid and liquid phases were treated separately. Namely, convection for liquid and conduction for solid phase were investigated respectively. The retrieved heat was calculated from the experimentally determined solidified mass. Furthermore, the effects of initial temperature of the liquid and cooling temperature on the heat discharge rate were also studied.

In the heat retrieving process, the governing factor for the solidifying rate is the cooling temperature, because most of the liquid sensible heat is rapidly discharged in the initial stage of solidification. Hence heat transfer mechanism during heat retrieving process can be safely considered as conduction. In the cut of frozen paraffin, there showed an empty space in the upper region. It is caused by the temperature drop in the liquid paraffin. While volume shrinkage caused by phase transition was indiscernible.

Irrespective of cooling temperature and initial liquid temperature, solidified mass was well–correlated with the product of Fourier number and Stefan number in the solid phase.

NOMENCLATURE

C_{pl} : Specific heat of liquid paraffin
C_{ps} : Specific heat of solid paraffin
Fo : Fourier number
ΔH_f: Latent heat of paraffin
k_1 : Thermal conductivity of the liquid paraffin
k_s : Thermal conductivity of the solid paraffin
Pr : Prandtl number
R : Radius of the tube
Ra : Rayleigh number
r* : Dimensionless coordinate in the radial direction
Ste_l : Stefan number in the liquid phase
Ste_s : Stefan number in the solid phase
T_1* : Dimensionless temperature in the liquid phase
T_m : Phase change temperature of the paraffin
T_o : Initial temperature of the liquid paraffin
T_s* : Dimensionless Temperature in the solid phase
T_w : Cooling temperature of the wall
t* : Dimensionless time, Fourier number

GREEK LETTERS

α_l : Thermal diffusivity of liquid paraffin
α_s : Thermal diffusivity of solid paraffin
β : Thermal expansion coefficient
θ * : Dimensionless coordinate in the angular direction
ζ : Coordinate in the Landau transformation
ρ_l : Density of liquid paraffin
ρ_s : Density of solid paraffin
υ_o : Dynamic viscosity
χ : Coordinate in Landau transformation
Ψ* : Dimensionless stream function
ω * : Dimensionless vorticity

1. 서 론

태양열이나 폐열과 같이 간헐적으로 공급되는 에너지를 효과적으로 사용하기 위해서는 에너지의 공급시간과 수요시간 간의 시차를 극복하기 위한 방안이 필요하다. 이 목적을 달성하기 위하여 열저장이 사용된다. 열저장에는 현열축열과 잠열축열이 있으나 에너지가 필요한

온도구간 내에서 상변화하는 축열물질을 사용하면 단위 질량당 많은 에너지를 저장할 수 있고 또한 상변화온도 부근에서 대부분의 에너지를 얻을 수 있는 잠열축열이 유리하다. 상변화물질을 사용한 저장조를 제작할 때에는 기본적으로 다음과 같은 두가지 사항을 고려해야 한다.

어떤 성질을 갖는 상변화물질을 이용하여 어떤 구조로 제작할 것인가? 이에 따라서 잠열축열에 관한 연구도 두 갈래로 구분된다. 상변화물질의 물성에 대한 연구는 주로 난방용을 중심으로 진행되어 왔으나[1~3] 산업용으로도 사용이 가능한 고온에서 상변화를 하는 물질에 대해서도 연구가 진행되었다.[4~5] 그러나 아무리 우수한 특성을 갖는 상변화물질을 사용한다고 하더라도 축방열속도가 느리다면 그 본래의 목적을 달성할 수는 없다. 따라서 어떤 형태의 잠열조를 제작하여 어떤 방법에 의하여 축방열할 것인가? 하는 것이 중요한 과제이다. 이의 핵심이 되는 문제가 잠열축열조 내에서의 열전달이다. 잠열축열조 내에서의 열전달은 에너지의 출입방향에 따라서 축열과 방열로 나눌 수 있고 용기의 형태에 따라서 평판형, 원통형, 구형으로 나눌 수 있다. 그리고 열전달의 진행방향에 따라서 내부로의(inward) 상변화와 외부로의(outward) 상변화로 나누어진다.

본 연구는 잠열축열조를 구성하는 단일축열관 내에서의 열전달에 관한 것으로 상변화물질인 파라핀을 채운 수평원통관 내에서의 응고과정에서 일어나는 열전달현상을 해석하였다. 수평원통관 내에서의 응고과정에 대한 연구는 Katayama등[6]이 Naphthalene의 용융·응고과정에 대하여 실험을 하고 열전도모델을 사용하여 이론적인 해석을 하여 그 결과를 비교하였고, Guenigault와 Poots[7]는 금속의 응고과정에 관하여 액상에서의 유동장과 온도장을 준정상상태로 가정하여 해석하였다. 그리고 Himeno등[8]은 혼합물의 용융과 응고과정을 실험적으로 해석하였다.

본 연구에서는 실험적 연구와 이론적 연구를 병행하였다. 이론적인 해석은 관벽으로부터 생성되는 고상층과 그 내부의 액상층으로 나누어서 고상층에 대해서는 열전도모델을, 그리고 액상층에 대해서는 자연대류를 고려한 열전달모델을 세워서 고상과 액상에 대하여 각각 이동경계면을 기준으로한 일차원적 Landau 변환을 적용하여 수치해석함으로써 시간에 따른 응고형태와 액상에서의 유동장, 온도장 및 고상에서의 온도장을 구하였다. 실험적으로는 미리 정한 시간대에서의 응고형태를 분석함으로써 시간에 따른 방열량을 계산하였다. 그리고 초기의 액상온도와 관벽의 냉각온도가 응고에 미치는 영향을 알아보기 위하여 조건을 달리하며 실험을 행하였다. 이론적 결과와 실험적 결과로부터 열전달속도의 변화에 영향을 미치는 요인을 규명하였다.

2. 이론적 해석

파라핀을 채운 수평관 내에서의 방열과정은 관벽을 냉각하여 액상파라핀의 현열과 액고간의 상변화에 따른 잠열, 그리고 고상파라핀의 현열을 관의 외부로 방출하는 과정이다. 관내에서는 관벽으로부터 내부를 향하여 응고가 일어나고 고상 내부의 액상은 상변화온도와의 온도차로 인하여 열을 빼앗긴다. 그리고 고상층은 응고가 일어난 후 부터 서서히 식어간다.

열이 전달되는 경로를 보면 내부의 액상파라핀에서는 상변화온도로 유지되는 고액경계면으로 둘러싸여 Fig.1과 같은 요인으로 자연대류가 발생하며 열이 고액경계면으로 이동하게 되고 고상파라핀에서는 고액경계면의 상변화온도와 관벽의 냉각온도의 차이에 의한 전도로 내부액상에서 나오는 현열과 상변화잠열을 관벽으로 보내게 된다. 이와같이 고상과 액상의 열전달 방식이 다르므로 이 두 상을 분리하여 해석하였다. 고상과 액상은 서로 영향을 미치게 되지만 상경계면을 공유하므로 상변화온도로 일정하게 유지되고, 잠열이 방출됨으로써 응고되는 상경계면의 특성을 이용하면 각 상을 연결시켜서 그 영향을 반영할 수 있다.

이 계에서의 전달현상을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. (1)축 방향으로의 전달을 무시한다. (2)자연대류에 의한 액상유

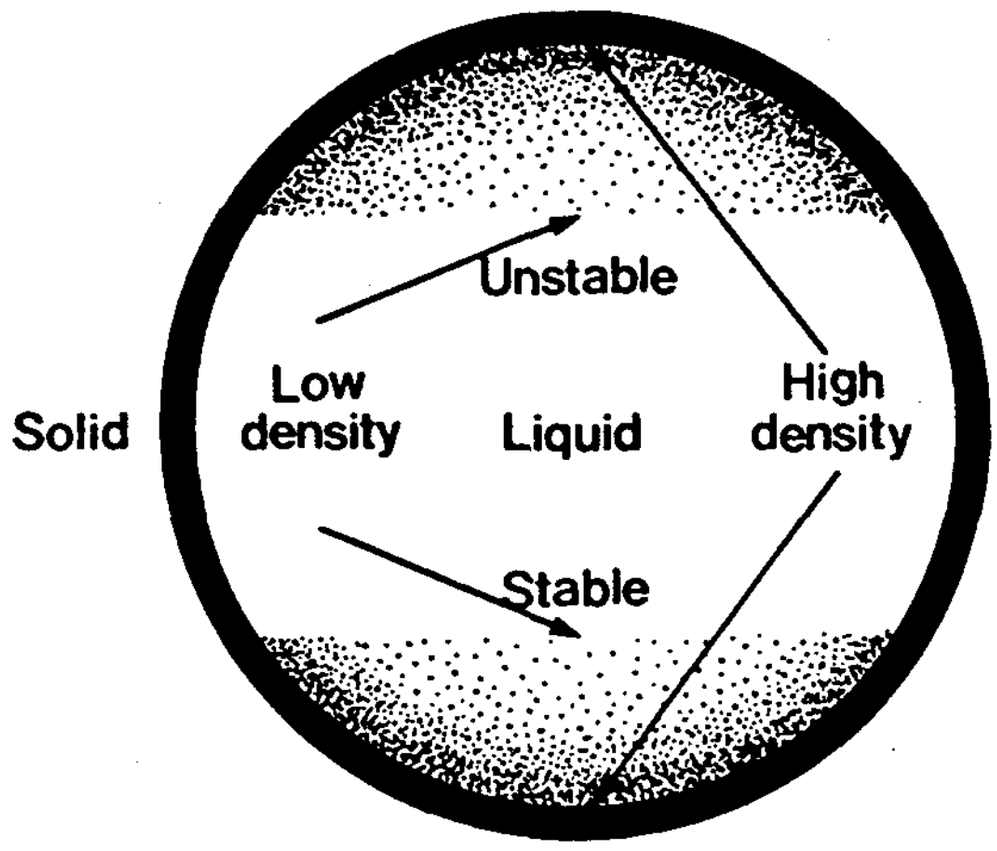

Fig.1 Convection due to the difference between densities of the liquid near solidifying area and the liquid bulk

동은 뉴튼성 층류이다. (3)운동방정식에서 부력에 의해서 유발되는 힘에 관련되는 밀도를 제외한 모든 물성치는 온도에 무관하다. (Boussinesq 근사) (4)고액 상변화에 따른 부피 변화는 무시한다.

2.1 지배방정식과 초기조건 및 경계조건

좌표축의 선정

고상과 액상의 전달현상을 해석하기 위하여 Fig.2와 같은 주면 좌표계를 사용하였다. 이 좌표계를 사용할 경우에는 원점 0가 응고한 후에는 0에 대응하는 고액경계면이 없거나, 2개가 될 수 있기 때문에 경계면의 추적에 어려움이 있지만 원점이 응고할 시점에서는 이미 95%이상의 상변화가 이루어진 상태이므로 그런 의미에서는 전체방열과정이 거의 다 이루어졌다고 보아도 무리가 없다.

지배방정식

앞서 선정한 좌표계에서의 운동방정식, 연속방정식 그리고 액상과 고상의 에너지수지식으로부터 ω^*, Ψ^*, T_l^*, T_s^*에 대한 관계식이 다음과 같이 유도된다.

액상의 운동방정식

$$\frac{\partial\omega^*}{\partial t^*}+\frac{1}{\pi r^*}\left(\frac{\partial\Psi^*}{\partial r^*}\frac{\partial\omega^*}{\partial\theta^*}-\frac{\partial\Psi^*}{\partial\theta^*}\frac{\partial\omega^*}{\partial r^*}\right)$$
$$=\Pr\left[\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial\omega^*}{\partial r^*}\right)+\frac{1}{\pi^2 r^{*2}}\frac{\partial^2\omega^*}{\partial\theta^{*2}}\right]$$
$$-\Pr Ra\left[\sin(\pi\theta^*)\frac{\partial T_l^*}{\partial r^*}+\frac{\cos(\pi\theta^*)}{\pi r^*}\frac{\partial T_l^*}{\partial\theta^*}\right] \quad (1)$$

액상의 와류도-흐름함수 관계식

$$\omega^*=\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial\Psi^*}{\partial r^*}\right)+\frac{1}{\pi^2 r^{*2}}\frac{\partial^2\Psi^*}{\partial\theta^{*2}} \quad \cdots (2)$$

액상의 에너지수지식

$$\frac{\partial T_l^*}{\partial t^*}+\frac{1}{\pi r^*}\left(\frac{\partial\Psi^*}{\partial r^*}\frac{\partial T_l^*}{\partial\theta^*}-\frac{\partial\Psi^*}{\partial\theta^*}\frac{\partial T_l^*}{\partial r^*}\right)$$
$$=\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial T_l^*}{\partial r^*}\right)+\frac{1}{\pi^2 r^{*2}}\frac{\partial^2 T_l^*}{\partial\theta^{*2}} \quad \cdots (3)$$

고상의 에너지수지식

$$\frac{\alpha_l}{\alpha_s}\frac{\partial T_s^*}{\partial t^*}=\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial T_s^*}{\partial r^*}\right)$$
$$+\frac{1}{\pi^2 r^{*2}}\frac{\partial^2 T_s^*}{\partial\theta^{*2}} \quad \cdots (4)$$

초기조건과 경계조건

위의 식들에 대한 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

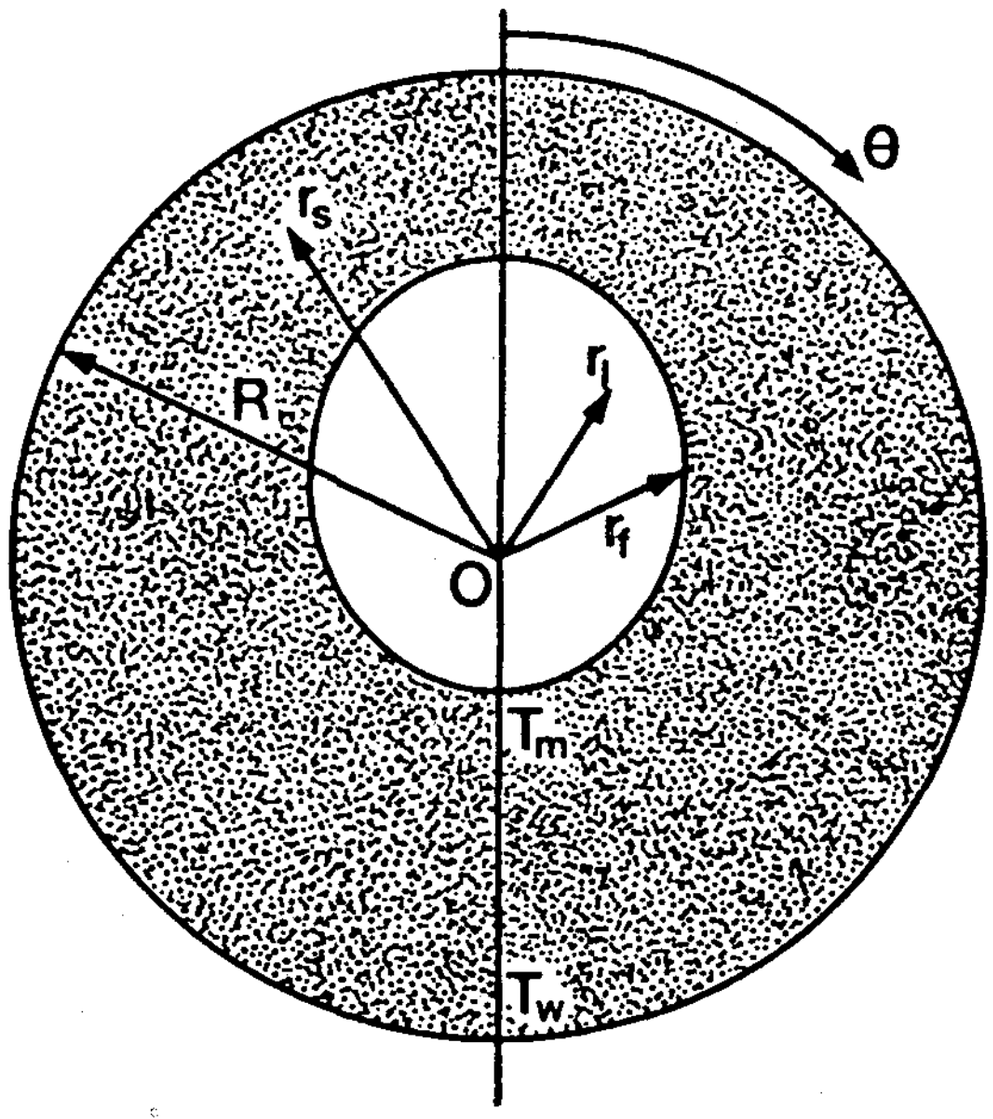

Fig.2 Coordinate system for representing liquid and solid phases in solidification process.

초기조건($t^*=0$) :

$T_l^*=1,\ T_s^*=T_s^*(0,\ r^*,\ \theta^*),\ \omega^*=0$

경계조건 :

고액경계면($r^*=r_f^*$)

$T_l^*=0,\ T_s^*=0,\ \omega^*=\omega^*(t^*,\ r_f^*,\ \theta^*),\ \Psi^*=0$

관벽($r^*=1$)

$T_s^*=-1$

대칭선($\theta^*=0,1$)

$$\frac{\partial T_s^*}{\partial\theta}=0,\ \frac{\partial T_l^*}{\partial\theta}=0,\ \omega^*=0,\ \Psi^*=0$$

고액경계면의 이동속도식($r^*=r_f^*$)

$$\frac{\rho_s}{\rho_l}\frac{\partial r_f^*}{\partial t^*}=\left[1+\frac{1}{\pi^2 r_f^{*2}}\left(\frac{\partial r_f^*}{\partial\theta^*}\right)^2\right]\left(\mathrm{Ste}_s\frac{k_s}{k_l}\frac{Cp_l}{Cp_s}\frac{\partial T_s^*}{\partial r^*}-\mathrm{Ste}_l\frac{\partial T_l^*}{\partial r^*}\right)$$

무차원변수와 무차원상수

위의 식에서 사용한 무차원변수와 무차원상수는 다음과 같이 정의된다.

$$t^*=\frac{\alpha t}{R^2},\ r^*=\frac{r}{R},\ \theta^*=\frac{\theta}{\pi},$$

$$r_f^*=\frac{r_f}{R},\ \omega^*=\frac{R^2\omega^*}{\alpha},\ \Psi^*=\frac{\Psi}{\alpha},$$

$$T_l^*=\frac{T_l-T_m}{T_o-T_m},\ T_s^*=\frac{T_s-T_m}{T_m-T_w}$$

$$\mathrm{Ra}=\frac{\beta g(T_o-T_m)R^3}{\upsilon_o\alpha},\ \mathrm{Pr}=\frac{\upsilon_o}{\alpha},$$

$$\mathrm{Ste}_l=\frac{Cp_l(T_o-T_m)}{\Delta H_f},\ \mathrm{Ste}_s=\frac{Cp_s(T_m-T_w)}{\Delta H_f}$$

2.2 Landau 변환

앞서 유도한 여러 식들을 이용하여 해를 구할 경우에 시간에 따른 고액경계면의 이동으로 인하여 대상구역이 변화하므로 경계조건을 직접 사용함에 있어서 어려움이 있다. 따라서 시간에 따라 이동하는 고액 경계면과 고정경계면인 관벽을 기준으로 대상구역에서의 상대적인 위치를 나타내는 새로운 좌표를 설정하면 편리하다.[9,10] 이 목적으로 Landau변환[11]을 사용하였다. 액상층과 고상층에 대하여 새로운 변수 ξ와 χ를 다음과 같이 정의하였다.

$$\xi=\frac{r^*}{r_f^*(t^*,\ \theta^*)},\ \chi=\frac{r^*-r_f^*(t^*,\ \theta^*)}{1-r_f^*(t^*,\ \theta^*)}\quad\cdots(5)$$

이 변수들을 사용하면 상변화면의 좌표를 항상 $\xi=1,\ \chi=0$으로 고정시켜 주기 때문에 편리하다. 이를 이용하여 지배방정식과 초기조건, 경계조건을 바꾸면 아래와 같은 최종식을 얻을 수 있다.

액상의 운동방정식

$$\frac{\partial\omega^*}{\partial t^*}+\frac{\partial\omega^*}{\partial\xi}\frac{\partial\xi}{\partial t^*}+\frac{1}{\pi r^*}\frac{\partial\xi}{\partial r^*}\left(\frac{\partial\Psi^*}{\partial\xi}\frac{\partial\omega^*}{\partial\theta^*}-\frac{\partial\Psi^*}{\partial\theta^*}\frac{\partial\omega^*}{\partial\xi}\right)=\mathrm{Pr}\nabla_l^2\omega^*-\mathrm{Pr}\ \mathrm{Ra}\left\{\left[\sin(\pi\theta^*)\frac{\partial\xi}{\partial r^*}+\frac{\cos(\pi\theta^*)}{\pi r^*}\frac{\partial\xi}{\partial\theta^*}\right]\frac{\partial T_l^*}{\partial\xi}+\frac{\cos(\pi\theta^*)}{\pi r^*}\frac{\partial T_l^*}{\partial\theta^*}\right\}\quad\cdots\cdots(6)$$

액상의 와류도-흐름함수 관계식

$$\omega^*=\nabla_l^2\Psi^*\quad\cdots\cdots(7)$$

액상의 에너지수지식

$$\frac{\partial T_l^*}{\partial t^*}+\frac{\partial T_l^*}{\partial\xi}\frac{\partial\xi}{\partial t^*}+\frac{1}{\pi r^*}\frac{\partial\xi}{\partial r^*}\left(\frac{\partial\Psi^*}{\partial\xi}\frac{\partial T_l^*}{\partial\theta^*}-\frac{\partial\Psi^*}{\partial\theta^*}\frac{\partial T_l^*}{\partial\xi}\right)=\nabla_l^2T_l^*\quad\cdots(8)$$

고상의 에너지수지식

$$\frac{\alpha_l}{\alpha_s}\left(\frac{\partial T_s^*}{\partial t^*}+\frac{\partial T_s^*}{\partial\chi}\frac{\partial\chi}{\partial t^*}\right)=\nabla_s^2T_s^*\quad\cdots\cdots(9)$$

여기서 ∇_l^2와 ∇_s^2는 각각 다름과 같다.

$$\nabla_l^2=\left[\left(\frac{\partial\xi}{\partial r^*}\right)^2+\frac{1}{\pi^2r^{*2}}\left(\frac{\partial\xi}{\partial\theta^*}\right)^2\right]\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+\left(\frac{1}{r^*}\frac{\partial\xi}{\partial r^*}+\frac{1}{\pi^2r^{*2}}\frac{\partial^2\xi}{\partial\theta^{*2}}\right)\frac{\partial}{\partial\xi}+\frac{2}{\pi^2r^{*2}}\frac{\partial\xi}{\partial\theta^*}\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\theta^*}+\frac{1}{\pi^2r^{*2}}\frac{\partial^2}{\partial^2\theta^*}\quad\cdots\cdots(10)$$

$$\nabla_s^2=\left[\left(\frac{\partial\chi}{\partial r^*}\right)^2+\frac{1}{\pi^2r^{*2}}\left(\frac{\partial\chi}{\partial\theta^*}\right)^2\right]\frac{\partial^2}{\partial\chi^2}+\left(\frac{1}{r^*}\frac{\partial\chi}{\partial r^*}+\frac{1}{\pi^2r^{*2}}\frac{\partial^2\chi}{\partial\theta^{*2}}\right)\frac{\partial}{\partial\chi}+\frac{2}{\pi^2r^{*2}}\frac{\partial\chi}{\partial\theta^*}\frac{\partial^2}{\partial\chi\partial\theta^*}+\frac{1}{\pi^2r^{*2}}\frac{\partial^2}{\partial^2\theta^*}$$

초기조건($t^*=0$) :

$T_l^*=1,\ T_s^*=T_s^*(0,\ \chi,\ \theta^*),\ \omega^*=0$

경계조건 :

고액경계면($\xi=1,\ \chi=0$) :

$T_l^*=0,\ T_s^*=0,\ \omega^*=\omega^*(t^*,\ 1,\ \theta^*),\ \Psi^*=0$

관벽($\chi=1$)

$T_s^*=-1$

대칭선($\theta^*=0,1$)

$$\frac{\partial T_s^*}{\partial \theta}=0,\ \frac{\partial T_l^*}{\partial \theta}=0,\ \omega^*=0,\ \Psi^*=0$$

고액경계면의 이동속도식($\xi=1,\ \chi=0$)

$$\frac{\rho_s}{\rho_l}\frac{\partial r_f^*}{\partial t^*}=[1+\frac{1}{\pi^2 r_f^{*2}}(\frac{\partial t_f^*}{\partial \theta^*})^2]$$

$$(Ste_s\frac{k_s}{k_l}\frac{Cp_l}{Cp_s}\frac{\partial T_s^*}{\partial \chi}\frac{\partial \chi}{\partial r^*}-Ste_l\frac{\partial T_l^*}{\partial \xi}\frac{\partial \xi}{\partial r^*})$$

2.3 수치해석과정

고상층과 액상층은 연관을 가지면서 열을 전달하므로 식(6), (7), (8)과 식(9)를 동시에 해결하여야 한다. 이 식들을 풀기 위하여 유한차분법(Finite Difference Method)으로 전개하여 고상층과 액상층을 동시에 계산하였다. 초기에는 고상층이 없으므로 계산을 수행할 수 없다. 따라서 초기에 정상상태의 온도분포를 갖는 반경 1%에 해당하는 고상층의 존재를 가정하고 계산하였다.

3. 실험적 해석

3.1 파라핀의 물성치

본 연구에서 사용한 파라핀은 Shinyo Pure Chemical Co.에서 제조한 상변화온도가 46−48℃인 시약용으로 물성치 중에서 잠열, 상변화온도, 비열, 밀도, 열팽창계수와 점도는 직접 측정을 하였으며 고상과 액상의 열전도도는 문헌치[12]를 사용하였다. 사용한 파라핀의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of paraffin used.

Properties	Unit	Value	Ref.
Melting temperature	C	49.1	*
Solid density	kg/m^3	820.	*
Liquid density	kg/m^3	$778.3Exp(-8.249\times10^{-4}(T-50))$	*
Thermal expansion coefficient	$℃^{-1}$	8.249×10^{-4}	*
Viscosity	kg/(m.sec)	$9.658\times10^{-3}-9.230\times10^{-5}T$	*
Latent heat	J/kg	154000.	*
Solid heat capacity	J/(kg.℃)	2180.	*
Liquid heat capacity	J/(kg.℃)	2110.	*
Thermal conductivity of liquid	J/(m.℃sec)	0.336	**
Thermal conductivity of solid	J/(m.℃sec)	0.242	**

*: measured value **: refercece[12]

3.2 실험장치

실험장치는 다음과 같이 구성되어 있다. 파라핀을 채운 충전관과 이를 수평으로 지지하기 위한 장치와 관벽의 냉각온도를 일정하게 유지하기 위한 항온수조와 부수장치이다. 파라핀 충전관은 내경 54㎜, 길이 250㎜, 두께 2㎜의 동관이다. 충전관에서 양단면을 통해 열이 빠져나가는 것을 막기 위하여 Polyacetal봉으로 마개를 만들어서 막았으며 항온수조에 넣을 때에 관내로 물이 스며드는 것을 방지하기 위하여 마개의 한쪽은 나사를 내었고 다른 한쪽은 마개의 중간지점에 O-링을 설치하였다. 액상파라핀의 초기온도를 정확히 실험온도로 맞추기 위하여 마개의 중심에 구멍을 뚫어 C.C.열전대(copper constantan thermocouple)를 설치하였다. 관의 내부는 Fig.3과 같다. 항온조의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 On-Off조절방식을 사용하였다. 실험시에 연속적으로 항온조 내의 온도를 측정하여 조절오차가 0.5℃이내임을 확인하였다. 그리고 관벽의 온도가 항온조의 설정온도와 같도록 유지하기 위하여 교반기로 활발하게 저었으며 관벽에 열전대를 부착하여 이를 확인하였다. 실험장치 구성도는 Fig.4와 같다.

3.3 실험방법

파라핀은 고상에서 불투명하므로 내부의 관찰

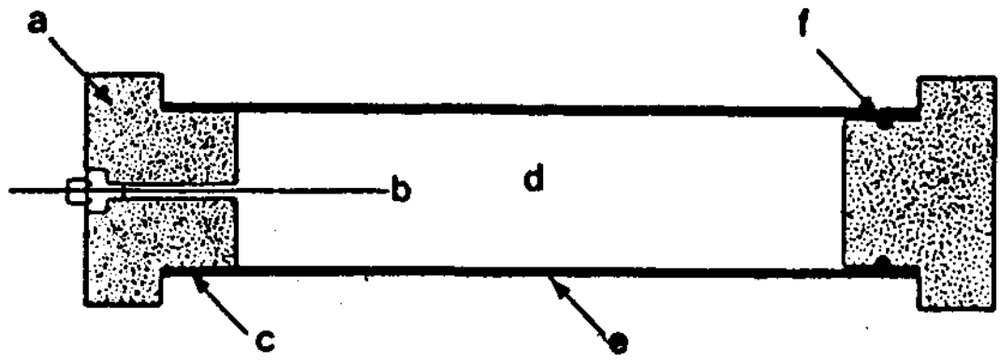

Fig.3 Details of experimental unit for solidification process.
(a) polyacetal (d) paraffin
(b) thermocouple (e) copper pipe
(c) threaded plug (f) O–ring

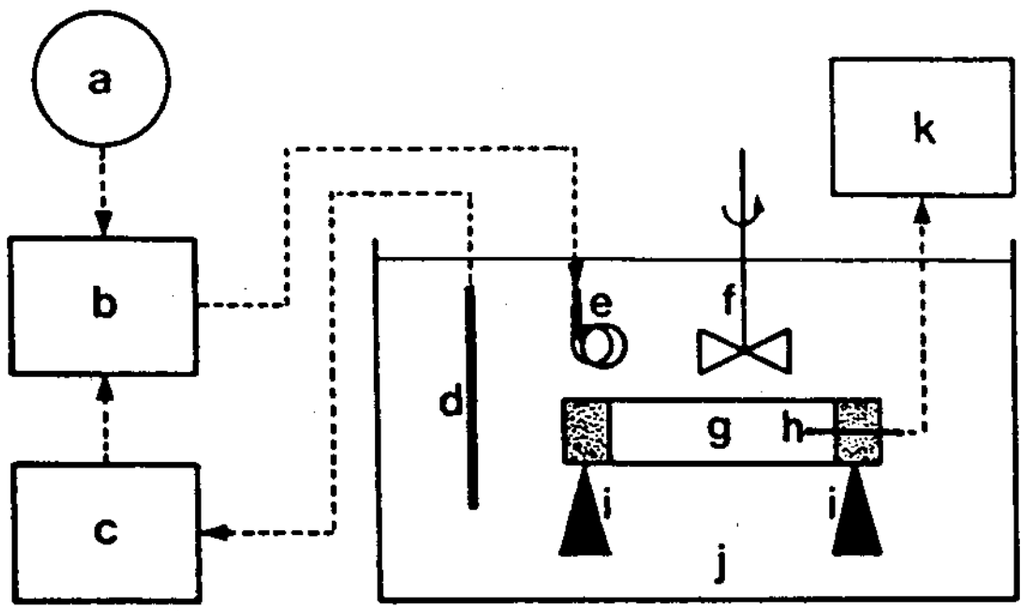

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparutus for solidification process.
(a) power supply (g) experimental unit
(b) power relay (h) thermocouple
(c) on–off controller (i) pipe supporter
(d) Mercury Temp. regulator
(e) heater (j) constant temp. bath
(f) stirrer (k) multipoint re corder

이 어렵다. 따라서 연속적인 실험결과의 관측은 불가능하고 어느 시간에 관 내의 용융파라핀과 미용융파라핀을 분리하여 그때까지의 고화형상을 재어 해석하였다. 전체 응고과정에 걸쳐서 고르게 분포된 데이타를 얻기 위하여 순수열전도방정식을 풀어 실험시간을 미리 정하였다. 초기 액상온도의 영향을 알아보기 위하여 관벽의 냉각온도를 상변화온도보다 10℃ 낮게하고 초기 액상온도를 전이점보다 10℃, 20℃, 30℃ 높은 상태로 하여 실험을 실시하였다. 또한 관벽 냉각온도의 영향을 알아보기 위하여 초기 액상온도를 상변화온도보다 10℃ 높게 하고 관벽의 냉각온도를 상변화온도보다 10℃, 20℃, 30℃ 낮게 하여 실험을 행하였다. 이 실험 조건은 태양열을 사용하여 난방을 할 경우에 60~80℃로 가열된 액상파라핀을 20~40℃의 공기나 물을 사용하여 방열할 경우를 생각하여 결정하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 고상과 액상에서의 열전달특성

주어진 관 내에서 액상파라핀이 응고할 때에 그 내부의 상태를 좌우하는 요소는 초기의 액상파라핀 온도와 관벽의 냉각온도이다. 이 두 조건에 의하여 전체의 방열속도는 결정된다. 따라서 이 조건들이 어떤 경로를 거쳐서 응고에 영향을 미치는지를 알기 위하여 한 가지 조건을 고정시키고 다른 한 조건을 변화시키며 이론적인 해석을 하였다. Fig.5는 원점 직하의 고상층 두께가 반경의 0.1, 0.25, 0.4, 0.55, 0.7, 0.85배일 때의 응고형태와 온도분포 및 액상의 유동형태를 이론적으로 계산한 결과이다.

고상의 온도분포

고상의 온도분포는 고상현열의 방출량에도 관계가 되지만 내부의 응고에 따른 잠열과 액상현열을 방출하는 경로의 상태를 결정하는 요인이므로 매우 중요하다. 액상의 초기온도는 고상의 온도분포에 큰 영향을 주지 않았다. 이는 고상과 액상이 일정하게 유지되는 상변화온도에 의해 분리되어 있고 또한 고상을 거쳐서 방출되는 에너지의 대부분은 잠열이기 때문이다. 그러나 관벽의 냉각온도가 변하면 고상 내의 무차원 등온선은 영향을 받는다. 냉각온도가 낮을 수록 관벽 주위에서는 온도구배가 커지는 반면 상변화면 주위에서는 변화가 없다. 그리고 이 경향은 응고초기에는 미약하고 중기 이후에 서서히 나타나게 된다. 응고초기에는 고상층이 얇으므로 관벽과 고액경계면 간의 열전달속도가 빨라서 고액경계면의 이동속도는 고상층 내의 온도분포에 영향을 미치지 못한다. 그러나 고상층이 두터워지면 열전달저항이 커지므로 그 영향이 나타난다. 관벽의 냉각온도가 낮으면 관의 중심을 향한 고액경계면의 이동속도가 빠르므로 관벽 주위에서는 온도 구배

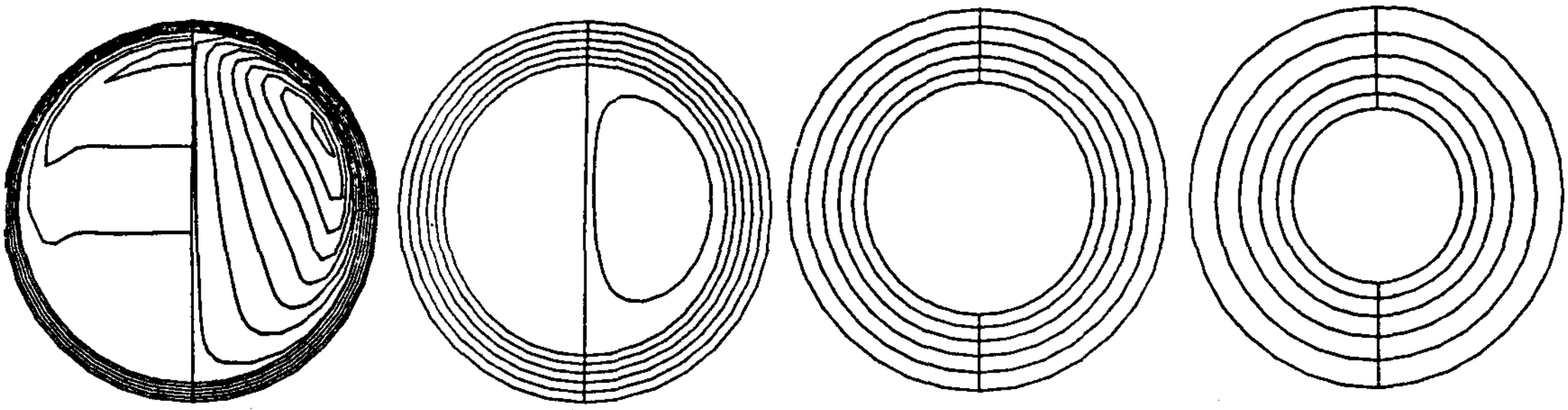

Fig.5 (a)Timewise variation of temperature(left) and streamline(right) profiles in the liquid phase and temperature profiles in the solid phase during solidification process
$\Delta T_0=10℃$, $\Delta T_w=10℃$

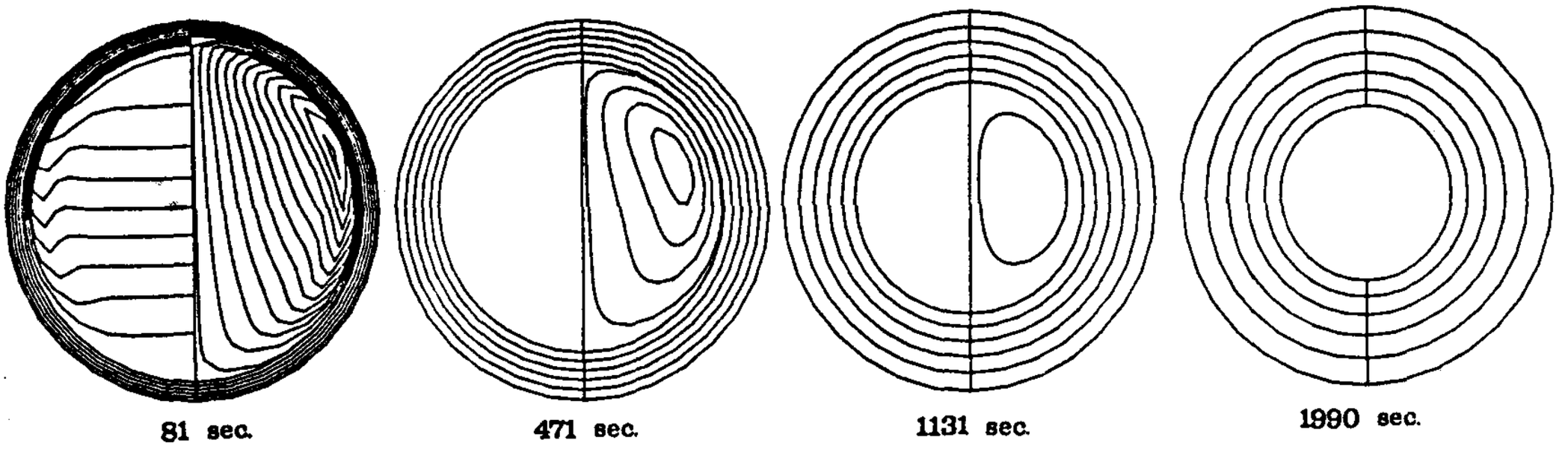

Fig.5 (b)Timewise variation of temperature(left) and streamline(right) profiles in the liquid phase and temperature profiles in the solid phase during solidification process
$\Delta T_0=10℃$, $\Delta T_w=30℃$

가 커지고 상변화면 주위에서는 온도구배가 작아진다. 원관에서는 중심에 가까울수록 단위두께당 열전달저항이 작으므로 상변화면 주위에서의 무차원 온도분포는 영향을 받지 않기 때문이다.

액상의 온도분포

액상의 온도는 액상현열의 방출량과 관련된다. 액상의 초기온도나 관벽의 냉각온도에 관계없이 대부분의 액상현열은 응고초기에 얇은 고상층을 통하여 방출된다. 액상의 유동이 없다면 시간이 흐름에 따라 고액경계면에서 관의 중심을 향해 점진적으로 온도가 높아지는 온도장이 형성되어서 열전달저항이 커지겠지만 자연대류가 발생하여 높은 온도의 밀도가 낮은 액상은 상승하여 관의 상부에서 상변화온도와 접촉하게 되므로 액상현열의 방열속도는 빨라진다. 그리고 액상의 열전도도가 고상의 열전도도 보다 1.4배 정도 크다는 것도 한 가지의 원인이 된다. 이 두가지 요인으로 인하여 응고 초기에 액상의 온도는 상변화온도로 낮아지게 되고 전체액상이 같은 온도로 되기 때문에 자연대류도 소멸되어서 고액경계면과 관벽의 냉각온도 간의 차이에 의한 순수열전도로 잠열이 관의 외부로 방출된다.

초기의 액상온도와 관벽의 냉각온도가 자연대류에 미치는 영향

액상 내의 자연대류는 액상의 온도와 직접 관계가 있다. 초기의 액상온도가 높을수록 자연대류가 활발히 일어날 것으로 예상되나 초기 액상온도가 높을수록 응고 초기에 활발한 자연대류가 발생하여 액상의 현열이 보다 원활하게 방출되기 때문에 자연대류는 초기 액상온도의 높고 낮음에 영향을 받지않고 소멸하였다.

초기 액상온도가 같은 Fig.5의 (a)와 (b)의 유동장을 비교하면 관벽의 냉각온도가 낮을수록 자연대류가 활발하게 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 고상층을 거쳐서 관벽으로 방출되는 에너지양은 관벽과 고액경계면의 온도차에 비례한다. 따라서 동일한 두께의 고상층일 경우에 관벽의 온도가 낮아지면 방열량은 이에 따라 많아진다. 그러나 액상층에서는 상변화온도에 있는 고액경계면에 의하여 둘러싸여 있으므로 관벽온도에 의한 직접적인 영향을 받지는 않는다. 따라서 관벽의 온도가 낮아지면 고상층의 온도구배는 이에 비례하여 커지지만 액상층의 온도구배는 큰 변화가 없다. 즉, 고화속도는 빨라지게 되지만 액상 현열의 방출속도는 큰 차이가 없다. 비슷한 양의 고화가 진행되었을 때를 비교하면 관벽의 온도가 낮을수록 내부 액상파라핀의 현열은 많이 남아있게 되어서 액상 내에 자연대류가 더 활발하게 일어나게 된다. 그러나 관벽의 냉각온도가 내부 액상의 방열속도에 전혀 무관한 것은 아니다. 고액경계면의 이동속도가 빨라질수록 고액경계면 주위의 액상온도구배가 커지므로 액상현열이 좀 더 빨리 방출되는 효과는 있다.

4.2 실험에서 구한 응고형태

실험에서 구한 응고형상 중에서 관벽의 냉각온도가 상변화온도보다 10℃ 낮고 초기의 액상온도가 상변화온도보다 10℃ 높은 상태에서의 실험을 기준으로 하여 실험조건상 가장 큰 대조를 보이는 응고형상을 Fig.6에 도시하였다. 이론적으로 계산한 결과와의 차이점은 고상의 상부에 빈 공간이 생긴다는 것이다. 응고과정에서의 밀도의 변화는 두가지의 원인에 의한다. 첫째가 액고간의 상변화에 의한 밀도변화이고 둘째가 액상의 온도변화에 따른 밀도변화이다. 첫째 요인은 전 응고과정에 걸쳐서 영향을 미치는 반면 초기에 대부분의 액상현열이 방출되므로 둘째 요인의 영향은 초기에 국한된다. 따라서 고상상부에 생긴 빈 공간이 주된 원인은 액상현열의 방출에 의한 것이다.

대부분의 액상현열이 초기에 방출되는 것은 실험시에 측정한 중심의 온도가 초기에 급속히 상변화온도로 낮아지는 것으로 알 수 있었다. 그리고 상변화에 의한 부피변화의 영향은 미응고 파라핀의 상부 공간에 반영된다. 실험에서 구한 고상의 내부 공간에는 액상파라핀 만이 존재하는 것이 아니라 액상의 상부에는 빈 공간이 존재한다. 전체적인 응고형상을 보면 이론적으로 예측한 바와 같이 초기 액상온도가 변하여도 큰 영향이 없었다. 그러나 관벽온도가 낮아지면 변화가 관찰되었다. 관벽온도가 낮을수록 응고속도가 빠르므로 상부에서 약간의 응고가 이루어진 상태에서 빈 공간이 형성됨을 볼 수 있다. 이론적으로

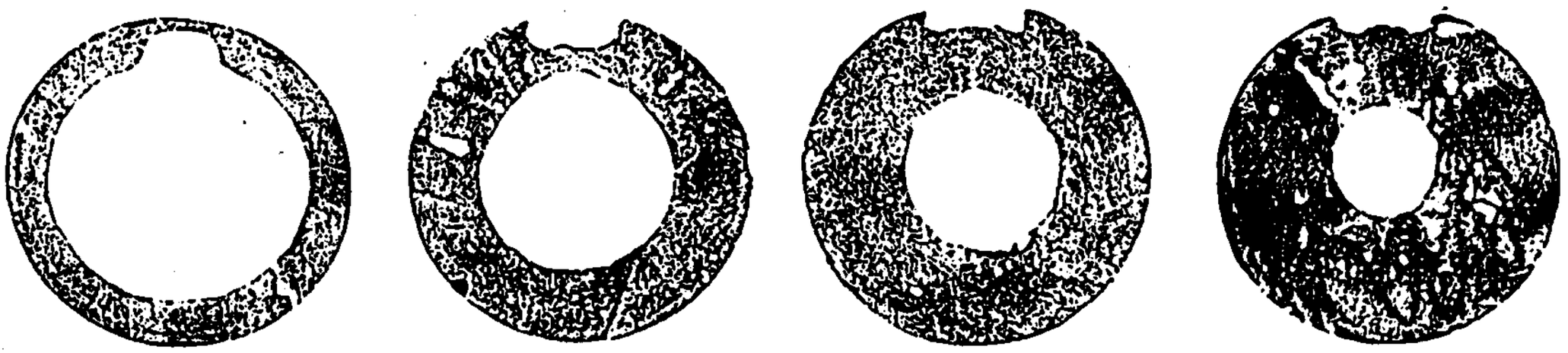

Fig.6 (a)Timewise shape variation of solid paraffin in solidification process ($\Delta T_0=10℃$, $\Delta T_w=10℃$

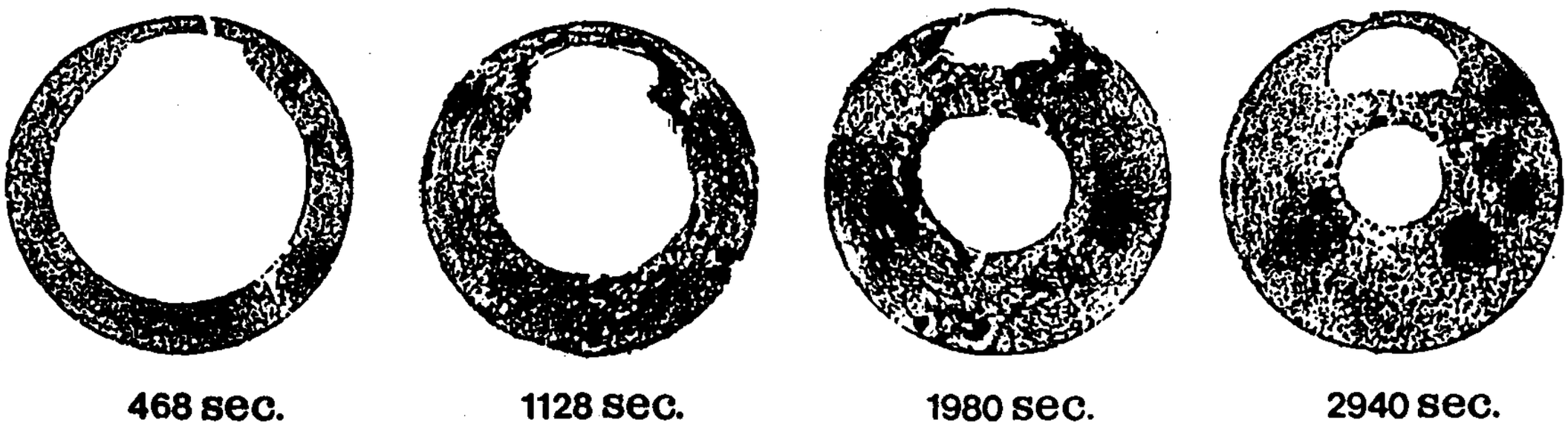

Fig.6 (b)Timewise shape variation of solid paraffin in solidification process ($\Delta T_0=10℃$, $\Delta T_w=30℃$)

예측한 응고형상과 실제 실험으로부터 구한 응고형상은 빈 공간의 생성을 제외하면 시간에 따라서 잘 일치하였다.

4.3 방열량

Fig.7은 이론적으로 계산한 응고량과 실험에서 구한 응고량을 시간에 따라 도시한 것이다. 실험치와 이론치는 서로 잘 일치하고 있다. 먼저 초기 액상온도가 응고속도에 미치는 영향을 보면, 이론치들은 초기 액상온도에 무관하게 나타났고, 실험치들은 초기 액상온도가 높을 수록 응고속도가 늦게 나타났지만 서로 간에 큰 차이를 발견할 수는 없다.

초기 액상온도가 응고속도에 미치는 영향은 매우 약하다는 것을 알 수 있다. 반면 관벽온도에 따라서는 응고량에 큰 차이가 난다. 즉 관 내에서의 응고속도를 결정하는 지배적인 요소는 관벽의 냉각온도이다. 이는 응고 초기에 대부분의 액상 현열이 방출되기 때문에 초기에는 액상온도의 영향이 있겠지만 이는 전체 응고과정의 일부분이

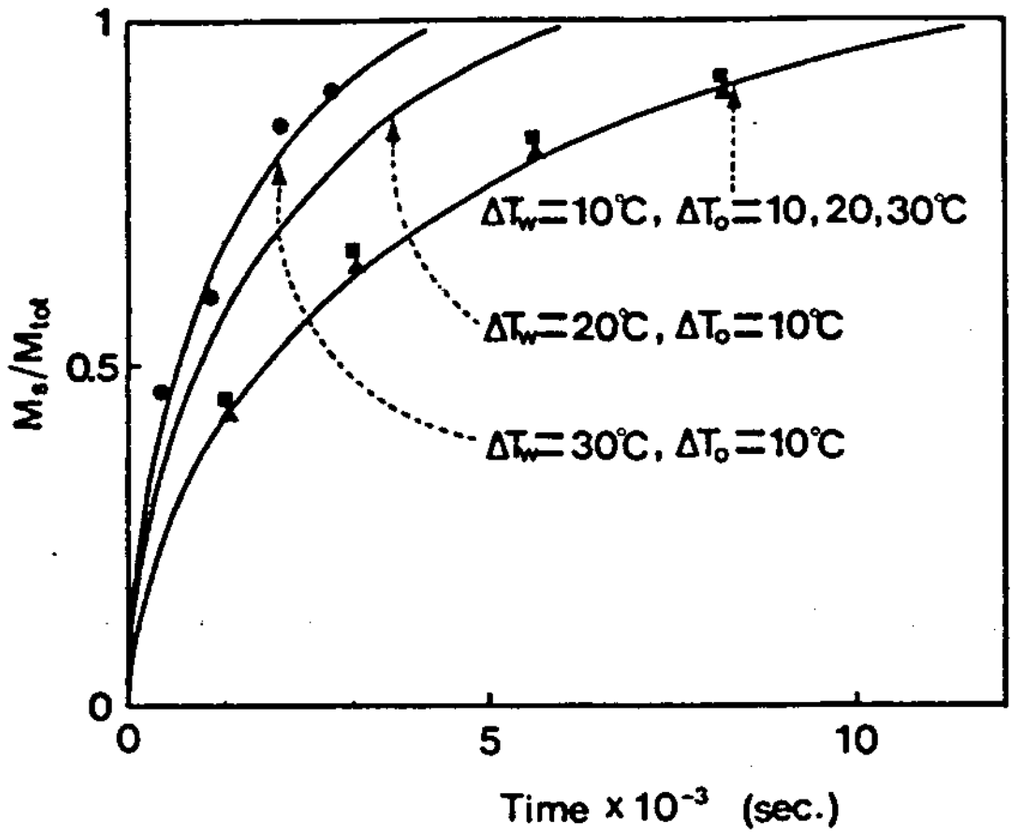

Fig.7 Solidified mass fraction as a function of time(in sec)

다. 그러나 응고가 진행되는 동안에는 고상층을 거쳐서 관의 외부로 빠져나가는 에너지량은 관벽온도와 상변화온도와의 차에 비례하게 되므로 관벽온도가 응고과정을 지배하는 요인이 된다.

이를 근거로 하여 관경에 대하여 무차원화한

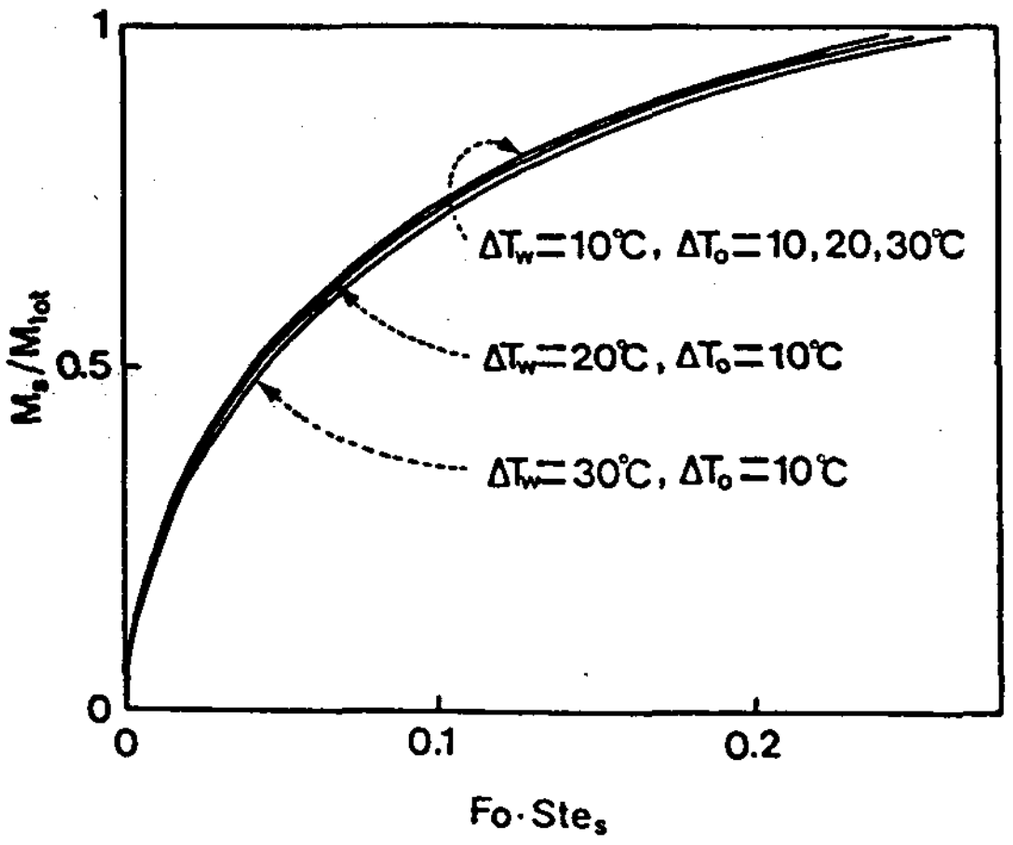

Fig.8 Plot of the solidified mass fraction against Fo·Ste

시간인 Fourier수와 관벽온도를 무차원화한 형태인 고상의 Stefan수를 곱하여 횡축으로 사용하여 응고량을 도시하였다. Fig.8에서 볼 수 있듯이 관벽온도에 무관하게 실험결과와 이론의 결과들이 서로 모인 것을 알 수 있다. 즉, Fo Ste$_s$을 횡축으로 사용하면 관벽온도와 초기 액상온도에 무관하게 응고량을 표시할 수 있다.

축열과정에서 용융량의 증가 추세와 방열과정에서 응고량의 증가 추세를 비교하면[13], 두과정에서 모두 종기로 갈수록 용융·응고속도는 늦어진다. 그러나 그 감소정도는 용융과정에 비하여 응고과정은 상당히 크다. 용융과정에서는 용융한 액상이 열전달 저항층으로 작용하지만 액상내에서 자연대류가 발생하므로 열전달이 잘 일어나게 도움을 주고 관벽과 근접해 있는 하부 액막을 통한 열전달량이 75%~80%이므로 열전달속도의 감소 경향이 작은 반면 응고과정에서는 관벽으로부터 고상층이 생성되므로 열전달저항이 계속적으로 커져서 응고속도는 더욱 느려지게 된다.

5. 결 론

파라핀을 채운 수평원관을 냉각할 때에 일어나는 응고과정에서의 열전달특성을 실험과 이론을 거쳐 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 응고과정에서 관벽의 냉각온도가 응고속도에 큰 영향을 미치는데 반하여 초기의 액상온도는 영향을 미치지 못한다.

2) 대부분의 액상현열은 응고초기에 방출되었다.

3) 액상내에서의 자연대류는 초기에만 영향을 미치므로 대부분의 응고과정은 고상층에서의 열전도에 의해 진행된다.

4) 응고가 진행됨에 따라서 고상층의 열전달저항은 계속적으로 커지게 되므로 응고에 소요되는 시간은 용융과정에 비해 매우 길다.

5) 액상에 대한 자연대류를 고려한 열전달모델과 고상에 대한 열전도모델을 사용한 이론적인 해석은 시간에 따른 응고량을 잘 예측해 주었다.

참 고 문 헌

1. R.T. Lefrois and H.V. Willmott, 'Inorganic phase change materials for energy storage in solar thermal program,' In sharing the sun, The American section of the international solar energy society, Florida, Vol.8, pp.107–122(1976)
2. D. Heine and A. Abhat, 'Investigation of physical and chemical properties of phase change materials for space heating/cooling applications,' In sun(Ed. by F.D. Winter and M. Cox), Pergamon press, N.Y., Vol.1, pp.500–506(1978).
3. A. Abhat, 'Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials,' Solar Energy, Vol.30, pp.313–332(1983)
4. G.J. Janz, E. Neuenschwander and F.J. Kelly, 'High temperature heat content and related properties for Li_2CO_3, Na_2CO_3, K_2CO_3 and the ternary eutectic mixture,' Trans. Faraday Soc., Vol.59, pp.841–845(1963)
5. J.K. Ives and B.J. Goodman, 'High temperature molten salt storage concept,' Proc. 21st IECEC, Vol.2, pp.862–866(1986)
6. K. Katayama, A. Saito, Y. Utaka, A. Saito, H. Matsui, H. Maekawa and A.Z A. Saifullah,' Heat transfer characteristics of the latent heat

thermal energy storage capsule,' Solar Energy, Vol.27, pp.91–97(1981)
7. R. Guenigault and G. Poots, 'Effects of natural convection on the inward solidification of spheres and cylinders,' Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.28, pp.1229–1231(1985)
8. N. Himeno, K. Hijikata and A. Sekikawa, 'Latent heat thermal energy storage of a binary mixture–flow and heat transfer characteristics in a horizontal cylinder,' Int. J. Heat Mass Transfer. Vol.31, pp.359–366(1988)
9. T. Saitoh and K. Hirose, 'High Rayleigh number solution to problems of latent heat thermal energy storage in a horizontal cylinder capsule,' J. of Heat Transfer, Vol.104, pp.545–553(1982)
10. H. Reiger, U. Projahn, M. Bareiss and H. Beer, 'Heat transfer during Melting inside a horizontal tube,' Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.27, pp.705–716(1983)
11. H.G. Landau, 'Heat conduction in melting solid,' Quarterly of Applied Mathematics, Vol.8, pp.81–94(1950)
12. 이재성, 박재성, '상변화 매체를 이용한 태양열 저장에 관한 연구,' 서울대학교 공대연구보고, 제16권제1호, pp.11–25(1984)
13. 홍창식, '파라핀을 채운 수평원관 내에서의 축열 및 방열특성에 관한 연구,' 박사학위논문 서울대학교 공과대학(1990)

후기) 본 연구는 한국과학재단의 학술지원에 의해 이루어졌다. 관계 제위에 감사의 뜻을 전한다.

A Study on Comparison of Heat Transfer Characteristic and Heat Storage Capability of $C_{28}H_{58}$ and $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$

Chang Soon Yim · Jun Keun Kim* · Nam Cheol Cho* · Young Ki Kim*

Inha Uni.
Graduate School, Inha Uni.*

ABSTRACT

Heat transfer phenomena and temperature characteristics in heat storage and release process in the heat storage system using PCM(Phase Change material) were studied experimentally. The melting points of Octacosane paraffin($C_{28}H_{58}$) and sodium pyrophosphate decahydrate($Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$) used for phase change materials are 62℃ and 79℃ respectively.

Experiments were performed in order to investigate temperature distributions, the heat storage quantity and the release quantity on octacosane paraffin and sodium pyrophosphate decahydrate for heat storage and release in the heat storage system. Furthermore the comparison of these characteristics between paraffin and $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ were evaluated.

In case of the paraffin, temperature slowly increased at early heat storage process by natural convection, while temperature of $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ rapidly increased the dominant role played by conduction at early heat storage processing.

Also, during the heat storage and release process in case of the paraffin, it was observed that the variation of temperature of the neighborhood of wall and center in the top and bottom of the tube exhibited a great difference, however in $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$, it was observed that the variation of temperature exhibited a little difference. And heat storage quantity of each PCM of identity mass in heat storage process was shown that $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ exhibited more by 16 percents than paraffin.

Heat Transfer Characteristics for Inward Solidification in a Horizontal Cylinder Packed with P.C.M.

Sung Bae Yum · Chang Shik Hong* · Chai–sung Lee*

Dept. of Chemical Technology, College of Industry and Art, Hongik Univ.
Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, S.N.U.*

ABSTRACT

Heat transfer characteristics for heat retrieving processes in a paraffin–filled horizontal circular cylinder was studied. Theoretical and experimental analyses were carried out. In the theoretical analysis, solid and liquid phases were treated separately. Namely, convection for liquid and conduction for solid phase were investigated respectively. The retrieved heat was calculated from the experimentally determined solidified mass. Furthermore, the effects of initial temperature of the liquid and cooling temperature on the heat discharge rate were also studied.

In the heat retrieving process, the governing factor for the solidifying rate is the cooling temperature, because most of the liquid sensible heat is rapidly discharged in the initial stage of solidification. Hence heat transfer mechanism during heat retrieving process can be safely considered as conduction. In the cut of frozen paraffin, there showed an empty space in the upper region. It is caused by the temperature drop in the liquid paraffin. While volume shrinkage caused by phase transition was indiscernible.

Irrespective of cooling temperature and initial liquid temperature, solidified mass was well-correlated with the product of Fourier number and Stefan number in the solid phase.

A Numerical Study on the Natural Convection from Two Isothermal Square Beams Attached to an Vertical Adiabatic Plate

Jae Lim Park · Dae Sok Bae* · Sun Sok Kwon**

Busan College
Kyung Nam Junior College*
Dept. of Mechanical Engineering, College of Engineering, Dong-A University**

ABSTRACT

A Steady laminar natural convection heat transfer from two isothermal square beams attached to a vertical adiabatic plate has been studied numerically.

The results have been obtained for dimensionless beam spacings, $0.5 \leq D/L \leq 3.0$, and for $Gr = 5000-10000$ at $\Phi_2/\Phi_1 = 1.0$.

1. The local Nusselt number from the beam surface is increased with the dimensionless beam spacing D/L, but that of the downward surface of the lower beam is almost same as the D/L increases. And, the local Nusselt number from the upward surface of a lower beam is greatly increased with D/L.

2. The beam spacings of the maximum mean Nusselt number for the downward surface of an upper beam and the upward surface of a lower beam occur at $D/L = 2.6$ and 2.0 respectively.

3. The beam spacing for the maximum total mean Nusselt number occurs at $D/L = 2.6$.

A Preliminary Study on the Solar-Hydrogen System Utilizing Photoanodic TiO_2 Semiconductor Electrode

Tai Kyu Lee · Suh Hyun Cho · Duk ki Jo · Young Hi Chea

New and Renewable Energy Research Center, Applied Solar Energy Lab.
Korea Institute of Energy and Resources

ABSTRACT

Electrochemical reaction utilizing the semiconducting photoanodes can be applied to the photoelectrolysis of water to produce hydrogen. In this preliminary experiment, TiO_2 photoanodes were pre-