

垂直冷却管内에서 相變化物質의 凝固에 관한 實驗的 研究

李 在 睦* 李 采 文** 任 將 淳***

An Experimental Study on Freezing of Phase
Change Material in a Cooled Vertical Tube

J·M·Lee, C·M·Lee and J·S·Yhim

ABSTRACT

Experiments were performed for freezing of an initially superheated or nonsuperheated liquid phase in a cooled vertical tube. The liquid was placed in a copper tube whose surface maintained a uniform temperature during the data run and the freezing occurred in a copper tube. The phase change medium was n-octadecane, a paraffin which freezes at about 61 °C. Measurements were made which yielded information about the time dependence of the freezing front, of the amount of frozen mass, and of the various energy components extracted from the tube. The time-wise decay of the initial liquid superheat was also measured.

Initial superheat of the liquid tends to moderately diminish the frozen mass and associated latent energy extraction at small times but has little effect on these quantities at large times. Natural convection in the liquid plays a modest role only at small times and disappears when the superheat decay to zero. Although the latent energy constitutes the largest contributor to the total extracted energy, the sensible energy components can make a significant contribution, especially at large tube wall subcoolings, large initial liquid superheating and short freezing time.

* 李 在 睦：正會員 仁荷大學校 大學院

** 李 采 文：正會員，仁荷大學校 大學院

*** 任 將 淳：正會員，仁荷大學校 工科大學

Nomenclature

- C_{lig} : liquid phase specific heat (kJ/kg°C)
- C_{sol} : solid phase specific heat (kJ/kg°C)
- E_{s1} : energy extracted from subcooled solid (kJ)
- E_{s2} : energy extracted from liquid which solidifies (kJ)
- E_{s3} : energy extracted from liquid which remains unfrozen (kJ)
- E_{tot} : total energy extracted, equation (2-4) and (2-7) (kJ)
- E_L : energy liberated by freezing (kJ)
- E_{Lmax} : energy liberated if total mass freezes (kJ), equation (2-8)
- Fo : Fourier number, equation (2-9)
- K_{sol} : solid-phase thermal conductivity (W/M°C)
- M : frozen mass (kg)
- M_{tot} : total mass of phase - change material (kg)
- r : radial coordinate in solid (m)
- r_w : radius of tube wall (m)
- r^* : radius of solid-liquid interface (m)
- Ste : solid-phase Stefan number, equation (2-10)
- T_b : liquid bulk temperature (°C)
- T_i : initial temperature of solid (°C)
- T_m : mean temperature of frozen mass (°C) equation (2-3)
- T^* : phase change temperature (°C)
- $T(r)$: temperature distribution in solid
- t : time (sec)
- α_{sol} : solid-phase thermal diffusivity (m²/sec)
- δ : frozen layer thickness (m)
- λ : latent heat of fusion (KJ/kg°C)
- ρ_{sol} : solid-phase density (kg/m³)

1. 序 論

最近 熱에너지의 저장수단으로 相變化 物質의 凝固 및 溶融時에 수반되는 용해잠열을 利用하는 方法이 많이 研究되고 있다 (1, 2, 3, 4). 相變化 物質의 溶融時의 自然對流 熱傳達에 關한 研究가 Viskanta(2) 와 Kemink (3) 에 依하여, 그리고 凝固時의 自然對流 熱傳達에 關한 研究가 Sparrow(4)에 依하여 實驗的으로 규명되었다. 또한 垂直圓筒에서 溶融에 關한 數值的인 解析이 Sparrow(5)와 Hossfeld (6) 등에 依해서 行하여졌다. 그러나 外部로부터 冷却되는 垂直管内의 凝固에 關한 研究는 거의 發表되지 않고 있다. 本 研究에서는 相變化 物質이 채워진 垂直冷却管内에서 凝固가 發生될 때 放出되는 各種 에너지成分과 凝固된 相變化 物質의 形狀에 關하여 考察하므로써 相變化 物質의 熱傳達問題를 解析하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

實驗裝置의 主要部分은 1) 相變化 物質이 담겨지는 銅管 (外經 5.08cm, 두께 0.2cm, 길이 40 cm 2), 凝固過程中 銅管周의 溫度를 一定하게 維持시켜주는 低溫恒溫槽 (50×50×50cm), 3) 凝固를 進行하기에 앞서 銅管에 담겨진 液體狀態의 파라핀을 一定溫度로 維持시켜 주는 高溫恒溫槽 (40×40×50cm), 4) 實驗이 끝난 후 銅管内에 殘留하는 液體狀態의 파라핀을 推出해 내기 위한 特殊眞空 system으로 構成되었으며 主 實驗裝置의 概略圖를 Fig.1에 나타냈다. 銅管内에서는 별도로 設置된 高溫恒溫槽에서 一定溫度(61°C, 71°C, 81°C)로 維持된 液體狀態의 파라핀 300g이 채워져 있으며 Fig.1의 低溫恒溫槽에서 一定時間 (10分~90分)을 경과시킨 후 銅管的 口마개를 빼내고 液體狀態로 殘留하는 파라핀의 溫度를 測定한다. 그리고 眞空 system을 利用하여 液體狀態의 殘留파라핀을 推出한다음 凝固된

파라핀의 質量을 測定한다. 이 實驗에서 相變化 物質로는 純度 99%, 溶融溫度 61°C인 Octadecane 파라핀을 使用하였고 實驗條件으로 低溫 恒溫槽의 溫度를 31°C 및 51°C로, 高溫恒溫槽의 溫度를 61°C, 71°C 및 81°C로 各各 變化시키면서 實驗을 遂行하였다.

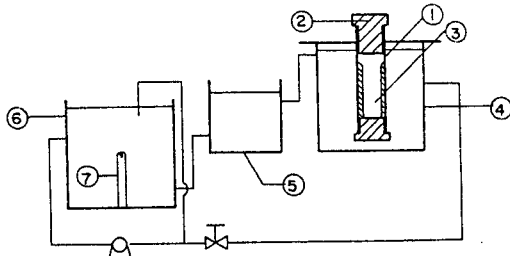


Fig. 1. Schematic Diagram of the Experimental Apparatus.

1. COPPER TUBE
2. INSULATION PLUG
3. LIQUID PARAFFIN
4. COOLED WATER BATH
5. COOLING DEVICE
6. WATER CONTROL BATH
7. HEATER

3. 理論 解析

液體 파라핀의 初期溫度를 相變化溫도와 같게 하였을 경우에는 두가지 成分의 에너지가, 그리고 初期溫度를 相變化溫度 以上으로 過熱하였을 때는 네가지 成分의 에너지가 銅管으로 부터 放出된다. 만약 凝固過程에서 凝固된 파라핀의 質量을 M 이라 하면 凝固過程에서 放出된 잠열에너지는 다음과 같이 計算된다.

$$E_1 = \lambda \cdot M \quad (2-1)$$

또한 相變化溫度以下로 固體파라핀이 過冷될 때 放出되는 현열에너지 E_{s1} 은

$$E_{s1} = M \cdot C_{sol} (T^* - T_m) \quad (2-2)$$

으로 되며, 여기서 T_m 은 凝固된 파라핀의 平均溫度로서 T_m 은,

$$T_m = \frac{\int_{r_i}^{r_w} T(r) \rho_{sol} 2\pi r dr}{\int_{r_i}^{r_w} \rho_{sol} 2\pi r dr} \quad (2-3)$$

로 表示되며 따라서 液體파라핀의 初期溫度 T_i 가 相變化溫도와 同一할때 銅管에서 放出되는 總

에너지 E_{tot} 는,

$$E_{tot} = E_1 + E_{s1} \quad T_i = T^* \quad (2-4)$$

으로 나타난다.

液體파라핀의 初期溫度 T_i 가 相變化溫度보다 높을 때에는 위의 (2-4)式보다 두가지 成分의 에너지(E_{s2} 와 E_{s3})가 더해지는데, E_{s2} 는 實驗期間中 凝固된 파라핀의 初期溫度 T_i 에서 파라핀의 溶融溫度 T^* 까지 冷却될 때 放出되는 현열에너지이며 E_{s2} 는

$$E_{s2} = M \int_{T^*}^{T_i} C_{lig} dT \quad (2-5)$$

로 計算된다. E_{s3} 는 實驗이 끝난 후 液體狀態로 남아 있는 파라핀이 파라핀의 初期溫度 T_i 에서 殘留파라핀의 溫度 T_b 까지 冷却될 때 放出되는 현열에너지이며 E_{s3} 는

$$E_{s3} = (M_{tot} - M) \int_{T_b}^{T_i} C_{lig} dT \quad (2-6)$$

로 表示된다. 따라서 液體파라핀의 初期溫度가 相變化溫度보다 클 경우 銅管으로 부터 放出되는 總에너지 E_{tot} 는

$$E_{tot} = E_1 + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} \quad T_i > T^* \quad (2-7)$$

로 나타난다.

實驗의 結果는 銅管에 담겨진 液體狀態의 파라핀이 全部 凝固될 때 放出되는 잠열에너지 E_{1max} 에 의해 無次元化하였고 또한 $Fo \times Ste$ 수를 써서 無次元化하였다. 여기서 E_{1max} , Fourier 수 및 Stefan 수는 다음과 같다.

$$E_{1max} = \lambda M_{tot}$$

$$Fo = \alpha_{sol} t / r_w^2$$

$$Ste = C_{sol} (T^* - T_w)$$

4. 實驗結果 및 考察

Fig. 2는 파라핀의 初期溫度 T_i 와 파라핀의 相變化溫度 T^* 의 差 $\Delta T_i = 20^\circ C$ 이고 파라핀의 相變化溫度 T^* 와 低溫恒溫槽의 溫度 T_w 의 差 $\Delta T_w = 10^\circ C$ 일때의 時間에 따른 凝固形態의 變化를 나타낸다. 本 實驗범위에서는 이 경우에서 凝固

期間이 짧을 때 (Fig.2에서 10분과 20분의 경우)에 自然對流의 影響을 가장 많이 받을 것으로 豫想되는데 自然對流의 影響으로 銅管 아래部分의 凝固 두께가 上部分보다 아주 尠소한 程度로 두껍게 나타났다. 이 尠소한 기울기를 제외하면 凝固形態는 $T_i = T^*$ 일때와 같은 形態가 된다. Fig. 2에서 銅管의 밑바닥에서는 斷熱材를 통한 熱放出으로 因하여 尠은 凝固層이 形成되었으며, 上部分에서는 凝固가 進行됨에 따라 相變化에 따른 密度의 增加로 因해 液體 파라핀의 表面이 낮아지게 된다. 時間이 경과함에 따라; 液體 파라핀의 上部表面에도 尠은 凝固層이 形成되고 凝固表面바로 밑의 液體 파라핀의 表面이 계속 낮아져 凝固表面밑에 빈 空間이 생긴다.

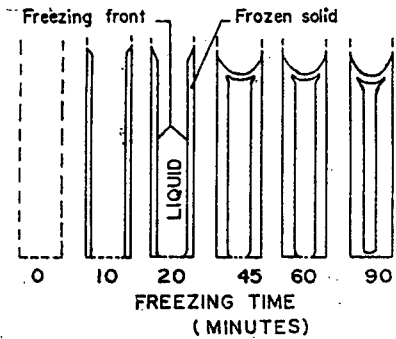


Fig 2. Representative Pattern of Freezing :

$$T_i - T^* = 20^\circ\text{C}, T^* - T_w = 10^\circ\text{C}$$

凝固表面이 처음 形成되었을때에는 수평이지만 空間과 大氣사이의 壓力差에 依해 점진적으로 오목하게 된다. 또한 凝固表面에는 樹枝狀 結晶이 나타나는데 이것은 液體 파라핀內에 自然對流가 일어나고 있지 않음을 말해 준다.

Fig.3은 파라핀의 總質量 M_{tot} 에 對한 凝固質量 M 의 比를 各各의 實驗條件에 對하여 時間의 함수로 表示하였다.

Fig.3에서 M/M_{tot} 의 값은 $T_i - T^*$ 보다 $T^* - T_w$ 의 크기에 依해 뚜렷하게 變化하는 것으로 나타났다. 또한 $T^* - T_w$ 의 값이 클수록 파라핀의 凝固期間이 현저하게 짧아지는 것을 알수 있다.

Fig.4는 初期에 過熱된 파라핀溫度를 時間에 따른 變化를 나타내고 있는데 一般的으로 凝固를 시작한 후 約 10分 程度에서 相變化溫度에 가깝게 冷却된다. 따라서 約 10分이 경과하면 液體 파라핀에서 凝固表面으로의 에너지 傳達은 매우 적게 되고 自然對流現象도 나타나지 않는 것으로 사료된다.

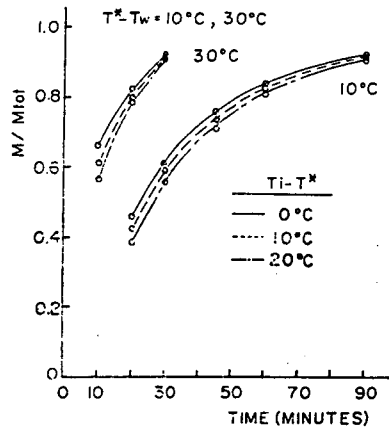


Fig 3. Timewise Variations of the Frozen Mass.

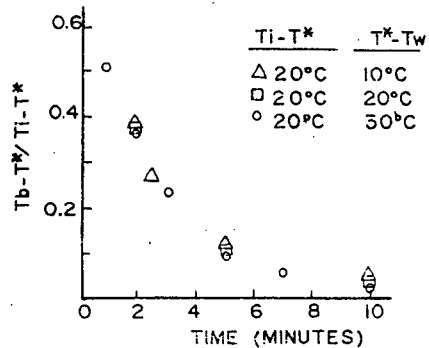


Fig 4. Decay of the Liquid Superheat with Time.

Fig.5와 Fig.6은 $T^* - T_w$ 가 各各 10°C 및 30°C (즉 $St_e = 0.122, 0.366$)일때 E_{max} 을 기준으로 한 各成分에너지의 比를 表示하고 있다.

Fig.5에서 알수 있는 바와 같이 凝固된 파라핀

에서 放出되는 顯열에너지 E_{s1} 은 相變化에 依해 放出되는 잠열에너지 E_2 에 比해 매우 적게 나타 난다. 그리고 E_{s1} 의 크기는 파라핀을 相變化溫 도보다 20°C 만큼 過熱시킨 경우와 그 차이 가 매 우 적게 나타나고 $Fo \times Ste$ 수가 증가할수록 많 은 量의 파라핀이 凝固되어 E_{s2} 는 增加하고 E_{s3} 는 減少하게 된다. 또한 $Fo \times Ste$ 수의 大部分의 범위에서 液體狀態로 남아 있는 파라핀의 溫度 T_b 가 파라핀의 相變化溫度 T^* 와 同-해지고 따 라서 E_{s2} 와 E_{s3} 의 합은 一定한 값이 되는 것으 로 나타났다. Fig.6에서는 Fig.5에서 보다 Ste 수가 클 때의 各 成分에너지의 比를 나타내고 있 다. 여기서 E_{s1} 의 크기는 파라핀의 初期過熱의 程度에 關係없이 거의 一定하게 나타났으며 또 한 $T_i - T^*$ 의 값이 커짐에 따라 顯열에너지가 總 에너지中의 상당한 部分을 차지하는 것으로 나 타났다.

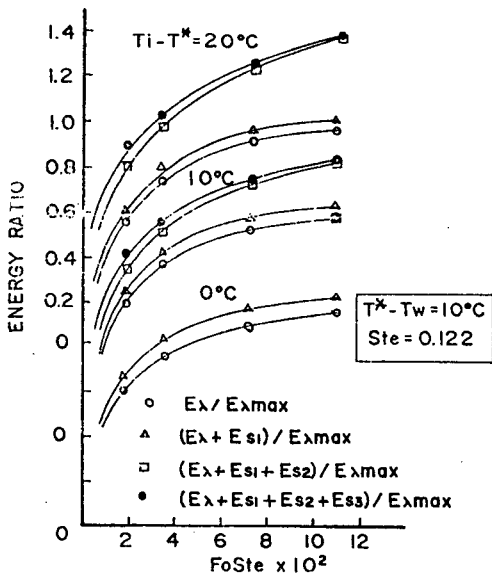


Fig 5. Component Extracted Energies for a Wall Subcooling $(T^* - T_w) = 10^{\circ}\text{C}$ and $Ste = 0.122$

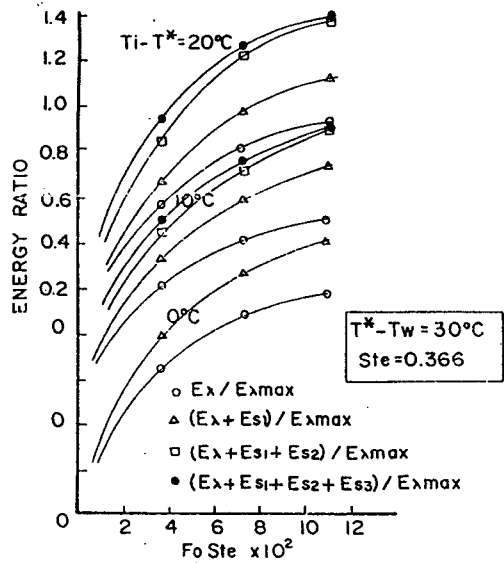


Fig.6. Component Extracted Energies for a Wall Subcooling $(T^* - T_w) = 30^{\circ}\text{C}$ and $Ste = 0.366$

Fig.7과 Fig.8은 $T^* - T_w$ 가 各各 10°C 및 30°C 일때 總에너지 E_{tot} 와 잠열에너지 E_2 의 크기를 表示하고 있는데 $T^* - T_w$ 가 커짐에 따라 凝固速 度가 매우 빠른 것을 알 수 있다. 또한 初期過 熱의 程度가 클수록 銅管에서 放出되는 잠열에 너 지는 減少하지만 總에너지는 實質的으로 增加하 는 것으로 나타났다.

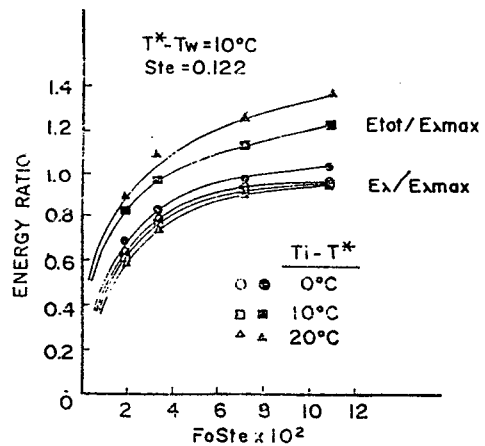


Fig 7. Comparison of Total and Latent, Extracted Energies: $(T - T_w) = 10^{\circ}\text{C}$ and $Ste = 0.122$

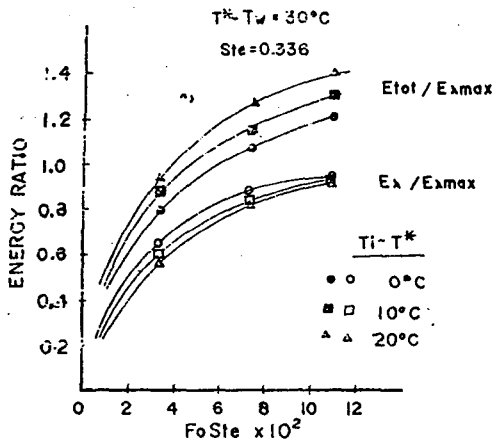


Fig 8. Comparison of Total and Latent Extracted Energies : $(T_i - T_w) = 30^\circ\text{C}$ and $Ste = 0.366$

5. 結 論

本 研究는 外部로부터 冷却되어지는 垂直管内에서 相變化物質의 凝固에 關한 研究로서 파라핀의 初期溫度 T_i 와 파라핀의 相變化溫度 T_m 의 差 ΔT_i 를 0°C , 10°C 및 20°C 로, 파라핀의 相變化溫度 T_m 와 低溫恒溫槽의 溫度 T_w 의 差 ΔT_w 를 10°C 및 30°C 로 各各 變化시키면서 파라핀의 凝固形態와 凝固質量 및 파라핀에서 放出되는 各 成分에 에너지等에 關하여 考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 파라핀의 凝固質量 M 은 파라핀의 初期溫度 T_i 와 파라핀의 相變化溫度 T_m 의 差 ΔT_i 보다 파라핀의 相變化溫度 T_m 와 低溫恒溫槽의 溫度 T_w 의 差 ΔT_w 에 의해 크게 變化되는 것으로 나타났다.

2) 液體 파라핀의 初期溫度를 相變化溫度以上으로 過熱하였을 경우에는 初期溫度를 相變化溫度로 한 경우에 比해 凝固質量과 잠열에너지가 약간 減少하는 것으로 나타났으나 總에너지는 크게 나타났다. 이러한 現象은 凝固 期間이 짧을때에 현저하게 나타났다.

3) 液體 파라핀內에서 自然對流의 영향은 파라

핀의 初期溫度 T_i 와 低溫恒溫槽의 溫度 T_w 를 높게 하였을 때 가장 큰것으로 나타났으며 本 實驗범위에서는 約 10分이 경과한 후에는 銅管内의 液體 파라핀의 溫度가 相變化溫도와 같아지게 되므로 더 以上 自然對流의 영향은 받지 않는 것으로 나타났다.

4) 잠열에너지가 總에너지의 大部分을 차지하고 있지만 파라핀의 初期溫度 T_i 를 높게하고 低溫恒溫槽의 溫度 T_w 를 낮게 하였을 때에는 현열에너지도 總에너지中의 상당한 部分 ($34 \sim 42\%$)을 차지하는 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

1) R. Viskanta, A. G. Bathelt and N. W. Hale, Jr., "Latent heat-of-fusion energy storage : experiments on heat transfer during solid-liquid phase change", Proceedings, Third Miami International Conference on Alternative Energy Sources, December 1980.

2) R. Viskanta; "Phase-Change Heat Transfer" Solar Heat storage: Latent Heat Materials, edited by G. A. Lane, CRC press, Boca Raton, Florida 1982.

3) R. G. Kemink and E. M. Sparrow; Heat transfer Coefficients for melting about a vertical cylinder with or without subcooling and for open or closed containment, Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 24, pp 1699-1710(1981)

4) E. M. Sparrow, J. W. Ramsey and R. G. Kemink; Freezing controlled by natural convection in the melt region of melting in the presence of natural convection in the melt region, J. ASME Heat Transfer Vol. 99, pp 521 ~ 526 (1977)

b) L. M. Hossfeld; A Coordinate transformation method for solving a convection phase

change problem, Ph. D thesis, Department of Mechanical Engineering University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota (1979)

7) E. I Griggs and W. R. Humphries; A design hand book for phase change thermal control and energy storage device, NASA Technical Paper 1074 (1977)