

핀이 부착된 垂直 冷却管에서의 熱傳達到 關한 實驗的인 研究

An experimental study on heat transfer of finned vertical cooling tube

* 송 하 진 * 이 채 문 * * 임 장 순
(H.J, Song) (C.M, Lee) (C.S, Yim)

ABSTRACT

Experiments were performed to study freezing on a finned vertical tube when either conduction in the solid or natural convection in a liquid controls the heat transfer. Conduction is the controlling mode when the liquid is at its fusion temperature, whereas natural convection controls when the liquid temperature is above the fusion value. The liquid was housed in a cylindrical containment vessel whose surface was maintained at a uniform, time-invariant temperature during a data run, and the freezing occurred on a finned vertical tube positioned along the axis of the vessel. The phase change medium was n-octacosan, a paraffin which freezes at about 61°C. For conduction-controlled freezing, the enhancement of the frozen mass due to finning is greatest when the frozen layer is thin and decrease as the layer grows thicker. The degree of enhancement is generally less than the surface area ratio of the finned and unfinned tube.

NOMENCLATURE

A : surface area;
 A_f : surface area of finned tube;
 K : thermal conductivity of solidified material;
 M : frozen mass;
 M_f : frozen mass on finned tube;
 M_{uf} : frozen mass on unfinned tube;
 T_i : temperature of cooled tube;
 ΔT_i : inner temperature difference, T^*-T_i ;
 T_o : surface temperature of containment vessel and initial temperature of liquid;
 ΔT_o : outer temperature difference, T_o-T^* ;
 T^* : fusion temperature;

t : time
 x : coordinate normal to surface;
 δ : thickness of frozen layer;
 λ : latent heat of fusion;
 ρ : density of solid;

1. 緒 論

熱에너지의 收受 및 傳達到 時間에 따라 一定하지 못한 熱機器에서 熱供給을 원활히 하기 위해서는 効果的인 에너지 저장수단이 필요하다. 熱에너지 저장수단으로 相變化를 동반하는 方法이 Sparrow¹⁾ 등에 依해서 研究發表되었다.

熔融時 自然對流에 關한 研究는 Bathelt²⁾ 와 kmink³⁾에 依해 實驗的으로 수행되었으며

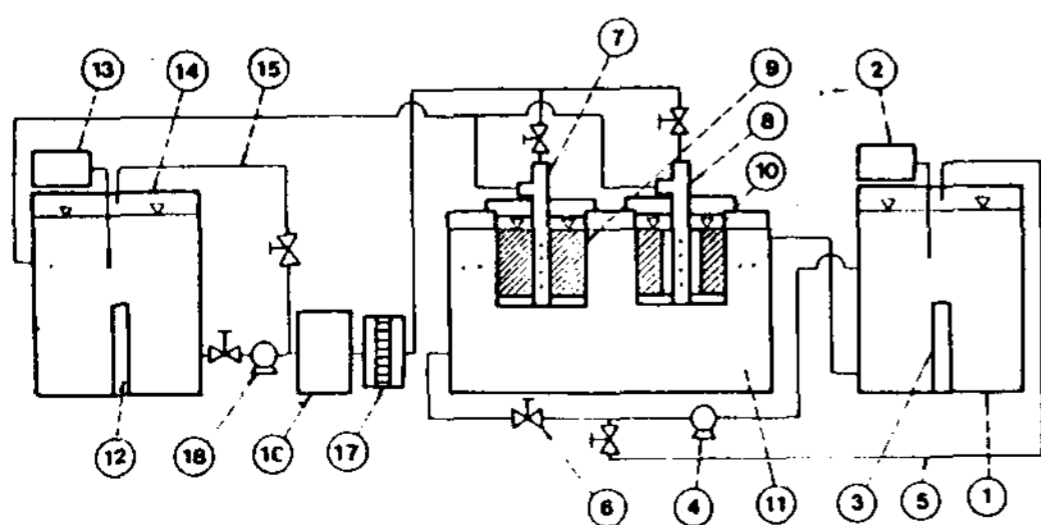
* 正會員 仁荷大學院
 * * 正會員 仁荷大學工大

또한 垂直원통에 관한 수치적인 해석이 Sparrow⁴⁾ 와 Hossfeld⁵⁾ 에 의해서 행해졌다.

최근 凝固에 관한 研究로는 액상상태의 相變化物質의 溫度가 熔融點 以上인 상태에서 垂直 또는 水平管주위에서의 凝固에 관한 실험이 sparrow⁶⁾ 와 Bathelt⁷⁾ 에 의해 發表되었다. 여기서 凝固현상은 管의 表面에서 發生하며 액상 안에서는 自然對流가 발생함으로써 凝固率이 감소하는 현상이 나타났고 凝固成長에 어떤 限界가 存在한다는 것이 규명되었다. 凝固率이 감소하면서 응고과정이 종료되는 것은 상변화를 이용하는 熱貯藏장치에서의 熱傳達과정에서 심각한 장애요소로 나타나고 있다. 특히 이런 현상은 熱貯藏장치로 부터 열이 방출되는 비율을 감소시키므로 이러한 열전달의 감소를 보상하기 위해서 응고과정에서 熱傳達을 向上시키는 方法이 강구되어야 한다. 強制對流나 自然對流가 發生하는 熱傳達과정에서 熱轉達率을 向上시키기 위하여 핀을 附着하는 方法이 利用되어 왔다. 相變化를 同伴하는 熱傳達에서도 傳熱面積을 넓히기 위하여 핀을 利用하여 핀의 傳熱과정 및 凝固現象을 고찰하여 보기로 한다.

本實驗에서는 핀으로 부터 그 周圍의 相變化物質로의 熱傳達 特性을 두가지 시스템에서 비교·관찰하였고 相變化物質에 저장된 에너지를 회수하는데 필요한 熱傳達問題를 해석하기 위하여 凝固와 熔融과정 中 凝固과정을 해석하는데 力點을 두었다.

2. 實驗裝置 및 方法



1. Heating Chamber
2. Temperature Controller
3. Heater
4. Pump
5. By-Pass Line
6. Valve
7. Unfinned Tube
8. Finned Tube
9. Cylindrical Containment Vessel
10. Paraffin
11. Constant Water Bath
12. Heater
13. Temperature Controller
14. Heating Chamber
15. By-Pass Line
16. Mixing Chamber
17. Flow Mass
18. Pump

Fig.1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

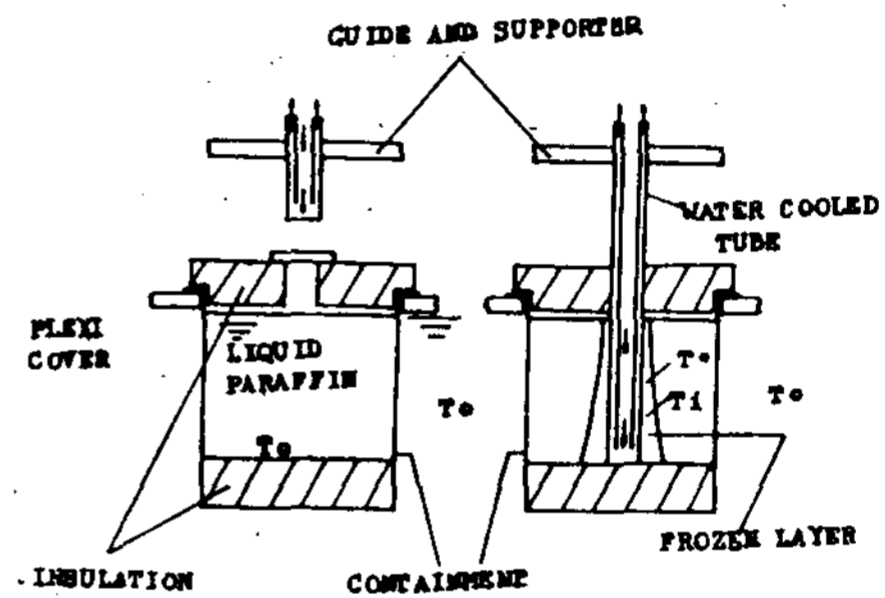


Fig.2 Schematic diagrams of the experimental apparatus. left-hand diagram preparatory stage of an experiment; right-hand diagram: a deta run in progress.

2-1. 實驗裝置

相變化物質에 의한 熱傳達 關係를 규명하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 또한 相變化가 일어나는 용기 및 냉각과정에 대한 상세도를 Fig.2에 나타냈다. 실험장치의 주요부는 항온조, 상변화물질이 담긴 용기, 응고가 발생하는 냉각관, 냉각수 또는 온수 공급장치, 온도 조절장치 및 기타 측정계기들로 이루어진다. 凝固가 발생하는 냉각관을 중심으로 왼쪽부분은 냉각관에 공급되는 냉각수의 공급 및 조절장치이며 냉각수의 유량과 온도를 조절할 수 있도록 하였고 오른쪽 부분에는 상변화 물질이 담겨있는 용기의 온도를 조절하기 위한 온수를 만들어 공급하는 장치가 설치되어 있다. 또한 凝固

가 발생하는 실험부위는 필요에 따라 즉시 이동이 가능하도록 지지대를 설치하여 매 실험때마다 시험 부위를 취출하여 凝固量 및 凝固두께를 측정 관찰할 수 있도록 하였으며 특히 흰불이 냉각관과 원이 없는 매끈한 냉각관이 동일한 유량 및 온도 조건에서 실험될 수 있도록 동시에 삽입 제거가 될수 있는 장치로 제작하였다.

2-2. 實驗方法

本 實驗에서 相變化物質로 *n*-octacosan(C₂₈H₅₈) 파라핀을 사용하였으며 냉각관에 유입되는 유량은 6.5ℓ/min. 으로 일정하게 유지하였다.

순수 열전도에 의해서만 지배되는 조건은 액상 파라핀 온도와 용융 온도와의 차 ΔT₀가 0 일때 파라핀의 용융온도와 냉각수 온도와의 차 ΔT_i를 5°C, 10°C, 15°C로 변화시켰고 自然對流 流動의 지배적인 조건은 ΔT₀를 15°C, 20°C로 ΔT_i를 15°C, 23°C, 30°C로 각각 변화시키면서 5, 15, 30, 60, 90, 120, 180 分에 걸쳐 응고에 관한 실험을 하였다. 實驗에 앞서 밀폐용기와 그속에 든 액체 파라핀이 열적인 평형 상태에 도달하도록 하기 위하여 밀폐용기에 파라핀을 넣은후 약 2시간 동안 유지시켰다. 또한 액체 파라핀 속에 잠긴 열전대와 냉각관 표면에 부착된 열전대로 부터 측정된 온도를 digital thermometer 로 읽어 냉각수와 냉각관의 열적인 평형 상태를 확인하였다. 열적인 평형상태가 확인되면 냉각관을 파라핀에 넣어 실험을 시작한다.

일정한 시간이 경과하면 액상 파라핀으로부터 냉각관을 끌어내어 고정한 후 응고된 파라핀을 측정하기 위하여 heating chamber 의 뜨거운 물(약 70°C)를 by-pass line 를 통하여 냉각관에 흐르도록 함으로써 응고된 파라핀을 채취하였다. 채취된 표본은 정확도 0.1 g의 천칭을 가지고 질량을 측정하였고 Vernier Calipers 로써 응고층의 두께를 측정하였다.

3. 實驗結果 및 考察

相變化物質에서 凝固된 파라핀의 質量M은 凝固過程에서 放出된 에너지로 表示할수 있다. 또한 파라핀의 凝固量은 時間t에 따라 增加하며 冷却水와 파라핀의 熔融溫度와의 差ΔT_i에 따라 變化한다.

3-1. 熱傳導에 依한 凝固 시스템

3-1-1. 원이 附着된 管에서 傳導에 依해 支配되는 凝固

熔融溫度에 있는 液相 파라핀이 凝固될때 X 軸 方向으로만 고려한 1次元的 解析에 對해서 알아보고져 한다.

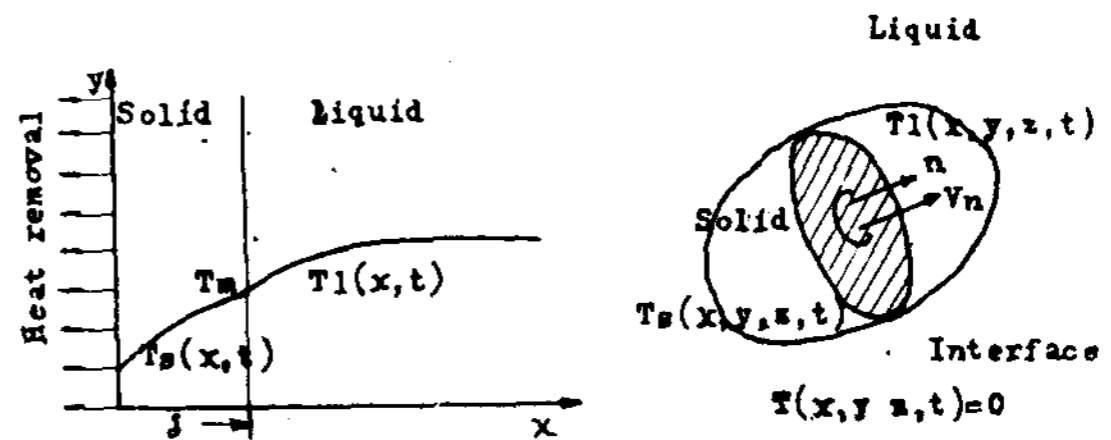


Fig.3 Coordinates for the derivation of the boundary condition at the solid-liquid interface

〔固相을 通過하는 陰의 x 方向의 熱流動〕 — 〔液相을 通過하는 陰의 x 方向의 熱流動〕 — 〔境界面의 單位面積當 凝固에서 方出되는 熱放出率〕

$$\text{즉 } -(q_s - q_l) = \rho \cdot \lambda \cdot dx / dt \quad (1)$$

$$q_l = -K_l \cdot \partial T_l / \partial X$$

$$q_s = -k_s \cdot \partial T_s / \partial X \quad (2)$$

(2) 식을 (1) 식에 代入하면

$$k \cdot \partial T / \partial X = \rho \cdot \lambda \cdot d\delta / dt \quad (3)$$

境界條件은 $x = \delta$ 에서 $T = T^*$ 이며 $x = 0$ 에서 $T = T_i$ 이다. 한편 熱傳導 方程式으로 부터 熱傳導率이 一定하고 정상상태 이며 内部에 熱發生이 없는 경우 x 軸으로만 解析한다면 Laplace equation이 되므로 다음과 같이 쓸수있다.

$$d^2 T / dX^2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式을 積分하여 境界條件을 代入하고 (3)과 連립 방정식을 풀어 初期條件 $t=0$ 에서 $\delta=0$ 를 代入하면,

$$M = A(2 \cdot \rho \cdot k / \lambda)^{1/2} \cdot (\Delta T_i \cdot t)^{1/2} \dots\dots(5)$$

그러므로 $M \sim (\Delta T_i \cdot t)^{1/2}$ 이 되고 위와 같은 解析的인 解를 實驗的인 解와 比較하기 위해 파라핀의 과열온도와 冷却水 온도와 의 差 ΔT_0 를 0으로 하고, 熔融溫도와 冷却水 溫度와의 差 ΔT_i 를 5°C , 15°C , 30°C 로 유지하면서 매시간 마다 凝固質量 및 두께를 測定하였다.

Fig.4에는 ΔT_i 와 凝固時間 t 및 凝固質量 M 과의 상관관계를 양대수 그래프로 表示하였고,

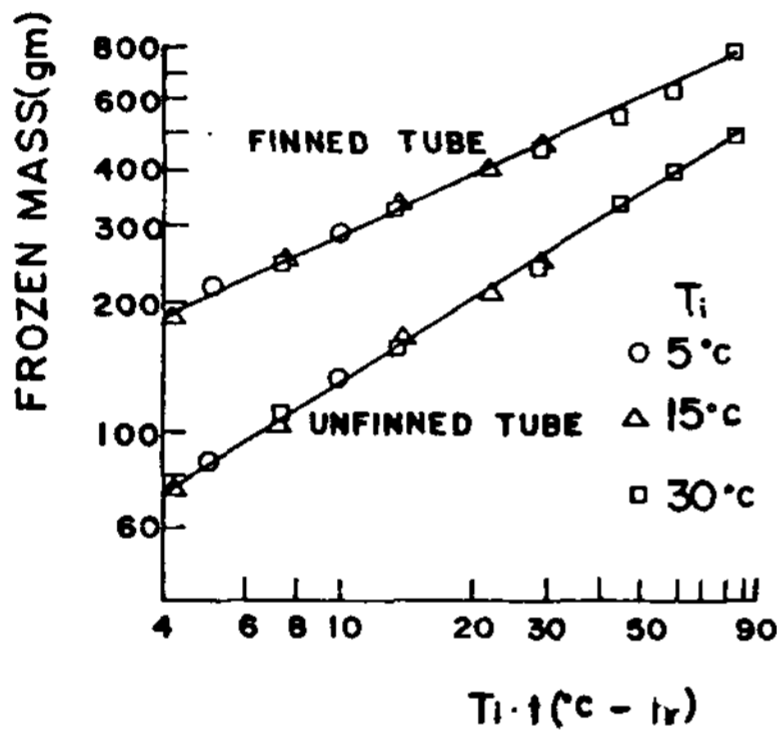


Fig.4 Correlations of the frozen mass on finned and unfinned tubes for conduction-controlled freezing

$\Delta T_i \cdot t$ 를 앞의 解析的인 解와 一致시키기 위하여 ΔT_i 와 시간 t 를 서로 교환할수 있는 변수로 취급하여 圓錐이 냉각관과 매끄러운 冷却管에 대한 質量 M 과 $\Delta T_i \cdot t$ 의 관계식을 여기서 부터 다음과 같이 구하였다.

$$M_f = 94.62(\Delta T_i \cdot t)^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

$$M_{uf} = 31.7(\Delta T_i \cdot t)^{0.614} \dots\dots\dots(7)$$

(6)식은 圓錐이 冷却管, (7)식은 매끄러운 冷却管에 대하여 각각 質量을 나타내고 있다.

또한 (6)식과 (7)식으로 부터 圓錐이 冷却管과 매끄러운 冷却管的 質量比를 구하면 다음과 같다.

$$M_f / M_{uf} = 2.98 / (\Delta T_i \cdot t)^{0.114} \dots\dots\dots(8)$$

$$M_f / M_{uf} < A_f / A_{uf} \dots\dots\dots(9)$$

여기서 A_f / A_{uf} 의 값은 3이다.

식 (5)와 식(6)의 독립변수가 $(\Delta T_i \cdot t)^{1/2}$ 로 동일하다는 사실로 비추어 실험식(6)을 解析的인 解(5)식과 比較할 수 있다. 식(5)의 解析的인 解를 풀기 위하여 物性值를 문헌⁸⁾로 부터 얻어 (5)식의 계수에 代入하여 다음과 같은 결과치를 얻었다.

$$M_f = 86.7(\Delta T_i \cdot t)^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

식 (10)의 계수는 실험식에서 구한 (6)식과 약 8%의 誤差가 있다는 것을 알았다. 이러한 誤差는 幾何學的 形狀, 熱傳導係數 등에서 其因된 差異라고 사료된다. 이러한 사실로 부터 方程式(5)를 圓錐이 冷却管的 解析的인 方程式으로 사용할 수 있다는 것이 규명된다.

3-1-2. 매끄러운 관에 대한 열전도만의 응고

$M_{uf} = 31.7(\Delta T_i \cdot t)^{0.614}$ 로 나타났으며 圓錐이 冷却管에 對해 구한해와 比較자료로 구해졌다. 매끄러운 관에서는 수치상의 결정이 생기는데 파라핀의 용융온도와 냉각수의 온도차 ΔT_i 가 增加할수록, 응고층의 두께가 두꺼울수록 수치상의 결정이 크게 생긴다. 이러한 수치상의 結晶이 생기므로써 凝固를 촉진시켜 凝固層의 두께를 增加시킬 뿐아니라 凝固층의 增加率이 0인 定常狀態에 도달하는 時間을 연장시켜 주는 것으로 생각된다.

3-2 自然對流가 支配的인 凝固시스템

液相파라핀의 溫度 T_0 가 熔融溫度 T^* 보다 클 때 液相에서 自然對流 순환이 발생하는데 흐름의 方向은 固·液 界面을 따라서 내려가고 용기의 벽을 따라 올라간다. 이러한 순환으로 인하여 시간이 경과함에 따라서 凝固率이 감소하게 되고 나중에 멈추게 되는 매끄러운 관에 대한 物理的 現狀이 Sparrow¹⁾에 의해 밝혀졌다.

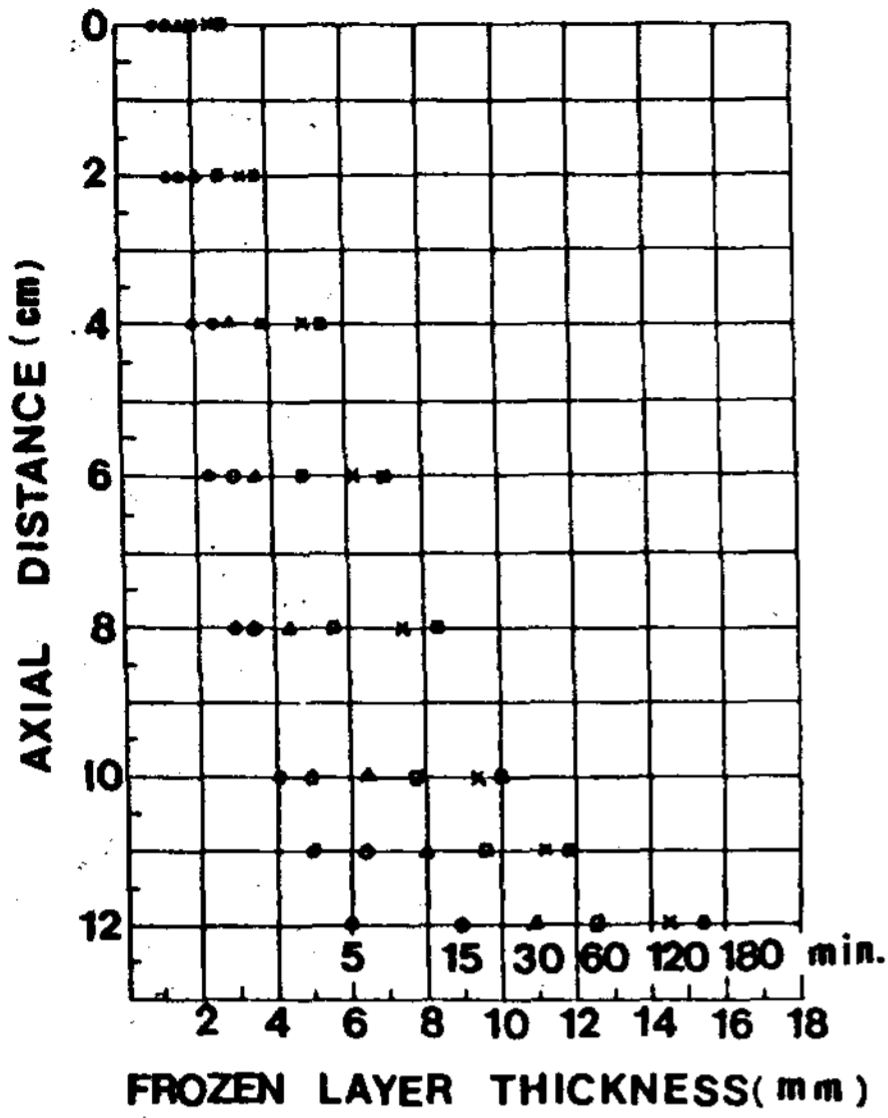


Fig.5 Axial distributions of the frozen layer thickness at a circumferential location midway between the fin. $\Delta T_i = 30^\circ\text{C}, \Delta T_o = 15^\circ\text{C}$.

Fig.5 는 원붙이 냉각관에서 ΔT_i 가 30°C , ΔT_o 가 15°C 일 때 5, 15, 30, 60, 120, 180 분에 걸쳐 응고 층의 두께를 측정 한 그래프로서 원의 맨 윗부분에서는 응고 초기에 이미 응고가 끝나 있는 것을 볼 수 있고 시간이 경과 함에 따라 응고율이 감소되는 것을 나타내고 있다.

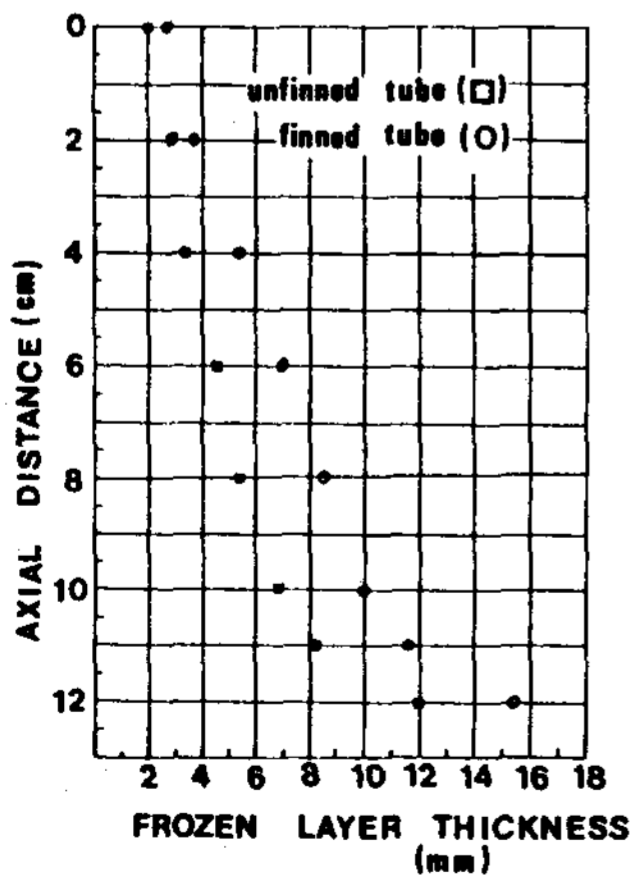


Fig.6 Axial distributions of the frozen layer thickness at unfinned tube and finned tube. $\Delta T_i = 30^\circ\text{C}, \Delta T_o = 15^\circ\text{C}$.

Fig.6 은 원붙이 냉각관의 응고층의 두께와 매끄러운 관에서의 응고층의 두께를 비교하였다. 원붙이 냉각관에서의 응고층의 두께는 원들사이의 중앙 위치에서 두께를 측정 한 Data로서 매끄러운 냉각관에 비해 응고가 향상됨을 알 수 있다.

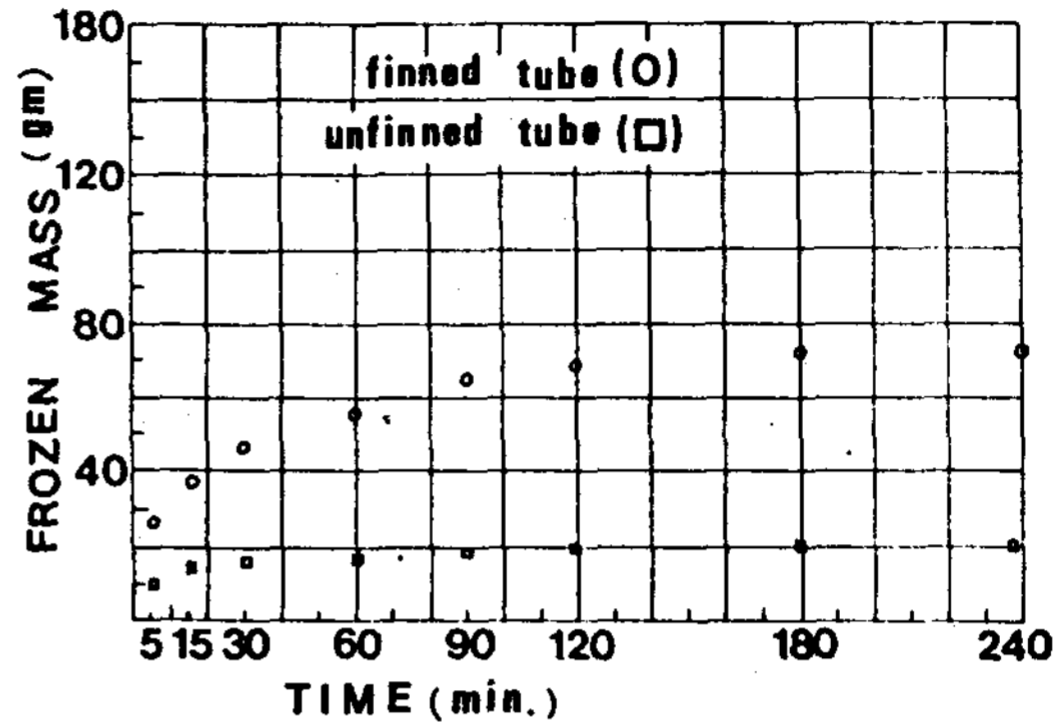


Fig.7 Timewise variations of frozen mass for natural-convection-controlled freezing. $\Delta T_i = 15^\circ\text{C}, \Delta T_o = 15^\circ\text{C}$.

Fig.7 은 ΔT_i 가 15°C , ΔT_o 가 15°C 일 때 원붙이 냉각관과 매끄러운 냉각관에 대해서 5, 15, 30, 60, 90, 120, 180 분에 걸쳐 시간이 경과 함에 따라 응고질량을 나타낸다. 초기응고 시에 응고질량은 급격히 증가하나 시간이 경과함에 따라 응고는 감소하고 충분한 시간이 경과하면 응고율은 0이 되며 매끄러운 냉각관의 응고종료가 원붙이 냉각관에서 보다 빨리 도달하는 것을 보여 준다.

Fig.8 은 ΔT_i 가 30°C 일 때 Fig.7 에서와 동일한 조건에서 응고질량을 측정하였다. Fig.7 과 Fig.8 로 부터 ΔT_i 가 증가 함에 따라 응고질량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Table 1은 내부온도차 ΔT_i 가 15°C , 30°C 외부온도차 ΔT_o 가 15°C 일 때 시간의 변화에 따라 원붙이 냉각관과 매끄러운 냉각관의 질량비 M_f / M_{nf} 를 나타낸다. 응고초기에는 응고질량비 M_f / M_{nf} 의 값은 작으나 시간이 경과함에 따라 커지며 일정한 시간후에는 변하지 않게 되

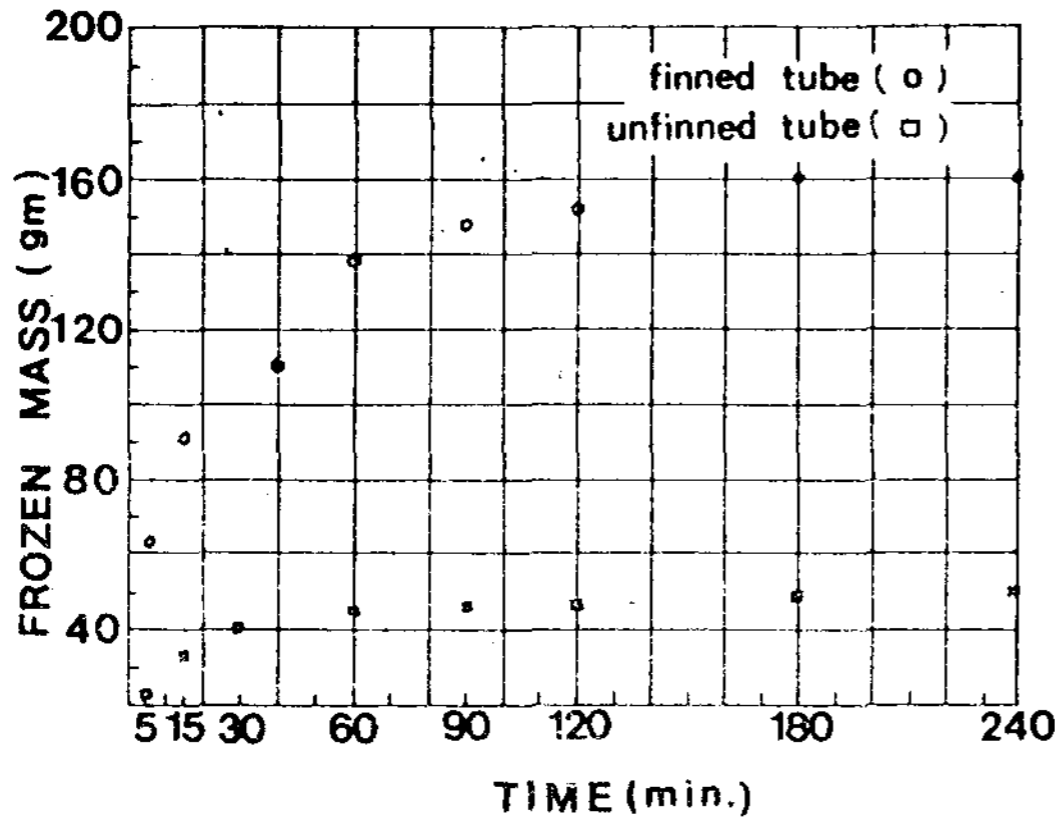


Fig. 8 Timewise variations of frozen mass for natural-convection-controlled freezing.
 $\Delta T_i = 30^\circ\text{C}$, $\Delta T_o = 15^\circ\text{C}$.

| t(min) | 5 | 15 | 30 | 60 | 90 | 120 | 180 | 240 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| M_f/M_{uf} (Fig7) | 2.5 | 2.92 | 3.13 | 3.32 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 |
| M_f/M_{uf} (Fig8) | 2.42 | 2.77 | 2.97 | 3.23 | 3.28 | 3.32 | 3.32 | 3.32 |

Table 1. Values of M_f/M_{uf} natural-convection-controlled freezing

고 질량비 M_f/M_{uf} 의 값은 ΔT_i 가 30°C 일 때 보다 15°C 일 때 더 크고 불변하는 값도 더 빠르게 나타났습니다.

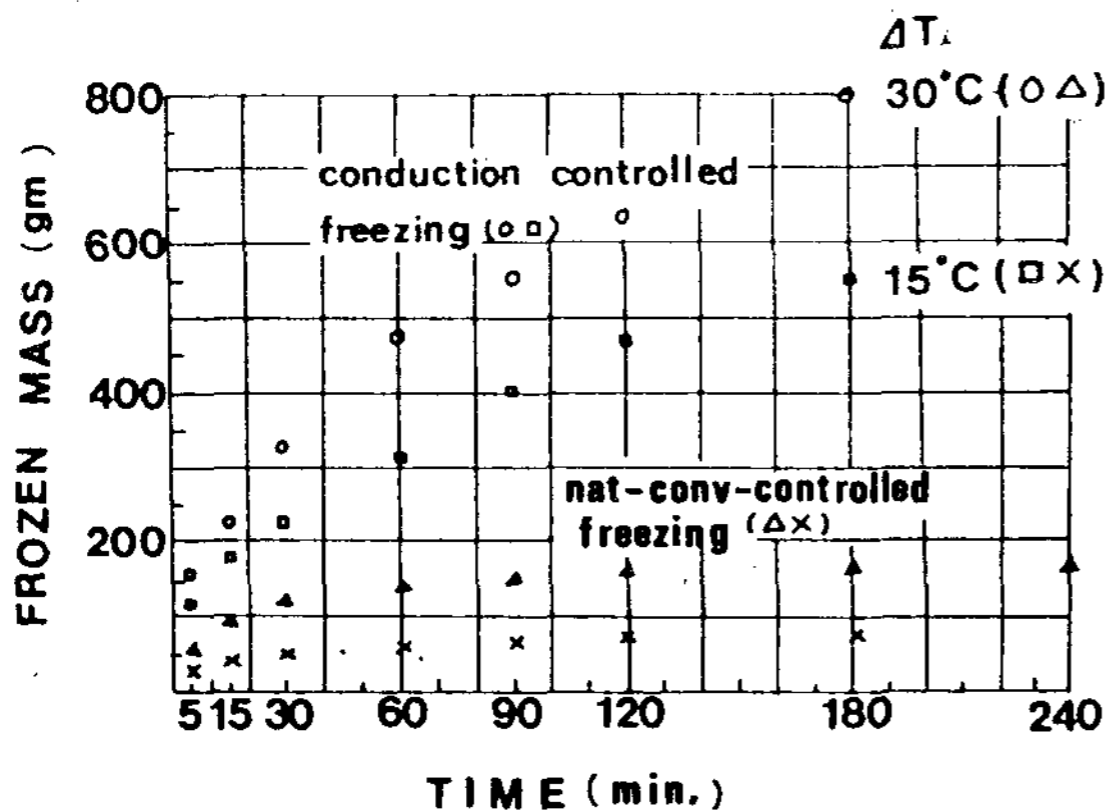


Fig. 9 Comparison of the frozen mass for conduction-controlled and natural-convection-controlled freezing on a finned tube.

Fig. 9 는 흰불이 냉각관에서 ΔT_i 가 15°C 30°C ΔT_o 가 0°C 될 때 순수열전도에 의해 지배되는 응고와 ΔT_i 가 15°C , 30°C ΔT_o 가 15°C 일 때 자연대류에 의해 지배되는 응고를 나타내고 있다.

4. 結 論

냉각관 표면에서의 凝固에 對한 傳熱實驗을 行한 結果아래와 같은 結論들을 얻었다.

1) 순수 열전도만에 의해 支配되는 凝固

(1) 凝固된 질량과 $\Delta T_i \cdot t$ 의 實驗的인 相關關係는 $M \sim (\Delta T_i \cdot t)^n$ 으로 나타났으며 흰불이 냉각관의 n의 값은 0.5, 매끄러운관에서의 n값은 0.614로 나타났다.

(2) 응고질량비 M_f/M_{uf} 은 面積比 A_f/A_{uf} 보다 작은 것으로 나타났다.

(3) 固·液 境界面에 樹枝狀 結晶이 나타났으며 凝固된 파라핀의 形狀은 냉각관의 軸에 거의 平行이었다.

2) 自然對流에 支配的인 狀態에서의 凝固

(1) 自然對流에 依한 運動量의 影響으로 파라핀 形狀의 頂부분에서의 凝固成長率은 밑부분의 응고성장률 보다 빨리 응고종료에 도달했다.

(2) 凝固質量比 M_f/M_{uf} 은 2.5~3.5로 分布되었다.

(3) 熔融溫度와 冷却水 溫度差 ΔT_i 의 값이 낮은 값에서 凝固成長率의 減小가 컸다.

REFERENCES

1. E.M. Sparrow and J.A. Broadbent, Freezing in a Vertical Tube, J. ASME, Heat Treansfer. Vol. 105, 217–255 (1983).
2. R. Viskanta, A.G. Bathelt and N.W. Hale, Jr., Latent heat-of-fusion energe storage: experiments on heat transfer during solid-liquid phase change, Proceedings, Third Miami International Conference on alternative Energy Sources, December 1980.
3. R.G. Kemink and E.M.S. parrow, Heat transfer coefficents for melting about a vertical cylinder with or without subcooling and for open or closed containment, Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 24, 1699–1710 (1981).
4. E.M. Sparrow, S.W. Patanker and S. Ramadhyani, Analysis of melting in the presence of natural natural convection in the melt region, J. ASME, Heat Transfer. Vol. 99, 520–526 (1977).
5. L.M. Hossfeld, Accordinate transfermation method for solving a convection phace change problem. Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota (1979).
6. E.M. Sparrow, J.W. Ramsey and R.G. Kemink, Freezing controlled by naturall convection, J. asme, Heat Transfer. Vol. 101, 578–584 (1979).
7. A.G. Bathelet, P.D. Van Buren and R.Viskanta, Heat transfer during solidification around a cooled horizontal cylinder, in Heat Transfer Sandiago- 1979 A.I.Ch.E.Symp.Ser. 75 (189), 103–111 (1979).
8. E.I. Griggs and W.R. Humphries, A design handbook for phasechange termal controll and energy storagy devices, NASA Technical Paper 1974 (1977).
9. E.M. Sparrow, S. Kamadhyani and S.V. Pantanker, Effect of Subcooling on cylindrical melting, J. Heat Transfer 100, 395–402 (1978).