

|||||||  
| 論 文 |  
|||||||

# 水平圓管속에 同心으로 놓여있는 얼음 棒의 融解現象에 관한 實驗的 研究

李 東 旭\* 柳 常 新\*\*

(1986年 5月 20日 接受)

## An Experimental Study on the Melting of Horizontal Ice-Bar Located Concentrically in the Cylinder

Dong Wook Lee\*, Sang Sin Yoo\*\*

### ABSTRACT

The melting phenomena of horizontal cylindrical ice-bar immersed in water and air concentrically in the cylinder are experimentally investigated for the temperature range from 3.5°C to 25°C. The shapes of the melting ice-bar are recorded photographically by the shadowgraph method.

The shadowgraphs of the melting ice-bar show that water adjacent to the bar flows upward for the temperature range from 3.5°C to 5.8°C while above 5.8°C the flow is downward direction. The local and average Nusselt numbers are obtained with the recorded shadowgraphs and comparator.

Melting shapes of the ice-bar in the air show the vortex motion in the bottom portion of the bar, whereas no vortex motion appears in the bottom portion when the bar is melted in the water.

#### 記 號

$C$  : 물의 比熱

$D$  : 얼음棒的 初期直徑

$D_0$  : 圓管的 內徑

$F_0$  : Fourier 數( $\alpha t/D^2$ )

$g$  : 重力 加速度

$h$  : 물의 對流熱傳達係數

$k$  : 물의 熱傳導率

$L$  : 얼음의 融解潛熱

$N_u$  : 局部 Nusselt 數( $hD/k$ )

$\bar{N}_u$  : 平均 Nusselt 數

$r$  : 얼음의 半徑方向

$R_a$  : Rayleigh 數( $\frac{g\beta \Delta T(\frac{D_0}{2} - \frac{D}{2})^3}{\alpha\nu}$ )

$St_s$  : Stefan 數( $c(T_\infty - T_i)/L$ )

$t$  : 時 間

\* 正會員, 大田開放大學 機械工學科

\*\* 正會員, 韓國航空大學 機械工學科

- $T$  : 溫 度
- $\alpha$  : 물의 熱擴散係數
- $\beta$  : 물의 體積膨脹係數
- $\nu$  : 물의 動粘性係數
- $\rho$  : 얼음의 密度
- $\tau$  : 無次元時間( $F_0 \cdot St_e$ )
- $\phi$  : 얼음棒的 圓주角  
下 添 字
- $i$  : 얼음과 물의 接觸面
- $\infty$  : 周圍물의 狀態

1. 緒 論

에너지 變換技術에 關한 研究中에서 에너지利用方法을 多樣化하고 效率을 增加시키기 위하여 에너지저장기술의 研究에 많은 관심을 모으고 있다. 특히 熱에너지저장기술에 있어서 相變化物質(Phase Change Material)을 이용한 열에너지저장(Thermal Energy Storage)에 關한 研究는 靑열이용, 열펌프의 응용, 太陽에너지이용 등의 效率을 向上시킬 目的으로 집중적으로 연구되고 있다.

同心圓筒內的 融解現象에 關한 研究는 內部圓筒이 相變化物質이며 外部圓管이 加熱部가 되고 원통사이에는 상변화물질이 液相으로 채워져 있어 自然對流를 수반하는 경우에 대하여 많이 발표되었다. 相變化物質로는 파라핀(n-Octadecane) 및 얼음과 물이 많이 사용되었다. Sparrow 등(1)은 뜨거운 水平실린더가 固相의 相變化物質속에 끼워진 상태로 있을때 실린더주위의 용해현상을 實驗的으로 연구하였으며 이와 유사한 연구가 Bathelt 등(2)에 의하여도 수행된 바 있다. Saitoh 와 Hirose(3)는 最大密度點 부근의 물속에 水平으로 잠겨있는 얼음棒주위에 발생하는 熱的不安定에 대한 數值解를 발표한바 있고, Pannu 등(4)은 열저장을 위한 同心圓筒의 棒周圍에 발생하는 自然對流에 關한 현상에 대하여 연구발표하였다. Saitoh 와 Hirose(5)는 상변화

물질로 파라핀과 물을 사용하여 水平圓筒內的 潛熱 熱貯藏問題의 解를 높은 Rayleigh 數 條件에서 數值的으로 求하였다. Nguyen 등(6)은 表面溫度가 낮은 동심원통棒이 低溫의 물속에 잠겨있을 때 棒周圍에 발생하는 자연대류현상에 關한 研究를 수행하였으며 Rieger 등(7)은 同心水平圓筒의 상변화물질이 용해되는 현상을 實驗 및 解析的方法으로 연구하였고, 이와 유사한 연구가 Ho 와 Viskanta(8)에 의해서도 진행되었다. 유갑중(9)은 低溫의 물속에 傾斜진 얼음面이 잠겨있을때 경사각이 自然對流에 미치는 영향에 關하여 연구하였고 이동욱과 유상신(10)은 얼음棒이 물속에 水平으로 잠겨진 상태에서의 融解現象을 陰影方法(Shadowgraph method)에 의하여 可視化하고 얼음의 融解量을 측정하여 局部 및 平均熱傳達係數를 구하는 實驗的 研究를 행하였다.

以上에서 상변화물질로 파라핀과 물을 사용하였는데 파라핀은 밀도변화에 의한 對流現象의 反轉이 없으나 얼음과 물을 사용할때는 물이 4°C 부근에서 最大密度를 갖는 특이한 性質로 인하여 얼음이 물속에서 용해될때 주변물의 對流反轉現象이 發生하기 때문에 상변화물질로 얼음과 물을 사용할 경우에는 파라핀류를 사용한 실험의 경우와는 다른 현상이 발생한다.

本研究에서는 물이 4°C 부근에서 最大密度를 갖는 특성과 低溫에서 열저장능력이 큰것을 고려하여 얼음과 물을 相變化物質로 사용하였으며 폐쇄공간으로 幾何學形狀이 간단한 等溫水平同心圓筒形 얼음棒的 용해현상을 陰影方法으로 可視化하여 얼음棒的 融解形狀을 觀察하고 融解量을 측정하여 局部 및 平均熱傳達係數를 구하고자 한다. 또 棒의 周圍에 발생하는 渦動에 대하여 발표된 연구결과들이 相衝(4,5,7) 됨을 확인하기 위하여 얼음棒이 同心원통사이에서 채워진 空氣中에서 용해될때의 현상을 實驗的으로 관찰하였다.

## 2. 實 驗

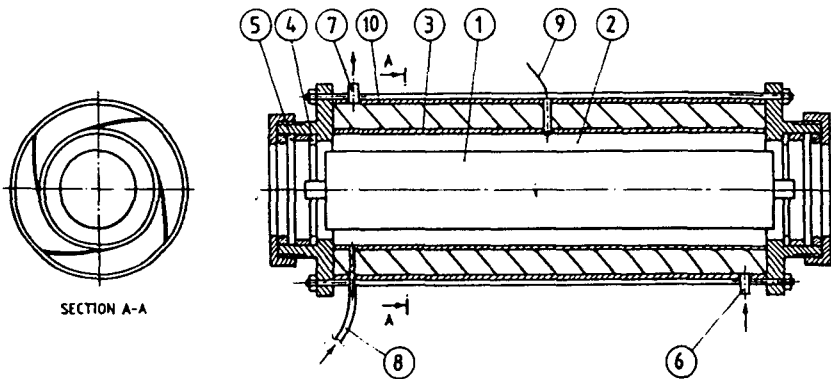
### 2-1 實驗裝置

試片인 얼음棒이 同心圓管의 媒質속에 水平으로 놓여진 상태에서 실험을 수행할 수 있도록 Fig.1 과같은 장치를 만들었다. 그림에서 ①은 본 실험체인 얼음棒이고 ②는 液相의 媒質, ③은 銅管으로 내경 80 mm, 길이 320 mm로 하였다. 이 관의 양끝은 얼음棒이 同心으로 설치되도록 中心에 구멍이 뚫린 유리 ④와 통속에 들어있는 媒質이 밀폐되고 빛이 통과되도록 유리판 ⑤를 끼워놓았다. 동관③의 外部에는 同心의 플라스틱관⑩을 두고 공간간격은 20 mm로 均一하게 하고 동심원통에는 螺線形流路를 만들어 동관의 溫度가 一定하게 유지되도록 循環水가 ⑥으로 들어가 ⑦로 나오도록 하였다. 銅管內壁面의 溫度를 一定하게 유지시켜야 하기때문에 온도를 측정할 수 있도록 동관의 中央部의 內壁面에 熱電對⑨를 90°간격으로 上, 下 및 側面에 각 1개씩

과 양끝에 각 1개씩 모두 5개를 설치하였다. 熱電對는 補正된 copper-constantan 을 사용하였다. ⑧은 얼음의 融解로 인한 體積減少로 생기는 공간에 물을 채우기위한 給水管이다.

試片인 얼음棒의 製作은 직경이 50 mm로 하였으며 잘 연마된 銅管을 製水管으로 사용하였고 시편이 용해시 終效(End effect)의 영향에 의한 3次元流動現象을 무시할 수 있도록 길이는 300 mm로 하였다. 얼음의 용해시 물에서 공급되는 熱은 얼음의 용해에만 所要되는 것으로 취급할 수 있도록 하기위하여 얼음棒은 0°C에 가까운 상태로 만들어 시편으로 사용하였다.

위와같은 상태로된 얼음棒이 용해되는 현상을 2次元陰影으로 記錄하고 同心圓管의 壁面效果를 관찰할 수 있도록 하기 위하여 光彈性試驗裝置의 平行光部를 사용하였으며 實驗裝置의 자세한 構造는 참고문헌(10)과 같다.



- ① ice-bar
- ② water
- ③ copper tube
- ④ specimen holder
- ⑤ sealing glass
- ⑥ water inlet
- ⑦ water Outlet
- ⑧ water refill hose
- ⑨ thermocouple
- ⑩ outer tube

Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

2-2 實驗方法

同心圓管의 壁面溫度를 一定하게 유지시키기 위하여 實驗장치의 螺旋形流路에 펌프로 물을 순환시켰으며 試片인 얼음棒周圍의 물과 접촉하는 銅管온도를 定해진 實驗온도를 유지시킨다. 이때 순환수는 얼음의 融解熱을 供給하고 주위 물의 온도를 일정하도록 해야하므로 순환수의 온도는 거의 一定한 것이 요구된다 이를 위하여 별도의 保溫탱크를 만들어 循環水源으로 사용하고 펌프와 관로 등에서 外部로부터의 熱傳達에 의한 물의 溫度變化는 冷却 또는 加熱 등의 方法으로 補正한다. 實驗장치는 Fig. 2 와 같다. 원관내의 試片인 얼음棒을 設置하기 전에 우선 관속에 물을 채우고 펌프로 나선형流路에 물을 순환시켜 實驗온도를 유지시킨후 0°C 가까운 상태의 얼음棒을 신속하고 조용하게 설치시킨다. 시편을 설치한 후에는 圓管內部에 물이 充滿되도록 하고 光彈性試驗裝置의 平行光部에 實驗장치를 설치하며 물속에 잠겨진 얼음棒의 2次元陰影이 사진기의 스크린에 뚜렷이 나타나도록 焦點을 조정한다. 이때 시편의 焦點은 시편길이의 中央部이며 焦點은 물의 온도와 관계 있기 때문에 물의 온도를 달리하면 焦點을 다시 조정해야 한다. 한번 조정된 焦點은 定해진 實驗이 끝날때까지 고정된 상태에서 시간의 경과에 따라 變化되는 형태가 스크린에 나타나는 陰影을 일정한 시간간격을 택하여 사진기로 촬영한

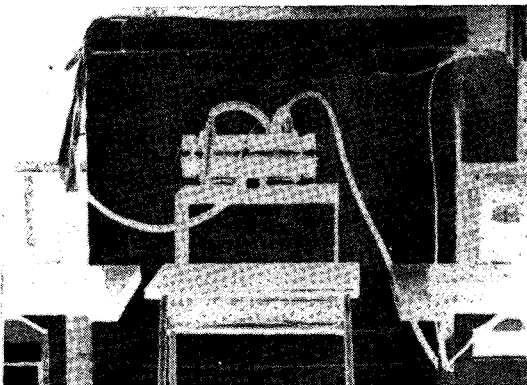


Fig. 2 A photograph of experimental setup

다. 이때 필름은 코닥흑백 ASA-400 을 使用하였으며 노출시간은 1/60 초로 하였다. 위의 실험은 물의 온도를 3.5°C 로부터 10°C 까지의 범위에서 수행하였다.

다음에는 空氣中에서 얼음이 용해되는 현상을 관찰하기 위하여 원통관속에 물 대신 空氣를 媒質로 하고 모든 실험방법은 물에서와 같이 하였으며 이때 실린더벽의 온도는 3.5°C 에서 25°C 까지의 범위에서 온도를 정하고 融解상태를 관찰하였다.

3. 實驗結果 및 檢討

3-1 無次元數의 定義

Rayleigh 數는 다음식으로 定義한다.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T \left(\frac{D_o}{2} - \frac{D_i}{2}\right)^3}{\alpha\nu} \dots\dots\dots (1)$$

Nusselt 數( $N_u$ )는 다음식으로 구한다.

$$Nu = \frac{L \cdot \rho \left(-\frac{dr}{dt}\right) \cdot D}{k(T_\infty - T_i)} \dots\dots\dots (2)$$

無次元時間( $\tau$ )은 용해와 關係있는 無次元數인 Fourier 數( $F_o$ )와 Stefan 數( $St_e$ )의 곱으로 定義한다.

$$\begin{aligned} \tau &= F_o \cdot St_e \\ &= \frac{\alpha t}{D^2} \cdot \frac{C(T_\infty - T_i)}{L} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

3-2 陰影에 依한 結果檢討

(1) 陰影의 形狀 : 물속에 잠겨진 얼음棒의 融解形狀을 시간경과에 따라 陰影으로 記錄한 결과 Fig. 3을 얻었다.

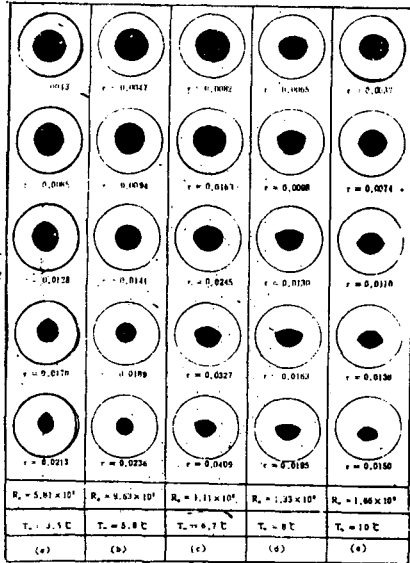


Fig.3 Shadowgraphs of melting ice-bar in the water

Fig.3에서 음영의 形狀을 살펴보면 얼음棒周圍의 물의 온도가 3.5°C인 (a)의 경우는 얼음棒의 밑부분이 빨리 녹아 密度差에 의하여 棒周圍에 上昇流가 發生하여 시간의 경과에 따라 용해현상은 重力의 反對方向으로 뾰족한 모양을 보인다. (b)인 5.8°C인 (b)의 경우는 全圓周가 均一하게 初期狀態인 圓形을 계속 유지하면서 용해되어 棒周圍에 마치 自然對流가 발생치 않는 것과 같은 현상을 보인다. 실험온도가 6.7°C, 8°C, 10°C인 (c),(d) 및 (e)의 경우는 棒의 윗부분이 빨리 용해되어 棒周圍의 물은 下降流가 發生한다. 봉의 윗부분이 녹는 현상은 6.7°C에서는 약간 평평한 형상이고, 8°C는 약간 둥근 형상이며, 10°C는 더욱 둥근 형상을 보이는데 이것은 온도가 높을수록 윗부분이 둥근 형태로 볼록해지는 것을 보여준다. 이때 밑부분은 모두 둥근 형상으로 변하는데 이것은 自然對流의 영향을 받으면서 용해되기 때문으로 볼 수 있다. 위와같이 5.8°C를 分岐點으로 하여 流動反轉現象이 발생하는 것은 물의 밀도가 4°C 부근에서 最大인 特性에 의하여 발생하는 특이한 현상이다. 위의 形狀變化를 Rieger (7)의 실험결과와 비교해보면 Rieger는 相變化物質로

파라핀을 사용하였으며  $R_a = 4 \times 10^5$  과  $R_a = 10^6$ 의 경우 실험결과를 제시하였는데 두 경우 모두 밑부분이 뾰족한 상태로 변하였으며  $R_a = 4 \times 10^5$ 에서는 끝이 뾰족한 반면,  $R_a = 10^6$ 의 경우는 끝부분이 주위 媒體의 渦動의 영향을 받는 형상을 보인다. 이와같이 상변화물질이 다른 경우, 특히 密度反轉이 없는 물질의 실험결과가 물과 전혀 다른 상태를 보여준다. 얼음과 물의 경우  $R_a = 5.81 \times 10^5 \sim 1.66 \times 10^6$  사이에서는 渦動의 영향을 받은 陰影의 형상을 전혀 발견할 수 없으며 밑부분이 뾰족하지 않고 모두 둥근 형상으로 변하였는데 이것은 상변화물질이 다르면 유사한  $R_a$ 數에서도 融解形狀이 다르다는 것을 증명한다. 對流反轉現象이 있을 경우와 없을 경우의 特性길이(圓筒과 얼음棒의 간격)가 다르기 때문에  $R_a$ 數의 定義가 중요함을 나타내고 있다고 판단된다. 同一한  $R_a$ 數( $2 \times 10^5$ )에서 연구한 Pannu(4), Saitoh(5) 및 Rieger(7)의 결과를 비교해보면 Pannu는 棒의 윗부분에 渦動이 發生함을 발표했고 Saitoh는 밑부분에 발생한다고 했으며, Rieger는 渦動이 전혀 발생되지 않는 것으로 나타났다. Saitoh(5)는 상변화물질로 파라핀 또는 물을 사용하였다고 발표하였는데 본 실험결과로 보아 파라핀과 물을 동일한 性質의 相變化物質로 취급하고 同一한 特性길이를 사용하는 것은 잘못된 것으로 생각된다. Pannu와 Saitoh가 제시한 渦動部位도 正反對인데 물속에서 실험한 결과에서는 渦動現象을 發見할 수 없어 이번에는 空氣中에서 얼음棒이 용해되는 상태를 관찰하였다. 이 관찰결과를 개략적으로 圖示하면 Fig.4와 같다.

Fig.4와 같이 渦動現象은 棒의 밑부분에 發生됨을 관찰할 수 있었으며 외동에 영향을 주는 因子는 同心圓管사이의 간격과 銅管壁의 溫度임을 알 수 있었다. 간격이 비교적 적고 管壁의 溫度가 높을수록 棒 밑부분에 發生되는 渦動은 活發하며, 반면에 원통간격이 커지고 管壁의 온도가 낮을수록 와동현상은 약하여 얼음棒의 밑부분이 뾰족하게 변화됨을 관찰할 수 있었다. 이 결과와 Rieger

의  $R_a = 10^6$ 의 경우에 대한 실험 및 數值解의 결과로 보아 渦動現象은 棒의 밑부분에 發生한다고 발표한 Saitoh의 연구결과가 옳은 것으로 볼 수 있다.

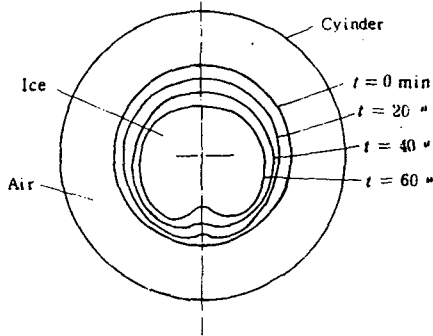


Fig.4 Melting front contour of ice-bar in the air(cylinder wall temperature at 15°C)

(2) 熱傳達係數: Fig.3의 陰影을 活用하여 局部 및 平均Nusselt 값을 구할 수 있다. 融解形狀인 陰影의 필름을 콤퍼레이터(comparator)에 비추어 擴大시키고 이것을 實測하여 원래의 시편

치수로 환산하고 시간경과에 따른 半徑方向的 變化量을 最小自乘法에 의하여 함수식을 구하고 이것을 미분하여 반경의 변화율을 구한후 Nusselt 값을 구하는 식(2)에 代入하여 局部Nusselt 값( $N_u$ )과 平均Nusselt 값( $\bar{N}_u$ )을 구한다. 이를 구하는 상세한 과정은 참고문헌(10)과 같다. 各實驗溫度에서 局部Nusselt 값을 구하여 圖示하면 Fig.5와 같다. 물의 溫度가 3.5°C인 (a)의 경우는 Nusselt 값이 원주각 0°C 부근에서 가장 작고 원주각이 增加함에 따라 약간의 증가현상을 보인다. 5.8°C인 (b)의 경우는 全圓周角에서 Nusselt 값이 거의 變化없이 一定하며 시간경과에도 初期값과 거의 같은 값을 갖는다. 6.7°C인 (c)의 경우는 원주각의 증가에 따라 Nusselt 값은 약간의 감소현상을 보인다. 8°C인 (d)의 경우는 원주각에 따라 Nusselt 값의 變化가 심하며 원주각 90° 부근에서 낮은 값을 가지며 시간의 증가에 따라 초기상태와 비례하여 변한다. 10°C인 (e)의 경우는 역시 원주각에 따라 Nusselt 값의 變化가 심하며 90° 부근에서 시간의 경과에 따라 큰 폭으로 변하는데 이와같은 結果는 얼음棒 주위의 自然對流 영향임을 추측할 수 있다.

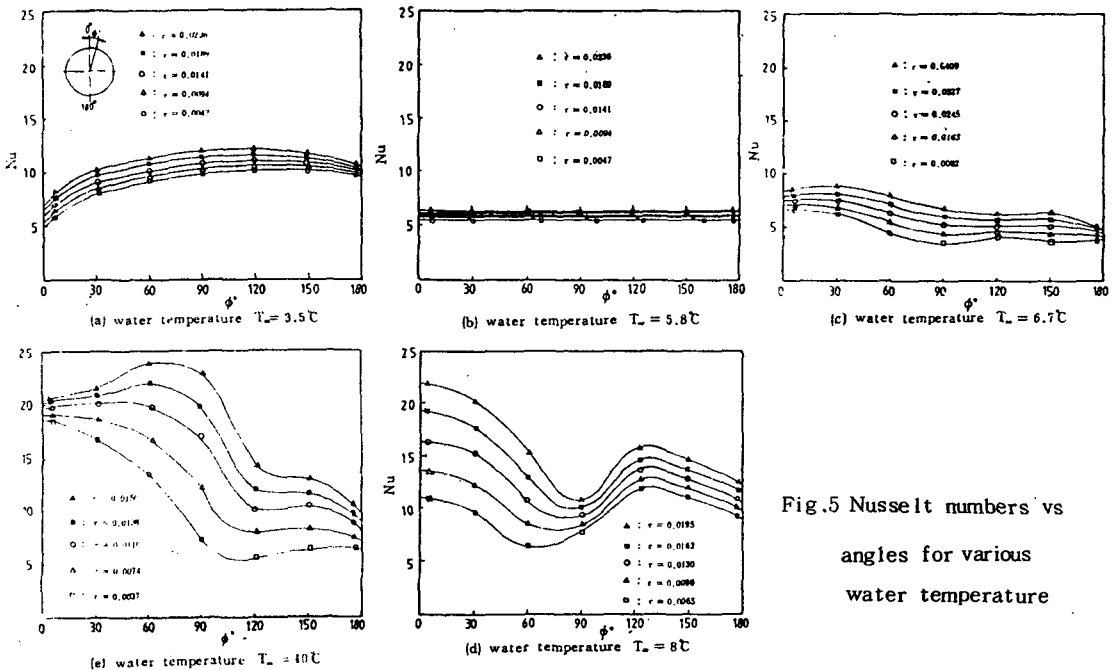


Fig.5 Nusselt numbers vs angles for various water temperature

Fig.6 은 각 실험 온도에서 無次元時間( $\tau$ )에 대한 平均Nusselt 값( $\bar{Nu}$ )를 나타낸 것이다. 물의 온도가 5.8°C에서는 무차원시간이 증가하여도 平均Nusselt 값이 一定하며 그외의 실험 온도에서는 무차원시간의 증가와 더불어  $\bar{Nu}$  값이 약간 증가하는 현상을 보인다. 5.8°C를 전후한 本 실험 온도에서는 6.7°C에서 最小值이고, 3.5°C의 경우가 오히려 5.8°C 경우보다  $\bar{Nu}$  값이 큰것을 발견할 수 있으며 5.8°C로부터 溫度差가 클수록 큰값의 差를 볼 수 있는데 이와같은 현상은 융해시 얼음棒 주위에 발생하는 自然對流의 役割에 의한 것으로 볼 수 있다.

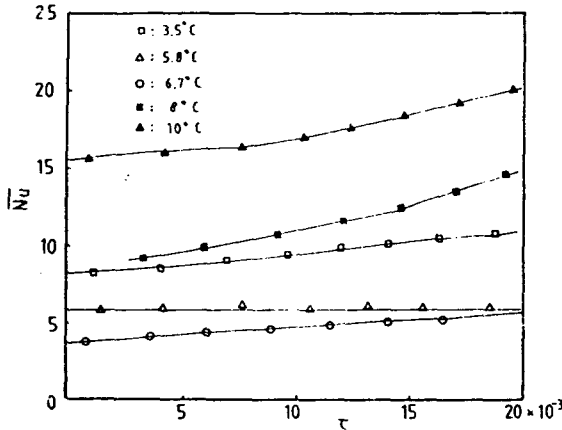


Fig.6 Average Nusselt numbers vs dimensionless times for various water temperature

4. 結 論

水平圓管의 流體속에 同心으로 잠겨있는 얼음棒이 물의 溫度 3.5°C로부터 10°C까지의 범위와 空氣의 온도 3.5°C로부터 25°C까지의 범위에서 일정한 실험 온도로 유지시킨 상태에서 融解될때 形狀의 變化를 陰影記錄裝置를 이용하여 實驗的으로 관찰한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 물의 온도 5.8°C를 分岐點으로 하여 이

온도보다 낮은 온도에서는 얼음棒周圍에 上昇流가 발생되며 棒의 밑부분이 빨리 용해되어 重力의 反對方向으로 倂속하게 변하고 5.8°C에서는 初期狀態인 圓形을 계속 유지하면서 용해되어 棒周圍에 마치 自然對流가 발생치 않고 정지된 상태같이 보이며, 5.8°C이상의 온도에서는 윗부분이 빨리 용해되어 下降流가 發生하며 용해형상은 자연대류의 壁面효과로 밑부분이 둥근 모양으로 된다.

(2) 물의 온도가 5.8°C에서는 局部Nusselt 값이 各圓周圍의 변화와 시간의 경과에도 불구하고 거의 一定하나 5.8°C를 전후하여 溫度差가 클수록 各 圓周角에서의 Nusselt 값이 크게 變하며 시간경과에 따라 初期값들에 比例하여 변한다. 한편, 平均Nusselt 값은 5.8°C에서만 無次元時間에 따른 變化가 거의 없고 그외의 경우는 시간의 경과에 따라 약간의 增加現象을 보인다.

(3) 얼음이 물속에서 融解될 경우에는 渦動에 의한 용해현상을 發見할 수 없으나 같은 幾何學의 모델이 空氣中에서 용해될 경우 棒의 밑부분에 渦動이 發生하는 것을 발견할 수 있다.

REFERENCES

1. E.M. Sparrow, R.R. Schmidt and J.W. Ramsey, Experiments on the Role of Natural Convection in the Melting of Solids, ASME, J. Heat Transfer, Vol. 100, Feb., pp. 11-16, 1978.
2. A.G. Bathelt, R. Viskanta and W. Leidenfrest, An Experimental Investigation of Natural Convection in the Melted Region around a Heated Horizontal Cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 90, Part 2, pp. 227-239, 1979.
3. T. Saitoh and K. Hirose, Thermal Instability of Natural Convection

- Flow over a Horizontal Ice Cylinder Encompassing a Maximum Density Point, ASME, J. Heat Transfer, Vol. 102, May, pp. 261-267, 1980.
4. J. Pannu, C. Jolekar and P.A. Rice, Natural Convection Heat Transfer to Cylinders of Phase Change Material used for Thermal Storage, AIChE. Symp. Ser. 76(198), pp. 47-55, 1980.
  5. T. Saitoh and K. Hirose, High Rayleigh Number Solutions to Problems of Latent Heat Thermal Energy Storage in a Horizontal Cylinder Capsule, ASME, J. Heat Transfer, Vol. 104, August, pp. 545-553, 1982.
  6. T. Hung Nguyen, P. Vasseur and L. Robillard, Natural Convection between Horizontal Concentric Cylinders with Density Inversion of Water for Low Rayleigh Numbers, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 10, pp. 1559-1568, 1982.
  7. H. Rieger, U. Projahn, M. Bareiss and H. Beer, Heat Transfer during Melting Inside a Horizontal Tube, ASME, J. Heat Transfer, Vol. 105, May, pp. 226-234, 1983.
  8. C.J. Ho and R. Viskanta, Heat Transfer during inward Melting in a Horizontal Tube, J. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 705-716.
  9. 유갑종, 최대밀도점 부근의 물속에 잠겨있는 경사진 얼음면의 자연대류에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교, 1985.
  10. 이동욱, 유상신, 물속에 수평으로 잠겨있는 원통형 얼음봉의 용해현상에 관한 실험적 연구, 대한기계학회 논문집, 제 9 권, 제 4 호, pp. 414-420, 1985.