

<論 文>

물속에 水平으로 잠겨있는 圓筒形 얼음棒的 融解現象에
관한 實驗的 研究

李 東 旭* · 柳 常 新**

(1985年 2月 15日 接受)

An Experimental Study on the Melting of a Horizontal Cylindrical
Ice-Bar Submerged in Water

Dong Wook Lee and Sang Sin Yoo

Key Words: Melting Ice-Bar(融解되는 얼음棒), Shadowgraph(陰影), Melting Shape
(融解形狀), Flow Direction(流動方向), Critical Temperature(臨界溫度)

Abstract

The melting phenomena of the horizontal cylindrical ice-bar submerged in water are experimentally investigated for the temperature range from 2.5°C to 15°C. The shapes of the melting ice-bar are recorded by the Photo-Elasticity Apparatus with modification of the test section.

The shadowgraphs of the melting ice-bar show that water adjacent to the bar flows upward for the temperature range from 2.5°C to 5.6°C while above the temperature of 5.6°C the flow is downward direction. The local and average Nusselt numbers become minimum at 5.6°C which is considered as a critical temperature and the Nusselt numbers increase as temperature difference from the critical temperature increases.

記 號 說 明

- | | |
|--------------------------------------|--|
| c : 물의 比熱 | Ste : Stefan 數 $[c(T_{\infty} - T_i)/L]$ |
| D : 얼음棒的 初期直徑(特性길이) | T : 溫度 |
| F_0 : Fourier 數 (at/D^2) | t : 時間 |
| h : 물의 對流熱傳達係數 | α : 물의 熱擴散係數 |
| k : 물의 熱傳導率 | ρ : 密度 |
| L : 얼음의 融解潛熱 | τ : 無次元時間 $(F_0 \cdot Ste)$ |
| Nu : 局部 Nusselt 數 $(\frac{hD}{k})$ | ϕ : 얼음棒的 圓주角 |
| \bar{Nu} : 平均 Nusselt 數 | |
| r : 얼음의 半徑方向 | |

下 添 字

- | |
|--------------------|
| i : 얼음과 물의 接觸面 |
| s : 固體狀態 |
| ∞ : 周圍물의 狀態 |

* 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

1. 緒 論

相變化를 수반하는 熱傳達現象은 自然 및 工學分野에서 자주 접할 수 있는 현상이며 固相에서 液相으로 상변화를 일으키는 物質의 예로서 얼음과 물 및 파라핀系 등이 있다. 이들 相變化物質(PCM, Phase Change Material)에 관한 研究는 많은 著者들에 의하여 수행되어 왔으며 이 중에서 특히, 얼음의 상변화에 대한 연구들을 살펴보면 얼음의 幾何學的 形狀에 따라 球形, 垂直圓筒形, 水平圓筒形, 垂直平板形 등으로 區分할 수 있다. 대부분의 研究결과들은 물속에 잠겨진 상태에서 실험을 수행하였다. Dumoré⁽¹⁾ 등은 물속에 잠겨있는 얼음球가 용해될 때 球의 直徑變化와 重量變化를 이용하여 熱傳達係數를 구하였으며 Vanier and Tien⁽²⁾은 球의 크기와 물의 溫度를 變化시키면서 물속에서 얼음球가 녹는 現象을 重量測定法을 이용하여 實驗的으로 연구하였다. Wang⁽³⁾은 垂直圓筒形 얼음棒이 물속에서 融解될 때 원통주위에 발생하는 自然對流現象을 實驗的으로 연구하였으며, 이와 同一한 幾何學的 形狀에 대하여 數值解析으로 얻은 결과와 기존의 실험결과를 比較한 연구가 金炳河와 劉玉鍾⁽⁴⁾에 의하여 發表되었다. 水平圓筒形 얼음棒이 물속에 잠겨진 상태에서 용해될 때 자연대류현상에 대한 理論的 解析과 實驗的 研究가 Saitoh⁽⁵⁾에 의하여 수행되었으며, 溫度가 높은 水平圓筒形 棒이 얼음속에 끼워진 상태에서 원통주위의 얼음이 용해되는 현상에 관한 연구가 Sparrow⁽⁶⁾ 등, Bathelt⁽⁷⁾ 등 Goldstein and Ramsey⁽⁸⁾ 등에 의하여 수행되었다. Gebhart and Mollendorf⁽⁹⁾가 새로운 密度와 溫度關係式을 제시하고 이를 이용하여 물속에 잠겨있는 수직항온평판 주위의 熱傳達狀態를 理論的으로 연구하였고 이와 類似한 연구가 Carey⁽¹⁰⁾ 등에 의하여도 수행되었다. 수직얼음板이 물속에 잠겨진 상태에서 용해할 때 自然對流에 의한 물의 流動에 관한 실험적연구가 Wilson and Vyes⁽¹¹⁾에 의하여 수행되었으며, 같은 방법의 연구가 Wilson and Lee⁽¹²⁾에 의해서도 행하여졌다. 수직얼음板이 물속에 잠겨진 상태에서 용해될 때 발생하는 流動現象을 可視化한 연구가 Carey and Gebhart⁽¹³⁾에 의하여 수행되었으며, 그외 많은 著者들에 의하여 위의 여러 실험들과 유사한 연구가 發表되었다. 最近의 연구로서 Sammakia and Gebhart⁽¹⁴⁾는 수직얼음벽이 소금물에 잠겨 있을 때 소금물과 얼음벽 사이의 境界面이 시간에 따라 용해되는 현상과 그에 따른 流

動場을 可視化하여 경계층 유동이 存在함을 보였고, 용해된 얼음량을 測定하고 周圍소금물의 溫度와 濃도를 變化시키면서 平均 熱傳達量을 구한 연구가 수행되었다. 이상의 연구들을 檢討해 본 결과 원통형 얼음棒이 水平으로 놓여진 상태에서 용해될 때 熱傳達係數가 最小인 溫度 즉, 臨界溫度(critical temperature)가 6°C 부근에 있음은 發表된 바 있으나 주어진 周圍물의 온도에서 원통형 얼음봉이 融解되는 形狀을 時間의 變化에 따라 可視化하고 사진으로 제시한 실험적 연구결과는 찾아볼 수 없었다. 따라서 얼음봉이 용해되는 形狀을 可視化하고 記錄하므로써 熱傳達係數가 最小인 주위물의 온도를 찾아내고, 시간의 경과에 따른 얼음봉의 融解量과 熱傳達係數를 구할 必要性이 요청된다. 時間의 함수로 나타난 용해량과 열전달계수는 移動境界(moving boundary) 條件을 갖는 非定常狀態 熱傳達解析의 比較資料로 利用할 수 있다.

本 研究에서 相變化 物質은 얼음과 물을 택하였으며, 試片의 幾何學的 形狀은 圓筒形 얼음棒을 사용하였고 온도가 일정한 물속에 水平으로 잠겨진 상태에서 얼음봉이 용해되는 現象을 可視化하고 이를 觀察하였다. 試片周圍에 發生하는 自然對流現象이 壁面效果를 받지 않도록 하기 위하여 물탱크의 크기는 시편직경의 5배 이상으로 하였고 주위물의 온도는 密度가 最大인 4°C 부근을 전후한 最低 2.5°C에서 最高 15°C까지를 택하였다. 融解現象은 2次元 陰影方法으로 可視化하고 사진으로 記錄하였다. 용해되는 얼음봉의 形狀은 Fourier 數와 Stefan 數의 곱으로 定義된 無次元時間(τ)을 變數로 하여 나타내었다. 定해진 물의 溫度에서 사진으로 기록된 結果를 콤퍼레이터(comparator)를 이용하여 陰影의 變化量을 구하여 各 圓周角에서의 局部 Nusselt 數와 平均 Nusselt 數를 無次元時間에 대하여 구하였다.

2. 實 驗

2.1. 實驗裝置

원통형 얼음棒이 물속에 水平으로 잠겨있는 상태에서 용해될 때 시간의 경과에 따라 용해되는 形狀을 記錄하기 위하여는 얼음棒의 軸方向에 平行한 光線이 要求되며, 平行光線에 의하여 나타나는 시편의 陰影을 촬영하므로써 얼음棒이 용해되는 形狀의 기록이 가능하다. 본 실험에서 平行光線을 얻기 위하여 光彈性試驗裝置의 一部를 改造하여 사용하였다. 위의 실험장치중에서 偏光렌즈(polarizer lens)와 시편을 설치하고 荷重을

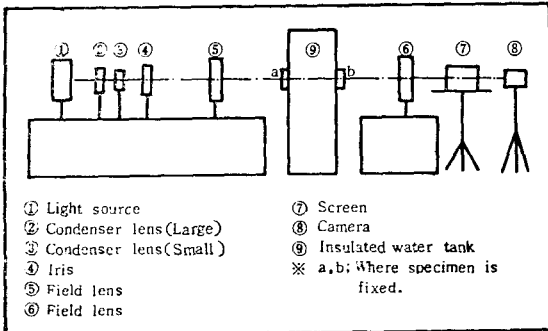


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

加하는 부분을 除去시키고 이 位置에 본 실험의 試驗部를 설치하고 平行光部를 活用한 것이다. 이 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 여기서 ①은 光源, ②와 ③은 콘덴서 렌즈 ④는 Iris(pinhole), ⑤와 ⑥은 피일드 렌즈, ⑦은 스크린, ⑧은 사진기등으로 구성되어 있다. 이 장치 중에서 平行光部인 렌즈 ⑤, ⑥ 사이에 물탱크 ⑨를 設置하였다. 시편인 얼음棒的 용해량을 측정하는 동안 棒周圍에서 발생하는 自然對流가 물탱크 벽의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 탱크는 充分한 크기인 1000mm×320mm×1000mm로 하였고, 鐵板으로 제작하고, 斷熱시키기 위하여 모든 表面을 100mm 두께의 스티로폴로 絶緣시켰다. 물탱크 높이의 $\frac{2}{3}$ 되는 곳에 두께 3mm, 크기 100m×100m의 유리로된 透光窓을 설치하여 平行光線이 이곳을 통과하게 하고, 窓의 中心部에 光線과 平行하게 얼음棒을 고정시킬 수 있도록 고리를 만들어 놓았다. 물탱크 속에는 물을 가득 채우고 물의 溫度差로 인한 熱成層狀態를 확인하기 위하여 熱電對를 탱크의 內壁面을 따라 100mm 간격으로 설치하고, 또 각 모서리와 얼음棒的 위치와 同一한 平面等에 총 15개를 설치하여 물의 溫度를 測定할 수 있도록 하였으며 熱電對는 補正된 Copper-Constantan을 사용하였다.

試片인 얼음棒的 製作는 內徑 50mm 길이 320mm인 잘 연마된 銅管을 製氷통으로 사용하였고, 동관 中心에 心棒인 직경 5mm의 대나무를 넣고 양끝은 마개를 만들어 漏水가 없고, 心棒이 中心을 유지하도록 하여 얼음棒을 透光窓에 설치된 고리에 고정할 수 있게 하였다. 얼음은 氣泡가 적고 均質의 상태로 만들기 위하여 0°C에 가까운 물을 製氷銅管에 넣고, 미리 稼動되어 零下로된 브라인(2차냉매) 속에 넣어 만들었다. 용해

시 周圍의 물로부터 熱이 얼음내부로 傳達되는 것을 最小로하기 위하여 얼음의 溫度는 0°C에 가깝도록 낮은 온도에서 급속히 제빙한후 0°C에 가까운 영하의 온도에서 장시간 유지시키든가, 혹은 0°C에 가까운 영하의 온도에서 장시간에 걸쳐 제빙하는 方法을 택하였다. 이때 얼음의 溫度狀態를 알기 위하여 心棒에 미리 熱電對를 부착하여 얼음의 온도상태가 0°C에 가까운가를 확인한 후에 시편으로 사용하였다.

2.2. 實驗方法

2次元 陰影을 얻기 위하여는 平行光이 필요하고 重力方向에 따라 自然對流가 發生하기 때문에 이 平行光線은 重力方向에 대하여 垂直으로 유지되어야 한다. 따라서 Fig. 1과 같은 장치의 各部를 잘 조정하여 光源으로부터 나오는 모든 빛이 平行光線이 되고 重力方向에 대하여 수직이 되게 하였다. Fig. 2는 본 실험장치를 보여준다. 물탱크 속에 있는 물의 열성층 현상을 最小로 하기 위하여 물을 強制流動시켜 溫度를 均一하게 만들고 상당시간 기다려 靜止狀態가 된 후에 시편인 얼음棒을 신속하고 조용하게 설치 시키므로써 얼음棒 周圍의 물의 流動을 가급적 적게 하였다. 본 실험에서 물의 온도는 2.5°C로부터 15°C까지의 범위이고 이 區間의 온도에서 얼음棒이 시간의 경과에 따라 變化되는 모양을 사진으로 記錄하였다. 즉, 물탱크속에 있는 얼음棒의 모양이 Fig. 1의 스크린 ⑦에 나타나며 이때 스크린에 나타나는 陰影의 焦點은 얼음棒길이의 中央位置에 맞추었고 陰影은 필요한 시간간격을 두고 사진기로 촬영하였다. 이때 사용한 필름은 코다 흑백 ASA-400 이고 노출시간은 60으로 하였다.

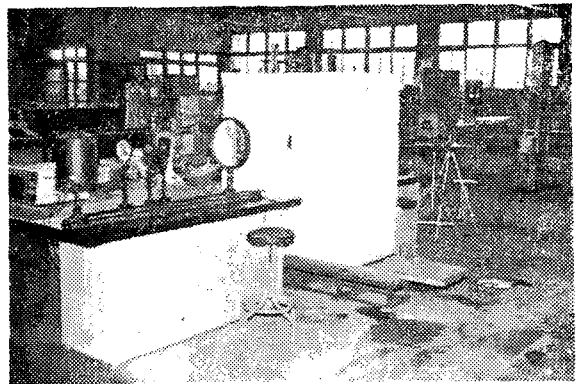


Fig. 2 A photograph of experimental setup

3. 實驗結果 및 檢討

3.1. 熱傳達係數 및 無次元時間의 定義

물속에 잠겨있는 얼음봉이 0°C라 가정하면 얼음내부로 傳導되는 熱量은 무시할 수 있으므로 물에서 전달되는 熱量은 얼음棒的 表面을 融解시키는 열량과 같으므로 따라서 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$L\rho_s\left(-\frac{dr}{dt}\right)=h(T_\infty-T_i) \quad (1)$$

얼음棒的 初期直徑을 D 라 하면 局部 Nusselt 數 Nu 는 다음과 같이 定義된다.

$$Nu=\frac{h\cdot D}{k} \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 代入하여 정리하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$Nu=\frac{L\cdot\rho_s\left(-\frac{dr}{dt}\right)\cdot D}{k(T_\infty-T_i)} \quad (3)$$

여기서 ρ_s 는 얼음의 密度로서 916.8kg/m³(온도, 273.15k)이고 L 은 얼음의 融해잠열로 333.4kJ/kg이다⁽¹⁵⁾. 한편 平均 Nusselt 數 (\bar{Nu})는 全圓周角에서의 局部 Nusselt 數의 平均值로서 定義된다.

무차원시간 (τ)은 融해와 관계있는 代表的 無次元數인 Fourier 數 (F_0)와 Stefan 數 (Ste)의 곱으로 정의한다.

$$\tau=F_0\cdot Ste = \frac{at}{D^2} \cdot \frac{c(T_\infty-T_i)}{L} \quad (4)$$

實驗結果는 4°C인 물의 熱擴散係數(α) 1.35×10⁻⁷ m²/s과 물의 比熱(c)는 4.21kJ/kgK를 활용하여 산출하였다.

3.2. 陰影에 의한 結果檢討

實驗에 의하여 Fig. 3와 같은 陰影을 얻었다. Fig. 3의 (a)~(f)는 周圍물의 溫度(T_∞) 값이 각각 2.5°C, 4°C, 5.6°C, 7°C, 10°C, 15°C의 경우이다. 물의 密度는 4°C 부근에서 最大이기 때문에 물의 特性을 살펴보기 위하여 위와같은 4°C 전후의 온도를 택하였다. Fig. 3의 (a) 및 (b)는 얼음이 融해된 물의 밀도가 주위물의 밀도보다 작기 때문에 密度差에 의하여 上昇流가 發生되며 시간의 경과에 따라 重力方向과 正反對方向으로 얼음棒的 형상이 變換하게 變해간다. 이때 流動方向을 알수 있도록 하기 위하여 시편인 얼음棒을 제

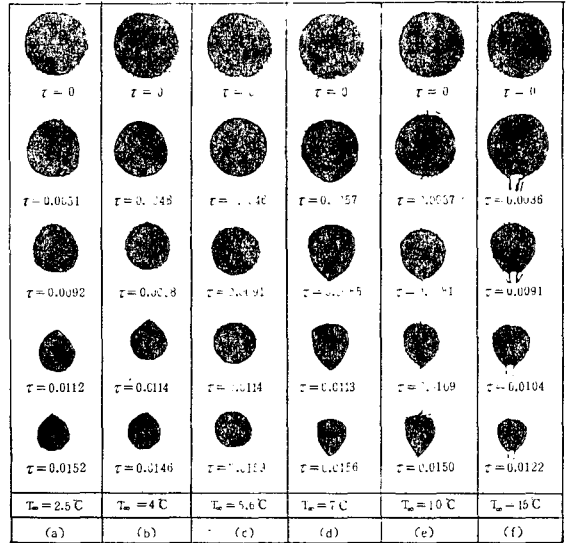


Fig. 3 Shadowgraphs of the melting ice-bar

작할때 물의 밀도와 유사한 물감을 조금넣어 얇게 착색하여 실험도중 流動상태를 육안으로 관찰할 수 있도록 하였다. Fig. 3(c)의 경우는 주위물의 온도가 5.6°C 부근으로 특이한 모양의 變化를 보여주고 있다. 이 溫度는 많은 회수의 반복실험을 통하여 찾아낸 溫度로 5.6°C를 分岐點으로 하여 流動方向이 上昇流와 下降流로 된다. 이 溫度를 臨界溫度라 할 수 있다. 이 온도는 研究發表者^(2,5,10,11,12,13)에 따라 약간의 차이가 있는데 본 실험에서는 5.6°C 부근임이 확인되었다. 주위 물이 5.6°C 부근에서는 마치 自然對流가 發生치 않고 純粹 熱傳導에 依해서만이 融해 되듯이 初期상태와 같은 거의 원형 모양을 계속 유지한다. 이때는 얼음棒 周圍의 물의 熱成層 構造가 安定화된 平衡狀態를 유지하고 있는 것으로 볼 수 있다. 본 연구와 동일한 모델을 사용한 Saitoh⁽⁵⁾의 연구결과는 臨界溫度가 6°C 부근이라고 發表하였고, 모델이 다른 경우인 球에서 Vanier and Tien⁽²⁾은 임계온도를 5.35°C로, 그리고 수직원통형 棒 또는 수직평판형을 이용한 연구결과^(4,10,11,12,13)들도 임계온도가 대략 5°C 내지 6°C로 發表되고 있어 본 實驗結果들과 근사하게 一致한다. 臨界溫度로부터 溫度差를 점차 크게한 Fig. 3 (d), (e) 및 (f)의 경우는 周圍물보다 融解된 물의 온도가 낮기 때문에 密度差에 의하여 下降流가 發生하여 棒의 頂부분이 빨리 融해되고 얼음棒的 모양은 Fig. 3의 (a) 및 (b)와 正反對인 重力方向으로 變換한 모양의 融解形狀을 보여주고 있

다. 또한 記錄된 陰影을 콤퍼레이터로 측정한 결과 各 正해진 물의 온도에서 同一한 無次元 時間에 대한 融解量은 거의 비슷함을 발견할수 있는데 이것으로부터 Fourier 數와 Stefan 數의 乘으로 定義된 無次元時間이 融解量을 나타내는 좋은 媒介變數임을 알 수 있다.

3.3. 陰影에 의한 熱傳達係數의 計算

열전달계수는 無次元數인 局部 Nusselt 數(Nu)와 平均 Nusselt 數(\bar{Nu})를 구하는 것이다. 실험과정에서 記錄된 陰影의 필름을 콤퍼레이터에 비추워 擴大시키고

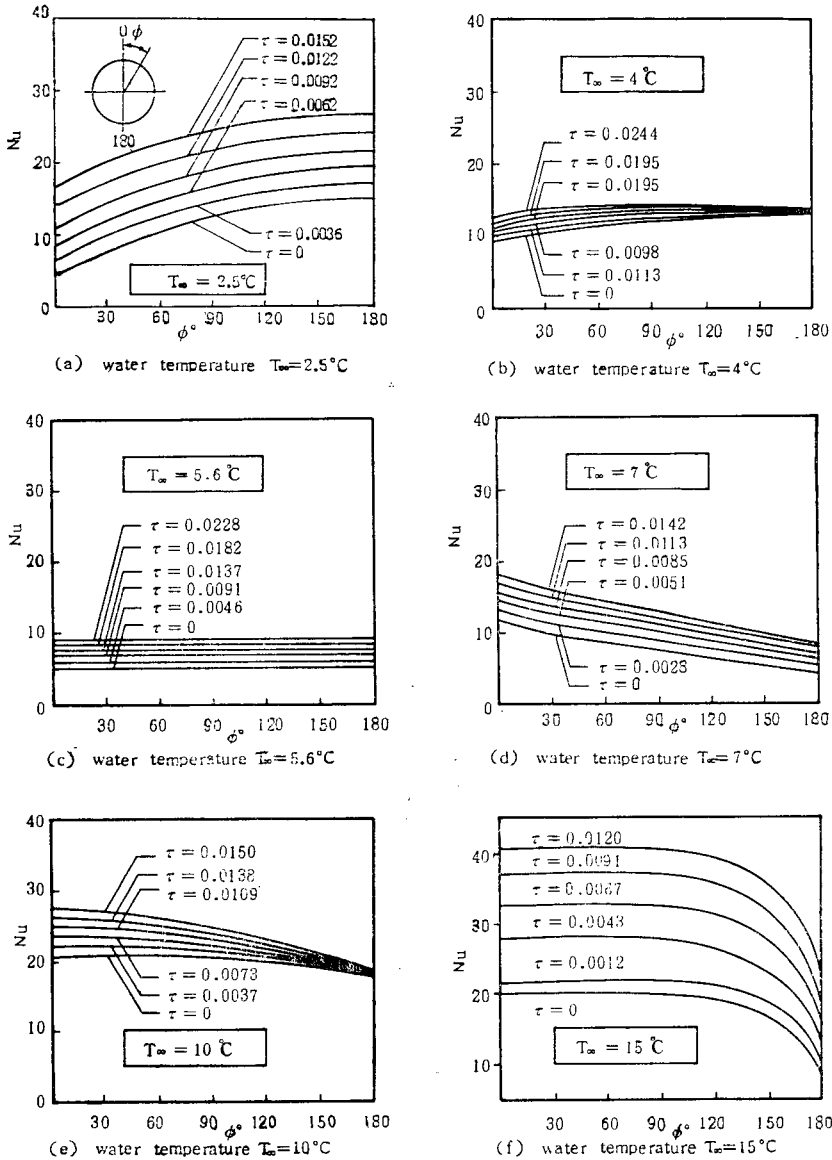


Fig. 4 Nu vs angle for various dimensionless time

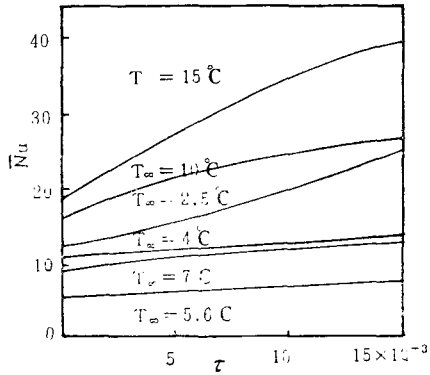


Fig. 5 \bar{Nu} vs dimensionless time for various temperature

中心을 一致시킨 상태에서 시간경과에 따른 얼음棒 半徑의 變化量을 實測하고 이 값을 실제 試片치수로 환산하여 이 값으로 各圓周角에서 시간경과에 따른 半徑變化의 關係함수를 最小 自乘法에 의하여 구하고 半徑變化率을 식 (3)에 代入하므로써 시간 경과에 따른 各 圓周角에서의 局部 Nusselt 값을 구하였다. 陰影은 重力 方向에 대하여 左右대칭이므로 얼음棒的 圓周角 0°에서 180°까지 10° 간격으로 극부 Nusselt 값을 구하였고 各 圓周角에서 極부 Nusselt 값을 무차원 시간에 대하여 圖示하면 Fig. 4와 같다. 주어진 주위물의 온도에서 무차원 시간 (τ)의 증가에 따라 주어진 모든 물의 局部 Nusselt 값은 增加한다. Fig. 4의 (a)와 (b)에서 볼 수 있는 바와같이 주어진 시간에서 局部 Nusselt 값은 圓周角이 증가할수록 增加하며, (c)의 경우는 局部 Nusselt 값이 最小值이고 주어진 시간에 대하여 모든 圓周角에서 거의 동일한 값을 가지며, (e), (f)와 (g)의 경우는 주어진 시간에서 圓周角이 增加할수록 局部 Nusselt 값은 減少하는 現象을 보인다.

平均 Nusselt 값 (\bar{Nu})은 주어진 시간에서 全圓周角에 대한 局部 Nusselt 값의 平均值로서, 무차원 시간 (τ)에 대한 平均 Nusselt 값을 圖示하면 Fig. 5와 같다. 이 그림에서도 5.6°C에서 平均 Nusselt 數가 最小值이고 5.6°C를 기준으로 하여 溫度差가 클수록 變化量도 큰것을 發見할 수 있다.

4. 結 論

溫度가 2.5°C에서 15°C까지의 범위에서 一定하게

유지된 물속에 水平으로 잠겨있는 圓筒形 얼음棒이 融解되는 形狀을 陰影方法에 의하여 實驗的으로 研究하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 물의 溫度가 5.6°C를 臨界溫度로하여 5.6°C以下에서는 上昇流가 발생하여 融解形狀은 重力의 正反對 方向으로 뾰족해지고 5.6°C以上에서는 下降流가 발생하여 重力方向으로 뾰족해지며, 5.6°C 부근에서는 初期狀態와 같은 圓형 모양을 계속 유지하면서 溶해되어 純粹 熱傳導에 의해서만이 融解되는 것과 같은 現象을 나타낸다.

(2) 融解形狀의 變化는 時間을 變數로 하여 陰影으로 記錄하였으며 기록된 映像을 이용하여 산출한 局部 Nusselt 數와 平均 Nusselt 數는 5.6°C 부근에서 最小值이며 5.6°C 부근을 기준으로 實驗溫度範圍에서는 溫度差가 클수록 그 값들은 增加한다.

(3) 光彈性 試驗裝置의 一部를 活用하여 물속에 잠겨있는 얼음棒的 融解現象을 기존방법보다 명확하게 觀察하고 사진으로 記錄할 수 있으며, 컴퓨터를 이용하여 融解되는 얼음棒的 半徑變化量을 용이하게 決定할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) J.M.Dumoré, H. J. Merk and J.A. Prins, Heat Transfer from Water to Ice by Thermal Convection, Nature, Vol. 172, pp.460~461, 1953
- (2) C.R. Vanier and C. Tien, Free Convection Melting of Ice Spheres, J. A.I. Ch. E., Vol. 16, No. 1, pp.76~82, 1970
- (3) T. Wang, An Experimental Study of Melting Vertical Ice Cylinders in Cold Water, Master Thesis, State Univ. of New York at Buffalo 1981
- (4) B.H. Kim and K.J. Riu, Numerical Analysis of Natural Convection from a Vertical Ice Circular Cylinder in Pure Water, Trans., Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 7, No. 4, pp. 483~488, 1983
- (5) T. Saitoh, Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Ice Cylinder, Appl. Sci. Res. 32, Oct., pp. 429~451, 1976
- (6) 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 Tra-

- nsfer, Vol. 100, pp.11~16, 1978
- (7) 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
- (8) R.J. Goldstein and J.W. Ramsey, Heat Transfer to a Melting Solid with Application to Thermal Storage System, A Festschrift for E.R.G. Eckert, ed. By J.P. Hartnett, Hemisphere, Washington, pp. 199~206, 1979
- (9) B. Gebhart and J.C. Mollendorf, Buoyancy-Induced Flows in Water under Conditions in which Density Extrema May Arise, *J. Fluid Mech.*, Vol. 89, pp. 673~707, 1978
- (10) V.P. Carey, B. Gebhart and J.C. Mollendorf, Buoyancy Force Reversals in Vertical Natural Convection Flows in Cold Water, *J. Fluid Mech.* Vol. 97, pp. 279~297, 1980
- (11) N.W. Wilson and B.D. Vyes, Velocity Profiles near a Vertical Ice-Surface Melting into Fresh Water, *ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 313~317, 1979
- (12) N.W. Wilson and J.H. Lee, Melting of a Vertical Ice Wall by Free Convection into Fresh Water, *ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 13~17, 1981
- (13) V.P. Carey and B. Gebhart, Visualization of the Flow adjacent to a Vertical Ice Surface Melting in Cold Pure Water, *J. Fluid Mech.*, Vol. 107, pp. 37~55, 1981
- (14) B. Sammakia and B. Gebhart, Transport adjacent to Ice Surfaces Melting in Saline Water: Visualization Experiments, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 11, No. 1, pp. 25~34, 1984
- (15) D.V. Hale, M.J. Hoover and M.J. O'Neil, Phase Change Materials Handbook, NASA-CR-61363, pp. 5-81~5-82. 1971