

〈論 文〉

## 저온의 순수물속에 잠겨있는 수평 얼음원기둥에 의해 야기되는 자연대류 열전달의 실험적 해석

유갑종\* · 추홍록\*\* · 문종훈\*\*

(1993년 11월 12일 접수)

### Experimental Study of Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Ice Cylinder Immersed in Cold Pure Water

K. J. Riu, H. L. Choo and J. H. Moon

**Key Words :** Horizontal Cylinder(수평 원기둥), Melting Shape(용해형상), Density Maximum(최대 밀도점), Stagnation Point(정체점), Steady State(정상상태), Unsteady State(비정상상태)

#### Abstract

Natural convection heat transfer from a horizontal ice cylinder immersed in quiescent cold pure water was studied experimentally. The experiment was conducted for the ambient water temperatures ranging from 2.0°C to 10.0°C. The flow fields around an ice cylinder and its melting shapes were visualized and local Nusselt numbers obtained. Especially, its attention was focused on the density maximum effects and stagnation point Nusselt number. From the visualized photographs of flow fields, three distinct flow patterns were observed with the ambient water temperature variation. The melting shapes of ice cylinder are various in shape with flow patterns. Steady state upflow was occurred at the range of  $2.0^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 4.6^{\circ}\text{C}$  and steady state downflow was occurred at  $T_{\infty} \geq 6.0^{\circ}\text{C}$ . In the range of  $4.7^{\circ}\text{C} < T_{\infty} < 6.0^{\circ}\text{C}$ , three-dimensional unsteady state flow was observed. Especially, the melting shapes of ice cylinder have formed the several spiral flutes for the temperatures ranging from 5.5°C to 5.8°C. For upflow regime, the maximum stagnation point Nusselt number exists at  $T_{\infty} = 2.5^{\circ}\text{C}$  and as the ambient water temperature increases the Nusselt number decreases. At ambient water temperature of about 5.7°C, Nusselt number shows its minimum value.

#### 기 호 설 명

<p><math>D_{in}</math> : 원기둥의 초기직경 (m)</p> <p><math>D_r</math> : Reference diameter (m)</p> <p><math>h_{\phi}</math> : 국소 열전달계수 (<math>\text{W}/\text{m}^2\text{C}</math>)</p> <p><math>K</math> : 열전도율 (<math>\text{W}/\text{mC}</math>)</p> <p><math>Nu_{\phi}</math> : 국소 누셀트수 (<math>h_{\phi}D_{in}/K</math>)</p>	<p><math>q</math> : 얼음의 용해잠열 (<math>\text{J}/\text{kg}</math>)</p> <p><math>r</math> : 원기둥의 반경 (m)</p> <p><math>T</math> : 온도 (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</p> <p><math>t</math> : 시간 (sec)</p> <p><math>\rho</math> : 밀도 (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</p> <p><math>\phi</math> : 원기둥의 원주각 (<math>^{\circ}</math>)</p>
---	--

\*정회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*정회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

하첨자

- $e$  : 카메라 노출  
 $i$  : 시편의 입수  
 $m$  : 최대 밀도점  
 $o$  : 원기둥 표면  
 $\infty$  : 주위물

## 1. 서 론

용해나 응고와 같은 상변화(phase change)를 수반하는 열전달현상은 자연계와 공학분야의 여러 방면에서 광범위하게 찾아볼 수 있다. 이러한 상변화를 수반하는 열전달현상에 있어서는 주위유체와 고체벽면과의 온도차로 인한 대류유동에 의해 고체-액체의 경계면이 이동함으로서 그 유동 및 열전달 특성이 매우 복잡하게 된다. 따라서 얼음, 파라핀 등과 같은 상변화 물질(PCM, phase change material)로 이루어진 구, 원기둥 및 평판 등의 기하학적 형상에 따른 자연대류현상의 고찰은 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 특히 상변화 물질인 얼음이 저온의 물속에서 용해될 경우에는 최대 밀도점의 영향으로 인하여 주위물의 온도에 따른 유동 및 열전달 특성이 매우 특이하게 나타날 수 있다.

이에 대한 연구로서는 Merk<sup>(1)</sup>가 저온의 순수물속에 잠긴 얼음구에 대한 자연대류현상을 최초로 이론해석하였고, Wang<sup>(2)</sup>은 저온의 순수물과 공기의 계면에 놓여진 수직 얼음원기둥이 용해될 때 공기와 물의 경계면, 수직벽면, 원기둥 밑면부근에서 일어나는 유동형태를 실험적으로 고찰하였다. Saitoh<sup>(3)</sup>는 수평 얼음원기둥이 최대 밀도점 부근의 순수물속에 잠겨진 상태에서 용해될 때 일어나는 유동 및 열전달 특성을 유한차분법으로써 수치해석하고, 원기둥의 용해형상을 실험적으로 고찰하였다. 여기서는 이론 및 실험적 결과와의 상세한 비교를 위하여 정체점(stagnation point)의 누셀트수를 측정하여 상호 비교하였으며, 주위물 온도의 변화에 따른 누셀트수, 속도 및 온도분포를 각각 구하여  $T_{\infty} \leq 4.6^{\circ}\text{C}$ 에서는 정상상태 상향유동,  $4.7^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 8.1^{\circ}\text{C}$ 에서는 비정상상태 유동,  $T_{\infty} > 8.1^{\circ}\text{C}$ 에서는 정상상태 하향유동이 일어난다고 하였다. 또한  $T_{\infty} = 6.0^{\circ}\text{C}$ 에서는 축방향 유동이 발생함과 동시에 누셀트수가 최소가 된다고 하였다. 그러나 실험적 결과로서는 유동장의 가시화 사진을 제시하지 않고 용해형상에 대한 개략적인 그림만으로 유동형

태를 파악함으로써 주위물 온도의 변화에 따른 자세한 유동형태의 특성을 명확히 밝히지 못하였다. Lee 등<sup>(4)</sup>은 물속에 잠겨있는 수평 얼음봉에 대하여 개조한 광탄성 시험장치를 이용하여 얼음단면의 용해형상을 음영사진 촬영법으로 가시화하여 주위물의 온도가  $5.6^{\circ}\text{C}$ 일 때를 상향과 하향유동의 분기점 온도가 된다고 하였다. Fukusako 등<sup>(5)</sup>은  $2.8^{\circ}\text{C} \sim 20.3^{\circ}\text{C}$  범위에 있는 소금물(3.5 wt%)속에서 수평 얼음원기둥이 용해할 때 야기되는 유동 및 열전달 특성을 실험적으로 구명하였다. 그들은 용해되는 얼음원기둥에 의한 유동형태가 원기둥 하부에서는 두방향 층류유동, 상부에서는 상향의 난류유동으로 나타남을 밝혔다. 또한 누셀트수는 주위유체의 온도가 증가함에 따라  $13.0^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 하여  $13.0^{\circ}\text{C}$  이하일 때는 단순 증가하고, 그 이상에서는 거의 일정한 값에 접근한다고 하였다.

기존의 연구중에서 주위유체가 저온의 순수물이고, 얼음의 기하학적 형상이 수평 원기둥일 경우에 대한 대부분의 연구들<sup>(3,4)</sup>은 얼음의 용해시 온도분포 및 용해형상의 특성만으로 대류유동의 특성을 설명함으로써 각기 서로 다른 결론을 주장하고 있다. 결국 실험적 연구로서 유동장의 가시화를 통한 직접적인 자료를 구체적으로 제시해 주지 못하고 있다. 한편, Fukusako 등의 연구는 주위유체가 소금물인 경우에 한정되었다. 주위유체가 순수물인 경우에는 소금물에 비하여 최대 밀도점 부근에서 온도변화에 따른 밀도기울기가 급격하여 주위물의 온도변화에 따른 유동형태가 더욱 복잡하게 된다.

따라서 저온의 순수물속에 잠겨있는 수평 얼음원기둥의 용해에 따른 유동 및 열전달 특성을 구체적으로 확인할 수 있는 전 유동장의 가시화와 그 결과로 나타나는 용해형상을 함께 비교 설명할 수 있는 실험적 연구를 수행하여 기존 연구들의 해석 결과들을 효율적으로 검토할 필요성이 있다.

본 연구에서는 상변화 물질인 수평 얼음원기둥이 저온의 순수물속에서 용해될 때 야기되는 유동형태 및 열전달 특성을 전 유동장의 가시화를 통한 실험적 방법으로써 구명하였다. 즉, 수평 얼음원기둥의 용해에 따른 얼음 주위의 전 유동장 및 용해형상을 직접 가시화하고 누셀트수를 계산하였다. 특히 물의 최대 밀도점의 존재가 유동 및 열전달 특성에 미치는 영향과 정체점(stagnation point)에서의 열전달 특성을 중점적으로 고찰하였으며, 본 연구결과와 기존의 연구결과<sup>(3~5)</sup>들을 함께 비교 고찰하였

다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 그림이다.

실험장치는 크게 실험용 탱크, 가시화 장치, 증류수 제조장치 및 시편 제조장치 등으로 나누어진다. 탱크의 크기는 얼음원기둥에 의한 자유유동 (free flow)이 가능하도록 충분한 크기인 길이 1200 mm, 폭 1500 mm, 깊이 1500 mm로서 수압에 충분히 견딜 수 있는 강화유리로 제작하였다. 또한 탱크의 외부에는 벽면을 통한 주위와의 열차단을 위하여 폴리스티렌(polystyrene) 단열재와 유리섬유로 단열하였다. 탱크의 외부에는 유동의 가시화를 위하여 사방에 창을 만들었다. 또한 물의 온도변화를 최소화하기 위하여 탱크 주변의 공간에는 에어컨을 이용하여 주위의 공기온도를 항상 실험온도와 같게 유지하였다. 탱크속의 물은 순수물로서 냉각기를 이용하여 필요한 주위물 온도( $T_{\infty}$ )까지 냉각한 후 펌프로써 공급하였다. 이때 탱크내의 물의 온도를 균일하게 하기 위하여 탱크내에 교반기를 설치하였다. 탱크내의 물의 균일한 온도분포를 확인하기 위하여 탱크내 각 모서리의 상, 중, 하부분

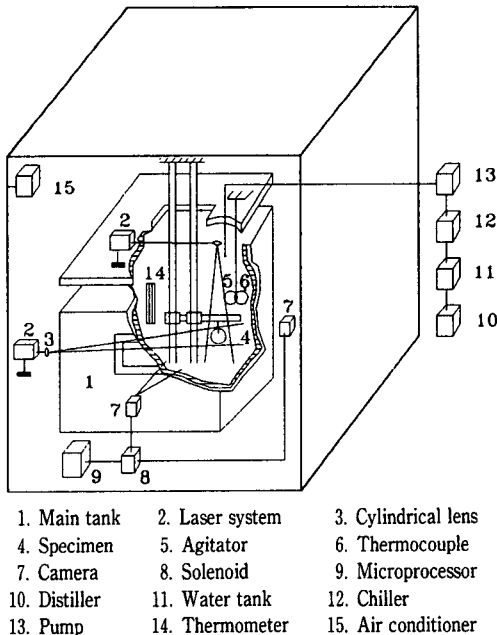


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

에 총 12개의 열전대(K-type)와 정밀 유리봉온도계 1개를 각각 설치하였다.

Fig. 2는 유동 가시화 장치의 개략도이다.

여기서, "A" 표시는 사진기의 위치를 나타낸다. 삼각 프리즘과 원기둥형 렌즈가 부착된 20 mW He-Ne 레이저를 탱크의 상부와 측면에 설치하여 슬릿(slit)형의 두 비입이 얼음시편이 고정된 정확한 위치에서 겹쳐지도록 조정하여 입사시켰다. 이때 유동가시화에 사용된 가시화 입자는 물에 용해되지 않고 장시간 부유할 수 있는 비중 1.026, 입자의 평균 지름이 40  $\mu\text{m}$ 인 플리오라이트(Pliolite) 입자를 사용하였다. 카메라의 위치는 수평 원기둥의 정면방향과 측면방향에 각각 1개씩 설치하여 두 방향에서 유동장의 가시화를 가능하도록 하였다.

실험에 사용한 얼음 시편은 길이 200 mm, 초기 직경 95 mm~100 mm인 0°C의 얼음원기둥을 사용하였다. 시편은 두께 0.05 mm인 내부면이 매끈한 스테인레스 스틸(stainless steel) 원통에 증류수를 채워 빙결시켰다. 이때 제방과정중 생성되는 얼음속의 기포의 생성을 제거하기 위하여 원통 중앙에 심봉을 회전시켰다. 제빙된 시편은 실험에 사용하기 전 항온조내에서 약 8시간 정도 저장하여 0°C의 얼음의 되도록 하였다. 이때 시편의 온도는 얼음속에 설치된 열전대를 이용하여 데이터 처리장치 (data acquisition system, Fluke 2400B series)로서 확인하였다.

### 2.2 실험방법

온도조절이 이루어진 탱크속의 물에 플리오라이트입자를 약 0.9 g정도 물속에 혼합하고, 균일한 입자분포를 위해 10분 정도 교반을 한다. 교반기 및 에어컨을 중지시키고, 탱크내의 유동이 정지되

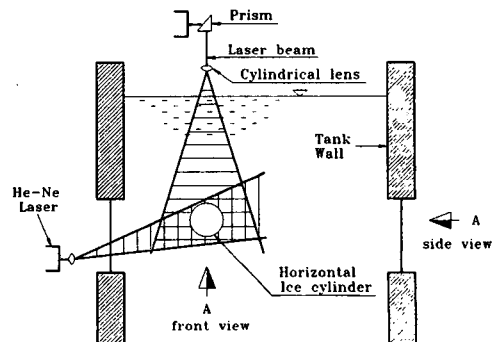


Fig. 2 Detail of flow visualization

도록 약 30분 정도의 진정시간을 둔다. 탱크내의 물의 온도를 확인한 후, 시편 고정틀에 시편을 정확히 수평으로 위치시킨 다음 탱크위에 장치한 도르래로 탱크내의 수직봉을 따라 물속에 잠입시켜 탱크내의 정확한 촬영위치에 고정시킨다. 이때 시편을 탱크의 물속에 넣기전에 항온조에 넣어서 0°C가 되도록 한 후, 저온실에서 시편의 초기직경을 다이얼게이지 마이크로미터(dial gage micrometer)가 부착된 측정장치를 이용하여 정확히 측정한다. 측정지점은 시편의 축방향으로 일정간격의 10개소를 선택하여 둘레방향으로 15°간격으로 측정하였다.

시편을 물속에 넣을 경우에 발생하는 미약한 유동의 영향을 없애기 위하여 5~10분 정도의 진정시간을 둔다. 물속에 잠긴 시간은 초시계를 이용하여 정확히 측정한다. 카메라의 노출시간과 셔터의 작동은 각 조건에 따라서 마이크로 프로세서(microprocessor, Intel SDK MC 7-85)로써 제어되는 전자밸브(solenoid controlled valve, CKD AS-03-A701, CONT 21)가 조절하도록 하였다. 적절한 촬영조건을 찾기위한 예비실험 결과에 따라 시편을 물속에 넣고 30분 후에 촬영을 시작하였고, 카메라의 노출시간은 정면사진인 경우에는 8초, 측면사진인 경우에는 15초로 하여 정상상태 유동장에서는 10분 간격으로 5회씩, 비정상상태의 유동장에서는 1분간격으로 연속적으로 촬영하였다. 여기서 카메라의 노출시간을 달리 한것은 유속의 상대적인 비교를 재확인하기 위함이다. 실험이 끝난후 시편을 들어내어 물속에서 녹은 깊이를 저온실에서 정확히 측정한다 다음에 시편의 용해형상을 촬영하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구는 0°C의 수평 얼음원기둥이 주위물의 온도범위가 2.0°C~10.0°C까지인 저온의 순수물속에 잠겨있을 때 야기되는 유동 및 열전달 특성을 전 유동장과 용해형상의 가시화 및 정체점의 누셀트수를 측정하여 조사하였다.

실험과정 중의 유동현상의 육안관찰과 가시화된 각 사진들로부터 원기둥 주위의 유동형태는 주위물의 온도변화에 따라 크게 세 영역으로 분류되었다. 즉  $2.0^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 4.6^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서는 정상상태 상향 유동,  $4.7^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.9^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서는 비정상상태 3차원 유동,  $T_{\infty} \geq 6.0^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 정상상태 하향

유동으로 나타났다. 그러나 Saitoh<sup>(3)</sup>의 연구에서는 정상상태 하향유동의 영역이  $T_{\infty} > 8.1^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서, Lee 등<sup>(4)</sup>의 연구에서는  $T_{\infty} > 5.6^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 나타난다고 주장하여 본 연구와는 다른 결과를 얻었으나 구체적인 가시화 사진이 제시되지 않았다. 이에 관한 더욱 상세한 고찰은 아래의 유동형태에서 논하기로 한다. 아래의 유동형태의 고찰에서 제시되는 각각의 사진은 각 주위물 온도에서의 대표적인 사진을 선택하여 제시한 것이다. 또한 유동현상에 대한 명확한 고찰을 위하여 수평 원기둥의 정면과 측면방향의 가시화 사진을 함께 제시하였다. 얼음원기둥의 정면 사진은 축방향의 중심부에서의 유동을 촬영한 사진이다. 본문에서 얼음원기둥의 원주각은 원기둥 상부에서의 값을  $\phi = 0^{\circ}$ 로 하였다.

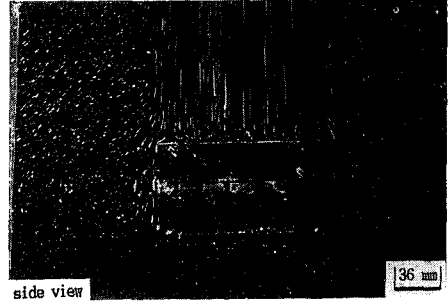
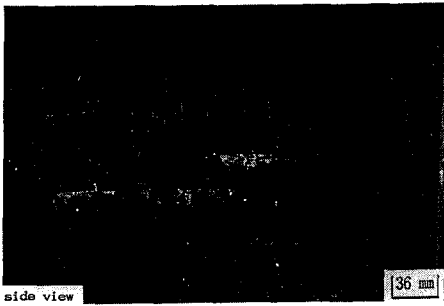
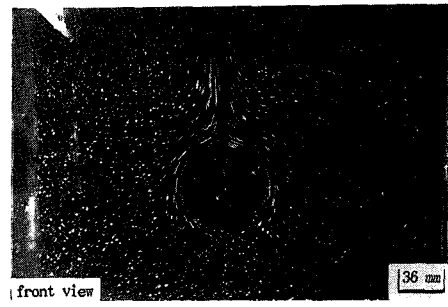
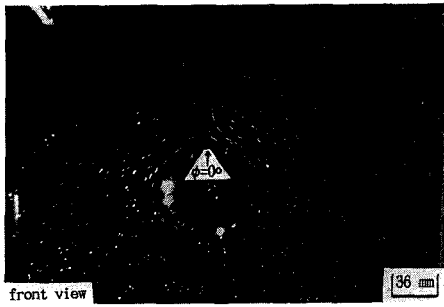
#### 3.1 유동형태

##### 3.1.1 정상상태 상향유동

Fig. 3(a), (b), (c) 및 (d)는 0°C의 수평 얼음원기둥이 2.0°C, 2.5°C, 3.0°C 및 4.6°C의 순수물속에 잠긴후 40분 후에 수평 원기둥 주위의 유동장을 정면과 측면에서 촬영한 가시화 사진이다.

사진 중앙부에 위치한 검은 구 및 사각형 부분은 얼음원기둥이고, 측면사진에서는 얼음원기둥의 좌측에 얼음을 고정시키기 위한 심봉이 나타나 있다. 수평 얼음원기둥 주위에 나타난 흰선은 카메라 노출시간 동안 플리오라이트입자가 이동한 유동궤적을 나타내고, 그 주위의 흰점은 주위물의 정체상태를 나타내는 플리오라이트입자이다.

$T_{\infty} = 2.0^{\circ}\text{C}$ 인 (a)의 경우 유동은 원기둥 하부에서 유입된 물이 좌우 양쪽으로 갈라져 원기둥 주위를 따라 상승하다가 상부정체점( $\phi = 0^{\circ}$ )부근에서 양쪽으로 갈라진 물이 합쳐지면서 수직지름을 대칭축으로 한 반중력 방향으로의 상승 분류(plume)를 형성한다. 시편의 길이를 유한하게 잡은 경우로서 측면 사진 (b)의 양쪽 끝단에서 나타나는 양단효과(end effect)는 전반적인 유동형태에는 크게 영향을 미치지 않는다. 이와같은 유동형태는 2차원 정상상태 상향유동으로서 얼음벽면과 주위물의 온도차에 의한 열경계층내의 물의 밀도가 주위물의 밀도보다 작아짐으로서 나타나는 유동형태이다. 이와 같이 발달된 유동형태는 얼음원기둥의 용해에 따른 고체-액체 경계면의 이동을 수반하지만 시간



(a)  $T_{\infty}=2.0^{\circ}\text{C}$

(b)  $T_{\infty}=2.5^{\circ}\text{C}$



(c)  $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$

(d)  $T_{\infty}=4.6^{\circ}\text{C}$

**Fig. 3** Flow patterns at front and side view of horizontal ice cylinder for (a)  $T_{\infty}=2.0^{\circ}\text{C}$ , (b)  $T_{\infty}=2.5^{\circ}\text{C}$ , (c)  $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ , (d)  $T_{\infty}=4.6^{\circ}\text{C}$  and  $T_0=0^{\circ}\text{C}$  in conditions of  $t_1=40$  minutes,  $t_e=8$  seconds (front view) and  $t_e=15$  seconds (side view)

에 따른 유동형태의 변화는 나타나지 않았다.

$T_{\infty}=2.5^{\circ}\text{C}$ ,  $3.0^{\circ}\text{C}$  및  $4.6^{\circ}\text{C}$ 인 경우 경계층내 유동형태의 전반적인 성향은  $T_{\infty}=2.0^{\circ}\text{C}$ 의 경우와 동일하게 2차원 정상상태 상향유동으로서 주위물 온도의 증가에 따라 분류의 폭이 넓어진다. 또한  $T_{\infty}=2.5^{\circ}\text{C}$ 일 경우에는 경계층내 유적선의 길이가  $T_{\infty}=2.0^{\circ}\text{C}$ ,  $3.0^{\circ}\text{C}$ ,  $4.6^{\circ}\text{C}$ 일 때보다 더욱 길게 나타나 상향유동이 제일 활발히 일어남을 알 수 있다. 따라서 상향유동 영역중  $T_{\infty}=2.5^{\circ}\text{C}$ 일 경우에 대류 열전달이 가장 활발히 일어남을 예측할 수 있다. 상기와 같은 정상상태 상향유동은  $2.0^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 4.6^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 나타났다. 이와 같은 성향들은 Saitoh<sup>(3)</sup>의 이론해석의 결과와 잘 일치한다. Lee 등<sup>(4)</sup>의 결과에서는 상향유동이 발생하는 온도의 상한치를  $5.6^{\circ}\text{C}$ 로 판단하여 본 연구결과와 다소의 차이를 나타내고 있다.

### 3.1.2 비정상상태 유동

Fig. 4는 주위물의 온도  $T_{\infty}=4.7^{\circ}\text{C}$ 일때  $0^{\circ}\text{C}$ 의 수평 얼음원기둥 주위의 유동형태의 변화를 시간의 경과에 따라 나타낸 가시화 사진이다.

사진 (a)에서는 원기둥의 하부에서 유입된 물이 상부정체점 부근에서 분류를 형성하여 상승하다가 중력방향으로 유동이 반전(flow reversal)되어 하향하는 유동형태이다. 이는 얼음원기둥 부근의 물의 밀도가 주위물의 밀도보다 작아 상부정체점 부근에서 분류를 형성하여 상승하다가 주위물과의 열전달 및 주위물의 유입으로 인해서 분류를 형성한 물의 온도가 하류(downstream)로 갈수록 최대 밀도점온도에 가까워짐으로서 주위물의 밀도보다 커져 다시 하향하기 때문이다.

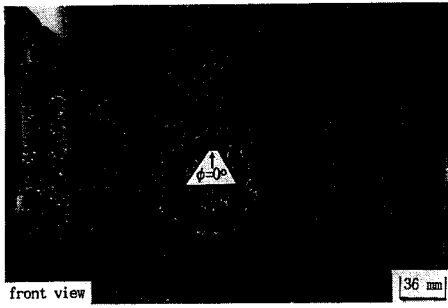
이러한 상승분류 및 하향운동은 시간이 지남에 따라 더욱 성장하여 (b)에서와 같이 분류가 위쪽으로 더욱 상승함으로써 하향유동은 원기둥 벽면쪽으로 더욱 접근하게 된다. 이렇게 원기둥에 접근된 하향유동으로 인해서 (c)와 같이 오른쪽 하부로의 물의 유입이 차단되면서 왼쪽상부에 와류가 형성되어 왼쪽하부로의 미약한 하향유동이 발생한다. 이와같은 불규칙한 유동은 70분이 지난후의 (d)와 같이 초기상태의 유동형태인 (a)의 상태로 돌아가게 된다. 이와 같이  $T_{\infty}=4.7^{\circ}\text{C}$ 에서의 유동형태는 약 30분 정도의 시간적인 주기를 가지고 반복되며 또한 정상상태 2차원 유동형태와는 달리 수평원기둥의 측면 가시화 사진에서 원기둥의 축방향으로의

유동이 발생함으로써 3차원 비정상상태의 유동형태를 나타낸다. 이와 같이 상향분류의 형성과 반전되어 하향하는 비정상상태의 주기적인 유동형태는  $4.7^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.0^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 나타났으며, 이 범위에서는 주위물 온도의 증가에 따라 상향하던 분류의 반전위치가 얼음면에 점차 가까워져 얼음면에 매우 근접된 상부에서 와류를 형성하면서 하향유동은 더욱 활발해진다. 또한 유동형태가 반복되는 주기적인 시간이 주위물 온도의 증가에 따라 점차 짧아지게 된다. 이는 원기둥 상부의 상승류가 주위물 온도의 증가에 따라 최대 밀도점 온도에 더욱 빨리 도달되고, 이러한 최대 밀도와 주위물과의 밀도차가 주위물 온도의 증가에 따라 커짐으로서 나타난다.

Fig. 5(a), (b)는 주위물의 온도  $T_{\infty}=5.5^{\circ}\text{C}$ ,  $5.6^{\circ}\text{C}$ 인 경우일 때  $0^{\circ}\text{C}$ 의 수평 얼음원기둥 주위의 유동장을 가시화한 사진이다.

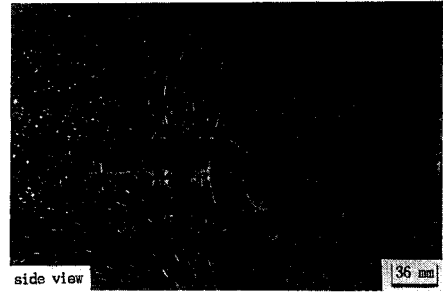
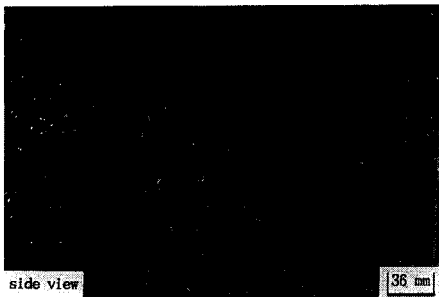
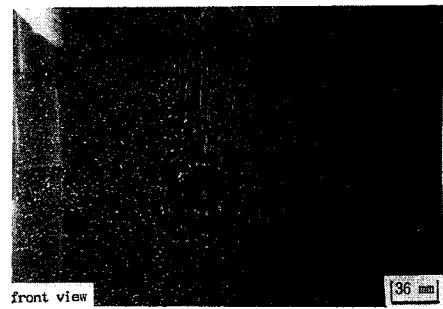
Fig. 4에서 주위물 온도의 상승에 따라 상향분류의 반전위치가 얼음면에 점차로 접근되어  $T_{\infty}=5.5^{\circ}\text{C}$ 에 가까워지면 상승분류가 형성되지 못하고 얼음면 바로 인접된 곳에서 '유동이 반전되어 상부 정체점( $\phi=0^{\circ}$ )에서부터  $\phi=90^{\circ}$ 부근까지 작은 와류가 형성되어 소멸하면서 하향으로의 분류를 형성한다. 또한 정면 사진에서 나타난 작은 와류가 측면 사진에서도 나타난 것은 이 유동 비정상상태 3차원 유동임을 알 수 있게 한다. 이는 얼음원기둥에 매우 인접된 면에서 상승부력을 받는 작은 밀도의 유체가 밀도가 큰 주위물에 의해 바로 가열되어 반전되면서 인접된 또다른 상향유체의 영향을 받아 와류를 형성하면서 온도가 상승하여 주위유체의 밀도보다 커지기 때문에 발생한다. 그러나 Fig. 4와 같은 시간의존성 유동형태는 나타나지 않았다.

주위물의 온도  $T_{\infty}=5.6^{\circ}\text{C}$ 인 Fig. 5(b)인 경우  $T_{\infty}=5.5^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 비해 주위물 밀도가 작아짐으로 인해서 상부 와류의 크기가 더욱 커졌고, 하향분류의 폭은 작아지면서 유속이 더욱 빨라졌다. Saith<sup>(3)</sup>의 연구에서는  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ 에서 이러한 축방향 유동이 발생한다고 하였으나 본 실험결과에서는  $5.5^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.8^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 관찰되었다. 또한 원기둥 상부에서 나타나는 2차 유동은 주위유체가 소금물인 경우 Fukusako 등<sup>(5)</sup>의 연구결과에서도 관찰되었다. Lee 등<sup>(4)</sup>의 결과에서는 상기에서의 비정상상태 유동형태에 대한 구분없이  $T_{\infty}=5.6^{\circ}\text{C}$ 를 상향 및 하향유동의 분기점으로 하여 이 온도에서



(a)  $t_1=40$  minutes

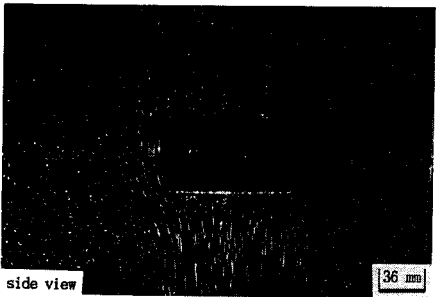
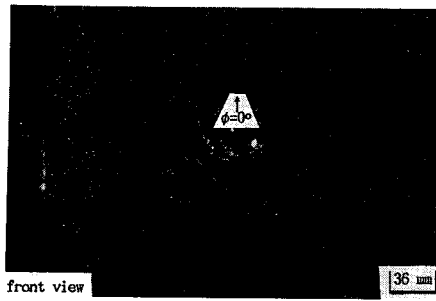
(b)  $t_1=50$  minutes



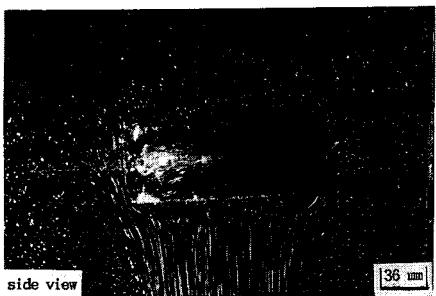
(c)  $t_1=60$  minutes

(d)  $t_1=70$  minutes

**Fig. 4** Flow patterns at front and side view of horizontal ice cylinder for  $T_\infty=4.7^\circ\text{C}$  and  $T_o=0^\circ\text{C}$  in conditions of (a)  $t_1=40$  minutes, (b)  $t_1=50$  minutes, (c)  $T_1=60$  minutes, (d)  $t_1=70$  minutes and  $t_e=8$  seconds (front view) and  $t_e=15$  seconds (side view)

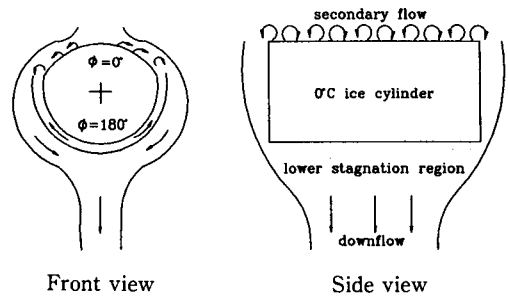


(a)  $T_{\infty}=55.0^{\circ}\text{C}$



(b)  $T_{\infty}=5.6^{\circ}\text{C}$

**Fig. 5** Flow patterns at front and side view of horizontal ice cylinder for (a)  $T_{\infty}=5.5^{\circ}\text{C}$ , (b)  $T_{\infty}=5.6^{\circ}\text{C}$  and  $T_0=0^{\circ}\text{C}$  in conditions of  $t_1=40$  minutes,  $t_e=8$  seconds (front view) and  $t_e=15$  seconds (side view)



**Fig. 6** Flow model of horizontal ice cylinder for  $T_{\infty}=5.6^{\circ}\text{C}$  and  $T_0=0^{\circ}\text{C}$

상향유동이 발생한다고 하였으나, 본 실험에서는 가시화사진에서와 같이 비정상상태 3차원 유동형태를 나타내었다. Saitoh<sup>(3)</sup>의 연구에서는 이 온도구간에서 비정상상태 유동으로 나타나 본 실험결과와 일치하고 있다. 상기의 유동형태는 주위물 온도가 증가함에 따라 얼음 원기둥 상부에서 발생된 와류가 점차 소멸되면서 완전 하향유동에 접근하게 된다.

이상과 같이 주위물 온도가  $4.7^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.9^{\circ}\text{C}$ 인 범위에서는 경계층내 최대 밀도점의 영향이 유동장에 매우 큰 영향을 미치게 되어 비정상상태 3차원 유동형태가 나타났으며, 특히  $4.7^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.0^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서는 시간의존성 유동형태가 나타난다.

Fig. 6은 Fig. 5의 가시화 사진들의 유동모델을 나타낸 그림이다.

얼음원기둥의 상부에서는 원기둥에 매우 인접된 곳에서의 상향부력이 경계층내의 지배적인 하향부력을 불안정하게 함으로서 작은 와류가 형성되고 이러한 와류는  $\phi=90^{\circ}$ 부근에서부터 소멸되어 원기둥의 하부에서는 완전 하향유동으로 바뀌게 된다.

### 3.1.2 정상상태 하향유동

Fig. 7(a), (b)는 주위물의 온도  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ ,  $7.0^{\circ}\text{C}$ 인 경우일때  $0^{\circ}\text{C}$ 의 수평 얼음원기둥 주위의 유동장을 가시화한 사진이다.

얼음원기둥의 상부정체점에서 유입된 물이 원기둥 주위를 따라 하강하다가 하부 정체점( $\phi=180^{\circ}$ )부근에서 아무런 흔들림 없이 중력방향으로 곧게 내려가는 완전 하향유동을 형성한다. 이는 얼음면에 매우 인접된 곳의 속도경계층내에서 주위물보다 작은 밀도를 가지는 층이 충분히 발달된 경계층 전반의 하향유동층의 전단력에 의해서 상향유동을 일



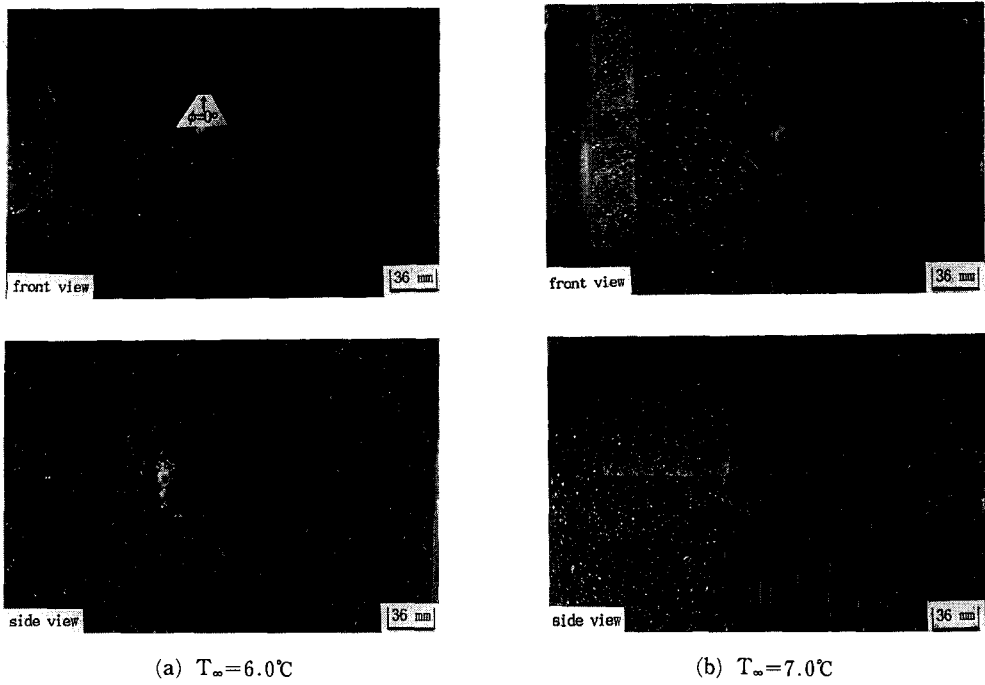


Fig. 7 Flow patterns at front and side view of horizontal ice cylinder for (a)  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1=50$  minutes, (b)  $T_{\infty}=7.0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1=40$  minutes in conditions of  $T_0=0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_e=8$  seconds (front view) and  $t_e=15$  seconds (side view)

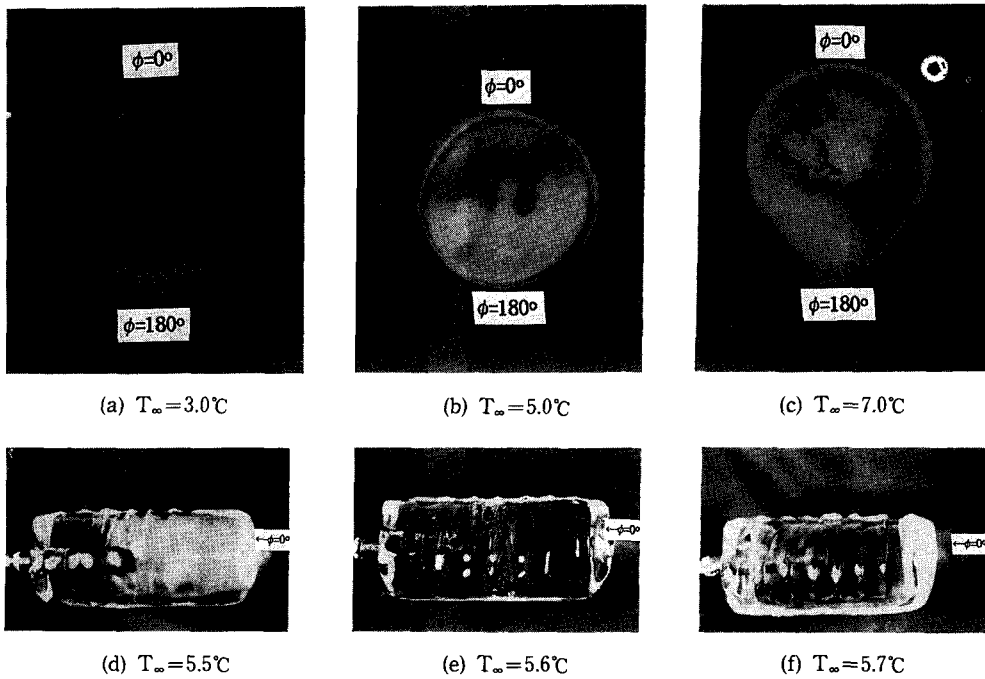


Fig. 8 Melting shapes of the  $0^{\circ}\text{C}$  ice cylinder at various  $T_{\infty}$

오키지 못하고 하향하기 때문이다. 이러한 유동형태는 시간에 따른 유동형태의 변화가 없는 2차원 정상상태 하향유동으로서 Saitoh<sup>(3)</sup>는  $T_{\infty}=8.1^{\circ}\text{C}$ , Lee 등<sup>(4)</sup>은  $T_{\infty}=5.6^{\circ}\text{C}$ 에서부터 완전 하향유동이 발생한다고 하였으나, 본 실험의 가시화 사진에서는  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ 에서부터 나타났다.

$T_{\infty}=7.0^{\circ}\text{C}$ 인 Fig. 7(b)의 경우 유동형태는  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ 에서의와 같은 정상상태 하향유동형태로서 유동은 더욱 활발해지고 얼음 하부에서의 하향분류의 폭도 작아진다. 이는 주위물 온도의 증가에 따라 경계층내의 유체와 주위유체의 밀도차가 더욱 커지기 때문이다.

### 3.2 용해형상

Fig. 8은 각각의 유동영역중에서 대표적인 주위물 온도  $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ ,  $5.0^{\circ}\text{C}$ ,  $7.0^{\circ}\text{C}$ 에서의 정면 용해형상과  $T_{\infty}=5.5^{\circ}\text{C}$ ,  $5.6^{\circ}\text{C}$ ,  $5.7^{\circ}\text{C}$ 에서의 측면 용해형상을 각각 나타낸 그림이다.

상향유동 영역중의 대표적인 주위물 온도인  $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ 에서의 얼음원기둥의 용해형상은 원기둥의 상부정체점이 뾰족한 형태로서 나타난다. 이는 수평 원기둥을 따라 좌우에서 유입된 물이 상승하면서 분류가 형성되는 상부정체점( $\phi=0^{\circ}$ )부근에서 정체점(stagnation point)이 형성되어 다른 부분에 비해 용해율이 감소하기 때문이다. 이러한 용해형상은 Saitoh<sup>(3)</sup> 및 Lee 등<sup>(4)</sup>의 결과와 잘 일치한다.

비정상상태 유동영역중의 대표적인 주위물 온도인  $T_{\infty}=5.0^{\circ}\text{C}$ 에서의 용해형상은 동심원 형태로서 Saitoh<sup>(3)</sup>와 Lee 등<sup>(4)</sup>은 이러한 동심원 형태의 용해형상이 각각  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\infty}=5.6^{\circ}\text{C}$ 에서 나타난다고 하였으나, 본 실험에서는  $4.7^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.4^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 관찰할 수 있었다.

하향유동 영역중의 대표적인 주위물 온도인  $T_{\infty}=7.0^{\circ}\text{C}$ 에서의 용해형상은 하부정체점 부근이 뾰족한 형태로서 Saitoh<sup>(3)</sup> 및 Lee 등<sup>(4)</sup>의 하향유동 구간에서의 용해형상과 잘 일치한다.

$5.5^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.8^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서의 얼음원기둥의 측면 용해형상은 상부정체점( $\phi=0^{\circ}$ )에서  $\phi=90^{\circ}$ 인 지점 부근까지 폭이 일정한 6~7개 정도의 나선형 형태의 골을 형성하면서 용해되었다. 특히 나선형 형태의 골은  $T_{\infty}=5.7^{\circ}\text{C}$ 일때 가장 깊게 형성되었다. 이러한 용해형상은 이 온도범위에서 3차원 유동형태가 나타남을 입증하는 것으로서 Fig. 5의 유동형태와 잘 부합되는 결과이다. Fukusako<sup>(5)</sup>의 연

구에서도 얼음원기둥 상부에서 이러한 나선형 형태의 용해형상이 관찰되었다.

Fig. 9는 시간에 따른 용해형상의 변화를 나타내기 위하여 하향유동 영역중 대표적인 주위물 온도  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ 에서의 본 실험결과와 참고적으로 Saitoh<sup>(3)</sup>의 연구에서 제시된 결과중  $T_{\infty}=10.0^{\circ}\text{C}$ 에서의 용해형상을 도시화하여 나타낸 그림이다.

용해형상은 하부정체점 부근이 뾰족한 계란형의 형태를 나타내었다. 이러한 용해형상은 주위물 온도  $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$ 에서부터 이러한 계란형의 용해형상을 갖는다고 한 Lee 등<sup>(4)</sup>의 결과와 잘 일치한다. 그러나 Saitoh<sup>(3)</sup>의 이론해석에서는  $T_{\infty}=8.1^{\circ}\text{C}$ 이상에서 이러한 용해형상이 나타나 본 실험결과와 상당한 차이를 보였다. 상부정체점( $\phi=0^{\circ}$ )에서  $\phi=90^{\circ}$ 부근까지는 시간의 변화에 따른 용해율의 변화가 거의 일정하지만  $\phi=90^{\circ}$ 부근에서부터 하부정체점( $\phi=180^{\circ}$ )까지는 시간의 증가에 따른 용해율의 변화가 점차 감소한다.

### 3.3 누셀트수

얼음의 내부 및 표면온도를 일정하게  $0^{\circ}\text{C}$ 로 유지한 수평 얼음원기둥이 물에 잠겨있을 경우 얼음의 표면에서 얼음내부로의 열전달은 일어나지 않는다. 따라서 주위 물로부터 얼음원기둥으로의 전열량은 얼음원기둥을 용해시키는 열량과 같으므로, 열평형 방정식 (1)로부터 일정 원주각  $\phi$ 에서의 국소 열전달계수  $h_{\phi}$ 는 식(2)와 같이 된다.

$$q \rho_{\text{ice}} \left( \frac{\Delta r}{\Delta t} \right) = h_{\phi} (T_{\infty} - T_0) \quad (1)$$

$$h_{\phi} = \frac{\rho_{\text{ice}} q}{(T_{\infty} - T_0)} \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서,  $q$ 는 얼음의 용해잠열로서  $333.4 \text{ KJ/kg}$ ,  $\rho_{\text{ice}}$ 는  $0^{\circ}\text{C}$  얼음의 밀도로서  $916.8 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta r$ 는

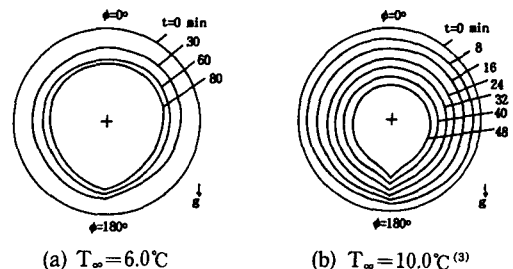


Fig. 9 Variations of cross section of the  $0^{\circ}\text{C}$  ice cylinder with time stages

얼음 원기둥의 초기반경과 일정한 시간 용해된 후의 반경과의 차이,  $\Delta t$ 는 얼음원기둥이 물속에 잠긴 전체시간을 나타낸다.

또한, 0°C 얼음원기둥에서의 국소 누셀트수  $Nu_\phi$ 는 식(2)를 이용하여 식(3)으로서 계산하였다.

$$Nu_\phi = \frac{h_\phi D_m}{K} = \frac{q \rho_{ice} (\Delta r / \Delta t) D_{in}}{K (T_\infty - T_o)} \quad (3)$$

계산에 사용된 물성치들은 막 온도(film temperature),  $T_f = (T_\infty + T_o) / 2$ 일때의 값으로서 Kukulka<sup>(6)</sup>의 연구결과를 이용하였다.

Fig. 10은 각각의 유동형태를 대표하는 주위물 온도  $T_\infty = 2.5^\circ\text{C}$ ,  $5.6^\circ\text{C}$ ,  $7.0^\circ\text{C}$ 에서의 국소 열전달 계수  $h_\phi$ 를 나타낸 그림이다.

상향유동형태가 나타나는  $T_\infty = 2.5^\circ\text{C}$ 의 경우 원기둥의 하부정체점( $\phi = 180^\circ$ )에서 상부정체점( $\phi = 0^\circ$ )으로 갈수록 열전달계수가 점차 감소한다. 이러한 성향은 온도차로 발생하는 원기둥 주위의 상향 유동으로 인하여 하부정체점 부근에서는 경계층내로 유입되는 따뜻한 물에 의하여 대류 열전달량이 커지고, 상부정체점으로 갈수록 원기둥의 주위를 따라 상승하던 경계층내의 상승류가 점차 차가워지면서 온도구배가 상대적으로 감소하여 열전달량이 감소하기 때문이다.

비정상상태 유동형태가 나타나는  $T_\infty = 5.6^\circ\text{C}$ 의 경우에는  $\phi = 90^\circ$ 를 경계로 하여 열전달계수가 갑자기 줄어든다. 이는 얼음면에 인접된곳에서의 상향

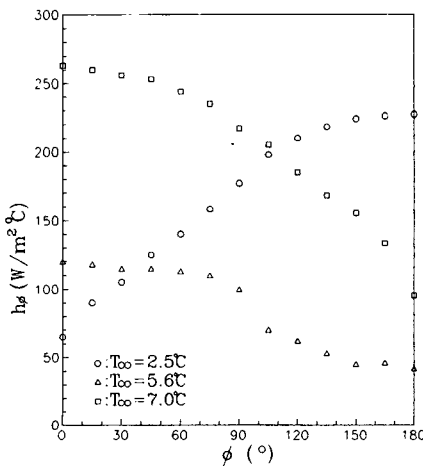


Fig. 10 Local heat transfer coefficients of 0°C horizontal ice cylinder for  $T_\infty = 2.5^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty = 5.6^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty = 7.0^\circ\text{C}$

부력이 경계층전반의 하향부력을 불안정하게 함으로서  $\phi = 0^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위에서 2차 유동(secondary flow)이 발생하기 때문이다. 하향유동형태가 나타나는  $T_\infty = 7.0^\circ\text{C}$ 의 경우 상부정체점( $\phi = 0^\circ$ )에서 하부정체점( $\phi = 180^\circ$ )으로 갈수록 열전달 계수가 점차 감소한다. 이는 원기둥 상부정체점 부근에서 경계층내로 유입되는 주위물에 의하여 대류 열전달량이 커지고, 하부정체점으로 갈수록 원기둥의 주위를 따라 하강하던 경계층내의 주위유체가 점차 차가워지면서 열전달량이 감소하기 때문이다. Fig. 10에서 나타나듯이 얼음원기둥이 저온의 순수물속에 잠겨있을 경우 주위물 온도의 변화에 따라 야기되는 유동 및 열전달 특성에 있어서 정상상태 유동영역 뿐만 아니라 최대밀도점 온도의 존재로 발생하는 열적 불안정성(thermal instability)으로 인한 비정상상태 유동영역에서 정체점 누셀트수의 변화는 주위물 온도의 변화에 따른 열전달 특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 요소가 된다.<sup>(3)</sup>(3.2 용해형상 참조)

Fig. 11은 주위물 온도( $T_\infty$ )의 증가에 따른 정체점의 누셀트수의 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 정체점은 유동형태에 따라서 초기 유동이 시작되는 전단(leading edge), 즉 상향유동의 경우에는 원기둥의 하부정체점, 하향유동의 경우에는 원기둥의 상부정체점, 비정상상태 유동중  $4.7^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 5.4^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 원기둥의 하부정체점,  $5.5^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 5.9^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 상부정체점을 각각 나타낸다. 또한 세로좌표는  $Nu_\phi / (\rho_{ice} / D_r)^{3/4}$ 로서 경계층 근사(boundary-layer approximation)에서 누셀트수가 특성길이( $D_m$ )의 3/4승에 비례하기 때문에 기준지

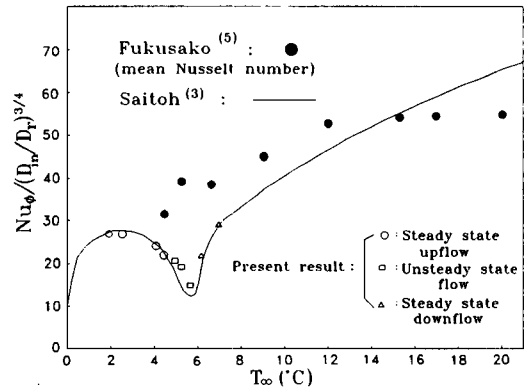


Fig. 11 Stagnation point Nusselt numbers of the 0°C horizontal ice cylinder versus ambient water temperatures

름(reference diameter)  $D_r$ 에 대해 얼음원기둥의 직경을 고정하기 위해서 누셀트수를  $(D_m/D_r)^{3/4}$ 로 나누어준 값으로 나타내었다.<sup>(3,5)</sup> 이것은 초기의 원기둥 직경이 각 실험마다 항상 같지 않기 때문이다. 여기서, 기준지름  $D_r$ 의 값은 기존의 연구결과들<sup>(3,5)</sup>과 비교하기 위하여 100 mm로 하였다.

얼음 원기둥 주위의 유동형태는 주위물 온도의 증가에 따라 정상상태 상향유동, 비정상상태 유동, 정상상태 하향유동으로 구분된다. 정상상태 상향유동영역에서의 누셀트수는 약 2.5°C 부근에서 최대를 나타내다가 주위물 온도의 증가에 따라 감소하고, 열적 불안정성이 존재하는<sup>(3)</sup> 비정상상태 유동영역인  $T_\infty=5.7^\circ\text{C}$ 에서 최소값을 나타낸후, 정상상태 하향유동영역에서 다시 증가하게 된다. 이러한 누셀트의 값은 Saitoh<sup>(3)</sup>의 결과들과 비교해서 약 10%이내의 오차를 나타낸다. 최소 누셀트수는 Saitoh<sup>(3)</sup>의 연구결과에서는  $T_\infty=6.0^\circ\text{C}$ 에서 나타나서 본 실험적 결과와 차이를 나타내고 있고 Lee 등<sup>(4)</sup>의 결과에서는  $T_\infty=5.6^\circ\text{C}$ 에서 최소 누셀트수가 나타나 거의 일치된 결과를 보이고 있다. 또한 주위유체가 소금물(3.5wt%)인 경우의 Fukusako<sup>(5)</sup>의 결과에서 누셀트수는 소금물의 온도가 13.0°C 이하일때는 단순 증가하고, 그 이상에서는 거의 일정한 값에 접근하는 성향으로 나타나 주위유체가 순수물인 경우의 성향과는 상당한 차이를 보이고 있다.

#### 4. 결 론

0°C의 수평 등은 얼음원기둥이 2.0°C~10.0°C의 저온의 순수물속에 잠겨있을 때 수평 얼음원기둥에 의해 야기되는 대류유동 및 열전달 특성에 관한 해석을 실험적으로 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수평 얼음원기둥 주위의 유동형태는 주위물의 온도에 따라 크게 세 영역으로 분류하였다. 즉  $2.0^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 4.6^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 정상상태 상향유동,  $4.7^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 5.9^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 비정상상태 3차원 유동,  $T_\infty \geq 6.0^\circ\text{C}$ 의 범위에서 정상상태 하향유동으로 나타났다. 특히  $4.7^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 5.0^\circ\text{C}$ 인 범

위에서는 주기적으로 변화하는 유동형태로서 나타난다.

(2) 주위물의 온도가  $4.7^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 5.4^\circ\text{C}$ 인 범위에서의 얼음면의 융해현상은 동심원의 형상으로 나타나며, 특히  $5.5^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 5.8^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 원기둥 상부표면에 나선형의 골이 형성된다.

(3) 상향유동 영역중 최대 누셀트수는 2.5°C에서 나타나고, 하향유동 영역에서는 주위물 온도의 증가에 따라 누셀트수는 증가한다. 최소 누셀트수는 비정상상태 유동영역인 5.7°C에서 나타난다.

#### 참고문헌

- (1) Merk, H. J., 1953, "The Influence of Melting and Anomalous Expansion on the Thermal Convection Laminar Boundary Layers," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 4, pp. 435~452.
- (2) Wang, T., 1981, *An Experimental Study of Melting Vertical Ice Cylinders in Cold Water*, Master Thesis, State Univ. of New York at Buffalo.
- (3) Saitoh, T., 1976, "Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Ice Cylinder," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 32, pp. 429~451.
- (4) Lee, D. W. and Yoo, S. S., 1985, "An Experimental Study on the Melting of a Horizontal Cylinder Ice-Bar Submerged in Water," *Trans. of the Korea Society of Mechanics Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 414~420.
- (5) Fukusako, S., Tago, M., Yamada, M., Kitayama, K. and Watanabe, C., 1992, "Melting Heat Transfer from a Horizontal Ice Cylinder Immersed in Quiescent Saline Water," *Trans. of ASME, J. Heat Transfer.*, Vol. 114, pp. 34~40.
- (6) Kukulka, D. J., 1981, *Thermodynamic and Transport Properties of Pure and Saline Water*, Master Thesis, State Univ. of New York at Buffalo.