

(論 文)

저온인 순수물 속의 등은 수직얼음 원기둥에 의해 야기되는 자연대류의 실험적 연구

유갑종* · 예용택** · 박상희**

(1991년 5월 10일 접수)

Experimental Study of Natural Convection Adjacent to an Isothermal Vertical Ice Cylinder in Cold Pure Water

Kap Jong Riu, Yong Taeg Yea and Sang Hee Park

Key Words : Vertical Cylinder(수직 원기둥), Melting Shape(용해 형상), Heat Transfer Coefficient(열전달 계수), Density Extremum Parameter(최대밀도 매개변수), Dual Flow(두방향 유동)

Abstract

A natural convection adjacent to an isothermal vertical ice cylinder is studied experimentally in cold pure water. The experiments are carried out as changing the temperature of the ambient water and then the flow and heat transfer characteristics is visualized and observed. It is shown that flow patterns are steady state upflow, unsteady state flow, steady state dual flow, and steady state downflow. There is also obtained a heat transfer coefficient and mean Nusselt number at various ambient temperature. These results are in good agreement with the theoretical ones.

기 호 설 명

- D : 시편의 초기직경 (m)
- h : 열전달 계수 ($W/m^2\text{C}$)
- h_u : 얼음의 용해잠열 (kJ/kg)
- L : 시편의 길이 (m)
- K : 열전도율 ($W/m\text{C}$)
- m' : 얼음의 용해율 (kg/s)
- Nu : 누셀트수
- R : 최대밀도 매개 변수 $\{(T_m - T_\infty)/(T_w - T_\infty)\}$
- Ra : 레이리수 ($Pr \cdot Gr_L$)
- T_∞ : 온도 (C)
- W : 시편의 표면적 (m^2)
- x : 국소 거리 (m)
- ρ : 밀도 (kg/m^3)

하 첨 자

- m : 최대밀도점
- ∞ : 주위물
- w : 시편 벽면

1. 서 론

고체벽이 온도가 다른 순수물 속에 놓이게 되면 벽면 가까스로 부터 온도차에 의한 밀도의 변화 때문에 자연대류가 발생한다. 지금까지 이에 관한 연구는 균일 열유속을 갖는 면⁽⁴⁾과 등온면^(1,2,3,5)에 관한 연구로 구분된다. 등온면에 관한 연구는 물체의 기하학적 형상이 대부분 평판인 경우이었다. 그러나 원기둥의 경우는 종횡비(D/L)의 영향에 따른 유동 및 열전달 특성이 복잡할 것으로 예상되나 이에 관한 특성구명의 자료가 미진하여 연구의 필요

* 정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과

** 경북대학교 대학원

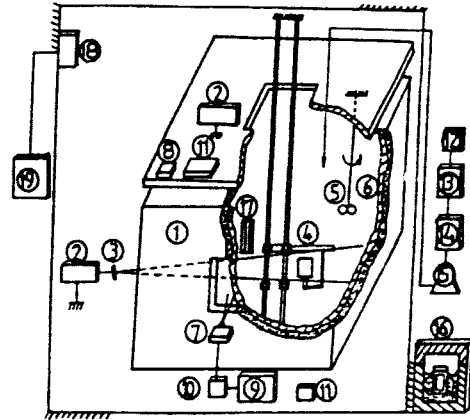
성이 요구된다. 수직 원기둥의 경우 Nagendra등⁽⁴⁾은 수치해석적으로 연구하여 원기둥의 범주를 긴 원기둥 ($0.05 < Ra \cdot D/L < 10^4$), 짧은 원기둥 ($10^4 < Ra \cdot D/L$) 및 강선 ($Ra \cdot D/L < 0.05$)으로 구분하여 종횡비에 따른 열전달 특성을 밝혔으나, 주위 유체가 상온의 물인 경우에 국한하였다. 또한 Riu 등⁽³⁾은 Nagendra 등의 연구를 확장시켜 저온 및 상온의 순수물 속에서 등온 수직원기둥에 의한 열전달 특성을 구명하였다. Wang⁽²⁾은 최대밀도점 부근의 순수물 속에서 수직 얼음원기둥 ($D/L = 0.634$)을 수면위로 돌출시켜 원기둥 주위의 유동특성을 실험적으로 연구하였다. 이상과 같이 수직원기둥이 최대밀도점 부근의 저온의 물 속에 놓였을 때의 자연대류에 관한 수치해석적 연구는 다소 있었으나 실험적 연구는 매우 드물다. 따라서 본 논문에서는 저온의 순수물 속의 등온 수직원기둥에 의해 야기되는 열전달 특성을 구명함에 있어서 짧은 원기둥 범주^(4,5)에 속하는 종횡비 0.5인 얼음 원기둥을 이용하여 실험적으로 열전달 특성을 구명하였다. 그리고 전 유동장을 가시화 하였으며, 얼음의 용해율로서 누셀트(Nusselt)수를 측정하여 기존의 결과들과 비교검토하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험장치는 크게 실험용 탱크, 증류수 제조장치, 시편 제조장치 및 가시화 장치로 구분된다. 실험용 탱크 장치에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

실험용 탱크는 길이 1500mm, 폭 1200mm, 깊이 1500mm의 대형 유리로 제작하였다. 유리의 내부와 외부와의 단열을 위하여 두께 100mm의 유리섬유와 폴리스티렌 단열재로 단열시켰으며, 탱크 속의 유동 현상을 관찰하기 위해 사방에 창을 만들었다. 탱크 속의 물은 증류한 순수물로서 냉각기를 이용하여 필요한 주위물 온도(T_w)가 되도록 조절하였다. 이 때 탱크 내의 물의 온도는 직경 0.25mm인 12개의 열전대(copper-constantan)와 유리봉 온도계를 탱크 속에 장치하여 균일한 온도분포가 되도록 하였다. 본 실험에서 사용된 시편은 길이 200mm, 직경 100mm인 얼음봉을 사용하였다. 제작된 시편은 용해시 시편 내부로의 열전도의 영향을 방지하기 위해 항온조에 약 20시간 머무르게



(1) Main tank (2) Laser system (3) Cylindrical lens (4) Specimen (5) Agitator (6) Thermocouple (7) Camera (8) Ice box (9) Microprocessor (10) Water tank (11) Recorder (12) Distiller (13) Water tank (14) Chiller (15) Pump (16) Const. Temp. Bath (17) Thermometer (18) Airconditioner (19) Control box

Fig. 1 Outline of experimental apparatus

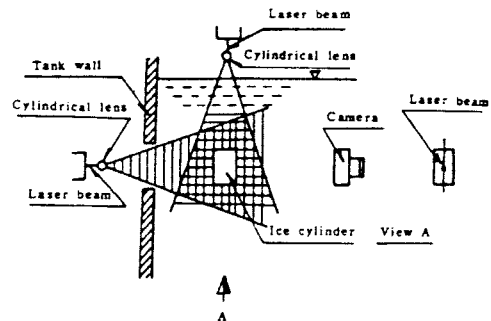


Fig. 2 Schematic diagram of test set up

하여 0°C의 등온체로 만들었다. 또한 유동현상을 가시화하기 위하여 물에 용해되지 않고 물 속에서 장기간 부유할 수 있는 지름 40 μ m인 pliolite입자 0.9g을 물 속에 넣었다. 가시화장치로는 50mW He-Ne laser 2대를 사용하였으며, 유동현상을 촬영하기 위하여 모터가 부착된 사진기(cannon F1.4, 50mm)를 사용하였다. 사진기의 노출시간은 마이크로 프로세스 및 슬레노이드 밸브로서 서터를 작동하도록 하여 조절하였다. Fig. 2는 유동 가시화 장치의 개략도로서 "A"표시는 사진기가 고정되어 유동을 촬영한 위치를 나타낸다.

2.2 실험 방법

탱크 내의 물의 온도를 열전대와 정밀 유리봉 온도계를 사용하여 측정하고, pliolite 입자를 물 속에 혼합한다. 이 후 탱크 내의 유동이 정상상태가 되도록 약 30분 정도 정적상태로 둔다. 레이저에 장치된 삼각 프리즘과 원기둥렌즈를 조정하여 수직 및 수평방향으로 빔 (beam) 을 입사시켰으며, 촬영 위치에서 두 빔이 정확히 겹쳐지도록 하였다. 저온실에서 시편의 초기직경을 15점에서 측정한 후, 시편을 탱크 내의 촬영위치에 정확히 위치시킨다. 사진촬영은 유동이 일정하게 일어날 때에는 10초 간격으로 5회로 하였으며, 유동이 시간에 따라 변화하는 경우에는 10초 간격으로 연속촬영하였다. 촬영이 끝난 후, 저온실에서 시편의 녹은 길이를 정확히 측정하였다. 측정된 데이터의 평균을 구하여 물 속에서 녹은 얼음의 무게를 산출한 다음, 물에 잠겨있었던 전체시간으로 나누어 단위질량당 얼음의 용해율 m' 을 계산하여 국소 및 평균 누셀트수를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 형태

본 연구에서는 저온의 순수물 속에 수직얼음 원기둥이 잠겨있을 때 주위물의 온도를 2.0°C 에서 10.0°C 까지 변화시켜가면서 실험을 하였다. 제시된 그림들은 주위물의 온도가 각각 다른 조건 하에서 일어나는 유동에 관한 가시화 사진들로서 사진의 노출 시간, 주위물 온도 및 촬영시간이 명시되어 있다. 얼음원기둥 벽면 부근의 경계층 유동을 관찰하였을 때, 크게 네가지 유동형태로 나눌 수 있었다. 즉 정상상태 상향유동, 비정상상태 유동, 정상상태 dual flow, 정상상태 하향유동이다.

(1) 정상상태 상향유동

Fig. 3은 주위물의 온도 $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ 인 순수물 속에 얼음시편을 담근 후 50분만에 찍은 사진이다. 사진에서 중앙의 검은 사각형 부분은 얼음 원기둥이며 검은 사각형 중앙 하단의 중심에 나타난 흰 부분은 얼음을 고정하기 위한 지지봉을 나타낸다. 수직 얼음 원기둥 주위에 나타난 흰선은 사진기 노출시간 동안의 입자의 유동체적을 나타내고, 그 주위의 흰 점은 정적상태를 나타내는 pliolite 입자이다. 유동형태는 얼음 원기둥 하부에서 유입된 물이 원기둥 하단벽면 전단 (leading edge) 에서부터 경계

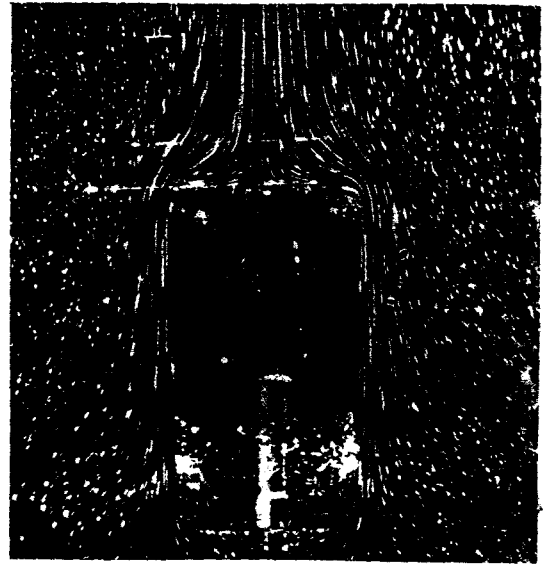


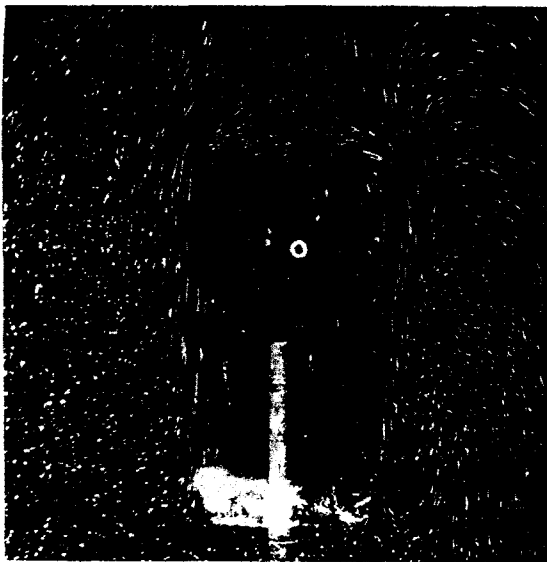
Fig. 3 Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$. 10 seconds exposure time. This photograph was taken at 50 minutes after the ice cylinder was initially put into the water

층을 형성하여 대칭 상향유동이 일어나며, 원기둥 상단면 (topface) 에서는 대칭유동이 상단면과 평행하게 흘러 들어와서 대칭축 부근에서 상호작용하여 분류 (plume) 를 형성하면서 반중력 방향으로 곧게 상승한다. 이러한 유동현상은 경계층 밖의 주위물의 밀도보다 얼음이 용해된 경계층 내의 밀도가 작아서 상향으로 큰 부력을 받기 때문이다. 수직벽면의 경계층 내에서는 수직 속도성분이 경계층 밖의 속도보다 크게 나타나고, 압력은 경계층 밖의 압력보다 낮아지기 때문에 경계층 내와 밖에서는 압력차가 생긴다. 이 압력차에 의하여 수직벽면에 경계층을 형성하는데 필요한 물을 보충하게 된다. 상단면에서 형성된 분류는 열전달에 의해서 주위물의 온도와 같아질 때까지 계속 상승하여 원기둥 벽면으로부터 매우 먼 부분에서 하향유동이 일어나 수직 원기둥 하부로 유입, 연속성을 만족한다. 수직벽면의 전단에서 후단 (trailing edge) 으로 갈수록 경계층의 두께는 증가하고 온도구배는 감소하여 열전달이 감소됨을 알 수 있다. 또한 후단으로 갈수록 수직 속도성분이 더 크게 나타난다. 이것은 후단으로 갈수록 밀도차에 의한 부력은 거의 일정하나 관성력의 영향을 더 크게 받기 때문이다. 이러한 유동형태는 $2.0^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 4.0^{\circ}\text{C}$ 의 전 범위에 걸

쳐 나타났으며, 시간에 따른 유동형태의 변화는 없었다. 이 온도구간 중 $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ 일 때 유속이 최대가 되어 가장 활발한 상향유동이 일어나며 경계층 두께가 가장 얇다. 이는 Kim⁽⁶⁾의 이론해석 결과와 잘 일치한다. 그리고 Riu⁽³⁾의 수직평판에 관

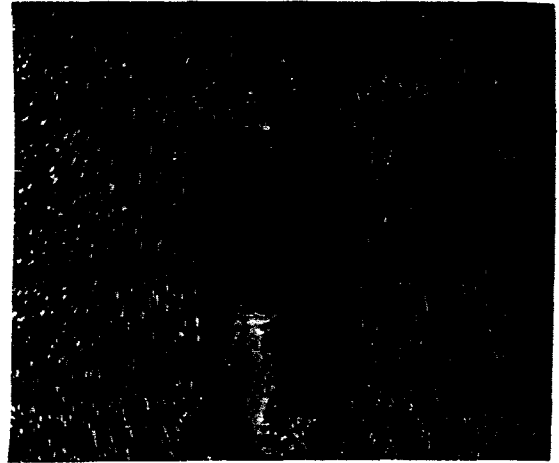


(a)

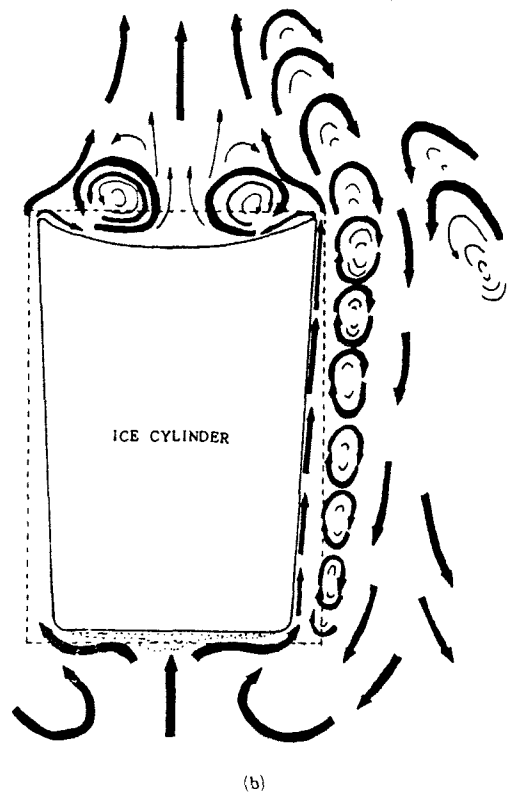


(b)

Fig. 4 Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty}=4.2^{\circ}\text{C}$, 10 seconds exposure time. These photographs were taken at (a) 50 minutes, (b) 70 minutes after the ice cylinder was initially put into the water



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty}=4.6^{\circ}\text{C}$, 10 seconds exposure time. This photograph was taken at 90 minutes after the ice cylinder was initially put into the water and (b) sketch of the flow directions and melting shape

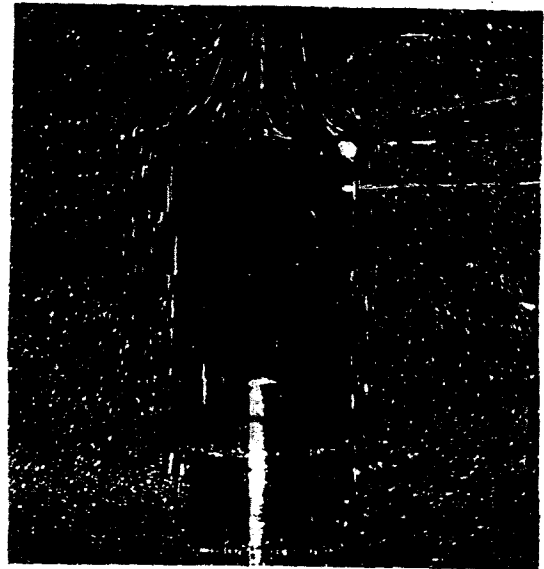
한 실험결과에서는 주위물의 온도가 2.5°C 에서 일어난다고 하였다. 이 정상상태 상향유동 영역에서는 용해율이 전단으로 갈수록 증가하여 얼음 표면의 용해형태는 전단에 가까울수록 많이 용해된 경사면의 형태를 나타낸다.

Fig. 4(a)는 수직 원기둥을 4.2°C 의 순수물 속에 넣은 후 50분이 경과했을 때 촬영한 유동가시화 사진으로써 Fig. 3의 유동형태와 비슷한 성향을 보인다.

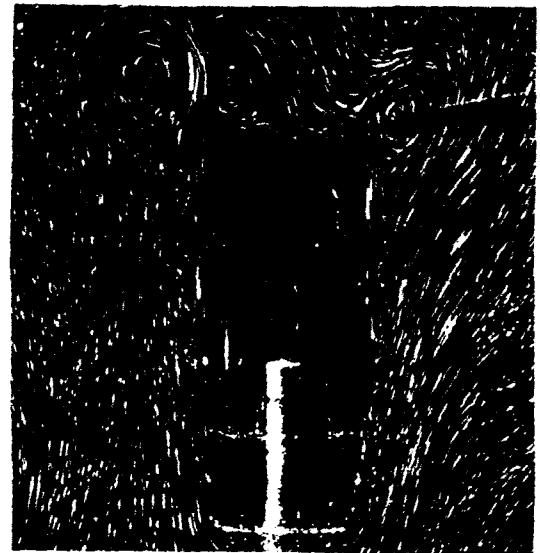
Fig. 4(b)는 수직 원기둥을 4.2°C 의 순수물 속에 넣은 후 70분이 경과했을 때의 가시화 사진으로써 원기둥 수직 벽면 부근의 경계층 유동은 Fig. 3과 동일한 유동형태이나 사진 오른쪽 상부에서는 미약한 하향유동이 일어나고 있다. 이러한 유동현상은 분류와 주위물과의 열교환에 의하여 상승하는 분류가 최대 밀도점 온도에 도달하여 밀도반전이 일어나기 때문이다.

Fig. 5(a)는 시편이 $T_{\infty}=4.6^{\circ}\text{C}$ 인 순수물 속에 잠긴 후 90분이 경과했을 때의 가시화 사진이며, Fig. 5(b)는 용융형태의 개략도이다. 화살표의 길이는 유동방향과 유동속도의 크기를 나타내며 파선은 시편의 초기 형태를 나타낸다. 밀도반전으로 인하여 분류는 하향으로 움직이고, 이러한 하향유동은 시간이 경과함에 따라 시편 벽면쪽으로 옮겨간다. 따라서 수직벽면 주위의 유동은 경계층 내부에서 상향유동이며, 경계층 외부 영역에서는 하향 유동이 된다. 이후 하향유동은 경계층 내부까지 유입되고 경계층 내의 상향유동은 점성력에 의해 하향유동으로 바뀌어지면서 상호 순환이 일어나게 된다. 이러한 유동현상은 분류가 밀도반전에 의하여 수직벽면쪽으로 회전하면서 부력이 점차로 감소하고, 점성력의 영향을 상대적으로 크게 받기 때문이다. 시편 상단면에서는 cup 모양의 홈이 심하게 파여져 cell flow가 발생되나, 이 cell flow는 수직벽면의 경계층 유동에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 이와같은 유동형태는 $4.2^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 4.6^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 걸쳐 나타나며 주위물의 온도가 증가할수록 밀도반전에 의한 하향유동이 경계층 부근으로 점차로 접근하여 Fig. 4(a)와 같이 상향유동이 일어나는 시간을 점점 단축하게 한다.

Fig. 6(a)는 시편이 4.7°C 의 순수 물속에 잠긴 후 40분이 경과했을 때의 가시화 사진을 나타낸다. 40분 이전의 유동형태는 Fig. 3과 동일하며, 수직벽면의 경계층 두께와 분류의 폭만 좁아졌다. Fig.



(a)



(b)

Fig. 6 Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty}=4.7^{\circ}\text{C}$, 15 seconds exposure time. These photographs were taken at (a) 40 minutes, (b) 80 minutes after the ice cylinder was initially put into the water

6(b)는 시편이 4.7°C 의 순수물 속에 잠긴 후 80분이 경과했을 때의 가시화 사진이다. 사진의 상단부에서 vortex가 형성되고 있으며, 이 vortex들은 시편벽면 근처에서의 상향하던 유동이 주위물

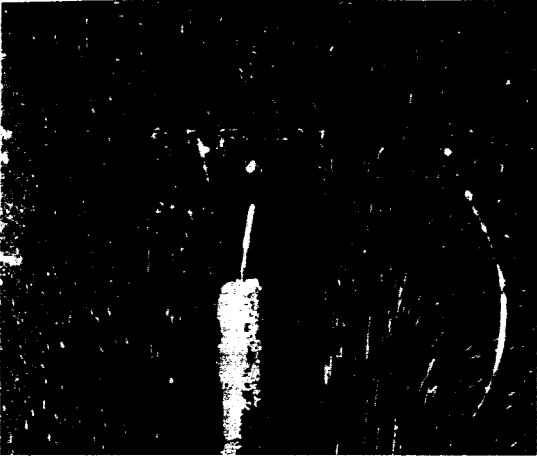


Fig. 7 Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty} = 4.9^{\circ}\text{C}$, 15 seconds exposure time. This photograph was taken at 60 minutes after the ice cylinder was initially put into the water



Fig. 8 Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty} = 5.4^{\circ}\text{C}$, 15 seconds exposure time. This photograph was taken at 65 minutes after the ice cylinder was initially put into the water

해 가열되어 밀도가 커지면서 밀도반전에 의해 하향유동으로 변하고, 이 하향유동은 상승하는 물에 열을 계속 빼앗겨서 밀도가 적어져 다시 상승하면서 발생한다. 이 vortex들의 형태와 위치는 시간이 경과함에 따라 발생, 성장 및 소멸을 되풀이 하는 매우 복잡한 유동형태를 나타낸다. 결국 40분이 후의 유동형태는 비정상상태 유동으로 변화하게 된다. 얼음 시편이 $4.7^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.3^{\circ}\text{C}$ 범위의 순수물 속에서 녹고 있을 때 얼음 시편의 용해형태는 중심선에 평행한 짧고 얇은 골들이 시편 벽면에 형성된다. 그리고 얼음 시편의 상단면에 cup 모양의 홈들이 $2.0^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 4.7^{\circ}\text{C}$ 범위에 걸쳐 연속적으로 형성되어진다.

(2) 비정상상태 유동

Fig. 7은 시편이 4.9°C 의 순수물 속에 잠긴 후 60분이 경과했을 때의 유동을 가시화한 사진이다. 시편의 수직벽면에서는 미약한 상향유동이 일어나고, 후단부에서는 바로 밀도반전이 일어나면서 vortex가 형성되고 있다. 이러한 vortex는 시간이 경과함에 따라 후단부에서 성장, 감소를 하여 전단 쪽으로 하강하면서 소멸되어 불규칙한 유동형태로 변화된다. 이 유동형태는 불안정 상태의 유동이며, 이러한 불규칙 유동은 $4.8^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.3^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 걸쳐 관찰되었다.

(3) 정상상태 dual flow

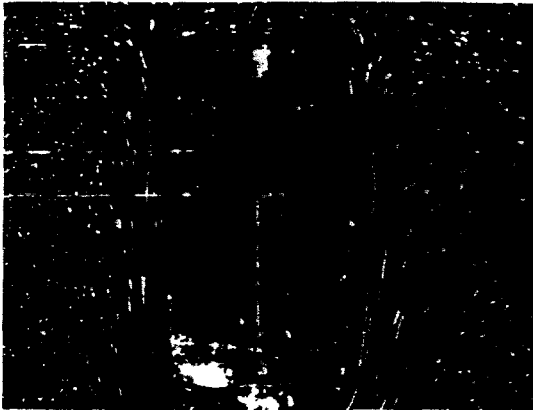
Fig. 8은 시편이 5.4°C 의 순수물 속에 잠긴 후

65분이 경과했을 때의 유동 가시화 사진이다. 수직 벽면에 아주 가까운 곳에서는 미약한 상향 유동이 존재하고 있으나 전경계층 내에서는 하향유동이 지배적이다. 시편 상단부에서는 작은 vortex가 형성되어 있으며, 이 vortex는 시간이 경과하여도 크기와 위치의 변화가 생기지 않는다.

Fig. 9(a)는 시편이 5.7°C 의 순수물 속에 잠긴 후 70분이 경과했을 때 유동을 가시화한 사진이고, Fig. 9(b)는 용해형상을 촬영한 사진이다. Fig. 8에서 나타난 상단 부근에서의 vortex는 거의 소멸되었다. 벽면 가까이에서 야기되어 상향유동하고 있는 물은 경계층 내에서 하강하고 있는 물과의 열교환에 의하여 밀도가 커져 속도가 점점 줄어들어서 하강하는 물에 혼합되어 하향유동을 한다. 이와 같은 상향유동하는 물의 속도가 클 때에는 얼음의 용해가 많이 되고 속도가 작을 때는 용해가 적게 된다. 따라서 용해형상은 시편면에 굴곡을 형성하는 Fig. 9(b)와 같이 된다. 이러한 정상상태 dual flow가 일어나는 주위 물의 온도는 $5.4^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.9^{\circ}\text{C}$ 의 구간이다.

(4) 정상상태 하향유동

Fig. 10은 시편이 6.0°C 의 물 속에 잠긴 후 60분이 경과하였을 때 유동을 가시화한 사진이다. 얼음 원기둥 상부에서 유입된 물이 원기둥 상단벽면 전단에서부터 경계층을 형성하여 대칭 하향유동이 일어나고, 원기둥 하단면의 대칭축 부근에서는 유동



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty}=5.7^{\circ}\text{C}$, 10 seconds exposure time. This photograph was taken at 65 minutes after the ice cylinder was initially put into the water and (b) Melting shape of Fig. 9 (a)

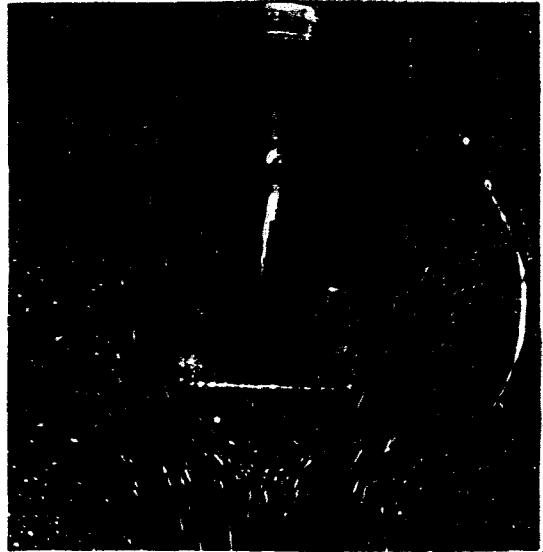


Fig. 10 Flow adjacent to a vertical ice cylinder for $T_{\infty}=6.0^{\circ}\text{C}$, 13 seconds exposure time. This photograph was taken at 60 minutes after the ice cylinder was initially put into the water

이 상호작용하여 분류를 형성하면서 중력방향으로 곧게 내려가고 있다. 또한 벽면 경계층 내의 유적선을 보면 전단에서 후단으로 내려갈수록 유적선의 길이가 길어진다. 그리고 시편의 하단면에는 toroidal vortex가 형성된다. 용해형상은 전단에서 용해율이 가장 크고 후단으로 갈수록 용해량이 적어졌으며, 벽면에는 전혀 굴곡이 관찰되지 않은 매끈한 경사면을 이루었다. 6.0°C 이상의 온도에서는 위와 동일한 형태를 나타냈으며, 온도가 증가할수록 경계층의 두께가 감소되었다.

3.2 열전달 계수와 누셀트수

0°C 의 수직 얼음 원기둥이 물 속에 잠겨있을 때 주위물에 의한 얼음내부로의 열전도는 무시할 수 있다. 따라서 주위물로부터 시편으로의 전열량은 얼음 원기둥을 용해시키는 열량과 같으므로 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$hu \rho_i \left(-\frac{d}{dt} \right) = h_x (T_{\infty} - T_w) \quad (1)$$

국소 누셀트수 Nu_x 는 다음 식으로 정의된다.

$$Nu_x = \frac{h_x X}{K} \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음 식으로

나타낼 수 있다.

$$Nu_x = \frac{h_x X}{K} = \frac{\rho_i h_u \Delta d X}{K \Delta \tau (T_\infty - T_w)} \quad (3)$$

여기서 h_u 는 얼음의 융해잠열로 333.4kJ/kg, ρ_i 는 0°C 얼음의 밀도로서 916.8kg/m³이다. Δd 와 $\Delta \tau$ 는 얼음 원기둥의 초기직경과 실험후의 융해된 직경 사이의 측정거리차와 시편이 물 속에 잠긴 전체시간이다.

실험 결과 얼음의 융해를 m' 를 계산하여 평균 누셀트수를 구하였다.

$$Nu = \frac{hL}{K} = \frac{m' h_u}{WK(T_\infty - T_w)} \quad (4)$$

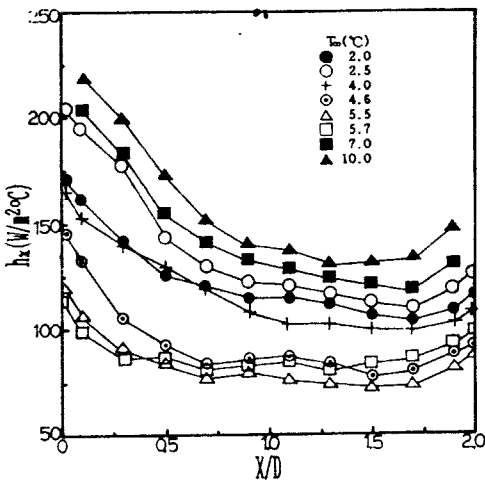


Fig. 11 Local heat transfer coefficient versus dimensionless length for various ambient temperature, T_∞ .

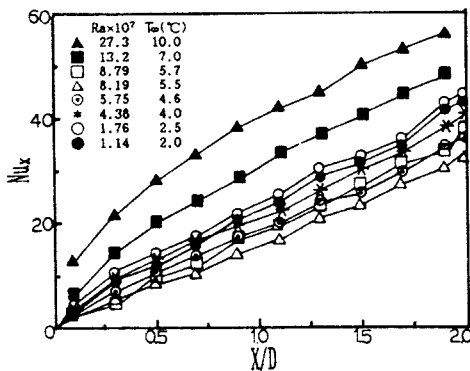


Fig. 12 Local Nusselt number versus dimensionless length for various Rayleigh number

여기서 L 은 시편의 길이로서 200mm이고, h 는 평균 열전달계수, W 는 얼음 원기둥의 표면적이다. 열전도율 K 는 Kukulka⁽⁷⁾의 연구결과를 사용하여 film temperature $T_f = (T_\infty + T_w)/2$ 일 때의 값을 사용하였다.

Fig. 11은 무차원거리에 대한 국소 열전달계수를 주위물의 온도 변화에 따라 나타낸 것이다. 상향유동 영역($2.0^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 4.7^\circ\text{C}$)에서 전체적인 국소열 전달계수는 T_∞ 가 2.5°C 일 때 가장 크게 나타나, 이 온도에서 온도구배가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 $T_\infty = 5.5^\circ\text{C}$ 에서 열전달계수가 가장 작게 나타나기 때문에 이 온도에서 최소 누셀트수가 됨을 알 수 있다(Talbe 1 참조). 그리고 하향유동 영역($6^\circ\text{C} \leq T_\infty$)에서는 T_∞ 가 증가할수록 열전달계수는 점차로 증가한다. 상향유동과 하향유동 모두 국소 열전달계수의 최대치는 전단부분에 존재하며 온도구배가 가장 크게 나타났다. 거리가 증가함에 따라 열전달계수는 점차로 감소하다가 후단부분에서 약간 증가하고 있다. 이는 경계층 내로 유입되는 따뜻한 물에 의하여 전단부분에서는 온도구배가 커져 시편의 열전달량이 가장 많이 일어나기 때문이고, 이 유입된 물은 점차 부력에 의하여 상승되면서 차가워져 온도구배가 작아지므로 열전달량이 점차로 감소된다. 그러나 후단부분에서는 분류형성에 소요되는 물이 후단에서 유출되면서 주위물과의 열교환에 의하여 갑자기 온도구배가 커져 열전달량이 많아지기 때문에 증가한다.

Fig. 12는 무차원거리에 대한 국소 누셀트수의 변화를 나타낸 것이다. 국소누셀트수는 전단에서 후단으로 갈수록 점차적으로 증가한다. 상향유동 영역($2.0^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 4.7^\circ\text{C}$)에서는 레일리수가 1.76×10^7 인 경우 가장 크게 된다. 또한 레일리수가 커질수록 국소 누셀트수는 전체적으로 감소하였고, 레일리수가 8.19×10^7 일 때 가장 낮게 나타남을 알 수 있다. 8.19×10^7 이상에서는 국소 누셀트수는 전체적으로 증가하였다.

Table 1은 주위물의 온도 변화에 따른 최대밀도 매개변수, 레일리수, 열전달계수 및 평균 누셀트수를 나타낸 것이다.

Fig. 13은 Table 1의 최대밀도 매개변수에 대한 평균 누셀트수의 변화를 나타낸 것이다. 본 실험과정에서 상향유동 영역에서는 주위물의 온도가 2.5°C ($R = -0.612$)일 때 최대가 되었으며, 주위물의 온도가 증가할수록 점점 작아지다가 주위물의

Table 1 Density extremum parameter, Rayleigh number, mean heat transfer coefficient and mean Nusselt number at various ambient temperature, T_{∞}

T_{∞} (°C)	R	$Ra \times 10^7$	h (W/m ² °C)	Nu
2.0	-1.015	1.14	128.59	45.18
2.5	-0.612	1.76	134.46	47.23
3.0	-0.343	2.50	134.06	46.99
4.0	-0.007	4.38	118.51	44.30
4.2	0.040	4.82	115.84	42.44
4.3	0.063	5.04	112.66	40.33
4.4	0.084	5.27	115.57	41.34
4.6	0.124	5.75	93.78	34.73
4.7	0.142	6.00	115.48	40.30
4.8	0.160	6.26	99.85	35.84
4.9	0.177	6.52	96.21	34.93
5.0	0.194	6.78	93.56	32.64
5.2	0.225	7.33	91.59	31.95
5.4	0.924	7.90	85.38	29.78
5.5	0.267	8.19	83.54	28.30
5.6	0.280	8.49	85.74	29.90
5.7	0.293	8.79	88.40	30.84
5.8	0.305	9.10	97.05	33.84
5.9	0.317	9.41	97.23	33.90
6.0	0.328	9.73	101.22	35.29
7.0	0.424	13.20	141.79	49.39
10.0	0.597	27.30	198.48	79.19

온도가 5.5°C ($R=0.267$)일 때 최소를 나타내고, 5.5°C 이상의 온도에서는 증가한다. 평균 누셀트수 값은 Kim⁽⁶⁾의 결과와 비교했을 때 오차가 10% 이내로 나타났으며, 최대오차는 $R=-0.007$ 일 때 9.6%이었다. 따라서 본 실험의 결과는 Kim⁽⁶⁾의 결과와 잘 일치하는 것으로 생각된다.

Kim⁽⁶⁾은 상향유동 영역에서 주위물의 온도가 3.0°C 부근에서 최대 누셀트수가 된다고 하였고, Tkachev⁽¹⁾은 주위물의 온도가 5.5°C일 때 최소가 된다고 하였다. 이는 본 실험결과와 잘 일치하였다.

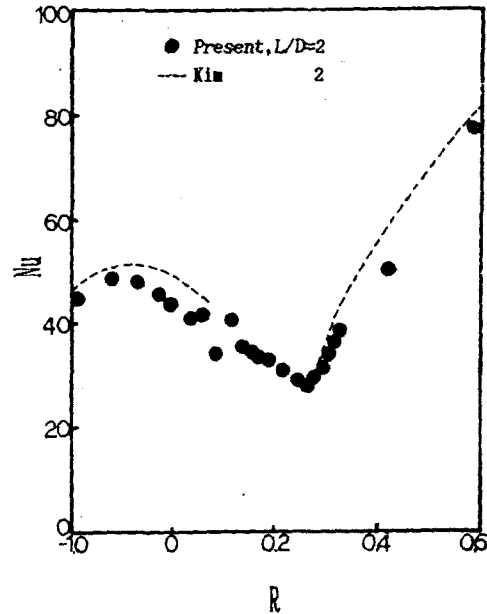


Fig. 13 Mean Nusselt number versus density extremum parameter

4. 결 론

최대밀도점을 포함하는 저온의 순수물 속에 0°C의 등은 수직원기동이 잠겨있을 때 야기되는 자연대류에 대하여 실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유동형태는 주위물의 온도구간에 따라 정상상태 상향유동 ($2.0^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 4.7^{\circ}\text{C}$), 비정상상태 유동 ($4.8^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.3^{\circ}\text{C}$), 정상상태 dual flow ($5.4^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 5.9^{\circ}\text{C}$) 및 정상상태 하향유동 ($6.0^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty}$)으로 나타난다.

(2) 상향유동영역 중 주위물의 온도가 3.0°C 부근에서 유동이 가장 활발하게 일어나고, 주위물의 온도가 4.7°C일 때의 유동형태는 초기에서는 상향유동이나 시간이 지남에 따라 비정상상태 유동으로 변화한다.

(3) 정상상태 dual flow영역에서의 응해형상은 시편면에서 수평 방향의 풀이 형성된다.

(4) 상향유동 영역에서 주위물의 온도가 2.5°C일 때 최대 누셀트수가 나타나고, 최소 누셀트수는 정상상태 dual flow영역인 5.5°C에서 나타난다. 5.5°C 이상에서는 온도의 증가에 따라 누셀트수가 증가한다.

참고 문헌

- (1) Tkachev, A.G., 1953, "Heat Exchange in Melting and Freezing of Ice," AEC-TR-3405 Translated from a Publication of the State Power Press Moscow Leingrad, pp.169~178.
- (2) Wang, T., 1982, "An Experimental Study of Melting Vertical Ice Cylinder in Cold Water," Master Thesis, State Univ. of New York at Buffalo.
- (3) Riu, K.J. and Kim, B.H., 1983, "Numerical Analysis of Natural Convection from a Vertical Ice Circular Cylinder in Pure Water," Trans. of the Korea Society of Mechanical Engineering, Vol.7, pp.483~488.
- (4) Nagendra, H.R., Tirunarayanan, M.A., Ramachanran., 1969, "Free Convection Heat Transfer from Vertical Cylinders and Wires," Chem.Eng. Science., pp.1491~1495.
- (5) 유갑종, 엄용균, 이성진, 1991, "저온의 순수 물 속에 잠겨있는 등온수직원기둥에 의한 자연대류 열전달에 중황비가 미치는 영향", 대한기계학회논문집, 제15권, 제2호, pp.677~684.
- (6) Kim, B.H., 1987, "Natural Convection from a Horizontal Flat Ice Surface Immersed in Water near It's Density Extremum," Doctor Thesis, Kyungpook Univ.
- (7) Kukulka, D.J., 1981, "Thermodynamic and Transport Properties of Pure and Saline Water," Master thesis, State Univ., New York.