

〈論 文〉

# 수평으로부터 약간 경사진 등온면이 저온의 순수물 속에 잠겨있을때 일어나는 자연대류 열전달

유 갑 종\*·엄 용 균\*\*

(1991년 2월 6일 접수)

## Natural Convective Heat Transfer Adjacent to Slightly Inclined Isothermal Surface Immersed in Cold Pure Water

Kap Jong Riu and Yong Kyoon Eum

**Key Words:** Limited Angle of Inclination(한계 경사각), Transition Region(전이 영역), Stagnation Region(정체 영역), Downflow(하향 유동), Dual Flow(두방향 유동), Upflow(상향유동)

### Abstract

For the 0°C isothermal inclined plate immersed in cold pure water, natural convection flow is studied numerically and experimentally at various angles of inclination. As a plate surface facing upward is inclined approaching to the horizontal, the flow patterns of the inclined-surface change to the transition region. This transition are found to arise at different inclined angles for each ambient water temperatures. The limit angle of inclination is suggested which predicts the ending of the inclined-surface flow patterns at each ambient water temperature.

———— 기 호 설 명 —————  $\rho$  : 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  : 정압 비열 (J/kg·°C)

$K$  : 열 전도율 (W/m·°C)

$L$  : 시편의 길이 (m)

$Nu$  : 누셀트 수

$P$  : 압력 (kg/m<sup>2</sup>)

$T$  : 온도 (°C)

$T_f$  : 평균온도  $\{(T_o + T_\infty)/2\}$

$U$  : X방향의 속도성분 (cm/s)

$V$  : Y방향의 속도성분 (cm/s)

$X$  : 시편 길이방향의 거리

$Y$  : 시편에 수직인 방향의 거리

$\epsilon$  : 수렴한 계치

$\theta$  : 시편의 경사각

하 첨 자

$m$  : 최대밀도점

$o$  : 시편면

$\infty$  : 주위물

### 1. 서 론

유체속의 전열면에 의해 일어나는 자연대류 현상은 자연현상뿐만 아니라 공업에서도 많이 응용되고 있다. 특히 전열면 주위의 유체가 저온의 물 일때는 최대밀도점의 영향으로 상온인 경우보다 더욱 복잡한 자연대류 현상을 나타낸다. 따라서 냉동및 제빙공업등에서는 이러한 현상에 대한 확실한 구멍이 필수요건이다. 최대밀도점의 영향에 대한 기존

\* 정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정회원, 안동대학교 자연대학 기계공학과

의 많은 연구중에서도 전열면을 등온면으로 설정할 경우, 가장 이상적인 등온면으로서 0°C 얼음을 택하고 있다. 이에 대한 초기의 연구들은 수치해석<sup>(1)</sup>이나 실험결과<sup>(2)</sup>가 매우 한정적인 것이었다. 이후 Carey와 Gebhart<sup>(3)</sup>는 순수 물속에 수직 얼음평판이 놓여 있을 때 일어나는 자연대류의 전 유동장을 가시화하여, 유적으로부터 유속을 계산하고 얼음의 용해면으로부터 국소 뉴셀트수를 계산하였다. 그 결과 주위물의 온도변화에 따라 4가지 유동형태가 존재함을 밝혔다. 경사면에 대한 연구로서 Riu<sup>(4)</sup>가 1.0°C ≤ T<sub>∞</sub> ≤ 15.0°C의 순수 물속에 잠겨있는 수직에서부터 60°까지의 경사진 얼음평면에 의하여 야기되는 유동과 열전달현상을 실험과 수치해석으로 연구하였다. 그는 T<sub>∞</sub> ≤ 4.6°C일 때 완전 상향유동이고 5.7°C ≤ T<sub>∞</sub> < 6.0°C (6.15°C)일 때는 두 방향 유동, T<sub>∞</sub> ≥ 6.0°C (6.15°C)일 때 완전하향유동, 4.6°C ≤ T<sub>∞</sub> ≤ 5.7°C일 때는 수치해를 구하지 못하였으며, 또한 실험결과로부터 4.4°C ≤ T<sub>∞</sub> < 5.0°C에서는 시간 의존성 유동형태가 존재함을 밝혔다. 상향수평면에 대한 Kim의 연구결과<sup>(5)</sup>에서는 정상상태 대칭 유동과 비정상상태 3차원 유동이 존재하며, T<sub>∞</sub> ≥ 7.0°C에서는 유동은 없고 전도에 의해서만 열전달이 일어남을 밝혔다. 이외에도 순수 물속에 잠겨있는 등온물체에 대한 연구가 다수 있으나 주로 수직<sup>(1,2,3)</sup>, 수평형태<sup>(5)</sup>가 대부분이고, 0°C의 경사 등온면인 경우는 경사각을 수직에서부터 60°까지 변화시켜 연구를 수행한 바 있다.

그러나 경사각을 증가시켜 수평에 가까와지는 어느 경사각에서는 경사면에 의한 유동형태가 수평면에 의한 유동형태로 변화되는 복잡한 유동현상, 즉 천이영역이 존재할 것으로 예측된다.

본 연구는 이러한 천이유동의 존재를 밝히고 천이영역과 경사각의 관계, 유동 및 열전달특성을 구명하고자 한다. 이를 위해 유한차분방법(FDM)으로 수치해석하고 실험결과와 비교, 검토하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 좌표계와 지배방정식

이론해석을 위한 등온 경사면의 좌표계를 Fig. 1과 같이 설정하였다. U와 V는 X방향과 Y방향의 속도성분을, g는 중력가속도를 각각 나타낸다. 유동은 2차원 정상유동이라 가정하고, Boussinesq가정을 적용하여 유동함수(stream function)  $\Psi$ 와 와

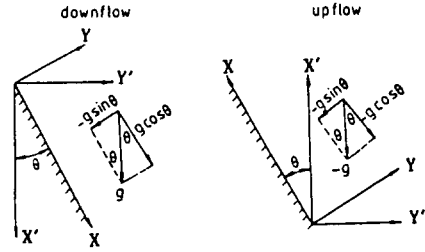


Fig. 1 Coordinate system

도(vorticity)  $\omega$ 를 도입한 지배방정식은 다음과 같다.

(1) 연속방정식

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} \right) + \omega = 0 \quad (1)$$

(2) 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} \left( \omega \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left( \omega \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) - \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial Y^2} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{U^2 + V^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{U^2 + V^2}{2} \right) \\ \pm g \cos \theta \frac{\partial \rho}{\partial Y} + g \sin \theta \frac{\partial \rho}{\partial X} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} \left( T \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left( T \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right) \\ - \frac{K}{C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 운동량 방정식중 체적력항(body force term)  $\pm g \cos \theta \cdot \partial \rho / \partial Y$ 는 상향유동이 지배적일 때 음의 부호, 하향유동이 지배적일 때 양의 부호가 적용된다. 또한 유동함수  $\Psi$ 와 와도  $\omega$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\rho U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad \rho V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X} \quad (4)$$

$$\Psi = \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y} \quad (5)$$

(4) 물의 밀도식

물의 밀도식은 Gebhart등<sup>(6)</sup>의 연구결과인 식(6)을 사용하였다.

$$\rho(T) = \rho_m [1 - \alpha |T - T_m|^q] \quad (6)$$

여기서 표준대기압에서  $\rho_m = 999.9720 \text{ kg/m}^3$ ,  $T_m = 4.02932^\circ\text{C}$ , 계수  $\alpha = 9.297173 \times 10^{-6} (\text{C})^{-q}$ ,  $q = 1.894816$ 이다.

### 2.2 경계 조건

수치해석시 적용되는 경계조건을 요약하여 도시

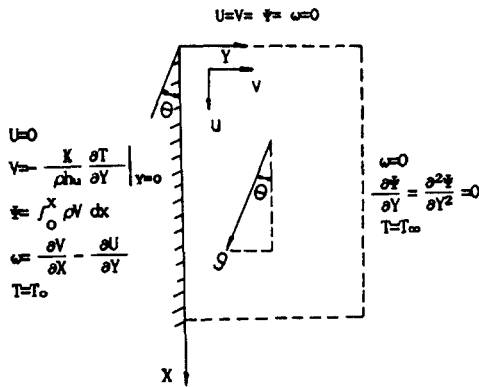


Fig. 2 Boundary condition

하면 Fig. 2와 같다. 또한 시편의 후단인  $X=L$ 에서는 인접한 내부로부터 외압법을 이용하여 구하였다. 여기서, 고체벽면의 온도  $T_0$ 는  $0^\circ\text{C}$ 이며, 주위 물의 온도  $T_\infty$ 는 고체면에서 멀리 떨어진 정지된 물의 온도이다. 또한  $h_u$ 는 단위질량당 얼음의 융해열이다.

### 2.3 계산 과정

지배방정식의 해를 구하기 위하여 Gosman등<sup>(7)</sup>의 방법을 적용한 유한 차분방정식을 만들어 수치 계산 하였다. 계산에 사용된 격자는 충분한 절점수로  $x \times y = 20 \times 40$ 을 택하였으며, 전단(leading edge) 및 벽면부근을 좀더 자세히 해석하고자 조밀한 격자를 사용하였다. 계산과정중 수렴조건을

개선하기 위하여 SUR(Successive Under Relaxation)방법을 적용 하였으며, 반복계산 과정중 변수  $\phi$ 에 대한 수렴조건은  $\max|\phi^N - \phi^{N-1}| \leq \epsilon$ 으로서  $N$ 는 반복횟수를 나타내고, 수렴한계치  $\epsilon$ 은  $10^{-4}$ 으로 하였다. 그리고 얼음벽면에서 국소 누셀트수 ( $Nu_x$ ), 평균 누셀트수 ( $Nu$ ), 국소 열전달계수 ( $h_x$ ), 평균 열전달계수 ( $h$ )등은 다음과 같이 각각 정의하였다.

$$h_x = -\frac{K}{T_0 - T_\infty} \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (9)$$

$$h = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (10)$$

$$Nu_x = \frac{h_x X}{K} = -\frac{X}{T_0 - T_\infty} \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (11)$$

$$Nu = \frac{hL}{K} \quad (12)$$

여기서  $L$ 은 본 실험실에서 사용되는 실험용 시편의 길이와 같이 23.2cm로 하였으며, 그 밖의 물 성치는 Kukulka<sup>(8)</sup>의 연구결과를 이용하였다.

계산영역은  $1.0^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 15.0^\circ\text{C}$ 이며, 각각의 온도에서 경사면의 유동과 열전달현상을 고찰하기 위하여 경사각을  $60^\circ$ 로부터  $1^\circ$  혹은  $2^\circ$ 씩 증가시켜 수렴가능한 경사각까지 계산하였다.

### 2.4 이론해석의 결과 및 고찰

이론해석의 결과에서 유동형태는 종전의 연구결과<sup>(4)</sup>와 같이 세 영역, 즉 하향유동( $6.0^\circ\text{C} < T_\infty$ ), 두방향 유동( $5.7^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 6.0^\circ\text{C}$ ) 그리고 상향유동( $1.0^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 4.3^\circ\text{C}$ )영역으로 나타났다. Fig. 3은

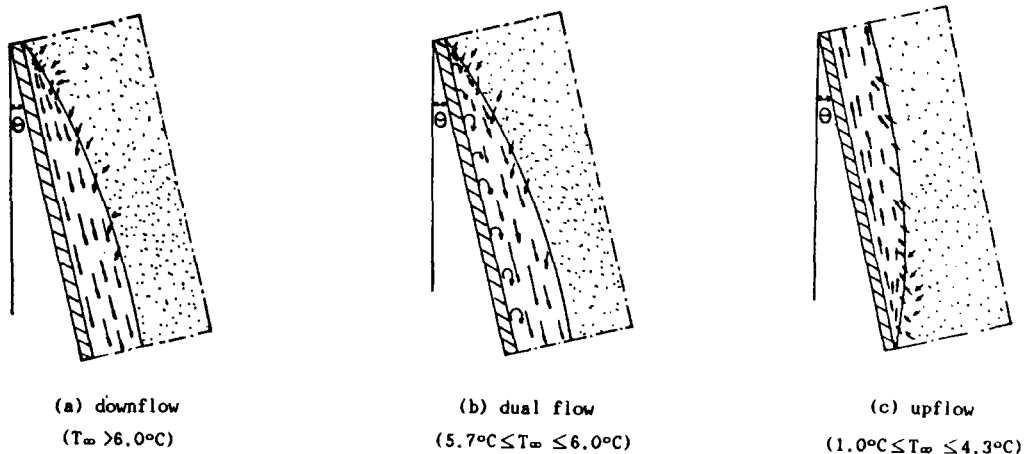
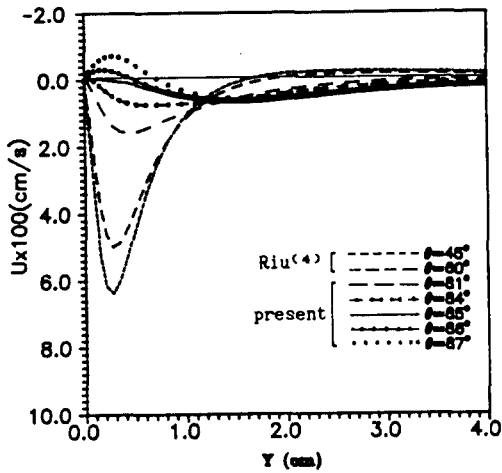


Fig. 3 General flow pattern of inclined surface for each flow region

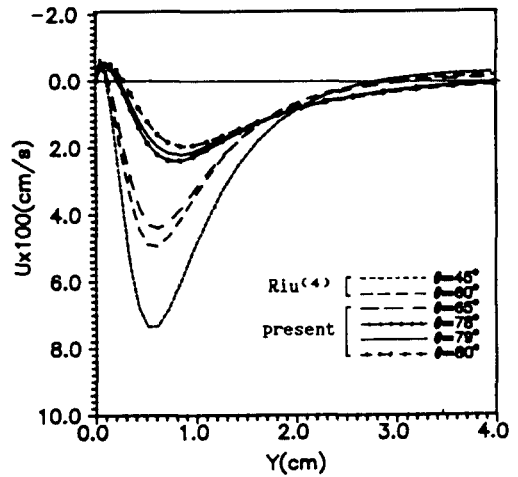
경사면에 의한 세 유동영역의 일반적인 유동특성을 도시한 것이다. 이러한 결과중에서 각 유동형태를 대표하는 온도를 하나씩 선택하여 이들 온도에서의  $U$  및  $V$  속도분포를 Fig. 4, 5, 6, 7에 제시하였다. 이 속도분포들은 각 경사면의 전단으로부터  $X=9.5(\text{mm})$  [Fig. 7에서는  $X=183.8(\text{mm})$ ]인 거리에서의 결과치이다. 또한 각 온도에서 경사각 증가에 따른 유동현상을 조사하기 위해 Riu<sup>(4)</sup>의 결과를 함

게 제시하였다.

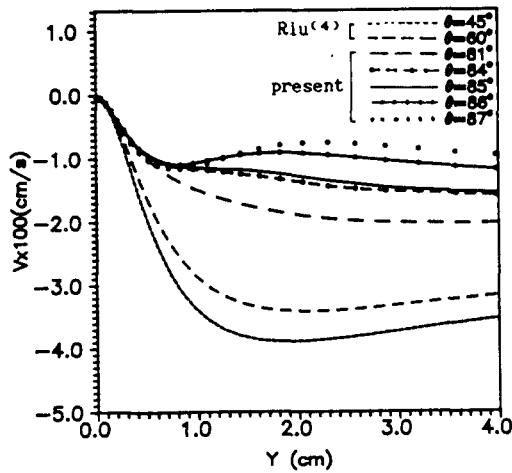
Fig. 4는 하향유동 영역중  $T_\infty=7.0^\circ\text{C}$ 일때의 결과이다. 경사각  $84^\circ$ 까지는 경사각 증가에 따라  $U, V$  속도가 전반적으로 같은 성향으로 감소하고 있다. 경사각이 증가할 수록 속도가 감소하는 이유는 기울기는 각도만큼 밀도변화에 의한 체적력(body force)이 감소하기 때문이다. 이러한 결과로 경사각  $84^\circ$ 에서는 전체적으로 큰 감소를 나타내며,  $U$



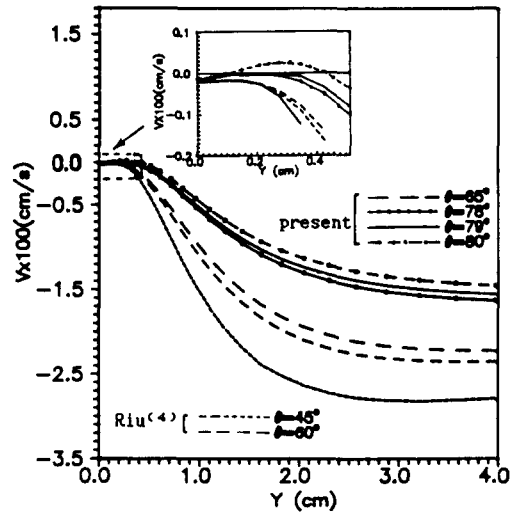
(a) U-velocity profiles



(a) U-velocity profiles



(b) V-velocity profiles



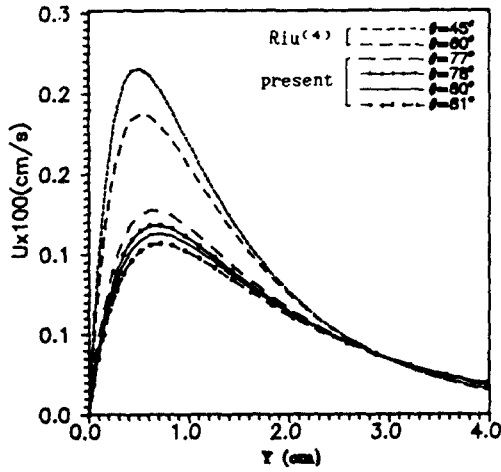
(b) V-velocity profiles

Fig. 4 Velocity profiles with the different inclined angles at  $X=9.5(\text{mm})$  for  $T_\infty=7.0^\circ\text{C}$

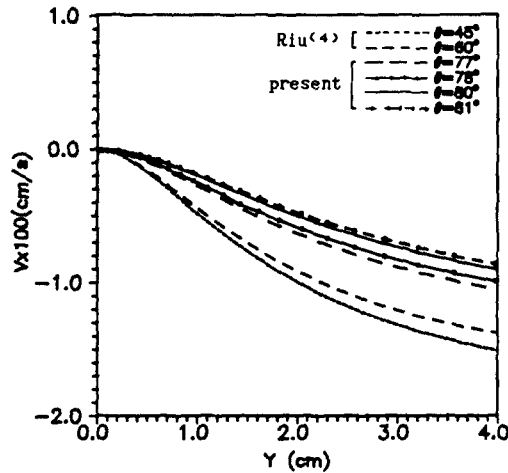
Fig. 5 Velocity profiles with the different inclined angles at  $X=9.5(\text{mm})$  for  $T_\infty=5.8^\circ\text{C}$

및  $V$ 의 최고치가 0.1mm/sec와 0.16mm/sec정도이다. 또한 85°에서 벽면부근의 속도  $U$ 는 정지상태가 된다. 경사각을 더욱 증가시켜 86°, 87°에 이르면 속도분포에서 큰 변화를 볼 수 있다.  $U$ 속도분포를 보면 상향과 하향유동이 동시에 일어나고 있다. 이와같은 현상은 다음과 같은 원인으로 사료된다. 0°C 등온면에서부터 주위물의 온도가 1.0°C까지 되는 유체층의 밀도는 그 층의 외부유체보다 작다. 따라서 이 층에서는 항상 위로 향하는 부력이

존재하지만, 하향하는 바깥층의 강한 영향력 때문에 상향유동이 존재하지 않는다. 그러나 경사각이 증가하면 체적력이 감소하고 이로인하여 하향유동을 주도하는 바깥층의 세력이 약해져서 경사각 85°일때와 같이 벽면 근처에서의 유동은 거의 정지상태가 된다. 이러한 상태에서 경사각이 증가하면 이 층의 부력이 바깥층의 체적력보다 크게 되어서 상향유동이 일어나게 된다.  $V$ 속도분포도 증가와 감소를 반복하여 85°일때 보다 크게 다른 형상을 나

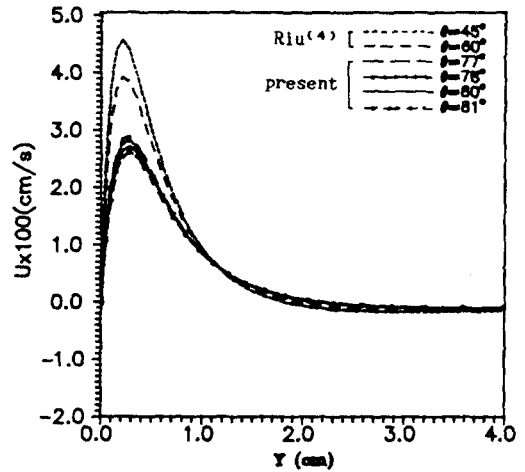


(a) U-velocity profiles

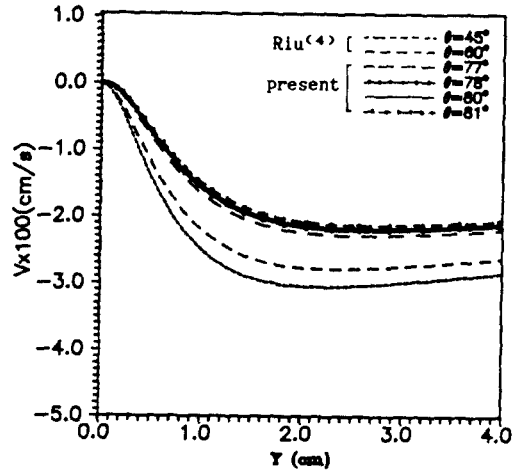


(b) V-velocity profiles

Fig. 6 Velocity profiles with the different inclined angles at  $X=9.5(\text{mm})$  for  $T_\infty=3.0^\circ\text{C}$



(a) U-velocity profiles



(b) V-velocity profiles

Fig. 7 Velocity profiles with the different inclined angles at  $X=183.9(\text{mm})$  for  $T_\infty=3.0^\circ\text{C}$

타내고 있다. 따라서 경사각  $86^\circ$  이상에서는 경사면에 의한 유동형태와 다른 유동형태가 존재하는 것을 볼 수 있다. 이 온도에서 경사면의 지배방정식과 경계조건으로써 경사각  $87^\circ$  이상에서는 수렴치를 구할 수 없었다. 또한 하향 유동영역( $T_\infty \geq 6.15^\circ\text{C}$ )의 이론해석 결과에서도, 수렴치가 존재하는 경사각은 각 온도마다 조금씩 다르지만, Fig. 4와 같은 성향을 나타내었다.

Fig. 5는 두방향 유동영역중  $T_\infty = 5.8^\circ\text{C}$  일때의 이론해석 결과이다. Fig. 5(a)에 나타난  $U$  속도분포는 경사각이 증가할수록 벽면부근에서의 상향유동영역은 커지고 벽면바깥에서 발생하는 하향유동의 속도분포는 감소하고 있다. Fig. 5(b)의  $V$  속도분포에서는 경사각이 증가할수록 속도가 감소하고, 경사각  $80^\circ$ 에서 벽면부근에 역방향의 속도가 존재한다. 이러한 역방향의 속도분포는 두 방향 유동영역( $5.6^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 6.0^\circ\text{C}$ )에서만 볼 수 있는 현상으로 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 하향유동이 지배적인 경계층내에서 벽면부근에 흐름의 반전이 형성되는 일반적인 두방향의 유동형태와는 다른 특성이다. 이와 같은 현상은  $T_\infty = 5.7, 5.9, 6.0^\circ\text{C}$ 에서도 같은 결과를 얻었다.

Fig. 6, 7은 상향유동 영역의 결과중  $T_\infty = 3.0^\circ\text{C}$  일

때의 속도분포를 나타내고 있다. 수렴치는 경사각  $81^\circ$ 까지이다. Fig. 6은 전단부근에서, Fig. 7은 후단부근에서의 결과치이다. 두 그림에서 나타난 바와 같이 경사각이 증가할수록  $U$  및  $V$  속도분포는 감소하고 있다. 이러한 경향은 앞서 제시된  $T_\infty = 7.0, 5.8^\circ\text{C}$  일때와 같은 현상이다. 그러나 Fig. 6, 7에 나타난 바와 같이  $T_\infty = 3.0^\circ\text{C}$ 에서는  $T_\infty = 7.0, 5.8^\circ\text{C}$  일때와 같이 수렴 경사각에서 나타나는  $U$  및  $V$  속도분포의 상이한 변화형태를 양단 어느 곳에서나 볼 수 없다. 이와 같은 현상은 유동형태를 변화시키는 주된 요인이 plume의 거동에 의해 결정되기 때문이며, 경사각  $81^\circ$  이상에서는 천이가 발생한다는 것을 실험결과에서 알 수 있었다. 이론해석에서 각 온도마다 수렴 경사각은 다르지만  $1.0^\circ\text{C} \leq T_\infty \leq 4.6^\circ\text{C}$ 에서도 Fig. 6, 7과 같은 현상의 결과를 얻었다.

Fig. 8은 유선 형태를 대표적으로 제시한 것으로 계산 결과중  $T_\infty = 7.0^\circ\text{C}$  일때이다. 경사각  $87^\circ$  일때 전단부근에서 비록 적은 값이기는 하지만 상이한 형태를 볼 수 있다. 이러한 유동형태는 경사각이 증가할수록 더욱 복잡해져  $87^\circ$  이상의 경사면에서는 경사면의 유동장과 상이한 유동형태가 존재할 것으로 예측할 수 있다.

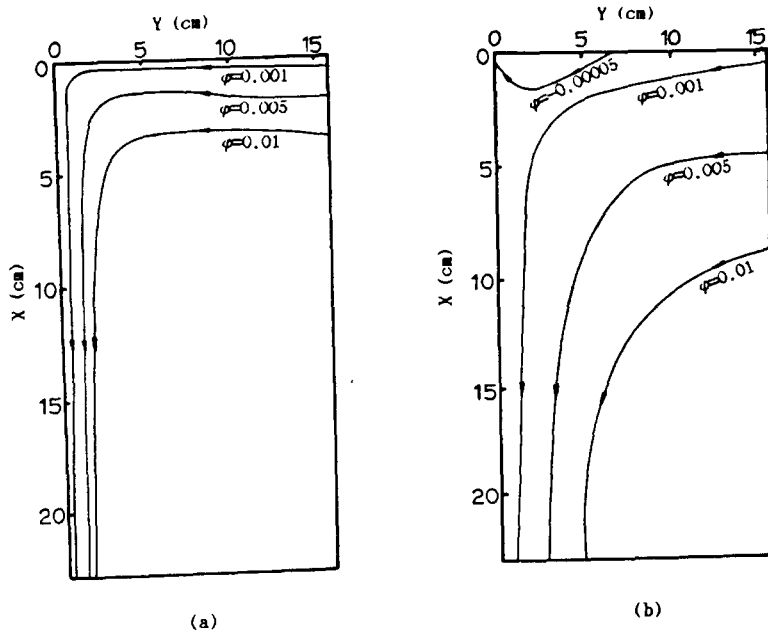


Fig. 8 Streamlines for  $T_\infty = 7.0^\circ\text{C}$  : (a)  $\theta = 60^\circ$  (b)  $\theta = 87^\circ$

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치 및 방법

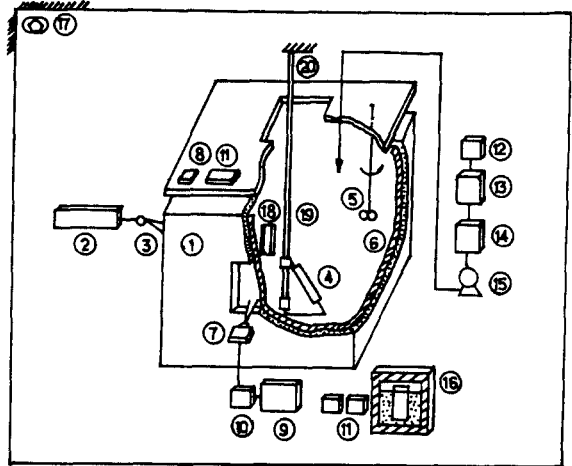
Fig. 9는 실험장치의 개략도이다. 탱크내의 물은 증류수로서 0.05℃까지 정밀 보정된 온도계를 이용하여 실험에 필요한 주위물 온도로 유지시켰다. 탱크내 유체의 적절한 항온 유지를 위해 단열시킨 탱크 주위의 실험실을 냉방실이 되게 보완 하였다. 또한 시편이 탱크내에 주입될 때 외부유동을 최소화 하기 위하여 4개의 슬라이딩 베어링이 부착된 수직봉을 탱크내 설치하였으며, 시편은 이 베어링대에 고정하여 D.C 모터로써 투입시켰다. 유동의 가시화를 위하여 비중 1.026, 지름 40 $\mu$ m인 pliolite입자 0.9g를 넣었으며, 시편의 경사각은 레이저 비임을 이용하여 정밀하게 조정하였다. 가시화를 위한 촬영은 시편을 투입시킬 때 일어나는 미세한 외부 유동이 정체될 때까지 20~30분을 기다린 후 시작하였다. 촬영장치는 microprocessor에 의해 사진의 노출시간, 연속 촬영수, 각 컷사이의 시간들이 조정되도록 하였다. 이와같은 방법들은 이미 좋은 연구결과를 얻은 바 있는 Carey<sup>(3)</sup> 및 Riu<sup>(4)</sup>의 연구방법을 이용한 것이다.

#### 3.2 실험결과 및 고찰

실험을 행한 주위물의 온도범위는 2.0℃에서 1℃씩 혹은 0.1℃씩 변화시켜 15.0℃까지 하였다. 얼음평면의 경사각은 60°로부터 증가시켜 수평으로 접근하고, 각 온도에서 천이발생이 예상되는 경사각에서는 1°씩 변화 시켰다.

실험결과 모든 온도에서의 유동형태는 3가지 유형으로 나타났으며, Fig. 10, 11, 12는 각 유형을 대표하는 온도를 하나씩 제시한 것이다. 사진에서 시편 주위의 하얀 점들은 가시화 입자들의 정지상태를 나타내며, 시편부근의 짧은 하얀 선들은 그 지점에서 유체가 8초 동안 이동한 궤적이 된다. 짧은 하얀선 밑에 길게 나타난 선은 얼음면과 주위 유체와의 경계선이 되며, 그 인접한 검은 부분은 얼음면이 된다.

Fig. 10은 주위물의 온도  $T_{\infty}=7.0^{\circ}\text{C}$ 일때의 가시화 사진이다. Fig. 10(a)는 경사각  $\theta=85^{\circ}$ 일때, Fig.10(b)는  $\theta=87^{\circ}$ 일때의 경우이다.  $T_{\infty}=7.0^{\circ}\text{C}$ 일때 0℃등온 경사면에 의한 유동형태는 완전 하향유동영역( $T_{\infty}\geq 6.15^{\circ}\text{C}$ )에 속한다<sup>(4)</sup>. Fig.10(a)에서 얼



- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| ① Main tank        | ⑪ Recorder          |
| ② Laser system     | ⑫ Distiller         |
| ③ Cylindrical lens | ⑬ Water tank        |
| ④ Specimen         | ⑭ Chiller           |
| ⑤ Agitator         | ⑮ Pump              |
| ⑥ Thermocouple     | ⑯ Const. temp. bath |
| ⑦ Camera           | ⑰ Room cooling      |
| ⑧ Ice box          | ⑱ Thermometer       |
| ⑨ Microprocessor   | ⑲ Specimen guider   |
| ⑩ Solenoid         | ⑳ D.C moter         |

Fig. 9 Outline of experimental apparatus

음면 앞의 유동형태는 경계층을 형성하면서 완전 하향유동이 된다. 또한 전단에서 10mm까지는 정체영역이 형성되고 있다. 앞서 제시된 이론해석과 비교해 보면 이 지점에서  $U$  및  $V$ 의 최고치가 0.1 mm/s, 0.16mm/s이하였다. 실험에서 노출시간이 8 sec이므로 유체의 이동을 나타내는 궤적의 길이는 1mm이하가 되어 사진에서는 정체점으로 보인다. 이와 같은 유동특성은 이론해석과 잘 일치하는 층류 경계층 유동형태이다. Fig. 10(b)에서 유동형태를 보면 전단으로부터 약 70mm되는 지점에서 정체영역이 형성되고 있다. 이 정체영역을 중심으로 시편면의 하부에서 하향유동, 상부에서는 미약한 상향유동이 형성된다. 이러한 유동형태는 Fig. 10(a)와 다른 유동특성을 나타내며, 또한 Kim<sup>(5)</sup>의 연구결과에서 밝혀진 수평면의 유동형태와도 다른 특성을 나타내고 있다. 따라서 이 경사각에서는 수평면에 의한 유동형태로 변화하는 천이형태가 됨

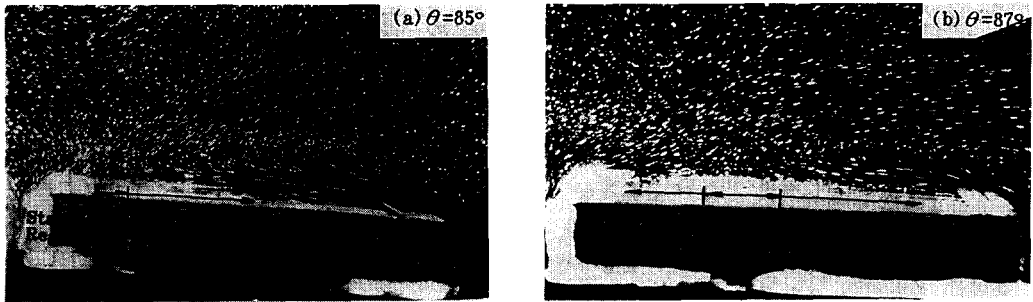


Fig. 10 Flow adjacent to an inclined ice slab for  $T_{\infty}=7.0^{\circ}\text{C}$ , exposure time 8 sec

을 볼 수 있다. 또한 이론해석 결과에서 수렴치는  $87^{\circ}$ 까지 구할 수 있었으나, 이미 고찰된 바와 같이  $87^{\circ}$ 에서는 상이한 유동형태가 나타났으므로 실험결과와 같이 천이영역으로 보는 것이 타당하리라 사료된다. 실험결과중 여기에 제시되지 않은  $T_{\infty}=6.5, 10.0, 15.0(^{\circ}\text{C})$ 에서도 천이영역이 존재하였고, 천이가 시작되는 경사각은 각각  $86^{\circ}, 88^{\circ}, 88^{\circ}$ 이었다.

Fig. 11은 주위물의 온도가  $5.8^{\circ}\text{C}$ 이고 (a)는  $\theta=79^{\circ}$ , (b)는  $\theta=81^{\circ}$ 일때 가시화 사진이다. Fig. 11(a)에서 유동형태를 보면 시편면에 인접한 부근에서 상향하던 입자가 바깥쪽으로 돌아서 하향하는, 즉 전형적인 두방향 유동형태이다. Fig. 11(b)에서의 유동형태는 전단으로부터 약 50mm되는 지점에서 정체영역이 형성된다. 이 정체점을 중심으로 시편면의 하부에서는 두방향 유동이 존재하고, 상부에서는 상향유동이 발생하여 시편상단의 바깥쪽으로 흐르고 있다. 이미 Fig. 10(b)에서 고찰한 바와 같이, 이 온도에서도 수평면에 의한 유동형태로 변화하는 천이영역이 존재함을 볼 수 있다.  $T_{\infty}=5.7, 5.9, 6.0(^{\circ}\text{C})$ 일때의 실험결과에서도

경사각  $67^{\circ}, 83^{\circ}, 83^{\circ}$ 에서 Fig. 11(b)와 같은 유동현상이 존재함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 12는 주위물의 온도가  $3.0^{\circ}\text{C}$ 이고 (a)는  $\theta=79^{\circ}$ , (b)는  $\theta=81^{\circ}$ 일때의 가시화 사진이다.  $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ 는 경사 등온면이  $0^{\circ}\text{C}$ 일때 유동형태가 완전 상향유동으로 형성되는 온도구간( $T_{\infty}\leq 4.6^{\circ}\text{C}$ )에 속한다<sup>(4)</sup>. Fig. 12(a)의 유동특성을 살펴보면 얼음면 앞의 유동은 완전 상향 유동이 되어 등온평면인 얼음을 지나서 상승 plume이 형성된다. 이러한 유동형태는 앞서 제시된 Fig. 10(a), 11(a)와 같이 경사면의 유동형태로서 이론해석에서 해가 존재하는 영역의 유동특성과 잘 일치한다. Fig. 12(b)에서의 유동형태는 시편하단으로부터 유체가 유입되어 상단으로 흐르는 주류가 형성되고, 시편의 상단부근에서 시편 안쪽으로 유입하는 유체가 이 주류와 합류한다. 합류한 유체는 얼음면내에서 상승 plume을 형성한다. 이 상승 plume으로 인하여 경사면의 유동형태와 다른 특성을 나타낸다. 또한 이 상향 유동영역에서는 유동형태의 변화과정에서 두 방향 및 하향 유동영역과는 또다른 특징을 나타낸다. 먼저 제시된 두 유동영역에서는 경사각이 증가할때



Fig. 11 Flow adjacent to an inclined ice slab for  $T_{\infty}=5.8^{\circ}\text{C}$ , exposure time 8 sec





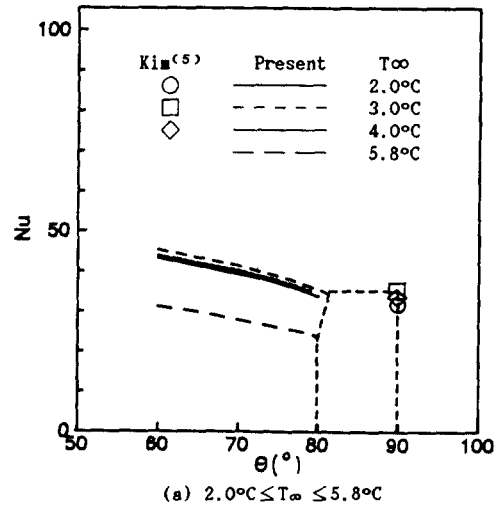
Fig. 12 Flow adjacent to an inclined ice slab for  $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ , exposure time 8 sec

경계층내에서의 체적력이나 부력의 감소로 정체영역이 형성되면서 점진적으로 경사면의 유동형태가 천이영역으로 되었다. 그러나  $T_{\infty}=3.0^{\circ}\text{C}$ 에서는 Fig. 12와 같이 경사각 증가로 인한 정체영역은 발생하지 않고, 상승 plume이 얼음면내에 유입되는 어떤 경사각에서 갑자기 천이영역이 되는 단절의 형태를 이룬다. 따라서 이론해석의 결과인 Fig. 6, 7에 나타난 유동특성과 잘 일치하고 있다. 이러한 현상은 제시되지 않은 상향유동 온도구간( $T_{\infty}\leq 4.6^{\circ}\text{C}$ )에서의 실험결과에서도 같은 양상을 보였다.

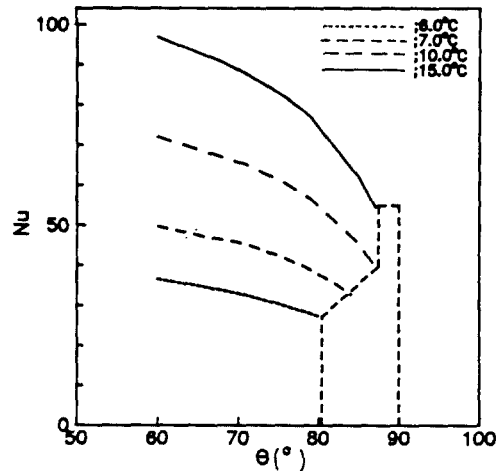
실험결과에서 나타난 바와 같이 경사면의 경사각을 증가시켜 갈때 각 온도마다 경사면의 유동형태가 수평면의 유동형태로 변화되는 과정에서 천이영역이 존재하고, 천이영역이 발생하기 전에 경사면의 유동특성이 유지되는 한계 경사각이 존재함을 알 수 있다. 실험결과에서 천이가 발생하는 경사각이 이론해석의 결과와 1°정도 차이가 나타나고 있다. 이러한 현상은 실험할 때 시편의 선단효과

Table 1 The limited inclined-angle of an inclined ice-surface for various  $T_{\infty}$

$T_{\infty}(^{\circ}\text{C})$	$\theta(^{\circ})$	$T_{\infty}(^{\circ}\text{C})$	$\theta(^{\circ})$
2.0	80	5.8	79
3.0	81	5.9	81
4.0	80	6.0	81
4.3	80	6.5	84
4.4	79	7.0	85
4.5	78	10.0	87
4.6	74	15.0	87
5.7	65		



(a)  $2.0^{\circ}\text{C}\leq T_{\infty}\leq 5.8^{\circ}\text{C}$



(b)  $6.0^{\circ}\text{C}\leq T_{\infty}\leq 15.0^{\circ}\text{C}$

Fig. 13 The variations of mean Nusselt number for the different inclined angles at each  $T_{\infty}$

(end effect) 때문이라 사료 된다.

이상과 같이 이론해석과 실험결과와 고찰에서 경사각을 증가시킬때 각 온도마다 경사면의 유동특성이 유지될 수 있는 한계 경사각을 Table 1과 같이 구하였다. 한계 경사각의 범위는 주위물의 온도가 높을수록 상향유동영역에서는 감소하고, 하향유동영역에서는 증가한다. 또한 상향과 하향 유동영역 보다는 두 방향 유동영역에서 유동형태의 변화에 경사각이 크게 영향을 미친다.

Fig. 13은 경사각 증가에 따른 각 온도에서의 누셀트 수( $Nu$ )를 각각 나타내고 있다. 각 그림의 점선구역은 지금까지 이론해석과 실험결과와 고찰에서 천이유동이 존재하는 영역을 나타내고 있다. 또한, 실선 부분은 한계 경사각까지의 이론해석 결과이며 경사각  $90^\circ$ , 즉 수평에서의 값은 Kim<sup>(6)</sup>의 이론해석 결과이다. 경사각과 누셀트값의 관계는 경사각이 증가할수록 누셀트값은 전반적으로 감소하고 있다. 이는 경사각이 증가함에 따라 체적력(body force)의 감소로 유동이 활발하지 못하여 대류 열전달이 미약해지기 때문이다. 또한 주위물의 온도가 높을수록 누셀트값의 감소구배도 급격히 커진다. 이와같은 사실은 Kim<sup>(6)</sup>의 이론해석결과에서  $T_\infty \geq 7.0^\circ\text{C}$ 일때 유동은 일어나지 않고 전도에 의해서만 열전달이 일어난다는 사실에 잘 접근하고 있다.

#### 4. 결 론

이상과 같이 주위물의 온도가  $1.0^\circ\text{C}$ 에서  $15.0^\circ\text{C}$  사이에 변화하고, 각 온도마다  $0^\circ\text{C}$  상향 등온평면의 경사각을  $60^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 접근시켜갈때 일어나는 자연대류 현상에 대한 이론해석과 실험결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 경사면에 의한 유동형태와 수평면에 의한 유동형태사이에 천이가 존재하며, 경사각 증가에 따른 천이의 발생형태는 각 유동영역(상향, 하향, 두 방향 유동영역)에서 다르게 나타난다.

(2) 이러한 천이가 발생하기 전의 경사각, 즉 경사면에 의한 유동특성이 유지되는 한계 경사각들(Table 1)을 제시하였다.

(3) 한계 경사각의 크기는 주위물의 온도가 높을수록 상향유동영역에서는 감소하고, 하향유동영역에서는 증가한다. 또한 상향과 하향유동영역 보다는 두 방향유동영역에서 유동의 변화가 경사각에 민감하게 나타난다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Vanier, C.R. and Tien, C., 1968, "Effect of Maximum Density and Melting on Natural Convection Heat Transfer from a Vertical Plate", Chem. Eng. Progress Symposium Series, Vol. 64, pp. 240~254.
- (2) Bendell, M.S. and Gebhart, B., 1976, "Heat Transfer and Ice-Melting in Ambient Water near Its Density Extremum", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 19, pp. 1081~1087.
- (3) Carey, V.P. and Gebhart, B., 1981, "Visualization of the Flow Adjacent to a Vertical Ice Surface Melting in Cold Pure Water", J. Fluid Mech., Vol. 107, pp. 37~55.
- (4) 유갑종, 1984, "최대밀도점 부근의 물속에 잠겨있는 경사진 얼음평면에서의 자연대류", 서울대학교 대학원, 박사학위논문.
- (5) 김병하, 1987, "최대밀도점 부근의 물속에 잠겨있는 수평 얼음 평면에서의 자연대류", 경북대학교 대학원, 박사학위논문.
- (6) Gebhart, B. and Mollendorf, J.C., 1977, "A New Density Relation for Pure and Saline Water", Deep-sea Res., Vol. 24, pp. 831~848.
- (7) Gosman, A.D., Pun, W.M., Runchal, A.K., Spalding, D.B. and Wolfschtein, M., 1969, "Heat and Mass Transfer in Recirculating Flow", Academic Press, New York.
- (8) Kukulka, D.J., 1981, "Thermodynamics and Transport Properties of Pure and Saline Water", Master Thesis, State Univ. of New York Buffalo.