

〈論 文〉

## 저온의 순수물속에 잠겨있는 약간 경사진 균일 열유속 원기둥에 의한 자연대류의 실험적 연구

유갑종\* · 추홍록\*\* · 장우석\*\*

(1994년 1월 7일 접수)

### Experimental Study of Natural Convection from a Slightly Inclined Cylinder with Uniform Heat Flux Immersed in Cold Pure Water

Kap Jong Riu, Hong Lock Choo and Woo Suk Jang

**Key Words:** Density Extremum(최대밀도점), Uniform Heat Flux(균일 열유속), Slightly Inclined Angle(약간 경사진 각), Upflow(상향유동), Downflow(하향유동), Unsteady State Flow(비정상상태 유동)

#### Abstract

Natural convection from a slightly inclined circular cylinders immersed in quiescent cold pure water was studied experimentally. The experiment was carried out for circular cylinders with uniform heat flux ranging from 100 W/m<sup>2</sup> to 800 W/m<sup>2</sup> and inclined angle ranging from horizontal ( $\phi=0^\circ$ ) to 15°. The flow fields around cylinder were visualized and heat transfer characteristics investigated by measuring the surface temperatures for each case. As the results, it is shown that flow patterns are changed consecutively through the sequence of steady state downflow, unsteady state flow and steady state upflow with increasing heat flux. At the same inclined angle, as heat flux increases, the average Nusselt number decreases and then increases. At the same heat flux, as inclined angle increases, the average Nusselt number decreases.

#### 기 호 설 명

<p><math>A</math> : 원기둥의 표면적 (m<sup>2</sup>)</p> <p><math>D</math> : 원기둥의 직경 (m)</p> <p><math>h</math> : 평균 열전달계수 (W/m<sup>2</sup>K)</p> <p><math>h_x</math> : 국소 열전달계수 (W/m<sup>2</sup>K)</p> <p><math>K</math> : 열전도계수 (W/mK)</p> <p><math>L</math> : 원기둥의 길이 (m)</p> <p><math>Nu</math> : 평균 누셀트수 (<math>hD/K</math>)</p> <p><math>q_w</math> : 열유속 (W/m<sup>2</sup>)</p> <p><math>T</math> : 온도 (°C)</p> <p><math>\bar{T}</math> : 평균온도 (°C)</p>	<p><math>\phi</math> : 경사각 (°)</p> <p>하첨자</p> <p><math>m</math> : 최대밀도점</p> <p><math>w</math> : 원기둥 표면</p> <p><math>\infty</math> : 주위물</p>
--	---

#### 1. 서 론

최근 공업장치의 냉각효과를 상승시켜 장치의 수명 및 효율성을 향상시키려는 노력에 있어서 자연대류의 역할에 관한 비중이 증대됨에 따라 이에 대

\*정회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*정회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

한 관심이 집중되고 있다. 이러한 자연대류 열전달은 주위유체, 고체면의 기하학적 형상과 재질 및 온도조건에 따라서 그 특성이 매우 다양하게 나타난다.

특히 주위유체가 용해된 창연(Bismuth), 안티몬(Antimony), 갈륨(Gallium)이나 저온의 물과 같은 경우에는 온도의 변화에 따라 밀도가 최대가 되는 점이 존재하여 대류반전(convective inversion) 등의 매우 특이한 대류유동 특성이 나타나게 된다. 상기의 유체중에서 대기압하 4.03°C 부근에서 최대 밀도점(density extremum)을 갖는 저온의 순수물인 경우에는 그 공업적 응용성이 매우 다양하여 많은 관심이 집중되고 있다. 이에 관한 연구로서 Merk<sup>(1)</sup>가 최초로 저온의 순수물속에 잠겨있는 열음구 주위의 자연대류를 적분형 운동량방정식으로서 이론해석한 이후 Gebhart와 Mollendorf,<sup>(2)</sup> Sammakia,<sup>(3)</sup> Carey,<sup>(4)</sup> Riu<sup>(5)</sup> 등의 연구가 다수 있다. 그러나 이와 같은 상기의 연구들에서는 고체면의 조건이 0°C인 등온면인 경우가 대부분이다.

한편, 균일 열유속을 갖는 원기둥일 경우에 관한 연구로서는 Arabi와 Salman<sup>(6)</sup>이 공기속에서 구리 원기둥에 균일 열유속을 가하여 수평에서 수직에 이르는 각 경사각에 대해 자연대류 열전달현상을 연구하였다. Stewart<sup>(7)</sup>는 공기속에서 여러가지 종횡비의 알루미늄 원기둥을 전기 온풍기 및 전열선을 이용하여 가열한 후, 냉각속도를 측정하여 누셀트수와 경사각의 관계를 조사하였다. Oosthuizen<sup>(8)</sup>은 공기중에서 가열된 알루미늄이 냉각될 때의 자연대류 열전달에 관한 실험적 연구를 통하여 누셀트수와 Grashof수와의 상관관계를 구하였다. Nagendra 등<sup>(9)</sup>은 상온의 물속에서 등온 및 균일 열유속을 갖는 수직 원기둥에 의한 자연대류를 수치해석 및 실험적 연구를 수행하여 원기둥을 긴 원기둥(long cylinders), 짧은 원기둥(short cylinders) 및 강선(wires)으로 구분하고 각각의 열전달 상관식을 구한 바 있다. 그러나 이상과 같이 고체면이 균일 열유속을 갖는 원기둥일 경우에는 주위유체가 대부분 공기나 상온의 물속인 경우에만 한정되어 최대밀도점의 영향에 대한 고찰이 부족하다.

또한 원기둥의 기하학적인 위치가 수평 및 수직인 경우에는 2차원적의 유동 및 열전달 특성이 나타나지만 경사진 원기둥의 경우에는 3차원적인 특성이 나타나게 된다. 여기서 원기둥이 수평에서 수직 방향으로 약간 기울어진 경우는 수평 원기둥에 의

한 유동특성에서 경사 원기둥에 의한 유동특성으로 천이하는 경사각의 구간이 존재하여 이 영역에서는 유동 및 열전달 특성이 매우 복잡하게 될 것으로 예측된다.

결국 복잡한 대류유동 및 열전달현상이 예상될수 있는 조건으로서 주위유체가 저온의 순수물이고, 고체면이 수평으로부터 약간 경사진 균일 열유속을 갖는 원기둥에 의한 자연대류 특성에 관한 자세한 고찰이 요구된다.

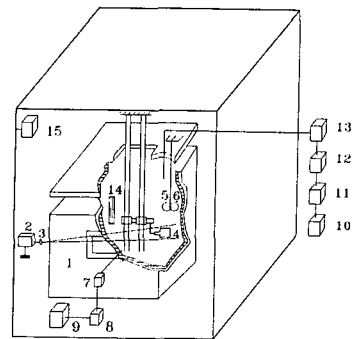
따라서 본 연구는 저온의 순수물속에서 수평 및 수평으로부터 약간 경사진 균일 열유속을 갖는 원기둥에 의한 자연대류를 실험적으로 고찰 하였다. 즉, 열유속 및 경사각의 변화에 따른 원기둥 주위의 전 유동장을 가시화하고 누셀트수를 구하여 유동 및 열전달 특성을 구명하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 크게 실험용 탱크, 증류수 제조장치 및 가시화 장치로 구분된다. Fig. 1은 그 개략도를 나타낸 그림이다.

실험용 탱크는 길이 1500 mm, 폭 1200 mm, 깊이가 1500 mm이며, 두께 12 mm의 강화유리로 제작하였다. 유리면은 H형강과 앵글로서 보강하여 수압에 충분히 견딜수 있도록 하였다. 또한 유리면에



- |                     |                 |
|---------------------|-----------------|
| 1. Main tank        | 2. Laser system |
| 3. Cylindrical lens | 4. Specimen     |
| 5. Agitator         | 6. Thermocouple |
| 7. Camera           | 8. Solenoid     |
| 9. Microprocessor   | 10. Distiller   |
| 11. Water tank      | 12. Chiller     |
| 13. Pump            | 14. Thermometer |
| 15. Air conditioner |                 |

Fig. 1 Outline of experimental apparatus

는 가시화를 위한 창을 만들고 탱크의 내부와 외부와의 열교환을 차단하기 위하여 두께 100 mm의 유리섬유와 폴리스티렌 단열재로서 최대한 단열시켰다.

Fig. 2는 시편, 레이저빔(laser beam) 및 카메라의 상대적 위치를 나타낸 그림이다. 가시화를 위한 광원으로서 20 mW의 He-Ne 레이저빔을 프리즘 및 원기둥형 렌즈를 이용하여 두께 약 2.5 mm의 평면형 광원으로 만들어 사용하였다. 실험탱크내의 물은 증류수로서 냉각기를 사용하여 필요한 온도까지 냉각하여 펌프로써 공급하였으며, 탱크내의 물의 온도 측정은 12점에 설치한 열전대 및 정밀 유리봉 온도계를 이용하여 측정하였다.

Fig. 3은 시편의 형상, 내부구조 및 원기둥의 표면온도를 측정하기 위한 열전대의 위치를 나타낸 개략도이다.

본 연구에서 사용된 원기둥은 Nagendra 등<sup>(9)</sup>의

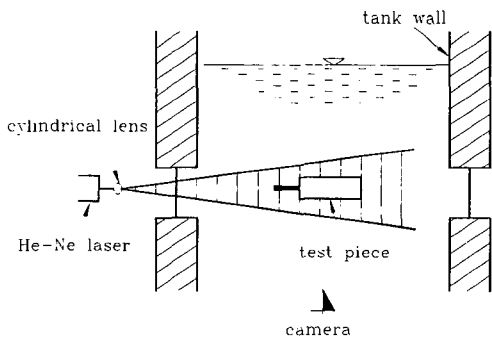


Fig. 2 Schematic diagram for flow visualization

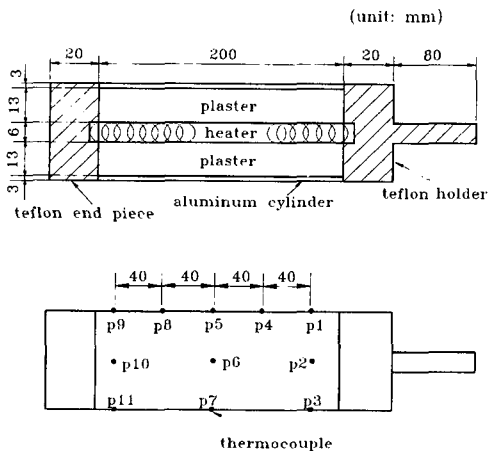


Fig. 3 Details of a test piece and thermocouple arrangement

연구에서 정의된 긴 원기둥에 해당되는 비교적 중형비( $D/L=0.19$ )가 작은 알루미늄 환봉(6061-T6, 길이 200 mm, 외경 38 mm, 내경 32 mm)을 사용하였다. 원기둥의 양단에는 End effect를 최소화하기 위하여 외경 38 mm, 길이 20 mm의 end piece를 부착하였다. end piece의 재질은 원기둥으로부터 길이방향으로의 열전도를 최대한 막기 위하여 알루미늄과 열전도율의 비가 약 800 : 1이 되는 열전도도가 극히 낮은 테프론 봉을 사용하였다. 원기둥의 중앙에는 니크롬선으로 된 heater를 길이 방향으로 설치하였고, heater와 알루미늄 원기둥 내면 사이에는 석고분말을 충분히 건조시킨 후 충전하여 알루미늄 원기둥 전체에 균일한 열유속이 공급되도록 하였다. 또한 원기둥의 표면온도를 측정하기 위하여 원기둥 표면에 등간격으로 상부에 5개소, 중앙 및 하부에 각각 3개소 등 모두 11개소의 열전대를 장착하였다. 온도측정에 사용한 열전대는 T-type (직경 0.25 mm)이며, 데이터의 처리는 개인용 컴퓨터로 제어되는 데이터처리장치(Fluke 2400B series)를 이용하여 출력되도록 하였다.

## 2.2 실험방법 및 범위

실험용 탱크속의 물의 온도를 필요한 주위물 온도로 유지시킨 후, 유동장의 가시화를 위해 물에 잘 용해되지 않는 Pliolite입자 약 0.9 g을 물속에 넣고 약 10분 정도 교반한다. 실험범위내의 일정한 각도로 고정틀에 고정시킨 원기둥을 탱크위에 장치한 도르래를 이용하여 외부유동을 최대한 줄이면서 탱크속에 위치시킨다. 이때 생긴 외부유동이 정체가 되도록 30분 정도 기다린다. 본 실험에서는 열유속을 가한 후 원기둥 각 지점에서의 시간당 표면온도 변화가  $0.1^{\circ}\text{C}$  범위내일 때를 정상상태에 도달한 것으로 간주하였다. 본 실험범위에서는 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간이 약 30분 정도 소요되었다. 정상상태에 도달한 후 원기둥 각 위치의 온도를 데이터처리장치를 이용하여 기록하고, 동시에 원기둥 주위의 유동장을 촬영하였다. 사진촬영은 예비실험 결과에 따라 유동이 일정하게 일어날 때는 노출시간을 14초로 하여 10초 간격으로 20회 촬영하였으며, 유동이 시간에 따라 변하는 경우에는 연속촬영하였다.

공급된 열유속은  $q_w=100\text{ W/m}^2\sim 800\text{ W/m}^2$ 까지 다양화 하였으며, 이들 열유속은 원기둥의 전원 공급 장치에 연결된 전압조정기로 변화시켰다. 원기

등으로의 균일 열유속 공급은 실험전에 일정온도의 순수물속에 원기둥을 수직 및 수평상태로 위치시킨 후 원기둥 둘레방향과 길이방향으로의 온도분포를 측정하여 확인하였다. 이때 원기둥 표면온도 분포의 최대오차는 각각  $\pm 0.05^\circ\text{C}$  정도로서 나타났다. 주위물의 온도( $T_w$ )는  $3.5^\circ\text{C}$ 를 대표적으로 선택하였다. 이는 주위유체가 저온의 순수물일 경우 최대 밀도점 온도( $T_m=4.03^\circ\text{C}$ )를 경계로 하여 최대밀도점 온도 이하의 주위물 온도에 있어서는 벽면의 열유속 증가에 따라 열경계층내에 밀도구배의 비선형적인 영역이 포함됨으로써 매우 다양한 유동특성이 예상되기 때문이다. 원기둥의 경사각은  $\phi=0^\circ$ (수평),  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  및  $15^\circ$ 로 하였다.

본 실험에서는 원기둥 상부에서의 표면온도를 기준으로 하여 열유속 및 경사각의 변화에 따른 열전달 특성을 상호 비교하기 위하여 국소 열전달계수  $h_x$ 를 식(1)과 같이 정의하였다.

$$h_x = q_w / ((T_w)_x - T_w) \quad (1)$$

$$q_w = Q/A = IV/A \quad (2)$$

여기서,  $(T_w)_x$ 는 원기둥 상부 길이방향으로의 국소 표면온도,  $T_w$ 는 주위유체의 온도,  $I$ 와  $V$ 는 각각 heater에 가해지는 전류 및 전압,  $A$ 는 원기둥의 표면적이다. 평균 누셀트수  $Nu$ 는 식(3)으로서 정의하였다.

$$Nu = hD/K \quad (3)$$

$$h = 1/L \int_{x=0}^{x=L} h_x dx \quad (4)$$

$$= 1/L \int_{x=0}^{x=L} \frac{q_w}{(T_w)_x - T_w} dx$$

여기서,  $K$ 는 주위유체의 열전도계수,  $D$ 는 특성길이로서 원기둥의 직경,  $h$ 는 평균 열전달계수를 각각 나타낸다. 계산에 사용된 물성치들은 film temperature인  $T_f = (T_w + T_w)/2$ 에서의 값들로서 Kukulka<sup>(10)</sup>의 연구결과를 이용하여 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 최대밀도점의 영향

Fig. 4는 원기둥이 수평상태( $\phi=0^\circ$ )에 있을 때 원기둥에 가해지는 열유속이 각각  $102 \text{ W/m}^2$ ,  $450 \text{ W/m}^2$ ,  $745 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$ 인 경우 원기둥 주위의 유동장을 가시화한 사진이다.

사진중앙의 검은 사각형은 균일 열유속을 갖는

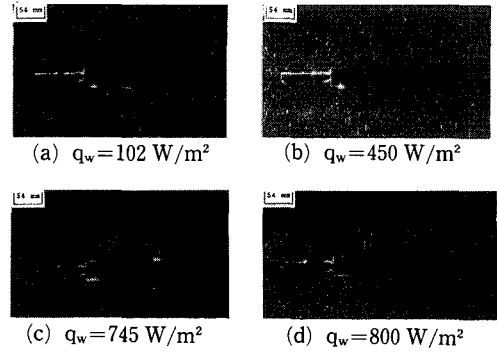


Fig. 4 Flow patterns around horizontal cylinder ( $\phi=0^\circ$ ) for various heat flux,

수평 원기둥이고, 좌측에 지름이 작은 원기둥은 시편을 고정하기 위한 봉이다. 수평 원기둥 주위의 흰색 점들은 유체의 정체상태를 나타내는 Pliolite 입자이고, 흰색 선들은 온도차로 발생하는 유체의 유동에 따라 나타나는 입자의 궤적으로서 대류유동 상태를 나타낸다. 이때 원기둥 좌측의 지름이 작은 봉은 경계층내 전반적인 유동형태에는 영향을 미치지 않는다.

열유속  $q_w=102 \text{ W/m}^2$ 인 (a)는 원기둥의 평균 벽면온도가  $\bar{T}_w \approx 4.3^\circ\text{C}$ 인 경우로서 유동형태는 경계층내의 유체가 원기둥 하단부분에서 중력방향으로 곧게 내려가는 완전 하향유동 형태를 나타내고 있다. 이는 벽면과 주위유체와의 온도차로 인해 경계층내의 유체의 밀도가 주위유체의 밀도보다 커짐으로서 나타난다.

이러한 하향유동 형태는 열유속  $100 \text{ W/m}^2 \leq q_w \leq 185 \text{ W/m}^2$  ( $4.3^\circ\text{C} \leq \bar{T}_w \leq 5.5^\circ\text{C}$ )의 범위에서 관찰되었다. 여기서 하향유동 형태의 상한치에 대한 평균 벽면온도가  $\bar{T}_w \approx 5.5^\circ\text{C}$ 로 나타난 것은  $T_w=3.5^\circ\text{C}$ 의 물의 밀도는 최대밀도점( $T_m=4.03^\circ\text{C}$ )을 기준으로 하여 약  $4.6^\circ\text{C}$ 의 밀도와 같기 때문에  $4.3^\circ\text{C} \leq T_w \leq 4.6^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 하향부력만 존재하지만,  $q_w=185 \text{ W/m}^2$ 인 경우 열경계층내에 존재하는  $4.6^\circ\text{C} < T_w < 5.5^\circ\text{C}$ 의 온도영역으로 인한 상향부력이 하향부력에 비해 매우 미약하기 때문에 경계층내 전반적인 유동형태에 영향을 미치지 못하기 때문이다. 열유속  $q_w=450 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 7.3^\circ\text{C}$ )인 (b)의 경우에는 원기둥 하단부분에서의 하향유동이 미약해지고, 원기둥 상단 및 하단부근에서 시간에 따라서 변화하는 매우 불규칙한 비정상상태의 유동형태를 나타낸다. 이는 열유속의 증가에 따라 경계층

내의 물의 밀도가 고체 벽면부근에서는 주위물의 밀도보다 작고, 경계층의 경계부근에서는 주위물의 밀도보다 크므로 해서 경계층내에 상하향 부력이 동시에 존재하게 되어 유동의 불안정성으로 인해 나타나는 현상이다.

열유속이 더욱 증가된  $q_w=745 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 9.3^\circ\text{C}$ )의 (c)인 경우에는 원기둥 하단의 불규칙한 하향유동이  $q_w=450 \text{ W/m}^2$ 에 비해 매우 미약해지고, 원기둥 상부에서는 중력방향과 반대방향으로의 상향유동이 나타난다. 이는 열유속의 증가에 따라 경계층내의 상향부력의 작용영역이 하향부력의 작용영역보다 커짐으로 해서 나타난다. 상기와 같은 비정상상태 유동형태는 열유속  $185 \text{ W/m}^2 < q_w < 800 \text{ W/m}^2$  ( $5.5^\circ\text{C} < \bar{T}_w < 9.6^\circ\text{C}$ )의 범위에서 관찰되었다.

열유속  $q_w=800 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 9.6^\circ\text{C}$ )인 (d)의 경우에는  $q_w=745 \text{ W/m}^2$ 에서 나타난 원기둥 하단부근에서의 불규칙한 하향유동이 사라지고, 원기둥 상단에서 중력방향과 반대방향으로의 상승분류가 형성되는 완전 상향유동형태를 나타낸다. 이는 열유속의 증가에 따라 경계층내의 물의 밀도가 주위물의 밀도보다 작아짐으로 해서 상향부력이 원기둥의 길이방향에 따라 균일하게 작용하기 때문에 나타난다. 이때 경계층내에 존재하는 하향부력은 전경계층의 유동형태에는 영향을 미치지 못하고 다만 상향유동을 감쇄시키는 영향을 미치게 된다. 이러한 상향유동 형태는 열유속  $q_w=800 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w = 9.6^\circ\text{C}$ )에서부터 관찰되었다.

Fig. 5는 원기둥이 수평상태 ( $\phi=0^\circ$ )일 때 각각의 유동형태를 나타내는 대표적인 열유속  $q_w=102 \text{ W/m}^2$ ,  $185 \text{ W/m}^2$ ,  $690 \text{ W/m}^2$  및  $800 \text{ W/m}^2$ 에 있어서 원기둥 상부의 무차원 길이에 따른 국소 열전달계수를 나타낸 그림이다. 그림에서  $\bar{T}_w$ 는 각각의 열유속에 있어서의 평균 벽면온도를 각각 나타낸다.

열전달계수는 원기둥 길이방향에 따라 거의 균일한 분포를 나타낸다. 이는 수평 원기둥의 길이방향에 따른 열전달량의 변화가 없어 벽면의 온도분포가 동일하게 나타나기 때문이다. 단, 정상유동 상태로서 나타나는 열유속 ( $q_w=102 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$ )에서 양단의 열전달계수의 값이 높게 나타난다. 이는 원기둥의 길이가 유한한 경우에 경계층내 유체유동의 연속성을 만족시키기 위해 원기둥 양단에서 유입되는 차가운 물에 의해 열전달량이 많아지기 때문이다.

비정상상태 유동구간에 해당되는 열유속  $q_w=$

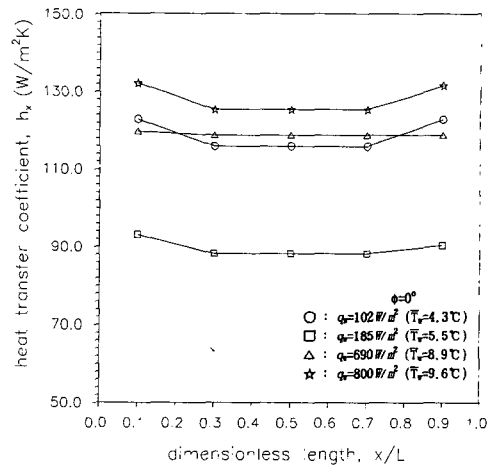


Fig. 5 Variation of local heat transfer coefficients with dimensionless cylinder length (at  $\phi=0^\circ$ )

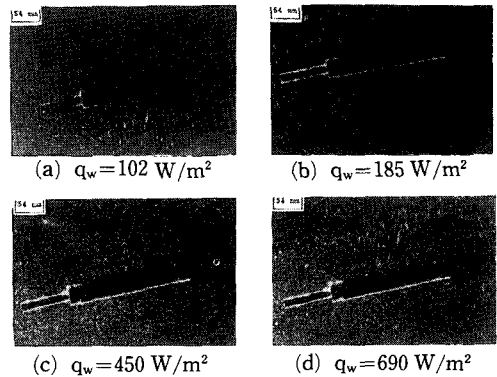


Fig. 6 Flow patterns around cylinder of inclined angle  $\phi=10^\circ$  for various heat flux

$185 \text{ W/m}^2$ 의 경우 정상상태 하향유동의 대표적인 열유속  $q_w=102 \text{ W/m}^2$ 보다 열유속이 증가했음에도 불구하고 열전달계수의 값이 작아진다. 이는 Fig. 4에서 설명된 바와 같이 비정상상태의 유동구간에서는 경계층내의 상하향부력의 불안정성으로 인해 유동이 미약해져 열전달량이 감소하기 때문이다. 특히 비정상상태 유동의 경우에 정상상태 유동의 경우와는 달리 원기둥 양단의 열전달계수가 증가하는 성향이 거의 나타나지 않는다. 이는 비정상상태 유동의 경우 매우 불규칙한 유동이 원기둥 길이방향 전체에 걸쳐서 발생하기 때문이다.

Fig. 6은 수평으로부터  $10^\circ$  경사진 원기둥에 각각  $102 \text{ W/m}^2$ ,  $185 \text{ W/m}^2$ ,  $450 \text{ W/m}^2$ ,  $690 \text{ W/m}^2$ 의 열유속을 가했을 경우 원기둥 주위의 유동장을 가시화한 사진이다.

(a)는  $q_w=102 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 4.4^\circ\text{C}$ )인 경우로서 원기둥의 하단으로부터 왼쪽으로 치우친 하향유동이 지배적으로 나타난다.  $q_w=185 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 5.7^\circ\text{C}$ )인 (b)의 경우는 경계층내의 상하향 부력의 불안정성으로 인해 매우 불규칙한 비정상상태 유동 형태가 나타난다.  $q_w=450 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 7.5^\circ\text{C}$ )인 (c)의 경우에는  $\phi=0^\circ$ 에서의 비정상상태의 유동 형태와는 달리 완전 상향유동 형태로서 나타난다. 열유속이 더욱 증가된  $q_w=690 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 9.03^\circ\text{C}$ )인 (d)의 경우는 전반적인 유동형태가 (c)의 경우와 동일한 완전 상향유동 형태를 나타내지만 경계층내의 유적선의 길이가 상대적으로 길게 나타나 유동이 더욱 활발해짐을 알수있다. 이는 열유속의 증가로 인해 벽면과 주위 유체의 온도차가 커짐에 따라 상대적으로 밀도차가 커지기 때문이다. 이러한 열유속 변화에 따른 유동형태의 변화, 즉 하향 유동에서 비정상상태 유동으로, 비정상상태 유동에서 상향유동으로의 변화는 경사각  $\phi=5^\circ, 15^\circ$ 일 경우에도 동일한 현상으로 나타났다. 단, 각각의 유동형태에 관한 열유속의 범위는 경사각이 증가할수록 약간 감소하여 나타난다.

Fig. 7은 각각의 경사각에 있어서 열유속 증가에 따른 평균 누셀트수의 변화를 나타낸 그림이다.

동일한 경사각에서 열유속이 증가할수록 평균 누셀트수는 감소하다가 다시 증가하는 형태로 나타난다. 또한 경사각이 증가함에 따라 열유속에 관계없이 평균 누셀트수는 감소한다. 이러한 최소 누셀트수가 나타나는 성향은 최대밀도점의 영향으로서 열유속의 증가에 따라 경계층내 상하향 부력의 불안정성으로 인한 비정상상태의 유동형태가 나타나기 때문이다. 이때 모든 경사각에서 최소 누셀트수는 비정상상태 유동영역에 속하는 약  $200 \text{ W/m}^2$ 부근에서 나타난다. 이에 대한 자세한 고찰을 위해서  $\phi=0^\circ$ 일때 열유속 변화에 따른 평균 누셀트수의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

평균 누셀트수는 열유속  $q_w=102 \text{ W/m}^2$ 에서부터 급격히 감소하여  $q_w \approx 199 \text{ W/m}^2$ 부근에서 최소값을 나타내고, 그 이상의 열유속에서는 증가하는 성향을 나타낸다. 이는 하향유동영역에서는 열유속의 증가에 따라 경계층내에 주위물과 밀도가 비슷한  $4.06^\circ\text{C}$ 보다 높은 온도영역으로 인해 발생하는 상향 부력이 하향부력을 감쇄시키는 작용을 하여 하향유동이 미약해지기 때문이다. 열유속을 더욱 증가하게 되면 상향부력이 하향부력을 불안정하게 함으로

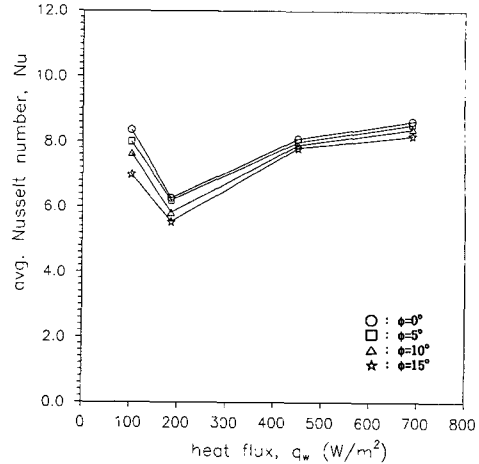


Fig. 7 Variation of average Nusselt numbers with heat flux for different inclined angles

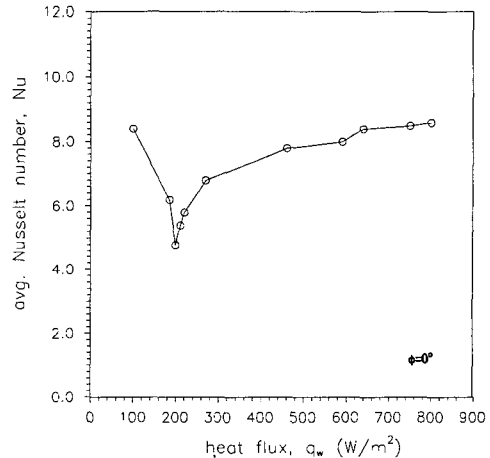


Fig. 8 Variation of average Nusselt numbers with heat flux for horizontal cylinder ( $\phi=0^\circ$ )

서 비정상상태의 유동형태가 나타나 상대적으로 평균 누셀트수는 급격히 감소하여  $q_w \approx 199 \text{ W/m}^2$ 부근에서 최소평균 누셀트수를 나타낸다. 여기서 열유속을 더욱 증가시키면 벽면과 주위물과의 온도차가 커짐으로서 경계층내에 상향부력이 지배적으로 작용함에 따라 평균 누셀트수는 증가한다.

### 3.2 경사각의 영향

Fig. 9는 원기둥의 경사각이  $\phi=0^\circ$ 에서부터  $\phi=5^\circ, \phi=10^\circ$  및  $\phi=15^\circ$ 로 변화할 때 각각의 경사각에서 하향 및 상향유동이 지배적으로 나타나는 대표적인 열유속 ( $q_w \approx 102 \text{ W/m}^2, q_w \approx 690 \text{ W/m}^2, q_w \approx 800 \text{ W/m}^2$ )에서의 유동장을 나타낸 사진이다. 여

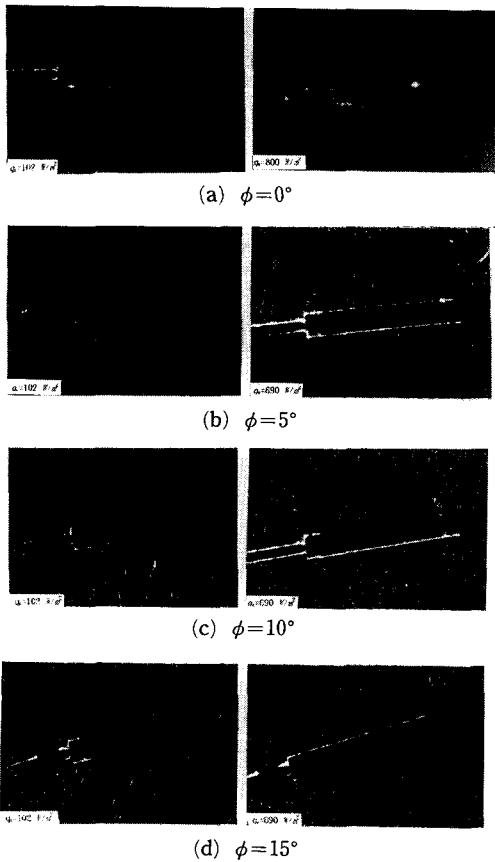


Fig. 9 Flow patterns around cylinder with inclined angles (a)  $\phi=0^\circ$ , (b)  $\phi=5^\circ$ , (c)  $\phi=10^\circ$ , (d)  $\phi=15^\circ$  for heat flux  $q_w=102 \text{ W/m}^2$ ,  $q_w=690 \text{ W/m}^2$ ,  $q_w=800 \text{ W/m}^2$

기서  $\phi=0^\circ$ 의 경우에 상향유동의 대표적인 열유속으로서  $q_w \approx 800 \text{ W/m}^2$ 을 선택한 것은 수평 원기둥의 경우에 완전 상향유동의 형태가 열유속  $q_w \geq 800 \text{ W/m}^2$ 의 범위에서 나타나기 때문이다.

$\phi=0^\circ$ 인 (a)의 경우는 원기둥의 하부 및 상부의 end piece가 있는 비가열면을 제외한 원기둥의 길이방향 전체에 걸쳐서 중력방향 및 중력반대방향으로의 균일한 분류를 형성한다. 이는 벽면과 주위유체와의 온도차로 인해서 발생하는 상·하향부력이 수평 원기둥의 길이방향에 따라 균일하게 작용함으로써 나타난다.

$\phi=5^\circ$ 인 (b)의 경우는 상하향 분류가  $\phi=0^\circ$ 인 경우에 비해 하향유동인 경우에는 좌측으로, 상향유동인 경우에는 우측으로 약간 치우친 상태로 형성된다. 이는 원기둥이 경사점에 따라 하향유동인

경우에는 원기둥의 우측전단, 상향유동인 경우에는 좌측전단에서 주위유체의 유입이 용이해지기 때문에 나타난다.

$\phi=10^\circ$ 인 (c)의 경우는  $\phi=5^\circ$ 인 경우에 비해서 경사각의 영향으로 인해서 하향유동인 경우에는 원기둥의 우측전단, 상향유동인 경우에는 좌측전단에서의 유체의 유입속도가 더욱 증가하여 분류가 하향유동의 경우에는 좌측으로, 상향유동의 경우에는 우측으로 더욱 더 치우쳐 형성된다. 한편  $\phi=10^\circ$ 인 경우까지는 하향유동의 경우 원기둥의 좌측전단, 상향유동의 경우에는 우측전단에서 유체의 유입이 존재하여 일반적으로 수평원기둥에서 나타나는 좌우측 양단의 전단형성이 유지되고 있다.

그러나 동일 경사각에서 상향유동인 경우에 비해 하향유동인 경우가 전단에서의 유체유입에 따른 영향을 많이 받아 상향유동인 경우에는  $\phi=10^\circ$ 인 경우까지 원기둥 길이방향 전체에 걸쳐서 중력반대방향으로의 분류가 형성되고 있으나 하향유동인 경우에는 우측전단에서 유입된 유체가 경사면을 따라 원기둥 중심위치까지 유동하다가 중력방향으로의 분류를 형성한다.

$\phi=15^\circ$ 인 (d)인 경우는 경사각이 증가함에 따라 하향유동의 경우에 원기둥의 우측전단에서 유입된 유체가 경사면을 따라 원기둥 벽면으로 경계층을 형성하여 유동하다가 원기둥 좌측전단 부근에서 중력방향으로의 하향분류를 형성한다. 상향유동의 경우는 원기둥의 좌측전단에서 유입된 유체가 경사면을 따라 유동하다가 원기둥 중심에서부터 상향분류를 형성한다. 또한  $\phi=10^\circ$ 까지 나타나던 원기둥의 양단이 전단으로 형성되는 수평 원기둥의 유동특성이 완전히 사라진다. 결국 원기둥을 수평에서부터 경사각을 증가시켜갈때 원기둥에 의한 유동특성은 어느 일정 경사각에서 수평 원기둥의 유동특성에서 경사 원기둥의 유동특성으로 변화하는 천이 유동형태를 나타내게 된다. 본 연구결과에서는  $\phi=15^\circ$ 부근에서 이러한 천이 유동형태가 나타난다.

Fig. 10은 원기둥의 경사각이  $\phi=0^\circ$ 에서부터  $\phi=5^\circ$  및  $\phi=15^\circ$ 로 변화할 때 대표적인 열유속( $q_w \approx 102 \text{ W/m}^2$ ,  $q_w \approx 690 \text{ W/m}^2$ )에서의 무차원 길이에 따른 원기둥 상부의 국소 열전달계수를 나타낸 그림이다.

$\phi=0^\circ$ 인 경우에는 열유속에 관계없이 원기둥 길이방향에 따라 거의 균일한 열전달계수 값을 나타낸다. 이는 원기둥 길이방향에 따른 열전달량의 변

화가 없기 때문에 나타나는 경향으로서 일반적인 수평 원기둥에 의해 나타나는 열전달 특성이다 (Fig. 5 설명참조). 이와 같은 성향은 공기중에서의 수평 원기둥에 관한 Arabi와 Salman<sup>(6)</sup>의 연구결과와 잘 일치한다. 또한 전반적으로 경사각이 증가할수록 열전달계수의 값은 감소한다. 이러한 성향은 Fig. 9의 유동형태와 잘 부합되는 결과로서 원기둥의 경사각이 증가할수록 경계층내 유동의 중력방향 및 중력 반대방향으로의 속도성분이 감소하여 상대적으로 열전달량이 감소하기 때문에 나타난다.

특히 하향유동이 지배적으로 나타나는 그림(a)에서  $\phi=5^\circ$ 인 경우 무차원 길이  $x/L=0.7$ 인 곳

서 가장 낮은 열전달계수 값이 나타난다. 이는 원기둥이 수평에서  $\phi=5^\circ$ 로 경사짐에 따라 원기둥의 우측전단에서 유입된 유체가 원기둥 벽면을 따라 유동하면서 가열되어 이 부분에서부터 하향분류를 형성하여 상대적으로 열전달량이 감소하기 때문이다. 이러한 성향은 원기둥의 경사각이 증가하여  $\phi=15^\circ$ 가 되면 더욱 뚜렷이 나타나 원기둥 중앙부인  $x/L=0.5$ 인 곳에서 열전달계수 값이 급격히 감소하여 나타난다.  $\phi=15^\circ$ 에서 나타나는 상기의 성향은 일반적으로 경사 원기둥에서 나타나는 열전달 특성과 잘 일치한다. 결국 경사각  $\phi=15^\circ$ 이전의 경사각에 있어서는 수평 원기둥의 열전달 특성을 나타내다가  $\phi=15^\circ$ 가 되면 경사 원기둥의 열전달 특성으로 변화하게 된다. 그러나 상향유동이 지배적인 (b)에서  $\phi=15^\circ$ 의 경우 양단을 제외한 원기둥 중앙부의 열전달계수의 값의 차이가 하향유동이 지배적인 (a)에 비해서 크게 나타나지 않는 것은 상향유동의 경우 하향유동에 비해서 경사각의 영향을 적게 받기 때문이다. (Fig. 9 설명참조)

여기서 원기둥이 경사짐에 따라 하향유동의 경우 원기둥의 우측 전단부분에서, 상향유동의 경우 좌측전단의 극소 열전달계수의 값이  $\phi=0^\circ$ 에 비해 크다. 이는 하향유동의 경우 원기둥이 경사짐에 따라 하향유동의 경우 우측 전단부근에서, 상향유동의 경우 좌측전단에서 유체의 유입이 수평인 경우보다 더욱 용이하여 유입속도가 빨라져 열전달이 활발해지기 때문이다. 단, (a)에서  $\phi=15^\circ$ 인 경우  $\phi=0^\circ$ 에 비해 경사각이 증가했음에도 불구하고 우측 전단부분의 열전달계수의 값이 작은 것은 이 조건에서 원기둥의 상부에 일부 비정상상태의 유동이 나타나 상대적으로 열전달량이 감소하기 때문이다. (Fig. 9(d) 참조)

$q_w \approx 690 \text{ W/m}^2$ 인 (b)의 경우  $\phi=0^\circ$ 에서 평균 열전달계수의 값이  $\phi=5^\circ$ 에 비해 작은 것은 이 조건에서 비정상상태 유동이 발생하여 열전달량이 감소하기 때문이다. 이러한 열전달 특성은 Fig. 9의 유동특성과 잘 일치한다.

Fig. 11은 대표적인 열유속  $q_w=102 \text{ W/m}^2$ ,  $185 \text{ W/m}^2$ ,  $450 \text{ W/m}^2$ ,  $690 \text{ W/m}^2$ 에 있어서 경사각의 변화에 따른 평균 누셀트수의 변화를 나타낸 그림이다.

전반적인 경향은 동일 유동형태에서 수평으로부터 경사각이 증가할수록 원기둥의 누셀트수는 점차 감소한다. 특히 모든 경사각에서 하향유동이 지배

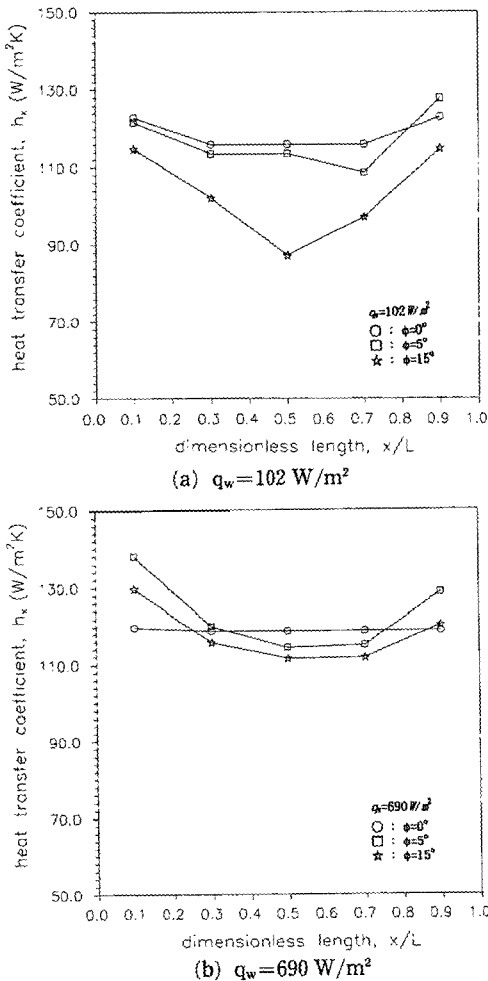


Fig. 10 Variation of local heat transfer coefficients with dimensionless cylinder length for different inclined angles at (a)  $q_w=102 \text{ W/m}^2$ , (b)  $q_w=690 \text{ W/m}^2$



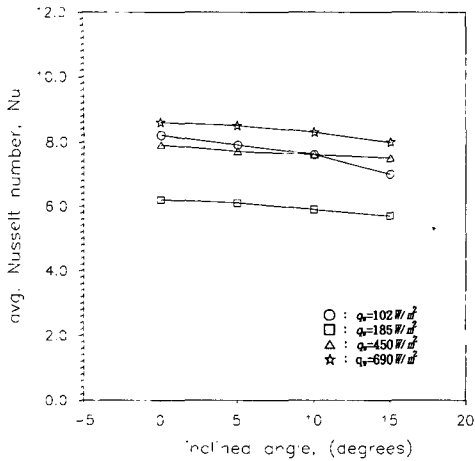


Fig. 11 Variation of average Nusselt numbers with inclined angles for representative heat flux

적으로 나타나는  $q_w = 102 \text{ W/m}^2$  인 경우에 경사각 증가에 대한 누셀트수의 변화가 가장 크다. 이는 경사각이 누셀트수에 미치는 영향이 비정상상태 유동영역보다 정상상태 유동영역, 상향유동인 경우보다 하향유동영역에서 크게 나타나기 때문이다.

### 5. 결 론

수평 및 수평으로부터 경사진 ( $\phi = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ ) 균일 열유속 조건의 원기둥이  $3.5^\circ\text{C}$ 의 순수물속에 잠겨 있는 경우 원기둥에 의해 발생하는 자연대류 열전달에 대하여 전 유동장의 가시화에 의한 실험적 연구를 수행하여 경사각 및 열유속의 변화에 따른 유동 및 열전달 특성을 구명할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 경사각에서 열유속이 증가할수록 원기둥 주위의 유동형태는 하향유동, 비정상상태 유동, 상향유동으로 변화한다.

(2) 동일 유동형태에서 경사각을 증가시키면 평균 누셀트수는 감소한다. 동일 경사각에서 열유속이 증가할수록 평균 누셀트수는 감소하여 비정상상태의 유동영역에서 최소값을 나타내다가 다시 증가한다. 수평 원기둥의 경우에 최소 누셀트수는 열유속  $q_w \approx 199 \text{ W/m}^2$  ( $\bar{T}_w \approx 6.13^\circ\text{C}$ ) 부근에서 나타난다.

(3) 하향유동이 지배적인 경우에 수평 원기둥의 유동 및 열전달 특성에서 경사 원기둥에 의한 특성으로의 천이는 경사각  $\phi = 15^\circ$  부근에서 나타난다.

(4) 경사각이 누셀트수에 미치는 영향은 비정상

상태 유동영역보다 정상상태 유동영역, 상향유동보다는 하향유동에서 크게 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) Gebhart, B. and Mollendorf, J. C., 1977, "A New Density Relation for Pure and Saline Water," *Deep-Sea Res.*, Vol. 24, pp. 831~848.
- (3) Sammakia, B. G., 1981, *Transient Natural and Mixed Convection Flows and Transport adjacent to an Ice Surface Melting in Saline Water*, Doctoral Dissertation, State Univ. of New York at Buffalo.
- (4) Carey, V. P., 1981, *Transport in Vertical Mixed Convection Flows and Natural Convection Flows in Cold Water*, Doctoral Dissertation, State Univ. of New York at Buffalo.
- (5) 유갑중, 예용택, 박상희., 1991, "저온인 순수물속의 등온 수직 얼음원기둥에 의해 야기되는 자연대류의 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제15권 제5호, pp. 1737~1746.
- (6) PL-Arabi, M. and Salman, Y. K., 1980, "Laminar Natural Convection Heat Transfer from an Inclined Cylinder," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 45~51.
- (7) Stewart, W. E., 1982, "Experimental Free Convection from an Inclined Cylinder," *Trans. of ASME, J. Heat Transfer.*, Vol. 114, pp. 34~40.
- (8) Oosthuizen, P.H., 1976, "Experimental Study of Free Convection Heat Transfer from an Inclined Cylinders," *Trans. of ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 672~674.
- (9) Nagendra, H.R., Tirunarayanan, M. A. and Ramachanran, A., 1969, "Free Convection Heat Transfer from Vertical Cylinders and Wires," *Chem. Eng. Science*, Vol. 24, pp. 1491~1495.
- (10) Kukulka, D.J., 1981, *Thermodynamic and Transport Properties of Pure and Saline Water*, Master Thesis, State Univ. of New York at Buffalo.