

두개의 축방향핀을 가진 전도관과 원통사이의 자연대류에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Natural Convection from a Conducting Tube with Two Axial Fins to a Surrounding Cylinder

안 철 린*, 정 태 현*, 권 순 석**
C. R. Ahn, T. H. Chung, S. S. Kwon

ABSTRACT

An experimental study has been performed on the heat transfer by the natural convection from a conducting tube with two axial fins to a surrounding cylinder.

In case of vertical fins, the maximum local Nusselt number of conducting tube appears at $\theta \approx 145^\circ$ and that of outer cylinder appears at $\theta = 0^\circ$, for $l_F = 0.3$. In case of horizontal fins, the maximum local Nusselt number of conducting tube appears at $\theta = 180^\circ$ and that of outer cylinder appears at $\theta = 0^\circ$.

The local Nusselt number of the upper fin and the downward fin shows negative values for $l_F = 1.0$

The local Nusselt number of the lower fin and the downward fin shows higher values than that of the upper fin and the upward fin.

The mean Nusselt number of conducting tube in case of vertical fins are increased in order of $l_F = 0.6, 0.3, 1.0$ and 0.0 , but in case of horizontal fins, in order of $l_F = 1.0, 0.6, 0.3$, and 0.0 .

The mean Nusselt number of outer cylinder in case of vertical fins are increased in order of $l_F = 1.0, 0.0, 0.3$ and 0.6 , but in case of horizontal fins, in order of $l_F = 0.6, 1.0, 0.3$, and 0.0 .

기 호 설 명

D : 전도관의 직경

g : 중력가속도

Gr : Grashof 수

h : 열전달 계수, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

k : 열전도율, $W/m \cdot ^\circ C$

L : 특성길이, $R_o - R_{i0}$

l : 무차원길이, $(R_o - R_{i0})/L$

Nu : 국소 Nusselt 수

Nu^* : 수정 국소 Nusselt 수

Pr : Prandtl 수

R : 반경방향 좌표

Ra_L : Rayleigh 수

T : 온도, $^\circ C$

α : 열확산 계수

* 동아대학교 대학원 기계공학과

** 동아대학교 공과대학 기계공학과

- β : 열팽창 계수
- ν : 동점성 계수
- θ : 원주방향 좌표
- <참 자>
- b : 채적
- F : 핀
- f : 유체
- io : 전도관의 외부면
- o : 원통의 내부면
- t : 전도관
- : 평균

1. 서 론

자연대류 열전달은 에너지 교환에 의하여 생기는 밀도차에 의해 유체 유동이 발생하면서 유체와 인접경계 사이에 열교환이 일어나는 현상이다.¹⁾

McAdams²⁾는 자연대류 열전달을 기하학적 모델별로 구분하여 수직표면, 수평원통, 수평평판 및 밀폐공간 등으로 이전의 연구들을 정리하고 그 각각에 대한 이론과 상사해들을 소개하였다. 이후 환상공간에 관한 연구들이 실험이나 수치해석으로 활발하게 수행되어 여러 가지 형상에 대한 열전달 특성을 보고하게 되었다.

수평전도관에 관한 연구로서는 Kuehn 과 Balvanz³⁾가 $Ra_L = 10^6$ 및 무차원 열전도율의 면수에서 관내부와 외부유체에서 국소 엔트로피의 발생에 대하여 연구하였다.

동심환상공간에 관한 연구는 Powe 등⁴⁾이 실험적으로 6개의 상이한 등온수평동심원통 사이 공기의 자연대류유동에 관한 압력과 온도변화의 특성을 연기를 사용하여 가시화 하였다.

본 연구에서는 수평원통내의 전도관에 두개의 축방향 핀을 수평과 수직으로 부착하고 핀의 길이 및 Rayleigh수를 변수로 하여 이들에 따른 등온선의 형상을 관찰하여 자연대류 열전달 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 장치의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같으며, 전도관과 핀의 재질은 스테인레스강($k=16.3\text{W/m}^\circ\text{C}$)을 사용하였고, 외부원통의 재질은 열전도율이 큰 구리($k=386\text{W/m}^\circ\text{C}$)를 사용하여 제작하였다.

내부 전도관은 니크롬선을 사용하여 가열하였으며, 가열기에 일정한 전력을 공급하기 위하여 전압조정기, 전압계, 전류계 등을 사용하였다. 수평원통의 내부에는 냉각수를 통과시켜서 전도관벽과 원통벽의 온도차가 일정하게 유지되도록 하였다. 전도관의 온도를 측정하기 위하여 6개의 Chromel-Alumel 열전대를 부착하였고, 전도관내의 채적 온도를 측정하여 온도 분포가 균일하도록 공급열량을 조절하였다.

수평원통의 내부 중앙에 전도관이 위치하도록 양단에 지지봉을 설치하여 전도관 표면과 원통벽 사이의 간격을 균일하게 하였다.

본 실험에서는 밀도차에 따른 온도장을 가시화하기 위하여 광선의 광로차를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계를 사용하였으며 광원은 He-Ne Laser 이다. 전도관과 원통 사이의 환상공간 유동영역에서 발생하는 온도 간섭무늬의 촬영은 온도장의 크기가 간섭계의 직경(80mm)보다 크기 때문에 대칭축을 중심으로 반만을 하였다.

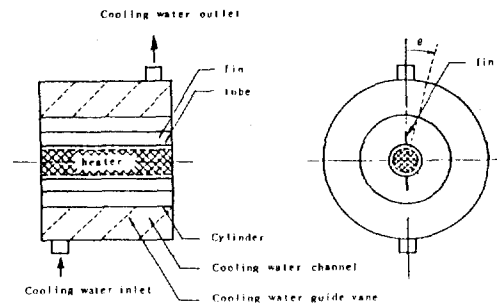


Fig.1 Cross Section of the Experimental Horizontal Annulus

3. 실험 해석

두개의 축방향 핀이 전도관에 부착되어 열 전달이 되는 경우 전도관과 핀 베이스간의 접촉부는 완전한 집합으로 접촉저항이 없는 것으로 가정하였고, 환상공간에서의 열전달은 유체의 층류자연대류에 의하여 일어나는 것으로 하였다.

실험으로 얻은 등온선의 간섭무늬사진은 공구현미경을 사용하여 판독하였으며 벽면으로부터의 거리와 프린지폭 등을 측정하여 벽면에서의 온도구배를 계산하여 국소 Nusselt 수를 구하였다.

국소 Nusselt 수를 계산하기 위하여 특성길이는 환상공간간격 L 로 취하고 하첨자 t, o, f, F 및 b 는 전도관, 원통, 유체, 핀 및 체적을 나타낸다. ΔT 는 벽면에서 가장 가까이 있는 두개의 프린지 사이의 온도차이고, b 는 이들 프린지 사이의 간격이다.

$$Nu = \frac{h \cdot L}{K_f} = - \frac{L}{T_b - T_o} \left(\frac{dT}{dR} \right) \dots\dots\dots (1-1)$$

$$\left(\frac{dT}{dR} \right) \cong \left(\frac{\Delta T}{\Delta R} \right) = \frac{\Delta T}{b} \dots\dots\dots (1-2)$$

수평전도관에서 국소 Nusselt 수는

$$Nu_t = - \frac{L}{T_b - T_o} \left(\frac{\Delta T}{b} \right) \dots\dots\dots (2)$$

수평원통에서 국소 Nusselt 수는

$$Nu_o = \frac{h_o \cdot L}{K_f} = \frac{L}{T_b - T_o} \left(\frac{\Delta T}{b} \right) \dots\dots\dots (3)$$

핀에서 국소 Nusselt 수는

$$Nu_F = \frac{h_F \cdot L}{K_f} = - \frac{L}{T_F - T_o} \left(\frac{T}{b} \right) \dots\dots\dots (4-1)$$

여기에서 사용된 핀 국소 Nusselt 수 Nu_F^* 를 다음과 같이 정의하여 사용하면

$$Nu_F^* = \frac{h_F \cdot L}{K_f} \left(\frac{T_F - T_o}{T_b - T_o} \right) = - \frac{L}{T_b - T_o} \left(\frac{T}{b} \right) \dots\dots\dots (4-2)$$

평균 전도관 및 평균 원통 Nusselt 수는 다음과 같다.

$$\bar{Nu}_t = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi Nu_t d\theta \dots\dots\dots (5-1)$$

$$\bar{Nu}_o = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi Nu_o d\theta \dots\dots\dots (5-2)$$

Rayleigh 수는 다음과 같다.

$$Ra_L = Gr \cdot Pr = \frac{g \beta L^3 (T_b - T_o)}{\nu \cdot \alpha} \dots\dots\dots (6)$$

4. 실험결과 및 고찰

동일 Rayleigh 수에서 무차원 핀의 길이가 $l_F=0.3$ 인 수직 혹은 수평으로 핀이 부착된 간섭무늬 사진을 Fig. 2에서 나타내었다. 간섭무늬사진을 관찰하여 보면 간섭무늬 간격이 전도관 하부에서는 좁게 나타나고 있다. 이는 전도관 하부에서는 유동이 상승함에 따라 경계층의 두께가 얇아져서 열전달이 잘되고 있기 때문이다. 또한 원주방향의 좌표(θ)를 기준으로 90° 이하의 유동영역에서는 온도반전현상이 생기는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 핀이 수직으로 부착된 경우, 각도 θ 에 대한 전도관의 국소 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다. 핀이 부착되지 않은 $l_F=0.0$ 에서는 θ 가 증가함에 따라 국소 Nusselt 수는 증가하였고 최대값은 $\theta=180^\circ$ 에서 나타났다.

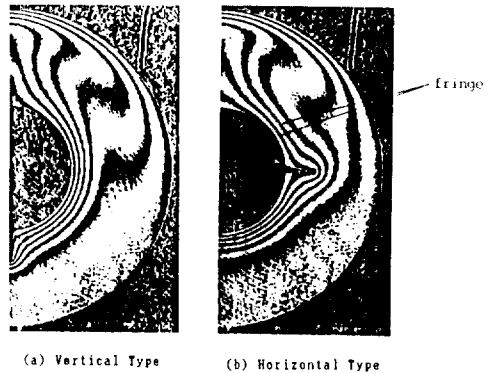


Fig. 2 Interferograms from the Experimental Test at $Ra_L=1.14 \times 10^4$

그러나 핀이 부착된 경우에는 최대값이 $\theta \approx 145^\circ$ 에서 나타났고, $\theta \geq 145^\circ$ 에서는 감소하였다. 또한 $l_F=1.0$ 에서는 $\theta \approx 10^\circ$ 부근에서 최소값이 나타났다. 이러한 현상들은 θ 가 증가함에 따라서 전반적으로 환상공간의 하부로 갈수록 유체가 낮은 온도를 유지하여 Nusselt 수가 증가하게 되고, 전도관의 상부는 하부로

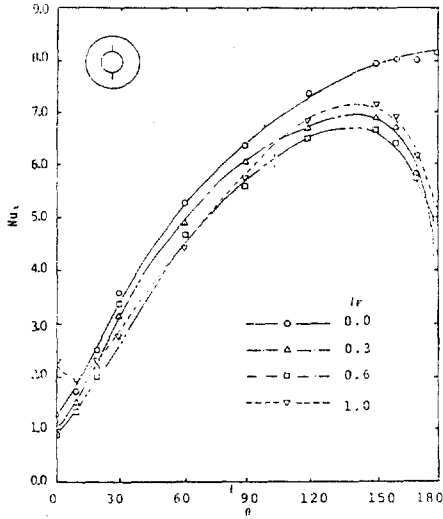


Fig. 3 Local Nusselt Number of Conducting Tube versus Angle at $D_o/D_{i_o}=2.6$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, $k_w/k_f=625$, Vertical Type

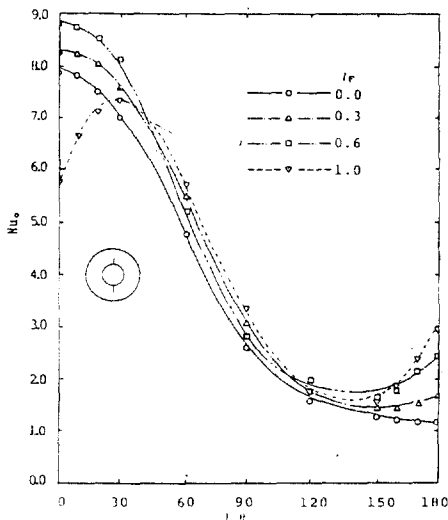


Fig. 4 Local Nusselt Number of Outer Cylinder versus Angle at $D_o/D_{i_o}=2.6$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, $k_w/k_f=625$, Vertical Type

부터의 가열된 유체로 인하여 낮은 Nusselt 수 분포를 나타내었다. $\theta \leq 145^\circ$ 에서는 하부에 부착된 핀으로부터의 가열유체가 전도관의 열전달을 억제하여 낮은 값이 나타났고, $l_F=1.0$ 인 경우 $\theta=0^\circ$ 근방에서는 핀이 격판의 역할을 하여 다소 높은 값이 나타났다.

Fig. 4는 핀이 수직으로 부착된 경우, 각도 θ 에 대한 외부원통의 국소 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다.

일반적으로 환상공간의 상부에서는 높은 Nusselt 수 분포를, 하부에서는 낮은 Nusselt 수 분포를 보이지만, $l_F=1.0$ 에서는 상부핀이 격판의 역할을 하여 환상공간의 상부에서의 유동을 억제하여 열전달을 감소시키고 있으며, $\theta \geq 150^\circ$ 에서 $l_F=0.3, 0.6$ 및 1.0 의 경우는 핀의 열전달이 전도관 하부에서의 열전달을 촉진시키는 역할을 하여 다소 증가하고 있다.

Fig. 5는 핀이 수평으로 부착된 경우, 각도 θ 에 대한 전도관의 국소 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다. $l_F=0.0$ 인 것을 제외하고 핀이 부착된 부근에서는 핀이 유체유동을 방해하여 국소 Nusselt 수는 낮게 나타났다. 최대 국소 Nusselt 수는 $\theta=180^\circ$ 에서 나타났다.

Fig. 6은 핀이 수평으로 부착된 경우, 각도 θ 에 대한 외부원통의 국소 Nusselt 수 분포를

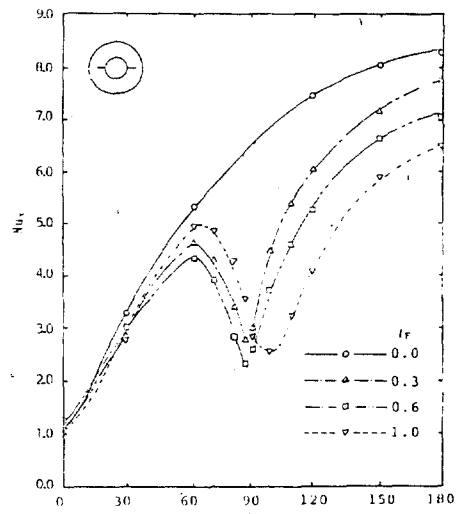


Fig. 5 Local Nusselt Number of Conducting Tube versus Angle at $D_o/D_{i_o}=2.6$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, $k_w/k_f=625$, Horizontal Type

나타낸 것이다. θ 가 증가함에 따라 국소 Nusselt 수가 $l_F=0.0$ 과 0.3 에서는 점차적으로 감소하지만, $l_F=0.6$ 과 1.0 에서는 핀이 부착된 부근에서 증가하다가 감소하였다. 이는 $l_F=0.6$ 과 1.0 인 경우 핀의 상부 부근에서는 유체가 정체되고 핀의 하부에서는 부력의 영향을 받기 때문이다. 최대 Nusselt 수는 $\theta=0^\circ$ 에서 나타났다.

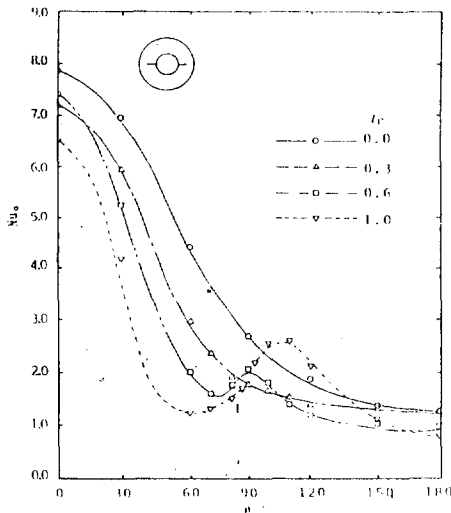


Fig.6 Local Nusselt Number of Outer Cylinder versus Angle at $D_o/D_{i0}=2.6$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, $k_w/k_f=625$, Horizontal Type

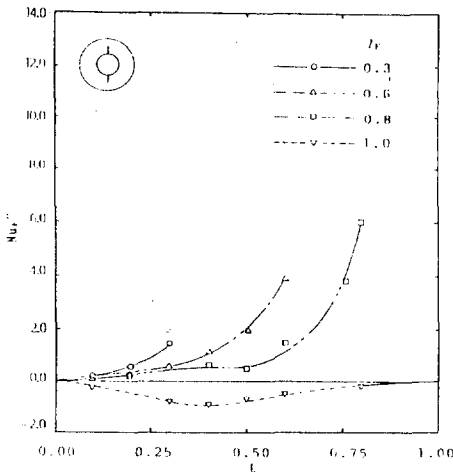


Fig.7 Local Nusselt Number of an Upper Fin versus Dimensionless Length at $D_o/D_{i0}=2.6$, $k_w/k_f=625$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, Vertical Type

Fig.7은 핀이 수직으로 부착된 경우, 특성 길이 L 에 대한 상부 핀의 국소 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다. 무차원핀의 거리가 증가함에 따라 $l_F=1.0$ 을 제외하고는 증가하는 경향이 나타났고, l_F 가 증가할수록 핀의 선단부는 국소 Nusselt 수가 증가하였다. $l_F=1.0$ 에서는 전체가 음의 값을 나타냈는데 이는 주위의 가열된 유체로부터 격판으로 열전달이 이루어지기 때문이다.

Fig.8은 핀이 수직으로 부착된 경우, 특성 길이 L 에 대한 하부 핀의 국소 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다. 모든 조건에서 국소 Nusselt 수는 양의 값이 나타났고, $l_F \leq 0.8$ 에서는 l_F 가 증가함에 따라서 핀 중간부까지는 미소하게 증가하다가 핀 선단에서는 급격하게 증가하였다. 이는 핀 저부에서 전도관이 열경계층에 영향을 받고, 핀 선단에서는 환상공간의 대류유동에 크게 영향을 받기 때문이다.

Fig.9는 핀이 수평으로 부착된 경우, 특성 길이 L 에 대한 상향핀의 국소 Nusselt 수를 나타낸 것이다. 국소 Nusselt 수는 $l_F=1.0$ 을 제외하고는 l_F 가 증가함에 따라 증가하였고, $l_F=1.0$ 인 경우에 최대값은 $L \approx 0.25$ 에서 나타났다.

Fig.10은 핀이 수평으로 부착된 경우, 특성 길이 L 에 대한 하향핀의 국소 Nusselt 수를

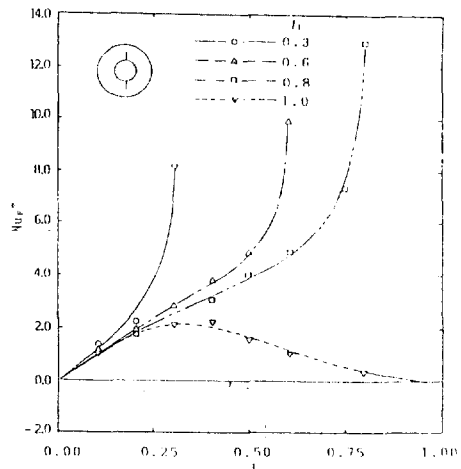


Fig.8 Local Nusselt Number of a Lower Fin versus Dimensionless Length at $D_o/D_{i0}=2.6$, $k_w/k_f=625$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, Vertical Type

나타낸 것이다. 국소 Nusselt 수는 $l_F=1.0$ 에서는 음의 값이, $l_F \leq 0.8$ 에서는 양의 값이 나타났고, l_F 가 증가함에 따라 값도 증가하였으며, 상향핀의 경우보다 높은 값이 나타났다. 이는 핀의 하부에서는 부력의 영향을 받고, 핀의 상부에서는 전도관의 열경계층의 영향을 받기 때문이다.

Fig. 11은 핀이 수직으로 부착된 경우, 전도관에서의 평균 Nusselt 수를 나타낸 것이다. $l_F=0.0$ 에서 열전달이 가장 잘 되었고, 그 다음은 $l_F=1.0$, $l_F=0.3$, $l_F=0.6$ 의 순으로 Nu-

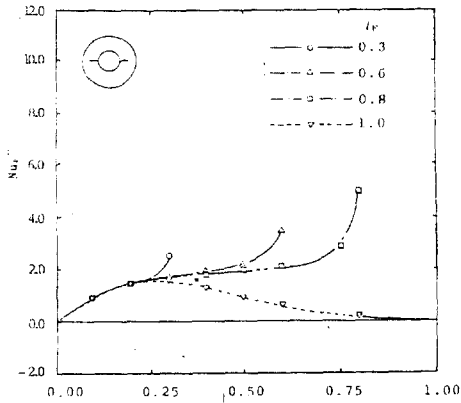


Fig. 9 Local Nusselt Number of an Upward Fin versus Dimensionless Length at $D_o/D_{i0}=2.6$, $k_w/k_f=625$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, Horizontal Type

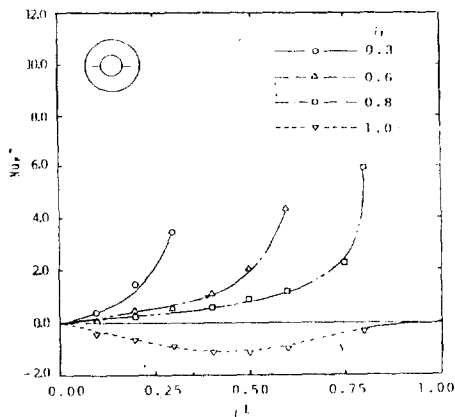


Fig. 10 Local Nusselt Number of a Downward Fin versus Dimensionless Length at $D_o/D_{i0}=2.6$, $k_w/k_f=625$, $Ra_L=1.14 \times 10^4$, Horizontal Type

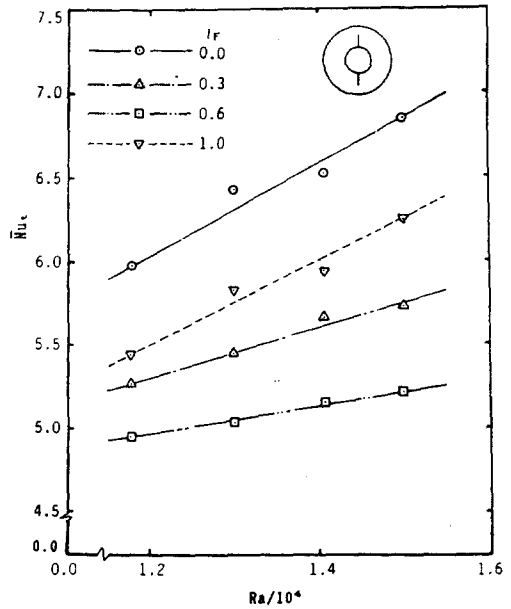


Fig. 11 Mean Nusselt Number of Conducting Tube versus Rayleigh Number at $D_o/D_{i0}=2.6$, $k_w/k_f=625$, Vertical Type

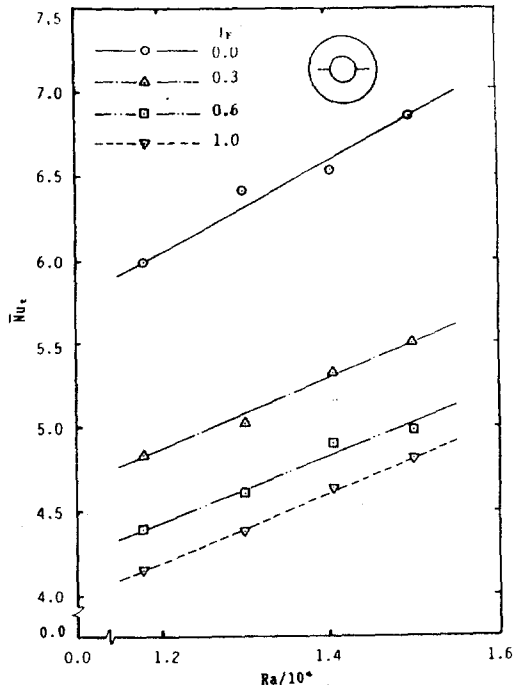


Fig. 12 Mean Nusselt Number of Conducting Tube versus Rayleigh Number at $D_o/D_{i0}=2.6$, $k_w/k_f=625$, Horizontal Type

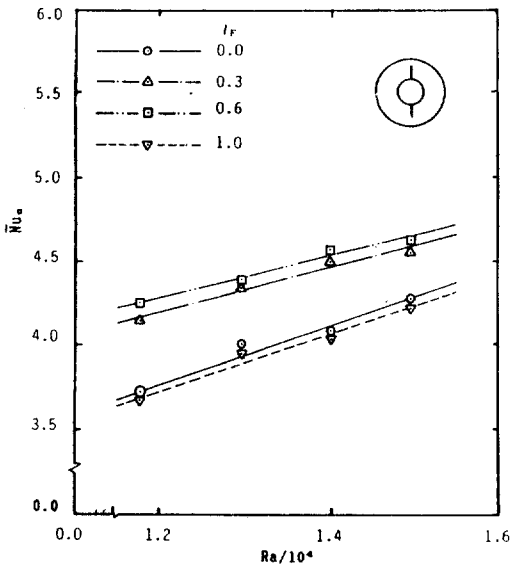


Fig. 13 Mean Nusselt Number of Outer Cylinder versus Rayleigh Number at $D_o/D_{io}=2.6$, $k_w/k_f=625$, Vertical Type

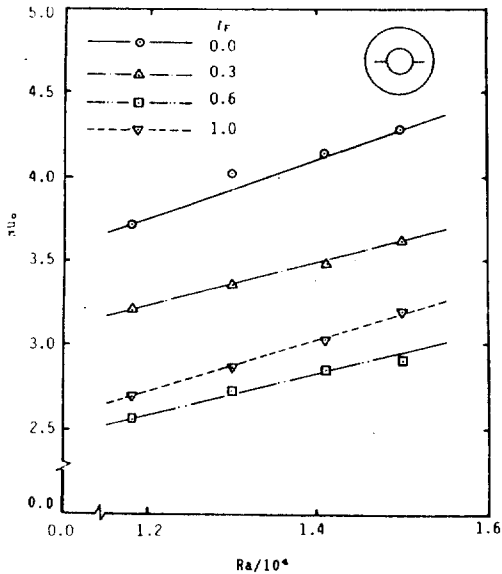


Fig. 14 Mean Nusselt Number of Outer Cylinder versus Rayleigh Number at $D_o/D_{io}=2.6$, $k_w/k_f=625$, Horizontal Type

sselt수 분포가 나타났다. $Ra_L=1.14 \times 10^4$ 에서 $l_F=0.6$ 보다 $l_F=0.3$ 은 6.5% 높게, $l_F=1.0$ 은 10.3% 높게, $l_F=0.0$ 은 21.3% 높게 나타났다.

Fig. 12는 핀이 수평으로 부착된 경우, 전도판에서의 평균 Nusselt 수를 나타낸 것이다. $l_F=0.0$ 에서 열전달이 가장 잘 되었고, 그 다음은 $l_F=0.3$, $l_F=0.6$, $l_F=1.0$ 의 순으로 Nusselt수 분포가 나타났다. $Ra_L=1.14 \times 10^4$ 에서의 평균 Nusselt수는 핀이 수직으로 부착된 경우가 수평으로 부착된 경우보다 $l_F=0.3$ 에서는 8.7%, $l_F=0.6$ 에서는 12.5%, $l_F=1.0$ 에서는 27.6% 높게 나타났다.

Fig. 13은 핀이 수직으로 부착된 경우, 원통에서의 평균 Nusselt 수를 나타낸 것이다. 원통에서의 평균 Nusselt 수는 $l_F=0.6$ 에서 최대 값을 나타냈는데, 이는 전도판에서 핀을 통하여 전도된 열이 환상공간의 대류유동을 촉진시켰기 때문이다. 또한 $l_F=1.0$ 에서 평균 Nusselt 수가 $l_F=0.0$ 보다 작은 것은 핀이 격판으로 작용하여 환상공간내에 유체유동을 다소 저해하고 있으며 하부핀에서 발생한 가열된 유체의 영향을 받기 때문이다.

Fig. 14은 핀이 수평으로 부착된 경우, 원통에서의 평균 Nusselt 수를 나타낸 것이다. 최대 평균 Nusselt 수는 $l_F=0.0$ 에서 나타났으며, 핀의 길이가 증가함에 따라 핀이 유체유동을 방해하므로 평균 Nusselt 수는 감소하였다. 그러나 $l_F=1.0$ 인 경우 $\theta=90^\circ$ 이상에서는 정체된 고온의 가열된 유체가 저온의 외부원통으로 열전달이 되기 때문에 $l_F=0.6$ 보다 높은 Nusselt 수 분포를 나타내었다.

5. 결 론

수평원통내의 전도판에 두개의 축방향 핀을 수직과 수평으로 부착하고 무차원 핀의 길이를 변화시킨 환상공간에서의 자연대류 열전달에 관한 연구결과는 다음과 같다.

(1) 수직방향으로 핀이 부착된 경우, 전도판에서의 최대 국소 Nusselt 수는 $l_F=0.0$ 일 때

$\theta=180^\circ$ 에서 나타났고, $I_F \geq 0.3$ 일 때 θ 는 145° 부근에서 나타났다. 원통에서의 최대 국소 Nusselt 수는 $I_F=1.0$ 일때 $\theta=30^\circ$ 부근에서 나타났고, $I_F \leq 0.6$ 일때 $\theta=0^\circ$ 에서 나타났다.

(2) 수평방향으로 핀이 부착된 경우, 전도판에서의 최대 국소 Nusselt 수는 $\theta=180^\circ$ 에서 나타났고, 원통에서의 최대값은 $\theta=0^\circ$ 에서 나타났다.

(3) 핀의 국소 Nusselt 수는 $I_F=1.0$ 을 제외하고, I_F 가 증가함에 따라서 증가하였고, 핀의 선단에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 $I_F=1.0$ 일 때, 상부핀과 하향핀의 Nusselt 수는 음의 값을 나타내었다.

(4) 상부핀 보다는 하부핀이, 상향핀 보다는 하향핀이 높은 국소 Nusselt 수를 나타내었다.

(5) 전도판에서의 평균 Nusselt 수는 핀이 수직으로 부착된 경우, $I_F=0.6, 0.3, 1.0$ 그리고 0.0 의 순으로 증가하였고, 핀이 수평으로 부착된 경우, $I_F=1.0, 0.6, 0.3$ 그리고 0.0 의 순으로 증가하였다.

(6) 원통에서의 평균 Nusselt 수는 핀이 수직으로 부착된 경우, $I_F=1.0, 0.0, 0.3$ 그리고 0.6 의 순으로 증가하였고, 핀이 수평으로 부착된 경우, $I_F=0.6, 1.0, 0.3$ 그리고 0.0 의 순으로 증가하였다.

참 고 문 헌

1. J.P. Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill Co., pp. 207-371, 1986.
2. W.H. McAdams, "Heat Transfer", McGraw-Hill Co., pp. 140-201, 1958.
3. T.H. Kuehn and J.L. Balvanz, "Conjugate Heat Transfer by Natural Convection from a Horizontal Heat Exchanger Tube", Proc. 7th Heat Transfer Conference, Vol. 2, pp. 317-322, 1982.
4. R.E. Powe, C.T. Carley and E.H. Bishop, "Natural Convection Flow Pattern in Cylindrical Annuli", ASME, J. Heat Transfer, pp. 310-314, 1969.
5. S.S. Kwon, "An Experimental Investigation of Natural Convection from a Horizontal Annulus with Spacers", Applied K.R.D., Vol. 12, No. 2, pp. 25-31, 1988.
6. T.H. Kuehn and R.J. Goldstein, "An Experimental and Theoretical Study of Natural Convection in the Annulus between Horizontal Concentric Cylinders", J. Fluid Mech., Vol. 74, pp. 695-719, 1976.
7. M.J. Shilston and S.D. Probert, "Effects of Horizontal and Vertical Spacers on the Heat Transfer across a Horizontal Annulus, Air-filled Cavity", Applied Energy(4), pp. 21-37, 1978.
8. C.H. Cho, K.S. Chang and K.H. Park, "Numerical Simulation of Natural Convection in Concentric and Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli", Trans. KSME, Vol. 6, No. 1, pp. 46-55, 1982.
9. H.S. Chung, "A Study on Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Conducting Tube", Ph.D. Thesis, Dong-A University, 1987.