

【論文】

水平環狀空間의 自然對流에서 隔板의
영향에 관한 實驗的 研究

Experimental study on Effects of Spacers on Natural Convection
from a Horizontal Annulus

鄭泰鉉* 金善政* 李範澈* 權純錫**
T. H. Chung S. J. Kim B.C. Lee S.S. Kwon

ABSTRACT

Natural convection in a horizontal annulus with spacers has been studied on the effects of diameter ratio and Rayleigh numbers and position of spacers by experimental method.

In case of vertical spacers, the local spacer Nusselt numbers show positive values on the lower spacer, but negative values on the upper spacer.

In case of horizontal spacers, the local spacer Nusselt numbers show positive values on the upward surface of spacer, but negative values on the downward surface of spacer.

The mean tube Nusselt numbers and mean cylinder Nusselt numbers with vertical spacer are increased 10% and 2.1%, respectively by those of horizontal spacer.

記號說明

D : 傳導管의 直徑

g : 重力加速度

Gr : Grashof 數, $g\beta L^3 (T_b - T_o) / \nu^2$

h : 熱傳達係數

K : 熱傳導率

L : 特性길이

Nu : 局所Nusselt 數, hL/k_f

Nu* : 修正局所 Nusselt 數

Pr : Prandtl 數, ν/α

R : 半徑方向座標

Ra : Rayleigh 數, $g\beta L^3 (T_b - T_o) / \nu\alpha$

T : 溫度, °C

α : 熱擴散係數

β : 熱膨脹係數

ν : 動粘性係數

θ : 圓周方向座標

添 字

b : 體積

f : 流體

io : 傳導管의 外部面

t : 傳導管

* 東亞大學校 大學院 機械工學科

** 東亞大學校 工科學 機械工學科

- o : 圓筒의 内部面
- s : 隔板
- w : 壁
- ∞ : 周圍
- c : 圓筒
- : 平均

I. 序 論

環狀空間内部에서 일어나는 自然對流 熱傳達 現象은 集中式 太陽熱集熱裝置, 축열조, 電子裝 置, 原子爐등에 널리 응용되고 있으며 이에 대 한 研究가 活潑히 進行되고 있다.

Kuehn 과 Goldstein¹⁾은 環狀空間內的 流體 가 물과 空氣인 경우 Rayleigh 數, 直徑比 및 Prandtl 數를 변수로 하여 實驗的으로 研究하 였다.

Kwon 등²⁾은 水平同心環狀空間內에 120° 間 隔으로 3個의 隔板을 附着하여 數值解와 實驗 으로 熱傳達特性을 考察하였다.

Chung³⁾은 水平傳導管에서 自然對流 現象을 Rayleigh 數와 Prandtl 數 및 管熱傳導率의 變化 등으로 考察하였고,

Kwon 등⁴⁾은 水平傳導管과 水平圓筒사이의 環 狀空間에서 直徑比 2.6인 경우 垂直隔板과 水 平隔板이 附着된 경우에 대하여 實驗的으로 研 究하였다.

本 研究에서는 水平傳導管과 水平圓筒사이 에 隔板을 가진 環狀空間에서 自然對流가 일어나는 경우 작동유체를 空氣로 하고 直徑比 1.8 과 2.6에 대하여 Rayleigh 數 $3.21 \times 10^3 \sim 1.20 \times 10^4$ 범위에서 隔板位置가 自然對流에 미치는 영향을 實驗的으로 考察하였다.

II. 實驗裝置 및 方法

本 實驗에 使用된 試驗部分의 概略圖는 Fig. 1과 같으며 實驗條件은 Table 1에 나타내었다. 傳導管의 材質은 스테인레스鋼, (열전도율, $16.3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)은 圓筒의 材質은 純鋼 (열전도율,

$386 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) 이고 隔板은 베이클라이트 (열전 도율, $0.232 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) 로 하였다.

圓筒外部에서 定常狀態를 얻기위해서 냉각수 통로를 만들어 냉각수를 供給하였고, 加熱器에 서 一定한 熱量을 供給하기위하여 電壓調節器, 電壓計 및 電流計를 使用하였다. 圓筒의 溫度가 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 범위의 오차로 되었을때 定常狀態로 된것으로 간주하였으며 약 3時間 정도 소요되 었다.

水平傳導管과 水平圓筒 사이의 環狀空間 流動 領域에서 발생되는 干涉무늬를 Mach-Zehnder 干涉計를 使用하여 촬영하였고, 촬영은 溫度場 크기가 干涉計의 直徑보다 크기때문에 대칭축을 中心으로 溫度場의 반만을 하였다.

III. 實驗解析

傳導管, 圓筒 및 隔板에서 Nusselt 數를 계 산하기 위하여 特性길이는 L로 하였으며 本 實 驗에서 求한 Nusselt 數는 다음과 같다.

水平傳導管에서의 一般的인 局所Nusselt 數 는 다음과 같다.

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

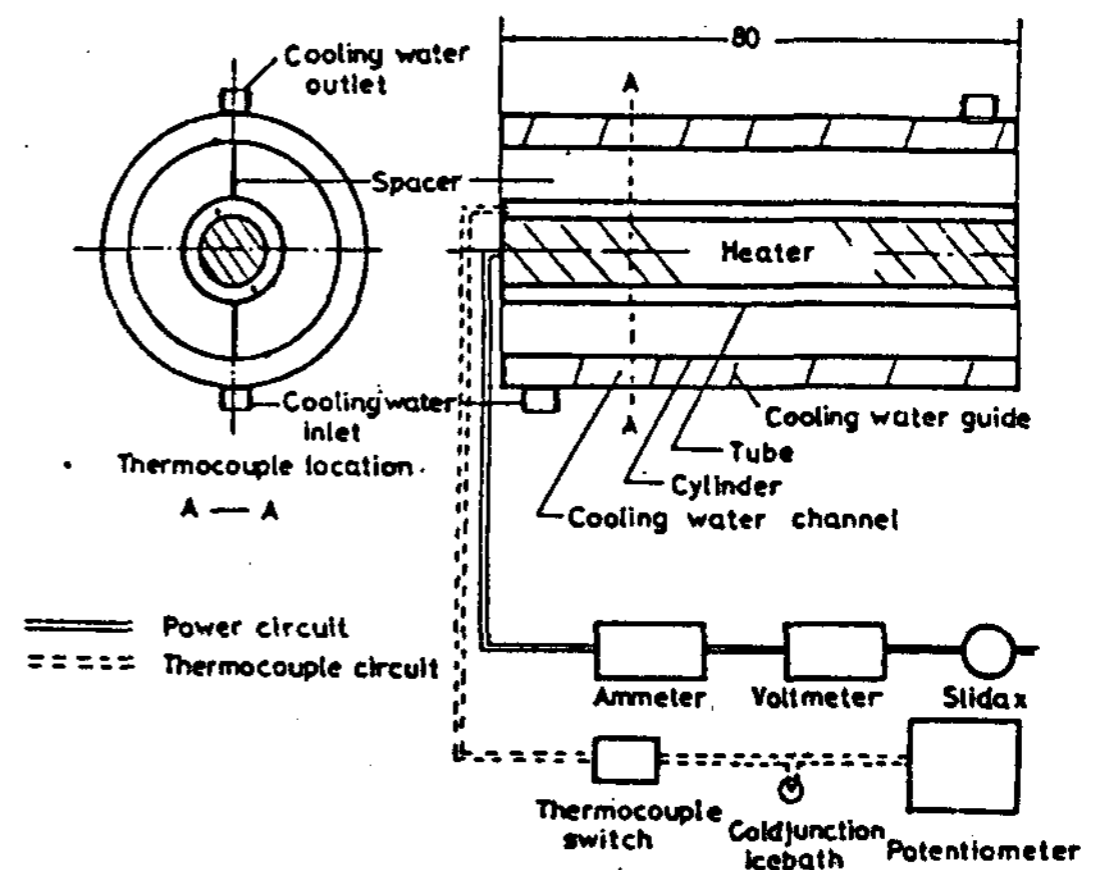


Fig. 1 Schematic diagram of the geometry investigated

Table 1 Experimental conditions of annuli

($D_o/D_{i0} = 1.8, D_o = 47 \text{ mm}, D_{i0} = 26.1 \text{ mm}$)

RUN NUMBER	TYPE	T_b (°C)	T_o (°C)	ΔT (°C)	T_∞ (°C)	T_{i0} (°C)	Ra_L	Pr
1	⊙	65.02	23.88	41.04	25.79	64.07	3.21×10^3	0.702
2		75.04	23.97	51.06	25.81	74.06	3.74×10^3	0.697
3		85.03	24.06	61.06	25.82	64.09	4.18×10^3	0.695
4		95.03	24.15	71.05	25.85	94.04	4.57×10^3	0.693
1	⊙	65.01	23.96	41.05	25.80	64.01	3.21×10^3	0.702
2		75.03	24.04	51.06	25.82	74.01	3.74×10^3	0.697
3		85.02	24.13	61.04	25.84	84.03	4.18×10^3	0.695
4		95.03	24.22	71.06	25.85	94.01	4.57×10^3	0.693

그런데 $(\frac{dT}{dR}) \approx (\frac{\Delta T}{\Delta R}) = (\frac{\Delta T}{b})$ 이므로

$$\bar{Nu}_s^* = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_s dr \dots\dots\dots (5)$$

局所傳導管 Nusselt 數 (local tube Nusselt number) 는 다음과 같다.

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

ΔT 는 벽면에서 가장 가까이 있는 2個의 프린지 사이의 溫度差이고, b 는 이 프린지 사이의 間隔이다.

여기에서 使用한 修正 局所隔板 Nusselt 數 (modified local spacer Nusselt number), Nu_s^* 를 다음과 같이 정의하고 간단히 局所隔板 Nusselt 數로 使用한다.

$$Nu_s^* = \frac{h_s L}{K_f} \left(\frac{T_s - T_o}{T_b - T_o} \right) = - \frac{L}{T_b - T_o} \left(\frac{\Delta T}{b} \right) \dots\dots\dots (3)$$

平均傳導管 및 平均圓筒 Nusselt 數 (mean cylinder Nusselt number) 는 다음과 같다.

$$\bar{Nu}_t = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi Nu_t d\theta$$

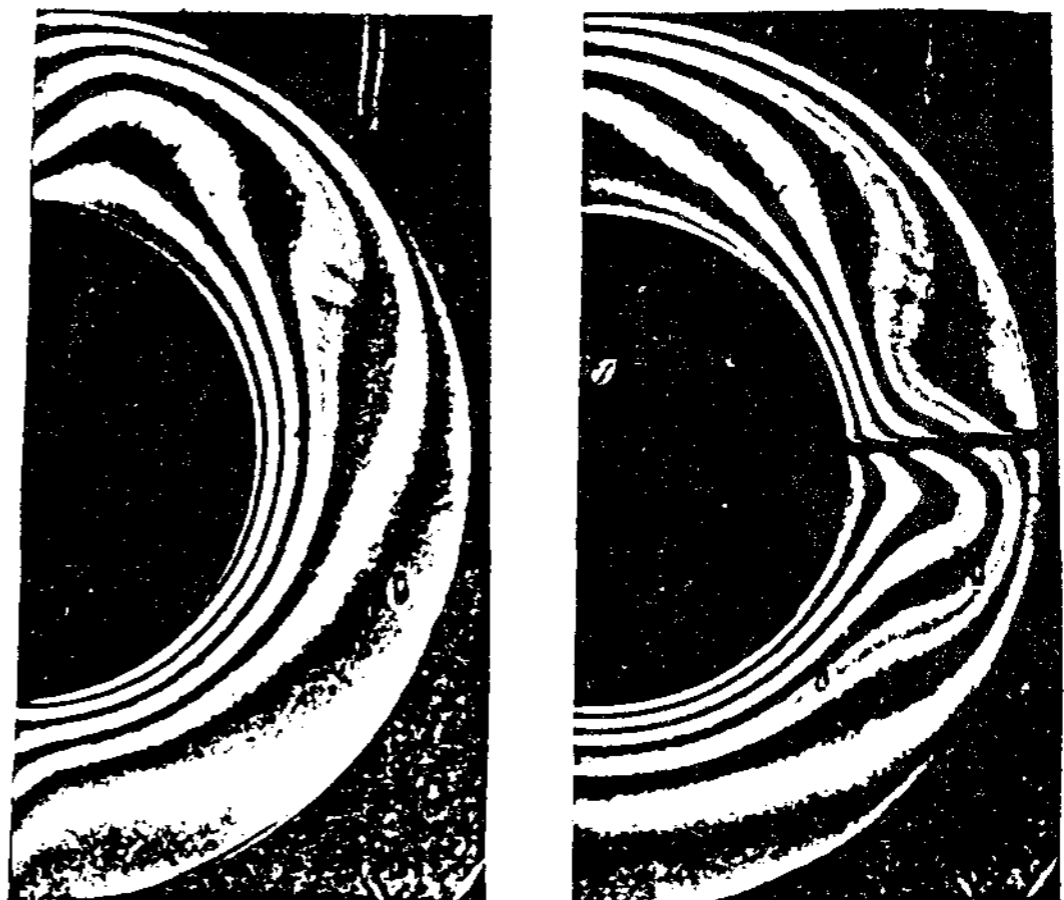
$$\bar{Nu}_c = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi Nu_c d\theta \dots\dots\dots (4)$$

平均隔板 Nusselt 數 (mean spacer Nusselt number) 는 다음과 같다.

IV. 實驗結果 및 考察

環狀空間內에 隔板을 垂直과 水平으로 附着한 경우의 干涉사진을 Fig. 2에 나타내고 있다.

干涉사진을 보면 干涉무늬間隔은 傳導管 下部에서 좁고, 上部에서는 넓다. 이는 傳導管 下部에서 熱傳達이 잘되기 때문이다.



a) Vertical spacers. b) Horizontal spacers.

Fig. 2 Interferograms from the experimental test at $Ra_L = 3.21 \times 10^3, D_o/D_{i0} = 1.8$

Rayleigh 數를 변수로 하고 隔板을 垂直과 水平으로 附着한 경우, 干涉사진을 分析 考察한 結果는 다음과 같다.

Fig. 3 은 垂直隔板이 附着된 경우, 여러가지 Rayleigh 數에서 θ 에 대한 局所傳導管 Nusselt 數 分布를 나타낸다. 局所Nusselt 數는 θ 가 增加함에 따라 $\theta \leq 145^\circ$ 에서는 增加하고 $\theta \geq 145^\circ$ 에서는 減少하였으며 最大局所 Nusselt 數는 $\theta \approx 145^\circ$ 에서 나타났다.

Fig. 4 는 水平隔板이 附着된 경우, 局所傳導管Nusselt 數는 θ 가 增加함에 따라 隔板의 上部에서는 $\theta \leq 70^\circ$ 에선 增加하고 $70^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 에서는 減少하였으며 隔板下部에서는 $90^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$ 에서 減少하고 $\theta \geq 100^\circ$ 에서는 增加한다. 最大局所Nusselt 數는 $\theta = 180^\circ$ 에서 나타났는데, 이는 隔板이 對流流動을 妨害하여 熱傳達이 鈍化된 때문이다.

Fig.5 는 垂直隔板이 附着된 경우, 여러가지 Rayleigh 數에서 θ 에 대한 局所圓筒Nusselt 數의 分布를 나타낸다. 局所Nusselt 數는 $\theta \leq 20^\circ$ 에서는 增加하고 $20^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$ 에서는 減少하였으며 $\theta \geq 150^\circ$ 에서는 增加하였다. 最大局所Nusselt 數는 $\theta \approx 20^\circ$ 에서 나타났으며 이 部分에서는 溫度場의 관찰로 보아서 流

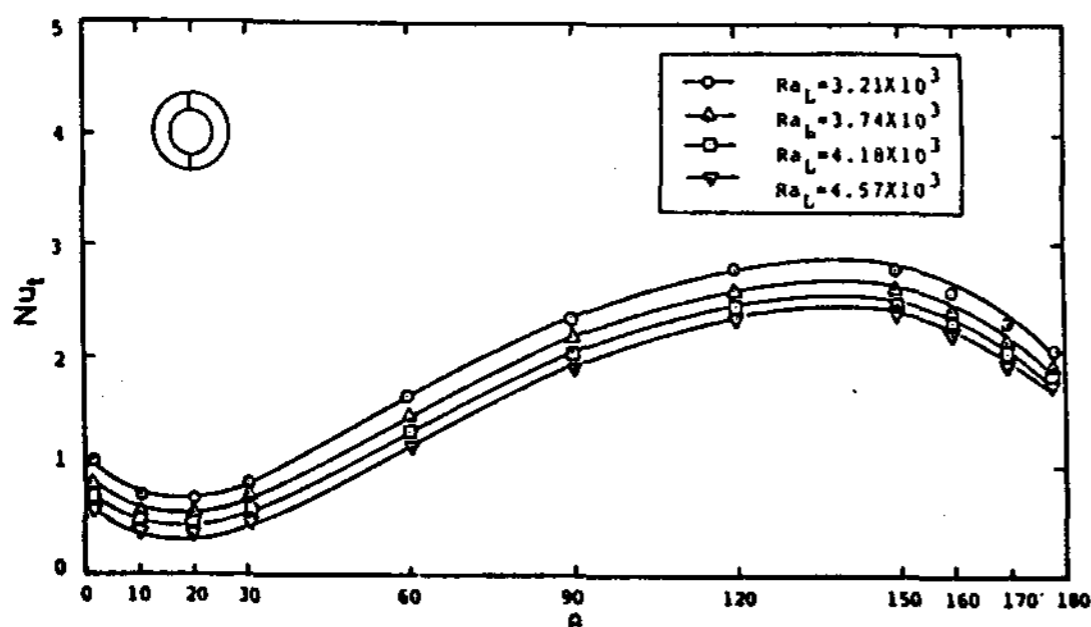


Fig. 3 Local tube Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/Dio=1.8$, $Kw/K_f=625$, $Ks/K_f=9$, vertical spacers

動이 活潑하다.

Fig. 6 은 水平隔板이 附着된 경우, 局所圓筒Nusselt 數는 θ 가 增加함에 따라 $0 \leq \theta \leq 80^\circ$ 에서는 減少하고 $80^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$ 에서는 增加하며 $\theta \geq 105^\circ$ 에서는 다시 減少하였다. 隔板上部에서는 對流流動이 活潑하여 最大Nusselt 數는 $\theta = 0^\circ$ 에서 나타났다.

Fig. 7 은 垂直隔板이 附着된 경우, 여러가지 Rayleigh 數에서 無次元 隔板길이, $L/(r_o - r_{i0})$ 에 대한 局所隔板Nusselt 數 分布를 나타낸다.

局所隔板Nusselt 數는 下部隔板에서는 양의 값을, 上部隔板에서는 隔板附近에 加熱된 上昇流가 많이 모여 이 뜨거운 流體로부터 隔板으로 熱傳達되기 때문에 음의 값을 나타내었다.

Fig. 8 은 水平隔板이 附着된 경우, 局所隔板Nusselt 數 分布를 나타내었다. 局所隔板 Nusselt 數는 上向表面에선 양의 값을, 下向表面에서 음의 값을 나타내었다. 이는 上向에서는 隔板에 의하여 自然對流가 잘되고, 下向에서는 加熱된 上昇流가 停滯되기 때문이다.

Fig. 9는 여러가지 Rayleigh 數에서 直徑比 1.8에 대한 平均傳導管Nusselt 數를 直徑比 2.6의 경우와 비교한 것이다. 直徑比 1.8에 대한 平均傳導管Nusselt 數는 直徑比 2.6의

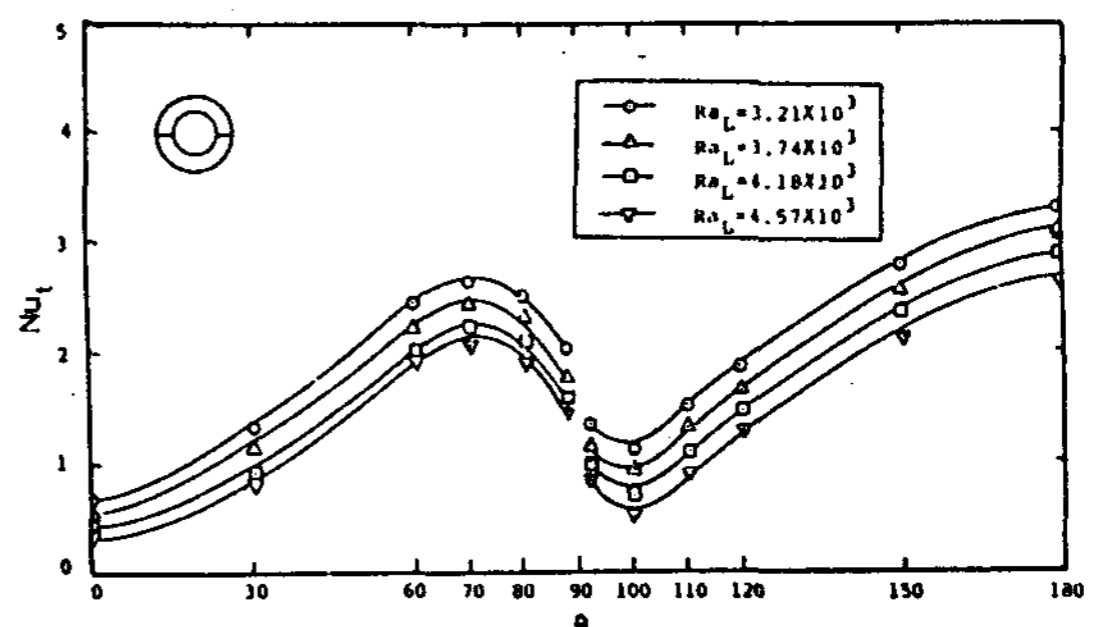


Fig. 4 Local tube Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/Dio=1.8$, $Kw/K_f=625$, $Ks/K_f=9$, horizontal spacers

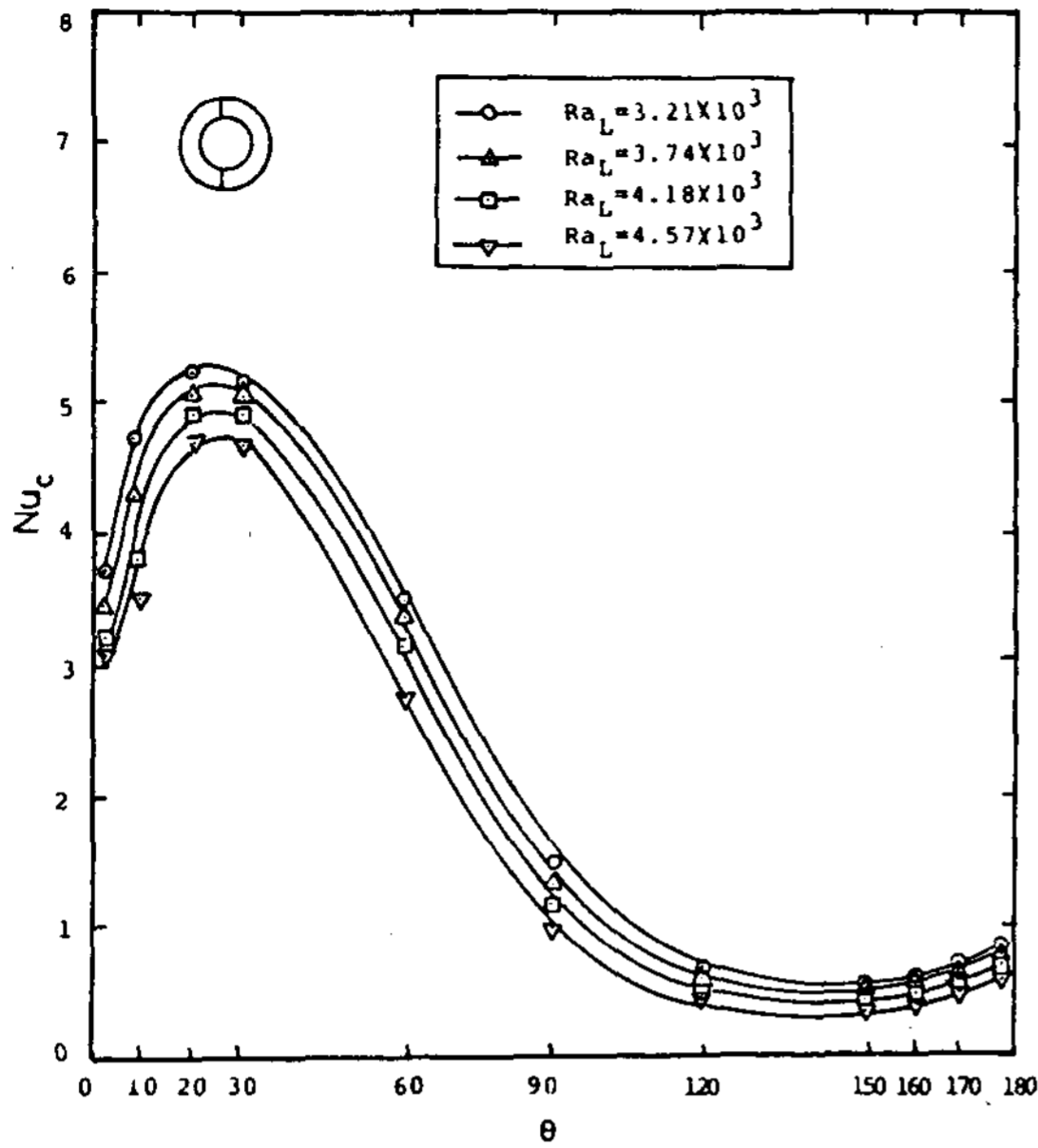


Fig. 5 Local cylinder Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/D_{i0}=1.8$, $K_w/K_f=625$, $K_s/K_f=9$, vertical spacers

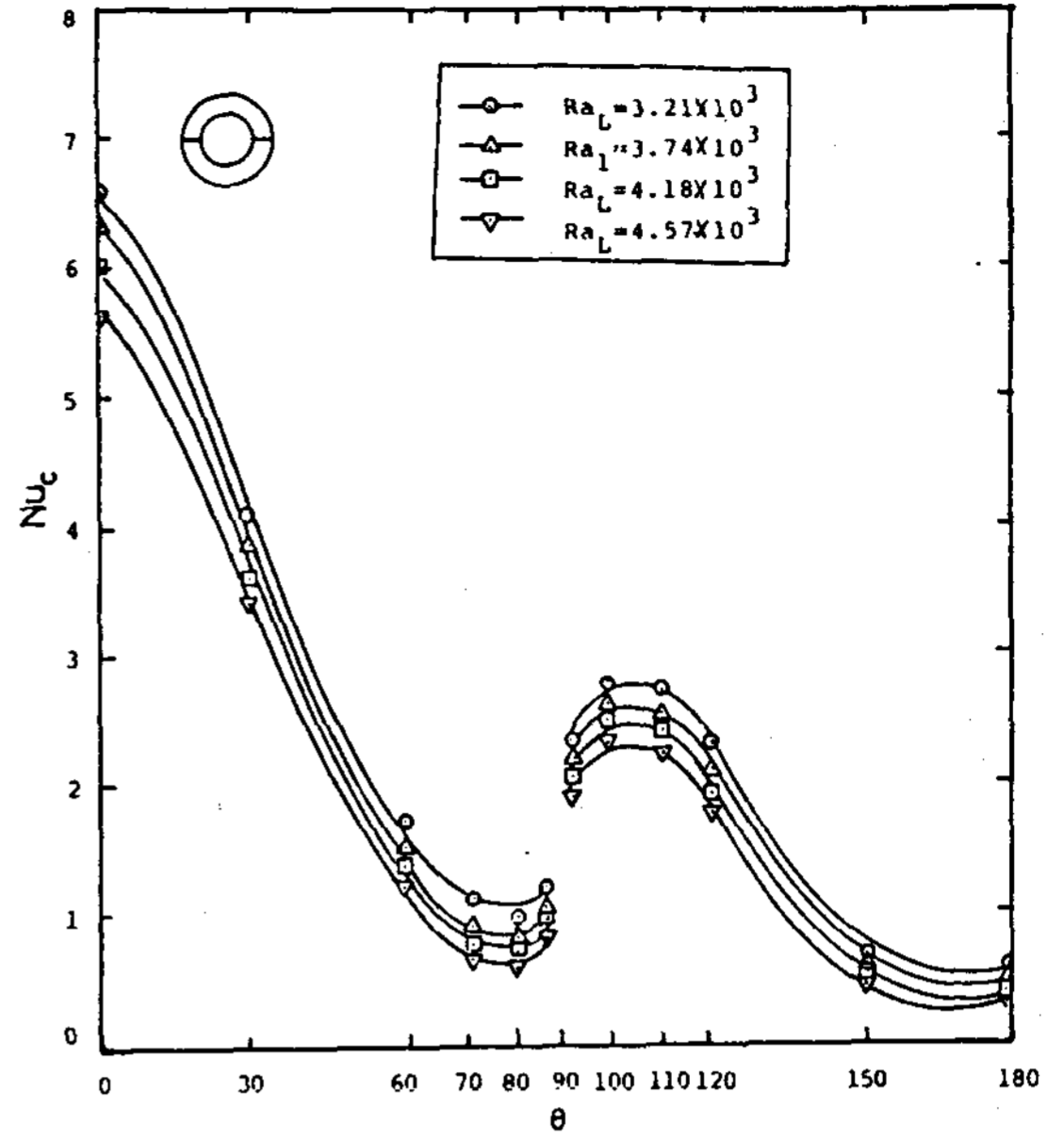


Fig. 6 Local cylinder Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/D_{i0}=1.8$, $K_w/K_f=625$, $K_s/K_f=9$, horizontal spacers

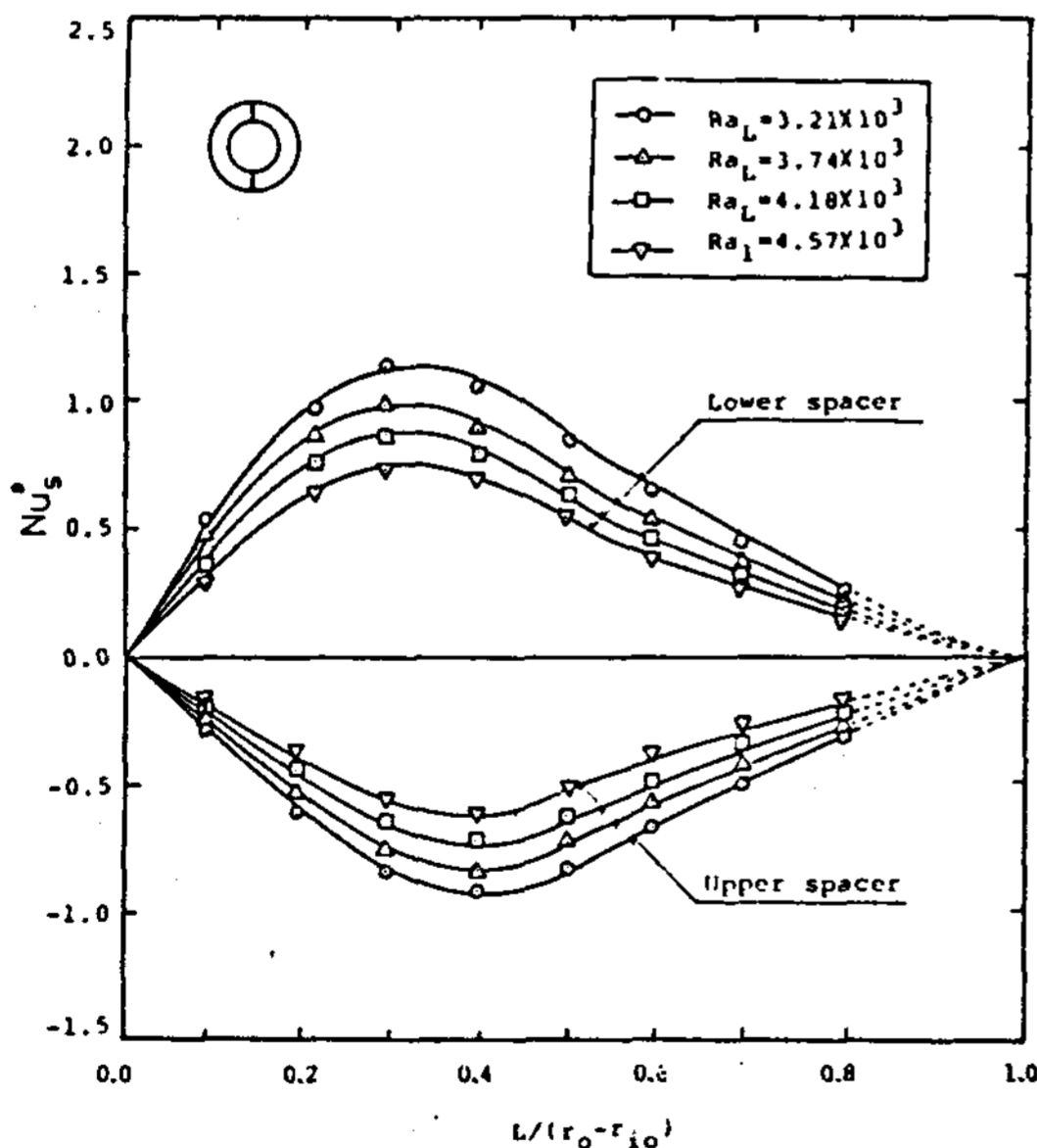


Fig. 7 Local Spacer Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/D_{i0}=1.8$, $K_w/K_f=625$, $K_s/K_f=9$, vertical spacers

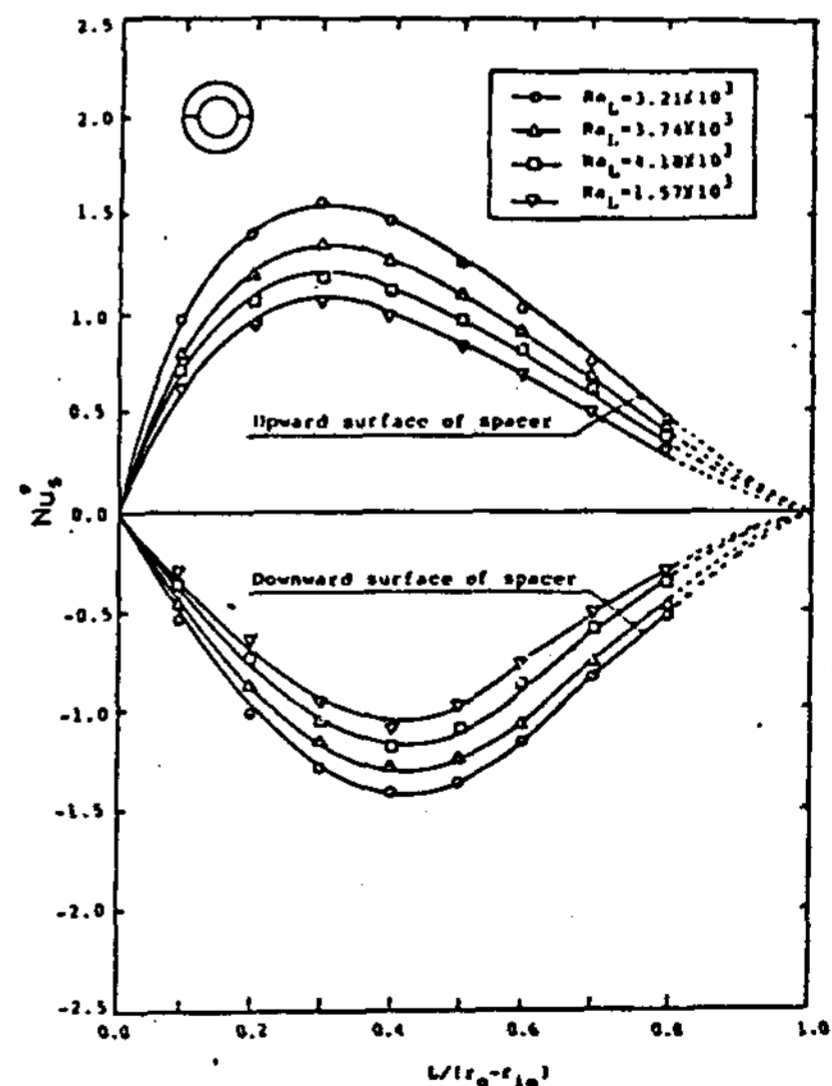


Fig. 8 Local spacer Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/D_{i0}=1.8$, $K_w/K_s=625$; $K_s/K_f=9$, horizontal spacer

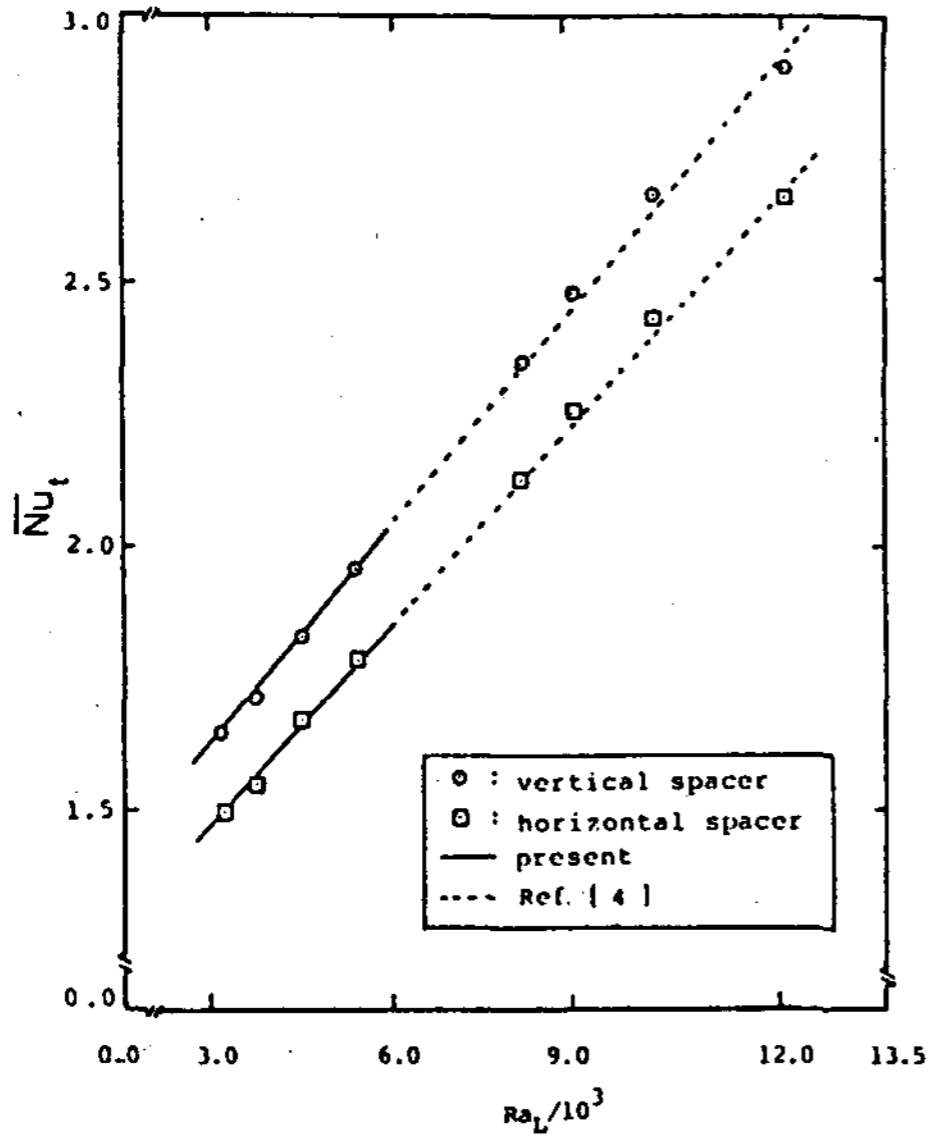


Fig. 9 Mean tube Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/Dio=1.8$, $Kw/Kf=625$, $Ks/Kf=9$

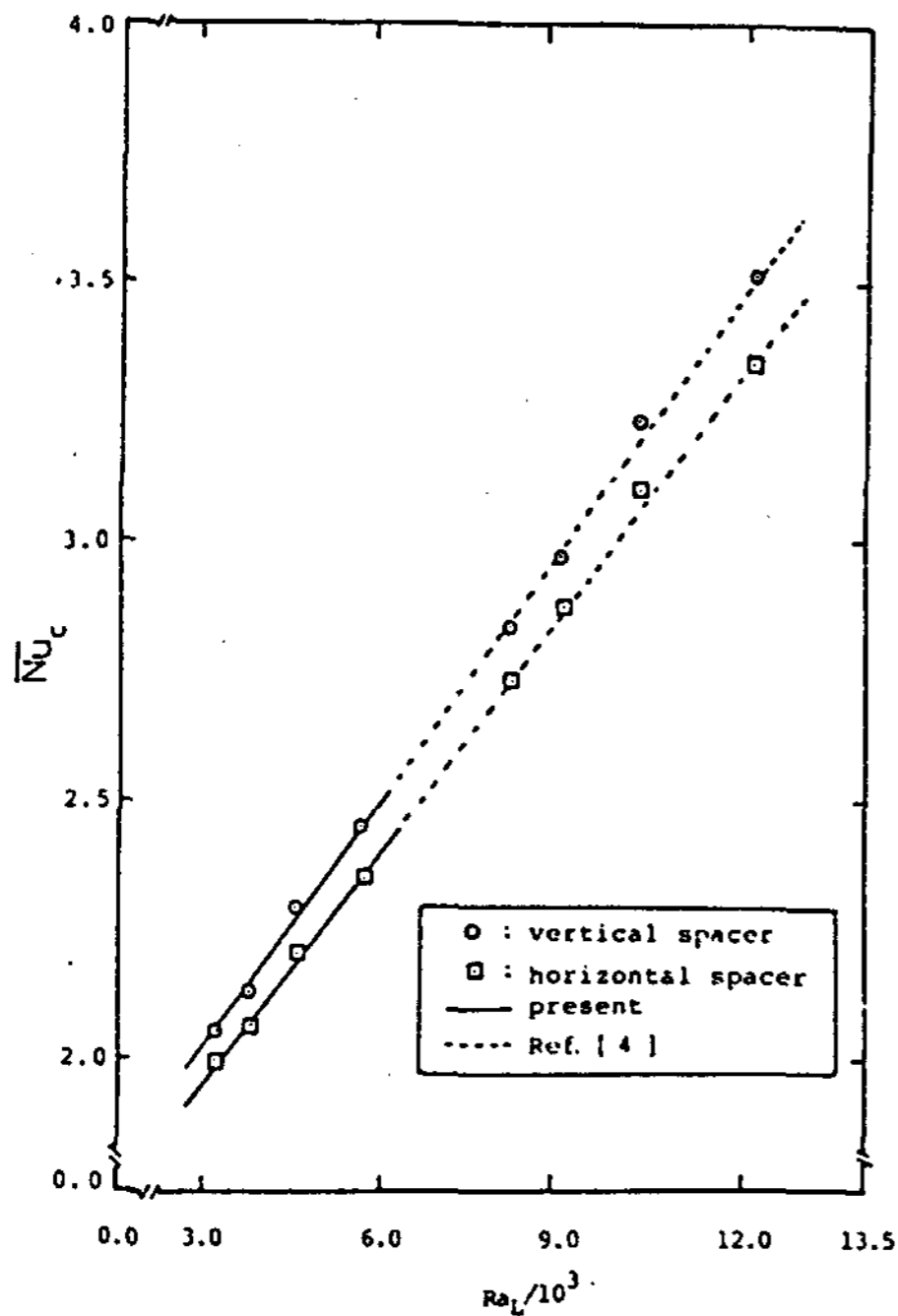


Fig. 10 Mean cylinder Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/Dio=1.8$, $Kw/Kf=625$, $Ks/Kf=9$

경우와 비교하여 낮게 나타나는데 이는 環狀空間의 間隔이 減少되기 때문이다. 또한 直徑比에 關係없이 平均傳導管 Nusselt 數는 Rayleigh 數의 增加에 따라 선형적으로 增加되었다.

垂直隔板이 附着된 경우의 平均傳導管 Nusselt 數가 水平隔板이 附着된 경우보다 높게 나타났으며, $Ra_L = 3.21 \times 10^3$ 에서 10% 높았다. 이는 浮력이 垂直隔板에 平行으로 作用하여 自然對流가 촉진되기 때문이다.

Fig. 10 은 여러가지 Rayleigh 數에서 平均圓筒 Nusselt 數를 直徑比 2.6의 경우와 비교한 것이다. 直徑比 1.8에 대한 平均 Nusselt 數는 直徑比 2.6의 경우와 비교하면 낮게 나타내며 $Ra_L = 3.21 \times 10^3$ 에서 垂直隔板을 가진 圓筒이 水平隔板을 가진 圓筒보다 2.1% 增加되었다. 이 增加가 傳導管의 경우보다 작은 것은 垂直隔板보다 水平隔板이 環狀空間에 熱傳達을 많이 하기 때문이다.

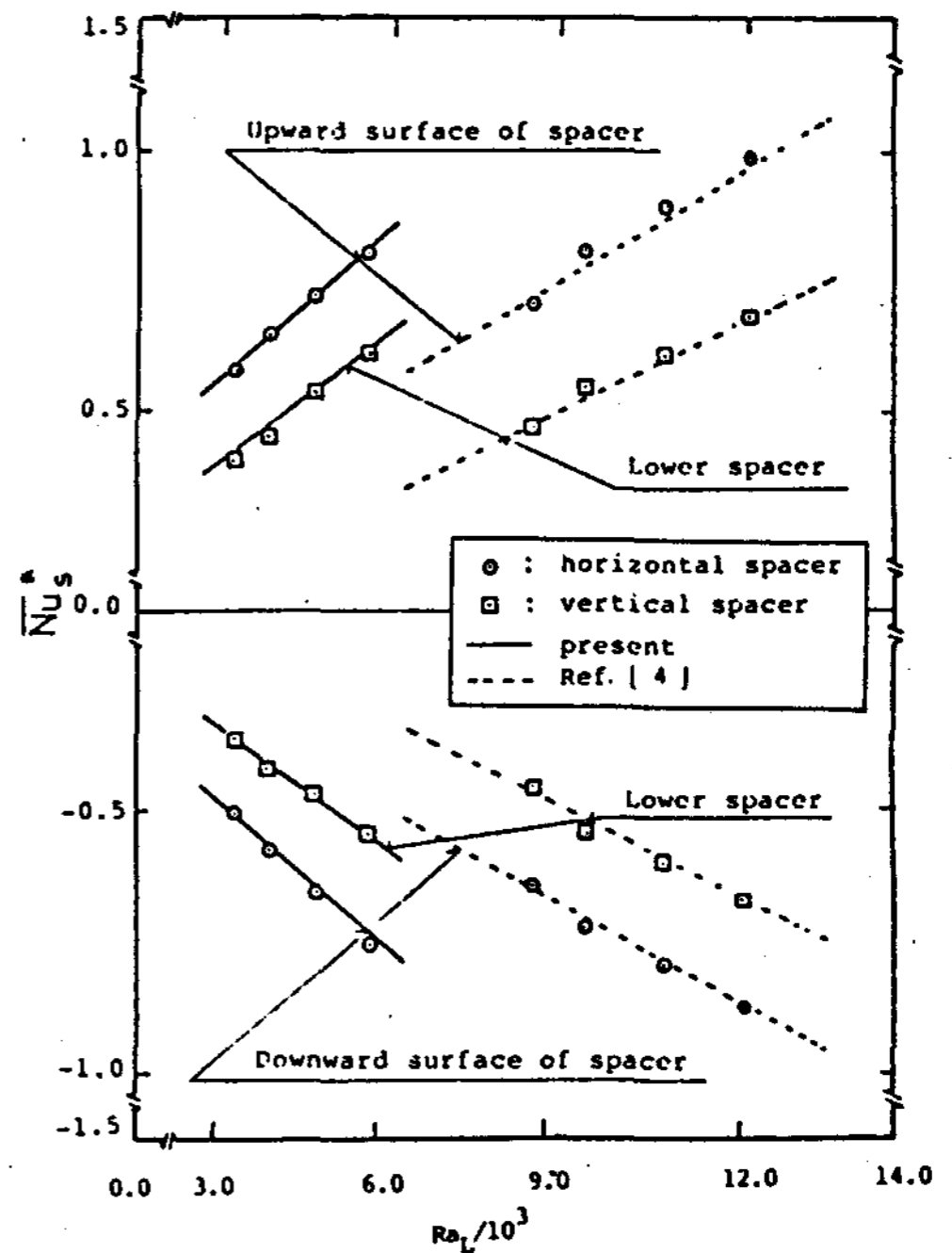


Fig. 11 Mean spacer Nusselt number for various Rayleigh numbers at $Do/Dio=1.8$, $Kw/Kf=625$, $Ks/Kf=9$

Fig.11 은 여러가지 Rayleigh 數에서 直徑比 1.8 에 대한 平均隔板Nusselt 數를 直徑比 2.6 의 경우와 비교한 것을 나타낸다. 平均 Nusselt 數는 直徑比 2.6 의 경우와 비교하면 Rayleigh 數의 增加에 따라 선형적으로 增加하는 것보다 높게 나타났다. 이는 隔板길이가 짧아 隔板에서 熱傳達이 잘 되기 때문이다. 또한 Rayleigh 數가 增加함에 따라 水平隔板의 上向表面과 垂直隔板의 下部隔板에서는 양의 값으로 增加하고, 水平隔板의 下向表面과 垂直隔板의 上部隔板에서는 음의 값으로 절대치가 增加하였다. 이는 對流流動에 水平隔板이 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

V. 結 論

空氣中の 定常層流狀態에서 隔板을 가진 水平環狀空間에서의 自然對流 現象을 直徑比, Rayleigh 數, 隔板의 位置를 변화시켜 實驗적으로 考察한 結果는 다음과 같다.

1. 垂直隔板의 경우 最大局所Nusselt 數는 傳導管에서 $\theta \approx 145^\circ$, 圓筒에서 $\theta \approx 20^\circ$ 에서 나타났다.
2. 水平隔板의 경우, 最大局所Nusselt 數는 傳導管에서 $\theta = 180^\circ$, 圓筒에서 $\theta = 0^\circ$ 에서 나타났다.
3. 隔板에서의 局所Nusselt 數는 垂直隔板의 경우, 上部隔板에서는 음의 값을, 下部隔板에서는 양의 값을 나타내고, 水平隔板의 경우, 上向表面에서는 양의 값을, 下向表面에서는 음의 값을 갖는다.

4. $Ra_L = 3.21 \times 10^3$ 에서 垂直隔板의 경우가 水平隔板의 경우보다 平均傳導管Nusselt 數는 10%, 平均圓筒Nusselt 數는 2.1% 가 높게 나타났다.
5. 一般적으로 Nusselt 數는 直徑比 2.6 보다 直徑比 1.8이 낮게 나타났다.

REFERENCES

1. 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.
2. S.S. Kwon, T.H. Kuehn and T.S. Lee, "Natural convection in the annulus between horizontal circular cylinders with three axial spacers", ASME., J. Heat Transfer, Vol. 104, pp.118-124, 1982.
3. H.S. Chung, "A study on natural convection heat transfer from a horizontal conducting tube", Ph.D. Thesis, Dong-A University, 1986.
4. S.S. Kwon, "An Experimental Investigation of Natural Convection from a Horizontal Annulus with Spacers". K.R.D, Dong-A University, Vol.12, No.2, pp.25-31, 1988.
5. W. Hauf and U. Grigull, "Optical Methods in Heat Transfer," Advances in Heat Transfer Vol.6, pp.133-366, 1970