

내원통의 편심이 수평환상공간내 자연대류열전달에 미치는 영향

김무현
기계공학과

<요 약>

내원통의 수직 편심이 수평 두 원통사이의 환상공간내 자연대류열전달특성에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. 하부편심인 경우 온도장 및 유동장형상은 동심인 경우와 비슷하였으나, 상부편심인 경우는 상단부영역에 나타나는 전도열전달현상으로 동심인 경우와 매우 다르게 나타났다. 열전달은 하부편심 내원통의 경우 90°지점에서 최대값을 보였고 외원통의 경우 0°에서 최대, 120°지점에서 최소값을 나타내었다. 상부편심 내원통의 경우 30°지점에서 최소, 180°지점에서 최대를 나타내었고 외원통의 경우 20°-30°지점에서 최대값을 보였다. Rayleigh수에 따른 열전달관계식은 $k_{eq} = 0.21 Ra^{0.25}$ 로 나타나서 선행연구와 대략 일치하였다.

Effects of The Eccentricity of Inner Cylinder on Natural Convection Heat Transfer in Horizontal Annuli

Kim, Moo Hyun
Dept. of Mechanical Engineering

<Abstract>

An experimental study is conducted on the natural convection heat transfer in horizontal annuli. Attention is paid to the effects of the eccentricity of inner cylinder on

* 본 연구는 96년도 울산대학교 학술연구비 지원에 의해 연구 되었음

heat transfer. In the case of negative eccentricity, isothermal lines and cell flow patterns are similar to the concentric case. In the case of positive eccentricity, however, temperature and flow fields are quite different with the concentric case due to the appearance of conduction region near the top. A correlation between heat transfer and Rayleigh number is given as $k_{eq} = 0.21 Ra^{0.25}$.

1. 서 론

수평 동심(concentric) 및 편심(eccentric)원통간의 자연대류는 태양열에너지 집열장치, 에너지 변환 시스템, 축열장치, 지하 전송케이블(transmission cable)설비등과 관련되어 실험적, 해석적 그리고 수치적으로 연구의 대상이 되어 왔다[1-5].

내부원통이 동온 또는 일정열유속으로 고온부를 유지하고 외원통은 저온을 유지하는 경우 환상공간(annulus)내에는 부력에 의한 자연대류현상이 존재한다. 고온부인 내부원통 표면에서 이루어진 유동은 동심형태인 경우, 기본적으로 좌우대칭인 두개의 셀유동을 이루며, 이때 내원통에서 외원통으로 열전달이 수반된다. 두 원통의 중심이 일치하여 동심인 경우의 유동 및 열전달에 관한 문제가 기본적인 형상이라고 전제할 경우 여기에 다른 물리적 상황을 부여 또는 고려하므로써 다양한 변수가 관여되는 새로운 문제가 가능하게 된다. 즉, 두 원통의 중심이 일치되지 않고 상하 또는 좌우로 편심된 경우 유동 및 열전달특성은 동심인 경우와 매우 달라지게 된다. 실제로 전송케이블(transmission cable)의 경우 외원통 주위를 냉각유체로서 냉각시키게 되는데 동심뿐 아니라 편심을 고려한 유동 및 열전달특성을 정확히 밝히는 것이 중요하다. 근래에 와서는 편심인 경우에 편심이 집중되어 왔다. Kuehn 과 Goldstein[6,7]은 실험적으로, Prusa와 Yao[8]는 수치해석법으로 편심된 환형공간내 자연대류 열전달특성을 연구하였다. 그들의 연구결과에 의하면 외원통의 중심이 내원통의 중심보다 위에 위치하여 편심도(eccentricity, ε)가 양의 값을 갖는 경우($\varepsilon > 0$) 평균열전달은 동심인 경우보다 증가하나 편심도가 음의 값을 갖는 경우($\varepsilon < 0$)는 동심인 경우보다 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 편심도가 음의 값인 경우, 평균열전달은 편심도에 따라 일률적으로 감소하는 것이 아니고 어떤 편심도일때 최소값이 존재한다고 고찰하였다. 이는 편심도가 매우 작아질 경우, 즉 내부원통이 외부원통의 수직방향 꼭대기에 근접할 경우 전도에 의한 열전달이 크게 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

최근에 Kumar[9]은 동심원통인 경우 Rayleigh수 영역을 넓혀 연구, 조사하였고 Sande와 Hamer[10], Castrejon 와 Spalding[11]은 내원통이 갑자기 가열되는 경우 비정상상태에서 초기 내부 고온원통의 상단부에서 형성되는 유동(forming-plume flow)특성과 대류에 의한 셀유동의 형성과정을 조사하였다. Bishop[12]은 동심인 경우 공간내 유체가 헬륨이고 저온영역(cryogenic temperture)인 경우 실험적으로 열전달특성을 연구하였고 Wang과 Zhang[13], Takata등[14]은 환상공간이 경사되고 3차원형상인 경우에 대하여 경사각의 변화에 대하여 공간내 열전달특성을 조사하였다. 이 분야에 대한 최근의 연구들은 포괄적인 물리적 변수의 영역에 대한 연구, 환형공간이 다공물질(porous media)인 경우의 연구, 비정상상태(transient)인 경우의 유동특성에 관한 연구, 내부원통이 들인 경우의 문제, 환형공간내의 유동이 난류 또는 축방향으로 강제유동이 존재하는 경우의 문제등에 관심을 두고

계속 이루어져 오고 있다.

본 연구는 두 원통이 동심 및 편심인 경우 물리적 변수로서 Rayleigh수, 편심도 (eccentricity)등을 포괄적으로 변화시키므로써 이에 따른 유동 및 열전달특성을 실험적으로 조사하여 기존의 연구결과와 비교, 검토하며 마하젠더 인터페로메터(Mach-Zehnder Interferometer)를 사용하여 환형공간에서의 열 및 유동장을 가시화하여 열전달특성을 명확히 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치 시스템은 Fig.1 과 같다. 먼저 시험부는 기본적으로 두 개의 원통으로 이루어 진다. 고온부인 내원통은 외경 22.2 mm 의 구리환봉을 사용하였다. 환봉내부에 가열 니크롬선이 있고 슬라이닥스로 전원을 공급하므로써 고온을 얻도록 하였다. 저온부인 외원통은 내경 60 mm 의 황동환봉을 사용하였고 그 외면 주위에 나선형의 홈을 내어 냉각수를 순환시킴으로 상대적으로 낮은 온도를 유지하도록 하였다. 온도측정을 위해 K-type열전대를 내원통에 6개, 외원통에 3개 심었고 Virtual data logger로 수시로 온도를 조사하였다. 내,외원통 각각 열전대의 온도를 평균하여 T_i, T_o 값으로 취하였다.

본 실험에서는 환형공간에 대한 열적 특성관찰 및 가시화를 위하여 마하젠더 간섭계를 사용하였다. 임의의 실험조건이 결정되면 전원을 공급하고 항온조를 가동시키며 대략 100 분 후 정상상태에 도달하였다. 정상상태에서 간섭계를 조작하여 기본적으로 무한대프린지장(infinite fringe field)을 얻고 그 후 시험부(test section)를 광로 상에 위치시킨다. 본 간섭계는 He-Ne레이저 광원을 사용하고 매 실험조건에 따라 관찰된 간섭무늬를 CCD카메라 및 Frame grabber 로서 486-PC 에 저장하였다. 저장된 인터페로그램을 디스켓에 담아 레이저프린트로 인쇄하여 조사, 분석하였다. 한편 동심인 경우가 기본형상이라면 편심인 경우는 외원통을 고정한 상태에서 내원통을 필요한 만큼 상하방향으로 수직이동시킴으로써 편심도를 얻었다.

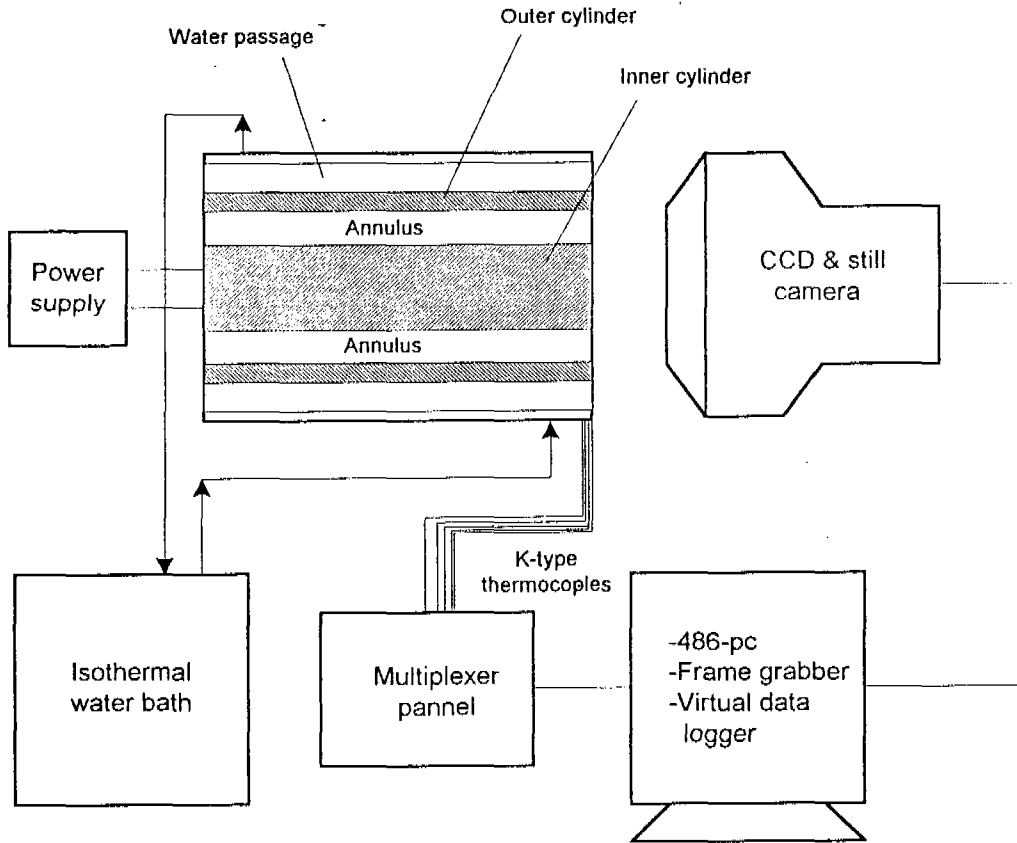


Fig. 1 Experimental set up

3. 실험결과 해석

실험에서 얻어진 간접무늬해석은 Hauf 와 Grigull[17] 및 이진호등[18]에 자세히 언급되어 있다. 온도장해석결과를 사용하여 임의의 벽면에서의 온도구배를 계산한 후 고온벽면 및 저온벽면의 국소Nusselt수 및 국소열유속(local heat flux)은 각각 다음과 같이 구하였다.

$$Nu = \left. \frac{\partial T}{\partial X} \right|_{wall} \cdot \frac{\Delta R}{T_i - T_o} \quad (1)$$

$$q'' = k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial X} \right|_{wall} \quad (2)$$

여기서 ΔR 은 두 원통의 반경차, $R_o - R_i$ 이고 T_i 및 T_o 는 고온 내원통 및 저온외원통의 온도이며 k 는 두 원통온도의 평균치에서의 공기의 열전도계수이다. 한편 내,외원통의 상당열전도계수(equivalent conductivity)는

$$k_{eq,i} = \frac{h_i D_i l_n(D_o/D_i)}{2k} \quad ; \text{ 내원통} \quad (3)$$

$$k_{eq,o} = \frac{h_o D_o l_n(D_o/D_i)}{2k} \quad ; \text{ 외원통} \quad (4)$$

로 계산하였고[7] D_i 및 D_o 는 내,외원통의 직경이고 h_i 및 h_o 는 내,외원통면의 국소대류 열전달계수이다.

본 연구에서는 외원통중심의 위치가 고정되고 내원통중심이 상하 수직방향으로 편심된다. 외원통중심에서 내원통중심까지의 거리를 편심도 ϵ 라고 하면 상부편심인 경우 $\epsilon > 0$, 하부편심인 경우 $\epsilon < 0$ 로 고려하였다. 이때 최대편심도는 ΔR , 즉 $R_o - R_i$ 보다 클 수 없으므로 실제 자료정리시 무차원수 $\epsilon / \Delta R$ 를 사용하였다. 이 무차원편심도는 $-1.0 < \epsilon / \Delta R < 1.0$ 영역의 값을 갖게 되며 본 실험에서 상부편심, 동심, 하부편심인 경우 각각 0.69, 0, -0.66 이다. 한편 ϵ 만큼 편심된 경우 내원통중심에서부터 외원통면까지의 거리를 R_e 라 하였고 반경방향무차원수 $(R - R_i) / (R_e - R_i)$ 를 사용하였다. 또한 무차원수인 Rayleigh수는 $\Delta T = T_i - T_o$ 및 ΔR 를 사용하여

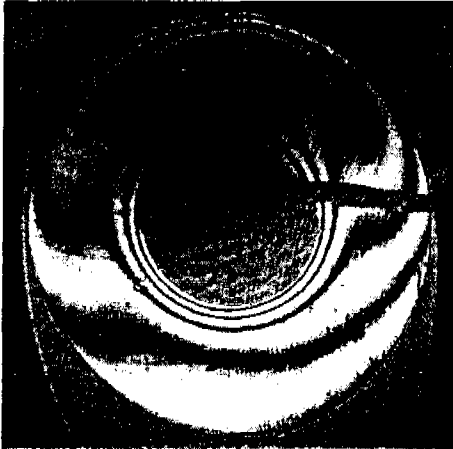
$$Ra = \frac{g \beta \Delta T \Delta R^3}{\alpha \nu} \quad (5)$$

로 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 내원통의 편심이 수직방향으로 이루어지는 경우 두 원통사이의 환형공간내 열전달특성을 실험적으로 조사하였다. 편심의 영향을 명확히 밝히기 위해서는 동심인 경우의 연구결과가 기본적으로 요구될 것이므로 동심인 경우의 실험도 아울러 수행하였다. 일반적으로 내원통이 고온이고 외원통이 저온을 유지할 때 환형공간내에는 부력에 의해 대류현상이 존재한다. 고온부인 내원통 주위에서 발달한 자연대류흐름은 상승한 후 외원통면을 따라 아래로 흐르게 된다. 이 흐름은 좌우 대칭을 이루는데 우측은 시계방향의, 좌측은 반시계방향의 셀형태유동(cell type flows)으로 나타난다. 이러한 셀유동형태는 동심인 경우를 기본 형태라고 할때, 편심인 경우는 유동형태와 기하학적 형태가 변화하므로 인해 열전달특성은 동심일때와는 매우 달라지게 된다.

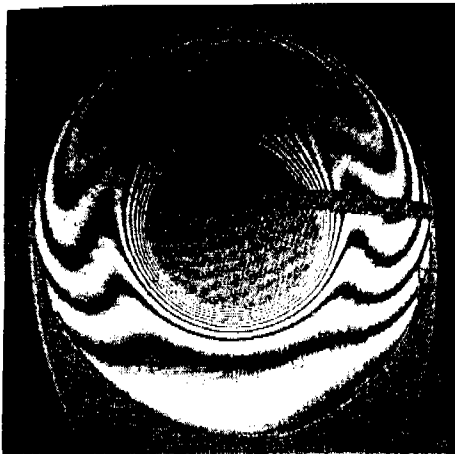
Fig.2는 동심인 경우 두 원통사이의 온도차 또는 Rayleigh수가 4가지로 변하는 경우 인터페로그래프이다. 이 그림에서 각각의 프린지는 등온선을 의미하고 대략 좌우 대칭형태를 보이고 있다. 그림에서 내원통주위는 등온선이 밀집되어 있음을 관찰할수 있는데 이것은 고온벽면근처에 열경계층이 뚜렷이 형성되기 때문이다. 그러나 외원통근처는 상부영역, 즉 $\theta = 0^\circ$ 근처에서 비교적 열경계층이 강하게 나타나고 있다. 한편 $30^\circ - 120^\circ$ 영역에서 등온선이 반전되고 있는데 이는 이 구간에서 셀형태의 대류유동이 활발히 일어나고 있기 때문이다. 또한 그림에서 내원통 상부지점에 plume형태의 유동이 강하게 형성되고 있으나 하단부에서는 열적으로 안정된 성층화영역이 나타나고 있는 것으로 보아, 환형공간 하단부는 유동이 거의 없는 정체영역임을 알 수 있다. Fig.3은 하부편심인 경우 인터페로그래프이며 이 경우 실험조건인 온도차 및 Ra수는 동심인 경우와 대략 같게 취하였다. 하부로 편심될 때 그림으로 보아, plume형태가 더욱 강하게 형성되어 동심인 경우보다 대류유동이 더 활발하게 이루어지고 있으며 그 결과 내원통벽면 열경계층은 90° 근처에서 가장 조밀하게 등온선이 형성되고 있다. 그러나 하부 환형공간영역에서는 대류현상이 제한되어 열전달이 주로 전도에 의해 이루어지고 있음을 관찰할 수 있다. 한편 상부편심인 경우는 Fig.4 와 같고 이때의 전체적인 프린지형태는 앞의 두 경우와는 매우 다르다. 하부 넓은 영역의 셀형태유동은 하부편심인 경우와 비교해 볼 때 상대적으로 매우 약하게 나타나고 있다. 또한 상단부에서는 전도에 의한 열전달이 지배적으로 나타나기 때문에 plume 유동은 관찰되지 않는다. 고온 내원통면에 인접한 열경계층을 관찰하면 앞의 두 경우와는 판이하게 달라서, 대략 $\theta = +30^\circ$ (혹은 -30°)지점에서 벽면에 인접한 등온선의 간격이 듬성듬성함을 관찰할수 있는데 이는 그 지점에서 열전달계수가 최소가 됨을 시사하고 있다.



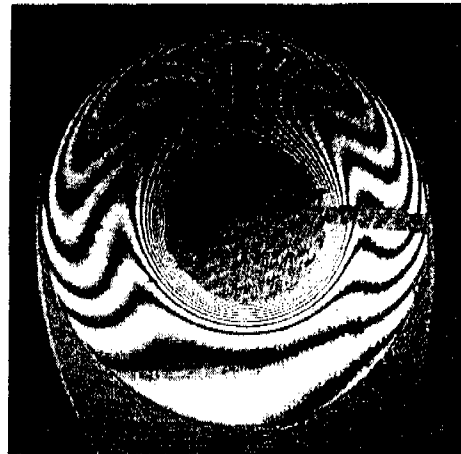
(a) $\Delta T=15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=2.02 \times 10^4$



(b) $\Delta T=30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=3.86 \times 10^4$



(c) $\Delta T=42.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=5.24 \times 10^4$

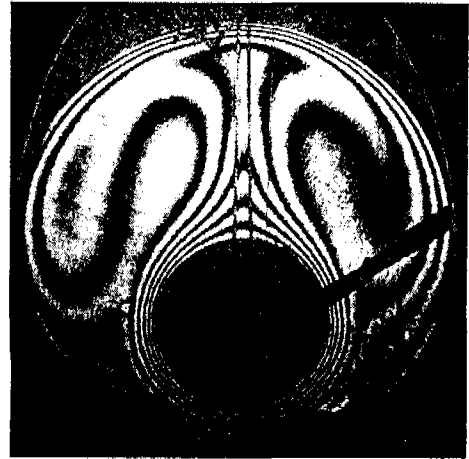


(d) $\Delta T=53.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=6.49 \times 10^4$

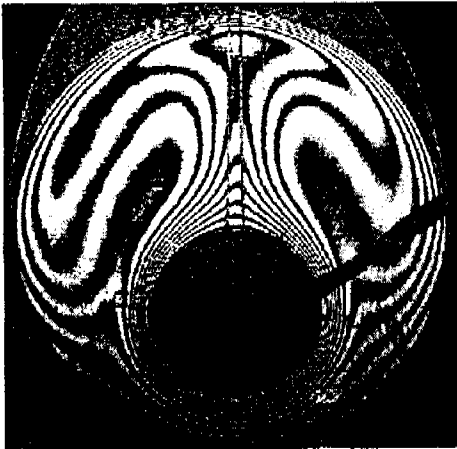
Fig. 2 Interferograms for concentric case($\epsilon/\Delta R=0$)



(a) $\Delta T=18.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=2.31 \times 10^4$



(b) $\Delta T=28.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=3.64 \times 10^4$

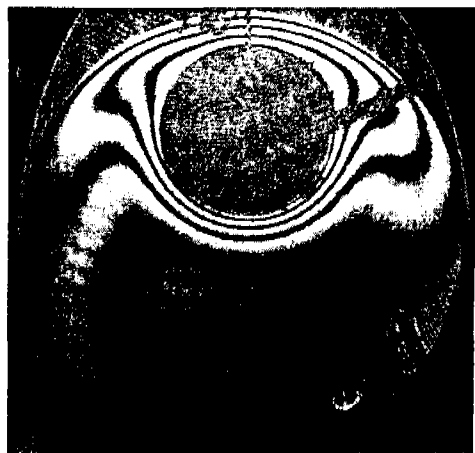


(c) $\Delta T=42.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=5.30 \times 10^4$

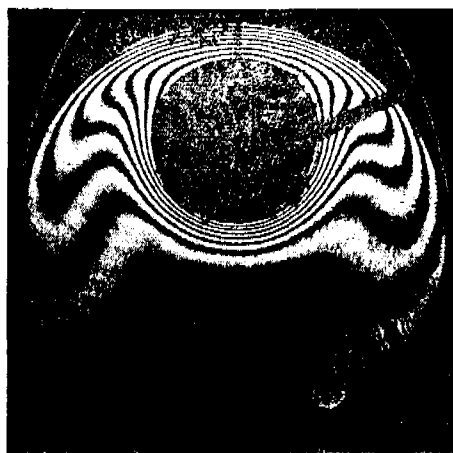


(a) $\Delta T=55.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=6.69 \times 10^4$

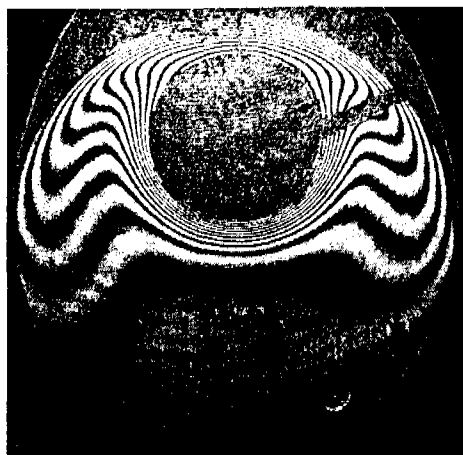
Fig. 3 Interferograms for eccentric case with $\varepsilon/\Delta R=-0.66$



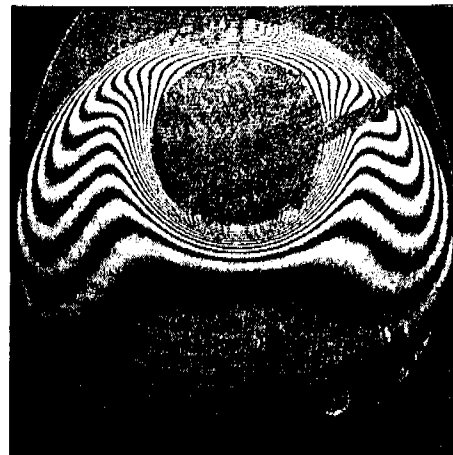
(a) $\Delta T=14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=1.90 \times 10^4$



(b) $\Delta T=28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=3.55 \times 10^4$



(c) $\Delta T=47.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=5.84 \times 10^4$



(d) $\Delta T=58.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Ra=7.03 \times 10^4$

Fig. 4 Interferograms for eccentric case with $\epsilon/\Delta R=0.69$

Fig.5 - Fig.7 은 각각 동심, 상부편심 및 하부편심인 경우 Rayleigh수의 크기가 거의 비슷할 때 인터페로그램[Fig.2 - Fig.4 의 (b)경우]을 해석한 후 무차원온도 대 무차원반경길이로서 나타낸 결과이다. 여기서 파라미터인 각도는 내원통 중심에서 수직방향이 0° 이며 시계방향을 따라 증가하고 좌우대칭이므로 $0^\circ - 180^\circ$ 구간만을 고려하였다. 동심인 경우를 먼저 살펴보면 30° 이상 영역에서 내원통근처에 온도구배가 급하게 나타나서 이 영역에 열경계층이 강하게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 열경계층 특성은 외원통 근처에서는 30° 이하, 즉 상단영역에에서 비교적 뚜렷하지만 그 외의 영역에서는 뚜렷하지 않다. 한편 $30^\circ - 120^\circ$ 영역에서 온도곡선이 반전되어 내원통 인접지역에서 낮게, 외원통 인접지역에서 높게 나타나는 것은 이 영역에서 자연대류에 의한 셀유동이 활발히 순환되고 있기 때문이다. 상부편심인 경우는 동심인 경우와는 달라서 60° 미만인 상단부영역에서 두 원통간의 열전달이 거의 전도에 의해 이루어지는 것을 알 수 있으며, 90° 이상 영역의 내원통인접 부분에 강한 열경계층이 형성되어 온도구배가 크게 나타나고 있다. 내원통의 위치가 하부로 편심된 경우 고온벽면근처의 열경계층은 $60^\circ < \theta < 120^\circ$ 영역이 $120^\circ < \theta < 180^\circ$ 영역보다 더 강하게 나타나서 동심인 경우와 다름을 알 수 있으며, 저온벽면근처의 온도구배는 상단부($\theta = 0^\circ$)에서 크게 나타났다.

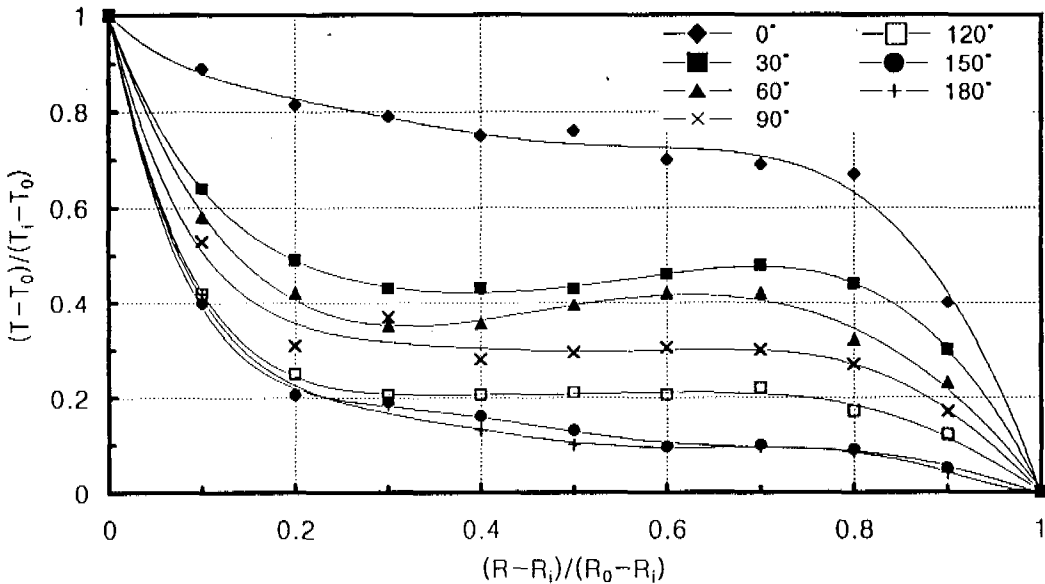


Fig. 5 Dimensionless temperature distributions for concentric case with $\epsilon/LR=0$, $Ra=3.86 \times 10^4$

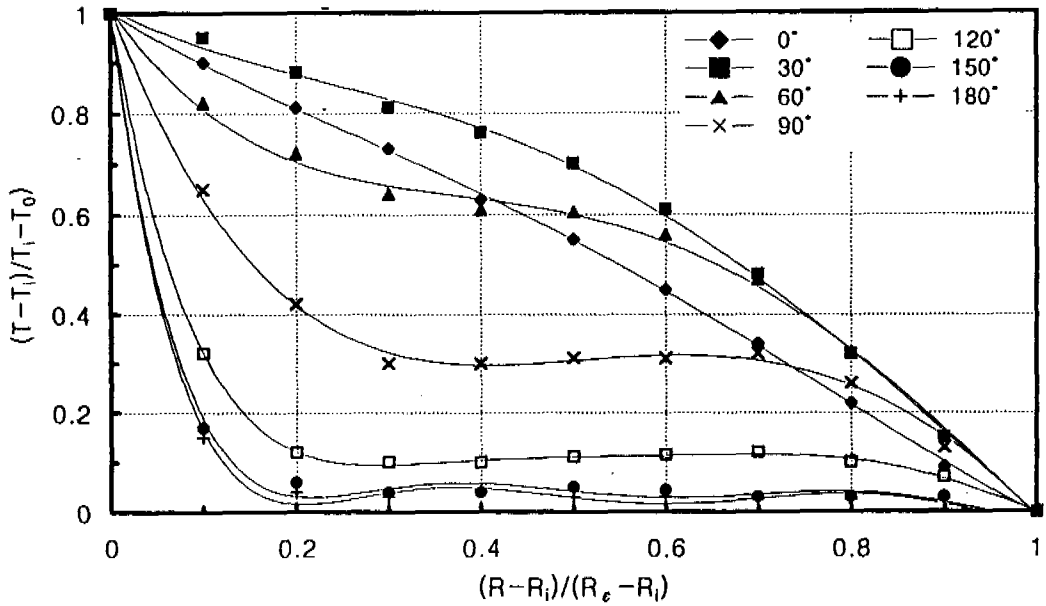


Fig. 6 Dimensionless temperature distributions for eccentric case with $\varepsilon/\Delta R=0.69$, $Ra=3.55 \times 10^4$

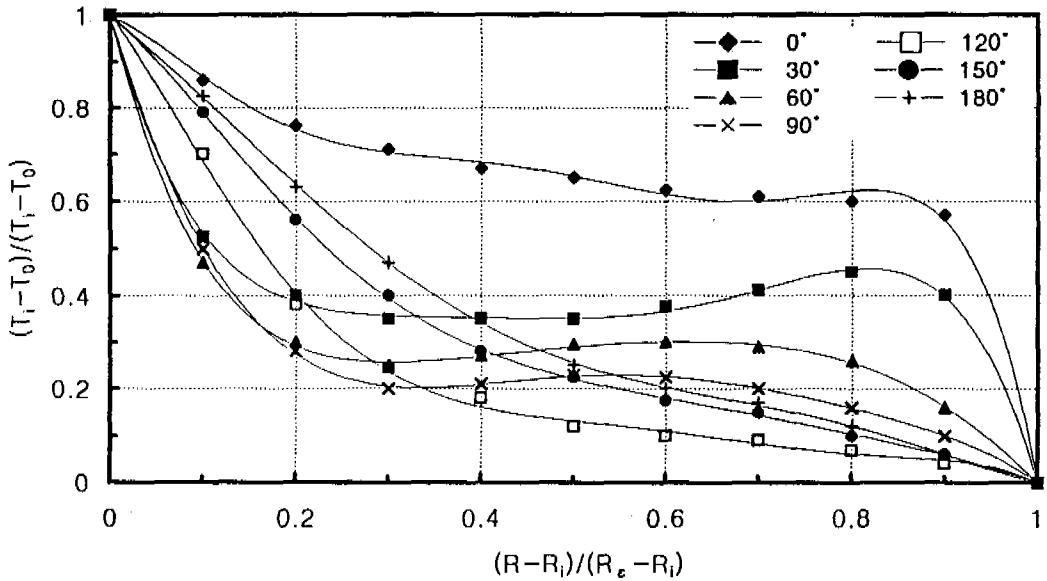


Fig. 7 Dimensionless temperature distributions for eccentric case with $\varepsilon/\Delta R=-0.66$, $Ra=3.64 \times 10^4$

Fig.8 및 Fig.9 는 세가지 편심도에 따른 고온내원통면과 저온외원통면에서의 국소상당 열전도계수 및 국소Nusselt수를 각각 나타낸다. 이 결과는 Fig.2 - Fig.4 의 (b)경우들로서 Ra수는 약간씩 크기가 다르나 평균하여 $Ra = 3.68 \times 10^4$ 로 고려하였다. 이 두 그림은 결국 국 내, 외원통면에서의 열전달율의 크기를 나타내며 서로 같은 경향을 갖는다. 상부편심 내원통의 경우 30°지점에서 최소값을 보였으며 180° 근처, 즉 하단부에서 최대열전달을 나타내었다. 상부편심 외원통의 경우 약 20°지점에서 최대값을 나타내었고 180°지점에서 매우 낮은 값을 보였다. 여기서 내원통벽면의 최소열전달값과 외원통벽면의 최대열전달값은 서로 관련되어 있음이 분명하고, 그들의 발생지점 또한 편심도 및 Ra수와 관련되는 것으로 보이며 이에 대해서는 차후 연구가 더 요구된다. 한편 하부편심 내원통의 열전달은 미약하나마 90°근처에서 최대값을 보여 마치 단일원통의 열전달특성과 비슷하게 나타났고 하부편심 외원통의 경우 0°에서 최대, 120°지점에서 최소 열전달을 나타내었다. 이상에서 볼 때 하부편심인 경우는 동심인 경우와 비교적 비슷한 열전달특성을 갖지만 상부편심인 경우는 국소 최대 및 최소 열전달특성에 있어 동심인 경우와 다름을 고찰할 수 있다.

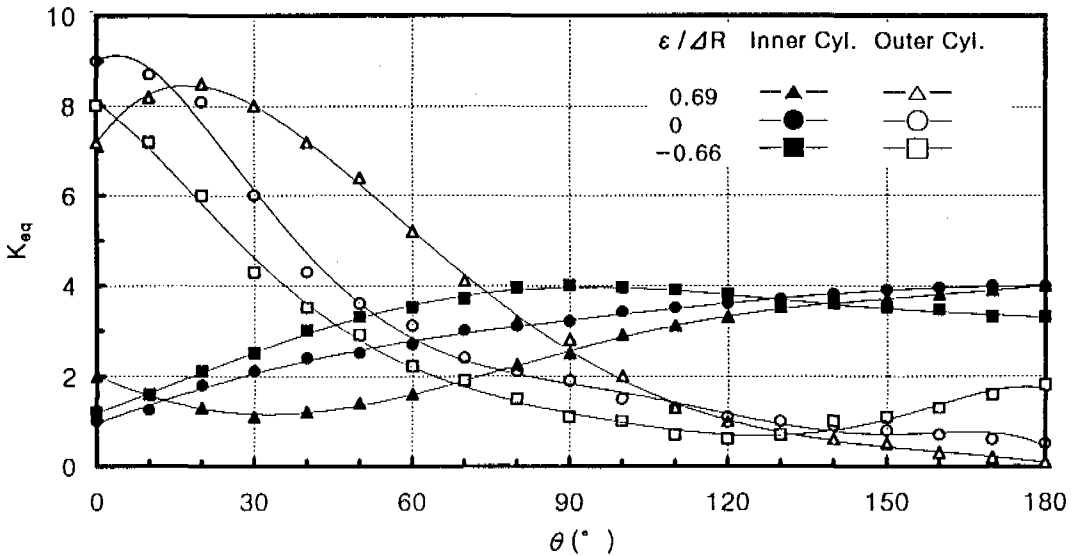


Fig. 8 Comparison of concentric and eccentric local equivalent conductivities at inner and outer cylinder surfaces for $Ra \approx 3.68 \times 10^4$

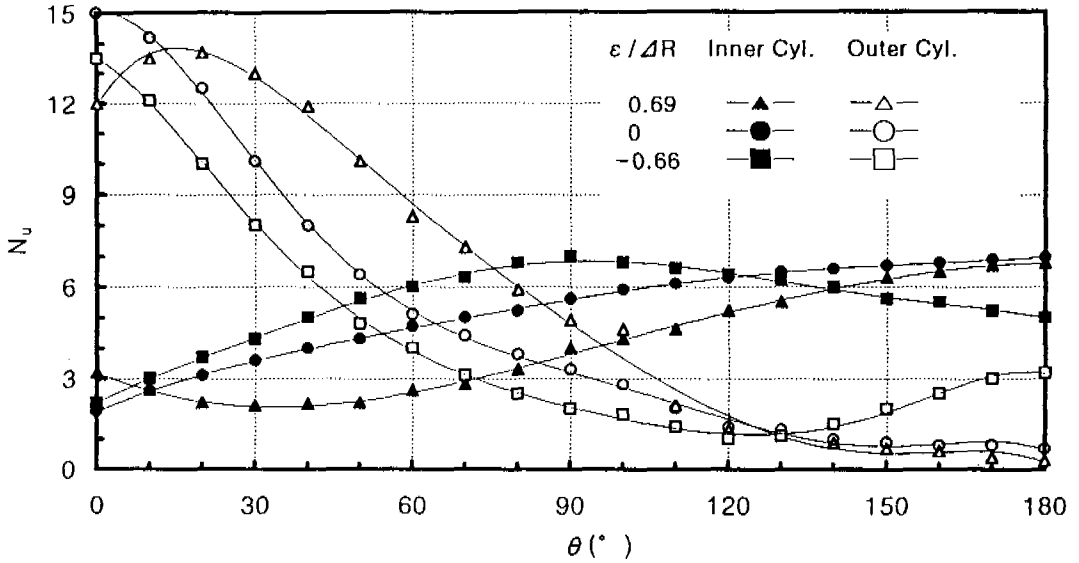


Fig. 9 Comparison of concentric and eccentric local Nusselt numbers at inner and outer cylinder surfaces for $Ra=3.68 \times 10^4$

Fig.10은 Ra수의 변화에 따른 상당열전도계수를 선행 연구결과와 비교한 것이다. 전체적으로 볼 때 Ra수가 증가함에 따라 열전달은 증가하였고 본 연구의 경우

$$k_{eq} = 0.21 Ra^{0.25}$$

로 나타났다. 이 결과는 Ra수 $10^3 - 10^5$ 범위에서 연구한 Boyd등[15]의 결과, $2.11 \times 10^4 - 9.76 \times 10^5$ 범위에서 연구한 Kuehn등[4] 및 Darc등[16]의 결과와 좋은 일치를 보였다.

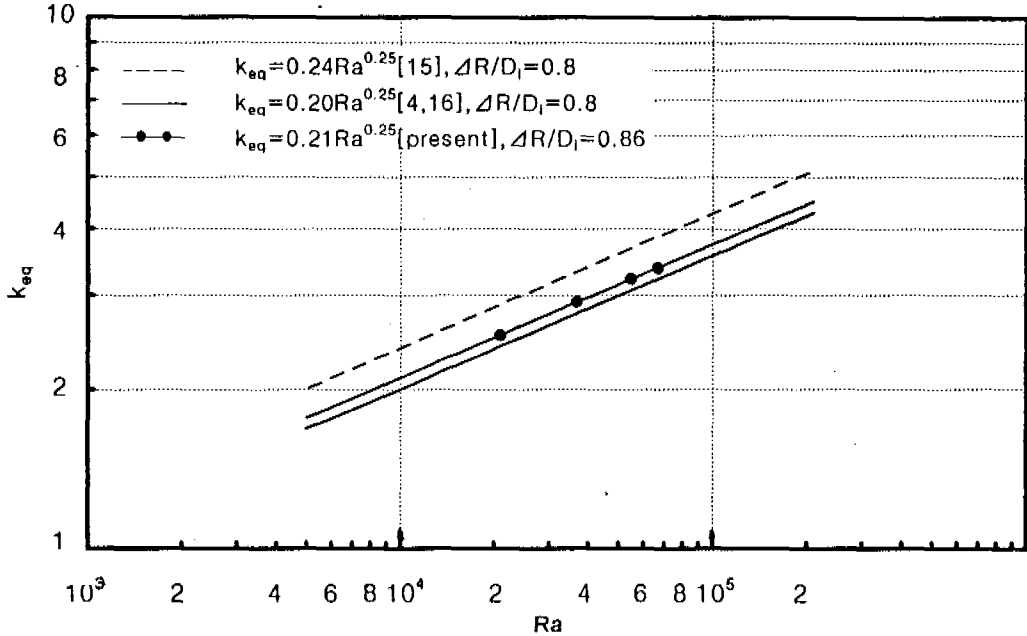


Fig. 10 Comparison of equivalent conductivities for variable Rayleigh number

5. 결 론

내원통의 수직편심이 두 원통사이의 환형공간내 자연대류 열전달 특성에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다.

하부편심인 경우 전체적인 셀 및 plume유동형태와 온도장에 대한 등온선분포는 동심인 경우와 흡사하였다. 그러나 상부편심인 경우는 상단부영역에서 두 벽면간에 전도열전달이 지배적으로 나타나므로 유동이 억제되었으며, 그로 인하여 전체적인 유동형태 및 등온선분포는 동심인 경우와 전혀 다르게 나타났다.

열전달특성에 대해 살펴보면 하부편심 내원통의 경우 90°지점에서 최대값을 보였고 외원통의 경우 0°에서 최대, 120°지점에서 최소열전달값을 나타내었다. 상부편심 내원통의 경우 30°지점에서 최소, 180°에서 최대를 나타내었고 외원통의 경우 20°-30°지점에서 최대값을 나타내는 특성을 보였다. 한편 Ra수에 따른 열전달관계식은 본 연구의 경우

$$k_{eq} = 0.21 Ra^{0.25}$$

로 나타나서 선행연구와 좋은 일치를 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Liu,C.,Mueller,W.K. and Landis,F.,1961, "Natural Convection Heat Transfer in Long Horizontal Cylindrical Annuli" ,ASME International Developments in Heat Transfer, Proceedings of the 1961-62 International Heat Transfer Conference.
- [2] Powe,R.E.,Carley,C.T. and Bishop,E.H., 1969, "Free Convection Patterns in Cylindrical Annuli", J. of Heat Transfer, Vol.91, pp.310 - 314.
- [3] Mack,L.R. and Bishop,E.H., 1968, "Natural Convection Between Horizontal Concentric Cylinders for Low Rayleigh Numbers", J. of Mechanics and Applied Mathematics, Vol.21, pp.223 - 241.
- [4] Kuehn,T.H. and Goldstein,R.J., 1976, "An Experimental and Theoretical Study of Natural Convection in the Annulus Between Horizontal Concentric Cylinders", J. of Fluid Mechanics, Vol.74, pp. 695 - 719.
- [5] Powe,R.E., Carley,C.T. and Carruth,S.L., 1971, " A Numerical Solution for Natural Convection in Cylindrical Annuli", J. of Heat Transfer, Vol.93, pp.210 - 220.
- [6] Kuehn,T.H. and Goldstein,R.J., 1976, " Correlating Equations for Natural Convection Heat Transfer Between Horizontal Circular Cylinders", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol.19, pp.1127 - 1134.
- [7] Kuehn,T.H. and Goldstein,R.J., 1978 , "An Experimental Study of Natural Convection Heat Transfer in Concentric and Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli", J. of Heat Transfer, Vol.100, pp.635 -640.
- [8] Prusa,J. and Yao,L.S., 1983, "Natural Convection Heat Transfer Between Eccentric Horizontal Cylinders", J. of Heat Transfer, Vol.105, pp.108 - 116.
- [9] Kumar,R.,1988, "Study of natural convection in horizontal annuli", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. , pp.1137 - 1148.
- [10] Sande,E. and Hamer,B.J.G.,1979, "Steady and Transient Natural Convection in Enclosures Between Horizontal Circular Cylinders (Constant Heat Flux)", Int.J. of Heat Mass Transfer, Vol.22,pp.361 -370.
- [11] Castrejon,A. and Spalding,D.B., 1988, " An experimental and Theoretical study of transient free-convection flow between horizontal concentric cylinders", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp.273 - 284.
- [12] Bishop,E.H., 1988, "Heat Transfer by Natural Convection of Helium Between Isothermal Concentric Cylinders at Cryogenic Temperature", J.of Heat Transfer, Vol.110, pp.109 - 115.
- [13] Wang,B. and Zhang,X., 1990, "Natural convection in liquid -saturated porous media

- between concentric inclined cylinders", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 33, pp.827 - 833.
- [14] Takata, Y. et al, 1984, "Three-Dimensional Natural Convection in An Inclined Cylindrical Annulus", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. pp.747 - 754.
- [15] Boyd, R.D., 1981, "A unified theory for correlating steady laminar convection heat transfer data for horizontal annuli", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 24, pp. 1545-1548.
- [16] Date, A.W., 1986, "Numerical Prediction of Natural Convection Heat Transfer in Horizontal Annulus", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 29, pp.1457-1464. [17] Hauf, W. and Grigull, 1971, *Optical Method in Heat Transfer*, in *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York. Vol.6.
- [18] 이진호, 김무현, 모경하, 1990, "단열 및 등온수평경계조건을 갖는 직각 밀폐용기내 공기의 자연대류열전달", *기계학회논문집*, 14권 1호, pp.207 - 213.