

<論 文>

내관의 온도가 불균일한 동심환상공간에서의 자연대류

김 찬 원* · 권 순 석**

(1989년 4월 29일 접수)

Natural Convection in Concentric Annuli with the Nonuniform Temperature Distribution of the Inner Cylinder

Chan-Won Kim and Sun-Sok Kwon

Key Words: Three-Dimensional Natural Convection(3차원 자연대류), Inclined Concentric Annulus(경사진 동심환상원판), Nonuniform Temperature Distribution(불균일 온도분포), Inclination Angle(경사각)

Abstract

Numerical analysis has been performed on three-dimensional natural convection in inclined concentric annuli with the nonuniform temperature distribution of the inner cylinder. The governing equations are numerically solved by successive over-relaxation methods for various inclination angles at $R_a=3 \times 10^4$, $P_r=7.0$ and $r_1/r_2=0.6$. Temperature and Nusselt number distributions are obtained and calculated results are compared with those of published uniform temperature distributions. It is found that the mean Nusselt numbers for the nonuniform temperature distributions increase more than those for the uniform temperature distributions by about 9.6% at $\delta=0^\circ$, 7.5% at $\delta=30^\circ$ and 4.6% at $\delta=60^\circ$. In the case of $\delta=0^\circ$, the maximum local Nusselt numbers on the inner and outer cylinder walls show at $\xi=0.5$, 1.5 of $\phi=100^\circ$ and $\xi=0.4$, 1.6 of $\phi=180^\circ$. But in the case of $\delta=30^\circ$ and $\delta=60^\circ$, the maximum local Nusselt numbers on the inner and other cylinder walls show at $\xi=0.0$ of $\phi=180^\circ$ and $\xi=2.0$ of $\phi=180^\circ$.

기 호 설 명	
g : 중력가속도	R_1 : 내외관의 반경비(= r_1/r_2)
L : 무차원 축길이(= l/r_2)	r : 반경방향좌표
l : 원통축 길이	r_1, r_2 : 내관 및 외관의 반경
Nu_1 : 내관의 국소 Nusselt수	T : 온도
Nu_2 : 외관의 국소 Nusselt수	T_m : 내관의 평균온도
Nu_m : 평균 Nusselt수	T_1 : 내관의 온도
P_m : 동압력	T_2 : 외관의 온도
P_r : Prandtl수(= ν/α)	V : 속도벡터
R_a : Rayleigh수(= $g\beta(T_m - T_2)r_2^3/\alpha\nu$)	z : 축방향좌표
R : 무차원 반경방향좌표(= r/r_2)	α : 열팽창계수
	β : 선팽창계수
	δ : 경사각도
	θ : 무차원 온도(= $(T - T_2)/(T_m - T_2)$)

*정회원, 창원기능대학 차량학과

**정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

- ν : 동점성계수
- ξ : 무차원 원통축좌표 (= z/r_2)
- ρ : 밀도
- ϕ : 원주방향좌표
- ψ : 벡터 포텐셜
- Ω : 와도 벡터

참 자

- 1 : 내관
- 2 : 외관

1. 서 론

동심2중원관에서 내관을 가열하고 외관을 냉각하면 환상공간내에 자연대류가 발생한다. 이러한 자연대류 현상은 태양열 집열기내의 유동, 지하매설 고전압 케이블의 냉각 등에 응용된다.

Beckmann⁽¹⁾은 환상원관의 내외반경비에 따라 평균 Nusselt수와 Grashof수의 관계를 나타내었으며 Crawford 등⁽²⁾은 환상공간내 자연대류 현상을 수치해석하여 유선은 초생달형과 신장형 유동을 얻었다. 또 Grigull과 Hauf⁽³⁾은 연기를 이용한 가시화 실험에서 유동은 유사전도 영역, 원이 영역, 그리고 충분히 발달한 2차원 층류 영역으로 분류하였다. Bishop과 Carley⁽⁴⁾도 연기를 이용한 가시화 실험에서 초생달형과 신장형 유동을 확인 하였으며 이는 Grigull과 Hauf⁽³⁾가 분류한 2차원 층류 영역에 해당된다. 그 후 Powe 등⁽⁵⁾은 역시 연기를 이용한 가시화 실험을 통하여 Grashof수와 반경비에 따른 자연대류 유동을 관찰하였다. Kuehn과 Goldstein⁽⁶⁾은 수치해석 및 간섭계를 이용한 실험으로 온도 및 국소 Nusselt수 분포 등을 구하였다.

한편 Aziz와 Hellums⁽⁷⁾는 하면가열 상면냉각의 직사각형 용기내 자연대류 현상을 A.D.I.법에 의해 최초로 3차원 수치해석하였으며 Ozoe 등^(8,9)도 하면가열 상면냉각의 경사진 직사각형 용기내 자연대류를 가시화 실험 및 수치해석한 결과 유선은 풍속 2중나선임을 밝혔다.

그 후 Takata 등^(10,11)은 경사환상 다공질층내 자연대류와 밀폐환상공간내 자연대류현상을 3차원 수치해석하여 열전달 특성과 유동 등을 연구하였다. Kim과 Kwon⁽¹²⁾은 경사진 동심환상공간에서 내관의 온도분포가 균일한 경우 $Ra = 3 \times 10^4$, $Pr = 7.0$, 내외관의 반경비 0.6일 때의 자연대류 열전달 특성

을 3차원 수치해석하였다.

Hickox 등^(13,14)은 태양열 집열장치의 수열관의 온도분포가 일정하지 않아 이에 대한 영향을 수치해석으로 연구한 결과 균일온도분포보다 불균일온도분포에서 열전달율이 증가됨을 발표하였다. Kays와 Crawford⁽¹⁵⁾는 충분히 발달한 층류관내 유동에서 수평관의 일정 열유속은 일정표면온도일 때보다 평균 Nusselt수가 약 16% 증가한다고 하였다.

본 연구에서는 열원인 내관의 온도가 불균일한 경사진 동심환상공간에서의 열전달 특성을 $Ra = 3 \times 10^4$, $Pr = 7.0$, 내외관의 반경비 0.6일 때 경사각 $\theta = 0^\circ, 30^\circ$ 크리코 60° 에 대하여 3차원 수치해석으로 연구하였으며 균일온도분포인 경우⁽¹²⁾와 비교 고찰하였다.

2. 수치해석

본 해석에 사용한 좌표계는 Fig. 1과 같고 내의 반경 r_1 , r_2 원관길이 l 의 2중 동심환상공간내 유체는 수평에서 각 δ 만큼 경사진 상태에서 내관이 열 외관냉각되어 자연대류가 발생하며 양단은 인적으로 절연되어 있다. 해석을 간단히 하기 위하여 유체의 유동은 정상상태이고 물성치는 운동량방정식의 중력항만 온도차에 의해 밀도변화를 하며 점성소산 및 복사열전달은 무시하였다. 이러한 가정에서 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \tag{1}$$

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -g\beta(T - T_2) \mathbf{l} - \frac{1}{\rho} \nabla P_m + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \tag{2}$$

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T \tag{3}$$

식 (2)의 \mathbf{l} 는 중력방향의 단위 벡터이며 경사각 δ 의 함수이다.

$$\mathbf{l} = [\cos \phi \cdot \cos \delta, -\sin \phi \cdot \cos \delta, -\sin \delta] \tag{4}$$

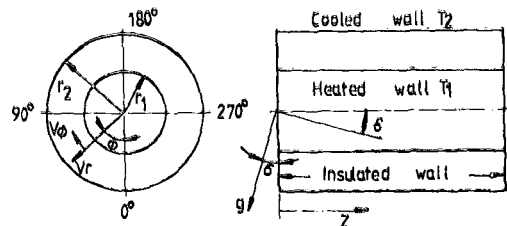


Fig. 1 Geometry and coordinate system

Aziz 등⁽⁷⁾에 의하면 벡터 포텐셜 Ψ 와 와도 Ω 는 다음과 같다.

$$\mathbf{V} = \nabla \times \Psi \tag{5}$$

$$\Omega = \nabla \times \mathbf{V} \tag{6}$$

$$\Omega = -\nabla^2 \Psi \tag{7}$$

무차원변수와 무차원수는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} R &= r/r_2, \quad \phi = \phi, \quad \xi = z/r_2 \\ \theta &= (T - T_2)/(T_m - T_2) \\ R_a &= g\beta(T_m - T_2)r_2^3/\alpha\nu \\ P_r &= \nu/\alpha \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

여기서 내관의 온도 $T_1 = T_m - 2\cos\phi$ 로 정하고 $\phi = 90^\circ$ 인 $T_1 = T_m$ 을 내관의 평균온도로 하였다.

따라서 무차원 와도수송방정식은

$$\frac{1}{P_r} \{ (\mathbf{V} \cdot \nabla) \Omega - (\Omega \cdot \nabla) \mathbf{V} \} = Ra \left[\begin{aligned} &\sin\delta \frac{1}{R} \frac{\partial\theta}{\partial\phi} - \sin\phi \cos\delta \frac{\partial\theta}{\partial\xi} \\ &-\cos\phi \cos\delta \frac{\partial\theta}{\partial\xi} - \sin\delta \frac{\partial\theta}{\partial R} \\ &\cos\delta \left(\sin\phi \frac{\partial\theta}{\partial R} + \cos\phi \frac{1}{R} \frac{\partial\theta}{\partial\phi} \right) \end{aligned} \right] + \nabla^2 \Omega \tag{9}$$

무차원 에너지방정식은

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \theta = \nabla^2 \theta \tag{10}$$

무차원 지배방정식을 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

속도 \mathbf{V} 의 경계조건은

$$\left. \begin{aligned} R=R_1, \text{ 1에서 } V_R = V_\phi = V_\xi = 0 \\ \phi=0^\circ, 180^\circ \text{에서 } : \frac{\partial V_R}{\partial\phi} = V_\phi = \frac{\partial V_\xi}{\partial\phi} = 0 \\ \xi=0, L \text{에서 } : V_R = V_\phi = V_\xi = 0 \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

벡터 포텐셜 Ψ 의 경계조건은

$$\left. \begin{aligned} R=R_1, \text{ 1에서 } : \frac{\partial}{\partial R} (R\Psi_R) = \Psi_\phi = \Psi_\xi = 0 \\ \phi=0^\circ, 180^\circ \text{에서 } : \Psi_R = \frac{\partial \Psi_\phi}{\partial\phi} = \Psi_\xi = 0 \\ \xi=0, L \text{에서 } : \Psi_R = \Psi_\phi = \frac{\partial \Psi_\xi}{\partial\xi} = 0 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

와도 Ω 의 경계조건은

$$\left. \begin{aligned} R=R_1, \text{ 1에서 } : \\ \Omega_R = 0, \quad \Omega_\phi = -\frac{\partial V_\xi}{\partial R}, \quad \Omega_\xi = \frac{\partial V_\phi}{\partial R} \\ \phi=0^\circ, 180^\circ \text{에서 } : \\ \Omega_\phi = \frac{\partial \Omega_\phi}{\partial\phi} = \Omega_\xi = 0 \\ \xi=0, L \text{에서 } : \\ \Omega_R = -\frac{\partial V_\phi}{\partial\xi}, \quad \Omega_\phi = \frac{\partial V_R}{\partial\xi}, \quad \Omega_\xi = 0 \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

무차원 온도 θ 의 경계조건은

$$\left. \begin{aligned} R=R_1 \text{에서 } : \theta = 1 - 0.286\cos\phi \\ R=1 \text{에서 } : \theta = 0 \\ \phi=0^\circ, 180^\circ \text{에서 } : \frac{\partial\theta}{\partial\phi} = 0 \\ \xi=0, L \text{에서 } : \frac{\partial\theta}{\partial\xi} = 0 \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

수치계산은 식 (5), (7), (9), (10)의 지배방정식을 차분방정식으로 변환하여 S.O.R.법으로 계산하였으며 중심차분을 사용하였다.

수렴조건은

$$\text{Max} \left| \frac{B_{i,j,k}^{n+1} - B_{i,j,k}^n}{B_{i,j,k}^n} \right| \leq 10^{-3} \tag{15}$$

여기서 $B_{i,j,k}^n$ 는 (i, j, k) 위치에서 n 번째 반복회수의 값이고 B 는 Ω, Ψ 및 θ 를 나타낸다. 수치계산은 $R_a = 3 \times 10^4, P_r = 7.0, R_1 = 0.6, L = 2.0$ 인 경우 $\delta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 에 대하여 계산하였으며 격자점수는 r 방향 13, ϕ 방향 37, z 방향 41이며 모두 19721이다. 본 해석에 사용된 계산기는 PRIME-550이고 한 해를 얻는데 걸린 CPU시간은 약 750분이었으며 반복회수는 1200번 근방에서 수렴하였다.

수치계산에 의해 구한 해는 다음 식들에 의해 Nusselt수를 계산하였다.

내관의 국소 Nusselt수 :

$$Nu_1 = R_1 \ln R_1 \left(\frac{\partial\theta}{\partial R} \right)_{R=R_1} \tag{16}$$

외관의 국소 Nusselt수 :

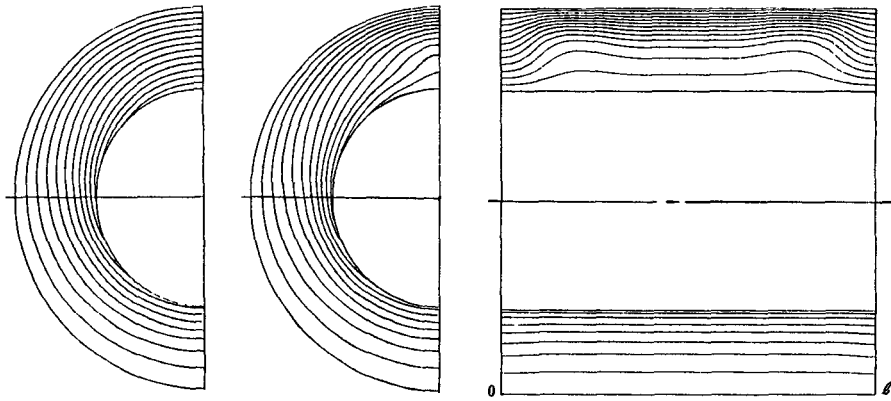
$$Nu_2 = \ln R_1 \left(\frac{\partial\theta}{\partial R} \right)_{R=1} \tag{17}$$

평균 Nusselt수 :

$$\begin{aligned} Nu_m &= \frac{1}{\pi L} \int_0^L \int_0^\pi Nu_1 d\phi d\xi \\ &= \frac{1}{\pi L} \int_0^L \int_0^\pi Nu_2 d\phi d\xi \end{aligned} \tag{18}$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 $\delta = 0^\circ$ 인 경우 $R-\phi$ 와 $R-z$ 단면의 등온선이다. $R-\phi$ 단면의 등온선 분포는 관 하부에서 $\xi = 0.0$ 및 $\xi = 1.0$ 인 경우 유사한 경향을 나타내고, 관 상부에서는 $\xi = 0.0$ 인 경우 거의 일정한 반면 $\xi = 1.0$ 에서는 외관측에 조밀하게 나타났다. 또 $R-z$ 단면의 등온선 분포는 좌우 대칭을 이루며 관 상부에서는 양단의 영향으로 다소 변형이 있었고 관 하부에서는 축방향에 거의 일정하였다.



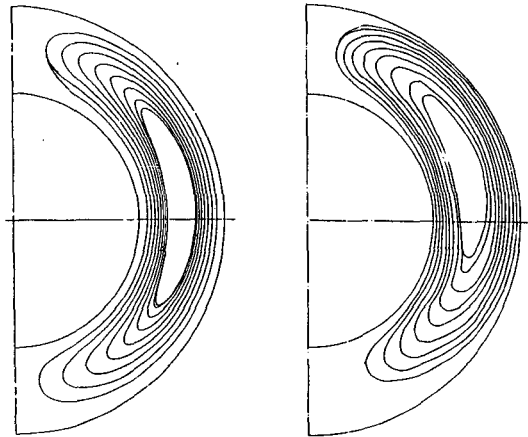
(a) $R-\phi$ plane at $\xi=0.0$ (b) $R-\phi$ plane at $\xi=1.0$ (c) $R-z$ plane

Fig. 2 Isothermal lines on the $R-\phi$ and $R-z$ planes for $\delta=0^\circ$

Fig. 3은 $\delta=0^\circ$ 인 경우 균일온도분포와 불균일온도분포의 유선을 나타낸 것이다. 최대유동함수값을 나타내는 유선의 중심이 불균일온도분포가 균일온도분포에서 보다 관 상부로 이동되었다. 이는 내관의 온도 분포가 불균일로 인해 관 하부보다 관 상부에서 대류가 활발함을 의미한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 $\delta=30^\circ$ 와 $\delta=60^\circ$ 일 때 $R-\phi$ 와 $R-z$ 단면의 등온선이며 $R-\phi$ 단면의 등온선 분포는 경사각이 증가할수록 $\xi=0.0$ 에서는 내관측에 $\xi=2.0$ 에서는 외관측에 조밀하게 나타났다. 이는 경사로 인해 $\xi=0.0$ 에서 유체는 거의 내관에 연하여 유동하고, $\xi=2.0$ 에서는 내관을 따라 상승한 유체는 외관을 따라 다시 내려오기 때문이다. 또 $R-z$ 단면의 경우 역시 경사각이 증가할수록 관 하단에서는 내관측, 관 상단에서는 외관측에 온도분포가 조밀하다.

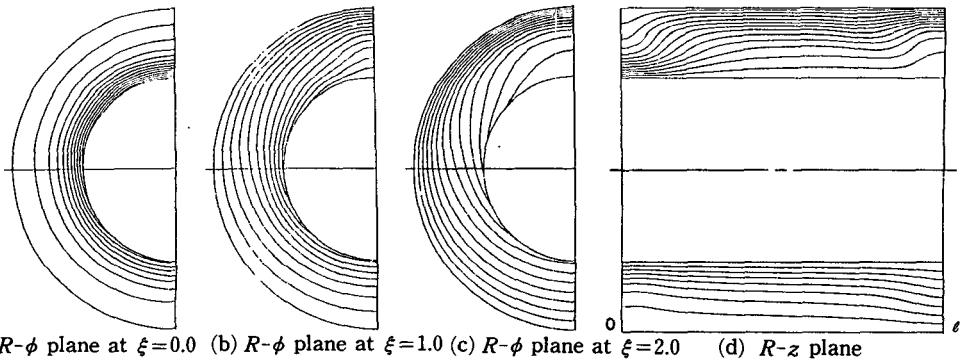
Fig. 6은 $\delta=0^\circ$ 의 내외관 국소 Nusselt수 분포이다. 내관에서는 Nusselt수가 ϕ 방향으로 상승한 후



(a) Uniform temperature (b) Nonuniform temperature

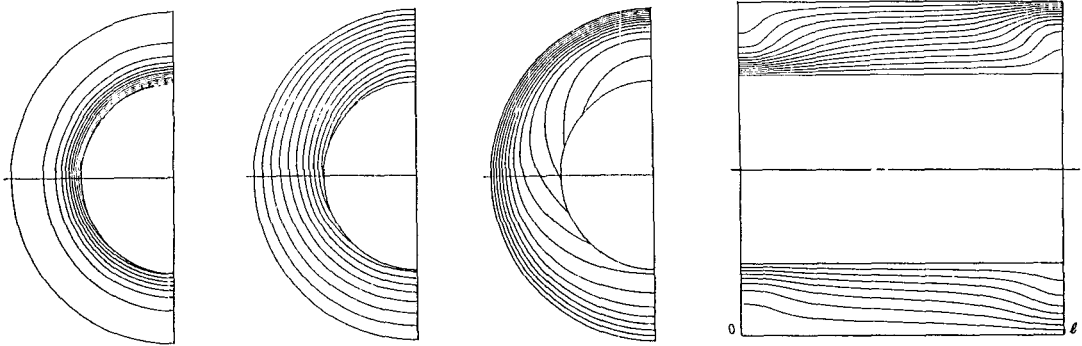
Fig. 3 Streak lines for $\delta=0^\circ$ starting at the point $(0.5, 1.369, 1)$

다시 감소하는 경향을 나타내며, 최대국소 Nusselt수는 $\phi=100^\circ$ 의 $\xi=0.5$ 및 1.5에서 나타났고, 외



(a) $R-\phi$ plane at $\xi=0.0$ (b) $R-\phi$ plane at $\xi=1.0$ (c) $R-\phi$ plane at $\xi=2.0$ (d) $R-z$ plane

Fig. 4 Isothermal lines on the $R-\phi$ and $R-z$ planes for $\delta=30^\circ$



(a) $R-\phi$ plane at $\xi=0.0$ (b) $R-\phi$ plane at $\xi=1.0$ (c) $R-\phi$ plane at $\xi=2.0$ (d) $R-z$ plane

Fig. 5 Isothermal lines on the $R-\phi$ and $R-z$ planes for $\delta=60^\circ$

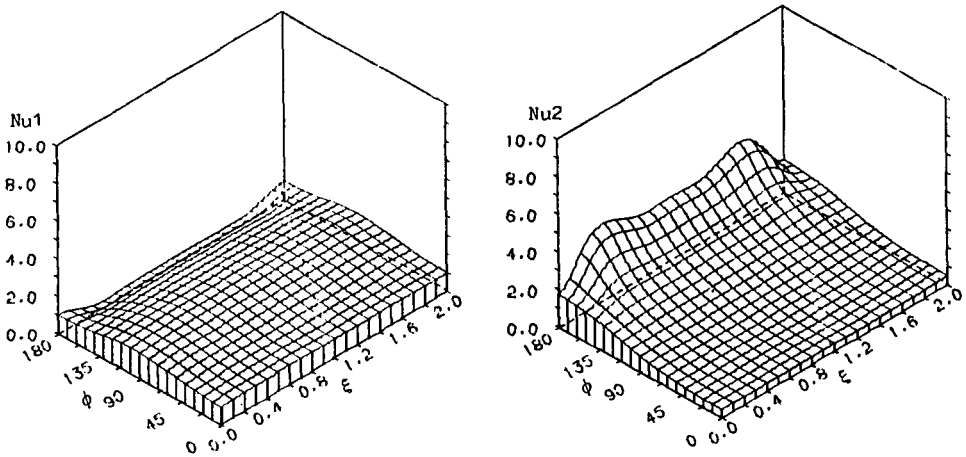


Fig. 6 Local Nusselt numbers at the inner and outer cylinder walls for $\delta=0^\circ$

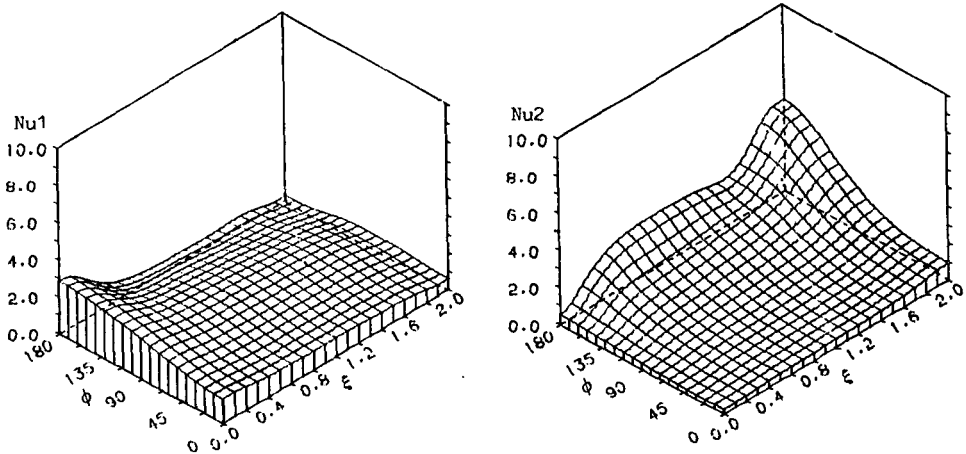


Fig. 7 Local Nusselt numbers at the inner and outer cylinder walls for $\delta=30^\circ$

관의 최대국소 Nusselt수 위치는 $\phi=180^\circ$ 의 $\xi=0.4$ 및 1.6 이었다. 또 양단의 영향은 내관측보다 외관측에 크게 미친다.

Fig. 7과 Fig. 8은 $\delta=30^\circ$ 와 $\delta=60^\circ$ 일 때 내외관의 국소 Nusselt수 분포이며 경사각이 증가할수록 내관의 $\xi=0.0$, 그리고 외관의 $\xi=2.0$ 에서 ϕ 방향

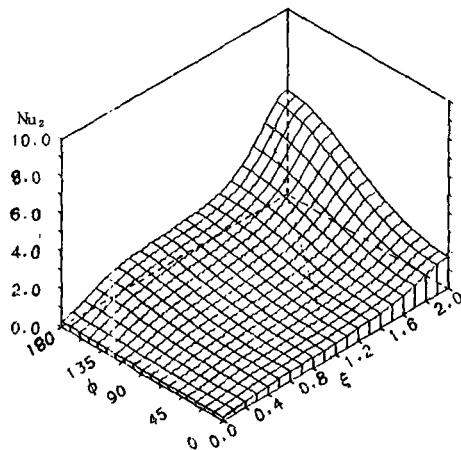
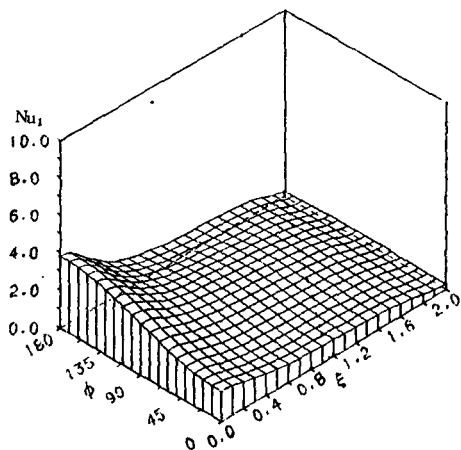


Fig. 8 Local Nusselt numbers at the inner and outer cylinder walls for $\delta=60^\circ$

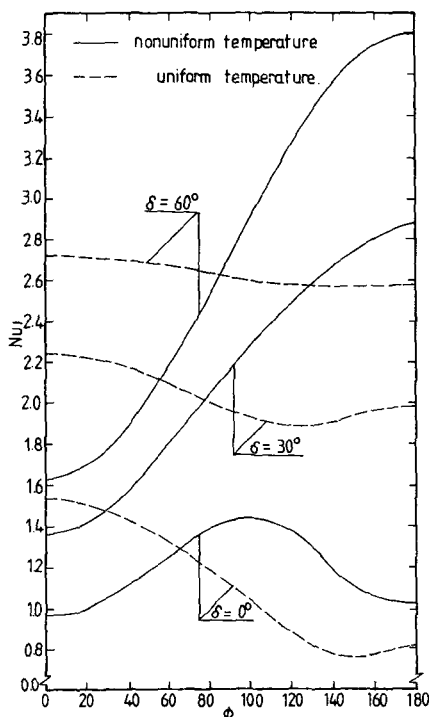


Fig. 9 Variation of local Nusselt number at inner cylinder wall of $\xi=0.0$ with ϕ

을 따라 Nusselt수가 크게 증가하였다.

Fig. 9는 $\xi=0.0$ 에서 내관의 국소 Nusselt수 분포이며 $\delta=0^\circ$ 인 경우 최대국소 Nusselt수는 불균일온도분포에서는 $\phi=100^\circ$, 균일온도분포에서는 $\phi=0^\circ$ 에서 나타내고, $\delta=30^\circ$ 와 60° 의 경우 국소 Nusselt수 분포는 ϕ 가 증가하면 불균일온도분포에서는 크게 증가하나 균일온도분포에서는 약간 감소

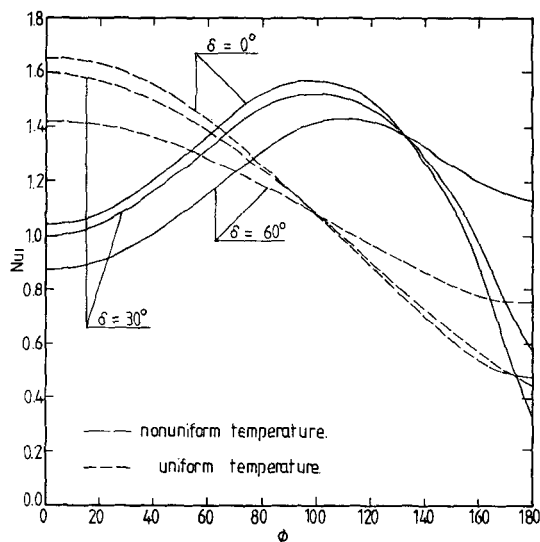


Fig. 10 Variation of local Nusselt number at inner cylinder wall of $\xi=1.0$ with ϕ

하였다. 또 $\delta=0^\circ$ 는 $\phi=65^\circ$, $\delta=30^\circ$ 는 $\phi=75^\circ$, $\delta=60^\circ$ 는 $\phi=85^\circ$ 에서 각각 불균일온도분포 Nusselt수와 균일온도분포의 Nusselt수가 일치하였다.

Fig. 10은 $\xi=1.0$ 에서 내관의 국소 Nusselt수 분포이며 불균일온도분포의 경우 $\phi=100^\circ$ 근방에서 최대값을 나타내며 $\phi=135^\circ$ 에서 Nusselt수가 일치하였고, 균일온도분포의 경우 ϕ 와 함께 감소하며 $\phi=100^\circ$ 에서 Nusselt수가 일치하였다.

Fig. 11은 $\xi=2.0$ 에서 내관의 국소 Nusselt수 분포이며 이 부분에서는 대류가 억제되어 경사각도가 증가할수록 Nusselt수의 분포가 감소하였다.

Fig. 12는 $\phi=0^\circ$ 인 환상공간 하부에서 축방향으

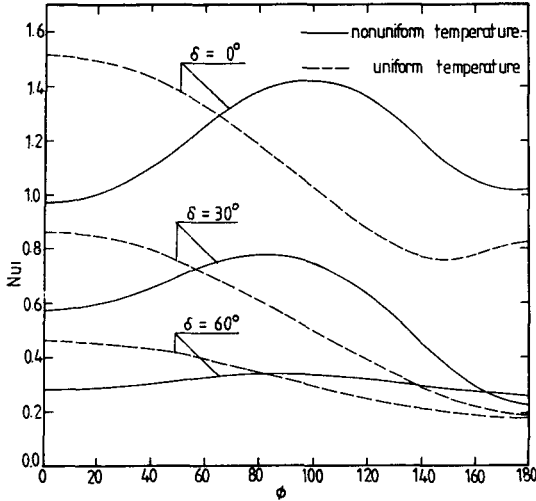


Fig. 11 Variation of local Nusselt number at inner cylinder wall of $\xi=2.0$ with ϕ

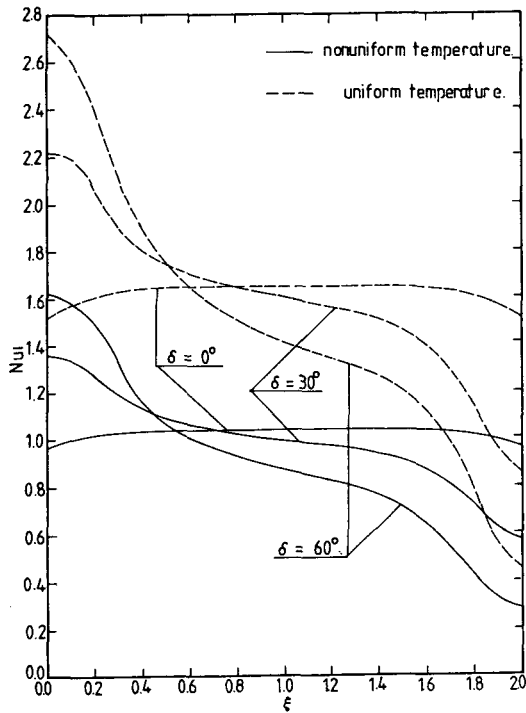


Fig. 12 Variation of local Nusselt number at inner cylinder wall of $\phi=0^\circ$ with ξ

로의 내관의 국소 Nusselt수 분포이며 $\delta=30^\circ$ 와 60° 의 경우 ξ 가 증가하면 Nusselt수는 감소하고 $\delta=0^\circ$ 의 경우 거의 변화가 없다.

Fig. 13은 $\phi=90^\circ$ 에서 내관의 축방향 국소 Nusselt수 분포이며 $\phi=0^\circ$ 와 비교하여 불균일온도

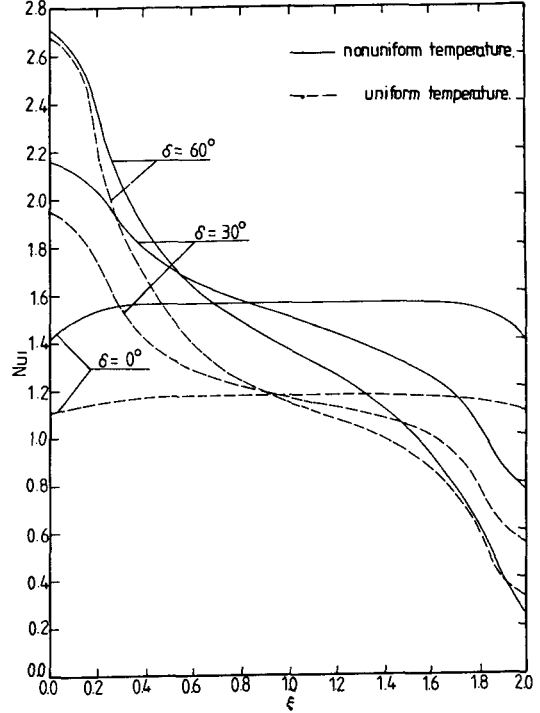


Fig. 13 Variation of local Nusselt number at inner cylinder wall of $\phi=90^\circ$ with ξ

분포의 경우가 균일온도분포의 경우보다 Nusselt수 분포가 큰 값을 나타내었다.

Fig. 14는 환상공간 상부인 $\phi=180^\circ$ 에서 내관의 축방향 국소 Nusselt수 분포이며 $\delta=0^\circ$ 의 양단에서의 국소 Nusselt수 분포는 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 와는 반대로 증가하였다.

Fig. 15는 $\xi=0.0$ 에서 외관의 국소 Nusselt수 분포이며 $\delta=0^\circ$ 인 경우 ϕ 가 증가하면 Nusselt수 분포도 증가하나 $\delta=30^\circ$ 와 60° 인 경우에는 경사로 인해 $\xi=2.0$ 으로 열전달이 집중되어 거의 변화가 없었다.

Fig. 16은 $\xi=1.0$ 에서 외관의 국소 Nusselt수 분포이며 이 Nusselt수 분포는 대체로 $\phi < 110^\circ$ 에서 불균일온도분포의 경우는 균일온도분포의 경우보다 감소하였고 $\phi > 110^\circ$ 에서는 이와 반대의 현상을 나타내었다.

Fig. 17은 $\xi=2.0$ 에서 외관의 국소 Nusselt수 분포이며 ϕ 가 증가하면 Nusselt수가 증가하였고, 불균일온도분포와 균일온도분포의 Nusselt수 일치점은 $\delta=0^\circ$ 에서 $\phi=120^\circ$, $\delta=30^\circ$ 는 $\phi=100^\circ$, $\delta=60^\circ$ 는 $\phi=80^\circ$ 이었다.

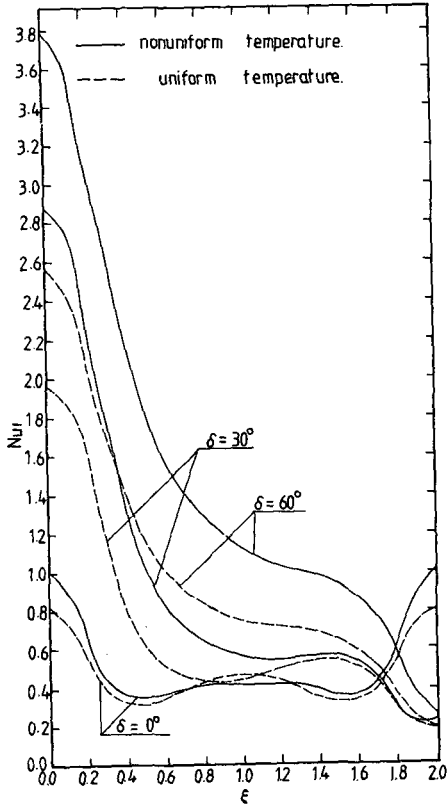


Fig. 14 Variation of local Nusselt number at inner cylinder wall of $\phi=180^\circ$ with ξ

Fig. 18은 $\phi=0^\circ$ 에서 외관의 축방향 국소 Nusselt수 분포이며 $\delta=0^\circ$ 인 경우 양단에서 약간 증가하였으며, $\delta=30^\circ$ 와 $\delta=60^\circ$ 인 경우에는 ξ 가 증가하면 크게 증가하였다.

Fig. 19는 $\phi=90^\circ$ 에서 외관의 축방향 국소 Nusselt수 분포이며 $\delta=0^\circ$ 인 경우 $\phi=0^\circ$ 와는 반대로 양단의 국소 Nusselt수 분포는 약간 감소하였으며, $\delta=30^\circ$ 와 $\delta=60^\circ$ 인 경우는 불균일온도분포와 균일온도분포의 국소 Nusselt수 분포가 거의 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 20은 $\phi=180^\circ$ 에서 외관의 축방향 국소 Nusselt수 분포이며 이 국소 Nusselt수 분포는 $\delta=0^\circ$ 인 경우 양단에서 크게 감소하였고, $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 와는 반대로 불균일온도분포의 경우가 균일온도분포의 경우보다 큰 값을 나타내었다. 또 $\delta=30^\circ$ 인 경우에는 $\xi=1.0$ 부근까지 증가하다가 $\xi=1.4$ 부근에서 다시 감소한 후 크게 증가하였고 $\delta=60^\circ$ 인 경우는 감소함이 없이 계속 증가하였다.

Table 1은 불균일온도분포와 균일온도분포의 평

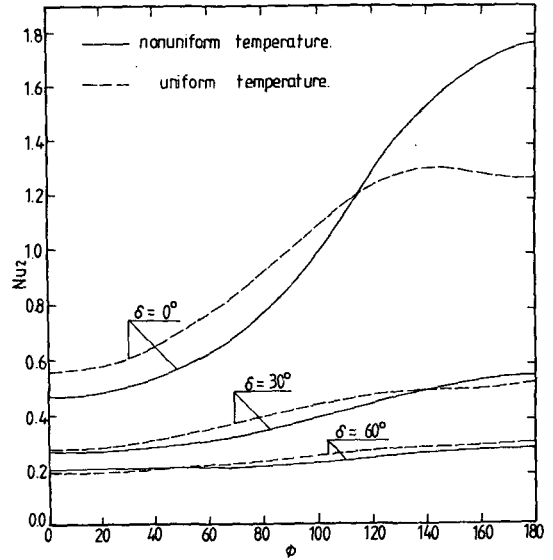


Fig. 15 Variation of local Nusselt number at inner cylinder wall of $\xi=0.0$ with ϕ

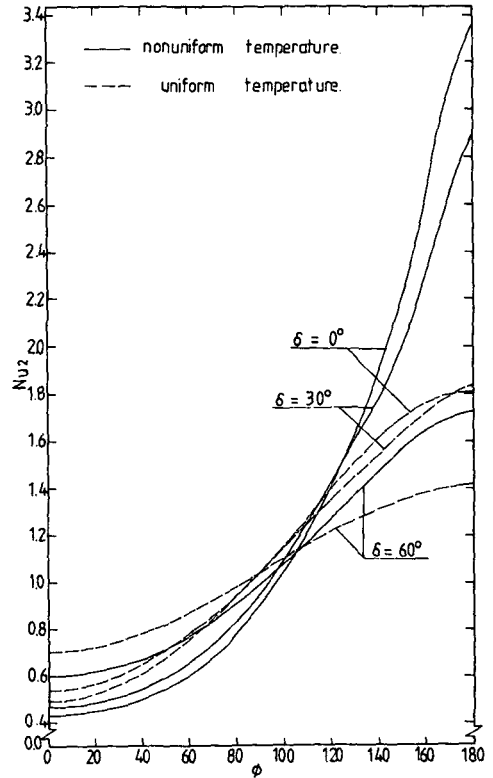


Fig. 16 Variation of local Nusselt number at outer cylinder wall of $\xi=1.0$ with ϕ

균 Nusselt수를 비교한 것이다. 불균일온도분포의 경우가 균일온도분포의 경우보다 $\delta=0^\circ$ 에서

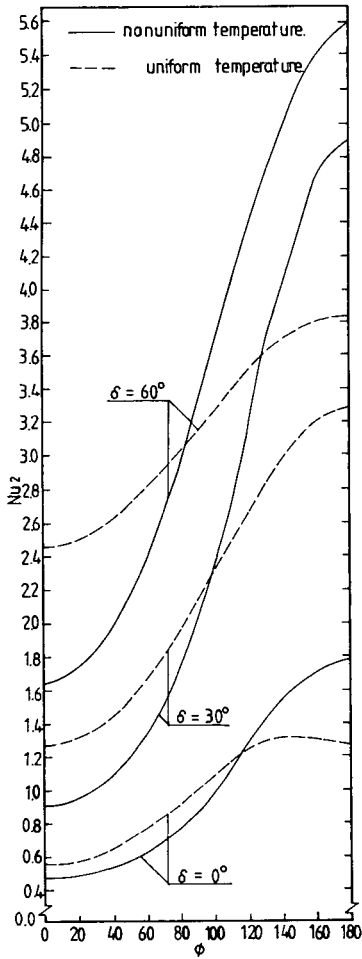


Fig. 17 Variation of local Nusselt number at outer cylinder wall of $\xi=2.0$ with ϕ

Table 1 Comparison of mean Nusselt number for nonuniform temperature and uniform temperature with inclination angle

δ	Nonuniform temperature	Uniform temperature	Remark
0°	1.2375	1.1186	9.6%
30°	1.2757	1.1799	7.5%
60°	1.3151	1.2540	4.6%

9.6%, $\delta=30^\circ$ 에서 7.5%, $\delta=60^\circ$ 에서 4.6% 증가하였다.

이는 Hickox 등^(13,14)의 연구결과와 Kays와 Crawford⁽¹⁵⁾의 일정열유속은 일정표면온도일 때보다 Nusselt수가 증가한다는 것과 정성적으로 일치

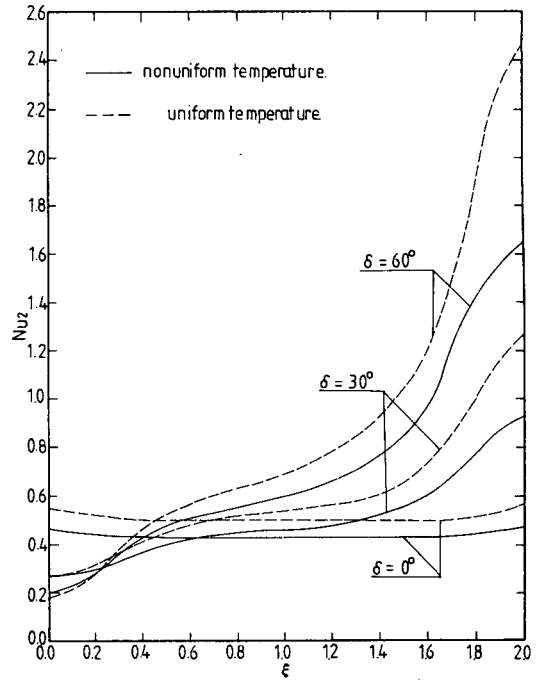


Fig. 18 Variation of local Nusselt number at outer cylinder wall of $\phi=0^\circ$ with ξ

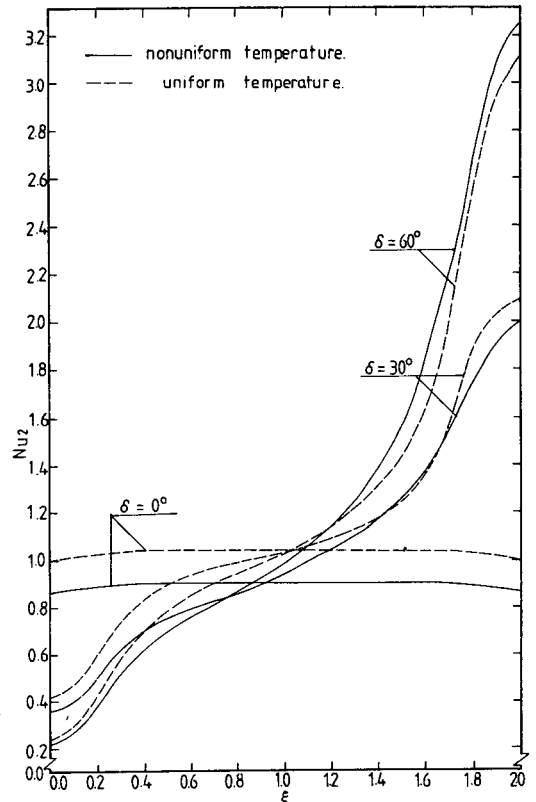


Fig. 19 Variation of local Nusselt number at outer cylinder wall of $\phi=90^\circ$ with ξ

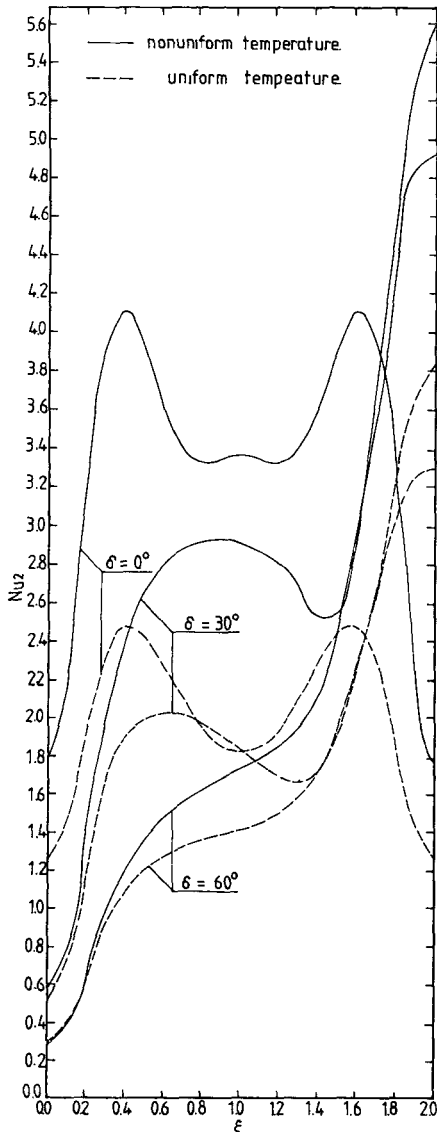


Fig. 20 Variation of local Nusselt number at outer cylinder wall of $\phi=180^\circ$ with ξ

한다.

4. 결 론

내관의 온도가 불균일한 동심환상공간에서 $R_a=3 \times 10^4$, $P_r=7.0$, $R_1=0.6$, $L=2.0$ 일 때 경사각도 0° , 30° , 60° 에 대한 자연대류 열전달을 3차원 수치해석하여 균일온도분포인 경우⁽¹²⁾와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) $\delta=0^\circ$ 인 경우 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 에서 외관의

축방향 국소 Nusselt수 분포는 불균일온도분포가 균일온도분포보다 작으나 $\phi=180^\circ$ 에서는 반대로 불균일온도분포가 균일온도분포보다 큰 값을 나타 내었다.

(2) 최대국소 Nusselt수 위치는 내관에서 $\delta=0^\circ$ 인 경우 $\phi=100^\circ$ 의 $\xi=0.5$ 및 1.5 이고 $\delta=30^\circ$ 와 $\delta=60^\circ$ 인 경우는 $\phi=180^\circ$ 의 $\xi=0.0$ 이었으며, 외관에서는 $\delta=0^\circ$ 인 경우 $\phi=180^\circ$ 의 $\xi=0.4$ 및 1.6 이고 $\delta=30^\circ$ 와 $\delta=60^\circ$ 인 경우는 $\phi=180^\circ$ 의 $\xi=2.0$ 이었다.

(3) 평균 Nusselt수는 불균일온도분포의 경우가 균일온도분포의 경우보다 $\delta=0^\circ$ 에서 9.6%, $\delta=30^\circ$ 에서 7.5%, $\delta=60^\circ$ 에서 4.6% 증가하였다.

참 고 문 헌

- (1) Beckmann, W., 1931, "Die Wärmeübertragung in Zylindrischen Gasschichten bei Naturlicher Konvektion", Forsch. Ged. d. Ingenieurwesen, Vol. 2, pp. 165~178.
- (2) Crawford, L. and Lemlich, R., 1962, "Natural Convection in Horizontal Concentric Cylindrical Annuli", I & EC Fund., Vol. 1, No. 4, pp. 260~264.
- (3) Grighli, U. and Hauf, W., 1966, "Natural Convection in Horizontal Cylindrical Annuli", Proc. of 3rd International Heat Transfer Conference, Vol. 2, pp. 182~195.
- (4) Bishop, E. H. and Carley, C. T., 1966, "Photographic Studies of Natural Convection Between Concentric Cylinders", Proc. 1966 Heat Transfer Fluid Mech. Inst., pp. 63~78.
- (5) Powe, R. E., Carley, C. T. and Bishop, E. H., 1969, "Free Convective Flow Pattern in Cylindrical Annuli", J. Heat Transfer, Vol. 91, pp. 310~314.
- (6) Kuehn, T. H. and Goldstein, R. J., 1976, "An Experimental and Theoretical Study of Natural Convection in the Annulus Between Horizontal Concentric Cylinders", J. Fluid Mech., Vol. 74, pp. 695~719.
- (7) Aziz, K. and Hellums, J. D., 1967, "Numerical Solution of the Three Dimensional Equations of Motion for Laminar Natural Convection", The Physics of Fluids, Vol. 10, pp. 314~324.
- (8) Ozoe, H., Sayama, H. and Churchill, S. W., 1977, "Natural Convection Patterns in a Long Inclined Rectangular Box Heated From Below: Part 1. Three-Dimensional Photography", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, pp. 131~139.

- (9) Ozoë, H., Yamamoto, K., Sayama, H. and Churchill, S. W., 1977, "Natural Convection Patterns in a Long Inclined Rectangular Box Heated from Below: Part 2. Three-Dimensional Numerical Results", *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 20, pp. 131~139.
- (10) Takata, Y., Fukuda, K., Hasegawa, S., Shimomura, H. and Sanokawa, K., 1980, "Three-Dimensional Natural Convection in a Porous Medium between Concentric Inclined Cylinders", *Proc. 19th Natl. Heat Transfer Conf.*, Vol. HTD-8, pp. 97~103.
- (11) Takata, Y., Iwashige, K., Fukuda, K., and Hasegawa, S., 1984, "Three-Dimensional Natural Convection in an Inclined Cylindrical Annulus", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 5, pp. 747~754.
- (12) Kim, C. W. and Kwon, S. S., 1987, "경사진 동심 원통 사이의 환상공간에서 자연대류 열전달", *Solar Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 53~60.
- (13) Hickox, C. E. and Gartling, D. K., 1977, "The Effects of Nonuniformities on Natural Convection in Annular Receiver Geometries", Sandia Laboratories Report SAND 77-1641.
- (14) Ratzel, A. C., Hickox, C. E. and Gartling, D. K., 1979, "Techniques for Reducing Thermal Conduction and Natural Convection Heat Losses in Annular Receiver Geometries", *Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp. 108~113.
- (15) Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1980, "Convective Heat and Mass Transfer", pp. 90~97, McGraw-Hill Co., New York.