

< 論 文 >

수평 타원 환상공간에서의 자연대류에 관한 실험적 연구

이 재 순\* · 서 정 일\*\* · 이 택 식\*\*\*

(1987년 7월 12일 접수)

An Experimental Study on Natural Convection in the Annuli between Two Horizontal Elliptic Cylinders

Jae Soon Lee, Jeong Il Suh and Taik Sik Lee

Key Words: Natural Convection(자연대류), Interferogram(간섭계무늬 사진), Thermal Plume(열기둥), Annuli(환상공간), Equivalent Heat Conductivity(등가열전도계수)

Abstract

Experimental study has been carried out on natural convection in the annuli formed by two isothermal horizontal inner and outer elliptic cylinders with uniform gap. The eccentricities of inner and outer elliptic cylinder and the gap ratio for the experimental model were 0.5078, 0.389 and 0.363 respectively. The temperature distributions were obtained through the analysis of interferograms which were taken by Mach-Zehnder interferometer in the range of Rayleigh number (RaL) from 0.34x10^4 to 3.07x10^4. It showed that flow was laminar when RaL <= 2.5x10^4, while above the range of Rayleigh number we could get information on the fluctuation of interference fringe. Therefore, the upper limit of RaL for the correlation equation of mean equivalent conductivity in reference(1) is confirmed. The flow pattern could be visualized by simple smoke test. The comparison of streamlines, isotherms, temperature distributions and local equivalent heat conductivity between existing numerical and present experimental results showed good agreement.

기 호 설 명

G : 간격비 (gap ratio) ( 2(내외부관 간의 공간폭) / (내부관 단경 + 내부관 장경) )
h : 열전달계수
K : 열전도계수

Keq : 국소등가열전도계수 (local equivalent heat conductivity) ( = qconv / qcond )
K\_eq : 평균등가열전도계수
L : 내외부관의 공간폭
Nu : Nusselt 수 ( = hL / K )
Pr : Prandtl 수 ( = nu / alpha )

\*정회원, 전국대학교 공과대학 기계공학과
\*\*정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과
\*\*\*정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- $q_{cond}$  : 순수 전도시의 국소열전달율
- $q_{conv}$  : 국소열전달율
- $Ra_L$  : Rayleigh 수  $(= \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{\alpha})$
- $t_h$  : 내부고온 벽면온도
- $t_c$  : 외부저온 벽면온도
- $t_r$  : 실내온도
- $\Delta t$  : 고온과 저온 벽면간의 온도차
- $t_m$  : 고온과 저온 벽면의 평균온도
- $\Delta T$  : 무차원 유체온도차

그리스 문자

- $\alpha$  : 유체의 열확산계수
- $\beta$  : 유체의 열팽창계수
- $\nu$  : 동점성계수

하첨자

- cond : 전 도
- conv : 대 류
- $i, o$  : 내부 및 외부벽면
- LY : 와상(臥狀)
- W : 벽 면

1. 서 론

본 연구는 이중벽용기에서 볼 수 있는 환상공간에 관한 자연대류 연구로서 용기속에 들어 있는 유체의 열차폐를 위한 최적의 가스두께를 측정하기 위하여 필요한 지식을 얻기 위한 열전달 연구이다.

실제로 저온유체(cryogenic fluid)수송용 용기 제작을 위하여서는 터널이나 횡단교의 통과고의 높이제한 때문에 그단면이 주로 타원형 이중관 형태로 제작되거나 내외부관이 동심타원관(confocal elliptical cylinder)은 아니고 내외부관사이의 간격이 균일한 수평타원 이중관 형태로 제작될 수 밖에는 없다. 동심타원관은 내외부관 사이의 간격이 위치에 따라 일정하지 못하게 된다. 여기서 균일한 간격이란 수평 및 수직축에 대한 내외부관간의 간격이 일정함을 말한다.

본 연구는 층류유동범위내에서 연구한 참고문헌(1)의 이론적 연구결과를 뒷받침하기 위하여 수행한 실험적 연구로서 사용한 내부 및 외부타원의 편심율과 그 간격비는 각각 0.5078, 0.389 및 0.363 이었다.

실험의 목적은 다음 세가지로 요약될 수 있다. 첫째 목적은 선택한 기하학적 환상공간에 대하여  $Ra_L$  증가에 따른 간섭무늬 사진을 얻어 이를 검토할시  $Ra_L$ 의

층류상한값을 얻을 수 있다는 것이다. 따라서 참고문헌(1)에서 제시한 환상공간의 와상에 관한 평균등가열전도계수( $\overline{Keq}_{LY}$ )와  $Ra_L$ 의 상관관계식( $\overline{Keq}_{LY} = 0.134 Ra_L^{0.271}$ )의  $Ra_L$  값의 적용범위를 확인하자는 것이다. 여기서 와상이란 타원의 장축방향이 수평방향인 것을 말한다.

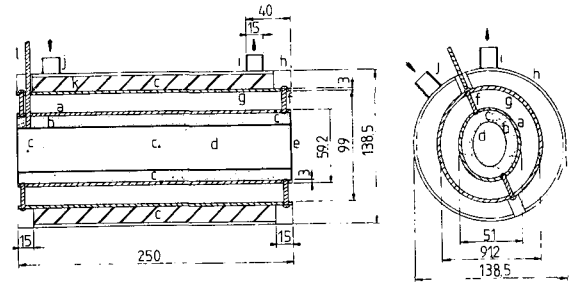
둘째 목적은 층류범위내의 특정한  $Ra_L$  값( $1.44 \times 10^4$ )을 택하여 특정한 Prandtl 수( $Pr=0.706$ )와 간격비 값( $G=0.363$ )에 관하여 온도분포와 국소등가 열전도계수의 이론계산치를 구하고 또 동일조건하의 실험치를 구하여 상호비교함으로써 이론계산의 정확도의 정도를 분석하여 보자는 것이다.

세째 목적은 이론계산으로는 알수 없는 환상공간의 상부대칭 경계선부근의 간섭무늬의 요동에 관한 지식을 얻을수 있다는 것이다. 간섭무늬의 요동은 유동이  $Ra_L$  증가에 따라 층류범위를 벗어날때 부터 일어나는 현상이다.

2. 실험장치

2.1 실험모델제작

본 연구대상 기하학적 모형은 Fig.1과 같으며 내부 및 외부타원관은 99.9%의 동봉으로 제작하였다. 이 내외부타원관은 와이어커팅머신(wire cutting machine)으로 가공하였는데 길이가 250mm로 너무 길어서 wire의 잦은 절단으로 250mm를 한꺼번에 와이어커팅머신으로 가공하는 것은 어려웠다. 따라서 길이가 140mm인 순동봉으로 140mm씩 일단 2개를 가공하여 이 2개를 알루미늄에폭시로 접착하여서 280mm 길이인 타



- a Inner Cylinder
- b Heater
- c Location of thermocouple junction
- d Conductor
- e Cover
- f Supporting Bolt
- g Outer Cylinder
- h Cooling Water jacket
- i Water Outlet
- j Water inlet
- k Cooling Water Guide
- l Electric wire for the thermocouple and heater

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal elliptical annulus

Table 1 Geometry of annulus between horizontal elliptic cylinders with uniform gap

	Focus length (mm)	Major axis (mm)	Minor axis (mm)	Eccentricity	Gap width (mm)
Inner elliptic cylinder	15	59.2	51	0.5078	20
Outer elliptic cylinder	19.259	99	91.2	0.389	

원관을 만든다음 양단을 절단하여 250mm가 되도록 만들어 사용하였다. 그리고 내부타원관은 4개의 지지볼트로 외부타원관에 관간폭이 등거리가 되도록 고정하였다. 내외부타원관의 환상공간의 기하학적 치수는 Table 1과 같다.

외부타원관과 내부타원관은 참고문헌(2)의 모형과 같이 동심축접타원(confocal elliptic cylinder)은 아니고 촛점이 상이한 타원이 되며 내부와 외부타원관의 간격은 같게 된다. 따라서 간격이 균일한 타원환상공간이 만들어질 수 있게 된다.

내부관 안쪽에 직경이 0.65mm이고 저항이 m당 5.4Ω인 니크롬선 2.8m를 타원형 마분지에 감아서 집어넣었다. 그리고 내관양단에는 전원공급용 동선코일을 알미늄나사조임으로 연결하였다. 감겨진 니크롬선 위에 종이테이프를 감고 동선코일에는 절연튜브를 이용하여 절연시켰다. 이 열원체와 내부타원관사이 및 열원체의 내부공간에는 열전도를 촉진시키기 위하여 장석가루를 채워 넣은후 내부관 양단에 두께 2mm의 알미늄판을 타원형으로 가공하여 막았다.

내부관의 열전대는 Fig. 1에서와 같이 알루미늄에폭시로 부착하였으며 좌우부에 각각 2개씩 도합 4개를 상이한 길이위치에 상호 90°가 되도록 설치하였다. 열전대는 직경 0.127mm의 구리 콘스탄탄(T형)으로 Omega Temperature Measurement 회사제로서 내관벽에 1.2mm 구멍을 낸후 열전대 junction을 내부관 안쪽에서 내부관의 외벽쪽으로 넣은 후 알루미늄에폭시로 고착하였다.

외부관에는 냉각수 안내기쪽에서 외부관내부벽면쪽으로 길이방향과 원주방향으로 상이한 위치에 3개의 열전대를 내부관벽에서의 열전대고착방법과 같은 방향으로 고정시켰다.

## 2.2 실험장치

Mach-Zehnder 간섭계는 같은 위상을 가지는 2개의 광속이 다른 굴절물의 밀도장을 통과하므로써 생긴 광로차를 이용하여 온도장을 가시화하는 방법으로 열전달현상의 연구에 가장 효과적인 실험장치이다. Fig. 2

는 간섭계 실험장치이고 오목거울직경은 250mm이고 사용한 광원은 5 mW He-Ne 레이저소오스(laser source)를 이용하였다.

실험모델은 Fig. 2에서 보는바와 같이 V블록형 지지대위에 올려져 있고 이 지지대는 상하전후좌우 및 회전 가능한 이동대위에 설치되어 있으므로 실험모델의 위치조정이 쉬웠다.

내부관 가열을 위한 공급전원량 조절을 위하여 슬라이더스를 사용하였는데 그 규격은 전압범위가 0~130V, 입력이 100V, 60Hz인 1kW의 정격용량이다. 그리고 열전대 온도측정을 위하여 디지를 전기온도계를 연결 사용하였는데 Yoko Gawa 전기제작성소제였다.

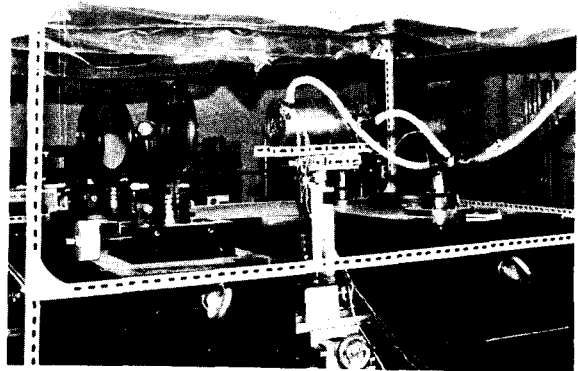


Fig. 2 Photograph of experimental device

## 3. 실험방법

일정한 온도의 냉각수를 외부관 냉각수통로를 통하여서 흐르게하고 내외부타원관벽의 온도차가 일정하게 되도록 조정하였다. 가열기의 전원공급은 슬라이더스로 조정하였으며 내외부관의 온도는 각각 전자온도계로서  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  범위내의 오차로 들어갔을때 정상상태로 된 것으로 간주하였으며 정상상태가 되기까지는 대략 4시간 가량의 시간이 걸렸다.

간섭계 무늬 사진으로 부터 내외부관벽에서의 온도

Table 2 Experimental conditions and results

Run number	$t_h$ (°C)	$t_c$ (°C)	$t_r$ (°C)	$\Delta t$ (°C)	$t_m$ (°K)	$Pr$	$Ra_L$	Fig. No.	
								Standing	Lying
1	27.5	23.0	25.0	4.5	298.25	0.7085	$3.4 \times 10^3$	—	—
2	32.0	24.0	26.8	8.0	301.00	0.708	$6 \times 10^3$	—	—
3	37.5	24.0	26.2	13.5	303.75	0.707	$9.55 \times 10^3$	—	4
4	42.5	24.0	26.5	18.5	306.25	0.706	$1.25 \times 10^4$	—	—
5	45.8	24.0	26.2	21.8	307.9	0.706	$1.44 \times 10^4$	—	—
6	55.0	24.0	26.5	31.0	312.5	0.705	$1.84 \times 10^4$	—	—
7	65.5	23.0	24.6	42.5	217.25	0.704	$2.43 \times 10^4$	—	5
8	74.9	23.0	24.5	51.9	321.95	0.703	$2.77 \times 10^4$	—	—
9	85.0	23.0	24.0	62.0	327.0	0.702	$3.076 \times 10^4$	—	6

구배를 구하기 위하여 무늬필름을 약 19배가량 확대 인화하여 무늬 사진의 간격을 판독하였다. 이 온도구배로부터 내외부관의 Nusselt 수를 구하였다.

그리고 유선촬영을 위하여 연기를 환상공간에 집어 넣어 정상상태가 될때까지 기다려 촬영하였다. 이때 기준광속은 차단하고 측정광속만 통과시켜 찍었다.

사용한 카메라는 35mm 마이크로 렌즈 카메라이며 사용된 필름은 ASA 100 이며 셔터속도는  $\frac{1}{125} \sim \frac{1}{250}$  이었다. 가시화 사진을 위한 셔터시간은 1초정도였다

#### 4. 실험결과 및 검토

실시한 실험조건은 Table 2에 주어져 있다. 여기서  $t_h$ 란 내부고온타원관의 온도를 말하고  $t_c$ 란 외부저온 타원관의 온도를 말한다. 내부관은 열원에 대하여 가열이 되며 외부관은 냉각수에 의해 냉각이 된다.  $t_r$ 는 실내온도이며  $\Delta t$ 는 내부고온 타원관과 외부저온타원관 간의 온도차이다.  $t_m$ 는 외부와 내부관의 평균온도이며  $Pr$ 는 환상공간내의 공기의 Prandtl 수이다.  $Ra_L$ 는 내외부타원관간의 공간폭을 특성길이로 하는 Rayleigh 수이다. Standing 과 Lying 은 입상과 와상을 말하며 타원의 장축방향이 수평일때는 와상, 수직일때는 입상이라한다.

간섭무늬사진은 광학적 측정에 의하여 얻는 것으로 총 18개의 경우에 대하여 간섭무늬 사진을 얻었으나 본논문에서는 지면관계로 대표적으로 몇개만 Fig. 4, 5, 6으로 제시하였다. 본 연구 환상공간의 모양이 Fig. 3에 주어져 있다. 환상공간을 수직으로 가로지른 실선은 가상적인 수직대칭선을 표시하고 있으며 화살표는

열기둥의 유동방향을 표시하고 있다. 열기둥은 고온내부타원벽을 따라 상승하다가 상부수직대칭선을 따라 외부저온타원벽면으로 침투하여 이 냉각벽면을 따라 아랫부위로 하강하게된다. 분석을 위하여 환상공간의 수직대칭선 아랫부분을 0°로 놓고 윗부분을 180°로 놓았다.

Fig. 4의  $Ra_L$ 가  $9.55 \times 10^3$  때를 보면 환상공간의 180° 부위에서 열기둥<sup>(2-4)</sup>이 생기는 것을 볼수 있다.  $Ra_L$ 가  $2.43 \times 10^4$  인 Fig. 5를 보면 열기둥이 더 날카로워지며 90° 이상의 환상공간에서 온도반전현상<sup>(2-4)</sup>이 생기는 것을 볼수 있다. 온도반전현상이란 냉표면 가까이 있는 유체가 가열표면 가까운 유체보다 더 온도가 높은 현상을 말한다. 이는 내부열경계층과 외부 열경계층이 환상공간내에서 유동방향이 반대로 되면서 상호 유동간섭을 일으키므로 생긴다.  $Ra_L$ 가 증가함에 따라 온도반전현상이 더 심하게 나타남을 볼수 있다.  $Ra_L$ 가  $3.076 \times 10^4$  인 경우의 Fig. 6 경우를 보면 간섭무늬가 상부수직선을 중심으로  $\pm 30^\circ$  정도의 상부공간에서 유동의 요동이 일어남을 볼수 있다. 환상공간을 90°회전시킨 입상의 경우에는  $Ra_L$ 가  $2.77 \times 10^4$  일때 벌써 간섭무늬의 요동이 발견된다. 요동속도는 약 1Hz 정도였다. 간섭무늬의 요동이 난류라고 단정할 수는 없어도 적어도 층류범위를 벗어났다고는 할수 있을 것이다. 고로 안전하게  $Ra_L$ 가  $2.5 \times 10^4$  이하일때는 층류로 볼수 있을 것이고 그래서 본 기하학적 형태에서  $Ra_L \leq 2.5 \times 10^4$  때는 본모델에 대한 층류방정식의 이론계산이 가능하다고 사료된다. 그리고 환상공간의 0°부근의 하부를 관찰하여 보면 유동은 거의 정지한 상태와 같으며 이러한 현상은 내외부관의 온도차가 증가하여도 같은 현상을 보인다.

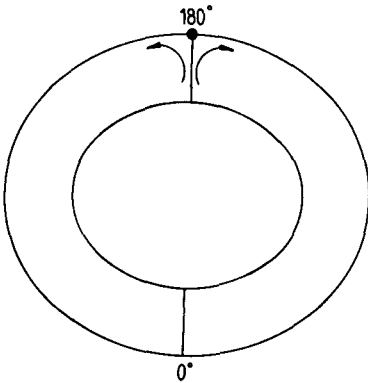


Fig. 3 Flow pattern of thermal plume at 180°

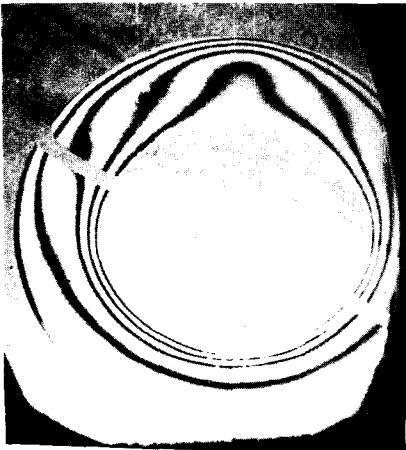


Fig. 4 Interferogram taken using air for  $Ra_L=9.55 \times 10^3$ ,  $Pr=0.707$  at lying position



Fig. 5 Interferogram taken using air for  $Ra_L=2.43 \times 10^4$ ,  $Pr=0.704$  at lying position

본실험에서 얻은 간섭무늬를 관찰하여 보면 내부관 근처의 반경방향 간섭무늬 간격은 하부에서 제일 작다 이 사실은 가장 큰 온도구배와 열유동이 하부에서 생



Fig. 6 Interferograms taken using air for  $Ra_L=3.076 \times 10^4$ ,  $Pr=0.702$  at lying position

긴다는 것을 뜻한다. 유동이 내부관위로 상승함에 따라 경계층 두께는 증가한다. 가장 큰 경계층두께와 가장 적은 온도구배는 내부관상부의 유동대칭선에서 일어난다. 내부관상의 열기둥은 위의 외부관쪽으로 침투하여 180° 근처의 외부관에서 제일 얇은 경계층 두께를 만들고 따라서 가장 높은 열유동을 일으킨다. 이 고온의 유체는 저온의 외부관벽상의 경계층내에서 외부관벽을 따라 하부로 움직인다. 이때 내외부관 사이에서 두경계층이 상호분리 되면서 온도반전현상이 생기게 된다.

### 5. 기존이론결과와 실험결과의 비교

실험이 수행된  $Ra_L$  범위중에서 층류유역에 속하고 비교적  $Ra_L$ 가 높은  $1.44 \times 10^4$ 의 경우를 택하여 와상의 경우에 대하여 이론치(1)와 실험치를 비교하였다.

이론치에 대하여 언급하면 본 환상공간은 그 내외부타원의 편심율이 상이하므로 불규칙한 기하학적 형상이 되며 이와같이 불규칙한 기하학적 형상에 대하여 널리 사용되고 있는 유한요소법(F.E.M)을 도입하여 수치계산한다.

비교 항목은 (1) 실험으로 구한 간섭무늬사진으로부터 얻은 실험적 온도구배와 동일 조건하의 이론 계산으로 구한 온도구배의 비교 (2) 무차원 반경방향 온도 분포에 있어서 실험과 이론치 비교 (3) 내외부관벽에 있어서 이론 및 실험의 국소등가열전도계수의 비교 (4)  $Ra_L$ 가  $3.076 \times 10^4$  일때 연기를 이용한 유선 사진과  $Ra_L$ 가  $2 \times 10^4$  일때 이론 계산으로 얻은 유선사진의 비교이다.

(1) Fig. 7은 간섭무늬사진과 수치계산으로 구한 등온선과의 비교이다. 간섭무늬는 등온선을 나타낸다. 따라서 우측의 수치계산 등온무차원곡선은 좌측의 간섭무늬와 같아야한다. 실험에서 구한 간섭무늬 사이의 온도차는 내관근처에서는  $3.3^\circ\text{C}$ 이나 외관근처에서는  $2.9^\circ\text{C}$ 가 되며 이론등온선의 차이는  $2.18^\circ\text{C}$ 가 된다. 수치계산이나 실험이나 오차는 생기기 마련인데 실험 오차는 주로 광학적인 것으로 단말영향(end effect)은 물론, 불완전한 무한대 프린치(fringe)조정등에 기인한다. 그리고 수치계산의 오차는 Boussinesq approximation, 유한한 격자수, 해의 수렴판정 기준치의 한계성 등(2)에서 생긴다.

이와같은 오차로 인하여 완전치는 않지만 본 실험과 이론 계산 결과로 얻은 등온선모양은 잘 일치하며 온도구배도 정성적으로 잘 맞는다고 볼 수 있다.

(2) Fig. 8은 무차원 반경 방향 온도 분포의 이론 및 실험치의 비교로서 실선은 이론계산치이다. 실험과 이론의 온도분포 비교는 중앙부위보다 양벽면이 더 잘 맞고 내부관 벽면이 외부관 벽면보다 더 잘 맞는다. 중앙의 최대차이는 6.25%이내이고 평균은 2.06% 이내이다. 열전달 계수의 계산은 양벽면의 온도 구배를 이용함으로 이론치와의 차이는 감소되게 된다.

(3) Fig. 9에는  $Keq_i$ , Fig. 10에는  $Keq_o$ 의 이론계산치와 실험치의 비교가 주어져 있다.  $Keq_i$ 와  $Keq_o$ 의 이론과 실험치의 평균차이는 0.6%와 2.4%로 각각 된다. 이 차이를 잘 검토하여 보면 내부관근처가 외부관근처보다 이론계산치와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다. 왜냐하면 환상공간 실험유체를 간섭계에서 광축을 조정할시 실험유체 중앙축을 중심으로 조정하였기 때문에 내관쪽이 더 잘 맞는다고 추론된다.



Fig. 7 Comparison between experimental and numerical isotherms for  $Ra_L=1.44 \times 10^4$ ,  $Pr=0.706$  at lying position

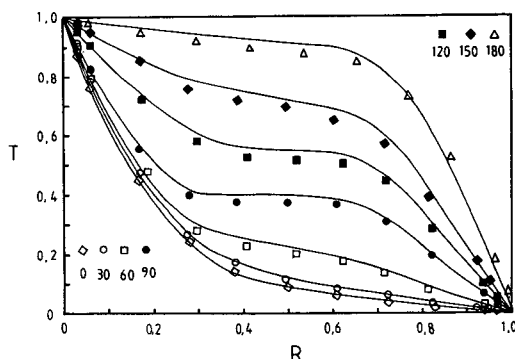


Fig. 8 Comparison between experimental and numerical temperature distribution for  $Ra_L=1.44 \times 10^4$ ,  $Pr=0.706$  at lying position

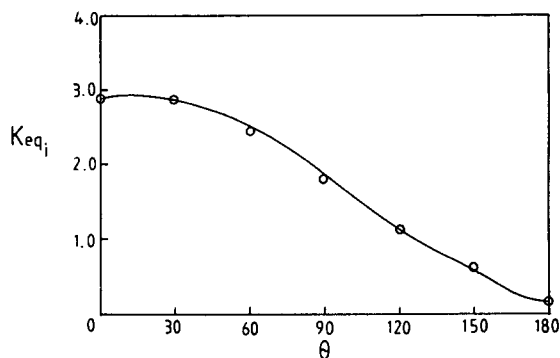


Fig. 9 Comparison between experimental and numerical local equivalent conductivity at inner cylinder for  $Ra_L=1.44 \times 10^4$ ,  $Pr=0.706$  at lying position

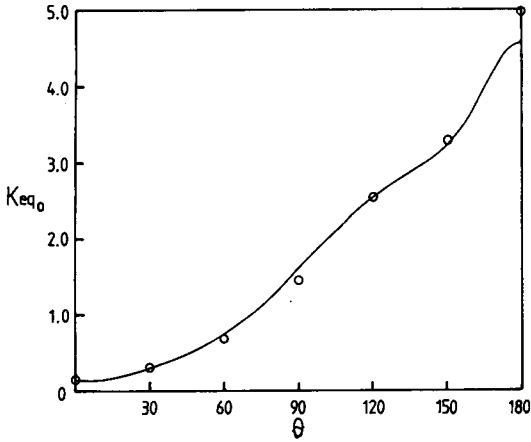


Fig. 10 Comparison between experimental and numerical local equivalent conductivity of outer cylinder for  $Ra_L=1.44 \times 10^4$ ,  $Pr=0.706$  at lying position

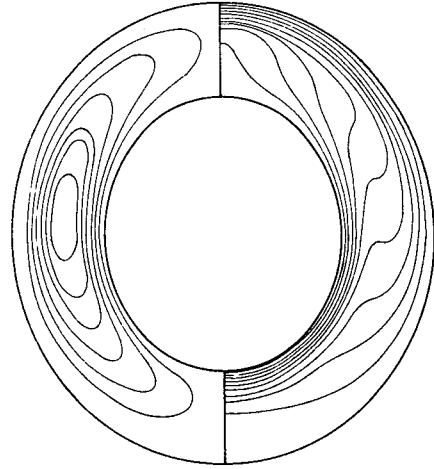


Fig. 12 Isotherms and Streamlines for  $Ra_L=2 \times 10^4$ ,  $Pr=0.7$  at standing position

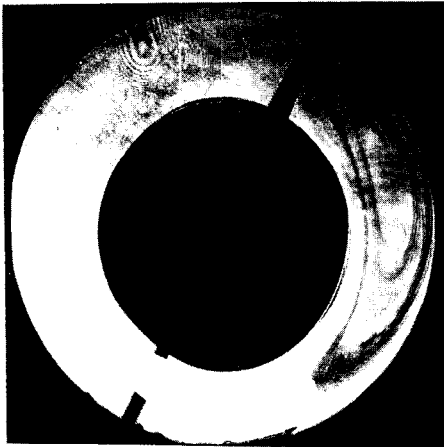


Fig. 11 Flow visualization by smoke for  $Ra_L=3.076 \times 10^4$ ,  $Pr=0.702$  at standing position

6. 결 론

(1) Rayleigh 수의 층류상한값 및 그 영향

간격비가 0.363 인 수평타원 환상공간에서 공기를 실험유체로 사용하여  $Ra_L$  을  $3.4 \times 10^3$  에서  $3.076 \times 10^4$  의 범위로 변경시키면서 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 온도분포를 측정하였다.

$Ra_L$  가 증가할수록 등온선의 온도반전형상,  $180^\circ$  근방의 열기둥 및 평균등가열전도계수치는 증가하였으나  $0^\circ$  부근은  $Ra_L$  에 무관하게 거의 정지상태로 있었다.

실험결과를 분석하면 다음과 같다.  $Ra_L$  가  $3 \times 10^3$  에서 열기둥이  $180^\circ$  부근에서 생기기 시작했고  $Ra_L$  가  $9.55 \times 10^3$  에서 온도반전현상이 환상공간상부에서 생기기 현상은  $Ra_L$  가  $2.43 \times 10^4$  까지 계속되나 입상의 경우가 와상의 경우보다 강하였다.  $Ra_L$  가  $2.77 \times 10^4$  이 되면 입상에서는 간섭무늬의 요동이 시작되었고  $Ra_L$  가  $3.076 \times 10^4$  에서는 입상와상 할것없이 모두 수직대칭선을 중심으로  $\pm 30^\circ$  범위에서 간섭무늬의 모양은 그대로 유지하면서 심한 요동을 일으켰다. 요동속도는 대략 1Hz 였다.

따라서 본 실험에서  $Ra_L$  가  $2.5 \times 10^4$  이하일때는 와상에서 층류임이 밝혀졌다. 따라서 기 발표한 본 모델에 관한 2 차원 층류유동때의 평균등가열전도계수와  $Ra_L$  의 상관관계식의  $Ra_L$  의 상한값은  $2.5 \times 10^4$  임이 입증되며 이는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\overline{Keq_{LV}} = 0.134 Ra_L^{0.271} \quad (3 \times 10^3 \leq Ra_L \leq 2.5 \times 10^4)$$

(2) 이론과 실험치의 비교

(4) Fig. 11 은  $Ra_L$  가  $3.076 \times 10^4$  일때 연기를 이용하여 유동을 가시화시킨 것이다. 모기향연기를 환상공간에 집어넣고 정상상태가 될때까지 기다려 촬영하였다. 선명한 가시화 사진을 얻기가 무척 어려웠다. 여기서 제시한 사진은 사진의 선명도 때문에 환상공간을  $90^\circ$  회전시킨 경우의 입상때의 것이다.

기 발표한 참고문헌 (1)의 이론 계산은  $Ra_L$  가  $2.5 \times 10^4$  이하의 층류범위에서 수행한 것으로  $3.076 \times 10^4$  까지의 유선계산은 없다. 그러나 Fig. 12 의  $2 \times 10^4$  의  $Ra_L$  때의 입상경우의 유선과의 비교로서 그 경향이 정성적으로 잘 맞음을 확인할 수 있다.

$Ra_L$  수가  $1.44 \times 10^4$  일때인 경우를 택하여 이론과 실험치간의 등온선, 온도구배 및 국소등가열전도계수를 비교하였다. 환상공간의 중앙부위보다 양벽면이 이론과 실험치가 더 잘 들어맞으며 외관보다 내관벽면이 더 잘 들어맞음이 확인되었다.

또  $Ra_L$  가  $3.076 \times 10^4$  일때 유선을 촬영하여 이론계산 유선과 비교하여 본 결과 기존수치계산결과와 실험으로 얻은 결과치가 정성적으로 잘 일치함을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) 이재순, 서정일, 1984, "간격이 균일한 수평타원 환상공간에서의 자연대류에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 8 권, 제 4 호, pp. 351~359.
- (2) Lee, J.H., 1979, "Natural Convection in the Annuli between Horizontal Confocal Elliptic Cylinders", Ph. D. Thesis, Seoul National Univ.
- (3) Kuehn, T.H., 1976, "Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Circular Cylinder to a Surrounding Cylindrical Enclosure", Ph. D. Thesis, Univ. of Minnesota
- (4) Kuehn, T.H. & Goldstein, R.J., 1976, "An Experimental and Theoretical Study of Natural Convection in the Annulus between Horizontal Concentric Cylinders", J. Fluid Mech., Vol. 74, Part 4, pp. 695~719.

(1) 이재순, 서정일, 1984, "간격이 균일한 수평타원 환상공간에서의 자연대류에 관한 연구", 대한기계학