

# 수평채널 내 고 점성유체의 볼텍스 유동에 관한 3차원 수치해석(1) Three-Dimensional Numerical Study on the Vortex Flow in a Horizontal Channels with High Viscous Fluid

박일용\* · 김정수\*\* · 배대석\*\*\*†

Ri-Long Piao\*, Jeong-Soo Kim\*\* and Dae-Seok Bae\*\*\*†

(접수일 : 2014년 04월 17일, 수정일 : 2014년 05월 20일, 채택확정 : 2014년 06월 05일)

**Abstract:** Mixed convective vortex flow in the three-dimensional rectangular channel filled with high viscous fluid( $Pr=909$ ) is investigated computationally under various operating conditions. The Reynolds number is varied from 0 to  $5 \times 10^{-1}$ , the Rayleigh number from  $10^3$  to  $5 \times 10^4$ . The three-dimensional governing equations are discretized using the finite volume method. The effects of Reynolds number and Rayleigh number are presented and discussed. From a parametric study, it is found that vortex flow pattern of mixed convection in rectangular channels can be classified into three flow patterns basically, but the new vortex flow structures containing wave rolls are found, which are affected by Rayleigh number and Reynolds number. From this results, we can draw a flow regime map to delineate various vortex flow patterns in the high viscosity fluid mixed convective flow.

**Key Words :** Numerical Analysis, Mixed Convection, Vortex Flow, High Viscous Fluid.

## — 기 호 설 명 —

cp : 정압비열  
g : 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>]  
H : 채널 높이 [m]  
L : 채널 길이 [m]  
Pr : Prandtl수,  $\nu/\alpha$   
p : 압력 [N/m<sup>2</sup>]  
Ra : Rayleigh수,  $g\beta H^3(Th-Tc)/\nu \alpha$   
Re : Reynolds수,  $UiH/\nu$   
T : 온도 [K]  
Tc, Th : 냉각 및 가열 벽의 온도 [K]

$T^\infty$  : 냉각과 가열 벽의 평균 온도 [K]  
 $U_i$  : 입구 평균 속도 [m/s]  
W : 채널 폭 [m]  
u, v, w : x, y, z 방향의 속도 성분 [m/s]  
X, Y, Z : 무차원 수평(x/L), 수직(y/H), 날개  
(z/W)방향의 좌표

## 그리스 문자

x, y, z : 수평, 수직, 날개방향의 좌표  
 $\alpha$  : 열확산율  
 $\beta$  : 체적팽창계수

\*\*\*† 배대석(교신저자) : 부경대학교 기계공학과  
E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, Tel : (051)629-6138

\* 박일용 : 포스코 플랜텍 기술연구소

\*\* 김정수 : 부경대학교 기계공학과

\*\*\*† Dae-Seok Bae(corresponding author) : Department of  
mechanical engineering, Pukyong National University,  
E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, Tel : (051)629-6138

\* Li-Long Piao : Posco Plantec

\*\* Jeong-Soo Kim : Department of mechanical engineering,  
Pukyong National University,

- $\Theta$  : 수평방향에 x축과 이루는 각
- $\lambda$  : 열전도율
- $\mu$  : 유체의 점성계수
- $\nu$  : 동 점성계수
- $\rho$  : 밀도

## 1. 서 론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 사각채널 내에서 부력에 의한 혼합대류 볼텍스 유동은 화학기상증착(chemical vapor deposition), 마이크로 전자장비의 냉각, 태양열 집 열기의 에너지 수송, 밀집형 열 교환기 등과 같은 많은 공학적인 응용분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 많은 연구자들에 의하여 관심 있는 문제로 취급되어져왔다. 혼합대류 볼텍스 유동패턴에서 전형적인 롤 구조인 종방향 롤(longitudinal roll)과 횡방향 롤(transversal roll) 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 종방향 롤은 강제유동의 방향으로 나선형 모양으로 회전하면서 형성되는 롤이고, 횡방향 롤은 강제유동의 방향과 반대인 수직방향으로 회전하면서 형성되는 롤이다. 이와 같은 혼합대류 볼텍스 유도에 관하여 많은 연구자들은 Reynolds수, Rayleigh수 그리고 종횡비 등의 영향에 대하여 이론적, 실험적, 수치해석적 방법으로 다양하게 연구해 왔다<sup>1-12)</sup>. Maughan 등<sup>2)</sup>은 하부가 등온으로 가열되는 사각채널 내에서 AR=10, Pr=0.7인 경우 Reynolds수 ( $125 < Re < 500$ ), Grashof수 ( $7 \times 10^3 < Gr < 1 \times 10^6$ ) 그리고 경사각( $0 < \Theta < 30^\circ$ )을 변수로 하여 혼합대류 공기유동의 특성을 실험적으로 연구하였으며, Grashof수, Reynolds수 그리고 경사각이 불안정 유동의 발생 시기에 미치는 영향을 밝혔다. Nace 등<sup>4)</sup>은 하부가 가열되고 상부가 냉각되는 사각채널 내에서 AR=2, Ra=22,200, Re=18.75, 36, 54일 때 질소의 혼합대류 유동특성을 실험 및 수치해석적 방법으로 연구하였으며, 그 결과가 서로 잘 일치함을 보였다. Yu 등<sup>7)</sup>은 하부에서 가열되는 수평평행 채널 내에서의 혼합대류유동을 AR=12, Pr=0.7인 경우 Reynolds수 ( $20 \leq Re \leq 50$ )와 Rayleigh수 ( $Ra \leq 31000$ )를 변수로 하여

롤의 생성, 개수, 크기, 위치 등에 대하여 3차원 비정상 수치해석적으로 연구하였다. Gau 등<sup>10)</sup>은 하부가 가열되는 수평 평행평판 내에서 AR=6.67, Pr=0.7인 경우 Reynolds수( $100 < Re < 2000$ ),  $Gr/Re^2$  ( $2.5 < Gr/Re^2 < 907$ )를 변수로 하여 혼합대류 2차유동과 열전달의 특성을 실험적으로 연구하였다. Ozsunar 등<sup>11)</sup>은 하부가 가열되는 수평 평행평판 내에서 Ar=6.67, Pr=0.7인 경우 Reynolds수 ( $50 < Re < 1000$ ), Grashof수 ( $7 \times 10^5 < Gr < 4 \times 10^6$ ) 그리고 경사각( $0 \leq \Theta \leq 90^\circ$ )이 혼합대류 유동특성에 미치는 영향을 3차원 수치해석적으로 연구하였으며, 그 결과를 이전의 연구결과와 비교하여 서로 잘 일치함을 보여 주었다.

그러나 지금까지의 연구들은 대부분 저 점성유체인 공기, 질소나 물의 혼합대류 연구에 국한되었으며,  $Re \ll 1$ 인 저 Reynolds수나 Prandtl수가 큰 고 점성유체에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Pr=999인 고 점성유체가 작동유체로 사용되는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 사각채널 내에서 저Reynolds수( $0 \leq Re \leq 5 \times 10^{-1}$ )영역에서 Rayleigh수( $10^3 \leq Ra \leq 5 \times 10^4$ )가 혼합대류의 볼텍스 유동특성에 미치는 영향을 3차원 수치해석적 방법으로 고찰하였다.

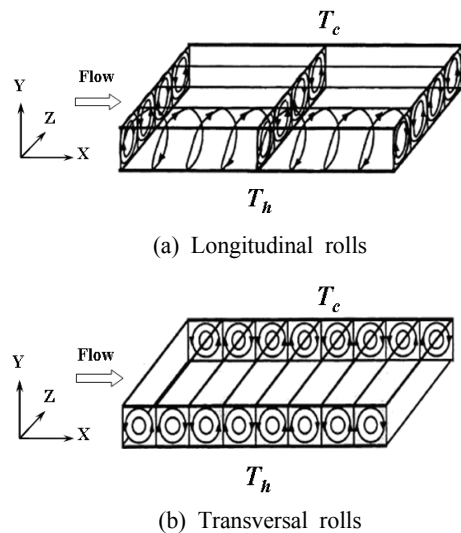


Fig. 1 Schematic representation of two primary vortex flow pattern

## 2. 수치 해석

### 2.1 수치 모델

본 연구는 사각채널 내에서의 3차원 정상상태 층류 혼합대류에 관한 것이며, 기하학적 형상은 Fig. 2와 같다. 유동장을 해석함에 있어서 점성소산과 복사열전달은 무시하였다. 유체는 비압축성이며, 모든 물리적 성질은 일정하다고 가정하였다. 작동유체는 Prandtl수가 909인 고 점성유체이다. 유체는 균일속도와 상, 하부의 평균온도로 일정하게 유입되어 사각채널을 통과하여 유출된다.  $L_0 \leq x \leq L_0 + L$ 인 영역에서는 상부와 하부 면은 등온으로 각각 냉각, 가열되며, 기타의 모든 경계 벽들은 단열되어진다.

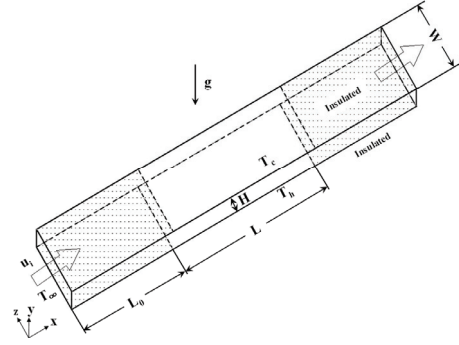


Fig. 2 Schematic diagram of the three dimensional geometry investigated

### 2.2 지배방정식 및 경계조건

위의 가정에 따라 Boussinesq 근사를 적용한 3차원 정상상태 층류유동의 연속, 운동량 및 에너지 방정식은 식(1)-(5)와 같다. 여기서  $u, v, w$ 는 각각  $x, y, z$  방향의 속도,  $T$ 는 온도,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $g$ 는 중력 가속도,  $\mu, cp, \lambda$ 는 각각 유체의 점성계수, 정압비열, 열전도율을 나타낸다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad (2)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) + \rho g \beta \Delta T \quad (3)$$

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{\partial p}{\partial z} = \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad (4)$$

$$\rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = \lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) \quad (5)$$

본 연구에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$x = 0 : u = u_i, v = w = 0, T = T_\infty$$

$$x = L : \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$y = 0, L_0 \leq x \leq L + L_0 : u = v = w = 0, T = T_h$$

$$y = H, L_0 \leq x \leq L + L_0 : u = v = w = 0, T = T_c$$

$$y = 0, 0 \leq x < L_0, x > L + L_0 :$$

$$u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

$$y = H, 0 \leq x < L_0, x > L + L_0 :$$

$$u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$z = 0 : u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

$$z = W : u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

### 2.3 격자계

격자생성에서 X와 Z 방향에서는 균일격자를 생성하고, Y 방향에서는 가열 및 냉각 벽 근처에서 물리량들의 큰 구배가 예상되기 때문에 계산

의 정도를 높이기 위하여 격자를 조밀하게 생성하였다. Fig. 3은 Y-Z 평면에서의 격자분포를 나타낸다. Fig. 4는 해의 격자계 비의존성을 확인하기 위하여  $AR=4$ ,  $Pr=909$ ,  $Re=2 \times 10^{-2}$ ,  $Ra=10^4$  일 때 여러 격자수가 수치해석 결과에 미치는 영향을 나타낸다. 격자수가  $9.5 \times 10^4$ ,  $12.5 \times 10^4$ ,  $19 \times 10^4$ ,  $26 \times 10^4$ ,  $36 \times 10^4$ 개 일 때 평균 Nusselt수는 각각 2.2298, 2.2428, 2.2595, 2.2766, 2.2772로 나타내고 있으며, 격자수  $26 \times 10^4$ 개와  $36 \times 10^4$ 개인 경우 평균 Nusselt수를 비교하면 오차는 0.02635%에 불과하므로  $26 \times 10^4$ 개를 기본 격자수로 하여 계산을 수행하였다.

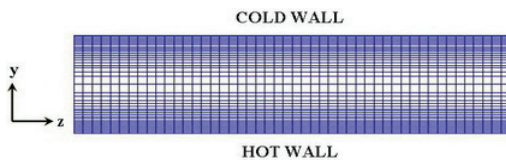


Fig. 3 Schematic illustration of the computational grid distributions in the Y-Z plane

## 2.4 해석방법

수치해석은 유한체적법(finit volume method)을 기초로 한 상용코드인 STAR-CD 3.22를 사용하였으며, 압력보정은 PISO(pressure implicit with splitting of operators)알고리즘을 사용하였고, 대류항은 중심차분도식(central differencing scheme)을

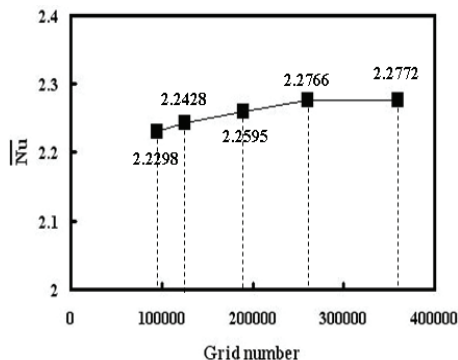


Fig. 4 Examination of grid independence of numerical solution at  $Re=2 \times 10^{-2}$  and  $Ra=10^4$

사용하여 계산을 수행 하였다. 속도에서의 완화 계수(relaxation factor)는 0.7, 압력은 0.4 그리고 온도는 0.85로 정하였으며, 수치계산에서는 최대오차한계(residual tolerance)를  $10^{-4}$ 으로 하였다. 계산에 사용된 컴퓨터는 CPU가 3.0GHz인 Intel Pentium IV이고, 격자수가  $26 \times 10^4$ 개 일 때 하나의 해를 구하는데 약 8시간이 소요되었다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 사각채널 내에서의 혼합대류 볼텍스 유동에 대하여,  $Pr=909$  일 때 Rayleigh수( $10^3 \leq Ra \leq 5 \times 10^4$ ) 및 저 Reynolds수( $0 \leq Re \leq 5 \times 10^{-1}$ )가 사각 채널 내 혼합대류에 미치는 영향을 3차원 수치해석적 방법으로 연구하였다.

### 3.1 Reynolds수의 영향

Fig. 5는  $AR=4$ ,  $Pr=909$  그리고  $Ra=1 \times 10^4$ 일 때 Reynolds수( $0 \leq Re \leq 9.6 \times 10^{-3}$ )의 증가에 따라 채널 내부의  $Y=0.5$ 인 위치에서의 X-Z 평면에서 형성되는 유동장의 변화를 보여주고 있다.  $Re=0$ 인 경우, 유동은 오로지 부력에 의한 자연대류의 영향을 받으므로 속도분포는 대칭적이고, 정지되어 있는 전형적인 횡방향 롤 유동형태를 나타낸다[Fig. 5(a)]. 입구 유속이 아주 작은  $Re=1 \times 10^{-3}$ 인 경우, 유동장은  $Re=0$ 인 경우의 횡방향 롤 유동형태를 유지하지만 입구 유속으로 인해 하류방향으로 천천히 이동함을 알 수 있다[Fig. 5(b)]. 이것은 입구 유속에 의한 강제대류가 유동장에 영향을 미치지 않지만 그 영향이 매우 작기 때문이다.  $Re=2 \times 10^{-3}$ 인 경우는  $Re=1 \times 10^{-3}$ 인 경우에 나타난 횡방향 롤들은 입구유속의 증가로 인해 채널 내 입구영역에서는 사라지고 다른 형태의 롤인 종방향 롤을 나타내지만 하류 방향에서는 여전히 횡방향 롤을 나타내는 혼합 롤의 유동형태를 보여준다[Fig.5(c)]. 입구 유속이 증가하여  $Re=4 \times 10^{-3}$ 인 경우, 입구 유속의 증가로 횡방향 롤은 완전히 사라지고 전 유동장은 안정적이고 대칭적인 분포를 나타내는 종방향 롤 유동에 의해 지배된다[Fig. 5(d)]. Reynolds

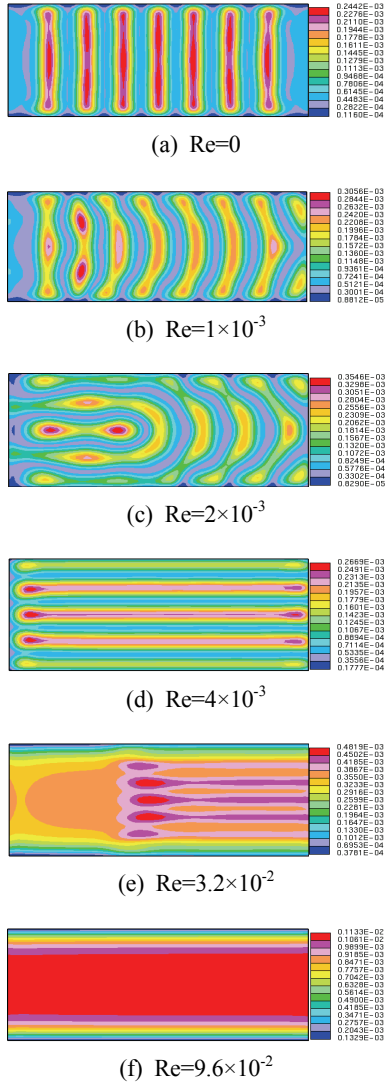


Fig. 5 Velocity magnitude distributions for various Reynolds number at AR=4, Pr=909, Ra=10<sup>4</sup> and Y=0.5

수가 더욱 증가하여  $Re=3.2 \times 10^{-2}$ 인 경우, 하류 방향에서의 유동은 여전히 중방향 물에 의해 지배되지만 입구 영역에서는 관성력에 의한 강제대류가 상, 하 벽의 온도차에 의해 형성된 자연대류보다 훨씬 크게 작용하기 때문에 물은 형성되지 않았다[Fig. 5(e)]. Reynolds수가  $9.6 \times 10^{-2}$ 에 도달하면 유동장은 완전히 강제대류의

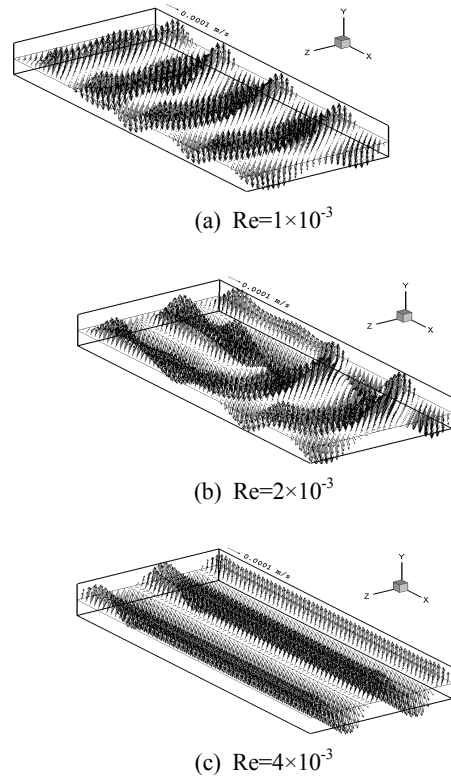


Fig. 6 Velocity vector plots for various Reynolds number at AR=4, Pr=909 and Ra=10<sup>4</sup>

지배를 받기 때문에 채널 내 전 영역에서는 어떠한 롤도 형성되지 않았다[Fig. 5(f)].

Fig. 6은 AR=4, Pr=909 그리고 Ra=10<sup>4</sup>일 때 Reynolds수의 증가에 따라 채널 내부의 높이방향 중간부분인 X-Z평면(Y=0.5)에서의 u, v, w 속도 분포를 나타낸 것이다.  $Re=1 \times 10^{-3}$ 일 때의 속도벡터는 상, 하부 온도차에 의해 생성된 자연대류의 영향이 입구유속에 의한 강제대류의 영향보다 훨씬 크게 작용하기에 수직방향의 속도크기는 수평 방향의 속도크기보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이 경우 하류 방향으로 천천히 이동하는 횡방향 물의 영향으로 유동은 파도모양의 형태를 형성함을 알 수 있다[Fig. 6(a)]. Reynolds수가 증가하여  $Re=2 \times 10^{-3}$ 일 때의 속도벡터는 입구 유속의 증가로 인해 입구 영역에서는 유동은 강제대류의 영향으로 인해 중방향으로 물이 형성되지만 하류 방향

에서는 여전히 부력에 의한 횡방향 롤 유동을 나타내는 전반적으로 혼합 롤 유동을 보여준다[Fig. 6(b)]. Reynolds수가 더욱 증가하여  $Re=4 \times 10^3$ 일 때에는 채널 내에서의 횡방향 롤들은 입구유속의 증가로 인해 완전히 사라지고 오로지 종방향 롤의 유동을 나타냄을 알 수 있다[Fig. 6(c)]. 따라서 사각채널 내 혼합대류 볼텍스 유동은 Reynolds수가 증가함에 따라 횡방향 롤의 유동에서 종방향과 횡방향 롤이 혼재하는 혼합 롤의 유동 그리고 종방향 롤 유동의 순서로 바뀌는 것을 알 수 있다.

### 3.2 Rayleigh수의 영향

Fig. 7은 종횡비  $AR=4$ ,  $Pr=909$  그리고  $Re=10^3$ 일 때 Rayleigh수( $10^3 \leq Ra \leq 2.5 \times 10^4$ )의 증가에 따라 채널의  $Y=0.5$ 인 위치에서의  $X-Z$  평면에서 형성되는 유동장의 변화를 보여준다.  $Ra=10^3$ 인 경우, 대류가 일어나는 임계 Rayleigh수( $Ra_c=1708$ )보다 작기 때문에 롤은 형성되지 않았다[Fig. 7(a,b)]. Rayleigh수가 임계 Rayleigh수를 초과한  $Ra=2 \times 10^3$ 인 경우, 부력에 의한 자연대류가 점차적으로 유동장에 영향을 미치게 되어 채널 내에 종방향 롤이 형성됨을 알 수 있다[Fig. 7(c)]. Rayleigh수  $Ra=2.5 \times 10^3$ 인 경우, 혼합대류 볼텍스 유동은 하류방향의 종방향 롤과 출구 영역에서의 횡방향 롤이 혼재하는 혼합 롤 유동을 나타낸다[Fig. 7(d)]. Rayleigh수가 증가하여  $Ra=5 \times 10^3$ 인 경우는 여전히 종방향과 횡방향의 혼합 롤의 유동을 나타내지만  $Ra=2.5 \times 10^3$ 인 경우와는 반대로 입구 영역에서만 종방향 롤이 형성되고 채널 내 대부분 영역에서는 횡방향 롤을 나타낸다[Fig. 7(e)]. 이것은 부력에 의한 자연대류의 영향이 점차적으로 증가하기 때문이다. Rayleigh수가 더욱 증가하여  $Ra=10^4$ 인 경우, 종방향 롤은 완전히 사라지고 유동은 오로지 하류방향으로 천천히 이동하는 횡방향 롤의 지배만 받는다[Fig. 7(f)]. Rayleigh수가 더욱 증가하여  $Ra=2.5 \times 10^4$ 인 경우, 여전히 하류방향에서는  $Ra=10^4$ 인 경우에 나타난 유동과 같이 규칙적인 횡방향 롤의 유동을 보이지만 입구 영역에서는 과도형 유동형태를 나타낸다[Fig. 7(g)]. Rayleigh수

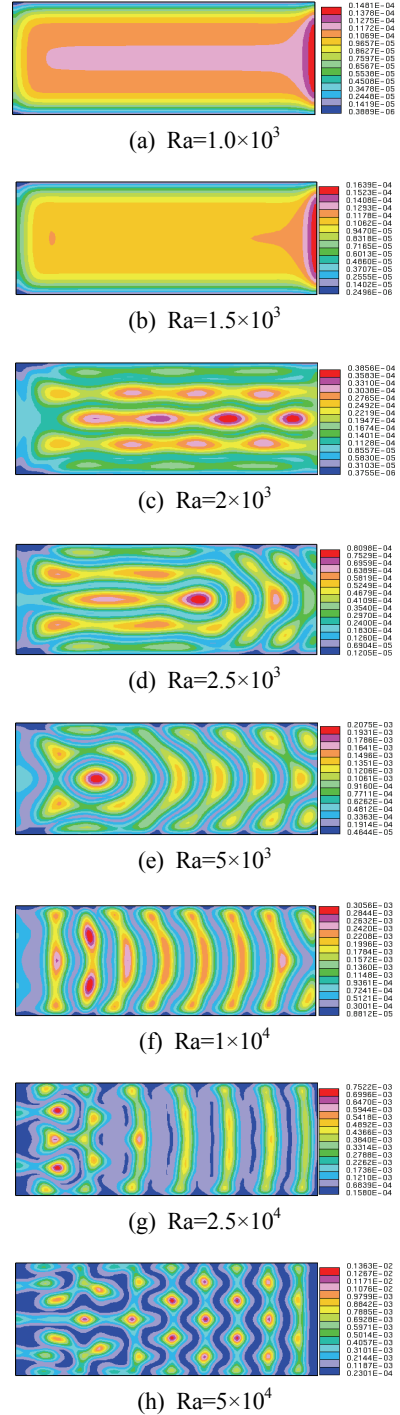


Fig. 7 Velocity magnitude distributions for various Rayleigh number at  $AR=4$ ,  $Pr=909$ ,  $Re=10^3$  and  $Y=0.5$

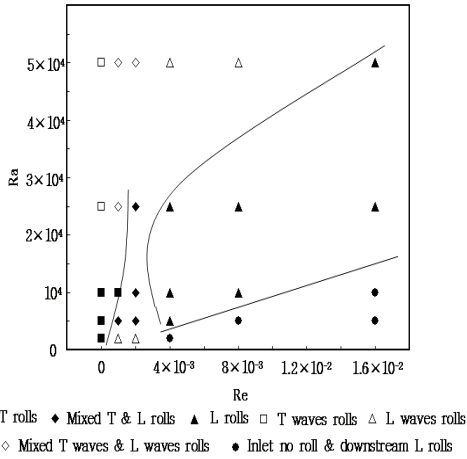


Fig. 8 Flow regime map for different vortex flow patterns at AR=4 and Pr=909

Ra=5×10<sup>4</sup>에 도달하면, 채널 내의 유동은 전부 과도형 유동을 나타낸다[Fig. 7(h)]. 따라서 채널 내의 혼합대류 볼텍스 유동은 Rayleigh수가 증가함에 따라 기본적으로 종방향 롤의 유동에서 혼합롤의 유동 그리고 횡방향 롤의 유동으로 변화하지만 추가로 과도형 롤 형태를 포함하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 AR=4, Pr=909일 때 Reynolds수와 Rayleigh수의 변화에 따라 형성된 여러 가지 볼텍스 유동패턴을 유동영역지도로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Reynolds수와 Rayleigh수의 크기에 따라 볼텍스 유동패턴은 횡방향 롤, 과도형 횡방향 롤, 종방향과 횡방향의 혼합 롤, 종방향과 횡방향의 과도형 혼합 롤, 종방향 롤, 과도형 종방향 롤 그리고 입구 영역에서는 롤이 없고, 하류방향에서 종방향 롤을 형성하는 형태로 분류하여 나타낼 수 있었다. 따라서 이 유동영역지도로부터 Reynolds수와 Rayleigh수의 변화에 따른 고점성유체의 여러 가지 볼텍스 유동패턴의 예측이 가능하였다.

#### 4. 결론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등

온 벽으로 구성된 사각채널 내에서 저 Reynolds수 ( $0 \leq Re \leq 5 \times 10^{-1}$ ), Rayleigh수( $10^3 \leq Ra \leq 5 \times 10^4$ )가 고 점성유체의 혼합대류에 미치는 영향을 유한체적법으로 수치해석하여 사각채널내의 유동을 3차원으로 가시화한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. Reynolds수가 증가함에 따라 사각채널 내의 유동은 횡방향롤 유동에서 혼합롤 유동을 거쳐 종방향롤 유동의 순서로 점차적으로 변화되어 사각채널 내의 유동을 기본적으로 3가지의 유동패턴 즉 횡방향롤 유동, 혼합롤 유동, 종방향롤 유동으로 분류할 수 있지만, 아주 유속이 낮은 저 Reynolds수영역에서는 Rayleigh수에 따라 과도형 모양의 새로운 유동패턴이 발생하였다. 따라서 기본적인 3가지 유동패턴에 과도형 종방향롤 유동, 과도형 혼합롤 유동, 과도형 횡방향롤 유동을 추가한 유동영역지도(flow regime map)을 만들 수 있었고, 이 유동영역지도로부터 Reynolds수 및 Rayleigh수에 따른 여러 가지 볼텍스(vortex)유동패턴의 예측이 가능하였다.

#### 후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음”

#### Reference

1. S. Ostrach and Y. Kamotani, 1975, "Heat Transfer Augmentation in Laminar Fully Developed Channel Flow by Means of Heating From Below", Journal of Heat Transfer, pp. 220-225.
2. J. R. Maughan and F. P. Incropera, 1987, "Experiments on Mixed Convection Heat Transfer for Airflow in a Horizontal and Inclined Channel", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 7, pp. 1307-1318.
3. J. R. Maughan and F. P. Incropera, 1990, "Regions of Heat Transfer Enhancement for Laminar Mixed Convection in a Parallel Plate

- Channel", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 3, pp. 555-570.
4. T. A. Nace, J. Ouazzani, A. D. Daubin and F. Rosenberger, 1992, "Mixed Convection in a Horizontal Rectangular Channel-Experimental and Numerical Velocity Distributions," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 6, pp. 1481-1494
  5. C. C. Huang and T. F. Lin, 1995, "Vortex Flow and Thermal Characteristics in Mixed Convection of Air in a Horizontal Rectangular Duct: Effects of the Reynolds and Grashof Numbers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 9, pp. 1661-1674
  6. S. S. Chen and A. S. Lavine, 1996, "Laminar, Buoyancy Induced Flow Structures in a Bottom Heated, Aspect Ratio 2 Duct with Through Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-11
  7. C. H. Yu, M. Y. Chang, C. C. Huang and T. F. Lin, 1996, "Unsteady Vortex Roll Structures in a Mixed Convective Airflow Through a Horizontal Plane Channel: a Numerical Study", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 3, pp. 505-518
  8. M. Y. Chang, C. H. Yu and T. F. Lin, 1997, "Changes of Longitudinal Vortex Roll Structure in a Mixed Convective Air Flow Through a Horizontal Plane Channel: an Experimental Study", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 2, pp. 347-363
  9. X. Nicolas, A. Mojtabi and J. K. Platten, 1997, "Two-Dimensional Numerical Analysis of the Poiseuille-Benard Flow in a Rectangular Channel Heated From Below", *Phys. Fluids*, Vol. 9, No. 2, pp. 337-348
  10. C. Gau, C. W. Liu, T. M. Huang and W. Aung, 1999, "Secondary Flow and Enhancement of Heat Transfer in Horizontal Parallel-Plate and Convergent Channels Heating from Below", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2629-2647
  11. A. Ozsunar, S. Baskaya and M. Sivrioglu, 2001, "Numerical Analysis of Grashof Number, Reynolds Number and Inclination Effects on Mixed Convection Heat Transfer in Rectangular Channels", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 7, pp. 985-994
  12. T. C. Cheng, J. T. Lir and T. F. Lin, 2002, "Stationary Transverse Rolls and U-rolls in Limiting Low Reynolds Number Mixed Convective Air Flow Near the Convective Threshold in a Horizontal Flat Duct", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, pp. 1211-1227