사각채널 내 고 Pr 수의 혼합대류 볼텍스 유동에 관한 3차원 수치적 연구

박일룡+·배대석++

Three-Dimensional Numerical Study on Mixed Convective Vortex Flow in Rectangular Channels at High Prandtl Number

Ri-Long Piao+ and Dae-Seok Bae++

Abstract : A three-dimensional numerical calculation has been performed to investigate mixed convective vortex flow in rectangular channels(width/height=4) with the upper part cooled and the lower part heated uniformly. In this study, the Prandtl number was 909, the Reynolds number was varied from 0 to 9.6×10^{-2} and the Rayleigh number from 10^3 to 5×10^4. The governing equations were discretized using the finite volume method. From a parametric study, velocity and temperature distributions were obtained and discussed. It is found that vortex flow of mixed convection in rectangular channels can be classified into three flow patterns which depend on Reynolds and Rayleigh numbers, and the regular vortex structure disappears around Rayleigh number 5×10^4.

Key words : Mixed convective vortex flow(혼합대류 볼텍스 유동), Three-dimensional numerical simulation(3차원 수치해석), High Prandtl number(고 Pr수)

1. 서 론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 사각채널 내에서 부력에 의한 혼합대류 볼텍스 유동은 마이크로 전자장비의 냉각, 화학기상증착(Chemical vapor deposition), 밀집형 열교환기 등과 같은 많은 공학적인 응용분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 많은 연구자들에 의하여 관심 있는 문제로 취급되어져 왔다. Chen 등[1]은 하부에서 가열되는 수평 덕트 내에서의 혼합대류 유동을 AR=2, Pr=0.7인 경우 Re($1\le Re\le 20$) 수 와 Ra($2\times10^3\le Ra\le 4\times10^3$) 수를 변수로 하여 종방향 및 횡방향 롤 구조에 대하여 수치해석적 방법으로 연구하였으며, 그 결과를 이전의 실험 및 수치해석 결과와 비교, 검토하였다. Nicolas 등[2]은 하부에서 가열되는 수평 사각채널 내에서의 혼합대류유동을 Pr=6.4인 경우 Re($Re\le 3$) 수와 Ra($Ra\le 6\times10^3$) 수를 변수로 하여 Poiseuille-Bénard flow에 대하여 수치해석적 방법으로 연구하였으며, 그 결과를 레이저-도플러 풍력측정법(laser-Doppler anemometry)을 기초로 한 실험결과와 비교하여 서로 잘 일치함을 보여주었다. Yu 등[3]은 하부에서 가열되는 수평 평행채널 내에서의 혼합대류 유동을 AR=12, Pr=0.7인 경우 Re($20\le Re\le 50$) 수와 Ra($Ra\le 3.1\times10^4$) 수를 변수로 하여 볼텍스 롤의 생성, 크기, 위치 등에 대하여 비정상 수치해석적 방법으로 연구하였으며, Chang등[4]은 하부에서 가열되는 수평 평행채널 내에서의 혼합대류 유동을 AR=12, Pr=0.7인 경우 Re($20\le Re\le 50$) 수와 Ra($6\times10^3\le Ra\le 3\times10^4$) 수를 변수로 하여 혼합대류 종방향 롤 구조에 대하여 실험적 방법으로 연구하였다. Cheng 등[5]은 수평 평행덕트 내에서의 혼합대류 공기유동을 AR=16, Pr=0.7인 경우 Re(Re=1,2) 수와 Ra($1.2\times10^3\le Ra\le 4\times10^3$) 수를 변수로 하여 혼합대류 횡방향 롤과 U형 롤 구조에 대하여 실험적 방법으로 연구하였으며, Lin[6]은 수평 채널 내 부력에 의한 볼텍스 유동과 열전달 특성에 대하여 저 Reynolds 수가 혼합대류 기체 유동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그러나 지금까지의 연구들은 대부분 저 점성 유체인 Pr 수가 0.7인 공기나 Pr 수가 6인 물을 작동유체로 사용하였으며 고 점성유체가 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 수치해석적 또는 실험적 방법으로 연구한 경우는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 사각채널 내에서 AR=4인 경우에 대하여 저 Re($0\le Re\le 9.6\times10^{-2}$) 수 및 Ra($10^3\le Ra\le 5\times10^4$) 수가 고 점성유체(Pr=909)의 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 3차원 수치해석적 방법으로 고찰하였다.

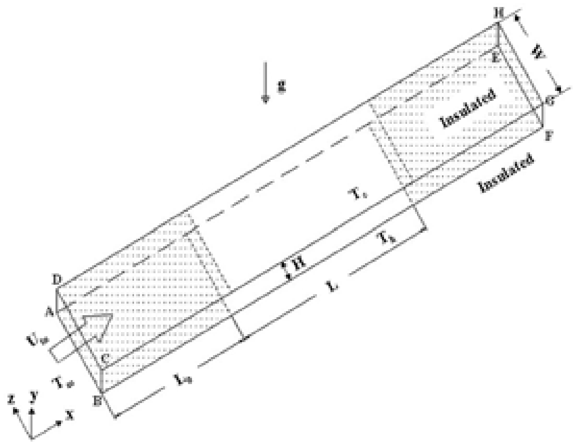


Fig. 1 Computational geometry

2. 수치해석

본 연구에서 3차원 사각채널 내에서의 혼합대류 유동을 수치해석하기 위해 사용한 기하학적 형상은 Fig. 1과 같다. 종횡비 AR=4이다. 작동유체는 Pr수가 909인 고 점성유체이다. 작동유체는 균일속도 U_{in}과 상하부의 평균온도 T_m로 유입되어 사각채널을 통과하여 유출된다. 초기 시간 t<0에서 유동은 완전발달 유동이고 모든 경계 벽들은 단열조건이다. 시간 t=0부터 x 길이가 $L_0\le x\le L_0+L$인 영역에서는 상부 면은 T_c의 온도로 등온으로 냉각하고 하부 면은 T_h의 온도로 등온으로 가열한다. 기타의 모든 경계 벽들은 단열조건이다. 본 수치해석은 3차원 정상상태, 비압축성 층류유동으로 가정하고 부력과 관련된 밀도변화는 Boussinesq근사를 사용하였다. 수치해석은 유한체적법을 기초로 한 유동해석 코드인 STAR-CD를 사용하여 계산하였으며, 압력보정에는 PISO 알리즘을 사용하였고, 대류항에는 중심차분 도식을 사용하였다.

+ 박일룡(부경대학교 대학원 기계공학부), E-mail:prlong2000@hanmail.net, Tel: 051)620-1616
++ 배대석, 부경대학교 기계공학부

3. 결과 및 고찰

3.1 Reynolds 수의 영향

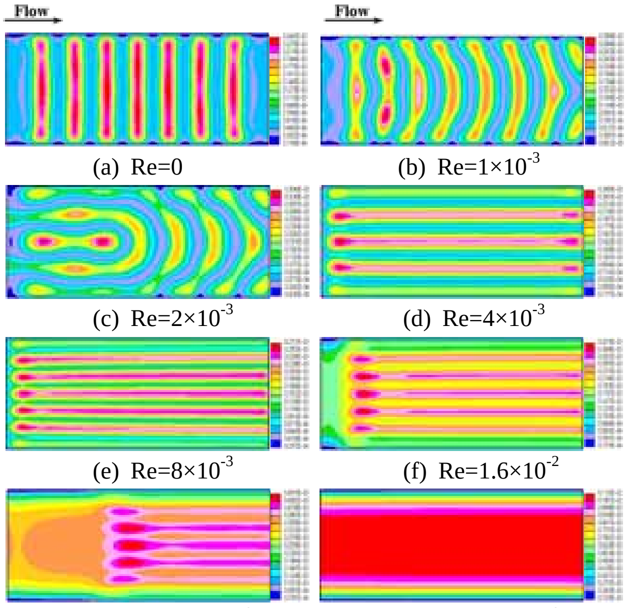
Fig. 2는 AR=4, Pr=909, Ra=10^4일 때 Re($0 \le Re \le 9.6 \times 10^{-2}$)수의 증가에 따라 채널 내부의 y=0.5인 평면에서 형성되는 유동장의 변화를 보여주고 있다. Re=0인 경우, 유동은 오로지 부력에 의한 자연대류의 영향을 받기 때문에 속도분포는 대칭적인 정지되어 있는 횡방향 롤 형태를 나타낸다[Fig. 2(a)]. 입구 유속이 아주 작은 Re=10^{-3}인 경우, 유동장은 Re=0인 경우의 횡방향 롤 형태를 유지하지만 입구 유속으로 인해 하류방향으로 천천히 이동함을 알 수 있다[Fig. 2(b)]. 이것은 입구유속에 의한 강제대류가 유동장에 영향을 미치지만 그 영향이 매우 작기 때문이다. Re=2×10^{-3}인 경우, Re=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. 2(c)]. 이는 Pr 수가 0.7인 공기의 경우와는 다른 유동의 형태를 보여준다[5]. 공기인 경우, 저 Re 수에서 혼합 롤의 유동형태는 나타나지만 본 연구에서 나타낸 것과는 달리 채널 중간부분에서 횡방향 롤이 형성되고 채널 측벽 부근에서 종방향 롤이 형성되었다. 입구 유속이 증가하여 Re=4×10^{-3}, 8×10^{-3}, 1.6×10^{-2}인 경우, 횡방향 롤은 완전히 사라지고 전 유동장은 안정적이고 대칭적인 분포를 나타내는 종방향 롤 유동에 의해 지배된다[Fig. 2(d~f)]. Re수가 더욱 증가하여 3.2×10^{-2}인 경우, 하류 방향에서의 유동은 여전히 종방향 롤에 의해 지배되지만 입구 영역에서는 관성력에 의한 강제대류가 상,하 벽의 온도차에 의해 형성된 자연대류보다 훨씬 크게 작용하기 때문에 롤은 형성되지 않았다[Fig. 2(g)]. Re 수가 9.6×10^{-2}에 도달하면 유동장은 완전히 강제대류의 지배를 받기 때문에 채널 내 전 영역에서 롤은 형성되지 않았다[Fig. 2(h)]. 이로부터 AR=4, Pr=909인 채널 내 혼합대류 볼텍스 유동을 Re수의 증가에 따라 크게 횡방향 롤의 유동, 종방향과 횡방향 롤이 혼재하는 혼합 롤의 유동 그리고 종방향 롤의 유동으로 분류할 수 있다.

3.2 Rayleigh 수의 영향

Fig. 3은 AR=4, Pr=909, Re=10^{-3}일 때 Ra($10^3 \le Ra \le 5 \times 10^4$) 수의 증가에 따라 채널 내부의 y=0.5인 평면에서 형성되는 유동장의 변화를 보여주고 있다. Ra=10^3과 1.5×10^3인 경우, 대류가 일어나는 임계 Ra(Ra_c=1708) 수보다 작기 때문에 롤은 형성되지 않았다[Fig. 3(a), (b)]. Ra 수가 임계 Ra 수를 초과한 Ra=2×10^3인 경우, 부력에 의한 자연대류가 점차적으로 유동장에 영향을 미치게 되어 채널 내에 종방향 롤이 형성됨을 알 수 있다[Fig. 3(c)]. Ra=2.5×10^3인 경우, 혼합대류 볼텍스 유동은 하류방향의 종방향 롤과 출구 영역에서의 횡방향 롤이 혼재하는 혼합 롤 유동을 나타낸다[Fig. 3(d)]. Ra 수가 증가하여 Ra=5×10^3인 경우는 여전히 종방향과 횡방향의 혼합 롤의 유동을 나타내지만 Ra=2.5×10^3인 경우와는 반대로 입구 영역에서만 종방향 롤이 형성되고 채널 내 대부분 영역에서는 횡방향 롤을 나타낸다[Fig. 3(e)]. 이것은 부력에 의한 자연대류의 영향이 점차적으로 증가하기 때문이다. Ra 수가 더욱 증가하여 Ra=10^4인 경우, 종방향 롤은 완전히 사라지고 유동은 오로지 하류방향으로 천천히 이동하는 횡방향 롤의 지배만 받는다[Fig. 3(f)]. Ra 수가 더욱 증가하여 Ra=2.5×10^4인 경우, 여전히 하류방향에서는 Ra=10^4인 경우에 나타난 유동과 같이 규칙적인 횡방향 롤의 유동을 보이지만 입구 영역에서는 불규칙적인 롤의 형성을 볼 수 있다[Fig. 3(g)]. Ra 수가 5×10^4에 도달하면, 채널 내 유동은 전부 불규칙적인 유동이 됨을 알 수 있다.

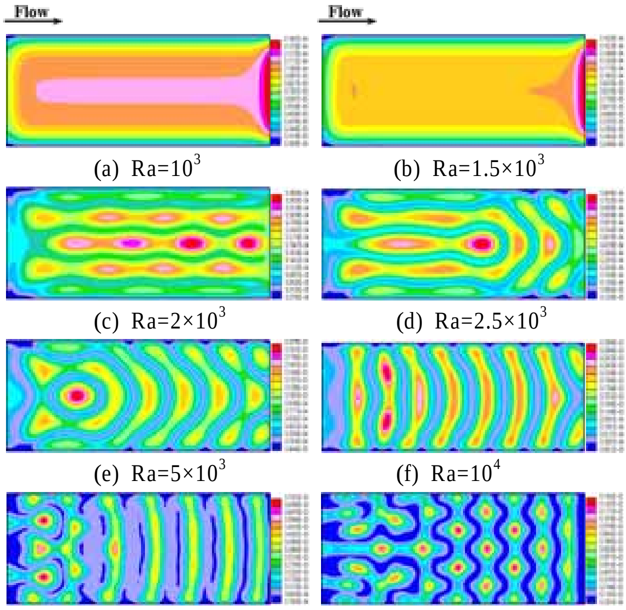
4. 결 론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 수평 사각채널 내에서 Pr=909, 종횡비 AR=4인 경우, Ra 수($10^3 \le Ra \le 5 \times 10^4$) 및 Re 수($0 \le Re \le 9.6 \times 10^{-2}$)가 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 3차원 수치해석적 방법으로 연구한 결과 유동 형태는 Re 수 및 Ra 수 변화에 따라 기본적으로 횡방향 롤의 유동, 종방향과 횡방향 롤이 혼재하는 혼합 롤의 유동 그리고 종방향 롤의 유동으로 분류할 수 있지만 혼합 롤 유동인 경우, 채널 중간부분에서 횡방향 롤이 형성되고 측벽부근에서는 종방향 롤이 생성되는 공기(Pr=0.7)유동과는 달리 Pr 수가 높은 고 점성 유체의 유동에서는 종방향 롤은 상류방향에서 형성되고 횡방향 롤은 하류방향에서 형성되었다. 또한, Ra=5×10^4에서 채널 내 볼텍스 유동은 전반적으로 불규칙적인 롤 유동을 나타내었다.



(a) Re=0 (b) Re=1×10^{-3} (c) Re=2×10^{-3} (d) Re=4×10^{-3} (e) Re=8×10^{-3} (f) Re=1.6×10^{-2} (g) Re=3.2×10^{-2} (h) Re=9.6×10^{-2}

Fig. 2 Velocity magnitude distributions for various Reynolds numbers at AR=4, Pr=909, Ra=10^4, y=0.5



(a) Ra=10^3 (b) Ra=1.5×10^3 (c) Ra=2×10^3 (d) Ra=2.5×10^3 (e) Ra=5×10^3 (f) Ra=10^4 (g) Ra=2.5×10^4 (h) Ra=5×10^4

Fig. 3 Velocity magnitude distributions for various Rayleigh numbers at AR=4, Pr=909, Re=10^{-3}, y=0.5