한국동력기계공학회지 제23권 제2호 pp. 20-26 2019년 4월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.2.020
Vol. 23, No. 2, pp. 20-26, April 2019

경사진 사각채널 내에서의 혼합대류에 관한 3차원 수치해석
Three-Dimensional Numerical Study on the Mixed Convection in Inclined Rectangular Channels

박일룡* · 김정수** · 배대석**†
Il-Yong Park*, Jeong-Soo Kim** and Dae-Seok Bae**†

(Received 04 October 2018, Revision received 19 February 2019, Accepted 21 February 2019)

Abstract: Three-dimensional numerical study is carried out to explore mixed convection in inclined rectangular channels with bottom heated and top cooled uniformly. In such a mixed convection, the flow pattern plays an important role in various technological processes. The three-dimensional governing equations are discretized using the finite volume method. The effects of the angle of inclination ($0° \leq \theta \leq 45°$) are presented and discussed in the range of low Reynolds number ($Re \leq 4\times10^{-3}$). It is found that the roll flow pattern in the inlet and exit of inclined channels is the transversal roll, and the longitudinal roll is always formed in the middle of inclined channels. Also, the size of the transversal rolls is increased in the channel inlet and exit and the size of the longitudinal roll in the middle of channel comes to be decreased as the angle of inclination is increased.

Key Words : Mixed Convection, Angle of Inclination, Vortex Flow, High Viscous Fluid

- 기 호 설 명 -

AR : 형상비, W/H
c_p : 정압비열
g : 중력가속도 [m/s2]
H : 채널 높이 [m]
L : 채널 길이 [m]
Nu : Nusselt 수, h·L/k
Pr : Prandtl수, ν/α
p : 압력 [N/m^2]
Ra : Rayleigh수, gβH3(Th-Tc)/ν
Re : Reynolds수, UiH/ν
T : 온도 [K]
T_c, T_h : 냉각 및 가열 벽의 온도 [K]
T∞ : 냉각과 가열 벽의 평균 온도 [K]
Ui : 입구 평균 속도 [m/s]
W : 채널 폭 [m]
u, v, w : x, y, z 방향의 속도 성분 [m/s]

**† 배대석(ORCID:http://orcid.org/0000-0003-2557-0272) : 교수, 부경대학교 기계공학과
E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, Tel : (051)629-6138
*박일룡(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5665-3225) : 연구원, 포스코 플랜텍 기술연구소
**김정수(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-7665-9202) : 교수, 부경대학교 기계공학과

**† Dae-Seok Bae(ORCID:http://orcid.org/0000-0003-2557-0272) : Professor, Department of mechanical engineering, Pukyong National University.
E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, Tel : (051)629-6138
*Il-Yong Park(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5665-3225) : Sr. Mnager, Posco Plantec Research & Development Center.
**Jeong-Soo Kim(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-7665-9202) : Professor, Department of mechanical engineering, Pukyong National University.

X, Y, Z : 무차원 수평(x/L), 수직(y/H), 폭(z/W) 방향의 좌표
x, y, z : 수평, 수직, 폭 방향의 좌표

그리스 문자

α : 열확산율
β : 체적팽창계수
Θ : 수평방향이 x축과 이루는 각
λ : 열전도율
μ : 유체의 점성계수
ν : 동 점성계수
ρ : 밀도

1. 서 론

경사진 사각채널 내에서의 혼합대류는 태양열 집열기, 밀집형 열교환기 및 화학기상증착, 자동차 기관 및 금형장비의 냉각 등과 같은 많은 공학적 응용 분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 많은 연구자들의 관심을 끌어 왔다. 특히 강제 및 자연대류의 상호 작용에 의한 혼합대류는 복잡한 유동 형태를 나타내어, 그 특성을 파악하는 것은 열 및 물질전달 장치의 설계에 있어 매우 중요하다. 따라서 많은 연구자들에 의해 Reynolds수, Rayleigh수, 경사각, 종횡비 및 Prandtl수 등의 영향에 대하여 다양하게 고찰되어져 왔다.

Kamotani 등[1]은 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 수평 평행평판채널 내에서의 혼합대류 열전달 특성을 Pr=0.7인 공기를 작동유체로 하여 실험적으로 연구하였으며, Reynolds수($30 \le Re \le 1100$), Rayleigh수($10^3 < Ra \le 3.1\times10^4$)rk 혼합대류에 미치는 영향을 검토하였고, Chiu 등[2,3]은 하부가 가열되는 수평 평행 채널 내에서의 혼합대류 열전달 특성에 대하여 작동유체를 공기로 하고 $2.71\times10^2 \le Gr/Re^2 \le 6.79\times10^4$ 범위 내에서 실험과 수치적 계산을 동시에 진행하여 그 결과를 고찰하였다. Nace 등[4]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[5]은 하부에서 가열되는 수평평행 채널 내에서의 혼합대류유동을 AR=12, Pr=0.7인 경우 Reynolds수 ($20 \le Re \le 50$)와 Rayleigh수 ($Ra \le 31000$)를 변수로 하여 롤의 생성, 개수, 크기, 위치 등에 대하여 3차원 비정상 수치해석적으로 연구하였다. Chang 등[6]은 수평 사각 덕트 내에서의 종방향 볼텍스 유동에 대하여 저 점성유체인 공기를 이용하여 종횡비의 영향에 대하여 체계적으로 실험하였다. Lin[7]은 수평 사각 채널 내 부력에 의한 볼텍스 유동과 열전달 특성에 대하여 저 Reynolds수가 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 저 점성유체인 공기(Pr=0.7)를 작동유체로 하여 실험적으로 연구하였다. Ozsunar 등[8]은 하부가 가열되는 수평 평행평판 내에서 Ar=6.67, Pr=0.7인 경우 Reynolds수(50<Re<1,000), Grashof수 ($7\times10^5 < Gr < 4\times 10^6$) 그리고 경사각($0 \le \theta \le 90^o$)이 혼합대류 유동특성에 미치는 영향을 3차원 수치해석인 방법으로 연구하였으며, 그 결과를 이전의 연구결과와 비교하여 서로 잘 일치함을 보여 주었다. 최근 Piao 등[9,10]은 고 점성유체를 사용하여 Reynolds수와 Rayleigh수가 수평채널 내의 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 3차원 수치해석적인 방법으로 연구하였다. 그러나 Piao 등[9,10]의 연구를 제외한 지금까지의 연구들은 대부분 저 점성유체인 공기, 질소나 물의 혼합대류 연구에 국한되었으며, 고 점성유체로 채워진 경사진 평행평판에서 경사각이 고 점성유체의 혼합대류에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡하다. 따라서 기관 및 변압기의 냉각유체로 유용하게 사용되고 있는 고 점성유체에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 고 점성유체로 채워진 경사진 사각채널 내에서 경사각이 저 Reynolds수에서의 혼합대류 볼텍스 유동 및 열전달에 미치는 영향을 유한체적법을 기초로 한 3차원 수치해석적인 방법으로 고찰하고자 한다.

2. 3차원 수치 해석

2.1 수치 모델

본 연구는 사각채널 내에서의 3차원 정상상태

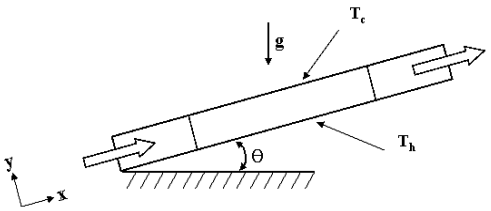

Fig. 1 Schematic diagram of the geometry investigated

층류 혼합대류에 관한 것이며, 기하학적 형상은 Fig. 1과 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. 실험부의 상부와 하부 면은 등온으로 각각 냉각, 가열되며, 기타의 모든 경계 벽들은 단열되어진다.[9)]

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, w는 각각 x, y, z 방향의 속도, T는 온도, p는 압력, ρ는 밀도, g는 중력 가속도, μ, cp, λ는 각각 유체의 점성계수, 정압비열, 열전도율을 나타낸다.[9)]

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

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

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

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

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

본 연구에서의 경계조건은 다음과 같다.

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

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

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

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

$$y=0, 0\le x<L_0, x>L+L_0: u=v=w=0, \frac{\partial T}{\partial y}=0$$

$$y=H, 0\le x<L_0, x>L+L_0: u=v=w=0, \frac{\partial T}{\partial y}=0 \tag{6}$$

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

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

2.3 격자계

격자생성에서 X와 Z 방향에서는 균일격자를 생성하고, Y 방향에서는 가열 및 냉각 벽 근처에서 물리량들의 큰 구배가 예상되기 때문에 계산의 정도를 높이기 위하여 격자를 조밀하게 생성하였다. Fig. 2는 해의 격자계 비의존성을 확인하기 위하여 AR=4, Pr=909, Re=2×10^{-2}, Ra=104일때 여러 격자수가 수치해석 결과에 미치는 영향을 나타낸다. 격자수가 9.5×10^4, 12.5×10^4, 19×10^4, 26×10^4, 36×10^4개일 때 평균 Nusselt 수는 각각 2.2298, 2.2428, 2.2595, 2.2766, 2.2772이었다. 격자수 26×10^4개와 36×10^4개인 경우 평균 Nusselt수를

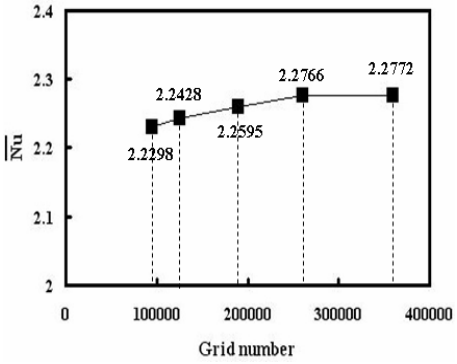

Fig. 2 Examination of grid independence of numerical solution at Re=2×10-2 and Ra=104

비교하면 오차는 0.02635%에 불과하므로 26×10^4 개를 기본 격자수로 하여 계산을 수행하였다.[9)]

2.4 해석방법

수치해석은 유한체적법을 기초로 한 상용코드인 STAR-CD 3.22를 사용하였으며, 압력보정은 PISO(pressure implicit with splitting of operators)알고리즘을 사용하였고, 대류항은 중심차분도식(central differencing scheme)을 사용하여 계산을 수행 하였다. 속도에서의 완화계수(relaxation factor)는 0.7, 압력은 0.4 그리고 온도는 0.85로 정하였으며, 수치계산에서는 최대오차한계(residual tolerance)를 10^{-4}으로 하였다.[9)]

3. 결과 및 고찰

본 연구는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 사각채널 내에서 Pr=909, $Ra=10^{-3}$, AR=4.0일 때 경사각이 사각채널 내의 혼합대류 볼텍스 유동 및 열전달에 미치는 영향을 3차원 수치해석적인 방법으로 연구하였다.

Fig. 3은 $Re=10^{-3}$일 때 Y=0.5인 위치의 X-Z 평면에서 경사각 변화($0°\leq\theta\leq45°$)에 따른 채널 내의 유동장과 온도장을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 경사각 θ=0°인 경우 입구 유속이 상대적으로 매우 작기 때문에 전 유동장은 자연대류가 지배적인 유동을 하여 하류방향으로 천천히

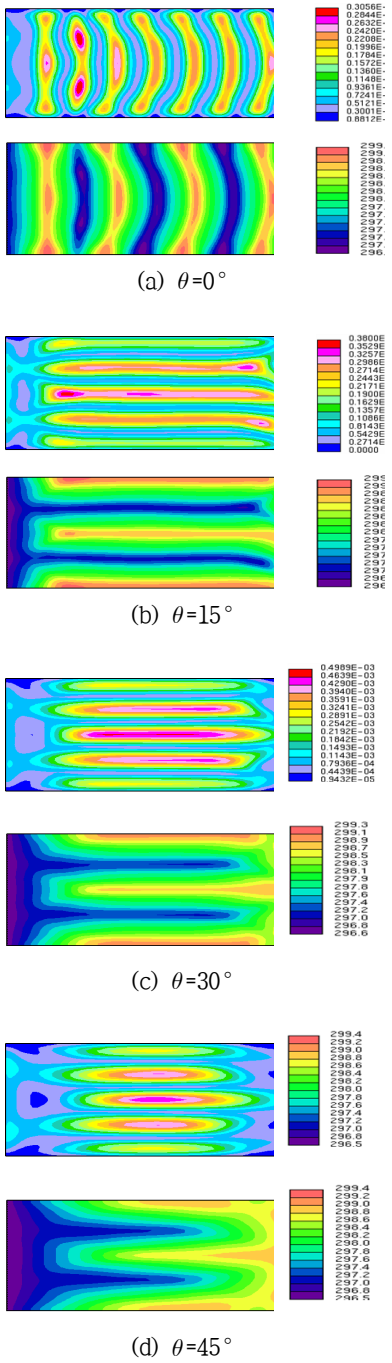

Fig. 3 Velocity magnitude and temperature distributions for various angles of inclination at AR=4.0, Pr=909, $Re=1\times10^{-3}$, $Ra=10^4$ and Y=0.5

이동하는 횡방향 롤 유동이다. 경사각이 증가하여 θ=15°인 경우, 경사각이 증가함으로써 수직방향 유속의 증가로 채널 중간부분에서의 횡방향 롤은 종방향 롤로 변화되어진다. 그리고 채널 입구에서는 부력에 의한 횡방향 롤 유동이 입구 유속에 의해 서로 나누어지는 것을 볼 수 있다. 경사각이 더욱 증가하면 채널 중간부분에서의 종방향 롤의 길이는 경사각의 증가로 인해 점차적으로 작아진다. 이는 지구 중력의 영향으로 경사각이 증가할수록 일정 위치를 정점으로 수직방향 유체유동 성분이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 채널 입구 및 출구에서는 횡방향 롤은 더욱 분명히 나누어져 구분되어지고, 그 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 AR=4.0, Pr=909, $Re=1\times10^{-2}$, $Ra=10^4$ 경사각 $15°\leq\theta\leq45°$ 범위에서 채널의 입구와 출구영역에서는 서로 구분된 횡방향 롤을 형성하고, 채널 중간부분에서는 종방향 롤을 형성하여 전체적인 유동 형태는 두 형태의 유동이 혼합된 혼합 롤 유동을 형성함을 알 수 있다.

Fig. 4는 경사각 θ=0°, 15°, 30°, 45°일 때 사각 채널 내의 혼합대류 볼텍스 유동장과 온도장의 속도벡터와 온도분포를 3차원적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 θ=0°인 경우 3차원 사각채널의 X-Y평면상에 자연대류에 의한 횡방향 롤 유동이 형성됨을 잘 나타내고 있고, 경사각이 증가하면 종방향 롤 유동이 형성됨을 X-Z 및 X-Y 면을 통해 잘 나타내고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 경사각이 증가하면 가열된 하부평판으로부터 데워진 유체가 하부평판의 경사면을 따라 상부에 모여 하나의 열섬을 형성함을 알 수 있다. 이 데워진 유체는 저속유입과 저속유출 그리고 경사각의 영향으로 냉각된 경사진 상부평판을 따라 하부로 순환하면서 종방향 롤 유동에 의해 열전달이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Pr=909, $Ra=10^{-3}$, AR=4.0, $Re=1\times10^{-3}$ 일 때 경사각의 증가에 따른 채널 중심에서의 주 유동방향 속도분포를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 경사각 θ=0°인 경우 유동은 횡방향 롤 유동으로 속도분포는 주기적으로 변화하는 사인곡선을 나타낸다. 경사각이 증가함에

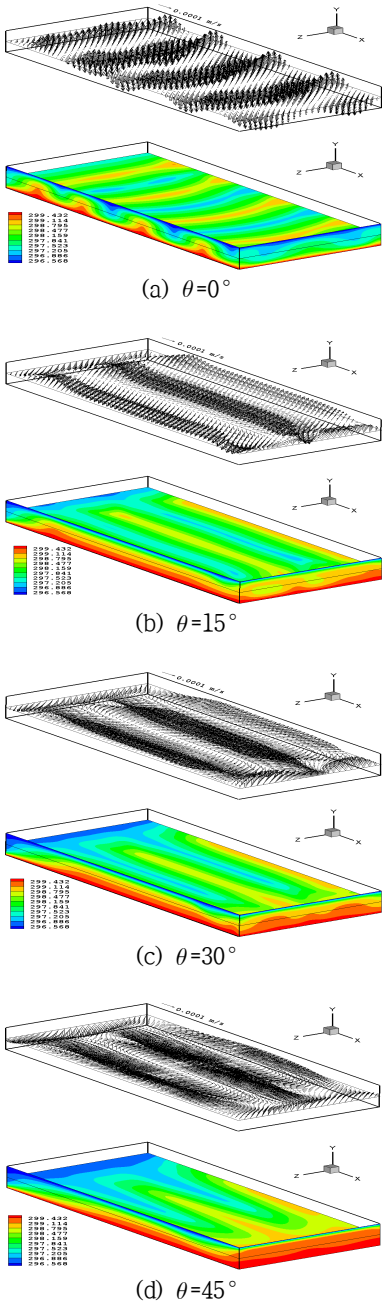

Fig. 4 Three-dimensional velocity vector and temperature distributions for various angles of inclination at AR=4.0, Pr=909, $Re=1\times10^{-3}$, $Ra=10^4$

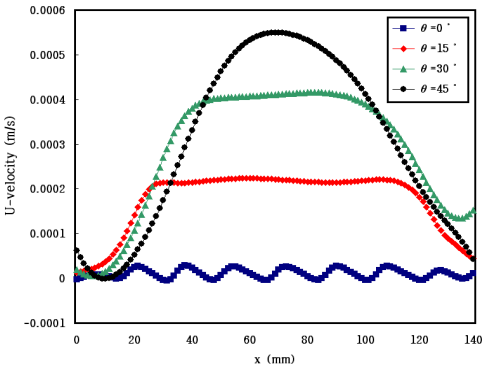

Fig. 5 U-velocity distributions at mid-heigh for various angles of inclination at AR=4.0, Pr=909, Ra=10^4 and Re=1×10^{-3}

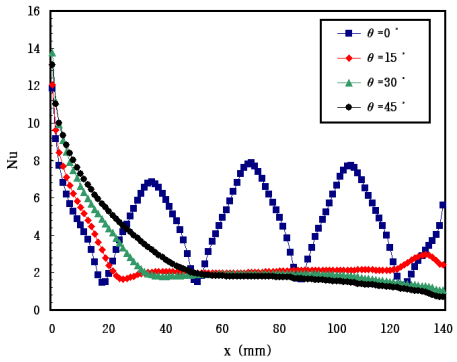

Fig. 6 Local Nusselt number distributions of hot wall for various angles of inclination at AR=4.0, Pr=909, Ra=10^4 and Re=1×10^{-3}

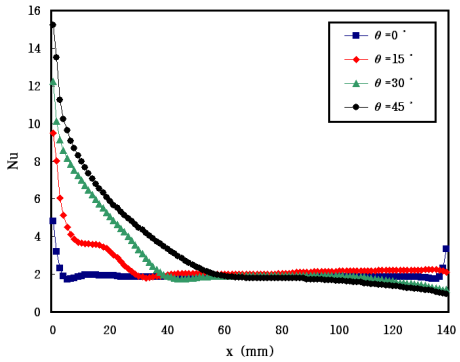

Fig. 7 Local Nusselt number distributions of hot wall for various angles of inclination at AR=4.0, Pr=909, Ra=10^4 and Re=4×10^{-3}

따라 주 유동방향 U속도는 증가하여 속도분포는 전부 양의 값을 나타내고 최대 속도크기는 채널 중심 영역에서 나타나며 경사각이 증가함에 따라 증가하였다.

Fig. 6은 Pr=909, Ra=10^{-3}, AR=4.0, Re=1×10^{-3} 일 때 경사각에 따른 가열 벽에서의 국소 Nusselt수 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 경사각 θ=0°에서는 횡방향 롤 유동으로 Nusselt수는 주기적인 사인곡선을 나타낸다. 경사각이 증가함에 따라 주 유동방향 속도 U가 증가함으로 입구영역에서는 Nusselt수는 증가하고 하류 방향으로 가면서 감소하지만 그 변화는 아주 작았다.

Fig. 7은 Pr=909, Ra=10^{-3}, AR=4.0, Re=4×10^{-3} 일 때 경사각에 따른 가열 벽에서의 국소 Nusselt수 분포를 나타낸 것이다. 이 경우는 Fig. 6에 비해 입구 유속이 증가하여 θ=0°인 경우 나타나는 자연대류에 의한 횡방향 롤은 사라지고 전 유동장은 안정적이고 대칭적인 분포를 나타내는 종방향 롤에 의해 지배되어지므로 더 이상 사인곡선은 나타나지 않는다. 또한 경사각이 증가함에 따라 Fig. 6과 같이 입구영역에서의 Nusselt수는 증가하고 하류 방향으로 가면서 감소하지만 그 변화는 아주 작았다.

4. 결 론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 사각채널 내에서 경사각이 사각 채널 내의 혼합대류 볼텍스 유동 및 열전달에 미치는 영향을 3차원 수치해석적인 방법으로 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 유체의 유입속도가 낮고(Re=10^{-3}), 고 점성유체(Pr=909)로 채워진 사각채널 내에서의 볼텍스 유동은 경사각이 θ=0°인 경우 자연대류의 영향으로 횡방향 롤 유동을 형성하였다.

2) 경사각 θ를 15°에서 45°까지 변화시키면서 그 영향을 살펴본 결과는 경사각 15°≤θ≤45°범위에서 채널 입구와 출구에서는 횡방향 롤 유동이 형성되고, 중간부분에서는 종방향 롤 유동이 형성되는 혼합 롤 유동형태를 나타냈으며, 경사각

이 증가함에 따라 사각채널 내에서 형성되는 종방향 롤의 길이는 작아졌다.

3) 경사각 θ=0°인 경우의 속도분포는 주기적으로 변화하는 사인곡선을 나타내었고, 경사각이 증가함에 따라 X방향 U속도는 증가하여 속도분포는 전부 양의 값을 가지며, 최대 속도는 채널 중심에서 형성되었고, 그 크기는 경사각이 증가함에 따라 증가하였다.

4) 경사각 θ=0°에서 Nusselt 수는 주기적인 사인곡선 형태를 나타내었고, 경사각 $0° \leq \theta \leq 45°$영역에서 Nusselt 수는 입구영역에서 최대값을 가지고 출구쪽으로 가면서 감소하였으며, 그 크기는 경사각이 증가함에 따라 증가하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

I. Y. Park; Data curation., Investigation, Writing-original draft. J. S. Kim; Supervision, Validation, Visualization. D. S. Bae; Conceptualization, Project administration, Writing-review & editing.

References

1. Y. Kamotani and S. Ostrach, 1976, "Effect of Thermal Instability on Thermally Developing Laminar Channel Flow", Journal of Heat Transfer, pp. 62-66. (DOI:10.1115/1.3450471)
2. K. C. Chiu and F. Rosenberger, 1987, "Mixed convection between horizontal plates-Ⅰ. Entrance effects", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 8, pp. 1645-1654. (DOI:10.1016/0017-9310(87)90310-3)
3. K. C. Chiu, J. Ouazzani and F. Rosenberger, 1987, "Mixed convection between horizontal plates-Ⅱ. Fully developed flow", Int. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 8, pp. 1655-1662. (DOI:10.1016/0017-9310(87)90311-5)
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. (DOI:10.1016/0017-9310(92)90038-T)
5. C. H. Yu, M. Y. Chang and T. F. Lin, 1996, "Structures of moving transverse and mixed rolls in mixed convection of air in a horizontal plane channel", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 2, pp. 333-346. (DOI:10.1016/0017-9310(96)00099-3)
6. 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. (DOI:10.1016/0017-9310(96)00098-1)
7. T. F. Lin, 2003, "Buoyancy driven vortex flow and thermal structures in a very low Reynolds number mixed convective gas flow through a horizontal channel", International Journal of Heat and Fluid Flow 24, pp. 299-309. (DOI:10.1016/S0142-727X(03)00020-1)
8. 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. (DOI:10.1016/S0735-1933(01)00302-5)
9. R. L. Piao, J. S. Kim and D. S. Bae, 2014, "Three-dimensional numerical study on the voryex flow in a horizontal channels with high viscous fluid", Journal of Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 79-86. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.3.079)
10. R. L. Piao, J. S. Kim and D. S. Bae, 2018, "Experimental study on vortex flow in a rectangular channels(1)", Journal of Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 37-44.