

양 끝이 개방된 경사진 채널 내에서의 혼합대류에 관한 수치적 연구

배대석† · 박일용*

(원고접수일 : 2004년 8월 17일, 심사완료일 : 2004년 11월 18일)

A Numerical Study on the Mixed Convection in Open-Ended Inclined Channels

Dae-Seok Bae† · Ri-Long Piao*

Abstract : A numerical calculation is performed to study the effects of buoyancy force on the heat transfer characteristics of laminar forced convection flow in inclined parallel plates with the upper part cooled and the lower part heated uniformly. Numerical results are presented for the Reynolds number ranges from 4.0×10^{-3} to 1.13×10^{-1} , the angle of inclination, θ , from 0 to 90 degree, and Pr of the high viscosity fluid is 909. It is found that the flow pattern of mixed convection in inclined parallel plates can be classified into four patterns which affected by Reynolds number and the angle of inclination.

Key words : Mixed convection(혼합대류), Parallel plates(평행판), Angle of inclination(경사각)

기호설명

A : h/L	T : 온도
C_p : 정압비열	T_{∞} : 입구평균 온도 $(T_{high} + T_{low})/2$
Gr : Grashof 수 $g\beta h^3(T_{high} - T_{low})/\nu^2$	U_{in} : 입구평균 속도
L : 평판 길이	g : 중력가속도
Pr : Prandtl 수 ν/α	h : 평판 간격
Re : Renolds 수 $U_{in}h/\nu$	p : 압력
	t : 전체 시간
	u : x 방향 속도

† 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail: dsbae@pknu.ac.kr, Tel : 051)620-1616

* 부경대학교 대학원 기계공학부

- v : y 방향 속도
- a : 열확산율
- β : 체적팽창계수
- θ : 수평방향이 x축과 이루는 각
- λ : 열전도율
- μ : 유체의 점성계수
- ν : 동점성계수
- ρ : 밀도
- τ : 유동이 정상상태에 이르기까지의 시간

1. 서 론

혼합대류는 유체 내의 온도기울기에 기인한 자연대류의 영향을 무시할 수 없는 강제대류 열전달 현상으로 그 응용분야가 대단히 넓다. 특히 평행평판 내에서의 혼합대류는 태양에너지 집열기, CVD (Chemical Vapor Deposition), 지열에너지 시스템, 원자로 및 전자장비의 냉각 등에 널리 응용되고 있어 이에 대한 연구가 지금까지 많은 연구자들에 의해 활발히 수행되어져 왔다^{(1)~(10)}.

Lin 등⁽¹⁾은 수직 평행 채널 내 비정상 층류 혼합대류의 유동특성에 대하여 $Pr=5.0$, $0 \leq Gr/Re \leq 1000$ 범위 내에서 수치 해석적 방법으로 연구하였고 Ramachandran 등⁽²⁾은 수직 평행 평판 내 혼합대류에 대해 $0 \leq Gr/Re^2 \leq 16$ 범위에 대하여 차분 방정식을 이용한 수치적 계산과 실험을 통하여 이 두 결과가 잘 일치함을 보여주었다. Chen 등⁽⁴⁾은 수평 평행평판 내에서의 혼합대류 경계층 유동특성을 국소 상사 방법과 국소 비 상사 방법(local nonsimilarity method)을 이용하여 수치적으로 해석하였다. Maughan 등⁽⁵⁾은 수평과 경사진 채널 내에서 $Pr=0.7$, Re ($125 < Re < 500$) 수와 Gr ($7 \times 10^3 < Gr < 1 \times 10^6$) 수, 그리고 경사각 ($0^\circ < \theta < 30^\circ$)을 변수로 하여 혼합대류의 유동특성을 실험적으로 연구하였다. Incropera 등⁽⁶⁾은 수평 관내에서의 입구영역에 대한 Re ($480 \leq Re \leq 2020$) 수와 Gr ($4.5 \times 10^6 \leq Gr \leq 5 \times 10^9$) 수가 혼합대류의 유동특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. Anmen 등⁽⁸⁾은 수평 사각 공간 내 혼합대류 열전달에 대하여 Re 수와 Ra 수

를 변수로 하면서 실험과 수치적 계산을 동시에 진행하여 그 결과를 비교 검토하였다. Gau 등⁽⁹⁾은 한쪽 벽은 가열되고 한쪽 벽은 단열인 수평 사각 채널 내에서의 혼합대류 열전달에 대하여 $0 \leq Gr/Re^2 \leq 2 \times 10^4$ 범위 내에서 실험적으로 연구하였고 Chiu 등⁽¹⁰⁾은 밑으로부터 가열되는 수평 평행 채널 내에서의 혼합대류 열전달 특성에 대하여 작동유체를 공기로 하고 $2.71 \times 10^2 \leq Gr/Re^2 \leq 6.79 \times 10^4$ 범위 내에서 실험과 수치적 계산을 동시에 진행하여 그 결과를 고찰하였다.

그러나 이들에 대한 연구는 대부분은 저 점성 유체의 수직평행평판^{(1)~(2)} 및 수평평행평판^{(4)~(10)} 내의 혼합대류에 국한되어져 있고, Gr/Re^2 가 매우 높은 경우 ($7.4 \times 10^2 \leq Gr/Re^2 \leq 5.9 \times 10^5$)에 대한 연구는 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 경사진 평행평판 내에서 Gr/Re^2 가 높은 값을 가지는 저 Re 수 ($4.0 \times 10^{-3} \leq Re \leq 1.13 \times 10^{-1}$)와 경사각 ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)이 고 점성유체의 혼합대류의 유동특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 수치해석

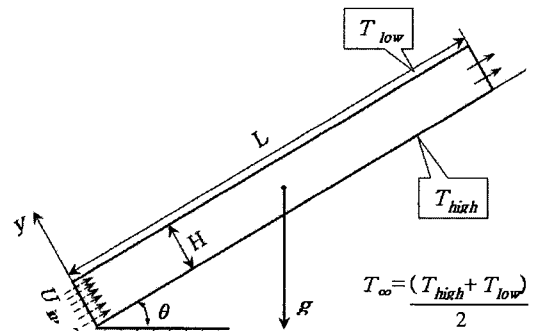


Fig. 1 Schematic diagram of flow geometry

본 연구에서 고려된 양 끝이 개방된 경사진 채널의 기하학적 형상은 Fig. 1 과 같다. 균일온도 T_∞ 와 균일속도 U_{in} 으로 작동유체가 유입되어 평행평판 사이를 통과하여 유출된다. 윗면과 아랫면은 등온으로 각각 냉각되고 가열된다.

본 모델에서의 혼합대류 열전달 특성을 수치해석하기 위해, 지배방정식은 다음의 가정으로 단순화 되었다.

- 1) 2차원, 비압축성, 층류유동이다.
- 2) 유체의 물성치는 일정하고, 부력과 관련된 밀도 변화는 Boussinesq 근사를 사용한다.
- 3) 점성에 의한 에너지소산과 복사는 무시다. 위의 가정들에 기초한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

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

X-방향 운동량 방정식:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \Delta T \sin \theta \quad (2)$$

Y-방향 운동량 방정식:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \Delta T \cos \theta \quad (3)$$

에너지 방정식:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

여기서 (u, v) 는 (x, y) 방향의 속도, T 는 온도, p 는 압력, ρ 는 밀도, g 는 중력 가속도, μ , c_p , λ 는 각각 유체의 점성계수, 정압비열, 열전도율이고 θ 는 수평방향에 x 축과 이루는 각도이다.

경계조건은 다음과 같다.

$$y=0, 0 \leq x \leq L: T=T_{high}, u=0, v=0$$

$$y=h, 0 \leq x \leq L: T=T_{low}, u=0, v=0$$

$$x=0, 0 < y < h: T=T_{\infty}, u=U_{in}, v=0$$

지배방정식은 유한 체적 법을 기초로 한 140×15 의 균일한 격자를 만들어 계산하였다. 대류 항은 중심 차분 도식(Central differencing scheme)을

사용하였고, 압력보정은 PISO(The Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 알고리즘을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등은 벽으로 된 경사진 평행판 내에서, 형상비 $A=15/140$, $Gr=9.43$, $Pr=909$ 일 때 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 및 $4.0 \times 10^{-3} \leq Re \leq 1.13 \times 10^{-1}$ 의 범위에 대하여 수치해석을 진행하였다.

Fig. 2는 $Re=1.3 \times 10^{-2}$, $\theta=0^\circ$ 에서 시간별 유동장의 유동 특성을 온도분포로 나타낸 것이다. 여기서 v 는 전체 시간에서 유동이 정상상태에 이르기까지의 시간(τ)을 뺀 시간을 나타낸다($v=t-\tau$). 이 경우 롤(roll)은 유속에 의해 오른쪽으로 이동하면서 주기가 $v=220$ 초인 주기적인 유동특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 주기적 현상은 자연대류에 의해 좌측면에서 생성된 새로운 유동을 우측으로 이동시키면서 우측 끝의 기존유동을 연속적으로 소멸시킨다.

Fig. 3은 $Re=1.3 \times 10^{-2}$, $\theta=15^\circ$ 에서 시간별 유동장의 유동 특성을 온도분포로 나타낸 것이다. 이 경우 Fig. 2와 마찬가지로 롤은 오른쪽으로 이동하면서 주기적인 유동특성을 나타내지만 그 주기는 200초로 $\theta=0^\circ$ 에 비해 감소함을 알 수 있다.

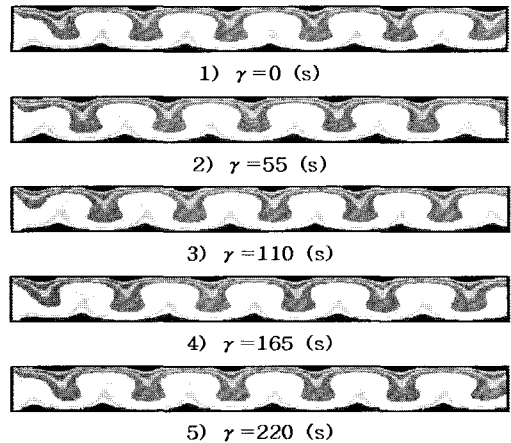


Fig. 2 The temperature patterns for various instants at $\theta=0^\circ$, $Re=1.3 \times 10^{-2}$

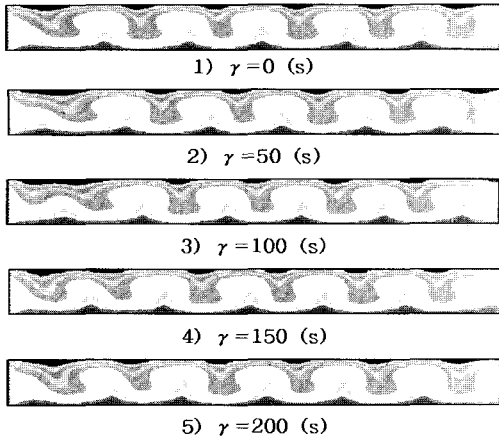


Fig. 3 The temperature patterns for various instants at $\theta=15^\circ$, $Re=1.3 \times 10^{-2}$

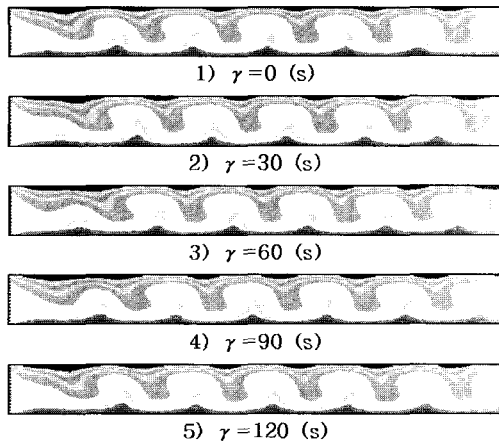


Fig. 4 The temperature patterns for various instants at $\theta=15^\circ$, $Re=2.3 \times 10^{-2}$

Fig. 4는 $Re=2.3 \times 10^{-2}$, $\theta=15^\circ$ 에서 시간별 유동장의 유동특성을 온도분포로 나타낸 것이다. 이 경우도 Fig. 2와 Fig. 3처럼 주기적인 유동특성을 나타내지만 그 주기는 120초로 $Re=1.3 \times 10^{-2}$ 인 경우에 비해 감소함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 경사각과 입구 유속은 평행평판 내 혼합대류의 주기적 유동형태에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 5 에 경사각과 입구 유속이 주기에 미치는 전반적인 경향을 그래프로 나타내었다. $Re < 4.0 \times 10^{-3}$ 에서는 입구유속이 전체 유동형태에 영향을 미치지 못하여 주기적 유동형태는 명확하게 나타나지 않았으나 Re 수가 증가할수록 주

기적인 유동형태가 명확하게 나타나며, 그 주기는 경사각이 증가할수록, Re 수가 증가할수록 점점 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 경사각 $\theta \geq 30^\circ$, $Re > 5.0 \times 10^{-2}$ 인 경우에는 주기적인 유동형태는 발생하지 않는다. 이는 부력에 의한 y 방향 속도성분의 감소와 입구유속의 증가에 따른 x 방향 유동이 지배적이기 때문이다.

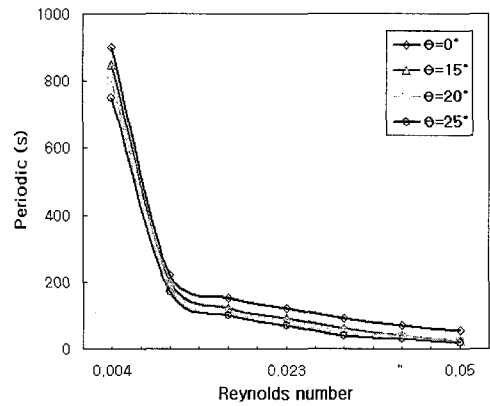


Fig. 5 Effect of angle of inclination and Reynolds number on periodic flows

Fig. 6은 $\theta=15^\circ$ 일 때 $4.0 \times 10^{-3} \leq Re \leq 6.25 \times 10^{-2}$ 에서 혼합대류의 속도장을 속도벡터로 나타낸 것이고 Fig. 7은 동일조건하에서의 온도분포를 나타낸다. $Re=4.0 \times 10^{-3}$ 에서는 입구 유속이 작기 때문에 부력에 의한 자연대류가 전체 유동장에서 지배적인 작용을 하여 전형적인 Rayleigh- Bernard 대류유동을 유지하고 있음을 알 수 있으나, $1.3 \times 10^{-2} \leq Re \leq 2.3 \times 10^{-2}$ 에서는 입구유속의 영향으로 자연대류에 의해 생성된 물은 상하벽면으로 이동하여 전반적으로 사인곡선형 유동형태를 나타내고 물의 수가 증가함을 알 수 있고 입구영역의 평행 유동은 점차적으로 발달되는 것을 알 수 있다.

$Re=3.75 \times 10^{-2}$ 에서는 강제대류가 점차적으로 지배적인 작용을 하지만 하류방향은 여전히 사인곡선형 유동이며 입구영역의 평행 유동은 더욱 발달되고 물 개수는 다시 적어지는 것을 알 수 있고, $Re \geq 6.25 \times 10^{-2}$ 에서는 자연대류의 영향이 급격히 줄어들고 강제대류의 영향이 지배적이어서 x 방향 유속은 전부 양의 값을 나타내고 완전 평행 유동이라는 것을 알 수 있다.

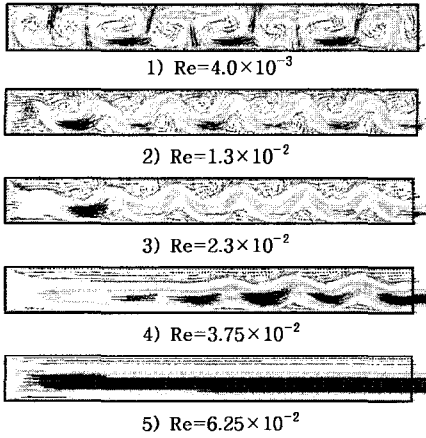


Fig. 6 The velocity vectors for various Reynolds number at $\theta=15^\circ$

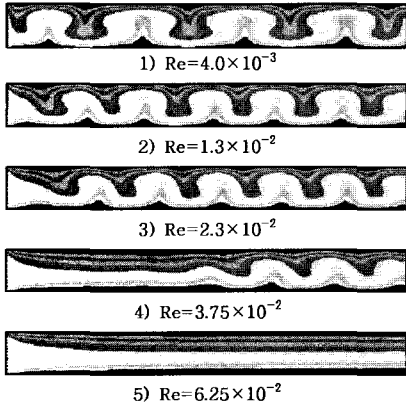


Fig. 7 The temperature patterns for various Reynolds number at $\theta=15^\circ$

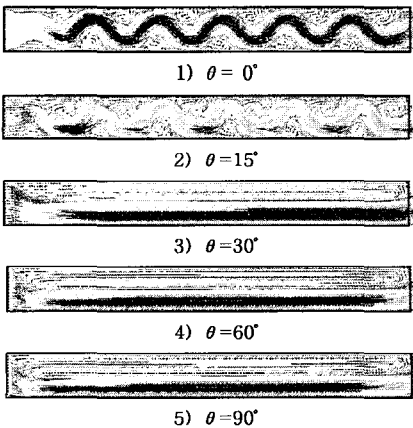


Fig. 8 The velocity vectors for various angle of inclination at $Re=2.3 \times 10^{-2}$

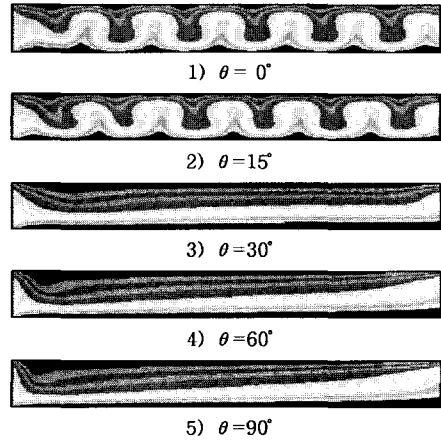


Fig. 9 The temperature patterns for various angle of inclination at $Re=2.3 \times 10^{-2}$

Fig. 8은 $Re=2.3 \times 10^{-2}$ 일 때 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 에서의 혼합대류의 속도장을 속도벡터로 나타낸 것이고 Fig. 9는 동일조건하에서의 온도분포이다. 이 경우 입구 유속이 상대적으로 작기 때문에 $\theta=0^\circ$ 에서의 유동은 사인곡선형을 나타내고 입구 영역은 유속에 의해 평행 유동이다. $\theta=15^\circ$ 에서 여전히 사인곡선형 유동을 나타내지만 $\theta=0^\circ$ 인 경우와 비교하면 물 모양은 점차적으로 파괴되면서 윗면에서의 물들은 크고 아랫면에서의 물들은 작은 것을 알 수 있다. 경사각이 더욱 증가하여 $\theta \geq 30^\circ$ 에서는 입구영역의 평행 유동은 점차적으로 소멸되며 평판 내에서의 최대 속도는 점차적으로 아랫부분으로 이동하면서 유체가 밖으로 유출되고 윗부분에서는 하나의 큰 물 모양을 형성하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10, Fig. 11과 Fig. 12는 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 에서 Re 수가 각각 6.25×10^{-2} , 8.75×10^{-2} , 1.13×10^{-1} 일 때 x 방향 중간부분에서의 U 속도분포를 나타낸다. 이 경우 $\theta=0^\circ$ 일 때는 세 경우 모두 자연대류의 영향이 전체 유동형태에 영향을 미치지 못하므로 강제대류가 지배적인 완전히 발달된 유동을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 경사각이 증가할수록 평판 내에서의 최대 속도크기는 증대되고 그 위치는 Fig. 13에서 보여주는 것과 같이 점차적으로 아래평판 쪽으로 이동한다는 것을 알 수 있다. Re 수가 6.25×10^{-2} 일 때 경사각 θ 가 45° 이상(Fig. 10), Re 수가 8.75×10^{-2} 일 때 경사각 θ 가 60° 이상(Fig. 11)에서

는 평판 내 윗부분에서의 속도가 음의 값을 가지는 것으로 보아 유동형태는 Fig. 8의 3), 4), 5)와 같은 한 개의 롤을 형성한다는 것을 알 수 있지만 입구 유속이 더욱 증가하여 Re 수가 1.13×10^1 (Fig. 12)일 때는 입구유속에 의한 강제대류가 부력에 의한 자연대류보다 훨씬 커지기에 전 경사영역($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)에서 평판 내에서의 x 방향 속도가 전부양의 값을 가지는 강제대류가 지배적인 유동임을 알 수 있다.

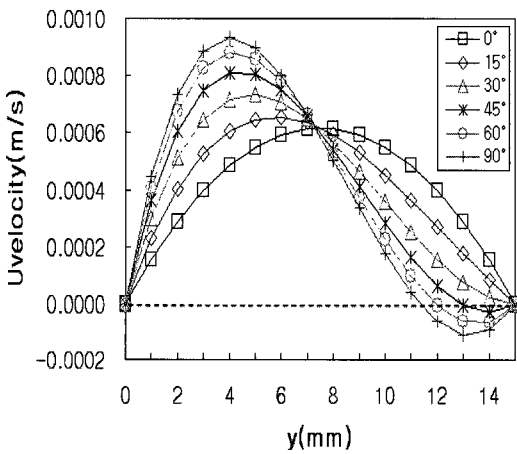


Fig. 10 The U-velocity profiles for various angle of inclination at $Re=6.25 \times 10^{-2}$

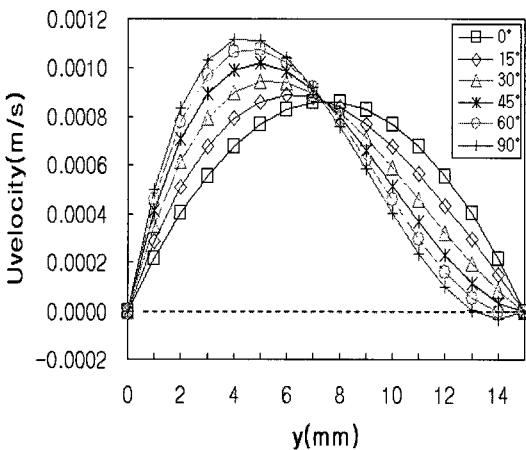


Fig. 11 The U-velocity profiles for various angle of inclination at $Re=8.75 \times 10^{-2}$

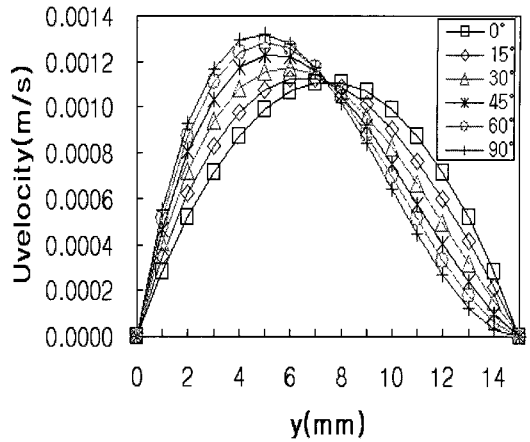


Fig. 12 The U-velocity profiles for various angle of inclination at $Re=1.13 \times 10^1$

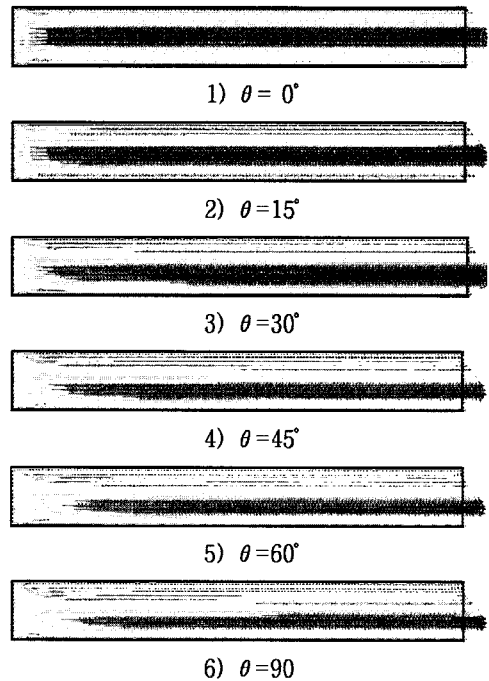


Fig. 13 The velocity vectors for various angle of inclination at $Re=8.75 \times 10^{-2}$

4. 결 론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등은 벽으로 된 경사진 평행평판 내에서의 혼합 대류 열전달에 대하여 수치해석적인 방법으로 연구하였다.

본 연구를 통하여 경사진 평행평판 내의 혼합대류의 주기적인 유동형태는 경사각 $0^\circ \leq \theta < 30^\circ$, $Re < 6.25 \times 10^{-2}$ 인 경우에 나타나고, 그 주기는 Re 수 및 경사각이 증가할수록 감소한다는 것을 알 수 있었으며, 경사진 평행평판 내의 혼합대류의 유동형태를 다음과 같이 경사각과 Re 수에 따른 4가지 유동형태로 분류할 수 있었다.

(1) 자연대류가 지배적인 유동은 $Re \leq 4.0 \times 10^{-3}$, $\theta < 15^\circ$ 인 경우에 발생하였다.

(2) 사인곡선형 유동은 $4.0 \times 10^{-3} < Re < 6.25 \times 10^{-2}$, $15^\circ < \theta < 30^\circ$ 인 경우에 발생하였다.

(3) 출구의 아랫부분에서는 유체가 밖으로 유출되고 윗부분에서는 한 개의 물줄을 형성하는 유동은 다음과 같은 경우에 발생하였다.

a) $4.0 \times 10^{-3} \leq Re < 6.25 \times 10^{-2}$, $\theta \geq 30^\circ$

b) $6.25 \times 10^{-2} \leq Re < 8.75 \times 10^{-2}$, $\theta \geq 45^\circ$

c) $8.75 \times 10^{-2} \leq Re < 1.13 \times 10^{-1}$, $\theta \geq 60^\circ$

(4) 강제대류가 지배적인 유동은 다음과 같은 경우에 발생하였다.

a) $6.25 \times 10^{-2} \leq Re < 8.75 \times 10^{-2}$, $\theta < 45^\circ$

b) $8.75 \times 10^{-2} \leq Re < 1.13 \times 10^{-1}$, $\theta < 60^\circ$

c) $Re \geq 1.13 \times 10^{-1}$, $\theta \leq 90^\circ$

참고문헌

- [1] T. F. Lin, C. P. Yin and W. M. Yan, "Transient Laminar Mixed Convective Heat Transfer in a Vertical Flat Duct," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 384-390, 1991.
- [2] N. Ramachandran, B. F. Armaly and T. S. Chen, "Measurements and Predictions of Laminar Mixed Convection Flow Adjacent to a Vertical Surface," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 636-641, 1985.
- [3] N. Ramachandran, B. F. Armaly and T. S. Chen, "Measurements of Laminar Mixed Convection Flow Adjacent to an Inclined Surface," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 146-150, 1987.
- [4] T. S. Chen, E. M. Sparrow and A. Mucoglu, "Mixed Convection in Boundary Layer Flow on a Horizontal Plate," ASME Journal of Heat Transfer, February, pp. 66-71, 1977.
- [5] J. R. Maughan and F. P. Incropera, "Experiments on Mixed Convection Heat Transfer for Airflow in a Horizontal and Inclined Channel," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp. 1307-1318, 1987.
- [6] F. P. Incropera, A. L. Knox and J. R. Maughan, "Mixed-Convection Flow and Heat Transfer in the Entry Region of a Horizontal Rectangular Duct," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 434-439, 1987.
- [7] F. S. Lee and G. J. Hwang, "The effect of asymmetric heating on the onset of thermal instability in the thermal entrance region of a parallel plate channel," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, pp. 2207-2218, 1991.
- [8] R. Anmen, M. Shinoki and M. Ozawa, "Mixed Convection in a Rectangular Slender Channel," 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, pp. 199-204, 2000.
- [9] C. Gau, Y. C. Jeng and C. G. Liu, "An Experimental Study on Mixed Convection in a Horizontal Rectangular Channel Heated From a Side," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 122, pp. 701-707, 2000.
- [10] K. S. Chiu, J. Richards, "Experimental and Numerical Study of Conjugate Heat Transfer in a Horizontal Channel Heated From Below," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 123, pp. 688-697, 2001.

저 자 소 개



박일용 (朴日龍)

1977년 7월생, 국적 중국, 2000년 중국 연변대학교 통용기계학과 졸업(공학사), 2003년 한국 부경대학교 대학원졸업(공학석사), 현재 한국 부경대학교 대학원 박사과정.



배대석 (裵大錫)

1955년 2월생, 1980년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동아대학교 대학원 졸업(석사), 1991년 동 대학원 졸업(박사), 1994년 University of Minnesota (post doctor), 1999년 일본 후쿠이대학(교환교수), 현재 부경대학교 기계공학부 교수.