

경사진 평행평판 내 고 점성유체의 혼합대류 열전달 특성 및 가시화에 관한 연구

박 일 룡, 배 대 석**

부경대학교 대학원 에너지시스템공학과, *부경대학교 기계공학부

A Study on the Visualization and Characteristic of Mixed Convection between Inclined Parallel Plates Filled with High Viscous Fluid

Ri-Long Piao, Dae-Seok Bae**

Department of Energy System Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received October 12, 2005; revision received July 12, 2006)

ABSTRACT: Experiment and numerical calculation have been performed to investigate mixed convection heat transfer between inclined parallel plates. Particle image velocimetry (PIV) with thermo-sensitive liquid crystal (TLC) tracers is used for visualizing and analysis. This method allows simultaneous measurement of velocity and temperature fields at a given instant of time. Quantitative data of the temperature and velocity are obtained by applying the color-image processing to a visualized image, and neural network is applied to the color-to-temperature calibration. The governing equations are discretized using the finite volume method. The results are presented for the Reynolds number ranges from 0.004 to 0.062, the angle of inclination, θ , from 0 to 45 degree and Prandtl number of the high viscosity fluid is 909. The results show velocity, temperature and mean Nusselt numbers distributions. It is found that the periodic flow of mixed convection between inclined parallel plates is shown at $0^\circ \leq \theta < 30^\circ$, $Re < 0.062$, and the flow pattern can be classified into three patterns which depend on Reynolds number and the angle of inclination. The minimum Nusselt numbers occur at $Re = 0.05$ regardless of the angle of inclination.

Key words: Mixed convection(혼합대류), PIV(입자영상유속계), TLC(감온액정), Neural network(뉴럴 네트워크), Angle of inclination(경사각)

기 호 설 명

A : L/H
 C : 상호상관계수

c_p : 정압비열
 D : 평판 깊이 [mm]
 g : 중력가속도 [m^2/s]
 Gr : Grashof 수, $g\beta H^3(T_{high} - T_{low})/\nu^2$
 H : 평판 높이 [mm]
 h : 열전달계수
 L : 평판 길이 [mm]
 Nu : 국소 Nusselt 수, hH/λ

† Corresponding author

Tel.: +82-51-620-1616; fax: +82-51-620-1531

E-mail address: dsbae@pknu.ac.kr

- p : 압력 [N/m^2]
 Pr : Prandtl 수, ν/α
 Re : Reynolds 수, $U_{in}H/\nu$
 T : 온도
 t : 시간 [s]
 u : x 방향 속도 [mm/min]
 U_{in} : 유입속도 [mm/min]
 v : y 방향 속도 [mm/min]

그리스 문자

- α : 열확산율
 β : 체적팽창계수
 γ : 주기 $t-\tau$ [s]
 Θ : 수평방향이 x 축과 이루는 각
 λ : 열전도율
 μ : 유체의 점성계수
 ν : 유체의 동 점성계수
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 τ : 유동이 정상상태에 이르기까지의 시간

1. 서 론

하부가 가열되고 상부가 냉각되는 평행판 내에서의 혼합대류는 마이크로 전자장비의 냉각, 밀집형 열교환기, 태양에너지 집열판, 화학기상증착(chemical vapor deposition) 등에서의 많은 실제적 문제에서 중요한 역할을 한다. 따라서 이들에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 지금까지 다양하게 수행되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 그러나 이들 연구의 대부분은 컴퓨터를 이용한 수치적 연구이고 실험적으로 연구된 경우도 정성적인 가시화와 점계측법에 의한 국소적인 정보획득에 국한되었으며, 온도장과 속도장의 계측도 각각 별도로 이루어졌다. 하지만 기계공학을 비롯한 많은 공학 분야에서 열 유동을 정량적으로 해석하는 것은 기기 및 시스템 설계에 대단히 중요하고, 정확한 해석을 위해 전 유동장에 걸쳐 속도와 온도의 정량적 정보가 동시에 필요하다.

최근 컴퓨터와 컬러 화상처리기술의 비약적인 발전으로 감온액정을 이용하여 정량적으로 전 유동장의 속도와 온도를 동시에 계측할 수 있는 방법이 제안되고 있다. Ozawa et al.⁽⁷⁾은 감온액정을 사용하여 Hele-Shaw cell 내부 자연대류의

유동장과 온도장을 동시에 정량적으로 가시화하는 실험을 성공적으로 수행하였다. Yoon et al.⁽⁸⁾은 감온액정과 컬러 화상처리기법을 비정상 열 유동의 순간적인 온도측정에 사용함으로써 Hele-Shaw cell 내부 유동의 온도장변화를 해석하였고, Lee et al.⁽⁹⁾은 2-frame PIV 속도추적법과 컬러 화상처리시스템을 이용하여 속도장 및 온도장 측정기법을 Hele-Shaw cell 내 자연대류에 적용하여 시간에 따른 대류유동의 속도장과 온도장 변화를 동시에 측정하였으며, 기존의 광학적인 가시화 결과와 정성적으로 잘 일치하는 결과를 얻었다. Kimura et al.⁽¹⁰⁾은 회전계 자연대류에 적용하여 온도장과 속도장을 계측하고 3차원 실험기법의 필요성을 제시하였다. 또한 Bae^(11,12)는 비정상 기포유동 및 Rayleigh-Bénard 대류의 온도장과 속도장을 감온액정을 이용하여 정량적으로 가시화하여 전 유동장의 온도와 속도를 정량적으로 계측하였으며, 그 결과를 수치해석결과와 비교하여 정성적으로 서로 잘 일치함을 보여주었다. 감온액정을 이용하여 전 유동장의 속도와 온도를 동시에 계측한 실험적 연구는 다수 있으나 대부분은 자연대류에 대한 것이고 자연대류와 강제대류가 혼재하는 혼합대류에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 감온액정을 이용한 온도장, 속도장 동시 계측법을 독자적으로 구현하고, 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 경사진 평행판 내의 혼합대류에 적용하여 혼합대류의 속도장과 온도장을 정량적으로 가시화하고자 한다. 정량적 속도분포는 계조치 상호상관법을 적용한 PIV 계측법을 사용하여 속도 벡터로 나타내고, 정량적 온도분포는 뉴럴 네트워크를 색-온도 변환에 적용하여 색으로 나타내었다. 또한 Re 수와 경사각의 변화가 혼합대류에 미치는 영향을 고찰하고, 그 결과를 수치해석결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 실험부(test cell), 두 개의 항온조, 두 개의 광원, 오일 탱크, 펌프, 온도제어기, 디지털 온도계, 디지털 비디오카메라, 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다. 실험부의 상부와 하부는 두께가 15 mm인 두 개의 동판으로 되어 있으며, 4개의 수

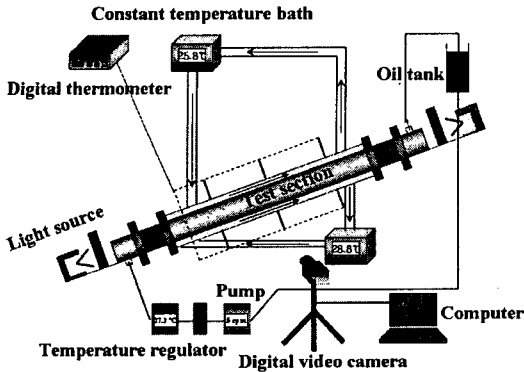


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

직 벽 부분은 가시화를 위하여 두께가 15mm인 투명한 아크릴 평판으로 만들어졌다. 크기는 140mm×15mm×10mm ($L \times H \times D$)이다. 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상획득 부분을 제외한 실험부의 촬영 전면에 검정색 종이를 부착하였다. 진열면인 상, 하부의 동판 내부에는 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 두 개의 항온조로 순환시킨다. 실험부 내에 들어가는 작동유체의 온도는 실험부 좌측에 설치한 온도제어장치에 의해 억제되고 보존된다.

작동유체는 온도변화에 따른 액정의 선명한 색 변화를 얻기 위하여 실리콘 오일(Sin-Etsu Silicon Oil KF-96-100cSt)을 사용하였으며, 액정은 RM2830(Japan Capsular Products Inc)을 사용하였다. 조명은 좌, 우에 검정색 종이로 만들어진 2mm 슬릿을 통하여 조사되었으며, 또한 백색 광원으로부터 나오는 열을 차단하기 위하여 물 필터를 사용하여 백색 광원으로부터의 열이 유동장의 유동과 온도에 미치는 영향을 최소로 하였다. 액정의 질량농도는 0.1%이다. 액정이 반사하는 빛의 색깔은 온도가 증가함에 따라 빨강에서 파랑으로 변하며, 그 색깔변화는 광원과 카메라 사이의 각도에 크게 영향을 받는다. 따라서 본 실험에서는 각 변화에 의한 오차를 없애기 위하여 모든 실험장치를 실험기간 동안 고정하였다. 실내 온도의 영향을 감소시키기 위하여 별도의 차단벽을 설치하였으며 실내온도를 실험부 상, 하부의 평균 온도로 설정하여 실험하였다.

실험은 다음의 순서로 행하여 졌다. 우선 실험부 내에 실리콘 오일과 액정의 혼합액을 펌프를

이용하여 아주 천천히 주입하고, 항온조를 작동시켜 상부에서 냉각, 하부에서 가열하였다. 액정이 실험부 내의 전 영역에 골고루 섞이게 한 후 펌프를 정지하고 상부를 가열, 하부를 냉각하여 수직온도구배가 형성된 후 액정의 다양한 발색에 대한 온도정보를 파악하였다. 다음에 다시 상부를 냉각, 하부를 가열하였으며, 펌프를 이용하여 유체를 요구되어지는 유속으로 실험부 내에 유입시키고, 일정한 시간이 지난 후 혼합대류가 완전히 형성된 후 유동현상을 디지털 비디오카메라로 촬영하여 저장하였다. 본 실험에서 실험부 내에 흘러들어가는 유체의 온도는 상, 하부의 평균 온도로 설정하였다.

3. 계조치 상호상관법을 이용한 속도계측

본 연구에서는 일정시간 간격을 가진 두 개의 추적 입자화상을 소영역으로 분할해서, 각각의 영역에 있어서의 농도패턴 상호상관계수를 계산해서 그 최대치의 공간위치로부터 추적 입자군의 이동거리 및 방향을 구해 속도 벡터를 계산하는 계조치 상호상관법⁽¹³⁾으로 속도 벡터분포를 계측하였다. Fig. 2는 2프레임의 영상데이터를 이용한 계조치상호상관법의 원리를 설명하였다. 미소시간 동안 유동장의 입자영상의 계조패턴은 크게 변하지 않는다고 가정하면 제 1 프레임에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소시간 후의 제 2 프레임에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제 1 프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제 2 프레임 상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관계수값을 구하여 비교하면 그 중 가장 큰 값을 동일입자의 이동위치로

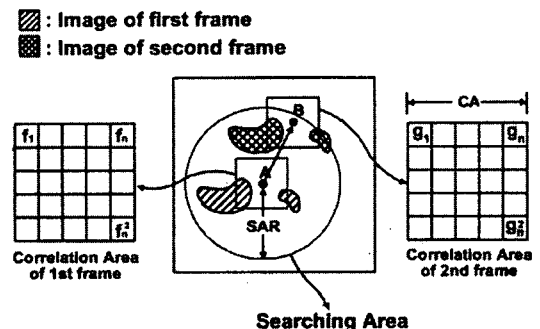


Fig. 2 Diagram of cross correlation method.

간주할 수 있게 된다. 컴퓨터 상에서 이와 같은 조작을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심 입자(속도 벡터의 시점)에 대하여 벡터의 종점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임 간의 상호상관계수는 식(1)로 구해진다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

여기서 f_i, g_i 는 상관영역 내의 각 픽셀의 계조치를 나타내고 '-'는 연속화상에 대한 시간 평균을 나타낸다.

사용한 계조치 상호상관법의 입자추적 알고리즘은 복수의 추적입자가 만든 소영역의 농도패턴으로써 처리되기에 화상은 농도의 정보를 함유할 필요가 있다. 그러나 본 실험에서 얻은 화상은 전부 컬러영상으로 되어 있기 때문에 농도뿐만 아니라 색상의 정보까지 포함하고 있어 계조치상호상관법을 그대로 적용할 수 없다. 따라서 상호상관계수의 계산에는 RGB 표색계를 YIQ 표색계의 1속성인 휘도신호로 변환하여 화상데이터를 이용하였다. 본 연구에서는 상용 프로그램인 Thinker eyes를 사용하여 휘도신호로 변환하고 속도장 계측을 진행하였다.

4. 뉴럴 네트워크를 이용한 색-온도 변환

열유동의 정량적 가시화를 위하여 액정이 사용되어졌고, 액정이 온도변화에 따른 색변화의 관계는 보정에 의해 결정되어진다. Fig. 3은 보정실험의 결과인 열전대를 사용하여 측정된 온도 T_m 와 식(2)를 이용하여 구한 r, g, b 사이의 관계를 보여주며, 그 관계가 강한 비선형적임을 나타내고 있다. 이 비선형성 때문에 색-온도 변환을 위한 방정식을 만드는 것이 대단히 어렵다. 따라서 본 연구에서는 색-온도 사이의 관계를 정립하기 위하여 뉴럴 네트워크를 사용하였다.

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R+G+B} \\ g &= \frac{G}{R+G+B} \\ b &= \frac{B}{R+G+B} \end{aligned} \quad (2)$$

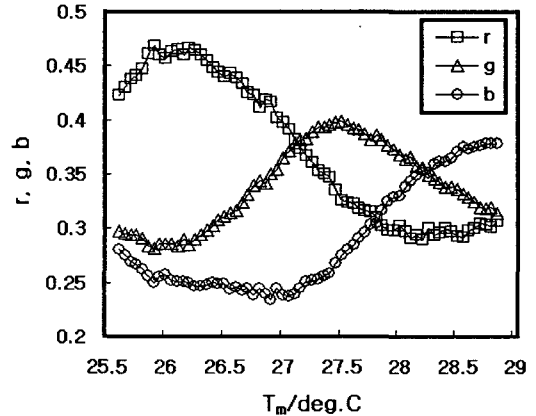


Fig. 3 Relationship between r, g, b and temperature T_m .

Fig. 4는 본 연구에 적용된 3계층 뉴럴 네트워크 구조를 나타낸다. 좌측에서 다중입력, 즉 r, g, b 값이 입력되어지고, 우측에서 입력값에 대한 온도 T_c 가 구해진다. 좌측의 입력층(input layer)은 하나의 온도에 대해 r, g, b 세 값을 갖기 때문에 세 유닛(unit)으로 구성되었으며, 입력값으로는 식(2)로부터 계산된 0과 1 사이의 규격화된 r, g, b 값이 사용되었다. 중간층(hidden layer)은 유닛 수를 늘리면 계산시간이 증가되고, 줄이면 중간층의 존재의미가 저하한다. 본 연구에서는 경험적으로 3유닛으로 한다. 출력층(output layer)은 온도로 유닛 수는 1이다. 이와 같이 뉴럴 네트워크의 구조를 먼저 결정한 뒤 결합하중 초기값을 적당하게 주고 규격화된 입력데이터와 대응하는 온도를 사용하여 오차 역전법(back-propagation method)으로 뉴럴 네트워크 학습을 진행하였다.

Fig. 5는 열전대로 측정된 온도 T_m 와 뉴럴 네트워크의 학습 후 출력 T_c 와의 관계를 나타내며, 반복횟수 300,000 후 T_m 와 T_c 의 값이 서로 잘

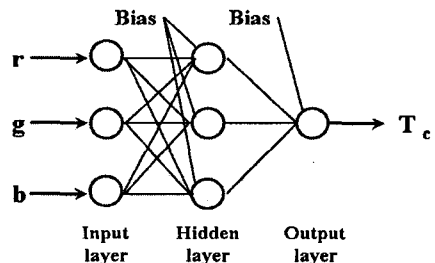


Fig. 4 Neural-network structure.

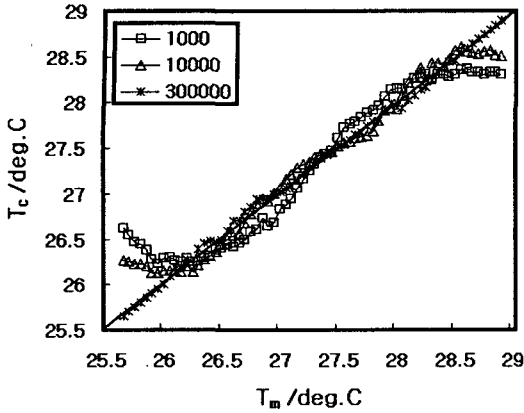


Fig. 5 Relationship between measured temperature T_m and network output T_c .

일치함을 보여준다. 따라서 이상의 결과로부터 뉴럴 네트워크는 색-온도 변환에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

5. 수치해석

본 연구에서 고려된 양 끝이 개방된 경사진 채널의 2차원 기하학적 형상은 Fig. 6과 같다. 작동 유체는 균일속도와 상, 하부의 평균 온도로 일정하게 유입되어 평행평판 사이를 통과하여 유출된다. 윗면은 등온으로 냉각되고 아랫면은 등온으로 가열된다. 형상은 실험에서 사용한 형상과 동일하게 $H=15\text{ mm}$, $L=140\text{ mm}$ 로 하였다. 유체를 비압축성으로 가정하였고, 유동은 온도변화에 따른 밀도변화로 생성되는 부력항에 Boussinesq 근사 조건을 적용하였으며, 점성에 의한 에너지 소산과 복사는 무시하였다. 본 모델에서의 혼합대

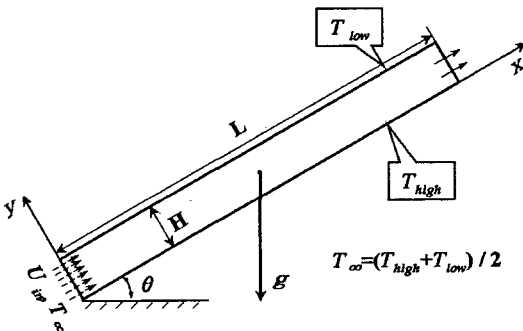


Fig. 6 Schematic diagram of flow geometry.

류 열전달 특성을 수치해석하기 위한 연속, 운동량 및 에너지방정식은 식(3)~(6)과 같으며, 본 연구에서의 경계조건은 식(7)~(10)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \Delta T \sin \theta \tag{4}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \Delta T \cos \theta \tag{5}$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{6}$$

$$x=0, 0 \leq y \leq h: T = T_\infty, u = U_{in}, v = 0 \tag{7}$$

$$x=L, 0 \leq y \leq h: \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \tag{8}$$

$$y=0, 0 \leq x \leq L: T = T_{high}, u=0, v=0 \tag{9}$$

$$y=h, 0 \leq x \leq L: T = T_{low}, u=0, v=0 \tag{10}$$

유한체적법에 의한 이산화방정식의 대류항은 중심차분도식(central differencing scheme)을 사용하였고, 압력보정은 PISO(pressure implicit with splitting of operators) 알고리즘을 사용하여 계산하였다.

6. 결과 및 고찰

6.1 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 $Pr=909$, $Re=0.004$ 일 때 경사각 θ 가 평행평판 내 고 점성유체의 혼합대류에 미치는 영향을 액정을 이용한 PIV 법으로 정량적으로 가시화한 결과이다. 상부와 하부의 온도차는 3°C ($Ra=8600$)이다. Fig. 7에서 (a)는 계조치상호상관법을 적용한 속도벡터를, (b)는 뉴럴 네트워크를 이용한 색-온도 변화의 결과인 온도분포를 나타낸다.

경사각 $\theta=0^\circ$ 인 경우는 입구유속이 매우 작기

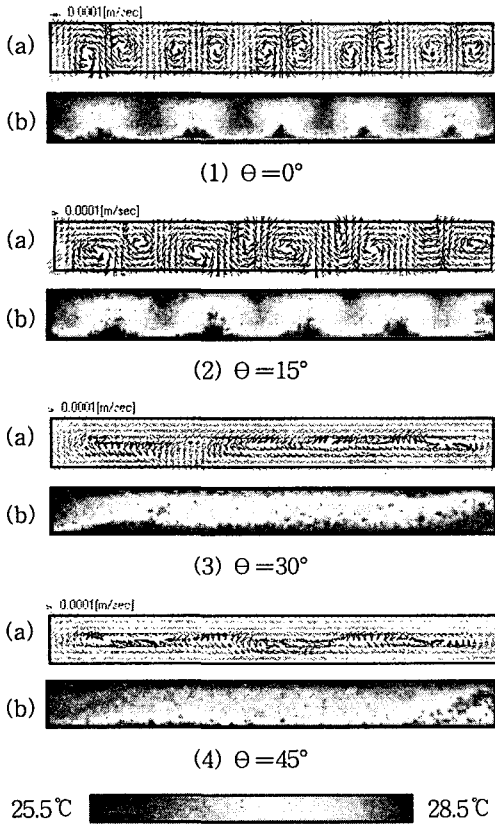


Fig. 7 Experiment results for various angles of inclination at $Re=0.004$, $Pr=909$ [(a) Velocity vectors, (b) Temperature patterns].

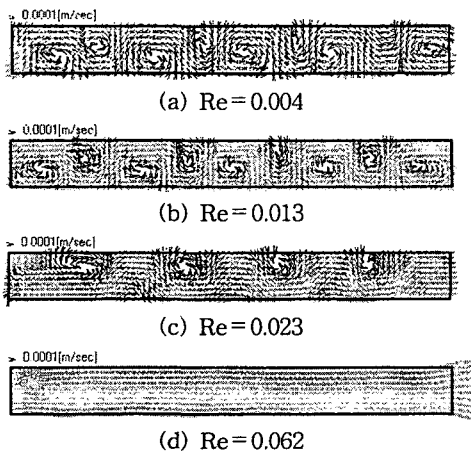


Fig. 8 Velocity vectors for various Reynolds numbers at $\theta=15^\circ$.

($U_{in}=1.6 \text{ mm/min}$)에 유입된 유량은 실험부 전 영역에 걸쳐 자연대류에 의해 발생한 Rayleigh-Bénard 셀에 거의 영향을 미치지 못하고 계속 자연대류구조의 전형적인 속도분포와 온도분포를 유지하면서 매우 느리게 이동하는 것을 알 수 있다. 경사각 $\theta=15^\circ$ 인 경우는 x 방향의 유속에 미치는 부력의 영향 증가로 경사각 $\theta=0^\circ$ 에서 좌우

대칭이던 셀 형태는 붕괴되어짐을 알 수 있다. 기울기가 더욱 증가하면 x 방향에 미치는 부력의 영향은 더욱 커져 $\theta \geq 30^\circ$ 에서는 하나의 큰 셀 모

양을 형성한다. 온도분포도 경사각 θ 가 증가함에 따라 층상화되고 단일 셀 유동에 의해 대칭적인 온도분포를 나타내며, 온도경계층 두께가 얇아져 열전달이 촉진됨을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 $\theta=15^\circ$ 와 45° 일 때 $0.004 \leq Re \leq 0.062$ 에서 혼합대류의 속도장을 속도 벡터로 나타낸 것이다. $\theta=15^\circ$ 인 경우 $Re=0.004$ 와 0.013 에서는 입구유속이 상대적으로 작기에 부력에 의한 자연대류가 전체 유동장에서 지배적인 작용을 하지만 $Re=0.023$ 인 경우는 입구유속의 증가로 인해 자연대류의 영향이 점점 작아져서 하부 면에서는 셀 유동이 사라지고 상부 면에서만 셀 유동이 나타남을 알 수 있다. $Re=0.062$ 인 경우는 자연대류의 영향이 급격히 줄어들고 강제대류의 영향이 지배적이어서 x 방향 유속은 전부 양의 값을 나타나고 평행 유동을 하는 것을 알 수 있다(Fig.

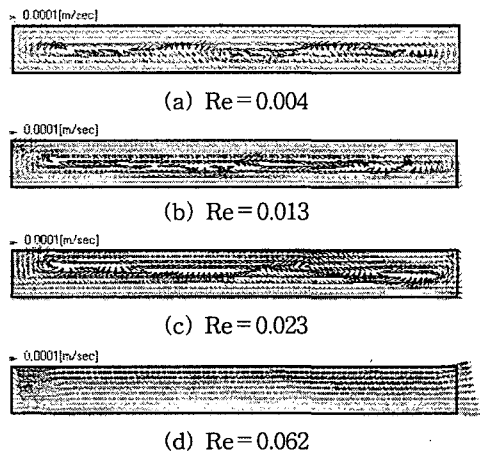


Fig. 9 Velocity vectors for various Reynolds numbers at $\theta=45^\circ$.

8). $\theta=45^\circ$ 일 때 $Re=0.004, 0.013, 0.023$ 인 경우 유동이 전반적으로 한 개의 셀 모양을 형성하고 있으나 입구유속이 더욱 증가하여 $Re=0.062$ 인 경우에는 셀 모양은 없어지면서 전부 한 방향의 평행 유동을 하는 것을 알 수 있다(Fig. 9).

6.2 수치해석결과 및 고찰

본 연구에서는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 된 경사진 평행판 내에서 형상비 $A=L/H=9.33, Gr=9.43, Pr=909$

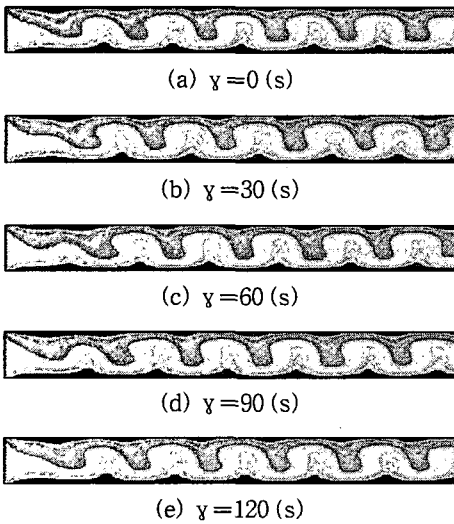


Fig. 10 Temperature patterns for various instants at $\theta=15^\circ, Re=0.023$.

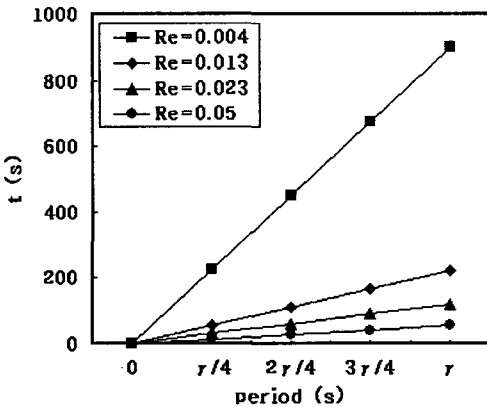


Fig. 11 Effect of Reynolds numbers on periodic flows at $\theta=0^\circ$.

일 때 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 및 $0 \leq Re \leq 1.8$ 의 범위에 대하여 수치해석을 진행하였다.

Fig. 10은 $Re=0.023, \theta=15^\circ$ 일 때 시간별 유동장의 유동 특성을 온도분포로 나타낸 것이다. 여기서 γ 는 전체 시간에서 유동이 정상상태에 이르기까지의 시간(τ)을 뺀 시간을 나타낸다($\gamma = t - \tau$). 이 경우 셀은 유속에 의해 오른쪽으로 이동하면서 주기 $\gamma=120$ 초인 주기적인 유동 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 주기적 현상은 자연대류에 의해 생성된 새로운 유동을 우측으로 이동시키면서 우측 끝의 기존 유동을 연속적으로 소멸시킨다.

Fig. 11은 경사각 $\theta=0^\circ$ 일 때 여러 가지 입구 유속이, Fig. 12는 $Re=0.013$ 일 때 여러 가지 경사각이 주기에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 Re 수가 증가할수록(Fig. 11) 혹은 경사각이 증가할수록(Fig. 12) 그 주기는 점차적으로 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 Re 수 및 경사각에 따른 평판의 가열 벽과 냉각 벽에서의 평균 Nu 수의 분포를 나타낸 것이다. $Re=0.05$ 를 기준으로 하여 $Re < 0.05$ 에서는 Re 수가 증가함에 따라 평균 Nu 수는 점차적으로 감소하고, $Re > 0.05$ 에서는 Re 수가 증가함에 따라 평균 Nu 수는 점차적으로 증가하여 모든 경사각에서 $Re=0.05$ 일 때 열전달이 최소가 됨을 알 수 있다. 또한 경사각 $\theta=0^\circ$ 인 경우는 가열 벽과 냉각 벽에서의 평균 Nu 수의 값은 거의 일치하지만 경사각이 증가함에 따라 가열 벽에서의 평균 Nu 수의 값은 냉각 벽에서보다 크게 나타나

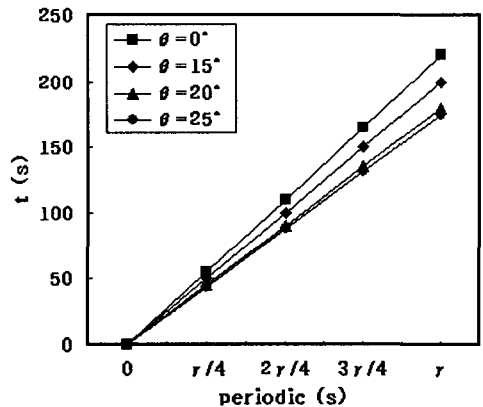


Fig. 12 Effect of the angles of inclination on periodic flows at $Re=0.013$.

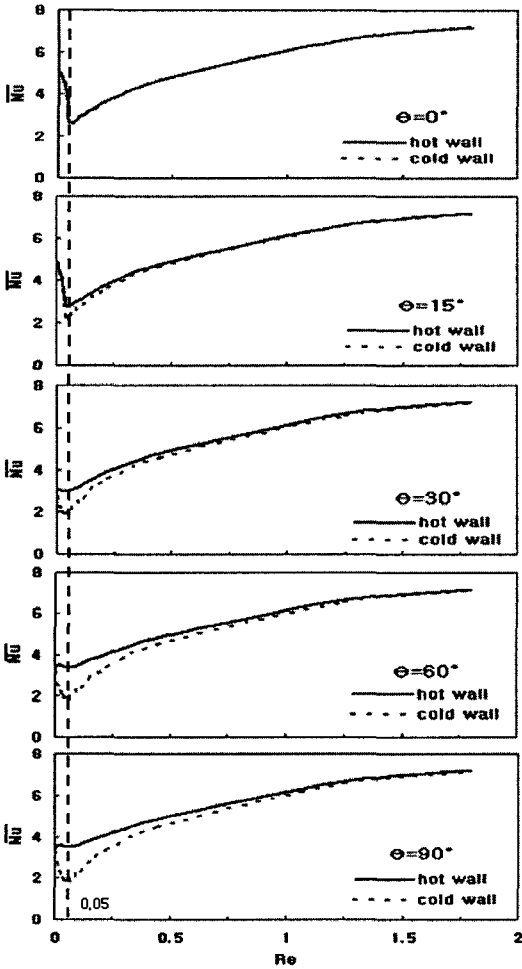


Fig. 13 The average Nusselt numbers versus Reynolds numbers for various angles of inclination.

다가 $Re > 1$ 에서는 경사각에 관계없이 다시 일치함을 나타내었다.

6.3 실험 및 수치해석결과 비교

Fig. 14와 Fig. 15는 $\theta = 15^\circ$, $Re = 0.004$ 일 때 수치해석 및 실험으로 구한 속도 벡터와 온도분포를 정량적으로 가시화한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 셀의 크기와 위치는 다소 차이가 있지만 실험오차와 수치해석오차를 고려하면 전반적으로 실험과 수치해석결과는 잘 일치하였다.

Fig. 16은 $Re = 0.023$, $\theta = 45^\circ$ 일 때 실험 및 수치해석으로 구한 높이방향 중간부의 수직속도분

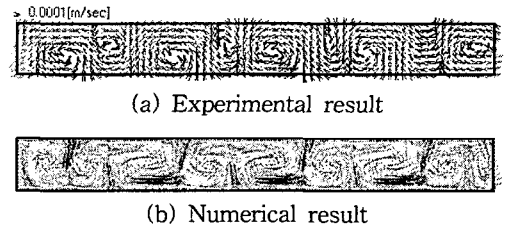


Fig. 14 Comparison of velocity vectors at $\theta = 15^\circ$, $Re = 0.004$, $Ra = 8600$.

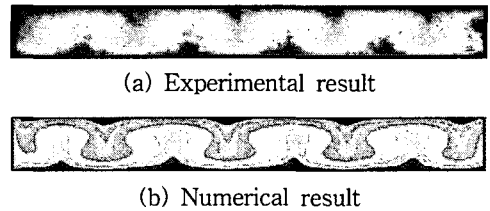


Fig. 15 Comparison of temperature patterns at $\theta = 15^\circ$, $Re = 0.004$.

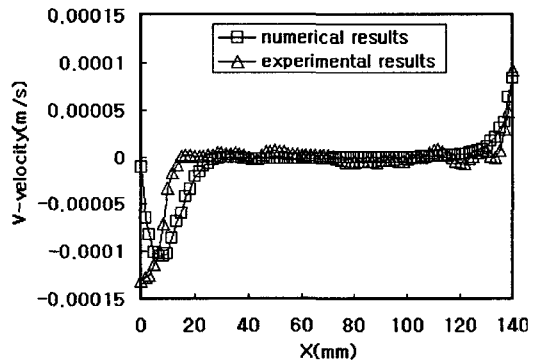


Fig. 16 Comparison of experimental and numerical vertical velocity profiles for $Re = 0.023$, $\theta = 45^\circ$ at $y = h/2$.

포를 나타낸다. 광원에 의한 열전달의 원인으로 입구영역에서는 실험과 수치해석결과가 다소 차이가 있지만, 전반적으로는 실험과 수치해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

7. 결론

온도차를 갖는 경사진 평행판 내에서의 고 점성유체의 혼합대류 열전달 특성을 감온액정을 사용하여 가시화하고, 그 결과를 수치해석결과와

비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험적으로 경사진 평행평판 내의 혼합대류 유동의 온도장과 속도장을 동시에 정량적으로 가시화하고 계측할 수 있었으며, 실험결과는 수치해석결과와 잘 일치하였다.

(2) 경사진 평행평판 내의 혼합대류의 주기적인 유동형태는 경사각 $0^\circ \leq \theta < 30^\circ$, $Re < 0.062$ 인 경우에 나타나고, 그 주기는 Re 수 및 경사각이 증가할수록 감소하였다.

(3) 경사각(θ)과 입구유속(Re 수)은 평행평판 내의 혼합대류 유동에 크게 영향을 미쳤으며, $\theta < 30^\circ$, $Re < 0.062$ 에서는 다중 셀 유동 형태를 나타내고, $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, $Re < 0.062$ 에서는 단일 셀 유동 형태를 나타내며, $\theta \leq 45^\circ$, $Re \geq 0.062$ 에서는 한 방향의 평행 유동형태를 나타내었다.

(4) 최소 평균 Nu 수는 경사각에 관계없이 $Re = 0.05$ 에서 발생하였다.

참고문헌

1. Chiu, K. C. and Rosenberger, F., 1987, Mixed convection between horizontal plates-I. Entrance effects, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 8, pp. 1645-1654.
2. Maughan, J.R. and Incropera, F.P., 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.
3. Lee, F. S. and Hwang, G. J., 1991, Transient analysis on the onset of thermal instability in the thermal entrance region of a horizontal parallel plate channel, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 363-370.
4. Gau, C., Liu, C. W., Huang, T. M. and Aung, W., 1999, Secondary flow and enhancement of heat transfer in horizontal parallel-plate and convergent channels heating from below, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42, pp. 2629-2647.
5. Gau, C., Jeng, Y. C. and Liu, C. G., 2000, An experimental study on mixed convection in a horizontal rectangular channel heated from a side, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 122, pp. 701-707.
6. Chiu, W. K. S., Richards, C. J. and Jaluria, Y., 2001, Experimental and numerical study of conjugate heat transfer in a horizontal channel heated from below, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 688-697.
7. Ozawa, M., Muller, U., Kimura, I. and Takamori, T., 1992, Flow and temperature measurement of natural convection in a Hele-shaw cell using a thermo-sensitive liquid-crystal tracer, *Experiments in Fluids* 12, pp. 213-222.
8. Yoon, J. H., Doh, D. H. and Lee, S. J., 1996, Temperature field measurement of convective flow in a Hele-Shaw cell with TLC and color image processing, *Transactions of the KSME B*, Vol. 20, No. 3, pp. 1114-1122.
9. Lee, S. J., Baek, S. J., Yoon, J. H. and Doh, D. H., 1996, Simultaneous velocity and temperature measurement of thermo-fluid flows by using particle imaging technique, *Transactions of the KSME B*, Vol. 20, No. 10, pp. 3334-3343.
10. Kimura, I., Hyodo, T. and Ozawa, M., 1998, Temperature and velocity measurement of a 3-D thermal flow field using thermo-sensitive liquid crystals, *Journal of Visualization*, Vol. 1, No. 2, pp. 145-152.
11. Bae, D. S., 2003, A study on the analysis of temperature field of bubbly flow using thermo-sensitive liquid crystals, *Transactions of the KSME B*, Vol. 27, No. 11, pp. 1572-1578.
12. Bae, D. S., Kim, J. M., Kwon, O. B., Lee, D. H., Lee, Y. W. and Kim, N. S., 2003, A study on the quantitative visualization of Rayleigh-Bénard convection using thermochromic liquid crystal, *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 27, No. 3, pp. 395-404.
13. Utami, T. and Blackwelder, R. F., 1991, A cross-correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization, *Experiments in Fluids* 10, pp. 213-223.