

# 온도차를 갖는 경사진 평행평판 내의 혼합대류 열전달 Mixed Convection between Inclined Parallel Plates with different Temperatures

박일용 · 배대석 · 권오봉  
R. L. Piao, D. S. Bae and O. B. Kwon

**Key Words** : Mixed Convection(혼합대류), PIV(입자영상유속계), TLC(감온액정), Neural Network(뉴럴 네트워크), Angle of Inclination(경사각)

**Abstract** : Experiments are performed to study the mixed convection flow and heat transfer in an inclined parallel plates with the upper part cooled and the lower part heated uniformly. The Reynolds number ranges from  $4.0 \times 10^{-3}$  to  $6.2 \times 10^{-2}$ , the angle of inclination,  $\theta$ , from 0 to 45 degree from the horizontal line, and Pr of the high viscosity fluid is 909. In this paper, the PIV(Particle image velocimetry) with TLC(Thermo-sensitive liquid crystal) tracers is used for visualizing and analysis. This method allows simultaneous measurement of velocity and temperature field 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. This paper describes the methods, and presents the quantitative visualization of mixed convection. From this study, it is found that the flow pattern can be classified into three patterns which are affected by Reynolds number and the angle of inclination.

## 기 호 설 명

## 1. 서 론

- A : 채널의 횡단 면적
- D : 채널의 깊이
- $D_h$  : 수력 직경,  $4A/P$
- E : 오차 함수
- H : 채널의 높이
- P : 채널의 점수 길이
- Re : Reynolds 수,  $U_{in} \times D_h / \nu$
- Ra : Rayleigh 수,  $\beta g \Delta T D_h^3 / \alpha \nu$
- $T_c$  : 뉴럴 네트워크 학습후 출력 온도
- $T_m$  : 열전대로 측정된 온도
- $U_{in}$  : 입구 균일 유속
- V : 수직 방향 속도
- $W_i$  : 가중치
- $X_i$  : 뉴런의 입력 값
- g : 중력 가속도
- $\theta$  : 역치 및 경사각도

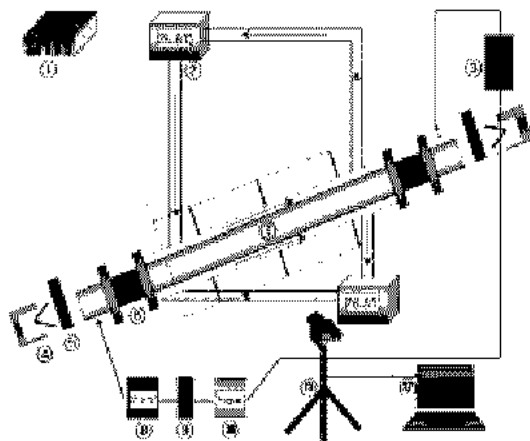
평행평판 내에서의 혼합대류 열전달은 태양에너지 집열기, CVD, 지열에너지 시스템, 원자로 및 전자장비의 냉각 등에서도 같은 많은 공학적인 응용 분야에서 여러 가지 흥미 있는 현상을 보여준다. 따라서 이들에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 지금까지 실험적, 수치적 방법으로 연구되어져 왔다. 특히 하부가 가열되는 수평평행평판 내에서 발생하는 혼합대류 열전달에 관한 연구는 두 등온 벽의 온도차, 평판 간격, 유체 매질의 Pr 수, Re 수, 경사각 등의 영향에 대해 다양하게 고찰되어 왔다<sup>1) 7)</sup>. 그러나 이들 연구의 대부분은 수치적인 방법으로 수행되었고, 실험적으로 연구된 경우도 정성적인 가시화와 점 계측법에 의한 국소적인 정보획득에 국한되었으며, 온도장과 속도장의 계측도 각각 별도로 이루어졌다.

최근 컴퓨터와 화상처리기술의 비약적인 발전으로 감온 액정을 이용한 속도장, 온도장의 동시 계측 기법이 활발히 연구되고 있다. 감온액정은 온도에 의하여 색깔이 변화하므로 색과 온도사이의 상관 식을 구하여 색/온도 변환에 의한 정량적인 온

접수일 : 2005년 3월 9일  
배대석(책임저자) : 부경대학교 기계공학부  
E-mail : dsbae@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1616  
박일용 : 부경대학교 대학원  
권오봉 : 부경대학교 기계공학부

도정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 액정입자를 추적 입자로 사용하여 유동장의 속도도 정량적으로 측정할 수 있다. 이 측정 방법은 측정온도범위가 감온액정의 발색범위라는 제한이 있지만 점 측적인 열전대나 국소유속계 등과는 달리 온도장, 속도장 동시 측정이 가능하며, 복잡한 형상의 온도측정, 순시속도측정, 과도현상의 측정에 적합하고 또한 유체에 현탁되는 감온액정의 입자가 아주 미소하여 유동장에 주는 영향을 거의 무시할 수 있는 등의 이점이 있어 활발히 연구되고 있다<sup>8),9)</sup>. 본 연구에서는 감온 액정을 사용하여 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 경사진 평행평판 내에서 발생하는 혼합대류의 유동장과 온도장을 정량적으로 가시화하고자 한다. 정량적 속도분포는 제조치 상호 상관법을 적용한 PIV 측정법을 사용하여 속도 벡터로 나타내고, 정량적 온도분포는 뉴턴 네트워크를 색-온도변환에 적용하여 색으로 나타내어 Re 수와 경사각의 변화가 혼합대류에 미치는 영향을 함께 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법



- ① digital thermometer
- ② constant temperature bath
- ③ oil tank
- ④ light source
- ⑤ water filter
- ⑥ honey combs
- ⑦ test section
- ⑧ temperature regulator
- ⑨ pulse dampener
- ⑩ pump
- ⑪ digital video camera
- ⑫ computer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

본 실험에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같으며, 시험부(test section), 두 개의 항온조, 두 개의 광원, 두 개의 물 필터, 오일 탱크, 펌프, 온도제어기, 디지털 온도계, 디지털 비디오키메라, 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다. 시험부의 상부와 하부는 두께가 15 mm인 두 개의 동판으로 되어있으며, 4개의 수직 벽 부분은 가시화를 위하여 두께가 15 mm인 아크릴 평판으로 만들어졌다. 크기는 140 mm×15 mm×10 mm (L×H×D)이다. 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상획득 부분을 제외한 시험부의 촬영전면에 검정색 종이를 부착하였다. 전열 면인 상, 하부의 동판내부에는 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 두 개의 항온조로 순환시킨다. 시험부내에 들어가는 작동유체의 온도는 시험부 좌측에 설치한 온도제어장치에 의해 억제되고 보존되며, 입구에서 동일한 유량을 공급하기 위해 Honey combs를 사용하였다.

작동유체는 온도변화에 따른 액정의 선명한 색변화를 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 종이를 만들어진 2 mm 슬릿을 통하여 조사되었으며, 또한 백색광원으로부터 나오는 열을 차단하기 위하여 물 필터를 사용하여 백색광원으로부터의 열이 유동장의 유동과 온도에 미치는 영향을 최소로 하였다. 액정의 질량농도는 0.1%이다. 액정이 반사하는 빛의 색깔은 온도가 증가함에 따라 빨강에서 파랑으로 변하고, 그 색깔변화는 광원과 카메라 사이의 각도에 크게 영향을 받는다. 따라서 본 실험에서는 각 변화에 의한 오차를 없애기 위하여 모든 실험 장치를 실험기간동안 고정하였다. 실내온도의 영향을 감소시키기 위하여 별도의 차단벽을 설치하였으며 실내온도를 시험부 상, 하부의 평균온도로 설정하여 실험하였다.

실험은 다음의 순서로 행하여 졌다. 우선 시험부내에 실리콘 오일과 액정의 혼합액을 펌프를 이용하여 주입하고, 항온조를 작동시켜 상부에서 냉각, 하부에서 가열하였다. 액정이 시험부내의 전 영역에 골고루 섞이게 한 후 펌프를 정지하고 상부를 가열, 하부를 냉각하여 수직온도구배가 형성된 후 액정의 다양한 발색에 대한 온도정보를 파악하였다. 다음 다시 상부를 냉각, 하부를 가열하였으며, 펌프를 이용하여 유체를 요구되어지는 온도와 유속으로 시험부내에 유입시키고, 일정한 시간이 지난

후, 혼합대류가 완전히 형성된 후 유동현상을 디지털 비디오카메라로 촬영하여 저장하였다. 본 실험에서 시험부내에 흘러 들어가는 유체의 온도는 상, 하부의 평균온도로 설정하였다.

### 3. 속도장의 계측

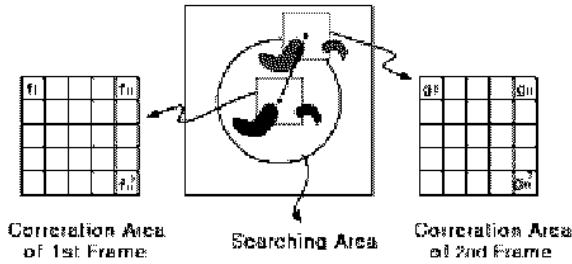


Fig. 2 Diagram of cross correlation method

본 연구에서는 일정시간 간격을 가진 두 개의 추적 입자화상을 소 영역으로 분할해서, 각각의 영역에 있어서의 농도패턴 상호상관계수를 계산해서 그 최대치의 공간위치로부터 추적 입자군의 이동거리 및 방향을 구해 속도벡터를 계산하는 계조치상호상관법으로 속도벡터분포를 계측하였다. Fig. 2는 2프레임의 영상데이터를 이용한 계조치상호상관법의 원리를 설명하였다. 미소시간동안 유동장의 입자영상의 계조패턴은 크게 변하지 않는다고 가정하면 제1프레임에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소시간 후의 제2프레임에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제1프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관계수값을 구하여 비교하면 그중 가장 큰 값을 동일입자의 이동위치로 간주할 수 있게 된다. 컴퓨터상에서 이와 같은 조작을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심입자(속도벡터의 시점)에 대하여 벡터의 종점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임간의 상호상관계수는 식(1)로 구해진다.

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

사용한 계조치상호상관법의 입자추적 알고리즘은 복수의 추적 입자가 만든 소영역의 농도패턴으로써 처리되기에 화상은 농도의 정보를 함유할 필요가 있다. 그러나 본 실험에서 얻은 화상은 전부 컬러

영상으로 되어 있기 때문에 농도뿐만 아니라 색상의 정보까지 포함하고 있어, 계조치상호상관법을 그대로 적용할 수 없다. 따라서 상호상관계수의 계산에는 RGB표색계를 YIQ표색계의 1속성인 휘도신호로 변환하여 화상데이터를 이용하였다. 본 연구에서는 상용프로그램인 Thinkers eyes를 사용하여 휘도신호로 변환하고 속도장 계측을 진행하였다.

### 4. 온도장의 계측

열 유동의 정량적 가치화를 위하여 액정이 사용되어졌고, 액정의 온도변화에 따른 색변화의 관계가 강한 비선형적임을 나타내기에 색-온도변환을 위한 방정식을 만드는 것이 대단히 어렵다. 본 연구에서는 색-온도 사이의 관계를 정립하기 위하여 Neural-Network를 사용하였다.

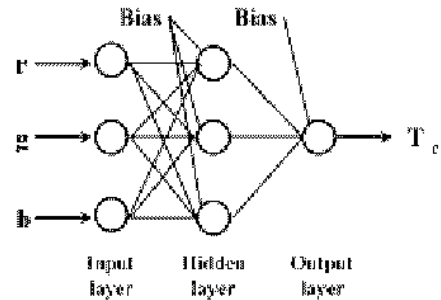


Fig. 3 Neural network structure

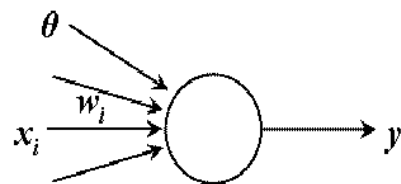


Fig. 4 Neuron model

Fig. 3은 계층이 3층인 계층구조 뉴럴 네트워크(Neural-Network)를 나타내며, 색의 r, g, b값이 입력되어 온도 \$T\_c\$가 구해진다. Fig. 4는 각 층을 구성하는 Neuron모형을 나타내고 있다. 이 Neuron은 앞 층의 Neuron으로부터 입력 값의 가중치 합을 구해, 시그모이드 함수(sigmoid function)를 사용하여 출력 값을 결정한다. 입력 값 X의 가중치 합을 구하는 식은 식(2)와 같으며, 출력은 식(3)으로 구해지고 이 식을 시그모이드 함수(sigmoid function)라고 부른다.

$$X = \sum_{i=1}^n X_i W_i + \theta \quad (2)$$

$$y = f(X) = \frac{1}{1 + \exp(-X)} \quad (3)$$

여기서  $X_i$ 는 neuron의 입력이고,  $W_i$ 는 가중치, 그리고  $\theta$ 는 역치를 나타낸다. Neural Network의 학습은 입력  $r$ ,  $g$ ,  $b$ 에 의한 출력  $T_c$ 가 열전대에 의해 측정된 온도  $T_m$ 와 일치하도록 수행되어진다.

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_c - T_m)^2 \quad (4)$$

따라서 Neural Network의 학습은 식(4)의 오차 함수  $E$ 가 최소가 되도록 하는 가중치  $W_i$ 와 역치  $\theta$ 를 구하는 것이라고 할 수 있다.

### 5. 결과 및 고찰

같은 액정을 사용하여 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 경사진 평행평판 내에서의 혼합대류유동을 가시화 하였다. 상부와 하부표면의 온도차는  $3^\circ\text{C}$  ( $25.5^\circ\text{C}$   $28.5^\circ\text{C}$ )이다.

Fig. 5는  $Re=4.0 \times 10^3$ 일 때  $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 에서의 혼합대류의 속도장을 계조치상호상관법을 적용하여 속도벡터로 나타낸 것이다. 경사각  $\theta=0^\circ$ 인 경우는 입구 유속이 매우 작기( $U_m=1.6$  mm/min) 때문에 유입된 유량은 시험부의 전 영역에 걸쳐 자연대류에 의해 발생한 Rayleigh B'nard 셀에 거의 영향을 미치지 못하고 계속 자연대류 구조를 유지하면서 매우 느리게 이동하는 것을 알 수 있다. 경사각  $\theta=15^\circ$ 인 경우는 x방향의 유속에 미치는 부력의 영향 증가로 경사각  $\theta=0^\circ$ 에서 좌우 대칭이던 셀 형태는 파괴되어짐을 알 수 있다. 기울기가 더욱 증가하면 x방향에 미치는 부력의 영향은 더욱 커져  $\theta \geq 30^\circ$ 에서는 하나의 큰 셀 모양을 형성한다.

Fig. 6은 동일조건 하에서 뉴럴 네트워크를 이용하여 색 온도 변환한 온도분포이다. 그림에서 보는 바와 같이  $\theta=0^\circ$ 인 경우는 입구 유속이 자연대류 유동에 거의 영향을 미치지 못하여 Rayleigh B'nard 셀 유동에 의한 전형적인 온도분포를 나타낸다. 그러나 경사각  $\theta$ 가 증가함에 따라 다중셀 유동은 파괴되어  $\theta \geq 30^\circ$ 인 경우 온도분포는 층상화되어지고 단일셀 유동에 의해 대칭적인 온도분포를 나타내며, 온도경계층 두께가 얇아져 열전달이 촉진됨을 알 수 있다.

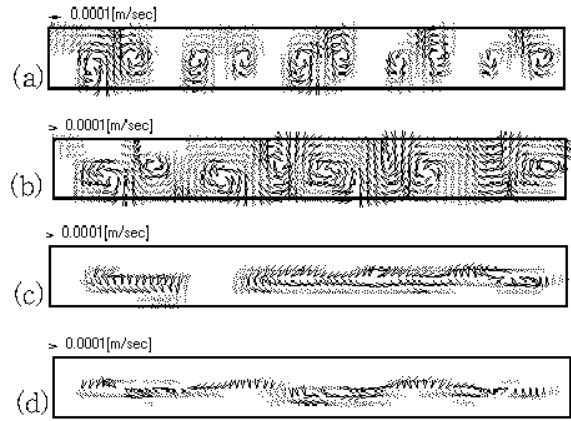


Fig. 5 The velocity vectors for various angle of inclination at  $Re=4.0 \times 10^3$ ,  $Ra=8.57 \times 10^3$ : (a)  $\theta=0^\circ$  (b)  $\theta=15^\circ$  (c)  $\theta=30^\circ$  (d)  $\theta=45^\circ$

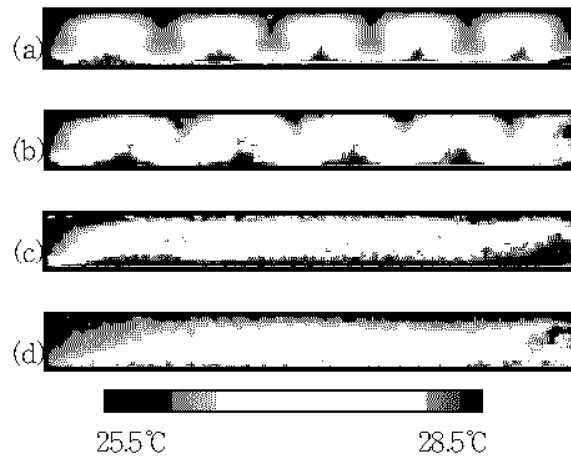


Fig. 6 The temperature patterns for various angle of inclination at  $Re=4.0 \times 10^3$ ,  $Ra=8.57 \times 10^3$ : (a)  $\theta=0^\circ$  (b)  $\theta=15^\circ$  (c)  $\theta=30^\circ$  (d)  $\theta=45^\circ$

Fig. 7은  $Re=2.3 \times 10^2$ 일 때  $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 에서의 혼합대류의 속도장을 계조치상호상관법을 적용하여 속도벡터로 나타낸 것이다. 입구 유속의 증가로  $\theta=0^\circ$ 인 경우는 자연대류에 의해 생성된 셀은 상하벽면으로 이동하여 전반적으로 사인곡선형 유동형태를 나타내고 셀의 수가 증가함을 알 수 있다.  $\theta=15^\circ$ 인 경우는 여전히 사인곡선형 유동을 나타내지만  $\theta=0^\circ$ 인 경우와 비교하면 하부면 부근의 셀은 거의 파괴되고 상부면 부근에서만 셀 유동이 존재함을 알 수 있다. 이것은 기울기가 증가함으로써 x 방향 중력의 영향이 증대되기 때문이다. 기울기가 더욱 증가하여  $\theta \geq 30^\circ$ 에서는 입구영역의 평행 유동은 점차적으로 소멸되며 평판 내에서의 최대 속도크기는 점차적으로 평판 아랫부분으로 이동하면서 유체가 밖으로 유출되고 평판 윗부분에서는 하나의 셀 모양을 형성하는 것을 알 수 있다.

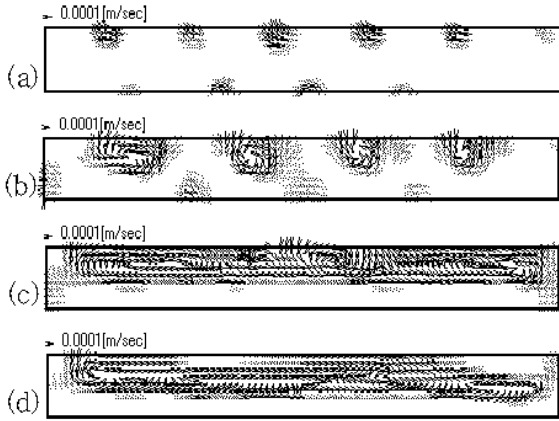


Fig. 7 The velocity vectors for various angle of inclination at  $Re=2.3 \times 10^{-2}$ ,  $Ra=8.57 \times 10^3$ :  
(a)  $\theta=0^\circ$ , (b)  $\theta=15^\circ$ , (c)  $\theta=30^\circ$ , (d)  $\theta=45^\circ$

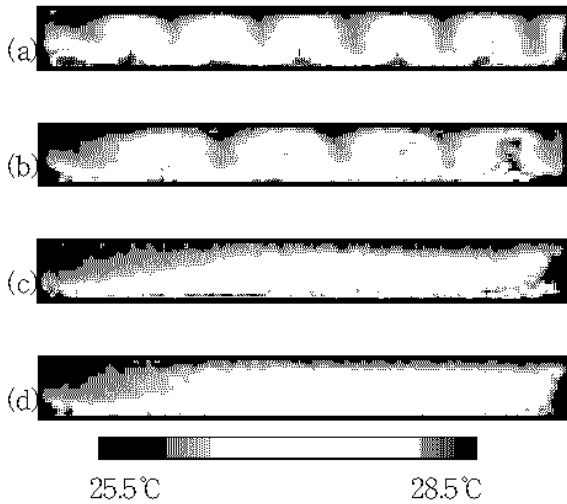


Fig. 8 The temperature patterns for various angle of inclination at  $Re=2.3 \times 10^{-2}$ ,  $Ra=8.57 \times 10^3$ :  
(a)  $\theta=0^\circ$ , (b)  $\theta=15^\circ$ , (c)  $\theta=30^\circ$ , (d)  $\theta=45^\circ$

Fig. 8은 동일조건 하에서 뉴럴 네트워크를 이용하여 색 온도로 변환한 온도분포이다. 입구 유속의 증가로 Fig. 6의 경우보다 Rayleigh Be'nard 셀 유동의 전형적인 온도분포 형태의 파괴가 뚜렷하고 입구 유속의 증가에 의해 열전달이 촉진됨을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은  $\theta=15^\circ$ 와  $45^\circ$ 일 때  $4.0 \times 10^{-3} \leq Re \leq 6.2 \times 10^{-2}$ 에서 혼합대류의 속도장을 속도벡터로 나타내었다.  $\theta=15^\circ$ 인 경우,  $Re=4.0 \times 10^{-3}$ 와  $1.3 \times 10^{-2}$ 에서는 입구 유속이 상대적으로 작기 때문에 부력에 의한 자연대류가 전체 유동장에서 지배적인 작용을 하지만  $Re=2.3 \times 10^{-2}$ 인 경우 입구 유속의 증가로 인해 입구 영역에서는 평행 유동을 하고 자연대류의 영향이 점점 작아져서 하부 면에서는 셀 유

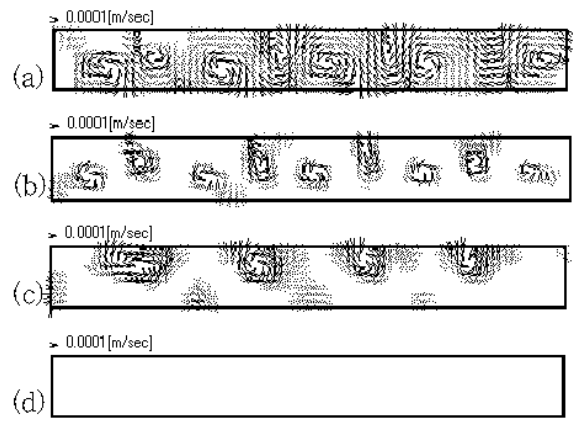


Fig. 9 The velocity vectors for various Reynolds number at  $\theta=15^\circ$ ,  $Ra=8.57 \times 10^3$ :  $Re=$   
(a)  $4.0 \times 10^{-3}$ , (b)  $1.3 \times 10^{-2}$ , (c)  $2.3 \times 10^{-2}$ , (d)  $6.2 \times 10^{-2}$

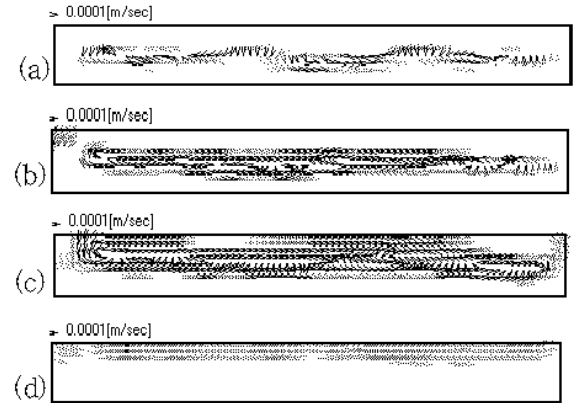


Fig. 10 The velocity vectors for various Reynolds number at  $\theta=45^\circ$ ,  $Ra=8.57 \times 10^3$ :  $Re=$   
(a)  $4.0 \times 10^{-3}$ , (b)  $1.3 \times 10^{-2}$ , (c)  $2.3 \times 10^{-2}$ , (d)  $6.2 \times 10^{-2}$

$\theta=45^\circ$ 인 경우,  $Re=4.0 \times 10^{-3}$ ,  $1.3 \times 10^{-2}$ ,  $2.3 \times 10^{-2}$ 인 경우 유동이 전반적으로 한 개의 큰 셀 모양을 이루고 있으나 입구 유속이 더욱 증가하여  $Re=6.2 \times 10^{-2}$ 인 경우에는 셀 모양은 없어지면서 전부 한 방향의 평행 유동을 하는 것을 알 수 있다(Fig. 10).

Fig. 11과 Fig. 12는 경사각  $\theta=15^\circ$ 와  $45^\circ$ 일 때, y 방향 중간부분에서의 여러 가지 Re 수에 따른 V속도를 정량적으로 나타내었다. 경사각  $\theta=15^\circ$ 인 경우(Fig. 11), 입구 유속이 상대적으로 작을 때에는 ( $Re=1.3 \times 10^{-2}$ ,  $2.3 \times 10^{-2}$ ) y방향의 속도 V는  $\pm 0.0001 \sim 0.00015$  m/s 부근에서 주기적으로 변화하면서 사인곡선형 유동형태를 나타내지만, 입구 유속이 증가하면 사인곡선형태는 파괴되고  $Re=6.2 \times 10^{-2}$ 일 때에는 V속도는 거의 0에 접근하여 U속도만 존재하는 한 방향의 유동형태를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 경사각이 증가하여  $\theta=45^\circ$ 인 경우(Fig.

12), Re 수에 관계없이 입출구 부분을 제외한 전부 영역에서의 V속도는 0에 접근하는 한 방향의 유동 형태를 나타는 것을 알 수 있다.

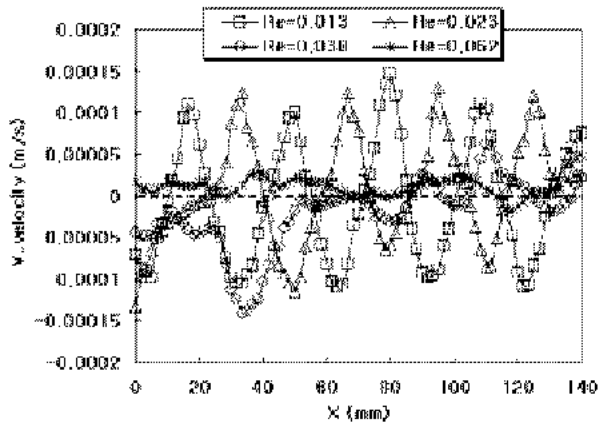


Fig. 11 The V-velocity profiles for various Reynolds numbers at  $y=H/2$ ,  $\theta=15^\circ$

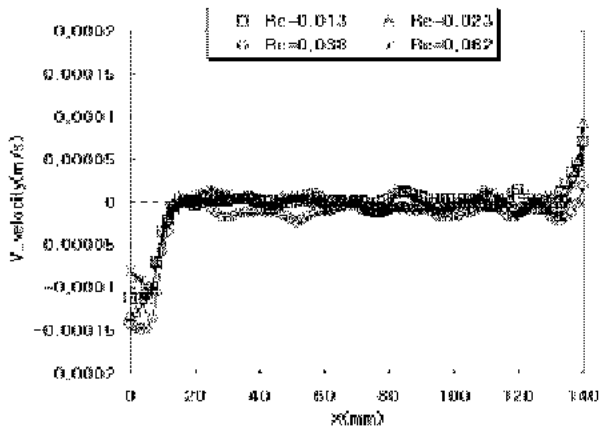


Fig. 12 The V-velocity profiles for various Reynolds numbers at  $y=H/2$ ,  $\theta=45^\circ$

## 6. 결 론

온도차를 갖는 경사진 상하부 평행평판 내의 혼합대류 열전달 특성을 감온 액정을 사용하여 실험하고, 입구유속과 경사각이 혼합대류에 미치는 영향을 검토한 결과 전 유동장 영역의 속도장과 온도장을 동시에 가시화 하고 정량적으로 측정할 수 있어 감온액정이 열 유체의 유동 및 열전달 실험에 매우 유용함을 확인할 수 있었다. 입구 유속과 경사각은 유동형태와 열전달 특성에 크게 영향을 미쳐 입구 유속과 경사각이 증가할수록 열전달은 촉진되었으며, 경사진 평행평판 내의 혼합대류 유동 형태를 다음과 같이 크게 세 가지 유동형태로 분류할 수 있었다.

- 1) 다중 셀을 형성하는 유동
- 2) 단일 셀을 형성하는 유동
- 3) 한 방향의 평행 유동

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 첨단 에너지기계 연구센터의 지원(과제번호: R12-2003-001-03006-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. C. Gau, Y. C. Jeng and C. G. Liu, 2000, "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
2. K. S. Chiu, J. Richards, 2001, "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
3. N. Ramachandran, B. F. Armaly and T. S. Chen, 1987, "Measurements of Laminar Mixed Convection Flow Adjacent to an Inclined Surface," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 146-150
4. T. S. Chen, E. M. Sparrow and A. Mucoglu, 1977, "Mixed Convection in Boundary Layer Flow on a Horizontal Plate," ASME Journal of Heat Transfer, February, pp. 66-71
5. 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, pp. 1307-1318
6. F. P. Incropera, A. L. Knox and J. R. Maughan, 1987, "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
7. F. S. Lee and G. J. Hwang, 1991, "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

8. M. Ozawa, U. Muller, I. Kimura and T. Takamori, 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
9. I. Kimura, T. Hyodo and M. Ozawa, 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