

# 격판이 존재하는 정사각형 밀폐공간내의 자연대류에 대한 PIV 계측

김광희\* · 김유곤\*\*

## PIV Measurement of Natural Convection in a Square Partitioned Enclosure

Kwang-Hee Kim, You-Gon Kim

**Key Words:** Natural Convection(자연대류), Square Enclosure(정사각형 밀폐공간), Horizontal partition(수평격판), PIV(입자영상유속계), Cross-correlation(상호상관)

### Abstract

The paper presented some results of a experimental study of natural convection in partitioned 2D square enclosure. The square enclosure consist of two adiabatic vertical walls and the upper cold and the lower hot walls. A partition is positioned perpendicularly at the center of left vertical insulated wall. The PIV measurements were performed with the variations of the partition length and inclination of enclosure. The working fluid is water with a Prandtl number of 6.996 at 20 °C temperature. A captured images were calculated by using a Cross-Correlation(Multi-frame/Single-exposure) method.

#### 기호설명

H : 밀폐공간의 높이(특성길이)

W : 밀폐공간의 폭길이

L : 격판의 길이

Ra : Rayleigh 수

$T_h$  : 가열면의 온도

$T_c$  : 냉각면의 온도

$\Delta T$ : 양단의 온도차

$\Delta t$ : 각 프레임의 시간간격

$\phi$  : 밀폐공간의 경사각

t : 격판의 두께

### 1. 서 론

밀폐공간내에서의 자연대류에 관한 연구는 태양열 집열장치, 주거공간에서의 냉난방 문제, 축열조 및 전자장비의 냉각문제 등 여러분야에서의 응용으로 많은 연구가 되어왔다.

밀폐공간의 종횡비, 경사각, 가열 및 냉각면의 위치 및 크기 변화, Rayleigh수 등의 변화에 따른 연구가 다각적으로 진행되어 왔으며 최근에는 밀폐공간내에 격판이 설치된 경우에 대하여 유동현상의 변화 및 전열량의 변화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Nansteel과 Greif<sup>1)</sup>는 밀폐공간내의 상부단열벽에 수직격판이 있는 경우에 대하여 유동가시화 실험을 하였으며 K.hanjalic<sup>2)</sup>등은 Nansteel와 같은 조건에 대하여 높은 Rayleigh수에서 수직격판의 길이 변화에 따른 수치계산을 하였다.

Bajorek<sup>3)</sup>등은 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 상하 단열벽에 2개의 수직격판이 있는 경우에 대하여 실험적인 연구를 수행하였다. Lee<sup>4)</sup>등은 상하의 수평전도벽이 존재하고 그곳에 격판이 부착되어 있는 경우에 대하여 수치해석과 간섭계를 이용한 실험을 병행하여 전도와 자연대류가 결합된 시스템에 대한 연구를 하였다.

\* ) 회원, 전남대학교 대학원

\*\* ) 회원, 전남대학교 기계공학과

위의 실험들은 모두 상하가 단열되고 양벽이 가열, 냉각되며 격판이 존재하는 경우에 대한 연구들이었다. Chung 등<sup>5)8)</sup>은 밀면이 고온, 윗면이 저온이며 양쪽 수직벽면이 단열인 정사각형 밀폐 공간에서 한쪽의 단열된 수직벽의 중앙에 평행하게 격판이 설치된 경우에 대하여 다각적인 연구를 수행하였다. Chung 등은 격판이 설치된 밀폐 공간내에서 자연대류 유동이 일정한 주기로 유동 방향을 바꾸어 가는 것을 가시화 실험을 통하여 관찰하였고 이를 수치해석을 통하여 재규명하였다. 또한 동일한 경계조건에 대하여 밀폐공간의 상부 냉각면이 일부 개방된 공간 내에서 발생하는 자연대류 문제를 내부 유체가 공기인 경우에 대하여 수치적인 연구를 하였으며 밀폐공간의 경사와 수평격판의 각도를 변화시켜가며 유동 및 열전달 특성을 수치적으로 연구하였다.

위의 Chung 등의 연구는 유동가시화 및 수치계산에 의한 결과이므로 본 논문에서는 PIV 기법을 이용하여 밀폐공간내에 격판이 설치된 경우의 유동특성을 실험적으로 분석하였다. 실험장치는 상부 냉각, 하부 가열면이며 양측면이 단열 되었으며 단열면의 중앙에 수평격판이 설치되어 있는 Chung 등의 연구와 동일한 조건을 갖추고 있다. 각각의 실험은 격판의 길이와 밀폐공간의 경사를 변화시켜가며 행하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 밀폐공간은 종횡비(W/H)가 1인 정사각형 단면으로  $H=W=60\text{ mm}$ 이며 폭방향 길이는 300 mm 으로 2차원 유동에 충분히 가깝도록 설계하였다. 상부 냉각면과 하부 가열면은  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  정도의 오차를 가지는 항온조를 사용하여 일정온도의 물을 공급하여 벽면의 온도를 일정하게 유지시켰으며 양측 단열벽은 두께 10 mm의 아크릴수지(열전도율  $0.19\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ )와 외부에 열전도율이  $0.03\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  인 polystyrene foam 을 붙여 단열하였다. figure 1에 본 실험에 사용된 실험장치의 계략도를 나타내었다.

figure 2는 실험에 사용된 PIV 전체 시스템이다. 광원인 Ar-ion레이저(2 W)에서 나온 빔은 광섬유를 통해 실험장치까지 전달되고 전달된 빔은

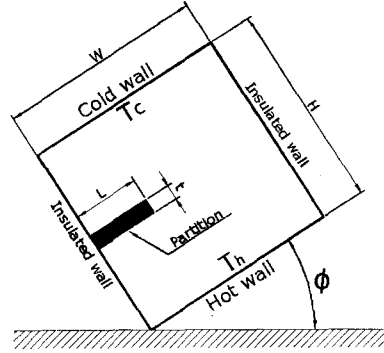


Fig. 1 Schematic diagram of enclosure

빔확장기(beam expander)에 의해 평면광(laser-sheet)을 형성한다. 빔확장기로부터 밀폐공간의 측정부까지의 거리는 200 mm이며 측정부에서의 빔의 두께는 1 mm이다. 평면광은 밀폐공간의 폭방향 중앙부에 조사되어지며 작동유체인 물속에 포함되어 있는 추적입자(Tracer particles)에 의해 가시화 된다. 실험에 사용된 추적입자는 polyamid ( $50\text{ }\mu\text{m}$ )이다. 가시화된 영상은 평면광에 수직인 방향에서 디지털CCD카메라(Kodak Es 1.0)에 의해 획득되어진다. 실험에 사용된 디지털CCD카메라는  $1018 \times 1008$  화소를 가지고 있으며 획득된 입자영상을 컴퓨터에 내장된 영상 보드(frame grabber: Matrox Mil-light)로 전송한다. 영상보드에 의해 입자영상은 디지털신호로 변환되어 컴퓨터에 저장되어진다.

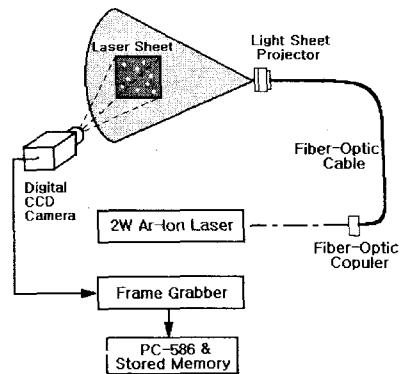


Fig. 2 Schematic diagram of the PIV system

## 2.2 실험 방법

각각의 실험은 일정 Rayleigh수( $6.2 \times 10^6$ )에서 격판의 길이와 밀폐공간(enclosure)의 경사를 바꾸어 가며 행하였다. 실험에 사용된 작동유체는 이차증류한 순수한 물이며 추적입자로는 밀도가 1.03인 Polyamid( $50 \mu\text{m}$ )를 채택하였다. 가열면의 온도는  $21^\circ\text{C}$ , 냉각면의 온도는  $19^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되어 양단의 온도차는  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ 로 일정하다. 격판의 두께(t)는 0.1H 이며 격판의 길이(L)는 0.4H, 0.6H, 0.8H 세가지이다. 이 세가지의 경우에 대하여 각도를  $10^\circ$  에서  $90^\circ$  까지 변화시켜가며 측정하였다.

모든 가시화 영상은  $\Delta t = 0.3 \text{ sec}$ 의 간격으로 단일노출/다중프레임법으로 20 분동안 디지털 CCD 카메라로 측정되었으며 CCD의 노출 시간은 30 msec로 일정하게 유지하였다. 획득된 가시화 영상은 영상보드에 의해 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터로 저장되어 진다.

## 3. PIV계측 기법을 이용한 화상처리

### 3.1 영상 전처리(image pre-processing)

Digital PIV속도측정기법을 위한 입자영상은 매우 좁은 시간 간격을 주어 입자영상에 streak가 형성되지 않게 하고, 충분한 입자 쌍이 분포되도록 2개의 입자영상사이의 시간간격( $\Delta t$ )을 조절해야 한다. 특히 입자 쌍의 거동이 직선 등속도 이동한다고 가정할 수 있도록 시간간격은 충분히 짧아야 한다. 본 자연대류 실험에서 입자의 이동 속도는 최대  $10 \text{ mm/sec}$  이하 이므로  $\Delta t = 0.3 \text{ sec}$ 에서 최대변위는  $3 \text{ mm}$  이하가 된다. 20분동안 측정된 영상들중 5분간격으로 영상데이터를 선택하여 4개의 순간속도장을 계산하였다. CCD 카메라 센서 자체의 암전류(dark current)노이즈와 입자산란광의 불균일성에 의해서 입자화상은 많은 노이즈를 내포하고 있기 때문에 히스토그램 등가화(histogram equalization)과정을 거쳐서 고주파 성분의 노이즈를 제거하였으며 threshold 값의 변화를 통해 낮은강도의 산란광을 제거하였다.

### 3.2 알고리즘

Multi-frame/Single-exposure 기법은 개개의 입

자영상을 각각 다른 프레임에 취득하고, 시간간격  $\Delta t$ 로 취득한 2개의 입자영상에서 상호상관함수(cross-correlation function)를 계산하여 유동 속도벡터를 구하는 방법이다. 이는 유동방향의 모호성이 발생하지 않는 장점이 있으므로 현재 가장 많이 쓰이는 기법이다. 본 논문에서는 탐색영역(interrogation window)의 크기를  $61 \times 61 \text{ pixel}$ 로 하여 계산을 수행하였다. 탐색영역내의 유효입자수는 10개로 하였으며 탐색영역내에서 허용하는 입자의 최대 변위는 탐색영역의  $1/3$ 로 제한하였다.

### 3.3 Data 후처리(post-processing)

PIV 속도장 측정에 있어서 유동의 3차원성으로 인하여 시간간격  $\Delta t$  사이에 측정영역 내부로 새로운 입자가 들어오거나 기존 입자가 나감으로써 오류벡터가 존재한다. 이런 오류벡터를 수작업으로 제거하는 것은 주관적인 요소의 개입 및 비효율적이므로 자동으로 오류벡터를 제거할 수 있는 알고리즘이 필요하게 된다. 본 논문에서는 분석하고자 하는 속도벡터와 가장 인접한 8개의 속도벡터의 평균을 비교함으로써 그 차이의 절대값이 일정값을 넘을 경우 오류벡터로 처리하도록 하였다. 원시 속도벡터장에서 오류벡터해석을 통해 모든 오류속도벡터를 제거하고 난후 제거된 벡터들의 위치에 새로운 속도벡터값을 대체삽입하기 위해 Lagrange polynomial을 이용한 데이터 보간법을 행하였다.

## 4. 실험 결과

밀면이 고온, 윗면이 저온으로 유지되고 양쪽 수직벽이 단열인 정상각형 밀폐공간내의 한쪽 측벽에 수평격판이 부착되어 있는 경우 이 격판에 의해서 정상상태의 자연대류 유동이 격판선단을 따라 상하로 방향이 교차하는 진동현상의 특성에 대해서 정등의 연구에서 밝혀진바 있다. 본 연구에서는 격판이 공간내의 중간높이에 부착되어 있을 때 밀폐공간이 경사되는 경우에 대한 자연대류유동특성을 PIV를 이용하여 측정하였다. 일정 정상각에서 자연대류의 진동현상이 발생하므로 진동현상이 발생하는 경사부근에서는 20분동안 디지털CCD를 통해 영상을 저장하였으며 진동현

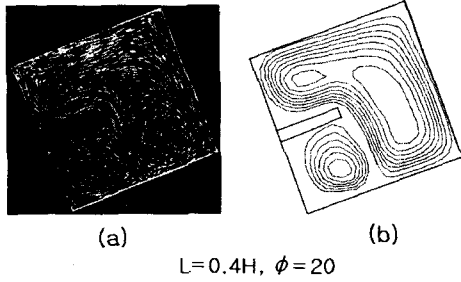


Fig. 3 (a) streaking image (b) streamline

상이 없는 경사각에서는 2분동안 측정하였다. 각 경우에 대하여 경사별로 측정을 하였다. figure 3에 유동가시화 이미지와 알고리즘에 의해 구한 유선을 나타내었다. figure 3 (a)의 이미지는  $\Delta t = 0.3 \text{ sec}$  간격의 이미지를 중첩하여 얻은 결과이며 (b)는 탐색영역의 크기를  $61 \times 61$ 로 하여 계산한 결과이다. 격판의 길이가  $0.4H$ 인 경우에 대하여  $10^\circ \sim 90^\circ$ 로 경사각을 변화시켜가며 실험을 행하였다.

정동의 연구에서 나타난 자연대류의 진동현상이 경사각  $10^\circ$ 에서 나타났다. 이 진동유동의 발생원인은 상부 혹은 하부공간에서 흐름이 정체될 때 상하부의 등온면과의 열교환으로 유체 내부의 에너지가 증가하거나 감소하게 되어 부양력과 하강력이 발생하게 되어 발생하는 것으로 생각된다. 시간에 따른 유동의 변화과정을 figure 4에 나타내었다.

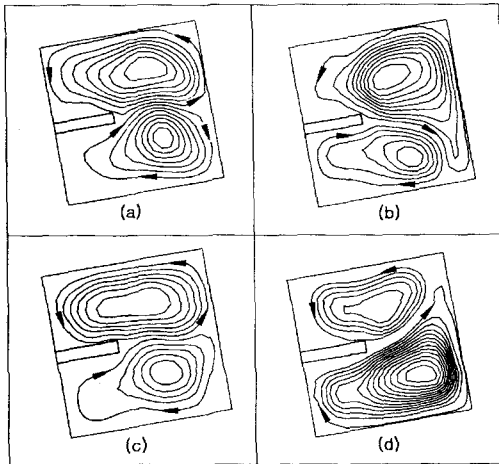


Fig. 4 Streamlines of oscillating flow  
(  $L= 0.4H, \phi = 10^\circ$  )

격판 상하부에 두 개의 순환유동이 형성되며 시간에 따라 그 크기가 변화하고 있다. figure 4의 유선은 시간에 따른 대표적인 유동을 나타낸 것이다. 유동의 형태 및 시간에 따른 변화는 일정한 주기를 가지고 있지 않고 불규칙적인 주기를 나타내었다. 격판 상하부의 두 개의 순환유동이 시간에 따라 팽창 및 축소를 반복하며 계속적인 변화를 나타내며 그 방향은 일정하게 유지되었다. 격판의 길이가  $0.6H, 0.8H$ 의 경우에서도 경사각  $10^\circ$ 에서 진동현상이 나타났다. 격판의 길이가 증가함에 따라 유동억제 효과가 커지게 되어 격판 상하부 공간에서는 닫힌 유동특성을 보이게 되고 진동유동은 격판 선단부분에서 작은폭의 상승 하강을 반복하는 형태를 보였다. 격판의 길이가 짧을 경우 일정시간내에 발생하는 진동횟수는 증가하였으며 격판의 길이가 증가함에 따라 진동횟수는 감소하는 경향을 보였다.

밀폐공간의 경사각이  $20^\circ$  이상으로 증가하게 되면 figure 3에서의 결과와 같이 진동현상이 사라지게 되고 시간에 따라 변화하지 않는 정상상태에 이르게 된다. 경사각이  $20^\circ$ 에 이르면 격판선단을 따른 하강유동이 강해져 격판 하부의 순환유동은 크기가 감소되며 경사각이  $30^\circ$ 로 증가하면 격판선단으로 이동하여 주순환유동으로 끌려가게 된다. 경사각  $20^\circ$  이상에서의 실험결과를 figure 5에 나타내었다.

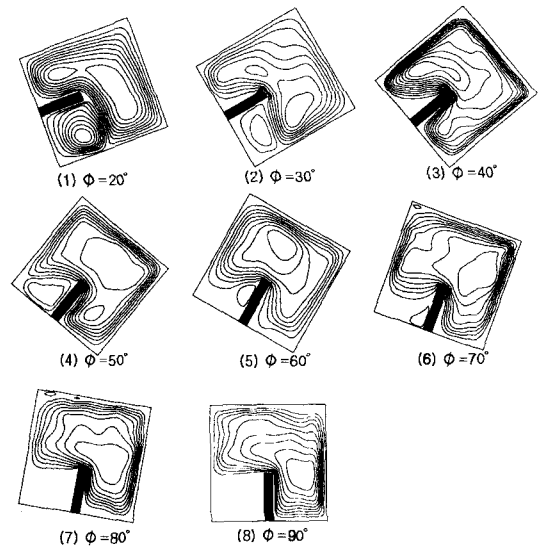


Fig. 5 Streamlines for various inclination angles  
(  $L= 0.4H$  )

경사각  $40^\circ$  에서는 격판하부의 순환유동이 주순환유동 내부로 포함되어 완전한 단세포 유동이 형성되며 순환유동이 전영역에 걸쳐 활발하게 나타났다. 경사각이 더욱 증가 하면 주순환유동은 격판상부의 하단까지 영향을 미치지 못하고 격판 선단에서 하강하게 된다. 경사각  $90^\circ$  의 결과에서 보듯이 냉각면방향 하부 유동은 거의 정지상태에 이르게 되고 격판 선단을 따라 하강유동이 발생하여 가열면쪽으로는 주순환유동이 형성된다.

경사각  $50^\circ \sim 70^\circ$  에서의 결과를 살펴보면 주순환 유동의 내부영역유동이 약해지게 되어 벽면 근접부분의 경계층 유동만이 활발히 발생하는 것을 볼 수 있다. 경사각  $30^\circ$  에서의 결과와  $50^\circ$  의 결과를 속도벡터로 나타내어 figure 6에서 비교하였다. 경사각  $30^\circ$  에서 내부유동이 가장 활발하였고 경사각  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  에서 내부유동의 정지영역이 넓어짐에 따라 벽면의 경계층유동이 활발하게 나타났다. 경사각이 더욱 증가함에 따라 경계층유동 마저 크기가 현저하게 감소하였다.

격판길이  $0.6H$ 에서도  $0.4H$ 와 같은 경향을 나타내고 있다. figure 7에 경사각에 따른 결과를 나타내었다. 경사각  $40^\circ$  에서의 결과를  $L = 0.4H$ 와 비교해 보면 냉각면방향의 하강 유동이 아주 작아지고 격판선단을 따라 가열면쪽으로 하강유동이 빨리 형성되는 것을 볼 수 있다. 격판의 길이 증가에 의해 유동역제효과가 나타나 전체적인 유동속도는 크게 감소하였다.

$L = 0.8H$ 에서의 결과를 figure 8에 나타내었다. 경사각  $30^\circ$  에서 다른 격판길이에서와는 다른 형태의 유동분포를 보이고 있다. 격판 선단을 따라 가열면으로의 하강유동이 더욱 빨리 형성 되었으며 냉각면 방향의 유동은 거의 전영역에 걸쳐 안정된 상태를 나타내었다. 경사각  $90^\circ$  에서는 가

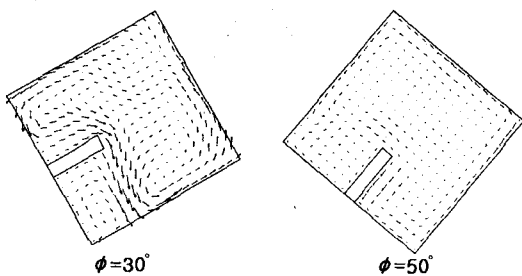


Fig. 6 velocity vector for inclination angles (  $L = 0.4H$  )

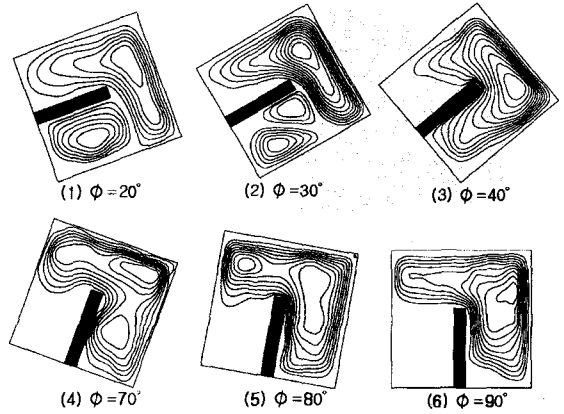


Fig. 7 Streamlines for various inclination angles (  $L = 0.6H$  )

열면쪽의 순환유동이 격판 선단을 거의 넘지 않고 국부적인 단일 순환유동을 나타내었다. 격판의 유동제한효과에 의하여 모든 경사각도에 대하여 전체적인 유동속도는 가장 작게 나타났다.

위의 실험들에서 나타나는 공통점들을 요약하면 다음과 같다.  $10^\circ$  에서는 모두 진동현상이 발생하였으며 단위시간내 진동의 횟수는 격판의 길이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 낮은 경사각에서는 주순환유동과 격판하부의 재순환유동이 생기는 유동형태를 나타내고 있으며, 경사각의 증가에 의해서 격판하부의 재순환유동은 사라지고 주순환유동이 공간의 전역으로 확장되어

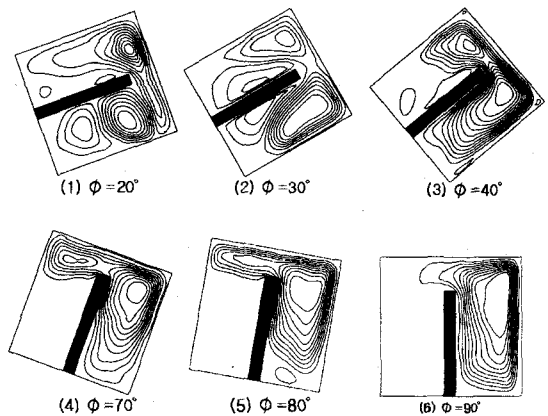


Fig. 8 Streamlines for various inclination angles (  $L = 0.8H$  )

안정된 단세포유동으로 발달하였다. 그러나 경사각을 계속 증가시키면 격판 상부의 정지영역이 격판선단 방향으로 이동하며 확장되고 공간내 전체적인 유동속도가 현저하게 약해지는 경향을 나타내고 있다.

## 5. 결 론

밀면이 고온, 윗면이 저온으로 유지되고 양쪽 수직벽이 단일인 정사각형 밀폐공간내의 한쪽 측벽의 중앙에 수평격판이 부착되어 있는 경우에 대한 자연대류 유동을 PIV 측정 기법을 사용하여 실험을 하였다. 동일한 온도조건에서 격판의 길이와 밀폐공간의 경사각을 변화시켜가며 얻은 순간속도장으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 경사각  $10^\circ$  에서 격판의 길이가  $0.4H$ ,  $0.6H$ ,  $0.8H$ 인 모든 경우에 대하여 시간에 따라 유동장이 변화하는 자연대류 진동현상이 발생하였으며 그 주기와 유동형태는 불규칙한 형태를 나타내었다. 또한 격판의 길이가 증가함에 따라 진동주기는 더욱 길어지는 경향을 나타내었다.

(2) 경사각이 증가하여  $20^\circ$  에 이르르면 진동현상이 사라져 정상상태에 도달하였다. 유동속도는 더욱 증가하였으며 주순환 유동과 격판하부의 재순환영역이 형성되었다.

(3) 재순환 영역은  $30^\circ$  이상에서 사라지고 전영역에 걸쳐 주순환 유동이 형성되었다.

(4) 경사각  $30^\circ \sim 40^\circ$  에서 주순환유동의 내부영역 유동이 가장 활발하였으며  $50^\circ \sim 60^\circ$  에서 내부영역 유동이 감소하고 벽면에 인접한 유동이 활발히 나타났다.

(5) 경사각이  $70^\circ$  이상으로 증가하면 격판상부의 정체영역이 더욱 넓어지고 벽면근처 유동마저 현저히 감소하여 전체적인 유동속도가 감소하였다.

각 실험들을 통하여 진동현상 및 전체적인 유동형상의 변화를 알아 볼 수 있었다.  $Ra$ 수와 격판 길이에 따른 진동주기의 변화와 진동현상이 사라지는 천이각도에 대한 세부적인 실험을 추후 추진할 계획이다.

## 참고문헌

- (1) Nansteel, M.W and Grief, R.,1981, " Natural Convection in Undivided and Partially Divided Rectangular Enclosure" , ASME J. Heat Transfer, Vol.103, pp.623-629
- (2) K.Hanjalic, S. Kenjeres, F. Durst,1996, " Natural Convection in partitioned two-dimensional enclosures at higher Rayleigh numbers" , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.39, No.7, pp.1407-1427
- (3) Bajorek, S.M., and Lloyd, J.R.,1982 " Experimental investigation of Natural Convection in Partitioned Enclosures" , ASME Journal of Heat Transfer, Vol.104, pp. 527-532
- (4) Taik Sik Lee, Sang Woo Lee, 1987, " Effect of Horizontal Conducting Walls and Partitions on Two-Dimensional Laminar Natural Convective Heat Transfer in a Rectangular Enclosure" , 공기조화.냉동공학회, 제16권, 제2호, pp.204-215
- (5) I. K. Chung, J. Y. Kim, H. J. Lee, 1991, " Partition-Induced Oscillatory Motion of Natural Convection in Square Enclosure Heated from Below" , Dept. of Precision Mechanical Engineering, 연구보고 제19권, 제 1호, pp.55-62
- (6) J. S. Kim, I. K. Chung, D. J. Song, 1993, " Oscillatory Motion of Natural Convection in a Square Enclosure with a Horizontal Partition" 공기조화.냉동공학회, 제5권, 제4호, pp.285-294
- (7) J. S. Kim, I. K. Chung, D. J. Song, 1995, " Natural Convection in a Partially Opened Enclosure with a Horizontal Divider" , 공기조화.냉동공학회, 제7권, 제3호, pp.528-537
- (8) I. K. Chung, D. J. Song, J. S. Kim, 1994, " Effects of Inclination of Enclosure and Partition on Natural Convective Heat Transfer in a Partitioned Enclosure" , 공기조화.냉동공학회, 제6권, 제3호, pp.302-314