

# 디지털 홀로그래픽 간섭계와 PIV 를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 열유동 해석

김 석\* . 이 상 준†

(2003 년 12 월 12 일 접수, 2004 년 2 월 8 일 심사완료)

## Diagnosis of HSC Convective Flow Using a Digital Holographic Interferometry and PIV System

Seok Kim and Sang Joon Lee

**Key Words :** Hele-Shaw Cell, Holographic Interferometry(홀로그래픽 간섭계), PIV(입자영상유속계), Thermal Fluid Flow(열유동)

### Abstract

Variations of temperature and velocity fields in a Hele-Shaw convection cell (HSC) were investigated using a holographic interferometry and 2-D PIV system with varying Rayleigh number. To measure quasi-steady variation of temperature field, two different measurement methods of holographic interferometry; double-exposure method and real-time method, were employed. In the double-exposure method, unwanted waves were eliminated effectively using a digital image processing technique. The reconstructed images are clear, but transient flow cannot be reconstructed clearly. On the other hand, transient convective flow can be reconstructed well using the real-time method. However, the fringe patterns reconstructed by the real-time method contain more noises, compared with the double-exposure method. Experimental results show a steady flow pattern at low Rayleigh numbers and a time-dependent periodic flow structure at high Rayleigh numbers. The periodic flow pattern at high Rayleigh numbers obtained by the real-time holographic interferometer method is in a good agreement with the PIV results.

### 기호설명

$b$  : HSC 의 너비  
 $d$  : HSC 의 폭  
 $h$  : HSC 의 높이  
 $n$  : 작동유체의 굴절률  
 $l$  : 홀로그래프의 강도분포  
 $K$  : 다공질 매체의 침투성  
 $m$  : 간섭무늬의 번호  
 $N_f$  : 간섭무늬의 개수  
 $S$  : 광원의 세기  
 $s$  : 간섭무늬 강도분포곡선의 기울기  
 $x$  : 좌표계

$Pr$  : Prandtl 수  
 $Ra$  : Rayleigh 수  
 $Ra_c$  : 대류유동 발생 임계 Rayleigh 수  
 $Ra_{osc}$  : 주기적 유동 발생 임계 Rayleigh 수  
 $\alpha$  : 열확산계수  
 $\beta$  : 열팽창계수  
 $\delta$  : 온도경계층의 두께  
 $\theta$  : 물체파와 참조파가 이루는 각도  
 $\kappa$  : 작동유체의 열전달계수  
 $\lambda$  : 레이저의 파장  
 $\nu$  : 동점성계수  
 $\tau$  : HSC 대류유동의 무차원 주기  
 $\Delta n$  : 굴절률의 변화량  
 $\Delta f$  : 프린지 이동량  
 $\Delta T$  : HSC 상하부 온도차  
 $\Delta T_f$  : 간섭무늬당 온도차

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

## 1. 서론

정상상태 열유동의 경우 측정센서를 일정 간격으로 이송(scanning)시켜 온도장과 속도장을 측정할 수 있다. 그러나, 비정상 열유동을 해석하기 위해서는 온도장과 속도장의 순간적인 변화를 계속하는 것이 필요하다. 최근 컴퓨터와 화상처리 기술의 비약적인 발전에 힘입어 속도계측의 경우, PIV(particle image velocimetry),<sup>(1)</sup> PTV(particle tracking velocimetry)<sup>(2)</sup>등과 같은 속도장 측정기술이 개발되어 활용되고 있다. 온도장 측정의 경우, 온도에 따라 색깔이 변화하는 감온성 액정(thermo chromic liquid crystal)<sup>(3)</sup>을 이용하는 방법과 LJF(laser induced fluorescence)<sup>(4)</sup>기법 등이 있는데, 이들은 주로 액체 유동의 온도장 측정에 사용되고 있다. 액체와 기체에 상관없이 열유동의 온도장을 측정할 수 있는 방법으로 참조파(reference wave)와 물체파(object wave)의 회절에 의한 간섭무늬를 이용하는 홀로그래픽 간섭계(holographic interferometry)가 있다.

Hele-Shaw<sup>(5)</sup>는 다공질 매체 내부의 점성유동과 Hele-Shaw Cell (이후부터는 HSC로 약칭 함) 내부의 등온 유동은 유사성을 가짐을 밝혔다. HSC 내부 유동의 온도와 속도분포를 결정하는 무차원 수로는 Rayleigh수(Ra), Prandtl수(Pr), 그리고 HSC의 종횡비(aspect ratio) 등이 있다. HSC 형상과 작동 유체가 정해지면 자동적으로 Pr수와 종횡비가 결정되며, 지배변수 Ra수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T h^3}{\alpha \nu} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 열확산계수,  $h$ 는 셀의 높이,  $\beta$ 는 열팽창계수,  $\nu$ 는 동점성계수,  $\Delta T$ 는 HSC 상하부 온도차를 나타낸다. Ra수가 임계(critical) 값( $Ra_c$ )보다 작은 경우 온도차에 기인한 부력이 점성력보다 작기 때문에 대류현상이 관찰되지 않고 주로 전도에 의해 열전달이 이루어진다.

HSC 상하부의 온도차를 준 정상상태(quasi-steady state)로 증가시켜  $Ra$ 보다 커지게 되면 열적 불안정성에 의해 HSC 내부에 대류현상이 형성되게 된다.  $Ra$ 수가  $Ra_c$ 보다 조금 큰 경우에는 정상상태(steady state)를 유지하다가 온도차  $\Delta T$ 를 보다 크게 하면 유동이 비정상 상태로 바뀌게 된다. 온도차가 더욱 커지면 비정상 상태의 유동에서 새로이 정상 상태의 유동으로 변화하게 된다.<sup>(6, 7)</sup> Koster 등<sup>(8)</sup>은 셀의 종횡비 변화에 따른 임계  $Ra$ 수를 구하였으며, 주기적인 대류유동이 셀 상하부의 온도경계층(thermal boundary layer)의

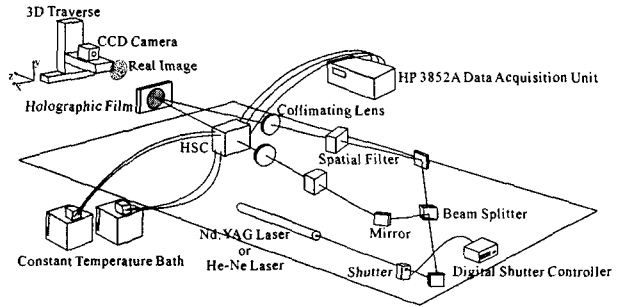


Fig. 1 Schematic diagram of holographic interferometry system

불안정성에 기인한다고 하였다. 또 다른 연구로 Bühler 등<sup>(9)</sup>은 홀로그래픽 간섭계를 이용하여 Ra수 변화에 따른 HSC 대류유동의 간섭무늬를 구하여 수치해석의 결과와 비교하였다. Ozawa 등<sup>(10)</sup>은 감온성 액정을 이용하여 HSC 내부 자연 대류의 온도와 유동장을 가시화하였으며, 윤정환 등<sup>(4)</sup>은 감온성 액정과 화상처리를 통해 HSC 내부 유동을 연구하였다. 최근 강민구 등<sup>(11)</sup>은 간섭계 영상해석을 위한 통합 프린지(fringe) 해석 시스템을 개발하였다. 김석 등<sup>(12)</sup>은 홀로그래픽 간섭계의 이중노출 방법과 실시간 방법을 이용하여 HSC 내부 온도장을 가시화하고 대류유동을 해석하였다.

본 연구에서는 홀로그램 간섭영상을 디지털 영상처리하여 정량적인 온도장 결과를 얻을 수 있는 디지털 홀로그래픽 간섭계를 개발하고 이를 2-D PIV 기법과 함께 HSC 내부 대류유동에 상호 보완적으로 적용하여 온도장 및 속도장 변화를 정량적으로 해석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 홀로그래픽 간섭계

본 연구에 사용된 HSC의 종횡비는 1이며 너비  $b=50$  mm, 높이  $h=50$ mm, 폭  $d=5$ mm이다. HSC의 앞과 뒷면은 두께 13mm의 BK7 Glass이고, 그 사이에 5mm 두께의 아크릴이 양측면에 샌드위치 모양으로 끼워져 있다. HSC의 상하부는 구리로 만들어진 블록과 단열을 위한 베이클라이트(bakelite)로 구성되어 있다. 그리고 HSC 좌우에 스티로폼(styrofoam)을 부착하여 단열조건을 만족하도록 하였다. 작동유체로는 Prandtl수가  $Pr=205$ 이고 동점성계수가  $\nu=20$ cs인 실리콘 오일을 이용하였다. 그리고 HSC 상하부의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 구리블록 내부 채널을 통해 물을 순환시켰다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 비축(off-axis) 홀로

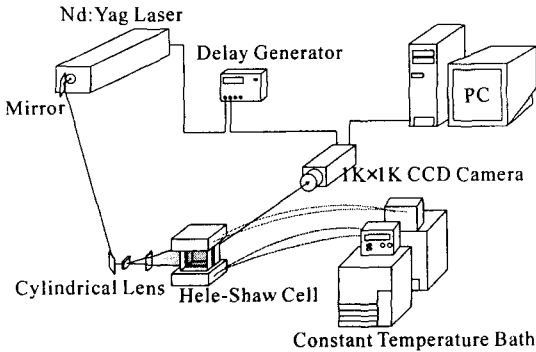


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for PIV velocity field measurements

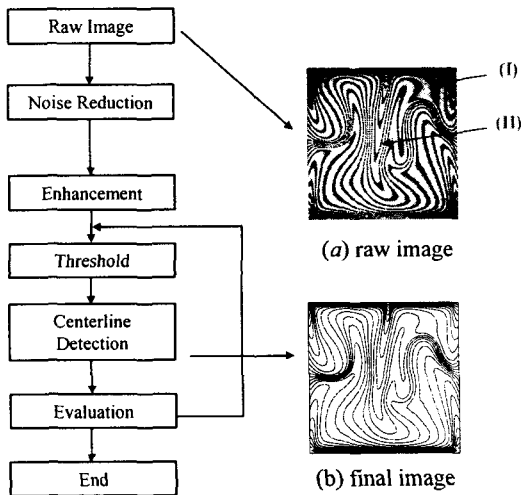


Fig. 3 Flow chart of digital image processing procedure

그래픽 간섭계의 구성도를 나타낸다. HSC 내부 열유동의 온도장은 홀로그래픽 간섭계 기법 중 이중노출(double-exposure)방법과 실시간(real-time) 방법 2가지를 병행하여 측정하였다. 먼저  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 의 정확도를 갖는 2개의 항온조(Neslab RTE-211, 221)로부터 공급된 물을 구리 블록 내부로 순환시켜 HSC 상하부 온도를 실험조건에 맞게 일정하게 유지시킨다. 조명장치로 Nd:YAG 레이저와 헬륨-네온(He-Ne) 레이저를 사용하였으며, 헬륨-네온 레이저의 경우 디지털 서터(Newport Model 846)를 사용하여 레이저 노출시간을 조정하였다. 레이저 빔은 광분리기(beam splitter)를 통해 참조파와 물체파로 나뉘어지고 공간필터(spatial filter)를 통해서 노이즈를 제거한 후 시준 렌즈(collimating lens)를 거쳐 평행광으로 만들어진다. 물체파는 HSC내부를 관통한 후 필름에 맺히고, 참조파는 바로 필름에 맺히게 된다. 이때 물체파와 참조파가 이루는 각도

는  $\theta=19^{\circ}$ 이고, 이들이 필름에 도달하는데 까지 걸리는 시간이 같도록 광분리기와 광학기구를 배치하였다. 본 연구에 사용된 홀로그래픽 필름(Slavich, VRP-M)은 3000 lines/mm의 해상도를 갖고 있다. 공간상에 재생된 간섭무늬는 3축 이송장치에 부착된 2Kx2K 픽셀 해상도의 CCD 카메라를 이용하여 획득하였다. 모든 광학장치는 진동 흡수 시설이 설치되어 있는 광학 테이블(optical table) 위에 설치하였다.

2.2 2-D PIV

HSC 내부의 복잡한 열유동의 유동특성을 이해하기 위하여 PIV 속도장 측정기법을 적용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 PIV 시스템의 구성을 나타낸 계략도이다. 증류수를 작동유체로 사용하였으며, 추적입자로써는 평균직경이 10 $\mu\text{m}$ 인 glass bead를 사용하였다. 입자영상의 취득은 1Kx1K 픽셀 CCD 카메라를 이용하였다.

2.3 디지털 영상처리

홀로그램에 의해 재생된 간섭영상은 스펙클 노이즈와 moirés, 영상 노이즈 등이 포함하고 있다. 이러한 노이즈는 간섭패턴 해석에 영향을 준다. 따라서 이들 불필요한 영상정보를 없애기 위해 디지털 영상처리 과정이 필요하다. 디지털 영상처리는 광학적 방식에 비해 매우 효과적이다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 디지털 영상처리 과정의 순서도이다. Fig. 3(a)의 영역(II)에서는 선명한 프린지를 볼 수 있지만, 영역(I)에서는 배경(background)과의 차이가 뚜렷하지 않아 간섭무늬를 배경과 분리하기가 쉽지 않다. 그래서, 각각의 간섭무늬를 분리하기 위하여 2차원 Gaussian 함수를 적용하여 간섭무늬의 테두리(edge)를 검출(detection)하였으며, Gaussian 함수를 연속적으로 적용하여 불필요한 배경이미지를 구하고 이를 본래 영상(raw image)로부터 제거하였다. 노이즈가 제거된 영상을 이용하여 정량적 해석을 하기 위해 고대비(threshold) 기능과 중앙선 찾기(centerline detection)과정을 거쳐 단일 곡선[Fig. 3(b)]을 획득하였다. 마지막으로 원래 간섭무늬와 획득한 단일 곡선의 차이를 최소화하는 반복과정을 거쳐 에러를 줄였다. 본 연구에서 수행한 디지털 영상처리과정을 통해 구한 단일 곡선과 원래 간섭무늬를 비교한 결과 그 차이는 약 0.91 픽셀이었다.

2.4 Abel Transform

언어진 홀로그램을 정량적으로 해석하기 위하여 본 연구에서는 Abel 변환기법<sup>(10)</sup>을 도입하였다. 프린지 이동량  $\Delta y$ 의 변화에 따른 굴절률의 변화  $\Delta n$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta n(x') = -\frac{\lambda}{\pi} \int_{x'}^{\phi} \frac{\partial \Delta f}{\partial x} \frac{dx}{(x-x')}$$
 (2)

여기서,  $x$ 는 좌표계,  $b$ 는 HSC의 크기를 나타낸다. 그리고 이동량  $\Delta f$ 는 간섭무늬의 강도분포로부터 구할 수 있다.

$$f_{of} = \begin{cases} 1-h(I_o) & \text{if } s_o \text{ is positive} \\ h(I_o) & \text{if } s_o \text{ is negative} \end{cases}$$
 (3)

$$\Delta f = \begin{cases} f_{of} + (m-1) + h(I) & \text{if } s \text{ is positive} \\ f_{of} + m - h(I) & \text{if } s \text{ is negative} \end{cases}$$

$$I = g(S), \quad S = g^{-1}(I)$$

$$h(I) \equiv 0.5 - (1/2\pi) \cos^{-1} \left[ \frac{g^{-1}(I) - S_1 - S_2}{2(S_1 S_2)^{1/2}} \right]$$
 (4)

여기서  $I$ 는 홀로그램의 세기분포,  $S$ 는 광원의 세기,  $m$ 과  $s$ 는 각 세부영역에서 강도분포 곡선의 기울기와 간섭무늬의 개수를 나타낸다. 그리고, 아래첨자 1과 2는 각각 물체파와 참조파를 나타낸다. 따라서, 굴절률의 변화량은 식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하여 얻을 수 있으며, 적분항을 유한함으로 치환하여 계산하였다.<sup>(13)</sup>

$$\Delta n_j = \frac{\lambda}{b} \sum_{k=0}^{N-1} a_{jk} \Delta f_k$$
 (5)

그런데, 식 (2) 계산시  $\Delta f$ 가 미분항으로 표현됨에 따라 오차(error)가 발생한다. 따라서, Abel 변환에 기인한 오차를 추정하기 위해, 본 연구에서는 다음의 식을 이용하였다.<sup>(13)</sup>

$$\delta(\Delta n_j) = (\lambda/b) \left[ \sum_{k=0}^{N-1} (a_{jk})^2 \right]^{1/2} \delta(\Delta f)$$
 (6)

여기서,  $\delta$ 는 Bockasten series의 추정오차이다. 본 연구에서 다른 실험조건에 대하여, 온도의 측정 오차는  $\pm 2.2\%$ 였으며,  $\Delta f$ 의 불확실도는  $\pm 0.028$ 이었다. 실험조건  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 인 경우에  $\Delta f$ 의 절대 크기는 약 9.2였으며, 온도값으로 환산하였을 때 전체 온도영역에 대하여  $\pm 0.18^\circ\text{C}$ 의 편차를 가졌다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 홀로그래픽 간섭계

Fig. 4는 온도차가 각각  $\Delta T = 1, 3, 5, 10, 20^\circ\text{C}$ 인 경우에 해당하는  $Ra = 0.6 \times 10^6, 1.9 \times 10^6, 3.2 \times 10^6, 6.35 \times 10^6, 1.27 \times 10^7$  조건에서 이중노출 방법으로 측정된 HSC 내부 온도장 결과이다. 일차 노출 후 HSC 내부에 열유동을 발생시키고, 약 9시간 경과 후 정상상태에 이르게 되면 이차 노출하였다. 왼쪽 그림은 재생한 간섭무늬이고 오른쪽은 각각의

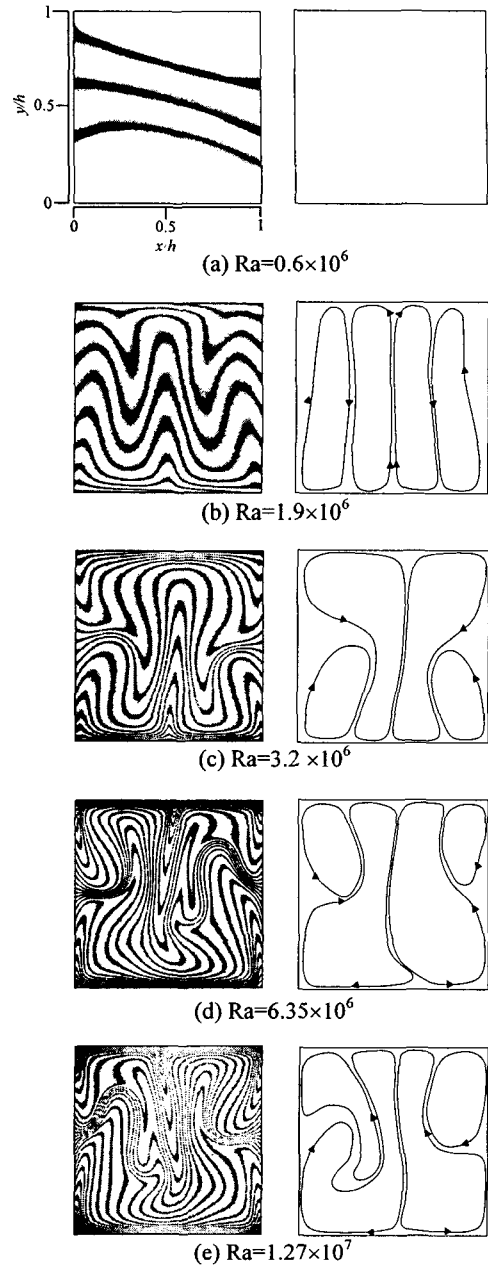


Fig. 4 Isothermal contours reconstructed using double-exposure method and corresponding streamline patterns

간섭무늬로부터 유선(streamline)형태를 스케치 한 것이다. 2차원 비압축성 점성유동의 경우, 온도와 와도(vorticity) 사이에는 상사성(analogy)이 존재하는데, 와도는 속도구배(VV)에 수직이므로 유선은 등온선에 수직하게 연결된다.

Fig. 4를 보면, 상하부 온도차가 커질수록 HSC 내부에서 온도구배가 증가하며 물체파와 참조파와

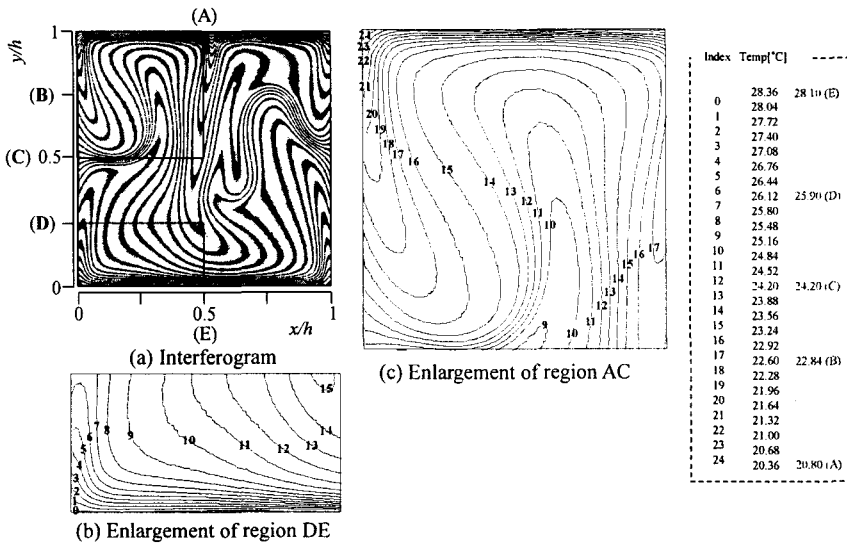


Fig. 5 Iso-thermal lines derived from interferogram at  $Ra=5.1 \times 10^6$

의 회절에 의한 간섭무늬 개수도 증가한다. Fig. 4(a)는 대류발생 임계  $Ra$ 수( $Ra_c=1.0 \times 10^6$ )보다 작은  $Ra=0.6 \times 10^6$  조건에서의 간섭무늬를 나타낸 것으로 열전달이 대부분 전도에 의해서 이루어지므로 간섭무늬가 거의 평행하게 나타난다.

Fig. 4(b)는 임계  $Ra$ 수보다 조금 큰  $Ra=1.9 \times 10^6$ 에 해당하는 것으로 좌우 대칭인 간섭무늬와 유선형태를 보여주고 있다. 이것은 Bühler 등<sup>(9)</sup>이 이야기한 4롤(roll) 모드에 해당하며, 수직 방향의 긴 와동(vortex)이 4개가 존재한다. 간섭무늬를 자세히 보면 HSC 중앙부분과 좌우 모서리 부분에서 부력의 영향으로 온도가 높은 아래 면으로부터 온도가 낮은 윗면으로 상승하는 유동이 생성되어 같은 온도의 등온선이 높은 위치에 놓여있다. 모서리와 중앙의 중간영역에서는 등온선 위치가 낮으며 양쪽에서 상승하는 유동에 기인해 하강하는 유동이 발생하게 되며 이로 인해 4개의 와동이 형성되는 것이다.

HSC 상하부 온도차가  $\Delta T=5^\circ C$ 인  $Ra=3.2 \times 10^6$ 에서의 실험결과(Fig. 4(c))는 4와동 모드(4 vortex mode)를 보여준다. Fig. 4(b)와 마찬가지로 셀 중앙을 기준으로 거의 좌우 대칭인 분포를 가지며, 중앙과 하부 좌우 모서리에서 벽을 따라 상승하는 유동이 형성된다. 그러나, 셀 상부에는 2개의 큰 와동이 존재하며 좌우 벽면을 따라 하강하던 유동은 셀 높이 1/2위치에서 분리되어 셀 중앙으로 하강하고 작은 크기의 와동이 셀 아래쪽 좌우 모서리에 형성되게 된다. HSC 상하부의 온도차가 보다 커짐에 따라 유동 형태는 준 정상상태로 전환된다.

Fig. 4(d)는 HSC 상하부 온도차가  $10^\circ C$ 일 때의

결과로 준 정상상태에 해당하며, Fig. 4(c)의 결과와는 반대로 2개의 작은 와동이 윗면 좌우 모서리에 위치하고 있다. 이때의  $Ra$ 수는 주기적인 대류유동이 발생하는 임계  $Ra$ 수( $Ra_{osc}=3.98 \times 10^6$ )보다 크게 되어 4개의 와동이 주기적으로 변화하는 모드(periodic 4 vortex mode)에 해당된다. 그림에서 보는 바와 같이 셀 하부에 형성된 와동이 상부 외곽에 형성된 와동에 비해 크며, 더 이상 좌우 대칭이 아닌 유동형태를 보여주게 된다. 온도가 높은 아래쪽 좌우 모서리에서는 부력의 영향으로 유동이 상승하며, 주위 유체와의 열전달에 의해 상승하는 유체의 온도는 점차 낮아져 셀 높이 1/2부분 부근에서 유동 박리가 발생하게 된다. 박리된 유동의 일부는 셀 상부 양쪽 모서리 쪽으로 움직여 작은 와동을 형성하고, 나머지는 셀 상부 중앙으로 모인 후 반대쪽에서 올라온 유동과 합쳐져 셀 중앙을 따라 바닥 면까지 내려오게 된다.

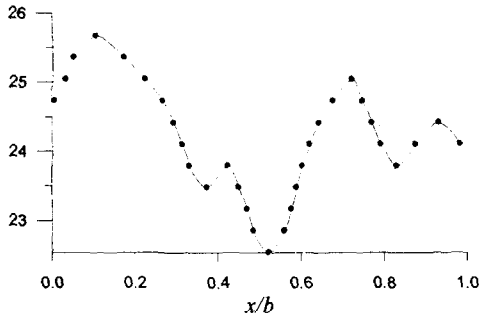
Fig. 4(e)는 HSC 상하부의 온도차가  $\Delta T=20^\circ C$ 일 때의 간섭무늬와 유선형태를 나타낸 것이다. 이것은 Fig. 4(d)와 같이 주기적 4 와동 모드에 해당하며 큰 온도차이에 기인하여 간섭무늬가 보다 많이 생기고 유동이 매우 활발함을 알 수 있다. 간섭무늬 하나에 해당하는 온도차를 나타내는 간섭무늬의 해상도(resolution)는 이론적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_r = \frac{\Delta T}{N_f} = \left( \frac{d \, dn}{\lambda \, dT} \right)^{-1} \quad (7)$$

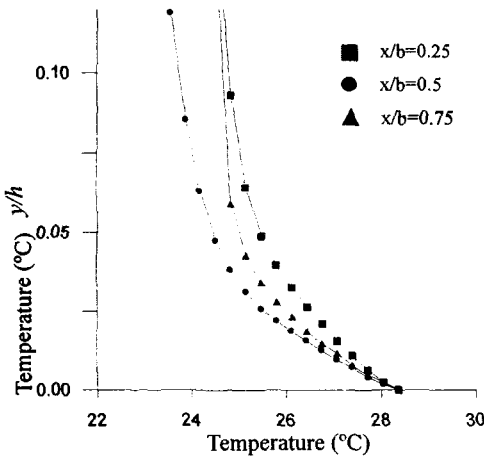
여기서,  $N_f$ 는 전체 간섭무늬의 개수,  $\lambda$ 는 레이저의 파장,  $n$ 은 작동유체의 굴절률이다. 식 (7)에 따르면

본 실험조건에서 간섭무늬의 해상도는 약 0.3°C이다. 따라서 재생된 영상에서 간섭무늬 하나는 대략 0.3°C의 온도차를 갖는다.

Fig. 5는 HSC 내부의 온도분포를 정량적으로 해석하기 위해  $Ra=5.1 \times 10^6$  실험조건에서 취득한 간섭무늬에 디지털 영상처리 기법을 적용하여 등온선을 추출한 결과이다. 확대된 등온선 그림에서



(a) Horizontal profile at  $y/h=0.5$



(b) Vertical profiles

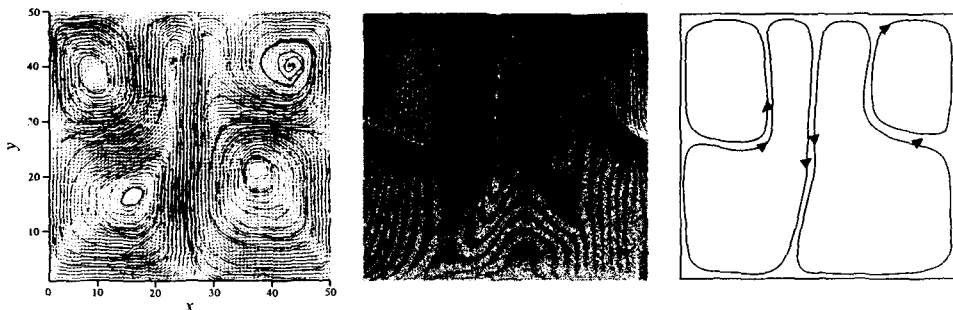
Fig. 6 Temperature profiles along horizontal and vertical lines at  $Ra=6.35 \times 10^6$

볼 수 있듯이 영상처리 기법을 통해 벽면 근처에서의 조밀한 등온선 분포를 정확히 구할 수 있었다. Fig. 5(a)에 표시된 (A)~(E)는 열전대가 설치된 위치로 식 (2)를 이용해 구한 해상도와 비교하였을 때 전체 온도차이에 대하여 약 2~4%의 측정오차를 가졌다.

Fig. 6은  $Ra=6.35 \times 10^6$ 에서 HSC 내부의 온도분포 변화를 정량적으로 비교하기 위해 Fig. 5의 온도장 결과로부터  $y/b=0.5$ ,  $x/b=0.25, 0.5, 0.75$  위치단면에서의 온도분포 곡선을 추출하여 나타낸 것이다. 여기서 보면, HSC 내부 유동이 매우 복잡하며 진동하는 유동형태를 가지며, 상단의 좌측 셀에 위치한 크기가 우측의 셀보다 큰 것을 알 수 있다. 또한, 셀 아래면에서 3개의 HSC 폭 방향 위치 단면에서의 온도분포를 보면, 일반적인 형태는 유사하나 각 위치에서의 온도 상승의 기울기가 다르다. 이러한 결과로부터, HSC 아래 면에서 형성된 온도경계층이 불안정함을 알 수 있으며, 이로 인해 주기적으로 진동하는 유동이 생성 된다고 생각된다.

3.2 2-D PIV

홀로그래픽 간섭계를 이용한 HSC 내부 온도장 결과를 검증하기 위하여 동일한 조건에서 PIV 기법을 이용하여 HSC 내부 유동의 속도장을 측정하였다. Fig. 7은  $Ra=6.35 \times 10^6$  조건에서 PIV 기법을 통해 얻은 속도장 결과와 실시간 홀로그래픽 간섭계로 얻은 간섭무늬를 함께 나타낸 것이다. 속도장 결과로부터 구한 유선과 간섭무늬로부터 스케치한 유선의 형태가 유사하며 HSC 내부에서 유동이 박리되는 위치가 거의 일치하고 있다. HSC 내부 중양을 따라 하강하는 유동이 좌우로 진동함에 따라, HSC 아래 부분에서 주기적으로 속도구배를 변화시키고 이에 따라 온도구배도 함께 변화시킴으로써 연속적으로 주기적인 유동 형태가 나타나게 된다. 실시간 홀로그래픽 간섭계로 측정된 HSC 내부유동의 변동



(a) Velocity field and streamline

(b) Interferogram and streamlines

Fig. 7 Comparison of results measured by PIV and holographic interferometer at  $Ra=6.35 \times 10^6$

주기는 62초이었는데, PIV 속도장 결과로부터도 같은 값을 얻었다.

결과적으로 홀로그래픽 간섭계에 의해 추정했던 주기적인 유동형태는 PIV 기법을 통해 획득한 속도장 결과와 잘 일치함을 보였다.

#### 4. 결론

디지털 홀로그래픽 간섭계와 PIV 기법을 HSC 내부 열유동에 적용하여 대류 유동의 유동구조와 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 디지털 영상처리 기법을 도입하여 획득한 홀로그램 간섭 영상의 노이즈를 제거하고 간섭무늬 영상의 질을 향상시킬 수 있었다.

HSC 내부 유동은 낮은 Ra 수에서 정상상태의 주기적인 유동 형태를 가지고 있으며, Ra 수가 커질수록 시간에 따라 변화하는 주기적인 유동 형태를 나타내었다. 홀로그래픽 간섭계에 의해 나타난 비정상 대류유동의 유동형태와 주기를 PIV 기법을 통해 획득한 속도장 결과로부터 확인할 수 있었으며 서로 잘 일치하였다. HSC 내부의 주기적인 유동은 HSC 내부의 경계면에서의 불안정한 온도 경계층에 의해 야기되는 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)사업의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

(1) Lee, S. J., 1999, *PIV(Particle Image Velocimetry) Velocity Field Measurement*, AFERC, POSTECH.  
 (2) Baek, S. J. and Lee, S. J., 1995, "Development of a New 2-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 19, No. 7, pp. 1741~1748.  
 (3) 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," *Journal of the Korea Society of*

*Mechanical Engineers (B)*, Vol. 20, No. 3, pp. 1114~1122.  
 (4) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2000, "Temperature Field Measurement of Non-Isothermal Jet Flow Using LIF Technique," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 24, No. 10, pp. 1399~1408.  
 (5) Elder, J. W., 1967, "Steady Free Convection in a Porous Media Heated from Below," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 29~48.  
 (6) Hartline, B. K. and Lister, C. R. B., 1977, "Thermal Convection in a Hele-Shaw Cell," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 79, pp. 29~48.  
 (7) Koster, J. N., Erhard, P. and Müller, U., 1986, "Nonsteady End Effects in Hele-Shaw Cells," *Physical Review Letters*, Vol. 56, No. 17, pp. 1802~1824.  
 (8) Koster, J. N. and Müller, U., 1982, "Free Convection in Vertical Gaps," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 125, pp. 429~451.  
 (9) Bühler, L., Erhard, P., Gunther, G., Müller, U. and Zimmermann, G., 1987, "Natural Convection in Vertical Gaps Heated at the Lower Side on Experimental and Numerical Study," in *Bifurcation Phenomena in Thermal Process and Convections*, ASME HTD, Vol. 94, pp. 67~74.  
 (10) Ozawa, M., Müller, 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*, Vol. 12, pp. 213~222.  
 (11) Kang, M. G., Joo, W. J., Cha, D. J., Kang, B. S., 2003, "Development of Integrated Fringe Analysis System: For Severe Noise-ridden Interferometric Image Analysis," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1534~1541.  
 (12) Kim, S. and Lee, S. J., 2001, "Temperature Field Measurements of Hele-Shaw Convection Cell Using a Holographic Interferometry," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 25, No. 11, pp. 1624~1631.  
 (13) Hauf, W. and Grigull, U., 1970, "Optical Methods in Heat Transfer," in *advances in Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 367~374.  
 (14) Bockasten, K., 1961, "Transformation of Observed Radiance into Radial Distribution of the Emission of a Plasma," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 51, p. 943.