

# Hele-Shaw Cell 내부의 열유동 해석을 위한 홀로그래픽 간섭계와 2차원 PIV의 적용

김석\* · 이상준†

## Application of Holographic Interferometry and 2-D PIV for HSC Convective Flow Diagnostics

Seok Kim and Sang Joon Lee

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

### Abstract

The 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 changes 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 can be eliminated effectively using digital image processing technique and the reconstruction images are clear, but transient flow structure 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.

### 1. 서 론

정상상태 열유동의 경우 측정센서를 일정 간격으로 이송 시키면서 온도장과 속도장을 측정할 수 있다. 그러나, 비정상 열유동을 해석하기 위해서는 순간적인 온도장과 속도장 변화를 측정하는 것이 필요하다. 최근 컴퓨터와 화상처리 기술의 비약적인 발전에 힘입어 속도계측의 경우, PIV(particle image velocimetry), PTV(particle tracking velocimetry)등과 같은 새로운 속도장 측정기술이 개발되어 활용되고 있다. 온도장 측정의 경우, 온도에 따라 색깔이 변화하는 감온

성 액정(thermo chromic liquid crystal)을 이용하는 방법과 LIF (laser induced fluorescence)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.

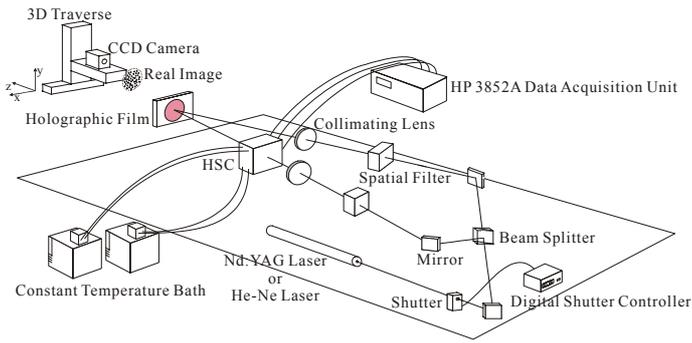
Hele-Shaw<sup>(1)</sup>는 다공질 매체의 침투성(permeability)을 Hele-Shaw Cell (이후부터는 HSC로 약칭함)의 두께  $d$ 를 사용하여  $K=d^2/12$ 로 정의하면 다공질매체 내부의 점성유동과 HSC내부의 등온 유동은 유사성을 가져 HSC 내부유동의 연구로 다공질매체 내부유동을 모사할 수 있음을 밝혔다. HSC 내부 유동의 온도와 속도분포를 결정하는 무차원수로는 Rayleigh수(Ra), Prandtl수(Pr), 그리고 HSC의 종횡비(aspect ratio) 등이 있다. HSC 형상과

† 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

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

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원



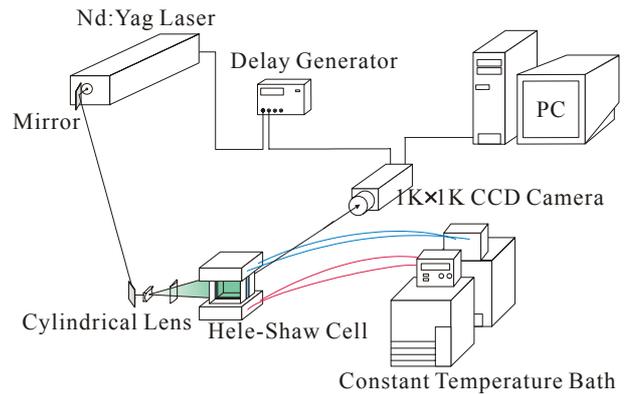
**Fig.1** Schematic diagram of holographic interferometry system.

작동 유체가 정해지면 자동적으로 Pr수와 종횡비가 결정되므로 지배변수로 Ra수가 남게 되며 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 의한 부력이 점성력보다 작기 때문에 대류현상이 관찰되지 않고 열전달은 주로 전도에 의해서 이루어진다. HSC 상하부의 온도차를 준 정상상태(quasi-steady state)로 증가시켜  $Ra_c$ 보다 커지게 되면 열적 불안정성에 의해 HSC 내부에 대류현상이 발생하게 된다.  $Ra_c$ 보다 조금 큰 경우에는 정상상태(steady state)를 유지하다가 온도차  $\Delta T$ 를 보다 크게 하면 유동이 정상상태 유동에서 비정상상태로 바뀌게 된다. 온도차가 더욱 커지면 비정상상태의 유동에서 새로이 정상 상태의 유동으로 변화하게 된다.<sup>(2, 3)</sup> Koster<sup>(4)</sup> 등은 셀의 종횡비 변화에 따른 임계 Ra수를 구하였으며, 주기적인 대류 유동이 셀 상하부의 온도경계층(thermal boundary layer)의 불안정성에 기인한다고 하였다. 또 다른 연구로 Bühler<sup>(5)</sup> 등은 홀로그래픽 간섭계를 이용하여 Ra수 변화에 따른 HSC 대류유동의 간섭무늬를 구하여 수치해석의 결과와 비교하였다. Ozawa<sup>(6)</sup> 등은 감온성 액정을 이용하여 HSC 내부 자연대류의 온도와 유동장을 가시화하였으며, 윤정환<sup>(7)</sup> 등은 감온성 액정과 화상처리를 통해 HSC 내부 유동을 연구하였다. 김석<sup>(8)</sup> 등은 홀로그래픽 간섭계의 이중노출 방법과 실시간 방법을 이용하여 HSC 내부 온도장을 측정하고 유동을 해석하였다.

본 연구에서는 홀로그래픽 간섭계와 PIV 기법을 상호 보완적으로 HSC 내부 대류유동에 적용 하여 온도장 및 속도장 변화를 해석하고자



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

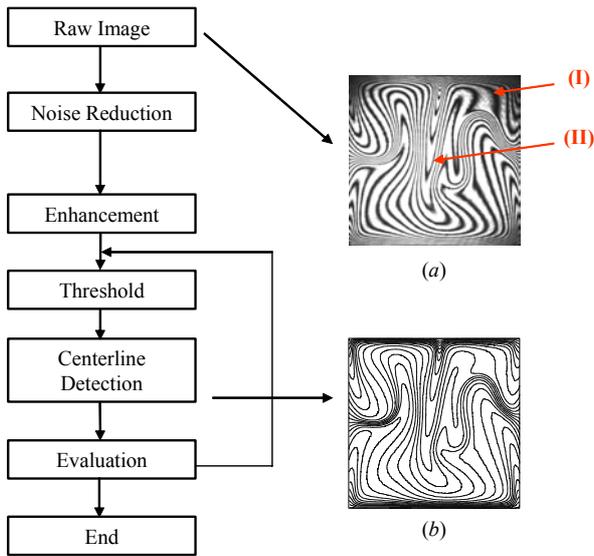
한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 홀로그래픽 간섭계

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 위와 아랫부분은 구리로 만들어진 블록과 단열을 위한 베이클라이트(bakelite)로 구성되어 있다. 그리고 HSC 좌우에 스티로폼(styrofoam)을 삽입하여 단열조건을 만족 시키도록 하였다. 작동유체로는 프란틀수  $Pr=205$  이고 동점성계수가  $\nu=20cs$ 인 실리콘 오일을 이용하였다. 그리고 HSC 상하부의 온도를 일정 하게 유지하기 위하여 구리블록 내부에 물을 순환시킬 수 있는 채널을 설치하였다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 홀로그래픽 간섭계의 구성도를 나타낸다. HSC 내부 열유동의 온도장 측정은 홀로그래픽 간섭계 기법 중 이중노출(double-exposure)방법과 실시간(real-time) 방법을 병행하여 이용하였다. 구리 블록 내부로  $\pm 0.01^\circ C$ 의 정확도를 갖는 2개의 항온조(Neslab RTE-211, 221)로부터 공급된 물을 순환시켜 HSC 상하부 온도를 실험조건에 맞게 일정하게 유지시킨다. 조명장치로 Nd:YAG 레이저와 헬륨-네온(He-Ne) 레이저를 사용하였으며, 헬륨-네온 레이저의 경우 디지털 셔터(Newport Model 846)를 사용하여 레이저 노출시간을 조정하였다. 레이저 빔은 광 분리기(beam splitter)를 통해 참조파와 물체파로 나뉘어지고 공간필터(spatial filter)를 통해서 노이즈를 제거한 후 시준 렌즈(collimating lens)를 지나 평행광으로 만들어진다. 물체파는



**Fig. 3** Flow chart of digital image processing procedure. (a) raw image; (b) final image.

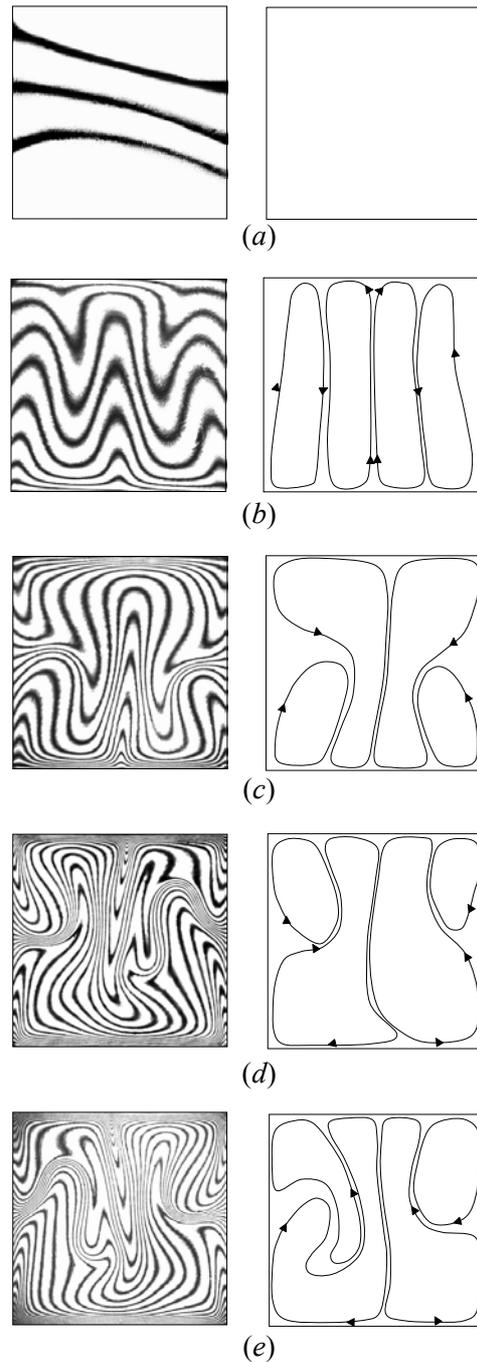
HSC내부를 관통해 필름에 맺히고, 참조과는 바로 필름에 맺히게 된다. 이때 물체과와 참조과가 이루는 각도는  $\theta=19^\circ$ 이고, 이 둘이 필름에 도달하는데 까지 걸리는 시간이 같도록 광 분리기와 광학기구를 배치하였다. 본 연구에 사용된 홀로그래픽 필름(Slavich, VRP-M)은 3000 lines/mm의 해상도를 갖고 있다. 모든 광학장치는 진동 흡수시설이 되어있는 광학 테이블(optical table) 위에 설치하였다.

2.2 2-D PIV

HSC 내부의 복잡한 열유동을 이해하기 위하여 PIV 기법을 적용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 PIV 측정 구성의 개략도이다. 작동유체는 증류수를 사용하였으며, 추적입자는 평균직경이  $10\mu\text{m}$ 인 glass bead를 사용하였다. 본 연구에서는 주기적인 유동특성이 나타나는  $\text{Ra}=6.35 \times 10^6$ 에서 속도장을 측정하였다.

2.3 디지털 영상처리

홀로그램에 의해 재생된 간섭영상은 스펙클 노이즈와 moirés, 영상 노이즈 등이 포함되어있다. 이러한 노이즈는 간섭패턴 해석에 영향을 준다. 그러므로 디지털 영상처리 과정을 통하여 불필요한 영상정보를 없애는 과정이 필요하다. 디지털 영상처리는 광학적 방식에 비해 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 배경과의 차이가 뚜렷하지 않아



**Fig. 4** Isothermal contours reconstructed using double-exposure method and corresponding streamline patterns. (a)  $\text{Ra}=0.6 \times 10^6$ ; (b)  $\text{Ra}=1.9 \times 10^6$ ; (c)  $\text{Ra}=3.2 \times 10^6$ ; (d)  $\text{Ra}=6.35 \times 10^6$ ; (e)  $\text{Ra}=1.27 \times 10^7$ .

간섭무늬를 배경과 분리하기가 어렵다. 그래서, 각각의 간섭무늬를 분리하기 위하여 2차원 Gaussian 함수를 적용하여 간섭무늬(fringe)의 테두리를 찾을 수 있었으며, Gaussian 함수를 연속적으로 적용하여 불필요한 배경이미지를 획득하여 본래 영상에서 제거하였다. 노이즈가 제거된 영상에서 정량적 해석을 하기 위해 고대비(threshold) 기능과 중앙선 찾기(centerline

detection)를 통해 단일 곡선을 획득하였다. 마지막으로 원래 간섭무늬와 획득한 단일 곡선의 차이를 줄이는 과정을 반복하여 에러를 최소화 하였다. 본 연구에서 수행한 디지털 이미지 처리과정을 통해 원래 간섭무늬와 단일 곡선의 차이는 약 0.91 픽셀이었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 홀로그래픽 간섭계

Fig. 4는 온도차가  $\Delta T=1, 3, 5, 10, 20^\circ\text{C}$ 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 HSC내부 온도장 결과이다. 일차 노출 후 실험조건에 따라 HSC내부에 정상상태의 열유동을 발생시킨 후, 약 9시간이 경과하면 정상상태에 이르게 되고 이 상태에서 이차 노출하였다. 왼편은 재생한 간섭무늬이고 오른편은 각각의 간섭무늬로부터 유선형태(streamline pattern)를 스케치 한 것이다. 2차원 비압축성 점성유동의 경우 온도와 와도(vorticity) 사이에는 유사성(analogy)이 존재한다. 그리고 와도는 속도구배( $\nabla V$ )에 수직이므로 유선은 등온선에 수직하게 연결하여 그렸다. 여기서 보면, 상하부 온도차가 커질수록 HSC내부에서 온도구배가 증가하며 물체과와 참조과와의 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 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<sup>(5)</sup>의 4롤(roll) 모드에 해당하며, 수직 방향의 긴 와동(vortex)이 4개가 존재한다. 간섭무늬를 자세히 보면 HSC중앙 부분과 좌우 모서리 부분에서는 부력의 영향으로 온도가 높은 아래면으로부터 온도가 낮은 윗면으로 상승하는 유동이 생성되어 같은 온도의 등온선이 높은 위치에 놓여있다. 모서리와 중앙의 중간 영역에서는 등온선 위치가 낮으며 양쪽에서 상승하는 유동에 기인해 하강하는 유동이 발생하게 되며 이로 인해 4개의 와동이 형성되는 것이다.

HSC 상하부 온도차가  $\Delta T=5^\circ\text{C}$  인  $Ra=3.2\times 10^6$ 에서의 실험결과(Fig. 4(c))는 4 와동 모드(4 vortex mode)를 보여준다. Fig. 4(b)와 마찬가지로 셀 중앙을 기준으로 거의 좌우 대칭인 분포를 가지며, 중

양에서 상승하는 유동과 하부 좌우 모서리에서 벽을 따라 상승하는 유동이 형성된다. 그러나, 셀 상부에는 2 개의 큰 와동이 존재하며 벽면을 따라 하강하던 유동은 셀 높이 1/2 위치에서 분리되어 작은 크기의 와동이 셀 아래쪽 좌우 모서리에 형성되게 된다. HSC 상하부의 온도차이가 보다 커짐에 따라 유동 형태는 준 정상상태로 전환된다.

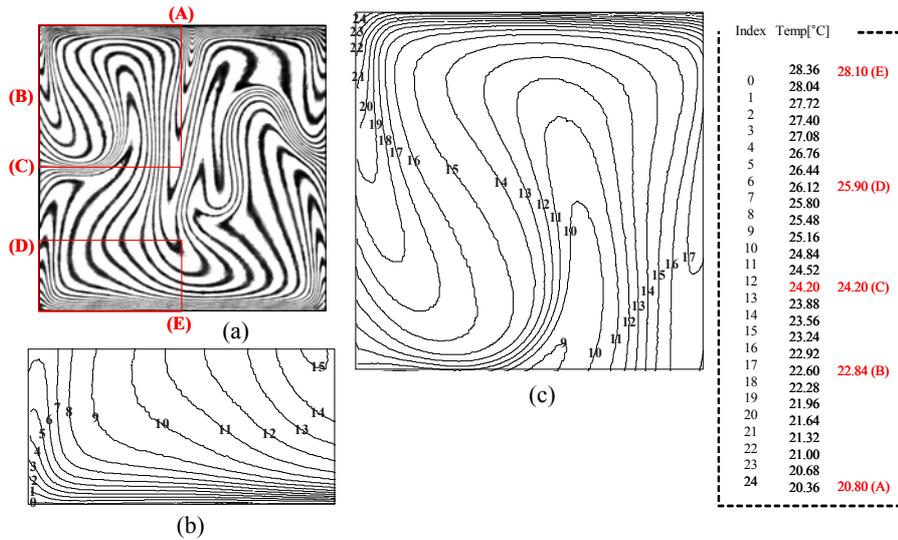
Fig. 4(d)는 HSC 상하부 온도차이가  $10^\circ\text{C}$  일 때의 결과로 준 정상상태에 해당하며, Fig. 4(c)의 결과와는 반대로 2 개의 작은 와동이 윗면 좌우 모서리에 위치하고 있다. 이때의  $Ra$  수는 주기적인 대류유동이 발생하는 임계  $Ra$  수( $Ra_{osc}=3.98\times 10^6$ )보다 크게 되어 4 개의 와동이 주기적으로 변화하는 모드(periodic 4 vortex mode)에 해당된다. 그림에서 보는 바와 같이 셀 하부에 형성된 와동이 상부 외곽에 형성된 와동에 비해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

Fig. 4(e)는 HSC 상하부의 온도차가  $\Delta T=20^\circ\text{C}$  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 같다.

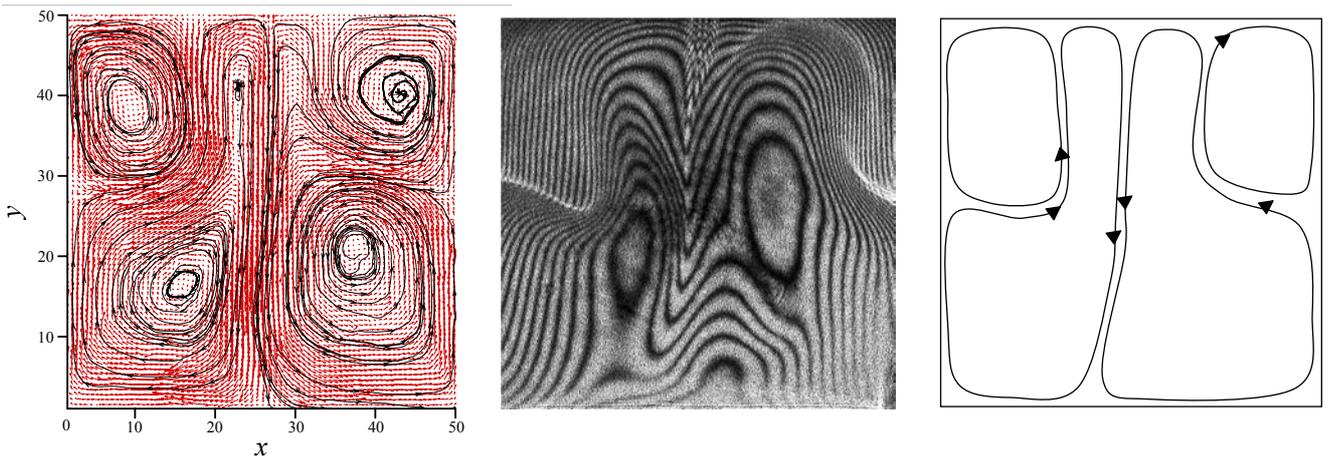
$$\frac{\Delta T}{S} = \left( \frac{d \, dn}{\lambda \, dT} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 간섭무늬의 개수,  $\lambda$ 는 레이저의 파장,  $n$ 은 작동유체의 굴절률이다. 식 (2)에 따르면 본 실험조건에서 간섭무늬의 해상도는 약  $0.3^\circ\text{C}$ 이다. 따라서 재생 이미지에서 간섭무늬 하나마다 대략  $0.3^\circ\text{C}$ 의 온도차를 갖는다.

이상의 결과로부터  $Ra$ 수가 증가함에 따라 HSC 아래면에서 윗면으로의 열전달이 증가하게 되고,  $Ra$ 수가 대류발생 임계  $Ra$ 수보다 조금 커지게 되면 셀 내부에 대칭적인 대류유동이 발생하게 된다. 보다 큰  $Ra$ 수에서는 아래 모서리 부근의 작은 와동과 중앙부의 큰 와동이 지배적인 준정상상태에 이르게 된다.  $Ra$ 수가 크게 증가하여



**Fig. 5** Iso-thermal lines derived from interferogram at  $Ra=5.1 \times 10^6$ . (a) interferogram; (b) enlargement of region DE; (c) enlargement of region AC.



**Fig. 6** Comparison of PIV and holographic interferometer results at  $Ra=6.35 \times 10^6$ . (a) velocity field and streamline; (b) interferogram and streamlines sketched from the interferogram.

주기적 유동 발생 임계  $Ra$ 수보다 커지게 되면 HSC 윗면의 좌우 모서리에 있는 작은 와동이 커지고 작아지는 주기적인 변동을 하는 상태에 이르게 된다.

Fig. 5는 본 연구에서 HSC 내부의 온도분포를 정량적으로 해석하기 위해 디지털 영상처리 기법을 적용한 결과이다. 실험조건은  $Ra=5.1 \times 10^6$ 이며 간섭무늬로부터 등온선을 추출한 결과이다. Fig. 5(a)에 표시된 (A)~(E)는 열전대가 설치된 위치로 식 (2)에서 구한 해상도와 비교하였을 때 약 2~4%의 오차를 가진다.

3.2 2-D PIV

홀로그래픽 간섭계를 이용한 HSC 내부 온도장 결과를 검증하기 위하여 동일한 조건에서 PIV

기법을 이용한 속도장 측정 실험을 수행하였다. Fig. 6은  $Ra=6.35 \times 10^6$ 에서 PIV 기법을 통해 얻은 속도장과 실시간 홀로그래픽 간섭계로 얻은 간섭무늬와 스케치한 유선이다. 속도장에서의 유선과 스케치한 유선의 형태가 유사하며 HSC 내부에서 유동이 박리되는 위치가 거의 동일하다. HSC 내부의 중앙을 따라 하강하는 유동은 좌우로 진동함으로써, HSC 아랫면에서 다른 속도 구배를 야기하고 이는 아랫면에서 다른 온도 구배를 가지게 함으로써 연속적으로 주기적인 유동 형태가 나타나게 된다.

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

## 4. 결 론

비축 홀로그래픽 간섭계와 2차원 PIV 기법을 HSC 내부 열유동 측정에 적용하여 유동구조와 대류 유동의 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 획득한 영상의 노이즈를 제거하고 간섭무늬 영상의 질을 향상시키기 위해 디지털 영상처리 기법을 도입하였다.

HSC 내부 유동은 낮은 Ra수에서 정상상태의 주기적인 유동 형태를 가지고 있으며, Ra수가 커질수록 시간에 따라 변화하는 주기적인 유동 형태를 나타낸다. 홀로그래픽 간섭계에 의해 나타난 비정상 주기 유동은 PIV 기법을 통해 획득한 속도장으로부터 확인할 수 있었으며 잘 일치함을 보였다. HSC 내부의 이러한 주기적인 유동은 HSC 내부의 경계면에서의 불안정한 온도경계층에 의해 야기되는 것으로 사료된다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Elder, J. W., 1967, "Steady Free Convection in a Porous Media Heated from Below," *J. Fluid Mech.*, Vol. 27, pp. 29~48.
- (2) Hartline, B. K. and Lister, C. R. B., 1977, "Thermal Convection in a Hele-Shaw Cell," *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, pp. 29~48.
- (3) 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.
- (4) Koster, J. N. and Müller, U., 1982, "Free Convection in Vertical Gaps," *J. Fluid Mech.*, Vol. 125, pp. 429~451.
- (5) 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.
- (6) 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," *Exp. in Fluid*, Vol. 12, pp. 213~222.
- (7) 윤정환, 도덕희, 이상준, 1996, "TLC 와 컬러화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정," *대한기계학회 논문집(B)*, 제 20 권, 제 3 호, pp. 1114~1122.
- (8) 김석, 이상준, 2001, "홀로그래픽 간섭계를 이용한 Hele-Shaw Convection Cell 내부 온도장 측정," *대한기계학회 논문집(B)*, 제 25 권, 제 11 호, pp. 1624~1631.