

홀로그래픽 간섭계와 PIV를 이용한 Hele-Shaw Convection Cell 내부 열유동 해석

김 석* · 이 상 준†

Measurement of Thermal Flow in a Hele-Shaw Convection Cell Using Holographic Interferometry and PIV Technique

Seok Kim · Sang-Joon Lee

Abstract

Variations of temperature and velocity fields in a Hele-Shaw Convection Cell (HSC) were measured using a holographic interferometry and PIV technique with varying Rayleigh number. Experimental results show a steady flow pattern at low Rayleigh numbers and a time-dependent periodic flow at high Rayleigh numbers. Two different measurement methods of holographic interferometry, double-exposure method and real-time method, were employed to measure the temperature field variations of HSC convective flow. In the double-exposure method, unwanted waves can be eliminated and reconstruction images are clear, but transient flow structure cannot be observed clearly. On the other hand, transient flow can be observed and reconstructed well using the real-time method. PIV results show that flow inside the HSC is periodic and the oscillating state is well matched with the temperature field results. The holographic interferometry and PIV techniques employed in this study are useful for analyzing the unsteady convective thermal fluid flows.

Key Words : Holographic Interferometry(홀로그래픽 간섭계), PIV(입자영상유속계), Hele-Shaw Cell(HSC)

1. 서 론

정상상태 열유동의 경우 측정센서를 일정간격으로 이송 시키면서 온도와 속도분포를 측정할 수 있다. 그러나, 비정상 열유동을 해석하기 위해서는 순간적인 온도장과 속도장 변화를 계측하는 것

이 필요하다. 최근들어 컴퓨터와 화상처리 기술의 비약적인 발전에 힘입어 PIV(particle image velocimetry), PTV(particle tracking velocimetry)등과 같은 새로운 속도장 측정기술이 개발되어 활용되고 있다. 온도장 측정의 경우, 온도에 따라 색깔이 변화하는 감온성 액정(thermo chromic liquid crystal)을 이용하는 방법과 LIF(laser induced fluorescence)기법 등이 주로 액체유동의 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 홀로

* 포항공과대학교, 기계공학과 대학원
E-mail : jandi@postech.ac.kr

† 회원, 포항공과대학교, 기계공학과
E-mail : sjlee@postech.ac.kr

그래픽 간섭계(holographic interferometry)가 있다.

Hele-Shaw Cell (이후부터는 HSC 로 약칭함) 내부 유동의 온도와 속도분포를 결정하는 무차원 수로는 Rayleigh 수(Ra), Prandtl 수(Pr), 그리고 HSC 의 종횡비(aspect ratio) 등이 있다. HSC 형상과 작동유체가 정해지면 자동적으로 Pr 수와 종횡비가 결정되므로 지배변수로 Ra 수가 남게 되며 Ra 수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, α 는 열확산계수, h 는 셀의 높이, β 는 열팽창계수, ν 는 동점성계수, ΔT 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 HSC내부에 대류현상이 발생하게 된다. Ra_c 보다 조금 큰 경우에는 정상상태(steady state)를 유지하다가 온도차(ΔT)를 보다 크게 하면 비정상상태로 바뀌게 된다. 온도차가 더욱 커지면 비정상상태의 유동에서 새로이 정상상태의 유동으로 변화하게 된다^(1, 2).

본 연구에서는 이중노출 방식과 실시간 방식의 홀로그래픽 간섭계와 PIV 속도장 측정기법을 이용하여 HSC 상하부 온도차 변화에 따른 내부유동의 온도장과 속도장 변화를 측정하여 전열특성과 함께 유동특성을 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 HSC의 종횡비는 1이며 너비 $b=50$ mm, 높이 $h=50$ mm, 폭 $d=5$ mm이다. HSC의 앞과 뒷면은 두께 13mm의 Glass BK7이고, 그 사이에 5mm두께의 아크릴이 양측면에 샌드위치 모양으로 끼워져 있다. HSC의 위와 아래 부분은 구리로 만들어진 블록과 단열을 위한 베이클라이트(bakelite)로 구성되어 있다. 그리고 HSC 좌우에 스티로폼(styrofoam)을 삽입하여 단열 조건을 만족시키도록 하였다. 작동유체로는 프란틀수 $Pr=205$ 이고 동점성계수가 $\nu=20$ cs인 실리콘 오일을 이용하였다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용되어진 홀로그래픽 간섭계의 구성도를 나타낸다. 구리 블록 내부로

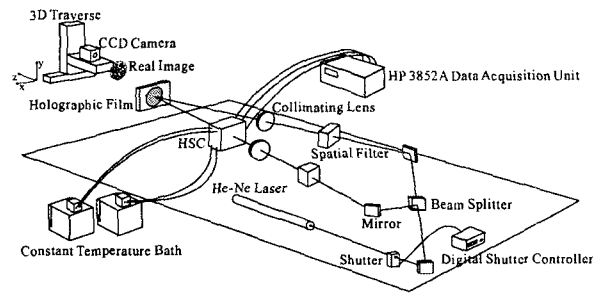


Fig. 1 Schematic diagram of holographic interferometer and experimental set-up

$\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의 정확도를 갖는 2개의 항온조(Neslab RTE-211, 221)로부터 공급된 물을 순환시켜 HSC 상하부 온도를 실험조건에 맞게 일정하게 유지시킨다. 조명장치로 헬륨-네온(He-Ne) 레이저를 사용하였는데, 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. 이때 물체파와 참조파가 이루는 각도는 $\theta=19^\circ$ 이고, 이 둘이 필름에 도달하는데 까지 걸리는 시간이 갈수록 광 분리기와 광학장치들을 배치하였다. 모든 광학장치는 진동 흡수시설이 되어있는 광학테이블(optical table) 위에 설치 하였다.

HSC 내부 유동의 속도장은 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. PIV 측정 시스템은 1Kx1K CCD 카메라, Nd:YAG 레이저, 그리고 광학장치 등으로 구성되어 있다. 사용된 입자는 평균직경이 $10\mu\text{m}$ 인 hollow glass bead를 사용하였으며 HSC 셀 측면에서 레이저 평면광을 입사하여 초당 6 프레임씩 입자영상을 취득하였다.

2.2 실험방법

HSC 상하부의 온도차이를 5가지($\Delta T=1, 3, 5, 10$)로 변화시켰는데 상하부 온도 각각을 일정하게 유지하기 위해 두 대의 항온조를 이용하였다. HSC 하부로는 고온의 물을 순환시키고 상부에는 낮은 온도의 물을 순환시켜 HSC내부에 대류유동을 발생시켰다. B hler⁽³⁾의 실험결과에 따르면 HSC 상하부 온도차가 $\Delta T=3^\circ\text{C}$ 보다 큰 경우에는 임계 Ra수보다 크게 되어 HSC내부에서 대류유동이 형성되게 된다. 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간은 HSC내부에서의 열전달이 모두 전도에 의해서만 이루어진다고 가정하고 열전도 방정식으로부터 열확산 시간(thermal diffusion time)을 계산

할 수 있다. 열전달계수가 κ 인 작동유체에 대한 열확산 시간은 h^2/κ 로 주어진다. 본 연구에서 사용한 실리콘 오일과 Glass BK7에 대한 열확산 시간을 계산한 결과 약 9시간 정도이었다.

3.3 실험결과 및 고찰

3.1 홀로그래픽 간섭계

Fig. 2는 온도차가 $\Delta T=1, 3, 5, 10^\circ\text{C}$ 인 경우에 해당하는 $Ra=0.6 \times 10^6, 1.9 \times 10^6, 3.2 \times 10^6, 6.35 \times 10^6$ 조건에서 이중노출 방법으로 측정된 HSC내부 온도장 결과이다. 일차 노출 후 실험조건에 따라 HSC내부에 열유동을 발생시키고, 약 9시간이 경과하여 정상상태에 이르게 되면 이 상태에서 이차 노출하였다. Fig. 2(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. 2(b)는 임계 Ra 수보다 조금 큰 $Ra=1.9 \times 10^6$ 에 해당하는 것으로 좌우 대칭인 간섭무늬와 유선형태를 보여주고 있다. 이것은 B hler⁽⁹⁾의 4롤(roll) 모드에 해당하며, 수직 방향의 긴 와동(vortex) 4개가 존재한다. 간섭무늬를 자세히 보면 HSC중앙부분과 좌우 모서리 부분에서는 부력의 영향으로 온도가 높은 아래 면으로부터 온도가 낮은 윗면으로 상승하는 유동이 생성되어 같은 온도의 등온선이 높은 위치에 놓여있다. 모서리와 중앙사이의 중간영역에서는 등온선 위치가 낮는데, 이것은 양쪽에서 상승하는 유동이 상부에 부딪힌 후 하강하는 유동에 기인한 것이며, 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. 2(c))는 4 와동 모드(4 vortex mode)를 보여준다. Fig. 2(b)와 마찬가지로 셀 중앙을 기준으로 거의 좌우 대칭인 온도 분포를 가지며, 중앙에서 상승하는 유동과 하부 좌우 모서리에서 벽을 따라 상승하는 유동이 형성된다. 그러나, 셀 상부에는 2개의 큰 와동이 존재하며 벽면을 따라 하강하던 유동은 셀 높이 1/2위치에서 분리되어 작은 크기의 와동이 셀 아래쪽 좌우 모서리에 형성되게 된다. HSC 상하부의 온도차이가 보다 커짐에 따라 유동 형태는 준 정상상태로 전환된다.

Fig. 5(d)는 HSC 상하부 온도차이가 10°C 일 때의 결과로 준 정상상태에 해당하며, Fig. 5(c)의 결과와는 반대로 2개의 작은 와동이 윗면 좌우

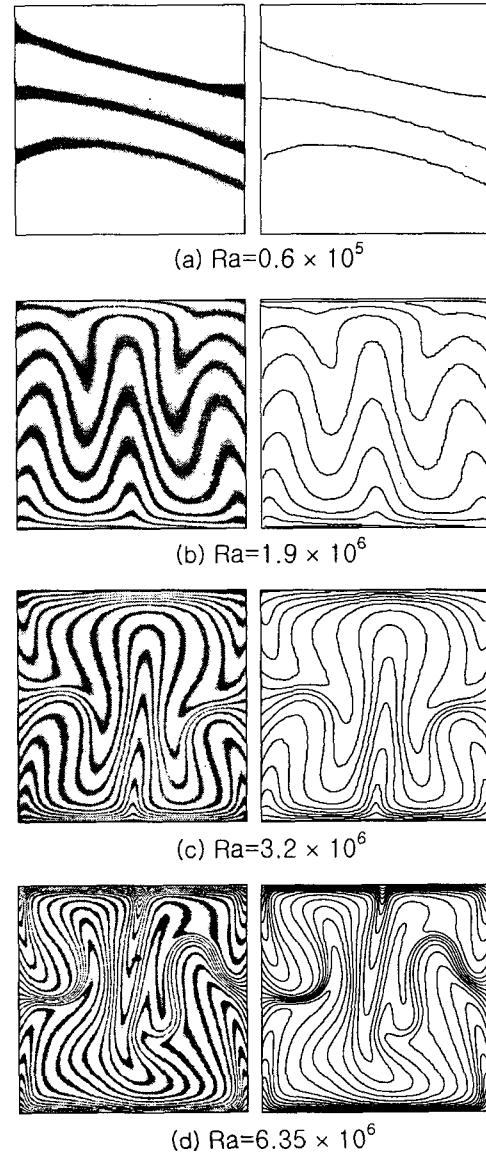


Fig. 2 Isothermal contours reconstructed using double-exposure method and center-line patterns ((a): $\Delta T=1^\circ\text{C}$, (b): $\Delta T=3^\circ\text{C}$, (c): $\Delta T=5^\circ\text{C}$, (d): $\Delta T=10^\circ\text{C}$)

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 보여지게 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 모서리쪽으로 향하여 작은 와동을 형성하고, 나머지는 중앙으로 모인 후 반대쪽에서 올라온 유동과 합쳐져 셀 중앙을 따라 바닥면까지 내려오게 된다.

간섭무늬 하나에 해당하는 온도차를 나타내는 간섭무늬의 해상도(resolution)는 이론적으로 다음과 같다.

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

여기서, S는 간섭무늬의 개수, λ 는 레이저의 파장, n은 작동유체의 굴절률이다. 식 (2)에 따르면 본 실험조건에서 간섭무늬의 해상도는 약 0.3°C이다. 따라서 재생 이미지에서 간섭무늬 하나마다 대략 0.3°C의 온도차를 갖는다.

이상의 결과로부터 Ra수가 증가함에 따라 HSC 아래면에서 윗면으로의 열전달이 증가하게 되고, Ra수가 대류발생 임계 Ra수보다 조금 커지게 되면 셀 내부에 대칭적인 대류유동이 발생하게 된다. 보다 큰 Ra수에서는 아래 모서리 부근의 작은 와동과 중앙부의 큰 와동이 지배적인 준정상상태에 이르게 된다. Ra수가 크게 증가하여 주기적 유동 발생 임계 Ra수보다 커지게 되면 HSC 윗면의 좌우 모서리에 있는 작은 와동이 커졌다 작아지는 주기적인 변동을 하게 된다.

3.2 PIV기법을 이용한 내부 유동측정

Ra 수가 임계 Ra 수($Ra_{osc}=3.98 \times 10^6$)보다 큰 경우 HSC 셀 내부 대류유동은 주기적인 유동특성을 가지고 있다. $Ra=6.35 \times 10^6$ 조건에서 홀로그래픽 간섭계의 실시간 방법을 이용하여 얻은 간섭무늬와 비교했을 때 정성적으로 일치하는 결과를 보이며 내부의 주기적인 셀 유동을 확인할 수 있다.

4. 결 론

PIV 속도장 측정기법과 함께 홀로그래픽 간섭계의 이중노출 방법과 실시간 방법을 이용한 온도장 측정기법을 상하부 온도차가 $\Delta T=1, 3, 5, 10^\circ C$ 인 Hele-Shaw Cell(HSC) 내부 대류유동에 적용하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

(1) 정상상태 대류유동의 온도장 측정에는 이중노출 방법의 홀로그래픽 간섭계가 조작성이 간단하고 재생된 간섭무늬가 깨끗하고 노이즈가 적었다.

(2) 준 정상상태 혹은 비정상상태의 온도장 측정에는 실시간 방법을 이용하여 시간에 따른 간섭

무늬의 변화를 효과적으로 관찰할 수 있었다.

(3) 상하부 온도차가 주기적 대류유동이 발생하는 임계 Ra수보다 커지게 되면 좌우 수직 벽면의 온도 경계층의 불안정성에 기인하여 HSC 상부의 좌우 모서리에서 생성된 와동이 현저하게 주기성을 가지고 변화하게 된다. $Ra=6.35 \times 10^6$ 조건에서 홀로그래픽 간섭계와 PIV 실험으로부터 구한 변동 주기는 약 62초이었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Hartline, B. K. and Lister, C. R. B., 1977, "Thermal Convection in a Hele-Shaw Cell," J. Fluid Mech., Vol. 79, pp. 29~48.
- (2) 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.
- (3) 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.