

홀로그래픽 간섭계를 이용한 Hele-Shaw Convection Cell 내부 온도장 측정

김 석* · 이 상 준†

(2001년 4월 17일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

Temperature Field Measurements of Hele-Shaw Convection Cell Using a Holographic Interferometry

Seok Kim and Sang-Joon Lee

Key Words : Holographic Interferometry(홀로그래픽 간섭계), Temperature Field(온도장), Hele-Shaw Cell(HSC), Double-Exposure Method(이중노출 방법), Real-Time Method(실시간 방법)

Abstract

Variations of temperature field in a Hele-Shaw convection cell (HSC) were measured using a holographic interferometry 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. Especially, the period of oscillation at $Ra = 6.35 \times 10^6$ was 62 seconds. 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. However, the fringe patterns reconstructed by the real-time method contain more noise, compared with the double-exposure method. The two holographic interferometer techniques employed complementary in this study were proved to be useful for analyzing the temperature field variations of unsteady thermal fluid flows.

| | |
|------------------|---------------------------|
| ————— 기호설명 ————— | |
| b | : HSC 의 너비 |
| d | : HSC 의 폭 |
| h | : HSC 의 높이 |
| n | : 작동유체의 굴절률 |
| K | : 다공질 매체의 침투성 |
| S | : 간섭무늬 개수 |
| Pr | : Prandtl 수 |
| Ra | : Rayleigh 수 |
| Ra_c | : 대류유동 발생 임계 Rayleigh 수 |
| Ra_{osc} | : 주기적 유동 발생 임계 Rayleigh 수 |
| α | : 열확산계수 |

| | |
|------------|--------------------|
| β | : 열팽창계수 |
| δ | : 온도경계층의 두께 |
| θ | : 물체파와 참조파가 이루는 각도 |
| κ | : 작동유체의 열전달계수 |
| λ | : 레이저의 파장 |
| ν | : 동점성계수 |
| τ | : HSC 대류유동의 무차원 주기 |
| ΔT | : HSC 상하부 온도차이 |

1. 서 론

정상상태 열유동의 경우 측정센서를 일정간격으로 이송 시키면서 온도장과 속도장을 측정할 수 있다. 그러나, 비정상 열유동을 해석하기 위해서는 순간적인 온도장과 속도장 변화를 계측하는 것이 필요하다. 최근 컴퓨터와 화상처리 기술의 비약적인 발전에 힘입어 속도계측의 경우, PIV(particle

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail: sjlee@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

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 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.

Gabor⁽¹⁾는 빛의 간섭을 이용하여 위상(phase) 분포를 방사강도(irradiance) 무늬로 변환시켜 기록할 수 있다는 것을 증명하여 홀로그래피(holography)의 원리를 처음으로 제안하였다. Leith와 Upatnieks⁽²⁾는 비축(off-axis) 홀로그래피를 제안하여, 재생과정에서 회절되어 나타나는 3개의 파(wave)를 공간적으로 분리하여 오늘날의 홀로그래피 개념을 완성시켰다. 홀로그래픽 간섭계는 크게 기록(recording)과 재생(reconstruction) 과정으로 이루어지며, 측정방법에는 이중노출 방법(double-exposure method)과 실시간 방법(real-time method)이 있다. 본 연구에서는 위의 두 가지 측정방법을 상호 보완적으로 Hele-Shaw Cell (이후부터는 HSC로 약칭함) 내부 대류유동에 적용하여 온도장 변화를 해석하고자 한다.

Hele-Shaw⁽³⁾는 다공질 매체의 침투성(permeability)을 HSC의 두께 d 를 사용하여 $K=d^2/12$ 로 정의하면 다공질매체 내부의 점성유동과 HSC 내부의 등온 유동은 유사성을 가져 HSC 내부유동의 연구로 다공질매체 내부유동을 모사할 수 있음을 밝혔다.

HSC 내부 유동의 온도와 속도분포를 결정하는 무차원수로는 Rayleigh 수(Ra), Prandtl 수(Pr), 그리고 HSC의 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. Ra 수가 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 내

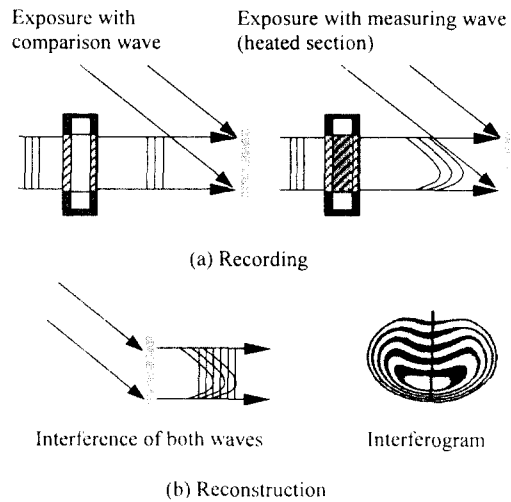


Fig. 1 Principle of double-exposure method

부에 대류현상이 발생하게 된다. Ra_c 보다 조금 큰 경우에는 정상상태(steady state)를 유지하다가 온도차 ΔT 를 보다 크게 하면 유동이 정상상태 유동에서 비정상상태로 바뀌게 된다. 온도차가 더욱 커지면 비정상상태의 유동에서 새로이 정상상태의 유동으로 변화하게 된다.^(4, 5) Koster⁽⁶⁾ 등은 셀의 종횡비 변화에 따른 임계 Ra 수를 구하였으며, 주기적인 대류 유동이 셀 상하부의 온도경계층(thermal boundary layer)의 불안정성에 기인한다고 하였다. 또 다른 연구로 Bühler⁽⁷⁾ 등은 홀로그래픽 간섭계를 이용하여 Ra 수 변화에 따른 HSC 대류 유동의 간섭무늬를 구하여 수치해석의 결과와 비교하였다. Ozawa⁽⁸⁾ 등은 감온성 액정을 이용하여 HSC 내부 자연대류의 온도와 유동장을 가시화하였으며, 윤정환⁽⁹⁾ 등은 감온성 액정과 화상처리기를 통해 HSC 내부 유동을 연구하였다.

본 연구에서는 이중노출 방식과 실시간 방식의 홀로그래픽 간섭계를 개발하고, 이들을 HSC 대류 유동에 적용하여 HSC 상하부 온도차 변화에 따른 내부유동의 온도장 변화와 유동특성을 해석하고 두 가지 측정방법의 장단점을 비교하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 홀로그래픽 간섭계

홀로그래픽 간섭계는 기록과 재생 방법에 따라 이중노출 방법과 실시간 방법으로 나누어지며 각각의 기록과 재생 과정을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 이중노출 방법은 우선 HSC 내부에 열유동이 없는 상태에서 물체파와 참조파를 필름에 일차

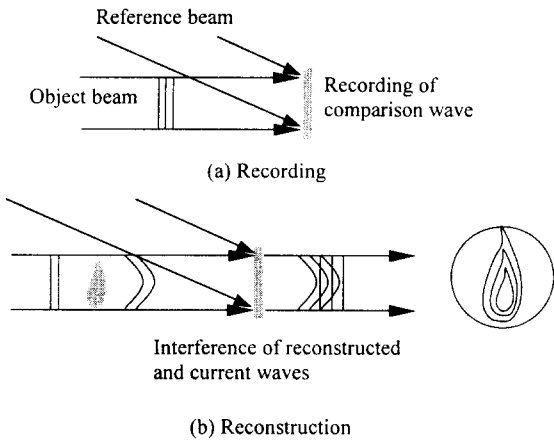


Fig. 2 Principle of real-time method

노출시킨다. 그리고, 실험하고자 하는 열유동을 생성시킨 후 다시 물체파와 참조파를 이차 노출하여 얻은 필름을 현상하여 홀로그램(hologram)을 얻는다. 마지막으로 참조파만을 노출시켜 홀로그램을 통해 재생 이미지(reconstruction image)를 얻게 된다.

반면에, 실시간 방법은 물체파와 참조파를 열유동이 없는 상태에서 홀로그래픽용 필름에 일차노출시키고 필름을 현상하여 얻은 홀로그램을 다시 원래 위치에 고정시킨 후 HSC 내부에 열유동을 발생시키고 물체파와 참조파에 노출시켜 재생 이미지를 얻는 방법이다.

기록과 재생과정의 차이로 인해 생기는 이중노출 방법과 실시간 방법의 차이는 다음과 같다. 이중노출 방법은 두 번의 노출에 의한 간섭무늬를 통해 재생 이미지를 얻기 때문에 시간에 따라 변화하는 천이과정(transition process)을 기록하기 어렵다는 단점이 있다. 반면에 실험을 수행하는 동안 불필요한 광학장치의 움직임이나 필름의 이동 등이 없기 때문에 노이즈가 적고 원하지 않는 파를 제거시킬 수 있는 장점이 있다.

실시간 방법은 천이과정을 관찰하고 기록할 수 있으나 일차노출된 필름을 현상하고 나서 다시 원래 위치에 정확히 위치시키지 못할 경우, 오차를 유발할 수 있으며, 일반적으로 이중노출 방법에 비해 노이즈가 많다. 따라서, 본 연구에서는 정상상태의 HSC 대류유동 해석에는 이중노출 방법을 사용하고, 주기적인 대류유동에 대해서는 실시간 방법을 적용하였다. 홀로그래픽 간섭계에 관한 자세한 정보는 참고문헌에 나와있다.^(10, 11)

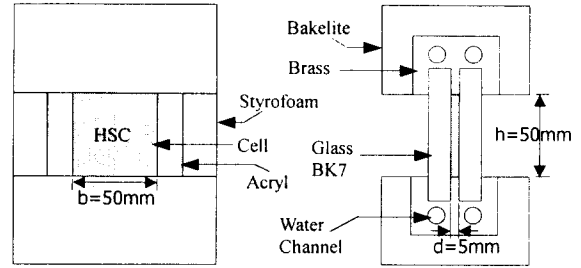


Fig. 3 Schematics of Hele-Shaw cell

2.2 실험 장치

본 연구에서 사용한 HSC의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. HSC의 종횡비는 1이며 너비 $b=50\text{mm}$, 높이 $h=50\text{mm}$, 폭 $d=5\text{mm}$ 이다. HSC의 앞과 뒷면은 두께 13mm 의 Glass BK7이고, 그 사이에 5mm 두께의 아크릴이 양측면에 샌드위치 모양으로 끼워져 있다. HSC의 위와 아래부분은 구리로 만들어진 블록과 단열을 위한 베이클라이트(bakelite)로 구성되어 있다. 그리고 HSC 좌우에 스티로폼(styrofoam)을 삽입하여 단열조건을 만족시키도록 하였다. 작동유체로는 프란틀수 $Pr=205$ 이고 동점성계수가 $\nu=20\text{cs}$ 인 실리콘 오일을 이용하였다. 그리고 HSC 상하부의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 구리블록 내부에 물을 순환시킬 수 있는 채널을 설치하였다.

Fig. 4는 본 실험에서 사용되어진 홀로그래픽 간섭계의 구성도를 나타낸다. 구리 블록 내부로 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 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 서터(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 HSC 내부를 관통해 필름에 맺히고, 참조파는 바로 필름에 맺히게 된다. 이때 물체파와 참조파가 이루는 각도는 $\theta=19^\circ$ 이고, 이 둘이 필름에 도달하는데 까지 걸리는 시간이 같도록 광 분리기와 광학기구를 배치하였다. 본 연구에 사용되어진 홀로그래픽 필름(Agfa 8E75)은 5000 lines/mm 의 해상도를 갖고 있다. 모든 광학장치는 진동 흡수시설이 되어있는 광학 테이블(optical table) 위에 설치하였다.

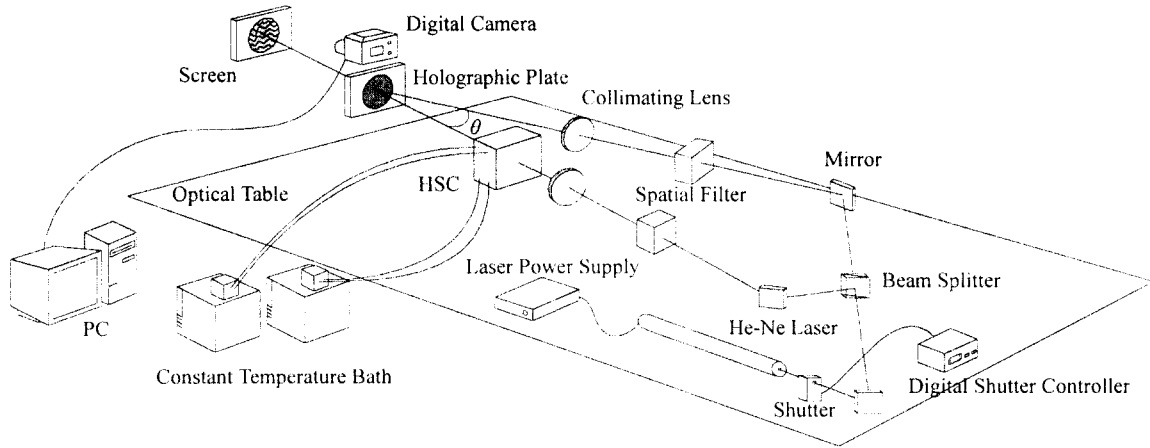


Fig. 4 Schematic diagram of holographic interferometer and experimental set-up

2.3 실험 방법

HSC 상하부의 온도차이를 5 가지($\Delta T=1, 3, 5, 10, 20^\circ\text{C}$)로 변화시켰는데 상하부 온도 각각을 일정하게 유지하기 위해 두 대의 항온조를 이용하였다. 주위 온도를 기준으로 HSC 하부로는 고온의 물을 순환시키고 상부에는 낮은 온도의 물을 순환시켜 HSC 내부에 대류유동을 발생시켰다. Bühler⁽⁷⁾의 실험결과에 따르면 HSC 상하부 온도차가 $\Delta T=3^\circ\text{C}$ 보다 큰 경우에는 임계 Ra 수보다 크게 되어 HSC 내부에서 대류유동이 형성되게 된다. 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간은 HSC 내부에서의 열전달이 모두 전도에 의해서만 이루어진다고 가정하고 열전도 방정식으로부터 열확산 시간(thermal diffusion time)을 계산할 수 있다. 열전달계수가 κ 인 작동유체에 대한 열확산 시간은 h^2/κ 로 주어진다. 본 연구에서 사용한 실리콘 오일과 Glass BK7 에 대한 열확산 시간을 계산한 결과 약 9 시간 정도이었다.

이중노출 방법으로 실험을 할 경우, 열유동이 없는 상태에서 참조파와 물체파를 동시에 홀로그래픽용 필름에 일차 노출시키고 열유동을 발생시킨 후 이차 노출시켜 HSC 내부 온도장에 해당하는 간섭무늬를 기록하게 된다. 그리고 열유동 영상이 기록이 된 필름을 현상하여 얻은 홀로그램에 참조파를 노출시켜 재생된 영상을 해상도가 1600×1200 pixel 인 디지털 카메라로 촬영하여 컴퓨터에 저장하였다. HSC 상하부 온도차이가 $10, 20^\circ\text{C}$ 로 증가시킨 경우 HSC 내부에 주기적인 대류유동이 나타났었다. 이와 같은 주기적 유동특성을 갖는 대류유동의 온도장 측정에는 실시간 방법을 적용하였다. 실시간 방법은 열유동이 없을 때 참조

파와 물체파를 동시에 일차노출 시킨 필름을 현상하여 얻은 홀로그램을 다시 원래 위치에 설치하고 열유동을 참조파와 물체파를 노출시켜 실시간으로 HSC 내부의 온도장 변화를 간섭무늬 형태로 얻을 수 있다. 실시간 방법의 경우 레이저 파장의 절반 ($\lambda/2$)에 해당하는 허용범위 내에 현상된 필름을 원래 위치에 다시 설치 시켜야 정확하고 깨끗한 재생 영상을 얻을 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 홀로그래픽 간섭계의 이중노출 방법과 실시간 방법을 HSC 내부유동에 상호 보완적으로 적용하여 Ra 수 변화에 따른 HSC 대류유동의 온도장 변화를 해석하였다.

3.1 이중노출 방법

Fig. 5 는 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 HSC 내부 온도장 결과이다. 일차 노출 후 실험조건에 따라 HSC 내부에 정상상태의 열유동을 발생시킨 후, 약 9 시간이 경과하면 정상상태에 이르게 되고 이 상태에서 이차 노출하였다. 원편은 재생한 간섭무늬이고 오른편은 각각의 간섭무늬로부터 유선형태(streamline pattern)를 스케치 한 것이다. 2 차원 비압축성 점성유동의 경우 온도와 와도(vorticity) 사이에는 상사성(analogy)이 존재한다. 그리고 와도는 속도구배(VV)에 수직이므로 유선은 등온선에 수직하게 연결하여 그렸다. 여기서 보면, 상하부 온도차가 커질수록 HSC 내부에서 온도구배가 증가하며 물체파와 참조파와의 회절에

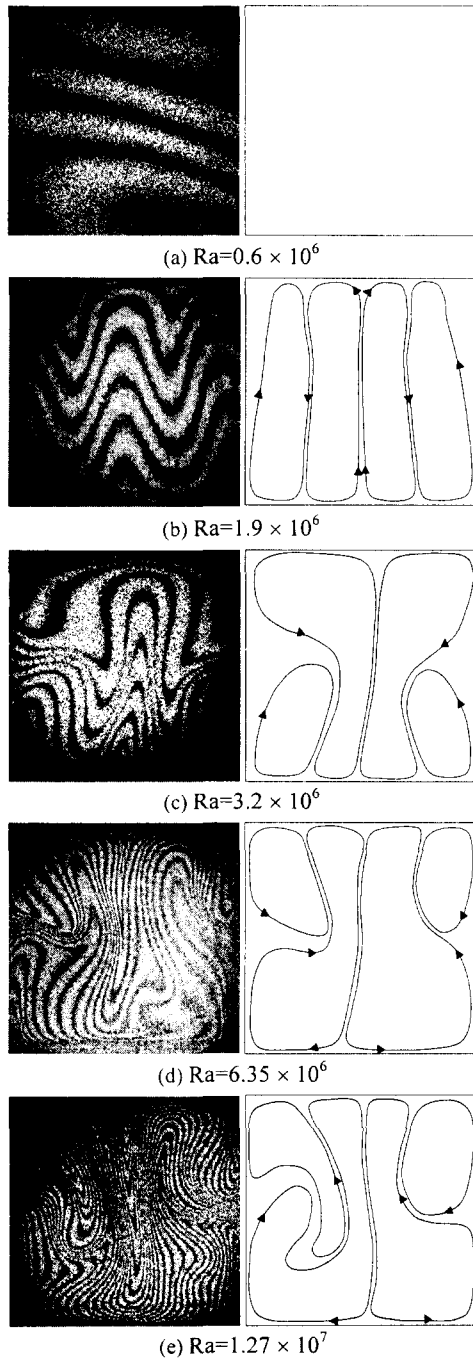


Fig. 5 Isothermal contours reconstructed using double-exposure method and corresponding streamline patterns ((a): $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, (b): $\Delta T = 3^\circ\text{C}$, (c): $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, (d): $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, (e): $\Delta T = 20^\circ\text{C}$)

의한 간섭무늬 개수도 증가한다. Fig. 5(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

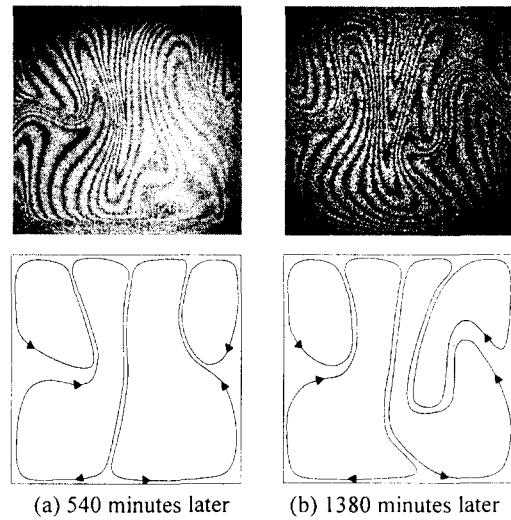


Fig. 6 Effect of elapsed time on reconstruction image obtained using double-exposure method ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$, $Ra=6.35 \times 10^6$)

대부분 전도에 의해서 이루어지므로 간섭무늬가 평행하게 나타난다.

Fig. 5(b)는 임계 Ra 수보다 조금 큰 $Ra=1.9 \times 10^6$ 에 해당하는 것으로 좌우 대칭인 간섭무늬와 유선 형태를 보여주고 있다. 이것은 Bühler⁽⁷⁾의 4 롤(roll) 모드에 해당하며, 수직 방향의 긴 와동(vortex)이 4 개가 존재한다. 간섭무늬를 자세히 보면 HSC 중앙부분과 좌우 모서리 부분에서는 부력의 영향으로 온도가 높은 아래면으로부터 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 4 개의 와동이 형성되는 것이다.

HSC 상하부 온도차가 $\Delta T=5^\circ\text{C}$ 인 $Ra=3.2 \times 10^6$ 에서의 실험결과(Fig. 5(c))는 4 와동 모드(4 vortex mode)를 보여준다. Fig. 5(b)와 마찬가지로 셀 중앙을 기준으로 거의 좌우 대칭인 분포를 가지며, 중앙에서 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. 5(d)는 HSC 상하부 온도차이가 10°C 일 때의 결과로 준 정상상태에 해당하며, Fig. 5(c)의 결

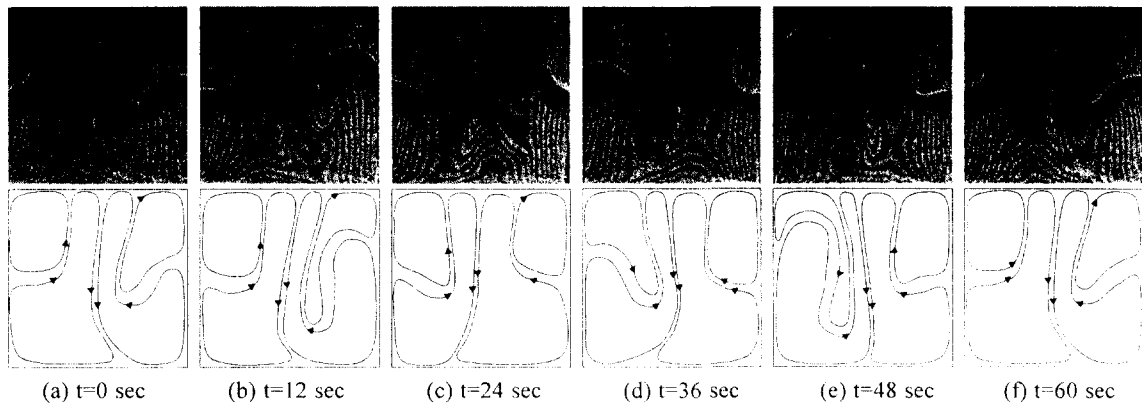


Fig. 7 A series of fringe pattern reconstructed using real-time method and corresponding streamlines showing oscillating flow structure at $Ra=6.35 \times 10^6$

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

Fig. 5(e)는 HSC 상하부의 온도차가 $\Delta T=20^{\circ}C$ 일 때의 간섭무늬와 유선형태를 나타낸 것이다. 이것은 Fig. 5(d)와 같이 주기적 4 와동 모드에 해당하며 큰 온도차이에 기인하여 간섭무늬가 보다 많이 생기고 유동이 매우 활발함을 알 수 있다.

Fig. 6 은 이중노출 방법에서 일차 노출에서 이차 노출까지의 경과시간의 차이에 따른 간섭무늬와 상응하는 유선형태를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 약 9 시간, Fig. 6(b)는 약 23 시간이 경과한 후에 취득한 결과로 간섭무늬 개수는 두 경우 모두 동일하나 주기적인 유동특성에 기인하여 두 경우의 유선형태가 조금 다르다. 이는 유동구조의 모드가 달라진 것이 아니라 주기적인 변화로 인해 이차 노출하는 시점이 일차노출시의 위상(phase)과 정확히 일치하지 않기 때문이다. 이것으로부터 모든 열전달이 전도에 의해서만 이루어진다는 가정 하

에서 예측한 열확산 시간(약 9 시간)이 어느 정도 타당함을 알 수 있다.

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, S 는 간섭무늬의 개수, λ 는 레이저의 파장, n 은 작동유체의 굴절률이다. 식 (2)에 따르면 본 실험조건에서 간섭무늬의 해상도는 약 $0.3^{\circ}C$ 이다. 따라서 재생 이미지에서 간섭무늬 하나마다 대략 $0.3^{\circ}C$ 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 주기적 유동 발생 임계 Ra 수보다 커지게 되면 HSC 윗면의 좌우 모서리에 있는 작은 와동이 커지고 작아지는 주기적인 변동을 하는 상태에 이르게 된다.

3.2 실시간 방법

실시간 방법의 홀로그래픽 간섭계를 이용하여 시간에 따른 온도장 변화를 효과적으로 관찰할 수 있었다. HSC 상하부 온도차를 $\Delta T=10^{\circ}C$ ($Ra=6.35 \times 10^6$)로 하여 열유동을 생성시키고 약 930 분이 경과한 후, 디지털 카메라를 이용하여 3 초 간격으로 재생된 간섭무늬 영상을 획득하였으며, 12 초 간격의 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 영상 취득 시 카메라의 노출 시간은 약 $1/50$ sec로 고정하였다.

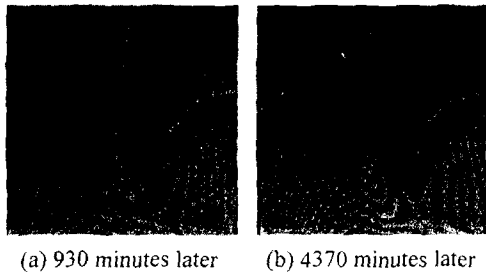


Fig. 8 Effect of elapsed time on fringe pattern reconstructed using real-time method ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$, $Ra = 6.35 \times 10^6$)

$Ra = 6.35 \times 10^6$ 조건에서 HSC 내부 유동은 약 62 초의 주기를 가지며, 4 개의 와동 중 윗면 모서리 부근에 위치한 와동의 주기적 변화가 현저하였다. 초기에는 오른쪽 상부의 작은 와동이 하부 벽면에서 상승하는 유동에 의해 대각선 방향으로 길어지는 모양을 하고 있다(Fig. 7(a)). 이로부터 12 초가 경과한 Fig. 7(b)를 보면 오른쪽 하부에서 상승하는 높은 온도의 유동으로 인해 상대적으로 낮은 온도의 상부 와동이 더욱 길게 아래쪽으로 늘어지게 된다. 시간이 흐름에 따라 오른쪽 상부에 위치한 긴 와동은 하부에서 올라오는 유동에 의해 중간 부분이 끊기게 되고, 끊어진 와동의 아래부분은 하부의 오른쪽 와동과 합쳐져 셀 하부의 왼쪽 와동쪽으로 확장하게 된다. 이에 따라 밀리게 된 왼쪽 하부의 와동이 왼쪽 벽면을 타고 상부로 이동하면서 왼쪽 상부의 와동이 중앙 아래쪽으로 향하여 대각선 방향으로 길어지게 된다(Fig. 7(c), (d)).

Fig. 7(e)에서는 Fig. 7(b)와 대칭되는 간섭무늬를 가지는데, 왼쪽 하부에서 올라오는 높은 온도의 유동이 셀 높이의 4/5 위치까지 이르고 상부의 와동은 수직방향으로 길게 늘어나게 된다. 시간경과에 따라 길게 늘어난 상부의 왼쪽 와동은 중간부분에서 끊기어 주기의 마지막 부분에서는 다시 오른쪽 상부의 와동이 길어지는 유동형태를 보여주고 있다. 즉, HSC 상부 좌우의 모서리에 있는 와동이 서로 엇갈리면서 주기적으로 변화하고 있다. Elder⁽³⁾는 다공질 매체의 온도경계층 영역에서 Ra 수를 $Ra(\delta) = (1/2)\beta g K(\kappa\nu)^{-1}\delta\Delta T$ 로 정의하였고, 안정된 온도경계층의 두께는 $\delta \propto \Delta T^{-1}$ 의 관계를 가진다고 하였다. Ra 수가 대류발생 임계 Ra 수보다 조금 크고 안정된 온도경계층이 형성되었다고 할 때, 열전도방정식으로부터 열확산 시간과 경계층 두께 사이의 관계를 구하면 $h^2/\kappa \propto \delta^2$ 이다. 따라서 위의 두 식에서 ΔT 를 소거하면 Ra 수와 HSC 대류유동의 무차원 주기 τ 는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\tau \propto Ra^{-2} \quad (3)$$

본 실험에서 얻어진 무차원 주기는 2.1×10^{-3} 으로 Koster⁽⁶⁾, Bühler⁽⁷⁾의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 8 은 실시간 방법을 이용하여 열유동을 발생시킨 후 경과시간의 차이에 따른 간섭무늬를 비교한 것이다. 실험조건은 HSC 상하부의 온도차가 10°C 로 $Ra = 6.35 \times 10^6$ 이다. Fig. 8(a)는 약 15 시간, Fig. 6(b)는 약 73 시간이 경과된 후 취득한 간섭무늬 영상이다. 이중노출 방법과 마찬가지로 간섭무늬 개수와 전반적인 온도장 분포는 두 경우 거의 차이가 없다.

따라서, 주기적 대류유동 발생 임계 Ra 수보다 큰 HSC 내부 대류유동의 주기는 Ra 수의 제곱에 반비례하며, 상부 좌우 모서리에 위치한 와동의 주기적 변화가 현저하였다. 이러한 와동의 주기적인 특성은 Howard⁽¹²⁾가 지적한 것처럼 좌우 수직벽면을 따라 발달하는 온도경계층의 불안정성에 기인한 것으로 보인다.

3.3 이중노출 방법과 실시간 방법의 비교

같은 Ra 수에서 측정된 Fig. 6 과 Fig. 8 을 비교해보면 이중노출 방법과 실시간 방법을 이용하여 얻은 간섭무늬의 개수는 거의 차이가 없지만 재생된 간섭무늬의 모양은 서로 다르다. 이것은 홀로그래프를 얻는 방법상의 차이에 기인한 것으로 보인다. 이중노출 방법은 노이즈가 적고 실험 중에 전혀 광학장치의 조작이 없으므로 상대적으로 깨끗한 영상을 얻을 수가 있다. 그러나 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 셀 내부에 비정상유동이 형성되어 있는 경우 이차 노출을 하는 시점에 따라 서로 다른 간섭무늬를 만들게 된다. 따라서 준 정상상태 혹은 비정상상태의 온도장 측정에는 어려움이 따른다.

반면에 실시간 방법은 비정상상태의 유동이나 주기적인 유동에 대해서 실시간으로 원하는 순간에 간섭무늬 영상을 획득하는 것이 가능하다. 그러나 일차 노출 후 필름을 현상하고 현상된 필름을 일차노출시의 원래 위치에 장착할 때는 레이저 파장의 반 파장($\lambda/2$) 범위 내에 놓여지지 않으면 오차가 발생하게 된다. 또한 시준 렌즈를 통과한 물체좌와 참조좌는 완벽하게 평행광이 되어야 한다. 따라서 실험 시 필름홀더축의 기울기(tilting)와 좌우로의 이동(translation) 등을 잘 조정하여 오차를 최소화하여야 한다. 그리고 나머지 광학장치들도 실험하는 동안 전혀 움직이지 않아야 한다. 이

와 같은 분해능을 충분히 고려하지 않게 되면 원하지 않는 파가 간섭을 일으켜 간섭무늬에 노이즈가 생성되어 측정 오차가 유발되게 되고, 이를 제거하기 위한 추가적인 영상처리 과정이 필요하게 된다. 본 연구에서는 재생이미지의 노이즈를 제거하기 위해 가우시안(gaussian) 필터와 그레이 레벨(gray level) 조절을 통하여 깨끗한 영상을 획득하였다.

4. 결론

홀로그래픽 간섭계의 이중노출 방법과 실시간 방법을 이용한 온도장 측정기법을 상하부 온도차가 $\Delta T=1, 3, 5, 10, 20^{\circ}\text{C}$ 인 Hele-Shaw Cell (HSC) 내부 대류유동에 상호 보완적으로 적용하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

- (1) 정상상태 대류유동의 온도장 측정에는 이중노출 방법이 조작성이 간단하고 재생된 간섭무늬가 깨끗하고 노이즈가 적었다.
- (2) 준 정상상태 혹은 비정상상태의 온도장 측정에는 실시간 방법을 이용하여 시간에 따른 간섭무늬의 변화를 효과적으로 관찰할 수 있었다.
- (3) 대류유동 발생 임계 Ra 수 이하에서는 내부의 열전달이 주로 전도에 의해서만 일어나며 Ra 수가 증가함에 따라 부력 효과가 커지며 HSC 내부에서 좌우 대칭인 대류유동이 발생하게 된다.
- (4) 주기적 대류유동 발생 임계 Ra 수보다 커지게 되면 좌우 수직 벽면의 온도경계층의 불안정성에 기인하여 HSC 상부의 좌우 모서리에서 생성된 와동이 현저하게 주기성을 가지고 변화하게 된다. $Ra=6.35 \times 10^6$ 조건에서는 주기가 약 62 초이었다.
- (5) 본 연구에서 다른 HSC 내부 유동처럼 실험 조건에 따라 정상상태와 비정상상태 유동이 공존하는 경우, 이중노출 방법과 실시간 방법을 상호 보완적으로 적용하는 것이 유용하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Gabor, D., 1948, "A New Microscopic Principle," *Nature*, Vol. 161, pp. 777~778.
- (2) Leith, E. and Upatnieks, J., 1964, "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 54, pp. 1295-1301.
- (3) Elder, J. W., 1967, "Steady Free Convection in a Porous Media Heated from Below," *J. Fluid Mech.*, Vol. 27, pp. 29-48.
- (4) Hartline, B. K. and Lister, C. R. B., 1977, "Thermal Convection in a Hele-Shaw Cell," *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, pp. 29-48.
- (5) 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.
- (6) Koster, J. N. and Müller, U., 1982, "Free Convection in Vertical Gaps," *J. Fluid Mech.*, Vol. 125, pp. 429-451.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 윤정환, 도택희, 이상준, 1996, "TLC 와 컬러화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정," 대한기계학회논문집(B), 제 20 권, 제 3 호, pp. 1114~1122.
- (10) Ostrovsky, Yu. I., Shchepinov, V. P. and Yakovlev, V. V., 1991, "Holographic Interferometry in Experimental Mechanics," 1st Ed., Springer-Verlag.
- (11) Rastogi, P. K., 1994, "Holographic Interferometry," 1st Ed., Springer-Verlag.
- (12) Howard, L. N., 1964, "Convection at High Rayleigh Number," In *Proc. 11th Int. Congr. Appl. Mech. München*, pp. 1109-1115.