

<논 문>

화상처리기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정기법 개발

이상준* · 백승조** · 윤정환** · 도덕희***

(1996년 3월 9일 접수)

Simultaneous Velocity and Temperature Measurement of Thermo-Fluid Flows by Using Particle Imaging Technique

Sang-Joon Lee, Seung-Jo Baek, Jong-Hwan Yoon and Deog-Hee Doh

Key Words : Velocity Field(속도장), Temperature Field(온도장), 2-Frame PTV(2화면 입자추적 속도계), Color Image Processing(컬러화상처리), Hele-Shaw Cell(Hele-Shaw 셀), TLC(감온성 액정).

Abstract

A quantitative flow visualization technique was developed to measure velocity and temperature fields simultaneously in a two-dimensional cross section of thermo-fluid flows. Thermochromic liquid crystal(TLC) particles are used as temperature sensor and velocity tracers. Illuminating a thermo-fluid flow with a thin sheet of white light, the reflected colors from the TLC particles in the flow were captured simultaneously by two CCD cameras; a 3-chip CCD color camera for temperature field measurement and a black and white CCD camera for velocity field measurement. Variations of temperature field were measured by using a HSI true color image processing system and TLC solution. The relationship between the hue values of TLC color image and real temperature was obtained and this calibration curve was used to measure the true temperature under the same camera and illumination condition. The velocity field was obtained by using a 2-frame PTV technique using the concept of match-probability to track true velocity vectors from two consecutive image frames. These two techniques were applied at the same time to the unsteady thermal-fluid flow in a Hele-Shaw cell to measure the temperature and velocity field simultaneously and some results are discussed.

1. 서 론

대부분의 실제 열유동현상은 난류이고 비정상상태이기 때문에 이를 정확히 해석하기 위해서는 속

도장과 온도장의 변화를 동시에 계측할 수 있는 측정기법이 필수적이다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 속도 및 온도측정기법은 유동의 흐름을 방해하거나 한 순간에 한 점에서의 물리량을 측정할 수 있는 점측정(point measurement)방법이 대부분이다. LDV(Laser Doppler Velocimetry)의 경우 유동의 흐름을 방해하지 않고 속도를 측정할 수 있으나, 두 개의 레이저빔이 만나는 측정체적내에서

*회원, 포항공과대학교 기계공학과

**포항공과대학교 대학원

***회원, 한국해양대학교 냉동공조공학과

입자거동을 측정하는 점측정방법의 한계 때문에 비정상유동의 속도장측정에는 적합하지 못하다. 최근 컴퓨터 및 화상처리기술의 발달로 인해 유동장내 많은 지점의 순간적인 속도정보를 얻는 것이 가능하게 되었다. 이러한 정량적인 유동가시화방법은 가시화된 디지털영상으로부터 시간에 따른 유동장 전체의 정보들을 획득해 낼 수 있으므로 열유동의 유동구조 및 열전달을 연구하는데 응용할 수 있다.

속도장 측정의 경우 폴리스티렌, 알루미늄 입자, 나일론 등을 유동의 추적입자(tracer)로 사용하며, 측정방법에는 입자의 변위(displacement)를 측정하는 방법에 따라 PSV (Particle Streak Velocimetry), PIV (Particle Image Velocimetry), LSV (Laser Speckle Velocimetry), PTV (Particle Tracking Velocimetry) 등으로 나누어진다. 이들 각각에 대한 자세한 내용은 Adrian,⁽¹⁾ Hesselink,⁽²⁾ Yang⁽³⁾ 등에 기술되어 있다.

PTV 방법은 연속적으로 획득된 입자화상(particle image)으로부터 각 입자(중심)를 추출한 후 각각의 입자를 추적함으로써 입자의 변위를 측정한다. 따라서 이 방법은 각각의 추적입자를 잘 구별할 수 있고 입자들이 속도벡터를 형성할 정도로 입자수밀도(particle number density)가 작은 경우 유리하다.

열유동해석에서 온도분포측정은 전열특성을 이해하는데 도움을 줄뿐만 아니라 유동구조 자체를 이해하는데도 크게 도움이 된다. 또한 시간에 따른 온도의 공간적인 분포를 알 수 있는 경우 국부적인 전열특성을 해석할 수 있다. 온도측정에는 수온온도계, 열전대, 저항온도계, 복사온도계 등이 널리 쓰이고 있으며, 이 가운데 열전대가 가장 많이 사용되고 있다. 열전대의 경우 정확하며 가격이 저렴하다는 장점이 있으나 유동을 방해하고 점측정방법이다. Pyrometry, CT (Computerized Tomography), LIF (Laser Induced Fluorescence), 감온성 액정 등은 광학적 온도측정방법으로써 비접촉성이므로 유동을 방해하지 않으며, 측정면의 온도정보를 동시에 측정할 수 있다. 그러나 Pyrometry, CT, LIF 방법은 높은 가격과 해상도가 낮다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 TLC (Thermochromic Liquid Crystal)를 이용한 온도측정기법들이 개발되어 높은 정확도와 우수한 공간분해능을 가지고 만족할만한 결과들을 보여주고 있다.

Klein⁽⁴⁾는 천이 경계층의 유동가시화 연구에 TLC

를 최초로 사용하였으며, Lemberg⁽⁵⁾는 비정상상태 조건하에서 이와 유사한 실험을 하였다. 그러나, 이들은 캡슐화되지 않은 TLC를 사용함으로써 TLC의 분자구조가 온도와 전단응력의 영향을 받아 변화하여 온도측정이 정확하지 못했다. McElderry⁽⁶⁾는 이를 극복하기 위해 캡슐화된 TLC를 이용하여 Klein⁽⁴⁾과 유사한 실험을 수행하였다. TLC를 이용한 초기의 온도장 측정은 대부분 일반 카메라를 이용한 정성적인 유동가시화를 통하여 이루어졌으나 최근에는 컴퓨터와 화상처리기술을 이용하여 가시화된 결과를 분석함으로써 정량적인 온도값을 얻는 것이 가능해졌다.⁽⁷⁾

Kimura⁽⁸⁾는 표면온도측정에만 사용되던 TLC를 유동장의 내부온도측정에 응용하였다. 캡슐화된 TLC를 유체와 혼합함으로써 TLC가 유동의 움직임과 온도를 나타내는 입자로 사용되어진다. 이 방법은 열유동 내부 특정단면에서의 온도분포를 측정하는데 효과적이다. Kimura⁽⁸⁾는 자연대류운동의 온도와 속도장을 두 화상 사이의 상호상관법을 이용하여 측정하였다. 그러나, 이 상관법은 화상의 공간분해능에 의해 크게 좌우되고 상대적으로 분해능이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

열유동내의 열전달현상은 대부분 운동량 전달현상과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 속도장과 온도장을 동시에 측정하는 것은 전달현상을 이해하는데 아주 유용하다. 본 연구는 비정상 열유동의 온도장과 속도장을 동시에 측정할 수 있는 측정기법을 개발하는 것을 목적으로 하며, 개발된 측정기법을 Hele Shaw cell (이후부터는 HSC로 약칭함)에 적용하여 cell 내부의 대류유동을 해석하고자 한다.

2. Hele-Shaw Cell (HSC)

밀폐공간 내부의 자연대류현상은 내부유동의 윗부분보다 아랫부분의 온도가 높아 발생한 열적 불안정성에 기인한다. 지금까지 많은 연구자들이 이와같은 자연대류현상을 연구하였으며, 열전달 모드의 상단부분을 밝혀 왔다. Gebhart⁽⁹⁾는 이러한 자연대류에 관한 기존의 연구들을 잘 정리하였다.

Hele-shaw⁽¹⁰⁾은 다공질매체내의 이차원유동과 평행평판 사이의 등온유동 사이의 유사성을 밝혔다. 다공질매체 내부의 점성유동과 HSC 내부의 등온유동은 유사성을 가지므로 HSC 내부유동의

연구로부터 다공질매체 내부유동을 해석할 수 있다.

HSC의 cell 크기와 작동유체가 결정된 경우 HSC 내부유동을 결정하는 무차원수로는 Rayleigh 수가 쓰인다. 여기서 Rayleigh수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T H^3}{\nu \alpha}$$

여기서, α 는 열확산계수, H 는 cell의 높이, β 는 열팽창계수, ν 는 동점성계수, ΔT 는 HSC 상하부 온도차를 나타낸다. 임계 Rayleigh수 이하의 경우 온도차에 의한 부력이 점성력보다 작기 때문에 열전달은 전도에 의해서만 이루어진다. HSC 상부와 하부의 온도차를 준정상상태(quasi-steady state)로 증가시켜 임계 Rayleigh수 이상이 되게 되면 HSC 내부는 열적으로 불안정해져 HSC 내부에 대류현상이 발생한다. Rayleigh수가 임계 Rayleigh수보다 조금 큰 경우 정상상태를 유지하다가 온도차를 더 크게 하면 유동이 정상상태에서 비정상상태로 바뀐다. 온도차가 더욱 커지면 비정상상태의 유동에서 새로운 정상상태의 유동으로 변화하게 된다.

Krishnamuti⁽¹¹⁾는 HSC 내부유동이 층류에서 난류로 천이하는 현상을 실험적으로 연구하였으며, Rayleigh수와 Prandtl수에 기초하여 HSC 유동을 다섯 가지로 분류하였다. Ozawa⁽¹²⁾은 TLC를 이용하여 HSC 자연대류의 온도와 유동구조를 가시화하였으며, Buhler 등⁽¹³⁾은 홀로그래피법으로 Rayleigh수 변화에 따른 HSC 대류유동의 인터페로그래프(interferogram)를 구하여 해석하였다.

밀폐공간내에서의 자연대류현상에 대한 기존의 연구들은 수치해석이 대부분이며, 실험의 경우 비정상 대류유동의 온도장과 속도장을 동시에 측정해야 하는 어려움 때문에 shadowgraph, schlieren, interferometry 등을 이용한 광학적 유동가시화 기술을 이루고 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 속도장측정

주어진 시간간격(Δt) 동안 입자가 움직인 변위벡터들을 획득하기 위해서는 연속적인 화상내에서 동일한 입자를 추적해야 한다. 기존의 추적 알고리즘

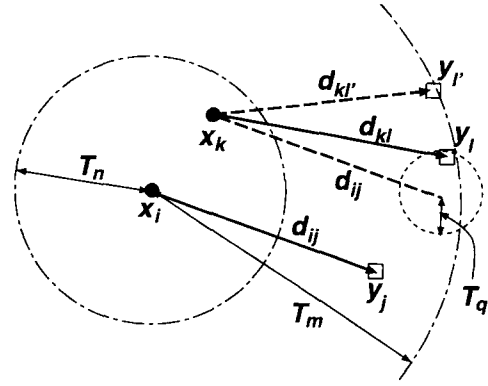


Fig. 1 Two-frame particle tracking algorithm by using match probability concept

으로는 4-frame PTV, 2-frame 상관법 등이 있다.^(14~16)

본 연구에서는 연속된 두 장의 입자영상만으로 입자를 효율적으로 추적할 수 있는 일치확률(match probability)방식의 2-frame PTV 속도추출기법을 이용하여 순간 속도장을 측정하였다. Fig. 1은 입자추적 알고리즘을 도시한 것이다.

이것은 2장의 연속된 디지털 유동화상내에 있는 입자의 가능한 모든 변위벡터를 고려한 후, 각 변위들에 대한 일치확률(match probability P_{ij})을 정의하고, 불일치확률(no-match probability P^*)과 함께 반복계산함으로써 일치확률밀도가 가장 높은 것을 변위벡터로 채택한다. 여기서, i 는 첫번째 화상의 입자중심의 번호를 나타내고, j 는 두번째 화상의 매칭(matching) 가능한 입자중심들의 번호를 의미한다. P_{ij} 는 두번째 프레임의 입자(j)가 첫번째 프레임의 특정한 한 입자(i)와 일치할 확률을 의미하며 P^* 은 첫번째 프레임에 있는 목적입자(i)가 두번째 프레임내에서 어떠한 match point가 없을 확률이다. 그러므로 목적입자(i)에 대한 P_{ij} 의 합들과 P^* 을 합하면 항상 1이 된다. 시간간격(ΔT)동안 첫번째 프레임의 입자(i)에 대응 가능한 두번째 프레임의 입자는 일정치(maximum movement) 이상을 넘지 않는다고 가정한다. 이때 움직임의 최대치는 일반적으로 유동내에서의 최대 변위에 맞추어진다. 또한 적분길이척도(integral length scale)의 개념에 의해 일정영역 T_n (neighborhood threshold)내에서 모든 입자들이 고체운동에 가깝게 움직인다고 가정할 수 있다. 즉, 입자(i)를 중심으로 하는 반경 T_n 내의 입자들은 변위의 차이를 나타내는 T_q (quasi-rigidity threshold)

가 크지 않다고 가정할 수 있다. Quasi-rigidity threshold T_0 는 유동내에서의 Taylor 미소길이척도(microscale)와 유사한 개념이다. 이러한 가정을 이용하여 연속적으로 일치확률 P_0 와 P^* 를 계산한 후 가장 큰 확률을 가지는 변위벡터를 구한 뒤 이를 두 화상 사이의 시간간격(Δt)으로 나누어 줌으로써 속도벡터를 구한다. 본 연구에서 사용한 2-frame PTV 알고리즘은 기존의 4-frame PTV 방식에 비해 계산시간이 짧으며, 단위면적 당 측정가능한 입자수가 훨씬 많다. 또한 속도벡터 회복비가 빠르며 측정 정확도가 높고 측정가능한 속도범위가 넓다. 구체적인 비교검증 결과와 이 방법을 이용한 난류유동장 측정에는 Lee & Beak^(17,18)에 잘 나타나 있다.

3.2 온도장 측정

TLC를 이용하여 온도를 측정할 경우 TLC의 컬러와 온도와의 관계를 정량적으로 구하는 작업이 필요하며, 이와같은 보정을 하기 위해서는 색을 정량적으로 표현하여야 한다. 일반적으로 RGB(red, green, blue)의 기본적인 값을 이용하여 색을 해석하며, 컬러시스템에 따라 Munsell 컬러 표현법, CIE와 XYZ 시스템, NTSC RGB 시스템으로 나눌 수 있다. 이 중 가장 많이 사용되는 방법은 비디오의 컬러신호 전송에 쓰이는 NTSC RGB 표현법이다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용된 HSI 컬러삼각형 모델을 나타낸 것으로 컬러영상을 HSI(Hue,

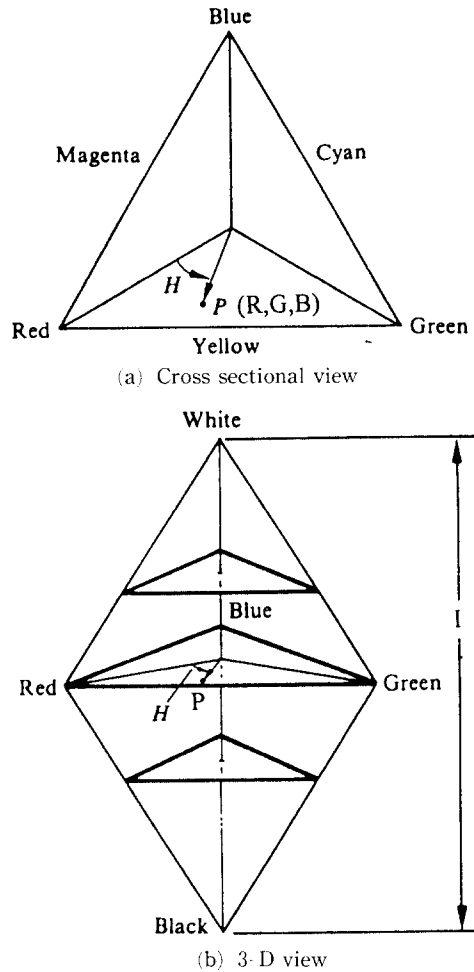


Fig. 2 HSI color triangle model

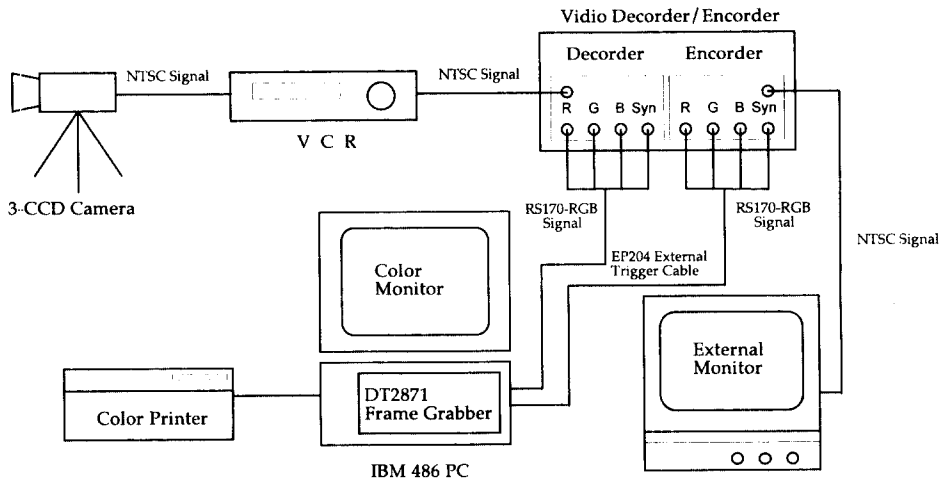


Fig. 3 Schematic diagram of a true color image processing system

Saturation, Intensity) 라는 인식가능한 특성값으로 표현한다. ⁽¹⁹⁾ 밝고 어두움을 나타내는 intensity I 는 삼각형들의 중심을 이은 선의 극값으로 표현되며, 컬러의 차이를 나타내는 hue값 H 는 삼각형 모델에서 intensity축을 기준으로 빨간색으로부터 회전한 각도로 표현된다. 또한 컬러의 깊이를 나타내는 saturation S 는 삼각형 중심에서부터 P 점까지의 거리로 나타내어진다.

본 실험에 사용되어진 컬러화상처리시스템의 구성도를 Fig. 3에 나타내었다. ⁽²⁰⁾ 저장된 영상을 분석하기 위해 NTSC신호를 디코더에 의해 RGB (Red, Green, Blue)의 세 가지 신호로 분리한 후 프레임그래버(Data Translation, DT2871)를 이용하여 256레벨(8bit)로 디지털화한 후 $512 \times 512 \times 8$ 비트의 각각의 프레임버퍼에 저장된다. RGB로 구성된 컬러정보는 프레임그래버에 내장된 RGB/HSI 컨버터에 의해 실시간 HSI값으로 바뀌어진다. 열유동의 온도정보를 얻기 위해 HSI 중 hue값이 주로 이용되며 hue값은 RGB값들로부터 계산이 가능하다. TLC를 이용한 열유동의 온도장 측정에는 TLC의 색깔과 온도의 관계를 알아내는 TLC 보정실험이 반드시 필요하다. 보정실험에서 얻어진 TLC의 hue값과 온도 사이의 상관관계는 열유동측의 TLC 입자의 실제 온도를 구하는데 이용된다.

3.3 실험장치

본 실험에 사용된 HSC 장치의 cell 내부는 높이 $H=50$ mm, 너비 $L=60$ mm, 폭 $d=5$ mm이다. Fig. 4는 실험장치의 개략도와 좌표계를 보여주고 있다. HSC의 앞뒷면은 두께 12.5 mm의 투명한 polycarbonate 시트로 제작하였고, 그 사이에 5 mm 두께의 아크릴이 HSC 양측면에 샌드위치모양으로 끼워져 있다. HSC의 위와 아랫부분은 구리로 만들어진 블록으로 구성되어져 있다. 구리블록 내부로 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의 정확도를 갖는 2개의 항온조(Neslab RTE-211, RTE-221)로부터 공급된 물을 순환시켜 HSC의 상하부 온도를 실험조건에 맞게 일정하게 유지시킨다. 그러므로 HSC 아래 윗면은 일정온도조건이며, 그 이외의 벽면은 아크릴로 제작되었으므로 단열조건으로 가정할 수 있다. 블록의 온도측정을 위해 상하부 구리블록 내부에(cell 내부로부터 1 mm 위치) T형 열전대를 장착하였다. 실험시 온도는 다점온도측정장치(Keithley 740)를 이용하여 측정하였으며 할로겐램프에 의한 백색광원을 HSC 좌측에 있는 슬릿을 통해 조명하였다. 실험시 조명에 의한 복사열전달을 최소화하기 위하여 영상을 기록할 때만 조명을 사용하였다.

TLC의 입자화상은 3-component 컬러 CCD 카메라(Sony DXC-930)와 흑백 CCD 카메라

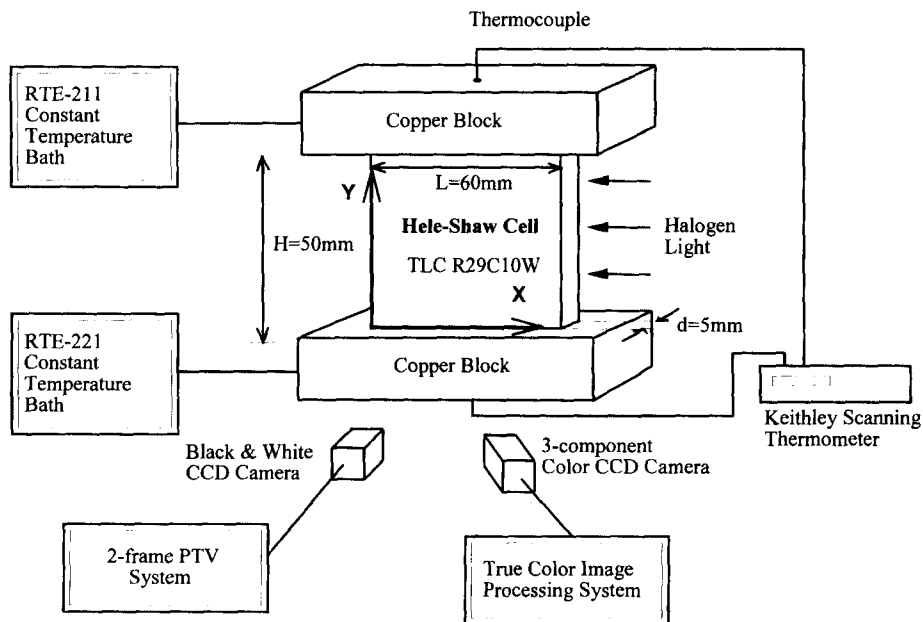


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

(Panasonic WV BL-600)를 이용하여 기록하였다. 3-component 컬러 CCD 카메라는 TLC의 색깔변화를 획득하여 온도를 측정하고, 흑백 CCD 카메라는 TLC 입자의 위치를 추적하여 속도장을 구하는데 이용된다. 컬러카메라는 조명과 약 60°의 각을 이루고 있으며 흑백카메라는 조명과 90°의 각을 이루고 있다.

3.4 실험방법

TLC 보정실험에서는 두 개의 항온조를 이용하여 HSC 상하부 구리블럭을 상부온도를 높게, 하부온도를 낮게 유지시켜 원하는 온도조건에 이르면 17% 글리세린 수용액에 TLC를 약 0.05% 질량비로 섞은 혼합액체를 작동유체로 HSC 내부로 주입한다. 이때 물과 글리세린의 질량비는 TLC와 글리세린 수용액의 비중을 같게 만들기 위하여 반복 실험을 통해 미세하게 조절하였다. 상부의 온도가 하부의 온도보다 높아 수직방향으로 안정된 온도구배가 형성될 때까지 기다린다. 안정된 온도구배가 형성되면 왼쪽 구리블럭에 있는 구멍을 통해 열전대를 HSC 내부로 삽입하여 수직으로 이송시키며 온도와 그 온도에 해당하는 TLC 컬러영상을 획득한다. TLC에서 반사되는 색은 온도만의 함수가 아니라 조명과 카메라의 위치에 크게 영향을 받기 때문에 본 실험과 같은 조명 및 카메라 상태에서 보정실험을 수행하였다. 보정실험이 끝나면 HSC의 상부를 낮은 온도, 하부를 높은 온도조건으로 바꾸어 상하부 구리블럭을 일정한 온도차로 유지시킨 후 작동유체를 삽입한다.

온도감지 및 속도추적을 위한 입자(particle)로써 29°C로부터 약 10°C의 발색범위를 갖는 마이크로 캡슐화된 TLC(Hallcrest R29C10W)를 사용하였다. 사용된 TLC는 지름이 약 100 μm 로써 2-frame PTV를 이용하여 속도를 측정하는데 적당한 크기이며 질량비가 적기 때문에 유동의 흐름을 거의 방해하지 않는다.

마이크로 캡슐화된 TLC를 열유동의 온도측정 센서로 사용하기 위해서는 먼저 TLC의 광학적인 성질과 온도변화에 따른 반응시간을 고려하여야 한다. 마이크로 캡슐화된 TLC 입자의 광학적인 성질은 Bragg 형태의 산란이므로 TLC 입자의 온도가 일정한 경우에도 카메라와 TLC 입자에 입사하는 빛의 각도에 따라 색이 바뀌게 된다. 3-Component CCD 카메라는 HSC 장치로부터 약

120cm 떨어진 곳에 조명과 약 60도의 각도를 갖도록 설치하는데 이 경우 카메라와 조명의 각도 차이에 따른 hue값의 변화는 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁶⁾

마이크로 캡슐화된 TLC 입자표면의 온도변화에 따른 입자중심의 반응시간은 TLC 입자의 반경과 TLC의 열확산계수의 함수이다. TLC 입자의 지름이 100 μm 보다 작은 경우 반응시간은 100msec 미만이며, 특히 유체중에 입자가 떠 있는 경우 입자는 작동유체와 같이 움직이므로 TLC 입자의 표면 온도는 급격하게 변하지 않는다.⁽¹⁶⁾ 본 연구에서와 같이 유동의 속도가 느린 경우, 시간지연은 같지만 TLC는 유동의 온도변화에 따라 정확히 반응하므로 TLC를 온도센서로 사용하는 데는 큰 어려움이 없다.

본 실험에서는 열적 불안정성에 의해 HSC 내부에 자연대류현상이 생길 때까지 기다린 후, 3-component 컬러 CCD 카메라와 흑백 CCD 카메라로부터 구한 TLC 입자화상을 두 대의 컴퓨터를 이용해 하드디스크에 동시에 기록한다. 속도장 측정의 경우 연속적으로 기록된 두 장의 입자화상을 이용하여 속도벡터를 획득하였다. 이때 시간간격 Δt 가 짧을수록 보다 정확한 측정이 가능하나 입자변위 측정의 불확실성이 커지게 된다. 즉, 입자변위가 작은 경우에는 측정가능한 속도범위가 줄어들고 측정오차가 커지며, 변위가 큰 경우는 공간분해능이 떨어지게 된다. HSC 내부의 유동은 아주 느리기 때문에 $\Delta t=0.6$ 초 간격으로 두 개의 입자화상을 얻은 후 2-frame PTV 입자추적 알고리즘을 이용하여 속도벡터를 추출한 후 에러검출 알고리즘을 이용하여 에러벡터들을 제거하였다. 유동화상내의 최대 입자수와 측정가능한 속도범위는 속도장 측정 알고리즘과 측정장치의 hardware에 의해 결정되어진다. 예를 들어 높은 분해능을 가진 CCD 카메라를 사용할 경우 입자수와 측정 정확도를 높일 수 있으며, 고속카메라를 사용하거나 시간간격(Δt)를 감소시킴으로써 측정가능한 최대속도를 높일 수 있다. 온도장 측정의 경우 저장된 컬러화상으로부터 hue값을 추출한 뒤 TLC 보정실험에서 얻어진 hue와 온도와의 관계식을 이용하여 온도장을 계산하게 된다. 온도장 및 속도장 동시측정의 경우 TLC 입자 하나 하나가 온도감지센서와 속도 측정 tracer 역할을 동시에 수행하므로, 이 두 가지 조건을 동시에 만족할 수 있는 TLC 입자를 적

절히 선정하여야 한다.

4. 결과 및 토의

TLC를 이용한 온도장 측정에 필요한 TLC의 색깔과 온도 사이의 상관관계를 구하기 위하여 열전대가 설치된 위치에서 100×3 pixel의 컬러정보를 평균하여 구한 hue값과 열전대로 측정된 온도를 기록하여 보정실험을 수행하였다. Fig. 5은 HSC 내부에 위치한 TLC 용액의 hue값과 실제온도 사이의 보정결과를 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 hue값이 비례하여 증가하고 있으며, $28.3^\circ\text{C} \sim 31.7^\circ\text{C}$ 구간의 보정곡선은 다음과 같은 6차 다항식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Temperature} [^\circ\text{C}] = & 30.59 - 0.2456 \times \text{hue} + 0.0126 \\ & \times \text{hue}^2 - 2.049E(-4) \times \text{hue}^3 \\ & + 2.125E(-6) \times \text{hue}^4 \\ & - 1.084E(-8) \times \text{hue}^5 \\ & + 2.151E(-11) \times \text{hue}^6 \end{aligned}$$

이와 같이 구해진 TLC 보정식을 본실험에서 구한 TLC 컬러영상의 hue값에 대입하여 실제온도를 측정할 수 있다. 컬러영상의 intensity와 saturation은 조명의 세기와 입자의 단위면적당 분포개수에 따라 변화하기 때문에 온도측정에 사용하기 어렵다. 그러나, intensity가 너무 낮게 되면 색정보의 정확도가 떨어지기 때문에 본 실험에서는 일정한 intensity 이하의 색정보는 무시하였으며 저역필터(low-pass filter)를 이용하여 노이즈를 제거하였다.

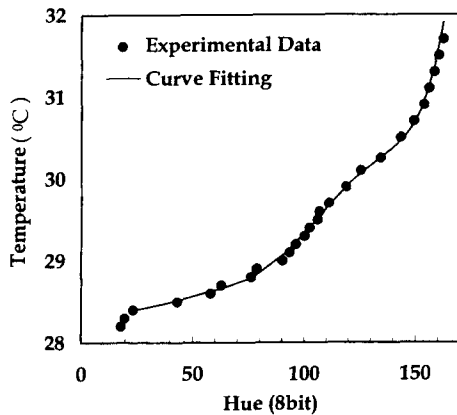


Fig. 5 Hue versus temperature calibration curve

Fig. 6은 초기온도가 22°C 인 작동유체를 HSC 내부에 주입하고 10분이 경과한 후 30초 간격으로 측정된 HSC 내부 속도장을 나타내고 있다. 이때 하부 구리블럭의 온도는 30.5°C , 상부 구리블럭의 온도는 28.3°C 로 유지시켰다. 온도가 높은 아랫부분의 좌우 모서리에서 부력의 영향으로 윗방향으로 유동이 향하고 있으며, 모서리에서 수직벽면을 타고 위로 상승하던 유동은 cell 높이의 약 9/20위치에서 양쪽벽면으로부터 박리되어 cell 윗면 중앙을 향해 나아간다. 이들중 일부는 윗면의 중앙부분에 부딪힌 후 반대쪽에서 오는 유동과 합쳐져 중앙 수직면을 따라 바닥면까지 하강하고, 일부는 양쪽 모서리방향으로 향하여 작은 와동을 형성한다. HSC

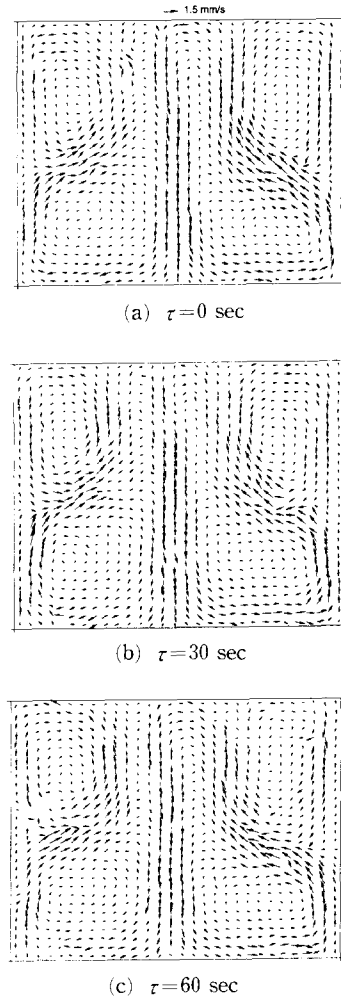


Fig. 6 Variation of velocity field in a Hele-Shaw cell after 10 minutes.

내부의 유동은 네 개의 와동으로 구성되어 있으며 완전하지는 않지만 거의 좌우대칭의 형태를 보여주고 있다. 하부에 있는 와동의 크기는 상부에 형성된 와동에 비해 크다. 30초 간격으로 측정된 속도장 결과를 비교해 보면 전반적으로 유사한 유동구조를 갖고 있으나 국부적인 속도변동을 볼 수 있다. 이와같은 현상은 온도장 결과에서도 비슷하게 나타나고 있다.

Fig. 7은 같은 실험조건에서 10분 경과 후의 HSC 내부 온도장 변화를 0.05°C 간격으로 흑백명암(gray level)으로 나타낸 것이다. HSC 하부의 좌우 수직면에서의 온도가 가장 높게 나타났다. 이

는 속도장 결과에서 높은 온도의 유동이 상승하는 부분과 일치한다. 즉, 온도가 높은 아래부분에서는 유동이 가열되어 양측 벽면을 따라 상승하고 온도가 낮은 윗부분의 유동은 cell 중앙 수직면과 양측 벽면을 따라 아래로 하강하게 된다. HSC 윗면 바로 아래부분과 HSC의 중앙 수직면 부근의 온도가 가장 낮게 나타난다. 전체 온도장은 속도장과 마찬가지로 중앙 수직면을 기준으로 거의 좌우 대칭인 형태를 보여주고 있다. 또한 시간에 따른 온도장 공간분포 변화를 자세히 살펴보면 아래면에서 윗면으로의 열전달이 주로 대류에 의해 이루어지기 때문에 속도장(Fig. 6)의 유동구조 변화와 서로 밀접

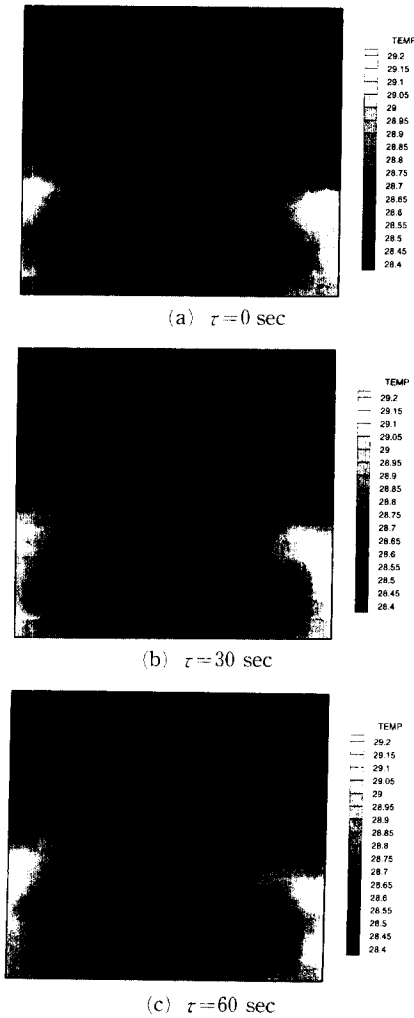


Fig. 7 Variation of temperature field in a Hele-Shaw cell after 10 minutes.

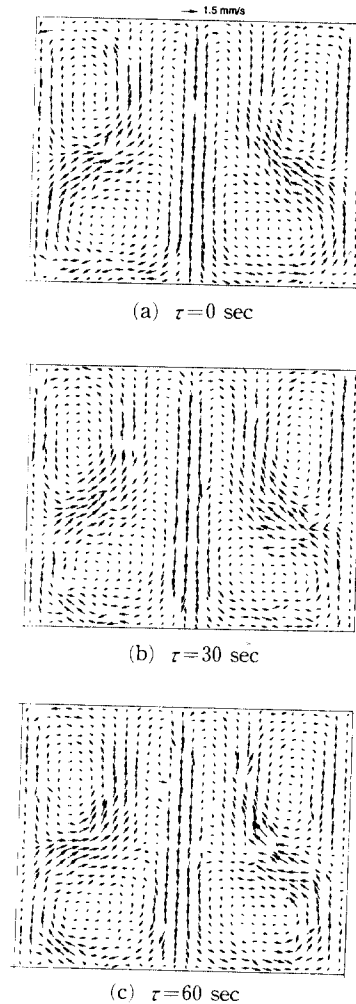


Fig. 8 Variation of velocity field in a Hele-Shaw cell after 20 minutes.

한 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 이들 속도장과 온도장 측정결과는 Buhler⁽¹³⁾의 인터페로그램을 이용한 가시화 결과와 유사하다.

Fig. 8은 20분 경과후 30초 간격으로 측정한 HSC 내부 속도장 변화를 나타낸다. 여기서 보면, 10분동안 HSC 내부온도가 약간 상승하여 Fig. 6의 결과와 비교할 때 cell 상부에 있는 낮은 온도의 와동은 아래 위 방향으로 약간 길쭉한 형태로 바뀌고, cell 하부의 와동은 옆으로 약간 길쭉한 형태로 변화한다. 따라서 두 속도장 결과를 비교하게 되면 cell 중앙높이 부분의 속도벡터들이 약간 변화했음을 볼 수 있다. 그러나, HSC 내부 대류운동의 속도장은 거의 발달한 단계에 이르러 전체적

인 유동구조는 매우 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 9는 20분 경과 후의 HSC 내부 온도장 변화를 나타낸 결과이다. 이 결과를 보면 전반적으로 cell 내부 온도값들이 상승하여 Fig. 7의 결과보다 높은 온도분포를 보인다. 그러나 전체적인 등온선의 형태는 속도장 결과와 유사함을 알 수 있다.

5. 결 론

2-frame PTV 속도추적법과 컬러화상처리 시스템을 이용하여 속도장 및 온도장 측정기법을 개발한 후 이를 Hele-Shaw cell(HSC) 자연대류운동에 동시에 적용한 결과, 시간에 따른 HSC 내부 대류운동의 속도장과 온도장 변화를 동시에 측정할 수 있었으며 기존의 광학적인 가시화 결과와 정성적으로 잘 일치하는 결과를 얻었다. 본 연구에서 개발한 속도장 및 온도장 동시측정기법은 기존의 점계측방법으로는 불가능한 비정상 열유동의 유동구조 및 열전달해석에 매우 유용하며, 열유동문제의 해결에 크게 도움이 될 것으로 기대되어진다.

후 기

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 연구되었다.

참고문헌

- (1) Adrian, R. J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, pp. 261~304.
- (2) Hesselink, L., 1988, "Digital Image Processing in Flow Visualization," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 20, pp. 421~485.
- (3) Yang, W. J., 1989, *Handbook of Flow Visualization*, Hemisphere Publishing Cp., New York.
- (4) Klein, E. J., 1968, "Liquid Crystals in Aerodynamic Testing," *Astronaut Aeronaut.*, Vol. 6, pp. 70~73.
- (5) Lemberg, R., 1971, "Liquid Crystals for the Visualization of Unsteady Boundary Layers," *3rd canadian congress of Applied Mechanics*, Calgary.

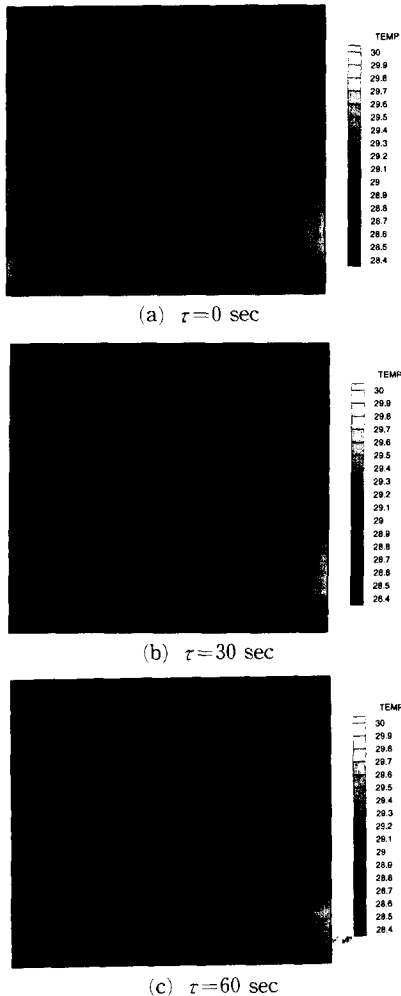


Fig. 9 Variation of temperature field in a Hele-Shaw cell after 20 minutes.

- (6) McElderry, E. D., 1970, "Boundary Layer Transition on a Flat Plate," *Air Force Flight Dynamics Lab Report., FDMGTM70-3*.
- (7) Cooper, T. E., Field, R. J. and Meyer, J. F., 1975, "Liquid Crystal Thermography and Its Application to the Study of Convective Heat Transfer," *J. Heat Transfer*, Vol. 92, pp. 442~450.
- (8) Kimura, R., 1974, "Visualization of Temperature Fields of Water by Liquid Crystals," *Proc. 2nd. Symp. on Flow Visualization*, Japan, pp. 99~102.
- (9) Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R.L. and Sammakia, B., 1988, "Buoyancy-Induced Flows and Transport," Hemisphere, New York.
- (10) Hele-Shaw, H.S., 1898, "The Flow of Water," *Nature*, Vol. 58, pp. 34~36.
- (11) Krishnamurti, R., 1973, "Some Further Studies on the transition to Turbulet Convection," *J. Fluid Mech.*, Vol. 60, Part 2, pp. 285~303.
- (12) Ozawa, M., Muller, 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 Fluids*, Vol. 12, pp. 213~222.
- (13) Buhler, L., Erhard, P., Gunther, G., Muller, 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.
- (14) Willert, M. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluid*, Vol. 10, pp. 181~193.
- (15) Kobayashi, T., Saga, T., Haeno, T. and Tsuda, N., 1991, "Development of a Real-Time Velocity Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using a Digital Image Processing Design," *ASME, Experimental and Numerical Flow Visualization (ASMEFED-128)*, B. Khalighia et al., ed., New York, Atlanta, pp. 9~14.
- (16) Doh, D.H., 1994, "A Study on Three-Dimensional Particle Imaging Tehrmometry and Velocimetry using Liquid Crystal," Ph. D. Thesis. Univ. of Tokyo., Japan.
- (17) Lee, S. J. and Baek, S. J., 1995, "Two-Frame PTV and Its Application to a Turbulent Channel Flow", *Proc. of Int. Workshop on PIV-Fukui'95*, Fukui, Japan, pp. 217~226.
- (18) 백승조, 이상준, 1995, "일치확률방식의 2-프레임 PTV 알고리즘개발," 대한기계학회논문집 제19권 제7호, pp. 1741~1748.
- (19) 이대성, 이상준, 1994, "TLC Solution을 이용한 반경방향으로 온도구배가 존재하는 회전유동에서의 온도장 측정," 대한기계학회 '94년도 추계학술대회 논문집(Ⅱ), pp. 280~285.
- (20) 윤정환, 도덕희, 이상준, 1996, "TLC와 컬러화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제3호, pp. 1114~1122.