

Two-color LIF 기법을 이용한 단열체가 있는 밀폐계 내에서의 자연대류에 관한 실험적 연구

권수현* · 정은호* · 민영욱* · 김정천†

Experimental Study on the Natural Convection in an Enclosure with an Adiabatic Body Using the Two-Color LIF Method

S. H. Kwon, E. H. Jeong, Y. U. Min and K. C. Kim

Abstract. Most of the previous studies on natural convection were based on the numerical analysis, and some experimental studies considered the classic case of thermal convection. In this study, an adiabatic square body was located at the center of an enclosure between the bottom hot and top cold walls. And the measurement of the detailed temperature fields was conducted by the method of two-color Laser Induced Fluorescence using a Nd:Yag laser. As a result, heat transfer characteristics of natural convection with an adiabatic body was estimated as a function of time over a range of Rayleigh numbers.

Key Words : Laser Induced Fluorescence(레이저형광여기법), Natural convection(자연대류), Temperature field(온도장)

1. 서 론

밀폐계 내에서의 자연대류는 전자장비 내부의 냉각, 열교환기 설계, 축열장치, 원자로 및 초전도 자성체의 냉각, 건물의 단열 등 공학적인 측면에서 문제뿐만 아니라 환경공학, 지구 물리학 등의 여러 응용분야와도 관련되어 지금까지 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. 이러한 밀폐공간 내에 있어서의 자연대류 특성은 공간의 기하학적 형태나 경계조건에 따라 매우 민감하며, 기본방정식이 비선형이고 운동량방정식과 에너지방정식이 서로 연관되어 있기 때문에 이론 및 실험적 연구가 상당히 어렵고 제한적이어서 현재까지 이루어진 대부분의 자연대류 관련 연구는 Prandtl수나 Rayleigh수에 따른 유동장 및 온도장 특성을 수치해석적으로 구명한 논문 외에는 연구가 미비한 실정이다. 물론, Sernas는 종횡비가 작은 사각 밀폐공간에 대해서 Wollaston prism schlieren interferometer를 이

용하여 실험적으로 연구하였고, 담배연기를 사용하여 유동을 가시화하였다. 또한, Braga는 한쪽 측면이 가열되고, 다른쪽 측면이 냉각되는 사각 밀폐공간 내에 물이 들어 있는 경우에 대하여 유동장을 가시화하여 최대밀도점이 유동 및 열전달 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 하지만 단열체가 내부에 존재하는 밀폐계의 자연대류에 관한 2차원 온도장의 측정 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Sakakibara & Adrian의 실험적 연구로 제안된 레이저에 의해 여기되는 온도에 민감한 염료를 사용하는 Two-color LIF 기법을 바탕으로 기존의 실험에서 광원으로 사용되어진 Ar-ion 레이저에 비해 광출력이 높은 Nd-Yag 레이저를 사용하여 상·하부면이 등온면이고, 양측면은 단열면으로 구성되어 있는 정사각형의 밀폐공간의 중앙에 단열체가 있을 때 밀폐공간 내에서의 자연대류현상의 측정을 통해 2차원 온도장을 분석하였다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 밀폐계의 개략도를 Fig. 1에 나

†부산대학교 기계공학부

E-mail: kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 대학원 기계공학과

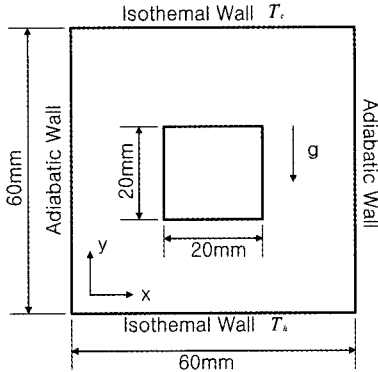


Fig. 1. Schematic diagram of enclosure with adiabatic solid body.

타내었다. 실험 모델은 광투과성과 투명성 및 치수안정성이 우수하며, 온도 변화에 따른 변형이 거의 없는 두께 15 mm의 투명 아크릴로 제작하였다. 크기는 가로 60 mm, 세로 60mm로 제작되었으며, Mallinson과 de Vahl Davis(1977)의 결과에 따라 end effect를 최소화하기 위하여 길이는 150 mm(1.2배 이상)으로 제작하였다. 밀폐 공간의 윗면과 아랫면은 저온부와 고온부의 등온면으로 두께 1 mm의 동판으로 제작하였다.

상·하 등온면의 온도 유지를 위해서 두께 15 mm의 아크릴을 이용하여 직사각형 구조의 안내유로를 만들어, 이를 동판과 직접 접촉시켰다. 안내유로를 따라 순환된 물이 등온면으로 사용되어진 동판과 직접 접촉하여 정상상태의 온도를 유지하도록 하였으며, 온도 유지를 위해서 두 대의 항온조(constant temperature bath)를 사용하여 실험조건을 유지하였다. 순환되는 물의 온도는 고·저온부 모두 1차 냉각 또는 가열 후 항온조에서 교반기를 이용하여 교반시킴으로써 국부적인 온도차가 나지 않도록 하였다. 이 때 항온조 내의 물의 온도는 디지털 온도계와 열전대, 수온 온도계를 사용하여 비교 측정하였다. 물의 순환은 항온조 자체에 설치되어 있는 펌프를 이용하였으며, 항온조의 입출구에 바이패스 라인과 밸브를 설치하여 유량과 압력을 조절하였다. 유동의 가시화를 위한 전·후면을 제외한 나머지 벽면들은 모두 두께 20 mm의 단열체로 단열하여 주위와의 열전달을 최대한 차단하여 외부로의 열손실을 없게 하였다. 또한 밀폐 공간 내에는 가로·세로 20 mm, 길이 150 mm의 내부 단열체를 두었으며, 레이저에 의한 광산란 효과를

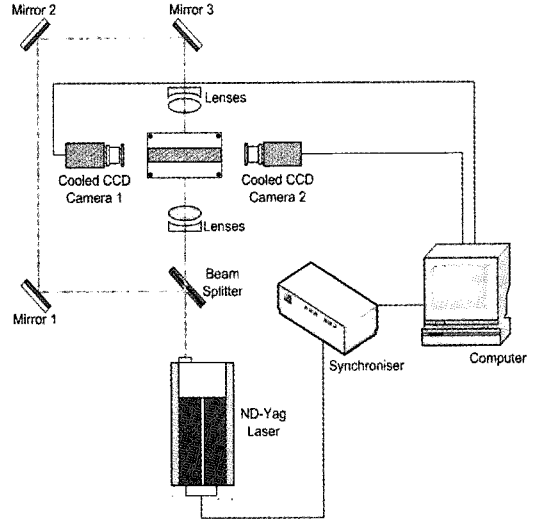


Fig. 2. Schematic of experimental setup.

고려하여 표면에 흑색 무광페인트로 도색하였다.

항온조와 등온면으로 사용된 동판의 온도분포 측정을 위해 미세열전대(T-type, OMEGA사)와 이에 따른 데이터 획득장치(Data logger, FLUKE사)를 사용하였으며, 상·하 등온면에 각각 6개의 열전대를 부착하였다. 본 실험에 사용된 미세열전대의 경우 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 의 정도를 가지며 신뢰성 확보를 위해 사용 전 온도 보정을 실시하여 보정 값을 산출, 처리하였다.

2.2 실험방법

Fig. 2는 온도장 측정을 위해 사용된 실험장치도를 나타낸다. 밀폐공간 내의 온도장의 가시화를 위한 Two-color LIF 기법에 사용된 광원은 이중펄스 방식의 Nd-Yag 레이저로서 532 nm의 파장을 가지며, 4 nsec 동안 12 mJ의 펄스 레이저를 방출한다.

실험장치의 측정영역 내부에는 형광염료인 Rhodamine B (1 g/l)와 Rhodamine 110 (0.1 g/l) 용액으로 채웠으며, 증류수(deionized water)에 용해시켜 사용하였다. Nash 등에 의하면 비형광입자는 노이즈로 작용하기 때문에 $5\ \mu\text{m}$ 로 필터링된 증류수를 사용하였다.

Rhodamine B는 물속에서 화학적 안정성과 스펙트럼 특성이 매우 우수하기 때문에 가장 널리 사용되는 형광물질이다. 특히 Rhodamin B는 온도에 민감하고, 470~600 nm의 흡수스펙트럼을 가지며 Argon-ion-Nd-Yag 레이저 등으로 쉽게 여기(Excitation)상태

로 만들 수 있기 때문에 온도감응용 형광염료로 사용된다. Two-color LIF실험을 위해 온도변화에 민감하지 않은 염료인 Rhodamine 110를 사용하였으며 이 염료는 Rhodamine B와 공통된 흡수파장영역을 가지는 동시에 Rhodamine B와는 다른 방출파장영역을 가지는 특성을 지닌다. Rhodamine B와 Rhodamine 110에서 나온 형광 빛은 두 대의 Cooled CCD 카메라(PIV CAM 13-8, TSI사)로 촬영된다. 이 때, 두 대의 Cooled CCD 카메라 렌즈 앞에는 입사광이나 광학적 잡음을 제거하기 위해 각각 OG-550 nm(Melles Griot)의 high pass filter와 505~515 nm(Edmund-510)의 band pass filter를 사용하였으며 동기화를 위해 싱크로나이저를 사용하였다.

2.3 실험조건

본 실험에서는 저온부의 온도를 10°C로 일정하게 고정시키고 고온측의 물의 온도를 각각 20°C, 30°C, 40°C, 60°C로 변화시켜 레이놀즈 수 10^7 - 10^8 구간에 대하여 실험을 수행하였다. 고·저온부의 등온면에 설치되어있는 미세열전대를 통해 등온면의 온도분포 및 온도변화를 관찰한 후 등온면의 시간당 온도 변화량이 평균 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내 일 때를 정상상태(steady state)에 도달한 것으로 간주하였다.

표 1은 본 실험이 수행된 조건과 범위를 나타낸 것이다. 여기서 R_α 는 밀폐공간의 상, 하부의 등온면의 온도차에 의해서 정해지는 Rayleigh수를 나타낸다. (단, α : 유체의 열팽창률, ν : 동적점성률, β : 유체 중의 온도기울기, g : 중력가속도, L : 특성길이)

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

실험에서는 밀폐공간의 종횡비(aspect ratio)를 1로서 고정하였으며 밀폐공간의 중앙에 설치된 단열체의 종횡비도 1로서 고정하였다. 또한, 실험이 수행된 Rayleigh수의 범위는 $R_\alpha = 1.82 \times 10^7 \sim 3.27 \times 10^8$ 범위이며 사용된 내부 단열체는 아크릴 사각봉을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 Calibration

온도 측정을 위하여 자연대류 모델에서 온도변화에

Table 1. Experimental conditions

	T_h	T_c	P_r	R_α
Case 1	60°C	10°C	4.83	3.27×10^8
Case 2	40°C	10°C	6.14	2.10×10^8
Case 3	30°C	10°C	7.01	5.74×10^7
Case 4	20°C	10°C	8.09	1.82×10^7

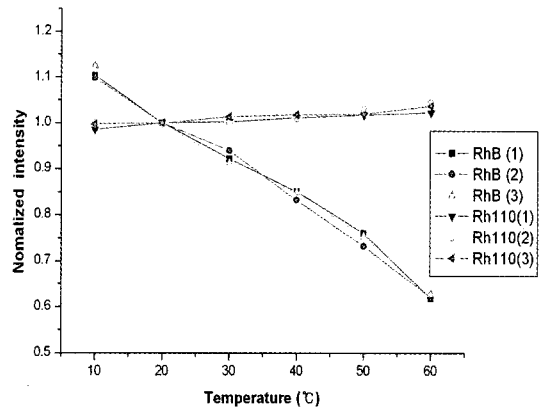


Fig. 3. Variation of the fluorescence intensity against temperature.

따른 Rhodamine B, Rhodamine 110 두 염료의 형광 강도변화에 관한 보정 실험을 실시하였다.

온도 조건은 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C로 변화시켜가며 실험을 수행하였으며 각각 20장의 보정용 이미지를 획득하여 평균하여 각각의 온도에 대해 측정된 형광 이미지의 위치에 따른 보정식을 구하였다. 이 때 하나의 픽셀 값을 대표값으로 사용할 경우, 국부적인 오차에 의한 신뢰도가 떨어지게 되므로 8×8 픽셀의 값을 평균하여 사용하였다.

Fig. 3은 Rhodamine B와 Rhodamine 110의 온도에 따른 형광강도 변화를 나타내고 있다. Rhodamine B는 온도가 증가함에 따라 형광강도가 감소하지만 Rhodamine 110은 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이를 통해 온도의존성에 독립적인 Rhodamine 110을 사용함으로써 레이저소스의 관원 불균일성을 보정할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 4는 형광강도의 시간 의존성에 관한 실험 결과로 시간이 경과함에 따라 형광강도가 감소하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 온도와 형광강도에 관한 보정 결과를 이미지 후처리 과정을 거쳐 100장의 이미지를 앙상블한 결과와 각 온도 범위에서의 라인 데이터 값이다. 실험결과 1.5°C~2.5°C 이내의 높은 온도 지시

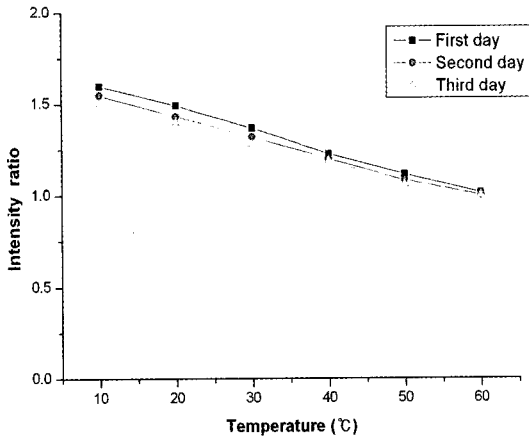


Fig. 4. Variation of the fluorescence intensity against time passage.

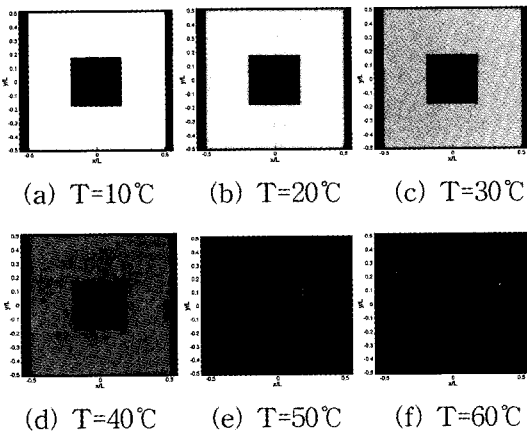


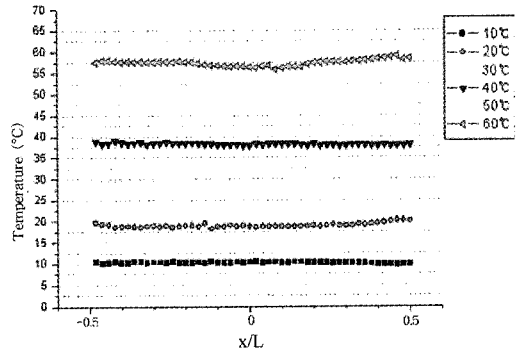
Fig. 5. Fluorescence ratiometric images of Rhodamine 110 and Rhodamine B.

성을 확인할 수 있었다.

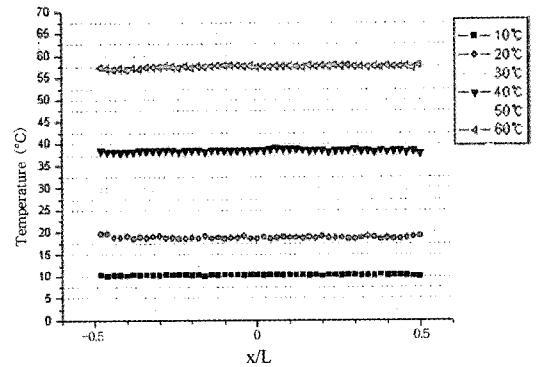
3.2 평균 온도장

Fig. 7은 $R_a = 3.27 \times 10^8$ ($\Delta T = 50^\circ\text{C}$), 2.1×10^8 ($\Delta T = 30^\circ\text{C}$), 1.82×10^7 ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$), 5.74×10^7 ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$) 일 때의 평균 온도장 결과로서 100장의 순간 온도장 이미지를 앙상블한 결과이다.

단열체의 좌측이 우측보다 평균 $3^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ 높은 온도분포를 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 단열체의 좌우측면에 단열을 위하여 설치한 단열체의 열평형이 맞지 않아 발생한 결과로 보인다. 그러나 높은 Rayleigh 수의 조건에서는 단열체내의 유체가 활발한 대류현상에 의해 상대적으로 낮은 온도구배를 가짐을



(a) P1 (width)



(b) P2 (height)

Fig. 6. Variation of spatial temperature.

확인할 수 있었다. 특히 상하등온면의 온도차가 적은 경우 내부의 온도차가 불연속적인 특성이 두드러짐을 확인할 수 있는데, 이는 단열체의 좌우에서 조명이 입사되는 실험구조의 특성상 레이저광이 서로 중첩되면서 간섭을 일으켜 발생하는 광손실에 의해 불연속면이 발생하는 것으로 추측된다. 본 실험결과를 통해 전체적인 온도장의 구조는 모든 영역에서 비슷한 구조를 나타냄을 확인할 수 있었다.

3.3 순간 유동장

각 구간에서의 순간 속도장의 이미지를 측정하여 Fig. 9와 같이 나타내었다.

선행연구자의 전산 연구 결과에 따르면 Rayleigh수가 $1708 < Ra_L < 5 \times 10^4$ 인 범위에서는 유체의 운동은 규칙적인 간격으로 회전셀(roll cell)을 형성하지만 큰 Rayleigh수의 영역에 대하여는 일정한 형태의 대칭형 와구조는 나타나지 않으며 유체유동은 난류가 되어 형태 및 시간의 주기성을 갖지 못하여 정상상태에도

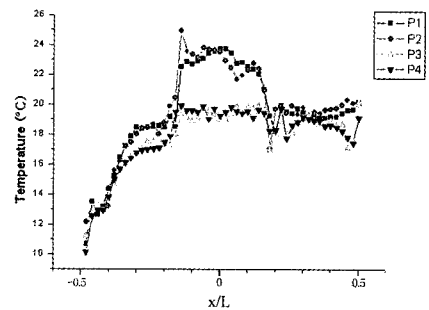
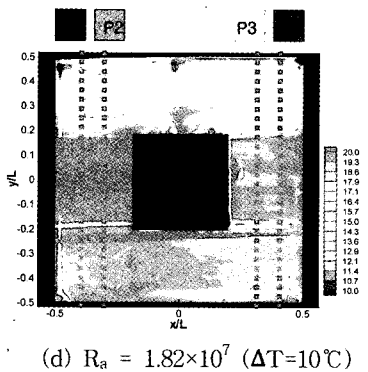
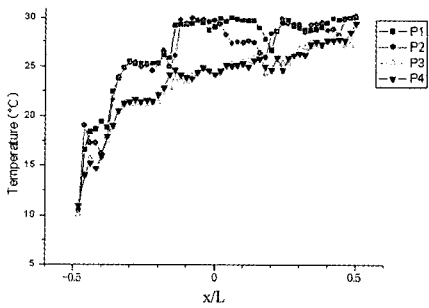
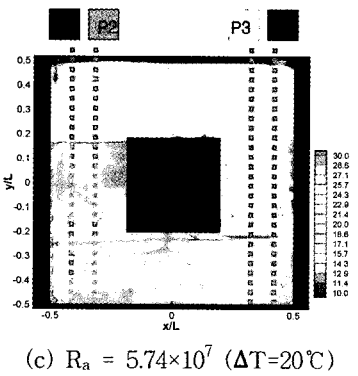
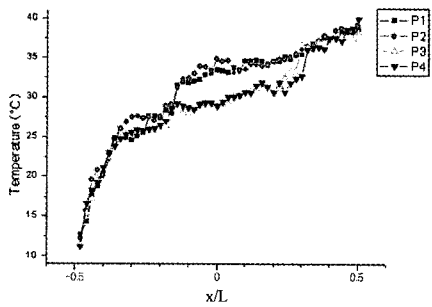
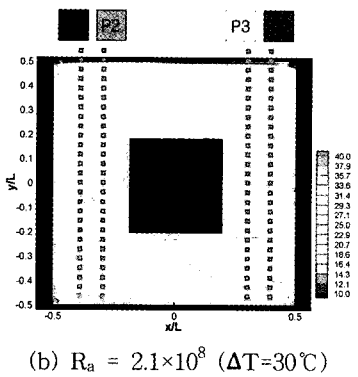
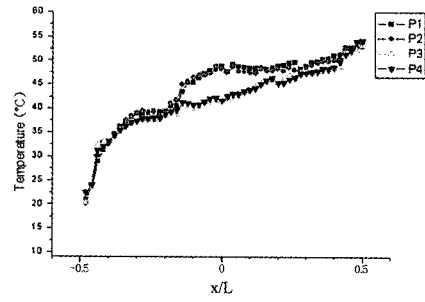
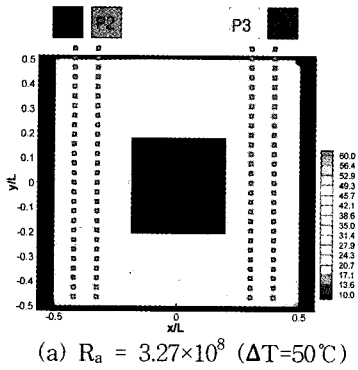
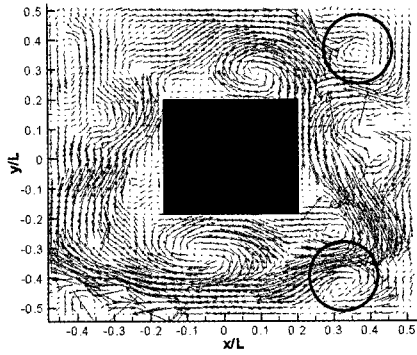
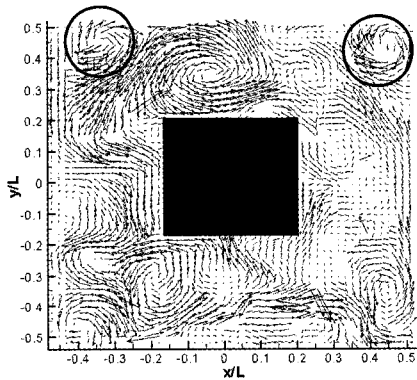


Fig. 7. Temperature fields at experimental model.

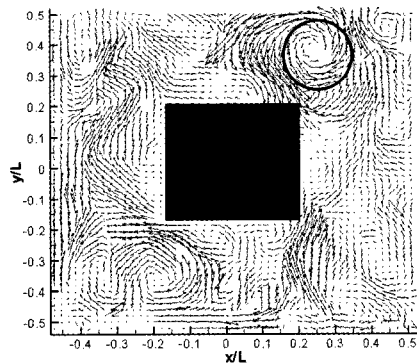
Fig. 8. Variation of Spatial Temperature.



(a)



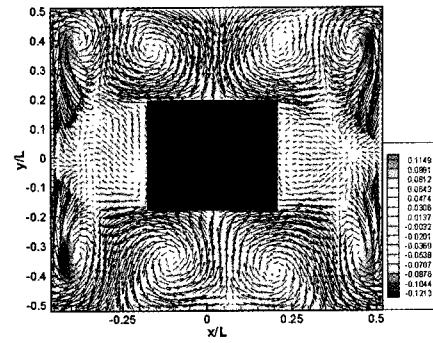
(b)



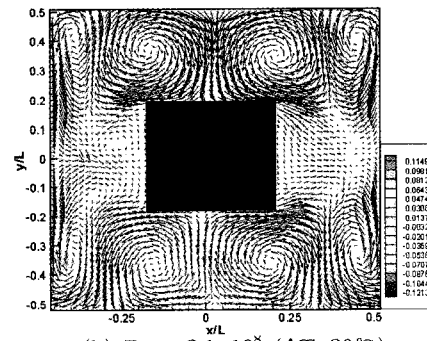
(c)

Fig. 9. Instantaneous velocity vector field.

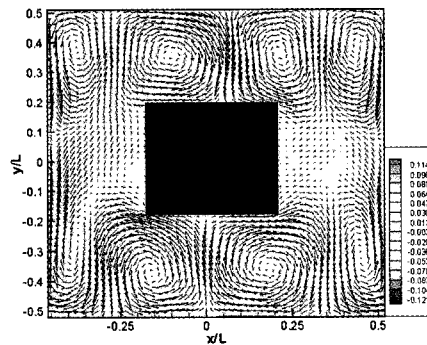
달하지 않고 계속 요동한다. 본 실험결과를 통해 와류는 일정셀을 형성하지 않는 다양한 유동 흐름을 보이며, 그 형태도 시간의 변화에 따라 요동을 하며 비대칭적 구조를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 내부 단열체에 의한 유동의 교란 현상이 더욱 크게 나타났으며 특히 밀폐계의 모서리 부분에 와가 집



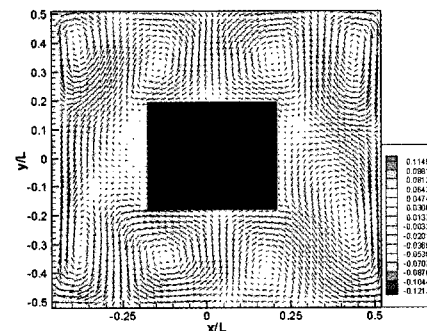
(a) $Ra = 3.27 \times 10^5$ ($\Delta T = 50^\circ C$)



(b) $Ra = 2.1 \times 10^5$ ($\Delta T = 30^\circ C$)



(c) $Ra = 5.74 \times 10^4$ ($\Delta T = 20^\circ C$)



(d) $Ra = 1.82 \times 10^7$ ($\Delta T = 10^\circ C$)

Fig. 10. Velocity vector fields.

증되는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 평균 유동장

Fig. 10은 Rayleigh 수의 변화에 따른 평균 유동장으로 500장의 순간 속도장을 앙상블 평균한 속도장이며 vorticity 강도를 함께 나타내었다. Rayleigh 수의 변화에 따른 유동구조의 변화는 나타나지 않지만, Rayleigh 수의 증가로 속도 벡터의 크기가 커지며, vorticity가 증가하는 것을 볼 수 있는데 특히 벽면으로부터의 vorticity 증가 경향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 선행연구자의 결과에서 $Ra = 10^6$ 일 때 앙상블한 평균 유선이 4개의 대칭구조를 가지는 현상에 이어 $Ra = 10^7, 10^8$ 구간에서 단열체 상하에 4개의 와류 구조와 함께 충분히 발달하지 못했던 단열체 모서리 부분에서의 와류의 형성이 진행되는 것임을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

Two-color LIF 기법 및 PIV 기법을 이용하여 내부에 단열체가 있고 바닥이 가열되는 수평층의 자연대류(Rayleigh-Bernard convection)현상을 규명하는 실험을 수행하였다.

그 결과, Rayleigh수 변화에 따른 유동장과 온도장의 구조를 통해 저온면과 고온면의 온도차가 커질수록 유체 속도가 빨라지면서 열전달 계수가 증가하여 온도구배가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

특히 단열체로 인한 내부 유동장의 교란으로 와류의 형성이 활발해지는 것을 확인할 수 있었으며, 평균 유동장 결과를 통해 낮은 Rayleigh에서 나타나지 않던 모서리 부분에서의 와류 현상도 확인할 수 있

었다.

와류의 구조 및 크기 변화는 매우 다양한 양상을 보였으나 평균 유동장 결과를 보면 Rayleigh 수의 변화는 단지 속도의 증가를 보일뿐 와류의 구조는 일정함을 알 수 있었다. 아울러 본 실험을 통해서 확립된 Two-color LIF 기법은 LIF 기법에 비해 온도 지시성 및 오차가 적은 것을 알 수 있었으며, 내부 단열체가 있는 자연대류 모델에서의 특이한 유동 특성을 파악할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) Sakakibara, J. and Adrian, R.J., 1997, "Whole Field Temperature Measurement in Water Using Two-color Laser Induced Fluorescence", TAM Report no. 864, University of Illinois at Urbana Champaign.
- 2) Shiralkar, G., Gadgil, A. and Tien, C.L., 1981, "High Rayleigh Number Convection in Shallow Enclosures with Different End Temperature", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 1621-1629.
- 3) Kim, H.J. and Kihm, K.D., 2002, "Application of Two-color LIF Temperature Measurement in the Heated Channel with Micro-scale Spatial Resolution", Flow Visualization.
- 4) Man Yeong Ha, 2002, "Unsteady fluid flow and temperature fields in a horizontal enclosure with an adiabatic body", Physics of Fluids, Vol. 14, No. 9, pp. 3189-3202.