

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

권수현\* · 정은호\* · 김경천†

## Experimental study on the natural convection in an enclosure with an adiabatic body using the two-color LIF method

Su Hyun Kwon, Eun Ho Jeong, Kyung Chun 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. 서론

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 Prandtl

수나 Rayleigh수에 따른 유동장 및 온도장 특성을 수치해석적으로 구명한 논문 외에는 연구가 미비한 실정이다. 물론, Sernas<sup>(1)</sup>는 종횡비가 작은 사각 밀폐공간에 대해서 Wollaston prism schliern interferometer를 이용하여 실험적으로 연구하였고, 담배연기를 사용하여 유동을 가시화하였다. 또한, Braga<sup>(2)</sup>는 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 자연대류에 관한 2차원 온도장의 측정 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Sakakibara & Adrian<sup>(3)</sup>의 실험적 연구로 제안된 레이저에 의해 여기되는 온도에 민감한 염료를 사용하는 Two-color LIF 기법을 기존에 광원으로 사용되어진 Ar-ion 레이저에 비해 광출력이 높은 Nd-Yag 레이저를 사용하여 상·하부면이 등온면이고, 양측면은 단열면으로 구성되어 있는 정사각

† 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

형의 밀폐공간의 중앙에 단열체가 있을 때 밀폐공간 내에서의 자연대류에 관한 실험적 연구를 통해 비접촉식으로 2차원 온도장을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 밀폐계의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험모델은 광투과성과 투명성 및 치수안정성이 우수하며, 온도변화에 따른 변형이 거의 없는 두께 15mm의 투명 아크릴로 가로 60mm 세로 60mm로 제작되었으며, Mallinson과 de Vahl Davis(1977)의 결과에 따라 end effect를 최소화하기 위하여 길이는 150mm(1.2배 이상)로 제작하였다. 밀폐공간의 저온부와 고온부의 등온면은 두께 1mm의 동판으로 제작하였으며, 등온면의 온도 유지를 위해 직사각형의 안내유로를 만들어 동판과 직접 접촉시켰다. 등온면의 온도 유지를 위해서 사용되는 물은 모두 1차 냉각 또는 가열 후 항온조에서 교반기를 통해 교반시킨 후 순환시켜 국부적인 온도차가 나지 않도록 하였으며, 항온조의 입출구에 바이패스 라인과 밸브를 설치하여 유량과 압력을 조절하였다. 유동가시화를 위한 전·후면을 제외한 나머지 벽면은 모두 두께 20mm의 단열체로 단열시켰다. 밀폐공간 내에는 가로·세로 각각 20mm, 길이 150mm의 내부 단열체를 두었으며, 광산란 등을 고려하여 표면에 흑색 무광페인트를 칠하였다. 등온면의 온도 측정에는 미세열전대를 사용하였으며, 상하의 등온면에 각각 6개씩 총 12개를 부착하였다.

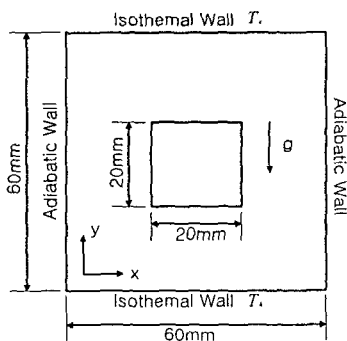


Fig. 1 Schematic diagram of enclosure with adiabatic solid body

### 2.2 실험방법

Fig. 2는 온도장 측정을 위해 사용된 실험장치를 나타낸다. 밀폐공간 내의 온도장의 가시화를 위한 Two-color LIF 기법에 사용된 광원은 이중펄스 방식의 Nd-Yag 레이저(Continuum)이며 532nm의 파장으로 4sec 동안 12mJ의 펄스 레이저를 방출한다. 광원으로부터 나온 레이저는 빔스플리터(beam splitter)로 50:50으로 분리된 후 각각 원통형렌즈와 구형렌즈를 거치면서 측정부(field of view)에 얇은 평면광을 형성한다. 형광염료로는 물 속에서 화학 안정성과 스펙트럼 특성이 우수한 Rhodamine B(1g/l)와 비슷한 파장 특성을 가지면서 온도에 거의 민감하지 않은 Rhodamine 110(0.1g/l)을 증류수에 용해시켜 사용하였다. Nash에 의하면 비형광입자는 노이즈로 작용하기 때문에 5 $\mu$ m로 필터링된 증류수를 사용하였다. 두 형광염료에서 나온 형광 빛은 두 대의 Cooled CCD 카메라(PIV CAM 13-8, TSI사)로 촬영된다. Cooled CCD는 열전(thermoelectric)방식으로 CCD를 냉각시켜 매우 작은 양의 광자(photon)도 받아들일 수 있도록 설계된 카메라로 LIF 실험에 적합한 카메라이다. 두 대의 Cooled CCD 카메라 렌즈 앞에는 두 가지 파장의 영상정보를 구분하여 카메라로 수광함과 동시에 광학적 잡음을 제거하기 위해 각각 OG-550 필터와 Edmund-510 필터를 사용하였으며 동기화를 위해 Synchronizer(TSI사)를 사용하였다.

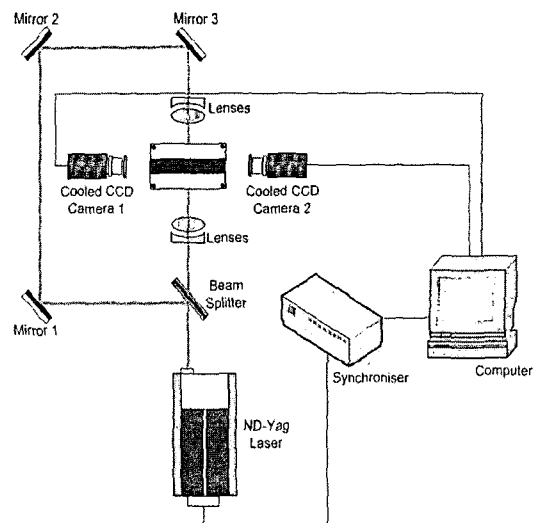


Fig. 2 Schematic of experimental setup

### 3. 실험 결과

온도 측정을 위해서 온도와 형광강도에 관한 보정실험을 자연대류 모델에서 하였다. 실험은 10°C~60°C의 범위에서 균일 온도에 대해 형광강도와 온도에 대한 측정을 하였다. Fig.3 은 그 결과를 나타내고 있다. 실험결과 Rhodamine 110은 온도 의존성이 거의 없는 것으로 나타났으나, Rhodamine B의 경우는 온도 증가에 따른 형광강도의 감소를 나타냈다.

온도보정에 의해 획득한 두 형광염료의 이미지 데이터는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 아주 균일한 온도 분포를 보여준다.

Fig. 5는 온도차가 각각  $\Delta T=10^\circ\text{C}$  ( $T_{hot}=20^\circ\text{C}$ ),  $\Delta T=20^\circ\text{C}$  ( $T_{hot}=30^\circ\text{C}$ ),  $\Delta T=30^\circ\text{C}$  ( $T_{hot}=40^\circ\text{C}$ ),  $\Delta T=50^\circ\text{C}$  ( $T_{hot}=60^\circ\text{C}$ )일 때의 자연대류 실험 결과이다. 정상상태 도달 후 각 구간에서의 온도장을 측정하였으며 전체 측정영역은 60mm×60mm이다. 전체 온도장의 분포가 비대칭인 관계로 불균일한 분포를

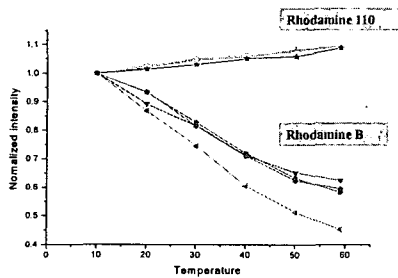


Fig 3. Variation of the fluorescence intensity against temperature

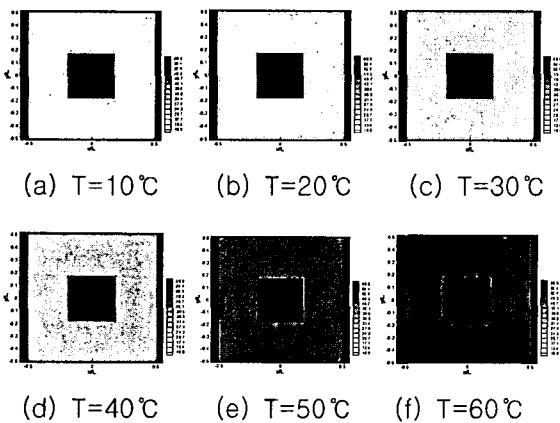


Fig 4. Fluorescence ratiometric images of Rhodamine 110 and Rhodamine

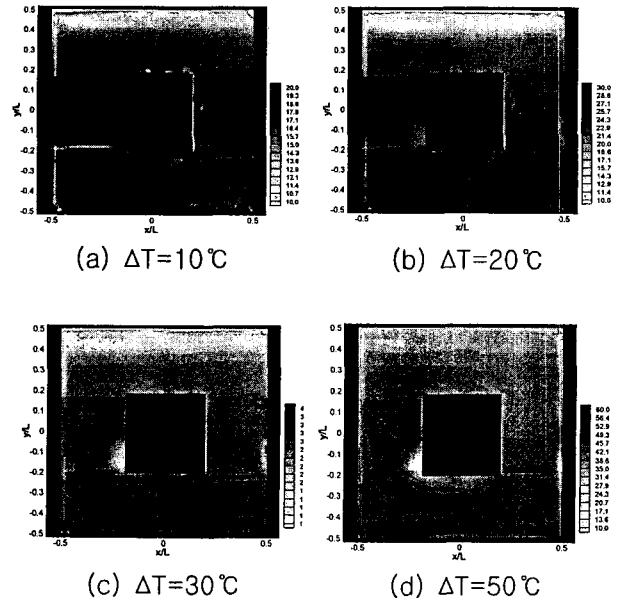
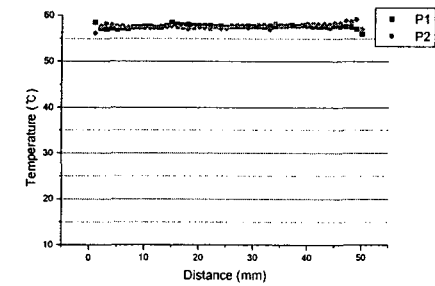
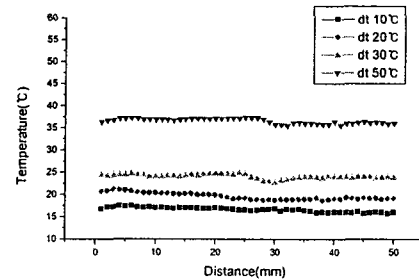


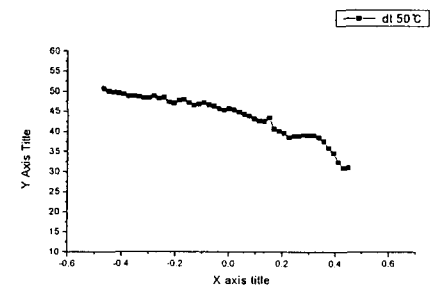
Fig. 5 Temperature fields



(a) T=50°C (P1:width, P2:height)



(b) P1 ( $\Delta T=10^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$ )



(c) P2 ( $\Delta T=50^\circ\text{C}$ )

Fig.6 Variation of Spatial Temperature

나타낸다. 하지만 온도차가 다른 각각의 온도장을 비교해 보면 비슷한 온도장 구조를 가짐을 파악할 수 있다. 또한 내부 단열체 주위의 온도장 분포 패턴의 변화가 매우 심한데 이는 물체가 내부의 열전달 흐름을 막기 때문이다. 하지만 그림에서와 같이 내부 단열체 주위에 하얗게 표시되는 부분은 실험 중 내부에서 발생된 기포에 의한 반사로 생긴 어려움으로 단열체의 좌측면의 상하에 동일한 패턴의 온도장이 형성되는지의 여부 파악을 불분명하게 한다. 온도장의 변화는 시간의존성을 가지나, 온도장의 변화 양상의 주기성은 나타나지 않았다.

Fig. 6은 각각 온도보정 실험과 자연대류 실험에서 획득한 데이터들의 온도분포도를 나타내었다.

#### 4. 결 론

밀폐계 내에서의 자연대류에 관한 실험적 연구를 위하여 Two-color LIF 기법을 이용하여 온도장을 측정하였다. 온도보정 실험을 통해 얻어진 데이터의 통계처리를 통해 온도와 형광강도의 관계를 구했다. 또한 각각의 온도 구간에서 정상상태에서의 온도장을 내부 유동에 영향을 미치지 않고 측정할 수 있었으며, 정상상태 도달 후의 온도장은 온도차와는 관계없이 비슷한 유동구조를 가짐을 알 수 있었다. 하지만 보다 정확한 유동구조의 파악을 위해서는 속도장과의 동시 측정이 이루어져야 한다.

#### 참 고 문 헌

1) V. Sernas and E. I. Lee, 1981, "Heat Transfer in Air Enclosures of Aspect Ratio

Less than One," Trans. ASME, J. of Heat Transfer, Vol.103, pp.617~622.

2) S. L. Braga and R. Viskanta, 1992, "Transient Natural Convection of Water Near Its Density Extremum in a Rectangular Cavity," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.35, No.4, pp.861~875.

3) Sakakibara J, Adrian RJ, 1997, "Whole Field Temperature Measurement in Water Using Two-color Laser Induced Fluorescence," TAM Report no. 864, University of Illinois at urbana Champaign.

4) Jones, G.n, 1990, "Photochemistry of laser dyes. Dye Laser Principles with applications", pp.287-343

5) Coolen, M.C.J., Kieft, R.N., Rindt, C.C.M., and van Steenhoven, A.A., 1999, " Application of 2-D LIF Temperature Measurements in Water Using a Nd-Yag Laser," Experiments in Fluids, 27, pp.420-426.

6) 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.

7) G. Shiralkar, A. Gadgil and C.L. Tien, 1981, "High Rayleigh Number Convection in Shallow Enclosures with Different End Temperature," Int. J. hEAT Mass Transfer, Vol.24, pp.1621-1629.

8) A.F Emery, 1969, "Exploratory Studies of Free Convection Heat Transfer though an Enclosed Vertical Liquid Layer with a Vertical Baffle," Trans. ASME, J. of Heat Transfer, Vol.91, pp.163-165.