

마이크로 스케일 유동에서의 속도장 온도장 동시 측정 기법과 동전기 유동에의 적용

이범준[†] · 진송완* · 김영원** · 유정열**

Simultaneous measurement of velocity and temperature fields in micro-scale flow and its application to electrokinetic flow

Beomjoon Lee, Songwan Jin, Young Won Kim and Jung Yul Yoo

Key Words : PTV(입자추적 유속계), LIF(레이저 유도 형광법), velocity(속도), temperature(온도), electrokinetics(동전기)

Abstract

In this paper, a technique of simultaneously measuring the velocity and the temperature in micro-scale flow is proposed. This method uses particle tracking velocimetry (PTV) for measuring the velocity and laser induced fluorescence (LIF) for measuring the temperature. To measure the accurate velocity and temperature, images for PTV and for LIF are separated by using two light sources and a shutter which is synchronized with a camera. By using only one camera, measurement system can be simplified and the error from complicate optical system can be minimized. Error analyses regarding the concentrations of fluorescent dye and particle and the light source fluctuation are also conducted. It is found that the error of the temperature and the velocity highly depends on the concentration of fluorescent particles which are used for PTV. This technique is applied to the simultaneous measurement of the velocity and the temperature in the electrokinetic flow. It is found that the velocity and temperature vary with the electric field strength and the concentration of electrolyte.

기호설명

C_p : 형광 입자의 농도
 C_{rno} : 로다민-B의 농도
 E : 전기장의 세기
 λ_{LIF} : LIF 광원 파장
 λ_{PTV} : PTV 광원 파장
 σ_T : 온도 오차
 σ_V : 속도 오차

1. 서론

최근 마이크로 열교환기, 마이크로 반응기(micro reactor), 열모세관 펌프 등 마이크로 스케일에서 열의 발생과 이동이 수반되는 유동의 연구가 활발

히 진행되고 있다. 이러한 연구에서 속도장과 온도장의 동시 측정은 물리적 현상을 이해하기 위해 서뿐만 아니라 기기의 성능을 정량적으로 분석하기 위해서도 매우 중요하다. 그러나 현재까지 마이크로 스케일의 유동에서 속도장과 온도장 동시 측정에 관한 연구는 많이 이루어지지 않았다.

매크로 스케일의 유동에서는 다음과 같은 다양한 비접촉식 동시 측정법이 사용되고 있다. 먼저 레이저 도플러 속도계(Laser Doppler Velocimetry, LDV)와 평면 레이저 유도 형광 기법(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)이 속도와 온도를 측정하는데 사용되었으나 점 측정 방식이라는 한계가 있었다.⁽¹⁻²⁾ 이후 전체 속도장과 온도장을 동시 측정하기 위하여 입자 영상 유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)나 입자 추적 유속계(Particle Tracking Velocimetry, PTV)와 PLIF 기법을 결합한 방법⁽³⁻⁶⁾과 열색성 액정(Thermochromic Liquid Crystal, TLC)을 캡슐화하여 추적입자로 사용하는 디지털 입자 영상 속도/온도 측정법(Digital Particle Image Velocimetry/Thermometry, DPIV/T)⁽⁷⁾이 개발되어 사용되고 있다. 최근에는 분자 표식 기법

[†] 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : inspac1@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1649 FAX : (02)882-3059

* University of California, San Francisco

** 서울대학교 기계항공공학부

(Molecular Tagging Technique, MTT)의 발전으로 분자 표식 유속계(Molecular Tagging Velocimetry, MTV)와 분자 표식 온도 측정법(Molecular Tagging Thermometry, MTT)이 동시 측정에 사용되기 시작하였다⁽⁸⁾.

마이크로 스케일 유동에서의 속도장과 온도장의 동시 측정은 최근에 시도되고 있으나, 아직까지는 몇 가지 기술적 한계를 지니고 있다. MTV-MTT 기법을 마이크로 스케일 유동에 적용하여 속도와 온도를 측정하는 것이 시도되었으나, 주유동 방향의 속도 성분만을 측정할 수 있었으며 측정 영역이 극히 제한적이다⁽⁹⁾. 또한 브라운 운동이 온도에 따라 증가하는 성질을 이용하여 PIV 수행 시 얻어지는 상호상관 최대 값의 변화를 온도로 환산하여 동시 측정하는 기법⁽¹⁰⁾이 개발되어 마이크로 유체에 적용되었으나 온도의 정확성이 떨어지고 유속이 제한되는 단점이 존재한다.

한편, 매크로 스케일 유동에서 PTV-PLIF 방법을 이용하여 속도장과 농도장을 동시 측정하는 연구가 수행되었다⁽¹¹⁾. 이 기법은 PTV와 LIF를 위한 두 가지 광원을 사용하여 추적 입자와 형광 염료를 선택적으로 발광시키는 기법을 채택함으로써, 추적 입자에 의한 농도장의 오차를 최소화하는 장점을 가지고 있다. 또한 단일한 카메라를 사용함으로써 측정 시스템을 단순화하여 광학 시스템에서 발생하는 오차를 방지할 수 있기 때문에 위의 기법을 마이크로 스케일의 속도장과 온도장 측정에 적용할 수 있는 가능성이 높다고 판단하였다.

본 연구에서는 위의 기법을 응용하여 마이크로 스케일 유동의 속도장과 온도장의 동시 측정에 적용하고자 한다. 또한 형광입자와 형광염료의 농도가 속도장과 온도장에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 그 밖의 여러 오차 요인에 대해서 고찰하도록 한다. 그리고 이 기법을 동전기 유동(electrokinetic flow)에서의 속도장과 온도장 측정에 적용하여, 추적 입자의 속도와 줄 가열(Joule heating)에 의한 온도의 변화를 측정하도록 한다.

2. 동시 측정 방법

2.1 동시 측정 기법 및 실험 장치

속도장과 온도장의 동시 측정은 PTV-LIF 기법을 사용하여 수행되었다. 두 개의 광원이 각각 PTV 수행을 위한 형광 입자와 LIF 수행을 위한 형광 염료를 발광시키는데 사용된다. 동시 측정은 PTV를 위한 영상과 LIF를 위한 영상을 연속적으로 획득함으로써 수행된다.

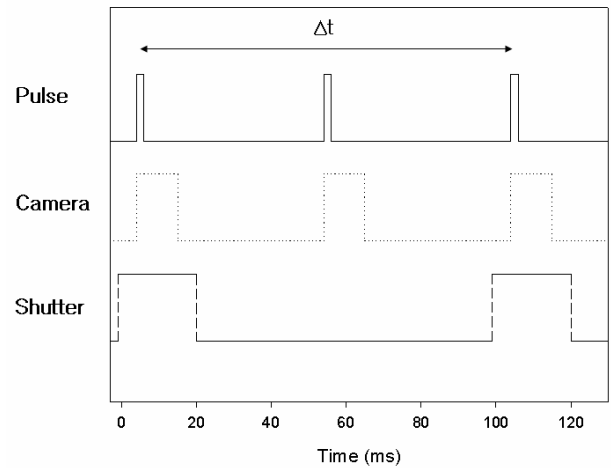


Fig. 1 Timing diagram.

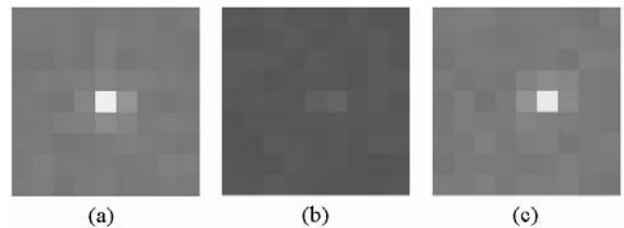


Fig. 2 Three consecutive images: (a) first image used for PTV, (b) second image used for LIF, (c) third image used for PTV.

이를 위해 PTV 광원 앞에 편광 셔터를 장착하였고 카메라와 동기화되었다. 카메라의 영상 획득 속도가 편광 셔터의 작동 속도의 2 배가 되도록 조절함으로써 카메라를 통해 연속적으로 획득된 세 장의 영상 중 첫 번째와 세 번째는 레이저에 의해 발광된 형광 입자의 영상을 포함하고 두 번째는 형광 염료의 영상만을 포함하게 된다. 따라서 첫 번째와 세 번째의 영상은 속도장 측정에 사용되고 두 번째 영상은 온도장 측정에 사용된다. Fig. 1은 동기화 장치와 카메라 그리고 편광 셔터의 작동 신호를 나타내고 있다. 또한 Fig. 2는 위의 방법을 통해 얻은 연속적인 영상의 일부이며, (a)와 (c)는 PTV를 수행하는데 사용되고, (b)는 LIF를 수행하는데 사용된다.

위의 동시 측정 기법을 적용하기 위해서는 적절한 형광 입자와 염료 그리고 필터의 선택이 중요하다. 일반적으로 형광 물질은 낮은 파장의 빛에서 여기 되어 높은 파장의 빛을 방출하는데, 광원과 형광물질의 방출광을 분리하기 위해 색선별 거울(dichroic mirror, transmission wavelength = λ_D)과 장파장 통과 필터(long-pass filter, cutoff wavelength = λ_C)를 사용한다. 또한 두 형광 물질을 선택적으로 여기 시키기 위해서는 파장이 서로 다른 LIF 광원(λ_{LIF})과 PTV 광원(λ_{PTV})을 사용하여 한다. 그러

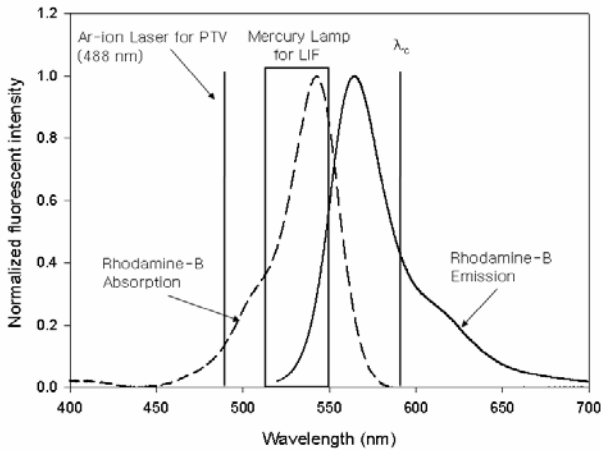


Fig. 3 Spectra characteristics of rhodamine-B and optical system.

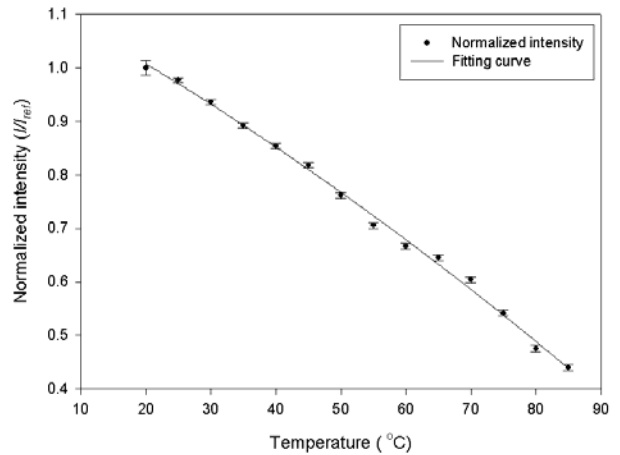


Fig. 5 Normalized calibration data and second-order polynomial fitting curve.

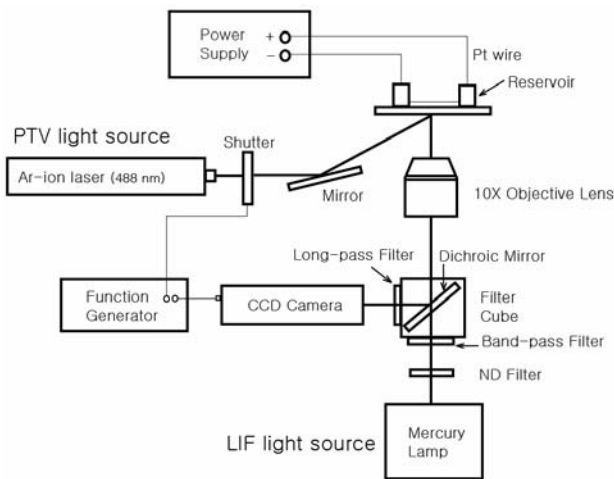


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus for simultaneous measurement system.

나 대부분의 형광 입자는 넓은 흡수 파장대를 가지고 있기 때문에, λ_{LIF} 와 λ_{PTV} 가 충분히 차이가 있을지라도 LIF 광원에 의해 형광 입자가 미세하게 여기 되는 현상이 발생한다. 이 현상은 LIF 수행 시 온도장의 오차를 발생시키기 때문에, 본 연구에서는 5 X 5 픽셀 영역에서 중간 값 필터 (median filter)를 적용하여 형광 입자의 영향을 최소화하였다⁽¹²⁾.

본 연구에서 PTV 광원은 아르곤-이온 레이저(Ar-ion Laser, $\lambda_{PTV} = 488 \text{ nm}$)에 편광 셔터(DANTEC)를 장착하여 사용하였으며 LIF 광원은 수은램프(Mercury Lamp)에 대역통과필터 ($\lambda_{LIF} = 510\text{-}550 \text{ nm}$)를 장착하여 사용하였다. 광원과 형광 물질의 방출광을 분리하기 위해 색선택 거울 ($\lambda_D = 570 \text{ nm}$)과 장파장 통과 필터 ($\lambda_C = 590 \text{ nm}$)를 사용하였고 영상은 10 배의 대물렌즈(10 X Objective Lens, Olympus)를 통해 cooled-CCD카메라 (Sensicam QE, PCO)에 의해 획득되어 영상 획득 보드를 통해 컴

퓨터에 저장된다. 형광 입자는 1 μm 녹색의 구형 폴리스티렌(G0100, Duke Scientific)을 사용하였으며 형광 염료는 온도 민감도가 높은 로다민-B (Rhodamine-B, Sigma)를 사용하였다. 이 형광 물질들은 증류수 (DI water)에 희석되었고 200 X 20 μm 크기의 직사각형 마이크로채널 (borosilicate, vitrocom)에 채워졌다. 카메라와 편광셔터를 동기화 시키기 위해 함수 발생기(Function generator, SONY)와 펄스 발생기(Pulse generator, Berkeley Nucleonics Corp.)를 사용하였다. 또한 동전기 유동을 발생시키기 위하여 고전압 증폭기 (MATSUSADA, AMS-3B10)를 사용하여 전압을 발생시켰고 백금 전극을 통해 직경 1.5 cm 의 저장부(reservoir) 내부의 유체에 인가 되었다. 전해질은 탄산수소나트륨(NaHCO_3)을 사용하였다.

Fig. 3 는 형광물질의 흡수와 방출 파장과 광원파 필터의 광학적 특성을 나타낸 그래프이며, Fig. 4 은 동시측정 실험 장치의 개념도를 나타내고 있다.

2.2 속도장 측정

본 동시 측정 기법에서는 형광 입자가 온도장의 오차를 유발하므로 입자의 농도를 낮추어 PTV 기법을 사용하여 속도를 측정하였다. 형광 입자를 포함하는 연속적인 영상의 모든 입자를 추적하여 각 입자의 위치에서 속도 벡터를 얻었으며, 이를 공간 평균(spatial average) 하여 속도장을 측정하였다⁽¹³⁾. 입자의 농도에 따른 속도장과 온도장의 오차는 2.4 에서 자세히 서술하기로 한다.

2.3 온도장 측정

LIF를 이용한 온도 측정은 온도 민감 형광 물질의 방출 강도(emission intensity)가 온도에 따라 변

화하는 성질을 이용한다. 형광 물질의 방출 강도는 아래의 식으로 표현된다⁽¹⁴⁾.

$$I = I_0 C \phi \varepsilon \quad (1)$$

I_0 는 입사광의 강도, C 는 형광물질의 농도, ϕ 는 양자효율, ε 은 흡수계수이다. 이 중 ϕ 만이 온도의 함수이기 때문에 동일한 광원과 농도 조건에서 형광 물질의 방출강도를 이용하여 온도를 측정할 수 있다. 그러나 균일한 온도 조건에서, 채널 내부의 로다민-B의 방출 강도가 채널의 너비 방향으로 변화함을 확인할 수 있었다. 이 현상에 의한 온도장의 오차를 보정하기 위하여 20° C에서 획득한 영상으로 측정 영상을 나누어 정규화하였다. 정규화된 영상으로부터 온도를 측정하기 위하여, 온도 검정을 수행하였으며 온도 검정 곡선으로부터 마이크로 채널 내부의 온도장을 계산하였다. Fig. 5는 20° C에서 정규화된 로다민-B의 온도 검정 그래프이며 2차 곡선 적합(second-order curve fitting)을 사용하였다.

2.4 오차 해석

온도장 측정 시 채널 벽 근처에서는 굴절률의 변화에 의한 섀도우그래프 효과(Shadowgraph effects)에 의한 오차가 존재하며, 이를 피하기 위하여 채널 벽에서 10 μm 이상 떨어진 영역에서 온도장을 측정하였다. 또한 동시 측정 기법에 의한 온도장의 오차는 광표백 효과(photo-bleaching effect), 입사광의 세기의 변화, 형광 염료의 농도, 형광 입자의 농도 등에 의해 영향을 받는다. 광표백 효과는 형광 물질이 지속적으로 광원에 노출될 때, 형광 물질의 방출 강도가 감소하는 현상을 말한다. 이 현상을 방지하기 위하여 수은램프 앞에 중화 필터(neutral density filter, ND 12)를 장착하였고 레이저의 파워와 노출 시간을 최소화하였다. 이러한 조건에서 30분 동안 방출 강도 감소 현상은 일어나지 않았다. 다음으로 입사광의 영향을 살펴보기 위하여 단일 챔버를 이용하여 채널 내부의 온도를 균일하게 유지하면서 로다민-B의 방출 강도를 측정하였다. 이렇게 측정된 수은램프의 광량의 변화율 0.26%이며 이는 0.24° C 이내의 온도 오차를 의미한다. Fig. 6은 형광 입자와 로다민-B의 농도에 따른 온도 오차(σ_T)를 나타내고 있다. 형광 입자의 농도(C_p)가 높아질수록 형광 입자에 의한 온도장의 오차가 증가하게 되며 로다민-B의 농도(C_{rho})가 높아지면 형광 입자의 방출 강도에 비해 로다민-B의 방출 강도가 증가하여 온도 오차는

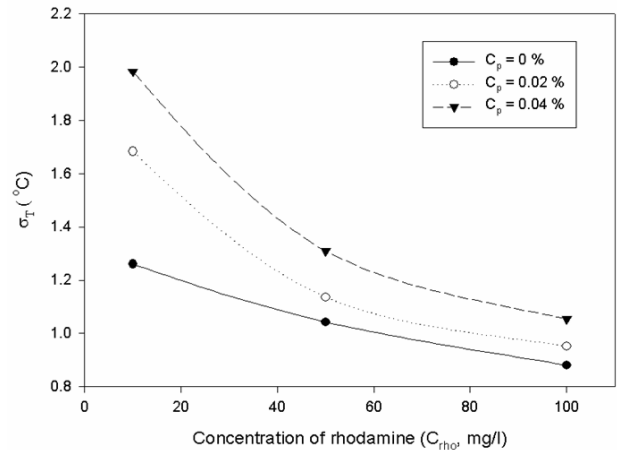


Fig. 6 Variation of temperature error σ_T with respect to concentration of rhodamine-B and particle.

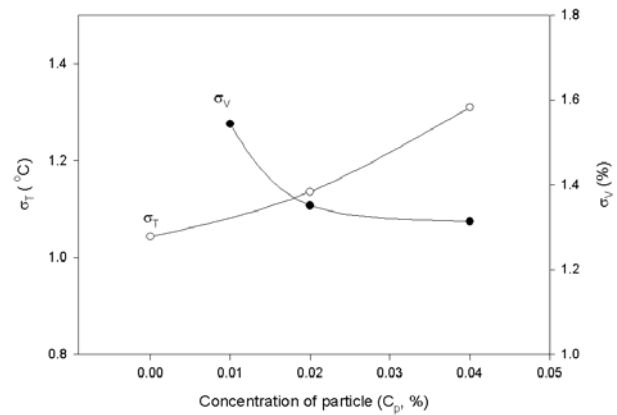


Fig. 7 Variation of temperature error σ_T and velocity error σ_v with respect to concentration of particle.

줄어들키게 된다.

형광 입자의 농도가 속도 오차(σ_v)에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동전기 유동을 발생시켜 속도의 표준 편차를 계산하였다. Fig. 7은 형광 입자의 농도에 따른 속도와 온도의 오차를 나타내고 있으며, 농도가 높아질수록 속도의 오차는 줄어들고 온도의 오차는 커짐을 확인할 수 있다.

본 동시 측정 실험에서는 형광 입자의 검출을 용이하게 하고자, 형광 입자의 농도는 0.02%, 로다민-B의 농도는 50 mg/l를 사용하였고 형광 입자에 의한 온도 오차는 1.13° C으로 나타났다. 따라서 본 실험 조건에서의 온도 오차는 수은램프의 광량 변화와 형광 입자에 의한 오차의 합인 1.37° C이다.

3. 동전기 유동에서의 동시 측정 결과 및 해석

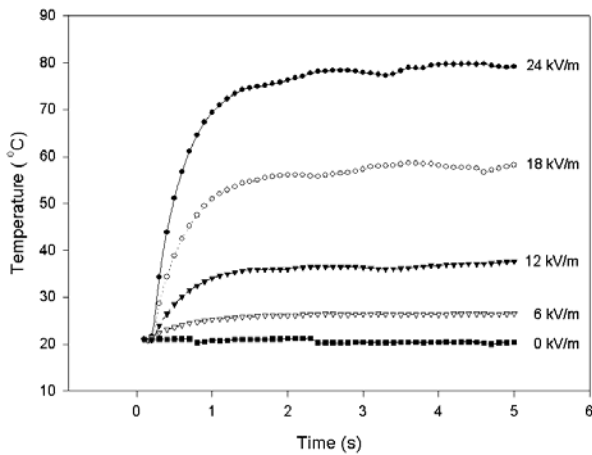


Fig. 8 Mean temperature variation with respect to time and electric field strength.

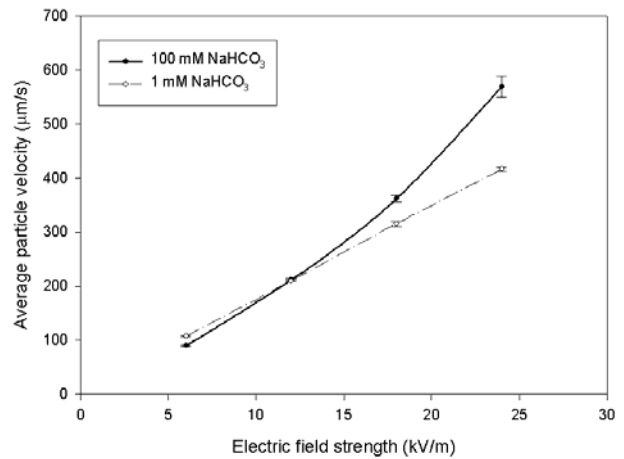


Fig. 10 Averaged apparent particle velocity with respect to electric field strength.

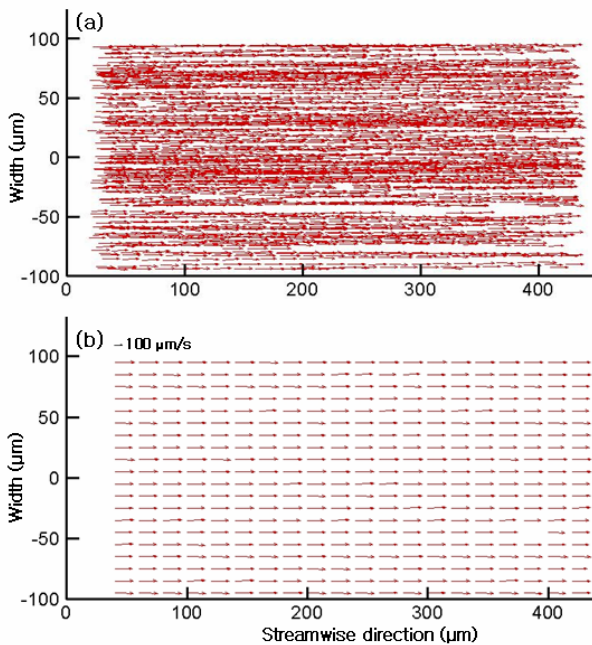


Fig. 9 PTV results at 12 kV/m: (a) total velocity vectors from 650 PTV images, (b) spatially averaged velocity field.

일반적으로 이온화된 용액이 고체 표면과 접하게 되면 고체 표면에 전기이중층(electrical double layer, EDL)이 형성된다. EDL이 형성된 유체에 전기장이 인가되면, 채널 벽의 EDL에 의한 유체의 움직임인 전기삼투(electroosmosis) 유동과 입자 표면전하의 극성에 의해 입자가 움직이는 현상인 전기영동(electrophoresis)이 동시에 일어난다. 따라서 측정된 입자의 속도는 전기삼투 유속과 전기영동에 의한 입자의 속도의 합이다. 또한 인가된 전기장에 의해 줄 가열이 발생하여 유체의 온도가 증가하게 된다.

본 실험에서는 속도장과 온도장 동시 측정 기법을 마이크로 채널내의 동전기 유동에 적용하였다.

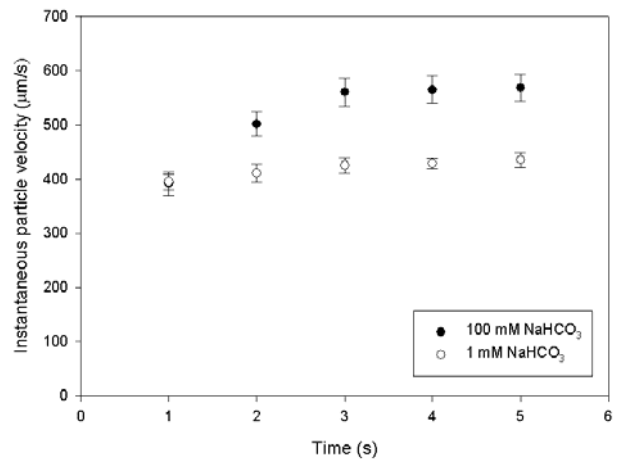


Fig. 11 Instantaneous apparent particle velocity at 24 kV/m.

작동 유체는 로다민-B ($C_{\text{rho}} = 50 \text{ mg/l}$)와 형광 입자 ($C_p = 0.02 \%$)가 희석된 증류수에 탄산수소나트륨을 1 mM과 100 mM 두 가지 농도로 희석하여 사용하였다.

Fig. 8은 탄산 수소 나트륨 100 mM을 이용하였을 때, 전기장의 세기에 따른 마이크로채널 내부 유체의 평균 온도 변화를 나타낸다. 전기장의 세기가 커질수록 온도의 변화 폭이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 5 s 이내에서 정상 상태에 도달하였다. 그러나 탄산수소나트륨 1 mM을 이용하였을 경우에는, 온도 상승의 최대 값이 약 5°C 로 뚜렷한 온도 변화를 관찰할 수는 없었다.

Fig. 9(a)는 650 장의 영상으로부터 얻은 모든 형광 입자의 속도 벡터를 나타낸 것이며, (b)는 $20 \times 20 \mu\text{m}$ 의 영역내의 속도 벡터를 평균하여 얻은 속도장이다. 평균 속도는 유속이 정상상태에 도달하는 5 s 후부터 측정되었다. 평균 속도장에서 알 수 있듯이 입자의 속도는 전 영역에서 균일한 값을 보이고 있다. Fig. 10은 전기장의 세기에 대한

입자의 평균 속도를 나타낸다. 탄산수소나트륨 1 mM의 경우에는 평균 속도가 전기장의 세기에 비례하지만, 100 mM의 경우에는 전기장의 세기가 커질수록 평균 속도의 상승폭이 더 커짐을 확인할 수 있다. 이 현상은 온도 변화에 의한 유체의 점성과 전도도의 변화에 따른 효과로 알려져 있는데, 이를 확인하기 위하여 전기장의 세기가 24 kV/m인 경우의 순간 속도를 Fig. 11에 나타내었다. 온도의 큰 변화가 나타나지 않는 탄산수소나트륨 1 mM의 경우에는 속도도 거의 일정한 값을 나타내었으나, 온도가 크게 상승한 100 mM의 경우에는 속도의 증가가 나타났다. 또한 속도의 증가가 온도가 크게 변화하는 0-3 초 동안 주로 나타나는 것으로 미루어, 줄 가열에 의한 온도의 상승이 속도 상승의 원인이라고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 단일 카메라를 이용한 PTV-LIF 기법을 마이크로 스케일 유동에 적용하여 속도장과 온도장을 동시 측정하였다. 또한 오차해석을 통해 속도와 온도 오차의 여러 요인에 대하여 고찰하고 정량화하였다. 온도 오차를 줄이기 위하여 기준 온도의 영상으로 측정 영상을 정규화하였으며, 5 X 5 픽셀에 대해 중간값 필터를 적용하는 방법을 사용하였다. 또한 본 측정 방법을 동전기 유동의 속도장과 온도장 측정에 적용하였다. 본 실험 조건에서 온도장의 공간 분해능은 6.4 X 6.4 μ m이며 최대 온도 오차는 1.37 $^{\circ}$ C로 나타났으며, 속도장의 공간 분해능은 20 X 20 μ m이며 속도 오차는 평균 속도에 대해 1-5%로 측정되었다. 속도장과 온도장은 측정 영역에서 거의 균일한 값을 나타냈으며 전해질의 농도와 전기장의 세기가 온도의 변화에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한 순간 속도를 측정함으로써, 줄 가열에 의한 속도의 증가를 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005년도 한국학술진흥재단(KRF-2005-041-D00131) 및 마이크로열시스템 연구센터의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

(1) Papanicolaou, P. N. and List, E. J., 1988, "Investigations of round vertical turbulent buoyant jets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 195, pp. 341~391.
 (2) Lemoine, F., Antonie, Y., Wolff, M. and Lebouche,

M., 1999, "Simultaneous temperature and 2D velocity measurements in a turbulent heated jet using combined laser-induced fluorescence and LDA," *Experiments in Fluids*, Vol. 26, pp. 315~323
 (3) Sakakibara, J., Hishida, K. and Maeda, M., 1993, "Measurements of thermally stratified pipe flow using image-processing techniques," *Experiments in Fluids*, Vol. 16, No. 2, pp. 82~96.
 (4) Sakakibara, J., Hishida, K. and Maeda, M., 1997, "Vortex structure and heat transfer in the stagnation region of an impinging plane jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 13, 3163~3176.
 (5) Hishida, K. and Sakakibara, J., 2000, "Combined Planar laser-induced fluorescence - particle image velocimetry technique for velocity and temperature fields," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. s129~s140.
 (6) Hu, H., Kobayashi, T., Saga, T., Segawa, S. and Taniguchi, N., 2000, "Particle image velocimetry and planar laser-induced fluorescence measurements on lobed jet mixing flows," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No. 7, pp. s141~157
 (7) Park, H.G., Dabiri, D. and Gharib, M., 2001, "Digital particle image velocimetry/thermometry and application to the wake of a heated circular cylinder," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, No. 3, pp. 327~338
 (8) Hu, H. and Koochesfahani, M. M., 2006, "Molecular tagging velocimetry and thermometry and its application to the wake of a heated cylinder," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 16, pp. 1269~1281.
 (9) Hu, H. and Koochesfahani, M. M., 2006, "Molecular tagging technique for the simultaneous measurements of flow velocity and temperature fields," *Proceedings of 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA-2006-0041, Reno, Nevada.
 (10) Hohreiter, H., Wereley, S. T., Olsen, M. G. and Chung, J. N., 2002, "Cross-correlation analysis for temperature measurement," *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, No. 7, pp. 1072~1078.
 (11) Cowen, E. A., Chang, K. -A. and Liao, Q., 2001, "A single-camera coupled PTV-LIF technique," *Experiments in Fluids*, Vol. 31, No. 1, pp. 63~73.
 (12) Funatani, S., Fujisawa, N. and Ikeda, H., 2004, "Simultaneous measurement of temperature and velocity using two-colour LIF combined with PIV with a colour CCD camera and its application to the turbulent buoyant plume," *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 983~990.
 (13) Jin, S., Huang, P., Park, J., Yoo, J. Y. and Breuer, K. S., 2004, "Near-surface velocimetry using evanescent wave illumination," *Experiments in Fluids*, Vol. 37, No. 6, pp. 825~833.
 (14) Sakakibara, J. and Adrian, R. J., 1999, "Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence," *Experiments in Fluids*, Vol. 26, No. 1, pp. 7~15.