

미소입자영상유속계를 이용한 굴절률이 다른 두 유체 유동 측정

김병재* · 유임정** · 성형진*

Micro PIV Measurement of Two-Fluid Flow with Different Refraction Indices

Byoung Jae Kim*, Ying Zheng Liu**, Hyung Jin Sung*

Key Words : Micro PIV (미소입자영상유속계), Two-Fluid Flow (두 유체 유동), Refraction Index (굴절률)

ABSTRACT

The influence of property difference in refraction index on micro PIV measurement of two-fluid flow in a microchannel was analyzed. The difference of measurement planes in two fluids would bring misunderstanding of the physics. The objective-imaging system for two-fluid flow measurement was presented, and the condition for measurement of valid velocity profile across two-fluid interface was derived. A micro PIV experimental system was set up to measure two-fluid flow inside a Y-shape microchannel. Under the conditions, three cases of two-fluid flow of glycerol solutions at different concentration (ϕ), e.g., $\phi = 0$ and $\phi = 0.2$, $\phi = 0.1$ and $\phi = 0.5$, and $\phi = 0$ and $\phi = 0.6$, were measured. Close agreement of experimental and numerical results was found.

1. 서론

미소유체기계에서 두 유체 혼합은 DNA 정화, PCR(polymerase chain reaction) 같은 생물화학공정에 많이 쓰이고 있다. MEMS(micro-electro-mechanical-system) 칩의 다양한 기능 중에 시료와 샘플을 혼합하는 것은 실험 대상을 준비하는 단계에서 사용된다⁽¹⁾. 여기서 칩의 성능은 두 유체를 얼마나 효과적으로 그리고 빨리 혼합하는데 달려 있다. 두 유체의 혼합뿐만 아니라 어떤 유체 속에서 서로 크기가 다른 입자들을 분리하는 것 또한 MEMS 칩에서 많이 사용된다. 이런 혼합과 분리과정에서는 서로 종류가 다른 유체들이 사용된다. 따라서 마이크로채널 내에서 두 유체 유동을

측정하기 위해 현미경을 사용할 경우 두 유체의 물성치 차이가 측정에 미치는 영향이 사전에 고려되어야 한다.

지금까지의 마이크로채널 내 두 유체 유동에 관한 대부분의 연구는 편리성 및 제약 조건으로 인하여 하나의 유체 혹은 비슷한 유체들을 사용해왔다. Koch (1999)⁽²⁾ 등은 마이크로채널 내에서 혼합정도를 측정하기 위하여 에탄올에 녹인 빨간색, 녹색 잉크를 사용하였고, Liu (2000)⁽³⁾ 등과 Beebe (2001)⁽⁴⁾ 등은 3차원 뱀모양 채널의 혼합성능을 평가하기 위하여 에틸알코올에 녹인 페놀프탈레인, 수산화나트륨 용액을 사용하였다. 그리고 Lee (2000)⁽⁵⁾ 등과 Stroock (2002)⁽⁶⁾ 등은 각각 압력을 이용하여 혼합을 증대시키는 혼합기와 물고기 뼈 모양 채널의 성능을 평가하기 위하여 형광입자가 들어 있는 유체와 투명한 유체를 혼합한 후 형광

* 한국과학기술원 기계공학과

** 상하이 교통대학 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

입자의 분포를 측정하였다. 최근에 Liu (2003)⁽⁷⁾ 등은 이런 채널들에 유체의 물성치 변화를 고려한 수치해석을 수행하였고 그 결과 유동특성은 두 유체의 물성치 차이에 크게 영향을 받음이 밝혀졌다. 그러나 지금까지 이에 대한 실험적인 연구는 거의 없었다. 따라서 두 유체 유동에 대한 실험이 필요하며, 이를 위해서 특히 두 유체의 굴절률 차이가 두 유체 유동 측정에 미치는 영향이 해석되어야 한다.

미소입자영상유속계(micro particle image velocimetry)⁽⁸⁾는 수백 나노미터 크기의 형광입자들을 현미경으로 확대하여 수 마이크로미터의 공간분해능으로 유체의 속도를 측정하는 기법이다. 이 기법은 물과 같은 하나의 유체에 적용되어왔다. 그러나 앞서 말한바와 같이 두 유체의 굴절률 차이의 효과는 측정에 영향을 미칠 수 있다. 기존의 입자영상유속계(particle image velocimetry)는 일반적으로 카메라의 초점심도(depth-of-focus) 안에 레이저 평면이 위치하므로 작동유체의 굴절률 변화는 측정평면의 위치 영향을 미치지 않는다. 그러나 체적조명(volume illumination)을 사용하는 미소입자영상유속계의 경우 측정평면의 위치는 레이저 평면이 아닌 렌즈의 초점거리에 의하여 결정되므로 측정평면의 위치는 작동유체의 굴절률에 의하여 영향을 받게 된다. 미소유체기계의 채널 깊이는 일반적으로 (10~100 μm)이고 미소입자영상유속계의 깊이 방향 분해능(out-of-plane resolution)은 대략 1~10 μm이다. 따라서 깊이 방향 분해능이 채널의 깊이에 비하여 그리 크지 않아 채널의 깊이 방향으로 몇 개의 측정평면을 얻을 수 있다. 경우에 따라서 깊이 방향 분해능이 채널의 깊이보다 큰 경우도 있다⁽⁹⁾. 여기서 두 유체의 유동을 측정할 때, 하나의 평평한 측정평면을 만들기 위해서는 무엇보다도 초점이 맞추어진 측정평면들의 위치가 깊이 방향 분해능 보다 작아야 한다.

본 연구에서는 두 유체 유동에서 초점이 맞추어진 측정평면들의 위치 차이를 이론적으로 살펴보았다. 또한 Y 모양의 마이크로채널에서 두 유체의 속력 분포를 미소입자영상유속계로 측정하여 그 타당성을 검증하여 보았다. 이를 위해 서로 화학반응이 일어나지 않으며 섞이는 물과 글리세롤 수용액을 작동유체로 사용하였다. 유체의 물성치는 글리세롤 수용액의 질량농도를 변화시켜 조절하였다($\phi = 0 \sim 0.6$). PDMS (polydimethylsiloxane)와 슬라이드 글라스를 접합하여 300×50×20000 μm의 마이크로채널을 제작하였다. 모든 실험에서 유체의 입구속력은 2 mm/s로 하였다. 실험결

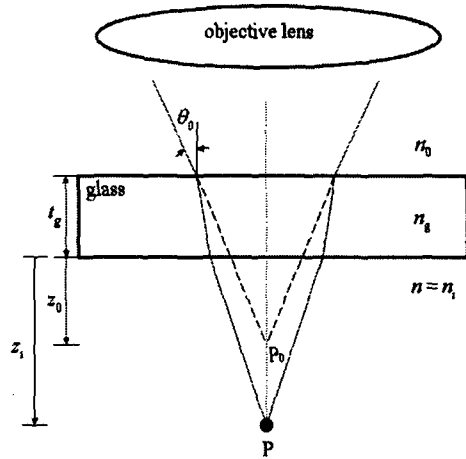


Fig. 1 Schematic diagram of objective-imaging system for one-fluid flow measurement

과의 타당성 검증을 위하여 수치해석결과와 비교하였다.

2. 두 유체 측정에서 초점평면들의 위치차

Fig. 1은 한 유체 유동 측정을 위한 미소입자영상유속계에서 대물렌즈를 이용한 대상물체의 측정 개략도를 보여준다. 형광입자는 작동유체, 글래스, Immer전 유체(immersion medium), 대물렌즈를 거쳐서 카메라에 기록된다. Fig. 1에서 z_0 와 z_i 는 글래스의 밑면에서 각각 P_0 와 P 까지의 거리이다. 여기서 P_0 와 P 는 각각 글래스와 작동유체가 없을 때와 있을 때 광축선과 광선의 교점이다. 이 때 z_i 는 다음과 같이 유도된다.

$$z_i = \alpha z_0 + \beta t_g \quad (1)$$

여기서

$$\alpha = \sqrt{\frac{n_i^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}{n_0^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{n_i^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}{n_0^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}} - \sqrt{\frac{n_g^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}{n_0^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}} \quad (3)$$

여기서 n_0 , n_i , n_g 는 각각 Immer전 유체의 굴절률, 작

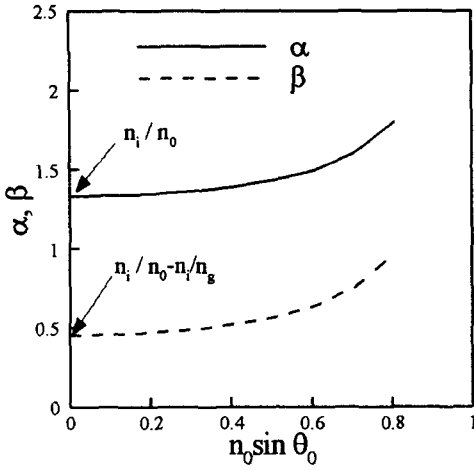


Fig. 2 Dependence of α and β on θ_0 ($n_0 = 1.000$, $n_i = 1.333$, $n_g = 1.520$)

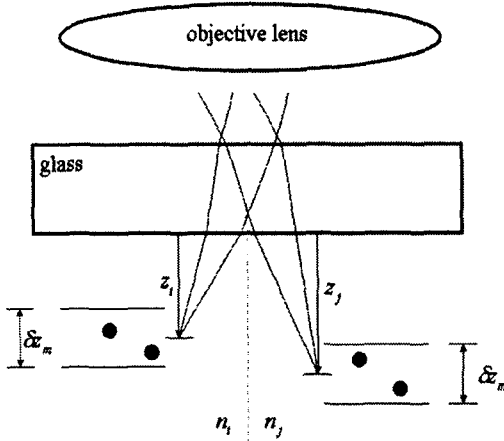


Fig. 3 Schematic diagram of objective-imaging system for two-fluid flow measurement

동유체의 굴절률, 글래스의 굴절률이며, t_g 는 글래스의 두께, θ_0 는 형광입자의 빛이 글래스에서 임머전 유체를 통과할 때 투과되는 각도이다. 작동유체가 물이고 오일 임머전 렌즈(oil-immersion lens)를 사용하였을 때 θ_0 에 대한 α 와 β 값의 변화는 Fig. 2에 나타나있다. 식(1)~(3)과 Fig. 2를 통하여 대물렌즈를 통과하는 광선은 한점에 모아지지 않음을 알 수 있다. 이런 수차(aberration)에 의하여 입자 형상은 흐려지게 된다. 글래스에 의하여 발생하는 구면수차는 높은 NA

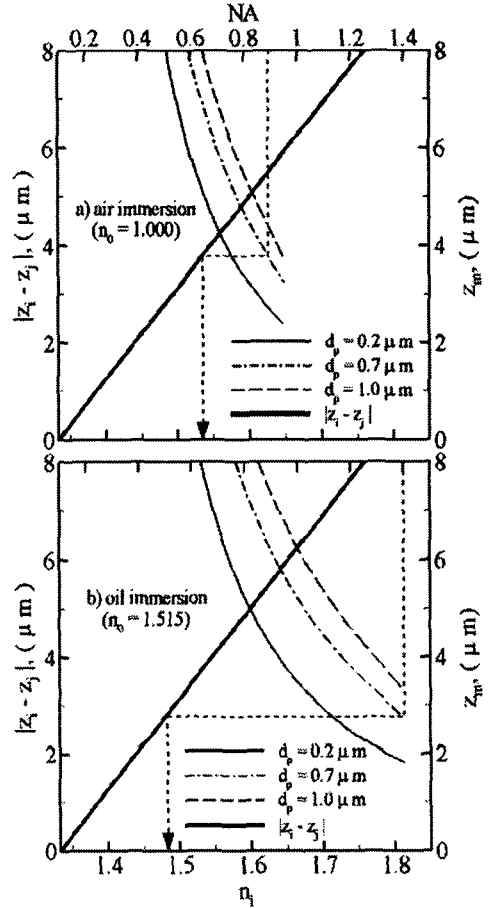


Fig. 4 Out-of-plane resolution and spatial deviation of measurement planes in two fluids: a) air-immersion lens, and b) oil-immersion lens

(numerical aperture) 렌즈의 경우 무시할 수 없다 (<http://www.olympusmicro.com/primer/anatomy/anatomy.html>). 그래서 몇몇 대물렌즈는 이 수차를 보정해 주기 위한 초승달 렌즈(meniscus lens)를 사용한다. 그러나 때때로 사용하는 글래스의 두께가 허용된 두께보다 큰 경우가 있다. 이 때에는 글래스 두께가 미치는 영향이 고려되어야 한다. 일반적으로 대물렌즈는 글래스 바로 밑면에 초점이 가장 잘 맞추어져 있도록 설계된다. 그래서 글래스 밑면 이하를 측정할 경우, $n_0 \neq n_i$ 일 때에도 수차는 발생하게 된다. 식(1)로부터 z_0 가 커질수록 수차가 증가함을 알 수 있다. 이런 수차에 대한 정확한 분석이 필요하지만 간편함을 위해 근축광선 ($\theta_0 \ll 1$)을 식(1)~(3)에 적용하면 초점 평면의 위치는 다음과 같이 유도된다.

$$z_i \approx \frac{n_i}{n_o} z_o + \left(\frac{n_i}{n_o} - \frac{n_i}{n_g} \right) t_g \quad (4)$$

두 유체 유동 측정의 경우 대물렌즈를 이용한 대상 물체 측정의 개략도는 Fig. 3에 나타나 있다. 두 유체의 굴절률 차이에 의하여 초점평면들의 평평하지 않음을 볼 수 있다. 즉 측정 조건에 대한 세밀한 주의가 없으면 두 유체의 경계면에서 얻어진 속력 분포는 갑작스런 변화를 보일 수도 있다. 평평한 측정평면을 만들기 위하여 초점평면들 위치가 측정시스템의 깊이 방향 분해능보다 작아야 한다.

$$|z_i - z_j| < \delta z_m \quad (5)$$

여기서 δz_m 은 측정시스템의 깊이 방향 분해능이고, z_i 와 z_j 는 각각 작동유체의 굴절률이 n_i 와 n_j 일 때 초점위치이다.

대물렌즈의 초점심도는 다음과 같이 주어진다⁽¹⁰⁾.

$$\delta z = \frac{n_o \lambda_o}{NA^2} + \frac{n_o e}{M \cdot NA} \quad (6)$$

여기서 λ_o 는 카메라에 기록되는 빛의 파장, e 는 카메라의 픽셀 크기, M 은 렌즈의 배율이다. 한편, 상호상관깊이(depth-of-correlation)는 다음과 같이 주어진다⁽¹¹⁾.

$$\delta z_c = \frac{3n_o \lambda_o}{NA^2} + \frac{2.16d_p}{\tan(\theta_0)_{max}} + d_p \quad (7)$$

여기서 $NA = n_o (\sin \theta_0)_{max}$ 이고 d_p 는 형광입자의 직경이다. 상호상관깊이는 렌즈의 초점평면에서부터 입자강도가 10%인 곳까지 거리의 두 배로 정의된다. 이 상호상관깊이는 상호상관(cross-correlation)에 영향을 미치는 영역에 대한 개념을 도입하였다. 따라서 속도를 추출하기 위해 상호상관을 이용하는 미소입자 영상유속계의 경우 초점심도(δz)보다 상호상관깊이(δz_c)가 깊이 방향 분해능으로 더 적절하다. 즉 $\delta z_m = \delta z_c$ 라고 할 수 있다.

오일 임머전 렌즈와 에어 임머전 렌즈(air-

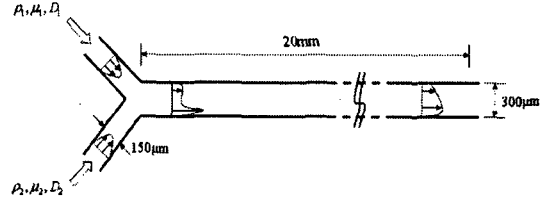


Fig. 5 Top view of Y-shaped microchannel (depth=50 μm)

immersion lens) 두 경우에 대하여 n_i 에 대한 측정평면들의 위치 차 $|z_i - z_j|$, 그리고 NA 와 d_p 에 대한 깊이 방향 분해능 z_m 이 Fig. 4에 나타나 있다. 여기서 다른 한 유체는 물로 고정되어 있고($n_j = 1.333$), $|z_i - z_j|$ 는 $z_j = 25 \mu\text{m}$ 일 때 계산되었다. 보는 바와 같이 두 유체의 측정평면들의 위치 차는 n_i 에 비례하는 반면, 깊이 방향 분해능은 NA 에 제곱 반비례한다. Fig. 4를 통하여 NA 가 고정되어 있을 경우 평평한 측정평면을 만들기 위한 n_i 의 범위가 제한되어 있음을 볼 수 있다. 예를 들면 $NA = 1.4$ 인 오일 임머전 렌즈를 사용하여 $d_p = 0.7 \mu\text{m}$ 입자로 유동을 측정할 경우 $z_m \approx 2.8 \mu\text{m}$ 이고, 이 때 $n_i < 1.48$ 이어야 $|z_i - z_j| < 2.8 \mu\text{m}$ 이게 된다. 다시 말하면 물에서 초점이 $z_j = 25 \mu\text{m}$ 으로 맞추어져 있을 경우 다른 한쪽 유체는 $n_i < 1.48$ 인 유체이어야 한다. 두 종류의 렌즈를 비교하면 일반적으로 오일 임머전 렌즈의 경우 높은 NA 에 의한 작은 δz_m 으로 인하여 두 유체의 굴절률차이가 더 작아야 한다.

3. 실험장치

3.1. Micro PIV 셋업

초점평면들의 위치 차이가 있음에도 하나의 평평한 측정평면이 만들어짐을 보기 위해 미소입자영상유속계를 설치하여 마이크로채널에서 두 유체의 속력을 측정하였다. 미소입자영상유속계의 개략도는 Fig. 5에 나타나 있다. 마이크로채널은 두 입구를 가지고 있으며 두 입구는 튜브에 의하여 주사기펌프(pump11, Harvard Inc.)에 연결되어 있다. 형광입자(Duke Scientific)의 직경 $d_p = 0.7 \mu\text{m}$ 이고 542 nm 파장의 빛을 흡수하여 612

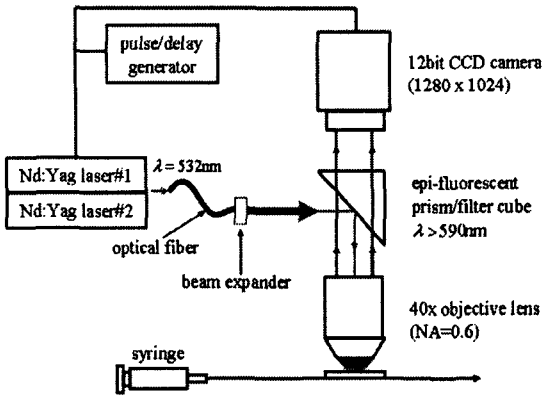


Fig. 6 Schematic diagram of micro PIV setup

nm 파장의 빛을 방출한다. 상용 형광입자는 일반적으로 DI수(deionized water)에 들어있다. 그러나 본 실험에서는 글리세롤 수용액이 사용되기 때문에 형광입자가 들어있는 글리세롤 수용액을 만들 때 주의가 필요하다. 예를 들면 입자의 부피농도가 0.1%이고 글리세롤의 질량농도가 60%인 수용액을 만들기 위해서는 상용 형광입자(1% 입자부피 농도)와 65.2%의 글리세롤 수용액을 1:10의 부피 비율로 섞어야 한다. Nd:Yag 레이저는 광케이블과 빔익스팬더(bean expander)를 통하여 마이크로채널을 조명하게 된다. 입자영상을 기록하기 위하여 1280×1024 해상도를 가지는 12비트 카메라(Sensicam faster shutter, PCO)와 $NA = 0.6$ 이고 $M = 40$ 인 대물렌즈를 사용하였다.

속력구배가 강한 곳에서도 속도벡터를 추출하기 위하여 윈도우 오프셋을 동반한 계층적 반복 알고리즘(iterative multigrid algorithm with window offset)⁽¹²⁾과 상관함수기반 에러벡터 제거법(correlation-based correction)⁽¹³⁾을 사용하였다. 윈도우의 크기를 64×64 픽셀에서 16×16 픽셀로 점차적으로 감소시킬 경우 평면에서 벡터 분해능은 2.3×2.3 μm이고 깊이 방향 분해능은 7.3 μm였다.

3.2. Y 모양 마이크로채널

Y 모양 마이크로채널은 Fig. 6에 나타나 있다. 채널은 PDMS와 글래스($t_g = 1$ mm)를 접합하여 만들었다. 채널의 단면의 크기는 300×50 μm이고 길이는 20 mm였다. 제작공정은 다음과 같다. 먼저 50 μm 두께의 몰드 마스터를 만들기 위해 SU-8을 실리콘 웨이퍼 위에 스펀 코팅하였다. 그 후 SU-8 위에 패턴 마스크를 씌우

Table 1 Properties of glycerol solutions at 25 °C^(14,15)

Mass fraction ϕ	Density g/cm^3	Viscosity $\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$	Diffusivity $\times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$	Refraction index
0	1.000	0.888	10.6	1.333
0.1	1.021	1.147	8.98	1.345
0.2	1.044	1.527	7.52	1.357
0.3	1.067	2.137	5.81	1.370
0.4	1.091	3.130	4.18	1.384
0.5	1.117	4.991	3.24	1.398
0.6	1.143	8.640	2.30	1.413
1.0	1.264	887		1.476

고 자외선으로 포토리소그래픽(photolithograph) 처리를 하면 자외선에 노출된 부분은 경화된다. 그리고 경화되지 않은 부분을 화학적으로 제거하였다. PDMS를 마스터로부터 쉽게 떼어내기 위해 마스터 표면을 CHF_3 처리를 하였다. 액상 PDMS와 큐어링 액(curing agent)를 20:1로 혼합한 후 잘 섞어주고 진공 챔버에서 공기를 제거하였다. 액상 PDMS와 큐어링 액 혼합물을 마스터 위에 붓고 80 °C에서 약 1시간 정도 두었다. 온도가 내려간 후 PDMS 리플리카를 마스터로부터 떼어내었다. 그리고 입구와 출구를 편치하고 PDMS 리플리카와 글래스의 강한 접합을 위해 PDMS 리플리카 표면을 플라즈마 클린너에서 산화시켰다. 그리고 PDMS 리플리카와 글래스를 접하였다.

작동유체로 서로 다른 질량농도를 갖는 글리세롤 수용액을 사용하였다. 글리세롤 수용액의 굴절률은 수용액속의 글리세롤 질량농도 ϕ 에 따라 달라진다.

$$\phi = \frac{m_g}{m_g + m_w} \quad (8)$$

여기서 m_g 와 m_w 는 각각 글리세롤과 물의 질량이다. 두 유체가 동일한 유량으로 채널에 주입된다. 속력분포는 두 입구에서 유체의 물성치 차, 예를 들면 점성계수, 농도, 확산계수 등의 차이에 의하여 크게 영향을 받는다. 글리세롤 수용액의 물성치의 ϕ 에 대한 변화는 표1에 주어졌다. 표1에서 0% 농도는 무한히 낮은 글리세롤 질량농도를 의미한다. 수용액의 물성치는 ϕ 에 민감한데, ϕ 가 증가할수록 확산계수는 감소하고 점성계수와 굴절률은 증가하게 된다.

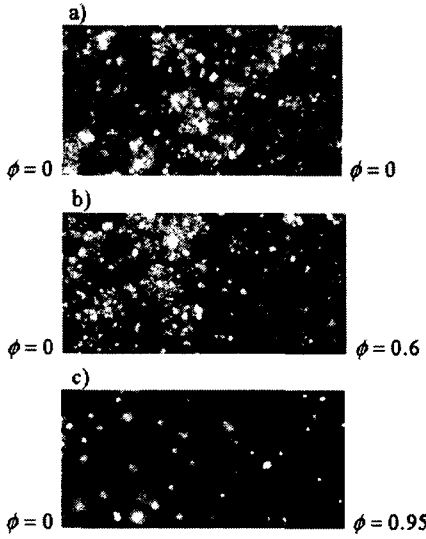


Fig. 7 Flow photographs near the interfaces of two fluids at three conditions

4. 결과 및 토론

실험결과를 검증하기 위하여 동일한 조건에서 수치 해석을 수행하였다. 두 유체가 혼합하는 유동은 다음의 물질전달 방정식을 통하여 해석할 수 있다.

$$\nabla \cdot [\rho(\phi)\phi\vec{V}] = \nabla \cdot [D(\phi)\nabla\phi] \quad (9)$$

여기서 ρ 는 혼합물의 밀도, D 는 확산계수이고 \vec{V} 는 속도벡터이다. 채널 벽과 출구에서 ϕ 에 대하여 노이만 조건을 적용하였다. 두 유체 유동에서 물성치 변화를 고려하였다. 물성치는 표1에 나타난 것처럼 오직 글리세롤의 질량농도에 의하여 변한다. 그러나 식(9), 연속 방정식, 3차원 모멘텀 방정식은 서로 다른 물성치로 커플되어 있다. 이 관계를 디커플 시키기 위하여 먼저 연속방정식과 3차원 모멘텀 방정식은 가정된 ϕ , $\rho(\phi)$, $\mu(\phi)$ 를 기초로 풀어지고 그 결과로부터 얻어진 속도벡터와 $D(\phi)$ 를 기초로 물질전달 방정식이 풀어지게 된다. 그 다음에 $\rho(\phi)$, $\mu(\phi)$, $D(\phi)$ 가 업데이트 된다. 단면의 격자수는 20×50 이었고 SIMPLEC 알고리즘을 적용하였다. 본 수치해석에서 물성치의 값이 수렴하기 위해서는 $200 \sim 1200$ 의 스텝이 필요하였다. 수렴조건은 이어지는 두 스텝 동안 ϕ 의 변화가 상대적으로 10^{-4} 보다 작아질 때로 하였다. 자세한 사항

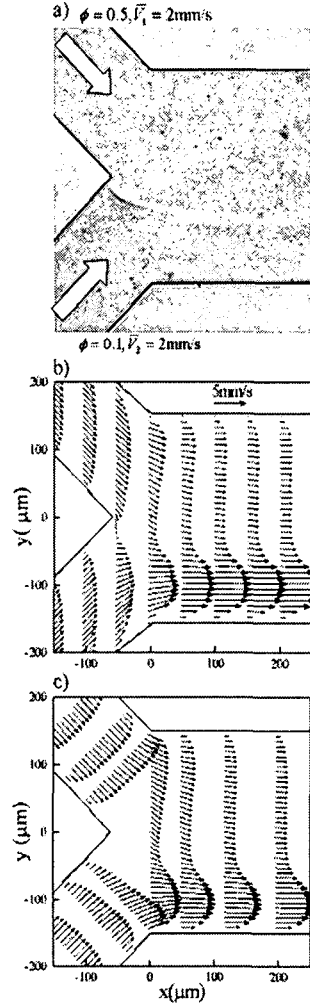


Fig. 7 Mixing of $\phi = 0.1$ and $\phi = 0.5$: a) photograph of two fluids (experiment), b) velocity profiles (experiment), and c) velocity profiles (simulation)

은 Liu 등(2003)⁽⁷⁾ 논문에서 찾을 수 있다. 한 유체 유동($\phi = 0$)과 두 유체 유동($\phi = 0$ 과 $\phi = 0.6$, $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.95$)에 대한 입자영상은 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7a)와 b)는 $NA = 0.6$ 인 에어 입머전 렌즈를 통하여, Fig. 7c)는 $NA = 1.4$ 인 오일 입머전 렌즈를 통하여 얻어졌다. 두 렌즈의 경우 깊이 방향 분해능은 각각 $7.8, 2.7 \mu\text{m}$ 이다. 한 유체 유동의 경우 형광입자는 고르게 분포되어 있지만, 두 유체 유동의 경우 불연속적인 백그라운드 노이즈를 보인다. 이 불연속성은 앞서 설명한 두 유체의 경계면에서 수차의 정도가 변하기 때문이다. 점성계수가 낮은 곳에 비하여 높은 곳에

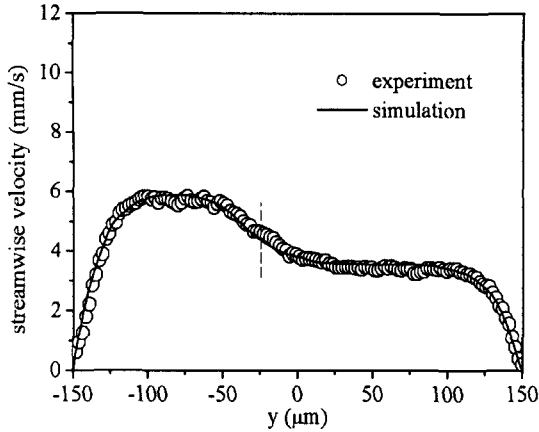


Fig. 9 Velocity profile of two-fluid flow at $300\ \mu\text{m}$ downstream ($\phi = 0$ and $\phi = 0.2$)

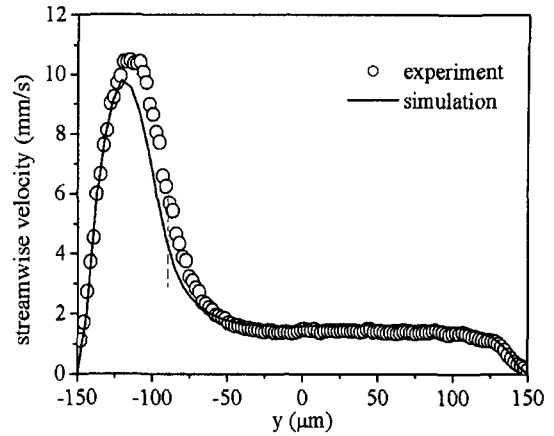


Fig. 11 Velocity profile of two-fluid flow at $300\ \mu\text{m}$ downstream ($\phi = 0$ and $\phi = 0.6$)

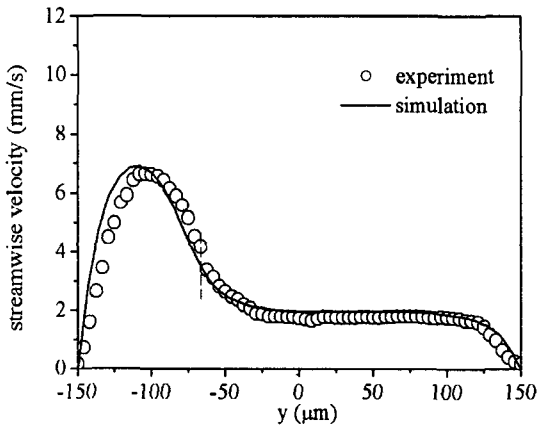


Fig. 10 Velocity profile of two-fluid flow at $300\ \mu\text{m}$ downstream ($\phi = 0.1$ and $\phi = 0.5$)

는 이미지의 질(image quality)이 훨씬 좋다. 그 이유는 글리세롤 수용액의 경우 점성계수가 높아질수록 굴절률이 슬라이드 글라스의 굴절률이 비슷해지기 때문이다. 이미지 질의 차이는 오일 임머전 렌즈의 경우(Fig. 7c)에 더 커지게 된다. 이 경우 두 유체 측정평면들의 위치가 렌즈의 깊이 방향 분해능보다 약간 크고 이것은 경계면 부분에서 속도분포의 불연속성을 야기할 수 있다.

Fig. 8은 $\phi = 0.1$ 과 $\phi = 0.5$ 를 혼합하였을 때 속도분포의 변화과정을 보여 준다. 두 유체가 만나게 되면 높은 점성계수를 가지는 유체가 더 넓은 영역을 차지하고, 이로 인하여 점성계수가 낮은 유체의 속력이 빨라지게 된다. 속도분포의 불연속성은 보이지 않고

있다. 두 유체가 만나는 과정 중에는 2차원 유동 특성을 보이다가 어느 거리 이상($x = 160\ \mu\text{m}$)이 되면 1차원 유동 특성을 보이게 된다. 속도분포는 혼합이 증가함에 따라 점점 부드럽게 되고 이는 수치적 예측과 잘 일치한다. 두 유체가 완전히 혼합되기 전의 속도분포는 전형적인 Poiseuille 유동이다.

세 경우($\phi = 0$ 과 $\phi = 0.2$, $\phi = 0.1$ 과 $\phi = 0.5$, $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.6$)에 대하여 두 입구채널이 만나는 지점으로부터 $300\ \mu\text{m}$ 인 곳에서 속도분포를 수치해석결과와 비교하였다. Fig. 9~11에서 대시선(---)은 두 유체의 경계면으로 그곳에서 농도는 두 입구 농도의 중간값과 같다. Fig. 9~11에서부터 실험결과와 수치해석결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.2$ 유동의 경우(Fig. 9) 두 유체의 측정평면의 위치 차는 $0.5\ \mu\text{m}$ 인데 이는 깊이 방향 분해능($7.3\ \mu\text{m}$)보다 작다. 그래서 실험과 수치결과가 잘 일치한다. 그러나 다른 경우, 유체의 물성치가 급격히 변하는 경계면을 기준으로 점성계수가 낮은 부분에서 실험과 수치해석 사이에 약간의 차이가 보인다. 이 차이는 2장에서 설명한 이미지의 흐려짐으로 인한 속도 추출시 SNR의 감소 때문으로 생각되어진다. 많은 영역을 차지하는 점성계수가 높은 유체에 초점을 맞추어 이미지를 얻고 프로세싱되어 점성계수가 낮은 유체의 이미지가 흐려졌다. 이로 인하여 점성계수가 낮은 부분에서 얻어진 속도분포가 수치해석 결과와 약간의 차이가 있음으로 보인다. 그 외에 생각할 수 있는 오차요인으로는 레이저 펄스로 인한 유체의 온도상승에 의한 물성치의 변화가 있다.

5. 결론

미소입자영상유속계를 두 유체 유동에 적용하여 얻어진 결과는 두 유체의 굴절률 차이에 의하여 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서 두 유체 유동 측정에 서 대물렌즈를 이용한 측정 시스템에 대해 살펴보았다. 두 유체의 경계면에서 유효한 속력분포를 얻기 위한 조건을 제시하였다. 그 조건에서 미소입자영상유속계를 이용하여 Y 모양 마이크로채널내의 두 유체 유동을 측정하였다. 세 경우($\phi = 0$ 과 $\phi = 0.2$, $\phi = 0.1$ 과 $\phi = 0.5$, $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.6$)에 대하여 실험을 수행하였고 수치해석과 비교하였다. 굴절률이 급격하게 변하는 두 유체의 경계면에서 점성계수가 작은 부분에서 실험과 수치해석결과 사이에 약간의 오차가 있었지만 전반적으로 좋은 일치율을 보여 주었다. 이 차이는 두 유체 유동에서 이미지가 흐려짐 정도의 차이에 기인한 것으로 보인다.

후 기

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Beebe, D. J., Mensing, G. A. and Walker, G. M., 2002, "Physics and Applications of Microfluidics in Biology," Annual Review of Biomedical Engineering, Vol. 8, pp. 261-286.
- (2) Koch, M., Witt, H., Evans, A. G. R. and Brunnschweiler, A., 1999, "Improved Characterization Technique for Micromixers," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 9, pp. 156-158.
- (3) Liu, R. H., Stremmer, M. A., Sharp, K. V., Olsen, M. G., Santiago, J. G., Adrian, R. J., Aref, H. and Beebe, D. J., 2000, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 9, pp. 190-197.
- (4) Beebe, D. J., Adrian, R. J., Olsen, M. G., Stremmer, M. A., Aref, H. and Jo, B. H., 2001, "Passive Mixing in Microchannels: Fabrication and Flow Experiments," Mechanics and Industry, Vol. 2, pp. 343-348.
- (5) Lee, Y. K., Tabeling, P., Shih, C. and Ho, C. M., 2000, "Characterization of a MEMS-Fabricated

Mixing Device ASME IMECE," Orlando, Florida, U.S.A.

- (6) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," Science, Vol. 295, pp. 647-650.
- (7) Liu, Y. Z., Kim, B. J. and Sung, H. J., 2003, "Two-Fluid Mixing in a Microchannel," International Journal of Heat and Fluid Flow, accepted.
- (8) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Santiago, J. G., 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," Experiments in Fluids, Vol. 27, pp. 414-419.
- (9) Kim, M. J., Beskok, A. and Kihm, K. D., 2002, "Electro-Osmosis-Driven Micro-Channel Flows: a Comparative Study of Microscopic Particle Image Velocimetry Measurements and Numerical Simulations," Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 170-180.
- (10) Inoue, S. and Spring, K., 1997, Video Microscopic: The Fundamentals, Plenum, New-York.
- (11) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Gray, M. H. B., 2000, "Volume Illumination for Two-Dimensional Particle Image Velocimetry," Measurement Science and Technology, Vol. 11, pp. 809-814.
- (12) Scranio, F. and Riethmuller, M. L., 1999, "Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," Experiments in Fluids, Vol. 26, pp. 513-523.
- (13) Hart, D. P., 2000, "PIV Error Correction," Experiments in Fluids, Vol. 29, pp. 13-22.
- (14) Dorsey, N. E. 1940, Properties of Ordinary Water-Substance, Reinhold, New-York.
- (15) Ternstrom, G., Sjostrand, A., Aly, G. and Jernqvist, A., 1996, "Mutual Diffusion Coefficients of Water+Ethylene Glycol and Water+Glycerol Mixtures," Journal of Chemical Engineering Data, Vol. 41, pp. 876-879.
- (16) Cussler, E. L., 1997, Diffusion mass transfer in fluid system, Cambridge university press, Cambridge.