

직선채널과 확대채널에서의 액적 내부 유동 가시화

진병주* · 김영원* · 유정열†

Flow Visualization of the Flow inside the Droplet Passing through a Straight and a Diverging Channel

Byungju Jin, Young Won Kim and Jung Yul Yoo

Abstract

Flow visualization of a droplet passing through a straight channel and a diverging channel has been carried out using micro-PIV. Diverging channel is frequently used in lab-on-a-chip and microfluidic devices, where flow pattern inside the droplet passing is quite different from that through a straight channel. In the present study, we visualized the droplet flow in three different regions. The first region is where the droplet has a wide contact area with the channel wall, the second region is characterized with a narrow contact area and the third region is where droplet is detached from the channel wall. Visualization results show that the internal flow inside the droplet passing through the straight channel moves in the opposite direction to the droplet velocity in the near wall exhibiting complex flow patterns. But in the diverging channel the internal flow inside the droplet moves in the same direction as the droplet velocity due to the shear induced by oil phase flow exhibiting rather simple flow pattern.

Key Words : Droplet(액적), Microfluidic device(미세유체소자), Micro-PIV(입자영상유속계), Diverging channel(확장 채널), Protrusion(돌출부)

기호설명

H	채널의 높이
Q_o	Oil phase 유량
Q_w	Water phase 유량
V_w	벽면으로 이동하는 속도 성분
V_c	중앙으로 이동하는 속도 성분
W	채널의 너비

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
서울대학교 정밀기계설계공동연구소
E-mail : jyyoo@snu.ac.kr

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

1. 서론

미세액적은 작은 크기(small size), 제한된 형상(confined geometry), 균일한 크기(monodisperse size), 빠른 생성 비율(fast generation rate), 미량의 콘트롤 에너지(small control energy) 등의 다양한 특성으로 주목을 받고 있다. 이러한 특성들로 인해 혼합(mixing)이나 생화학 반응(biological/chemical reaction)^(1~5), 폴리머 입자 합성(particle synthesis)^(6~9), cell encapsulation^(10~14) 등의 다양한 분야에 응용되고 있다. 특별히 생화학반응에 있어서 미세액적은 극미량의 시료가 사용되고 분산(dispersion)효과가 억제되며, 신속한 혼합(rapid mixing)등의 특징으로 인해 그 연구

의 중요성이 증가하고 있다.⁽²⁾

이러한 미세액적 내 혼합특성을 이해하고 이를 활용하기 위해서는 미세채널 내에서 미세액적의 유동특성에 대한 유체역학적 이해가 필수적이라고 할 수 있다. 그 동안 액적의 유동특성을 이해하기 위해 형광 염료(dye)를 이용한 가시화 연구^(1~5)와 마이크로 입자영상유속계(micro PIV)을 이용한 액적 내부 가시화 연구⁽¹⁵⁾가 이루어졌다.

이러한 연구들에 의하면 직선채널에서 액적이 이동할 때에 유동의 이동방향에 대한 좌우 절반 영역에서 회전하는 유동(recirculating flow)이 생기고 이 절반영역이 각각 혼합되며 그 사이에는 혼합이 잘 되지 않는 특성을 보여준다.⁽²⁾ 이러한 혼합 특성을 향상시키기 위해 굽어진 채널(winding channel)을 사용하거나 울퉁불퉁하게 굽은(Bumpy Serpentine) 형태의 채널을 사용하여 액적 내부 혼합 특성에 대해 밝히기도 하였다.⁽⁵⁾ Kinoshita 등⁽¹⁵⁾은 직선채널에서의 공초점 입자영상 유속계(confocal micro-PIV)를 이용하여 미세액적 내부 유동장에 대한 3 차원 측정을 실시하였다.

종국적으로는 미세액적을 이송하고(moving), 병합(merging), 분리(split) 시켜서 생화학 반응을 확인하는 하나의 칩(chip) 형태로 활용할 수 있으며, 이 때 직선 채널 이외에 확대채널(diverging channel), 수축채널(converging channel)이 다양하게 사용되고 있다. 특히 확대채널에서는 직선채널과 다른 내부 유동 특성을 보인다. 그러나 그동안 직선채널에서와는 달리 확대채널에서는 액적의 내부 유동특성에 대한 연구가 거의 수행되지 않았다.

따라서, 본 연구는 마이크로 입자영상유속계를 이용하여 액적이 직선채널과 확대채널을 통과할 때 액적 내부 유동을 가시화하고 유동특성을 비교하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 방법 및 절차

2.1 채널 제작

채널 제작을 위한 마스터는 Bio-IT Foundry Center 를 통해 제작되었으며, 채널은 DA-184A 와 DA-184B (DowCorning)를 10:1 로 혼합하여 사용하였다. 채널이 형성되어 있는 실리콘 웨이퍼 위에 액상의 Poly-dimethyl-siloxane(PDMS)를 부은 다음 진공펌프에서 기포를 빼낸 후 오븐(oven)에 넣어 65°C 에서 1 시간 동안 굽는다. 4 개의 면이 모두 동일한 소수성 특성을 갖게 하기 위해서 밀판 또한 동일한 방법으로 제작하였다.

준비한 PDMS channel(PDMS replica)과 밀판은 Air plasma(ulvac g-50da, harrick plasma)를 이용하여 600 Torr 에서 2 분 30 초간 플라즈마(plasma) 처리 후 붙인다. 플라즈마 처리한 PDMS 표면은 소수성에서 친수성으로 표면특성이 바뀌게 된다. 반면에 액적(water droplet)을 만들기 위해서는 표면이 소수성을 유지해야 함으로 표면의 소수성이 충분히 회복되도록 24 시간 이상 오븐에 두었다.

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 채널의 개념도이다. 액적은 너비 50 μm , 높이 50 μm 의 T 자 형태의 채널을 통해 생성되며 액적을 효율적으로 생성하기 위해 돌출부(protrusion)를 사용하였다. 돌출부 효과를 확인하기 위해 Fig. 2 와 같이 돌출부의 크기가 각각 0, 5, 17, 28 μm 인 4 가지 형태의 채널을 제작하여 실험하였다. Fig. 3, 4 는 돌출부의 크기에 따른 액적 생성 결과를 보여준다. 4 가지 채널에 대해 water phase 유량을 고정시키고 oil phase 유량을 (a) 3 $\mu\text{l/h}$ 에서 (f) 50 $\mu\text{l/h}$ 까지 증가시키면서 액적생성 결과를 비교하였다. Oil phase 유량이 증가함에 따라((a) \rightarrow (f)) 생성되는 액적의 크기는 작아진다. 또한 돌출부에 의해 생성되는 액적의 크기가 줄어들고, 돌출부의 크기가 커짐에 따라 줄어드는 정도가 더 커진다.

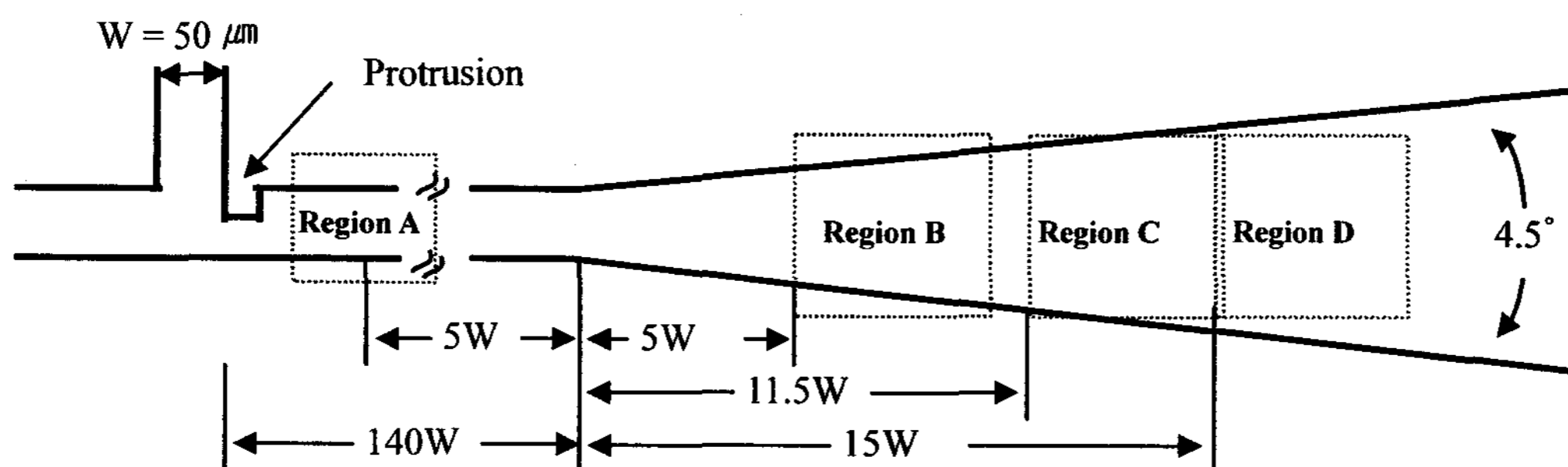


Fig. 1 A schematic of straight and diverging channel geometry (Region A, straight channel region; Region B, wide contact between the droplet and channel wall; Region C, narrow contact between the droplet and channel wall; Region D, droplet detached from the wall).

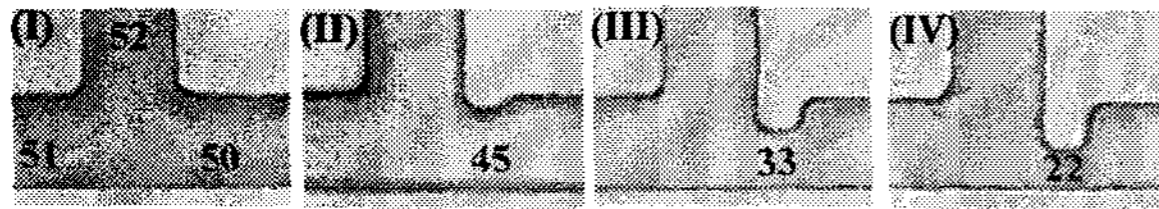


Fig. 2 Microfabricated channel dimension (μm) at the T-junction (channel I, no protrusion; channel II, $5\text{-}\mu\text{m}$ protrusion; channel III, $17\text{-}\mu\text{m}$ protrusion; channel IV, $28\text{-}\mu\text{m}$ protrusion).

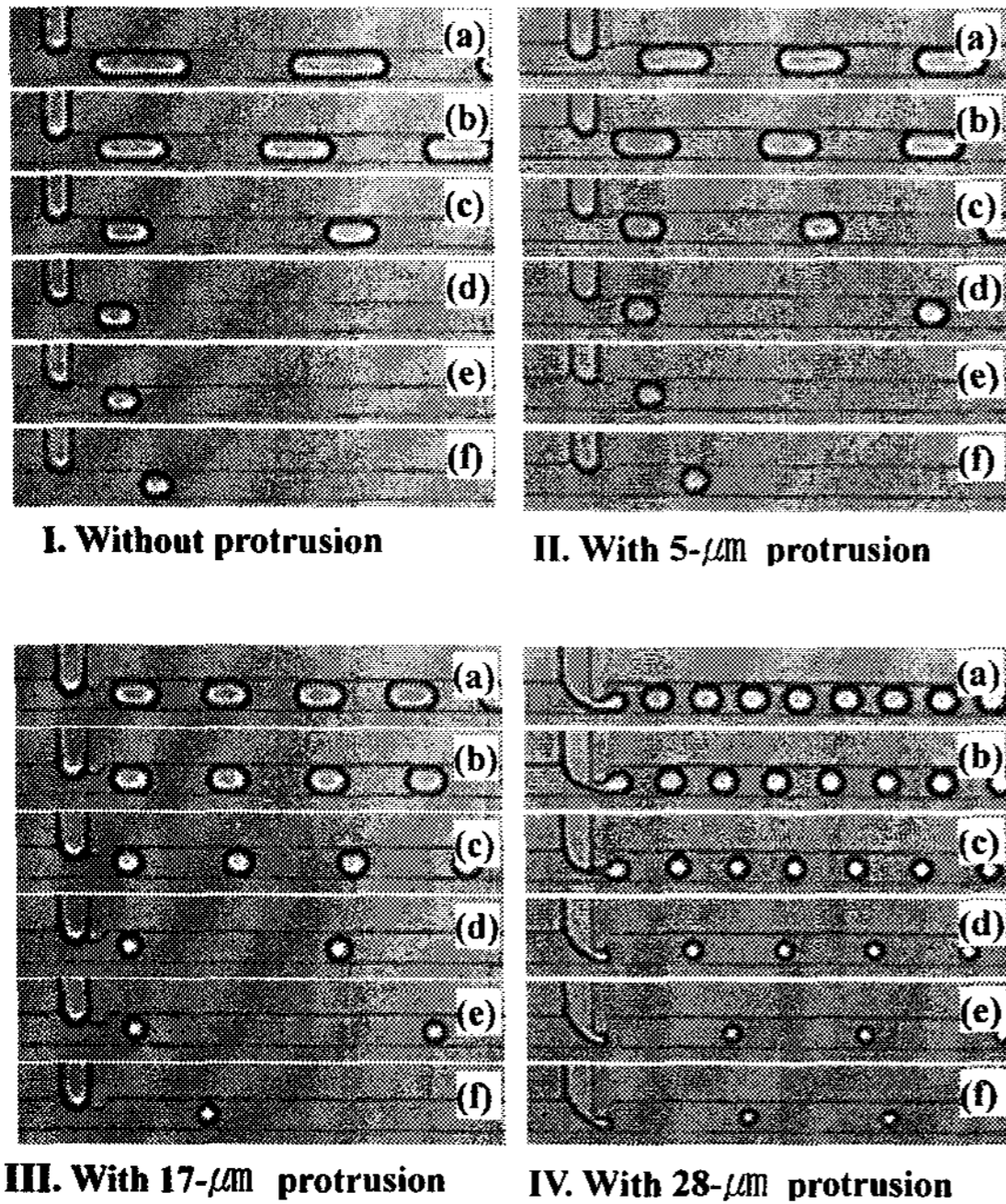


Fig. 3 Monodisperse droplet generation with four different channel types (water phase flowrate is constant ($Q_w = 3 \mu\text{l/h}$) and oil phase flowrate increase): (a) $Q_o = 3 \mu\text{l/h}$, (b) $Q_o = 5 \mu\text{l/h}$, (c) $Q_o = 10 \mu\text{l/h}$, (d) $Q_o = 20 \mu\text{l/h}$, (e) $Q_o = 30 \mu\text{l/h}$, (f) $Q_o = 50 \mu\text{l/h}$.

생성된 액적은 직선채널을 지나 확대채널로 유입된다. 확대채널은 4.5° 각도로 만들어졌다. 액적의 내부 유동은 4 곳의 영역(Regions A, B, C, D)에서 마이크로 입자영상유속계를 이용하여 가시화하였다.

2.2 실험 방법

액적을 생성하기 위해 하나의 입구로는 물이 유입되고, T-junction의 왼쪽에서는 oil이 유입된다. 세부적으로 두 종류의 유체는 시린지펌프(Syringe pump, Model 100, 210 Series, kdScientific)를 사용하여 시린지(Syringe, 100F-LL-GT, SGE)를 통해 채널 내부로 유입된다.

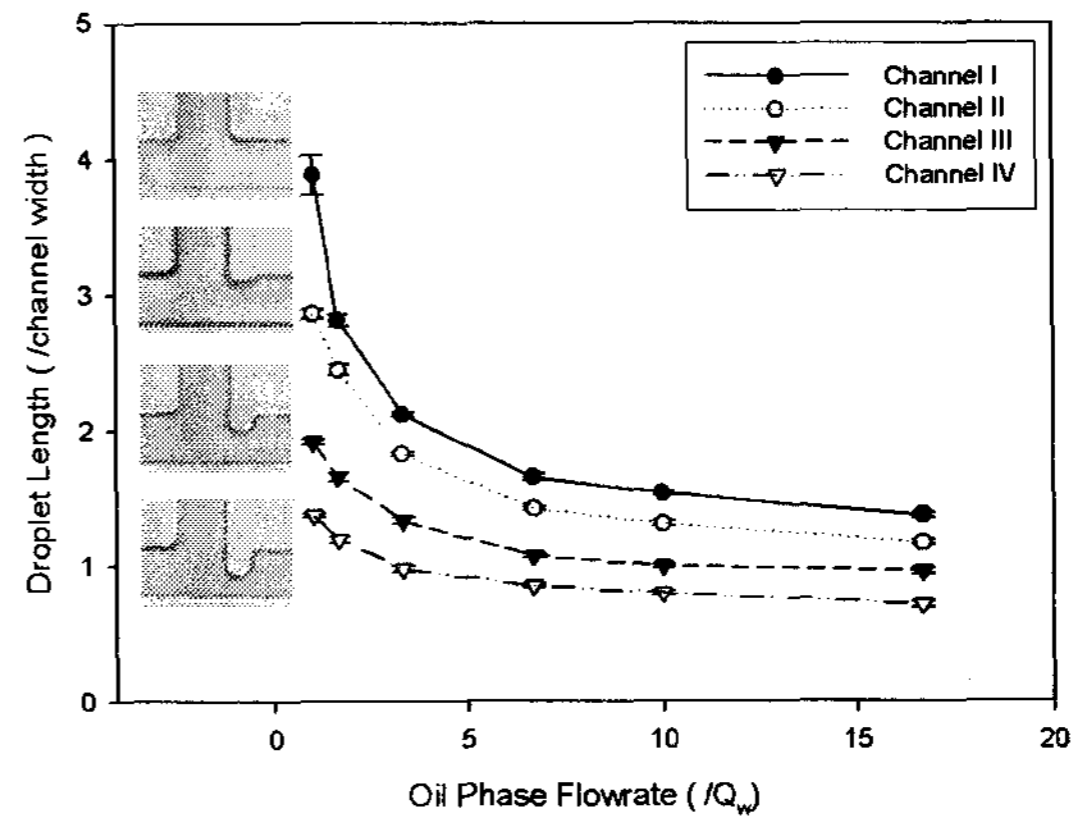


Fig. 4 Droplet length changes as oil phase flowrate increases and water phase flowrate is held constant.

시린지와 채널의 연결은 테플론튜브(내경: $254 \mu\text{m}$, 외경: $1587 \mu\text{m}$)를 사용하였으며 동일한 튜브를 사용하여 액적 생성에 영향을 미치는 압력강하 조건을 동일하게 유지하였다.

액적을 생성하기 위해 사용되는 두 종류의 유체로는, 굴절율이 유사한 실리콘 오일(Silicon oil KF-6002, Shin-Etsu Chemical Co. Ltd., Japan)와 물과 글리세롤(glycerol) 혼합액을 사용하였다. 실리콘 오일은 굴절율이 1.414로 PDMS의 굴절율 1.412과 크게 차이가 없다. 또한 물과 글리세롤 혼합액은 물과 글리세롤을 45%, 55%로 혼합할 경우 굴절율이 1.414로 실리콘 오일과 PDMS의 굴절율과 동일하게 된다.⁽¹⁵⁾

2.3 Micro-PIV를 이용한 가시화

T-junction에서 만들어진 액적은 직선 채널 1곳과 확장 채널 3곳에서 중앙단면의 이미지를 획득하여 가시화하였다. Water phase 유량과 oil phase 유량은 각각 $1 \mu\text{l/h}$ 와 $1.2 \mu\text{l/h}$ 로 조절하였다. 가시화를 위해 $0.5 \mu\text{m}$ 크기의 형광입자(Polystyrene Red Fluorescent Microsphere, particle suspension density $1.0\sim 1.05 \text{ g/cm}^3$, Duke Scientific)를 사용하였으며, 40배 대물렌즈(JP/UPlanFL40x, Olympus)를 사용하였다. 입자영상은 Cooled CCD camera(High Speed SensiCam^{QE}, $1376 \text{ (H)} \times 1040 \text{ (V)}$ pixel number, $6.45 \mu\text{m}$ pixel size, 10 fps at full frame, Cooke)를 사용하여 촬영하였으며 2배 binning하여 최대 $20\sim 36 \text{ frame/s}$ 로 촬영하였다. 이미지를 바탕으로 속도장 처리를 위해 32×32 pixel 크기의 Interrogation window를 사용하였으며, 50% 오버랩(overlapping)하였고 직선 채널에서는 75% 오버랩 하였다.

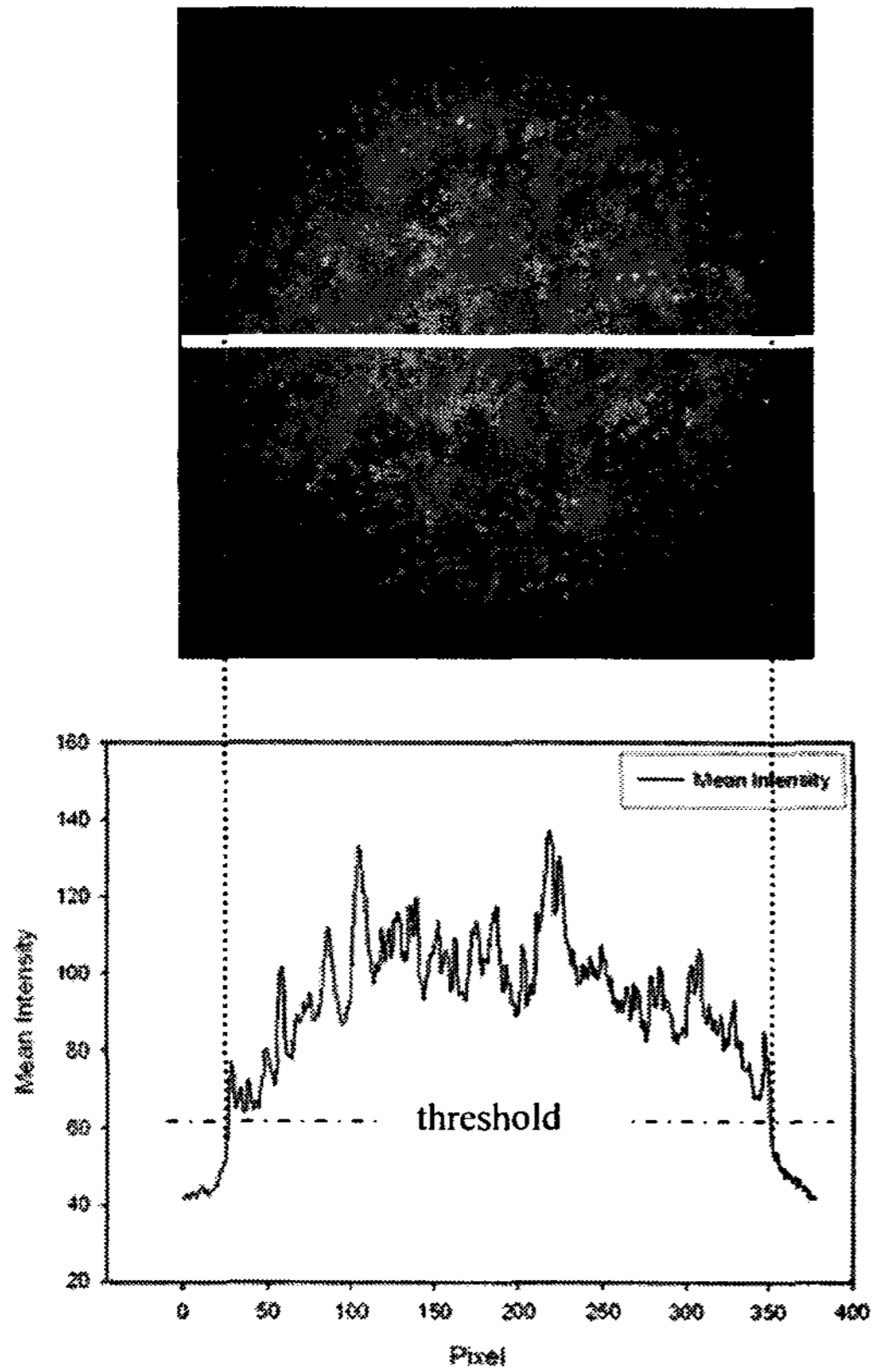


Fig. 5 Mean intensity distribution along the droplet center to detect interface.

액적의 유동특성상 액적의 이동속도에 비해 액적 내부 유동 속도가 작으므로 액적의 이동속도에 대한 상대속도로 액적의 내부 유동속도를 가시화 하였다. (본 실험의 경우 직선 채널에서 액적의 이동속도는 $150.8 \mu\text{m/s}$, 액적의 내부 유동 최대속도는 $60.1 \mu\text{m/s}$ 였다.) 직선 채널에서는 액적의 크기가 변하지 않으므로 동일한 액적의 순간 속도장 10 장을 평균하였으며, 확대채널에서는 진행함에 따라 모양이 변함으로 연속되는 액적 중에 동일한 크기의 액적을 동일한 위치에서 구한 순간 속도장 10 장을 평균하였다. 확대채널에서 액적이 벽면에서 떨어져 나간 Region D의 경우는 액적의 크기가 동일하므로 동일한 액적의 위치 변화에 따른 순간 속도장 10 장을 평균하여 평균 속도장을 구하였다.

액적의 위치를 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 단면에서의 평균 intensity 값을 기준으로 계면의 위치를 측정하였다.

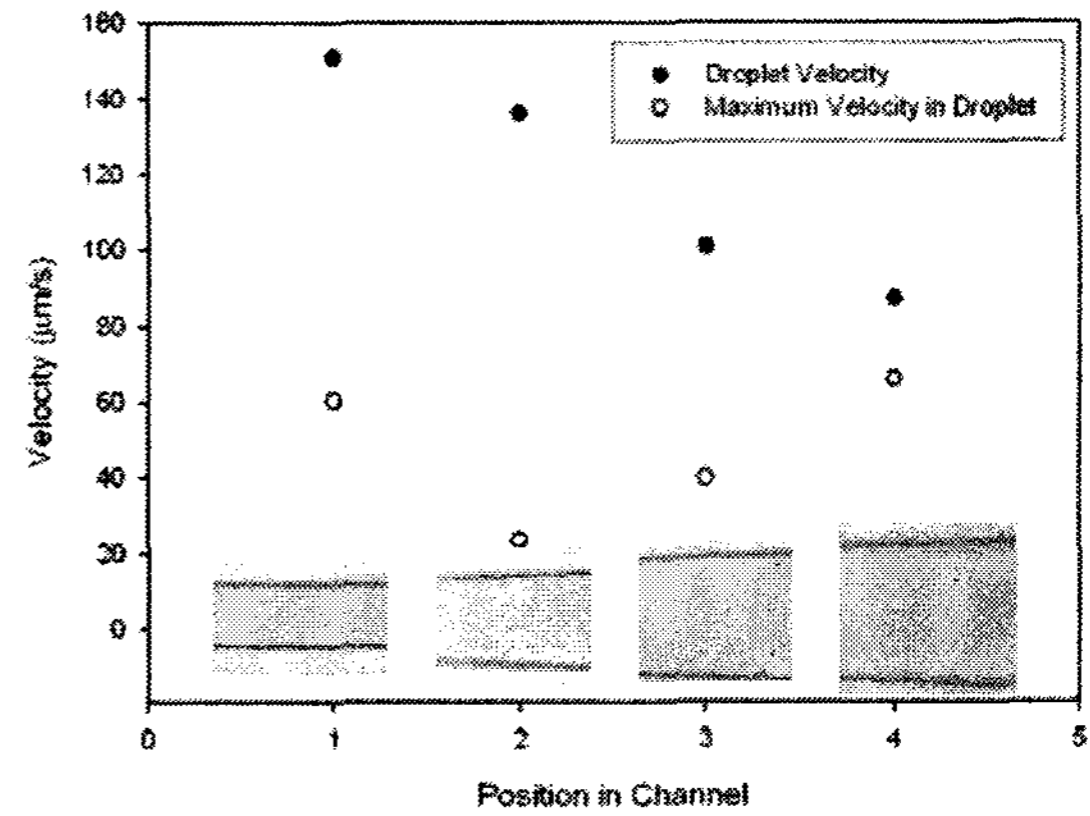


Fig. 6 Droplet velocity and maximum velocity in droplet relative to droplet velocity in regions A, B, C, D.

3. 실험 결과

3.1 직선 채널에서의 액적 내부 유동

Fig. 6은 채널의 각 위치에서 액적의 운동속도와 액적의 운동속도에 대한 액적 내부의 상대 속도 성분의 최대값을 보여준다. 채널이 확장되면서 액적의 운동속도는 줄어들고 액적의 내부 상대속도는 확대채널로 들어서면서 줄었다가 다시 증가하는 경향을 보여준다. 이것은 확장되면서 벽면과의 마찰면적이 줄어들어 벽면의 전단력에 의해 유도되는 유동속도 성분의 크기가 줄어들고, 반면에 확대채널에서 부착되었던 액적이 벽면에서 떨어져 나가면 oil phase 유체의 전단력에 의해 액적의 운동방향과 동일한 내부 유동 속도 성분이 유도되기 때문이다.

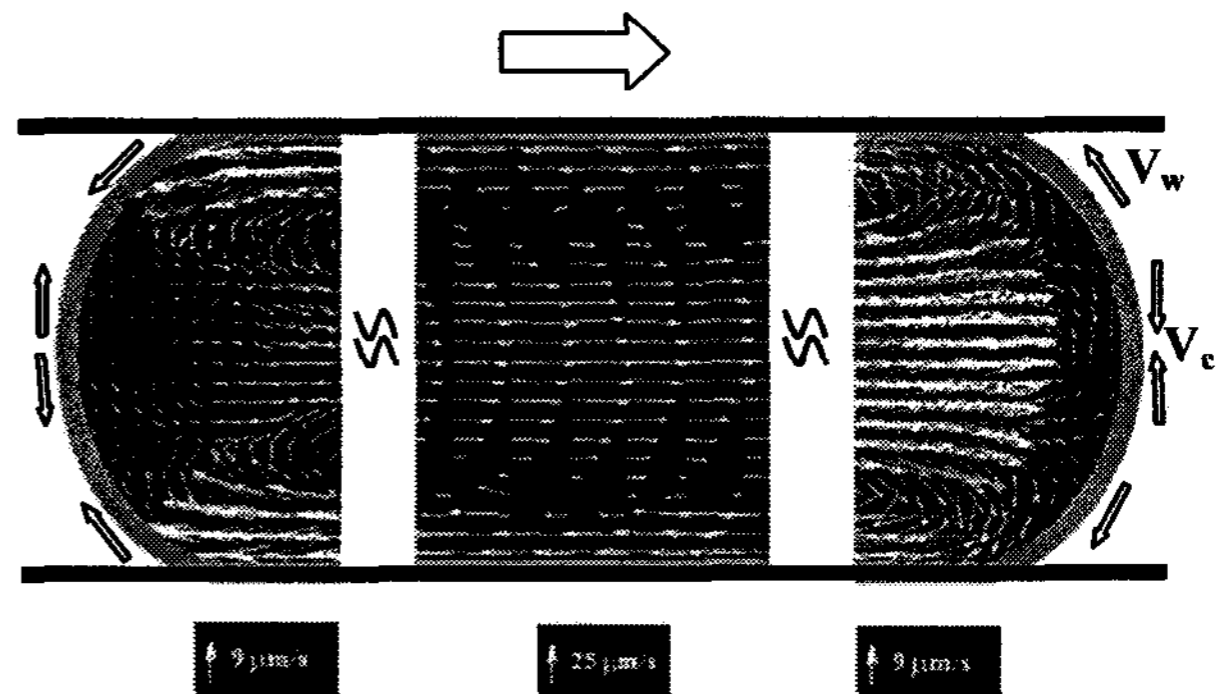


Fig. 7 Velocity vectors at the center plane of the droplet through the straight channel. The hollow arrow represents droplet moving direction. The reference vectors are referred under the image. The interrogation window size is 32×32 pixels and 75% overlap method was used. In the middle, some vector data are not shown for clarity.

Fig. 7 은 직선채널에서의 내부 유동을 보여준다. 벽면근처에서는 벽면에 의한 전단력에 의해 액적의 운동방향과 반대 방향의 큰 속도성분이 존재하며 중앙부분에서는 액적의 운동방향과 동일한 방향의 속도성분이 나타난다. Receding meniscus 와 advancing meniscus 에서는 3 차원 유동 특성으로 인해 복잡한 유동 형태가 존재한다. Receding meniscus 에서는 벽면의 속도성분과 receding meniscus 로 말려 올라온 속도 성분이 만나는 영역이 존재한다. 또한 advancing meniscus 에서는 속도성분이 벽면쪽으로 회전하는 속도성분(V_w)과 액적 중앙으로 회전하는 속도 성분(V_c)으로 분리된다. 이러한 직선 채널에서의 유동 특성은 이전 연구자의 결과와 유사하다.⁽¹⁵⁾ 그러나 액적 중앙의 속도 성분이 크게 나타나는 점과 advancing meniscus 에서의 속도성분이 작게 나타나는 상이한 결과를 보인다. 이는 채널의 크기와 유량의 차이에서 기이하는 것으로 생각된다.

3.2 확장 채널에서의 액적 내부 유동

확장채널에서의 액적 내부 유동 특성은 벽면과의 접촉면적이 큰 경우(Region B), 벽면과의 접촉면적이 매우 작고 액적이 벽면에서 떨어지기 직전인 경우(Region C), 벽면에서 떨어져 나가 벽면과의 접촉 부분이 없는 경우(Region D)로 크게 나누어 볼 수 있다.

액적이 벽면과 접촉하는 부분이 큰 경우 벽면의 전단력에 의해 액적의 이동방향과 반대방향의 큰 속도성분이 존재하는 것은 직선채널에서의 경우와 유사하다. 그러나 advancing meniscus 부분이 확장되면서 회전하는(recirculation) 유동의 크기가 커진다. 반면에 액적이 채널 벽면과 접촉하는 부분이 매우 작은 경우에는(Region D) 더 이상 벽면의 전단력에 의한 액적의 운동방향과 반대방향의 속도성분이 존재하지 않는다. 오히려 액적의 운동방향과 동일한 방향의 큰 속도성분이 벽면근처에 존재하게 된다. 이는 접촉면적이 줄어들면 벽면과 액적 사이의 oil film 면적이 줄어들어 oil phase 물질이 film 을 통과하여 진행하면서 전단력을 유도하기 때문으로 생각된다. oil phase 에 의해 액적이 벽면에서 떨어져 나간 경우에는 액적 주변의 oil phase 유체에 의한 강한 전단력에 의해 액적의 운동방향으로 큰 속도성분이 존재하고 위아래 큰 회전유동이 존재하게 된다. 한편 액적과 벽면과의 거리가 작은 쪽에 비해 큰 쪽에서 더 큰 속도성분과 회전운동이 존재하게 된다.

이와 같이 액적이 확대채널을 통과하면서는 액적의 내부 유동 특성이 직선채널의 경우와 반대방향으로 나타난다. 즉 중앙부분의 속도성분이 줄어들고 벽면근처에서의 속도성분도 액적의 운동방향과 동일한 방향의 속도성분으로 바뀌게 된다.

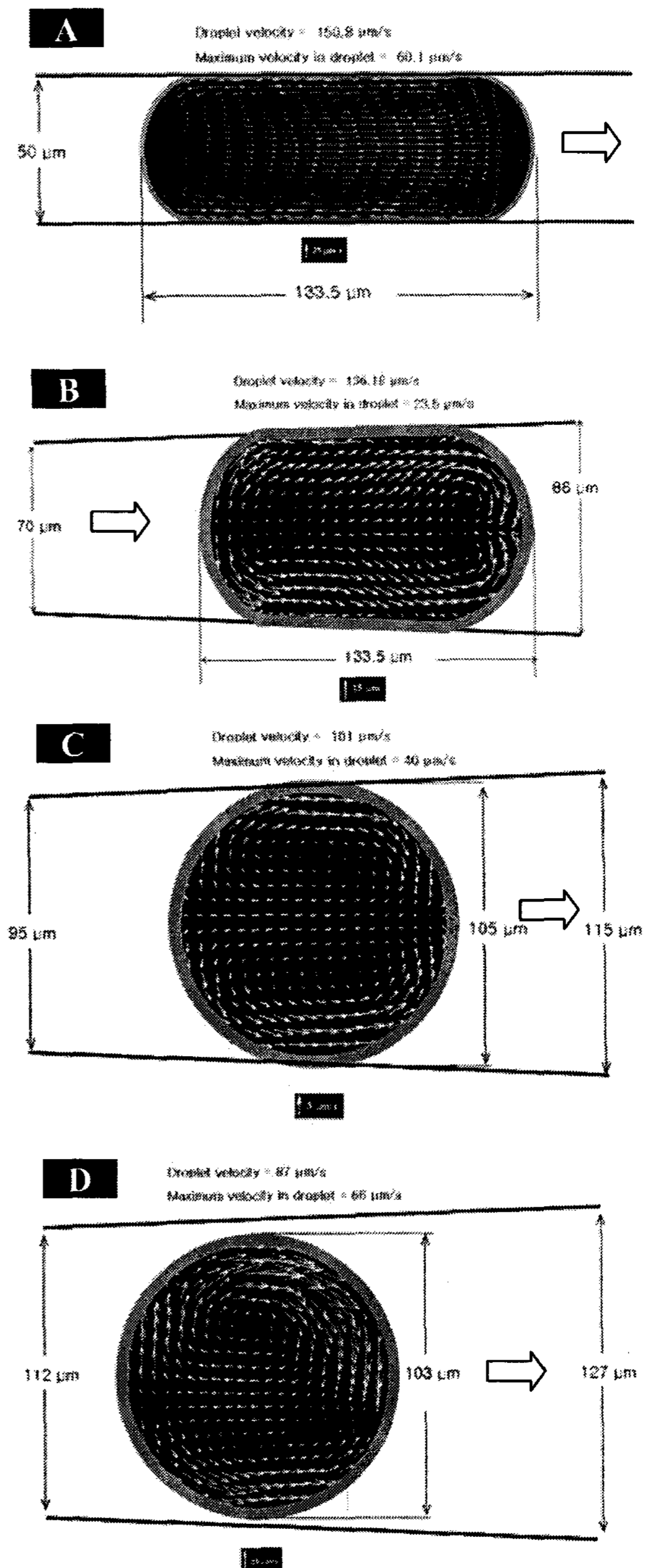


Fig. 8 Velocity vectors at the center plane of the droplet through the diverging channel in the 4 regions. The hollow arrow represents droplet moving direction. The reference vectors are referred under each image. The interrogation window size is 32×32 pixels and 50 % overlap method was used except in region A where 75 % overlap method was used.

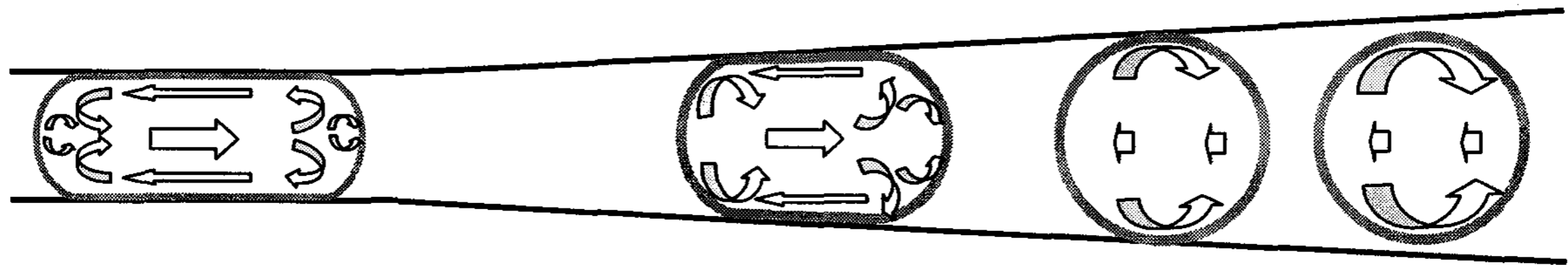


Fig. 9 Flow patterns in the droplet at region A, B, C, D

4. 결 론

마이크로 PIV 를 이용하여 직선채널과 확대채널에서 액적 내부 유동을 가시화하고 유동특성에 대해 살펴 보았다. 직선채널에서는 벽면의 전단력에 의해 벽면근처에 액적의 이동 방향과 반대 방향의 큰 속도성분이 유도된다. 그러나 확대채널을 지나면서 oil phase 유체의 전단력에 의해 액적의 이동 방향과 동일한 방향의 속도성분이 벽면근처에 유도된다. 유동의 구조 또한 직선채널에서는 복잡한 유동구조가 나타나지만 확대채널에서는 단순한 유동구조를 보였다.(Fig. 9)

후 기

본 연구는 산학연 공동기술개발사업(2006-017-04)과 한국과학재단 지정 마이크로열시스템 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Bringer, M. R., Gerds, C. J., Song, H., Tice, J. D. and Ismagilov, R. F., 2004, "Microfluidic Systems for Chemical Kinetics that Rely on Chaotic Mixing in Droplets," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 362, pp. 1087~1104.
- (2) Song, H., Tice, J. D. and Ismagilov, R. F., 2003, "A Microfluidic system for controlling reaction networks in time," *Angew. Chem. Int. Ed*, Vol. 42(7), pp. 768~772.
- (3) Tice, J. D., Lyon, A. D. and Ismagilov, R. F., 2004, "Effects of Viscosity on Droplet Formation and Mixing in Microfluidic Channels," *Analytica Chimica Acta*, Vol. 507, pp. 73~77.
- (4) Tice, J. D., Song, H., Lyon, A. D. and Ismagilov, R. F., 2003, "Formation of Droplets and Mixing in Multiphase Microfluidics at Low Values of the Reynolds and the Capillary Numbers," *Langmuir*, Vol. 19, pp. 9127~9133.

- (5) Liao, A., Karnik, R., Majumdar, A. and Cate., J. J. D., 2005, "Mixing Crowded Biological Solutions in Milliseconds," *Analytical Chemistry*, Vol. 77(23), pp. 7618~7625.
- (6) Dendukuri, D., Tsoi, K., Hatton, T. A. and Doyle, P. S., 2005, "Controlled Synthesis of Nonspherical Microparticles Using Microfluidics," *Langmuir*, Vol. 21, 2113~2116.
- (7) Khan, S. A., Günther, A., Schmidt, M. A. and Jensen, K. F., 2004, "Microfluidic Synthesis of Colloidal Silica," *Langmuir*, Vol. 20, pp. 8604~8611.
- (8) Yen, B. K. H., Günther, A., Schmidt, M. A., Jensen, K. F. and Bawendi, M. G., 2005, "A Microfabricated Gas-Liquid Segmented Flow Reactor for High-Temperature Synthesis: The Case of CdSe Quantum Dots," *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 44, pp. 5447~5451.
- (9) Nie, Z., Li, W., Seo, M., Xu, S. and Kumacheva, E., 2006, "Janus and Ternary Particles Generated by Microfluidic Synthesis: Design, Synthesis, and Self-Assembly," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 128, pp. 9408~9412.
- (10) Carlo, D. D. and Lee, L. P., 2006, "Dynamic Single-Cell Analysis for Quantitative Biology," *Anal. Chem.*, Vol. 78(23), pp. 7918~7925.
- (11) He, M., Edger, J. S., Jeffries, G. D. M., Lorenz, R. M., Shelby, J. P. and Chiu, D. T., 2005, "Selective Encapsulation of Single Cells and Subcellular Organelles into Picoliter- and Femtoliter-Volume Droplets," *Anal. Chem.*, Vol. 77, pp. 1539~1544.
- (12) Heubner, A., Srisa-Art, M., Holt, D., Abell, C., Hollfelder, F., deMello, A. J. and Edel, J. B., 2007, "Quantitative Detection of Protein Expression in Single Cells Using Droplet Microfluidics," *Chem. Commun.*, No. 12, pp. 1218~1220.
- (13) Oh, H. J., Kim, S. H., Baek, J. Y., Seong, G. H., Lee, S. H., 2006, "Hydrodynamic Micro-Encapsulation of Aqueous Fluids and Cells via 'on the fly' Photopolymerization," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, pp. 285~291.
- (14) Tan, Y. C., Hettiarachchi, K., Siu, M., Pan, Y. R. and Lee, A. P., 2006, "Controlled Microfluidic Encapsulation of Cells, Proteins, and Microbeads in Lipid Vesicles," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 128, pp. 5656~5658.
- (15) Kinoshita, H., Kaneda, S., Fujii, T. and Oshima, M., 2006, "Three-Dimensional Measurement and Visualization of Internal Flow of a Moving Droplet Using Confocal Micro-PIV," *Lab Chip*, Vol. 7, pp. 338~346.