

# 미세유체소자 내부에서의 Droplet 형성에 대한 Micro-PIV 측정

윤상열\* · 고춘식\*\* · 김재민† · 김경천\*\*\*

## Micro-PIV Measurement on the droplet formation in a microfluidic channel

Sang Youl Yoon, Choon Sik Ko, Jae Min Kim and Kyung Chun Kim

**Key Words :** Cross-junction microchannel(십자형 마이크로 채널), Y-junction microchannel(Y형 마이크로 채널), Two-phase flow(2상 유동), Micro-PIV measurement(마이크로 입자영상 유속 측정), Droplet formation

### Abstract

This experiment has been carried out to measure the process of droplet formation between water phase fluid(PVA 3%) and organic phase fluid(oil) and vector fields measured by a Dynamic Micro-PIV method in the inside of a droplet while generated. Droplet length controlled by changing flow rate conditions in microchannel. Water-in-oil(W/O) droplets successfully generated at a Y junction and cross microchannel. But oil-in-water(O/W) droplets could not be formed at a Y junction microchannel. That is, PVA 3% flow could not be detached from the PDMS surface and ran parallel with oil flow. When PVA 3% flow rate was constant, droplet length and time period decreased as oil flow rate increased, but droplet frequency increased. When PVA 3% and oil flow rate ratio was constant, droplet length and time period decreased as flow rate increased, but droplet frequency increased. All that case, Standard deviation of droplet formation have less than 5% at averaged droplet length and regular-sized droplets were reproducibly formed.

### 기호설명

x : 유동방향  
y : 유동에 수직한 방향

### 1. 서론

최근 MEMS(micro-electromechanical systems)기술의 발달로 인하여 마이크로 단위의 구조물의 제작이 가능해짐에 따라서 미세유체소자(microfluidics)에 대한 관심이 증대하고 있으며 많은 연구들이 Lab-on-a chip 과  $\mu$ -TAS(Micro Total Analysis System) 등에 많이 응용되고 있다.

분석시스템의 각 요소를 MEMS 기술에 의해 초소형화하여 기판 위에 집적시키면 시스템의 소형화, 비용절감, 무효체적의 감소가 가능하다. 또한 계측에 필요한 샘플이나 시약의 양을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 분석과정에서 발생하는 폐액량도 절감할 수 있다. 이 외에도 측정시간의 단축과 시스템 전체의 에너지 소모량 절감효과의 이점도 가지고 있다.

미세유체소자를 이용한 시스템은 크게 continuous-flow 구조와 droplet-based 구조 두 가지 경우로 분류된다. 대부분의 미세유체소자는 액체의 continuous-flow 을 위하여 압력이나 전극의 전압에 의한 기계적, 전기적인 힘에 의한 펌프작용에 의해서 이송된다. 그러나 제작이 복잡하며 유체를 다른 위치로 이송하기 위해서는 높은 전압과 압력을 요구한다. 반면에 droplet-based 구조는 continuous-flow 구조보다 제작이 간단하며 유체를 다른 위치로 이송하기 위해서 작은 전압과 압력을 요구되므로 최근 들어 droplet-based 구조에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. Droplet-based 구조는

† 부산대학교 기계공학과

E-mail : mechkjm@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2324 FAX : (051)515-7866

서로 혼합되지 않는 organic phase fluid 와 water phase fluid 를 이용하여 T 자형 또는 Y 자형 마이크로채널에서 표면장력과 계면전단응력을 이용하여 균일한 크기의 droplet 형성에 관한 연구가 이루어졌다. (1)(2)(3)

Droplet-based 구조의 가장 큰 장점은 미세유체소자에서 혼합작용(mixing)을 수행할 수 있다는 점이다. 일반적인 혼합작용은 큰 난류유동이 요구되지만 미세유체소자에서는 낮은 레이놀드수로 인해 층류유동이 형성되어 혼합이 어렵게 된다. 또한 일반적으로 Y 자형 마이크로채널이 마이크로 믹서 등에 널리 이용되고 있는 미세유체소자 중 하나이지만, 갈라진 두 채널로부터의 두 유체가 유입되고 하나의 채널로 합쳐지게 되는 데 낮은 확산성에 의해 채널과 평행하게 유체들은 흐르게 되고 혼합은 아주 느리게 이루어지게 된다. 이러한 혼합작용을 효과적으로 이루어지게 하기 위해 개별적인 droplet 에서 혼합작용을 발생시키는 연구가 이루어졌다. 이러한 현상은 Y 형 마이크로 채널에서 일어나는 일반적인 혼합 기술과는 근본적인 차이가 있다. 또한 최근 개별적으로 나누어진 droplet 을 기반으로 한 디지털 미세유체소자(digital microfluidics) 개념이 새로운 패러다임으로 제기되고 있다. 디지털 미세유체소자의 공정은 단위 사이즈화된 다발들의 이송, 저장, 혼합, 반응, 분석 등이 개별/독립적으로 이루어지게 된다. 따라서 표준화된 여러 개의 공정이 동시에 이루어지는 것을 의미한다.(4)

본 실험에서는 PDMS 로 제작된 두 종류의 마이크로채널 즉 십자형 마이크로채널과 Y 자형 마이크로채널 채널에서 서로 혼합되지 않는 organic phase fluid(oil)과 Water phase fluid(PVA 3%)에 의해 생성되는 W/O droplet 에 대해서 실험하였다. 또한 Micro-PIV 기법을 적용하여 droplet 이 생성되는 과정에서의 내부 유동장을 측정하여 droplet 생성과정에서의 내부 유동 변화에 대하여 정확한 정보를 얻음으로써 droplet 형성 메커니즘을 파악하는데 중요한 기초자료를 제공한다.

## 2. 실험장치 및 조건

Fig. 1 은 본 실험에 사용된 Micro-PIV 장치를 나타낸 그림이다. Micro-PIV 측정기법중의 하나인 Dynamic Micro-PIV 기법이 사용되었으며 실험장치는 형광현미경, 10bit high speed camera, 광원으로 구성되어 있다. 본 실험에서 광원은 형광현미경 (BX51, Olympus) 하부에 장착되어 있는 할로겐램프에 의해 조사되었으며, 10×, 20×의 배율을 가지는 objective lens(Olympus)를 통과한 화상획득을 위해 1280×1024 의 해상도와 635fps 를 가지는 10bit high speed camera(1200hs, PCO)가 사용되었다. Droplet 형성과정에서의 Droplet 내부 유동장의 Micro-PIV 기법을 적용하였으며 PVA 3% 용액에 1 μm직경의 polystyrene 입자(R0100, Duke scientific)를 혼합하였다. 유량의 변화는 syringe pump 에 의해 조절하였다.

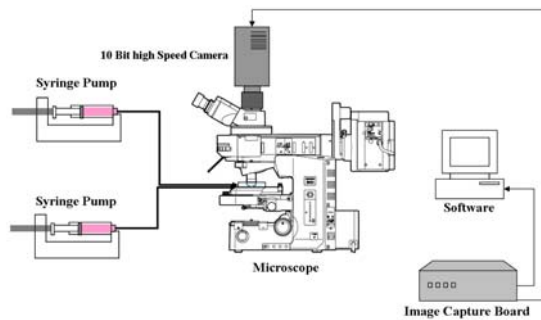


Fig. 1 Schematic of Experimental Setup

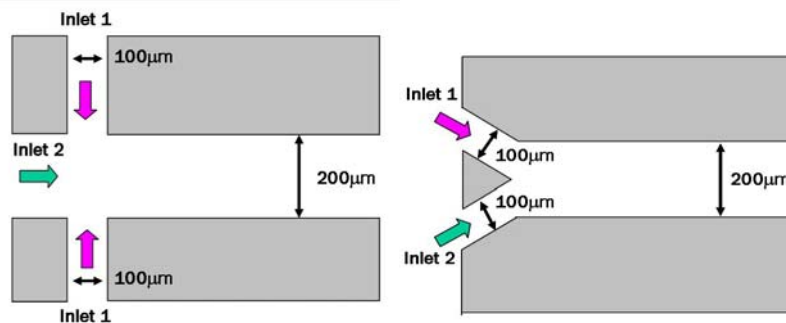


Fig. 2 Dimensions of Cross-junction and Y-junction microchannel

Fig. 2 는 본 실험에서 사용된 마이크로채널의 형상 및 크기를 나타낸 그림이다. 십자형과 Y 자형 두 가지 다른 형상의 마이크로채널이 사용되었다. 두 종류의 서로 다른 유체를 주입하기 위해서 십자형 마이크로 채널은  $100\ \mu\text{m}$ (폭) $\times$  $100\ \mu\text{m}$ (높이)를 가지는 두 개의 inlet1(Oil)과  $200\ \mu\text{m}$ (폭) $\times$  $100\ \mu\text{m}$ (높이)를 가지는 하나의 inlet2(PVA3%)를 통해 들어온 유체들이  $200\ \mu\text{m}$ (폭) $\times$  $100\ \mu\text{m}$ (높이)의 단일 직관으로 유입되면서 혼합되게 된다. 또한 Y 자형 마이크로채널은  $100\ \mu\text{m}$ (폭) $\times$  $100\ \mu\text{m}$ (높이)를 가지는 두 개의 inlet 을 통해 들어온 유체들이  $200\ \mu\text{m}$ (폭) $\times$  $100\ \mu\text{m}$ (높이)의 단일 직관으로 유입되면서 혼합되게 된다. Micro-PIV 측정과 가시화를 위해서 1mm 두께를 가지는 Pyrex glass 로 덮혀 있으며 채널은 poly-dimethyl-siloxane (PDMS)로 제작하였다.

본 실험은 십자형과 Y 자형 마이크로채널에서 서로 혼합되지 않는 organic phase fluid 과 water phase fluid 에 의해 생성되는 W/O droplet 형성에 관한 실험이다. Organic phase fluid 로는 ester 성분의 oil(Freol ALPHA 10G)이 사용되었으며 Water phase fluid 로는 PVA 3% 용액이 사용되었다(Fig. 3). 본 실험은 두 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

1) PVA 3% 용액의 유량은 일정하게 고정시키고 oil의 유량을 변화시켰을 경우에 W/O droplet 형성 실험

2) PVA 3% 용액과 oil의 유량비를 1:2(십자형)과 1:3(Y 자형)로 일정하게 고정시키고 유량을 변화시켰을 경우에 W/O droplet 형성 실험

측정은 채널의 상하 중심에서 이루어 졌으며, 화상 노이즈를 줄이기 위해 16bit 이미지가 저장되어 처리되었다. 속도벡터의 추출은 two-frame cross correlation 기법을 적용하였으며, 속도추적 구간의 크기는  $32\times 32$  픽셀이었으며 이때의 공간적인 해상도는  $19.2\ \mu\text{m}\times 14.4\ \mu\text{m}$  이었다. 그리고 초점 깊이는 약  $10\ \mu\text{m}$  이었다.

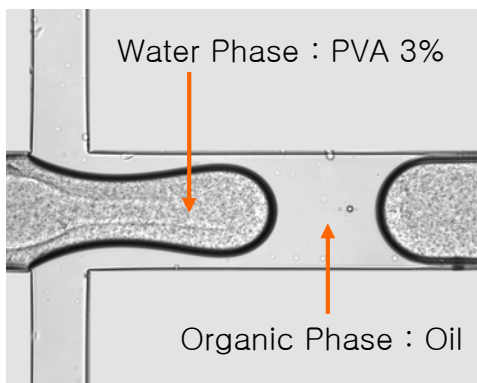


Fig. 3 Water Phase and Organic phase

### 3. Micro-droplet 측정

Fig. 4 는 water phase(PVA 3%)와 organic phase(oil)의 유량(oil :  $0.5\ \mu\text{l}/\text{min}$ , PVA 3% :  $0.5\ \mu\text{l}/\text{min}$ )이었을 때의 시간 변화에 따른 W/O droplet 형성의 성장과 분리에 대한 가시화를 나타낸 그림이다. 십자형 마이크로채널에서 W/O droplet 이 규칙적으로 생성되는 것을 볼 수 있었다. 두 유체의 계면을 통한 확산이 이루어지지 않기 때문에 표면장력이 유체 계면을 따라 형성되어지며, 이러한 이유로 낮은 레이놀즈 수를 가진 유동일지라도 계면에서의 상호작용에 의해 유동은 비선형성을 지니게 된다. 따라서 droplet 이 성장하고 분리되게 된다.

십자형 채널에서의 가시화된 이미지로부터 계산된 각각의 속도 벡터장이 Fig. 4-1 에 나타나 있으며, 이를 통해 droplet 주변의 유동변화들을 확인할 수 있다. Fig. 4-1(a)(b)에서 droplet 이 성장하고 늘어나는 동안 벽면과 droplet 계면 사이의 단면적이 좁아짐에 따라 오일의 속도가 가속된다. 따라서 높은 전단력이 droplet 의 선단에 발생하며 이곳에서의 water phase fluid 의 압력이 낮아지는 결과를 초래하게된다. 이러한 높은 전단력과 표면장력 그리고 droplet 내부의 높은 압력과 낮은 주변 압력으로 인해 droplet 의 형성이 이루어진다. Droplet 내부의 속도분포는 초기에는 포물선형태를 유지하며 전형적인 층류유동을 형성하지만 droplet 과 오일의 계면에서의 표면장력 등에 의한 상호작용으로 인해 droplet 의 선단으로 진행될수록 중심에서 droplet 의 계면으로 갈수록 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4-1(c)에서는 droplet 의 특정지점에서 이러한 균형은 깨어지고 주변 유체의 유입이 이루어짐에 따라 특정지점에서의 단면이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 droplet 의 늘어남, 주변유동의 막힘에 의해 강한 음압이 droplet 의 후단에 발생함과 동시에 막힘에 의한 주변 유동의 높은 압력에 의한 것임을 알 수 있다. 이 때 droplet 내부의 속도 분포는 주변 유동의 유입으로 인하여 droplet 의 단면이 감소하는 위치를 기준으로 전방으로는 유동방향으로 유동의 속도가 급격하게 증가하지만 후방으로는 역방향으로 유동의 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4-1(d)에서는 droplet 이 분리된 후의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 주변 유동의 유입으로 인해 단면이 감소하여 분리되는 지점의 전방에서는 분리된 droplet 이 유동방향으로 진행하였다. 그러나 분리되는 지점 후방에서는 역방향으로 증가한 유동에 의해서 droplet 이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 실린지 펌프에 의해 공급되는 유량과 서로 상쇄된 후 droplet 이 다시 성장하는 것을 볼 수 있다.

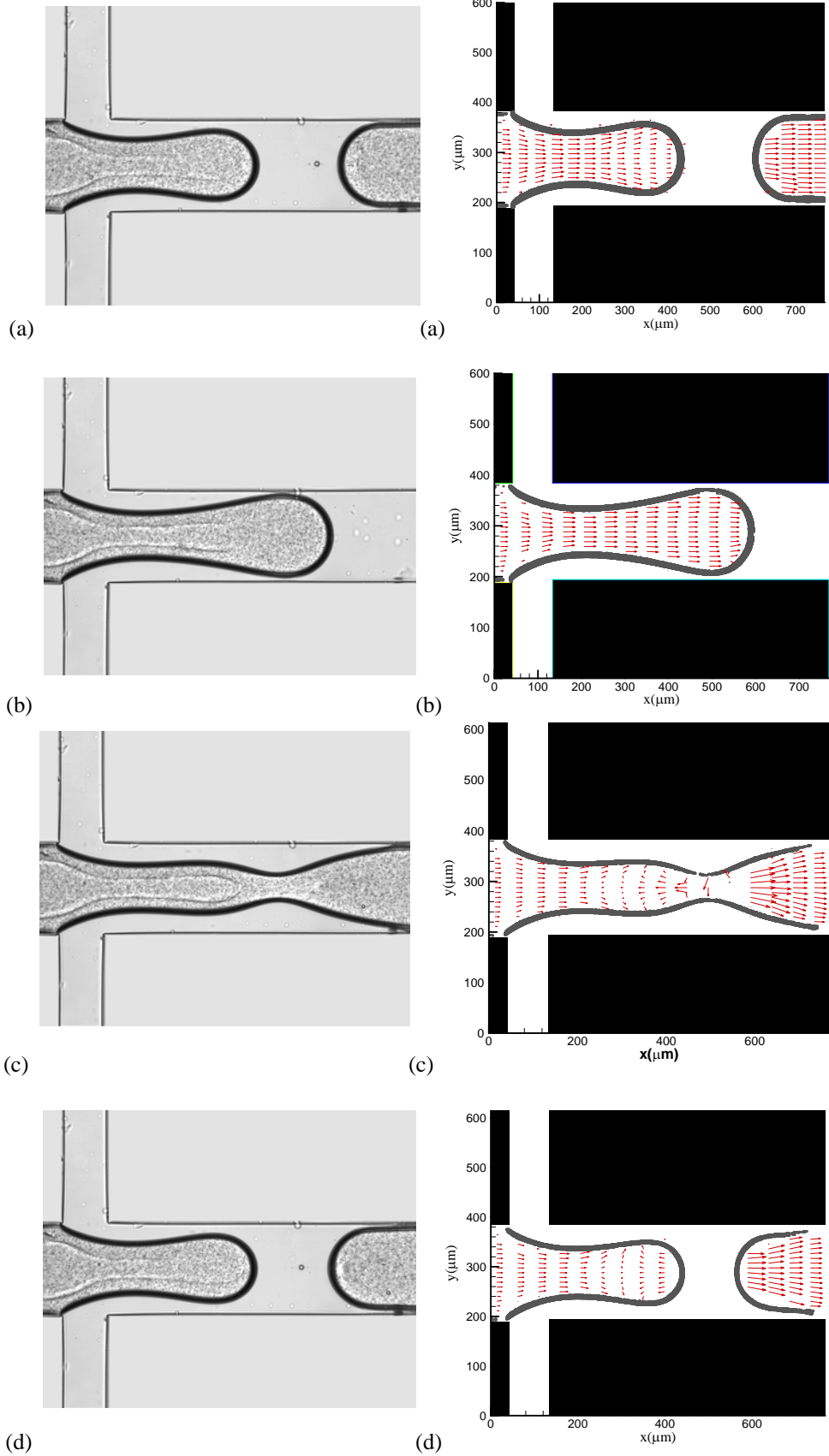
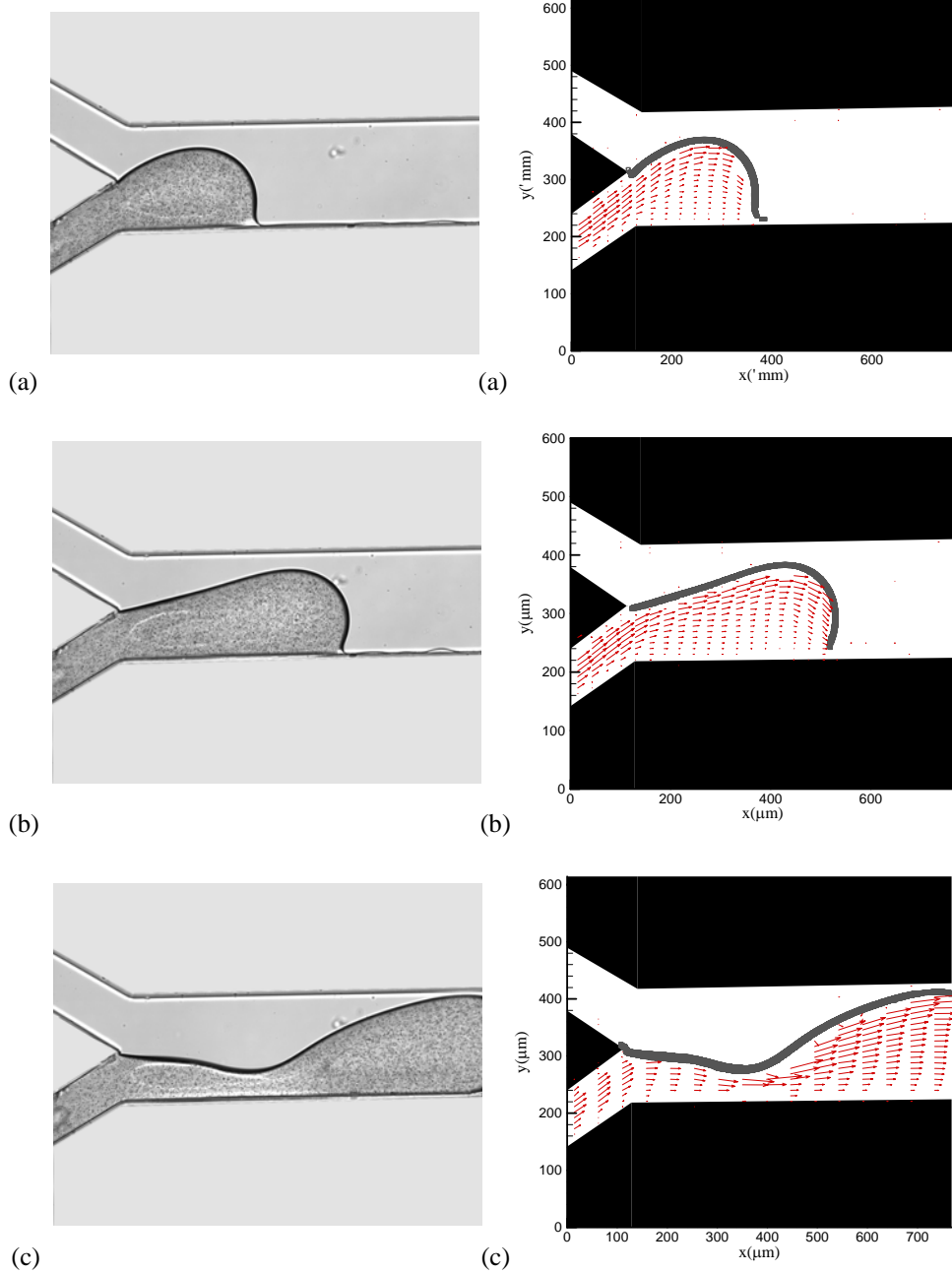


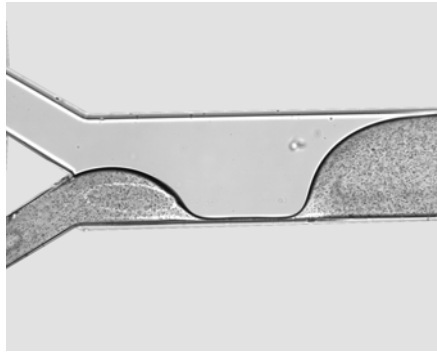
Fig. 4 Visualization of droplet formation in a cross junction channel (oil : 0.5 $\mu$ l/min, PVA 3% : 0.5 $\mu$ l/min)

Fig. 4-1 Instantaneous vector fields according to droplet formation in a cross junction channel

Fig. 5 와 Fig. 5-1 은 Y 자형 마이크로 채널에서의 water phase(PVA 3%)와 organic phase(oil)의 유량(oil : 2.0 $\mu$ l/min, PVA 3% : 0.5 $\mu$ l/min)이였을때의 시간 변화에 따른 W/O droplet 형성의 성장과 분리에 대한 가시화와 속도분포를 나타낸 그림이다. 십자형 마이크로채널에서와는 달리 droplet 과 마이크로채널의 벽면에서의 전단력도 droplet 형성에 중요한 역할을 한다. 따라서 droplet 이 성장하고 분리되게 된다.

Fig. 5-1(a)(b)은 droplet 의 성장단계로서 droplet 이 성장하고 늘어나는 동안 벽면과 droplet 계면 사이의 단면적이 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5-1(c)(d)에서도 역시 droplet 성장단계로서 droplet 이 계속 성장하면서 늘어나지만 droplet 의 특정지점에서 이러한 균형은 깨어지면서 주변 유체의 유입이 이루어짐에 따라 특정지점에서의 단면이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.





(d)

Fig. 5 Visualization of droplet formation in a Y-junction channel (oil : 2.0 $\mu$ l/min, PVA 3% : 0.5 $\mu$ l/min)

#### 4. 결론

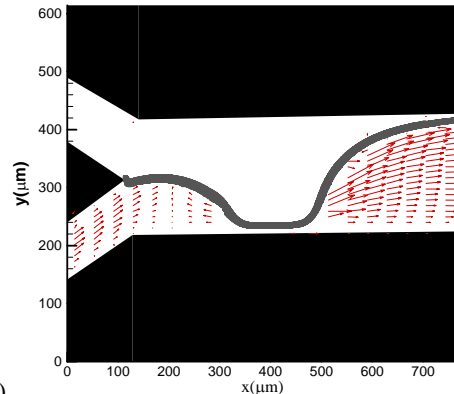
본 연구에서는 Dynamic Micro-PIV 기법을 이용하여 PDMS 에 의해 제작된 십자형과 Y 자형의 두 종류의 마이크로채널 내부에서 water phase fluid(PVA3%)와 organic phase fluid(oil)에 의해 형성되는 W/O droplet 의 가시화 및 droplet 내부 유동장을 측정하였다.

#### 후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) T. Nisisako, T. Torii and Higuchi T, 2002, "Preparation of Picoliter-sized Reaction/Analysis Chambers for Droplet-based Chemical and Biochemical Systems," *Micro Total Analysis Systems*, Nara, Japan, 3-7 Nov, vol.1, pp 362-367
- (2) A. Kawai, T. Futami, H. Kiriya, K. Katayama and K. Nishizawa, 2002, "Mass-production System of Nearly Monodisperse Diameter GEL Particles Using Droplets Formation in a Microchannel," *Micro Total Analysis Systems*, Nara, Japan, 3-7 Nov, vol.1, pp 368-370
- (3) V. Srinivasan, V. Pamula, M. Pollack and R. Fair, 2003, "A digital microfluidic biosensor for multianalyte detection," *Proceedings of the IEEE 16th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 327-330
- (4) P. Paik, V. K. Pamula, M. G. Pollack and R. B. Fair, 2003, "Electrowetting-based droplet mixers for microfluidic systems," *Lab on a Chip*, vol 3, pp. 28-33
- (5) T. Thorsen, R. W. Roberts, F. H. Arnold and S.



(d)

Fig. 5-1 Instantaneous vector fields according to droplet formation in a Y-junction channel

- R. Quake, 2001, "Dynamic Pattern Formation in a Vesicle-Generating Microfluidic Device," *Physical Review Letters*, Vol.86, pp 4163-4166
- (6) J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe and R. J. Adrian, 1998, "A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics," *Experiments in Fluids*, Vol. 25 (4), pp. 316-319
- (7) C. D. Meinhart, S. T. Wereley and J. G. Santiago, 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 27, pp. 414-419
- (8) A. G. Koutsiaris, D. S. Mathioulakis and S. Tsangaris, 1999, "Microscope PIV for Velocity-field Measurement of Particle Suspensions Flowing Inside Glass Capillaries," *Meas. Sci & Tech.*, Vol. 10, pp. 1037-1046
- (9) S. Stone, C. D. Meinhart and S. T. Wereley, 2001, "Using Micro-PIV to Probe Wall Shape With Nanoscale Resolution," *4th Int. Sym. on Particle Image Velocimetry*, Paper No. 1143
- (10) D. Trethewey and C. D. Meinhart, 2001, "Micron-Resolution PIV Near a Hydrophobic Microchannel wall," *4th Int. Sym. on Particle Image Velocimetry*, Paper No. 1171
- (11) M. G. Olsen and R. J. Adrian, 2000, "Out-of-focus Effects on Particle Image Visibility and Correlation in Microscopic Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 29/7, pp. 166-174