

Y형 마이크로채널에서의 물/기름 2상 유동에 대한 Micro-PIV 측정

윤상열* · 고춘식** · 김경천†

(2004년 1월 15일 접수, 2004년 4월 8일 심사완료)

Micro-PIV Measurement of Water/Oil Two Phase Flow in a Y-Junction Microchannel

Sang Youl Yoon, Choon Sik Ko and Kyung Chun Kim

Key Words : Y-Junction Microchannel(Y형 마이크로채널), Two-Phase Flow(2상 유동), Micro-PIV Measurement(마이크로 입자영상유속 측정), Droplet Formation(액적 생성)

Abstract

Y-junction microchannels are widely used as a flow mixer. Fluids are entered from two branch channels and merged together at a combined channel. In this study, we suggest a simple method to create the fluid digitization using flow instability phenomena. Two immiscible liquids (water/oil) are infused continuously to each Y-junction inlets. Because of the differences in fluid and flow properties at the interface, oil droplet is formed automatically followed by flow instability. In order to clarify the hydrodynamic aspects involved in oil droplet formation, a quantitative flow visualization study has performed. Highly resolved velocity vector fields are obtained by a micro-PIV technique, so that detail flow structures around the droplet are illustrated. In this study, fluorescent particles were mixed with water only for visualization of oil droplet and velocity field measurement in water flow.

기호설명

x : 유동방향
y : 유동에 수직한 방향

1. 서론

바이오기술과 마이크로제작기술이 융합되어 감에 따라, 미세유체소자(Microfluidics)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며 μ -TAS(Micro Total Analysis System)등에 많이 응용되어 지고 있다. 특히 Y형 채널은 마이크로 믹서 등에 널리 이용되고 있는 미세유체소자 중 하나이다. 갈라진 두

채널로부터의 두 유체가 유입되고 하나의 채널로 합쳐지게 되는 데 낮은 확산성에 의해 채널과 평행하게 유체들은 흐르게 되고 혼합은 아주 느리게 이루어지게 된다. 그러나 물/유기유체 혼합의 경우 이러한 분자단위의 혼합 현상은 일어나지 않는다. 물/유기유체들을 함께 사용할 때 이러한 믹싱을 효과적으로 이루어지게 하기 위해 T 또는 Y형 마이크로 채널에서 표면장력을 이용하여 지름 1 μ m이하의 극미세 마이크로 droplet을 생성하여 혼합하거나 표면의 화학적 반응을 극대화하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 표면적의 극대화를 통한 혼합방식은 Y형 마이크로 채널에서 진행되는 일반적인 기술과는 근본적인 차이가 있다.

Emulsion은 다양한 산업분야에서 많은 응용범위를 가지고 있으며, emulsion의 새로운 시도들이 이루어지고 있다. 최근 emulsion을 기반으로한 유기합성이 연구되어지고 있으며, 유기화학 분야에서 새로운 영역으로 많은 시도가 이루어 지고 있다. 더불어 화학/생물학 실험에서 전기적인 장치에 의한 droplet의 생성이 최근 연구되고 있다. 따라서

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

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

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 대학원 기계공학과

droplet을 기반으로한 마이크로 반응기가 매력적인 연구분야로 자리매김되고 있다.⁽¹⁻³⁾

또한 최근 개별적으로 분리된 droplet을 기반으로 디지털 미세유체소자(digital microfluidics) 개념이 새로운 패러다임으로 제기되고 있다. 미세유체소자들에서의 다양한 처리들이 단위사이즈화된 다발들의 이송, 저장, 혼합, 반응, 분석 등으로 개별/독립적으로 하나의 소자에서 이루어지도록 한다는 것이다. 즉 표준화된 여러 프로세스가 동시에 이루어지는 것을 의미한다.⁽⁴⁻⁵⁾

본 연구에서는 유속측정을 위하여 Micro-PIV (Micro-Particle Image Velocimetry) 기법이 사용되었다. 현재 마이크로 채널내부 유동을 수 마이크로 단위의 공간해상도를 가지고 유동장 측정이 가능한 Micro-PIV기법이 개발되고 있다. 높은 공간 해상도의 마이크로 유동의 측정이 가능해 졌으며, 높은 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio)를 위한 알고리즘이 개발되고 있다. 또한 시간해상도를 높인 Micro-PIV 기법이 개발되고 있어 비정상 유동의 측정과 해석이 가능하게 되었다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 두 개의 서로 다른 상 (water/oil phase)을 가지는 유체가 기존의 T형 채널이 아니라 Y형 채널을 사용하여 마이크로-droplet

이 형성되는 과정을 Micro-PIV 기법을 적용하여 분석하고자 하였으며 기존의 가시화에 의존한 해석을 벗어나 정량적 데이터를 확보하여 분석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 조건

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 Y형 채널의 형상과 크기 및 측정 영역을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 본 채널은 두 개의 다른 입구를 가지고 있어 각각의 유체가 다른 유량으로 유입되도록 하였다. 이때의 입구채널의 폭은 100 μm 이었다. 그리고 하나의 채널로 모아지도록 하였으며 이때의 단일채널 폭 또한 100 μm 이었다. 마이크로 채널 전체의 깊이는 90 μm 로 제작되었으며, 유동가시화와 Micro-PIV 측정을 위해 300 μm 두께의 Pyrex 유리를 실리콘웨이퍼로 제작된 채널 위에 부착하였다. Fig. 1에 점선으로 표시된 측정영역은 속도장 측정이 이루어진 곳이며 합쳐지는 지점으로부터 약 200 μm 정도 떨어진 위치였다. 이때의 측정영역의 크기는 약 360 μm ×420 μm 이었다. Fig. 2는 실험장치를 나타낸다. 본 연구에서는 마이크로 유동장을

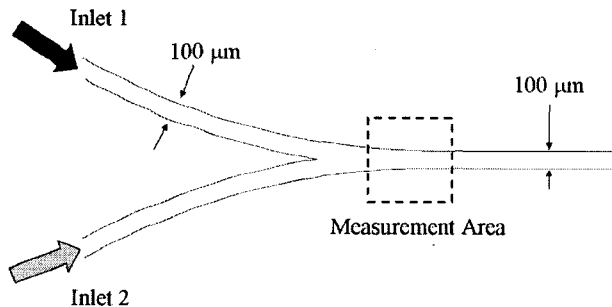


Fig. 1 Dimensions of Y-junction microchannel and measurement area

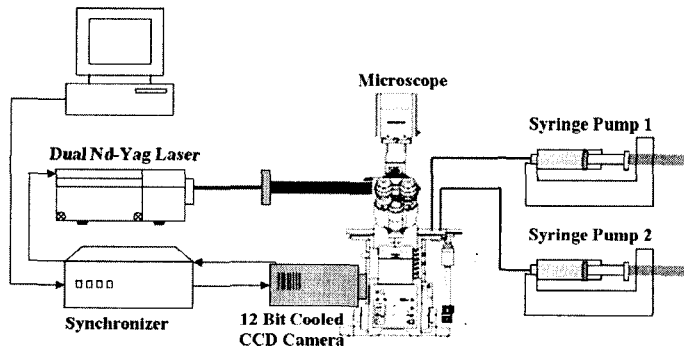


Fig. 2 Experimental setup

측정하기 위한 Micro-PIV 시스템과 두 개의 주사기 펌프를 사용하였다. Micro-PIV 시스템은 1280×1024 픽셀 해상도를 가지는 12bit cooled ccd 카메라, 532nm 파장을 가진 dual Nd-YAG 레이저와 형광현미경으로 이루어져 있다. 현미경 내부에는 dichroic mirror와 필터로 구성된 필터큐브가 내장되어 있다. Nd-YAG 레이저는 빔확장기 (beam expander)에 의해 확대되어지고, dichroic mirror에 의해 반사되어져 대물렌즈(20X)를 통과한 후 마이크로 채널에 조사되도록 하였다. 형광파장의 오렌지색 빛은 필터를 통과하여 CCD에 이르도록하였으며, 채널 주변에서 반사된 레이저와 동일한 녹색 파장의 빛은 필터에서 제거되도록 하였다.

서로 혼합되지 않는 유기상 유체(Butyl acetate)와 알코올수용액(3% poly vinyl Alcohol aqueous solution)이 사용되었으며, 주사기펌프를 사용하여 지속적으로 주입되었다. 본 연구에서 적용된 유량은 유기유체의 경우 0.5 μ l/min, 알코올수용액의 경우 3 μ l/min 이었으며, 가시화에 의한 선행연구의 결과 유량과 비에 따라 각기 다양한 크기의 droplet이 생성되었으며 본 연구를 위하여 적절하다고 판단되는 유량과 비를 적용하였다. Micro-PIV 측정을 위해 1 μ m직경을 가지는 형광입자가 사용되었으며, 녹색파장의 빛을 흡수하여 오렌지 파장의 빛을 방출한다(Excitation : 535 nm, Emission : 575 nm). 이러한 형광입자는 butyl acetate 용액에는 용해되기 때문에 알코올수용액에만 혼합되어 측정되었다(Fig. 3).

측정은 채널의 상하 중심면에서 이루어졌으며, 화상 노이즈를 줄이기 위해 12bit 이미지가 저장되어 처리되었다. 속도벡터의 추출은 two-frame cross correlation 기법을 적용하였으며, 속도추적 구간의 크기는 24×48 픽셀이었으며 이때의 공간적인 해상도는 4.2 μ m×8.2 μ m이었다. 그리고 초점 깊이는 약 10 μ m 이었다.

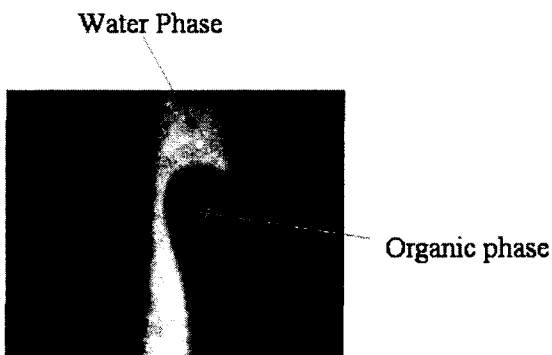


Fig. 3 Water Phase and Organic phase

3. Micro-droplet 측정

Fig. 4에서는 droplet 형성에 대한 가시화를 나타내고 있으며, 이러한 이미지들은 time-series에서 선별된 것이 아니라 많은 순간 이미지 중에서 선별된 것이다. 형광입자가 알코올수용액에만 있기 때문에 유기유체는 검은 droplet로 나타내어져 있다. 가장 자리가 흐릿한 것은 droplet이 3차원적인 형상을 하고 있음을 의미한다. 그림에서 확인 할 수 있는 바와 같이 droplet이 성공적으로 생성되었다. 두 유체의 계면을 통한 확산이 이루어지지 않기 때문에 표면장력이 유체계면을 따라 형성되어지며, 이러한 이유로 저 레이놀즈 수를 가진 유동 일지라도 계면에서의 상호작용에 의해 유동은 비선형성을 지니게 된다. 따라서 droplet이 형성되어늘어지고 떨어져 나가게 된다. Fig. 4(d)(e)(f)에서 알코올수용액의 유입이 이루어지고 droplet이 떨어져 나감을 확인할 수 있다.

가시화된 이미지로부터 계산된 각각의 속도 벡터장이 Fig. 5에 나타나 있으며, 이를 통해 droplet 주변의 유동변화들을 확인할 수 있다. 두 가지의 중요한 효과들을 확인할 수 있는데 하나는 경계가 정적으로 고정되어있지 않다는 것과, 또 다른 하나는 주변 유체의 유입이다. Fig. 4(a)(b)(c)에서 droplet이 형성되고 늘어나는 동안 벽면과 droplet 계면 사이의 단면적이 좁아짐에 따라 droplet 주변의 유체 속도가 가속되어짐을 알 수 있다. 따라서 높은 전단력이 droplet의 머리주위에 발생하며, 이곳에서의 주변유체의 압력이 낮아지는 결과를 초래하게 된다. 이러한 높은 전단력과 표면장력 그리고 droplet 내부의 높은 압력과 낮은 주변 압력으로 인해 droplet의 생성이 계속 진행하게 된다 (Rayleigh instability). 이러한 전단력과 표면장력은 Rayleigh instability를 유발하여 이 때 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있듯이 유기유체가 잘록해지는 것을 알 수 있다. 이로 인해 droplet이 잘록해진 부분에서 늘어나고 분리되어 떨어지는 과정이 진행된다. 분리과정 동안 특정 지점에서 주변 유체의 유입이 이루어짐을 Fig. 4(d)(e)(f)에서 확인할 수 있다. 이것은 droplet의 늘어남으로 인해 강한 음압이 droplet의 꼬리부근에 발생함과 동시에 주변유동이 막힘으로 인해 주변유동에 발생하는 높은 압력에 의한 것임을 알 수 있다. 이러한 급작스런 유입은 가시화 이미지를 통해서도 확인되어질 수 없는 현상이다. Fig. 6은 Fig. 5(f)의 일부를 확대한 그림이다. Droplet이 떨어져 나가는 순간 유입된 주변유체의 상세한 유동을 확인할 수 있으며 일부 역류되는 현상 또한 확인할 수 있다. 본 가시화 및 속도장 측정을 통해 정리해본 Y형 채널에서의 droplet의 생성과정에 대한 개념도가 Fig. 7에 나타나어져 있다.

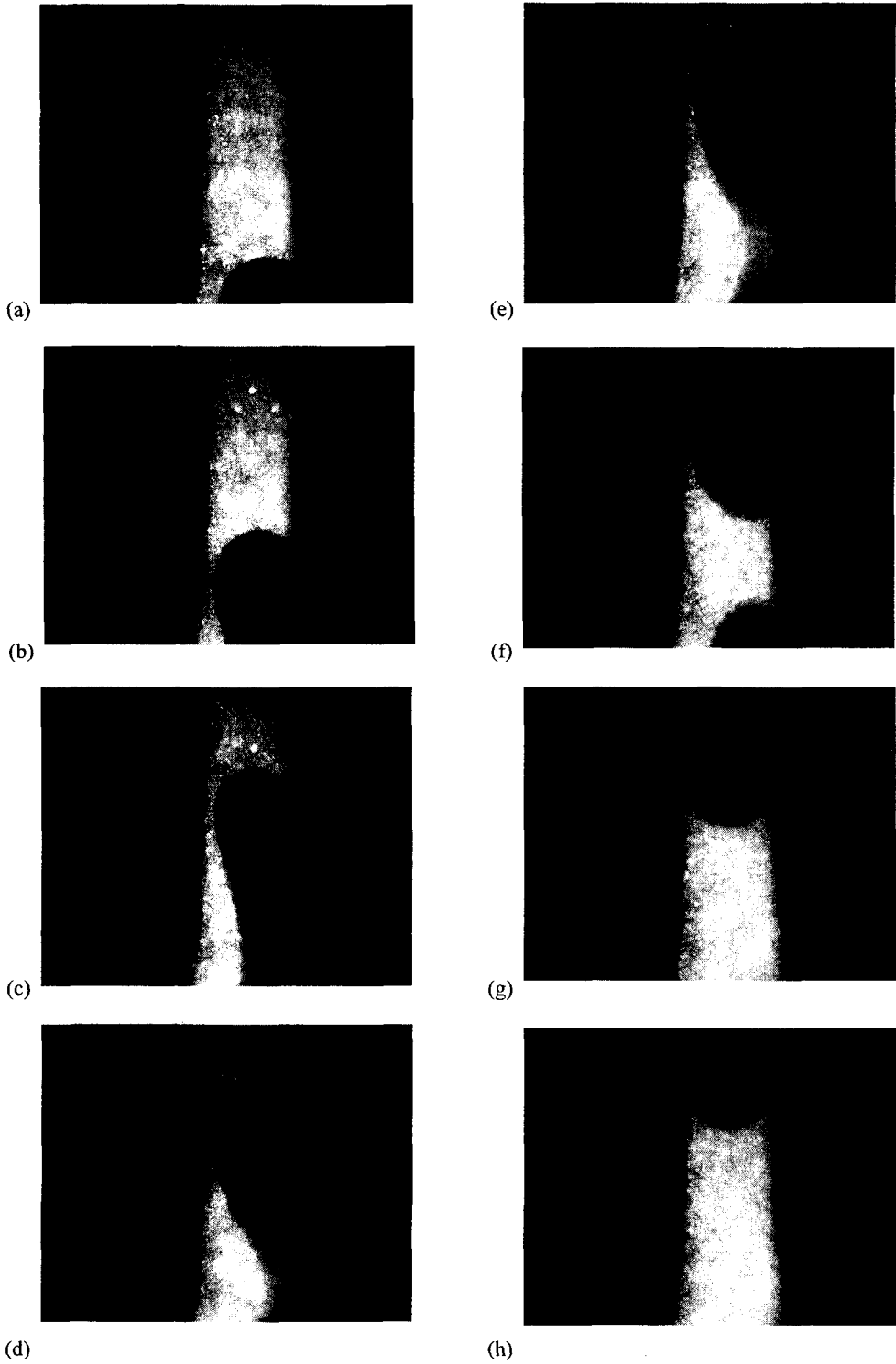


Fig. 4 Visualization of droplet formation

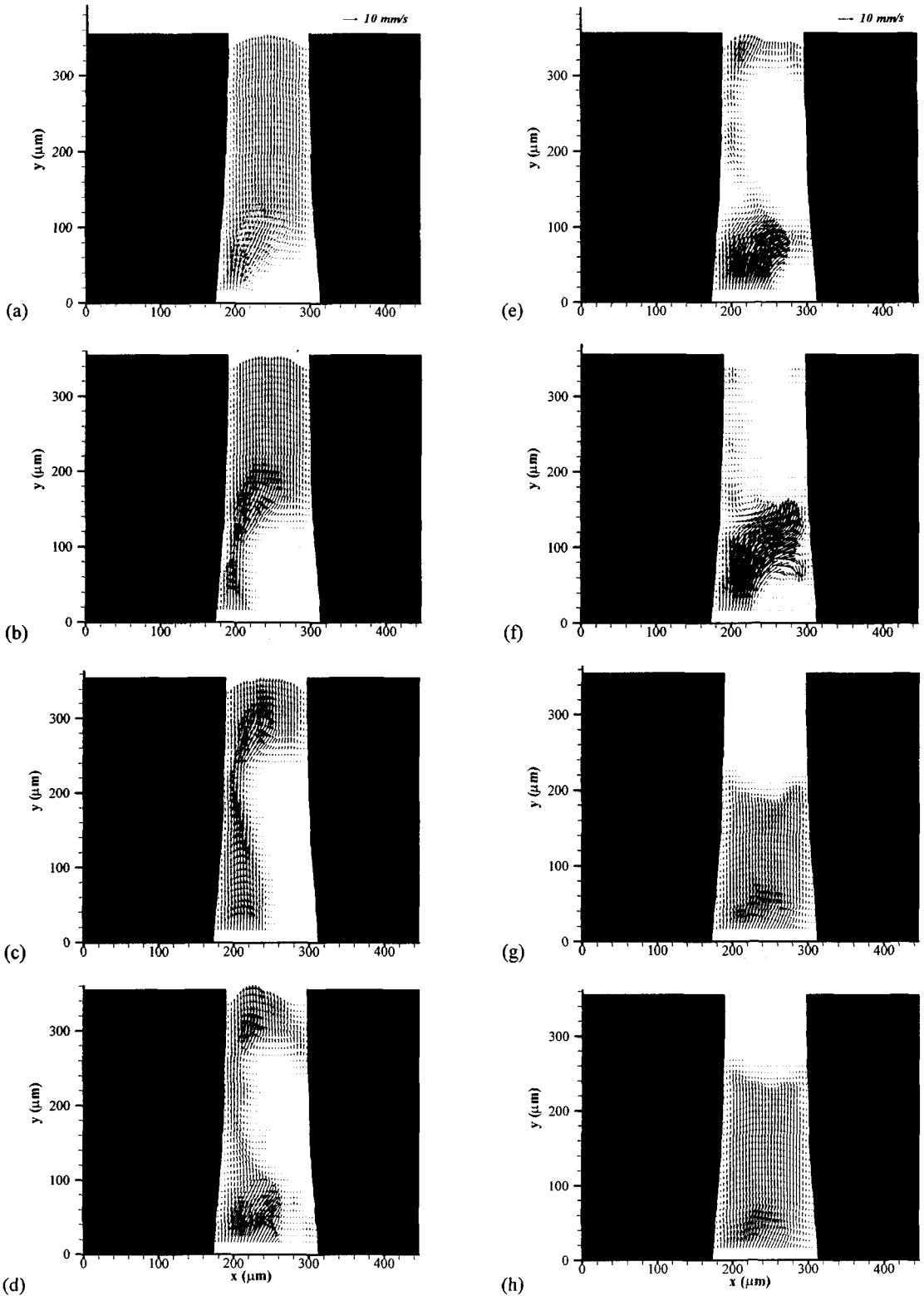


Fig. 5 Instantaneous vector fields according to droplet formation

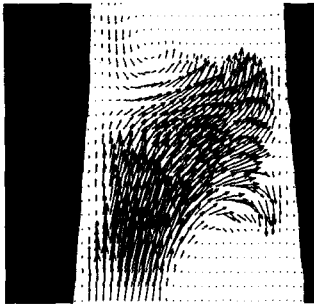


Fig. 6 Enlarged figure of Fig. 5(f)

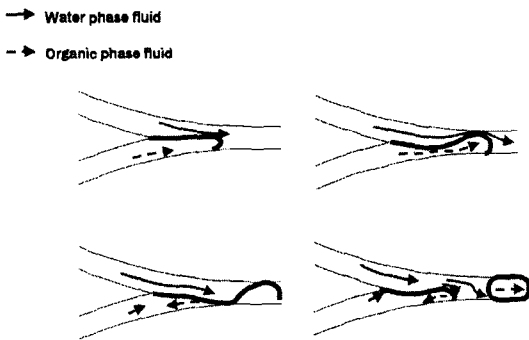


Fig. 7 Droplet formation

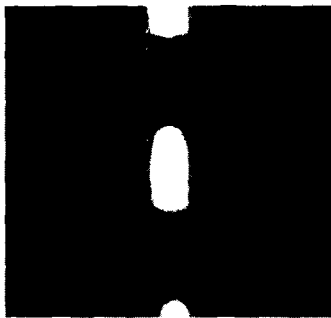


Fig. 8 Application of blood plasma

Fig. 8은 본 연구를 응용한 혈장의 droplet 생성을 가시화한 이미지이다. 형상이 탄환과 흡사한 이유는 벽면과의 전단력이 원인이라 판단된다.

4. 결론

Y형 마이크로 채널에서 유동의 마이크로 droplet의 생성이 성공적으로 이루어졌으며, droplet이 생성되는 동안 droplet 주변의 속도장을 획득하여 생성과정을 분석을 할 수 있었다. 표면장력과 전단력의 상호작용에 의한 비선형성과 이로부터의 미세한 불균형은 droplet의 생성이 가능함을 알 수

있었다. 이러한 droplet 생성은 표면장력 차이에 의한 Rayleigh instability의 결과이다. 그리고 물성치와 유량을 변화시키면 다양한 크기와 주기를 가진 droplet생성이 가능할 것이라 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Nisisako, T., Torii, T. 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) Kawai, A., Futami, T., Kiriya, H., Katayama, K. and Nishizawa, K., 2002, "Mass-Production System of Nearly Monodisperse Diameter GEL Particles Using Droplets Formation in a Microchannel," *Micro Total Analysis Systems*, Japan, 3-7 Nov, Vol. 1, pp. 368~370.
- (3) Suh, Y. K. and Heo, H. S., 2003, "A Numerical Study on Stirring Characteristics in a Microchannel with Various Arrangement of Blocks," *Trans. KSME B*, Vol. 27, No. 7, pp. 901~908.
- (4) Srinivasan, V., Pamula, V., Pollack, M. and Fair, R., 2003, "A Digital Microfluidic Biosensor for Multi-analyte Detection," *Proceedings of the IEEE 16th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 327~330.
- (5) Paik, P. K., Pamula, V., Pollack, M. G. and Fair, R. B., 2003, "Electrowetting-Based Droplet Mixers for Microfluidic Systems," *Lab on a Chip*, Vol. 3, pp. 28~33.
- (6) Thorsen, T., Roberts, R. W., Arnold, F. H. and Quake, S. R., 2001, "Dynamic Pattern Formation in a Vesicle-Generating Microfluidic Device," *Physical Review Letters*, Vol. 86, pp. 4163~4166.
- (7) Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J. and Adrian, R. J., 1998, "A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, No. 4, pp. 316~319.
- (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) Koutsiaris, A. G., Mathioulakis, D. S. and Tsangaris, S., 1999, "Microscope PIV for Velocity-Field Measurement of Particle Suspensions Flowing Inside Glass Capillary," *Meas. Sci & Tech.*, Vol. 10, pp. 1037~1046.
- (10) Olsen, M. G. and Adrian, R. J., 2000, "Out-of-Focus Effects on Particle Image Visibility and Correlation in Microscopic Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No. 7, pp. 166~174.