

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.7.671

유체 소자를 이용한 미세 액적 생성[§]

김수동* · 김영원** · 유정열*†

* 서울대학교 기계항공공학부 및 정밀기계설계공동연구소, ** 서울대학교 차세대기계항공시스템 창의설계인력양성사업단

Generation of Fine Droplets in a Simple Microchannel

Sudong Kim*, Young Won Kim** and Jung Yul Yoo*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, and Institute of Advanced Machinery and Design, Seoul Nat'l Univ.,

** BK21 School for Creative Engineering Design of Next Generation Mechanical and Aerospace Systems, Seoul Nat'l Univ.

(Received December 29, 2008 ; Revised June 1, 2010 ; Accepted June 1, 2010)

Key Words: Fine Droplet(미세 액적), T-junction(T자 채널), Flow-focusing Geometry(유체 집속 구조), Plug Movement(플러그 이동), Flow Resistance(유동 저항)

초록: 본 연구에서는 직경이 수백 nm로부터 수 μm 에 이르는 균일한 크기의 액적을 생성하는 마이크로 플루이딕 플랫폼이 설계되었다. 미세한 액적을 생성하기 위하여 T-정선과 유동집속 장치가 마이크로플루이딕 채널로 통합되었다. 상대적으로 큰 수성 액적들이 상류의 T-정선에서 생성되어 유동집속 장치로 이송되는데, 여기에서 각각의 액적은 압력과 점성응력의 작용에 의하여 목표로 하는 크기로 잘게 쪼개진다. 이러한 구성은 내부 유체의 매우 느린 유량과 유동집속 영역에서 내부 및 외부 유체 사이의 높은 유량비를 가능하게 한다. 본 마이크로플루이딕 장치는 약 1 μm 크기의 직경을 가지는 액적들을 3%보다 작은 표준 편차로 생성할 수 있음이 제시되었다.

Abstract: In the present study, we designed a microfluidic platform for generating monodisperse droplets with diameters ranging from hundreds of nanometers to several micrometers. To generate fine droplets, T-junction and flow-focusing geometry are integrated into the microfluidic channel. Relatively large aqueous droplets are generated at the upstream T-junction and transported to the flow-focusing geometry, where each droplet is broken into smaller droplets of the desired size by the action of pressure and viscous stress. In this configuration, the flow rate of the inner fluid can be made very low, and the ratio of the inner- and outer-fluid flow rates in the flow-focusing region can be made very high. It has been shown that the present microfluidic device can generate droplets with diameters of approximately 1 μm (standard deviation: <3%).

1. 서 론

마이크로 공정 기술의 발전과 미세유체역학(microfluidics) 연구의 활성화로 picoliter(10^{-12} L), femtoliter(10^{-15} L) 수준의 액체를 마이크로 채널 내부에서 다루는 기술이 활발히 연구되어 왔다. 최근 마이크로 채널 구조를 이용하여 작고 균일한 유상액(emulsion)을 생성하는 연구는 약물 전달, 특수 재료의 합성 등의 많은 분야에 적용 가능한 기술로 널리 연구되고 있다. 액적의 미세한 크기와 그 균일성은 유상액의 안정성, 유변학적 특성, 화학 반응성,

생리학적 효율성 등에 영향을 미치는 가장 중요한 성질이다.⁽¹⁾ 따라서 액적을 작고 균일하게 생성하기 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다.

Anna 등⁽²⁾은 유동-집속 구조(flow-focusing geometry)를 이용하여 수상(water phase)의 분산상(dispersed phase)과 유상(oil phase)의 연속상(continuous phase)을 좁은 오리피스를 통해 유입시키고 이때 유도되는 두 유체 사이의 높은 전단력을 이용하여 수 μm 에서 수 십 μm 크기의 액적을 매우 균일한 크기로 생성하였다. 하지만 이 연구에서 제시한 방법은 생성 가능한 액적의 최소 크기가 수 μm 정도로 제한되어 있다는 한계를 지닌다. 이것은 생성 가능한 최소 액적 크기가 유동-집속 구조의 오리피스 너비에 큰 영향을 받기 때문이다. 이러한 한계를 극복하고

§ 이 논문은 대한기계학회 2008년도 추계학술대회(2009. 11. 5.-7., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, jyoo@snu.ac.kr

1 μm 이하의 작은 액적을 생성하기 위해 여러 가지 방식이 제안되었다. Anna 등⁽³⁾은 계면활성제를 수상에 첨가함으로써 표면장력의 크기를 작게 하여 유동-집속 구조의 오리피스에서 수상이 더 좁은 폭으로 집속되도록 유도하였다. 이로써 이전의 유동-집속 구조에 비해 더 작은 액적을 생성할 수 있었지만 계면활성제의 첨가는 생성되는 액적의 유체역학적 특성과 화학적 성질을 변화시켜 실제 응용의 측면에서는 하나의 제약으로 작용하게 되는 단점이 있다. Tan 등⁽⁴⁾은 특정 유량 조건에서 액적을 생성할 때 부수적으로 생성되는 위성 액적(satellite droplet)을 필터링하고 수집하는 채널 형상을 제안하여 100 nm 이하의 작은 미세 액적을 생성하였다. 하지만 이러한 방식은 채널 형상이 복잡하고 여러 층으로 이루어진 PDMS(Polydimethylsiloxane) 채널을 구현해야 한다는 단점이 있다. 또한 사용한 분산상의 극히 일부만이 원하는 크기의 액적으로 생성되고 위성 액적이 아닌 대부분의 분산상을 버려야 한다는 효율성의 문제도 있다. Link 등⁽⁵⁾과 Kim 등⁽⁶⁾은 액체에 전기를 가하여 작은 액적으로 분할되도록 하는 이온화 기술을 마이크로 채널 내부에서 적용하였다. 이들은 마이크로 채널 내부에 삽입된 전극에 전기장을 걸어 전기장의 크기가 커질수록 작은 액적이 생성된다는 연구 결과를 보여주었다. 이러한 방식에서는 1 μm 이하의 수준의 미세한 액적이 생성 가능하나 액적의 생성 가능 여부가 분산상의 전기적 성질에 의해 결정되며 생성된 액적의 크기가 균일하지 못하게 되는 한계를 가진다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 전기장 혹은 복잡한 채널 형상의 도움 없이, 그리고 작동 유체의 성질을 변화시키지 않고 1~2 μm 수준의 작은 액적을 균일하게 생성해 내는 방식을 제안하고자 한다. 이를 위하여 마이크로 채널에서 T자 채널과 유동-집속 구조를 결합하였다. T자 채널에서 생성된 수상의 플러그는 높은 유동 저항을 유도하고 채널의 상류와 하류의 입구, 출구에 걸린 작은 압력차에 의해 서서히 이동하여 유동-집속 영역의 내부유체로 유입되고, 외부유체와의 높은 유량비에 의해 다시 작은 액적으로 분해된다.

2. 연구 방법

2.1. 원리와 방법

2.1.1 미세 액적 생성의 원리

본 연구에서는 생성되는 액적의 크기가 매우

균일한 장점을 지니는 유동-집속 구조를 사용하여 작은 액적을 생성하도록 한다. 유동-집속 구조를 이용하여 생성되는 액적의 크기는 채널의 형상과 작동 유체의 성질, 그리고 분산상과 연속상의 유량 및 두 유체 사이의 유량비에 의해 영향을 받는다.

일반적인 유동-집속 구조의 형상은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 분산상의 유량, 즉 내부유체(inner fluid)의 유량을 Q_{inner} 라 하고 연속상의 유량, 즉 외부유체(outer fluid)의 유량을 Q_{outer} 라 하면 두 유체의 유량비 ϕ 는 $Q_{\text{outer}}/Q_{\text{inner}}$ 로 정의된다. 채널의 형상과 작동 유체가 결정되면 두 유체의 유량과 유량비에 의해 생성되는 액적의 크기가 쉽게 제어 가능하다. 일반적으로 유량비가 큰 경우 더 작은 액적을 생성할 수 있으며 본 연구의 미세 액적 생성 원리도 이러한 경향에 바탕을 둔다.

유동-집속 구조에서 유량비를 크게 하는 데에는 간단히 두 가지 전략을 취할 수 있다. 한 가지는 Q_{outer} 를 늘리는 방식이며, 다른 한 가지는 Q_{inner} 를 줄이는 방식이다. 전자의 방식은 모세관수(capillary number)가 커져 액적 크기가 균일하지 못하게 생성되는 단점이 있으며 PDMS의 결합력이 채널 내부의 큰 유량을 감당하지 못하는 문제점도 있다. 후자의 방식은 모세관수가 작아 안정적인 액적 생성이 가능하지만 일반적인 시린지 펌프로는 10 $\mu\text{l/h}$ 이하의 유량을 균일하게 유지해 주기 어렵다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 유상을 연속상, 수상을 분산상으로 하는 마이크로 채널 내부의 유동에서 수상이 플러그의 형태로 움직일 때 유발하는 높은 유동 저항을 이용하여 Q_{inner} 를 크게 감소시키고 유량비를 극대화하여 작은 액적을 생성하도록 한다. 일반적으로 이와 같은 2유체(two-fluid)의 유동은 수상 혹은 유상이 단독으로 흘러가는 유동의 경우보다 유동저항이 더 크다는 사실이 잘 알려져 있다.⁽⁸⁾ 의 간단한 식에서 알 수 있듯이 동일한 압력차 ΔP 가 채널의 양단에 걸린 경우 유동저항(R)이 큰 2유체 유동의 경우가 유량(Q)이 더 작음을 알 수 있다.⁽⁹⁾ 따라서 채널 내부에 높은 유동저항을 유도하고 이를 작은 압력차로 움직이게 하면 채널 내부의 유량을 매우 작게 할 수 있고 유동-집속 구조에서 높은 유량비를 통해 액적을 생성할 수 있다.

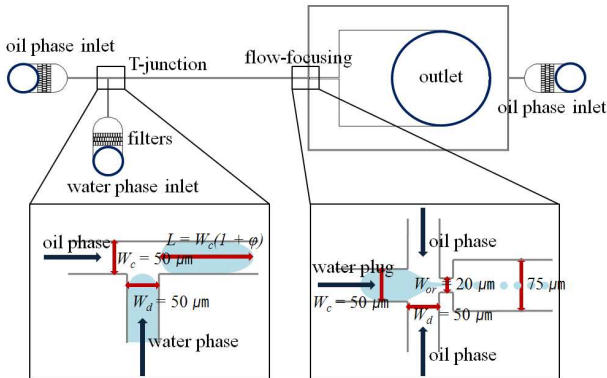


Fig. 1 Schematic channel geometry for generation of fine droplets

채널 내부로 일정한 유량을 흘려주기 위해 가장 널리 사용되는 펌프는 시린지 펌프이다. 시린지 펌프를 이용하여 채널 내부로 작동유체를 유입하는 경우, 채널 내부 저항의 크기와는 관계없이 일정 유량이 유입된다. 내부의 유동저항이 어떠한 크기를 가지더라도 일정 유량을 유지하여 주기 위해서는 입구와 출구 사이의 압력차도 유동저항에 비례하여 증감하기 때문이다. 따라서 시린지 펌프를 이용할 경우에는 플러그를 이용하여 높은 유동저항을 유도하더라도 채널 내부의 유량이 감소하지는 않는다.

마이크로채널로 일정 유량을 유입해 주던 시린지 펌프의 구동을 정지시키면 채널 내부의 압력차는 즉각적으로 소멸하지 않고 유동이 멈출 때까지 서서히 정상상태에 도달한다. 작은 압력차가 직선 채널의 양단에 걸리고 채널 내부에 수십 개의 플러그가 연속적으로 존재하는 경우 플러그에 의한 높은 유동저항으로 인하여 채널 내부 유량은 매우 작아지게 된다. 매우 느린 속도로 움직이는 플러그를 유동-집속 구조의 내부 채널로 유입시키면 매우 높은 유량비를 통해 미세 액적을 생성할 수 있다.

2.1.2 채널 설계와 제작

높은 유동저항을 이용하여 큰 유량비를 유도하기 위해 Fig. 1과 같이 T자 채널과 유동-집속 구조를 마이크로 채널에서 결합한다.

T자 채널은 직교류에 의해 액적을 생성하는 방식이다. T자 채널에서 생성된 액적은 크기가 채널의 너비에 비해 상대적으로 커 액적이 T자 채널의 하류 채널 단면을 대부분 채우는 플러그 형태와 생성된 액적이 채널에 비해 상대적으로 작

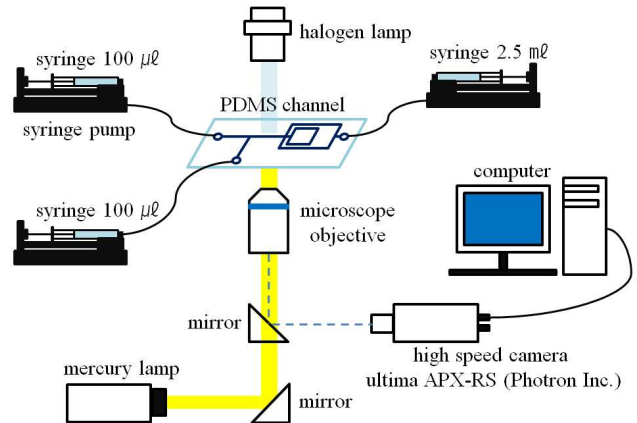


Fig. 2 Experimental setup

은 구형(sphere)의 형태로 크게 분류될 수 있다. 전자의 경우는 연속상이 유입되는 채널과 분산상이 유입되는 두 채널의 너비의 비가 1 : 1에 가까운 경우이며, 후자의 경우는 연속상이 유입되는 채널의 너비가 분산상이 유입되는 채널의 너비보다 5배 이상 큰 경우에 해당한다.⁽¹⁰⁾ 모세관수가 작은 유동($Ca = \mu_c U / \sigma = \mu_c Q / (\sigma W_c H) < 0.1$)에서는 유체의 계면 변형에 대한 저항으로 작용하는 표면장력이 전단력보다 더 크기 때문에 수상이 채널의 단면을 다 막아버리기 전까지 연속상의 직교류가 분산상을 끊어내지 못한다. 이때 생성되는 플러그의 길이는 채널 너비의 수 배 정도에 해당한다. 본 연구에서는 T자 채널에서 하류 채널의 단면을 거의 막아버리는 플러그를 생성하고 이로 인해 유발되는 높은 유동 저항을 이용하므로 T자 채널을 구성하는 두 채널의 너비가 $50 \mu\text{m}$ 로 서로 같도록 제작한다.

T자 채널에서 생성된 플러그는 유동-집속 구조의 중앙 채널로 연결되어 집속에 의해 다시 작은 액적으로 분해된다. 유동-집속 구조는 일반적으로 널리 사용되는 채널 형상을 그대로 적용하여 설계하고 연속상과 분산상이 흐르는 채널 너비는 각각 $50 \mu\text{m}$, 오리피스의 너비는 $20 \mu\text{m}$ 이며 채널의 높이는 $50 \mu\text{m}$ 로 채널 전 영역에서 동일하다.

채널은 SU-8 몰드에 PDMS precursor (Sylgard 184, Dow Corning)와 경화제를 10 : 1의 비율로 혼합하여 붓고 이를 상온에서 15 분, $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 오븐에서 60 분 보관하여 제작하였다.⁽¹¹⁾ 4면이 모두 PDMS인 채널을 제작하기 위하여 몰드에서 떼어낸 PDMS 채널과 채널 바닥면을 구성할 PDMS를 산소 플라즈마(oxygen plasma)로 처리하여 결합하였다. 플라즈마에 노출된 PDMS 면은

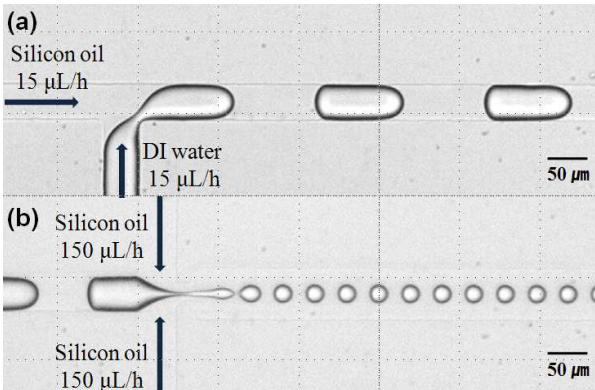


Fig. 3 T-junction and flow-focusing geometry generating (a) water plugs and (b) substantially small spherical droplets while syringe pumps are continuously supplying constant flow rate

일시적으로 친수성의 성질을 가지게 되므로 결합된 채널을 다시 65 °C에서 수 시간 동안 보관하여 PDMS가 소수성의 성질을 회복하도록 한다.

2.2 실험 장치

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 실험 장치를 보여주고 있다. 채널은 세 개의 입구와 하나의 출구로 구성되어 있으며 각 입구는 관을 통해 시린지와 시린지 펌프에 연결되어 있다. 미세 액적의 생성시 액적의 경계를 명확히 얻기 위해서는 고속카메라를 이용하여 노출시간(exposure time)을 매우 짧게 설정하여 촬영하여야 한다. 따라서 충분한 광량의 확보가 중요하다. 명확한 실험 결과 이미지를 얻기 위하여 도립현미경(inverted microscope)과 고속카메라(ultima APX-RS, Photron Inc.)를 사용하였으며 컴퓨터를 통해 제어하여 실시간으로 관찰 및 이미지 저장이 가능하도록 실험 장치를 구성한다. 광원은 수은 램프와 할로겐 램프를 동시에 사용하여 매우 짧은 노출시간에서도 상이 충분히 밝게 나올 수 있도록 한다.

본 연구에서 수행한 모든 실험에서 유상은 silicone oil (KF-6002, Shin-Etsu)을 사용하였으며 수상은 계면활성제 등의 다른 화학물질의 혼합 없이 순수한 초순수(DI water)를 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 Plug의 형성과 break-up

Fig. 3은 시린지 펌프가 채널 내부에 일정 유량을 지속적으로 공급할 때 T자 채널에서 생성되는

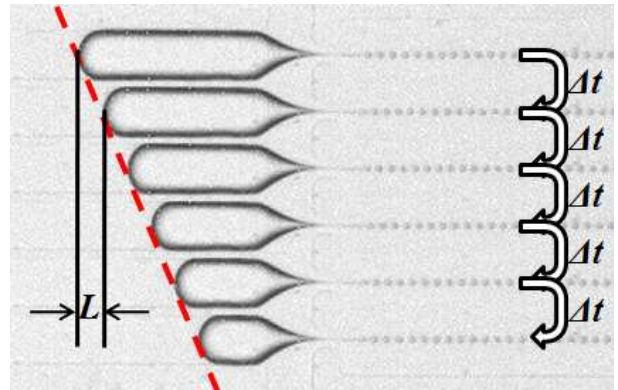


Fig. 4 Serial images recorded at every 1/6 second. The velocity of the moving plug and the flow rate of the inner fluid can be calculated by analyzing these serial images

초순수(DI water)의 플러그와 이것이 유동-집속 구조로 유입되어 더 작은 구형 액적으로 분할되는 이미지를 보여주고 있다. T자 채널을 구성하는 두 채널의 너비와 채널에 흐르는 수상과 유상의 유량이 같은 경우 생성되는 플러그는 하류로 흐르는 4각 채널의 단면을 채우며 그 길이는 채널 너비의 약 3배 정도이다. 유동-집속 구조에서 플러그는 비교적 작은 액적으로 다시 분해되는데 유량비 7.5에서 생성된 액적의 크기는 오리피스 너비와 큰 차이가 없으며 생성된 액적의 크기는 매우 균일하다.

3.2 플러그의 이동 속도 측정

유동-집속 구조에서 유량비를 계산하기 위해서는 분산상, 연속상의 유량을 정확히 알아야 한다. 본 연구에서 수행된 실험에서는 직관 채널 내부의 플러그가 채널 양단의 압력차에 의해서 움직이므로 시린지 펌프를 이용한 유동에서와 같이 유량조건을 직관적으로 알기 어렵다. 따라서 플러그의 속도를 측정하고 이 속도 값과 채널의 단면적을 고려하여 Q_{inner} 와 유량비를 계산해야 한다. 플러그의 이동 속도는 플러그의 후면 메니스커스(receding meniscus)의 이동을 일정 시간간격으로 촬영하여 이미지를 얻고 이를 분석함으로써 얻을 수 있다. Fig. 4는 각각 1/6초 간격으로 촬영된 플러그의 후면 메니스커스를 보여준다. 촬영된 이미지에서 일정 시간 Δt 동안 후면 메니스커스가 이동한 픽셀(pixel)의 수를 구하고 한 픽셀의 크기를 고려하여 이동거리와 속도를 계산할 수 있다.

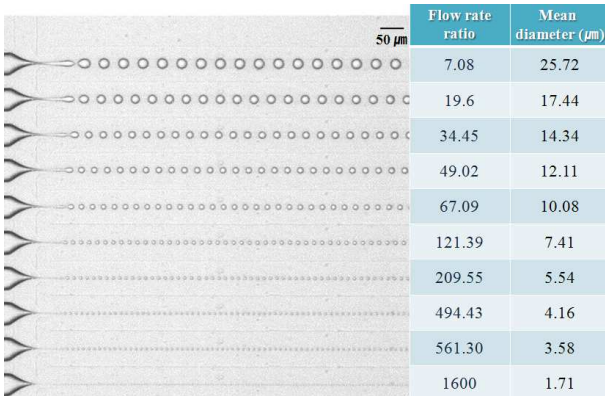


Fig. 5 Generated droplets under different flow rate ratio conditions observed at immediate downstream of the orifice. The droplet size decreases as the flow rate ratio increases

일반적인 단일상의 유동의 경우 $Q = AV$ 의 관계가 성립한다. 본 연구에서 측정된 Q_{inner} 도 마찬가지로 플러그의 이동속도를 채널의 단면적에 곱한 결과이나 이 값은 필연적으로 오차를 지니게 된다. 일반적으로 PDMS 채널 내부에 유상과 수상이 공존할 경우 유상이 소수성의 PDMS 채널 내벽을 모두 적시게 된다. 수상의 플러그가 채널의 단면적을 거의 채우지만 플러그와 채널 벽 사이에는 얇은 유상의 막(oil film)이 존재하며 사각 채널의 네 귀퉁이에는 유상이 흐르는 유로(gutter)가 있어 실제 플러그의 단면적은 PDMS 채널의 단면적보다 더 작은 값을 가지게 되고 Q_{inner} 는 실제 수상의 유량보다 다소 큰 값으로 계산된다. 아직 수상과 유상이 공존하는 PDMS 4각 채널에서 유상의 막 두께와 네 귀퉁이 유로의 규모를 계산하는 연구가 제안되지 않아 오차의 원인이 명확함에도 Q_{inner} 의 정확한 값을 계산할 수 없다. 본 연구에서는 지속적으로 감소하는 채널 양단의 압력차를 이용하여 높은 유동저항을 지닌 플러그를 이동시키므로 채널 내부의 플러그 이동 속도는 압력이 감소함에 따라 느려진다. 하지만 채널의 입구와 출구 사이의 압력차가 빠른 시간내에 회복되지 않기 때문에 이러한 이동 속도 둔화 역시 즉각적으로 나타나지 않고 느리게 진행된다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 적어도 하나의 플러그가 분해되는 과정에서는 플러그의 속도가 일정하다. 즉 매우 작은 플러그의 속도에서도 Q_{inner} 가 일정하여 하나의 플러그가 분해되어 생성된 미세 액적은 동일한 유량비에서 생성된 균일한 크기의 액적이라고 간주할 수 있다.

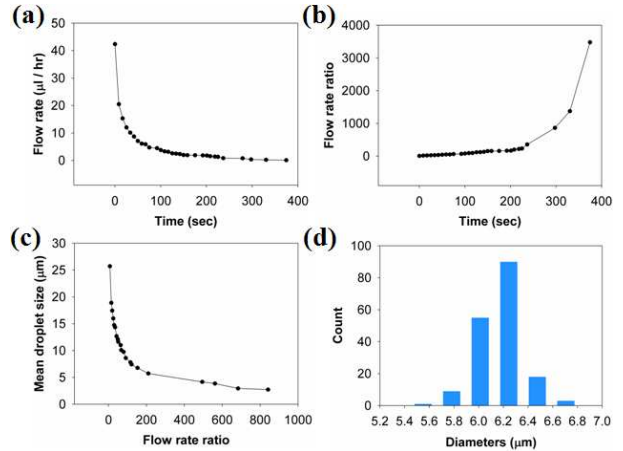


Fig. 6 Analysis in view of flow rate, flow rate ratio, and droplet size. (a) Decreasing flow rate of the inner fluid at the flow focusing geometry, (b) increasing flow rate ratio, (c) mean droplet size and (d) droplet size distribution

3.3 미세 액적의 생성

Qouter를 300 μL/h로 고정하고 여러 Q_{inner} 조건에서 액적을 생성하였다. Q_{inner} 가 감소함에 따라 유량비가 증가하고 액적의 크기는 감소한다. Fig. 5는 각각의 유량비에서 생성되는 액적의 크기 변화를 보여준다. 유량비가 7인 경우 생성되는 액적은 오리피스 너비 20 μm 보다 더 크며 유량비 증가에 따라 유량비 1600에서 액적의 크기는 1.7 μm 수준까지 작아진다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 T자 채널에 일정 유량을 공급하던 시린지 펌프의 구동을 멈춘 후 T자 채널과 유동-집속 구조 사이의 압력 감소에 따른 Q_{inner} 의 변화와 유량비 Φ 의 변화를 나타낸 그래프이다. 시린지 펌프가 꺼진 직후에는 유량이 큰 폭으로 감소하지만 시간이 지남에 따라 유량의 감소폭은 작아지고 비교적 긴 시간 동안 작은 유량이 유지된다. 유량은 약 0.086 μL/h 까지 감소하였으며 유량비는 3400 이상까지 증가하였다. 이러한 유량비는 마이크로채널 내부에서 유동-집속 구조를 이용하여 액적을 생성한 이전 연구들의 유량비를 훨씬 상회한다. 또한 Q_{inner} 의 계산에서 Q_{inner} 가 실제보다 더 큰 값으로 계산되는 오차요인까지 고려한다면 실제 유량비는 계산한 값보다 클 것으로 예상된다. Fig. 6(c)는 유량비가 증가함에 따라 생성되는 액적의 크기가 감소하는 경향을 보여주며 가장 작은 수준의 액적은 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 2 μm 이하이다. Fig. 6(d)

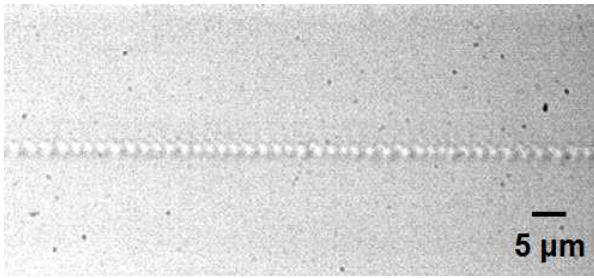


Fig. 7 Enlarged image of monodisperse fine droplets with size of 2 μm

는 유량비 150 수준에서 생성되는 액적들의 크기를 분석한 결과를 나타낸다. 평균 액적 직경은 6.17 μm 이며 표준편차는 0.817 μm 로 생성된 액적이 매우 균일한 크기임을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 오리피스의 너비가 20 μm 인 유동-집속 구조에서 유량비만을 크게 함으로써 오리피스 너비보다 훨씬 작은 수준의 작은 액적이 생성 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유동-집속 구조에서 높은 유량비를 통하여 전기장과 같은 부가적인 힘, 복잡한 채널 형상, 작동 유체의 성질 조작 없이 미세 액적을 생성하는 방법을 제안하였다. 마이크로채널 내부에 T자 채널과 유동-집속 구조를 결합하고 유상과 수상의 높은 유량비를 통해 1~2 μm 수준의 미세 액적을 생성하였다. T자 채널에서 생성된 수상의 플러그는 유동-집속 구조에 이르는 10 mm 채널에 일렬로 배열됨으로써 높은 유동 저항을 유발하고 이를 낮은 압력차를 이용하여 느린 속도로 운반하여 유동-집속 구조에서 높은 유량비를 얻었다. 플러그를 움직이는 요인인 압력차가 서서히 작아짐으로써 플러그의 이동 속도가 감소하고 유량비가 증가하며 결과적으로 3500에 이르는 높은 유량비에서 미세 액적을 생성하였다. 또한 이러한 방식을 통하여 생성한 액적들은 표준편차 3% 이하의 매우 균일한 크기를 지님을 보였다.

본 연구에서 제안한 방식은 간단한 형상의 마이크로 채널만으로도 이전 연구에서 보여준 크기보다 작은 미세 액적을 균일한 크기로 생성하여 안정한 유중수(water-in-oil) 유상액을 생성할 수 있는 가능성을 제시한다. 본 연구가 기존의 연구에 비해 가지는 차별성과 장점은 작동유체의 전기적 성질과는 무관하게 미세 액적을 생성할 수

있다는 점, 오리피스의 너비를 더욱 작게 제작할 필요 없이 유량비만을 제어하여 오리피스 너비보다 훨씬 작은 규모의 액적을 생성할 수 있다는 점, 작동유체에 계면활성제 등을 첨가하여 표면장력을 줄이지 않고 순수한 초순수의 미세 액적을 생성할 수 있다는 점, 복잡한 형상을 지니거나 여러 층으로 이루어진 PDMS 채널 혹은 공정비가 비싼 유리 채널을 제작하지 않고 간단한 PDMS 채널을 통해 미세 액적을 생성할 수 있다는 점이다. 본 연구에서 제안한 미세 액적 생성 방식은 유동-집속 구조를 이용한 유중수(water-in-oil) 유상액, 수중유(oil-in-water) 유상액, 기체 버블, 고체의 고분자 입자, 야누스 입자 등 여러 다양한 입자의 소형화에 폭넓게 적용될 수 있으리라 기대된다.

후 기

본 연구는 본 연구는 학술진흥재단의 중점연구소 지원사업(KRF-0420-2007-0058)과 마이크로열시스템 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kobayashi, I., Nakajima, M. and Mukataka, S., 2003, "Preparation Characteristics of oil-in-water Emulsions Using Differently Charged Surfactants in Straight-through Microchannel Emulsification," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 229, pp. 33~41.
- (2) Anna, S. L., Bontoux, N. and Stone, H. A., 2003, "Formation of Dispersions Using "flow focusing" in Microchannels," *App. Phys. Lett.*, Vol. 82, No. 3, pp. 364~366.
- (3) Anna, S. L. and Mayer, H. C., 2006, "Microscale Tipstreaming in a Microfluidic Flow Focusing Device," *Phys. Fluids*, Vol. 18, No. 12, pp. 121512-1~121512-13.
- (4) Tan, Y. C. and Lee, A. P., 2005, "Microfluidic Separation of Satellite Droplets as the Basis of a Monodispersed Micron and Submicron Emulsification System," *Lab Chip*, Vol. 5, No. 12, pp. 1178~1183.
- (5) Link, D. R., Grasland-Mongrain, E., Duri, A., Sarrazin, F., Cheng, Z., Cristobal, G., Marquez, M.

- and Weitz, D. A., 2006, "Electric Control of Droplets in Microfluidic Devices," *Angew. Chem.*, Vol. 118, No. 16, pp. 2618~2622.
- (6) Kim, H., Luo, D., Link, D., Weitz, D. A., Marquez, M. and Cheng, Z., 2007, "Controlled Production of Emulsion Drops using an Electric Field in a Flow-focusing Microfluidic Device," *App. Phy. Lett.*, Vol. 91, No. 13, pp. 133106-1~133106-3.
- (7) Barrero, A. and Loscertales, I. G., 2007, "Micro- and Nanoparticles via Capillary Flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 39, pp. 89~106.
- (8) Adzima, B. J. and Velankar, S. S., 2006, "Pressure Drops for Droplet Flows in Microfluidic Channels," *Journal of Micromech. and Microeng.*, Vol. 16, No. 8, pp. 1504~1510.
- (9) Fuerstman, M. J., Lai, A., Thurlow, M. E., Shevkoplyas, S. S. and Stone, H. A., Whitesides, G. M., "The Pressure Drop Along Rectangular Microchannels Containing Bubbles," *Lab. Chip.*, Vol. 7, No. 11, pp. 1479~1489.
- (10) Garstecki, P., Fuerstman, M. J., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., 2006, "Formation of Droplets and Bubbles in a Microfluidic T-junction—Scaling and Mechanism of Break-up," *Lab. Chip.*, Vol. 6, No. 3, pp. 437~446.
- (11) Bhattacharya, S., Datta, A., Berg, J. M. and Gangopadhyay, S., 2005, "Studies on Surface Wettability of Poly(Dimethyl) Siloxane (PDMS) and Glass Under Oxygen-Plasma Treatment and Correlation With Bond Strength," *J. MEMS*, Vol. 14, No. 3, pp. 590~597.