

마이크로 채널 내부에서의 액적의 쌍안정성과 이를 활용한 유동 제어

이범준* · 유정열†

Droplet Bistability in Microchannel and its Application to Flow Control

Beomjoon Lee and Jung Yul Yoo

Abstract. We demonstrate the droplet bistability in a microchannel which has two symmetric necks that operate as capillary valves. It is shown that there are certain flow conditions, determined by droplet velocity and droplet size, to achieve bistability. Droplet bistability allows simple but precise control of droplet at a bifurcation channel. Therefore, by an appropriate channel design to induce droplet bistability, we can distribute droplets at a junction passively in the manner of perfect alternation and perfect switching in the choice of the outlets.

Key Words: Droplet(액적), Bistability(쌍안정성), Microchannel(미세채널)

1. 서 론

미세 채널 구조는 스펀지, 멤브레인, 생체 내 순환계 등 일상 생활에서 쉽게 발견할 수 있다. 이러한 미세 채널 구조는 흔히 내부에 복잡한 네트워크 구조를 이루고 있으며, 채널 내부에 다상의 유동을 형성한다. 복잡한 미세 채널 내부의 다상 유동은 층류 유동을 특징으로 하는 단상 유동과는 달리 버블이나 액적으로 발생하는 비선형성으로 인해 복잡한 유동 특성을 나타낸다.

이러한 복잡한 유동을 제어하기 위해서 많은 연구진들이 능동적 또는 수동적 제어 기법을 개발하여 왔다. 능동적 제어 기법으로는 공압 제어⁽¹⁾, 동전기 제어⁽²⁾, 초음파 제어⁽³⁾ 등이 있으나, 이를 위해서는 외부 장치 및 외부 에너지가 필요하다는 단점이 있다. 반면 채널의 기하학적 구조를 활용하는 수동적 제어는 주기적 유동 특성을 보이는 다상 유동 제어에 효과적이며, 간단하고 정밀한 유동 제어에 적합하다. Prakash⁽⁴⁾ 등은 미세 채널의 형상 설계를 통해 기체-액체 2상 유동에서 논리 연산 장치를 구현하였으며, 기체 버블이 쌍안정성을 가진다는 것을 보고하였다. 기체 버블의 쌍안정성

이란 기체 버블이 대칭적 구조의 미세 채널을 통과할 경우, 기체 버블이 대칭 구조에서 번갈아 상하의 챔버에 갇혔다가 통과하는(trap and release) 현상을 말한다. 이들은 기체 버블의 쌍안정성을 활용하여 플립 플롭 메모리(flip flop memory), 버블 카운터(bubble counter) 등을 구현하였다.

한편 물질 전달과 활용의 측면에서 쉬이지 않는 두 액체를 이용한 액적 기반의 연구의 중요성이 부각되고 있으며, 액적 기반의 랩온어칩 장치에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 액적들은 외부와 분리되어 캡슐화 되어 있기 때문에, 액적 단위의 반응기나 세포 배양 유닛 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이들 장치는 나노 혹은 피코리터 크기의 극히 작은 크기의 액적을 매우 빠른 속도로 정밀하게 제어하는 것을 요구한다.

또한, 액적의 병합, 분리 등의 기능은 마이크로플루이딕스 장치의 핵심적 기능이기 때문에, 분지 채널에서 액적의 이동 경로에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 일반적으로 분지 채널에서 액적을 수동적 제어 기법으로 정밀하게 제어하는 데는 어려움이 따른다. 왜냐하면 대부분의 액적 경로 제어 장치들은 액적의 이동으로 생성되는 압력 강하를 활용하여 액적을 제어하는데, 액적의 생성 주기 및 액적 사이의 간격이 액적 제어에 큰 영향을 미치기 때문이다. 또한 액적이 만들어 내는 압력 강하는 미세하기 때문에 채널 구조

†정회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : jyyoo@snu.ac.kr

*서울대학교 기계항공공학부

의 미세한 비대칭성이나 섭동에 의해 액적의 경로 제어에 어려움이 따른다. 하지만 액적 기반의 장치에서 기체 버블에서와 같이 쌍안정성을 구현한다면, 액적 및 외부 유체의 유동 제어에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구진은 마이크로 채널 내부에서 액적을 정밀하게 제어하기 위하여, 액적의 쌍안정성에 관하여 연구하였으며, 쌍안정성을 이용하여 분지 채널에서의 액적 경로 제어 장치를 개발하였다. 이 장치는 모세관 밸브의 작동 원리를 대칭적 구조의 채널에 적용하여 액적의 쌍안정성을 구현함으로써 작동한다.

2. 실험방법

2.1 채널 제작

채널은 기존의 소프트리소그래피(soft lithography) 기법을 사용하여 제작하였다. 실리콘 웨이퍼에 감광제(photoresist) SU-8 50을 사용하여 패터닝하였다. 패터닝된 실리콘 웨이퍼에 Poly (dimethyl-siloxane) (PDMS)를 부어 경화시켜 PDMS채널을 제작하였다. 4면이 PDMS가 되도록 유리에 PDMS를 스핀 코팅하여 아래 판을 제작한 후, 패터닝된 PDMS와 접합하여 채널을 완성하였다.

2.2 채널 형상 및 실험 방법

액적을 생성하기 위하여 T자 형태의 채널을 사용하였으며, Fig. 1과 같이 액적의 쌍안정성을 유도하기 위하여 폭이 좁아지는 채널(w_{neck})을 분지된 채널의 상하에 대칭적으로 배치한다. 액적을 생성하기 위한 oil phase 물질로는 실리콘 오일(Siliconoil, 50 cS)을 사용하였으며, water phase로는 초순수(Deionized water)를 사용하였다. 두 유체를 주입하기 위하여 두 개의 시린지 펌프(Syringe pump, kdScientific)와 시린지(Syringe, SGE)를 사용하였으며, 테프론 튜브를 이용하여 PDMS 채널과 연결하였다. 가시화를 위해 현미경(IX50,

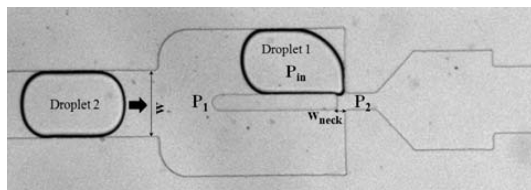


Fig. 1. 액적의 쌍안정성 구현을 위한 채널 형상.

Olympus)과 CCD 카메라(SensiCam, Cooke)를 사용하여 영상을 획득하였다.

표면 장력(Surface tension)은 Du Nouy ring method (Autotensiometer, Fisher)를 사용하여 측정하였으며, 초순수와 실리콘 오일의 계면장력(interfacial tension)은 45.9 mN/m로 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액적의 쌍안정성

채널 내부의 액적은 자신의 표면적을 최소화시킴으로써 낮은 표면에너지를 유지하게 된다. 갑자기 좁아졌다 넓어지는 채널을 지나는 액적의 경우, 액적이 좁은 채널을 통과하기 위해서는 자신의 표면적을 넓혀야 하며, 이는 에너지 상태에서 불안정성을 초래하게 된다. 좁은 채널을 지난 액적은 다시 원래의 낮은 표면 에너지 상태를 회복하게 된다.

Fig. 1과 같이 상하 대칭으로 분지 채널이 존재하는 경우, 액적은 상하 채널 중 한쪽으로 진행 방향을 선택하게 된다. 액적이 진입하여 좁은 채널에 도달하였을 때, 액적으로 인해 발생하는 최대 압력 강하는 Young Laplace equation을 사용하여 식 (1)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$P_{clog} = 2\gamma \left(\frac{1}{w_{neck}} - \frac{1}{w} \right) \quad (1)$$

$w_{neck} = 30 \mu\text{m}$, $w = 200 \mu\text{m}$ 이다. 따라서 좁은 채널에 다른 액적은 상당한 유동 저항을 발생시키게 되며, 대부분의 oil phase는 반대편 채널을 통해 흐르게 된다. 액적은 P_{clog} 이상의 압력강하가 발생하기 전까지는 지속적으로 좁은 채널 입구에 머무르게 된다. 뒤따르는 액적2가 분지 채널에 도달하게 되면, 액적1에 의해 발생한 유

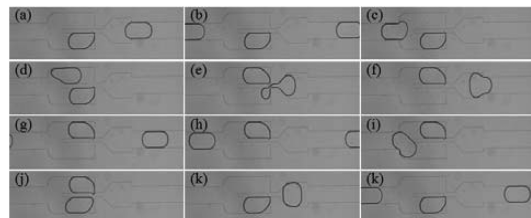


Fig. 2. 시간 경과에 따른 쌍안정 상태에 있는 액적의 이동 특성 (Time interval = 133 ms).

동 저항으로 인해 반대편의 채널을 선택하게 된다. 액적 2가 좁은 채널에 도달하였을 때, 액적2 역시 유동저항을 발생시키며, 이는 상류의 압력 상승을 유발한다. 이 때 oil phase의 압력 강하 $\Delta P_{oil} = P_1 - P_2$ 가 P_{clog} 보다 커지게 되어 액적1은 좁은 채널을 통과하게 된다. 액적1은 액적2가 좁은 채널에 도달하기 전, 이미 좁은 채널에서 형상이 변화되어 있기 때문에, 액적1이 먼저 좁은 채널을 통과하고 액적2는 안정적으로 좁은 채널 입구에 갇혀있게 된다. 이러한 과정은 Fig. 2와 같이 뒤따르는 액적에 의하여 반복적으로 나타나게 되며, 이는 전기 회로 중의 토글(toggle) 회로 또는 플립 플롭 메모리(flip flop memory) 등의 특성(뒤 따르는 신호가 존재할 때, 이전의 신호를 방출하는 회로)과 유사성을 지니고 있다.

액적의 쌍안정성에 대한 정량적 분석을 위해 연속상인 실리콘 오일과 분산상인 DI water의 유량을 변경하여 분지 채널에서의 액적 거동 양상을 관찰하였다. Oil phase의 유량 범위는 10 - 120 $\mu\text{L/h}$, water phase의 유량 범위는 5 - 50 $\mu\text{L/h}$ 이다. 분지 채널에서의 액적의 거동은 Fig. 3의 그래프와 같이 크게 쌍안정 상태(bistable state), 좁은 채널을 통과하는 상태(monostable state), Rayleigh-Plateau instability 상태로 나누어 볼 수 있다. P_{clog} 가 연속상 유체의 압력강하 ΔP_{oil} 보다 큰 경우, 액적의 쌍안정성은 안정적으로 관찰된다(bistable state). 그러나 유속의 증가로 ΔP_{oil} 이 P_{clog} 보다 커지게 되면, 액적2의 존재와는 상관 없이 액적1은 좁은 채널을 통과하게 된다(monostable state). 한편, 액적이 좁은 채널을 통과할 때, 액적이 분리되는 불안정한 유동 특성을 나타내는 영역이 존재함을 관찰하였다. 이는 Rayleigh-

Plateau instability에 의한 액적의 분리 현상이며, 액적의 길이가 길고 유속이 빠른 경우에 발생한다는 기존의 연구 결과와 일치함을 확인하였다.

3.2 쌍안정성을 활용한 유동 제어

분지 채널에서 액적의 이동 경로에 관한 연구는 많은 연구진에서 진행하고 있으며, 액적의 이동 경로는 분지 채널의 길이 및 대칭성, 액적의 유입 주기 및 액적 간의 거리 등 많은 파라미터가 영향을 미치는 복잡한 특성을 보인다. 액적의 쌍안정성은 간단하면서도 정확하게 액적을 제어할 수 있다는 측면에서 분지 채널에서 액적의 이동 경로 제어에 적합한 방법이다. 본 연구진은 액적의 쌍안정성을 활용하여 분지 채널에서 액적을 상하의 분지 채널로 교대로 분배하는 장치와 액적의 진행경로를 스위칭하는 장치를 개발하였다.

Fig. 4와 같이 상하 대칭의 분지 채널은 연속된 마이크로 필라 구조로 구분된 두 채널과 연결되어 있다. 마이크로 필라 구조의 간격은 50 μm 이며, 이는 상하 채널의 압력을 동등하게 만드는 동시에 액적의 경로를 분리하기 위하여 설계하였다. 이러한 형상에서 액적의 쌍안정성은 Fig. 1의 채널에서와 같은 메커니즘으로 발생하지만, 쌍안정성이 발생하는 유량 범위는 차이가 나타남을 확인하였다. 액적이 쌍안정 상태에 있을 경우, Fig. 5와 같이 액적은 좁은 채널을 통과하여 상하의 채널에 교대로 유입된다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 좁은 관로를 통과하는 유량은 액적의 유입(toggle event)에 의

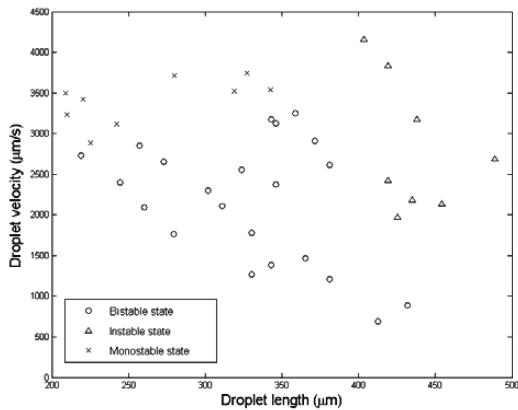


Fig. 3. 액적의 속도와 길이에 따른 액적의 거동 특성.

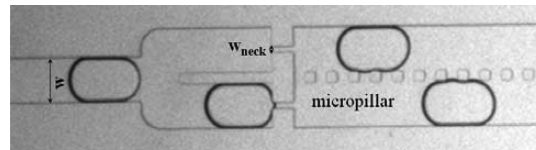


Fig. 4. 마이크로 필라구조를 활용한 액적 분배 장치.

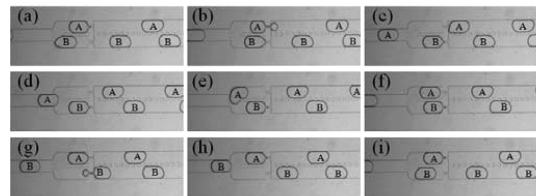


Fig. 5. 시간 경과에 따른 분지 채널에서의 액적의 이동 특성(Time interval = 133 ms).

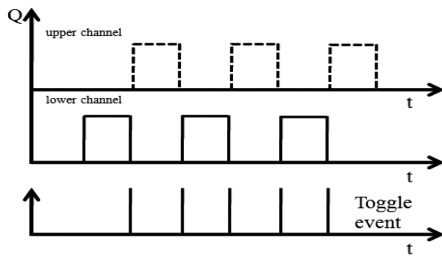


Fig. 6. 액적 분배 장치의 유동 특성.

해 상부 채널과 하부 채널의 유량이 디지털화되는 특성을 보이고 있다. 이 기법은 기존의 많은 유동 파라미터에 의해 영향을 받는 기법과는 달리, 액적이 쌍안정 상태에 존재하면 완벽하게 작동하는 특성을 지니고 있다.

Fig. 7(b)는 액적의 이동 경로를 교체하는 채널의 형상을 나타내고 있다. 상하의 두 채널은 $50\ \mu\text{m}$ 의 통로를 통해 연결되어 있다. 일반적으로 액적이 쌍안정 영역에 있지 않은 경우, 액적은 Fig. 7(a)와 같이 분지관을 지나 이동 경로의 변경 없이 주방향(오른쪽 방향)으로 진행한다. 하지만 액적이 쌍안정 영역에 있게 되면, 액적은 채널의 유동을 막는 밸브 역할을 한다. Fig. 8(d)와 같이 위쪽 채널에 액적 A가 진입하게 되면 액적 B가 쌍안정성에 의하여 좁은 채널을 통과하게 된다. 이때 액적 B는 Fig. 8(e)와 같이 주 방향과 작은 통로에 의해 위쪽 방향의 분지관을 만나게 되고, 진행 방향을 선택하게 된다. 이때 액적 A는 위쪽 채널의 밸브 역할

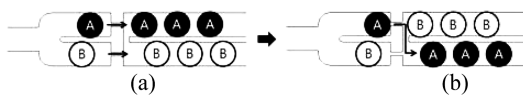


Fig. 7. 액적 경로 교체 장치 개념도.

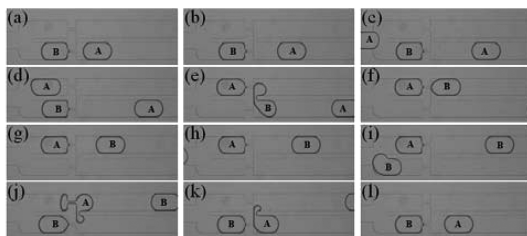


Fig. 8. 시간 경과에 따른 교체 채널에서의 액적의 이동 특성 (Time interval = 133 ms).

을 하기 때문에, 위쪽 채널의 유량은 존재하지 않는다.

아래쪽 채널의 유량은 주유동 방향과 위쪽 채널 방향으로 분배되지만 좁은 채널이 존재하는 위쪽 방향의 유속이 더 빠르기 때문에, 액적 B는 진행 경로를 바꾸어 아래쪽 채널에서 위쪽 채널로 진입하게 된다. 이러한 과정이 반복적으로 일어남으로써, 액적의 이동 경로 전환이 지속적으로 발생하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 채널에서 대칭의 분지 채널을 이용하여 액적의 쌍안정성을 최초로 관찰하였으며, 이를 정량화함으로써 쌍안정성이 발생하는 유동 범위를 찾아내었다. 또한 액적의 쌍안정성을 이용하여 액적을 분지채널로 교대로 분배하는 장치 및 액적의 이동 경로를 변환하는 장치를 개발하였다.

액적이 쌍안정 상태에 있는 경우, 유동은 연속적이지 않고 디지털화 되는 특성을 나타낸다. 따라서 이를 활용하면 안정적이며 정밀한 유동 제어가 가능하기 때문에 액적의 쌍안정성에 대한 연구는 유동 제어 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중점연구소지원사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) John Paul Urbanski, William Thies, Christopher Rhodes, Saman Amarasinghe and Todd Thorsen, 2006, "Digital microfluidics using soft lithography," Lab Chip, Vol. 6, p. 96
- 2) Wei Wang, Chun Yang, and Chang Ming Li, 2009, "Efficient On-Demand Compound Droplet Formation: From Microfluidics to Microdroplets as Miniaturized Laboratories," Small, Vol. 5(10), p. 1149.
- 3) Jinjie Shi, Xiaole Mao, Daniel Ahmed, Ashley Colletti and Tony Jun Huang, 2008, "Focusing microparticles in a microfluidic channel with standing surface acoustic waves (SSAW)," Lab Chip, Vol. 8, p. 221.
- 4) Manu Prakash and Neil Gershenfeld, 2007, "Microfluidic Bubble Logic," Science, Vol. 315, p. 832.

- 5) Wilfried Engl, Matthieu Roche, Annie Colin, and Pascal Panizza, 2005, "Droplet Traffic at a Simple Junction at Low Capillary Numbers," PRL, Vol. 95, p. 208304.
- 6) Michael Schindler and Armand Ajdari, 2008, "Droplet Traffic in Microfluidic Networks: A Simple Model for Understanding and Designing," PRL, Vol. 100, p. 044501.
- 7) Galder Cristobal, Jean-Philippe Benoit, and Mathieu Joanicot, 2006, "Microfluidic bypass for efficient passive regulation of droplet traffic at a junction," APL, Vol. 89, p. 034104.