

십자형 마이크로 채널 내에서의 액적 형성에 관한 실험적 연구

박재현* · 배기화* · 허영근** · 서용권†

Experimental Study on the Droplet Formation in a Microchannel with a Cross Junction

Jae Hyoun Park, Ki Hwa Bae, Young Gun Heo, and Yong Kweon Suh

Abstract. This paper describes an experimental study on the droplet formation and the subsequent motion in a microchannel having a cross junction. While one kind of liquid (pure water or water-surfactant mixture) is drawn into a horizontal inlet channel, the other kind (oil) is introduced through two vertical inlet channels. Due to the effect of surface tension on the interface between the two fluids, the droplets of the first fluid are formed near the cross junction. In this study, we have found that the droplet formation is affected even by slight difference in the surface tension. When the surface tension between two fluids is decreased, the droplet size is decreased in order to keep the equilibration between the pressure and the surface tension. In addition, the time interval between each of the droplet formations is decreased and the distance between droplets is also decreased when the surface tension is decreased.

Key Words: Flow Visualization (유동가시화), Cross-junction Microchannel(십자형 마이크로 채널), Droplet(액적), Surface Tension(표면장력), Surfactant(계면활성제)

1. 서 론

마이크로 크기의 제품 생산을 위한 기술이 급격하게 발달하면서 마이크로 장치를 기반으로 하는 MEMS (Micro ElectroMechanical System)는 생화학, 생물학, 의약 등의 생명공학과 첨단 항공우주사업 등에 적용될 전망이다. 따라서 마이크로 펌프, 마이크로 밸브, 마이크로 믹서, 마이크로 채널 등의 제품 제조 및 제어에 관한 연구가 전 세계적으로 활발히 수행되고 있다.

일반적으로 마이크로 또는 나노 크기의 길이 척도를 가지는 현상의 규명에 있어서는 길이에 대한 척도가 감소함에 따라 중력과 같은 체적력보다 면 또는 길이에 관한 힘이 더욱 커지기 때문에 표면장력과 같은 힘들이 중요하게 취급된다.

본 연구는 십자형(cross-junction) 마이크로 채널 내에서의 액적(droplet) 형성에 관한 실험적 연구이다. 마이크로 기기 내 흐름은 이상유동 또는 다상유동의 형태인 경우가 많으며, 액체-기체뿐만 아니라 액체-액체, 액체-고체 등 다양한 접촉형태를 보인다. 또한 생성된 기포나 액적의 크기가 기기의 크기에 비례하거나 오히려 더 크기 때문에 기기를 형성하는 경계면의 효과가 지배적으로 작용한다. 마이크로 채널 내에서 액적은 액적을 구성하는 액체 내의 혼합효과를 높여서 화학적 반응속도를 증진시킨다는 큰 장점이 있어 이에 대한 연구가 수행되고 있다. 일반적으로 규모가 큰 채널에서는 난류작용에 의해 유체의 혼합효과가 크지만 마이크로 채널 내에서는 낮은 레이놀즈수의 층류유동의 형성 및 낮은 확산성(특히 바이오 물질과 같은 큰 분자의 경우)으로 인하여 유체 혼합이 어렵다. 이 경우 마이크로 채널 내에 액적을 만들어 액적 내부에서 혼합시켜 화학반응을 증대시키는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 이에 관한 연구는 주로 T자형 또는 Y자형의 마이크로 채널에서 수행되고 있으며 액적의 형태와 크기 및 생

†동아대학교 기계공학부
E-mail: yksuh@dau.ac.kr

* (재)한국조선기자재연구원 에너지해양연구본부
** 동아대학교 기계공학부(학부)

성 빈도 등에 대한 연구가 주류를 이룬다. 이러한 마이크로 채널 내에서 생성되는 액적은 emulsion을 기반으로 한 유기합성 및 마이크로 반응기 등에 응용될 수 있다.⁽¹⁻⁶⁾

본 연구에서는 십자형 마이크로 채널 내에서의 유량의 변화에 따른 액적의 형태, 크기 및 생성 빈도에 대한 실험을 통해서 액적의 생성 및 발달에 관한 원리를 고찰함을 목적으로 한다. 상호 혼합되지 않는 두 유체의 경계면의 표면장력의 변화가 액적의 생성 및 발달에 미치는 영향을 분석하기 위하여 증류수에 계면활성제(식기 세척용)를 혼합한 후, 액적 형성에 관한 가시화 결과를 획득하여 분석하였다.

십자형 마이크로 채널의 경우, Y 자형과 T 자형 채널에 비해서 액적생성 시 채널 면의 전단력에 의한 영향이 없기 때문에 액적 생성의 원리 및 표면장력의 변화에 따른 영향을 분석하기가 상대적으로 용이하며 유량 조절을 통해서 다양한 액적 생성이 쉬운 장점이 있다.

본 연구를 통해서 얻은 결과는 마이크로 채널 내에서의 액적의 생성 메커니즘에 미치는 다양한 인자들의 영향을 파악하는 데 있어서 중요한 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

2. 유동모델 및 실험해석 방법

2.1 유동모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 유동모델을 나타낸 것이다. 채널의 형상은 ‘+’의 형상으로 3개의 유체 유입부와 1개의 유체 유출부를 가지고 있으며 수평방향 및

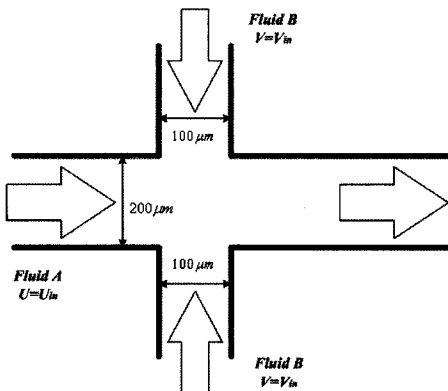


Fig. 1. Geometry of the cross junction microchannel for the present study.

수직방향의 유체 유입부의 폭은 각각 200 μm과 100 μm이다. 수평방향의 유체 유입부로는 용액A를 유입시켰으며 2개의 수직방향 유체 유입부로는 용액B를 유입시켜 채널의 교차지점에서 압력과 표면장력의 영향에 의해서 액적이 주기적으로 (혹은 비주기적으로) 형성되도록 하였다. 본 연구에서 용액 A로는 증류수 또는 계면활성제가 포함된 수용액(용액 농도 1%)을 사용하였으며 용액 B로는 식용유(soybean oil)를 사용하였다.

2.2 마이크로 채널의 제작

본 연구에 사용되어진 마이크로 채널은 PDMS (Poly-dimethyl-siloxane)로 제작하였으며 Fig. 2는 마이크로 채널의 제작과정을 나타낸 것이다. 실리콘 웨이퍼(Si wafer)(Fig. 2a) 위에 PR(photo resistor, Az5214z)를 입히고(Fig. 2b), 오븐에서 약하게 구운 후 마스크 조준기를 이용하여 채널 형상이 들어 있는 마스크를 고정 후 UV광으로 노광한다(Fig. 2c). 노광된 영역을 PR 현상액(Az300mix)를 이용하여 현상하면(Fig. 2d) 식각 작업을 위한 유로가 구분되고 이를 식각액으로 식각하면 실리콘 웨이퍼 위에 유로가 만들어진다(Fig. 2e). 최

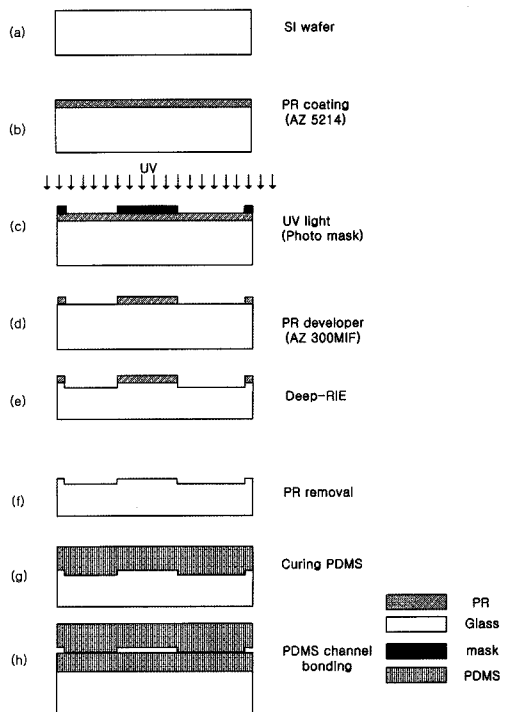


Fig. 2. Fabrication process of the PDMS microchannel.

종적으로 아세톤(aceton)을 이용하여 PR을 제거하고 세척(piranha세척; 황산:과산화수소=3:1)후 건조한다(Fig. 2f). 이렇게 완성된 틀 위에 PDMS를 붓고 굳힌 뒤, PDMS를 틀로부터 분리해 낸다(Fig. 2g). 그리고 채널의 하부면으로 따로 제작한 PDMS 하판을 플라즈마로 붙이면 PDMS 마이크로 채널이 완성된다(Fig. 2h).

2.3 실험장비의 구성

Fig. 3은 채널 내의 액적형성에 관한 가시화를 위해 사용한 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 데이터 취득/처리 장치(그림의 (7)), 유량조절 장치(그림의 (5, 6)), 고배율 광학현미경(그림의 (1, 2))으로 구성된다.

유동장의 촬영에는 디지털 고속 카메라(Olympus-Photometrics-cool snap; Fig. 3(2))를 사용하였다. 사용한 광학 현미경(Olympus제품모델 BX51; Fig. 3(1))의 배율은 200배에서 800배까지 가능하며 상하단의 할로겐 광원을 사용하여 액적을 가시화하였다. 특히 하단의 광원에는 콘덴서를 설치하여 조사되는 빛을 더욱 밝게 하였다. 카메라로 취득한 영상은 이미지 보드(DT 3155, Data Translation)가 내장된 컴퓨터(Fig. 3의 (7))

에 저장한 뒤 후처리하도록 하였다. 화상처리 소프트웨어로는 MetaMorph (Molecular Device사)를 사용하였다.

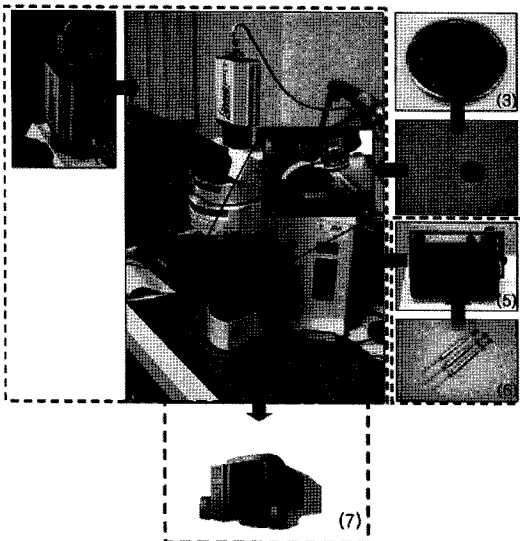
PDMS를 이용하여 만든 마이크로 채널(Fig. 3의 (3, 4)) 내로 일정한 유량을 주입시키기 위하여 시린지 펌프(Fig. 3(5))를 사용하였으며 채널의 유체 유입부와 시린지 펌프를 튜브로 연결하고 50 μ l, 25 μ l 용량의 시린지(Fig. 3(6))에 들어있는 유체를 마이크로 채널 내부로 흐르게 하였다.

2.4 작동유체의 특성

실험에 사용된 작동유체의 표면장력, 점성계수와 밀도는 각각 표면장력 측정장치(Wilhelmy 방식, Sigma 703), 점성계수 측정장치(회전원통 방식, Rion VT-03), 그리고 전자저울을 사용하여 측정하였다. 먼저 증류수와 식용유, 그리고 계면활성제가 포함된 증류수의 표면장력을 각각 측정하였다. 측정오차를 줄이기 위하여 10회 반복 실험을 수행하고 이 데이터들을 평균하여 사용하였다. 식용유의 비중은 0.86, 표면장력은 41 mN/m이며, 증류수의 경우는 비중이 1, 표면장력이 69.6 mN/m이다. 계면활성제가 1% 농도로 포함된 증류수의 경우 표면장력은 29.7 mN/m이다.

본 연구에서는 두 가지의 서로 다른 작동유체를 사용하여 액적을 생성시키기 때문에 두 유체 사이의 경계면에서의 표면장력이 직접 유동에 영향을 미치게 된다. 위에서 제시한 표면장력의 데이터는 정확히 말하여 작동유체와 공기사이의 표면장력이다. 두 유체 사이의 표면장력 측정 결과는, 증류수와 식용유 사이에서 20.1 mN/m, 1% 농도의 계면활성제가 포함된 용액과 식용유 사이에서 2.2 mN/m로 계면활성제가 조금만 첨가되어도 유체 상호간 경계면에서의 표면장력이 크게 차이가 남을 확인할 수 있었다. 한편, 점성계수는 순수 증류수의 경우가 가장 작은 값을 나타내며 계면활성제의 농도가 높아질수록 값이 약간씩 증가하지만 그 차이는 크지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 4는 계면활성제가 포함된 증류수가 공기와 접촉한 경우와 식용유와 접촉한 두 가지 경우에 있어서 측정된 표면장력의 측정결과를 그래프로 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 공기와 접촉하였을 때에 비하여 식용유와 접촉하였을 때의 표면장력이 상대적으로 낮은 값을 나타내며 계면활성제의 농도 1% 미만에서 미셀(micelle)이 형성됨을 이해할 수 있다.



- (1) Microscope (2) High speed camera
- (3) PDMS (4) Micro channel
- (5) Syringe pump (6) Micro syringes
- (7) Computer

Fig. 3. Experimental setup for visualization of droplets.

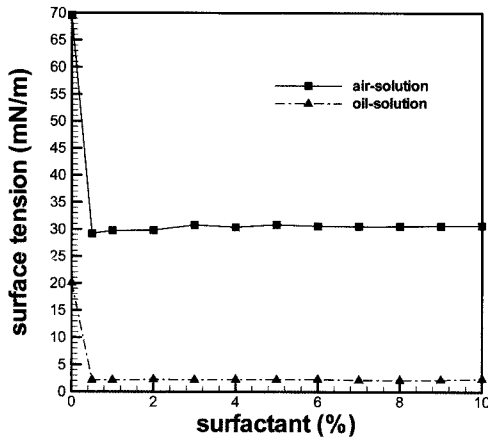


Fig. 4. Measured surface tension of the water-oil mixture in the air and oil depending on the surfactant conc.(%).

2.5 실험방법

작은 용량의 시린지에 작동유체를 주입한 후, 용액 A가 주입된 시린지는 튜브를 수평방향 채널의 입구에, 용액 B가 주입된 시린지는 2개의 수직방향 채널의 입구에 연결한 후, 시린지 펌프를 이용하여 채널 내로 유체를 유입하였다. 실험에서 시린지는 50 μl , 25 μl 의 두 가지 용량이 사용되었다. 채널 내에서 형성되는 액적은 고속 카메라를 이용하여 노출 시간을 1/100~1/500 s로, 초당 25~60프레임씩 촬영하였으며 이렇게 촬영한 영상으로부터 Photoshop 프로그램을 이용하여 액적의 크기와 액적 사이의 거리 등을 구하는 데이터 처리 과정을 수행하였다.

제작한 채널은 작동유체 중 식용유에 의해서 쉽게 오염된다. 장시간 채널을 사용할 경우 채널의 각 면에 식용유가 부착되어 실험 결과에 영향을 미치기 때문에 충분

한 개수의 동일한 채널을 제작하여 실험에 사용하였다.

액적의 가시화는 동일한 파라미터의 실험에서 20번 씩 반복 실험하고 매회 데이터를 추출, 평균값을 취하는 방법을 통해서 실험결과와 신뢰도를 높이고 노력하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 식용유 유량의 변화에 따른 액적특성 변화

Figs. 5~8은 증류수의 유량 Q_{water} 를 0.25 $\mu\text{l}/\text{min}$ 과 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 두 가지로 하고 각각에 대해 식용유의 유량 Q_{oil} 을 2 $\mu\text{l}/\text{min}$ 와 4 $\mu\text{l}/\text{min}$ 로 하였을 때의 마이크로 채널 내부에서의 액적의 형성 및 발달에 대한 가시화 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 증류수의 유량에 상관없이 식용유의 유량이 상대적으로 작을 경우에는 채널 내부에서 생성되는 액적이 크고, 생성 주기도 길어지지만, 식용유의 유량이 증가함에 따라 액적의 크기가 작아지며 생성 주기도 짧아지는 생성특성을 보인다. 수직방향의 채널로 유입되는 식용유의 유량이 증가하면 수평 방향 유입 유체의 흐름이 가늘어지기 때문에 생성되는 액적도 작아질 수밖에 없을 것이다. 또한 채널 내부로 유입된 증류수는 모두 채널 하부로 흘러가야 하기 때문에 액적이 작아지면 그만큼 액적의 생성 속도가 빨라질 수밖에 없다(이에 관해서는 3.2절에서 상세히 설명할 것이다.)

한편, 상대적으로 식용유의 유입 유량이 작은 Fig. 5의 경우 액적이 분리된 후 하부로 흘러가면서 탄두모양의 형태를 가지는 것을 볼 수 있으나, 증류수의 유량이 증가한 Fig. 6의 경우에는 구의 형태를 보인다. 한편 증류수의 유량이 증가하면 액적의 크기도 당연히 커진다(Fig. 7, 8).

Fig. 9와 10은 증류수의 유량을 0.251.25 $\mu\text{l}/\text{min}$ 로,

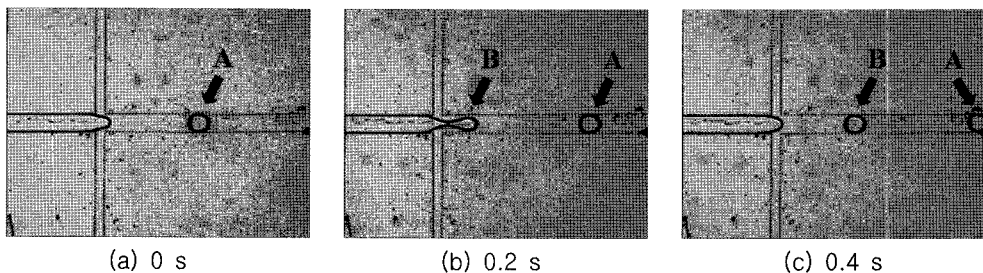


Fig. 5. Visualization of droplet formation for $Q_{\text{water}} = 0.25 \mu\text{l}/\text{min}$ and $Q_{\text{oil}} = 2 \mu\text{l}/\text{min}$.

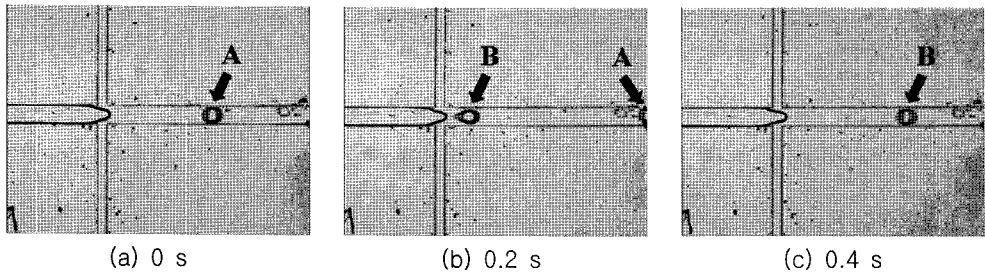


Fig. 6. Visualization of droplet formation for $Q_{\text{water}} = 0.25 \mu\text{l}/\text{min}$ and $Q_{\text{oil}} = 4 \mu\text{l}/\text{min}$.

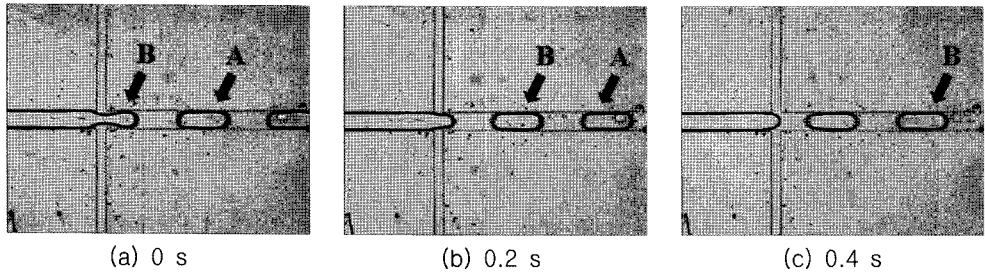


Fig. 7. Visualization of droplet formation for $Q_{\text{water}} = 1 \mu\text{l}/\text{min}$ and $Q_{\text{oil}} = 2 \mu\text{l}/\text{min}$.

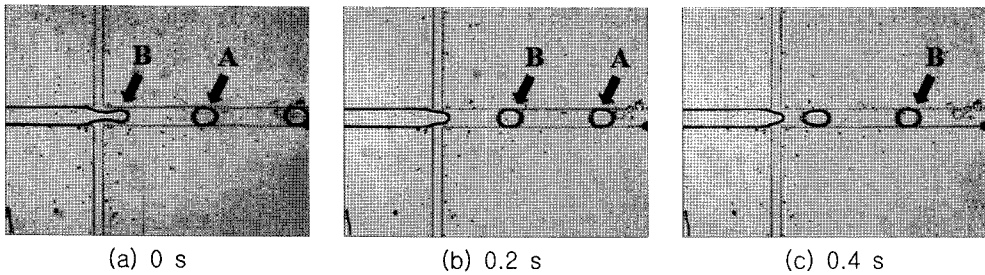


Fig. 8. Visualization of droplet formation for $Q_{\text{water}} = 1 \mu\text{l}/\text{min}$ and $Q_{\text{oil}} = 4 \mu\text{l}/\text{min}$.

식용유의 유량을 $24 \mu\text{l}/\text{min}$ 로 변화시켜 가면서 액적의 생성 주기 및 액적 사이의 거리를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 수평방향 유입유량이 일정할 때, 수직방향 유입유량이 증가할수록 액적 간의 거리는 증가하고, 액적의 생성 주기는 짧아진다. 또한 수직방향의 유입유량이 일정할 때, 수평방향의 유입유량이 증가할수록 액적간의 거리는 감소하고, 액적의 생성 주기는 짧아짐을 알 수 있다.

3.2 표면장력의 변화에 따른 액적특성 변화

Fig. 11과 12는 계면활성제의 영향을 알아보기 위해 수용액의 농도를 1%로 한 경우에 대하여 수용액의 유량을 $0.5 \mu\text{l}/\text{min}$ 로 고정한 후, 식용유의 유량을 $2 \mu\text{l}/$

min (유량비 $R_Q=4$)와 $3.5 \mu\text{l}/\text{min}$ (유량비 $R_Q=7$)로 하였을 때의 채널 내부에서의 액적의 형성 및 발달에 대한 가시화 결과를 비교한 것이다. Fig. 11과 12의 결과를 통해서 알 수 있듯이 계면활성제를 첨가하면 순수한 증류수와 식용유를 사용한 결과보다 액적의 생성 주기도 짧고(즉, 또한 액적의 생성 빈도가 높다) 크기도 작음을 알 수 있다. 계면활성제가 1% 포함된 수용액과 순수 증류수의 물성치를 비교해보면 표면장력에서 큰 차이가 난다(Fig. 4 참조). 즉, 이러한 표면장력의 큰 차이는 액적의 생성속도에 이 같이 큰 영향을 미침을 알 수 있으며 이로 인해서 액적의 생성속도는 증류수-식용유의 경우에 비해서 상당히 빠르게 형성된다.

이러한 표면장력의 영향은 Fig. 13에서 제시한 것처럼

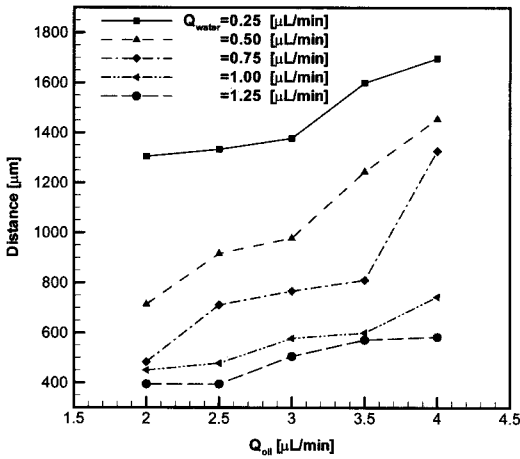


Fig. 9. Distance between droplets for various Q_{water} and Q_{oil} .

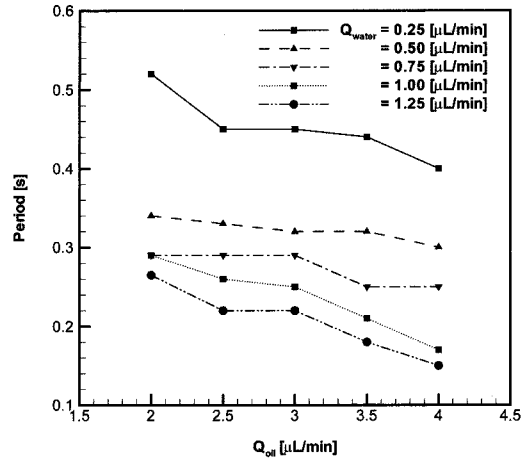


Fig. 10. Period of droplet formation with various Q_{water} and Q_{oil} .

림 채널 내에서 액적이 형성되는 원리로 설명할 수 있다. 수평 방향으로 유입되는 유체는 두 유체 사이의 계면을 하류 쪽으로 블록하게 하려는 경향이 있으며 수직 방향으로 유입되는 유체는 계면의 상하부로부터 계면을 잘록하게 하여 액적으로 만들고자 하는 경향이 있다. 결국 수직 방향의 유입 유량의 영향이 커지면 액적 생성이 빨라지거나 더욱 잦아질 것임을 이해할 수 있다. 이를 표면장력과 압력의 균형원리로 설명하면 다음

과 같다. 경계면에서의 표면장력의 차이가 작을 경우 수평방향으로 유입되는 유체의 압력 P_A 와 평형상태를 유지하기 위해서는 경계면의 곡율이 커야 한다(Fig. 13a). 즉 액적의 크기가 작아지게 된다. 또한 수직방향으로 유입되는 유체의 압력 P_B 와도 평형상태를 이루기 위해서 상대적으로 더욱 오목한 형태가 되고 액적의 생성 주기가 짧아진다. 한편 표면장력의 차이가 큰 경우에는 이와 반대로 되는 것을 이해할 수 있다(Fig. 13b).

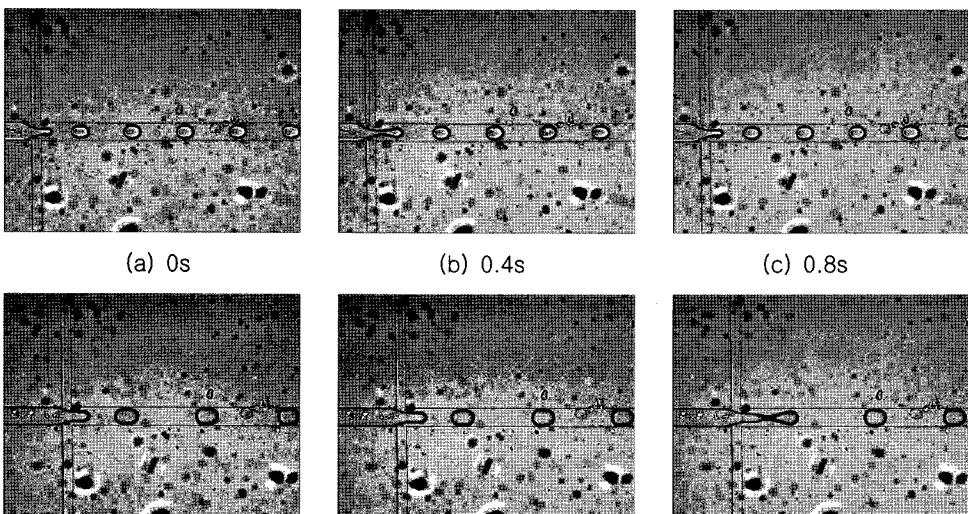


Fig. 11. Comparison of droplet formation between solution-oil (upper frames) and water-oil (lower frames) experiments at $R_Q=4$.

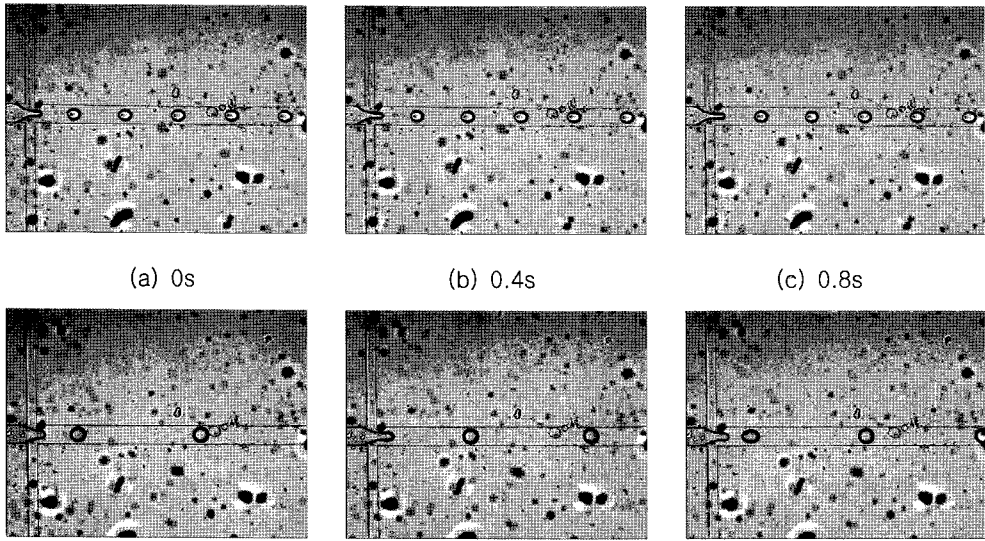


Fig. 12. Comparison of droplet formation between solution-oil (upper frames) and water-oil (lower frames) experiments at $R_Q=7$.

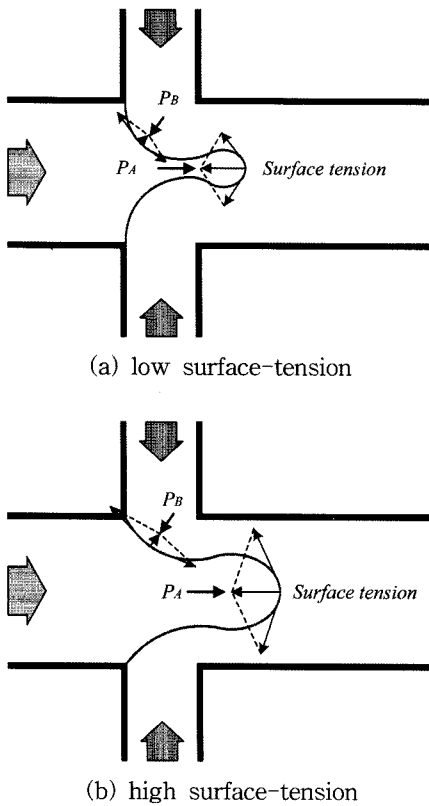


Fig. 13. Schematic illustrating the difference in the droplet formation with different surface tension.

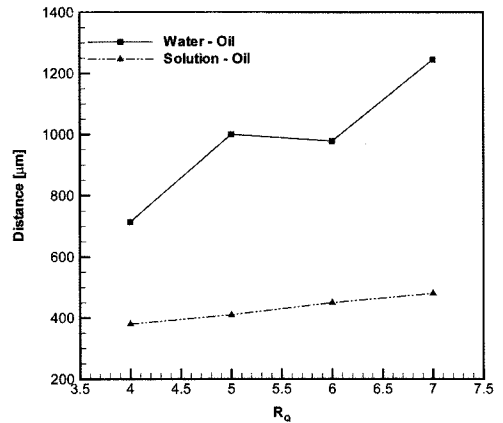


Fig. 14. Comparison of distance between droplets measured for different combination of liquids with various R_Q .

Figs. 14~16은 1% 수용액과 증류수의 유량을 $0.5 \mu\text{l}/\text{min}$ 로, 식용유의 유량을 $23.5 \mu\text{l}/\text{min}$ 로 변화시켜 가면서 액적의 생성 주기 및 액적 사이의 거리 및 액적의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. 1% 수용액-식용유와 증류수-식용유의 두 결과 모두 앞서 기술했던 결과와 마찬가지로 유량이 증가함에 따라서 액적간의 거리는 증가하며 주기가 조금씩 짧아지며 또한 액적의 크기는 전반적으로 작아지는 경향을 보인다.

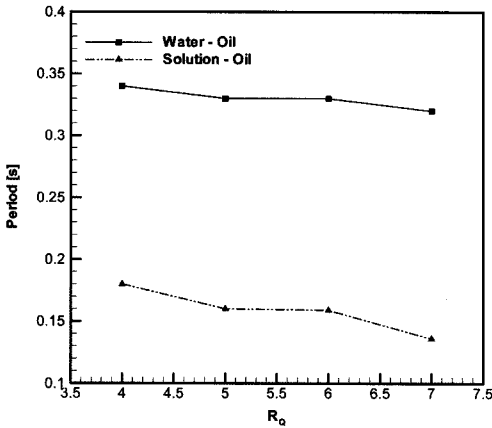


Fig. 15. Comparison of droplet-formation period for different combination of liquids with various R_o .

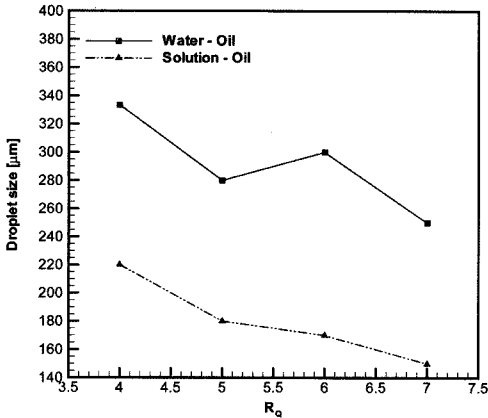


Fig. 16. Comparison of droplet size for different combination of liquids with various R_o .

마이크로 또는 나노 크기의 길이 척도를 가지는 유동현상에서는 체적력보다는 압력과 같은 표면력 및 표면장력 등이 더 중요하게 취급되어야 함을 본 결과를 통해서 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 십자형 마이크로 채널 내에서의 액적의 형성과 발달에 관한 실험을 수행하고 여러 가지 인자의 영향에 대해서 연구하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 압력과 표면장력의 평형원리를 적용함으로써 액

적 생성의 메커니즘을 설명할 수 있었다. 즉, 수평방향으로 유입되는 유체의 압력과 경계면에서의 표면장력이 평형상태를 유지하기 위해 액적 전방 경계면은 볼록한 형상을 나타내며, 수직방향으로 유입되는 유체의 압력과 경계면에서 표면장력이 평형상태를 유지하기 위해 액적 상하부 경계면은 오목한 형상을 나타내고, 이러한 과정의 마지막 단계에서 액적이 생성된다.

2. 수평방향 유입유량에 대한 수직방향 유입유량의 비가 증가하면 수직방향으로 유입되는 유체의 유량 증가와 이에 따른 압력 상승으로 인하여 경계면은 더욱 오목한 형상을 나타내고 이로 인하여 액적의 크기는 작아진다.

3. 수평방향 유입유량에 대한 수직방향 유입유량의 비가 증가하면 액적의 크기가 작아지므로 채널 내로 유입된 두 유체는 연속방정식을 만족하기 위하여 액적 간의 거리는 짧아진다.

4. 두 유체사이의 표면장력이 감소하면, 수평방향으로부터 유입되는 유체의 압력과 평형상태를 유지할 수 있도록 작은 액적이 생성되며 이로 인하여 액적의 생성빈도는 빨라지며 액적 간의 거리는 짧아진다.

5. 표면장력의 차이가 액적의 형성 및 발달에 현저한 차이를 일으키며 마이크로 또는 나노 크기의 길이 척도를 가지는 유동현상에서는 체적력보다는 압력과 같은 표면력 및 표면장력 등이 더 중요하게 취급되어야 함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(과제번호:2005-01091).

참고문헌

- 1) T. Nisisako, T. Torii and Higuchi T., 2002, "Preparation of Picoliter-sized Reaction/Analysis Chambers for Droplet-based Chemical and Biochemical System", Micro Total Analysis System, 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

- System, 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 System, pp. 327-330.
 - 4) Y. K. Suh and H. S. Heo, 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
 - 5) S. Y. Yoon, C. S. Ko, J. M. Kim and K. C. Kim, 2004, "Micro-PIV Measurement on the droplet formation in a microfluidic channel", Proceedings of the KSME 2004 Fall Annual Meeting, pp. 1534-1539
 - 6) S. Y. Yoon, C. S. Ko and K. C. Kim, 2004, "Micro-PIV Measurement of Water/Oil Two Phase Flows in a Y-Junction Microchannel", Trans. KSME (B), Vol. 28, No. 6, pp. 682-687