

미세 유체 플랫폼에서의 광력을 이용한 액적의 연속적인 제어 기술의 개발

정진호 · 조현준 · 하병항 · Ghulam Destgeer · 성형진[†]

Optical Manipulation of Droplets in a Microfluidic Platform

Jin Ho Jung, Hyunjun Cho, Byung Hang Ha, Ghulam Destgeer, and Hyung Jin Sung

Abstract. In the present study, the optofluidic droplet manipulation in a microfluidic platform was demonstrated via theoretical and experimental approaches. Optical scattering force and gradient force were used to separate and trap droplets. Two types of droplets were generated by a T-junction method in the microfluidic channel. While they approach a test region where the optical beam illuminates the droplets, they were pushed by the optical scattering beam. The displacement by the laser beam is dependent on the refractive index of the droplets. By using the optical gradient force, the droplets can be trapped and coalesced. In order to bring the droplets in a direct contact, the optical gradient force was used to trap the droplets. A theoretical modeling of the coalescence was derived by combining the optical force and drag force on the droplet.

Key Words: Droplet (액적), optofluidics (광유체역학), two-phase flow (다상유동), optical tweezer (광집계)

1. 서론

최근 마이크로 채널 내에서 이루어지는 여러 제어 기법에 의한 실험들을 통하여 면역학, 약물 전달, 암 조기 진단 등의 여러 분야로의 확장이 이루어지고 있다. 특히 이러한 마이크로 채널에서의 제어 방법 중 액적을 이용한 미세 유체적 기술이 주목 받고 있는데, 그 이유는 액적을 물질 대사의 기본 단위로 사용하여 여러 화학 물질을 합성 또는 검증하는 용도로 사용하는데 많은 이점을 가지고 있기 때문이다.[1] 액적이란 상이 다른 두 유체가 섞이지 않는 상태로 혼재하는 것을 말한다. 이러한 혼합 되지 않는 성질을 이용하여 실험 및 관찰의 대상이 되는 물질을 pico liter 단위로 분리하여 세밀하게 관찰할 수 있으며, 여러 화학 종의 오염 방지 등 미세 유체에서의 실험에 사용하기에 용이한 장점들을 가지고 있다[2]. 따라서 액적 기반의 미세 유체 플랫폼을 제작하여 기존의 생 화학 실험을 대체하여 증대된 효율을 가지도록 하는 연구가 많이 진행되고 있다.[3] 그러나 액적을 이용한 실험이 복잡한 공정을 거치는 기존의 실험을 대체하기 위해서는 액적을 조작하여 원하는 곳으로 보내거나 합쳐지게 하는 연구가 필연적이다. 이를 위하여, 미세 구조물[4], 전극[5], 음향

진동[6], 극부적인 열 전달[7] 등을 이용한 방법들이 제시되었다. 그러나, 이러한 연구들은 수동적으로 쓸 수 밖에 없거나, 미세유체 칩 공정 비용이 비싼 등 한계점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 샘플을 오염시키지 않으며, 미세유체 칩 공정 가격을 낮추면서 해당 물질들을 제어할 수 있는 장점을 가진 광 집계 (optical tweezer)를 이용하여 액적을 제어하는 기법을 구현하였다.

광력은 Ashkin의 연구를 통하여 dielectric 물질들을 제어할 수 있다는 사실이 알려졌으며[8], 샘플을 오염시키지 않으면서 마이크로 단위의 물체들을 옮길 수 있다는 점에서 여러 연구에 적용되어 왔다. 이러한 광력은 굴절률과 해당 물체의 표면에 따라 많은 영향을 받는다. 높은 굴절률의 물체가 낮은 굴절률을 가지는 주변 유체에 존재할 경우, 레이저 빔의 입사 방향으로, 축 방향으로는 물체를 끌어당기는 광구배력 (gradient force)을, 레이저 빔 방향으로로는 물체를 밀어내는 광산란력 (scattering force)을 받게 된다.

본 연구에서는 광 구배력과 산란력을 이용하여, 액적을 분리하거나 포획할 수 있는 마이크로 장치를 구현하였다. 먼저, 서로 다른 두 액적을 표면 지포 없이 광력만으로 분리하기 위해서 미세 채널 내부에서 T-junction 기법을 이

[†] Corresponding Author, KAIST, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea, hjsung@kaist.ac.kr, Tel: 042-350-3027

용하여 두 종류의 액적을 생산하였다. 이렇게 생성된 두 종류의 액적은 서로 다른 굴절률을 가지도록 하였으며 미세 유로를 따라 이송되었다. 레이저 빔은 액적이 이동하는 방향과 수직인 방향으로 조사되었으므로, 광산란력을 받으며, 이 힘은 액적의 크기와 굴절률이 커짐에 따라 증가하므로 높은 굴절률을 가지는 액적은 큰 광력을 받아 상대적으로 낮은 굴절률을 가지는 액적과 분리 될 수 있었다.

한편 액적을 분리하는 것뿐 아니라, 광구배력을 이용하여 액적을 포획하고 다른 액적과의 합성을 통하여 융합실험에 응용할 수 있음을 보였다. 이 때 레이저 빔을 액적이 지나가는 방향과 수직하는 방향으로 조사하되, 미세 유로를 좁게 하여 광산란력에 의해 움직일 수 있는 여지를 줄였다. 이렇게 하여 광구배력의 영향을 증가시키면, 액적이 움직이지 않고 포획되는 현상을 보인다. 액적은 연속적으로 생성되어 이송되기 때문에 앞서 포획된 액적이 멈춰있을 경우 부딪혀서 합쳐지게 된다. 이러한 결과를 통하여 액적을 이용한 생화학적 실험 및 lab on a chip 응용 기술에 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 본 론

2.1 이론

액적과 같은 구형 유전체에 작용하는 광력을 해석하기 위해 크게 Rayleigh scattering, Mie Theorem, Photon stream method의 세가지 방식이 사용되고 있다. 본 연구에서는 해당 액적의 지름이 약 40 ~ 80 μm 에 해당하는 데 이는 레이저 광원의 파장($\lambda = 1064 \text{ nm}$)과 비교할 때 매우 큰 값이므로 광력은 광자흐름법에 의해 도출될 수 있다. 액적에 작용하는 힘은 레이저광의 평행한 방향과 진행방향으로 작용하는 광구배력과 산란력으로 나뉜다.[9]

$$F_g = \frac{n_1 r_d^2}{2c} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\rho, z) Q_g \sin 2\theta_1 \cos \varphi d\theta_1 d\varphi, \quad (1)$$

$$F_s = \frac{n_1 r_d^2}{2c} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\rho, z) Q_s \sin 2\theta_1 d\theta_1 d\varphi \quad (2)$$

이 때, F_g , F_s 는 각각 광구배력과 광산란력을 나타낸다. r_d 는 액적의 반지름이며, n_1 은 액적의 굴절률을 의미

한다. $I(\rho, z)$ 는 레이저 빔을 기준으로 하여 방사 방향으로의 ρ 와 빔 축 방향의 z 위치에서의 광 강도를 나타내며, Q_s 와 Q_g 는 각각 단일 광자의 굴절 현상에 의한 빔 축 방향과 방사 방향으로의 운동량 변화를 나타낸다. 이 때 광자는 레이저 빔 축의 수평한 각도로 입사된다고 가정한다.

본 연구에서는 광산란력을 주로 이용하여 액적의 분리에 응용하였고, 광구배력을 통하여 액적의 포획 및 융합 현상을 관찰하였다. 미세유로 내부에 있는 액적에는 크게 광력과 항력이 작용한다고 가정할 수 있으며 항력은 Stokes drag force에서 미세유로의 형상학적 특성을 고려한 유효 점도항 및 항력 계수들을 적용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$F_d = 6\pi\mu^*r_d(k_1u_\infty - k_2u_d) \quad (3)$$

F_d 는 Stokes drag 를 의미하고, μ^* 는 유효 점도를 의미한다. k_1 과 k_2 는 각각 항력 계수를 의미하며, 이 수치는 각각 정지해 있는 물체에 가해지는 유체에 의한 항력의 보정 값과 유속이 없는 유체 에서 움직이는 물체의 항력 보정 값을 의미한다. u_∞ 는 액적이 없을 시 동일 유선에서의 유속이며, u_d 는 액적의 속도이다. 액적을 구형의 입자로 가정할 때 액적의 거동은 입자 이동 식에 대입하여 예측할 수 있다.[10]

2.2 액적의 분리

먼저 액적을 분리하는 실험은 아래 도식에 나타나 있다. 두 종류의 액적이 생성되어 미세유로를 따라 이송되었으며, 레이저는 액적이 지나가는 방향과 수직하게 입사되었다.

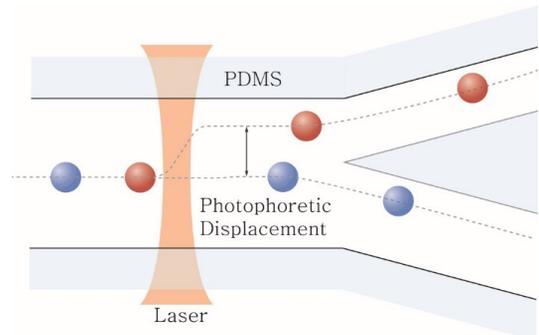


그림 1. 광력을 이용한 굴절률기반의 액적의 분리

액적이 받는 광력은 액적의 크기와 굴절률이 클수록 높

아지는 경향을 가지고 있는데, 본 연구에서는 두 액적의 크기는 비슷하지만 다른 굴절률을 가지고 있으므로 굴절률을 기반으로 하여 분리를 할 수 있다는 것을 보여 주었다. 이 때 광력에 의해 진행방향과 수직으로 밀려난 거리를 photophoretic displacement라고 하며 이는 광력에 의한 분리 성능의 기준이 될 수 있다. 본 실험을 위해서 액적의 크기를 바꾸지 않으면서 전체 유량을 조절하여 액적의 거동을 관찰하기 위하여 sheath flow를 도입하였다. 광력을 주기 위해서 1064 nm 레이저를 이용하였고 빛을 적절하게 집속시키기 위해서 대물렌즈를 사용하였다. 액적과 광원의 정렬이 중요하기 때문에, 미세유체 칩을 5축 스테이지를 이용하여 정렬하였다. 미세 유체칩은 soft lithography 기법을 이용하여 polydimethylsiloxane (PDMS)를 이용하여 제작 하였고, 표면을 소수성으로 처리하기 위해 EGC-1720 (3M) 용액을 채널 내부에 유입시킨 뒤 상온에서 건조시키는 방법으로 처리하였다. 미세 유체 칩의 폭은 600 μm , 높이는 140 μm 이다. 연속상의 유체로, HFE-7500 (3M)에 1H, 1H, 2H, 2H - perfluoro-1-octanol 10v/v%의 혼합 용액을 사용하였고 액적의 유체로 순수 deuterium oxide (D_2O , Sigma aldrich)와 이에 calcium chloride를 6M로 혼합한 용액을 각각 사용하였다. 액적의 융합을 방지하기 위하여 분산상에 tween 20용액을 1 wt%의 농도로 혼합하였다.

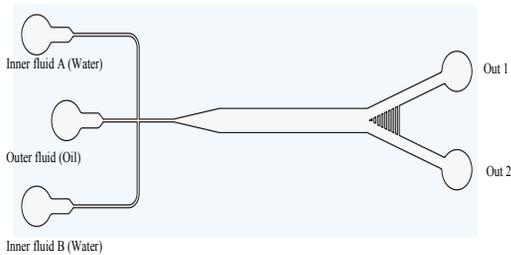


그림 2. 액적 분리에 사용된 미세 유체 형상. 두 종류의 액적을 T-junction 기법으로 생성 하였으며, 그 후 칩 중앙부에서 광력을 이용하여 실험 하였다.

아래 그림에 각기 다른 두 액적의 광력에 의한 거동이 나타나 있다. 액적 A의 경우 높은 굴절률을 가지므로 큰 광산란력 및 구배력을 가지게 되며 따라서 비교적 큰 photophoretic displacement를 가지는 것을 확인할 수 있다. 반면 액적 B의 경우 연속상과 비슷한 굴절률을 가지는데, 레이저 빔이 충분히 굴절 되지 못하므로 낮은 광력을 받게 된다. 그 결과 액적 B는 액적 A와 비교하여 액적의 진행방향과 수직으로 적게 움직이게 되는 것을 확인할

수 있다. 위 결과를 통해 액적들을 별도의 센서가 없이도 굴절률에 기반하여 분리할 수 있는 것을 알 수 있으며, 광력을 높여줄 수록 이러한 분리 효율은 증가한다.

2.3 광력을 이용한 액적의 포획

위 액적의 분리 실험을 통하여 이미징 툴 없이 굴절률 기반의 화학 종 분리가 가능하다는 것을 보였다. 본 연구에서는 추가적으로 광구배력을 이용하여 마이크로 채널에서 액적의 포획 및 융합에 대한 실험을 수행하였다. 액적의 포획에 대한 실험 도식이 아래에 나와 있다. 두 종류의 액적을 생성한 뒤 미세 유로를 따라 이동할 때 아래와 같이 레이저를 미세 유로에서 좁은 폭을 가지는 높이 방향으로 조사해 주었다. 광산란력에 의해 액적이 이동할 수 있는 거리가 적으므로, 액적은 주로 레이저 빔 축으로 끌려 당겨지는 광구배력을 받으며 레이저 에너지가 높은 경우에 포획된다. 이 때 액적은 연속적으로 생성되어 이동하는 중에 있기 때문에 앞서 액적이 포획되면 뒤의 액적은 따라오면서 자연스럽게 융합된다. 그러므로 광력을 이용하여 서로 다른 종류의 화학 종들을 합성할 수 있다.

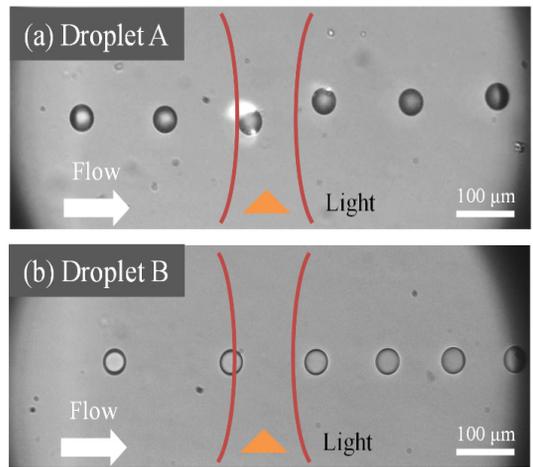


그림 3. 액적 A와 액적 B의 광력 하에서의 거동. 상대적으로 높은 굴절률을 가지는 액적 A가 액적 B에 비해 유동 진행 방향과 수직으로 더 많이 이동하는 것을 알 수 있다.

이 때 액적에 가해지는 힘은 크게 광력과 항력으로 구분할 수 있다. 액적이 감속할 때 유체에 대한 상대 속도가 증가하므로 항력은 그에 비례하여 증가한다. 그러므로 액적의 위치와 상대속도에 따른 광력 및 항력을 비교함으로써 액적의 거동을 파악할 수 있으며, 이는 앞서 설명하였던 광자흐름법 등을 이용하여 계산할 수 있다. 아래 그림

에 시간에 따른 광력 및 항력, 액적의 위치를 나타내었다. 계산을 위하여, 미세유체 폭은 그 너비와 높이가 각각 500, 90 μm 으로 설정 하였으며, 레이저 빔폭은 5.08 μm , 액적의 반지름은 24.2 μm , 유량은 155 $\mu\text{l/hr}$ 이다. 액적의 굴절률은 1.4234, 연속상의 유체 굴절률은 1.2992로 하였고, 광력을 2~5 W로 변화시키면서 계산을 수행하였다. 그래프에서 양의 값을 가지는 힘은 액적의 진행방향으로 가해진 힘을 나타낸다. 즉 그림 4 (a)에서 약 20ms 까지 가해진 광력은 액적을 진행방향으로 가속시키는데 이는 액적이 빔 축으로 진입하기 전 광구배력이 빔 축으로 끌어 당기려는 힘으로 작용하기 때문이다. 액적이 빔 축을 지나고 나면, 광구배력은 액적을 빔 축으로 끌어당기려고 하므로, 액적을 감속시킨다. 이 때 액적의 속도가 줄기 때문에 레이저 빔 안에서 체류하는 시간이 길어지며, 이는 레이저 빔과 액적 사이의 운동에너지 교환량을 크게 하므로 이 때 액적이 포획될 가능성이 있다.

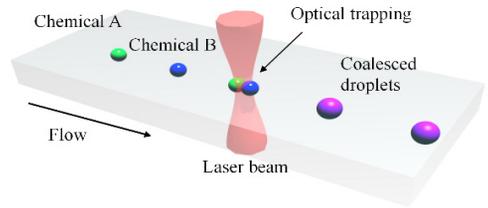
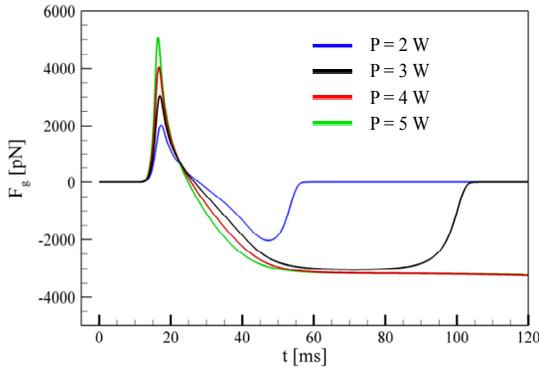


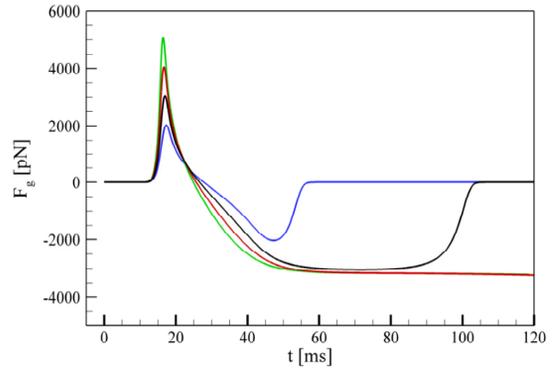
그림 4. 광력을 이용한 액적의 포획 및 융합 실험 도식도

한편 항력은 액적의 유체에 대한 상대속도에 비례하는 경향을 가지고 있으므로, 광력에 의한 액적의 움직임에 반대되는 방향으로 작용하는 특성을 나타낸다.

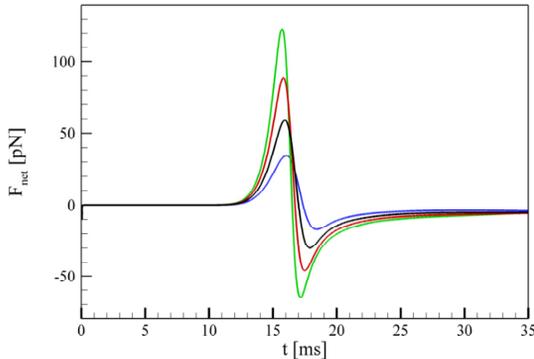
(a) Optical gradient force



(b) Drag force



(c) Net force



(d) Droplet position

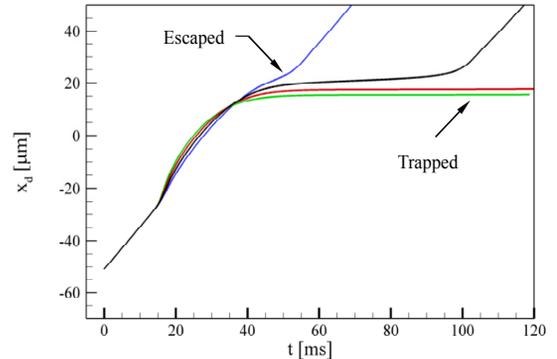


그림 5. 액적의 위치 및 역학 관계에 대한 수치해석 결과. (a) 액적에 가해지는 광력의 시간에 대한 변화량 (b) 액적에 가해지는 항력의 시간에 대한 변화량 (c) 시간에 대한 광력과 항력의 합력 (d) 시간에 대한 액적의 위치 변화

향력과 광력을 비교해 보면, 두 힘은 비슷한 정도의 힘을 주기 때문에, 각각의 힘을 분석하는 것으로는 액적의 경로를 예측하기 힘들다. 따라서 그 힘의 합력(그림 4(c))을 분석하여 액적의 거동을 파악하여야 한다. 합력은 빔축을 지나기 전에 액적의 속도를 증가하는 방향으로 가해지게 되고, 액적이 빔축을 벗어나면서 감속시키게 된다. 그림을 볼 때 액적을 증가시키는 합력이 더 큰 값을 가지나, 힘을 가해주는 시간은 액적을 감소시키는 방향으로 더 길게 작용한다. 따라서 액적의 운동량은 힘의 합력을 시간에 대해 적분한 값이라고 볼 수 있으므로, 운동량 교환의 총 합은 액적을 감소시키는 방향으로 작용하는 것을 알 수 있다. 그러나 단순히 액적의 속도를 감속시키는 것에 그치지 않고 포획하기 위해서는 일정 이상의 광력을 필요로 한다. 본 실험에서 사용된 조건에 의하면 이는 4 W 이상의 광력을 필요로 하며, 실험 조건에 따라 가변한다. 이 결과를 바탕으로 액적의 포획을 위한 실험 조건을 설립할 수 있으며, 추후에 액적의 포획 및 융합을 통한 화학 실험의 소형화에 사용될 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 광력을 이용하여 액적을 제어하는 미세 유체역학적 기법을 개발하고 이를 이론적, 실험적 기법으로 연구하였다. 광력을 이용한 액적의 분리 기술을 실험적으로 규명하였고, 액적의 거동에 대한 이론적 해석을 적용하였다. 이러한 해석은 액적의 포획 및 융합에 대한 실험적 연구에도 응용이 가능할 것이다.

후 기

This work was supported by the Creative Research Initiatives (No. 2014-001493) program of the National Research Foundation of Korea.

참고문헌

- (1) Teh, S. Y., Lin, R., Hung, L. H. and Lee, A. P. (2008). "Droplet microfluidics." *Lab Chip* 8(2), pp.198-220.
- (2) Song, H., Chen, D. L. and Ismagilov, R. F. (2006). "Reactions in droplets in microfluidic channels." *Angew Chem Int Ed Engl* 45(44), pp.7336-7356.
- (3) Kintses, B., van Vliet, L. D., Devenish, S. R. A. and Hollfelder, F. (2010). "Microfluidic droplets: new integrated workflows for biological experiments." *Current Opinion in Chemical Biology* 14(5), pp. 548-555.
- (4) Christopher, G. F., Bergstein, J., End, N. B., Poon, M., Nguyen, C. and Anna, S. L. (2009). "Coalescence and splitting of confined droplets at microfluidic junctions." *Lab Chip* 9(8), pp.1102-1109.
- (5) Velev, O. D., Prevo, B. G. and Bhatt, K. H. (2003). "On-chip manipulation of free droplets." *Nature* 426(6966), pp.515-516.
- (6) Franke, T., Abate, A. R., Weitz, D. A. and Wixforth, A. (2009). "Surface acoustic wave (SAW) directed droplet flow in microfluidics for PDMS devices." *Lab Chip* 9(18), pp.2625-2627.
- (7) Baroud, C. N., de Saint Vincent, M. R. and Delville, J. P. (2007). "An optical toolbox for total control of droplet microfluidics." *Lab Chip* 7(8), pp.1029-1033.
- (8) Ashkin, A. (1970). "Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure." *Physical Review Letters* 24(4), pp.156-159
- (9) Kim, S. B. and Kim, S. S. (2006). "Radiation forces on spheres in loosely focused Gaussian beam: ray-optics regime." *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics* 23(5), pp.897-903.
- (10) van der Sman, R. G. (2010). "Drag force on spheres confined on the center line of rectangular microchannels." *J Colloid Interface Sci* 351(1), pp. 43-49.