

마이크로채널 내에서 DROPLET 생성, 분기 및 분리에 관한 연구

정은호* · 고정상* · 타카히로 아라카와** · 슈이치 쇼지** · 김경천†

A Study of Droplet Generation, Fragmentation and Separation in Microchannel

Eun Ho Jeong, Jeung Sang Go, Takahiro Arakawa, Shuichi Shoji and Kyung Chun

Abstract

Study of a micro chemical plant consisted with droplet generation, digital sorting and separation was conducted. The droplet generation was quantitatively characterized. The digital sorting brought effective reaction by shortening the droplet size and the pitch of droplet generation simultaneously. To prevent the unfavorable higher order reaction, perfect separation of droplets was visualized.

Key Words : Microchannel (마이크로채널), Micro Droplet (미소액적), Droplet Generation (액적생성), Digital Sorting (디지털분류), Separation (분리)

1. 서 론

마이크로 스케일의 기술은 새로운 화학물질과 의 약의 발견에 도전한다. 그것은 반응조건들의 정교한 제어가 가능하고 일정한 확산거리를 가지는 화학반응시 미소 체적에 의한 효과적인 반응을 시킬 수 있기 때문에 전통적인 반응 경로로서는 불가능하였던 민감한 화학적 반응을 가능하게 한다. 또한, 매우 반응성이 강하고 독성이 강한 화학물질이나 가스를 이용한 경우에도 안전하게 반응을 시킬 수 있다. 불용성 두 유체가 microchannel로 유입될 때, 두 유체의 계면에서

hydrodynamic instability에 의해 droplet이 생성된다. 초소형 제조기술을 이용하여 organic phase와 water phase 용액의 화학물질들의 혼합을 이용하여 droplet기반의 micro chemical processing plant를 개발하였다.

G.I. Taylor 에 의해 droplet break-up의 첫번째 연구 이후, 수많은 계속되는 연구자들에 의해 droplet 생성은 viscous stress가 surface tension effect보다 클 때 발생한다고 결론내었다. 이 논문은 micro chemical plant의 kernel chemical process에 대해 실험적으로 연구를 수행하였다.

† 부산대학교 기계공학과
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

* 부산대학교 기계공학과

** 와세다대학교 전자정보통신학과

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 droplet phase flow를 이용한 순차적 화학반응기의 개략도

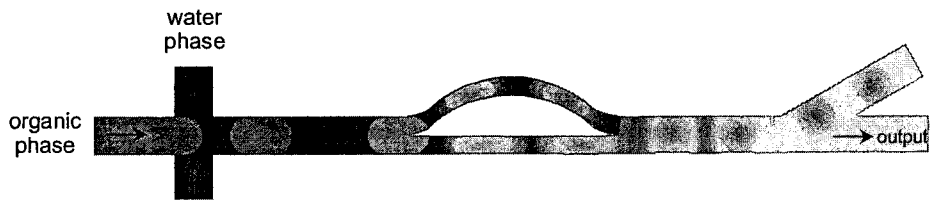


Fig. 1 Sequential processes of the droplet flow



Fig. 2 Fabricated on-line micro chemical plant

를 나타내고, Fig. 2는 실리콘(silicon)을 기반으로 deep RIE공정에 의해 만들어진 마이크로채널의 SEM 이다. droplet 생성, 분기와 분리가 순서대로 구성되어 있다.

Droplet들은 십자형태로 교차된 microchannel에서 생성된다.

두갈래로 나누어진 channel은 droplet들을 나누고 효과적인 반응을 얻기 위해 디지털형태로 분리한다. 분리 부분에서는 하나의 채널이 세개의 microchannel로 나뉘면서 반응이 끝난 droplet들 분리해 낸다. 각각의 channel 크기는 가로 100 µm, 세로 100 µm이다.

Organic phase로 사용된 Buthyl alcohol은 십자 채널의 가운데 부분으로 유입되고, 3% wt Ethylene- diamine을 포함하는 water phase 용액이 두개의 측면 channel로부터 유입된다. 두개의 불용성 유체를 주입하기 위해 syringe pump들이 사용하였다. droplet phase flow를 가시화하고 특성을 관찰하기 위하여 high speed CCD camera (Photron Fastcam)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Droplet 생성

광학현미경과 고속카메라를 이용하여 Droplet flow의 영상이미지를 획득하고(Fig. 3) 이미지 처리를 통해 droplet의 크기, 피치와 생성률등의 데이터를 획득하였다. 생성률은 단위시간당 생성된 droplets들의 개수로서 정의된다.

Fig. 4에서와 같이, 입구 유량비(ratios of inlet flowrate)는 아래와 같이 정의 된다.

$$Ratio = \frac{2Q_w}{Q_o} \quad (1)$$

여기서, *Ratio*는 입구 유량비, *Q_w*는 water phase flow rate, *Q_o*은 organic phase flow rate를 나타낸다. 입구유량비가 증가함에 따라, droplet의 크기는 100 µm에서 300 µm 구간에서 감소하는 반면 pitch는 증가한다. 생성률은 유량

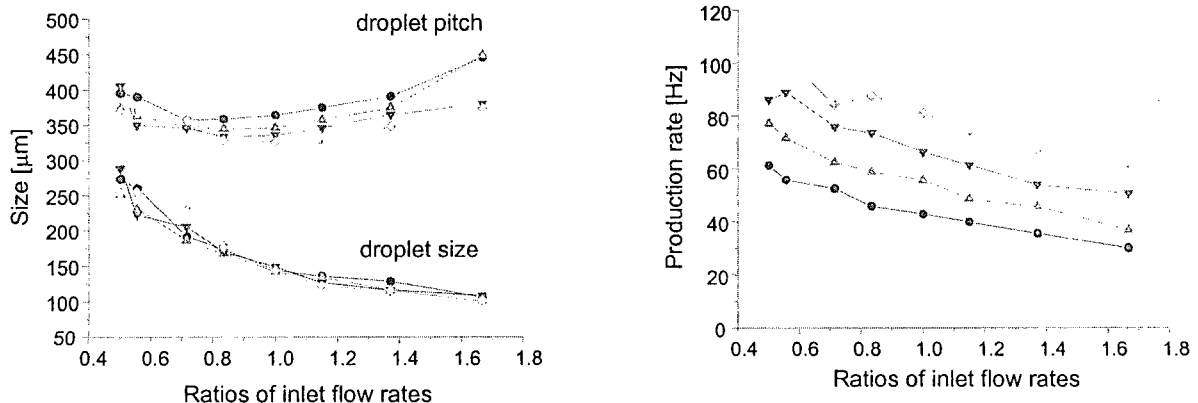


Fig. 3 Evaluation of droplet size, pitch and generation rate by increasing the ratio of flow rates.

비가 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 보여주고 있다. 이 결과들을 통해 droplet phase flow에서 droplet 크기와 피치의 통제 가능성을 알 수 있다.

피치가 가장 긴 경우에 해당하는 droplet의 최소 크기는 채널 폭에 의존적이다.

3.2 Digital Sorting

대부분의 화학반응은 Droplet의 경계면을 통하여, 확산에 의해 일어난다.[5]. droplet 생성의 결과에 의하면, droplet의 최소 크기에서는 최대의 피치를 나타낸다.

이는 반응을 종료하기 위하여 더 많은 시간이 필요하다는 것을 의미한다. 반면, 최소의 피치를 만들기 위해서는 droplet의 크기가 최대가 된다. 이는 droplet의 과도한 size 로 인해 효과적인 화학반응을 일으키기 힘들다. 따라서, 효과적인 화학반응과 비용을 고려하면, size와 pitch의 동시적인 감소시킬 필요가 있다.

Digital sorting은 큰 droplet을 여러 개의 작은 droplet으로 나누고 bypass channel을 통하여 흐르는 분리된 작은 droplet들은 straight channel보다 거리가 길고 압력손실에 의해 속도가 작아지기 때문에 하나의 droplet에서 분리된 두 개의 droplet들을 체계적으로 분류할 수 있으므로 그 해결책을 제공한다.[6].



Fig. 4 Visualization of droplet generation.

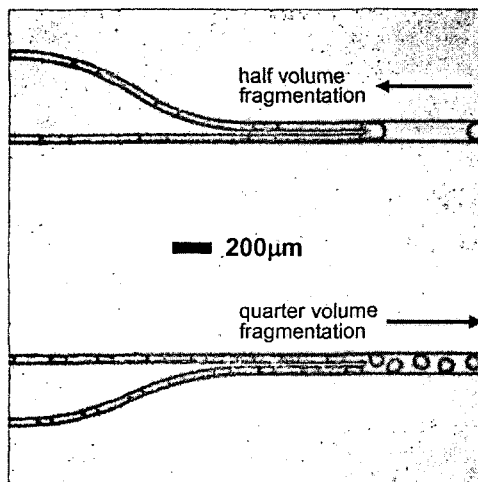


Fig. 5 Visualization of droplet generation.

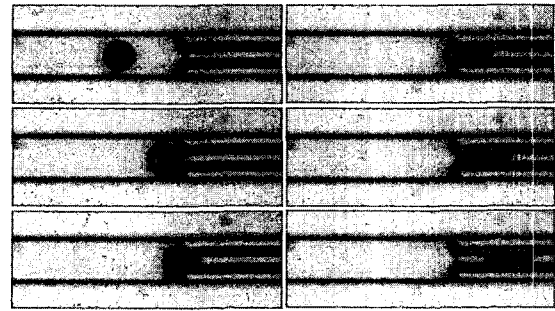


Fig. 6 In-channel separation of the reaction-completed droplets

Digital sorting을 얻기 위하여, channel은 원래 channel의 폭의 절반을 가지는 straight channel과 bypass channel로 나누어진다(Fig. 2). Fig. 5는 droplet 의 1/4체적 fragmentation과 조직적인 분류체계 보여준다. 이것은 digital sorting이라 불리는 보다 작은 droplet 크기와 짧은 피치를 보여준다.

3.3 Droplet Separation

필요한 반응이 지나면, droplet들은 2차반응 또는 그 이상의 반응이 이루어져 순도가 떨어지는 반응의 경우, 재 정제가 까다롭고 비용이 많이 든다. 이를 방지하기 위하여 요구된 반응 시간이 끝나는 부분에서 즉시 분리되어야 한다. Fig. 6은 droplet들의 panoramic separation을 보여준다. pelican mouth의 형상을 한 중앙의 separation channel은 반응이 완료된 droplet들을 흡입한다.

반응된 water phase의 유체는 두개의 측면 channel들을 통하여 빠진다. 8 µl/min의 유입속도에 대하여, droplet separation channel에서 4 µl/min의 유속으로 흡입할 때 droplet들의 완벽한 separation은 이루어졌다. 흡입속도가 3 µl/min으로 떨어질 때, droplet은 나누어지고, droplet의 일부가 측면 channel들로 유입된다.

4. 결론

Droplet을 이용한 micro chemical plant의 기초적인 연구가 성공적으로 완수되었다. droplet 생성에서, droplet들의 크기는 피치에 반비례한다. 따라서, micro chemical plant의 효율을 향

상사키기 위하여, droplet 분리(fragmentation)는 하나의 좋은 해결책이 될 수 있다. 실질적인 응용을 위하여, micro chemical plant는 새로운 화학물질과 의약을 발견하기 위한 organic synthesis나 chemical processing에 기원을 둔다. 더군다나, 장치의 병렬화 하고 적층화 함으로써, "작은 물방울이 큰 대양을 이루듯이" 대량생산이 가능하다.

후 기

본 연구는 Japan Science and Technology Agency COE Research and CREST 및 국가지정연구소(NRL)사업에서 부분적인 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- 1 K.F. Jensen, Chemical Engineering Science, 56, 293-303 (2001).
- 2 R.S. Wegeng, C.J. Call and M.K. Drost, Spring National Meeting of the American Institute of Chemical Engineering, PNNL-SA-27317 (1996)
- 3 S.J. Peng and R. A. Williams, Trans. IChemE, 76, 894-901 (1998)
- 4 G.I. Taylor, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 146, 501-523 (1934)
- 5 J.R. Burns and C. Ramshaw, Lab on a Chip, 1, 10-15 (2001)
- 6 J.S. Go, E.H. Jeong, S.Y. Yoon, K.C. Kim and S. Shoji, Micro Total Analysis Systems, 1275-1278 (2003)