

Microfluidics를 이용한 화장품 에멀전 캡슐레이션에 대한 연구

정남균^{1*}, 진흥종²

¹인하공업전문대학교 기계과, ²(주)케이피티 연구개발센터

A Study on the Encapsulation of Cosmetic Emulsion Using Microfluidics

Nam-Gyun Jeong^{1*}, Hong-Jong Jin²

¹Division of Mechanical Engineering, Inha Technical College

²Research and Development Center, KPT Co., Ltd.

요약 화장품 산업은 정밀화학분야로 기술집약적인 산업이며 세계적으로 지속적인 성장률을 보이고 있다. 이러한 화장품 산업에서 시장 점유율을 높이기 위해 과거에는 기능적 측면이 주로 강조가 되어 왔으나, 최근에는 국내외적으로 화장품의 우수한 성능과 더불어 시각적 효과로 소비자의 관심을 유도하려는 노력이 고조되고 있다. 이에 따라 화장품 제조업체에서는 화장품 에멀전을 캡슐화하고 에멀전 캡슐의 형태, 색상 및 질감 등을 다양하게 변형시킬 수 있는 기술을 다방면으로 시도하고 있는 상황이다. 에멀전을 캡슐화하는 기본 방식은 에멀전 저장소에 에멀전을 채워 넣고 노즐을 통해 에멀전을 낙하시키는 방법으로 업체에서 가장 쉽게 이용할 수 있다. 그러나, 에멀전을 캡슐레이션하는 기존 방식은 캡슐의 사이즈를 줄이는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 방식의 한계를 이론 및 수치해석방법으로 고찰하였으며, 이러한 방식의 문제를 해결하기 위한 대안책으로 미세유체역학(Microfluidics)을 적용하기 위하여 마이크로 채널 내에서 발생하는 에멀전 캡슐레이션 현상을 연구하였다.

Abstract The cosmetic industry is technology-intensive in the field of fine chemistry and continues to grow globally. The functional aspects have been mainly emphasized in the past to increase the market share in these cosmetics industries. Recently, however, efforts have been made to attract the attention of consumers to the visual effects as well as the excellent performance of cosmetics at home and abroad. Accordingly, cosmetic manufacturers are trying various technologies that encapsulate the cosmetic emulsion and modify the shape, color, and texture of the emulsion capsule. The basic and easiest method of encapsulating emulsion is dropping the emulsion through the nozzle from emulsion storage. On the other hand, the existing method of encapsulating emulsion has a limit in reducing the size of the capsule. In this study, the limit was shown by theory and numerical analysis method, and the emulsion encapsulation phenomena occurring in the micro-channel were studied to apply microfluidics as an alternative.

Keywords : Cosmetic emulsion, Encapsulation, Microfluidics, Multiphase flow, CFD

이 논문은 2020년도 인하공업전문대학 산학협력활성화연구사업 지원에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Nam-Gyun Jeong(Inha Technical College)

email: nkjung@inhac.ac.kr

Received September 2, 2020

Revised September 28, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

화장품 산업은 정밀화학의 한 분야로 기술집약적인 산업이라고 할 수 있으며, 세계적으로 지속적인 성장률을 보이는 산업이다. 국내 화장품 시장의 규모는 70년대 경제성장과 더불어 지속 성장하여 현재는 미국, 중국, 일본에 이어 세계 8위의 수준에 달하고 있다[1]. 화장품을 구매할 때 다양한 제품과 가격이 중요하게 영향을 미치는 것으로 나타났는데[2], 이러한 화장품 산업에서 시장 점유율을 높이기 위해 과거에는 기능적 측면이 주로 강조가 되어 왔다. 그러나, 최근에는 소비자들의 구매성향이 점차 복잡하게 변화되고 있고[3], 제품의 외관에서 오는 시각적 즐거움을 위해 에멀전을 캡슐의 형태로 제조하여 에멀전의 형태, 색상 및 질감 등을 다양하게 변화하여 화장품 제조에 이용하고자 하는 노력이 다각적으로 시도되고 있는 추세이다[4].

에멀전을 캡슐화하는 기본적인 방식은 냉각매질 상부에 에멀전 저장소를 설치하고 노즐을 통해 에멀전을 액적 형태로 낙하시키는 방법으로, 노즐의 사이즈를 최소화 하더라도 에멀전 캡슐의 사이즈를 줄이는데 한계가 있어 수 mm 정도의 제품만 생산이 가능한 상황이다. 본 연구는 1 mm 이하의 크기로 에멀전 캡슐을 제조하기 위한 대안책으로 미세유체역학(Microfluidics)을 이용하기 위하여 마이크로 채널 내에서 발생하는 에멀전 캡슐레이션 현상을 이상유동해석을 통하여 연구한다.

2. 본론

2.1 기존 낙하방식의 한계 고찰

에멀전 캡슐을 생성하는 가장 쉬운 방법 중의 하나는 Fig. 1과 같이 냉각 매질 상부에 가열된 액상의 에멀전을 저장하는 저장소를 설치하고, 중력을 이용하여 노즐을 통해 에멀전을 액적의 형태로 낙하시켜 캡슐화하는 방법이다. 이러한 방식을 사용할 경우 에멀전 캡슐의 사이즈를 줄이기 위해서는 노즐의 사이즈를 줄여야 하는데, 노즐의 사이즈를 에멀전이 통과하는 도중에 경화되지 않을 정도로 최대한 줄이더라도 1 mm 이하의 캡슐을 생성하기 어려운 문제가 발생한다.

에멀전이 중력에 의해서 저장소로부터 노즐을 통과하여 흐르게 되면 Fig. 2와 같이 노즐의 끝단에 액적의 형태로 맺히게 되고, 점점 액적의 크기가 증가하다가 그 무게를 표면장력이 더 이상 견디지 못하게 되면 낙하하게

된다. 노즐과 액적이 가질 수 있는 최대 직경을 각각 D_n 과 D_e 라 하고, 에멀전의 표면장력과 밀도를 각각 σ , ρ , 그리고 중력가속도를 g 라 하면, 액적의 무게와 표면장력 간의 힘의 밸런스는 Eq. (1)과 같다. Eq. (1)을 에멀전 액적의 최대 직경인 D_e 에 대해서 정리하면 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_n \times \pi \times \sigma = \frac{1}{6} \times \pi \times D_e^3 \times \rho \times g \quad (1)$$

$$D_e = \left(\frac{6D_n \sigma}{\rho g} \right)^{1/3} \quad (2)$$

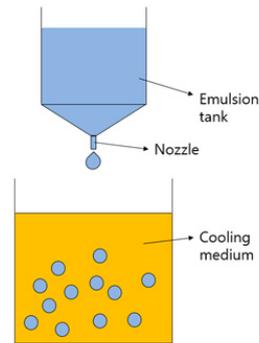


Fig. 1. Schematic diagram of falling method for encapsulating cosmetic emulsion

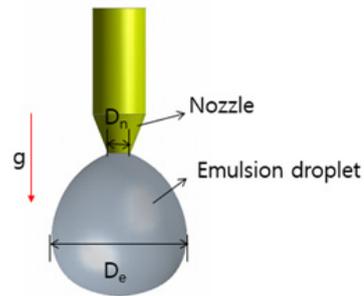


Fig. 2. Emulsion droplet suspended from nozzle

Eq. (2)를 이용하여 에멀전 액적의 최대 사이즈를 예측해 보면, 노즐의 직경이 1.0 mm이고 에멀전의 밀도가 1000 kg/m^3 인 경우 표면장력이 0.04 N/m 일 때는 최대 직경이 2.9 mm정도로 예측이 되며, 표면장력이 0.075 N/m 일 때는 3.56 mm정도로 예측된다.

이론 식과 에멀전이 흐르는 동적인 상황 및 에멀전 점도의 영향을 고려한 실제 상황과의 비교를 위해서, Fig. 3과 같이 직경이 30 mm이고, 높이가 35mm인 원통형

탱크 안으로 직경 1 mm인 노즐을 통해 에멀전을 낙하시키는 경우에 대한 해석을 수행해 보았고 결과를 이론적으로 얻은 값과 비교를 해보았다.

노즐의 입구경계에는 에멀전 저장소에 에멀전이 5 cm 높이로 저장되었을 때의 압력이 가해진다고 가정하였고 나머지 경계면은 벽으로 가정하였으며, 에멀전의 밀도는 1000 kg/m^3 이라고 하였다.

에멀전 액적 생성에 대한 해석을 위해서 본 연구에서는 ANSYS FLUENT를 이용하여 비정상상태 해석을 하였고, 이상유동(Two-phase flow)해석을 위해서는 VOF(Volume of Fluid)방법을 사용하였다.

Fig. 4에 에멀전의 밀 표면장력이 0.04 N/m와 0.075 N/m일 때 액적이 노즐에서 떨어지기 바로 직전의 결과를 나타내었다. 전산해석을 통해 예측된 에멀전 액적의 최대 직경은 약 2.8 mm 와 3.24 mm로 이론 식으로 도출한 값과 비슷한 결과를 보인다. 따라서, 기존의 낙하방식을 이용한 에멀전 액적 생성 시, Eq. (2)를 이용하여 액적의 최대 사이즈를 미리 예측해 볼 수 있음을 알 수 있다.

노즐 사이즈를 0.5 mm로 줄였을 경우 에멀전 액적의 최대 사이즈를 Eq. (2)를 이용해서 예측해 보면 표면장력이 0.04 N/m와 0.075 N/m일 때 각각 2.3 mm, 2.8 mm가 된다.

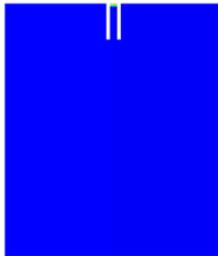


Fig. 3. Nozzle geometry and calculation domain

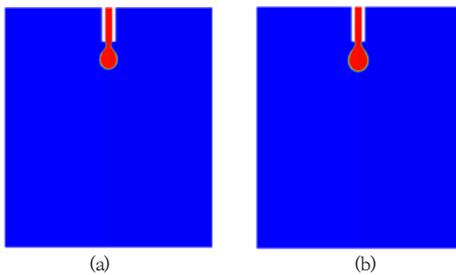


Fig. 4. Calculation results for emulsion droplet of falling method
(a) $\sigma = 0.04 \text{ N/m}$ (b) $\sigma = 0.075 \text{ N/m}$

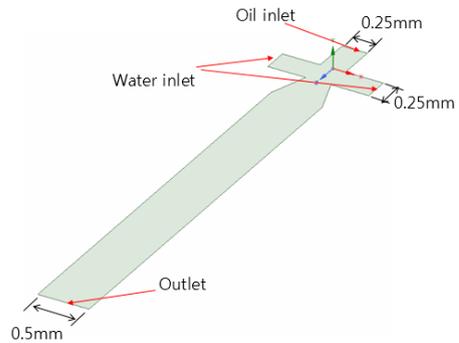


Fig. 5. 2D Calculation domain & boundary conditions for the simulation of microfluidics

밀도를 1200 kg/m^3 까지 증가시키더라도 에멀전 액적의 사이즈는 각각 2.2 mm, 2.7 mm 정도가 된다. 사이즈를 0.5 mm 미만으로 줄이게 되면 가공이 매우 어려워질 뿐만 아니라 노즐이 에멀전 경화로 인하여 막히게 되므로, 기존의 낙하방식으로는 1 mm이하의 캡슐 생성이 어렵다고 결론지을 수 있다.

2.2 Microfluidics를 이용한 에멀전 캡슐레이션

미세유체역학은 마이크로 스케일 혹은 메조스케일에서 유체의 거동을 비롯한 이동현상을 연구하는 학문 분야이다. 유동 스케일이 마이크로 스케일로 축소되면 표면적/부피의 비가 증가하여 표면에 미치는 힘의 효과가 상대적으로 중요하게 되고, 이러한 마이크로 스케일에서의 특성들이 유체 흐름에 지대한 영향을 미친다[5].

먼저 이러한 미세유체의 특성을 반영한 두 가지 상(Phase)이 존재하는 유동의 흐름을 전산해석적으로 구현하기 위하여 Fig. 5와 같은 2차원 형상에 대한 해석을 수행하였는데, 이러한 형상은 미세유체역학을 이용한 연구에서 마이크로채널 내의 액적 생성을 위하여 많이 사용되는 형상 중 하나이다[6]. 연속상(Continuous phase)에는 물을 사용하였고, 액적상(Droplet phase)인 에멀전의 밀도는 1200 kg/m^3 이라고 하였다. 마이크로채널의 벽면 위에서 에멀전 액적이 표면과 이루는 접촉각은 에멀전의 형태에 큰 영향을 미치게 되는데[7, 8], 본 연구에서는 마이크로채널의 벽면 상태가 에멀전 캡슐화에 유리한 표면조건을 갖는다는 가정 하에서 접촉각을 90° 보다 크다고 가정하였고, 기존의 전산해석을 이용한 미세유체역학관련 연구를 참고하여 135° 라고 가정하였다[9].

Fig. 6에 점도가 $0.005 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 이고, 물속에서의 표면장력이 0.005 N/m 인 에멀전이 0.01 m/s 의 속도로 주

입되는 경우에 대한 결과를 나타내었다. 물의 주입속도는 에멀전의 주입속도와 동일하다고 가정하였다. 시간에 따른 마이크로 채널 내부에서의 유동해석 결과를 0.05 sec 간격으로 나타내었는데, 채널 내에 1mm보다 작은 사이즈의 액적이 잘 형성되고 있음을 알 수 있다.

화장품 에멀전은 구성요소와 조성비에 따라 물성치가 변하게 되는데, 경화제 등과 같은 첨가물로 인하여 가장 큰 영향을 받는 물성치 중의 하나는 점도이다. 에멀전의 점도가 마이크로채널에서 캡슐레이션에 미치는 영향을 알아보기 위해서 점도를 1.0 kg/m·s로 높인 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 점도를 제외한 나머지 물성치 및 경계조건은 동일하게 유지하였다. Fig. 7에 그 결과를 나타내었는데, 에멀전 상의 액적이 생성되지 않고 매우 높은 점성의 영향으로 에멀전이 길게 늘어지는 양상을 보이고 있다.

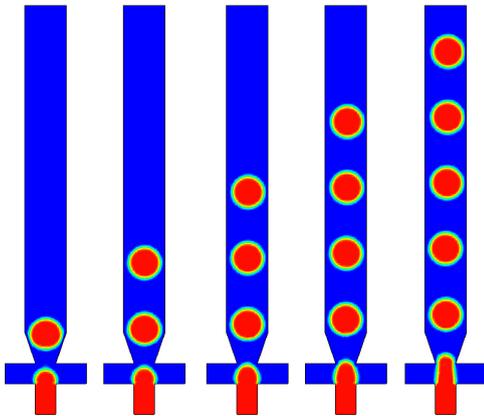


Fig. 6. Results of flow pattern in the microchannel when $\mu_{emulsion} = 0.005 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$; $\sigma = 0.005 \text{ N/m}$; $V_{emulsion} = 0.01 \text{ m/s}$; and $V_{water} = 0.01 \text{ m/s}$

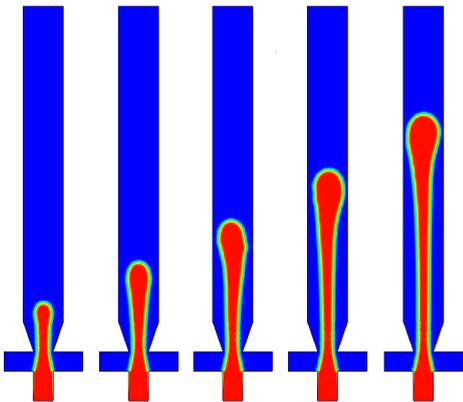


Fig. 7. Results of flow pattern in 2D microchannel when $\mu_{emulsion} = 1.0 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$; $\sigma = 0.005 \text{ N/m}$; $V_{emulsion} = 0.01 \text{ m/s}$; and $V_{water} = 0.01 \text{ m/s}$

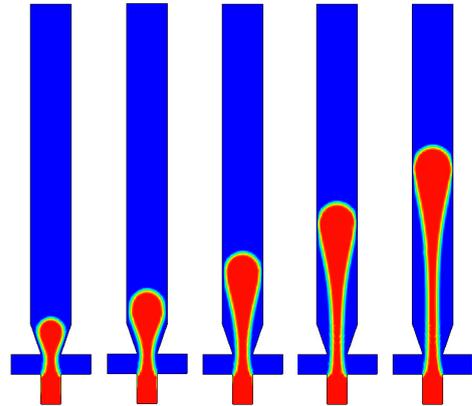


Fig. 8. Results of flow pattern in 2D microchannel when $\mu_{emulsion} = 1.0 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$; $\sigma = 0.1 \text{ N/m}$; $V_{emulsion} = 0.01 \text{ m/s}$; and $V_{water} = 0.01 \text{ m/s}$

액적의 표면장력이 클수록 액적의 형상이 구형에 가까워지는 경향이 있으므로, 표면장력의 크기를 증가시키면 Fig. 7에서와 같이 에멀전이 길게 늘어지는 양상을 감소시킬 수 있을 것이므로, 표면장력의 크기를 0.1 N/m로 증가시켜 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 표면장력이 작은 경우보다는 늘어짐이 줄어들고 에멀전 끝부분의 형상이 훨씬 구형의 형태로 유지되는 경향은 있으나, 에멀전의 캡슐화는 이루어지지 않음을 알 수 있다.

옆면에서 주입되는 물의 주입속도를 높이면 주입된 물이 마이크로채널의 십자 확장유로 부분에서 에멀전과 충돌 시에 에멀전의 폭이 줄어드는 목부분을 조이는 효과를 줄 수 있고, 확장유로로 물이 빠져나갈 때 빨라진 유속이 에멀전을 주흐름에서 분리시키는데 유리하게 작용할 수 있을 것이다.

Fig. 9에 물의 주입속도를 0.1 m/s로 증가시켰을 경우에 대한 해석 결과를 나타내었는데, 예상대로 물의 주입속도가 0.01 m/s인 경우보다 에멀전의 목부분의 폭이 줄었고, 주흐름에서 에멀전을 액적 형태로 잘 분리시키고 있음을 알 수 있다. 에멀전의 주입속도가 마이크로채널 내에서 액적 생성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 에멀전의 주입속도를 0.005 m/s로 줄여서 계산을 수행하였고, 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 에멀전의 주입속도를 줄이게 되면 생성되는 에멀전 사이즈가 작게 나타남을 알 수 있다.

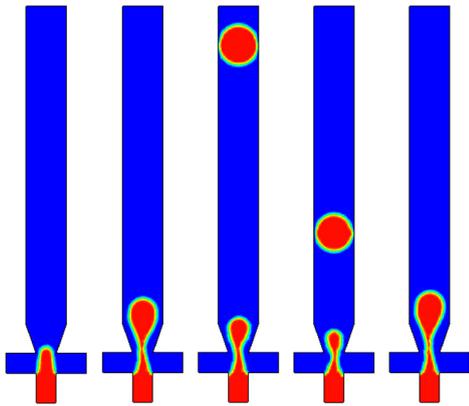


Fig. 9. Results of flow pattern in 2D microchannel when $\mu_{emulsion} = 1.0 \text{ kg/m} \cdot \text{s}; \sigma = 0.1 \text{ N/m}; V_{emulsion} = 0.01 \text{ m/s};$ and $V_{water} = 0.1 \text{ m/s}$

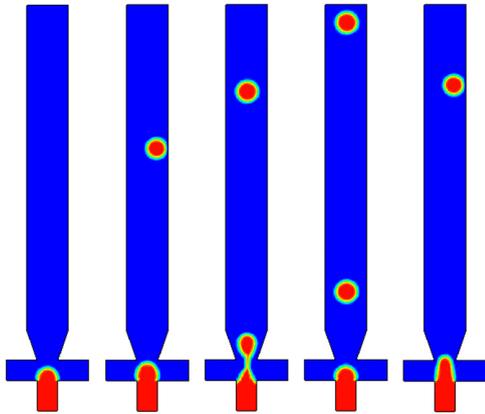


Fig. 10. Results of flow pattern in 2D microchannel when $\mu_{emulsion} = 1.0 \text{ kg/m} \cdot \text{s}; \sigma = 0.1 \text{ N/m}; V_{emulsion} = 0.005 \text{ m/s};$ and $V_{water} = 0.1 \text{ m/s}$

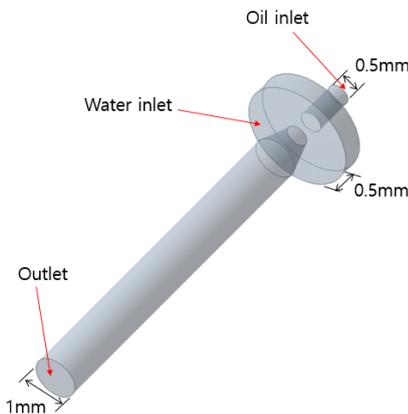


Fig. 11. 3D Calculation domain & boundary conditions for the simulation of microfluidics

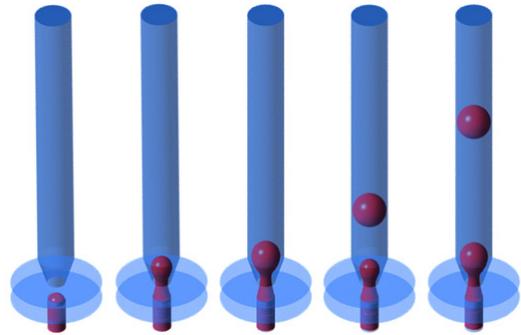


Fig. 12. Results of flow pattern in 3D microchannel when $\mu_{emulsion} = 1.0 \text{ kg/m} \cdot \text{s}; \sigma = 0.1 \text{ N/m}; V_{emulsion} = 0.01 \text{ m/s};$ and $V_{water} = 0.005 \text{ m/s}$

미세유체역학을 이용하여 에멀전 캡슐레이션을 구현하기 위하여 2차원 마이크로채널 내에서의 유동해석을 실시하였고, 에멀전의 점도 및 표면장력, 물과 에멀전의 유입 속도 등이 에멀전 액적 생성에 어떤 영향을 주는 지 알아보았으나, 실제로 업체에서 에멀전 캡슐을 생산하기 위해 고려해야 되는 마이크로채널은 3차원의 형상을 가진다. 3차원 형상에서의 에멀전 액적 생성을 위한 조건을 알아보기 위하여 Fig. 11과 같은 마이크로튜브에서의 유동현상을 해석하였다. 에멀전의 밀도와 점도는 $1200 \text{ kg/m}^3, 1.0 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 이라고 하였고, 표면장력은 0.1 N/m 이라고 가정하였다.

Fig. 12에 에멀전과 물이 각각 $0.01 \text{ m/s}, 0.005 \text{ m/s}$ 의 속도로 주입되는 경우에 대해 중심단면에서의 결과를 0.1 sec 간격으로 나타내었다. 물의 주입속도가 상당히 작음에도 불구하고 액적이 잘 생성되고 있음을 알 수 있는데, 마이크로튜브의 경우는 전체적인 사이즈 증가와 옆면에서 주입되는 물과 에멀전의 3차원적인 충돌이 액적 생성에 유리하게 작용하는 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 액상의 에멀전을 냉매 상부에서 노즐을 통해 액적의 형태로 낙하하여 캡슐레이션하는 기존 방식을 이용할 경우 사이즈를 줄이는데 발생하는 한계점을 이론적인 방법으로 고찰하였고, 수치해석적인 방법으로 검증하였다. 고찰결과 기존의 낙하방식은 노즐의 사이즈를 0.5 mm 까지 줄여도 1 mm 이하의 에멀전 액적을 생성하기 어렵다는 것을 확인하였다.

기존 방식에 대한 대안으로 미세유체역학을 이용한 캡

슬레이션이 가능한지 알아보기 위하여 마이크로채널에서의 이상유동현상을 해석하였는데, 예멸전의 점도와 표면장력, 예멸전 주입속도와 옆면에서 주입되는 물의 속도 등이 액적생성에 미치는 영향을 알아보았다. 해석결과 예멸전의 점도가 낮은 경우는 액적이 잘 생성되나 고점도인 경우는 액적 생성이 용이하지 않았고, 옆면에서 주입되는 냉매의 속도를 높여 액적생성이 가능함을 알 수 있었다. 2차원형상과 더불어 3차원형상에 대한 해석도 수행하였는데, 3차원형상인 마이크로튜브의 경우는 옆면에서 주입되는 물의 유속이 작아도 고점도 예멸전의 액적이 잘 생성됨을 알 수 있었다.

References

- [1] Korea Trade Insurance Corporation, "Analysis of the trend in domestic and foreign cosmetics industry", *Industrial Trends Report*, 2018.
- [2] J. H. Chun, Y. J. Chun, "Study of the Purchasing Behavior of Cosmetics: Focused on Japanese, Chinese Tourist and Korean", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.15, No. 12, pp.7459-7466, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.12.7459>
- [3] M. N. Lee, M. H. Jang, I. H. Lee, "The status of skin condition and using of cosmetic for 50's women", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.15, No. 12, pp.7005-7011, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.12.7005>
- [4] F. Casanova, L. Santos, "Encapsulation of cosmetic active ingredients for topical application - a review", *Journal of Microencapsulation*, Vol.33, No. 1, pp.1-17, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.3109/02652048.2015.1115900>
- [5] S. H. Ma, J. M. Sherwood, W. T. S. Huck, S. Balabani, "On the flow topology inside droplets moving in rectangular microchannels", *Lab on a Chip*, Vol.14, pp.3611-3620, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/anie.201402327>
- [6] Y. S. Song, C. S. Lee, "In situ Gelation of Monodisperse Alginate Hydrogel in Microfluidic Channel Based on Mass Transfer of Calcium Ions", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol.52, No. 5, pp.632-637, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9713/kcer.2014.52.5.632>
- [7] M. Mastiani, B. Mosavati, "Numerical simulation of high inertial liquid-in-gas droplet in a T-junction microchannel", *RSC Advances*, Vol.7, pp.48512-48525, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/c7ra09710g>
- [8] G. Rosengarten, D. J. E. Harvie, J. Cooper-White,

"Contact angle effects on microdroplet deformation using CFD", *Applied Mathematical Modelling*, Vol.30, pp.1033-1042, 2006.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2005.06.011>

- [9] M. Y. A. Jamalabadi, M. Daqiqshirazi, A. Kosar, M. S. Shadloo, "Effect of injection angle, density ratio, and viscosity on droplet formation in a microfluidic T-junction", *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, Vol.7, pp.243-251, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2017.06.002>

정 남 균(Nam-Gyun Jeong)

[정회원]



- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2010년 10월 : 삼성전자 책임연구원
- 2010년 11월 ~ 2015년 2월 : 한국원자력연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과교수

<관심분야>

전산유체역학, 다상유동

진 흥 중(Hong-Jong Jin)

[정회원]



- 2013년 10월 ~ 2017년 2월 : KAIST EEWs 연구센터 선임연구원, 국민은행 기술평가 전문위원
- 2017년 2월 ~ 2019년 4월 : 특허청 기계분야 심사관
- 2019년 4월 ~ 현재 : ㈜케이퍼티 연구소장

<관심분야>

Liquid Droplet, Fluidized Bed Coating