

전산유체역학을 이용한 화장품 오일 캡슐레이션 현상에 대한 연구

정남균
인하공업전문대학 기계과

A Study on the Encapsulation of Cosmetic Oil Using Computational Fluid Dynamics

Nam-Gyun Jeong
Division of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요약 농업분야를 비롯한 식품산업 등 다양한 산업에서 사용되고 있는 오일은 기능성 화장품 개발에도 주요한 원료로 사용되고 있다. 오일은 산소나 빛, 습기 또는 고온에 노출되면 화학적으로 불안정하고 산화되기가 쉬운 특징이 있어 이러한 환경에 그대로 노출되지 않도록 캡슐화하기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 오일보다 밀도가 큰 냉매 안에 오일을 주입하면, 오일과 냉매의 밀도차로 인한 부력에 의해 오일이 떠오르면서 오일을 캡슐화 할 수 있는데, 본 연구에서는 이러한 방식의 오일 캡슐레이션 장비를 개발함에 있어 오일 캡슐화의 최적의 장비 구동조건을 찾기 위하여 다상유동에 대한 전산해석을 이용하여 오일 캡슐레이션 현상을 모사하였다. 냉매로는 물이나 세럼(Serum)을 이용할 수 있는데, 상대적으로 점도가 상당히 작은 물을 냉매로 사용했을 경우는 오일과 물을 지속적으로 주입시키는 방식으로 장비를 구동하더라도 오일액적이 잘 생성됨을 알 수 있었으나, 점도가 매우 큰 세럼을 냉매로 사용했을 경우는 오일이 액적의 형태로 노즐에서 이탈되지 않고 길게 늘어지는 양상을 나타냈다. 세럼을 냉매로 이용한 경우는 오일을 연속으로 주입시키는 방법 대신 짧은 순간 빠르게 주입한 후 얼마의 시간동안 주입을 멈춰 부력에 의해 오일액적을 노즐로부터 이탈시키는 방법을 이용하면 오일액적 생성이 가능함을 알 수 있었다.

Abstract Oil is used in various industries, including the agricultural sector, food industry, and functional cosmetics. These oils are chemically unstable and prone to oxidation when exposed to oxygen, light, moisture, or high temperatures. Therefore, various attempts have been made to encapsulate them so that they are not exposed to such environments. When oil is injected into a refrigerant with greater density, the oil can be encapsulated as it rises due to buoyancy caused by the density difference. In this study, oil encapsulation was simulated to find the optimal conditions for operating equipment using computational fluid dynamics (CFD) for multiphase flows. Water or serum can be used as a refrigerant. The viscosity of water is relatively small, and if it is used as a refrigerant, oil droplets can be produced well even if oil and water are continuously injected in the equipment. However, the viscosity of serum is very high, and if it is used, the oil is stretched out and does not leave the nozzle. The results show that when using serum as a cooling medium, oil encapsulation is possible if the injection is stopped for some time after instantaneous injection at high speed.

Keywords : Cosmetic Oil, Encapsulation, Buoyancy, Multiphase Flow, CFD

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

email: nkjung@inhac.ac.kr

Received October 12, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised November 18, 2020

Published February 28, 2021

1. 서론

천연 성분의 농약을 이용하는 농업 분야를 비롯하여 비타민이나 어류의 기름을 이용한 영양제 개발, 향미증진제나 식용색소와 같은 식품산업 등 다양한 특징이 있다 [1]. 따라서 이러한 환경에 그대로 오일이 노출되지 않도록 오일을 캡슐화하여 화장품의 성능 저하를 막기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다[2].

오일의 캡슐화 기술은 오일의 단순한 성능저하 측면에서 뿐만 아니라 오일캡슐의 형태, 외색, 사용감 등에서 다각적인 제품의 변화를 꾀할 수 있기 때문에, 점차로 복잡해지는 소비자들의 화장품 구매 성향과[3] 다양한 제품을 원하는 구매요구[4]를 충족하는 데 있어서도 절실히 요구된다고 할 수 있다.

오일보다 밀도가 큰 냉매 안에 오일을 주입하면, 오일과 냉매의 밀도차로 인한 부력에 의해 오일이 떠오르면서 오일을 캡슐화 할 수 있는데, 본 논문에서는 이러한 방식의 오일 캡슐레이션 장비를 개발함에 있어 오일 캡슐화의 최적 조건을 찾기 위하여 전산해석을 이용한 오일 캡슐레이션 현상을 모사하였다.

2. 본론

2.1 오일 캡슐레이션 장비 구성 및 해석 영역

본 연구에서 해석을 고려하는 오일 캡슐레이션 장비의 대략적인 형상은 Fig. 1과 같다. 원통형 냉매 탱크(Cooling medium tank)에 노즐을 연결하고 오일주입피스톤(Oil injection piston)으로 가압하여 오일이 노즐을 통해 냉매 탱크 안으로 주입될 수 있도록 하였다. 냉매 탱크 아랫부분에는 바닥에 홀을 가공하고 냉매주입연결구(Cooling medium injection port)를 설치하여 필요할 때 냉매 유입 장치와 연결을 할 수 있도록 하였다. 전체 장비에 해당하는 영역을 해석에 다 고려할 필요는 없으므로, Fig. 1에서 적색으로 표시한 부분만을 유동해석 영역으로 하였다.

냉매 탱크에 연결된 오일 주입 노즐의 지름은 0.5 mm이고, 탱크 치수는 지름이 110 mm, 높이가 1000 mm이므로 오일액적이 생성될 때 액적의 크기와 전체 해석 영역 크기의 차이가 매우 크므로, Fig. 2의 (a)와 같은 3차원 유동 영역으로 해석을 진행하기에는 상당한 어려움이 있다. 따라서 Fig. 2 (b)와 같이 냉매 탱크와 오일 주입 노즐의 중앙을 가로지르는 2차원 형상의 유동 영역에 대하여 해석을 수행하였다.

Fig. 3에는 계산에 사용된 격자계를 나타내었는데, 전체적으로 사각형의 격자를 이용하였으며, 오일이 노즐로부터 주입되어 액적을 생성하는 과정에서 오일액적의 경계면을 정확하게 예측할 수 있도록 노즐 근처영역에 조밀한 격자를 집중하여 격자를 생성하였다. 노즐에서 떨어져 나온 오일액적은 냉매에 의해 빨리 경화가 되어 오일 탱크의 상부로 상승하는 동안 액적 형상에 큰 변화를 일으키지 않을 것이므로, 노즐 근처를 제외한 나머지 영역에서는 성긴 격자를 이용하여 계산의 효율성을 높였다.

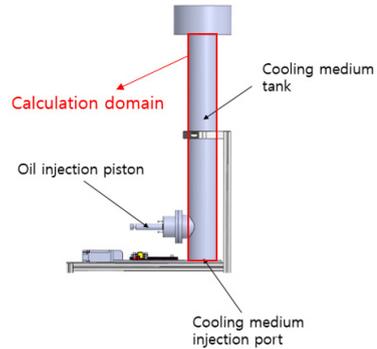


Fig. 1. Schematic diagram of oil encapsulating device

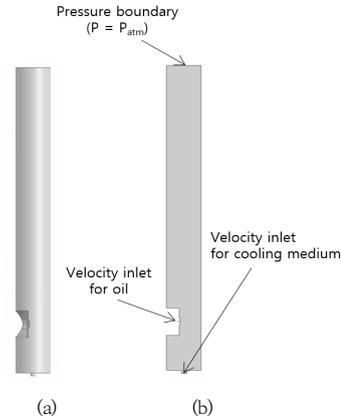


Fig. 2. Fluid domain for calculation and boundary conditions (a) 3D domain (b) 2D domain

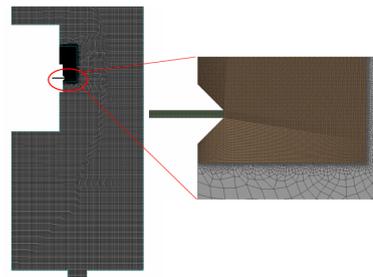


Fig. 3. Grid system

2.2 오일 캡슐레이션 유동해석 결과

냉매로는 물이나 세럼(Serum)을 이용할 수 있는데, 물을 이용할 경우는 취급이 쉽고 냉매 구매에 드는 비용을 절감할 수 있는 장점이 있지만, 오일 캡슐화가 이루어진 후에 오일을 따로 거둬들여 화장품 용기에 세럼과 함께 저장해야 하는 번거로움이 있다. 세럼을 이용하게 되면 냉매에 소요되는 비용이 추가되는 단점은 있으나, 생성된 오일캡슐과 함께 바로 용기에 저장할 수 있다는 장점이 있다.

이번 연구에서는 두 가지 액체를 냉매로 사용했을 경우에 대하여 해석을 수행하고, 각각의 경우에 대해 오일 캡슐화를 위한 장비 구동 조건을 알아보았다. 노즐 내부에는 오일이 Fig. 4와 같이 초기에 이미 채워져 있다고 가정하였고, 오일 입구경계에서 일정한 유속을 가지고 오일이 공급된다고 가정하였다. 냉매주입구에 해당하는 경계에서는 냉매의 주입이 필요한 경우는 일정한 속도로 냉매가 주입된다고 가정하였으나, 냉매가 주입되지 않는 경우는 벽조건을 부여하였다. 냉매탱크 상부는 대기압이 가해진다고 가정한 압력경계 조건을 부여하였다.

오일과 냉매의 유동현상 예측을 위하여 ANSYS FLUENT를 이용한 비정상상태 해석을 하였고[5], 다상 유동(Multiphase flow)해석을 위해서는 VOF(Volume of Fluid)방법을 사용하였는데, VOF방법은 Hirt and Nicols[6]에 의해서 처음 제시되어 최근에는 Rider and Kothe[7]에 의해 확장되었다. 계산에 사용된 물과 세럼, 오일의 밀도는 각각 998 kg/m^3 , 933 kg/m^3 , 844 kg/m^3 이고, 점도는 각각 $0.001 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $0.6 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $0.2 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 이다. 냉매 내부에서 오일의 표면장력은 0.005 N/m 라고 가정하였다.

2.2.1 물을 냉매로 한 경우의 캡슐레이션 거동

오일 주입 노즐과 냉매 주입구를 통해 오일과 물이 연속적으로 주입되는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 오일의 주입속도는 오일 주입 노즐의 지름과 오일을 주입하는 피스톤의 지름 비율 및 피스톤 구동의 최저 속도 등을 고려하여 0.01 m/s 라고 가정하였고, 물의 경우는 유입 속도가 너무 작으면 오일을 노즐로부터 이탈시키기 어려우므로 오일주입 속도의 10배인 0.1 m/s 라고 가정하였다. Fig. 5에 시간에 따른 냉매 탱크 내부에서의 오일 거동을 나타내었다.

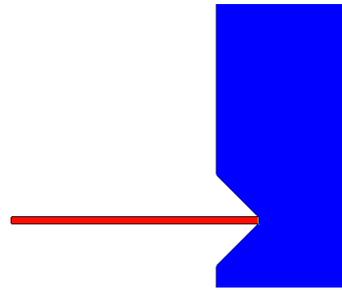


Fig. 4. Initial state of oil before starting the calculation

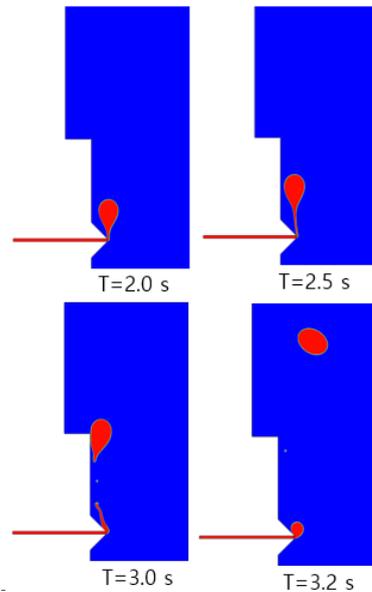


Fig. 5. Result of rising pattern of injected oil for $V_{water} = 0.1 \text{ m/s}$

시간이 흐름에 따라 노즐을 통해 냉매 탱크 내부로 유입된 오일액적이 점점 커지면서 오일 부피 증가로 인한 부력의 크기도 증가하게 된다. 오일이 주입되기 시작한 지 2.0 s 정도가 지나게 되면, 부력의 크기가 오일액적을 노즐에 부착시키려는 힘보다 커지게 되어 오일액적이 떠오르게 되면서 노즐부분에서 길게 늘어지게 되고, 3.0 s 후에는 결국 이탈하게 된다. 오일은 점도가 높기 때문에 이탈 전에는 상당히 늘어진 형상을 가지나, 상승이 계속되면서 점차 구형의 특성을 띠게 된다.

물의 주입속도가 액적생성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 물의 주입속도를 변화시켜가며 계산을 수행하였다. Fig. 6에 물의 주입속도가 0.2 m/s 인 경우에 대한 결과를 나타내었다. 오일이 주입되기 시작한 후 2.5 s 가 지나면 오일액적이 길게 늘어지면서 이탈하게 되는데, 주

입속도가 0.1 m/s인 경우와 냉매탱크 내부의 물의 흐름에 차이가 있어 오일 액적이 떨어져 나가는 방향이 아래를 향하고 있다. Fig. 7에 나타난 냉매 탱크 내부에서의 물의 흐름을 보면 노즐 근처에서 2차 유동이 발생하고, 이 2차 유동이 오일액적을 노즐 아래쪽으로 밀어내면서 이탈시킴을 알 수 있다.

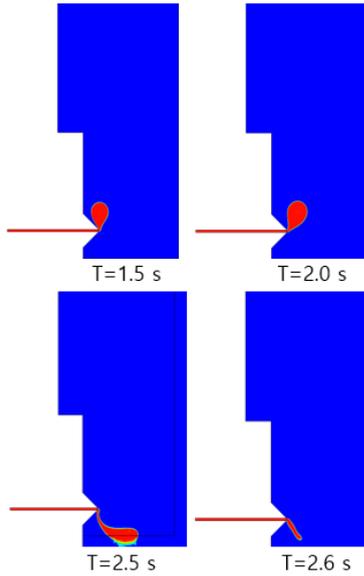


Fig. 6. Result of rising pattern of injected oil for $V_{water} = 0.2\text{ m/s}$

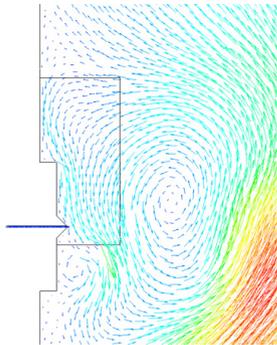


Fig. 7. Result of velocity field near oil injection nozzle at $T = 2.5\text{ s}$ for $V_{water} = 0.2\text{ m/s}$

물의 주입속도를 0.4 m/s로 증가시키게 되면 Fig. 8에서와같이 오일액적이 노즐에서 떨어지는 시간이 1.4 s로 크게 줄어들게 된다. 오일노즐에서 이탈한 오일액적의 사이즈를 동일한 면적을 갖는 원형액적의 직경으로 변환

하여 물의 주입속도별로 비교하면, 물의 주입속도가 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.4 m/s일 때 각각 3.09 mm, 2.87 mm, 2.30 mm 정도가 된다.

물의 주입속도가 빠를수록 노즐에서 액적을 빨리 이탈시키게 되므로 액적사이즈도 줄어들게 되는 것이다. 따라서 물의 주입속도를 조절하여 오일액적사이즈 조정이 가능할 것으로 판단된다.

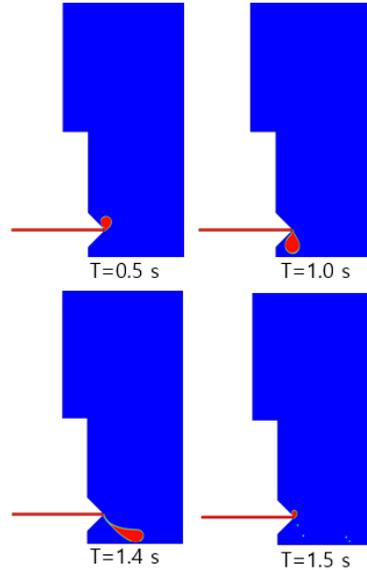


Fig. 8. Result of rising pattern of injected oil for $V_{water} = 0.4\text{ m/s}$

2.2.2 세럼을 냉매로 한 경우의 캡슐레이션 거동

세럼을 냉매로 사용할 경우 세럼의 점도가 물의 점도의 600배에 달한다. 냉매의 점도가 오일액적 생성에 주는 영향을 알아보기 위하여 냉매를 세럼으로 바꾸어 계산을 수행하였다. 오일은 물을 냉매로 사용했을 경우와 같이 0.01 m/s로 주입된다고 하였고, 세럼의 주입속도는 0.2 m/s, 0.4 m/s로 가정하였다.

Fig. 9에 나타난 해석결과를 보면, 물을 냉매로 사용했을 경우와는 다르게 5 s가 지난 후에도 오일액적이 제대로 생성되지 않고 있다. 물의 경우는 주입속도를 높일수록 오일을 노즐로부터 더 잘 이탈시켰으나, 세럼의 경우는 주입속도를 높인 경우에도 길게만 늘어지는 형태를 보인다. 따라서 냉매로 세럼과 같은 고점도의 액체를 사용할 경우는 장비의 구동 방식을 물을 냉매로 사용했을 경우와 다르게 해야 함을 알 수 있다.

세럼으로 채워진 냉매 탱크 내부에 세럼을 주입하지

얇은 상태에서 오일을 0.4 m/s로 0.1 s 동안 주입하면 Fig. 10과 같이 구형에 가까운 오일액적이 생성된다. 그 후 오일의 주입을 멈추면 오일액적이 부력에 의하여 떠오르게 되면서 Fig. 11에서와 같이 6 s 후에는 노즐에서 이탈하게 된다.

또 다른 오일액적의 생성을 위해서는 다시 오일을 주입시켜야 하는데, 먼저 생성된 오일액적이 어느 정도 상승한 후에 주입시켜야 두 오일액적이 합쳐지지 않고 간격을 유지할 수 있기 때문에, 최초로 오일을 주입하기 시작한 시간부터 7.2 s 가 지난 후에 다시 주입을 하였고, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 오일 주입 후 6 s 후에 노즐에서 이탈했던 첫 번째 액적과 달리 3 s 정도가 지나면 두 번째 액적이 노즐에서 이탈하게 되는데, 이것은 첫 번째로 떠오른 오일액적으로 인해 발생하는 유동의 영향인 것으로 판단된다. Fig. 13에 나타난 냉매 탱크 내부에서의 흐름을 보면 상승하는 유동이 잘 나타나 있다.

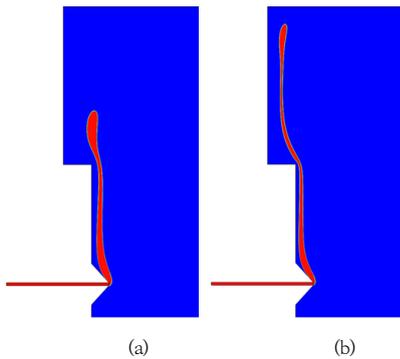


Fig. 9. Result of rising pattern of injected oil at T=5 s
(a) $V_{serum} = 0.2 m/s$ (b) $V_{serum} = 0.4 m/s$

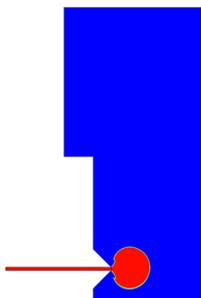


Fig. 10. Shape of injected oil after 0.1 s injection with $V_{oil} = 0.4 m/s$ for $V_{serum} = 0 m/s$

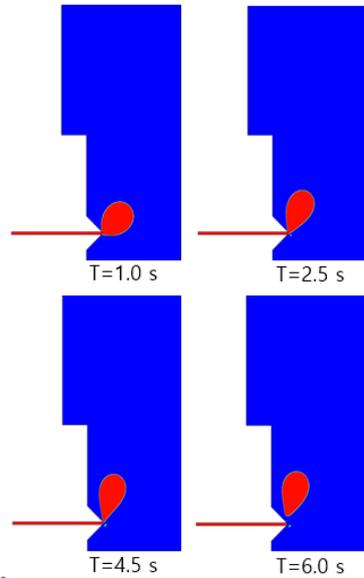


Fig. 11. Result of oil rising pattern after stopping oil injection for $V_{serum} = 0 m/s$

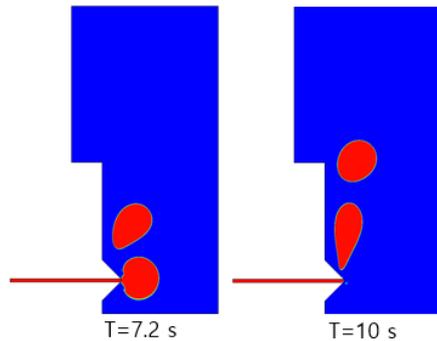


Fig. 12. Result of oil rising pattern after stopping second oil injection for $V_{serum} = 0 m/s$

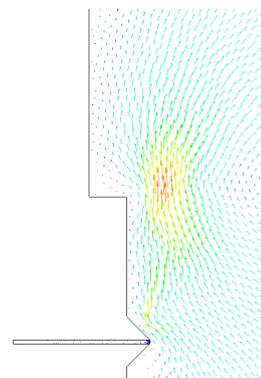


Fig. 13. Velocity field near oil injection nozzle at T=10 s for $V_{serum} = 0 m/s$

장비 구동을 단순화시키려면 오일 주입을 0.1 s 실행하고 7 s 정도 멈추고 다시 오일을 0.1 s 동안 주입하는 방식을 반복적으로 수행하면 될 것이나, 생산 효율을 높이기 위해서는 첫 번째 오일액적 생성 후에는 오일 주입을 멈추는 시간을 줄이는 방식으로 구동시키는 것이 좋을 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 오일액적 생성 장치에서 냉매 탱크에 물 또는 세럼을 냉매로 이용했을 경우에 대해, 각각의 냉매에 맞는 장비 구동 조건을 알아보기 위한 해석을 수행하였다.

해석결과 상대적으로 점도가 상당히 작은 물을 냉매로 사용했을 경우는 오일과 물을 지속적으로 주입시키는 방식으로 장비를 구동하더라도 오일액적이 잘 생성됨을 알 수 있었다. 오일을 0.01 m/s로 주입하는 동안, 물을 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.4 m/s 로 주입하면 각각의 주입속도에 대해 액적의 직경이 3.09 mm, 2.87 mm, 2.30 mm 정도로 예측되어 물의 주입속도 조절을 통해 오일액적의 사이즈 조정이 가능함을 알 수 있었다.

점도가 매우 큰 세럼을 냉매로 사용했을 경우는 오일과 세럼을 지속적으로 주입시킬 경우, 오일이 액적의 형태로 노즐에서 이탈되지 않고 길게 늘어지는 양상을 나타냈다. 따라서 세럼을 냉매로 이용한 경우는 물을 냉매로 사용하는 경우와 다른 구동 조건이 필요함을 알게 되었고, 오일을 연속으로 주입시키는 방법 대신 0.1 s 동안 0.4 m/s 의 속도로 주입한 후, 얼마의 시간동안 주입을 멈춰 부력에 의해 오일액적을 노즐로부터 이탈시키는 방법을 이용하면 오일액적 생성이 가능함을 알 수 있었다.

References

[1] E. Martins, D. Poncelet, R. C. Rodrigues, D. Renard, "Oil encapsulation techniques using alginate as encapsulating agent: applications and drawbacks", *Journal of Microencapsulation*, Vol. 34, pp. 754-771, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02652048.2017.1403495>

[2] Z. A. Özbek, P. G. Ergönül, "A Review on Encapsulation of Oils", *Celal Bayar University Journal of Science*, Vol. 13, pp. 293-309, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.18466/cbayarfb.313358>

[3] 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>

[4] 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>

[5] ANSYS Inc., "ANSYS FLUENT User's Guide"

[6] C. W. Hirt, B. D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)

[7] W. J. Rider, D. B. Kothe, "Reconstructing volume racking", *Journal of Computational Physics*, Vol.141, pp.112-152, 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1006/jcph.1998.5906>

정 남 균(Nam-Gyun Jeong)

[정회원]



- 2001년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 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