

과립 적체현상을 해결하기 위한 유동층장비 전산유동해석

정남균^{1*}, 진흥종²

¹인하공업전문대학교 기계공학과, ²(주)케이피티 연구개발센터

CFD Analysis for Fluidized Bed Equipment to Solve the Problem of Granulation Congestion

Nam-Gyun Jeong^{1*}, Hong-Jong Jin²

¹Division of Mechanical Engineering, Inha Technical College

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

요약 유동층 반응기에 의하여 과립화된 입자는 분말원료보다 선호되기 때문에, 화장품 및 바이오 산업에서는 과립 형성에 유동층 반응기를 자주 이용하고 있다. 그러나, 유동층 반응기는 미립자를 장비 내부에서 유동시키는 과정 중 하부 벽면에 입자들이 유동화되지 못한 채 적체되는 현상이 발생하여, 작업자가 장비에 외부에서 충격을 주어 벽면에서 떨어 뜨리는 과정을 반복하게 되는데, 이러한 과립물의 적체현상은 제품의 품질 및 생산수율에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 전산유동해석을 이용하여 유동층 장비에 대한 유동 및 입자거동을 예측하고, 유동층 장비의 내부 형상변화가 벽면에서의 과립 적체현상에 미치는 영향을 연구하였다. 유동층 반응기의 하부 벽면에서의 유동의 흐름이 원활하지 않은 것으로 나타났고, 입자들의 움직임 또한 크지 않아 적체될 확률이 클 것으로 예상되었다. 유동정체 영역을 감소시키기 위해 용기의 형상을 유선형으로 바꾼 결과 과립의 적체량을 기존 적체량 대비 41%정도로 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract The fluidized bed reactor is used frequently in the cosmetics and bio-industries for granulation because granulation by a fluidized bed reactor is preferred over raw powder materials. In the fluidized bed reactor, however, particles are not fluidized on the lower wall during the process. Workers repeatedly impact the equipment from the outside and drop it from the wall, which greatly affects the product quality and yield. In this study, the flow and particle behavior in fluidized bed equipment were predicted using computational fluid dynamics, and the effect of the internal shape of fluidized bed equipment on the granule congestion phenomenon on the wall was studied. The flow stagnated on the lower wall of the fluidized bed reactor, and the movement of particles was not large, so it was expected that the possibility of congestion would be high. The accumulated quantity on the wall could be reduced to 41% of that for the previous shape by changing the shape of the container to reduce the flow stagnation area.

Keywords : Computational Fluid Dynamics, Fluidized Bed, Granulation, Lagrangian, Particle Behavior

1. 서론

유동층반응기(fluidized bed reactor)는 고체를 다루는 다른 장치와 달리, 용기 속에서 고체와 유체가 혼재하

여 거동하므로 열 및 물질전달이 우수하여 많은 산업 분야에서 반응기로 사용되고 있으며, 이에 대한 연구 또한 활발하게 연구되고 있다. Geldart[1]는 입자사이즈와 사이즈의 분포가 유동층의 거동에 미치는 영향을 연구하였고,

이 논문은 2022년도 인하공업전문대학 산학협력활성화연구사업 지원에 의하여 연구되었음.

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

email: nkjung@inhac.ac.kr

Received November 11, 2022

Revised January 2, 2023

Accepted January 6, 2023

Published January 31, 2023

많은 분말의 유동화 거동이 평균 입자 크기와 입자 크기 분포 모두에서 독립적이라는 것을 보여주었다. Jang & Cha[2]는 기체-고체 유동층에서 Gaussian 분포를 이용한 다입자경의 입자분포 변화에 따른 비산유출 특성을 연구하였고, Choi *et al.*[3]은 대규모 유동층 연소기와 냉간 모델 유동층에서 입자 유입율과 입자 크기 분포를 측정하여 입자 유입율을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. Jang *et al.*[4]은 유동층반응기에서 메탄 열분해에 의한 수소 생산과 탄소 생성에 대해 연구하여 층내 입자 이동성, U-Umf, 마모, 비산유출, 유동화가스의 효율밀도 등이 분해효율에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

이러한 유동층반응기는 용기 내의 분립체가 유체의 일정한 유속에 따라 균일하게 혼합되어 입자와 유체의 접촉을 좋게 하며 온도조절이 용이하므로, 화장품이나 제약 및 기타 바이오 분야에서 유동층 과립화 공정(fluidized bed granulation)을 위해서도 널리 사용되고 있다.

유동층 과립화 공정은 미세 입자에 결합제 액체(liquid binder)를 분무하고 입자들끼리 서로 접촉되게 하여 과립을 형성시키는 공정으로 유동성(flowability) 향상, 정제의 타정(tabletting)을 위한 압축성(compressibility) 향상, 작업자와 환경적 안전성을 위한 분진의 감소, 분산성(dispersibility) 향상, 균일성(uniformity) 향상 등의 이점을 가지고 있다. 그러나 입자 충돌로 인한 입자 표면에서의 물방울 침적, 고온의 유동가스로 인한 습윤, 입자 표면으로부터의 액체의 증발, 습윤 입자의 충돌로 인한 입자 응집, 유동량의 시공간적 변동과 같은 다양한 현상으로 반응기 내부의 전반적인 유체 거동이 상당히 복잡하여, 과립 크기의 균일도 및 목표치 구현을 위한 공정 분석을 상당부분 전산해석을 이용한 방법에 의존할 수밖에 없다[5].

국내 유동층 반응기 수요업체의 경우 대부분 일본, 중국, 유럽 등에서 제품을 수입하여 사용하고 있고, 생산 노하우나 장비제조 인프라 측면에서 선진국과의 기술격차가 상당부분 존재하고 있으며, 이러한 장비를 사용하여 생산하고 있는 제품의 품질이나 확장성에도 한계점이 존재하고 있어 유동층 장비의 국산화 및 자체 기술 개발이 시급한 실정이다. 유동층 장비의 국산화를 위해서는 적용 분야에 맞는 구조로 설계하기에 앞서 개발하고자 하는 유동층 장비에 대한 유동 및 입자거동 해석을 통해 내부 현상을 이해할 필요가 있으므로, 본 연구에서는 유동층 장비 내부의 입자거동 및 유동현상을 전산유체해석을 통하여 규명하고자 한다.

그리고 유동층 반응기를 이용한 과립화 공정을 진행할 때, 내부 용기의 경사진 하부 벽면에 입자들이 유동화되지 못한 채 적체되는 현상이 발생하게 되는데, 이러한 적체현상은 과립물 또는 캡슐의 입도 분포를 균일하지 못하게 하고 제품의 품질 및 생산수율에 영향을 미치므로, 본 연구를 통해 벽면에서의 적체 현상을 해소할 수 있는 반응기 형상을 제시하고 해석을 통해 검증하고자 한다.

2. 본론

2.1 유동층 해석방법

유동층 반응기 내부에서 고체와 기체의 흐름을 예측하는 방법으로는 크게 오일러리안-오일러리안 방식(Eulerian-Eulerian approach)과 오일러리안-라그랑지안 방식(Eulerian-Lagrangian approach)으로 구분된다[6]. 오일러리안-오일러리안 방식은 기체상과 입자상을 모두 연속상으로 취급하여 한 공간에서 차지하는 각 상의 부피분율을 아래와 같이 예측하는데, 컴퓨터 자원을 적게 소모하는 반면, 여러 모델을 동시에 계산하기 때문에 수렴성이 좋지 못해 계산이 불안정한 단점이 있다.

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \vec{v}_g) = 0 : gas \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \vec{v}_s) = 0 : solid$$

Where, α denotes volume fraction, g and s denote gas and solid phases, and \vec{v} denotes velocity

오일러리안-라그랑지안 방식은 기체상은 연속상으로, 고체상은 입자들이 연속상에 분산되어 있는 것으로 가정하여, 뉴턴의 운동방정식을 기반으로 각각의 입자들의 움직임을 직접 계산한다. 그러므로, 보다 사실적인 입자 거동 모사가 가능하여 Fig. 1과 같이 입자들을 밀폐공간에 채우고 기울였을 때 오일러리안-오일러리안 방식으로는 불가능한 실제 입자의 분포형태를 제대로 모사할 수 있다.

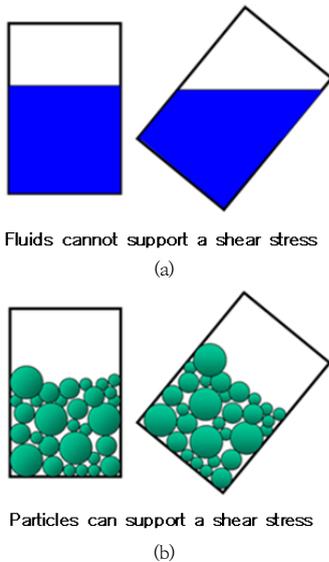


Fig. 1. The difference between the Eulerian-Eulerian approach and the Eulerian-Lagrangian approach[6]
 (a) Eulerian-Eulerian approach
 (b) Eulerian-Lagrangian approach

2.2 형상 및 계산조건

유동층 반응기는 결합제 액체를 스프레이를 통해 분사하는 위치에 따라 크게 top-spray 방식과 bottom-spray 방식, wurster-coater 방식, wpouted bed 방식, rotating 방식으로 나뉘며[5], 각각의 방식에 따라 반응기의 형상도 차이가 발생한다. 본 연구에서는 대량생산용 유동층 과립화 장비가 아닌 Fig. 2와 같은 실험실용 유동층 반응기를 대상으로 하였는데, 반응기 내 용기의 형상과 치수는 Fig. 3에 나타내었다. 용기의 형상이 축대칭이므로, 해석을 위한 격자는 Fig. 4와 같이 사변형의 격자(quadrilateral mesh)를 이용하여 대칭면에 대해서만 2차원으로 생성하였다.

유동층 반응기 내부에서의 유동현상을 해석하기 위하여 ANSYS 2020 R2 FLUENT를 이용한 비정상상태 해석을 하였다[7]. FLUENT에서는 다상유동(Multiphase flow)해석을 위해서 VOF(Volume of Fluid), Mixture, Eulerian 모델 등을 제공하는데, VOF와 Mixture 모델은 각 상에 대하여 동일한 속도장을 적용하나 Eulerian 모델은 각 상에 대한 속도장을 따로 계산하므로, 고체상과 기체상의 속도가 다를 수밖에 없는 유동층 반응기 내부에서의 유동현상 해석을 위해서 본 연구에서는 Eulerian 모델을 사용하여 계산을 수행하였다.



Fig. 2. Fluidized bed equipment for experiments

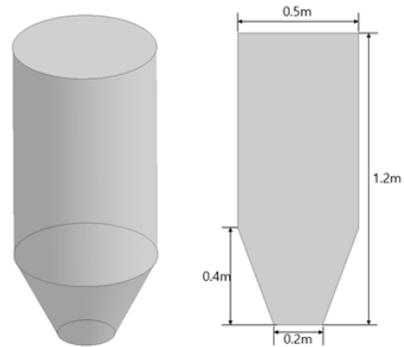


Fig. 3. Geometry and dimensions of bowl in the fluidized bed equipment

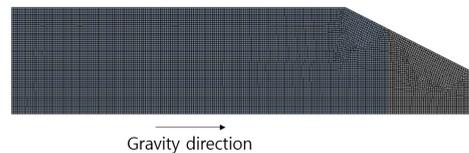


Fig. 4. Grids for 2D axial-symmetric calculation



Fig. 5. Initial distribution of solid phase

입자는 밀도가 280 kg/m³, 입도가 2 mm인 Granular 타입으로 가정하였으며, 구형의 모양을 가정하여 Packing Limit을 0.63으로 제한하였다. 따라서 입자들의 초기 분

포상태를 Fig. 5와 같이 입자들이 부피분율(volume fraction) 0.63으로 유동층 반응기 하부에 채워져 있다고 가정하였다. 기타 Eulerian 모델을 사용하기 위한 다른 설정들은 기본적으로 주어진 조건을 그대로 적용하였고, 비정상상태의 해석을 위한 시간간격은 0.001초로 고정하였다.

격자수가 계산에 미치는 영향을 알아보기 위하여 격자 수를 5000, 10000, 15000개로 변화시켜가면서 계산을 수행하였고 유동층 장비 하부에서 공기를 5 m/s의 속도로 공기를 유입시켰을 경우 0.1초 후의 결과를 비교하였다. Fig. 6에 입자분포를 비교한 결과를 보면 격자를 5000개로 했을 경우와 10000개를 사용했을 경우는 차이가 많은 것으로 보이나, 10000개와 15000개의 경우는 결과가 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 이후의 해석에서는 계산의 경제성을 위하여 10000개의 격자를 이용하여 계산을 수행하였다.

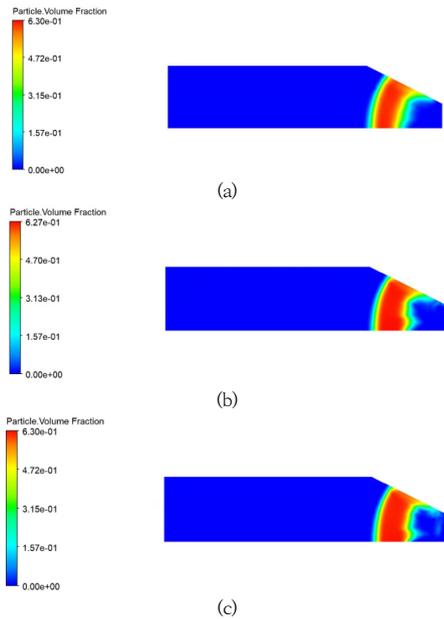


Fig. 6. Results of grid sensitivity test
(a) 5000 grids (b) 10000 grids (c) 15000 grids

2.3 계산 결과

2.3.1 오일러리안-오일러리안 방식

유동층 장비 하부에서 공기를 5 m/s의 속도로 유입시켰을 때, 시간에 따른 반응기 내부의 입자거동을 Fig. 7에 나타내었다. 공기를 분사하기 시작한 후부터 1초 간격으로 결과를 나타내었는데, 오일러리안-오일러리안 방

식을 이용한 해석에서의 계산결과는 입자들의 거동을 연속상의 형태로 나타내므로, 용기 내부의 각 위치에서 공기 대비 입자들이 차지하는 부피의 분율로만 표현되었다. 초반에 중심부에서 빠르게 유입되는 공기로 인하여 유동층 반응기 용기의 상부까지 상승했던 입자들이 중력에 의해 다시 용기의 하부로 내려앉고 있음을 알 수 있다. 유동의 흐름이 원활하지 않은 용기 하부의 바깥쪽 경사진 벽면에서는 입자들의 움직임 또한 크지 않아 적체될 확률이 클 것으로 예상된다.

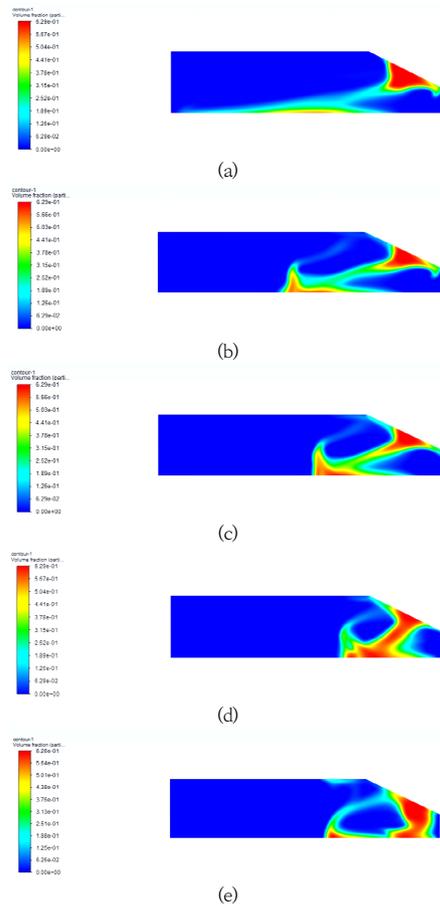


Fig. 7. Solid phase distribution over time
(a) 1 sec (b) 2 sec (c) 3 sec (d) 4 sec (e) 5 sec

Fig. 8에는 공기 분사 후 8초가 되었을 때의 입자들의 부피분율과 입자 속도의 분포를 나타내었는데, 용기 하부 벽면에서 입자들의 속도가 중심부 대비 낮게 형성되고 있음을 알 수 있고, 이로 인하여 입자들의 움직임이 벽면에서 정체되고 있음을 알 수 있다.

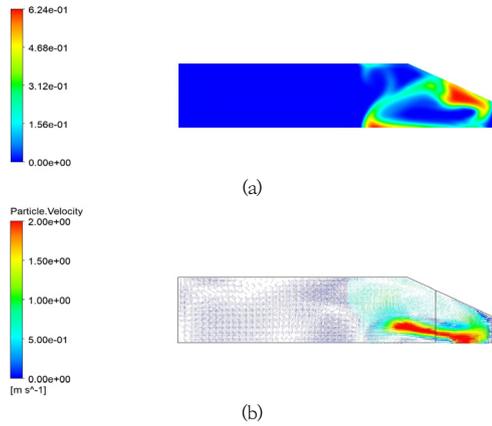


Fig. 8. Volume fraction of solid phase and velocity vector for particles at t=8 sec
(a) volume fraction of solid phase
(b) velocity vector for particles

2.3.2 오일러리안-라그랑지안 방식

입자들의 라그랑지안 방식의 거동해석을 위해서 DDPM (Dense Discrete Phase Model)을 사용하였으며, 총 2.586 kg에 해당하는 과립 입자들을 Fig. 9과 같이 반응기 용기 하부에 적재시켰다.



Fig. 9. Initial state of solid particles

입자들의 밀도와 직경을 고려할 때 계산에 필요한 입자 수는 2204900개 정도가 되지만, 모든 입자 수를 반영한 해석은 불가능하므로 전체 입자를 대표하는 10000개의 입자 parcel을 이용하여 유동현상을 분석하였다.

2.3.1절에서와 같이 유동층 장비 하부에서 공기를 5 m/s의 속도로 유입시켰을 때, 시간에 따른 반응기 내부의 입자거동을 Fig. 10에 나타내었다. 벽면에서 입자 경계조건은 벽면에 탄성체로 충돌하는 reflect조건을 사용하였다. 입자들을 연속체 개념의 고체상으로 가정하여 계산한 결과와 많은 차이를 보이므로, 유동층 반응기 내부에서의 입자 거동을 정확하게 묘사하기 위해서는 라그랑지안 방식의 해석이 추가되어야 함을 알 수 있다.

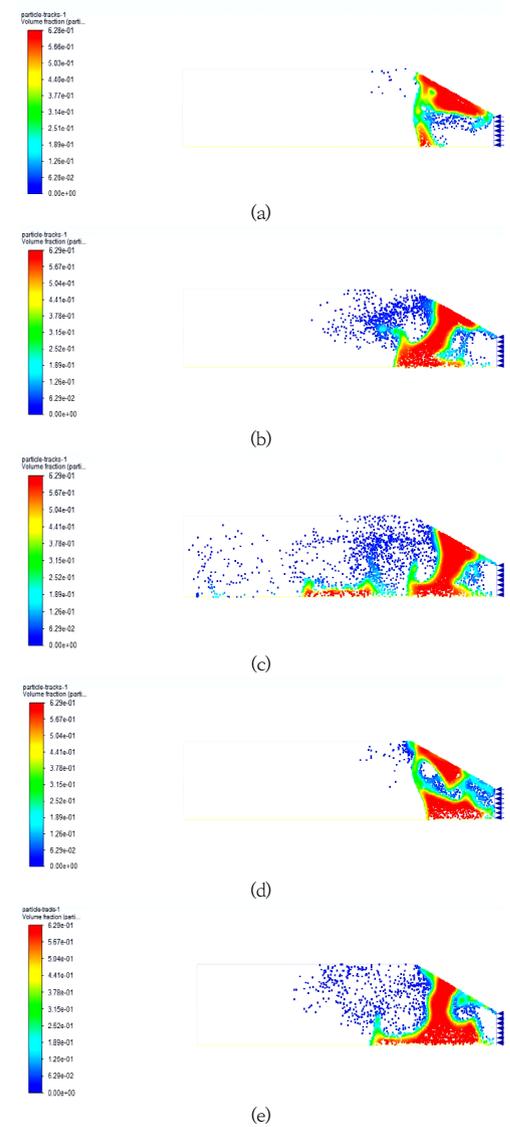


Fig. 10. Distribution of solid particles over time
(a) 1 sec (b) 2 sec (c) 3 sec (d) 4 sec (e) 5 sec

뿐만 아니라, 오일러리안-오일러리안 방식은 벽면 trap현상을 제대로 묘사할 수 없으므로, 유동층 반응기를 사용한 과립화 공정에서 발생하는 벽면 적체 문제를 해결하는데 한계가 있다.

다만, 라그랑지안 방식은 각각의 입자들에 대한 위치 추적 및 입자간의 상호작용에 대한 추가적인 계산이 필요하므로, 과립화 공정과 같이 상당히 많은 입자들에 대한 해석이 필요한 경우 오일러리안 방식보다 해석 시간이 크게 증가한다. 본 연구에서는 오일러리안 방식보다 4배에 가까운 해석시간을 필요로 하였다.

2.3.3 벽면 적체현상 모사

유동층 반응기 형상변화가 입자들의 벽면 적체현상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 11과 같이 반응기 용기의 형상을 바꾸어 해석을 진행하였다. 높이 및 윗면과 아래면의 직경은 이전 형상과 동일하게 유지하면서 옆면에서의 유동 정체를 막기 위하여 돌레형상만 유선형으로 변경하였다. 해석방법은 벽면에서의 trap현상을 모사하기 위하여 오일러리안-라그랑지안 방식을 사용하였으며, DDPM의 벽면 경계조건으로 벽면 하부에서는 trap조건을, 나머지 영역에서는 reflect조건을 사용하였다. 총 해석시간을 1 sec로 하고, 1 sec 동안 trap 발생으로 감소한 입자 수를 파악하여 형상에 따른 적체현상을 비교하였다. 입자의 밀도 및 입도, 공기 주입 속도 등의 기타 다른 계산조건들은 이전 해석과 동일하게 유지하였다.

공기주입 시작 후 0.2 sec, 0.4 sec, 0.6 sec, 0.8 sec, 1 sec 후의 결과를 Fig. 12에 비교하여 나타내었는데, 용기의 형상을 유선형으로 변경한 쪽이 용기 내부로의 입자분산이 더 잘 이루어짐을 알 수 있다. 하부 벽면에서 trap으로 인하여 손실된 입자 수를 비교했을 때, 이전 형상의 경우에는 2100여개 정도의 입자가 손실된 반면 변경된 형상의 경우에는 870여개 정도가 손실됨을 확인할 수 있어, 반응기 형상을 유동의 정체를 감소시키는 유선형으로 변경하게 되면 벽면에서 발생하는 과립의 적체량을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

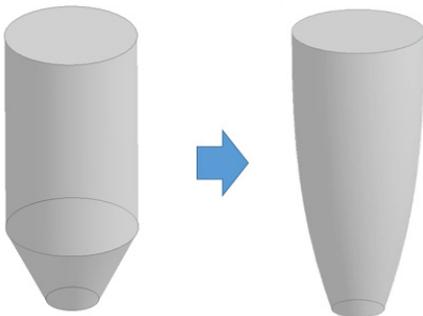
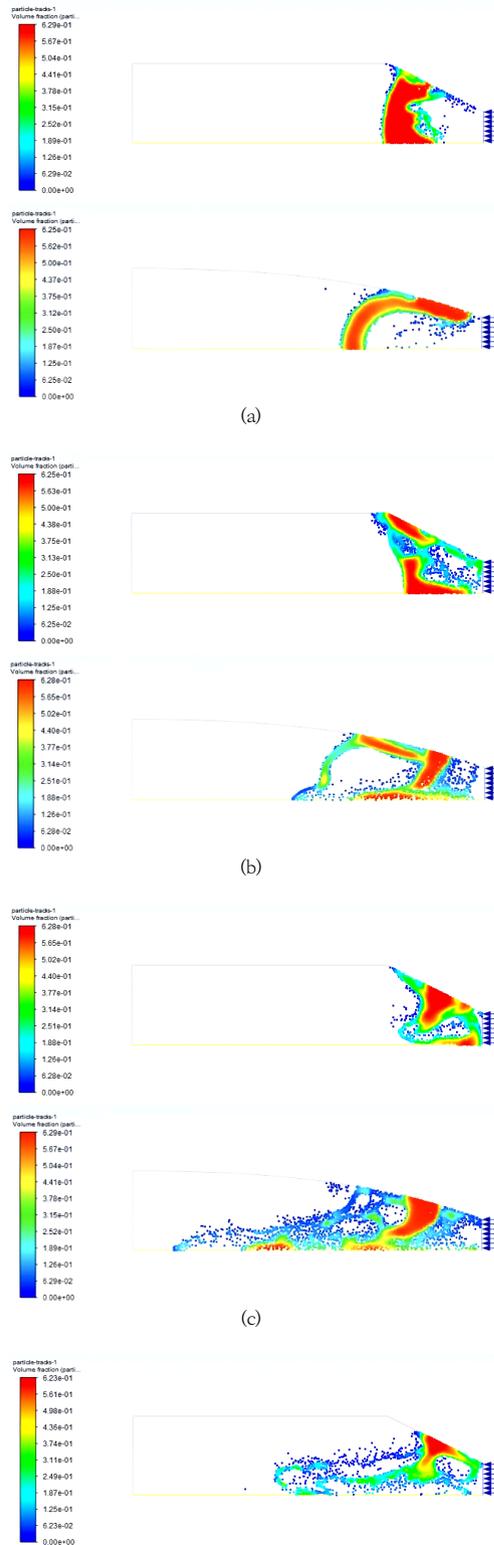


Fig. 11. Shape change of bowl to solve the granulation congestion on the wall



References

- [1] D. Geldart, "the effect of particle size and size distribution on the behaviour of gas fluidized beds", *Powder Technology*, Vol.6, No.4, pp.201-215, 1972. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)83014-6](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)83014-6)
- [2] H. T. Jang, W. S. Cha, "The Characteristics of Elutriation with Gaussian Particle Size Distributions in a gas-solid fluidized bed", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.10, No.11, pp.3274-3279, 2009. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.11.3274>
- [3] J. H. Choi, J. E. Son, S. D. Kim, "Solid entrainment in fluidized bed combustors", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.22, No.6, pp.597-606, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1252/jcei.22.597>
- [4] H. T. Jang, J. Y. Lee, W. S. Cha, "Thermal Decomposition of Methane Using Catalyst in a Fluidized Bed Reactor", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.9, No.2, pp.487-492, 2008. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2008.9.2.487>
- [5] J. E. Kim, Y. M. Chung, "Analysis of FBG process through modeling and simulation", *Journal of Advanced Engineering and Technology*, Vol.10, No.3, pp.251-260, 2017. DOI: <https://doi.org/10.35272/jaet.2017.10.3.251>
- [6] J. H. Lim, D. H. Lee, "Simulation of Fluidized Bed Reactor Using CFD", *News & Information for Chemical Engineers*, Vol.34, No.2, pp.118-125, 2016. <https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=1383771>
- [7] Ansys. Ansys|Engineering Simulation Software. <https://www.ansys.com>

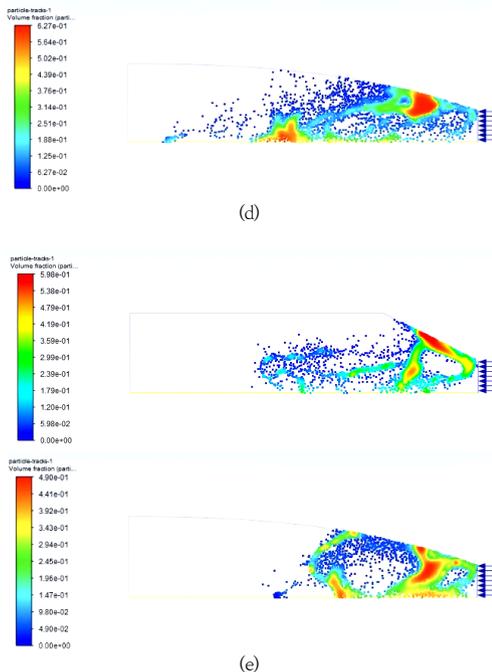


Fig. 12. Distribution comparison of solid particles over time
 (a) 0.2 sec (b) 0.4 sec (c) 0.6 sec (d) 0.8 sec (e) 1 sec

3. 결론

본 연구에서는 유동층 반응기를 이용한 과립화공정에서 반응기 내부에서 발생하는 유동현상을 오일러리안-오일러리안 방식과 오일러리안-라그랑지안 방식의 해석방법을 이용하여 모사하였고, 그 결과를 비교하였다. 오일러리안-오일러리안 방식은 적은 시간으로 대략적인 유동현상을 빠르게 이해하는데 유리하지만, 각 입자들의 거동을 정확히 예측하는데 어려움이 있었다. 오일러리안-라그랑지안 방식은 각각의 입자들의 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있고 벽면에서의 입자상태를 부여할 수 있어, 형상변화에 따른 과립적체 현상을 모사하기위해 오일러리안-라그랑지안 방식을 택하여 계산하였다.

반응기 용기의 옆면에서 발생하는 유동정체 영역을 감소시키기 위해 용기의 형상을 유선형으로 바꾸어 해석을 수행하였고 10000개의 입자 중에서 벽면 적체현상으로 손실된 입자의 개수를 비교한 결과, 기존 형상의 경우는 2100개 정도의 손실을 보였고 유선형의 경우는 870개 정도의 손실을 보여 벽면에서 발생하는 과립의 적체량을 41%정도로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

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 기계공학과교수

<관심분야>

전산유체역학, 다상유동

진 흥 종(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 : (주)케이퍼티 연구소장

〈관심분야〉

Liquid Droplet, Fluidized Bed Coating