

# 이산요소법 교반 시뮬레이션을 이용한 다자유도 로봇 믹서 성능 평가

손권중

홍익대학교 기계정보공학과 부교수

## Performance Evaluation of Multi-Degree-of-Freedom Robotic Mixer using Discrete Element Mixing Simulations

Kwon Joong Son

Associate Professor, Department of Mechanical and Design Engineering, Hongik University

**요약** 입상재료를 균일하게 혼합하기 위한 입자 교반기는 다양한 산업 분야에서 널리 활용되는 기계 장치로서 응용 분야와 혼합 조건에 따라 다양한 형태로 개발되어 사용되고 있다. 하지만 대부분 산업용 교반기의 구동 자유도는 2 자유도 이하로써 혼합재료의 기계적 특성 및 교반기의 구조를 제외한 운전 조건 측면에서 최적 교반을 위한 인자의 선택 범위는 넓지 않다. 운전 조건의 선택 범위를 확대하기 위해 본 논문에서는 다관절 로봇과 입자용 드럼 믹서를 융합한 다자유도 로봇 교반기를 제안하였고 가상 작동 환경에서 교반 성능을 평가하였다. 입자 유동 해석 기법인 이산요소법을 이용하여 다자유도 로봇 믹서의 성능 예측 시뮬레이션을 수행하였고 제안된 장치 설계안이 기존 교반기보다 개선된 혼합 성능을 발휘할 수 있다는 것을 확인하였다.

**주제어** : 이산요소법, 다자유도 교반, 로봇 믹서, 드럼 믹서, 교반 시뮬레이션, 융합 설계

**Abstract** Industrial mixers to homogeneously blend particulate materials have been developed and widely used in various industries. However, most industrial mixers have at most two-degree-of-freedom for the operation, which limits the range of operation parameter selection for optimal blending. This paper proposes a multi-degree-of-freedom robotic mixer designed by converging a conventional drum blender and a robotic manipulator and evaluated its performance in a virtual operating environment. Discrete element simulations were conducted for mixing performance evaluation. The numerical results showed that the proposed mixer design exhibits a better mixing performance than conventional ones.

**Key Words** : DEM, MDOF mixing, Robotic mixer, Drum mixer, Mixing simulation, Convergence design

### 1. 서론

입상재료 교반 기술은 기계, 금속, 화학, 제약, 바이오, 식품 산업 등 다양한 제조 산업에 필수 불가결한 기반 기술이다. 현재까지 다양한 종류의 교반기가 개발되어 산업

현장에서 사용되고 있으며 용기의 형상 및 운동 자유도와 임펠러 장착 여부 등에 따라 여러 형태로 분류할 수 있다[1]. Fig. 1은 산업용 교반기 중에서 블레이드를 사용하지 않고 용기의 운동만으로 혼합하는 무임펠러 교반기의 대표적 예를 보여준다. Fig. 1에 소개된 교반기 중

\*This work was supported by 2019 Hongik University Research Fund and by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government(MSIT) (No. 2019R1F1A1056630)

\*Corresponding Author : Kwon Joong Son(kjson@hongik.ac.kr)

Received August 26, 2020

Accepted October 20, 2020

Revised September 10, 2020

Published October 28, 2020

에서 2 자유도 행성식 교반기[2,3]를 제외하면 대부분 교반 운동은 1 자유도를 갖는다. 1 자유도 교반기는 기계적 구조가 단순하고 혼합 용기의 운동 제어가 쉽다는 장점이 있어 널리 사용된다. 하지만 구조적 단순성과 제어 용이성에도 불구하고 낮은 운동 자유도 때문에 교반 최적화를 위해 선택할 수 있는 인자의 종류와 범위가 제한적이라는 단점이 있다. 예를 들어 Fig 1.의 드럼 믹서의 경우 최적 교반 조건을 찾으려 할 때 사용자가 제어할 수 있는 인자는 드럼의 회전 속도뿐이므로 구동 속도 범위 내에서 균일 교반 조건을 찾지 못할 경우에는 추가적인 최적화 운전 조건을 모색해 볼 수 없게 된다. 교반 용기의 운동 자유도를 높임으로써 최적화를 위한 파라미터 공간의 차원을 확대할 수 있다는 점이 본 논문에서 로봇 머니플레이터와 드럼 믹서를 융합한 다자유도 드럼 믹서 디자인을 제안한 배경이다.

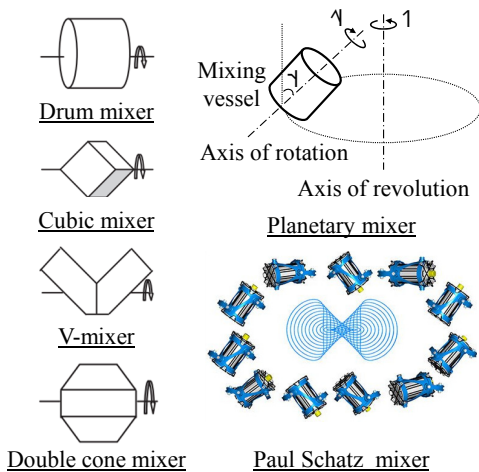


Fig. 1. Examples of typical blade-free powder mixers

본 논문에서는 입자 교반기의 혼합 성능을 정량적으로 평가하기 위해 제안된 여러 종류의 교반 지수중에서 무게 중심 기반 교반 지수를 평가 지표로 활용하였다 [4]. 분말 재료의 무게 중심을 계산하기 위해서는 개별 입자의 3차원적 위치 정보를 실시간으로 수집해야 하는데 실험적으로 개별 입자의 위치를 실시간으로 측정하는 것은 기술적으로 매우 어렵다. 측정 기술의 한계성 때문에 분말 혼합 연구 분야에서 교반 성능을 평가하기 위해 실험적인 방법 대신 개별 입자의 위치와 속도 데이터를 시간별로 추출할 수 있는 이산요소법 (DEM, discrete element method) 수치 해석 방법이 주로 사용되고 있다 [2-4]. 본 논문에서는 입자 운동 해석 기법인 이산요소법을 이용하여 혼합 시뮬레이션을 수행하고 교반 지수

를 분석하여 다자유도 드럼 믹서 융합 디자인의 성능을 예측하는 것을 목표로 한다.

## 2. 이산요소법 교반 시뮬레이션

이산요소법은 입자 간 접촉 및 충돌이 빈번한 입상재료의 동적 거동을 계산할 수 있는 수치 해석법이다[5]. 이산요소법은 분말과 같은 입상성 재료의 다양한 제조 공정을 해석할 수 있으며 입자 교반 해석 및 최적화에도 널리 사용되고 있다[2,3,6-13]. 본 연구에서는 상용 이산요소법 소프트웨어인 EDEM을 이용하여 입자 교반 해석을 수행하였다. 이산요소법 운동방정식과 접촉모델 등의 이론적 세부사항은 참고문헌[2]에 설명되어 있다.

이산요소법 교반 시뮬레이션의 전처리 단계에서는 로봇팔의 말단에 지름 90mm 길이 120mm인 실린더형 드럼 믹서를 장착한 5 자유도 로봇팔 CAD 형상을 생성한 후 허용하중을 고려하여 지름 6mm 입자 총 500g을 용기 내부를 부분적으로 채웠다. 시간에 따른 입자 혼합 양상을 관찰하고 교반 성능을 평가하기 위하여 입자를 두 그룹으로 나누고 교반 이전 그 둘이 공간적으로 분리되도록 초기 조건을 설정하였다. 후처리 과정에서는 육안으로도 교반 정도를 구분할 수 있도록 입자 시각화 시 그룹별로 서로 다른 색상을 사용하였다. Fig. 2는 다자유도 로봇 교반기의 작동 전 초기 상태를 시각화하여 보여준다.

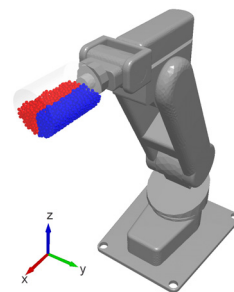


Fig. 2. Initial configuration of robotic mixing system with loaded particles for DEM simulation

본 연구에서는 1 자유도부터 3 자유도까지 서로 다른 3가지 운동 자유도를 갖는 교반 모드를 대상으로 이산요소법 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 비교 및 분석함으로써 운동 자유도와 혼합 성능과의 상관관계를 살펴 보았다. 1 자유도 모드는 Fig. 2에서처럼 용기의 축을 좌표의 x 축과 일치시켜서 용기가 수평을 유지하면서 회전

하도록 구속하여 일반적인 드럼 믹서처럼 작동하도록 한다. 용기의 회전 운동은 정지상태로부터 1초 동안 90 deg/s<sup>2</sup>로 등가속 시켜 정상 상태 속도인 15rpm에 도달한 후로부터 회전 속도를 일정하게 유지하도록 설정하였다. 2 자유도 모드는 1 자유도 모드에 용기의 상하 스윙 운동을 추가한 것으로 Fig. 2에서 보이듯이 용기를 지지하고 있는 팔목 조인트의 회전을 통해 제어한다. 상하 스윙 운동은 ±30도의 스트로크와 0.5Hz의 주파수를 갖도록 설정하였다. 3 자유도 모드는 2 자유도 모드에 용기의 수평 스윙 운동을 추가한 것으로 로봇팔의 Fig. 2에 나타난 바닥 지지대와 연결된 몸통 조인트의 구동기를 제어하여 구현한다. 수평 스윙 운동은 ±15도의 스트로크와 1.0Hz의 주파수에 맞추어 작동하도록 설정하였다. 3가지 교반 모드에 대한 운전 조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Three mixer operation modes

Mixer operating condition	1-DOF	2-DOF	3-DOF
Rotation speed (rpm)	15	15	5
Vertical swing stroke (deg)	-	±30	±30
Vertical swing rate (Hz)	-	0.5	0.5
Horizontal swing stroke (deg)	-	-	±15
Horizontal swing rate (Hz)	-	-	1.0

입자와 용기가 같은 재료로 되어있다고 가정하였고 시뮬레이션 입력 인자로 사용한 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 밀도는 입자의 질량 및 중력과 관성력을 계산할 때 필요하고 탄성계수와 푸아송비는 헤르츠(Hertz) 접촉 모델을 기반으로 구형 입자 사이의 접촉 반발력을 계산할 때 필요한 물성이다.

Table 2. Material properties for DEM simulations

Property	Powder	Container
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,500	2,500
Shear modulus (MPa)	2.16	2.16
Poisson's ratio	0.3	0.3
Particle radius (mm)	3.0	-

이산요소법에서 입자의 접촉 거동은 입자와 입자 사이 그리고 입자와 용기 사이의 탄성 반발력과 같은 보존력의 영향뿐만 아니라 소성 반발력 및 마찰력의 영향도 크게 받는다. Table 3에 이산요소법 접촉 모델에 필요한 마찰계수와 반발계수를 정리하였다. 전단 마찰계수는 입자 간 상대 미끄럼 운동에 대한 마찰 저항 계산에 사용되고 구름 마찰계수를 이용하여 상대 회전 운동에 대한 저

항력 계산에 사용된다. 반발계수는 헤르츠 민들(Hertz-Mindlin) 점탄성 접촉 반발력 모델에서 점성계수 계산 시 요구된다.

Table 3. Contact model parameters

Parameter	Powder-Powder	Powder-Container
Coefficient of static friction	0.5	0.5
Coefficient of rolling friction	0.05	0.05
Coefficient of restitution	0.85	0.85

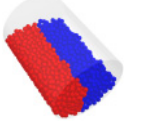
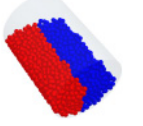
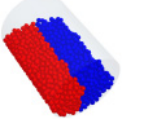
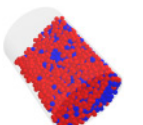
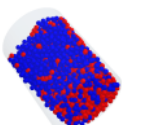
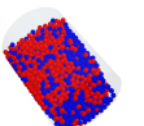
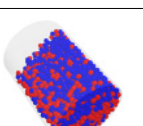
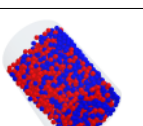
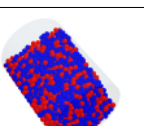
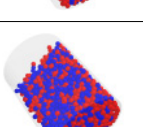
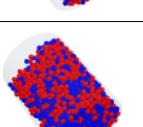
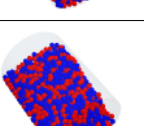
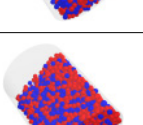
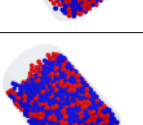
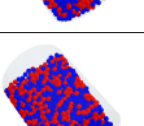
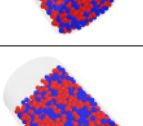
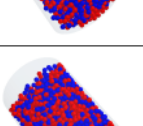
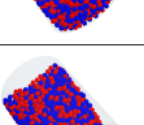
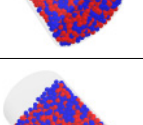
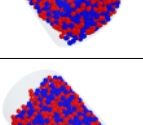
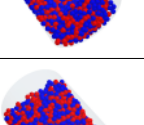
Table 4에 주요 시뮬레이션 변수를 정리하였다. 이산요소법에서 입자와 입자 사이 또는 입자와 구조물 사이의 접촉 여부 검출은 매우 빈번하여 접촉 전체 시뮬레이션 소요 시간 중 접촉 검출이 차지하는 비중이 상당히 크다. 이산요소법에서는 입자가 차지하는 공간을 셀로 나누는 뒤 셀 단위로 접촉 여부를 검사하는 이웃 셀 접촉 검출 알고리즘 (neighboring cell contact detection algorithm)이 주로 사용되고 있다. 셀 크기가 입자 지름의 1.5배가 될 때 계산 효율이 가장 높은 것으로 보고되고 있어[14] 본 연구에서도 배경 셀의 크기를 입자 직径의 1.5배인 9mm로 설정하였다. 로봇의 운동 범위를 고려하여 이산요소법 계산 영역을 230mm×400mm×350mm로 정의한 뒤 9mm의 크기를 갖는 정육면체 셀 45,630개로 분할하였다. 총 시뮬레이션 시간은 20초이며 계산 시간 간격은 100μs로 설정하여 총 계산 스텝 수는 2만 회이다. 이산요소법에서는 레일리 시간 간격(Rayleigh time step)이 수치 적분 시 수렴성 확보를 위한 임계 적분 시간의 기준값으로써 널리 활용하고 있다 [15]. 본 연구에서 채택한 계산 시간 간격은 레일리 임계값의 0.3배 이하 수준으로 실제 시뮬레이션 중 수치 해의 불안정성 또는 발산 현상은 나타나지 않았다. 시뮬레이션 시간 1초당 최대 100프레임을 재생할 수 있는 시뮬레이션 결과 동영상 제작할 수 있도록 계산 데이터는 저장 빈도는 10ms로 입력하였다.

Table 1에서 정의한 세 가지 교반 모드에 대한 이산요소법 시뮬레이션 결과 데이터를 5초 간격으로 시각화하여 Table 5에 시간순으로 나타내었다. 육안으로 관측했을 때 모든 교반 모드에서 입자 혼합은 지속하고 있음을 정성적으로 확인할 수 있다. 다음 장에서 교반 지수를 사용하여 각 교반 모드에 대한 혼합 성능을 정량적으로 평가하고 비교 분석하였다.

Table 4. DEM simulation parameters

Parameter	Value
Total mass of particles (g)	500
Number of particles	1,770
Computation domain (mm <sup>3</sup> )	230 × 400 × 350
Cubic cell size (mm)	9.0
Number of cells	45,630
Computational time step (μs)	100
Simulation time (s)	20
Number of iterations	200,000
Data save interval (ms)	10
Number of saved time steps	2,000

Table 5. DEM mixing simulation results

Time	1-DOF	2-DOF	3-DOF
0s			
10s			
20s			
30s			
40s			
50s			
60s			

### 3. 결과 분석

이산요소법 혼합 시뮬레이션 데이터로부터 교반 지수를 계산하기 위하여 프로그래밍 언어인 Python과 EDEMPy 라이브러리를 사용하였다. EDEMPy는 상용 이산요소법 소프트웨어 EDEM 결과로부터 계산 데이터 추출 기능을 제공하는 Python 라이브러리이다. 교반 지수는 두 입자 그룹의 무게 중심 간 거리를 정규화한 값을 기반으로 정의하였다. 초기에 분리된 상태의 두 입자 그룹의 무게 중심 간 거리를 교반 지수 0으로 정의하고 이상적으로 완전 교반이 달성되어 두 입자 그룹의 무게 중심이 정확히 일치한 경우를 교반 지수 1로 정의한다. 따라서 교반 지수가 커질수록 더 균질한 혼합 상태를 나타낸다고 볼 수 있다.

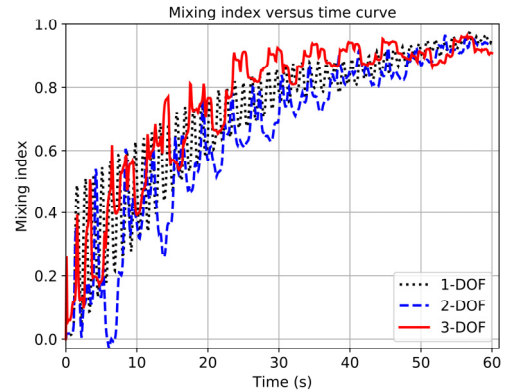


Fig. 3. Mixing index versus time curves for 1-, 2- and 3-DOF mixing cases

Fig. 3은 시간에 따른 교반 지수의 변화 곡선을 보여주는 그래프이다. 회전하는 용기 벽면과의 마찰이 없이 상단에 노출된 입자들이 빠르게 자유 표면상에서 유동하기 때문에 교반 지수 값이 단조롭게 증가하지 않고 증감을 반복하는 형태로 나타나기는 하지만 시간이 지남에 따라 교반 지수는 전반적으로 상승하는 경향을 확인할 수 있다. 특별히 1 자유도와 2 자유도의 모드에 비해 3 자유도 교반 모드에서 교반 지수가 더 빠르게 증가하는 경향을 관측할 수 있다. 따라서 교반 자유도를 추가하는 설계 방법이 교반 성능의 향상을 위한 방안이 될 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

교반기의 성능은 최종 혼합물의 균질성뿐만 아니라 균질 혼합에 도달하는 신속성에도 달려있다. 본 연구에서는 입자 혼합의 신속성을 정량화하기 위하여 교반 지수가 항상 0.8 이상을 유지하게 되는 최소 시간을 80% 교반

시간으로 정의하였다. 시뮬레이션 결과로부터 교반 시간을 계산한 결과를 Fig. 4에 막대그래프로 나타내었다. 교반 시간이 빠를수록 교반 성능이 우수함을 나타내기 때문에 본 연구에서 채택한 시뮬레이션 조건에서는 교반 자유도가 높을수록 혼합 신속성이 개선된다는 점을 다시 한번 확인할 수 있다.

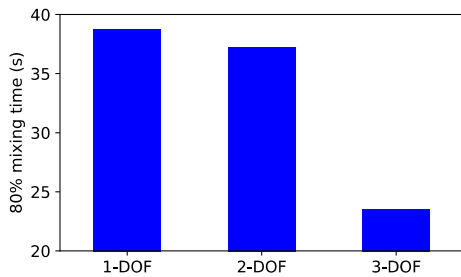


Fig. 4. Bar chart comparing the 80% mixing time for 1-, 2- and 3-DOF mixing cases

결론적으로 본 논문에서 제안하고 있는 다자유도 로봇 교반기 용합 디자인이 교반 균질성 및 신속성 측면에서 기존 1 자유도 드럼 믹서의 성능을 개선할 수 있음을 이산요소법 시뮬레이션 결과 분석을 통해 확인하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 다관절 로봇팔에 혼합용 실린더 용기를 장착한 다자유도 드럼 믹서 디자인을 제안하고 그 성능을 예측하기 위해 이산요소법 수치해석을 수행하였다. 다자유도 드럼 믹서는 5 자유도 다관절 로봇팔의 말단에 회전형 실린더 용기를 장착한 용합구조로 설계되었다. 교반 용기의 운동 자유도와 교반 성능의 상관성을 살펴보기 위하여 1 자유도부터 3 자유도까지 서로 다른 3가지 자유도를 갖는 교반 모드를 설정하고 각각의 경우에 대해 이산요소법 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 과정에서 생성한 입자는 비응집성 구형 입자로서 헤르츠-민들린 접촉 알고리즘과 구름마찰 모델을 사용하여 입자 거동을 계산하였다. 정성적 분석을 위해 세 가지 교반 모드에 대한 시뮬레이션 데이터를 시각화한 결과를 제시하였고 정량적 분석을 위해 교반 지수와 교반 시간을 계산한 결과를 비교 분석하였다. 로봇과 혼합 용기의 기하학적 특성이나 운전 조건 등 한정된 설계 및 구동 조건에서 전산 해석을 진행하였기 때문에 분석 결과를 일반화할 수는 없지만 본 연구에서 채택한 시뮬레이션 조건에서는

혼합 용기의 운동 자유도가 높을수록 교반 균질성이나 신속성의 측면에서 교반 성능이 개선되는 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

본 논문의 연구 결과의 의의는 크게 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 교반기 용기의 회전 속도 제어에 크게 의존하던 교반 최적화 방식을 본 연구에서 운동 자유도를 확대하는 방식으로 접근했다는 점이 산업용 교반기의 용합 설계 기술의 다양성에 기여할 것으로 사료된다. 둘째, 최근에 기계 기술의 지능화와 더불어 주목받고 있는 스마트 제조 기술의 핵심 기술 중 하나인 로봇 제조 분야에서 프로그램 가능한 로봇의 범용성과 입자 교반 기술의 성숙성을 융합한 차세대 교반 기술 진보에 본 연구의 결과가 이바지할 것으로 기대한다.

#### REFERENCES

- [1] N. Raval, V. Tambe, R. Maheshwari, P. K. Deb & R. K. Tekade. (2018). Chapter 19 - Scale-Up Studies in Pharmaceutical Products Development. *Dosage Form Design Considerations*. London : Academic Press. DOI : 10.1016/B978-0-12-814423-7.00019-8
- [2] K. J. Son. (2018). A Numerical Study of the Influence of Rheology of Cohesive Particles on Blade Free Planetary Mixing. *Korea-Australia Rheology Journal*, 30(3), 199-209. DOI : 10.1007/s13367-018-0020-z
- [3] K. J. Son. (2019). A Numerical Study of the Influence of Operating Conditions of a Blade Free Planetary Mixer on Blending of Cohesive Powders. *Korea-Australia Rheology Journal*, 31(1), 15-23. DOI : 10.1007/s13367-019-0002-9
- [4] Y. Wen, M. Liu, B. Liu & Y. Shao. (2015). Comparative Study on the Characterization Method of Particle Mixing Index Using DEM Method. *Procedia Engineering*, 102, 1630-1642. DOI : 10.1016/j.proeng.2015.01.299
- [5] H. R. Norouzi, R. Zarghami, R. Sotudeh-Gharebagh & N. Mostoufi. (2016). *Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows*. Chichester : John Wiley & Sons. DOI : 10.1002/9781119005315
- [6] F. Bertrand, L. -A. Leclaire & G. Levecque. (2005). DEM-Based Models for the Mixing of Granular Materials. *Chemical Engineering Science*, 60(8-9), 2517-2531. DOI : 10.1016/j.ces.2004.11.048
- [7] P. W. Cleary. (2000). DEM Simulation of Industrial Particle Flows: Case Studies of Dragline Excavators, Mixing in Tumblers and Centrifugal Mills. *Powder Technology*, 109(1-3), 83-104.

DOI : 10.1016/S0032-5910(99)00229-6

- [8] P. Y. Liu, R. Y. Yang & A. B. Yu. (2013). DEM Study of the Transverse Mixing of Wet Particles in Rotating Drums. *Chemical Engineering Science*, 86, 99-107. DOI : 10.1016/j.ces.2012.06.015
- [9] R. K. Soni, R. Mohanty, S. Mohanty & B. K. Mishra. (2016). Numerical Analysis of Mixing of Particles in Drum Mixers using DEM. *Advanced Powder Technology*, 27(2), 531-540. DOI : 10.1016/j.appt.2016.01.016
- [10] M. S. Escotet-Espinoza, C. J. Foster & M. Ierapetritou. (2018). Discrete Element Modeling (DEM) for Mixing of Cohesive Solids in Rotating Cylinders. *Powder Technology*, 335, 124-136. DOI : 10.1016/j.powtec.2018.05.024
- [11] S. Yang, Y. Sun & J. W. Chew. (2018). Simulation of the Granular Flow of Cylindrical Particles in the Rotating Drum. *Particle Technology and Fluidization*, 64(11), 3835-3848. DOI : 10.1002/aic.16342
- [12] E. Yazdani & S. H. Hashemabadi. (2019). The Influence of Cohesiveness on Particulate Bed Segregation and Mixing in Rotating Drum using DEM. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 525, 788-797. DOI : 10.1016/j.physa.2019.03.127
- [13] H. Ma & Y. Zhao. (2017). Modelling of the Flow of Ellipsoidal Particles in a Horizontal Rotating Drum based on DEM Simulation. *Chemical Engineering Science*, 172, 636-651. DOI : 10.1016/j.ces.2017.07.017
- [14] H. Mio, A. Shimosaka, Y. Shirakawa & J. Hidaka (2005). Optimum Cell Size for Contact Detection in the Algorithm of the Discrete Element Method. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 38(12), 969-975. DOI : 10.1252/jcej.38.969
- [15] K. J. Son. (2018). A Discrete Element Model for the influence of Surfactants on Sedimentation Characteristics of Magnetorheological Fluids. *Korea-Australia Rheology Journal*, 30(1), 29-39. DOI : 10.1007/s13367-018-0004-z

손 권 중(Kwon Joong Son)

[정회원]



- 2003년 2월 : 포항공과대학교 기계공학과(공학사)
- 2005년 5월 : 미국 카네기멜런대학교 기계공학과(공학석사)
- 2009년 5월 : 미국 텍사스대학교오스틴 기계공학과(공학박사)
- 2010년 8월 ~ 2015년 4월 : 아랍에미리트 두바이아메리칸대학교 기계공학과 부교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : 홍익대학교 기계정보공학과 부교수
- 관심분야 : 전산역학, 스마트제조, 인공지능, 융합교육
- E-Mail : kjson@hongik.ac.kr