

DEM-MBD 연성 해석 및 DOE 기반 6축 로봇 입자 교반기의 매니폴레이션 최적화

팀 명 : HyperEDRO

팀 원 : 변정현, 이한진

지도교수 : 손권중(홍익대학교 기계정보공학과)

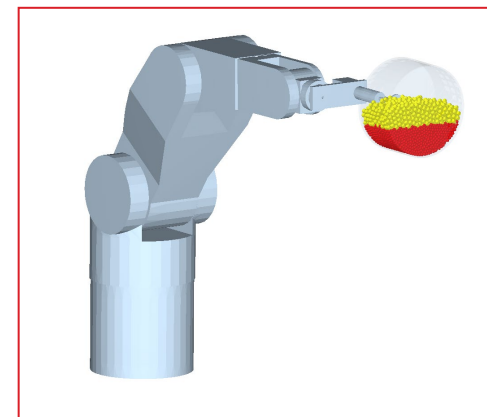
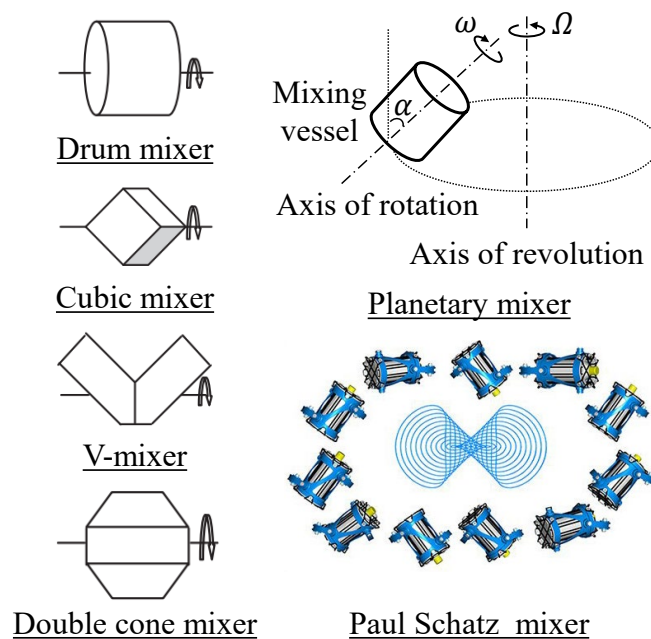
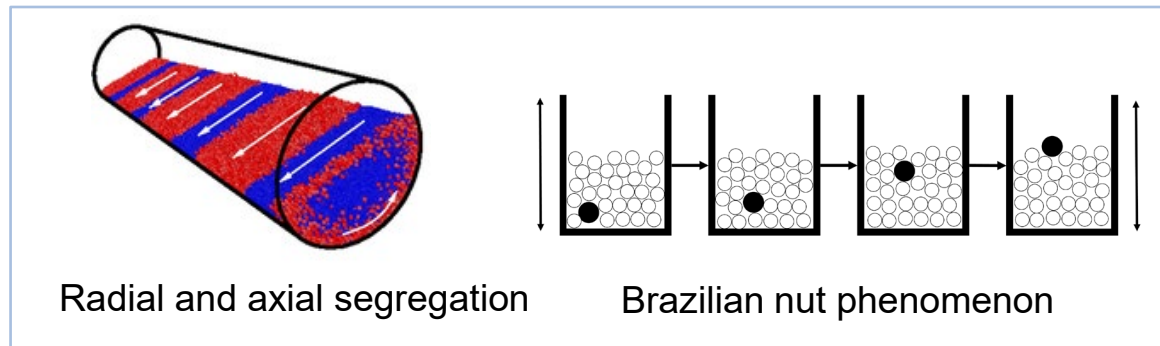
목차

- 연구 배경 및 목적
- 실험 구성 및 모니터링 시스템
- 혼합도 정량화
- Altair EDEM 기반 시뮬레이션
- 모션 최적화 및 결과
- 결론 및 향후 계획

연구 배경 및 목적

연구 배경

- 입자 혼합의 중요성
 - 제약: 성분 불균일 → 약효 저하
 - 건축: 콘크리트 불균질 → 구조물 강도 불균형
 - 식품: 첨가물 편중 → 맛/영양 불균형
- 드럼 믹서의 입자 분리 현상
 - 드럼이 짧으면 → **Radial segregation**
 - 중심·벽면에서 → **Axial segregation**
 - 진동 시 → **Brazilian nut 현상**
- 기존 산업용 교반기의 구조적·기능적 한계
 - 대부분 단순 회전 (1자유도) 구조
 - 입자 이동이 반복적이고 제한적
- 해결 방향
 - 다자유도(6자유도) 로봇 활용 → 궤적 설계 자유도 확보
 - 실시간 모션 변화 & 복잡 경로 구현 가능



연구 목표 및 방법

- 연구 목표

입자 분리 현상을 극복할 수 있는 다자유도 로봇 입자 교반기의 머니플레이션 최적화

- 연구 방법론

시뮬레이션

최적화

실험 및 검증

- 로봇 모션  MotionSolve
Multibody simulation
- 입자 교반  EDEM
Particle simulation
- 결과 분석  EDEMpy
EDEM Python library

- DOE  HyperStudy
Design exploration

- 로봇 모델  Inspire
CAD modeling
- 로봇 제어  ORiN2 SDK
Denso robot programming
-  WINCASPIII
Denso robot controlling
- 결과 분석  OpenCV



혼합도 정량화

혼합도 (MI, mixing index)

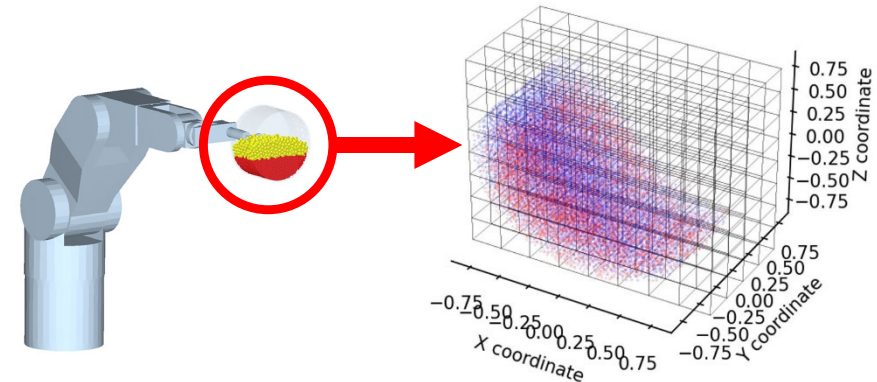
- Particles vs Pixels

- EDEM 해석 결과 모든 입자의 운동역학적 변수(위치, 속도) 데이터 획득 가능
- 실험적으로 입자의 위치 및 속도 정보 획득 어려움
 - 컴퓨터 비전 정보를 가공하여 각 입자가 차지하는 공간의 픽셀 데이터를 획득

- Lacey Method

- 서브 도메인 분할
- 서브 도메인 별 입자 비율 계산
- 입자 비율이 전체적으로 균일할수록 MI 증가
- 단점
 - 계산시간이 오래 걸려 실시간 모니터링 어려움

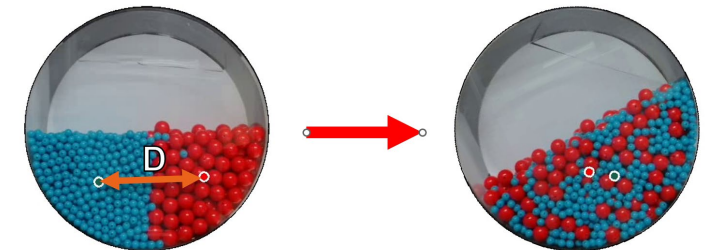
$$S_r = \frac{P(1-P)}{N}$$
$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i}{N_i} - P \right)^2$$
$$S_0 = P(1-P)$$
$$MI = \frac{S_0 - S}{S_0 - S_r}$$



- Centroidal Distance Method

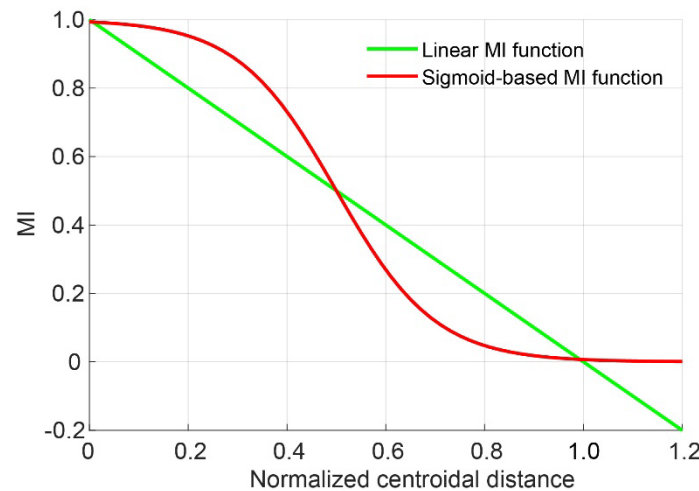
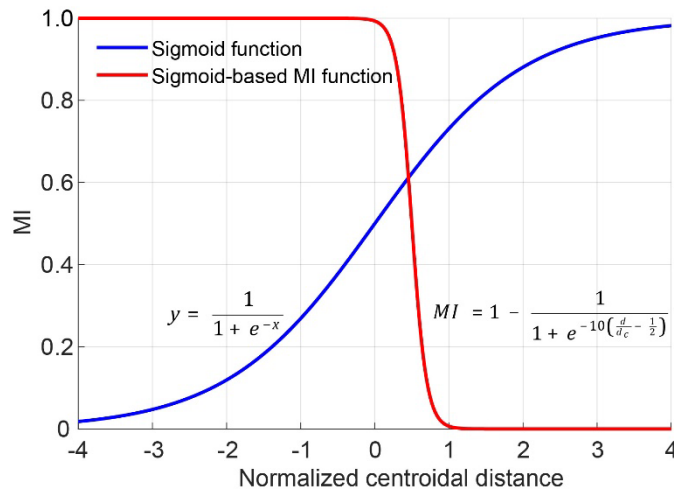
- 각 입자 그룹의 무게중심 위치 계산
- 무게중심간 거리가 가까울수록 MI 증가
- 단점
 - 계산시간은 빠르나 임계거리 d_c 산출 어렵고, 초기값 사용시 MI 음수 발생 가능
 - Radial segregation 발생시 MI가 감소하지 않고 오히려 증가하는 문제 발생

$$d = |\bar{\mathbf{r}}_{c1} - \bar{\mathbf{r}}_{c2}|$$
$$MI = 1 - \frac{d}{d_c}$$



개선된 무게중심 기반 혼합도 모델

- 참고문헌: Polymers(2024), Vol. 16, No. 11, p. 1524
- Sigmoid-based nonlinear mixing index
 - 기존 선형함수 기반 MI의 음수 발생 문제를 sigmoid함수로 해결



Linear MI

$$d = |\bar{\mathbf{r}}_{c1} - \bar{\mathbf{r}}_{c2}|$$

$$MI = 1 - \frac{d}{d_c}$$

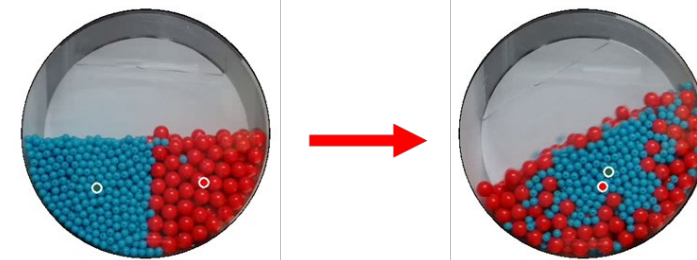


Sigmoid-based nonlinear MI

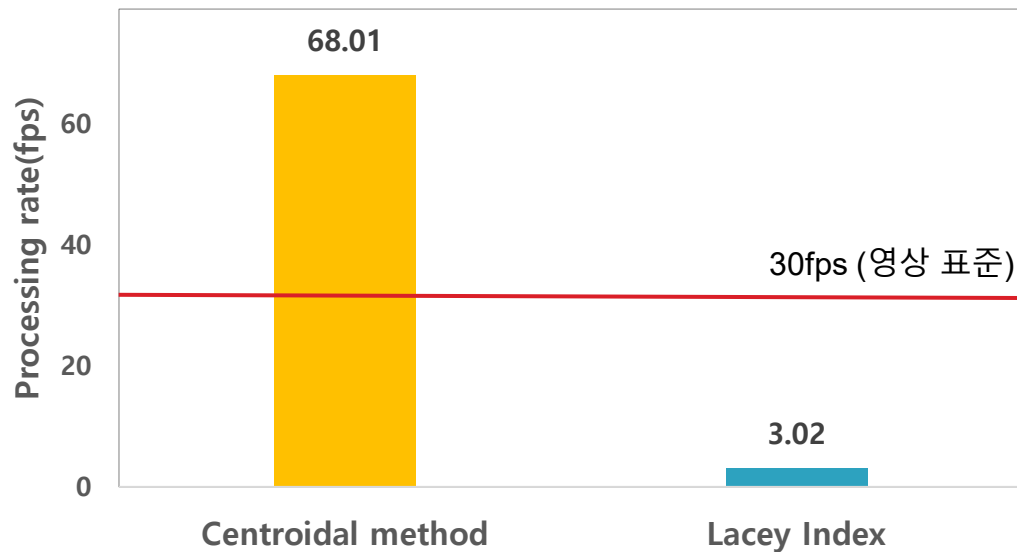
$$MI = 1 - \frac{1}{1 + e^{-10(\frac{d}{d_c} - \frac{1}{2})}}$$

- Radial segregation 발생시 MI가 높게 계산되는 문제를 표준편차와 convolution을 통해 해결

$$MI = \left[1 - \frac{1}{1 + e^{-10(\frac{d}{d_c} - \frac{1}{2})}} \right] \left[1 - \frac{1}{1 + e^{-10(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_c} - \frac{1}{2})}} \right]$$



혼합도 성능 비교 및 적용 기준

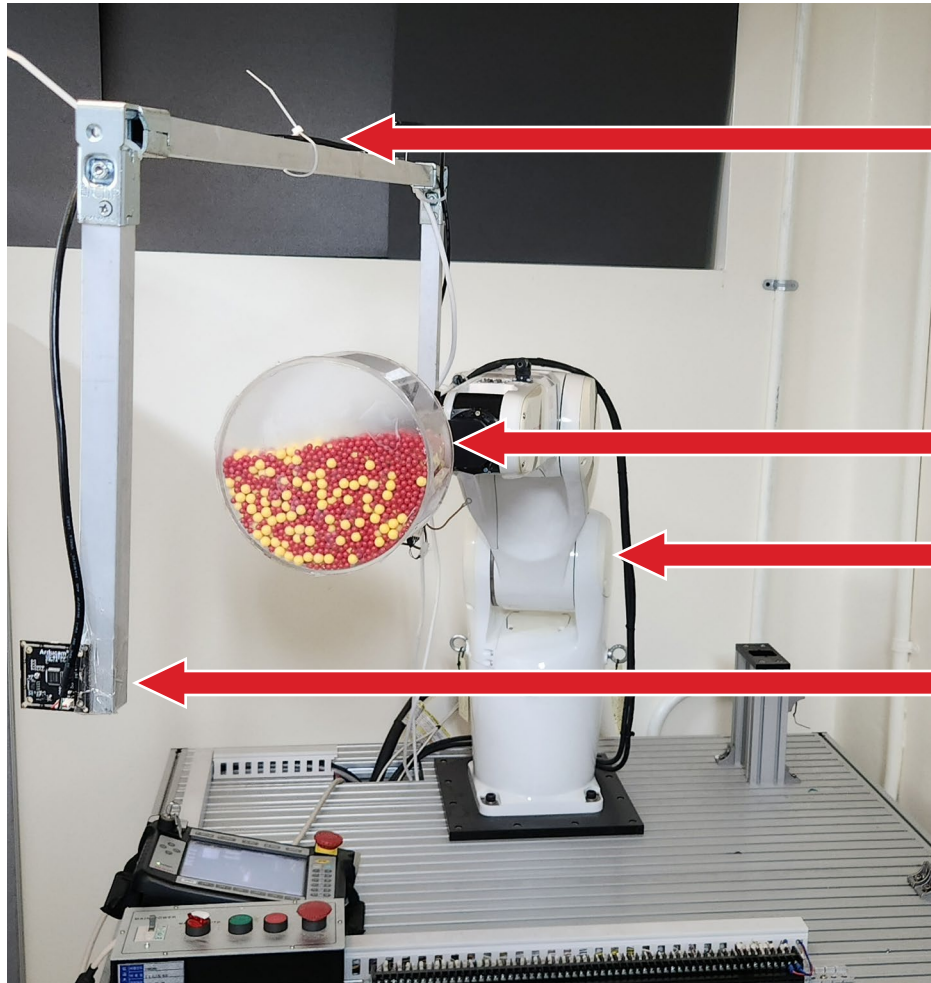


	Lacey Index	Sigmoid 기반 MI
적용 권장 영역	시뮬레이션 & DOE 최적화	실험 & 실시간 평가
특징	이론적 정확도, 공간 분포 고려	계산 속도 빠름, 실시간 적용 가능

- **Lacey Index: 정확도↑ / 속도↓ (시뮬레이션용)**
- **Sigmoid 기반 MI: 속도↑ / 실시간 적용 (실험용)**

실험 구성 및 모니터링 시스템

실험 장치 구성 (로봇 기반 다자유도 믹서)



실험 장치
(로봇 믹서 + 카메라 모듈)

Top Camera
Module

Mixing Vessel

6-axis Robot

Front Camera
Module



Robot Controller

Ethernet Link



Computer



WINCAPSIII



ORIN2 SDK



Python



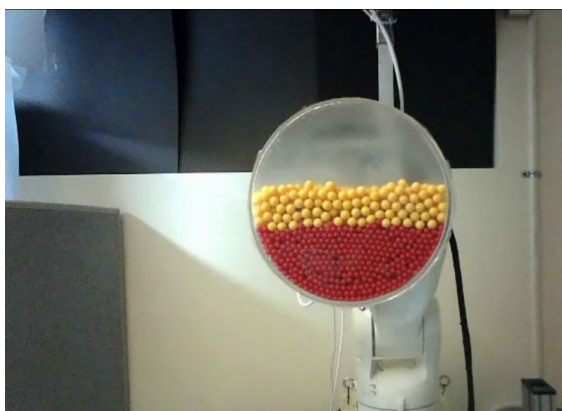
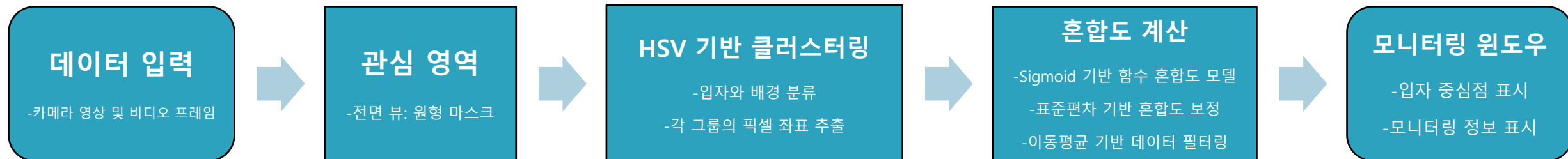
OpenCV

Robot Control

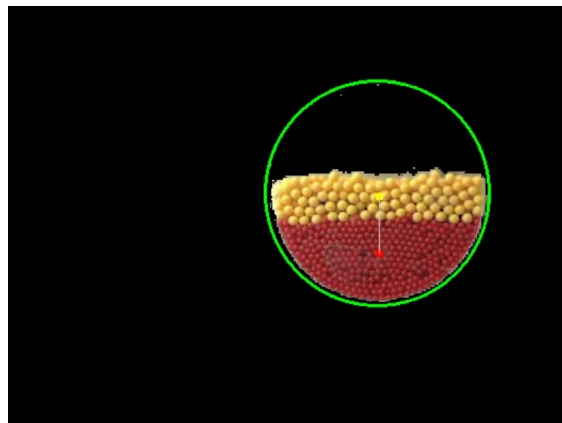
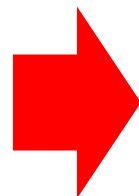
Monitoring

제어 및 모니터링
(Controller + WINCAPSIII + Python)

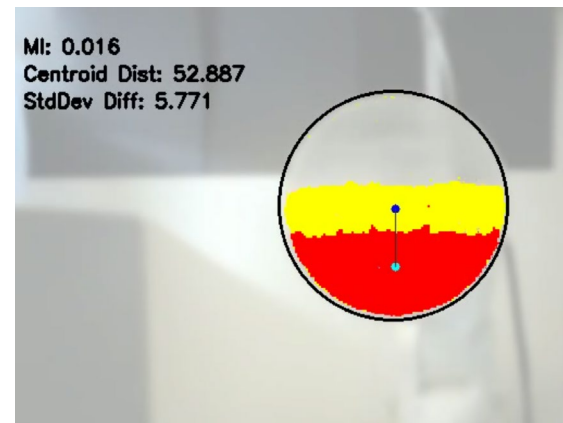
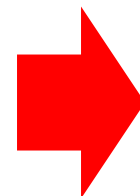
모니터링 시스템(영상 기반 HSV + Sigmoid 혼합도 계산)



원본 이미지



관심 영역 마스크



혼합도 계산 결과

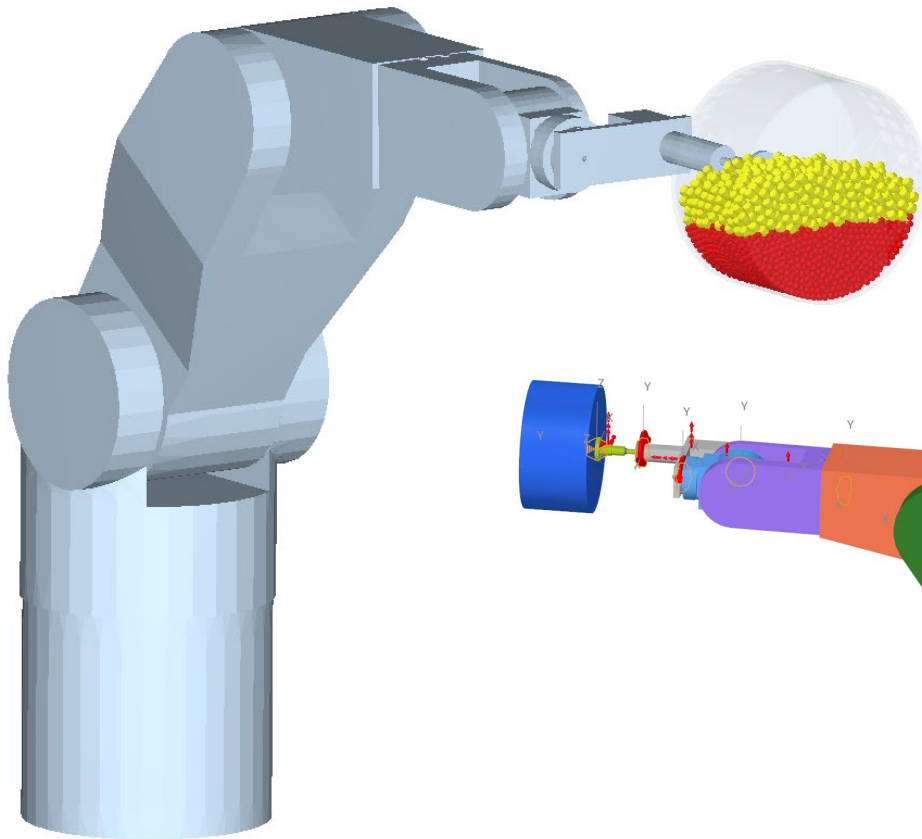


입자 색상 분류 기준

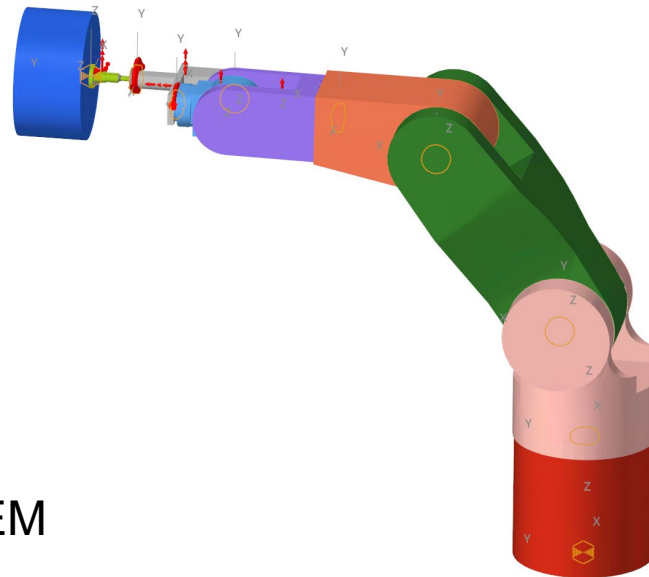
	Hue (색상)	Saturation (채도)	Value (명도)
Red	0~10, 170~180	30~180	30~255
Yellow	11~30	30~255	30~255

Altair EDEM 기반 시뮬레이션

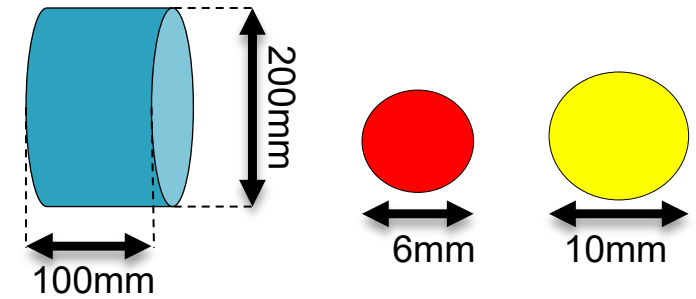
이산요소해석 및 다물체 동역학 모델링



Robot Mixer modelled in EDEM



Robot Mixer modelled in MotionSolve



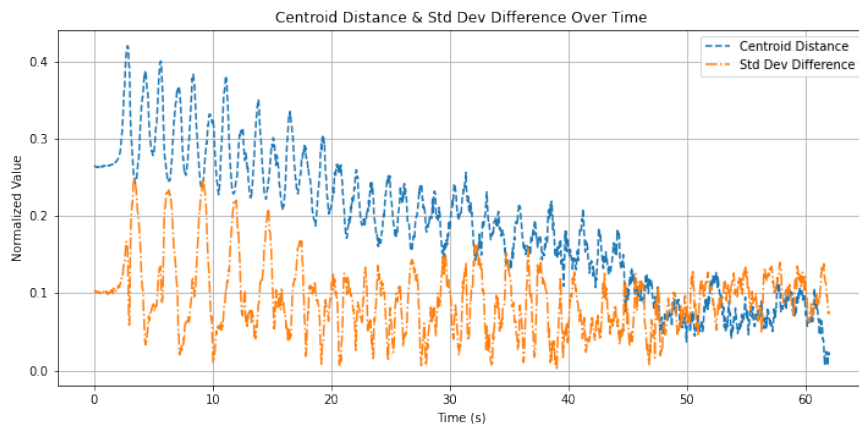
입자 스펙	
Diameter(mm)	6 / 10
Density(kg/m ³)	1080
Number of Particles	4630 / 1000

이산요소해석 접촉 모델 인자

상호작용 (입자-드럼)	
Restitution	0.7 / 0.55
Static Friction	0.2
Rolling Friction	0.01
상호작용 (입자-입자)	
Restitution	0.55
Static Friction	0.2
Rolling Friction	0.01

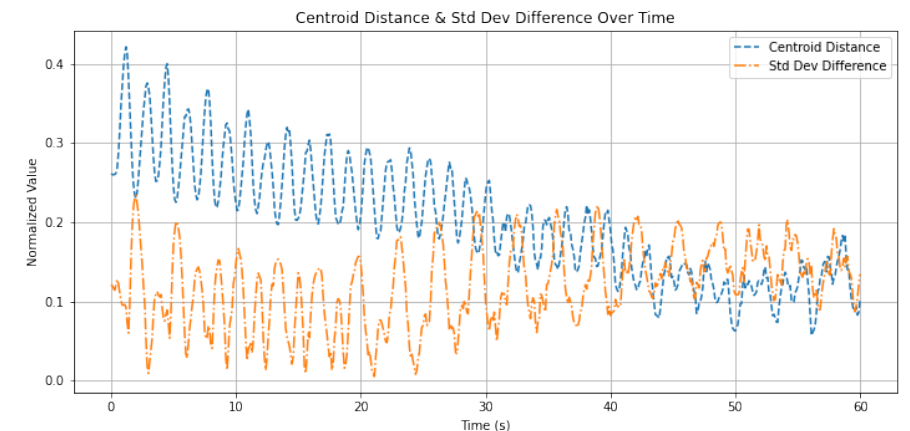
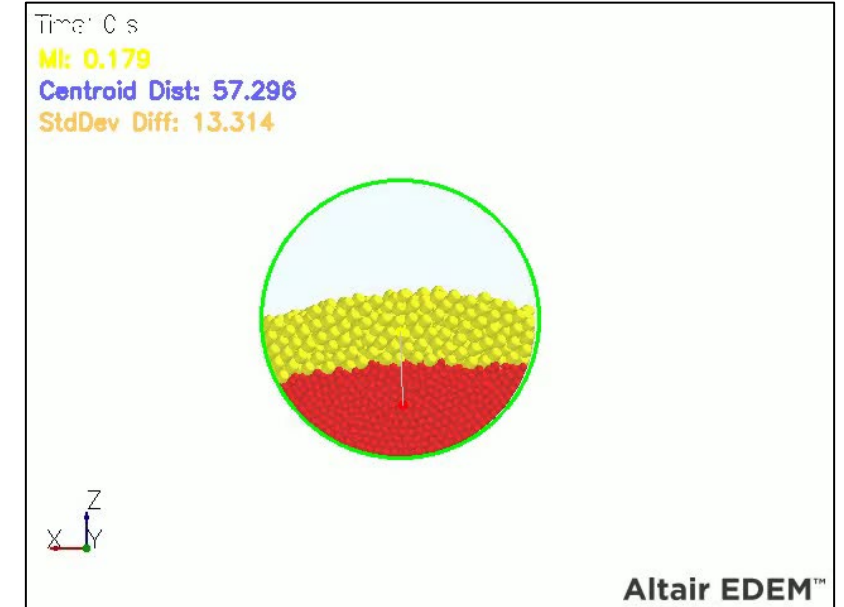
실험·시뮬레이션 기반 단순 회전 드럼 혼합 특성 비교

실험 (Experiment)



영상을 통한 입자
거동 비교

시뮬레이션 (EDEM Simulation)



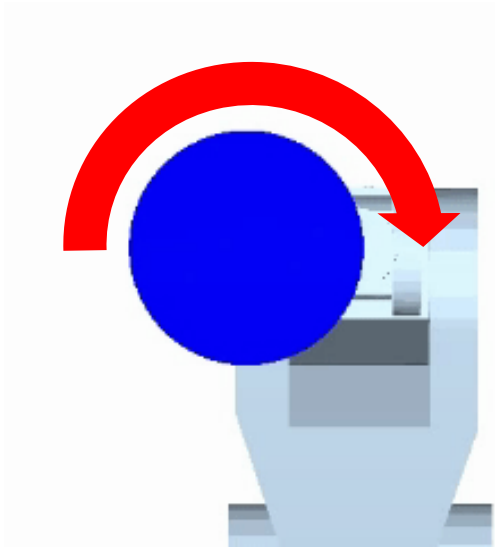
중심점 및 표준편차
거리 차 비교

Centroid Distance ↓ → 혼합 진행
Std Dev Difference ↓ → 균질화

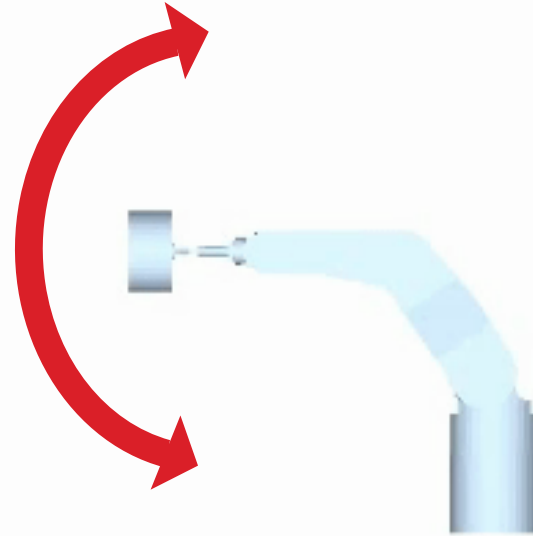
실험과 시뮬레이션의 입자 거동이 일치함을 확인

모션 최적화 및 결과

혼합 모드 설계 변수 정의



Rotating
(speed)

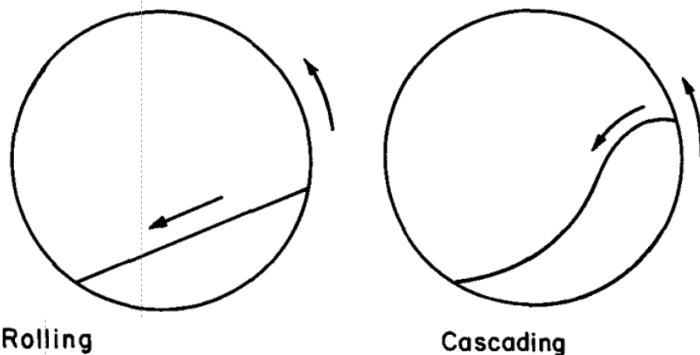


Nodding
(stroke, speed)

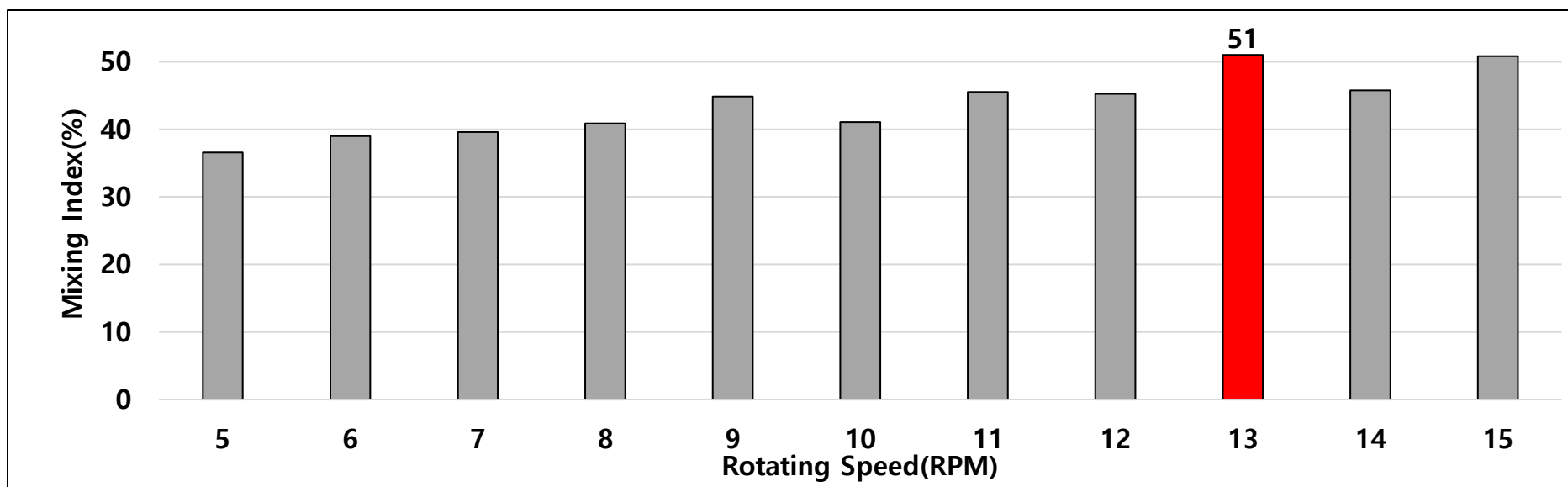
Mixing Mode	nod
Rotating speed(rpm)	5-15[step: 1]
Vertical swing stroke(deg)	15-35[step: 5]
Vertical swing rate(Hz)	0.05-0.5[step: 0.05]

본 연구에서는 **3가지 변수** (속도, 스트로크, 주파수)를 DOE 인자로 사용

단순 회전 드럼 혼합 최적화



단순 드럼 회전 혼합 모션이 혼합을 위한 Rolling 및 Cascading에 포함되는 범위 내에서 최적화를 진행

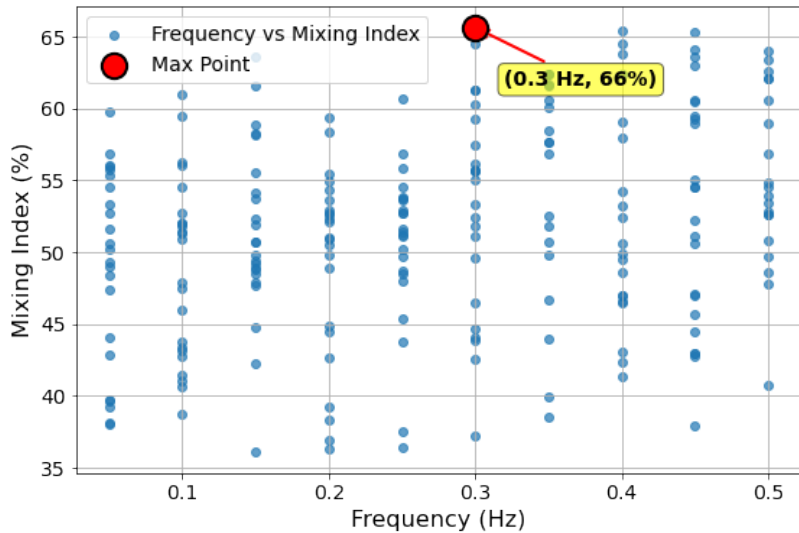


단순 회전 드럼 혼합 모션에서는 회전속도 13 rpm에서 최대 약 51%의 혼합도를 달성함을 확인

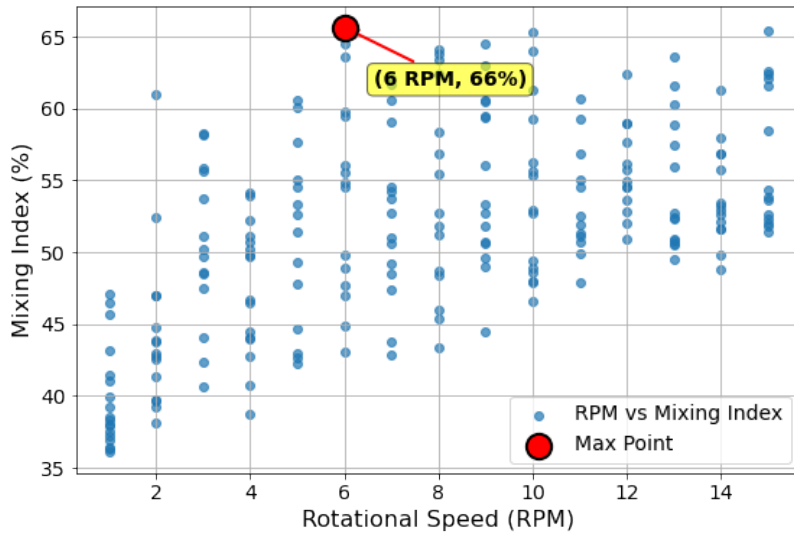
DOE 기반 모션 최적화

MELS(Modified Extensible Lattice Sequence) 방식으로
200개의 Case에 대해 DOE(Design Of Experience)를 진행

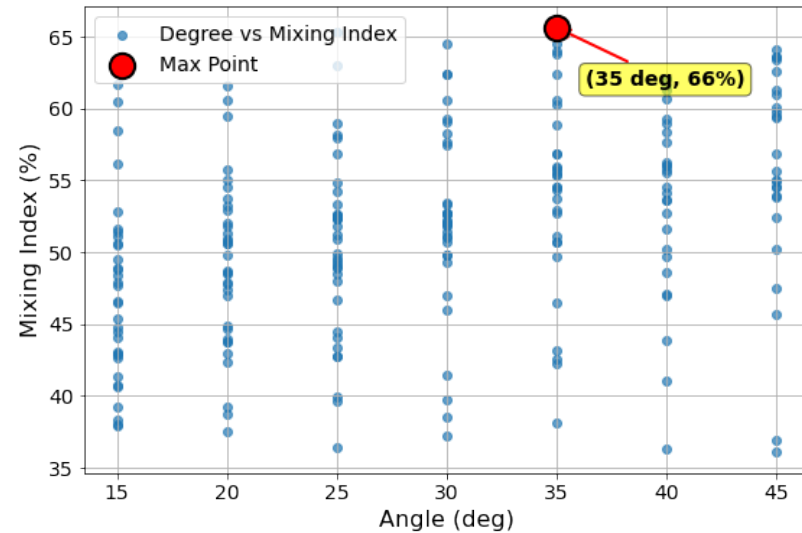
Frequency vs Mixing Index



RPM vs Mixing Index



Degree vs Mixing Index



최적 조건

Frequency	0.3 Hz
Rotating Speed	6 rpm
Angle	35°

기존 단순 회전 기반 혼합도: 약 50%
제안된 최적 조건 혼합도: 약 66%
→ **약 32% 개선**

시뮬레이션 결과: 1DOF 단순 회전 vs 2DOF 최적화 모션 (Lacey Index)

Time: 0 s

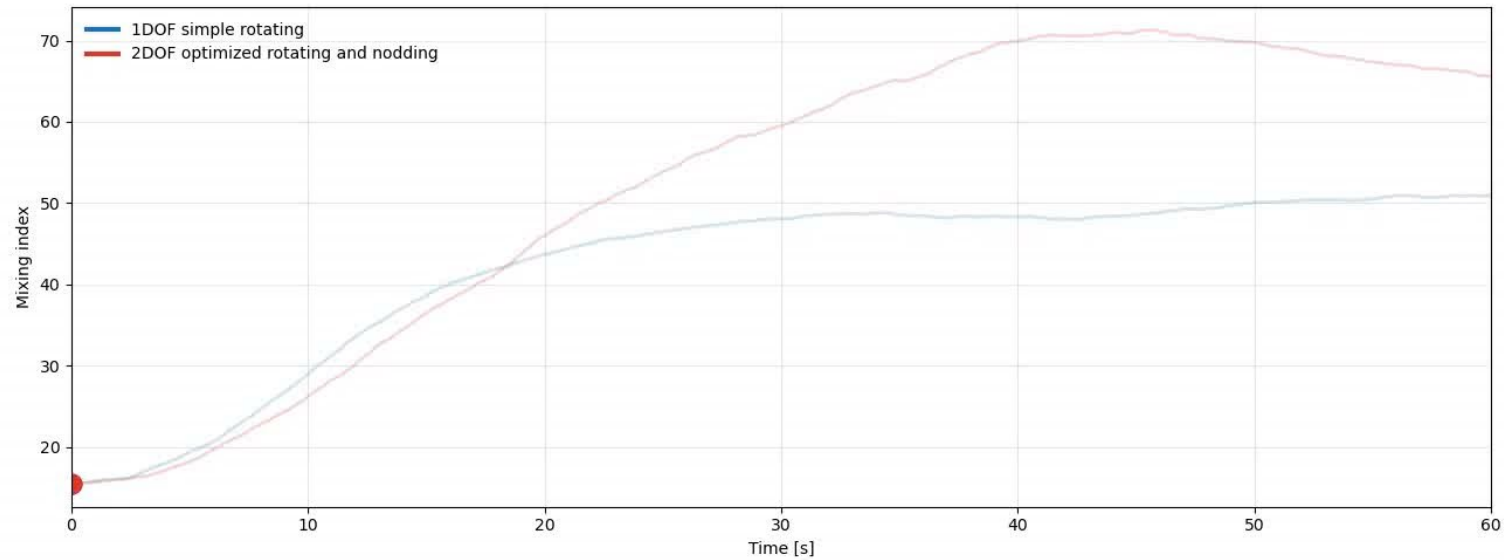


Altair EDEM™

Time: 0 s

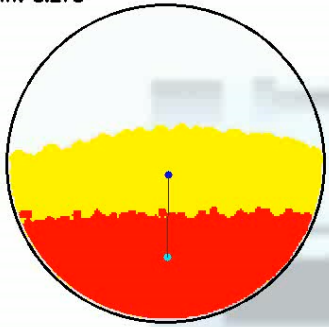


Altair EDEM™

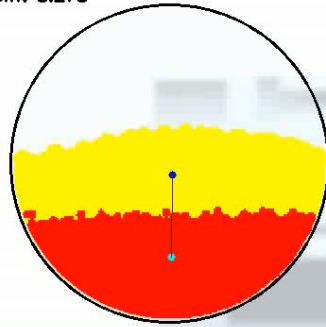


시뮬레이션 vs 실험 결과 비교 (최적화 전후)

MI: 0.000
Centroid Dist: 87.218
StdDev Diff: 8.278



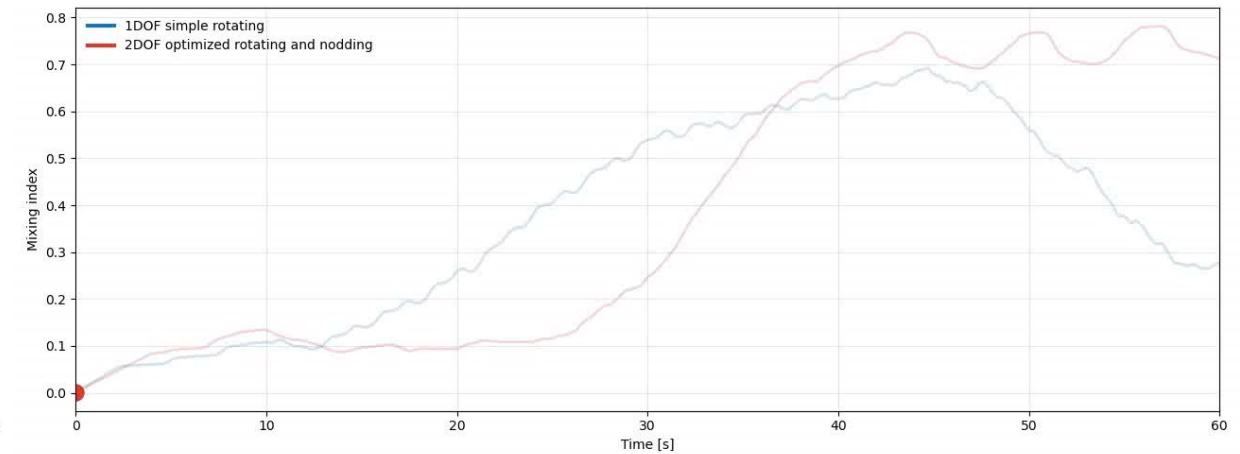
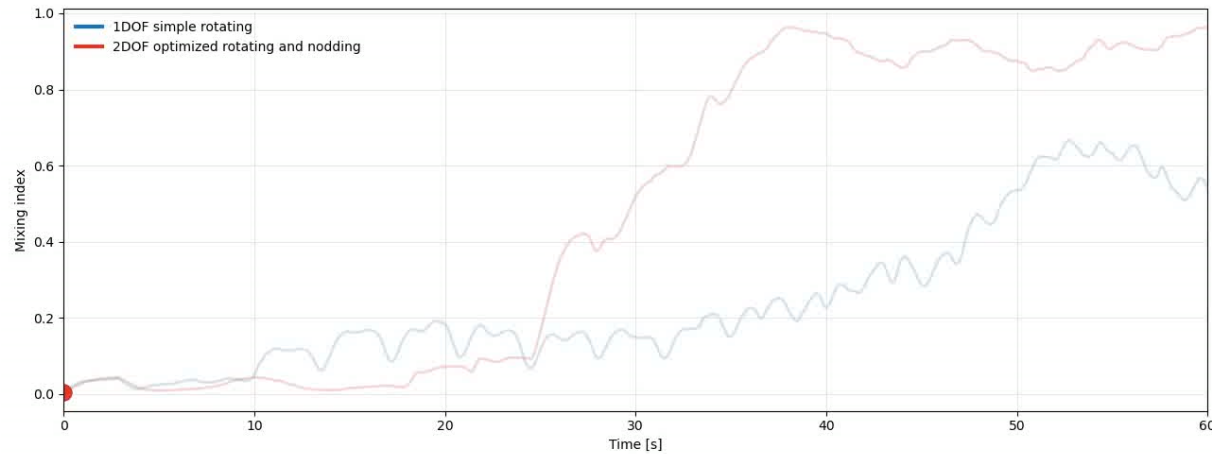
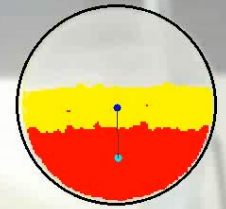
MI: 0.000
Centroid Dist: 87.218
StdDev Diff: 8.278



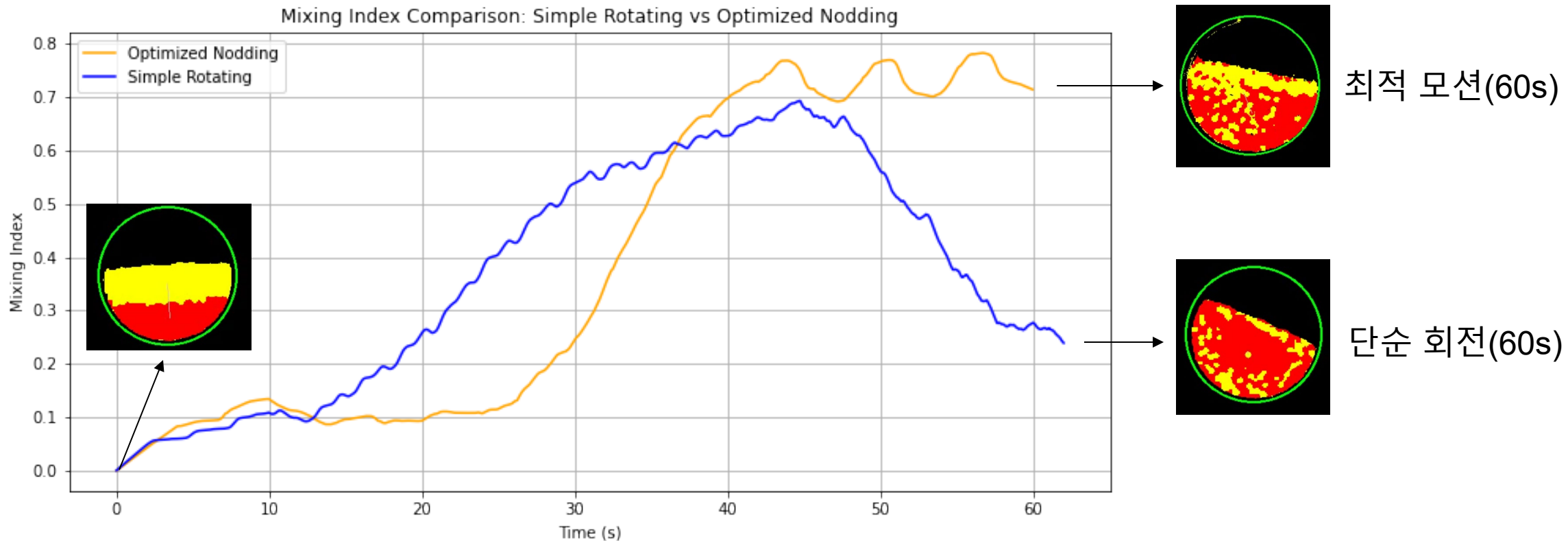
MI: 0.001
Centroid Dist: 43.764
StdDev Diff: 3.343



MI: 0.001
Centroid Dist: 53.347
StdDev Diff: 6.069



단순 회전 vs 최적화 모션: 실험 결과 비교



- 1DOF 단순 회전 방식은 초기 혼합도가 증가하다가 일정 시간 후 입자 분리가 발생하여 혼합도가 감소함.
- Radial segregation 발생 상황에서도 최적화된 2DOF 교반을 통해 MI 70%이상 달성 및 유지 가능함.
- 로봇 nodding 운동의 방향 전환시 충격이 발생하여 MI 초기 증가율과 최종값이 시뮬레이션 보다 작게 관측됨.
 - 충격 발생 시 입자가 드럼 표면으로부터 이탈하여 혼합의 주요 구동력인 마찰력이 소실되므로 교반 과정의 진행 속도가 저하됨.

결론 및 향후 계획

결론 및 향후 계획

- 결론

- 다자유도 로봇 교반 방식을 통해 입자 분리 현상을 억제하고 혼합 성능을 개선함.
- EDEM-MotionSolve 연성 해석 기반 DOE로 최적 조건을 효과적으로 도출함.
- 시뮬레이션과 실험 간 정량적 일치도를 확보하여 방법론의 신뢰성을 검증함.
- 컴퓨터 비전 기반 모니터링 시스템에 적합한 혼합도를 도입하여 계산 속도와 정확도를 개선함.

- 기대 효과

- 제약, 식품, 건축 등 산업 전반의 입자 공정에서 품질 균일성과 생산성을 향상시킬 수 있음.
- 디지털 트윈 기반 로봇 공정 최적화 기술로 확장 가능성을 확보 가능함.
- 산업 현장의 스마트 제조 및 지능형 공정 제어 기술 발전에 기여할 수 있음.

- 향후 연구 계획

- 제시된 rotating and nodding 교반 모드 이외에 다른 교반 모션에 대해서도 최적화 연구 수행 예정임.
- 혼합 상태에 따른 실시간 피드백 제어 시스템을 구축하여 자율 최적화를 구현할 계획임.
- 다양한 입자 크기, 재료 특성을 반영한 고도화된 모델링 연구를 진행할 예정임.

References

- Byun J, Son KJ. Experimental and Numerical Study of Computer Vision-Based Real-Time Monitoring of Polymeric Particle Mixing Process in Rotary Drum. *Polymers*. 2024; 16(11):1524.
- Wen, Y., Liu, M., Liu, B., & Shao, Y. (2015). Comparative study on the characterization method of particle mixing index using DEM method. *Procedia engineering*, 102, 1630-1642.
- Sahni, E., Yau, R., & Chaudhuri, B. (2011). Understanding granular mixing to enhance coating performance in a pan coater: Experiments and simulations. *Powder Technology*, 205(1-3), 231-241.
- Liao, Y., You, Y., Wang, D., Hui, Y., Xing, K., & Sun, W. (2025). Motion simulation of oat and vetch seeds in distributors based on DEM-CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 233, 110176.
- 손권중. (2020). 이산요소법 교반 시뮬레이션을 이용한 다자유도 로봇 믹서 성능 평가. *한국융합학회논문지*, 11(10), 219-224.

감사합니다

Team HyperEDRO