



전산유동해석을 활용한 제트유동 내 CaCO_3 입자 확산 연구

이상민¹·김병천¹·노형주²·이광현²·장경식^{1,†}
울산대학교 기계공학부¹
하이에어코리아²

The Study of CaCO_3 Particle Diffusion in Jet Flow Using Computational Fluid Dynamics

Sangmin Lee¹·Byeong-Cheon Kim¹·HyungJu Roh²·GwangHyun Lee²·Kyoungsik Chang^{1,†}
School of Mechanical Engineering, University of Ulsan¹
Hi Air Korea²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recently, with the acceleration of global warming, the importance of carbon neutrality is being emphasized. In response to this, various technologies are being developed to achieve carbon neutrality, with Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) being a prominent example. Research has been conducted on the injection technology to environmentally discharge carbon captured by using one of the carbon capture technologies, HAK-CRS. In this study, numerical simulations were performed using commercial software, ANSYS Fluent, to understand the dispersed multiphase flow between a water jet and CaCO_3 particles. The analysis focused on the differences in particle behavior when injecting CaCO_3 with different flow rates. It was observed that as the mass flow rate of CaCO_3 increased, there was a tendency for the particles to deviate from the flow of the jet and rapidly fall, influenced significantly by gravity. These results indicate that, for CaCO_3 particles to disperse widely, the flow rate should not be excessively high. Given the potential adverse impacts on marine ecosystems due to the high density of CaCO_3 , research on injection technology should also be conducted.

Keywords : Carbon neutrality(탄소 중립), Green ship(친환경 선박), CCUS(탄소 포집·활용·저장 기술), CaCO_3 (탄산칼슘), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Discrete phase model(이산상 모델)

1. 서론

최근 지구 온난화의 심화로, 탄소의 배출량 감소를 위해 전 세계에서 다양한 노력을 하고 있다. 지구 평균 온도의 상승을 억제하기 위해 전 지구적으로 이산화탄소 배출량을 감축하고, 2050년에 탄소 중립(Net-zero)을 목표로 하고 있다 (IPCC, 2018). 전체 온실가스 배출량 중 해운 분야는 약 2.9%를 차지하며, 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서는 해운 분야의 탈탄소화를 위해 여러 전략들을 수립하여 선박의 온실가스 배출량을 감축하는 목표를 계획하고 있다 (Jung et al., 2018).

선박의 온실가스 감축을 위해서 친환경 선박을 개발 중에 있다. 친환경 선박이란 기후변화 위기에 능동적으로 대응하는 수단

으로서 조선 및 해운산업의 신성장동력으로 주목받고 있다 (Ahn, 2022). 친환경 선박은 크게 3가지 구분되며, 해양 오염을 저감하는 기술을 적용한 선박, 선박 에너지 효율을 향상시키는 기술을 적용한 선박, 환경친화적 에너지를 동력원으로 사용하는 선박이다. 선박으로부터의 온실가스 저감 로드맵인 IMO MEPC72 2018에 따라 온실가스(GHG, Greenhouse Gas) 배출 감축에 대한 국제해사기구(IMO)의 전략이 수립되었으며, 그에 따른 후속 프로그램 또한 다양하게 연구 및 개발을 진행 중에 있다. 현재 수립되고 있는 온실가스 관련 정책들에 의하면, 선박 배기가스의 이산화탄소를 포집하고 저장할 수 있는 기술인 CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage) 기술이 각광받을 것으로 예상된다 (Koh, 2022). 이러한 경향에 따라 여러 기업에서 GHG 감축

전략으로 CCUS 기술을 활용하기 위해 다양한 형태의 기술이 연구 개발되고 있다.

탄소배출을 포집 및 저장을 통해 감소시키는 모든 종류의 개념을 CCUS라고 한다. CCUS 기술에는 여러 가지 기술들이 존재하는데, 각각의 기술은 탄소 배출 감소 및 탄소 활용에 특화된 목적과 방법을 가지고 있다. CCUS를 활용한 대표적인 기술로는 후속 포집 기술(post-combustion capture), 선도 포집 기술(pre-combustion capture) 등이 있다. 후속 포집 기술은 산업 공정이나 발전소와 같은 CO₂ 배출원에서 발생하는 이산화탄소를 분리하고 포집하는 방식이다. 주로 연기나 폐기물 gas와 같은 탄소가 함유된 gas에서 CO₂를 분리하는 것이다. 이 기술은 기존 산업 시설에 탄소 포집 장치를 추가하여 CO₂를 포집하는 방식으로 구현된다. 다음으로 선도 포집 기술은 연료를 가스화시키고, 가스 정제 및 변환 단계에서 CO₂를 분리하여 포집한다, 선도 포집 기술은 주로 천연 가스 및 석탄 등의 탄화수소 연료에서 사용된다 (Kim and Nah, 2019).

다양한 탄소 포집 기술 중 HAK-CRS(Carbon Reduction System), 하이에어코리아와 한화오션에서 개발한 OCCS(Onboard Carbon Capture System) 장비는 선박 연소 후 배기가스에 포함된 CO₂를 습식 흡수(wet scrubbing)하여 화학 반응을 통해 고형화(solidification)하며, 고형화된 CO₂ 화합물을 선 외로 배출 또는 재활용하는 것을 목적으로 개발된 장비이다. 공정은 4가지 순서로 구분된다(Fig. 1). 첫 번째로는 quenching process, 연소 후의 배기가스를 해수를 활용하여 냉각하고, 배기가스에 포함되어 있는 이물질질을 제거해 이후 공정에서 발생하는 부반응을 최소화하는 단계이다. 두 번째로는 wet scrubbing process, 스크러버 내부에 염기성 화합물(NaOH, NH₄OH 등)을 순환시켜 유입된 배기가스의 CO₂ 성분이 물에 흡수된다. 이와 함께 순환되는 흡수 용액과 반응하여 탄산염(Na₂CO₃, (NH₄)₂CO₃ 등)을 생성하는 단계이다. 세 번째로는 solidification process, 생성된 탄산염에 CaO(Calcium Oxide)를 첨가하여, CaCO₃(Calcium Carbonate) 형태로 CO₂를 고형화한다. 결정화된 CaCO₃를 고체-액체 분리 장치를 사용하여 흡수 용액과 분리하여 고형물은 하부로 배출하고, 분리된 흡수 용액은 저장탱크로 이송하여 스크러버에서 재사용하는 단계이다. 네 번째로는 discharge/storage process, 분리 공정에서 하부로 배출된 고형물을 quenching process에서 사용 후 배출되는 해수와 혼합하여 선외로 배출하거나, 상황에 따라 육상에서 재활용할 수 있도록 저장탱크로 이송 및 보관하는 단계이다. 이 기술을 활용하여 선박에서 발생하는 배기가스 내 포함된 CO₂를 CaCO₃로 고형화하여 CO₂를 포집한다.

CaCO₃는 해양 생물군의 구조체 형성에 사용되는 해양 생태계 구성에 필요한 성분이다 (Lee et al., 2023). 주로 굴이나 홍합 껍질 등 다양한 생물군의 구성물이며, 산호말의 골격 형성에도 사용된다. 또한 해양의 탄소 저장과 탄소 격리에도 큰 기여를 한다 (Min, 2018). 따라서 해양 생태계 내 탄산칼슘이 사용되므로 HAK-CRS 장치를 이용하여 발생한 CaCO₃가 선외로 배출되더라도 해양 생태계에 미치는 영향은 적을 것으로 예상된다. 하지만 CaCO₃의 밀도가 집중적으로 높아지면 해양의 산성화가 진행될 수 있기 때문에 이를 해소하기 위해 분사 기술이 필요하다.

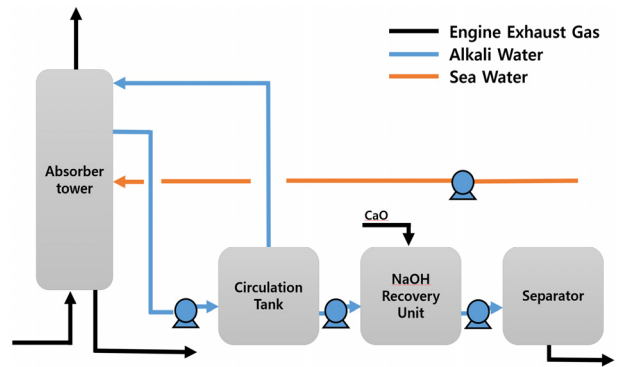


Fig.1 CO₂ absorption using Alkali water

본 연구에서는 CaCO₃가 포함된 제트 유동에 대해 전산 유동 해석을 진행하여, CaCO₃ 입자의 확산에 대해 연구하였다. CaCO₃ 입자의 확산을 분석하기 위해 상용 소프트웨어인 Ansys사의 FLUENT version 18.2를 이용하여 해석하였다. 액체 상태의 제트 유동과 고체 상태의 CaCO₃의 거동을 모사하기 위하여 DPM(Discrete Phase Model)을 사용하였다. 2가지 CaCO₃ 질량 유량에 대한 제트 유동과의 상호작용과 확산 및 거리와 시간에 따른 분포를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

해수 제트 유동은 연속상으로 연속방정식과 레이놀즈 평균 나비에 스톡스 방정식(Renolds Averaged Navier-Stokes, RANS)을 풀어 계산된다. 제트 유동을 모사하기 위해 realizable k-ε 난류모델을 사용하였으며, 벽면에서 유동 모사를 위해 Standard wall function을 사용하였다. 사용된 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) + F_{particle} \end{aligned} \quad (2)$$

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k}) \delta_{ij} \quad (3)$$

식 (1), (2)는 각각 연속방정식과 나비에-스톡스 방정식이며, 식 (2)의 $F_{particle}$ 은 CaCO₃ 입자에 의한 외력을 나타내었다. 여기서 ρ 는 물의 밀도, u_i 와 u_i' 는 각 방향의 시간평균속도 성분과

난류섭동속도성분, μ 는 물의 점성계수, $\overline{\rho u_i' u_j'}$ 는 난류섭동 속도성분에 의한 레이놀즈 응력항을 나타낸다.

k - ϵ 난류 모델을 사용할 때, 와점성계수, μ_t 는 $k^{3/2}/\epsilon$ (난류 특성길이 척도)와 $k^{1/2}$ (난류 특성속도 척도)에 의해 식으로 표현된다 (Reynolds, 1987).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\epsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (7)$$

위의 식 (5), (6)은 k (난류 유동 에너지)와 ϵ (난류 운동 에너지 소산율)의 수송 방정식이다. 여기서, G_k 는 난류생성항을 나타내고 C_2 는 1.9, σ_k 는 1.0, σ_ϵ 은 1.2, C_μ 는 0.09의 값을 가지는 난류 모델 상수이다.

CaCO₃ 입자는 분산상으로 뉴턴 제 2법칙을 적용하여 거동을 모사하였으며, drag force(항력), virtual mass force(가상 질량력), pressure gradient force(압력 경도력), saffman 양력, 중력, 부력을 고려하였다. 입자와 입자 사이의 충돌은 고려하지 않았다 (Ansys, 2018).

$$\begin{aligned} m_p \frac{du_p}{dt} = F_{Drag} + F_{Pressure\ gradient} \\ + F_{Virtual\ mass} + F_{Gravity} + F_{Lift} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F_{Drag} = \frac{\rho A_p}{2} C_D |u - u_p| (u - u_p) \\ = \frac{3}{4} m_p \frac{\rho}{\rho_p} \frac{C_D}{d_p} |u - u_p| \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} F_{Pressure\ gradient} = \\ \int_A -pdA = \int_V \nabla p dV = - \frac{m_p}{\rho_p} \nabla p \end{aligned} \quad (10)$$

$$F_{virtual\ mass} = \frac{m_p}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d(u - u_p)}{dt} \quad (11)$$

$$F_{Gravity} = m_p \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g \quad (12)$$

$$F_{Lift} = m_p \frac{2K\nu^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (u_i - u_{p,i}) \quad (13)$$

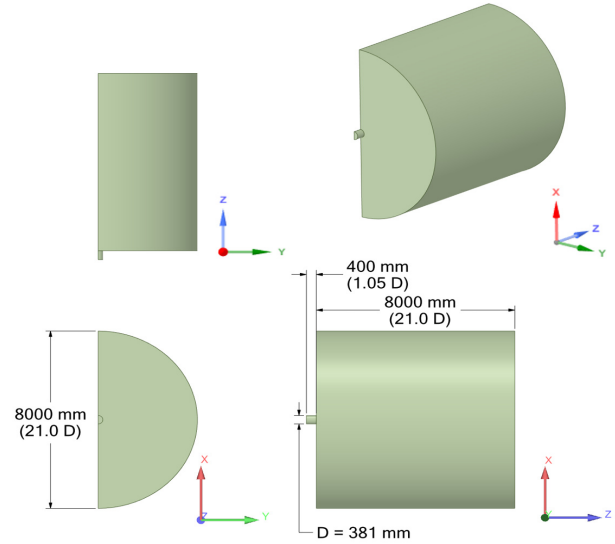


Fig. 2 The geometry of present work

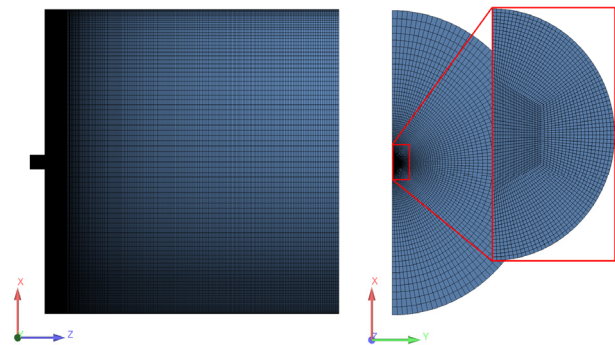


Fig. 3 The schematic diagram of grid

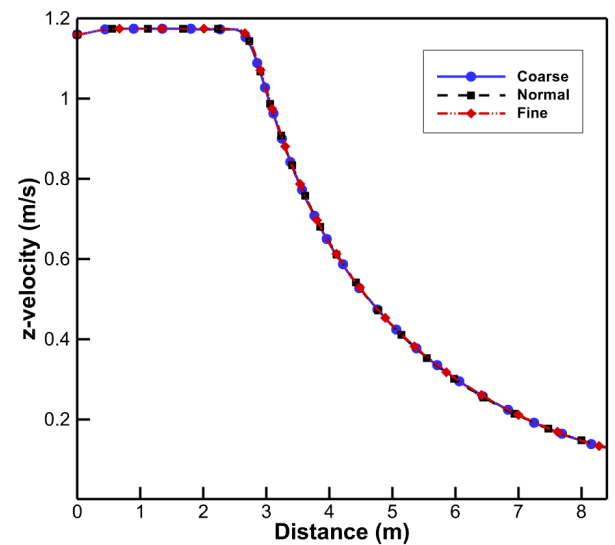


Fig. 4 Mesh independence with respect to the number of nodes

K 는 2.594, d_{ij} 는 deformation tensor이다. 식 (8)은 입자의 운동방정식을 나타내었으며, 식 (9)–(13)은 입자의 거동을 모사하기 위해 사용된 모델 식을 나타내었다. 수치 해석 기법으로 속도와 압력은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 알고리즘을 사용했으며, 공간 차분은 압력과 운동량은 2차 정확도의 상류 차분법을 적용하였고, 난류 운동 에너지와 난류 소산율은 1차 정확도의 상류 차분법을 적용하였다.

2.2 해석 형상

본 연구에서 사용된 모델의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 입구 노즐 직경(D)은 산업체(하이에어코리아)에서 사용하는 노즐의 직경을 이용하여 381mm로 선정하였다. 효율적인 해석 진행을 위하여 대칭 경계 조건을 이용하여 실린더의 절반 형상만 해석을 진행하였다. 실린더의 형상은 유동 방향으로 8400mm, 반경 방향으로 2000mm이다.

2.3 해석 격자

본 연구에서의 해석 격자는 제트 유동을 활용한 선행 연구를 참고하여 생성하였다. 해석 격자는 전체가 육면체(hexahedral) 격자로 구성되어 있고, ansys meshing을 이용하여 격자를 생성하였다. Fig. 4는 격자 의존도 시험을 진행하였으며, 정상상태일 때, CaCO₃입자에 의한 제트유동 중심부의 z방향 속도를 거리에 따라 나타내었다. 약 180만개, 340만개, 510만개 총 3가지 격자 모델의 입자가 포함된 제트 유동의 정상상태 해석의 수렴을 통해 격자 의존성 검토를 수행하였다. 3가지 격자 모델 간의 z방향 속도가 수렴함을 확인할 수 있었다. 최종적으로 계산의 정확도를 고려하여 3,388,071개의 격자로 선정하여 해석을 수행하였다. DPM을 활용한 입자 확산 분석을 위해 선행 연구에서 사용한 70만개의 격자보다 조밀한 격자계를 구성하였다 (Choi et al., 2019). 격자의 최대 skewness는 0.3330이며, 최소 orthogonal quality는 12.7로 구성하였다. Standard wall function을 적용하였으며 y^+ 값은 약 150으로 설정하였다. 30이상 300이하의 값으로 $k-\epsilon$ 모델의 사용이 적합하다.

2.4 경계 조건

Fig. 5는 해석에 사용된 경계 조건을 나타내고 있다. 산업체(하이에어코리아)에서 사용하는 노즐의 입구 속도는 1.16m/s, 출구 압력은 0Pa, 물성은 해수이다. 중력은 -x 방향으로 9.81m/s²으로 설정하였다. 입자는 구형의 강체로 가정하고, CaCO₃ 입자의 밀도(ρ_p)는 2,711kg/m³, 직경(d_p)는 9.25 μ m로 설정하였다. CaCO₃의 질량 유량(\dot{m}_p)은 2가지 조건(Case1, Case2)에 대해 해석을 진행하였으며, 각각 1150, 2300 kg/hr이다. CaCO₃ 입자는 Inlet surface에서 분사되며, 속도는 1.16m/s이다. CaCO₃ 입자의 질량 유량과 입구 속도, Inlet 경계면의 격자수에 따라 Parcel의 직경과 밀도가 결정된다(Table1, Table 2). Parcel 질량과 지

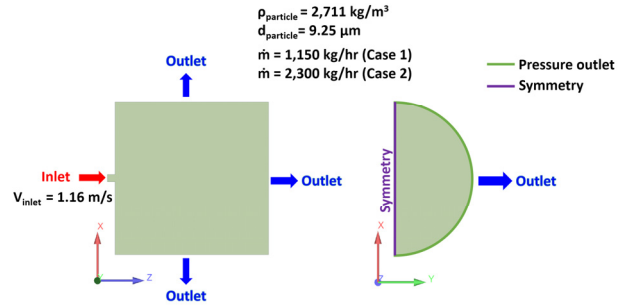


Fig. 5 The schematic diagram of boundary conditions

름은 Table 3에 나타내었다. Parcel 이란 모든 입자들의 거동을 해석하기에는 계산 자원 상 한계가 있기 때문에 전체 입자를 대표하는 입자를 활용하여 유동 현상을 분석하는 것이다. 입자의 크기, 속도, 온도 등 동일 특성에 대한 입자들을 묶어서 계산하는 단위이다. 식은 아래와 같다.

$$NP = \dot{m}_s \frac{\Delta t}{m_p} \tag{14}$$

Table 1 The setting of Eulerian(seawater) system

Name	Value
Turbulence model	Realizable k- ϵ , Standard wall function
Inlet velocity [m/s]	1.16
Pressure outlet [Pa]	0
Ambient fluid material	Seawater

Table 2 The setting of Lagrangian(CaCO₃) system

Name	Value
Physics models	Virtual mass force, Pressure gradient force, Saffman lift force, Two-way turbulence coupling
Particle shape	Sphere
Particle density(CaCO ₃) [kg/m ³]	2,711
Particle diameter [μ m]	9.25
CaCO ₃ mass flow rate [kg/hr]	Case 1: 1,150 Case 2: 2,300

Table 3 The information of parcel for case 1 and case 2.

Parameter	Case 1	Case 2
Parcel diameter [m]	9.41 $\times 10^{-4}$	1.19 $\times 10^{-3}$
Parcel mass [kg]	1.18 $\times 10^{-6}$	2.37 $\times 10^{-6}$

NP 는 Parcel에 포함된 입자의 수, \dot{m}_s 는 입자의 질량 유량, Δt 는 시간 간격, m_p 는 입자의 질량이다.

입자의 경우 벽면에는 reflect 조건, outlet에는 escape 경계

조건으로 설정하였다. 시간의 따른 입자와 제트 유동과의 상호작용을 파악하고 CaCO₃ 입자의 확산을 해석하기 위해 비정상(unsteady) 해석을 진행하였다. 제트 유동을 완전히 발달시킨 후 입자 분사 및 입자 추적을 진행하였다. Δt는 0.01초로 설정하였으며, 입자가 입자 밀집으로 인해 첫 번째 낙하가 발생하는 시간인 60초까지의 계산을 수행하였다.

3. 결과

3.1 유동 방향 속도분포

Fig. 6에서는 대칭면에서의 유동장의 속도 분포와 전체 해석 영역에서 입자의 분포를 시간에 따라 나타내었다. CaCO₃ 입자의 질량 유량에 따라 Case 1과 Case 2를 해석하였다. 10초 일 때, 두 Case에서 모두 발달된 제트 유동을 따라 CaCO₃ 입자가 이동하는 것을 볼 수 있다. 이후 20초부터 제트 유동의 유속이 점점 감소한다. 제트 유동의 운동량이 입자의 운동량으로 전달되기 때문이다. 입자의 분사 초기에는 입자가 제트 유동을 따라 이동하지만 입자는 중력에 의해 중력방향(-X 방향)으로 이동하며, -X 방향으로의 이동이 제트 유동과 CaCO₃ 입자 사이의 불안정성을 발생시킨다. 이러한 불안정성은 입자들의 밀집을 증가시키고, 입

자들의 유동 방향 속도를 감소시킨다. 따라서 입자들이 -X 방향으로 이동하고, 제트 유동의 영향에서 벗어나 낙하한다. 또한 시간 변화에 따른 제트 유동의 길이 변화는 제트 유동의 분사와 입자의 낙하가 동시에 진행되기 때문에 발생한다. 입자 밀집으로 인한 제트 유동의 유속 감소와 입자 낙하로 인한 유속 상승이 반복적으로 나타난다.

CaCO₃ 입자 질량 유량에 따라 입자들의 낙하 위치가 달라진다. CaCO₃ 질량유량이 높은 Case 2의 입자 낙하 위치가 Case 1의 낙하 위치보다 노즐에 더 가깝게 관찰되며, 60초 일 때, Case 2는 약 4m 이내에서, Case 1은 8m 이내에서 낙하가 예측되었다.

Fig. 7은 60초 때, 1m 간격으로 XY 평면에서의 유동방향(+Z 방향) 속도 분포를 나타내었다. Case 1은 제트의 중심에서 높은 유속을 보이며 노즐에서 멀어질수록 유속이 감소한다. Case 2도 비슷한 경향을 보인다. 그러나 Case 1보다 노즐과 더 가까운 위치에서 감소하는데 이는 Case 1보다 Case 2의 Parcel의 질량이 더 무겁기 때문이다. Case 1과 Case 2의 또 다른 차이점은 제트의 길이이다. Case 1에서는 제트 유동의 코어 구조가 뚜렷이 관찰된다. 그러나 Case 2에서는 4m 이후에는 확인할 수 없다. Case 2의 높은 질량 유량으로 인해 입자가 초기에 밀집되어 제트 유동을 방해하기 때문이다. Case 1의 경우 4m 구간의 입자의 밀집으로 인해 6m 구간의 분사 속도가 4m 구간의 분사 속도보다 더 높음을 확인할 수 있다.

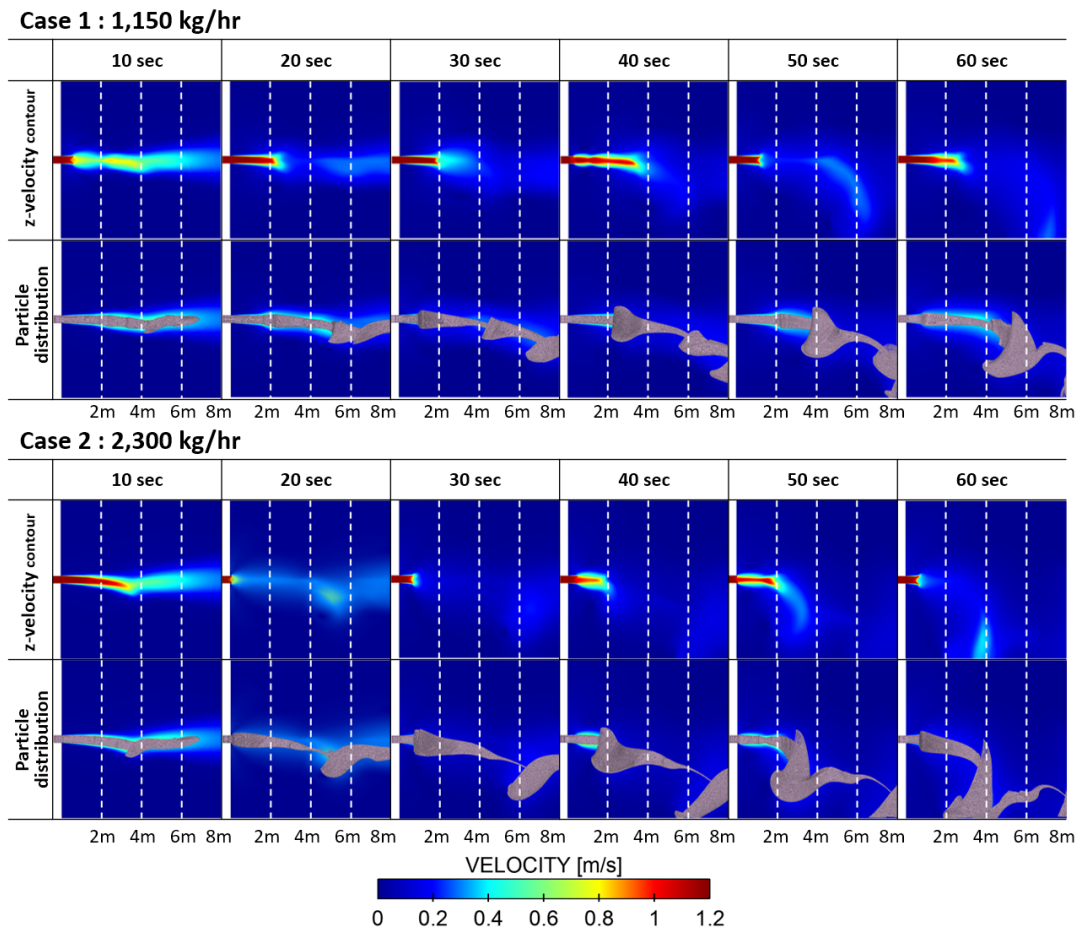


Fig. 6 The streamwise(z-direction) velocity contour and CaCO₃ particle distribution along the time.

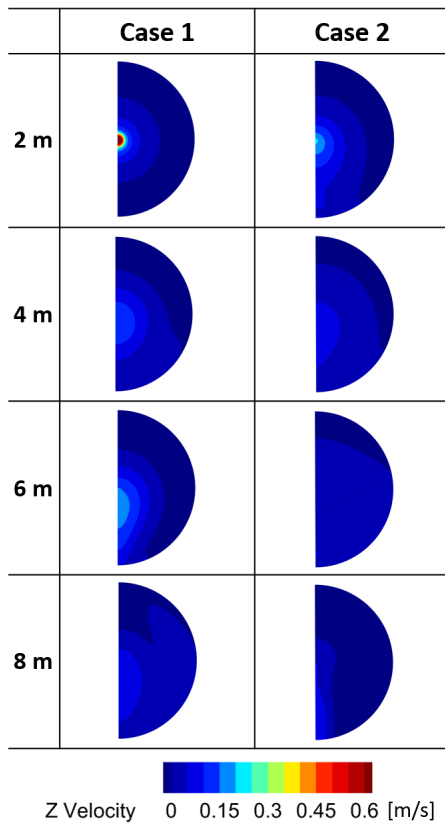


Fig. 7 The streamwise velocity contour (60 sec)

3.2 DPM concentration 분포

Fig. 8은 DPM concentration, C 분포를 나타내었다. DPM concentration은 격자 셀 내의 Parcel 질량의 합을 셀의 부피로 나눈 값이며 아래와 같이 계산된다.

$$C = \frac{n \times m_{pc}}{V} \quad (15)$$

여기서, n , m_{pc} , V 는 각각 Parcel 내 입자의 개수, 입자의 질량, 그리고 격자 셀의 부피이다. Case 2가 Case 1보다 Parcel 질량의 차이로 인해 DPM concentration이 더 높은 것을 알 수 있다. 그 차이는 입자 질량 유량의 차이로 인해 발생한다. 60초 일 때, DPM concentration 분포가 유동 방향에 수직이 되는 위치는 Case 1과 Case 2에서 각각 약 7m와 4m이다. 60초인 경우 Case 1은 Parcel 질량이 가벼워 3m까지 방사상 확산이 넓어지는 것을 보여준다. 3m 후 Parcel이 모여 유동방향 속도를 잃기 시작한다. 그런데 Case 2의 Parcel은 Case 1보다 더 무겁고 밀집 위치는 약 1m임을 알 수 있다.

3.3 입자 거동 결과

Fig. 9은 Z 방향에 따른 입자 질량 합산 그래프이다. 각 지점에서 Parcel 질량과 개수를 합산하여 각 지점 별 입자의 질량을 나타내었다. 합산 영역은 각 지점에서 0.05m 이전 영역으로 설정하였다. 입자 분사 시간에 따라 같은 선으로 표시하였다. 60초일 때, Case 2는 제트 유동에 의한 후류로의 입자 전달이 저하되며, 5m 이후의 전달량이 급감하였다. 반면에 Case 1은 6m 까지 입자가 전달되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10는 시간에 따른 입자 질량 합산을 그래프이며, 각 시간 별 Parcel 질량을 합산하여 입자 질량의 합산을 나타내었다. 60초 일 때, Case 1은 5m와 6m가 최대값을 나타냈고, Case 2는 4m가 최대값을 보였다. 특히 40초 이후 5m 이후 영역에서 입자 질량이 급감하는 경향을 보였다.

3.4 정상상태 해석

Fig. 11에서는 질량유량에 따른 정상상태 해석의 유동 방향 속도 분포이다. 정상상태의 해석을 통해 입자의 대략적인 낙하 위치를 예측할 수 있다. 1,150kg/hr의 경우 8m 구간 내에서 낙하지 않고, 2,300kg/hr은 약 8m 구간에 입자가 낙하한다. 이는 비

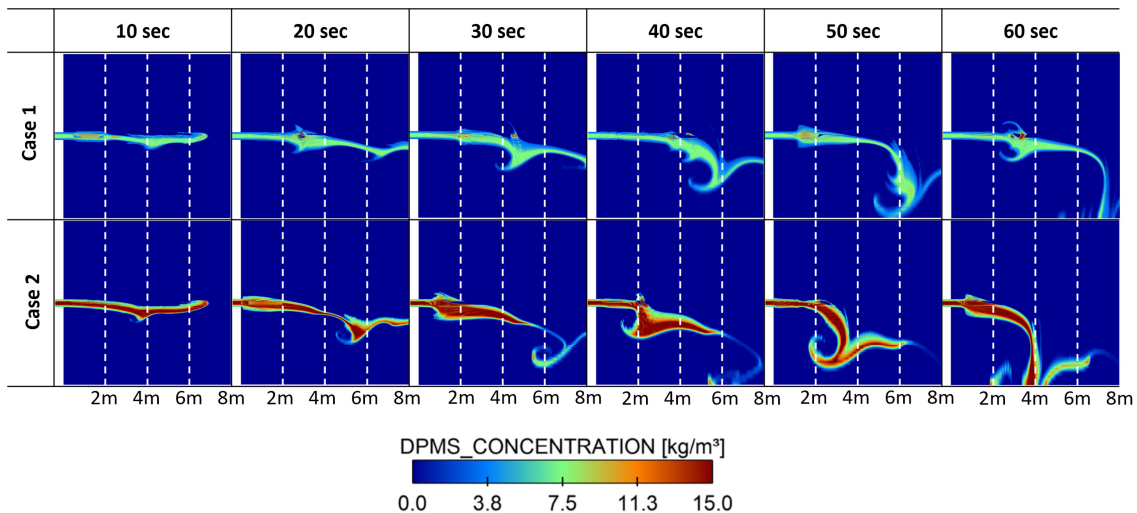


Fig. 8 The DPM concentration contour of symmetric plane along the time.

정상 해석 결과인 Case 1의 8m, Case 2의 4m의 결과와는 큰 차이를 보인다. 제트 유동과 입자 간의 상호작용으로 인해 정상상태 해석보다 비정상 해석의 입자 낙하가 더 앞당겨진 것을 확인할 수 있다. 정상상태의 해석은 시간평균된 해석의 결과로 해석 시간 단축과 같은 장점이 있지만 제트유동에 의한 입자의 거동과

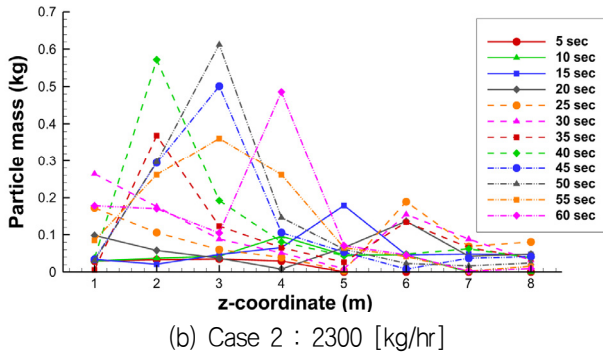
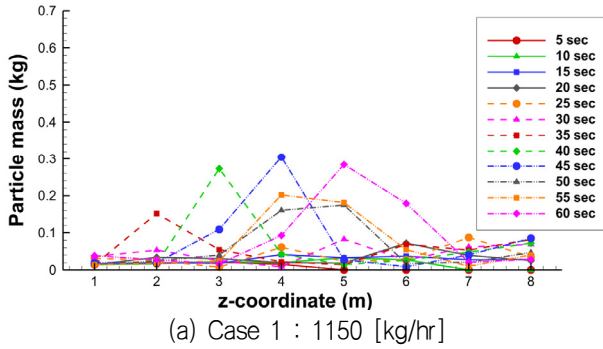


Fig. 9 The particle mass distribution along z-direction

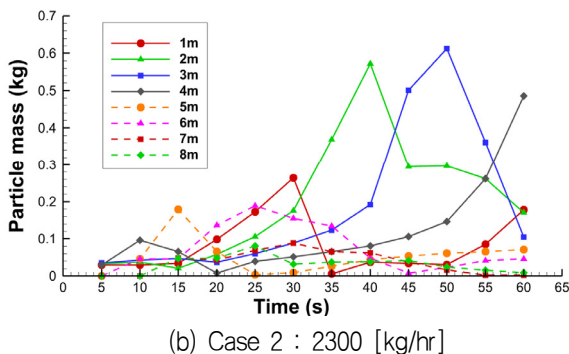
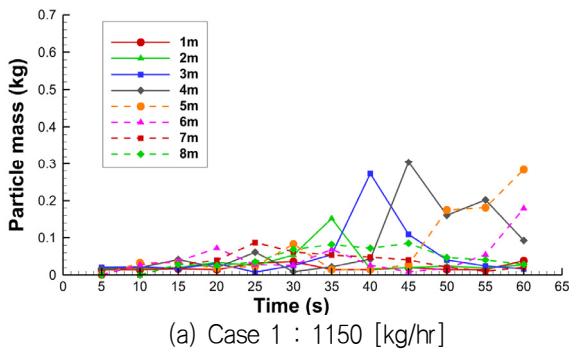


Fig. 10 The particle mass distribution along the time

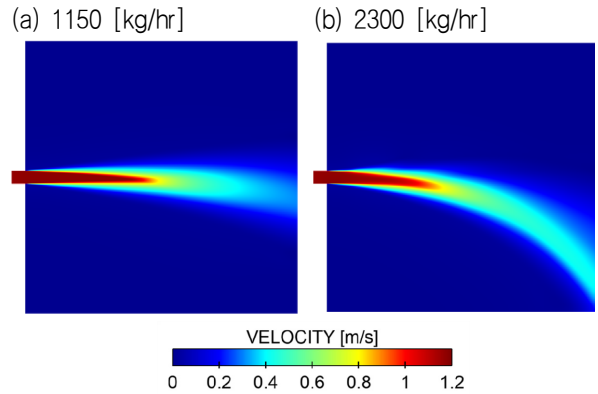


Fig. 11 The streamwise(z-direction) velocity contour of steady state

같은 불규칙성이 높은 거동을 모사하기에는 부족함이 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 CaCO₃ 입자가 포함된 제트 유동 수치해석을 수행하였다. 입자가 포함된 난류유동을 모사하기 위해 양방향 결합 DPM기법을 적용하였으며, CaCO₃ 입자의 질량유량에 따른 확산을 연구하였다. CaCO₃ 입자를 완전히 발달된 제트 유동에 분사하였으며, 30초까지 제트 유동을 따라 이동한다. 그러나 CaCO₃ 입자가 제트유동에 불안정성을 발생시키며, 입자의 밀집과 낙하를 유발한다. 결과적으로 CaCO₃ 입자는 중력에 영향으로 아래쪽 방향으로 향하는 제트 유동 발생시키며, 입자 질량 유량의 증가에 따라 제트 유동이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 입자의 질량유량을 2배로 늘린 Case 2에서 입자의 추락 위치는 8m 이내에서 약 4m 이내로 감소하였다. 정지된 상태에서의 CaCO₃ 입자의 질량유량 증가는 확산 범위의 감소로 나타남을 확인했다.

탄소 중립을 위한 핵심 기술인 CCUS를 통해 CO₂를 포집하고, 포집한 CO₂를 환경 오염이 발생하지 않게 처리하는 처리 기술에 대한 연구가 진행되어야 한다. 그 중 해수 분사 기술에 대해 연구를 진행하였다. 해양 산성화를 방지하기 위한 기준을 세우고, 기준에 대한 입자 확산 연구가 필요하다. 실제 실험으로 검증하기 어려운 상황과 다양한 조건을 전산유동해석을 통해 검증하였다. 해양 분사를 위한 최적 상황을 찾기 위해 여러 변수를 조정하며 검증하는데 CFD의 활용이 기대된다.

후기

본 연구는 하이에어코리아(주) 기술연구소의 지원을 받아 이루어졌음에 감사드립니다. 이 논문은 산업통상자원부가 지원한 '지역혁신클러스터육성(R&D)'으로 지원을 받아 수행된 연구 결과임

니다 [과제명:전력구동 모빌리티용 전지 및 에너지생산-저장 융 복합산업 개방형 혁신사업(P0025406)].

References

- Ahn, J.K., 2022. A study on improvement for greenship certification scheme to achieve net-zero. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(6), pp.372-384.
- Ansys 18.2, 2018. Fluent Theory guide. 2018 SAS IP Inc.: USA.
- Choi, Y.S., Cha, M.H, Kim, M. and Lim T.W., 2019. Designing of nozzle diameter based on the IMO regulation for discharging scrubber wash-water. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 43(4), pp.285-291.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018. Global Warming of 1.5 C, Geneva: IPCC.
- Joung, T.H., Kang, S.G., Lee, J.K. and Ahn, J., 2018. IMO GHG emission regulation trends and responses. *Journal of the Society on Naval Architects of Korea*, 55(4), pp.48-54.
- Kim, H.M. and Nah, I.W., 2019. Brief review on carbon dioxide capture and utilization technology. *Korean chemical engineering research*, 57(5), pp.589-595.
- Koh, M.H, 2022. CO₂ Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Policy Trends in the European Union (EU) and major European countries. *Public Land Law Review*, 100(-), pp.463-483.
- Lee, S.H., Jo, H.M., Lee, J.Y. and Lee, J.U., 2023. Development of drying energy saving technology of paperboard by applying precipitated calcium carbonate made from oyster-shell byproducts. *Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 55(2), pp.39-47.
- Min, J.H., 2018. *Change of carbon acquisition characters of corallina officinalis along the various CO₂ and O₂ environments induced future climate conditions*, M.S. Chonnam National University.
- Reynolds, W.C., 1987. Fundamentals of turbulence for turbulence modeling and simulation, *Lecture Notes for Von Karman Institute Agard Report No. 755*.



이 상 민



김 병 천



노 형 주



이 광 현



장 경 식