

CPFD를 이용한 태양열 유동층 흡열기의 수력학적 특성 해석

김수영 · 원근혜 · 이민지 · 김성원[†]

한국교통대학교 응용화학에너지공학부
27469 충청북도 충주시 대학로 50

(2022년 6월 29일 접수, 2022년 7월 12일 수정본 접수, 2022년 7월 14일 채택)

Analysis of Hydrodynamics in a Directly-Irradiated Fluidized Bed Solar Receiver Using CPFD Simulation

Suyoung Kim, Geunhye Won, Min Ji Lee and Sung Won Kim[†]

School of Chemical and Material Engineering, Korea National University of Transportation,
Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea

(Received 29 June 2022; Received in revised form 12 July 2022; Accepted 14 July 2022)

요 약

실리콘 카바이드 입자(평균 입도 123 μm)의 유동층 태양열 흡열기의 성능 및 효율에 영향을 미치는 입자 거동 해석을 위해 MP-PIC 모델을 이용하여 전산모사를 수행하였고, 기존 실험결과와의 비교를 통해 검증하였다. 특히, 본 연구에서는 실험적으로 접근하기 어려운 유동층 표면 부근에서의 거동을 모사함으로써 흡열 성능과 입자 거동과의 상호 영향을 분석하였다. CPFD 모사결과는 입자층 및 프리보드에서의 평균 고체체류량과 압력요동 등 수력학적 특성 실험 결과를 잘 예측하였다. 입자 흡열기에서 1차적으로 태양열 에너지를 흡수하여 층 내부로 전달하는 층 표면 부근에서의 국부 고체체류량은 입자층 내 기포거동에 따라 중심부에서 상대적으로 낮은 값을 나타내는 불균일 분포를 나타내었다. 프리보드 영역에서 국부 고체체류량은 기체속도가 증가할수록 축방향과 각 높이에서의 횡방향에서 불균일성이 증가하였고, 이는 입자 흡열기의 프리보드 영역 내 비산된 입자에 의해 반사된 태양광 에너지 손실과 연관된 압력강하 상대표준편차 증가의 원인을 나타내었다. 입자 흡열기 내 기체속도 증가에 따른 국부적인 기체 및 입자 속도의 변화에 대한 고찰을 통해, 유동층 내 국부적인 입자거동 특성은 Geldart B 입자 물성과 관련된 입자층 내 기포 거동과 밀접하게 연관됨을 확인하였다. 유동층 입자 흡열기의 성능 척도인 일사량 당 유동기체의 출입구 온도차(ΔT_{DNI})는 입자 층 표면 및 표면 상부 프리보드 영역 내 압력요동 RSD와 상관관계가 매우 높음을 확인하였고, 이 결과는 흡열기 성능 개선에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

Abstract – A CPFD (Computational particle fluid dynamics) model of solar fluidized bed receiver of silicon carbide (SiC: average $d_p=123\ \mu\text{m}$) particles was established, and the model was verified by comparing the simulation and experimental results to analyze the effect of particle behavior on the performance of the receiver. The relationship between the heat-absorbing performance and the particles behavior in the receiver was analyzed by simulating their behavior near bed surface, which is difficult to access experimentally. The CPFD simulation results showed good agreement with the experimental values on the solids holdup and its standard deviation under experimental condition in bed and freeboard regions. The local solid holdups near the bed surface, where particles primarily absorb solar heat energy and transfer it to the inside of the bed, showed a non-uniform distribution with a relatively low value at the center related with the bubble behavior in the bed. The local solid holdup increased the axial and radial non-uniformity in the freeboard region with the gas velocity, which explains well that the increase in the RSD (Relative standard deviation) of pressure drop across the freeboard region is responsible for the loss of solar energy reflected by the entrained particles in the particle receiver. The simulation results of local gas and particle velocities with gas velocity confirmed that the local particle behavior in the fluidized bed are closely related to the bubble behavior characterized by the properties of the

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kswcfb@ut.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 교재교육 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

Geldart B particles. The temperature difference of the fluidizing gas passing through the receiver per irradiance ($\Delta T/I_{\text{DNI}}$) was highly correlated with the RSD of the pressure drop across the bed surface and the freeboard regions. The CPFD simulation results can be used to improve the performance of the particle receiver through local particle behavior analysis.

Key words: Solar particle receiver, Fluidized bed, Simulation, Silicon carbide, Particle behavior

1. 서 론

전세계적으로 화석 에너지 사용으로 인한 탄소 배출 등의 환경적 영향을 줄이기 위해, 산업계는 물론 다양한 분야에서 신재생에너지를 이용하려는 노력이 지속적으로 이루어지고 있다. 다양한 신재생에너지 중에서, 태양 에너지는 산업계에 적용 가능한 유망한 것 중의 하나로 가장 주목받고 있다[1].

태양에너지 전환기술은 태양광을 직접 전력으로 변환하는 PV (Solar photovoltaic energy) technology, 집광을 통한 전력 발전 기술인 CSP (Concentrating Solar Power), 그리고, 전력을 포함한 다양한 영역에서 사용되는 열에너지를 생산하는 태양열 응용 기술(Solar thermal technology) 등으로 분류할 수 있다[2]. 이들 중에서 태양열 응용 기술은 다양한 분야에서 가장 대중적으로 응용되고 있다. 특히, 저온 영역을 이외에, 300 °C 이하의 중저온 영역의 태양열 응용 기술은 산업 공정, 태양열을 이용한 냉각 및 공조 기술 및 태양열 건조 등의 영역에서 중요한 진보를 이루어 오고 있다[3]. 태양열 기술 중에서 다양한 산업의 공정에 사용되는 기체의 예열을 위한 태양열 기체 가열 기술(SAH: Solar air heating)은 CSP 기술과 유사하게 접시(dish)나 프레넬 렌즈(Fresnel lens) 등을 이용하여 태양광을 모으는 집광기술과 집광된 태양에너지를 수용하여 열전달 매체에 전달하는 흡열기(receiver)로 구분될 수 있으며, 두 가지 영역 중 흡열기는 전체 SAH 효율을 결정하는 중요한 요소이다. 흡열 효율을 향상시키기 위해, 직접 또는 간접 조사 방식과 흡열 및 열전달 매체의 흐름 구조에 따라 다양한 흡열기가 개발되고 있다. 이들 중 흡열 매체로서 입자를 사용하고, 유동층 형태로 운전되는 유동층 태양열 흡열기(fluidized bed solar receiver)는 입자의 원활한 혼합에 의한 흡열기 내 높은 열전달 특성이라는 유동층의 장점을 이용한 것으로 SAH 적용을 위해 다양한 연구가 진행되고 있다[4-7].

유동층 태양열 흡열기의 성능 및 효율은 다양한 스케일에서의 입자 거동에 의한 모멘텀과 에너지 전달 메커니즘 등 복잡한 요소에 의해 지배된다. 이들 중 고체 체류량 및 고체 속도 및 체적은 동적 요소의 주요 요소이다[8]. 이와 관련하여, 최근 Park 등[5,9]과 Park and Kim[10]은 서로 다른 형태의 유동층 입자 흡열기들에서 실리콘 카바이드 입자를 이용하여 유동층 태양열 흡열기들의 흡열 성능 및 효율은 유동층 및 프리보드 내 입자 거동에 의해 크게 영향을 받음을 보고하였다. 그러나, 고체 체류량 등의 정보는 열간 장치(hot bed)의 측정 구간 세분화의 한계로 인해, 층 내부와 프리보드 두 구간의 광역 영역에서의 측정에 의함에 따라, 입자의 세부적 수력학적 특성 정보는 제공하지 못하였다.

유동층 연구에 있어, 실험적 측정에 의한 접근 방법은 이론적 해석에 있어 가장 기본이다. 그러나, 고온 조건에서의 입자 거동과 같이 미세한 영역에서의 정보를 얻는 것은 실험적 측정의 한계로 인해 매우 어렵다[11,12]. 이에 따라, 전산모사적 접근 방법은 기체-고체 유동층과 같이 특정 영역에서 측정이 어려운 복잡한 입자 거동에 대한 해석을 위한 보조적 방법으로서 매우 중요한 역할이 되고 있다

[13]. 특히, 고온 조건에서 운전되는 유동층 내 관심영역에서의 입자의 미세 거동에 대한 다양한 정보는 장치의 개발이나, 기존 장치에서의 현상 규명과 개선 및 운전 최적화에 큰 도움을 줄 수 있다[12,14,15]. 이와 관련하여, 최근 기체-고체 유동층과 같이 고체 입자의 해석에 MP-PIC (multiphase particle in cell) 모델을 기반을 개발된 CPFD (Computational Particle Fluid Dynamics)의 기법을 이용한 Barracuda[®]이 제안 및 활용되고 있다[16]. MP-PIC 모델은 입자에 대해 Lagrangian 방식을 적용한 반면, 기체 흐름에 대해 Eulerian 방식 또는 연속방정식을 적용한 Eulerian-Lagrangian 방식을 적용하고 있고, 입자군 움직임에 추적에 있어 입자분포함수(particle distribution function)를 이용하여 복잡한 입자거동을 갖는 유동층 공정 해석에 계산시간을 단축시킬 수 있는 장점을 갖는다[17].

이에 따라 본 연구에서는 유동층 태양열 흡열기의 성능 및 효율에 큰 영향을 미치는 유동층 내 미세한 입자 거동 해석을 위해 MP-PIC 모델을 이용하여 전산모사 하였다. 기존 연구[5,9,10]에서 사용된 유동층 흡열기를 구현한 전산모사 모델을 통해 유동층 내부 및 프리보드 영역에서 국부적 입자 거동 특성을 고찰하였다. 특히, 실험적으로 접근하기 어려운 유동층 표면 부근에서의 거동을 모사함으로써 흡열 성능과 입자 거동과의 상호 영향을 전산모사 해석을 통해 분석하였다.

2. 전산모사에 적용된 수학적 모델

2-1. 지배 방정식

본 연구에서는 유동층 흡열기 내 입자 거동을 분석하기 위해 MP-PIC 모델 기반 Barracuda[®] (version 21.1.0)를 이용하였다. 기체-입자 항력 계산은 Wen-Yu 모델에 기반하였다. 앞서 언급하였듯이, 전산모사는 Euler-Lagrangian 방식에 근거하고 있고, 입자군의 움직임 계산에 있어, 입자는 작은 입자들이 응집체(agglomerate)를 형성하는 현상을 반영하여, 응집체를 큰 입자로 가정하여 항력 계산에 등가 입자크기(equivalent particle size)를 적용하였다[15,16]. MP-PIC 모델에서 유체 및 고체의 거동을 해석하기 위해 사용된 지배방정식은 Table 1과 같다[18-20].

2-2. 모사 조건

유동층 입자흡열기 내 입자거동을 CPFD 전산모사하기 위하여 본 연구에서는 기존 연구[5,9,10]에서 사용된 실험장치를 모사대상으로 하였고, 개략도를 Fig. 1(a)에 나타냈다. 입자흡열기는 원환관 형태로 직경은 50 mm이고, 높이는 150 mm이며, 100 mm 지점에서 흡열기 직경은 110 mm로 확장된다. 확장된 흡열기의 상부에는 태양광이 빔 다운(beam-down) 형태로 조사될 수 있는 투명창이 있으나, 본 연구에서는 열적 거동은 반영하지 않으므로 고려되지 않았다. 분산판은 소결판 형태로, 본 모사에서는 이를 반영하기 위해 전체 단면에 균일하게 기체가 주입되도록 모사하였다.

전산모사 모델에 있어 전체 격자셀의 개수는 132,846개이고, MP-

Table 1. Governing equations for MP-PIC model

Equation	Equation expression
Continuity equation	$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g u_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g u_g) = \delta m_p$
Momentum conservation equation	$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g u_g u_g) = -\nabla p + F + \alpha_g \rho_g g + \nabla \cdot \tau_g$ $\tau_g = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_{g,i}}{\partial X_j} + \frac{\partial u_{g,j}}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial X_k}$
Particle equation of motion	$\frac{du_p}{dt} = D_p(u_g - u_p) - \frac{\nabla p}{\rho_p} + X + g + \frac{\bar{u}_p - u_p}{2\tau_D}$ $X = \frac{1}{\bar{\rho}_p \alpha_s} \frac{\partial \tau_p}{\partial \chi_i} + g_i(\alpha_s) \left[\bar{D}(u_g - \bar{u}_p) - \bar{D}(u_g - \bar{u}_p) - \left(\frac{1}{\bar{\rho}_p} - \frac{1}{\rho_p} \right) \frac{\partial p}{\partial \chi_i} \right]$
Particle collision model	$\tau_p = \frac{10 P_s \alpha_p^\beta}{\max[(\alpha_{cp} - \alpha_p), \epsilon(1 - \alpha_p)]}$ $g_i(\alpha_s) = \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha_s = 0 \\ 1 & \text{if } \alpha_s = \alpha_{s,cp} \end{cases}$
Acceleration and contact stress	$\bar{D} = \frac{\iiint f m D d m_p d u_p d T_p}{\bar{\rho}_p \alpha_s}$ $\bar{u}_p = \frac{\iiint f m D d m_p d u_p d T_p}{\bar{\rho}_p \alpha_s \bar{D}}$
Energy transfer between gas and solid model	$F = \iiint f \left\{ m_p \left[D_p(u_g - u_p) - \frac{\nabla p}{\rho_p} \right] + u_p \frac{d m_p}{d t} \right\} d m_p d u_p d T_p$ $D_p = \frac{6}{8} C_d \frac{\rho_g u_g - u_p }{\rho_p d_p}$ $C_d = \begin{cases} \frac{24 \alpha_g^{-2.65}}{Re}, & Re < 0.5 \\ \frac{24 \alpha_g^{-2.65}}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.678}), & 0.5 \leq Re \leq 1000 \\ 0.44 \alpha_g^{-2.65}, & Re > 0.5 \end{cases}$

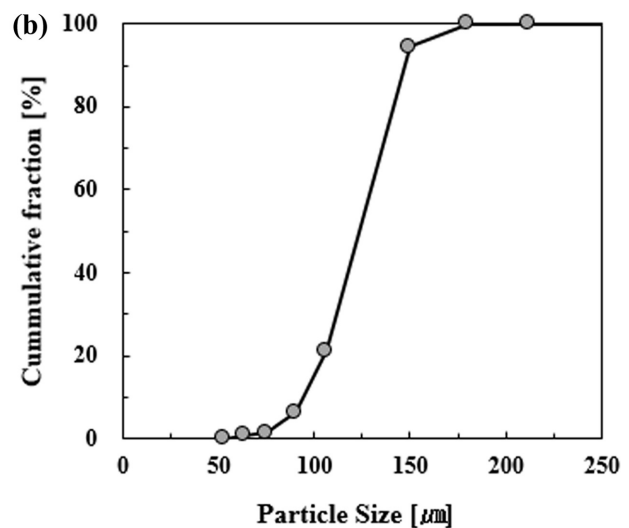
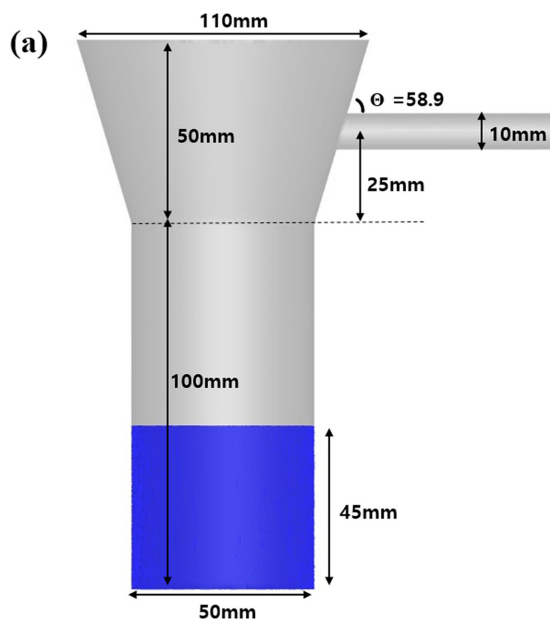
**Fig. 1. Experimental apparatus (a) and size distribution of particle (b) used in simulation.**

Table 2. Input parameters used in CPFD simulation

Parameters	Numerical Value
Diameter of SiC	1.23×10^{-4} m
SiC Bulk density	1524 kg/m ³
SiC Particle density	3015 kg/m ³
Minimum fluidization velocity	0.0178 m/s
Gas velocity	0.075-0.15 m/s
Gas composition	Air
Drag model	Wen-Yu-Ergun
Sphericity	0.74
Initial bed height	45 mm
Total number of all cells	539448
Total number of real cells	132846
Time step	0.001 s
Total time	40 s

PIC 모델을 이용하는 CPFD 모델 적용에 있어 격자수에 큰 문제가 없음을 확인하였다[16]. 20초 이상에서 유동층 운전의 정상상태에 도달한다는 기존 문헌[17-19]을 바탕으로 40초 동안의 전산모사 수행 후, 정상상태 도달 후인 20-40 초 사이의 모사 결과를 도출하여 입자의 거동을 분석하였다. 본 연구에서 적용된 입자는 실리콘 카바이드 입자로서 기존 연구[5,10]와 동일한 입자를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 입자 물성 및 매개변수에 대한 정보를 Table 2에 요약하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 유동층 입자 흡열기 내 축방향 수력학적 특성 모사

본 연구에서는 Park 등 [5]이 보고한 입자 흡열기의 유동층 내 수력학적 특성 실험결과에 대해 CPFD 전산모사를 수행하고, 그 결과를 상호 비교하여 검증하였다.

Fig. 2에 입자흡열기 기체속도 변화에 따른 입자층 및 프리보드 영역에서의 고체체류량 변화를 나타내었고, 이에 대한 전산모사 결과를 비교하였다. 유동층은 층 경계를 중심으로, 층 내부와 프리보드 영역으로 구분되며, 층 내부의 고체체류량은 기체 유속 증가에 따라 입자층에서 발생하는 기포의 성장에 의해 지속적으로 감소하게 된다. 프리보드의 경우, 입자 층내에서 발생된 기포에 의해 입자가 비산되어, 고체 체류량이 증가하게 되는데, 기체속도가 증가할수록 기포의 크기가 증가하고, 기포의 크기가 클수록, 기포의 속도가 증가함에 따라 기포가 갖는 모멘텀은 증가한다. 이는 층표면에서 기포가 파열될 때, 기체에 의해 비산되는 입자량이 증가하게 되어 프리보드 내 고체체류량을 증가시킨다[20]. 본 연구에서의 전산모사 결과를 통해, 상기 기체속도 변화에 따른 내부 고체체류량 변화를 실험 범위 내 최대 8.3% 이내에서 잘 모사하고 있음을 확인하였다.

입자층 내 기포 상승에 따른 입자의 거동 및 프리보드 내 입자 거동은 아래 식 (1)-(3)에 의해 표현되는 고체체류량의 상대 표준편차를 통해 표현될 수 있다[9,21].

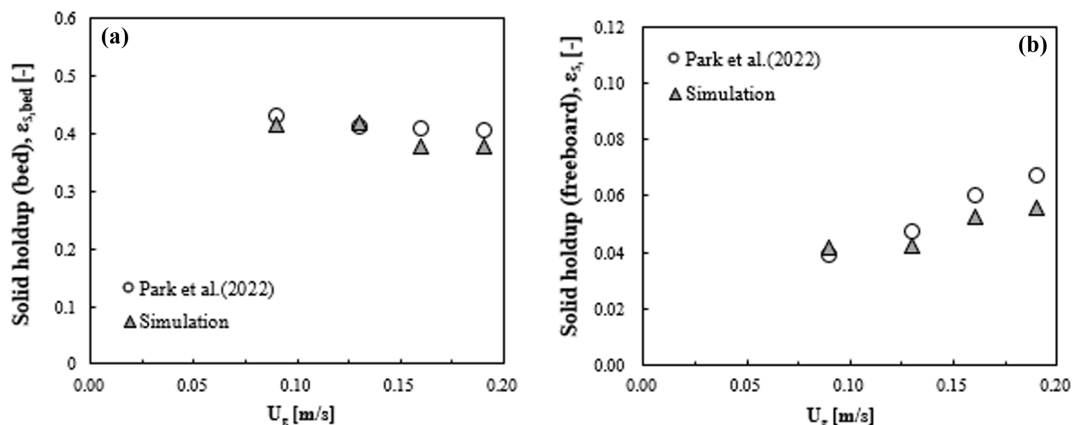


Fig. 2. Effect of gas velocity on solid holdups in bed (a) and freeboard (b).

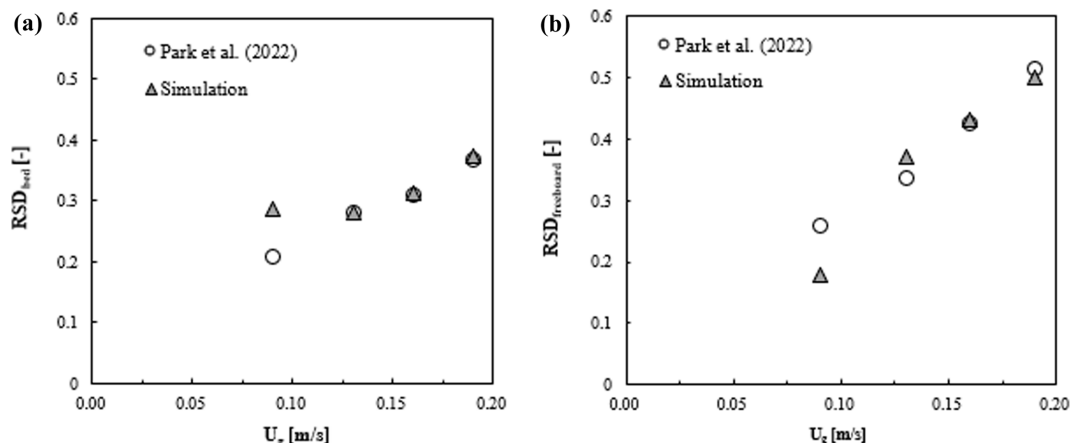


Fig. 3. Effect of gas velocity on RSD of solid holdups in bed (a) and freeboard (b).

$$\text{Standard deviation, } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (2)$$

여기서 N 은 전체 측정시간, n 은 순간 측정 시간, $x(n)$ 은 순간 측정 시간에서의 압력 강하, \bar{x} 는 평균 압력 강하를 의미한다. 입자 간 상호 비교에 있어, 입자 밀도 차에 의해 실험군 별 압력 강하는 상이하게 나타나므로, 이의 일반화를 위해 상대 표준편차(relative standard deviation, RSD)를 도입하였으며, 식 (3)에 의해 나타난다[21].

$$\text{RSD} = \sigma / \Delta \bar{P} \quad (3)$$

Fig. 3에 기체속도 변화에 따른 RSD 변화를 나타내었고, 이에 대한 전산모사 결과를 비교하였다. 기체속도 증가에 따라 발생된 기포의 빈도 수 증가에 의한, 이들의 합체 및 분열에 따른 기포의 거동 변화는 입자층 내부 입자의 거동에 영향을 주고, 이는 입자층 내 압력강하의 RSD 증가를 유발한다. 또한, 변화하며 상승되는 기포들의 층 내 균일성 정도에 따라, 층 표면에서 기포들의 파열 정도는 프리보드 내 비산되는 입자의 균일성과 직접적으로 연관될 수 있다[22]. 상기 기체속도 변화에 따른 내부 고체체류량의 RSD 변화에 대한 본 연구의 전산모사 결과는 유동화 초기를 제외한 0.13 m/s 이후에서 매우 잘 일치하고 있으며, 전체적인 경향성은 기체유속에 따른 고체체류량의 변화를 잘 묘사하고 있는 것으로 보인다.

3-2. 유동층 입자 흡열기 내 입자 국부 거동 모사

상기 3.1절에서의 축방향 고체체류량 및 이들의 RSD 결과는 단면적 평균을 기준으로 산출된결과로, 거시적 관점에서 입자의 태양

광 흡열 현상에 대한 설명을 제공할 수 있으나, 입자의 에너지 수용 메커니즘을 직접적으로 설명하기에는 부족하다. 이에 따라, 본 연구에서는 Figs. 2와 3의 모사 결과에서 동시에 얻어진 국부적 모사 결과로부터 태양열 에너지 수용지점에서의 유동층 수력학적 특성을 확인하였다.

Fig. 4에 기체속도 변화에 따른 입자 흡열기 내 각 높이 별 단면에서의 국부 입자 부피분율 또는 고체체류량(solid holdup)의 평균 변화를 나타내었다. 기체속도가 증가할수록 입자층 내 기포 분율에 비례한 층팽창 및 층 표면에서 파열된 입자 비산량에 비례하여, 높이에 따른 고체체류량이 증가하였다. 입자 흡열기에서 1차적으로 열에너지를 흡수하는 층 표면 부근에서의 국부 고체체류량은 불균일성을 나타내었는데, 기포가 입자층 단면에 비해 고르게 분포하지 않음을 의미한다. 특히, 기체속도가 증가할수록, 단면 중심부에서의 국부 고체체류량은 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 이는 높은 기체속도에서 생성된 기포는 주변 기포와 합체하여 높이가 증가할수록 중심부로 흐르는 Geldart B 입자의 일반적인 기포 거동에 의한 것이다 [22].

유동층 입자흡열기의 태양광 흡열 성능은 수력학적 특성을 바탕으로 해석하였을 때 에너지 수용지점에서의 입자 거동, 기포의 빈도와 성장 및 이와 관련된 기체의 체류시간에 크게 영향을 받는다[23]. 이와 관련하여, 최근 Park 등[5]은 빔 다운(beam-down) 형태의 유동층 입자흡열기의 성능과 관련하여, 프리보드 및 층 표면에서 나타나는 입자의 수력학적 거동이 태양광 에너지의 흡수, 산란 및 재흡수에 직접적으로 연관된다고 보고하였다. 따라서, 흡열 메커니즘의 이해를 위해서는 층 표면 부근에서의 입자 거동 및 프리보드 상부에서의 입자 거동을 이해하는 것이 중요하다[2].

Fig. 5에 기체속도 변화에 따라 유동층 층표면에서의 국부 고체체

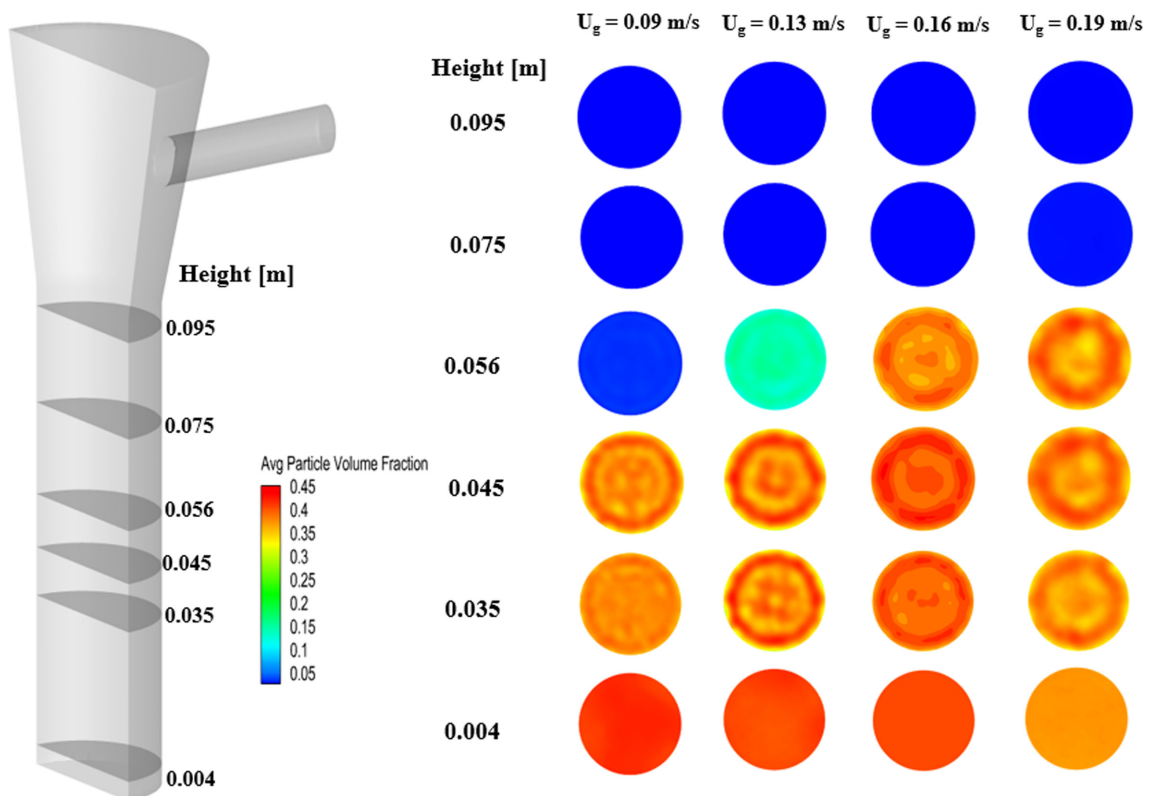


Fig. 4. Particle volume fraction at different height in the receiver with gas velocity.

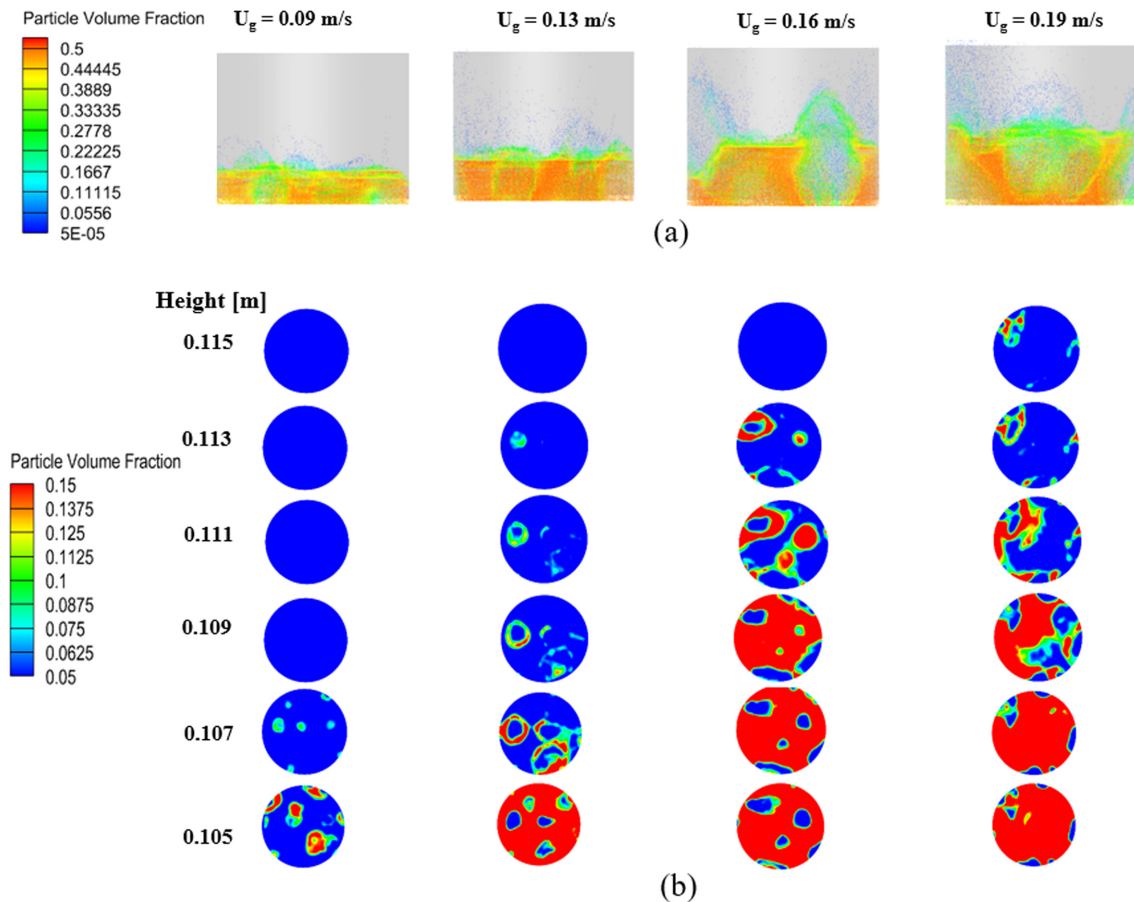


Fig. 5. Snapshot of particle volume fraction around bed surface (a) and at different height in freeboard (b) of the receiver with gas velocity (time = 20 seconds).

류량 변화와 동일 조건에서 프리보드 내 서로 다른 높이에서의 국부 고체체류량 변화를 나타내었다. 결과에 나타난 모사결과는 모든 조건에서 유동층이 정상화 이후, 20초에서의 순간을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 층표면에서의 입자 거동은 기체속도 증가에 따라 층 내부에서 상승하는 기포 크기가 증가함에 따라 표면의 균일성 또는 수평도가 감소하고, 표면에서 분출되는 입자량이 증가하였다. 이러한 결과는 Fig. 3(a)에서 나타난 기체속도 증가에 따른 입자층 내 압력강하의 상대표준편차 값의 증가를 잘 설명한다. 이와 같은 기포에 의한 입자층 표면의 변화는 태양열 에너지 1차 수용지점인 층 표면에서 에너지를 수용한 입자의 표면을 빠르게 붕괴(avalanching)시킨 후 뒤섞임(renewal)을 야기한다[23]. 이에 따라 하부로 이동된 가열 입자는 층 내부에서 상승하는 기포에 의해 빠르게 차가운 입자와 혼합하며 층 내 온도 분포를 균일하게 하고, 이는 입자와 기체와의 대류 열전달 효과를 증대시키는 열적 플라이휠(thermal flywheel)효과를 유발하므로, 입자 흡열기의 성능을 향상시키는 것이다[9,24]. 프리보드 영역의 경우, 입자 표면에서 파열되며 비산된 입자에 의해 고체체류량 횡방향 분포가 형성되며, 이는 기포의 횡방향 분포와 잘 일치된다. 기체속도가 증가할수록 기포크기의 증가에 따라 더 높은 영역에서 비산된 고체입자가 모사되며, 각 높이에서 볼 때, 기포 발생 지역의 불균일성으로 인해 고체체류량은 단면적에 대해 불균일한 값을 나타내었다. 또한, 0.111 m 이상의 프리보드 영역에서 비산된 입자들은 미립자 입자의 특성인 반데르발스 힘(van der Waals

force)에 의해 응집체 형태로 나타남을 확인할 수 있다[20]. 이러한 프리보드 내 국부 고체체류량의 축방향 및 횡방향 불균일성은 Fig. 3(b)에서 설명하였던, 프리보드 내 압력강하의 RSD 변화 원인을 잘 나타내준다.

상기 기체속도 변화에 따른 고체입자의 분포 변화에 대한 원인인 입자 거동을 모사하기 위해, Fig. 6에 기체의 공탐속도 변화에 따른 국부적인 기체속도의 변화를 나타내었다. 공탐 기체속도가 증가할수록 입자층 내 국부 기체속도는 층 내부 기포 빈도 증가 및 기포크기 증가에 따라 일부 영역에서 증가하는 경향을 보였다. 특히, 국부 기포속도에서 예상되는 기포의 형성은 층 내부에서 불균일성을 나타내고, 0.19 m/s 에서는 중심부 영역에서 높은 국부 기체속도를 나타내었는데, 이는 앞서 언급되었듯이, Geldart B 그룹에 속하는 SiC 입자특성에 의한 것으로, 층 높이가 증가할수록 기포가 합체되어 중심부로 향하는 현상을 잘 나타내며[20], Fig. 4에서 보인 입자층 내 국부 고체체류량의 분포의 원인을 잘 설명한다. 이러한 큰 기포 형성은 흡열된 입자와 기체와의 접촉면적을 낮춘은 물론, 층 상단에서 수용되는 태양 에너지의 유동층 내부로의 열확산 정도를 낮추어 흡열기 내 기체의 흡열 효율을 저하시킬 것으로 판단된다[5,9]. 입자층 내 기포의 거동은 층표면에서 기포 파열 후에도, 유지되어 0.15 m/s 이상의 공탐 기체속도에서, 프리보드 내 기체 국부속도가 중심부 영역에서 상대적으로 높게 나타남을 확인할 수 있고, 이는 Fig. 5에 나타난 프리보드 내 높이 별 단면적 내 입자의 불균일한 분포를 야기

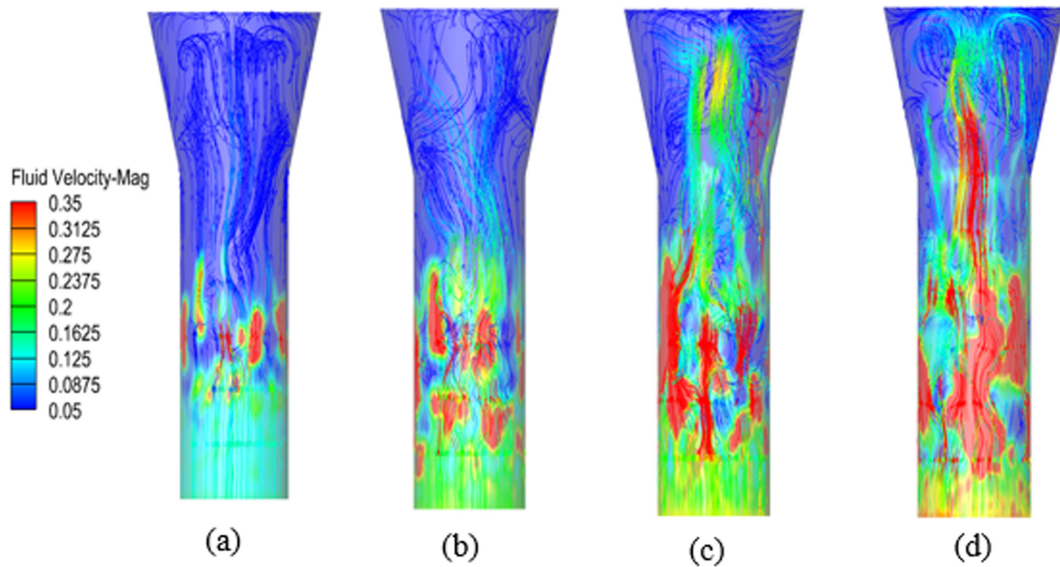


Fig. 6. Effect of superficial gas velocity on local gas velocity in a particle receiver: $U_g=0.09$ m/s (a), 0.13 m/s (b), 0.16 m/s (c), 0.19 m/s (d).

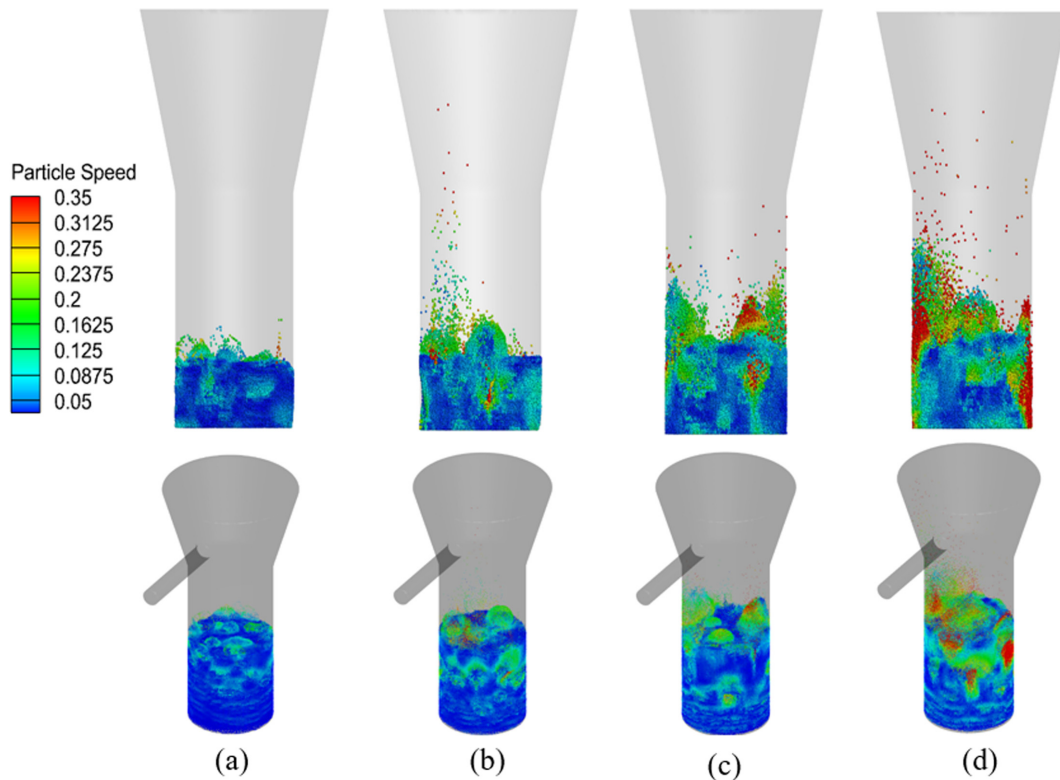


Fig. 7. Effect of gas velocity on particle velocity in a particle receiver: $U_g=0.09$ m/s (a), 0.13 m/s (b), 0.16 m/s (c), 0.19 m/s (d).

한다고 판단된다. 프리보드 내 비산된 입자는 반응기 상부의 투과창으로 주입되는 태양광에 노출되며, 에너지 흡수 및 반사 및 산란의 과정을 갖는다[23]. 입자들에 의한 산란되거나 반사된 태양광은 주변에 입자가 있으면 충분히 에너지가 입자에 의해 재흡수 가능하나, 주변에 충분한 고체량이 존재하지 않을 경우, 흡열기 벽면 또는 투과창을 통한 외부로의 에너지 손실이 일어나게 된다[25]. 이에 따라, 연구결과에서 기체속도에 따른 입자의 불균일한 공간 내 분포 및 거동은 흡열 효율을 저하시킬 것으로 판단된다.

Fig. 7은 기체속도 변화에 따른 국부적인 입자속도의 변화를 묘사한 그림이다. 그림과 같이, 기체속도가 증가할수록 입자층 내 개별 입자들은 Fig. 6에서 보인 층 내부 기포 거동과 연계되어 층내부에서의 속도 분포 변화를 나타낸다. 입자 흡열기 내 태양광의 프리보드 내 입자 흡열에 영향을 주는 프리보드 상의 입자분포 및 입자의 속도 변화는 층 표면 부근 기포 또는 기체의 국부속도와 직접적으로 연관되어 있음을 확인할 수 있다. 흥미로운 것은 층 표면 부근에서의 입자 거동과는 달리, 층 내부 기포가 성장하는 지점 이하에서 입

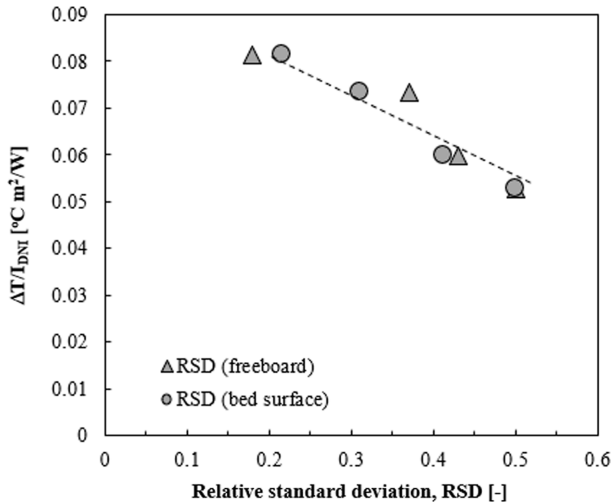


Fig. 8. Effect of RSD of pressure drop across bed on the temperature difference per irradiance in receiver.

자의 속도는 매우 낮은 값을 나타냈다는 것이다. 이는 태양광의 유동층 내 1차적인 에너지 수용 지점인 층표면과 층하부의 원활한 혼합거동이 어려울 수 있음을 나타내며, 본 연구 대상인 빔 다운형 (beam-down type)의 집광 입자 흡열기의 효율 향상을 위해서는 입자층 내 축방향 입자 혼합 개선이 요구됨을 의미한다.

Figs. 3-7의 결과로부터 유동층 입자 흡열기 내 축방향 고체체류량 및 압력의 RSD로 표현되는거시적 수력학적 특성은 유동층 내 기포 거동 특성과 연관된 입자층 표면 및 프리보드 영역에서의 국부적인 입자 거동 특성으로 설명될 수 있었다. 이를 입자 흡열기의 성능과의 관계를 설명하기 위해, 본 연구에서는 입자 흡열기를 이용한 기체 예열기의 성능을 표현하는 방법 중의 하나인 일사량 당 흡열기체의 온도차($\Delta T/I_{DNI}$)와 입자 거동과의 관계를 비교하고자 하였다. 즉 외 태양광을 집광하는 입자 흡열기를 이용하여 기체를 가열시키는 시스템에 있어, $\Delta T/I_{DNI}$ 는 변화되는 일사량(I_{DNI})에 대해 태양광 에너지를 흡수한 유동층 입자가 입자층 내부를 통과하는 기체에 에너지를 전달함으로써 발생하는 기체의 흡열기 입출구 온도 변화(ΔT)를 의미한다. Fig. 8에 전산모사 결과로부터 추출된 입자층 표면 부근과 프리보드 영역에서의 압력 RSD 평균값과 기존 연구[5]의 $\Delta T/I_{DNI}$ 를 상호 비교하였다. 그림에서와 같이, RSD가 증가할수록 $\Delta T/I_{DNI}$ 는 감소하였고, 상호 직접적인 상관성을 잘 나타내었다. 기존의 연구결과들은 유동층 흡열기의 성능은 유동층 내 입자층과 프리보드 각각의 전체 영역에서의 압력요동과 상관관계가 높다고 보고되어 왔다 [5,9,10]. 그러나, 본 연구 결과로부터 유동층 내 입자층 표면 부근 기포 파열이 발생하는 영역에서의 RSD 및 표면 상부 프리보드 영역 내 입자층 존재 영역에서의 RSD는 입자 흡열기의 성능과 더욱 직접적인 상관관계를 보임을 확인할 수 있었다. 이로부터, 시스템 개선 단계에서 입자 물성 또는 흡열기 설계 변화를 반영한 전산모사의 RSD 등 입자들의 국부 거동 예측 결과를 이용한다면, 입자 흡열기의 성능 개선에 크게 기여할 것으로 판단된다[5,25].

4. 결 론

본 연구에서는 MP-PIC 모델을 적용한 CPFD 전산모사를 통해 태양열 입자 흡열기의 성능에 대한 유동층 내 미세한 입자 거동 영향

을 분석하였다. 모델에 적용된 매개변수 조건에서의 CPFD 모사결과를 기존 입자 흡열기 연구에서 얻은 입자층 및 프리보드에서의 평균 고체체류량 변화 및 압력요동 등 수력학적 특성 실험결과를 잘 예측하였다. 입자 흡열기에서 1차적으로 열에너지를 흡수하는 층표면 부근에서의 국부 고체체류량은 입자층 내 기포거동에 따라 중심부에서 상대적으로 낮은 불균일 분포를 나타내었다. 프리보드 영역에서 국부 고체체류량은 기체속도가 증가할수록 축방향과 각 높이에서의 횡방향에서 불균일성이 증가하였고, 이는 프리보드 영역 내 압력강하의 RSD 증가 원인이 되었다. 입자 흡열기 내 기체속도 증가에 따른 국부적인 기체 및 입자 속도의 변화에 대한 고찰을 통해, 유동층 내 국부적인 입자거동 특성은 Geldart B 입자 물성과 관련된 입자층 내 기포 거동과 밀접하게 연관됨을 확인하였다. 유동층 입자 흡열기의 성능 척도인 $\Delta T/I_{DNI}$ 는 입자층 표면 및 표면 상부 프리보드 영역 내 압력요동 RSD와 상관관계가 매우 높음을 확인하였고, 이 결과는 흡열기 성능 개선에 활용할 수 있을 것으로 기대되었다.

감 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1A2C1011671, NRF-2021M3I3A1084951).

Nomenclature

C_d	: Drag model coefficient
d_p	: Mean particle diameter [m]
D_p	: Aerodynamic drag function
f	: Particle size distribution function
F	: Momentum transfer between the fluid and solid phases
g	: Gravity acceleration [m/s ²]
I_{DNI}	: Irradiance [W/m ²]
m	: Mass [kg]
P	: Pressure [Pa]
P_s	: Positive constant for particle normal stress [Pa]
t	: Time [s]
T	: Temperature [K]
U_g	: Superficial gas velocity [m/s]
u	: Velocity vector [m/s]

Greek symbols

α	: volume fraction [-]
β	: constant [-]
ε	: constant [-]
ε_s	: Solid holdup or solid volume fraction
ΔT	: Temperature difference of gas across particle receiver [°C]
δ	: strain rate tensor [-]
μ	: viscosity [m ² /s]
ρ	: density [kg/m ³]
τ	: particle normal stress [Pa]
τ_D	: collision damping time [s]

Subscripts

- cp : close pack
 eff : effective viscosity
 f : fluid
 i, j, k : coordinate index
 p : particle
 s : solid

References

- Hwang, H., Mun, J., Kim, J., "Economic Benefits of Integration of Supplementary Biopower and Energy Storage Systems in a Solar-Wind Hybrid System," *Korean Chem. Eng. Res.*, **58**(3), 381-389(2020).
- Shahabuddin, M., Alim, M. A., Alam, T. Mofijur, M., Ahmed, S. F. and Perkins, G., "A Critical Review on the Development and Challenges of Concentrated Solar Power Technologies," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, **47**, 101434(2021).
- Kalogirou, S., "The Potential of Solar Industrial Process Heat Applications," *Appl. Energy*, **76**(4), 337-361(2003).
- Almendros-Ibáñez, J. A., Fernández-Torrijos, M., Díaz-Heras, M., Belmonte, J. F. and Sobrino, C., "A Review of Solar Thermal Energy Storage in Beds of Particles: Packed and Fluidized Beds," *Sol Energy*, **192**, 193-237(2019).
- Park, S. H., Kim, S. and Kim, S. W., "Heat Absorption Characteristics of Gas in a Directly Irradiated Solar Fluidized Bed Receiver with tube Shaped Immersed Transmission Window," *Sol Energy*, **232**, 388-397(2022).
- Seo, S. B., Go, E. S., Ling, J. L. J. and Lee, S. H., "Techno-economic Assessment of a Solar-assisted Biomass Gasification Process," *Renewable Energy*, **193**, 23-31(2022).
- Seo, S. B., Ahn, H., Go, E. S., Ling, L. J. J., Siambun, N. J., Park, Y. and Lee, S. H., "Evaluation of the Solar Thermal Storage of Fluidized Bed Materials for Hybrid Solar Thermo-chemical Processes," *Biomass Conv. Bioref.*, March(2022). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02609-8>.
- Jiang, K., Du, X., Zhang, Q., Kong, Y., Xu, C. and Ju, X., "Review on Gas-solid Fluidized Bed Particle Solar Receivers Applied in Concentrated Solar Applications: Materials, Configurations and Methodologies," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **150**, 111479(2021).
- Park, S. H., Yeo, C. E., Lee, M. J. and Kim, S. W., "Effect of Bed Particle Size on Thermal Performance of a Directly-Irradiated Fluidized Bed Gas Heater," *Processes*, **8**(8), 967(2020).
- Park, S. H. and Kim, S. W., "Characteristics of Heat Absorption by Gas in a Directly-irradiated Fluidized Bed Particle Receiver," *Korean Chem. Eng. Res.*, **59**(2), 239-246(2021).
- Atsonios, K., Nikolopoulos, A., Karellas, S., Nikolopoulos, N., Grammelis, P. and Kakaras, E., "Numerical Investigation of the Grid Spatial Resolution and the Anisotropic Character of EMMS in CFB Multiphase Flow," *Chem. Eng. Sci.*, **66**(17), 3979-3990(2011).
- Bandara, J. C., Jayarathna, C., Thapa, R., Nielsen, H. K., Moldestad, B. M. E. and Eikeland, M. S., "Loop Seals in Circulating Fluidized Beds – Review and Parametric Studies Using CPFD Simulation," *Chem. Eng. Sci.*, **227**, 115917(2020).
- Zhou, Q. and Wang, J., "CFD Study of Mixing and Segregation in CFB Risers: Extension of EMMS Drag Model to Binary Gas-Solid Flow," *Chem. Eng. Sci.*, **122**, 637-651(2015).
- Liang, Y., Zhang, Y., Li, T. and Lu, C. A., "Critical Validation Study on CPFD Model in Simulating Gas-Solid Bubbling Fluidized Beds," *Powder Technol.*, **263**, 121-134(2014).
- Lee, J. M., Kim, D. W., Park, K. I. and Lee, K. H., "Analysis of Fluidization in a Fluidized Bed External Heat Exchanger using Barracuda Simulation," *Korean Chem. Eng. Res.*, **58**(4), 642-650(2020).
- Go, E. S., Kang, S. Y., Seo, S. B., Kim, H. W. and Lee, S. H., "Slug Characteristics in a Bubbling Fluidized Bed Reactor for Polymerization Reaction," *Korean Chem. Eng. Res.*, **58**(4), 651-657(2020).
- Lim, J. H. and Lee, D. H., "Two- and Three-dimensional Analysis on the Bubble Flow Characteristics Using CPFD Simulation," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(5), 698-703(2017).
- Liu, H., Cattolica, R. J. and Seiser, R., "Operating Parameter Effects on the Solids Circulation Rate in the CFD Simulation of a Dual Fluidized-bed Gasification System," *Chem. Eng. Sci.*, **169**, 235-245(2017).
- Lim, J. H., Bae, K., Shin J. H., Kim, J. H., Lee, D. H., Han, J. H. and Lee, D. H., "Effect of Particle-particle Interaction on the Bed Pressure Drop and Bubble Flow by Computational Particle-fluid Dynamics Simulation of Bubbling Fluidized Beds with Shroud Nozzle," *Powder Technol.*, **288**, 315-323(2016).
- Kim, S. W., "Effect of Height on CNT Aggregates Size and Shape in Freeboard Region of a Fluidized Bed," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(1), 105-110(2019).
- Johnsson, F., Zijerveld, R. C., Schouten, J. V., Van den Bleek, C. M. and Leckner, B., "Characterization of Fluidization Regimes by Time-series Analysis of Pressure Fluctuations," *Int. J. Multiph. Flow*, **26**(4), 663-715(2000).
- Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston(1991).
- Tregambi, C., Chirone, R., Montagnaro, F., Salatino, P. and Solimene, R., "Heat Transfer in Directly Irradiated Fluidized Beds," *Sol Energy*, **129**, 85-100(2016).
- Kim, S. W. and Kim, S. D., "Heat Transfer Characteristics in a Pressurized Fluidized Bed of Fine Particles with Immersed Horizontal Tube Bundle," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **64**, 269-277(2013).
- Calderón, A., Barreneche, C., Palacios, A., Segarra, M., Prieto, C., Rodríguez-Sánchez, A. and Fernández, A. I., "Review of Solid Particle Materials for Heat Transfer Fluid and Thermal Energy Storage in Solar Thermal Power Plants," *Energy Storage*, **1**(4), e63(2019).

Authors

Suyoung Kim: Master's course, School of Chemical and Material Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju-si, Chungbuk 27469, Korea; 9818su0@ut.ac.kr

Geunhye Won: Bachelor's course, School of Chemical and Material Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju-si, Chungbuk 27469, Korea; 1719142@ut.ac.kr

Min Ji Lee: Senior, School of Chemical and Material Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju-si, Chungbuk 27469, Korea; uk1697w@gmail.com

Sung Won Kim: Professor, School of Chemical and Material Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju-si, Chungbuk 27469, Korea; kswcfb@ut.ac.kr