

태양열 유동층 흡열기의 기체 열흡수 특성

박새한 · 김성원[†]

한국교통대학교 응용화학에너지공학부
 27469 충북 충주시 대소원면 대학로 50
 (2021년 1월 20일 접수, 2021년 2월 8일 수정본 접수, 2021년 2월 8일 채택)

Characteristics of Heat Absorption by Gas in a Directly-irradiated Fluidized Bed Particle Receiver

Sae Han Park and Sung Won Kim[†]

School of Chemical and Energy Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea
 (Received 20 January 2021; Received in revised form 8 February 2021; Accepted 8 February 2021)

요 약

태양열 SiC 입자 유동층 흡열기(내경 50 mm, 높이 150 mm)에서 수력학적 특성 및 기체 열흡수 특성이 연구되었다. 측정 구간 내에서, 기체 속도가 증가할수록 유동층 내 고체체류량은 일정하였으나, 유사한 기체속도 구간($U_g = 0.03\text{--}0.05\text{ m/s}$)에서 미세한 SiC 입자(SiC II; $d_p=52\text{ }\mu\text{m}$, $\rho_s=2992\text{ kg/m}^3$)는 굵은 SiC 입자(SiC I; $d_p=123\text{ }\mu\text{m}$, $\rho_s=3015\text{ kg/m}^3$) 대비 유동층 내 압력요동의 상대 표준편차는 낮았으며, 프리보드 내 고체체류량은 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 미세한 SiC II 입자는 굵은 SiC I 입자 대비 일사량의 변화에 관계없이 상대적으로 높은 일사량 당 흡열기 입출구 온도차를 보였고, 이는 상대적으로 균일한 유동층 내 입자 거동에 의한 층 표면 수용 열의 효율적인 열확산 효과에 더하여, 프리보드 영역에서 비산된 입자에 의한 추가적인 태양열 흡수 및 기체로의 열전달 효과에 기인한다. 본 시스템에서 기체속도 및 유동화 수가 증가할수록 열 흡수 속도 및 열효율은 증가하였다. SiC II 입자는 최대 17.8 W의 열 흡수 속도와 14.8%의 열효율을 보였고, 이는 SiC I 입자 대비 약 33% 높은 값을 나타내었다.

Abstract – Characteristics of hydrodynamics and heat absorption by gas in a directly-irradiated fluidized bed particle receiver (50 mm-ID X 150 mm high) of SiC particles have been determined. Solid holdups of SiC particles show almost constant values with increasing gas velocity. Fine SiC particles (SiC II; $d_p=52\text{ }\mu\text{m}$, $\rho_s=2992\text{ kg/m}^3$) showed low values of relative standard deviation of pressure drop across bed but high solids holdups in the freeboard region compared to coarse SiC particles (SiC I; $d_p=123\text{ }\mu\text{m}$, $\rho_s=3015\text{ kg/m}^3$). The SiC II exhibited higher values of temperature difference normalized by irradiance due to the effect of additional solar heat absorption and heat transfer to the gas by the particles entrained in the freeboard region in addition to the efficient thermal diffusion of the solar heat received at bed surface. Heat absorption rate and efficiency increased with increasing the gas velocity and fluidization number. The SiC II showed maximum heat absorption rate of 17.8 W and thermal efficiency of 14.8%, which are about 33% higher than those of SiC I within the experimental gas velocity range.

Key words: Solar heat, Fluidized bed, Particle receiver, Hydrodynamics, Gas heater

1. 서 론

산업계에서의 막대한 에너지 사용에 의한 환경적 영향을 줄이기 위해, 세계 각국에서는 신재생 에너지를 이용하려는 노력을 지속적으로 기울이고 있다[1]. 다양한 신재생에너지 중에서, 태양 에너지는

다양한 공정에 적용 가능한 유망한 것으로 가장 주목받고 있다[2].

태양광 에너지 변환 기술은 태양광을 직접 전력으로 변환하는 PV (Solar photovoltaic energy) 전지 기술, 집광을 통해 전력을 생산하는 CSP (Concentrating Solar Power) 기술 및 태양열 에너지를 이용하여 직접 또는 간접적으로 가열 및 냉각에 적용하는 STC (Solar Thermal Collectors for heating and cooling) 기술로 구분된다. 현재까지 화석연료 소비에 매우 높은 분율을 차지하는 발전 부문에서의 이산화탄소 배출 저감을 위해 PV 기술 및 CSP 기술 위주의 많은 진전이 있어 왔다. 그러나, 최근 1차 및 2차 산업(농업, 화학, 제지 등)은 물론, 석탄 발전 및 정유산업에서 연소용 공기의 예

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kswcfb@ut.ac.kr

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.

열 등과 같이 250~300 도씨 이하의 중·저온 에너지 생산을 위해, STC 기술에 대한 관심이 집중되고 있다[3,4].

태양열 에너지를 활용하기 위한 STC 기술은 크게 태양광을 모으는 집광기술과 모아진 태양광을 열전달 매체에 전달하는 흡열기(receiver) 기술로 구분할 수 있다. 흡열기 시스템은 직접 조사 방식과 간접 조사 방식으로 구분될 수 있는데[5], 태양열 직접 조사 방식에서 흡열 매체로서 고체 입자를 이용하는 입자 흡열기(particle receiver) 기술은 STC 분야에서 다양하게 연구되고 있다[6,7]. 특히, 유동화된 고체입자의 원활한 혼합과 이에 의한 높은 열전달 특성을 갖는 유동층 운전방식을 이용하여, 고체 흡열기 내 국부적 과열에 대한 리스크를 최소화 하고, 높은 열적 안정성과 열전달 계수를 제공하는 유동층 고체 흡열기(fluidized bed particle receiver)는 전도 유망한 기술로 평가되어 수십년 간 Flamant [7] 등에 의해 지속적인 연구가 이루어져 왔다[5,6,8-10].

그러나, 유동층 고체 흡열기는 고정층 대비 반응기 설계 및 운전 조건 최적화가 상대적으로 어려워, 흡열기로서의 높은 잠재력에도 불구하고, 상대적으로 낮은 태양열 전환 효율(solar efficiency)을 보이고 있어 추가적인 개선이 필요한 상황이다. 이는 본 연구의 관심 영역인 300 °C 이하의 중·저온 공정에 대한 효과적인 적용을 어렵게 하고 있다[11]. 따라서, 유동층을 이용한 고체 흡열기의 효율적 설계와 운용을 위해, 흡수체의 물성 및 흡열 특성과 유동층 내 입자의 거동 및 태양광 투과 과정 등 태양열 전환 효율에 미치는 영향 연구가 필요하다[10,12-16]. 뿐만 아니라 태양열 전환효율을 측정하기 위한 대부분의 실험은 태양이 존재하는 야외 조건(outdoor)이 아닌 실내(indoor)에서 제논 램프(Xenon lamp)를 사용하는 태양광 가상 조건 하에 수행되고 있기 때문에 기존 공정에 적합성 평가 및 적용 가능성을 평가하기 위한 설계값 도출에 매우 제한적이다. 따라서, 가변적인 날씨의 야외 조건에서 유동층 고체 흡열기 운전을 통해 태양열 전환효율에 대해 정보가 필요하다[6,8,9-17].

본 연구에서는 중·저온 공정용 기체 예열을 위한 태양열 직접조사 유동층 기체 흡열기 개발을 위해 야외 조건에서 입자 흡열기의 기체 태양열 흡수 특성이 연구되었다. 유동층 입자 흡열기에 대표적으로 사용되는 두 종류의 SiC 입자들에 대해 기체속도 변화에 따른 수력학적 특성을 해석하고, 흡열기 내 흡열에 의한 기체 온도 변이를 측정하였으며, 이로부터 기체의 흡열량 및 흡열 효율 변화에 대한 수력학적 특성의 영향을 해석하였다.

2. 실험

Fig. 1에 본 실험에서 사용된 태양열 유동층 입자 흡열기 및 집광 장치의 개략도와 압력탭 및 온도지시계의 위치를 나타내었다. 수력학적 거동이 기체 흡열 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해, cold bed model (Fig. 1(a)) 과 흡열 실험에 이용되는 hot bed model (Fig. 1(b))는 서로 같은 규격으로 설계되었다. 전체 장치는 주탑(main column)과 태양광 투과창으로 구성되어 있다. 주탑의 직경은 50 mm 이고, 전체 길이는 150mm 이며, 분산판으로부터 확장관까지의 높이는 100 mm이다. 내부 흐름현상을 관찰하기 위하여 cold bed model은 Plexyglas 칼럼으로, hot bed model은 Pyrex glass 칼럼으로 제작하였다. 실험 간 입자 비산에 의한 외부유출과 투과창에 미립자의 부착을 방지하기 위해, 반응기 상부는 80 mm의 직경으로 확장된다. 집광된 태양 에너지 흡수체인 입자로 공급되기 위해, 확장관의 투과창은 석영

유리($\tau_{\text{quartz}} = 92\%$, 5T)로 제작되었다.

본 실험의 cold bed model에서는 기체속도에 따른 수력학적 거동을 확인하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 압력탭을 설치하여 pressure transmitter로 연결하였고, 분산판 위 15~45 mm 지점에서 베드 영역의 압력강하를 45~125 mm 지점에서 층 표면과 프리보드 영역에서의 압력 강하를 측정하였다. 여기서 나온 신호는 data acquisition system으로 보내져 저장된 후 PC에서 저장하여 신호를 처리하였다. 압력 요동신호의 포집은 10 ms 간격으로 61 초 동안 총 6100개의 data를 수집하였다.

Hot bed model은 Fig. 1(b)와 같이 총 5개의 열전쌍(thermocouple, K-type)들이 설치되었다. 열전쌍은 기체 주입구, 층 내부(30 mm), 프리보드(90 mm), 확장관(125 mm), 기체 배출구(125 mm)에 설치되었으며, 온도 신호는 5 sec 마다 포집되었다. 층 내부에 삽입된 열전쌍은 층 직경 절반인 25 mm만큼 삽입되었으며, 프리보드 및 확장관 영역은 벽면과 근사한 위치로 삽입되어 집광 에너지에 의한 가열 방지 하에 기체 온도 측정이 수행되었다. 확장관 영역의 열전쌍은 배출구와 동일 높이에 위치하기 때문에 상단 투과창에 의한 열 손실이 나타나기 이전에 유지되는 최대 온도로서 간주할 수 있다. 가열 실험에서 유동층 흡열기로 태양 에너지를 공급하기 위해 프레넬 렌즈(Fresnel lens, 0.457m-I.D. Edmund optics)를 이용한 집광 시스템을 설계하였다. 집광 장치는 태양의 고도를 따라 수동으로 추적하는 시스템으로, 프레넬 렌즈로부터 굴절된 태양 에너지는 평행선과 근사하게 시준 되도록 초점 렌즈를 설치하였다. 시준된 직사광선이 유동층 가열기의 층 표면에 수직 조사될 수 있도록 초점 렌즈의 후단에는 반사판이 설치되었으며, 반사판은 프레넬 렌즈의 1/2 수직 각도로 변화된다. 층 표면에 수직 조사되는 집광 에너지의 초점 직경은 30~40 mm으로 유지된다. 태양 고도 추적에 있어, 프레넬 렌즈로 수직 입사되는 직달 일사량을 측정하기 위해, 프레넬 렌즈 고정부 전면에 일사량 측정 장치(solar power meter, SPM-1116SD, Lutron)의 센서가 부착되었으며, 일사량 변동 신호의 포집은 5sec로 수행되었다. 대기 중 구름 등에 의하여 발생될 수 있는 산란 일사량이 측정에 포함되지 않도록 방지하기 위해, 센서 측면부에는 반사율이 없는 가림막이 설치되었다.

실험에 사용된 입자는 평균입도가 다른 두 종류의 탄화규소(SiC)로서, 입도를 기준으로, Geldart B 그룹의 굵은 SiC (SiC I; F220, Showa denko, Tokyo, Japan)와 Geldart A 그룹의 미세한 SiC (SiC II; F100, Showa denko, Tokyo, Japan)를 사용하였다. 두 입자의 물성 정보는 Table 1과 같으며, 입도 분포 정보는 Fig. 2와 같다. 동일한 LHSV를 부여하기 위해 초기 초기 층 높이는 45 mm로 고정되었으며, 공기는 질량 유량계(mass flow meter, RK1150, Kojima instrument, Kyotanabe Kyoto, Japan)를 통해 유량이 조절되어 주탑 하부에서 소결 분산판(sintered plate)을 통하여 흡열기 내로 주입되었다.

실험은 일정 기체속도에서 일사량이 크게 변하지 않는 조건에 이르렀을 때, 온도 분포가 균일하게 유지되는 준 정상상태에서 수행되었다. 유동층 흡열기 내에서 준 정상상태를 정량적으로 평가하기 위한 일사량 당 환산 온도 차(reduced temperature difference) 계산식은 다음과 같다[18].

$$T_F^* = \left| \frac{(T_{\text{outlet}} + T_{\text{inlet}})}{2} - T_{\text{amb}} \right| \frac{1}{I_{\text{DNI}}} \quad (1)$$

여기서, T_{outlet} 은 배출구 온도, T_{inlet} 은 기체 유입온도, T_{amb} 는 외기 온

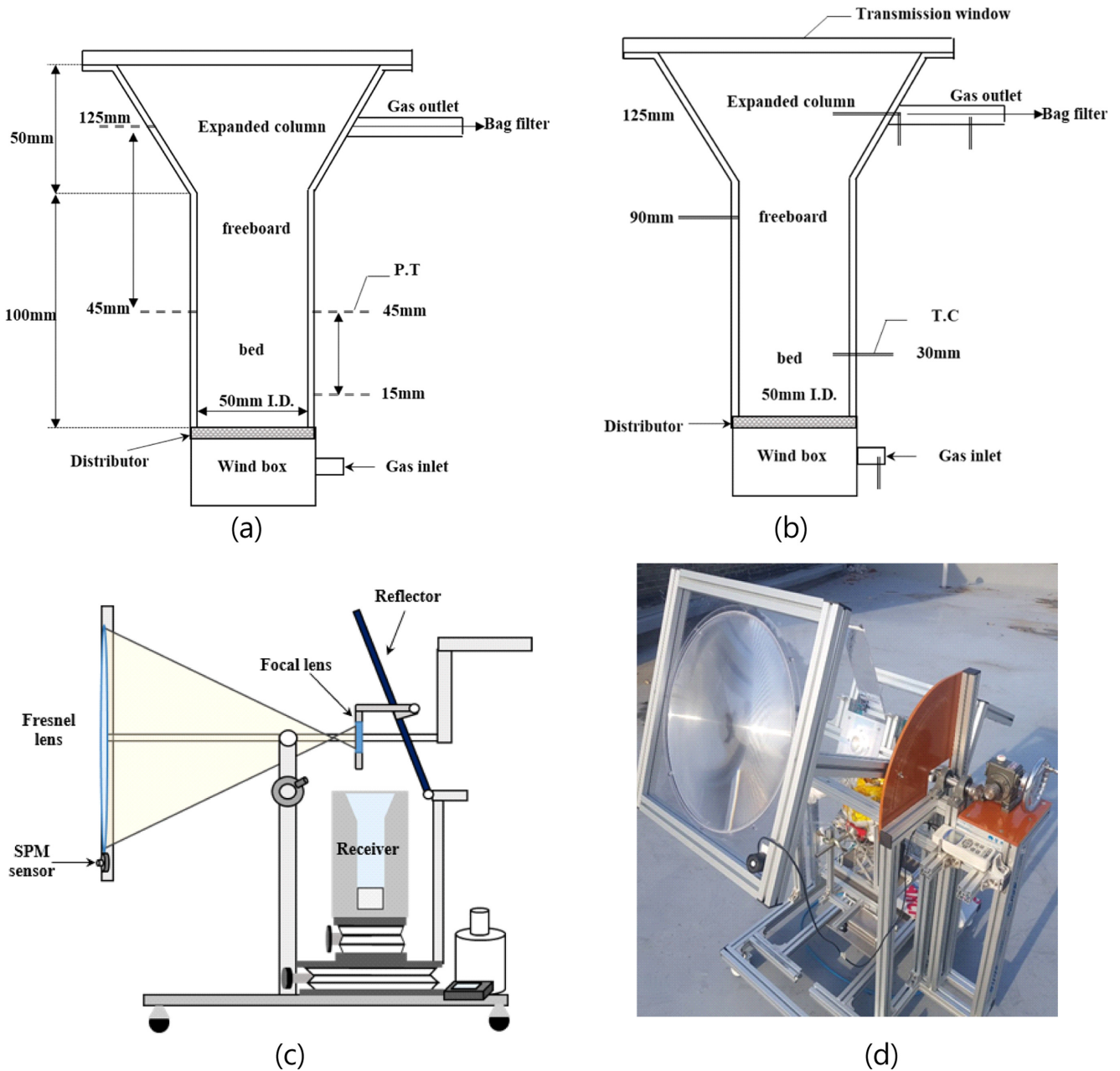


Fig. 1. Experimental apparatus. (a) cold model of particle receiver (pressure taps: dash line), (b) hot model of particle receiver (thermo-couples: thick line), (c) schematic diagram of solar collector and particle receiver, (d) photograph of apparatus.

Table 1. Physical properties of SiC particles used in experiment

Powder	Sauter mean diameter [μm]	Particle density [kg/m^3]	Bulk density [kg/m^3]	Absorptivity [%]	Fine contents [wt.%]	U_{mf} [m/s]
SiC I	123	3015	1524	90.92	-	0.018
SiC II	52	2992	1374	88.79	25.2	0.006

도, I_{DN} 는 직달 일사량의 세기이다. 유동층 흡열기의 준 정상상태를 판별하기 위해 Fig. 3과 같이 시간에 따른 일사량 당 환산 온도 차의 변화를 나타내었다. 공급되는 태양 에너지에 의해 시간에 따라 일사량 당 환산 온도 차는 증가하였으며, 기체 속도에 의한 열 흡수 속도가 최대가 되는 지점에서 근사한 값이 유지되는 구간을 통해 준 정상상태의 판별 기준으로 확인하였다. 흡열기 내에서 기체 유속 증가에 따라 도달 가능한 일사량 당 환산 온도 차는 감소하나, 준 정

상상태에 도달하는 시간은 빨라지는 특징을 확인할 수 있었다.

유동층 흡열기 내에서 기체에 의한 열 흡수 속도 계산식은 다음과 같다.

$$Q_{gas} = \rho_{gas} U_g A_f C_{p,gas} (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad (2)$$

여기서, Q_{gas} 는 단위 시간당 기체에 의해 흡수된 열량, ρ_{gas} 는 기체 밀도, A_f 는 흡열기의 단면적, $C_{p,gas}$ 는 가스의 비열용량이다.

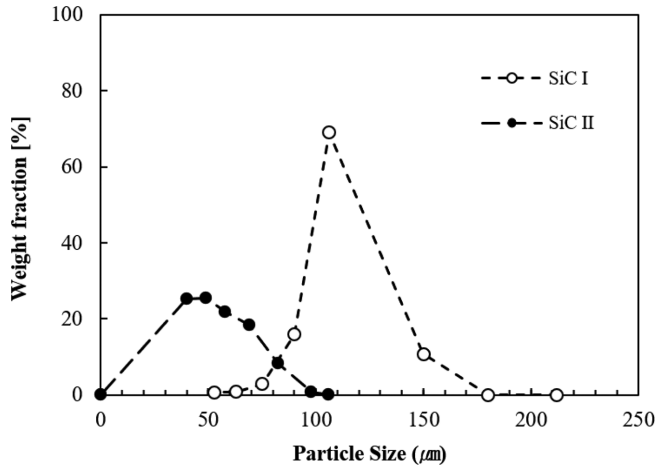


Fig. 2. Particle size distributions of SiC particles used in experiment.

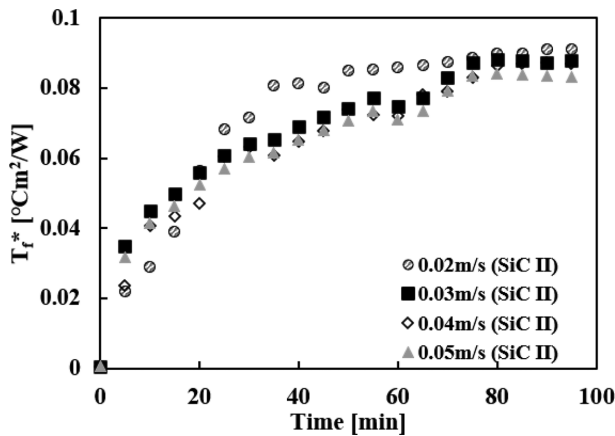


Fig. 3. Reduced temperature difference over time for quasi-steady state in the particle receiver with SiC II.

흡열기의 열효율은 아래와 같이 식 (3)와 (4)에 의해 구해졌다.

$$\eta_{receiver} = Q_{gas}/Q_{solar} \quad (3)$$

$$Q_{solar} = I_{DNI} A_{Fresnel} \rho_{mirror} \tau_{l,Fresnel} \tau_{l,focal} \tau_{quartz} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 입자 물성 변화에 따른 수력학적 특성

기체 흡열기 내 수력학적 특성에 대한 입자 물성의 영향을 비교하기 위해, 유속 및 유동화 수(U_g/U_{mf}) 증가에 따른 구간별 고체 체류량 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 고체 체류량은 식 (5)와 같이 계산되었다[19].

$$\text{Solidholdup, } \epsilon_s = \frac{\Delta P}{\rho_s g \Delta H} \quad (5)$$

여기서, ΔP 는 측정구간에서의 압력강하, ρ_s 는 입자 밀도, g 는 중력 가속도, ΔH 는 측정구간의 높이차이다. 유동성이 우수한 미세 SiC II는 저 유속에서 유동화 상태로 도달하며, Geldart A group의 특성과 일치하는 부드러운 층팽창 거동이 나타났다. 유동층 내부 고체체류량은 두 입자 간의 차이는 적었으나 굵은 SiC I는 유속 및 유동화 수가

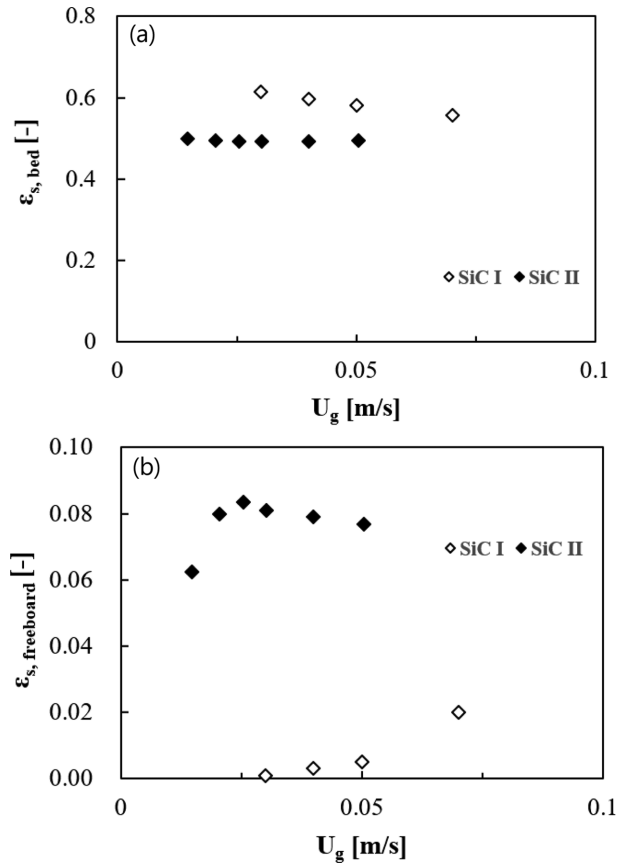


Fig. 4. (a) Effect of gas velocity on solids holdup across bed, (b) Effect of gas velocity on solids holdup across freeboard region.

증가할수록, 프리보드 영역에서의 고체 체류량은 미세한 SiC II 대비 상대적으로 매우 낮았다. 이에 따라, 측정 기체유속 구간에서는 SiC II는 동일한 LHSV에서 프리보드 영역에서 더 넓은 태양광과의 접촉 면적을 가질 것으로 예상되며, 프리보드에서 에너지를 수용한 후 효과적인 기체로의 열전달이 나타날 것으로 판단된다.

기체 유속 증가에 따른 입자 층에서 발생하는 기포의 성장과 내부 거동은 층물질의 혼합 효율 또는 기체-고체 간 접촉 효율에 영향을 주므로, 태양열 흡열 반응기에서 에너지 수용 및 열전달 현상에 영향을 준다. Fig. 4에서 두 입자 모두 측정 기체속도 범위에서 고체 체류량은 큰 변화없이 거의 일정한 값이 나타났으나, 반응기 효율 분석을 위해 입자 별 유동층 층물질 거동을 파악하는 것은 매우 중요하며, 이는 시간에 따른 압력 요동의 표준편차 분석을 통해 유동층 내 기포 성장 및 층 거동 변화를 간접적으로 확인할 수 있다[20]. 유동층 내 층물질 거동을 비교하기 위해, 시간에 따른 압력 요동의 표준편차(standard deviation)를 사용하였으며, 식 (6)와 (7)에 의해 표현될 수 있다[19,21].

$$\text{Standard deviation, } \sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (7)$$

여기서 N 은 전체 측정시간, n 은 순간 측정 시간, $x(n)$ 은 순간 측정 시간에서의 압력 강하, \bar{x} 은 평균 압력 강하를 의미한다. 입자 간 상

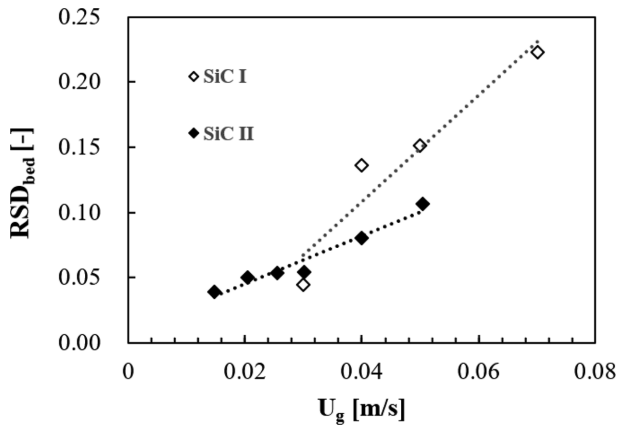


Fig. 5. Effect of gas velocity on relative standard deviation of pressure drop across fluidized bed.

호 비교에 있어, 입자 밀도 차에 의해 실험군 별 압력 강하는 상이하게 나타나므로, 이의 일반화를 위해 상대 표준편차(relative standard deviation, RSD)를 도입하였으며, 식 (8)에 의해 나타난다[19,21].

$$RSD = \sigma_p / \Delta \bar{P} \quad (8)$$

Fig. 5에 기체유속 증가에 따른 입자 별 압력 요동의 상대편차 변화를 나타내었다. 작은 입도의 입자는 기포 분쇄 빈도를 증가시키므로 상대적으로 높은 기포의 비표면적을 제공하며 층 내에서 기포의 성장을 제한하고 균일한 기포 분율을 만들 수 있기 때문에 [21], 기체속도가 증가할수록 미세한 SiC II 입자는 상대적으로 낮은 RSD 값을 나타내어 균일한 유동층 거동을 보이는 것으로 판단된다. 반면, SiC I 입자는 큰 기포를 생성함으로써 층 내 입자 거동은 불균일성을 나타내는 것으로 판단되며, 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[6].

3-2. 입자 물성 변화에 따른 기체 흡열 특성

Fig. 6에 기체 유속 증가에 따른 유동층 흡열 반응기 내 기체의 출구 온도 및 유동층 내부 온도의 변화를 나타내었다. 또한, 태양열

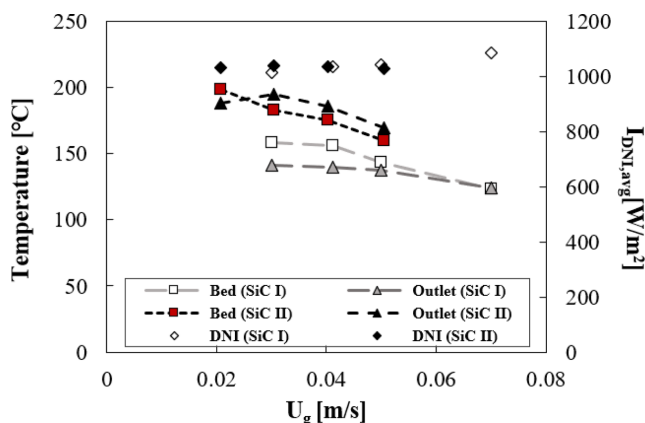


Fig. 6. Effect of gas velocity on temperatures at bed and gas outlet in particle receiver.

에너지 시스템의 성능은 측정된 날씨 또는 일사량에 영향을 받으므로, 날씨에 의한 영향 정도를 고려하기 위해 측정된 시간에서의 평균 일사량(DNI: direct normal irradiance)을 함께 나타내었다. 유동층 내부의 온도 측정지점은 전체 층 높이의 60% 지점에 해당하고, 층 표면 하부 2 cm 이하 지점이다. 기체의 입구 온도는 SiC I의 경우 24 °C였고, SiC II는 21 °C로 일정하게 유지되었다.

기체 유속이 증가할수록 유동층 내 온도 및 출구 기체의 온도는 감소하는 결과를 나타내었다. 기체 유속이 증가하면, Fig. 5에서 보인 바와 같이, 층 내부 격렬해지는 기포 거동에 의한 층물질 유동성 증가와 함께 입자가 얻은 열이 기체로 전달되는 효율이 증가될 수 있으나, 기체가 유동층 내 체류하는 시간 즉, 뜨거운 입자와 접촉하는 시간의 감소로 인해 얻어지는 기체의 온도는 감소하게 된다. 또한, 기포의 성장 또는 기포 크기 증가는 기체-입자가 기체 단위 부피당 표면적의 감소 또는 입자와 기체간의 열전달 저항 증가를 가져옴으로써 열전달 속도를 낮추는 결과를 야기한다[17,23].

입자 간 비교에 있어, 유사한 기체속도 측정구간(0.03~0.05 m/s)에서 SiC II의 유동층 내 온도와 출구온도가 SiC I 보다 상대적으로 높은 결과를 나타내었다. 이는 미세한 SiC II 입자가 SiC I 보다 층 표면에 조사된 태양열이 상대적으로 유동층 층물질 전체에 잘 전달되고, 층물질로부터 기체로 빠르게 전열됨을 의미한다. SiC II는 Fig. 5의 유동층 내 압력요동 변이의 결과로부터 예측할 수 있듯이, 1차적으로 유동층 내 균질한 혼합으로 인한 것으로 판단된다. 특히, Fig. 2에 나타난 입자의 입도 분포로부터 SiC II내 층물질의 유동성을 향상시키는 45 μm 이하의 입자가 상대적으로 높은 것 또한 유동층 내 높은 혼합과 빠른 열전달을 유도한 것으로 판단된다[24].

그러나, 위에서 언급하였듯이 흡열기 내 기체 흡열의 성능은 날씨 변화에 따른 DNI에 영향을 받고, 본 가열실험에서 일사량 조건은 900~1150 W/m²로 변화되었으므로, 입자간 상호 비교를 위해서는 일사량 당 흡열기 입출구 온도 차($\Delta T / I_{DNI}$)로 정규화해야 한다[24]. Fig. 7에 기체속도 증가에 따른 일사량 당 흡열기 온도차의 변화를 나타내었다. 미세한 SiC II는 SiC I 대비 높은 값을 나타냄으로써, 일사량의 변화에 관계없이 상대적으로 높은 값을 나타내었으며, 이러한 결과는 유동층 층물질의 물성과 이와 연관된 층물질의 거동에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 입자 별 수력학적 특성과 흡열기 내 영역 별 흡열

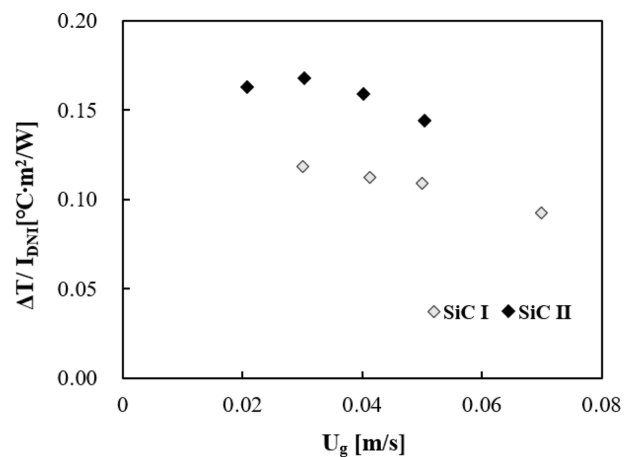


Fig. 7. Effect of gas velocity on temperature difference normalized by I_{DNI} in particle receiver.

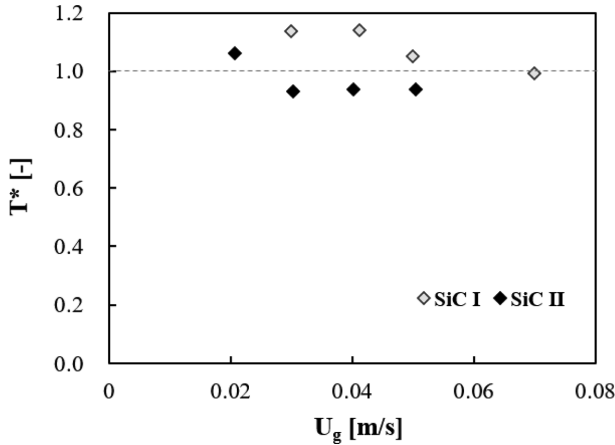


Fig. 8. Effect of gas velocity on relative temperature differences across bed and freeboard regions in particle receiver.

특성을 확인하기 위해 식 (8)에 의해 정의된 상대 흡열 온도(T^*)를 도입하였다.

$$T^* = \frac{T_{bed} - T_{inlet}}{T_{outlet} - T_{inlet}} \quad (8)$$

상기 정의에 의해 투과창으로의 흡열기의 열손실을 감안할 때, T^* 가 1 보다 클 경우, 기체 흡열기 내 기체의 흡열은 유동층 표면 하부 영역에서 흡열이 주로 일어나고, T^* 가 1보다 작을 경우, 표면 부근 또는 그 이상의 영역에서 기체 흡열이 높게 일어남을 의미한다.

Fig. 8에 기체 유속 변화에 따른 T^* 의 변이를 나타내었다. 그림에서와 같이, SiC II는 초기 1 보다 높은 값을 나타냈으나, 0.03 m/s 이상에서 일정하게 약 0.94의 값을 나타내었다. 굵은 SiC I의 경우, 기체속도가 증가할수록 1.14에서 0.99로 낮아지는 결과를 나타냈다. 이는 SiC II의 경우, 층 하부영역에서의 온도 차이보다, 층 표면 및 프리보드 영역에서 일사량당 온도 차가 크고, 결론적으로 더 많은 열을 기체가 흡수함을 의미한다. 이러한 결과는 Fig. 4와 Fig. 5의 결과에서 유추할 수 있듯이, 입도가 작은 SiC II의 경우, 낮은 기체속도의 경우, 층 하부에서 대부분의 입자-기체 간 열전달이 일어나지만, 기체 유속이 증가할수록 프리보드 영역으로의 입자 비산량이 균질하게 증가하고, 비산된 입자에 의해 프리보드 영역에서의 태양열 흡수 및 기체로의 열전달이 상대적으로 높은 비율로 일어남을 의미한다.

반면, Fig. 4와 같이 입자 비산량이 낮은 SiC I은 유동층 하부 영역에서 주로 고체-기체 열교환이 일어나고 있는 것이다. 그러나, SiC I 입자 또한, 비산량이 증가하는 0.07 m/s에서 T^* 는 1.0에 도달 하였으나, 상대적으로 높은 유동층 영역에서의 압력요동 RSD 값으로부터 유추할 수 있듯이(Fig. 5) 큰 기포의 형성으로 인한 비산의 균질성이 상대적으로 낮을 것으로 판단되어, T^* 의 증가 정도는 상대적으로 낮게 나오고, 이는 상대적으로 낮은 $\Delta T/I_{DM}$ 의 원인으로 판단된다. 따라서, 입자의 물성에 따른 상대적인 주요 기체-고체 열전달 영역의 차이는 흡열기 설계 및 최적 운전조건 선정에 있어 중요한 고려 사항이 될 수 있을 것이다.

Fig. 9(a)에 기체 속도 변화에 따른 기체 흡열기 내 기체의 열흡수율 변화를 나타내었다. 기체의 열 흡수 속도는 식 (2)에 의해 구해졌다. 그림에서와 같이, 열 흡수 속도는 두 입자 모두, 기체속도가 증가할수록 증가하였다. 이는 앞에서 언급되었듯이, 기체가 증

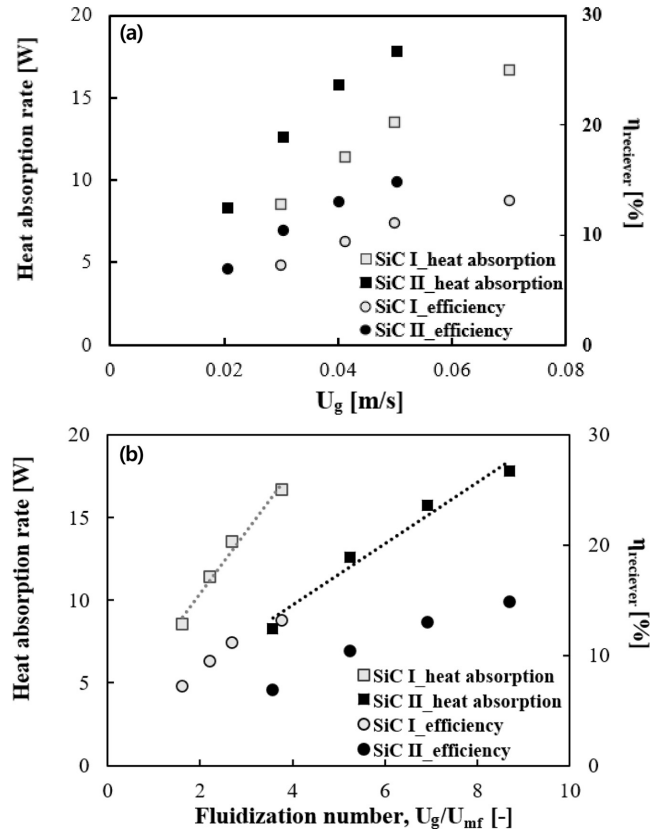


Fig. 9. Effects of gas velocity (a) and fluidization number (b) on heat absorption rate of gas and efficiency of particle receiver.

가할수록 유동층 내 기포 거동이 활발해짐에 따라 층 내 기체-고체 혼합이 증가하고, 또한, 입자의 비산량 증가에 따라 비산된 입자에 의한 흡열 및 입자-기체 열전달 영역 증가로 인해, 흡열된 입자로부터 기체 열전달량이 증가된 것으로 판단된다. SiC II의 경우, 최대 실험범위인 0.05 m/s에서 17.8 W의 열 흡수 속도를 나타냈으며, SiC I은 0.07 m/s에서 16.7 W의 열 흡수 속도를 보였다. 동일 유속의 비교에 있어, SiC II의 최대 열 흡수 속도를 보인 0.05 m/s 기준으로 SiC II는 상대적으로 낮은 I_{DM} 에도 불구하고, SiC I 대비 약 1.3 배 높은 열흡수율을 나타냈다. 이는 본 연구대상의 흡열기 시스템에서 동일 기체량 주입 기준에서 미세한 SiC II 입자가 상대적으로 높은 효율을 나타낸다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 유동층 태양열 흡수기에서의 열흡수능은 500~1,000 μm 범위의 입자가 우수하다는 Flamant [7]의 결과와는 다른 것이다. 그러나, 본 연구에서는 낮은 기체 유속에서 미세한 입자의 비산은 입자의 태양열 흡수 및 기체로의 열전달 영역을 확장할 수 있음을 확인하였다. 또한, 입자가 Geldart A 영역[25]에 포함될 때, 유동층 내 작은 기포의 생성으로 인한 혼합도 향상 가능성은 본 연구 시스템에서 미세 입자가 더욱 적합할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Fig. 9(a)에 기체 속도에 변화에 따른 기체 흡열기의 기체 흡열 효율의 변화를 나타내었다. 기체속도가 증가할수록 흡열기 내 기체 흡열효율은 열 흡수 속도와 유사하게 증가하였다. SiC II 입자는 실험범위에서 최대 14.8%의 효율을 얻었고, SiC I 입자는 최대 13.1%의 효율을 얻었다. 또한, 동일한 0.05 m/s에서 SiC II는 SiC I 대비 1.33배의 기체 효율을 나타냈다. 이는 입자의 평균 입도 크기 변화를 통해 흡열기의 효율을

33% 높일 수 있음을 나타낸다. 그러나, 본 시스템에서 얻어진 기체 열 효율은 실외 현장에서 얻어진 결과들과 마찬가지로 상대적으로 낮은 열효율을 얻었고[26], 이는 대부분 단열이 불가능한 투과창을 통해 열손실이 매우 크기 때문이다.

이에 따라, 흡열기 시스템의 효율을 증대시키기 위해서는 태양광 집광기로부터 투사되는 태양광의 면적을 고려하여 투과창 면적을 최적화시킬 필요가 있을 것으로 판단된다[27].

Fig. 9(b)에 유동화 수(fluidization number: U_g/U_{mf}) 변화에 따른 기체 흡열기 내 기체의 열 흡수 속도와 흡열 효율 변화를 나타내었다. 유동화 수는 설계에 유용하게 사용될 수 있는 기체속도의 무차원 값이다. 그림과 같이, 기체의 열 흡수 속도와 흡열 효율은 유동화 수에 선형적으로 증가하였으며, 이로부터 기체속도의 증가를 통해 비산되는 입자를 제어할 수 있다면 기체의 열 흡수 속도 또는 흡열효율을 향상시킬 수 있음을 의미한다. 따라서, 비산을 제어할 수 있도록 프리보드 영역의 확장 또는 사이클론 등의 설치를 통해, 본 시스템의 열 흡수능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

태양열 유동층 흡열기에서 SiC 입자를 사용한 기체 열흡수 특성에 관한 본 실험의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유사한 기체속도 구간에서 미세한 SiC II 입자는 굵은 SiC I 입자대비 유동층 내 고체체류량은 유사하였으나, 압력요동의 상대 표준편차는 낮았으며, 프리보드 내 고체체류량은 상대적으로 높은 값을 나타내었다.

(2) 미세한 SiC II 입자는 SiC I 입자대비 일사량의 변화에 관계 없이 높은 일사량 당 흡열기 입출구 온도차를 보였다.

(3) 굵은 SiC I 입자의 태양열 흡수 및 기체로의 열전달은 유동층 하부 영역에서 주로 일어나지만, SiC II 입자는 상대적으로 균일한 유동층 내 입자 거동에 의한 층 표면 수용 열의 효율적인 열확산에 더하여, 프리보드 영역에서 비산된 입자에 의한 태양열 흡수 및 기체로의 열전달이 높은 비율로 일어났다.

(4) 본 시스템에서 기체속도 및 유동화 수가 증가할수록 열 흡수 속도 및 흡열 효율은 증가하였고, 동일한 기체속도 조건에서 SiC II 입자의 열 흡수속도와 흡열 효율은 SiC I 대비 약 1.3 배 높은 값을 나타냈다.

감 사

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

사용기호

A	: Bed area [m ²]
$C_{p, gas}$: Specific heat capacity of gas [J/kg·K]
d_p	: Mean particle diameter [m]
D_t	: column diameter [m]
g	: gravitational acceleration [m/s ²]
H	: bed height from distributor [m]

ΔH	: difference of measurement height [m]
I_{DMI}	: directly irradiated solar irradiance [W/m ²]
N	: total measurement time of pressure signal [s]
n	: instantaneous measurement time of pressure signal [s]
P	: pressure [Pa]
ΔP	: pressure drop across the bed [Pa]
Q_{gas}	: heat absorption rate by gas [W]
Q_{solar}	: concentrated solar energy [W]
RSD	: relative standard deviation [-]
T_{inlet}	: inlet gas temperature [°C]
T_{bed}	: bed temperature [°C]
$T_{freeboard}$: freeboard temperature [°C]
T_{outlet}	: outlet gas temperature [°C]
T^*	: relative heat absorption temperature [-]
T_F^*	: Reduced temperature difference [°Cm ² /W]
U_g	: superficial gas velocity [m/s]
U_{mf}	: minimum fluidization velocity [m/s]
x(n)	: Instantaneous signal of pressure drop [pa]
x	: Average signal of pressure drop [pa]

그리스 문자

$\eta_{receiver}$: thermal efficiency of receiver [-]
ρ_g	: gas density [kg/m ³]
ρ_s	: apparent particle density [kg/m ³]
ρ_{mirror}	: reflectivity of reflector [-]
$\tau_{l, Fresnel}$: transmissivity of Fresnel lens [-]
$\tau_{l, focal}$: transmissivity of focal lens [-]
τ_{quartz}	: transmissivity of quartz glass [-]
σ_p	: standard deviation of pressure fluctuation [Pa]
ϵ_s	: solid hold up [-]

References

- Hwang, H., Mun, J. and Kim, J., "Economic Benefits of Integration of Supplementary Biopower and Energy Storage Systems in a Solar-Wind Hybrid System," *Korean J. Chem. Res.*, **58**, 381-389(2020).
- Miller, J., Nwe, K., Youn, Y., Hwang, K., Choi, C., Mola, P. W. and Jin, S., "Development of a Low Environmental Impact, Porous Solar Absorber Coating Utilizing Binary/ternary Solvent Blends for CSP Systems," *Korean J. Chem. Eng.*, **36**, 996-1003 (2019).
- Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. P., and Saidur, R., "Solar Process Heat in Industrial Systems—A Global Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 2270-2286(2018).
- Jia, T., Dai, Y., and Wang, R., "Refining Energy Sources in Wine-making Industry by Using Solar Energy as Alternatives for Fossil Fuels, A Review and Perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **88**, 278-296(2018).
- Li, S., Kong, W., Zhang, H., Sabatier, F., Ansart, R., Flamant, G., and Baeyens, J., "The Fluidized Bed Air Heat Exchanger in a Hybrid Brayton-cycle Solar Power Plant," *In AIP Conference Proceedings*, **2126**, July, Taiwan, 140002(2019).

6. Tregambi, C., Chirone, R., Montagnaro, F., Salatino, P., and Solimene, R., "Heat Transfer in Directly Irradiated Fluidized Beds," *Sol. Energy*, **129**, 85-100(2016).
7. Flamant, G., "Theoretical and Experimental Study of Radiant Heat Transfer in a Solar Fluidized-bed Receiver," *AIChE Journal*, **28**, 529-535(1982).
8. Gokon, N., Takahashi, S., Yamamoto, H., and Kodama, T., "Thermochemical Two-step Water-splitting Reactor with Internally Circulating Fluidized Bed for Thermal Reduction of Ferrite Particles," *Int. J. Hydrogen Energy*, **33**, 2189-2199(2008).
9. Matubara, K., Kazuma, Y., Sakurai, A., Kodama, T., Gokon, N., Choi, H. S., and Nagase, Y., "Laboratory Experiment and Simulation of High-temperature Fluidized Bed Air Receiver for Concentrated Solar Power Generation," *Journal of the Japan Institute of Energy*, **94**, 1323-1329(2015).
10. Tregambi, C., Montagnaro, F., Salatino, P. and Solimene, R., "Directly Irradiated Fluidized Bed Reactors for Thermochemical Processing and Energy Storage: Application to Calcium Looping," *In AIP Conference Proceedings*, 1850, June, 090007(2017).
11. 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).
12. Ma, Z., Mehos, M., Glatzmaier, G. and Sakadjian, B. B., "Development of a Concentrating Solar Power System Using Fluidized-bed Technology for Thermal Energy Conversion and Solid Particles for Thermal Energy Storage," *Energy Procedia*, **69**, 1349-1359(2015).
13. Ho, C. K., "Advances in Central Receivers for Concentrating Solar Applications," *Solar Energy*, **152**, 38-56(2017).
14. 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**, e63(2019).
15. Koenigsdorff, R. and Kienzle, P., "Results of and Prospects for Research on Direct-absorption Fluidized Bed Solar Receivers," *Solar Energy Materials*, **24**, 279-283(1991).
16. Werther, J., Koenigsdorff, R. and Fischer, M., "Use of Circulating Fluidized Bed as Solar Receiver," *Preprints of Annual Meeting Society of Chemical Engineers*, Japan Sendai, 28-30(1994).
17. 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**, 967(2020).
18. Roberto, B., Ubaldo, C., Stefano, M., Roberto, I., Elisa, S., and Paolo, M., "Graybox and Adaptive Dynamic Neural Network Identification Models to Infer the Steady State Efficiency of Solar Thermal Collectors Starting from the Transient Condition," *Sol. Energy*, **84**, 1027-1046(2010).
19. Kunii, D. and Levenspiel, O., "Fluidization Engineering," 2nd ed., Butterworth-Heinemann(1991).
20. Bi, H. T., "A Critical Review of the Complex Pressure Fluctuation Phenomenon in Gas-solid Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 3473-3493(2007).
21. 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. Multiphase Flow*, **26**, 663-715(2000).
22. 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 J. Chem. Res.*, **58**, 651-657(2020).
23. 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 Transfer*, **64**, 269-277(2013).
24. Kim, S. W., Yeo, C. E. and Lee, D. Y., "Effect of Fines Content on Fluidity of FCC Catalysts for Stable Operation of Fluid Catalytic Cracking Unit," *Energies*, **12**, 293(2019).
25. Abrahamsen, A. R. and Geldart, D., "Behaviour of Gas-Fluidized Beds of Fine Powders Part I. Homogeneous Expansion," *Powder Technol.*, **26**, 35-46(1980).
26. Gomez-Garcia, F., Gauthier, D., and Flamant, G., "Design and Performance of a Multistage Fluidised Bed Heat Exchanger for Particle-receiver Solar Power Plants with Storage," *Appl. Energy*, **190**, 510-523(2017).
27. Baccoli, R., Frattolillo, A., Mastino, C., Curreli, S., and Ghiani, E., "A Comprehensive Optimization Model for Flat Solar Collector Coupled with a Flat Booster Bottom Reflector Based on An Exact Finite Length Simulation Model," *Energy Convers. Manag.*, **164**, 482-507(2018).