

태양열 하이브리드 공정을 위한 유동층 입자들의 마모 및 열전달 특성 연구

김형우¹, 이도연², 남형석², 홍영완¹, 서수빈¹, 고은솔¹, 강서영¹, 이시훈^{1,*}

¹전북대학교 자원에너지공학과
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
²한국에너지기술연구원 온실가스연구실
34129 대전광역시 유성구 가정로 152

(2020년 1월 9일 접수; 2020년 1월 10일 수정본 접수; 2020년 2월 10일 채택)

Attrition and Heat Transfer Characteristics of Fluidized Bed Materials for a Solar Hybrid Process

Hyung Woo Kim¹, Doyeon Lee², Hyungseok Nam², Young Wan Hong¹, Su Been Seo¹, Eun Sol Go¹, Seo Yeong Kang¹, and See Hoon Lee^{1,*}

¹Department of Mineral resources and energy engineering, Jeonbuk National University
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54896, Republic of Korea
²Greenhouse Gas Laboratory, Korea Institute of Energy Research
152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Republic of Korea

(Received for review January 9, 2020; Revision received January 10, 2020; Accepted February 10, 2020)

요 약

전기와 천연가스와 같이 안정적이며 신뢰할 수 있는 에너지를 현대 사회가 요구하기 때문에 재생에너지와 화석연료의 장점을 모두 보유하고 있는 다양한 방식의 태양열 하이브리드 공정들이 세계 각국에서 개발되고 있다. 특히 고체 입자에 태양열을 저장하는 유동층 기반의 태양열 하이브리드 공정은 기존의 유동층 연소 및 가스화에 적용할 수 있을 것으로 기대받고 있다. 이에 본 연구에서는 ASTM D5757 반응기와 0.14 m의 직경과 2 m 높이의 유동층 반응기를 이용하여 태양열 하이브리드 공정의 유동층물질로서 검토되고 있는 실리콘 카바이드, 알루미늄 입자들의 마모 및 열전달 특성을 고찰하였다. 특히 다양한 상업 유동층 반응기에서 유동층물질로 이용되는 모래와 비교하였다. 실리콘카바이드와 알루미늄의 내마모성은 모래보다 우수하였으며 평균 열전달 계수도 125 ~ 152 W m⁻²K⁻¹ 범위를 가지는 것으로 고찰되었다.

주제어 : 열전달, 마모, 태양열 하이브리드 공정, 유동층 매체

Abstract : Various solar hybrid energy conversion processes, which have both the advantages of renewable energy sources and fossil energy sources, have been developed in the world because stable and predictable energy supplies, such as electricity and natural gas, are necessary for modern societies. In particular, a solar hybrid energy conversion process based on a dual fluidized bed process concept has been expected as the promising solution for sustainable energy supply via thermochemical conversions, such as pyrolysis, combustion, gasification, and so on, because solar thermal energy could be captured and stored in fluidized bed materials. Therefore, the attrition and heat transfer characteristics of silicon carbide and alumina particles used for fluidized bed materials for the solar hybrid energy conversion process were studied in an ASTM D5757 reactor and a bubbling fluidized bed reactor with 0.14m diameter and 2m height. These characteristics of novel fluidized bed materials were compared with those of sand particles which have widely been used as a fluidized bed material in various commercial fluidized bed reactors. The attrition resistances of silicon carbide and alumina particles were higher than those of sand particles while the average values of heat transfer coefficient in the bubbling fluidized bed reactor were in the range of 125 ~ 152 W m⁻²K⁻¹.

Keywords : Heat transfer, Attrition, Solar hybrid process, Fluidized material

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: donald@jbnu.ac.kr; Tel: +82-63-270-2362; Fax: +82-63-270-2365

doi: 10.7464/ksct.2020.26.1.65 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

1. 서론

사회 및 산업 구조가 고도화되고 효율화됨에도 불구하고 세계 경제의 지속적인 성장은 에너지의 생산과 소비를 증가시키는 주원인이 되고 있다[1-4]. 비록 선진국들을 중심으로 태양광, 풍력 등의 재생에너지 자원들의 생산과 이용이 급격히 증가하고 있으나, 중국, 인도로 대표되는 저개발국가들의 빠른 성장은 화석 연료들의 생산과 소비를 지속적으로 증가시키고 있다. 가격 경쟁력, 넓고 빠른 수송과 분배, 생산과 소비의 광범위한 인프라구조 등의 장점들을 지니고 있는 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료들은 세계 각국의 규제에도 불구하고 향후 30년 이상 전 세계 에너지 생산과 소비의 중심에 여전히 위치할 것으로 예측되고 있다[5-10].

화석자원들을 주로 이용하는 방법은 연소를 통해 열을 이용하거나 전기로 전환하여 이용하는 것이다. 2000년대에 들어서 온실가스를 포함한 대기 오염 물질들의 배출 저감, 화석 자원들의 고갈에 대한 두려움 극복을 달성하는 현실적인 방법들 중의 하나로서 원자력에 대한 관심이 증가하였다. 그러나 2011년 동일본 대지진으로 인한 후쿠시마 원전 사고로 인하여 원자력에 대한 관심을 가진 국가들의 대부분은 원자력 발전에서 석탄 화력 발전, 천연가스 복합 발전 등의 화석 자원들의 이용을 증가시키고 있다[1,7,11].

유럽 중심의 선진국들은 태양광, 풍력 등의 재생에너지 자원들에 대한 다양한 인센티브 정책들을 통해서 재생에너지의 생산 증대를 유도하고 있으며, 이를 통해서 에너지 및 환경과 관련된 다양한 과제들을 해결하려고 한다. OECD 국가들을 포함한 세계각국의 전력 시장을 보면, 재생에너지 자원을 이용한 전력 생산의 비중 확대, 부하 변동 및 가동 중단이 가능한 발전 플랜트의 이용 확대, 간헐적 생산만이 가능한 재생에너지 전력에 대한 수요-공급을 일치시키는 대용량의 에너지 저장 시스템 연계 또는 비상 전력망 확대 등이 동시에 이루어지고 있다. 이와 같은 에너지 생산 및 소비의 급격한 변화에도 불구하고 안정적이며 예측 가능한 에너지를 현대 사회가 요구하고 있기에 화석 자원들의 빠른 대체보다는 증가하는 에너지 수요의 일부를 재생에너지가 차지하는 방식으로 에너지 생산과 소비가 진행되고 있다[1,8-10,12-14].

전 세계의 유틸리티 회사들은 화석 자원들을 사용함에도 불구하고 지구 온난화, 미세 먼지와 같은 환경오염 저감과 동시에 안정적인 전력을 공급할 수 있는 청정 발전 기술들에 대한 투자를 진행하고 있다. 현실적으로 선택할 수 있는 비용경제적인 방법은 초초임계 증기 터빈, 순산소 연소, 이산화탄소 연소 후 포집과 같이 에너지 전환 효율을 향상하거나 온실가스의 대기 중 배출을 직접적으로 저감하는 것이다. 또 다른 방법은 지속가능하며 환경에 거의 무해한 재생에너지 자원들을 기존의 화석 자원들의 에너지 전환 설비에서 이용하도록 연계하는 것이다. 전력 시장에서 재생에너지의 확대를 가로막는 요인들은 전력 생산 비용의 증가로 인한 전기 요금의 상승, 기후 조건의 의존에 따른 간헐적이며 단기간의 전력 생산, 전력 생산량의 변동 폭 증대 등이다. 이와 같은 단점들을

해결하는 방법으로 재생에너지와 대용량 전력 저장을 연계하고 있으나 아직까지 유틸리티 규모의 대용량 전력 저장은 불가능한 상황이다. 이를 해결할 수 있는 방법으로 기존의 화석 연료들이 가지는 장점과 재생에너지가 가지는 장점을 연계하는 하이브리드 공정 개발이 확산되고 있다[8-10,15,16].

단순히 발전 플랜트에 태양광 발전 설비 및 풍력 발전 설비를 건설하고 기존의 전력망에 연결하는 방식은 재생에너지의 단점 극복에는 부족하다. 이에 몇몇 연구자들은 집중 태양열 발전과 기존의 연소 또는 가스화 설비를 연계하는 새로운 방식을 제시하고 있다. 집중 태양열 발전을 위하여 증기 터빈에서 이용되는 물 또는 용융염과 같은 에너지 저장 물질들을 이용하는 방식들이 제시되기도 하였다. 특히 증기 터빈에 공급되는 증기의 직접 가열이 아닌 고체 입자로의 열에너지 저장을 통한 간접 이용은 태양열 이용이 가질 수 있는 간헐적 에너지 생산이라는 단점을 극복하고 유틸리티 규모에서 재생 에너지를 직접 이용할 수 있도록 해준다.

따라서 고체 입자들을 이용하는 유동층 또는 순환유동층을 이용하는 열화학적 공정들이 태양열과의 융합에 적극적으로 검토되고 있다. 그러나 열화학적 전환 공정에 이용되는 유동층 공정들에서 유동층 물질로서 상업적으로 이용되는 층물질은 모래밖에 없는 상황이다. 그러나 태양열을 저장하는 매체로서 많이 검토되고 있는 물질들은 실리콘카바이드(SiC) 또는 알루미늄 산화물(Al_2O_3)이다. 그러나 실리콘카바이드, 알루미늄 산화물의 유동층 공정 적용을 위한 입자의 마모, 열전달 특성 자료는 태양열 하이브리드 공정의 개발에 필요하다. 이에 본 연구에서는 유동층 물질로서의 적합도를 평가하고 설계에 필요한 실리콘카바이드, 알루미늄 산화물의 마모 및 열전달 계수를 ASTM D5757 반응기와 기포유동층 반응기를 이용하여 측정하였다. 또한 기존의 모래와의 비교를 통해 유동층 공정의 응용 가능성을 검토하였으며 신개념의 공정 설계에 필요한 설계 인자를 확보하였다.

2. 실험방법

2.1. ASTM D5757 반응기

유동층 기반의 태양열 하이브리드 공정에서 실리콘카바이드와 알루미늄 산화물의 입도 변화를 고찰하고 상업 유동층 및 순환유동층 설비에서 이용되는 모래와의 비교를 위하여 본 연구에서는 입자 마모도 측정에 이용되는 ASTM D5757 반응기를 이용하였으며 설치된 반응기는 Figure 1과 같다. ASTM D 5757-95 반응기는 내경 0.035 m, 높이 0.71 m, 두께 3 mm의 stainless steel로 이루어진 마모관과 반응기 외부로의 고체 입자 유출을 막는 내경 0.11 m, 높이 0.63 m, 두께 3 mm의 stainless steel로 제작된 침강조로 구성되어 있다. 침강조의 하부는 높이 0.23 m의 확장관으로 마모관에 연결되어 있으며, 상부는 높이 0.1 m의 수축관으로 직경 0.034 m의 기체 출구와 연결되어 있다[17].

마모관에서 입자-입자, 입자-벽의 충돌로 인하여 발생하는 미세 입자들은 침강조에서 포집되어 마모관으로 재주입되지



Figure 1. ASTM D5757 reactor.

않고 기체와 같이 출구를 통하여 외부로 배출되게 된다. 기체 출구를 통해 배출된 미세 입자들은 그림에서 보듯이 삼각 플라스크와 텀블 필터를 통해서 포집된다. 입자의 움직임을 위하여 기체는 마모관 하부에 설치된 분산판을 통해서 주입된다. 분산판은 유동층 반응기에서 일반적으로 이용되는 perforated plate로 되어 있으며 0.381 mm의 직경을 가지는 오리피스가 분산판에 삼각 pitch (오리피스간 거리 : 0.017 m)로 3개가 설치되어 있다. 반응기의 기체 유속은 ASTM D 5757-95의 규정에 따라 0.17 m s^{-1} (기체 유량 : 10 L min^{-1})로 고정하였다. 마모 특성을 고찰하기 위한 입자층의 무게는 50 g으로 하였으며, 반응기 하부에서 공기를 정해진 유속에 따라 수직으로 주입하여 5시간 동안 운전하며 마모 특성을 실험하였다. 각각의 실험에서 비산화제는 1시간 단위로 측정되었으며 실험이 끝난 후, 삼각 플라스크와 텀블 필터에 포집된 비산화제와 마모관에 남아있는 고체의 입도를 sieve shaker (0 ~ 75, 75 ~ 106, 106 ~ 212, 212 ~ 500, 500 ~ 1,000 μm)를 이용하여 입자의 마모에 따른 입도 변화를 측정하였으며 모래 입자와의 비교를 통해 실리콘카바이드와 알루미늄 산화물의 내마모성을 확인하였다[17].

2.2. 기포 유동층 반응기

유동층에서의 열전달 특성을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 기포 유동층 반응기를 이용하였으며 이의 전체적인 개략도를 Figure 2에 나타내었다. 기포유동층 반응기(반응기 직경은 0.14 m, 높이는 2 m)는 반응 가스 공급부, 반응기로 구성되었다. 가스 주입구 유동화 기체는 MFC (mass flow controller)로 정량하여 예열기를 통해 주입한다. 원하는 온도를 제어하기 위하여 외부에는 전기 히터를 반응기에 설치하였다. 그림에서 보듯이 열전달 측정 프로브는 총 6개로 수평 열전달 측정 프로브 4개, 수직 열전달 측정 프로브 1개 그리고

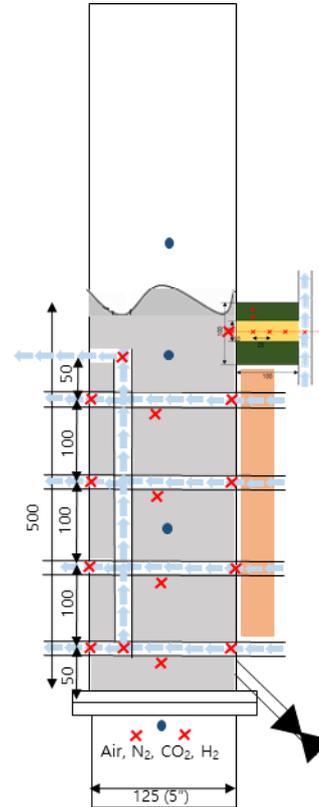


Figure 2. A bubbling fluidized bed reactor.

bed-to-wall 열전달 측정 프로브로 1개로 이루어져 있다. 수평 열전달 측정 프로브는 분산판을 기준으로 50 mm, 150 mm, 250 mm, 350 mm 높이에 설치하였고 각 프로브 하단 10 mm 지점에 온도계를 설치하여 반응기 부위별 온도 구배를 확인하고 또 열전달 계수를 구할때 베드 온도로 사용하였다. 또한 bed-to-wall 측정 프로브는 분산판 기점으로 450 mm 높이에 설치되었고 프로브 측정표면에서 1 cm 떨어진 곳에도 온도계를 설치하였다.

2.3. 열전달 계수 측정

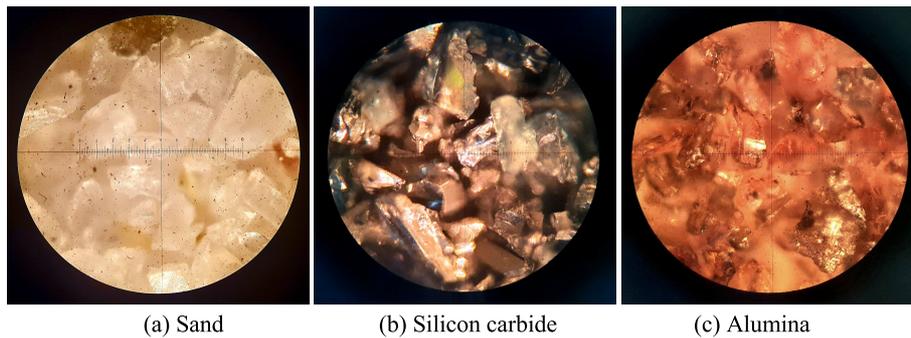
열전달 계수 측정을 위해 기포 유동층 반응기 내부에서 전 열관으로 전달되는 열량(Q)을 열전달 계수 측정 전열관으로 들어가는 물의 입출구 온도와 냉각수의 유입량으로 계산한다. 우선 Tbed를 이용하여 총괄열전달 계수, U를 Equation (1)을 이용하여 구한다. 총괄열전달 계수 U, 전열관의 내부열전달 계수 h_i , 전열관의 열전도도를 이용하여 유동층 내에서의 열전달 계수 h_o 를 구한다(Equation (2)). 본 연구에서는 반응기 하부에서부터 2번째(150 mm 높이) 전열관에서 열전달 계수를 측정하였다.

$$Q = m \times C_p \times (T_{wo} - T_{wi}) = A_o \times U \times \Delta T_{LMTD} \quad (1)$$

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{U} - \frac{\Delta x \times r_o}{k \times r_{im}} - \frac{1 \times r_o}{h_i \times r_{im}}} \quad (2)$$

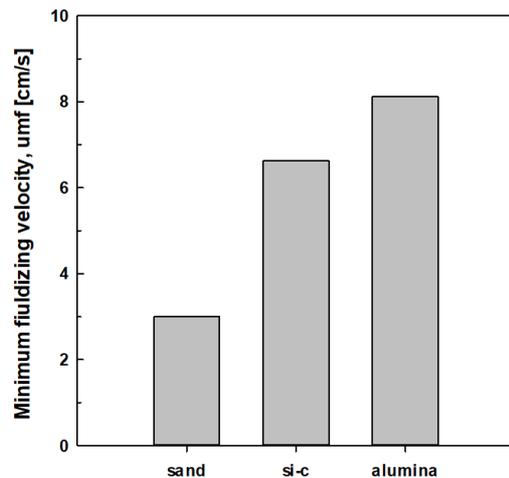
Table 1. Physical properties of SiO₂, SiC, Al₂O₃

Property	SiO ₂	SiC	Al ₂ O ₃
Mean size (μm)	182	315	310
Melting point (°C)	1903	2730	2072
Boiling point (°C)	2590	N/A	2977
Molecular wt (g mol ⁻¹)	60.08	40.11	101.96
Density (g cm ⁻³)	2.17-2.65	3.0-3.2	3.4-4.1
Hardness (MPa)	4500-9500	15710	25500
Poisson's ratio (-)	0.17	0.15-0.21	0.22-0.24
Compressive strength (MPa)	1100-1600	2780-3900	1920-2750
Elastic modulus (GPa)	73	370-490	220-370
Specific heat capacity (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	480-730	670-1180	870-940
Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.3-1.5	120-170	14-30
Thermal expansion (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	0.55-0.75	4.0-4.5	6.7-8.2

**Figure 3.** Photographs of fluidized bed materials.

2.4. 입자

태양열 하이브리드 공정에 사용할 유동층 입자들은 상업 유동층 및 순환유동층 발전 설비에서 이용하는 모래가 아닌 실리콘카바이드와 알루미나 산화물이다. 이들의 물리 특성들을 모래와 비교하여 Table 1에 나타내었으며 유동층 반응기에 주입된 상태에서의 입자 사진은 Figure 3과 같다. 표에서 보면 실리콘카바이드와 알루미나 산화물의 녹는점은 매우 높아 일반적으로 800~900°C에서 조업되는 유동층 발전 설비에 적용할 수 있다. 또한 이들 입자의 밀도가 모래보다 높아 최소 유동화 속도도 높음을 유추할 수 있다. 더불어 입자의 열용량이 크고 열전도도도 모래보다 우수하여 태양열 흡수에 보다 유리하다. 입자의 구형도는 Figure 3에서 보듯이 모래와 비슷하기 때문에 0.6~0.7 사이일 것으로 예측되며 유동 특성도 모래와 동일하게 Geldart B의 거동을 나타낼 것으로 보여 유동화를 이루기에는 큰 문제가 없을 것으로 예상되었다. 실리콘 카바이드와 알루미나 입자의 유동화를 검토하기 위한 경험식으로 계산한 최소유동화 속도는 Figure 4에서 보듯이 6~8 cm s⁻¹ 사이를 가질 것으로 나타나, 모래와 동일한 기포 유동층을 형성하기 위해서는 보다 많은 기체 유량이 필요함을 확인하였다.

**Figure 4.** Minimum fluidizing velocities for bed materials.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석회석 마모 특성

재생에너지 자원들을 기존의 열화학적 전환 공정에 접목하는 방법들 중의 하나로서 유동층 공정에서 이용되는 고체 입자로의 열저장이 가능성 있는 해결책으로 대두되었다. 전기

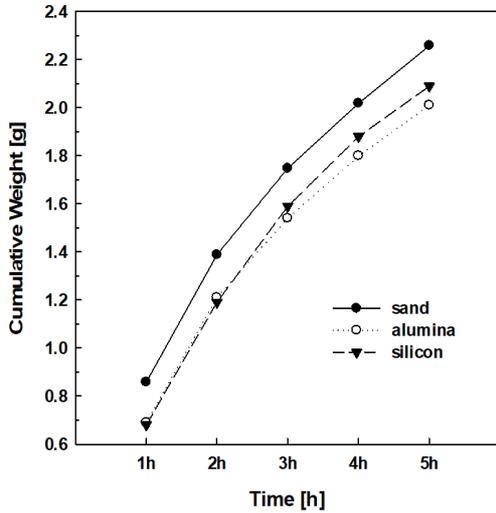


Figure 5. Cumulative weights of fine particles emitted the ASTM D5757-95 reactor.

를 생산하는 유동층 공정들은 크게 기포유동층과 순환유동층으로 나누어진다. 1개의 반응기를 통해 구현되는 기포유동층과는 다르게 순환유동층은 입자가 유동화되어 상승되는 상승관, 기체-고체를 분리하여 고체 입자를 포집하는 싸이클론, 포집된 입자를 상승관에 재주입하기 위한 다운너 및 Loop-seal로 구성되어 있다. 특히 높은 전환율과 빠른 반응으로 인해 순환유동층 방식이 에너지 전환에 널리 이용되고 있으며 태양열의 고체 저장을 위한 열저장 시스템의 연계도 용이한 것으로 평가받고 있다. 특히 순환유동층에 기포 유동층 방식을 접목시켜 상승관에서 연소 반응을 일으키고 다운너 영역에서 가스화와 같은 다른 반응을 일으킬 수 있는 이중 유동층 공정에 대한 개발이 빠르게 확산되고 있으며 특히 태양열 하이브리드 공정과 같이 고체 입자에 태양열을 복사시키는 열전달 공간의 확보가 용이하기 때문에 높은 관심을 받고 있다[6,8-11,16-18].

유동층 기반의 태양열 하이브리드 공정의 고체입자로 사용될 실리콘카바이드와 알루미늄 산화물은 입자간의 마찰 또는 상승관, 싸이클론, loop-seal을 순환하면서 입자와 내부벽 및 싸이클론과의 충격으로 인해서 입도가 변화하게 된다. 고체 입자들의 입도 변화를 야기시키는 입자들의 충돌과 분쇄 영향을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 상용 순환유동층의 모래와 동일한 입도(200~300 μm)를 가지는 실리콘카바이드와 알루미늄 산화물을 이용하여 실험하였다. 더불어 이들의 마모 특성을 모래와 비교하였으며 Figure 5에 ASTM D5757 반응기에서 반응기 밖으로 배출되는 입자들의 누적 무게를 나타내었다.

그림에서 보면 ASTM D5757-95 마모 실험 방법에 따라 측정되는 입자의 비산량은 초기 1시간 동안 가장 많이 배출되고 이후 비산량이 조금씩 낮아짐을 확인할 수 있다. 비산되는 입자들의 크기는 대략 10 μm 이하의 미세 입자들로 나타났기에 고체 입자의 유동화가 필연적으로 입자들의 충돌을 야기시키고 미세한 입자를 발생시킴을 알 수 있다. 태양열 하이브리드 공정에서 이용할 실리콘카바이드나 알루미늄 산화물의

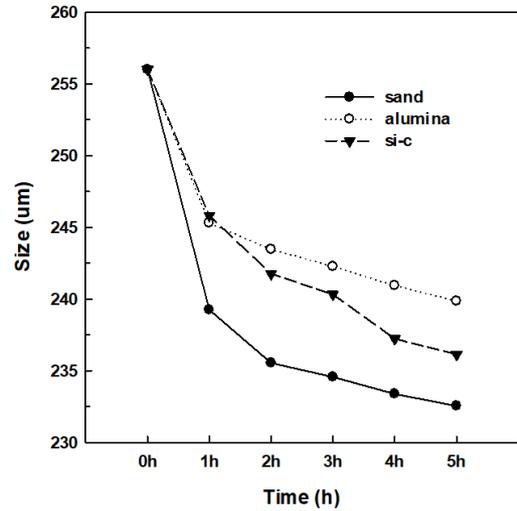


Figure 6. Mean particle size changes of bed materials.

비산량은 모래와 비교하여 상대적으로 낮아 모래보다 마모에 강함을 알 수 있다. Table 1에서 보듯이 이들 입자들의 경도는 모래에 비해 2배 이상 높고 밀도도 높아 동일한 유속으로 실험하는 마모 실험에서는 10 μm 이하의 미세입자의 발생이 상대적으로 낮음을 유추할 수 있다.

비산된 입자를 포함하여 마모 실험에 따른 입자들의 평균 크기 변화를 시간대별로 분석하여 Figure 6에 나타내었다. 초기에 주입한 입자들의 평균 크기는 257 μm 이었으나 입자의 마모로 인해서 평균 크기가 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 모래의 평균입도는 257 μm 에서 235 μm 까지 변화했으나 실리콘카바이드, 알루미늄 산화물은 모래보다 평균 입도 감소 폭이 작았으며 알루미늄 산화물의 입도 변화가 6%였으며 실리콘카바이드의 입도변화도 8% 내로 나타났다. 따라서 상용 순환유동층에서 충물질로 사용되는 모래와 비교하여, 실리콘카바이드, 알루미늄 산화물의 순환유동층 또는 이중 유동층 적용은 입자 마모 측면에서 큰 문제가 되지 않을 것으로 나타났다. 순환유동층 연소로에서 이용되는 석회석은 상대적으로 마모에 취약하여 미세한 입자를 많이 발생시키고 입도 변화 폭도 높아 설계값과 동일한 유동층 상태를 유지하기 위해서는 큰 입도를 가진 입자들의 추가 주입과 같은 운전이 필요하다[17]. 이에 비해 실리콘카바이드나 알루미늄 산화물은 높은 평균 입도를 가지는 입자들의 추가 주입 없이 태양열 하이브리드 공정에서 충분히 이용할 수 있을 것으로 예측되었다. 또한 평균 입도 감소폭도 낮아 설계값에서 예측한 운전 결과와 유사한 운전 결과를 태양열 하이브리드 반응기에서도 충분히 확보할 수 있을 것이다.

3.2. 열전달 특성

유동층에서의 열전달은 고온의 고체 입자들의 대류에 의한 열전달, 기체의 대류에 의한 열전달, 열원에서의 복사에 의한 열전달 등과 같이 매우 복잡한 열전달 메커니즘을 지니는 것으로 알려져 있다. 유동화되어 있는 고체 입자에 의한 열전달은 고체만의 거동으로 결정되지 않고 유동층 내부에 존재

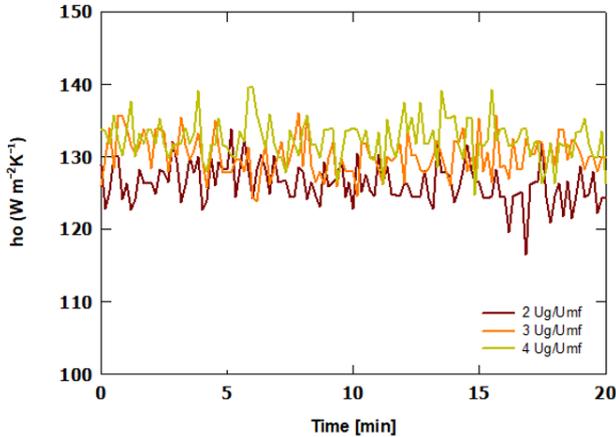


Figure 7. Heat transfer coefficients of silicon carbide with different gas velocities.

하는 상승, 분쇄, 합체와 같은 수력학적 거동에 크게 영향을 받게 된다. 특히 기체-고체 유동층에서 열전달에 영향을 끼치는 가장 큰 요인들은 고체 입자의 크기와 반응 온도라고 하였다. 고체 입도가 $800\ \mu\text{m}$ 이내이고 반응온도가 $900\ \text{K}$ 이하이면 열전달 메커니즘에서 고체 입자의 대류가 가장 큰 영향을 끼친다. 입자 크기가 $1,000\ \mu\text{m}$ 이상이면 기체의 대류에 의한 열전달도 총괄열전달 계수에 미치는 영향이 매우 커진다. 또한 $900\ \text{K}$ 이상의 온도에서는 내부 열원의 복사 열전달도 충분히 고려해야 한다[19-21].

태양열 하이브리드 공정에서 사용할 입자들의 열전달 특성을 고찰하고 총괄열전달 계수를 측정하기 위하여 본 연구에서는 Figure 2와 같은 기포 유동층 반응기에 열전달을 측정할 수 있는 실험 설비를 구축하여 이용하였다. 순환유동층 또는 이중 유동층의 태양열 흡수 영역은 고체 입자들이 포집되어 상승관으로 주입되기 전인 싸이클론 하단부터 loop-seal 사이에 존재하게 되며 이들 영역은 기포 유동층 정도의 기체 유속에서 조업되고 있다. 이에 본 연구에서는 Figure 7에서 보듯이 $2\sim 4\ \text{Umf}$ 의 유속 범위에서 열전달 실험을 수행하였다. 실제 실험 유량은 최소유동화속도 차이 때문에 $39.5\ \text{L min}^{-1}\sim 119.2\ \text{L min}^{-1}$ 이었으며 모래가 상대적으로 낮았다. 다만 Figure 4와는 다르게 실험을 통해서 구한 최소유동화속도가 각각 $5.28\ \text{cm s}^{-1}$ (모래), $6.50\ \text{cm s}^{-1}$ (실리콘카바이드), $7.98\ \text{cm s}^{-1}$ (알루미나 산화물)로 나타나 이를 기준으로 재설정하였다. 또한 유동층 내의 온도는 $300\ ^\circ\text{C}$ 로 균일하게 유지하였고 유동화 기체로는 공기를 이용하였다.

Figure 7에서 보면 기체 유속과 상관없이 기포유동층 영역에서는 고체입자가 활발하게 움직이기 때문에 온도가 유동층 상태 변화와 동일하게 변하게 되어 열전달 계수도 급격하게 변동하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 유동화 속도가 증가함에 따라서 Equation (2)에 의해서 계산된 열전달 계수의 최저값과 최고값이 상승하고 있음을 알 수 있다. 기포 유동층에서 이루어진 실험을 보면, 기체 유속이 증가함에 따라서 열전달이 활발하게 이루어져 열전달 계수값이 증가하다가 유동층 내부에서 난류 영역이 접근하여 열전달이 이루어지는 영역내

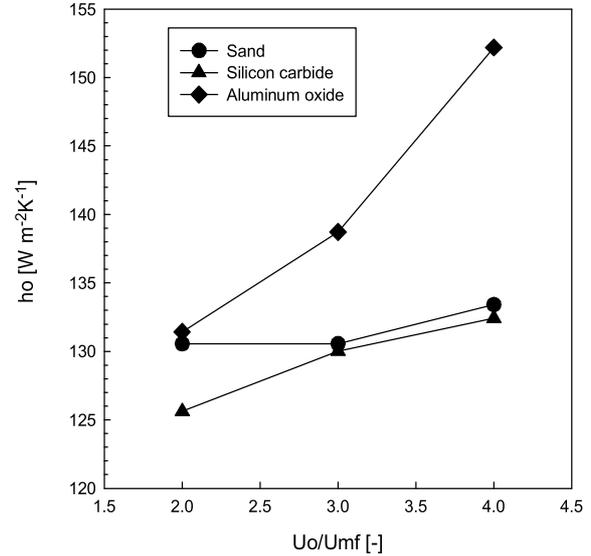


Figure 8. Average heat transfer coefficients of bed materials.

의 고체 입자량이 감소하게 되면서 열전달 계수값이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 고체 입자의 대류가 유동층 내의 열전달에 큰 영향을 끼치나 고체 입자의 대류, 즉 고체 입자의 움직임은 기체 유속에 따라 조절되기에 기체 유속의 변화가 열전달에도 큰 영향을 끼칠 수밖에 없다. 유속이 낮은 조건에서 기체의 유속이 증가하면 고체입자의 흐름과 접촉 현상이 격렬해지며 열전달이 일어나는 열교환 튜브와의 접촉 강도와 빈도를 증가시켜서 열전달 계수값이 증가하게 된다[19,20]. 이에 기체 유속 변화에 따른 열전달 계수값의 변화를 고찰하여 Figure 8에 나타내었다. 기체 유속이 증가함에 따라서 모든 입자들에서 열전달 계수값이 증가하였으며 모래와 비교하여 큰 차이를 나타내지 않고 있어 태양열 하이브리드 공정 설계 시에 모래를 기반으로 설계하여도 열전달 측면에서는 큰 문제가 발생하지 않음을 알 수 있다. 즉 동일한 기체 유속비에서는 열전달 계수가 큰 차이를 나타내지는 않았으나 열용량이 큰 알루미나 입자의 경우 상대적으로 높은 $132\sim 152\ \text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ 의 열전달 계수값을 가지고 있음을 확인하였다. 결론적으로 상용 설비에서 많이 이용되는 모래를 태양열 저장을 위해 실리콘카바이드와 알루미나 산화물 입자들로 대체하여도 순환유동층 또는 이중 유동층 운전에는 큰 문제가 없을

4. 결론

태양열 하이브리드 공정에서 열저장 매체로서 검토되고 있는 실리콘카바이드와 알루미나 산화물의 입자의 마모 및 열전달 계수를 ASTM D5757 반응기와 기포 유동층 반응기를 통해서 고찰하였고 모래와의 비교를 통해서 유동층 공정의 이용가능성을 분석하였다. 실리콘카바이드와 알루미나 산화물의 내마모도는 모래보다 우수하여 입도 변화폭도 8% 이내로 나타나 유동층 공정에 적합한 것으로 나타났다. 또한 기포 유동층 영역에서의 열전달 계수도 모래와 비슷하거나 우수하였고 열전달 계수값이 $125\sim 152\ \text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ 였다. 따라서 순환

유동층 또는 이중 유동층 기반의 태양열 하이브리드 공정에서 태양열을 저장함과 동시에 유동층 매체로서 실리콘카바이드와 알루미늄 산화물은 모래를 대체할 수 있으며 보다 우수한 성능을 가질 것으로 예상된다.

감사

이 논문은 한국전력공사의 2018년 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원(과제번호: R18XA06-49)과 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제 번호: 2019281010007B)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Lee, S. H., "Development of a Hybrid Process for Energy Production via Solar Thermo-Chemical Conversion," *News & Information for Chemical Engineers*, **37**, 200-206 (2019).
- Lee, S. H., Lee, T. H., Jeong, S. M., and Lee, J. M., "Economic Analysis of a 600 MWe Ultra Supercritical Circulating Fluidized Bed Power Plant Based on Coal Tax and Biomass Co-Combustion Plans," *Renewable Energy*, **138**, 121-127 (2019).
- Gwak, Y. R., Kim, Y. B., Gwak, I. S., and Lee, S. H., "Economic Evaluation of Synthetic Ethanol Production by using Domestic Biowastes and Coal Mixture," *Fuel*, **213**, 115-122 (2018).
- BP, BP energy outlook 2019 edition, www.bp.com (2019).
- Mills, S., "Combining Solar Power with Coal-Fired Power Plants, or Cofiring Natural Gas," *Clean Energy*, **2**, 1-9 (2018).
- Almendros-Ibanez, J. A., Fernandez-Torrijos, M., Diaz-Heras, M., Belmonte, J. F., and Sobrino, C., "A Review of Solar Thermal Energy Storage in Beds of Particles: Packed and Fluidized Beds," *Solar Energy*, **192**, 193-237 (2019).
- Lee, S. H., and Lee, J. M., "Introduction and Current Status of Ultra Supercritical Fluidized Bed Boiler," *KEPCO J. Electric Power Energy*, **2**, 211-221 (2016).
- Verdolini, E., Vona, F., and Popp, D., "Bridging the Gap: Do Fast Reacting Fossil Technologies Facilitate Renewable Energy Diffusion?," *Energy Policy*, **116**, 242-256 (2018).
- <https://www.power-eng.com/2016/08/17/study-says-renewable-power-still-reliant-on-backup-from-natural-gas/> (accessed Aug. 2016).
- 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).
- Yoo, H. M., Um, N. I., Kim, Y. J., Cho, Y. A., Shin, S. K., and Kim, K. H., "Evaluation of Emission Characteristics on Co-combustion of Coal with TDF (Tire Derived Fuel) in a Cogeneration System, Applying the Circulating Fluidized Bed Boiler," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, Vol. 34, 776-783 (2017).
- Kim, Y. B., Kang, S. Y., Seo, S. B., Keel, S. I., Yun, J. H., and Lee, S. H., "The Attrition and Calcination Characteristics of Domestic Limestones for In-Situ Desulfurization in Circulating Fluidized Bed Boilers," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**, 687-694 (2019).
- Kook, J. W., Shin, J. H., and Gwak, I. S., "A Reaction Kinetic Study of CO₂ Gasification of Petroleum Coke, Biomass and Mixture," *Appl. Chem. Eng.*, **26**, 184-192 (2015).
- Park, H. C., Choi, M. K., and Choi, H. S., "A Study on the Characteristics of Cooling Heat Transfer for Carbon Black from Waste tire Pyrolysis Process," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **36**, 601-607 (2019).
- Goransson, K., Soderlind, U., He, J., and Zhang, W., "Review of Syngas Production via Biomass DFBGs," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **15**, 482-492 (2011).
- Liu, T., Liu, Q., Lei, J., and Sui, J., "A New Solar Hybrid Clean Fuel-fired Distributed Energy System with Solar Thermochemical Conversion," *J. Clean. Prod.*, **213**, 1011-1023 (2019).
- Kim, Y. B., Kang, S. Y., Seo, S. B., Keel, S. I., Yun, J. H., and Lee, S. H., "The Attrition and Calcination Characteristics of Domestic Limestones for in-situ Desulfurization in Circulating Fluidized Bed Boilers," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**, 687-694 (2019).
- Lee, S. H., Yoon, S. J., Choi, Y. C., Kim, J. H., and Lee, J. G., "Characteristics of Coal Methanation in a Hydrogasifier," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**, 631-635 (2006).
- Kang, Y., Kim, Y. R., Ko, M. H., Seo, Y. C., Jin, G. T., Son, J. E., and Kim, S. D., "Immersed Heater-to-bed Heat Transfer in a Pressurized Gas-solid Fluidized Bed," *Korean Chem. Eng. Res.*, **35**, 282-288 (1997).
- Kang, S. H., Han, K. H., Jin, G. T., and Kang, Y., "Heat Transfer Characteristics in a Pressurized Fluidized Bed for Anthracite Coal Combustion," *Korean Chem. Eng. Res.*, **40**, 218-223 (2002).
- Hwang, G. J., Lee, B. K., Choi, M. K., and Choi, H. S., "A Study on Yield and Characteristics of Biocrude-oil Produced by Circulating Fluidized Bed Fast Pyrolyzer," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **35**, 126-133 (2018).