

왕겨/모래/왕겨 회재의 유동 및 혼합 특성 연구

김보화*** · 서명원*† · 국진우* · 최희망* · 라호원* · 윤상준* · 문태영* · 김용구* · 이재구* · 이영우***†

*한국에너지기술연구원 기후변화연구본부
34129 대전광역시 유성구 가정로 152
**충남대학교 에너지과학기술대학원
34134 대전광역시 유성구 대학로 99

(2016년 2월 5일 접수, 2016년 3월 2일 수정본 접수, 2016년 3월 4일 채택)

Flow Behavior and Mixing Characteristics of Rice Husk/Silica Sand/Rice Husk Ash

Bo Hwa Kim***, Myung Won Seo*†, Jin Woo Kook*, Hee Mang Choi*, Ho Won Ra*, Sang Jun Yoon*, Tae Young Mun*,
Yong Ku Kim*, Jae Goo Lee* and Young Woo Rhee***†

*Climate change research division, Korea Institute of Energy Research (KIER), 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Korea

**Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University (CNU), 99, Daehak-ro,
Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

(Received 5 February 2016; Received in revised form 2 March 2016; accepted 4 March 2016)

요 약

Lab-scale 기포유동층 반응기(D=0.1 m, H=1.5 m)에서 왕겨와 모래를 혼합하여 가스화를 통해 합성가스를 얻고 남은 왕겨 회재는 고부가가치 물질로 사용하기 위한 연구의 선행연구로서 왕겨/ 유동사/ 왕겨 회재(실리카)의 혼합 및 유동 특성을 규명하였다. 왕겨/유동사를 5:95, 10:90, 20:80, 30:70의 부피비로 유속 범위(0~0.63 m/s)조건으로 수행하였으며, 또한 왕겨 회재는 왕겨를 기준으로 부피비 6%로 결정하였다. 왕겨/유동사, 왕겨/유동사/왕겨 회재의 혼합실험을 통해 왕겨 부피비 0%, 5%, 10%에서는 최소유동화속도가 0.19~0.21 m/s임을 확인하였고, 20%일때는 0.3 m/s로 증가하였으며, 30%일때는 분리현상이 나타나 최소유동화속도가 측정 되지 않았다. 또한, 실험데이터에 따라 Brereton과 Grace의 mixing index를 이용하여 각 조건 별로 mixing index값을 도출한 결과 왕겨/유동사의 혼합은 0.8~1, 왕겨/유동사/왕겨 회재의 혼합은 0.88~1 사이임을 확인하였다. 이를 통하여 왕겨/유동사의 혼합과 왕겨/유동사/왕겨 회재 혼합의 최적 조업조건을 도출할 수 있었으며, 운전조건을 결정할 수 있었다.

Abstract – We investigate fluidization characteristics of the mixture of rice husk, silica sand and rice husk ash as a preliminary study for valuable utilization of rice husk ash obtained from gasification of rice husk in a fluidized bed reactor. As experiment valuables, the blending ratio of rice husk and sand (rice husk: sand) is selected as 5:95, 10:90, 20:80 and 30:70 on a volume base. Rice husk ash was added with 6 vol% of rice husk for each experiment and air velocity to the reactor was 0~0.63 m/s. In both rice husk/sand and rice husk/sand/ash mixture, the minimum fluidization velocity (U_{mf}) is observed as 0.19~0.21 m/s at feeding of 0~10 vol.% of rice husk and 0.30 m/s at feeding of 20 vol.% of rice husk. With increasing the amount of rice husk up to 30 vol.%, U_{mf} can not measure due to segregation behavior. The mixing index for each experiment is determined using mixing index equation proposed by Brereton and Grace. The mixing index of the mixture of rice husk/sand and rice husk/sand/ash was 0.8~1 and 0.88~1, respectively. The optimum fluidization condition was found for the good mixing and separation of rice husk ash.

Key words: Rice Husk, Silica Sand, Rice Husk Ash, Flow, Mixing, Fluidized Bed

1. 서 론

전 세계적으로 볼 때 벼 생산량은 4억 7천만 톤에 이르며, 그 중 우리나라의 벼 연간 수확량은 550만 톤에 이른다. 지역에 따라 다르

지만 벼의 무게비로 10~20%가 부산물인 왕겨로 발생한다[1,2]. 왕겨는 미곡 종합처리장에서 폐기물로 발생하며 이로 인한 환경문제가 제기 되고 있다. 그간 왕겨는 저부가가치 물질인 일부 축산시설 깔개, 퇴비, 상토, 보온재 등에 제한적으로 활용 되어 왔다[3]. 최근에는 왕겨를 고부가가치 물질로서 하나의 자원으로 인식하고 가스화, 열병합 발전, 보일러 등의 연료로서 이용하고, 복잡한 다공성 구조인 활성탄을 만드는 원료로 쓰이며, 그 밖에도 실리카, 실리콘 성분의 원료와 다공성의 SiO₂/C 합성물 등으로 활용하고 있다[4]. 왕

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mwseo82@kier.re.kr, ywrhee@cnu.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.

거 회재 내에는 실리카가 함유되어 있으며 성장지역 및 토양성분에 따라 다르지만 통상 실리카의 양은 왕겨 회재 무게의 10~15% 정도가 포함되어 있다. 최근에는 강철 산업, 세라믹/내열성 소재 산업, 시멘트와 건설 산업 등에 사용되고 있으며 리튬이온전지의 실리콘 음극소재, 태양전지 등의 재료로서 연구 되고 있다[4,5].

왕겨를 에너지화 하는 방법에는 여러 가지 방법이 있는데 그 중 기포유동층은 연료 선택의 유연성, 고체/기체간 접촉 향상, 효과적인 열 및 물질전달 특성 등의 장점을 갖는다[6,7]. 이로 인하여 왕겨와 모래를 혼합하여 가스화를 통해 합성가스를 얻고 남은 왕겨 회재는 고부가가치 물질로 이용하는 연구가 늘어나고 있는 추세이다. 특히 가스화 과정에서 왕겨 회재는 반응 중에 연속적으로 생성되며 이는 왕겨와 모래의 유동화 특성에 영향을 미치며, 왕겨 회재를 지속적으로 분리해내기 위한 조업 유속, 조업 온도 등 기초데이터 확보가 필요한 상황이다.

바이오매스는 특성상 불규칙한 형태와 큰 입도 그리고 낮은 밀도로 단일 입자로는 유동화가 쉽지 않은 물질로 알려져 있으며, 모래와 같은 불활성 재료를 섞어 혼합물로 많이 사용한다. 이러한 층 물질은 유동화를 용이하게 해주는 역할뿐 아니라 반응기에서 열전달 매개체의 역할을 수행한다[8].

기포 유동층 반응기에는 조업온도, 각종 유속(최소유동화 속도, 종말 속도), 압력 등 다양한 요인이 있다. 혼합은 유동층에서 열과 물질 이동의 향상, 입자의 개선과 상호 작용에 많은 영향을 미치는데 유동층에서의 기포의 요동으로 인해 발생하는 압력의 평균값을 측정하여 유동층 내부의 거동을 예측할 수 있다[9].

유동층 반응기를 이용한 바이오매스 및 층 물질의 유동 및 혼합특성에 대한 선행연구를 Table 1에 요약하였다. Cha 등[9]은 크기가 다른 모래를 사용해 분리현상은 평균압력과 표준편차로 확인하였고 유동화특성은 혼합 특성으로 파악하였다. Shin[10]은 폴리스티렌과 모래를 사용해 유속이 증가함에 따라 mixing index가 증가함을 파악하였다. Fang 등[11]은 왕겨와 모래를 사용해 모래 크기가 0.55 mm 일 때 가장 원활한 혼합이 이루어짐을 파악하였다. Alayi 등[12]은 Geldart C그룹의 입자들을 사용해 유동 특성을 확인한 결과 산화이트륨 분말에 알루미늄 입자를 추가시킴으로써 더 우수한 유동 특성을 보임을 파악하였다. 실제 가스화 조업 조건과 유사한 상태인 삼성분계

실험은 Sharma 등[13]이 유일한 것으로 알려져 있다. 문헌에 발표된 바와 같이 이성분계에 관한 유동 및 혼합 특성의 연구는 많지만 삼성분계의 유동 특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구의 시료인 왕겨, 모래, 왕겨 회재와 같이 Geldart A, B, D[14]의 삼성분계로 유동 및 혼합 특성에 대한 연구는 보고되지 않아 이에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 아크릴 재질의 기포 유동층 cold-model 장치에서 왕겨, 모래, 왕겨 회재의 압력측정을 통하여 최소유동화속도 결정 및 유동 특성을 파악하고, 각 위치에서의 sampling을 통하여 mixing index값을 도출하여 혼합 특성을 살펴보고 이를 통하여 최적의 운전 조건을 알아보려고 한다.

2. 실험

2-1. 시료

2-1-1. 왕겨

실험에 사용된 왕겨는 충남 공주시 미곡종합처리장에서 채취하였다. 왕겨는 다른 전 처리를 하지 않았으며 입도분석 특성은 Table 2 [15-17]에 나타내었다. 보는 바와 같이 왕겨의 입도(d_p) 길이는 7~8 mm, 폭은 2~3 mm, 두께는 0.2 mm이며 밀도(ρ_s)는 505 kg/m³으로 측정되었다. 공업분석과 원소분석 결과는 Table 3에 나타내었다. 왕겨의 원료 특성을 살펴보면 휘발분은 66.39%로 다른 바이오매스와 비슷한 수준이며, 회분은 11.69%로 다소 높은 편이다. 또한 저위 발열량이 3,844 kcal/kg으로 전 세계 평균 왕겨 발열량(13~20 MJ/kg)과 비슷한 걸 확인하였으며, 발열량 자체를 활용하기 위해 연료로서의 활용 가능성이 충분함을 알 수 있다[3].

2-1-2. 모래

본 실험에는 모래를 유동사로 사용하였으며, 모래의 입도분석 특성은 Table 2에 나타내었다. 입도(d_p)는 427 μ m이며 밀도(ρ_s)는 2642 kg/m³으로 측정되었다.

2-1-3. 왕겨 회재

실험에 사용된 왕겨 회재의 입도분석 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Summary of literature survey on fluidization and mixing of binary and tertiary mixtures

Author	Reactor	Fuel	Bulk density (kg/m ³)	Size (mm)	Velocity (m/s)	Remarks
Cha <i>et al.</i> [9].	Fluidized bed / 1.8 m i.d × 1.8 m	Sand	Sand: 2624	Large particle: 0.175 fine particle: 0.359, 0.194	0.3~0.7	Delamination phenomenon was observed from an average pressure and standard deviation and fluidization properties was investigated by knowing mixed properties in the layer.
Shin [10].	Fluidized bed / 0.11 m i.d × 0.4 m	Sand Polystyrene	Sand: 1730 Polystyrene: 660	Sand: 0.5 Polystyrene: 2~3	0~0.9	As the excess air flow is increased, the mixing index also tended to increase.
Fang <i>et al.</i> [11].	Fluidized bed / 0.12 m i.d × 2 m	Rice husk sand coal	Rice husk: 122	Rice husk: 8~10	0~2	When the size of sand was 0.55 mm, the smoothest mixing was realized.
Alayi <i>et al.</i> [12].	Fluidized bed / 0.05m i.d × 1 m	Yttrium oxide Glass Sand Alumina Zirconia	Yttrium oxide: 5300 Glass: 1500 Sand: 1500 Alumina: 1900 Zirconia: 3400 Zirconia: 3300	Yttrium oxide: 0.0012 Glass: 0.08 Sand: 0.3 Alumina: 0.29 Zirconia: 0.3 Zirconia: 0.5	0~0.2	A good fluidization quality has been obtained by adding coarse alumina particles to the yttrium oxide powders.
Sharma <i>et al.</i> [13].	Fluidized bed / 0.25 m i.d × 2 m	Switchgrass Sand GSR	Switch grass: 111±6.2 Sand: 1602±11.1 GSR: 205±5.6	Switchgrass: 0.0103±0.0017 Sand: 0.348±0.0016 GSR: 0.08±0.0026	0~0.19	Fluidization sustained up to 3% level of switchgrass. However, in bed channelization caused ineffective fluidization at 5% level of switchgrass in the mixture.

Table 2. Characteristics of rice husk, rice husk ash, and silica sand [15]

Properties		Rice husk	Rice husk ash	Silica Sand
Density (kg/m ³)	Bulk (ρ_b)	111	262	1249
	Particle (ρ_s)	505	1238	2642
Size (mm)		Length: 7~8 Width: 2~3 Thickness: 0.2	0.031	0.427
Sphericity, Φ_s (-)		0.19 Theoretical calculation	0.23~0.25 Theoretical calculation	0.92~0.96 Theoretical calculation
Bed voidage, ϵ (-)		0.78	0.79	0.52
U_{mf} (m/s)	Literature	0.46 0.60	0.30 0.16	-
	Theoretical calculation [16]	0.35	0.008	0.15 (R.T.) 0.08 (700 °C)
U_t (m/s)	Literature	0.76 1.1	0.8 0.7	-
	Theoretical calculation [17]	1.0	0.17	1.93 (R.T.) 1.31 (700 °C)

Table 3. Proximate & ultimate analysis of rice husk

Sample/Analysis	Proximate analysis (Air dry basis)				Ultimate analysis (Dry basis)					LHV (kcal/kg)
	M	VM	Ash	FC	C	H	O	N	S	
Rice husk	9.96	66.39	11.69	11.96	55.13	6.43	38.43	0.01	0.00	3844

Table 4. Ash composition analysis of rice husk

Sample/Analysis	Analysis									
	SiO ₂	K ₂ O	Cl	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO	NiO
Rice husk ash	84.6	6.14	2.1	2.0	1.9	1.7	0.62	0.56	0.11	0.09

입도(d_p)는 31 μm 이며 밀도(ρ_s)는 1238 kg/m^3 으로 측정되었다. 왕겨 회재는 전기로에서 제조되었으며 공기 분위기, 650 °C의 온도에서 5 시간 동안 유지하여 유기물을 제거하여 제조 되었다. 왕겨 회재의 분석 결과를 Table 4에 나타내었으며, 85%가 실리카(SiO₂)이고 표면적이 100 m^2/g 로 높아서 침투성이 높고 가볍다. K₂O의 함유량이 가장 높고, 나머지는 Cl, CaO, SO₃, P₂O₅ 등을 함유하고 있다.

2-2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 실험에 사용한 실험 장치는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 직경이 0.1 m이고 높이가 1.5 m인 아크릴 재질의 기포 유동층 반응기이다. 분산판은 sintered metal plate로, 주입된 공기를 골고루 분산하는 역할을 한다. 압력강하를 측정하기 위해 압력계(DPL series, Sensys korea)를 사용하였고 분산판으로부터 0.1 m의 높이에 설치하였다. 압력강하는 유속 범위(0~0.63 m/s)에서 1분간 3회씩 측정하여 평균값을 사용하였다. 공기유속은 최소유동화속도를 고려하여 최소(0 m/s)부터 최대(0.63 m/s)로 증가 시킨 후 다시 0 m/s까지 감소 시켰다. 기포 유동층 가스화기 실험에 앞서 반응기 내에서는 연료와 층 물질의 혼합은 유동층 조업에 중요한 요소이므로, 층 물질에 왕겨의 부피비를 0~30%까지 변화시키고, 왕겨기준 왕겨 회재 부피비 6%를 추가시켜 이성분계와 삼성분계의 유동화 속도를 측정하였다. 최소 유동화속도는 압력강하와 마찬가지로 총 3회씩 측정하였으며 평균 값을 사용하였다.

Fig. 2는 실험에 사용한 sampling valve와 tube를 나타내었다. One touch value를 사용해 다른 한쪽에는 sampling tube를 설치하였고,

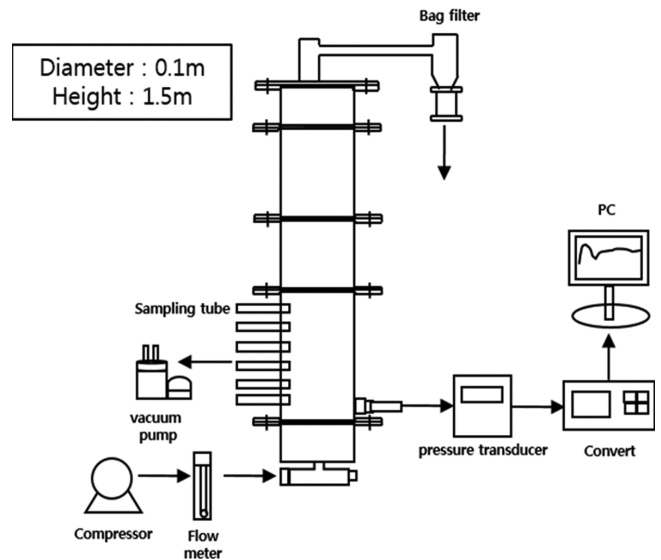


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

한쪽에는 sus mesh를 설치해 입자가 외부로 유출되지 않도록 하였으며 진공펌프를 사용하여 등속조건에서 각 sample 시료를 얻었다.

Mixing index는 각 부피비에 따라 유속 범위(0~0.63 m/s)에서 0.05 m, 0.09 m, 0.13 m, 0.17 m, 0.21 m, 0.25 m에 따른 6 곳의 sampling 구간에서 1분 동안 sampling을 수행하며 총 3번의 실험값을 측정하여 평균값을 얻었다.

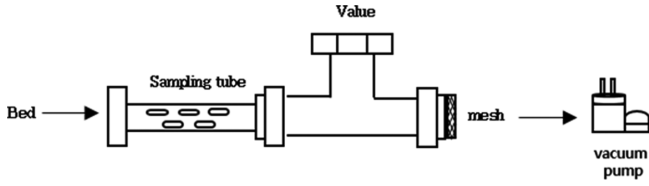


Fig. 2. Schematic diagram of sampling valve and tube.

2-3. 실험조건

실험은 왕겨와 모래를 각각 5:95, 10:90, 20:80, 30:70의 부피비로 섞은 뒤에 유속 기준(0~0.63 m/s)에서 진행하였으며 총 8번의 실험 조건을 Table 5에 나타내었다. 또한 왕겨 회재는 왕겨 기준 6%의 부피비로 실험을 진행하였으며, 이때의 왕겨, 모래, 왕겨 회재의 무게는 Table 5에 정리하였다.

2-4. 데이터 해석

2-4-1. 압력강하

압력강하는 먼저 공탑 상태의 압력을 측정한 뒤 유동층 내부에 균일하게 혼합된 왕겨, 왕겨 회재, 모래의 혼합시료를 채운 후의 압력을 측정하여 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\Delta P = \Delta P_i - \Delta P_o \tag{1}$$

ΔP_i : 시료가 채워진 유동층의 반응기 하부(분산판 상부 0.1 m)에서 측정한 압력강하(Pa)

ΔP_o : 공탑 상태에서 유동층 반응기 하부(분산판 상부 0.1 m)에서 측정한 압력강하(Pa)

2-4-2. 최대압력

최대압력(ΔP_{max})은 각 시료의 무게를 측정하여 기포 유동층 반응기의 면적으로 나누어 식 (2)과 같이 계산하였다.

$$\Delta P_{max} = \frac{W}{A} \tag{2}$$

W : 층 물질의 중력(N)

A : 기포 유동층 반응기의 면적(m²)

2-4-3. Mixing index

층 내의 고체 입자들의 움직임에 대한 혼합과 분리 등의 현상을 나타내기 위해서 Mixing index의 식을 사용하여 식 (3)~(7)과 같이 나타내었다. Brereton과 Grace [18]는 각 주입 유속 및 높이에 따라 층 내의 혼합 정도를 정량적으로 나타내기 위해 다음과 같이 mixing index (M)를 규정했다[19]. bed의 내에 혼합물이 채워져 있을 때, M은 고체혼합지수로 규정하였고 \bar{X}_j 가 평균조성물의 분율을 나타내

고 X_{ji} 는 각 i의 위치에서 조성물의 분율을 나타낸다.

Segregation index (γ)는 층 내 조성물의 평균조성(\bar{X}_j)으로부터 각 높이별 층 내 조성의 완전히 층 분리된 표준 편차(σ_{fs})와 층 내 조성(X_j)의 표준 편차(σ)의 비이다[19].

$$\gamma = \sigma / \sigma_{fs} \tag{3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_{ji} - \bar{X}_j)^2} \tag{4}$$

$$\bar{X}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_{ji} \tag{5}$$

$$\sigma_{fs} = \sqrt{\bar{X}_j(1 - \bar{X}_j)} \tag{6}$$

$$M = 1 - \gamma = 1 - \sigma / \sigma_{fs} \tag{7}$$

고체 혼합은 mixing index (M)가 1에 가까워질수록 높고, mixing index가 0에 가까워질수록 완전 분리된 상태가 된다[20].

3. 결과 및 고찰

3-1. 각 물질의 유동 특성

기포 유동층 반응기 내에서 혼합비 및 주입 유속에 따른 입자 거동 특성과 유동 특성을 살펴보았다.

3-1-1. 왕겨

먼저 왕겨의 유동 특성을 Fig. 3에 나타내었다. Table 2에 나타낸 바와 같이 평균밀도와 평균입도를 고려하여 Geldart 분류[14]에서 살펴보면 Geldart D group에서 속하며, spoutable한 특성을 가지고 있고, 0.19의 구형도와 보트와 같은 입자 형태, 1.0 m/s의 낮은 중단 속도로 인해 유동화에 적합하지 않은 물질이라고 예측 할 수 있다.

Huang 등[21]과 Sen과 Gosh[22]는 왕겨가 원통 형상이고 과립형이 아니기 때문에 유동화 하기에 어렵다고 보고한 바 있다[23].

실험결과에 따르면, 기체의 유속이 낮은 고정층 범위에서는 압력 강하가 낮은 값을 갖다가 유속 0.3~0.4 m/s 범위에서 갑자기 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는, 주입된 유량이 골고루 분산되지 않다가 어느 순간 갑작스럽게 slug가 형성되며 층 상부에서 왕겨가 분출되는 현상 때문으로 판단된다. 실제로 ΔP_{max} 값을 계산해보면 112 Pa에 도달해야 하지만 실험결과에 따르면, 이의 68%정도(76 Pa) 밖에 도달하지 못했기 때문에 제대로 유동화가 되었다고 판단하기 어렵다.

3-1-2. 모래

모래의 유동 특성을 Fig. 4에 나타내었다. Table 2에 나타낸 바와 같이 평균밀도와 평균입도를 고려하여 Geldart 분류에서 살펴보면 Geldart B group에 속한다. 모래는 구형도가 0.92~0.96으로 높고 최

Table 5. Bed compositions of each run

	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8
Sample name	RH5%	RH10%	RH20%	RH30%	RH5%-RHA 6%	RH10%-RHA 6%	RH20%-RHA 6%	RH30%-RHA 6%
Sand (kg)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
RH (kg)	0.007	0.015	0.035	0.058	0.007	0.015	0.035	0.058
RHA (kg)					0.00105	0.00225	0.00525	0.0087
RH : Sand (Volume)	5:95	10:90	20:80	30:70				
RH : RHA (Volume)					94:6	94:6	94:6	94:6

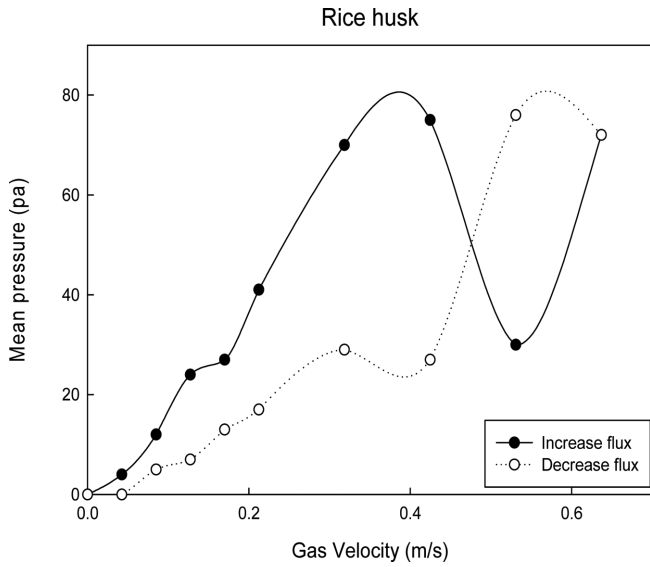


Fig. 3. Pressure drop of rice husk with variance of superficial gas velocity.

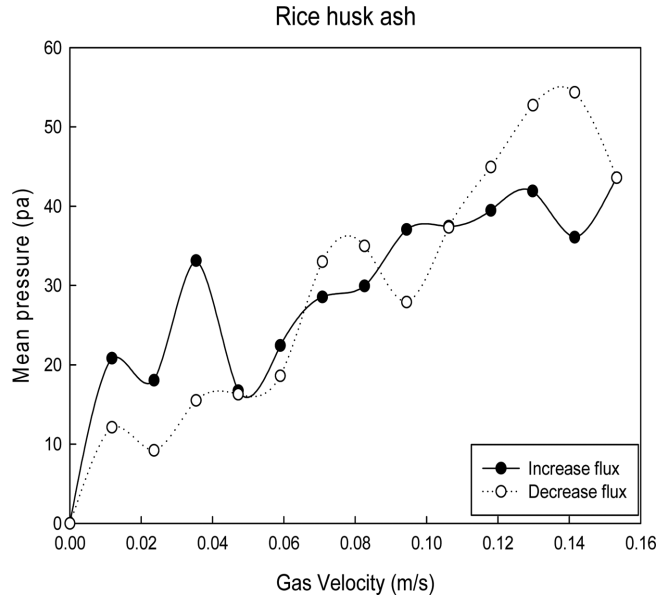


Fig. 5. Pressure drop of Rice husk ash with variance of superficial gas velocity.

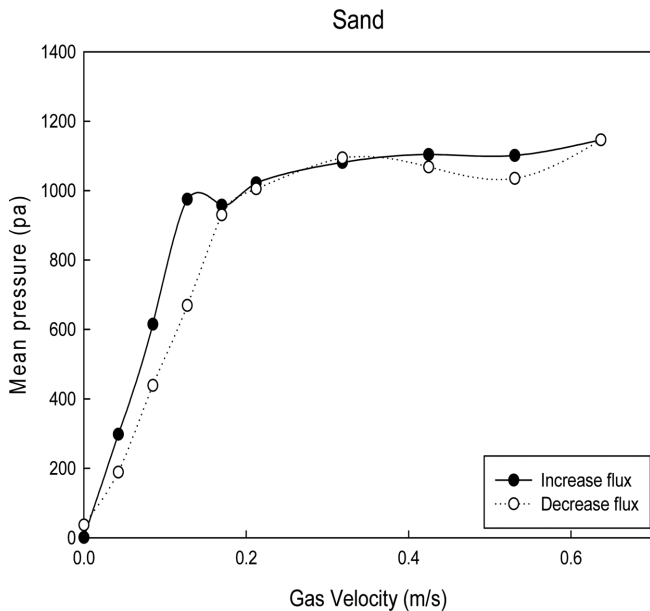


Fig. 4. Pressure drop of sand with variance of superficial gas velocity.

소유동화속도와 중단속도가 일정한 성질을 가지고 있으며 마모에 대한 높은 내성 때문에 유동화에 적합한 물질이라고 판단할 수 있다. 일반적으로 모래는 균일한 입자 밀도, 균일한 입도 분포 및 일정한 형상을 가지고 있어, 넓은 온도범위에서 열적으로 안정하며 허용 가능한 압력강하를 발생시켜 좋은 유동 특성을 나타낸다[24].

실험결과에 따르면, 주입 유속이 낮은 고정층 범위에서는 주입 유속의 증가에 따라 유동층의 압력강하가 거의 선형적으로 증가하지만 기체의 유속이 점점 증가하여 어느 정도 이상 되면 유동층 내부에서의 압력강하는 주입유속의 증가에도 불구하고 거의 일정해지는 것을 알 수 있으며, 이 지점을 최소유동화속도로 정의한다. 이와 같은 압력강하 변화를 이용하여 모래의 최소유동화속도를 0.17 m/s로 결정하였고, 이는 Table 2의 이론값(0.15 m/s)과 유사한 값을 나타내었다[6].

3-1-3. 왕겨 회재

왕겨 회재의 유동 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 왕겨 회재는 Table 2에 나타낸 바와 같이 평균밀도와 평균입도를 고려하여 Geldart group A에 속하긴 하지만 실제로는 C group의 경계선에 있으며 밀도가 매우 낮은 편이며, 강도가 낮고, 구형도 또한 0.23~0.25로 낮아 유동화하기에 다소 어려운 특성을 가지고 있다.

실험결과, 왕겨 회재를 층 물질로 사용하였을 때에는 주입 유속이 증가함에 따라 압력이 선형적으로 증가하지 않았으며, 왕겨 회재 무게를 고려하면 ΔP_{max} 값이 43 Pa로서 ΔP_{max} 에 도달했음에도 불구하고, 전형적인 유동화 곡선을 그리지 않아 제대로 유동화가 되었다고 보기 어렵다.

3-2. 왕겨/모래 혼합물

3-2-1. 압력강하

왕겨/모래 혼합물의 유동 특성을 결정하기 위해 전체 혼합물에서 왕겨의 부피비를 5%, 10%, 20%, 30%로 혼합하여 실험을 수행하였다. 앞서 각 물질의 유동 특성을 살펴보았을 때 왕겨 자체만으로는 유동화가 어렵다는 것을 확인할 수 있었다. Rozainee 등 [23]의 연구에 따르면, 왕겨는 다른 고체 입자와 혼합될 때 bed 내의 유동화 품질 및 혼합을 향상시키면서 성공적으로 유동화 특성을 얻을 수 있다고 보고했다.

Fig. 6에는 왕겨/모래 혼합물의 유속에 따른 압력강하를 도시하였으며, 모래를 혼합함으로써 원활한 유동이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 최소유동화속도는 유속이 증가함에 따라 압력강하가 일정하게 유지되기 시작하는 지점을 의미한다. 왕겨의 부피비가 증가함에 따라 최소유동화속도가 점점 증가하는 것으로 나타났다. 실험 결과, 모래 자체의 최소유동화속도는 0.17 m/s이었고, 부피비 5%와 10%에서 최소유동화속도가 각각 0.21 m/s의 범위였으며, 20%일 때는 0.3 m/s로 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 상대적으로 큰 입자의 비율이 증가하면서 평균입도의 증가와 치밀도를 감소시켜 최소유동화속도가 증가하는 것으로 판단된다. 부피비 30%에서는 모래에 대한

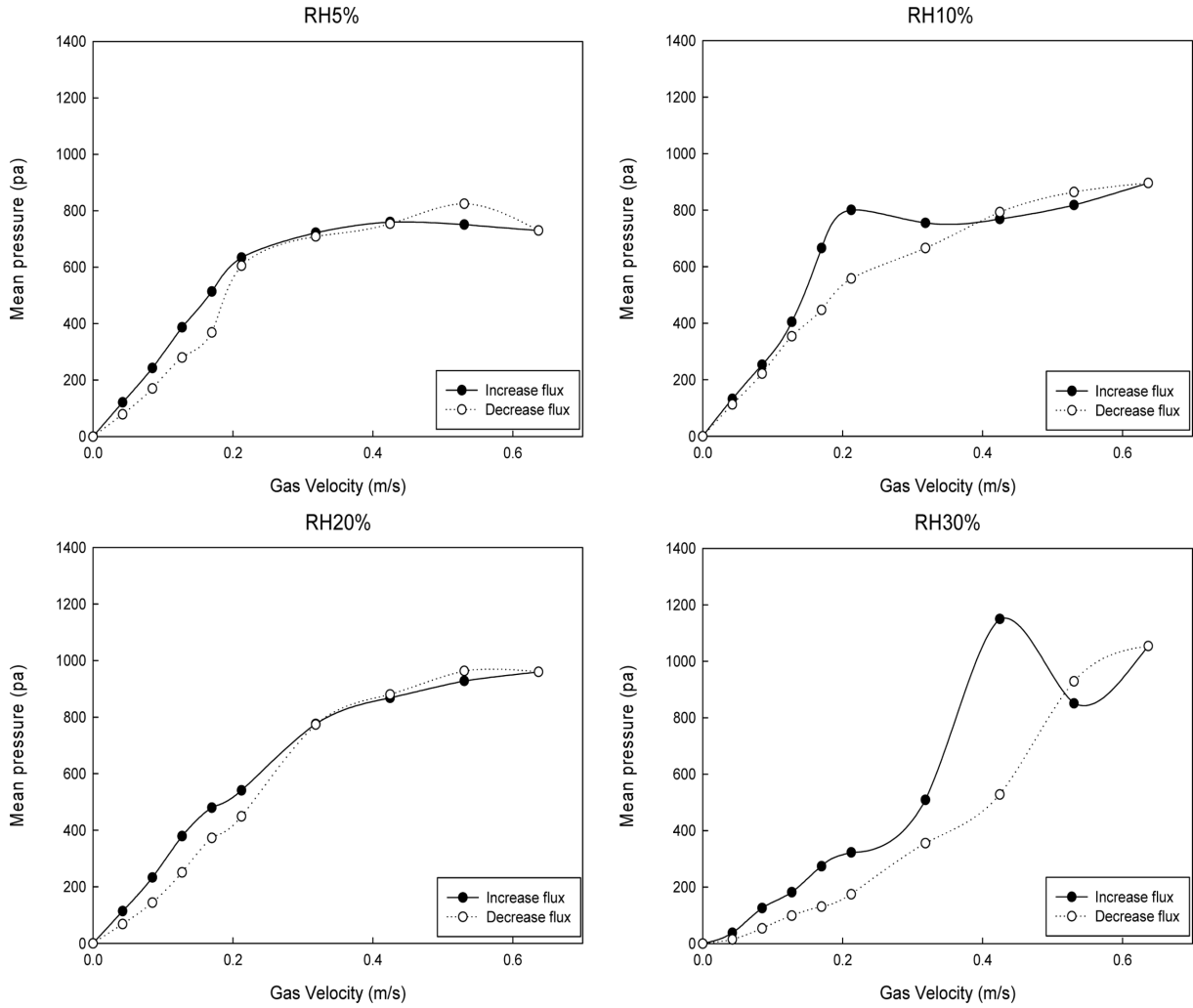


Fig. 6. Bed pressure drop of RH/sand mixture with respect to superficial gas velocity.

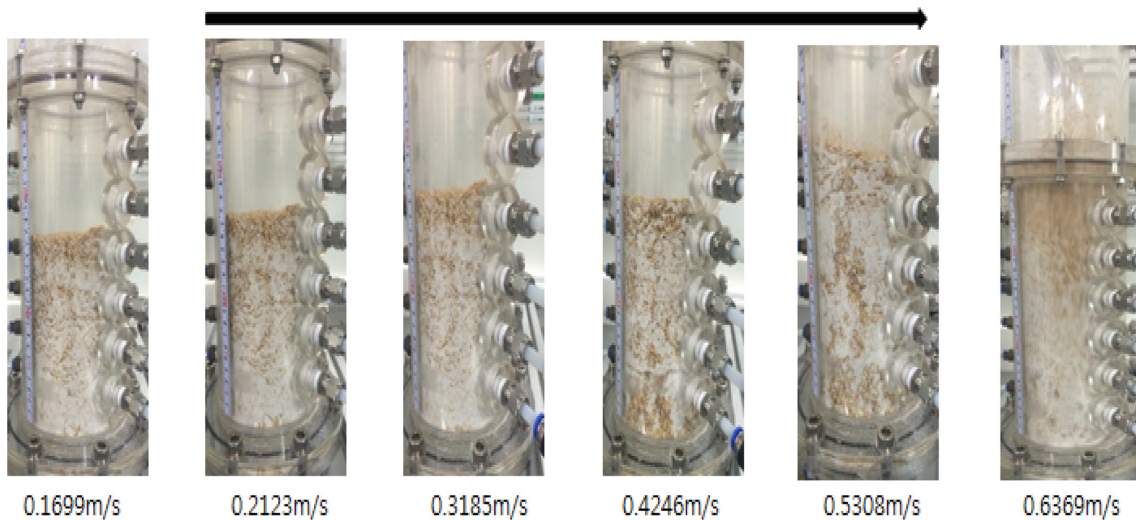


Fig. 7. Flow characteristics of RH/sand mixture with increasing superficial gas velocity (RH volume ratio 30%).

왕겨 입자의 비가 커지면서 층 내의 혼합이 일정하게 이루어지지 않음을 알 수 있었다. Fig. 7에서처럼 낮은 유속에서는 층 하부는 왕겨가 주를 이루고 높은 유속에서는 층 상부에 왕겨가 위치하는 전형적인 분리 현상이 나타났고 채널링 현상을 관찰할 수 있었다. 그래프의

경향 또한 모래와 같은 전형적인 Geldart B group 입자가 아닌, Fig. 4의 왕겨 압력강하 그래프와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 왕겨의 부피비가 일정 수준 이상이 되면, 왕겨의 분율이 증가함에 따라 왕겨의 압력강하 특성과 비슷한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다.

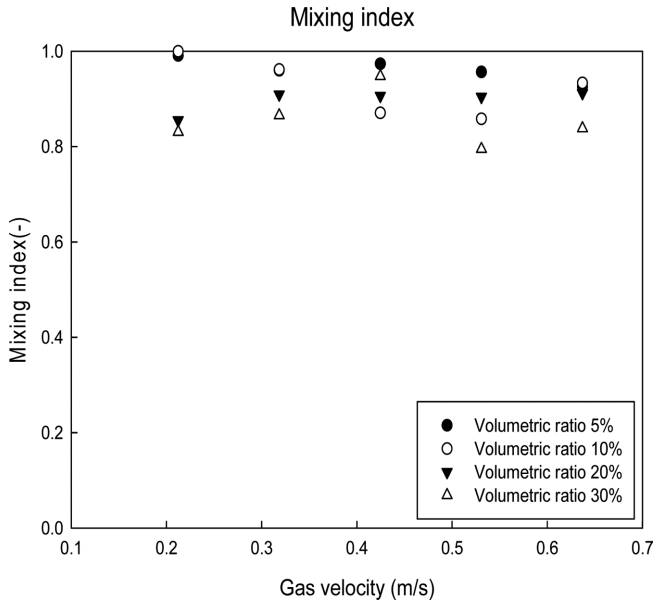


Fig. 8. Mixing index of RH/sand mixture with variance of superficial gas velocity.

각각의 혼합 조건에서 주입 유속이 증가할수록 층 내의 혼합 특성이 좋아져 내부가 균일해지는 것을 확인할 수 있었으나, 유속이 0.6 m/s 보다 클 때, 왕겨입자가 비산되기 시작하는 것을 확인할 수 있었다. 유동층에서 적절한 유동화 속도는 최소유동화속도보다 높아야 하는 것을 고려하여 왕겨 기포 유동층의 균일한 유동화를 위한 유속은 0.2~0.6 m/s의 범위를 알 수 있었다[24].

3-2-2. Mixing index

고체-기체 유동층에서 유동화 영역에 따라 고체 혼합 정도를 결정하기 위해[25] 주입 유속에 따른 왕겨와 모래의 혼합에 대한 Mixing index는 2-4-3에서 살펴본 바와 같이, Brereton과 Grace[18]의 mixing index를 이용하여 값을 도출하였고 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 왕겨 부피비에 따라 다소 차이는 있으나, 주입 유속 증가에 따라 mixing index값은 증가하다가 감소하는 경향을 나타냈으며 그 값은 0.8~0.9 사이 값을 나타내었다. 일반적으로 일정한 유속 범위 내에서의 주입 유속 증가는 고체 간 혼합에 긍정적인 영향을 미치고 일정 범위 이상의 유속에서는 입자간 분리가 일어나기 시작하며, 혼합에 대한 부정적인 영향을 미친다[26]. 유동층 내에서 층하부 물질이 기포의 상승으로 인하여 층상부로 이동하게 되고 이 현상에 의하여 층 내 혼합이 이루어진다[10].

신용섭[10]이 모래와 polystyrene을 혼합하여 혼합 특성을 연구한 결과에 따르면 mixing index값이 0.8~1 사이로, 본 연구와 유사한 결과를 확인하였고 기포와 입자 순환흐름에 의한 mixing index 값이 유속의 증가에 따라 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 본 연구에서는 유속이 증가함에 따라 mixing index의 값이 증가했다가 일정구간을 지나면서 층 분리 현상이 일어나 약간 감소하는 경향이 나타났다.

Mixing index값이 모든 주입 유속 범위에서 다소 크게 나타났는데, 이는 Kim 등[20]이 연구한 결과에서와 같이 Brereton과 Grace[18]의 mixing index식을 이용한 값이 다른 mixing index 계산식과 비교하여 다소 크게 계산되기 때문인 것으로 판단된다. 왕겨 부피비에 따른 경향은 두드러지지 않았으나, 부피비 30%일 때는 앞의 왕겨/모래

혼합물의 유동 특성(Fig. 6, Fig. 7)에서도 확인한 바와 같이 mixing index값이 가장 낮은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

3-3. 왕겨/모래/왕겨 회재 혼합물

3-3-1. 압력강하

왕겨/모래/왕겨 회재 혼합물의 유동 특성을 확인하기 위해 왕겨/모래 혼합물을 왕겨 부피비 5%, 10%, 20%, 30%로 혼합한 후 왕겨 부피 기준으로 왕겨 회재를 6% 추가 혼합하여 실험을 진행하였다. 이는 왕겨 무게 기준으로 약 15%에 해당되며 Table 3에서 보는 바와 같이 왕겨 회재의 무게비가 왕겨 대비 11.69% 정도 값이므로 이를 고려하여 선정하였다.

Fornisani와 Girimonte[27]는 유동화속도가 주로 물질과 밀도/크기의 비율 및 입자의 초기 분포에 의해 결정된다고 보고했으며, 삼성분계 혼합물인 경우 이성분계 혼합물과 비교하여 다양한 밀도/크기 비율을 가짐에 따라 좀 더 복잡한 혼합 유동 특성을 나타낼 것으로 예상된다.

왕겨/모래/왕겨 회재의 유동 특성 실험결과는 Fig. 9에 나타내었다. 실험 결과에 따르면, 삼성분계의 혼합은 고정층 범위에서 불규칙한 기포형성으로 저조한 혼합을 보였지만 최소유동화상태를 넘어서는 연속적인 기포형성과 내부순환으로 인하여 향상된 혼합 특성을 관찰할 수 있었다. 주입 유속 0.21 m/s부터 유동화가 시작되었고 왕겨 부피비 5%와 10%에서 최소유동화속도가 0.21 m/s의 범위였고, 20%일 때는 0.3 m/s로 증가하는 것을 확인하였다. 왕겨 부피비 20%에서는 분리현상이 관찰되기 시작하였고, 30%에서는 분리현상이 현저히 나타났으며 이는 혼합물의 입자크기의 비율과, 밀도비의 큰 차이 때문이라고 판단된다. 이를 통해, 왕겨/모래/왕겨 회재 혼합물의 유동 특성은 왕겨/모래 혼합물의 유동 특성과 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있었다. 특히 왕겨 부피 5% - 왕겨 회재 부피 6%, 왕겨 부피 10% - 왕겨 회재 부피 6% 혼합물의 경우에는 최소유동화속도 이후 유동이 잘 일어나는 것을 알 수 있는데, 기존의 바이오매스 회재 (GSR; gasifier solid residue)의 경우 접착력(adhesive force)으로 인해 층 내 분리 특성에 기여하는 것으로 알려져 있으나[13], 본 연구에서는 왕겨 회재가 낮은 입도 및 밀도로부터 기인한 정전기적 인력 및 왕겨와 비슷한 성상으로서 혼합에 긍정적인 영향을 미쳤기 때문으로 판단한다.

또한 주입 유속이 0.4 m/s보다 클 때, 왕겨 회재 입자 대부분이 비산되는 것을 확인했다. 따라서 유동층 가스화 조업 및 왕겨 회재의 효율적인 분리를 위해서는 0.4~0.6 m/s 범위에서 조업을 하는 것이 좋은 혼합 특성과 높은 왕겨/왕겨 회재 분리 효율을 가짐을 확인할 수 있었다[13].

3-3-2. Mixing index

주입 유속에 따른 왕겨/모래/왕겨 회재 혼합물에 대한 Mixing index는 앞서 왕겨/모래 혼합물의 경우와 마찬가지로, Brereton과 Grace [18]의 mixing index를 이용하여 값을 도출하였고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 주입 유속이 증가함에 따라 Mixing index는 다소 감소하는 듯한 경향을 보였지만, 0.88~1 값의 높은 값을 보임을 확인할 수 있었다. 왕겨의 부피비가 증가함에 따른 경향은 찾아보기는 힘들었으나, 주입 유속 0.63 m/s 일 때는 왕겨의 혼합 부피비가 증가함에 따라 mixing index는 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이, 왕겨 회재의 정전기적 인력과 왕겨와 비슷한 혼합 특성 때문인 것으로 판단되며, 이로서 왕겨 회재를 혼합하였을 때 mixing index가 다소 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

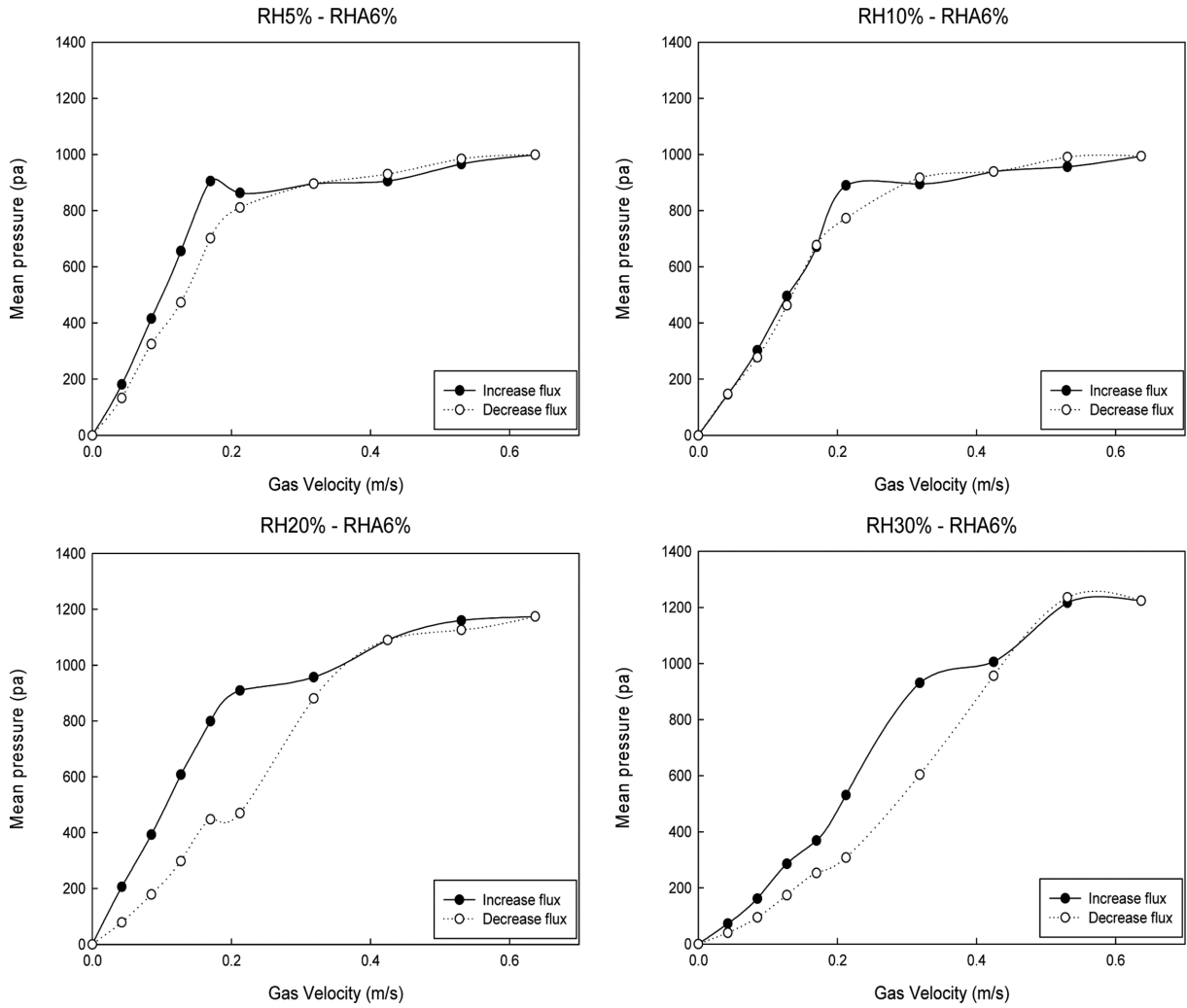


Fig. 9. Bed pressure drop of RH/sand/RHA mixture with respect to superficial gas velocity.

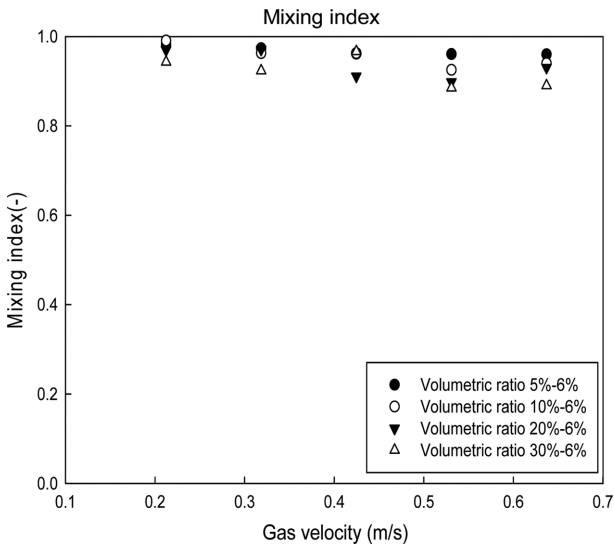


Fig. 10. Mixing index of RH/sand/RHA mixture with variance of superficial gas velocity.

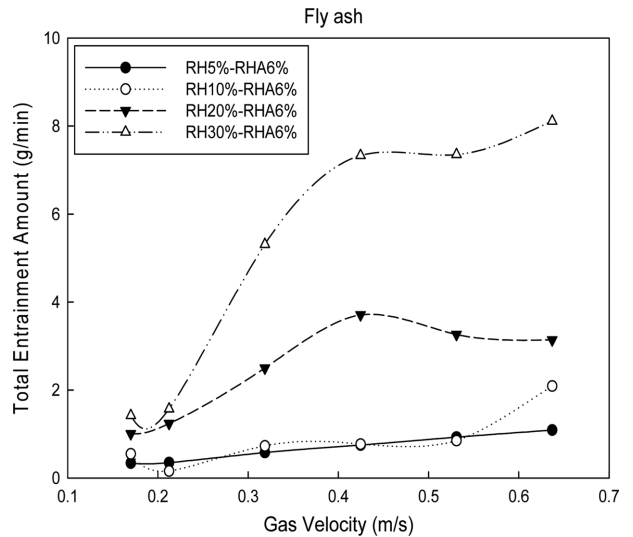


Fig. 11. Total entrainment amount of RH/sand/RHA mixture with increasing superficial gas velocity.

3-3-3. 왕겨 회재의 비산 특성

비산(Entrainment)은 유체의 흐름에 따라 유동층에서 발생할 수

있는 입자를 운반하는 과정이다[28]. 고체입자들의 거동은 입자의 크기와 밀도의 차이에 따라서 주입 유속에 큰 영향을 받는다. 주입

유속은 층 분리와 혼합 현상에 큰 영향을 미칠뿐더러 유속이 지나치게 높으면 고체 입자들이 비산된다[25]. 본 실험에서도 주입 유속이 0.4 m/s일 때 왕겨 회재의 비산이 관찰 되었으며 이는 Table 2의 왕겨 회재의 종말 속도(문헌값 0.7~0.8 m/s, 이론값 0.17 m/s)와는 다소 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

실제 왕겨/모래/왕겨 회재 혼합물의 총 비산량을 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 유속이 증가함에 따라 비산 된 왕겨 회재의 양은 급속하게 증가함을 볼 수 있다. 왕겨 회재의 무게가 적을 경우 (RH 5% - RHA 6%, RH 10% - RHA 6%) 이러한 경향은 두드러지지 않았으나, 왕겨 회재의 무게가 증가한 경우에는 0.4 m/s를 기점으로 비산량이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 왕겨 회재 비산량이 주입 유속 0.4 m/s 이상일 때 일정해 지는 것을 확인할 수 있었으며, 앞서 언급한 바와 같이 왕겨 회재를 fly ash 형태로 분리하며 가스화, 연소 등 에너지 전환 공정을 적용하기 위해서는 적정 주입 유속이 0.4~0.6 m/s 범위를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 왕겨를 에너지화 하고 왕겨 회재를 고부가가치 물질로 활용하기 위한 유동층 공정에 적용을 하기 위하여 왕겨/모래/왕겨 회재(실리카)의 혼합 및 유동 특성을 살펴보았다. Cold-model 기포 유동층 장치(D=0.1 m, H=1.5 m)를 활용하여, 왕겨/모래 및 왕겨/모래/왕겨 회재 혼합물을 대상으로 정해진 유속 범위(0~0.63 m/s)에서 유동 및 혼합 특성을 측정하였다. 왕겨/모래, 왕겨/모래/왕겨 회재의 혼합실험을 통해 왕겨 부피비가 증가함에 따라 최소유동화속도가 0.19 m/s에서 0.3 m/s로 증가하는 것을 확인하였고, 왕겨 부피비가 30%로 증가하였을 때에는 최소유동화속도가 관측되지 않았으며 왕겨 자체의 불규칙한 유동 특성을 보임을 확인하였다. 왕겨 회재의 정전기적 인력과 혼합 특성으로 인하여 왕겨/모래/왕겨 회재 혼합물의 mixing index 값이 0.88~1로 왕겨/모래 혼합물의 mixing index 값(0.8~1) 보다 다소 큰 것을 확인하였다. 이를 통하여 왕겨의 혼합 비율은 30% 이내로, 왕겨/모래의 혼합과 왕겨 회재의 연속적인 분리를 위해서는 주입 유속이 0.4~0.6 m/s 범위여야 함을 알 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B6-2414) 및 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-15-07-KIER)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 또한, 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2014303009060).

References

- Lee, W. J., "A Research on the Gas Flow through Nano Space Network in Rice Husk Silica Layer," M.S. Dissertation, Chonnam National University(2013).
- KIER Research Report, Energy production through rice husk gasification and development of anode materials for rechargeable battery(2014).
- No, S. Y., "Effective Utilization Methods of Rice Husk," *J. Biosystems Eng.*, **23**, 507-518(1998).
- Kumar, A., Mohanta, K., Kumar, D. and Parkash, O., "Properties and Industrial Applications of Rice Husk: A Review," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, **2**, 2250-2459(2012).
- So, S. J., "Characterization, Size Reduction and Biological Effect of a BPNM, Rice Husk Silica," Ph.D. dissertation, Chonnam National University(2012).
- Son, S. M., Kim, U. Y., Shin, I. S., Kang, Y. and Choi, M. J., "Characteristics of Minimum Fluidization Velocity and Pressure Fluctuations in Annular Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**, 707-713(2008).
- Lee, C. G., Kim, J. S., Song, P. S., Cho, Y. J., Kang, Y. and Choi, M. J., "Effects of Catalyst on the Pyrolysis of Polystyrene Wastes in a Fluidized Bed Catalytic Reactor," *HWAHAK KONGHAK*, **40**, 445-449(2002).
- Rao, T. R. and Ram Bheemarasetti, J. V., "Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands," *Energy*, **26**, 633-644(2001).
- Cha, W. S., Hong, S. C., Oh, K. J. and Doh, D. S., "Minimum Fluidization Velocity and Fluidization Characteristics of Binary Particle System," *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 641-648(1992).
- Shin, Y. S., "Mixing of Solid Particles in a Sand/Polystyrene Fluidized Bed," *Journal Env. Sci. and Tech Res.*, **10**, 49-57(2000).
- Fang, M., Yang, L., Chen, G., Shi, Z., Luo, Z. and Cen, K., "Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed," *Fuel Process. Technol.*, **85**, 1273-1282(2004).
- Alavi, S. and Caussat, B., "Experimental Study on Fluidization of Micronic Powders," *Powder Technol.*, **157**, 114-120(2005).
- Sharma, A. M., Kumar, A., Patil, K. N. and Huhnke, R. L., "Fluidization Characteristics of a Mixture of Gasifier Solid Residues, Switchgrass and Inert Material," *Powder Technol.*, **235**, 661-668(2013).
- Geldart, D., "Types of Gas Fluidisation," *Powder Technol.*, **7**, 285-292(1973).
- Rozainee, M., "Production of Amorphous Silica from Rice Husk in Fluidised Bed System," Ph.D. dissertation, Universiti Teknologi Malaysia(2007).
- Wen, C. Y. and Yu, Y. H., "A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidising Velocity," *AIChE Journal*, **12**, 610-612(1966).
- Haider, A. and Levenspiel, O., "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles," *Powder Technol.*, **58**, 63-70(1989).
- Brereton, C. M. H. and Grace, J. R., "Microstructural Aspects of the Behaviour of Circulating Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 2565-2572(1993).
- Kim, D. Y., "A Study on the Flow Characteristics of Fine Particle in a Gas-Solid Fluidized Beds with Binary Particle," M.S. Dissertation, Sungkyunkwan University(2013).
- Kim, D. Y., Rim, G. H. and Lee, D. H., "Flow Characteristics and Axial Bed Composition According to Mass Ratio of Binary Solids in Gas-Solid Circulating Fluidised Beds," *Powder Technol.*, **258**, 344-351(2014).
- Huang, S., Jing, S., Wang, J. F., Wang, Z. W. and Jin, Y., "Silica white Obtained from Rice Husk in a Fluidized Bed," *Powder Technology*, **117**, 232-238(2001).
- Sen, R. and Gosh, D. N., "Fluidization and Combustion Charac-

- teristics of Rice Husk," *Indian Chem. Eng.*, **34**, 206-211(1992).
23. Rozainee, M., Ngo, S. P., Salema, A. A., Tan, K. G., Ariffin, M. and Zainura, Z. N., "Effect of Fluidising Velocity on the Combustion of Rice Husk in a Bench-scale Fluidised Bed Combustor for the Production of Amorphous Rice Husk Ash," *Bioresour. Technol.*, **99**, 703-713(2008).
 24. Martinez, J. D., Pineda, T., Lopez, J. P. and Betancur, M., "Assessment of the Rice Husk Lean-combustion in a Bubbling Fluidized Bed for the Production of Amorphous Silica-rich Ash," *Energy*, **36**, 3846-3854(2011).
 25. Chandrasekhar, S., Satyanarayana, K. G., Pramada, P. N. and Raghavan, P., "Review Processing, Properties and Applications of Reactive Silica from Rice Husk-an Overview," *J. Mater. Sci.*, **38**, 3159-3168(2003).
 26. Zhang, Y., Jin, B. and Zhong, W., "Experimental Investigation on Mixing and Segregation Behavior of Biomass Particle in Fluidized Bed," *Chem. Eng. Process.*, **48**, 745-754(2009).
 27. Formisani, B. and Girimonte, R., "Experimental Analysis of the Fluidization Process of Binary Mixtures of Solids," *KONA*, **21**, 66-75(2003).
 28. Mehdi, A., "Hydrodynamic Modeling of the Entrainment of Geldart A Group Particles in Gas-solid Fluidized Bed: The Effect of Column Diameter," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(7), 1599-1607(2011).