

다단 환원형 유동층에서 J-valve의 운전변수에 따른 고체 흐름량 및 기체 우회

홍윤석, 강경수[†], 박주식[†], 이동현*

성균관대학교 화학공학과

440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

[†]한국에너지기술연구원

305-343 대전광역시 유성구 가정로 152

(2011년 2월 22일 접수; 2011년 3월 10일 수정본 접수; 2011년 3월 14일 채택)

Solid Flow Rate and Gas Bypassing with Operating Variables of J-valve in Multistage Annular Type Fluidized Beds

Yoon Seok Hong, Gyung Soo Kang[†], Joo Sik Park[†] and Dong Hyun Lee*

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do 440-746, Korea

[†]Hydrogen Energy Research Center, KIER, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received for review February 22, 2011; Revision received March 10, 2011; Accepted March 14, 2011)

요 약

다단 환원형 유동층 반응기(상승관: $0.01 \times 0.025 \times 2.8 \text{ m}^3$, J-valve: $0.009 \times 0.015 \text{ m}^2$)에서의 수력학적 특성을 연구하였다. 층 물질로는 glass beads ($d_p = 101 \mu\text{m}$, $\rho_b = 1,590 \text{ kg/m}^3$, $U_{mf} = 1.25 \times 10^{-2} \text{ m/s}$, Geldart B)를 사용하였다. Batch 상태에서 고체흐름량을 측정하기 위하여 전자저울을 사용하여 누적된 무게로 계산하였다. 연속공정에서는 고체순환량을 측정하기 위하여 고체가 순환상태에서 사이클론 하단의 3-way 밸브를 이용하여 일정시간에 누적된 무게로 계산하였다. 또한 정상상태에서 가열된 입자가 열전대를 통과하는 시간을 측정하여 고체순환량을 계산하였다. 고체의 흐름량은 주입 기체의 유속($1.2 \sim 2.6 U_{mf}$)과 층높이(z , $0.24 \sim 0.68 \text{ m}$)가 증가함에 따라 2.2에서 23.4 kg/s로 증가하였다. 이때 고체체류시간은 440에서 1,438 s까지 변화하였다. 상승관내의 고체 체류량을 확인하기 위하여 각 구간에서의 압력강하를 측정하여 고체 체류량을 계산하였다. 본 연구에서 얻어진 고체체류량 분포는 end effect를 갖는 exponential decay model의 형태로 나타났다. 상단 유동층에서 중단 유동층으로의 기체 우회를 확인하기 위하여 상단 유동층으로 주입되는 공기에 일정 조성의 CO_2 추적기체를 주입한 후, 기체 분석기를 이용하여 중단 유동층의 배출기체중 CO_2 가 우회되는 양을 측정하였다. 측정된 기체우회(gas bypassing)량은 2.6% 미만으로 그 영향이 크지 않는 것으로 판단하였다.

주제어 : 다단 환원형 유동층, 고체흐름량, 고체순환량, 고체 체류량, 기체 우회

Abstract : Hydrodynamic characteristics in multistage annular type fluidized bed (riser: $0.01 \times 0.025 \times 2.8 \text{ m}^3$, J-valve: $0.009 \times 0.015 \text{ m}^2$) were investigated. Glass beads ($d_p = 101 \mu\text{m}$, $\rho_b = 1,590 \text{ kg/m}^3$, $U_{mf} = 1.25 \times 10^{-2} \text{ m/s}$, Geldart classification B) was used as a bed material. Accumulated weight by the electronic balance was measured to determine the solid flow rate in batch-type. In circulation condition, we measured the accumulated weight of particle transported from riser. At the steady state condition, solid circulation rate was calculated from time interval of the heated bed material passing between two thermocouples. Solid flow rate increased with increasing inlet gas velocity ($1.2 \sim 2.6 U_{mf}$) and the static bed height (z , $0.24 \sim 0.68 \text{ m}$) from 2.2 to 23.4 kg/s. However, mean residence time decreased with increasing inlet gas velocity ($1.2 \sim 2.6 U_{mf}$) and the static bed height (z , $0.24 \sim 0.68 \text{ m}$) from 1,438 to 440 s. The solid holdup in the riser was determined by measuring pressure differences according to the riser height. These results showed a similar trend to that of simple exponential decay type except for the top section of the riser. To verify the gas bypassing from top bubbling beds to middle bubbling beds, CO_2 gas was injected by tracer gas in constant ratio, and then was measured CO_2 concentration in outlet gas by gas chromatography. Gas bypassing occurred below 2.6% which is negligible value.

Keywords : Multistage circulating fluidized bed, Solid flow rate, Solid residence time, Gas bypassing

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dhlee@skku.edu

1. 서론

석유자원의 유한성과 지리적 편재로 인한 석유의 불안정한 공급과 고가화에 대처하기 위하여 천연가스와 석탄의 효율적인 이용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편, 화석 연료의 사용에 따라 발생하는 질소산화물, 황산화물뿐만 아니라 최근에는 이산화탄소까지 지구 온실 효과 문제로 배출이 규제될 가능성이 있음에 따라 연료전지나 수소에너지와 같은 청정에너지에 관한 연구가 진행되고 있다. 수소는 친환경 연료로서 앞으로 화석연료를 대신할 에너지원으로 그 가치가 매우 높아지고 있으며, 그 수요 또한 급속히 증가할 것으로 예상된다. 천연가스를 원료로 한 수증기 메탄 개질(steam methane reforming, SMR) 공정은 현재까지 보유한 기술 및 인프라를 통해 대량의 수소생산이 가능하다. 그러나 CO₂의 분리 및 회수로 인한 비용의 증가는 중·장기적인 관점에서 이를 개선하기 위한 공정 기술개발이 요구된다.

순환유동층 반응기는 기포유동층 반응기에 비하여 높은 유속에서 조업되는 반응기로 고체와 기체간의 접촉 효율이 좋으며 접촉이 균일하게 되기 때문에 높은 반응 전환율 및 열전달 속도를 얻을 수 있어 보일러 및 소각, 발전 산업에 활용되고 있는 유동층 기술의 한 분야이다[1]. 순환유동층 반응기는 일반적으로 기포유동층과 고속유동층인 상승관, 상승관에서 비산되는 입자를 포집하여 주는 사이클론과 downcomer, 그리고 입자들을 다시 반응기로 재순환 시키는 고체 재주입 밸브로 구성되며, 이중에서도 downcomer와 고체 재주입 밸브로 구성되는 재순환부는 전체 반응기의 효율 및 안정성을 결정짓는 핵심요소라고 할 수 있다[2].

비기계식 밸브는 제작 및 유지가 간단하며, 고온고압에 견디기 쉽다는 장점 이외에도 안정성이 좋아 높은 연소효율과 반응율을 얻을 수 있으며, 내부의 입자 층에 의해서 기체의 역류를 차단하는 밀폐의 기능을 수행하며, 비록 한정된 범위가기는 하나 고체입자의 흐름량의 조절이 가능하다는 장점 때문에 많은 유동층에서 사용되고 있다[3]. 본 연구에 사용된 J-valve는 기계식 밸브의 한 종류로 기체의 주입에 의해서 입자를 흐르게 하는 장치로 주입하여준 기체와 고체입자사이의 frictional drag force를 감소시켜 고체입자가 흐르게 한다[4].

Kim et al.[5]은 loop seal을 가지는 순환유동층 반응기에서의 FCC입자와 silica sand입자의 고체흐름특성을 연구 하였다. Loop seal내로의 주입기체의 유속이 증가함에 따라 solid mass flux가 선형적으로 증가하는 것을 발견하였으며, 새로운 형태의 loop seal을 개발하여 기존의 loop seal보다 안정적으로 조업이 가능하며 높은 solid mass flux를 얻었다고 주장하였다.

환원형 유동층은 외부순환유동층에 비하여 장치가 compact 하고 열손실이 적다는 장점을 갖는다. 또한 반응기와 J-valve를 사각형으로 제작하므로써 대용량으로 scale-up 할 경우 module화가 용이한 장점이 있다. Ahn et al.[6]은 orifice-type draft tube와 gas separator를 가지는 내부순환 유동층에서 orifice의 크기, sand particle의 크기, 주입유속, 층높이에 따른

고체순환량 및 기체우회에 대한 연구를 수행하였다. Orifice의 크기, 기체주입유속이 커짐에 따라 고체순환량이 증가하였으며, orifice의 크기가 커질수록 annulus에서 draft tube로의 기체 우회율이 많아지는 현상을 발견하였다.

이와 같은 다단 환원형 유동층 장치의 장점을 유지하고 기체 우회율이 높아 단계반응에는 적합하지 않다는 단점을 보완하기 위하여 기체 우회를 막아주는 기능을 가진 비기계식 밸브를 이용하여 다단으로 구성된 내부순환유동층 장치를 제안하였고 이에 대한 수력학적 연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

Figure 1에 나타낸 장치는 본 실험에 사용된 다단 환원형 순환유동층 장치의 개략도를 나타낸다. 입자의 거동을 확인하기 위하여 아크릴로 제작되었으며, 두 개의 기포유동층반응기(0.15 × 0.06 × 0.9 m³ height: 상단 유동층, 0.15 × 0.06 × 0.81 m³ height: 중단 유동층)와 상승관으로 입자를 공급해 주기 위한 하단 유동층(0.15 × 0.06 × 0.63 m³ height), 한 개의

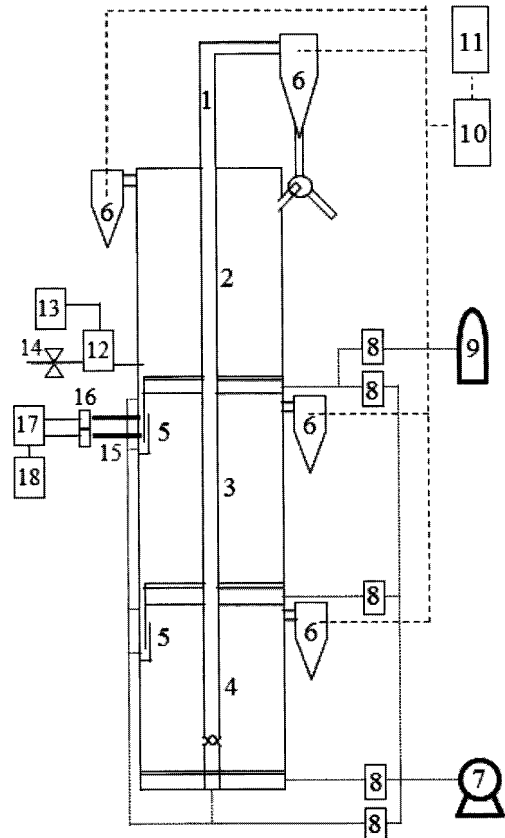


Figure 1. Scheme of a multistage internal circulating fluidized bed. 1. Riser, 2. Upper reactor, 3. Middle reactor, 4. Bottom reactor, 5. J-valve, 6. Cyclone, 7. Compressor, 8. Flow meter, 9. CO₂ cylinder, 10. Gas sampling pot, 11. Gas sampling pot, 12. Tracer chamber, 13. Temperature controller, 14. Solenoid valve, 15. Thermocouple, 16. Amplifier, 17. A/D converter, 18. Personal computer.

Table 1. Physical properties of glass beads

Bed material	Glass bead
Mean Diameter [μm]	101
Particle density [kg/m^3]	2,500
Bulk density [kg/m^3]	1,590
Geldart classification	B

상승관($0.01 \times 0.025 \times 2.8 \text{ m}^3$ height), 비산되는 입자를 포집 해주기 위한 cyclone, 각 반응기 하단에 위치한 J-valve ($0.018 \times 0.015 \text{ m}^2$: 상단 반응기, $0.009 \text{ m} \times 0.015 \text{ m}^2$: 중단 반응기)로 구성되어 있다. 유동층으로 주입되는 기체는 압축공기를 사용하였으며, valve와 유량계를 이용하여 기체의 유량을 조절하였다. 유량이 조절된 기체는 각 반응기내로 주입이 되며 배출 기체는 유량과 조성을 측정하기 위하여 사이클론으로부터 적산유량계와 sampling pot을 거쳐 일정량이 포집된 후 배출되었다. 기포유동층과 상승관으로의 유동화 기체는 오리피스 직경이 2 mm인 분산판을 이용하여 중력 반대방향으로 주입하였다. J-valve내에는 층물질이 내려오는 쪽의 바닥지점($h = 0.005\text{m}$)과 중간지점($h = 0.11 \text{ m}$)에서 수평방향으로 기체를 주입하였다. Figure 1의 점선으로 표시된 것은 기체유속을 측정하기 위하여 적산유량계와 기체포집기에 연결된 투명 호스를 나타내었다. Table 1은 본 실험에 사용된 층물질인 glass beads ($U_{mf} = 1.25 \times 10^2 \text{ m/s}$)의 물성을 나타내었다.

2.2. 실험 방법

고체흐름량을 측정하기 위하여 하단유동층을 분리한 후 중단 유동층에 3.7 kg의 층물질을 충전한 후 J-valve내에 $5 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 의 일정한 기체유속을 주입하고 전자저울(METTLER TOLEDO, SR64001)로 시간에 따른 고체의 누적량을 측정하여 고체흐름량을 계산하였다. 전자저울을 이용하여 1초마다 누적된 양을 기록한 실험결과를 Figure 2(a)에 나타내었다. Figure 2(a)에서 보는 바와 같이 처음 채워진 양과 저울에 누적된 양의 차이를 그 시간에서의 반응기에 남아있는 양과 같다고 보고 정해진 충전량일 때의 기울기를 이용하여 고체 흐름량을 계산하였다. Figure 2(a)에서 F_s 는 임의의 시간에 계산된 고체흐름량을 표시한 것이다.

고체순환량을 측정하기 위하여 150 °C로 가열된 층물질을 solenoid valve를 이용하여 J-valve 상단으로 소량 주입하였으며, J-valve내에 위치한 2개의 열전대에서 나오는 mV단위의 신호를 각각 증폭기를 거쳐서 V단위의 신호로 증폭시켜 A/D 변환기를 이용하여 실험결과를 수집하였다. 각 신호에서 열추적자가 지나가면서 생기는 신호의 최고점이 나타나는 시간의 차이로 두 열전대 사이의 거리를 나눠 입자의 선속도를 구하였다. 이때의 신호변화를 Figure 2(b)에 나타내었다.

하단반응기의 바닥을 분해한 후 전자저울을 이용하여 구한 고체흐름량과 열추적자를 이용하여 구한 고체순환량을 동시에 측정하여 Figure 3에 나타내었다. 이때 오차는 10% 미만으로 두 가지 방법 모두 비교적 신뢰성 있는 측정 방법이라고

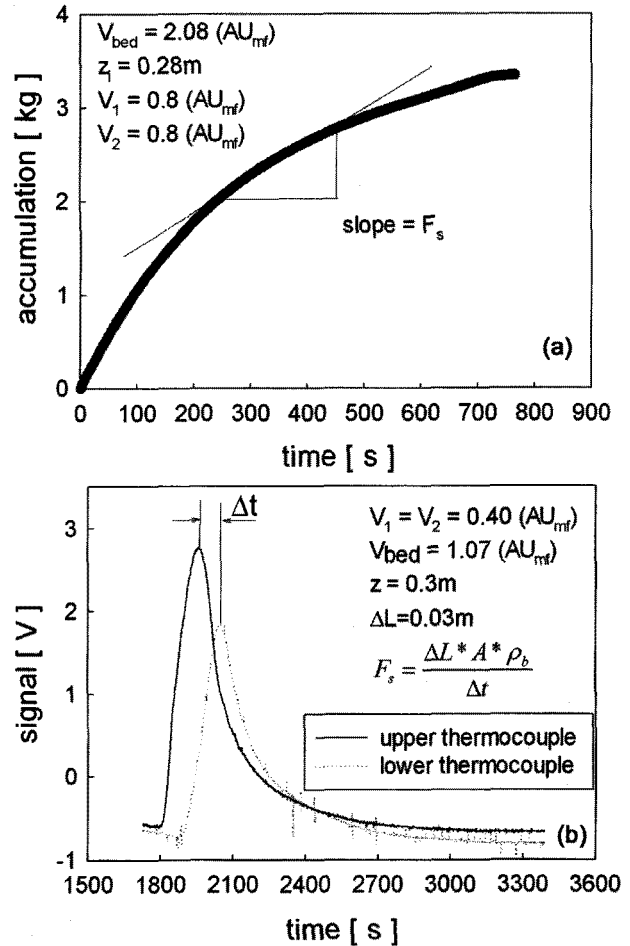


Figure 2. (a) Raw data of measuring solid circulation rate using hot tracer, (b) Raw data of measuring solid circulation rate using electronic scale.

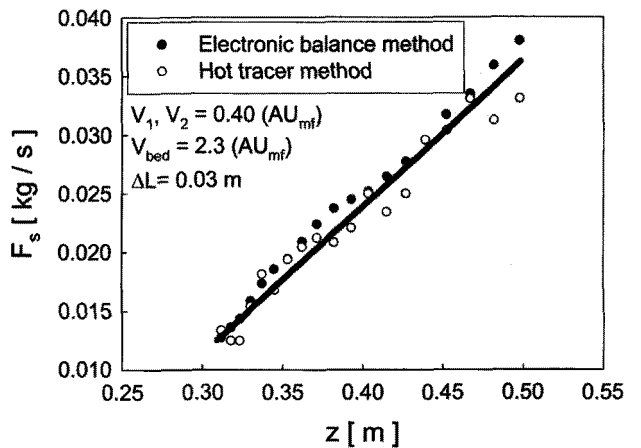


Figure 3. Comparison data of calculated value using hot tracer and electronic scale.

판단되었다.

기포유동층에서의 체류시간은 반응의 전환율을 결정하는 중요한 인자이며 식 (1)과 같이 나타내어진다. W_s 는 충전량이고, F_s 는 고체흐름량을 나타낸다.

$$\tau = \frac{W_s}{F_s} \quad [s] \quad (1)$$

상승관내에서 고체체류량을 알아보기 위하여 상승관에 0.2 m간격으로 압력 tap을 설치하였고 각 구간에서의 압력강하를 측정하였다. 상승관내 고체 체류량을 계산하기 위하여 식 (2)을 사용하였다. ρ_g 와 ρ_s 는 각각 기체와 고체의 밀도이고, ε_g 와 ε_s 는 각각 기체와 고체의 체류량을 나타낸다.

$$-\frac{\Delta P}{\Delta L} = (\rho_s \varepsilon_s + \rho_g \varepsilon_g)g \quad (2)$$

또한 상단 유동층과 중단 유동층사이의 기체 우회를 알아보기 위하여 상단 유동층의 유동화 기체에 일정비율로 추적기체인 CO₂를 주입한 후 각 반응기에서 배기되는 기체의 유량을 적산 유량계를 통하여 측정하였다. 이 기체를 sampling하여 각 배출기체중 CO₂의 조성을 확인하여 유동화 기체인 공기와 CO₂의 물질수지식을 세워 data의 타당성을 검토하였다. 추적자인 CO₂의 기체우회(gas bypassing)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, V_{in} 는 상단 반응기로 주입한 기체의 유량, V_{out} 는 중단반응기에서 배출되는 기체의 유량, X_{in} 과 X_{out} 은 각각 주입 과 배출된 기체 내 CO₂의 조성을 나타낸다.

$$f_{CO_2}(\%) = \frac{V_{out} \times X_{out}}{V_{in} \times X_{in}} \times 100 \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 고체 흐름량

J-valve 내 기체의 주입을 위하여 여러 가지 위치에서 기초 실험을 통하여 조업을 한 결과 고체가 내려오는 쪽 하부에서 기체를 주입하였을 때 가장 주입기체의 변화에 따른 고체 흐름량의 변화가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. J-밸브의 중간(h = 0.11 m)에 보조 기체를 주입해주자 고체흐름량을 더 크게 조절할 수 있었다. Figure 4(a)와 (b)에 J-valve의 바닥부분에서의 기체의 주입유량(V_1)과 중간부분에 주입되는 기체의 주입유량(V_2)에 따른 고체흐름량의 변화를 나타내었다. 주입 기체의 유량이 증가함에 따라 고체흐름량은 2.2×10^3 에서 23.4×10^3 kg/s까지 증가함을 알 수 있었다. 이러한 현상은 기체주입량이 증가하면 더욱 많은 기체들이 입자들의 공극사이로 흐르면서 고체와 고체사이의 마찰력을 감소시켜 고체 흐름량을 증가시키기 때문이다[7]. 상단에 위치한 기포유동층의 충전량이 클수록 고체흐름량도 크게 나오는 것이 관찰되었는데 이는 앞에서 언급한 바와 같이 고체흐름의 구동력이 되는 입자의 하중이 증가하기 때문이다.

3.2. 고체 순환량

Figure 5는 J-valve로 주입되는 기체유량에 따른 고체순환량의 변화를 나타내며 본 연구에서의 결과를 Ahn et al.[6]

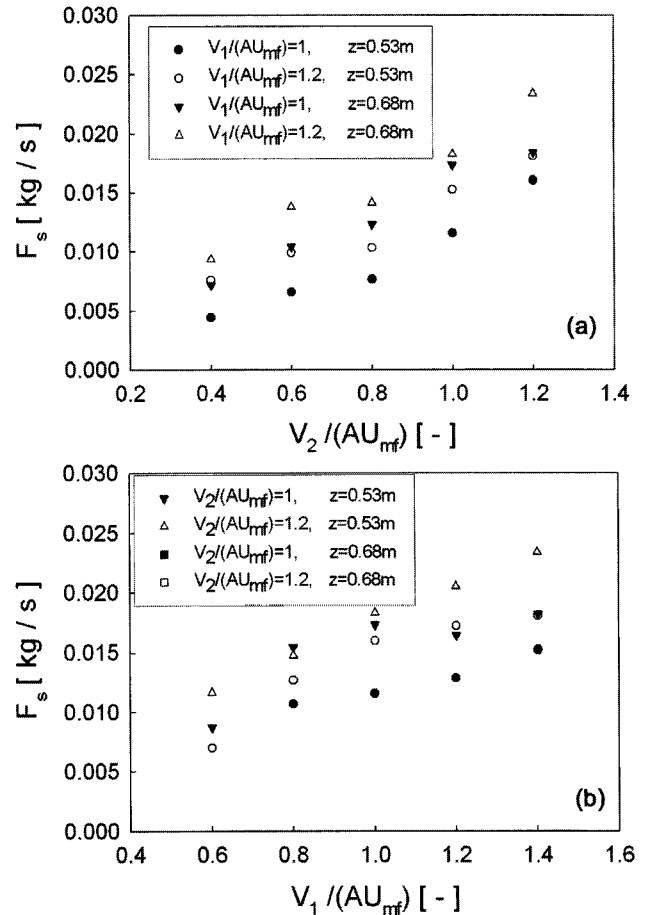


Figure 4. (a) Effects of dimensionless gas flow rate, $V_1/(AU_{mf})$ on solid circulation rate in J-valve, (b) Effects of dimensionless gas velocity, $V_2/(AU_{mf})$ on solid circulation rate in J-valve.

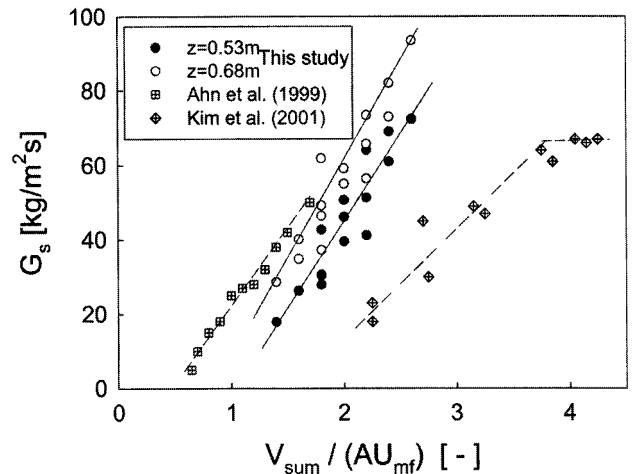


Figure 5. Effects of dimensionless gas flow rate, $V_{sum}/(AU_{mf})$ on solid circulation rate in J-valve.

(sand particle, $d_p = 300 \times 10^{-6}$ m, $\rho_s = 2,620$ kg/m³, $U_{mf} = 0.1$ m/s)과 Kim et al.[5] (silica sand, $d_p = 125 \times 10^{-6}$ m, $\rho_s = 3,055$ kg/m³, $U_{mf} = 0.031$ m/s)의 결과와 비교하여 나타낸 그래프이다. V_{sum} 은 J-valve바닥에서의 주입기체의 유량(V_1)과 보조 주

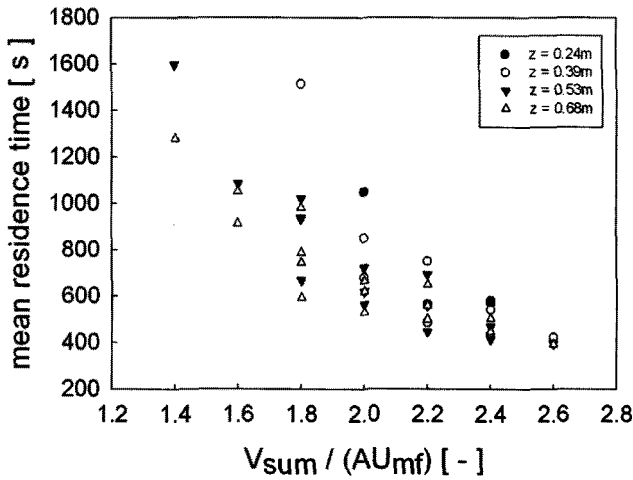


Figure 6. Effects of gas velocity on residence time.

입기체의 유량(V_2)의 함으로 표현되며 선행 연구들과 정량적인 비교를 위해 J-valve 전체에 걸쳐 주입된 기체의 유량으로써 나타내었다. 본 연구에서 사용된 장치의 J-valve의 구조는 수평관의 높이 대 수평관의 길이의 비(L_v/H_v)가 0.5/0.9로 Kim et al.[7]이 사용한 loop seal ($L_v/H_v = 0.18/0.08$)에 비해 수평관에서 입자의 흐름이 저항을 적게 받기 때문에 더 큰 고체순환량이 얻어짐을 알 수 있다. 본 연구에서 J-valve에서의 유효직경은 0.011 m이고 Kunii and Levenspiel[8]에 따르면 Geldart B입자인 경우 대략 고체순환량이 70~100 kg/m²s의 값을 갖는 것으로 예측될 수 있다. 본 실험에서 사용된 glass beads의 평균입경은 101×10^{-6} m, $\rho_s = 2,500$ kg/m³로써 Geldart 분류에 따르면 group A와 B의 경계임을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 얻은 100 kg/m²s의 값을 얻을 수 있다.

Figure 6에는 고체순환량과 충전량을 이용하여 주입기체의 유량과 충전량에 따른 고체의 체류시간을 나타낸 값으로 440~1,438 s의 값을 가진다. 주입기체의 유량의 증가는 고체순환량의 증가를 가져오며 이로 인하여 체류시간은 감소하게 된다. 충전량의 변화에 따른 체류시간의 변화를 살펴보면 충전높이가 큰 경우 충전량이 증가하나 고체 순환량 역시 크게 증가하므로 고체흐름량의 증가폭이 더 크다. 결과적으로 체류시간은 감소하게 된다. Figure 5와 Figure 6에서의 실험결과를 비교하였을 때 높이에 따른 체류시간의 차이가 크지 않는 것도 이 사실을 뒷받침해준다.

3.3. 상승관내 고체 체류량

Figure 7에 상승관내 축방향 고체 체류량 분포를 Brereton [9]의 실험결과와 함께 나타내었다. Brereton[9]의 실험장치와 본 연구에서 사용한 실험장치의 높이가 서로 상이하므로 상승관에서 각 구간에 대한 높이와 전체 높이에 대한 비(Z_d)로써 나타내었고, 고체순환량은 정상상태에서 3-way를 이용하여 누적된 입자의 무게를 이용하여 측정하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Kunii and Levenspiel[10]이 제안한 농후상영역이 생기지 않고 freeboard영역에서 지수적 감소곡선을 그

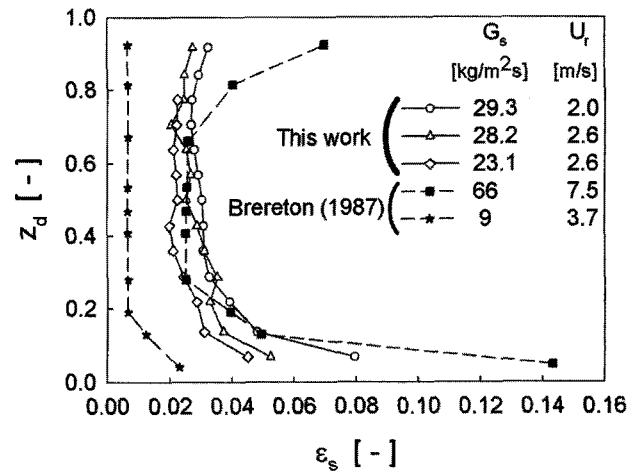


Figure 7. Axial solid holdup in riser with Brereton[6]'s study.

Table 2. Mass balance and reproducibility test of tracer gas

No. 1		X [%]	V_{in} [m ³ /s]	V_{total} [m ³ /s]	$V_{out}X_{out}$ [m ³ /s]	$V_{CO2,out}$ [m ³ /s]
Inlet	upper reactor	26.1	2.46×10^{-4}	9.18×10^{-4}	0.64×10^{-4}	0.64×10^{-4}
	middle reactor		0.88×10^{-4}		0	
	bottom reactor		0.42×10^{-4}		0	
	riser		5.43×10^{-4}		0	
Outlet	upper reactor	26.4	2.41×10^{-4}	8.88×10^{-4}	0.64×10^{-4}	0.64×10^{-4}
	middle reactor	0.59	8.89×10^{-4}		5.55×10^{-7}	
	bottom reactor		0.16×10^{-4}		0	
	riser		5.42×10^{-4}		0	
No. 2		X [%]	V_{in} [m ³ /hr]	V_{total} [m ³ /hr]	$V_{out}X_{out}$ [m ³ /hr]	$V_{CO2,out}$ [m ³ /hr]
Inlet	upper reactor	25.8	2.46×10^{-4}	9.01×10^{-4}	0.64×10^{-4}	0.64×10^{-4}
	middle reactor		0.88×10^{-4}		0	
	bottom reactor		0.44×10^{-4}		0	
	riser		5.22×10^{-4}		0	
Outlet	upper reactor	26.1	2.43×10^{-4}	9.17×10^{-4}	0.63×10^{-4}	0.64×10^{-4}
	middle reactor	0.84	0.86×10^{-4}		5.55×10^{-7}	
	bottom reactor		0.27×10^{-4}		0	
	riser		5.61×10^{-4}		0	
No. 3		X [%]	V_{in} [m ³ /hr]	V_{total} [m ³ /hr]	$V_{out}X_{out}$ [m ³ /hr]	$V_{CO2,out}$ [m ³ /hr]
Inlet	upper reactor	26.7	2.46×10^{-4}	9.20×10^{-4}	0.66×10^{-4}	0.66×10^{-4}
	middle reactor		0.88×10^{-4}		0	
	bottom reactor		0.44×10^{-4}		0	
	riser		5.43×10^{-4}		0	
Outlet	upper reactor	26.4	2.45×10^{-4}	8.89×10^{-4}	0.65×10^{-4}	0.65×10^{-4}
	middle reactor	0.91	0.84×10^{-4}		5.55×10^{-7}	
	bottom reactor		0.31×10^{-4}		0	
	riser		5.29×10^{-4}		0	

리는 freeboard entrainment model에 따름을 알 수 있었다. 또한 상승관의 상부에서는 end effect가 발생하여 고체 체류량이 높게 나타났다. 전체적으로 일정 유속에서 고체순환량이 증가할수록 상승관내 고체체류량이 더 농후하게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 일정한 고체순환량에서는 상승관의 유속이 클수록 고체 체류량은 작게 나타나는 것이 관찰되었다. 이는 고체순환량이 증가하면 상승하는 고체의 입자의 back-mixing이 증가하여 평균 고체체류시간이 증가하기 때문이다[11].

3.4. 기체우회

기체 우회를 확인하기 위하여 정상상태에 도달한 후 상단 반응기에 주입되는 기체와 각 반응기에서 배출되는 기체의 조성을 측정하고 후 CO₂와 air에 관한 물질수지식을 세우고, 기체우회율을 계산하였다. Table 2는 동일조건하에 3번 반복 실험한 실험결과를 나타내었다. 재현성을 확인한 후 air와 CO₂에 관한 물질수지를 정리하였으며 여러 조업조건에서 기체우회실험을 수행한 결과 하단 반응기의 배출기체의 유량이 주입기체의 유량보다 조금 높은 것으로 보아 주입기체중 일부가 하단반응기에서 상승관으로 기체 우회가 일어나는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 Song et al.[12]의 연구결과와 유사함을 알 수 있다. 본 연구결과에서 상단 반응기에서 하단반응기로 기체 우회는 최대 2.5%까지 나타남을 알 수 있었다. 한편 오리피스를 통하여 반응기간 입자가 수송되는 구조를 가지는 Ahn et al.[6]과 Song et al.[12]의 연구 결과에서 기체우회가 최대 60%까지 발생한 것과 비교하여 볼 때 본 연구에서의 각 단에서 단 간의 기체 우회는 매우 적음을 알 수 있다.

4. 결 론

다단계반응에 의하여 CO₂가 원천 분리된 수소생산을 위해 개발된 다단 내부순환 유동층 반응기에서 고체입자의 흐름특성과 기체 우회에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) J-valve내 주입기체의 유량이 커짐에 따라 J-valve내 입자들 간의 마찰이 줄어들어 고체흐름량이 증가하는 모습을 보였다. J-valve 상단의 기포반응기에서 고체입자층의 높이 증가는 입자 하층의 증가로 고체흐름량의 증가를 일으킨다. 입자의 체류시간은 주입 기체의 유속의 영향을 크게 받으며 고체순환량은 2.2×10^3 에서 23.4×10^3 kg/s까지 변하고 고체의 평균체류시간은 440에서 1,438 s까지 조절이 가능하였다.

2) 상승관내 입자의 평균체류시간을 구하기 위하여 고체체류량을 측정하고 고체체류량 분포는 Kunii and Levenspiel [10]이 제시한 freeboard entrainment model을 따르는 지수적 감소 형태를 나타내었다. 고체순환량과 상승관 주입 유속을 조절함으로써 상승관에서의 평균체류시간을 조절할 수 있다.

3) 본 연구에서 사용된 다단 내부순환유동층 장치에서 비기계적 밸브인 J-valve를 통한 각단 사이의 기체우회가 무시

할 만큼 적은 양을 나타내므로 반응기 간의 기체우회가 심한 내부순환유동층 장치의 단점을 보완할 수 있는 장치임을 확인하였다.

감 사

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환(2009T100100424)으로 수행되었습니다. 본 연구의 저자 중 이동현은 성균관대 GRRC Program을 통한 지원에 감사드립니다.

기호 설명

- A : Cross-sectional area [m²]
- d_p : Mean diameter [μm]
- F_s : Solid flow rate [kg/s]
- G_s : Solid circulation rate [kg/m²s]
- h : Height from bottom of J-valve [m]
- H_v : Height of horizontal part of valve [m]
- L_v : Length of horizontal part of valve [m]
- U_{mfr} : Minimum fluidization velocity [m/s]
- U_r : Gas velocity in riser [m/s]
- V₁ : Flow rate of inlet gas to bottom of J-valve [m³/s]
- V₂ : Flow rate of inlet gas to downcomer of J-valve [m³/s]
- V_{bed} : Inlet flow rate [m³/s]
- V_{CO2} : CO₂ flow rate [m³/s]
- V_i : Gas flow rate at each part [m³/hr]
- V_{in} : Inlet gas flow rate [m³/s]
- V_{out} : Outlet gas flow rate [m³/s]
- V_{sum} : Sum of V₁ and V₂ [m³/s]
- W_s : Inventory of solid [kg]
- X_{in} : CO₂ fraction of inlet gas [-]
- X_{out} : CO₂ fraction of outlet gas [-]
- z : Height of bed [m]
- Z_d : Ratio of whole height to measuring height [-]
- z_i : Height of bed at initial state [m]
- ΔL : Interval between two thermocouples [m]
- Δt : Time interval of peak
- ε_g : Fraction of gas [-]
- ε_s : Fraction of solid [-]
- ρ_b : Bulk density [kg/m³]
- ρ_g : Density of gas [kg/m³]
- ρ_s : Particle density [kg/m³]
- τ : Mean residence time [s]

참고문헌

1. Yerushalmi, J., "Circulating Fluidized Bed Technol.," eds. by P. Basu, Pergamon Press, New York, 1986 pp. 97-97.
2. Kim, S. W., "A Characteristics of Solid Recycle System with

- Loop-seal in a Circulating Fluidized Bed," *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **2**(2), 2339-2342 (1996).
3. Shun, D. W., "Study of a Nonmechanical Solid Valve(Loop Seal)," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **37**(6), 925-929 (1999).
 4. Grace, J. R., Avidan, A. A., and Knowlton T. M., *Circulating Fluidized Beds*, Blackie Academic & Professional, London, New York, 1996, pp. 242-242.
 5. Kim, S. W., "Effect of pressure on Solid Flow Characteristics in Recycle System of a Circulating Fluidized Bed," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(2), 1-7 (2010).
 6. Ahn, H. S., and Lee, W. J., "Solid Circulation and Gas Bypassing in an Internally Circulating Fluidized Bed with an Orifice-Type Draft Tube," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(5), 618-623 (1999).
 7. Kim, S. W., "Solid Recycle Characteristics of Loop-seals in a Circulating Fluidized Bed," *Chem. Eng. Technol.*, **24**, 843-849 (2001).
 8. Kunii, D., and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering, Boston, 1990, p. 377.
 9. Brereton, C. M. H., "Fluid Mechanics of High Velocity Fluidized Beds," Ph. D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, 1987.
 10. Kunii, D., and Levenspiel, O., "Entrainment of Solids from Fluidized Beds I. Hold-up of Solids in the Freeboard, II. Operation of Fast Fluidized Beds," *Powder Technol.*, **61**, 193-206 (1990).
 11. Smolder, K., and Baeyens, J., "Gas Fluidized Beds Operating at High Velocities: a Critical Review of Occurring Regimes," *Powder Technol.*, **119**, 269-291 (2001).
 12. Song, B. H., and Kim, Y. T., "Circulation of Solid and Gas Bypassing in an Internally Circulating Fluidized Bed with a Draft Tube," *Chem. Eng. J.*, **68**, 115-122 (1997).