

선택적 고체순환을 위한 2탑 유동층 시스템에서 고체분리속도에 미치는 조업변수들의 영향

류호정*[†] · 진경태* · 배달희* · 김흥기*^{***}

*한국에너지기술연구원 온실가스연구단
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
**충북대학교 공업화학과
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410
(2009년 3월 9일 접수, 2009년 3월 26일 채택)

Effects of Operating Variables on Solid Separation Rate in Two-interconnected Fluidized Beds System for Selective Solid Circulation

Ho-Jung Ryu*[†], Gyoung-Tae Jin*, Dal-Hee Bae* and Hong-Ki Kim*^{***}

*Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

**Department of Industrial Engineering Chemistry, Chungbuk National University,
410 Sungbong-ro, Heungduk-gu, Cheong-ju, Chungbuk 361-763, Korea

(Received 9 March 2009; accepted 26 March 2009)

요 약

선택적 고체순환을 위한 2탑 유동층 공정에서 고체분리기에 의한 고체분리속도에 미치는 조업변수들의 영향을 측정 및 고찰하였다. 본 연구에서 개발한 고체분리기를 이용하여 굵은입자(212~300 또는 425~600 μm)와 고운입자(63~106 μm)의 분리가 가능하였으며 고체분리속도는 66~987 g/min의 범위를 나타내었다. 고체분리속도는 고체분사노즐의 유속, 고체층 높이, 고체분사노즐의 직경, 고운입자와 굵은입자의 입자크기 차이, 고체분리기 금속망 간극크기 및 혼합입자 중 고운입자의 무게분율이 증가함에 따라 증가하였으며 유동화 속도의 영향은 크지 않았다.

Abstract – Effects of operating variables on solid separation rate in two-interconnected fluidized beds system for selective solid circulation have been investigated. Coarse(212~300 or 425~600 μm) and fine(63~106 μm) particles were separated using the solid separator and the solid separation rate was ranged from 66 to 987 g/min. The solid separation rate increased as the gas velocity through the solid injection nozzle, solid height, diameter of solid injection nozzle, particle size of coarse particles, aperture of the solid separator, and weight fraction of fines in the solid mixture increased. However, the effect of the fluidization velocity was negligible.

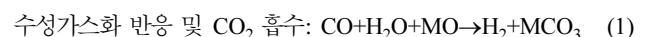
Key words: Solid Separation, Fluidized Bed, SEWGS, SESMR

1. 서 론

최근 수소에너지 및 연소전 CO₂ 회수에 대한 관심이 증대되면서, 회수증진 메탄 수증기 개질(Sorption Enhanced Steam Methane Reforming, SESMR) 공정과 회수증진 수성가스화(sorption Enhanced Water Gas Shift, SEWGS) 공정에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다[1-5]. SESMR 및 SEWGS 공정에서 개질반응기 또는 수성가스화 반응기에서는 개질촉매(또는 수성가스화 촉매)와 CO₂ 흡수제가 함께 반응하며 다른쪽 반응기에서는 CO₂ 흡수제의 재생반응이 일어나게 된다[1, 3, 5].

회수 증진 수성가스화 반응을 예로 들면, 수성가스화 반응기에서

는 식 (1)과 같이 수성가스화 촉매와 CO₂ 흡수제가 함께 존재하는 조건에서 CO가 H₂O와 반응하여 H₂와 CO₂를 생성하며, 발생된 CO₂는 금속산화물(MO, metal oxide) 계열의 CO₂ 흡수체에 흡수된다. CO₂를 흡수한 흡수체는 재생반응기에서 열에 의해 CO₂를 배출하고 초기상태의 금속산화물로 재생된다[5].



이와 같은 공정에서 CO₂ 흡수체는 수성가스화 반응기와 재생반응기 사이를 순환하면서 CO₂ 흡수-재생을 반복하지만 수성가스화 촉매의 경우에는 재생반응기로 이동할 필요가 없으며, 수성가스화 반응기에 계속적으로 체류하는 것이 공정에 적합하다. 하지만 두 가지 입자(촉매 및 흡수제)가 혼합된 고체혼합물 중에서 하나의 입자

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hjryu@kier.re.kr

를 선택적으로 순환하는 것은 매우 어려우며 지금까지는 촉매와 흡수제를 모두 순환시키면서 수성가스화반응과 재생반응을 모두 거치는 공정들이 고려되고 있다. 수성가스화 촉매가 재생반응기로 순환되면 입자의 마모에 의한 손실이 증가하며 고온에서 조업되는 재생반응기에 도입되면서 열충격에 의한 촉매 활성 저하가 일어날 수 있다. 결과적으로 회수증진 수성가스화 공정의 성능과 경제성 개선을 위해서는 수성가스화 촉매와 CO₂ 흡수제가 혼합되어 있는 고체 혼합물 중에서 CO₂ 흡수제를 선택적으로 재생반응기로 순환시킬 수 있는 시스템의 개발이 필요하다[3]. 또한, 수성가스화 반응기와 재생반응기 사이의 고체순환을 위해서는 유동층 반응기의 적용이 필요하며, 수성가스화 촉매와 CO₂ 흡수제 중 CO₂ 흡수제만 선택적으로 순환시킬 수 있는 2탑 유동층 시스템의 개발이 필요하다.

유동층 반응기에서 고체혼합물의 선택적 분리를 위한 방법으로는 주로 고체입자의 밀도 또는 입자크기 차이에 의한 입도분리(segregation) 현상을 이용하는 방법과 사이클론의 정밀한 설계에 의해 가볍고 작은 입자와 무겁고 큰 입자로 분리하는 방법들이 사용되어 왔다. 하지만 입도분리 현상을 이용하는 경우 입자들의 밀도차이나 입자크기 차이가 크지 않은 경우에는 사용할 수 없으며, 완벽한 분리가 불가능한 단점이 있다. 또한 사이클론을 이용하는 경우에는 두 가지 고체혼합물을 사이클론으로 이송시켜야 하므로 고속유동층(fast fluidized bed)이 사용되어야 하는데, 고속유동층의 경우 기체체류시간이 짧아 촉매 또는 흡수제의 반응속도가 높지 않은 경우에는 적용하기 어려우며 입도분리 현상을 이용하는 경우와 마찬가지로 완벽한 입도분리가 불가능하다. 결과적으로 두 가지 고체혼합물 중에서 하나의 고체입자를 선택적으로 순환시킬 수 있으면서 유동층 내부에서 기체의 체류시간을 증가시킬 수 있고(즉, 기포유동층 조건에서도 적용 가능하고) 분리효율 및 분리속도가 높은 새로운 공정의 개발이 필요하다.

최근 Ryu 등[6]은 금속망(metal screen)을 설치한 고체분리기를 유동층 내부에 삽입하여 비교적 적은 입도차이(고온입자: 63~106 μm, 굵은입자: 212~300 μm)를 갖는 혼합입도 중에서 고온입자를 선택적으로 분리할 수 있음을 실증하였으며 고체분리속도는 4.4~127 g/min의 범위를 나타내었다. Ryu 등[6]의 연구는 유동층 반응기에서 고체혼합물의 선택적 분리를 위한 방법으로 사용되던 입도분리(segregation) 현상과 사이클론을 이용하는 기존의 방법들에 비해 입도차이가 적은 입자를 분리할 수 있으며 완벽한 입도분리가 가능하다는 장점이 있다. 한편 Ryu 등[7, 8]은 두 가지 반응이 일어나는 유동층 사이에서 고체입자의 순환을 위해 사용하던 기존의 3탑 유동층 시스템(고속유동층-기포유동층-기포유동층)의 단점(복잡한 공정구성, 2~3개의 루프실 필요)을 극복하기 위해 고체분사노즐의 개념을 적용하였으며 기존 시스템에 비해 층내 기체체류시간을 증가시킬 수 있고 루프실없이 기포유동층-기포유동층의 2탑 유동층으로 조업가능한 고체순환시스템을 개발하여 각 변수의 영향을 측정 및 해석하였으며 장기연속운전을 실증한 바 있다. 또한 Ryu 등[9]은 고체분사노즐에 의해 분사되는 고체를 금속망에 접촉시키는 방법을 사용하여 Ryu 등[6]의 연구에 사용된 내부장착형 고체분리기의 고체분리속도(4.4~127 g/min)를 더욱 증가(66~453 g/min)시킨 바 있으며 고체분리-재순환이 통합된 2탑 연결 유동층에서 약 20시간까지 장기연속운전을 실증한 바 있다.

본 연구에서는 Ryu 등[9]의 연구에서 개발한 고체분사와 금속망에 의한 고체분리기의 고체분리속도에 미치는 조업변수들의 영향에

대해 추가적인 변수실험을 수행하였으며, 이를 통해 고체분리속도의 증대 가능성을 확인하였고 실제 고체분리기의 설계에 적용하기 위한 기초자료를 얻고자 하였다. 실험변수로는 고온입자와 굵은입자의 입도분포 차이, 고온입자와 굵은입자의 혼합비율, 고체분리기 금속망의 간극크기, 고체층 높이, 유동화 유속, 고체분사노즐의 직경, 고체분사노즐의 유속 등을 고려하였다.

2. 실험

Fig. 1에는 고체분리속도 측정에 사용한 유동층 실험장치를 나타내었다. 전체 실험장치는 플레넘(plenum), 유동층, 고체분리기, 고체분사노즐, 사이클론 및 고체포집을 위한 밸브 등으로 구성되어 있다. 플레넘은 직경 0.15 m, 높이 0.15 m이며 바닥에서 0.09 m 높이에서 유동화기체가 주입되도록 하였다. 기체분산판은 플레넘과 유동층 사이에 위치하며, 1 mm의 구멍이 24개 뚫려있는 다공판(perforated plate)을 사용하였다. 유동층은 하부, 상부의 투명 아크릴관과 가운데 고체분리기의 세 부분으로 구성되어 있으며 직경은 모두 0.15 m, 높이는 아래쪽부터 0.5, 0.3, 0.3 m로 총 높이는 1.1 m가 되도록 하였다. 최소유동화속도의 측정과 원활한 유동화상태의 확인을 위해 차압형 압력변환기(SIEMENS, Smart Type, 0~1,000 mmH₂O)를 설치하였으며 데이터수집 시스템(Agilent, 34970A)에 의해 기록 및 저장되었다. 유동화기체와 고체분사용 기체로는 공기를 사용하였으며 질량유량계(MFC, Brooks, 5851E, 5850E)를 이용하

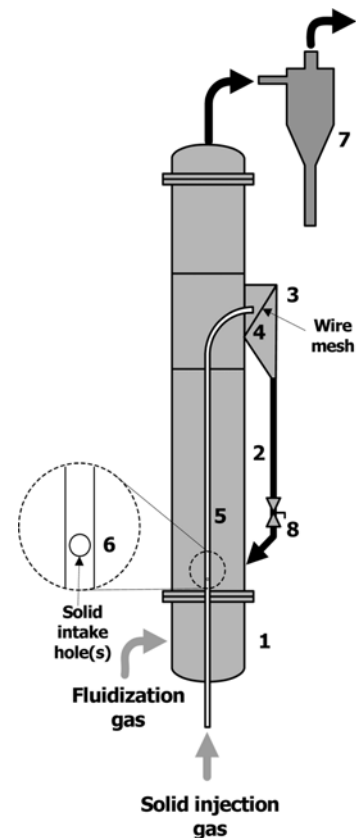


Fig. 1. Schematic of solid separation test apparatus.

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| 1. Plenum | 5. Solid injection nozzle |
| 2. Fluidized bed | 6. Solid intake hole(s) |
| 3. Solid separator | 7. Cyclone |
| 4. Wire mesh | 8. Valve |

여 주입하였다.

고체의 입도분리 실험을 위한 충물질로는 입도분포가 다른 세 종류의 유리구슬(glass bead)이 사용되었으며 입도분포에 따라 고운입자(fine, 63~106 μm)와 굵은입자(coarse, 212~300 또는 425~600 μm)로 구분하였다.

고체분리기 내부에는 수직선으로부터 30° 각도를 갖도록 금속망(180 또는 425 μm)을 설치하였으며(Fig. 1의 4) 금속망을 통과해 안쪽으로 이동한 고운입자는 고체분리기 하부의 고체순환관과 밸브를 거쳐서 유동층으로 재순환되도록 하였다. 고체분리기 내부 금속망의 면적은 0.017 m^2 였다.

유동층의 내부에는 플레넘과 분산관을 관통하여 고체분리기 입구까지 연결된 고체분사노즐을 설치하였다. 고체분사노즐에는 고체유입구멍(Fig. 1의 6)이 뚫려있으며 이 구멍을 통해 고체입자가 유입된다. 고체입자 분사방법은 다음과 같다. 혼합입도의 충물질을 유동층에 장입한 후 일정 유속에서 유동화시킨다. 유동화된 고체는 유체(fluid)와 같은 흐름특성을 지니므로 고체분사노즐의 고체유입구멍을 통해 내부로 유입된다. 이 상태에서 고체분사노즐 하부에서 기체를 주입하면 고체유입구멍을 통해 유입된 고체가 상부로 이송되며 고체분리기의 금속망에 고체를 분사한다. 고체분사노즐을 이용한 고체분사방법의 원리 및 여러 변수들의 영향에 대해서는 Ryu 등 [7,8]의 보고에 자세히 나타나 있다.

실험방법은 다음과 같다. 먼저 고운입자(fine, 63~106 μm)와 굵은입자(coarse, 212~300 또는 425~600 μm)를 일정 혼합비로 혼합하여 유동층에 주입하고 원하는 유속에서 유동화시킨다. 층의 압력 강하가 거의 일정해지면 고체분사용 기체를 주입하여 혼합입도의 고체입자를 고체분리기에 분사한다. 분사된 고체는 고체분리기 내부에 설치된 금속망과 접촉하고 금속망의 간극(aperture)보다 작은 입자는 고체분리기 내부로 이동한 후 중력에 의해 떨어져 재순환관을 통해 유동층으로 재순환된다. 고체분리속도 측정을 위해 먼저 재순환관의 밸브 위쪽으로 임의 높이에 눈금을 표시하고, 밸브와 눈금선 사이에 채워지는 고체의 무게를 측정하였다. 다음으로는 각 조업조건에서 정상적인 입도분리와 고체순환이 이루어짐을 확인한 후 재순환관의 밸브를 순간적으로 차단하여 일정높이까지 고체가 채워지는데 걸리는 시간을 측정하여 고체분리속도(solid separation rate, g/min)를 계산하였다.

본 연구에서는 고운입자와 굵은입자의 입도분포 차이, 고운입자와 굵은입자의 혼합비율, 고체분리기 금속망의 간극크기, 고체층 높이, 유동화 유속, 고체분사노즐의 직경, 고체분사노즐의 유속 변화를 측정 및 고찰하였으며 실험조건 및 변수를 Table 1에 요약하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

고체분리기를 이용한 고운입자의 분리여부를 확인하기 위해 고체분사노즐을 통해 이송되어 고체분리기의 금속망을 통과하고 재순환관으로 분리된 고체를 채취하여 표준체(140 mesh, 106 μm)를 이용하여 입도를 측정하였다. 분리된 고운입자는 모두 106 μm 이하였으며 결과적으로 고체분리기를 이용하여 고운입자의 분리가 가능함을 확인하였다.

Fig. 2(a)와 (b)에는 대표적으로 고체분사노즐의 내경이 7.5 mm(고체유입구멍 직경 5 mm, 구멍 개수 4개)인 경우, 굵은입자와 고운입자를 212~300 μm , 63~106 μm 로 선택하여 1:2의 비율로 혼합한 경우와 425~600 μm , 63~106 μm 로 선택하여 1:1의 비율로 혼합한 경우 각각에 대해 고체분사노즐의 유속, 고체층 높이 및 유동화속도의 변화에 따른 고체분리속도의 변화를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 조건에서 고체분사노즐의 유속이 증가함에 따라 고체분리속도가 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 Ryu 등 [7,8]의 보고에 나타난 바와 같이 고체분사노즐의 유속이 증가함에 따라 고체이송능력이 증가하여 고체분리기의 금속망에 접촉할수 있는 고체량이 증가하기 때문으로 사료되었다. 또한 측정된 고체분리속도는 Fig. 2(a)와 (b) 모두에서 고체층의 높이가 증가함에 따라 증가하였으며 이와 같은 경향은 고체유입구멍(Fig. 1의 6) 상부에 존재하는 고체의 높이가 증가함에 따라 아래 방향으로 작용하는 압력이 증가하므로 고체유입구를 통한 고체유입속도가 증가하기 때문으로 사료되었다[7,8]. 한편 Fig. 2(a)와 (b) 모두에 대해, 본 연구의 유속범위 내에서 기포유동층의 유동화속도 변화는 고체분리속도에 큰 영향을 미치지 않았는데, 이와 같은 경향은 층 내부가 유동화되어 기포유동층 조건에 해당하는 경우, 고체유입구를 통한 고체유입속도는 거의 일정하게 유지되는 것을 의미한다[6-9]. 따라서, 이후의 그림에서는 세 가지 유속에서 측정된 고체분리속도의 평균값을 도시하였다.

Fig. 3(a)부터 (c)까지에는 고체분리속도에 미치는 고체분사노즐 직경의 영향을 나타내었다. 그림에는 굵은입자(212~300 μm)와 고운입자(63~106 μm)가 1:2로 혼합되어 있고, 고체분리기 금속망의 간극이 180 μm 인 경우를 나타내었으며 각 고체분사노즐은 직경이 다르지만(3.7, 7.5 mm), 같은 높이에 직경(5 mm)과 개수(4개)가 같은 고체유입구멍을 갖고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 고체층 높이에서 고체분사노즐의 직경이 증가할수록 고체분리속도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 고체분사유속이 낮은 경우에도 고체분리속도가 더 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 고체분사노즐의 직

Table 1. Summary of experimental conditions and variables

Item	Values	
	Fine (63~106 μm) + Coarse (212~300 μm)	Fine (63~106 μm) + Coarse (425~600 μm)
Solids (glass beads)	Fine (63~106 μm) + Coarse (212~300 μm)	Fine (63~106 μm) + Coarse (425~600 μm)
Mixing ratio of fine to coarse	2	1, 2, 3
Aperture of solid separator [μm]	180	180, 425
Separation area [m^2]	0.017	0.017
Static bed height [m]	0.3, 0.4, 0.5	0.3, 0.4, 0.5
Fluidization velocity [m/s]	0.016, 0.024, 0.032	0.028, 0.042, 0.056
Solid injection nozzle inside diameter [mm]	3.7(1/4"), 7.5(3/8")	7.5(3/8")
Solid intake hole diameter [mm]	5	5
No. of solid intake holes [#]	4	4
Solid injection velocity [m/s]	1.08~2.95	1.19~1.67

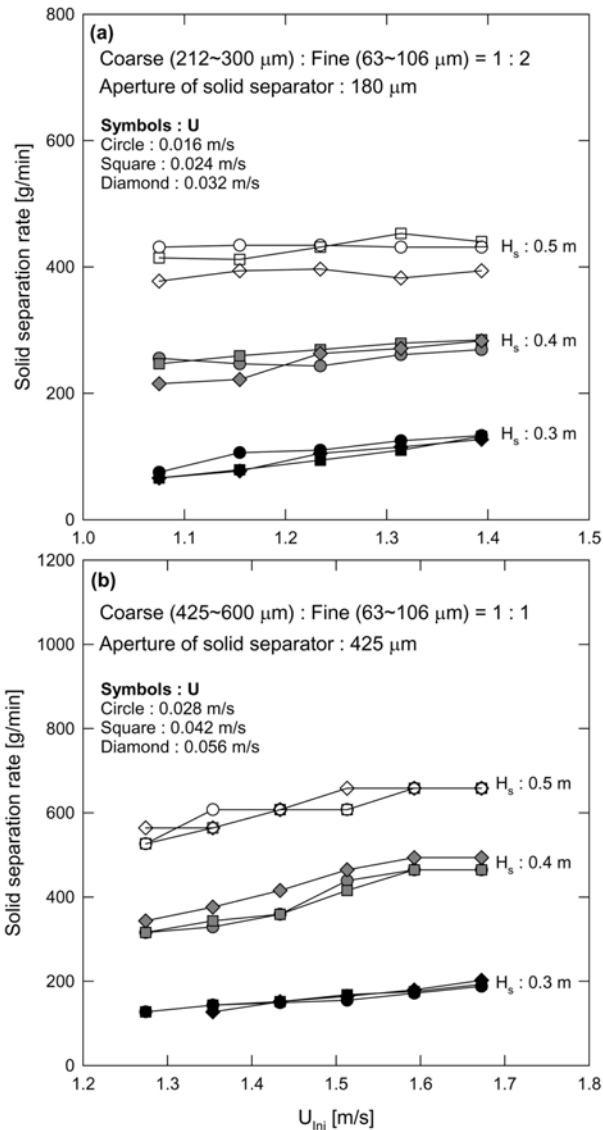


Fig. 2. Effects of fluidization velocity, solid injection velocity, and solid height on solid separation rate(solid injection nozzle I.D. = 7.5 mm).

경이 증가함에 따라 고체이송능력이 증가하여 고체분리의 금속망에 접촉할 수 있는 고체량이 증가하기 때문에 사료되었다[7,8]. 또한 Fig. 3(a), (b), (c)를 비교하면 고체층 높이가 증가할수록 고체분사노즐 직경 변화에 따른 고체분리속도 차이가 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 고체층 높이가 증가할수록 고체분사노즐 직경 변화에 따른 고체분사량 차이가 증가한다는 기존 보고[7,8]와 동일한 경향을 나타내었다. 결과적으로 고체분리속도를 증가시키기 위해서는 고체분사노즐의 직경이 큰 경우가 유리하다. 하지만, 고체분사노즐의 직경이 큰 경우 고체분사를 위해 필요한 유량이 증가하므로 실제 공정설계를 위해서는 고체분리속도 측면과 고체분사유량 측면을 함께 고려해야 한다. Fig. 3의 실험결과를 살펴보면, 고체분사유속의 경우 고체분사노즐 3.7 mm의 경우 1.64~2.95 m/s, 7.5 mm의 경우 1.08~1.39 m/s로 고체분사노즐의 직경이 큰 경우가 낮지만 고체분사유량은 고체분사노즐 3.7 mm의 경우 1.0~1.8 l/min, 7.5 mm의 경우 2.7~3.5 l/min로 고체분사노즐의 직경이 큰 경우가 높다. 실제 공정에서 고체분사를 위한 기체로는 스팀이 주로 사용되며 고체

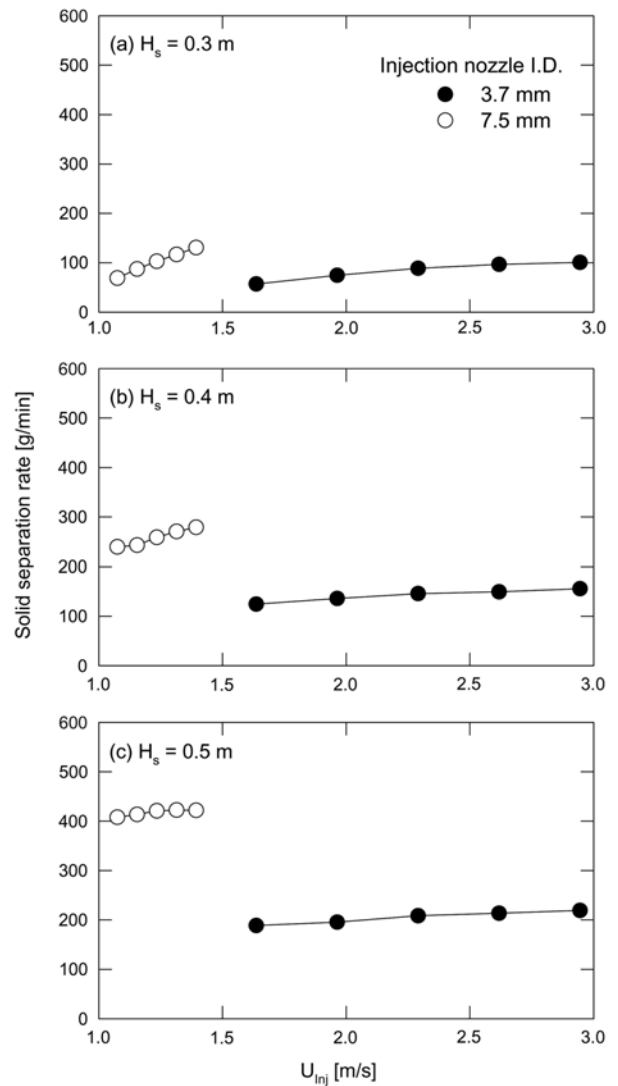


Fig. 3. Effect of inside diameter of the solid injection nozzle on the solid separation rate(coarse(212~300 μm) : fine (63~106 μm) = 1:2, aperture of solid separator = 180 μm).

분사용 스팀은 대부분 반응에 참여하지 않고 배출되므로 전체 스팀 사용량이 증가할 경우 전체 공정의 경제성이 저하되는 역할을 할 수 있다. 한편 Fig. 2에 나타난 바와 같이 고체층 높이가 고체분사노즐의 유속이 증가함에 따라 고체분리속도가 증가하였다.

Fig. 4(a)부터 (c)까지에는 고체분리속도에 미치는 굵은입자와 고운입자의 입도분포 차이 영향을 나타내었다. 그림에는 굵은입자와 고운입자의 혼합비가 1:2, 고체분사노즐의 직경 7.5 mm, 고체분리기 금속망의 간극 180 μm인 경우를 나타내었으며 고운입자의 크기 분포는 63~106 μm로 일정하고, 굵은입자의 크기분포가 212~300 μm인 경우와 425~600 μm인 경우를 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 굵은입자의 크기가 클 경우, 즉 고운입자와 굵은입자의 입도분포 차이가 클수록 고체분리속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향을 나타내는 이유로는 (1) 굵은입자의 크기 변화에 의한 고체분리기에 분사되는 고체량(고체분사속도) 변화와, (2) 분사된 고체 중 고운입자의 무게분율 변화를 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서는 두 가지 영향 중 어떤 영향이 주된 요인인지를 해석하기 위해 추가실험을 수행하였다. 추가실험에서는 Fig. 1의 5

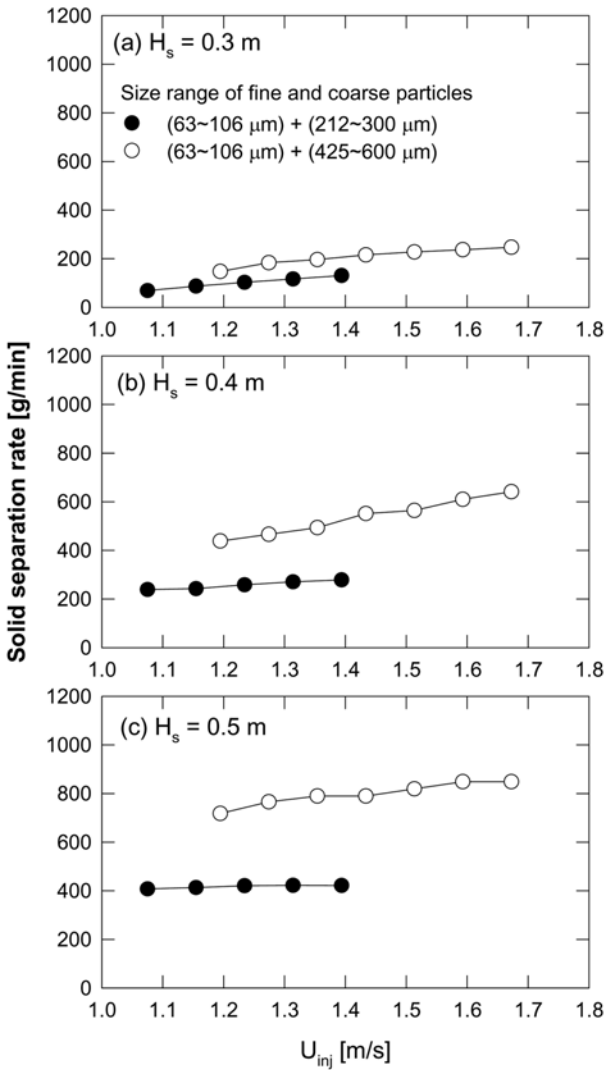


Fig. 4. Effect of particle size range on the solid separation rate(coarse: fine = 1 : 2, solid injection nozzle I.D. = 7.5 mm, aperture of solid separator = 180 μm).

로 표시된 고체분사노즐을 통해 분사되는 고체의 양을 측정하기 위해, 고체분리기가 설치되어 있는 컬럼과 그 상부의 컬럼을 제거하였으며, 고체분사노즐에서 분사되는 고체를 호퍼에 포집하였다. 서로 다른 굵은입자를 갖는 혼합입도의 입자를 공급하는 과정과 초기 유동화 상태에서 고체유입구멍을 통해 고체가 유입될 수 있으므로 실험에서는 고체분사노즐을 통해 배출된 입자중 초기에 배출되는 입자(100~150 g)를 제외한 나머지 입자들을 분석하였다.

Fig. 5(a)와 (b)에는 고체층 높이 0.3, 0.4 m에서 굵은입자의 입자 크기가 변화할 때 고체분사노즐의 유속변화에 따른 고체분사량의 변화 및 분사된 고체중 고운입자의 분율 변화를 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 고체층의 높이가 증가함에 따라 고체분사량이 증가하는 일반적인 경향을 나타내었으며 굵은입자의 크기가 증가함에 따라 고체분사량이 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 고체층 높이와 굵은입자의 크기 변화에 따라 측정된, 분사된 고체중 고운입자의 무게분율은 거의 차이가 없었으며, 굵은입자와 고운입자의 초기혼합비율(1:2)에 의해 계산된 고운입자의 분율인 0.667과 유사한 값인 평균 0.675를 나타내

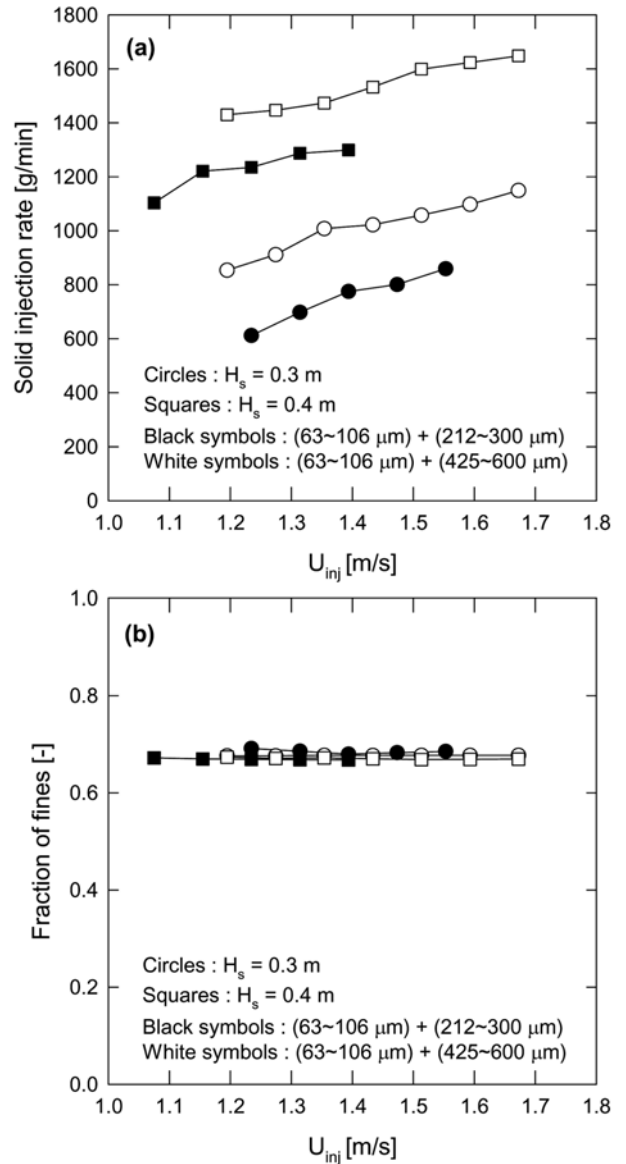


Fig. 5. Effect of particle size range on the solid injection rate and fraction of fines(coarse : fine = 1 : 2, solid injection nozzle I.D. = 7.5 mm, aperture of solid separator = 180 μm).

었다. 결과적으로 Fig. 4에서 굵은입자의 크기가 증가할 때 고체분리속도가 증가하는 경향은 고체분사량이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 또한 굵은입자의 크기증가에 따른 고체분사량의 증가는 두 가지 고체혼합물의 벌크밀도(bulk density) 차이로 해석할 수 있다. 본 연구에서 사용한 두 가지 고체혼합물의 벌크밀도는 굵은입자(212~300 μm)와 고운입자(63~106 μm)를 1:2로 혼합한 경우는 1,539 kg/m³이었으며, 굵은입자(425~600 μm)와 고운입자(63~106 μm)를 1:2로 혼합한 경우에는 1,687 kg/m³으로 나타났다. 이와 같이 굵은입자의 크기증가에 의한 벌크밀도의 증가는, 같은 고체층 높이에서, 고체유입구멍(Fig. 1의 6) 상부에 존재하는 고체에 의해 아래 방향으로 작용하는 압력을 증가시키게 되며, 이에 의해 고체유입구를 통한 고체유입속도를 증가시켜 고체분사량을 증가시킨다[7, 8].

Fig. 6(a)부터 (c)까지에는 고체분리속도에 미치는 고체분리기 금속망 간극크기의 영향을 나타내었다. 그림에는 굵은입자(425~600 μm)

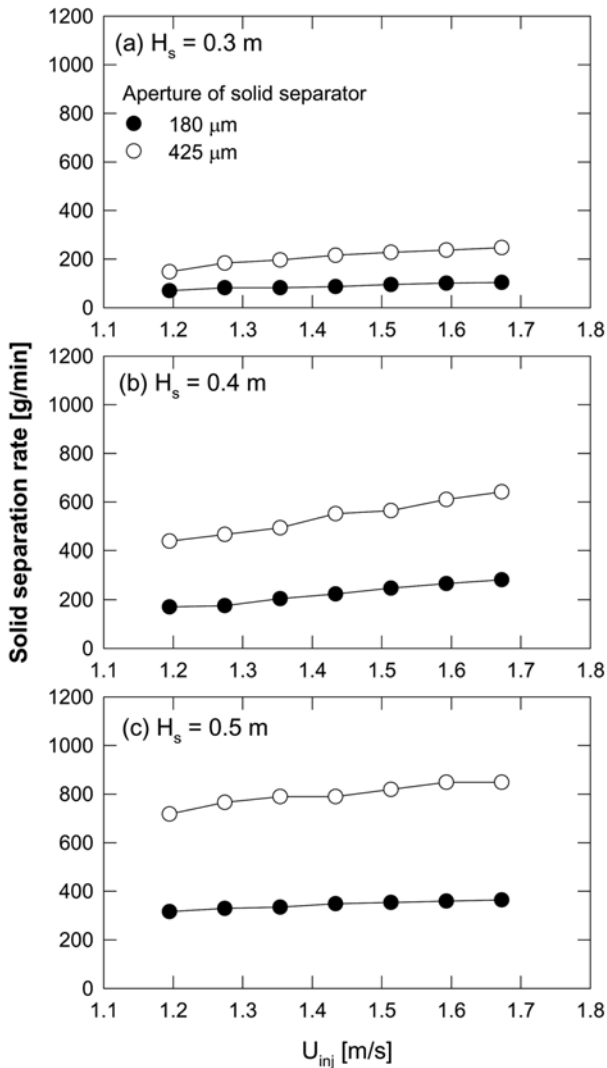


Fig. 6. Effect of the solid separator aperture on the solid separation rate(coarse(425~600 μm) : fine(63~106 μm) = 1:2, solid injection nozzle I.D. = 7.5 mm).

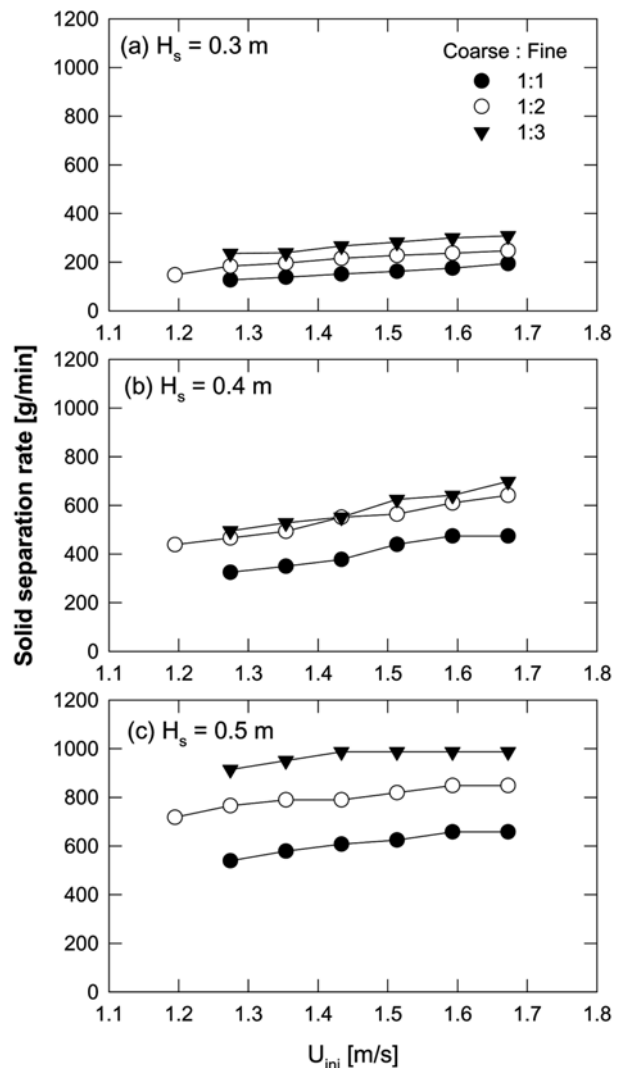


Fig. 7. Effect of solid mixing ratio on the solid separation rate(coarse = 425~600 μm, fine = 63~106 μm, solid injection nozzle I.D. = 7.5 mm, aperture of solid separator = 425 μm).

와 고운입자(63~106 μm)의 혼합비가 1:2, 고체분사노즐의 직경 7.5 mm인 경우를 나타내었으며 금속망의 간극크기가 180 μm(80 mesh)인 경우와 425 μm(40 mesh)인 경우를 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 금속망의 간극크기가 증가할수록 고체분리속도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 간극의 크기가 증가할수록 고운입자가 통과할 확률이 증가하기 때문이며, 고운입자와 굵은입자의 입도분포 중에서 굵은입자의 하한입경 정도의 간극을 갖는 금속망을 사용하여 고체분리속도를 증가시킬 수 있음을 의미한다. 예를 들면, Fig. 2(a)의 경우와 같이 굵은입자로 212~300 μm, 고운입자로 63~106 μm의 입자를 사용할 경우, 180 μm의 간극을 갖는 금속망보다는 212 μm의 간극을 갖는 금속망을 사용하는 경우에 고체분리속도가 증가하는 것을 예상할 수 있다. 한편, Fig. 4와 6을 함께 고려하면, 굵은입자와 고운입자의 입도차이가 클수록 고체분리속도가 증가하며, 입도차이가 큰 경우 금속망의 간극을 크게 설치할 수 있으므로 고체분리속도를 더욱 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 하지만 굵은입자와 고운입자의 입도차이가 너무 큰 경우 기포유동층 내에서 입도분리(segregation)가 일어날 수 있으므로 주

의가 필요하다. Fig. 7(a)부터 (c)까지에는 고체분리속도에 미치는 굵은입자와 고운입자의 혼합비를 영향을 나타내었다. 그림에는 굵은입자로 425~600 μm의 입자를, 고운입자로 63~106 μm의 입자를 사용하고 고체분사노즐의 직경 7.5 mm, 금속망의 간극크기가 425 μm(40 mesh)인 경우에 굵은입자와 고운입자의 혼합비율이 각각 1:1, 1:2, 1:3인 경우를 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 고운입자의 혼합비가 증가할수록 고체분리속도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 고운입자의 무게분율이 증가할수록 고체분사노즐을 통해 분사되는 고체량 중 고운입자의 분율이 증가하여 고운입자가 고체분리의 금속망에 접촉할 횟수가 많아지기 때문으로 사료되었다. 본 연구에서 측정된 고체분리의 고체분리속도를 종합적으로 고려하면 본 연구의 실험범위 내에서 유통화속도, 고체층의 높이, 고체분사노즐의 유속, 고체분사노즐의 직경, 입도분포 차이, 금속망 간극 크기 및 굵은입자와 고운입자의 혼합비율 변화에 따라 66~987 g/min의 변화범위를 나타내었으며 결과적으로 각 변수의 조절을 통해 원하는 고체분리속도를 얻기 위한 고체분리 및 고체분사노즐의

설계 및 설치방법을 도출할 수 있다. 한편 본 연구의 조업조건에서는 Ryu 등[6]의 결과(4.4~127 g/min) 및 Ryu 등[9]의 결과(66~453 g/min)에 비해 고체분리속도를 더욱 증가시킬 수 있었다.

4. 결 론

선택적 고체순환이 가능한 신개념 2탑 유동층 공정에 적용하기 위한 고체분리기의 고체분리속도에 미치는 여러 변수들의 영향을 고찰하였다. 본 연구의 실험범위에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 개발한 금속망을 이용한 고체분리기를 이용하여 굵은입자(212~300 또는 425~600 μm)와 고운입자(63~106 μm)의 분리가 가능하였으며 본 연구의 실험범위에서 고체분리속도는 66~987 g/min의 범위를 나타내었다.

(2) 고체분리기에 의한 고체분리속도는 고체분사노즐의 유속, 고체층 높이, 고체분사노즐의 직경이 증가함에 따라 증가하였으며 유동화 속도의 영향은 크지 않았다.

(3) 또한 고체분리속도는 고운입자와 굵은입자의 입자크기 차이, 고체분리기 금속망 간극크기 및 혼합입자 중 고운입자의 무게분율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

(4) 본 연구를 통해 고체분리기의 설계와 조업조건 선정에 관한 기초자료를 얻을 수 있었으며, 고체분사노즐 직경을 선정할 경우에는 고체분사유량에 대한 세밀한 고려가 필요하며, 고운입자와 굵은입자의 입도차이를 선정할 경우에는 입도분리현상에 대한 확인이 필요하다.

감 사

본 연구는 지식경제부 에너지·자원기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

H_s : solid height in the fluidized bed [m]

U : fluidization velocity [m/s]

U_{inj} : gas velocity through the solid injection nozzle [m/s]

참고문헌

1. Ryu, H. J., "Process Design and Selection of Operating Conditions for SMART System," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **18**(1), 1-11(2007).
2. Ryu, H. J., "Hydrogen Generation Characteristics of SMART System with Inherent CO₂/H₂ Separation," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **18**(4), 382-390(2007).
3. Ryu, H. J., Yi, C. K., Shun, D. and Jin, G. T., "Conceptual Design and Performance Estimation of SEWGS Process for Precombustion CO₂ Capture," *Theories and Applications of Chem. Eng.*, KICChE, **14**(2), 294(2008).
4. Cobden, P. D., van Beurden P., Reijers, H. Th. J., Elzinga, G. D., Kluiters, S. C. A., Dijkstra, J. W., Jansen, D. and van den Brink, R. W., "Sorption Enhanced Hydrogen Production for Pre-combustion CO₂ Capture: Thermodynamics Analysis and Experimental Results," *Int. J. of Greenhouse Gas Control*, **1**, 170-179(2007).
5. Lee, K. B., Verdooren, A., Caram, H. S. and Sircar, S., "Chemisorption of Carbon Dioxide on Potassium-carbonate-promoted Hydrotalcite," *J. of Colloid and Interface Science*, **308**, 30-39(2007).
6. Ryu, H. J., Park, Y. C., Lee, S. Y. and Kim, H. K., "Development of Solid Separator for Selective Solid Circulation in Two-interconnected Fluidized Beds System," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(2), 195-202(2009).
7. Ryu, H. J., Park, Y. C., Jo, S. H. and Park, M. H., "Development of Novel Two-Interconnected Fluidized Bed System," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **25**(5), 1178-1183(2008).
8. Ryu, H. J., Park, J., Kim, H. K. and Park, M. H., "Solid Circulation Characteristics in a 3 kW Chemical-looping Combustor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(6), 1057-1062(2008).
9. Ryu, H. J., Jang, M. S., Kim, H. K. and Lee, D. K., "Development of Two-interconnected Fluidized Beds System for Selective Solid Circulation," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(2), 195-202(2009).