

Spout-Fluid형 유동층에 있어서 대립자의 선택적 배출

김용하[†] · 이일옥* · 김행구* · 정선광* · 오창섭**

부경대학교 화학공학과

*포항산업과학연구원 용융환원프로젝트팀

**호서대학교 화학공학과

(2001년 4월 13일 접수, 2001년 6월 5일 채택)

Selective Discharge of Coarse Particles in a Spout-Fluid Type Fluidized Bed

Yong-Ha Kim[†], Il-Ock Lee*, Hang-Goo Kim*, Sun-Kwang Jeong* and Chang-Sup Oh**

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

*Smelting Reduction Project Team, Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-330, Korea

**Department of Chemical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

(Received 13 April 2001; accepted 5 June 2001)

요 약

유동층로에서 대립자에 의한 不流動을 미연에 방지하면서 안정된 유동조업을 장기간 유지하기 위해서는 대립자를 조업중에 선택적으로 배출시키는 기술이 중요하다. 본 연구에서는 가스-고체 유동층에서 원추형 가스분산판의 중앙에 spout tube를 연결 부착하여 로내에 공급된 입자중 유동에 지장을 줄 우려가 있는 대립자를 선택적으로 배출하는데 있어서 장치와 운전조건에 따른 입자 분리의 특성을 밝히고자 하였다. 이를 위해 직경 10 cm의 spout-fluid형 상온 유동층 시스템을 설치하고, 모사 입자로써 glass beads를 사용했을 때 조업 변수의 변화에 따른 배출 속도와 분리 효율 등을 파악하였다. 대립자의 배출 속도와 분리 효율에는 spout tube내 가스유속이 가장 지배적인 변수로 작용하였다. 대립자의 분리효율을 90%이상으로 유지하는데는 미립자내 최대입자의 입경을 기준한 입자 종말속도의 3.0배이상의 가스유속이 spout tube내 가스유속으로 설정되어야 했다. Spout tube내 가스유속이 낮은 경우 대립자의 배출 속도를 어느 수준으로 유지하는데 문제가 없다면 spout tube의 직경을 축소하는 것이 분리 효율은 높이고도 spout tube로의 가스 공급량은 감소시키는 효과가 있었다. 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률이 낮아질수록, 대립자의 입경이 작을수록 그리고 층내 유동성이 떨어질수록 대립자의 효율적 분리가 어려워짐 등을 유동층 공정의 설계와 실제 조업에서 충분히 고려해야 한다.

Abstract – In a fluidized-bed operation, unwanted particles larger than a designed size can be introduced unexpectedly or form during the operation in a reactor. These large particles should be removed from the bed during the operation, otherwise a long-term stable operation is impossible due to defluidization phenomena caused by them. For this purpose, the present study examined a spout-fluid type fluidized bed reactor of which conical gas distributor had a spout tube(outlet) in its center, using glass beads as solid particles to be simulated. In the removal of large particles from a fluidized bed, the gas velocity in the spout tube was found to be one of the most important factors. In order to obtain more than 90% separation efficiency of unwanted coarse particles from fine particles, the gas velocity in the spout tube had to be kept at least 3.0 times higher than the terminal velocity for the largest particle size of fine particles. The separation efficiency decreased as the portion and the size of coarse particles decreased and as the fluidization in the bed became worse. It was also found that if the discharge of coarse particles through the spout tube was not affected by the decrease of inner diameter of the tube, the smaller inner diameter of the tube showed the better separation efficiency at a low gas velocity in the tube.

Key words: Spout-fluid Bed, Coarse Particle-selective Discharge, Center Outlet

1. 서 론

용융환원과 직접제철법은 현재의 용광로법을 대체 내지는 보조할 차세대의 제철법으로써 주목받으며 연구개발이 진행되고 있다. 여러 가지

방식이 제안, 연구되고 있는데 원료공급의 안정 측면에서 분철광석의 직접사용을 전제조건으로 하고 있어 철광석의 가스환원에는 공통적으로 유동층을 택하고 있다. 즉 DIOS(일)의 경우는 sinterfeed, 즉 -8 mm 정도의 분철광석을 사전처리없이 기포유동층에 투입 예열하고 FeO까지 예비환원한 후 최종환원의 용융환원로에 공급하는 방식을[5] 그리고 HIs melt(호주)의 경우에는 -1 mm의 분철광석을 순환유동층에서 예

[†]E-mail: yhkim@mail.pknu.ac.kr

비환원 환후 용융환원로로 공급하는 방식을 [2], FINEX(한/오스트리아)와 FINMET(베네주엘라/오스트리아)에서는 각각 -8 mm와 -12 mm의 분철광석을 3단과 4단의 다단식 기포유동층에서 예열, 예비 및 최종환원하여 용융가스화로에 투입 또는 환원철로 제품화하는 방식을 개발중에 있다[4, 8].

이와같은 유동층 환원로의 개발에 있어서 -8—12 mm 철광석의 사용은 pelletfeed와 sinterfeed를 거의 대부분 사용할 수 있다는 것이며 이는 원료 대응성면에서 중요한 사항으로 이와 관련된 유동화 기술의 확보가 필요하다. 일반적으로 유동층에서 사용되는 입자는 입도가 비교적 균일해야 하는데 이는 층내 유동성을 안정되게 유지하고 비산 내지는 불유동을 초래할 가능성이 있는 입자군을 미리 제거해야 하기 때문이다. 따라서 유동층에 대한 대부분의 연구 역시 제한된 입경을 가진 입자의 유동성을 규명하는데 국한되어 있으며, 이에 따라 유동 오차가 적고 그 결과의 해석에서도 수학적 모델과 상관식의 적용이 비교적 용이하다고 볼 수 있다.

그러나 상용화 내지는 pilot plant까지 scale-up되고 있는 철광석의 환원이나 석탄의 가스화, 연소로 등에서 사용되는 고체 입자에는 수 μm 에서부터 수 mm까지의 분/입체가 폭 넓게 분포되어 있으며 또한 반응이 진행되면서도 입도변화가 일어나 입도 분포의 변화가 생기게 된다. 특히 실제 조업은 800-1,200 °C의 고온에서 진행되므로 분체내에 존재하는 미분과 대립자에 의해 유동에 불리한 현상이 일어나기 쉽다. 예를 들면, 미분의 고온 반응에서는 응집이 쉽게 일어나 응집체가 형성되며 조업시간의 경과에 따라 이들이 분산관 직상부에 점차 많이 분포되면서 不流動 상태를 가져오게 된다. 또한 유동층에 공급되는 분체는 큰 입자를 분쇄하여 일정 크기로 조절한 후 공급하게 되는데 이때 상대적으로 큰 입자는 유동이 활발하지 못하여 분산관 부근에 정체되면서 고온의 열에 의해 응집되기 쉬워 유동 악화의 원인이 되기도 한다. 유동 조업에서 응집체에 의한 不流動을 미연에 방지하면서 안정된 유동조업을 장기간 유지하기 위해서는 층내의 응집체만을 유동 조업중에 선택적으로 배출시키는 기술의 개발이 중요하다. 입경 분포를 갖고있는 유동층으로부터의 입자 분리는 유입가스의 유량을 조절하거나 입자 유출관의 위치를 잘 선택하면 어느 정도 가능하다. 그러나 가스 분산관을 사용한 유동층이나 spout형 유동층에서 크기가 다른 혼합입자의 입자분리에 관한 기존의 연구 결과를 볼 때 큰 입자만의 선택적 배출을 위해 유출관의 위치를 정확히 선택하는 것은 사실상 불가능하다. 한편, 유동층 반응기 하부에 관 형태의 유동 분리장치를 반응기의 일부분으로 설치하여 적절한 입자 유동을 일으켜 혼합물중 큰 입자는 아래로, 작은 입자는 상부 반응기 층으로 이동시키는 방법을 고려할 수 있다. Spouting 형성을 위한 고속 jet가 갖추어진 jet 유동층은 ash 응집형 석탄 가스화로에서 이와같은 목적에 부합되도록 개발된 유동층 반응기이다. 그 원리를 보면, 석탄은 로내에서 건류되어 char 입자가 되며 이것이 유동층을 형성하면서 산소 및 수증기와 반응하여 가스화한다. 반응이 진행하여 입경이 작아진 char는 생성가스에 동반되어 로외로 비산 배출된다. 비산 배출된 char는 사이클론 등으로 포집하여 가스화로에 산소와 함께 불어넣으며 1,600 °C 부근의 고온에서 가스화한다. 석탄중의 회분은 가스화로와 사이클론 사이를 순환하면서 점차 축적되므로 이를 제외로 배출해야 한다. 이에 유동층을 회가 용착하는 반응온도로 유지하고 회를 응집시켜 조립하며 spout tube의 불어 올리는 유속을 char 입자는 낙하시키지 않으나 응집회는 낙하하도록 설정하여 회분만을 분리하는 것이다. 이와같은 분리관은 설치가 용이하고 입자분리에 필요한 가스로서 반응기에 유입되는 가스중 일부를 사용할 수 있고 제품입자중 미세 입자는 반응층으로 다시 보내 입자 성장 등의 반응을 계속시켜 제품 회수율을 높일 수 있고 제품 입자의 냉각을 동시에 시킬 수 있으며, 조업을 연속화하는 것이 가능하다는 것이다.

본 연구에서는 가스-고체 유동층에서 원추형 가스분산관의 중앙에

spout tube를 연결 부착하여 로내에 공급된 입자중 유동에 지장을 줄 우려가 있는 대립자와 장기간 고온 조업에서 발생하는 응집체를 선택적으로 배출하는데 있어서 장치와 운전조건에 따른 입자 분리의 특성을 밝히고자 한다. 이를 위해 직경 10 cm의 spout-fluid형 상온 유동층 시스템을 설치하고, 모사 입자로서 glass beads를 사용했을 때 조업 변수의 변화에 따른 배출 속도와 분리 효율 등을 파악하였다.

2. 유동층으로부터 대립자의 배출 기술 동향

유입기체의 흐름에 의해 유동상태에서 고체입자가 coating, 화학 증기 증착(CVD), 造粒(granulation) 등의 반응에 의해 초기 반응기에 투입될 때보다 크기가 증가되거나 미분체가 환원, 가스화, 탈황 등의 고온 반응으로 응집되어 입자의 불유동화 등 장치 조업상 trouble을 유발시킬 가능성이 있는 경우 이들을 정상상태의 유동층에서 연속적으로 배출해야 한다. 이와 같은 관점에서 지금까지 진행되어온 연구 결과는 다음과 같다.

전 등[3]은 입자가 성장하는 연속 정상상태 유동층 반응기에서의 입자 유동을 상온에서 모사할 수 있는 반응부 유동층 하부에 큰 제품 입자를 선택 유출할 수 있는 분리관을 설치하여 입경분포를 갖는 반응부 유동층 입자의 분리를 연구하였다. 여기서 반응부와 분리관을 연결하는 연결관에서의 원활한 입자 혼합이 분리관 내부의 연속적 입자분리에 중요하며, 실험에 사용한 실리콘 입자의 높은 입자분리를 위해서는 분리관내 가스유속으로 $0.95 < U/U_{mf} < 1.15$ 의 필요 조건이 존재하며 이 경우 유동층내 평균입경보다 큰 제품입자가 90% 이상으로 분리가 가능하다고 하였다.

Chou와 Uang[1]은 가스가 환상부로만 흐르는 dead-zone이 있는 분산관을 구비한 유동층이 밀도 또는 입경이 상이한 입자의 분리에 효율적임을 보였다. 공급 가스의 유속, 공급 입자의 조성, dead-zone의 직경과 위치에 따라 분리 효율이 영향을 받는데, dead-zone의 직경은 분산관 직경의 0.5배일 때 약 95%의 분리효율이 가능하였다.

Koya 등[6]은 미분철광석을 중질유로 조립 pellet화하여 가스환원시 유동층 환원로의 하부에 설치한 screw(screw의 날에 구멍이 뚫린 형태)의 회전을 이용하여 대립자만을 선택적으로 배출하는 기술을 제안했다. 배출구로의 가스유속의 증대에 따라 분급률이 증대되며 분급률 100% 도달에 필요한 가스유속은 배출 입자의 종말 속도에 근사함을 밝혔다.

Zhang 등[9]은 분산관의 중앙 하부에 venturi를 설치하여 수직형 spout가 형성되는 고속 jet형 유동층을 이용하여 대립자의 분리 배출에 있어서 jet의 형태, jet 유속 및 입경과 밀도에 따른 배출속도와 분리효율 등을 연구하였다. 초기 분리속도, U_L 와 임계 분리속도, U_{CL} 사이에 대립자가 안정되게 배출될 수 있는 가스유속, U_J 가 존재하며 대립자의 안정된 배출속도는 $(U_L - U_J)$ 에 비례하여 증가됨을 보고하였다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 상온 spout-fluid 유동층으로 크게 유동층 본체와 공기압축기 및 유량제어 시스템, 사이클론 그리고 대립자의 배출기로 구성되어 있다. 유동층은 내경 10 cm, 높이 130 cm의 아크릴 수지계 실린더 관의 상부에 내경 25 cm, 높이 40 cm의 강관제 팽창부분이 연결되어 있어 미립자의 비산 배출이 억제되도록 하였다. 가스분산관에는 내경 2 mm의 구멍이 정사각형(개구비=0.02)으로 배열된 45° 원추형 스텐레스강 판을 사용하였다. 가스분산관의 중앙부에는 강관제 spout tube가 설치되어 있으며 spout tube의 끝부분에는 대립자의 포집통이 연결되어 있다. 유동화 가스로는 공기를 사용하였으며, 공기압축기에서 공급된 공기는 oil filter를 통과시켜 수분과 먼지, oil 등을 제거하고 pressure regulator에서 일정 압력으로 조정된 후 유량계를 경유하

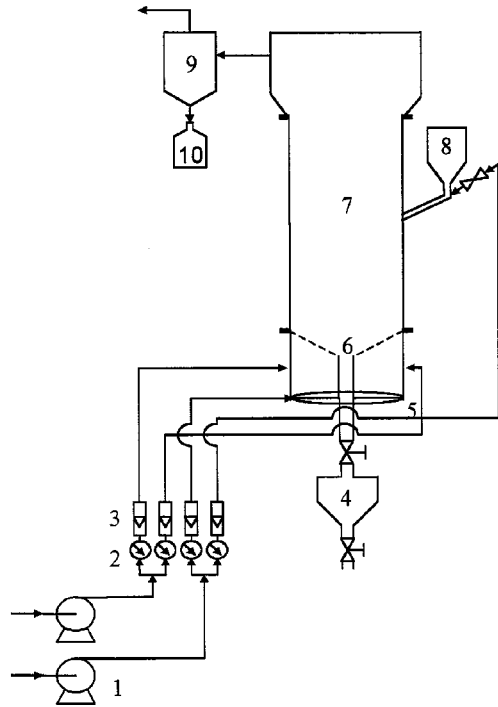


Fig. 1. Experimental apparatus.

1. Compressor
2. Pressure regulator
3. Flow meter
4. Coarse particle collector
5. Spout gas inlet
6. Conical distributor
7. Spout-fluid bed
8. Feeder
9. Cyclone
10. Fine particle collector

게 되어 있다. 공기는 각각 가스분산판과 spout tube의 부분으로 분리되어 공급되도록 되어 있다. 가스분산판 중앙부로부터 약 25 cm의 위치에 도너츠형의 가스 공급기를 설치하여 spout tube로의 가스 공급이 균일하게 되도록 하였다. 가스분산판로의 가스유속은 0.26-1.65 Nm/s, 그리고 spout tube내 가스유속은 4.1-22.2 Nm/s로 하였다. 유동층내에서 기포의 성장을 억제하고 가스분산판의 구멍을 통해 입자가 빠지는 것을 방지하기 위해서 분산판 밑에 200 mesh의 스텐레스강 망을 붙였다.

입자로는 밀도가 약 2,500 kg/m³인 glass beads를 사용하였으며, 대립자로서는 710-990 μm , 991-1,397 μm , 그리고 1,500-2,500 μm 의 세 종류를, 그리고 미립자로서는 212-425 μm 의 한 종류를 택하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 glass beads(구형도=0.8)의 입경별 최소유동화 속도와 종말속도의 계산 값을 나타낸 것이다[7].

Table 1. Calculated U_{mf} and U_t with respect to diameter of glass beads used in this study

Particle diameter(μm)	U_{mf} (Nm/s)	U_t (Nm/s)
212	0.10	1.34
318*	0.22	2.00
425	0.39	2.55
710	1.05	3.66
850*	1.15	4.10
990	1.24	4.49
1194*	1.36	5.01
1397	1.47	5.47
1500	1.53	5.69
2000*	1.76	6.65
2500	1.97	7.48

* Average diameter of particles

Table 2. Experimental conditions

Diameter range of fine particle	212-425(:318*) μm
Diameter range of coarse particle	710-990(:850*), 991-1397(:1194*), 1500-2500(:2000*) μm
Gas velocity in distributor	0.26-1.65 Nm/s
Gas velocity in spout tube	4.1-22.2 Nm/s
Initial ratio of coarse to fines	0.05-0.2
Inventory of fines	1,000-2,000 g
Discharging time	2-7 minute
Diameter of spout tube	1.0, 1.3, 2.0 cm

*Average diameter of particles

실험 변수로는 가스 분산판과 spout tube내 가스유속과 대립자의 입경외에 미립 glass beads에 대한 대립 glass beads의 초기 혼합률, 미립 glass beads의 장입량, 배출시간, 그리고 spout tube의 직경을 택하였으며 실험 조건은 Table 2에서 보는 바와 같다.

유동층의 가스분산판과 spout tube로 일정 유량의 공기를 공급하여 안정된 상태를 유지한 상태에서 정량의 미립자를 분체 공급관을 통해 장입하고 난 후 대립자를 추가로 공급하는 방식을 택하였다. 대립자까지 완전 공급한 후 spout tube의 끝부분과 대립자 포집구사이에 설치된 밸브를 열어 일정 시간동안 입자를 배출하였다. 이와 같이 배출된 입자의 질량과 입도분포를 측정하여 배출속도와 분리효율을 계산하였다. 여기서 배출속도는 배출된 양을 배출시간으로 나눈 값으로, 분리효율은 배출된 총 입자중 대립자로 장입된 입자의 질량 비율로 정의하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. Spout tube내 가스 유속의 영향

Fig. 2는 미립자로 221-425 μm 의 glass beads, 미립자의 장입량을 1,500 g, 미립자에 대한 991-1,397 μm 대립 glass beads의 초기 혼합률을 0.1, 배출시간을 3분 그리고 가스분산판로의 가스유속을 0.26 Nm/s로 설정하고 직경 2.0 cm의 spout tube내 가스유속을 4.1-14.4 Nm/s의 범위에서 변화시켰을 때 대립자와 미립자, 그리고 이들을 합한 총 입자별 배출속도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 spout tube내 가스유속의 최저값 4.1 Nm/s는 본 실험에서 미립자로 사용한 glass beads의 최대 입자, 즉 425 μm glass beads의 종말속도, 2.55 Nm/s의 약 1.55배에 해당되는 값이다. Spout tube내 가스유속이 증가되면서 총 배출속도가 감소되는 경향을 보이는데 spout tube내 가스유속 범위에 따라 크게 3가지의 영역으로 분류될 수 있다. 첫째, spout tube내 가스유속이 약 7 Nm/s이하에서는 spout tube내 가스 유속의 감소에 따라 대립 및 미립자, 그리고

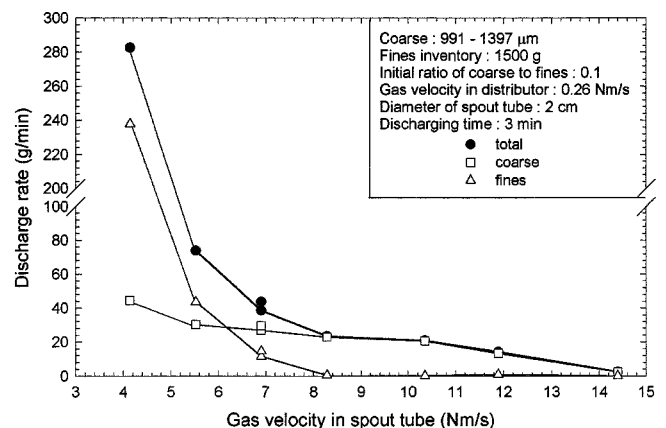


Fig. 2. Effect of gas velocity in spout tube on discharge rate.

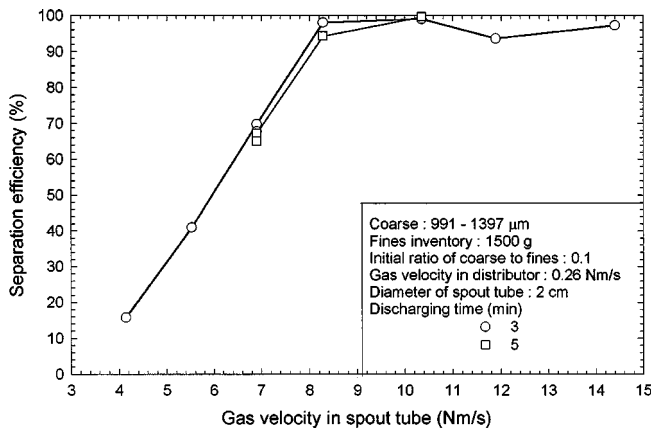


Fig. 3. Effect of gas velocity in spout tube on separation efficiency.

총 입자의 배출속도가 급격히 증가되는데 특히 약 6 Nm/s 이하부터는 미립자의 배출속도 증가가 현저해져 대립자의 배출속도를 초과하게 됨을 알 수 있다. 이로부터 spout tube내 가스유속이 미립자로 사용한 glass beads의 최대 입자, 즉 425 μm glass beads의 종말속도에 근접, 즉 Zhang 등[9]이 정의한 임계분리속도에 접근하게 되면 배출속도가 급격히 증가되면서 직경이 제한된 spout tube내 입자의 흐름이 plugging 상태를 보이면서 배출이 정지될 수 있는 것이다.

Spout tube내 가스유속이 7-12 Nm/s의 범위에서는 가스 유속의 증대에 따라 대립자의 배출속도는 약 27 g/min에서 약 18 g/min로 서서히 감소되는데 비해 미립자의 배출은 무시될 정도로 미미하였다. 여기서 spout tube내 가스유속 7-12 Nm/s는 미립자로 사용한 glass beads의 최대 입자, 즉 425 μm glass beads의 종말속도, 2.55 Nm/s의 2.64-3.77 배에 해당된다. 한편 spout tube내 가스유속이 12 Nm/s 이상으로 높아지면서부터는 대립자의 배출속도도 급격히 감소되어 약 14.4 Nm/s의 가스유속에서 대립자의 배출속도가 약 2 g/min에 그치는 등 대립자와 미립자 모두의 배출속도가 급격히 줄어들게 된다.

Fig. 3은 Fig. 2의 실험조건에서 분리효율에 대한 spout tube내 가스 유속의 영향을 나타낸 것으로 여기서 배출시간으로는 3분외에 5분의 경우를 추가하였다. Spout tube내 가스유속이 약 8.4 Nm/s 이상에서는 분리효율이 약 96% 이상임을 알 수 있다. 한편 가스유속이 이보다 낮아지면서는 spout tube내 가스유속의 감소에 따라 분리효율이 직선적으로 감소됨을 보이고 있다. 여기서 가스유속이 미립자로 사용한 glass beads의 최대 입자, 즉 425 μm glass beads의 종말속도와 같아지면서 분리효율은 약 10%까지, 즉 유동층에 장입된 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률인 0.1, 즉 10%에 접근하게 되어 대립자의 분리 배출이 불가능해짐을 예상할 수 있다.

4.2. 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률의 영향

Fig. 4는 미립자로 221-425 μm 의 glass beads, 대립자로 991-1,397 μm 의 glass beads, 배출시간을 3분, 그리고 가스분산판로의 가스유속을 0.26 Nm/s, 직경 2.0 cm의 spout tube내 가스유속의 범위를 6.9-10.3 Nm/s로 설정하고 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률을 0.05-0.2의 범위에서 변화시켰을 때 대립자와 미립자별 배출속도의 변화를 나타낸 것이다. 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률이 증가되면서 대립자의 배출속도가 증가되는데 이때 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률 증가에 따른 대립자의 배출속도 증가는 spout tube내 가스유속이 작을수록 급격히 높아짐을 보이고 있다. 단, spout tube내 가스유속이 너무 낮게 되면 미립자도 상당분 같이 배출되는 문제점이 있다.

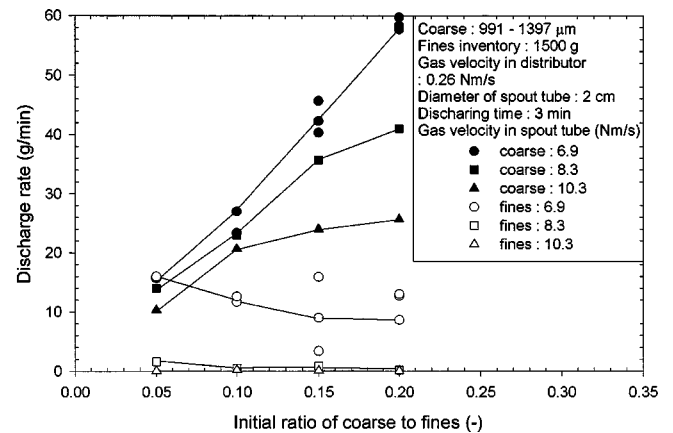


Fig. 4. Effect of initial ratio of coarse to fines on discharge rate.

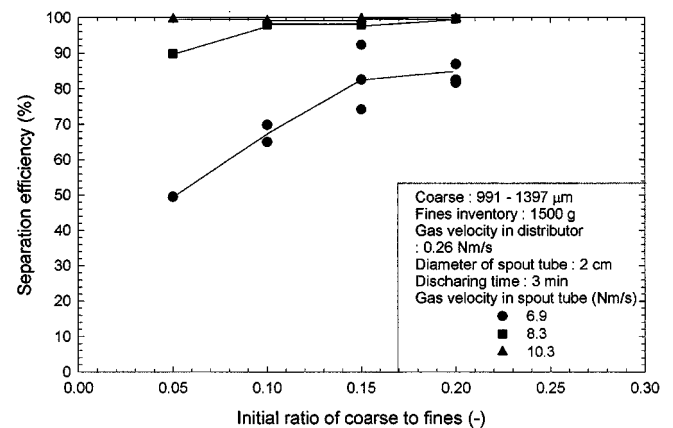


Fig. 5. Effect of initial ratio of coarse to fines on separation efficiency.

Fig. 5는 Fig. 4의 실험조건에서 분리효율에 대한 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률의 영향을 나타낸 것으로, 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률이 증가됨에 따라 분리효율이 증가됨을 알 수 있다. 이때 spout tube내 가스 유속이 8.3 Nm/s와 10.3 Nm/s로 높은 경우에는 본 실험범위에서 90% 이상의 높은 분리효율을 보이는데 비해 가스유속이 6.9 Nm/s로 낮은 경우에는 분리효율이 저하되며 특히 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률이 낮게 되면 분리효율도 급격히 저하됨을 보이고 있다.

4.3. 대립자 입경의 영향

Fig. 6은 미립자로 221-425 μm 의 glass beads, 미립자의 장입량을 1,500 g, 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률을 0.1, 배출시간을 3분과 5분, 그리고 가스분산판로의 가스유속을 0.26 Nm/s, 직경 2.0 cm의 spout tube내 가스유속을 6.9 Nm/s와 8.3 Nm/s로 설정하고 배출하고자 하는 대립자 glass beads의 입경을 710-990 μm , 991-1,397 μm , 1,500-2,500 μm 의 세 종류로 변화시켰을 때 대립자와 미립자별 배출속도의 변화를 나타낸 것이다. 대립자의 입경이 작아짐에 따라 대립자의 배출속도가 급격히 감소되는데 비해 미립자의 배출속도는 혼합된 대립자의 직경에는 무관하며 단지 spout tube내 가스유속에만 영향 받음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 실험조건에서 분리효율에 대한 대립자 입경의 영향을 나타낸 것으로, spout tube내 가스유속이 8.3 Nm/s인 경우 대립자 입경이 1/2이하로 감소되어도 분리효율은 약 7-8% 감소하는데 그쳤다. 그러나 spout tube내 가스 유속이 6.9 Nm/s로 낮아지게 되면 대립자 입경의 감소시 분리효율이 현저히 악화됨을 보이고 있다. 즉, 대립자와 미립자의 입경 차이가 작아질수록 높은 분리효율을 얻기 위해서는 spout tube내 가스유속이 높게 유지되어야 함을 알 수 있다.

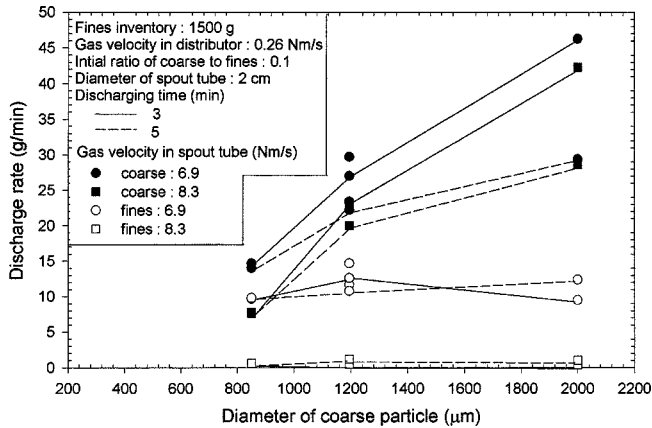


Fig. 6. Effect of diameter of coarse particle on discharge rate.

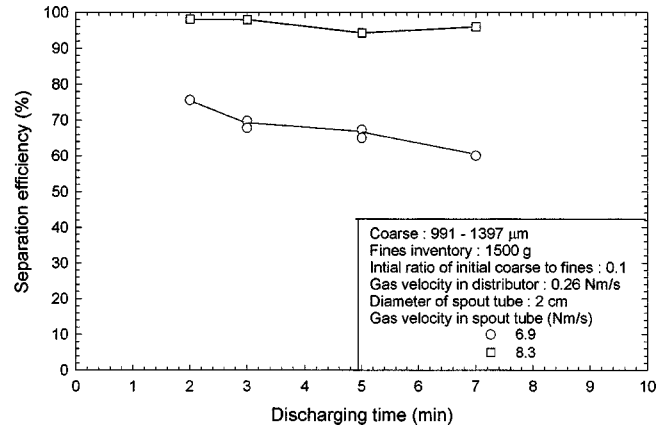


Fig. 9. Effect of discharging time on separation efficiency.

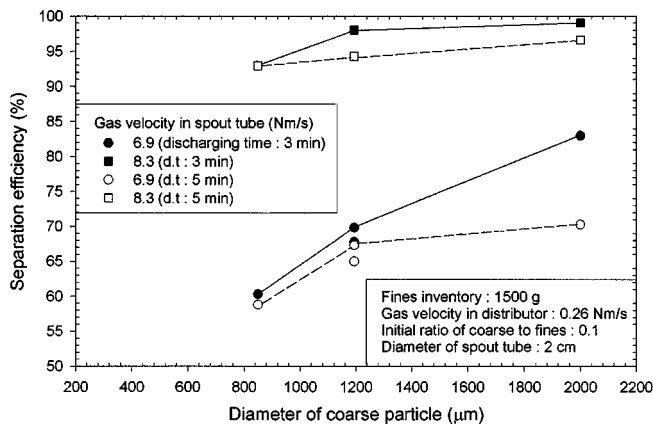


Fig. 7. Effect of diameter of coarse particle on separation efficiency.

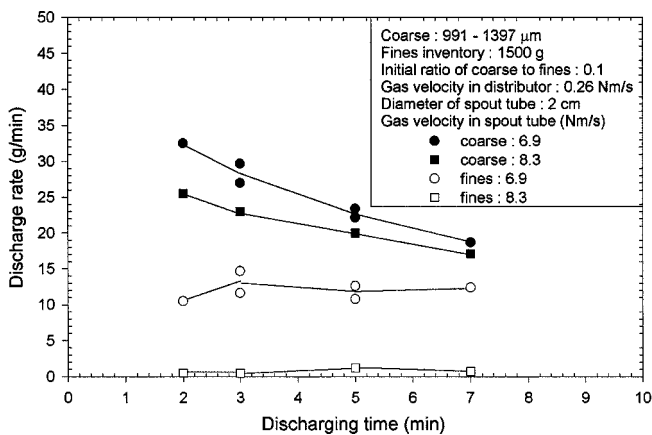


Fig. 8. Effect of discharging time on discharge rate.

4.4. 배출시간의 영향

Fig. 8은 미립자로 221-425 μm 의 glass beads, 미립자의 장입량을 1,500 g, 대립자로 991-1,397 μm 의 glass beads, 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률을 0.1, 그리고 가스분산판로의 가스유속을 0.26 Nm/s, 직경 2.0 cm의 spout tube내 가스유속을 6.9 Nm/s와 8.3 Nm/s로 설정하고 배출시간을 2, 3, 5 그리고 7분으로 변화시켰을 때 대립자와 미립자별 배출속도의 변화를 나타낸 것이다. 배출시간의 증가에 따라 대립자의 평균 배출속도는 서서히 감소되는데 비해 미립자의 배출속도는

일정하게 유지됨을 알 수 있다. 상기 조건에서 분리효율이 미립자에 대한 초기 대립자의 혼합률보다 월등히 높기 때문에 층내에 남아 있는 대립자의 혼합률은 서서히 감소하게 되며, 이 때문에 4-2절 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률의 영향에서 설명한 바와 같이 대립자의 평균 배출속도가 감소되는 것이다. Fig. 9는 Fig. 8의 실험 조건에서 분리효율에 대한 배출시간의 영향을 나타낸 것으로, spout tube내 가스유속에 관계없이 분리효율은 배출시간의 경과에 따라 서서히 감소함을 알 수 있다. 이 역시 4-2절 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률의 영향에서 설명한 바와 같이 층내에 남아 있는 대립자의 혼합률이 서서히 감소되기 때문이다.

4.5. 초기 미립자 양의 영향

Fig. 10은 미립자로 221-425 μm 의 glass beads, 대립자로 991-1,397 μm 의 glass beads, 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률을 0.1, 그리고 가스분산판로의 가스유속을 0.26 Nm/s, 직경 2.0 cm의 spout tube내 가스유속을 6.9 Nm/s와 8.3 Nm/s, 배출시간을 3분과 5분으로 설정하고 층내에 초기 장입된 미립자의 양을 1,000 g, 1,500 g 그리고 2,000 g으로 변화시켰을 때 대립자와 미립자별 배출속도의 변화를 나타낸 것이다. 장입된 미립자에 대해 0.1의 일정 비율로 대립자를 초기에 혼합했기 때문에 미립자의 초기 장입량의 증가에 따라 대립자의 배출속도는 spout tube내 가스유속에 관계없이 서서히 증가됨을 보이고 있다. Fig. 11은 Fig. 10의 실험조건에서 분리효율에 대한 층내에 초기 장입된 미립자 양의 영향을 나타낸 것으로, 분리효율은 초기 장입된 미립자의 양에는 크게 영향 받지 않음을 알 수 있다.

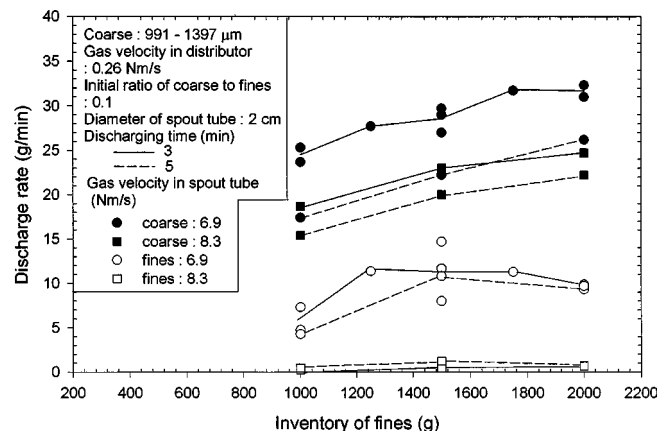


Fig. 10. Effect of inventory of fines on discharge rate.

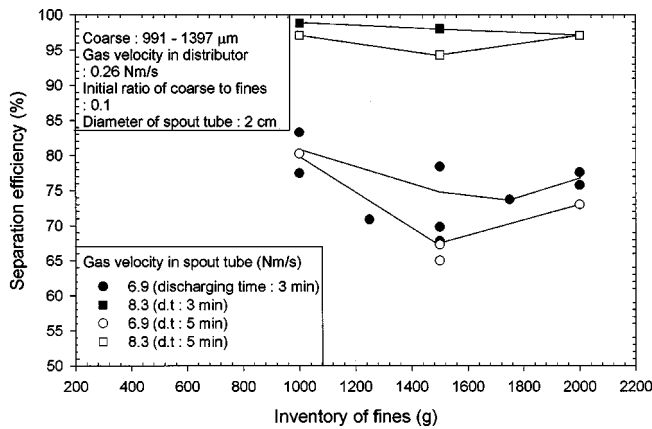


Fig. 11. Effect of inventory of fines on separation efficiency.

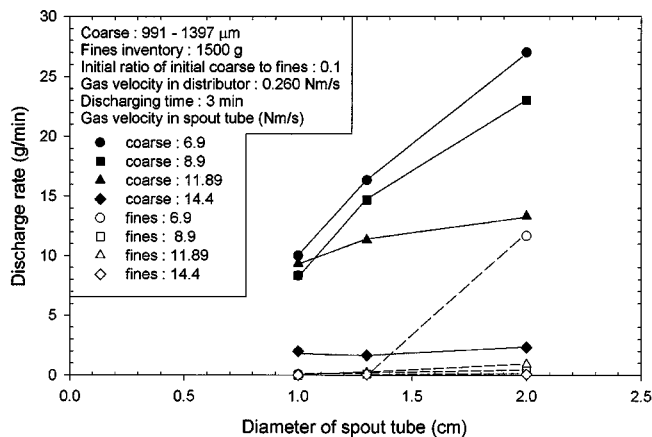


Fig. 12. Effect of diameter of spout tube on discharge rate.

4-6. Spout tube 직경의 영향

Fig. 12는 미립자로 221-425 μm 의 glass beads, 대립자로 991-1,397 μm 의 glass beads, 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률을 0.1, 그리고 가스분산판로의 가스유속을 0.26 Nm/s, spout tube내 가스유속을 6.9 Nm/s, 8.9 Nm/s, 11.9 Nm/s, 14.4 Nm/s, 배출시간을 3분으로 설정하고 spout tube의 직경을 1.0 cm, 1.3 cm 그리고 2.0 cm로 변화시켰을 때 대립자와 미립자별 배출속도의 변화를 나타낸 것이다. 가스분산판로의 가스유속이 0.26 Nm/s, spout tube내 가스유속이 6.9 Nm/s, 8.9 Nm/s, 11.9 Nm/s, 14.4 Nm/s일 때 spout tube의 직경이 2.0 cm, 그리고 유동층의 직경이 10 cm의 경우 가스분산판로의 가스유량은 20.4 Nm^3/s , spout tube로의 가스유량은 각각 21.7 Nm^3/s , 27.9 Nm^3/s , 37.4 Nm^3/s , 45.2 Nm^3/s 로 상당량의 가스가 spout tube로 공급되어야 함을 알 수 있다. 이때 spout tube로의 가스가 층대 반응에 필요한 가스이고 가스 압력과 온도가 반응조건에 적합한 경우에는 가스분산판로의 가스유속이 유동층 하부의 유동에 지장을 주지않을 정도만 되면 큰 문제가 없다. 그러나 spout tube로의 가스가 반응성 가스가 아니거나 그 자체의 온도나 압력이 반응 조건보다 낮아 반응에 지장을 초래할 가능성이 있는 경우에는 spout tube내 가스유속을 유지하되 spout tube로의 가스유량을 최대로 억제해야한다. 이런 관점에서 spout tube의 직경을 줄여가면서 대립자의 배출특성을 살펴보았다. Spout tube의 직경이 2.0 cm에서 1.3 cm 그리고 1.0 cm로 축소되면 동일한 spout tube내 가스유속을 유지하는데 필요한 가스유량은 42% 그리고 25%로 줄어든다. 이때 spout tube의 직경이 2.0 cm에서 1.3 cm 그리고 1.0 cm로 축소될 때 spout tube내 가스유속이 6.9 Nm/s와 8.9 Nm/s로 낮은 경우에는 배출속도, 특히 대립

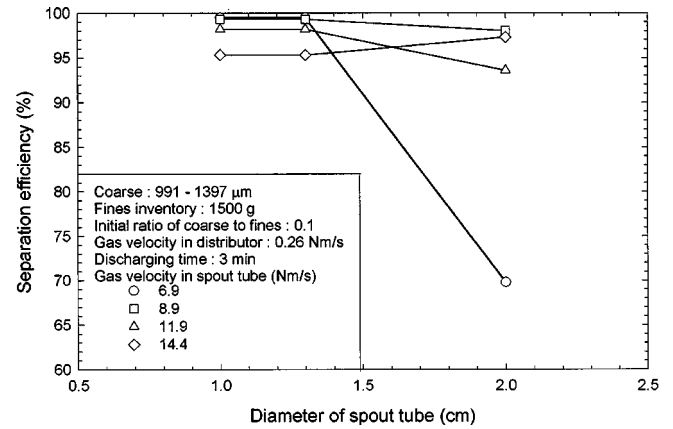


Fig. 13. Effect of diameter of spout tube on separation efficiency.

자의 배출속도가 급격히 감소되었지만 spout tube내 가스유속이 높은 경우에는 spout tube 직경의 영향이 약해졌다. 미립자의 배출은 가스유속이 6.9 Nm/s로 낮은 경우에 spout tube의 직경이 2.0 cm에서 1.3 cm로 축소될 때 배출속도의 감소가 있었지만 spout tube내 유속이 높은 경우에는 미립자의 배출 속도도 낮았지만 그 값 자체가 spout tube의 직경과는 무관하였다.

Fig. 13은 Fig. 12의 실험조건에서 분리효율에 대한 spout tube 직경의 영향을 나타낸 것이다. Spout tube내 가스유속이 본 실험조건에서 8.9 Nm/s이상, 즉 미립자 glass beads의 최대 입경인 425 μm 의 종말속도의 약 3.3배이상인 조건에서는 spout tube의 직경에 관계없이 분리효율은 95%이상으로 거의 일정한 반면 가스유속이 낮은 경우에는 spout tube의 직경이 확대되면서 분리효율이 감소됨을 보이고 있다. 이는 spout tube내 가스유속이 낮은 경우 대립자의 배출 속도를 어느 수준으로 유지하는데 문제가 없다면 spout tube의 직경을 축소하는 것이 분리효율은 높이고도 spout tube로의 가스 공급량은 감소시키는 효과가 있음을 의미한다.

4-7. 가스분산판로의 가스유속의 영향

Fig. 14는 미립자로 221-425 μm 의 glass beads, 대립자로 991-1,397 μm 의 glass beads, 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률을 0.1, spout tube의 직경을 1.0 cm와 1.3 cm, spout tube내 가스유속을 8.9 Nm/s, 배출시간을 3분으로 설정하고 가스분산판로의 가스유속을 0.26 Nm/s에서 0.48 Nm/s까지 변화시켰을 때 대립자와 미립자별 배출속도의 변화를

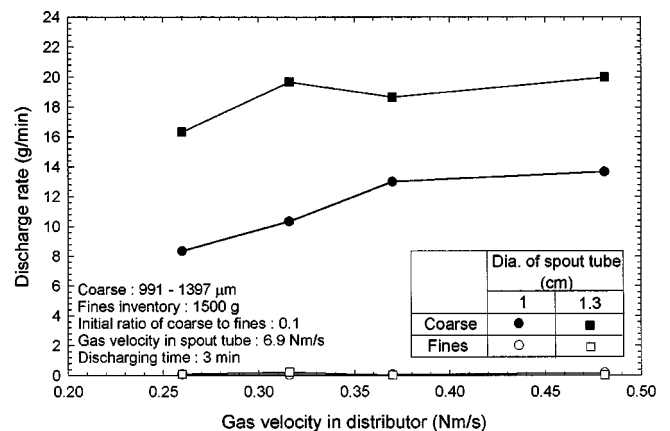


Fig. 14. Effect of gas velocity in distributor on discharge rate.

나타낸 것이다. 이는 층내의 유동상태에 지배적 역할을 하는 가스분산판로의 가스유속이 배출속도에 어떤 영향을 줄 것인가를 파악하기 위한 것이다. Spout tube의 직경에 관계없이 가스분산판로의 가스유속이 증가되면서 대립자의 배출속도도 증가, 즉 유동상태가 활발해지면서 층하부에 설치된 가스분산판의 중심부에 있는 spout tube를 통한 배출도 원활해짐을 알 수 있다. 이를 역으로 생각하면 spout tube내 가스유속은 대립자의 배출에 적합하게 설정되어도 가스분산판로의 가스유속이 너무 낮아 유동이 활발치 못하면 배출이 안될 수 있다는 것을 의미한다. 본 실험에서 택한 8.9 Nm/s의 spout tube내 가스유속에서 미립자의 배출속도는 가스분산판로의 전체 유속범위에서 거의 무시될 정도였다.

5. 결 론

가스-고체 유동층에서 원추형 가스분산판의 중앙에 spout tube를 연결 부착하여 로내에 공급된 입자중 유동에 지장을 줄 우려가 있는 대립자를 선택적으로 배출하는데 있어서 장치와 운전조건에 따른 입자 분리의 특성을 밝힌 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 대립자의 배출속도와 분리효율에는 spout tube내 가스유속이 가장 지배적인 변수로 작용한다. 대립자의 분리효율을 90%이상으로 유지하는 데는 미립자내 최대입자의 입경을 기준한 입자 종말속도의 3.0 배이상의 가스유속이 spout tube내 가스유속으로 설정되어야 했다.

(2) spout tube내 가스유속이 낮은 경우 대립자의 배출 속도를 어느 수준으로 유지하는데 문제가 없다면 spout tube의 직경을 축소하는 것이 분리효율은 높이고도 spout tube로의 가스 공급량은 감소시키는 효과가 있었다.

(3) 미립자에 대한 대립자의 초기 혼합률이 낮아질수록, 대립자의 입경이 작을수록 그리고 층내 유동성이 떨어질수록 대립자의 효율적 분

리가 어려워짐 등을 유동층 공정의 설계와 실제 조업에서 충분히 고려해야 한다.

사용기호

U_{CI}	: critical separation velocity [m/s]
U_{II}	: initial separation velocity [m/s]
U_J	: jet velocity [m/s]
U_{mf}	: minimum fluidization velocity [Nm/s]
U_t	: terminal velocity [Nm/s]

참고문헌

1. Chou, T.-C. and Uang, Y.-M.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **24**, 683(1985).
2. Cusack, B. L., Wingrove, G. S. and Haride, G. J.: *I&SM*, **13**, February(1995).
3. Jeon, J. Y., Song, Y. M., Kim, H. Y. and Yoon, P.: *HWAHAK KONGHAK*, **26**, 364(1988).
4. Hassan, A. and Whipp, R. H.: *MPT International*, 50, June(1996).
5. Kitagawa, T.: *J. Soc. Energy, Japan*, **75**, 890(1996).
6. Koya, T., Komata, E. and Kunii, D.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **14**, 203(1988).
7. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 2nd edition, Butterworth-Heinemann, p. 68-77 and p. 80-83(1991).
8. Lee, I. O., Kim, Y. H. and Chung, U. C.: International Patent, PCT/KR 65208(Korean Patent, Applicant No. 95-41931)(1996).
9. Zhang, J.-Y., Zhang, B.-J. and Chitester, D. C.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 1277(1988).