

상온 2단 선회류 유동층에서 상단으로의 입자 유입속도

장정국 · 신용섭* · 최용준 · 이재근[†] · 전해수**

부산수산대학교 공과대학 환경공학과

*경성대학교 공과대학 환경공학과

**고려대학교 공과대학 화학공학과

(1995년 6월 5일 접수, 1995년 11월 29일 채택)

Entrainment Rate of Particles from the Lower Stage to the Upper Stage in a Cold Model Two-Stage Swirl-Flow Fluidized Bed

Jeong-Gook Jang, Yong-Seop Shin*, Yong-Jun Choi, Jea-Keun Lee[†] and Hai-Soo Chun**

Dept. of Environ. Eng., National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea

*Dept. of Environ. Eng., Kyungshung University, Pusan 608-736, Korea

**Dept. of Chem. Eng., Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received 5 June 1995; accepted 29 November 1995)

요 약

상온 2단 선회류 유동층에서 하단 유동층으로 공급된 연료 입자 중 하단 가스공탐속도 변화에 따른 상단으로의 입자 유입속도를 파악하였다. 하단 가스공탐속도 증가에 따라 단위시간당 입자의 상단 유입량은 증가하는 경향을 보였으며, 본 연구의 하단 가스공탐속도 범위($U_{o1}=0.9-1.3$ m/s) 내에서 상단으로의 입자 유입량은 하단 유동층으로 공급되는 전체 입자량의 약 35-48% 범위에 해당되었다. 입경별 상단으로의 입자 유입속도를 측정된 결과, 입자의 종말속도가 하단 가스공탐속도보다 큰 입자들은 거의 상단으로 유입되지 못하였다. 그러나 입자의 종말속도가 하단 가스공탐속도보다 작은 입자들의 경우에는 하단으로 공급된 시료입자 중 상단으로 유입된 입자의 비율은 하단 가스공탐속도가 증가하고 입경이 감소할수록 증가하였으며, 무차원 slip velocity가 1에 접근하게 되면 하단으로 공급된 연료입자 중 거의 대부분이 상단으로 유입되는 경향을 보였다. 또한 하단으로 공급된 연료입자 중 상단으로 유입되는 입자의 비율은 아래 식과 같이 무차원 slip velocity에 대하여 지수함수적인 상관관계를 가졌으며, 이 때 상관계수는 0.89이었다.

$$\frac{E_{ni}}{F_{oi}} = 1 - 189.1 \exp \left[-8.377 \left(\frac{U_{o1} - U_n}{U_{o1}} \right)^{0.17} \right]$$

Abstract — The rate of particles entrained from the lower stage to the upper stage according to the primary superficial air velocity are investigated in a cold model two-stage swirl-flow fluidized bed combustor. The total entrainment rate increases with the primary superficial air velocity and ranges from 35 percent to 48 percent of particles fed into the lower bed under the operating conditions($U_{o1}=0.9-1.3$ m/s). The particles whose terminal velocity is higher than the primary superficial air velocity may not be entrained from lower stage to the upper stage. However, in the case of particles whose terminal velocity is lower than the primary superficial air velocity, the entrainment rate of particles increases as the particle size becomes smaller and/or the primary superficial air velocity increases. Further, the particles whose dimensionless slip velocity approaches to unity are almost entrained. The entrainment rate can be correlated with the dimensionless slip velocity as follows:

$$\frac{E_{ni}}{F_{oi}} = 1 - 189.1 \exp \left[-8.377 \left(\frac{U_{o1} - U_n}{U_{o1}} \right)^{0.17} \right]$$

Key words: Fluidized Bed, Swirl Flow, Entrainment Rate of Particle, Slip Velocity, Primary Superficial Air Velocity

1. 서 론

유동층 연소법은 저온 연소(800-900°C)가 가능하여 연소시 질소

산화물의 생성량이 적을 뿐만 아니라, 흡수제를 연료와 함께 주입하므로써 별도의 후처리 장비 없이 황산화물 제거가 가능한 장점이 있어 석탄연소 및 각종 폐기물의 소각처리에 가장 적합한 것으로 알려

저 있다[1-5]. 그러나 유동층 연소법에서는 종말속도가 가스공탄속도보다 작은 미세입자가 다량으로 비산유출되며, 이러한 미세입자들은 대부분 연소로 내에서의 체류시간이 짧아 미연소된 상태로 배출된다. 따라서 미세입자의 과도한 비산유출은 연소효율을 감소시키고 대기오염물질 배출의 주원인이 된다. 이와 같은 유동층 연소법의 단점을 개선하기 위해 여러 가지 방법들[6-8]이 사용되고 있다. 이러한 방법들 중 최근에 본 연구자들에 의해 2단 선회류 유동층 연소법(Two-Stage Swirl-Flow Fluidized-Bed-Combustor)이 개발되었으며, 이를 석탄 연소 및 산업 고형폐기물 소각에 적용한 결과 연소 효율 증진과 미세입자 비산유출의 감소에 있어서 우수한 성능이 있음을 확인할 수 있었다[8-16].

2단 선회류 유동층 연소로에서 연소과정 중 입경 변화가 크지 않은 저열량 무연탄과 같은 연료를 연소시킬 경우 하단 유동층으로 공급된 연료입자들 중 비교적 큰 입자들은 하단 유동층 내에 체류하면서 연소된 후 하단 회재배출구를 통하여 배출되는 반면 미세입자는 연소가스와 함께 비발동반되어 미연소된 상태로 상단으로 유입된다. 이와 같은 연료입자의 상하단 분배는 정해진 연소로의 구조에서 하단 유동층의 가스공탄속도와 연료의 입경분포에 의하여 결정된다. 그러므로 2단 선회류 유동층 연소로의 설계, 조업을 위해서는 하단 유동층으로 주입된 연료의 상하단 분배와 미세입자의 비산유출속도에 대한 설계 및 조업변수의 영향이 정량적으로 밝혀져야만 한다. 이와 같은 관계를 토대로 상하단 유동층 내 입경분포, 1차, 2차 공기의 유량비와 조업 가스공탄속도 범위, 상하단 직경, 상하단 연소율과 집진장치 등이 결정될 수 있다. 그러나 2단 선회류 유동층 연소로의 경우에 공급된 연료입자의 상하단 분배에 대한 정량적인 고찰은 아직까지 연구된 바 없다. 그러므로 본 연구에서는 연료가 하단 유동층으로 연속 주입되는 상온 2단 선회류 유동층 연소로에서 상단으로의 입자 유입속도에 대한 하단 가스공탄속도의 영향을 정량적으로 고찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 상온 2단 선회류 유동층 연소로, 압축공기 공급 계통, 시료입자 공급 계통, 입자 포집 계통으로 구성되어 있으며, 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

상온 2단 선회류 유동층 연소로는 내경 11cm의 아크릴 파이프로 제작되었으며, 하단 높이 0.7m, 상단 높이는 1m이다. 상단과 하단 사이에 선회류 유도 노즐이 부착된 상단 공기분산판이 존재하며, 하단 calming section을 포함한 전체 높이는 2m이다. 하단 공기분산판으로부터 20cm 상부에 연료입자 주입구가 설치되었고, 상·하단 입자배출관은 하단 공기분산판으로부터 5cm 상부와 상단 공기분산판으로부터 5cm 상부지점에 각각 설치되었다. 상·하단 공기분산판은 multi-orifice type으로 직경 2mm의 구멍이 정삼각 pitch로 뚫려 있으며, 각각의 개공비는 2%와 5%이다. 상단 공기분산판에는 전보[10]에서 사용했던 것과 동일한 4개의 선회류 유도노즐이 설치되었다.

유동화 공기는 공기압축기로부터 공기여과기(air filter)와 압력조절기(regulator)를 거쳐 불순물이 제거되고 일정 압력으로 조절되어 공급된다. 입자거동특성을 실험하기 위하여 아크릴관으로 유동층을 제작한 경우 입자간 그리고 입자와 아크릴 기벽간의 마찰에 의한 정전기 발생으로 인해 입자가 기벽에 부착되게 되는데 이러한 현상을 방지하기 위하여 습도조절기(humidifier)를 설치하여 유동화 공기의 습도를 일정 습도로 조절하였다. 습도가 조절된 압축공기는 공기유량계를 통하여 일정 유량의 1차 공기와 2차 공기로 나뉘어져 공급된다. 하단 분산판으로 공급된 1차 공기는 하단 유동층과 하단 free-

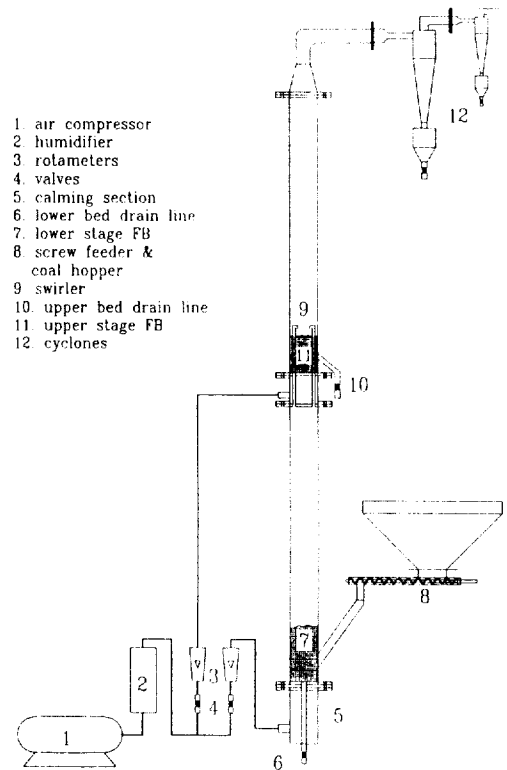


Fig. 1. Schematic flow diagram of the experimental apparatus.

board를 거친 후 상단 분산판에 부착된 선회류 유도노즐을 통하여 상단 freeboard에 점선방향으로 유입되어 선회류(swirl flow)를 형성하고, 2차 공기는 상단 분산판을 통과하여 상단 유동층을 형성한 후 상단 freeboard 내에 축방향으로 유입되어 1차 공기에 의한 선회류와 혼합되어 연소로 출구를 통하여 외부로 배출된다.

시료입자는 주입속도를 조절할 수 있는 screw feeder를 사용하여 연속적으로 하단 입자 주입구를 통하여 공급하였다. 유동화 공기와 함께 비산유출되는 미세입자를 포집하기 위하여 연소로의 공기 출구에 크기가 다른 2개의 사이클론을 직렬로 연결하였다.

2-2. 실험방법

이제까지 대부분의 상온 유동층 실험에서는 입자의 비발동반속도 혹은 입자의 비산유출속도를 측정하기 위하여 일정량의 입자를 유동층에 충전한 후 주어진 실험조건하에서 비산유출된 입자를 집진장치를 통해 포집한 후 그 입자를 연속적으로 재순환시키는 연속순환계를 사용하였다. 그러나 2단 선회류 유동층 연소로의 상단 층물질은 하단으로부터 유입되는 연료입자에 의하여 결정되므로 본 연구에서는 집진장치에서 포집된 입자를 재순환하지 않고 시료입자를 연속주입하는 연속비순환계를 이용하여 실험하였다. 본 연구에서 유동층물질과 시료 주입입자로 국내 무연탄을 사용하였으며, 시료로 사용한 무연탄은 반응기에 1회 통과 후 재사용되지 않기 때문에 실험에 충분한 양만큼 미리 준비하였다. 시료로 사용한 무연탄의 입경분포는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

하단 유동층으로 공급된 연료 입자가 하단 유동층 표면에서 비발동반되어 상단으로 유입되는 입자유입량을 측정하는 경우, 하단 유동층에만 Fig. 2와 같은 입경분포를 갖는 석탄시료를 aspect ratio가 1이 되도록 층물질로써 충전하였으며, 상단 유동층은 공탄으로 비워두었다. 그리고 상단 유동화 공기 공급을 중단한 상태에서 하단 유동층에 층물질을 연속적으로 공급하면서 하단 가스공탄속도 변화에

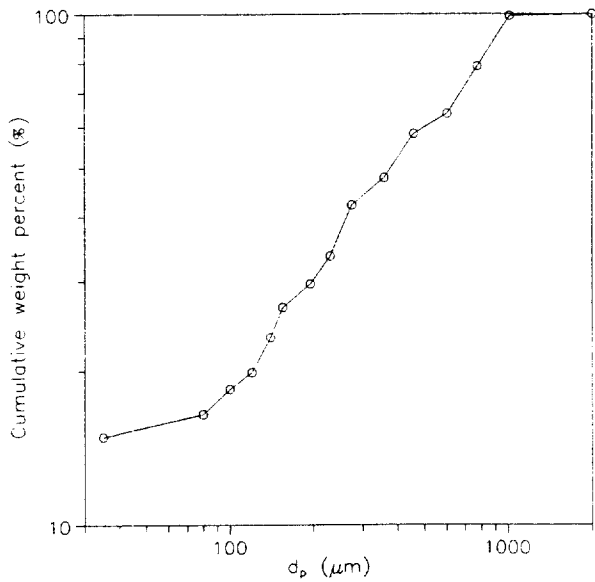


Fig. 2. Particle size distribution of anthracite coal used.

따라 일정 시간동안 상단 유동층으로 충전되는 입자량과 사이클론에서 포집되는 입자량을 측정하고 표준망체와 Ro-Tap sieve shaker를 사용하여 체분리한 후 입경분포를 측정하였다.

하단으로 공급되는 1차 공기의 유량은 가스공탐속도로 환산하여 0.9-1.3 m/s 범위였으며, 2차 공기는 공급을 차단하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 입자의 상단 유입속도와 입경분포

2단 선회류 유동층 연소로에서 연료물질은 하단 유동층에만 주입되므로 상단 유동층으로의 연료 유입은 하단 유동층에서 1차 공기에 의하여 비발동반된 입자들이 선회류 유도 노즐을 통하여 상단으로 이송된 후 상단 freeboard 내 선회류 흐름의 영향을 받아 유입된 입자들 중 일부가 포집되므로써 이루어진다. 따라서 상단으로 유입되는 입자들의 양, 입경분포와 조성은 하단 유동층의 가스공탐속도와 유동화 상태에 의하여 결정되며, 이와 같은 상단으로의 입자 유입량이 결정되어야만 상단 유동층의 설계와 조업조건 범위가 결정된다.

Fig. 3은 하단 유동층으로 공급되는 연료 입자의 단위시간당 주입량이 일정하고 상단에 2차 공기의 공급을 차단한 조건하($U_{a2}=0$ m/s)에서 상단으로의 입자 유입량에 대한 하단 가스공탐속도의 영향을 측정한 결과이다. Fig. 3에 나타난 결과에서 F_0 는 연료 주입속도, F_2 는 단위시간당 상단 유동층의 총물질 증가량, 즉 단위시간 동안 상단 내에 포집된 입자량이며 F_3 는 비산유출속도이다. 따라서 상단으로의 입자 유입속도는 F_2+F_3 로 나타낼 수 있다. 여기서 실험의 전과정을 통하여 하단 유동층에 공급되는 입자 공급속도(F_0)의 영향을 고려하기 위하여 F_2 , F_3 를 F_0 에 대한 비로 각각 나타내었다. Fig. 3에서 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 연소로 밖으로 비산유출되는 입자의 양은 미약하나마 증가하고 상단 freeboard에서 입자의 포집량이 증가함을 볼 수 있다. 따라서 하단으로 공급된 입자들 중 상단으로의 입자 유입량($(F_2+F_3)/F_0$)은 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 증가한다. 본 연구에서 결정된 하단 가스공탐속도 범위 내에서 하단 유동층으로 공급된 연료 입자 중 35-48% 정도의 입자들이 상단으로 유입됨을 볼 수 있다.

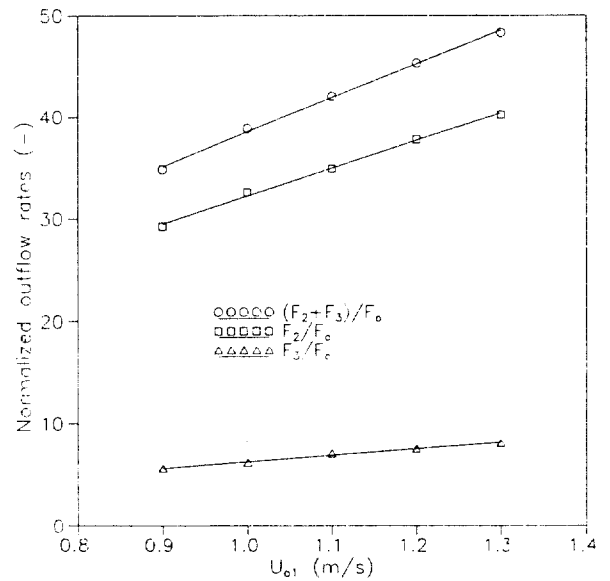


Fig. 3. Variation of normalized outflow rates of particles with primary superficial air velocity.

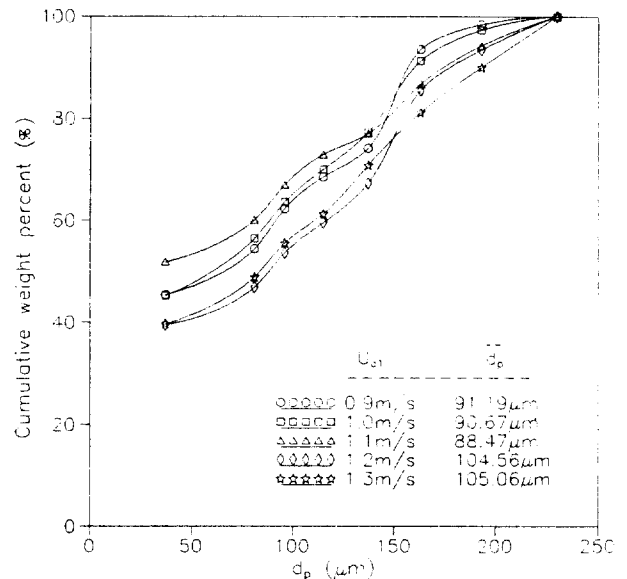


Fig. 4. Variation of size distributions of particles entrained into the upper stage with primary superficial air velocity.

Fig. 4는 하단 가스공탐속도 증가에 따른 상단으로 유입된 입자들(F_2+F_3)의 입경분포를 나타낸 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구의 하단 가스공탐속도 범위($U_{a1}=0.9-1.3$ m/s)에서 하단 유동층으로부터 상단으로 유입된 입자는 230 μ m 이하의 크기를 갖는 입자들이 대부분을 차지하였으며, 하단 가스공탐속도 증가에 따라 평균입경이 91 μ m에서 105 μ m로 증가함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 상단으로 유입되는 입자들에 대하여 하단 가스공탐속도 증가의 영향이 균일하게 나타나지 않음을 나타낸다. 즉, 하단 가스공탐속도 증가에 따라 큰 입자의 상단 유입량 증가가 미세입자에 비하여 상대적으로 크기 때문에 평균 입경이 증가한다. 또한 상단으로 유입될 수 있는 최대 입경을 갖는 입자는 하단 가스공탐속도와 입자의 종말속도가 같을 경우이므로 하단 가스공탐속도의 증가에 따라 상단으로 유입가능한 입자의 입경이 증가한다. Fig. 5는 하단 가스공탐속도 증

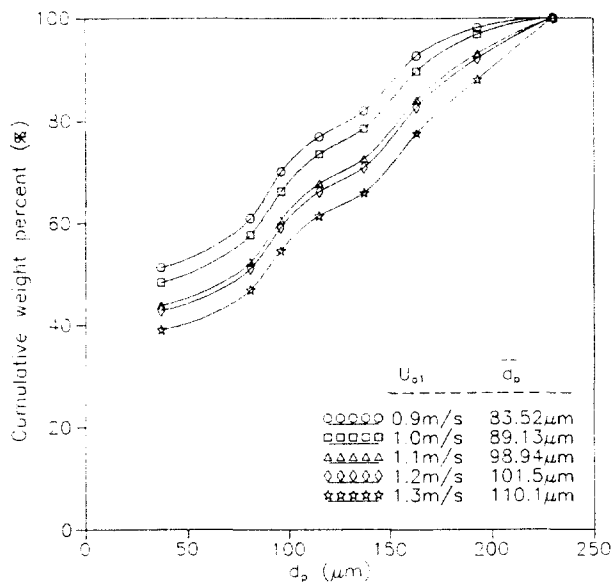


Fig. 5. Effect of primary superficial air velocity on the size distributions of particles from upper stage outflow.

가에 따른 상단 freeboard 내에서 포집되어 상단 유동층으로 침강한 입자들(F_2)의 입경분포 변화를 측정된 결과이다. Fig. 5를 보면 상단 freeboard 내에서 포집된 입자들의 입경분포는 하단 가스공탐속도 증가에 따라 평균 입경이 $83.5\mu\text{m}$ 에서 $110\mu\text{m}$ 로 증가하고 있으며, Fig. 4에 나타난 상단으로 유입된 입자들의 입경분포와 거의 동일한 값을 보임을 알 수 있다.

3-2. 입자의 상단 유입속도에 대한 하단 가스공탐속도의 영향

Fig. 6은 하단 가스공탐속도 변화에 따른 상단으로의 입경별 입자 유입속도를 나타낸 결과이다. 여기서 E_m 는 단위시간당 상단으로 유입되는 입경 d_m 인 입자의 유입량을 나타내며 Fig. 3에 나타난 $F_2 + F_3$ 와 같다. Fig. 6에 나타난 비(E_m/F_m)는 하단으로 공급된 입자 중 하단으로부터 상단 분산판에 설치된 선회류 유도노즐을 통과하여 상단으로 유입된 입자의 분율을 표시한다. 그림에 나타난 바와 같이 일정한 크기의 입자에 대하여 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 상단으로의 입자 유입속도는 증가함을 볼 수 있다. 또한 입경이 클수록 입자의 상단 유입속도는 하단 가스공탐속도에 크게 영향을 받아 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 크게 증가하는 경향을 보인다. 그러나 입경이 감소함에 따라 입자의 상단 유입속도에 대한 하단 가스공탐속도의 영향은 감소하며, 본 연구의 하단 가스공탐속도 범위 내에서 하단으로 공급된 연료입자의 거의 대부분이 상단으로 유입됨을 알 수 있다.

이와 같은 경향을 좀더 정량적으로 고찰하기 위하여 상단으로 유입되는 입자들의 유입 기구를 살펴보면 다음과 같다. 하단 유동층으로부터 비말동반된 입자가 상단 분산판 하부로부터 상단 분산판에 설치된 4개의 선회류 유도노즐로 유입되는 과정에서는 단면적 축소에 의한 가스 유선(streamline)의 변화와 하단 freeboard 내 입자의 선속도와 선회류 유도노즐 내 입자의 선속도간의 차이가 발생할 것이다. 이러한 경우에 가스의 유로 변형을 잘 쫓아가는 입자와 입자가 갖고 있는 운동량에 의하여 가스의 유로 변형을 제대로 따라가지 못하는 입자가 발생할 것이다. 따라서 가스의 유로 변형을 제대로 쫓아가지 못하는 입자에 대하여 상단 분산판은 방해판과 같은 역할을 할 것이며 상단으로 유입되는 가스 흐름 중 입자 농도가 감소할 것으로 예상된다. 이 과정에서도 입자 농도의 감소 정도가 입경과

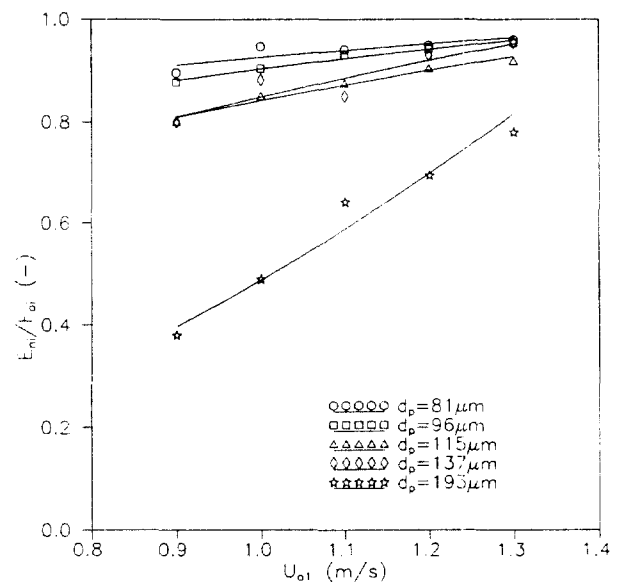


Fig. 6. Relationship between particle entrainment rate into the upper stage and primary superficial air velocity.

하단 가스공탐속도에 따라서 변할 것이며, 입경이 작을수록 그리고 하단 가스공탐속도가 증가할수록 상단으로 유입되는 가스흐름 중의 입자 농도는 증가할 것이다.

Horio[17] 등의 연구에 의하면 유동층 표면에서 기포 파괴에 의하여 초기 비말동반된 입자들은 freeboard 내를 상승하면서 비말동반속도가 지수함수적으로 감소한다. Kunii와 Levenspiel[18]의 연구에 의하면 이러한 입자 비말동반속도의 지수함수적인 감소함수에서 감쇄상수(decay constant)는 입경이 감소하고 가스공탐속도가 증가함에 따라 감소한다. TDH 이상의 freeboard 높이에서는 입자의 비말동반속도는 일정한 값을 유지하며, 이러한 입자의 비말동반속도는 Zenz와 Weil[19]의 연구에 의하면 공기의 포화수송능력(saturation carrying capacity)에 의하여 결정된다. 그러나 본 연구에서와 같이 하단 freeboard의 높이가 TDH 보다 훨씬 작은 경우, 상단 분산판 하부에서 입자의 비말동반속도는 공기의 포화수송능력보다 훨씬 큰 값을 가질 것이다.

결과적으로 하단 유동층으로부터 상단으로의 입자 유입속도는 상단 분산판 하부에서 입자의 비말동반속도와 상단 분산판에 의한 방해판 효과에 의하여 결정된다. 그러므로 Fig. 6에서와 같이 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 상단으로의 입자 유입속도가 증가하는 것은 하단 가스공탐속도 증가에 따라 상단 분산판 하부에서 비말동반된 입자의 농도가 증가하고 상단 분산판에 의해 입자가 충돌하여 하단으로 침강하는 방해판 효과가 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 입경이 감소함에 따라 E_m/F_m 이 0.9 이상의 값을 보이는 것은 입경이 감소할수록 상단 분산판에 의한 방해판 효과는 감소하고 이러한 방해판 효과에 대한 하단 가스공탐속도의 영향이 입경 감소에 따라 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 경향을 확인하기 위하여 입자의 상단 유입속도에 대한 입경의 영향을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7은 입경 변화에 따른 하단으로 공급된 입자 중 상단으로의 입자 유입속도를 측정된 결과이다. 그림을 보면 입경이 증가함에 따라 하단으로 공급된 입자 중 상단으로 유입되는 입자의 분율은 급격히 감소한다. 특히 입경이 $150\mu\text{m}$ 보다 큰 입자의 경우 상단으로 유입되는 입자의 분율은 입경이 증가함에 따라 급격히 감소함을 볼 수 있다. 반면에 $150\mu\text{m}$ 보다 작은 입자들의 경우에 E_m/F_m 의 값은 0.8

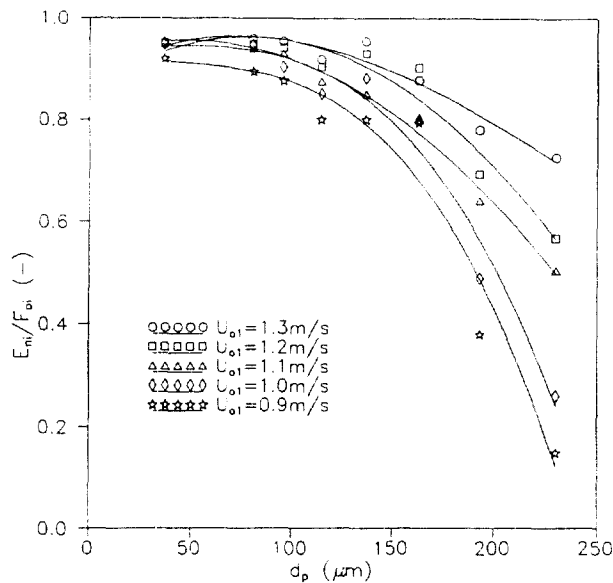


Fig. 7. Variation of E_m/F_{a0} with particle size.

이상의 매우 큰 값을 가지며 입경이 감소함에 따라 E_m/F_{a0} 의 값은 증가하는 경향을 보인다.

하단 유동층이 완전혼합 상태를 이루고 있다고 가정하면 하단 유동층 표면에서 기포 파괴시 freeboard로 방출되는 입자들의 입경분포는 하단 유동층의 총물질 입경분포와 동일할 것이다. 또한 기포 파괴시 입자들의 방출은 개별적인 방출보다 입자의 덩어리(cluster) 형태로 방출될 것이므로 입자들이 갖는 초기 상승속도는 입경에 무관하게 거의 동일할 것으로 생각되며, 다만 이와 같은 입자의 초기 상승속도는 기포 크기의 불균일성과 입자 상승방향의 다양성으로 인하여 일정하게 고정된 한 가지 값이 아니고 분포를 가질 것으로 생각된다. 그러나 비록 입자들이 입경에 관계없이 균일한 초기속도를 갖고 freeboard로 방출될지라도 입자에 따라 일정 높이에 도달하면 초기에 갖고 있던 운동량은 모두 잃고 중력과 가스에 의한 항력이 균형을 이루게 되므로 이 때부터는 하단 가스공탐속도와 입자의 종말속도의 차인 상대속도(slip velocity)를 가지게 되며 이것은 입자의 실제 상승속도를 나타낸다. 이와 같은 상대속도가 음의 값을 갖는 입자들은 freeboard 내를 상승하지 못하고 침강하게 되며, 상대속도가 양의 값을 갖는 입자의 경우에는 입경이 감소함에 따라 입자의 상승속도는 증가한다.

선회류 유도노즐 내에서도 입자의 상승속도를 선회류 유도노즐 내의 가스속도에서 입자의 종말속도를 뺀 상대속도와 같다고 가정하면 선회류 유도노즐 내에서의 입자의 상대속도가 상단 분산판 하부에서의 입자의 상대속도보다 항상 크므로 상단으로 유입될 수 없는 입자는 상단 분산판 하부에서 상대속도가 0인 입자일 것이다. 이와 같은 가정은 본 연구에서 실험적으로 측정된 상단으로의 입자속도에 대한 결과와 일치하는 것으로써, 본 연구의 하단 가스공탐속도 범위에서 하단 가스공탐속도보다 입자의 종말속도가 큰 230 μm 이상의 입자들은 이론적으로 상단으로 유입되지 못하게 되며, 실험적으로 측정된 결과에서도 230 μm 보다 큰 입자는 거의 상단으로 유입되지 못하고 대부분 하단 유동층 내에 잔류함을 확인할 수 있었다.

또한 하단 freeboard 내에서 상단 분산판으로 유입되는 기체의 유로 변경을 그대로 쫓아가는 입자는 입자의 실제 상승속도와 가스의 선속도가 일치할 것이다. 따라서 하단 freeboard 내에서 입자의 실제 상승속도와 가스의 선속도의 차이가 증가할수록 입자는 가스의 유로 변경을 제대로 쫓아가지 못하고 상단 분산판에 의한 방해판 효과

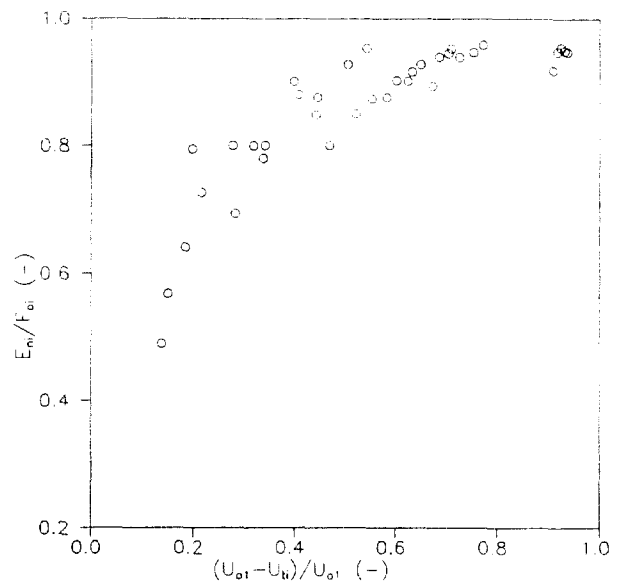


Fig. 8. Relationship between E_m/F_{a0} and $(U_{a1} - U_{a0})/U_{a1}$.

가 크게 나타날 것이다. 여기서 입자의 상승속도는 하단 가스공탐속도에서 입자의 종말속도를 뺀 입자의 slip velocity와 같고 입경 감소에 따라 입자의 종말속도는 입경의 2승에 비례하여 감소한다. 그러므로 입경 감소에 따라 하단 가스공탐속도와 종말속도의 차인 slip velocity는 증가하여 하단 가스공탐속도와 거의 같은 값을 갖게 되고 이에 따라 상단 분산판 하부에서 입자의 비발동반속도는 증가한다. 더욱이 이와 같은 입자 상승속도의 증가에 따라 입자의 slip velocity와 하단 가스공탐속도의 차는 0에 가까워 지므로 상단 분산판에 의한 방해판 효과 역시 입경 감소에 따라 감소하여 일정한 값으로 될 것이다.

이와 같은 이유로 인하여 Fig. 7에서와 같이 150 μm 보다 작은 입자들의 경우 상단으로의 유입속도가 입경에 대하여 미약한 의존성을 보이고 E_m/F_{a0} 의 값이 1에 접근하는 경향을 보인다. 150 μm 보다 큰 입자의 경우에는 입경 증가에 따라 하단 가스공탐속도와 종말속도의 차인 slip velocity가 감소하므로 상단 분산판 하부 높이까지 도달한 입자의 양이 감소할 뿐만 아니라 상단 분산판 높이까지 도달한다고 할지라도 상단 분산판에 의한 방해판 효과가 증가하여 Fig. 7에 나타난 바와 같이 입경 증가에 따라 입자의 유입속도는 급격히 감소한 것으로 생각된다.

Fig. 8은 E_m/F_{a0} 와 하단 freeboard 내에서 입자의 무차원 slip velocity, $[(U_{a1} - U_{a0})/U_{a1}]$ 와의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서 입경 d_p 인 입자의 종말침강속도(U_{a0})는 Levenspiel 등[18]에 의한 무차원 입경과 무차원 종말침강속도와의 상관관계식을 사용하여 계산하였다. 그림에 나타난 바와 같이 입자의 무차원 slip velocity가 증가함에 따라 하단으로 공급된 연료 입자 중 상단 유동층으로 유입되는 입자의 비율은 증가한다. 앞에서 언급한 바와 일정한 밀도를 갖는 입자계에서 입경이 작아질수록 입자의 종말침강속도(U_{a0})는 입경의 2승에 비례하여 작아지고, 동시에 하단 가스공탐속도가 커지게 되면 slip velocity 또한 커지게 되므로 입경이 작아질수록 입자의 실제 상승속도인 slip velocity와 하단 freeboard 내 가스의 선속도와와의 비는 1에 근접하게 된다. 따라서 Fig. 8에서와 같이 무차원 slip velocity 증가에 따라 상단 분산판에 의한 방해판 효과는 감소하여 입자의 상단으로의 유입속도는 증가한다. 더욱이 하단 freeboard의 높이가 TDH보다 훨씬 낮으므로 상단 분산판 하부에서 입자의 비발동반속도는 공기에 의한 포화상승능력보다 훨씬 큰 값을 가지며 궁극적으로 하단으로

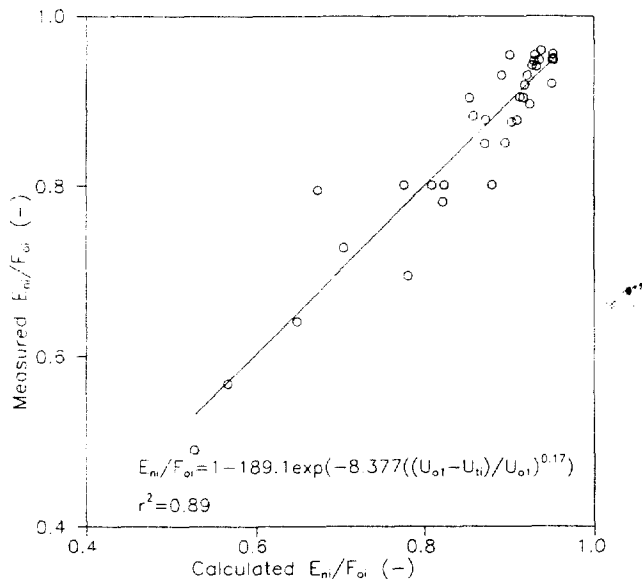


Fig. 9. Correlation result of particle input rate into the upper stage.

공급되는 입자의 공급속도 F_o 로부터 직접적인 영향을 받을 것이다. 그러므로 무차원 slip velocity 증가에 따라 E_m/F_o 는 증가할 뿐만 아니라 1로 접근하는 경향을 보인다.

Fig. 9는 하단으로 공급된 연료 입자 중 상단으로 유입되는 입자의 분율(E_m/F_o)과 무차원 slip velocity간의 상관관계를 구한 결과이다. 본 연구의 유동층 구조와 조업범위 내에서 아래 식 (1)에 나타낸 바와 같이 입자의 하단에 잔류하는 분율은 무차원 slip velocity에 지수함수적인 상관관계를 가졌으며, 이 때 상관계수는 0.89이었다.

$$\frac{E_m}{F_o} = 1 - 189.1 \exp \left[-8.377 \left(\frac{U_{o1} - U_n}{U_{o1}} \right)^{0.17} \right] \quad (1)$$

4. 결 론

2단 선회류 유동층에서는 하단 유동층에 공급된 입자들 중 일부는 하단 가스공탐속도에 영향을 받아 상단으로 유입되어 상단 유동층을 형성하게 된다. 본 연구에서는 상온 2단 선회류 유동층에서 하단 가스공탐속도 변화에 따른 상단으로의 입자 유입속도와 입경분포를 측정하였으며, 측정 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 하단 유동층에 공급된 입자들 중 입자의 상단 유입량은 하단 가스공탐속도 범위($U_{n1}=0.9-1.3$ m/s)에서 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 증가하였으며, 상단으로의 입자 유입량은 하단 유동층으로 공급되는 입자량의 약 35-48% 정도의 값을 보였다.

(2) 하단 가스공탐속도 증가에 따라 상단으로 유입되는 입자의 평균 입경은 $91 \mu\text{m}$ 에서 $105 \mu\text{m}$ 로 증가하였으며, 상단으로 유입된 입자 중 상단 freeboard 내에서 포집된 입자들의 입경분포는 상단으로 유입된 입자들의 입경분포와 거의 동일한 경향을 보였다.

(3) 입경별 상단으로의 입자 유입속도를 측정한 결과 하단 가스공탐속도보다 입자의 종말속도가 큰 입자들은 거의 상단으로 유입되지 못하였으며, 종말속도가 하단 가스공탐속도보다 작은 입자들의 경우 하단으로 공급된 연료입자 중 상단으로 유입된 입자의 분율은 입경이 감소할수록, 그리고 하단 가스공탐속도가 증가할수록 증가하였다.

(4) 하단으로 공급된 연료입자 중 상단으로 유입된 입자의 분율은

아래 식과 같이 무차원 slip velocity에 대하여 지수함수적인 상관관계를 가졌으며, 이 때 상관계수는 0.89이었다.

$$\frac{E_m}{F_o} = 1 - 189.1 \exp \left[-8.377 \left(\frac{U_{o1} - U_n}{U_{o1}} \right)^{0.17} \right]$$

감 사

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구비 지원(92-2600-02-01-3)과 핵심전문연구비 지원(923-1000-010-2)에 의하여 이루어진 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

사용기호

- d_p : diameter of particle [m]
- E_m : particle input rate into the upper stage of size d_p [kg/s]
- F_o : particle feed rate [kg/s]
- F_m : particle feed rate of size d_p [kg/s]
- F_2 : trapping rate of particles in the upper stage [kg/s]
- F_3 : elutriation rate of particles [kg/s]
- U_{o1} : primary air superficial velocity [m/s]
- U_n : terminal velocity of particle of size d_p [m/s]

참고문헌

1. Sarofim, A. F.: "Handbook of Solid Waste Management: Thermal Processing; Incineration and Pyrolysis", Van Nostrand Reinhold Co., New York(1977).
2. Berkowitz, N.: "An Introduction to Coal Technology", Chap. 10, Academic Press, New York(1979).
3. Radovanovic, M.: "Fluidized Bed Combustion", Chap. 1, Hemisphere Publishing Co., New York(1986).
4. Taylor, T. E.: Proc. of the 2nd Eng. Found. Conf. on FBC, 258(1978).
5. Anthony, E. J., Becker, H. A., Code, R. K., Liang, D. T. and Stephenson, J. R.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, 32(1985).
6. Chen, T. P. and Saxena, S. C.: Proc. of the 2nd Eng. Found. Conf. on FBC, 151(1978).
7. Korenberg, J.: Proc. Int. Conf. on Fluidization, 491(1983).
8. Lee, J. K., Hu, C. G., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **68**(5), 824(1990).
9. 이제근, 이기호, 이규현, 전해수: 화학공학, **28**(4), 470(1990).
10. 이제근, 이기호, 장정국, 임준혁, 임종성, 전해수: 화학공학, **30**(4), 499(1992).
11. 이제근, 장정국, 여석준, 허철구, 임준혁, 전해수: 한국폐기물학회지, **9**(1), 45(1992).
12. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **24**(6), 703(1991).
13. Lee, J. K., Lee, K. H. and Chun, H. S.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **26**(2), 179(1993).
14. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G. and Chun, H. S.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **26**(4), 368(1993).
15. Gong, J. H., Lim, J. H., Shin, Y. S., Lee, J. K. and Chun, H. S.: Proc. 1st Asian Conf. on Fluidized Bed and 3-Phase Reactors, Tokyo, Japan, 253(1988).

16. Lim, J. H., Lim, J. S., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: Proc. of 2nd Asian Conf. on Fluidized Bed and 3-Phase Reactors, Kenting, Taiwan, 202(1990).
17. Horio, M., Shibata, T. and Muchi, I.: Proc. 4th Int. Conf. on Fluidization, 307(1984).
18. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", 2nd ed., Ch. 1, Ch. 7, Butterworth-Heinemann Inc., New York(1991).
19. Zenz, F. A. and Weil, N. A.: *AIChE J.*, **4**(4), 472(1958).