

기체-고체 유동층에서 사이클론과 프리보드의 형상이 고체 비산 손실에 미치는 영향

류호정^{1,†} · 조성호¹ · 이승용¹ · 이도연¹ · 남형석¹ · 황병욱¹ · 김하나¹ · 원유섭¹ · 김정환¹ · 백점인²

¹한국에너지기술연구원, ²한국전력공사 전력연구원

Effects of Cyclone and Freeboard Geometry on Solid Entrainment Loss in a Gas-Solid Fluidized Bed

HO-JUNG RYU^{1,†}, SUNG-HO JO¹, SEUNG-YONG LEE¹, DOYEON LEE¹, HYUNGSEOK NAM¹,
BYUNG WOOK HWANG¹, HANA KIM¹, YOO SEOB WON¹, JUNGHWAN KIM¹, JEOM-IN BAEK²

¹Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

²Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, 105 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

[†]Corresponding author :
hjryu@kier.re.kr

Received 23 July, 2019
Revised 13 August, 2019
Accepted 31 August, 2019

Abstract >> Effects of cyclone and freeboard geometry on solid entrainment loss were investigated with two different types of cyclones and bubbling beds in a gas-solid fluidized bed system. The solid entrainment loss was measured by collected fines during continuous solid circulation condition. Bubbling bed which has an expanded freeboard showed less solid entrainment than the bubbling bed which has a straight freeboard. The cyclone which has a wide gas-solid mixture inlet showed less solid entrainment loss than the cyclone which has a narrow gas-solid mixture inlet. Moreover, the cyclone has a wide gas-solid mixture inlet can capture smaller particles.

Key words : Fluidized bed(유동층), Cyclone(사이클론), Freeboard(프리보드), Geometry(형상), Solid entrainment(입자비산)

1. 서론

기체-고체 유동층은 고정층(fixed bed), 이동층(moving bed) 공정에 비해 물질 및 열전달 속도가 높고 여러 개의 반응기 사이에서 고체순환이 가능하여 순환유동층 연소(circulating fluidized bed combustion, CFBC), 유동층 촉매개질(fluidized catalytic cracking, FCC)과 같이 내부 유동물질이나 촉매입자의 재순환

이 필요한 경우 및 매체순환연소(chemical looping combustion, CLC), 회수증진 수성가스화(sorption enhanced water gas shift, SEWGS), 건식 CO₂ 회수(CO₂ capture using dry sorbent)와 같이 산화-환원 또는 흡수-재생의 개별적인 반응이 동시에 일어나는 공정에 널리 사용되고 있다¹⁻⁴⁾. 특히 다탑 기체-고체 유동층 공정은 적어도 하나 이상의 유동층을 고속유동층(fast fluidized bed)으로 설치하여 고속유동층에서 입

자의 종말속도(terminal velocity) 이상의 유속으로 입자를 비산시키고 사이클론 등의 기체-고체 분리장치에 의해 입자를 포집하여 다른 쪽 반응기로 이송시키는 공정 구성을 갖게 된다⁵⁾.

한편, 다탑 유동층 내부에 존재하는 입자의 반응속도가 빠른 경우에는 고속유동층 또는 난류유동층(turbulent fluidized bed)이 사용될 수 있으며 입자의 반응속도가 느린 경우에는 기체-고체의 충분한 접촉시간을 확보하기 위해 기체유속이 상대적으로 낮은 기포유동층(bubbling fluidized bed)이 사용될 수 있다. 앞서 언급한 다탑 유동층 공정 중에서 상업공정인 유동층 촉매개질 공정의 경우 고속유동층-고속유동층 구성이 주로 사용되고 있으며 매체순환연소, 회수증진 수성가스화, 건식 CO₂ 회수 등과 같이 현재 기술개발 중이며 규모격상(scale-up) 과정에 있는 공정의 경우에는 반응에 사용되는 입자도 함께 개발 중이므로 충분한 반응성 확보를 위해 고속유동층-기포유동층 구성이 주로 사용되고 있다²⁻⁴⁾.

고속유동층의 경우 비산된 입자를 포집하는 사이클론의 효율이 낮으면 입자가 지속적으로 손실되므로 주기적으로 입자를 보충(make-up)해야 하며, 값비싼 입자를 사용하는 경우 전체 시스템의 경제성에 악영향을 미치게 된다⁶⁾. 또한 기포유동층의 경우에도 기체유속은 낮지만 입자층 표면에서 기포가 파괴되면서 고체층 상부로 입자가 비산될 수 있으며 고속유동층에 비해서는 적은 양의 입자가 비산되지만 장기간의 운전시간을 고려하면 무시하지 못할 정도의 입자 비산손실이 발생할 수 있다. 따라서 다탑유동층 공정의 설계 과정에서 입자의 비산손실을 최소화할 수 있는 사이클론 및 기포유동층 형상에 대한 고려가 필수적이다.

특히 다탑 유동층 공정의 규모 격상(scale-up) 과정에서 내화물(refractory)을 설치할 경우 사이클론 상부 기체출구 부위의 두께(thickness) 변화에 의해 기체-고체 혼합물 유입부와 간섭이 발생하는 경우가 있으며, 기포유동층의 경우 내화물 설치시 단면적의 변화가 없는 경우가 시공이 편리하므로 기포유동층 상부에 프리보드(freeboard)를 설치하지 않는 설계

기준을 적용할 수 있다. 하지만 이러한 설계 기준의 변화가 고체 비산손실에 미치는 영향에 대한 고려는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다탑 유동층 공정에 사용되는 사이클론과 기포유동층 프리보드 형상이 고체 비산손실에 미치는 영향을 측정 및 해석하였으며, 향후 다탑 유동층 공정의 규모격상 과정에서 설계기준을 결정하는데 도움을 주고자 하였다.

2. 실험

2.1 유동화 입자

유동화 입자로는 한국전력공사 전력연구원에서 분무건조법(spray drying method)에 의해 제조한 산소전달입자(OCN706-1100)를 사용하였다. Fig. 1에는 OCN706-1100 입자의 광학현미경 사진을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 입자는 구형을 나타내었다. Table 1에는 산소전달입자의 입자 특성을 요약하여 나타내었다. OCN706-1100 입자의 입자밀도는 4,537 kg/m³, 벌크밀도는 1,655 kg/m³였으며 평균 입자 크기는 125 μm였다⁷⁾.

2.2 실험장치

Fig. 2에는 실험에 사용한 2탑 연결 순환유동층 실

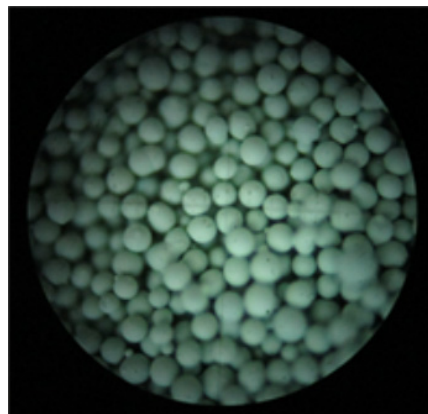


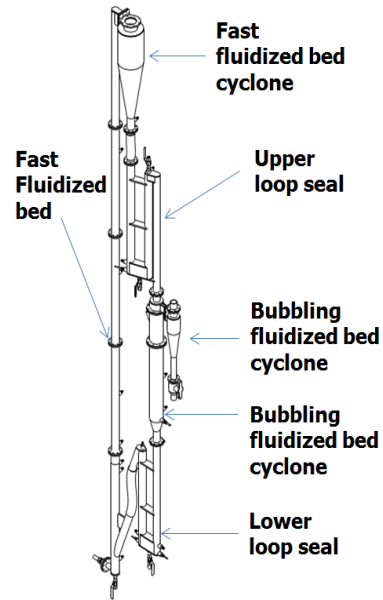
Fig. 1. Microscopic image of OCN706-1100 particle

험장치를 나타내었다. 실험장치의 3차원 형상 및 각 부분의 명칭을 Fig. 2(a)에 나타내었으며 유동화를 위해 공기를 주입하는 질량유량계(mass flow controller, MFC)의 배치를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 2탑 연결 순환유동층 시스템은 고속유동층(fast fluidized bed), 고속유동층 사이클론, 상부 루프실(upper loop seal), 기포유동층(bubbling fluidized bed), 기포유동층 사이클론, 하부 루프실(lower loop seal)로 구성되어 있으며 내부의 고체 거동을 관찰할 수 있도록 아크릴 재질로 제작하였다. 고속유동층은 바닥부터 1 m까지는 내경 0.06 m이며, 0.1 m 길이의 축소부(tapered zone)를 거치면서 내경 0.05 m로 축소되도록 하였으며, 내경 0.05 m인 구간의 총 길이는 4 m로 고속유동층의 총 높이는 5.1 m이다. 고속유동층 사이클론의 내경은 0.2 m이며 총 높이가 0.8 m로 설계하였으며 내부의 치수를 다르게 하여 두 종류의 사이클론을 제작하였다. 상부 루프실과 하부 루프실의 수직관 내경은 0.05 m이며, 수직관 바깥쪽 사이의 거리는 0.1 m로 설계하였다. 기포유동층의 경우 하부측의 내경은 0.1 m로 동일하지만 상부측의 내경이 다른 두 종류의 기포유동층을 제작하였다. 기포유동층 사이클론은 내경 0.09 m, 총 높이가 0.36 m로 제작하였다.

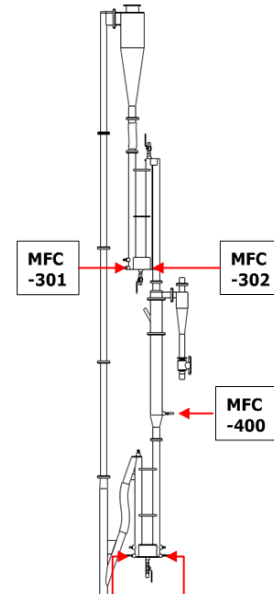
고속유동층, 상부 루프실, 기포유동층 및 하부 루프실의 유동화를 위해 Fig. 2(b)와 같이 총 6개의 질량유량계를 사용하였으며, 공기압축기에서 압축된 공기를 질량유량계와 스파저(sparger)를 통해 각 부분에 주입하였다.

2탑 연결 순환유동층 실험장치에 유동화 입자를 장입한 후, 상부 루프실과 기포유동층을 먼저 유동화 시킨 후 고속유동층에 공기를 주입하였다. 이후 하부 루프실을 유동화시키면 유동화 입자는 기포유동층에

서부터 중력에 의해 하강하면서 하부 루프실을 거쳐서 고속유동층으로 이송되며 고속유동층 사이클론에



(a)



(b)

Table 1. Properties of oxygen carrier particles

| Particle name | Raw materials (wt. %) | | Apparent density (kg/m ³) | Bulk density (kg/m ³) | Mean particle size (μm) |
|---------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | Metal oxide | Supporter/p romoter | | | |
| OCN706-1100 | NiO (70) | Confidential (30) | 4,537 | 1,655 | 125 |

Fig. 2. (a) 3D view of two-interconnected circulating fluidized bed system, (b) mass flow controller arrangement

서 입자가 포집되어 상부 루프실을 거쳐서 기포유동층으로 재순환된다⁸⁾.

고속유동층, 상부 루프실, 하부 루프실 및 기포유동층에 존재하는 고체층의 높이를 측정하기 위해 각 위치에 차압형 압력변환기(differential pressure transducer)를 설치하였다. 질량유량계의 유량 및 차압형 압력변환기에서 측정되는 차압값은 programmable logic controller (PLC)를 거쳐서 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

각 조업 조건에서 고체순환속도 측정을 위해 고체가 연속적으로 순환되는 조건에서 상부 루프실의 질량유량계를 통한 기체유입을 정지하여 상부 루프실을 유동화 상태에서 고정층 상태로 변화시켰으며 이를 통해 고속유동층 사이클론에서 포집된 입자가 상부루프실과 사이클론 사이에 쌓이도록 하였고 기포유동층으로의 고체 재순환이 없는 조건에서 시간 변화에 따른 기포유동층 내부 고체층 높이의 감소 정도를 측정하여 입자의 벌크밀도로부터 단위시간 동안 단위면적당 고체순환량인 고체순환속도($\text{kg/m}^2\text{s}$)를 계산하였다. 실험장치 및 고체순환 방법과 고체순환속도 측정 예시에 대해서는 기존 보고⁹⁾에 자세히 나타나 있다.

2.3 기포유동층 프리보드 형상 변화

Fig. 3에는 실험에 사용한 두 가지 기포유동층의 3차원 형상 및 내부 치수를 비교하여 나타내었다. Type A 기포유동층의 경우 프리보드에 확장구간이 있는 경우로서 공기가 주입되는 스파저로부터 0.75 m 까지 기포유동층 하부 직경(D1)은 0.1 m이며, 0.05 m 길이의 확대부(tapered zone)를 거치면서 상부 직경(D2)은 0.15 m로 확대되도록 하였고, 내경 0.15 m인 구간의 길이는 0.21 m로 기포유동층의 기체출구 아래까지의 높이는 1.01 m이다. Type B 기포유동층의 경우 프리보드에 확장구간이 없는 경우로서 공기가 주입되는 스파저로부터 기포유동층의 기체출구 아래까지 1.01 m 구간의 직경(D1)이 모두 0.1 m로 동일하게 제작되었다.

2.4 고속유동층 사이클론 형상 변화

Fig. 4에는 실험에 사용한 두 가지 사이클론의 3차원 형상 및 내부 치수를 비교하여 나타내었다. 두 가지 사이클론 모두 외부에서 보는 3차원 형상은 큰 차이가 없으며, Fig. 4에 D로 표시된 사이클론 기체배

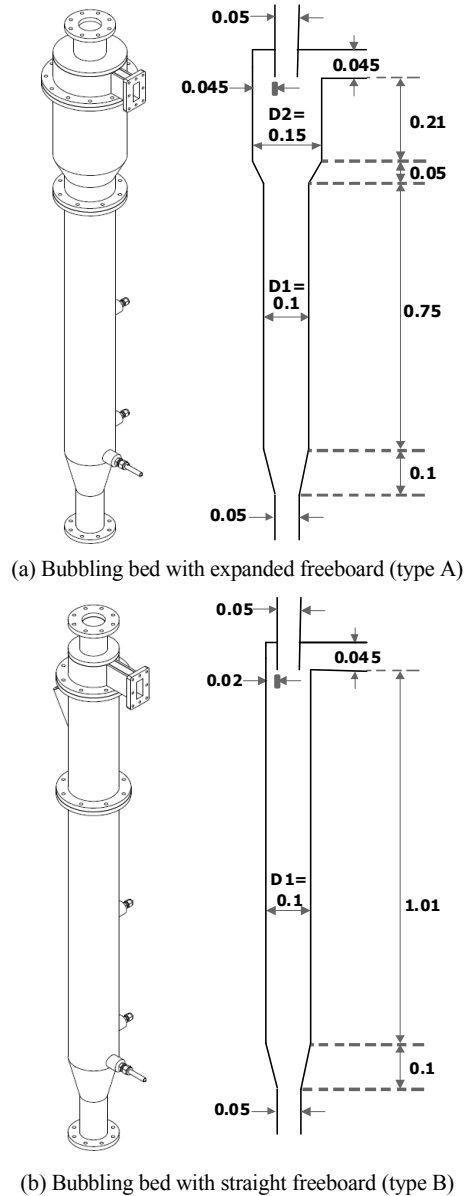


Fig. 3. 3D view and detail dimension of two bubbling beds (unit: m)

출구의 직경은 동일하지만, 두께의 차이에 의해 W로 표시된 기체와 고체 혼합물의 주입구 폭이 달라지는 두 종류의 사이클론을 제작하여 고체입자의 비산손실량을 비교하고자 하였다. 특히 W의 변화는 사이클론 제작 시 내경은 동일하지만 각 부분의 두께가 변화하는 경우의 영향을 반영하기 위해 고려하였다. Fig. 2에 표시된 실험장치 그림은 type B의 사이클론과 기포유동층이 연결된 경우를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5에는 Fig. 3에 나타낸 두 가지 기포유동층에 대해 장시간의 고체순환 동안 기포유동층 사이클론에서 포집된 입자량 및 기포유동층 사이클론에서 포집되지 못하고 상부의 기체출구를 통해 배출된 미세

입자들이 후단의 필터에서 포집된 양을 나타내었다.

고체를 순환하기 위한 조건으로 고속유동층의 유량은 430 Nl/min (고속유동층 하부 직경 기준 2.8 m/s, 상부 직경 기준 4.0 m/s)로 고정하였으며, 기포유동층의 유량은 26 Nl/min (하부 직경 기준 0.06 m/s), 상부 루프실의 유량은 4.0 Nl/min (0.037 m/s), 하부 루프실의 유량은 2.6 Nl/min (0.024 m/s)로 고정하였다. Type A와 B의 기포유동층에 대해 각각 28.6시간 및 27.6시간 동안 연속적으로 고체를 순환하였다. 프리보드 형상의 영향을 비교하기 위한 실험 조건에서 고속유동층 사이클론은 Fig. 4에 나타난 type A의 사이클론을 사용하였다.

기포유동층 사이클론에서 포집되는 고체량은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기포유동층 사이클론 고체배출구 하부의 밸브에 thimble filter를 연결하여 입자포집 전, 후의 필터무게를 측정하여 계산하였다. 기포유동

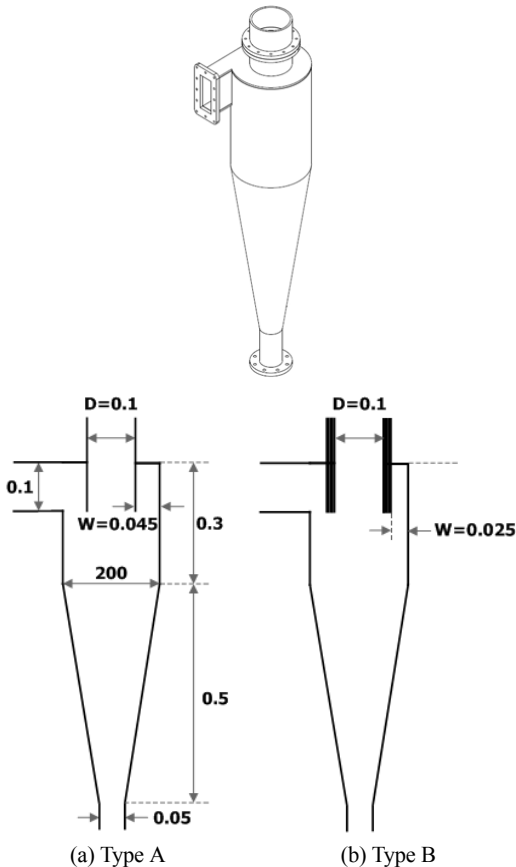


Fig. 4. 3D view and detail dimension of two cyclones (unit: m)

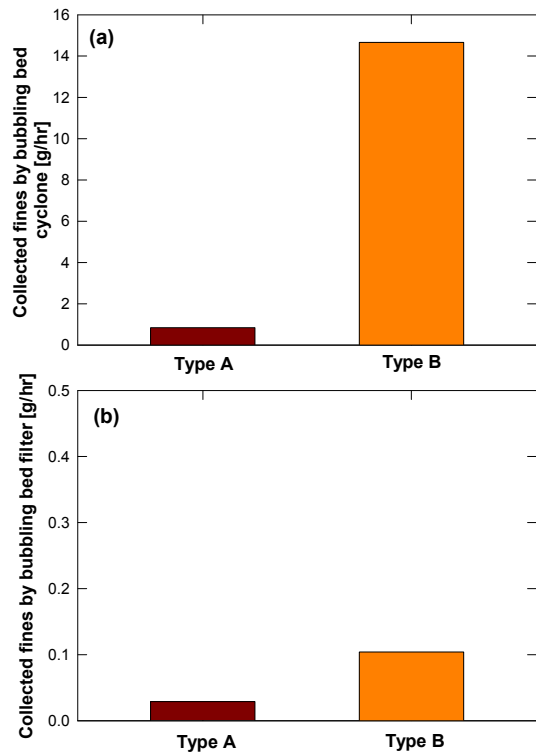


Fig. 5. Comparison of collected fines by (a) bubbling fluidized bed cyclone and (b) filter

층 사이클론 후단의 필터에서 포집되는 고체량도 유사하게 입자포집 전, 후의 필터무게를 측정하는 방법을 사용하였다. 기포유동층 사이클론 및 필터에서의 시간당 고체포집량은 포집된 고체량을 총 고체순환 시간으로 나누어 결정하였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 두 가지 기포유동층 모두 사이클론에 의한 시간당 고체포집량에 비해 필터에 의한 시간당 고체포집량이 작게 나타났는데 이는 기포유동층에서 비산된 입자의 대부분이 사이클론에서 우선적으로 포집되며, 사이클론에서 포집되지 않은 입자들이 필터에서 포집되는 것을 의미한다.

프리보드 형상 변화의 영향을 살펴보면 type A의 기포유동층과 같이 프리보드의 직경이 확장된 경우가 type B와 같이 프리보드의 직경 변화가 없는 경우에 비해 사이클론에서 포집되는 고체량과 필터에서 포집되는 고체량 모두 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 경향은 프리보드의 직경이 확장되면서 해당 구간의 기체유속이 감소하므로 입자비산이 감소하기 때문이며, 기포유동층 상부를 통해 주입되는 고체의 재비산도 감소하기 때문으로 해석할 수 있다¹⁰⁾. 즉, 기포유동층에 공기 유량 26 NL/min를 주입하는 경우 직경 0.1 m인 경우에는 내부 기체유속이 0.06 m/s인 반면 직경이 0.15 m로 확대되는 경우 기체유속이 절반 이하인 0.027 m/s로 감소하게 되기 때문이다.

한편, 기포유동층 사이클론과 필터에서 포집된 입자의 크기를 비교하기 위해 입도분석을 수행하고자 하였으나 각 위치에서 포집된 고체입자의 양이 입도 분석에 필요한 양보다 적어 수행할 수 없었다.

Fig. 6에는 Fig. 4에 나타난 두 가지 사이클론에 대해 장시간의 고체순환 동안 고속유동층 사이클론에서 포집되지 못하고 배출된 미세입자들이 후단의 필터에서 포집된 양을 정리하여 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 고속유동층 사이클론에서 포집된 입자는 상부 루프실로 이동하게 되므로 사이클론에서 포집된 입자량을 별도로 측정할 수 없었으며 고속유동층 사이클론에서 포집되지 못하고 배출되는 입자를 필터를 이용하여 포집한 후 비교하였다.

고체를 순환하기 위한 조건으로 고속유동층의 유

량은 450 NL/min (고속유동층 하부 직경 기준 2.9 m/s, 상부 직경 기준 4.2 m/s)로 고정하였으며, 기포유동층의 유량은 26 NL/min (하부 직경 기준 0.06 m/s), 상부 루프실의 유량은 4.0 NL/min (0.037 m/s)로 고정하였다.

사이클론의 형상 변화에 따른 고체입자의 비산손실량 변화와 함께 고체순환속도의 영향도 함께 고려하기 위해 하부 루프실의 유량을 2.6 NL/min (0.024 m/s)와 3.0 NL/min (0.028 m/s)로 변경시켰으며 이로 인해 고체순환속도는 11.8 kg/m²s와 16.3 kg/m²s로 변화시킬 수 있었다. 사이클론 형상과 고체순환속도의 영향을 비교하기 위한 실험 조건에서는 Fig. 3에 나타난 type A의 기포유동층을 사용하였다.

고속유동층 사이클론 후단 필터에서의 포집 고체량은 입자포집 전-후의 필터무게를 측정하는 방법을 사용하여 측정하였으며 포집된 고체량을 총 고체순환 시간으로 나누어 시간당 고체포집량을 결정하였다.

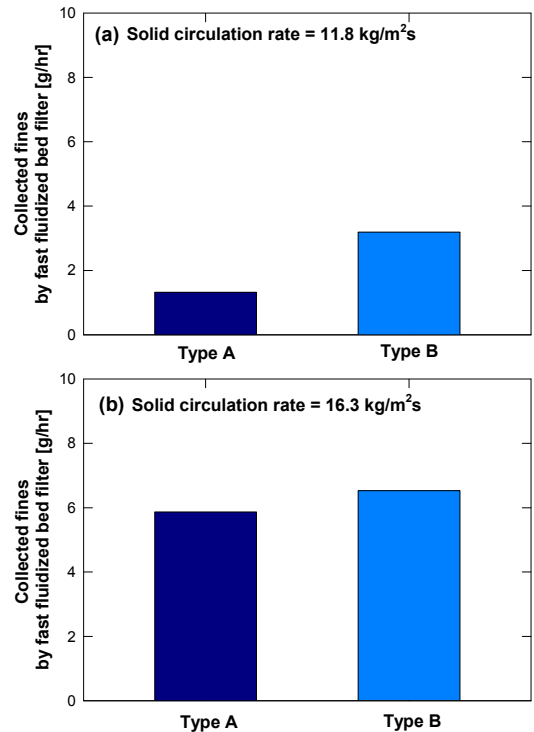


Fig. 6. Comparison of collected fines by fast fluidized bed filter (a) solid circulation rate=11.8 kg/m²s, (b) solid circulation rate=16.3 kg/m²s

Fig. 6에 나타난 바와 같이 동일한 고체순환속도에서 type A의 사이클론을 사용하였을 때 type B의 사이클론에 비해 사이클론 후단 필터에 포집되는 고체량이 적은 것으로 나타났으며 결과적으로 type A의 사이클론의 포집 효율이 type B의 사이클론에 비해 우수한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4에서 W로 표시된 사이클론 상부 배출부의 외경이 증가하면서 유입된 고체의 일부가 사이클론 상부의 배출구에 의해 흐름에 방해받을 수 있으며, 이로 인해 사이클론의 포집효율이 저하되기 때문으로 사료되었다.

한편, 동일한 사이클론을 사용하였을 경우에도 고체순환속도가 증가함에 따라 필터에 포집되는 고체량이 증가하는 경향을 나타내었으며(Fig. 6[a]와 Fig. 6[b] 비교), 이는 고체순환량이 증가하면 사이클론으로 유

입되는 고체량이 증가하고 사이클론의 포집효율이 동일한 경우에도 사이클론에서 포집하지 못하고 필터로 배출되는 절대량은 증가하기 때문으로 사료되었다.

Fig. 6(b)의 실험에서는 사이클론 형상 변화에 따른 고체입자의 비산손실량 비교와 함께 사이클론에서 포집되지 않은 입자의 입도분포(즉, 필터에 포집된 입자의 입도분포)를 고려하기 위해 입도분석에 필요한 충분한 양의 고체시료를 얻고자 하였으며 이를 위해 장시간(type A: 32시간, type B: 52시간)의 고체순환시간 및 높은 고체순환속도(16.3 kg/m²s)를 조업변수로 선정하였다.

Fig. 7에는 Fig. 6(b)의 실험 조건에서 고속유동층 사이클론 후단의 필터에서 포집된 입자의 입도분포 분석 결과를 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 type A의 사이클론을 사용한 경우에는 필터에서 포집되는 입자의 대부분이 0.425 μm 이하(Fig. 7[a]에는 나타나지 않았으나 0.375-0.425 μm의 입자 극미량 존재)인 반면 type B의 사이클론을 사용한 경우에는 31 μm의 입자까지도 사이클론에서 포집되지 못하고 필터에서 포집되는 것으로 나타났다. 결과적으로 type A의 사이클론이 시간당 고체 비산손실량과 손실된 고체의 입도분포 측면에서 모두 type B의 사이클론에 비해 유리한 것으로 나타났다.

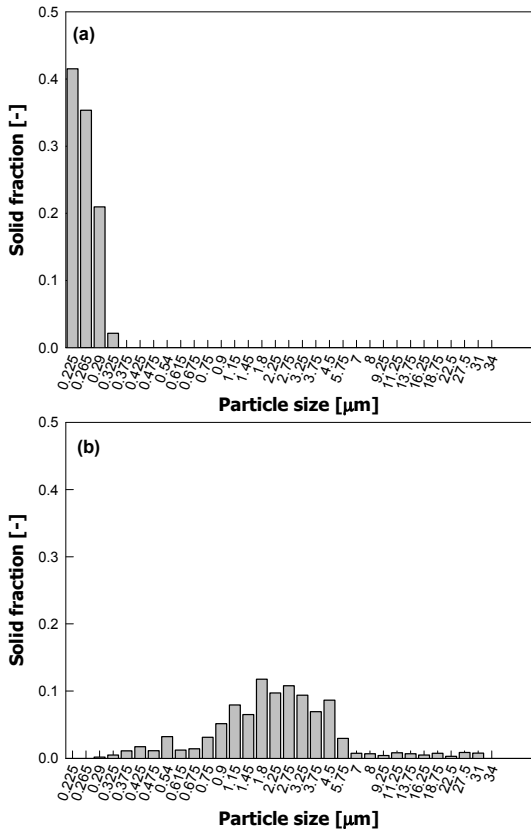


Fig. 7. Comparison of particle size distribution for collected fines by fast fluidized bed filter, (a) type A cyclone, (b) type B cyclone

4. 결론

2탑 연결 기체-고체 유동층에서 기포유동층 프리보드 형상 및 고속유동층 사이클론 형상의 변화가 고체 비산손실에 미치는 영향을 측정 및 해석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 기포유동층 프리보드 직경이 확장된 경우가 프리보드의 직경 변화가 없는 경우에 비해 사이클론에서 포집되는 고체량과 필터에서 포집되는 고체량 모두 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 경향은 프리보드의 직경이 확장되면서 해당 구간의 기체유속이 감소하므로 입자비산속도가 감소하기 때문으로 사료되었다.

2) 사이클론 상부 배출부의 외경이 증가하여 유입된 고체의 일부가 사이클론 상부 배출구에 의해 흐름이 방해 받는 경우 사이클론의 포집효율이 저하되며 이로 인해 사이클론에서 포집되지 못하고 손실되는 양이 증가하며 손실되는 입자크기도 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제이다(20152010201840).

References

1. D. Lee, D. Shun, D. H. Bae, H. J. Ryu, and J. I. Baek, "Solid Circulation Characteristics of Two Lower Loop Seals with Two Kinds of Particles in a Circulating Fluidized Bed System", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 52, No. 1, 2019, pp. 106-110, doi: <https://doi.org/10.1252/jcej.18we057>.
2. H. Ryu, D. Lee, M. Jang, J. Kim, and J. I. Baek, "Conceptual Design and Feasibility Study on 0.5 MWth Pressurized Chemical Looping Combustor", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 2, 2016, pp. 201-210, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.2.201>.
3. H. J. Ryu, H. S. Kim, S. Y. Lee, D. H. Lee, and J. C. Kim, "Effects of Operating Variables on Sorption Capacity of CO₂ Absorbents for SEWGS Process", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 50, No. 6, 2012, pp. 994-1001, doi: <http://dx.doi.org/10.9713/kcer.2012.50.6.994>.
4. K. Kim, S. Yang, J. B. Lee, T. H. Eom, C. K. Ryu, H. J. Lee, T. S. Bae, Y. B. Lee, and S. J. Lee, "A Log-term Test of a New CO₂ Sorbent (KEP-CO2P2) in a 0.5 MW_e CO₂ Capture Test Bed", *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 32, No. 4, 2015, pp. 677-684, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11814-014-0297-7>.
5. H. J. Ryu, S. H. Jo, S. Y. Lee, D. Lee, H. Nam, B. W. Hwang, H. Kim, J. Kim, and J. I. Baek, "Solid Circulation and Reaction Characteristics of Mass Produced Particle in a 0.5 MWth Chemical Looping Combustion System", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 170-177, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.170>.
6. H. Ryu, D. Lee, S. Lee, and G. Jin, "Attrition Characteristics of WGS Catalyst for SEWGS System", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 2, 2014, pp. 122-130, doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.2.122>.
7. H. J. Ryu, D. Lee, H. Nam, S. H. Jo, and J. I. Baek, "Solid Circulation Characteristics of Two Oxygen Carriers for Chemical Looping Combustion System", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 393-400, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.393>.
8. D. H. Lee, S. H. Jo, G. T. Jin, C. K. Yi, H. J. Ryu, and S. B. Park, "Comparison of Solid Circulation Characteristics with Change of Lower Loop Seal Geometry in a Circulating Fluidized Bed", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 52, No. 4, 2014, pp. 522-529, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2014.52.4.522>.
9. J. Yoon, H. Kim, J. Kim, D. Lee, J. I. Baek, and H. J. Ryu, "Solid Circulation Characteristics of Oxygen Carrier for Chemical Looping Combustion System at Ambient Temperature and Pressure", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 4, 2017, pp. 384-391, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.4.384>.
10. Y. S. Won, M. S. Khurram, A. R. Jeong, J. H. Choi, and H. J. Ryu, "Predicting the Transport Velocity by the Correlation on Particle Entrainment Rate in the Gas Fluidized-bed", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 55, No. 5, 2017, pp. 638-645, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2017.55.5.638>.