

기체-고체 유동층에서 루프실의 형상이 고체순환에 미치는 영향

류호정^{1,†} · 조성호¹ · 이승용¹ · 이도연¹ · 남형석¹ · 황병욱¹ · 김하나¹ · 원유섭¹ · 김정환¹ · 백점안²

¹한국에너지기술연구원, ²한국전력공사 전력연구원

Effect of Loop Seal Geometry on Solid Circulation 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 14 July, 2019
Revised 8 August, 2019
Accepted 31 August, 2019

Abstract >> Effect of loop seal geometry on solid circulation characteristics was investigated with two different types of upper loop seals and lower loop seals in a gas-solid fluidized bed system. Upper loop seal which has a wide gap between solid intake and outlet parts requires more fluidization gas to maintain smooth solid circulation. Moreover, the lower loop seal which has a wide gap requires more fluidization gas to achieve the same solid circulation rate. These results can be explained by results of minimum fluidization velocity in the lower loop seals. Consequently, if a loop seal has a wide gap between solid intake and outlet parts, more fluidization gases should be fed to ensure enough solid circulation rate and smooth solid circulation.

Key words : Fluidized bed(유동층), Loop seal(루프실), Geometry(형상), Solid circulation(고체순환), Minimum fluidization(최소유동화)

1. 서론

기체-고체 유동층 공정은 순환유동층 연소(circulating fluidized bed combustion, CFBC), 유동층 촉매개질(fluidized catalytic cracking, FCC), 매체순환연소(chemical looping combustion, CLC), 회수증진 수성가스화(sorption enhanced water gas shift, SEWGS)와 같은 상업 공정과 신규 시스템 개발에 널리

사용되고 있다^{1,4)}.

특히, 두 개의 유동층 반응기 사이에서 고체가 순환되는 다탑 유동층 시스템에서 두 반응기 사이의 원활한 고체순환과 기체 혼합 방지를 위한 비기계적 밸브(non-mechanical valve)로 L-valve, J-valve, 루프실(loop seal), 실 팻(seal pot) 등이 사용되고 있으며 이 중 루프실은 고체순환속도의 제어가 용이하여 널리 사용되고 있다¹⁾.

일반적으로 루프실은 고체유입부와 고체배출부가 연결되어 있으며, 하부에서 스파저(sparger) 또는 기체분산판(gas distributor)을 통하여 기체를 주입하게 된다. 루프실은 하부에서 주입되는 유동화기체에 의해 유동화되어 내부의 고체입자가 유체와 같은 특성을 갖게 되므로 연속적으로 고체가 주입되고 배출될 수 있으며 루프실 하부에서 주입되는 기체는 상부방향으로 이동하고, 내부에 존재하는 고체층에 의해 기체의 역흐름을 방지할 수 있으므로 두 반응기 사이의 기체 혼합을 최소화할 수 있는 장점이 있다^{2,3)}.

하지만 루프실에 대한 기존 연구들의 경우, 고체순환속도에 미치는 루프실 조업변수(루프실 유동화 유속, 유동화 위치, 고체 특성 등)의 영향에 집중하였으며⁵⁻¹⁰⁾, 루프실의 형상 변화가 고체순환에 미치는 영향에 대한 연구는 제한적인 실정이다. 특히 순환유동층 공정의 개발 과정에서 실험실 수준의 장치에서는 루프실의 고체유입부와 배출부 사이의 거리가 가깝게 설치될 수 있으나 규모 격상(scale-up) 과정에서 두 개의 유동층 반응기 사이의 거리가 멀어지거나 루프실 내부에 내화물(refractory)을 설치할 경우 고체유입부와 배출부 사이의 거리가 멀어질 수 있으며 이로 인해 루프실 내에서 입자의 수평 이동거리가 증가할 수 있다.

본 연구에서는 순환유동층 공정에 사용되는 두 종류의 루프실(상부 루프실 및 하부 루프실)에 대해 고체유입부와 배출부 사이의 거리 변화가 고체순환에 미치는 영향을 종합적으로 측정 및 해석하였으며, 향후 순환유동층 공정의 규모격상 과정에서 운전변수를 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 나타내

었다. 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 μm였다.

2.2 실험장치

Fig. 2에는 실험에 사용한 2탑 연결 순환유동층 실험장치를 나타내었다. 실험장치의 3차원 형상 및 각 부분의 명칭을 Fig. 2(a)에 나타내었으며 유동화를 위해 공기를 주입하는 질량유량계(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.

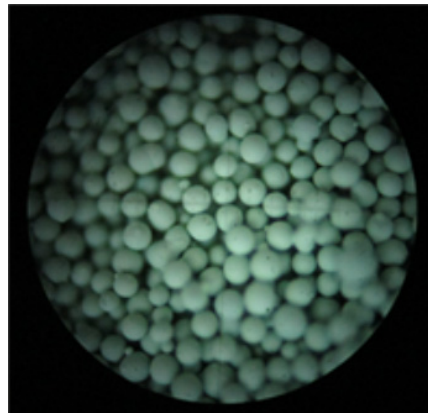


Fig. 1. Microscopic image of OCN706-1100 particle

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/promoter			
OCN706-1100	NiO (70)	Confidential (30)	4,537	1,655	125

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 구간 의 총 길이는 4 m로 고속유동층의 총 높이는 5.1 m 이다. 고속유동층 사이클론의 내경은 0.2 m이며 총 높이가 0.8 m로 설계하였다. 상부 루프실과 하부 루프 실의 수직관 내경은 0.05 m이며, 수직관 바깥쪽 사이 의 거리는 0.1, 0.01 m의 두 종류로 설계하였다. 기포 유동층의 경우 내경 0.1 m, 높이 1.05 m이며 기포유 동층 사이클론은 내경 0.09 m, 총 높이 0.36 m로 설 계하였다.

고속유동층, 상부 루프실, 기포유동층 및 하부 루 프실의 유동화를 위해 Fig. 2(b)와 같이 총 6개의 질 량유량계(mass flow controller, MFC)를 사용하였으 며, 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 거쳐 서 고속유동층으로 이송되며 고속유동층 사이클론에 서 입자가 포집되어 상부 루프실을 거쳐서 기포유동 층으로 재순환된다.

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

각 조업 조건에서 고체순환속도 측정을 위해 고체 가 연속적으로 순환되는 조건에서 상부 루프실의 질 량유량계를 통한 기체유입을 정지하여 상부 루프실 을 유동화 상태에서 고정층 상태로 변화시켰으며 이 를 통해 고속유동층 사이클론에서 포집된 입자가 상 부 루프실과 사이클론 사이에 쌓이도록 하였고 기포 유동층으로의 고체 재순환이 없는 조건에서 시간 변 화에 따른 기포유동층 내부 고체층 높이의 감소정도

를 측정하여 입자의 벌크밀도로부터 단위시간 동안 단위면적당 고체순환량인 고체순환속도(kg/m^2s)를 계산하였다. 실험장치 및 고체순환 방법과 고체순환

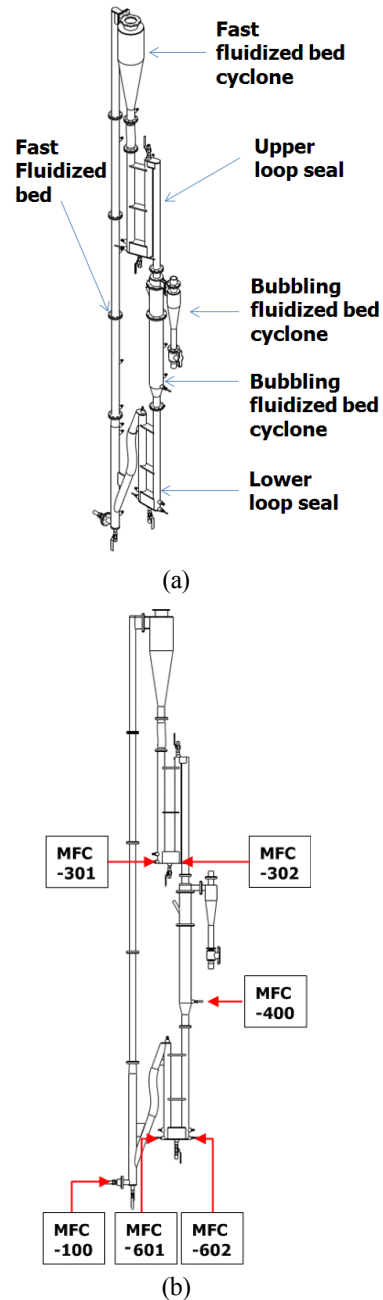


Fig. 2. (a) 3D view of two-interconnected circulating fluidized bed system, (b) mass flow controller arrangement

속도 측정 예시에 대해서는 기존 보고³⁾에 자세히 나타나 있다.

2.3 상부 루프실 및 하부 루프실 형상 및 치수

Fig. 3에는 실험에 사용한 상부 루프실과 하부 루프실의 3차원 형상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 type A의 경우 고체유입부와 고체배출부 사이의 거리가 0.1 m (외부 기준)로 만들어졌으며, type B의 경우 0.01 m (외부 기준)로 만들어졌다. 상부 루프실과 하부 루프실의 형상 변화에 따른 각 부분의 치수 및 고체입자의 유입 및 배출방향을 정리하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)의 그림은

type A의 상부 루프실과 type A의 하부 루프실을 연결한 경우를 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5에는 고속유동층과 기포유동층 사이에 고체가 순환하는 조건에서 상부 루프실 유동화 유량 변화에 따른 사이클론 및 상부 루프실에 존재하는 고체의 높이를 시각적으로 측정된 결과를 나타내었다. 사이클론 및 상부 루프실에 존재하는 고체층 높이는 사이클론과 상부 루프실의 아크릴 벽체에 눈금자를 부착하여 정상상태 순환 조건에서 시각적으로 측정하였으며, Fig. 5에 시각적 관찰 결과를 실측치와 유

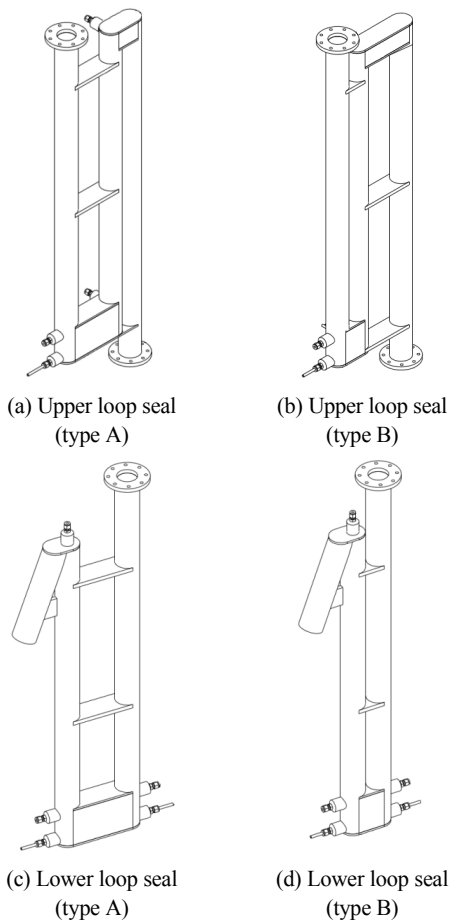


Fig. 3. 3D view of upper and lower loop seals geometry

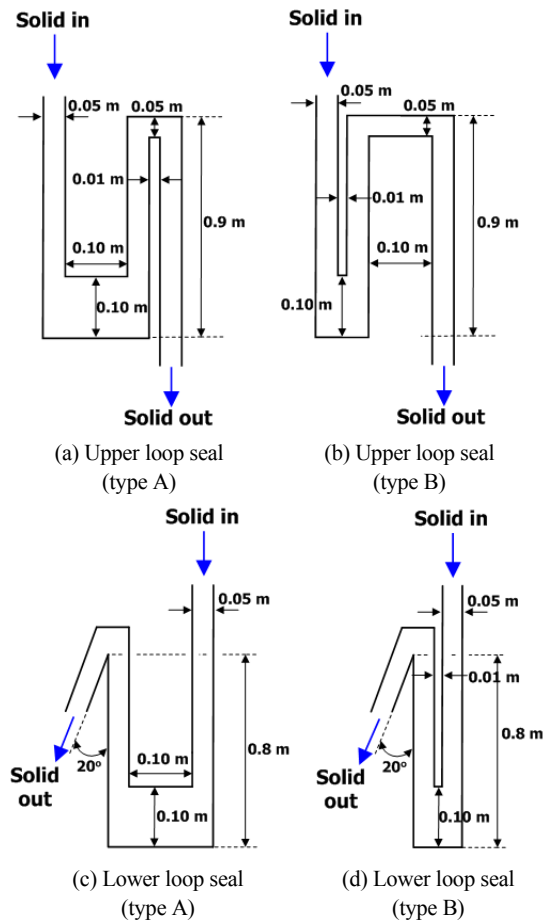


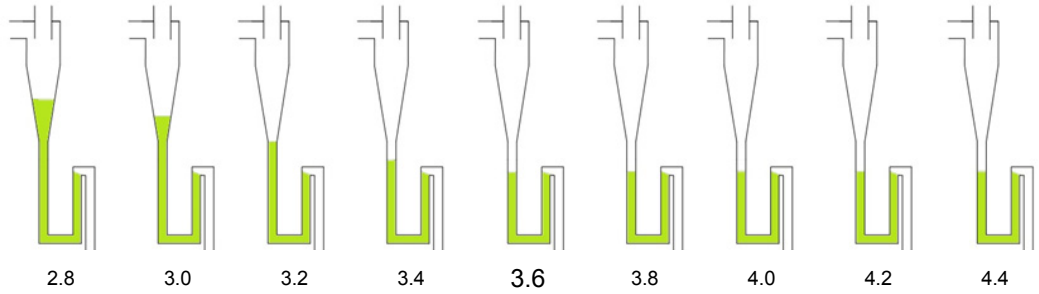
Fig. 4. Dimension of upper and lower loop seals

사하게 표시하였다. 고체를 순환하기 위한 조건으로 고속유동층의 유량은 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 (0.06 m/s), 하부 루프실의 유량(Fig. 2[b]의 MFC-601, 602의 유량)은 1.5 NL/min (0.014 m/s)로 고정하였다. Fig. 5에서 유량은 Fig. 2(b)의 MFC-301과 MFC-302를 통해 각각 동일하게 주입되는 유량을 의미하며 모든 실험 조건에서 MFC-301과 MFC-302를 통해 주입되는 유량을 동시에 변화시켰다. 그림에 나타난 바와 같이 type A와 type B의 상부 루프실 모두 상부 루프실 유동화 유량이 낮은 경우에는 좌측의 고체유입부에 존재하는 고체층의 높이가 우측의 고체배출부에 존재하는 고체층의 높이보다 높게 유지되었으며, 이는 상부 루프실의 고체 흐름이 원활하지 못할 경우 좌측의 고체층 높이가 일정 높이 이상이 되어 하부로 향하는 압력이 증가한 경우에만 고체가 고체배출부를 통해 배출될 수 있음을 의미한다. 또한, type A와 type B의 상부 루프실 모두 상부 루프실 유동화 유량

이 증가하면 루프실 내부의 고체입자가 유동화되면서 고체입자의 흐름이 원활해져 고체유입부와 고체배출부에 존재하는 고체층의 높이가 거의 같아지는 현상을 나타내었다.

한편, 고체유입부와 고체배출부 사이의 거리가 먼 type A의 상부 루프실의 경우, 주입 유량이 3.6 NL/min 이상인 경우에 고체유입부와 고체배출부의 고체층 높이가 같아지는 반면 고체유입부와 고체배출부 사이의 거리가 가까운 type B의 상부 루프실의 경우에는 주입유량이 2.4 NL/min 이상이 되면 고체유입부와 고체배출부의 고체층 높이가 같아지는 현상을 나타내었다. 특히 type A의 상부 루프실의 경우 루프실 유동화 유량 2.8 NL/min 이하, type B의 상부 루프실의 경우 루프실 유동화 유량 1.8 NL/min 이하인 경우에는 고체순환이 진행됨에 따라 사이클론에 쌓여 있는 고체층의 높이가 지속적으로 증가하여 사이클론이 폐색되고 더 이상 고체순환이 불가능하였다. 결과적으로 고체유입부와 고체배출부 사이의 거리가 먼 상부 루프실의 경우 안정적인 고체순환을 위해서는

(a) Upper loop seal (Type A)



(b) Upper loop seal (Type B)

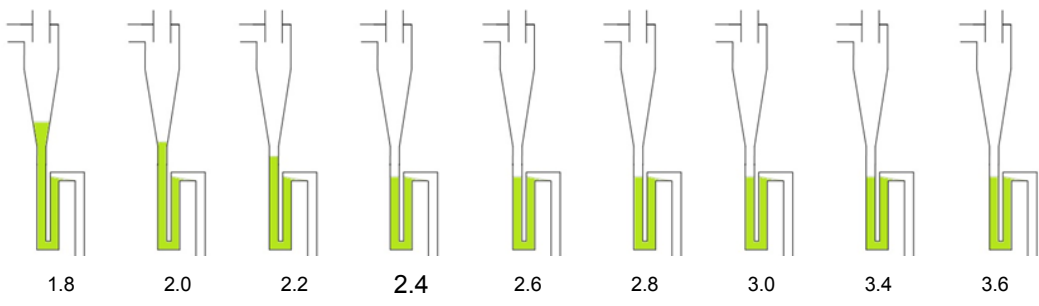


Fig. 5. Effect of upper loop seal geometry and flow rate on solid height in the cyclone and upper loop seal

더 많은 기체를 주입해야 하는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과를 해석하기 위해 상부 루프실과 하부 루프실 형상 변화에 따른 최소유동화속도 차이를 측정 및 비교하였다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 상부 루프실과 하부 루프실은 고체유입부와 배출부의 형상이 다소 다르긴 하지만 루프실 바닥으로부터 0.8 m 높이까지의 모양은 동일하다. 따라서 본 연구에서는 대표적으로 하부 루프실에 고정층 높이가 0.6 m에 해당하는 유동화 입자를 장입한 후 type A와 type B의 변화, 즉 고체유입부와 고체배출부 사이의 거리(수평방향 길이) 변화에 따른 최소유동화속도의 변화를 측정 및 비교하였다.

Fig. 6에는 type A와 type B의 하부 루프실에서 측정된 최소유동화속도를 비교하여 나타내었다. 최소유동화속도는 하부 루프실 좌측과 우측에 설치된 스파저에 유입되는 공기 유량을 Fig. 2(b)의 MFC-601과 MFC-602를 통해 동시에 증가시켜가면서 하부 루프실 고체유입부(우측)와 고체배출부(좌측)에 설치된 차압형 압력변환기에서 측정된 압력강하(pressure drop)를 측정하는 방법을 통해 결정하였다. Fig. 6에 표시된 기체 유량은 하부 루프실 좌측(MFC-601)과 우측(MFC-602)에 각각 주입되는 유량을 의미한다. 두 개의 차압형 압력변환기 중 좌측은 하부 루프실 바닥으로부터 0.48 m와 1.25 m에 각각 (+)측과 (-)측이 연결되어 있으며 우측은 0.48 m와 1.36 m에 연결되어 있다. 그림에 나타난 바와 같이 하부 루프실로 주입되는 유량이 증가함에 따라 압력강하 값이 증가하는 경향을 나타내다가 유량이 더욱 증가하면 최대값을 보인 후 감소하고 거의 일정하거나 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 하부 루프실의 좌측과 우측에서 측정된 압력강하 값은 큰 차이가 없었으며, 이는 루프실 좌측과 우측의 고체층 높이가 거의 동일함을 의미한다. 또한 시각적으로 관찰한 결과에서도 고체층 높이가 거의 유사하게 나타났다. 최소유동화속도의 정의에 따라 압력강하 값이 증가하다가 최대값을 보이는 조건을 최소유동화속도로 결정하였으며 type A의 하부 루프실의 경우 0.0158 m/s (하부 루프실의 고체유입부 또는 고체배출부의 직경 기준)

인 반면 type B의 하부 루프실은 0.0148 m/s로 나타났다. 이와 같은 경향은 루프실 고체유입부와 고체배출부 직경이 같은 경우에도 고체유입부와 고체배출부의 간격이 증가하는 경우 루프실 하부 수평구간의 면적이 증가함에 따라 해당 구간에서의 유속이 감소하고 이로 인해 루프실 내부의 입자를 유동화 상태로 만들기 위해 더 많은 유량이 필요한 것을 의미한다. 결과적으로 Fig. 5에 나타난 결과도, type A의 상부 루프실과 같이 고체유입부와 고체배출부의 간격이 넓은 경우 루프실 하부 수평구간의 면적이 넓으므로 입자를 유동화 상태로 만들어 원활하게 입자의 이동이 가능하도록 하기 위해서는 더 많은 유량이 필요한 것으로 해석할 수 있다.

상부 루프실의 경우 고속유동층에서 비산된 입자를 사이클론에서 포집하여 기포유동층으로 재순환하는 역할을 하는 반면 하부 루프실의 경우 루프실 하

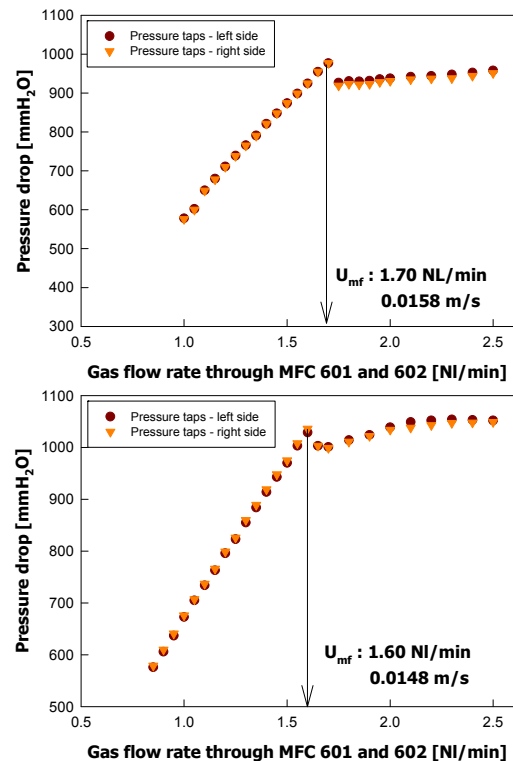


Fig. 6. Trends of pressure drop versus gas flow rate through MFC 601 and 602

부 좌측과 우측에 주입하는 기체 유량을 제어하여 고속유동층으로 주입되는 고체량(즉, 고체순환속도)을 제어할 수 있다^{3,11)}. 따라서 고체순환속도에 미치는 하부 루프실 형상 변화의 영향에 대한 해석이 필수적이다.

Fig. 7에는 type A와 B의 하부 루프실에 대해 루프실 하부로 주입되는 공기 유량의 변화에 따른 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 고체를 순환하기 위한 조건으로 고속유동층의 유량은 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 (0.06 m/s), 상부 루프실의 유량(Fig. 2[b]의 MFC-301,

302의 유량)은 4.0 Nl/min (0.037 m/s)로 고정하였다. Fig. 7의 x축에 표시된 기체 유량은 하부 루프실 좌측(MFC-601)과 우측(MFC-602)에 각각 주입되는 유량을 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 type B의 하부 루프실이 type A의 하부 루프실에 비해 적은 유량으로 높은 고체순환속도를 얻을 수 있었으며 유량 증가에 따른 고체순환속도의 증가 기울기도 크게 나타났다. 이는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 type B의 하부 루프실의 경우 루프실 내부에 존재하는 고체의 유동화를 위한 유량이 적으므로 낮은 유량에서도 입자의 유동이 가능하며, 루프실 하부의 수평구간의 길이가 짧으므로 고체입자의 수평방향 이동이 용이하기 때문으로 사료되었다.

다음으로, 다른 조건에서도 하부 루프실 형상 변화에 따른 고체순환속도의 변화 여부를 확인하기 위한 추가실험을 진행하였다. Fig. 8에는 type A와 B의 하부 루프실에 대해 기포유동층 내부의 고체층 높이와 루프실 하부로 주입되는 공기 유량의 변화에 따른 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 고체순환 조건은 변수로 고려된 조건 이외에는 Fig. 7의 조건과 동일하다. 그림에 나타난 바와 같이 type A와 B의 하부 루프실 모두 기포유동층 내부의 고체층 높이가 증가함에 따라 루프실 고체유입부에 가해지는 압력이 증가하므로 고체순환속도가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 한편 Fig. 7과 마찬가지로 type B의 하부 루프실이 type A의 하부 루프실에 비해 적은 유량으로 높은 고체순환속도를 얻을 수 있었다.

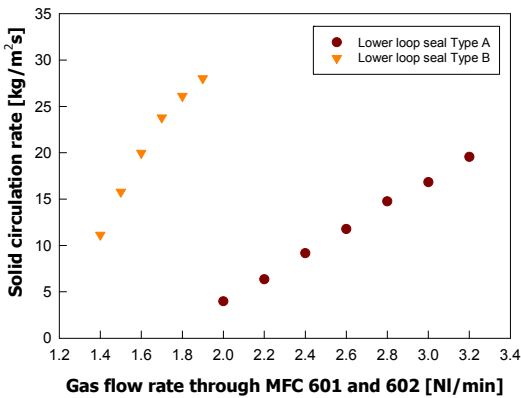


Fig. 7. Effect of gas flow rate through lower loop seal on solid circulation rate

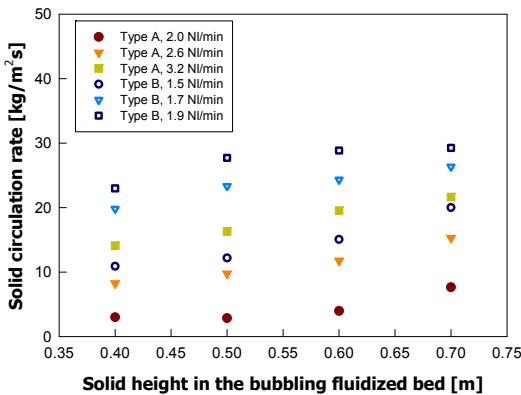


Fig. 8. Effects of solid height in the bubbling fluidized bed and gas flow rate through lower loop seal on solid circulation rate

4. 결론

2탑 연결 기체-고체 유동층에서 상부 루프실과 하부 루프실의 고체유입부와 배출부 사이의 거리 변화가 고체순환에 미치는 영향을 측정 및 해석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상부 루프실의 고체유입부와 배출부 사이의 거리가 증가하면 고속유동층 사이클론에서 포집된 고체입자의 원활한 재순환을 위해 필요한 유동화 유량이 증가하였다.

2) 하부 루프실의 고체유입부와 배출부 사이의 거리가 증가하면 동일한 고체순환속도를 얻기 위해 더 많은 유동화 유량이 필요하였다.

3) 상부 루프실과 하부 루프실 모두 고체유입부와 배출부 사이의 거리가 증가하는 경우 루프실 하부 수평구간에 존재하는 입자의 유동화를 위해 더 많은 유량이 필요하며, 고체입자의 수평방향 이동이 어려워지는 것으로 나타났다.

4) 이러한 경향은 루프실 고체유입부와 배출부 사이의 거리 변화에 따른 최소유동화속도의 변화로 해석할 수 있었으며 추가적인 실험을 통해 재확인 필요하다. 또한 수치해석적 연구를 통해 보다 깊이 있는 이해가 가능할 수 있다.

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. J. Ryu, S. H. Jo, S. Y. Lee, D. Lee, H. Nam, B. W. Hwang, H. Kim, J. Kim, and J. I. Bark, "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>.
3. 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>.
4. Y. S. Won, P. S. Youn, D. Kim, J. B. Joo, J. H. Choi, and H. J. Ryu, "Bed pressure drop of a bubbling fluidized-bed with overflow solid discharge", *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 1165-1173, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.03.012>.
5. P. Bareschino, R. Solimene, R. Chirone, and P. Salatino, "Gas and solid flow patterns in the loop-seal of a circulating fluidized bed", *Powder Technology*, Vol. 264, 2014, pp. 197-202, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.036>.
6. P. Basu, "Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review", *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, No. 22, 1999, pp. 5547-5557, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00285-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00285-7).
7. P. Basu and J. Butler, "Studies on the operation of loop-seal in circulating fluidized bed boilers", *Applied Energy*, Vol. 86, No. 9, 2009, pp. 1723-1731, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.024>.
8. P. Basu and L. Cheng, "An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 78, No. 7, 2000, pp. 991-998, doi: <https://doi.org/10.1205/026387600528102>.
9. X. Han, Z. Cui, X. Jiang, and J. Liu, "Regulating characteristics of loop seal in a 65 t/h oil shale-fired circulating fluidized bed boiler", *Powder Technology*, Vol. 178, No. 2, 2007, pp. 114-118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.04.015>.
10. S. W. Kim and S. D. Kim, "Effects of particle properties on solids recycle in loop-seal of a circulating fluidized bed", *Powder Technology*, Vol. 124, No. 1-2, 2002, pp. 76-84, doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00472-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00472-7).
11. 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>.