

감압 순환유동층 플라즈마 반응기의 축방향 고체체류량

박성희[†]

우석대학교 에너지공학과
27841 충청북도 진천군 진천읍 대학로 66
(2016년 1월 29일 접수, 2016년 2월 19일 수정본 접수, 2016년 2월 23일 채택)

Axial Solid Holdup in a Circulating Fluidized Bed Plasma Reactor under Reduced Pressure

Sounghye Park[†]

Department of Energy Engineering, Woosuk University, 66, Daehak-ro, Jincheon-eup, Jincheon, Chungbuk, 27841, Korea
(Received 29 January 2016; Received in revised form 19 February 2016; accepted 23 February 2016)

요 약

감압상태(1torr)의 순환유동층 플라즈마 반응기(내경 10 mm, 높이 800 mm)에서 기상 유속과 고체순환속도가 축방향 고체체류량 분포에 미치는 영향을 연구하였다. 폴리스타이렌 고분자 입자와 질소가스를 고체 및 기상 물질로 각각 사용하였다. 감압상태 순환유동층의 고체 순환량 변화는 상승관의 많은 기체 유량(40~80 sccm)에 의한 변화만큼 고체 재순환부의 작은 유량 변화(6.6~9.9 sccm)에 의해서도 가능하였다. 감압상태 순환유동층의 고체 순환속도는 재순환부 기체 유속에 따라 증가하였다. 상승관내의 축방향 고체 체류량 분포는 하부의 농후상 영역에서 상부의 희박상 영역까지 높이에 따라 감소하는 형태를 나타내었다. 상승관 내 각 높이에서 고체순환속도의 증가에 따라 직선적으로 고체 체류량이 증가하였다. 이로써 플라즈마 형성과 유지 그리고 플라즈마 반응을 위해 적절한 플라즈마 로드 위치를 결정할 수 있다.

Abstract – The effects of gas velocity and solid circulation rate on the axial solid holdup distribution have been determined in a 10 mm-I.D. × 800 mm-high circulating fluidized bed plasma reactor under reduced pressure (1torr). Polystyrene polymer powder and nitrogen gas are used as solid and gas materials respectively. The change of solid circulation rate by a large gas flow rate of the riser (40~80 sccm) is also possible by a relatively small gas flow rate of the solid recirculation part (6.6~9.9 sccm). The solid circulation rate in the reactor under reduced pressure increases with increasing aeration velocity in the solid recirculation part. The axial solid holdup in the riser decreases from the dense at the bottom to the dilute phase at the top section of the riser. Solid holdups at the axial positions in the riser increase linearly with increasing solid circulating velocity. From these results, we could determine the position of plasma load for good plasma ignition, maintain and plasma reaction.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Plasma, Reduced Pressure, Vacuum, Solid-holdup

1. 서 론

최근 기-고 유동층 반응기의 활용범위가 에너지 산업의 석탄 연소로 등을 넘어 미세입자 및 나노입자의 고기능성 활용을 위해 고체 입자의 물리적 화학적 성질을 변화시키는 반응기로서 활용이 확대되고 있다. 특히 플라즈마 기술과 접목하여 입자의 표면성질을 바꿈으로서 고체입자의 표면특성을 바꾸는데 유동층 반응기를 활용하고 있다[1-6]. 입자 형태 물질을 기존의 필름형태에 적용되는 반응기를 사용할 수 없기 때문에 입자에 적용할 수 있는 새로운 반

응기가 필요하다. 입자를 처리하기 위한 반응기들은 반응기 내에서의 입자의 거동에 따라 세 가지의 형태로 나눌 수 있다. 입자들 간의 상대적인 움직임이 없는 고정층, 입자들이 기계적인 조작이나 중력에 의하여 부분적으로 움직임을 갖는 이동층, 반응기체에 의하여 입자들이 유동화되어 입자 개개의 움직임이 증가하여 기체와 입자간의 혼합이 원활히 일어나는 유동층으로 나눌 수 있다. 이들 반응기 중에서 유동층 플라즈마 반응기는 연속적인 조업이 가능하며 입자의 혼합으로 처리의 균일성이 높으므로 입자처리에 선호되어 왔다.

한편으로 기포 유동층 플라즈마 반응기에서는 농후상과 프리보드 영역으로 나누어지며 프리보드 영역에 플라즈마를 가하여 표면처리 반응을 일으키므로 여전히 열전달 문제, 반응 진행 정도의 편차 등의 가능성이 존재하며 불균일한 코팅, 표면처리로 이어질 수 있다. 이에 반해 순환유동층 반응기는 고체 흐름층에 직접 플라즈마를 형성시킬 수 있어 고체입자와 플라즈마간의 접촉이 더욱 우수한 반응기

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: drpark@woosuk.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

형태로 입자와 플라즈마간의 균일한 접촉으로 인해 입자 표면 전체에 균질한 반응을 일으키는 반응기이다. 순환유동층 상승관(riser)내에 기체를 고속으로 주입함으로써 비발동반하는 고체입자를 집진기에서 포집하여 층내에 재주입시키는 유동층을 이룬다. 순환유동층 반응기는 난류유동층(turbulent fluidized bed), 고속유동층(fast fluidized bed) 희박상유동(dilute phase flow)의 유동영역에서 조업이 이루어진다[7]. 순환유동층은 높은 기상유속에서 조업이 되기 때문에 고체입자의 재순환이 격렬하게 이루어지고, 기체흐름이 plug flow로 유지되기 때문에 기포유동층에서처럼 기포에 의한 기체의 by-passing이 없어 기-고체간의 접촉 효율이 높고, 층내 전체에 걸쳐서 기-고체의 접촉이 균일한 등 여러 장점이 있어서 다양한 기-고 반응기에 적용이 되고 있다[8]. 그러나 순환유동층 반응기의 활용범위 확대에 있어 가압조건에서의 순환유동층 반응기에 대한 연구가 진행된 바는 있으나, 감압상태 즉 진공상태의 조건하에서 순환유동층 반응기의 수력학적 특성을 연구한 사례가 전무한 상태이다.

플라즈마란 물질을 이루고 있는 상태의 측면에서 보면, 고체, 액체, 기체와 구별되는 물질의 제 4의 상태라고 할 수 있다. 반응기체에 대개 직류 전류, 라디오 주파수, 마이크로파등을 인가하여 플라즈마를 만든다. 생성된 플라즈마내에는 전자, 이온, 라디칼등 다양한 활성종을 만들어져 플라즈마 화학반응을 진행할 수 있게 된다. 플라즈마 생성 조건 중 압력 측면에서 대개 감압상태에서 이루어지고 있다[9]. 감압 순환유동층 플라즈마 반응기의 성공적인 조업 및 설계를 위해서는 층내 고체입자의 체류량 분포에 대한 정보가 매우 중요하다. 순환유동층 상승관층 내 입자의 체류량 분포는 상승관내의 압력 강하와 고체입자의 평균체류시간 등과 직접적인 관계가 있으며, 이것에 따라 단위부피당의 기-고 접촉 면적이 결정되고, 기-고간의 물질 전달 및 반응속도가 결정된다[10]. 이에 기체상의 플라즈마 형성 및 고체 입자와 플라즈마간의 접촉 및 반응 관계에서 플라즈마 생성 영역에서의 고체 입자 분포 및 양이 곧 플라즈마와 고체 입자간 반응의 기본 인자이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 감압 순환유동층 플라즈마 반응기에서 운전변수에 따른 고체 순환량과 축방향 압력분포를 결정하고 축방향 고체 체류량 분포를 결정하고자 한다.

2. 연구방법 및 이론

본 연구에서 사용한 감압상태에서 운전되는 순환유동층 플라즈마 반응기의 개략도는 Fig. 1과 같다. 전체 장치는 상승관, 사이클론, downcomer, 고체재순환부로 구성되어 있다. 상승관의 직경은 10 mm 이고, 분산판으로부터 상승관 상단까지의 높이는 800 mm이다. 반응기의 재질은 감압상태의 플라즈마 순환유동층 반응기로 활용할 수 있도록 파이프스 유리로 만들어 있어 상승관등 전체 반응기내의 흐름 현상을 관찰할 수 있다. 비산되는 입자를 포집하여 재순환시키기 위하여 상승관 끝을 사이클론으로 연결한다. 사이클론에서 입자와 기체가 분리되어 기체는 기체 출구를 거쳐 진공펌프를 통하여 배출된다. 입자는 하부에 위치한 downcomer 로 하강하고, 입자들은 downcomer 를 지나 고체재순환부인 고체재순환부를 통하여 반응기의 상승관으로 재주입된다. 고체 재순환부의 반응기체 주입을 위해 분산판으로 glass 재질로 제작된 sintered plate를 사용하였다. 재순환되는 고체는 상승관의 분산판 위 30 mm 지점에서 상승관으로 주입되며, 순환되는 고체속도는 정상상태에 도달되면 미리 염색하

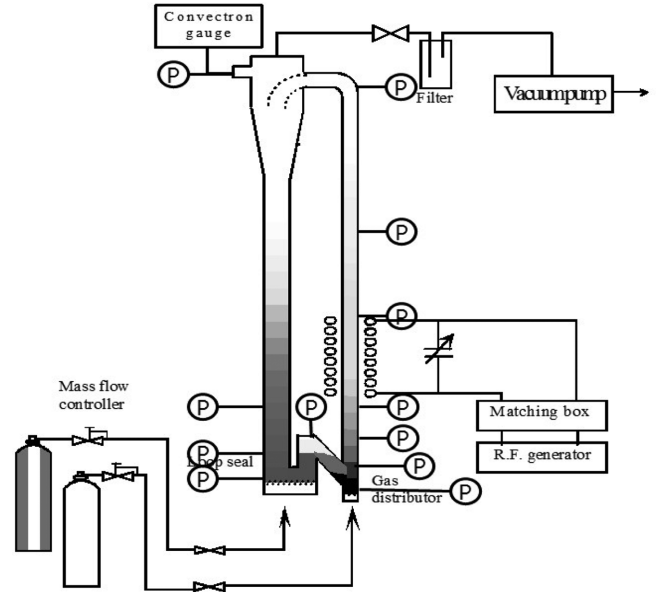


Fig. 1. The schematic diagram of a circulating fluidized bed plasma reactor under reduced pressure.

여 충전된 tracer 입자가 일정 구간을 지나는 시간을 측정하여 고체 순환속도를 결정하였다.

반응기체는 MFC (Edward Inc. MFC-1605)로 유량을 조절하여 상승관 및 고체재순환부에 주입된다. 반응기체는 상승관을 거쳐 사이클론 출구부에 연결된 진공펌프를 통하여 반응기 바깥으로 배출된다. 진공펌프를 거치기 전에 트랩이 설치되었으며 진공펌프는 반응기 내의 압력을 일정한 진공 감압상태를 유지할 수 있도록 사이드 밸브를 조작한다. 분산판은 stainless steel재질의 sintered plate를 사용하였다. 사용된 입자는 평균 직경이 342 μm 인 폴리스타이렌 고분자 입자이며, 밀도는 1040 kg/m^3 으로 금호석유화학 지원으로 사용하였다. 반응기체는 질소를 사용하였다. 입자의 최소유동화 속도 및 순환을 시키기 위한 상승관에서의 유속결정의 기본이 되는 종말속도를 구함에 있어 Kusakabe 등의 식[11]을 바탕으로 계산하였다. 그 결과로 342 μm 의 직경과 1040 kg/m^3 의 밀도를 갖는 폴리스타이렌 입자의 최소유동화속도는 6.6 sccm을 얻었고 종말 속도는 40 sccm을 얻었다.

상승관과 downcomer 내의압력분포를 측정하기 위해 상승관 벽면의 7 위치(10, 50, 105, 150, 300, 466, 771 mm)에 pressure tap을 설치하였고, downcomer의 벽면에는 3지점에 pressure tap을 설치하였다. 또한 loop-seal의 상단 위치에 설치하였다. 압력 측정을 위해 진공압력을 측정할 수 있는 Convectron Gauge vacuum gauge (Granvil-Phillips 316 series)와 pressure indicator를 사용하였다. 반응기내의 압력 측정은 먼저 재순환부인 downcomer에 입자를 충전한 후 반응기 전체의 압력을 133Pa(1 torr)가 되도록 진공을 뺀 후 기체를 원하는 기상유속으로 상승관과 고체재순환부내로 공급한다. 일정시간이 경과된 후 상승관내의 압력분포가 일정한 상태에 이르면 이를 정상상태로 간주하고, 정상상태에서의 압력강하를 측정하여 고체체류량을 결정하였다.

2-1. 고체체류량과 압력수지

상승관내의 축방향 고체체류량은 상승관 높이 따라 축방향으로

압력강하를 측정함으로써 구할 수 있다. 상승관내의 총 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = (\rho_s \varepsilon + \rho_g \varepsilon_s)g$$

기체밀도가 고체밀도에 비해 무시할 수 있다면 위 식은

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho_s \varepsilon_s g$$

로 간단해 질 수 있다. 그러므로 주어진 조업조건하에서 축방향으로 압력강하를 측정함으로써 단면적에 대한 평균 고체체류량을 구할 수 있다.

또한 순환유동층 반응기는 다음과 같이 전체 순환유동층 시스템을 구성하는 상승관, 싸이클론, downcomer, 고체재순환부가 압력 수치를 이루면서 조업된다[13].

$$\Delta P_d = \Delta P_{ls} + \Delta P_r + \Delta P_c$$

여기서, ΔP_d : downcomer에서 압력강하

ΔP_{ls} : 고체 재순환부에서 압력강하

ΔP_r : 상승관에서 압력강하

ΔP_c : 싸이클론에서 압력강하

전체 반응기의 압력수치를 측정하기 위하여 상승관, 고체 재순환부 및 싸이클론 부위의 각 위치에서 압력을 측정하여 조업변수에 대한 압력 수치의 변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 감압상태의 순환유동층 플라즈마 반응기의 재순환부 기체 유속 변화에 따른 고체 순환속도를 나타낸 그림이며, Fig. 3은 상승관내 기체 유속 변화에 따른 고체 순환속도를 나타낸 그림이다. 여기서 상승관내의 기체 유속 변화시 진공펌프의 이송능력을 조절할 수 있는 슬라이드 밸브를 통해 조절하여 최종 반응기의 압력을 감압상태 압력을 유지하면서 얻은 결과이다. 반면 고체 재순환부의 기체유속의 변화 실험은 총 기체의 유량을 일정하게 유지하여 얻은 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 고체재순환부 기체 유속과 상

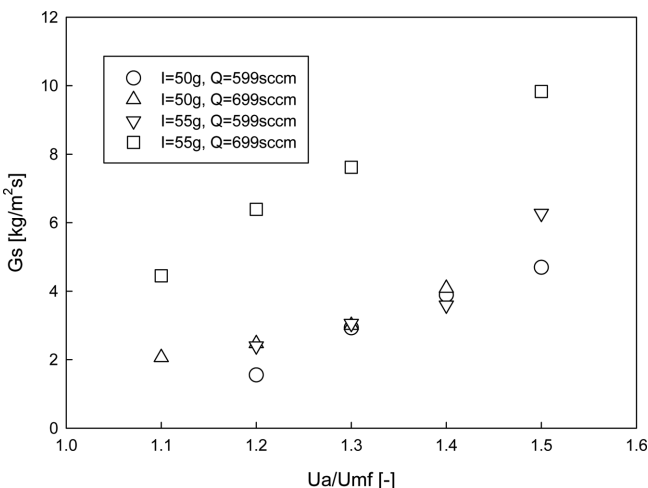


Fig. 2. Solid circulation rate with aeration velocity in the solid recirculation part.

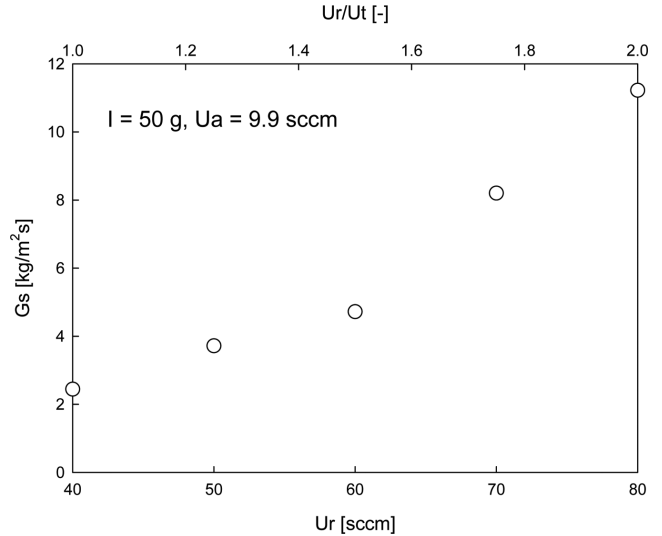


Fig. 3. Solid circulation rate with gas velocity of riser.

승관내 기체유속 변화에 대해 각각 고체순환속도가 거의 비례관계를 보임을 알 수 있다. 이로써 각 기체 유속 운전변수 조작으로 원하는 고체순환속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 반면에 상압 순환유동층 반응기와는 달리 감압상태의 순환유동층 플라즈마 반응기는 균일한 플라즈마 형성을 위해 반응기내의 압력을 일정한 감압상태를 유지하여야 하며, 감압상태에서 운전하는 본 연구의 반응기에서는 감압상태를 유지하기 위해 진공펌프를 사용하게 되는데 물리적으로 진공펌프의 최대 이송능력이 있다. 따라서 본 그림에서 알 수 있듯이 많은 유량(40~80 sccm)의 상승관내 기체 유속의 증가에 의한 고체 순환량 변화만큼 고체 재순환부의 기체 유속의 작은 유량 변화(6.6~9.9 sccm)에 대한 고체 순환량 변화가 가능하다. 이는 감압상태에서 일정 기체 유량을 진공펌프로 배출시켜 압력을 유지해야하는 시스템의 상황을 고려한다면 같은 고체 순환량을 얻기 위해 상승관의 유속을 조절하기 보다는 downcomer의 유량을 조절하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

Fig. 4에 고체순환속도 변화와 고체주입량과 고체 재순환부 기체 유속에 따른 전체 반응기의 압력 수치를 나타내었다. 그림에서 보

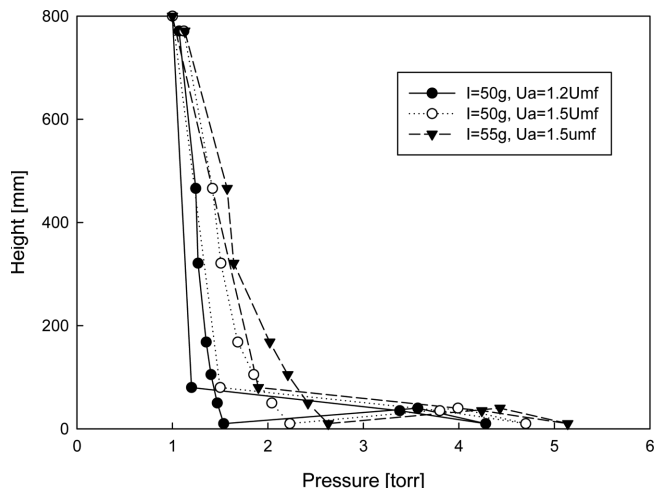


Fig. 4. Static pressure around CFB loop for different value of aeration rate and solid inventory.

듯이 각 운전조건에서 감압상태하의 순환유동층이 안정된 순환흐름을 갖는 순환유동층을 형성함을 알 수 있다. 감압상태에서 운전된 순환유동층에서도 압력수지에 의해 downcomer 내 압력강하를 추진력으로 하여 전체 시스템이 균형을 이루며 조업된다. 그리고 순환유동층 loop에 있어 압력이 제일 높은 지점은 고체재순환부 하단부에 존재하고 제일 낮은 지점은 loop으로부터 기체가 배출되는 사이클론 출구 영역이다. 고체주입량 증가에 따라 downcomer 하부의 압력값이 증가하였다. 고체주입량 증가에 의해 downcomer 내에 고체량 증가는 고체량에 비례하여 전체 충전층의 높이를 증가시키고, 입자층의 높이가 증가함에 따라 압력이 증가하는 것이다. 고체재순환부의 기체주입을 통해 고체흐름이 일어날 때, downcomer 내 고체흐름은 일반적으로 유동화 되지 않는 일정한 공극의 충전층 형태를 갖는다. 따라서 downcomer 하단의 압력이 높게 된다. 그리고 고체주입량 증가에 따라 상승관 하부의 압력 증가는 고체 순환량이 증가할 것을 예측해 볼 수 있다. 또한 이 압력의 증가로 전체 순환 현상에 있어 안정성의 향상을 관찰할 수 있었다. 이는 기존의 상압 순환유동층의 결과들[14,15]과 유사한 압력수지 모습을 보인다. 이는 상압 또는 가압상태의 순환유동층의 유동현상과 마찬가지로 감압 상태의 순환유동층에서도 충전된 고체량과 기체유속에 의한 압력강하로 전체 압력수지가 결정되기 때문이다.

Fig. 5와 6은 고체순환속도를 변화시켰을 때, 상승관내 고체순환 속도가 순환유동층 시스템 내 압력수지의 각 성분에 미치는 영향을 나타낸 것이다. ΔP_d 는 downcomer에서 압력강하, ΔP_{ls} 는 고체 재순환부에서 압력강하, ΔP_r 는 상승관에서 압력강하, ΔP_c 는 사이클론에서 압력강하를 각각 나타낸다. 그림에서 보듯이 고체 순환속도의 증가에 따라 전체적으로 증가한다. 그러나 각 조건에서 ΔP_c 와 ΔP_r 의 압력 차이 값은 상대적으로 적은 차이를 보인 반면 ΔP_d 와 ΔP_{ls} 는 큰 압력값의 차이를 보여주고 있다. 이는 고체 재순환부의 고체체류량이 상대적으로 상승관과 사이클론부에 비해 크기 때문이다. 또한 고체 순환 속도의 증가에 따라 ΔP_r 이 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고체순환부 내로 기체 주입량을 증가시키기에 따라 고체 순환속도가 증가하고, 상승관내 고체체류량이 증가하고 상승관의 압력강하는 증가하게되기 때문이다. 또한 고체순환속도가 증가할 수록 고체재순환부와 사이클론에서의 압력강하가 약간 증가하는

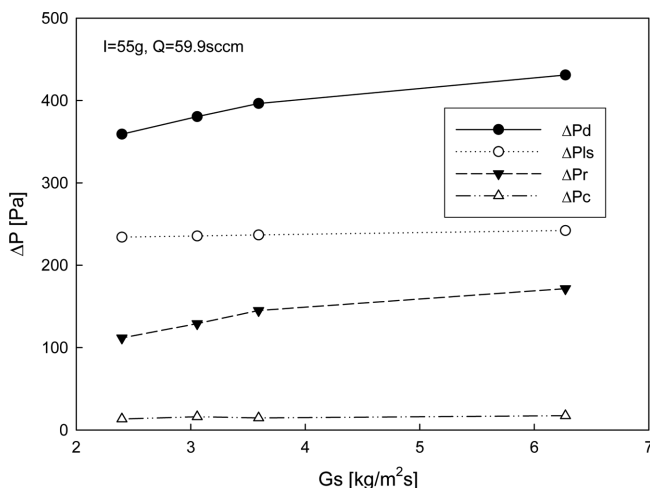


Fig. 5. Effect of solid circulation rate on the pressure balance in the CFB loop ($I = 55$ g, $Q = 59.9$ sccm).

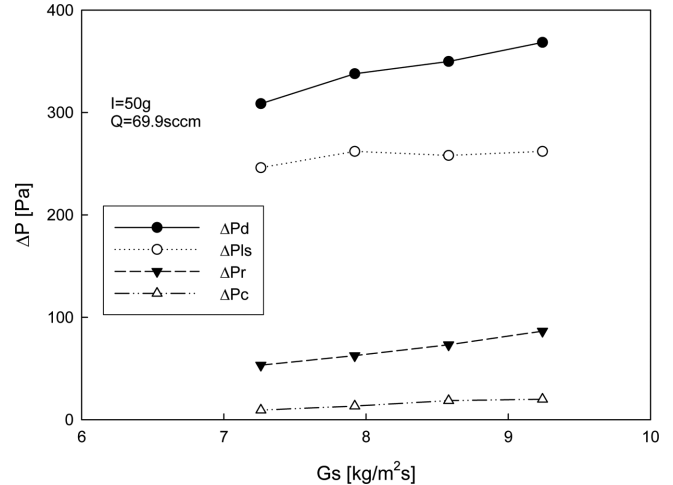


Fig. 6. Effect of solid circulation rate on the pressure balance in the CFB loop ($I = 50$ g, $Q = 69.9$ sccm).

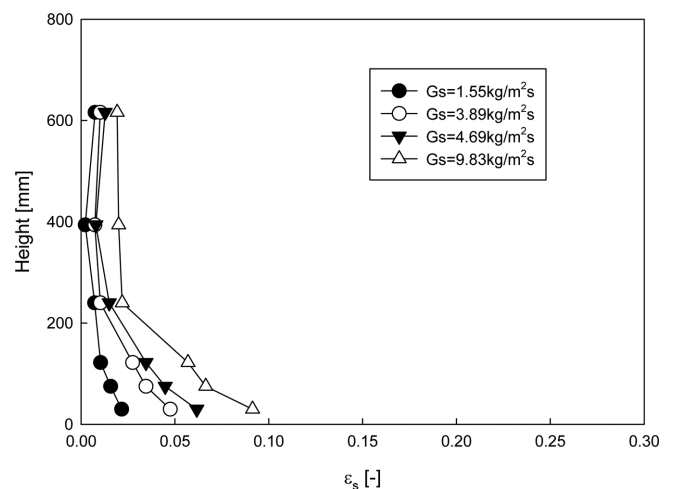


Fig. 7. Effect of solid circulation rate on axial solid holdup distribution.

경향을 보이는데 이는 이들을 통한 고체흐름속도 증가에 따른 압력 손실의 증가로 보여진다[12,14].

Fig. 7은 감압상태에서 운전된 순환유동층 플라즈마 반응기에서 고체순환속도에 따른 상승관내의 높이에 따라 고체체류량 분포를 나타낸 것이다. 여기서 각 고체순환속도는 상승관의 기상유속, 재순환부 기상유속, 고체충진량등의 운전조건 변화에 따라 얻어진 고체 순환속도이다. 그림에 나타난 것과 같이 고체순환속도 증가에 따라 상승관내 고체 체류량은 증가하였다. 고체 순환속도가 낮은 경우 층내로 재주입되는 입자는 빠른 속도로 상승하게 되어 상승관 전체는 고체체류량이 낮은 상태가 된다. 그러나 고체 순환속도가 증가됨에 따라 입자들의 평균 상승속도가 감소하게 되어 고체체류량은 증가하게 된다. 재순환부로부터 고체가 재 유입되는 부위에서는 상대적으로 높은 체류형태를 보이고 있으나 곧 나머지 상승관 부분은 희박상 형태를 보여주고 있다. 전체적으로 축방향 고체체류량 분포는 상승관 하부의 농후상영역에서 상부의 희박상영역까지 높이 따라 감소하다가 상승관의 배출구 부근에서 상승관의 출구효과에 의해 증가되는 경향을 나타내었다[14]. 따라서 감압상태 순환유동층 플라즈마 반응기내에서 플라즈마를 형성시키는 위치는 플라즈마 상

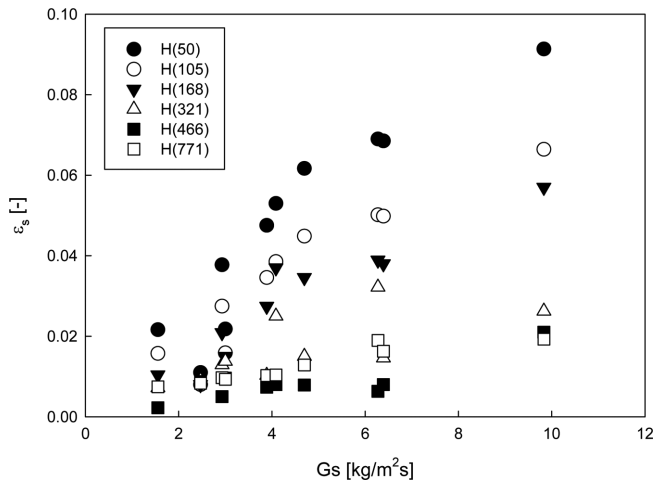


Fig. 8. Effect of solid circulation rate on Solid holdups in different axial heights in a circulating fluidized plasma reactor.

태를 안정적으로 유지할 수 있으면서 고체 체류량을 조절할 수 있는 축방향 높이를 결정할 필요가 있다.

Fig. 8은 상승관 내 각 높이에서 고체 체류량을 고체 순환속도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 고체순환속도의 증가에 따라 거의 직선적으로 고체 체류량이 증가함을 알 수 있다. 그리고 상단부(H466, H771)와 중단부(H321)의 고체체류량은 희박함을 알 수 있다. 감압상태 순환유동층 플라즈마 반응기는 플라즈마 상태를 생성 유지하는 복합매개변수(W/FM)t/m으로 설명할 수 있는데[1], 여기서 W는 플라즈마 공급 파워, F는 기체유량, M은 기체의 분자량, t는 처리시간, 그리고 m은 고체의 양이다. 다른 플라즈마 조건이 같은 경우 고체의 양이 적을수록 플라즈마를 생성시키고 유지하기에 유리하다. 그러나 이는 플라즈마 형성과 유지에는 유리할 수 있으나 플라즈마와 미세입자간의 접촉량이 적게되어 미세입자를 플라즈마로 처리함에 있어서는 불리할 수 있다. 따라서 폴리스타이렌 미세입자의 플라즈마 처리 조업에서 상승관 내 축방향 고체체류량 분포와 각 높이에서의 고체 순환속도에 따른 변화를 통해 플라즈마 생성 위치와 최적의 플라즈마 형성 조건을 결정할 수 있음을 알았다. 따라서 최적의 플라즈마 생성을 이룰 수 있는 수력학적 운전 조건을 도출할 수 있다. 이를 근거로 앞서 발표된 미세입자의 플라즈마 형성 조건으로 133Pa 압력하에서 플라즈마 형성 위치를 결정할 수 있었고, 플라즈마 로드를 설치하고 각 운전변수를 조절하여 고체순환량을 조절하여 최적의 미세입자의 플라즈마 표면 개질을 할 수 있었다[3].

4. 결 론

감압상태에서 운전가능한 순환유동층 플라즈마 반응기를 설계 제작하였고 각 운전조건에 따라 안정적 운전이 가능하였으며, 상승관내 고체상체류량 분포를 각 운전조건에 따라 조사 연구하였다. 고체 재순환부 주입 가스 유량과 상승관 내 주입되는 반응가스 유량에 따라 전체 압력 수치 및 고체 순환속도를 결정하였고, 상승관 내 축방향에 따른 고체체류량을 고체순환속도에 따라 결정하였다. 이 결과들을 통해 감압상태 순환유동층 플라즈마 반응기의 최적의 플라즈마 처리와 안정적 고체순환을 이루는 최적의 운전조건을 결정할 수 있는 수력학적 변수들을 결정할 수 있다.

감 사

이 논문은 우석대학교 교내 연구비 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

사용기호

g	: gravitational acceleration [m/s ²]
G_s	: solids circulation rate [kg/m ² s]
H	: Height [mm]
I	: solid inventory [kg]
Q	: total flow rate [sccm]
U_a	: gas superficial velocity of solid recirculation part [m/s]
U_g	: gas superficial velocity [m/s]

그리스문자

ϵ	: gas holdup [-]
ϵ_s	: solid holdup [-]
ρ_g	: density of gas [kg/m ³]
ρ_s	: density of solid [kg/m ³]
$\Delta P/\Delta L$: pressure drop [kg/m ² s ²]

References

- Jung, S. H., Park, S. H. and Kim, S. D., "Surface Treatment of Polymeric Fine Powders by CF₄ Plasma in a Circulating Fluidized Bed Reactor," *J. Chem. Eng. Jap.*, **37**, 166-173(2004).
- Jung, S. H., Park, S. H., Lee, D. H. and Kim, S. D., "Surface Modification of HDPE Powders by Oxygen Plasma in a Circulating Fluidized Bed Reactor," *Polym. Bull.*, **47**, 199-205(2001).
- Park, S. H., "Surface Modification of Fine Particle by Plasma Grafting in a Circulating Fluidized Bed Reactor under Reduced Pressure," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(5), 614-619(2015).
- Park, S. H. and Kim, S. D., "Plasma Surface Treatment of HDPE Powder in a Fluidized Bed Reactor," *Polym. Bull.*, **33**, 249-256 (1994).
- Park, S. H. and S. D. Kim, "Plasma Surface Treatment of HDPE Powders By CF₄ Plasma In A Fluidized Bed Reactor," *Polym. Bull.*, **41**, 479-486(1998).
- Park, S. H. and S. D. Kim, "Oxygen Plasma Surface Treatment of Polymer Powder in a Fluidized Bed Reactor," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Eng. Aspects* **133**, 33-39(1998).
- Basu, P. and Fraser, S. A., "Circulating Fluidized Bed Boiler: Design and Operation," Butterworth-Heinemann, Boston(1991).
- Yerushalmi, J.: in "Circulating Fluidized Bed Technol," eds. by Basu, Pergamon Press, New York, 97(1986).
- Bell, A. T., "Fundamentals of Plasma Chemistry," in Techniques and Applications of Plasma Chemistry, J. R. Hollahan and A. T. Bell, eds., Wiley, New York(1974).
- Kobro, H. and Brereton, C.: in "Circulating Fluidized Bed Technol," eds. by P. Basu, Pergamon Press, New York, 263(1986).
- Kusakabe, K., Kuriyama, T. and Morooka, S., "Fluidization of Fine Particles at Reduced Pressure," *Powder Technol.*, **68**, 125-130(1989).

12. Li, Y. and Kwauk, M.: in "Fluidization," eds. by J. R. Grace and J. M. Masten, Plenum Press, New York, 537(1980).
13. Rhodes, M. J. and Laussman, P., "A Study of the Pressure Balance Around the Loop of a CFB," *Can. J. Chem. Eng.*, **70**, 625-630 (1992).
14. Namkung, W, Cho, Y. J. and Kim, S. D., "Axial Solid Holdup Distribution in a Circulating Fluidized Bed," *Hwakak Konghak*, **32**, 241-247(1994).
15. Kim, S. W., Namkung, W. and Kim, S. D., "Solids Flow Characteristics in Loop-seal of a Circulating Fluidized Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 82-88(1999).