

3 kW급 매체순환식 가스연소기의 고체순환특성

류호정*[†] · 박재현* · 김홍기** · 박문희***

*한국에너지기술연구원 재료에미션연구센터
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
**충북대학교 공업화학과
361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48
***호서대학교 통계학과
336-795 충남 아산시 배방면
(2008년 7월 18일 접수, 2008년 8월 21일 채택)

Solid Circulation Characteristics in a 3 kW Chemical-looping Combustor

Ho-Jung Ryu*[†], Jaehyeon Park*, Hong-Ki Kim** and Moon-Hee Park***

*Zero Emission Technology Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

**Department of Industrial Engineering Chemistry, Chungbuk National University, San 48 Gaesin-dong, Heungduk-gu, Cheongju 361-763, Korea

***Department of Informational Statistics, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

(Received 18 July 2008; accepted 21 August 2008)

요 약

기존 2탑 유동층 공정의 단점을 극복하기 위해 두 개의 기포유동층, 고체분사노즐, 상승관 및 고체재순환관으로 구성된 신개념 2탑 유동층 공정을 적용한 3 kW 매체순환식 가스연소기를 개발하였다. 본 연구에서는 3 kW급 매체순환식 가스연소기에서 고체순환속도에 미치는 고체분사노즐 유속, 유동화속도, 고체층 높이, 고체유입구의 단면적, 층 온도 등의 영향을 고찰하였다. 고체순환속도는 고체층 높이가 증가하고 고체유입구의 단면적이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며 유동화속도와 온도의 영향은 크지 않았다. 장기연속운전 가능성을 검토하기 위해 50시간까지 고체순환 장기연속운전을 실증하였다. 두 유동층과 고체재순환관의 압력강하 값이 안정적으로 유지되어 고체순환이 원활하고 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다.

Abstract – To overcome disadvantages of conventional two interconnected fluidized beds system, a novel two-interconnected fluidized bed process has been adopted to 3kW chemical-looping combustor. This system has two bubbling beds, solid injection nozzles, solid conveying lines, and downcomers. In this study, effects of operating variables such as gas velocity through the solid injection nozzle, fluidizing velocity, solid height, geometry of solid intake hole, bed temperature on solid circulation rate have been investigated in a 3kW chemical-looping combustor. The solid circulation rate increased as the solid height and the opening area of solid intake holes increased. The effect of the fluidizing velocity and the bed temperature were negligible. Moreover, long-term operation of continuous solid circulation up to 50 hours has been performed to check feasibility of stable operation. The pressure drop profiles in the bubbling beds and the downcomers were maintained steadily and solid circulation was smooth and stable.

Key words: Chemical-looping Combustion, Solid Circulation, Bubbling-bubbling Bed, Long-term Operation

1. 서 론

두 개의 유동층이 연결된 2탑 유동층 공정은 Fisher-Tropsch, 고온 탈황, 건식 흡수제를 이용한 이산화탄소 분리-회수 공정, 매체순환식 가스연소, 회수증진 메탄 수증기 개질, 매체순환식 수소생산 등 여러 공정에 사용되고 있다. 하지만 기존의 2탑 연결 유동층은 두 개 또는 그 이상의 반응기가 필요하며 고체순환과 기체누설방지,

압력균형 유지를 위해 루프실(loopseal), 실포트(seal-pot), J 밸브, L 밸브, U 밸브 등의 비기계적 밸브가 필요하다[1]. Fig. 1에는 기존의 2탑 연결 순환유동층 공정들의 개념도를 나타내고 있다[2-6]. Fig. 1(a)는 기포유동층-기포유동층-고속유동층 공정을 나타내고 있다. 이 공정은 2개의 기포유동층과 한 개의 고속유동층, 2개의 루프실 및 3개의 사이클론으로 구성되어 있다. 2개의 기포유동층은 반응기로 사용되며 고속유동층은 고체이송을 위해 사용된다. 이 공정은 주로 두 기포유동층에서 일어나는 반응이 느려서 기체-고체의 접촉시간을 증대시킬 필요가 있을 때 주로 사용된다. 이 공정의 경우

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hjryu@kier.re.kr

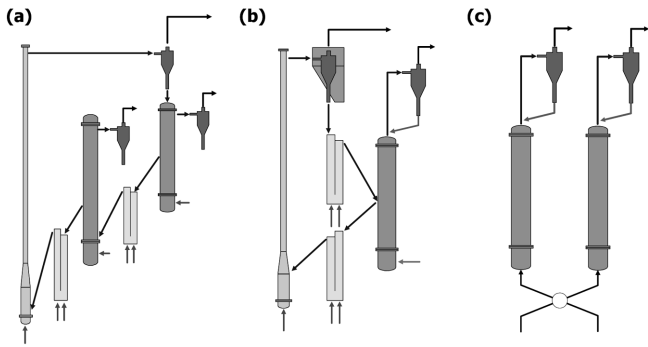


Fig. 1. Schematic of conventional two interconnected circulating fluidized bed system.

3개의 유동층이 사용되므로 각 반응기와 루프실 사이의 압력균형을 유지하기가 어려우며, 압력균형이 맞지 않을 경우 고체의 역흐름이 생길 수 있다. 또한 3개의 유동층과 2개의 루프실에 고체가 채워져야 하므로 필요 고체량이 많고 각 루프실에 1개의 기체주입이 필요 하더라도 최소 5개의 기체 주입구가 필요하다.

한편 두 반응기에서 일어나는 반응 중 한쪽의 반응속도가 충분히 빠른 경우에는 Fig. 1(a)의 고속유동층을 고체이송 뿐 아니라 반응 에도 이용할 수 있으므로 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 고속유동층-기포유동층 형태의 공정구성이 가능해진다. 이 공정의 경우 한 개의 기포유동층과 한개의 고속유동층, 2개의 루프실 및 두 개의 사이클론으로 구성된다. 하지만 이 공정의 경우에도 2개의 유동층과 2개의 루프실 사이의 압력균형을 조절하기 쉽지 않다. Fig. 1(a)와 (b)의 기포유동층-기포유동층-고속유동층 및 기포유동층-고속유동층 공정의 단점은 공정구성이 복잡하고 유동층 사이에 존재하는 루프 실로 인해 공정의 부피가 커진다는 점이다. 실제적으로 이러한 공정 구성들은 네 개 또는 다섯 개의 개별적인 공간에 기체-고체 혼합물이 존재하게 되므로 필요한 고체량이 많고 각 부분의 압력균형을 맞추기가 쉽지 않다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 1(c)와 같은 기포유동층-기포유동층 공정구성이 제안되었다[7]. 두 개의 기포유동층은 개별적인 반응기로 사용되며, 연속적인 조업을 위해 각각의 유동층에 주입되는 기체는 주기적으로 교체(switching)된다. 이 공정구성은 두 기포유동층에서 일어나는 반응이 느려서 기체-고체의 접촉시간을 증대시킬 필요가 있는 경우에 주로 사용된다. 하지만 실제적으로는 주입되는 기체를 교체하는 과정에서 압력충격(pressure sock)이 발생하며, 주입 기체의 교체 전에 각 반응기 내부에 존재하는 기체를 제거(purge)해야 하므로 연속적인 조업이 어렵고, 각 유동층의 반응 온도가 다른 경우에는 가열 또는 냉각 과정이 필요하다.

지금까지 살펴본 2탑 연결 유동층 공정의 단점을 해결하기 위해 신개념 2탑 유동층 공정이 개발되었다[8]. 신개념 공정은 2쌍의 기포유동층, 고체분사노즐(solid injection nozzle), 상승관(riser), 사이클론, 고체재순환관(downcomer)으로 구성되어 있다. 기존 순환유동층과는 달리 신개념 공정은 두 유동층 사이에 루프실이 필요없기 때문에 고체중진량을 줄일 수 있고, 루프실 고체의 유동화를 위한 별도의 유체주입이 필요없으며, 루프실과 각 반응기를 연결하기 위한 배관이 필요없어 반응기 부피가 축소된다. 또한 기포유동층-기포유동층 조업이 가능하므로 기체-고체의 접촉시간을 증대시킬 필요가 있을 때 사용할 수 있으며 두 반응기 사이의 압력균형 조절이 용

이하다. 또한 고체순환 대신 기체를 주기적으로 교환하는 기포유동층-기포유동층 공정구성은 달리 압력충격이 가해지지 않고 기체 제거(purge)가 필요 없으므로 연속적인 조업이 가능하다. 한편, 신개념 공정은 고체분사노즐의 규격, 고체분사노즐 유속, 고체층 높이, 고체유입구 단면적, 층 온도 등 여러 변수들에 의해 고체순환속도가 변화될 수 있으며 이러한 변수들에 대한 정성적, 정량적 해석이 충분하지 않기 때문에 정확한 설계가 어렵다. 기존 연구에서는 기포유동층 사이의 고체순환속도에 미치는 고체분사노즐 유속, 유동화 유속, 고체층 높이, 고체분사노즐 직경, 고체유입구 직경 등의 영향을 고찰하였으며 두 기포유동층 사이의 기체혼합특성을 고찰한 바 있다. 본 연구에서는 매체순환식 가스연소기의 장기연속운전을 용이하게 수행하기 위해 3 kW급 실험장치에 신개념 공정을 적용하였으며 반응실험에 앞서 두 유동층 사이의 고체순환특성을 재확인 하였고, 고체순환속도에 미치는 온도의 영향을 추가적으로 고려하였으며, 연속운전시 원활한 고체순환이 가능한지를 확인하기 위해 50시간까지 고체순환 장기연속운전을 실증하였다.

2. 실험

고체순환속도 측정 및 고체순환 장기연속운전 실험은 Fig. 2에 나타난 3 kW 매체순환식 가스연소기에서 수행하였다. 전체 실험장치는 플레넘(plenum), 기포유동층, 고체분사노즐, 고체유입구, 상승관, 사이클론 및 고체재순환관으로 구성되어 있다. 두 개의 기포유동층 모두 직경 0.1 m, 높이 0.3 m이며, 분산판으로는 직경 0.5 mm의 구멍이 20개 뚫려있는 다공판(perforate plate)을 사용하였다. 플레넘은

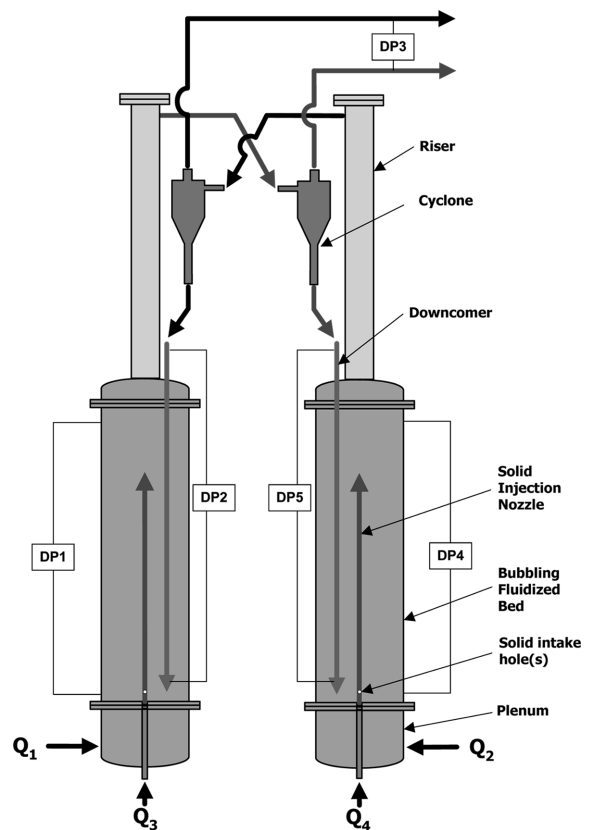


Fig. 2. Schematic of 3kW chemical-looping combustor (DP: differential pressure transducer).

직경 0.1 m, 높이 0.1 m이며 분산판 하부 0.05 m 높이에서 반응기체가 주입되도록 하였다. 두 반응기의 상승관(riser)은 외경 1/2"(내경 0.0104 m)이며 재순환관도 외경 1/2"(내경 0.0104 m)로 설치하였다. 재순환관의 하부는 분산판으로부터 높이 0.03 m에 위치하며 압력탭을 설치하여 재순환관 내부의 고체높이를 측정할 수 있도록 하였다. 두 반응기 모두 사이클론의 내경은 0.05 m로 표준비율을 갖도록 설치하였다. 두 개의 기포유동층에서 입자를 상승관으로 상승시키기 위한 고체분사노즐은 직경 2 또는 4 mm의 고체유입구가 2개 또는 4개 뚫려있는 1/4" 관(내경 0.0037 m)을 사용하였다. 고체분사노즐의 하부는 유동층의 플레넘 하부에 위치하며, 플레넘, 분산판을 관통하도록 하였으며, 고체분사노즐의 상부 끝은 상승관이 시작되는 지점으로부터 0.03 m 높이에 위치하도록 설치하였고 각 고체분사노즐의 고체유입구명의 중심점은 분산판으로부터 높이 0.02 m에 위치하도록 하였다. 두 반응기에 유동화기체 및 고체분사용 기체를 주입하기 위해 5개의 질량유량계(MFC)를 설치하였다. 전체 시스템의 온도 및 압력분포를 측정하기 위해 5개의 차압형 압력변환기와 9개의 열전대(K-type)를 설치하였다.

고체입자로는 평균입경 159 μm (106~212 μm), 입자밀도 2,575 kg/m^3 , 벌크밀도 1,269 kg/m^3 인 모래를 사용하였으며 유동화기체로는 공기를 사용하였다. 유동화기체는 기포유동층 하부의 플레넘으로 주입되며(Q_1 , Q_2), 기포유동층 하부의 분산판을 통해 유동층으로 주입된다. 고체분사를 위한 기체(Q_3 , Q_4)는 유동층 하부로부터 고체분사노즐을 통해 주입된다. 기포유동층의 기체유속을 결정하기 위해 먼저 상온에서 모래입자의 최소유동화속도를 측정하였다. 질량유량계를 이용하여 유속을 증가시켜 가면서 층의 압력강하(DP1)를 측정하였다. 유속이 증가함에 따라 층의 압력강하가 계속적으로 증가하다가 임의 유속 이상이 되면 거의 일정한 값을 나타내었다. 최소유동화속도의 정의에 따라[9] 층의 압력강하가 최대값을 나타내는 유속(0.031 m/s)을 최소유동화속도로 결정하였다.

두 유동층 사이의 고체순환 메커니즘은 다음과 같다. 고체순환을 위해서 먼저 최소유동화속도(U_{mf}) 이상의 유속(U_1 , $U_2 > U_{mf}$)으로 기포유동층 내부의 고체를 유동화 시키면 층 내부의 고체는 유체와 같은 흐름특성을 갖게 되며, 고체분사노즐에 뚫려있는 고체유입구를 통해 고체분사노즐 안쪽으로 고체가 흘러들어간다. 이 상태에서 고체분사노즐을 통해 일정 유량의 기체를 주입하면 고체분사노즐 내부에 존재하는 고체는 상승하여 상승관(riser)으로 이동하게 된다. 실제 반응기에서 고체분사노즐의 끝부분은 상승관 안쪽에 삽입되어 있다. 한편 기포유동층에 주입된 기체 유량(Q_1 또는 Q_2)은 최소유동화상태 이상의 기포유동층 조건에 해당하지만 상승관에서는 단면적 감소에 의해 입자의 종말속도(terminal velocity) 이상으로 유속이 빨라지면서 상승관에 유입된 고체를 비산시켜 사이클론으로 이송시킨다. 사이클론에서 포집된 고체는 재순환관(downcomer)을 통해 반대편 기포유동층으로 유입되게 된다. 반대편 유동층에서도 같은 작용을 통해 다른 쪽 유동층으로 고체를 이송하게 된다.

두 반응기 사이의 고체순환속도를 측정하기 위해 두 유동층이 최소유동화속도 이상의 유속에서 유동화 되는 상태에서 한쪽 유동층의 고체분사노즐에 기체를 주입하여 한쪽 유동층으로부터 반대편 유동층으로 고체를 이동시키면서 두 유동층 내부의 고체층 높이 증가/감소 속도를 측정하였고 반대편의 유동층으로부터 고체가 분사되는 조건에 대해 같은 실험을 반복하였으며 두 경우의 평균값으로 고체순환속도를 측정하였다. 즉, 고체순환이 있는 조건에서 유동층

Table 1. Summary of operating conditions and variables

Item	Values
Bed dimension	0.1 m I.D., 0.3 m high (bubbling bed)
Solid	Sand, 106~212 μm Apparent density : 2575 kg/m^3 Bulk density : 1269 kg/m^3 Particle terminal velocity : 1.34 m/s *
Gas	Air
Solid injection nozzle	Nozzle diameter : 1/4" (3.7 mm I.D.) Solid intake hole dimension Case 1 : 2 mm \times 2 holes Case 2 : 2 mm \times 4 holes Case 3 : 4 mm \times 2 holes
Minimum fluidization velocity [m/s]	0.031
Fluidization velocity [m/s]	0.043, 0.054, 0.065
Solid height [m]	0.18, 0.21, 0.24
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	15, 300, 600, 900

*Calculated by Kunii and Levenspiel[10]

의 압력강하 변화를 측정하여 층직경과 고체층 높이, 모래입자의 벌크밀도를 기준으로 증가 또는 감소한 입자무게를 계산하였으며 측정시간으로 나누어 고체순환속도를 계산하였다.

본 연구에서는 두 유동층 사이의 고체순환속도에 미치는 고체분사노즐 유속, 유동화 유속, 고체층 높이, 고체유입구의 단면적, 층온도의 영향을 고찰하였으며 연속운전시 원활한 고체순환이 가능한지를 확인하기 위해 50시간까지 고체순환 장기연속운전을 실증하였다. Table 1에는 본 연구의 실험조건 및 변수를 요약하여 나타내었다. Table 1에는 본 연구에서 사용한 입자에 대한 종말속도 및 각 유속조건에서 상승관에서의 유속을 함께 표시하였다. 입자의 종말속도 계산에는 Kunii와 Levenspiel[10]의 상관식을 사용하였다. Table 1에 나타난 실험조건 중에서 상승관에서의 유속이 가장 낮은 조건은 양쪽 유동층의 유동화 속도(U_1 또는 U_2)가 0.043 m/s, 층온도 15, 고체분사노즐의 유속(U_3 또는 U_4)이 0.82 m/s인 경우이며, 이 경우에도 상승관에서의 유속은 4.4 m/s에 해당하며, 계산된 입자종말속도(1.34 m/s)보다 상당히 높은 유속이므로 원활한 고체수송이 가능한 것으로 사료되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 고체분사노즐 유속의 변화에 따른 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 그림에는 대표적으로 오른쪽 유동층에서 왼쪽 유동층으로 고체가 순환되는 조건에서 고체분사노즐에 4 mm의 고체유입구가 2개 뚫려있으며, 고체층 높이가 0.21 m인 조건에서의 실험결과를 나타내었다. 그림에서 U_4 는 오른쪽 유동층의 고체분사노즐을 통한 기체유속을 의미한다. 측정된 고체순환속도는 고체분사노즐의 유속이 증가함에 따라 증가한 후 일정해지는 경향을 나타내었다. 전체 유속범위를 고체순환속도의 변화에 따라 나누면 고체분사노즐의 유속이 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하는 영역(region A)과 일정하게 유지되는 영역(region B)로 구분할 수 있다. 두 영역에서의 고체순환특성을 살펴보면, region A에서는 시간변화에 따른 압력강하(고체높이)의 변화가 불규칙하였으며, 이는 고체순환이 간헐적으로 일어나는 것을 의미한다. 한편 region B에서는 시간변화에 따른 압력강하의 변화가 일정하게 나타나 고체순환이 연속적으로 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 고체

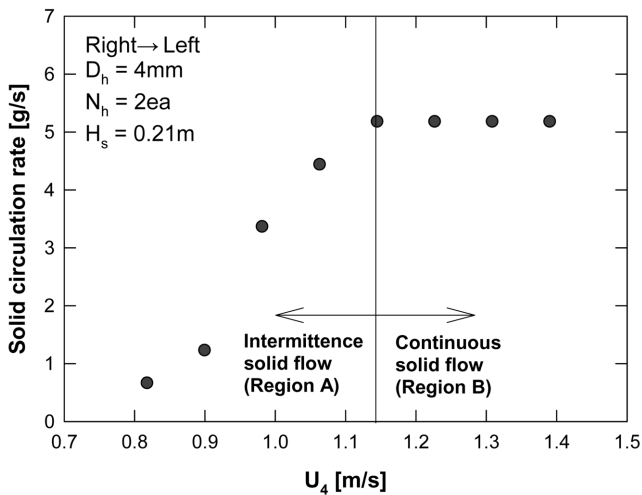


Fig. 3. Solid circulation rate versus gas velocity through the solid injection nozzle.

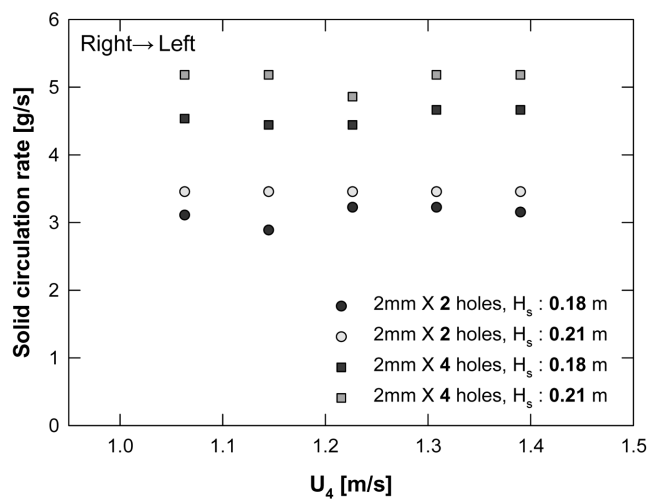


Fig. 5. Effects of solid height and number of solid intake holes on solid circulation rate.

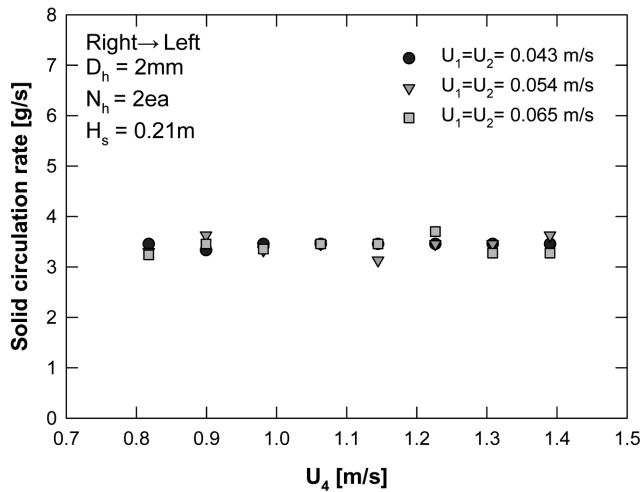


Fig. 4. Effect of fluidizing velocity on solid circulation rate.

유입구를 통한 고체입자의 유입속도는 일정한 반면 고체분사노즐의 유속이 증가함에 따라 고체이송능력이 증가하므로 일정 유속까지는 고체분사노즐 유속이 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하지만, 그 이후에는 고체유입속도의 한계에 의해 고체순환속도가 거의 일정해지는 것으로 사료되었다. 한편 앞으로의 결과 및 고찰에서는 연속적인 고체순환이 일어나는 경우(region B)만을 고려하였다.

Fig. 4에는 기포유동층의 유동화속도(U_1, U_2) 변화에 따른 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 그림에는 대표적으로 오른쪽 유동층에서 왼쪽 유동층으로 고체가 순환되는 조건에서 고체분사노즐에 2 mm의 고체유입구가 2개 뚫려있으며, 고체층의 높이가 0.21 m인 조건에서의 실험결과를 나타내었다. 그림에서 U_4 는 왼쪽 유동층의 고체분사노즐을 통한 기체유속을 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 유동화속도는 고체순환속도에 거의 영향을 미치지 않았다. 이와 같은 경향은 층 내부가 유동화되어 기포유동층 조건에 해당하는 경우, 고체유입구를 통한 고체유입속도는 거의 일정하게 유지되는 것을 의미하여, 기체유속 중에서는 고체분사노즐의 유속이 고체순환속도를 결정하는 중요한 변수임을 나타낸다. 한편, Fig. 3과 4를 비교하면 Fig. 3의 경우에는 고체분사노즐의 유속이 1.14 m/s 부터 고

체순환속도가 일정해지는 반면, Fig. 4의 경우에는 고체분사노즐의 유속이 0.82 m/s일 때부터 고체순환속도가 일정해지는 것으로 나타났는데 이는 고체분사노즐의 고체유입구 단면적이 감소하면 고체유입량이 감소하고, 고체이송능력의 한계유속이 감소하기 때문으로 사료되었으며 Ryu 등[8]의 결과와 유사하였다.

Fig. 5에는 고체순환속도에 미치는 고체층 높이 및 고체유입구의 영향을 나타내었다. 그림에서 U_4 는 왼쪽 유동층의 고체분사노즐을 통한 기체유속을 의미한다. 측정된 고체순환속도는 고체층의 높이가 증가함에 따라 증가하였다. 이와 같은 경향은 고체유입구 상부에 존재하는 고체층 높이가 증가함에 따라 아래 방향으로 작용하는 압력이 증가하므로 고체유입구를 통한 고체유입속도가 증가하기 때문으로 사료되었다. 한편 고체유입구의 구멍개수가 증가함에 따라 고체순환속도가 증가하였는데, 이는 고체유입구의 구멍개수가 증가함에 따라 구멍을 통해 유입되는 고체의 양이 증가하기 때문으로 사료되었다.

Fig. 6에는 동일한 고체층 높이에서 고체순환속도에 미치는 고체유입구의 영향을 나타내었다. 그림에서 U_3 는 오른쪽 유동층의 고체

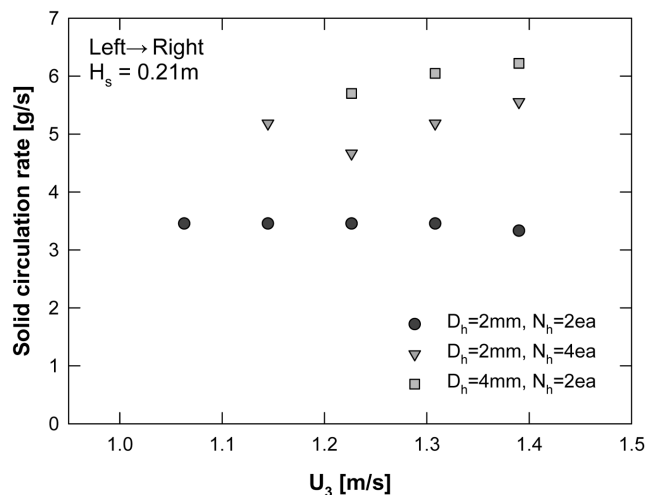


Fig. 6. Effects of diameter and number of solid intake holes on solid circulation rate.

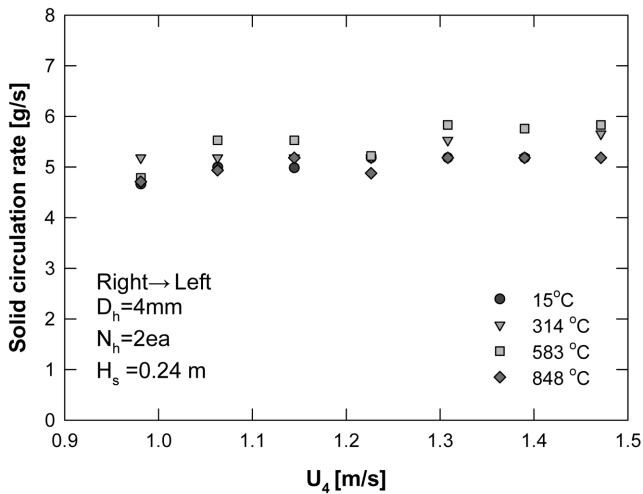


Fig. 7. Effect of bed temperature on solid circulation rate.

분사노즐을 통한 기체유속을 의미한다. 그림에서 고체유입구의 형상이, 1) 구멍이 2 mm, 개수가 2개인 경우, 2) 구멍이 2 mm, 개수가 4개인 경우, 3) 구멍이 4 mm, 개수가 2개인 경우로 변화함에 따라 고체유입구의 단면적은 각각 2배씩 증가하게 된다. 측정된 고체순환속도는 고체유입구의 단면적이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 앞서 살펴본 바와 같이 고체유입구멍 단면적이 증가함에 따라 구멍을 통해 유입되는 고체의 양이 증가하기 때문에 고체

순환속도가 증가하는 것으로 사료되었다. 측정된 고체순환속도의 평균값은 각각 3.43, 5.15, 5.98 g/s로 나타나 고체유입구의 단면적 증가에 따라 고체순환량이 정비례하게 증가하지는 않는 것으로 나타났다.

Fig. 7에는 층 온도 변화에 따른 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 고체순환속도에 미치는 층 온도의 영향은 크지 않았으며, 이와 같은 경향은 층 온도가 높더라도 고체분사노즐에 유입되는 기체의 유속이 매우 빠르기 때문에 층 온도까지 가열되지 못하고 통과하기 때문으로 사료되었다. 결과적으로 고체순환속도에 미치는 온도의 영향을 보다 세밀하게 관찰하기 위해서는 고체분사노즐에 유입되는 기체를 예열하여 층 온도와 같은 온도조건에서 주입하면서 고체순환속도를 측정해야 한다.

3 kW 매체순환식 가스연소기에서 최소한의 조업조건 변경으로 안정적인 고체순환이 가능한지를 확인하기 위해 장기 고체순환운전 실증시험을 수행하였다. 고체분사노즐은 4 mm의 구멍이 2개 뚫려 있는 노즐을 사용하였으며 층물질로는 모래입자를 이용하여 상온에서 수행하였다. 유동화 기체로는 공기를 사용하였고 유동화 기체의 유속은 두 유동층 모두 0.043 m/s였으며, 고체분사노즐의 유속은 왼쪽 유동층의 경우 1.23~1.24 m/s, 오른쪽 유동층의 경우 1.11~1.14 m/s의 범위에서 조절하였다. 이 조건에서 고체순환속도는 5.2 g/s였다. Fig. 8에는 50 시간 동안의 장기연속운전 동안 두 유동층에서 유동화기체의 유량, 고체분사노즐의 유량(Q3, Q4)의 변화와 유동층의 압력강하, 두 유동층 사이의 압력차이 및 두 개의 고체 재순환관에서

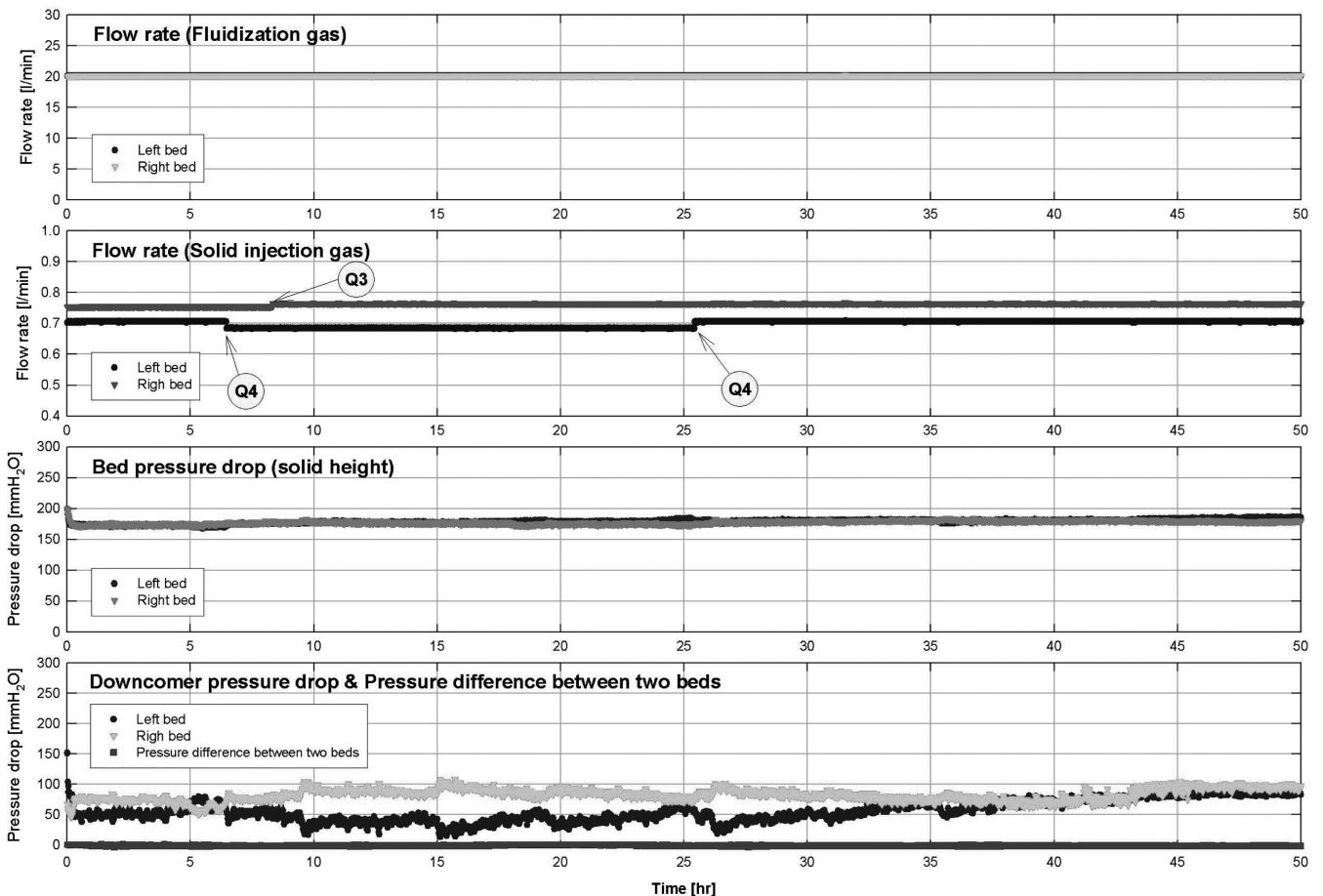


Fig. 8. Traces of gas flow rate and pressure drop profiles during 50 hours long-term operation.

의 압력강하의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 50 시간의 운전시간 동안 층높이 유지를 위해 오직 3회의 유량변경이 있었으며 유동층의 층높이(유동층 압력강하) 및 두 반응기 사이의 압력강하, 재순환관의 압력강하가 거의 일정하게 유지되었다. 결과적으로 본 연구에서 개발된 3 kW 매체순환식 가스연소기는 장기적이고 안정적인 고체순환이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결 론

신개념 2탑 유동층 공정을 적용한 3 kW 매체순환식 가스연소기에서 고체순환속도에 대한 조업변수의 영향을 고찰하였으며 고체순환 장기연속운전을 실증하였다. 본 연구의 실험범위에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 기포유동층-기포유동층 조건의 신개념 2탑 유동층 공정에서 고체순환속도는 고체층 높이가 증가하고 고체유입구의 단면적이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) 고체순환속도에 미치는 유동화속도와 온도의 영향은 크게 나타나지 않았다.

(3) 장기연속운전 가능성을 검토하기 위해 50시간까지 고체순환 장기연속운전을 실증하였다. 두 유동층과 고체재순환관의 압력강하 값이 안정적으로 유지되어 고체순환이 원활하고 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다.

감 사

본 연구는 지식경제부 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

- D_h : diameter of solid intake holes [mm]
 H_s : solid height in bed [m]
 N_h : number of solid intake holes [-]
 Q_1 : gas flow rate to left fluidized bed [l/min]
 Q_2 : gas flow rate to right fluidized bed [l/min]
 Q_3 : gas flow rate to solid injection nozzle in left fluidized bed [l/min]
 Q_4 : gas flow rate to solid injection nozzle in right fluidized bed [l/min]

- U_1 : gas velocity to left fluidized bed [m/s]
 U_2 : gas velocity to right fluidized bed [m/s]
 U_3 : gas velocity through the solid injection nozzle in left fluidized bed [m/s]
 U_4 : gas velocity through the solid injection nozzle in right fluidized bed [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidization velocity [m/s]

참고문헌

- Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., *Fluidization*, 2nd ed., Academic Press, London(1985).
- Diego, L. F., Labiano, F. G., Gayan, P., Cleaya, J., Palacios, J. and Adanez, J., "Operation of a 10 kWth Chemical-looping Combustor During 200h with a CuO-Al₂O₃ Oxygen Carrier," *Fuel*, **86**, 1036-1045(2007).
- Ryu, H. J. and Jin, G. T., "Conceptual Design of 50 kW Thermal Chemical-looping Combustor and Analysis of Variables," *Energy Engg. J.*, **12**(4), 289-301(2003).
- Ryu, H. J. and Jin, G. T., "Chemical-Looping Hydrogen Generation System: Performance Estimation and Process Selection," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(3), 527-531(2007).
- Johansson, E., Lyngfelt, A., Mattisson, T. and Johnsson, F., "Gas Leakage Measurements in a Cold model of An Interconnected Fluidized Bed for Chemical-looping Combustion," *Powder Technology*, **134**, 210-217(2003).
- Kronberger, B., Johansson, E., Löffler, G., Mattisson, T., Lyngfelt, A. and Hofbauer, H., "A Two-compartment Fluidized Bed Reactor for CO₂ Capture by Chemical-looping Combustion," *Chem. Eng. Technol.*, **27**(12), 1318-1326(2004).
- Ryu, H. J., "Process Design and Selection of Operating Conditions for SMART System," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **18**(1), 1-11(2007).
- Ryu, H. J., Park, Y. C., Jo, S. H. and Park, M. H., "Development of Novel Two-interconnected Fluidized Bed System," *Korean J. Chem. Eng.*, **25**(5), 1178-1183 (2008).
- Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, MA(1991).
- Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, 1st Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York(1969).