Korean Chem. Eng. Res., Vol. 48, No. 2, April, 2010, pp. 198-204

순환유동층 재순환부 내 고체흐름 특성에 대한 시스템 압력의 영향

김성원*,† · 김상돈

한국과학기술원 생명화학공학과
305-701 대전시 유성구 구성동 373-1
(2009년 11월 17일 접수, 2009년 12월 15일 채택)

Effect of Pressure on Solids Flow Characteristics in Recycle System of a Circulating Fluidized Bed

Sung Won Kim*,† and Sang Done Kim

Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea
(Received 17 November 2009; accepted 15 December 2009)

요 약

가압순환유동층 적용을 위해 루프씰(loop-seal: 내경 0.10 m)을 갖는 고체재순환부(직경 0.10 m, 높이 2.25 m)에서 층 물질로 silica sand 입자(d_p=240 μm, ρ_s=2582 kg/m^3)를 사용하여 시스템 압력 변화(0.10~0.71 MPa)에 따른 고체흐름 특성을 연구하였다. 루프씰을 통한 고체질량플럭스는 공기주입량이 증가할수록 선형적으로 증가하였고, 동일한 공기주입속도에 대해 시스템 압력이 증가할수록 증가하였다. downcomer 내 압력변이는 시스템 압력이 증가할수록 동일한 공기주입속도에 대해 증가하였고, 흐름 내 고체속도 및 기체 속도 또한 증가하였다. 고체질량플럭스로부터 downcomer에서의 압력변이를 예측할 수 있는 상관관계식을 Transportation number와 Pressure drop number를 이용하여 제안하였다. 루프씰에서의 압력강하는 시스템 압력에 관계없이 고체질량플럭스가 증가할수록 증가하였다. 각각의 시스템 압력에서 공기주입속도 변화에 따른 고체질량플럭스 및 Transportation number를 예측할 수 있는 상관관계식을 제안하였다.

Abstract – Solids flow characteristics have been determined in a pressurized solids recycle systems of silica sand particles for the application in a pressurized CFB(PCFB). The solids recycle system is composed of a downcomer(0.10 m i.d. 2.25 m high) and a loop-seal(0.10 m i.d.). The silica sand(d_p=240 μm, ρ_s=2,582 kg/m^3) particles were transported at room temperature and system pressure(P_{sys}) up to 0.71 MPa using air. Solids mass flux(G_s) increases with increasing system pressure at constant aeration rate. Pressure gradient, solids velocity and actual gas velocity increase with increasing P_{sys} at constant aeration rate. The Pressure drop number(Φ) on pressure gradient in downcomer has been correlated with Transportation number(Tr). Pressure drop across the loop-seal increases with increasing of G_s irrespective of variation of P_{sys}. The obtained G_s and Transportation number(Tr) have been correlated with the experimental variables.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Solids Recycle System, Loop-Seal, System Pressure

1. 서 론

순환유동층(Circulating Fluidized Bed: CFB)이란 기존의 기포유동층에 비하여 높은 유속에서 조업되는 반응기로, 고속의 기체와 크기가 작은 고체입자간의 긴밀한 접촉을 통하여 비교적 대규모의 여러 가지 화학적 물리적 작업을 수행하는 유동층 기술의 한 분야이다. 순환유동층 기술은 기포유동층과 달리 기포에 의한 bypassing이 없어 기-고체의 접촉효율이 높고, 층 내 전체에 걸쳐서 기-고체의 접촉이 균일하므로, 이러한 장점을 바탕으로 석탄 연소[1] 및 석탄가스화[2] 등에 상업적 규모로 이용되고 있다.

상업적으로 사용되는 석탄 연소로 및 가스화기 등의 유동층 시스템은 실제적으로 고온 및 고압에서 조업되므로 기포를 비롯한 기체-고체 흐름에 미치는 온도와 압력의 영향을 아는 것은 매우 중요하다. 이와 관련하여 지금까지 온도와 압력의 영향에 대한 많은 연구들이 이루어져 왔으나, 유동층 공정의 조업에 있어 실제적으로 어떻게 영향을 미치는 지에 대해 더 많은 연구가 필요한 실정이다[3].

순환유동층의 특징인 입자의 재주입을 담당하는 고체재순환부는 downcomer와 고체재주입 밸브로 구성되어 있는데, Transport 가스화기의 예[2,4]에서 처럼, 고온 및 고압에서 조업될 경우, 고체재주입밸브로서 기체 주입에 의해 고체입자의 재순환을 조절하는 비기계적 밸브를 사용한다[5]. 비기계적 밸브는 sealing의 문제가 없고 제작 및 유지가 간편하여 고온 고압의 조건에 유리하며, 그 예로는

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kswcfb@skenergy.com
현재주소: 대전광역시 유성구 원촌동 140-1 SK에너지기술원 촉매공정연구소
‡이 논문은 KAIST 김상돈 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

루프씰(loop-seal), 실포트(seal pot), L-valve, V-valve 등이 있으며 Lee[6]의 보고를 기준으로 세계 상용 보일러의 약 72%는 루프씰 형태의 비기계적 밸브를 채택하고 있다[7].

순환유동층 조업 시 공장에서 반응기가 정지되는 대부분의 문제는 반응과 관련된 것이 아니라 고체의 주입부나 재순환부에서 발생한다[8]. 이와 관련하여 고체재순환부의 적절한 설계 및 최적의 조업은 전체 반응기의 효율 및 안정성을 결정짓는 핵심요소라 할 수 있다. 그러나, 이러한 중요성과 최근의 많은 응용분야 확대에도 불구하고 가압 시스템의 고체재순환부 내 고체흐름 특성에 대한 압력영향에 관한 연구는 매우 부족하다. 특히, 고체재순환부의 비기계적 밸브로서 루프씰은 주입된 공기에 의해 고체흐름속도를 조절하므로 이를 가압순환유동층에 적용 시, 조업은 공기의 물성변화에 영향을 받게 된다. 그러나 지금까지 상압에서 운전되는 루프씰에 대한 결과는 많이 발표되었으나, 가압 시스템에서 연구결과는 상대적으로 미흡한 실정이다[9].

따라서, 본 연구에서는 가압 순환유동층 적용을 위해 루프씰을 갖는 고체재순환부 내 고체흐름 특성에 대한 시스템 압력의 영향 및 루프씰의 조업특성을 고찰하였고, 운전변수로부터 고체재순환부의 압력변이 및 고체흐름속도를 예측할 수 있는 상관관계를 제안하였다.

2. 실 험

본 연구에서 사용한 가압 고체재순환설비의 개략도는 Fig. 1과 같다. 전체 장치는 고체재순환부(solid recycle system), 싸이클론(cyclone), 호퍼와 수송관(transport line)으로 구성되어 있다. 고체재순환부는 고체를 주입하기 위한 고체주입호퍼, downcomer, 루프씰 및 배출된 고체를 저장하기 위한 저장호퍼로 구성되어 있고, downcomer와 루프씰의 직경은 0.1 m이고, 재순환부 만의 높이는 2.55 m이다. 전체 시스템은 고체흐름에 대한 압력의 영향을 살펴보기 위해 10 kg_f/cm^2의 허용범위 내에서 조업될 수 있도록 설계되었고, 재질은 sus 316으로 제작되었다. 전체 시스템의 높이는 6.90 m이고, 고체주입호퍼, 고체재순환설비 및 고체저장호퍼의 가압영역과 고체 이송관의 상압영역으로 이루어져 있다. 고체 이송관의 직경은 0.05 m이고, 이를 통하여 비산유출되는 고체 입자를 포집하여 고체주입호퍼에 저장시키기 위하여 이송관 출구에 직경 0.10 m인 사이클론을 설치하였고, 싸이클론에 잡히지 않는 입자는 bag filter를 사용하여 포집하였다. 싸이클론에서 포집된 입자는 하부에 위치한 고체저장 호퍼로 하강하였고, 이들은 호퍼 하부에 위치한 knife gate 밸브를 이용하여 흐름속도를 조절하여 downcomer로 주입되었다. 이들은 연속적으로 루프씰로 주입되었으며, 루프씰에서 공기주입으로 순환되는 양이 조절되어 하부에 위치한 고체저장호퍼로 주입되었다. 고체재순환설비 내 고체흐름속도는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 재순환부의 1.8 m 지점에 가열된 모래입자의 주입구를 설치하고, 0.1 m 하부에 0.03 m 간격으로 3개의 K-type 열전쌍을 흐름 중심에 위치하도록 설치한 후, 500 ºC로 가열된 모래를 solenoid valve를 이용하여 공기압에 의한 pulse 형태로 주입하였다. 이 때 고체흐름을 타고 가열된 입자가 열전쌍을 지날 때 Fig. 2의 신호와 같이 시간에 따라 time-lag(τ)를 가지고 온도의 peak가 나타나고, 두 개의 열전쌍 간격(L_T)에 대해 식 (1)과 (2)에 의해 고체속도(U_s)와 고체흐름속도 또는 고체질량플럭스(G_s)를 예측하였다.

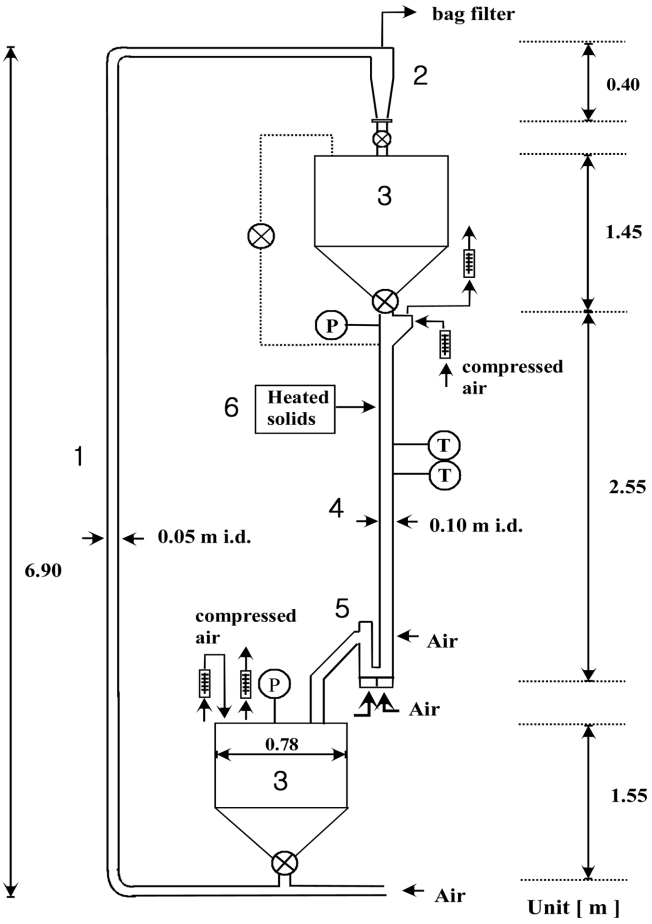

Fig. 1. Schematic diagram of pressurized solids recycle system.

1. Transport line
2. Cyclone
3. Hopper
4. Downcomer
5. Loop-seal
6. Solids mass flux measurement device
P. Pressure indicator
T. Thermocouple

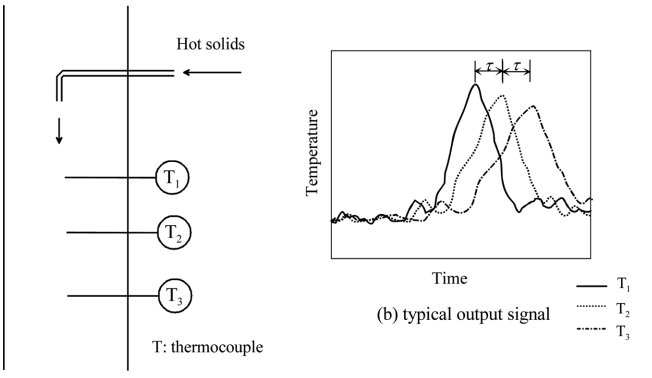

Fig. 2. Measurement of solids mass flux.

$$U_s = \frac{L_T}{\tau} \tag{1}$$

$$G_s = U_s \rho_s (1-\varepsilon) \tag{2}$$

열전쌍의 신호는 10 ms의 간격으로 A/D converter를 이용하여 PC에 저장되었다. 호퍼에 저장된 고체는 상부 호퍼의 고체량을 고려하여 일정한 시간마다 고체수송관을 이용하여 상부 고체주입호퍼로 공압식으로 이송시켰다. 공기는 가압영역의 경우, 공기필터와 압력

Table 1. Physical properties of silica sand

Particle	d_p [μm]	ρ_s [kg/m^3]	U_{mf}[m/s]	U_t [m/s]
Silica sand	240	2582	0.048	2.06

조절계를 이용하여 원하는 시스템 내 압력을 맞춘 후 유량계로 유량이 조절되어 고체재순환설비 내로 주입되었다. 가압시스템 내 압력은 시스템 내로의 공기주입을 통하여 상승시켰으며 원하는 압력값에 대하여 보정된 안전밸브(safety valve, swagelock, USA) 및 상부와 하부호퍼 사이에 연결된 압력균형 라인(line)과 추가적으로 설치된 배출밸브(drain valve)를 이용하여 내부 압력을 일정하게 유지시켰다. Downcomer 및 루프씰 내의 압력분포를 측정하기 위하여 재순환설비의 벽면에는 0.1 m 간격으로 pressure tap을 설치하였고, pressure transducer 및 마노미터로의 입자유입을 막기 위하여 tap의 내면에 400 mesh 철망을 부착하였다. 압력을 측정하기 위하여 마노미터와 pressure transducer(valydine, USA) 및 A/D converter를 사용하였고, 여기서 나오는 신호는 PC를 사용하여 저장하였다.

상압 및 가압조건의 실험에 사용된 시료는 silica sand 입자로서, Geldart 분류[10]에 의하면 group B의 대표적 물질이다. 이의 주요 물성을 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 시스템 압력변화에 따른 loop-seal의 고체흐름 특성

Fig. 3에 loop-seal의 수직공기 주입부에 주입된 공기유속에 대한 고체질량플럭스의 변화를 나타내었다. 하부에서의 공기유속은 상압실험에서 최적의 유속으로 선택된 1.25 U_{mf}로 일정하게 유지시켰고[7], 시스템 압력은 상압에서 0.71 MPa까지 변화시켰다. 공기주입속도는 주입된 공기유속을 최소유동화속도의 비로 나타낸 fluidizing number에 대해 나타내었다. 고체흐름속도는 각각의 압력에서 공기주입속도가 증가할수록 선형적으로 증가하였고, 그 증가정도는 시스템 압력이 증가할수록 더 증가하는 경향을 나타내었다. 루프씰 내에 공기가 주입되면, 입자들의 공극사이로 흐르게 된다. 이 때, 흐르는 공기는 고정층 형태로 존재하는 고체 입자에 대하여

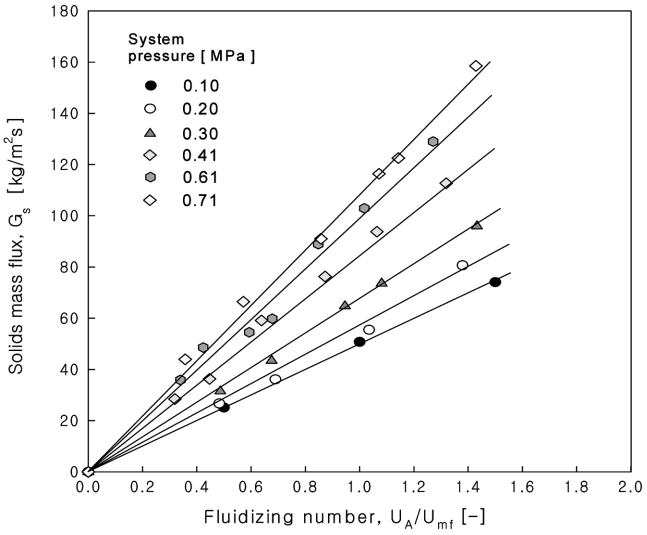

Fig. 3. Effect of fluidizing number on solids mass flux at each system pressure.

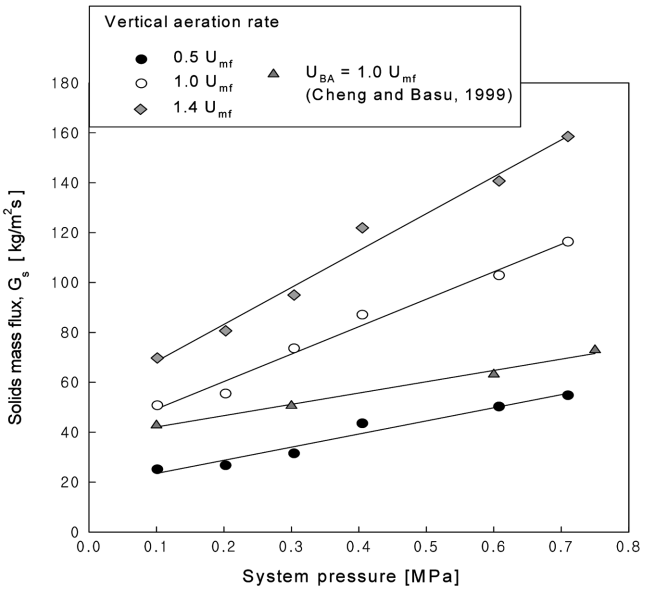

Fig. 4. Effect of system pressure on solids mass flux.

마찰력을 생성시킴으로써 downcomer 내 압력을 형성시킨다. 공기의 주입량이 더욱 증가하여 항력이 고체흐름에 대한 저항을 극복하는데 필요한 힘을 초과하면, 입자는 유동성을 갖으며 고체는 하중에 의해 loop-seal 하부로 흐르기 시작한다. 그러므로, 초기에 주입되는 공기유량이 증가되면 더 큰 downcomer 내 압력강하가 형성되면서 높은 고체흐름속도를 갖게 되는 것이다. 시스템 압력의 증가에 따른 고체흐름속도의 증가는 Fig. 4에 의해 설명될 수 있다.

Fig. 4에 동일한 공기주입속도(fluidizing number)에서의 고체질량플럭스에 대한 시스템 압력의 영향을 나타내었다. 고체질량플럭스는 동일한 공기주입속도에 대해 압력이 증가할수록 증가하였고, 증가정도는 공기주입량에 대해 선형적으로 증가하였다. 이러한 경향은 Fig. 4에 나타내었듯이 1 in.의 내경을 갖는 가압 순환유동층에서 루프씰(또는 seal pot)의 조업에 대한 압력의 영향을 연구한 Cheng과 Basu[9]의 결과와 일치하는 것이다. 그러나, 그들의 조업은 루프씰에서 수직공기주입 없이 하부에서의 공기주입량을 조절함으로써 전체적으로 고체흐름속도에 대한 제어성이 없고, 루프씰의 단면적이 downcomer 면적의 11배의 크기를 갖는 seal pot의 형태를 갖고 있다. 시스템 내 압력의 증가는 크게 두 가지 효과로 나타난다. Fig. 5에 나타내었듯이 압력이 증가할수록 기체물성 변화에 의해 최소유동화 속도가 감소하게 되고[11], 기체 또는 공기의 밀도가 증가하게 된다. 이는 루프씰 조업과 같은 공기주입에 의한 고체흐름에 대해 두가지 영향을 미친다. 최소유동화 속도의 감소는 압력이 증가할수록 동일한 기체유속에 대해 상대적으로 더 높은 유동성을 얻을 수 있음을 의미한다[9]. 또한, 압력 증가에 따른 기체밀도의 증가는 고체입자를 띄우게 할 수 있는 부력의 증가를 의미한다. 이는 상대적으로 낮은 공기주입량에서도 입자의 무게를 지지할 수 있게 만든다. 이는 루프씰 하부에서 입자의 원활한 유동성 유지에 기여할 것으로 판단된다. Li와 Kuipers[12]는 기체-고체 흐름구조에 대한 시스템 압력의 영향을 보고하였는데, 시스템 압력의 증가는 입자간의 충돌빈도(collision frequency)를 감소시키고, 큰 기포의 생성 또는 성장을 억제시키며 기체-고체입자 사이의 상호작용을 강화시킴으로써 기체-고체 흐름구조를 더욱 균일화시킨다고 하였다. 따라서, 루프씰 내

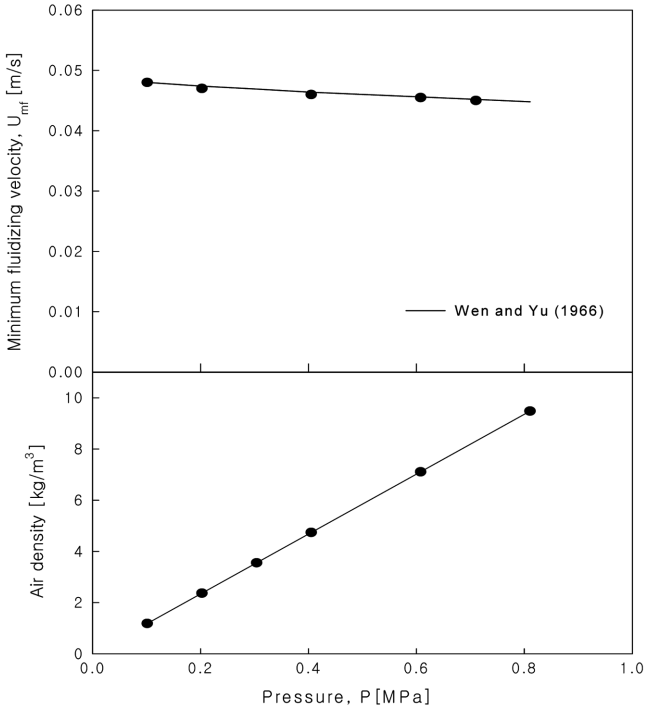

Fig. 5. Effect of system pressure on (a)minimum fluidizing velocity (b)air density.

주입된 기체는 압력이 증가할수록 높은 부력을 가지고 입자사이를 균일하게 흐름으로써 공극의 확대를 유발하고, 이는 곧 입자의 움직임에 있어 더 큰 공간을 제공하여 유동성을 더욱 증가시킬 것으로 판단된다. 또한, 시스템 압력 증가에 의한 고체 입자흐름속도의 증가는 입자에 대한 항력에 의해 분석될 수 있다. 기체의 입자에 대한 항력은 식 (3)에 의해 표현된다.

$$F_a = C_a A_p \frac{\rho_g}{2} U_g^2 \tag{3}$$

시스템 압력의 증가는 Fig. 5와 같이 기체 밀도의 증가를 의미한다. 이는 주입된 동일한 기체유속에 대해 식 (3)에 의해 더 큰 항력을 유발시켜 고체흐름에 대해 더 큰 모멘텀을 제공함을 알 수 있다.

Fig. 6에 주어진 공기주입속도에서의 압력변이를 0.41 MPa의 시스템 압력에서 나타내었다. 공기주입점 상부 downcomer 영역에서의 압력변이는 공기주입속도가 증가할수록 기체와 입자속도의 차이인 slip velocity의 증가로 인하여 증가하였고, 고체재순환부 내 최고 압력값은 공기주입점에서 나타났다. 이러한 경향은 상압에서의 결과[13]와 동일한 경향이다. 압력은 공기주입점 상부에서 흐름방향에 대해 증가하였고, 하부에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 고체입자 흐름영역의 변화를 나타내는 것으로 slip velocity가 양의 값을 갖는 transitional moving bed에서 음의 값을 갖는 packed bed flow regime으로 바뀜을 의미한다[14]. 높은 공기주입속도의 경우, 상압에서의 결과처럼 공기주입점 상부에서 압력강하의 기울기가 적어지는 현상이 나타났는데 이는 상압조건에서 관측되는 것처럼 높은 공기주입속도에서 Geldart B 입자흐름에서 나타나는 국부기포 유동층 형성에 의한 것으로[13] 그 정도는 공기주입속도가 증가할수록 증가하였다.

Fig. 7에 각각의 시스템 압력에서 downcomer 내 압력변이에 대

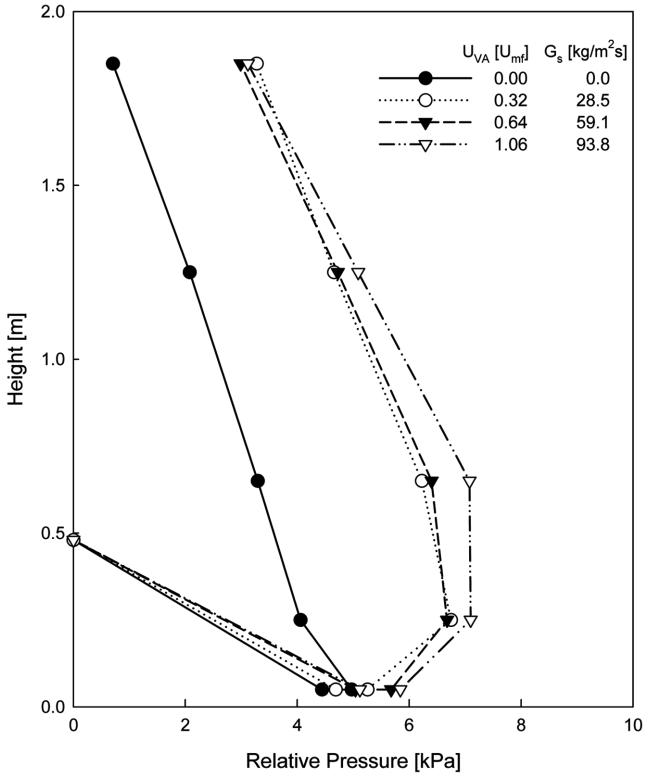

Fig. 6. Variation of pressure proifle in solids recycle system with solids mass flux(P_{sys}=0.41 MPa).

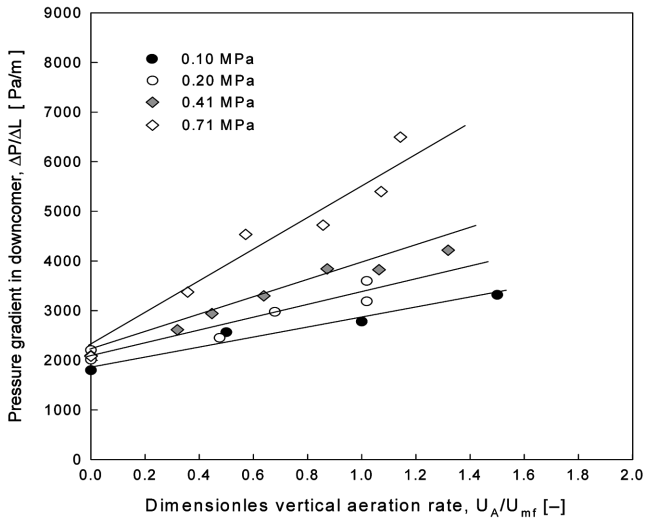

Fig. 7. Effect of vertical aeration rate on pressure gradient in downcomer.

한 수직공기주입속도의 영향을 나타내었다. Downcomer 에서 압력은 기체와 고체간의 속도차인 slip velocity에 의해 형성되고[15], 이는 다음식에 의해 정의된다[13].

$$U_{sl} = U_s - \frac{U_g}{\varepsilon} \tag{4}$$

공기주입속도가 증가하면 압력변이는 증가하였고, 시스템 압력이 증가할수록 증가정도가 커지는 경향이 나타나는데, 이는 동일한 공기주입속도에 대해 시스템 압력의 증가로 인해 밀도가 더 큰 공기

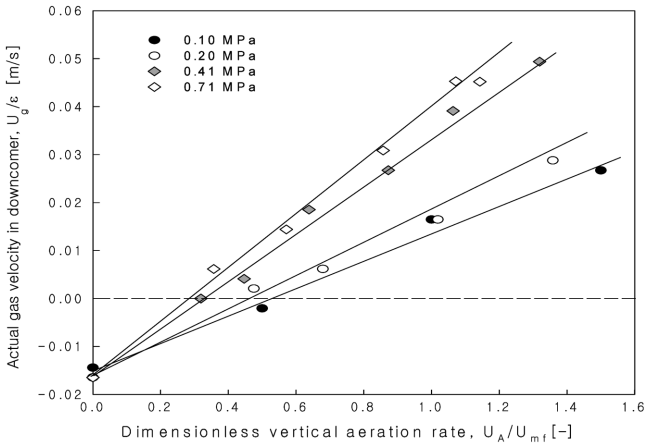

Fig. 8. Effect of vertical aeration rate on actual gas velocity in downcomer with variation of system pressure.

가 더 큰 항력을 유발함으로써 높은 고체흐름속도를 갖게 함으로써 slip velocity가 증가하기 때문이다.

Fig. 7의 압력변이는 식 (4)의 slip velocity에 의해 지배되고, 식 (5)와 같이 slip velocity의 함수인 변형된 Ergun 식에 의해 표현될 수 있다[14].

$$\frac{dP}{dL} = -\frac{150\mu_g(1-\varepsilon)^2 U_{sl}}{(\phi_s d_p)^2\varepsilon^2} + \frac{1.75\rho_g(1-\varepsilon)U_{sl}^2}{(\phi_s d_p)\varepsilon} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에 의해 측정된 압력변이 및 고체질량플럭스로부터 흐름 내 공극은 최소유동화 조건(ε_{mf}=0.486)으로 가정하여[13] 내부 기체 및 고체입자의 요소속도 및 slip velocity를 구할 수 있다.

Fig. 8에 downcomer 흐름 내 실제 기체유속(U_g/e)에 대한 수직 공기주입속도의 영향을 나타내었다. 그림에서 양의 값은 고체흐름과 동일한 방향 즉 하강흐름을 나타내고, 음의 값은 상승흐름을 나타낸다. 수직공기 주입속도가 증가할수록 공극을 통한 기체유속은 초기에 상승흐름을 갖다가 고체흐름 증가에 따라 하강하는 흐름으로 바뀌었으며, 하강흐름속도는 수직공기주입속도가 증가할수록 증가하였다. 흐름 내 기체가 하강흐름을 갖는다는 것은 주입된 공기가 하강흐름을 갖는다는 것을 의미하고, 이는 하강하는 고체입자가 상부의 기체를 함께 끌고 내려오고(entrained) 있음을 의미한다. 내부 기체흐름의 상승에서 하강으로 변하는 전이 공기주입속도는 시스템 압력이 증가할수록 감소하였다. 이는 동일한 공기주입속도에서 시스템 압력이 증가할수록 높은 고체질량플럭스 또는 고체흐름속도를 나타냄으로써 주입된 공기가 쉽게 상승하지 못하기 때문이다.

Fig. 9에 slip velocity와 공극을 통한 기체속도에 대한 고체질량플럭스의 영향을 나타내었다. 고체질량플럭스가 증가할수록 slip velocity와 공극을 통한 실제 기체속도는 증가하였고, 시스템 압력이 증가할수록 동일한 고체질량플럭스에서 slip velocity는 더 높은 값을 실제 기체속도는 더 낮은 값을 나타내었다. 또한, 고체흐름속도 증가에 대해 기체흐름이 상방향에서 하방향으로 전이되는 현상이 나타났는데, 이는 Geldart과 Jones[16]와 Kim과 Kim[13] 등이 본 연구와 물성이 유사한 실리카 모래(Geldart B 입자)에 대해 상압(0.10 MPa)에서 기체주입에 의한 고체흐름에서 나타나는 현상과 동일하였다. 그러나, 압력이 증가할수록 기체흐름방향이 전이되는 고체흐

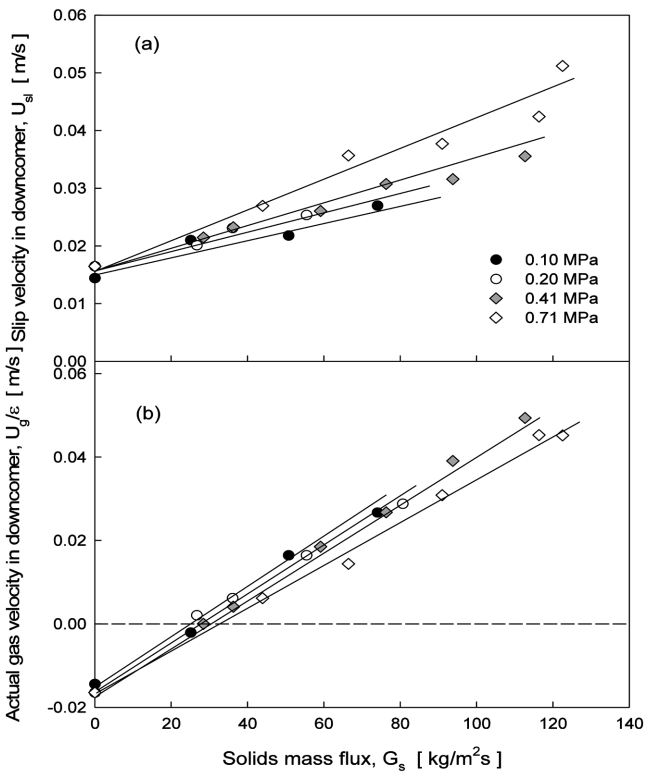

Fig. 9. Effect of solids mass flux on (a) slip velocity and (b) actual gas velocity in downcomer.

름플럭스 값이 증가하였고, 이는 압력이 증가함에 따라 상대적으로 낮은 기체속도에서 높은 고체질량플럭스(또는 높은 slip velocity)를 가지므로 발생된다. Wirth[17]는 상용 가압순환유동층과 같이 downcomer가 상압반응기에 비해 상대적으로 긴 길이를 가지고 있을 때, 전체 가압순환유동층의 안정적인 조업을 위해서는 조업변수에 따른 downcomer의 압력강하 정보가 중요하다고 강조하고, 고체흐름으로부터 압력강하를 예측할 수 있는 도표를 제시하였다. 여기서 고체질량플럭스를 Transport number로 무차원화하고 다음과 같이 정의하였다[17].

$$\mathrm{Tr} = \frac{G_s}{\rho_s(1-\varepsilon)}\left(\frac{\rho_s-\rho_g}{\rho_g}d_p g\right)^{-1/2} \quad (6)$$

또한, 내부 압력변이에 대해 다음과 같이 Pressure drop number로서 정의하였다.

$$\Phi = \frac{\Delta P}{(\rho_s-\rho_g)(1-\varepsilon_{mf})g\Delta L} \quad (7)$$

이에 대해 다음과 같은 downcomer 내부 압력변이에 대한 상관식을 제시하였다[17].

$$\Phi = 0.22\,\mathrm{Tr}^{0.70} \quad \text{with } \mathrm{Ar} \le 200,\ \mathrm{Tr} \le 1 \quad (8)$$

그러나, 식 (8)은 Geldart A 입자에 해당되는 Archimedes number의 범위로 연소로나 가스화기와 같은 가압순환유동층의 재순환물질인 회재의 경우[1,2]보다 매우 낮은 값에 해당된다. 본 연구에서는 Wirth [17]의 연구를 근거로 실험결과에 대해 다음과 같은 상관관계식을 제안하였다.

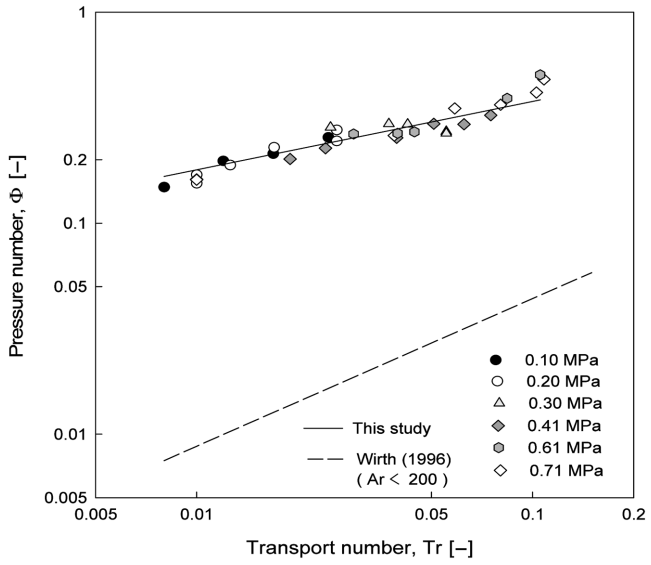

Fig. 10. Pressure drop diagram on gas-solids flow in downcomer.

$$\Phi = 0.91\mathrm{Tr}^{0.32} \quad (9)$$

상관식의 상관계수는 0.93이고, 표준오차는 0.096이다. 상관식의 적용 범위는 다음과 같다; 947≤Ar≤6,629, 0.008≤Tr≤0.105, 0.13≤Φ≤0.60. Fig. 10에 식 (9)와 실험값을 Wirth[17]의 상관식과 비교를 하였고, 제안된 상관식은 실험값을 잘 예측하였다.

3-2. 시스템 압력변화에 따른 loop-seal의 압력강하

Fig. 11(a)에 루프씰에서의 압력강하에 대한 고체질량플럭스의 영향을 각각의 시스템 압력에 대해 나타내었다. 루프씰에서의 압력강하는 고체재순환부에서 최대 절대압력을 나타내는 수직공기주입점으로부터 루프씰의 weir 부에서 하부호퍼로 배출되는 지점까지의 압력차이이다. 루프씰에서의 압력강하는 고체흐름속도가 증가될수록 증가되었다. 그러나, 압력에 따라서는 큰 영향을 받지 않았다.

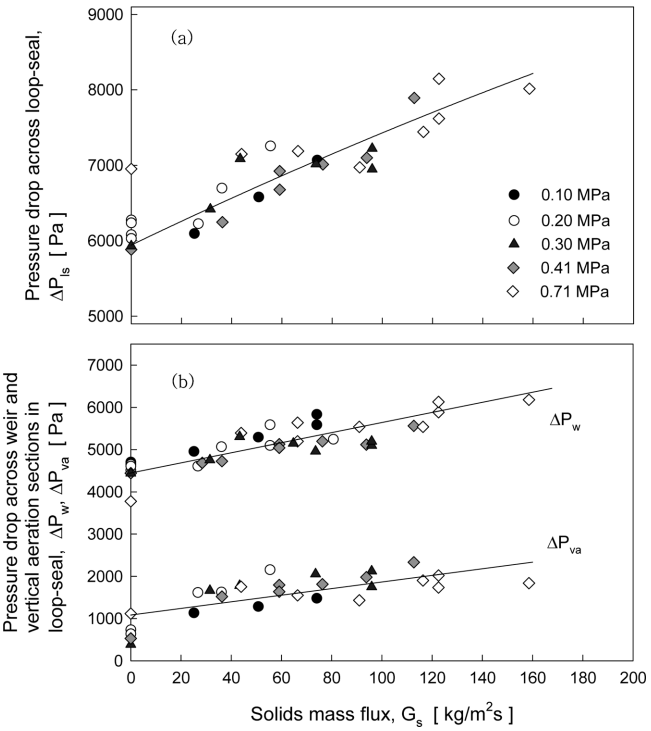

Fig. 11. Effect of solids mass flux on pressure drop across (a)loop-seal and (b)each component.

루프씰은 조업원리상 크게 수직공기주입부와 weir 부로 구성되어 있고, 압력강하의 해석을 위해서는 두 요소가 각각 분석되어져야 한다[5,13]. Fig. 11(b)에 수직공기주입부와 weir 부에서의 압력강하에 대한 고체질량플럭스의 영향을 나타내었다. 수직공기주입부에서의 압력강하는 수평공기주입점으로부터 루프씰 하부영역을 포함한 영역까지의 압력강하를 나타내고, weir 부에서의 압력강하는 입자들이 상승하여 넘쳐 흘러가는 영역에서의 압력강하를 나타낸다. Weir 부의 경우 압력강하는 고체질량플럭스가 증가할수록 증가하였고, 이는 플럭스 량이 증가할수록 wier 부에 유입되는 고체량이 증가함으로써, 열교환부의 고체층 높이가 증가하였기 때문이다. 시스템 압력 변화에 대해서는 특별한 영향이 나타나지 않았는데, 이는 wier 부가 유동층 영역에서 조업되고 있고, 시스템 압력 증가에 따른 기체 즉, 공기의 밀도가 증가하더라도 입자 고체밀도에 비해 상당히 작으므로(0.71 MPa: ρ_g=8.30 kg/m^3; ρ_s=2,582 kg/m^3) weir 부 전체 압력강하에 큰 영향을 미치지 못한다. 수직공기주입부 내 압력강하의 경우, 상압에서처럼 고체질량플럭스가 증가할수록 증가하였고, 시스템 압력변화에 대해 특별한 영향이 나타나지 않았다.

3-3. 고체질량플럭스의 예측

각각의 압력에서 공기주입속도에 대한 고체질량플럭스 변화 결과를 바탕으로 고체질량플럭스와 Transportation number를 예측할 수 있는 상관식을 fluidizing number 및 Archimedes number에 대해 제시하였다.

고체질량플럭스의 경우,

$$G_s = 1.67\left(\frac{U_A}{U_{mf}}\right)^{1.62}\mathrm{Ar}^{0.49} \quad (10)$$

상관계수는 0.99이고, 표준오차는 0.31 kg/m^{2}s이다.

Transport number(Tr)의 경우,

$$\mathrm{Tr} = 1.33\times10^{-4}\left(\frac{U_A}{U_{mf}}\right)^{0.53}\mathrm{Ar}^{0.72} \quad (11)$$

상관계수는 0.98이고, 표준오차는 0.29이다. 식 (10)과 (11)의 적용범위는 다음과 같다: 947≤Ar≤6,629, 0.009≤Tr≤0.140, 0≤U_A/U_{mf}≤1.50.

4. 결 론

가압 고체재순환부에서 silica sand 입자를 사용한 고체흐름 특성에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 루프씰을 통한 공기주입량이 증가할수록 고체흐름속도는 선형적으로 증가하였다.

(2) 동일한 공기주입속도에 대해 시스템 압력이 증가할수록 고체질량플럭스는 증가하였다.

(3) 시스템 압력이 증가할수록 downcomer 내 압력변이는 동일한 공기주입속도에 대해 증가하였고, 흐름 내 고체속도 및 기체 속도 또한 증가하였다.

(4) Transportation number와 Pressure drop number를 이용하여 고

체질량플럭스로부터 downcomer에서의 압력변이를 예측할 수 있는 상관관계식을 제안하였다.

(5) 루프씰에서의 압력강하는 시스템 압력에 관계없이 고체질량 플럭스가 증가할수록 증가하였다.

(6) 각각의 시스템 압력에서 공기주입속도 변화에 따른 고체질량 플럭스 및 Transportation number를 예측할 수 있는 상관관계식을 제안하였다.

사용기호

A_p : projected area[m^2]
Ar : Archimedes number, $d_p^3 g_g(\rho_s-\rho_g)/\mu_g^2$ [−]
C_d : drag coefficient[−]
d_p : mean diameter of particle[m]
F_d : drag force[N]
G_s : solid mass flux[kg/m^2s]
g : acceleration due to gravity[m/s^2]
L : length[m]
L_T : length between thermocouples[m]
P : pressure[Pa]
ΔP_{ls} : pressure drop across loop-seal[Pa]
ΔP_{va} : pressure drop across vertical aeration section in loop-seal[Pa]
ΔP_w : pressure drop across weir section in loop-seal[Pa]
Tr : Transportation number, $\frac{G_s}{\rho_s(1-\varepsilon)}\left(\frac{\rho_s-\rho_g}{\rho_g}d_p g\right)^{-1/2}$ [-]
U_A : aeration rate[m/s]
U_{BA} : aeration rate at bottom[m/s]
U_g : gas velocity[m/s]
U_g/ε : actual gas velocity[m/s]
U_{mf} : minimum fluidization velocity[m/s]
U_s : actual solid velocity[m/s]
U_{sl} : slip velocity[m/s]
U_t : terminal velocity[m/s]

그리이스 문자

ε : voidage[−]
ε_{mf} : voidage at minimum fluidization condition[−]
μ_g : gas viscosity[kg/ms]
ρ_g : gas density[kg/m^3]
ρ_s : apparent density of particle[kg/m^3]
τ : time interval between signal peaks from thermocouples in Fig. 2[sec]
F : Pressure drop number, $\frac{\Delta P}{(\rho_s-\rho_g)(1-\varepsilon_{mf})g\Delta L}$ [−]
ϕ_s : shape factor[−]

참고문헌

1. Lee, S. H., Lee, J. M., Kim, J. S., Choi, J. H. and Kim, S. D., "Combustion Characteristics of Anthracite Coal in the D CFB Boiler," *HWAHAK KONGHAK*, **38**(4), 516-522(2000).
2. Mann, M. D., Knutson, R. Z., Erjavec, J. and Jacobsen, J. P., "Modeling Reaction Kinetics of Steam Gasification for a Transport Gasifier," *Fuel*, **83**, 1643-1650(2004).
3. Knowlton, T. M., "Pressure and Temperature Effects in Fluid-Particle Systems," Fluidization VII, eds. by O. E. Potter and D. J. Nicklin, Engineering Foundation, New York, 27-46(1992).
4. Beer, J. M., "High Efficiency Electric Power Generation: The Environmental Role," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **33**(2), 107-134 (2007).
5. Kim, S. W., Namkung, W. and Kim, S. D., "Solids Recycle Characteristics of Loop-Seals in a Circulating Fluidized Bed," *Chem. Eng. Technol.*, **24**, 843-849(2001).
6. Lee, Y. Y., "Design Consideration for CFB Boilers," Circulating Fluidized Beds, eds. by J. R. Grace, A. A. Avidan and T. M. Knowlton, Blackie Academic and Professional, London, UK, 417-440 (1997).
7. Kim, S. W., "Solids Recycle and Heat Transfer Characteristics in a Pressurized Circulating fluidized bed System," PhD Disseration, KAIST(2002).
8. Merrow, E., "Linking R & D to Problems Experienced in Solids Processing," *Chemical Engineering Processing*, May, 14-22(1985).
9. Cheng, L. and Basu, P., "Effect of Pressure on Loop seal Operation for a Pressurized Circulating Fluidized Bed," *Powder Technol.*, **103**, 203-211(1999).
10. Geldart, D., "Types of Gas Fluidization," *Powder Technol.*, **7**, 285-292(1973).
11. Wen, C. Y. and Yu, Y. H., "A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity," *AIChE J.*, **12**, 610-612(1966).
12. Li, J. and Kuipers, J. A. M., "Effect of Pressure on Flow Behaviors in Dense Gas-Fluidized Beds: A Discrete Particle Simulation Study," *Fluidization X*, eds. by Kwauk, M., Li, J. and Yang, W., United Engineering Foundation, New York, 389-396(2001).
13. Kim, S. W. and Kim, S. D., "Effects of Particle Properties on Solids Recycle in Loop-Seal of a Circulating Fluidized Bed," *Powder Technol.* **124**, 76-84(2001).
14. 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).
15. Knowlton, T. M., "Unique Problems and Solutions in Gas-Solids Flow," *AIChE Symp. Series*, **93**(317), 1-6(1997).
16. Geldart, D. and Jones, P., "The Behavior of L-valves with Granular Powders," *Powder Technol.*, **67**, 163-174(1991).
17. Wirth, K.-E., "Fluid Mechanics of the Downcomer in Circulating Fluidized Beds," Fluidization VIII, eds. by Large, J. and Laguerie, C., Engineering Foundation, New York, 105-112(1996).