

순환공정의 수평관에서 농후상 기류수송의 경계유속

박은호 · 홍성선 · 조성호* · 이창근*† · 진경태*

충북대학교 화학공학과

*한국에너지기술연구소 유동충기술연구센터

(2001년 2월 24일 접수, 2001년 4월 26일 채택)

Critical Velocity for the Dense-Conveying in a Horizontal Pipe of a Circulation Process

Eun-Ho Park, Sung-Sun Hong, Sung-Ho Jo*, Chang-Keun Yi*† and Gyoung-Tae Jin*

Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 360-763, Korea

*Fluidization Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received 24 February 2001; accepted 26 April 2001)

요 약

고체순환장치의 수평관에서 차압계를 이용하여 농후상영역과 plug 흐름사이의 경계유속을 측정하였다. 수평관은 직경 0.034 m, 길이 1.8 m로 Plexiglas로 만들어졌다. 본 실험에서는 FCC 촉매, 아연계탈황제, polyethylene 입자를 사용하였다. 본 연구에서는 경계유속을 결정하기 위해 수평관에서 차압, 표준편차와 고체수송속도를 측정하였다. 실험결과 경계유속은 고체수송속도가 증가할수록 증가하였으나 압력범위 1.0-2.0 atm에서는 별다른 변화가 없었다. 입자의 밀도, 직경, 고체수송속도를 사용하여 경계유속을 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다. 가압순환공정에 있어 경계유속 이하의 유속에서 발생하는 plug flow는 가압시스템의 수평관 전후의 압력균형에 불안정한 요소로 작용하였다.

Abstract – Critical velocities were measured by differential pressure transducers in a solid circulation experimental apparatus which was a 1.8 m in length, 0.034 m in diameter of Plexiglas horizontal pipe. Three kinds of particles of FCC catalyst, zinc titanate and polyethylene were used. Pressure drop, standard deviation of pressure drop fluctuations and solid conveying rate were measured to determine the critical velocity. Critical velocity increased with increasing solids conveying rate, however, there was little effect of the pressure on the critical velocity in the range from 1.0 to 2.0 atm. The critical velocity was correlated in terms of particle density, diameter and solid conveying rate. Unstable Pressure balance was occurred at front section and at rear section of a horizontal pipe in a pressurized circulation system when it was disturbed by plugs at a velocity less than U_{cr} .

Key words: Critical Velocity, Dense-Conveying, Pneumatic Transport, Horizontal Pipe

1. 서 론

기류수송이란 기체를 사용하여 관을 통한 입자의 수송으로 밀가루, 석회석, 석탄, 과립상의 입자, 플라스틱 칩 등의 수송에 사용되고 있다 [1]. 일반적으로 기체는 공기를 사용하지만, 반응을 요하는 공정이나 안전상의 이유를 들어 다른 기체가 사용되기도 한다. 실질적인 기류수송의 개념인 입자를 한 곳에서 다른 곳으로 수송하는 기류수송 시스템은 1878년 곡물을 저장고로 수송하는 데서 출발하여 현재까지 여러 분야의 산업현장에서 이용되고 있다 [2].

수평관 기류수송 시스템에서 중요한 고려사항은 고체를 수송하는 데 있어 적당한 유속을 선택하는 것이다. 유속이 너무 높으면 과도한 기체가 필요하며 높은 압력강하가 일어나고, 유속이 너무 낮으면 불안정한 plug 흐름이 일어난다. 수평관에서 기체속도가 모든 입자를 부유상

으로 운반할 만큼 유속이 충분히 높은 경우 dilute-phase pneumatic transport 영역이라 하며, 기체속도가 모든 고체를 부유상태로 유지하기에 불충분하게 되어 고체 입자들이 관의 바닥에 가라앉기 시작하는 기체속도를 saltation velocity(U_{salt})라 하며 이 유속이하의 영역을 dense-phase pneumatic transport 영역이라 한다 [3-5]. 농후상 수평관 기류수송에서 기체속도가 감소함에 따라 다음과 같은 흐름형태의 변화를 보게 된다. 대부분의 입자수송이 기상에서 이루어지고 일부는 관의 바닥에서 층을 이뤄 수송되는 stratified flow, 수송관의 상부는 적은 양의 입자가 기체와 함께 수송되며 하부는 입자의 bulk density와 비슷한 밀도를 가지고 dune의 모양을 이뤄 수송되는 dune flow, 수송되는 입자에 의해 관의 막힘을 가져오는 plug flow로 크게 구분 지을 수 있다. Plug 흐름을 보이는 가장 높은 기체유속을 critical velocity(U_{cr})라 하며 Muschelknautz와 Wojahn [6], Wirth [7], Wirth와 Molerus [8]은 안정한 수송영역과 불안정한 수송영역을 구분 짓는 기체유속으로 정의했다. Table 1은 기존의 수평관 기류수송에 대한 연구를 정리한 것이다.

†E-mail: ckyi@kier.re.kr

Table 1. Summary of previous researches on horizontal dense-phase pneumatic transport

Author(s)	Solids	Particle diameter(mm)	Pipe internal diameter(mm)	Length(m)	Mass flow rate of solids(kg/s)	Superficial air velocity(m/s)	Solid/air mass flow rate ratio	Classification of the work done
Albright et al. [9]	Pulverized coal	90% through 200-mesh	6.25 7.83 11.06	17.68	0.018-0.170	1.72-5.12 2.00-6.28 1.82-6.4	141-219 125-197 145-236	Tabulated data; correlation
Wen and Simons [10]	Coal powder Glass beads	0.754 0.500 0.112 0.279 0.147 0.071	Glass pipes 12.7, 19.1, 25.4; (using coal powder only) Steel pipe: 9.25; (for both materials)	3.048	0.005-0.038	0.15-15.0	50-850	Data presented as small-scale graphs; propose design method and correlation
Lippert[11]	Alumina	0.075 0.066	40	12.5	0.28-2.50	1-20	10-250	Data presented on phase diagrams
P.E.C.Report [12]	Sand	0.864	25.4	22.86 53.34	0.06-0.42	1.24-6.90	40-160	A large amount of tabulated data; some semiempirical correlations
		2.39	50.8	22.86 53.34 121.92 167.64	0.03-1.7	0.88-8.15	9-191	
		3.63	76.2	30.48 53.34 60.96 121.92	0.04-2.31	0.33-7.24	2-292	
Konrad[13]	Polyethylene granules	~4	47.3	6.36	0.05-0.645	1.72-4.25	14-81	Tabulated data for plug conveying flow pattern; theory to predict pipeline ΔP ; correlation
Chari[14]	PPG catalyst carrier	0.437	25.4 50.8 76.2	0.16-2.44	0.0122-0.563	0.20-0.495	48-208	Tabulated data for moving bed flow; correlation
	Sodium tripolyphosphate granules	0.320	25.4 50.8 76.2	0.61-2.44	0.0260-0.566	0.245-0.514	78-204	
	Catalyst beads	2.63	50.8 76.2	0.91-2.44	0.112-0.354	1.30-1.98	28-74	
	Potassium sulphate crystals	0.14	47.3	0.61-2.44	0.045-0.183	0.068-0.088	123-383	

농후상 수평관 기류수송은 희박상 수평관 기류수송에 비해 수송기체의 절감, 입자와 수송관의 마모 감소, 수송되는 동안 입자가 가지고 있는 고유한 성질 유지, 정전기가 감소되는 장점을 가지고 있으나, 수송되는 입자의 정확한 mechanism에 대한 이해가 없어 공정의 운전에서 있어 예외적인 상황이 발생하며 설계의 어려움과 뜻하지 않는 관 막힘의 위험성이 있다. 또한 batch식의 한 호퍼에서 다른 호퍼로의 입자의 수송이 주를 이루며, 입자가 수송되는 동안 때때로 흐름형태의 변화를 가져와 연속적인 공정을 유지하기 어려운 단점이 있다[15, 16]. 그러나 이러한 단점들을 극복하고자 하는 연구가 계속 되어왔고, 단점을 극복하여 장점을 살린다면 경제적으로 많은 이득을 가져올 수 있으므로 최근 농후상 수평관 기류수송에 대한 연구가 꾸준히 증가하고 있는 추세이나 국내에서는 아직 많은 연구가 이루어지지 않았다. 또한 기존의 수평관 기류수송 실험은 주입장치, 수평관, 호퍼로 구성되는 단순시스템으로 이루어져 있어 실제 시스템의 적용에는 다소 무리가 있었다.

이에 본 연구에서는 실제 시스템에 적용할 수 있는 유동층 공정을 포

합하는 가압 순환공정의 수평관에서 유속변화에 따른 기-고 흐름형태를 이해하고, 차압계를 이용하여 시스템의 압력, 입자의 물성, 입자의 주입속도의 변화에 따른 경계유속을 측정하여 장치의 scale-up시 안정적인 입자수송을 위한 설계자료로 활용하는데 목적이 있다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 연구에서 사용한 고체순환장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 입자의 흐름형태를 관찰하기 위해 장치의 재질은 Plexiglas로 만들어졌다. 수평관은 길이 1.8 m×내경 0.034 m이며, 반응기 쪽에서 0.72 m 떨어진 부분의 상단에 DP1(P1, P2)과 DP1에서 0.02 m 아래에 DP2(P3, P4)의 차압변환기를 설치하였다. 차압변환기의 위치설정은 수평관 전후의 기체가 배출되는 ejector의 영향과 수평관과 상승관과의 혼합영역의 간섭을 최소화 하는 부분을 선택했다. 오른편의 상승관은 밑 부분이 내경 0.05 m×높이 0.63 m,

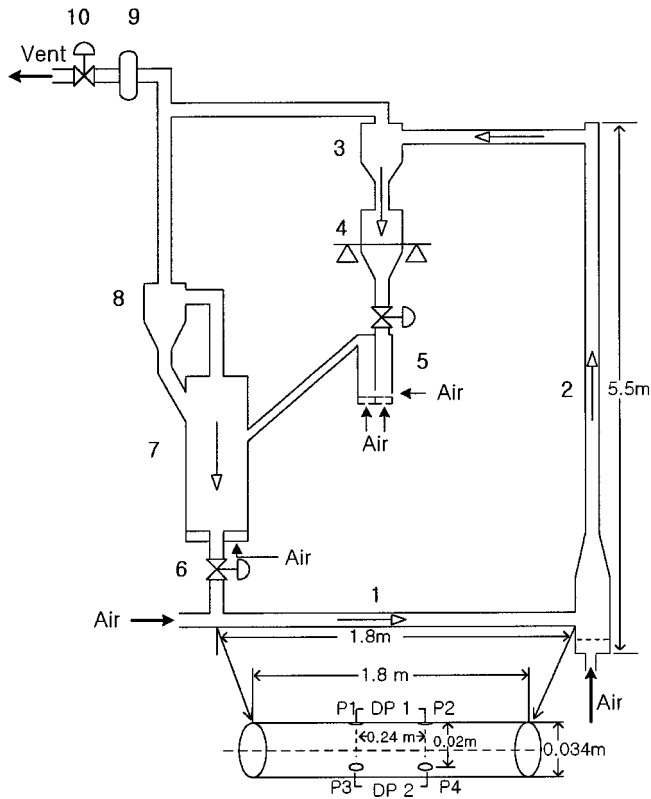


Fig. 1. Schematic diagram of a circulating process with a horizontal pipe.

1. Horizontal pipe
2. Riser
3. Cyclone
4. Load cell hopper
5. Loop-seal
6. Slide valve
7. Reactor
8. Cyclone
9. Filter
10. Pressure control valve

윗부분은 내경 0.035 m×높이 4.65 m이며, 두 부분이 길이 0.17 m의 reducer 관에 의해 연결되어 있다. 왼편의 반응기는 내경 0.16 m×높이 1.25 m의 유동층 반응기로 공기 분산관과 연결되어 있다. 반응기와 상승관은 수평관에 의해 연결되어 있다. 윗부분의 상승관과 반응기는 loop-seal에 의해 연결되어 있으며, 고체수송량을 측정하기 위해 load cell hopper를 설치하였다. 비산유출되는 고체 입자를 포집하기 위하여 상승관 출구에는 사이클론을 설치하였고, 사이클론에서 포집되지 않은 입자는 필터를 사용하여 포집하였다. 유량의 조절은 3개의 질량유량계를 사용하여 수평관, 반응기, 상승관의 유속을 독립적으로 제어할 수 있다. 필터 후단에는 압력제어밸브를 설치하여 2기압까지 가압실험을 할 수 있게 하였다.

2.2. 실험방법

반응기에 입자를 채운 후 유동화 시키며, 수평관과 상승관에 기체를 공급하여 원하는 압력과 유속을 조절한다. 전체 시스템의 압력과 수평관과 상승관에서의 유속을 맞춘 다음 반응기 하단의 slide valve를 열어 입자를 순환시킨다. 컴퓨터 모니터에 나타나는 측정차압의 시간에 따른 변화가 일정한 경향을 나타내어 정상상태에 도달하였다고 판단되

Table 2. Properties of particles used

Particles	Zinc titanate	FCC	Polyethylene
Mean particle diameter[m]	55×10^{-6}	74×10^{-6}	544×10^{-6}
Particle density[kg/m ³]	2010	1380	917
Bulk density[kg/m ³]	1415	898	492
Geldart classification	AB	A	B

면 측정된 차압을 컴퓨터에 저장하고 고체수송량을 측정한다. 같은 방법으로 압력, 입자, slide valve의 조건을 바꿔가며 실험치를 측정한다.

2.3. 시료물성 및 실험변수

본 실험에서는 아연계탈황제, FCC(Fluid Catalytic Cracking) 촉매, polyethylene 입자를 사용하였다. 입자들의 주요한 특성과 실험변수의 범위를 Table 2와 3에 각각 나타내었다. Geldart[17] 입자분류법에 의해 아연계탈황제는 그룹 A와 B의 경계영역에 속하는 입자이며, FCC 입자는 그룹 A, polyethylene 입자는 그룹 B에 속하는 입자이다. Fig. 2는 실험에 사용된 입자의 입도분포를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 압력변화가 경계유속에 미치는 영향

압력변화가 경계유속에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0 atm에서 경계유속을 측정하였다. Fig. 3은 FCC 입자의 경우 수평관에서 유속변화에 따른 전형적인 차압요동을 나타낸 것으로 수평관 내에서 기-고상의 흐름형태를 예측할 수 있다. 이때 slide valve의 열림 정도는 40%이며 차압은 DP1에 의해 측정되었다. (a)는 기체유속이 4.0 m/s로 stratified flow로 대부분의 입자들은 관의 상부에서 회박상의 부유상으로 수송이 이루어지나, 일부의 입자는 관의 바닥에서 구르거나 또는 미끄러지며 흘러서 수송이 이루어지며 비교적 균일한 차압요동을 보인다. (b)는 기체유속이 3.5 m/s로 dune flow를 나타낸다. 수평관의 상부에서는 적은 양의 입자가 기체와 함께 회박상으로 수송되며, 관의 하부는 입자의 bulk density와 비슷한 밀도를 가진 층을 이루며 층 상부는 dune의 모양을 하며 수송된다. 이때도 일부의 입자들은 구르거나 미끄러져 흐르면서 수송되어지며, 가끔씩 빠른 속도를 갖는 고농도의 입자들이 수송되는 ripple을 나타내 (a)에 비해 큰 차압요동을 나타내는 것을 볼 수 있다. (c)는 기체유속이 3.0 m/s로 입자가 관의 바닥을 점점 높게 층을 이루다가 결국 관의 막힘을 가져오는 plug flow를 나타내는 것으로 작은 범위에서 차압요동을 나타내는 (a), (b)에 비해 (c)는 간헐적으로 급격한 차압상승을 볼 수 있다. 이 급격한 차압상승이 바로 입자에 의해 관이 막혀 나타나는 것으로 plug flow를 결정짓는 단서를 제공하며, 이때의 유속을 경계유속으로 결정지을 수 있다. Plug가 수평관을 지나 수직관으로 이동하게 되면 수평관은 다시 dune flow를 나타나게 되며 다시 plug가 생기는 순환을 하게 된다. Hong[18]은 수평관내 기-고상의 흐름에서 유속이 감소함에 따라 비교적 일정한 차압요동을 나타내다 갑자기 큰 폭의 차압요동을 나타내는 유속을 경계유속의 기준으로 보았다. (c)는 Hong의 경계유속 결정기준과 잘 일치함을 나타낸다. (d)는 기체유속이 2.5 m/s로 경계유속보다 낮은 유속

Table 3. Conditions of experimental parameters

Parameters	Static pressure[atm]	Gas density[kg/m ³]	Gas velocity[m/s]	Slide valve opening percent[%]
Particles				
Zinc titanate	1.0	1.21	2.0-6.0	50
FCC	1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0	1.21-2.39	1.5-15	40, 50, 60, 70
Polyethylene	1.0	1.21	1.3-6.0	50

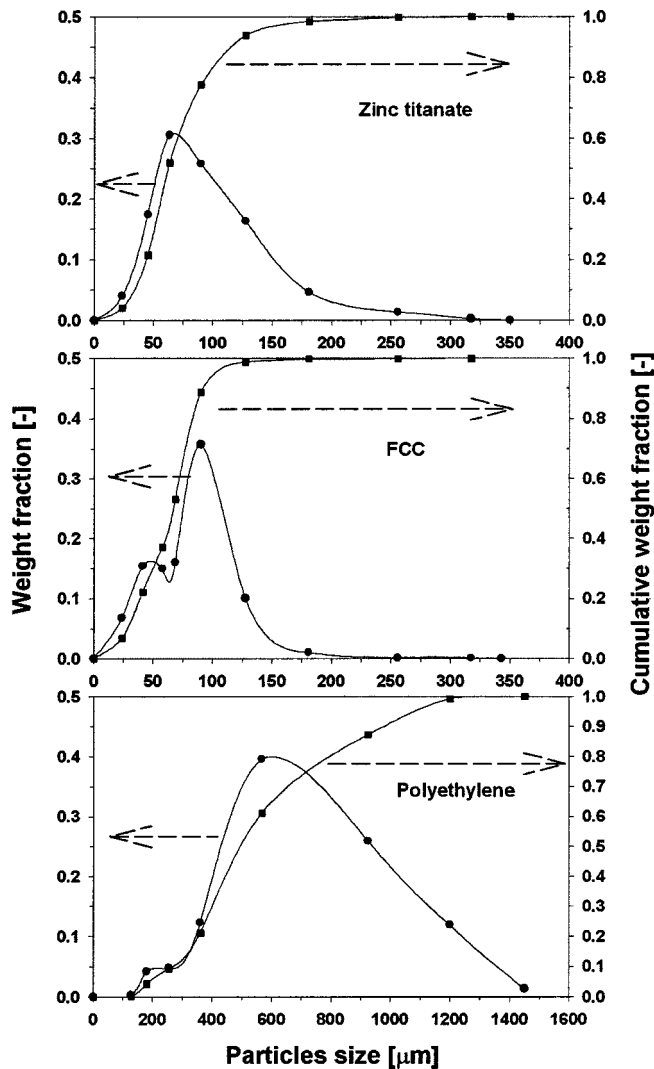


Fig. 2. Particle size distributions of three particles.

에서 차압요동을 나타낸다. 기-고상의 흐름형태는 (c)와 비슷한 형태를 나타낸다. (c)와 (d)에 있어 plug를 나타내는 peak가 높고 폭의 차이를 보이는데 이것은 수평관에서 차압을 측정함에 있어 plug의 길이와 밀도의 차이가 생겨 나타나는 것으로 사료되어진다. 이상에서 압력 1.0 atm, slide valve가 40%일 때 차압요동으로 결정되어진 경계유속은 3.0 m/s이다.

Fig. 4는 압력 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0 atm에서 유속에 따른 DP1의 차압을 표준편차로 나타낸 그림이다. 표준편차가 크게 나타나는 것은 차압요동이 심하여 수평관내의 기체-고체 흐름이 안정적이지 못하다는 판단근거를 제공한다. 기체유속 3.5-5.5 m/s의 영역에서는 차압요동이 비교적 균일한 값을 가짐으로서 표준편차가 20미만의 작은 값을 나타내나 plug flow가 시작되는 3.0 m/s에서는 그림에서 보여주는 바와 같이 표준편차가 20이상의 값을 가지며 비교적 큰 증가를 보였다. 상압과 비교하여 가압조건에서는 입자의 흐름이 좀더 활발한 움직임을 보이며 같은 유속 조건을 갖는 상압의 차압 값에 비해 크게 나타났다. 입자의 움직임이 빨라진 이유는 시스템의 압력이 증가할수록 기체의 밀도가 증가하고 이로 인해 입자의 종말속도는 증가하게 되어 입자의 속도가 기체의 유속에 빨리 도달하는 것으로 사료되어진다.

이상에서 0.034 m의 직경을 갖는 수평관에서 slide valve 40%일 때 경계유속은 압력범위 1.0-2.0 atm에서는 동일한 유속인 3.0 m/s에서 나타나 압력변화에 대해 별다른 영향이 없는 것으로 나타났다.

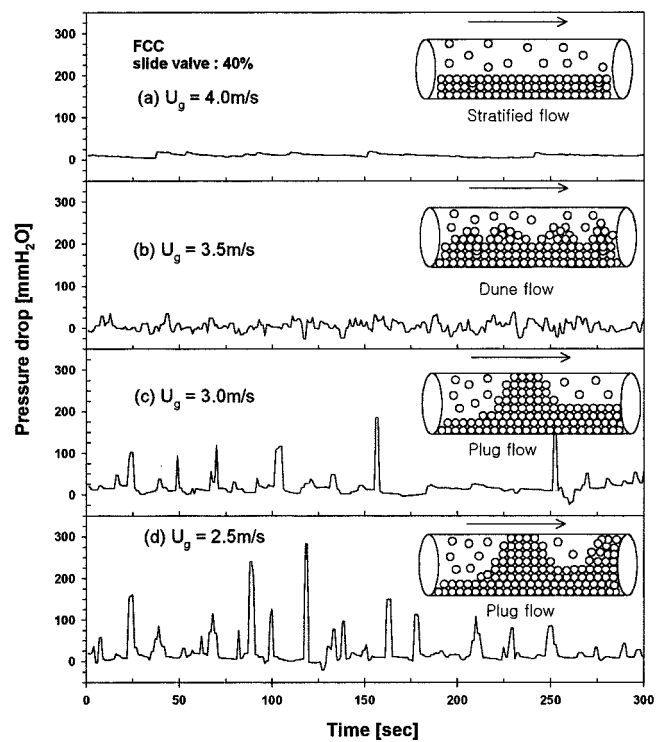


Fig. 3. Dense-conveying flow pattern and differential pressure change with decrease of gas velocity.

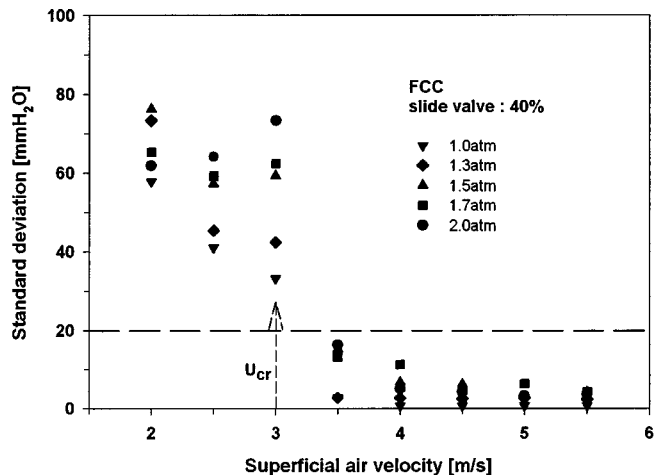


Fig. 4. Determination of a critical velocity by standard deviation data with gas velocity.

3-2. 입자물성이 경계유속에 미치는 영향

기류수송에 있어 입자의 물성(크기, 밀도, 분포)에 따라 입자와 기체 간의 상호작용이 다르게 작용하여 다른 수송형태를 갖게 되므로 설계와 운전에서 중요한 고려 대상이 된다[19]. 입자물성이 수평관에서의 경계유속에 미치는 영향을 알아보기 위해 FCC 촉매, 아연계탈황제, polyethylene 입자를 사용하여 실험하였다. 아연계탈황제와 FCC 입자는 크기와 구형도에 있어서 비슷한 값을 가지나 밀도에 있어 큰 차이를 보이며, polyethylene은 비교적 작은 밀도와 넓은 입도분포를 가지고 있다. Fig. 5는 아연계탈황제, FCC 촉매, polyethylene 입자에 대해 slide valve 50%일 때 DP1의 차압을 표준편차로 나타낸 것으로 아연계탈황제는 4.5 m/s, FCC 입자는 4.0 m/s에서 큰 증가를 보여 경계유속임을 알 수 있으나 polyethylene의 경우 뚜렷한 증가를 보이지 않았다

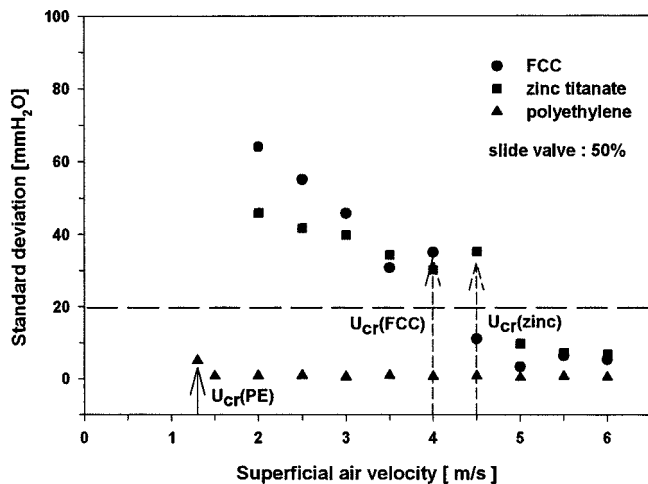


Fig. 5. Critical velocity change of three particles.

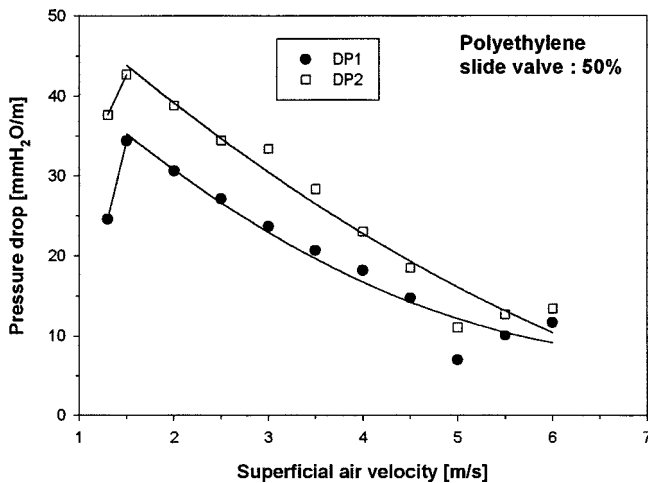


Fig. 6. Differential pressure change at the upper section(DP1) and the lower section(DP2) in a horizontal pipe in case of polyethylene.

다. 이것은 polyethylene의 경우 1.3 m/s에서 plug가 생기면서 수평관을 완전히 막고 더 이상의 흐름을 보이지 않아 나타난 현상이다. Fig. 6은 Fig. 5의 polyethylene 입자의 표준편차를 구한 평균차압을 나타낸 것으로 유속이 감소할수록 수평관 바닥의 입자층이 높아져 차압이 증가함을 보인다 유속 1.3 m/s에서 증가하던 차압이 감소함을 보이는데 이것은 차압계 전단에서 plug가 생겨 더 이상의 흐름을 보이지 않아 나타난 현상으로 polyethylene 입자의 넓은 입도분포로 인해 나타난 현상으로 생각된다. 또한 그림에서 보듯이 DP2가 DP1 보다 큰 차압을 나타내며 유속이 감소할수록 그 차이는 더 커진다. 유속이 감소할수록 DP2와 DP1의 차압의 차가 커지는 것은 입자층의 높이가 높아지기 때문이며, DP2가 DP1과 비슷한 형태의 압력강하를 나타내는 것으로부터 수평관 하부 입자층이 고정되어 있는게 아니라 흐름을 보이는 것으로 생각된다. 아연계탈황제와 FCC의 경우 하부의 입자층은 고정되어 있고 상부만이 흐름을 보였다. 본 실험에서는 polyethylene 입자를 수송하는 동안 정전기를 볼 수 없었으며 아연계탈황제나 FCC에 비해 더 좋은 흐름을 보였으나 입자층이 높아져 관의 막힘을 가져오면 더 이상 흐름을 보이지 않았다. Jiang 등[20]은 입도분포 90-500 μm 를 갖는 평균직경 325 μm , particle density 660 kg/m^3 , bulk density 445 kg/m^3 를 갖는 미세한 polyethylene 입자에 평균직경 4,400 μm , particle density 1,010 kg/m^3 , bulk density 664 kg/m^3 를 갖는 큰 입자를 첨가하여 입자

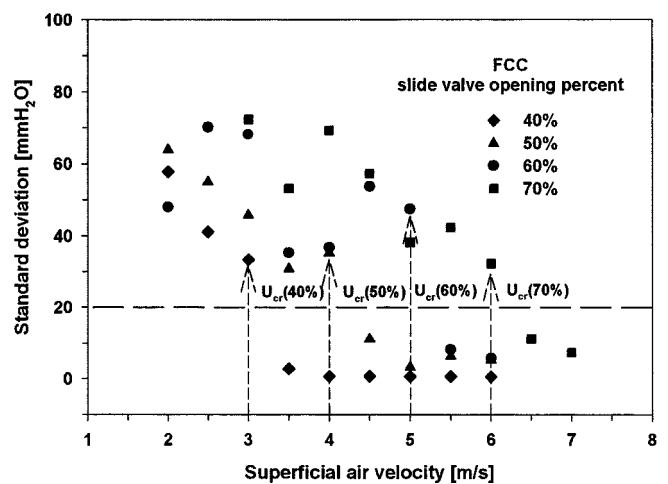


Fig. 7. Effect of slide valve opening percent on critical velocity.

간의 상호 인력에 의해 나타나는 agglomeration이 제거될 수 있으며, 운전 안정성을 좋게 한다고 하였다. Li 등[21], Bi 등[22]도 미세 입자에 대해 큰 입자를 첨가하면 유동화를 좋게 한다고 하였다. 실험에 사용된 polyethylene 입자의 경우 Fig. 2에서 보였듯이 100 μm 의 미세입자부터 1,500 μm 까지의 큰 입자들이 섞여 있는 넓은 입도 분포를 가지고 있으며, 대기중의 상대습도의 영향, 실험장치의 점지 등의 이유로 정전기가 나타나지 않은 것으로 생각된다. 이상에서 수평관에서 입자의 수송에 있어 입자의 밀도, 크기, 입도분포 등 여러 가지 물성의 영향을 받는 것으로 사료된다.

3.3. 입자주입속도가 경계유속에 미치는 영향

입자주입속도의 변화가 경계유속에 미치는 영향을 알아보기 위해 FCC 입자에 대해 slide valve 40, 50, 60, 70%를 열고 실험을 하였다. Fig. 7은 slide valve가 40, 50, 60, 70% 열렸을 때의 DP1에 의해 측정된 차압을 표준편차를 이용해 나타낸 그림으로 slide valve가 40%일 때 3.0 m/s, 50%일 때 4.0 m/s, 60%일 때 5.0 m/s, 70%일 때 6.0 m/s를 경계유속으로 결정할 수 있었다. 농후상 수평관 기류수송에 있어 입자가 수평관으로 유입되면 입자의 일부는 부유상으로 수송될 것이고, 일부는 부유상으로 수송되지 못하고 관의 바닥에 떨어져 수송될 것이다. 관의 바닥을 따라 수송되는 입자층은 기체에 의해 침식이 생기고, 그 자리에 다시 주입되는 입자가 자리를 채우는 과정을 반복할 것이다. 수평관의 입자 수송에 있어 모든 입자가 부유상으로 수송되다가 유속을 감소시키에 따라 관의 바닥에 떨어지기 시작하는 유속과 유속을 증가시키에 따라 관의 바닥에 있는 입자가 부유상으로 수송되는 기체의 유속은 서로 다른 유속을 보이며 후자의 경우가 더 높은 유속을 필요로 한다[23, 24]. 반응기로부터 수평관으로 입자가 주입될 때 입자가 유입되는 부분과 입자가 정상상태의 교체속도를 가지고 수송되는 부분과는 거리차가 생길 것이다. 즉, 동일한 유속에서 입자가 반응기로부터 수평관으로 주입될 때 slide valve의 열림정도가 커질수록 수평관 전단의 바닥에 쌓이는 입자들은 더 많아질 것이고, 이로 인해 경계유속은 높은 유속에서 나타나는 것으로 생각된다. Fig. 8(a)는 slide valve를 40% 열었을 때 압력조건별 유속에 따른 교체수송속도를 나타낸 그림으로 압력이 증가할수록 기체의 밀도가 증가하여 교체수송속도가 증가함을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 아연계탈황제, FCC, polyethylene 입자에 대해 slide valve를 50% 열었을 때의 교체수송속도이다. 경계유속을 전후로 교체수송속도의 특이한 변화는 볼 수 없었다. 유속이 증가함에 따라 교체수송속도는 증가하다가 비교적 일정한 값을 보이는데 이것은 slide valve의 열림정도에 따른 최대주입용량과 관계 있는 것으로 생각된다. Fig. 8(c)는

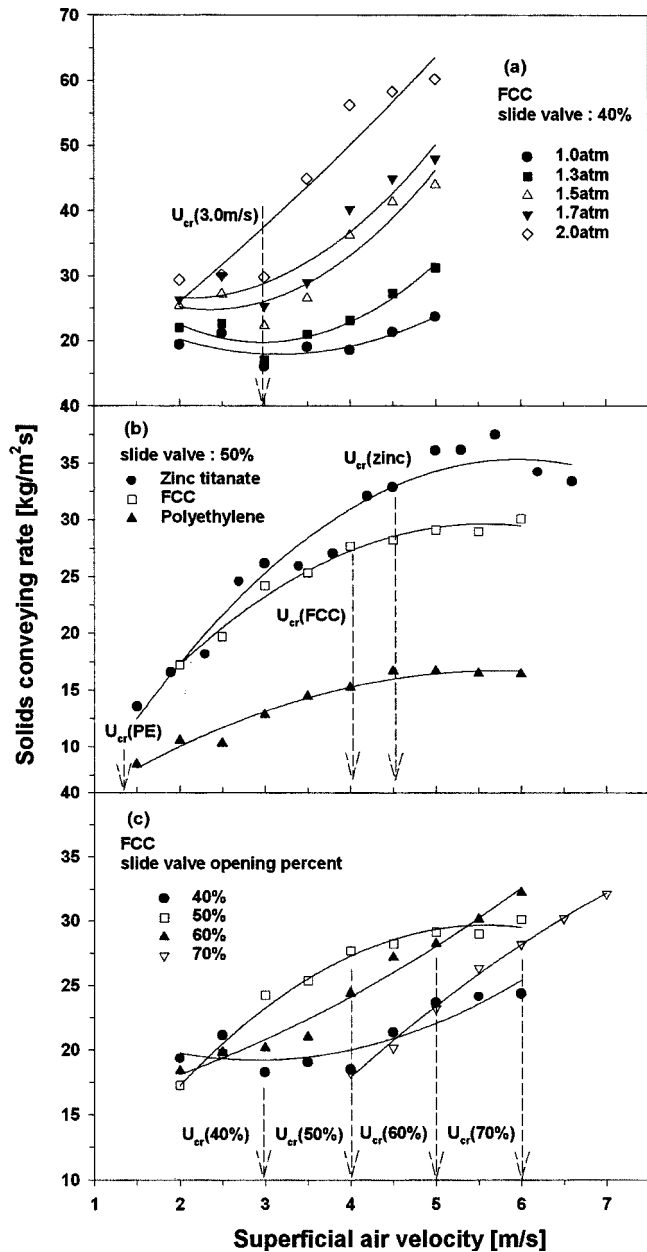


Fig. 8. Effect of gas velocity on solids conveying rate.

slide valve의 변화에 따른 FCC 입자의 고체수송속도를 나타낸 그림이다. 이상에서 입자의 밀도, 직경, 고체수송속도에 따른 경계유속에 대하여 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$U_{cr} = 65.35(G_s/\rho_p)^{1.1}(D_r/d_p)^{0.28}$$

regression coefficient = 0.86

3.4. Plug flow가 반응기와 상승관사이의 압력에 미치는 영향

농후상 수평관 기류수송에 있어 경계유속의 측정은 공정의 안정적인 운전을 위해 꼭 필요하다. 특히 가압순환시스템을 갖는 공정에 있어 수평관의 기고상의 흐름형태에 의해 두 반응기사이의 압력에 영향을 미치므로 중요한 고려 대상이 된다.

Fig. 9(a)는 경계유속보다 높은 유속에서 반응기와 상승관 사이의 압력을 (b)는 경계유속시에 나타나는 반응기와 상승관의 압력을 나타낸 그림이다. 입자의 원활한 수송을 위해 상승관을 약간 높은 압력을 유

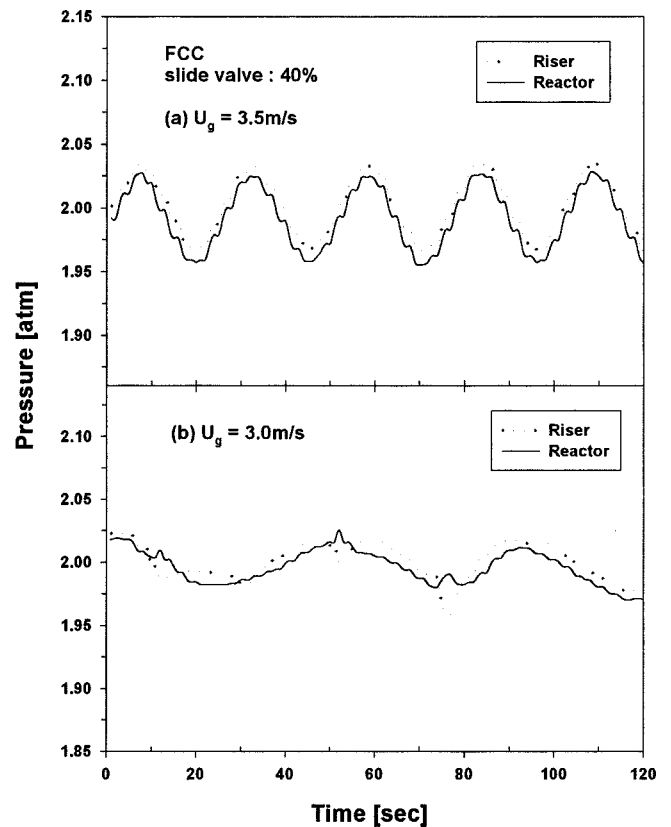


Fig. 9. Reverse of absolute pressures between a front section of a horizontal pipe(a reactor) and a rear section of a horizontal pipe(a riser) in a pressurized circulation system when it is disturbed by plugs at a velocity less than U_{cr} .

지하며 운전하였다. (a)는 2.0 atm, slide valve는 40%, 유속 3.5 m/s에서 반응기와 상승관의 압력을 나타낸다. 이때의 수평관의 흐름형태는 dune flow로 비교적 안정적인 압력요동을 보이며 상승관이 약간 높은 압력을 나타내며 운전된 것을 볼 수 있다. (b)는 (a)와 같은 조건에서 경계유속인 3.0 m/s에서의 반응기와 상승관의 압력을 나타낸다. 그림에서 보듯이 반응기의 압력이 상승관보다 간헐적으로 높게 나타남을 볼 수 있다. 반응기의 압력이 상승관의 압력보다 높게 나타나는 이유는 수평관에서 plug가 생겨 수평관으로 유입되는 기체가 상승관으로 가지 못하고 순간적으로 압축되어 반응기로 역흐름이 생겨 나타나는 것으로 생각된다. 이상에서 본 것처럼 plug flow는 순환공정에 있어 수평관을 통해 불안정한 흐름형태를 보이며 두 반응기 사이의 압력에 영향을 미쳐 공정의 안정적인 운전에 위험 요소로 작용하게 된다. 그러므로 공정의 운전에 앞서 수평관에서 경계유속을 측정하여 경계유속 이상의 최적 운전 조건을 찾아야겠다.

4. 결 론

고체순환장치의 수평관에서 농후상기류수송을 위한 경계유속(critical velocity)을 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

직경 0.034 m, 길이 1.8 m를 갖는 수평관에서 측정한 정량적인 경계유속은 다음과 같다.

- Zinc titanate: 4.5 m/s(1.0 atm, $G_s = 32.87 \text{ kg/m}^2\text{s}$)
- FCC 입자: 3.0 m/s(1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0 atm, $G_s = 18.24, 18.53, 22.31, 25.36, 29.76 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

4.0 m/s(1.0 atm, $G_s = 27.68 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

5.0 m/s(1.0 atm, $G_s = 28.23 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

6.0 m/s(1.0 atm, $G_s = 28.21 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

• Polyethylene 입자: 1.3 m/s(1.0 atm, $G_s = 8.48 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

차압계를 이용하여 경계유속을 측정시 차압요동이 급격히 상승하는 유속을 경계유속으로 결정할 수 있었고, 측정된 차압을 표준편차로 나타내 경계유속을 해석할 수 있었다. 고체수송속도가 일정하면 시스템의 압력범위 1.0-2.0 atm에서는 동일한 경계유속을 보였으며, 고체수송속도가 증가하면 경계유속은 증가함을 보였다. 순환공정에 있어 경계유속 이하의 유속에서 발생하는 plug flow는 반응기 사이의 압력균형에 불안정한 요소로 작용하였다. 경계유속을 예측할 수 있는 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$U_{cr} = 65.35(G_s/\rho_p)^{1.1}(D_t/d_p)^{0.28} \quad (r^2 = 0.86)$$

사용기호

D_t	: diameter of a horizontal pipe [m]
d_p	: particle diameter [m]
G_s	: solids conveying rate [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
P	: pressure [atm]
U_{cr}	: critical velocity [m/s]
U_g	: superficial gas velocity [m/s]
U_{salt}	: saltation velocity [m/s]
ρ_p	: particle density [kg/m^3]

감 사

본 연구는 과학기술부에서 시행하고 한국과학기술평가원에서 지원한 국가지정 연구실사업인 가압유동층공정 핵심기술개발 사업수행 결과입니다. 연구비지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Konrad, K.: *Powder Technology*, **49**, 1(1986).
- Molerus, O.: *Powder Technology*, **88**, 309(1996).
- Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston(1991).
- Molerus, O. and Burschka, A.: *Chemical Engineering and Processing*, **34**, 173(1995).
- Hong, J. and Tomita, Y.: *Int. J. Multiphase Flow*, **4**, 649(1995).
- Muschelknautz, E. and Wojahn, W.: in Fordem(Ed.), "Ullmanns Encyklopadie der technischen Chemie," Chemie, Weinheim, **3**, 131(1973).
- Wirth, K. E.: *Ger. Chem. Engng.*, **6**, 45(1983).
- Wirth, K. E. and Molerus, O.: in N. P. Cheremisinoff(Ed.), "Encyclopedia of Fluid Mechanics, Solids and Gas-Solids Flow," Gulf, Houston, TX., vol. 4, chap. 11(1986).
- Albright, C. W., Holden, J. H., Simons, H. P. and Schmidt, L. D.: *Ind. Eng. Chem.*, **43**, 1837(1951).
- Wen, C. Y. and Simons, H. P.: *AIChE J.*, **5**, 263(1959).
- Lippert, A.: *Chemie-Ing. Techn.*, **38**, 350(1966).
- P. E. C. (Physics Engineering Chemistry Corp.) Report, "Characteristics of Confined Dense-Phase Flow of Granular Solids Driven by Compressed Air," U. S. Report No. A.D.642845(1966).
- Konrad, K., Harrison, D., Nedderman, R. M. and Davidson, J. F.: *Proc. of Pneumotransport*, **5**, 225(1980).
- Chari, S. S.: 63rd Annual Meeting of AIChE, AIChE Symp. Ser., **67** (116), 17(1971).
- Rhodes, M.: "Introduction to Particle Technology," John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 139(1998).
- Wen, C. Y. and Galli, A. F., in J. F. Davidson and D. Harrison(Eds.), "Fluidization," Academic Press, London and New York, 675(1971).
- Geldart, D.: *Powder Technology*, **7**, 285(1973).
- Hong, J., Shen, Y. and Tomita, Y.: *Powder Technology*, **84**, 213(1995).
- Pan, R.: *Powder Technology*, **104**, 157(1999).
- Jiang, P., Bi, H., Liang, S. C. and Fan, L. S.: *Fluid Mechanics and Transport Phenomena*, **40**, 193(1994).
- Li, H., Legros, R., Brereton, C. M. H., Grace, J. R. and Chaouki, J.: *Powder Technology*, **60**, 121(1990).
- Bi, H. T., Jiang, P. J., Jean, R. H. and Fan, L. S.: *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 3113(1992).
- Cabrejos, F. J. and Klinzing, G. E.: *Powder Technology*, **79**, 173(1994).
- Savage, S. B., Pfeffer, R. and Zhao, Z. M.: *Powder Technology*, **88**, 323(1996).
- Han, G. Y., Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **2**, 141(1985).
- Lee, J. S. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **20**, 207(1982).
- Lee, J. K. and Park, D.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**, 336(1987).