

공기압 수송에 의한 고체입자의 정량적인 공급

이종기 · 박달근

한국과학기술원 반응공학연구실
(1986년 9월 24일 접수, 1987년 5월 6일 채택)

Controlled Feeding of Solid Particles by Pneumatic Transport

Joong Kee Lee and Dalkeun Park

Reaction Engineering Laboratory, KAIST
(Received 24 September 1986; accepted 6 May 1987)

요 약

공기압 수송에 의한 고체입자의 정량적 공급을 실험적으로 연구하였다. 모래, 유연탄, 무연탄을 유동층으로 공급하는 경우를 대상으로 하였으며 주요 변수인 오리피스내경, 수송관내경 및 길이, 수송용 공기량, 수송용 공기압력, 호퍼 ΔP 등이 수송량에 미치는 영향을 조사하였다. 실험결과 주어진 수송관 시스템에서 조절이 용이한 "호퍼 ΔP "와 수송용 공기량을 변화시킴으로써 고체 수송량을 제어할 수 있다는 것이 입증되었다. 또한 유동층으로의 공기압 수송에 의한 고체입자 공급시스템의 설계방법도 제시되었다. 한편 수송용 공기의 압력에 의한 영향은 1차적으로 Kinetic Energy만을 고려하여도 그 영향이 예측 가능하였다.

Abstract—Characteristics of solids feeding to a fluidized bed by pneumatic transport were studied experimentally. Sand, bituminous coal and anthracite particles were used as feed material. Studied variables were orifice ID, length and ID of conveying line, flow rate and pressure of transport air, and "hopper ΔP ". It was experimentally proved that feeding rate of solid particles can be controlled by manipulating transport air rate and "hopper ΔP ", without use of any moving machinery. Design procedures for the pneumatic transport of solid particles to a fluidized bed is suggested as well. We also found that the effect of pressure of transport air can be estimated by considering kinetic energy only.

1. 서 론

유동층 연소법은 석탄이용의 새로운 방법으로써 세계적으로 연구 개발이 활발히 진행되어 왔으며 이 결과로 급속히 상업적으로 보급되고 있다[1]. 유동층연소로(Fluidized Bed Combustor: FBC)에 석탄을 공급하는 방법에는 여러가지가 있으나 입자크기가 작은 석탄의 경우에는 공기압수송(pneumatic transport)이 일반적으로 많이 쓰이고 있다. 그리고 특히 가압유동층연

소로(Pressurized FBC; PFBC)의 경우에는 대부분 공기압 수송을 이용하게 되는데 그 이유는 대기압하에 있는 석탄 입자들을 가압상태에 있는 연소로 안으로 공급하기 위해서는 압력장애(pressure barrier)를 극복하면서도 공기밀폐가 가능하여야 하기 때문이다.

유동층연소로에서의 석탄의 공기압 수송은 다음과 같은 점에서 일반적인 공기압 수송의 경우와는 다르다.

1. 유동층연소로의 내부온도제어 및 부하조절(load control)은 주로 석탄 공급량에 의존하므로 석탄 공급

량은 넓은 범위에서 제어가 가능하여야 한다.

2. 공급되는 석탄은 단순한 파쇄에 의해 최대입자크기만 조절하므로 균일한 크기의 입자들이 아니며 넓은 입도분포(wide size distribution)를 가진다. 석탄입자의 크기는 수 mm에서 μm 크기까지에 걸쳐 있으며 미분탄 연소에서처럼 미세한 입자만으로 구성된 것은 아니다.

3. 유동층연소로 내부의 압력은 기포의 분출(bubble eruption)¹ 등에 의해서 불규칙적인 압력 동요가 늘 존재한다.

이상과 같이 일반적인 공기압 수송에서 보다 어려운 점들이 있지만 이와는 반대로 수송에 필요한 공기는 연소로 내부에서 연소에 사용된다는 잇점도 있다.

유동층연소로, 특히 가압유동층연소로에서 석탄의 공기압 수송은 일반적으로 lock hopper system이 쓰이게 되는데 이때에 석탄 공급량은 다음과 같은 변수들에 의해서 결정되게 된다.

- 공급 석탄의 입도분포, 밀도 및 유동성
- 공급 호퍼와 유동층 사이의 압력차
- 공급 호퍼와 공급 라인의 접합 사양(orifice, venturi 등)
- 공급 라인의 내경, 길이, 높이, 구배 등등
- 수송용 공기 유량 및 압력

고체입자의 공기압 수송은 이론적 해석에 의한 설계가 거의 불가능하며 주로 경험에 의존하게 되는데, 그 이유는 액체나 고체와는 달리 적용 가능한 correlation이 별로 없으며 geometric similarity law가 성립하지 않을 뿐만 아니라 비교적 큰 규모의 장치를 사용하는 실험은 비용과 노력이 많이 들며 attrition 등의 문제 때문에 측정하는데에서 부터 많은 어려움이 따르기 때문이다[2, 3].

본 논문에서는 소규모 파이롯규모의 유동층연소로에서의 공기압 수송에 의한 석탄공급실험을 수행하고 여러가지 변수의 영향을 조사하였다. 여기에서는 유동층연소로에서의 석탄공급에는 물론, 다른 경우에서의 공기압 수송(예를 들면, 유동층 석탄가스화)에서도 이용될 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있는데 석탄을 유동층연소로에 공급하기 위해 lock hopper system과 공기압 수송이 결합된 것을 볼 수

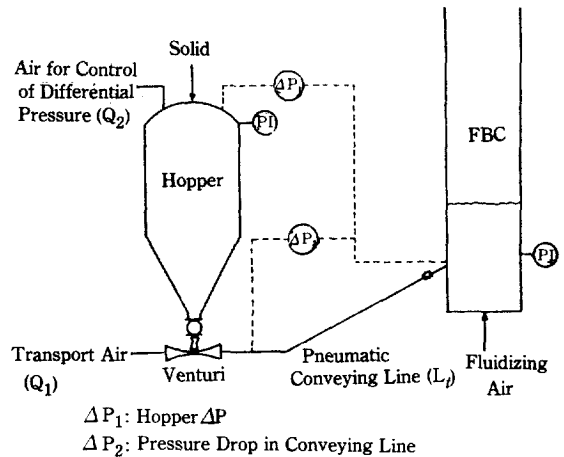


Fig. 1. Schematic diagram of measuring system.

있으며 입자가 통과하는 부분에 moving equipment를 전혀 사용하지 않는 것이 특징이다. 공급 호퍼는 200 kg 용량의 digital balance 위에 놓여져 있어서 석탄 공급량을 연속적으로 측정할 수 있게 되어 있으며, 저울 감도를 유지하기 위해서 공급 호퍼에 연결되어 있는 파이프들은 flexible hose로 접합되어 있다.

호퍼에서 흘러 내려오는 석탄입자들은 venturi feeder에서 수송용 공기와 혼합되어 수송관을 통해서 유동층내로 공급된다.

본 석탄공급실험에서는 주어진 수송관에 대해서 호퍼와 연소로 간의 차압(ΔP_1), 수송용 공기량의 변화 등에 따르는 시간당 석탄공급량과 수송관 내에서의 압력강하(ΔP_2)를 측정하였는데 실험 절차는 아래와 같다.

1. 석탄 공급 호퍼 하단에 있는 ball valve를 잠근 상태에서 호퍼에 석탄을 장입한 후 밀폐한다.
2. 차압조절용 공기(Q_2)를 공급한 후 원하는 ΔP_1 을 유지시킨다.
3. 수송용 공기를 원하는 유량으로 수송관으로 공급한다.
4. 호퍼와 venturi feeder 사이의 ball valve를 연다.

차압(ΔP_1)과 수송용 공기 유량은 자동제어장치를 사용하여 정밀하게 조절할 수 있게 하였다. 한편 본 연구에서는 국내 저질무연탄(low-grade anthracite; L.A)과 남이공화국산의 유연탄(bituminous coal; B.) 두 가지의 석탄 및 모래를 공기압 수송의 시료로 사용하였는데 이들의 물성치는 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. Physical properties of conveyed solids.

Physical properties		Solid materials	Sand	Bituminous Coal	Low-grade Anthracite
Bulk density (kg/m ³)			1760	950	1136
Angle of repose (°)			30-32	31-32	41-42
Bulk voidage			0.38	0.39	0.43
Particle size distribution (wt%)	KS				
	-14 + 16 mesh	9.79	7.93	1.09	
	-16 + 20	28.95	20.72	15.90	
	-20 + 25	17.23	10.22	8.87	
	-25 + 30	14.91	12.49	10.50	
	-30 + 35	7.30	8.30	6.79	
	-35 + 40	4.17	9.09	6.89	
	-40 + 60	10.74	13.04	18.04	
	-60 + 80	2.90	5.61	9.27	
	-80 + 100	1.18	8.89	7.83	
	-100 + 150	2.93	2.18	4.80	
	-150 + 200	-	1.15	7.87	
	-200 + 270	-	0.17	1.49	
	-270	-	0.15	0.67	

3. 실험결과 및 토의

3-1. Orifice 내경의 영향

유동층으로 공급되는 석탄은 공급 호퍼와 venturi feeder 사이의 orifice를 먼저 거치게 되는데 석탄 공급량은 일차적으로 orifice 크기에 영향을 받고 다른 변수들에 의해서도 영향을 받는다. Orifice 내경은 공급되는 입자의 최대 크기보다 커야할 뿐만 아니라 호퍼에서 중력만으로 배출되는 입자의 유량은 orifice 내경의 크기에 민감하다는 것은 잘 알려져 있는데 일반적으로 중력에 의해서 배출되는 고체입자들의 유출속도 W 는

$$W = cD^n \quad (1)$$

으로 표시된다. 여기서 D_o 는 orifice의 직경, c 와 n 은 상수이다. 한편 입자크기의 영향을 고려하기도 하는데 이 경우에는 유출속도는

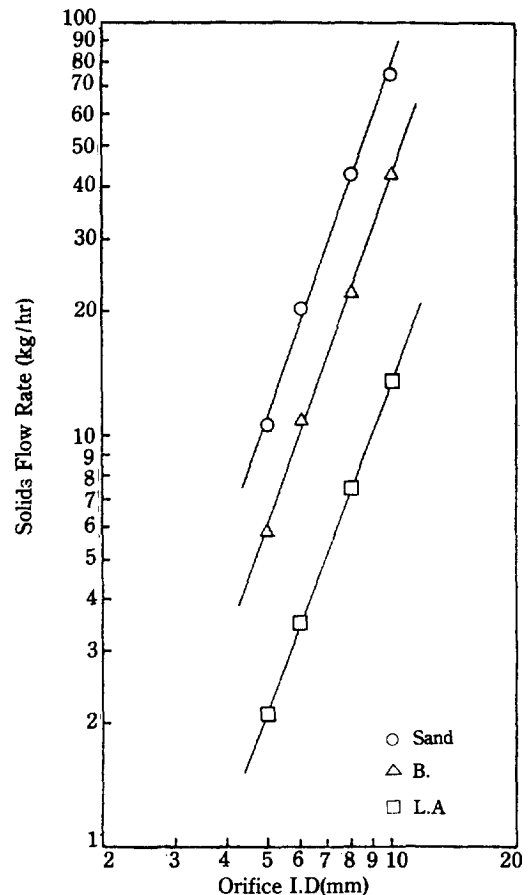
$$W = c(D_o - kdp)^n \quad (2)$$

으로 나타내며 k 는 상수이다[4]. n 의 값은 보통 2.5-3 내외인데 Fig.2에서 보는 바와 같이 본 연구에서 사용된 모래, 유연탄 및 저질탄의 경우에도 n 의 값은 2.5 정도이므로 (1)식이 잘 적용되는 것을 알 수 있다. 그

런데 저질탄입자 경우에는 입자간의 응집력의 크고 안식각의 높아서 호퍼 내에서는 "rat hole" 현상이 생기고 orifice에서는 "bridging" 현상이 일어났다. 따라서 중력에 의해서만은 입자가 원활하게 흘러내리지 않았으므로 진동기의 부착 사용이 필요했는데, Fig.2에서 저질탄의 경우는 그러한 결과이다. Fig.2에서 보듯이 중력만에 의해서 orifice를 거쳐 흘러내리는 고체입자의 양은 모래의 경우가 가장 많고 그 다음에는 유연탄, 무연탄의 순서이다. 본 연구에서는 주로 내경 5mm의 orifice를 사용하여 실험을 수행하였다.

3-2. 수송관 내경의 영향

수송관 내경의 크기에 따른 수송관 내에서의 압력강하 효과를 알아보기 위해 내경 12.5mm 파이프, 내경 7.8mm 튜브, 그리고 내경 4.7mm 튜브를 수송관으로 사용하여 실험을 수행했는데 그 결과가 Fig.3에 나타나 있다. "blank test"는 석탄을 공급하지 않은 경

**Fig. 2. Effect of orifice size on solids flow rate.**

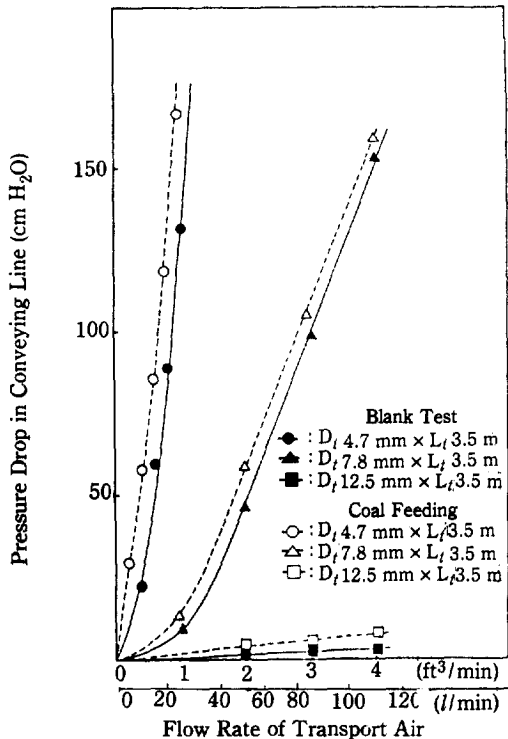


Fig. 3. Effect of flow rate of transport air on pressure drop in conveying line.
(material; Bituminous Coal, Particle size; <1.41 mm, Orifice size; 5 mm)

우, 즉 공기만 통했을 때이고 석탄 공급의 경우는 호퍼 차압 (ΔP_1 , Fig.1 참조) 조절용 공기를 공급하지 않은 상태였다.

동일한 수송용 공기량의 경우 수송관 내경이 크게 되면 상대적으로 수송관 내에서의 유속이 낮아져 수송관 내의 압력강하가 작은 대신에 saltation 또는 choking 이 발생할 수 있다. 이와 반대로 수송관 내경이 작으면 wall effect에 의한 "plugging"이 발생하기 쉬우며 압력강하도 커지게 된다. 또한 유동층으로 공급되는 석탄의 크기는 분쇄에 의해 조절가능하지만 분쇄에 드는 에너지의 절약과 연소효율을 고려하여야 하므로 공기압 수송에 지장이 없을 정도로만 석탄을 파쇄하는 것이 좋다. 이런 관점에서는 수송관의 내경이 클수록 큰 입자의 수송에 유리하다. 그러나 한편으로는 유동층연소로의 경우에 수송용 공기량과 수송관 내에서의 압력강하는 비교적 문제가 되지 않을 뿐만 아니라 유동층 내에서의 압력변동에 의한 영향을 최소화 시키고, 안정된 석탄공급량의 제어를 위해서는 오히려 어느 정도의 압력강하가 필요하다. 이와같은 것을 고려한 결과 대부분

의 석탄공급 실험에는 내경 7.8mm 튜브를 사용하였다.

3-3. 수송관 길이의 영향

수송관의 길이는 연소로와 석탄 공급 호퍼와의 거리에 따라 최소값이 주어지지만 경우에 따라서는 석탄 공급 제어의 편의를 위해 이 최소 거리보다 훨씬 더 긴 수송관을 사용할 수도 있다. 수송관의 길이가 석탄공급에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수송관의 길이를 5m, 10m, 15m의 세가지를 사용하여 석탄공급 실험을 하였는데 그 결과가 Fig.4에 나타나 있다.

동일한 호퍼 ΔP (ΔP_1)에서 수송관 길이를 길게 하면 상대적으로 수송관 내에서의 압력강하가 커지므로 orifice ΔP 는 작아지며 이 결과로 호퍼에서 venturi 로 흐르는 석탄의 양이 감소되므로 석탄공급량도 감소한다. 그런데 이와같이 석탄공급량이 감소되면 수송관 단위길이당 압력강하도 감소되는 것을 Fig.4에서 볼 수 있다.

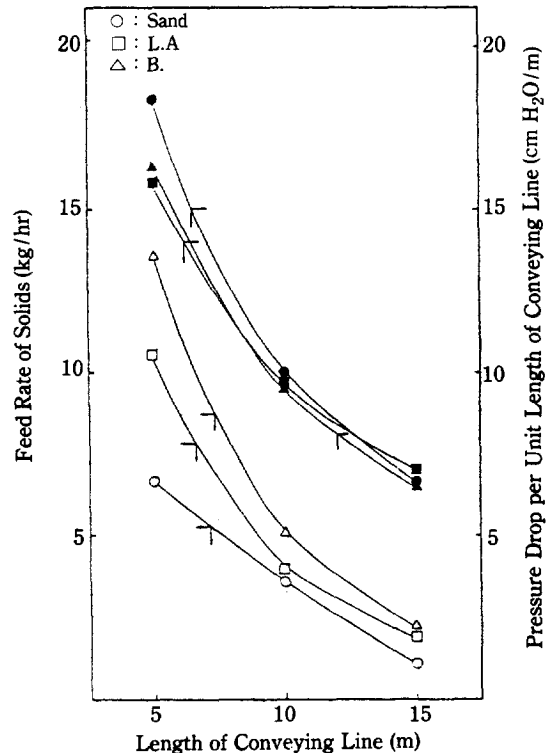


Fig. 4. Effect of length of conveying line on feed rate of solids and pressure drop per unit length of conveying line.

(orifice size; 5 mm, hopper ΔP ; 104 ± 4 cm H_2O , Q_1 ; 32.2 l/min, D_f ; 7.8 mm, particle size; <1.41 mm)

3-4. 수송관 공기량의 영향

수송용 공기유량의 영향은 일반적으로 Fig.5와 같이 표시된다[5]. saltation 또는 choking 현상이 일어나는 것을 피하기 위하여 최소 압력강하를 가져다주는 공기속도 이상에서 운전하는 것이 보통이다. Fig.5에서 보듯이 동일한 고체 수송량의 경우, 공기 속도가 커지면 압력강하도 증가하게 된다. 따라서 saltation이나 choking을 피하기 위하여 공기유량을 크게하여 조업하면 그만큼 에너지 손실을 초래하게 된다.

한편 유동층연소에서는 적절한 과잉공기의 양은 보통 15% 내외이므로 석탄공급량에 의해 연소로에로의 공기 공급량도 정해지는데 공기 공급량은 유동화에 필요한 공기량과 수송용 공기량의 합계가 된다. 즉

$$\text{연소용 공기량} = \text{유동화 공기량} + \text{수송용 공기량} \quad (3)$$

$$(C) \qquad (F) \qquad (T)$$

그런데 연소용 공기량은 석탄의 종류에 따라 차이가 있으며 석탄과 연소용 공기량과의 무게비는 유연탄의 경우는 대체로 석탄량의 10배, 저질탄의 경우는 석탄량의 5배가 된다. 그리고 유동화 공기량은 적어도 최소 유동화 속도보다 더 커야한다. (3)식을 석탄공급량으로 나누고 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$M = \frac{1}{SK} \quad (4)$$

여기에서

M = 석탄 수송량/수송용 공기량의 무게비

S = 연소용 공기량/ 석탄공급량의 무게비

K = 수송용 공기량/연소용 공기량의 무게비

K의 값이 커지면 (3)식에 의해 유동화 공기량이 그만큼

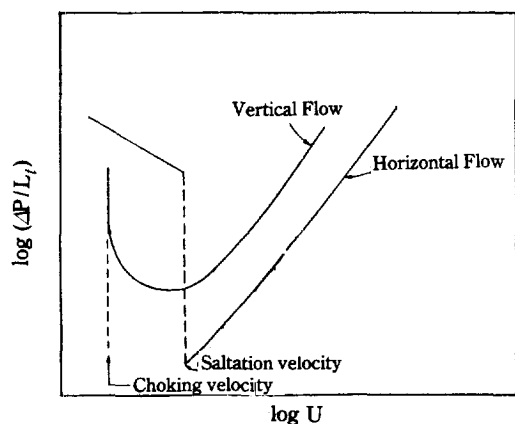


Fig. 5. Effect of air velocity on line pressure drop in vertical and horizontal flow.

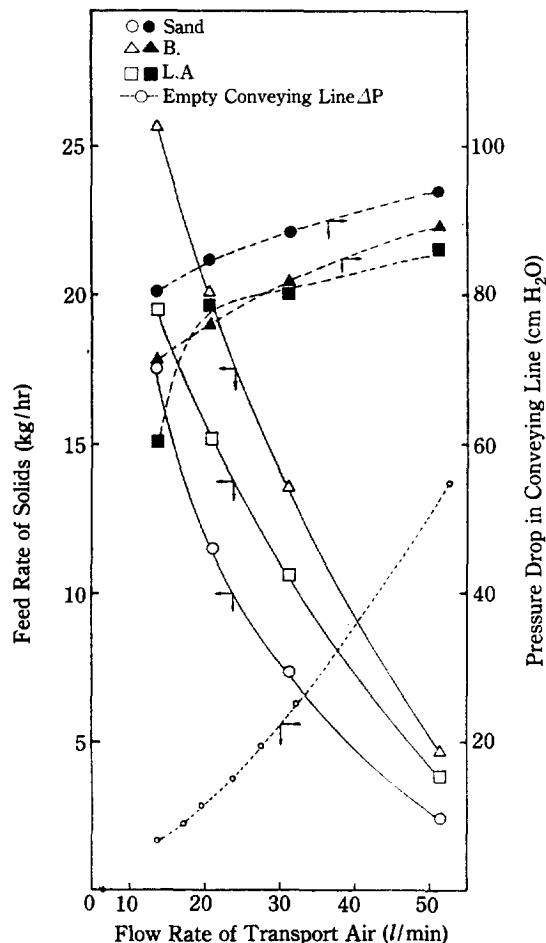


Fig. 6. Effect of flow rate of transport air on feed rate of solids and pressure drop in conveying line.

(orifice size; 5 mm, hopper ΔP ; 101 ± 2 cm H_2O , D_i ; 7.8 mm, L_i ; 5 mm)

큼 작게 되는데 심한 경우 유동화가 어렵게 될 수 있다. 또한 수송용 공기에 의해 유동층 내에서 과다한 jet의 발생에 따른 여러가지 문제가 발생할 수 있으므로 K의 값은 낮을수록 좋으며 보통 0.1 정도가 되며 최대 0.3을 넘지 않는 것이 좋다. 따라서 적용 가능한 수송용 공기량의 범위는 saltation 또는 choking에 의해 하한이 결정되며 수송관 내의 압력강하에 따르는 에너지 손실과 (4)식에 의해 산출된 K 값의 적정성에 의해 상한이 결정된다. 한편 호퍼 ΔP 를 일정하게 유지시키고 수송용 공기량을 변화시켰을 때, 실제로 호퍼를 거쳐서 유입되는 공기량(Q_2)은 수송용 공기량에 비해서 대개의 경우 무시할만 하였다. Fig.6은 일정한 호퍼

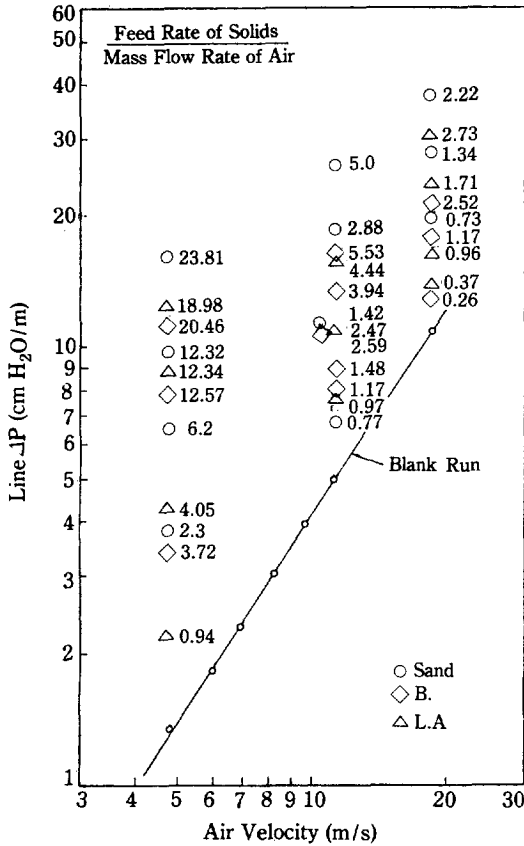


Fig. 7. Line pressure drop versus air velocity at various ratio of feed rate of solids to mass flow rate of air.

ΔP 에서 수송용 공기량 변화에 따르는 모래, 유연탄 및 저질탄의 공급속도를 도시한 그림이다. 그림에서 보듯이 수송용 공기량이 증가함에 따라서 입자공급속도가 줄어드는 것을 알 수 있는데 이것은 일정한 호퍼 ΔP 에서 공기 수송량이 증가하면 수송관 압력강하가 증가하게 되므로 호퍼와 venturi 사이의 압력차가 줄어들기 때문이다. 또한 수송관 내의 공기 유속변화에 따른 수송관 압력강하는 Fig.7에 나타나 있는데 데이터 점열에 표시된 것은 수치는 (4)식에 의한 M 값이다. 이와같이 수송용 공기량의 변화에 의해 입자공급속도를 변화시킬 수 있으므로 유동층연소로에 공급되는 석탄의 양은 조절 가능하다.

3-5. 호퍼 ΔP 의 영향

Fig.8은 세가지 수송용 공기유량에 대한 호퍼 ΔP 의 변화(Fig.1 참조)에 따른 입자공급속도를 나타내고 있다. 실제의 유동층연소로에는 석탄공급속도가 호

퍼 ΔP 에 대한 민감도가 어느 정도 작은 것이 필요하게 되는데, 그 이유는 연소로내에서 기포의 움직임 등에 의한 압력혼란, 공기압축기 등에서의 혼란요소 등의 존재로 인하여 호퍼 ΔP 는 자동차제어장치의 존재에도 불구하고 fluctuation하게 되므로 호퍼 ΔP 에 대해 어느 정도 둔감한 것이 필요하기 때문이다. Fig.8에서 보듯이 수송용 공기량이 클수록 호퍼 ΔP 에 대해서 입자공급량의 기울기가 작은 것을 알 수 있는데 이는 수송용 공기량이 클수록 수송관 압력강하가 크기 때문이다.

그리고 수송관 길이를 길게하여도 수송관 압력강하가 커지게 되므로 같은 효과를 가져오는데 이것은 Fig.9에 나타나 있다.

따라서 호퍼 ΔP 에 대한 입자 수송량의 민감도는 수송용 공기량과 수송관길이를 증가시킴으로서 낮출 수 있다.

3-6. 유동층내에서의 공급관 출구 위치의 영향

유동층연소로에서의 석탄공급점 위치는 석탄공급이 용이한 유동층 표면위보다는 유동층내의 공기 분산판 바로 위가 좋은데 이는 공급점 위치가 낮을수록 공급되는 석탄중의 미세산 입자와 휘발분이 층내에서 많이 연소되기 때문이다.

층내의 출구 위치의 영향을 조사하기 위하여 유동층

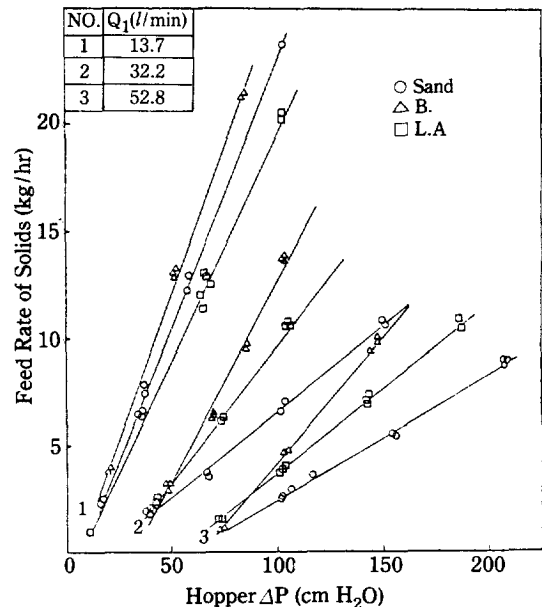


Fig. 8. Effect of hopper ΔP on feed rate of solids at various flow rates of transport air. (orifi size; 5 mm, D_i ; 7.8 mm, L_i ; 5 mm)

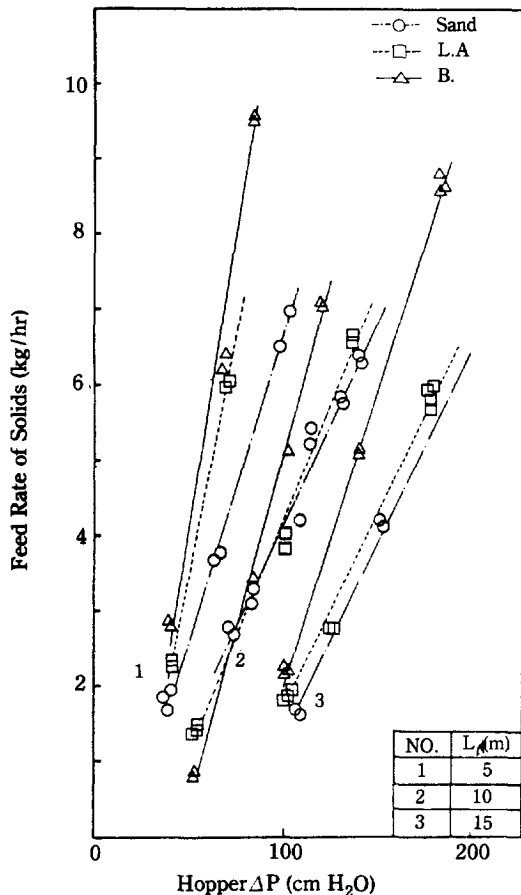


Fig. 9. Effect of hopper ΔP on feed rate of solids for various lengths of conveying line (particle size; <1.41 mm, Orifice size; 5 mm, D_t ; 7.8 mm)

에 고체입자를 충전하지 않았을 경우와 충내 물질을 공기 분산판에서 1m 높이로 채웠을 경우의 두 가지 경우의 석탄공급 실험을 수행하였는데 두 경우 다 석탄공급점은 공기 분산판에서 30 cm 위였다.

실험결과는 Fig.10에 나타나 있는데 그림에서의 호퍼 ΔP 는 호퍼와 유동층 표면위와의 압력차이를 나타낸다. 그림에서 보듯이 공급점의 위치는 입자공급 특성에 별로 영향을 미치지 않는데 유동화가 잘 된 유동층에서는 당연한 결과라 할 수 있다.

3-7. 수송용 공기 압력의 영향

가압유동층연소로의 경우에는 수송용 공기 역시 가압되는데 압력이 증가함에 따라 공기의 밀도도 증가하므로 고체입자 수송도 그 영향을 받게된다. 즉 수송관 내

에서의 공기선 속도를 일정하게 유지하면 압력이 증가함에 따라서 수송용 공기량 (표준상태)도 증가하게 되며 따라서 식 (4)의 K 값도 증가한다. 이와는 반대로 terminal velocity는 기체 밀도의 증가에 따라서 감소하게 되므로 적용 가능한 수송관 내의 공기속도의 범위는 줄어들게 된다.

일반적으로 수송관 내에서의 공기의 kinetic energy는 $1/2 \rho u^2$ 로 주어지므로 입자수송이 공기의 kinetic energy에 의존한다면 가압의 효과는 공기 선속도의 조절로서 상쇄시킬 수 있다. 즉 동일한 kinetic energy를 가지기 위해서는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\left(\frac{1}{2} \rho u^2\right)_{\text{상압}} = \left(\frac{1}{2} \rho' u'^2\right)_{\text{가압}} \quad (5)$$

여기서 $\rho' = (P'/P)\rho$, ρ 는 공기의 밀도, u 는 수송관 내에서의 공기의 선속도, P 는 압력을 나타내며 1 는 가압상태 임을 뜻한다. 따라서 가압효과를 상쇄시키기 위해서는 가압하에서의 공기 선속도는 다음과 같아야 한다.

$$u' = \left(\frac{P}{P'}\right)^{1/2} u \quad (6)$$

그런데 수송용 공기량 (질량 기준)은 ρu 에 비례하므로

$$\rho' u' = \left(\frac{P'}{P}\right)^{1/2} \rho u \quad (7)$$

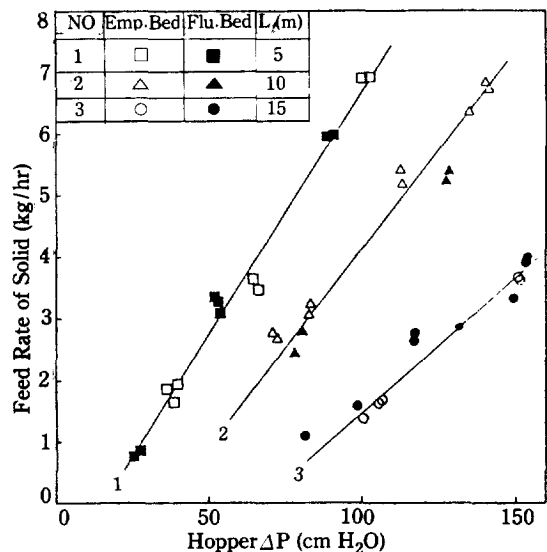


Fig. 10. Effect of hopper ΔP on feed rate of solids for various lengths of conveying line and bed conditions. (material; sand, orifice size; 5 mm, D_t ; 7.8 mm, L_t ; 5 mm, Q_1 ; 32.2 l/min)

(6)식에 의하면 가압효과를 상쇄하기 위해 (즉 동일한 입자공급속도를 갖기위해) 수송관 내의 선속도는 압력의 1/2승에 역비례하여, 줄어들지만 수송용 공기량 (질량기준)은 압력의 1/2승에 비례하여 증가한다. Fig.11과 12는 각각 유연탄과 저질탄에 대해서 수송용 공기를 3 기압으로 가압했을 때의 결과를 상압상태에서와 비교한 것이 나타나 있다. (6)식에서 3기압으로 가압하면 $u'/u=0.58$ 이 되는데 Fig. 11과 12에서는 각각 0.66과 0.71의 경우에 상압 상태에서의 석탄공급량과 가장 비슷한 것으로 나타났다. 이는 고체 수송시스템에서 kinetic energy만으로도 first approximation이 가능한 것을 나타낸다. 그러나 kinetic energy 외에도 수많은 인자들이 관계되므로 위와 같은 오차가 발생하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

적절한 내경의 orifice, 적절한 크기와 길이를 가진 공급관의 설치, 그리고 수송용 공기량과 호퍼 ΔP 의 조절로써 유동층연소로에 연속적 석탄을 정량 공급할 수 있다는 것이 실증되었다. 유동층연소로 전체 시스템의 자동제어에는 연소로의 온도 및 부하의 변화에 따라서 석탄공급량의 자동조절이 필수적인데 본 실험결과 조절이 용이한 수송용 공기량과 호퍼 ΔP 만으로써 석탄 공급량을 변화시킬 수 있다는 사실은 매우 만족스러운 사실이다.

본 연구결과를 고찰해 보면 유동층연소에서의 공기압

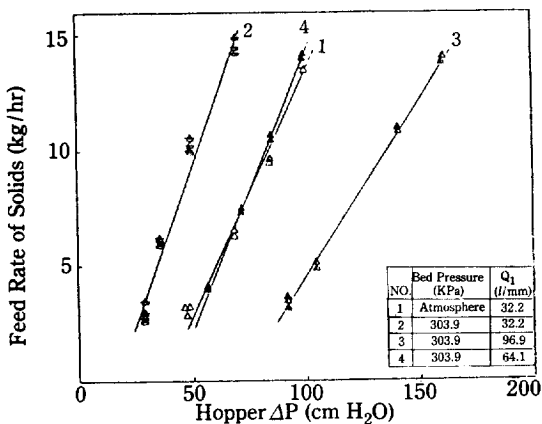


Fig. 11. Effect of hopper ΔP on feed rate of solid for various flow rates of transport air and bed pressure.

(material; Bituminous Coal, particle size; <1.41 mm, orifice size; 5 mm, D_t ; 7.8 mm, L_t ; 5m)

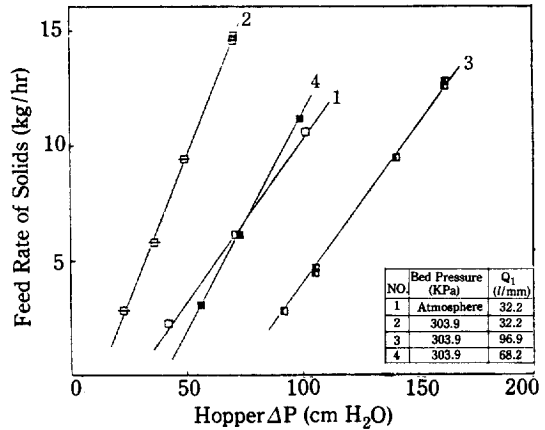


Fig. 12. Effect of hopper ΔP on flow rate of solid for various flow rates of transport air and bed pressure.

(material; Low-grade Anthracite, particle size; <1.41 mm, orifice size; 5 mm, D_t ; 7.8 mm, L_t ; 5 m)

수송에 의한 석탄공급시스템의 설계는 아래와 같은 순서로 가능하다.

가) 주어진 조건의 설정: 석탄공급량의 범위, 연소로 layout으로부터의 최소수송거리, saltation 또는 choking velocity의 산정 및 (4)식으로부터의 수송용 공기량의 상한 결정, 그리고 호퍼 ΔP 의 상한 결정

나) 적절한 orifice의 크기 선정 [(1)식 참조]

다) 수송관 내경 선정

라) 정상 상태에서의 수송용 공기량의 선정 [수송관 내에서 saltation 또는 choking 가능성 점검, (4)식에서의 상한치와 비교]

마) 수송관에서의 압력강하 계산

바) 호퍼 ΔP 허용 범위 내에서 석탄공급량의 범위가 주어진 석탄 공급량의 범위를 만족하는지 여부 확인. 만족안되면 라)로 감.

사) 다)에서 마)까지 세가지 다른 수송관 내경을 선정하여 반복함.

아) 최적 시스템 선택

이상과 같은 절차는 일반적인 공기압 수송 설계 절차 [3]와는 약간 차이를 나타내게 된다. 한편 주어진 공기압 수송 시스템에서 석탄공급량은 호퍼 ΔP 에 의해 가장 큰 지배를 받으며 그 다음이 수송용 공기유량에 의한 지배이다. 그리고 공기압 수송에서의 가압에 의한 효과는 1차적으로 kinetic energy만을 고려했을 때 어느 정도 예측 가능하다.

NOMENCLATURE

- c : constant
 C : air mass flow rate for combustion (kg/hr)
 D_o : orifice inside diameter (mm)
 d_p : particle diameter (m)
 D_t : inside diameter of conveying line (mm)
 F : air mass flow rate for fluidization (kg/hr)
 k : constant
 K : ratio of air mass flow rate for pneumatic transport to that for combustion (-)
 L_t : length of conveying line (m)
 M : ratio of coal feed rate to air mass flow rate for pneumatic transport (-)
 n : constant
 P : pressure (atm, Pa)
 ΔP_1 : pressure difference between combustor and coal hopper, Hopper ΔP (cmH₂O)
 ΔP_2 : pressure difference between combustor and pneumatic conveying line (cmH₂O)
 Q : pneumatic transport air (l/min)
 S : ratio of air mass flow rate for combustion to coal

feed rate (-)

- T : air mass flow rate for pneumatic transport (kg/hr)
 u : air velocity (m/sec)
 W : efflux rate of solid particles (kg/hr)
 ρ : density of air (kg/m³)

REFERENCES

1. KAIST Report N105-2372-6, "Fluidized Bed Combustion of Low grade Anthracite" (1985).
2. Bohner, M.: "Advances in the design of pneumatic conveyors", International Chemical Engineering, **25**(3), 287-405 (1985).
3. Park, Y-J.: "Pneumatic conveying systems", Seminar at KAIST (1985).
4. Kubo, T., et. al (editors): "Funtai (in Japanese)", Maruzen, Tokyo (1982).
5. Zenz, F.A. and Othmer, D.F.: "Fluidization and Fluid-Particle Systems", Reinhold Publishing Corp. New York (1960).