

미분탄 연소를 위한 공기압 수송에 관한 연구

Study on Pneumatic Transport for Pulverized Coal Combustion

오 창 섭*, 최 병 선**, 홍 성 선***, 황 갑 성***
 C. S. Oh, B. S. Choi, S. S. Hong, K. S. Hwang

Key Words : Pulverized coal combustion(미분탄연소), Power plant(화력발전소), Pneumatic transport(공기압 수송), Saltation velocity(최소공기유속)

ABSTRACT

Saltation occurs in horizontal flow of solid and gas when the carrier gas velocity is small enough to permit enough to settling of the solid particles within the transport line. So we should examine the pneumatic flow system to lessen the unbured carbon in the power plant.

In this paper the saltation velocity was studied on the various solid flow rate in the constant pipe diameter and on the various temperatures of the flow gas. The air velocity in the power plant transport lines was also surveyed in order to compare with the saltation velocity. As the solid flow rate increased in the constant diameter, saltation velocity increased and as the temperater of the flow gas increased in the transport line, saltation velocity also increased.

기호설명

$U_{s'}$: 단일 입자의 최소공기유속 (m/s, cm/s)

U_s : 최소공기 유속 (m/s, cm/s)

D : 수송관의 내경 (cm, inch)

W : 단위 면적당 고체 유량 ($g/s \cdot cm^2$)

W_s : 고체유량 (g/sec)

ρ_s : 고체의 밀도 (g/cm^3)

ρ_g : 기체의 밀도 (g/cm^3)

n : 기울기

D_p : 미분탄 입자크기 (cm, μ)

1. 서 론

미분탄 연소는 미분탄(200mesh 통과분 80% 이상)이 수송 유체인 공기와 함께 연소로 분사되어 연소로 내의 연소공간에서 부유 연소되는 방식이다. 이러한 연소방식은 20세기에 개발 발

* 정회원, 한국에너지기술연구소

** 한국전력기술연구원

*** 충북대학교, 화공과

전된 석탄 연소기술로서 대용량의 고효율 및 안정적인 연소 유지가 필요한 발전용 보일러에 이용하게 되었다. 이와 같은 미분탄 연소시스템은 탄종에 별로 구애 받지 않고 용량의 대형화에 따른 설비비의 상승폭이 적다는 장점이 있다. 그러나 미분탄 연소를 위해서는 석탄을 미분화 시켜야 되는데 이를 위해 사용되는 분쇄기의 운전비용이 높고 장시간 연소시에는 발생하고 있는 회의 퇴적이 열전달의 장애요인으로 되는 등의 문제점이 있다. 무엇보다도 미분탄 연소에서는 앞서 언급된 대로 수송 유체에 의해서 미분탄이 연소로에 투입되기 때문에 수송시키는 공기의 유속이 연소에 대단히 중요한 역할을 한다. 수송공기 유속이 너무 빠르면 미분탄이 연소로에서의 체류시간이 짧기 때문에 미분탄이 완전히 연소되기도 전에 배출되어 미연탄소가 배가스와 함께 나가게 되어 열효율이나 환경문제 등의 문제를 야기 시킨다. 반대로 수송공기유속이 너무 느리면 미분탄의 수송이 원만히 이루어지지 못하고 수송관 내에서 미분탄이 침전되어 플러그 현상이 일어나 결국 수송관이 막히게 된다.^{1,2)} 현재 실험대상으로 하고 있는 화력발전소에서는 미연탄소분이 상당량 발생하고 있으며 이의 개선을 위하여 시스템의 각 부분을 조사하여 연소효율을 높임으로써 미연탄소분을 줄이고자 하는게 본 연구의 기본 방향이다.

대상 발전소에서 미연탄소분의 발생원인을 발전소의 계통별로 조사 분석하여 본 결과 무엇보다 우선 미분탄을 수송하고 있는 공기압 수송시스템을 해결하여야만 연소로에 미분탄이 안정적으로 공급되어 미연탄소분 발생을 줄일 수 있고 연소효율을 높일 수 있는 것으로 밝혀졌다. 화력발전소에서의 연소용 공기의 공급 방식은 수송관에서 미분탄을 수송하면서 연소로내에 투입되는 1차공기와 연소에 필요한 산소량을 조절하기 위한 2차 공기 그리고 화염의 형태와 방향을 조절하는 3차 공기로 주입되고 있다. 이 중에서도 미분탄을 수송하는 1차 공기는 그 유속에 따라 미분탄이 원만히 안정적으로 연소로에 공급되도록 미분탄이 침전하기 시작

하는 최고공기유속 이상을 유지하도록 하여야 하고, 연소로내에서의 미분탄의 체류시간을 길게 하기 위하여서는 되도록 유속을 느리게 할 필요가 있는 양면성이 있다. 또한 미분탄이 연소로내에서 짧은 체류시간에서도 연소될 수 있도록 1차공기를 Preheater로 사전에 먼저 약 300℃ 근처로 예열하여 공급하고 있으나 수송관의 기체온도 또한 최소공기유속과 밀접한 관계가 있을것으로 사료된다. 이러한 점을 고려하여 발전소에서 투입되는 미분탄의 양과 수송시키는 수송유체와 관계를 규명하여 원만한 공기압 수송을 이룰수 있는 공기의 유속을 알아보고 균일 흐름을 이룰수 있는 최소공기유속(saltation velocity)를 알아냄으로써 발전소에서의 미분탄 연소가 원만히 이루어질 수 있도록 그 대책을 마련하고자 하는게 본 연구의 목적이다.

2. 이 론

2.1 미분탄 수송계에서의 최소공기 유속

고체-기체의 공기압 수송계통에서 중요한 인자는 고체의 입자가 침전되는 것을 방지하는 최소공기 유속을 찾아내어 그 이상의 유속으로 조업하는 것이 필요하다. 고체의 질량 속도가 일정한 범위에서 입력되고 있을때는 기체의 유속이 증가 할수록 균일 흐름의 영역으로 변하고 반대로 기체의 유속이 감소하여 최소공기유속 이하로 떨어지면 고체 입자의 침강이 일어나서 양호한 수송역할이 어렵게 될 것이다. 즉 일정한 양의 고체 입자들이 어떤 수송계에 연속적으로 주입할 경우 가장 이상적인 흐름의 형태는 균일 흐름(homogeneous flow)영역일 것이며 이것은 최소공기유속 이상을 유지할 때만 가능하다.⁶⁾ 이러한 최소공기유속을 구하는 방법으로는 여러가지 방법이 제시되고 있으나 Zenz(1964)가 제시한 실험적 자료에 의한 도표를 이용하는 것이 가장 널리 이용되고 있다.^{3), 4)}

Fig.1에서 U_s' 는 단일입자의 최소공기 유속이며 이에 관한 관계식은

$$U_s' \propto D^{0.4} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{W}{\rho_s} = B5 \frac{U_s - U_s'}{U_s'} \dots\dots\dots (2)$$

$$W_s = \frac{1}{4} \pi D^2 W \dots\dots\dots (3)$$

가 되고, 여기서 B5는 Fig.1의 기울기 n 에 의해서 결정되어,

$$B5 = 21.4n^{1.5} \quad n \geq 0.68 \dots\dots\dots (4)$$

$$B5 = 0.32 \quad -0.11 \leq n < 0.68 \dots\dots\dots (5)$$

이 된다.

또한, 기울기 n 을 구하기 위해서는

$$D_p / B7 = D_p \left[\frac{3\mu^2}{4g\rho_g(\rho_s - \rho_g)} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

을 이용하며, B7은 기체-고체의 흐름에서 기체의 밀도 및 점도, 투입고체의 밀도로 결정되는 고유값으로 고체 입자의 크기에 따라 Fig.1의 횡축값을 결정한다. 횡축의 값이 결정되면 그 지점에서의 기울기 n 가 결정되고, n 값에 따라

B5 값을 알 수 있으며, B5 값에 따라 종축의 값을 결정할 수 있다. 또한, Fig.1의 종축의 값이 결정되면,

$$U_s / B6 = U_s' \left[\frac{4g\mu(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g^2} \right]^{-1/3} \dots\dots\dots (7)$$

에서 U_s' 를 구하며, B6는 기체-고체 흐름에서 수송되는 고체의 단일입자 최소공기 유속을 결정하기 위한 값으로 역시 수송고체의 밀도와 수송시키는 기체의 밀도 및 점도로 결정된다.^{2), 3), 4)}

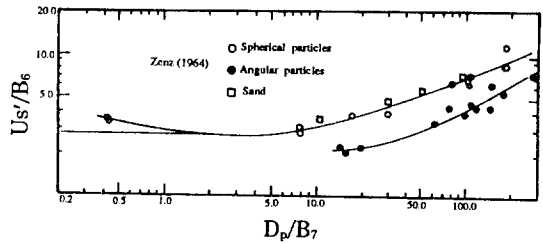


Fig 1. Saltation velocity of uniform sized solids U_s in a 6.35cm diameter tube.

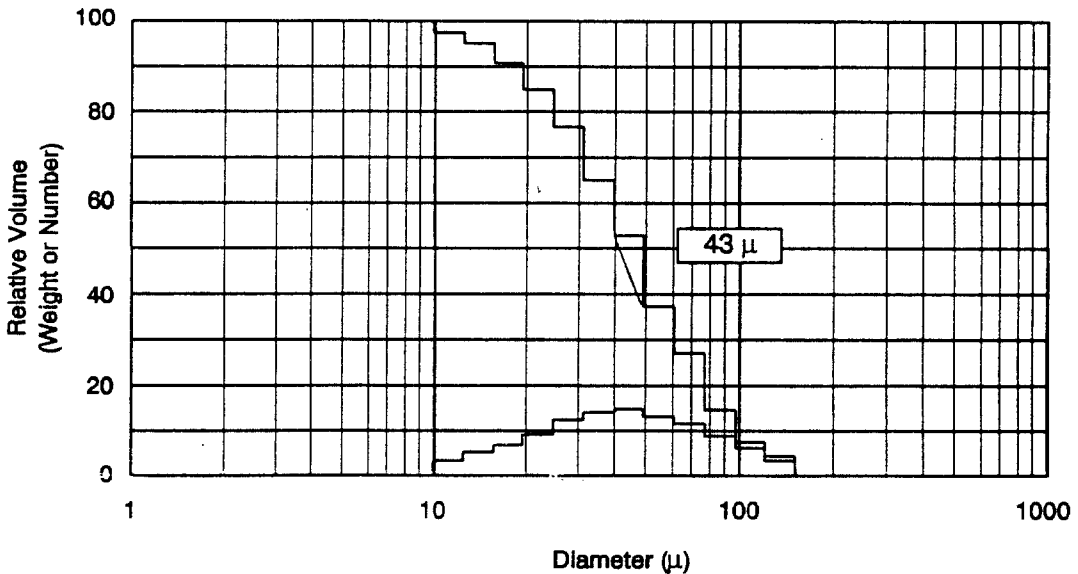


Fig 2. Pulverized Coal diameter distribution

2.2 발전소 수송관의 최소공기 유속

실험 대상 발전소에서 최소공기 유속을 찾아 내기 위하여 Zenz의 실험적 자료에 의한 Fig.1에서 기울기 n 을 구한다. 발전소에서 사용되고 있는 미분탄 입자의 크기는 Fig.2 미분탄의 입도분포에서 $D_p=43\mu$ 으로, 밀도는 $\rho_s=2\sim 2.5g/cm^3$ ($2.46g/cm^3$)로 측정되었으며 공기의 밀도와 점도는 공기의 상태 정수표를 이용하였다. 한편 실험 대상 발전소에서의 주입되는 전체 석탄량 ($75t/h\sim 133t/h$)을 고려하여 식(2)으로 부터 W 는 $g/sec \cdot cm^2$ 로 환산되었으며 최소공기 유속 U_s 와 W 의 관계를 일정온도에서 알아보면, 실험대상 발전소의 수송공기가 약 $300^\circ C$ 이므로 $300^\circ C$ 에서 W 와 U_s 의 관계는 Fig.3과 같다.

Fig.3에서 알수 있듯이 최소공기유속은 일정한 수송관에서 단위 면적당 미분탄 유량이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있고, 이것은 투입되는 미분탄을 증가시키고자 한다면 공기의 유속 또한 증가하여야만 미분탄의 침전을 막을 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig.4는 어느 일정한 수송관에서 온도 변화에 따른 최소공기 유속을 단위 면적당 투입되는 미분탄과의 관계를 보여주고 있다. Fig.4에서와 같이 온도의 변화는 공기의 밀도와 점도를 변화시키므로 최소공기 유속이 변하여 수송공기의 온도가 증가할수록 최소공기 유속 또한 증가함을 알 수 있다. 이로부터 조업에 지장이 없는한 미분탄의 원활한 수송을 위해서는 수송관내의 공기온도를 너무 증가시킬 필요가 없음을 보여주고 있다. 한편 Fig.5에서와 같이 수송관의 크기는 최소공기 유속에 상당한 변화를 주며 특히 투입되는 미분탄의 유량이 클수록 그 변화는 더큼을 알 수 있다. 즉 미분탄 수송관의 적당한 크기의 선정이 미분탄 수송을 양호하게 하는데 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.⁵⁾

3. 대상발전소의 실험 및 결과고찰

미분탄 연소이용 발전소에서 공기압 수송계의 문제는 미분탄 수송공기 유속이 각 수송관의 길이나 장치 모양 등에 관계되어 수송관의 길

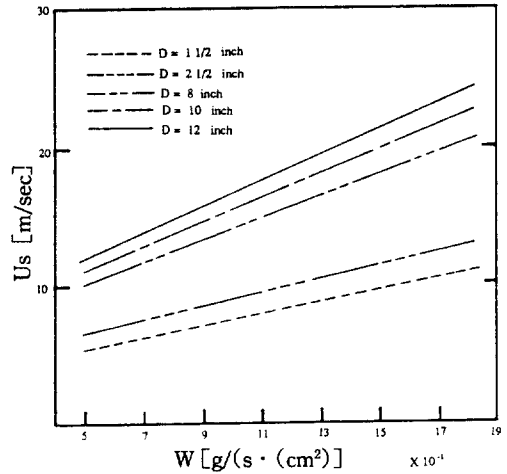


Fig 3. Saltation velocity according to solid flow rate.

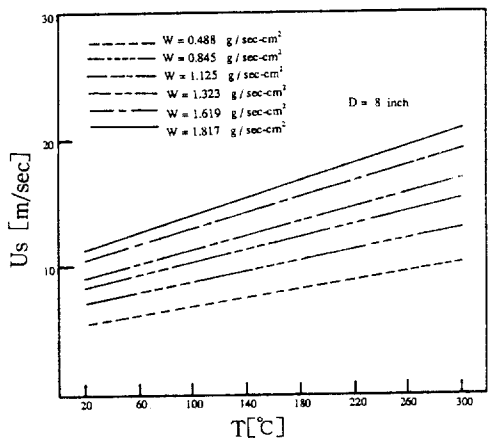


Fig 4. Saltation velocity according to gas temperature.

이가 길수록 수송관에 대한 압력강하로 인하여 유속이 줄게 된다. 실험대상 발전소의 시스템 연소계통 구성도는 Fig.6과 같으며 실험은 미분탄 투입구(P/C feeder)와 예열기(preheater)에서 나오는 1차공기(primary air)와 혼합된 후 약 1.0m 지점에서 피토포(pitot tube)을 이용하여 측정 실험하였다. 대상 발전소는 보일러의 앞(front)과 뒤(rear)에 각각 20개의 수직버너가 설치되어 있으며 버너는 비문탄과 기름을 연소할 수 있도록 설계되어 있지만 주연료는 미분탄이고 기름은 화염의 안정을 위하여 경우에

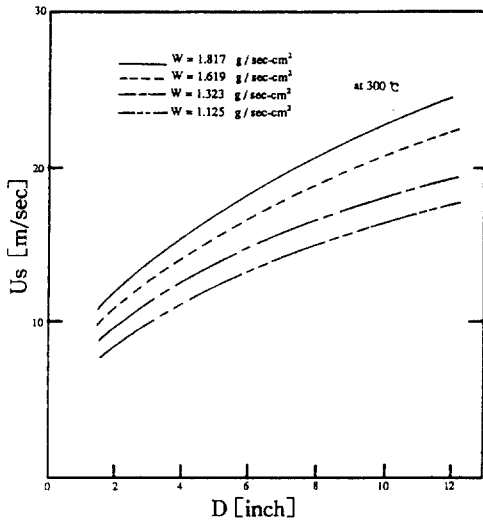


Fig 5. Saltation velocity according to pipe diameter.

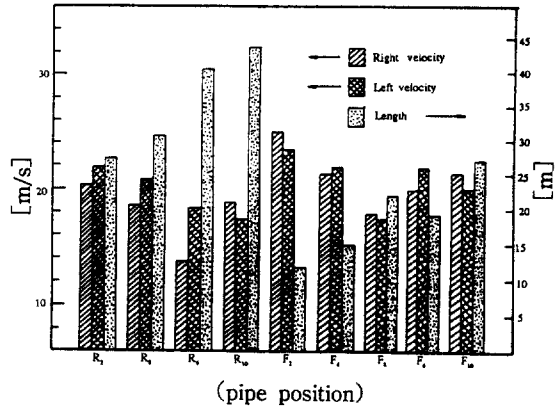


Fig 7. The air velocity and length of the pipe in power plant.

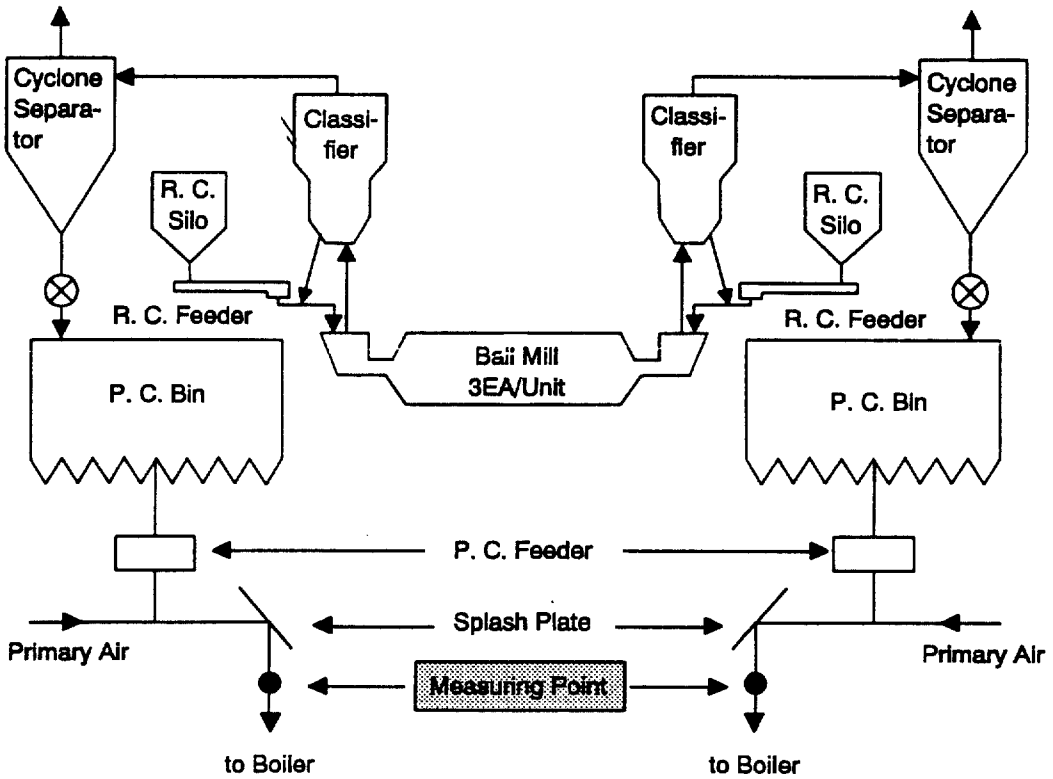


Fig 6. Schematic Diagram of System

따라 증유를 혼소하도록 되어 있다. Fig.7은 실험대상 발전소의 각 수송관의 길이와 각 수송관에서의 공기 유속을 나타낸 것이며 이 발전소에서는 각 미분탄 투입구에서 두개의 수송관이 있고 Fig.7에서 각 수송관의 도표중 앞의 것이 발전소에서 앞쪽에 위치해 있는 것이다. 앞서 언급했듯이 연소로내에 주입되는 총 공기량은 화염이나 연소효율 등에 영향을 미치지만 미분탄 수송에서 최소공기 이상을 유지하는 것이 무엇보다도 보일러의 연소안정에 중요하다. 이러한 관계를 고려하여 대상발전소의 각 수송관의 유속이 기체-고체의 흐름에서 고체의 침전이 시작되는 최소공기유속 이상으로 유지되고 있는지를 확인하기 위하여 각 수송관마다 Pitot tube를 이용하여 이 발전소를 설치, 건설한 미국의 Combustion Engineering, Inc. staff과 3개월에 걸쳐 10회 반복하여 각 수송관의 유속을 조사한 후 평균한 평균값을 취하여 이론적으로 계산된 값과 실험대상발전소에서의 실제 유속과의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig.8이다. Fig.8에서 나타나듯이 수송관은 미분탄 투입 유량에 따라 플러그가 일어날 수 있고, 특히 R6, F8, R10등의 수송관은 투입 미분탄 유량이 1.619 g/sec·cm² 이상인 경우에는 가장 먼저 플러그가 일어날 것이다. 수송관에서 어느 한쪽이 플러그가 일어나면 다른 한쪽은 일정 미분탄 유량이 투입되는 경우는 공기유속이 빨라져서 플러그가 덜 일어날 수도 있으나 발전소에서는 미분탄 투입량을 전체적으로 발전양에 따라 조절함으로 플러그가 일어나지 않은 쪽으로 더 많은 양이 투입되어야 함으로 플러그가 일어나지 않은 쪽으로 미분탄 유량(W)이 증가하여 거의 동시에 모든 수송관에서 플러그가 일어나게 된다. 결국 공기압 수송에서는 미분탄이 균일하게 공급되어야 보일러가 안정되므로 최소공기유속 이상을 유지하도록 시설을 개선하든지 아니면 미분탄 투입량이 적게 투입 되도록 개선하는 것이 바람직하지만 미분탄 투입량은 발전양과 관계되므로 조절이 힘들고 각 수송관마다 공기 유속을 조절하여 미분탄 투입량에 따른 최소공기유속을 유지하도록 조업하는 것이 필요하다.

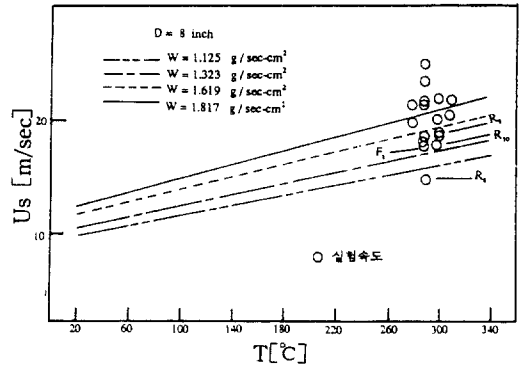


Fig 8. Saltation velocity to air velocity in power plant.

4. 결 론

실험대상발전소에서 미분탄 연소를 위한 공기압 수송연구에서 이론 및 실측 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 대상발전소에서 수송관의 크기가 일정한 경우 1차 공기의 Preheating을 높일 경우 수송기체의 온도가 증가함에 따라 최소공기유속이 증가함으로 더 많은 공기의 유속이 필요하였으며 연소로에서의 미분탄의 체류시간을 고려하여 적절한 preheating의 조절이 필요하였다.

2) 미분탄의 투입은 발전양에 따라 결정되고 있지만 투입 미분탄의 양이 증가함에 따라 최소공기유속이 더 증가함으로 최소한 수송관의 플러그가 일어나지 않도록 투입 미분탄을 조절하여 1차 공기의 유속은 미분탄양에 따른 최소공기유속 이상을 유지하여야 한다.

3) 대상발전소에서는 균일하게 최소공기유속을 결정할 수는 없으며 일부 수송관은 투입 미분탄 유량이 1.7g/sec·cm² 이상이면 플러그가 일어나고 어느 한쪽이 플러그가 일어나면 다른 쪽 수송관이 더 많은 미분탄 수송역할을 담당하게 되어 동시에 전체적으로 플러그가 일어나고 있다. 그러므로 각 수송관 마다 최소공기유속을 측정하기 위하여 공기유속과 압력강하의 관계를 조사하여 연속적으로 공기유속을 측정할 수 있도록 설치하여야 한다.

참 고 문 헌

1. Davidson, J.F. and Harrison, D., 1977, 'Fluidization,' Academic press.
2. Klinzing, George E., 1981, 'Gas-Solid transport,' mcgraw-Hill.
3. Kunni, D., and Levenspiel, O., 1969, 'Fluidization Engineering,' John Wiley and Sons.
4. Davidson, J.F., Clift, R., and Harrison, D., 1985, 'Fluidization 2nd,' Academic press.
5. Williams, O.A., 1983, 'pneumatic and Hydraulic Conveying of solids,' Marcel Dekker.
6. 홍성선, 오창섭, 최익수, 최병선, 1988, '수평관에서의 미분탄 공기압 수송시스템에 관한 연구,' 산업과학기술연구소, Vol.2, No.1.