

입자수송시스템 내 공기-입자 유동장의 압력손실 특성 해석

이재근* · 구재현* · 권순홍**

Analysis of Pressure Drop Characteristics for the Air-Particle Flow in Powder Transport Piping System

Jae-Keun Lee*, Jae-Hyun Ku*, Soon-Hong Kwon**

Key Words: Pressure Drop (압력손실), Air-Particle Flow (공기-입자 유동장), Particle Motion (입자운동), Mixture Ratio (혼합비), Friction Factor (마찰계수), 수송장치 (Piping System)

ABSTRACT

This study reports the analysis of the pressure drop characteristics for the air-particle flow in powder transport piping system. The pressure drop characteristics of air-particle flow in piping system is not well understood due to the complexity of particles motion mechanism. Particles or powders suspended in air flow cause the increase of the pressure drop and affect directly the transportation efficiency. In this study, the pressure drop in powder transport piping system with straight and curved pipes is analyzed for the interactions of air flow and particle motion. The total pressure drop increases with increasing of the pipe length, the mixture ratio, and the friction factor of particles due to the increasing friction loss by air and particles in a coal piping system. For the coal powders of 74 μm size and powder-to-air mass mixture ratio of 0.667, the total pressure drop by the consideration of powders and air flow is 30% higher than that of air flow only.

1. 서 론

미분탄, 시멘트, 화학약품, 곡류 등의 입자수송산업에 있어서 수송의 용이성과 공정의 적합성을 위하여 재료를 입자화하는 경향이 많아졌고, 수송관내 가스-입자의 2상 유동에 관하여 많은 연구가 수행되고 있다. 화력발전소, 시멘트공업, 제분공업 등에 있어서 입자 수송능률이 생산능률과 품질 향상 및 수익성에 연결되므로, 최적 생산공정을 위하여 사용되는 가스-입자 수송장치 해석에 대한 연구는 절실히 요구되고 있는 실

정이다. 관내 공기-입자 유동장에서 입자수송은 공기와 입자의 2상 유동으로, 수송관 구조가 직선관, 곡선관, 커플링 등의 수송관 개수, 길이, 각도 등의 형상적 특성 및 공기흐름과 부유 입자운동에 의한 압력손실에 의하여 수송효율이 크게 저하되는 문제점이 있다.

공기-입자 수송관내의 전체 압력손실은 공기흐름과 부유 입자운동에 의하여 발생하며, 이 중 공기흐름보다 부유 입자운동에 의한 압력손실이 매우 지배적이다. 그러나, 현재 각종 수송관의 특성과 공기-입자의 유동에 따른 압력손실 관련자료의 부족으로, 공기흐름만을 고려한 압력손실에 의해 수송관내 가스-입자수송을 해석하기 때문에 최적 수송조건을 찾지 못하는 실정이다. 따라서 수송에너지의 절감과 수송효율의 향상을 위하여 수송관내의 부유 입자운동을 고려한 압력손실 해석

* 부산대학교 기계공학과
** 밀양대학교 기계공학과
E-mail : jklee@pusan.ac.kr

이 요구된다.

입자 수송시스템에서 공기 유동에 의한 압력손실은 주로 공기의 가속력과 관 내부의 마찰력에 의해 발생한다. 수송관 내 공기-입자 유동장에서는 입자의 크기, 형상, 밀도 등의 많은 인자들의 영향으로 인해 정확한 압력손실 해석이 어렵기 때문에, 많은 해석방법들이 주로 실험식에 의존하고 있다. 관 내 공기-입자 유동장에서 압력손실에 영향을 주는 인자들 중 입자와 공기의 혼합유동 양식이 중요하며 이를 결정하는 주요 인자는 입자의 질량 혼합비 (Mixture Ratio)이다^{(1)~(3)}. 석탄 화력발전소에서 미분탄 수송시스템에서는 입자의 질량 혼합비가 10보다 작은 희석 유동양식 (Dilute Flow Pattern)을 나타내며, 일반적으로 질량 혼합비는 0.4~1.0의 범위이다^{(1)~(3)}. 공기-입자 유동장의 압력손실 관련 여러 해석 모델들이 많이 연구되고 있으나, 해석 모델 각각의 특성에 따라 제한된 조건에서만 양호한 결과를 보이며, 해석조건 및 인자에 따른 압력손실 해석의 체계적인 연구가 부족한 실정으로서 이에 대한 정량적인 해석이 필요하다.

본 연구는 입자 수송관내 공기-입자 유동장의 압력손실 특성 해석에 대한 것으로, 공기유동에 의한 압력손실과 함께 총 압력손실에 지배적인 영향을 주는 미분탄 입자운동에 의한 압력손실을 고려하여 관 길이, 입자 혼합비, 입자 마찰계수에 따른 압력손실 해석을 통하여 관내 총 압력손실 해석을 수행하고자 한다. 본 연구는 가스-입자 수송관내의 입자에 의한 압력손실 해석기술의 확립과 높은 수송효율을 갖는 최적의 가스-입자 수송시스템을 설계하고자 하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

2. 공기-입자 유동장내 압력손실 메카니즘

관 내 입자들에 의한 압력손실 메카니즘 해석은 압력손실을 일으키는 입자운동 메카니즘에 의해 크게 영향을 받는다. 관 내 유동에서 반지름 방향에 따라 속도가 변화하며, 난류의 경우 특히 관 벽부의 속도변화가 크게 나타난다. 따라서 관 내 유동공기 중에 혼합된 입자속도는 관 벽으로부터 위치에 따라 달라지게 되고, 관내의 입자운동은 매우 복잡한 메카니즘을 갖는다.

Fig. 1은 파이프라인 (Pipe Line)을 통과하는 입자들의 수송메카니즘을 나타내고 있는 것으로, 입자수송시 파이프라인 내부표면에 입자가 부착되거나, 입자들이

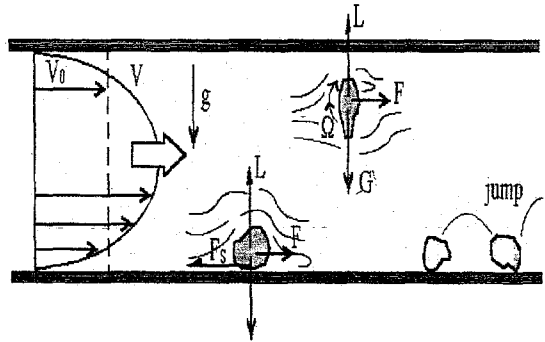


Fig. 1 Transport mechanism of particles in a pipe

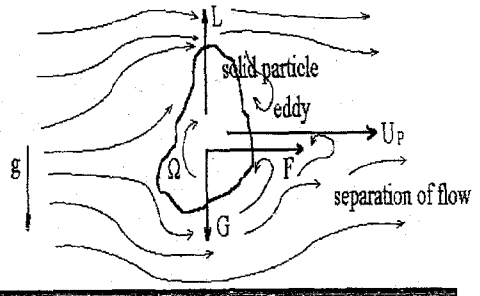


Fig. 2 Aerodynamic forces and streamlines acting on a particle

장애물이 되어 압력손실이 발생하게 되는데 이러한 메카니즘에 기여하게 되는 힘은 크게 입자의 중력 (G), 양력 (L), 압력 (F), 마찰력 (F_s) 등으로 볼 수 있다⁽⁴⁾.

Fig. 2는 기류 안에서 한 입자에 작용하는 공기역학적인 힘들과 입자 주변의 유선이 나타낸 것으로, 유속이 증가되어 파이프 밑바닥 근처의 기류에 의한 입자의 압력 (F)이 입자의 마찰력을 극복할 수 있을 때, 입자는 천천히 미끄러지면서 움직이기 시작한다. 유속이 증가함에 따라 양력이 증가하고 마침내 입자의 중력을 극복하여 파이프 밑바닥에서 기류속으로 떠오르게 된다. 이 경우에 불안정하게 기류축을 따라 가다가 순간적으로 다시 밑바닥으로 떨어진다, 이러한 도약을 반복되는데, 여기서 유속을 더 증가시키게 되면 난류 흐름이 발생된다⁽⁴⁾.

Fig. 3은 난류흐름 속에서의 입자운동의 궤적을 나타낸 것으로, 입자들은 각각 작은 진동을 가지고 움직이며, 입자 후류에 발생하는 여러 가지 와류 때문에 입자 자체에 순환류가 발생하고, 기류가 결합되어 흐름과 직각으로 작용하는 힘 즉, 마그너스 효과 (Magnus Effect)가 발생한다. 이와 같은 운동 방향과 직각인 힘때문에 입자는 사행운동을 해서 관 내벽에 충돌하고 그 때의 마찰로 운동에너지의 일부를 소모하게 된다. 이와 같이

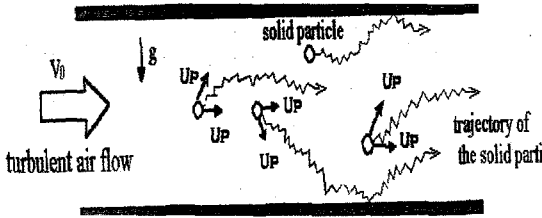


Fig. 3 Trajectory of particles in turbulent flow of air

관의 반경위치에 따라 변화하는 각각의 입자운동에 의한 압력손실 메카니즘 해석이 입자군 모두 조사하는 것이 매우 어렵기 때문에 일반적으로 입자군 전체의 운동평균값을 구하여 수행한다. 이 경우, 공기와 입자를 제각기 특별한 유체로 해석하고 각 유체운동을 파악하여 압력손실을 계산한다. 관 내 입자운동에 의한 압력손실 해석시 입자군의 유동양식 (Flow Pattern)이 중요하게 영향을 주며, 입자군의 유동양식은 입자와 공기의 혼합비에 의해 결정되므로 이를 고려한 압력손실 해석이 수행되어야 한다⁽⁴⁾.

3. 입자 수송관내 공기-입자 유동장 압력손실 해석

3.1 공기흐름에 의한 압력손실 해석

관 내 공기흐름에 의한 압력손실은 공기의 가속력과 관 내부의 마찰력에 의해 발생한다. 본 연구에서 공기흐름에 의한 압력손실은 공기가 가속된 후 관 내부로 유입되어 관 내부는 등속상태라는 가정하에서 관 마찰력에 의한 직선관과 곡선관 압력손실의 합으로 해석한다^{(5),(6)}.

직선관에서 공기흐름에 의한 압력손실은 식 (1), (2)와 같이 Darcy의 관 마찰공식을 사용하여 수평관 및 수직관에 대하여 해석하며, 압력손실에 영향을 주는 주요 변수는 관 마찰계수 (f), 유속 (V) 및 관 직경과 길이 이의 비 (L/D)이다^{(5),(6)}.

$$\Delta P_{HP} = \left(f \frac{L}{D} \right) \frac{\rho V^2}{2} \quad (1)$$

$$\Delta P_{VP} = \left(f \frac{L}{D} \right) \frac{\rho V^2}{2} - \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (2)$$

$$f = \frac{0.25}{[\log (\varepsilon / D) / 3.7 + 2.51 / Re \sqrt{f}]^2} \quad (3)$$

여기서, ΔP_{HP} 와 ΔP_{VP} 는 각각 수평관과 수직관의 압

력손실, V는 유속, f는 공기흐름에 의한 관 마찰계수로서 식 (3)의 Colebrook 식을 이용하여 구한다. Z_1 - Z_2 는 두 지점의 높이 차, ε 은 관 내부 표면거칠기, g는 중력가속도, Re는 레이놀즈 수이다.

곡선관에서 압력손실은 난류흐름, 곡률반경에 따른 2차유동 (Secondary Flow), 관 반경과 곡률반경의 비 (R/r), 곡선관의 각도 (θ) 등 인자들 해석의 어려움으로 인하여 일반적으로 유동조건에 따른 실험식을 사용하여 해석한다. 본 연구에서는 실제 입자 수송관내에서 일반적으로 사용되는 레이놀즈 수 (Re)가 10^5 등급의 난류유동조건을 만족하는 Ito 실험식을 사용하여 곡선관 압력손실을 해석하였다⁽⁸⁾. Ito 실험식에 의한 곡선관 압력손실 해석은 주어진 레이놀즈 수 범위에서 곡선관 각도에 따른 보정계수 (C_θ) 및 곡선관 손실계수 (K_{90})를 구하여 손실계수 (K_θ)를 계산하며, Darcy 관 마찰공식을 사용하여 곡선관 압력손실을 구한다^{(5),(6)}.

$$\Delta P_{CP} = K_\theta \frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

$$K_\theta = C_\theta K_{90} \quad (5)$$

$$C_\theta = (1.63 \times 10^{-2}) \theta - (6.65 \times 10^{-5}) \theta^2 + (9.9 \times 10^{-8}) \theta^3 \quad (6)$$

여기서, ΔP_{CP} 는 곡선관의 압력손실, K_{90} 은 곡선관 각도 90° 에서의 곡선관 손실계수, C_θ 는 곡선관 각도에 따른 보정계수, K_θ 는 곡선관의 손실계수, θ 는 곡선관 각도이다. 곡선관 손실계수 (K_{90})는 식 (7) 및 식 (8)과 같이 레이놀즈 수의 범위에 따라 계산한다.

$$\textcircled{1} \text{ Re} \cdot (r/R)^2 < 91 \text{ 일 경우, } K_{90} = (0.00873) \alpha f \theta (R/r) \quad (7)$$

$$\textcircled{2} \text{ Re} \cdot (r/R)^2 > 91 \text{ 일 경우, } K_{90} = 0.00241 \alpha \theta (R/r)^{0.84} Re^{-0.17} \quad (8)$$

여기서, r은 관 반지름, R은 곡선관 곡률반경, f는 Ito에 의해 구해진 마찰계수, α_θ 는 각도에 따른 실험인자로, 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같이 계산한다.

$$f = \left(\frac{r}{R} \right) \cdot \left[0.029 + \frac{0.304}{\left(Re \cdot \frac{r^2}{R^2} \right)^{0.25}} \right] \quad (9)$$

$$\alpha_{\theta} = 0.95 + (17.2)(R/r)^{-1.96} \quad (10)$$

따라서, 입자 수송관내 공기흐름에 의한 총 압력 손실은 직선관과 곡선관 압력손실의 합으로 구한다.

3.2 입자운동에 의한 압력손실 해석

관 내 입자운동에 의한 압력손실은 공기-입자 유동장의 2상 유동의 에너지 측면에서 도출되는 이론에 의해 해석한다. 입자운동에 의한 압력손실을 발생시키는 원인은 입자에 의한 가속력, 마찰력, 부유력 및 상승력으로, 본 절에서 입자운동에 의한 압력손실은 가속항을 무시하고 등속구간만을 고려하여 마찰력, 부유력 및 상승력을 고려하여 해석한다. 입자에 의한 압력손실 계산시 공기와 관 벽과의 마찰은 공기만이 흐르는 경우와 동일시하여 계산한다. 또한 입자에 의한 관 내 단면적 감소를 무시하며, 입자와 관 벽과의 마찰손실은 관 내에 부유하고 있는 입자를 특수한 유체로 간주하여 계산한다는 가정하에서 해석한다⁽⁷⁾.

입자 마찰력에 의한 압력손실은 Darcy 관 마찰공식을 사용하여 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$\Delta P_{s,FF} = \gamma_s \lambda_s \frac{L}{D} \frac{u_s^2}{2g} \quad (11)$$

여기서, $\Delta P_{s,FF}$ 는 입자 마찰력에 의한 압력손실, γ_s 는 입자 비중량, u_s 는 입자속도, g 는 중력가속도, λ_s 는 입자의 관 마찰계수로서, 입자 개개의 마찰손실의 총합을 의미한다. 관 내 입자가 균일하게 유동할 경우, 입자가 관 벽 전면에 일정하게 접촉하므로 λ_s 는 특수한 유체에 의한 관 마찰계수로 가정하며, 본 연구에서는 관내 입자 수송과정에서 일반적으로 많이 사용되는 식 (12)의 Mathur와 Klinzing 입자 마찰계수 모델링을 사용하여 입자 마찰력에 의한 압력손실을 해석하였다.

$$\lambda_{s=12.2} D^{1.1} V_g^{-0.64} D_p^{-0.26} \rho_p^{-0.91} \quad (12)$$

여기서, D 는 관 직경, V_g 는 기체속도, D_p 는 입자직경, ρ_p 는 입자밀도이다.

마찰력 이외에 압력손실을 발생시키는 힘은 입자의 부유력 및 상승력으로 이 두 힘을 합하여 부양력이라고 하며, 입자의 종류, 형상, 비중 등의 인자들에 의해 영향을 받는다. 부유력이란 입자를 현존위치에 유지하기

위해 필요한 힘이나, 상승력이란 상승관 또는 경사관에서 입자를 소정 높이까지 상승시키기 위한 힘을 말한다. 수평관에서는 대개 입자의 부양을 위하여 부유력만을 고려하나, 수직관의 경우 부유력과 함께 상승력이 작용하여 입자를 부양시킨다.

Fig. 4는 수평관에서 기류 내 입자군에 작용하는 힘들을 나타낸 것으로, 입자군에 작용하는 힘으로부터 부양에너지 즉, 부유에너지와 상승에너지를 이론적으로 계산할 수 있다. 관 길이 L , 상승높이 H 의 조건에서 관 내 전 입자를 고려하여 기류흐름 방향을 기준으로 단위 시간당 입자군의 힘 G_s 는 입자군 속도 u_s 로 나누어 단위 길이당 입자군의 힘 G_s/u_s 로 표현되며, 관 길이 L 을 고려하여 관 길이 L 에서 작용하는 단위길이당 입자군의 힘 $G_s L/u_s$ 로 나타낼 수 있다. 이 힘이 중력방향으로 작용할 때, 입자 중력침강속도 u_{mg} 를 고려하여 관 길이 L 에서 작용하는 단위길이당 입자군 힘은 중력방향으로 단위시간당 거리에 작용하는 에너지로 환산할 수 있다. 이 에너지가 압력손실 에너지로 작용하며, 공기의 단위체적 (Q_a)당 입자부유력에 의한 압력손실 에너지 ($\Delta P_{s,B}$)는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\Delta P_{s,B} = \left(\frac{G_s \cdot L \cdot u_{mg}}{u_s} \right) \frac{1}{Q_a} \quad (13)$$

관 내 입자상승력에 의한 압력손실은 동일한 개념속에서 입자에 의해 일정한 높이 H 까지 상승시키는 힘을 에너지로 환산하여 단위체적당 입자상승력에 의한 압력손실 ($\Delta P_{s,L}$)에너지는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\Delta P_{s,L} = \frac{G_s H}{Q_a} \quad (14)$$

따라서, 입자 부양력에 의한 압력손실은 식 (13)의 입자 부유력과 식 (14)의 입자 상승력에 의한 압력손실 합으로 해석한다.

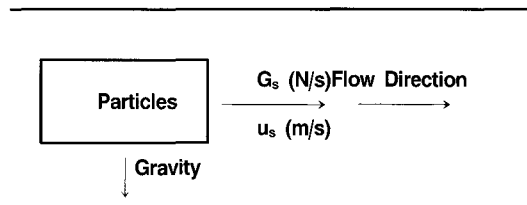


Fig. 4 Forces acting on solid particles in air flow

본 연구에서 미분탄 수송관내 입자운동에 의한 압력 손실 (ΔP_s)은 입자의 마찰력, 부유력 및 상승력에 의한 압력손실 합으로 해석하며, 식 (15)와 같이 나타낸다.

$$\Delta P_s = \gamma_s \lambda_s \frac{L}{D} \frac{u_s^2}{2g} + \frac{1}{Q_a} \left(\frac{G_s L u_{mg}}{\phi u_a} + G_s H \right) \quad (15)$$

여기서, ϕ 는 공기속도 (u_a)와 입자속도 (u_s)의 비이다. 관내 공기-입자 유동장에서 공기의 수송중량 (G_a)과 입자의 수송중량 (G_s)의 비로 표현되는 혼합비 (m)는 압력손실에 영향을 주는 주요 인자로, 혼합비를 고려하여 식 (15)를 정리하면 식 (16)과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

$$\Delta P_s = m \gamma_a \left\{ \lambda_s \frac{L}{D} \frac{\phi u_a^2}{2g} + \left(\frac{L u_{mg}}{\phi u_a} + H \right) \right\} \quad (16)$$

실제 입자 수송관에서 수송거리를 최소화하기 위하여 곡선관을 많이 사용하며, 일반적으로 곡선관 (Bend)에서 관 벽면 가까이 있는 유체는 관성때문에 벽면에 부착하면서 흐르나, 중심선에 있는 유체는 벽면에 부착하는 영향이 미약하다. 따라서, 곡선관에서 유체는 원심력의 작용을 받아 유동하나, 관의 횡단면의 중심부에 가까운 곳의 유체는 바깥쪽 방향의 힘을 현저하게 받아 2차흐름의 소용돌이가 생긴다. 이러한 현상의 영향 때문에 동일한 실제길이의 직선관에 비하여 압력손실이 매우 크다. 곡선관에서 입자에 의한 압력손실 관련 기존 연구는 Schuchart (1969), Spronson (1973), Morikawa et al. (1978) 등이 수행하여 관련 계산 모델식을 제시하였으나, 대부분 입경 1~2 mm의 큰 입자에 대하여 적합하기 때문에 본 연구에서 사용되는 입경 74 μm 의 미분탄 입자의 경우에는 적용되기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 곡선관을 동등한 압력손실을 갖는 동등길이의 직선관으로 환산하여 입자에 의한 압력손실을 해석한다.

3.3 공기-입자 유동장의 총 압력손실 해석

미분탄 수송관내 공기-입자 유동장의 총 압력손실 (ΔP_T)은 3.1절의 공기흐름에 의한 압력손실과 3.2절의 입자운동에 의한 압력손실의 합으로 표현되며, 식 (17)과 같이 표현된다.

$$\Delta P_T = \left\{ f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} - \rho g(Z_1 - Z_2) + K_o \frac{\rho V^2}{2} \right\} + m \gamma_a \left\{ \lambda_s \frac{L}{D} \frac{\phi u_a^2}{2g} + \left(\frac{L u_{mg}}{\phi u_a} + H \right) \right\} \quad (17)$$

4. 미분탄 수송관 압력손실 해석

Table 1은 미분탄 수송관내 공기-입자 유동장의 총 압력손실 해석을 위해 사용된 기본적인 입력 값으로서, 수송관, 공기 및 입자의 물성치를 나타낸다. 실제 화력 발전소의 미분탄 수송관과 동일한 조건으로 온도 82 $^{\circ}\text{C}$ 에서 수송관 직경 (D) 0.54 m, 공기유속 (u_a) 25 m/s, 혼합비 (m) 0.667, 미분탄 직경 (D_c) 74 μm 를 기본적 입력값으로 사용하였다. 일반적으로 공기유동장에서 입자속도는 공기입자의 0.6배이므로, 미분탄 입자속도는 15 m/s로 분석되었으며, 중력침강속도 u_{mg} 는 입자 레이놀즈 수 Re_p 가 53으로 계산되어 $Re_p > 1$, 입자 직경 $D_c > 1 \mu\text{m}$ 이므로 식 (18)에 의해 계산한다.

$$u_{mg} = \left(\frac{4 \rho_p D_c g}{3 C_D \rho_g} \right)^{0.5} \quad (18)$$

여기서, C_D 는 입자의 항력계수, ρ_g 는 기체밀도로, 식 (19)와 같이 계산한다.⁽⁹⁾

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right) \quad (19)$$

Table 1 Properties for the pressure drop analysis of the air-particle flow in pipe lines

Item	Property
Pipe Line	- Surface Roughness (ϵ)=0.000046 m - Pipe Diameter (D)=0.54 m
Air	- Absolute Viscosity (μ) =2.09 $\times 10^{-5}$ Ns/m ² - Temperature: 82 $^{\circ}\text{C}$ - Density (ρ)=0.998 kg/m ³ - Flow Velocity (V_a)=25 m/s
Coal Particle	- Mixture Ratio (m)=0.667 - Density (ρ_c)=2,200 kg/m ³ - Diameter (D_c)=0.000074 m (74 μm) - Velocity (V_c)=15 m/s - Settling Velocity (u_{mg})=1.19 m/s - Particle Friction Factor (λ_s)=0.0085

Table 2 Input data for the pressure drop analysis in coal piping system

Pipe		Specification
Straight Pipe	Length (m)	50
	Number	1
Curved Pipe	Angle (°)	45
	R/r	4

Note: R/r=Ratio of Radius of Curvature (R) to Pipe Radius (r)

Table 2는 화력발전소 미분탄 수송관 내의 공기-입자 유동장의 총 압력손실 해석을 위한 수송관 구조의 입력데이터로, 수송관은 각각 직선관과 곡선관으로 구성되며 직선관은 길이가 입력되고 곡선관은 각도, 수, 관의 곡률반경과 반지름의 비 (R/r)가 입력되어 압력손실을 해석한다. 수송관 내 총 압력손실은 직선관과 곡선관에 대하여 공기흐름에 의한 압력손실과 입자운동에 의한 압력손실의 합으로 계산한다.

Fig. 5는 수송관 직경 (D) 0.54 m, 공기유속 (u_a) 25 m/s, 입자유속 15 m/s, 미분탄 입자직경 $74 \mu\text{m}$ 입력조건에서 입자 마찰계수 (λ_s)와 혼합비 (m)에 따른 압력손실 비 (α) 즉, 공기유동에 의한 압력손실과 공기-입자 유동에 의한 압력손실 비를 해석한 결과이다. 혼합비 증가에 따라 관 마찰력이 증가하여 압력손실비는 증가하고, 입자 마찰계수 증가는 입자들이 관 내부 표면과 마찰이 증가하여 입자 운동에너지 손실로인하여 압력손실 비를 증가시키는 것으로 분석되었다. 혼합비 2, 입자 마찰계수 0.0085 조건에서 미분탄 수송시 압력손실 비의 값은 약 2로서 총 압력손실은 공기흐름에 의한 압력손실보다 약 2배정도 증가하는 것으로 분석

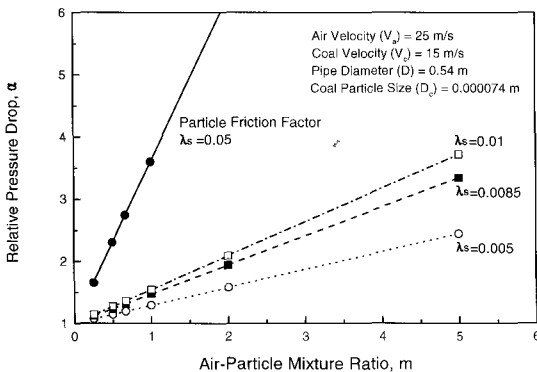


Fig. 5 Analysis results of the pressure drop as a function of mixture ratio and particle friction factor for the air-particle flow in coal piping system

되었다. 수송관내 입자 수송시 곡선관에서 공기-입자 유동장 압력손실이 크게 작용하며, 기존의 Schuchart (1969) 모델을 사용하여 곡선관에서 공기-입자 유동장의 총 압력손실을 해석하면 총 압력손실은 공기흐름에 의한 압력손실보다 약 1.6배 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 Schuchart 모델이 직경 1~2 mm의 큰 직경의 입자에 적용되는 것에 기인한 결과이며, 향후 입경을 고려한 압력손실 해석에 관한 연구가 요구된다.

Fig. 6은 Table 1과 Table 2에서 나타낸 미분탄 수송관에서 직선관 길이 변화에 따른 압력손실 해석결과로, 혼합비 (m) 0.667, 입자 마찰계수 (λ_s) 0.0085, 공기유속 (u_a) 25 m/s, 수송관 직경 (D) 0.54 m에서 입자 직경 $74 \mu\text{m}$ 의 미분탄을 수송할 경우, 직선관 길이 증가에 따라 공기와 입자 마찰력이 증가하여 압력손실은 선형적으로 증가하며 공기흐름에 의한 압력손실은 직선관 길이의 6.74배로 증가하는 것으로 해석되었다. 수송관 내 총 압력손실은 직선관 길이의 8.84배로 증가하며, 직선관 길이 증가에 따라 공기흐름에 의한 압력손실보다 1.31배 증가하는 것으로 분석되었다. 동일한 조건에서 기존에 공기-입자 유동장의 총 압력손실 해석을 위한 Wen과 Simons 모델 (1969)에서는 수송관내 총 압력손실이 직선관 길이의 0.28배로 증가하며, Stegmaier 모델 (1978)에서는 총 압력손실이 직선관 길이의 356배로 나타났다으며, 이는 기존의 각 모델들은 관 직경, 입경, 유동조건 등에서 차이를 가지고 있는 제한된 실험조건하에서 도출된 실험식들이기 때문에 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구결과는 실제 화력발전소의 미분탄 수송관내 공기-입자 유동장 조건에서 총 압력손실을 해석하였으며, 향후 각종 입자 수송관의 최적 설계에 적용이 가능하다.

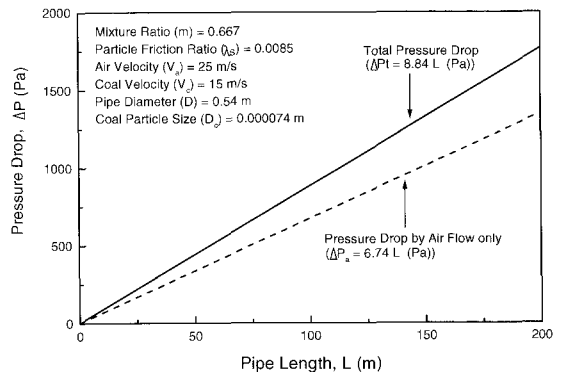


Fig. 6 Comparison of total pressure drop and pressure for air flow only as a function of pipe length for the air-particle flow in coal piping system

5. 결 론

본 연구는 미분탄 수송관내 공기-입자 유동장의 압력손실 특성 해석에 관한 것으로, 직선관 및 곡선관에 대하여 혼합비, 입자 마찰계수, 관 길이에 따라 공기흐름 및 입자운동을 고려한 압력손실 특성 해석을 수행하였다.

- 1) 관 내 공기-입자 유동장에서 혼합비와 입자 마찰계수가 증가할수록 공기흐름과 입자운동에 의한 관 마찰력이 증가하여 총 압력손실은 공기유동만을 고려할 경우보다 크게 증가한다.
- 2) 실제 발전소 미분탄 수송관 운전조건인 혼합비 2, 입자 마찰계수 0.0085 조건하에서 입경 74 μm 의 미분탄을 수송할 경우, 총 압력손실은 공기흐름에 의한 압력손실 보다 약 2배정도 증가하는 것으로 분석되었다.
- 3) 관 길이에 따른 공기-입자 유동장의 압력손실을 분석한 결과, 직선관 길이 증가에 따라 공기 및 입자의 마찰력이 증가하여 압력손실이 증가하며, 실제 발전소 미분탄 수송관 운전조건에서 공기흐름에 의한 압력손실은 직선관 길이의 6.74배이며, 총 압력손실은 직선관 길이의 8.84배로 증가하는 것으로 분석하였다.
- 4) 미분탄 수송관내 공기-입자 유동장의 압력손실 해석 해석 프로그램을 개발하였으며, 각종 입자 수송관 최적 설계에 적용이 가능하다.

참고문헌

- (1) Hetsroni, G., 1982, Handbook of Multiphase, McGraw-Hill.
- (2) Roco, M. C., 1993, Particulate Two-Phase Flow, Butterworth-Heinemann, a Division of Reed Publishing (USA) Inc..
- (3) 송광호 역, 1995, 분체수송기술, 도서출판 기술.
- (4) 정양범, 임홍식, 육옥성, 김혁필, 이재근, 1997, "미분탄 수송장치의 압력손실에 대한 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 83~88.
- (5) Blevins, R. D., 1984, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Company Inc..
- (6) Benedict, R. P., 1980, Fundamental of Pipe Flow, John Wiley & Sons.
- (7) 이세희 역, 1995, 분립체의 공기수송장치, 대신 기술.
- (8) Mathur, M. P., Rohatgi, N. D., and Klinzing, G. E., 1987, Analysis of Coal Pneumatic System, DOE/PETC/TR-87/7, DE87 006301.
- (9) Hinds, W.C., 1982, Aerosol Technology, John Wiley and Sons.
- (10) Wen, C. Y. and Simons, H. P., 1959, "Flow Characteristics in Horizontal Fluidized Solids Transport," AIChE Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 263~267.