



연소효율 향상을 위한 공기-미분탄 수송배관장치의 최적화 설계 프로그램 개발

†구재현

†한국소방산업기술원 소방산업기술연구소
(2009년 8월 14일 접수, 2009년 9월 21일 수정, 2009년 9월 21일 채택)

Development of Optimal Design Program of Air-Coal Pneumatic Conveying System to Enhance Combustion Efficiency

†Jae Hyun Ku

†*Fire Industry Technology Institute, Korea Fire Industry Technology Institute,
Yongin-si, Gyeonggi-do 446-909, Korea*
(Received 14. August. 2009, Revised 21. September. 2009, Accepted 21. September. 2009)

요 약

본 연구는 석탄화력발전소 노의 연소효율 향상을 위하여 미분탄 수송배관의 공기-입자 유동장의 압력손실 특성을 분석하여 미분탄 수송장치 내에 설치되어 유량을 제어하는 오리피스 설계에 적용하고자 하는 것이다. 통상의 미분탄 수송배관장치는 관의 형태에 따라 직선관, 곡선관 및 엘보우로 구성된다. 본 연구에서는 공기유동과 입자운동의 상호작용 해석을 통하여 직선관과 곡선관을 갖는 미분탄 수송배관장치 내의 압력손실을 분석하였다. 총 압력손실은 공기-미분탄 입자의 마찰손실 증가와 배관의 길이, 곡선관 각도의 증가에 따라 증가하는 것으로 확인되었다. 연구결과로 압력손실과 유량제어를 위한 최적화된 오리피스 설계 프로그램이 개발되었으며 그 계산 결과를 기존의 실험결과와 비교, 분석하였다.

Abstract - This study describes to analyze the pressure drop characteristics for the air-particle flow in pneumatic coal powder conveying system and to proper design of the orifice located in the system to enhance combustion efficiency in furnace of the coal-fired power plant. Usually the system consists of the straight type pipe, the curved type pipe and the elbow, which cause increase of the pressure drop. In this study, the pressure drop arised in the system with straight and curved type pipes is analyzed with interactions of motion of air flow and particles. It is realized that total pressure drop increases with increasing of the pipe length and the angle of curved type pipe due to friction loss of air and particles in the system. The program for analysis of the pressure drop and optimum design of the orifice size for air flow control in the system is developed. The result is also compared with the existing system.

Key words : pressure drop, air-particle flow, particle motion, coal pneumatic conveying system, orifice design

†주저자:kujhhh@empal.com

1. 서론

석탄 화력발전소에서 공기와 혼합된 미분탄은 미분탄 수송배관장치(Coal piping system)에 의해 분쇄기(Mill)로부터 보일러의 연소로 윈드박스(Furnace windbox)까지 수송되며, 연소로 윈드박스에서 4개 코너(Corner)로 균일하게 분배하여야 최적의 연소조건을 얻을 수 있다. 그러나, 미분탄 수송시스템에서 각각의 수송관은 길이가 다른 직선관, 곡선관, 엘보우(Elbow) 등으로 구성되기 때문에 압력손실의 차이가 발생하여 유량이 달라진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 압력손실이 적은 수송관 내에 오리피스(Orifice)를 설치하여 보일러 윈드박스 내의 미분탄 분사노즐에서 공기와 미분탄 혼합유동의 분사속도가 균일하게 조절되도록 하고 있다. 실제 미분탄 수송관 내 오리피스 설계는 공기와 미분탄 입자의 2상유동을 고려하여 수행되어야 하나, 기존의 오리피스 설계는 공기유동만을 고려하여 설계하기 때문에 입자운동에 대한 해석을 통해 최적 오리피스 설계가 바람직하다. 따라서, 윈드박스 내에서 균일한 분사속도를 갖기 위하여 미분탄 수송시스템을 구성하는 직선관과 곡선관을 고려한 압력손실 해석을 통해 최적의 오리피스를 설계하여야 한다.

미분탄 수송시스템에서 공기유동에 의한 압력손실은 주로 공기의 가속력과 관 내부의 마찰력에 의해 발생한다. 수송관 내 공기-입자 유동장에서는 입자 크기, 형상, 밀도 등의 많은 인자들의 영향으로 인해 많은 해석방법들이 주로 실험식에 의존하고 있다. 관 내 공기-입자 유동장에서 압력손실에 영향을 주는 인자들 중 입자와 공기의 혼합유동양식이 가장 중요하며 이를 결정하는 주요 인자는 입자의 질량 혼합비(Mixture ratio)이다[1-3]. 공기-

입자 유동장의 압력손실 관련 각종 해석 모델들이 많이 연구되고 있으나, 해석모델 각각의 특성에 따라 제한된 조건에서만 양호한 결과를 보이며, 해석 조건 및 인자에 따른 압력손실 해석의 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

본 연구는 석탄화력발전소의 연소효율 향상을 위하여 공기-입자 유동장의 압력손실 해석을 통한 미분탄 수송장치의 최적 설계에 대한 것으로, 미분탄 수송관내 공기유동과 입자운동을 고려한 직선관 및 곡선관의 압력손실 계산을 통하여 최적 오리피스 설계를 목표로 하였다. 오리피스 해석결과는 국내 보령 석탄 화력발전소에서 미분탄 수송시스템에서 수행된 유량분석을 통해 기존의 수송관 내에 설치된 오리피스 설계데이터와 비교, 분석을 통하여 타당성을 증명하고자 한다.

II. 관 내 입자운동에 의한 압력손실 메커니즘

Fig. 1은 수송관 내부에서 입자를 수송할 때 유동양식을 나타낸 것으로, 공기량에 대한 입자농도의 비율을 나타내는 혼합비에 따라 입자 유동양식은 균일류, 관저류, 소밀류, 집단류, 부분류로 변화하며 이 순서에 따라 관내 입자운동에 따른 압력손실도 증가한다.

Fig. 2는 파이프라인(Pipe line)을 통과하는 입자의 수송메커니즘을 보여 주는 것이다. 이것은 입자수송시 파이프라인 내부표면에 입자가 부착되거나, 입자들이 장애물이 되어 압력손실이 발생하게 되는데 이러한 메커니즘에 기여하게 되는 힘은 크게 입자의 중력(Gravity), 양력(Lift), 압력(Pressure), 마찰력(Friction force) 등이 있다. 관내 유속 증가에 따라 파이프 내에 정체된 입자는 천천히 미끄러지면서 움직이기 시작하며, 파이프 밑바닥에서 기류속으로 뛰어오르게

Flow Pattern		Pressure Drop (kgf/cm ² per100m)	Transport Velocity(m/s)	Mixture Ratio
(a) Homogeneous Flow		0.1~0.5	20~30	1~10
(b) Segregation Flow		0.3~1.0	10~20	10~20
(c) Dune Flow		2~5	5~15	10~100
(d) Slug Flow		2~5	5~15	30~150
(e) Flug Flow		2~5	1~5	30~150

Fig. 1. Flow pattern for particles transport.

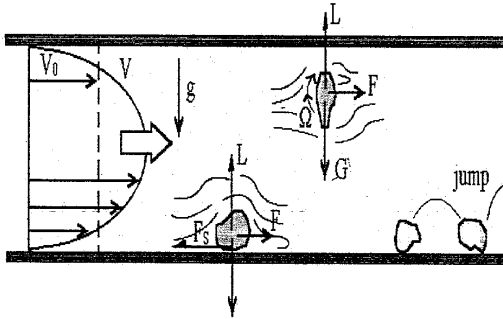


Fig. 2. Transport mechanism of particles in a pipe.

되고 이에 따라 난류흐름이 발생된다. 이 때 입자들은 각각 작은 진동을 가지고 움직이며, 입자 후류에 발생하는 와류때문에 입자자체에 순환류가 발생하고, 기류가 결합되어 흐름과 직각으로 작용하는 힘 즉, 마그너스 효과효과(Magnus effect)가 발생한다. 그리고, 입자들은 불규칙한 운동으로 인하여 관 내벽에 충돌하고 그때의 마찰로 인하여 운동에너지 일부를 소모하게 된다. 따라서, 관내 입자에 의한 압력손실 메카니즘 해석은 압력손실을 일으키는 입자운동 메카니즘에 의해 크게 영향을 받는다[4].

III. 해석

3.1. 미분탄 수송관내 압력손실 해석

관 내 기류가 입자를 수송하는 일은 기류가 압력 형태의 에너지를 소비하는 과정으로 해석하며, 입의 길이의 직선관 내 공기-입자 혼합유동의 총 압력손실(ΔP_T)은 공기흐름에 의한 압력손실(ΔP_a), 분립체 입자를 어느 속도까지 가속하기 위한 압력손실(ΔP_{SG}) 및 가속을 마친 입자를 일정한 속도로 수송하기 위해 가하는 압력손실(ΔP_s)의 합계로 식 (1)과 같이 나타낸다[5].

$$\Delta P_T = \Delta P_a + \Delta P_{SG} + \Delta P_s \quad (1)$$

한편 공기흐름에 의한 압력손실은 공기 가속력과 관 내부 마찰력에 의해 발생한다. 본 연구에서 공기흐름에 의한 압력손실은 공기가 가속된 후 관 내로 유입되어 관 내부는 등속상태라는 가정하에서 관 마찰력에 의한 수평관, 수직관 및 곡선관에 의한 압력손실의 합으로 계산된다[6].

$$\Delta P_a = \Delta P_{수평관} + \Delta P_{수직관} + \Delta P_{곡선관} \quad (2)$$

여기서, $\Delta P_{수평관}$ 은 수평관에 의한 압력손실, $\Delta P_{수직관}$ 은 수직관에 의한 압력손실, $\Delta P_{곡선관}$ 은 곡선관에 의한 압력손실이다.

수평관, 수직관, 곡선관에서 공기흐름에 의한 압력손실은 Darcy의 관 마찰공식[6]을 사용하여 해석하며, 압력손실에 영향을 주는 주요 변수는 관 마찰계수(f), 유속(V) 및 관 직경과 길이의 비(L/D)이다. 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, Darcy의 관 마찰공식을 사용하여 곡선관 압력손실을 구한다[7].

$$\Delta P_{수평관} = (f \frac{L}{D}) \frac{\rho V^2}{2} \quad (3)$$

$$\Delta P_{수직관} = (f \frac{L}{D}) \frac{\rho V^2}{2} - \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (4)$$

$$\Delta P_{곡선관} = K_\theta \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$$

여기서, V 는 유속, f 는 공기흐름에 의한 관 마찰계수로서 Colebrook 식을 이용하여 구한다.[5]

관 내 입자운동에 의한 압력손실(ΔP_s)은 공기-입자 유동장의 2상 유동의 에너지 측면에서 도출되는 이론에 의해 해석한다. 관내 입자운동에 의한 압력손실은 입자에 의한 마찰력, 부력(Buoyancy force) 및 상승력의 3가지 힘을 고려하여 해석을 수행한다.

$$\Delta P_s = \Delta P_{s,마찰력} + \Delta P_{s,부력} + \Delta P_{s,상승력} \quad (6)$$

입자 마찰력에 의한 압력손실($\Delta P_{s,마찰력}$)은 Darcy 관 마찰공식을 사용하며, 본 연구에서는 관내 입자 수송과정에서 일반적으로 Mathur와 Klinzing 입자 마찰계수 모델링을 사용하여 입자 마찰력에 의한 압력손실을 해석하였다.[9] 입자군에 작용하는 힘으로부터 부력과 상승력에 의한 압력손실 에너지를 이론적으로 계산할 수 있다. 관 길이(L), 상승높이(H)의 조건에서 관 내의 전 입자를 고려하여 기류 흐름 방향을 기준으로 공기 단위체적(Q_a) 당 입자 부력에 의한 압력손실 에너지($\Delta P_{s,부력}$)를 표현할 수 있다. 관 내 입자 상승력에 의한 압력손실은 동일한 개념 속에서 입자에 의해 일정한 높이(H)까지 상승시키는 힘을 에너지로 환산하여 단위 체적당 입자상승력에 의한 압력손실($\Delta P_{s,상승력}$)에너지로 표현된다. 관내 입자운동에 의한 압력손실은 입자에

의한 마찰력, 부력 및 상승력의 3가지 힘을 고려하여 해석하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_s = m \gamma_a \left\{ \lambda_s \frac{L}{D} \frac{\phi u_a^2}{2g} + \left(\frac{L u_{mg}}{\phi u_a} + H \right) \right\} \quad (7)$$

여기서, m 은 혼합비로서 공기 수송중량과 입자 수송중량의 비를 나타내며, γ_a 는 공기 비중량, λ_s 는 입자의 관 마찰계수, ϕ 는 공기속도(u_a)와 입자속도(u_s)의 비, g 는 중력가속도, u_{mg} 는 중력침강속도이다.

실제 석탄화력발전소의 미분탄 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 대부분 입경 1~2mm의 큰 입자에 대하여 적합하기 때문에 본 연구에서 사용되는 입경 74 μ m의 미분탄 입자의 경우에는 적용되기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 곡선관을 동등한 압력손실을 갖는 동등길이의 직선관으로 환산하여 입자에 의한 압력손실을 해석하였다.

미분탄 수송관내 공기-입자 유동장의 총 압력손실(ΔP_T)은 공기흐름에 의한 압력손실과 입자운동에 의한 압력손실의 합으로 표현되며, 식 (8)과 같이 표현된다[5].

$$\Delta P_T = \left\{ f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} - \rho g(Z_1 - Z_2) + K_0 \frac{\rho V^2}{2} \right\} + m \gamma_a \left\{ \lambda_s \frac{L}{D} \frac{\phi u_a^2}{2g} + \left(\frac{L u_{mg}}{\phi u_a} + H \right) \right\} \quad (8)$$

3.2. 미분탄 수송관내 최적 오리피스 해석

화력발전소의 미분탄 수송관은 일반적으로 4개의 관으로 구성되며, 최적 설계조건은 수송관 출구부의 미분탄 분사노즐에서 압력강하를 동일하게 설계하여 동일한 유량의 미분탄을 분사하는 것이다. 오리피스 한계직경(D_{oc})은 일반적으로 식 (9)와 같이 오리피스를 통과하는 속도가 수송관 유속의 1.5배 이하가 되도록 설계하며, 오리피스 통과속도가 수송관 속도의 1.5배 이상일 경우에는 오리피스

수를 증가시켜 압력손실을 증가시킨다[6-8].

$$D_{oc} = \sqrt{\frac{D^2}{1.5}} \quad (9)$$

여기서, D_{oc} 는 오리피스 한계직경, D 는 관 직경이다.

본 연구에서는 실제 국내 A 화력발전소 입력데이터를 이용하여 4개 미분탄 수송관에 대하여 각각 공기와 입자에 의한 총 압력손실을 해석하였다. 최대 압력손실 값을 갖는 수송관을 기준으로 그 보다 작은 압력손실을 갖는 수송관에 최대 압력손실과의 차이만큼 압력손실을 발생시키는 오리피스 직경과 개수를 설계함으로써, 4개 수송관 내 압력손실 양은 모두 동일하며 각 수송관으로부터 분사되는 미분탄은 동일한 유량으로 분사된다. 기존의 오리피스 설계를 위한 압력손실 분석용 CE 프로그램은 입자운동을 고려하지 않고 공기흐름에 의한 압력손실만을 고려하여 해석하고 있다. 본 연구에서 개발된 프로그램의 결과를 기존의 CE 프로그램의 결과와 비교, 분석하여 본 연구의 미분탄 수송관 압력손실 해석 결과의 타당성을 검토하였다.

IV. 결과 및 고찰

Table 1은 미분탄 수송관내 공기-입자 유동장의 총 압력손실 해석을 위한 기본적인 입력 값으로서, 수송관, 공기 및 입자의 물성치를 나타낸다. 실제 화력발전소 미분탄 수송관과 동일한 조건으로 온도 82 °C에서 수송관 직경(Diameter) 0.54m, 공기유속(u_a) 25m/s, 혼합비(m) 0.667, 미분탄 직경(D_c) 74 μ m를 사용하였다. 일반적으로 공기유동장에서 입자속도는 공기속도의 0.6배이므로, 미분탄 입자속도는 15m/s로 분석되었으며, 중력침강속도(u_{mg})는 입자 레이놀즈 수(Re_p)가 53으로 계산되어 $Re_p > 1$, 입자직경 $D_c > 1 \mu$ m이므로 다음 식 (10)에 의해 계산한다[9-11].

$$u_{mg} = \left(\frac{4 \rho_f d_p g}{3 C_D \rho_g} \right)^{0.5} \quad (10)$$

여기서, C_D 는 입자 항력계수, ρ_g 는 기체밀도이며, 식 (11)과 같이 계산된다.[9,10]

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{Re_p^{\frac{2}{3}}}{6} \right) \quad (11)$$

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)= 2.09×10^{-5} Ns/m ² - Temperature= 82°C - Density(ρ)=0.998kg/m ³ - Flow Velocity (V_a)=25 m/s
Coal Particle	- Mixture Ratio(m)=0.667 - Density(ρ_c)=2,200kg/m ³ - Diameter(D _c)=0.000074m(74 μ m) - Velocity(V _c)=15m/s - Settling Velocity(u _{ms})=1.19m/s - Particle Friction Factor(λ_s)=0.0085

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

Pipe No.	Straight Pipe Length (m)	Curved Pipe		
		Number	Angle (°)	R/r
1	50	1	45	4
2	90	2	60, 45	3, 4
3	80	3	30, 40, 75	3, 4, 5
4	150	4	80, 55, 45, 30	6, 4, 3, 2

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

Table 2는 화력발전소 미분탄 수송관 내 공기-입자 유동장의 총 압력손실 해석을 위한 수송관 구조의 입력 데이터로, 4개 수송관은 각각 직선관과 곡선관으로 구성되며 직선관은 총 길이가 입력되고 곡선관은 각도, 개수 및 관 곡률반경과 반지름의 비(R/r)가 입력되어 총 압력손실을 해석할 수 있다.

Table 3은 실제 국내 A 화력발전소의 미분탄 수송관에서 압력손실 해석을 위한 수송관 구조의 입력 데이터로, 미분탄 분쇄기(Mill) A, B, C는 각각 4개의 수송관과 연결되어 미분탄 수송관 시스템을 이루며, 미분탄 수송관은 직선관과 곡선관으로 구성된다. 직선관은 총 길이가 입력되고 곡선관의 경우

Table 3. Input data for the pressure drop analysis in the system.

Mill Line No.	Pipe Line No.	Input Data for Pipe	
		Straight Pipe Length(m)	Curved Pipe Angle(°)(Number)
A	A1	20.114	- 90°(2), 45°(2), 25°(1)
	A2	38.444	- 90°(2), 45°(3), 35°(1)
	A3	76.110	- 90°(3), 48°(1), 45°(1), 36°(2)
	A4	46.094	- 90°(2), 62°(1), 35°(1)
B	B1	21.660	- 90°(3), 45°(2)
	B2	43.725	- 90°(3), 40°(1), 35°(1)
	B3	68.100	- 90°(3), 50°(1), 45°(1), 5°(2), 18°(2)
	B4	35.028	- 90°(2), 70°(1), 45°(2), 15°(1)
C	C1	28.468	- 90°(2), 15°(1)
	C2	47.102	- 90°(2), 85°(1), 52°(1)
	C3	52.730	- 90°(2), 48°(1), 22°(1)
	C4	35.914	- 90°(2), 33°(1)

각도와 수를 입력하여 압력손실을 해석한다.

Table 4는 Table 1과 Table 2에서 나타난 수송관 직경(D) 0.54m, 공기유속(u_a) 25m/s, 혼합비(m) 0.667의 입력조건에서 4개 미분탄 수송관의 직선관과 곡선관에 따라 압력손실을 해석한 결과로, 공기흐름에 의한 압력손실 및 입자운동에 의한 압력손실을 계산하여 총 압력손실을 해석하였다. 직선관 길이가 증가할수록, 곡선관 각도와 개수가 증가할수록 공기흐름에 의한 압력손실과 입자운동에 의한 압력손실이 증가하며, 관 내 총 압력손실은 증가하는 것으로 분석하였다. 이는 직선관 길이가 증가할수록 공기흐름 및 입자운동에 기인하여 관내 마찰력에 의한 마찰손실이 증가하여 압력손실이 증가하는 것으로 보였다. 이는 곡선관 각도와 개수가 증가함에 따라 공기 및 입자 마찰력이 증가하고 곡관부에 2차흐름의 소용돌이가 발생하여 동일한 실제길이의 직선관에 비하여 압력손실이 매우 커지기 때문이다. 4번 수송관에서 직선관 길이 150m, 각도가 80°, 55°, 45°, 30°의 4개 곡관부를 가지는 최대 압력손실을 발생시키며, 공기흐름에 의한 압력손실이 1,146.26Pa, 입자운동에 의한 압력손실이 357.54Pa로 총 압력손실은 1,503.80Pa로 해석되었다. 공기흐름에 의한 압력손실(ΔP_a)과 총 압력손실(ΔP_T)의 비인 압력손실 비(α)는 1.31로 계산되며, 공기흐름에 입자가 혼합비(m) 0.667로 혼합될 경우 총 압력손실은 공기 흐름에

Table 4. Analysis results of the pressure drop as a function of pipe type for the air-particle flow in the system.

Pipe No.	Pressure Drop for Air Flow			Pressure Drop for Particles Motion			ΔP_t (Pa)	α
	ΔP_a (Pa)	ΔP_s (Pa)	ΔP_c (Pa)	ΔP_p (Pa)	ΔP_s (Pa)	ΔP_c (Pa)		
1	365.04	336.77	28.27	113.86	105.06	8.80	478.90	1.31
2	673.67	606.20	67.47	210.14	189.12	21.02	883.80	1.31
3	627.08	538.84	88.24	195.59	168.10	27.49	822.67	1.31
4	1,146.26	1,010.32	135.94	357.54	315.18	42.36	1,503.80	1.31

Note:

1. ΔP_a : pressure drop for air flow
2. ΔP_p : pressure drop for particles motion
3. ΔP_s : pressure drop for the straight pipe
4. ΔP_c : pressure drop for the curved pipe
5. ΔP_t : total pressure drop for the air-particle flow
6. α : relative pressure drop(= $\Delta P_t/\Delta P_a$)

Table 5. Analysis of the developed program for orifice design in the system.

Mill No.	Pipe Line No.	Results by Previous Program (CE)		Measured Mass Flow			Results by Developed Program	
		Orifice I.D. (cm)	Orifice No.	Coal Flow (kg/h)	Air Flow (kg/h)	Total Flow (kg/h)	Orifice I.D. (cm)	Orifice No.
A	A1	42.86	2	8,170	14,012	22,182	44.13	2
	A2	44.77	2	7,790	13,813	21,603	46.64	2
	A3	-	-	7,900	16,425	24,325	-	-
	A4	45.09	2	9,950	14,737	24,687	45.04	2
B	B1	44.13	2	7,510	13,712	21,222	43.33	2
	B2	43.18	1	6,740	14,127	20,867	45.02	2
	B3	-	-	7,030	13,774	20,804	-	-
	B4	45.40	2	8,680	13,883	22,563	45.11	2
C	C1	43.82	1	9,000	14,596	23,596	45.10	1
	C2	51.44	1	8,450	14,184	22,634	52.87	1
	C3	-	-	9,750	14,579	24,329	-	-
	C4	45.40	1	6,180	13,866	20,046	46.41	1

Note:

1. CE: Previous Program for orifice analysis of Combustion Engineering Com.
2. I.D.: Inside Diameter

의한 압력손실보다 31% 증가하는 것으로 분석하였다.

Table 5는 Table 3의 구조를 갖는 미분탄 수송관에 대하여 압력손실 해석을 통한 최적 오리피스 설계 결과를 분석한 것으로, 기존 오리피스 설계 프로그램인 CE 프로그램 결과와 본 연구에서 개발된 오리피스 설계 프로그램 결과를 비교하여 개발 프로그램의 타당성을 검증하였다. 미분탄 분쇄기(Mill) A, B, C는 각각 4개 수송관과 연결되어 있으며, 최적 오리피스 설계결과 분석은 각각 수송관에 대하여 오리피스 직경과 개수를 계산하고 각각의 수송관에 설치한 후 수송관 출구부에서 측정되는 유량값을 측정하여 수행하였다. 미분탄 분쇄기 A의 수송관 A1, A2, A3, A4 중 최대 압력손실을 갖는 수송관이 A3로서, 기존 CE 프로그램에 의해 식 (9)를 사용하여 A1, A2, A4의 오리피스 직경과 개수를 계산하여 수송관에 설치하였다. A1 수송관에서 직경 42.86cm의 오리피스를 2개 설치한 결과 수송관 출구에서 측정된 총 질량유량은 미분탄 입자유량 8,170kg/h와 공기유량 14,012kg/h의 합인 22,182kg/h이며, 이는 A3의 총 질량유량 24,325kg/h보다 작기 때문에 수송관 A3의 질량유량과 같아지기 위해서는 오리피스 직경을 증가시켜야 하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 오리피스를 설계한 결과, 오리피스 직경이 44.13cm, 개수가 2개로서 CE 프로그램에서 설계된 오리피스 직경보다 증가되었으므로 계산결과는 타당성이 있다고 볼 수 있다. 수송관 A4의 경우 직경 45.09cm의 오리피스를 2개 설치한 결과 수송관 출구에서 측정된 총 질량유량은 미분탄 입자유량 9,950kg/h와 공기유량 14,737kg/h의 합인 24,687kg/h이며, 이는 A3의 총 질량유량 수송관 A3의 질량유량과 같아지기 위해서 오리피스 직경을 감소시켜야 하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 오리피스를 설계한 결과, 오리피스 직경이 45.04cm, 개수가 2개로서 CE 프로그램에서 설계된 오리피스 직경보다 감소되었으므로 계산결과는 타당성이 있다고 생각된다. 동일한 방식으로 미분탄 분쇄기 B와 C에 대하여 오리피스 설계결과를 분석한 결과, 기존 CE 프로그램 계산결과와 비교하여본 연구에서 개발된 프로그램 계산결과와 타당성이 확인되었으며, 이는 기존 CE 프로그램은 입자운동을 고려하지 않고 공기흐름만을 고려하고 입자운동에 의한 압력손실을 고려하지 않았기 때문에 실제 미분탄 수송관 오리피스 설계에 상당한 오차가 발생한 것으로 보였다.

V. 결 론

본 연구는 석탄화력발전소 연소로의 효율 향상을 위하여 공기-입자 유동장의 압력손실 해석을 통한 미분탄 수송장치의 최적 설계에 관한 것으로, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 미분탄 수송관내 공기흐름과 입자운동에 따른 압력손실을 해석하였으며, 총 압력손실은 직선관 길이 및 곡선관 각도가 증가할수록 공기와 입자의 관 마찰력이 증가하기 때문에 증가하는 것으로 분석하였다.

2) 관 길이에 따른 공기-입자 유동장 압력손실 분석결과, 직선관 길이증가에 따라 공기와 입자 마찰력이 증가하여 압력손실은 증가하며, 실제 발전소에서 혼합비(m) 0.667, 입자 마찰계수(λ_s) 0.0085의 조건에서 총 압력손실은 직선관 길이의 8.84배로 해석되어 공기흐름에 의한 압력손실보다 1.31배 증가하는 것으로 분석하였다. 따라서, 본 연구결과 수송관내 공기-입자 유동장에서 각종 입자수송관의 압력손실 해석용 기초자료로 활용이 가능하다고 본다.

3) 석탄 화력발전소 미분탄 수송관의 압력손실 해석을 통하여 관 출구유량이 동일하도록 오리피스 설계를 수행하였으며, 기존 오리피스 설계결과와 비교하여 본 연구에서 개발된 오리피스 설계프로그램 계산결과가 우수함을 검증하였다. 따라서, 개발 프로그램은 공기-입자 유동장 압력손실 해석 및 오리피스 설계에 적용 가능하며 입자 수송관 최적화 설계에 적용이 가능하다고 본다.

참고문헌

- [1] Chari, S. S., "Pressure Drop in Horizontal Dense Phase Conveying of Air-Solid Mixtures", *AICHE Symposium*, 67(116), 77-84, (1967)
- [2] Roco, M. C., *Particulate Two-Phase Flow*, Butterworth-Heinemann, a Division of Reed Publishing (USA) Inc., (1993)
- [3] 송광호 역, *분쇄수송기술*, 도서출판 기술, (1995)
- [4] Dr. Eng., A. O., *Separation of Particles from Air and Gases*, CRC Press, Inc., (1984)
- [5] 이재근, 구재현, 권순홍, "입자수송시스템 내 공기-입자 유동장의 압력손실 특성 해석", *유체기계저널*, 5(1), 20-26, (2002)

- [6] Gerhart, P. M., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 468-486, (1992)
- [7] Benedict, R. P., *Fundamental of Pipe Flow*, John Wiley & Sons, (1980)
- [8] 이세희 역, *분립체의 공기수송장치*, 대신 기술, (1995)
- [9] Mathur, M. P., Rohatgi, N. D., and G. E. Klinzing, *Analysis of Coal Pneumatic System*, DOE/PETC/TR-87/7, DE87 006301, (1987)
- [10] Hinds, W. C., *Aerosol Technology*, John Wiley and Sons, (1982)
- [11] Wen, C. Y. and H. P. Simons, "Flow Characteristics in Horizontal Fluidized Solids Transport", *AIChE Journal*, 5(2), 263-267, (1959)