

## 밀폐된 컨베이어 벨트 내부의 분진 제거를 위한 환기 시스템의 수치해석적 분석

이예승<sup>1)</sup> · 정기진<sup>1)</sup> · 김종민<sup>2)</sup> · 노정훈<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>고등기술연구원

<sup>2)</sup>(주) 마이크로원

(투고 2023년 03월 24일, 수정 2023년 05월 24일, 게재확정 2024년 05월 26일)

## Numerical Analysis of Ventilation System for Dust Removal Inside the Enclosed Conveyor Belt

Yeseung Lee<sup>1)</sup>, Ki Jin Jeong<sup>1)</sup>, Jong Min Kim<sup>2)</sup>, Jung-Hun Noh<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>*Institute for Advanced Engineering*

<sup>2)</sup>*Micro-One LTD*

(Received March 24 2023; Revised May 24 2023; Accepted May 26 2023)

### Abstract

In this study, the ventilation system of the enclosed conveyor belt for coal transportation was evaluated, and the particle removal efficiency according to the ventilation conditions was identified using computational fluid dynamics and particle behavior analysis. The most effective way to remove dust generated inside the closed conveyor belt is to adjust the position of the exhaust port of the duct so that the air is exhausted around the rear of the conveyor belt. And this method seems to work for another narrow and long spaces where air enters in one direction. In addition, when the air flow rate of the each duct was less than 300 CMM, it was efficient to increase the flow rate of the duct located at the rear of the conveyor belt, and when the flow rate of the each duct was higher than 300 CMM, it was efficient to increase the flow rate of the duct located at the front of the conveyor belt.

**Keywords:** coal tripper room, ventilation system, particle removal efficiency

---

\* Corresponding author.

Tel : +82-31-330-7418, Fax : +82-31-330-7117

E-mail : junghunnoh@iae.re.kr

### 1. 서론

미세먼지와 대기오염에 대한 대중의 경각심이 증가함에 따라 정부에서는 미세먼지 관리 종합대책을 수립하여 분진이 많이 발생하는 산업 및 발전 부문에 대하여 적극적인 저감 정책을 시행하고 있다. 특히 석탄 화력 발전소는 석탄의 운송과정에서 발생하는 분진과 연소 가스로부터 생성되는 미세먼지 등 다양한 공정으로부터 대량의 먼지가 발생할 가능성이 있는 시설로서, 국내 초미세먼지 발생의 주요 요인으로도 지적되고 있다 (Park et al., 2017). 그러므로 국내 대기환경의 개선을 위하여 석탄 화력 발전소에 대해서도 효과적인 미세먼지 저감 정책이 추진될 필요성이 있다.

이러한 석탄 화력 발전소의 미세먼지 대책 중에는 야외 저탄장을 옥내 저탄장으로 교체하도록 의무화하여 대기중으로 배출되는 비산먼지를 저감하는 것이 포함되어 있다 (Park et al., 2019). 그러나 저탄장을 옥내화 할 경우에는 석탄의 운송과정에서 비산된 분진이 실내에 지속적으로 축적되어 부유하게 되므로 내부 작업자에게 호흡기 질병 및 분진 폭발의 위험과 (Man et al., 2014) 시야 방해 등의 문제를 유발하는 단점이 있다. 그러므로 옥내 저탄 시설에는 비산된 분진을 제거하여 내부 작업자의 안전을 보호하기 위한 환기 시스템이 반드시 설치되어야 한다.

본 연구에서는 옥내 저탄장의 작업 환경 개선을 위하여 석탄을 각각의 저장고 (silo)로 운반하여 저장하는 시설인 석탄 분배기실 내에서의 비산 입자 거동을 수치 해석을 통해 분석하였다. 석탄 분배기실에서는 주로 석탄을 운반하는 컨베이어 벨트 주변에서 분진이 발생하는데, 기존의 연구 (Lee et al., 2022) 에서는 컨베이어 벨트의 하부가 개방되어 실내 공간으로 분진이 유입되는 상태로 분배기실 전체를 환기하였을 때의 입자 제거 효율을 분석하였다. 그러나 이번 연구에서는 환기 효율의 개선을 위하여 컨베이어 벨트가 덮개로 완전히 밀폐된 상태일 때에 덮개 내부를 환기하는 분진 저감 장치가 적용된 경우를 분석하였으며, 다양한 환기 조건에 의해 덮개 내부에서 발생한 입자가 배출되는 효율을 수치해석을 통하여 파악하였다. 이처럼 컨베이어 벨트가 밀폐된 경우에는 덮개 내부에서 발생한 분진이 실내 공간으로 유출되기 어려우므로 수치 해석 영역은 컨베이어 벨트의 덮개 내부 영역으로 한정되었다.

### 2. 해석 모델

#### 2.1 해석 모델의 형상

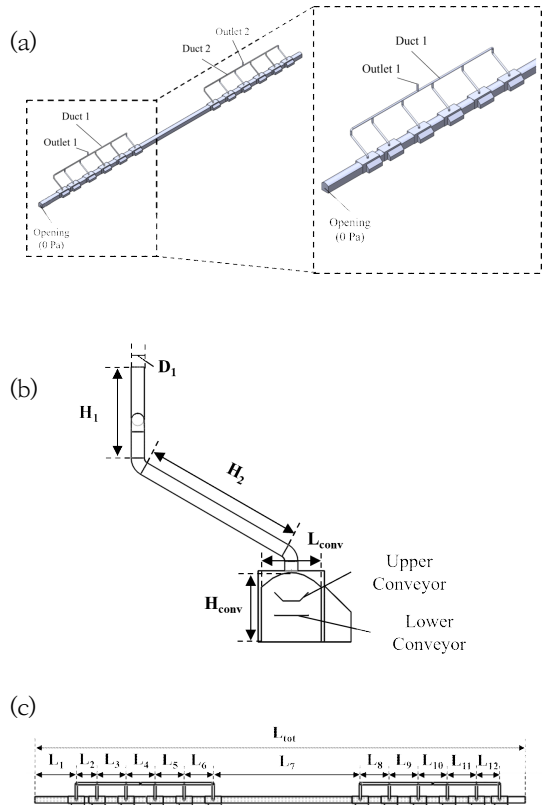


Figure 1 Geometry of the Numerical Model (a) Overview (b) Side View (c) Top View

석탄 분배기실은 컨베이어 벨트를 통하여 운반되어 온 석탄을 각 석탄 저장고로 분배하는 장소이며, 일렬로 배치된 저장고의 상부를 지나가도록 컨베이어 벨트가 설치되어 있다. 또한 각각의 저장고 상부에 석탄이 도달하면 석탄을 아래로 쏟아 내리는 장치를 사용하여 저장고에 석탄을 비축하므로 석탄이 저장조로 쏟아지는 과정에서 상당한 양의 분진이 발생한다.

Table 1 Dimension of the Numerical Model

Symbol	D1	H1	H2	Hconv	Lconv	Ltot
Length [m]	0.25, 0.35, 0.45	2.60	4.69	1.98	1.72	135
Symbol	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Length [m]	11.4	5.70	8.00	8.00	8.00	8.00
Symbol	L7	L8	L9	L10	L11	L12
Length [m]	40.5	8.00	8.00	8.00	6.35	7.07

Table 2 Range of the parameters

Parameters	Duct Diameter [m]	Port Position	Duct 1 Flow Rate [CMM]	Duct 2 Flow Rate [CMM]
Case 1	0.35	Center	300	300
Case 2	0.25	Center	300	300
Case 3	0.45	Center	300	300
Case 4	0.35	Front	300	300
Case 5	0.35	Rear	300	300
Case 6	0.35	Center	150	300
Case 7	0.35	Center	450	300
Case 8	0.35	Center	300	150
Case 9	0.35	Center	300	450

이러한 컨베이어 벨트의 수치 모델 형상은 그림 1에 도시되어 있다. 발생한 분진이 외부로 배출되지 않도록 컨베이어 벨트는 외부 덮개로 밀폐되어 있으며, 석탄을 저장고로 낙하시키기 위한 장치가 일정한 간격으로 배치되어 있는 것을 그림 1의 (a)에서 확인할 수 있다.

분진이 발생하는 각 장치의 상부에는 발생한 먼지를 제거하기 위한 배기 덕트가 부착되어 있다. 각각의 배기 덕트는 분지관의 형태로 상부에 위치한 포트를 통하

여 공기 흡입장치와 연결되어 있으며, 석탄이 운반되어 들어오는 전면 입구에서는 신선한 공기가 유입되고 배기구를 통해서 먼지가 섞인 공기가 배출되면서 덮개 내부의 공기가 순환된다.

그림 1의 (b)에서는 컨베이어 벨트 덮개의 내부 구조를 확인할 수 있다. 유체의 흐름에 영향이 적은 컨베이어 벨트의 지지 프레임은 모두 제외되었으며, 석탄을 운반하는 접시 형태의 상부 벨트와 역방향으로 돌아 나오는 평면 형태의 하부 벨트만이 모델링 되어 있다. Table 1은 그림 1에 표기된 형상 치수를 정리하여 나타낸 것이다.

### 2.2 입자 해석 및 환기 조건

환기 조건에 따른 분진 제거 효율을 분석하기 위하여 Table 2와 같이 4가지의 인자를 사용하여 9개의 Case를 구성하였다. 이 중 2가지의 인자는 덕트의 형상과 관계된 것으로 각각 Duct의 지름과 배기 포트의 위치이며, 나머지 2가지의 인자는 작동 조건과 관계된 것으로 각각 Duct 1과 Duct 2의 흡기 유량이다. 이때 Case 1은 Reference Case로서 모든 인자의 중간 값을 가지며, 다른 Case는 Case 1으로부터 하나의 인자만을 변경함으로써 환기 효율과 해당 인자와의 관련성을 확인하였다. 배기 포트의 위치에 따른 Duct의 형상 변화는 그림 2에 도시되어 있다.

컨베이어 덮개 내부에서 부유하는 분진은 사일로로 석탄을 쏟아 내리는 과정에서 낙하한 석탄이 기존에 저장된 석탄과 충돌하여 발생한다고 가정하였다. 따라서 그림 3과 같이 해석 영역으로의 입자 유입은 스크래퍼 장치의 바닥에서부터 균일하게 이루어진다고 설정하였으며, 따라서 그림 3과 같이 입자의 유입은 스크래퍼 장치의 바닥에서부터 균일하게 이루어진다고 설정하였으며, 비산된 분진의 최초 방향과 속도를 정확히 예측할 수는 없으므로 수치해석에는 분진의 제거가 가장 어려울 것으로 예상되는 임의의 조건을 설정하였다. 이에 따라 수치해석 모델에서의 분진은 거의 정지된 상태인 0.001 m/s의 초기 속도를 가지며, 상부 방향으로 내부에 유입된다. 분진의 입경은 스크래퍼 장치의 상부 구조물에 퇴적된 입자를 채취하여 분석한 뒤 결정하였으며, 측정 결과 약 1 ~ 100 $\mu$ m의 입경 범위를 가지므로 각각 1, 5, 10, 20, 50, 100 $\mu$ m의 입경을 가지는 입자

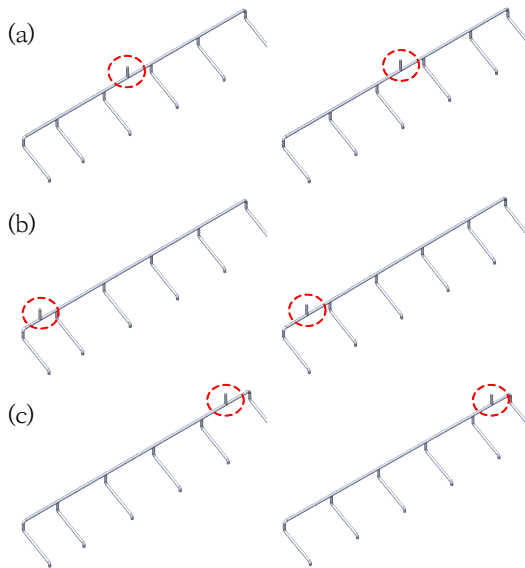


Figure 2 Geometry of the Duct by Port Position (a) Geometry of the Duct for Case 1 (Center Port) (b) Duct for Case 4 (Front Port) (c) Duct for Case 5 (Rear Port)

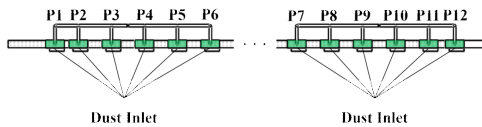


Figure 3 Dust Inlet for Particle Tracking (Top View of the Numerical Domain)

에 대하여 개별적인 거동 분석을 수행하였다. 석탄 분진의 거동은 Discrete Phase Model을 사용하여 분석하였으며, 입자의 크기가 미세하여 공기의 유동에 입자가 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보이기 때문에 유동 해석이 마무리 된 이후 유동장에 투입된 입자를 추적하는 1-way 방법을 사용하여 분석을 진행하였다.

그리고 환기 시스템에 의한 입자의 제거 효율은 입자가 유동장 내에 투입된 이후 30분의 시간이 경과하는 동안 최종적으로 유출된 입자의 수  $N_{out}$ 과 내부 유동 영역에 유입된 총 입자 수  $N_{in}$ 의 비율을 바탕으로 계산하였으며 아래의 식과 같이 정의하였다 (An et al., 2021).

$$\eta_{sim} = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (1)$$

해석 모델의 격자 구성은 Fig. 4와 같으며, 상대적으로 공간이 넓은 컨베이어 내부 영역에는 80 mm 크기의 사면체 격자를 사용하였고, 덕트 내부 영역에는 40 mm 크기의 사면체 격자를 사용하였다. 격자의 수는 Case 별로 상이하나 약 1천만개 내외이며 평균 Quality는 약 0.77 이다.

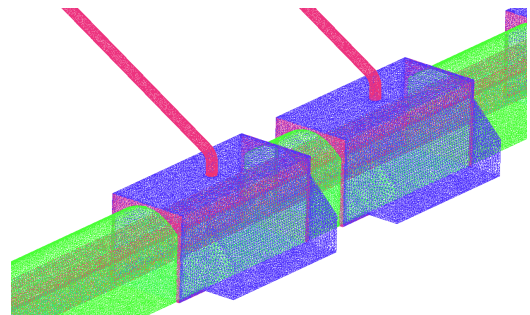


Figure 4 3D Mesh of the Numerical Model

### 2.3 지배방정식 및 경계 조건

유동 해석 및 입자 거동 해석은 상용 프로그램인 ANSYS Fluent v22.2를 통해 수행되었다. 유동 해석의 지배방정식은 움직이는 컨베이어 벨트와 각 분기관 덕트의 공기 흡입으로 인해 해석 모델의 유동이 매우 복잡해질 것임을 고려하여 복잡한 유동을 비교적 잘 묘사하는 것으로 알려진 Shear-Stress Transport 난류 모델을 연속 방정식 및 운동량 방정식과 함께 적용하였다. 또한 배기 포트의 일부분을 제외하면 대부분의 유동 영역에서 공기의 유속이 압축성을 가지는 유속 범위보다 낮으므로 비압축성 유체로 공기를 가정하였으며, 물성은 Table 3와 같이 지정하였다. 또한 입자의 무게에 의한 영향을 고려하기 위하여 유동 해석에 중력 조건을 적용하였다. 사용된 지배방정식은 아래와 같다.

**Mass conservation equation**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (2)$$

**Momentum conservation equation**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = & -\nabla p + \rho \vec{g} + \\ \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + S_u \end{aligned} \quad (3)$$

**Transport equation for k (SST k- $\omega$  model)**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \\ + G_k - Y_k + S_k + G_b \end{aligned} \quad (4)$$

**Transport equation for  $\omega$  (SST k- $\omega$  model)**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \\ + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b} \end{aligned} \quad (5)$$

입자 거동 해석을 위한 Discrete Phase Model에서는 Drag Law에 Stokes-Cunningham (Ounis et al., 1991). 모델을 사용하여 입자의 크기에 따른 항력을 모사하였으며, 공기의 물성을 바탕으로 Correction Factor를 계산하여 아래의 식과 같이 적용하였다 (Davies et al., 1945).

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d} \cdot (A_1 + A_2 \cdot e^{-\frac{A_3 \cdot d}{\lambda}}) \quad (6)$$

여기서  $C$ 는 비연속체의 항력을 slip factor로 조정하는 Slip Correction Factor이며,  $\lambda$ 와  $d$ 는 각각 Mean Free Path와 Particle Diameter이고,  $A_1 \sim A_3$ 는 유체의 물성과 관련된 실험값이다.

해석 모델의 경계 조건은 Table 4와 같으며, Duct 1과 Duct 2 각각의 배기구에 Mass Flow Outlet 조건을 지정하여 Case 별로 Table 2의 조건에 해당되는 유량이 각각 배기 되도록 설정하였다. 또한 컨베이어 벨트를 통해 석탄이 유입되는 방면에서는 Pressure Inlet의 0 Pa 조건을 지정하여 개방된 상태를 모사하였으며, 석탄을 운반하는 컨베이어 벨트는 상부면과 하부면이 서로 반대 방향으로 3.17 m/s의 속도로 움직이도록 Moving Wall 조건을 지정하였다.

입자 해석 경계 조건의 경우 공기가 유입되는 Inlet 과 공기가 배출되는 배기 포트는 입자가 탈출할 수 있도록 개방되어 있으므로 Escape 조건을 주었으며, 분배기실과 덕트의 벽면에는 모두 Reflect 조건을 주었다. 또한 환기시스템에 의해 컨베이어 벨트 주변에 공기의 유동장이 지속적으로 형성되므로 입자가 유동에 의해 다시 비산될 것을 고려하여 분배기실의 바닥면에 도 Reflect 조건을 지정하였다.

Table 3 Properties of Air

Properties	Value	Unit
Density	1.225	kg/s
Viscosity	1.789	kg/m-s, $\times 10^{-5}$

Table 4 Boundary Conditions

Boundary	Condition	Value	Unit
Opening	Pressure Inlet	Gauge Pressure	0 Pa
Outlet 1	Mass Flow Inlet	-	150, 300, 450 CMM
Outlet 2	Mass Flow Inlet	-	150, 300, 450 CMM
Wall	Stationary Wall	-	-
Conveyor Belt	Moving Wall	-	3.17 m/s

**3. 해석 결과 및 분석**

**3.1 입자의 크기에 따른 컨베이어 벨트의 환기 특성**

그림 5는 Reference Case인 Case 1의 유동 해석 및 입자 거동 해석 결과를 토대로 각각의 입경마다 약 80여개의 입자를 추적하여 경로를 나타낸 것이다. 해당 그림에서는 입경이 1 ~ 20 $\mu$ m인 입자의 경우 환기 시스템에 의한 유동의 영향으로 덕트를 따라 입자가 비교적 균일하게 배출된다는 것이 확인되나, 입경이 50 $\mu$ m인 입자의 경우에는 중력의 영향으로 비산이 어려워 분지관에 흡입되는 양이 많지 않다는 것과, 입경

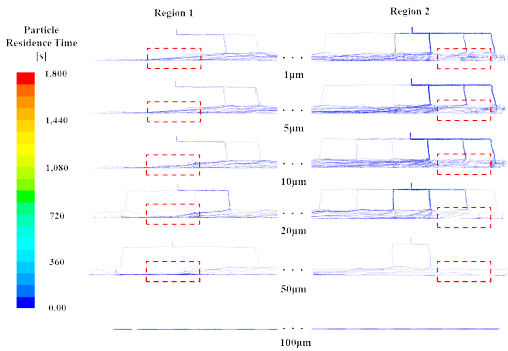


Figure 5 Particle Tracking Results by Particle Size in Case 1

이 100 $\mu\text{m}$ 인 입자의 경우에는 거의 비산조차 되지 못한다는 것이 확인된다. 또한 전반적으로 Duct 1보다는 Duct 2에서 더 많은 입자가 흡입되는 것이 확인되며, 이는 입구에서 불어오는 유동이 입자를 컨베이어의 후단 방향으로 비산시키기 때문이다. 이러한 현상은 그림 5의 붉은색으로 표시된 지점에서 확인할 수 있으며, 입자가 컨베이어 벨트의 길이 방향을 따라 사선의 형태로 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 그림 6과 7은 컨베이어 내부의 공기 유속 및 유선을 나타낸 것으로서 공기가 유입되는 컨베이어의 전단부에서는 공기가 수직 방향의 속도가 거의 없이 수평 방향으로만 이동한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 바닥에서 발생한 입자가 충분히 비산되기 전에 공기 유동에 의해 컨베이어의 후단으로 이동하는 현상이 발생한다.

반면에 분배기실의 후단에서는 각 분지관을 통해 대부분의 공기가 유출되었으므로 유속이 느려지며 와류가 형성되어 입자가 덩트로 흡입될 확률이 높아진다. 그러나 입경이 20  $\mu\text{m}$  이상인 입자들은 유동이 약해지는 컨베이어 벨트의 후단에서 지면에 가라앉는 경향이 나타나므로 컨베이어 벨트의 후단부에서 흡입되는 양이 점차 감소한다.

그림 8은 모든 해석 Case의 입자 제거 효율을 한번에 도시한 것으로서 입경이 20 $\mu\text{m}$  이하라면 입자의 최소 제거 효율이 약 56% 이상으로 높게 나타나지만 입경이 50 $\mu\text{m}$ 인 입자의 경우에는 최대 제거 효율이 8%에도 미치지 못한다는 것이 확인되며, 100 $\mu\text{m}$ 의 입경을 가지는 입자는 전혀 흡입하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 비산되지 않아 환기시스템으로는 제거

하기 어려운 입경 50 $\mu\text{m}$  이상의 입자를 배제하고, 입경 20 $\mu\text{m}$  이하인 입자를 중심으로 환기 조건에 따른 제거 효율의 변화를 입자별로 분석하였다.

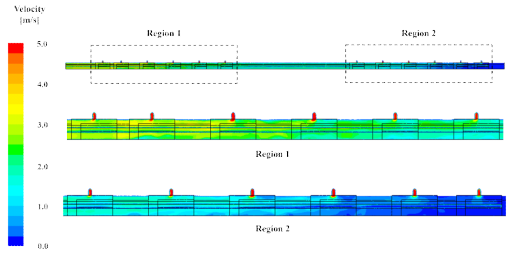


Figure 6 Velocity Distribution of the Center Plane in Case 1

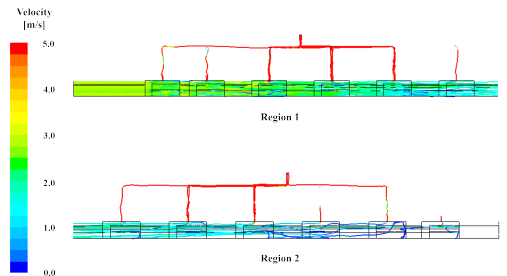


Figure 7 Streamline Distribution in Case 1

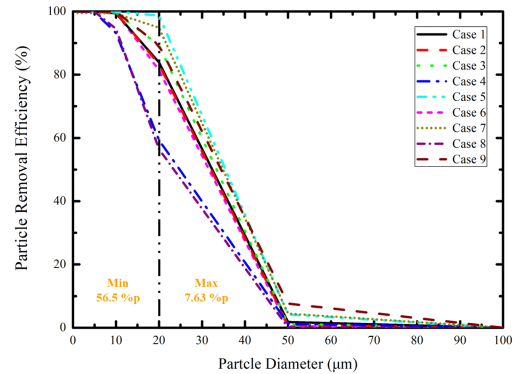


Figure 8 Particle Removal Efficiency by Particle Size in All Cases

### 3.2 덕트의 지름에 의한 컨베이어 벨트의 환기 특성

덕트의 지름이 작으면 덕트로 유입되는 공기의 유속이 빨라지며, 덕트의 지름이 크면 더 넓은 범위의 유동을 흡입할 수 있다. 따라서 입자의 제거 효율에 대한 덕트 지름의 영향을 파악하기 위하여 해석이 수행되었다.

그림 9는 각 분지관에서 흡입되는 공기의 유량을 연속적인 그래프로 표현한 것으로서 P1 ~ P12는 그림 3에 도시된 위치와 같다. 해당 그래프에 따르면 덕트의 지름에 따른 유량 분포의 변화는 크지 않으며, 분지관의 배기 포트가 위치하는 덕트의 중심부에서 가장 많은 공기를 흡입한다는 것이 공통적으로 확인된다.

또한 덕트의 지름에 따른 입자 제거 효율의 변화는 그림 10에서 확인할 수 있으며, 입경  $10\mu\text{m}$  이하인 입자들은 덕트의 지름에 따른 제거 효율의 변화가 거의 나타나지 않으나, 입경이  $10\mu\text{m}$ 를 초과하는 입자의 경우에는 덕트의 지름이  $0.45\text{m}$ 로 증가하였을 때, 다른 덕트에 비하여 약  $5.4\%$  더 많은 입자를 흡입하는 것으로 분석되었다. 따라서 덕트의 지름이  $0.45\text{m}$  이상이면 그림 11과 같이 덕트가 더 넓은 범위의 유동을 흡입함으로써 입자의 제거 효율이 비선형적으로 상승하는 효과가 있는 것으로 보이지만, 그보다 작은 크기의 덕트를 사용하여도 입경이  $10\mu\text{m}$  이하인 입자의 경우 입자 제거율이 100%에 가까우므로 입자 흡입량 증가의 효과를 보기 어렵다고 할 수 있다.

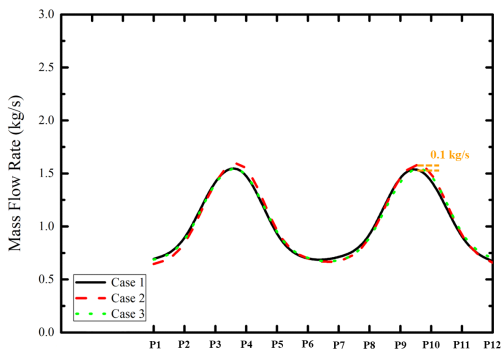


Figure 9 Variation of Flow Distribution with Duct Diameter

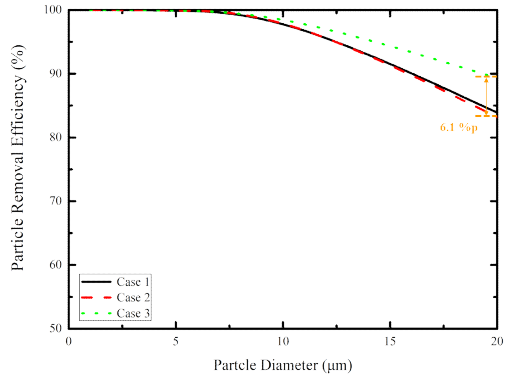


Figure 10 Particle Removal Efficiency by Duct Diameter

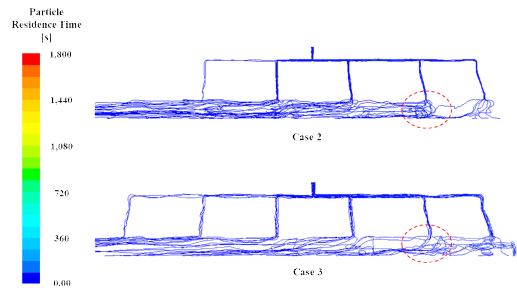


Figure 11 Particle Tracking Results by Duct Diameter

### 3.3 배기 포트의 위치에 의한 컨베이어 벨트의 환기 특성

석탄 분배기실 실내 공간의 환기 조건을 다룬 기존의 연구 (Lee et al., 2022)에서도 석탄 분배기실과 같이 길이 방향으로 길게 뻗어 있는 공간의 경우 흡입 장치를 입구와 최대한 멀게 배치하여야 충분한 공기량이 분배기실의 후단까지 도달하여 입자의 제거 효율이 상승한다는 것을 확인하였다. 또한 그림 7을 통해서도 입구에서 유입되는 유동에 의하여 비산되기 쉬운 가벼운 입자가 컨베이어 벨트의 후단 방향으로 이동한다는 것이 확인되었으므로 밀폐된 컨베이어 벨트에서도 배기 포트의 위치에 의한 영향이 크게 나타날 것으로 예측되었다. 따라서 그림 2와 같이 배기 포트 위치가 변화하였을 때의 입자 제거 효율을 분석하였다.

그림 12는 배기 포트의 위치를 변경하였을 때의 유량 분포를 연속적인 그래프로 나타낸 것이다. 그리고 해당 그래프에서는 배기 포트와 가까운 위의 유량이 크게 상승한다는 것을 모든 Case에서 확인할 수 있으며,

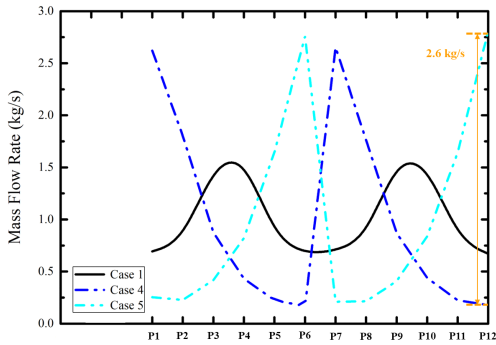


Figure 12 Variation of Flow Distribution with Port Position

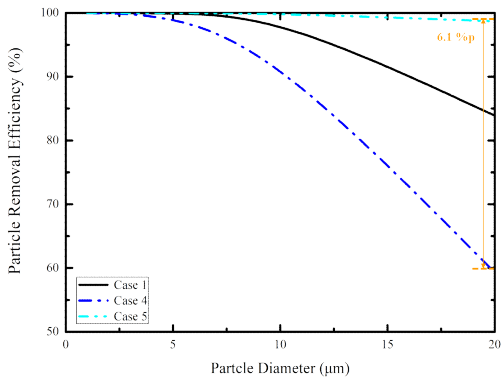


Figure 13 Particle Removal Efficiency by Port Position

P1 ~ P6 까지의 유량이 상대적으로 고르게 분포하는 Case 1과는 달리 Case 4와 Case 5에서는 분지관의 양 끝단인 P1, P7과 P6, P12의 유량 차이가 극명하게 나타나는 것으로 확인되었다.

그림 13은 배기 포트의 위치에 따른 입자 제거 효율 변화를 나타낸 것이며 앞선 덕트 지름에 비하여 Case 별 효율 차이가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 입경이 20 $\mu\text{m}$ 인 입자의 경우 배기 포트가 앞단에 위치한 Case 4와 후단에 위치한 Case 5의 입자 제거 효율 차이가 약 39.4%p 까지 나타나는 것으로 확인되었다. 또한 Case 5의 경우에는 입경 20 $\mu\text{m}$  이하의 모든 입자에 대하여 100%에 가까운 제거 효율을 보인다. 이로 인해 컨베이어 벨트를 밀폐한 경우라도 공기가 최대한 컨베이어 벨트의 후단에서 유입되도록 설계하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있으며, 이는 기존 연구에서 분석된 분배기실 실내 공간 전체 환기시스

템의 특성과도 유사하다. 즉, 좁고 길게 뻗어 있는 공간에 한쪽 측면에서만 공기가 유입될 경우에는 최대한 많은 양의 공기가 후단까지 도달할 수 있도록 배기 포트의 위치를 후단에 설치하는 것이 내부 환기 및 입자 배출에 유리하다는 공통된 특성을 확인할 수 있다.

### 3.4 Duct 1 유량에 의한 컨베이어 벨트의 환기 특성

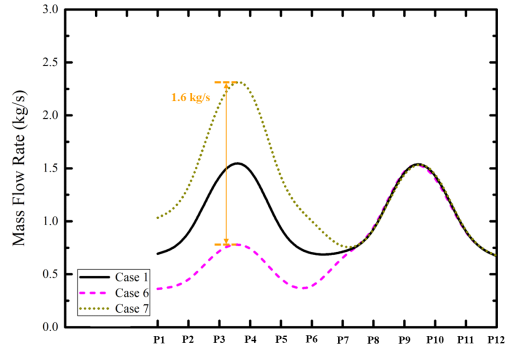


Figure 14 Variation of Flow Distribution with Flow Rate of Duct 1 Position

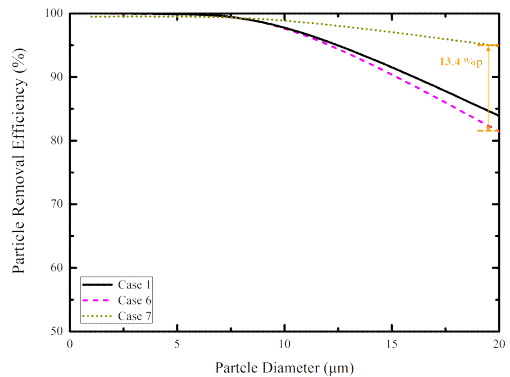


Figure 15 Particle Removal Efficiency by Flow Rate of Duct 1

Duct 1의 유량을 변경하였을 때의 유량 분포와 입자 제거 효율은 각각 그림 14와 그림 15에 도시되어 있다. 전반적으로 유량이 증가할수록 덕트 중심부에서 흡입되는 유량의 비율도 함께 증가한다는 것이 확인되며, 입자 제거 효율의 경향은 Duct의 지름을 변경하였을 경우와 유사하게 나타난다. 즉, Duct 1의 유량이 150 ~ 300 CMM 까지는 제거 효율의 큰 변화가 나타나지 않으나, 유량이 450 CMM으로 증가할 때는 입경 10 $\mu\text{m}$  이상인 입자의 제거 효율이 비선형적으로



증가한다는 것이 확인된다. 이 때, 입경이 20 $\mu$ m인 입자의 경우에는 입자 제거 효율의 최댓값과 최솟값의 차이가 약 13.4%p로 나타나며, 덕트 지름을 변경할 경우에는 해당 값이 약 6.1%p이므로 Duct 1의 유량이 입자 제거 효율에 미치는 영향은 덕트 지름에 비해 더 크다고 할 수 있다.

### 3.5 Duct 2 유량에 의한 컨베이어 벨트의 환기 특성

그림 16은 Duct 2의 유량 변화에 따른 배기 유량의 분포를 나타내며, 그림 14에 도시된 Duct 1의 유량 변화와 거의 대칭의 형태를 보인다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 15에 도시된 입자 제거 효율은 배기 포트의 위치 변화의 경향과 유사하게 입자의 입경이 커질수록 효율의 최댓값과 최솟값의 차이가 큰 쪽으로 증가한다. 다만 Case 1을 중심으로 효율 상승 쪽과 하락 쪽이 유사했던 배기 포트 위치 변화와는 달리 Duct 2의 유량의 경우에는 유량이 증가하였을 때의 제거 효율 상승 쪽보다 유량이 감소하였을 때의 하락 쪽이 더 크다.

그림 15에 도시된 바와 같이 Duct 1의 유량을 150 ~ 450 CMM으로 변경할 경우에 확인되는 입경 20 $\mu$ m 입자의 제거 효율 범위는 81 ~ 95%이며, Duct 2의 경우는 같은 유량 범위에서 56 ~ 89%의 효율을 보인다. 따라서 Duct 1은 Duct 2보다 동일한 유량 범위에서의 효율 변화 폭은 작지만 유량이 450 CMM으로 상승하였을 경우의 최대 제거 효율은 더 높다. 이를 정리하면 300 CMM을 기준으로 Duct 2는 유량이 감소할 때의 하락 폭이 더 크고 Duct 1은 유량이 증가할 때의 상승 폭이 더 크므로 설계 유량의 범위에 따라 효율적으로 덕트의 유량을 배분해야 한다는 것을 알 수 있다.

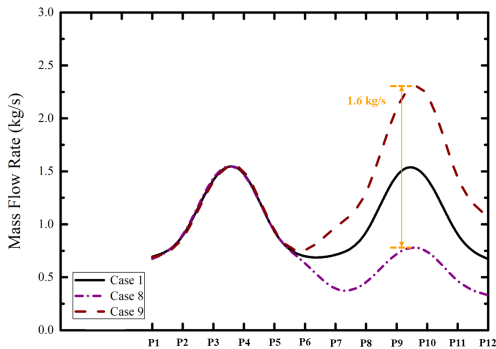


Figure 16 Variation of Flow Distribution with Flow Rate of Duct 2

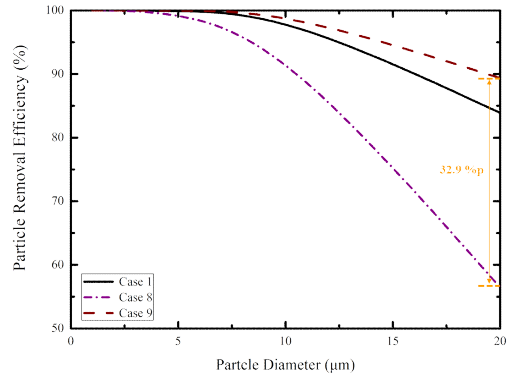


Figure 17 Particle Removal Efficiency by Flow Rate of Duct 2

## 4. 결론

본 연구에서는 석탄 분배기실의 운송과정에서 발생하는 분진 제거 및 실내 환경 유지를 위하여 컨베이어 벨트를 밀폐하였을 때의 내부 환기시스템을 평가하였으며, 유동 해석 및 입자 거동 해석을 활용하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 석탄 분배기실의 밀폐된 컨베이어 벨트에서 발생한 분진을 제거할 때는 배기 포트의 위치를 변경하는 것이 입자 제거 효율을 가장 큰 폭으로 상승시켰다.
2. 즉, 배기 포트의 위치가 후단에 있을수록 입자 제거의 효율이 높으며, 이는 외부에서 유입되는 공기가 컨베이어의 전단에서 발생한 분진을 후단으로 밀어낼 뿐만 아니라, 분배기실의 후단까지 충분한 양의 공기가 도달해야 가장 안쪽에서 발생한 부유 입자를 제거할 수 있기 때문이다.
3. 기존 연구에서 분석된 석탄 분배기실 전체 실내 공간에 대한 환기시스템에서도 이와 유사한 특성이 나타나므로, 공간이 길이 방향으로 길고 한쪽 벽면에서만 공기가 유입되는 형태의 공간에 대한 공통적인 환기 특성일 것으로 추정된다.
4. 석탄 분배기실의 밀폐된 컨베이어 벨트에 설치된 환기시스템 덕트의 경우 300 CMM 이하에서는 Duct 1보다 Duct 2의 유량이 증가하는 것이 입경 20  $\mu$ m 이하의 입자 제거 효율 개선에 효과가 더 크며, 300

CMM 이상에서는 Duct 1의 유량이 증가하는 것이 효율 개선에 더 효과적이다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20217410100030).

## Nomenclature

$\rho$	: density
$t$	: time
$u$	: velocity
$P$	: pressure
$\mu$	: viscosity
$S$	: user-defined source terms
$\kappa$	: turbulent kinetic energy
$\Gamma_k$	: effective diffusivity of $\kappa$
$\Gamma_\omega$	: effective diffusivity of $\omega$
$G_b$	: buoyancy terms
$G_{\omega b}$	: buoyancy terms
$Y_k$	: dissipation of $\kappa$ due to turbulence
$Y_\omega$	: dissipation of $\omega$ due to turbulence

## References

- Park, S. A. and Shin, H. J. (2017). Analysis of the Factors Influencing PM2.5 in Korea: Focusing on Seasonal Factors, Korea Environmental Policy and Administration Society, 25(1), 227-248.
- Park, S. E. (2019). The Risk-transfer Politics of Control-oriented Regulation and Outsourcing: Focusing on the Introduction Process of Coal Shed, ECO, 23(2), 145-178.
- Man, C. K., and Harris, M. L. (2014). Participation of large particles in coal dust explosions, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 27, 49-54.
- Lee, Y. S., Cho, M. C., Kim, J. M., and Noh, J. H. (2022). Numerical Analysis of the Influence of Ventilation System Design Parameters in a Coal Tripper Room, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 21(11), 47-54.
- An, I. H., Lee, C. H., Lim, J. H., Lee, H. Y., and Yook, S. J. (2021). Development of a miniature cyclone separator operating at low Reynolds numbers as a pre-separator for portable black carbon monitors, Advanced Powder Technology, 32(12), 4779-4787.
- Ounis, H., Ahmadi, G., and McLaughlin, J. B. (1991). Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in the Viscous Sublayer, Journal of Colloid and Interface Science, 143(1), 266-277.
- Davies, C. N. (1945). Definitive equations for the fluid resistance of spheres, Proceedings of the Physical Society, 57(4), 259.