

석탄광산 선탄장에서 비산분진의 국소배기 특성

이승철*, 조우현**, 박영록**, 옥윤용***, 김태혁****
*강원대학교 소방방재학부, **강원대학교 방재전문대학원,
*** (주)티에스엔지니어링, ****한국광해관리공단
e-mail: sclee@kangwon.ac.kr

Local Exhaust Ventilation Characteristics of Coal Dust in Coal Preparation Plant of a Coal Mine

Seung-Chul Lee*, Woo-Hyun Jo**, Young-Rok Park**, Yun-Yong Ok***,
Tae-Hyuk Kim****

*School of Fire and Disaster Prevention, Kangwon University

**The Professional Graduate School of Disaster Prevention Technology,
Kangwon University

TS Engineering co., Ltd, *Mine Reclamation Corp.

요 약

본 연구에서는 석탄광산 선탄장설비와 국소배기시스템의 일부를 모형화하여 포집특성과 유동특성실험을 수행하였으며 동일조건에서 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교·검토하였다. case 5가 46.35%의 가장 높은 포집효율을 보였으며 실험의 3가지 변수 중 고무 커튼의 사용유무가 국소배기시스템의 포집효율에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 case 1, 5, 6에 대해 포집된 입자크기 확인 결과, 포집성능이 우수한 case 5가 입경 $20\mu\text{m}$ 초과 입자들이 약 55%로 가장 많이 포집된 것을 알 수 있었다. 따라서 제어거리는 0.5m 이상이 적절한 것으로 판단된다.

1. 서 론

광산 선광장설비는 광산에서 채굴한 광석을 파쇄, 선별, 이송, 분쇄 과정에 필요한 것이다. 이러한 설비는 실내 작업장에 설치된 경우도 있고 대기에 노출된 상태로 가동되는 경우도 상당하다. 또한 작업 중 발생하는 분진은 작업자의 작업환경, 설비의 노후화, 지역주민의 생활환경에 막대한 피해를 발생하고 있어 먼지날림방지설비의 개발이 시급한 실정이다. 석탄광산 선탄장설비에서 발생하는 분진을 포집하기 위해 캐노피형 후드가 채용된 국소배기시스템이 일반적으로 많이 사용된다.

광산 선광장설비에서 발생하는 분진과 국소배기시스템에 대한 관련규정은 산업안전보건법 노동부고시, 노동부작업환경기준 그리고 광산보안법시행규칙 등을 참조할 수 있지만, 대상 업체가 영세하고 이에 대해 무관심하며 초기에 설치한 국소배기시스템의 유지관리가 제대로 되지 못하고 있다. 또한 선광장설비의 배치와 용량크기에 따라 국소배기시스템이

편이하게 달라지므로 국소배기시스템의 표준화와 관련 기술개발이 시급한 실정이다.

이와 관련된 국내 연구는 일반 산업체 작업공정에서 발생하는 유해가스과 미세분진을 효율적으로 포집하기 위해 환기시스템의 최적화에 대한 내용들이 대부분⁽¹⁻³⁾이며 석탄광산 선탄장설비에서 발생하는 비산분진에 대한 것은 미미하다.

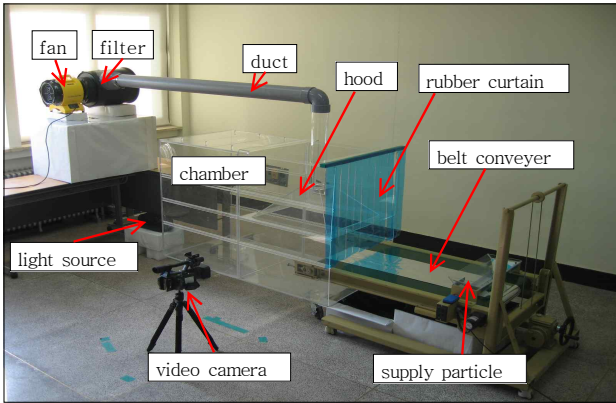
따라서 본 연구에서는 석탄광산 선탄장설비와 국소배기시스템의 일부를 모형화하여 포집특성과 유동특성실험을 수행하였으며 동일조건에서 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교·검토하였다.

2. 모형실험

본 연구에서는 캐노피형 후드가 파쇄된 석탄을 이동시키는 벨트컨베이어 전환점과 여기에서 발생하는 분진을 포집하기 위해 캐노피후드를 채용한 국소배기시스템을 대상으로 한 모형장치를 제작하여 후드 포집성능 실험을 수행하였다.

2.1 실험장치

그림 1에는 후드포집성능 시험을 위한 모형실험장치를 나타내었다. 후드 포집성능 실험 장치는 일반적인 국소배기시스템과 유사하게 구성되며 크게 벨트 컨베이어를 통해 시료를 공급하는 시료 공급부, 비산먼지의 확산을 막아주는 챔버와 비산먼지를 포집하여 여과하여 주는 배기부 그리고 비산먼지의 이동 특성을 촬영하는 측정부로 나눌 수 있다.



[그림 1] 실험장치 사진

치수를 포함한 실험장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 점선 화살표는 시료공급부에 시료가 공급되어 벨트컨베이어를 통해 이송되고 챔버 입구를 지나 아래로 낙하하게 된다. 이때 미세분진은 후드와 덕트를 통해 포집되고 나머지 분진은 챔버 아래로 낙하되어 쌓이게 되는 과정을 표시한 것이다.

그림에서 보이는 바와 같이 후드의 단면은 600mm × 600mm이며 수직 덕트와 수평덕트의 길이는 550mm와 1900mm이다. 또한 벨트컨베이어는 챔버 내부로 284mm 들어와 있고 챔버바닥에서 벨트 컨베이어까지 높이는 250mm이다. 그리고 그림에서 제어거리, L_c 는 챔버바닥에서 후드 입구면까지의 거리를 의미하며, 제어속도는 후드와 송풍기 사이의 덕트내 평균속도를 의미한다.

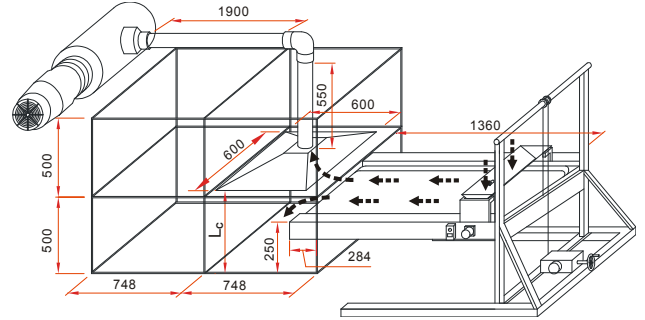
본 실험에서 사용된 송풍기는 축류형 송풍기로서 최대 풍량과 전압은 각각 2400m³/h, 87mmAq이다.

2.2 실험종류 및 방법

본 실험은 제어거리, 제어풍속 그리고 고무커튼의 유·무에 따라 변화시키며 모두 6가지 실험을 수행하였다. 실험은 제어거리(0.3m, 0.5m, 0.7m), 제어풍속(15m/s, 18m/s, 21m/s)을 변화시키며 수행하였으며 상세한 실험종류는 표 1을 참조바란다. 실험에서 사용된 광종은 석회석이며, 비중은 2.2 정도이고 입자크기 0.5~80 μ m의 시료를 공급하였다.

2.3 실험결과

본 실험은 24~27°C의 실험실 온도와 51~55%의 상대습도 환경에서 수행되었다. 그림 3에는 6가지 실험의 결과인 포집효율을 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 고무커튼을 사용하고 제어거리가 짧을수록 그리고 제어속도가 클수록 포집효율은 높아짐을 알 수 있다.



[그림 2] 치수를 포함한 실험장치 개략도

[표 1] 실험 종류

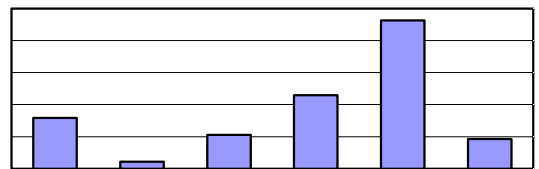
case	rubber curtain	L_c [m]	V_c [m/s]
1	○	0.5	18
2	×		18
3	○		15
4	○	0.3	21
5	○		18
6	○	0.7	18

국소배기시스템의 포집효율, η 는 다음의 식을 사용하였다.

$$\eta[\%] = \frac{M_{co}}{M_{in}} \times 100 \quad (1)$$

여기에서 M_{in} 과 M_{co} 는 각각 실제 투입한 시료량과 포집된 시료량을 의미한다.

상세한 결과 비교를 위해 표 2에 실험종류별 실제 투입시료량, 포집량 그리고 포집효율을 나타내었다. 고무커튼이 없고 제어거리와 제어속도가 각각 0.5m과 18m/s인 case2가 2.15%의 가장 낮은 포집효율을 보였다. 또한 고무커튼이 사용되고 제어거리와 제어속도가 각각 0.3m과 18m/s인 case 5가 46.35%의 가장 높은 포집효율을 보였다. 본 실험의 포집효율 결과들을 살펴보면 실험의 3가지 변수(고무커튼, 제어거리, 제어속도) 중 국소배기시스템의 포집효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 고무 커튼의 사용유무이며, 그 다음이 제어거리, 제어속도 순이다.



[그림 3] 실험 종류별 포집효율

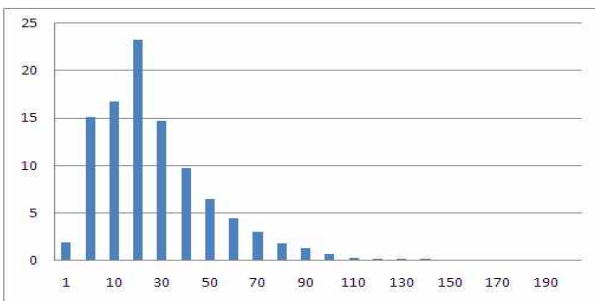
[표 2] 실험 종류별 포집효율

case	M _{in} [g]	M _{co} [g]	η[%]
1	1989.7	316.30	15.90
2	1995.0	42.69	2.15
3	1961.4	207.28	10.57
4	1954.7	448.67	22.95
5	1993.8	924.13	46.35
6	1961.2	166.33	9.27

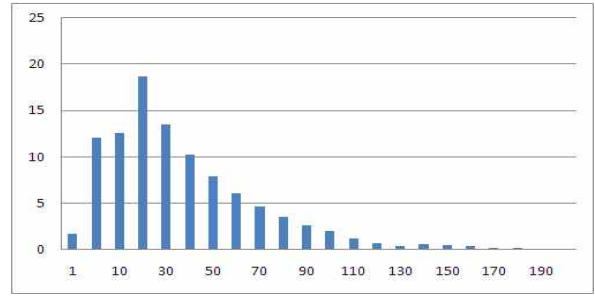
고무커튼의 사용유무는 챔버로 유입되는 공기의 유속을 증가시키기 때문이다.

석탄광산 선탄장에서 국소배기시스템의 포집효율도 중요하지만 챔버에서 발생한 비산분진이 챔버외부로 유출되지 말아야하며, 또한 약 20 μ m를 초과하는 입자가 포집된다면 오히려 전체 작업의 효율을 떨어뜨리게 된다. 따라서 이러한 부분을 확인하기 위하여 제어속도가 18m/s이고 고무커튼이 사용된 case 1, 5, 6에 대해 포집된 입자분포 그림을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 종축은 입자크기(μ m)이고 횡축은 각 입자크기별 차지하는 분율(%)이다. 그림에서 보이는 바와 같이 case 1은 전체적으로 20 μ m 이하의 입자가 약 57% 정도 포집된 결과를 알 수 있으며, case 5는 약 45%, case 6은 약 51% 정도 포집되었다. 또한 분진 입자 약 30 μ m 이하를 기준으로 할 때 case 1은 약 72% 정도 포집된 결과를 알 수 있으며, case 5는 약 59%, case 6은 약 66% 정도 포집되었다.

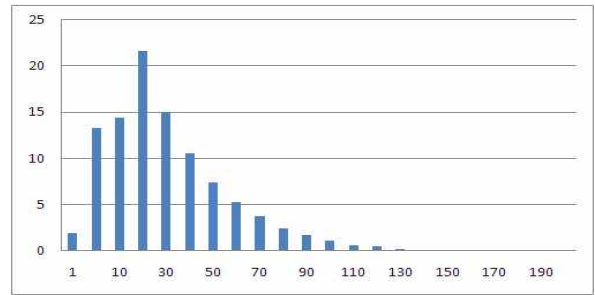
이러한 결과에서 보이는 바와 같이 석탄 선탄장에서 국소배기시스템의 포집효율도 중요하지만 필요 이상의 큰 입자(20 μ m 이상)가 포집된다면 전체적 작업효율을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 석회석 선광장에서 국소배기시스템의 용량 산정 시, 포집 입자의 크기를 기준으로 하여야 한다고 판단된다. case 1, 2, 5에 대한 유동특성 결과는 다음절에서 다루기로 한다.



(a) case 1



(b) case 5



(c) case 6

[그림 4] 각 종류별 입자분포

3. 수치해석

3.1 대상모델

본 연구에서는 앞서 설명한 실험에서 고무커튼이 사용되고 제어속도가 18m/s인 case 1, 5, 6에 대해 전산유체역학 기법을 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 본 수치해석은 3차원, 정상상태 공기유동만을 해석하였다.

3.2 지배방정식 및 경계조건

모형실험장치의 유동특성을 기술하는 정상상태의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식 그리고 난류운동에너지소산율방정식이다. 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였으며, 각 방정식에 대한 수식적 표현은 지면관계상 생략하였다.

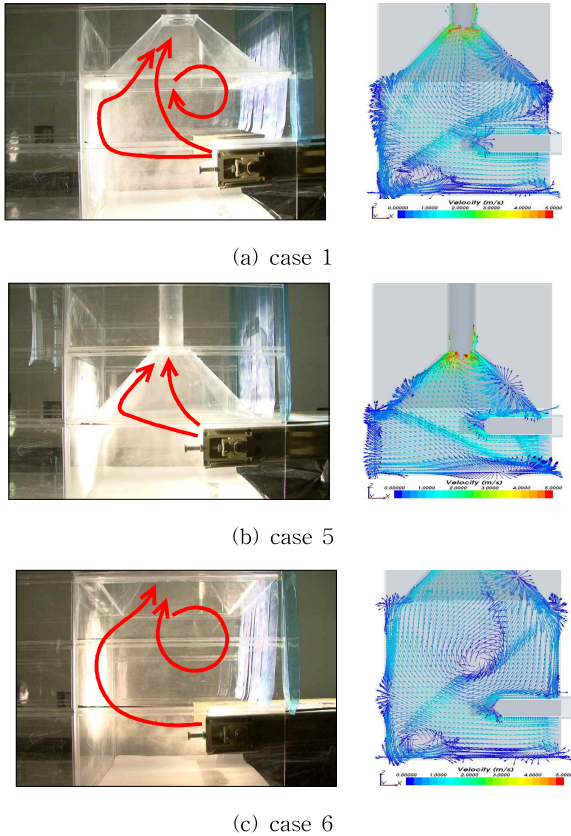
본 수치해석에서 사용된 경계조건은 바닥과 천정은 점착조건(no-slip condition)이 사용되었으며, 모형실험장치를 둘러싼 나머지 영역은 대기압조건이 사용되었다. 또한 y-z 단면의 덕트 출구부에서는 모형실험에서 측정된 다음과 같은 균일 속도조건을 부여하였다.

$$u = -18.0 \text{ m/s at case 1, 5, 6} \quad (2)$$

3.3 수치해석 방법

본 연구에서는 모형실험장치에서의 유동특성을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+⁽⁴⁾를 사용하였다. 대류항을 계산하기 위해서 2차 상류차분

법(upwind differencing scheme)을 사용하였고, 속도장을 얻기 위하여 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다. 수렴판정 조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 cell에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하일 때, 에너지방정식에서의 유수의 합이 10^{-5} 일 때로 정하였다.



[그림 5] 분진 이동경로와 수치해석 속도벡터

3.4 결과 및 고찰

그림 5에는 실험에서 얻어진 case 1, 5, 6에 대한 분진입자의 유적선과 수치해석의 속도벡터 결과를 나타내었다. 제어거리가 0.7m인 case 6의 경우, 벨트 컨베이어 아래로 유입된 공기가 분진과 함께 챔버 좌측으로 상승하여 후드 중앙부로 포집되어 배출되며 또한 챔버 중상부에 재순환영역이 발생한다. 실험과 수치해석 결과는 전반적으로 일치하나 국소위치에서의 속도 크기나 재순환영역의 크기는 다소 차이가 있다.

제어거리가 0.5m인 case 1의 경우, case 6의 유동특성과 유사한 패턴을 보인다. 하지만 제어거리가 짧아 유적선의 방향이 급격히 변화함을 알 수 있었으며 주유동 우측에 작은 재순환영역이 존재함을 알 수 있다. 실험과 수치해석 결과는 국소적으로는 다소 차이가 있으나 전반적으로 유사한 결과를 보인다.

제어거리가 0.3m인 case 5의 경우, 짧은 제어거리로 인하여 유적선의 방향이 급격히 변화하며, 챔버와 후드의 접한 부분, 후드의 코너부분으로 분진이 부딪치며 후드방향으로 상승하여 배출됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 석탄 광산 선탄장설비와 국소배기시스템의 일부를 모형화하여 제어거리, 제어풍속, 고무커튼의 유·무에 따라 변화시키며 모두 6가지 포집특성실험과 유동특성실험을 수행하였다. 또한 동일조건에서 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. case 5가 46.35%의 가장 높은 포집효율을 보였으며 실험의 3가지 변수 중 고무 커튼의 사용유무가 국소배기시스템의 포집효율에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.
2. case 1, 5, 6에 대해 포집된 입자크기 확인 결과, 포집성능이 우수한 case 5가 입경 $20\mu\text{m}$ 초과 입자들이 약 55% 가장 많이 포집된 것을 알 수 있었다. 따라서 제어거리는 0.5m 이상이 적절한 것으로 판단된다.
3. case 1, 5, 6의 유동특성에 대한 수치해석 결과, 전반적으로 결과가 유사하므로 향후 수치해석을 이용하여 국소배기특성을 해석할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

[1] Seung-Chul Lee, Soo-Chang Kim, Kwang-Chul Noh and Myoung-Ho Park, 2009, "Control of Suspended Dust in Various Ventilation Systems of Cement Packaging Process," Trans. of the KAIS, Vol. 10, No. 3, pp. 463~469.

[2] Young-sun Kim, Yool-Kwon oh, 2008, "A Study on Improvement of Industrial Hood in Ventilation System for Elimination of Harmful Material and Dust," Trans. of The SAREK, Vol. 20, No. 4, pp. 238~244.

[3] Chung Seub Yi, Sung Cheol Jang, Kang Ro Yoon, 2007, "A Numerical Analysis on Improvement of Push-Pull Local Ventilation System," Trans. of the SAREK, pp. 594~599

[4] Computational Dynamics Ltd., 2008, STAR-CCM+ Version 4.02 User Manual, Computational Dynamics Ltd.