KSMER Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers

Vol. 61, No. 1 (2024) pp. 53-60, https://doi.org/10.32390/ksmer.2024.61.1.053

ISSN 2288-0291(print)
ISSN 2288-2790(online)

기술보고

광산내 분진 제거를 위한 와류형 세정식 집진기 개발

박종명[1]* · 김민식[1] · 양상호[2] · 이상열[2]

[1]한국지질자원연구원, [2](주)삼원이앤비

Development of Vortex Scrubbers for Dust Removal in Mines

Jongmyung Park[1]*, Minsik Kim[1], Sang-ho Yang[2] and Sang-yeol Lee[2]

[1]Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

[2]Sawon E&B, 233 Jeongwangcheon-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, Korea

***Corresponding Author.** Jongmyung Park, CARL@kigam.re.kr, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

Received
17 January 2024

Final version Received
21 February 2024

Accepted
27 February 2024

Abstract

To ensure the safety of workers inside mines, it is important to remove dust particles generated within tunnels. Although filter-type dust collectors are commonly used for dust removal, they are likely to experience filter clogging, leading to a reduction in their dust removal efficiency over time. Especially in mines of non-metallic resources, dust tends to combine with moisture within tunnels, resulting in easy clogging of filters and making operation of the dust collector difficult. To address this issue, a mine-specific vortex-type scrubber was developed to eliminate filter clogging and reduce dust, thereby enhancing workplace safety. This technical report introduces the design, analysis, fabrication, and testing involved in the development of mine-specific dust collectors.

Key words : mine worker safety, filter-type dust collector, vortex-type scrubber, filter clogging, dust removal

요 약

광산내 작업자의 안전을 확보하기 위해서는 갱도 내 발생하는 분진의 제거는 중요하다. 분진제거를 위해서 필터형 집진기를 많이 사용하지만, 필터 막힘 현상이 있어, 시간에 따라 분진 제거 효율이 감소한다. 특히 석회석 같은 비금속 광산에서는 분진이 갱도내 습기와 결합하여 필터를 쉽게 막히게 하여 집진기의 운용을 어렵게 한다. 이에 광산용 와류형 세정식 집진기를 개발하여 필터막힘 현상을 없애고 분진을 감소시켜 작업안전을 확보하고자 하였다. 이 기술 보고에서는 광산용 집진기의 개발을 위해 설계, 분석, 제작 및 시험을 소개하였다.

주요어 : 광산작업자 안전, 필터 타입 집진기, 와류형 세정식 집진기, 필터 막힘, 분진 제거

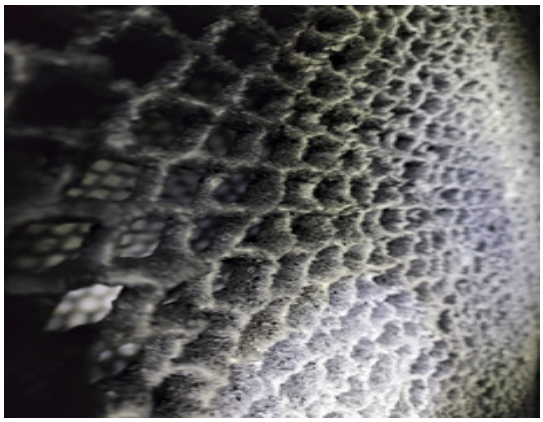
서 론

광산 분진의 요소는 여러 가지 원인이 있지만 발파시 나오는 분진과 차량에서 나오는 매연이 주원인이다(Hartman *et al*., 1997). 집진기는 대기나 공기에 있는 먼지들을 제거하거나 감소시킴으로써 공장 및 광산 작업장에서 공기의 질을 개선하기 위한 목적으로 사용하는 기계장치이다. 집진을 하는 방법은 다음과 같은 방법이 있다(Chun and Kang, 2019). 중력을 이용한 중력집진기, 관성력을 이용한 관성력 집진기, 그리고 원심력을 이용한 원심력 집진기가 있는데 이것은 사이클론이라고도 한다. 또한 전기집진기는 전하의 극성을 이용하여 집진을 하는 장치로 금속 광산등에서 자주 사용하지만, 초기 시설비가 고가인 것이 단점이다. 필터 집진기는 필터를 이용하여 분진을 집진하는 장비이며

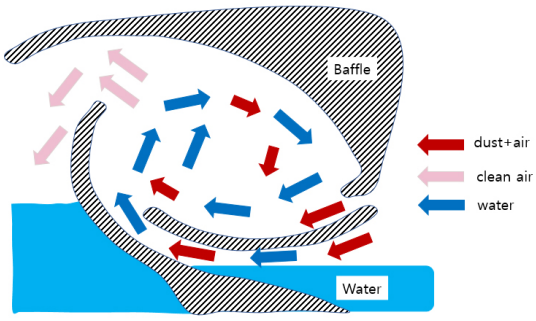
Copyright ⓒ 2024, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers

집진율은 우수하지만, 흡수성 분진이 필터를 막히게 하여 성능이 떨어지는 단점이 있으며 필터 역시 고가여서 유지비가 많이 든다. 세정식 집진기는 분진을 액적에 충돌시켜 제거하는 장치이다. 습윤 분진, 미세분진의 제거가 가능하고 집진효율이 우수하다. 그러나 습식이기 때문에 부식의 대책이 필요하며 압력손실이 커서 상대적으로 동력비가 많이 든다. 광산에서는 주로 필터형 집진기를 사용해왔다. 필터형은 미세먼지를 제거할 수 있는 장점은 있지만, 압력손실도 매우 크고 흡수성 분진의 제거는 어렵다. 또한 분진으로 인한 필터 막힘은 집진기의 성능을 저하시킨다. Fig. 1은 광산내의 습윤성 분진과 와류형 세정식 집진기의 원리를 보여주고 있다.

Fig. 1(a)는 광산내 설치한 송풍기 철망에 1 ~ 1.5 cm의 두께로 들러붙은 습윤성 분진을 보여준다. 광산내에서 발생한 분진은 습기가 많은 공기를 만나 케이크처럼 뭉치게 된다. 이런 물기 많은 고체는 광산내 전자/기계장비에 부착되어 장비사용을 어렵게 만든다. Fig. 1(b)는 와류형 집진의 원리를 보여준다. 그림의 우측에서 들어오는 분진을 포함한 공기는, 노즐을 통과하여 속도가 증가하게 되며 배플의 형상을 따라 와류를 만든다. 형성된 와류는 물과 같이 섞이며, 송풍기로 만들어진 강한 모멘텀은 세탁기의 빨래를 세탁하듯 더러운 공기에서 분진을 분리한다. 분리된 분진은 물속에 존재하게 되며, 분진을 떨어낸 공기는 데미스터(demister : mist eliminator)를 통과하여 공기 중의 수분을 제거하게 되며 깨끗한 공기로 배출되게 된다. 본 보고서에서는 집진기 내부의 배플의 형상에 따라 스퀘어 타입(square type)의 집진기와 서큘러 타입(circular type)의 집진기를 연구하였다.



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Wet dust, (b) principle of a vortex-type wet scrubber.

본 론

와류형 세정식 집진기의 설계/분석/제작

기존의 광산 필터형 집진기는 분진에 의한 필터 막힘 현상으로 성능이 하락하게 되고 필터 교체 시 상당한 양의 분진이 누설되는 단점이 있다. 기존 필터형 집진기가 가지고 있는 단점들을 극복하고자 광산용 와류형 세정식 집진기의 개발 및 도입이 이루어지고 있다(Taylor, 2019; Kim *et al*., 2019; Breitenmoser *et al*., 2021). 와류형 세정식 집진기는 집진기 내의 물을 이용하여 공기 내의 분진을 세정하는 형태로 집진기 내에 많은 와류를 생성할 수 있는 구조가 필요하다. 본 보고서에서는 와류형 세정식 집진기의 개념설계 및 유동해석, 제작 실험을 수행하였다. 특히 와류를 만들기 위하여 노즐 부분에 얇은 직사각형 형태의 배플이 있는 스퀘어 타입의 집진기(square type scrubber)와 곡선 형태의 배플이 있는 서큘러 타입의 집진기(circular type scrubber)를 개발하였다. 스퀘어 타입 집진기의 기존 설계 도면은 전산유체역학을 이용하여 분석하였다. 개선점을 바탕으로 새롭게 설계하여 제작하고 집진기 효율을 측정하였다. 서큘러 타입의 집진기는 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 벽면에서는 작은 와류를 생성하고, 중앙에서는 큰 와류를 생성하기 위하여 최적의 형상을 매개변수 방법(parametric method)을 사용하여 분석하였다.

스퀘어 타입 배플이 있는 집진기 수치해석

스퀘어 타입 배플의 집진기를 분석하였다. 배플이 사각형태인 스퀘어 타입 집진기는 광산 작업장에서 발생하는 분진을 흡입/배출하기 위한 입구, 출구와 집진기 챔버, 와류 생성을 위한 사각형 배플로 구성되어 있다. Fig. 2는 스퀘어 타입 집진기의 기본형상과 모델링을 위한 형상 정리작업을 보여준다.

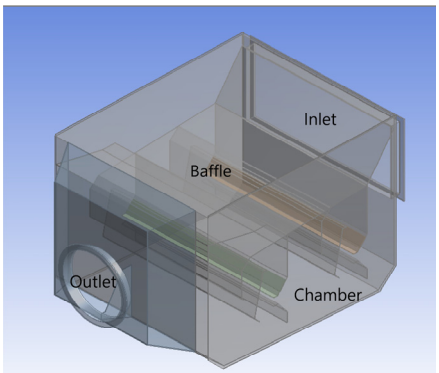
Fig. 2(a)는 집진기의 기본형상으로, 분진을 포함한 공기는 입구(inlet)를 통과하여 집진기로 들어온다. 집진기 안의 배플은 스퀘어 타입으로 만들어졌으며, 노즐은 1단과 2단

으로 구성되어 있다. 1단과 2단을 통과하면서 공기는 와류를 생성하고 물과 섞이게 된다. 물과 섞이면서 분진은 공기에서 물로 이동하게 되며 깨끗한 공기는 출구(outlet)로 빠져나오게 된다. 분진은 물에 남게 되며 남은 공기는 출구로 나가게 된다. Fig. 2(b)는 기본형상에서 격자생성을 위해 수행한 정리작업을 보여준다. 너무 작은 공간들은 격자가 들어가기 어렵다. 형상에서 배플과 챔버 사이의 미세한 공간은 제거하였으며, 두 개의 미세배플은 통합하였다. 또한 너무 뾰족한 형태의 형상은 격자가 만들어지기가 어렵기 때문에 가능한 정리하였다. 미세공간들은 제거해야 하지만, 기본적인 유동에 중요하다고 생각되는 부분은 살려두면서 격자가 들어가도록 하였다. Fig. 3은 생성된 격자와 경계조건을 보여준다.

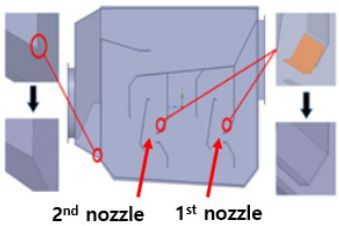
계산 격자의 형상(Fig. 3(a))은 테트라 격자이며, 격자의 수는 약 200 만개를 사용하였다. 입구조건에서 유량은 500 ~ 600 CMM이며 해석 코드로는 ANSYS CFX를 사용하였다. 집진기 내부 유동 해석의 난류 모델로 k-ε 모델을 사용하였다. k-ε 모델은 다른 난류 모델보다 비교적 역사도 길고, 이론도 잘 확립되어 있으며, 공학적인 문제들의 결과 검증이 많이 되어 있다(Versteeg and Malalasekera, 2007). 경계조건(Fig. 3(b))으로는 집진기 입구에는 압력 조건(0 Pa), 출구에는 유량 조건(500 ~ 600 m^3/min) 설정하였고, 챔버와 배플에서는 점착조건의 벽면 경계조건으로 정의하였다. 경계조건은 집진기 내부 유동의 경향성을 확인하고 그에 따른 설계 수정 조건을 확립하기 위하여 설정하였다. 스퀘어 타입 집진기의 유동 해석의 결과는 Fig. 4에 나와 있다.

Fig. 4(a)는 집진기내 속도분포이다. 집진기내 송풍기는 출구쪽에 있으며 출구에서 공기가 가속하게 되는 원인이 된다. 입구쪽에 들어온 공기는 A3의 1단 노즐에서 1차 가속하게 되며 와류를 형성한다. A2의 2단 노즐에서도 공기는 가속하며 와류를 일으킨다. A3와 A2의 노즐을 떠난 공기는 출구쪽으로 이동하게 된다. 이때 A1의 영역에서 공기의 속도는 낮아지며, 필요없는 공간이 생기게 된다. 또한 1단 노즐과 2단 노즐사이에 필요없는 공간이 역시 만들어지게 된다. 이런 필요없는 공간은 유선으로도 확인할 수 있다(Fig. 4(b)). 이렇게 A1의 공간과 A2와 A3의 공간을 줄인 최종 설계안은 Fig. 5에 도시하였다.

최종 설계의 특징은 공기 유로설계를 통하여 불필요한 공간들을 없앴으며, 세정수가 집진기 토출구로 방출되는 것을 방지하기 위해 데미스터를 설치하였다. 출구에 설치될 송풍기의 용량을 선정하기 위해 집진기 내부의 압력손

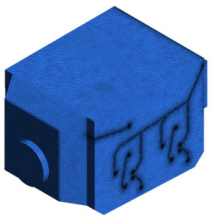


(a)

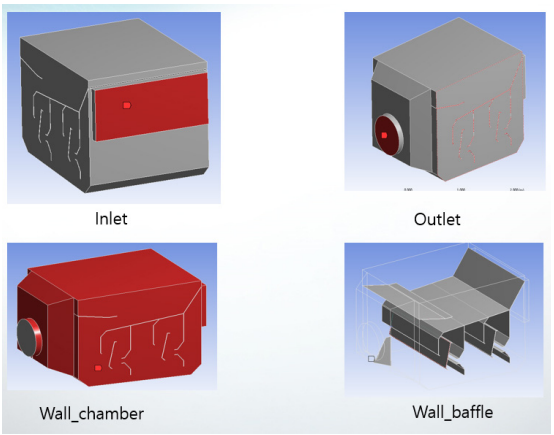


(b)

Fig. 2. (a) Basic geometry, (b) design cleaning of the square-type scrubber.

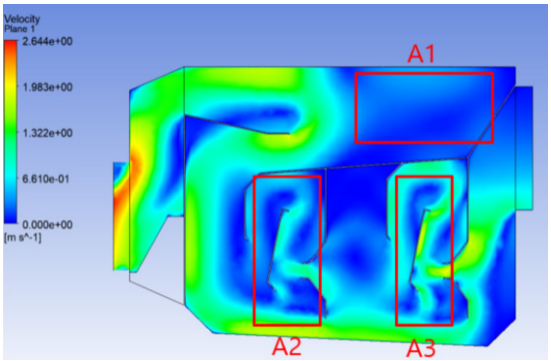


(a) Geometry and grid for calculation

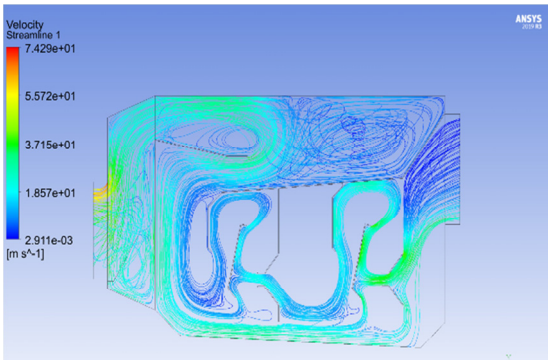


(b) Boundary conditions

Fig. 3. (a) Numerical grids, (b) boundary conditions of the scrubber.



(a) Velocity distribution



(b) Streamline distribution

Fig. 4. (a) Velocity, (b) streamline distribution.

실 값을 계산하였다. 집진기 내부 압력손실 값은 전산유체역학으로 계산시 약 3,000 Pa로 나왔다. 이 압력손실 값을 극복할수 있는 송풍기로 선정하였다. 광산 환경 및 운영조건에 따른 내구성 향상과 분진에 의한 집진기 손상과 마모를 최소화하기 위하여 마모가 가장 많이 발생 되는 집진기 내부 노즐 및 배플의 두께는 6t 이상으로 두껍게하여 설계하였다. 송풍기 및 집진기 케이싱 두께는 4.5t 이상으로 제작하여 광산 갱도내 손상에 대비하였다.

서큘러 타입 배플이 있는 집진기 수치해석

스퀘어 타입 집진기의 배플 형태와는 다른, 배플이 곡선 형태인 서큘러 타입 집진기를 대상으로 최적 설계를 수행하고 전산유체역학을 이용한 설계와 분석을 시행하였다. Fig. 6은 서큘러 타입의 광산 집진기의 전산유체역학 계산을 위한 형상 및 계산 격자이며, 결과로 내부 유선의 분포를 보여준다. 유동 분석을 위한 경계조건은 입구는 대기압 조건(0 Pa)이며, 출구는 유량 값으로 500 ~ 600 m^3/min이다. 작동유체는 물과 공기이며, 유동은 비정상상태로 계산하였으며, 계산 격자의 수는 약 1,000 만개이다.

와류형 세정식 집진기는 흡입된 공기가 배플을 통과하면서 많은 와류가 생성되는 것이 중요하다. 집진기 내 와류를 많이 생성하기 위해, 집진기 기본형상을 변경하고 이에 따른 유동 분석을 시행하였다. 집진기 형상 변경을 네가지 경우로 하여 유동 분석을 시행하였고, Fig. 7은 집진기의 현상 변경에 대한 그림이다. 기본 케이스(case 1)의 형상에서 집

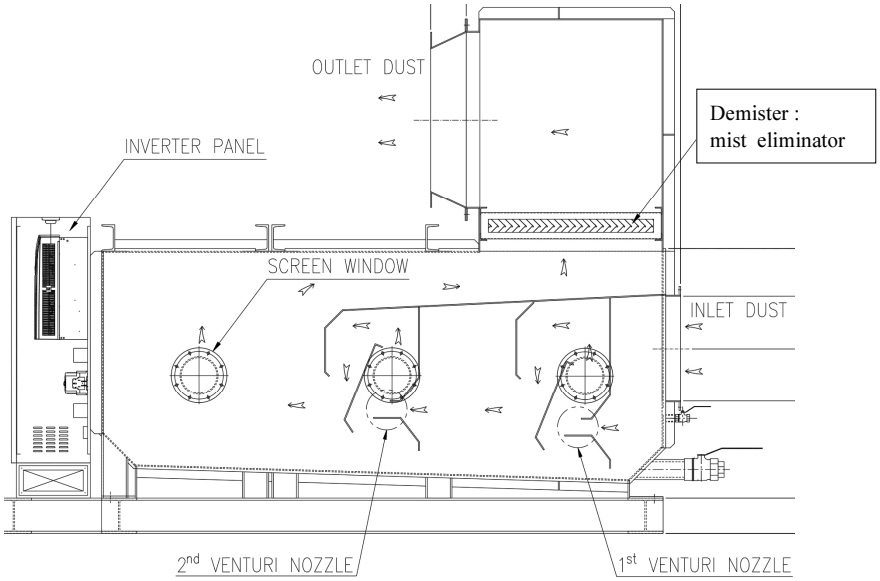


Fig. 5. Final design of a vortex-type wet scrubber with rectangular baffles.

진기 하부에 많은 와류를 생성하기 위해 집진기 하부를 둥글게 바꾼 case 2 형상과 집진기 입구 쪽 유로를 좁게 하면서 덕트로 연결하여 입구의 유속을 증대시킨 case 3 형상, 집진기 벽면과 내부 배플을 추가한 case 4 형상으로 4개 형상에 대한 매개변수 분석을 시행하였다.

Fig. 7에서 파란 부분은 공기를 나타내고, 빨간 부분은 물을 나타낸다. Case 1에 대한 유동 분석 결과로 시간에 따라 물과 공기 양쪽 부분에서 와류가 생기는 것을 확인하였다. 공기와 물의 두 매질 간의 경계에서 와류 발생은 크게 관찰되지 않는다. Case 2 및 case 3의 유동 분석 결과도 마찬가지로 case 1의 결과와 유사한 유동 패턴을 보인다. 물과 공기의 교차 경계면에서는 와류가 생성되나, 전반적으로는 와류의 형성이 미미한 것으로 나타난다. Case 4는 case 1 기본형상에서 입구 유로를 변경하였고, 내부에 배플을 추가한 형상이다. 집진기 내부 중앙에 눈물방울 형태의 내부 배플을 추가하여 많은 와류가 생성되도록 하였으며, 벽면 가까이에 스퀘어 배플을 설치하여 와류의 생성과 출구 쪽으로 비산되는 물의 양을 최소화하였다. 유동 분석 결과를 보면, 집진기 내부 물 수위는 일정하게 유지되면서 눈물방울 형태의 배플 영역에서 물과 공기가 서로 혼합하면서 와류를 생성하는 것을 알 수 있다. 일부 물이 출구 쪽으로 배출되는 현상이 보였지만, 출구 쪽에 데미스터를 설치하여 물의 배출량을 줄일 예정이다. Fig. 8은 서큘러 타입의 와류형 세정식 집진기의 최종형상이다.

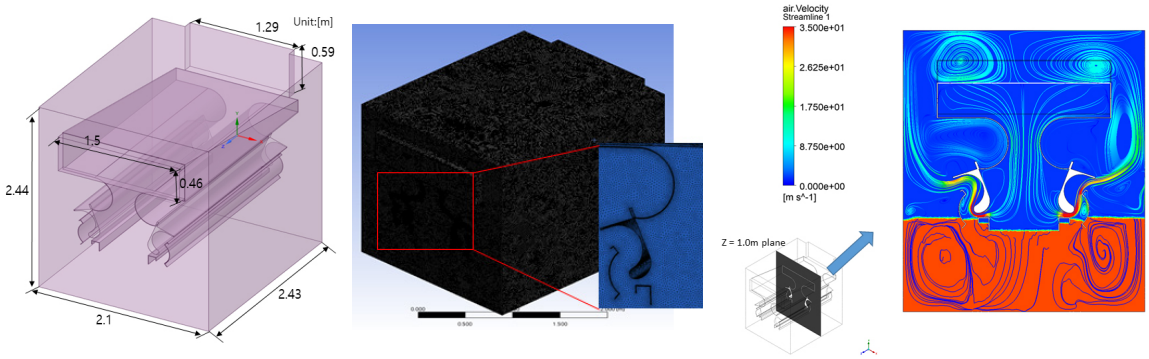


Fig. 6. Geometry, numerical grid, and streamlines result of the circular-type scrubber.

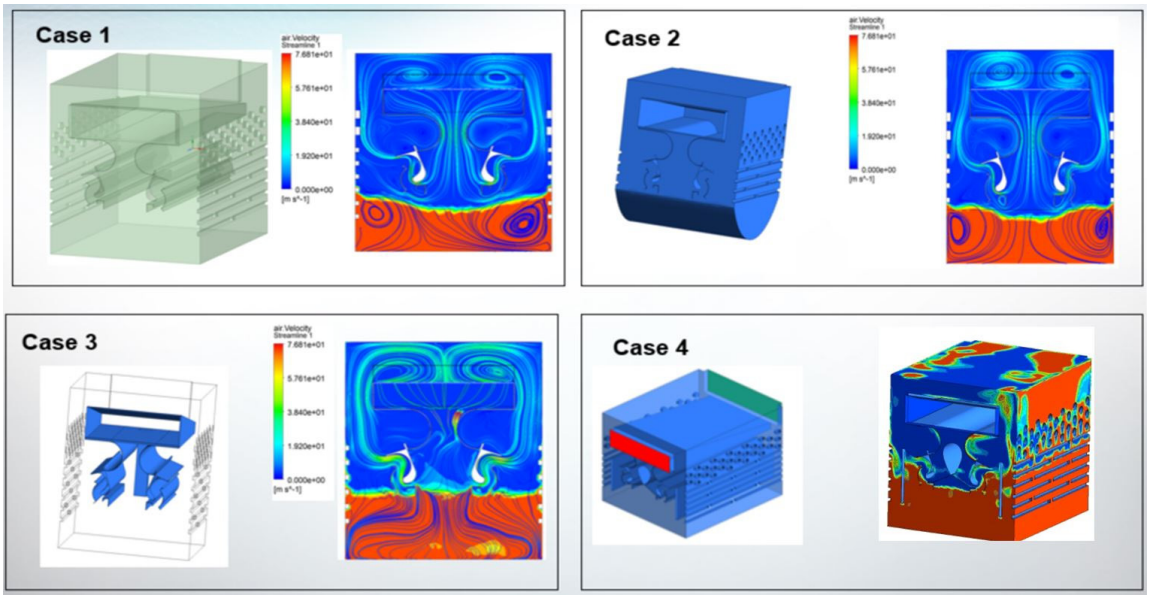


Fig. 7. Results of the parametric study for cases 1, 2, 3, and 4.

벽면의 사각형 립은 작은 와류를 생성하고 중앙의 눈물 방울 형상의 서큘러 배플은 주변의 노즐과 함께 큰 와류를 생성한다. 분진을 포함하고 있는 공기는 물과 잘 섞여야 해서 노즐 주위의 서큘러 배플의 형상이 매우 중요하다. 4가지 형상조건을 통하여 와류를 많이 생성할 수 있는 case 4가 선택되었지만, 노즐 지름과 배플 길이에 대한 최적의 설계 형상은 계속 연구해야 하는 부분이다. 또한 서큘러 타입은 와류를 형성하는 부분은 장점이 있지만, 배플이 곡선이다 보니 제작에는 어려움이 있다. 이 네가지 케이스를 시뮬레이션하여 많은 와류를 생성하는 케이스를 결정하였고 그 케이스의 설계를 최종 설계로 결정하였다.

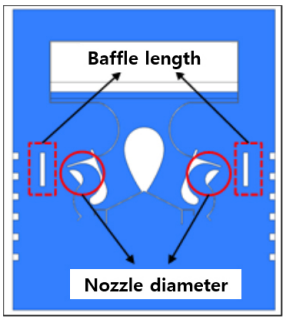


Fig. 8. Final design of a vortex-type wet scrubber with circular baffles.

Fig. 9. A vortex-type wet scrubber with rectangular baffles.

집진기의 제작과 성능검사

집진기의 설계 사양은 풍량 600 m^3/min, 압력 200 mmAq, 회전수 1,780 RPM이며, 15 kW 축류 송풍기 2대를 직렬 연결하여 압력 상승시켰다. 세정하는 과정에서 비산되는 세정수가 집진기 토출구로 방출되는 것을 방지하기 위해 데미스터를 설치하였다. 제작된 집진기는 Fig. 9와 같다.

세정식 집진기의 성능 평가 방법은 두가지가 있다. 광산란식 카운팅 방법과 중량법이 있는데, 광산란식 카운팅 방법은 집진기를 가운데에 두고 상류측/하류측에 각각 설치된 측정구를 통하여 계측기를 사용하여 농도를 측정하고 집진효율을 측정하는 방법이다. 이 방법은 비교적 정확한 효율을 얻을 수 있다는 장점은 있지만, 하류에서 물입자가 포함되면 계측기가 물입자를 카운트할 가능성이 높다. 다른 방법으로는 중량법이 있는데 상류/하류의 측정구에서 일정량의 공기샘플을 필터를 통하게 하여 그 필터에 부착된 분진의 무게를 구해 집진효율을 구하는 방법이다. 이 방법은 광산란식 카운팅 방법보다는 시간이 오래 걸린다는 단점이 있지만, 공기 수분의 존재 여부와 관계없이 효율을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 본 광산용 집진기는 중량법으로 효율을 측정했으며, 그 모식도는 Fig. 10과 같다.

그림에서 초록색 화살표는 공기 유동 방향이며, 분진을 포함하는 더러운 공기는 상류덕트로 들어가 집진기, 데미스터, 송풍기를 순차적으로 통과하여 제진과 제습이 된다. 제진된 공기는 하류덕트를 통하여 밖으로 배출된다. 공기를 샘플링하기 위해, 상류덕트에 구멍을 뚫어 펌프를 이용하여 일정한 시간과 일정한 양의 공기를 수집한다. 하류 덕트도 동일한 공기의 양을 샘플링할 수 있도록 구멍을 뚫는다. 샘플링된 공기는 필터에 통과시키고 필터의 무게를 재서 집진효율을 구하게 된다. Fig. 11은 실제 집진기의 성능 측정 실험을 보여준다.

상하류 덕트에 샘플링 튜브를 삽입하고 등속펌프를 연결

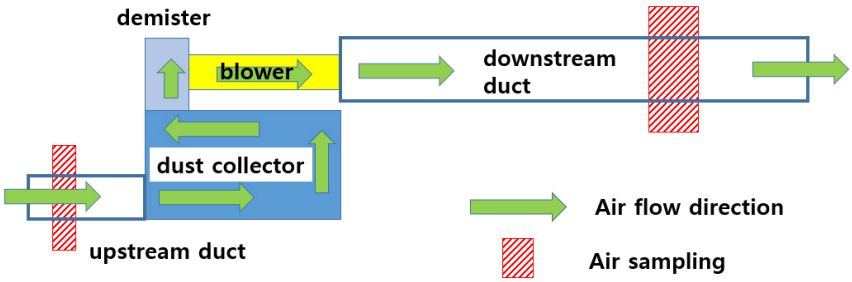


Fig. 10. Schematic diagram of the wet scrubber for performance testing.

Fig. 11. Performance test of the vortex-type wet scrubber.

하면 동일한 공기유량을 배출할 수 있게 하였다. 등속펌프로는 BUCK사의 Libra Plus LP-5 모델을 사용하였다. 유량은 약 3,000 ~ 4,000 cc/min을 펌핑할 수 있도록 지정하였다. 공기는 집진기 전의 상류에서 한번 채취하고 집진기 후의 하류에서 한번 측정한다. 각각의 샘플링 튜브는 필터박스와 연결되어 있고 이 필터박스내의 필터에 묻은 분진은 전자저울을 사용하여 무게를 측정하였다. 전자저울은 Precisa XM60 측정기를 사용하였다. 상류에서 분진 가루(활성탄)를 살포하고, 집진기를 가동시키며 샘플링한 두곳에서의 필터박스의 필터를 정밀저울로 무게를 측정하였다. 집진기 상류에서 나온 필터는 분진을 함유하고 있어 더러운 필터로 나오며, 집진기 하류에서 나온 필터는 분진이 집진기에 의해 제거되어 있어 깨끗한 필터로 나오게 된다. 두 필터의 무게의 차가 집진기에 남은 혹은 제거한 분진의 무게가 된다. 공인기관에서 나와서 공인성능 시험을 시행하였고 집진기의 집진효율(분진 제거 효율) 약 85% 가 나왔다.

본 보고서에는 배플이 있는 집진기를 초기 설계부터 분석하여 수정된 최종 설계치로 제작하고, 성능검사를 실시하였다. 배플은 스퀘어 타입과 서큘러 타입이 있지만, 각각 와류의 형성과 제작 용이성의 문제가 있다. 스퀘어 타입 배플은 제작이 용이하다는 장점이 있지만, 와류의 생성을 위한 배플의 최적 설계가 필요하다. 서큘러 타입의 배플은 와류를 많이 생성할 수 있지만, 제작하는 데 어려움이 있을 수 있다. 이 두가지 타입을 혼합하여 장점은 극대화시키고 단점은 줄여줄 수 있는 최적 설계에 관한 연구가 필요하다.

결 론

광산 갱도의 분진을 제거하여 작업자의 환경 안전을 보장하고자 광산용 세정식 집진기를 개발하였다. 필터식 집진기와는 달리 세정식 집진기는 필터막힘 현상 없이 집진기를 사용할 수 있는 장점이 있다. 다수의 와류를 생성하기 위해서 스퀘어 타입과 서큘러 타입의 세정식 집진기를 제시하였다. 스퀘어 타입의 집진기는 와류를 일으키는 배플이 직선형이기 때문에 제작은 쉽지만, 와류 생성이 적은 편이고, 서큘러 타입의 집진기는 배플이 곡선형이라 와류를 일으키기는 쉽지만, 제작이 어려운 면이 있다. 각 타입의 집진기는 전산유체역학을 통하여 설계와 분석을 하였으며, 이중 스퀘어 타입의 배플을 가진 집진기는 실제 제작을 통해 성능도 측정하였다. 앞으로의 과제로는 높은 집진효율을 위하여 스퀘어 타입과 서큘러 타입의 집진기 합종 설계가 될 것이며, 또한 와류가 생성되는 부분인 노즐 지름과 배플 길이에 대한 최적 설계도 필요하다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “국내 바나듐(V) 등 에너지 저장광물 정밀탐사기술 개발 및 부존량 예측(GP2020-007)” 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

References

Breitenmoser, D., Papadopoulos, P., Lind, T., and Prasser, H., 2021. Droplet size distribution in a full-scale rectangular self-priming Venturi scrubber with liquid film injection, *International Journal of Multiphase Flow*, 142. 103694

Chun, M.Y. and Kang, B.W., 2019. *Air pollutants Control & Removal Engineering* (2nd Ed.), Donghwa Press, Gyeonggi-do, Korea, 374p.

Hartman, H.L., Mutmansky, J.M., Ramani, R.V., and Wang, Y.J., 1997. *Mine Ventilation and Air Conditioning* (3rd Ed.), John Wiley & Sons, USA, 730p.

Kim, K., Naim, H., Lee, K., Lee, J., and Park, Y., 2019. Control of fugitive fine coal particulate emissions from coal handling system at coal-fired power plants using a two-stage vortex scrubber, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), p.282-293.

Taylor, A., 2019. *The Redesined Vortecone: A Maintenance-Free Wet Scrubber Device*, MS Thesis, University of Kentucky, USA, 81p.

Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (2nd Ed.), Prentice Hall, England, 503p.

박 종 명

2006년 미국 유타대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; CARL@kigam.re.kr)

김 민 식

2018년 동아대학교 대학원 에너지자원공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 연구원
(E-mail; mskim27@kigam.re.k)

양 상 호

2019년 한국공학대학교 지식기반기술에너지대학원 기계시스템공학전공 공학박사

현재 ㈜삼원이앤비 기업부설연구소 연구소장/부사장
(E-mail; shyang@sebco.co.kr)

이 상 열

2018년 강원대학교 일반대학원 바이오시스템공학과 공학석사

현재 ㈜삼원이앤비 부설연구소 대리/주임연구원
(E-mail; sang4728@sebco.co.kr)