

## 대기오염방지

&lt;KEITI 중국사무소 차목승 연구원&gt;

## 시멘트 산업의 전기-백필터 집진기 결합기술 개조사례

## ▶ 개요

중국은 시멘트 생산과 소비의 대국으로, 동 산업에서 발생하는 대기오염물질이 심각한 상황이다. 현재 시멘트 공업은 2014년 제정된 <시멘트 산업 대기오염물질 배출표준(水泥工业大气污染物排放标准)>에 따라 오염물질을 제어하고 있으며, 입자상물질 배출표준은  $30\text{mg}/\text{m}^3$ (중점지역  $20\text{mg}/\text{m}^3$ )이다. 하지만 최근 석탄화력발전소의 초저배출 개조가 완료되면서, 시멘트 산업 역시 석탄화력발전소와 같은 입자상물질 배출농도인  $10\text{mg}/\text{m}^3$  미만으로 요구하고 있는 추세이다.

따라서 본 기술동향은 시안시광환보과기유한공사(西安西矿环保科技有限公司, 이하 '시광환보')에서 개발한 '전기-백필터 결합 집진기(电袋复合除尘器)'를 통해 오염물질 배출저감 효과를 알아보고자 한다. '시광환보'는 대기오염물질 전문 처리 기업으로 시장의 변화에 맞춰 시멘트 가마에서 배출하는 입자상물질 배출농도가  $10\text{mg}/\text{m}^3$  미만으로 배출되는 설비를 개발하였다. 이는 입자상물질 배출농도 제어 기술인 전기 집진기(电除尘器及), 백필터 집진기(袋除尘器)를 결합한 기술이며, 동 기술동향은 '전기-백필터 결합 집진기'로 개조한 사례를 소개한 것이다.

## ▶ 전기-백필터 집진기의 공정원리

공업에서 생산되는 입자상물질을 처리하기 위해 주로 전기 집진기와 백필터 집진기 위주로 적용하고 있다. 하지만 산업의 특성상 두 집진기를 동시에 적용하기에는 쉽지 않다. 이에 전기 집진기와 백필터 집진기의 장점을 살려 개발한 기술이 바로 '전기-백필터 결합 집진기'이다.

여기서 '전기-백필터 결합 집진기'이란 하나의 본체 안에 전기장 구역(电场区)과 여과필터 구역(滤袋区)을 각각 설치하여, 유기적으로 정전기와 백필터 집진의 두 가지 구조를 결합한 집진기를 의미한다.

우선 분진을 함유한 기체는 기류분포장치(气流分布装置)를 통해 전기장 구역(1~2개 전기장)으로 유입된다. 이때 전기 집진기를 통해 고농도와 입자가 큰 분진을 약 80~85% 제거하게 된다. 그 후 남아있는 분진이 여과필터 구역으로 유입되면서 백필터 집진기를 통해 안정적으로 저(低)배출하도록 처리된다. 아울러 하전(荷电, electric charge)<sup>1)</sup>을 통해 분진의 포집과정에서 발생하는 저항을 감소시킴으로써 에너지절약이 가능하다.

1) 하전(荷电, electric charge) : 전기가 통하는 성능이 좋지 않은 물질로 반도체 재료나 절연체 박막 등에 대해 전자빔(electron beam)을 통해 그 표면에 일정한 음전하가 축적되도록 하는 것을 의미한다. / 출처 : 바이두 백과 번역(2021.1.25.검색)

분진 수집기(收尘机)는 하전을 통해 여과필터에 퇴적된 분진의 여과 저항을 감소시켜, 분진 제거가 잘 되도록 푸석푸석하게 만든다. 하전된 분진은 저항을 감소시켜 에어로졸(气溶胶, aerosol)<sup>2)</sup> 효과를 강화하여 분진의 농도 분포를 균일하게 한다. 이는 전기 집진기에서 응집되어 작은 알갱이가 큰 알갱이로 변하면서 미립자 수량을 감소시키기 때문에 여과필터의 효율을 높일 수 있다.

## ▶ 프로젝트 현황

동 사례는 쓰촨성 더양시 스팡시(四川省德阳市什邡市)에 위치한 쓰촨리선건축재료집단유한공사(四川利森建材集团有限公司, 이하 ‘쓰촨리선’)에서 개조를 진행하였다. ‘쓰촨리선’은 신형 건식 시멘트 생산라인 2대(생산규모 각각 3,200톤/일 및 5,000톤/일)를 보유하고 있다. 모든 생산라인의 시멘트 가마 헤드부분에 전기 집진기가 설치되어 있지만, 장기간 사용으로 인한 분진 처리 효율이 떨어져 제거 효율을 높이기 위해 개조가 필요한 상황이다.

2019년 4월, ‘쓰촨리선’은 ‘시광환보’의 설비를 적용하여 전기 집진기를 개조하였다. 개조내용은 생산라인 2대에 있는 시멘트 가마 헤드부분의 전기 집진기 전단부는 제1전기장으로 교체하고, 후단부에 있는 전기장을 전부 제거한 후 그 공간에 여과필터를 설치하였다. 이로 인해 기존에 있던 배출시스템, 쉘, 버킷, 연기 유입·배출구 송풍관 등을 그대로 사용 가능하면서, 개조 후 시멘트 가마의 배출구에서 배출되는 입자상물질 배출농도 또한  $10\text{mg}/\text{m}^3$  미만으로 배출하고 있다.

## ▶ 전기-백필터 결합 집진기 개조

기존의 전기 집진기를 ‘전기-백필터 결합 집진기’로 개조하여, 전단부의 전기장 구역은 기존과 동일하게 유지하면서 후단부에 위치한 전기장을 제거한 후, 여과필터를 설치하여 투자규모를 최소화하였다.

일반적으로 입자상물질 배출농도가  $10\text{mg}/\text{m}^3$  미만에 부합하려면 입자상물질 제거 효율이 99.97%에 달해야 한다. 하지만 현재 1전기장의 구조가 고정되어 있기 때문에 제거 효율을 높이기 위해 여과필터 설치 구역의 설계·설치 등을 통해 입자상물질 배출농도 제어가 가능하다.

### 1) 설계

① (여과풍속 선택, 过滤风速选取) 여과필터 구역의 선형(选型)에 중요한 요소로 여과풍속에 따라 배출구 분진 배출, 미세분진 포착 효율, 여과필터 저항, 설비의 사용수명, 설비 저항 등이 영향을 미치게 된다.

특히 여과풍속 조절을 통해 가공한 원료의 분진은 알갱이가 단단하고 굵으며, 입자  $10\mu\text{m}$  미만 15%,  $45\mu\text{m}$  미만 50% 정도를 보이기 때문에 분진의 성질은 크게 변하지 않는 것이 특징이다. 따라서 시멘트 가마 헤드에 설치된 전기 집진기 전단부의 1전기장은 굵은 알갱이 형태의 분진을 수집할 수 있다.

후단부에 있는 여과필터 구역에서 풍속이 낮으면, 압력손실 감소, 분진제거 생명주기 연장, 미세분진 포착효율 향상되어 배출구에서 배출되는 배출농도가 작기 때문에 여과필터의 수명이 길다. 하지만 필터링의 면적이 커져 경제적 비용이 증가하는 단점이 있다.

반대로, 여과풍속이 높아지면, 여과면적과 투자·운영비용이 적은 장점이 있지만, 집진기의 운영압력 손실이 크고, 전력 소비량이 많기 때문에 여과필터가 파손되어 필터의 사용수명이 짧아지게 되는 단점이 있다. 그렇기 때문에 여과풍속을 선택할 때에는 경제성과 분진 포착 효율 요구사항, 효율성, 필터 저항·사용수명 주기 등 여러 가지 요소를 고려해야 한다.

따라서 ‘쓰촨리선’은 여과필터의 풍속, 통기량(透氣量, amount of air current)<sup>3)</sup>, 압력손실 3가지 부분을 고려하여, 0.9m/m<sup>3</sup> 이하의 여과풍속을 선택하였다.(일반적인 백필터 집진기의 여과 풍속은 1m/m<sup>3</sup> 이하이다.)

## ② (균일한 기류분포 기술, 气流均布技术) 균일한 기류 분포가 여과필터의 성능에 영향을 미친다.

만약 기류가 불균일하게 분포된다면, 기체의 유량이 적은 여과필터나 여과풍속이 낮은 경우에서 분진제거가 용이하지만, 반대로 유량이 많은 여과필터의 경우, 기류의 고속 충돌로 인해 여과필터실 내 기류가 변하면서 와류(渦流, vortex)<sup>4)</sup>가 발생하여 여과필터가 파손될 수 있는 단점이 있다.

하지만 각 여과필터실의 기류가 균일하게 분포되면, 다음과 같은 장점이 있다.

- 기류의 속도를 조절할 수 있으며, 분진을 함유한 기류를 피할 수 있어, 직접적으로 여과 필터의 청소가 가능하다. 또한 여과필터의 흔들림과 충돌을 방지하여 여과필터의 사용 수명을 보장한다.
- 집진기 내 분진을 함유한 기류의 흐름을 변화하여 균일하게 상승시키고, CAN(控制器局域网络, Controller Area Network)<sup>5)</sup> 버스(bus, 컴퓨터의 정보 전송 회로) 속도를 제어할 수 있어, 분진 침전이 용이하다.
- 집진기의 다양한 구역에 걸쳐 여과필터의 부하가 균일하다.
- 집진기의 구조에 대한 저항을 감소시킨다.

즉, 집진기 내 균일한 기류 분포는 분진제거 효율 역시 높고, 설비운영에 대한 저항력이 낮기 때문에 여과필터의 사용수명을 보장할 수 있다.

이와 반대로 불균일한 기류분포 문제는 컴퓨터 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 ‘CFD’)<sup>6)</sup> 기술을 이용하여 해결할 수 있다.

2) 에어로졸(气溶胶, aerosol) : 대기 중에 부유하는 고체 또는 액체의 미립자이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)

3) 통기량(透氣量, amount of air current) : 포기 시설에 필요한 공기를 불어 넣는 산기 장치를 이용하여 상온에서 건조한 상태로 공급하는 공기의 양을 의미한다. / 출처 : 네이버 국어사전 발췌(2021.1.25.검색)

4) 와류(渦流, vortex) : 유체의 회전운동에 의하여 주류와 반대방향으로 소용돌이치는 흐름. 강하게 회전하면서 흐르는 유체의 형태를 소용돌이 혹은 와류라 부른다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)

5) CAN(控制器局域网络, Controller Area Network) : 차량 내에서 호스트 컴퓨터 없이 마이크로 컨트롤러나 장치들이 서로 통신하기 위해 설계된 표준 통신 규격이다. CAN 통신은 메시지 기반 프로토콜이며 최근에는 차량뿐만 아니라 산업용 자동화 기기나 의료용 장비에서도 종종 사용되고 있다. Controller Area Network (CAN)은 각 제어기들 간의 통신을 위해 주로 사용되는 non-host 버스 방식의 메시지 기반 네트워크 프로토콜이다. / 출처 : 위키백과 발췌(2021.1.25.검색)

6) 컴퓨터 유체 역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) : 유체역학 문제를 수치적으로 푸는 것에 대한 학문을 말한다. 기존의 풍동실험 등을 컴퓨터로 대신하는 것으로 사용 분야는 항공, 자동차, 토목, 플랜트 등 유체가 사용되는 모든 부분에 적용할 수 있다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)

‘CFD’ 기류 시뮬레이션을 통해 각 여과필터 구역으로 유입되는 기류의 편차를 5% 미만으로 설정하면(일반적으로 백필터 집진기의 기류 편차는 20% 미만), 설비의 저항력은 1,000Pa 미만이 되면서 운행저항을 감소시킨다. 따라서 ‘시광환보’의 설비는 다양한 테스트를 통해 ‘CFD’ 기술을 유기적으로 결합하여 기류의 불균일한 문제를 해결하였다.

- ③ (여과필터의 재료선택) 필터의 재료 선택은 집진기의 설계와 사용에 있어 중요한 요소이다. 여과재료 선택은 여과필터가 사용되는 환경(분진을 포함한 기체의 성질, 분진 배출농도, 미세분지 입자 크기, 온도 등)을 우선적으로 고려해야 하지만, 설비의 내부식성(耐腐蝕性), 내온성(耐溫性能) 및 높은 내마모성·여과정밀도 등 역시 중요한 사항이다. 따라서 여과필터의 재료는 직접 집진기의 분진제거 효율과 운행 저하에 영향을 미치게 된다.

일반적으로 시멘트 가마 헤드부분에 적용되는 여과 재료는 대부분 아라미드 섬유(芳酰胺纤维, aramid fiber)<sup>7)</sup> 등으로 코팅된 막을 이용한 재료를 사용한다.

아라미드 섬유는 방향족 섬유질로 내열성이 우수하다. 사용주기는 260°C에서 1,000시간, 200°C에서 20,000시간까지 지속적으로 사용이 가능하며, 강도는 원섬유의 90%를 유지한다. 아울러 난연성이 매우 우수하고, 대부분의 산을 부식시킬 수 있어 안정성이 좋지만 이에 비해 가수분해(水解) 성능은 떨어진다.

특히 배출농도를 10mg/m<sup>3</sup> 이하로 요구할 때는 아라미드 섬유의 여과필터는 반드시 계단 형태로 만들어져야 한다. 즉, 배출저감 요구사항에 부합하기 위해서는 필터의 분진 접촉면(迎尘面)과 스위트 가스(净气, sweet gas)<sup>8)</sup> 접촉면(净气面)의 섬유크기가 다르기 때문에 분진 접촉면에 초미세 섬유를 추가하거나 스위트 가스 접촉면은 두꺼운 섬유를 사용하여 여과 재료의 저항력을 감소시켜야 한다.

분진 접촉면에 첨가된 초미세 섬유는 보통 1.2~1.5dtex<sup>9)</sup>의 미세 아라미드 섬유를 사용한다. 스위트 가스 접촉면은 2.2dtex의 일반 섬유를 사용하여 무게를 580g/m<sup>2</sup>로 늘릴 수 있다.

- ④ (기타사항) 시멘트 가마 헤드부분의 전기 집진기를 백필터 또는 ‘전기-백필터 결합 집진기’로 개조할 때는 보통 집진기 앞쪽에 전용 냉각시설인 그레이트 쿨러(篋冷机, Grate cooler)<sup>10)</sup>를 추가로 설치해야 한다. 이때 그레이트 쿨러가 정상적으로 작동되면, 일반적으로 배기가스의 온도를 200~250°C에서 여열 이용한 후 100°C까지 감소시킨다.

7) 아라미드 섬유(芳酰胺纤维, aramid fiber) : 열에 강하고 튼튼한 방향족 폴리아마이드 섬유이며, 지방족 폴리아마이드는 나일론이라 부른다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)

8) 스위트 가스(净气, sweet gas) : 천연가스 중에 함유되며, 황화합물을 거의 또는 전혀 함유하지 않는 가스. 혹은 석유 정제과정 중에 발생하는 가스에서 황화수소 등 악취와 부식성 성분을 제거한 가스를 의미한다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)

9) dtex : 어떤 물리량을 단위 길이 당 값으로 나타낸 것을 말한다. 흔히 단위 길이 당 질량을 뜻하기도 한다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)

10) 그레이트 쿨러(篋冷机, Grate cooler) : 포틀랜드 시멘트의 클링커 쿨러의 일종. 뜨거운 클링커를 격자 위에 떨어뜨리고, 격자를 진동시켜 수송하면서 아래에서 공기를 보내 냉각한다. 가열된 공기는 2차 공기로서 이용된다. 에어 웬칭 쿨러라 불리는 것은 그레이트 쿨러를 개량하고, 또 급랭성을 잘한 것이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)

만약 그레이트 쿨러가 정상 작동하지 않을 경우, 배기가스 온도는 300~400°C 상승하여 배출된다. 이는 전기 집진기의 경우, 고온을 견딜 수 있지만, 보통 여과필터는 300°C 이상 고온에 약하기 때문에 파손될 수 있다. 그렇기 때문에 백필터 집진기나 ‘전기-백필터 결합 집진기’로 개조 후에는 집진기의 유입구 온도를 조절하는 것이 중요하다.

따라서 현재 동 사례의 시멘트 가마 헤드부분에 온도를 냉각시키는 그레이트 쿨러를 설치하여 공기 냉각과 가습(增濕)을 해야 한다. 이는 전기 집진기를 백필터 집진기나 ‘전기-백필터 결합 집진기’로 개조하면 설비 전체의 저항이 증가하므로, 기존의 송풍기에 대한 압력증가 조절이나 개조가 필요한 상황이다.

## 2) 설비규격

입자상물질 배출농도는 10mg/m<sup>3</sup> 미만이며, 백필터 집진기는 반드시 정밀제조기술(精密製造技術)을 적용해야 한다. 동 사례는 합판에 레이저를 이용한 가공방식으로 두께 6mm, 길이 편차 1% 미만, 중심부 공차(公差, tolerance)<sup>11)</sup> Φ1.5mm, 합판의 구경(孔径) 편차 0~0.3mm이다.

### ▶ 개조효과

‘쓰촨리산’의 시멘트 가마 헤드부분 전기 집진기 개조 후 설비에 적용된 기술 매개변수는 다음과 같다.

표 1. 집진기 개조를 위한 기술 매개변수

구분	생산라인		구분	생산라인	
	#1(3,200톤/일)	#2(5,000톤/일)		#1(3,200톤/일)	#2(5,000톤/일)
연기 처리량(m <sup>3</sup> /h)	400,000	600,000	전기장 구역(개)	1	1
유입구 배출농도(mg/m <sup>3</sup> )	≤30,000	≤30,000	여과필터 구역(실)	4	6
배출구 배출농도(mg/m <sup>3</sup> )	≤10	≤10	여과풍속(m/min)	0.86	0.86
처리효율(%)	99.97	99.97	설비저항(Pa)	<1,000	<1,000
여과필터 재료	유리섬유 복막	유리섬유 복막	누풍률(%)	≤2	≤2

자료출처 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

이를 통해 개조 후 입자상물질 배출농도는 #1 생산라인 6.4mg/m<sup>3</sup>, #2 생산라인 3.5mg/m<sup>3</sup>로 모두 초저배출 표준에 부합하는 것을 확인할 수 있다.

### ▶ 시사점

전기 집진기와 백필터 집진기의 장점을 결합한 ‘전기-백필터 집진기’는 초기 투자비용이 적고, 가성비가 뛰어나 기존의 전기 집진기의 효율을 높이는 개조에 적합하다. 특히 설계부터 설치까지 모든 단계에서 제어가 가능하면서 현재 중국 정부의 초저배출 표준에도 부합하고 수 있다. 따라서 향후 시멘트 산업에서 ‘전기-백필터 결합 집진기’는 투자비용 절감효과와 동시에 초저배출 표준에 부합하는 우수한 기술 중 하나가 될 것으로 전망된다.

출처 : 북극성대기망(2021.1.14.발표), <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20210114/1129409.shtml>, 2021.1.26.접속

※ 기술용어 번역·해석이 일부 상이할 수 있으니 반드시 증문본을 확인하시기 바랍니다.

11) 공차(公差, tolerance) : 기계부품 등을 제작할 때 설계상 정해진 치수에 대해 실용상 허용되는 범위의 오차를 가리킨다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.25.검색)



## 중국환경산업 주간기술동향

발행

2021년 1월 26일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승 연구원(cms0522@keiti.re.kr)

공동저자

▷ 윤영근 연구원(ygyin0919@keiti.re.kr)

▷ 김종균 연구원(jaykim@keiti.re.kr)

▷ 임승택 연구원(stlim@keiti.re.kr)

▷ 성소묘 연구원(miao2013@keiti.re.kr)

국민과 함께  
미래를 여는  
글로벌 환경전문기관

중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.

문의 : +86-10-8591-0997~8