

## 대기오염방지

&lt;KEITI 중국사무소 차목승 연구원&gt;

## 시멘트 가마 배기가스 탈질 개조사례

## ▶ 개요

이번 기술동향은 최초 2008년에 적용된 5,000톤/일 규모의 시멘트 완제품 생산라인에 대한 설비 개조사례이다. 동 사례는 SNCR 탈질설비를 추가로 생산라인에 적용한 후 20% 농도의 암모니아수(氨水)를 분사하여 시멘트 가마에서 발생하는 질소산화물을 제거하는 것이 핵심이다. 여기서 SNCR 탈질설비는 시스템 조작이 간단하고, 적은 초기비용, 시멘트 가마에 미치는 영향과 설비의 부지면적이 적다는 장점이 있지만, 반대로 탈질효율이 낮기 때문에 이를 보완하기 위해 암모니아수의 사용량이 많은 것이 단점이다.

2019년 적용 사례에서는 암모니아수 사용수가 총 7,162톤으로 비교적 많은 편이 특징이다. 이와 같이 많은 양의 암모니아수가 시멘트 가마에서 분사되면, 설비 내부의 부식과 보조연료(석탄 등) 소모가 증가하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 2020년 사례에서는 연소과정 중 질소산화물을 제어하는 기술인 ‘다단연소기술(分级燃烧)’, ‘저산소연소기술(低氧燃烧)’을 적용하여, 기존의 암모니아수 사용량을 감소시켜 원가절감 및 탈질처리 효과를 높인 것이 주요 동향 특징이다.

## ▶ 기술개조 현황

시멘트 가마에서 생성되는 질소산화물은 주로 고온(Thermal NOx, 热力型NOx)·연료(Fuel NOx, 燃料型NOx)에 의해 발생하는 것으로 구분된다. ▲고온에 의해 발생하는 질소산화물(Thermal NOx)은 공기 중의 질소를 연소시키기 위해 1,500°C 이상 고온에서 산화되면서 생성되고, ▲연료에 의해 발생하는 질소산화물(Fuel NOx)은 연료가 유기적으로 결합된 질소를 함유하고 있을 때, 질소 성분이 연소과정에서 산화되어 발생하는 것을 의미한다.

고온·연료에 의해 발생하는 질소산화물 모두 연소과정을 통해 발생된다. 일반적으로 질소산화물은 회전식 가마의 고온 구역이 1,500°C 이상이거나 분해로의 표면 온도가 1,000°C 이하인 상태에서 주로 발생하기 때문에 이를 제어하기 위한 기술방식은 ‘연소 전 제어기술(燃烧前控制)’과 ‘연소 과정 중 제어기술(燃烧过程控制)’, ‘연소 후 제어기술(燃烧后控制)’로 분류된다.

우선 ▲‘연소 전 제어기술’은 연료 중의 질소 함량을 조절하는 것이 중점 내용이지만 아직까지는 기술수준이 높지 않기 때문에 지속적으로 연구개발 중이다. ▲‘연소과정 중 제어기술’은 ‘다단연소기술(分级燃烧)’, ‘저산소연소기술(低氧燃烧)’을 주로 적용하고 있으며, ▲‘연소 후 제어기술’의 가장 대표적인 방식이 SCR, SNCR이다.

일반적으로 ‘연소 전·후 제어기술’은 설비 추가가 불가피 하여 투자·운영비용이 증가하지만, 반면에 ‘연소과정 중 제어기술’은 연소를 최적화하는 방식으로 기존 설비의 리모델링을 통해 진행되므로, 운영비용은 크게 증가하지 않는 것이 특징이다.

## ▶ 기술개조 방안

표 1. 기술개조 방안 및 특징

| 구분                 | 개조내용  |
|--------------------|---|
| 시멘트 가마 후미부분 연소기 개조 | · ‘다단연소기술’ 적용하여 분해로의 구조 최적화를 통해 환원구역 형성하고, 석탄가루를 이용하여 산소가 부족한 상황에서 발생한 일산화탄소 등으로 환원된 물질이 회전식 가마에서 질소산화물과 반응하여 탈질 처리 |
| 3차 공기 배관 개조        | · ‘다단연소기술’을 적용하여 분해로의 연결 위치 조정을 통해 산소결핍 구간에서 발생하는 탄소와 먼저 반응하기 때문에 질소산화물이 환원구역에서 체류시간을 단축함으로써 탈질 효과 보장               |
| 시멘트 가마 헤드부분 연소기 개조 | · ‘저산소연소기’로 설비교체 후, 기존의 고풍량·저풍압이 회전식 가마로 유입되면서 열에너지 소모 및 질소산화물 생성량이 증가하는 문제 해결                                      |
| 4차 원료 유입관 개조       | · 분해로에 신규로 원료 유입관 2개, 원료분류 밸브 1개를 연결함. 특히 원료 분류 밸브는 분해로의 온도에 따라 90~950°C로 조절하여 분해로 내부의 표면과 배출구가 고온이 되는 것을 방지함       |

자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

### 1) 시멘트 가마 후미부분 연소기 개조(窑尾燃烧器改造)

‘다단연소기술(staged combustion technology, 分级燃烧)’은 분해로의 구조를 최적화하여, 내부에 환원구역을 형성한다. 이때 석탄가루 등의 연소로 인해 산소가 부족한 상황에서 발생한 일산화탄소(CO), 탄소화합물 등 물질이 회전식 가마 안에서 환원반응을 일으켜 탈질 처리하는 원리이다.

이에 동 사례는 분탄(fine coal, 分煤)<sup>1)</sup>을 이용하여 ‘다단연소기술’ 방식으로 개조를 진행하였다. 개조내용은 연소실 상단에 4대의 탈질 연소기를 대칭적으로 배치하여 일정하게 분포될 수 있도록 하였고, 기존에 있던 시멘트 가마 후미부분의 연소기 2대와 3차 공기(tertiary air, 三次风)<sup>2)</sup> 배관은 그대로 유지하였다.

3차 공기 배관 중 한 배관은 회전식 가마에서 석탄가루와 공기가 연소하면서 발생한 연기 배관으로, 이는 산소함량이 대부분 1~2%로 작기 때문에 연소실 상단에 추가로 4대의 탈질 연소기를 설치하여, 산소부족 문제를 해결하였다. 이로써 충분한 연소로 대량의 일산화탄소와 탄소화합물이 질소산화물과 반응하여 환원시키게 된다.

1) 분탄(fine coal, 分煤) : 탄광에서는 선탄수와 함께 유출하여 사이클론, 침전지 등에서 회수된 0.5 mm 이하 정도의 것을 말한다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.18.검색)  
 2) 3차 공기(tertiary air, 三次风) : 연료의 특성이나 연소 장치에 따라서는 1차 공기, 2차 공기에 더하여 다시 별도로 공기를 추가 공급하는 일이 있는데 이 공기를 말한다. 예를 들면 무연탄과 같이 휘발분이 매우 적어 연소가 힘든 연료에서는 착화의 안정을 꾀하기 위해 1차 공기, 2차 공기를 적게 하고 연소의 과정에서 다시 3차 공기를 공급한다. 또는 화염의 형상 조절을 위해 3차 공기를 공급하는 수도 있다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.19.검색)

## 2) 3차 공기 배관 개조(三次风管改造)

동 기업은 기존 3차 공기 배관과 분해로의 연결 위치는 그대로 유지하고 있다. 분탄으로 개조하기 전 사용했던 2대의 시멘트 가마 후미부분의 연소기는 3차 공기 배관 위쪽 약 300mm지점에 위치하고 있었지만, ‘다단연소기술’을 적용하여 기존 높이에서 상향 조절되었다. 이는 연소실의 석탄가루가 산소결핍 상태에서 생성된 탄소와 산소함량 21% 조건에서 먼저 반응하게 되면서, 질소산화물이 환원구역에서 체류시간을 단축시키기 때문이다.

따라서 동 사례는 탈질효과를 보장하고, 환원구역에서 질소산화물의 체류시간을 증가시키기 위해 3차 공기 배관을 개조하였다. 주요 개조 내용은 3차 공기 배관의 위치 조정이며, 시멘트 가마 끝에 위치한 3차 공기 배관의 연기 유입구를 분해로의 상단 위쪽으로 1,800mm로 향상 조절하였다.

## 3) 시멘트 가마 헤드부분 연소기 개조(窑头燃烧器改造)

‘저산소연소기술(低氧燃烧)’은 석탄가루가 연소하는 과잉공기계수(excess air number, 过剩空气系数)<sup>3)</sup>를 낮춰 연료 주변의 산소 농도를 감소시킨다. 이로 인해 연소 온도가 감소하면서 고온으로 인해 발생하는 질소산화물 생성을 억제할 수 있다.

개조 전, 사용했던 시멘트 가마는 1차 풍량(一次风量) 145.85m<sup>3</sup>/분으로 높고, 1차 풍압(一次风压) 29.4kPa로 낮은 특징이 있다. 이러한 고 1차 풍량·저 1차 풍압은 연소기의 화염을 안정적으로 유지하고 다양한 석탄의 종류에 대한 적응성은 뛰어나지만, 저온 상태의 1차 풍량이 대량으로 회전식 가마로 유입되면 열에너지 소모뿐 아니라 질소산화물 생성량도 증가시키는 단점이 있다.

따라서 동 기업은 석탄소모와 질소산화물 생성량을 줄이기 위해 시멘트 가마의 헤드부분 연소기를 ‘저질소연소기(低氮燃烧器)’로 교체하였고, 특히 기존의 송풍기를 자기부상(electromagnetic suspension, 磁悬浮)<sup>4)</sup> 송풍기로 교체하여, 풍량(90m<sup>3</sup>/분)과 풍속(72kPa)을 일정하게 유지하도록 하였다.

표 2. 개조 전·후 송풍기 주요 매개변수

| 구분   | 적용모델                  | 1차 풍량(m <sup>3</sup> /분) | 1차 풍압(kPa) |
|------|-----------------------|--------------------------|------------|
| 개조 전 | AFR-295형 나차송풍기(罗茨风机)  | 145.83                   | 29.4       |
| 개조 후 | YG150 자기현탁송풍기(磁悬浮鼓风机) | 90                       | 72         |

자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

## 4) 4차 원료 유입관 개조(四级下料管改造)

시멘트 가마의 연소기를 개조한 후, 미탄(tailings, 尾煤)<sup>5)</sup>은 일반적으로 연소실 위쪽에서 연기가 유입되면서 분해로(分解炉) 내부의 온도가 상승하게 된다. 만약 원재료가 온도가 상승된 분해로에서 열을 흡수함으로써 분해반응을 제대로 하지 않는다면, 분해로의 표면 등 설비에 부식을 초래하거나 시스템의 과부하로 정상 운영에 영향을 미치게 된다.

3) 과잉공기계수(excess air number, 过剩空气系数) : 실제 공기용량과 이론상 공기용량의 비율, 즉 실제공기용량/이론공기용량 값이 공기의 과잉정도를 나타내며, 이를 과잉공기계수라고도 한다. 보통 알파로 표시하며, 알파값은 1.05~1.35 사이이다. / 출처 : 바이두 백과 번역(2021.1.19.검색)

4) 자기부상(electromagnetic suspension, 磁悬浮) : 다른 지지대 없이 자기장의 인력과 반발만으로 물체를 띄우는 방법이다. 중력을 상쇄하는 방향으로 전자기력을 사용함으로써 물체가 중력으로부터 자유롭게 되고 떠있을 수 있게 된다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.1.19.검색)

5) 미탄(tailings, 尾煤) : 교체연료를 세척·가공하여 만든 찌꺼기 중 용유 연료가 너무 적어 더 이상 가공처리 할 필요가 없어 버려지는 것이다. / 출처 : 바이두 백과 번역(2021.1.19.검색)

기존의 원료 유입관은 모두 4개로 구성되어 있지만 일정한 분사를 위해 분해로의 중앙부분에 대칭적으로 배치되도록 설계되어 있기 때문에 분해로의 표면 온도를 낮추기 어렵다.

따라서 주요 개조내용은 기존의 분해로에 추가로 4차 원료 유입관 2개, 원료분류 밸프 1개를 연소실 상단부분 위쪽 1,500mm 지점에 설치하였다. 또한 원료분류 밸브는 분해로의 온도에 따라 900~950°C로 조절할 수 있어 분해로의 표면과 배출구가 고온이 되는 것을 방지할 수 있다.

## ▶ 경제성 분석

‘다단연소기술(分级燃烧)’과 ‘저산소연소(低氧燃烧)’ 두 가지 방법을 적용하여 개조한 부분은 시멘트 가마 헤드부분 연소기(窑头燃烧器), 시멘트 가마 후미부분 연소기(窑尾燃烧器), 3차 공기 배관(三次风管), 4차 원료 유입관(四级下料管), 를 개조하였다. 현재 동 기업은 개조 후 질소산화물을 처리하기 위해 사용된 암모니아수는 4,224톤/년으로, 개조 전(10,200톤/년) 대비 498톤/년 감소하였고, 개조 후 398.4만 위안(약 6.8억 원)/년을 절약한 것으로 나타났다.

표 3. 개조 전·후 암모니아수 사용량 및 비용 절감효과

| 구분          | 암모니아수 사용량(톤/년) | 암모니아수 비용(위안/년)   |
|-------------|----------------|------------------|
| 개조 전        | 10,200         | 6,800,000        |
| 개조 후        | 4,224          | 2,81,6000        |
| <b>절감효과</b> | <b>5,976</b>   | <b>3,98,4000</b> |

자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

## ▶ 시사점

동 사례는 기존에 SNCR 탈질 설비를 설치 후, 20% 농도의 암모니아수(氨水)로 시멘트 가마에서 발생하는 질소산화물을 제거하고 있는 개조 사례이다. SNCR 탈질 설비의 낮은 탈질효율로 인해 암모니아수 사용량이 많다. 이는 설비내부 부식과 보조연료 사용량 증가의 문제가 발생하기 때문에 암모니아수 사용량 감소를 위해 설비의 개조를 실시하였다.

또한 투자총액은 300만 위안(약 6억 원)으로 확인되며, 투자금은 기존 설비의 개조를 통해 암모니아수 사용량 감소로 1년 안에 원가를 회수하였을 뿐 아니라 암모니아수 사용량 감소로 인해 분해로에 유입되는 수분 또한 절감할 수 있었다.

SNCR를 사용할 경우, 탈질효율이 일반적으로 낮기 때문에 이를 해결하기 위해 암모니아수 사용량이 비교적 많고, 이로 인해 배관과 설비의 내부 부식과 환경오염을 유발하는 문제가 있다. 따라서 암모니아수 사용량을 감소시키는 기술을 적용하여, 배관과 설비부식 문제해결 뿐 아니라 원가절감, 환경오염 유발도 억제할 수 있을 것으로 전망된다.

환율적용 : 2021.1.19., 네이버 환율 기준 1위안=한화 169.73원

출처 : 북극성대기망(2021.1.14.기재), <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20210114/1129353.shtml>, 2021.1.19.접속

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



## 중국환경산업 주간기술동향

발행

2021년 1월 19일 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