

대기오염방지

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

석탄 보일러의 고농도 질소산화물 처리기술 소개

▶ 개요

석탄 발전소에서 배출하는 질소산화물(NOx) 총량의 약 40%는 석탄 보일러에서 배출되기 때문에 석탄 보일러의 질소산화물 처리·관리가 반드시 필요하다. 따라서, 질소산화물 처리를 위한 주요 공법인 SCR공법은 탈질처리 중 기술수준이 이미 상용화 단계이고, 처리효율도 높아 석탄 발전소에서 대규모로 사용되고 있다.

SCR공법은 일반적으로 암모니아수(aqueous ammonia, 氨水)를 감압(减压)·가열하여 기체 상태의 암모니아를 얻는다. 이때, 환원제인 암모니아수는 유독성 화학물질이다. 따라서, 암모니아수를 운송·저장하기 위해서는 <중대위험원식별(重大危险源辨识)>(GB18218-2009)에 따라 반드시 요구 사항에 부합해야 한다. 또한 암모니아수의 운송·저장 과정에서 발생할 수 있는 위험요소를 제거하기 위해 저농도 암모니아수를 가열·증발시켜 기체 상태의 암모니아를 추출하여 사용하고 있으며, 이 방법은 대부분 발전소에서 액체 암모니아법(液氨法)을 대체하여 보급되고 있다. 이로 인해, 현재 대부분의 공정에서 사용되고 있는 SCR공법은 저농도 질소산화물(<450mg/m³) 처리에 관련된 내용이지만 고농도 질소산화물(>500mg/m³) 처리에 대한 연구결과는 비교적 적다.

따라서, 본 기술동향은 220t/h의 석탄 보일러에서 발생하는 연기에 포함된 고농도 질소산화물 제거를 위해 SCR공법을 적용한 사례이다. 이는 20%의 암모니아수를 가열·증발시켜 기체 상태의 암모니아로 추출하였다. 그 결과 환원된 연기 중 고농도 질소산화물에 대한 처리효과도 분명하게 나타난 것을 확인하였다.

▶ 프로젝트 현황

장쑤성(江苏省) 지역의 어느 발전소에서 220t/h 석탄 보일러를 신규 건설하였다. 하지만 이 발전 설비에는 대량의 질소산화물과 같은 유해성 성분이 포함되어 있어 대기오염물질을 유발한다. 따라서 환경보호 배출표준 요구에 의해 연기의 탈질처리를 위한 설비세트를 설치하였고 그 매개변수는 다음과 같다.

<표1. 석탄가루 보일러 매개변수>

구분	매개변수	구분	매개변수
보일러 출력(t/h)	220	유입구 NOx농도(mg/m ³)	≤800
연기발생량(m ³ /h)	298,411	배출구 NOx농도(mg/m ³)	≤100
배출구 연기온도(°C)	360	처리효율(%)	≥87.5

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

현재, 석탄 보일러 연기의 탈질처리를 위한 공정은 SCR(선택적 촉매환원법)공법과 SNCR(선택적 비촉매 환원법)공법으로 크게 2가지로 나눌 수 있다. SNCR은 850~1,100°C의 고온 구역에서 기체 암모니아가 연기 중의 질소산화물과 직·간접적으로 반응하여 처리하는 방법이다. 처리 효율은 보일러 종류, 구조, 연기 온도, 반응기 내 체류시간 등 여러 영향을 쉽게 받기 때문에 질소산화물의 농도가 높지 않은 순환유동층보일러에서 주로 적용된다.

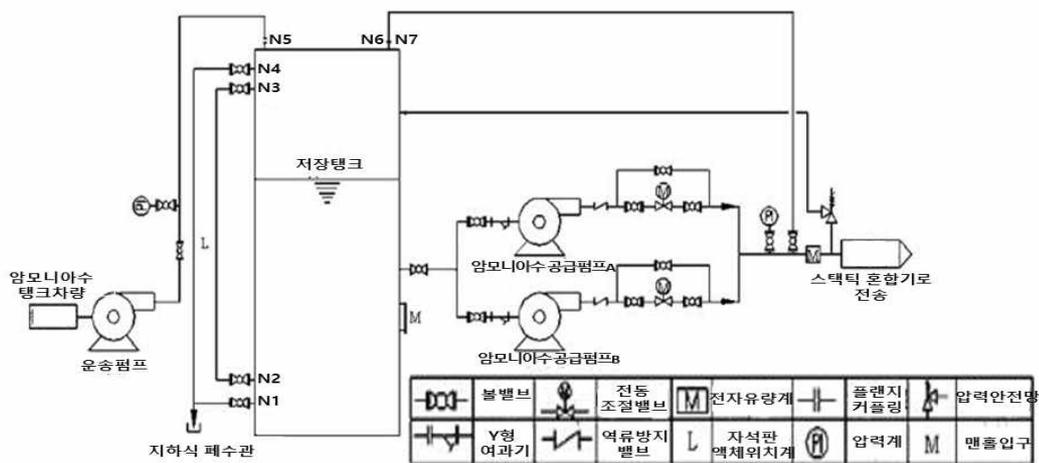
하지만, 석탄 보일러를 순환유동층보일러와 비교하였을 때, 보일러 내부 용해실이나 연소실의 회전 분무기 부분이 달라 연기가 고온에서 머무르는 시간이 짧고, 그 반응시간도 0.5초 미만이었다. 따라서 순환유동층보일러 대비 처리효율이 낮기 때문에 SNCR공법은 적합하지 않다. 하지만, SCR공법의 경우, 절탄기(economizer, 省煤器)¹⁾ 배출구의 온도가 320~420°C 정도의 중온 구간으로 암모니아와 연기 중 질소산화물이 촉매제를 통해 반응된다. 이는 촉매제를 여러 층으로 배치하고 환원제의 암모니아수 분사량 조절을 통해 처리효율을 90% 이상 보장할 수 있다. 따라서, 본 공정은 SCR공법을 적용하였으며, 환원제는 20%의 암모니아수로 증발시킨 암모니아 기체로 추출한 후, SCR반응기에서 분무하여 연기 통로로 유입된다.

▶ 공정 시스템

SCR공법은 일반적으로 암모니아수 저장·운송·증발시스템, SCR반응기가 포함되며, 시스템 설비, 배관, 밸브, 검측기계 등은 연기의 성분이나 매개체의 특성에 따라 합리적으로 촉매제를 선택해야 한다.

1) (암모니아수 저장·운송시스템) 암모니아수 저장·운송시스템은 <그림1>에 나타난 바와 같이 20%의 암모니아수를 탱크차량에서 운송펌프를 통해 암모니아수 저장탱크로 운송된다.

<그림1. 암모니아수 저장·운송시스템 공정도>



<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

암모니아수 탱크의 크기는 4.5X5m(가로X세로)로 5일간 사용 가능한 양이다. 펌프의 재질은 불소수지(fluoroplastics, 氟塑料)²⁾를 사용하며, 유량 80m³/h, 양정(lift, 扬程)³⁾ 15m로 1시간 내 펌프를 가득 채울 수 있다.

1) 절탄기(economizer, 省煤器) : 보일러 전열면(傳熱面)을 가열하고 난 연도(煙道) 가스에 의하여 보일러 급수를 가열하는 장치이다. (네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
 2) 불소수지(fluoroplastics, 氟塑料) : 플루오린을 함유한 플라스틱이다. (네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
 3) 양정(lift, 扬程) : 밸브가 밀려 올라지는 높이를 뜻한다. (네이버 국어사전, 2020.7.13.발췌)

암모니아수 배출구인 N1와 맨홀 입구(M)는 저장탱크의 세척과 정비가 용이하다. N2, N3는 자석판 액체위치계(Magnetic level indicator, 磁翻板液位计)⁴⁾가 접촉하는 부분으로 액체위치 신호가 분산제어시스템(DSC, Distributed Control System, 分散控制系统)⁵⁾을 통해 LCD화면으로 전송되며 제어가 가능하다. N4는 저장탱크에서 지하식 폐수관으로 배출된다.

N5는 암모니아수 유입부분으로 저장탱크 상단부에 설치한다. 만약 너무 높게 설계되면, 저장탱크로 운송과정에서 암모니아수에 충격이 가해지게 된다. 그로 인해, 유해성 물질인 암모니아 기체가 대량으로 배출되고, 저장탱크 내 압력이 높아져 팽창되면서 파괴될 수 있는 위험이 있다.

N6는 암모니아수 저장탱크의 상단부에 위치하며, 흡기밸브(air intake valve, 呼吸阀)⁶⁾의 접촉 부분으로 저장탱크의 기체 분압(partial pressure, 分压)⁷⁾을 일정하게 유지시키면서 암모니아수 저장탱크 배출구에서 운송펌프로 보낸다. 이때, 펌프는 총 2대를 사용하며, 규격은 입식 원심 펌프(centrifugal pump, 离心泵)⁸⁾, 소재 SUS304(304不锈钢)⁹⁾, 유량 1m³/h, 양정(扬程, p.2 각주3 참고) 100m이며, 컨버터(converter, 变频器)¹⁰⁾를 통해 유량을 조절한다.

암모니아수 운송펌프 유입구의 파이프라인에 볼밸브(ball valve, 球阀)¹¹⁾와 Y형 여과기를 설치하였다. 볼밸브는 펌프본체를 변경할 때 사용되고, Y형 여과기는 30mm 크기의 알갱이 형태로 구성되어 있다. 또한 배출구는 전동조절밸브(电动调节阀)와 2개의 볼밸브와 동시에 측로(旁路) 배관을 설치하여 전동조절밸브가 온라인으로 장비의 검측이 가능하도록 한다.

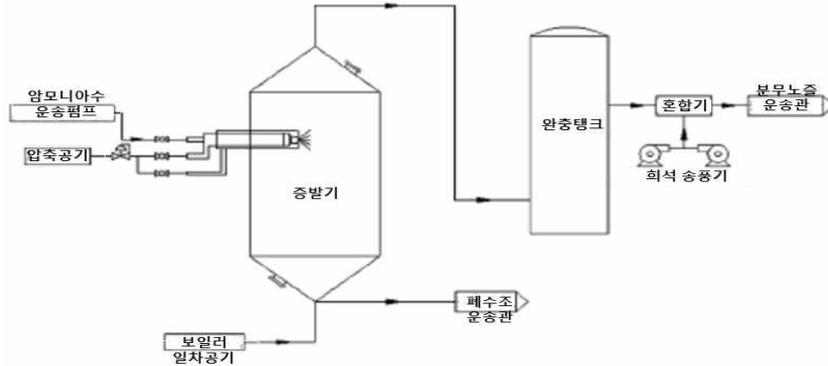
2대의 암모니아수 공급펌프 배출구에는 1개의 헤더(母管)를 사용하며, 압력계(pressure gauge, 压力表)¹²⁾, 환류관(回流管道), 전자유량계(Electromagnetic Flowmeter, 电磁流量计)¹³⁾, 안전밸브를 설치하여 일정하게 유량이 암모니아수 증발기에 운송되도록 한다. 또한 암모니아수 저장탱크, 배관, 밸브, 여과기, 유량계, 압력계 등은 모두 SUS304 소재를 사용한다.

2) (암모니아수 증발시스템) <그림2>와 같이 20%의 암모니아수가 양방향으로 된 분사기로 들어가 0.6~0.8MPa의 압력으로 작동된다. 분무된 액체는 30~70 μ m의 액체방울 형태이고, 증발기에 상하로 분사된다. 또한 증발기 하단부분으로 역류되어 70~130°C의 보일러에서 송풍기의 바람을 통해 암모니아 기체를 증발시킨다. 이때 증발된 암모니아 기체는 완충탱크로 들어가며, 그 압력은 0.1~0.2MPa로 일정하게 유지된다.

- 4) 자석판 액체위치계(Magnetic level indicator, 磁翻板液位计) : 각종 탱크, 홈, 구형(球型) 용기, 보일러 등의 설정에 사용되는 매개체의 액체위치 검측기기이다.(바이두 백과, 2020.7.13.발췌)
- 5) 분산제어시스템(DSC, Distributed Control System, 分散控制系统) : 교환기 제어부를 분산된 개개의 독립된 회로로 구성한 방식. 분산 방법(부하·기능·유닛)방식에 따라 3가지로 분류된다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
- 6) 흡기밸브(air intake valve, 呼吸阀) : 내연 기관에서 흡기구를 달기 위해 장치된 밸브로서, 보통 버섯형 밸브가 사용되고 있다.(네이버 지식백과, 2020.7.14.발췌)
- 7) 분압(partial pressure, 分压) : 혼합 기체를 만드는 각 성분 기체가 단독으로 원래의 혼합 기체와 같은 체적을 차지하고, 온도도 동일한 경우에 나타내는 압력을 뜻한다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
- 8) 원심펌프(centrifugal pump, 离心泵) : 회전식 펌프의 하나로 유체(액체나 기체)를 날개가 달린 회전압축기를 포함하는 원통형의 용기 중앙에 끌어들임으로써 작동된다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
- 9) SUS304(304不锈钢) : 대표적인 오스테나이트계 스테인리스강으로 18-8강으로 불리며, 내약품성, 내열성이 뛰어나기 때문에 처리수조 등에 사용된다. SUS304는 Ni 8~11%, Cr 18~20%를 함유한 강이다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
- 10) 컨버터(converter, 变频器) : 신호 또는 에너지의 모양을 바꾸는 장치이다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
- 11) 볼밸브(ball valve, 球阀) : 밸브의 개폐 부분에는 구멍이 뚫린 공 모양의 밸브가 있으며, 이것을 회전시킴에 의해 구멍을 막거나 열어, 밸브를 개폐시키는 것으로 콕과 유사한 밸브이다.(네이버 지식백과 2020.7.13.발췌)
- 12) 압력계(pressure gauge, 压力表) : 기체나 액체의 압력을 측정하는 계기이다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
- 13) 전자유량계(Electromagnetic Flowmeter, 电磁流量计) : 전자유도를 이용한 유량계를 말한다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)

또한 송풍기의 바람에 의해 희석된 공기와 혼합기(混合器)에서 부피율이 5%로 희석된 혼합기체(混合气体)는 암모니아수 분무노즐(喷氨格栅)을 통해 SCR반응기의 연기 통로로 유입된다. 이때, 2대의 희석 송풍기를 사용하며, 풍량 3,000m³/h, 전압 6,000Pa이다.

<그림2. 암모니아수 증발시스템 공정도>



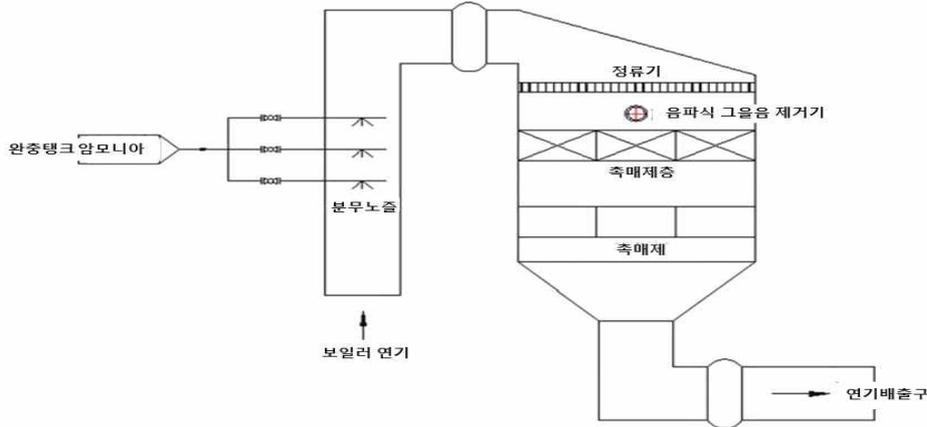
<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

증발기와 완충탱크에는 온도·압력측정계가 설치되어 있으며, 온도는 보일러의 일차 공기(primary air, 一次风)¹⁴⁾의 공급량을 통해 조절된다. 증발기 내 온도가 40~60°C로 일정 시간 유지하거나 압력이 0.3MPa를 초과할 경우, 암모니아수 공급은 자동으로 차단된다. SCR 반응기에서 암모니아 기체 사용량은 총 122kg/h이며, 기체의 변화 정도(气化能力)는 증발기의 암모니아 사용량에 따라 설계되었으며, 증발기 내 암모니아 기체의 잔여량도 일정하게 된다. 암모니아수 증발과정에서 약 487kg/h의 폐수가 발생하며, 이때 증발되지 않는 암모니아가 소량으로 함유되어 있으며, 증발기 하단부분부터 폐수조(废水池)로 흘러보내고 폐수펌프를 통해 폐수처리 시스템으로 운송된다. 폐수조는 1일간 저장 가능한 양으로 설계되어 있으며, 규격은 2X2X3m(가로X세로X높이)이며, 철근 콘크리트 구조로 되어 있다.

- 3) (SCR반응기) <그림3>과 같이 주로 연기 통로로 유입·배출구, 반응기 및 촉매제 등으로 구성되어 있다. SCR공법에서 최적의 탈질효율은 절탄기(省煤器, p.1 각주1 참고) 연기 온도가 약 360°C인 상태이다. 절탄기 배출구의 연기는 연기 통로(烟道)를 거쳐 SCR반응기로 들어가며 연기 통로의 상단 부분에 있는 3층 형태의 암모니아수 분무기를 설치한다. 암모니아수 분무기 구조는 지관(支管, 수도·가스 따위의 본관에서 갈라져 나온 관)으로 되어 있으며, 지관은 분무노즐로 구성된다. 이 분무노즐에는 5%의 암모니아 기체와 연기가 초기 단계(初步混合)로 혼합되어 있으며, 반응기 상단부분에서 정류기(Rectifier, 整流器)¹⁵⁾를 통해 균일하게 분포한 후, 질소산화물과 암모니아가 촉매제로 인해 탈질반응을 일으킨다. 이때, 촉매제는 3+1형태로 설계되어 있다. 촉매제는 벌집형 구조이며 규격은 1,910X970X1,300mm 이다. 1개 층 당 총 21개(7X3구조)의 모듈로 구성되어 있다. 이때, 반응기 규격은 6,950X5,990X12,120mm, 공탑속도(superficial velocity, 空塔烟气流速)¹⁶⁾ 4.6m/s, 연기 통로의 단면크기 6,950X1,840mm, 유속 15m/s이다.

14) 일차 공기(primary air, 一次风) : 연료에서 필요한 공기중에서 최초로 연료에 접촉하여 연소 반응에 기여하는 공기이다.(네이버 지식백과, 2020.7.14.발췌)
 15) 정류기(Rectifier, 整流器) : 정류기란 회로에 한 방향으로 전류가 흐르게 하는 소자를 말한다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)
 16) 공탑속도(superficial velocity, 空塔烟气流速) : 수직 원통형의 탑 내부를 유체가 흐르는 경우 탑 내부에는 어떤 구조물도 들어 있지 않은 빈 탑이라고 가정하여 계산되는 유체의 선속도 또는 질량속도이다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)

<그림3. SCR반응기 공정도>



<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

반응기와 연기 통로는 6mm 두께의 강철판으로 되어 있으며, 전체적으로 강철구조로 프레임을 고정한다. 특히, 운행과정에서 발생하는 열의 변화(热位)에 유연하게 대처하기 위해 반응기와 연기 통로의 철골 구조를 추가하지 않아야 한다. 또한 반응기, 절탄기, 공기 예열기(空气预热器) 사이에 연기 통로는 고온 금속재료를 팽창시켜 연결한다.

SCR반응기에는 연기의 분진 함량이 비교적 많고, 대량의 분진으로 인해 촉매제의 운송 통로 막힘 현상을 발생시킬 수 있다. 이로 인해, 질소산화물, 암모니아, 산소가 촉매제에 도달하는 것을 저하시켜 시스템의 저항 증가로 인해 처리효율을 감소시킨다. 또한 촉매제의 각 층마다 두께 0.5m의 음파식 그을음 제거기(Sonic soot blower, 声波吹灰器)¹⁷⁾ 2대를 설치하여, 온라인으로 제어 할 수 있다. 따라서 반응기의 유입·배출구에서 배출되는 연기속의 질소산화물, 입자상 물질, 산소함량, 온도, 압력, 유량 등 온라인 모니터링으로 실시간 검측이 가능하다.

▶ 처리효과

SCR 시스템은 조작이 간단하고, 비교적 안정적으로 운영을 한다. 따라서 <그림3>의 SCR 반응기를 통한 모니터링 결과는 <표2>와 같다. 20%의 암모니아수 유량 684ℓ/h이고, 암모니아/질소산화물의 분자비(molar ratio, 摩尔比)¹⁸⁾는 0.93이다. 처리전(前) 연기속의 질소산화물 농도가 782~796mg/m³일 때, 탈질처리 후 질소산화물은 71~88mg/m³로 모두 환경보호 배출 표준에 부합한다. 이때, 탈질효율은 88.9~91%이며, 암모니아 슬립(ammonia slip, 逃逸氨质量浓度)¹⁹⁾ 0.8~1.3mg/m³ 이다. 이는 <화력발전소 연기 탈황·탈질공정 기술규범 선택적 촉매환원법(火电厂烟气脱硝工程技术规范选择性催化还原法)>(HJ562-2010)에 규정된 암모니아 슬립은 2.5mg/m³에 부합한다.

17) 음파식 그을음 제거기(Sonic soot blower, 声波吹灰器) : 보일러에서 그을음이나 재를 처리하는 장치. 보일러의 노(爐) 안이나 연도(煙道)에 배치된 전열면에 그을음이나 재가 부착하면 열의 전도가 나빠지므로 이따금 증기 또는 공기의 분류(噴流)를 내뿜어 부착물을 청소하는 장치를 말하며, 주로 수관 보일러에 사용된다.(네이버 지식백과 등, 2020.7.13.정리)

18) 분자비(molar ratio, 摩尔比) 둘 또는 그 이상의 혼합한 계에 대해 각 성분을 그램몰 단위로 나타낼 때의 조성비를 말하며, 몰비라고도 한다.(네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)

19) 암모니아 슬립(ammonia slip, 逃逸氨质量浓度) : SCR 공정에서 가장 중요한 점은 반응온도이며, 이때 반응이 잘 일어나는 온도범위를 벗어나거나 질소산화물과 정량적으로 반응하는 암모니아 양보다 많은 양의 암모니아를 주입하게 되면 반응에 참여하지 않은 암모니아가 배기가스로 배출하는 현상이다.(바이두 백과 등, 2020.7.13.내용정리)

<표2. 운영시간별 모니터링 데이터>

측정시간	처리전(前, mg/m ³)	처리후(后, mg/m ³)	처리효율(%)	암모니아 슬립(mg/m ³)
8:00	789	81	89.7	1.3
8:30	796	79	90.1	1.1
9:00	782	83	89.4	1.2
9:30	793	76	90.4	0.9
10:00	786	71	91	0.8
10:30	789	84	89.4	1.2
11:00	794	88	88.9	1
11:30	782	87	88.9	0.8
12:00	795	84	89.4	1

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

▶ 경제성 분석

SCR 시스템의 연간 가동시간을 6,000h로 가정할 때, 경제성 분석은 <표3>과 같다. SCR 공법의 탈질처리의 주요 운영비용은 암모니아수, 전기소모, 인건비, 설비 감가상각이다. 하지만 그중 연간 암모니아수 사용 비용은 301.9만 위안(한화 약 5.2억원)으로 전체의 약 66%를 차지한다. 발전소에 SCR 탈질설비를 부착후 배출표준에 부합하였을 때, 매년 약 300만 위안(한화 약 5.1억원)의 전기비 보조금을 받을 수 있고, 질소산화물 배출 감축에 대한 비용을 환산하면, 172만 위안(한화 약 3억원)으로 총 14.8만 위안(한화 약 2,500만원)을 절감할 수 있다. 이때, 질소산화물 처리 비용의 단가는 3.2위안(한화 약 550원)/kg으로 계산된다. * 아래표에서 -로 표기된 부분은 연간 사용된 금액임

<표3. 연간 경제성 분석>

구분	경제성 효과	구분	경제성 효과
20% 암모니아수(만 위안)	-301.9	질소산화물 배출비용(만 위안)	172
전력소모(만 위안)	-67.8	설비 감가상각비용(만 위안)	-80
인건비(만위안/3인)	-7.5	전기보조금(만 위안)	300
총 감축비용(만 위안)			14.8

<자료 출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

▶ 시사점

암모니아수 증발법은 암모니아 기체를 SCR의 환원제로 사용하며, 액체 암모니아에서 발생하는 저장·운송의 안전에 대한 위험이 없다. 또한 증발된 열원은 보일러에서 송풍기의 일차 공기와 반응하여 암모니아를 증발한 후, 연기 통로를 따라 들어간다. 이때, 추가적인 열에너지 소모도 없다. 하지만 현재, 고농도의 질소산화물 처리는 촉매제의 층수를 추가하는 방식으로는 기존의 환경 보호 배출표준에 부합할 수 있지만, 시스템의 부하가 증가하여 기존의 송풍기 여압이 SCR 시스템에 영향을 미치기 때문에 요구사항 부합 여부를 충분히 고려해야 한다. 촉매제는 분진이 많이 있는 구간에 배치되어 마모가 크다. 또한 입자상물질이 촉매제의 계면활성(surface activity, 表面活性)²⁰을 저하시키고 금속, 금속산화물, 삼산화비소(As₂O₃) 등 유독성 물질이 함유되어 촉매제의 수명을 단축시킨다. 따라서, 향후 촉매제를 집진처리 후 배치하면서, 저온 탈질 촉매제의 개발이 지속적으로 연구개발이 필요할 것으로 전망된다.

<환율적용 : 2020.7.13. 네이버 환율 기준, 1위안=한화 171.63원>
 북극성대기망, <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200706/1086503.shtml>, 2020.7.14.접속
 ※ 기술용어 번역·해석이 일부 상이할 수 있으니 반드시 중문본을 확인하시기 바랍니다.

20) 계면활성(surface activity, 表面活性) : 녹아 있는 매체의 표면 장력 또는 다른 매체와의 계면 장력을 현저하게 감소시키는 물질의 성질이다. (네이버 지식백과, 2020.7.13.발췌)



중국환경산업 주간기술동향

발행

2020년 7월 14일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승(cms0522@keiti.re.kr)

자료제작

▷ 김종균(jaykim@keiti.re.kr)



중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.

문의 : +86-10-8591-0997~8