

대기오염방지

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

대형 석탄화력발전소에 적용된 고효율 탈질 처리기술 소개

▶ 개요

중국 지난 몇 년간 석탄화력발전의 초저배출을 강력히 추진하였다. 이로 인해 현재 초저배출 개조를 완료한 석탄발전세트 용량은 이미 8.1억kW·h에 달하며, 세계 최대의 청정에너지 발전 시스템을 구축하였다. 특히, 징진지(京津冀, 베이징시·톈진시·허베이성) 지역은 석탄발전세트에 대한 초저배출 표준을 산소함량 6% 기준에서 입자상물질 5mg/m³, 이산화황 25mg/m³, 질소산화물 30mg/m³으로 제한하고 있다.

그중 석탄화력발전소에서 배출하는 주요 오염물질 중 하나인 질소산화물 처리를 위해 주로 SCR(Selective Catalytic Reduction), SNCR(Selective Non-Catalytic Reduction), 저NOx 연소기술 등을 적용하고 있다. 따라서 각 기술의 특징을 살펴보면, SNCR은 상대적으로 투지비용은 낮지만, 처리효율이 30~50%에 불과하기 때문에 보통 유동층보일러에 적합하다. 반면에 SCR의 경우, 초기 투자비용과 처리효율이 90~95%로 비교적 높지만, 설비개조가 어렵다. 따라서 일정시간이 지나면 SCR은 암모니아 슬립으로 인해 공기에열기에 막힘 현상이 발생해 처리효율 감소와 설비의 안전성에서 문제가 나타나게 된다.

따라서 최근 오존-탈질기술(臭氧脱硝技术)을 이용해 SCR에서 발생하는 문제를 해결하면서 처리 효율도 보장하고 있어, 이미 석유 제련, 화학공업, 제철소, 바이오매스 발전소, 소형 석탄발전소의 보일러 연기 탈질처리에 적용되고 있다. 또한 고효율 탈질 처리뿐 아니라 수은, VOCs 처리, SCR의 암모니아 슬립 관리 등 다양한 오염물질을 동시에 제거할 수 있는 특징이 있다.

이에, 동 기술동향은 허베이성(河北省)의 석탄화력발전소에서 적용한 사례를 근거로 하여, 오존-탈질기술의 처리효과 등 어떠한 특징이 있는지 살펴보고자 한다.

▶ 오존-탈질기술 주요특징

오존-탈질기술은 주로 오존의 강한 산화성(Oxidation, 氧化性)¹⁾을 이용해 녹지 않는 저(底) 원자가 상태(valence state, 价态)²⁾의 질소산화물을 녹일 수 있고, 반대로 고(高) 원자가 상태의 질소산화물은 산화시킨 뒤 탈황탑에서 질소산화물을 세척·흡수하면서 탈질 처리한다. 이때, 일산화질소가 산화되는 화학 반응식은 다음과 같다.

1) 산화성(Oxidation, 氧化性) : 산소와 화합하는 반응 혹은 수소를 상실하는 반응을 산화라고 하였으나 현재는 그러한 것을 포함하여 널리 화학종이 전자를 상실하여 구성하는 원자의 산화수가 높아지는 것을 말한다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.11.9.)

2) 원자가 상태(valence state, 价态) : 결합에 관여할 수 있는 상태에 있는 각 원자의 전자 상태를 말한다. 수소 원자의 경우에는 1s 전자 궤도에 원자가 전자가 들어간 바닥 상태가 그대로 원자가 상태가 된다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.11.9.)

- (1) $2NO + 3O_3 = N_2O_5 + 3O_2$
- (2) $2NO_2 + O_3 = N_2O_5 + O_2$
- (3) $NO + O_3 = NO_2 + O_2$

산화반응 후 대부분의 오존은 소모되고 남은 소량의 오존이 탈황탑에서 분해되며, 오존-탈질 기술의 특징은 다음과 같다.

- 1) **(高유연성)** 오존-탈질기술은 온도에 대한 요구가 80~200°C로 높지 않다. 오존 분사 장치는 보일러 뒤편에 위치한 연기 통로의 탈황탑 입구 앞쪽에 설치되기 때문에 연기온도가 오존-탈질기술 요구를 만족한다. 또한 현장에서 연기 통로의 배치 상황에 따라 설비의 설치 위치를 유연하게 조절할 수 있으며, 분사 노즐과 연기 통로의 격자창의 압력손실이 100Pa를 초과하지 않기 때문에 보일러 가동에 미치는 영향이 매우 적다.
- 2) **(시공간단)** 오존발생기(臭氧发生器)는 성형설비로 분류되어 설치에 대한 공정량이 적다. 또한 분사시스템(喷射系统)은 연기 통로만 개조하면 되기 때문에 시공이 매우 간단하다.
- 3) **(조작용이)** 유지보수가 용이하고 조작·관리가 간단하다. 전체 공정에서 핵심설비는 오존발생기이며, 설비가 작고 자동화로 제어가 가능하다. 하지만 오존발생기의 유지보수는 주로 오존발생 지점에서 이뤄지기 때문에 운영상황에 따라 정기적인 유지보수가 필요하다. 또한 시스템 디버깅(debugging, 调试)³⁾이 쉽고 부팅시간이 짧다.
- 4) **(자원절약)** 보일러 부하 및 질소산화물 배출량에 따라 오존 생산량을 조절하여 에너지 소모를 낮출 수 있다.

<표1. 오존-탈질기술 주요 특징>

구분	주요 특징
高유연성	<ul style="list-style-type: none"> · 온도에 대한 요구가 80~200°C로 높지 않음 · 설비의 압력손실을 100Pa를 초과하지 않기 때문에 보일러 운영에 미치는 영향이 적음
시공간단	<ul style="list-style-type: none"> · 설치에 대한 공정량이 적고, 분사 시스템은 연기 통로만 개조하기 때문에 시공이 간단함
조작용이	<ul style="list-style-type: none"> · 유지보수가 용이하고 조작간단 · 시스템 디버깅이 쉽고 부팅시간이 짧음
자원절약	<ul style="list-style-type: none"> · 질소산화물 배출량에 따라 오존 생산량을 조절하기 때문에 에너지 소모 절감 가능

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

SCR의 장기간 사용이나 암모니아 슬립 등으로 인한 탈질효율이 감소할 경우, 오존-탈질기술을 적용하여 기존의 SCR 시스템과 서로 결합하여 사용할 수 있다. 이는 질소산화물 배출농도를 낮추는 동시에 기존의 SCR 설비의 운영압력을 완화하고, 암모니아 슬립 통제를 원활하게 한다. 따라서 오존-탈질기술은 전통적인 탈질기술인 SCR의 문제점을 보완한 고효율 탈질기술이다.

3) 디버깅(debugging, 调试) : 만든 프로그램들이 정확한가를 조사하는 과정. 프로그램 순서도를 살피는 검사, 컴파일러를 사용한 검사, 실제 데이터를 사용한 검사의 세 단계로 이루어진다. <네이버 지식백과 발췌, 2020.11.9.>

▶ 오존-탈질기술 주요설비

오존-탈질기술은 주로 산소생성·분해시스템(制氧分系统), 오존발생시스템(臭氧发生系统), 오존분사시스템(臭氧喷射系统), 공정수시스템(工艺水系统), 흡수탑시스템(吸收塔系统), 보조시스템(辅助系统), 분산제어시스템(DCS, Distributed Control System, 分散控制系统)⁴⁾ 등으로 구성되어 있다.

- 1) (산소생성·분해시스템) 가압흡착진공흡착법(加压吸附真空解吸法)을 이용하며, 이 시스템은 주로 진공펌프, 송풍기, 흡착탑, 산소압축기, 전기계기판 제어시스템, 완충탱크, 평형탱크 등으로 구성되어 있다. 변압흡착산소생성장치(变压吸附制氧装置)는 상온에서 분자체(molecular sieve, 分子筛)⁵⁾를 이용하여 공기 중의 질소를 선택적으로 흡착하고 흡착탑의 압력을 낮춰, 분자체에 흡착된 질소를 탈착하여 흡착-탈착의 사이클을 반복한다. 이로 인해 순도 90~95%, 이슬점 -60°C 이하의 산소를 연속적으로 생성한다.
- 2) (오존발생시스템) 주로 오존발생기, 냉각순환수시스템(冷却内循环水系统), 계기제어시스템(仪器仪表控制系统) 등으로 구성된다. 오존발생기는 매개체를 이용하여 설비의 방전(放电)을 막아 운영효율을 높일 수 있다. 또한 시스템을 연속적으로 운행시켜 안전에 대한 신뢰성도 향상시킬 수 있다. 오존발생기의 방전을 위해 적용된 모듈화는 점검·유지보수가 더욱 용이하다. 이때, 전기에너지의 90%가 오존이 아니라 열로 변하는데 열량은 반드시 냉각순환수시스템을 통해 발전소 외부의 순환냉각시스템으로 보내진다. 냉각수 온도가 시스템 설계 온도를 초과하거나 수량(水量)이 부족할 경우, 시스템은 자동으로 경보 신호를 보내 오존발생기에서 발생량을 감소시켜 발생기의 출력을 조절한다.
- 3) (오존분사시스템) 주로 희석송풍기(稀释风机, dilution fan)⁶⁾, 혼합기(混合器), 분사노즐(喷嘴) 등으로 구성되어 있다. 특히 오존분사시스템은 오존-탈질기술에서 처리효율에 대한 직접적인 영향을 미치는 핵심 설비이며, 이는 혼합기와 흡수탑의 거리, 분사방향, 분사노즐에 따라 오존-탈질기술의 처리효율이 결정된다.

▶ 석탄발전세트의 기존설비 및 오존-탈질설비 매개변수

허베이성 지역 330MW 규모의 석탄화력발전소에서 진행한 기존 SCR과 결합한 사례로 오존-탈질 기술을 결합하여 적용하였으며, 이때 #1, #2보일러의 매개변수는 다음과 같다.

<표2. 330MW 석탄화력발전소 보일러 매개변수>

구분	#1보일러	#2보일러	구분	#1보일러	#2보일러
증기유량(t/h)	1,100	987.8	보일러 열효율(%)	93.8	94.01
증기압력(MPa)	17.5	17.5	연기 배출 온도(°C)	130	125
증기온도(°C)	540	540	연료 소비량(t/h)	133	122

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

4) 분산제어시스템(DCS, Distributed Control System, 分散控制系统) : 교환기 제어부를 분산된 개개의 독립된 회로로 구성한 방식이다. 분산 방법에 따라 부하분산제어방식, 기능분산제어방식, 유닛분산제어방식으로 분류된다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.11.9.)
 5) 분자체(molecular sieve, 分子筛) : 분자체 작용을 가지는 점이 특징으로, 가열하여 결정수를 제거하면 그 흔적이 공동으로 되고, 세공을 통해 그곳에 가스를 흡착하는데 세공이 균일한 지름을 가지므로 그것보다도 유효 지름이 큰 분자는 흡착되지 않는다.(네이버 지식백과 발췌, 2020.11.9.)
 6) 희석송풍기(稀释风机, dilution fan) : SCR에서 탈질 희석송풍기의 작용은 대량의 공기를 넣어 암모니아 가스를 일정 비율로 희석한 후 반응기 파이프라인에 분사하는 것이다.(바이두 백과 발췌-번역, 2020.11.9.)

이때 산소함량 6% 기준, 기존에 적용된 SCR의 설계 매개변수는 다음과 같다.

<표3. SCR 매개변수>

구분	매개변수	구분	매개변수
연기량(m ³ /h)	1,150,000	설계된 탈질 처리효율(%)	90
SCR 촉매제 형태	3층, 벌집형	SCR 암모니아 슬립(mg/m ³)	≤2.28
유입구 질소산화물 배출농도(mg/m ³)	400	이산화황/삼산화황 전환율(%)	≤1
배출구 질소산화물 배출농도(mg/m ³)	40		-

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

오존-탈질기술 또한 SCR과 동일한 산소함량 조건에서 적용하였으며, 그 매개변수는 다음과 같다.

<표4. 오존-탈질기술 매개변수>

구분	매개변수	구분	매개변수
오존발생량(kg/h)	60	SCR 암모니아 슬립(mg/m ³)	≤2.28
산소생성량(m ³ /h)	500	이산화황/삼산화황 전환율(%)	≤1.5
송풍기 배출구 연기온도(°C)	115	냉각수 유입·배출온도(°C)	25 / 30
유입구 질소산화물 배출농도(mg/m ³)	40	순환냉각수 유입량(m ³ /h)	160
배출구 질소산화물 배출농도(mg/m ³)	25	시스템 에너지소비(kW·h)	750

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

▶ 개조효과

330MW 석탄발전세트에 기존의 SCR설비에 오존-탈질기술을 결합하여 적용하였고, 168시간의 시운전을 진행하였다. 이때 최종적으로 배출되는 질소산화물 배출농도는 24,74mg/m³로 나타났다으며, 연기 통로 배출구에서 오존은 발생되지 않았다. 또한 SCR 배출구에서 암모니아 슬립 역시 2.12mg/m³로 모두 배출표준에 부합하였고, 구체적인 데이터는 다음과 같다.

<표5. 개조효과>

구분	매개변수	구분	매개변수	
운행압력(Pa)	48.21	에너지소비(kW·h)	720	
SCR 배출구	질소산화물 배출농도(mg/m ³)	최종	질소산화물 배출농도(mg/m ³)	24.74
	암모니아 배출농도(mg/m ³)		암모니아 배출농도(mg/m ³)	미검측
	이산화황 배출농도(mg/m ³)		이산화황 배출농도(mg/m ³)	28.27
	삼산화황 배출농도(mg/m ³)		삼산화황 배출농도(mg/m ³)	미검측

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

특히, #1, #2보일러에서 SCR 배출구와 최종적으로 배출되는 질소산화물의 배출농도를 살펴보면, 다음과 같이 나타난다.

<표6. 서로 다른 보일러의 증발량에 따른 질소산화물 배출농도 변화>

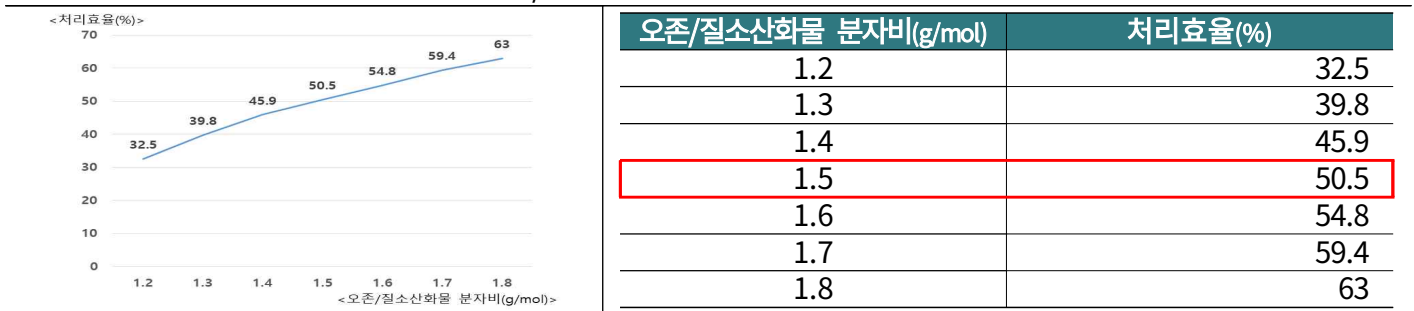
구분	#1보일러	#2보일러
SCR 배출구 배출농도(mg/m ³)	40.06	40.43
최종 배출농도(mg/m ³)	24.91	20.01
오존-탈질기술을 이용한 질소산화물 제거(mg/m ³)	15.15	20.42

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

따라서 <표6>을 살펴보면, 각각의 보일러에 오존-탈질기술을 적용하여 질소산화물이 제거된 농도는 15.15mg/m³, 20.42mg/m³로 나타났으며, 최종적으로 배출되는 질소산화물의 질소산화물 배출농도 모두 초저배출 제한치인 30mg/m³에도 부합하는 것을 확인할 수 있다.

또한 질소산화물 처리효율은 오존/질소산화물 분자비(molar ratio, 摩尔比)⁷⁾에 따라 영향을 미치며, 이는 오존-탈질기술의 처리효율로 연결된다. 따라서 각 분자비에 대한 처리효율은 다음과 같다.

<표7. 오존/질소산화물 분자비에 따른 처리효율>



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

오존/질소산화물 분자비가 높을수록 오존발생량이 많은 것을 의미한다. 따라서 이는 위 표에서 알 수 있듯, 오존-탈질기술의 처리효율은 오존 발생량이 많아질수록 처리효율도 높아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 오존 발생량이 많아지면 운영비용이 높아져 가성비가 떨어지는 문제점이 있다. 이로 인해 적절한 오존량을 발생시켜 경제적인 측면도 고려해야 한다.

동 사례에서는 오존/질소산화물 분자비가 1.5인 상태부터 최종적으로 배출되는 질소산화물 배출농도가 30mg/m³ 미만으로 억제되기 때문에 오존-탈질기술의 처리효율을 50%정도로 설계할 경우, 현재 적용되고 있는 석탄화력발전의 초저배출 제한치에 부합할 수 있다.

▶ 시사점

이번 허베이성에서 적용한 오존-탈질기술은 처음으로 330MW급 대형 석탄화력발전소에서 질소산화물을 제거하기 위해 적용한 개조사례이며, 기존의 SCR이나 SNCR에서 발생하는 문제점을 보완하고 보일러 부하로부터 영향을 받지 않는 고효율 탈질기술이다. 특히 기존의 SCR에서 암모니아 슬립으로 인해 공기에열기(air pre-heater, 空气预热器)⁸⁾의 막힘으로 처리효율 감소 문제를 해결할 수 있었다.

또한 초저배출 조건에 부합하기 위해 오존-탈질기술의 처리효율은 50%이하로 하여 경제성을 확보하면서 환경보호 목표도 달성할 수 있었다. 특히 오존-탈질기술은 시공이 간단하며, 추후 용량 확장이 용이하기 때문에 향후 질소산화물 제로 배출 목표에 부합할 수 있는 최적의 기술로 전망된다.

북극성대기망, <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200929/1107923.shtml>, 2020.11.10.접속

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

7) 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 발췌, 2020.11.9.)

8) 공기에열기(air pre-heater, 空气预热器) : 공기 예열기(기계공학용어사전 보일러로 보내는 연소용 공기를 연도(煙道) 가스의 폐열(廢熱)을 이용하여 200~250°C 정도로 예열하는 장치이다. (네이버 지식백과 발췌, 2020.11.9.)



중국환경산업 주간기술동향

발행

2020년 11월 10일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승(cms0522@keiti.re.kr)

자료제작

▷ 김종균(jaykim@keiti.re.kr)

국민과 함께
미래를 여는
글로벌 환경전문기관

중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.

문의 : +86-10-8591-0997~8