

## 대기오염방지

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

### 쓰레기 소각로 연기(탈황·탈질)처리를 위한 기술 적용 사례 소개

#### ▶ 개요

본내용은 쓰레기 소각로에서 배출되는 연기(탈황·탈질)처리를 위한 반건식탈황설비(SDA)<sup>1)</sup>과 선택적 무촉매 환원법(SNCR)<sup>2)</sup>을 집중적으로 소개한다. 이에 프로젝트 현황, 공정원리, 연기의 매개변수 등 분석을 통해 쓰레기 소각로에서 배출되는 연기 중 이산화황(SO<sub>2</sub>)과 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을 동시에 처리한다. 배출되는 연기농도는 배출표준에 부합하고, 시스템의 안정적인 운영도 보장해야 한다.

최근 몇 년 동안 중국경제가 지속적으로 발전하면서 동시에 쓰레기도 급속히 증가하고 있다. 따라서 중국의 사회발전 요구에 따라 많은 도시는 쓰레기 소각장 건설을 이미 완료하였거나 건설 중이다. 쓰레기 소각장의 연소방식을 통해 많은 쓰레기를 자원화·무해화로 처리된다. 하지만 쓰레기 소각로에서 발생하는 연기처리가 쓰레기 소각발전의 중요한 요소이다.

쓰레기 소각로로 인해 발생하는 연기에는 다량의 입자상물질·염화수소(HCl)·이산화황(SO<sub>2</sub>)과 같은 산성 물질과 중금속, 다이옥신 등 유해물질이 다양하게 포함되어 있다. 따라서 연기정화의 처리 과정은 탈산(deoxidation, 脱酸)<sup>3)</sup>과 집진시스템 위주로 구성된다.

#### ▶ 프로젝트 현황

① (설계근거) <도시생활쓰레기 소각처리 공정 프로젝트 건설표준(城市生活垃圾焚烧处理工程项目建设标准)>과 <생활쓰레기 소각처리 공정 기술규범(生活垃圾焚烧处理工程技术规范)>에 의거하여, 반건식회전분무식건조정화(半干法旋转喷雾干燥净化) 공정과 함께 기계회전분무건조(机械旋转喷雾干燥)를 탈산 반응탑의 활성탄 흡착과 백필터 집진기를 설치하였다.

본 프로젝트의 생활쓰레기 종합처리량은 650톤/일 중 소각처리는 530톤/일이다. 또한 시정 산업에서 발생하는 슬러지 처리량 50톤/일 중 소각처리는 20톤/일 규모이다. 소각설비는 550톤/일 규모의 순환유동층 쓰레기 소각처리 설비 2대를 설치하여 소각처리 한다. 또한 소각로에서 배출되는 연기의 오염물질은 다음과 같다.

- 1) SDA(Semi-Dry Absorber) : 반건식 혹은 준건식의 분무건조식 흡수장치로 불리는 유해가스 제거장치로 경우에 따라 SDR(Smei-Dry Reactor)혹은 SDS(Spray Drying Sorber)등으로 표현된다. SDA를 이용한 유해가스 흡수장치는 1970년대 이후 기존 습식 및 건식 배연탈황 장치의 장점을 결합한 공정으로 활발히 개발되어 왔으며 그 결과 선진국 여러 나라에 많은 수의 설비가 설치 가동되고 있다.(코네틱 'SDA(Spray Drying Absorber)기 본설계 절차' 보고서 내용 요약정리, 2001.9.18.)
- 2) 선택적 무촉매 환원법(SNCR, Selective Non Catalytic Reduction) : 소각로·보일러 등 폐기물이나 연료의 연소과정 중에 발생하는 질소산화물을 무해한 질소와 물로 환원시켜 제거하는 기술로 반응의 촉진을 위해 촉매를 사용하는 선택적 촉매 환원법(SCR)과 구분되는 기술이다.(코네틱 '질소산화물 저감을 위한 SNCR 기술지도' 보고서 발췌, 2012.4.17.)
- 3) 탈산(deoxidation, 脱酸) : 금속의 정련에 있어서 금속 중에 남아 있는 산소를 산화하기 쉽게 재료의 해가 되는 얇은 규소(Si)나 망간(Mn) 등의 탈산제를 가하여 산소를 제거하는 것이다.(네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

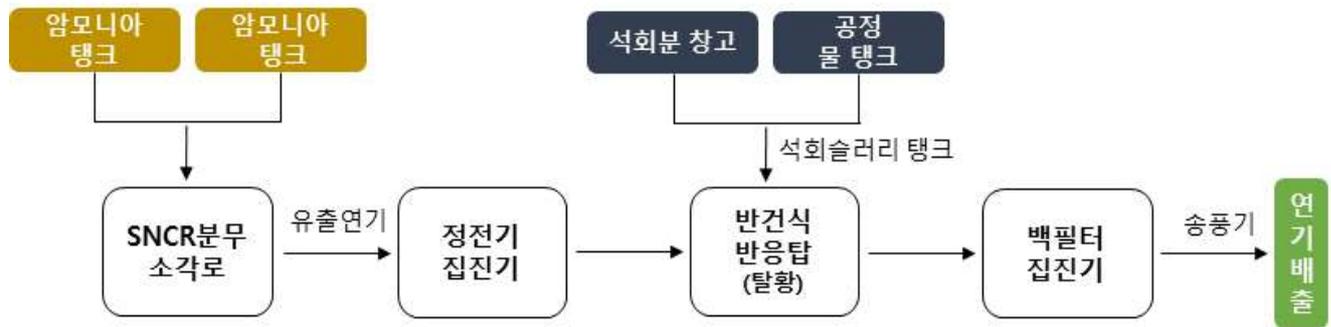
<소각로에서 배출되는 연기의 매개변수>

구분	매개변수	구분	매개변수
소각로 처리량(톤/일)	550	염화수소(HCl, mg/Nm <sup>3</sup> )	1,200
연기량(Nm <sup>3</sup> /h)	120,000	불화수소 <sup>4)</sup> (HF, mg/Nm <sup>3</sup> )	50
연기온도(°C)	170~200	일산화탄소(CO, mg/Nm <sup>3</sup> )	50
먼지(g/Nm <sup>3</sup> )	21	수은(Hg) 및 기타화합물(mg/Nm <sup>3</sup> )	1
이산화황(SO <sub>2</sub> , mg/Nm <sup>3</sup> )	600	카드뮴+탈륨(Cd+Tl, mg/Nm <sup>3</sup> )	4
질소산화물(NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup> )	400	납+비소+안티몬+구리+크롬+코발트+망간+니켈 (Pb+As+Sb+Cu+Cr+Co+Mn+Ni, mg/Nm <sup>3</sup> )	1,000
산소함량(%)	10.3	다이옥신(ng-TEQ <sup>5)</sup> /Nm <sup>3</sup> )	5
연기 중 수분함량(%)	18.7	-	-

<자료 출처 : 북극성대기망(北极星大气网), 2020>

② (처리과정) 실제 프로젝트에 적용된 데이터에 따라 연기처리의 초기설계 공정은 ‘SNCR+정전기 집진기+회전분무식반건조법+소석회<sup>6)</sup> 건식분사+활성탄 분사+백필터 집진기’이다.

<소각발전 연기처리 공정도>



<자료출처 : 북극성대기망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

보일러에서 배출된 연기는 1차로 정전기 집진기의 집진처리 후 탈황 반응탑 상단부로 유입된다. 동시에 석회슬러리(slurry, 浆液)<sup>7)</sup>가 고속 회전하는 분무기를 통해 탈황 반응탑에 균일하게 분사되며 이때 석회슬러리는 연기 중에 있는 염화수소(HCl), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 불화수소(Hf)와 같은 산성 물질과 반응한다. 열을 흡수하여 분사된 석회슬러리는 증발하고 건조 분말형태의 반응물질인 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>)<sup>8)</sup>, 플루오르화 칼슘(CaF<sub>2</sub>)<sup>9)</sup>, 아황산칼슘(CaSO<sub>3</sub>)<sup>10)</sup>, 황산칼슘(CaSO<sub>4</sub>)<sup>11)</sup> 등을 생성한다. 회전분사 탈황처리 후 연기는 백필터 집진기에서 집진처리 후 연기 굴뚝을 통해 배출된다.

4) 불화수소(hydrogen fluoride, 氟化氢) : 원소기호 HF, 19.5 °C 이하에서는 액체로 그 이상에서는 기체로 존재하는 플루오린(원소기호 F)과 수소의 화합물이다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

5) ng(nanogram) : 나노그램의 약자로 1ng=10<sup>-9</sup>g / TEQ(toxicity equivalency) : 독성 등가치로 다이옥신의 독성 기준치이다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

6) 소석회(hydrated lime, 消石灰) : 생석회(CaO)가 물과 반응·소화되어 생긴 수산화물(Ca(OH)<sub>2</sub>)로 가수석회 또는 수산화석회라고도 한다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

7) 슬러리(slurry, 浆液) : 미세한 고체 입자가 액체 중에 현탁되어 있는 유동성의 진흙 상태의 혼합물이다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

8) 염화칼슘(Calcium chloride, 氯化钙) : 염소와 칼슘이 반응하여 만들어진 이온성 화합물로, 화학식은 CaCl<sub>2</sub>이다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

9) 플루오르화 칼슘(calcium fluoride, 氟化钙) : 탄산칼슘 또는 수산화칼슘을 플루오르화수소산으로 중화시킨 용액에서 결정(고체 성분)의 용질로 용액을 만든 다음, 용매를 증발시키거나 용액의 온도를 낮추면 만들어지는 특별한 모양의 고체를 얻으며, 칼슘염과 플루오르화물을 수용액 속에서 반응시키면 침전되어 쌓이는 것을 얻을 수 있고 화학식은 CaF<sub>2</sub>이다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

10) 아황산칼슘(calcium sulfite, 亚硫酸钙) : 석회수에 이산화황을 통과시켜 얻는 황화합물의 일종으로, 화학식은 CaSO<sub>3</sub>이다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

11) 황산칼슘(Calcium sulfate, 硫酸钙) : 칼슘의 황산염으로 화학식은 CaSO<sub>4</sub>이다. (네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

▶ 탈황·탈질처리 적용기술

① (탈황기술) 회전분무건조법(SDA)을 이용한 탈황 공정은 설비가 간단하고 투자·운영비용이 낮다. 또한 설비의 사용부지 면적이 작고, 일반적인 탈황 처리효율은 75~90%를 보장한다. 처리되지 않은 뜨거운 연기는 기체 분포기(gas distributor, 气体分布器<sup>12</sup>)를 통해 분무건조 흡수탑으로 들어가 미세한 석회슬러리와 반응한다. 연기 중의 염화수소(HCl), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 삼산화황(SO<sub>3</sub>) 등과 같은 산성 물질이 아주 작은 알칼리성 액적(droplet, 液滴<sup>13</sup>)과 빠르게 반응하여 처리하고 동시에 연기 속의 수분을 증발시킨다.

유입가스의 분포, 슬러리 유량(discharge, 流量<sup>14</sup>), 크기를 제어하여 액적이 분무건조 흡수탑의 벽과 접촉하기 전에 건조시킨다. 이때 건조된 산물(product, 产物<sup>15</sup>)이 흡수탑 하단의 바닥으로 들어가 분진 운송 시스템으로 유입된다. 탈황처리된 연기는 백필터 집진기에서 고체 입자를 수집하고 수집기에서 나오는 연기는 유인 송풍기(induced draft fan, 引风机<sup>16</sup>)를 통해 굴뚝으로 배출된다.

② (탈질기술) 소각로 연기에서 질소산화물(NO<sub>x</sub>)를 제거하는 공법은 주로 선택적 촉매 환원법(SCR)과 선택적 무촉매 환원법(SNCR)이 있다. SCR은 촉매작용을 이용해 400°C 이하의 조건에서 질소산화물을 제거한다. 하지만 SCR은 설비가 복잡하고 투자·운영비용이 높아 현재 쓰레기 소각장에서 질소산화물 처리를 위해 적용사례가 많지 않다.

하지만 SNCR은 고온(800~1,000°C) 조건에서 환원제인 암모니아 또는 요소를 이용하여 질소산화물을 질소로 환원시킴으로써 촉매를 사용할 필요가 없다. 또한 소각로의 열을 이용하여 내부의 용광로에서 환원반응을 완료한다. SNCR은 낮은 투자비용, 조작간단 등의 장점으로 인해 현재 대다수의 쓰레기 소각장에서는 이를 통해 질소산화물 배출을 제어하는 경우가 많다.

<SCR 및 SNCR 비교>

구분	SCR	SNCR
반응온도(°C)	300~400	800~1,000
처리효율(%)	90	40~60
암모니아 슬립(ppm <sup>17</sup> )	3~5	5~10
촉매제	필요	불필요
환원제	암모니아 용액, 요소용액	암모니아 용액
시스템 압력손실(Pa)	700~1,000	거의 없음
부산물 생성	고체·액체폐기물 발생	없음
투자·운영비용	높음	비교적 낮음

<자료 출처 : 북극성대기망(北极星大气网), 2020>

12) 기체 분포기(gas distributor, 气体分布器) : 기체와 고체의 유동층으로부터 유입되는 기체가 전체 단면에 균일하게 분포되도록 하는 설비이다. (바이두 백과, 2020.5.26.검색)  
 13) 액적(droplet, 液滴) : 분무 건조할 때 액체상태의 식품을 분무기에 의해서 작은 액체방울로 미립화하여 열풍 중에 분무하여 건조한다. 분무 건조에서 건조효율은 이론적으로는 될 수 있는 한 액적을 작게 하고 나아가 균일하게 만드는 것이 가장 바람직하다.(네이버 지식백과, 2020.5.26.검색)  
 14) 유량(discharge, 流量) : 일정한 시간에 흐르는 유체의 량을 의미한다.(네이버 지식백과, 2020.5.26.검색)  
 15) 산물(product, 产物) : 일정한 곳에서 생산되어 나오는 물건의 총칭을 뜻한다.(네이버 국어사전, 2020.5.25.검색)  
 16) 유인 송풍기(induced draft fan, 引风机) : 실내 또는 특정 장소로부터 기체를 흡출해 내는 데 사용하는 환풍기이다.(네이버 지식백과, 2020.5.26.검색)  
 17) ppm(parts per million) : 물질의 농도나 성분비율을 백만분의 1로 나타내는 단위로 1ppm은 0.0001%이다.(네이버 지식백과, 2020.5.26.검색)

## ▶ 공정원리

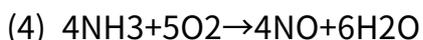
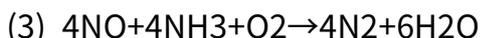
- ① (탈황기술) 회전분무식 반건조법(SDA)는 기계 또는 기류(air current, 气流)의 작용으로 입자 크기가 약 50 $\mu\text{m}$ 인 탈황제를 안개형태로 된 액적을 분산시킨다. 이에 따라 연기가 안개형태의 액적과 접촉하는 면적이 커지게 된다. 기체와 액체상태 사이에서 빠른 열전달(heat transfer, 传热)<sup>18)</sup>, 물질 이동(mass transfer, 传质)<sup>19)</sup>의 화학반응으로 탈황처리를 하게 된다. 연기 기류과정에서 온도를 낮추기 위해 본 프로젝트는 석회를 탈황제로 사용하고 먼지·분진을 저장하는 창고에서 나온 석회와 물이 반응하여 석회슬러리로 전환된다.

쓰레기 소각연기는 탈황설비 상단의 분사기를 거쳐 탈황 반응탑 내부로 들어가며, 연기 속의 이산화황은 탈황 반응탑 꼭대기의 중심에 위치한 회전분무기에서 나오는 수산화칼슘( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )<sup>20)</sup> 용액과 반응한다. 또한 연기에 포함된 삼산화황( $\text{SO}_3$ )<sup>21)</sup>과 같은 산성물질도 동시에 흡수제로 흡수하며 수산화칼슘 화학반응식(1)과 삼산화황 화학반응식(2)은 다음과 같다.



따라서 탈황 반응탑의 고체산물은 주로 아황산칼슘이나 황산칼슘이 포함된다.

- ② (탈질기술) 선택적 무촉매 환원법(SNCR)로 암모니아를 쓰레기 소각로에 분사하며, 온도가 750~900 $^{\circ}\text{C}$  구간에서 질소산화물이 암모니아와 반응해 질소와 물 등 무해물질을 생성한다. 반응이 없는 암모니아는 염화칼슘( $\text{CaCl}_2$ )<sup>22)</sup>과 염화암모늄( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )<sup>23)</sup>을 생성하여 질소산화물 배출량을 감소시킨다. 이때 발생하는 화학반응식은 다음과 같다.



환원제로 암모니아 용액 25%를 사용하며, 암모니아수는 연수(softened water, 软化水)<sup>24)</sup>와 혼합한 후 소각라인의 폐열보일러(waste heat boiler, 余热锅炉)<sup>25)</sup>에 설치된 SNCR 전용분무기·용광로 내부의 분무기·SNCR 탈질설비를 통해 쓰레기 소각로에서 발생하는 질소산화물의 배출량을 200mg/Nm<sup>3</sup>의 표준배출 요구사항에 배출하도록 한다.

18) 열전달(heat transfer, 传热) : 두 물체 사이에서 열에너지가 이동하는 것을 말한다.(네이버 지식백과, 2020.5.27.검색)

19) 물질 이동(mass transfer, 传质) : 하나의 물질에서 그 일부가 다른 물질로 옮겨가는 것을 말하며, 물질 전달이라고도 한다. 공기 속에 포함되어 있는 수증기가 이것과 접촉하는 물의 표면 사이로 흡수되거나 발산하는 것이 물질 이동에 해당된다.(네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

20) 수산화칼슘(calcium hydroxide, 氢氧化钙) : 칼슘의 수산화물로 화학식  $\text{Ca}_2$ 의 백색 분말 형태의 염기성 화합물이다.(네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

21) 삼산화황(sulfur trioxide, 三氧化硫) : 황의 무수물로 상온에서 무색 결정이며 강한 산성 물질이다.(네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

22) 염화칼슘(calcium chloride, 氯化钙) : 염소(Cl)와 칼슘(Ca)이 반응하여 만들어진 이온성 화합물이다.(네이버 지식백과, 2020.5.27.검색)

23) 염화암모늄(ammonium chloride, 氯化铵) : 암모니아의 염으로 순수한 상태에서 맑은 흰색의 수용성 결정이다.(네이버 지식백과, 2020.5.26.검색)

24) 연수(softened water, 软化水) : 칼슘 이온이나 마그네슘 이온의 함유량이 적은 물이다. 공업에서는 경도(硬度, 물속에 함유되는 칼슘과 마그네슘의 용존량을 나타내는 값) 10 이하의 물을 말하며, 증류수는 경도 0인 단물(칼슘이온이나 마그네슘이온을 적게 포함하고 있는 물)이다.(네이버 지식백과, 2020.5.25.검색)

25) 폐열보일러(waste heat boiler, 余热锅炉) : 여열보일러라고도 하며, 가열로·용해로·시멘트 킬른(kiln) 등으로 보일러 이외의 노로부터 오는 고온 배기가스의 열을 이용하여 증기 발생을 하는 것으로 보일러 자체에는 연소실이 없다. 배기가스의 종류는 다양한데 일반적으로 다량의 먼지나 부식성 가스를 포함하는 경우가 많기 때문에 각각의 경우에 따라 가스유속, 전열면의 배치 등 대책이 취해진다.(네이버 지식백과, 2020.5.27.검색)

## ▶ 처리효과

연기공정을 위한 설비는 <생활쓰레기소각오염 통제표준(生活垃圾焚烧污染控制标准)>(GB18485-2014) 요구사항에 부합해야 하며, 본 공정에서 배출된 오염물질의 농도는 다음과 같다.

<연기처리 설비 설치 후 배출농도>

구분	일(日) 평균 배출농도(mg/Nm <sup>3</sup> )		구분	일(日) 평균 배출농도(mg/Nm <sup>3</sup> )	
	국가표준	본 공정		국가표준	본 공정
연기먼지	20	10	총유기탄소(TOC) <sup>26)</sup>	-	10
이산화황	80	50	수은	0.05	0.05
질소산화물	250	200	카드뮴+탈륨	0.1	0.05
일산화탄소	80	50	납+크롬 등 기타화합물	1	0.5
염화수소	50	10	연기흑도(링겔만흑도 <sup>27)</sup> )	1	1
불화수소	-	1	다이옥신(ng-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	0.1	0.1

<자료 출처 : 북극성대기망(北极星大气网), 2020>

\* 위 표는 중국표준 상태인 산소함량 11% 기준에서 배출되는 오염물질 배출농도이며, 빨간색 표시는 쓰레기 소각로에서 배출되는 주요 대기오염물질의 제한치이다.

## ▶ 시사점

쓰레기 소각발전은 쓰레기의 자원화를 통해 재사용하는 기술이다. 하지만 이때 소각로에서 발생하는 연기처리는 소각발전에서 환경관리에 대한 중요한 요소로 2차 오염을 발생시킨다. 이는 쓰레기의 다양한 성분으로 인해 소각로에서 배출되는 연기에 함유되어 있는 오염물질도 복잡하다.

소각로에서 배출되는 연기 속에는 많은 양의 염화수소, 불화수소, 이산화황, 질소산화물, 중금속, 다이옥신 등 다양한 오염물질이 포함되어 있어 쓰레기 소각으로 발생하는 2차 오염을 방지하기 위해 오염물질 배출농도는 중국에서 규정한 배출표준에 반드시 부합해야 한다.

마지막으로 본 사례에서 쓰레기 소각로에서 배출되는 연기처리를 위해 ‘SNCR+정전기 집진+회전분무반건식탈황법(SDA)+백필터 집진기’ 기술을 적용하였다. 적용 후, 주요 오염물질 배출농도는 입자상물질 10mg/m<sup>3</sup>, 이산화황 50mg/m<sup>3</sup>, 질소산화물 200mg/m<sup>3</sup>로 모두 중국 <생활쓰레기 소각오염통제 표준>의 요구사항에 부합한 것으로 나타났다.

현재 중국의 쓰레기 처리방식이 매립에서 소각발전으로 전환하고 있는 시점이며, 이에 향후 쓰레기 소각로 연기의 탈황·탈질처리를 위해 이와 같은 기술이 적용될 것으로 전망된다.

북극성대기망(北极星大气网), <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200212/1042216.shtml>, 2020.5.27.접속

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

26) 총유기탄소(TOC, total organic carbon, 总有机碳) : 물속에 함유되어 있는 유기물 물질의 농도로서 물속에 포함된 전체 탄소량을 의미한다. 이는 수질의 오염정도를 나타내는 지표이다.(네이버 지식백과, 2020.5.26.검색)

27) 링겔만흑도(Ringelman emittance, 林格曼黑度) : 탄이나 중유를 연소할 때, 굴뚝에서 나오는 매연의 농도를 측정하기 위하여 사용하는 농도 지표이다.(바이두 백과, 2020.5.26.검색)



## 중국환경산업 주간기술동향

발행

2020년 5월 28일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승(cms0522@keiti.re.kr)

자료제작

▷ 김종균(jaykim@keiti.re.kr)



중국환경산업 주간기술동향은 매주 목요일 발행됩니다.  
문의 : +86-10-8591-0997~8