

## 대기오염방지

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

### 생활 쓰레기 소각발전소에서 배출되는 오염물질 제거 공정 소개

#### ▶ 개요

중국의 급격한 도시화로 인해 생활 쓰레기 발생량이 증가하고 있어 이로 인한 쓰레기 처리 문제가 중요한 화두로 급부상하고 있다.

쓰레기 소각발전은 환경보호 정책 요구사항에 부합하는 친환경 산업 중 하나로 이미 여러 선진국뿐 아니라 중국 내에서도 많이 적용하고 있다.

하지만 쓰레기 소각처리 과정에서 발생하는 연기는 대량의 오염물질을 포함하고 있어, 이를 잘못 처리하게 될 경우, 2차 오염을 유발할 수 있기 때문에 소각과정에서 발생하는 연기 내 오염물질 배출을 엄격히 통제해야 한다. 이에 생활 쓰레기 소각과정에서 연기의 오염물질 분석 결과에 따라 공정 설계가 달라지기 때문에 사전 분석이 중요한 사항이다.

본 기술동향은 중국에서 많이 적용되고 있는 생활 쓰레기 소각처리 과정에서 발생하는 연기정화 공정은 어떤 방식이 있는지 살펴보고자 한다.

#### ▶ 오염물질 처리기술

##### 1) 건식 연기 탈황·탈질 처리 결합 기술(干烟气脱硫脱硝一体化技术)

‘고에너지 방사선법(高能辐照法)’은 건식 연기 탈황·탈질 처리 결합 기술의 대표적인 기술로 ‘전자빔조사법(电子束辐照法)’, ‘펄스코로나이온체법(脉冲电晕离子体法)’ 2가지로 분류된다.

① (전자빔조사법) 주로 전자 가속기를 이용하여 오염물질을 제거하는 방식으로, 고에너지 플라즈마 산화 연기의 오염물질을 강산화(强氧化) 반응시켜 산화물과 이산화황을 제거한다. 강산화 반응 후 수증기와 반응하면서 황산 등 산성 물질이 생성되고, 다시 질산과 암모니아가 반응하여 질산암모늄과 황산암모늄을 생성하여 연기 중의 유해성분을 제거하게 된다.

② (펄스코로나이온체법) 주로 고압펄스 전원이 전자빔 가속기를 대체하여 사용되며, 원리는 ‘전자빔 조사법’과 거의 일치한다.

최근 과학기술 수준이 빠르게 발전되면서 ‘고에너지 방사선법’ 중 ‘전자빔조사법’이 광범위하게 응용되고 있으며, 탈황 효율은 90% 수준까지 도달한다. 하지만 탈질효율은 18%로 상대적으로 낮은 수준에 머무르고 있다.

‘고에너지 방사선법’은 탈황·탈질 과정 중에 폐기물과 폐수가 거의 발생하지 않기 때문에 2차 오염을 유발하지 않고 부산물은 가공하여 폐원료로 생산이 가능하여 경제적인 효과가 있다.

## 2) 탈산처리(脱酸处理)

생활 쓰레기 소각과정에서 발생하는 연기 중 탈산처리 기술은 주로 건식, 반건식, 습식 3가지 방식을 이용한다.

- ① (건식) 석회가루를 연기 통로에 직접 분사시켜 산성기체와 반응하도록 하여 고체 형태의 산화물로 만들어 탈산 처리하는 방식이다. ‘건식법’은 폐수를 발생시키지 않기 때문에 폐수 처리 설비가 필요 없다. 또한 조작이 간단하며, 설비의 원가와 유지비용이 저렴하다. 하지만 석회가루 소모가 많기 때문에 장기간 사용할 경우, 플라이 애시(fly ash)가 많이 발생하여, 탈착효율이 떨어지는 문제점이 있다.
- ② (반건식) 건식과 습식 탈산법 사이에 있는 탈산법으로 반응탑에 일정 농도의 수산화칼슘을 뿌려 연기 속에 있는 산성기체와 반응하면서 탈산 처리하는 것이다. ‘반건식법’은 연기의 여열을 이용하여 반응물 속 수분을 증발시키며, 최종적으로 반응된 산물은 마른 고체 상태로 배출된다. 이때, 반응온도가 탈산 효율에 영향을 미치기 때문에 온도가 너무 높거나 낮을 경우, 탈산 효율이 떨어진다. 일반적으로 ‘반건식법’의 탈산 효율은 90~99% 수준이지만, 조작이 어렵고 반응탑 내 체류시간과 배출구의 온도차에 대한 엄격한 제어를 요구하고 있다.
- ③ (습식) 석회석 용액으로 세척탑 안에서 연기 속의 산성가스와 반응하여 제거된다. ‘습식법’은 탈산 효율이 HCl 99% 이상, SO<sub>2</sub> 95% 이상으로 비교적 높지만, 탈산처리로 인한 많은 폐수가 발생하므로 폐수처리 장치 설치가 필요하다. 또한 ‘습식법’ 적용 후 연기온도는 보통 60~70°C이며, 연기 굴뚝의 부식이나 백연현상을 방지하기 위해 연기 재가열기를 추가로 설치하여 연기온도를 산노점(酸露点, acid dew point)<sup>1)</sup> 이상으로 가열하도록 해야 한다. 따라서 ‘습식 법’은 탈산 효율은 높지만, 시스템이 복잡하여 운영비용과 유지비용이 많이 드는 단점이 있다.

표 1. 탈산처리 방식 요약정리

구분	특징
건식	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 석회가루를 이용하여 연기 통로에 직접 분사하여 산성기체와 반응 후 고체 형태의 산화물로 만들어 처리함</li> <li>· 폐수를 발생하지 않기 때문에 폐수처리 장치 필요 없음</li> <li>· 간단한 조작, 운영·유지비용 적음</li> <li>· 장기간 사용 시 플라이 애시 발생으로 탈산 효율 감소</li> </ul>
반건식	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 반응탑에 일정 농도의 수산화칼슘을 뿌려 연기 속의 산성기체와 반응시켜 제거함</li> <li>· 연기의 여열을 이용하여 반응물의 수분을 증발시켜 고체 형태로 배출됨</li> <li>· 반응온도가 탈산 효율에 영향을 미치므로, 온도가 너무 높거나 낮은 경우 탈산 효율이 감소함</li> <li>· 탈산 효율 90~99%이며, 시스템 조작이 어렵고, 체류시간과 반응탑 배출구 온도차에 대한 제어가 엄격함</li> </ul>
습식	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 석회석 용액을 이용하여 탈산 처리함</li> <li>· 탈산 효율 HCl 99% 이상, SO<sub>2</sub> 95% 이상</li> <li>· 폐수가 발생하기 때문에 폐수처리 장치가 필요함</li> <li>· 연기 배출구의 부식이나 백연현상을 방지하기 위해 재가열기를 설치하여 산노점 이상으로 가열하여 배출됨</li> </ul>

자료출처 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

1) 산노점(酸露点, acid dew point) : 황을 많이 함유한 연료를 사용할 때, 연소 후 생성되는 SO<sub>2</sub>의 일부가 SO<sub>3</sub>로 더 산화되어 연기 속의 수증기와 결합해 황산 증기로 변하는 연기의 응결 온를 뜻한다. / 출처 : 바이두백과 번역(2021.2.8.검색)

### 3) 연기 집진처리 기술(烟气除尘技术)

연기 속에 포함된 입자상물질을 분리하기 위해서는 연기가 흐르는 방향과 수직으로 상대속도(相对速度, relative velocity)<sup>2)</sup>를 갖게 하거나, 입자상물질이 기체의 분자운동(烟气运动)에서 벗어나도록 해야 한다. 이를 통해 입자상물질이 여과필터 위로 쌓이게 하거나, 정전기의 양극부분에 있는 제거부분으로 모이도록 해야 한다. 따라서 집진설비에서 입자상물질을 모으는 방식은 관성·중력·원심력·전력 등 다양하며, 현재 가장 많이 사용되는 집진설비는 백필터 집진기와 전기 집진기이다.

### 4) 다이옥신 제어 기술(二噁英控制技术)

각종 플라스틱 제품과 일부 특수 금속으로 인해 소각 후 발생하는 연기에는 다이옥신 등 유해성 물질과 같은 처리하기 어려운 오염물질이 포함되어 있다. 표준상태(标准状态, Standard state)<sup>3)</sup>에서 다이옥신은 고체 상태로 물이 잘 녹지 않고 독성이 강하다. 또한 다이옥신은 비등점(沸点, boiling point)<sup>4)</sup>이 높고 수증기장력(汽化压力, vapour pressure)<sup>5)</sup>이 낮은 것이 특징이다.

현재 다이옥신을 처리하기 위해 활성탄 흡착법을 가장 많이 사용하고 있다. 이는 반응기와 집진기 사이의 연기 통로에 활성탄을 분사하여 연기와 충분히 혼합시켜 다량의 다이옥신과 중금속을 함유한 입자상물질을 흡착시키고, 집진기의 포집을 통해 흡착된 다이옥신과 함께 제거된다. 이밖에 쓰레기 소각 시 온도조절을 통해 다이옥신 발생을 원천적으로 제어하는 방법도 있다. 이 방법은 소각로 온도가 850°C 이상으로 반응기에서 연기 체류시간이 2초 이상 머물지 않으면 연소가 되는 산물에서 다이옥신은 거의 발생하지 않는다.

아울러 300~500°C의 온도 구간에서 연기가 머무르는 시간을 단축하여 급냉각 할 수 있도록 하고, 집진기 유입구의 연기온도를 200°C 이하로 조절해야 한다. 이는 고온으로 인해 필터의 수명이 줄어들고 다이옥신이 재합성되는 것을 방지한다.

동 공정은 시스템이 비교적 복잡하고 연기온도 제어에 대한 요구가 비교적 높기 때문에 현재 중국 내에서는 활성탄을 이용하여 다이옥신을 제거하는 방법을 주로 사용하고 있다.

### 5) 습식연기 탈황·탈질 처리 결합 기술(湿烟气脱硫脱硝一体化技术)

염소산(氯酸, Chloric acid)<sup>6)</sup> 산화반응 중 연기 속에 있는 일산화질소와 이산화황은 염소산의 강한 산화반응으로 흡수된다. 이 방식은 주로 전체 과정에서 진행되며, ‘기본흡수법(基本吸收法)’, ‘산화흡수법(氧化吸收法)’으로 구분된다.

일산화질소와 이산화황 제거에 뚜렷한 효과를 보일 뿐 아니라 연기 중에 있는 유독성 금속물질도 함께 제거할 수 있다. 또한 ‘습식연기 탈황·탈질 처리 결합 기술’은 촉매제에 대한 활성상실 등 문제가 발생하지 않아 설비의 적응성이 뛰어나며 상대적으로 흡수하는 연기의 구분 없이 산화흡수가 가능하다. 하지만 동 결합 기술에서 사용되는 염소산 흡수제의 제조가 어렵고 설비의 부식을 일으키기 쉬우며, 처리 후 발생하는 부산물인 폐산과 같은 2차 오염을 유발하기도 한다.

2) 상대속도(相对速度, relative velocity) : 어떤 물체에서 다른 물체를 본 상대적인 속도이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.8.검색)  
 3) 표준상태(标准状态, Standard state) : 상태에 따라 변화하는 물질의 여러 가지 성질을 기술하기 위하여 기준으로 정한 상태이다. 기체의 경우는 흔히 1 기압(atm)일 때의 상태를 표준상태라고 한다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.8.검색)  
 4) 비등점(沸点, boiling point) : 액체가 표면과 내부에서 기포가 발생하면서 끓기 시작하는 온도이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.8.검색)  
 5) 수증기장력(汽化压力, vapour pressure) : 수증기 분압을 말함. 공기중에 포함되어 있는 수증기가 항상 기체로 확산하여 함으로 생기는 압력이다. / 네이버 지식백과 발췌(2021.2.8.검색)  
 6) 염소산(氯酸, Chloric acid) : 무색의 강한 일염기산. 화학식 HClO3. 수용액으로만 존재한다. 염소산바륨수용액에 황산을 작용시켜 침전하는 황산바륨을 제거하여 만든다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.8.검색)

## 6) 중금속 제어 기술(重金属控制技术)

도시 생활 쓰레기 소각 시 쓰레기의 성질, 소각로 상태, 중금속 존재 형태에 따라 연기 속에 포함된 중금속의 농도가 결정된다. 보통 생활 쓰레기 소각과정에서 발생하는 연기의 중금속 원소는 입자상 물질이나 기체와 같은 형태로 존재하게 된다.

입자상물질 상태의 중금속은 온도가 낮아지면서 플라이 애시 표면에 흡착되며, 반면에 기체 상태인 경우, 쓰레기 소각과정에서 연기처리 시스템의 냉각과정에서 부분적으로 응축된다. 고체 입자 물질로 활성탄을 흡착한 뒤 집진기를 통해 플라이 애시를 흡수하여 제거하며, 습식 세척법을 통해 연기 중에 함께 있는 재, 중금속을 제거한다.

연기 처리시스템에서 냉각을 통해 응고되지 않은 중금속 원소는 플라이 애시 표면의 촉매반응으로 염화물이나 금속산화물의 입자상물질로 전환시켜 집진기에서 처리된다.

## 7) 플라이 애시 처리 기술(飞灰处理技术)

① (고체화 및 안정화법, 固化和稳定化法) 화학약품을 통해 플라이 애시와 혼합시켜 유해물질에 고정되면서 처리하는 방식이다. 현재까지 가장 보편화된 기술은 시멘트나 액체를 플라이 애시가 발생하는 부분에 투여하여 중금속과 접촉시켜 처리하며, 처리효율은 97% 이상으로 나타난다. 또한 안정성이 뛰어나고 용량의 감소율이 높은 특징이 있다.

② (습식화학처리법, 湿式化学处理法) 연기 중의 황산이나 염산을 혼합하여 수용액에서 녹여 중금속 물질을 용액 방향으로 석출(析出, eduction)<sup>7)</sup> 시킨 뒤 약품을 첨가하여 황화물이나 수산화물로 만들어 처리한다.

③ (고온처리법, 高温处理法) 소결법(烧结法)과 용융법(熔融法)으로 분류된다.

- (소결법) 플라이 애시와 미세한 유리가루를 혼합하여 처리하는 방식으로, 알갱이를 고온(1,000~1,400°C)에서 소결시켜 고체로 만들어 고체화가 장기적으로 안정화되도록 한다.
- (용융법) 소각로에 플라이 애시를 보내고 140°C까지 가열한다. 고함량 무기질을 고온에서 용해로 변화시켜, 플라이 애시를 감량화, 자원화, 무해화 처리한다.

이처럼 ‘고온처리법’은 ‘소결법’이나 ‘용융법’을 서로 결합하여 33~50%의 용량 감축이 가능하지만, 연기처리를 위한 설비가 필요하며, 복잡한 공정기술, 넓은 사용부지, 고(高)처리비용의 단점이 있다.

### ▶ 시사점

소각발전은 대량의 생활 쓰레기를 처리함과 동시에 자원화가 가능하기 때문에 현재 생활 쓰레기를 처리하는 주요 방식이다. 하지만 쓰레기 소각과정에서 연기 오염이 발생하기 때문에 이를 적절한 처리방식을 적용하여 처리하여 2차 오염을 방지해야 한다. 이에 쓰레기 소각발전소의 연기처리 공정은 설계 단계에서부터 연기 정화를 위해 적합한 공정 선택이 중요한 요소가 될 전망이다.

출처 : 북극성대기망(2021.1.21. 발표), <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20210121/1131379.shtml>, 2021.2.9. 접속

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

7) 석출(析出, eduction) : 온도를 녹는점 이하로 낮춰 액체상으로부터 고체상을 만들어 내거나, 온도에 따른 용해도 변화에 의해 용질이 결정화되는 현상을 말한다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.9.검색)



## 중국환경산업 주간기술동향

발행

2021년 2월 9일 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