

## 수처리

&lt;KEITI 중국사무소 차목승 연구원&gt;

## 석탄화력발전소 탈황폐수 제로 배출을 위한 적용기술 소개

## ▶ 개요

현재 공업용 가마(kiln, 窑炉)<sup>1)</sup>에서 배출되는 연기 탈황공법은 습식, 건식, 반건식 등 화학적 탈황 공법이 흔히 쓰이고 있다. 그중, 석회석-석고 습식 연기 탈황공법은 기술의 성숙도와 탈황 처리 효율이 높고 석탄에 대한 적합성이 뛰어나 석탄화력발전소에서 널리 응용되고 있는 방법이다. 하지만 실제 운행과정에서 연기속의 염화물질, 입자상물질, 중금속과 같은 여러 오염물이 지속적으로 발생되고 있다. 또한 설비 배관의 부식으로 탈황 효율 저하, 탈황시스템의 평형관(balanced tube, 平衡管)<sup>2)</sup> 불균형 등 문제가 발생하고 있다. 따라서 탈황공법을 적용한 후에는 일정 시간마다 일정량의 탈황폐수를 배출해야 한다. 특히, 이 폐수에는 많은 현탁물(suspended solid, 悬浮物)<sup>3)</sup>, 높은 염분, 다양한 중금속으로 인해 수질의 성분이 복잡하고 처리 난이도가 상당히 높다.

2015년 4월 중국은 <수오염행동방지계획(水污染行动防治计划)>('수10조, 水十条') 발표하여 석탄 화력발전소의 공업폐수 배출에 대한 새로운 요구조건을 제시하였다. 그리고 중국 내 모든 발전소의 폐수가 제로 배출이 되기 위해 개조 정책을 실시하였다. 또한 2017년 발표된 <화력발전소 오염 방지를 위한 기술 타당성 지침(火电厂污染防治可行性技术指南)> 역시 탈황폐수의 제로 배출과 관련된 내용이 포함되어 있다.

대부분의 석탄화력발전소에서 멀티 증발법(多效蒸发), 기계증기재압축증발법(机械蒸汽再压缩蒸发), 막처리법(膜处理技术) 등 공정으로 탈황폐수 제로 배출을 시행하고 있다. 하지만 이와 같은 시범 사업은 운행기간이 짧고 경제성이 떨어지는 등 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 내용은 탈황 폐수의 수질 특성을 분석하여 저온여열증기증발(低温余热闪蒸蒸发) 탈황폐수 처리기술을 적용하였다. 300MW 발전세트에서 15m<sup>3</sup>/h로 배출되는 탈황폐수에 대한 시범공정을 진행하였으며, 현재까지 시스템이 안정적으로 운영되고 있고 정수 회수이용율(净水回用率)도 높게 나타났다.

## ▶ 탈황폐수 특징 및 처리 현황

본 내용은 산시성(山西省)의 어느 석탄화력발전소에서 습식 탈황처리 후 배출되는 탈황폐수 처리에 대한 적용 사례이다. <표1>에 따르면, 탈황폐수의 주요 성분은 석회석, 회분 등이 많은 현탁물이다. 특히 칼슘이온·마그네슘이온·황산이온의 농도가 높아 스켈링(Scaling, 结垢)<sup>4)</sup> 현상이 많이 발생한다. 또한 pH값은 낮고 염소이온이 높아 설비의 배관에 부식을 초래하며, 수은·카드뮴·크롬 등 중금속도 포함되어 있어 탈황폐수의 수질은 굉장히 다양하게 나타난다.

1) 가마(kiln, 窑炉) : 소성(烧成)·용융(熔融) 등의 열처리공정을 수행하기 위해서 사용하는 장치로서, 도자기·벽돌·유리·시멘트 등 요업제품의 제조공정에 사용된다.(네이버 지식백과, 2020.6.18.검색)

2) 평형관(balanced tube, 平衡管) : 증기 집합관과 급수 헤더를 연결하는 관이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)

3) 현탁물(suspended solid, 悬浮物) : 하수 속에 현탁해 있는 물질이다.(네이버 지식백과, 2020.6.18.검색)

4) 스켈링(Scaling, 结垢) : 물을 끓일 때 칼슘, 마그네슘, 탄산수소염 등 흰색 침전물이 용기 내벽에 달라붙는 현상이다.(바이두 백과, 2020.6.22.검색)

<표1. 탈황폐수 수질 매개변수>

매개변수	함량	매개변수	함량
pH값	5~6	총 철금속(mg/l)	2~5
색도(희석배율)	16	총 동(μm/l)	110~200
현탁물(mg/l)	≤70	총 수은(μm/l)	1~5
COD(mg/l)	350~450	총 카드뮴(μm/l)	230
암모니아성 질소(mg/l)	15~30	총 크롬(μm/l)	28~147
황화물(mg/l)	0.005	총 비소(μm/l)	600~800
불소화합물(mg/l)	92~170	총 납(μm/l)	1,600
염소이온(mg/l)	6,800	총 니켈(μm/l)	≤1,000
황산이온(mg/l)	30,000	총 아연(μm/l)	160
총 규소(mg/l)	10~20	총용존 고형물 <sup>5)</sup> (g/l)	20~30
나트륨이온(mg/l)	1,260~1,380	고체함유량 <sup>6)</sup> (%)	≤1
칼슘이온(mg/l)	500~800	중탄산염 <sup>7)</sup> (μm/l)	0~2,900
마그네슘이온(mg/l)	8,000~10,000		-

<자료 출처 : 북극성 수처리망 내용 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

탈황폐수는 ‘중화(neutralization, 中和)<sup>8)</sup>-응집(flocculation, 絮凝)<sup>9)</sup>-침전’ 3중으로 처리된다. 회수된 용수(回用水)는 주로 석회 건조, 조습(conditioning, 调湿)<sup>10)</sup>, 타고남은 재의 응축 등에 사용된다. 탈황폐수는 스킨링(p1. 각주4 참고) 제거 시스템을 통해 조습 용수로 대체할 수 있다. 이는 낮은 시스템 개조비용, 단순한 구조, 조작 간단 등 장점이 있다. 하지만 스킨링 제거 시스템에 사용되는 용수의 양이 탈황폐수 생산량보다 적어 충분히 이용하기가 힘들다. 그리고 전통적인 처리 방법인 전처리 과정 후 폐수는 여전히 대량의 염소이온을 함유하고 있다. 따라서 pH값이 낮고 스킨링 제거 시스템 설비에 부식이나 막힘 현상이 자주 발생한다.

## ▶ 저온여열증기증발 탈황폐수 제로 배출 시스템

### 1) 저온 멀티 증발기술(低温多效蒸发技术) 원리

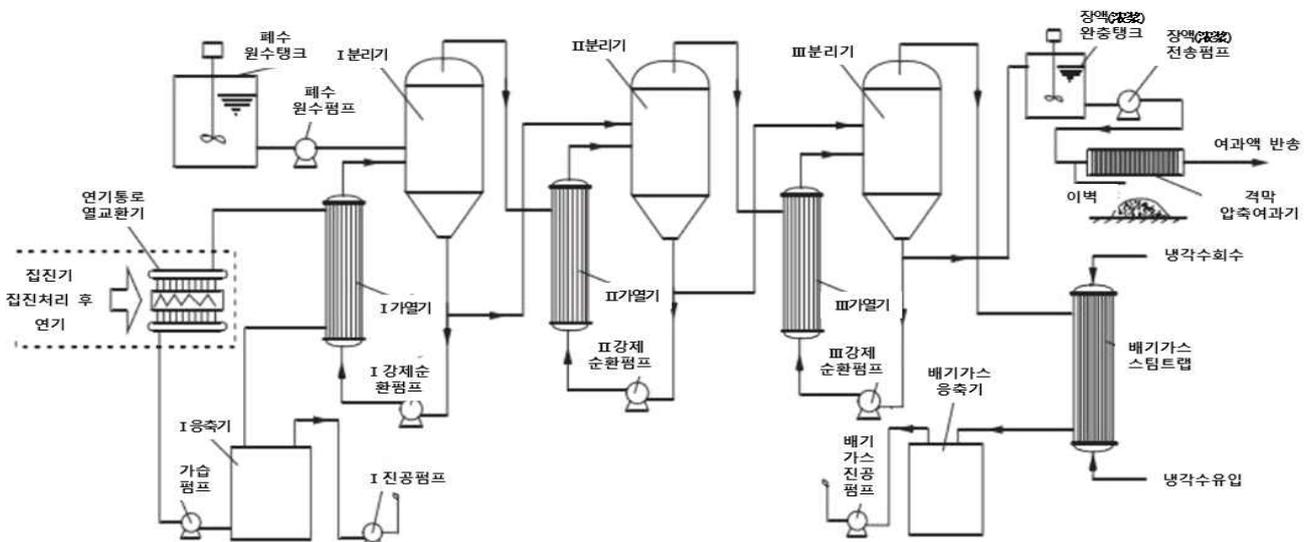
- ① (저온여열증기증발이용 원리) 본 기술은 수용액의 끓는점이 압력 저하로 인해 낮아지는 원리로서, 탈황폐수를 계단식 형태로 여러 번 증발하여 농축한다. 한편, 집진기 배출구에서 나온 저온의 연기 열에너지를 이용하고, 진공펌프(vacuum pump, 真空泵)<sup>11)</sup>를 통해 연기 통로(烟道)에 열교환기 시스템 부하 압축으로 생성된 100°C 미만의 저온 증기를 생성한다. 이때, 멀티 증발시스템의 외부 열에너지를 통해 연기의 여열을 효율적으로 이용하도록 한다.
- ② (가열기의 효율적인 찌꺼기 제거 원리) ‘강제순환유속제어기술(控制流速强制循环技术)’과 ‘촉매 자기화·결정스킬링제거기술(催化磁化及结晶防垢技术)’을 적용한다. 강제로 순환유속을 제어하여 물질이동(mass transfer, 传质)<sup>12)</sup>의 흐름을 향상시키고 파이프라인 벽에 스킨링을 감소시킨다.

5) 총용존 고형물(TDS, Total Dissolved Solids, 总溶解性固体) : 물속에 녹아 있는 고형물의 농도이다.(네이버 국어사전, 2020.6.22.검색)  
 6) 고체함유량(solid content, 含固量) : 이수(泥水)중에 포함된 점토분, 실트분, 사분, 혈암의 미립자와 바리이트 등의 함유량이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 7) 중탄산염(bicarbonate, 重碳酸盐) : 탄산수소염이라고도 하며, 탄산(H2CO3)에 포함된 2개 중 1개의 수소원자가 금속원자로 치환되어 생기는 염을 뜻한다.(네이버 지식백과, 2020.6.19.검색)  
 8) 중화(neutralization, 中和) : 산과 염기가 당량씩 반응하여 산 및 염기로서의 성질을 잃는 현상이다.(네이버 지식백과, 2020.6.19.검색)  
 9) 응집(flocculation, 絮凝) : 용액 중에 분산되어 있는 콜로이드 입자들의 인력으로 말미암아 용액상에서 비분산성 형태로의 상분리(phase separation)를 의미한다.(네이버 지식백과, 2020.6.19.검색)  
 10) 조습(conditioning, 调湿) : 일정한 온도·습도의 환경조건에 재료를 일정기간 노출시켜 재료가 환경조건에서 평형상태에 이르게 하는 것이다.(네이버 지식백과, 2020.6.19.검색)  
 11) 진공펌프(vacuum pump, 真空泵) : 대기압 이하의 압력에서 기체를 흡입하여 대기압에서 배출하는 데 사용되는 압축기이다.(네이버 지식백과, 2020.6.19.검색)  
 12) 물질이동(mass transfer, 传质) : 하나의 물질에서 그 일부가 다른 물질로 옮겨가는 것을 말하며, 물질 전달이라고도 한다.(네이버 지식백과, 2020.6.19.검색)

2) 공정과정

‘저온여열증기증발기술’은 석회석-석고 습식법에 응용되며, 탈황폐수 제로 배출을 위한 공정과정은 <그림1>과 같다. 전체 공정은 주로 폐수 저장·운송시스템, 연기 통로 열교환기 시스템, 멀티 증발시스템, 냉각시스템, 농액(浓液)처리시스템 등 구조로 구성된다. 또한 집진기 배출구와 송풍기 연기 통로 입구에 열교환기를 추가로 설치하도록 한다. 집진기 배출구에서 배출되는 132°C의 연기 열에너지는 I진공펌프의 작용에 의해 열교환기 안에 있는 매개질인 탈염수(desaltedwater, 除盐水)<sup>13)</sup>를 100°C 이하의 저온으로 증기를 가열하고, 그 증기(열에너지)를 I 증발시스템으로 보내 폐수를 증발시켜 농축한다. 응축된 증기를 수집하여 I 응축기에서 다시 가습펌프를 통해 연기 통로의 열교환기로 보내진다.

<그림1. 저온여열증기증발기술 공정도>



<자료 출처 : 복극성 수처리망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

하이드로클론(hydroclone, 水力旋流器)<sup>14)</sup>은 배출구로부터 배출된 탈황폐수는 폐수원수(raw water, 原水)<sup>15)</sup> 탱크와 펌프를 거쳐 멀티 증발시스템에서 가열·농축된다. 배기가스의 진공펌프에 의해 I 분리기에서 발생한 폐수는 I가열기 파이프라인을 통해 일정하게 흐른다. 그리고 I가열기의 셸(shell, 壳程)<sup>16)</sup> 과정으로 증기의 열을 교환하고, 가열된 폐수는 다시 I 분리기로 재진입하여 증기와 액체로 분리된다. 또한 I 강제순환펌프를 이용한 강제순환 증발농축재료의 경우는 I 증발 시스템에서 여러 번 순환하여 초기 단계의 농축재료는 평형관(p1. 각주2 참고)에서 액위(liquid level, 液位)<sup>17)</sup>의 압력차(pressure difference, 压差)<sup>18)</sup>로 II분리기로 들어간다. 동시에 I 분리기에서 발생하는 2차 증기가 II가열기로 들어가 II증발시스템의 열에너지로 사용된다.

13) 탈염수(desaltedwater, 除盐水) : 이온 교환 수지를 사용하는 이온 교환법 등에 의해 무기염류를 제거한 물이다.(네이버 지식백과, 2020.6.19.검색)  
 14) 하이드로클론(hydroclone, 水力旋流器) : 공기 속에 포함된 먼지를 제거하기 위하여 사용하는 사이클론 스크러버의 하나. 물을 분무하고 먼지는 침강시켜 제거한다.(네이버 국어사전, 2020.6.22.검색)  
 15) 원수(raw water, 原水) : 인공적인 처리를 하지 않은 자연 그대로의 물이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 16) 셸(shell, 壳程) : 유체가 열 교환기의 셸, 튜브 및 관속(vascular bundle, 물과 양분을 수송하는 관으로 물관과 체관으로 구성) 사이의 공극을 따라 왼쪽에서 오른쪽(또는 오른쪽에서 왼쪽)으로 흐른 거리를 뜻한다.(바이두 백과, 2020.6.22.검색)  
 17) 액위(liquid level, 液位) : 밀폐·개방된 용기 속 액체의 높이가 높고 낮음을 의미한다.(바이두 백과, 2020.6.22.검색)  
 18) 압력차(pressure difference, 压差) : 누설시험에서 누설부의 출입구의 압력 차이를 뜻한다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)

이러한 방식으로 폐수를 끊임없이 농축(浓缩)·결정(crystal, 结晶)<sup>19)</sup>하고 정수는 지속적으로 응축하여 증발시킨다. 최종적으로 Ⅲ분리기 배출구의 2차 증기는 배기가스 응축기(冷凝器) 내에서 냉각수로 순환 이용하여 증기를 응결수(condensation water, 凝结水)<sup>20)</sup>로 응축시키고, 배기가스 응축탱크(冷凝罐)에 수집된다. Ⅲ증발시스템에서 장액(serous fluid, 浆液)<sup>21)</sup>의 농도가 1,300kg/m<sup>3</sup> 이상인 경우, 추출밸브를 열고 Ⅲ강제순환펌프 배출구의 압력 수두(pressure head, 压头)<sup>22)</sup>를 이용해 농축액(浓浆液)을 장액 완충탱크로 보내 저장한다.

배출되는 각 오염물질에 따라 액위(p.3, 각주 17참고)가 감소한다. 폐수는 폐수원수펌프 작용과 오염물을 처리하는 연통관(communication vessel, 连通管)<sup>23)</sup>을 통해 각각의 분리기와 가열기로 보내진다. 분리기와 가열기는 오염물 처리를 위한 물질을 자체적으로 보충한다. 각 오염물 처리를 위한 물질의 보충 속도는 폐수원수의 전동밸브와 액위 설정 값에 따라 제어된다. 장액은 장액전송 펌프를 통해 고액분리(solid-liquid separation, 固液分离)<sup>24)</sup> 장치로 보내진다. 이때, 결정체(結晶体)와 포화용액(Saturated solution, 饱和溶液)<sup>25)</sup>을 분리하여 고체는 석고창고로 보내진다. 포화용액은 폐수원수탱크로 보내지면서 폐수는 다시 멀티 증발시스템을 통해 농축·결정을 진행한다.

‘저온여열증기증발기술’은 막기술의 농축 대비 ▲전처리 불필요, ▲간단한 시스템, ▲높은 신뢰성, ▲조작간단, ▲운영비용 절감 등의 장점이 있다. 따라서 전체적인 멀티 증발시스템은 외열식 강제증발공정(外熱式強制蒸發工藝)을 이용하여 시스템의 배관·설비에 대한 스케일링이 발생하는 것을 감소시킬 수 있다.

### 3) 주요 설비 매개변수

산시성의 한 300MW 발전세트의 연기 탈황 처리 후, 탈황폐수 처리를 위한 설비의 매개변수는 다음과 같다.

<표2. 주요 설비 매개변수>

매개변수	규격	수량	매개변수	함량	수량
폐수원수 탱크	V=80m <sup>3</sup> , Ø4.6*4.8mm	1	Ⅱ 강제순환펌프	q1=1,600m <sup>3</sup> /h, H=4m	1
폐수원수 펌프	qv=20m <sup>3</sup> /h, H=30m	2	Ⅲ 분리기	DN2,000mm	1
Ⅰ 분리기	DN2,000mm	1	Ⅲ 가열기	DN1,200mm	1
Ⅰ 가열기	DN1,200mm	1	Ⅲ 강제순환펌프	qv=1,600m <sup>3</sup> /h, H=4m	1
Ⅰ 강제순환펌프	qv=1,600m <sup>3</sup> /h, H=4m	1	배기가스 응축기	DN1,500m, H=3,500mm	1
Ⅰ 응축기	DN1,500mm, H=3,500m	1	배기가스 진공펌프	qv=1,000m <sup>3</sup> /h, p=-98kPa	2
Ⅰ 진공펌프	qv=300m <sup>3</sup> /h, p=-98kPa	2	장액완충탱크	V=13m <sup>3</sup> , Ø2.5*2.8mm	1
Ⅱ 분리기	DN2,000mm	1	연기통로 열교환기	700m <sup>2</sup>	4
Ⅱ 가열기	DN1,200mm	1	압축여과기	0.8 MPa	1

<자료 출처 : 북극성 수처리망 내용 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

\* V : 부피 / qv : 유량<sup>26)</sup> / H : 양정<sup>27)</sup> / p : 압력

19) 결정(crystal, 结晶) : 고체 성분의 용질로 용액을 만든 다음, 용매를 증발시키거나 용액의 온도를 낮추면 만들어지는 특별한 모양의 고체이다.(네이버 지식백과, 2020.6.23.검색)  
 20) 응결수(condensation water, 凝结水) : 수증기가 응축하여 생기는 물이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 21) 장액(serous fluid, 浆液) : 장막에서 분비되는 투명한 황색의 액체로 무기염류와 단백질이 들어있다.(네이버 국어사전, 2020.6.23.검색)  
 22) 압력 수두(pressure head, 压头) : 압력을 물의 높이로 표시하는 것이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 23) 연통관(communication vessel, 连通管) : 액체를 넣은 2개 이상의 용기 바닥을 관으로 이어 액체가 자유롭게 이동할 수 있게 만든 관이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 24) 고액분리(solid-liquid separation, 固液分离) : 고체와 액체를 분리하는 것을 의미한다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 25) 포화용액(Saturated solution, 饱和溶液) : 용액 중에 녹을 수 있는 용질의 전량(全量)을 함유한 용매로 이루어진 용액이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 26) 유량(flow, 流量) : 일정한 시간에 흐르는 유체의 양이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
 27) 양정(water-lift, 扬程) : 밸브가 밀려 올라가는 높이 또는 펌프에서 물을 퍼 올리는 높이로 단위는 m를 사용한다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)

## ▶ 시범운영 결과분석

### 1) 경제성 분석

전체 시스템의 시운전 기간 동안의 모니터링 데이터 통계에 따르면, 탈황폐수 제로 배출 시스템의 운영원가에 직접적인 영향을 미치는 것은 동력소모(动力消耗), 탈염수(p3. 각주13 참고) 소모, 공정수(工艺水, 공정에 사용되는 물) 소모 3가지로 분류된다.

(동력) 전력소모는 37.67kW·h/m<sup>3</sup>으로 환산되며, 전기가격은 0.5위안(한화 약 85.72원)/kW·h로 계산된다. 따라서 총 18.83위안(한화 약 3,228.02원)/kW·h를 절약하였다.

(탈염수) 소모량은 0.1톤/h이며, 처리비용은 15위안(한화 약 2,571.45원)/톤으로 0.1위안(한화 약 17.14원)/m<sup>3</sup>을 절약하였다.

(공정수) 소모량은 2.1m<sup>3</sup>/h이며, 처리비용은 3.5위안(한화 약 600.01원)/톤으로 0.49위안(한화 약 84원)/m<sup>3</sup>을 절약하였다.

<표3. 경제성 분석>

구분	소모량	처리비용(한화 원)	m <sup>3</sup> 당 절약비용(한화 원)
동력(kW/m <sup>3</sup> )	37.67	85.72	3,228.02
탈염수(톤/h)	0.1	2,571.45	17.14
공정수(m <sup>3</sup> /h)	2.1	600.01	84

<자료 출처 : 북극성 수처리망 내용 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

(경제성효과 비교) 인건비, 설비감가상각비 등을 제외한 탈황폐수 제로 배출을 위한 순수 운영비용은 약 19.42위안(한화 약 3,329.16원)/m<sup>3</sup>에 불과하다. 하지만 ‘전처리+증발결정(蒸发结晶)+분염(分盐)’ 기술을 적용한 타 기업의 실제 운영비용은 70~80위안(한화 약 1.2~1.4만원)/m<sup>3</sup>으로, 타 기업 대비 본 공정의 운영비용을 현저하게 감소시킨 것을 확인할 수 있다.

### 2) 시운전 결과분석

① (처리능력 분석) 본 탈황폐수의 3차 처리 공정은 2019년 6월 26일부터 총 7일간(168시간) 연속 운행하였다. 2#발전세트의 연기 열교환기가 아직 설치되지 않았기 때문에 기존 설계규모 대비 50%로 계산이 된다. 총 168시간 동안 누적 폐수 처리량은 681t, 응결수(p4. 각주20 참고) 회수량 632t으로 평균 회수율은 약 92.8%로 나타났다.

<표4. 7일간(168시간) 폐수 처리 운영 데이터>

운영시간(h)	평균부하(MW)	실제 총 측정값(t)		평균 감소값(t/h)	
		폐수 처리량	응결수 회수량	폐수 처리량	응결수 회수량
0~24(1일차)	151	92	85	7.62	7.04
24~48(2일차)	165	101	94	7.65	7.12
48~72(3일차)	154	87	81	7.06	6.57
72~96(4일차)	172	106	98	7.7	7.12
96~120(5일차)	160	93	87	7.27	6.8
120~144(6일차)	167	105	96	7.86	7.19
144~168(7일차)	158	97	91	7.67	7.2

<자료 출처 : 북극성 수처리망 내용 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

② (유출수 수질분석) 시운전 기간 중 폐수탱크에서 채취한 폐수원수(‘이하 FS’)와 응결수 펌프 배출구에서 채취한 시료(‘이하 NS’)에 대한 측정 데이터 결과는 <표5>와 같다.

<표5. 수질 측정 데이터>

매개변수	FS	NS	매개변수	FS	NS
pH값	6.44	6.82	암모니아성 질소(mg/ℓ)	31.1	15.3
현탁물(mg/ℓ)	2.56*10 <sup>4</sup>	4	총용존 고형물(mg/ℓ)	5.68*10 <sup>4</sup>	88
탁도(NTU <sup>28</sup> )	4*10 <sup>4</sup>	3	총인(mg/m <sup>3</sup> )	0.32	0.01
COD(mg/ℓ)	2.96*10 <sup>3</sup>	20	유리잔류염소 <sup>29</sup> (mg/ℓ)	0.96	0.08
철금속(mg/ℓ)	0.9	0.3	황산염(mg/ℓ)	2.45*10 <sup>3</sup>	67.1
망간(mg/ℓ)	60.8	<0.01	칼슘(mg/ℓ)	794	0.39
황화물(mg/ℓ)	8.01*10 <sup>4</sup>	<1	마그네슘(mg/ℓ)	3.8*10 <sup>3</sup>	2.11

<자료 출처 : 북극성 수처리장 내용 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

제거율 공식은 ‘S=(FSi-NSi)/FSi\*100%’이다.

\* FSi=탈황폐수 원수 중 제i개의 측정값, NSi=응결수 중 제i개의 측정값, i=2~14이다.

탈황폐수 처리 후의 측정된 오염물질 제거율은 <표6>와 같다.

<표6. 탈황폐수 처리 후의 오염물질 제거율>

매개변수	제거율(%)	매개변수	제거율(%)
pH값	-	암모니아성 질소(mg/ℓ)	50.8
현탁물(mg/ℓ)	99.98	총용존 고형물(mg/ℓ)	96
탁도(NTU)	99.99	총 인(mg/m <sup>3</sup> )	96.25
COD(mg/ℓ)	99.32	유리잔류염소(mg/ℓ)	91.17
철금속(mg/ℓ)	99.98	황산염(mg/ℓ)	97.26
망간(mg/ℓ)	99.99	칼슘(mg/ℓ)	99.93
황화물(mg/ℓ)	99.85	마그네슘(mg/ℓ)	99.94

<자료 출처 : 북극성 수처리장 내용 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

암모니아성 질소를 제외한 다른 오염물질은 일정한 제거율을 보이고 있다. 따라서 본 기술은 끓는점이 낮은 물질(암모니아성 질소)에 대한 제거율이 떨어진다는 것을 확인할 수 있다. 이는 암모니아성 질소는 주로 연기 탈질과정에서의 암모니아 가스로부터 발생하며 이는 습식 탈황 시스템에서 흡수되어 탈황폐수로 배출되기 때문에 암모니아성 질소 제거율이 낮게 나타났다.

<도시오수재생이용공업용수수질(城市污水再生利用工业用水水质)>(GB/T19923-2005)에서 보일러의 보급수(make-up water, 补给水)<sup>30</sup> 수질지표는 <표7>과 같다. <표5>의 응결수 시료 측정값과 비교해보면, 암모니아성 질소를 제외한 다른 지표는 일반적으로 보일러 보급수의 수질지표에 부합하고 있다. 하지만 암모니아성 질소를 추가로 제거해야 보일러에 보급수를 공급할 수 있다. 하지만 응결수 중 염소이온, 칼슘이온, 마그네슘이온, 황산이온의 질량농도는 기존 탈황폐수보다 훨씬 작다. 따라서 이 응결수는 직접적으로 탈황공정에 보급수로 사용할 수 있다.

28) NTU(Nephelo-metric Turbidity Unit) : 탁도의 단위로 사용된다. (네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)

29) 유리잔류염소(free residual chlorine, 游离性余氯) : 물속의 미생물을 살균하기 위해 염소를 주입하였을 때 발생하는 차아염소산과 차아염소산 이온의 형태로 존재하는 염소를 뜻한다. (네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)

30) 보급수(make-up water, 补给水) : 물이 순환 사용할 때 증발 혹은 누설 등에 의하여 손실된 물만큼 외부에서 새로 보급하는 물을 말한다. 보일러, 냉각탑, 흡수냉동기, 발전소 등에서 사용한다. (네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)

<표7. 보일러 보급수의 수질지표>

매개변수	수질지표	매개변수	수질지표
pH값	6.5~8.5	경도 <sup>31)</sup> (mg/ℓ)	≤450
현탁물(mg/ℓ)	-	총 알칼리도(mg/ℓ)	≤350
탁도(NTU)	≤5	황산염(mg/ℓ)	≤250
색도(도)	≤30	암모니아성 질소(mg/ℓ)	≤10
COD(mg/m <sup>3</sup> )	≤10	총 인(mg/ℓ)	≤1
BOD(mg/ℓ)	≤60	총용존 고형물(mg/ℓ)	≤1,000
철금속(mg/ℓ)	≤0.3	석유류(mg/ℓ)	≤1
망간(mg/ℓ)	≤0.1	양이온계면활성제 <sup>32)</sup> (mg/ℓ)	≤0.5
염소이온(mg/ℓ)	≤250	잔류염소 <sup>33)</sup> (mg/ℓ)	≥0.05
이산화규소(mg/ℓ)	≤30	대장균(개/ℓ)	≤2,000

<자료 출처 : 북극성 수처리망 내용 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

③ (스켈링 분석) <표1> 탈황폐수 수질 매개변수에서 확인하였듯이 탈황폐수에는 칼슘이온, 마그네슘이온, 황산이온 등 서로 다른 이온이 비교적 많고, 수질의 경도가 높아 시스템에 쉽게 스켈링(p1. 각주4 참고)이 발생한다. 외열식 강제순환증발기술을 통해 강제순환펌프의 동력으로 폐수가 높은 유속(일반적으로 1m/s보다 큼)으로 순환하여, 각 가열기의 열교환 효율을 향상시켰다. 아울러, 시스템의 파이프라인에서 발생하는 스켈링 제거에 대한 리스크를 감소시켰다.

전체 시스템을 40일 연속 작동한 후, 시스템 내 스켈링 현상을 확인한 결과, I·II시스템의 파이프라인에서는 스켈링이 발생되지 않았고, III분리기에는 약간 스켈링이 발생하였다. 하지만 이는 고압 상태의 물로 행구면 스켈링이 씻겨 지는 것을 확인하였다. 이를 통해 시스템에 발생한 스켈링은 주로 염류(盐类) 물질로 물에 쉽게 녹는 것을 알 수 있었다.

### ▶ 시사점

본 공정은 집진기 배출구의 저온 열에너지 증발을 이용한 원리이다. 폐수 운송시스템, 연기 열교환 시스템, 멀티 증발시스템, 농액압력여과결정시스템 등을 이용하여 ‘저온여열증기증발법’으로 탈황폐수 제로 배출 공정을 실시하였다. 15m<sup>3</sup>/h로 배출되는 탈황폐수 제로 배출을 위한 시운전도 완료하였으며, 운행결과 역시 안정적인 시스템 작동과 운영원가를 절감한 것을 확인할 수 있었다. 특히, 운영원가의 경우, 19.42위안(한화 약 3,328.01원)/m<sup>3</sup>에 불과하며, 타 공정(약 80위안, 한화 약 1.4만원/m<sup>3</sup>) 대비 대폭 감소한 것을 확인하였다. [p.5, ‘경제성 분석’ 내용참고]

또한 전처리 과정이 필요 없으며, 폐수 중의 석고를 이용하여 결정(結晶)을 만든다. 또한 말단 부분의 압력여과결정기술을 활용하여 탈황폐수에 있는 염류를 농축·분리할 수 있다. 그리고 멀티 증발시스템은 외열식 강제증발순환방식으로 시스템에서 스켈링이 발생하는 것을 방지하였고, 응결수 추출률도 약 92.8% 이상으로 높게 나타났다. 또한 응결수는 추가 처리 후에 보일러의 보급수로 사용되거나 직접 탈황 공정의 수분으로 재이용되었다. 따라서 ‘저온여열증기증발법’을 통해 탈황폐수의 제로 배출 달성과 에너지절약을 할 수 있을 것으로 전망된다.

<환율 적용 : 2020.6.22. 네이버 환율 기준, 1위안=한화 171.43원>  
북극성 수처리망, <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200426/1066726.shtml>, 2020.6.23.접속  
※ 기술용어 번역·해석이 일부 상이할 수 있으니 반드시 전문본을 확인하시기 바랍니다.

31) 경도(Hardness, 硬度) : 광물을 단단한 정도이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
32) 양이온계면활성제(cationic surfactant, 阳离子表面活性剂) : 수용액 속에서 이온화하여 생성된 양이온 부분이 계면활성을 나타내는 계면활성제이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)  
33) 잔류염소(residual chlorine, 余氯) : 물을 염소로 소독했을 때 특정한 형태로 존재하는 염소이다.(네이버 지식백과, 2020.6.22.검색)



## 중국환경산업 주간기술동향

## 발행

2020년 6월 23일 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