

# 1,000 MW 석탄화력발전소 대기환경오염물질 제거효율 향상을 위한 탈황설비 성능개선

이영수\*, 문승재\*\*†

\*한양대학교 파워엔지니어링공학과, \*\*†한양대학교 기계공학부

## Enhancement of Desulfurization System Efficiency in 1,000 MW Coal-Fired Power Plants

Young-Su Lee\*, Seung-Jae Moon\*\*†

\*Department of Power Engineering, Hanyang University

\*\*†Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

(Received Aug. 30, 2020; Revised Sept. 6, 2020)

**ABSTRACT** : Recently, air environmental issues such as fine dust have rapidly emerged as national issues, and intensive environmental regulations are being applied to coal-fired power plants. This study introduces the case of improving the performance of desulfurization facilities for removing sulfur oxides and dust, which are the main air pollutant emitters of coal-fired power plants, and conducted four case studies to improve the performance of 1,000 MW power plants currently in operation and carried out construction. Liquid ratio was increased by remodeling the absorption tower of desulfurization facilities, and vaporization reaction was promoted by increasing the flow rate of oxidized air. In addition, the gas heater leakage rate was improved to improve the efficiency of final desulfurization facilities. It is expected that performance improvement work considering harmony with existing facilities will satisfy the regulations(25ppm of sulfur oxides, 5mg/Sm<sup>3</sup>) that will be applied from 2023, and can be referred to other thermal power plants for review and application.

**초록** : 최근 미세먼지 등 대기환경 문제가 국가적 이슈로 급부상 하고있는 추세이며 특히 석탄화력발전소에 대한 강도높은 환경규제치가 적용되고 있는 실정이다. 본 연구는 석탄화력발전소 주요 대기오염 배출물질인 황산화물과 먼지 제거를 위한 탈황설비 성능개선 사례에 대해 소개하고 있으며 현재 운영중인 1,000 MW 발전소의 성능개선을 위한 네가지 Case Study를 수행하고 공사를 하였다. 탈황설비 흡수탑 개조를 통해 액기비를 증대시켰으며 산화공기 유량을 증대시켜 기액 반응을 촉진하였다. 또한 가스가스히터 누설률을 개선하여 최종 탈황설비 효율을 향상시켰다. 기존 설비와 조화를 고려한 성능개선 공사를 통해 2023년부터 적용될 규제치(황산화물 25ppm, 먼지 5mg/Sm<sup>3</sup>)를 만족할 것으로 예상되며 타 화력발전소에 검토 및 적용하는데 참고될 수 있다고 기대된다.

**Key words** : Power Plant(발전설비), Process Design(공정 설계), Desulfurization System(탈황설비), Performance Improvement(성능개선), Absorber(흡수탑)

Corresponding Author, smoon@hanyang.ac.kr

# 1,000 MW 석탄화력발전소 대기환경오염물질 제거효율 향상을 위한 탈황설비 성능개선

## -기호설명-

$C_N$  : 황산화물 농도, 먼지농도(ppm)  
 $C$  : 표준산소 농도에서의 오염물질 농도(mg/Sm<sup>3</sup>orppm)  
 $a$  : 적정에 사용한 N/100 초산바륨 용액(ml)  
 $b$  : 바탕시험 사용한 N/100 초산바륨 용액(ml)  
 $c$  : 분석용 시료용액의 분취량(ml)  
 $f$  : N/100 초산바륨 용액의 역가  
 $V_n$  : 건조시료 가스량(l)  
 $O_s$  : 표준산소농도(%)  
 $O_a$  : 실측산소농도(%)  
 $md$  : 포집된 먼지량(g)

$V'_m$  : 흡인가스량(ft<sup>3</sup>)  
 $V'_n$  : 표준상태의 흡인건조 배가스량(Sm<sup>3</sup>)  
 $\theta_m$  : 건식 가스미터 온도(°F)  
 $P_a$  : 대기압(mmHg)  
 $\Delta H$  : 오리피스 압차(mmHg)  
 $S_{F-out}$  : 탈황설비 출구측 황산화물 농도(ppm)  
 $S_{F-in}$  : 탈황설비 입구측 황산화물 농도(ppm)  
 $S_{A-out}$  : 흡수탑 출구측 황산화물 농도(ppm)  
 $D_{F-out}$  : 탈황설비 출구측 먼지 농도(mg/Sm<sup>3</sup>)  
 $D_{F-in}$  : 탈황설비 입구측 먼지 농도(mg/Sm<sup>3</sup>)

## 제1장 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

최근 고농도 미세먼지가 빈발하여 미세먼지 문제 해결을 위한 국가적 차원의 특단의 대책 수립 필요성이 대두됨에 따라 정부는 미세먼지가 국민의 안전과 건강을 위협하는 중차대한 환경난제임을 인식하고, 미세먼지 문제를 해결하기 위하여 국가간, 관계부처간 합동으로 총력대응을 하고 있다. 강화되는 대기오염물질 배출허용기준을 준수하기 위해 여러 발전소들이 환경설비 성능개선을 위한 노력을 하고 있고 여러 논문도 발표되고 있다.

### 1.2 연구내용

본 논문은 1,000 MW 석탄화력발전소를 대상으로 탈황설비 성능개선을 수행하고 황산화물 제거 효율향상, 가스-가스히터(이하 GGH) 누설률 감소, 먼지제거 효율향상에 대한 내용을 다루고 있다. 지금까지 발표된 500 MW 급 이하 표준석탄화력에서 수행된 탈황설비 성능개선과는 규모면에서 차이가 있으며 특히 1,000 MW 성능개선 논문 발표사례는 찾기 힘들다. 또한 소규모 실험실에서 산출된 여러 논문들의 데이터를 실제 대용량 발전소 성능개선에 적용하여 효과와 상관관계를 입증하는데 그 의미가 크다고 할 수 있다.

제 2장 부터는 한국중부발전(이하 KOMIPO)이 보유한 석탄화력 발전소 탈황설비 성능개선 적용사례를 살펴보고 발전소의 기타 일반적인 성능개선 방법에 대해 설명하고 있다. 또한 기존 설치-운영중인 국내최초 1,000 MW급 용량인 신보령화력 1,2호기 탈황설비를 대상으로 환경오염물질

제거효율 향상을 위한 Case study를 수행하여 최적의 성능개선 안을 도출해내어 약 4개월에 걸쳐 기존 탈황설비 성능개선 공사를 수행하였고 호기별 각 2회의 성능시험 실측 데이터를 근거로 성능개선이 환경오염물질에 속하는 황산화물, 먼지 배출량 저감 및 설비효율에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다.

## 제2장 탈황설비 성능개선 방법 및 사례

### 2.1 장치 특성 및 원리

#### 2.1.1 통풍설비 개요

Fig. 2.1은 탈황설비 전체 개요도이며 통풍설비 계통은 각 보일러당 2기의 유인송풍기(이하 CIDF), 1기의 GGH 및 1기의 흡수탑을 포함한다. 배연 가스는 보일러 CIDF, 탈황설비 입구 댐퍼, GGH, 흡수탑(Absorber), GGH, 탈황설비

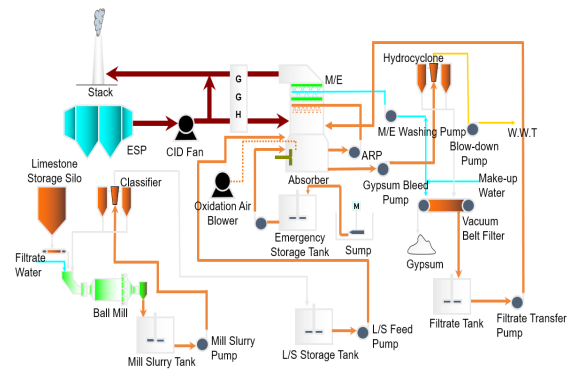


Fig. 2.1 Schematic diagram of Shinboryeong thermal power plant units 1 and 2

출구 댐퍼, 굴뚝 손으로 배출된다. 탈황설비로의 배연 가스 유입을 차단하기 위해 댐퍼가 설치되며 그 위치에 따라 탈황설비 입구, 출구 및 비상 댐퍼로 분류된다. Table 2.1은 통풍설비 계통별 구성장치이며, 운전시 제어내용에 따라 여러 가지 단위설비 및 계통으로 세분된다.

Table 2.1 Desulfurization ventilation system components of Shinboryeong thermal power plant

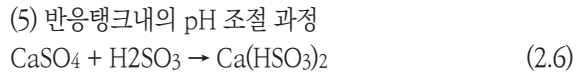
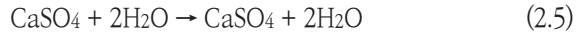
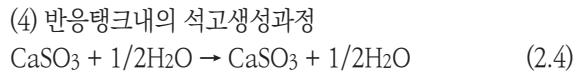
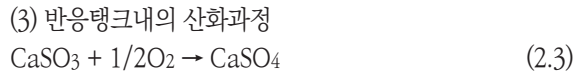
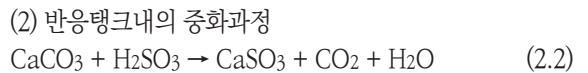
System classification	Device name	Quantity (per unit)
GGH	Gas reheater	1
Tandem damper	FGD inlet damper	1
	FGD outlet damper	1
Double louver damper	Emergency damper	1
Duct expansion joint	Duct expansion joint	9
	Scavenging duct ex. joint	3

2.1.2 흡수탑설비 개요

흡수탑의 황산화물 제거설비로는 5단으로 설치된 석회석 슬러리 분사헤더가 있으며, 석회석 슬러리를 헤더에 순환 공급하는 흡수탑 재순환 펌프는 흡수탑 1기당 운전용 4대와 예비용 1대(소용량 펌프 2대를 큰용량 1대로 간주)로 구성되어 있다. 흡수탑으로 유입된 연소 가스는 하단의 헤더에서 분사되는 석회석 슬러리와 혼합되어 냉각 및 포화 상태가 된다. 연소가스가 흡수탑을 통과하면서 흡수탑의 단면 전체에 균등히 분배되는데 이때 가스유속은 증가하고 최적의 기액 접촉이 일어난다. 이어 연소가스는 상단의 헤더에서 분사되는 석회석 슬러리와 접촉하면서 황산화물 흡수과정을 끝마치게 된다. 황산화물 흡수과정을 마친 연소가스는 흡수탑 상부에 상하 2단으로 설치된 미스트 제거기를 거치면서 제습된다. 각 단의 미스트 제거기 상하부에는 미스트 제거기 세척수 분사노즐이 부착된 헤더가 설치되어 있으며 세척수를 분사시켜 미스트 제거기 표면에 누적되는 각종 부착물을 제거한다.

황산화물제거 공정에는 강제산화방식의 산화공기계통도 포함된다. 산화공기의 공급은 반응염인 아황산칼슘(CaSO<sub>3</sub>·1/2H<sub>2</sub>O)이 스케일을 발생시켜 운전장애를 일으키고 후처리가 곤란하므로 이를 황산칼슘(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)으로 산화시키기 위하여 필요한 것이다. 산화공기는 예비용을 포함한 2대의 산화공기 블로워에 의해 공급되는데, 반응탱크

교반기의 임펠러 전방에 반응탱크 수위보다 낮은 레벨로 설치된 산화공기 공급 랜스를 통하여 반응탱크 내부로 공급되어 교반기에 의해반응탱크 내부 슬러리 전체로 확산시킴으로써 효율적인 산화반응이 이루어지도록 되어 있다. 전술된 연소가스 중의 황산화물 흡수에서 공정의 부산물인 석고 슬러리의 생성에 이르기까지의 과정에서 이루어지는 화학반응을 정리하면 식(2.1)부터 식(2.6)와 같다.



2.1.3 흡수탑설비 개요

발전소별 사용연료의 황함량, 정격출력, 적용설비에 따라 각각 다르지만 해당 지역의 조례 및 환경부 협의 기준에 따라 배출허용 기준을 충족해야 하기 때문에 낮은 수준으로 설계된 발전소의 수명기간 이내 환경설비 성능개선은 반드시 한번은 거쳐야 하는 과정으로 판단된다.

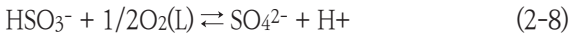
일반적인 탈황설비의 성능개선 방법은 아래의 다섯가지 방식들이 주로 검토 및 적용된다.

- 1) 흡수탑 재순환펌프(이하 ARP) 용량증대  
 연소가스중에 존재하는 황성분은 스프레이 뱅크(Spray Bank)를 통과하며 기액 물질전달이 이루어지는데 흡수탑 재순환펌프 용량 또는 운전대수를 증가시키면 석회석 슬러리의 순환유량이 증가되어 액기비 증대로 인한 황성분 물질 전달계수가 증가되어 탈황효율이 증가되는 효과를 볼 수 있다.

# 1,000 MW 석탄화력발전소 대기환경오염물질 제거효율 향상을 위한 탈황설비 성능개선

## 2) 산화공기 블로워(이하 OAB) 용량증대

흡수탑 내에 산소(O<sub>2</sub>)를 주입하게 되면 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> → SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 전환 반응이 촉진되어 결과적으로 액체상에 흡수된 SO<sub>2</sub>가 석고로 전환되어 배출되는데, 액체상에 SO<sub>2</sub>농도가 낮아지면 Fig 2.2 이중경막이론(Two Film Theory)에 의해 기체막과 액체막에 존재하는 분자가 농도가 높은 측에서 낮은 측으로 확산하려는 경향이 있으며 SO<sub>2</sub>농도가 낮아짐에 따라 기체경막에서 액체경막으로 확산하려는 추진력(Driving Force)이 강해져 식(2.7), 식(2.8) 화학반응이 정반응을 유지하면서 기/액 물질전달이 가속되므로 결과적으로 탈황효율 증가로 이어지게 된다.<sup>(7)</sup>



## 3) GGH 누설률 개선 및 무누설 타입 적용

GGH는 설비의 누설특성에 따라 Leakage Type(이하 누설타입)과 Non Leakage Type(이하 무누설 타입)으로 구분할 수 있는데 일본을 제외한 대부분의 해외 석탄 발전소에서 누설타입을 운영중에 있다. 누설타입은 원통 내면에서 고온의 연소가스가 저온의 연소가스 측으로 누설되면서 누설률만큼 반응하지 못하고 연돌로 배출되어 탈황제거 효율 저하에 영향을 주는 단점을 가지고 있다.<sup>(8)</sup> 그래서 누설타입의 경우 누설률을 개선하거나 무누설 타입 GGH를 적용하는데 영흥화력, 보령화력 3호기에 설치되어 있으며 신서천화력에도 적용되어 건설중에 있다.

## 4) 회전난류기 신설

흡수탑 하부에 회전난류 발생기를 설치하여 배연가스를 소용돌이 모양으로 선회시키면서 배연가스 분포를 균일하게 만들고 유입되는 배연가스의 온도가 높을수록 기액 반응을 저해하는데 온도를 빠르게 낮춰주는 역할을 한다. 또한 상부에서 분사되는 석회석 슬러리와 반응면적과 시간을 증가시켜 황산화물 흡수와 먼지제거 효율을 향상시키는데 회전난류기는 현재 태안화력에 적용되어 운영중에 있다.<sup>(3)</sup>

## 5) 화학 첨가제 사용

흡수탑내 순환용액에 Fig 2.3과 같은 분자구조를 하고 있는 아디프산(Adipic acid) 또는 DBA(Dibasic acid)와 같

은 유기산 첨가제등을 사용하기도 하는데 이들은 흡수액의 pH를 안정화 시키고 알칼리농도(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)를 증가시키는 완충제(Buffer)로 작용하며 아래의 화학반응식을 정반응으로 진행되도록 한다. 이런 방법은 영남화력, 태안화력, 보령화력에 적용한 사례가 있을 뿐 환경이슈 및 운영비용 증가 등의 문제로 일시적으로 적용되고 있다.

## 2.2 설치대상 발전소 분석

### 2.2.1 신보령화력 기존 탈황설비 설계현황

신보령화력 #1,2 호기 탈황 설비는 습식 석회석- 석고법이 적용되어 연소가스 중의 황산화물을 제거하는 설비이며 부산물로 석고가 생성된다. 범위탄(Range Coal, 1.3% Sulfur) BMCR 조건 하에 총 SO<sub>x</sub> 제거효율 95.5%, 배출농도 50ppm(as 6% O<sub>2</sub>)이하로 설계되었으며, 누설타입 GGH(1%) 가 적용되었다.<sup>(11)</sup> Table 2.5는 신보령과 영흥화력의 탈황설비 설계 기준으로 신보령화력 1,2 호기 탈황설비의 SO<sub>x</sub> 배출 성능을 영흥화력 기준으로 달성하기 위해서는 SO<sub>x</sub> 배출량을 약 50% 이상 저감해야 한다. 따라서, 현재 신보령화력 1,2 호기에 설치된 설비의 용량증대 및 설비 추가 등 개선사항 별 Case study를 수행하여, 영흥화력 SO<sub>x</sub> 배출 기준 25ppm 이하를 달성하기 위한 최적 방안을 검토하였다. 추가적으로, 탈황설비 성능개선을 통해 먼지 배출량을 5ppm 이하로 배출하기 위한 효율개선 결과를 도출하고자 한다. Table 2.6은 SRI EPA Report에서 제시된 공기에열기와 전기집진기(이하 ESP)를 거치는 SO<sub>3</sub> 제거율이며 기타 다양한 논문과 보고서를 통해 제시되고 있다. 연소가스(Flue gas)에 포함된 SO<sub>3</sub>는 공기에열기를 통과하면서 30%가 제거되며, 패싱된 SO<sub>3</sub>는 ESP에서 추가로 25%가 제거되어, 공기에열기와 ESP에서의 통합 제거율은 47.5%가 된다.

Table 2.2 Efficiency of elimination of SO<sub>3</sub> by facility classification<sup>(12)</sup>

Facility classification	Removal efficiency
Air preheater	30%
ESP	25%
APH + Cold ESP integrated elimination rate	47.5%



2.2.2 신보령화력 탈황설비 효율향상 방안

2.3.2.1 흡수탑 재순환펌프/흡수탑 개조 공사

현재 2/3/4단 재순환펌프의 용량을 증대시켜 개조된 흡수탑의 1/2/3단으로 사용하였다. 1단의 ARP는 철거하고 스프레이 बैं크를 5단 상부로 이설하고 12,300m<sup>3</sup>/h 용량(추가공사 없이 업체/모델 교체만으로 증대할 수 있는 최대 용량)의 신규 ARP를 신설하였다. 현재 5단의 대기용 4,750m<sup>3</sup>/h 흡수탑 재순환펌프 2기는 모터와 기어박스를 교체하여 6,150m<sup>3</sup>/h로 용량을 증대하고 50% 용량으로 부하 조정이 가능하도록 했다. 이를 통해 흡수탑의 액기 비율을 Fig 2.2와 같이 MGR 기준 10.1에서 12.03으로 증대시킬 수 있었고 동일한 흡수탑 출구 가스유량 대비 ARP운전대수 증가에 따라 액기비가 상승함을 알 수 있다.

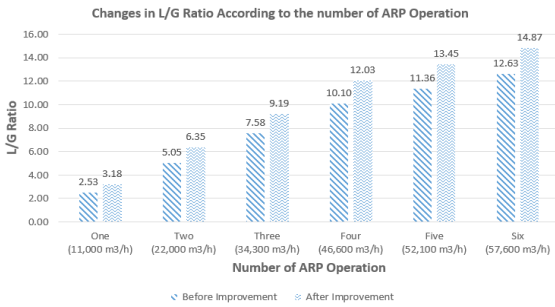


Fig. 2.2 Changes in L/G ratio according to the number of ARP(circulation flow) operation

흡수탑 재순환펌프 용량 증대로 흡수탑 순환 유량이 늘어남에 따라 반응조의 체류시간(Retention time) 확보를 위해 정상조건 수위가 현재보다 1.23 m 증가시켜야 되므로, 입구 덕트를 해체하고 상부로 이동시키는 설치 작업을 수행하였다.

2.3.2.2 흡수탑내 스프레이뱅크 노즐 ,배관교체

4단 흡수탑 재순환펌프의 순환유량 증대(12,300m<sup>3</sup>/h)로 인해 흡수탑 내부 스프레이뱅크 노즐 및 지지대를 교체하고, 순환 유량증대로 인한 배관경 확관 및 관련 배관품을 교체하였다. 또한, 5단 흡수탑 재순환펌프의 순환유량이 4,750m<sup>3</sup>/h에서 6,150m<sup>3</sup>/h으로 증대됨에 따라 스프레이뱅크 노즐 및 지지대가 교체되고, 배관경을 증대하였다. 기존 2/3/4단의 배관 및 스프레이 बैं크는 변경 없이 현재 상태

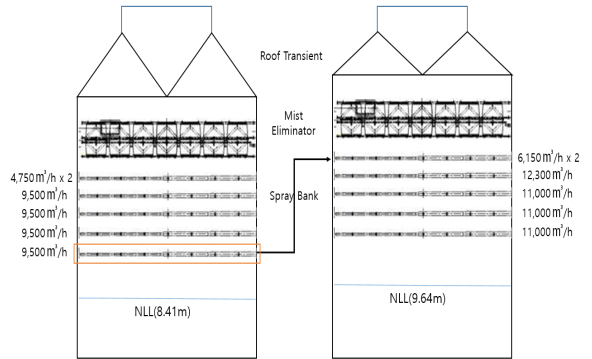


Fig. 2.3 Schematic diagram of Sinboryeong Units 1 and 2 desulfurization facility ARP/Absorption tower(left-before, right-after)

로 사용 가능하여 유지하였다.(유속 : 2.33m/s 이하)

2.3.2.3 흡수탑 철골 개조공사 시행

흡수탑의 입구덕트 위치 이동과 스프레이 बैं크 위치 변경 및 미스트 제거기(이하 ME) 위치 변경됨에 따라 간섭되는 기존 철골 일부를 해체하고 구조에 맞게 수정 및 보강 작업이 요구되었다.

흡수탑 맨홀 및 노즐 위치 변경에 따른 접촉 플랫폼 및 일부 층별 높이를 수정하였고 흡수탑 입구덕트 상향 조정에 따른 철골 간섭 부를 수정 하여 소기송풍기(이하 Scavenging Fan) 하부 철골 부분을 강화 하였고 Scavenging Fan 입출구 덕트 교체, 흡수탑 입구 전단 덕트 수직구간 길이조정 및 지붕 형상 변경에 따라 발생하는 덕트의 보강제 간섭부를 수정하였다. 그리고 기존 스프레이 बैं크 1단 파이프를 4단 용 DN1400(약 56인치) 크기로 교체 및 5단 상부 공간에 50% 스프레이 बैं크 2개소를 추가하고 DN1000A(약 40인치) 크기로 교체하여 ARP 배출용 파이프 라인을 보강하였고 ARP를 설치해둔 하우징의 작업용 크레인 용량 또한 증대(7.5 → 12.5 ton)하여 향후 기기정비의 용이성을 향상시켰다.

2.3.2.4 OAB 개조 공사

ARP 순환량이 늘어남에 따라, 기존 설치되어 있던 OAB(11,110 Nm<sup>3</sup>/h, 100%×3기)는 1호기 전용으로만 사용하고, 2호기 전용 OAB(16,200 Nm<sup>3</sup>/h, 100%×2기)를

## 1,000 MW 석탄화력발전소 대기환경오염물질 제거효율 향상을 위한 탈황설비 성능개선

신규 설치함으로써 증가된 산화공기의 유량을 확보할 수 있었다. 현재 OAB를 1호기 전용으로 사용하기 위해, 흡수탑 수위 상승 및 차압 증가로 인한 양정 증가를 보상하기 위해 토출 계기압력을 0.901 barg에서 0.961 barg로 증가시켜야 하므로 임펠러, 샤프트, 기어박스를 교체해야 했다. 이때, 토출 유량을 9,900 Nm<sup>3</sup>/h로 줄임으로써 모터는 교체 없이 재사용 할 수 있었다. 신규 설치되는 OAB는 2호기 ARP 건물 서측에 설치하였고, 별도의 기초공사 및 방음 하우징 공사를 진행하여 최종 공기 S/R비를 1.73에서 2.71로 상승시켰다.

### 2.3.2.5 GGH 개조 공사

Fig 2.4은 탈황설비 GGH 개선공사 개략도이며 현재 누설률 1%에서 0.65%로 감소하기 위해 먼저 Scavenge Fan의 용량을 증대(90 → 400 kW)하고, 원심방향 썰을 현재 단일 썰에서 더블 썰로 개조하여 퍼지 가스 시스템을 전반적으로 개선하였다. 세부 작업사항은 팬 용량을 930 Nm<sup>3</sup>/h에서 2,350 Nm<sup>3</sup>/h로 증대하였고 퍼지 노즐 설치시, 기 설치된 액츄에이터 부위 공간 부재로 콤팩트 타입으로 교체 및 재설치 하였다. 또한 퍼지 시스템 추가 적용에 따른 영향으로 확장 슬리브(Expansion Sleeve)를 설치하였고 기존 퍼지가스 덕트, 덕트 지지대, 확장 연결부, 단열제 제거 및 재설치에 따른 팬 덕트 교체 및 재설치, 케이싱 노즐 교체 및 재설치(기존 GGH 케이싱 덕트 노즐 제거/재설치 및 썰 프레임 슬롯 구멍 신규 작업), 철제 구조물 보강, 얇은 안감 추가 작업을 수행하였다.

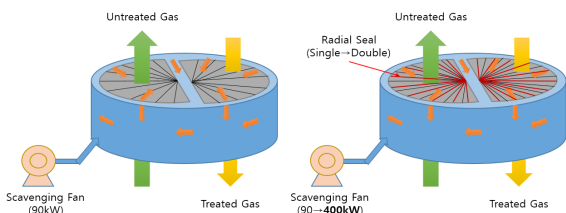


Fig. 2.4 Redevelopment of GGH for Shinboryeong units 1 and 2(left-before, right-after)

### 2.3.3 신보령화력 기준 탈황설비 설계현황

신보령화력 1,2호기의 탈황설비의 입구와 출구의 먼지농도는 각각 산소농도 6%를 기준으로 30mg/Sm<sup>3</sup>와 15mg/S

m<sup>3</sup>으로 설계되어 있다. 기존 탈황설비에서의 먼지제거효율은 50%로 설계 되어 있으나, 실제 운전결과 70%를 상회하고 있으며, 대부분의 선형 호기에서 탈황설비 후단의 먼지농도는 5mg/Sm<sup>3</sup>이하를 유지하고 있다.

강화된 충남도 조례 기준에 따른 신보령화력 1,2호기의 탈황설비에서 입구에서 먼지농도 30mg/Sm<sup>3</sup>에서 출구 먼지농도 5mg/Sm<sup>3</sup>을 유지하기 위해서는 탈황설비에서의 먼지제거효율이 83.3% 이상을 유지하여야 한다. 탈황설비 성능개선 후 탈황설비의 탈황효율이 97%이상으로 증가하며, 미처리된 배기가스 방류량 감소에 따라 탈황설비에서의 먼지제거율도 상승할 것으로 판단하였다.(10)

## 제3장 성능시험 결과 및 고찰

### 3.1 성능시험 조건 및 방법

#### 3.1.1 시험의 세부 목적

성능시험의 세부 목적은 개선 및 교체된 설비의 기자재, 설치시공의 결함여부를 최종 확인 하는데 의의가 있으며 신보령 2호기 탈황설비의 경우 총 2회(1차:2019.02.26, 2차:2019.07.27)에 걸쳐 성능시험을 수행하였다. 가스차압, 먼지 제한농도, 미스트 제한농도, 석고품질, 석회석소모량, 폐수발생량, 전력소모량, 용수소모량을 일정한 기준을 만족하는 조건 내에서 황산화물 제거효율, GGH 누설률, 먼지 제거효율 3가지 항목을 실측을 통해 결과값을 도출하고 효율향상 여부를 판단하였다.

보일러 운전 부하 변동별 가스유량 및 가스 구성변화에 대한 성능을 측정하여 흡수탑의 보일러 추종 능력을 확인하였고(보일러의 부하 조건은 제작사와 MGR로 협의) 황산화물 제거효율 및 농도는 탈황설비 입출구에서 동일 연소가스를 측정함이 원칙이나 가스의 이동시간을 감안하여 시차를 두고 입출구를 측정한다는 것이 곤란하여 측정 시간차에 따른 오차는 무시하였다.

#### 3.1.2 시험방법

##### 3.1.2.1 황산화물 측정방법

보일러 부하 Case별 본 설비의 SO<sub>x</sub> 제거 효율과 GGH 누설율을 계산하기 위하여 탈황설비 입/출구 및 흡수탑 출구에서 대기환경보전법에 명시한 대기 오염 공정시험기준

에 의거하여 황산화물을 측정하였다.

$$Ch = \frac{0.112 \times (a - b) \times f \times 250 / c}{Vn} \times 1,000 \quad (3.1)$$

식(3.1)에 따라 a는 적정에 사용한 N/100 초산 바륨 용액의 양(ml), b는 바탕시험에 사용한 N/100 초산 바륨 용액의 양(ml), c는 분석용 시료용액의 분취량(ml), f는 N/100 초산바륨 용액의 역가이며 0.112는(N/100) 초산바륨 용액 1 ml 상당하는(SO<sub>2</sub>+SO<sub>3</sub>) 가스의 부피환산 상수이다.

$$C = Ch \times \frac{21 - Os}{21 - Oa} \quad (3.2)$$

SO<sub>x</sub> 농도 실측정 방법은 황산화물 침전적정법에 따라 대기압 756 mmHg 상태에서 약 25분 간격으로 3회 측정하였고 측정된 황산화물 농도 Cn(ppm) 값을 통해 표준 산소농도 Os(%)와 실측 산소농도 Oa(%)에서의 오염물질 농도 C(mg/Sm<sup>3</sup>orppm)를 계산하여 3회 측정된 계산의 평균값을 최종 농도값으로 선정하였다.

### 3.1.2.2 먼지 측정방법

먼지 측정은 대기압 756 mmHg, 산소농도 약 5~6%, 보일러 MGR 상태에서 측정되었고 탈황설비 입·출구측 각 4개의 지점에서 각 5~8분간 측정하였다. 여지별 전후 무게차이로 바탕시험을 통한 보정된 먼지중량을 산출하여 측정 지점별 환산한 흡인가스량 체적의 평균값을 바탕으로 식(3.3)에 대입하여 표준상태의 흡인건조 배기가스량 V'n(Sm<sup>3</sup>)을 산출하였다.

$$V'n = 0.028317 \times V'm \times \frac{273}{273 + \theta m} \times \frac{Pa + \Delta H}{760} \times 10^{-3} \quad (3.3)$$

V'm은 흡인가스량(ft<sup>3</sup>)이고 θm은 건식가스미터 온도(°F), Pa는 대기압(mmHg), ΔH는 오리피스 압차(mmHg)이며 0.028317은 가스체적-농도간 환산계수를 나타내고 있다. 산출된 흡인건조 배기가스량 V'n(Sm<sup>3</sup>)과 먼지 포집 여지에서 측정된 먼지중량 md(g) 측정값을 이용해 건조 배출가스중의 먼지농도 Cn(ppm)을 구할수 있다.

$$Ch = \frac{md}{V'n} \quad (3.4)$$

식(3.4)의 V'n 은 표준상태의 흡인건조 배가스량(Sm<sup>3</sup>), md는 포집된 먼지량(g)을 의미한다. 최종적으로 표준산소농도에서의 먼지농도 C(mg/Sm<sup>3</sup>orppm)를 구하기 위해 식(3.5)와 같이 건조 배출가스중의 먼지농도 Cn(ppm)와 표준 산소농도 Os(%), 실측 산소농도 Oa(%)를 바탕으로 산출하였다.

$$C = Ch \times \frac{21 - Os}{21 - Oa} \quad (3.5)$$

### 3.1.2.3 GGH 누설률 측정방법

GGH로 인입된 처리되지 않은(Untreated) 가스중 흡수탑을 거치지 않고 배기 되는 정도, 즉 가스누출 정도를 GGH 전후의 SO<sub>x</sub> 농도를 측정하고 결과를 계산식을 적용하여 구하였다. 측정방법은 3.1.2.1 황산화물 측정방법과 동일한 방법으로 측정하였다.

Table 3.1 Methods and standards for each performance test

Performance test category	Method	Note
SO <sub>x</sub> Removal Efficiency	Process Test Standards, KS I 2200 EPA Method8	Atmosphere
SO <sub>x</sub> Concentration, GGH Leakage	Process Test Standards, KS I 2200 EPA Method8	Atmosphere
Particulate Matter Emission	Process Test Standards, KS I 2200	Atmosphere

## 3.2 황산화물 제거 효율

성능개선 전·후 탈황설비 효율변화를 비교하기 위해 굴뚝 배출 및 탈황설비로 유입되는 SO<sub>x</sub>값을 제3장 3.1.2. 시험방법에 따라 측정하였고 측정된 평균값을 식(3.6)에 대입하여 황산화물 제거효율을 도출하였다. SF-out은 탈황설비 출구측 황산화물 농도(ppm)이며 SF-in은 탈황설비 입구측 황산화물 농도(ppm)이다.

$$\eta_{sox} = 100 \times \left(1 - \frac{SF-out}{SF-in}\right) \quad (3.6)$$

흡수탑으로 유입된 배기가스는 성능개선 이후 증가된 액

# 1,000 MW 석탄화력발전소 대기환경오염물질 제거효율 향상을 위한 탈황설비 성능개선

기비로 인해 스프레이 뱅크를 통과하는 동안 분사되는 슬러리와 접촉면적이 증가되었고 높이가 변경으로 인한 반응시간 또한 증가되어 성능개선 전 대비 획기적인 효율개선이 예상되었다. 또한 산화공기의 유량이 증가된 것은 기액 물질전달의 촉진되어 효율에 큰 영향을 줄 것이라 기대하며 성능시험을 수행 하였다. 그 결과 Fig 3.1과 같이 개선전 탈황설비 입구농도 383.5ppm, 굴뚝 배출농도 15.4ppm으로 황산화물 제거효율 95.99% 수준에서 성능개선 이후 1차 성능시험에서 탈황설비 입구농도 399.5ppm, 굴뚝 배출농도 10.6ppm으로 황산화물 제거효율이 97.36%로 향상되었으며 7개월 뒤 2차 성능시험에서도 탈황설비 입구농도 333.5ppm, 굴뚝 배출농도 8.6ppm으로 황산화물 제거효율이 97.40%임을 검증하여 성능개선 전 대비 약 1~2% 향상된 결과를 확인하였다.

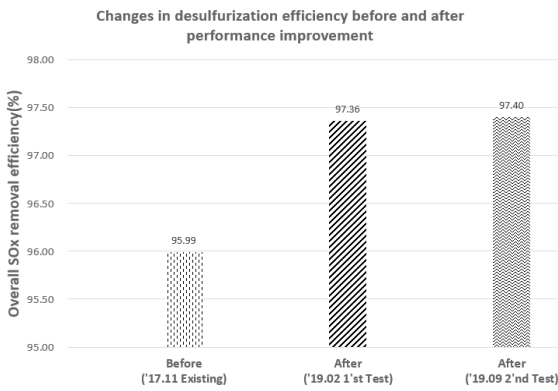


Fig. 3.1 Changes in desulfurization efficiency before and after performance improvement

### 3.3 GGH 누설률

탈황설비 성능개선 전·후 GGH 누설률 변화를 비교하기 위해 탈황설비 출구 SF-out(SO<sub>x</sub> in treated gas leaving GGH), 흡수탑 출구 SA-out(SO<sub>x</sub> in treated gas entering GGH), 탈황설비 입구 SF-in(SO<sub>x</sub> in untreated gas entering GGH) 황산화물 농도(ppm)을 측정하여 식(3.7)에 대입하여 GGH 누설률을 도출하였다.(Treated gas : 탈황설비 공정을 거친 배연가스, Untreated gas : 탈황설비 공정을 거치지 않은 배연가스)

$$\eta_{GGH, \text{leakage}} = 100 \times \left( \frac{S_{F-out} - S_{A-out}}{S_{F-in} - S_{A-out}} \right) \quad (3.7)$$

무누설 GGH를 적용하지는 못하였지만 Scavenge fan의 용량을 증대하였고 원심방향 쉘을 단일에서 더블 쉘로 전반적인 개선을 하였기 때문에 미 처리된 배연가스의 개선된 누설률을 기대하며 두 번의 성능시험을 수행 하였다.

그 결과 Fig 3.2와 같이 개선전 탈황설비 출구농도 15.36ppm, 흡수탑 출구 농도 12.33ppm, 탈황설비 입구농도 383.46ppm 으로 GGH 누설률이 0.8% 수준에서 성능개선 이후 1차 성능시험에서 탈황설비 출구농도 10.55ppm, 흡수탑 출구 농도 8.84ppm, 탈황설비 입구농도 399.46ppm 으로 GGH 누설률이 0.44%로 획기적으로 감소됨을 확인 하였고 2차 성능시험에서도 탈황설비 출구농도 8.55ppm, 흡수탑 출구농도 6.73ppm, 탈황설비 입구농도 333.46ppm 으로 GGH 누설률이 0.56%인 향상된 성능이 유지되고 있음이 확인되었다.

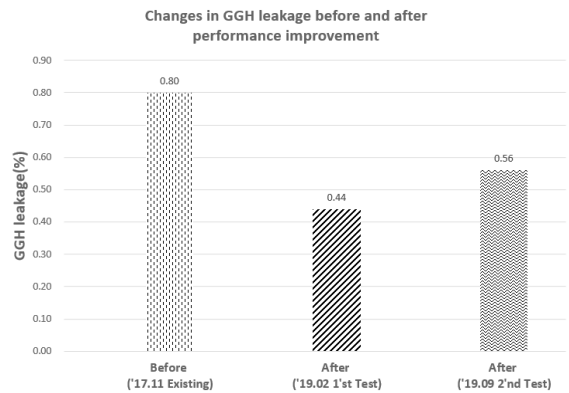


Fig. 3.2 Changes in GGH leakage before and after performance improvement

### 3.4 먼지 제거 효율

성능개선 전·후 탈황설비에서 먼지제거 효율을 비교하기 위해 제3장 3.1.2시험방법에 따라 측정하였고 측정된 평균값을 식(3.8)에 대입하여 먼지 제거효율을 산출하였다. DF-out은 탈황설비 출구측, DF-in은 탈황설비 입구측 먼지 농도(mg/Sm<sup>3</sup>)를 나타낸다.



$$\eta_{dust} = 100 \times \left(1 - \frac{D_{F-out}}{D_{F-in}}\right) \quad (3.8)$$

그 결과 Fig 3.3와 같이 성능개선 전 탈황설비 입구 먼지농도 3.2mg/Sm<sup>3</sup>, 탈황설비 출구 먼지농도 2.0mg/Sm<sup>3</sup>으로 먼지 제거효율 37.5% 수준에서 성능개선 이후 1차 성능시험에서 탈황설비 입구 먼지농도 5.9mg/Sm<sup>3</sup>, 탈황설비 출구 먼지농도 2.1mg/Sm<sup>3</sup>으로 먼지 제거효율 64.4%로 약 27% 증가하였고 2차 성능시험에서도 탈황설비 입구 먼지농도 5.3mg/Sm<sup>3</sup>, 탈황설비 출구 먼지농도 3.2mg/Sm<sup>3</sup>으로 먼지 제거효율 40.74%로 성능개선전 대비 약 3%증가로 소폭 상승되었음을 알 수 있었다. 이를 통해 탈황설비 공정을 거치면서 주 목적인 황산화물 제거효과 뿐만 아니라 먼지제거 효과 또한 크다는 것을 보여줄 수 있었다.

신보령 성능시험 당시 ESP를 통과한 탈황설비로 유입되는 먼지 측정 데이터는 약 5mg/Sm<sup>3</sup>내외로 상대적으로 작은 값이어서 획기적인 먼지제거 효율을 나타내진 못하였으나 탈황설비 입구 먼지량이 조금 더 많을 경우 먼지 제거효율은 더 커질 것으로 예상된다.

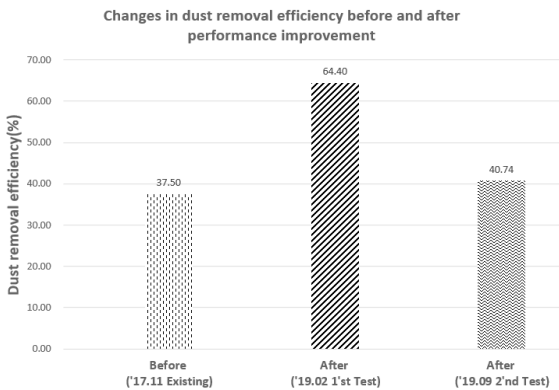


Fig. 3.3 Changes in dust removal efficiency before and after performance improvement

### 제4장 요약

본 논문에서는 기존 설치·운영 중인 석탄화력발전소의 탈황설비 성능개선 사례를 알아보고 황산화물, 먼지제거 효율

향상 및 GGH 누설률을 개선 시키기 위한 주요 방법들에 대해 연구하였다. 현재 운영중인 1,000 MW급 석탄화력발전소에 적용 가능한 가장 합리적인 방안을 선정하여 성능개선을 시행하였고 향후 점차 강화되고 있는 법규 및 조례의 환경오염물질 배출허용기준을 만족시킬 수 있을 만큼 성능을 개선 시켰다. 핵심 내용 및 결론 요약은 아래와 같다.

- 1) 탈황설비 성능개선 방법으로는 흡수탑 재순환펌프 용량 증대, GGH 누설률 개선 또는 무누설 GGH 적용, 산화공기 유량증대, 회전난류기 신설, 화학첨가제 사용 등이 주로 검토되며 각 발전소의 조건과 상황에 따라 최적의 성능개선방안을 도출할 수 있어야 한다.
- 2) 1,000 MW급 석탄화력발전소에 흡수탑 내부 석회석슬러리 순환유량과 황성분을 포함하는 연소가스의 비율인 액기비의 증가와 기액 물질전달 가속을 위한 산화공기유량 증대 및 GGH내부 미처리 연소가스의 누설률 개선을 한 결과 황산화물 제거 효율향상 뿐만아니라 먼지제거 효과 또한 개선되었다.
- 3) 액기비(10.10→12.03) 및 S/R비(1.73→2.71) 증가, GGH 누설률(1→0.65%) 감소로 인해 성능개선 전 황산화물 제거효율인 95.5%에서 성능개선 후 1차 97.36%, 2차 97.4%로 약 2% 증가되었고, 2019년 현재 대기오염물질 배출허용기준인 50ppm을 만족하면서 2023년부터 적용될 25ppm 기준 또한 조기충족시킬 수 있는 수준으로 효율이 상승 되었다.
- 4) 먼지제거 효율 또한 실측 데이터 분석을 통해 성능개선 전 37.5%에서 성능개선 후 1차 64.4%, 2차 40.74%로 개선 전 대비 상승되었음을 확인하였고, 전기집진설비와 함께 2023년부터 적용될 먼지 배출허용기준 5mg/Sm<sup>3</sup>기준을 만족하는데 기여할 것으로 예상된다.

본 논문에서의 연구대상인 기존 설치·운영중인 1,000 MW 석탄화력발전소 설비의 제약을 고려하여 적용한 탈황설비 성능개선 방식 뿐만아니라 추가 검토된 Case들은 향후 건설 예정이거나 건설 중인 발전소에 검토 및 적용되어 획기적인 대기오염물질 제거효율 향상 실측 데이터가 발표될 것 기대한다.

## 참고문헌

- (1) Doosan Heavy Industries & Construction Co., 2017 "Technical Proposal for the Performance Improvement of SinBoryeong Thermal Power Dehydrogenation Facilities."
- (2) Chungcheongnam-do, 2019 "Ordinance on Standards for Allowance of Air Pollutants in Chungcheongnam-do".
- (3) Kim Jong-sung, 2018, "Performance Improvement of 500 MW Coal-fired Power Plant desulfurization Facilities with Structural Constraints," Hanyang University Master's Degree Paper, p. 18, pp. 23-25.
- (4) Choi Hyun-ho, 2018, "appropriate pH for desulfurization facilities of 200 MW anthracite power plants," Hanyang University's master's degree thesis, p. 20.
- (5) Binlin Doubt, 2009, "Prediction of SO<sub>2</sub> Removal Efficiency for We Flue Gas Desulfurization".
- (6) Zhen et al, 2018, "Experimental study on the synthetic restoration of fine particles by we flow gas desulfurization tower with a flow pattern control device."
- (7) Park Seung-soo, Ahn Hee-soo, 2011, "How and its devices improve desulfurization rates in the smoke desulfurization process," the Korean Intellectual Property Office, pp. 3-4.
- (8) Korea Institute of Development Education, 2016, "Working on Desulfurization Facilities," 2016 Development Bridge-Revision-3 Textbook.
- (9) Sung Ki-jong, Lee Chang-sik, 2017, "Operation and Improvement of Non-leakage Type Gas-Gas Heater(GGH) for Coal-fired Dehydrogenation Facilities," Korean Combustion Society, p. 37.
- (10) KEPCO E&C, 2017, "Review on the improvement of atmospheric environmental facilities' performance by strengthening standards for allowing air pollutant emissions," pp. 9-10.
- (11) Korea Midland Power Co., 2017. "Shin Boryeong Air Environment Facility Performance Improvement Plan," Construction Office.
- (12) SRI EPA Report, 2006, "Estimated SO<sub>3</sub> Removal Efficiency," Table 2-4.
- (13) Korea Midland Power Co., 2019, "Report on the Second Performance Test Results of Shin Boryeong Unit 2 Back-to-Fluoride Evacuation Facility," Turbine Technology Department.
- (14) Korea Electric Power Corp., 2017, "Operation Manipulation Manual", pp. 15-5, 15-28, 15-29.

KIPEG