

# 국내 무연탄 발전소 혼소율 변화에 따른 탈황 특성 연구

김정유\*, 박대영\*\*, 이재현\*\*, 문승재\*\*1)

**Key words** : flue gas desulfurization, absorber, anthracite, bituminous, gypsum, limestone, SO<sub>x</sub>

## Abstract

The sulfur oxides is one of important materials to come about air pollution at thermal plant consuming fossil fuel. The several flue gas desulfurization equipments are installed and operated to decrease sulfur oxides. The flue gas desulfurization of our thermal plant is designed for optimizing flue gas desulfurization technical development and research by Korea Electric Power Research Institute. We operate this desulfurization equipment.

Now, our country imports nearly 97 percentage of the energy source and competes with the world for the energy because of the rise of raw materials cost. The fuel cost decrease of power plants is the most important factor of the operation. The fuel used in the experiment is the domestic anthracite from Kangwon Taeback and the bituminous coal from Russia ,Taldinsky Mine. This Study is experimental investigations of desulfurization characteristics for domestic anthracite power plant by increasing bituminous coal. We surveyed possible parameters and conducted the performance about desulfurization equipment in Y.D thermal power plant.

## 1. 서론

경제성장 및 국민 생활수준 향상에 따라 조금 더 편리한 생활을 영위하기 위하여 에너지의 사용량이 증대되기 시작하였다. 전력소비의 지속적 증가에 따라 특히 1차 에너지 소비중 발전분야 투입비중이 지속적으로 증가하고 있다. 1990년 이후 2004년까지 에너지수요는 연평균 6.2% 증가한 반면, 전력수요는 연평균 9.1% 증가하였다. 연평균 경제성장률은 5.5%에 비하면 상당히 높은 증가률이다[1]. 국내 발전설비의 증가와 더불어 국민들의 높아진 환경의식으로 전력설비 건설에 대한 지역 주민의 반대 등으로 사업추진이 지연·취소되는 등 불확실성이 증대되고, 국내 환경규제 강화와 기후변화협약 등 국제적 환경규제 강화에 대응하기 위해 친환경적 전력정책 수립이 필요한 때이다. 우리나라도 공해물질 배출규제치를 강화하였고 친환경적인 황산화물 제거 기술이 필요하게 되었다. 그래서 영동화력 탈황설비는 한전 전력연구원에서 “G-7 환경공학 기술개발 사업”의 일환으로 배연탈황기술 개발 및 실용화 연구를 수행하여 한국형 탈황흡수탑(KEPAR: KEPCO Absorption Reactor)을 개발하여 설치하였다.

탈황설비 흡수탑은 wet scrubbing gas dispersion type으로 보일러 유인통풍기를 거쳐온 배기가스는 승압송풍기에 의하여 공급되며, fan을 통과한 배기가스는 gas gas heater를 지나면서 열전달을 하고 가스냉각기로 유입된다. 가스냉각기에 유입된 배기가스는 흡수탑에서 공급되는 슬러리에 의해 단열포화 온도로 냉각된 후 흡수탑 상부로부터 흡수탑 하부로 유입되어 가스층을

형성한다. 아황산가스는 기포층에서 흡수제인 석회석 슬러리와 접촉하여 제거되고, 부산석고는 반응영역에서 흡수탑 교반기 전단으로 유입되는 산화공기중의 산소와 산화 반응한 후 석고 슬러리 펌프에 의해 흡수탑에서 탈수설비로 이송된다.[2]

본 연구는 최근 급변하는 국제정세와 각국의 에너지 확보경쟁 심화에 따라 고유가 및 에너지 수급 불안이 초래되고 있으며, 특히 에너지원의 해외 의존도가 높은 우리나라에서 연료비 절감을 할 수 있는 방안으로 지금까지 이루어진 실험적인 실험결과를 바탕으로 국내무연탄 발전소 발전설비의 탈황설비에 연료 혼소 비율에 따른 각종 운전조건의 변화, 입구 배기가스온도 변화, 입·출구 SO<sub>x</sub> 변화, 석회석 사용량 등을 조사, 분석하고 현장의 실증설비에 직접 적용하였고, 혼소율의 변화가 무연탄 발전소 탈황설비에 어떤 영향을 미치는지에 대해 연구를 수행하였다.

## 2. 흡수탑 탈황원리 및 종류

### 2.1 탈황방법 및 원리

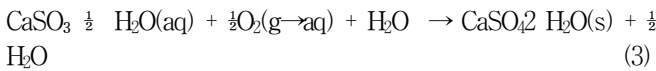
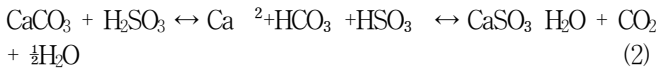
한국형 흡수탑은 Bubbling Type 이므로 Spray Tower보다 기액 접촉면적이 크고 석고슬러리를 재순환하지 않아도 되는 장점이 있고 부산물인 석고의 크기분포가 타 탈황설비에 비하여 월등히 큰 것으로 나타났다. 탈황의 기본원리는 Absorber(반응 흡수탑) 설비에 보일러 연소시 생성된 배기가스를 통과 시키면서

\* 한국남동발전(주) 영동화력, [kjykyj@kosep.co.kr](mailto:kjykyj@kosep.co.kr)

\*\* 한양대학교 대학원, [jhlee@hanyang.ac.kr](mailto:jhlee@hanyang.ac.kr)

배기 가스중의 아황산가스(SO<sub>2</sub>)와 흡수탑 상부로부터분사된 석회석 슬러리 (CaCO<sub>3</sub>)를 접촉시키면 석회석이 아황산가스를 흡수하고 화학반응을 일으켜 재활용이 가능한 고순도의 (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)석고로 부산물을 생산한다.

수용성 황산화물이 흡수탑에 통과시 분사된 물에 흡수되는 흡수 반응은 gypsum slurry liquid 사이의 기-액 평형(liquid/gas equilibrium)에 의해 지배를 받는다. 분사된 물에 흡수되어진 산성의 황산화물과 물에 용해된 알칼리 흡수제인 석회석과 즉각 반응하여 황산화물이 반수석고로 반응하는 용해 및 중화과정, 반수석고와 수용 황산화물은 전리 역반응이 쉽게 일어나 반응성을 저하시키고 불안정한 상태의 물질로 반응의 안정과 반응물질의 회수를 용이하게 하기 위하여 압축공기를 강제 공급하여 산소와 결합시키는 산화반응 과정, 황산화물과 석회석이 반응하여 gypsum을 생산하는 결정화 과정으로 이루어 진다. 흡수탑내에서 화학반응 메커니즘은 아래반응으로 식(1)에서 (4)까지로 분류된다.[3]



## 2.2 흡수탑 형식 및 현황

Table 1. The type of FGD in thermal power plant

연료	발전소별	탈황공정	흡수탑 형식	기술보유사 시공사
석탄	보령 3~6호기	습식석회석/석고	Grid Packed 병류/향류식	미쯔비시중공업 쌍용중공업
	태안 1~4호기	습식석회석/석고	Spray/Tray 향류식	B&W 현대중공업
	하동 1~6호기	습식석회석/석고	Spray/Tray 향류식	B&W 현대중공업
	당진1~4호기 삼천포1~4	습식석회석/석고	Spray 향류식	Steinmuler 삼환/한국코트렐
무연탄	영동 1~2호기	습식석회석/석고	가스층 다공판형 KEPAR	한국전력공사 한국전력기술
	서천 1~2호기	습식석회석/석고	가스층 다공판형 KEPAR	한국전력공사 한기/동아/정일
중유	울산 4~6호기	습식석회석/석고	JBR	Chiyoda 대우중공업
	울산 1~2호기	습식석회석/석고	Spray 향류식	Bischoff 한라중공업
	여수 1~2호기	습식석회석/석고	Spray 향류식	Marsulex 한국중공업/대림

흡수탑은 흡수제의 형태에 따라 습식법과 건식으로 나누며, 반응생성물로부터 흡수제의 재생 여부에 따라 재생법 및 비재생법

으로 나누며, 기-액 접촉방식에 따라 가수분사식과 액분사식으로 분류하고 있다.

탈황반응이 일어나는 흡수탑 형식은 영동 1~2호기, 서천 1~2호기, 울산 4~6호기를 제외한 22호기의 설비가 석회석 슬러리를 배기 가스에 분사하는 분사형이고 나머지 영동, 서천, 울산의 탈황설비는 배기가스를 흡수액 중에 분사하는 가스분사방식의 Bubble형이다. 이 중에서 영동 1~2호기, 서천 1~2호기 탈황설비는 전력연구원에서 개발한 단일단 다공판형 Tray형(KEPAR)이며 울산 4~6호기는 일본 Chiyoda사 CT-121 공정의 JBR(Jet Bubbling Reactor)형이다.[4] 국내 화력발전소별 배연탈황설비 현황을 표 1에 기술하였고, 대표적인 흡수탑 형식별 장단점을 표 2에 나타내었다.

Table 2. characteristics of the desulfurization type

흡수탑 형식	장점	단점
Spray	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Spray Header 외에 내부장치가 거의 없어 압력손실이 낮다.</li> <li>o 현재 습식 석회석/석고 공정의 거의 모든 흡수탑에 적용(80~90%) 되고 있다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 장치가 다른 형태의 흡수탑에 비해 크다</li> </ul>
Tray	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 기/액 접촉면적이 커서 SO<sub>2</sub> 제거효율이 높다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 안정적인 거품이 형성되기 위한 배기 가스 속도영역이 매우 좁다</li> </ul>
Packed	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 기/액 접촉면적이 커서 SO<sub>2</sub> 제거효율이 높다</li> <li>o 흡수탑의 크기가 작다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 스케일 및 부식발생 가능성이 많다</li> <li>o Spray 형이 적용되기 이전에 많이 사용되었다</li> </ul>
KEPAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 단일단 다공판형 흡수탑으로 탈황효율이 높고, 순환펌프를 사용하지 않는 자연순환 방식으로 운전비가 낮다</li> <li>o 기/액 접촉효율이 좋고 크기가 작다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 적용실적이 적다</li> </ul>
JBR	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 흡수,산화,중화 반응이 하나의 흡수탑에서 진행되므로 공정이 간단하다</li> <li>o 흡수제 이용률이 높고 폐수농도가 낮다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 대용량 발전소에 적용실적이 적다</li> <li>o 가스압력 손실이 크다</li> </ul>

## 3. 실험 및 방법

### 3.1 실험장치

영동 #2호기 탈황 공정은 보일러 유인통풍기를 거쳐서 나온 배기가스는 가스재열기를 거쳐 1차 보유 열량을 방출하여 142.2℃(BMCR)까지 냉각이 되고 다시 흡수탑 부속설비인 가스냉각덕트(Duct Cooler)에서 포화냉각 온도인 47℃까지 냉각된다. Duct Cooler에서 배기가스는 흡수탑 하부에서 Gas Cooling Pump에 의해 펌핑되어 노즐에서 분사되는 석고 슬러리와 반응이 일어나 냉각뿐만 아니라 SO<sub>2</sub>도 일부 제거된다.

Duct Cooler를 지난 배기가스는 흡수탑 상부로 유입되어 Duct Pipe를 통하여 흡수탑 하부의 슬러리 영역으로 진입하게 된다. 흡수탑 하부에서 배기가스는 석회석 슬러리와 반응을 하여 석고를 생성한다. 흡수탑에서 SO<sub>2</sub>가 제거되고 난 청정 배기가스는 일부의 액적과 함께 흡수탑을 빠져나가고 이 액적들은 습분분

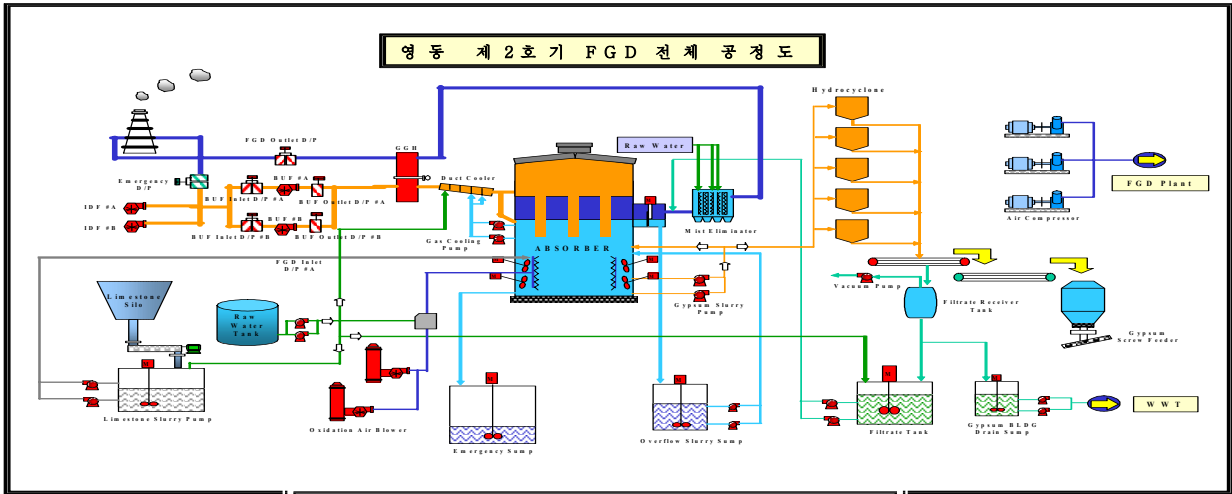


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

리기를 통과하는 동안에 제거 된다.

한편, 흡수탑 내부에서 생성된 석고는 Gypsum Slurry Pump에 의해 석고 탈수계통으로 이송되며 탈수계통으로의 이송여부는 흡수탑 내부 슬러리 밀도에 의해서 결정되고 내부 밀도가 낮을(14 wt%미만) 경우는 흡수탑 내부로 재순환이 된다. 실험장치인 영동화력 탈황설비는 최대 처리가스량 800,000Nm<sup>3</sup>/h, 입구 SO<sub>x</sub> 1019ppm 이하, 출구 SO<sub>x</sub> 농도 150ppm 이하로 설계되었다. 흡수탑은 순수 국내기술에 의해 개발된 습식석회석 석고법에 의한 Bubbling 형식으로 1개가 설치되어 있으며, 구조는 높이 14.6m, 직경 14.3m인 원통형으로 되어 있다.

석회석 취급계통은 분말석회석 이송차량에 의해 반입되는 석회석분말(325Mesh, 90%이상 통과)을 하역, 저장 및 슬러리화하여, 흡수탑에 보일러부하 및 SO<sub>2</sub> 유입 농도에 따라 일정량을 공급하는 기능을 가지며 석회석 사일로, 공급기(Screw Feeder), 펌프, 석회석 슬러리 공급 제어밸브, 연결배관으로 구성되어 있다.

### 3.2 실험방법

Table 3. Properties of the used domestic anthracite

CARBON	C	%	58.57
HYDROGEN	H	%	1.57
OXYGEN	O	%	1.87
NITROGEN	N	%	0.36
SULPHUR	S	%	0.54
ASH	A	%	37.09
HHV(Dry)	HHV	kcal/kg	4737

연료인 석탄은 국내무연탄으로 주로 T, G, D지역에서 채탄되는 석탄을 유연탄은 러시아에서 생산되는 Taldinsky탄을 사용하였고, Table 3에 무연탄의 물성을 수록하였다. 운전조건으로는 발전소 출력 125~130MW, 200MW 유·무연탄 혼소 방법은 Conveyor Belt 혼합으로 하였고 과잉공기율은 5~10% 범위내에

서 운전하였고 흡수탑 Level은 4.1~4.2m, PH는 4.8~4.9로 고정하여 최대한 실험조건에 접근하여 실험을 수행하였다. 운전상태 측정은 30~60분 간격으로 측정하였다.

Table 4. Analysis of the used bituminous coal

CARBON	C	%	72.93
HYDROGEN	H	%	4.61
OXYGEN	O	%	7.27
NITROGEN	N	%	1.71
SULPHUR	S	%	0.37
ASH	A	%	13.11
HHV(Dry)	HHV	kcal/kg	6698

Table 5. Analysis of the used heavy oil

CARBON	C	%	85.7
HYDROGEN	H	%	11
OXYGEN	O	%	0.155
NITROGEN	N	%	0.2
SULPHUR	S	%	2.8
ASH	A	%	0.03
MOISTURE	MF	%	0.11
HHV	HFO	kcal/kg	10089

Table 6. Chemical composition of the used limestone.

CaCO <sub>3</sub> ≥95%	MgCO <sub>3</sub> ≤4%	SiO <sub>2</sub> ≤2%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤0.5%
95.4	2.67	1.65	0.33

## 4. 결과 및 고찰

혼소율 변화가 탈황설비에 영향을 미치는 변수들을 조사 분석한 결과, 특히 중요한 배기가스량, 입·출구 SO<sub>x</sub>량, 배기가스온도,

흡수탑 PH, 석회석 사용량 등에 주안점을 두고 실험을 진행하였다.

#### 4.1 혼소율 변화에 따른 FGD 배기가스량(Nm<sup>3</sup>/h)

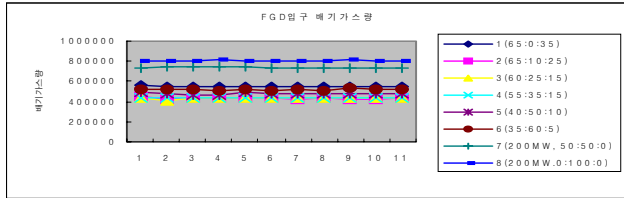


Fig. 2. The results of gas flow rate

Fig. 2에 혼소율변화에 따른 FGD 입구 배기가스량을 보였다. 혼소율 55:35:15(무:유:중)까지는 서서히 증가하는 경향을 보이고 있으며 유연탄 혼소비율이 50%이상일때 약간 더 증가하는 것으로 볼 수 있다. 배기가스 온도는 혼소율의 변화에 대해 큰차이를 보이지 않았지만 출력에 비례하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 혼소율 변화에 따른 입·출구 SO<sub>x</sub>량

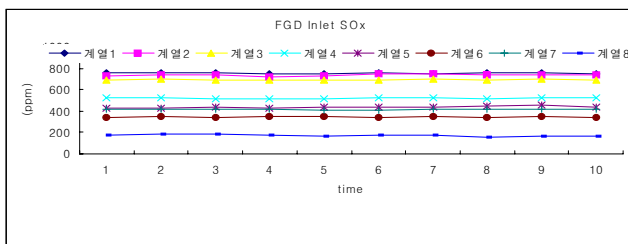


Fig. 3. Effect of the inlet SO<sub>x</sub> flow

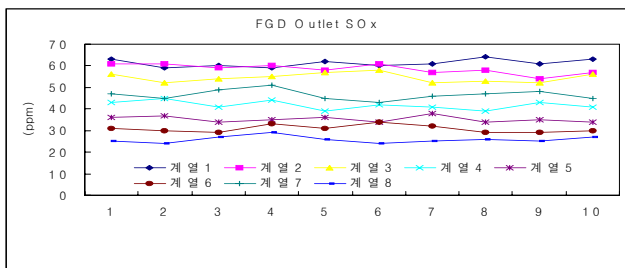


Fig. 4. Effect of the outlet SO<sub>x</sub> flow

혼소율 변화에 따른 입·출구 SO<sub>x</sub>량의 변화는 유연탄 비율이 증가할수록 입·출구 SO<sub>x</sub>량은 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 탈황설비가 혼소율을 감소시킬수록 즉 유연탄 비율을 증가시키고 무연탄과 중유 비율을 감소시킬수록 유리하다고 볼 수 있다. 이런 입·출구 SO<sub>x</sub>량 감소는 중유 감소에 따른 연료성분의 S 성분의 감소에 기인한 것으로 보여진다.

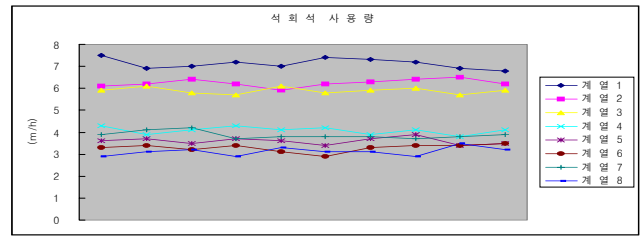


Fig. 5. The used limestone flow in the experiment study

#### 4.3 혼소율 변화에 따른 석회석 사용량

혼소율 변화에 따른 석회석 사용량은 유연탄 비율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 입·출구 SO<sub>x</sub>량의 감소로 화학반응에 필요한 석회석도 같이 감소하기 때문인 것으로 나타났다.

### 5. 결론

국내 무연탄을 사용하기 위해 설치된 발전소에 유연탄을 혼소시켜 배기가스량, 배기가스 온도, 입·출구 SO<sub>x</sub>량, 석회석 사용량에 대한 특성을 측정하였다. 본 연구의 실험조건에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유연탄의 사용량을 증가함에 따라 배기가스량도 서서히 증가하는 것으로 나타났다. 특히 유연탄 혼소비율이 50%이상일때 조금 더 급격하게 증가하는 것을 보였다. 유연탄을 100% 전소시 배기가스량이 설계치를 초과하여 각종 송풍기에 과부하를 줄 수 있으므로 장시간 운전을 곤란한 것으로 나타났다.
- (2) 유연탄의 혼소율 증가에 따라 입·출구 SO<sub>x</sub>량은 감소하는 것으로 나타났다. 유연탄 혼소율 35%이상으로 증가할 때 입·출구 SO<sub>x</sub>량 감소는 급격하게 감소하는 것으로 보였다. 유연탄을 100% 사용할 때 입·출구 SO<sub>x</sub>량은 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다.
- (3) 유연탄의 사용량을 증가함에 따라 석회석 사용량도 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 석탄 혼소율의 변화, 유연탄 사용량을 증가시키는 것은 전체적으로 탈황설비에 유리한 것으로 나타났다. 흡수탑 상부 upper deck의 slurry 누적 상태도 양호한 것으로 보였다.

#### 참고문헌

- [1] 산업자원부, 제3차 전력수급기본계획, 공고 제2006-349호, pp.1-75.
- [2] 한국전력기술주식회사, 영동2호기 탈황설비 운전지침서, 제1권, pp.1-157.
- [3] 권정순, 배연탈황설비, 대한설비공학회 설비저널 제29호(2000) pp.47-50.
- [4] 조승원, 황영호, 전상기, 황산화물 저감을 위한 배연탈황 설치 사례, 한국대기환경학회 제2권, pp.451-452.
- [5] 이영일, 배연탈황설비, 전력기술 29호(1997), pp.6-84
- [6] Pandey, R. A, Desulfurization of Gaseous Fuels with Recovery of Elemental Sulfur, Environmentb science and technology v29