

## 석탄화력발전시설에서의 하이브리드 집진기 적용 시 수은화합물 제어성능 평가

### Performance of Removal Efficiency for Mercury Compounds using Hybrid Filter System in a Coal-fired Power Plant

성진호 · 장하나 · 백승기 · 정법목 · 서용철\* · 강연석<sup>1)</sup> · 이철규<sup>1)</sup>

연세대학교 대학원 환경공학부, <sup>1)</sup>(주) 제이텍

(2014년 3월 26일 접수, 2014년 4월 15일 수정, 2014년 5월 21일 채택)

Jin-Ho Sung, Ha-Na Jang, Seung-Ki Back, Bup-Muk Jung,  
Yong-Chil Seo\*, Yeon-Suk Kang<sup>1)</sup> and Chul-Kyu Lee<sup>1)</sup>

Department of Environmental Engineering, WtERT Center, Yonsei University

<sup>1)</sup>J-E Tech Co., Ltd.

(Received 26 March 2014, revised 15 April 2014, accepted 21 May 2014)

#### Abstract

This study focused on the performance of the newly developed hybrid filter system to capture fine particulate matter and mercury compounds in a coal-fired power plant. The hybrid filter system combining bag-filter and electrostatic precipitator had been developed to remove fine particulate matter. However, it would have a good performance to control mercury compounds as well. In Hybrid filter capture system, the total removal efficiency of total mercury compounds consisting of particulate mercury ( $Hg_p$ ), oxidized mercury ( $Hg^{2+}$ ), and elemental mercury ( $Hg^0$ ) was 66.2%. The speciation of mercury compounds at inlet and outlet of Hybrid filter capture system were 1.3% and 0% of  $Hg_p$ , 85.2% and 68.1% of  $Hg^0$ , and 13.5% and 31.9% of  $Hg^{2+}$ , respectively. In hybrid filter capture system injected with 100% of flue-gas, the removal efficiency of total mercury was calculated to increase to 93.5%.

**Key words** : Particulate matter, Particulate mercury, Oxidized mercury, Hybrid filter, Mercury removal efficiency

#### 1. 서 론

수은화합물은 최근 대기질 관리에 있어 가장 관심이 집중되는 환경물질로써, 환경 중에서 미량으로 존재하지만 직접적인 장기적 노출로 인해 동/식물로의

오염 및 농축으로 인해 인간의 건강에 악영향을 미칠 수 있다(Gardner *et al.*, 2010; Lee and Huh, 2004; Sarabia *et al.*, 1998).

선진국의 경우 수은의 주요 배출원으로 석탄 화력 발전소, 도시 폐기물 소각로, 유해폐기물 소각로, 병원폐기물 소각로 등의 연소설비에서 연간 수은 배출량의 약 87%가 배출되고 있다(Jung *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2007; Soek *et al.*, 2004; US EPA, 1997). 특히, 발전소는 배가스 단위부피당 농도는 낮지만( $10 \mu g/$

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-760-2846, E-mail : seoyc@yonsei.ac.kr

m<sup>3</sup>) 배출가스의 총량은 많아, 선진국에서는 대기오염 물질 처리기술의 50% 이상이 현재 발전소에서 배출되는 수은 제거에 초점이 맞추어져 있다(Sun *et al.*, 2012). 국내에서도 인위적 오염원으로부터 연간 약 10~30 ton이 발생하는 것으로 보고되어 있으며, 석탄 발전소 및 소각로가 주 오염원 중에 하나이다. (NIER, 2007a, b). 수은은 최근에 국제협약(Minamata Convention)이 효력을 발생하게 되면서, 그 배출량의 대부분을 차지하는 석탄화력발전소, 소각로, 시멘트 킬른 등에서의 수은제거가 관심 대상이 되고 있다(UNEP, 2014). 수은화합물의 경우, 입자상 수은(Hg<sub>p</sub>)과 가스상 수은화합물로 분류되고, 가스상 수은화합물은 원수수은(Hg<sup>0</sup>), 산화수은(Hg<sup>2+</sup>)으로 존재한다. 산화수은(Hg<sup>2+</sup>)은 물에 용해도가 있어서 기존에 설치된 대기오염 방지설비로 제거가 가능하지만 원수수은(Hg<sup>0</sup>)은 흡착을 통해 제거되기 때문에 흡착설비가 편성이 되어있지 않은 시설에서는 배가스 수은의 약 50% 이상 제거되지 않고 배출되고 있는 실정이다(Park *et al.*, 2008; Nolan *et al.*, 2004).

본 연구에서는 석탄화력발전시설에서 배출되는 미세먼지를 제어하기 위해 제작된 정전여과방식 하이브리드 집진기를 적용하였을 경우 최근 대두되고 있는 수은화합물의 제거가능성을 평가하고자 하였다. 먼저 연료 기초특성 분석자료 결과를 CEA simulation code에 적용하여 온도에 따른 수은화합종의 지배종 분포를 예측하였고, 방지시설 별로 수은화합물을 측정하여 각 지점에서 수은화합종 분포를 예측값과 비교 및 제어효율을 도출하였다. 이후, 하이브리드 집진기를 통해 수은의 제어 가능성과 수은 제어 메커니즘을 확인하였고, 하이브리드 집진기의 적용유무에 따른 수은화합물 총 제거효율을 비교 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 배가스 내 수은화합종 거동 예측

본 시설에서 배출되는 배가스 내 수은화합종의 예측을 위한 CEA (Chemical Equilibrium and Application) simulation code의 기초자료 입력을 위해 본 시설에서 사용하고 있는 석탄의 발열량은 발열량분석기(LECO CORP., AC600, U.S.A)를 통해 고위발열량을 측정하였고, 공업분석은 열중량분석기(LECO CORP., TGA

701, U.S.A)로 미국재료시험협회(ASTM)의 규격으로 분석하였다. 수은화합물의 형성에 영향을 주는 석탄의 탄소(Carbon)과 황(Sulfer)의 함량은 원소분석기(ThermoFinnigan corp., EA1110, U.S.A), 염소(Chlorine)는 시료에 혼합산(질산, 황산)을 넣은 후 고온 분해하는 전처리를 거친 뒤 완전 용해된 상태의 샘플을 ICP (Inductively Coupled Plasma) 방출 분광분석기(Perkin-Elmer CORP., Optima 5300 DV, U.S.A), 수은은 EPA Method 7471A로 전처리한 뒤 샘플을 CVAA (Cold Vapor Atomic Absorption) 분석기(Lumax CORP., RA 915+, Russia)를 통해 분석하였다.

기초특성 분석결과를 적용하여 CEA (Chemical Equilibrium and Application) simulation code로 수은화합물의 온도별 거동을 예측하였다. CEA code는 화합물의 열화학적 토대로 하여 다양하고 복잡한 화학평형 조성을 예측하는 방법으로써 Gibbs 자유에너지와 Helmholtz 에너지의 최소화 기법과 온도와 압력에 관련된 열역학적 Matrix를 이용한다. 약 2,000개 이상의 화합물질에 대한 열역학 특성 Database를 가지고 있으며 이 프로그램은 Aerodynamics와 Thermodynamics 분야에 광범위하게 사용되고 있다. CEA code 적용 시 입력 단위는 국제 규격단위(SI)를 사용하고 있으며, 이상기체 상수  $R=8314.51 \text{ J/kg-mole} \cdot \text{K}$ 를 사용한다.

### 2.2 하이브리드 집진기 및 수은제거 효율 평가

그림 1에 하이브리드 집진기의 내부 모식도를 나타내었다. 하이브리드 집진기는 정전집진기와 여과포 집진기로 한 개의 챔버(Chamber) 내에 융합함으로써 구조의 단순화와 설치면적으로 최소화하며, 방전극에 의해 하전된 분진이 집진판에서 90% 이상 포집됨(Kim *et al.*, 2004)으로 여과포의 부하를 최소화시킨다. 나머지 미세분진들은 상호간의 응집작용에 의해 여과포에서 제거된다. 또한 펄스에어(Pulse air)에 의해 여과포에서 떨어진 미세분진은 집진판에 재응집되어 제거된다. 기존 정전집진기의 단점인 타봉(Rapper)에 의한 탈진시 순간적으로 높아지는 배출가스 내 미세먼지의 배출을 줄이며 주기를 감소시킬 수 있고, 여과포집진기의 주요문제점인 주기적인 여과포 교체 문제를 충격분출방식(Pulse jet)의 탈진주기 감소로 해결하여 동력비와 유지보수비의 절감을 기대할 수 있다.

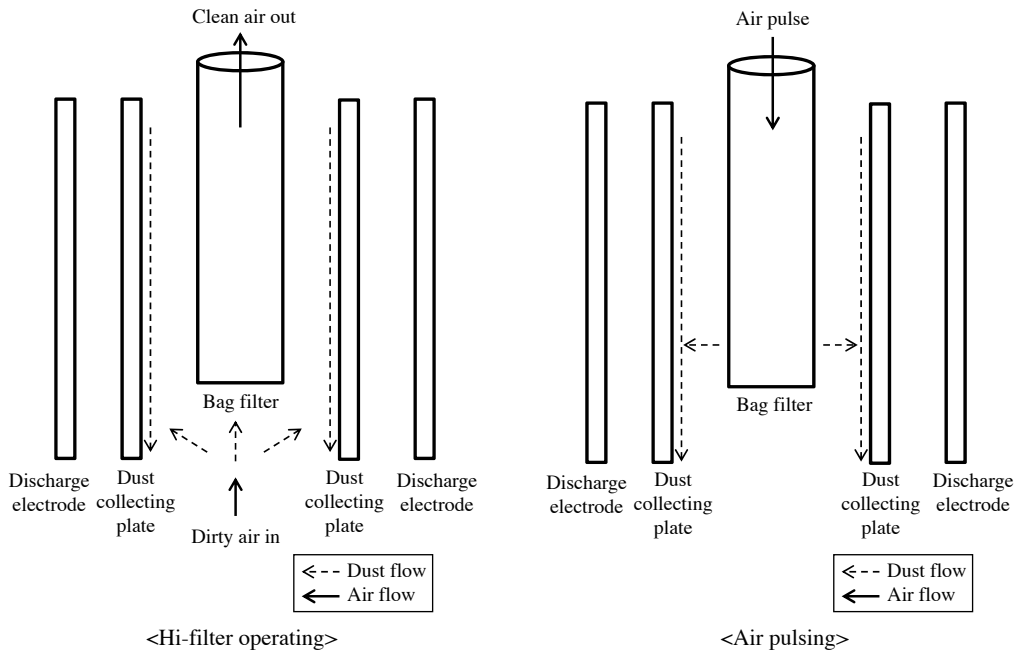


Fig. 1. Schematic diagram of Hybrid filter.

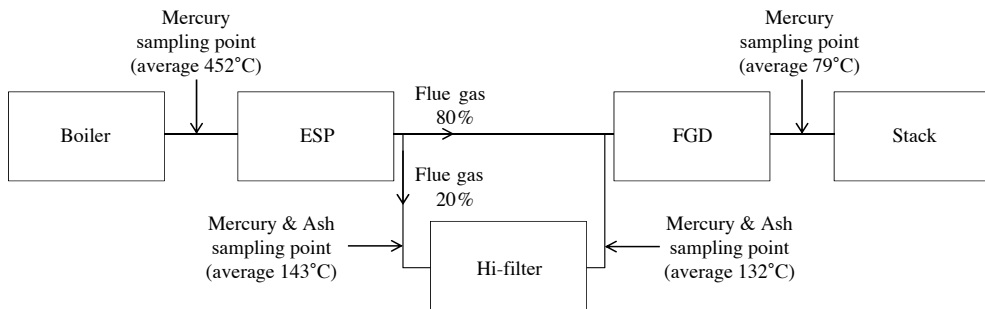


Fig. 2. Schematic diagrams of Hybrid filter test system at an existing coal-fired power plant.

본 시설은 총 용량은 400 MW이고, 배가스의 총 용량은 약  $45,600 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 으로 후단 방지시설은 두 방향으로 나뉜다. 두 방향으로 나뉜 후단방지시설은 동일하게 구성되어 있으므로 본 연구에서는 각 방지시설의 수은 제어효율과 하이브리드 집진기 적용시 수은 제어효율을 비교하기 위해, 한 방향의 방지시설들에서만 입자상, 가스상 수은을 채취하였다. 본 시설의 방지시설은 전기집진기(ESP)와 습식탈황기(FGD)로 구성되어 있다. 하이브리드 집진기의 처리용량은

$24,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 전기집진기(ESP)후단에 설치하여 배가스 총 용량의 20%을 처리하고 습식탈황기(FGD)전단에서 합류한다. 그림 2는 대상 시설의 채취 지점 및 채취당시의 평균 온도, 방지시설의 유형을 나타낸 것이다. 각 방지시설의 전/후단에서 3회씩 측정하여 수은화합물의 실제 거동에 대해서 파악하였다.

### 2.3 수은화합물 채취 및 분석

입자상, 가스상에 존재하는 수은화합물을 측정하고

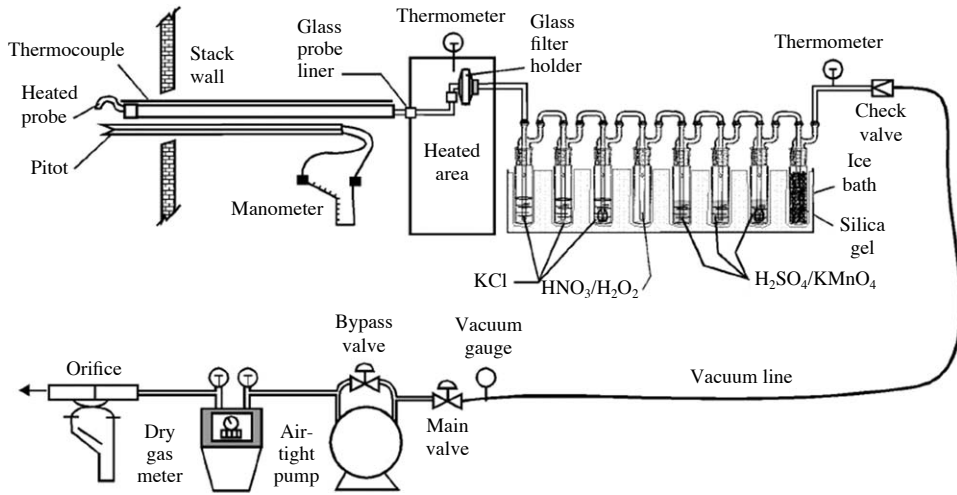


Fig. 3. Schematic diagram of sampling method in the ontario hydro method.

Table 1. Basic characteristic analysis result of fuel.

Method		Result		Unit
		Anthracite coal	Semi-anthracite coal	
Calorific value analysis		5,209	6,469	kcal/kg (dry basis)
Proximate analysis	Moisture	2.74	2.15	wt.% (dry basis)
	Volatile	5.44	16.76	
	Fixed Carbon	58.27	60.61	
	Ash	33.55	20.48	
Element analysis	Carbon	62.79	71.33	wt.% (dry basis)
	Sulfur	0.58	0.44	
	Choline	0.15	0.15	
	Mercury	44.96	318.51	

자 미국재료시험협회(ASTM)에서 공인된 OHM(Ontario Hydro Method)을 이용하여 측정을 실시하였다. 유량은 1 Sm<sup>3</sup> 이상 채취하였고, 등속흡입계수는 95~110%을 유지하였다. 채취 후, 흡수액의 회수는 US EPA OHM(Ontario Hydro Method)을 통해 실시하였고, 수은화합물의 분석은 CVAA(Cold Vaper Atomic Absorption) 분석기를 사용하였다. CVAA(Cold Vaper Atomic Absorption)방식의 분석방법은 흡수액에 채취된 시료를 환원시키고, 환원된 수은기체는 254 nm의 파장에서 흡광광도로 분석하게 되며, 분석은 3회 반복하여 실시하였다. 본 연구에서 사용된 CVAA(Cold Vaper Atomic Absorption) 분석기의 최소 감도는 0.5 ng/L이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 배가스 내 수은화합종 거동 예측

CEA (Chemical Equilibrium and Application) simulation code를 통한 배가스 내 수은화합종의 거동을 예측하고자, 본 시설에서 주로 사용되는 석탄에 대한 기초특성분석을 실시하였고, 결과를 위의 표 1에 나타내었다. 발전시설에서 가장 중요한 발열량은 국내 무연탄, 반무연탄은 각각 평균 5,209, 6,469 kcal/kg이고, 공업분석 결과 연료에서 중요한 고정탄소는 약 60%, 회분은 국내무연탄, 반무연탄 각각 30.45, 20.48%로 구성되어 있다. 원소분석 결과, 탄소는 국내무연탄, 반무연탄 각각 62.79, 71.33%을 나타내었다. 수은

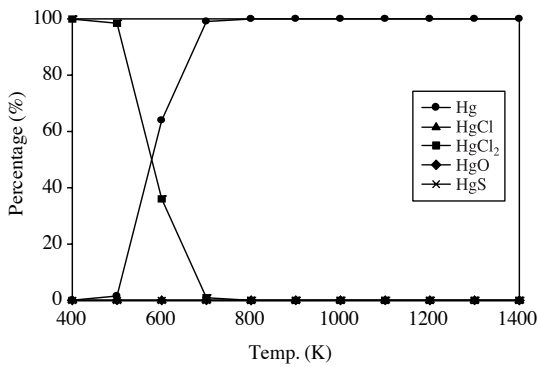


Fig. 4. Mercury compounds behavior prediction using CEA code (m=1.0).

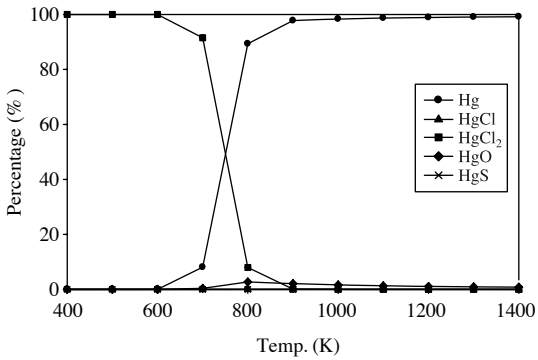


Fig. 5. Mercury compounds behavior prediction using CEA code (m=1.2).

화학종에 가장 큰 영향을 미치는 수은은 약 45~320 µg/kg로 석탄 정상별 차이를 보였고, 황은 약 0.5%, 염소는 0.15 mg/kg을 나타내었다.

위의 기초특성분석 결과를 기초로 과잉공기비를 변화시켰을 때, CEA (Chemical Equilibrium and Application) simulation code에서 온도변화에 따른 수은화합물의 거동 예측을 아래의 그림 4, 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이, 과잉공기비가 1.0인 이론공기연소인 경우 600 K 전후에서 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>)이 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)으로 변화하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 과잉공기비가 1.2로 증가하였을 경우 700 K 전후에 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>)이 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)으로 변화하였다. 이는 과잉공기비가 증가할수록 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>)에서 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)으로 전환하는 온도구간이 증가하며, 보일러

후단의 온도와 연소시 투입되는 과잉공기비가 수은 화학종 분포에 지배적인 영향을 미치게 되는 것을 보여 준다. 그러나, 본 설비에서 연소시 투입된 과잉공기비는 1~1.2이고, 흡착실험이 진행된 여과집진기 (FF) 구간에서 배가스 온도가 400 K 주변이므로, 본 구간에서는 과잉공기비와 관계없이 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>)이 지배적인 분포를 나타내게 된다.

### 3. 2 수은화합물 분포 및 제어효율

측정결과와 CEA (Chemical Equilibrium and Application) simulation code 예측결과를 비교했을 때, 보일러 후단에서 온도분포는 약 700 K 정도로 유지되며 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)이 큰 비율을 차지할 것으로 예측되었다. 열교환기 이후 배가스의 온도는 급격히 감소하게 되며, 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>)의 비율이 상승할 것으로 보인다. 온도에 따른 수은화합종의 변화 이외에 수은의 산화의 영향 요소인 분진 방지설비 (ESP, FF), 보일러 운전조건 (용량, 보일러타입), 연료의 특성 (염소농도, 회분 구성) 등의 영향도 있을 것으로 판단된다 (Chen et al., 2007). 본 시설의 경우, 하이브리드 집진기 구간에서 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)이 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>)으로 전환되고 비산재에 의한 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>) 흡착이 이루어져 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)이 보다 지배적인 것으로 파악된다.

본 시설의 수은화합물 배출농도 및 수은화합종 분포 결과를 그림 6에 나타내었다. 그 결과, 보일러 후단에서 총수은 (Total-Hg) 배출농도는 2.34~10.29 µg/Nm<sup>3</sup>, 전기집진기 (ESP) 후단은 2.25~6.66 µg/Nm<sup>3</sup>, 하이브리드 집진기 후단은 0.74~2.21 µg/Nm<sup>3</sup>으로 나타났고, 최종 대기 중으로 배출되는 굴뚝에서의 총수은 (Total-Hg) 배출농도는 0.71~2.23 µg/Nm<sup>3</sup>이었다. 전체 수은화합종 분포결과, 보일러 후단에서의 입자상수은 (Hg<sub>p</sub>), 원소수은 (Hg<sup>0</sup>), 산화수은 (Hg<sup>2+</sup>) 평균분포는 각각 1.15, 90.67, 8.18%를 나타내며, 전기집진기 (ESP) 후단은 1.31, 85.19, 13.50%, 하이브리드 집진기 후단은 0.00, 68.10, 31.90%, 굴뚝은 1.97, 88.97, 9.06%로 배가스 내 수은은 가스상 수은인 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)이 가장 높은 분포를 보였다. 보일러 후단 및 후단 방지시설에서 실측 결과, 본 구간에서 원소수은이 주 지배종으로 확인되었다. 이는 보일러 후단의 경우, 온도에 의한 영향인 것으로 판단되었으며, 후단 방지시설에서 배가스 온도가 급격히 낮아지면서 원소수은 (Hg<sup>0</sup>)에서 전환된 산화수은이 비산재에 결합 (Bound)되면

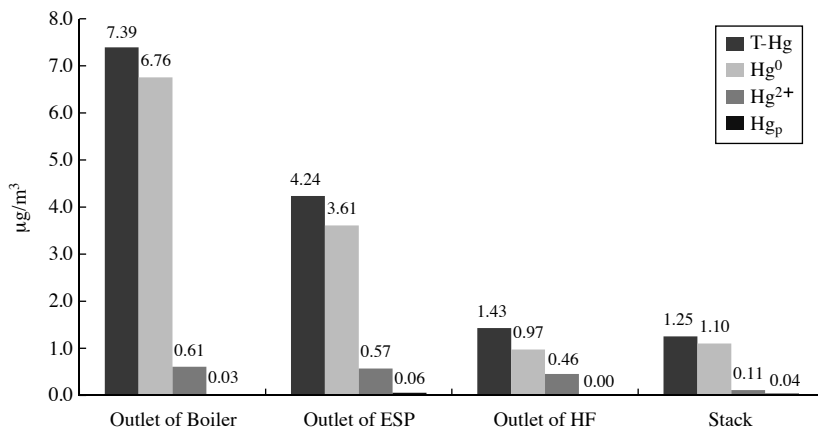


Fig. 6. Concentration and speciation of mercury emitted from coal-fired power plant.

Table 2. Concentration and speciation of Hg emitted from coal-fired power plant.

Air pollutant control device	Hg speciation	Inlet of APCDs		Outlet of APCDs		Removal efficiency (%)
		µg/Nm <sup>3</sup>	(%)	µg/Nm <sup>3</sup>	(%)	
ESP	Hg <sub>p</sub>	0.09	1.15	0.06	1.31	35.14
	Hg <sup>0</sup>	6.76	90.67	3.61	85.19	46.58
	Hg <sup>2+</sup>	0.61	8.18	0.57	13.50	6.19
	Total Hg	7.45	100	4.24	100	43.15
Hybrid filter	Hg <sub>p</sub>	0.06	1.31	0.00	0.00	99.93
	Hg <sup>0</sup>	3.61	85.19	0.97	68.10	73.00
	Hg <sup>2+</sup>	0.57	13.50	0.46	31.90	20.19
	Total Hg	4.24	100	1.43	100	66.22
FGD	Hg <sub>p</sub>	0.04	1.21	0.02	1.97	45.00
	Hg <sup>0</sup>	3.08	83.86	1.10	88.97	64.25
	Hg <sup>2+</sup>	0.55	14.93	0.11	9.06	79.55
	Total Hg	3.68	100	1.24	100	66.30

서 방지시설에 의해 저감되어 상대적으로 원소수은(Hg<sup>0</sup>)이 산화수은(Hg<sup>2+</sup>)보다 높게 평가되는 것으로 판단된다. 특히, 하이브리드 집진기 구간을 지나면서 총수은(Total-Hg)의 66.2%가 제어되었고, 대부분의 원소수은(Hg<sup>0</sup>)이 본 구간을 지나면서 저감되는 결과를 확인하였다. 이는 하이브리드 집진기 분진층에 형성되어 있는 입자상 물질이 원소수은(Hg<sup>0</sup>)을 산화수은(Hg<sup>2+</sup>)으로 전환을 촉진시키는 작용을 하여 수은 화합물과 입자상 물질을 동시에 저감시키는 역할을 하는 것으로 판단된다. 원소수은(Hg<sup>0</sup>)은 흡착설비를 가동하지 않을 경우 50% 이상이 대기 중으로 배출되지만, 하이브리드 집진기는 여과포에 생성되는 분진층이 고정상 흡착층을 형성하는 효과를 보이며 원소

수은(Hg<sup>0</sup>)의 제어가 일부 진행된다. 본 설비의 경우 여과포의 교체주기 증가로 인해 기존의 여과집진기(FF)보다 장기간 입자상물질과 원소수은(Hg<sup>0</sup>)을 동시에 제어가 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

표 2에 본 시설에서 각 방지시설의 수은화합물 제어효율을 나타내었고, 습식탈황기(FGD)의 경우 전기 집진기(ESP) 후단과 하이브리드 집진기의 배가스 합류지점에서의 수은의 채취는 직접 이루어지지 않았으나, 각 지점에서의 샘플 분석결과를 통해 산출하였다. 습식탈황기(FGD) 전단의 배가스 중 입자상수은(Hg<sub>p</sub>), 원소수은(Hg<sup>0</sup>), 산화수은(Hg<sup>2+</sup>)은 각각 0.04, 3.08, 0.55 µg/Nm<sup>3</sup>로 분포하였다. 이를 통해 습식탈황기(FGD)의 총수은(Total-Hg) 제어효율은 66.30%, 하이

브리드 집진기는 66.22%, 전기집진기(ESP)는 43.15% 순으로 나타났다. 입자상수은(Hg<sub>p</sub>)과 원소수은(Hg<sup>0</sup>)의 제어효율은 하이브리드 집진기, 습식탈황기(FGD), 전기집진기(ESP) 순이고, 산화수은(Hg<sup>2+</sup>)는 습식탈황기(FGD), 하이브리드 집진기, 전기집진기(ESP) 순이다. 따라서 하이브리드 집진기와 습식탈황기(FGD)를 직렬로 설치하였을 경우 기존 설비보다 매우 높은 수은 제어 효율을 보일 것으로 예측된다.

### 3.3 하이브리드 집진기 수은제어 메커니즘 및 성능평가

위의 결과를 토대로 하이브리드 집진기를 통해 배가스 내 수은을 제어할 수 있음을 확인하였다. 하이브리드 집진기에서 수은화합종의 제어는 구조적인 특징으로 인해 전기집진기(ESP)와 여과집진기(FF)에서의 제어 메커니즘이 복합적으로 이루어진다. 분진방지시설에서 수은화합종의 제어는 비산재 내 미연탄소(Unburned Carbon) 함량, 비산재의 산/알칼리 비율(Ratio of Acid to Alkali), 배가스 중 염화수소 함량으로 크게 3가지로 나뉜다(Thomas *et al.*, 2008).

하이브리드 집진기의 여과포는 운전 시 분진층을 형성하게 되고, 일정 압력강하 이전까지 분진층을 성장시키며 운전을 한다. 하이브리드 집진기의 경우, 방전극에 의해 하전된 분진을 1차적으로 포집하므로,

일반 여과집진기(FF)보다 탈질 주기가 길다. 따라서 분진층에 의한 오염물질의 흡착영향이 일반 여과집진기(FF)보다 클 것으로 판단된다. 또한 비산재의 미연탄소(Unburned carbon)는 흡착제 역할을 하게 되고, 미연탄소의 함량과 비표면적은 수은 흡착능에 상호 관련이 있다. 따라서 하이브리드 집진기 전단에 위치한 분진 제어시설인 전기집진기(ESP)에서 분진을 채취하였고, 공업분석기를 통해 미연탄소(Unburned Carbon)함량, 비표면적 측정기(Micrometritecs CORP., ASAP 2010, U.S.A)를 통해 비표면적을 측정하였다.

표 3에 하이브리드 집진기의 전/후단에서 배출되는 비산재의 분석결과를 나타내었다. 하이브리드 집진기 전단에서 배출되는 비산재의 경우 미연탄소(Unburned Carbon)의 함량은 20.77%으로 큰 분포를 보였고, 비표면적은 25.77 m<sup>2</sup>/g으로 흡착용 활성탄에 비해 낮았다. 하이브리드 집진기 후단에서 배출되는 비산재의 분석 결과, 비표면적이 4.00 m<sup>2</sup>/g로 감소하였고, 비산재의 수은 농도가 약 2818.26 µg/kg 증가하며 약 6배 농축되었다.

따라서, 본 시설에서 발생하는 비산재가 다른 방지시설에 비해 분진 부하량이 큰 하이브리드 집진기 구간에서 원소수은(Hg<sup>0</sup>)을 산화수은(Hg<sup>2+</sup>)으로 변화시켜 저감시키는 것으로 파악된다. 본 시설에 설치된 하이브리드 집진기는 배가스의 약 20%만을 적용하고 있지만, 배가스 용량의 100%에 해당하는 설비를 적용할 경우, 분진부하량에 비례하게 증가할 수 있을 것으로 예측된다.

기존 공정과 하이브리드 집진기를 적용했을 때의 공정과 수은제어효율을 표 4에 나타내었다. 하이브리드 집진기를 적용하지 않고 기존 공정만을 운영하였을 때, 대기로 배출되는 총수은(Total-Hg) 농도는 2.80

**Table 3. Results of fly ash & Activated carbon characteristic analysis.**

Division	ESP ash	Hybrid filter ash	Unit
Unburned carbon	20.77	14.90	%
Surface area	25.77	4.00	m <sup>2</sup> /g
Mercury content	543.24	3361.50	µg/kg

**Table 4. Installing Hybrid filter facility compared with the existing facility.**

Division	No installing hybrid filter		Installing hybrid filter with 100% capacity		
Schematic diagrams					
Total mercury removal efficiency	80.1%		93.5%		
Hg emission	Hg <sub>p</sub>	0.02 µg/Nm <sup>3</sup>	Hg <sub>p</sub>	0.00 µg/Nm <sup>3</sup>	
	Hg <sup>0</sup>	2.32 µg/Nm <sup>3</sup>	Hg <sup>0</sup>	0.63 µg/Nm <sup>3</sup>	
	Hg <sup>2+</sup>	0.45 µg/Nm <sup>3</sup>	Hg <sup>2+</sup>	0.36 µg/Nm <sup>3</sup>	
	Total Hg	2.80 µg/Nm <sup>3</sup>	Total Hg	0.99 µg/Nm <sup>3</sup>	

$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 이고, 화학종별 입자상수는 ( $\text{Hg}_p$ ), 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ ), 산화수은 ( $\text{Hg}^{2+}$ ) 순으로 0.02, 2.32, 0.45  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 로 나타났으며 총수은 (Total-Hg)의 제어효율은 약 80%로 나타났다. 본 시설의 배가스 총량을 적용할 수 있는 용량의 하이브리드 집진기를 설치할 경우, 비례적으로 계산하여 대기로 배출되는 수은농도를 산출하였다. 그 결과, 대기로 배출되는 총수은 (Total-Hg) 농도는 0.99  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 로 감소하였고, 화학종별 입자상수는 ( $\text{Hg}_p$ ), 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ ), 산화수은 ( $\text{Hg}^{2+}$ ) 순으로 0.00, 0.63, 0.36  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 로 배출되어, 모든 화학종의 배출농도가 감소하였고, 총수은 (Total-Hg)의 제어효율은 93.5%까지 증가하는 것으로 평가되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 미세분진을 제어하기 위해 개발된 하이브리드 집진기를 석탄 화력발전시설에 적용시 수은화합물의 제어 가능성을 평가하기 위해, 연료의 기초특성 분석의 결과로 수은화합물의 거동을 예측하였고, 각 방지지설의 전/후단에서 수은화합물을 측정하여 비교하였다. 또한 실측 결과를 통해 각 방지지설의 화학종별 수은 제어효율을 도출하였고, 본 시설에 하이브리드 집진기를 적용할 경우 수은화합물의 제어 효율을 도출하였다.

연료기초특성 분석자료를 이용하여 CEA (Chemical Equilibrium and Application) Simulation Code에 의한 수은화합물을 예측한 결과, 수은화합물 분포에 온도가 주요인자이며 과잉공기비가 1.2인 경우, 온도가 증가하면서 700 K 부근에서 산화수은 ( $\text{Hg}^{2+}$ )이 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ )으로 전환되는 것으로 예측되었다. 또한, 후단 방지지설의 실측 온도구간인 400 K 이하에서 과잉공기비와 관계 없이 산화수은 ( $\text{Hg}^{2+}$ )이 주 지배종인 것으로 예측되었다.

실측 결과에서는 보일러 후단에서 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ )이 지배적이었으며, 후단 방지지설에서도 산화수은 ( $\text{Hg}^{2+}$ )보다 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ )이 지배적이었다. 이는 보일러 후단의 경우, 온도에 대한 영향인 것으로 판단되었으며, 후단 방지지설의 경우 비산재에 의한 수은화합물 제어 메커니즘이 작용하였을 것으로 판단된다. 하이브리드 집진기를 본 시설에 적용했을 때, 굴뚝으로 배출되는 수은농도는 화학종별 입자상수는

( $\text{Hg}_p$ )은 0.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ )은 1.10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 산화수은 ( $\text{Hg}^{2+}$ )은 0.11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 총수은 (Total-Hg)은 1.24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 방지지설의 전/후단의 분석결과를 통해 각각의 제어효율을 도출한 결과, 하이브리드 집진기에서는 총수은 (Total-Hg)의 66%가 제어되었고, 대부분의 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ )이 집진기 후단에서 저감되는 결과를 확인하였다. 이는 하이브리드 집진기 분진층에 형성되어 있는 입자상 물질이 원소수은 ( $\text{Hg}^0$ )을 산화수은 ( $\text{Hg}^{2+}$ )으로 전환을 촉진시키는 작용을 하며 이에 의한 수은화합물 제어 메커니즘에 의해 수은화합물과 입자상 물질을 동시에 저감시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

하이브리드 집진기의 전/후단에서 배출되는 비산재의 미연탄소 (Unburned Carbon)과 비표면적을 분석한 결과, 전단에서 미연탄소 (Unburned Carbon)가 약 20.00%, 비표면적이 약 25.77  $\text{m}^2/\text{g}$ 인 분진이 후단에서 각각 약 15%, 4  $\text{m}^2/\text{g}$ 으로 감소하였고, 수은 농도는 6배 농축되는 것을 확인하였다.

배가스 용량의 20%를 적용한 하이브리드 집진기의 제어효율을 이용하여 100%의 배가스 용량을 적용할 수 있는 하이브리드 집진기를 실제 플랜트 방지지설에 적용할 경우 수은화합물에 대한 총 제어효율이 93.5%까지 증가하며, 약 13.4%의 수은화합물 제어효율이 증가할 것으로 예측되었다.

#### 감사의 글

환경부 “차세대에코이노베이션 기술개발사업”와 “지식기반 환경서비스 (폐자원에너지화) 전문인력양성사업”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- Chen, L., Y. Duan, Y. Zhuo, L. Yang, L. Zhang, X. Yang, Q. Yao, Y. Jiang, and X. Xu (2007) Mercury Transformation Across Particulate Control Devices in Six Power Plants of China: The co-effect of chlorine and ash composition, *Fuel*, 86, 603-610.
- Gardner, M., F.N. Jennifer, and K.S. Ellen (2010) Differential Immunotoxic Effects of Inorganic and Organic Mercury Species in Vitro, *Toxicology Letters*, 198,



- 182-190.
- Jung, S.J., Y.C. Seo, J.H. Kim, P. Deepak, S.K. Back, S.L. Lee, and J.M. Park (2011) Mercury Distribution Characteristic from Mercury Containing Waste and By-product Emission Facilities, Proceeding of the 2011 spring conference of the KSWM, 10-12.
- Kim, S.D., Y.O. Park, and Y. Kang (2004) Characteristics of a Hybrid Fabric Filter System with a Tangential Inlet, The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, 15(6), 5. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.K. and M.K. Huh (2004) Death Rate and Bioaccumulation on the Early Development of Mitten Crab by Treatment of Cadmium and Mercury, Korean Journal of Environmental Biology, 22(3), 369-375. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., K.S. Park, J.H. Lee, H.N. Jang, J.H. Kim, and Y.C. Seo (2007) A Study on the Emission Behavior of Mercury Generated from Waste Incinerators, Journal of Korea Society of Waste Management, 24(8), 204-713. (in Korean with English abstract)
- NIER (2007a) Research on the Mercury Emissions from Air Emission Facilities (I).
- NIER (2007b) Research on the Hazardous Air Pollutants from Stationary Sources (IV).
- Park, K.S., J.H. Lee, J.H. Kim, S.H. Lee, and Y.C. Seo (2008) A Study on Emission characteristics of Mercury from Coal Combustion at a Lab-scale Furnace, Journal of Korean Society for Atmospheric Environmental, 24(2), 238-248. (in Korean with English abstract)
- Paul, S.N., E.R. Kevin, T.A. Gerald, and A.K. Gregory (2004) Demonstration of Additive Use for Enhanced Mercury Emission Control in Wet FGD Systems, Fuel Processing Technology, 85, 587-600.
- Sarabia, R., A. Torreblanca, J.J. Del Ramo, and J. Diaz-Mayans (1998) Effects of Low Mercury Concentration Exposure on Hatching Growth and Survival in the Artemia Strain La Mata Parthenogenetic Diploid, Comparative Biochemistry and Physiology, 120, 93-97.
- Seok, K.S., J.H. Hong, S.J. Lee, D.G. Lee, D.G. Kim, and J.H. Park (2004) A Study on the Emission Characteristics of Mercury in Municipal and Industrial Waste Incinerators, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 20(2), 205-213. (in Korean with English abstract)
- Sun, M., J. Hou, T. Tang, R. Lu, L. Cheng, and X. Xu (2012) Stabilization of Mercury in Flue Gas Desulfurization Gypsum from Coal-fired Electric Power Plants with Additives, Fuel Processing Technology, 104, 160-166.
- Thomas, K.G., W.L. Bruce, and R.O. George (2008) Mechanisms Governing the Fate of Mercury in Coal-fired Power Systems, Fuel Processing Technology, 89, 139-151.
- UNEP (2014) Minamata Convention on Mercury, <http://www.mercuryconvention.org/Convention/tabid/3426/Default.aspx>.
- US EPA (1997) Mercury Study Report to Congress, Volume II, EPA-452/R-97-004.