

PB14) 석탄 연소설비에서의 수은 배출량 산정 기법 개발

Methodology Development of Mercury Emission from a Coal Combustion Plant

손승욱 · 이상협 · 이주형 · 김정훈 · 조성진 · 윤영식 · 서용칠 · 박규식
 연세대학교 환경공학과

1. 서 론

미국 EPA(1997)의 “Mercury Study Report to Congress”에 따르면, 인위적 배출원에서 연간 수은 배출량은 158톤이며 이중 석탄 화력발전소, 도시폐기물소각로, 병원폐기물소각로 등의 연소설비가 전체 배출량의 87%를 차지하는 것으로 나타나 주요 배출원에 대한 적극적인 대처가 필요한 것으로 나타났다.

그러나 국내에서의 수은화합물에 대한 배출특성 조사와 배출원에 대한 목록화(Inventory) 연구는 정부 연구기관 및 특정 대학교에서 실시하고 있는 단편적이고 한정적인 조사 연구로 미국 등에서 추진하고 있는 수은화합물 배출량 예측 Code 개발 등 수은화합물에 대한 연구 활동에 비하면 아주 미약한 수준에 머물러 있다. 또한 국내 에너지 분야 장기수급계획 등을 고려할 때 석탄을 연료로 하는 발전 설비용량이 점차 증가할 것으로 예상되는바 석탄 화력발전소에서 발생하는 수은화합물에 대한 배출특성 및 예측 Code 개발이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구를 통한 수은 배출량 예측 모델을 통하여 향후 화력발전소뿐만 아니라 소각시설 등에 적용 가능할 것으로 판단되며, 수은 배출 관리에 효율적인 기초자료로 활용 가능할 것이다.

2. 연구 방법

본 실험에서는 CEA(Chemical Equilibrium and Application) Code를 이용하여 유연탄 10종, 무연탄 1종에 대하여 석탄 화력발전소의 Boiler에서 석탄연소 시 발생하는 수은의 총 배출량을 예측하였다. CEA Code 적용 시에 제일 중요한 요인은 연소조건 및 연소되는 물질의 화학적 조성에 있다. 따라서 CEA Code에 적용하기 위한 유연탄 및 무연탄의 화학적인 성분을 알아보기 위해 원소분석 실시하였으며, EPA Method 7471을 이용하여 석탄 내에 함유되어 있는 총 수은의 함유량을 알아보았다. 또한 수은 거동에 영향을 미치는 Ca, Cl의 함량을 조사하기 위해 Ca의 경우 석탄을 Acid digestion한 후 IC(Ion Chromatography)로 분석하였으며, Cl의 경우 ASTM D 2361-02 규격시험방법 중 Eschka Method을 이용하여 분석하였다. 기본적인 석탄의 화학적 조성을 이용하여 CEA Code를 적용하였으며, 일반적인 화력발전소의 연소 온도인 약 1,200°C에서 공기비 1.2의 조건하에 연소된다고 가정을 하였다. CEA Code의 결과 총 발생하는 모든 가스(gas)의 mole fraction를 1로 가정하였으며, 모든 가스 중 배출되는 총 수은의 mole fraction을 아래의 식을 이용하여 Boiler에서 배출되는 수은의 배출량을 예측하여 볼 수 있다(원자량 200.5g).

$$\frac{X \text{ mol(Hg}_{(g)})}{1 \text{ mole(gas)}} \times \frac{1 \text{ mol(gas)}}{22.4 \text{ L}} \times \frac{200.5 \text{ g}}{1 \text{ mole(Hg}_{(g)})} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{10^6 \mu\text{g}}{1 \text{ g}} = \text{수은 배출량 } (\mu\text{g/Nm}^3)$$

국내 유연탄 화력발전소의 수은 Mass Balance를 계산 값과 각 방지시설별 수은 화합물 분포율의 평균 데이터를 종합하여 최종적으로 Stack에서 배출되는 수은화합물의 배출량을 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구를 통하여 유연탄 10종 및 무연탄 1종에 대한 석탄 연소 시 Boiler에서 배출되는 수은의 배출량을 예측하였으며, 그 한 예로 유연탄 중 석탄의 함유량이 0.068mg/kg인 NCA의 경우 배출되는 총 수

은 농도는 $8.81\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 으로, 수은 함유량이 $0.062\text{mg}/\text{kg}$ 인 Rotosouth의 경우 수은 농도 $7.58\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 으로 나타났다.

국내 석탄 화력발전소의 경우 두 가지 이상의 석탄을 혼합하여 투입하는 실정이며, 따라서 본 연구에서는 NCA와 Rotosouth의 비율이 6:4로 섞여있다는 가정 하에 비례식을 이용하여 혼합된 석탄의 연소 시 배출되는 수은의 농도를 $8.32\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 으로 설정하였다.

예측된 수은 화합물의 APCDs(Air Pollutant Control Device)에 따른 수은 화합물의 거동 및 최종적으로 Stack에서 배출되는 수은의 농도를 예측하기 위해 석탄 화력발전소의 Mass Balance를 산정하였으며, 산정된 결과는 Lee et al.(2006)의 연구 결과와 유사하다. 또한 각 방지시설 전·후단에 따른 수은 화학종 분포 특성 및 Stack의 분포특성 파악을 위하여 환경부(2006)에 제시되어 있는 유연탄 화력발전소의 평균 화학종 분포를 참고하였다.

Table 1. This study compares mass balance of mercury at coal-fired power plants, with earlier researches.

	Incoming			Outgoing					
	Total	Fuel coal	Lime/Limestone	Total	Fly ash (in ESP)	Flue gas & fly ash in gas	Gypsum	Bottom ash	Sludge & Effluent
Flow rate (g/hr)	12.23	12.21 ^a	0.02 ^b	11.93	7.62 ^c	2.25 ^d & 0.07 ^e	1.54 ^f	0.22 ^g	0.23 ^h
Mass balance(%)	100	99.8	0.2	97.0	63.9	18.9 & 0.006	12.9	1.8	1.9

^aAvg. coal feed rate 4128ton/day, ^bCalculated based on gypsum generation rate and include process water, ^cAvg. Hg in fly ash $0.37\text{mg}/\text{kg}$, ^dEstimated Flue flow rate $1,618,860\text{ Nm}^3/\text{hr}$, ^eAvg. fly ash content is 2.8% of total emission in stack, ^fEstimated gypsum generation 137ton/day, ^gEstimation base on coal ash contents, ^hIncluding sludge and effluent from wet FGD.

그 결과 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, $8.32\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 수은이 발생 후 Ash로 미량의 수은이 제거되고 ESP에서 다량의 입상 수은제거와 함께 FGD를 거쳐 Stack로 배출되는 수은의 농도는 총 $1.90\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 의 수은이 배출되어 진다. 이는 환경부(2006)에 제시된 일반적인 석탄 화력발전소의 배출 농도와 유사한 농도를 나타내고 있다.

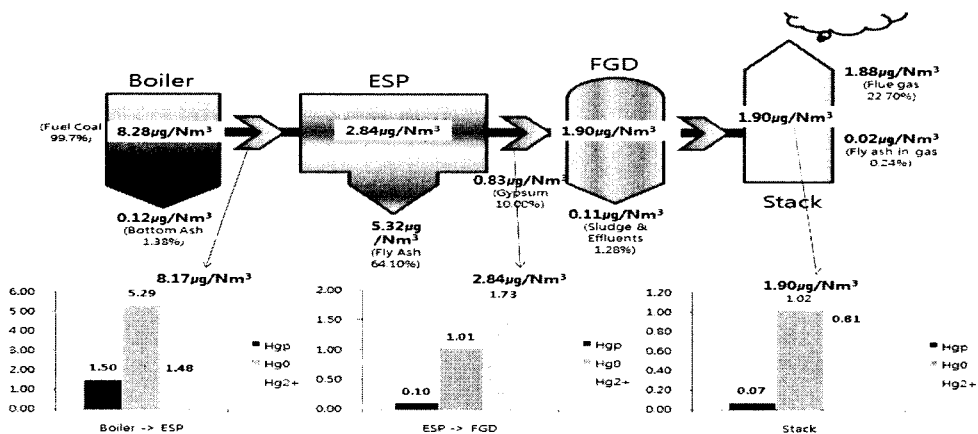


Fig. 1. Mercury concentration and speciation variation across air pollution control devices using NCA coal.

CEA Code 적용 시 더욱 다양한 인자들을 고려함과 동시에 Mass Balance뿐만 아닌 일반적인 수은의 화학적 특성들을 고려할 시에 더욱 정확한 배출량 산정이 가능 할 것으로 보여지며, 이를 통하여 다양한 산업분야별 수은 화합물의 농도를 예측하는데 적용 가능할 것이다.

사 사

이 연구는 산업자원부의 한국전력기반기금 사업, 한국환경기술진흥원의 차세대 사업 및 BK21 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 서용철, 박규식, 김성현, 서용찬, 이주형, 장하나, 정현태, 김영란, 김정훈, 이상협, 황규원, 정대영, 정태영, 정영희 (2006) 유해 대기오염물질 관리기술, HAPs 중 수은 배출계수 및 배출특성 평가기술 개발, 환경부.
- ASTM D 2361-02 Standard Test Method for Chlorine in Coal.
- Gordon, S. and B.J. McBride (1994) Computer for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Application I. Analysis, NASA Reference Publication 1311.
- Lee, S.J., Y.C. Seo, H.N. Jang, K.S. Park, J.I. Beak, H.S. An, and K.C. Song (2006) Speciation and mass distribution of mercury in a bituminous coal-fired power plants, Atmospheric Environment, 40, 2215-2224.
- Meij, R., H.J. Leo, Vredenburgt, and Henk te Winkel (2002) The Fate and Behavior of Mercury in Coal-Fired Power Plants, Air & Waste Environment Management Association, 52, 912-917.
- US EPA Method 7471A. Mercury in solid or semisolid waste(Manual Cold-Vapor Technique).
- US EPA (1997) Mercury Study Report to U.S. Congress, Volume II, EPA-452/R-97-004.