

## 석탄화력발전시설에서의 납, 카드뮴 분포특성

주종호<sup>1</sup> · 문영훈<sup>1</sup> · 이아영<sup>1</sup> · 권도형<sup>1</sup> · 김영희<sup>2</sup> · 석광설<sup>2</sup> · 송금주<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>포항공과대학교 환경연구소, <sup>2</sup>국립환경과학원

## Lead and Cadmium Distribution Characteristics in Coal Fired Power Plants

Jong-Ho Joo<sup>1</sup>, Young-Hoon Moon<sup>1</sup>, A-Yeoung Lee<sup>1</sup>, Do-Hyung Kwon<sup>1</sup>,  
Younghee Kim<sup>2</sup>, Kwang-Seol Seok<sup>2</sup>, and Geum-Ju Song<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Institute of Environmental and Energy Technology, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Korea

<sup>2</sup>National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

Received November 21, 2016/Revised November 30, 2016/Accepted December 10, 2016

Anthropogenic emission of lead (Pb) and cadmium (Cd) were assessed at tow power plants fueled by bituminous coal, and at one power plant fueled by mixes (bituminous and anthracite) coal. Plant input and output materials were sampled in each process. The input materials were the coal and B-C oil as fuel in the combustor, and limestone as the remover of SOx in air-pollutant control device. The output materials were bottom ash, fly ash, gesso and sludge. The materials were sampled at least three times at each sampling point, then analyzed using ICP or ICP/MS. The coal fuel was the main input source of Pb and Cd, and the concentration of Pb and Cd was higher in the mixed coal than in the bituminous coal. Total Pb and Cd emission in fly ash was highest among the output materials, and very low in off gas and sludge. However, the concentration of Pb and Cd in the sludge was highest among the output materials. The fly ash is sold for reuse, and the sludge is dumped in a landfill site. Therefore, Pb and Cd in the fly ash and in the sludge should be managed before they are passed on in these ways.

**Key words:** Lead, Cadmium, Distribution characteristics, Coal fired power plant, Mass balance

### 1. 서 론

유해화학물질 및 장거리 이동물질로 분류되고 있는 수은 및 납, 카드뮴 등은 인간뿐만 아니라 지구 생태계에도 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 수은은 2014년 미나마타협약에 의해 국제적인 차원의 관리물질로 결정되었다. 이러한 논의 및 결정과 연계하여, UNEP에서는 납, 카드뮴 또한 국제적인 관리의 필요성이 언급되어 국제적으로 많은 조사가 진행되어 2010년 UNEP로부터 납, 카드뮴 과학적 정보를 위한 보고서가 발간되었다. 이 최종보고서에 의하면, 납, 카드뮴은 다양한 자연적 발생원 및 인위적 발생원에 의해 환경으로 배

출된다고 보고하고 있다. 지구의 화산활동, 바위의 풍화작용, 운석먼지, 공중에 부유하고 있는 토양입자 등이 환경중의 납, 카드뮴의 농도에 영향을 미치는 자연적 발생원으로는 알려져 있다. 인위적 발생원은 인간의 활동에 의해 인위적으로 납, 카드뮴이 환경으로 유입되어 대기, 수계 및 토양중의 납, 카드뮴 농도에 영향을 미치는 요인으로, 화력발전시설이 주요 배출원 중 하나로 알려져 있다.<sup>2,3)</sup>

화력발전시설은 물을 끓인 증기를 이용하여 터빈을 돌려 발전을 하는 발전소로, 증기를 만들기 위해서는 여러 가지 연료가 사용된다. 일반적으로 화력발전시설의 주 공정으로는 연료저장실, 연료 조제실, 연소실, 연소가

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

스 처리공정, 연소가스 배출구로 이루어져 있고, 부대시설로 폐수 및 연소 잔재물 처리시설들로 이루어져 있다. 화석연료 연소 시에는 많은 오염물질이 다양한 공정에서 다양한 경로에 의해 배출되는데, 입자상물질은 대부분이 대기 및 폐수로 배출되고, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HCl, HF, 휘발성 유기화합물 등의 가스상 물질은 대기로, 금속 및 금속염화물, 유기화합물 등은 대기 및 폐수로 주로 배출되는 것으로 알려져 있다. 중금속류는 대기 및 수계, 토양으로 배출되는데, 대기로는 배출가스에 의해, 수계로는 폐수, 배출가스 정화수, 냉각수 순환수에 의해, 토양으로는 연소 후 잔재물 및 배출가스에서 제거되는 먼지의 매립 등으로 배출된다. 이렇게 다양한 형태로 다양한 경로에 의해 배출되는 중금속은 대부분이 사용되는 화석연료에 포함되어 있는 미량의 중금속들로 As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, V 등으로 주로 이루어져 있고, 보통 산화물 혹은 염화물 형태로 배출된다. 휘발성이 큰 Hg 및 Se는 부분적으로 증기상으로 존재하지만, 대부분의 저휘발성 중금속들은 작은 입자의 표면에 흡착되어 배출가스의 미세한 입자에 농축되어 나타난다. 특히, 석탄에는 기름이나 천연가스보다 높은 중금속을 함유하고 있고, 대부분의 중금속이 산화염, 황화염, 알루미늄 규산염과 같은 염화물과 결합되어 있고, 경석고 및 석고와 같은 광물과 결합되어 있다. 이러한 중금속성분들은 석탄 연소 시 복잡하게 변화하면서 휘발되는데 휘발경로 및 정도는 연료의 중금속 농도, 칼슘과 같은 무기물과의 결합 정도와 같은 특성에 따라 좌우되고 또한 보일러 형식 및 조건방식과 같은 시설의 기술적 특성에 따라 좌우된다.<sup>4)</sup>

1999년 조사된 전 세계적 납, 카드뮴 대기 배출량을 살펴보면, 납 총 배출량은 119.3천톤/년, 카드뮴 총 배출량은 2.9천톤/년인 것으로 나타났고, 이 중 연료연소시설에서의 납 배출은 9.8%, 카드뮴 배출은 23.2%로 조사되었다. 2006년 유럽연합의 자료에 의하면, 유럽연합에서의 납 대기 배출량은 10.9천톤/년, 카드뮴 배출량은 0.3 천톤/년인 것으로 나타났고, 이 중 연료연소시설에서의 납 배출은 6.4%, 카드뮴 배출은 22%로 조사되었다.<sup>5)</sup> 그러나 국내 대기배출원관리시스템 자료에 의하면 2010년 국내 납 대기배출량은 7,395 kg/년, 카드뮴 대기 배출량은 426 kg/년으로 조사되었다.<sup>6)</sup> 석탄화력발전시설의 경우 국내에서는 납, 카드뮴에 대해 비의도적 배출시설로 분류되어 화학물질 배출 및 이동 정보시스템에서의 관리범위에 들지 않기 때문에 대기 배출량 이외의 자료를 확보하기 어려운 상황이다.

그러므로, 본 연구에서는 납, 카드뮴 주요 배출원 중 하나로 알려져 있는 석탄화력발전시설을 대상으로 각 시설에서 연료로 사용하는 석탄 중 납, 카드뮴 함유량 및 투입량의 정도를 조사하고, 각 공정에서 배출되는 매체에서의 납, 카드뮴 함유량 및 배출량을 조사하여 석탄에 의해 투입된 납, 카드뮴이 어떠한 경로로 얼마나 어떻게 배출되고 있는지 투입 및 배출특성을 조사하여, 각 시설에서의 납, 카드뮴 분포특성을 물질수지에 의해 파악하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상시설 및 시료

화력발전은 화석연료인 석탄, 석유, 가스 등을 연소시켜 발생하는 열 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 발전 방식으로 일반적으로 기력발전 및 화력발전으로 구분한다. 본 연구에서는 석탄 화력발전시설을 대상으로 하였으며, 대상시설의 선정에 위해 국내 석탄 화력발전시설을 목록화하고 각 화력발전시설에서 사용되고 있는 석탄의 종류 및 사용량에 따라 분류하였다. 2011년 한국 전력공사 한국전력통계 자료에 의하면, 국내 무연탄계 화력발전시설은 총 6개로 무연탄 사용량은 총 1,658,801 톤/년, 유연탄계 화력발전시설은 총 50개로 유연탄 사용량은 79,854,167 톤/년으로 조사되었다.<sup>7)</sup> 본 연구 대상 시설은 국내 보유수가 많은 유연탄계 화력발전시설 2개(Plant 1 과 2), 무연탄계 화력발전시설 1개(Plant 3)를 선정하여 조사하였다. Plant 3은 무연탄 사용시설로 분류되지만, 유연탄과 무연탄이 약 3:1의 비율로 혼합되어 사용되는 시설로 소량의 벙커C유도 연료로 사용되고 있었다.

연소실에 투입될 석탄은 소비탄 저장고에 보관 후 연소실에 투입되어 1300~1400°C에서 연소된다. 연소 후 잔재물(바닥재)은 보일러 하단으로 배출되어 냉각조에서 냉각되어 외부로 배출된다. 연소가스는 선택적 환원 촉매반응기에서 질소산화물이 제거된 후 전기집진기를 거쳐 먼지를 제거하고 탈황설비에서 석회석에 의해 황산화물을 제거한 후 굴뚝으로 배출된다. 폐수처리시설에서 발생하는 처리폐수는 전량 자체 재이용되고 있었고, 폐수처리오니는 위탁처리되어 일반매립장에 매립되고 있었다. 단, Plant 3에서는 환원촉매반응기가 부착되어 있지 않았으며, 폐수처리오니도 처리폐수와 같이 전량 자체 재이용되고 있었다. 그러므로 본 연구에서는 연소실로 투입되는 석탄 및 벙커C유와 황산화물질의 제어를



Fig. 1. The general process of coal fired power plants tested.

Table 1. Sample type and sorts of the plants tested

Type	Plant 1	Plant 2	Plant 3
Input materials	-Bituminous coal -Limestone	-Bituminous coal -Limestone	-Bituminous coal + Anthracite -B-C oil -Limestone
Output materials	-Off-gas -Bottom ash -Fly ash -Wastewater treatment sludge -Gesso	-Off-gas -Bottom ash -Fly ash -Wastewater treatment sludge -Gesso	-Off-gas -Bottom ash -Fly ash -Gesso

위해 방지시설에서 사용되는 석회석을 투입시료로, 연소실에서 배출되는 바닥재, 대기오염방지시설에서 배출되는 비산재 및 석고가루, 폐수처리시설에서 배출되는 폐수처리오니, 공정 최종 굴뚝 배출가스를 배출시료로 하였다. Fig. 1은 본 연구 대상시설인 석탄화력발전시설의 일반적인 모식도를 나타내고 있고, Table 1은 시설 별 시료종류 및 형태를 나타내고 있다.

## 2.2. 시료채취

시료채취는 배출가스 시료채취 시간에 맞추어 각 시설 별 소비탄 저장실, 연소로, 대기오염물질방지시설, 폐수처리시설에서 투입물 및 배출물의 채취가 가능한 지점에서 채취하였으며, 배출되는 배출가스 중 입자 상의 납, 카드뮴을 조사하기 위한 것으로 굴뚝에서 배출되는 먼지를 채취하였다. 배출가스의 먼지채취를 위해 대기오염공정시험기준 ES-01112.1을 기준<sup>8)</sup>으로 하여 굴뚝 측정장치를 사용하여 100°C 이상에서 2~3시간 강열한 원통형 석영필터에 2 Sm<sup>3</sup> 이상 3회 시료를 채취하였다. 투입되는 고상연료, 방지시설 첨가물, 바닥재, 비산재, 석고가루, 폐수처리오니는 폐기물공정시험기준 ES 06130.b를 기준<sup>9)</sup>으로 투명 비닐백에 50 g씩 3회 이상 채취하여 혼합하였고, 액상연료, 액상 방지시설첨가물은 50 ml 갈색유리병에 3회 채취하여 혼합해서 사용하였다. 재이용처리수 및 최종 방류수는 수질공정시험기준 ES 04130.a를 기준<sup>10)</sup>으로 약 1 L씩 3회 이상 채취하여 혼합하여 분석시료로 사용하였다.

## 2.3. 시료분석

시료의 전처리는 US EPA-3051A<sup>11)</sup>를 기준으로 시료

에 따라 다소 변형하여 사용하였다. 시료 0.5 g을 정밀하게 취하여 250 ml 반응용기에 넣고 염산 21 ml 질산 7 ml를 주입하였다. 증기배출로 인한 분석대상물질의 손실을 막고자 흡수용기에 0.5 M 질산 15 ml를 넣고, 흡수용기와 환류냉각관에 시료가 담긴 반응용기와 연결시킨 후 상온에서 2시간 이상 정치시켜 천천히 산화되도록 하였으며, 반응혼합물의 온도를 서서히 올려 환류조건에 도달하도록 하고 4시간 동안 그 상태를 유지시켰다. 1차 분해가 끝나면 반응용기를 냉각시킨 후 다시 분해용기에 염산 6 ml와 질산 2 ml를 넣고 온도를 서서히 올려 2시간 30분 동안 반응혼합물을 환류시켜 분해한 후, 분해액과 흡수용기내의 흡수액을 Whatman No.40 여과지로 100 ml 용량플라스크에 여과하고 0.5 M 질산으로 표선까지 채워 검액으로 사용하였다. 시료 전처리 방법에 따라 조제된 검액은 U.S EPA Method 200.7<sup>12)</sup>에 따라 유도결합플라즈마 광학분광기(Inductively Coupled Plasma Spectrometer, ICP) 및 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS)를 이용하여 분석하였으며, 각각의 파장(Cd 214.438 nm, Pb 220.353 nm) 스펙트럼선의 강도를 측정하고, 표준물질의 농도와 스펙트럼선 강도측정값의 상관관계로 작성한 검정곡선으로부터 각 중금속의 농도를 구하여 함유량(mg/kg)을 산출하였다. 정량은 절대검정곡선법을 사용하였으며, 검정곡선 절대값(R<sup>2</sup>)은 0.999 이상을 나타냈다. 기기검출한계는 검정곡선 작성용 표준물질 중 가장 낮은 농도의 것을 이용하여 7회 분석하였으며, 그 결과값은 Pb 0.00014 µg, Cd 0.0004 µg로 나타났다. 분석방법검출한계를 측정하기 위해 농도 400 µg/L 짜리의 표준물질을 100 mL 증류수

에 주입한 시료 7개를 조제 후 시료의 분석과 동일한 방법에 의해 분석하였고, 그 결과값은 Pb 0.0263 µg/L, Cd 0.0150 µg/L로 나타났다. 본 연구에서의 정확도는 93.54~94.50%로 80% 이상을 나타냈고, 정밀도는 1.28~2.21%로 정도관리 기준인 20%의 범위를 충족하고 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 시료 별 납, 카드뮴 농도특성

각 시설 별 연소실에 투입되는 석탄 중 납, 카드뮴의 농도를 살펴보면, Plant 1과 2에서 사용된 석탄은 유연탄으로 Plant 1 유연탄의 카드뮴 농도는 ND(불검출)-0.260 mg/kg, 납 농도는 8.039~9.680 mg/kg으로 나타났고, Plant 2 유연탄의 카드뮴 농도는 0.209~0.965 mg/kg, 납 농도는 6.286~8.902 mg/kg으로 나타났다. Plant 1과 2에서 사용된 유연탄을 비교해 보면, 카드뮴은 Plant 2의 유연탄이, 납은 Plant 1의 유연탄이 다소 높게 나타났다. Plant 3에서 사용된 석탄은 유연탄과 무연탄을 약 3:1로 혼합하여 사용하고 있었는데, 이 혼합탄의 카드뮴 농도는 0.962~1.440 mg/kg, 납 농도는 11.135~21.480 mg/kg으로 Plant 1과 2에서 사용된 유연탄보다 납, 카드뮴 농도가 높게 나타났다. 그러므로 사용되는 유연탄에 따라서도 납, 카드뮴의 농도가 다르고, 유연탄과 무연탄을 혼합하여 소비탄으로 사용하는 Plant 3에서 납, 카드뮴 농도가 Plant 2보다 높게 나타난 것으로 보아, 무연탄의 납, 카드뮴 농도가 유연탄보다 높음을 추정할 수 있었다. 각 시설에서 사용되는 소비탄은 대부분이 국외 수입탄으로 입고되어 저장실에 혼합하여 저장하기 때문에 본 연구에서는 원산지 별 석탄의 납, 카드뮴 농도를 알 수 없었다.

각 시설 별 황산화물을 제거하기 위해 투입되는 석회석 중 납, 카드뮴의 농도를 살펴보면, 카드뮴 농도는 Plant 1은 0.077~0.160 mg/kg, Plant 2는 0.040~0.080 mg/kg, Plant 3은 ND~0.429 mg/kg을 나타냈고, 납 농도는 Plant 1은 1.538~2.060 mg/kg, Plant 2는 2.420~3.560 mg/kg, Plant 3은 2.280~4.571 mg/kg을 나타냈다. 시설 별 사용되는 석회석의 납, 카드뮴 농도는 다양한 분포를 나타내고 있었는데, 이는 각 시설마다 사용되는 석회석의 제품에 따라 다르게 나타나는 것으로 여겨진다. Plant 3에서만 사용된 병커 C유의 카드뮴 농도는 ND~0.100 mg/kg, 납 농도는 ND로 카드뮴이 다소 포함되어 있는 것으로 나타났다.

각 시설에서 배출되는 공정 배출물에서 납, 카드뮴의 농도를 살펴보면, Plant 1에서 배출되는 바닥재, 비산재, 석고가루, 폐수처리오니에서의 카드뮴 농도는 0.109~0.385, 0.519~1.057, 0.157~0.380, 1.704~2.291 mg/kg을 나타냈고, 납 농도는 13.811~18.462, 20.692~26.774, 33.231~38.564, 17.001~23.441 mg/kg을 나타냈다. 모든 배출물에서 납 농도가 카드뮴 농도보다 높았고, 카드뮴은 폐수처리오니에서, 납은 석고가루에서 농도가 가장 높게 나타났다. Plant 2에서 배출되는 바닥재, 비산재, 석고가루, 폐수처리오니에서의 카드뮴 농도는 2.740~3.740, 2.875~4.184, 0.196~0.451, 33.082~36.120 mg/kg을 나타냈고, 납 농도는 16.140~18.740, 24.781~26.694, 3.980~5.353, 85.417~88.880 mg/kg을 나타냈다. Plant 1과 같이 모든 배출물에서 납 농도가 카드뮴 농도보다 높았으나, 폐수처리오니에서 납, 카드뮴 농도 모두 가장 높게 나타났다. Plant 3에서 배출되는 바닥재, 비산재, 석고가루에서의 카드뮴 농도는 0.340~0.686, 1.708~2.245, 0.100~0.220 mg/kg을 나타냈고, 납 농도는 12.132~13.765, 26.612~28.102, 3.000~4.440 mg/kg을 나타냈다. 모든 배출물에서 납 농도가 카드뮴보다 높았고, 납, 카드뮴 농도 모두 비산재에서 농도가 가장 높게 나타났다. 그러므로 석탄화력발전시설의 공정배출물에서는 납이 카드뮴보다 높은 농도로 배출되었고, 연소가스 외 고상의 공정 배출물에서 높은 농도를 나타냈다. 그러나, 시설 별 배출물마다 농도분포는 다소 다르게 나타났고, 사용되는 석탄 및 석회석의 납, 카드뮴 농도와 배출물들의 납, 카드뮴 농도와는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았다. 또한 유연탄만 사용한 시설과 무연탄을 혼합하여 사용한 시설의 배출물 농도를 비교해보면, 무연탄을 혼합하여 사용하는 시설에서의 석탄 중 납, 카드뮴 농도가 높았으나, 배출물에서는 무연탄을 혼합하여 사용하는 시설에서 뚜렷하게 높게 나타나지 않았다. 오히려 배출물에서의 농도는 유연탄 사용시설보다 낮은 분포를 나타내는 경향을 보였다. 이는 투입되는 석탄 및 석회석의 납, 카드뮴 함량보다는 연소조건 및 방지시설의 조건 등이 배출물의 납, 카드뮴 함량에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

굴뚝에서 배출되는 연소가스 중 카드뮴과 납의 농도를 각각 살펴보면, Plant 1에서의 카드뮴 농도는 0.023~0.047 µg/Sm<sup>3</sup>, 납 농도는 0.406~0.754 µg/Sm<sup>3</sup>를, Plant 2에서의 카드뮴 농도는 0.001~0.002 µg/Sm<sup>3</sup>, 납 농도는 0.012~0.040 µg/Sm<sup>3</sup>를, Plant 3에서의 카드뮴 농도는 0.002 µg/Sm<sup>3</sup>, 납 농도는 0.022~0.023 µg/Sm<sup>3</sup>

**Table 2.** Concentration of Cd and Pb in input and output samples (n=3)

Items	Unit	Plant 1		Plant 2		Plant 3		
		Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	
Input	Bituminous coal	mg/kg	0.087	8.693	0.395	5.276	NA	NA
	Bituminous + anthracite coal	mg/kg	NA	NA	NA	NA	1.187	16.565
	Limestone	mg/kg	0.111	1.725	0.053	2.967	0.223	3.794
	Bunker C Oil	mg/kg	NA	NA	NA	NA	0.033	ND
Output	Off gas from stack	µg/Sm <sup>3</sup>	0.035	0.580	0.001	0.026	0.002	0.023
	Bottom ash	mg/kg	0.282	15.928	3.127	17.200	0.475	13.206
	Fly ash	mg/kg	0.758	23.677	3.516	25.781	2.005	27.919
	Gesso	mg/kg	0.237	35.121	0.318	4.170	0.154	3.725
	Sludge	mg/kg	1.971	19.821	34.574	86.779	NA	NA

\*ND: Not Detected, NA: Not Applicable.

를 나타냈다. 연소가스 중 납, 카드뮴은 3개 시설 모두 배출허용기준(납 0.2 mg/Sm<sup>3</sup>, 카드뮴 0.02 mg/Sm<sup>3</sup>)<sup>13)</sup> 이하의 매우 낮은 농도로 배출되고 있었다.

그러므로 본 연구대상 석탄화력발전시설에서의 연소가스 처리공정에서 배출되는 비산재에서의 납, 카드뮴 농도가 높게 나타났고, 연소가스에서의 납, 카드뮴 농도가 매우 낮게 나타났는데, 이는 대상시설에 설치된 먼지 제어를 위한 방지시설의 성능이 우수하기 때문인 것으로 보인다. 또한 폐수처리오니에서의 높은 농도를 나타낸 것은, 폐수는 주로 탈황폐수로 폐수처리시설에서 폐수 중 입자상 혹은 용해되어 있는 납, 카드뮴이 폐수처리시설에서 중금속 응집제 등에 의해 처리되어 배출되기 때문에 농도가 높게 나타나는 것으로 보여진다. Table 2는 시설 별 투입물 및 배출물 중 납, 카드뮴의 농도를 3회 측정된 평균값으로 나타내고 있다.

### 3.2. 시설 별 납, 카드뮴 투입- 및 배출특성

Table 3은 시설 별 납, 카드뮴 투입량 및 배출량을 나타내고 있다. 투입량 및 배출량은 Table 2에 제시한 각 매질 별 농도에 각 매질 별 연간 사용량 및 발생량을 곱하여 산출하였다. 각 매질 별 연간 사용량 및 발생량 자료는 대상시설의 일반적인 자료를 취합하기 위해 준비된 조사표에 사용량과 발생량을 최근 자체자료에 의해 기입하도록 하여 취합된 자료를 사용하였다.

Plant 1의 납 투입량은 12.329~14.851 톤/년, 카드뮴 투입량 0.002~0.402 톤/년으로 98~99%가 유연탄에 의해 투입되고 있었다. Plant 2의 납 투입량은 6.353~9.001 톤/년, 카드뮴 투입량은 0.210~0.967 톤/년으로 99% 이상이 유연탄에 의해 투입되고 있었다. Plant 3의 납 투입량은 6.781~13.007 톤/년, 카드뮴 투입량은 0.581~0.875 톤/년으로 99% 이상이 혼합탄(무연탄+유연탄)에 의해 투입되고 있었다. 그러므로 석탄화력발전

**Table 3.** Input and output amount of Cd and Pb in the plants tested (n=3) (Unit: ton/yr.)

Item	Plant 1		Plant 2		Plant 3		
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	
Input	Bituminous coal	0.132	13.287	0.590	7.880	NA	NA
	Bituminous/anthracite coal	NA	NA	NA	NA	0.717	10.011
	Bunker C Oil	NA	NA	NA	NA	ND	ND
	Limestone	0.003	0.047	0.001	0.083	0.003	0.044
	Total	0.136	13.334	0.592	7.963	0.720	10.054
output	Off gas from stack	0.001	0.009	0.00002	0.00039	ND	ND
	Bottom ash	0.017	0.969	0.053	0.294	0.014	0.389
	Fly ash	0.083	2.591	0.476	3.489	0.288	4.017
	Gesso	0.010	1.469	0.017	0.248	0.003	0.065
	Sludge	ND	0.001	0.005	0.011	NA	NA
	Total	0.111	5.039	0.551	4.044	0.305	4.471
	Input vs. Output (%)	81.6	37.8	93.1	50.8	42.4	44.5

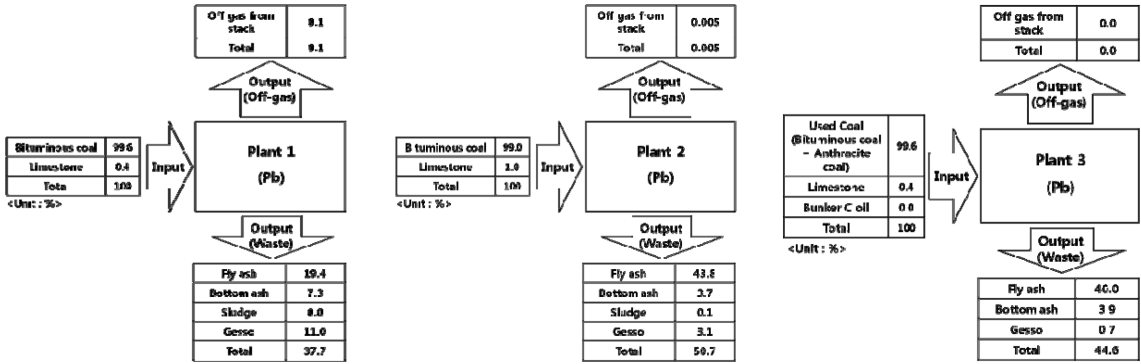


Fig. 2. Mass balance of Pb in the plants tested (n=3).

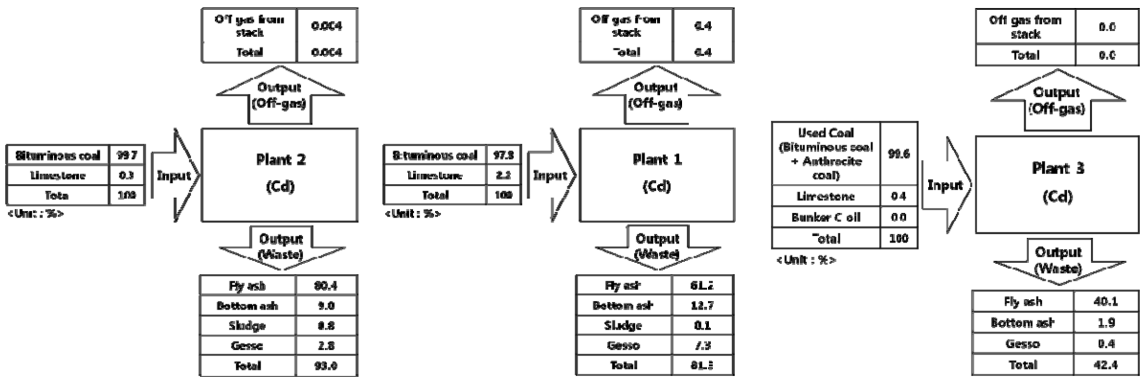


Fig. 3. Mass balance of Cd in the plants tested (n=3).

시설에서 납, 카드뮴 투입 주요 요인은 사용되는 석탄에 기인함을 알 수 있었다. 이의 석회석에 의한 납, 카드뮴의 투입량은 전체 투입량에 큰 영향을 미치지 못하고 있었다. 또한 Plant 3에서 연료로 사용되는 벙커C유류의 납, 카드뮴도 투입량은 전체 투입량에 큰 영향을 미치지 못하고 있었다.

Plant 1의 납 배출량은 4.501~5.679 톤/년, 카드뮴 배출량 0.071~0.156 톤/년으로 투입량과 비교해보면, 납은 33.8~39.9%, 카드뮴은 52.5~115.0%를 배출하고 있었다. 납, 카드뮴 모두 비산재에 의해 주로 배출되고 있었다. Plant 2의 납 배출량은 3.822~4.228 톤/년, 카드뮴 배출량 0.451~0.659 톤/년으로 투입량과 비교해보면, 납은 48.0~53.1%, 카드뮴은 76.1~111.3%를 배출하고 있었다. 납, 카드뮴 모두 비산재에 의해 주로 가장 배출되고 있었다. Plant 3의 납 배출량은 4.239-4.662 톤/년, 카드뮴 배출량 0.270~0.308 톤/년으로 투입량과 비교해

보면, 납은 42.2~46.4%, 카드뮴은 37.5~42.8%를 배출하고 있었다. 납, 카드뮴 모두 비산재에 의해 주로 배출되고 있었다. 이는 본 연구대상시설들이 사용하고 있는 전기집진설비가 먼지제거 효율이 좋기 때문인<sup>1)</sup> 것으로 판단된다. 폐수처리오니는 납, 카드뮴 농도가 높았으나, 그 발생량이 매우 낮아 총 배출량에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 배출가스에 의한 배출량 또한 매우 미흡하여 총 배출량에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

그러므로 석탄화력발전시설에서의 납, 카드뮴 주요 배출경로는 비산재임을 알 수 있었다. Figs. 2와 3은 각 시설 별 납, 카드뮴의 투입 및 배출특성을 물질수지로서 나타내고 있다. Figs. 2와 3에 의하면, 납, 카드뮴의 투입은 대부분이 사용되는 석탄에 의해 투입되고, 배출은 비산재에 의한 배출이 가장 높음을 알 수 있었다.

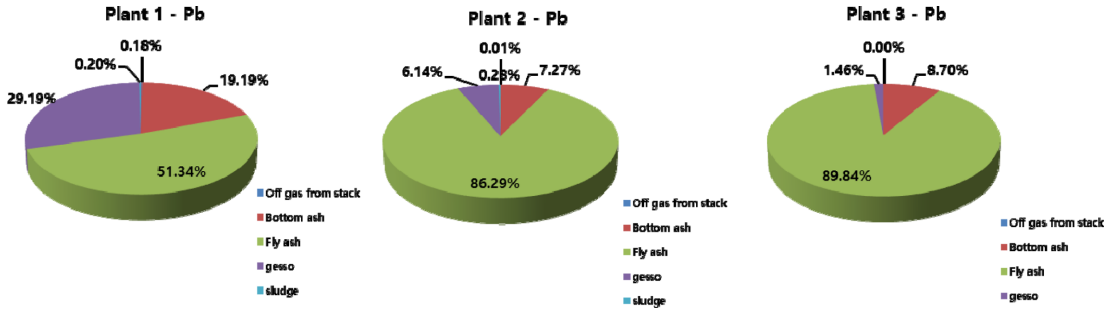


Fig. 4. Emission contributions of Pb in the plants tested (n=3).

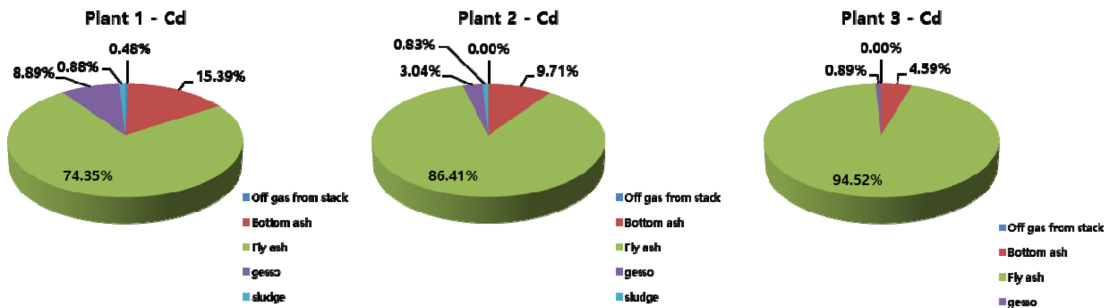


Fig. 5. Emission contributions of Cd in the plants tested (n=3).

3.5. 시설 별 납 카드뮴 배출기여도

배출 기여도는 배출물들의 배출량을 100%(평균값 기준)로 하여, 환경으로 배출되어 환경부하를 발생시키는 배출물의 종류를 알아보기 위하여 산정하였다. Fig. 4는 각 시설 별 납 배출 기여도를, Fig. 5는 각 시설 별 카드뮴 배출 기여도를 나타내고 있다. Plant 1에서 납은 비산재에 의해 50% 이상이 배출되고 다음으로는 석고가루에 의해 약 30%, 바닥재에 의해 약 19%가 배출되고 있었으나, Plant 2와 3에서 납은 비산재에 의해 85% 이상이 배출되고 있었다. Plant 2와 3에서 바닥재와 석고가루에 의한 납의 배출비중은 약 7~9%, 2~6%로 큰 비중을 차지하지 않았다. 배출가스로의 배출비중은 크게 나타나지 않았으나, Plant 1에서 약 0.2%로 Plant 2와 3에 비해 높았다. 그러므로 Plant 1에서의 납 배출은 Plant 2와 3보다는 모든 배출매체에 다양하게 분포되어 배출되는 경향을 나타냈다. Plant 1에서 카드뮴은 비산재에 의해 74% 이상이 배출되고 다음으로는 바닥재에 의해 약 15%, 석고가루에 의해 약 9%가 배출되고 있었으나, Plant 2와 3에서 카드뮴은 비산재에 의해 약 86

~96%가 배출되고 있었다. Plant 2와 3에서 바닥재와 석고가루에 의한 카드뮴의 배출비중은 약 5~10%, 1~3%로 큰 비중을 차지하지 않았다. 배출가스로의 배출비중은 크게 나타나지 않았으나, Plant 1에서 약 0.5%로 Plant 2와 3에 비해 높았다. 그러므로 Plant 1에서의 카드뮴 배출도 납 배출과 같이 Plant 2와 3보다는 모든 배출매체에 다양하게 분포되어 배출되는 경향을 나타냈다.

그러므로 석탄화력발전시설에서의 납, 카드뮴이 환경으로 배출되는 주요 경로는 매립 혹은 시멘트 소성시설 대체원료로 재활용되고 있는 비산재임을 알 수 있었다. 환경대기로의 배출이 거의 없는 것은 대부분의 시설들이 고효율의 대기오염방지시설이 부착되어 있기 때문인 것으로 여겨진다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 석탄화력발전시설에서 연료로 사용되는 석탄 및 공정 배출물 중의 납, 카드뮴 함유량을

조사하여 화력발전시설에서의 납, 카드뮴 투입 및 배출 특성, 환경으로의 배출기여도를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

석탄화력발전시설에서 사용되는 석탄 중 납, 카드뮴 농도를 비교해본 결과, 유연탄에 비해 무연탄이 혼합되는 혼합탄에서의 납 농도는 약 2~3배, 카드뮴 농도는 약 3~14배 높게 나타났다. 그러므로, 납, 카드뮴 함유량은 유연탄보다는 무연탄이 높은 것을 알 수 있었다.

각 시설 별 공정 배출물의 납, 카드뮴 함유량을 투입되는 석탄의 납, 카드뮴 함유량과 비교해본 결과, 3개 시설 모두 투입되는 석탄의 납, 카드뮴 함유량과 공정 별 배출되는 배출물의 납, 카드뮴 함유량과는 크게 상관성이 없는 것으로 나타났다. 그러므로 각 시설 별 투입된 석탄 중 납, 카드뮴의 거동이 각 시설에서의 연소 조건 및 방지시설 조건에 의해 다르게 분포하고 있음을 알 수 있었다.

각 시설 별 납, 카드뮴 투입량 과 배출량을 비교해보면, 납의 경우는 3개 시설 모두 납의 투입량 대비 배출량이 낮았고 3개 시설에서 크게 차이를 나타내지 않았으므로, 납 투입량이 많은 시설이 납 배출량도 많은 것으로 추정할 수 있었다. 카드뮴은 납의 경우만큼 분명하게 나타나지는 않았지만, 카드뮴의 투입량 대비 배출량이 1개 시설에서 다른 2개 시설에 비해 2배 가량 낮게 나타났기 때문에 이를 감안하면 카드뮴 투입량이 많은 시설이 카드뮴 배출량도 많은 것으로 추정할 수 있었다.

석탄화력발전시설에서의 납, 카드뮴 투입은 대부분이 사용되는 연료에 의해 투입되고 있었고, 배출은 비산재에 의해 주로 배출되고 있었다. 현재 국내 석탄화력발전시설에서 발생하는 비산재는 대부분이 외부로 판매되어 재활용되고 있는 상황이었으므로, 납, 카드뮴 함유 비산재 및 기타 매립되고 있는 고상 폐기물에 대한 이동량의 관리가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이는 현재 석탄화력발전시설의 경우, 대기배출량만의 관리로는 국내 납, 카드뮴 배출시설에서의 납, 카드뮴 통합관리가 어려울 것으로 여겨지므로, 비의도적배출시설이라 해도 배출되는 고상 폐기물의 배출량 (이동량) 관리가 이루어져야 합리적인 통합관리가 이루어 질 수 있을 것으로 여겨진다.

석탄화력발전시설 공정 배출물 중 배출량은 낮았으나 농도가 높은 바닥재 및 폐수처리오니는 폐기물관리법<sup>14)</sup>에 의한 매립 용출기준(납 3 mg/L, 카드뮴 0.3 mg/L)에 준하여 대부분이 매립되고 있었다. 2013년 국

립환경과학원 연구자료에 의하면, 폐기물 중 중금속의 함유량과 국내 용출시험법에 의한 용출량에는 뚜렷한 상관관계가 없음을 나타내고 있으므로<sup>15)</sup>, 매립되는 폐기물 중 납과 카드뮴에 대한 함유량에 대한 관리가 필요한 것으로 판단된다.

또한 배출가스 중 납과 카드뮴 함유량이 배출허용기준보다 매우 낮은 수준으로 배출하고 있는 것으로 조사되었으므로, 국내 화력발전시설은 납, 카드뮴 대기배출의 주요 발생원이 아님을 알 수 있었다. 이는 조사대상 시설에는 분진을 99.5% 이상, 납과 카드뮴을 90% 이상 제거가 가능하다고 보고<sup>1)</sup>되어 있는 전기집진기(cold side ESP)를 갖추고 있기 때문인 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. O. Rentz, S. Wenzel, R. Deprost, and U. Karl, "Materials for consideration in the discussion concerning the Protocol on Heavy Metals to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution", **2004**, 2<sup>nd</sup> Draft Report, Germany.
2. United Nations Environment Programme, Final review of scientific information on lead, December 2010, <http://www.unep.org/chemicalsandwaste/LeadandCadmium>, March, 2012.
3. United Nations Environment Programme, Final review of scientific information on cadmium, December 2010, <http://www.unep.org/chemicalsandwaste/LeadandCadmium>, March, 2012.
4. European Commission, "Reference document on best available techniques for large combustion plants", *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)*, **2006**.
5. J. M. Pacyna and E. G. Pacuna, "An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide", *Environmental Reviews*, **2001**, 9, 269-298.
6. 환경부, 2011년도 대기배출원관리시스템 조사자료, <http://sodac.nier.go.kr/index.do>, August, 2014.
7. 한국전력공사, 2011년도 한국전력통계, <https://home.kepco.co.kr/kepco/KO/ntcob/list.do>, April, 2012.
8. 환경부, "대기오염공정시험기준, 배출가스 먼지 시료채취 방법(ES 01301.1)", **2014**, 고시 제2014-9호, 124-164.
9. 환경부, "수질오염공정시험기준, 시료의 채취 및 보존방법(ES 04130.1c)", **2014**, 고시 제2014-163호, 15-26.
10. 환경부, "폐기물공정시험기준, 시료의 채취(ES 06130) 및 보존방법(ES 1112.1)", **2011**, 고시 제2011-3호, 19-

- 26.
11. U. S. EPA, "Microwave assisted acid digestion of sediment, sludges, soils, and oils (3051A)", *EPA Method*, USA, **2007**.
  12. U. S. EPA, "Trace elements in water, solids, and bio-solids, by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (200.7)", *EPA Method*, USA, **2001**.
  13. 환경부, "대기환경보전법, 대기오염물질의 배출허용기준", **2015**.
  14. 환경부, "폐기물관리법, 지정폐기물에 함유된 유해물질", **2013**.
  15. 국립환경과학원, "지정폐기물의 유해물질 규제항목 확대에 따른 파급효과 평가", **2013**, 9-13.