

Characterization of lead isotope emission profiles in non-ferrous smelters in South Korea

Jin-Ju Park¹, Ki-Jun Kim¹, Jin-Soo Park¹, Suk-Min Yoo¹, Kwang-Soo Park¹, Kwang-Seol Seok¹,
Hyung-Sun Shin², Guem-Joo Song³ and Young-Hee Kim^{1,★}

¹National Institute of Environmental Research of Environmental Research, Incheon 404-170, Korea

²Korea Basic Science Institute, Ochang, Korea

³Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

(Received May 6, 2013; Revised August 29, 2013; Accepted August 28, 2013)

국내 비철금속 제련시설에서의 납 동위원소 배출특성 연구

박진주¹ · 김기준¹ · 박진수¹ · 유석민¹ · 박광수¹ · 석광설¹ · 신형선² · 송금주³ · 김영희^{1,★}

¹국립환경과학원 화학물질연구과, ²한국기초과학지원연구원 환경과학연구부,

³포항공과대학교 환경공학부

(2013. 5. 6. 접수, 2013. 8. 29. 수정, 2013. 8. 29. 승인)

Abstract: This study was conducted to build up the inventories of Pb isotopic compositions of major Pb pollution sources in South Korea. Since non-ferrous metal smelters are one of major anthropogenic sources, two smelters for zinc, each one of smelter for lead and copper were selected for the study. The Pb concentrations and isotopic compositions of metal ores, wastewater, sludge, metal rod and produced sulfuric acid were analysed to understand the Pb isotopic patterns in environment. The isotopic ratio, ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb, of zinc ores from zinc smelter were in the range of 1.179~1.198 and the ratio of waste, flue gas and products samples were 1.105~1.147. This results implied that the isotopic patterns of output samples showed mixing patterns between two distinct metal ore sources. In 2011, major importing countries of zinc ore were Australia, Peru and Mexico. Thus Pb isotopic patterns from zinc smelter is originated from the mixing patterns between less radiogenic Australian ores and more radiogenic South America's ores. Lead smelters also showed the same mixing patterns with those of zinc smelters. However copper smelter showed same Pb isotopic patterns with more radiogenic South America's ores.

요약: 납 동위원소 분석은 국지적 및 지구적 납 오염 특성 해석을 위한 유용한 기법으로 널리 활용되어 왔다. 본 연구는 국내 환경 중 납 오염원을 추적하기 위해 주요 배출원별 납 동위원소 인벤토리 구축 사업의 일환으로 수행되었다. 특히 비철금속 제련시설은 가장 중요한 인위적 납 오염원으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 국내에서 가동 중인 아연 (2 개 시설), 납 및 구리 제련시설에서의 납 동위원소의 유입 및 배출특성을 조사하였다. 각 제련시설에서 사용 중인 정광, 슬러지 및 폐수, 배출가스, 부산물로 생산되는 황산 및 제련된 금속제품 중의 납 농도와 납 동위원소 조성을 조사하였다. 아연 제련시설에서의 아연광석의 납 동위원소 분포는 1.179~1.198의 높은 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 값을, 아연 제련시설에서 배출되는 배출가

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)32-560-7204 Fax : +82-(0)32-568-2039

E-mail : heek89@korea.kr

스, 제품, 폐기물 등은 1.105~1.147의 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 나타냈다. 국내 수입되는 아연광석은 주로 호주 및 페루 등이 주요 산지로서, 아연 제련시설에서 배출되는 물질들의 납 동위원소 분포는 중남미산 광석 및 호주산 광석의 납 동위원소 비율이 혼합된 것으로 추정되었다. 납 제련시설에서 배출되는 납 동위원소 패턴은 호주산 광석 및 중남미산 광석의 혼합 형태를 보이며, 구리 제련시설은 중남미 지역의 광석 패턴을 따르는 것으로 추정되었다.

Key words: Lead isotopic compositions, non-ferrous metal smelters, flue gas, metal ores

1. 서 론

환경 중으로의 주요 납 배출은 화산 및 풍화작용 등에 의한 자연적 배출과 화석연료 연소, 비철금속 제련 및 납 함유제품 생산으로부터 배출되는 인위적 배출로 구분할 수 있다. 특히 인위적 배출 중 대기로의 배출은 산업혁명 이후 증가하였으며, 1970년대부터 유연회발유의 사용으로 대기 중 납 농도가 급증하였으나, 1990년대 이후로 각 국가들이 유연회발유의 사용을 규제하면서, 1983년부터 1990년 중반까지 330,000톤에서 120,000톤으로 급감하였다.¹

납은 지각 중에 존재하는 원소로서 특히 은, 아연, 구리 및 금광석 중에 함유되어 있으며 전체 생산량의 30% 정도가 아연-납 광석에서 생산된다. 현재 40개국 이상이 납을 생산하고 있으며 2011년 기준 납 채광량은 4,616천 톤, 제련 납 금속 생산량은 10,372천 톤, 소비량은 10,216천 톤이다. 중국이 전체 채광량의 51%를 차지, 호주 12%, 유럽 8% 미국 7%, 페루 및 멕시코가 각 5%를 차지하였다. 2010년 대비 채광량은 약 9.8% 증가하였으며, 타 국가들의 채광량은 감소하는 반면 중국은 27% 증가하였다. 제련 납 생산량은 중국 4,648천 톤(45%), 유럽 1,750천 톤(17%), 미국 1,296천 톤(13%), 인도 426천 톤(4%) 및 우리나라 410천 톤(4%)이었다. 제련 납 금속 소비량은 중국 4,632천 톤(45%), 유럽 1,626천 톤(16%), 미국 1,578천 톤(15%), 인도 448천 톤(4%) 및 한국 384천 톤(4%)이었다. 전 세계 제련 납 생산량 중 2차 납 제련량이 1차 납 제련량 보다 약 12% 많으며, 특히 중국은 1차 납 제련량이 전체 제련량의 약 68%를 차지하였으나, 미국은 2차 납 제련량이 전체 제련량의 91%를, 유럽은 69%, 일본은 98%를 차지하는 것으로 나타났다.²

우리나라의 납 생산은 2010년 기준으로 고려아연에서 1차 납 제련에 의해 200천 톤을 생산하고 있으며,

납 스크랩 등으로부터 2차 납 생산이 중일 및 상신 금속 등에서 72천 톤을 생산하고 있다. 이처럼 우리나라는 주요 납 생산 및 사용국이면서, 전 세계 납 생산 및 소비의 45% 이상을 차지하는 중국의 인접 국가로서, 국내 환경 중 납 오염을 이해하기 위해서는, 국내 및 중국의 주요 납 배출원에 대한 조사가 필요하다.

환경부 대기배출원관리시스템(SEMS, Stack Emission Management System) 자료에 의하면, 2010년 국내 전체 대기배출량은 약 7,395천톤으로, 이 중에서 납 및 아연 제련, 정련, 합금제조업이 전체 배출량의 45.9%를 차지하였고, 축전지 제조업이 20.9%, 폐기물 처리업에서 10.6%를 차지하였다.³ 우리나라의 경우, 국내 납 배출의 45% 이상이 금속 제련업으로부터 배출되는 것으로 조사되어, 국내 납 배출특성을 조사하기 위해서는 일차적으로 금속제련 분야의 조사가 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구는 납 동위원소를 이용한 납 오염원 추적을 위해 국내 주요 배출원의 납 동위원소 데이터베이스 구축을 위해 수행되었다. 특히 납에는 광석의 생성 시기와 광상구에 따라 동위원소의 비율이 변하는 방사기원 동위원소들이 존재하며, 이로부터 납 광석 등은 산지에 따라 고유의 동위원소 비를 갖게 된다. 하지만 채광, 제련, 제품 사용, 폐기물 소각, 화석연료의 연소 등으로 납을 함유한 물질의 기원에 따라 환경 중의 납 동위원소 비율이 변하게 된다.⁴ 또한 납 동위원소는 일반적으로 분별작용(fractionation)이 거의 나타나지 않거나, 원산지별 조성 변화에 비해 미미하여 제련 및 연소 과정에서도 기존의 광석의 납 동위원소 조성을 그대로 유지하는 것으로 알려져 있어, 배출원별 오염원 추적에 널리 활용되고 있다.⁵

따라서 본 연구에서는 국내 비철금속 생산으로부터의 납 배출특성을 파악하기 위하여 주요 납 배출원인 비철금속 제련시설에서의 납 동위원소 유입 및 배출 특성을 조사하였다.

Table 1. Sample lists from non-ferrous (lead, zinc and copper) metal smelters

Type	Zinc smelter 1	Zinc smelter 2	Lead smelter	Copper smelter
Ore	zinc ores	zinc ores	lead ores	copper ores silica rock
Waste	sludges wastewater	sludges wastewater	sludges wastewater	sludges wastewater
Flue gas	roasting process casting process	roasting process casting process	roasting process casting process	roasting process casting process
Product	cadmium rod zinc rod sulfuric acid	cadmium rod zinc rod sulfuric acid	lead rod sulfuric acid	copper rod sulfuric acid

2 실험방법

2.1. 시료채취

조사 대상시설은 비철금속 제련시설 중 납, 아연 및 구리의 1차 제련 시설로 선정하였다. 현재 국내에는 아연제련 2 개 시설, 납 제련 1 개 시설 및 구리 제련 1 개 시설이 있으며, 본 조사에서는 이들 시설을 조사 대상 시설로 선정하였다. 선정된 시설별로 원광석, 부원료, 배출가스, 슬러지 및 폐수 등과 함께 아연피 및 납피 등의 제품과 부산물로 생산되는 황산 등을 채취하였다. 조사대상 시설별 시료채취 내역을 Table 1에 제시하였다.

2.2. 분석방법

채취한 시료는 동결건조 후 막자사발을 이용해 균질화 하였으며 균질화된 시료에서 0.2 g 정도를 정확히 취해 테플론 분해 용기(Teflon digestion vessel, Saville, USA)에 넣고 혼합산(HF+HNO₃+HClO₄)을 이용하여 분해하였다. 최종적으로 1% 질산용액으로 20 g을 만들어, EPA 시험방법 3051에 따라 ICP-OES (Optimer 5000DV, Perkin Elmer, USA)로 납 화합물을 분석하였다. 이후 이 용액을 다시 20 배 희석하고 여기에 질량분별을 보정하기 위해 Thallium (Tl)을 spike 하여 고분해능 다중채널검출기 유도결합플라즈마 질량분석기(Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, MC-ICP-MS)로 납 동위원소를 분석하였다.⁶

Table 2. Operating parameters for MC-ICP-MS

RF power	1200W
Cooling gas	15 L/min
Acceleration voltage	-2000V
Ion lens	Automatic
Sample cone	Nickel
Skimmer cone	Nickel
Mass resolution	Low (m/m=400)
Sampling mode	10-15 cycles
Integration time	4.2 s per cycle
Nebuliser	PFA-100
Sample uptake rate	~0.1 mL/min
Auxiliary gas	0.7 L/min
Sample gas	1.0-1.05 L/min

납 동위원소(²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb)는 총 9 개 검출기 중 center faraday 검출기를 기준으로 왼쪽에 위치한 L1 검출기로 ²⁰⁴Pb를 측정하며, 오른쪽에 위치한 H1, H2, H3사용하여 ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb를 측정하였다. 또한 시료에 첨가한 ²⁰³Tl과 ²⁰⁵Tl은 각각 L2와 center 검출기로 측정하며, ²⁰⁴Pb에 중첩되는 ²⁰⁴Hg의 간섭을 보정하기 위해 ²⁰⁴Hg 동위원소인 ²⁰²Hg를 측정하였다. Pb 동위원소 표준물질로는 NIST SRM 981을 사용하였다. Table 2과 Table 3에 각각 기기측정조건과 Pb 동위원소 측정의 검출기 배열을 표시하였다. 납 동위원소 분석은 한국기초과학지원연구소에서 수행되었다.

Table 3. Cup configuration of MC-ICP-MS

	L3	L2	L1	Ce	H1	H2	H3
Cup Configuration*	²⁰² Hg	²⁰³ Tl	²⁰⁴ Pb	²⁰⁵ Tl	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb
Corr-Interfer			²⁰⁴ Hg				

*²⁰⁵Tl and ²⁰³Tl were used mass bias correction

3. 결과 및 고찰

국내 환경 중 납 오염특성을 파악하기 위하여, 아연, 납 및 구리 제련시설에서의 원광석, 배출가스, 폐기물 및 제품 중의 납 농도 및 납 동위원소 조성을 조사하였다.

아연 제련시설의 경우, 아연 광석 중 납 함유량은 61.9~652.9 mg/kg으로, 대부분의 납이 아연 광석으로부터 유입되는 것으로 확인되었다. 조사된 아연 광석 중의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.179~1.198로 나타났다. 아연 제련시설에서 환경 중으로 배출되는 납 농도는 배출가스에서 0.14~13.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 슬러지에서 85.14~1766 mg/kg, 폐수에서 1.96~7.88 mg/L이었다. $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 배출가스에서 1.105~1.149, 슬러지에서 1.130~1.136, 폐수에서 1.122~1.137 이었다. 아연 괴 및 황산 등 제품으로의 배출되는 납 농도는 각각 11.1~61.9 mg/kg 및 2.2~75.8 mg/kg 이었으며, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 각각 1.112 및 1.123~1.146 이었다.

납 제련시설의 경우는, 납 광석 중 납 함유량은

261,894 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 조사된 납 광석 중의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.046~1.075로 나타났다. 납 제련시설에서의 배출가스 중 납 농도는 0.23~1.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.136~1.155 이었으며, 슬러지 중 납 농도는 85.1 mg/kg, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.136 이었다. 황산 중 납 함량은 0.02 mg/kg, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.152로 나타났다. 납 괴의 경우, 99.995% 이상의 순도를 갖는 납 제품으로 다른 시료에 비해 고농도의 시료로서 납 동위원소 분석이 수행되지 못했다.

구리 제련시설의 경우, 구리 광석 중 납 함유량은 92.0 mg/kg으로, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.186 이었다. 구리 제련시설에서의 배출가스 중 납 농도 및 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 13.0~52.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 1.182~1.184 이었으며, 슬러지에서 2,834 mg/kg 및 1.128, 폐수에서 1.7 mg/L 및 1.177, 전기 동 제품에서 6.7 mg/kg 및 1.176, 황산 제품에서 0.1 mg/L 및 1.150의 납 농도 및 납 동위원소 비율을 나타내었다. 시설별 납 동위원소 분포 특성을 Fig. 1에 제시하였다.

Fig. 1(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 아연 제련시설

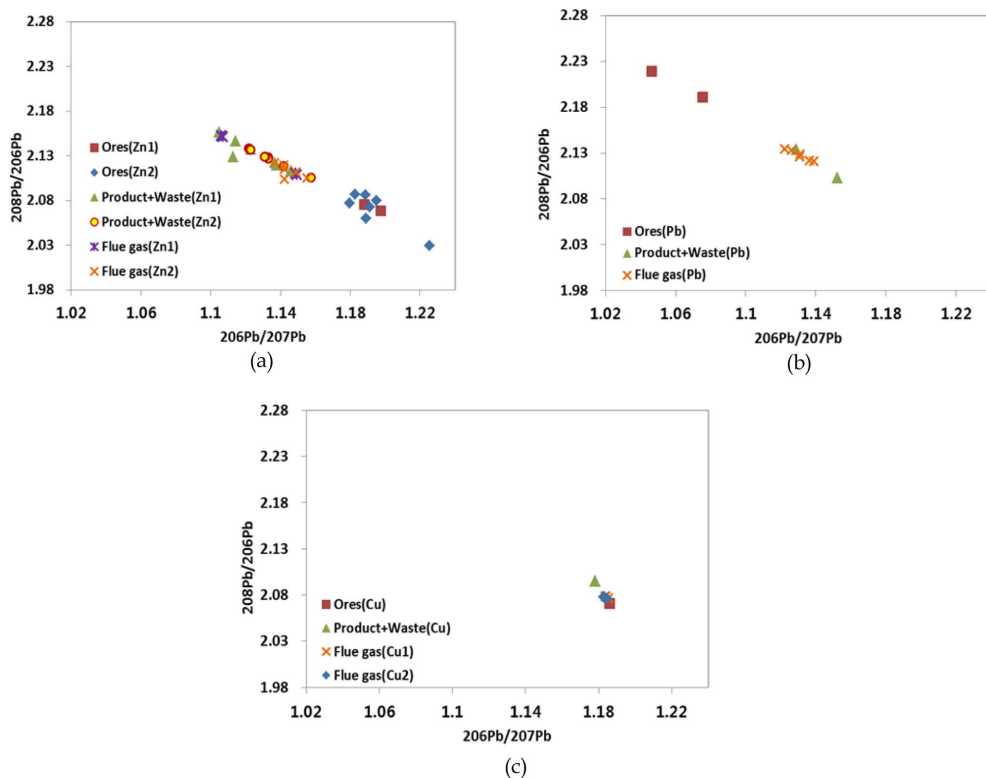


Fig. 1. Plots of $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ of ores, flue gas, wastes and products from (a) zinc smelter (b) lead smelter (c) copper smelter.

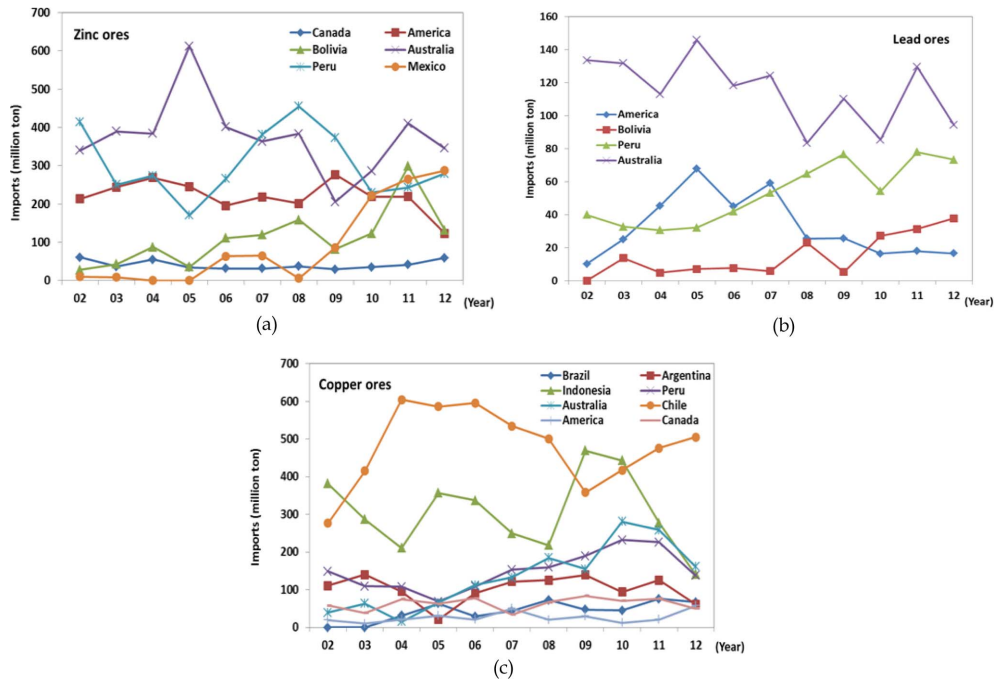


Fig. 2. Statistics of imported metal ores of South Korea (Korea trade statistics, 2011).

의 아연광석의 납 동위원소 분포는 1.179~1.198의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 갖는 것으로 나타났으나, 아연 제련시설에서 배출되는 배출가스, 제품, 폐기물 등의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.105~1.147로서 아연광석에 비해 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 나타냈다. 기존 연구결과에서 납 및 아연 제련 등 비철금속 제련에 의한 납 동위원소 배출 특성은 1 차 제련의 경우는, 납 동위원소가 제련과정 중 분별작용이 거의 일어나지 않거나, 그 영향이 미미하여, 광석 중의 납 동위원소 비율을 그대로 반영하는 것으로 알려져 있다.⁵ 따라서 제련시설에서 배출 물질들의 납 동위원소 분포는 유입 광석 중의 납 동위원소 분포 특성을 반영하여야 한다는 면에서 본 연구에서 조사된 아연 광석 이외에 추가적인 타 지역의 아연 광석이 사용된 것으로 추정할 수 있었다.

현재 우리나라에서 제련되는 비철금속 중 아연, 납 및 구리는 해외에서 광석을 전량 수입하여 국내에서 제련하고 있다. 한국무역협회의 국가무역통계 자료 중 2011년 비철금속 광석의 국가별 수입현황을 조사한 결과, Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 우리나라의 아연광석 주요 수입 국가는 호주, 페루 및 멕시코 등으로 확인되었다.⁷

기존 관련 연구에서, 볼리비아와 같은 중남미 지역의 납 광상은 1.175~1.206의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 가지며,

반면 호주의 납 광상은 1.03~1.10의 이보다 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Table 4).⁸ 따라서 본 연구에서 분석된 아연 정광은 대부분 페루 및 멕시코 등의 중남미산 광석으로 추정되며, 최종적으로 아연제련시설에서 배출되는 물질들의 납 동위원소 분포는 중남미산 광석 및 호주산 광석의 납 동위원소 조성의 혼합 형태로 추정되었다.

국내의 대표적 납, 아연광산으로는 경북 봉화에 위치한 연화 및 장군 광산으로 1980년대 말까지 운영되었다. 연화광산 방연석의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.202~1.250으로 국내 다른 광산들에 비해 상대적으로 높은 방사기원 납 동위원소 값을 보이는 것으로 알려져 있는 반면,⁹ 장군 광산 방연석의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.176~1.182으로, 국내 전북지역 광산에서 발견되는 방연석의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값, 1.155~1.235과 유사한 분포를 보이는 것으로 알려진 바 있다.^{10,11}

기존 연구결과에서 일반적으로 중국의 납 광석은 본 연구결과보다 다소 낮은 1.025~1.106의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 나타내는 것으로 확인되어,¹² 추후 국내 대기 환경 중 납 오염원 조사 시, 중국의 비철제련과 국내 비철제련으로부터의 납 오염 특성의 구분이 어느 정도 가능할 수 있을 것으로 추정되었다.

Fig. 1(b)의 납 제련시설의 경우, 아연 제련시설의

Table 4. Lead isotopic compositions of lead ores from various source regions

Location of lead ore	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Reference
China	1.025 ~ 1.106	-	12
South Korea	1.155 ~ 1.250	1.99 ~ 2.15	9, 10, 11
Bolivia	1.175 ~ 1.206	2.05 ~ 2.14	8
Australia	1.03 ~ 1.10	-	8

사례와 유사하게 본 연구에서 조사된 납 광석은 1.046~1.075의 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 나타내 호주산 광석으로 추정되었으며, 배출물질들은 1.136~1.155의 높은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 보여, 다른 높은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 갖는 납 광석이 사용된 것으로 추정되었다. 한국무역협회의 통계자료에 따르면, 납 광석 또한 호주 뿐 아니라, 페루와 볼리비아 등 남미 지역에서부터 대부분 수입되는 것으로 확인되었다. 따라서 납 제련시설에서 배출되는 배출물질의 납 동위원소 조성 분포도 호주산 광석 및 중남미산 광석의 혼합 형태를 보이는 것으로 추정할 수 있었다.

반면 Fig. 1(c)의 구리제련시설은 아연 및 납 제련 시설과는 달리, 구리 광석, 배출가스, 슬러지 및 제품 중의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값이 1.150~1.184의 좁은 범위 내에 분포하고 있어 다른 제련시설과는 구분되는 특성을 보였다. 이는 무역통계 자료에서 볼 수 있는 바와 같이 구리 광석이 대부분 칠레로부터 수입되며 호주 등에서 수입되는 양이 줄어들고 있어, 구리 제련시설의 배출물질의 납 동위원소 분포가 대부분 중남미 지역의 광석 패턴에 따름에 기인하는 것으로 추정되었다.

Fig. 3에서는 아연, 납 및 구리 제련시설에서 환경 중으로 배출되는 배출가스 중의 납 동위원소 분포를

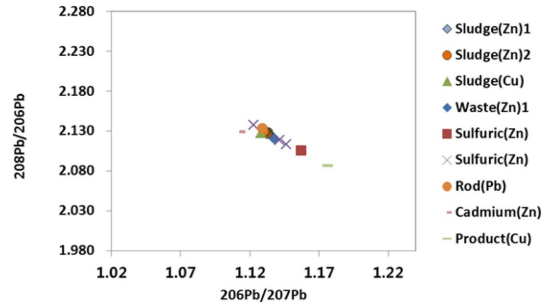


Fig. 4. Plots of (a) $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ for wastes and products from non-ferrous smelters.

나타내었다. 배출가스 중의 납 농도는 $3.1\sim 28.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.105~1.184의 분포를 나타내었다. 특히 아연 제련시설의 카드뮴 제조공정은 1.105의 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 보였으며, 구리 제련시설은 1.184의 높은 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 가져, 다른 시설과 구분되는 배출가스 중 납 동위원소 분포를 보였다.

조사된 비철금속 제련시설에서 납 농도 및 매체별 배출량을 조사한 결과, 대기로의 납 배출은 1% 미만으로 나타났으며, 대부분의 납은 납 피 등과 같은 제품 및 슬러지 등과 같은 폐기물로 환경 중으로 배출되는 것으로 확인되었다. 특히 슬러지로의 배출량은 100여 톤 이상으로, 비철금속 제련시설에서 배출되는 대부분의 슬러지는 지정폐기물 매립시설로 유입되는 것으로 알려져 있다. 납 함유 제품 또한 제품으로의 사용이 완료된 후 최종적으로는 폐기물 소각 등을 거쳐 슬러지 또는 비산재 등의 형태로 폐기물 매립시설 또는 시멘트 생산시설로 유입된다. 따라서 국내 환경 시료에서의 납 동위원소 분포특성은 슬러지 및 제품의 납 동위원소 조성에 많은 영향을 받을 것으로 예

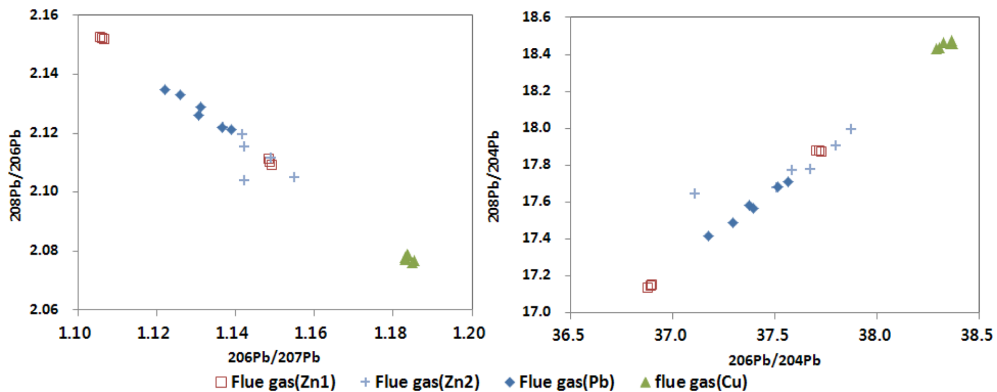


Fig. 3. Plots of (a) $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and (b) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ of flue gas collected from nonferrous smelters.

상할 수 있다. Fig. 4에서 제시된 바와 같이 본 연구에서 조사된 슬러지 중의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.127~1.138이며, 제품 중의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.112~1.176으로 조사되었으며 일반적으로 국내 납 광상의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값 1.155~1.250에 비해 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이로부터 토양 등의 환경 매체에서 과거의 국내 납 광석에 의한 비철금속 제련과 현재 수입광석에 의한 비철금속 제련으로부터의 오염특성의 구분이 가능할 수 있을 것으로 추정되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 환경 중 납 오염원의 추적을 위하여 국내 주요 납 배출원으로 알려진 비철금속(납, 아연 및 구리) 제련시설에서의 원광석, 배출가스, 폐기물 및 제품 중의 납 농도 및 납 동위원소 조성을 조사하였다. 아연 및 납 광석의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 각각 1.179~1.198 및 1.046~1.075를 나타내었으나, 배출되는 물질들은 1.105~1.155의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값을 가지는 것으로 조사되었으며 이는 중남미산 광석 및 호주산 아연 및 납 광석의 납 동위원소 비율이 혼합된 것으로 추정되었다. 반면 구리 제련시설은 구리 광석, 배출가스, 슬러지 및 제품 중의 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값이 1.150~1.184의 값을 가지며, 중남미 지역의 광석 패턴을 따르는 것으로 추정되었다. 아연, 납 및 망간 제련시설의 배출가스 중의 납 농도는 $3.1\sim 28.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 값은 1.105~1.184로 나타났다.

최근 중국의 급격한 산업 성장으로 납의 대기배출량은 2009년 기준, 9600톤으로 석탄화력 및 비철금속 부분에서 대부분의 납이 배출되는 것으로 보고된 바 있다. 하지만 환경 중 납 배출원은 이외에도 시멘트 생산시설, 비산먼지, 연료 연소 및 소각 등 매우 다양하다. 납 동위원소들의 분포 특성 또한 지역별 특이성을 가지나 동위원소 값들의 분포범위가 넓어, 대부분의 배출원이 비슷한 분포특성을 보이므로 오염원 추적에 한계를 나타내기도 한다. 따라서 최근에는 대기

입자 중의 납 동위원소와 함께 스트론튬, 아연 등의 다른 원소들의 동위원소들을 함께 분석하여, 발생원을 추적하는 연구가 진행되고 있다.¹³ 따라서 우리나라는 최대 납 배출국인 중국의 인접 국가로서, 국내 납 오염원에 대한 체계적 조사와 함께, 대기 입자 중의 다중 원소들에 대한 동위원소 특성 연구 등을 통한 납 오염 기원 추적 연구가 빠른 시일 내에 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. UNEP. Final review of scientific information on lead (2010).
2. ILZSG, <http://www.ilzsg.org>, Press release, Feb 2011.
3. <http://sodac.nier.go.kr/index.do>
4. C. Cloquet, J. Carignan, G. Libourel, T. Sterckeman and E. Perdrix, *Environ. Sci. Technol.*, **40**(8), 2525-2530 (2006).
5. E. S. Alyssa, W. Dominique and K. J. Orians, *Sci. Total Environ.*, **408**(11), 2357-2368 (2010).
6. J. Park, K. Kim, S. Yu, E. Kim, K. Seok, H. Shin and Y. Kim, *Anal. Sci. Technol.*, **25**(6), 429-434 (2012).
7. Korea trade statistics, <http://www.kita.net>, 2011.
8. E. Malin, W. D. Kylander and K. Bernd, *Sci. Total Environ.*, **407**(5), 1644-1657 (2009).
9. K. Park and H. Chang, *J. Petrol. Soc. Korea*, **14**(3), 141-148 (2005).
10. J. Jung and K. Park, *J. Petrol. Soc. Korea*, **15**(2), 81-89 (2006).
11. C. So, S. Yun, S. Choi, Y. Koh and S. Chi, *J. Geol. Soc. Korea*, **27**(6), 569-586 (1991).
12. H. Cheng and Y. Hu, *Environ. Pollut.*, **158**(5), 1134-1146 (2010).
13. D. Widory, X. Liu and S. Dong, *Atmospheric Environment*, **44**(30), 3679-3687 (2010).