

A Management Plan for Mercury-containing Waste

Jong Seok Park[#], Kyoung Hoon Rhee⁺, Byoung Seok Moon, Hyo Beom Lee, Bae Seok Lim

Department of Civil Engineering, Chonnam National University, 77 Youngbong-ro, Puk-gu, Gwangju, Korea

Abstract

Mercury has very peculiar property and can be used in a variety of way at industrial sites. Even when emitting to air, soil, and aquatic environment, its toxic components never disappear. It continues to cumulate inside living things and ends up being taken by apex predators, humans. Most of the mercury-containing waste are being thrown out or incinerated at the developed space with other wastes, which is not an environment-friendly way. This study suggests the method of classifying and managing mercury-containing wastes in an environment-friendly way. Results are as follows. First, supervision and management standards should be intensified to prevent damage from polluted materials during the process of purifying mercury. Second, the storage capacity of the facility handling unused mercury should be expanded and the rate of reuse should be increased to prevent pollution from mercury-containing wastes.

Key words: mercury-containing waste, environment-friendly, classification, management plan

1. 서론

수은은 매우 독특한 특성을 지니고 있기 때문에 온도계, 기압계, 형광등과 같은 제품과 클로르-알칼리, 염화비닐 단량체(Vinyl Chloride Monomer), 아세트알데하이드 생산과 같은 산업현장에서 매우 다양하게 사용된다. 그리고 국제 유해 오염물질의 하나로 잘 알려져 있으며 편의를 위해 여러 가지 물질로 변형되어 사용하고 있으며, 특히 우리나라의 경우 OECD 회원국 중 9번째로 수은 배출량이 많다(UNEP, 2013). 또한 대기, 토양 및 수생환경으로 배출될 시 독성이 사라지지 않고 생물 내에서 계속 축적되어 먹이사슬의 최상위 포식자

인 인간에게 섭취되게 된다. 해외에서도 오염물질이라는 인식이 확산되면서 수은이 포함된 제품과 산업계에 서의 수은 사용을 점차 줄이려는 경향이 커지고 있으나 수은 폐기물은 대부분의 나라에서 매우 심각한 문제가 되고 있다. 특히, 수은 사용과 배출을 줄이기 위한 국제 수은협약이 2013년 10월 외교회의를 거쳐 '수은에 관한 미나마타 협약'이 채택되면서 국내 폐기물 분야에서는 수은 함유 폐기물 분류부터 전반적인 관리체계에 대한 재정립이 필요한 상태이다. 미나마타 협약은 수은으로 인한 사람과 환경의 피해를 감축하기 위하여 수은이라는 단일 화학물질에 대하여 생산부터 저장, 사용, 배출 및 폐기까지를 관리하는 세계 최초의 협약이다.

[#] The 1st author: Jong Seok Park, Tel. +82-62-530-0431, Fax. +82-62-530-1659, e-mail. victorypjs@jnu.ac.kr

⁺ Corresponding author: Kyoung Hoon Rhee, Tel. +82-62-530-1656, Fax. +82-62-530-1659, e-mail. water@jnu.ac.kr

우리나라는 수은 배출량이 많은 국가에 해당하지만, 수은첨가제품과 배출시설에 대하여 관리를 실시하고 있다. 2015년 1월에 대기환경보전법을 개정함에 따라, 유럽연합과 대등한 수준의 대기배출시설 수은 허용기준을 강화하였고, 같은 해 12월에 환경부는 관계부처들과 협동하여 “수은관리 종합대책(2016~2020)” 계획을 수립하였다. 그러나 여전히 수은이나 수은을 함유한 제품은 특정 공정이나 오래된 공정에서 사용되고 있으며 지금까지는 수은 함유 폐기물을 재활용하거나 처리하는 것은 폐기물 관리 분야에서 주요 관심사가 아니었다. 수은의 장거리 이동 및 생태계 축적 등으로 인해 인간의 건강 및 환경에 악영향을 줄 수 있다는 사실이 입증되면서 국제적으로 관심이 증대되고 있다.

수은 함유 폐기물, 부산물, 제품의 취급, 수집, 저장, 수송 및 처리 과정에서 수은의 관리는 정확하게 수행되어야 하지만 수은 함유 폐기물, 부산물 처리에 어려움이 따른다. 수은을 함유한 토양, 폐기물의 처리에 대한 정보는 매우 적은 것으로 알려져 있다. 그리고 수은 폐기물, 버려진 형광등과 같은 사용 후 수은을 포함한 제품을 친환경적인 방법으로 처리할 수 있는 기술을 갖춘 국가는 많지 않다. 대부분 수은폐기물은 타 폐기물들과 함께 섞여 개발된 공간(수은을 폐기하기 위한 적재 공간)에 폐기되거나, 소각하는 등의 방법으로 처리하고 있어 친환경적이지 못하다(National Institute of Environmental Research, 2011).

이에 인간의 건강과 환경에 대한 수은의 위험을 줄이고 수은이 포함된 제품을 친환경적 관리를 위하여 수은 폐기물의 분류방법과 관리방안에 대해 살펴보고자 하며, 국내에서 발생하는 수은 함유폐기물의 처리를 위한 적정 수은 회수방법을 통하여 친환경적 수은 함유 폐기물 관리방안을 마련하고자 한다.

II. 이론적 고찰

1. 수은의 화학적 특징

수은(Hg)은 원소 번호 80번의 금속으로 상태에 따라

원소수은과 메틸수은(MeHg⁺)으로 분류된다. 실생활에서 사용되기 위해 위의 수은들은 여러 가지 화합물들과 혼합하여 여러 가지 형태로 사용된다. 그리고 수은은 기체 상태일 때 대기 중에 떠돌며 극지방에서 축적되는데 이것을 대기 수은 공핍 현상(At mospheric mercury depletion events)라고 한다(Steffen, 2007). 원소상태의 수은은 밀도가 높고, 은색을 띠며, 상온·상압에서 주로 액체 상태로 존재한다. 분자량은 200.59, 녹는점은 -38.87°C, 끓는점은 356.72°C이며 밀도는 25°C에서 13.534g/cm³이다. 그리고 원소상태의 수은은 휘발성이 매우 높아서 25°C에서 증기상태로 기화하게 된다(WHO, 2005). 메틸수은은 유기 금속의 구조를 가지고 있으며 생물 내에서 축적되는 환경 독성물질이다. 이러한 특성 때문에 미나마타병으로 수은의 위험성을 알게 된 일본을 포함한 아시아, 중동아시아, 수은공장 주변의 강·해안에서 생활하며 수산물을 먹는 민족들 체내에 상당한 메틸수은이 축적되어 있었다(WHO, 2005).

2. 선행연구 고찰

Kim(2017)은 미나마타협약 이행을 위한 유럽연합의 수은에 관한 규칙 입법안에 대한 고찰에 대해 연구에서 우리나라는 수은 배출량이 많은 국가에 해당되며 배출시설, 수은첨가제품에 대한 관리를 실시하고는 있지만 관련법이 유럽연합에 비해 빈약하기 때문에 이점을 보완해야 한다고 하였다. 연구 결과 수은에 관한 규칙 입법안을 총 20개 조항으로 구성하여 범규를 규정하여 입법으로 인한 피해 내지 규제를 최소화하고자 노력하였고, 유럽연합의 영향 평가 제도를 참고할 필요가 있다고 하였다. 그리고 Korea Environmental Industry & Technology Institute(2016)는 수은에 관한 미나마타협약이 발효되면 수은 폐기물에 대한 별도의 회수 및 매립 기준이 채택될 가능성이 높다고 하였다. 이에 앞서 미나마타 협약을 주도한 일본의 친환경적인 수은 회수·처리기술에 대해 연구하고 안정화 방법은 통상적으로 상업적으로 결정될 우려가 있다고 주장 하였다. 향후 우리나라도 친환경적인 처리 기술개발과 지속적

Table 2. Wastes that may contain mercury(Basel Convention)

Article	Contents
A1170	Unclassified waste batteries, except mixture of batteries.
A2060	Fly ash in coal-fired power plants with sufficient concentration
A3170	Waste resulting from the production of halogenated aliphatic hydrocarbons such as chloromethane, dichloroethane, vinyl chloride, vinylidene chloride, allyl chloride, and fchlorhydrin
A4010	Wastes arising from the production, preparation and use of pharmaceutical products. Except the wastes listed in List B
A4020	Medical and related waste; Wastes resulting from medical, nursing, dental, veterinary or similar procedures, and wastes arising during the course of study or treatment of patients in hospitals or other establishments or in research

※ Source: Basel Convention

2) UNEP의 활동

UNEP는 유출된 수은은 인간 건강에 해로운 결과를 가져오고 생태계에 손상을 입힐 수 있다는 것에 중심을 두고 있다. 수은과 관련된 전 세계의 문제에 관한 자문이나 결정을 내렸으며 많은 활동을 펼치고 있다. SAICM(국제적 화학물질관리에 대한 전략적 접근)을 통하여 수은 폐기물의 감소를 위해 과학적 정보를 바탕으로 다뤄지는 활동을 주로 하고 있다. 그리고 개발도상국 지원 프로그램을 통하여 수은에 대한 정보가 없는 나라들을 지원하고 선진국의 모델을 적용시켜 수은을 일정수준까지 처리할 수 있는 단계로 만들기 위해 노력하고 있다(UNEP, 2009).

3) 미나마타협약

미나마타협약은 수은의 오염에 기여한 산업 활동에서 초래하는 문제들을 해결하기 위한 협약이다. 수은의 인체 위해성은 ‘미나마타 병’으로 익히 알려졌으며, 2009년 UNEP에서 협약 제정을 결정한 이후 정부간협상위원회를 거쳐서 스위스 제네바에서 협약문이 완성됐다. 이 협약을 이행하는 것은 전 지구적인 수은 오염을 저감하는데 노력하는 방안 중 하나로써 이해되고 있다. 미나마타협약에서는 국제수은협약문을 확인하는 서명을 하는 것뿐만 아니라 추가적으로 협약의 구성원이 되기 위한 비준 수락서(Instrument of Acceptance)를 준비하였다. 수은의 사용과 배출을 줄일 수 있지만 단독적인 노력으로는 수은 오염을 해결하기에 충분하지 않다. 또한 일부 추정에 따르면, 지역에 따라 다르지

만 미국에 근접한 지역에 증착된 수은의 약 70%가 국제적인 배출원에서 기인한 것이다. 이러한 국제적 배출원은 천연 자원 및 재 방출되는 수은과 함께 타 국가에서 배출되는 인위적인 배출을 포함하고 있다. 따라서 국제적인 협약을 통한 통합적 관리체계가 필요하다. 미나마타 협약은 수은의 공급과 교역, 대기·물·토양으로의 배출, 수은첨가제품의 처리, 저장과 폐기를 주요 내용으로 구성하고 있다.

대상이 되는 수은첨가제품들은 제품군에 따라서 저감화와 단계적인 금지로 구분하여 관리되며, 배출의 경우는 엄격한 관리 현황과 시설관리의 이행결과를 당사국총회에 보고되어야 한다. 그리고 수은의 경우 임시저장만 허용되고, 최종적으로 친환경적인 처리를 통하여 폐기를 해야 한다(Minamata Convention on Mercury, UNEP, 2013).

2. 우리나라의 수은 관리 현황

1) 수은의 인체 노출 현황

우리나라는 환경부를 중심으로 하는 수은의 상태, 인체에 대한 위해성 평가를 실시하기 위하여 조사와 연구사업이 진행되고 있다. 2015년에 보건복지부와 환경부가 공동으로 실시한 국민 혈중 중금속농도에 대한 조사 결과(Ministry of Environment, 2016)는 다음과 같다. 혈중평균 수은의 농도는 4.34 µg/L로 확인되었고, 이는 미국과 독일에 비하여 약 5~8배 높은 수치이다. 독일의 수은 규정에 “민감한 사람에게 영향을 줄 수 있는 수준”으로 되어 있는 15µg/L을 초과하는 사람은

1.8%로 나타났고, 미국의 환경보호국 권고수치인 5.8μg/L을 초과하는 가임기의 여성이 약 27%를 차지하는 것으로 나타났다.

2) 국내 수은 사용 현황

우리나라에서 수은은 주로 형광등을 생산하는 용도로 주로 사용되고, 사용되는 모든 수은은 외국에서 수입되고 있다. 2009~2012년 사이에 연평균 약 18톤의 수은이 수입, 가공되어 유통하고 있으며, 주로 계측기(온도, 압력), 의료용 재료(치과), 가전제품 및 전기기기, 귀금속 추출(금, 은 등) 등으로 사용되고 있다(Table 3). 조사 결과 2012년에 수입된 수은의 양은 14.5톤에 이르고, 유통된 수은제품은 형광등이 5.93톤, 시약 6.4톤, 촉매 3.03톤, 기타 3.19톤으로 총 18.55톤이 유통이 된 것으로 파악된다(Ministry of Environment, 2015). 수은의 제품원료용 사용 이외에도 체온계, 건전지, 형광등과 같은 수은이 함유된 완제품도 수입을 통하여 사용되고 있다. 이와 같은 광범위한 수은의 사용량과 완제품 상의 수은 함유량에 대한 파악은 관련정보가 매우 부족한 실정이다.

3) 국내 수은 배출량

우리나라에서도 발전소, 소각시설, 제철소, 제련소 등 산업 활동과 형광등, 수은전지, 계측기 등의 제조, 사용, 폐기 과정에서 수은이 발생하여 배출되는 것으로 파악된다. 우리나라의 수은 배출량(2010년 기준) 추정치는 44.87톤이고 많은 배출원 순으로 나타내면 비철 금속 54.62%, 지정폐기물 소각 시설 24.35%, 철강제조 10.21%이며, 일반적으로 많은 배출원으로 알려진 화력발전소의 경우 7.72%로 다른 배출원 들이 기여가 더 큰

것으로 나타난다(Rhee, et. al., 2015). 하지만 국내의 주요 수은 배출원 중 화력발전의 경우는 석탄 사용 증가로 인하여 지속적인 수은의 배출이 나타나고 있다. 환경부의 실태 조사(Ministry of Environment, 2014)의 결과, 화력발전소에서 배출되는 수은의 농도는 0.08~26.3μg/Sm³ 수준이며 이는 외국의 사례와 비슷한 수치이지만, 석탄 사용량과 화력발전소의 시설 수 증가에 따른 화력발전소의 수은 배출량은 지속적으로 증가 될 것으로 추정하고 있다. 화력 발전 부분에서 수은의 발생은 석탄 내에 함유되어 있는 수은의 존재로 나타나는 것이며, 석탄의 사용량과 밀접한 관계가 있다. 또, 발전 부분의 석탄 사용량은 2010년에 21,504천 톤에서 2014년 27,970천 톤으로 4년간 사용량이 30%가 증가되었다(Ministry of Environment, 2014).

4) 수은폐기물 관리 현황 및 문제점

수은폐기물은 매년 배출량과 유통량에 대하여 조사가 실시되고 있으며 유해화학물질관법에 따라 유독물로 지정되어 처리하고 있다(National Institute of Environmental Research, 2007). 비점 오염원의 배출량 측정은 1999년부터 매년 실시하고 있으며 2002년부터 4년 주기로 실시하고 있다. 앞서 설명한 대로 우리나라는 2012년 수은 수입량은 14.5톤이고, 유통량은 18.55톤에 달한다. 그 중 수은 전지는 24.8% 만이 수거되고 있는 실정이다. 한 개당 약 7~15mg의 수은이 함유되어 있는 형광등 역시 생산자 책임재활용 제도(EPR: Extended Producer Responsibility)를 통하여 자발적인 협약을 이어감에도 불구하고, 총생산량 1억 5천만 개 중 17.6%에 해당되는 2천 6백만 개만 수거되어 처리하고 있다. 그리고 EU에서 판매를 금지하고 있는 치과

Table 3. Usage of imported mercury in Korea

Product or material	Income contents
Fluorescent lamp	Production: 92,000,000 imports 69,000,000 (mercury flow rate: 10 to 50mg)
Mercury cell	Mercury Battery, Mercury Oxide Battery
Thermometer / Sphygmomanometer	Thermometer: 680,000, Sphygmomanometer: 40,000
Medical material	Dental amalgam: 1.4 ton

※ Source: Ministry of Environment(2015)

치료용 아말감과 수은계측기에 대하여 우리나라는 현재까지도 제도가 미흡한 실정이다. 그리고 수은폐기물이 정화되지 않고 유해성분이 완전히 제거되지 않은 상태에서 매립되거나 재활용하는 사례가 발생하고 있다. 특히, 수은 관련 최악의 산업재해 사건으로 기록되게 된 남양전구 사건 역시 정화하지 않은 수은폐기물로 인한 피해자가 생겨나고 수은중독으로 건강상태가 악화되는 등 많은 피해를 놓고 있다. 따라서 국제 수은 협약에 대응하기 위해 수은 함유 제품의 실태조사 및 관리 방안의 마련, 수은 함유 폐기물의 적정 처리 개선 방안의 마련, 수은 함유 제품 대체품 보급 확대 및 개발 추진, 원자재 수은 관리 방안 마련 등 종합적인 관리대책 수립이 요구되고 있다.

5) 국내의 수은폐기물 처리방법

국내의 수은폐기물 처리방법의 경우 저가 수은 흡착제 개발 연구, 흡착탑을 이용하여 수은 제거기술, 플라즈마를 이용한 수은의 산화기술과 같은 연구가 수행되어지고 있다(Jurng, *et. al.*, 2002).

전력연구원을 중심으로 수행된 산업폐기물을 활용한 저가 수은 흡착제 개발에 대한 연구는 Pilot, 실증 시험이 수행되었으며, 배기가스 중 수은을 제거하기 위

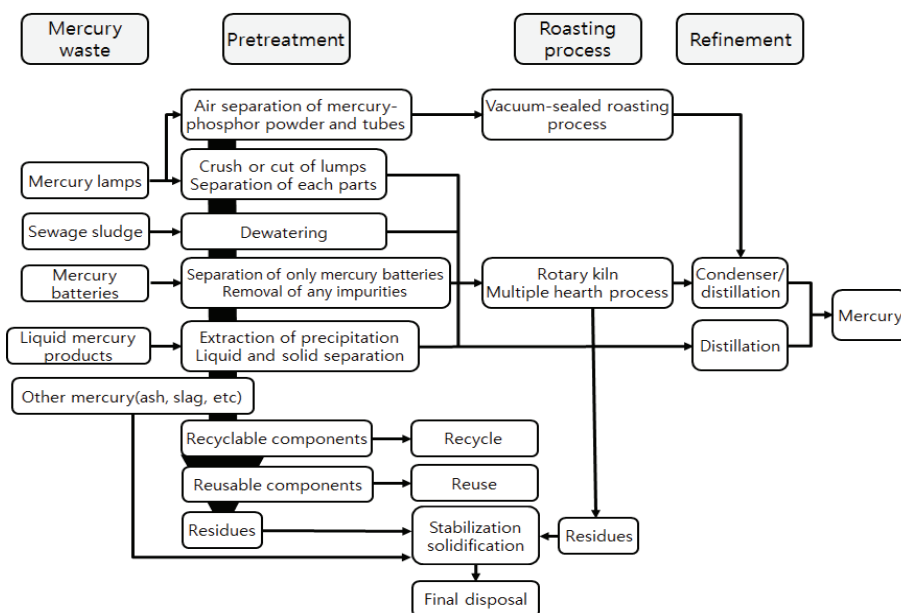
하여 산화 촉매장치의 개발 연구와 에너지 기술연구원과 공동으로 복합처리를 수행할 수 있는 장치의 개발과 연구도 수행되고 있다(Baek, 2003). 하지만 국내의 발전설비와 현장에서 바로 적용이 가능한 상용 기술 개발은 외국에 비해 아직 미치지 못하고 있기 때문에 실용적인 기술의 개발과 정부의 연구지원이 절실한 실정이다.

3. 수은폐기물 처리 및 재사용 방안

수은을 포함한 제품과 산업용 수은은 많은 국가에서 사용을 중단하고 있으며 우리나라에서도 에너지 소비를 줄일 목적으로 일반 형광등을 LED등으로 교체하는 것을 장려하고 있다. 그런데 그와 반대로 대량의 수은 포함 제품과 산업용 수은이 폐기물화 되고 있으며 많은 수은 폐기물들이 친환경적인 방법으로 처리되어 환경에 영향을 미치지 않도록 방지해야한다. 수은 폐기물을 처리하고 수은을 회수할 수 있는 친환경적인 방법은 아래와 같다(Nomura Kohsan Co. Ltd, 2009).

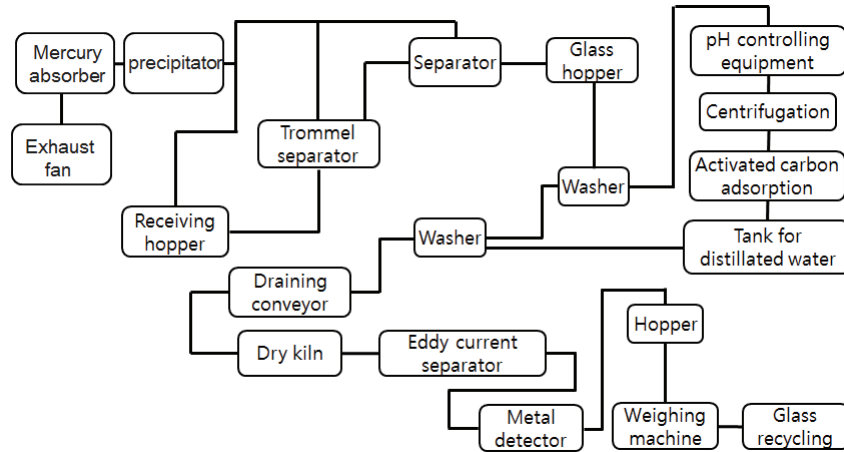
1) 전처리

수은 폐기물의 처리 흐름도는 전처리, 배소 공정, 정제로 구분할 수 있으며, 도식화 하면 (Figure 1)과 같다. 형광등은 (Figure 2)와 같이 전처리로서 기계 분쇄



※ Source: Nomura Kohsan Co, Ltd(2009)

Figure 1. Flow of mercury waste treatment



※ Source: Nomura Kohsan Co, Ltd(2009)

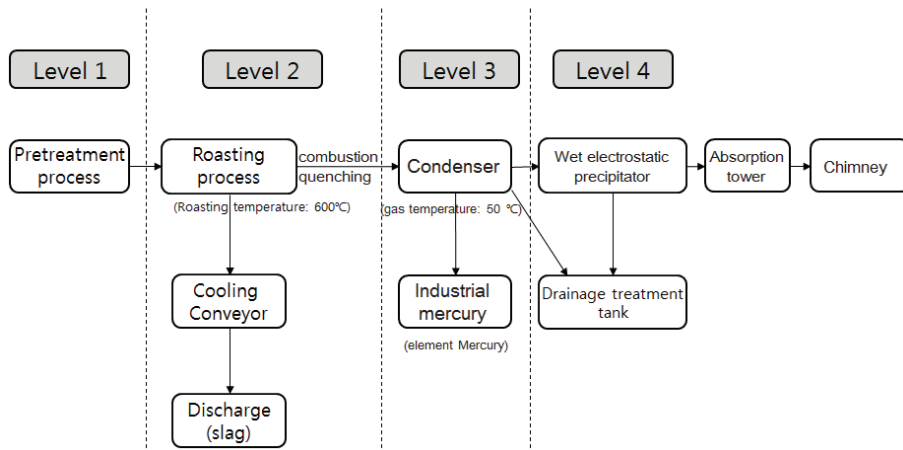
Figure 2. Recovering flow of mercury from fluorescent lamps-mechanical crushing

한 형광등에서 유출된 수은의 회수 흐름도로 사용이 끝난 전구를 분해하여 유리, 뚜껑, 수은으로 분리하여 기계 안에서 처리된다. 이공정은 전구를 밀폐된 분쇄 및 체거름실에 주입함으로 수행되며 뚜껑과 유리는 제거되어 재사용된다(Nomura Kohsan Co. Ltd, 2009). 그리고 수은을 재활용하기 위하여 수은 전지는 별도 수거, 분리되어야한다. 다른 전지와 함께 섞여서 분리 작업을 하면 분리 처리 효율이 매우 떨어지고 불순물이 발생하여 처리 시 문제가 발생한다. 그리고 가장 큰 문제는 유해 물질이 발생하기 때문에 기계적인 방법으로 크기 별로 선별해서 분류하는 것이 좋고 형광등 회수 흐름도와 공정은 동일하다. 또한 온도계, 기압계 등과 같이 액상 수은(원소수은)을 포함한 제품은 파손 없이 수거되

어야 하며, 파손될 경우 수은이 외부로 유출되어 환경적 피해를 낳을 수도 있다. 제품을 수거한 후 안에 들어있는 액상 수은을 추출, 감압 증류하여 정제해야 한다.

2) 배소공정

배소공정은 전처리 후 공정으로 직접적으로 수은의 불순물을 제거하여 분류하면 배소공정을 통해 슬래그, 대기방출, 원소수은으로 분류되어 수거하게 된다. 수은 회수 공정에 대한 단계별 순서는 아래 그림과 같다. 진공 배소 기술은 진공 열 공정은 전기로, 수냉 응축기, 진공 펌프, 그리고 활성탄 여과기로 구성된다. 수은 물질 분말은 감압 하에서 가열되고 이때 수은만 기화되고 재 응축되어 원소수은으로 회수된다(Muroya, 2010).



※ Source: 藤原梯(2014)

Figure 3. Mercury recovery process using roasting process



※ Source: Environmental(2014)

Figure 4. Types of roasting process

회전식 소성로는 전 처리된 산업 폐기물, 특히 플라스틱 폐기물 함량이 높은 폐기물뿐 아니라 가연성 수은 폐기물을 소각하는 데 쓰이며, 폐기물의 부피를 줄이고 중금속을 제외한 대부분의 유해 재료를 분해하여 무해한 물질로 변환한다. 수은 폐기물은 경사 회전식 소성로로 투입되고 회전운동(소성로 운동)을 하는 소성로 공정을 통과하여 재연소실에서 중금속을 제외한 폐기물 성분이 열복사(600-800°C)에 의하여 열분해 된 후 잔여물은 소성로의 뒷부분 끝과 소성로 후 공정에서 소각된다. 공정이 진행되는 중, 수은 폐기물에 포함된 수은은 600-800°C의 열복사에 의하여 수은 증기가 된다. 이렇게 생성된 수은 증기는 진공 분위기에서 냉각 지대로 이동되어 액체 상태로 응결한다. 고농도 수은이 함유된 폐 슬러지를 수은 함유 농도가 2,000mg-Hg/kg 이상의 시료를 사용하여 열적처리를 진행한 결과로 정량목표인 공정 배출 폐기물의 수은 함유 농도 5mg-Hg/kg를 달성하면서 수은 제거율 90%를 이룬다. 600°C 온도 조건의 실제 실험에서 약 20분의 체류시간 이후 시료 내에 있는 수은 함량을 분석해 보면 약 2.32mg-Hg/kg의 수은농도를 나타낸다(Yonsei University, 2014). 회수 및 재활용은 수은 폐기물을 열처리 과정에서 배출되는 수은 증기는 즉각 응축기로 보내져 냉각되어 응결된다. 응결된 수은을 수거하여 증류기에서 정제되어 재판매되거나 재사용 된다. 정제된 수은은 원자재로 거래되거나 수은을 포함한 제품으로 가공되어 판매된다. 이에

수은 정제 과정에서 오염물질 유출로 인한 피해가 발생하지 않도록 관리를 강화하고 재활용되는 수은의 경우 재활용 폐기물 원산지 표기 의무화해야 한다.

3) 배소공정 안정화 및 고형화를 위한 캡슐화 기술

수은 안정화 및 고형화는 가장 많이 쓰이는 수은 처리방법의 하나이지만 완벽하게 수은이 안정화 되는 것은 아니다. 하수슬러지, 소각로 재, 수은으로 오염된 액체, 수은으로 오염된 토양 등 다양한 수은 폐기물을 처리할 때 일반적으로 적용되며 침출이나 열탈착으로 수은을 분리하는 것은 어렵지만 안정화된 폐기물이 장기간 매립되어 있을 경우 다른 유기 화합물을 침출하는 것과 마찬가지로 수은을 침출하여 지하수로 유출 또는 대기 중으로 기화하게 되어 친환경적으로 처리되게 된다. 우리나라의 경우 수은 안정화를 위한 처리시설을 갖춘 대기업과 갖추지 못한 중소기업 간의 폐기물의 처리 비율이 문제가 되고 있다. 이에 각 기업 간 교류로 배소 공정을 통한 수은 폐기물 처리량을 비슷한 수준으로 맞춰야 될 것으로 생각된다.

그라우팅과 포틀랜드 시멘트 안정화는 가장 널리 쓰이고 있는 기중 하나로 접착성 재료를 사용하여 공정비용이 낮고 다양한 처분 조건에 적합하여 성능요구조건에 충족하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 접착성 재료로는 시멘트, 고로슬래그, 비산회, 석회, 규소 분진 등을 사용하여 내용물을 고정하고 각폐기물 특성을 향상하기



※ Source: Environmental(2014)

Figure 5. Mercury waste long-term storage and landfill

위해 다양한 첨가제가 사용된다. 그리고 유황 중합체를 이용한 안정화 기술은 폐기물을 고정하여 처리하는 캡슐화 처리중 하나이다. 수은을 포함한 폐기물에 유황 중합체 시멘트를 혼합하여 안정된 황화수은 화합물을 생성하고 원소 수은 상태로 침출될 수 있게 돕는다. 침출된 후 혼합 폐기물은 덩어리상태로 내부엔 안정화된 황화수은 이 캡슐화 되어 자리 잡게 된다(Adams, 2004). 황화폴리머 안정화 공정은 최종생성물의 표면적이 적고 암석 상으로 되어있어 수은 휘발과 용출이 억제되는 장점을 가지고 있다. 유황에 의한 안정화 개량 판이다. 생성물은 물에 매우 불용이고 부식 환경에 높은 내성을 나타내고 동결 융해 사이클에 강하며 기계적 강도도 높다. 공정 중에 휘발손실이 예상되기에 공학적 관리가 필요하다. 또 정제하는 폐기물의 체적은 대폭 증대한다. 마지막으로 수은 수요가 감소하고 수은 폐기물로부터 회수되는 수은의 양이 늘어나고 있기 때문에 많은 양의 수은을 저장소에 영구 저장되거나 친환경적인 방법에 의해 매립 될 것으로 생각된다. 그리고 수은 폐기물의 저장 용량을 충분히 확충하여 저장하는 것도 중요하지만 환경오염 우려가 없는 재사용 비율을 높여야 한다. 장기저장을 위한 수은의 안정화기술과 별개로 저장지역에서 수은이 유출되지 않도록 설비를 갖추는 것이 중요하다.

IV. 결론

수은에 처리에 관한 협약이 발효된다면 수은폐기물

회수 및 매립이 채택될 가능성이 높다. 이에 각 나라별 수은 피해 사례와 수은의 친환경적 수은 회수·처리 기술에 대해 알아보았다. 회수와 안정화 방법은 통상적으로 처리비용과 처리 난이도에 의해 결정될 가능성이 있지만 대부분의 수은처리가 안정화 후 저장 및 매립으로 처리하는 것을 알 수 있었다. 차후 한국도 친환경적인 처리 기술 개발 뿐만 아니라 지속적인 시설 운영을 위한 경제성 평가와 기술력 향상을 통해 친환경적인 수은 처리를 위한 몇 가지 결론을 제시하였다.

첫째, 기업들이 자발적으로 수은폐기물 재활용에 나선 수 있도록 인센티브를 강화하는 방법으로 법·제도를 정비해야 한다. 폐기물 배출량 감축, 순환제품 의무 사용 등 사업자에 대한 규제에만 지나치게 의존할 경우 오히려 자발적인 자원 재사용을 저해할 우려가 있고, 불법처분 등 부작용을 최소화하기 위해서는 기업들이 자발적으로 자원재사용에 동참할 수 있도록 유인책을 설계하고 실효성을 가질 수 있도록 이해관계자 및 시민 사회의 의견을 적극 반영하여 보완해야 한다.

둘째, 수은정제과정에서 오염물질에 의한 피해가 발생하지 않도록 관리·감독 기준을 강화해야 한다. 폐기물이 재활용 될 경우 재활용 폐기물 원산지 표기등 기준이 마련되어야 하고 법규를 정비하고 관리감독을 강화해야 한다.

셋째, 수은폐기물의 저장 용량을 충분히 확충하여 사용하지 않은 수은을 저장하고 환경오염 우려가 없는 재사용 비율을 높여야 한다. 기업에서 발표하는 처리가능

용량과 실제 처리 용량과의 괴리를 줄이는 한편 유·무형 진입장벽을 완화하여 신규 기술기업의 수은폐기물 시장 진입을 유도하고 대기업수준의 수은폐기물처리 기술을 갖춘 중소기업이 생겨날 수 있도록 기업 간 협약으로 불법폐기 없이 친환경적으로 환경을 살리고 공생발전할 수 있도록 건강한 폐기물 재사용 생태계 조성에 주력한다.

넷째, 폐기물 재사용과 관련 연구개발에 투자를 확대하고 자원순환형 산업을 새로운 성장동력으로 육성하는데 주력해야 한다. 국가적 차원에서 자원순환 관련 연구개발 투자를 확대함으로써 기술경쟁력을 확보하고 글로벌 자원순환 시장을 선점하고, 우수한 기술력을 기반으로 고부가가치를 창출할 수 있는 능력을 갖춘 기업을 선별하여 지원을 확대하여 자원 재사용 비율을 높여 환경을 지킬 수 있도록 노력해야 한다.

References

- Adams, J. W. Bowerman. 2004. *Sulphur Polymer Stabilization/solidification(SPSS) Treatability of Simulated Mixed-Waste Mercury Contaminated Sludge*. 511.
- Baek, Jum In, Hee Soo An, and Kyung Ryong Jang. 2003. Elemental Mercury Adsorption Characteristics of Mercury Sorbents. *Theory and Application of Chemical Engineering*.
- Certo, Samuel C. 1989. *Principles of Modern Management: Functions and Systems*. 4th(ed.). MA: Allyn and Bacon, Inc.
- Jeju Development Institute. 2014. *Introduction and Necessity of Collection System of Hazardous Waste in Jeju Area(Mercury)*.
- Jung, Jong Soo, Tai Gyu Lee, Gyo Woo Lee, Sung Jung Lee, Byung Hwa Kim, and Jochen Seier. 2002. Mercury Removal from Incineration Flue Gas by Organic and Inorganic Adsorbents. *Chemosphere*. 47(9): 907-913.
- Kim, Jae Young and Chung Hyun Park. 2015. Solid Waste Treatment and Countermeasures. *Scientific Bulletin 54th Issue*. 2: 45-90.
- Kim, Sang Man. 2017. A Review of the European Union's "Rules on Mercury" Legislation for the Implementation of the Minamata Convention. *Legal Studies*. 65: 1-23.
- Korea Environmental Industry & Technology Institute. 2016. *Trends in Environmentally Friendly Recovery and Treatment of Mercury Waste*.
- Lee, Sung Jun, Deepak Pudasainee, and Yong Chil Seo. 2008. Current Management Status of Mercury Emissions from Coal Combustion Facilities: International Regulations, Sampling Methods, and Control Technologies. *Journal Korean Society of Atmospheric Environment*. 24(E1): 1-11.
- Ministry of Environment. 2000. *Sewerage Maintenance Guidelines*.
- Ministry of Environment. 2014. *International Mercury Convention Response Plan*.
- Ministry of Environment. 2015. *Comprehensive Measures for Mercury Management*.
- Ministry of Environment. 2016. *Announcement Result of Heavy Metals Concentration in the Blood of the Nation*.
- Ministry of Strategy and Finance. 2016. *Waste Resource Management and Utilization Policies in Korea*.
- Muroya, M. 2010. NKC Has Started Mercury Recovering from Waste Fluorescent Lump. *NKK Giho*. 174: 84-85.
- National Institute of Environmental Research. 2007. *A Study on the Establishment of a Comprehensive Reinforcement System for Hazardous Waste in the Life*.
- National Institute of Environmental Research. 2011. *Technical Guidelines for Environmentally Friendly Management of Mercury Waste*.
- Nomura Kohsan Co.Ltd. 2009. *Treatment of Mercury-containing Waste at Itomuka Plant of Nomurakohsan Co. Ltd. Tokyo, Japan*.
- Putman, J. J. 1972. Quicksilver and Slow Death. *Natl. Geogr. Mag.* 144: 507.
- Rhee, Seung Whee, Hun Su Park, and Ho Sik Yoo. 2015. Effective Management of Mercury-containing Wastes According to the Status of Waste Fluorescent Lamps. *Environmental Policy Research*. 14(1): 135-158.
- Steffen, A. Douglas. 2007. A Synthesis of Atmospheric Mercury Depletion Event Chemistry Linking Atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 10837-10931.
- The Zero Mercury Working Group, Mercury Policy Project, Global Alliance for Incinerator Alternative. 2010. *Mercury Rising*

Redycling Global Emissions from burning Mercury-Added Products.

WHO. 2005. *Mercury in Health Care, Policy Paper.*

Yonsei University. 2014. *Survey on the Emission Status of Mercury-Containing Waste and Improvement of the System.*

藤原 梯. 2014. 水銀含有廃棄物処理及びリサイクルについて.

環境省. 2014. 水銀廃棄物に関する環境上適正な管理に関する検討会.

Korean References Translated from the English

국립환경과학원. 2007. 생활계유해폐기물의 종합관리체계 구축에 관한 연구.

국립환경과학원. 2011. 수은폐기물의 환경 친화적 관리를 위한 기술 지침서.

기획재정부. 2016. 한국의 폐기물 자원관리 및 활용정책.

김상만. 2017. 미나타협약 이행을 위한 유럽연합(EU)의 「수은에 관한 규칙」 입법안에 대한 고찰. 법학연구. 65: 1-23.

김재영, 박충현. 2015. 고품 폐기물 처리 및 대책. 학술원논문집. 54(2): 45-90.

백점인, 안희수, 장경룡. 2003. 수은 신 흡착제의 원소 수은 흡착특성. 화학공학의 이론과 응용.

연세대학교. 2014. 수은함유 폐기물의 배출실태조사 및 제도 개선 연구.

이승희. 2015. 폐형광등 현황에 따른 수은함유폐기물의 효율적 관리 방안. 환경정책연구. 14(1): 135-158.

제주발전연구원. 2014. 제주지역 생활계유해폐기물의 수거 체계 도입과 필요성(수은).

한국환경산업기술원. 2016. 수은폐기물의 친환경적 회수 및 처리기술 동향.

환경부. 2000. 하수관거 유지관리 지침.

환경부. 2014. 국제수은협약 대응계획.

환경부. 2015. 수은관리 종합대책.

환경부. 2016. 국민 혈중 중금속농도 조사결과 발표자료.

Received: Jul. 26, 2017 / Revised: Sep. 22, 2017 / Accepted: Oct. 11, 2017

수은폐기물의 관리 방안

국문초록 수은은 매우 독특한 특성을 가지고 있어 산업현장에서 매우 다양하게 사용되며, 대기, 토양 및 수생 환경으로 배출 될 시 독성이 사라지지 않고 생물 내에서 계속 축적되어 먹이사슬의 최상위 포식자인 인간에게 섭취되게 된다. 우리나라는 OECD 회원국 중 9번째로 수은 배출량이 높으며, 대부분의 수은폐기물은 다른 폐기물들과 함께 섞여 개발된 공간(수은을 폐기하기 위한 적재 공간)에 폐기되거나, 소각하는 등의 방법으로 처리하고 있어 친환경적이지 못하다. 이에 본 연구는 수은폐기물의 친환경적 관리를 위하여 수은폐기물의 분류방법과 관리방안을 제시하고자 하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었을 수 있다. 수은정제과정에서 오염물질에 의한 피해가 발생하지 않도록 관리·감독 기준을 강화해야 한다. 그리고 수은폐기물의 저장 용량을 충분히 확충하여 사용하지 않은 수은을 저장하고 환경오염 우려가 없는 재사용 비율을 높여야 한다.

주제어 : 수은폐기물, 친환경, 분류방법, 관리방안

Profiles **Jong Seok Park** : He received his Ph.D. from Chonnam National University Korea in 2012. Currently, he is a lecturer in Civil Engineering, Chonnam National University. A major area of interest is water crisis, climate change, water treatment, water quality modeling(victorypjs@jnu.ac.kr).

Kyoung Hoon Rhee : He received his Ph.D. from Missouri of State University USA. He is a professor of the Department of Civil Engineering at Chonnam National University. A major of interest is hydrological interpretation of streams, hydraulic analysis of fluid flow, environmental impact assessment(water@jnu.ac.kr).

Byoung Seok Moon : He received his Ph.D. from Chonnam National University. He is professor of the Department of Civil Engineering at Seonam University. Hydrologic interpretation of rivers, water quality modeling, and evaluation of river naturalness are the main areas of interest(moon7500@nate.com).

Hyo Beom Lee : He completed his Ph.D. in water resources/water engineering from Chonnam National University Graduate School and is currently working at the Ministry of Water Resources and Environment, Dongbu Engineering Co., Ltd. Areas of interest include water quality modeling and water resource(hblee58@naver.com).

Bae Seok Lim : Completed his Ph.D.(Water Resources/Water Engineering) at the Graduate School of Chonnam National University, and currently serves as Water Policy and Facilities Secretary of the Ministry of Land, A major area of interest is water crisis, climate change, water treatment, water quality modeling(soeklim@korea.kr).