

폐형광등 현황에 따른 수은함유폐기물의 효율적 관리 방안*

이승희** · 박헌수 · 유호식

Efficient Management System for Mercury-containing Waste according
to the Current Status of Spent Fluorescent Lamps

Seung-Whee RHEE** · Hun-Su Park · Ho-Sik Yoo

경기대학교 환경에너지공학과(Kyonggi University, Environmental Energy Engineering)

제출: 2015년 2월 13일 승인: 2015년 3월 18일

국문 요약

수은함유폐기물의 효율적인 관리방안을 마련하고자 국내 및 선진국의 유해성이 있는 폐형광등 관리 및 처리현황을 검토하였다. 국내 폐기물 관리법에서는 수은함유폐기물이라도 생활계에서 배출되면 생활폐기물로 분류하고 있으며 생활계에서 배출되는 유해성이 있는 수은함유폐기물에 대해서는 관리가 되고 있지 않다. 다만 일부 수은함유폐기물에 대해 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」에 따라 폐기물 부담금제도와 재활용의무대상품목에 포함되어 관리되고 있다. 따라서 폐형광등의 관리현황으로부터 수은함유폐기물의 별도의 관리방안에 수집 방안 확대와 고도 처리방법 등을 포함하였고, 이러한 수은함유폐기물의 수거에서 최종 처리되는 단계까지 주체별 역할에 대해 제시하여 더욱 효율적인 관리가 이루어지도록 하였다.

주제어 수은함유폐기물, 폐형광등, 폐기물관리체계, 개선방안

Abstract

An efficient management system of mercury-containing waste was designed by reviewing the management and treatment of spent fluorescent lamp in Korea and foreign countries. According to Waste Management Act in Korea, mercury-containing wastes from households are classified as municipal solid wastes even though mercury-containing wastes pose hazardous risks. In general, hence, mercury-containing wastes from households are not being managed properly because those wastes from households were not classified as specific wastes (or hazardous wastes). Some mercury-containing wastes are managed as a mandatory target item in waste charge system and Extended Producer Responsibility (EPR) system under Act on Promotion for Saving and Recycling of Resources. An efficient management plan of mercury-containing wastes can be derived with an improved collection system, designating disposal sites and advanced treatment facilities for spent fluorescent lamps. Finally, the

* 본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐금속유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 (과제번호 GT-11-C-01-070-0) 이에 감사드립니다.

** 주저자 · 교신저자 : swrhee@kgu.ac.kr

role of each agent involved from collection to disposal of mercury-containing wastes was suggested to establish the efficient management system for mercury-containing waste.

■ **Keywords** ■ Mercury-containing Waste, Spent Fluorescent Lamp, Improvement, Waste Management System

I. 서론

국민 문화의 수준이 향상되고 새로운 상품들의 사용이 활발해지면서 생활폐기물의 종류와 발생은 다양하게 나타나고 있다. 우리나라에서도 폐기물의 최소화과 재활용이 강조되면서 1995년 쓰레기 종량제 실시, 1회용품 사용억제 제도 등 폐기물 최소화과 재활용 촉진을 위한 보다 구체적인 정책수단이 도입되고 있다. 그리고 2003년부터 생산자책임재활용제도를 도입하여 수은함유폐기물인 폐전지, 폐형광등 등을 정책적으로 관리하고 있다.¹⁾

특히, 가정에서 배출되는 폐형광등은 수은을 함유하고 있으나 생활폐기물로 분류되어 소각 처리될 경우 대기오염을 유발하거나 불연성 폐기물로 대부분 매립 처분됐다. 매립처분된 이러한 폐기물은 토양과 지하수를 오염시키고 오염물질의 순환시스템에 의해 결국 우리가 섭취함으로써 궁극적으로 자연환경과 인간건강에 악영향을 미칠 것이다. 특히, 폐형광등에 포함된 수은은 대기에 존재하면 호흡기관으로 섭취될 수 있으며 지하수나 토양에 존재하면 음식물의 섭취로 인하여 인간의 건강을 위협할 수 있다.

수은에 의한 인간의 피해는 여러 유명한 사례가 있으며 그 중 일본의 미나마타 및 니이카타에서는 메틸수은이 축적된 어패류를 섭취함으로써 집단 유기수은중독이 발생하여 그 지역 이름으로 미나마타병이란 새로운 질병이 생겼으며, 이라크에서는 메틸수은으로 살균한 종자용 곡식을 빵의 원료로 사용하여 6,000여 명의 유기수은 중독환자를 발생시켰으며 이 중 450명의 인명피해를 내기도 한 사례도 있어 수은 중독에 의해 인간에 미치는 영향은 큰 것으로 조사되고 있다.²⁾

국제적으로 수은의 악영향으로부터 자연환경과 인간을 보호하고자 UNEP에서 수은에 대한 미나마타 협약을 2013년도에 채택하였고, 현재 128개국이 동의하였으며 10개

1) 국립환경과학원(2012), 「생활계 폐기물의 분류·수집·운반체계 관련 연구」.

2) LaGrega M. D., Buckingham P. L., Evans J. C.(2001), *Hazardous Waste Management, 2nd Ed.*

국이 비준하였다. 우리나라도 이 협약에 동의하였으며 2016년에 비준할 예정에 있다. 이 협약때문에 새로운 수은 광산의 개발은 금지되고, 사용되는 수은을 감소시키며, 수은이 대기로 방출되는 것을 관리하고, 소규모 금광에 수은을 사용하지 않도록 국제 규정을 수립하고 있다. 미나마타 협약으로 형광등에 수은 사용이 컴팩형광등과 60W 이하의 직관형 삼파장 형광등은 5mg 이하, 할로겐 형광물질을 사용하는 40W 이하의 직관형 형광등은 10mg 이하로 제한되며, 2020년부터는 형광등의 수출과 수입이 제한될 예정이다.³⁾

국내에서는 2007년 4월 「재활용가능자원의분리수거등에관한지침」이 개정됨에 따라 수은을 함유한 폐형광등에 대한 관리가 이루어져 왔다. 사업장 폐형광등 재활용에 대해서는 정책적인 강화 및 인프라 지원 등 보다 활성화를 위한 노력이 진행되고 있으나 가정(단독 또는 공동주택)에서 발생하는 폐형광등 분리수거 활성화를 위한 대책마련은 여전히 미흡한 실정이다. 현재 형광등 처리시설은 수도권(2,400만 개), 영남권(960만 개), 호남권(960만 개)으로 권역을 분리하여 설치되어 있으나 시설의 노후화와 재활용 기술의 부족으로 적절하게 운영되지 않고 있다. 또한, 2014년 말 (사)한국조명재활용협회가 해체됨에 따라 새로운 조명재활용협회가 구축되고 있으나 EPR (Extended Producer Responsibility) 규정에 의한 폐형광등을 처리하는 운영주체가 명확하지 않은 상태에 있다.

국내 형광등은 조명조합에 가입된 회원사에서 연간 약 1억4천만 개를 내수 판매하고 있다. 폐형광등 발생량에 대한 정확한 자료는 조사되고 있지 않지만 2008년 기준으로 연간 1억4천만 개 정도 발생하는 것으로 추정하고 있고 가정에서 약 33%, 사업체에서 약 67%가 배출되고 있는 것으로 파악하고 있다.⁴⁾

국내 폐형광등 재활용률은 발생량의 30% 이하이고 재활용 시설도 외국에서 도입하여 실시하고 있으며 다른 조명기기에 대해서는 전혀 이루어지지 않고 있다. 조명기기 중 저압형 방전램프형은 현재 전체 폐조명기기의 대부분을 차지하고 있으나 조명기기의 수명 및 능력향상과 소형 조명기기화 추세에 의해 점차 기타 특수형 방전램프와 LED 등 차세대 필라멘트램프의 사용 증가가 예측된다. 따라서 방전램프와 필라멘트램프를 모두 재활용할 수 있는 폐조명기기 재활용에 대한 기술개발이 필요한 실정이다.

3) UNEP(2013), *Minamata Convention on Mercury Text and Annexes*.

4) 이승희, 민달기, 전태원(2008), “국내 생활계 유해폐기물 발생 및 관리에 관한 현장조사”. 『한국폐기물학회지』 25(5): 441-446.

폐형광등과 같은 수은함유폐기물은 인체에 매우 위해성이 높은 수은을 함유하고 있어 폐기물로 발생하는 과정에서 다양한 경로를 통해 환경과 인간에게 위협을 줄 수 있어 안전한 처리와 재활용을 위해서는 더 철저한 관리체계가 필요하다. 외국에서는 폐형광등을 포함한 수은함유폐기물에 대하여 별도의 규정이나 재활용에 기초한 관리체계를 구축하여 관리하고 있으나 국내에서는 아직 폐기물의 품목별, 배출원별 수거, 재활용, 처리 등 수은함유폐기물 흐름의 전 과정에 대한 검토가 미흡한 실정이다.

따라서 국내와 일본, 미국, 독일 등 선진국의 수은함유폐기물인 폐형광등 관리 및 처리공정 현황을 기반으로 국내 수은함유폐기물에 대한 별도의 관리방안을 도출하고자 하였으며, 폐기물의 흐름인 발생, 수집, 운반 및 처리 체계의 효율적인 관리방안을 마련하고자 하였다.

II. 폐형광등의 관리 및 처리공정 현황

1. 국내 폐형광등 관리 및 처리공정 현황

1) 국내 폐형광등 관리 현황

현재 국내에서 형광등을 생산하고 있는 기업체는 없으며, 2010년 한국조명재활용협회에 등록된 회원사는 34개사로 형광등을 수입하여 판매하고 있다. 이러한 형광등의 수입, 판매는 폐형광등의 발생에 직접적으로 영향을 주고 있으나 형광등 수입사와 판매사가 한국조명재활용협회에 가입을 하지 않고 있어 처리에 대해서는 의무를 회피하고 있어 폐형광등 재활용률이 높지 않다. 폐형광등 발생량은 2004년도까지 조사되어 추이를 나타내었으나 2004년도 생산자책임재활용 품목으로 포함되면서 재활용 의무기준이 업체별 출고량으로 이루어져 폐형광등 발생량에 대한 통계는 주요 관심사가 되지 않고 있는 실정이다. 형광등의 생산량은 큰 변화는 없지만 꾸준히 증가하는 추세를 나타내고 있으며 2013년 생산량은 1억 5천 6백만 개 정도로 추정될 수 있다.⁴⁾ 가정에서 배출되는 폐형광등은 <그림 1>에서와 같이 각 지자체에서 분리 및 수거하여 처리장까지 운송하고 있다. 2004년부터는 생산자책임재활용제도 즉 EPR에 의해 형광등 생산업체를 중심으로 한국조명재활용협회에 의해 폐형광등이 관리되고 있으며, 정부청사를 비롯한 대형건물 및 수도권 일부 지역에서 배출되는 폐형광등은 따로 폐형광등재

활용공사(주)에서 처리하고 있다. 폐형광등 처리시설은 수도권(2,400만 개), 영남권(960만 개), 호남권(960만 개)으로 권역을 분리하여 설치되어 운영하고 있으며, (사)한국조명재활용협회에서 2014년까지 거의 모든 직관형과 기타형의 형광등을 EPR 규정에 따라 위탁 처리하고 있었다. 국내에서는 폐형광등에 대한 관리체계 구축에 대한 방안이 생산자책임재활용제도(EPR)에 의하여 생활폐기물과 사업장폐기물을 대상으로 이루어지고 있다. EPR 제도는 제품의 설계·생산 단계로부터 폐기물의 발생량을 원천적으로 줄이고 재활용을 확대하여 자원순환형 사회를 구축하기 위한 제도이다. 폐형광등은 미량의 유해물질인 수은이 함유된 폐기물로써, 재활용을 위해서는 안전성이 확보된 환경적 재활용 방안이 필요한 폐기물이다. 환경부는 2000년부터 협약을 체결하여, 시범사업기간을 걸쳐 2004년 EPR의 한 품목으로 형광등을 도입함에 따라, 주체별 역할이 <표 1>과 같이 분담되어 있다.⁵⁾

국내 폐형광등의 재활용은 2010년 기준 연간 약 3,500만 개가 이루어지고 있는 것으로 나타났다. ((사)한국조명재활용협회, 2011) 형광등의 개당 무게를 약 0.2kg으로 가정하면 연간 약 7,000ton의 폐형광등이 재활용되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 폐형광등의 구성성분 중 유리의 비율이 약 80~90%로 대부분을 차지하고 있으므로 연간 최소 약 5,600ton 이상의 유리가 재활용되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 폐형광등에 포함된 알루미늄, 철, 구리 등의 유가금속과 플라스틱류도 재활용이 가능하여 자원 순환에 크게 기여할 것으로 판단된다. 폐형광등을 비롯한 폐조명기기의 재활용과 자원회수를 통해 온실가스의 발생량 저감에도 크게 영향을 미칠 수 있다. (사)한국조명재활용협회와 조명재활용공사(주)에서 화성공장에 독일의 Herbon 시스템과 스웨덴 MRT 시스템을 합병하여 사용하고 있으며 경북 칠곡공장과 전남 장성공장에 독일의 Herbon 시스템을 이용하여 일부의 폐형광등을 재활용하고 있으나 수은처리 및 유가금속 회수에 문제점이 있다. 따라서 폐형광등을 포함한 폐조명기기로부터 수은 등의 유해물질을 안전하게 처리하고 유가물질을 회수하는 국내 재활용 기술개발이 필요하다.⁶⁾

5) 한국환경산업기술원(2014), 「폐조명기기로부터 유가자원 회수 및 무해화 기술개발」.

6) Korea Institute of Lighting Recycling Association(2011), *Recycling of domestic waste fluorescent lamps*.

그림 1 국내 수은함유폐기물 수거처리 체계 현황(폐형광등)

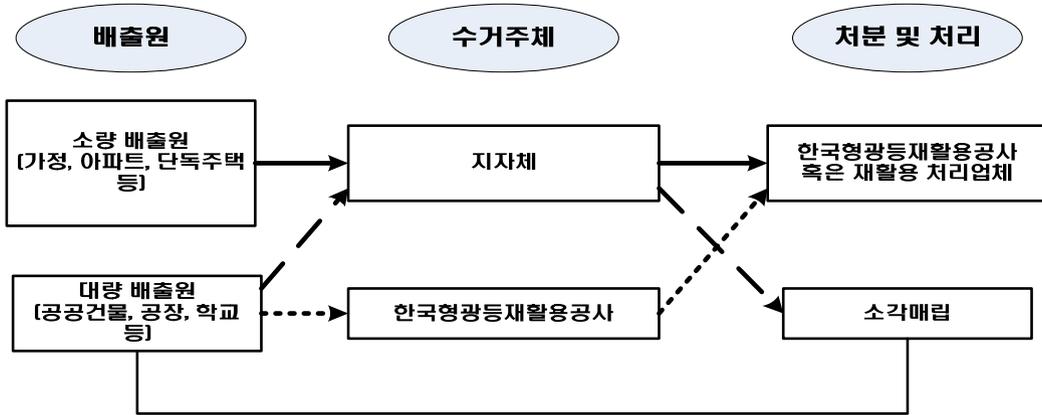


표 1 EPR 제도 관련 형광등 관련 주체별 역할

주체	역할
생산자	<ul style="list-style-type: none"> - 가정용 폐형광등 처리비용 부담 - 폐형광등 재활용 시스템(수거·운송·처리 관련) 구축
지자체	<ul style="list-style-type: none"> - 가정배출자의 분리수거함 확충 - 가정배출 폐형광등의 수거 및 운송 (단, HID의 경우 처리비 별도) - 관할구역 매립·소각장에 사업장 폐형광등 반입을 규제 - 특별관리대상 사업장 관리(명단확보) 및 점검 <ul style="list-style-type: none"> → 발생량에 준한 배출량 및 계약을 통한 최종처리를 확인 - 년 1회 관련 점검실적을 환경부 장관에게 보고 - 지역 내 발생량 및 분리수거량을 언론매체에 공표
가정배출자	<ul style="list-style-type: none"> - 지자체의 분리수거함에 분리배출 의무화 (요령 : 포장을 벗기고 깨지지 않게 배출)
대량사업장 (폐기물배출자)	<ul style="list-style-type: none"> - 깨지지 않게 분리 보관 (보관함 구비) - 수집·운송·처리를 재활용 가능자(한국조명재활용공사)에게 위탁 (계약을 체결)하여 안전처리 <ul style="list-style-type: none"> → 미 이행시 과태료 100만 원 이하 (자촉법 41조 ②의 1) - 지자체의 지도·점검에 성실히 이행
환경부	<ul style="list-style-type: none"> - 폐형광등 재활용 관련 제도전반 지원 - 관리·감독

국내 형광등에 사용되는 유해 중금속인 수은의 양(40W 직관 형광등 기준 평균 약 25mg)은 연간 약 3.5톤(형광등 1억 4천만 개 기준)으로써 이를 적정 처리하지 않고 방치할 경우 환경오염을 유발할 수 있고 인간생활 및 자연환경에도 큰 피해를 줄 수 있

다. 형광등에 포함되어 인간과 환경에 문제를 유발하는 수은은 형광등의 파쇄 시 대기 중으로 발생되어 대기오염에 의한 호흡기관으로 흡입될 수 있으며, 매립 시 토양 및 지하수 오염을 동·식물 등에 잔류하여 섭취에 의해 인간의 건강을 위협할 수 있다. 따라서 폐형광등을 재활용하거나 처리하기 위해서는 유해성을 제거하는 안정성 확보가 필요하다.

국내에서는 수은 배출허용기준으로 <표 2>와 같이 여러 관련 규정에서 수은농도를 규제하고 있으며 폐형광등 처리시설에 관련된 규정으로는 「대기환경보전법」이 가장 근접하고 「폐기물관리법」에서는 용출시험을 기준으로 규정하고 있다. 「대기환경보전법」에서는 배출시설에 대한 규정이 중요하며, 배출시설로는 소각처리 시설, 고형연료 사용제품시설, 시멘트 소성시설, 발전시설(고체연료 사용시설), 1차금속 제조시설 중 소결로, 그리고 그 밖의 배출시설에 한하고 있으며, 이러한 배출시설에 대한 규정은 <표 2>에 나타내었다. 그 밖의 배출시설은 증발시설, 농축시설이나 전조시설 및 정제시설 등으로 처리능력과 동력 20마력 이상의 분쇄 및 파쇄시설에 의해 결정된다. 폐형광등 활용시설은 증발시설, 농축시설이나 전조시설 및 정제시설이 아니므로 처리능력과 관련이 없이 배출시설에 포함되지 않는다.²⁾

표 2 국내 수은 관련 규정과 배출허용 기준

규제법령	규제기준 구분	배출허용 기준
환경정책 기본법	수질환경기준	- 하천, 호소 : 검출되지 않아야 함 - 해역 : 0.005mg/L 이하
대기환경 보전법	수은화합물 배출허용기준 (가스상)	- 폐수·폐기물·폐가스 소각처리 시설 및 고형연료제품 사용시설 일반배출시설 : 0.08mg/Sm ³ 이하, 특정배출시설 : 0.03mg/Sm ³ 이하 - 시멘트·석회·플라스틱 및 그 제품 제조시설 중 시멘트 소성시설 일반배출시설 : 0.08mg/Sm ³ 이하, 특정배출시설 : 0.05mg/Sm ³ 이하 - 발전시설(고체연료 사용시설), 1차금속 제조시설 중 소결로 일반배출시설 : 0.05mg/Sm ³ 이하, 특정배출시설 : 0.03mg/Sm ³ 이하 - 그 밖에 배출시설 일반배출시설 : 2mg/Sm ³ 이하, 특수배출시설 : 1mg/Sm ³ 이하
수질환경 보전법	배출허용기준	- 청정지역 : 0.001mg/L 이하 - 가지역, 나지역, 특례지역 : 0.005mg/L 이하
	방류수 수질기준	- 0.005mg/L 이하
폐기물 관리법	폐기물관리법 시행규칙	- 0.005mg/L 용출액 (0.005mg/L or 5ppb)

규제법령	규제기준 구분	배출허용 기준
토양환경 보전법	토양오염 우려기준	- 1지역 또는 생활용수 : 4mg/kg 이하 - 2지역 또는 농어업용수 : 10mg/kg 이하 - 3지역 또는 공업용수 : 20mg/kg 이하
	토양오염 대책기준	- 1지역 또는 생활용수 : 12mg/kg 이하 - 2지역 또는 농어업용수 : 30mg/kg 이하 - 3지역 또는 공업용수 : 60mg/kg 이하
	지하수 수질기준	- 1지역 또는 생활용수 : 0.001mg/L 이하 - 2지역 또는 농어업용수 : 0.001mg/L 이하 - 3지역 또는 공업용수 : 0.001mg/L 이하
먹는물 관리법	먹는물 수질기준	- 0.001mg/L 이하
산업안전 보건법	작업환경 유해물질의 허용농도기준	- 혈중수은 금속, 무기수은 : 3.5 μ g/dL 미만, 알킬수은 : 2 μ g/dL 미만 - 요중수은 금속, 무기수은 : 100 μ g/dL 미만, 알킬수은 : 20 μ g/dL 미만

2) 국내 폐형광등 처리공정 현황

국내에서는 독일의 Herborn GmbH 기술에 의해 최초로 수도권 화성, 영남권 칠곡, 호남권 장성의 처리시설에서 처리하고 있으며, 2006년도 이후 수도권 화성의 폐형광등 설비 공정은 기존처리 시설에 MRT 시스템을 보완·개선하여 처리 사업장에서 가동, 운영하고 있다. 또한, 형광등의 수거운반에서 중요한 수집장치 개발로 수집과 운반과정에서 파손으로 인한 수은 중독의 위험성을 방지하고 자원회수를 높일 수 있는 폐형광등 수집장치와 관련된 기술이 개발되어 있다.²⁾

폐조명기기 재활용 시 파쇄 공정에서는 로올러를 이용한 파쇄 공정을 활용하고 있으며 분리공정에서는 금속분리기(Metal Separator)를 이용하여 금속과 비철금속을 분리하고 있다. 또한, Roast를 이용하여 수은회수와 습식 안정화 기술을 활용하여 수은을 제어하고 있으며, Dust Collector, A/C 흡착탑 등으로 수은 외 유리, 알루미늄, 금속성분, 플라스틱, 기타 물질을 처리하고 있다. 폐형광등은 현재 경기도 화성, 경북 칠곡, 전남 장성 등에서 주도적으로 처리하고 있다. 특히 경기도 화성의 수도권 처리사업장은 독일 Herborn 사의 기존설비에 MRT 시스템을 접목하여 설비를 보완, 개선하고 형광등의 각 특성을 고려하여 국내에 적합한 공정을 개발한 폐형광등 처리 사업장으로 5,000~6,000개/hr의 처리 용량을 가지고 있다. 이 시설에서는 각 형태별 폐형광등의 처리가 가능하도록 자동투입장치를 개선하였고, 정렬투입, 1차 파쇄, 분쇄·분리로 이루어

어지는 일렬 3단 파쇄장치, 철의 분리가 가능하도록 전자석 분리를 이용하여 분리·선별기를 개선하였다.⁷⁾

또한, 국내에서는 2000년 11월 형광등 생산자들 간 자발적 협약으로 설립된 형광등 재활용협회에서 EPR 시스템에 의해 2004년부터 폐형광등 수거시스템이 구축되어 있다. 현재 폐형광등 처리는 한국조명재활용공사에서 2014년까지 재활용하였으며, 수은이 배출되는 형광등을 재활용하는 업체는 20마력 이하의 장치를 사용하고 있으므로 수은 배출농도 규정이 적용되는 배출시설 업체에 포함되지 않기 때문에 현재의 국내 규정에 의해 수은 배출농도의 적용이 어렵다. 따라서 20마력 이하의 장치를 사용하더라도 수은함유폐기물을 처리하는 시설에 대해서는 배출시설 중 특수시설에 포함시켜 관리하도록 하고 전처리, 중간처리시설 그리고 최종처분시설에 대한 배출수은 규정을 시급히 마련할 필요가 있다.⁸⁾

국내에서의 처리공정인 한국조명재활용공사(주)의 폐형광등 재활용 공정설비는 형광물질을 회수하기 위하여 자동 공기분사기에 유입시켜 형광분말을 흡입하여 회수한 후 형광분말 포집장치에 포집시킨 후 수은 증류기에 의해 수은을 회수한다. 그러나 이러한 설비에서 수은의 제거가 완전하게 이루어지지 않아 재활용 처리된 후의 형광분말과 유리에서 기준 이상의 수은이 발생되었으므로 이러한 설비의 개선이 필요한 상황이다. 한국조명재활용공사(주)에서는 배출되는 수은가스를 별도의 특수한 활성탄에 의해 포집하고 있으며 이는 선진국에서도 수은증기에 대해서 활성탄 흡착방식을 사용하는 것이 일반화되어 있다.⁵⁻⁷⁾

국내 폐형광등의 재활용기술은 2011년 이전에는 폐형광등의 수집과 파쇄기술에 대한 기술 개발이 이루어진 상태이며 2011년부터 폐형광등 재활용기술 개발이 이루어져 원천기술을 확보하는 연구를 수행 중에 있다. 폐형광등 내의 수은 함유율이 낮고, 취급의 위험성으로 기술의 한계가 나타나고 있어 공개된 기술을 이용하여 상업화된 예가 거의 없으므로 폐형광등 재활용 시설 분야에 대한 국가차원의 지원이 요구된다. 특히 EPR 대상 품목의 재활용 기술이 폐형광등에 있어서는 수은의 함유 등 유해한 중금속 때문에 처리 시설의 설치 및 가동기술의 현장 적용 시 시설 설치 입지 확보와 주민 동의가 가장 어려운 점으로 나타나고 있다.

7) Rhee, S. W, Park, H. S(2013), "Mercury Distribution of Major Components from 3-banded and General Spent Fluorescent Lamp", *Journal of Korea Society of Waste Management*, 30(3): 265-271.

8) Rhee, S. W, Choi, H. H., Park, H. S(2013), "Performance evaluation of material separation from spent fluorescent lamps using the thermal end-cutting method", *Springer*, 15(4): 503-509.

2. 선진국의 폐형광등 관리 현황

1) 미국

미국의 경우 폐건전지, 온도계, 폐조명기기 등을 Universal Waste(UW)로 규정하고 있으며 이러한 폐기물은 형광등, 버튼형 건전지, 자동온도조절장치, 온도계와 기타 의료장비, 압력계, 스위치 계전기(Relay)와 치과의 기기들이 포함된다.⁹⁾ 미국의 여러 주에서는 수은함유 제품의 판매를 금지하고 제품 표시(Labelling)을 의무화하며 수은함유 제품의 수집, 재활용 프로그램을 수행함으로써, 폐기물 속의 수은의 양을 줄이기 위한 법안을 수립, 통과시켰다. 형광등 회수 및 재활용은 14개 주에서 적용하고 있고 20개 주에서는 수은에 대한 규정을 법제화하고 있다. 조명과 수은 재활용업체 협회(Association of Lighting and Mercury Recycler)에 따르면 2003년도 37개소의 재활용 시설에서 23.3%의 재활용을 나타내고 있으나 2010년 이후에는 60개소에서 매년 회수량의 약 85%의 재활용을 하고 있다. 그리고 미국에서의 Mercury Export Ban Act(MEBA)과 Global Mercury Partnership을 2008년 1월부터 시행하고 있으며 그동안 선진국인 미국에서 많은 수은을 후진국으로 수출하여 그곳에서 금광을 캐내기 위한 수단으로 사용하여 왔기 때문에 이를 금지하는 강력한 규정을 제정하였다.¹⁰⁾

미국 연방 EPA(Environmental Protection Agency)와 Illinois EPA에서의 형광등 관련 규정을 <표 3>에 나타내었다. Illinois EPA 규정은 발생원과 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 농도에 대해서는 연방정부와 같으나 처리방법과 다른 사항에 대해서는 연방 규정보다도 더 엄격한 규정을 적용하고 있다. 한 달에 유해 폐기물 100kg 이하 또는 급성 유해폐기물 1kg 이하를 발생하는 소규모 발생원에 대해서는 규정 예외사항에 의해 관리대상에서 제외되고 있으며 TCLP 용출시험 농도규정은 0.2ppm로 규정하고 있다.

또한, 미국에서 수은에 대한 관련규정은 <표 4>에 나타내었으며 무기수은과 유기수은으로 구분하고 세부기관과 주(State)에 따라 수은농도 규정을 다르게 하고 있다. 독성물질과 질병등록청(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR)에서 무기수은의 최소위해수준은 $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이나 직업안전과 보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)에서 무기수은의 노출한계는 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 높은

9) EPA(2012), *Code of Federal Registrations Title 40 – Protection Environment, Part 273*.

10) EPA(2008), *Public Law 110-414 Mercury Export Ban Act*.

폐형광등 현황에 따른 수은함유폐기물의 효율적 관리 방안

편이다. ATSDR에서 유기수은의 최소위해수준은 $0.3\mu\text{g}/\text{kg}$ 이고 EPA에서의 유기수은의 기본정량 (Reference Dose, RfD)는 $0.1\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ 로 매우 낮은 편이다. 또한, 미국 식약청(Food and Drug Administration, FDA)에서의 유기수은 기준농도는 물고기를 기준으로 1ppm으로 되어 있다.⁹⁾

표 3 미국 연방 EPA와 Illinois EPA에서의 형광등 관련 규정

Jurisdiction	Generator exemption (CESQG)	Where can waste from CESQG go?	Can the waste be declared non-hazardous, based on TCLP?	Other stringency or exemptions?
Federal EPA	Generators producing less than 100kg (220pounds) of hazardous waste(HW) or 1kg acute HW in each month, including all HW generated. CESQGs are exempt from federal rules, but not exempt from liability (40 CFR 261.5)	Waste may go to any municipal solid waste landfill (MSWLF)	Wastes that test less than 0.2mg/l soluble mercury are not considered hazardous under federal rules.	Crushing can only be done by generator (40 CFR 262.34); crushed waste that is not UW- must be managed as RCRA HW. Crushing not allowed within federal UWR, but may be within State UW regulations. No one may crush third-party lamps without treatment authorization [1]. No mobile treatment units.
Illinois	Same	Waste must go to RCRA Sub-C facility or state equivalent	Same	Crushing by generator allowed as UW (Universal waste).

표 4 Mercury regulation in USA

Type	Description
Inorganic mercury	<ul style="list-style-type: none"> ATSDR : Minimal risk level(MRL) - $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ OSHA : Permissible exposure limits(PEL) - $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ ACGIH : Threshold limit value(TLV) ; TWA - $0.05\text{mg}/\text{m}^3$
Organic mercury	<ul style="list-style-type: none"> FDA : 1 ppm in commercially harvested fish (e.g. fish) FDA : Action level - $0.47\mu\text{g}/\text{kg}$ per day ATSDR : Minimal risk levels(MRL) - $0.30\mu\text{g}/\text{kg}$ Washington State : Total daily intake - $0.035 \sim 0.08\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ EPA : Reference dose(Rfd) - $0.1\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ (In 1997 the EPA estimated that 7% of women of childbearing age in USA > RfD of $0.1\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$) 41 states have issued over 2,000 fish consumption advisories related to mercury

2) 독일

독일에서는 LVG, Herborn, Werek를 비롯한 몇 개의 폐형광등 재활용 회사에서 폐형광등 재활용시설을 제작하고 있으며 세계에서 가장 우수한 형광등 재활용 시스템을 갖추고 있는 나라로 평가받고 있다. 폐형광등은 1993년도까지 주로 매립처분에 의해 처리되었으나 1996년 생산자책임재활용제도를 실시하기 위해 시행된 「순환경제기본법」의 전기/전자폐기물에 관한 명령에 포함되어 발생량의 70~80%에 달하는 5~6천만 개의 폐형광등이 재활용되었다.

독일의 Herborn 폐형광등 재활용 시스템은 작업장 내·외의 수은 농도를 Control Room에서 Monitoring 함에 따라 수은 외부 누출 시 즉시 조치할 수 있으며 작업장 환경 상태도 쾌적하게 운용할 수 있는 시스템을 보유하고 있다. 투입장치로는 Auto Feeding 장치가 있으며 40W(32m/m) 기준으로 약 1,000개들이 Container를 기계 장치에 올려놓으면 자동 투입 후 처리되는 시스템을 가지고 있어 작업 능률 향상 및 작업자가 설비에서 멀리 떨어져 작업할 수 있다. 파쇄 분리 후 배출 처리과정에서 유리는 적절한 진공상태인 Chamber로 이동 후 유리에 부착되어 있는 미세 잔류수은을 증발 제거하기 위하여 가열 오븐(500~550℃)을 통과하여 처리하는 시스템으로 파쇄 분리 후 유리 부분에 부착되어 있는 미세 수은까지도 가열 오븐을 통과 처리하는 과정을 거침에 따라 보다 완벽하게 수은을 처리할 수 있다.¹¹⁾

미국과 독일에서 대기배출시설에 대한 수은배출허용기준은 <표 5>에 나타난 바와 같고 미국에서의 배출시설은 폐기물 소각시설과 보일러를 중심으로 나타내었으며 그 밖의 시설로는 유해폐기물 소각시설, 시멘트 소성로를 들 수 있다. 독일에서도 배출시설은 폐기물 소각시설과 보일러를 나타내었으며 수은배출허용기준을 30분 기준과 24시간 기준으로 분리하고 이를 각각의 배출시설에 대해서 다른 기준을 적용하고 있다. 수은배출허용기준은 폐기물 소각시설에 대한 30분 기준으로 0.05mg/m³을 적용하고 있으나 보일러에 대해서는 0.06mg/m³로 약간 높게 적용하고 있다. 그러나 24시간 기준으로는 폐기물 소각시설과 마찬가지로 보일러 시설에도 0.03mg/m³을 적용하고 있다.¹²⁾

11) Schnurer H(2001), *Waste Management Policy in Germany : the effects of new European directives and implementation statue of waste law projects in Germany*; Waste Management Directorate to the Federal Ministry for Environment, Germany.

12) EPA(2007), *Household hazardous waste collection*.

표 5 국외 대기배출시설에 대한 수은배출허용기준

Facility	US EPA	Germany	
		30min average	24h average
MWI ^[1] Waste incineration and co-incineration ^[2]	0.080mg/dscm ^[5] or 85% reduction	0.05 mg/m ³	0.03 mg/m ³
Common boiler ^[3] (CPP) ^[4]	0.0020-0.0221 ng/L	0.06 mg/m ³	0.03 mg/m ³
All facility (HWI, Cement kilns, burning waste)	ES : 130µg/dscm(HWI) NS : 8.1µg/dscm(HWI) ES : 120µg/dscm(CK) NS : 120µg/dscm(CK)	-	-

- 주: 1) Rule and Implementation Information for Large Municipal Waste Incinerators
 2) Ordinance on Waste Incineration and Co-Incineration - 17. BImSchV
 3) Ordinance on Large Combustion Plants and Gas Turbine Plants- 13. BImSchV
 4) Standards of Performance for Electric Utility Steam Generating Units for Which Construction is Commenced After September18, 1978 (part 60 subpart Da)
 5) dscm: dry standard cubic meter

3) 스웨덴

스웨덴에서는 2001년 7월 1일부터 전기전자제품에 대한 생산자책임제도를 실시하였다. 이 제도는 소비자들이 새 제품을 살 때, 같은 수의 현 제품을 반환해야 한다는 것이다. 생산자는 무료로 제품을 회수하고 처리해야 한다. 이 제도에 포함되는 전기전자제품은 10개의 범주로 구분되고 형광등은 이 범주 중 하나에 포함되어 있다. 생산자책임제도에서 모든 생산자는 신상품이 팔린 곳에서 폐기물을 회수할 의무를 가지며 신상품을 구입하지 않고 폐기물을 처리하길 원하는 경우, 배출자가 비용을 부담하여 폐기물을 적정 처리할 의무가 있다. 생산자는 소비자에게 무료로 폐기물을 회수한다고 공지하여야 하고 스웨덴 환경부에 필요한 모든 정보를 제공해야 할 의무가 있으며 이를 이행하지 않았을 경우에는 생산자에게 벌금을 부과한다. 스웨덴은 1979년 조명기기 제조업체인 Lumalampn회사에 의해 수은함유폐기물을 처리하는 MRT시스템이 개발되었으며 이 방법은 End-Cutting 장치로 이루어진 파쇄기와 Sieving Unit를 사용하여 비철금속부분과 유리를 분리하고 형광등 내부의 분말을 증류 처리하여 수은을 분리, 회수하는 공정으로 이루어져 있다.¹³⁾

13) European Commission -Directorate- General Environment(2002), *Study on Hazardous household waste(HHW) with*

스웨덴의 MRT 시스템에서는 시간당 약 4,000개의 폐형광등을 10mm 크기로 파쇄하고 분리장치를 사용하여 유리(90%)와 금속류(5%)로 분류하고 형광물질과 혼합되어 있는 유리분말가루(5%)를 처리용량 100kg(16시간 소요)인 수은증류장치의 사용에 의해 수은을 회수하고 있다. MRT 시스템에서 발생하는 유리는 주로 매립을 하다가 최근에 샌드블라스터의 원료로 사용하고 있다.

4) 일본

일본에서는 일반조명광원 중 약 60%가 형광등이며, 생산개수는 연간 약 4억 5천만 개의 형광등이 사용되고 있으며, 이 중 가정계에서 2.7억 개, 사업계에서 1.8억 개가 사용되고 있다. 사용되고 회수된 폐형광등은 매년 4천만 개가 재활용되고, 4.1억 개는 파쇄·매립되고 있다.

폐형광등의 재활용율은 약 10% 정도로 2000년 기준 일본 3,232개 지자체(市町村) 중에서 약 700개 지자체가 폐형광등을 분리수거하고 있으며, 각 공장이나 사업소에서 분리 배출하여 재활용하고 있다. 각 공장이나 사업소에서 폐형광등을 회수하는 이유는 ISO 14000's 계열에 대응하거나 환경회계 또는 환경감사와 연관되어 있기 때문이다. 수은회수를 고려하지 않고 유리만 파쇄하여 재활용하는 것을 포함하면 폐형광등의 재활용률은 어느 정도 증가하지만, 여전히 대부분의 형광등은 파쇄되어 매립되거나 소각되고 있다.

일본은 폐형광등에 관해서 특별한 제재를 가하는 법률은 없다. 2001년 일본경제산업성의 산업구조심의회의 <품목별 폐기물처리/재활용 가이드라인>에 폐형광등이 지정품목에 추가되었다고는 하지만 법적인 제재는 없다. 다만 지자체별로 형광등을 어떻게 구분하느냐에 따라, 처리 방법이 달라진다. 지자체의 폐형광등 분류는 타지 않는 쓰레기, 타는 쓰레기, 유해쓰레기로 분류하는 세 가지의 경우가 있다. 폐형광등을 타지 않는 쓰레기로 분류하는 지자체에서는 폐형광등을 다른 불연폐기물과 함께 수집하여 매립하고, 타는 쓰레기로 분류하는 지자체에서는 파쇄하여 소각한다.

일본에서는 각 지자체, 기업위탁, 중간업체에서 폐형광등의 대부분을 노무라코산으로 운송하여 분리, 수은증기 발생 방지, 정제 등의 기술을 적용하여 최종 재활용하고, 필요한 유가자원은 회수하여 이용하고 있다. 노무라코산은 일본 최대의 폐형광등 재활용업

체로, 일본에서 유일하게 수은을 회수하는 업체이다. 지자체의 폐형광등 회수는 (사)전국도시청소회회의 형광등광역회수시스템을 통하여 이루어지며, 현재 폐형광등 광역회수에 참여하고 있는 지자체는 3,232개의 지자체(市町村) 중에서 약 700개 정도이다.¹⁴⁾

III. 수은함유폐기물의 효율적 관리 방안

1. 선진국의 수은함유폐기물 관리방안 검토

유해폐기물의 국가간 이동에 관한 Basel Convention의 수은폐기물의 환경 친화적 관리를 위한 기술 지침서¹⁵⁾에서는 가정에서 발생하는 수은함유폐기물의 수거에 대하여 나타내고 있다. 우선 수은함유폐기물은 전용 수거함을 마련하여 수거하여야 하며, 지자체 또는 기타 공인된 수거 기관만이 수거할 수 있도록 하고 있다. 폐형광등, 수은 온도계, 수은전지 등은 전용 용기를 색깔별로 구분하는 것이 중요하며, 파괴되지 않도록 주의하여야 한다. 시청, 도서관, 기타 공공건물, 전자기기 판매점, 백화점 등의 공공 장소에서 사용된 수은함유폐기물의 수거는 각각의 폐기물 특성에 맞게 설계된 수은 폐기물 수거함을 설치되어야 하며, 소비자는 수은함유폐기물을 수거함에 배출한다. 지자체 수거 당국 또는 민간수거 업체 등 공인된 수거 기관만이 수거함을 재활용 시설로 운송할 수 있다. 또한, 정부나 수은함유제품 생산자 또는 기타 관계자가 지역 수거기관에 의해 수은폐기물을 수거할 수 있도록 제도를 도입하여야 하며, 지역 수거 기관이 최종 소비자로부터 수은함유폐기물을 수거하여 폐기물 관리 센터, 재활용 시설, 폐기물 인계소 등의 공인된 장소로 운송하기 위하여 소비자, 지방정부, 생산자 및 기타 관계자에게 수거에 대한 배출요령과 지침에 대해서 홍보하여야 한다고 명시되어 있다.

이 지침서에 의하면, 수은함유폐기물의 운반은 반드시 국가 및 지자체의 규제를 준수하여야 하며, 운송수단은 적절하게 설계, 제조, 유지 보수가 되어야 한다. 이는 승인된 운송자만이 승인된 장소로 수은을 운송할 수 있으며, 승인된 운송자는 폐기물의 포장, 표지 부착상태가 규제에 부합하는지를 반드시 확인해야 한다. 이외에 운전자는 적절한 교육을 받아야 하는 것과 운송된 수은함유 폐기물의 관리 및 저장 등에 대해 제

14) Asian Productivity Organization TOKYO(2001), *Hazardous waste management – policies and practices in Asian countries*.

15) 국립환경과학원(2011), 「수은폐기물의 환경 친화적 관리를 위한 기술지침서」.

시하고 있다.

미국에서는 가정용 제품 중 수은의 사용을 줄이고 현존하는 제품이 폐기물이 되어 수은이 배출되는 것을 방지하기 위해 주별로 수은함유제품의 판매를 금지하거나 제품 라벨링을 의무화하는 등의 노력을 하고 있다. 이러한 수은함유제품의 수집과 재활용을 위한 프로그램을 수행함은 물론이고 폐기물 속의 수은 함량을 줄이기 위한 제도적 법안을 수립하거나 통과하였다. 또한, 수은함유제품을 대상으로 제품책임주의에 근거한 노력이 정부와 산업, 비정부 기구에 의해 시행되어 오고 있다.¹⁶⁾ 각주에서 수립한 법안 및 제도의 경우, 뉴잉글랜드와 뉴욕 및 뉴저지 주에서는 폐기물 프로그램 기획자들의 연합(NEWMOA, Northeast Waste Management Officials' Association)에서 폐기물 중 수은함량을 줄이기 위해 제조업자와 도매업자가 판매하는 수은함유제품의 상태를 알릴 의무, 일부 수은함유제품의 판매 금지, 제품의 단계적 제거방안과 의무 면제, 제품 라벨링 및 폐기 금지, 수집과 재활용 프로그램, 모델입법안의 주요 구성요소를 조정하는 정보센터 설립 등과 같은 다양한 접근방법을 통한 모델입법안을 제시하고 있으며 이러한 상세한 내용이 담긴 법안이 여러 주에 통과되어 시행되고 있다.

또한, 뉴햄프셔 주는 입법부가 수은함유온도계의 판매를 금지하고 학교에서의 수은 사용을 금지하며, 제조업자에게 통지의무를 부여하는 법안을 통과시켰다. 이외에도 표시(Labeling), 수집의무, 폐기 금지 및 단계적 제거 등의 내용도 포함하고 있다.¹⁷⁾

캐나다 환경부는 수은함유폐기물에 적용될 수 있는 수은배출기준을 마련하였다. 미국과 마찬가지로 캐나다에서도 국가적 차원에서의 수은배출을 감소시키기 위해 각 주에서는 자발적인 수은규제안 마련을 위한 노력을 하고 있다. 알버타 주에서는 수은을 함유한 폐형광등의 자발적 처리를 위해 이해관계자들이 협력하여 노력하고 있으며 이에 수은농도가 20mg/kg 이상 되는 제품에 대해서는 매립을 금지하고 있고, 재활용을 우선적으로 고려하도록 장려하고 있다.¹⁸⁾

스위스는 1991년 유해폐기물 국가간 이동의 관리를 위한 Basel Convention의 결정에 의해 폐형광등의 수출을 금지하였고, 1991년과 1992년에는 형광등의 제조업자, 수입업자

16) Silveira, TR G., Chang, S. Y(2011), "Fluorescent lamp recycling initiatives in the United States and a recycling proposal based on extended producer responsibility and product stewardship concepts", *Waste management & research*, 29(6): 656-668.

17) Triangle Region Solid Waste Planners Committee, 1994, *A Proposal for Regionally Coordinated Household Hazardous Waste Programs in Chatham, Durham, Orange, and Wake Counties, Final Report*.

18) Hilke, C., Friesen, K(2005), *Background Study on Increasing Recycling of End-of-life Mercury-containing Lamps from Residential and Commercial Sources in Canada*.

및 판매업자가 합동으로 폐형광등의 재활용 비용을 충당하기 위해 기금을 조성하기 시작하였다. 스위스의 수은함유폐기물 처리기술은 재활용을 기초로 한 RECYTEC Process에 의해 이루어지고 있으며, 이 시설의 처리대상 폐기물은 가정용 폐전지, 폐형광등, 기타 중금속 함유 폐기물이고 이 공정은 파쇄, 자석분류 등의 공정으로 구성되어 있다.^{13,5)}

스웨덴에서의 수은함유 폐형광등 수거제도는 EPA 주도하에 민간에서 수거 및 처리를 하고 있다. 처리비용은 정부 또는 대량배출업자가 부담하고 있으며, 수거방법은 3가지로 구분된다. 첫째는 수거 및 처리업체에 의한 수거방법으로 처리업체는 운반된 폐형광등을 적정처리하고 처리량에 대한 비용은 개별회사나 건물주에게 청구한다. 둘째는 제조업체에 의한 수거방법으로 제조업체별 판매처를 이용하여 소비자가 신제품을 구입 시 사용이 끝난 제품과 교환해서 판매의 역루트로 회수하는 방법이다. 셋째는 지자체에서 수거용기 및 수거장소를 제공하여 일반가정에서 배출되는 폐형광등을 수거하는 방법으로 일정량 발생 시 처리업체에 위탁처리하고 처리업체는 지자체에 처리비용을 청구한다. 스웨덴에서는 1979년 조명기기 제조업체에서 수은함유폐기물을 처리하는 형광등재활용설비를 개발하였다. 이 시스템은 파쇄기와 체거름 장치를 사용하여 비철금속부분과 유리를 분리하고 형광등 내부의 분말을 증류 처리하여 수은을 분리, 회수하는 공정으로 이루어져 있으며, 한국에도 수입 및 설치되어 사용되고 있다.^{11,14)}

오스트리아에서는 1991년부터 폐형광등은 매립 처리하였으며, 수은함유폐기물은 따로 유해폐기물로 간주하여 제한적으로 처리하고 있다. 프랑스 및 독일은 수은함유제품에 대해 EU 규제를 받고 있어 수은함유폐기물을 소각하는 것이 금지되어 있다.¹³⁾

일본은 1974년 노무라코산 주식회사가 이토무카 광업소 일체의 기술 및 설비 등을 매입하여 수은함유폐기물 처리를 중심으로 업무를 시작하였다. 1985년에는 국고보조사업으로 이토무카 광업소에서 수은함유 폐기물 재자원화 실증플랜트를 건설하였다. 폐형광등의 처리기술로는 고형화법이 주로 사용되고 있는 실정이다. 이는 형광등이 부서지기 쉬워 운반비가 많이 들고 형광등의 주성분인 유리는 재사용이 어려우며, 금속 비율이 낮아 처리 시 경제성이 낮기 때문이다.¹²⁾

미나타 협약에 의해 미국, 유럽과 캐나다 등에서는 국가적 차원에서의 수은배출을 감소시키기 위해 각 주에서는 자발적인 수은규제안 마련을 위한 노력을 하고 있으므로 국내에서도 수은함유폐기물을 수거하기 위하여 수은함유폐기물에 대한 별도의 배출규정을 마련하는 것이 절대적으로 필요하다. 또한, 수은함유폐기물의 친환경적인 수거를 위하여 별도의 수거함을 사용하도록 하고 이에 대한 교육과 홍보를 유치원과 초등학교

에서부터 실시할 필요가 있다. 그리고 수은함유폐기물의 운반에 대해서는 반드시 국가 및 지자체의 규제를 준수하여 승인된 운송수단과 적절한 교육을 받은 운송자만이 수은함유폐기물을 운송할 수 있으며, 수은함유폐기물에 대한 운송과 저장에 대해서 규정을 마련하고 이 규정에 의해 수은함유폐기물의 포장, 표지 부착상태, 저장방법이 규정에 부합되도록 하여야 한다.

2. 수은함유폐기물의 효율적 관리방안

수은함유폐기물인 폐형광등과 폐전지는 현재 EPR(extended producer responsibility) 제도에서 관리 및 처리가 이루어지고 있으나 일부 품목을 제외하고는 관리 및 처리시스템이 잘 갖추어져 있지 않아 수은함유폐기물 전체를 폭넓게 적용할 수 있도록 하는 방안이 필요하다. 수은함유폐기물을 효율적으로 수거하기 위하여 소비자들의 생활패턴을 고려하여 배출장소를 다양화하도록 하고 대형마트나 주민센터 등으로 확대하는 방안도 고려되어야 할 것이다.

선진국과 국내의 폐형광등 관리 및 처리 현황으로부터 효율적인 수은함유폐기물의 관리방안을 도출하여 <그림 2>에 나타내었다. 폐형광등의 수거에서 최종 처리되는 단계까지 주체별 역할을 수은함유폐기물의 범주로 적용해보면, 소비자는 기존의 공동주택 및 단독주택의 재활용 분리수거함에 수은함유폐기물을 정확하게 분리 배출하도록 하여야 한다. 특히 폐형광등은 잘못하여 부서지면 환경 중으로 수은이 배출될 가능성이 있으므로 별도의 수거함을 사용하여 배출하도록 권장하고 있다.¹⁹⁾

지자체는 소비자가 보다 효율적으로 수은함유폐기물을 배출할 수 있도록 추가적인 수거함과 수거장소를 제공하여야 한다. 또한, 수은함유폐기물에 대한 재활용 프로그램을 실시하여 이에 대한 홍보와 교육을 실시하여야 한다. 지자체는 시민들에게 제공되는 재활용 프로그램의 홍보와 더불어 추가로 설치되는 수거함에 대해 홍보도 이루어져야 하며, 수거용기에는 배출방법 및 배출품목에 대해 보다 상세한 정보를 기재하여 정확히 알도록 교육을 실시하여 지속적인 관리를 하여야 한다.²⁰⁾ 재활용 프로그램은 폐기물의 수집과 재활용하는 프로그램, 소규모 혹은 대규모 상점으로부터 수은함유폐기물을 수집하는 프로그램, 폐기물의 이동에 관하여 발신처와 수신처의 폐기물을 확인하

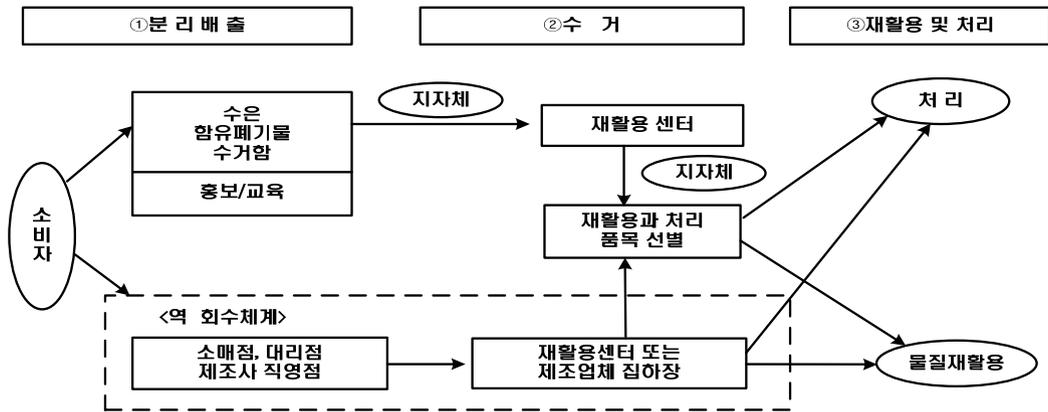
19) 국립환경과학원(2007), 「생활계 유해폐기물의 종합관리체계 구축에 관한 연구」.

20) 한국자원재생공사(1998), 「생활계 유해폐기물이 환경에 미치는 영향 및 별도 수거·처리체계 구축방안에 관한 연구」.

고 제어하는 부하-점검 프로그램, 수은함유폐기물의 불법적인 처분과 비상사태에 대응하기 위한 프로그램으로 구성되며, 행정구역에서 발생하는 수은함유폐기물의 수집 결과와 자료를 제공하도록 한다.

수은함유폐기물이 일반폐기물에 혼합되어 배출되지 않도록 하여야 하며, 허가받은 운반업체와 처리업체에 대한 체계적 관리를 통해 수거된 수은함유폐기물이 적정관리 및 처리될 수 있도록 한다. 그리고 재활용 및 처리를 담당하는 업체는 배출된 수은함유폐기물이 환경적으로 안전하게 처리될 수 있도록 적정처리를 하여야 한다. 이를 담당하는 담당업체 및 재활용사업 공제조합은 폐기물 입고량 및 처리량에 대한 서류를 보관하고, 일정 기간마다 보고하여 사실 증명을 유지한다. 또한, 수은함유폐기물의 저장과 효과적인 분리배출을 위해 제품 표시(Labelling)를 의무적으로 시행해야 한다. 이에 따라 효과적인 수거를 위해 용기에 부착된 표시에 유해물질 특성 및 함량을 비롯하여 배출방법을 표기하여 명확하게 인지하도록 하는 것이 바람직하다.¹⁷⁻¹⁸⁾

그림 2 수은함유폐기물 효율적인 관리방안



3. 수은함유폐기물의 효율적 처리방안

일반적으로 수은함유폐기물의 처리방식은 크게 중간처리와 최종처리로 구분할 수 있으며, 이에 대한 내용은 <표 6>에 나타난 바와 같다. 수은함유폐기물의 처리방법은 유해물질인 수은의 함량이 다소 낮거나 소량 배출될 때 효과적이다. 이에 따라, 현실적으로 이용할 수 있는 최고의 가용 기술(Best Available Technology; BAT)을 사용하여

수은함유폐기물 재활용을 활성화하고 유해물질에 의한 오염을 최소화하여야 한다. 또한, 폐형광등 외에 다른 수은함유폐기물에도 적용할 수 있도록 기술의 유연성이 확보되어야 하며, 적극적인 활용 및 개발이 필수적으로 수반되어야 한다.

수은함유폐기물의 보다 안전한 처리를 위해 적용가능한 폐형광등 처리기술은 국내 기술보다 수준이 높은 영국의 Balkan 재활용시스템, 스웨덴의 MRT 시스템 등 선진국의 기술들이다. 이러한 선진국의 폐형광등 처리 및 재활용의 가장 우선순위는 수은 및 유해물질에 대한 안정적인 처리를 우선으로 하고 있고, 안정적인 처리 후에 유용 자원에 대한 자원 회수 및 활용을 하고 있다.⁶⁾

이에 따라 수은함유폐기물의 안정적인 처리 공정 방안은 <그림 3>에 나타내었다. 이 공정은 수은함유폐기물의 처리를 위하여 파쇄, 선별, 회수, 증류, 흡착 공정순으로 구성하여 전처리부터 후처리까지 안정적인 처리 가능하며,²¹⁾ 수은함유폐기물은 원활한 재활용을 위해 일정 크기로 전처리가 필요하고 이 과정은 파쇄 공정에서 이루어진다. 파쇄된 수은함유폐기물은 각기 자력 및 공기선별을 통해 금속류, 비철금속류, 기타 잔재물로 나누어 재활용, 매립 혹은 산폐기물의 안정화를 위한 첨가제 등으로 활용할 수 있다.²¹⁻²⁴⁾

수은함유폐기물 처리 공정 중 발생하는 수은증기는 흡기하여 활성탄 흡착을 통해 제어함으로써 유해물질의 배출이 거의 없으며 전체 공정을 밀폐형으로 구성함에 따라 수은증기의 노출은 없다.²⁵⁾ 또한, 수은함유폐기물은 파쇄 후 선별을 통해 유용자원의 자원회수 외에 증류 공정을 통해 재활용이 가능한 수은을 회수할 수 있다.

제시된 수은함유폐기물의 처리 공정 방안은 폐형광등뿐만 아니라 다른 수은함유폐기물 품목에도 폭넓게 즉시 적용가능하며, 통합적인 수은함유폐기물 관리 및 처리방안으로 모든 수은함유폐기물에 대하여 투입부터 최종처리인 증류처리 공정까지 재활용 가능한 유가물질과 수은을 회수하고 배출될 수 있는 수은 증기를 제어하는 데 효과적으로 활용될 것으로 판단된다.

21) 이승희, 박헌수(2013), "삼파장과 일반 폐형광등 구성물질에서의 수은 분포 특성". 『한국폐기물자원순환학회지』 30(3): 265-271.

22) 이승희, 김형민, 박헌수(2012), "폐직관형형광등에서 형광물질(Phosphor) 분리에 대한 수치해석". 『한국폐기물자원순환학회지』 29(3): 281-287.

23) 이승희, 박헌수, 김재경(2014), "폐소형형광등의 구성성분별 수은분포와 유해특성에 관한 연구". 『한국폐기물자원순환학회지』 31(3): 431-347.

24) Rhee, S. W, Choi, H. H., Park, H. S(2014), "Characteristics of mercury emission from linear type of spent fluorescent lamp", *Waste Management*, 34(6): 1066-1071.

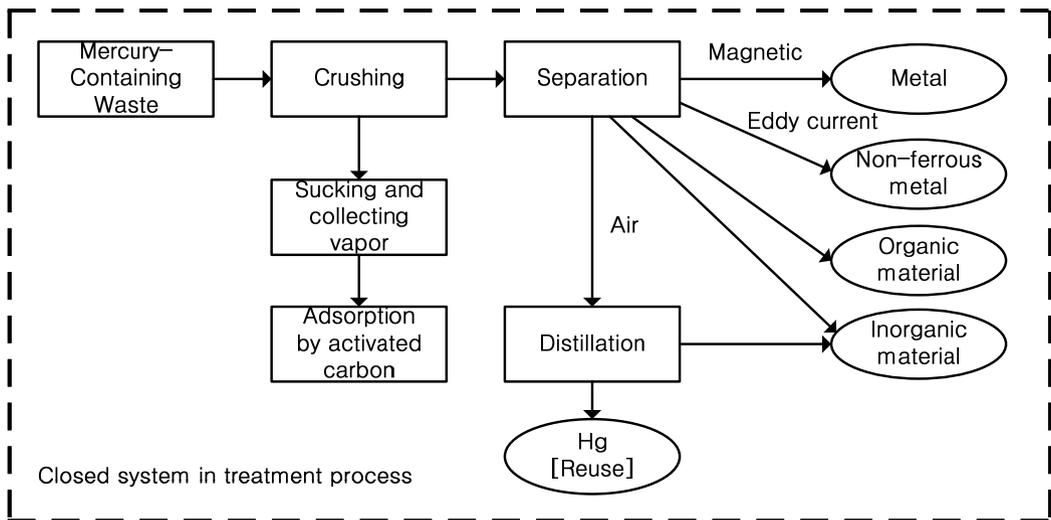
25) 이승희(2014), "소형형광등(Compact Fluorescent Lamp)의 파쇄에 따른 기상에서의 수은농도 특성". 『한국화학공학학회지』 52(5): 652-656.

표 6 국내외에서 사용 중인 수은함유 폐기물 처리기술

구분	기술명	내 용
중간 처리	소각	- 대기방지시설을 갖춘 지정 소각장에서 처리 - 비산재, 바닥재 등의 오염물질은 안정화/고형화 처리 후 최종처리
	안정화/고형화	- 화학적 반응을 통해 열역학적으로 안정한 고체 상태로 전환 - SPSS ^{a)} , CBPC ^{b)} 가 대표적 기술임.
	아말감	- 금, 구리 등의 금속과 반응시켜 아말감 형성
	재활용/회수	- 재활용 시설에서 원소수은과 폐기물을 분리하여 각각 처리
최종 처리	저장	- 지상저장시설, 지하저장시설 등을 이용한 장기간/ 영구적 저장 처리 시설
	매립	- 수은함량이 낮거나, 안정화/고형화 처리 후의 폐기물을 지정 매립지에 매립처리
	특수 시공 매립 (Specially engineered landfill)	- 지형적 특성과 인공적 기술을 이용하여 2차 오염을 방지시킨 매립처리
	관정 주입법 (Deep well injection)	- 지하 깊은 공간에 액상·수은 폐기물을 주입하여 영구적으로 처리

주 : a) Sulfur Polymer Stabilization/Solidification, 유황 중합체 안정화/고형화
b) Chemically Bonded Phosphate Ceramics, 화학적 결합 인산염 세라믹공법

그림 3 수은함유폐기물의 안정적인 처리방안



IV. 결론

국제적으로 수은과 수은함유폐기물에 대해서 미나마타 협약이 체결되어 국내에서도 수은함유폐기물에 대한 별도의 관리가 필요한 실정이다. 수은을 포함하고 있는 폐형광등에 대한 국내 및 선진국의 관리 및 처리현황을 검토하여 수은함유폐기물의 효율적인 관리방안을 마련하고자 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 국내에서 배출시설과 폐기물에 관련된 수은농도 기준은 「대기환경보전법」과 「폐기물관리법」에서 규정하고 있으나 폐기물 처리 및 재활용시설은 규정의 범위와 대상에서 제외되어 실질적으로 수은함유폐기물에 대한 규정이나 법규는 거의 없으므로 수은함유폐기물에 관한 규정을 시급히 마련하여야 한다.
2. 수은함유폐기물은 수은을 포함한 유해성분이 함유되어 있으므로 별도의 수거 및 관리를 위한 프로그램이 구축되어야 하며, 이에 대한 홍보와 교육을 시민 대상으로 지속적으로 실시하여 안정적으로 관리하여야 한다.
3. 수은함유폐기물은 수거장소와 수거용기를 별도로 설치하여 생활폐기물과 혼합되지 않도록 하고, 적절한 규정에 의해 수거체계에서 수은과 같은 유해물질에 의한 오염을 최소화하여야 한다.
4. 수은함유폐기물의 처리공정은 파쇄, 선별, 회수, 증류, 흡착 순으로 전체 공정을 밀폐형으로 구성하여야 유해물질의 배출 없이 안정적인 처리가 가능하며, 유용자원을 회수하고 및 수은을 제어할 수 있도록 하여야 한다.
5. 폐형광등 관리현황으로부터 수은함유폐기물은 수거에서 최종 처리 단계까지 주체별 역할을 상호보완적으로 적절하게 수행하여 종합적인 관리가 이루어져야 한다.

참고문헌

<국내 자료>

- 국립환경과학원. 2007. 「생활계 유해폐기물의 종합관리체계 구축에 관한 연구」.
- _____. 2011. 「수은폐기물의 환경 친화적 관리를 위한 기술지침서」.
- _____. 2012. 「생활계 폐기물의 분류·수집·운반체계 관련 연구」.
- 이승희. 2014. “소형형광등(Compact Fluorescent Lamp)의 파쇄에 따른 기상에서의 수은농도 특성”. 「한국화학공학회지」 52(5): 652-656.
- 이승희, 김형민, 박헌수. 2012. “폐직관형형광등에서 형광물질(Phosphor) 분리에 대한 수치해석”. 「한국폐기물자원순환학회지」, 29(3): 281-287.
- 이승희, 민달기, 전태완. 2008. “국내 생활계 유해폐기물 발생 및 관리에 관한 현장조사”. 「한국폐기물학회지」 25(5): 441-446.
- 이승희, 박헌수. 2013. “삼파장과 일반 폐형광등 구성물질에서의 수은 분포 특성”. 「한국폐기물자원순환학회지」 30(3): 265-271.
- 이승희, 박헌수, 김재경. 2014. “폐소형형광등의 구성성분별 수은분포와 유해특성에 관한 연구”. 「한국폐기물자원순환학회지」 31(3): 431-347.
- 한국자원재생공사. 1998. 「생활계 유해폐기물이 환경에 미치는 영향 및 별도 수거·처리체계 구축방안에 관한 연구」.
- 한국환경산업기술원. 2014. 「폐조명기기로부터 유가자원 회수 및 무해화 기술개발」.

<국외 자료>

- Asian Productivity Organization TOKYO. 2001. *Hazardous waste management - policies and practices in Asian countries*.
- EPA. 2007. *Household hazardous waste collection*.
- _____. 2008. Public Law 110-414 Mercury Export Ban Act.
- _____. 2012. Code of Federal Registrations Title 40 - Protection Environment, Part 273.
- European Commission -Directorate- General Environment. 2002. *Study on Hazardous household waste(HHW) with a main emphasis on hazardous household chemical(HHC) Final Report*.

- Hilkene, C., Friesen, K. 2005. *Background Study on Increasing Recycling of End-of-life Mercury-containing Lamps from Residential and Commercial Sources in Canada*, Korea Institute of Lighting Recycling Association, 2011. *Recycling of domestic waste fluorescent lamps*.
- LaGrega M. D., Buckingham P. L., Evans J. C. 2001. 「Hazardous Waste Management, 2nd Ed.」.
- Rhee, S. W, Choi, H. H., Park, H. S. 2013. "Performance evaluation of material separation from spent fluorescent lamps using the thermal end-cutting method". *Springer*, 15(4): 503-509.
- Rhee, S. W, Park, H. S. 2013. "Mercury Distribution of Major Components from 3-banded and General Spent Fluorescent Lamp". *Journal of Korea Society of Waste Management*, 30(3): 265-271.
- Rhee, S. W, Choi, H. H., Park, H. S. 2014. "Characteristics of mercury emission from linear type of spent fluorescent lamp". *Waste Management*, 34(6): 1066-1071.
- Schnurer H. 2001. *Waste Management Policy in Germany : the effects of new European directives and implementation statue of waste law projects in Germany; Waste Management Directorate fo the Federal Ministry for Environment, Germany*.
- Silveira, TR G., Chang, S. Y. 2011. "Fluorescent lamp recycling initiatives in the United States and a recycling proposal based on extended producer responsibility and product stewardship concepts". *Waste management & research*, 29(6): 656-668.
- Triangle Region Solid Waste Planners Committee. 1994. *A Proposal for Regionally Coordinated Household Hazardous Waste Programs in Chatham, Durham, Orange, and Wake Counties. Final Report*.
- UNEP. 2013. *Minamata Convention on Mercury Text and Annexes*.