

폐형광등의 처리기술 및 재활용 현황

윤 오 섭*

Status of Technologies and Recycling of Spent Fluorescent Lamp

Oh-Sub Yoon*

I. 서 론¹⁾

형광등은 형광 물질을 포함하는 용기 내에 내장된 수은 증기에 전압에 의한 광을 발생시키는 것으로, 수은 증기를 이용한 램프는 에너지 효율이 높고 발열량이 적어서 생활용 및 사업장에서 광범위하게 이용되고 있다.

수은 증기를 이용한 램프는 조명용 형광등, 냉음극선관램프(Cold Cathode Fluorescent: CCFL), 내부전극 형광램프(Inner Electrode Fluorescent Lamp: IEFL), 외부전극 형광램프(External Electrode Fluorescent Lamp: EEFL), 복합전극 형광램프(External Inner Electrode Fluorescent: EIEF), 면광원(Flat Fluorescent Lamp: FFL) 등으로 구분할 수 있다.

현재 재활용이 가능한 제품은 주로 형광램프인 직관형, 환형(원형), 안정기내장형 및 콤팩트형이다. 일반적으로 형광등은 형광관(유리관), 구금부, 꼭지쇄 등으로 구성되어 있다. 이들 구성 물질은 자성체, 비자성체, 유리분말(유리/접착제)의 금속 부분과 유리/수은의 유리부분 그리고 분말/수은

의 분말 등이다.

폐형광등의 재활용 기술은 처리 공정에서 발생되는 각 성상별 물질 분리와 회수를 위한 기술이며, 특히 투입과 처리 단계에서 유해물질의 사전 방지 기술이 중요하다. 폐형광등 처리에서는 형광등에 내장되어 있는 인체에 유해한 수은의 분리와 처리가 주요한 기술이다.

수은은 수은광산 지하에 매장되어 있는 황화수은(Hgs)의 적색을 띤 광석이나 금속 수은으로 산출된다. 황화수은을 약 600℃이상으로 가열 산화 분해하여 발생하는 수은 증기를 냉각하여 액체수은을 얻는다.

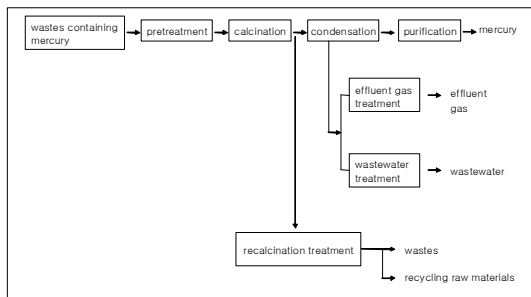


금속 수은의 원자량은 22.59, 비중은 13.5585이며, 녹는점은 -38.87℃, 끓는점은 356.58℃이며, 밀도는 13.6g/cm³이다.

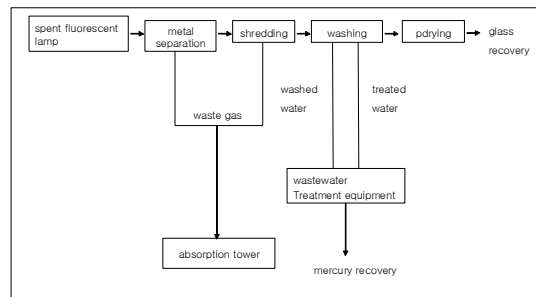
수은 증기를 상온까지 낮춘다 하여도 모두 액체로 되는 것은 아니고 20℃에서 1m³당 13.2mg(중

* 한밭대학교 환경공학과 교수(Professor, Department of Environmental Engineering, Hanbat National University), E-mail: yoosub@hanbat.ac.kr, Tel: 042-821-1257

1) 윤오섭(2002) 참조.



<그림 1> 건식방법에 의한 폐형광등 처리



<그림 2> 습식방법에 의한 폐형광등 처리

기압 0.00120mmHg)의 수은 증기가 포함된다. 즉, 수은 증기를 냉각제거한 폐가스 내에도 가스온도에 해당하는 증기압에 따른 부분의 수은이 포함되어 있어 이에 따른 가스제거 기술이 필요하다.

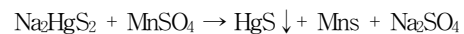
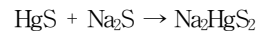
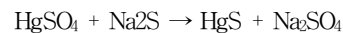
1. 폐형광등의 수은 자원화 기술

수은 회수처리 방법은 건식방법과 습식방법으로 분류할 수 있으며, 건식방법은 광석으로부터 수은을 제련하는 기술을 응용한 것으로 수은의 비점(b.P 356.66℃)이 낮은 특성을 이용하여 고온으로 배소하여 수은을 휘발시킨 후 다시 냉각 응축시키는 방법이다. 이에 따른 공정은 <그림 1>과 같다.

<그림 1>에서와 같이 전처리 공정(해체-파쇄-탈수)-건조 등)과 배소과정(600~800℃: 열분해-산화-환원)에 의해 수은을 증기화(연속식, 회분식)하고 응축·냉각시켜 금속수은을 회수하게 된다. 이때 배가스 중의 수은을 제거하는 공정으로 습식산화 공정과 건식흡착법을 이용한다. 또한, 수은 폐수가 발생할 경우 킬레이트 수지나 활성탄 등에 흡착 제거시켜야 한다. 습식방법은 <그림 2>와 같다.

<그림 2>에서와 같이 금속수은 증기를 산화제로 산화하여 용액에 흡수시키는 방법으로 염화제2철(FeCl_3)과 과망간산칼륨(KMnO_4), 과황산염($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$),

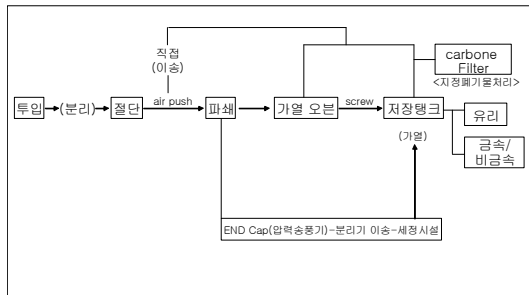
염소계(NaClO) 및 황화물 침전법 등이 있다. 일반적으로 폐수 등에서 수은을 제거하는 황화물침전법은 다음과 같다.



폐형광등의 수은 회수에 대한 최근 특허 기술(김중현, 2002)에 의한 미국, 일본, 유럽 및 국내 기술을 보면 국내의 폐형광등 18건에 대한 수은 회수기술은 습식안정화(처리)수은회수장치, 유해가스수거장치 등으로 순수 정제된 수은 회수 기술은 거의 없으며, 미국 및 유럽에서 수은회수(Mercury recovery)의 자원회수 기술과 일본에서의 형광제와 수은제거, 수은 회수 정제 등이 기술 특허로 출원되고 있다. 국내에서는 최근 폐형광등 자원회수 설비 공정을 새로이 구축하였으며 수은의 회수와 금속과 비철금속의 분쇄공정 설비가 수도권역 처리장에서 가동·운영되고 있다.

2. 폐형광등의 수은 이외 물질의 재활용

폐형광등의 수은 이외 물질의 재활용 기술을 보면 국내에서는 밀폐 파쇄-수거통에서의 Base



<그림 3> 국내 폐형광등 처리현황

cap으로부터 자력선별기에 의한 철분회수 및 알루미늄과 입자가 적은 유리 및 시멘트를 분리하는 Screen선별 장치의 실험실 단계기술과 폐유리의 발포유리제조, 결정화 유리제조 등의 자원화 기술이 보유되어 있고, 이들을 종합한 플랜트 이용은 거의 없는 것으로 나타났다.

일본에서는 형광물질의 회수와 유리의 재이용 기술이 보유되어 있고, 미국 및 유럽은 각 성상별 Sorting기술에 의한 자원화 기술 등이 있다.

II. 본 론

1. 재활용기술 수준이 가장 앞선 선진국 기술수준²⁾

선진국인 일본 및 미국, 유럽의 폐형광등 처리 기술 수준 및 재활용 기술 수준의 현황을 살펴보면 다음과 같다.

1) 일본

일본에서는 각 지자체, 기업위탁, 중간업체에서 폐형광등의 대부분을 Nomura Kohsan Company로 운송하여 다음과 같은 기술을 적용하여 최종 재활용하고 있다.

(1) 형광등 파쇄기

- 유리, 금속, 납 등의 분리 기술(유리-glasswool 원료 재활용)
- 수은증기 발생방지 기술
- 파쇄: 이송을 겸한 scraper conveyer 채용
- 파쇄형광등: 드럼수거용기

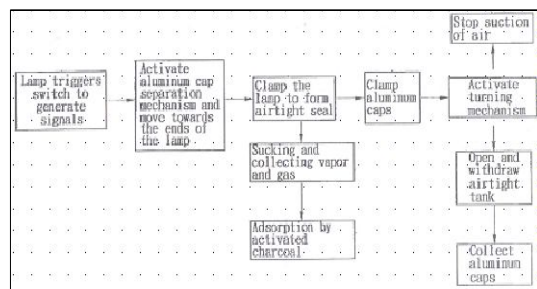
(2) 폐형광등 재활용 시스템

- 수은: 선별 → 세정/선별 → 수은슬러지 → 배소(600~800℃, 다단식배소로 이용) → 수은증기 → 응축탑(냉각-액체수은) → 정제(고순도금속수은)
- 알루미늄: 알루미늄 공장
- 유리: 유리원료 및 glasswool 공장

2) 미국 · 유럽

미국 · 유럽의 경우 폐형광등의 분리기술(파쇄-선별)과 수은회수에 대한 기술이 높은 수준을 보이고 있다.

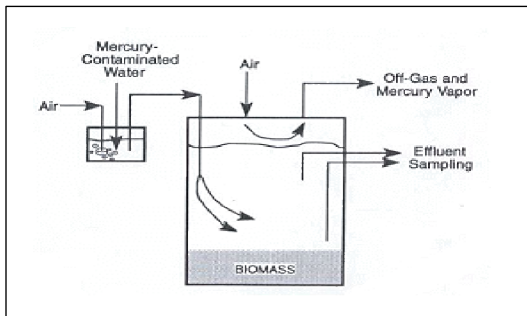
폐형광등의 처리 단계는 <그림 4>와 같은 시스템으로 알루미늄 및 수은을 회수한다.



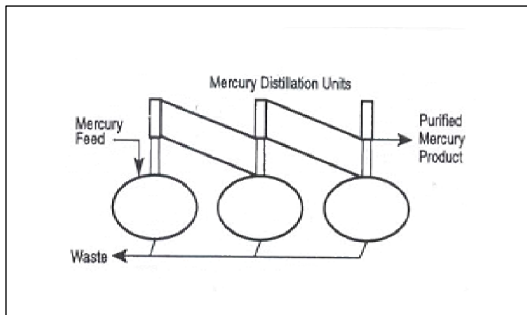
<그림 4> 폐형광등 처리 단계

수은회수방법은 Bioreduction에 의해 수은을 회수하는 방법과 distillation 공정 등이 있다(EPA, 1994).

2) 윤오섭(2007) 참조



<그림 5> Bioreduction에 의한 수은 회수



<그림 6> Distillation에 의한 수은 회수

최근의³⁾ 수은회수기술은 형광램프 내부표면에 Phospho layer가 형성된 것에 의한 Phospho powder가 포함된 수은을 건조법에서 유기환원제를 혼합, 가열하여 순수한 수은을 회수하는 적용 기술이다.

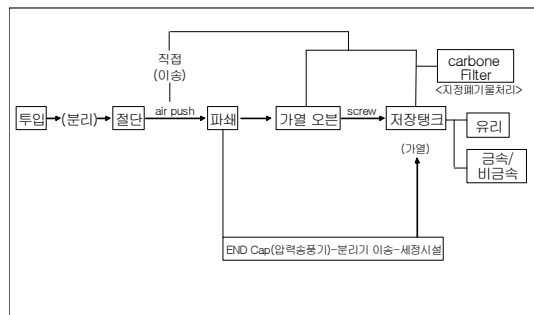
Phospho layer의 bulb로 인한 수은과 Phosphopowder의 혼합성분으로부터 금속수은과 Phospho powder의 분리로 두 물질의 재활용 기술 등이 연구 개발되고 있다.

또한 드럼형 처리기 내부에서 부압과 정압 작용으로 파쇄된 형광램프에서 발생된 수은가스를 HEPA Filter, A/C Filter에 의해 수은 독성을 방지하는 수은 회수 시스템이 특허 기술로 개발되고

있다(WO, 2008).

2. 국내 폐형광등 처리 기술⁴⁾

현재 국내에서는 독일의 Herborn GmbH 기술에 의해 수도권(제1공장), 영남권(제2공장), 호남권(제3공장)에서 다음과 같은 공정으로 처리하고 있다.



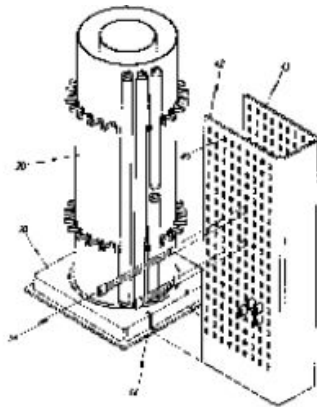
<그림 7> 국내 폐형광등 처리 공정

2006년도 이후 국내의 폐형광등 설비 공정은 기존처리 시설을 보완·개선하여 수도권 폐형광등 처리 사업장에서 가동·운영하고 있다.

또한 형광등의 수거운반에서 중요한 수집 장치가 <그림 8>과 같은 장치개발로, 수집과 운반과정에서 파손으로 인한 수은중독의 위험성을 방지하고 자원회수를 높일 수 있는 폐형광등 수집장치 특허(서장권, 2008) 기술이 2006년 이후 새로 개발되었다.

3) Nomurakohasn.co.jp 참조

4) 윤오섭(2007) 참조



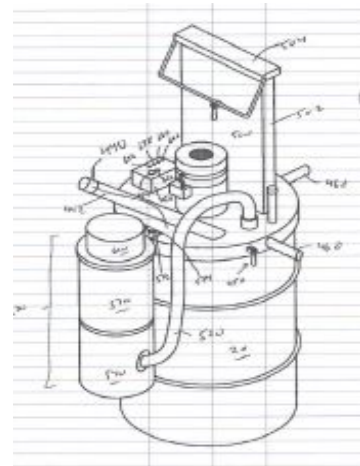
<그림 8> 폐형광등 수집 장치

3. 우리나라와 선진국과의 기술 수준 비교

<표 1>에서와 같이 국내 기술수준과 선진국(일본, 미국, 유럽) 폐형광등의 기술 수준⁵⁾을 비교해 보면, 폐형광등의 파쇄, 분리선별 및 수은 회수 방법 등은 외국과 유사한 기술을 보유하고 있으며,

일부 알루미늄, 유리, 금속 분리 등이 실험실 연구의 대부분을 차지하고 있다.

최근 특허기술 중의 하나인 <그림 9>와 같은 장치는 형광등을 드럼형의 처리장치에서 분쇄·분리하여 수은을 회수·처리하는 장치이다.



<그림 9> 폐형광등 회수 처리 장치

<표 1> 우리나라와 선진국과의 기존설비(독: Herborn) 기술 수준의 비교

구분	국외	국내	비고
(파쇄)	선회류교반파쇄	파쇄(로울러)	2단 파쇄
분리	유리, 금속, 알루미늄, (회귀금속), bulb layer접착제	Metal Separator (금속, 비금속)	유리 Powder Metal
수은 회수	건식(습식), 혼합powder 분리 -Distiller -Roast	Roast(회수) 습식 안정화(HgS)	수은의 순도(X) ※ Hg 및 감지 system
수은 외 물질	유리-원료공정 glass wool Al-원료공정 phospho powder 형광체-재활용 Y-회수	금속분리기 Dust Collector A/C 흡착탑	- 유리 - 알루미늄 - 금속성분 - 플라스틱 - 기타

국내와 외국에서 특허와 학술지의 논문을 통해 공개 및 발표된 요소 기술은 다수 있으나, 특히 국내의 경우 수은형광등 분야는 일부 습식처리로 연구를 하였으나 현재는 여러 기술적, 환경적(건강) 문제로 기술성도가 거의 없는 상태로 나타났다.

4. 국내 세부재활용 기술 수준

국내의 폐형광등 재활용 기술은 독일의 Herborn GmbH기술로 본 공정과 국내기술 개발과의 차이(세부기술 난이도 포함)를 비교해 보면 다음과 같다.

5) FUJIWARA et al.(2004), ASARI et al.(2005), KIDO and SAKAI(2005), SAKAMOTO and AKAGI(2005), TAKAOKA(2005) 참조.

  <p>1. 폐형광등 투입장치</p> <p>2. 자동 회수함 투입</p>	<p>국내: 자동투입장치</p> <p>난이도</p> <ul style="list-style-type: none"> · 형광등의 폐품 분리수거 상태 불량(철, 금속 등 이물질 혼합) · 분리수거함 내 파손형광등 혼합 · 자동투입시설/수작업 필요 	 <p>5. 파우더 흡입장치</p>	<p>국내</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 탄소부직포(Filter)-활성탄(Filter) ② 탈수탱크-수은(침전) ③ 투입구 개폐 장치-진공 모터로 흡인 (수은역류방지)-수은 가스 A/C 포집 ④ 파쇄 → 수거 Bag ⑤ Roller 하부 파쇄 형광등-송풍기 가스 작은 파쇄 부분(Gate)[가열 시 닫힘] <p>수거용가-덮개부의 개폐</p>
 <p>3. End-Cutting 부분</p>	<p>국내: 습식분쇄(실험실수준)</p> <p>파쇄: 분진역류방지, 소음 방지, 로울러 홈 Type (2개이용 파쇄)</p> <p>파쇄-금속부분-수거 Bag</p> <p>유해폐기물-수거 Bag</p> <p>파쇄-유해분진(가스)-탄소물질(1차Filter)→(2차Filter)-수은</p> <p>파쇄-Al Bag</p> <p>유리조각-1차탱크</p> <p>형광물-응집</p> <p>형광체(탈수)-수은-침전</p> <p>수은</p> <p>파쇄-형광물포집-수은가스 포집</p> <p>(입구 Brush, 투입구 개폐내장)</p>	 <p>5-1. 파우더 포집장치</p>	<p>난이도</p> <ul style="list-style-type: none"> · 온도(500℃)조절(분말, 접착제 등 이탈 필요) · Roller형(2개) 파쇄 및 파쇄 수거(탱크) Bag이 일련의 공정에서 유해가스의 leak 등 점검 필요. · 기술이 주로 각 부분별 특허 기술로 연속처리 시스템(Continuous treatment)이 필요
 <p>4. AUTO FEEDING 부분</p>	<p>난이도</p> <ul style="list-style-type: none"> · 현장적용 상용화(연속식) 미흡 · 유해가스, 재활용 분리 효율 검증 필요 · 폐형광등의 이물질(금속 성분) 등의 주입으로 파쇄기의 마모 및 정지, 고장빈번하게 발생 금속부절단장치 ● 압력강하조절(가스방출 방지) ● 형광분말, 수은 압축공기 조절이 예민함. 	 <p>7. 유리파쇄기</p> <p>파쇄분리된유리/수은 Powder/수은-파우더 증류기-수은회수</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Roller 하부 수거용기에 파쇄 전 형광등 가열(100~300℃) - 응축부 (냉각)-(-20~0℃)-냉각수은회수(용기), 흡인잔류 가스필터(A/C, 먼필터) <p>수은의 포집, 수은의 HgS 슬러지 및 정제된 수은의 회수기술이 미흡함.</p> <ul style="list-style-type: none"> · 특허기술로서의 폐형광등의 대형처리 시설로서의 기술수준 미약 · 수은의 외부 유출방지 기술 난이함 · 하계 가동 시 냉방시설 필요(수은회수처리장) · 유리관 내부 유리관 파쇄, 금속부파쇄, 유리저

 <p>유리/캡/기타잔재물 분리장치 및 HEATING OVEN장치</p>	<p>장 탱크 → 더스트 포집 (각 Line의 흡입상태조정) ※ Carbon Filter에 흡착 흡착 수은 등 폐Filter 의 지정폐기물로 처리 (회수 필요)</p>
 <p>5. 베이스 이송장치 6-1. 베이스기타잔재물 분리장치 6-2. 베이스 저장소 7-1. 유리저장소 7-2. 처리된 유리슬루</p>	<p>· 파쇄-자석분리-스크린- 자석철, 알루미늄-형광 체, 유리선별 분리 · 수거 이동 파쇄기-금속 부위수거 Bag</p> <p>폐형광등의 접착물질 및 형광물질의 분리기술 미흡</p>

5. 국내 폐형광등 최근 재활용 기술

국내의 폐형광등은 현재 경기도 화성, 경북 칠곡, 전남 장성 등에서 처리하고 있다. 특히 경기도 화성의 수도권 처리사업장은 독일의 기존설비의 단점을 보완하고 국내 형광등의 각 특성을 고려하여 국내에 적합한 공정을 개발한 폐형광등 처리 사업장으로 5,000~6,000개/hr 처리 용량을 가지고 있다.

국내 처리장치의 중요 처리 시스템의 개선내용은 다음과 같다.

- 자동투입장치 개선(각 형태별 형광등 처리 가능)
- 일렬 3단 파쇄장치(① 정렬투입 ② 1차파쇄 ③ 분쇄·분리)
- 분리·선별기의 개선(전자석분리: 철)

- 분쇄(알루미늄의 물질)
- 오븐(수은분리)
- 분리장치(유리), (분진)
- 방산, 확산 방지(백필터), (분필터), (분진제거): 밀폐시설, 방지시설(Bag Filter)

6. 국내 기술발달 수준 및 문제점

국내 폐형광등의 재활용기술 수준은 외국과 비교하여, 방법 등에 있어 유사한 기술과 특허출원이 18건에 달하여 외국에 비해 단일 특허로서는 높은 수준을 갖고 있으나(윤오섭, 2002), 2006년 이후에는 폐형광등 수집기술 외 기술에 대한 특허, 기술 개발은 거의 없는 상태이다. 형광등내의 수은 함유율이 낮고, 취급의 위험성으로 기술의 한계가 나타나고 있어 공개된 기술을 이용하여 상업화된 예는 거의 없다. 따라서 이에 대한 인프라 구축과 또한 사회적, 경제적 지원이 요구된다. 특히 EPR 대상 품목의 재활용 기술이 폐형광등에 있어서는 수은의 함유 등 유해한 중금속 때문에 처리 시설의 설치 및 가동기술의 현장 적용시 사회적 조건(주민 문제)이 가장 큰 문제점으로 나타나고 있다.

III. 결 론

폐형광등의 분리배출-처리공정에서 2006년 재활용 기술수준 현황과 최근의 외국과 국내의 기술 수준 비교 결과는 다음과 같다.

- 독일(Herborn 시스템)기술은 5000개/hr 이상 처리 용량을 가진 폐형광등의 자동 Process로 Cutting - 분리(Metal Separator) 유리/Powder/Metal류 - 형광분말/수은 Suction - Dust collector - Carbon Filter 등의 공정으

로 되어 있다.

※ Heating Device: (500 kg/hr) 잔류수는 제거

※ Monitoring: Hg

- 스웨덴, 일본 등의 2006년 기술수준에 비해 특수한 연구개발분야가 미약하다.
- 미국의 경우 일부 폐형광등을 DRUM형으로 파쇄 - 진공, 정압조정 흡입 - HEPA - A/C Filter등의 Mercury Vapor Recovery system 이 특허 기술로 개발되었다.
- 국내의 최근(2007년 이후) 기술개발은 거의 없는 상태이며 다만 폐형광등 수거함의 개발로 폐형광등을 각 형태 별로 안전하게 수집할 수 있는 장치 개발이 되어 있다.
- 국내 처리현장(수도권: 경기 화성시)에서는 국내발생 폐형광등의 각 형태를 3단 파쇄하는 (내마모성) 장치의 설비와 파쇄분리선별기의 개선(알루미늄외, 철, 유리, 분진) 및 오븐, 밀폐공간 등으로 파쇄된 분진과 형광물질, 수은의 외부유출을 차단하는 Bag Filter - A/C Filter로 처리하는 시스템으로 공정개발된 처리시설(5,000~6,000개/hr 용량)이 가동되고 있다(Monitoring 등 감시체계 설비).
- 국내에서 공정이 개선된 시설 중 분리된 유리와 금속 외 알루미늄의 물질 혼합물, 구리 등 유가금속의 선별기술이 개발 연구되어야 할 것으로 사료된다.
- 폐형광등에서 발생하는 수은은 별도로 수집·정제하는 수은정제기술을 개발하여 고순도의 수은회수 system을 구축할 필요가 있다.
- 폐형광등이 발생된(가정, 사업체, 기타) 장소에서 안전하게 수집·운반하고, 발생량 대비 처리량의 증가를 위해 최근 개발·개선된 국내설비공정 처리시설의 확대를 위한 사업계획이 이루어져 폐형광등으로 인한 환경오염 예방 및 국민건강 위험요소의 제반인자를 사전 대처할 필요가 있다.

참고문헌

- 김중현, 2002, 「폐형광등 재처리방법 및 이를 이용한 장치」, 서장권, 2008, 「폐형광등 수집장치」, (10-0839565).
- 윤오섭, 2002, 「유해폐기물처리」, 45~66.
- 윤오섭, 2007, 「폐형광등의 재활용기술수준」, 한국환경자원공사.
- ASARI, Misuzu, Kazuki FUKUI, Shin-Ichi SAKAI, and Hiroshi TAKATSUKI, 2005, "Substance Flow of Mercury and Fluorescent Lamp Recycling", *The Japan Society of Waste Management Experts*, Vol. 16, No.4, 105~190.
- EPA, 1994, *Handbook, Recycling and Reuse of Material Found on Superfund Sites*, 11~12.
- FUJIWARA, Kenji, Nishinomiya-Shi, Kiyokatsu, FUJINAMI, and Hirakata-Shi, 2004, Mercury Recovery Method and Mercury Recovery Apparatus, us20040213741A1.
- KIDO, Akiko and SAKAI, Shin-Ichi, 2005, Preliminary Estimation of Mercury Emission Inventories for Japan's Air, *The Japan Society of Waste Management Experts*, vol.16, No.4, 191~203.
- SAKAMOTO, Minoshi and AKAGI, Hirokatsu, 2005, "Mercury Toxicity and Its Health Effect", *The Japan Society of Waste Management Experts*, Vol.16, No.4, 185~189.
- TAKAOKA, Masaki, 2005, "Behavior and Control of Mercury in the Waste Combustion Process", *The Japan Society of Waste Management Experts*, Vol.16, No.4, 213~217.
- WO, 2008, Fluorescent Bulb Compacter and Mercury Vapor Recovery System, 2008/004129 A2.
- Nomurakohsan.co.jp, (2007~2008)