

# 수은에 대한 물질흐름분석 및 인체 위해성평가

장은실, 김경환, 황윤영, 허 탁\*  
건국대학교 신소재공학과

## Substance Flow Analysis of Mercury and Human Risk Assessment

Eun Sil Jang, Kyung Hwan Kim, Yoon Yung Hwang, and Tak Hur\*  
Dept. of Chemical and Biological Engineering, Konkuk University

### Abstract

Concerned about the harmful effects of mercury on human, the flows of mercury need to be analyzed to trace where it is used and decide how to manage it. In the study the substance flows of mercury are identified through the SFA (Substance Flow Analysis) and the effects of mercury on human are examined using HRA (Human Risk Assessment).

The MFA study shows that the total consumption of mercury in 2009 is reduced by 42%, compared to 2000. It is used mainly in lighting appliances such as HID (High-Intensity Discharge) lamp, fluorescent lamp, and cold cathode fluorescent lamp. It is mainly input to construction and electronic & electricity industry and waste mercury is recovered from discarded lighting appliances. At present, however, the collected mercury from the discarded products is disposed because of technical and economical difficulties. In the past the domestic demand of mercury was much larger than now and thus, the environmental emission of mercury is mainly from the 'manufacturing' stage. On the other hand, at present proper management of waste mercury becomes critical, since recently the demand of mercury decreases significantly and at the same time the increased amounts of mercury containing products are discarded.

The HRA is carried out to examine the probability and likely-hood of hazardous impact of mercury to human for each region. The disposal plant of mercury-containing products shows much higher potential risks on human than more populated place with high consumption of mercury-containing products. It is due to that the amounts of discarded products with contain mercury increase, while the amounts of new mercury-containing products decrease because of international regulations. Thus, the management of waste mercury is critical in order to reduce the risks of mercury to human. In addition, the amounts of mercury emission are analyzed for 16 cities/provinces in Korea using the factors which consider the characteristics of different mercury containing products. Human exposure assessment is performed considering the amount of mercury exposed by air inhaled and water intake. The results of risk characterization show that the most harmful place for human risk is different from the place with the largest amount of mercury emission.

## 1. 서론

지난 20년간 선진국에서는 다양한 화학물질이 도입되고, 그 사용량 또한 증가되어 왔다. 다양한 산업에서 사용된 화학물질들은 새로운 기능 및 특성, 효과로 인하여 여러 산업에서 이득을 창출하는 데에 새롭게 적용되고 있으며, 유용하게 사용되고 있다. 이렇게 화학물질이 다방면에 널리 사용되면서, 이에 대한 독성과 환경에 미치는 영향에 대해 관심이 급증하게 되었다. 이를 관리하기 위해서는 물질에 대한 정량적인 정보와 이로 인해 미칠 수 있는 영향에 대한 연구가 요구된다.

특히 수은의 경우, 전 지구적으로 배출저감을 위해 국제협약 등으로 관리하고자 하는 국제적인 움직임이 나타나고 있으며, 이에 따라 국내에서도 2006년 환경부에서 수은 종합대책을 수립하여 수은의 배출 특성 및 배출기준, 관리방안 등을 도출하기 위해 연구 중에 있다. 그러나 현재까지 아직 수은에 대한 인벤토리의 구축, 배출계수 등 관리에 요구되는 데이터의 부족으로 관리에 어려움을 겪고 있다. 따라서 국제적인 수은 규제 대응에 발맞추어 가기 위해서는 국내의 수은에 대한 정량적인 흐름의 규명과 이에 대한 위해성평가가 요구되며 이를 통해 보다 실질적인 수은규제대응이 가능할 것으로 예상된다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서 근본적으로 환경과 인간의 활동을 연계하여 분석할 수 있는 환경영향 관리를 위한 분석 기법들이 개발되고 있으며, 이 중 물질흐름분석(SFA; Substance Flow Analysis)은 대상 시스템 경계 내에서 사용되는 물질의 흐름을 규명하고, 각 경제 시스템 경계와 환경계/기술계 간의 흐름을 추적하고, 해당 시스템 경계 내에 사용되는 물질의 양과 집중도를 나타내는 곳, 그에 대한 축적을 규명할 수 있다. 또한 위해성 평가(RA; risk assessment)를 통하여 인간에게 노출된 물질량으로 인해 미칠 수 있는 유해성에 대해 평가하여, 실제 우리가 물질을 사용함으로써 인간에게 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

## 2. 수은의 물질흐름분석

### 2.1 물질흐름분석의 수행 절차

물질흐름분석이란 경제와 환경 사이의 물질 또는 에너지의 흐름을 연구하기 위하여 물질수지 원리를 기반으로 물질의 물리적 흐름을 분석하는 것이다. 현재까지 물질흐름분석에 대하여 국제적으로 표준화된 방법론은 없으며, 본 연구에서는 다음과 같은 절차에 따라 수행하였다.

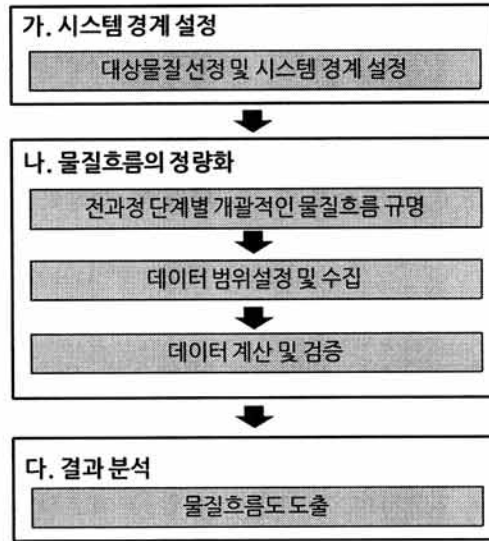


Fig. 1. 물질 흐름분석의 절차

2.2 물질흐름분석 수행

2.2.1 시스템 경계 설정

수은을 대상물질로 하여 Table 1과 같이 시스템 경계를 설정하여 수행하였다. 지리적 경계는 국내 자연계로부터의 원료채취와 물질의 배출로 정의되며 영토적 범위가 아닌, 수입·수출에 의한 행정상의 범위 내 물질의 흐름에 대해 나타내며, 우리나라의 경우 영토적으로 독립되어 있어 행정상의 경계와 영토적 경계가 동일시되기 때문에 지리적 경계를 한국으로 설정하였으며, 시간적 경계는 2009년으로 설정하였다.

Table 1. 수은의 물질흐름분석의 시스템 경계 설정

경계	정의
지리적 경계	한국
시간적 경계	2009년

2.2.2 물질흐름의 정량화

대상물질과 연관된 시스템 내의 흐름과 축적량에 대해 정량적으로 규명하는 단계로, 전과정 단계별 개괄적인 물질흐름 규명, 데이터범위 설정 및 수집, 데이터 계산 및 검증과정을 통해 수행될 수 있다.

• 전과정 단계별 개괄적인 물질흐름 규명

수은에 대한 물질흐름을 정량적으로 규명하는 가장 첫 번째 단계로, 정량적인 규명해야 하는 흐름을 파악하기 위해 수은의 개괄적인 흐름을 규명하는 단계이다. 이를 규명하기 위해 국외 수은에 대한 물질흐름분석 수행사례와 국내 산업정보, 산업계 동향보고서, 연구논문 등과 같은 다양한 문헌정보, 전문가 자문을 통해 실제 국내에서 나타나는 흐름에 대하여 규명하였다. 이를 통해 전과정에 걸친 수은의 개괄적인 흐름을 규명하였다.

#### • 데이터범위 설정 및 수집

수은에 대하여 전과정 단계별 세부적인 흐름을 정량적으로 규명하기 위해서는 통계, 문헌, 전문가 자문 등 다양하고 방대한 데이터 수집이 요구된다. 따라서 데이터 수집은 물질흐름분석 수행에 있어서 가장 많은 시간과 노력이 요구되는 단계이다. 이의 효과적인 수행을 위해 각 단계별로 해당 공정에 대한 필요 데이터 범위를 설정하고, 각 단계별 공정별로 목록화한 데이터를 수집하였다.

#### • 데이터 계산 및 검증

전과정 단계에 따라 각 공정별로 수집된 데이터를 바탕으로 질량보존의 법칙을 바탕으로 계산하였으며, 또한 산업 배출량을 산정하기 위하여 PBM(Population Balance Model)<sup>1)</sup> 기법을 사용한 동적 물질흐름분석을 수행하였다. 동적 물질흐름분석을 수행하기 위해 우선 산업별 수은의 투입량을 규명하고 산업별 수명분포를 도출하여, 수은의 배출량을 계산하였다.

### 2.2.3 결과분석

2000년부터 2009년에 대한 수은의 전과정 단계별 데이터를 통해 1년 단위의 물질흐름도를 작성하였다. 다음 Fig. 2는 수은의 물질흐름분석을 통해 작성된 2009년 수은의 물질흐름도이다. 아래의 흐름도는 'Material', 'Manufacturing', 'Use(Industry)', 'Waste management' 4단계로 구분하였으며, 각 단계별 네모는 공정, 화살표는 흐름, Use 단계의 공정 내 네모는 (축적+순축적)을 의미한다. 각 네모의 상, 하 흐름은 수출입을 의미하며, 각 단계별 수계, 대기, 토양 배출물에 대해서는 시스템 경계 아래에 나타내었다.

1) 공간내의 물질분포의 수지를 구하는 방법으로, 본 연구에서는 제품의 수명분포를 고려하여 특정년도에 폐기되는 제품의 양을 계산할 수 있음

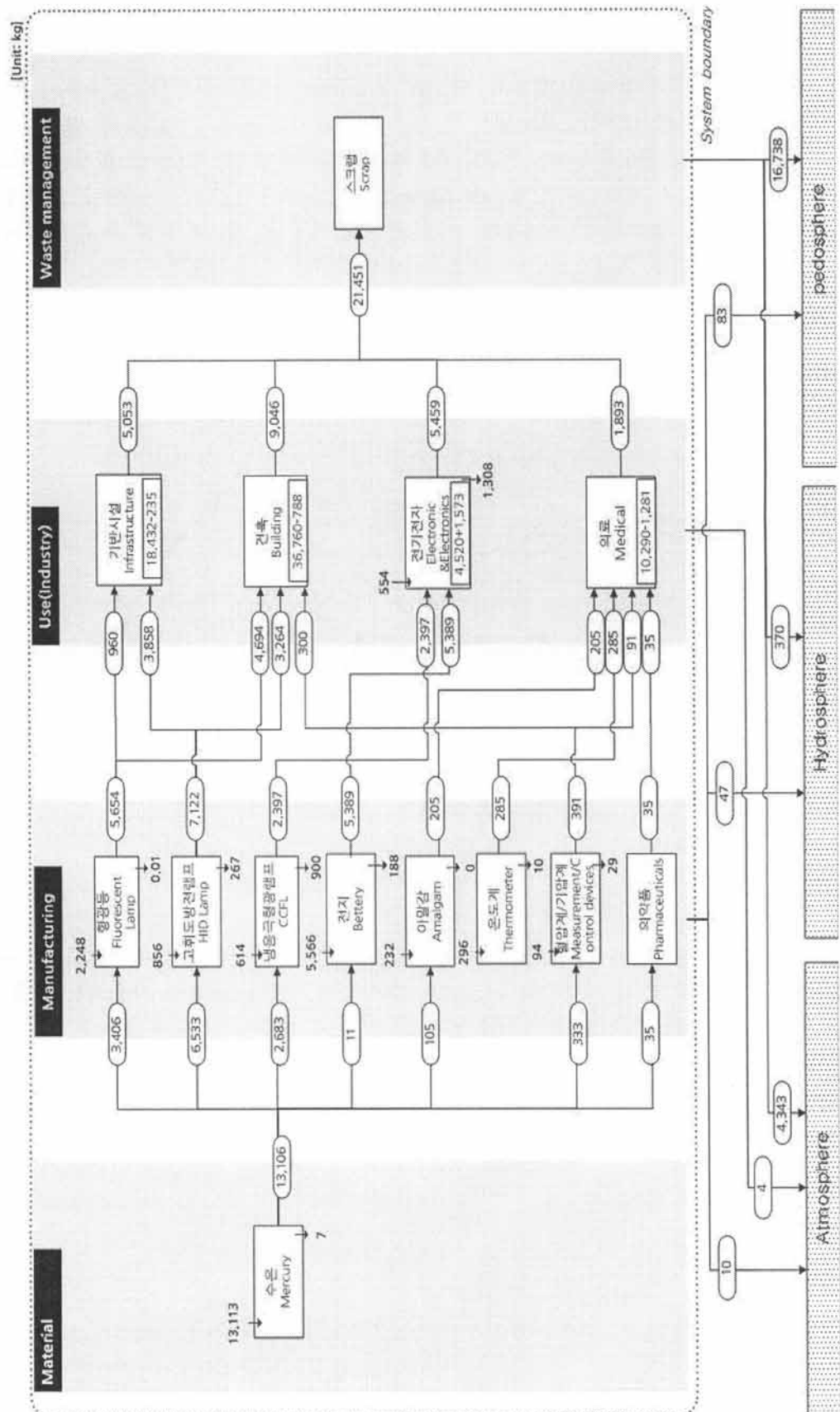


Fig. 2. 수은의 물질 흐름도 (2009년)

### • 산업별 수은 투입흐름 분석

Fig. 3은 2000년부터 2009년에 대한 산업별 수은의 투입량을 나타낸 것이다. 국내에서 소비되는 수은은 100% 수입에 의존하며, 이는 2000년대의 경우 형광등이 60%로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 그 외 아말감 22%, HID<sup>2)</sup> 11% 순으로 주요한 흐름을 나타내었다. 반면 현재에는 HID 램프가 50%, 형광등이 26%, CCFL(Cold Cathode Flourscent Lamp)<sup>3)</sup>이 20%로 나타나고 있다. 과거에 비해 현재의 형광등의 절대적인 수요량은 크게 변화가 없으나, 상대적으로 주로 거리나 도로 조명, 보안 조명과 같은 외부 조명으로 쓰이는 HID 램프의 수요가 증가하고, 2000년부터 CCFL를 BLU(Back Light Unit)<sup>4)</sup>으로 쓰는 LCD 산업이 급격히 발전함에 따라 그 비율이 증가하였다. 반면 그 외 아말감의 경우 최근 위해성 논란으로 인해 레진, 금 등과 같은 충전재로 대체되고 있어 그 수요가 감소하는 것으로 나타난다.

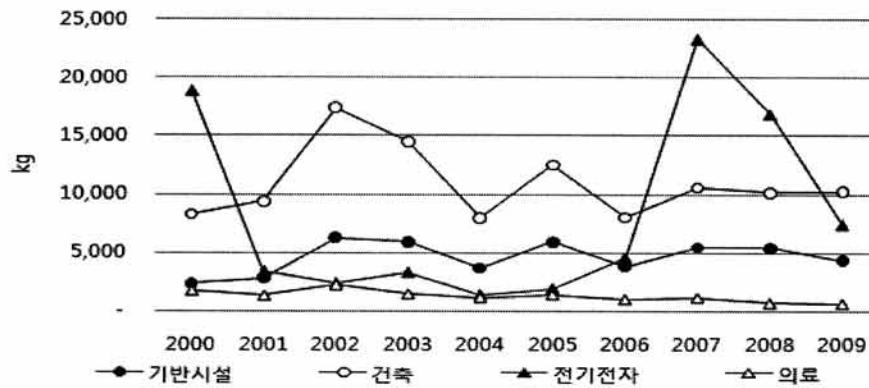


Fig. 3. 산업별 수은의 투입량

### • 수은의 축적 및 배출흐름 분석

위에서 도출한 산업별 투입량에 각 산업의 수명분포를 적용하여, 수은의 순축적량과 총 축적량, 배출량(재활용량+폐기량)에 대하여 다음의 Fig. 4와 같이 나타내었다. 수은을 사용하는 제품 및 산업은 대부분을 단기 수명을 띄고 있기 때문에 짧은 기간 내에 배출됨에 따라 축적량이 적게 나타나고 폐기량이 대부분을 차지하고 있다. 최근 수은의 사용량이 감소함에 따라 순축적량이 ‘-’값을 나타내고, 그 결과 총축적 또한 감소하는 흐름을 나타내고 있다.

2) 아크(arc) 방전식 전구의 일종으로서, (반)투명 용해 수정이나 알루미늄 튜브에 쌓인 텅스텐 전극과 아크 등으로 발광하는 방식

3) 외부에서 공급된 전압에 의해 방출된 전자가 가시광선을 만들어내는 LCD의 광원

4) 액정 디스플레이(LCD)는 자체로 빛을 내지 못하기 때문에 LCD 뒷쪽에 빛을 비춰야만 LCD에 나타난 화면을 볼 수 있으며, 이 때 LCD 뒷쪽에 고정시키는 광원을 지칭함

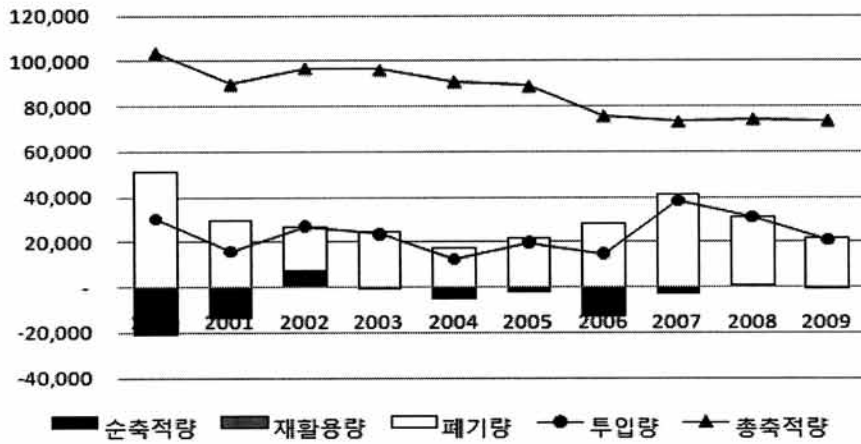


Fig. 4. 수은의 축적 및 배출흐름

수은이 사용된 형광등, HID램프, 전기·전자제품, 1차 전지는 일정기간 동안 사용된 후 배출되는 흐름을 갖고 있다.

폐조명제품은 수은의 가장 큰 흐름을 갖는 부분으로, 환경부가 EPR의 대상제품으로 포함하면서 한국조명재활용공사를 통해 회수되고 있으나, 아직까지 그 회수율이 약 20%로 낮게 나타나고 있으며 이 중 유리만이 재활용되며 수은은 전량 폐기되고 있다. 이는 수은에 대한 회수기술이 아직은 미흡하여 나타나는 현상으로, 회수 후 지정폐기물로 폐기하는 흐름을 갖는다. 이와 같이 수은에 대한 대부분의 흐름을 차지하는 조명기기에서 수은의 재활용이 이루어지고 있지 않은 실정이다. 전기·전자제품의 경우 또한 BLU가 사용되는 대표적인 제품이 TV에 대하여 2009년 95%의 재활용률을 보이고 있으나, 이 중 BLU로 사용되는 CCFL에 대해서는 회수조치 이루어지지 않아 조명기기 재활용업체로 공급도 이루어지지 않고 있는 상태이다.

1차 전지의 경우에도 과거에는 생활 폐기물에 포함되어 폐기됨에 따라 별도의 관리 및 수집 시스템조차 없었다. 그러나 2003년부터 EPR 대상품목에 포함됨에 따라 폐기물에 대한 관리가 시작되었으며, 2009년에는 산화은 전지의 경우에는 39%, 망간/알칼리 망간 전지의 경우에는 약 10%가 재활용되는 것으로 나타났다. 그러나 이 또한 이 중 다른 성분이 재활용 될 뿐, 이 중 수은이 재활용되는 흐름은 나타나지 않고 있다.

수은의 위해성과 관리의 필요성에 따라 수은이 주요하게 사용되는 조명제품과 1차 전지에 대한 관리제도가 시행되고 있으나, 정작 수은에 대한 관리 및 회수는 이루어지고 있지 않은 실정이다.

• 전과정 단계별 환경 배출흐름 분석

전과정 단계에 걸친 환경배출량 도출 결과, 아래의 Fig. 5와 같이 나타났다. 연도별 배출량 추이는 점차 감소하다가 2005년부터 증가하는 추세를 나타내는데, 이는 수은이 사용된 제품이 폐기물로 발생함에 따라 환경으로의 배출량이 크게 나타나게 된다.



환경배출량 중 가장 높은 비율을 차지하는 것은 토양 폐기물로, 이 중 대부분은 'Waste management' 단계에서 나타나고 있다. 일반적으로 사업장에서 수은이 토양 폐기물로 발생하는 경우, 지정 폐기물로 별도로 관리하여 처리되게 된다. 따라서 상대적인 배출량은 토양 배출량이 가장 높게 나타나나, 물질 흐름의 관리 관점에서는 토양 폐기물보다는 관리가 어려운 대기 및 수계 배출량에 대한 관리가 요구된다.

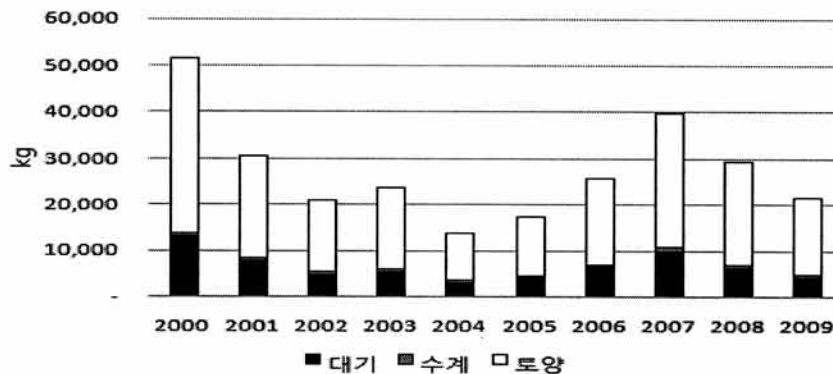


Fig. 5. 전과정에 걸친 수은의 대기·수계·토양 배출량

### 3. 수은의 인체 위해성 평가

위해성(Risk)이란 유해물질의 특정농도나 용량에 노출된 인체 또는 생태계에 있어 유해한 결과가 발생할 확률(Probability) 또는 가능성(Likelihood)로 정의된다. 이는 대상 수용체를 인체로 하는 인체 위해성 평가(Human Risk Assessment; HRA)와 생태계로 하는 생태계 위해성 평가(Ecological Risk Assessment; ERA)로 구분될 수 있다.

#### 3.1 수은의 인체 위해성 평가 절차

위해성 평가는 인체와 생태계가 환경적 유해(Environmental Hazard)에 노출되었을 경우에 발생 가능한 영향을 정성 또는 정량적으로 추정하는 과정으로 유해화학물질에 대한 역학적, 임상적, 동성학적 및 환경학적 연구결과로부터 외삽을 통해 주어진 조건 하에서 인체 및 생태계가 미칠 수 있는 위해범위를 예측하고 평가하는 것으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 위해성 평가 중 인간 건강에 대한 위해성 평가로써, 비발암성 물질에 의한 위해성 평가기법에 따라 수행하여, 위해성 확인, 용량-반응 평가, 노출 평가를 통해 결과를 도출하였다.

#### 3.2 수은의 인체 위해성 평가 수행

##### 3.2.1 위해성 확인

환경부에서는 우선적인 관리의 필요성이 가장 높은 화학물질 선정을 위해 화학물질 우선순위 선정 지원 프로그램(Chemical Ranking and Scoring ; CRS)을 시행하였다. 본 시스템은 위해성 평가와 일치하지는 않으나 일관성을 갖고 있는 개념으로, 시스템 내에서 위협(hazard)과 노출(exposure)의 함수로 설명되는 화학물질의 위협(threat)을 지표로 우선순위를 도출하는 방법이다. 그 결과 수은의 경우, 국내 사용량은 비교적 적은 물질이나 환경 중 노출되었을 경우 인체 및 생태에 미치는 유해 영향이 크기 때문에 총 선정된 26종 물질 중 1순위인 우선 평가 대상 물질 목



록 17종에 포함되어 선정되었다[19].

이에 따라 본 연구에서는 수은이 화학물질 중 관리의 필요성이 우선시되는 인체에 충분한 위해성을 내포하고 있다고 판단하고, 수은의 전과정 단계에 걸친 흐름에 따라 발생할 수 있는 노출경로를 파악하고, 이에 대한 위해성 평가를 수행하였다.

### 3.2.2 용량-반응 평가

EPA의 발암 분류 체계에 따르면, 수은의 호흡 경로 노출 및 섭취 경로 노출로 인한 위해도는 모두 비발암 영향으로 고려되고 있다. 따라서 본 연구에서는 수은으로 인한 위해도를 비발암성 물질에 대한 평가 방법을 기초로 참고치(reference concentration)를 이용해 위험값을 산출하고 평가하였다. 참고치의 경우 인체에 유해한 영향을 발생시킬 수 있는 기준치로, 국가적, 지역적 특성이 반영된 것이 아닌 인체의 반응에 대한 값으로, 국내에는 이에 대한 연구결과가 부재함에 따라 미국 EPA의 데이터를 활용하였다.

#### • 수은의 대기 중 참고치

수은에 대한 흡입 참고치는 건강한 성인이 어떠한 물질이 단위 농도( $\text{mg}/\text{m}^3$ )로 오염된 대기에 평생 동안 노출되었을 시, 이로 인해 유해한 영향이 나타나지 않을 최대 노출량으로, 본 연구에서는 US EPA IRIS에서 산정한 값을 인용하여 사용하였다. IRIS에서는 독성 실험 결과로 도출된 NOAEL에 불확실성 상수를 적용하여 참고치를 도출하였으며, 그 결과 도출된 대기 중 수은의 흡입에 대한 참고치는 3.9성 실험 결과 도출된 NOAEL값에 불확실성 상수를 적용하여 산출하였다. 그 결과, 대기중 수은의 흡입에 대한 참고치는 식 8)과 같이  $3.0 \times 10^{-4}$  ( $\text{mg}/\text{kg}\text{-day}$ )로 나타났다.

$$\begin{aligned} \text{참고치} (\mu\text{g}/\text{m}^3) &= \frac{\text{NOAEL or LOAEL} (\mu = \text{mg}/\text{m}^3)}{\text{불확실성상수} \times \text{첨가상수}} && \text{식 8)} \\ &= \frac{9}{30 \times 1} = 3.0 \times 10^{-4} (\text{mg}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

#### • 수은의 물 중 참고치

수은의 섭취에 대한 참고치는 건강한 성인이 어떤 물질에 단위 농도( $\text{mg}/\text{L}$ )로 오염된 물에 기대 수명 일생동안 마시고 살 경우, 이로 인해 유해한 영향이 나타나지 않을 최대 노출량을 말한다. 현재 IRIS에서 제시된 수은의 정량적 독성 실험결과가 없기 때문에, 본 연구에서는 미국의 음용수 기준치 관리안 수립에서 이용된 수은의 참고치를 적용하였다. 본 참고치는 수은의 자유편역계 이상으로 인산 신장 독성에 대한 영향에 기초하여 도출된 값으로,  $3.0 \times 10^{-4}$  ( $\text{mg}/\text{kg}\text{-day}$ )로 도출된다.

### 3.2.3 노출 평가

인체에 노출되는 수은의 배출량 산정을 위해서 물질흐름분석 결과를 바탕으로 지역별 배출량을 산정하고 이로 인한 오염도를 도출하여, 각 오염된 대기·수계에 노출되었을 경우 실제적으로 인체로 호흡 및 섭취되는 양을 도출하였다.

### · 대기·수계의 오염도 산정

위해성 평가를 위해서는 대상물질이 배출되었을 때 각각 대기·수계·토양으로 얼마나 흐름을 갖는지 그 경로에 대한 파악이 되어야 하고, 배출되었을 시 영향을 갖는 대상 범위를 규명하여 배출에 대한 농도의 산정이 필요하다.

본 연구에서는 2009년에 대하여 물질흐름분석을 규명한 대기·수계에 대한 배출량을 이용하여 각 전과정 단계에 따른 배출량을 각 지역별로 분배하여 지역별 농도량을 산정하였다.

우선 지역별 배출량 산정을 위하여 물질흐름분석 결과를 통해 도출된 각 환경배출량에 대하여 다음의 Table 2와 같은 할당인자를 적용해 시도별 배출량을 산정하였다. 형광등과 전지의 경우 분리수거의 여부에 따라 환경배출량이 다르게 나타나므로, 각 배출경로별 할당인자를 사용하였다.

Table 2. 제품별 환경배출량 지역 할당인자

제품명	전과정단계	지역 할당 인자		출처
형광등 (HID, CCFL 포함)	Waste management	비분리수거	지역별 건축허가 연면적	국토해양부
		분리수거	지역별 형광등 재활용 현황	한국조명재활용공사
전지	Manufacturing	지역별 전지 제조업체		로케트, 백셀
	Waste management	비분리수거	지역별 폐기물처리현황	환경부
		분리수거	지역별 전지 재활용업체	한국전지재활용협회
아말감	Manufacturing	지역별 치과 수		보건복지부
	Use(Industry)	지역별 인구 수		통계청
	Waste management	지역별 인구 수		통계청
온도계	Waste management	비분리수거	지역별 폐기물처리현황	환경부
혈압기	Manufacturing	-	-	-
	Waste management	지역별 병원수		보건복지부
기압계	Waste	지역별 건축허가 연면적		국토해양부

	management		
의약품	Waste management	지역별 인구 수	통계청

지역별 오염도, 즉 농도의 산정을 위해 지역별 분배된 환경 배출량에 각 지역별로 도출된 배출량이 영향을 미치는 대상 범위를 설정하였다. 대기의 경우에는 지역별 국토 면적에 대기혼합고도의 높이(1000m)를 적용하여 각 지역별로 대기 배출물이 분포되어 있는 부피(m<sup>3</sup>)를 도출하였으며, 수계의 경우에는 국토해양부의 ‘수자원총량 및 이용현황’에 따라 총 이용 가능한 수량을 수원별(하천수, 지하수, 댐)로 파악하고, 지역별 하천의 길이[22], 지역별 댐의 연평균저수량[22], 지역별 지하수 이용량[23]을 통해 지역별 이용 가능한 수량을 도출하였다.

‘수자원총량 및 이용현황’의 경우 가장 최근 데이터가 2006년에 대한 값으로, 데이터 일관성을 위하여 그 외의 데이터 역시 2006년을 기준으로 사용하였다.

물질흐름분석을 바탕으로 산출한 배출량은 1년 동안에 배출된 총량(kg/yr)을 의미하며, 인체 위해성 평가 시에는 그 참고치와 단위를 일치시키기 위하여 일일 배출량(mg/day)로 산정하여 계산하였다.

• 인체 노출 평가

도출된 인체 노출량을 바탕으로 실제적으로 호흡과 섭취에 의한 수은의 인체 노출량을 산정하였다.

대기 중 수은의 호흡을 통한 노출량의 경우, 다음과 같은 수식을 이용하여 산출하였다. 이 때 성인의 체중은 62.8kg, 일일호흡량은 남녀 호흡율의 가중평균을 통해 도출한 14.25m<sup>3</sup>/day를 적용하여 도출하였다[24]. 다음의 식 1)은 전과정에 걸친 서울의 대기 배출량에 대하여 계산한 예시이다.

$$\begin{aligned}
 \text{인체노출량}^{inhal_{air}}(mg/kg-day) &= \frac{\text{오염도}(mg/m^3) \times \text{일일호흡량}(m^3/day)}{\text{체중}(kg)} && \text{식 1)} \\
 &= \frac{2.17 \times 10^{-6}(mg/m^3) \times 14.25(m^3/day)}{62.8(kg)} = 4.93 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

일반적으로 물 중 수은의 섭취 경로를 통한 노출은 정수 처리되어 공급되는 가정수를 통해 이루어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 수계 배출된 물질량에 정수 처리율 99%를 적용하여 실제 인체가 섭취하는 물질량을 산정하였다(연세대학교 환경공해연구소, 2001). 이 때 성인의 체중은 대기 중 노출량 산정과 동일한 62.8kg이 적용되었으며, 일일음용수섭취율은 1.5를 적용하여 산정하였다[24]. 다음은 전과정에 걸친 서울의 수계 배출량에 대하여 계산한 예시이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{인체노출량}_{\text{water}}^{\text{ing}} \text{ (mg/kg-day)} && \text{식 2)} \\
 & = \frac{[\text{오염도 (mg/L)} \times (1.00 - \text{정수처리율})] \times \text{일일음용수섭취량 (L/day)}}{\text{체중 (kg)}} \\
 & = \frac{2.78 \times 10^{-3} \text{ (mg/L)} \times (1 - 0.99) \times 1.5 \text{ (L/day)}}{62.8 \text{ (kg)}} = 6.64 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

이와 같은 방법으로 각 지역에 대한 대기·수계의 오염도와 이로 인한 인체 노출량을 산정하였다.

### 3.2.4 위해도 특성화

국내 시·도별로 수은의 배출량으로 인한 인체 위해도를 산출하기 위하여 호흡 및 섭취에 대한 독성참고치를 활용하여 인체 독성 위험값을 도출하였다.

#### • 대기 중 수은으로 인한 인체 위해도

대기를 통한 수은의 호흡 독성 위험값 도출을 위하여 EPA에서 일반인에 대한 평가 지표로 제안하고 있는 호흡 독성 위험값인  $3.00E-04 \text{ (mg/m}^3\text{)}$ 을 활용하였다. 호흡 위험값은 호흡 참고치 대비 실제 호흡에 의한 인체 노출량을 통해 도출될 수 있으며, 이 값이 1보다 클 경우는 위해한 것으로 판단할 수 있다. 다음의 식 3)은 전과정에 걸친 서울의 호흡 위험값을 예시로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 \text{호흡위험값} & = \frac{\text{호흡노출에 의한인체노출량 (mg/kg-day)}}{\text{호흡참고치 (mg/m}^3\text{)} \times \text{체중 (kg)} / \text{일일호흡율 (m}^3\text{/day)}} && \text{식 3)} \\
 & = \frac{4.93 \times 10^{-07} \text{ (mg/kg-day)}}{0.0003 \text{ (mg/m}^3\text{)} \times 62.8 \text{ (kg)} / 14.25 \text{ (m}^3\text{/day)}} = 3.73 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

#### • 물 중 수은으로 인한 인체 위해도

물의 섭취로 인한 수은의 섭취 독성 위험값 도출을 위해 EPA에서 제안한 섭취 독성 참고치인  $3.00E-04 \text{ (mg/m}^3\text{)}$ 를 활용하였다. 섭취 위험값 역시 섭취 참고치 대비 실제 호흡에 의해 인체에 노출되는 양의 비율로 도출될 수 있으며, 이 값이 1보다 크게 나타나는 경우 인체에 위해한 것으로 판단할 수 있다. 다음의 식 4)는 전과정에 걸친 서울에 대한 섭취 위험값을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 \text{섭취위험값} & = \frac{\text{음용수섭취노출에 의한인체노출량 (mg/kg-day)}}{\text{섭취참고치 (mg/kg-day)} \times \text{오염된상대기여도}} && \text{식 4)} \\
 & = \frac{9.82 \times 10^{-09} \text{ (mg/kg-day)}}{3.00 \times 10^{-04} \text{ (mg/kg-day)}} = 3.27 \times 10^{-05}
 \end{aligned}$$

이렇게 도출된 각 지역별 흡입 및 섭취 위험값은 무차원의 값으로, 각 지역별 합산이 가능하며, 이를 통해 전과정 단계에 따른 각 시·도별 수은의 배출로 인해 흡입 및 섭취로 인해 발생할 수 있는 인체 위해도를 도출할 수 있다.

수은이 가장 많이 사용되는 형태는 형광등, 고휘도방전램프, 냉음극형광램프와 같은 조명기구이다. 그러나 이와 같은 조명기구의 경우에는 제조 및 사용 단계에서 환경배출량이 발생하지 않는

다. 따라서 폐기되는 단계에서 가장 많은 수은이 배출되는 것으로 산정되는 것으로 보인다. 또한 수은이 가공되는 과정에서는 최저 1%에서 최대 16%가 배출되나, 폐기 단계에서는 최저 3%에서 최고 50%까지 대기 및 수계로의 배출량이 나타난다. 따라서 상대적으로 폐기 단계에서의 환경배출량이 가장 높은 것으로 도출된다.

### 3.2.5 인체 위해성 분석결과

도출된 지역별 배출량과 지역별 인체 위해도 결과를 다음 Fig. 6과 같이 GIS(Geographic Information Systems)을 이용하여 나타내었다. 그 결과 배출량의 경우에는 경기, 서울, 경상북도 순으로 높게 나타나나, 인체 위해도의 경우에는 서울, 부산, 인천 순으로 높게 나타나고 있다. 각 배출량은 각 지역별 대기의 부피와 수계의 부피에 따라 농도가 산정되고, 해당 농도에 배출되었을 때 인체 위해도가 산정되게 된다. 따라서 배출량이 크다고 해도 그 범위가 광범위할 경우, 그 오염도가 작게 나타나고, 배출량이 상대적으로 작게 나타나도 영향을 미치는 범위가 작을 경우, 오염도가 높게 나타나 인체 위해도에 큰 영향을 나타내게 된다. 따라서 수은의 인체 위해도에 대해 관리 시에는 배출량 우선순위인 경기, 서울, 경상북도가 아닌 서울, 부산, 인천 순으로 관리되는 것이 적절할 것이라고 예상된다.

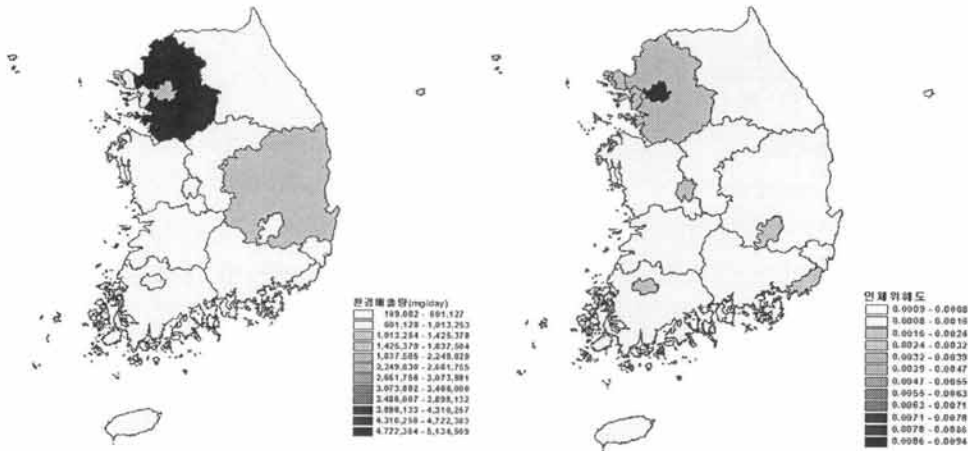


Fig. 6. 수은의 지역별 환경배출량(좌)과 인체위해도(우)

## 4. 결론

수은은 현재 화학물질 우선순위 선정 지원 프로그램(Chemical Ranking and Scoring ; CRS)에서 유해 영향이 큰 1순위 대상 물질 목록에 포함되어 있다. 이처럼 수은은 이에 대한 흐름 규명 및 관리의 필요성이 매우 대두되고 있으나, 현실적으로는 이에 대한 통계 데이터 및 회수 시스템 구축이 매우 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 물질흐름분석 기법을 통해 국내 수은의 흐름을 파악하고, 전과정에 걸쳐 발생하는 환경 배출량을 산정하여 이에 따라 발생하는 인체 위해도를 지역별로 평가하고자 한다.

물질흐름분석은 정적 모델과 동적 모델을 사용하여 전과정에 걸친 수은의 흐름을 규명하고, 수은이 사용되는 각 산업별 특성에 따라 일정기간 동안 수명을 가지고 사용된 후 배출되는 양을 도출하였다. 이와 같은 물질흐름을 규명하기 위하여 수은이 사용되는 주요한 흐름을 선정하고, 문헌, 전문가 자문, 통계 데이터를 통해 해당 물질흐름을 정량적으로 분석하였다. 산업별 수명의 경우, 수은이 사용되는 해당 산업의 주요제품군을 규명하고, 제품의 특성에 따라 기계적 수명 또는 소비자 성향에 따른 수명을 택하여 적용하였다.

또한 규명된 물질흐름을 바탕으로 'Material', 'Manufacturing', 'Use(Industry)', 'Waste management' 단계별로 각 제품의 흐름에 따라 발생하는 환경배출량을 산정하고, 이로 인한 인체위해도를 평가하였다. 인체 위해도의 경우, 지역적 특성에 따라 미치는 영향이 크게 차이가 나타나기 때문에, 시·도별 위해도를 개별적으로 산정하였다.

국내에서 소비되는 수은은 전량 수입에 의존하고 있으며, 이 중 주요 수요처로는 2009년 고휘도 방전램프 50%, 형광등 26%, 냉음극형광램프 20%로 조명기기가 전체 수은의 흐름 중 90% 이상을 차지하고 있다. 이는 주로 건축, 전기전자, 기반시설 산업으로 투입되어 사용된 후 배출된다. 최근 환경부에서 형광등, 고휘도방전램프, 전지를 생산자책임재활용제도 대상품목에 포함시킴에 따라 회수 시스템을 구축하고 있다. 그러나 아직까지 그 회수율이 낮게 나타나고 있으며, 회수된 경우에도 재활용되지 않고 전량 폐기되는 흐름을 갖는다. LCD TV에 사용되는 냉음극형광램프의 경우에는 아직 수명이 다하지 않아 배출되는 양이 거의 나타나지 않고 있으며, 향후 배출되었을 시 효과적인 관리를 위해서는 회수 및 처리 시스템의 준비가 필요하다. 현재 국내에는 수은이 재활용되는 흐름이 나타나고 있지 않으며, 회수 시스템이 구축되고 있는 상태이다. 수은의 자원순환성 향상을 위해서는 보다 체계적인 회수 시스템 마련과 이를 재활용 할 수 있는 기술개발이 필요하다.

수은의 환경 배출량의 경우 경기, 서울, 충청남도 순으로 높게 나타났으나, 배출량과 함께 배출되는 범위, 인체 노출경로 등을 고려하여 인체 위해성을 평가한 결과, 그 위해도가 서울, 부산, 인천 순으로 높게 나타났다. 이는 인체 위해성은 단순 배출량이 많음에 따라 비례하게 증가하는 것이 아니라, 인체에 노출되는 오염도에 따라 그 위해성의 다르게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 인체 위해성을 효과적으로 관리하기 위해서는 단순히 배출량이 많은 지역이 아닌, 실제적으로 인체 위해도가 높게 나타나는 서울, 부산, 인천에 대하여 우선적으로 관리가 요구된다.

## Reference

- [1] 국립환경과학원, 납, 카드뮴 및 수은 오염에 대한 위해성평가 기법 연구, 2005
- [2] Ayres, R.U., Accounting for resources 1: economy-side applications of mass balance principles to materials and waste, Edward Elgar, Cheltenham, 1998
- [3] Ayres, R.U., Accounting for resources 2: the life cycle of materials, Edward Elgar, Cheltenham, 1999

- [4] Robert U. Ayres, Leslie Ayres, a handbook of industrial ecology, 2002
- [5] Paul H. Brunner, H. Rechberger, Practical hand book of material flow analysis, CRC press company, United States of america, 2004
- [6] 김상용, 물질흐름분석의 개요 및 연구동향, 한국생산기술연구원, 2006
- [7] 환경부, 주요자원의 물질흐름분석을 통한 자원생산성향상방안 연구, 환경부, 2008
- [8] Ichiro Daigo, Daisuke Fugimake, Yasunari Matsuno, and Yoshihiro Adachi, Debelopment of a dynamic model for assessing environmental impact associated with cyclic use of steel, iron and steel institute of Japan edition Vol 91 p171-p178, 2005
- [9] Kazuhiko Yokota, Yasunari Matuno, Masaru Yamashita and Yoshihiro Adachi, Integration of life cycle assessment and population balance model for assessing environmental impacts of product population in a social scale, the international journal of life cycle assessment Vol 8 p129-p136, 2003
- [10] Dmitri H. Rubisov and Vlandmiros G. Papangelakis, Mathematical modelling; of the transient ehaviour of CSTRs with tractive pakulates: Part 1- The population balance framework, the canadian journa of chemical engineering Vol 74, 1996
- [11] 홍석진, 목재의 물질흐름분석과 탄소계정에 관한 연구, 2009
- [12] 유무상, 전과정평가에서 실내공기오염의 평가를 위한 Damage Factor의 개발, 2007
- [13] 한국산업기술시험원, 신뢰성 용어 수명분포, 2006
- [14] 이효영, 신뢰성 공학 개론, 2005
- [15] 지식경제부, 조명기기 이용.실태조사, 2008
- [16] 환경부, 국내 수은 유통 및 배출현황 기초조사, 2009
- [17] 의료폐기물 처리 실태 및 처리 방안
- [18] 환경부, 국내 수은 유통 및 배출현황 기초조사, 2009
- [19] 환경부, 위해우려물질 선정 및 평가 연구, 2003
- [20] United nations environment programme, toolkit for identification and quantification of mercury releases, 2010
- [21] Exposure assessment in the envaluation of risk to human heath, 1999
- [22] 국토해양부, <http://www.mltm.go.kr>
- [23] 국가지하수정보센터, <http://www.gims.go.kr>
- [24] 환경부, 한국노출계수핸드북, 2007