

산업연관분석표를 이용한 국내 납(鉛)의 물질흐름분석

-납의 축적량과 사용 후 제품 발생량을 중심으로-

장석도, 신미지, 안상전

(주)에코아이

Material Flow Analysis of lead with Input-Output table in Korea

Seok Do Jang, Mi Ji Shin, Ahn Sang Jeon

Ecoeye CO., Ltd.

Abstract

This study conducts the dynamic-material flow analysis (D-MFA) of Lead (Pb) with the Input-Output Tables issued by The Bank of Korea. As a result, an efficient material cycle system is formulated for the Pb flow(Raw materials and production-a primary production-Intermediate products-The final product-waste), stock and waste flow in 2008. The major conclusions are (1) Korean lead waste ratio was peak in 2005 but little by little after that, (2) stock ratio was peak in 2002, and (3) material recycling rate was 30% in 2008.

Keyword : Material flow analysis, Substance flow analysis, MFA/SFA, Lead, Pb, Recycle

주제어: 물질흐름분석, 산업연관분석표, 납, 재활용, 도시광산

1. 서론

국제통화기금(IMF)와 경제협력개발기구(OECD)가 최근 공동으로 작성한 'G20 주요 경제지표'를 보면, 2008년 우리나라 국내총생산 GDP에서 수출이 차지하는 비중은 45.4%로 G20 회원국 가운데 가장 높았다. 반면, 자원이 부족한 우리 경제의 특성상 수입 비중(46.8%, 2위 보다 약 14% 높음) 또한 G20 회원국 가운데 가장 큰 것으로 나타났다. 우리경제가 더 많은 수익을 확보하려면 수입 보다 수출이 많아야 한다. 하지만, 대부분의 원자재를 수입해야하는 국내 여건상 그 한계가 명백히 존재할 수밖에 없다.

지금 세계는 리튬 광산을 놓고 자원 전쟁이 벌어지고 있으며, 그 중심에 볼리비아가 있다. 리튬

은 세 번째로 가벼운 원소이고 금속 원소로는 제일 가볍다. 21세기의 추세가 된 전기자동차 혹은 하이브리드카도 리튬이온 전지가 필수적이다. 따라서 자동차 제조국가들은 리튬 확보에 혈안이 될 수밖에 없다. 리튬 전쟁에 불을 붙인 것은 중국이다. 중국이 리튬 수출을 통제하기 시작한 것이다. 이는 자원민족주의의 대표적인 사례라고 할 수 있다.

이처럼 전 세계는 자원이라는 목표로 전쟁을 하고 있고, 이로 인해 자원 민족주의라는 신조어가 생겨나기에 이르렀다. 게다가 대부분의 원자재를 수입에 의존하는 우리나라는 자원전쟁에 있어 약자일 수밖에 없다. 금속광물자원의 양은 한정되어 있으나 주요 산업에 없어서는 안 될 필수 원자재이다. 천연자원의 보존과 자원고갈과 자원가격 상승 등으로 인한 산업 위기에 유연하게 대처하기 위해서는 건강한 물질순환경제를 구축해야 한다.

산업별로 주요하게 쓰이는 물질이 얼마만큼 추출되고, 변환되어 이용되는지를 정량적으로 파악하고 이해하기 위해서는 산업간 거래되는 물질의 복잡한 네트워크를 자세하게 살펴보는 물질흐름분석이 필요하다. 산업 전반에 걸쳐 사용되는 자원의 특성상 현장조사(bottom-up 방법)를 통해 도출하는 물질흐름이 산업현장을 가장 정확하게 반영할 수 있다. 그러나 조사 시간 및 인력투입에 한계가 있고 기업이 정보공개 노출을 꺼리는 점 등 때문에 수행하기 어렵다. 이 때문에 본 연구에서는 산업간 공급망을 통한 자원흐름을 추적하기 위해 산업연관표를 기본 데이터로 활용한다. 산업연관표는 한 나라에 존재하는 수많은 산업간 물질거래를 하나의 통일된 물량단위로 파악하는 것이 어렵기 때문에 금액단위로 작성된 통계표이다.

산업연관표의 배출계수를 이용하여 납(鉛)의 산업간 물질흐름 및 최종소비 흐름을 파악하고, 내구년수를 고려하여 자연환경으로 배출되는 사용 후 제품 발생량, 가정이나 산업에 축적되는 축적량을 산정하였다.

2. 연구 방법

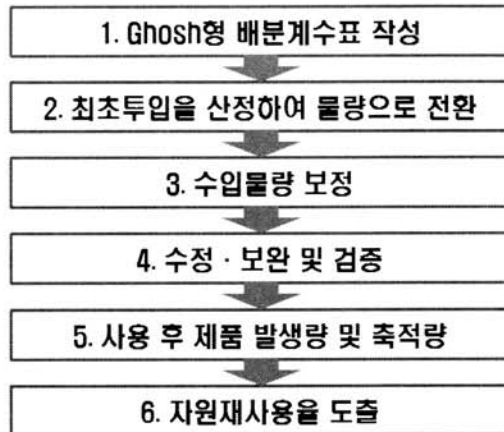
물질흐름분석을 수행하기 위해 다음과 같은 요건을 충족 할 수 있는 모형의 개발이 필요했다.

- 산업간 물질흐름을 파악할 수 있어야 한다.
- 가용한 데이터가 제한된 경우에도 사용할 수 있어야 한다.
- 채광되거나 수입된 천연자원이 공급망, 소비, 수출을 통해 분배되는 구조를 파악할 수 있어야 한다.

이러한 조건을 만족시키기 위해서 산업연관분석표의 Ghosh형¹⁾ 모형을 이용하였다. Ghosh형 모형은 전방연관효과(Forward Linkage Effect) 즉, 특정 산업부분에서 생산이 증가하면 다른 산업부

1) Ghosh 모형은 투입물이 산업의 공급망을 통해 분배되는 구조를 밝히는 산업연관분석표의 모델 중 하나이다.

분의 생산에 투입되는 상품의 공급이 추가적으로 증가하여 투입물과 생산과의 관계가 유기적으로 이어지는 모델이다. 산업연관분석표(Ghosh형 모델)를 통해 투입된 자원이 공급망을 통해 산업, 소비, 수출에 분배되는 구조를 파악하되, 현장에서 수집한 데이터를 동시에 사용할 수 있도록 하여 데이터 간 검증작업을 가능하게 하고 물질흐름 모형수립의 유연성을 높였다. 이를 본 연구에서는 HGM(Hybrid Ghosh Model)이라고 부르며 다음과 같은 절차로 수행되었다.



[그림 1] 물질흐름분석 수행 절차

2.1. 산업연관분석표상의 납(鉛)과 아연 분류

산업연관분석표에는 “연(납) 및 아연괴” 산업으로 통합되어 있기 때문에 현장데이터 및 문헌자료를 이용해 “연(납)” 산업과 “아연” 산업으로 분류한다.

2.2. Ghosh형 배분계수표 작성

배분계수는 납(鉛)이 재화나 서비스의 생산에 사용되기 위하여 다른 산업으로 배분되는 비율을 뜻한다. 즉, 산업연관분석표에서 각 산업금액을 총 납(鉛)의 총 공급액으로 나누어 Ghosh 배분계수를 산정하였다. 납(鉛)이 다른 산업으로 배분되더라도, 축적되거나 혹은 폐기물로 배출되어 다른 산업으로 배분되지 않는 경우가 있는데, 이를 보완하기 위해 납(鉛)이 다른 산업으로 배분되면 1, 배분되지 않으면 0으로 벡터 M을 산정하였다.

$$E = A \times D \dots\dots\dots\text{식 (1)}$$

- A : Ghosh 배분계수와 벡터 M을 곱한 계수
- D : $(I - A)^{-1}$ 의 납(鉛)의 대각행렬
- E : 최초투입량을 1로 보았을 때 납(鉛)의 배분계수

2.3. 최초투입을 산정하여 물량으로 전환(하이브리드화: Hybridization)

최초투입량은 납(鉛)의 물질흐름분석의 시작이자 가장 중요한 절차라고 할 수 있다. 이는 최초투입량에 따라 납(鉛)의 물질흐름양이 달라지기 때문이다. 앞서 구했던 배분계수표에 국내 산업으로 투입되는 납(鉛)의 최초 투입량을 산정하여 배분계수와 곱하여 물량단위로 전환 하였다. 최초 투입량은 무역통계 자료를 활용하여 납(鉛)광 및 괴의 수입, 전년 이월, 국내생산 물량 및 지질자원 연구원의 광산물 수급현황을 토대로 구하였다.

$$H = W \times E \dots\dots\dots\text{식 (2)}$$

- W : 국내 산업으로 투입되는 납(鉛)의 최초투입량
- E : 납(鉛)의 배분계수표
- H : 물량으로 전환한 납(鉛)의 배분 행렬

2.4. 수입물량 보정

수입물량을 보정해 주는 이유는 앞서 구한 H행렬이 국내에서 생산된 광물의 배분만을 나타내기 때문이다. 즉, 각 산업에서 수입된 제품에 포함되어 국내 산업으로 유입되는 광물의 배분은 H행렬만으로는 계산할 수 없다. 따라서 수입제품에 포함되어 직접 각 산업으로 유입되는 납(鉛)의 양을 계산하여 물량을 보정하였다.

$$V_i = (H_i + M_i) \dots\dots\dots\text{식 (3)}$$

- H_i : H행렬을 통해 i산업으로 투입되는 납(鉛)의 양
- M_i : i 산업으로 수입되는 납(鉛)의 양
- V_i : 보정한 i 산업의 납(鉛)의 양

2.5. 수정·보완 및 검증

위의 결과 중 물질흐름의 대부분을 차지하는 주요 허브를 중심으로 현장데이터와 대조하고, 물질수지 점검하고 차이가 있을 경우 이를 규명하고 수정·보완작업을 수행하였다. 또한 수집데이터의 불확실성이 물질흐름분석 산출결과에 미치는 영향을 정량적 분석도구인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 사용하여 분석하였다. 분석의 효율성을 높이기 위해 수집데이터 중 기여도 및 불확실성이 높은 주요 데이터를 선택하고, 적합한 확률분포를 결정한 후 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

2.6 물질흐름도 작성

HGM 방법론으로 작성된 산업연관분석표를 바탕으로 물질흐름도를 작성하였다. 작성된 산업연관 분석표의 장점은 403개의 산업간의 납의 흐름이 모두 연계되어 있다는 것이다. 즉, 납(鉛)의 투입 부터 소비까지의 모든 산업 흐름을 파악할 수가 있다. 하지만, 단점으로는 맵으로 표현하기에 한 계가 있다. 때문에 다음과 같은 과정으로 물질흐름도를 작성하였다.

- 가) 원료 및 생산 단계: 최초 광석 및 피의 투입량
- 나) 1차 가공 단계: 납(鉛)피에서 분배된 산업으로 상위 10개와 그 누적비율을 표현
- 다) 중간제품 단계: 1차 가공단계 10개 산업들에서 분배된 산업들로 상위 10개와 그 누적비율을 표현 ※중간단계는 상당히 많은 산업들이 유기적으로 존재하기 때문에 더 이상의 표현이 불가능함
- 라) 최종제품 단계: HGM 방법론으로 작성된 산업연관분석표에서 국내소비 부분에 해당하는 산업으로 이를 상위 10개의 산업으로 표현

2.7. 사용 후 제품 발생량 및 축적량

제품내의 납(鉛)은 사용단계를 거쳐 폐기된다. 해당년도의 사용 후 제품 발생량은 납(鉛)의 최종 소비로의 투입량, 제품 내구년수에 대한 함수로 추정할 수 있다. 제품내구년수는 법인세법 시행규칙²⁾에 의해 산정하였다.

- 사용 후 제품 발생량 = 최종소비되는 연도별 투입량 × 해당년도 배출될 확률(내구년수, 표준편차고려) ... 식 (4)
- 축적량 = 당해년도 축적량 + 당해년도 투입량 - 당해년도 사용 후 제품 발생량 축적량 식 (5)

2.8. 자원재사용율 도출

자원재사용율은 재활용 가능한 자원이 폐기되는 총 자원에서 차지하는 비중을 말하며 다음과 같이 도출한다.

$$\text{자원재사용율(\%)} = \frac{\text{자원재사용량}}{\text{폐기량}} \times 100 = \frac{\text{국내내수Old 스크랩양}^3 + \text{수출Old 스크랩양}^4}{\text{당해년도 폐기량}} \cdot \text{식 (6)}$$

2.9. 검증

납(鉛)의 검증은 집계 및 통계 자료가 확실치 않은 중간제품 단계를 제외한 최종산업에서 승용차, 승합차, 화물자동차에 대해 한국자동차공업협회 자료와 일본 광물자원공급대책조사보고서(2007년) 자료를 이용하여 검증 하였다.

2) [2010.03.31 기획재정부령 제139호]

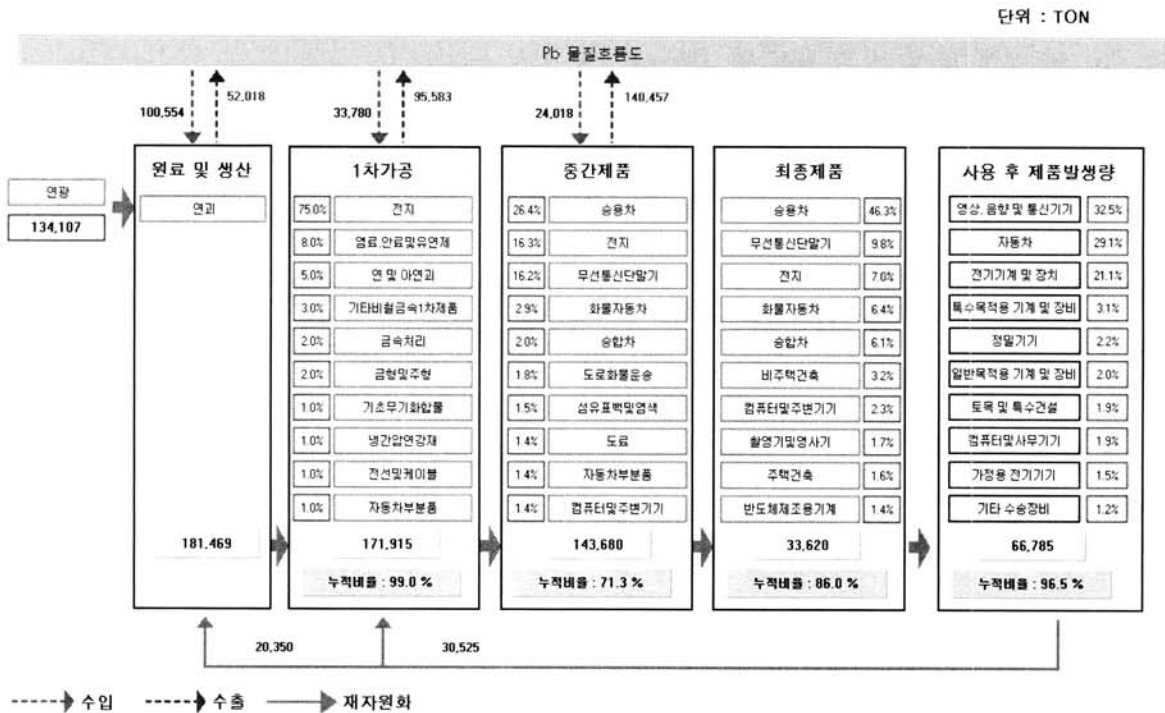
3) 수출(올드스크랩) = 국내 총 스크랩 수출량 × 수출스크랩의 자원함량 × 올드스크랩 발생비율

4) 국내내수 Old 스크랩 = 국내공급 스크랩 총량 × 자원함량 × 수요배분계수

3. 납(鉛)의 물질흐름분석 결과

3.1. 납(鉛) 물질흐름도(2008)

HGM 방법론을 이용한 납(鉛)의 물질흐름을 원료 및 생산-1차가공-중간제품-최종제품-사용 후 제품발생량 5단계로 나누어 작성한 물질흐름도는 다음과 같다.



[그림 2] 납(鉛)의 물질흐름분석(2008년)

‘2.6 물질흐름도 작성’에서 설명하였듯이 [그림 2]의 물질흐름도는 납(鉛)의 물질수지를 맞추어 물량을 계산하는게 목적이 아니라, 국내 납(鉛)의 흐름을 표현하는데 그 목적을 두었다.

A) 원료 및 생산 단계: 납(鉛)광 및 괴를 공급하는 단계이다. 국내에서는 수입된 납(鉛) 광석을 괴로 생산하여 다음 산업인 1차 가공 산업으로 판매한다. 납(鉛)광석은 국내 생산량은 극히 적으며 대부분을 수입에 의존한다. 2008년 납(鉛)광석은 수입, 재고 및 국내 생산을 합하여 총 134,107톤이 납(鉛)괴로 생산되고, 100,554톤의 납(鉛)괴가 수입되고, 52,018톤이 수출된다.

B) 1차 가공제품 단계: 납(鉛)괴를 이용하여 생산되는 제품을 말한다. 주로 전지 산업(75%)의 재료로 사용되며, 전지 외의 사용처로는 염료 및 안료(8%), 기타비철금속1차제품(3%), 금속처리(2.0%) 등에 사용된다.

C) 중간제품 단계: 1차 가공제품을 이용하여 산업 부품 소비 형태로 이루어진다. 1차 가공제품에서 대부분 전지 산업에 사용되었던 납(鉛)은 중간제품 단계로 오면서 전지를 사용하는 다양한 산

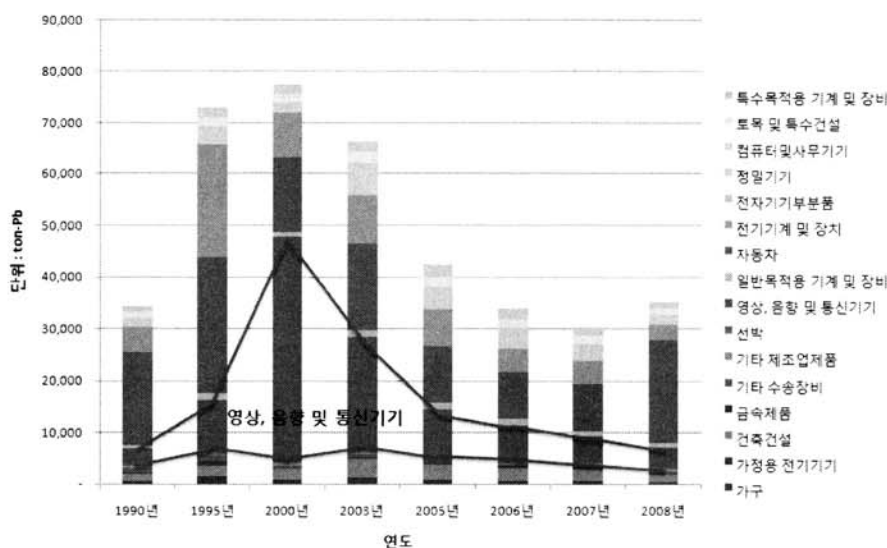
업에서 사용된다. 전기통신, 전기기기, 비상용 전원 등에 사용되는 고정용 축전지, 자동차의 시동, 점등, 점화 등에 사용되는 자동차용 축전지 등 전지와 관련된 다양한 산업에 사용된다.

D)최종제품 단계: 소비자들이 직접 접하는 제품들이다. 납(鉛)은 앞서 언급했듯이 대부분이 전지 형태로 사용되며 그 수요처는 자동차용 축전지, 전자 통신 산업용 축전지, 건물 등에 비상용 축전지 등 순으로 사용된다. 가장 많이 소비되는 부문은 승용차 46.3%(15,575 Ton-Pb), 무선통신단말기 9.8%(3,310 Ton-Pb), 전지 7.0%(2,369 Ton-Pb), 화물자동차 6.4%(2,155 Ton-Pb), 승합차 6.1%(2,064 Ton-Pb) 등으로 주로 자동차와 전기 및 전자기계 산업 순으로 나타났다.

E)사용 후 제품 발생량 단계: 최종제품 단계에서 소비된 제품들의 각각의 내구년수를 적용하여, 해당연도에 각 산업에서 배출되는 폐 제품량을 예측한 단계이다. 폐기되는 자동차, 건축 철거물, 폐 가전제품 등 시장에서 더 이상 제품으로서 역할을 하지 못하여 폐기되는 것을 말한다.

3.2. 최종소비 산업 부문

아래 [그림 3]은 연도별 납(鉛)의 최종소비 산업을 산업연관분석표의 중분류(78개 산업) 중 납(鉛)의 흐름과 관련 있는 16개 산업으로 나타낸 그림이다.



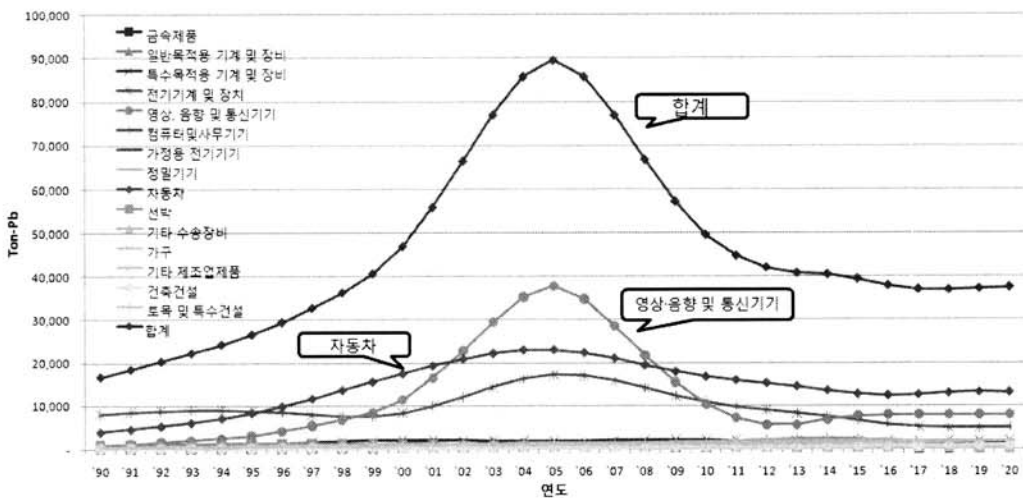
[그림 3] 연도별 납(鉛)의 최종소비 산업 부문

[그림 3]의 연도별 납(鉛)의 최종소비를 살펴보면, 2000년 이후로 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 그 원인으로는 전 세계적으로 납의 유해성분이 알려지면서 점차 그 사용량이 줄어들었고, 본격적으로 2003년 EU에서 제시한 유해물질 사용에 관한 지침(RoHS)에서 납(鉛)의 사용억제를 제시한바 있다.

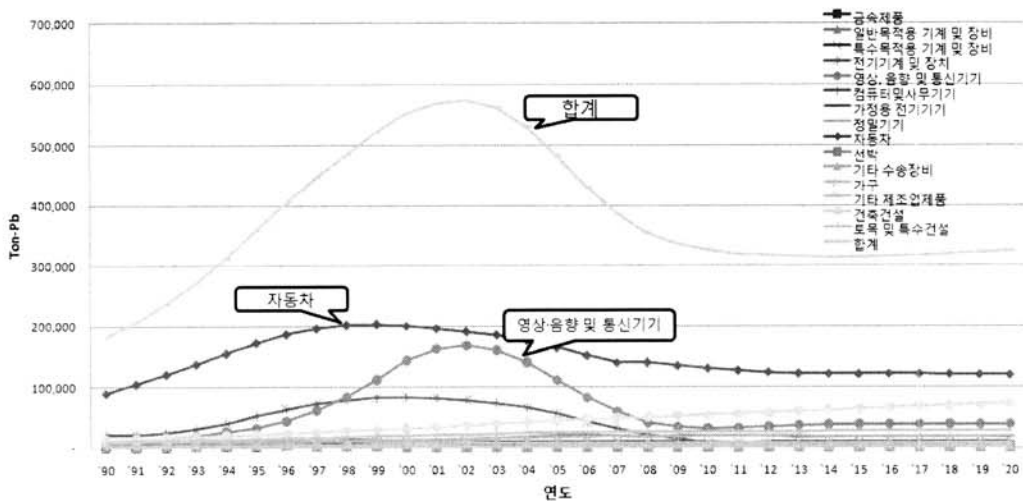
산업별로 살펴보면 영상·음향 및 통신기기에서 2000년을 기점으로 사용량이 현저히 줄어들었다는 걸 알 수 있다. 이는 기존의 카세트 테이프 및 CD 등을 이용하여 들던 음원을 온라인에서 듣기 시작하였고, 가정용 전축, 휴대용 카세트 등의 음원 전달 매체가 소형 제품인 MP3플레이어 형태로 바뀌게 되면서 납(鉛)의 영상·음향 및 통신기기에서의 사용량이 줄어들게 된 것으로 판단된다.

3.3. 납(鉛)의 사용 후 제품 발생량 및 축적량 예측

[그림 4, 5]는 납(鉛)의 사용 후 제품 발생량과 축적량을 예측한 그래프이다.



[그림 4] 산업별 납(鉛)의 사용 후 제품 발생량 예측



[그림 5] 산업별 납(鉛)의 축적량 예측

[그림 4]의 사용 후 제품 발생량과 [그림 5]의 축적량은 각각 1975년부터 2008년까지의 납(鉛)의 물질흐름분석 결과(최종소비제품)를 토대로 해당 산업의 내구연수를 고려하여 작성하였다. [그림 4]를 살펴보면, 2005년에 납(鉛)의 사용 후 제품 발생량이 89,551 Ton-Pb로 가장 많이 배출되는 것을 알 수 있다. 그 이유는 [그림 3]에서 찾아 볼 수 있다. [그림 3]에서 영상·음향 및 통신기기의 2000년 최종소비가 가장 많은 것을 알 수 있다. 영상·음향 및 통신기기의 내구연수가 5년⁵⁾인 것을 고려했을 때 제품이 폐기되는 시점 즉 2005년에 가장 많은 폐기물이 배출되는 것을 알 수 있다. [그림 5]를 살펴보면, 1990년도부터 지속적으로 납(鉛)의 축적량은 증가하다가 각종 규제 등으로 인해 소비가 줄어들면서 2002년을 기점으로 점차 그 축적량은 줄어들고 있다. 산업별로 살펴보면 최종소비에서와 마찬가지로 영상·음향 및 통신기기에서 2002년을 기점으로 급격히 줄어들었음을 알 수 있다. 또한 납(鉛)의 주요 사용분야인 자동차 산업에서 축적량이 가장 크게 나타났다.

3.4. 자원재순환률

납(鉛)은 사용단계에서 제품의 내구연수 동안 체류한 후 폐기된다. 폐기단계에서는 수집, 분류, 재활용, 폐기와 같은 복잡한 경로를 거쳐 일부 자원은 다시 국내 생산업체로 재순환되거나 스크랩 형태로 수출된다. 또 다른 경로는 제품형태로 배출된 폐제품을 부품교체 후 재제조(예; Remanufacturing)하거나 중고제품으로 수출하는 경로도 있다. 일부 자원은 고철순환에 불순물로 포함되어 이동하기도 한다.



[그림 6] 납(鉛)의 자원재순환율

위 [그림 6]을 보면 납(鉛)의 자원재순환율을 연도별로 나타내었다. 산업 발달이 이뤄진 2000년부터 2008년까지를 살펴보면 그 평균 자원재순환율은 26%이다. 전 세계 납(鉛)의 재활용은 약 50% 이상을 차지하며, 서유럽은 약 60%, 미국의 경우는 70%에 달한다⁶⁾. 국내의 경우는 세계 납 재활용량에 못미치는데 이는 재활용 의식 부족등으로 수거된 스크랩들의 해외 유출(혹은 수출)이

5) 법인세법 시행규칙 [2010.03.31 기획재정부령 제139호]

6) 아연과 납 이용 및 재생, 한국철강신문, 강탁 외 3명, 2005

많기 때문이라고 해석하였다.⁷⁾

4. 결론 및 시사점

이번 연구에서는 한국은행의 산업연관표(Input-Output Table)를 기반으로 한 Hybrid Ghosh-MFA와 시계열에 따라 자원의 이용과 손실을 고려한 Dynamic-MFA(동적물질흐름분석) 접근법을 이용한 방법론을 개발하고 납(鉛)에 적용하였다.

결과에서 보여주듯이 국내에서 납(鉛)은 그 수요가 2000년 중반에 비해 많이 줄어들었지만 2008년 이후로는 꾸준히 특정 산업에서 사용되는 것을 알 수 있었고, 축적량 예측을 통해 현재 시장에 얼마만큼의 납(鉛)이 도시광산으로 형성되어 있는지 알 수 있었다. 또한 사용 후 제품 발생량 예측은 재활용 가능한 납(鉛)의 양을 보여 주었다.

본 연구결과와 같이 1, 2차 자원에 대한 자원흐름을 파악하여 주요자원의 이용 및 흐름에 대한 정량적 정보를 축적하는 것은 2차 자원 즉, 도시광산자원의 이용 가능성을 가늠해볼 수 있게 해주어 순환자원경제를 이루는데 기본정보로 활용될 수 있을 것이다. 따라서, 납(鉛) 뿐만 아니라 대상자원을 확대⁸⁾하여 물질흐름분석을 수행하는 것은 순환자원경제를 이루는데 중요한 역할을 수행할 것이다. 또한, 이제는 자원수급의 불안정성에 대응하기 위한 국가 규모의 자원관리체계를 구축하여, 자원수급안정과 자원생산성 향상을 바탕으로 자원위기에 탄력적으로 대응할 수 있는 역량을 강화시켜야할 때이다.

Reference

- 1) A note on the calculus for physical input - output analysis and its application to land appropriation of international trade activities, Ecological Economics, Suh, S. 2004
- 2) The multilevel cycle of anthropogenic lead I. Methodology, Resource, Conservation and Recycling, J.S Mao, Jaimee Dong, T.E. Graedel, 2008
- 3) The multilevel cycle of anthropogenic lead II. Results and discussion, Resource, Conservation and Recycling, J.S Mao, Jaimee Dong, T.E. Graedel, 2008
- 4) 폐금속자원 재활용의 국가정책 및 국내현실에 관한 고찰, 환경공단, 2010
- 5) 아연과 납 이용 및 재생, 한국철강신문, 강탁 외 3명, 2005
- 6) 광산물 수급현황, 한국지질자원연구원, 2008

7) 납 스크랩 수거 업체의 인터뷰

8) 산업연관분석표에는 알루미늄, 아연, 구리 등 다양한 광종들이 구분되어 있다.

- 7) 자원총람, 한국지질자원연구원, 2005
- 8) 자동차통계월보, 한국자동차공업협회, 2010
- 9) 한국비철금속협회, <http://www.nonferrous.or.kr/>
- 10) 한국무역협회, <http://stat.kita.net/main/stat/main.jsp>
- 11) 한국지질자원연구원, <http://rik.kigam.re.kr/>
- 12) 국가통계포털, <http://kosis.kr/nsportal/index/index.jsp>