

폐도금액내 유가금속(Ag) 회수 공정에 대한 전과정 환경성 분석

김다연* · 이성유* · §황용우** · 권택관*

*인하대학교 순환경제환경시스템전공, **인하대학교 환경공학과

Life Cycle Environmental Analysis of Valuable Metal (Ag) Recovery Process in Plating Waste Water

Da Yeon Kim*, Seong You Lee*, §Yong Woo Hwang** and Taek Kwan Kwon*

*Program in Circular Economy Environmental System, Graduate School, Inha University

**Department of Environmental Engineering, Inha University

요 약

우리나라는 2018년 기준 전기전자 분야에서 은 수요는 249백만 톤으로 조사되었으며, 태양광 모듈용으로는 81백만 톤으로 조사되었다. 현재 태양광 모듈 설치의 급증으로 해당 분야의 은 사용량 또한 증가하고 있는 추세이다. 그러나 우리나라의 금속자원 및 부존량은 소비량 대비 부족한 실정이며, 금속자원 중 은광의 국내 자급률은 2021년 기준 약 2.2%로 매우 낮은 상황으로 조사되어 이를 개선하기 위해 금속산업에서 발생하는 폐도금액내 함유되어 있는 유가금속 자원회수기술을 통한 재활용이 필요하다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 전과정평가를 통해 폐도금액 내 유가금속 회수공정 개선에 따른 영향평가 결과를 비교 분석하고자 하였다. 그 결과, 개선을 통해 GWP 및 ADP는 각각 약 49% 및 67% 저감되는 것으로 나타났다. 그 중, 전기 및 상수의 GWP는 각각 98% 및 93% 저감되는 것으로 나타나 에너지 소비 최소화에도 크게 기여하는 것으로 나타났다. 따라서, 재자원화 기술의 발전이 화학물질 및 에너지의 사용 절감할 수 있으며, 이를 통해 도시광산산업에서 자원생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 은, 폐도금액, 재자원화, 전과정평가, 환경성 평가

Abstract

In 2018, the demand for silver (referred to as Ag) in the electrical and electronics sector was 249 million tons. The demand stood at 81 million tons in the solar module production sector. Currently, due to the rapid increase in solar module installation, the demand for silver is increasing drastically in Korea. However, Korea's natural metal resources and reserves are insufficient in comparison to their consumption, and the domestic silver ore self-sufficiency rate was as low as 2.2% as of 2021. This implies that a recycling technology is necessary to recover valuable metal resources contained in the waste plating solution generated in the metal industry. Therefore, this study compared and analyzed, the results of the impact evaluation through life cycle assessment according to an improvement in the process of recovery of valuable metals in the waste plating solution. The process improvement resulted in reducing GWP (Global Warming Potential) and ADP(Abiotic Depletion Potential) by 50% and 67%, respectively. The GWP of electricity and industrial water was reduced by 98% and 93%, respectively, which significantly contributed to the minimization of energy and water consumption. Thus, the improvement in recycling technology has a high potential to reduce chemical and energy use and improve resource productivity in the urban mining industry.

Key words : Silver, Plating Wastewater, Recycle, Life cycle Assessment (LCA), Environmental impact

· Received : February 22, 2023 · Revised : March 10, 2023 · Accepted : March 15, 2023

§ Corresponding Author : Yong Woo Hwang (E-mail : hwangyw@inha.ac.kr)

Department of Environmental Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내 탄소중립 실현을 위해 재생에너지인 태양에너지 및 풍력에너지와 전기자동차에 사용되는 배터리 기술의 중요성이 대두되고 있으며, 재생에너지와 에너지 저장 장치 기술을 포괄하는 탄소중립 기술은 다중 다량의 금속이 필요하다¹⁾. 은(Ag)은 물리적, 화학적 특성이 우수하여 전기·전자, 태양광 모듈 등 다양한 분야에서 사용되고 있다²⁾.

2022년 World Silver Survey에 의하면 수요처별 비중은 투자목적 26%, 장신구 17%, 태양광발전 11%, 은 식기류 4% 등으로 산업용 수요가 전체의 48% 수준이다³⁾.

국내 2018년 기준 전기전자 분야에서는 249백만 톤이 요구되고 있으며, 태양광 모듈용으로는 81백만 톤의 수요가 요구되고 있다. 현재 태양광 모듈 설치의 급증으로 해당 분야의 은 사용량 또한 증가하고 있는 추세이다⁴⁾.

그러나 우리나라의 금속광의 자급률은 2021년 기준 약 0.5% 불과하며, 금속광의 경우 대부분의 수요량을 수입에 의존하고 있다. 금속자원 중 은광의 국내 자급률은 2.2%로 매우 낮은 실정이다⁴⁾.

2021년 기준 은 수입량은 전년 대비 약 11% 증가한 약 99.7만 kg로 나타났으며, 그 중 은 봉·형재의 수입량은 약 4.1만kg으로 전년 대비 약 32% 증가하였다. 주로 산업용으로 소비되고 있으며, 국내 산업 수요 증가로 봉·형재 수입량이 증가한 것으로 나타났다⁵⁾.

선진국뿐만 아니라 신흥경제국들의 자원·에너지에 대한 소비 급증으로 인해 매장량이 유한한 천연자원 고갈 및 폐기물 증가에 의한 환경문제 등이 발생하고 있으며, 이를 개선하기 위해서는 지속가능한 생산과 소비, 자원의 효율적 사용을 위한 국내 자원순환 산업의 경쟁력 확보가 절실히 필요하다⁶⁾.

2018년 「제1차 자원순환기본계획」은 “자원의 선순환으로 지속가능한 순환경제 실현”이라는 비전에 순환이용률 향상을 위한 폐금속 자원의 회수를 강조하고 있다⁶⁾. 그러나, 현재 은 자원순환율 및 재자원화율은 2011년 기준 각각 67.7%, 90.3%, 2016년 기준 각각 37.6%, 85.7%로 2011년 대비 감소하는 추세이다⁷⁾.

현재 금속가공업체 폐수처리 공정은 대부분 물리·화학적 공정으로 산화·환원 및 응집·침전법을 이용하고 있으며⁸⁾, 은 재자원화 공정(이하 기존 공정)은 투입시스템 및 반응조건이 최적화되어 있지 않다. 이로 인해 은의 회수를

이 낮아 다량의 폐액이 발생하고 많은 양의 에너지 및 화학물질이 사용되고 있어 공정의 개선이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 활용하여 폐도금액 내 유기금속 회수공정 투입시스템 개발 및 반응조건 개선에 따른 환경영향을 비교 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서 폐도금액내 재자원화 공정 개선을 통해 기존 대비 환경영향을 산출하여 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment) 국제/국가 표준을 기반을 활용하였다.

LCA는 제품의 전과정에 걸쳐 제품시스템에 투입물 및 산출물의 양을 정량화하여 환경에 미치는 영향을 평가하고 이를 통해 환경개선 방안을 모색하는 평가 기법이다⁹⁾.

LCA 수행 절차는 목적 및 범위 설정(Goal and Scope Definition), 전과정 목록분석(Life cycle Inventory Analysis), 전과정영향평가(Life cycle Impact Assessment), 결과 해석(Interpretation)으로 구성된다⁹⁾.

2.1. 목적 및 범위 설정

본 연구의 목적 및 범위 설정은 Table 1에 나타내었으며, 목적은 폐도금액내 은 회수공정의 기존 및 개선 시의 환경영향 비교 분석으로 설정하였다. 또한, 대상 제품은 재자원화된 은으로 기능단위는 1 kg로 설정하였으며, 시스템경계는 수송단계를 포함하여 재자원화 공정 개선에 따른 전·후의 환경영향 비교 분석으로 제조전 단계 및 제조단계(Cradle to Gate)로 설정하였다.

2.2. 데이터 수집 및 전과정 목록분석

재자원화된 은 1 kg 기준으로 수집한 기존 및 개선 공정의 투입물/산출물 자료를 Table 2에 나타내었다. 환경영향 산정을 위해 은 재자원화공정인 A공장 및 B공장을 대상으로 데이터수집을 하였으며, A공장에서 사전 작업 후 은이 반제품으로 배출되고 이를 B공장으로 이동해 나머지 작업을 수행한다. 은 재자원화 공정에는 공용으로 질산, 에탄올, 가성소다 등 원료물질이 투입되며, 유틸리티는 상수 및 전기가 사용되고 있어 A공장 및 B공장에서 발생하는 투입물 및 산출물을 별도로 구분하지 않고 한 공

Table 1. Goal and Scope Definition

Goal and Scope Definition	
Purpose	• Comparative analysis of environmental impact of improvement process in preparation for the existing by improving the recovery rate of Ag from plating wastewater
Target	• Recycling Ag in plated waste liquor
Functional and unit	• Recycling Ag in plated waste liquor (1 kg)
System Boundary	• Raw material extraction and manufacturing (including transportation) <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <pre> graph LR A[Raw material extraction] --> B[Manufacturing] B --> C[Recovery] </pre> </div>

Table 2. Inventory analysis of current and improvement silver recycling process

	Type	Unit	Current	Improvement	Transportation
IN PUT	Plating spent liquor	kg	5.41E+02	4.69E+02	210 km (truck)
	Urea (CO(NH ₂) ₂)		2.03E+00	1.03E+00	21 km (truck)
	Borax (Na ₂ B ₄ O ₅ (OH) ₄ ·8H ₂ O)		8.26E-02	3.95E-02	
	Nitric acid (HNO ₃)		3.41E+01	2.18E+01	
	Ethanol (CH ₃ CH ₂ OH)		2.98E+00	2.15E+00	
	Sodium hydroxide (NaOH)		4.69E-01	7.69E-01	
	Sodium nitrate (NaNO ₃)		5.30E-02	2.82E-02	
	Water		1.13E+03	8.27E+01	
	Electricity	kWh	3.92E+02	6.26E+00	-
	half-finished recycled silver	kg	1.00E+00	1.00E+00	10 km (diesel car)
OUTPUT	Ag	kg	1.00E+00	1.00E+00	-
	Waste water		4.56E+02	2.92E+02	-
	Waste liquor		4.69E+02	2.84E+02	-

장에서 재자원화하는 것으로 가정하여 산출하였다.

폐도금액(은 함유) 수송 단계는 3개 공급업체가 존재하여 공급비율이 50% 이상인 한 업체를 기준으로 최단거리를 산정하여 적용하였다¹⁰⁾.

반제품 은 수송은 경유승용차를 이용하고 있어 2006 IPCC Guideline¹¹⁾에 제시된 이동 연소 Tier 1을 활용하였으며, 수송 거리에 따른 경유 사용량은 식(1)을 활용하였다. 경유 승용차의 연비는 평균 10 km/L, 수송 거리는 사업장 간 최단 편도거리 5 km로 월 2회 수송하는 것으로 가정하여, 10 km로 적용하였다.

$$Q = \text{소요대수} \times \left(\frac{\text{수송거리}(km)}{\text{연비}(km/L)} \right) \quad (1)$$

여기서, Q: 수송 거리에 따른 연료 사용량

원료 및 에너지 생산, 폐기물처리, 수송의 적용된 DB, 출처를 Table 3에 나타내었으며, 국내외 LCI DB를 활용하였다.

2.3. 전과정 영향평가

전과정영향평가는 전과정 목록분석 결과를 바탕으로 환경영향을 해석하는 것으로 영향범주와 지표를 이용하여 LCI 결과를 환경적 관점에서 평가하여 제품 시스템을 분석 및 조사하는 단계이다.

영향범주는 탄소발자국(Global Warming Potential, GWP), 자원발자국(Abiotic Depletion Potential, ADP),

Table 3. Applied LCI DB and sources

Type	Material	LCI DB	Source
Raw material and energy production	Urea (CO(NH ₂) ₂)	urea production RoW	ecoinvent 3.8 ¹²⁾
	Borax (Na ₂ B ₄ O ₅ (OH) ₄ ·8H ₂ O)	borax production, anhydrous, powder	
	Nitric acid (HNO ₃)	Nitric Acids	Korea National LCI DB ¹⁵⁾
	Ethanol (CH ₃ CH ₂ OH)	Edible Ethanol	
	Sodium hydroxide (NaOH)	Caustic soda(50%)	
	Sodium nitrate (NaNO ₃)	Sodium nitrate	
	Water	Drinking Water	
	Electricity	Electricity	
Waste treatment	Waste water	waste water treatment	
	Spent liquor	hazardous waste landfill	
Transport	Truck	road transportation-truck	2006 IPCC Guideline
	Diesel car	-	

Table 4. Evaluation coefficient

Material	GWP (kg CO ₂ eq.)	ADP (kg Sb eq.)	ODP (kg CFC11 eq.)	AP (kg SO ₂ eq.)	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	POCP (kg C ₂ H ₄ eq.)
Urea	1.61E+00	1.36E-02	9.11E-08	7.73E-03	2.49E-03	9.41E-04
Borax	1.42E+00	9.01E-03	9.03E-08	6.56E-03	1.73E-03	8.31E-03
Nitric acid	3.47E-01	2.03E-02	1.50E-07	6.52E-03	1.08E-02	1.05E-03
Ethanol	2.78E+00	1.26E-02	8.16E-07	2.71E-02	1.35E-02	6.92E-03
Caustic soda	6.29E-01	6.88E-03	9.71E-08	2.34E-03	2.86E-04	6.33E-04
Sodium nitrate	1.02E-01	1.61E-03	1.07E-08	2.50E-03	1.64E-04	1.70E-04
Water	2.37E-04	1.53E-06	1.45E-12	4.28E-07	8.29E-08	1.56E-08
Electricity	4.95E-01	3.13E-03	1.37E-11	8.37E-04	1.56E-04	3.53E-06
Waste water (m ³)	1.17E+00	6.12E-03	2.55E-08	2.65E-03	6.80E-04	2.46E-04
Waste liquor	1.80E+00	1.15E-03	4.24E-09	9.17E-04	2.42E-04	6.72E-05

오존층영향(Ozone Depletion Potential, ODP), 산성비(Acification Potential, AP), 부영양화(Eutrophication, EP), 광화학스모그(Photochemical Ozone Creation Potential, POCP), 물발자국(Water Footprint, WF) 7개로 구성되어 있다.

본 연구에서는 물발자국을 제외한 6대 영향범주에 대해 환경영향을 분석하였으며, Table 4에 환경성적표지 및 ecoinvent 배출계수를 나타내었다.

3. 전과정 영향평가 결과

재자원화된 은 1 kg 기준 6대 영향범주의 환경영향평가 결과를 Table 5-1, 5-2에 나타내었다.

그 결과, GWP의 기존 및 개선 공정의 영향은 각각 1.08E+03 kg CO₂ eq./kg 및 5.49E+02 kg CO₂ eq./kg으로 가장 높게 나타났다. ADP의 경우는 기존 및 개선 공정의 영향은 각각 2.53E+00 kg CO₂ eq./kg 및 8.37E-01 kg Sb eq./kg으로 두 번째로 높게 나타났다. 나머지 영향범주는 AP, EP, PDCP, ODP 순으로 환경영향이 높은 것으로 나타났다. 6대 영향범주 중 GWP 및 ADP가 가장 높게 나와 두 영향범주를 중심으로 물질별 환경영향평가 결과를 다음과 같이 도출하였다.

물질 중 폐액 처리 GWP는 기존 및 개선 공정에서 8.44E+02 kg CO₂ eq./kg 및 5.11E+02 kg CO₂ eq./kg로 가장 높게 차지하는 것으로 나타났다.

전기, 상수의 GWP는 각각 기존 공정에서 1.94E+02 kg

Table 5-1. LCA Results

Material	Impact Assessment Result					
	GWP (kg CO ₂ eq./kg)		ADP (kg Sb eq./kg)		ODP (kg CFC11 eq.)	
	Current	Improvement	Current	Improvement	Current	Improvement
Silver-containing waste liquid	2.19E+01	1.89E+01	1.38E-01	1.20E-01	3.71E-02	3.21E-02
Urea	3.28E+00	1.65E+00	2.76E-02	1.39E-02	1.41E-05	2.63E-05
Borax	1.18E-01	5.62E-02	7.44E-04	3.56E-04	5.74E-07	1.01E-06
Nitric acid	1.20E+01	7.55E+00	6.92E-01	4.41E-01	2.39E-04	5.60E-04
Ethanol	8.30E+00	5.98E+00	3.76E-02	2.72E-02	2.29E-05	5.68E-05
Caustic soda	2.97E-01	4.84E-01	3.23E-03	5.29E-03	3.26E-06	1.97E-05
Sodium nitrate	5.62E-03	2.88E-03	8.51E-05	4.53E-05	3.64E-07	7.22E-07
Water	2.68E-01	1.96E-02	1.73E-03	1.27E-04	1.64E-12	1.20E-13
Electricity	1.94E+02	3.10E+00	1.23E+00	1.96E-02	5.36E-09	8.57E-11
Waste water (m ³)	5.35E-01	3.43E-01	2.79E-03	1.79E-03	1.16E-05	7.46E-06
Waste liquor	8.44E+02	5.11E+02	5.41E-01	3.27E-01	1.99E-06	1.20E-06
Half-finished recycled silver	5.34E-06	5.34E-06	-	-	-	-
Total	1.08E+03	5.49E+02	2.53E+00	8.37E-01	3.74E-02	3.28E-02

Table 5-2. LCA Results

Material	Impact Assessment Result					
	AP (kg SO ₂ eq.)		EP (kg PO ₄ ³⁻ eq.)		POCP (kg C ₂ H ₄ eq.)	
	Current	Improvement	Current	Improvement	Current	Improvement
Silver-containing waste liquid	7.59E-06	6.57E-06	6.02E-03	5.21E-03	4.58E-02	3.96E-02
Urea	1.57E-02	7.93E-03	5.06E-03	2.55E-03	1.93E-03	9.74E-04
Borax	5.42E-04	2.59E-04	1.43E-04	6.84E-05	6.87E-04	3.28E-04
Nitric acid	2.23E-01	1.42E-01	3.70E-01	2.36E-01	3.62E-02	2.31E-02
Ethanol	8.08E-02	5.83E-02	4.02E-02	2.90E-02	2.07E-02	1.49E-02
Caustic soda	1.10E-03	1.80E-03	1.35E-04	2.21E-04	3.00E-04	4.93E-04
Sodium nitrate	1.32E-04	7.04E-05	8.75E-06	4.66E-06	9.47E-06	5.04E-06
Water	4.84E-07	3.54E-08	9.37E-08	6.86E-09	1.76E-08	1.29E-09
Electricity	3.28E-01	5.24E-03	6.11E-02	9.76E-04	1.38E-03	2.21E-05
Waste water (m ³)	1.21E+00	7.75E-01	3.10E-01	1.99E-01	1.12E-01	7.18E-02
Waste liquor	4.30E-01	2.60E-01	1.14E-01	6.87E-02	3.15E-02	1.91E-02
Half-finished recycled silver	5.34E-06	5.34E-06	-	-	-	-
Total	2.29E+00	1.25E+00	9.06E-01	5.41E-01	2.50E-01	1.70E-01

CO₂ eq./kg, 2.68E-01 kg CO₂ eq./kg 및 1.18E-01 kg CO₂ eq./kg로 나타났으며, 개선 공정은 3.10E+00 kg CO₂ eq./kg, 1.96E-02 kg CO₂ eq./kg 및 5.62E-02 kg CO₂ eq./kg로 기

존 대비 크게 저감된 것으로 나타났다.

가성소다의 경우 GWP는 기존 공정 2.97E-01 kg CO₂ eq./kg, 개선 공정 4.84E-01 kg CO₂ eq./kg로 기존 대비

Table 6. Impact Assessment Result and Reduction Effect

Impact Category	Current (A)	Improvement (B)	Reduction amount (A-B)	Reduction effect (A-B/A*100)
GHG Emission (kg CO ₂ eq./kg)	1.08E+03	5.49E+02	5.31E+02	49.17%
Resource Use (kg Sb eq./kg)	2.53E+00	8.37E-01	1.69E+00	66.92%

약 1.87E-01 kg CO₂-eq/kg 증가하였다. 또한, ADP도 기존 공정은 2.53E+00 kg Sb eq./kg, 개선 공정은 8.37E-01 kg Sb eq./kg로 약 3.91E+01 kg Sb eq./kg 정도 증가한 것으로 확인되었다.

전과정 영향평가 결과에 따른 온실가스 저감량 및 자원 저감량을 Table 6에 나타냈다. 기존 공정 대비 온실가스 저감량은 5.31E+02 kg CO₂ eq./kg, 자원 사용 저감량은 1.69E+00 kg Sb eq./kg로 나타났으며, 각각 약 49% 및 67% 정도 감소한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐도금액내 은의 기존 및 재자원화 공정 개선에 따른 환경영향평가 결과를 비교 분석하였다. 수행 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

환경영향평가 결과, 6대 영향범주 중 GWP가 가장 높게 나타났으며, 나머지 영향범주는 ADP, AP, EP, PDCP, ODP 순으로 나타났다. GWP 및 ADP가 가장 높게 나와 두 영향범주를 중심으로 결론을 다음과 같이 나타내었다.

GWP 저감량은 5.31E+02 kg CO₂ eq./kg으로 약 49% 감소하였으며, ADP는 1.69E+00 kg Sb eq./kg으로 약 67% 감소하였다.

물질 중 폐액 처리 GWP가 가장 높게 차지하며, 이는 폐액이 구리 및 기타 금속 등을 함유하고 있어 높게 나타난 것으로 확인되었다. 특히 구리는 유기금속으로 구리를 함유한 유독성 중금속 침전물을 매립할 시 환경오염 문제를 야기한다¹⁴⁾. 따라서 향후, 기술 개발을 통해 은 추출뿐만 아니라 구리 및 기타 금속 등을 회수 또한 처리하여 온실가스 발생량을 저감할 필요성이 있다고 판단된다.

전기, 상수의 GWP는 기존 공정 대비 개선 공정에 따른 저감 비율은 각각 약 98%, 93%로 나타났다. 이를 통해 에너지를 최소화하여 화석연료에 대한 의존도를 낮출 수 있다. 또한, 전체 온실가스 배출량의 약 87%를 차지하고 있

는 에너지 부문¹⁵⁾을 재자원화 기술을 통해 저탄소 시스템으로 전환하여 온실가스 저감에 기여한다.

가성소다 GWP의 경우 순도 향상을 위해 강알칼리(가성소다) 세정제 사용량을 증가시켜 기존 공정 대비 약 1.87E-01 kg CO₂-eq/kg 증가하였으며, ADP 또한 약 3.91E+01 kg Sb eq./kg 정도 증가하였다. 그러나 가성소다를 제외한 화학물질은 개선 공정을 통해 질산 약 36%, 에탄올 28%, 요소 50%, 질산나트륨 47%, 붕사 52%로 절감한 것으로 나타났다.

또한, 물질/에너지 절감 효과는 재자원화된 은 1 kg 기준 상수가 1,047 kg으로 가장 많이 절감되었으며, 전기 385 kWh, 폐액 185 kg 및 폐수 164 kg 등 순으로 절감 효과가 나타났다.

따라서, 본 연구를 통해 재자원화 기술의 발전은 은 재자원화를 향상, 물질 및 에너지의 사용을 절감하여 온실가스 배출량 저감, 자원 사용 절감이 가능한 것으로 나타났다. 이는 저탄소 산업구조로의 전환과 도시광산산업에서 자원생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구(지식기반 환경서비스 특성 확대확원사업)임.

References

1. J. G. Yoo, K. J. Ryu, 2021 : Securing Metal Resources for Carbon Neutral Implementation, pp.1-4, National Assembly Research Service, Korea
2. B. C. Kim, 2019 : Recycling Status of Gold, Silver, Platinum and Palladium, KSMER, 56(4), pp.359-366
3. The Silver Institute, 2022 : “World Silver Survey” 2022, pp.1-86, Washington, D.C.
4. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,

- 2022 : Mineral Commodity Supply and Demand 2021/2022, pp.10-11, Korea
5. H. Y. Kang, 2012 : Life Cycle Analysis of Material Flow and the Construction of National Integrated Resources Management System on Metal Resources, KSMER, 49(6), pp.865-873
 6. Ministry of Environment : 2018, 1st Basic Plans for Recycling of Resources (2018-2027), pp.44-51, Korea
 7. Korea Institute of Industrial Technology, Korean National Material Flow Analysis, <https://www.k-mfa.kr/>, March 2, 2023
 8. H. G. Kim, 2021 : Recent Technology Trends for Plating Wastewater Treatment, pp.1-7, KOSEN Report, Korea Institute of Science and Technology Information, Korea.
 9. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14040, in Environmental management-Life cycle assessment - Principles and framework, 2011.
 10. Korea Environmental Industry and Technology Institute, Environmental Product Declaration, <https://www.greenproduct.go.kr/epd/epd/guide03.do>, March 7, 2023.
 11. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, ISBN 4-88788-032-4.
 12. Ecoinvent, Zurich, Swiss 2021 : Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems Ecoinvent v3.8, Online available at <https://ecoinvent.org>, March 7, 2023.
 13. Korea Environmental Industry and Technology Institute, Environmental Product Declaration, <https://www.greenproduct.go.kr/epd/lci/evICffent.do>, March 7, 2023.
 14. H. Y. Lee, 2012 : Recovery of Copper in Wastewater from Electroless Plating Process, JKIRR, 21(6), pp.39-44
 15. Copyright Statistics Korea, Korea National Indicators System, <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4288>, March 8, 2023.

김 다 연

- 인하대학교 순환경제환경시스템전공 석사
- 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정

이 성 유

- 서울대학교 토목공학과 학사
- 서울대학교 토목공학과 석사
- 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정

황 용 우

- 일본 동경대학 도시공학 박사
- 한국전과정평가학회 회장
- 한국환경경영학회 부회장
- 현재 인하대학교 환경공학과 교수

권 택 관

- 인하대학교 화학공학과 학사
 - 호서대학교 수소에너지안전공학과 석사
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
-