

로듐 재자원화의 경제적 및 환경적 효과 분석

이성유* · §신가영* · 김두환* · 황용우** · 강훈윤* · 홍성민* · 김다연*

*인하대학교 일반대학원 순환경제환경시스템전공, **인하대학교 환경공학과

Economic and Environmental Effect Analysis of Rhodium Recycling System

Seong You Lee*, §Kayoung Shin*, Doo Hwan Kim*, Yong Woo Hwang**, Hong-Yoon Kang*,
Sung Min Hong* and Da-Yeon Kim*

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

**Department of Environmental Engineering, Inha University

요 약

본 연구에서는 비촉매분야에서 사용된 로듐의 재자원화 시, 경제적 및 환경적 효과를 분석하였다. 분석방법으로, 경제적 효과 분석은 비용편익분석과 자원절감효과분석을 적용하였으며, 환경적 효과 분석은 전과정평가를 적용하였다. 연구결과, 경제적 측면에서 B/C 값은 1.28로 사업성이 있는 것으로 나타났으며, 비용절감은 재자원화 로듐 1 g 기준으로 237,000원으로 나타나 2025년 로듐 재자원화량 71.7억 원으로 나타났다. 환경적 효과는 로듐 1 kg 기준의 재자원화 시와 해외매각 시에 대해 온실가스 배출량을 비교하였다. 산정 결과, 로듐 1 kg 기준으로 재자원화 시 온실가스 배출량은 65 kg CO₂eq./kg-Rh, 해외매각 시 28,800 kg CO₂eq.으로 나타나, 99.8%가 저감되었다. 본 연구결과는 비촉매분야에서 사용되는 로듐의 재자원화 시 경제적 및 환경적 효과 분석을 통해 자원이 부족한 우리나라에서 로듐 재자원화가 필요하다는 것을 제시할 수 있었다.

주제어 : 로듐 재자원화, 온실가스 감축, 비용편익분석(B/C), 전과정평가(LCA), 자원 절감

Abstract

This study analyzed the economic and environmental effect of recycling rhodium used in the non-catalytic field. As an analysis methodology, economic effect analysis applied cost-benefit analysis and resource-saving effect analysis and the environmental effect analysis applied life cycle assessment (LCA). The results show that from an economic point of view, the cost-benefit ratio was 1.28, which was feasible, and the cost reduction was 237,000 won based on 1 g of rhodium recycled and the amount of rhodium recycled was 7.17 billion won in 2025. As for the environmental effect, the greenhouse gas(GHG) emissions were compared between the case of recycling based on rhodium 1 kg and the case of overseas sales. The calculation results show that based on rhodium 1 kg, greenhouse gas emissions were reduced by 99.8%, from 65 kg CO₂eq./kg-Rh when recycling to 28,800 kg CO₂eq. when sold overseas. The results obtained from this study could suggest that rhodium recycling is necessary in Korea where resources are scarce by analyzing the economic and environmental effect of recycling rhodium used in the non-catalytic field.

Key words : Rhodium Recycling, Greenhouse Gas Reduction, Cost-Benefit Analysis(B/C), Life Cycle Assessment, Resource Reduction

Received : May 26, 2023 · 1st Revised : June 16, 2023 · 2nd Revised : June 26, 2023 · Accepted : June 27, 2023

§ Corresponding Author : Kayoung Shin (E-mail : kayshin@inha.ac.kr)

Program in Circular Economy Environmental System, 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

최근 첨단 산업화에 따른 희소 금속 자원의 부족은 국내 산업에 큰 부담으로 작용하고 있다. 그럼에도 현대 첨단 산업의 필수 소재인 백금족 금속(Platinum Group Metals, PGM)은 활용분야가 넓어 각광을 받고 있고 수요 또한 증가하고 있다¹⁾. 하지만, 백금족 금속은 매장량이 적으면서도 일부 국가에 한정적으로 매장되어 있고, 생산량도 일정하지 않아, 안정적인 공급에 어려움을 겪고 있다. 이에 산업이 발달된 국가들은 백금족 금속을 안정적으로 공급하고 확보하기 위해 폐금속자원 및 스크랩으로부터 백금족 금속을 추출하는 재활용 기술개발에 힘쓰고 있다^{2,3)}.

폐금속자원은 생활계 폐기물(폐자동차, 폐전기·전자제품, 폐전지류 등)과 사업장계 폐기물(폐액, 폐촉매, 공정 부산물 등)에 함유된 금속자원으로 구분하며, 폐금속 자원의 금속성분은 천연광석보다 더 많이 함유하고 있다. 폐금속자원 재활용이란 폐금속자원에 함유된 각종 금속 자원을 회수하거나 재활용하여 제품의 생산 원료로 재사용하는 것이다^{4,5)}. ‘도시광산 산업’으로 불리는 폐금속자원 재활용 산업은 금, 은, 백금 등의 희소 금속 자원의 가치가 증대되면서 자원회수의 필요성이 부각되어 활성화되고 있다. ‘도시광산 산업’의 발생원은 전기·전자제품, 전지, 자동차 등 금속자원을 주요 소재로 사용하고 있는 제조업 생산제품이며, 자원 대상품목은 폐기된 발생원 내에 함유된 철, 범용비철(구리, 알루미늄, 아연, 납), 귀금속

(금, 은), 희소 금속 등이다⁶⁻⁸⁾.

백금족 금속은 대표적인 폐금속자원으로, 팔라듐(Pd), 로듐(Rd), 백금(Pt), 루테튬(Ru), 이리듐(Ir), 오스뮴(Os)으로 6종이다. 특히 로듐의 활용 분야는 암모니아의 산화용 촉매, 내열재 및 내식재 이용, 로듐 전기도금용, 촉매 제조용, 백금의 경화 원소로 사용 등이며, 다른 백금족 금속의 활용 분야는 Table 1에 나타내었다^{9,10)}. 로듐의 전세계 생산량은 10 톤의 재활용량을 포함하여 약 30 톤이고, 국내산업의 수요량은 약 2 톤이다. 반도체 산업과 디스플레이 산업의 발전으로 로듐의 수요는 증가하지만, 생산량은 거의 일정하다. 따라서 로듐 원자재 가격의 변동폭은 매우 크다. 로듐과 팔라듐은 전자 및 자동차 소재 원료로 사용 후, 재활용되지 못하고 폐기되는 경우가 많다. 자동차의 삼원촉매장치에 사용된 로듐은 대부분 국내에서 회수되어 재활용되고 있으나, 비촉매 산업 분야에 사용된 로듐은 그대로 폐기되거나 해외로 매각되고 있으며, 인쇄회로기판 산업의 폐촉매액 등에 포함된 팔라듐은 회수율이 낮다¹¹⁻¹³⁾.

로듐은 남아프리카공화국, 러시아, 북아메리카, 짐바브웨 등에서 생산되고 있으며, 그 중 남아프리카공화국이 전세계의 80% 이상을 생산하고 있다. 생산량 추이를 보면, 전세계 로듐 생산량은 2015년 23.6 톤에서 2019년까지 23.6 톤으로 안정적으로 유지되다가, 2020년에 18.2 톤으로 급격히 감소하였다. 이는 세계 최대생산국인 남아프리카공화국이 코로나19로 인하여 생산을 중단하였기

Table 1. Applications of Platinum Group Metals(PGMs)

Metals	Applications	Metals	Applications
Palladium (Pd)	<ul style="list-style-type: none"> Glass fiber, Optical fiber Hydrogen Purification Chemical Reaction Catalyst related to Hydrogen & Oxygen Applications in Fuel Cells 	Rhodium (Rh)	<ul style="list-style-type: none"> Catalyst for oxidation of Ammonia Used as Heat resistant material & Corrosion resistance material For Rhodium Electroplating For Catalyst Manufacturing Used as a Hardening element for Platinum
Platinum (Pt)	<ul style="list-style-type: none"> Purification catalysis of automobile exhaust gas Catalyst application in chemical process Multi-layer ceramic capacitors Hard disk drive Application of dental alloy 	Ruthenium (Ru)	<ul style="list-style-type: none"> Electronic industry & petrochemical catalyst field Supercapacity electrode material Formation of black matrix of PDP front board Electrical contact material Semiconductor memory manufacturing
Iridium (Ir)	<ul style="list-style-type: none"> Dies for high melting point glass extrusion Crucible for high temperature reaction Electrical device Application of dental materials Used for catalyst production and insoluble anode 	Osmium (Os)	<ul style="list-style-type: none"> Light bulb filament Gramophone needle Precision bearing alloy material Alloy materials when manufacturing pivots Electrical contact material

Table 2. National Rhodium Supply by Years (unit : ton)

Supply tonnes	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total	Ratio(%)
South Africa	19.0	19.1	19.0	19.2	19.4	14.0	197.7	80.4
Russia	2.5	2.6	2.4	2.1	2.1	2.0	13.7	10.0
North America	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	4.3	3.2
Zimbabwe	1.1	1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	7.6	5.6
Others	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.2	0.9
Total supply	23.6	24.0	23.6	23.5	23.6	18.2	136.5	100

source: Johnson Matthey Pgm market report February 2021

때문이다(Table 2). 또한 로듐 가격 추이를 보면, 2016년부터 상승한 로듐의 가격은 2019년에 2016년 대비 3배가 되었으며, 2021년 1월 기준 온스당 2만 달러 이상으로 높아졌다. 2017년 이후, 로듐의 수요가 증가하였으나, 2021년에는 공급부족 현상으로(리퍼티티브 GFMS, Johann Wiebe 등) 로듐파우더의 가격은 900,000원/g으로 금 가격 63,000원/g의 14배를 넘었다. 이러한 불안정한 공급망으로 인해 로듐의 가격 변동성은 커지고, 정부에서는 이에 대한 선제적인 대처를 필요로 한다.

정부는 「자원순환기본법」 제11조에 근거하여 2018년 제1차 자원순환기본계획을 발표하였다. “자원의 선순환으로 지속가능한 순환경제 실현”이라는 비전 아래 ① 폐기물 발생량 20% 감축, ② 순환이용율 70.3%에서 82%로 상승, ③ 최종처분율 9.1%에서 3.0%로 감소라는 2027년까지 달성할 목표를 세웠다. 특히 순환이용률을 높이기 위해서는 폐기물 발생량을 줄이고, 재활용량과 순환자원 인정량은 증가할 필요가 있으며, 재활용량을 높이기 위해 폐금속자원의 회수가 필요하고, 또한 폐자원 재활용 기술 수준도 향상되어야 한다^{14,15)}. 현재 국내 폐자원 재활용 기술 수준은 선진국 대비 90% 이상이며, 매년 기술격차를 줄여가고 있다¹⁶⁾. 본 연구에서는 현재 국내에서 자원으로 가치는 높고 재자원화가 적은 로듐 사용 분야에 대하여, 로듐의 현황과 회수 공정을 조사하고 회수 및 재사용에 따른 경제적 및 환경적 효과를 분석할 것이다. 경제성 분석은 사업성을 파악하는 방법으로 가장 많이 적용되고 있는 방법론인 비용편익분석과 자원절감효과 분석을 적용하였으며, 환경성 분석은 최근 온실가스 배출량 등 환경영향의 산정과 관련되어 가장 많이 사용되고 있는 평가방법인 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 적용하였다¹⁷⁾.

따라서, 본 연구에서는 로듐의 현황과 회수 공정을 조사하고 회수 및 재사용에 따른 경제적 효과를 분석하여 로듐 재자원화의 사업 가능성과 자원절감효과를 파악하고, 동시에 환경적 효과를 분석하여 재자원화 사업의 지속가능성을 진단하고자 한다.

2. 폐액 및 스크랩 내 로듐의 특성 및 재자원화 공정

2.1. 로듐의 특성 및 활용

백금족 금속 중 하나인 로듐(Rh)은 단단하면서 무른 은백색의 금속으로, 산에 잘 녹지 않고, 녹는점이 높은 성질을 가지고 있다. 내식성이나 내마모성이 뛰어나 도금용으로 이용되며, 산화하지 않는 로듐은 은 제품의 도금에 사용된다. 또한, 로듐은 로듐, 백금과 알루미늄 합금으로 자동차 삼원촉매로 사용되어 유해 물질을 산화/환원반응으로 배기가스 중의 질소산화물인 NOx를 제거하는 기능도 있다. 이 외에 산화수소류의 수소첨가 촉매로서 사용되어, 메탄올의 카보닐화를 통한 아세트산 생산, 벤젠의 환원으로 사이클로헥세인 생산, 실리콘 고무 생산 등에 사용된다. 뛰어난 반사성을 살려 반사경이나 헤드라이트에도 이용되며, 그 외 유리섬유, 유리면, 광섬유 제조 등에 쓰이는 유리공업용 장치와 화학제품 제작 시 화학 촉매 형태 및 열전대 등에도 사용되고 있다.

로듐은 촉매, 화학, 전기, 유리산업 등에서 사용되며, 특히 2020년 기준으로 90%가 촉매로 사용되고 있으며, 수요량은 2015년 28.7 톤에서 2020년 31.3 톤으로 증가하고 있는 추세인데, 이는 환경규제에 따른 자동차 산업 촉매의 수요가 지속적으로 증가하기 때문이다. 로듐의 수요가 자동차 촉매에서 계속 증가하면서 2019년부터는 로듐의 공급보다 수요가 더 많아지게 되어, 재활용 로듐이

Table 3. Rhodium Supply and Demand (unit : ton)

		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Total supply		23.6	24.0	23.6	23.5	23.6	18.2
Demand	Autocatalyst	23.6	25.1	25.8	27.5	31.8	28.7
	Chemical	2.3	2.0	2.3	2.0	1.9	1.8
	Electronics	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3
	Glass	1.7	2.6	3.1	3.2	1.4	0.2
	Other	1.0	1.3	0.6	-0.4	0.6	0.3
Total gross demand		28.7	31.1	32.0	32.5	36.0	31.3
Recycling(Autocatalyst)		-8.7	-8.6	-9.6	-10.3	-11.1	-10.5
Total net demand		20.0	22.5	22.4	22.2	24.9	20.8
Movement in stocks		3.6	1.5	1.2	1.3	-1.3	-2.6

source: Johnson Matthey Pgm market report February 2021

전체 공급에서 차지하는 비중이 2015년 27%에서 2020년 37%로 10%나 증가했다(Table 3). 이러한 로듐 공급의 부족은 그대로 로듐 가격 상승에 반영되어 나타나고 있다.

로듐은 백금-로듐합금 형태로 전자부품, 항공기 점화 플러그의 전극, 고온 열전대와 저항체, 내화요업 노(爐)의 권선(捲線) 제품의 생산에 사용되고 있으며, 로듐 화합물은 자동차의 삼원촉매장치, 전기회로 개폐 및 접속장치, 금속처리 및 기타 화학제품의 생산에 주로 사용되고 있다. 국내 산업에서 로듐은 1차 가공제품에는 백금-로듐(10~30%/Rh)합금 형태로 전기·전자 부품과 내화요업 제품의 생산에 사용되고 있으며, 로듐 화합물은 자동차의 삼원촉매장치, 전기회로 개폐 및 접속장치, 금속처리, 기타 화학제품의 생산에 주로 사용되고 있다. 로듐 합금은 고온에서 잘 물리지거나 부식되지 않아 고온 열전대와 저항체, 실험실용 도가니, 고온 노(爐)의 권선(捲線), 항공기 점화 플러그의 전극, 베어링과 전기접점 등으로 중요하게 사용되고 있다. 로듐은 1차 자원(신재)과 2차 자원(재활용) 형태로 공급되며, 2019년 로듐은 1차 자원으로 수입된 1.3톤과 2차 자원으로 재활용된 로듐 0.5톤이 공급되고 있다.

국내에서 재활용 로듐은 백금족 금속을 회수하는 기술 중 고온 건식 회수법을 적용하여 자동차 삼원촉매장치에 사용된 로듐이 재자원화되며, 이 기술을 이용하여, H사는 현재 국내에서 대부분의 로듐을 재자원화하고 있다. 그러나 도금, 기타 전자부품, 열전대, 내화요업, 컴퓨터, 전자 및 광학기기, 기타 특수목적용 기계 등의 산업에서 발생하고 있는 로듐 함유 폐자원들은 재자원화 기술의 부재로

현재 회수하지 못하고 있는 실정이다. 국내에서 재자원화되지 못해 폐기되거나 해외로 매각되는 로듐 함유 스크랩들은 귀금속 도금, 기타 화학제품 촉매, 기타 전자부품, 기타 금속제품(열전대), 내화요업제품(유리공업용 도가니) 생산 공정 등에서 대부분 발생되고 있다. 이들은 분리가 까다로운 백금-로듐 합금의 형태로 있거나 삼원촉매장치에 사용되는 로듐에 비해 그 양이 적어서 회수기술을 적용하여 재자원화하는 데 어려움이 있다. 그러나 국내 반도체 산업과 디스플레이 산업이 발달하면서 로듐 함유 폐자원이 다량 발생하고 있으며, 로듐 원자재 구입 단가는 점점 올라가 비촉매 분야에 대한 로듐 재자원화 기술과 물량 확보는 더욱더 필요해지게 되었다.

국내 로듐의 재자원화는 2015년 395 kg에서 2019년 513 kg으로 증가하였으며, 재자원화 투입량 중 수입하여

Table 4. Change in domestic rhodium of recycling and overseas sales (unit : kg)

		2015(A)	2019(B)	Change (B-A)
Recycling input	Domestic collection	154	342	188
	Import	275	361	86
Recycling		395	513	118
Overseas sales		15	182	167
Disposal		19	8	-11

source : Korean National Material Flow Analysis(www.k-mfa.kr), Based on material flow analysis(MFA) of rhodium in 2015 and 2019

재자원화 한 양이 2015년 275 kg에서 2019년 361 kg으로 86 kg이 증가했다. 한편 국내 수집된 폐자원의 양은 154 kg에서 342 kg으로 크게 증가했으나, 수집된 양 모두 국내 재자원화로 투입되지 못하고 182 kg은 해외로 매각되었다. 재자원화되지 못하고 해외로 매각되는 양은 2015년 15 kg에서 2019년 182 kg으로 167 kg이 증가하였다(Table 4). 결국, 국내 로듐의 재자원화량은 증가하였으나 이는 로듐의 회수율이 증가한 것이 아니라 사용량 증가에 따른 것이며, 국내 폐로듐 발생량의 53%는 회수기술의 부재로 해외로 매각되고 있다. 따라서 비축매 분야의 로듐 재자원화를 통하여 국내 순환자원으로 재이용하게 된다면 약 200 kg의 자원을 확보하게 되는 것이다. 해외로 수출되는 182 kg과 사용-축적에 머물러 있는 230 kg의 30%를 재활용으로 투입한다는 가정하에, 비축매 분야에서 재자원화 가능한 로듐의 양은 250 kg 이상 될 것으로 예상된다.

2.2. 로듐의 재자원화 공정

본 연구에서는 2021년 기준 A 기업에서 로듐도금폐액 및 스크랩내 로듐 1 kg을 재자원화하는 로듐의 재자원화 공정을 통한 경제적 및 환경적 효과를 분석하였다. 로듐은 로듐도금폐액 및 스크랩의 입고, 전처리, 정제를 거쳐 재자원화되며, Fig. 1과 같이 로듐 재자원화 공정의 각 단계별 세부 공정은 다음과 같이 이루어진다.

I. 로듐도금폐액 및 스크랩의 입고 단계

II. 전처리공정 단계

전기전자 로듐도금폐액, 폐열전대 및 백금/로듐 합금 스크랩, 전기전자 로듐도금 스크랩 등을 전처리공정 흐름에서 다룬다.

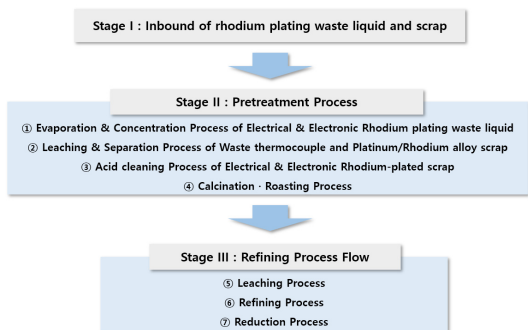


Fig. 1. Rhodium Recycling Processes Flow.

- ① 전기전자 로듐도금폐액의 증발·농축 공정: ICP-OES 분석기로 로듐함유량을 측정한 후, 폐수재이용 시설인 증발농축기에 투입하고 완전히 고형화될 때까지 증발 건조함. 여기서 완전히 건조된 분말은 로듐 정제 공정에 투입한다.
- ② 폐열전대 및 백금/로듐 합금 스크랩의 침출·분리 공정: 유리반응기와 여과기로 구성된 침출장치에서 로듐을 침전시킨다. 미용해잔사 고형물을 여과하여 걸러낸 후 침전된 로듐은 로듐 정제공정에 투입하고, 용액은 백금 정제공정에 투입한다. 고액분리한 후 로듐은 수산화로듐으로 제조되어 정제공정에 투입하고, 백금은 백금화합물로 제조되어 정제공정에 투입한다.
- ③ 전기전자 로듐도금 스크랩의 산 세정 공정: 도금된 로듐을 박리하거나 모재 및 로듐을 제외한 기타 불순물을 제거하는 공정으로 Fume Hood 시설 내에서 강산을 사용하고 가열한다. 산처리 후 고액 분리하여 얻은 여과된 박리 로듐 고형물은 회전소성로에서 건조 및 배소된 후 로듐 정제공정에 투입한다.
- ④ 하소(calcination)·배소(roasting) 공정: 도금폐액의 건조 분말, 도금스크랩의 고형물, 폐열전대 등의 침출·침전 고형물을 하소 또는 배소 하는 공정이며, Crude 로듐을 생산한다.

III. 정제공정 흐름 단계.

Crude 로듐은 원료에 따라 순도 95~99%까지 다양하지만, 전처리공정을 통해 로듐을 제외한 다른 물질을 최소화한 로듐이다. 순도 99.95% 이상의 로듐을 제조하기 위해 Crude 로듐이 함유한 불순물에 따라 그 적용방법이 각각 다르지만, 이를 줄이기 위한 정제공정 단계를 거친다.

- ⑤ 침출공정: 전처리가 완료된 Crude 로듐을 Tube Furnace에서 염화물로 만들어 물로 추출하고, 추출하고 남은 잔사는 유리 반응기에 왕수와 함께 넣고 끓여서 침출하고 고액분리한다.
- ⑥ 정제공정: 침출된 로듐용액을 분석하여 불순물의 종류와 함유량을 측정한 후 그 종류에 따라 농축과 희석을 반복하면서 이온교환으로 제거하거나, 용매추출로 제거한 후 로듐이온을 암모늄 화합물로 합성하여 고체화하고 잔류한 불순물을 용액에 잔류시켜 정제하여 고체의 로듐화합물을 고액분리한다.
- ⑦ 환원공정: 정제된 로듐암모늄화합물을 용액 속에서 환원하여 회전소성로에서 하소하거나 고체 화합물을 배

소하여 제조된 로듐을 기존 보유한 환원 Furnace에 넣고 스펀지 로듐으로 환원 처리한다.

3. 로듐 재자원화 공정의 경제성 분석

3.1. 비용-편익 분석(Cost-Benefit Analysis, B/C 분석)

경제성 분석 방법에는 여러 가지가 있으나, 주로 비용 편익분석을 사용한다. 비용편익분석은 사업에 산출되는 편익과 투입되는 비용을 비교 분석하여 사업성을 판단하는 방법으로 B/C 값이 1보다 클 때 사업 타당성이 확보된다. B/C 값을 구하기 위해서, 편익과 비용에 대한 기본 자료가 필요하다. 편익 항목은 판매비, 시장증가를 등이며, 비용 항목은 설비구입비, 인건비, 원료구입비, 유틸리티 사용비, 설비 유지관리비, 폐기물처리비, 감가상각비 등이다. B/C 값은 식 (1)과 같다.

$$B/C = \frac{\text{편익 합}}{\text{비용 합}} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

여기서 B_t 는 t 년도 편익의 현재가치, C_t 는 t 년도 비용의 현재가치, r 는 할인율(이자율), n 는 투자사업의 내구연도(분석기간)이다.

비용-편익 분석 방법으로 사업 타당성 분석을 할 때, 공공투자사업은 편익으로 특정 사업의 국민 생산에 대한 공헌으로, 비용으로 국가자원의 낭비(자원의 기회비용)로 간주하여 추정하며 분석하고, 민간투자사업은 개별 사업주체의 입장에서 화폐적 비용과 수입을 추정하는 재무적 분석 방법으로 분석한다. 식 (1)를 통해 B/C 값을 구할 때, 통상 공공투자사업의 예비 타당성 분석기간 t 는 도로/항만/공항 30년, 철도 40년, 다목적댐 50년 등 사업의 내구성과 관련된다. 사업의 내구연고는 건설·기계·건축 토목 기술의 발전에 따라 증가하고 있는 추세이다. 이전의 아파트 재건축 기한이 20년에서, 30년으로 연장되는 이유도 건축 기술의 발전으로 아파트의 내구성이 높아졌기 때문이다.

민간투자사업에서도 대단위 대형 사업은 공공투자사업 타당성 분석의 기준에 따르고 있으나, 수십억에서 수백억에 이르는 소규모 민간투자사업에서는 투자금을 회수하는 희망시기에 맞추어 분석기간을 설정한다. 본 연구에서는 투자회수기간을 5년으로 설정하였으며, 이는 A

Table 5. Recycling amount and Recycling benefit of rhodium in waste liquor and scrap

	Recycling amount (unit: kg)	Recycling benefit (unit: million KRW)	
		600,000 (KRW/g)	400,000 (KRW/g)
2021	25	15,000	10,000
2022	30	18,000	12,000
2023	35	21,000	14,000
2024	40	24,000	16,000
2025	50	30,000	20,000



Fig. 2. Rhodium price trend from October 2012 to June 2023.

기업이 로듐의 재자원화를 통해 투자금을 회수하고자 하는 희망 기간이다. 통상적으로 중소·중견 기업에서 투자를 결정할 때, 최대 5년 이내에 투자금을 회수하기를 원하기에, 분석기간 5년으로 기준을 세웠다.

A 기업의 2021년 로듐 재자원화량 25 kg 기준으로 연도별 폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화량은 평균 5 kg 씩 증가할 것으로 계획하여 설정한다. Table 5에서 2021년부터 2024년까지 매년 5 kg 씩 증가시킨 이유는 투자회수 기간인 5년 동안 재자원화량을 2배로 증대하려는 기업의 목표에 맞추어 매년 일정한 비율로 증가시켰으며, 마지막 해는 축적한 기술을 기반으로 재자원화량을 10 kg로 설정하였다. 5년 계획으로 재자원화량 2 배 증대의 목표달성을 위해, 재자원화량을 매년 일정 비율로 증가시키는 것은 타당한 접근이다.

본 연구진행 시점인 2021년 기준 가장 적절한 값을 얻기 위하여, 연구진행 시점과 가장 가까운 로듐 단가를 선정하였다. 로듐 단가는 2021년 1월~9월 로듐 국제 평균시세로 1 g 당 600,000원이다. 그러나 Fig. 2에서 2012년 10월부터 2023년 6월까지의 선물 가격으로 로듐 가격의 추

이를 살펴보면, 로듐의 가격이 최근 2년 사이에 급등하고 있음을 알 수 있다. 2021년 로듐의 가격은 15,000 USD/t oz(약 690,000원/g)을 넘어서고, 최고 30,000 USD/t oz(약 1,380,000원/g)까지 치솟았으나, 2023년 6월 현재 5,000 USD/t oz(약 210,000원/g)로 추락한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 개략적 B/C 값의 산정을 위해, 로듐 가격을 600,000원/g과 2023년 로듐의 대략적 평균값인 400,000 원/g을 사용하였다. 각 가격별 재자원화량에 대한 연도별 재자원화 편익은 Table 5와 같다.

신재 로듐의 가격과 재자원화된 로듐의 가격 차이가 분명히 있지만, 로듐 자원이 고가인 점, 희귀 자원인 점, 로듐 가격 변동성이 큰 점을 고려하여, 재자원화된 로듐의 시세는 위의 가격과 유사한 것으로 간주하였다. 그럼에도 로듐의 순도에 따라 가격 차이가 큰 것을 감안할 때, 신재 로듐 가격과 재자원화된 로듐의 가격을 유사하게 간주한 것에 대해 계산상 분명한 한계가 있음을 인식해야 한다.

투입비용은 A 기업이 실제로 로듐의 재자원화하는 과정에서 사용한 비용이며, 항목은 인건비, 간접비, 약품비, 유틸리티비, 폐수처리비, 감각상각비 등 이고, 연도별 공정 투입비용은 2021년~2025년까지 5년간 산정하였다. Table 6는 연도별 공정 투입비용을 나타내며, 2021년에

비해 2025년의 공정 투입 비용이 약 2배 정도 증가한다.

연도별 편익과 비용은 Table 7에 수록되었으며, 또한 실질 할인율을 고려한 편익과 비용을 계산하고, 연도별 편익합과 비용합을 통해 B/C 값을 산정하였다. 본 연구에서는 실질할인율으로 은행 기준금리를 적용하는데, 이는 실제로 기업의 가중평균자본비용(Weighted Average Cost of Capital, WACC), 즉 기업의 총자본에 대한 평균 조달 비용(자본 조달을 위해 지불하는 평균 이자율)을 적용하는 것이 적절하나, 해당 기업의 자본 비용 및 부채 비용 등의 자료 취득과 산정의 어려움이 있기 때문이다. 편익(r)과 비용(r)은 실질 할인율을 고려한 값이며, 여기서 2005년~2020년까지의 한국은행 기준금리를 이용한 평균 기준금리 r는 실질 할인율 2.84%를 적용한다.

Table 7에서 5년 동안의 누적 편익과 누적 비용을 로듐 가격이 600 KRW/mg와 400 KRW/mg인 경우를 나누어 산정하였다. 600 KRW/mg인 경우, B/C 값은 1.5(=101,246/67,527)이고, 400 KRW/mg인 경우, B/C 값은 1.0(=67,496/67,437)이다. 투자회수시기인 2025년에 평균 로듐 시세가 400 KRW/mg인 경우, 투자기업은 최소한 손해를 보지 않게 된다.

Table 6. Input costs of processes (unit: million KRW)

	Labor costs	Indirect costs	Drug costs	Utility costs	Waste treatment costs	Depreciation costs	Total costs
2021	4,800	3,456	45	250	15	1,100	9,666
2022	6,000	4,200	55	300	18	1,344	11,917
2023	7,000	5,040	64	350	22	1,630	14,106
2024	7,700	5,544	73	400	25	1,930	15,672
2025	10,100	7,500	91	500	31	2,300	20,522
Total	35,600	25,740	328	1,800	111	8,304	71,883

Table 7. Cost-Benefit Analysis by years (unit: million KRW)

	Benefit		Cost	Benefit(r)		Cost(r)
	600(KRW/mg)	400(KRW/mg)		600(KRW/mg)	400(KRW/mg)	
2021	15,000	10,000	9,666	15,000	10,000	9,666
2022	18,000	12,000	11,917	17,503	11,669	11,588
2023	21,000	14,000	14,106	19,856	13,237	13,338
2024	24,000	16,000	15,672	22,066	147,11	14,409
2025	30,000	20,000	20,622	26,821	17,881	18,437
Total	108,000	72,000	71,983	101,246	67,496	67,437

3.2. 자원절감에 따른 경제성 분석

전기·전자산업 폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화의 사업 타당성을 파악하기 위해서, B/C 분석 외에 자원절감 효과를 통한 경제성 평가를 수행한다. 자원절감의 경제적 효과를 위해 정확한 로듐의 가격을 정해야 하며, 이는 국제시세로 한다. 로듐의 국제시세는 백금족 금속을 포함한 귀금속 거래회사인 Kitco, (영)존슨매시사, (독)헤라우스, (일)다나카 금속 등의 고시가격을 참고하며, 환율처럼 살 때와 팔 때의 가격이 서로 다르므로, 각각 고시한다. 특히 Kitco의 경우 살 때와 팔 때의 가격 차이는 약 70,000원/g-Rh이다. 공급기업이 해외에 매각할 경우에는 통상 Kitco Bid(살때)시세나 각 해외기업의 매입 고시가격을 기준으로 회수율, 정제련비, 운송비를 차감한 후 매입회사의 정책에 따라 가격이 결정되므로 회사마다 가격이 다르며, 스크랩의 종류, 로듐 함량, 스크랩의 량 및 수급 현황에 따라 적용 매입율과 가격이 변동한다.

자원절감에 따른 경제성 분석에 따르면, 공급기업 손익은 재자원화 로듐 매입단가에서 로듐 스크랩 매각단가를 뺀 값(식 (2))이며, 수요기업 손익은 재자원화 로듐 판매단가에서 로듐 해외조달 단가를 뺀 값(식 (3))이다. 기업이 재자원화 공정을 수행하게 될 때, 재자원화기업 손익은 재자원화 로듐 판매단가에서 도금폐액 구매단가와 재자원화 공정단가를 뺀 값(식 (4))이 된다.

$$\begin{aligned} \text{공급기업 손익} &= \text{재자원화 로듐 매입 단가} \\ &\quad - \text{로듐 스크랩 매각단가} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{수요기업 손익} &= \text{재자원화 로듐 판매 단가} \\ &\quad - \text{로듐 해외조달 단가} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{재자원화기업 손익} &= \text{재자원화 로듐 판매단가} \\ &\quad - \text{도금폐액 구매단가} \\ &\quad - \text{재자원화 공정단가} \end{aligned} \quad (4)$$

자원절감에 따른 비용 분석을 위해서, 2021년 9월 기준 로듐 국제시세는 577,000원/g-Rh로 적용하였고(살 때와 팔 때의 중간가격), 재자원화 로듐 판매단가는 540,000원/g-Rh을 적용하였다. 또한 로듐 스크랩 매각 단가는 300,000원/g-Rh이고, 도금폐액의 재자원화 9월 평균 매입 단가는 320,000원/g-Rh이다. 로듐 스펀지를 1 kg 생산

Table 8. Items of rhodium recycling Costs(As of Sep. 2021)

Item	Rhodium 1 kg production costs(KRW)
Labor costs	20,000,000
Indirect costs	14,400,000
Drug costs	170,000
Utility costs	950,000
Waste treatment costs	50,000
Depreciation costs	4,500,000
Total costs	40,070,000

Table 9. Analysis result of economic effect due to resource saving (unit : KRW/g-Rh)

	Overseas sales(A)	Domestic recycling(B)	Benefit(B-A)
Supply company revenue	300,000	320,000	20,000
Recycling company revenue	-	180,000	180,000
Demand company revenue	-577,000	-540,000	37,000
Total revenue from Recycling.			237,000

하는데 발생하는 재자원화 비용은 40,070,000원이며 (Table 8), 로듐 재자원화 원단위로 약 40,000원/g-Rh으로 산출되었다.

공급기업, 수요기업, 재자원화 기업의 총수익은 237,000원/g-Rh이며, 각각의 수익은 Table 9에 나타난다. 공급기업의 수익은 도금폐액의 재자원화 매입 단가에서 로듐 스크랩 매각 단가를 뺀 값으로 20,000원/g-Rh이다(식 (2)). 수요기업 손익은 해외 매각 시 577,000원/g-Rh에 구매하였으나, 재자원화 로듐은 540,000원/g-Rh에서 구매하여 37,000원/g-Rh으로 나타났다(식 (3)), 재자원화기업 손익은 재자원화 로듐 판매금액 540,000원/g-Rh에서 폐기물 구매금액 320,000원/g-Rh와 공정비용 180,000원/g-Rh를 제외하면 180,000원/g-Rh가 된다(식 (4)). 따라서, 로듐 재자원화로 나타나는 자원절감효과는 237,000원/g-Rh이며, 연간 30 kg의 로듐을 재자원화할 경우, 자원절감효과는 71.1억원로 나타났다. 특히 Table 9에 의하면, 로듐을 재자원화할 때, 재자원화기업의 수익이 공급기업의 수익보다 약 9배, 수요기업의 수익보다 약 5배 정도 많음을 알 수 있다.

4. 로듐 재자원화 공정의 환경성 분석

온실가스 저감효과 분석을 위해 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)기법을 이용하였다. LCA 기법은 목적 및 범위 정의(Goal and Scope Definition), 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 결과 해석(Interpretation) 등으로 구성된다. 본 연구에서 적용한 LCA의 수행 단계는 다음과 같다.

4.1. 목적 및 범위 정의

본 연구에서 LCA의 목적은 “폐액 및 스크랩 내 로듐 국내 재자원화 시와 기존의 해외매각으로 인한 온실가스 저감효과 미세먼지 분석”이라 정의하였다. 기능단위에서, 로듐 재자원화는 ‘폐액 및 스크랩으로부터 재자원화된 로듐 1 kg’로, 로듐 해외매각은 ‘해외매각 로듐 1 kg’으로 설정하였다. 시스템 경계에서, 폐액 및 스크랩으로부터 재자원화된 로듐은 원료획득단계, 재자원화공정단계로 정하고, 해외매각되는 로듐은 원료획득단계, 수송단계로 정하였다. 가정 및 제한사항에서, 공정을 통해 폐기된 로듐은 모두 재자원화되고, 로듐 해외매각과정은 사용 후 전량 해외매각되는 것으로 가정하였다.

4.2. 전과정 목록분석

데이터 수집 단계에서, 폐액 및 스크랩으로부터 재자원화된 로듐의 경우, 재자원화공정 데이터를 로듐 1 kg 기준으로 수집하고, 공정자료는 투입물과 산출물을 모두 수집한다. 해외매각되는 로듐의 경우, 1 kg 기준으로 해외매각 자료를 수집한다. 로듐 1 kg 기준으로 수집한 해외매각 관련 로듐 LCI DB는 Table 10에 수록되어 있다.

로듐 재자원화 공정에서는 염산, 질산, 가성소다 등 원

Table 10. Applied LCI DB and sources

Type	LCI DB	Sources
Rhodium	Rhodium, at regional storage	Ecoinvent
Land transport (3 ton~5 ton)	Land transport (3 ton~5 ton)	ME*
Outer port, Container(average)	Outer port_Container ship(average)	KEITI**

* ME: Ministry of Environment

** KEITI: Korea Environmental Industry & Technology Institute

료물질이 사용되며, 유틸리티로 상수, 전기, LPG 등을 사용한다. 산출물로는 폐수, 응축수가 발생된다. 로듐 1 kg 기준으로 수집한 폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화공정 투입물과 산출물 자료는 Table 11에 나타나 있다.

그리고, 각 공정의 투입물과 산출물에 대한 목록 분석

Table 11. Input and Output in recycling process of rhodium in waste liquor and scrap

Classification	Unit	Material	Quantity
Input	kg	Rhodium Waste Liquor	218
	kg	Scrap	91
	kg	Hydrochloric acid(HCl)	36
	kg	Nitric acid(HNO ₃)	36
	kg	Ammonium Chloride (HH ₄ Cl)	18
	kg	Hydrazine(N ₂ H ₄)	9
	kg	Zinc powder	9
	kg	Chlorine gas	2
	kg	Nitrogen gas	5
	kg	Hydrogen gas	2
	kg	Caustic soda	18
	kg	Water	182
	kWh	Electricity	55
	kg	LPG	0
Output	kg	Rhodium	1.0
	kg	Waste Water	364
	kg	Condensate	200

Table 12. Applied LCI DB* and sources

Type	LCI DB	Sources
LPG	LPG	MOTIE**
Electricity	Electricity	MOTIE**
Water	drinking water	ME***
Nitric Acids	Nitric Acids	ME***
Hydrochloric Acids	Hydrochloric Acids	ME***
Ammonium Chloride	Ammonium chloride production	ME***
Caustic soda	Caustic soda	ME***
Hydrogen	Hydrogen	ME***
Nitrogen	Nitrogen	ME***

* LCI DB : Life Cycle Inventory Database

** MOTIE: Ministry of Trade, Industry & Energy

*** ME: Ministry of Environment

Table 13. GHG emission reduction by years

	Rhodium amount (kg-Rh/yr)	GHG emission(kg CO ₂ eq./yr)		
		Overseas sales	Recycling	Reduction
2021	25	720,000	1,625	718,375
2022	30	864,000	1,950	862,050
2023	35	1,008,000	2,275	1,005,725
2024	40	1,152,000	2,600	1,149,000
2025	50	1,440,000	3,250	1,436,750

Table 14. Rhodium reduction in waste liquid and scrap for rhodium recycling

	Consumption due to overseas sales(kg)		Recycling(kg) (C)	Reduction after recycling(kg) (D=A+B-C)
	Sales of Rhodium in waste liquid and scrap(A)	Purchase of new materials(B)		
Amount(kg)	30	30	30	30
Reduction Rate(%) [(D/(A+B))*100]	50%			

을 수행하였다. 원료 및 유틸리티 생산, 폐수처리에 대한 자료는 Table 12에 나타난 국내의 LCI DB를 이용하였다.

4.3. 전과정 영향평가

전과정 영향평가는 전과정 목록분석 결과를 기반으로 환경영향을 해석하는 것으로, 환경성적표지 평가계수를 활용하며, 영향평가값(potential)는 탄소발자국(GWP), 자원발자국(ADP), 오존층영향(ODP), 산성비(AP), 부영양화(EP), 광화학스모그(POCP) 등 6종으로 구성되나, 주요 환경범주인 지구온난화를 고려하여 탄소발자국 기반의 온실가스 배출량을 산정하였다. 산정방법은 로듐 1 kg 기준으로 폐기과정에서의 온실가스 배출량과 재자원화 과정에서 온실가스 배출량을 산정하였다. 온실가스 배출량은 식 (5)을 통하여 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{온실가스 배출량} &= \text{폐액 및 스크랩 해외매각과정의} \\ &\text{온실가스 배출량} - \text{폐액 및 스크랩 내 로듐} \\ &\text{재자원화 과정의 온실가스 배출량} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 폐액 및 스크랩 해외매각 = 신재 로듐 생산 + 폐액 및 스크랩 공정

4.4. 온실가스 저감 효과 분석

폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화로 인한 온실가스 저

감효과를 분석하였다. 로듐 1 kg 기준으로, 온실가스 배출량은 재자원화 과정에서 65(=1,625/25) kg CO₂ eq., 해외매각 과정에서 28,800(=720,000/25) kg CO₂ eq.이다. 이는 국내 재자원화의 에너지 소비량보다 해외매각의 수송으로 인한 에너지 소비량이 압도적 큼을 의미한다. 로듐 1 kg 기준으로 산정한 결과를 이용하여 폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화에 따른 온실가스 배출량의 저감량을 총량으로 산정한다(Table 13). 2025년 해외매각하는 경우의 온실가스 배출량은 1,440 ton CO₂ eq.이다. 로듐 연간 50 kg을 재자원화하는 경우의 온실가스 배출량은 3,250 kg CO₂ eq.이다. 따라서 2025년 기준, 로듐 재자원화에 따른 온실가스 저감량은 1,436.75 ton CO₂ eq.이다(Table 13). 이는 온실가스 저감전략으로 로듐 재자원화 사업을 적극적으로 추진하는 것을 제안한다.

4.5. 로듐 자원 절감 효과 분석

폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화로 인한 로듐 절감 효과를 분석하였다. 먼저, 폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화량 및 해외매각량, 신재투입량을 조사하였다. 폐액 및 스크랩 내 로듐 재자원화에 따른 자원절감량은 폐액 및 스크랩 내 로듐 해외매각량과 신재투입량을 합한 후 로듐 재자원화량을 뺀 값이다. Table 14에 나타난 로듐 절감량은 해외매각으로 인해 매각량 30 kg와 신재 구매량인 30 kg의 합에서 재자원화량인 30 kg을 제외하면 30 kg의 절감

효과가 있으며, 절감률은 50 %이다.

5. 결 론

로듐은 첨단산업화에 따라 그 용도와 수요가 불가피하고 희소 금속이어서 수요에 따라 가격의 변폭이 크고 가격 또한 매우 비싸다. 따라서 한번 사용하고 폐기하기에는 매우 아까운 자원이므로, 현재 폐기되고 있는 전자 및 자동차 산업의 스크랩 및 폐촉매액에 포함된 로듐을 재자원화할 필요가 있다.

본 연구에서는 로듐이 산업분야에 활용된 후 처분 또는 처리되는 현황을 살펴보고, 특히 스크랩과 도금 폐액 내의 로듐을 증점적으로 회수 후 재자원화하는 관점에서 조사하였다. 회수시 적용되는 증발 농축 공정, 침출 분리 공정, 산 세정 공정, 하소-배소 공정 등의 전처리 공정 흐름 관련 처리기술과 침출공정, 정제공정, 환원공정 등의 정제 공정 흐름 관련 처리기술들을 적절하게 설계하고 운영하여 폐자원의 재자원화를 실행할 경우, 그에 따른 재자원화의 경제적 타당성 확보 및 환경부하(온실가스/미세먼지 배출량)의 저감효과를 얻는다.

경제적 효과에 있어, 로듐의 경우 재자원화 제품량 기준으로 1 kg/년을 회수하면 약 5억원/년의 경제적 이익이 예상되며, 2025년 기준 B/C는 1.5로서 재자원화에 대한 투자 수익성도 높다. 로듐 1 kg 재자원화에 대한 자원절감 효과는 23 만원/g-Rh이고, 연간 30 kg의 로듐 재자원화할 경우, 자원절감효과에 의한 경제적 효과는 연간 약 71.1억 원이다. 환경적 효과로 온실가스 배출량은 연간 재자원화 65 kg CO₂eq./kg-Rh, 해외매각 28,800 kg CO₂eq./kg-Rh으로, 온실가스 저감률은 99.77%으로 나타났다. 2025년 기준 로듐 연간 50 kg을 재자원화하는 경우의 온실가스 배출량은 3,250 kg CO₂ eq., 로듐 재자원화에 따른 온실가스 저감량은 1,436.75 ton CO₂ eq.이다. 결국 로듐의 재자원화량이 증가할수록 환경부하의 저감효과는 비례하여 커지게 된다.

또한 재자원화 사업의 경우, 폐자원 발생 및 재자원화된 상품의 수요처와 재자원화업체 각각 재자원화 당위성을 공감하고 공급처, 재자원화업체, 수요처의 이익이 보장되면 재자원화 사업이 보다 쉽게 지속될 것이다. 이를 위한 하나의 방편으로 각각의 업체들이 협력 또는 연대를 통해 EIP(Eco-Industrial Park) Network을 구축할 필요가

있다. 결국 희소 금속인 로듐을 재자원화로 인한 경제적 효과와 더불어 환경적 효과도 크므로, 재자원화가 적극적으로 수행될 필요가 있다. 본 연구의 결과는 향후 정부의 재자원화 정책에 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

1. PGM Market Report, 2021 : Focus on Catalysts, Elsevier, 4, pp.2-2, Feb. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.focat.2021.03.006>.
2. H. B. Trinh, J. C. Lee, Y. J. Shu, et al., 2020 : A Review on the Recycling Processes of Spent Auto-Catalysts: Towards the Development of Sustainable Metallurgy, Waste Management, Elsevier B.V, 114, pp.148-165.
3. J. G. Kim, 2013 : Material Flow and Industrial Demand for Palladium in Korea, Resources, Conservation and Recycling, Elsevier B.V, 77, pp.22-28.
4. H. S. Park, 2011 : A Study on Recovery of Platinum Group Metals(PGMs) from Spent Automobile Catalyst by Melting Technology, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 20(2), pp.74-81.
5. M. S. Lee, 2010 : Chemical properties and dissolution technology of Platinum Group Metals in solutions, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 19(5), pp.3-12.
6. Y. W. Hwang, 2012 : A Study on the Status Analysis and Development Plan of Domestic Urban Mining Industry, Inha University Industrial-academy Cooperation Group, pp.1-113.
7. H. S. Lee, 2011 : Study on Institutional and Technical Supporting Plans to Activate Resource Recirculation of Rare Metals of Waste Metal Resources, Basic Study Report, 2011(0), pp.1-164.
8. L. J. Kim, H. J. Shin, and H. Y. Kang, 2016 : Investigation and Analysis for the Status of Urban Mining Industry in Korea, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 25(5), pp.3-13.
9. B. Kim, S. Chae, J. Kim, et al., 2018 : Oversea production status of gold, silver, platinum and palladium from scrap, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 27(6), pp.76-83.
10. H. Lee, 2011 : Study on insitutional and technical sup-

porting plans to activate resource recirculation of rare metals of waste metal resources, Basic Study Report, pp.1-164.

11. L. Kim, H. Shin, and H. Kang, 2016 : Investigation and analysis for the status of urban mining industry in Korea, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 25(5), pp.3-13.
12. Y. Hwang, 2012 : A study on the status analysis and development plan of domestic urban mining industry, Inha University Industrial-academy Cooperation Group, pp.1-113.
13. H. Kang, Y. Kim, J. Park, et al., 2017 : Urban mining policy for resource circular economy, Dahae, Seoul.
14. H. Kang, Y. Kim, 2019 : Business practices and further tasks towards circular economy, Environmental Management Research, 11(2), pp.21-40.
15. K. Shin, S. Lee and H. Kang, 2021 : Analysis of resource and GHG reduction by recycling palladium in plated spent catalyst solution, Resources Recycling, 30(3), pp.47-54.

16. Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning (KISTEP), 2021 : Technology Level Evaluation, Year 2020, Korea.
17. I. H. Kwak, Y. W. Hwang, K. H. Park, et al., 2016 : Environmental Evaluation for the Remanufacturing of Rental Product Using the LCA Methodology, J. of Korean Society of Environmental Engineers, 38(11), pp.611-617.

이성유

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

신가영

- London Hotel School College, UK 전문학사
 - 경희대학교 국제대학원 국제개발협력 석사
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
-

김두환

- 인하대학교 물리학과 박사
 - 인천대학교 경제학과 박사 수료
 - 한국원자력연구소 선임연구원
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 교수
-

황용우

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

강홍윤

- The University Queensland 토목공학 박사
 - (전) 한국생산기술연구원 수석연구원
 - 한국환경경영학회 회장
 - 현재 인하대학교 대학원 글로벌산업환경융합전공 교수
-

홍성민

- 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
-

김다연

- 인하대학교 순환경제환경시스템전공 석사
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
-