

니켈슬래그 재활용을 통해 생산된 쇼트 블라스팅 연마재의 Eco-efficiency 분석

문영수 · 김중권* · 박복재**,†

전남대학교 여수창업보육센터*

*주식회사 에스알

**전남대학교 경상학부

Eco-efficiency Analysis of Shot Blasting Abradant Produced by Recycling Nickel Slag

Young-Soo Moon · Jung-Kwon Kim* · Bok-Jae Park**,†

Yeosu Business Incubator, Chonnam National University

**SR Co., Ltd.*

***Division of Business & Commerce, Chonnam National University*

Abstract

This study was conducted to analyze Eco-efficiency of the abradant produced by recycling of nickel slag from the steel industry. Data for environmental and economic efficiency were collected for the analysis. Life cycle assessment(LCA) method was applied for the environmental efficiency and market price was applied for the economic efficiency. The environmental efficiency assessment resulted in improvement on ADP, GWP, ODP, AP, EP, and POCP. The eco-efficiency assessment showed efficiency of 5.010E+01. Thus, the recycle of nickel slag could be a sustainable alternative.

Keywords : Nickel slag, Eco-efficiency, LCA, Recycle, Abradant

1. 서론

니켈슬래그(nickel slag)는 니켈을 생산하기 위해 원료로 사용된 니켈 광석, 유연탄 등이 고온에서 용융되어 페로니켈과 분리된 후 발생하는 재활용 자원이다.

보통 니켈 1톤당 약 30톤의 슬래그가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 국내 발생량은 연간 약 100 만톤에 이르고 있다. 하지만 아직까지 니켈슬래그의 재활용은 미미한 수준

으로 단순 매립에 의존하고 있는 형편이다. 일본에서는 페로니켈 슬래그를 노반재나 비료 원료 및 콘크리트용 잔골재로 이용하기도 한다¹⁾.

국내에서는 광양 소재 기업의 니켈 제조 공정에서 발생하는데, 슬래그에는 Mg과 Si이 다량 함유되어 있으나 과도한 규산질 함유에 따른 겔 형성으로 분리공정 어려움²⁾이 있어 화학적 처리를 통한 재활용이 어려워, 매립 외의 재활용은 콘크리트용 골재, 주물사, 연

†Corresponding author E-mail: bjpark73@jnu.ac.kr

마재, 사문암 대체재 등의 천연자원 대체재로 활용되고 있다.

이러한 일부 재활용 외에 대부분 매립되고 있는 니켈슬래그는 매립지 부족, 분진, 침출수 등의 환경문제를 야기하므로 이를 고부가가치 제품으로의 재활용하기 위한 기술개발이 필요한 상황이다.

이러한 요구에 맞추어 니켈슬래그를 쇼트 블라스팅용 연마재로 활용하기 위한 연구가 국내 중소기업에 의해 진행 중이다.

니켈슬래그는 슬래그 발생 공정의 특성상 제강슬래그나 고로슬래그에 비해 강도가 약 30~40% 이상 높아 쇼트 블라스팅 연마재로 충분한 품질 요건을 갖추고 있다. 국내의 쇼트 블라스팅 연마재는 대부분 해외에서 수입하고 있으며, 일부는 자연산 모래를 이용하기도 한다. 따라서 고품질의 연마재 국산화를 통해 해외 수입 연마재에 대한 수입대체 품목으로 개발할 필요가 있다.

그러나 니켈슬래그 재활용 연마재 기술에 대한 환경적·경제적 효과의 정확한 평가가 이루어지지 않아 재활용 기술에 대한 정량적 효과를 평가하고 타당성을 부여하는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 환경성 평가 기법인 환경전과정평가(Life Cycle Assessment ; LCA)와 경제성 평가를 활용하여 니켈슬래그 재활용을 통해 생산된 쇼트 블라스팅 연마재의 Eco-efficiency를 분석하였다.

평가 대상 기술은 니켈슬래그 재활용 연마재와, 기존의 연마재로 사용되는 모래에 대하여 환경적·경제적 효율성을 비교 분석하였다.

2. 연구 내용

2.1. 시스템 경계 설정

본 연구의 대상은 니켈슬래그를 전처리 한 후, 건조, 파쇄, 선별 과정을 거쳐 연마재를 생산하는 공정이다. 따라서 본 연구의 시스템

경계는 원료물질 채취 및 제품제조단계(Cradle-to-Gate)에 한정하였다.

2.2. 데이터 수집 및 계산

환경성과 경제성 평가를 위해서는 기능, 기능단위 및 기준흐름의 설정이 필요하다. 본 연구에서 환경성과 경제성 평가를 위하여 설정한 기능, 기능단위 및 기준흐름은 아래와 같다.

- 기능 : 용접면 쇼트 블라스팅용 연마재
- 기능단위 : 연마재 1 kg 생산
- 기준흐름 : 니켈슬래그를 이용하여 생산된 연마재 1 kg

본 연구에서는 대상 시스템의 환경성과 경제성을 평가하여 eco-efficiency 분석에 활용하기 위해 실제 시험 제조 되고 있는 기업의 공정 데이터를 수집하였다. 데이터 수집을 위한 시간적·공간적 범위는 2014년 대한민국을 기준으로 하였으며, 현재 개발 진행 중인 대상기술의 기술적 범위를 고려하였다.

2.3. 환경성 평가

본 연구에서는 환경성 평가는 환경 LCA 방법론을 적용하였다. LCA 방법론에 대한 국제 표준 규격인 ISO 14040³⁾, 14044⁴⁾, 14047⁵⁾, 14049⁶⁾에서 제시하는 절차 및 내용에 따라 연구를 진행하였다. 이를 통해 eco-efficiency 도출에 활용할 환경성 인자 도출을 수행하였다.

2.3.1. 목적 및 범위 정의

본 연구의 환경성 평가 수행 목적 eco-efficiency 도출에 환경성 인자로서 활용에 있다. 연구 범위의 시스템 경계와 기능, 기능단위 및 기준흐름 설정의 내용은 시스템 경계 설정과 데이터 수집 및 계산에서 설정한 것과 같다.

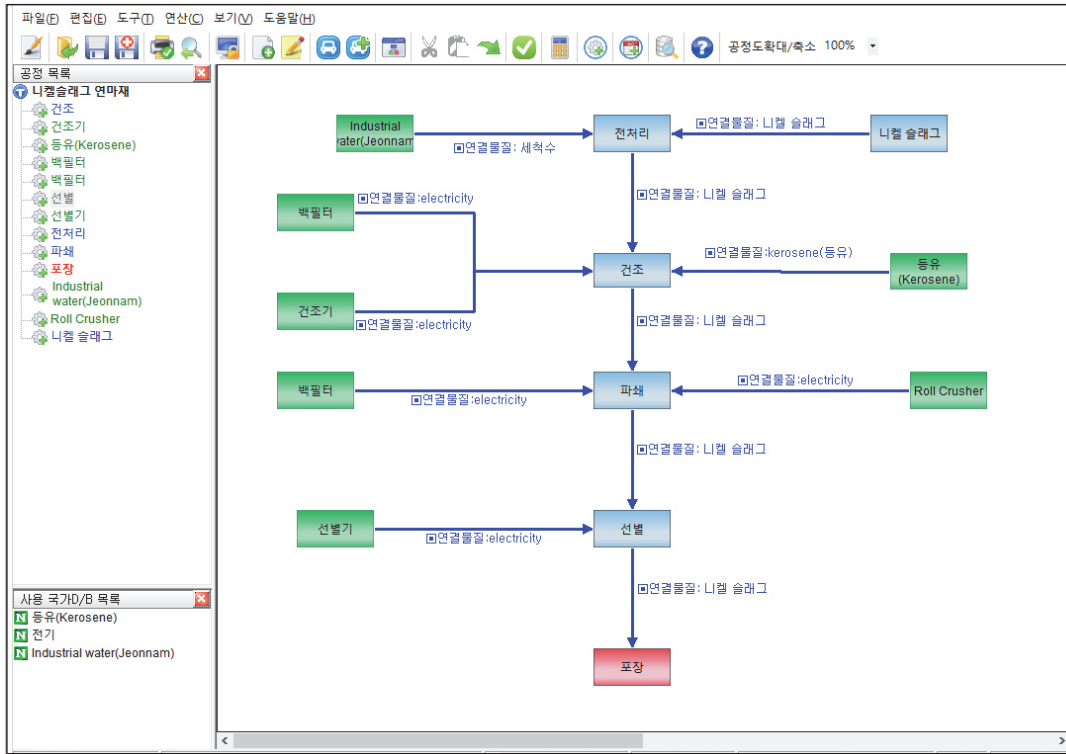


그림 1. 니켈슬래그 이용 연마재 생산 공정도(TOTAL 공정도 작성 화면).

2.3.2. 전과정 목록분석

전과정 목록 분석은 목적 및 범위 정의에 따라 대상시스템과 관련된 투입물과 산출물에 대한 데이터를 물질 수지나 에너지 수지, 등을 적용하여 정량화 하고 이를 분석하는 단계이다. 본 연구의 대상 시스템 목록 분석에서 수집한 데이터의 목록은 표 1과 같다.

기준흐름인 니켈슬래그를 이용하여 생산된 연마재 1 kg을 기준으로 수집 및 계산된 데이터를 환경부에서 개발한 LCA 소프트웨어 TOTAL 프로그램으로 공정도를 작성하였다. 공정도는 그림 1과 같다.

2.3.3. 전과정 영향평가

환경성 평가는 수집된 데이터를 바탕으로, 영향평가 방법론을 적용하여 수행된다. 본 연구에서는 대상 공정의 환경성 평가를 수행하기 위해, 우리나라의 환경성적표지의 특성화

표 1. 데이터 범주별 수집 목록

구분		물질명
투입물	원료물질	니켈슬래그
	에너지	건조기 전기, 파쇄기 전기, 선별기 전기, 백필터 전기(건조공정, 파쇄공정)등유
	보조물질	세척수
배출물	제품	연마재
	부산물	Dust
	폐기물	폐수

인자 6가지를 모두 적용하였다. 그리고 eco-efficiency를 위한 분석은 global warming potential efficiency(GWP:지구온난화)와 abiotic resource depletion efficiency(ARD:자원고갈)를 적용하였다.

2.3.4. 전과정 해석

본 연구에서 환경성 평가의 전과정 해석은

연구 결과의 분석 내용과 eco-efficiency 분석 내용으로 대체할 수 있다.

2.4. 경제성 평가

Eco-efficiency를 측정하기 위한 경제성 평가를 위한 방법론으로 전과정 비용분석이 주로 활용된다. 그러나 경제성 평가에 대한 분석 방법에 대해서는 표준화된 방법론이 제시되어 있지 않은 상태이다. eco-efficiency에서 경제 가치에 대한 측정은 생산량, 매출액, 생산성, ROE, ROI 등을 사용 할 수도 있다.

본 연구에서는 니켈슬래그 재활용을 통한 연마재 제조 기술이 진행 중이어서 전과정비용평가에 대한 데이터 확보가 어려운 점을 감안 Eco-efficiency 측정을 위한 경제성 평가는 비교 대상인 연마재인 sand(자연沙)의 시장가격을 적용하였다. 그리고 적용 데이터의 통일성을 위해 니켈슬래그 연마재도 예정 시장가격을 적용하였다.

2.5. Eco-efficiency 평가

Eco-efficiency는 환경부하가 적으면서 경제적 가치가 높은 차원의 원자재, 제품, 산업 부문의 공정 및 서비스 개선 등을 의미한다⁷⁾.

따라서 제품의 eco-efficiency는 아래 식과 같이 환경 영향과 창출된 제품의 경제적 가치의 상대적인 비율로 정의된다.

$$\text{Eco-efficiency} = \frac{\text{창출된 제품의 경제적 가치}}{\text{환경영향}}$$

본 연구에서는 대상 공정의 환경·경제적 효율성을 정량화한 효율성을 도출하기 위하여, 니켈슬래그 연마재 생산과 sand 연마재의 환경영향과 경제성을 비교하여 environmental-efficiency와 economic-efficiency를 평가하였다.

Environmental-efficiency는 기존의 sand 연마재를 대체하는 니켈슬래그 연마재의 환경성 결과를 상대적 비율로 나타내었다. 그리고 평가대상이 기존의 토양 매립용으로 처리

해왔던 니켈슬래그라는 특징을 고려하여 자원고갈과 지구온난화를 평가를 위한 주요 인자로 선정하였다.

따라서 eco-efficiency 평가를 위한 환경성 부문은 지구온난화(GWP)와 자원고갈(ARD)를 활용하게 된다. 다음은 GWP와 ARD의 efficiency를 각각 나타낸 것이다.

$$\text{GWP efficiency} = \frac{\text{GWP sand}}{\text{GWP slag}}$$

- GWP sand : sand 연마재 생산 지구온난화 영향
- GWP slag : 니켈슬래그 연마재 생산 지구온난화 영향

$$\text{ARD efficiency} = \frac{\text{ARD sand}}{\text{ARD slag}}$$

- ARD sand : sand 연마재 생산 자원고갈 영향
- ARD slag : 니켈슬래그 연마재 생산 자원고갈 영향

3. 연구 결과

3.1. 환경성 평가 결과

환경성 평가는 환경부의 환경성적표지제도에서 적용하고 있는 자원소모(ADP), 지구온난화(혹은 탄소성적, GWP), 오존층영향(ODP: Ozone Depletion Potential), 산성화(AP: Acidification Potential), 부영양화(EP: Eutrophication Potential), 광화학적산화물생성(POCP: Photochemical Ozone Creation Potentials) 6가지 특성화 영향범주를 적용하여 평가하였다. 수집 및 계산된 데이터를 적용하여 도출한 환경영향은 표 2와 같다.

평가 비교 대상인 sand 연마재의 환경영향데이터는 국가 LCI DB⁸⁾에서 2013년 구축된 유사 data인 규사(silica sand)를 선정하였다.

이에 따라 도출된 sand 연마재 1kg 생산에 따른 6가지 특성화 영향범주별 환경영향은 표 3과 같다.

3.2. 경제성 평가 결과

연구에서 정의한 전과정 비용은 원료취득

표 2. 니켈슬래그 연마제 1 kg 생산 환경영향

환경영향범주	영향결과
자원소모 [kgantimonyeq./[nickelslag1kg]	7.302E-05
지구온난화 [kgCO ₂ eq./[nickelslag1kg]	3.024E-03
오존층영향 [kgCFC11eq./[nickelslag1kg]	5.657E-11
산성화 [kgSO ₂ eq./[nickelslag1kg]	2.014E-05
부영양화 [kgPO ₄ ³⁻ eq./[nickelslag1kg]	1.578E-06
광화학적산화물생성 [kgC ₂ H ₄ eq./[nickelslag1kg]	1.038E-05

표 3. Sand 연마제 1 kg 생산 환경영향

환경영향범주	영향결과
자원소모 [kgantimonyeq./[sand(SiO ₂)1kg]	1.437E-04
지구온난화 [kgCO ₂ eq./[sand(SiO ₂)1kg]	2.190E-02
오존층영향 [kgCFC11eq./[sand(SiO ₂)1kg]	9.399E-11
산성화 [kgSO ₂ eq./[sand(SiO ₂)1kg]	8.366E-05
부영양화 [kgPO ₄ ³⁻ eq./[sand(SiO ₂)1kg]	1.296E-05
광화학적산화물생성 [kgC ₂ H ₄ eq./[sand(SiO ₂)1kg]	2.080E-05

비용, 생산비용, 폐기 비용을 모두 합한 값에 대한 현장 데이터를 이용하여 수집하여 계산하여야 한다. 그러나 니켈슬래그 연마제가 현재 개발 진행 중이어서 예정시장가격을 기준으로 하였다.

또한 비교대상인 sand 연마제도 현장 전과정 비용에 대한 현장 데이터의 수집이 불가능하여 sand 연마제의 시장가격을 기준으로 하였다.

다음의 표 4에 니켈슬래그 연마제와 sand 연마제의 시장가격에 대한 정보를 나타내었다.

3.3. Eco-efficiency 평가 결과

니켈슬래그 연마제와 sand 연마제의 환경영향범주별 결과를 비교하여 지구온난화와

표 4. 각 연마제 시장가격 및 생산비

구분	시장가격
니켈슬래그 연마제	198원/kg
sand 연마제	21원/kg

자원고갈측면에서 environmental efficiency를 분석한 결과는 표 5와 같다.

지구온난화에 대한 니켈슬래그 연마제는 s and 연마제에 비해 7.242E+00의 효율성을 보였으며, 자원고갈측면에서는 1.968E+00의 효율성을 나타냈다. 따라서 환경영향에 대하여 니켈슬래그 연마제의 영향이 더 적은 것으로 나타났으며 특히 지구온난화 측면에서는 7배 이상의 개선효과를 나타내었다. 이는 폐기물인 니켈슬래그를 재활용 하는 것이므로, 니켈슬래그 생성과 관련된 상위흐름은 환경영향범주에 포함시키지 않기 때문인 것으로 예상할 수 있다.

니켈슬래그 연마제 생산의 환경영향과 부가가치인 경제성에 대한 비교 결과인 eco-efficiency를 지구온난화와 자원고갈 측면에서 분석한 결과는 표 6과 같다. 지구온난화 측면에서의 eco-efficiency는 6.55E+04이며, 자원고갈 영향범주에서의 결과는 2.71E+06이다. 그리고 sand 연마제의 지구온난화 범주에서의 eco-efficiency는 표 7과 같이 9.59E+02이며, 자원고갈 측면에서는 1.46E+05로 나타났다.

이러한 니켈슬래그 연마제의 sand 연마제에 대한 eco-efficiency 개선효과는 표 8에서 정리하였다. 니켈슬래그 연마제의 지구온난화 측면에서의 eco-efficiency 개선효과는 6.83E+01이며, 자원고갈 측면에서의 eco-efficiency는 1.86E+01이다.

니켈슬래그 연마제의 지구온난화와 자원고갈 측면에서 eco-efficiency 지수의 개선효과를 통합하기 위해 아래와 같이 평균 제곱근의 합으로 계산하였다.

이와 같이 니켈슬래그 연마제 공정은 환경성적표지의 6가지 영향범주 모두에서 개선

표 5. 니켈슬래그 연마재의 environmental efficiency

구분	지구온난화(GWP)		자원고갈(ARD)	
	sand 연마재	니켈슬래그 연마재	sand 연마재	니켈슬래그 연마재
환경영향	2.190E-02	3.024E-03	1.437E-04	7.302E-05
environmental-efficiency	7.242E+00		1.968E+00	

표 6. 니켈슬래그 연마재의 eco-efficiency

구분	지구온난화(GWP)		자원고갈(ARD)	
	경제성	환경영향	경제성	환경영향
인자 값	1.980E+02	3.024E-03	1.980E+02	7.302E-05
eco-efficiency	6.55E+04		2.71E+06	

표 7. sand 연마재의 eco-efficiency

구분	지구온난화(GWP)		자원고갈(ARD)	
	경제성	환경영향	경제성	환경영향
인자 값	2.100E+01	2.190E-02	2.100E+01	1.437E-04
eco-efficiency	9.59E+02		1.46E+05	

표 8. 니켈슬래그 연마재의 sand 연마재에 대한 eco-efficiency 개선효과

구분	지구온난화(GWP)		자원고갈(ARD)	
	니켈슬래그 연마재	sand 연마재	니켈슬래그 연마재	sand 연마재
eco-efficiency	6.55E+04	9.59E+02	2.71E+06	1.46E+05
개선효과	6.83E+01		1.86E+01	

효과를 보였고, 특히 eco-efficiency 효율은 기존의 sand 연마재에 비해 매우 높은 결과를 나타냈다.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_i^2} = \sqrt{\frac{1}{2} ((6.83E+01)^2 + (1.86E+01)^2)}$$

$$= 5.010E+01$$

따라서 본 연구의 대상 공정인 니켈슬래그 재활용을 통한 연마재 생산은 환경적 및 경제적으로 모두 지속가능한 대안이라고 할 수

있다. 그리고 향후 기술개발 과정에서 공정의 최적화 등의 개선을 통해 환경성, 경제성측면의 eco-efficiency는 더욱 개선될 수 있을 것으로 예측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 니켈슬래그 재활용을 통해 생산된 연마재 기술에 대하여 기존 sand 연마재와의 비교 데이터를 기반으로 환경성, 경제성을 평가하고 이 결과를 통해 eco-efficie

ncy를 분석하였다.

분석 결과 환경적·경제적 측면의 개선은 물론 eco-efficiency 개선효과가 매우 높은 것으로 나타났다.

연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 지구온난화에 대한 니켈슬래그 연마재는 sand 연마재에 비해 $7.242E+00$ 의 효율성을 보였으며, 자원고갈측면에서는 $1.968E+00$ 의 효율성을 나타냈다.
- 2) 니켈슬래그 연마재 생산의 환경영향과 부가가치인 경제성에 대한 비교 결과인 eco-efficiency는 지구온난화 측면에서 $6.55E+04$ 이며, 자원고갈 영향범주에서의 $2.71E+06$ 이다.
- 3) 니켈슬래그 연마재의 sand 연마재에 대한 eco-efficiency 개선효과 지구온난화 측면에서는 $6.83E+01$ 이며, 자원고갈 측면에서는 $1.86E+01$ 이다.
- 4) 니켈슬래그 연마재의 지구온난화와 자원고갈 측면에서 eco-efficiency 지수의 개선효과를 통합한 결과는 $5.010E+01$ 이다.

이렇듯 환경성·경제성 평가 결과를 바탕으로 기존 제품 대비 니켈슬래그 연마재 제조 기술은 영향범주에서 모두 지속가능한 기술로 평가되었다.

하지만 본 연구를 통해 도출된 결과는 현재 본격적인 상용단계의 기술은 아니므로 공정의 최적화를 통해 투입물/산출물의 종류 및 양이 변동될 수 있어 최종적으로 확정된 평가 결과라고 보기에는 한계가 있다.

하지만 기술 개발이 완료단계에 있고, 대량 생산 과정에서 공정 개선을 추진하고 있다는 점에서 더 높은 eco-efficiency를 기대할 수 있다.

이승호(2010), 페로니켈 슬래그로부터 Mg 이온의 용출특성과 화합물 제조, 한국세라믹학회지 47(6), pp. 613-617.5.

2. 김은영, 최상원, Viktor Kim, 장우석, Yu Jia Li, 박지현, 김진영(2010), 무기계, 건설폐기물 처리 및 자원화 : 페로니켈 슬래그의 물리화학적 처리에 따른 용해 특성, 한국폐기물자원순환학회 추계학술연구회 발표논문집, pp. 283-285.
3. KS I ISO 14040:2011 환경경영-전과정평가-원칙 및 기본구조, 기술표준원
4. KS I ISO 14044:2011 환경경영-전과정평가-요구사항 및 지침, 기술표준원
5. KS I ISO 14047:2010 환경경영-전과정영향평가-KS I ISO14044 활용사례, 기술표준원
6. KS I ISO 14049:2010 환경경영-전과정평가-목적 및 범위설정과 목록분석에서의 KS I ISO 14044 활용보기, 기술표준원
7. 이다은, 김형석, 김진만, 최선미, 조봉규, 허탁(2013), 제강 환원슬래그의 재활용을 통해 생산된 초속경시멘트 생산의 Eco-efficiency 평가, 한국폐기물자원순환학회지 30(6) pp. 529-536
8. 국가 LCI DB(www.edp.or.kr/lci/lci_db.asp)

References

1. 추용식, 임유리, 박홍범, 송훈, 이종규,