

태양광 폐모듈 실리콘을 재활용한 메커니컬 실 제조공정의 환경성평가

신병철^{1,*}, 신지원¹, 권우택², 최준철³, 선주형⁴, 장근용⁴

¹(주)그린컨테크, 기술연구부

경기도 용인시 수지구 죽전로 146

²한국세라믹기술연구원, 탄소중립소재센터

경상남도 진주시 소호로 101(충무공동 15-4)

³드림마이닝(주) 기술연구소

경기도 화성시 송산면 사강로 57

⁴(주)플러스매니저, 기술연구소

경상남도 창원시 진해구 안골로 108번길 64

(2022년 5월 4일 접수; 2022년 6월 13일 수정본 접수; 2022년 6월 24일 채택)

Environmental Impact Evaluation of Mechanical Seal Manufacturing Process by Utilizing Recycled Silicon from End-of-Life PV Module

Byung-Chul Shin^{1,*}, Ji-Won Shin¹, Woo-Teck Kwon², Joon-Chul Choi³, Ju-Hyeong Sun⁴, and Geun-Yong Jang⁴

¹Greencontech, Yongin 16889, Korea

²Carbon Neutral Material Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Jinju 52851, Korea

³Dream mining, Hwaseong 18552, Korea

⁴PLUS Manager, Changwon, 51609, Korea

(Received for review May 4, 2022; Revision received June 13, 2022; Accepted June 24, 2022)

요 약

본 연구에서는 태양광 폐모듈 해체과정에서 회수한 실리콘을 재활용하여 기계구조용 메커니컬 실을 제조하는 공정에 대해 전과정평가방법에 의한 환경성평가를 수행하였다. 재활용 실리콘은 고순도 정제 후 탄소와 반응시켜 β-SiC 입자로 합성하고 압축 성형, 소결 및 열처리를 거쳐 제품을 생산한다. 현장 데이터 수집 및 환경부 LCI DB를 활용하여 각 단계별로 자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물 등 6개 영역의 환경영향을 산정하였다. 영향범주 별 환경영향은 지구온난화 45 kg CO₂, 광화학산화물 2.23 kg C₂H₄으로 크게 나타났으며 가중화 분석결과 광화학산화물, 자원고갈 및 지구온난화에 의한 환경영향이 98.7%로 높은 기여도를 차지하였다. 원료 실리콘과 탄소를 미분쇄 혼합하는 습식공정과 β-SiC 과립화 공정이 주요한 환경영향 유발요인이므로 건식공정으로 전환 및 대기 배출되는 용매는 회수하여 재이용하는 시스템으로 개선이 필요하다. 폐모듈 실리콘의 재활용에 의해 자원고갈의 영향은 53.9%, 지구온난화는 60.7% 감소하며 가중화 결과 전체적인 환경영향이 27% 감소하는 것으로 분석되어 폐모듈 재활용은 자원절약과 탄소중립 실현의 주요 수단이 될 수 있음을 LCA 분석으로 확인하였다.

주제어 : 폐모듈, 실리콘, 메커니컬 실, 전과정평가, 환경영향

Abstract : An environmental evaluation was conducted by employing LCA methodology for a mechanical seal manufacturing process that uses recycled silicon recovered from end-of-cycle PV modules. The recycled silicon was purified and reacted with carbon to synthesize β-SiC particles. Then the particles underwent compression molding, calcination and heat treatment to produce a product. Field data were collected and the potential environmental impacts of each stage were calculated using the LCI DB of the Ministry of Environment. The assessment was based on 6 categories, which were abiotic resource depletion, acidification, eutrophication, global warming, ozone depletion and photochemical oxidant creation. The environmental impacts by category were 45 kg CO₂ for global warming and 2.23 kg C₂H₄ for photochemical oxide creation, and the overall environmental

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: shinbucu@naver.com; Tel: +82-31-889-5151; Fax: +82-31-889-5250

doi: 10.7464/ksct.2022.28.3.203 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

impact by photochemical oxide creation, resource depletion and global warming had a high contribution of 98.7% based on weighted analysis. The wet process of fine grinding and mixing the raw silicon and carbon, and SiC granulation were major factors that caused the environmental impacts. These impacts need to be reduced by converting to a dry process and using a system to recover and reuse the solvent emitted to the atmosphere. It was analyzed that the environmental impacts of resource depletion and global warming decreased by 53.9% and 60.7%, respectively, by recycling silicon from end-of-cycle PV modules. Weighted analysis showed that the overall environmental impact decreased by 27%, and the LCA analysis confirmed that recycling waste modules could be a major means of resource saving and realizing carbon neutrality.

Keywords : End-of-life PV module, Silicon, Mechanical seal, Life cycle assessment, Environmental impact

1. 서론

정부의 신재생에너지 보급정책에 따라 태양광 모듈은 2000년대 초반부터 전국적으로 설치가 확대되었다. 태양광 모듈의 사용기한(15~25년)이 도래함에 2030년 약 8만 톤의 폐모듈 발생량이 전망되며 이후 기하급수적으로 크게 증가하여 2045년 155만 톤 이상이 될 것으로 예상되고 있다[1]. 국내 태양광 발전시장에서는 결정질 실리콘 모듈이 90%를 차지하는데, 일반적으로 태양광 모듈은 알루미늄 프레임, 강화유리, ethyl vinyl acetate (EVA) 필름, 태양전지(solar cell), 백시트(back sheet) 등으로 구성되어 있다. 유럽 Waste electrical and electronic equipment (WEEE)는 태양광 모듈 폐기시 모듈에 사용된 Cu, Pb, Cd 등의 중금속에 의한 환경오염을 방지하고 순환경제패키지(circular economy package) 달성을 위해 2012년 폐모듈을 전기전자폐기물로 지정하고 재활용을 의무화하였다. 국내는 2022년까지 태양광 모듈 회수·보관 체계 구축 및 재활용기술개발 등 기반 마련 후 2023년부터 태양광 폐모듈 생산자책임재활용제도를 도입할 예정으로 업체는 회수한 폐모듈의 80% 이상 재활용이 필요하다[1,2].

현재 국내 폐모듈 재활용은 발생량이 많은 강화유리, 알루미늄 및 일부 고가의 유가금속 중심이다. 실리콘은 태양광 모듈 구성소재의 3.65~4.1%를 차지하므로[3,4], 2045년 누적 배출량은 6만 5천 톤에 이를 것으로 추정되지만 고부가 재활용기술이 존재하지 않아 대부분 매립 처분해야 하는 상황이다. 메커니컬 실의 주원료인 탄화규소 분말은 국내에서 생산되지 않고 있어 폐모듈 실리콘을 정제하여 원료로 재활용하는 기술개발이 추진되고 있다[5]. 탄화규소(SiC)로 제조된 메커니컬 실은 기계적 특성이 우수하여 펌프, 컴프레서 등 유체를 다루는 회전기기에 널리 사용되고 있다[6].

폐자원의 재활용은 자원순환 측면에서 긍정적이지만 해체, 분리 등에 에너지가 소요되며 특히 화학원료로 사용하려면 정제공정에 여러 가지 약품과 많은 에너지가 소비되어 환경에 부정적 영향을 미친다. 재활용기술의 이와 같은 환경영향 유발 또는 개선효과를 정량적으로 분석하기에는 표준화된 전과정평가(life cycle assessment, LCA) 방법이 적합하다. LCA는 제품 시스템의 전체 수명주기에 걸쳐 자원 투입량과 환경 배출량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 영향을 체계적으로 평가하는 기법으로 주로 환경성적표지 인증과 마케팅 또는 친환경 공정설계에 이용되어 왔으며, 최근에는 폐자원 재활용[7,8] 또는 CO₂ 전환기술[9,10]에 대하여 지속가능발전의 기여도를 정량적으로 비교분석하여 우선순위를 판정하는데 적용되고 있다.

태양광 발전의 LCA는 많은 연구사례가 있으나[11], 폐모듈 재활용 분야의 연구는 초기단계이다. 폐모듈 1,000 kg의 수거, 소각을 포함한 재활용은 온실가스 370 kg의 유발요인이 있으며[4,7], 실리콘과 유리 재활용은 특히 온실가스 및 산성화 환경영향이 크게 감소하는 것으로 확인되었다[12,13].

본 연구에서는 폐모듈에서 회수한 실리콘을 메커니컬 실의 원료로 재활용하는 제조공정에 LCA 방법을 적용하여 환경에 미치는 영향을 전반적으로 분석·평가하여 환경부하 감축방안을 모색하고 실리콘 재활용에 의한 환경 개선효과를 정량적으로 파악하였다.

2. 연구 목적 및 범위

2.1. 연구 목적

본 연구의 목적은 LCA 방법을 이용하여 폐모듈 실리콘을 재활용하여 기계구조용 메커니컬 실을 제조하는 공정의 각 단계별 환경부하를 정량적으로 평가하고 환경영향을 유발하는 주요 물질과 공정을 규명하여 환경친화적 제품생산을 위한 개선방안을 도출하고 실리콘 재활용이 환경에 미치는 영향과 개선효과를 정량적으로 제시하는 것이다.

2.2. 연구 범위

2.2.1 기능 및 기능단위, 기준흐름

최종제품인 메커니컬 실의 기능은 회전기기 회전부분의 기밀 유지 기능을 담당하는 핵심소재 SiC로 정했다. 메커니컬 실의 크기는 적용기기에 따라 매우 다양하기 때문에 기능단위는 메커니컬 실의 핵심소재 SiC로 하고 기준흐름은 Table 1과 같이 정의하였다.

2.2.2 시스템 경계 설정

태양광 폐모듈에서 회수한 실리콘을 재활용하여 메커니컬 실을 제조하는 공정은 Figure 1과 같다. 95% 수준의 실리콘을 99.99% 이상의 고순도로 정제한 후, 고온에서 탄소와 직접 반응

Table 1. Scope definition

Function	SiC used in the manufacture of the mechanical seal products
Functional unit	Amount of SiC 1 kg
Reference flow	1 kg of SiC

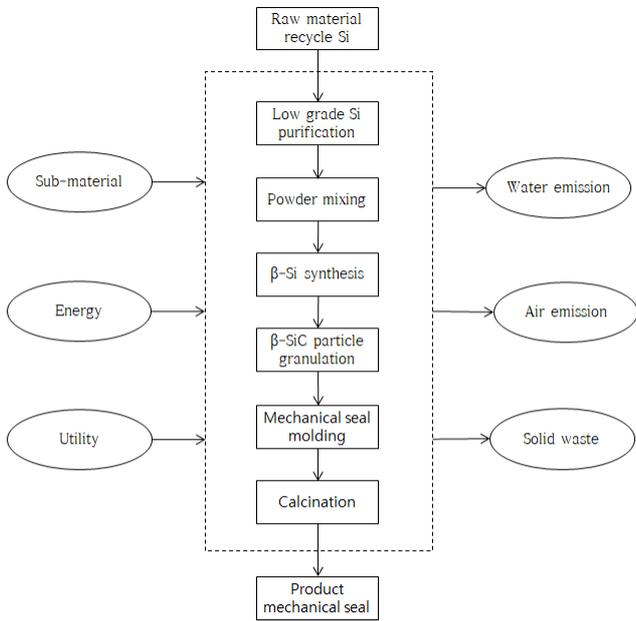


Figure 1. Process flow diagram of Si recycling from end-of-life PV module in mechanical seal manufacturing process.

시켜 β-SiC를 합성하고, 성형 및 소성공정을 거쳐 메커니컬 실을 제조한다. 전과정평가의 시스템 경계는 재활용 실리콘의 고순도 정제단계부터 메커니컬 실 제품의 제조단계(gate to gate)로 설정하였다. 각 공정단계별 환경부하 값과 원인구명을 위해 제조현장의 공정을 고려하여 총 6개 단위의 세부공정으로 구분하였다.

- 저순도 실리콘 정제(low grade Si purification): 폐모듈에서 회수한 실리콘을 산, 알칼리와 반응시켜 99.99% 이상의 고순도 실리콘으로 정제

- 원료 혼합(powder mixing): 고순도 실리콘 분말을 미분쇄한 후 에탄올 용매 하에서 카본 입자와 균일하게 혼합한 후 건조시켜 용매는 제거

- β-SiC 분말 합성(β-SiC synthesis): 실리콘과 카본이 혼합된 분말을 1,400~1,500℃의 고온에서 반응시켜 β-SiC 입자 합성

- 과립화(β-SiC particle granulation): β-SiC 입자, 유기바인더, 카본 블랙을 용매 하에서 혼합, 건조 및 분급하여 소결체 성형용으로 과립화

- 성형(mechanical seal molding): 분급된 β-SiC를 냉간 등방압 압축기로 제품을 성형하고 기계적으로 치수 가공 및 표면처리

- 소결(calcination): 가공된 성형체를 열처리하여 유기바인더를 제거한 후, 용융 Si 함침 및 소결반응을 통해 경화된 SiC 소결체의 메커니컬 실 제조

2.2.3 데이터 수집 및 전과정 목록분석

전과정평가의 데이터는 제조현장과 국가 또는 해외 LCI 데이터로 구분된다. 시간적 경계는 2021년 제조업체의 운전 데이터, 지역적 경계는 해당지역 데이터를 국내 LCI 데이터와 동일하게 설정하였다. 태양광 폐모듈에서 회수한 실리콘을 정제하여 메커니컬 실로 재활용하는 공정의 투입물은 주원료, 부자재, 유틸리티 및 에너지로 구분하였으며, 산출물은 제품, 수계

Table 2. Results of life cycle inventory analysis

Group	Material	Data category	Data Source			unit	Amounts
			Survey	Calculation	Estimation		
Input	Recycled Si from waste PV module	Main material	✓			kg	17.7
	Sulfuric acid	Sub-material	✓			kg	3.9
	Nitric acid	Sub-material	✓			kg	19.4
	Hydrogen peroxide	Sub-material	✓			kg	1.9
	Hydrogen fluoride	Sub-material	✓			kg	1.9
	Ethanol	Sub-material	✓			kg	44.6
	Carbon Black	Sub-material	✓			kg	12.7
	Oxygen	Sub-material	✓			kg	0.9
	Phenolic resin	Sub-material	✓			kg	5.8
	Lubricating oil	Sub-material	✓			kg	0.01
Utility & Energy	Silicon chunk	Sub-material	✓			kg	15.9
	Electricity		✓			kWh	837.8
	Industrial water		✓			m ³	84.4
Output	Cooling water		✓			m ³	4,515
	Mechanical seal	Product	✓			kg	22.3
	Waste water	Water emission		✓		m ³	113.9
	Solid waste	Land fill		✓		kg	27.7
Transportation	NMVOc	Air emission		✓		kg	42.3
					✓	km	900

배출물, 대기 배출물 및 고형 폐기물로 분류하였다. 수집 데이터는 측정치, 계산치, 추정치로 구분되며 배치 운전 당 투입물과 산출물의 데이터는 Table 2와 같다. 측정치는 폐모듈 실리콘을 고순도 정제하는 기업에서 측정한 공정 소비량 데이터 및 메커니컬 실을 생산하는 기업의 제조설비에 정제된 실리콘을 투입하여 기존 제품과 동등한 수준의 제품을 생산할 때 소요되는 원료와 부자재, 유틸리티 소비량 등 운전일지 데이터이다. 대기로 배출되는 용매 및 수증기, 미세하게 발생하는 분진, 고형 폐기물 등은 직접 측정이 곤란하여 각 공정별로 물질수지 계산을 통하여 산정하였다. 수송에 의한 환경영향은 고순도 실리콘 정제현장에서 메커니컬 실 제조현장까지의 수송거리와 디젤 트럭을 수송수단으로 추정하였다. 투입물과 산출물에 대한 상위 및 하위흐름의 연결은 환경부[14]와 산업통상자원부(구 지식경제부)에서 구축한 LCI 데이터베이스[15]를 기본으로 활용하였으며 필요한 경우 ecoinvent의 구축 데이터를 사용하였다[16].

2.2.4 가정 및 제한사항

폐모듈에서 회수한 저순도 실리콘을 재활용하여 기계구조용 메커니컬 실을 제조하는 공정의 환경영향평가를 수행함에 있어 현실적인 한계가 있어 다음과 같이 가정 또는 적용하였다.

- ① 태양광 폐모듈 해체과정에서 발생한 실리콘을 회수하여 재활용하는 것으로 저순도 실리콘 회수까지의 유틸리티 사용량은 고려하지 않았다.
- ② 폐모듈 실리콘의 정제와 메커니컬 실의 제조는 서로 다른 기업에서 이루어지므로, 실리콘 정제공정의 약품 및 유틸리티 투입량은 메커니컬 실 제조에 실제 투입된 재활용 실리콘 상당량으로 환산하였다.
- ③ 메커니컬 실 제조의 부자재로 사용되는 카본 섬유, 카본 시트는 카본 블랙과 동일한 것으로 고려하였다.
- ④ 메커니컬 실 제조과정에서 발생하는 고형 폐기물과 분진은 실리콘 금속이 주성분이므로 매립에 의한 처분방법을 적용하였다.

3. 전과정 영향평가 및 해석

3.1. 전과정 영향평가

전과정평가는 목록분석의 결과를 환경적인 측면에서 평가하여 환경부하의 수준을 규명하는 단계이다. 폐모듈에서 회수한

실리콘을 재활용하여 메커니컬 실을 제조하는 공정의 환경부하를 평가하기 위해서 환경성적표지제도 활성화 목적으로 한국환경산업기술원에서 개발한 TOTAL(Tool for type III Labeling & LCA, ver 6.6.1) 프로그램을 사용하였다[14]. 본 연구의 환경영향 범주에는 프로그램에서 고려하는 자원고갈(abiotic depletion potential; ADP), 지구온난화(global warming potential; GWP), 오존층파괴(ozone depletion potential; ODP), 산성화(acidification potential; AP), 부영양화(eutrophication potential; EP), 광화학산화물생성(photochemical oxidation creation potential; POCP)을 포함하였다. 현장조사 목록분석의 결과를 LCA 프로그램에 입력하고 특성화(characterization), 정규화(normalization), 가중화(weighting) 순서로 환경영향을 분석하였다.

3.1.1 특성화(Characterization)

특성화는 각 환경영향 범주별로 분류된 목록항목들이 각각의 환경영향에 미치는 기여의 정도를 정량화하는 단계로, 각각의 환경부하에 대응하는 상응인자를 곱하여 잠재적인 환경영향을 산정하였다. 메커니컬 실 SiC 1 kg을 제조할 때 공정 단계의 환경영향 분석결과는 Table 3과 같다.

자원고갈의 환경영향은 β-SiC 합성을 위해 고순도 실리콘 입자를 미분쇄하고 탄소 입자와 혼합하는 공정, 최종제품인 메커니컬 실을 성형하기 위해 유기바인더에 β-SiC와 카본 블랙을 혼합하여 입자를 과립화하는 공정에서 크게 나타났다. 자원고갈의 잠재적 환경영향은 0.359 kg Sb-eq로 주요 요인은 천연가스, 원유 및 석탄 소비에 의한 것으로 파악되었다. 자원고갈의 환경영향이 큰 두개의 공정은 미세입자의 혼합을 원활하게 하기 위해서 에탄올을 용매로 사용하는데 에탄올 생산에 필요한 열에너지와 전력 공급용 화석연료 소비량이 주요 자원고갈이다. 에탄올 증류탑에는 스티프 등 대량의 열에너지를 사용하므로 에탄올 1 kg을 생산할 때 전체적으로 15~23 MJ의 에너지를 소비하는 것으로 알려져 있다[17].

메커니컬 실 제조공정 전체의 지구온난화 잠재배출량은 45 kg CO₂-eq으로 여러 공정에서 주요하게 환경영향이 발생하고 있다. 공정 별 환경영향의 비중은 정제된 실리콘 입자의 미분쇄 및 탄소 입자와 혼합공정 23.4%, β-SiC 입자 과립화 22.8%, 성형제품의 소성 및 열처리가 25.3%를 차지하고 저순도 실리콘 정제공정은 2.4%로 파악되었다. 고강도 입자의 분쇄 및 혼합에 볼밀을 사용하며 고온의 소성 반응기에 전기로를 사용하는데 전기에너지 사용량이 크거나 또는 제품 생산의 에너지 소비량이 큰

Table 3. Results of characterization

Impact categories	unit	Low grade Si Purification	Powder mixing	β-SiC synthesis	β-SiC granulation	Mechanical seal molding	Calcination	Total
ADP	kg Sb-eq/kg	2.18E-02	9.91E-02	4.90E-02	1.02E-01	2.53E-02	6.15E-02	3.59E-01
AP	kg SO ₂ -eq/kg	2.07E-02	2.58E-02	1.31E-02	2.57E-02	6.79E-03	3.16E-02	1.24E-01
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq/kg	1.38E-02	3.79E-03	2.43E-03	3.34E-03	1.26E-03	4.16E-03	2.88E-02
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	1.07E+00	1.05E+01	7.73E+00	1.03E+01	4.00E+00	1.14E+01	4.50E+01
ODP	kg CFC11-eq/kg	3.18E-07	4.32E-06	4.45E-10	3.94E-06	1.50E-09	2.83E-07	8.86E-06
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq/kg	5.57E-02	1.03E+00	5.69E-05	1.07E+00	3.89E-05	6.55E-02	2.23E+00

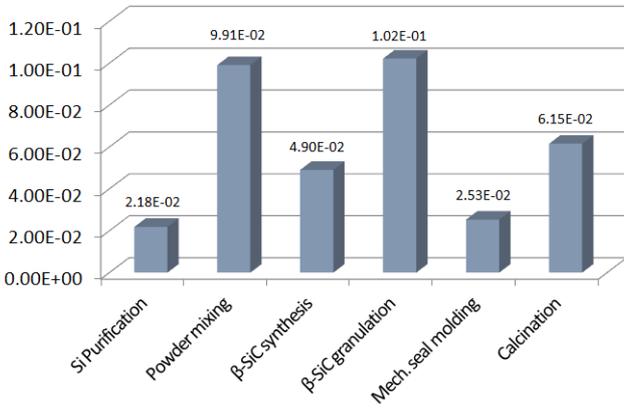


Figure 2. Characterization for abiotic resource depletion (ADP).

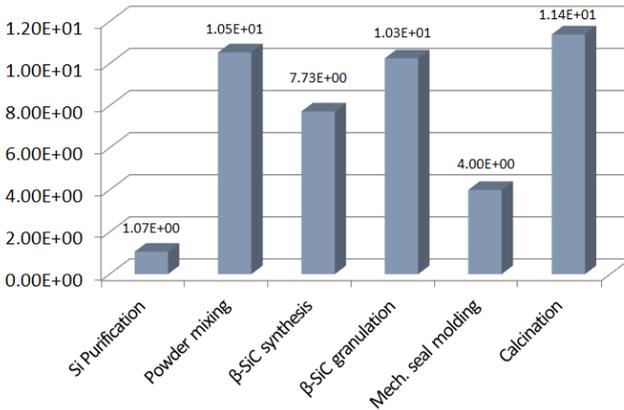


Figure 3. Characterization for global warming potential (GWP).

에탄올을 부자재로 사용하는 공정들의 기여도가 크다.

지구온난화 환경영향의 요인별 기여도 분석결과는 전기 사용이 54%로 가장 큰 것으로 파악되었다. 또한 미세한 실리콘과 탄소 입자를 혼합하는 습식공정과 β-SiC 과립공정의 용매 에탄올 사용에 기인하는 온실가스 배출량이 33.9%로 높은 비중을 차지하며, 기타 부자재로 첨가되는 카본 블랙, 실리콘 청크의 영향은 3~6% 정도이다. 온실가스 종류별 기여도는 이산화탄소(CO₂)가 전체 배출량의 95.2%로 가장 크며 메탄(CH₄) 4.5%, 아산화질소(N₂O) 0.3% 수준으로 에너지 공급을 위한 원유, 천연가스, 석탄 등 화석연료 연소의 온실가스 배출이 환경영향의 주요 원인으로 판단된다.

온실가스 배출량을 산정할 때 일반적으로 공정의 직접배출량과 에너지 사용에 의한 배출량만을 고려하고 있으나, 공정에 따라서 에탄올과 같은 부자재 사용에 의한 간접배출량이 상당한 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 공정간 비교 또는 개발기술의 환경성평가에 LCA 방법을 적용하면 제조공정의 원료와 부자재들에 기인하는 온실가스 배출량 등 추가적인 환경영향의 파악이 가능하므로 지속가능발전의 기여도 또는 친환경성 수준의 정밀한 비교에 적합하다고 할 수 있다.

산성화의 환경영향은 0.124 kg SO₂-eq이며 주요 원인물질은 이산화황(SO₂)과 질소산화물(NO_x)로 화석에너지 사용과 관련이 크다. 지구온난화 환경영향은 대부분 화석에너지 사용에 의

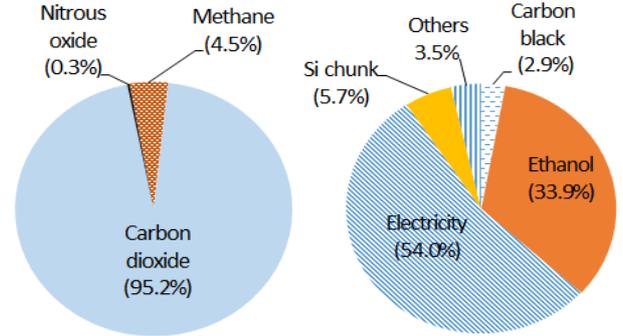


Figure 4. Impact contributions of input and greenhouse gas on global warming potential.

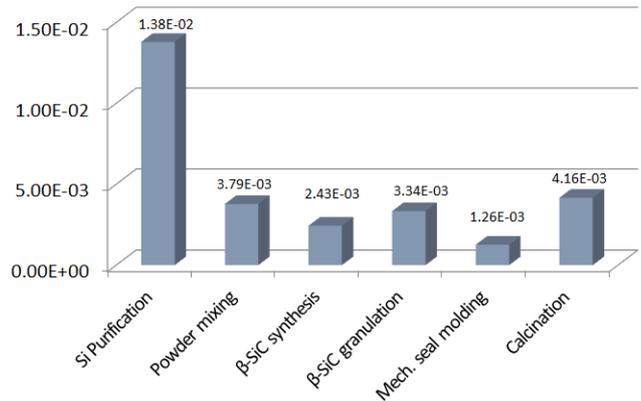


Figure 5. Characterization for of eutrophication potential (EP).

한 배출량으로 분석되었는데 산성화도 원료 혼합 20.9%, 과립화 20.8%, 제품의 소성 25.5%로 유사한 경향이다.

광화학산화물 생성에 의한 잠재적 환경영향은 2.23 kg C₂H₄-eq로 분석되었다. β-SiC 합성을 위해 원료 실리콘과 카본 입자의 혼합공정 46.4%, β-SiC와 카본 입자 혼합물의 과립화 공정이 48.2%로 파악되었다. 두 공정 모두 에탄올을 용매로 사용하고 건조단계에서 용매는 대부분 대기로 배출된다. 대기 중의 에탄올 증기는 non-methane volatile organic compounds (NMVOC)로 1 kg 당 광화학산화물 특성화인자는 0.399 kg C₂H₄-eq로 매우 높기 때문에 환경영향에 큰 기여를 한다.

오존층파괴 영향범주는 광화학산화물 생성과 유사한 형태로 원료 입자 혼합과 과립화 공정이 각각 48.7%, 44.4%를 차지하는데 잠재배출량 자체는 크지 않은 것으로 분석되었다. 주요 원인물질별로는 카본 블랙 27.6%, 에탄올 66.4%로 이들 물질 제조에 기인하는 것으로 불소 성분을 포함한 가스의 배출에 의한 것이다.

부영양화 영향범주에서는 산과 알칼리 약품을 사용하여 저순도 실리콘을 정제하는 공정의 환경영향이 전체 0.0288 kg PO₄³⁻-eq의 47.9%를 차지하는 것으로 파악되었다. 부영양화의 주요 원인물질은 질산 사용 및 폐수 발생에 의한 COD 비중이 45.2%, 화석연료 연소에 의해 대기 배출된 질소산화물(NO_x)에 의한 수질오염의 영향이 43.5%이다.

Figure 7는 기계구조용 메커니컬 실의 제조공정에서 각 환경영향 범주에 기여하는 주요 원인물질의 기여도를 비교분석한

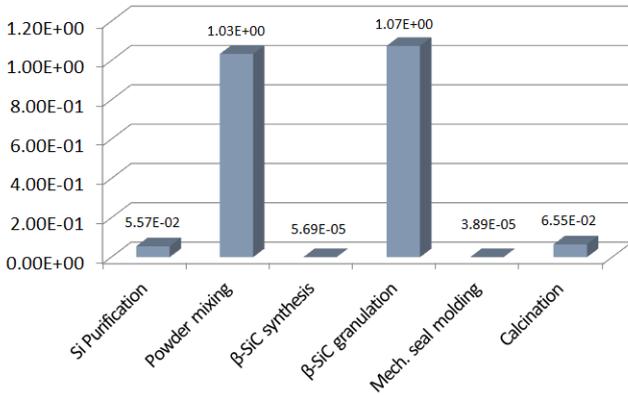


Figure 6. Characterization for photochemical oxidant creation potential(POCP).

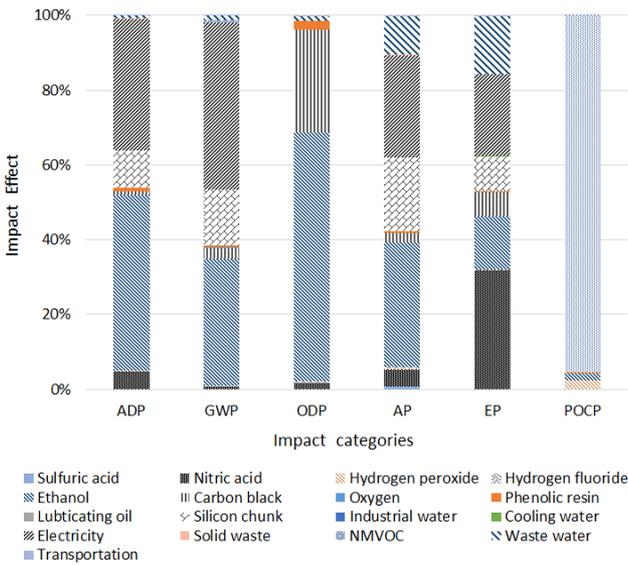


Figure 7. Comparison of environmental impact based on input and output materials.

것이다. 용매로 사용하는 에탄올은 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 산성화 등 여러 영향범주에 35~65% 정도로 주요하게 기여하고 있다. 특히 사용 후 건조과정에서 대기로 배출되는 에탄올은 NMVOC로 광화학산화물 환경영향에 95%의 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 메커니컬 실 제조공정은 실리콘 입자의 미분쇄 및 혼합의 물리적 조작, β-SiC 합성반응과 제품의 소결 및 열처리 등 고온에서 운전되는 반응기에 전기에너지를 많이 사용하고 있어 전력 생산용 화석연료의 자원고갈 및 연소에 의한 지구온난화와 산성화 환경영향에 미치는 기여도는 30~45%로 비중이 큰 편이다. 그 밖의 주요 물질로 보조재인 실리콘 청크 사용은 자원고갈, 지구온난화 및 산성화, 카본 블랙은 오존층, 저순도 실리콘 정제공정의 질산은 부영양화에 10~30% 정도 기여하는 것으로 파악되었다.

3.1.2 정규화(Normalization) 및 가중치 부여(Weighting)

정규화란 특성화와 가중치 부여단계 사이에 포함되는 단계로 환경영향범주간의 상대적 비교를 위하여 대상 기능단위가

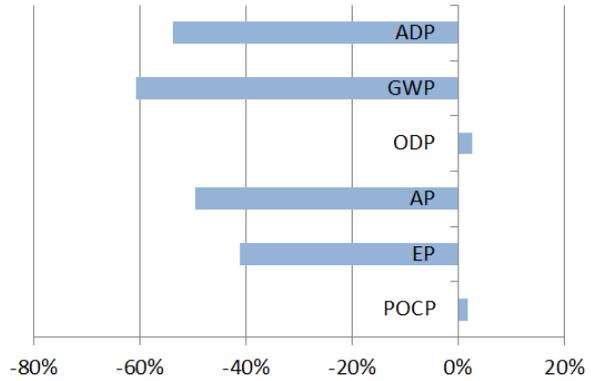


Figure 8. Improvement of environmental impact by Si recycling from end-of-life PV module in mechanical seal manufacturing process.

하나의 영향범주에 미치는 환경영향을 해당지역에서 일정기간 배출되는 총 환경영향으로 나누는 과정을 말한다. 가중치 부여는 정규화를 거친 각각의 환경영향 범주간의 상대적 중요도를 고려하여 전체적인 순위를 보여주는 과정이다[8].

TOTAL 프로그램에 내재된 인자 및 지표에 의한 정규화 결과 전체 환경영향 범주 중 광화학산화물 생성이 주요한 환경영향으로 나타났다. 가중치 부여결과는 정규화 결과와는 다소 다르게 광화학산화물 생성 70.3%, 자원고갈 16.7% 및 지구온난화가 11.7%로 기여도가 높았으며 오존층파괴 및 부영양화의 기여도는 1% 미만으로 낮았다.

3.2 전과정 결과해석 및 공정 청정화 방안

3.2.1 폐모듈 실리콘 재활용 효과

태양광 폐모듈 실리콘을 정제하여 메커니컬 실 제조에 재활용함으로써 신재 실리콘 대체에 의한 환경영향의 개선효과를 분석하였다. 태양광 모듈에 적용 가능한 수준의 신재 실리콘 제조공정의 LCI는 문헌[18]에 발표된 데이터를 TOTAL 프로그램에 입력하고 메커니컬 실 제조공정 전체의 환경영향을 산정하여 재활용 실리콘을 사용한 분석결과와 비교하였다.

폐모듈에서 회수한 저순도 실리콘의 정제에 의해 일부 환경영향이 증가함을 고려하더라도 재활용 실리콘을 원료로 이용하면 자원고갈 환경영향의 53.9%, 지구온난화 60.7%가 감소하는 것으로 분석되었다. 실리콘 정제과정 추가로 광화학산화물 생성 1.9%, 오존층파괴 환경영향은 2.7% 증가하지만 가중치를 고려한 전체적인 환경영향은 27% 감소하므로 환경보존 측면에서 유리한 효과가 있다. 지구온난화의 경우 폐모듈 실리콘을 태양전지 원료로 재활용하는 경우, 매립이나 소각 등의 처분방식에 비해 환경영향이 50% 이상 감소한다는 연구결과와 유사한 수준이다[13].

3.2.2 제조공정 청정화 방안

폐모듈 실리콘을 재활용하여 메커니컬 실을 제조하는 공정의 청정화를 위해서는 여러 환경범주에 걸쳐 주요하게 영향을 미치는 에탄올 사용공정의 개선이 우선적으로 중요하다. 에탄

을 용매로 사용하여 원료 실리콘과 탄소 입자를 혼합하는 습식공정은 건식공정으로의 전환이 바람직하며, 메커니컬 실을 성형하기 위해 β -SiC와 카본 블랙, 유기바인더를 혼합하여 과립화하는 공정의 건조과정에서 대기로 배출되는 용매는 회수하여 재활용하는 방안이 필요하다. 또한 제조공정 전체적으로 전기에너지를 많이 사용하고 있어 제조공정 및 설비의 에너지 효율화 방안이 필요하다.

4. 결론

태양광 폐모듈 실리콘을 기계구조용 메커니컬 실 제조의 주 원료로 재활용하는 공정의 환경영향을 LCA 방법으로 분석한 결과 제품 1 kg 당 45 kg CO₂-eq, 2.23 kg C₂H₄-eq 배출로 지구온난화 및 광화학산화물의 환경영향이 큰 것으로 파악되었으며 가중화 분석결과 광화학산화물, 자원고갈 및 지구온난화에 의한 환경영향의 기여도가 98.7%로 높게 분석되었다. 지구온난화 및 광화학산화물 생성의 환경영향을 유발하는 주요 공정 및 물질은 원료 실리콘과 탄소 입자를 미분쇄하여 혼합하는 공정 및 β -SiC 입자 과립화에 사용하는 용매 에탄올로 파악되었으며, 고강도 원료 입자의 분쇄 및 혼합, 제품의 성형과 소성에 전기를 사용하고 있어 전기에너지에 의한 환경영향의 기여도가 높았다. 에탄올이 환경영향의 주요 원인이므로 친환경적 제조공정으로의 전환을 위해서는 실리콘 입자를 미분쇄하여 탄소와 혼합하는 습식공정을 건식공정으로 대체가 최우선적으로 필요하였다. 폐모듈 실리콘의 재활용에 의한 신재 원료의 대체효과로 자원고갈의 환경영향 53.9%, 지구온난화는 60.7%가 감소하는 것으로 분석되었으며, 가중화 결과 전체적인 환경영향은 27% 감소하므로 실리콘 재활용은 자원절약 측면에서 유효하며 특히 온실가스 배출량 감축효과가 커서 탄소중립 실현을 위한 주요 수단이 될 수 있음을 LCA 방법으로 확인할 수 있었다.

감사

본 연구는 환경부의 재원으로 환경산업기술원의 재활용저해 제품 순환이용성 개선 기술개발사업(2020003100002)의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- Lee, K., and Cha, J., "Management of Solar Photovoltaic Panels under the Extended Producer Responsibility Legislation," *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **56**(4), 367-376 (2019).
- Kim, T. G., and Kim, K. Y., "Utilization Technology of Solar Photovoltaic Waste Panels," *KISTEP Tech. Brief*, 2021-13 (2021).
- Cho, J. Y., Park, A., Yun, H. M., Jun, Y. S., and Kim, J. S., "Current Status and Utilization Technology of End-of Life Photovoltaic Modules," *J. of Korean Inst. of Resources and Recycling*, **29**(4), 15-30 (2020).
- Latunussa, C. E. L., Ardente F., Blengini, G. A., and Mancini

- L., "Life Cycle Assessment of an Innovative Recycling Process for Crystalline Silicon Photovoltaic Panels," *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **156**, 101-111 (2016).
- Kim, G. M., and Jang, H. K., "SiC Powder Manufacturing through Silicon Recovery from Waste Si Solar Cells," *J. of The Korean Solar Energy Society*, **41**(4), 173-180 (2021).
- Dietzel, W., and Vasko, J., "The Evaluation and Application of Mechanical Seal Face Materials," 44th Turbomachinery & 31st Pump Symposia, 1-16 (2015).
- Bajagain, R., Panthi G., An, Y. J., and Jeong, S. W., "Current Practices on Solar Photovoltaic Waste Management: An Overview of the Potential Risk and Regulatory Approaches of the Photovoltaic Waste," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **42**(12), 690-708 (2020).
- Kim, H. J., Kwon, Y. S., Choi, Y. G., Chung, C. K., Baek, S. H., and Kim, Y. W., "Life Cycle Assessment on the Reuse of Glass Bottles," *Clean Technol.*, **15**(3), 224-230 (2009).
- Zimmermann, A. W., Wunderlich, J., Langhorst, T., Wang, Y., Armstrong, K., Müller, L. J., and Buchner, G. A., "Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization," Global CO₂ Initiative (2020).
- Choi, J. N., An, J. J., Park, P. J., Lee, J. J., Lee, G. W., and Chang, B. J., "Development of a Strategic Platform for Carbon Upcycling Technologies," KICET (2020).
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., and Parisi, M. L., "Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels," *Energies*, **13**, 1-38 (2020).
- Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao, J. I., and Corkish, R., "A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules," *Solar Panels and Photovoltaic Materials*, Chapter 2, 9-27 (2018).
- Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao J. I., and Corkish, R., "Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules," *Appl. Sci.*, **8**, 1-15 (2018).
- <https://www.greenproduct.go.kr/epd/epd/total.do> (accessed Jan. 2022).
- https://www.kncpc.or.kr/resource/lci_pass.asp (accessed Jan. 2022).
- <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/login/> (accessed Jan. 2022).
- Lorenz, D., and Morris D., "How Much Energy Does It Take to Make a Gallon of Ethanol?," Institute for Local Self-Reliance (1995).
- Méndez, L., Forniés, E., Garrain, D., Vázquez, A. P., Souto, A., and Vlasenko, T., "Upgraded metallurgical grade silicon and polysilicon for solar electricity production: A comparative life cycle assessment," *Sci. Total Environ.*, **789**, 1-56 (2021).