

회피효과를 고려한 인젝터 재제조의 전과정 환경영향 효익 분석

김남석¹, 김영운¹, 황용우², 강홍윤^{1*}, 김영호³

¹인하대학교 일반대학원 순환경제환경시스템전공

22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

²인하대학교 환경공학과

22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

³카런

14445 경기도 부천시 오정구 송내대로518번길 104-6

(2024년 3월 27일 투고; 2024년 4월 9일 수정본 접수; 2024년 4월 10일 채택)

Life Cycle Environmental Impacts Benefits Analysis of Remanufactured Injector Considering the Avoided Effect

Nam Seok Kim¹, Young Woon Kim¹, Yong Woo Hwang², Hong-Yoon Kang^{1*}, and Young Ho Kim³

¹Program in Circular Economy Environmental System, Graduate School of Inha University

100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

²Department of Environmental Engineering, Inha University

100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

³Car Run Co., Ltd

104-6 Songnae-daero 518beon-gil, Ojeong-gu, Bucheon-si, Gyeonggi-do 14445, Korea

(Received for review March 27, 2024; Revision received April 9, 2024; Accepted April 10, 2024)

요 약

재제조는 사용 후 제품을 분해, 세척, 검사, 보수, 조정, 재조립하여 원래의 성능 또는 그 이상의 성능을 가진 제품으로 재상품화하는 것으로, 재제조산업은 2050 탄소중립을 실현하기 위해 필요한 핵심 산업이다. 본 연구에서는 자동차부품 중 재제조가 활발히 이루어지고 있는 인젝터를 대상으로 전과정평가를 이용하여 회피효과를 고려 시와 미고려 시 자원 저감 및 온실가스 저감 효과를 분석하고자 한다. 연구결과, 인젝터 재제조로 인한 자원 저감 효과와 온실가스 저감 효과는 회피효과를 미고려 시 1개 기준으로 95.30%, 93.88%가 저감되는 것으로 나타났다. 재제조 시 제품을 재사용함으로써 사용 후 제품이 폐기되지 않는 환경영향과 천연자원을 사용하지 않는 환경영향의 회피효과를 고려할 시 190.91%, 188.33%가 저감되는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 향후 재제조 시 회피효과를 고려한 환경영향 저감량을 평가하고, 연구방법론 개발 시 활용될 수 있을 것으로 본다.

주제어 : 인젝터, 재제조, 회피효과, 전과정평가, 환경 효익 분석

Abstract : Remanufacturing re-commercializes a used product to achieve an equal or higher performance level than the original product by disassembling, cleaning, inspecting, repairing, reconditioning, and reassembling the used product. The remanufacturing industry is a key industry necessary to realize carbon neutrality by 2050. This study uses life cycle assessment to analyze the resource reduction and greenhouse gas reduction effects with and without considering the avoided effect for an injector, which is an automobile part that is actively being remanufactured. The results of this study showed that the resource reduction effect and greenhouse gas reduction effect induced by injector remanufacturing were reduced by 95.30% and 93.88%, respectively, based on one unit without considering the avoided effect. However, when considering the avoided effect, which in this case is the environmental impact of not disposing of the used injector and not having to use natural resources to manufacture a new injector because the used injector was reused during remanufacturing, the resource reduction effect and greenhouse gas reduction effect were 190.91% and 188.33%, respectively. The results of this study are expected to be used in the future to evaluate the amount of environmental impact reduction while considering the avoided effect during remanufacturing and to help develop research methodology for remanufacturing.

Keywords : Injector, Remanufacturing, Avoided effect, Life cycle assessment, Environmental benefits analysis

*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kanghy@inha.ac.kr, Tel: +82-32-860-9329

doi: 10.7464/ksct.2024.30.2.94 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.

1. 서 론

UN 산하 기후변화정부간협의체(IPCC)는 2100년까지 지구 평균기온이 산업화 이전 수준보다 1.5도 이상 상승하면 않된다고 발표하면서 온실가스 배출량을 현재보다 50%로 줄여야 한다고 권고하였다[1]. 이를 달성하기 위해 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하고, 2050년에 탄소중립을 달성해야한다고 제시하였다. 이에 따라 천연자원의 사용을 저감하고, 폐자원을 이용하는 순환경제가 대두되게 되었다[2]. EU에서는 그린딜에 합의하였으며[3], 미국은 Federal Vehicle Repair Cost Savings Act를 제시하고[4], 국내에서는 2050 탄소중립 선언 후, 이를 달성하기 위한 2050 탄소중립 추진전략의 10대 과제 중 하나로 순환경계의 활성화를 제시하고 있다.

순환경제는 자원 절약과 재활용을 통해 지속가능성을 추구하는 친환경 경제 모델로, 사회적 흐름에 따라 자원절약과 경제성장, 탄소 저감 효과가 탁월한 온실가스 저감 기술 개발 산업이 주목받고 있다. 순환경제를 구현하는 방법은 장기 사용 가능 설계, 유지 보수, 재사용, 재제조, 물질 재활용 등이 있다. 이 중에서 최근 산업분야로 확장하고 있는 분야가 재제조이다[5]. 재제조는 사용 후 제품을 체계적으로 회수하여 분해, 세척, 검사, 보수조정, 재조립 등 일련의 과정을 거쳐 신제품과 동등하거나 그 이상의 수준으로 재상품화하는 것이다[5]. 재제조 산업은 사용 후 제품을 원래 성능으로 복원·생산하는 산업으로 신제품 대비 약 50 ~ 90%의 탄소 저감 효과가 큰 탄소중립의 핵심 산업의 하나이며, 국내에서는 산업통상자원부에서 순환경제 전환을 위한 대안으로 재제조 산업을 활성화하고 있다. 국내에서의 재제조산업은 자동차부품이 가장 활성화되어 있으며, 이외에 건설기계, 토너 카트리지, 산업기계 등으로 확대되고 있다. 본 연구에서는 재제조가 가장 활성화되고 있는 분야인 자동차부품 중 주요 부품인 인젝터를 대상으로 환경영향 효익분석을 수행하고자 한다. 환경영향 효익분석방법은 환경성평가방법으로 환경영향평가[6] 등이 있으나, 주로 활용되고 있는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 이용하고자 한다. 전과정평가는 제품의 원료 취득, 생산, 사용, 폐기의 전

과정에 걸쳐 투입물과 산출물을 정량화하고 환경영향을 분석하여 개선하는 방법으로, 물티슈, 자동차부품 등 다양한 제품의 환경성 평가에 이용되고 있다[7,8].

인젝터의 전과정평가 연구는 Jorge et al. [9]에 의해 수행되었다. 이 연구는 트럭용 인젝터를 대상으로 신제품 인젝터를 이용한 25%, 75%, 100% 재제조 시 원료 취득, 부품 생산, 부품 수송, 재제조, 폐기 단계로 시스템경계를 설정하였으며, 영향평가방법론은 Eco-indicator 99를 이용하였다. 즉, 인젝터 신제품 대비 재제조품의 환경영향의 저감효과를 고려하지 않았다.

최근 회피효과에 대한 연구가 진행되고 있다. 회피효과는 제품 사용의 결과로 발생하나 제품의 수명주기나 가치사슬 외부에서 발생하는 환경영향이 감소되는 것을 의미한다[10]. 즉, 사용 후 제품의 일부를 재사용하면 재사용된 양의 환경영향은 기존에는 0으로 표현하였으나, 회피효과를 고려하면 재사용된 양의 환경영향이 (-)로 산정된다.

본 연구에서는 기존 연구를 보완하여 인젝터 신제품과 재제조품의 환경영향을 파악한 후, 인젝터 재제조로 인한 환경효익을 분석하고자 한다. 영향범주는 탄소중립과 연계하여 온실가스 측면인 지구온난화와 자원을 재사용한다는 측면에서 자원고갈로 선정하였으며, 회피효과를 고려하여 인젝터 재제조로 인한 환경효익을 분석하고자 한다.

2. 인젝터 재제조 개요

인젝터는 연료 분사 노즐로서, 액체 연료를 분무화해 엔진의 실린더의 가장 가까이서 연료를 최종 공급하는 장치로, 연료를 분사하는 역할을 하며, 공기와 잘 섞일 수 있도록 연료를 작은 미립자 형태로 만드는 부품이다. 원리는 커먼레일 연료 시스템의 인젝터는 실제로 연료를 분사하는 분사 밸브가 연료 압력이 초고압인 상태에서 작동하기 때문에 전기를 액추에이터만을 직접 구동하기 어려운 점이 있어 인젝터 내부에 유압서보회로를 설치하고 있다. 인젝터는 바디, 코일, 노즐, 노즐캡, 컨트롤 밸브, 상부캡으로 구성되어 있다.

한편, 인젝터 재제조과정은 Figure 1에 나타냈으며, 사용 후 인젝터를 수거한 후, 사용이 가능한 부품(이하 ‘코어’)을 분류

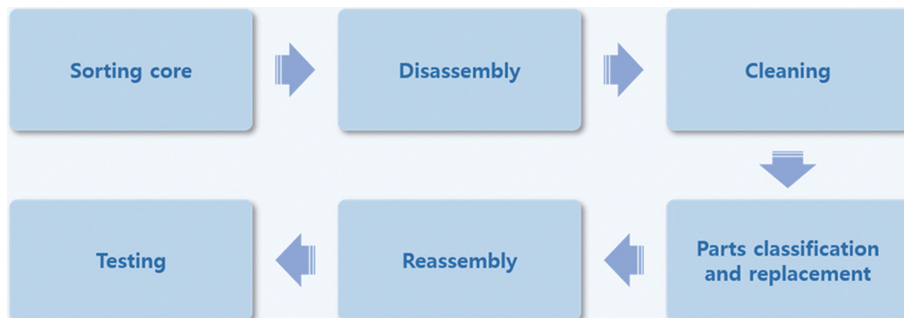


Figure 1. Remanufacturing process of an injector.

한 후, 분해하여, 세척 후 신 부품으로 교체한 후 재조립하여 검사하는 과정을 거친다.

3. 회피효과를 고려한 인젝터 재제조의 환경 효익 분석 방법

3.1 전과정평가

전과정평가는 제품의 원료 취득, 생산, 사용, 폐기의 전과정에 걸쳐 투입물과 산출물을 정량적으로 파악한 후, 환경영향을 정량화하는 방법이다. 전과정평가는 Figure 2에 나타난 목적 및 범위 정의, 목록 분석, 영향 평가, 결과 해석의 4가지 단계로 수행된다[5]. 목적 및 범위 정의단계에서는 연구목적, 연구 결과 활용 등을 정의하며, 대상 제품의 선정, 기능 단위, 시스템 경계, 데이터 품질 요건, 데이터 수집 방법, 데이터 계산, 할당, 영향평가 방법론, 가정 및 제한사항 등을 정의하게 된다. 목록 분석 단계는 정의한 목적 및 범위에 따라 데이터를 수집 및 계산하여 기능단위 기준으로 투입물과 산출물을 정리하는 과정이다. 데이터 수집 시에는 현장 데이터를 수집을 원칙으로 하지만, 없을 경우에는 전과정 목록 데이터베이스(Life cycle

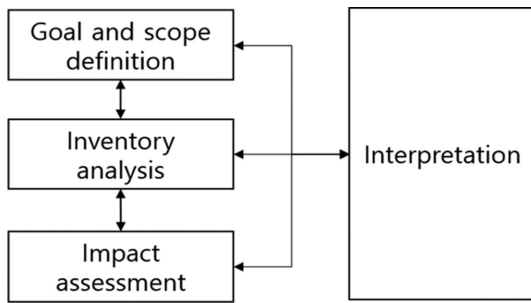


Figure 2. Procedure of LCA.

inventory database, LCI DB)를 이용하는 경우도 있다. 영향 평가 단계는 목록 분석결과를 이용하여 목적 및 범위 정의단계에서 선정한 환경영향 종류 및 영향평가 방법론에 따라 환경영향을 정량화하는 단계이다. 결과 해석은 주요 이슈를 파악하여 개선사항을 파악하거나, 비교 시에는 환경영향을 상호 비교하여 저감 효과 등을 파악하게 된다.

3.2 회피효과를 고려한 인젝터 재제조의 환경 효익 분석 방법

전과정평가를 이용하여 회피효과를 고려한 인젝터 재제조의 환경 효익 분석이 수행된다.

3.2.1 목적 및 범위 정의

본 연구에서의 LCA 수행목적은 인젝터 재제조로 인한 환경 효익을 분석하는 것이다.

기능단위는 인젝터 1개로 정의하며, 시스템 경계는 인젝터 신제품과 재제조품을 구분하였다. Figure 3은 인젝터 신제품과 재제조품의 시스템경계를 나타낸 것으로, 인젝터 신제품은 원료 취득, 재활용 및 폐기로 선정하였으며, 인젝터 재제조품은 신제품의 폐기, 재제조품의 원료 취득, 재활용 및 폐기로 선정하였다. 일반적으로 환경영향이 높은 단계는 원료 취득단계[7]이며, 제조단계와 사용단계의 환경영향은 적다. 본 연구에서는 제조단계와 사용단계의 데이터 수집이 어려워 제외하였다.

3.2.2 목록 분석

인젝터 신제품과 재제조품의 데이터는 재제조품을 제조하는 기업의 자료를 이용하여 부품별 중량, 구성물질을 수집하였다. 인젝터 재제조품은 사용 후 인젝터를 이용하는 비율인 재제조율을 수집하였다. 부품별 구성물질을 생산하는 데이터는 국내에서 구축한 전과정목록 데이터베이스(Life cycle inventory

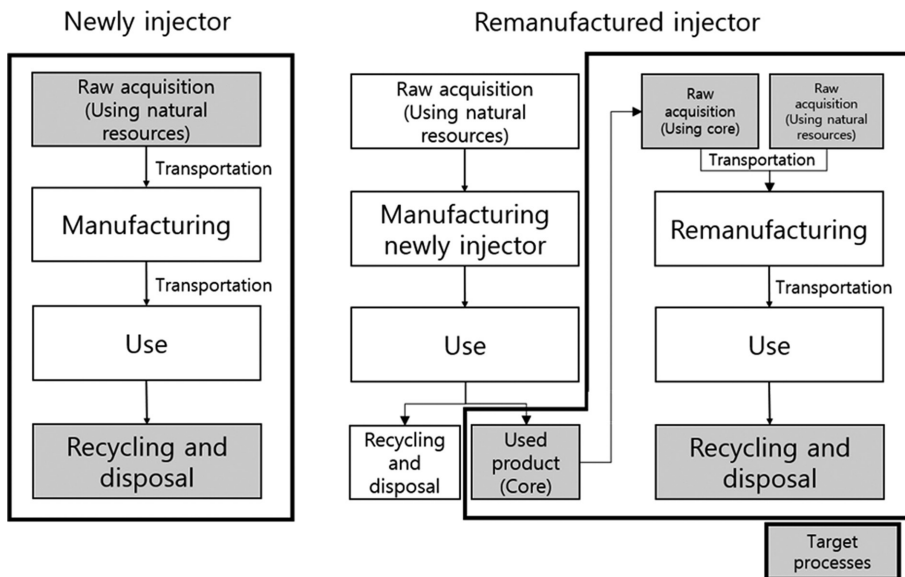


Figure 3. System boundaries of new and remanufactured injectors.

database, LCI DB) [11]와 해외 LCI DB인 Ecoinvent [12]를 이용하였다. 폐기단계의 데이터는 각 물질별 폐기물 처리 비율을 국내 환경성적표지인증 지침[13]에서 적용되고 있는 폐기물 통계자료[14]를 적용하여 산정하였다. 폐기과정의 데이터는 국내에서 구축한 LCI DB를 이용하였다.

3.2.3 영향 평가

영향범주는 탄소중립과 관련있는 지구온난화와 재제조를 통해 자원을 저감된다는 측면에서 자원고갈로 선정하였다. 지구온난화는 온실가스 배출량으로 나타내며, 자원고갈은 자원발자국으로 나타냈다.

인젝터 신제품과 재제조제품의 자원발자국 및 온실가스 배출량 총합은 각 단계별 인젝터 신제품과 재제조제품의 자원고갈 평가결과를 합하여 산정된다.

회피효과는 제품이 다시 사용되거나 폐기되지 않는 것에 대해 환경영향을 (-) 값으로 산정하는 방식이다. 현재는 사용 후 제품이 다시 사용되거나 폐기되지 않는 양의 환경영향은 '0'으로 표기하고 있다. 그러나, 사용 후 제품을 폐기하지 않는 양의 환경영향과 사용 후 제품을 사용하여 천연자원을 사용하지 않는 양의 환경영향도 저감되므로 고려할 필요가 있다. 회피효과 산정방법은 재활용된 양과 평가계수를 곱한 결과값에 (-) 값을 산정하는 방식이다. 즉, 사용 후 제품 중 주철이 재질인 'A'라는 부품의 재사용량이 1 kg 이라면, Table 1에 나타난 사용 후

주철의 폐기하지 않는 환경영향에 대한 회피효과와 Table 2에 나타난 천연자원을 이용하여 주철을 생산하는 환경영향에 대한 회피효과는 (-) 값으로 산정하는 것이다.

인젝터 재제조제품의 영향평가 시 회피효과를 고려하였다. 회피효과는 2가지 측면에서 적용하는 데, 사용 후 인젝터 신제품을 폐기하지 않음으로 인한 환경영향과 재제조되는 부품을 이용하여 천연자원을 사용하지 않음으로 인한 환경영향을 고려하였다.

산정한 인젝터 신제품의 자원발자국 및 온실가스 배출량과 인젝터 재제조제품의 자원고갈 및 온실가스 배출량을 이용하여 인젝터 재제조로 인한 자원발자국 및 온실가스 배출량의 환경효익 분석을 수행하였다. 회피효과를 고려 시와 미고려 시로 구분하여 환경 효익 분석을 수행하였다.

4. 회피효과를 고려한 인젝터 재제조의 환경 효익 분석 결과

4.1 목적 및 범위 정의

LCA의 수행 목적은 '인젝터 재제조로 인한 환경 효익 분석'이다. 대상 제품은 C사에서 재제조되는 인젝터 모델 4A710이며, 기능단위는 1대로 기준 흐름은 528.6 g이다.

시스템 경계는 Figure 2에 나타난 인젝터 신제품과 재제조제품 모두 원료 취득, 재활용 및 폐기로 정의하였다. 단, 인젝터 신

Table 1. Calculation example of GHGs emission considering the avoided effect in the end of life stage

| Waste | Disposal method | Weight (kg) | Information of LCI DB | | GHGs emission (kg CO ₂ eq.) |
|----------|-----------------|-------------|----------------------------|---|--|
| | | | Name of LCI DB | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) | |
| Part 'A' | Recycling | 0.6 | Waste iron metal recycling | -3.80E-03 | -2.28E-03 |
| | Landfill | 0.4 | Waste metal landfill | -1.22E-02 | -4.89E-03 |

Table 2. Calculation example of GHGs emission considering the avoided effect in the acquisition stage

| Part | Material | Weight (kg) | Information of LCI DB | | GHGs emission (kg CO ₂ eq.) |
|------|----------|-------------|--------------------------|---|--|
| | | | Name of LCI DB | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) | |
| A | A(core) | 1 | Cast iron production row | -1.65E+00 | -1.65E+00 |

Table 3. Composition information of an injector

| No. | Part | Weight (g) | Material | Remanufactured rate (%) |
|-----|---------------|------------|-----------------|-------------------------|
| 1 | Body | 450 | Cast iron | 99 |
| 2 | Coil | 12 | Copper | 98 |
| 3 | Nozzle | 25.4 | Cast iron | 90 |
| 4 | Nozzle cap | 23.1 | Nickel alloy | 95 |
| 5 | Control valve | 13.1 | Stainless steel | 10 |
| 6 | Upper cap | 5 | Polypropylene | 98 |
| | Sum | 528.6 | | |

Table 4. Parts weight of remanufactured injector

| No. | Part | Weight (g) | Reused rate (%) | Composition | Weight (g) |
|-----|---------------|------------|-----------------|----------------------|------------|
| 1 | Body | 450 | 99 | Body (core) | 445.50 |
| | | | | Cast iron | 4.50 |
| 2 | Coil | 12 | 98 | Coil (core) | 11.76 |
| | | | | Copper | 0.24 |
| 3 | Nozzle | 25.4 | 90 | Nozzle (core) | 22.86 |
| | | | | Cast iron | 2.54 |
| 4 | Nozzle cap | 23.1 | 95 | Nozzle cap (core) | 21.945 |
| | | | | Nickel alloy | 1.155 |
| 5 | Control valve | 13.1 | 10 | Control valve (core) | 1.31 |
| | | | | Stainless steel | 11.79 |
| 6 | Upper cap | 5 | 98 | Upper cap (core) | 4.90 |
| | | | | Polypropylene | 0.10 |
| | Sum | 528.6 | | | 528.60 |

품의 유틸리티 사용량을 파악할 수 없어, 본 연구에서는 제조 단계는 제외하였다.

영향범주는 자원고갈과 지구온난화로 한정하였으며, 영향평가방법은 환경성적표지인증 산정지침을 적용하였다.

4.2 목록 분석

4.2.1 데이터 수집 및 계산

Table 3은 C사에서 2022년에 수집한 인젝터를 구성하는 부

Table 5. Disposal information of wastes

| Material | Disposal rate (%) | | |
|----------------|-------------------|--------------|----------|
| | Recycling | Incineration | Landfill |
| Waste metals | 96.2 | 0.0 | 3.8 |
| Waste plastics | 79.7 | 19.9 | 0.4 |

품과 부품별 중량, 재질 및 재제조율을 나타내었다. 재제조율은 수집된 사용 후 인젝터의 각 부품의 중량 중 인젝터를 재제

Table 6. Disposal weight of new and remanufactured injectors in the end of life

| Waste | Weight (g) | Material | Disposal method | Disposal rate (%) | Weight (g) |
|---------------------|------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------|
| Waste body | 450 | Cast iron | Recycling | 96.2 | 432.90 |
| | | | Incineration | 0.0 | 0 |
| | | | Landfill | 3.8 | 17.10 |
| Waste coil | 12 | Copper | Recycling | 96.2 | 11.54 |
| | | | Incineration | 0.0 | 0 |
| | | | Landfill | 3.8 | 0.46 |
| Waste nozzle | 25.4 | Cast iron | Recycling | 96.2 | 24.43 |
| | | | Incineration | 0.0 | 0 |
| | | | Landfill | 3.8 | 0.97 |
| Waste nozzle cap | 23.1 | Nickel alloy | Recycling | 96.2 | 22.22 |
| | | | Incineration | 0.0 | 0 |
| | | | Landfill | 3.8 | 0.88 |
| Waste control valve | 13.1 | Stainless steel | Recycling | 96.2 | 12.60 |
| | | | Incineration | 0.0 | 0 |
| | | | Landfill | 3.8 | 0.50 |
| Waste upper cap | 5 | Polypropylene | Recycling | 79.7 | 3.99 |
| | | | Incineration | 19.9 | 1.00 |
| | | | Landfill | 0.4 | 0.02 |
| Sum | 528.6 | | | | 528.60 |

Table 7. Applied LCI DBs

| Stage | Part | Material | Information of LCI DB | | | |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|---|---|
| | | | Name of LCI DB | Source | Resource footprint coefficient (kg Sb eq./kg) | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) |
| Raw acquisition | Body | Cast iron | Cast iron production row | Ecoinvent 3.8 | 1.19E-02 | 1.65E+00 |
| | Coil | Copper | Copper production | Ministry of Environment | 3.06E-02 | 4.57E+00 |
| | Nozzle | Cast iron | Cast iron production row | Ecoinvent 3.8 | 1.19E-02 | 1.65E+00 |
| | Nozzle cap | Nickel alloy | Iron-nickel-chromium alloy production | Ecoinvent 3.8 | 5.13E-02 | 7.31E+00 |
| | Control valve | Stainless steel | Stainless steel production | Ministry of Environment | 1.52E-02 | 3.19E+00 |
| | Upper cap | Polypropylene | Polypropylene production | Ministry of Environment | 3.08E-02 | 1.47E+00 |
| End of life | Waste body, nozzle, control valve | Recycling | Waste iron metal recycling | Ministry of Environment | 2.56E-05 | 3.80E-03 |
| | | Landfill | Waste metal landfill | Ministry of Environment | 7.80E-05 | 1.22E-02 |
| | Waste coil and nozzle cap | Recycling | Waste non-iron metal recycling | Ministry of Environment | 1.28E-04 | 1.78E-02 |
| | | Landfill | Waste metal landfill | Ministry of Environment | 7.80E-05 | 1.22E-02 |
| | Waste upper cap | Recycling | Mixed waste plastic recycling | Ministry of Environment | 1.48E-04 | 1.88E-02 |
| | | Incineration | Mixed waste plastic incineration | Ministry of Environment | 5.40E-03 | 3.41E+00 |
| | | Landfill | Mixed waste plastic landfill | Ministry of Environment | 8.63E-05 | 1.32E-02 |

조하기 위해 재사용된 부품의 중량을 비율로 나타낸 것이다. 재질은 주철, 구리, 니켈 합금, 스테인리스강, 폴리프로필렌으로 구성되어 있으며, 부품별 재제조율은 컨트롤 밸브 이외에 90% 이상인 것으로 나타났다.

Table 4는 인젝터 재제조 시 부품별 코어와 천연자원을 이용하는 중량을 나타내었다. 부품의 중량과 재제조율을 곱하여 코어의 사용량을 산정하며, 신품의 중량은 부품의 중량에서 코어의 사용량을 제외하여 산정하였다.

Table 5는 폐기 단계에서 적용되는 각 부품별 처리방법과 비율을 나타내었다. 주철, 구리, 니켈, 스테인리스 강은 폐금속류로 폴리프로필렌은 폐플라스틱류의 폐기처리방법을 적용하였다.

Table 6은 인젝터 신품의 폐기 시와 인젝터 재제조품 폐기 시 중량을 나타내었다. 인젝터 재제조품은 1회만 재제조한다고 가정하여 산정하였으며, 폐기단계의 인젝터 신품과 재제조품의 폐기량은 동일하다.

4.2.2 적용 LCI DB

Table 7은 적용한 LCI DB를 나타내었다. C사에서 수집한 인젝터를 구성하는 부품과 부품별 중량, 재질 및 재제조율을 나타내었다. 재질은 주철, 구리, 니켈 합금, 스테인리스강, 폴리프로필렌으로 구성되어 있으며, 부품별 재제조율은 컨트롤 밸브 이외에 90% 이상인 것으로 나타났다.

4.3 영향 평가

4.3.1 인젝터 신품의 자원발자국 및 온실가스 배출량 산정 결과

Table 8은 인젝터 신품의 원료 획득 단계에서의 자원발자국과 온실가스 배출량을 산정한 결과를 나타내었다. Table 3에 나타난 부품별 중량과 Table 7에 나타난 부품별 재질의 자원발자국 계수 및 탄소배출계수를 곱하여 산정하였다. 산정결과 1개 기준의 인젝터 신품의 원료 획득 단계에서의 자원발자국은 7.57E-03 kg Sb eq.으로 나타났으며, 온실가스 배출량은 1.06E+00 kg CO₂ eq.로 나타났다.

Table 8. Resource footprint and GHGs emission of new injector in the raw acquisition stage

| Part | Material | Weight (g) | Information of LCI DB | | | Resource footprint (kg Sb eq./unit) | GHGs emission (kg CO ₂ eq./unit) |
|---------------|-----------------|------------|---------------------------------------|---|---|-------------------------------------|---|
| | | | Name of LCI DB | Resource footprint coefficient (kg Sb eq./kg) | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) | | |
| Body | Cast iron | 450 | Cast iron production row | 1.19E-02 | 1.65E+00 | 5.36E-03 | 7.42E-03 |
| Coil | Copper | 12 | Copper production | 3.06E-02 | 4.57E+00 | 3.67E-04 | 5.48E-02 |
| Nozzle | Cast iron | 25.4 | Cast iron production row | 1.19E-02 | 1.65E+00 | 3.02E-04 | 4.19E-02 |
| Nozzle cap | Nickel alloy | 23.1 | Iron-nickel-chromium alloy production | 5.13E-02 | 7.31E+00 | 1.18E-03 | 1.69E-01 |
| Control valve | Stainless steel | 13.1 | Stainless steel production | 1.52E-02 | 3.19E+00 | 1.99E-04 | 4.18E-02 |
| Upper cap | Polypropylene | 5 | Polypropylene production | 3.08E-02 | 1.47E+00 | 1.54E-04 | 7.35E-03 |
| Sum | | 528.6 | - | - | - | 7.57E-03 | 1.06E+00 |

Table 9. Resource footprint and GHGs emission of new injector in the end of life stage

| Waste | Disposal method | Weight (g) | Information of LCI DB | | | Resource footprint (kg Sb eq./unit) | GHGs emission (kg CO ₂ eq./unit) |
|---------------------|-----------------|------------|----------------------------------|---|---|-------------------------------------|---|
| | | | Name of LCI DB | Resource footprint coefficient (kg Sb eq./kg) | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) | | |
| Waste body | Recycling | 432.90 | Waste iron metal recycling | 2.56E-05 | 3.80E-03 | 1.11E-05 | 1.65E-03 |
| | Landfill | 17.10 | Waste metal landfill | 7.80E-05 | 1.22E-02 | 1.33E-06 | 2.09E-04 |
| Waste coil | Recycling | 11.54 | Waste non-iron metal recycling | 1.28E-04 | 1.78E-02 | 1.48E-06 | 2.05E-04 |
| | Landfill | 0.46 | Waste metal landfill | 7.80E-05 | 1.22E-02 | 3.56E-08 | 5.57E-06 |
| Waste nozzle | Recycling | 24.43 | Waste iron metal recycling | 2.56E-05 | 3.80E-03 | 6.26E-07 | 9.29E-05 |
| | Landfill | 0.97 | Waste metal landfill | 7.80E-05 | 1.22E-02 | 7.53E-08 | 1.18E-05 |
| Waste nozzle cap | Recycling | 22.22 | Waste non-iron metal recycling | 1.28E-04 | 1.78E-02 | 2.84E-06 | 3.96E-04 |
| | Landfill | 0.88 | Waste metal landfill | 7.80E-05 | 1.22E-02 | 6.85E-08 | 1.07E-05 |
| Waste control valve | Recycling | 12.60 | Waste iron metal recycling | 2.56E-05 | 3.80E-03 | 3.23E-07 | 4.79E-05 |
| | Landfill | 0.50 | Waste metal landfill | 7.80E-05 | 1.22E-02 | 3.88E-08 | 6.08E-06 |
| Waste upper cap | Recycling | 3.99 | Mixed waste plastic recycling | 1.48E-04 | 1.88E-02 | 5.90E-07 | 7.41E-05 |
| | Incineration | 1.00 | Mixed waste plastic incineration | 5.40E-03 | 3.41E+00 | 5.37E-06 | 3.40E-03 |
| | Landfill | 0.02 | Mixed waste plastic landfill | 8.63E-05 | 1.32E-02 | 1.73E-09 | 2.64E-07 |
| Sum | | 528.6 | - | - | - | 2.39E-05 | 6.10E-03 |

Table 9는 인젝터 신제품의 폐기 단계에서의 자원발자국과 온실가스 배출량을 산정한 결과를 나타내었다. Table 5에 나타난 부품별 폐기량과 Table 5에 나타난 재질별 폐기방법별 자원발자국 계수 및 탄소배출계수를 곱하여 산정하였다. 산정 결과 1개 기준의 인젝터 신제품의 폐기 단계에서의 자원발자국은 2.39E-05 kg Sb eq.으로 나타났으며, 온실가스 배출량은 6.10E-03 kg CO₂ eq.로 나타났다.

4.3.2 인젝터 재제조제품의 자원발자국 및 온실가스 배출량 산정 결과

Table 10은 인젝터 재제조제품의 원료 획득 단계에서의 자원발자국과 온실가스 배출량을 산정한 결과를 나타내었다. Table 3에 나타난 부품별 중량과 Table 7에 나타난 부품별 재질의 자원발자국 계수 및 탄소배출계수를 곱하여 산정하였다. 산정결

과 1개 기준의 인젝터 재제조제품의 원료 획득 단계에서의 자원발자국은 3.33E-04 kg Sb eq.으로 나타났으며, 온실가스 배출량은 5.89E-02 kg CO₂ eq.로 나타났다.

인젝터 재제조제품의 폐기 단계에서의 자원발자국과 온실가스 배출량은 인젝터 신제품의 폐기량과 폐기방법이 동일하므로, 인젝터 재제조제품 1개 기준으로 각각 2.39E-05 kg Sb eq., 6.10E-03 kg CO₂ eq.이다.

4.3.3 인젝터 재제조제품의 환경 효익 분석 결과

Table 11은 인젝터 신제품과 재제조제품의 전과정에 걸친 자원발자국과 온실가스 배출량을 산정한 결과를 나타내었다. 인젝터 신제품의 자원발자국과 온실가스 배출량은 7.59E-03 kg Sb eq., 1.06E+00 kg CO₂ eq.이며, 인젝터 재제조제품의 자원발자국과 온실가스 배출량은 3.57E-04 kg Sb eq., 6.50E-02 kg CO₂

Table 10. Resource footprint and GHGs emission of remanufactured injector in the raw acquisition stage

| Part | Material | Weight (g) | Information of LCI DB | | | Resource footprint (kg Sb eq./unit) | GHGs emission (kg CO ₂ eq./unit) |
|---------------|----------------------|------------|---------------------------------------|---|---|-------------------------------------|---|
| | | | Name of LCI DB | Resource footprint coefficient (kg Sb eq./kg) | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) | | |
| Body | Body (core) | 445.5 | - | - | - | - | - |
| | Cast iron | 4.5 | Cast iron production row | 1.19E-02 | 1.65E+00 | 5.36E-05 | 7.42E-03 |
| Coil | Coil (core) | 11.76 | - | - | - | - | - |
| | Copper | 0.24 | Copper production | 3.06E-02 | 4.57E+00 | 7.34E-06 | 1.10E-03 |
| Nozzle | Nozzle (core) | 22.86 | - | - | - | - | - |
| | Cast iron | 2.54 | Cast iron production row | 1.19E-02 | 1.65E+00 | 3.02E-05 | 4.19E-03 |
| Nozzle cap | Nozzle cap (core) | 21.945 | - | - | - | - | - |
| | Nickel alloy | 1.155 | Iron-nickel-chromium alloy production | 5.13E-02 | 7.31E+00 | 5.92E-05 | 8.44E-03 |
| Control valve | Control valve (core) | 1.31 | - | - | - | - | - |
| | Stainless steel | 11.79 | Stainless steel production | 1.52E-02 | 3.19E+00 | 1.79E-04 | 3.76E-02 |
| Upper cap | Upper cap (core) | 4.9 | - | - | - | - | - |
| | Polypropylene | 0.10 | Polypropylene production | 3.08E-02 | 1.47E+00 | 3.08E-06 | 1.47E-04 |
| Sum | | 528.6 | - | - | - | 3.33E-04 | 5.89E-02 |

Table 11. Environmental benefit of remanufactured injector

| Stage | Resource footprint (kg Sb eq./unit) | | GHGs emission (kg CO ₂ eq./unit) | |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|
| | Newly injector | Remanufactured injector | Newly injector | Remanufactured injector |
| Raw material acquisition | 7.57E-03 | 3.33E-04 | 1.06E+00 | 5.89E-02 |
| End of life | 2.39E-05 | 2.39E-05 | 6.10E-03 | 6.10E-03 |
| Sum | 7.59E-03 | 3.57E-04 | 1.06E+00 | 6.50E-02 |
| Reduced effect | 7.23E-03 | | 9.98E-01 | |
| Reduced rate (%) | 95.30 | | 93.88 | |

eq.으로 나타났다. 인젝터 재제조로 인한 자원발자국 및 온실가스 저감효과는 7.23E-03 kg Sb eq., 9.98E-01 kg CO₂ eq.이며, 저감율은 95.30%, 93.88%로 나타났다.

4.3.4 회피효과를 고려한 인젝터 재제조품의 환경 효익 분석 결과

Table 11은 회피효과가 고려되지 않는 환경 효익 분석 결과이나, 회피효과를 고려하면 저감효과는 증가될 것으로 사료된다. 인젝터 재제조품의 회피효과는 2가지 측면에서 고려할 수 있다. 첫 번째는 사용 후 제품을 이용하여 폐기되지 않는 양의 환경영향의 회피효과이며, 두 번째는 사용 후 제품을 이용하여 천연자원을 이용하지 않는 양의 환경영향의 회피효과이다.

Table 12는 첫 번째인 사용 후 인젝터 신품을 폐기하지 않고 이용할 시의 회피효과를 산정한 것이다. 즉, 인젝터 재제조품

에 사용되는 코어의 중량과 폐기와 관련된 자원발자국 계수와 탄소배출계수를 곱하여 산정한 것이다. 산정 결과 자원발자국은 -2.31E-05 kg Sb eq., 온실가스 배출량은 -5.93E-03 kg CO₂ eq.로 나타났다. (-)의 환경영향은 재제조로 인하여 물질 재활용이나 매립되지 않음으로 인한 환경 효익이 크다는 것을 의미하는 것이다.

Table 13은 두 번째인 천연자원을 이용하지 않을 시의 회피효과를 산정한 것이다. 즉, 인젝터 재제조품에 사용되는 코어의 중량과 천연자원의 생산의 자원발자국 계수와 탄소배출계수를 곱하여 산정한 것이다. 산정 결과 자원발자국은 -7.23E-03kg Sb eq., 온실가스 배출량은 -9.98E-01 kg CO₂ eq.로 나타났다.

Table 14에 나타낸 회피효과를 고려한 인젝터 재제조품의 자원발자국 및 온실가스 저감효과는 1.45E-02 kg Sb eq.,

Table 12. Resource footprint and GHGs emission considering the avoided effect in the end of life stage of new injector when remanufacturing the used injector

| Waste | Disposal method | Weight (g) | Information of LCI DB | | | Resource footprint (kg Sb eq./unit) | GHGs emission (kg CO ₂ eq./unit) |
|--------------------|-----------------|------------|----------------------------------|---|---|-------------------------------------|---|
| | | | Name of LCI DB | Resource footprint coefficient (kg Sb eq./kg) | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) | | |
| Used body | Recycling | 428.57 | Waste iron metal recycling | -2.56E-05 | -3.80E-03 | -1.10E-05 | -1.63E-03 |
| | Landfill | 16.93 | Waste metal landfill | -7.80E-05 | -1.22E-02 | -1.32E-06 | -2.07E-04 |
| Used coil | Recycling | 11.31 | Waste non-iron metal recycling | -1.28E-04 | -1.78E-02 | -1.45E-06 | -2.01E-04 |
| | Landfill | 0.45 | Waste metal landfill | -7.80E-05 | -1.22E-02 | -3.48E-08 | -5.46E-06 |
| Used nozzle | Recycling | 21.99 | Waste iron metal recycling | -2.56E-05 | -3.80E-03 | -5.63E-07 | -8.36E-05 |
| | Landfill | 0.87 | Waste metal landfill | -7.80E-05 | -1.22E-02 | -6.77E-08 | -1.06E-05 |
| Used nozzle cap | Recycling | 21.11 | Waste non-iron metal recycling | -1.28E-04 | -1.78E-02 | -2.27E-06 | -3.76E-04 |
| | Landfill | 0.83 | Waste metal landfill | -7.80E-05 | -1.22E-02 | -6.50E-08 | -1.02E-05 |
| Used control valve | Recycling | 1.26 | Waste iron metal recycling | -2.56E-05 | -3.80E-03 | -3.23E-08 | -4.79E-06 |
| | Landfill | 0.05 | Waste metal landfill | -7.80E-05 | -1.22E-02 | -3.88E-09 | -6.08E-07 |
| Used upper cap | Recycling | 3.91 | Mixed waste plastic recycling | -1.48E-04 | -1.88E-02 | -5.78E-07 | -7.26E-05 |
| | Incineration | 0.98 | Mixed waste plastic incineration | -5.40E-03 | -3.41E+00 | -5.26E-06 | -3.33E-03 |
| | Landfill | 0.02 | Mixed waste plastic landfill | -8.63E-05 | -1.32E-02 | -1.69E-09 | -2.59E-07 |
| Sum | | 528.28 | - | - | - | -2.31E-05 | -5.93E-03 |

Table 13. Resource footprint and GHGs emission considering the avoided effect in the raw material acquisition stage of remanufactured injector when remanufacturing the used injector

| Part | Material | Weight (g) | Information of LCI DB | | | Resource footprint (kg Sb eq./unit) | GHGs emission (kg CO ₂ eq./unit) |
|--------------------|-----------------|------------|---------------------------------------|---|---|-------------------------------------|---|
| | | | Name of LCI DB | Resource footprint coefficient (kg Sb eq./kg) | Carbon emission coefficient (kg CO ₂ eq./kg) | | |
| Used Body | Cast iron | 445.50 | Cast iron production row | -1.19E-02 | -1.65E+00 | -5.31E-03 | -7.35E-01 |
| Used Coil | Copper | 11.76 | Copper production | -3.06E-02 | -4.57E+00 | -3.60E-04 | -5.37E-02 |
| Used Nozzle | Cast iron | 22.86 | Cast iron production row | -1.19E-02 | -1.65E+00 | -2.72E-04 | -3.77E-02 |
| Used Nozzle cap | Nickel alloy | 21.95 | Iron-nickel-chromium alloy production | -5.13E-02 | -7.31E+00 | -1.13E-03 | -1.60E-01 |
| Used Control valve | Stainless steel | 1.31 | Stainless steel production | -1.52E-02 | -3.19E+00 | -1.99E-05 | -4.18E-03 |
| Used Upper cap | Polypropylene | 4.90 | Polypropylene production | -3.08E-02 | -1.47E+00 | -1.51E-04 | -7.20E-03 |
| Sum | | 528.28 | - | - | - | -7.23E-03 | -9.98E-01 |

Table 14. Environmental benefit of remanufactured injector considering the avoided effect

| Stage | Resource footprint (kg Sb eq./unit) | | GHGs emission (kg CO ₂ eq./unit) | |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|
| | Newly injector | Remanufactured injector | Newly injector | Remanufactured injector |
| Raw material acquisition | 7.57E-03 | 3.33E-04 | 1.06E+00 | 5.89E-02 |
| End of life | 2.39E-05 | 2.39E-05 | 6.10E-03 | 6.10E-03 |
| Avoided effect | - | -7.25E-03 | - | -1.00E+00 |
| Sum | 7.59E-03 | -6.87E-03 | 1.06E+00 | -9.33E-01 |
| Reduced effect | 1.45E-02 | | 2.00E+00 | |
| Reduced rate (%) | 190.91 | | 188.33 | |

2.00E+00 kg CO₂ eq.이며, 저감율은 190.91%, 188.33%로 나타났으며, 이는 사용 후 제품을 재사용하여 (-) 값이 나타나 환경효익이 크다는 것을 의미한다. 즉, 회피효과를 고려하지 않을 시보다 2배 이상으로 저감되는 것으로 나타났다.

이상과 같이 본 연구에서는 기존 인젝터 재제조에 따른 환경효익 연구인 Jorge et al. [9]에서 고려하지 않은 회피효과를 고려하여 산정하였다. 회피효과를 고려하였을 시 인젝터 재제조로 인한 자원발자국과 온실가스 저감효과를 2배 이상으로 볼 수 있었다. 이상과 같이 인젝터 재제조에 따른 회피효과를 고려하였을 시와 고려하지 않을 시의 온실가스 저감효과는 상이함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 기존에 수행되지 않은 회피효과를 고려한 인젝터

재제조로 인한 환경 효익을 분석하였다. 연구결과는 다음과 같다.

인젝터 신품의 자원발자국과 온실가스 배출량은 각각 7.59E-03 kg Sb eq., 1.06E+00 kg CO₂ eq.이며, 인젝터 재제조품의 자원발자국과 온실가스 배출량은 각각 3.57E-04 kg Sb eq., 6.50E-02 kg CO₂ eq.로 나타났다. 인젝터 재제조로 인한 자원발자국 및 온실가스 저감 효과는 95.30%와 93.88%로 나타났다.

따라서 인젝터 재제조 시 자원발자국과 온실가스 배출량 측면에서 고려한 회피효과는 각각 -7.25E-03 kg Sb eq., -1.00E+00 kg CO₂ eq.로 나타났다.

회피효과를 고려한 인젝터 재제조로 인한 자원발자국 및 온실가스 저감효과는 190.91%와 188.33%로 나타나, 회피효과를 고려하지 않을 시보다 2배 이상 저감되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 데이터 수집의 한계로 인젝터 신품과 재제조

품의 생산단계를 제외하고 환경 효익을 분석하였으나, 향후 추가하여 산정할 필요가 있다.

본 연구는 2050 탄소중립 달성전략 중 하나인 순환경제 실현방안으로 재제조 산업을 육성하기 위한 타당성을 입증할 수 있는 정량적 자료로 활용할 수 있으며, 관련정책 수립을 위한 환경성평가에 대한 의사결정 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20214000000520, 자원순환산업 고도화 인력양성).

References

1. <https://www.ipcc.ch/sr15/> (accessed March. 2024).
2. Velenturf, A. P. M., Archer, S. A., Gomes, H. I., Christgen, B., Lag-Brotons, A. J., and Purnell, P., "Circular Economy and the Matter of Integrated Resources," *Sci. of the Total Environ.*, **689**, 963-969 (2019).
3. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (accessed March. 2024).
4. Federal Vehicle Repair Cost Savings Act of 2015, <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/senate-bill/565/titles> (accessed March. 2023).
5. Kang, H. Y., Chung, N. H., and Hwang, Y. W. Remanufacturing Engineering, Yejark, Seoul (2022).
6. Kim, K. H., An, J. Y., and Ji, M. K., "A Guide for Environmental Impact Assessment for the Installation of Water-friendly Facilities in River Zones," *Clean Technol.*, **29**(3), 227-234 (2023).
7. ISO, "ISO 14040:2006, Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework" (2022).
8. Ahn, J. W., "Life Cycle Assessment on Process of Wet Tissue Production," *Clean Technol.*, **24**(4), 269-274 (2018).
9. Jorge, A., Peggy, Z., and Daniel, B., "Environmental Benefits of Parts Remanufacturing: The Truck Injector Case," 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Hefei, ANHUI, China (May 2010).
10. Draucker, L., Do We Need a Standard to Calculate "Avoided Emissions?," WRI, <https://www.wri.org/insights/do-we-need-standard-calculate-avoided-emissions> (accessed March. 2024).
11. Korea Environmental Industry and Technology Institute, "Envaluation coefficient for Environmental Declaration of Products," <https://ecosq.or.kr/websquare.do#w2xPath=/ui/cer/ic/oh/ICOH110M01.xml&valVI=tabs3&menuSn=20018500> (accessed Jan. 2024).
12. Ecoinvent, Swiss centre for life cycle inventories. Final report ecoinvent data. Online available at <https://ecoinvent.org/> (accessed March. 2024).
13. Korea Environmental Industry and Technology Institute, "Guidelines for Environmental Declaration of Products" (2024).
14. Korea Environmental Industry and Technology Institute, "Announcement no. 2021-127 Environmental Product Declaration Waste Statistics" (2021).