

전과정 분석을 통한 자동차엔진 재제조시 온실가스 저감효과 분석

박지형* · 이한솔* · §황용우** · 김영춘*** · 이충근****

*(주)엔디렉션, **인하대학교 환경공학과, ***한국생산기술연구원, ****(주)오성이엔지

An Analysis of Greenhouse Gas Reduction effect of Automotive Engine Re-manufacturing through Whole Process Analysis

Ji-Hyong Park*, Han-Sol Lee*, §Yong-Woo Hwang**, Young-Chun Kim*** and Chung-geun Lee****

*Endirection Ltd.

**Department of Environmental Engineering, Inha National University

***Korea Institute of Industrial Technology

****OHSUNG ENG Service

요 약

본 연구에서는 자동차엔진의 신제품제조와 재제조 발생하는 환경영향을 전과정 관점에서 산정하고 이를 기반으로 온실가스 저감효과를 산정하였다. 자동차엔진 원부자재 원료취득 및 제조공정에서 배출되는 온실가스량은 신제품제조 약 3,473 kg, 재제조 약 872 kg으로 재제조를 통해 저감되는 온실가스량은 약 2,601kg으로 나타나 폐기 단계를 제외한 전과정 측면에서 저감효과가 있는 것으로 분석되었다. LCA 가중화 분석 결과 신제품 제조시 환경영향은 1.07E+03 Eco-point, 재제조시 2.67E+02 Eco-point로 나타났으며, 주요 6대 영향범주 중 지구온난화 점유비율이 99.72%, 99.68%로 높게 나타났다.

주제어 : 자동차엔진, 전과정분석, 재제조, 온실가스, 저감효과

Abstract

In this research, through LCA analysis, the environmental impact of automotive engine manufacturing and re-manufacturing was analyzed from the perspective of the entire process, and the greenhouse gas reduction effect was calculated based on this. The amount of greenhouse gas emitted from the process of acquiring and manufacturing raw materials for automotive engines is about 3,473 kg for new manufacturing and 872 kg for re-manufacturing. Thus, the amount of greenhouse gas reduction by engaging in re-manufacturing is about 2,601 kg; the analysis shows a reduction effect in each part of the entire process except for the processing stage. As a result of the LCA weighted analysis, the environmental impact of new product manufacturing was found to be 1.07E+03 Eco-point, and it was 2.67E+02 Eco-point for re-manufacturing. The share of GWP(Global Warming Potential) among the six major impact categories(Abiotic Depletion Potential, Acidification Potential, Eutrophication Potential, Global Warming Potential, Ozone-layer Depletion Potential, Photochemical Oxidant Creation Potential) as high at 99.72%(new manufacturing) and 99.68%(re-manufacturing).

Key words : Automobile engine, LCA(Life cycle assessment), Re-manufacturing, Greenhouse gas, Reduction effect

· Received : March 10, 2023 · 1st Revised : April 2, 2023 · 2nd Revised : April 9, 2023 · Accepted : April 9, 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

‘22년말 자동차 누적등록 대수는 25,503천대로 전년 대비 2.4%(592천대) 증가하고 있으며¹⁾, 차량이 폐차됨에 따른 각종 환경오염 문제가 야기되고 있다²⁾. 특히 전세계적인 탄소중립 이슈로 인하여 이산화탄소 배출 규제를 강화하고 있는 실정이며, 이러한 자동차에 대한 온실가스 규제 강화는 자동차 주행 과정에서의 배출 뿐만 아니라 자동차의 생애 주기 전과정에서 배출되는 온실가스를 규제하는 방향으로 강화될 전망이다³⁾. 유럽위원회(EC)는 LCA를 바탕으로 한 자동차 탄소 배출 규제에 대해 가장 먼저 논의를 시작했다⁴⁾. EU는 지난 2019년 자동차에 대한 LCA 기준 논의에 착수했으며, 유럽의회와 유럽위원회는 새로운 자동차 환경 규정을 발표하면서 EU에 LCA 규제 도입 적용 검토를 요청, 이에 2023년까지 승용차 및 경량용차의 이산화탄소 배출에 대한 EU 공통의 전과정 평가 방법과 법제화 같은 후속 정책 등을 보고하기로 결정하였다. 중국도 2025년 이후 LCA 기반의 온실가스 규제를 위해 LCA 기준을 검토 중이다⁵⁾.

이러한 LCA 기반의 환경규제가 도입될 경우, 자동차 운행단계뿐만 아니라 자동차 부품의 소재 및 부품 선택 시 저탄소형 소재 및 부품의 선택, 부품 제조 및 조립 공정에서의 온실가스 배출 저감형 공법 도입 등 소재 및 부품 가공, 제조 전과정에서의 온실가스 관리가 필요할 것으로 판단된다. 단 현재까지 LCA 기반의 규제 도입에 필요한 자동차만의 표준화된 LCA 방법론 설정의 어려움으로 규제 도입이 더뎠고 있다.

국내 자동차 생산업체인 현대자동차에서도 이러한 움직임에 발맞춰 원료의 취득부터 운행, 폐기 및 재활용에 이르는 차량의 전 생애주기에 걸친 환경영향 분석을 위하여 LCA를 수행하였으며, 2020년 코나 EV를 대상으로 LCA 수행결과 전과정 중 운행단계(63.9%), 제조 전 단계(34.4%), 제조 단계(1.2%) 순으로 온실가스 배출량이 높은 것으로 나타났다⁶⁾. 2021년 내연기관차, 전기차, 수소차를 대상으로한 LCA 수행결과에서도 운행단계, 제조 전 단계, 제조 단계 순으로 온실가스 배출량이 높은 것으로 분석되어⁷⁾ 국제 사회의 LCA 기반 규제도입에 대응하기 위해서는 제조 전 단계의 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 제조 전 단계의 온실가스 배출량을 줄이기 위한 주요 수단으로 사용 후 부품을 주원료로 하여 원

부자재 원료취득 과정에서 발생하는 환경영향을 줄일 수 있는 재제조가 검토되고 있으며, 관련하여 국내에서는 자동차 부품의 재제조품 및 신품 제조공정간 환경영향 비교와 디젤엔진 재제조시 에너지저감에 대한 연구가 수행되었다.

Jo et al.(2011)⁶⁾은 자동차 부품 중 등속조인트, 시동전동기, 교류발전기, 에어컴프레서 4종을 대상으로 재제조품의 신품 대비 환경영향 저감을 분석하였다. 연구결과 등속조인트는 재제조품이 신품 대비 약 77%, 시동전동기 및 교류발전기는 약 50%, 에어컴프레서는 약 89%의 환경영향 저감을 나타내는 것으로 나타났다.

Lee(2019)⁷⁾는 자동차엔진 재제조 공정의 에너지 저감 효과를 분석하였다. 연구결과 자동차엔진 재제조 공정을 통해 얻어지는 에너지 저감효과는 신품 제조 공정 대비 약 81%로 나타났다.

이와 같이 제조 전 단계의 온실가스 배출 저감을 위한 주요수단으로 검토되고 있는 재제조의 저감효과 분석을 위한 연구가 수행되었으나 등속조인트, 시동전동기, 교류발전기, 에어컴프레서 4종에 한정되었으며, 자동차엔진의 경우 재제조공정의 에너지 저감효과만을 대상으로한 제한적인 연구가 수행되었다.

이에 동 연구에서는 자동차엔진 신품 제조시와 재제조시 투입되는 원부자재를 대상으로 LCA를 수행하여 온실가스 저감효과를 정량적으로 산출하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 전과정 분석을 통한 자동차엔진 재제조 기술의 온실가스 저감효과 검토가 목적으로, 자동차엔진 신품 제조시와 재제조시 투입되는 원부자재를 대상으로 전과정 측면에서 온실가스 저감효과를 산정하였다.

동 연구에서 자동차엔진 전과정에 대한 온실가스 정량화 분석은 LCA 기법을 적용하였으며, 국제표준인 ISO 14040(Life cycle assessment, 원칙 및 기본구조)을⁸⁾ 준용하였다. LCA 분석은 구성요소인 목적 및 범위 설정, 목록 분석, 영향평가, 결과해석의 절차에 따라 수행하였으며⁹⁾, 목록분석 및 영향평가 수행시에는 환경부 LCA 공용 프로그램인 TOTAL을 이용하였다. 영향평가지 환경성적표지 방법론을 이용하여 6대 영향범주(자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물생성)에 대

Table 1. Scope definition

Category	Definition
Function	A reciprocating internal combustion engine that operates heavy oil and light oil as fuel as a device that generates power necessary for driving a vehicle.
Functional Unit	Automotive engine DL06 1ea : Weight 727.710 kg

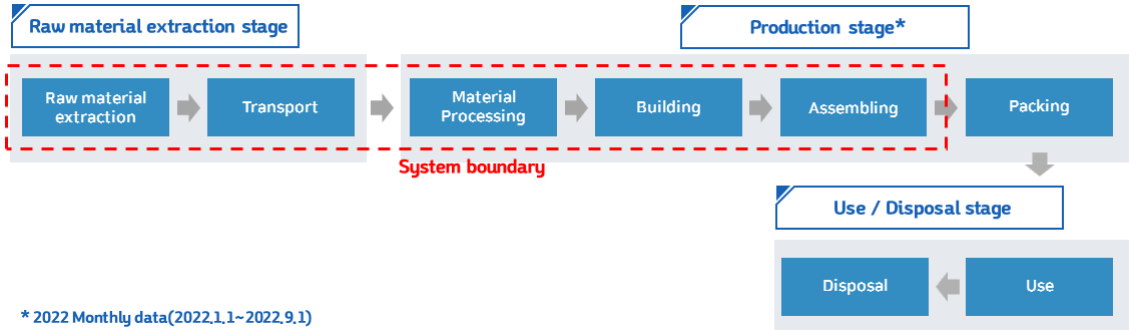


Fig. 1. System boundary of automotive engine.

한 특성화 및 가중화 값 분석결과를 제시하였다. LCA 수행을 위한 LCI DB(Life Cycle Inventory Database)는 국가 LCI Database 정보망(Korea LCI Database Information Network)에서 제공하는 국가 LCI DB를 우선 검토하였으며, 국가 LCI DB 검토결과 구축년도가 오래되거나, 데이터 부재로 분석에 적합하지 않을 경우 Ecoinvent 3.8.V의 해외 LCI DB를 이용하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 연구범위

본 연구에서는 Tier-3 단계 자동차엔진을 대상으로 재제조 기술을 개발한 자동차엔진 개조 및 재제조업체를 대상으로 현장조사를 통한 전과정 목록 분석 후 LCA 분석(특성화, 정규화)을 수행하였으며, 분석결과를 기반으로 자동차엔진 재제조를 통한 온실가스 저감효과를 산정하였다.

3.1.1. 기능단위 설정

본 연구에서는 기능, 기능단위 및 기준흐름을 Table 1에 정의한 것과 같이 자동차엔진으로 두고 분석을 수행하였다. 자동차엔진은 Tier-3 단계 특수차량에 내장되는 엔진을 기준으로 기능단위를 설정하고 LCA 분석을 수행하여 자동차엔진 주요 원부자재 채취에서부터 제조 공정까지 배출되는 온실가스를 정량화하고 비교 분석하였다.

3.1.2. 시스템 경계 및 제외 기준

본 연구의 시스템 경계는 투입되는 자재의 KS 규정 적합 여부를 검사하는 공정인 재료투입 및 재료시험 공정부터 핵심부품인 실린더 블록 및 헤드, 크랭크축, 캠축 등을 조립하여 최종제품으로 생산하는 조립공정까지를 포함하여 Cradle to Gate로 정의하였다. 포장공정의 경우 제조사별로 포장형태 및 재질이 상이하여 일반화가 어려워 제외하였으며, 제조공정과 직접적 연관성이 없는 사무시설 및 편의시설은 분석에서 제외하였다. 자동차엔진 생산에 대한 시스템 경계를 Fig. 1에 나타내었다.

3.1.3. 데이터 범주 및 품질

본 연구에서 고려하는 데이터 범주는 일반원칙에 따라 원료물질, 제품, 대기 배출물, 폐기물로 구분하며, 각 데이터 범주별 투입물과 산출물은 Table 2와 같다.

데이터는 크게 현장데이터와 공개된 일반데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)로 구분된다. 대상 제품을 생산하는 최종 생산단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하였으며 Tier-3 단계 자동차엔진 개조 및 재제조업체를 선정하여 데이터를 수집하였다.

3.1.4. 가정 및 제한사항

본 연구에서 분석대상으로 하고있는 Tier-3 단계 자동차엔진의 경우 생산업체에서 Tier-3 단계 자동차엔진만을

Table 2. Data category and input and output of the system

Group		Material
Input	Raw material	Carbon steel, Cast iron, Synthetic rubber, Copper, Aluminium alloy
Output	Product	Automotive engine DL06
	Water emission	Waste water
	Air emission	Dust
	Waste	Steel scrap, Rubber scrap

Table 3. Data sources for LCI of automotive engine

Material	Value (kg)	LCI Database	
		Database	Source
Cast iron	588	Market for cast iron removed by turning, primarily dressing, computer numerical controlled	Ecoinvent
Aluminium alloy	43	Market for aluminium alloy, metal matrix composite	Ecoinvent
Carbon steel	71	Market for reinforcing steel	Ecoinvent
Copper	20	Market for metal working, average for copper product manufacturing	Ecoinvent
Synthetic rubber	7	Market for synthetic rubber	Ecoinvent

대상으로한 별도의 공정라인이 구축된 것이 아닌 여타 자동차엔진 개조, 재제조라인을 공유하여 제조된 것으로 조사되었다. 따라서, 비정기적 생산활동으로 인하여 생산과정중 소비되는 전력, 용수 등의 유틸리티 사용량은 별도로 수집하지 않고 분석시 제외하였다.

3.2. 데이터 수집 및 계산

데이터 수집은 참여업체의 현장데이터를 우선 적용하는 원칙에 따라 설문서를 통하여 업체 현장데이터를 수집하였다. 데이터 수집이 불가능할 경우 논리적인 계산 및 추정을 통하여 데이터를 수집/보완하였다. LCI 데이터베이스의 사용은 원료물질, 보조물질, 에너지 등의 상위흐름 및 하위흐름 연결을 위한 데이터베이스를 활용하는 것으로 Ecoinvent(www.ecoinvent.org)¹⁰⁾ 등의 해외 데이터베이스를 활용하였다. 주요 원료 및 보조물질 등 투입물에 대한 데이터 출처 및 수집결과는 Table 3 과 같다.

3.3. 영향평가 결과

자동차엔진 1ea 생산 시 현장 데이터 등의 수집결과를 바탕으로 전과정 영향평가를 수행하였다. 영향평가는 TOTAL¹¹⁾ 프로그램을 이용하여 산업통상자원부 영향평가 방법론을 적용하였으며, 자원고갈(Abiotic Depletion Potential), 산성화(Acidification Potential), 부영양화(Eutrophication Potential), 지구온난화(Global Warming

Potential), 오존층파괴(Ozone-layer Depletion Potential), 광화학산화물생성(Photochemical Oxidant Creation Potential)로 총 6개의 영향범주를 고려하였다. 분석은 특성화, 정규화 및 가중화의 순서로 수행하였다.

3.3.1. 특성화(Characterization) 및 정규화(Normalization) 결과

주요 6대 영향범주에 대한 자동차엔진 신제품제조의 특성화 및 정규화 결과를 산정하여 Tables 4, 5에 나타내었다. 영향범주별 원인물질에 따른 기여도 분석결과 6대 영향범주 전부 주철에 의한 기여도가 가장 높은 것으로 나타났다. 주철 다음으로 알루미늄 합금, 탄소강 순으로 기여도가 높은 것으로 분석되었으나, 6대 영향범주 중 산성화와 부영양화의 경우 알루미늄 합금, 구리 순으로 기여도가 높게 나타났다. 산성화 영향범주의 경우 구리에 의한 기여도가 15.64%로 타 영향범주에 비해 높은 기여도를 나타내는 것으로 분석되었다.

자동차엔진 재제조시의 특성화 및 정규화 결과를 산정하여 Tables 6, 7에 나타내었다. 영향범주별 원인물질에 따른 기여도 분석결과 6대 영향범주 전부 주철에 의한 기여도가 가장 높은 것으로 나타났다. 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴 영향범주의 경우 주철, 알루미늄 합금 순으로 기여도가 높게 나타났다. 산성화, 부영양화 영향범주의 경우 주철, 구리 순으로 기여도가 높게 나타났으며, 광

Table 4. Result of characterization(DL06)

Impact category	Result value	Unit	Level of contribution(average of 3 standard)
ADP	9.10E+00	1/yr	① Cast iron(68.70%) ② Aluminium alloy (20.41%) ③ Carbon steel(4.83%)
AP	1.22E+01	kg SO ₂ -eq.	① Cast iron(56.14%) ② Aluminium alloy (25.22%) ③ Copper(15.64%)
EP	7.80E+00	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	① Cast iron(73.11%) ② Aluminium alloy (15.31%) ③ Copper(8.45%)
GWP	3.69E+03	kg CO ₂ -eq.	① Cast iron(73.17%) ② Aluminium alloy (20.92%) ③ Carbon steel(3.90%)
ODP	1.58E-04	kg CFC-11-eq.	① Cast iron(75.59%) ② Aluminium alloy (16.39%) ③ Carbon steel(4.56%)
POCP	2.43E+00	kg C ₂ H ₄ -eq.	① Cast iron(74.12%) ② Aluminium alloy (13.07%) ③ Carbon steel(7.40%)

Table 5. Result of normalization(DL06)

Impact category	Result value	Unit
ADP	3.66E-01	kg/person-yr ²
AP	3.07E-01	kg SO ₂ -eq./person-yr
EP	5.96E-01	kg PO ₄ ³⁻ -eq./person-yr
GWP	6.67E-01	kg CO ₂ -eq./person-yr
ODP	3.88E-03	kg CFC11-eq./person-yr
POCP	2.36E-01	kg C ₂ H ₄ -eq./person-yr
Total	2.18E+00	Eco-point

화학산물 생성 영향범주의 경우 주철 다음으로 탄소강의 기여도가 높게 나타났다. 산성화 영향범주의 경우 주철에 의한 기여도가 41.01%로 타 영향범주에 비해 낮은 기여도를 보였고, 구리에 의한 기여도가 35.28%로 타 영향범주에 비해 높은 기여도를 나타내는 것으로 분석되었다.

자동차엔진 신제품제조시와 재제조시 모두 주요 6대 영향범주에 대한 주철의 기여도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 신제품엔진의 경우 주요 6대 영향범주 모두 주철 다음으로 알루미늄 합금의 기여도가 높은 것으로 분석되었으나, 재제조엔진의 경우 재제조시 교체율이 높은 구리의

Table 6. Result of characterization(DL06 remanufactured)

Impact category	Result value	Unit	Level of contribution(average of 3 standard)
ADP	2.52E+00	1/yr	① Cast iron(56.12%) ② Aluminium alloy (15.16%) ③ Carbon steel(12.25%)
AP	3.79E+00	kg SO ₂ -eq.	① Cast iron(41.01%) ② Copper(35.28%) ③ Aluminium alloy (16.73%)
EP	2.17E+00	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	① Cast iron(59.47%) ② Copper(21.22%) ③ Aluminium alloy (11.30%)
GWP	9.25E+02	kg CO ₂ -eq.	① Cast iron(66.08%) ② Aluminium alloy (17.15%) ③ Carbon steel(10.91%)
ODP	4.16E-05	kg CFC-11-eq.	① Cast iron(64.98%) ② Aluminium alloy (12.79%) ③ Carbon steel(12.14%)
POCP	6.95E-01	kg C ₂ H ₄ -eq.	① Cast iron(58.79%) ② Carbon steel(18.19%) ③ Copper(11.34%)

Table 7. Result of normalization(DL06 remanufactured)

Impact category	Result value	Unit
ADP	1.01E-01	kg/person-yr ²
AP	9.52E-02	kg SO ₂ -eq./person-yr
EP	1.66E-01	kg PO ₄ ³⁻ -eq./person-yr
GWP	1.67E-01	kg CO ₂ -eq./person-yr
ODP	1.02E-03	kg CFC11-eq./person-yr
POCP	6.74E-02	kg C ₂ H ₄ -eq./person-yr
Total	5.98E-01	Eco-point

기여도가 산성화, 부영양화 영향범주에서 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

3.3.2. 가중화(Weighting) 결과

가중화 결과 산정을 위하여 환경부와 산업통상자원부가 환경영향 평가 범주화 방법인 CML 2001 방법론을 기반으로 환경성적표지를 위하여 만든 방법론을 사용하였다. 자동차엔진 신제품제조시의 세부적인 가중화 결과는 Table 8와 Fig. 2에 나타내었다. 가중화 산정 결과 자동차엔진 신제품 생산시 총 환경영향은 1.07E+03 Eco-point로

Table 8. Result of weighting(DL06)

Impact category	Result value	Unit	Level of contribution
ADP	2.10E+00	Eco-point	0.20%
AP	4.40E-01	Eco-point	0.04%
EP	2.97E-01	Eco-point	0.03%
GWP	1.06E+03	Eco-point	99.72%
ODP	4.61E-05	Eco-point	0.00%
POCP	1.58E-01	Eco-point	0.01%
Total	1.07E+03	Eco-point	100.0%

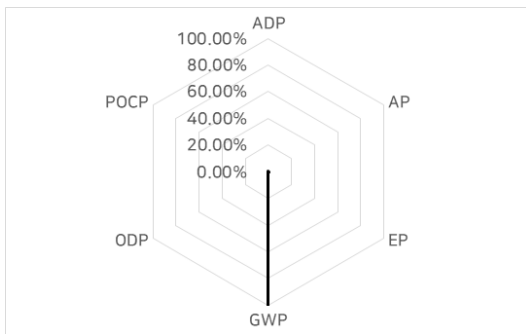


Fig. 2. Result of weighting for each impact categories(DL06).

나타났으며, 지구온난화 영향범주의 점유비율이 99.72%로 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 가중화 지수 산정을 위한 영향범주 간 상대적 비교시 지구온난화의 중요도가 다른 영향범주에 비해 높고 자동차엔진의 목록 분석 결과 오존층파괴, 광화학산화물 생성 등에 영향을 주는 물질이 많이 포함되어 있지 않아 지구온난화의 가중화 결과가 높게 분석되었다.

자동차엔진 재제조시의 세부적인 가중화 결과를 Table 9와 Fig. 3에 나타내었다. 가중화 산정 결과 자동차엔진 재제조시 총 환경영향은 2.67E+02 Eco-point로 나타났으며, 지구온난화 영향범주의 점유비율이 99.68%로 신제품 제조시와 마찬가지로 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 가중화 지수 산정을 위한 영향범주 간 상대적 비교시 지구온난화의 중요도가 다른 영향범주에 비해 높고 자동차엔진의 목록분석 결과 오존층파괴, 광화학산화물 생성 등에 영향을 주는 물질이 많이 포함되어 있지 않아 지구온난화의 가중화 결과가 높게 분석되었다.

Table 9. Result of weighting(DL06 remanufactured)

Impact category	Result value	Unit	Level of contribution
ADP	5.82E-01	Eco-point	0.22%
AP	1.36E-01	Eco-point	0.05%
EP	8.26E-02	Eco-point	0.03%
GWP	2.66E+02	Eco-point	99.68%
ODP	1.21E-05	Eco-point	0.00%
POCP	4.52E-02	Eco-point	0.02%
Total	2.67E+02	Eco-point	100.0%

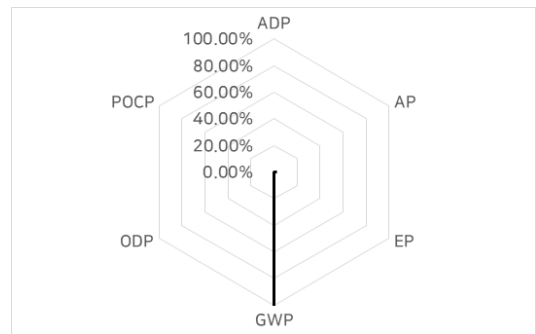


Fig. 3. Result of weighting for each impact categories(DL06 remanufactured).

3.4. 자동차엔진 신제품제조 및 재제조시 온실가스 발생량 산정

자동차엔진 목록분석결과를 기반으로 신제품 제조시와 재제조시 온실가스 발생량을 산정하였다. 본 연구에서 산정하고자 하는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황 발생량과 관련된 파라미터와 목록분석 결과값을 Table 10에 나타내었다.

목록분석결과 산정된 자동차엔진 신제품제조시 발생 온실가스는 약 3,473 kg이었으며 이산화탄소가 3,454 kg으로 99.45%를 차지하는 것으로 분석되었다. 메탄을 비롯한 아산화질소, 수소불화탄소, 육불화황의 발생량은 소량이었으며, 과불화탄소의 경우 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 자동차엔진 재제조시 발생 온실가스는 약 872 kg으로 신제품제조시와 마찬가지로 이산화탄소가 867 kg으로 발생량의 99.47%를 차지하고 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 육불화황의 발생량은 소량, 과불화탄소는 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

Table 10. Result of LCI analysis for LCI parameters

Material	Parameter	Result value(kg)		
		DL06	DL06 remanufactured	
Market for cast iron removed by turning, primarily dressing, computer numerical controlled	Output	Carbon dioxide(CO ₂)	2.34E+03	5.29E+02
		Carbon dioxide(CO ₂ , biogenic)	1.96E+02	4.45E+01
		Carbon dioxide(CO ₂ , land use change)	3.51E+00	7.94E-01
		Methane(CH ₄)	1.58E+01	3.58E+00
		Nitrous oxide(N ₂ O)	6.79E-02	1.54E-02
		Ethane, pentafluoro-, HFC-125	8.03E-32	1.82E-32
		HFC-134a(CH ₂ FCF ₃)	2.36E-06	5.35E-07
		HFC-143a(C ₂ H ₃ F ₃)	6.18E-33	1.40E-33
		HFC-152a(C ₂ H ₄ F ₂)	4.66E-05	1.06E-05
		HFC-23(CHF ₃)	4.93E-07	1.12E-07
		Sulphur hexafluoride(SF ₆)	2.85E-04	6.46E-05
Market for aluminium alloy, metal matrix composite	Output	Carbon dioxide(CO ₂)	6.98E+02	1.43E+02
		Carbon dioxide(CO ₂ , biogenic)	9.47E+00	1.95E+00
		Carbon dioxide(CO ₂ , land use change)	2.39E+00	4.92E-01
		Methane(CH ₄)	2.38E+00	4.89E-01
		Nitrous oxide(N ₂ O)	1.71E-02	3.52E-03
		Ethane, pentafluoro-, HFC-125	9.58E-33	1.97E-33
		HFC-134a(CH ₂ FCF ₃)	2.23E-05	4.58E-06
		HFC-143a(C ₂ H ₃ F ₃)	7.38E-34	1.52E-34
		HFC-152a(C ₂ H ₄ F ₂)	3.96E-06	8.13E-07
		HFC-23(CHF ₃)	3.74E-08	7.69E-09
		Sulphur hexafluoride(SF ₆)	1.40E-04	2.88E-05
Market for reinforcing steel	Output	Carbon dioxide(CO ₂)	1.33E+02	9.35E+01
		Carbon dioxide(CO ₂ , biogenic)	2.03E+00	1.42E+00
		Carbon dioxide(CO ₂ , land use change)	1.28E-01	8.96E-02
		Methane(CH ₄)	4.61E-01	3.23E-01
		Nitrous oxide(N ₂ O)	2.15E-03	1.51E-03
		Ethane, pentafluoro-, HFC-125	7.33E-34	5.15E-34
		HFC-134a(CH ₂ FCF ₃)	5.38E-08	3.78E-08
		HFC-143a(C ₂ H ₃ F ₃)	5.65E-35	3.96E-35
		HFC-152a(C ₂ H ₄ F ₂)	1.75E-07	1.23E-07
		HFC-23(CHF ₃)	1.4E-08	9.81E-09
		Sulphur hexafluoride(SF ₆)	5.52E-06	3.87E-06
Market for metal working, average for copper product manufacturing	Output	Carbon dioxide(CO ₂)	5.12E+01	3.58E+01
		Carbon dioxide(CO ₂ , biogenic)	2.91E+00	2.03E+00
		Carbon dioxide(CO ₂ , land use change)	1.02E-01	7.10E-02
		Methane(CH ₄)	1.94E-01	1.35E-01
		Nitrous oxide(N ₂ O)	4.02E-03	2.81E-03
		Ethane, pentafluoro-, HFC-125	1.63E-33	1.14E-33
		HFC-134a(CH ₂ FCF ₃)	7.91E-08	5.53E-08
		HFC-143a(C ₂ H ₃ F ₃)	1.25E-34	8.75E-35
		HFC-152a(C ₂ H ₄ F ₂)	2.84E-06	1.99E-06
		HFC-23(CHF ₃)	9.63E-09	6.73E-09
		Sulphur hexafluoride(SF ₆)	7.06E-06	4.94E-06
Market for synthetic rubber	Output	Carbon dioxide(CO ₂)	1.62E+01	1.34E+01
		Carbon dioxide(CO ₂ , biogenic)	5.02E-01	4.15E-01
		Carbon dioxide(CO ₂ , land use change)	1.99E-02	1.64E-02
		Methane(CH ₄)	5.73E-02	4.74E-02
		Nitrous oxide(N ₂ O)	3.76E-04	3.11E-04
		Ethane, pentafluoro-, HFC-125	1.59E-33	1.32E-33
		HFC-134a(CH ₂ FCF ₃)	1.63E-08	1.34E-08
		HFC-143a(C ₂ H ₃ F ₃)	1.23E-34	1.01E-34
		HFC-152a(C ₂ H ₄ F ₂)	2.51E-07	2.07E-07
		HFC-23(CHF ₃)	3.18E-09	2.63E-09
		Sulphur hexafluoride(SF ₆)	1.5E-06	1.24E-06

Table 11. Result of calculating greenhouse gas generated during production of automotive engine

Group	Result value(kg)	
	DL06	DL06 remanufactured
Total	3,473.107	871.937
Carbon dioxide	3,454.101	867.336
Methane	18.913	4.578
Nitrous oxide	0.092	0.024
Hydrofluorocarbon	0.00007	0.00002
Perfluorocarbons	-	-
Sulphur hexafluoride	0.0004	0.0001

Table 12. Result of calculating greenhouse gas reduction through automotive engine re-manufacturing

Group	Result value(kg)
Total	2,601.169
Carbon dioxide	2,586.765
Methane	14.336
Nitrous oxide	0.068
Hydrofluorocarbon	0.00006
Perfluorocarbons	-
Sulphur hexafluoride	0.0003

3.5. 자동차엔진 재제조시 온실가스 저감량 분석

자동차엔진 신제품제조시와 재제조시의 온실가스 발생량을 Table 11에, 재제조를 통한 온실가스 저감량을 Table 12에 나타내었다. 자동차엔진 재제조를 통한 온실가스 저감량은 이산화탄소 약 2,587 kg, 메탄 약 14 kg 등으로 총 2,601 kg 저감되는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차엔진의 신제품제조시와 재제조시 발생하는 환경영향을 전과정 관점에서 산정하고 이를 기반으로 온실가스 저감효과를 산정하였다. LCIA(Life Cycle Inventory Analysis)분석결과 자동차엔진 신제품제조시 온실가스 발생량은 약 3,473 kg, 재제조시 온실가스 발생량은 약 872 kg으로 분석되어 재제조를 통해 저감되는 온실가스량은 약 2,601 kg으로 분석되었다. 이에 기반하여 살펴볼 때 폐기 단계를 제외한 전과정 측면에서 자동차엔진 재제조 기술은 온실가스 저감효과가 있는 것으로 분석되었다.

다음으로 자동차엔진 1ea를 기능단위로 Cradle to Gate를 시스템 경계로 하여 LCA 분석을 수행하였다. 영향범주별 분석결과 중 지구온난화에 대한 분석결과를 살펴보면 자동차엔진 1 ea 신제품제조시 약 3,690 kgCO₂-eq, 재제조시 925 kgCO₂-eq가 배출되는 것으로 분석되었다. 배출량 기여도 분석결과 주철에 의한 영향이 신제품제조시 73.17%에서 재제조시 66.08%로 감소하고 탄소강에 의한 기여도가 3.90%에서 10.91%로 상승한 것으로 나타났다. 이는 재제조시 부품 교체율에 기인한 것으로 재제조 공정에 의한 주철 부품의 신제품수준으로의 복원률이 높고, 상대적으로 탄소강 부품의 신제품으로의 교체율이 높음을 의미한다. 자동차엔진 중 주철부품의 무게는 총 727.71 kg 중 587.69 kg으로 약 80%를 차지하고 있기 때문에, 주철부품의 높은 복원률은 재제조 공정간 신규로 투입되는 원부자재가 적음을 의미한다. 또한 자동차엔진 신제품제조시 발생하는 온실가스 약 3,473 kg 중 2,554 kg이 주철부품에 의해 발생하고 있는데 재제조시 주철부품에 의해 발생하는 온실가스는 약 578 kg으로 재제조를 통한 주철부품의 복원이 전과정 측면에서 온실가스 저감에 기여함을 나타낸다. 재제조를 통한 부품복원률과 신제품교체율의 온실가스 발생량과의 상관관계를 고려할 때 재제조를 통한 온실가스 저감을 극대화하기 위해서는 교체율을 최소화하기 위한 복원기술 개발 등이 필요함을 시사한다. 가중화 분석 결과 자동차엔진 신제품제조시 총 환경영향은 1.07E+03 Eco-point, 재제조시 2.67E+02 Eco-point로 나타났으며, 영향범주별로는 지구온난화 점유비율이 각각 99.72%, 99.68%로 가장 높았다.

동 연구를 통해 산정된 자동차엔진 재제조시 온실가스 저감량은 약 2,601 kg으로 나타났다. 다만 LCA 분석수행을 위한 LCI DB 선정과정에서 국내 LCI DB의 경우 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황 등 동 연구에서 산정하고자 하는 온실가스에 대한 목록분석이 데이터 부재로 불가능하여, 해외 LCI DB를 대신 채택하여 정밀 분석 결과 도출에 한계가 존재하였다. 주요 환경영향 범주로 이슈화되고 있는 온실가스에 대한 전과정 분석의 정밀도 향상을 위해서는 고도화된 방법론 및 국가 LCI DB의 정비 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원

(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2020 6410200010).

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Vehicle registration status, https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?jsessionid=T-Oeb3-jdaLfPaKWUMeotl7cNreep-2ONoGkUPwq.node11?idx_cd=1257, January 24, 2023.
2. Kwang-Hoon Ko, Yun-Jung Bae, Jin-Young Moon, et al., 2019 : An Economic Effect Analysis on Remanufacturing Part of Automobile, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 28(4), pp.37-43.
3. Hyundai Motor Group, What is the strengthened automobile environmental regulation and full-course evaluation, <https://www.hyundai.co.kr/story/CONT0000000000002755>, February 7, 2023.
4. Hyung-Chul Kim, 2021 : Climate Change and Life Cycle Assessment of Automobiles, Auto Journal, 43(5), pp.23-27.
5. National Institute of Environmental Research, Automotive Environmental Policy and Technology Trend, <https://www.nier.go.kr/NIER/cop/bbs/selectNoLoginBoardArticle.do>, March 31, 2023.
6. Hyun-Jung Jo, Yong-Woo Hwang, Ji-Hyoung Park, et al., 2011 : Environmental Impact Evaluation for the Automotive Remanufacturing Parts and Remanufacturing Toner Cartridge Using the LCA Methodology, J. of Korea Society of Waste Management, 28(7), pp.770-777.
7. Chung-geun Lee, 2019 : LCA analysis analysis of energy reduction in diesel engine remanufacturing, Ph.D. diss., Inha University.
8. ISO. ISO 14040:2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and framework, <https://www.iso.org/standard/37456.html>, December 16, 2022.
9. Sun-Hee Kim and Dong-Min Kim, 1995 : A Study on Methodology and Application of the Life Cycle Assessment, J. of Korea Society of Waste Management, 12(1), pp.145-152.
10. Ecoinvent, Ecoinvent Version 3.8, www.ecoinvent.org, November 29, 2022.
11. Ministry of Environment, Manual for Tool of type III labelling and LCA, TOTAL, <https://www.greenproduct.go.kr/epd/epd/total.do>, November 29, 2022.

박 지 형

- 현재 ㈜엔디렉션 대표이사

이 한 슬

- 건국대학교 환경보건과학과 학사
- 현재 ㈜엔디렉션 과장

황 용 우

- 일본 동경대학교 도시공학 박사
- 한국전과정평가학회 회장
- 한국환경경영학회 부회장
- 산업부 자체평가위원회 평가위원
- 현재 인하대학교 환경공학과 교수

김 영 춘

- 현재 한국생산기술연구원 국가청정지원센터 순환경제실 실장

이 충 근

- 현재 ㈜오성이엔지 연구소장
-