

## 재제조품의 온실가스배출 저감효과 산정 표준화를 위한 핵심 요소 도출

김남석\* · 배국표\* · 노재학\* · §강홍윤\* · 황용우\*\*

\*인하대학교 순환경제환경시스템전공, \*\*인하대학교 환경공학과

### Key Elements for Standardizing the Estimation of Greenhouse Gas Emissions Reduction Induced by Remanufactured Products

Nam Seok Kim\*, Kook Pyo Pae\*, Jae Hak No\*, §Hong-Yoon Kang\* and Yong Woo Hwang\*\*

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

\*\*Department of Environmental Engineering, Inha University

#### 요 약

기후 위기에 대응하고자 지난 2015년 파리협정에서 지구 온도상승을 2°C보다 아래로 유지하고 나아가 1.5°C 아래로 억제하기 위한 목표를 설정하였음에도 불구하고, 지구 온도는 계속 상승 중에 있다. 실질적으로 이에 대응하기 위한 주요 전략으로 선진국들은 순환경제 실현을 제시하고 있으며, 세부 이행 방법으로는 재사용, 재제조, 재활용, 에너지 회수 등이 있다. 그중 재제조는 다른 자원순환 방법보다도 고부가가치 및 탄소중립 달성에 큰 잠재력을 가지고 있지만, 재製조를 통한 온실가스 저감효과를 정량적으로 평가할 수 있는 표준화된 방법이 부재한 상황이다. 이에 본 연구에서는 재제조에 의한 온실가스배출 감축효과 산정에 관한 2020년 이후의 최근 연구동향과 온실가스를 포함한 환경영향 평가 국제 표준 및 환경성적표지제도를 비교·분석함으로써 재제조품의 온실가스배출 저감효과 산정 표준화를 위한 핵심 요소를 도출하였다.

**주제어 :** 재제조, 온실가스, 탄소중립, 순환경제, 자원순환

#### Abstract

Although the Paris Agreement in 2015 aimed to limit global temperature increases to below 2°C and eventually to 1.5°C to address the climate crisis, global temperature continues to rise. Developed countries have proposed a circular economy as a major strategy to tackle this issue. Detailed implementation methods include reusing, remanufacturing, recycling, and energy recovery. Remanufacturing has a greater potential to achieve high added value and carbon neutrality than other resource circulation methods. However, currently, no standardized method for quantitatively evaluating the greenhouse gas (GHG) reduction effects of remanufacturing exists. This study compares and analyzes recent research trends since 2020 on the calculation of GHG emission reduction effects from remanufacturing. It also examines international standards for environmental impact assessment, including GHGs and environmental performance labeling systems. This study derives the key factors for standardizing the calculation of the GHG emission reduction effects of remanufactured products.

**Key words :** Remanufacturing, Greenhouse gas, Carbon neutral, Circular economy, Resource circulation

· Received : March 22, 2024 · Revised : April 9, 2024 · Accepted : April 9, 2024

§ Corresponding Author : Hong-Yoon Kang (E-mail : kanghy@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

인류는 18세기 후반 산업혁명 이후 대량생산, 대량소비를 통한 경제발전을 이루어 왔다. 그 어느 때 보다 풍요의 시대에 살고 있으나 급속한 경제발전의 부작용으로 인한 환경오염의 위험도 증가하였다. 특히 지구의 화석연료 소비가 가속화되면서 대기 중으로 배출된 온실가스로 인한 지구온난화는 예상보다 빠르게 진행되어 지구의 자정작용으로 정화할 수 있는 임계점에 거의 다다랐다.

국제사회는 기후 위기에 대응하기 위해 1990년 중반부터 지구 평균기온 상승을 억제하기 위한 논의를 해왔으며, 지난 2010년 칸쿤 합의에서 지구 평균기온 2°C 상승 억제 목표를 채택 후 2015년 12월 파리협정에서 산업혁명 이전 대비 2°C보다 아래로 유지하고 나아가 1.5°C 아래로 억제하기 위한 목표를 설정하였다<sup>1)</sup>. 또 IPCC는 1.5°C 특별보고서를 통해 전 지구적으로 지구 평균온도 상승을 1.5°C 이내로 억제하기 위해서는 2050년까지 탄소 순배출량이 0이 되는 탄소중립 달성을 제시하였다<sup>2)</sup>. 이에 따라 전 세계 기업 및 산업 부문은 온실가스 배출량 감소에 주력하고 있다.

기후변화에 대응하기 위한 주요 방안으로 순환경제(Circular Economy)가 채택되고 있다. 순환경제는 기존의 제품 수명이 일회성인 선형경제와 달리 수명 주기 내에 제품을 다회 사용가능하게 하는 것을 목적으로 한다. 순환경제는 원료 취득부터 폐기단계까지 단계별 전략 수립이 가능하며, 그중 폐기단계에서 사용 가능한 전략은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 재사용, 재활용, 재제조 등이

있다. 재사용은 사용된 제품을 타인이 그대로 사용하거나 결함 부품에 대한 간단한 수리를 통해 사용 연한을 연장시킬 수 있는 반면, 제품의 성능은 기존 고장 또는 수리 이전과 동일하다. 재활용의 경우 사용 후 제품을 분리, 분해 후 녹여서 물질 형태로 만든 다음 재가공을 위한 원료로 공급하기 때문에 이 과정에서 많은 에너지와 자원의 손실이 발생한다.

이와는 달리 재제조는 사용 후 제품이나 부품을 회수하여 분해, 세척, 검사, 보수·조정, 재조립 등 일련의 과정을 거쳐 원래의 성능 또는 그 이상의 성능을 유지할 수 있는 상태로 만드는 것으로 재제조를 통해 자원이 효율적으로 활용될 수 있고, 폐기물 발생량 감소, 에너지 소비량 감소 등의 자원순환뿐 아니라 탄소중립 달성을 위한 이상적인 방법이라고 할 수 있다<sup>3)</sup>.

재제조란 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」 제 2조제2호에 따른 재활용 가능 자원을 「폐기물관리법」 제 2조제7호에 따른 재사용·재생이용할 수 있는 상태로 만드는 활동 중에서 일련의 공정을 거쳐 원래의 성능 또는 그 이상의 성능을 가진 상태로 만드는 산업활동을 말한다.

Fig. 2는 재제조 단계를 도식화한 것으로 코어 획득에서부터 재조립과 성능 확인까지의 반복적인 활동을 통하여 이루어진다. 이러한 재제조 공정은 신품 대비 적은 비용, 적은 자원 및 적은 에너지로 사용 후 제품을 녹이지 않고 비파괴 분해를 통해 제품 그 자체로 몇 번이든 순환시킬 수 있다는 점에서 기존의 물질 재활용과는 차별화된다<sup>4)</sup>.

재제조산업활동은 순환경제 실현과 탄소중립목표 달성을 위한 주요 수단이지만, 재製조를 통한 온실가스 감축 효

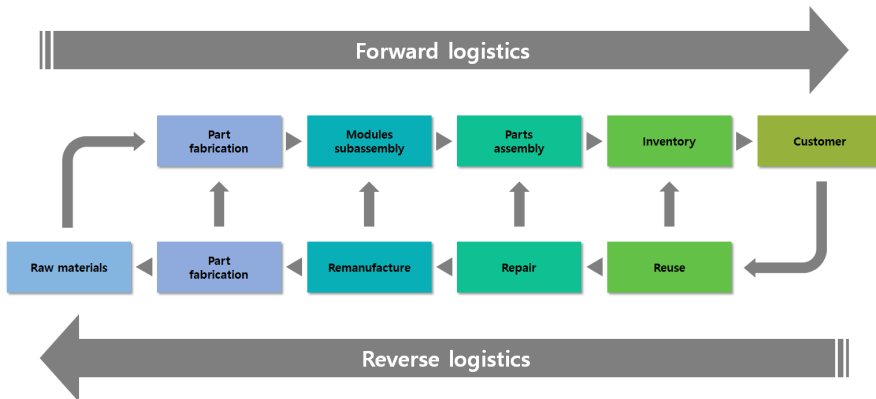


Fig. 1. Various Resources Recycling Methods.

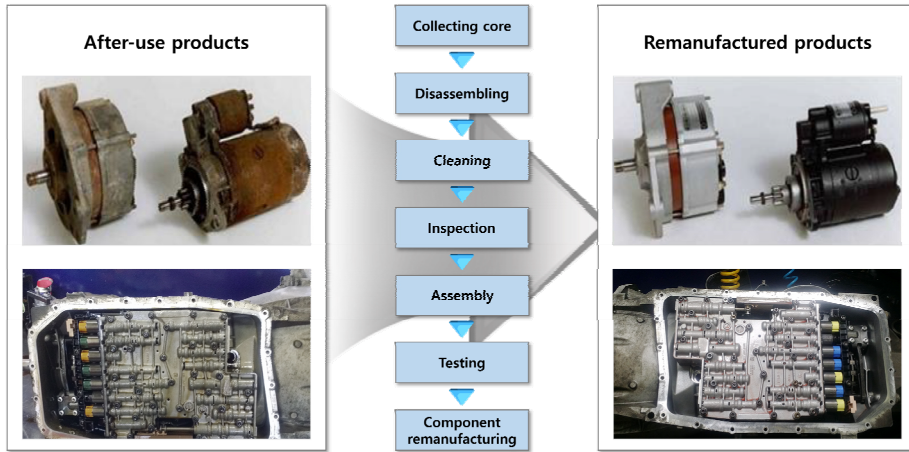


Fig. 2. Remanufacturing Process.

과를 평가하기 위한 표준화된 온실가스 배출량 산정방법이 부재하여 제대로 된 합리적 정량적 평가가 이루어지지 않고 있다. 기존 재제조 관련 논문을 검토한 결과 재제조품 온실가스 배출량 산정에는 원재료 투입 단계의 회피효과(Avoided Effect)를 주로 다루며, 사용 후 단계에서 발생하는 영향에 대한 고려는 부족한 상황이다. 그러나 실제 사용 후 제품이 재제조 공정을 통하여 재사용될 경우, 폐기물 처리 과정과 신제품 생산을 위한 천연원료 취득 및 제조과정이 불필요하게 된다. 이에 따른 미배출된 온실가스는 회피배출(Avoided Emissions)이라 정의되며, 이는 온실가스 감축을 위한 전략 수립 시 주요 고려사항으로 간주된다.

본 연구는 재제조를 통한 온실가스배출 저감효과 산정 방법 표준화를 위한 선행연구로 기존 관련 연구 및 표준을 분석하여 새로운 방법론 개발 시 고려되어야 할 핵심요소 도출에 가장 큰 목적을 두고 있다.

## 2. 분석 방법

재제조는 자동차부품, 건설/산업기계, 항공기, 군용장비, 토너 카트리지, 가구, 화학촉매제품 등 다양한 영역에 걸쳐 이루어지고 있으며, 에너지 및 자원 절감효과가 매우 높은 고부가가치 친환경 산업이다. 이에 본 연구에서는 재제조로 인한 온실가스감축효과의 정량적인 산정을 위해 표준화된 방법론 기초 연구뿐 아니라 재제조의 효과와 관련된 연구와 온실가스 및 환경영향 산정을 위해 사용되는 기존 방법론 분석을 수행하였다.

### 2.1. 선행 연구 분석

선행 연구는 2020년 이후 게재된 논문을 대상으로 하였으며, Google Scholar 데이터베이스를 검색하여 “Remanufacturing”을 주 키워드로 설정하고 “Avoided” 및 “Reduction”을 추가 키워드로 사용하였다. 재제조산업의 환경오염 저감효과와 관련된 논문들 위주로 검색/발취하여 30건의 논문에 대하여 분석하였다. 선행연구의 분석은 저감효과가 발생하는 단계를 대상으로 구분하였고, 그 외 주요 사항은 비교로 정리하였다.

### 2.2. 표준 및 환경성적표지 분석

본 연구에서는 재제조품의 온실가스 배출량 산정에 사용 후 제품의 폐기단계를 고려하고자 기존 온실가스 산정 방법론을 조사하여 비교 분석하였다. 비교·분석 대상이 되는 표준 및 환경성적표지는 다음 Table 1과 같다. 각 온실가스 산정방법론을 연구목적, 기능단위, 시스템경계, 제외기준, 데이터품질, 할당, 가정 및 제안사항으로 구분하여 정리하였으며 이를 기반으로 온실가스 저감효과 산정 표준화를 위한 핵심 요소와 제안사항을 도출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 선행 연구 분석

Table 2는 재제조를 통한 온실가스 감축 등 환경영향 저감효과 분석에 관한 최근의 연구 결과를 정리한 것이다. 분석한 총 30건의 논문 중 원료취득 단계 회피만을 고려

**Table 1.** The international standards and EPD Programs related with GHG emissions measurements

Standard/EPD	Contents
ISO 14044	Basic standards of conducting life cycle assessment providing specific requirements and guidelines
ISO 14067	Main Standards for specifying principles, requirements and guidelines for the quantification and reporting of the carbon footprint of a product
PAS 2050	British standards for the assessment of the life cycle green house gases emissions of goods and services
GHG Protocol	Standards providing a framework for businesses, governments, and other entities to measure and report their greenhouse gas emissions
EPD KOREA	Korean EPD system that accurately and transparently discloses quantitative information on the impact that the life cycle of a product and service
International EPD	Global programme for Environmental Declarations. Environmental Product Declarations (EPD) present transparent, verified and comparable information about the life-cycle environmental impact of products and services

**Table 2.** Recent studies on GHG emissions reduction effects induced by remanufacturing

No	Author(s)	RM <sub>Avoid</sub> *	EoL <sub>Avoid</sub> **	Remarks
1	Abdullah, Z. T. (2024) <sup>5)</sup>	o	x	Automotive remanufacturing is a circular economy process that involves the reuse of recovered parts. This process can bring economic benefits for both dismantling companies and consumers.
2	Yulizza, Henao., et al. (2024) <sup>6)</sup>	o	x	Repurposing through remanufacturing can provide a 20% environmental and economic benefit during the raw material acquisition stage for transmission poles.
3	Dimitry, Bogachuk., et al. (2024) <sup>7)</sup>	o	x	A 33% reduction in global warming potential (GWP) can be achieved by remanufacturing perovskite solar cells.
4	Yang, Soo Jin., et al. (2024) <sup>8)</sup>	o	x	The recycling of components in the post-use phase helps to reduce the need for virgin materials in the pre-manufacturing phase, thereby avoiding unnecessary waste.
5	Wrålsen, Benedikte., et al. (2023) <sup>9)</sup>	o	x	To fulfill the circular economy model through remanufacturing, over 16% of raw materials must be avoided at the acquisition stage
6	Kamath, Dipti., et al. (2023) <sup>10)</sup>	o	x	The carbon footprint can be reduced by 2-17% by reducing the raw materials used in battery production.
7	Russell, Jennifer., et al. (2023) <sup>11)</sup>	o	o	Value-Retention Processes (VRP), such as reuse, repair, and remanufacturing, can significantly reduce the impact of raw material acquisition by up to 90% and the impact of waste disposal processes by up to 55%.
8	Chen, Quanwei., et al. (2023) <sup>12)</sup>	o	x	Remanufacturing batteries with recycled materials can reduce environmental impact by 20% (NCM) and 32% (LFP) compared to batteries produced from natural resources
9	Yukse, Yagmur Atescan., et al. (2023) <sup>13)</sup>	o	o	The calculation of the avoidance effect resulting from remanufacturing is as follows: multiply the number of remanufacturings by the sum of the virgin material acquisition, manufacturing, end-of-life treatment, and remanufacturing process emissions, and then subtract the remanufacturing process emissions. The actual calculation resulted in a decrease from 310 kg CO <sub>2</sub> to 21 kg CO <sub>2</sub> .
10	Abdullah, Ziyad Tariq. (2023) <sup>14)</sup>	o	x	When nails are made from remanufactured processes such as stripping, cutting, and welding used rebar, it can reduce emissions by 0.2-2.76 kg CO <sub>2</sub> /kg nail compared to producing nails from iron ore-based materials
11	Lee, Jong-Hyo., et al. (2023) <sup>15)</sup>	o	x	Remanufacturing can reduce GWP by 52.2%, by avoiding the purchase of raw materials required for production.
12	Schlesinger, Linda., et al. (2023) <sup>16)</sup>	o	o	Remanufacturing can achieve a reduction of about 90% in emissions and material usage by reducing raw materials and waste.

**Table 2.** Recent studies on GHG emissions reduction effects induced by remanufacturing (Continued)

No	Author(s)	*RM <sub>Avoid</sub>	**EoL <sub>Avoid</sub>	Remarks
13	LIU, ChangYi., et al. (2023) <sup>17)</sup>	o	x	Advancements in remanufacturing technology can reduce costs by 50%, energy consumption by 60%, and material usage by 70%
14	Taleizadeh, Ata Allah., et al. (2023) <sup>18)</sup>	o	x	The process of retreading tires contributes to conserving resources and reducing CO <sub>2</sub> emissions.
15	Kim, Geon Yong., et al. (2023) <sup>19)</sup>	o	x	Increasing the remanufacturing rate of the perforators led to a reduction in GHG emissions of at least 27.5% and up to 69.7%.
16	Meister, Julia A., et al. (2022) <sup>20)</sup>	o	o	Avoiding the acquisition of new plastic materials can reduce 1.89 kg CO <sub>2</sub> eq, and avoiding the disposal stage can reduce an additional 1.19 kg CO <sub>2</sub> eq
17	Quanwei Chen., et al. (2022) <sup>21)</sup>	o	x	Battery remanufacturing with recycled materials can significantly reduce emissions compared to conventional battery production. According to the study, pyrometallurgy can reduce emissions by 86.86 kg CO <sub>2</sub> -eq, hydrometallurgy by 60.77 kg CO <sub>2</sub> -eq, and physical recycling by 43.92 kg CO <sub>2</sub> -eq.
18	Angela J. Nagle., et al. (2022) <sup>22)</sup>	o	x	Remanufacturing wind turbine blades can reduce CO <sub>2</sub> emissions by 342 kg per ton of waste blade at the raw material stage
19	Shiwei Du., et al. (2022) <sup>23)</sup>	o	x	Battery remanufacturing using recycled materials can reduce energy consumption by 74% compared to batteries made from virgin materials
20	Tomohisa Kanazawa., et al. (2022) <sup>24)</sup>	o	x	Remanufacturing mining machinery can reduce up to 194 tons of CO <sub>2</sub> eq. per machine by reusing parts
21	Sevda Alanya-Rosenbaum, et al. (2022) <sup>25)</sup>	x	x	The energy input required for the remanufacturing process is significant and must be taken into consideration
22	Chantelle Rizan., et al. (2022) <sup>26)</sup>	o	o	Up to a 20% reduction in greenhouse gas emissions is possible through life extension by repair
23	Shitong Peng., et al. (2022) <sup>27)</sup>	o	o	Comparing various studies, it has been found that excluding the End of Life stage can result in up to a 50% reduction in greenhouse gas emissions.
24	Zhengyang Zhang., et al. (2021) <sup>28)</sup>	o	x	Remanufacturing extends the service life of products and reduces overall physical losses of steel, nickel, and chromium in vehicle engines by 3%, 2%, and 5%, respectively
25	Yu, Meihan., et al. (2021) <sup>29)</sup>	o	x	Battery remanufacturing through direct physical recycling can reduce greenhouse gas emissions by 29.3-38.2%
26	Aguilar Esteva., et al. (2021) <sup>30)</sup>	o	x	An analysis of the automotive industry in the United States has shown that ICEVs use 27.5% of recycled materials, while BEVs use 21%. It is important to note the benefits of part reuse and recycling in the industry
27	Wolfram, Paul., et al. (2021) <sup>31)</sup>	o	x	Recycling and remanufacturing can reduce greenhouse gas emissions by between 6% and 20%, depending on the vehicle.
28	Schulte., et al. (2021) <sup>32)</sup>	o	o	The greenhouse gas emissions of vehicles are reduced by at least 6% and up to a maximum of 20%. The raw material section has been reduced by 99% (from 1.04 to 0.01), and the disposal stage has been reduced by 6.7%
29	Wrålsen., et al. (2020) <sup>33)</sup>	o	x	Battery remanufacturing, which includes recycling processes, results in an 8.55% reduction in energy consumption and a 6.62% reduction in greenhouse gas emissions compared to the production of virgin raw materials
30	Bobba, Silvia., et al. (2020) <sup>34)</sup>	o	x	In the minimum scenario of remanufacturing (minimum replacement), there is a 77.9% reduction in environmental impact. In the maximum scenario (maximum replacement), there is a 66.4% reduction. These percentages assume the same disposal stage

\*RM<sub>Avoid</sub>: Raw Materials acquisition step is avoided, \*\*EoL<sub>Avoid</sub>: End-of-Life step is avoided

**Table 3.** Major issues of ISO 14044

Category	Contents
Scope	Step-by-step instructions and guides for the four phases of Life Cycle Assessment
Function unit	Present the quantifiable performance of product systems
System boundary	Define the unit processes that should be included in the product system
Cut-off criteria	Exclusion criteria should consider mass, energy, and environmental significance
Data quality	Consideration of precision, completeness, representativeness, and consistency, as well as temporal, geographical, and technological scope, is necessary
Data collection	The collection of qualitative and quantitative data for each unit process included within the system boundary

**Table 4.** Major issues of ISO 14067

Category	Contents
Scope	Requirements and guidelines for calculating the product's carbon footprint
Function unit	Demonstrate quantifiable performance consistent with carbon footprint study goals and scope
System boundary	Define the boundaries of the product system for the purpose of studying its carbon footprint
Cut-off criteria	Exclusion criteria should consider mass, energy, and environmental significance
Data quality	Consideration of precision, completeness, representativeness, and consistency, as well as temporal, geographical, and technological scope, is necessary
Data collection	Collect data over an appropriate period of time to establish average GHG emissions and removals associated with a product's lifecycle
Allocation	Prioritize allocation avoidance and, if not, implement an allocation process that will consider physical and economic relationships
Allocation	Prioritize allocation avoidance and, if not, implement an allocation process that will consider physical and economic relationships

한 논문은 29건, 사용 후 단계 회피만을 고려한 논문은 없으며, 두 단계 모두 회피효과를 고려한 논문은 7건이었다. 두 단계를 모두 회피한 논문은 전체 논문 중 약 23%였으며, 이 중 대부분은 계산의 필요성만 제시할 뿐 실제 저감효과를 계산한 논문은 3건밖에 되지 않았다.

### 3.2. 온실가스 감축효과 산정 관련 국제 표준 및 환경 성적표지제도 분석

#### 3.2.1. ISO 14044

전과정평가에 대한 국제표준으로 제품 및 서비스의 수명 주기 동안 환경에 미치는 잠재적 영향의 정량화를 목적으로 하며 주요 내용은 Table 3과 같다<sup>35)</sup>.

#### 3.2.2. ISO 14067

ISO 14040/14044를 기반으로 한 제품의 탄소발자국 산정지침으로 토지이용 변화(Land-Use Change), 탄소 흡수(Carbon Uptake), 생물기원 탄소(Biogenic Carbon), 토양 탄소 변화(Soil Carbon Change) 등 특정 문제에 대한

요구 사항 포함하고 있다. 그 주요 내용은 Table 4에 정리하였다<sup>36)</sup>.

#### 3.2.3. PAS 2050

영국표준협회인 BSI(British Standards Institution)에서 개발된 표준으로 ISO 14067과 유사하게 ISO 14040/14044를 기반으로 하며, 제품 서비스의 전주기 온실가스 배출량 평가를 위해 개발되었다<sup>37)</sup>.

PAS 2050은 시스템경계 정의 및 할당 방식 등의 일반적인 규칙만이 아니라 탄소 저장(Carbon Storage) 및 지연 배출(Delayed Emissions) 등 보다 구체적인 문제를 다루는 방법에 대한 지침도 제시하고 있다. 그 주요 내용은 Table 5에 정리하였다.

#### 3.2.4. GHG Protocol

정부와 기업을 위해 WRI(World Resources Institute)에서 제시한 제품의 온실가스 배출량 정량화 및 보고 지침이며, ISO 표준 및 PAS 2050을 기반으로 작성되어 제품

**Table 5.** Major issues of PAS 2050

Category	Contents
Scope	Provides methods for calculating product carbon footprint and supports the establishment of corporate standards
Function unit	Should be reported as the mass of CO <sub>2</sub> eq. per functional unit
System boundary	Includes all emissions that can significantly impact the greenhouse gas emissions of the product
Cut-off criteria	Comply with the 95% Rule, where emissions are recalculated to 100%
Data quality	Prioritizes temporal, geographical, technological scope, accuracy, and precision
Data collection	Collecting process data that is owned, operated, or controlled by the organization implementing the guidance
Allocation	Consider allocation avoidance through process splitting, system expansion, etc. and present other transportation system-specific allocation methods

**Table 6.** Major issues of GHG Protocol

Category	Contents
Scope	Product GHG emissions standards designed for countries and organizations of all sizes
Function unit	A company's unit of analysis for all final (intermediate) products analytical unit of the corporation for all final (intermediate) products
System boundary	Includes all attributable processes
Cut-off criteria	Does not set exclusion criteria
Data quality	Evaluates data quality based on technological, temporal, geographical scope, completeness, and reliability
Data collection	Collects data distinguished between direct emissions data and activity data
Allocation	Present allocation methods based on physical and economic allocation and recycling, along with avoidance of allocation through process splitting, unit of analysis redefinition, system expansion, etc.

**Table 7.** Major issues of EPD Korea

Category	Contents
Scope	Provide product-specific PCRs such as energy-using products, steel products, etc. in addition to common products
Function unit	Present product units (one unit/piece) or feature units per product (e.g., per ton of steel product)
System boundary	Includes product-specific core processes across boundaries, including pre-production, manufacturing, use, and disposal
Cut-off criteria	Adheres to the 95% cumulative mass rule, but includes all utilities and energy in the calculation
Data quality	Differentiate between field and generic data and require quality requirements for each
Data collection	Presents data collection by category, including raw material and adjuvant inputs, transportation, and first-tier supplier data
Allocation	Performs allocation for multi-input, multi-output, and open-loop recycling without considering allocation avoidance

간 탄소 배출량 비교, 온실가스 배출 보고 등을 위해 사용된다<sup>38)</sup>.

조직의 운영 또는 활동에 직접적으로 기인하거나(Scope 1), 구매한 에너지(Scope 2), 및 그 외 범위(Scope 3)를 통해 간접적으로 기인할 수 있는 배출에 중점을 두고 있다. 그 주요 내용은 Table 6에 정리하였다.

### 3.2.5. 한국 환경성적표지제도

국내 환경라벨링 제도의 하나로 환경영향 중 탄소발자국을 영향범주 중 하나로 선정하였으며, 이는 ISO 14044, 14025 등을 근간으로 제품 서비스의 전과정에서 발생하는 온실가스 발생량을 이산화탄소 등가량으로 환산하여 라벨형태로 제품에 표시하는 Type III 인증제도이다. 그 주요 내용은 Table 7에 정리하였다<sup>39)</sup>.

**Table 8.** Major issues of International EPD scheme

Category	Contents
Scope	Provides Product Category Rules (PCRs) for specific products such as Basic Iron Product, Solid Waste Disposal, etc.
Function unit	Presents the functional unit per product
System boundary	Categorized by upstream, core, and downstream processes of the target product
Cut-off criteria	Varies according to PCR, complying with either the 95% or 99% Rule
Data quality	Differentiate between primary, secondary, and proxy data, and require quality conditions such as temporal, geographic, and technical scope
Data collection	Require upstream, core, and downstream process data collection conditions based on system boundaries
Allocation	Similar to ISO 14044, but distinguishes between products and by-products within the PCR for purposes like system expansion

**Table 9.** Key elements for estimating the GHG reduction effects of remanufactured products

Category	Contents
Function unit	Consider the product life cycle (e.g. one transmission that performs its function twice over a 10-year period)
System boundary	Establish system boundaries that cover the entire remanufacturing life cycle
Others	Consider the disposal of parts that are replaced during remanufacturing inspection and restoration Consider the final disposal steps of remanufactured products

3.2.6. International EPD scheme

1998년 스웨덴 환경보호국(SEPA)와 관련 업체가 만든 세계 최초이자 가장 오랫동안 운영된 제3자 인증으로, ISO 14067에 기반한 제품의 탄소발자국 등 환경영향을 산정하기 위한 제품별 지침(PCR)을 제공한다. 그 주요 내용을 Table 8에 정리하였다<sup>40)</sup>.

**3.3. 재제조제품의 온실가스배출 저감효과 산정을 위한 핵심 요소 도출**

앞선 온실가스 방법론 비교·분석과 선행연구 조사를 통해 기능단위, 시스템경계 등 6가지 주요항목에 대해 분석하였다. 본 연구에서는 재제조제품의 온실가스 저감효과 산정을 위한 핵심 고려 요소 중 기존 방법론과 차별성이 큰 2개 요소를 도출하였다. Table 9는 핵심 요소로 도출한 기능단위, 시스템경계 및 기타사항을 나타낸 것이다.

재제조제품의 온실가스 배출량 산정방법론 관련한 기존 연구를 분석한 결과 시스템경계 설정 단계에서 온실가스 배출량 산정을 위한 제품 및 제품 서비스의 수명주기를 고려하지 않은 상태로 시스템경계를 설정하고 있다는 것이 확인되었다. 이에 본 연구에서는 재제조제품의 온실가스 저감효과 산정 시 두 번째 생애 주기의 원료취득단계까지만을 고려한 기존 시스템경계가 아닌 코어회수, 재제조공정

배출, 재제조제품의 최종 폐기 등 재제조제품의 전체 수명주기 동안 발생하는 모든 환경영향을 시스템경계로 설정하여 산정하는 것이 보다 합리적이고 타당한 방법이라고 제안하는 바이다. 실제 추가적으로 고려되어야 할 주요 공정은 재제조 코어회수 시 운송, 재제조공정에서 마모된 부품의 대체용으로 사용되는 신제품 원료 및 에너지 투입, 재제조제품의 재질에 따른 최종 폐기(매립, 소각, 물질재활용)가 모두 고려되어야 하며, 이때 발생하는 환경영향이 제대로 파악되어 전체 온실가스 발생 저감량 산정에 반영하여야 함을 강조하고자 한다.

수명주기 고려와 더불어 재제조제품은 신제품의 생산 공정과는 다른 특성을 가지고 있다. 코어의 검사·복원 공정에서 재사용이 불가능한 부품은 신제품으로 교체가 이루어진다. 이때 교체되는 부품에 대한 폐기를 고려해야 한다. 재제조제품의 재질에 따라 소각, 매립, 물질재활용의 비율이 달라지기 때문에 폐기단계에서 발생하는 배출량이 상이하다. 또한 재제조제품은 다회 이용이 가능하기 때문에 재제조 과정도 다회 이루어질 수 있다. 이에 재제조제품의 온실가스 발생량을 산정하기 위해서는 재제조제품의 전체 수명을 확인하고 재제조 과정이 이루어지는 횟수를 고려하여, 공정마다 발생하는 교체품의 폐기단계를 고려해야 한다.



재제조품의 온실가스배출 저감량 산정을 위해서는 위의 두 가지 핵심 요소를 재제조 특징에 맞게 고려해야 객관적이고 타당한 온실가스 저감량 산정이 이루어질 수 있을 것으로 사료된다. 그 외 고려사항인 제외기준, 데이터품질 및 수집 그리고 할당은 기존 온실가스 배출량 산정 방법론에 맞게 적용하여도 결과 산정에 있어 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 재제조품의 온실가스 배출 저감효과 산정 표준화를 위한 핵심 요소 도출을 목적으로 수행하였다. 재제조품의 온실가스 배출량 및 환경영향 산정에 관한 연구 동향을 파악하기 위하여 최근 30건의 국내외 논문을 비교 분석하였다. 이를 통해 현재까지의 산정방식은 원료취득 단계 회피에만 중점을 두고 있다는 점을 확인하였다. 여러 논문에서 원료취득단계와 폐기단계를 동시에 고려해야 한다는 언급은 있었으나, 이에 대한 구체적인 검토나 산정은 이루어지지 않았다. 재제조품의 환경영향을 산정하기 위해서는 재제조 특징을 고려한 전과정평가가 이루어져야 할 것이다. 사용 후 제품의 두 번째 생애 주기의 시작인 코어회수, 재제조공정, 사용 후 제품의 폐기단계를 아우르는 전과정 시스템경계가 설정되어야 하고, 재제조공정 내에서 이루어지는 교체품의 폐기뿐 아니라 재제조품 사용 후 최종 폐기단계도 고려한 온실가스 배출량 산정이 되어야 현장 상황을 고려한 재제조품의 온실가스 저감효과 산정이 제대로 이루어졌다고 할 수 있을 것이다.

재제조는 자원순환 전략에서도 고부가가치 창출에 높은 잠재력을 가졌음에도 불구하고, 그 효과에 대한 검증 신뢰성이 부족하여 산업 현장에서 확산이 더딘 상황이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 제시한 핵심 고려사항인 기능단위와 시스템경계를 재제조특성에 맞게 고려하여 합리적이고 객관적인 온실가스 배출 저감량 산정이 이루어져야 할 것이다. 향후 다양한 제품 및 다양한 재질의 재제조품 시나리오 분석을 통해 표준화된 온실가스 배출량 산정 방법이 정립되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술

원의 지원을 받아 수행된 연구(지식기반 환경서비스 특성 화대학원사업)임.

#### References

1. Sang-Man Kim, 2016 : A Study on the Historical Significance and the Limits of the Paris Agreement, *Ajou Law Review*, 9(4), pp.225-249.
2. Ministry of Culture, Sports and Tourism, Republic of Korea Policy Briefing '2050 Carbon Neutrality'. <https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148881562>, March 13, 2024.
3. Hong-Yoon Kang, Young-Chun Kim, 2017 : Sustainable Growth Strategy through the Analysis of Korean Remanufacturing Industry 'Focusing on Automobile Industry Field', *KIC News*, 20(5), pp.1-12.
4. Hong-Yoon Kang, Nam Hoon Chung, Yong Woo Hwang, 2022 : *Remanufacturing Engineering*, pp.10-11, Yejark, Korea.
5. Abdullah, Z. T., 2024 : Remanufacturing waste steel sheet from end-of-life vehicles into electrical installation wall junction boxes: Quantitative sustainability assessment, *Results in Engineering*, 21, 101767, pp.1-11.
6. Henaio, Y., Grubert, E., Korey, M., et al., 2024 : Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of Repurposing Decommissioned Wind Turbine Blades as High-Voltage Transmission Poles, *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(5), 05024004, pp.1-15.
7. Bogachuk, D., van der Windt, P., Wagner, L., et al., 2024 : Remanufacturing perovskite solar cells and modules—a holistic case study, *ACS Sustainable Resource Management*.
8. Yang, S. J., Hwang, Y. W., Kim, Y. W., et al., 2024 : Environmental and Economic Benefits Induced by a Remanufactured Portable Power Station, *Energies*, 17(4), 793, pp.1-7.
9. Wrålsen, B., O'Born, R., 2023 : Use of life cycle assessment to evaluate circular economy business models in the case of Li-ion battery remanufacturing, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(5), pp.554-565.
10. Kamath, D., Moore, S., Arsenault, R., et al., 2023 : A system dynamics model for end-of-life management of electric vehicle batteries in the US: Comparing the cost, carbon, and material requirements of remanufacturing and recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, 196, 107061, pp.1-10.
11. Russell, J. D., Nasr, N. Z., 2023 : Value-retained vs. impacts avoided: the differentiated contributions of remanufacturing, refurbishment, repair, and reuse within a circular economy, *Journal of Remanufacturing*, 13(1), pp.25-51.

12. Chen, Q., Lai, X., Hou, Y., et al., 2023 : Investigating the environmental impacts of different direct material recycling and battery remanufacturing technologies on two types of retired lithium-ion batteries from electric vehicles in China, *Separation and Purification Technology*, 308, 122966, pp. 1-14.
13. Yuksek, Y. A., Haddad, Y., Pagone, E., et al., 2023 : Sustainability Assessment of Electronic Waste Remanufacturing: The Case of Laptop, *Procedia CIRP*, 116, pp.378-383.
14. Abdullah, Z. T., 2023 : Quantitative sustainability assessment of remanufacturing waste reinforcing steel, *Environmental Quality Management*, 32(4), pp.223-235.
15. Jong-Hyo Lee, Hong-Yoon Kang, Young Woo Hwang, et al., 2023 : Analysis of the life cycle environmental impact reductions of remanufactured turbochargers, *Journal of Remanufacturing*, 13(2), pp.187-206.
16. Schlesinger, L., Koller, J., Pagels, M., et al., 2023 : Alignment of design rules for additive manufacturing and remanufacturing, *Journal of Remanufacturing*, 13(2), pp.99-119.
17. Liu, C., Meng, X., Liu, C., et al., 2023 : Carbon footprint-based optimization method for remanufacturing machining paths, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(10), pp.3391-3406.
18. Taleizadeh, A. A., Moshtagh, M. S., Vahedi-Nouri, B., et al., 2023 : New products or remanufactured products: Which is consumer-friendly under a closed-loop multi-level supply chain?, *Journal of Retailing and Consumer Services*, 73, 103295, pp.1-23.
19. Geon Yong Kim, Yong Woo Hwang, Hyung Joo Roh, et al., 2023 : Environmental Evaluation for the Remanufacturing of Drilling Machine, *Journal of Environmental Management*, 15, pp.113-125.
20. Meister, J. A., Sharp, J., Wang, Y., et al., 2022 : Assessing long-term medical remanufacturing emissions with Life Cycle Analysis, *Processes*, 11(1), 36, pp.1-27.
21. Chen, Q., Lai, X., Gu, H., et al., 2022 : Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China, *Journal of Cleaner Production*, 369, 133342, pp.1-10.
22. Nagle, A. J., Mullally, G., Leahy, P. G., et al., 2022 : Life cycle assessment of the use of decommissioned wind blades in second life applications, *Journal of environmental management*, 302, 113994, pp.1-15.
23. Du, S., Gao, F., Nie, Z., et al., 2022 : Life cycle assessment of recycled NiCoMn ternary cathode materials prepared by hydrometallurgical technology for power batteries in China, *Journal of Cleaner Production*, 340, 130798, pp. 1-11.
24. Kanazawa, T., Matsumoto, M., Yoshimoto, M., et al., 2022 : Environmental impact of remanufacturing mining machinery, *Sustainability*, 14(13), 8118, pp.1-16.
25. Alanya-Rosenbaum, S., Bergman, R., Gething, B., et al., 2022 : Life cycle assessment of the wood pallet repair and remanufacturing sector in the United States, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(5), pp.1342-1352.
26. Rizan, C., Brophy, T., Lillywhite, R., et al., 2022 : Life cycle assessment and life cycle cost of repairing surgical scissors, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(6), pp.780-795.
27. Peng, S., Ping, J., Li, T., et al., 2022 : Environmental benefits of remanufacturing mechanical products: a harmonized meta-analysis of comparative life cycle assessment studies, *Journal of Environmental Management*, 306, 114479, pp.1-13.
28. Zhang, Z., Matsubae, K., Nakajima, K., 2021 : Impact of remanufacturing on the reduction of metal losses through the life cycles of vehicle engines, *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105614, pp.1-10.
29. Yu, M., Bai, B., Xiong, S., et al., 2021 : Evaluating environmental impacts and economic performance of remanufacturing electric vehicle lithium-ion batteries, *Journal of Cleaner Production*, 321, 128935, pp.1-11.
30. Aguilar Esteva, L. C., Kasliwal, A., Kinzler, M. S., et al., 2021 : Circular economy framework for automobiles: Closing energy and material loops, *Journal of Industrial Ecology*, 25(4), pp.877-889.
31. Wolfram, P., Tu, Q., Heeren, N., et al., 2021 : Material efficiency and climate change mitigation of passenger vehicles, *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), pp.494-510.
32. Schulte, A., Maga, D., Thonemann, N., 2021 : Combining life cycle assessment and circularity assessment to analyze environmental impacts of the medical remanufacturing of electrophysiology catheters, *Sustainability*, 13(2), 898, pp. 1-22.
33. Wrålsén, B., O’Born, R., 2023 : Use of life cycle assessment to evaluate circular economy business models in the case of Li-ion battery remanufacturing, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(5), pp.554-565.
34. Bobba, S., Tecchio, P., Ardente, F., et al., 2020 : Analysing the contribution of automotive remanufacturing to the circularity of materials, *Procedia CIRP*, 90, pp.67-72.
35. ISO, ISO 14040:2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and framework. <https://www.iso.org/standard/37456.html>, March 13, 2024.
36. ISO, ISO 14067:2018 Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification. <https://www.iso.org/standard/71206.html>, March 13, 2024.
37. BSI Group, PAS 2050:2011 Specification for the assess-

ment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. <https://www.en-standard.eu/pas-2050-2011>, March 13, 2024.

38. WRI, GREENHOUSE GAS PROTOCOL. <https://ghgprotocol.org/>, March 13, 2024.

39. KEITI, ECOSQUARE ‘Environmental Product Declaration’. <https://ecosq.or.kr/websquare.do#w2xPath=/cm/main/index.xml>, March 13, 2024.

40. EPD International AB, The International EPD System. <https://www.environdec.com/home>, March 13, 2024.

---

### 김남석

- 인하대학교 정치외교학과 학사
  - 인하대학교 글로벌산업·환경융합전공 공학석사
  - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
- 

---

### 배국표

- 인하대학교 환경공학과 학사
  - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 석사과정
- 

---

### 노재학

- 인하대학교 환경공학과 학사
  - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 석사과정
- 

---

### 강홍윤

- The University of Queensland 토목환경공학 박사
  - (전) 한국생산기술연구원 수석연구원
  - (전) 한국환경경영학회 회장
  - 현재 인하대학교 대학원 순환경제환경시스템전공학과 교수
- 

---

### 황용우

- 일본 동경대학 도시공학 박사
  - (전)한국전과정평가학회 회장
  - 현재 한국환경경영학회 회장
  - 현재 인하대학교 환경공학과 교수
-