

폐냉장고의 진공단열재 재제조 사례연구와 탄소 감축 잠재량 산정

박지환*, 임혜숙

한국환경연구원 지속가능전략연구본부

Case Study on the Remanufacturing of Vacuum Insulation Panels from End-of-Life Refrigerators and Estimation of Carbon Reduction Potential

Jihwan Park*, Hye Sook Lim

Sustainability Strategy Research Group, Korea Environment Institute, Korea

ABSTRACT

This study investigates the current processes and technologies for remanufacturing vacuum insulation panels (VIPs) recovered from end-of-life refrigerators, with a focus on making them reusable. The potential industrial applications of these re-VIPs in the building and cold chain sectors are also explored. Based on the above remanufacturing process information, the carbon reduction potential through the reuse of VIPs was assessed using Life Cycle Assessment (LCA). The study concluded that VIPs intended for reuse are most suitable for the cold chain sector. Additionally, it was estimated that assuming 15,600 VIP refrigerators are processed annually at one recycling centers, approximately 32 tons of VIPs can be reused, potentially reducing carbon emissions by -94,282 kg CO₂-eq.

Key words: vacuum insulation panel, end-of-life refrigerator, remanufacturing, carbon reduction potential, LCA

요약

본 연구는 폐냉장고로부터 회수한 진공단열재를 재사용이 가능하도록 재제조할 수 있는 공정·기술현황을 조사하고, 산업적 활용 방안을 모색하고자 건축 및 콜드체인 분야의 적용 가능성을 고찰하였다. 또한, 재제조 공정 시나리오를 기반으로 전과정평가(LCA)를 수행하여 진공단열재 재제조에 따른 신재 대체효과 즉, 잠재적 탄소배출 감축량을 산정하였다. 연구 결과, 재제조를 통해 생산된 진공단열재는 콜드체인 분야에 우선 활용이 가능한 것으로 판단하였으며, 국내 단일 재활용센터에서 연간 약 15,600대의 진공단열재 냉장고를 처리하여 약 32.828 kg의 진공단열재를 수집 및 재제조 원료로 활용할 수 있는 것으로 분석하였다. 재제조를 통해 통한 신재 대체효과로써 잠재적 탄소 감축량은 연간 약 -9.43E+04 kg CO₂-eq 수준으로 추정되었다.

주제어: 진공단열재, 폐냉장고, 재제조, 감축량, 전과정평가

1. 서론

진공단열재(vacuum insulation panel)는 기존에 주로 사용되어 온 폴리우레탄과 같은 단열재에 비해 우수한 단열 성능을 제공하도록 설계되어 극한의 조건이나 고온·저온조건 등

열에 민감한 제품의 온도 유지 또는 이동·보관을 목적으로 주로 사용되고 있다[1]. 진공단열재 구성요소는 크게 심재(core material), 밀봉지(gas-tight envelope), 흡착제(getter), 보호 레이어(protect layer) 등으로 구성된다[1,2].

심재는 주로 글라스울/실리카(Silica) 또는 유리섬유(glass

Date Received: Jul. 25, 2024, Date Revised: Aug. 28, 2024, Date Accepted: Aug. 29, 2024

* Corresponding author: Jihwan Park, Tel: +82-44-415-7013, E-mail: jhjeeh@kei.re.kr

© Copyright 2024 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

fiber)로 이루어진다. 글라스울/실리카 기반의 심재는 매우 낮은 열전도성(conductivity)을 가지므로 열 차단 효과를 극대화할 수 있으며 안정적인 성능을 유지할 수 있다. 유리섬유의 경우에는 글라스울/실리카에 비해 상대적으로 우수한 강도와 내구성 확보할 수 있으며, 저렴한 비용이 장점이다. 흡착제는 진공단열재 성능과 수명을 유지하기 위해 중요한 역할을 하는데, 진공단열재 내부에서 발생할 수 있는 기체나 수분을 흡수하여 진공 상태를 안정적으로 유지하는 역할을 한다. 흡착제 주요 성분은 질산칼슘($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), 바륨(Ba), 리튬(Li)으로써, 가스/수분을 효과적으로 흡수하는 능력을 갖는다. 보호 레이어는 진공단열재 외부에 덮어 내부 진공 상태를 유지하고 물리적 손상으로부터 보호하는 역할을 한다. 주요 성분은 알루미늄(Al) 계열의 호일(Foil)을 이용하며, 알루미늄이 제공하는 높은 기밀성을 바탕으로 기체와 수분의 침투를 효과적으로 방지하는 역할을 한다(Fig. 1)[3].

진공단열재 시장 규모는 최근 몇 년간 크게 성장한 것으로 보고된다. 글로벌 시장 규모에서 살펴보면, 2023년 93억 7,000만 달러에서 2024년 101억 3,000만 달러로 연평균 성장률(CAGR)은 약 8.2%로 성장할 전망으로 보고된다. 아시아 규모로 살펴보면, 2023년 약 8.4억 달러 규모로 추정되며, 한국의 시장 규모는 187백만(약 2,600억 원 규모) 달러로 추정되며, 2024년부터 2031년까지의 연평균 성장률(CAGR)은 7.1%로 전망되고 있다[4]. 이러한 진공단열재는 주로 건축, 냉장 및 냉동 기기, 물류 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.

한편, 국내 폐전기·전자제품 회수 및 재활용 의무를 이행하고 있는 생산자책임기부금(이순환거버넌스)의 통계자료에 따르면, 2021년 폐냉장고 회수·재활용량은 약 187,177톤, 2022년에는 183,887톤으로써 연간 약 18만 톤 이상 재활용 실적을 달성하고 있다[5].

본 연구에서는 진공단열재 활용분야로서 전기·전자제품 부문의 폐냉장고(제품)를 중심으로 연구를 수행하였다. 진공단열재는 냉장고의 가장 보편화된 단열재인 폴리우레탄 대비 에너지 효율이 최고 30% 이상 효과가 있으며, 냉장고 내부의 용

적률을 20% 이상 증대하는 효과를 기대할 수 있으므로 800리터 이상의 대형냉장고에 주로 적용되고 있다. 일본은 2003년부터 진공단열재를 개발, 적용하기 시작하였으며, 국내의 경우 2010년 이후 출시된 냉장고에 본격적으로 적용하기 시작하였다. 냉장고 제조사마다 다르나, 진공단열재는 일반적으로 냉장고 좌·우 측면과 후면에 주로 사용하고 있으며, 일부 제품의 경우 냉장고 본체 상·하판 및 도어부(door) 내 적용하는 사례도 점차 증가하는 것으로 알려져 있다[2,3].

이처럼, 냉장고 사용 단계에서는 높은 단열효과와 에너지 고효율화를 목적으로 진공단열재의 장점이 부각되고 있으나, 사용이 종료된 폐기 단계에서의 진공단열재는 적정 처리에 관해 많은 어려움을 겪고 있다. 진공단열재가 포함된 폐냉장고를 물리적으로 파쇄(shredding)할 경우, 심재의 주요 구성성분인 유리섬유(glass fiber) 또는 글라스울(glass wool)이 백필터를 통해 집진되면서 누적된 유리섬유/글라스울로 인해 배관의 막힘/적체 현상이 발생하거나, 산화된 칼슘이 고착화되어 집진 배관의 효율성을 떨어뜨리는 현상이 발생한다. 또한, 흡착제는 기체 및 수분 흡착을 위해 반응성이 큰 바륨(Ba)과 리튬(Li) 합금을 주로 사용하는데 이러한 물질은 물리적 충격 반응성이 커서 파쇄과정 중 잠재적 화재 및 폭발 가능성을 내포한다. 게다가, 심재의 유리섬유 분진으로 인해 비산먼지 등 작업장의 실내 공기질이 악화되는 등 인체 건강에 위해를 가할 수 있다[6].

이러한 문제점으로 인해, 진공단열재가 내장된 냉장고에 대한 물리적 재활용 공정의 개발이 필요하며, 그 과정에서 화재/폭발의 안전성과 인체 유해한 요소들에서 벗어날 수 있는 공정/기술 개발의 필요성이 시급하다. 관련 연구에 따르면, 물리적 파쇄가 아닌 수작업(dismantle manually)을 통해 폐냉장고 내 진공단열재를 직접 회수할 경우 냉장고 측부 단일면(1면) 제거 시 약 2분 40초, 양측면 및 후면(3면) 제거 시 약 11분 48초가 소요되는 것으로 조사되었다. 다시 말해서, 수작업(manual dismantle) 방식 기준으로 폐냉장고 5대/시간 정도의 처리(recycling capacity)가 가능하다[7,8].

본 연구에서는 폐냉장고에서 진공단열재를 손상없이 회수하고, 진공단열재를 재제조할 수 있는 방안에 대해 고찰하였으며, 재제조를 통해 생산한 진공단열재의 환경성 효과를 탄소발자국 중심으로 분석하였다. 먼저, 재제조 방안에 대한 사례연구 부분에서는 폐냉장고에서 진공단열재를 회수할 경우, 진공단열재 내 심재의 재사용을 위한 최적 공정과 적용 가능한 산업 부문에 적용 가능성을 검토하였다. 환경성 연구 부분에서는 재제조된 진공단열재를 사용함으로써 기대되는 잠재적 온실가스 감축효과(avoided emission)에 전과정평가 기법을 활용하여 분석하였다.

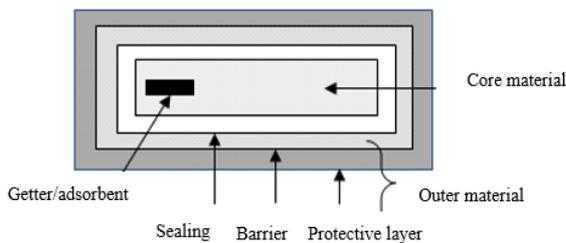


Fig. 1. Structure of the VIP.

2. 진공단열재 재제조 방안

2.1. 진공단열재 재제조 시나리오

2.1.1. 원료물질 획득

본 연구 수행을 위하여 진공단열재 재제조 시나리오를 설정하였다. 시나리오는 ‘원료물질 획득’, ‘재제조/제품생산’, ‘품질검사’ 등 3단계로 구분하였다. 원료물질 취득 단계는 진공단열재가 내장된 폐냉장고로부터 진공단열재를 회수하는 단계로 정의하였다. 구체적으로 단계는 ① 폐냉장고 측/후면에 진공단열재 내장 여부 확인, ② 진공단열재가 내장된 냉장고 외판(outer plate)의 절단(cutting) 및 분리(detaching), ③ 냉장고 외판과 접착된 진공단열재 외피재의 분리(separation) 단계로 구분하였다. 단, 진공단열재 내 외피재는 재제조 공정에 재사용하지 않았다(Fig. 2)[8].

2.1.2. 재제조/제품생산

본 연구 수행을 위하여 국내 진공단열재 제조기업의 도움을 받아, 원료물질(폐냉장고 진공단열재)을 이용하여 재제조 시나리오를 개발하였다. 재제조 제작공정은 단계는 ① 원료물질(회수된 진공단열재) 선별(육안검사 및 심재종류별 구분), ② 원료물질 재단(사용 목적에 맞는 규격으로 심재(Core material) 재단), ③ 심재 건조 및 외피재 포장, ④ 진공 및 봉합, ⑤ 에이징(숙성), ⑥ 테스트/검사로 정의하였다.

재제조 제품 생산단계에서의 핵심공정은 ③-④단계로써 회수한 진공단열재 원료물질로부터 심재를 열풍건조(160℃ 수준)시킨 후, 수분 및 가스를 증발시키고 새로운 흡착제와 함께 외피재를 이용하여 다시 심재를 진공/포장시키는 공정이다(Fig. 3)[7,8].



Fig. 2. Steps for obtaining reusable VIPs from end-of-life refrigerator.



Fig. 3. Reusable VIPs cutting, core material drying (160℃), aging/maturation, vacuuming and sealing (from the upper left, clockwise).

2.1.3. 품질검사

테스트/검사 공정(⑥단계)에서는 열전도율을 측정하여 진공단열재 신제품과 유사한 수준의 열전도율을 확보하였는지 여부를 판단한다. 진공단열재 산업계에서 주로 인정하는 우수한 진공단열재 신제품 수준은 열전도율 0.002 W/m · K 이하이며, 본 연구에서는 재제조 제품 수준에서 열전도율 0.003 W/m · K 이하일 경우 사용이 가능하다고 판단하였다[9].

본 연구를 통해 제작한 (진공단열재)재제조 제품의 열전도율 측정검사 결과 총 3개의 샘플에서 각각 0.0018, 0.0019, 0.0020 W/m · K로 측정되었다.

2.2. 재제조 제품 활용성

2.2.1. 건축

본 연구를 통해 생산된 재제조 진공단열재의 열전도율은 신제품과 유사한 0.002 W/m · K 이하 또는 그와 동등한 수준을 나타내었다. 즉, 간이식 건축물 등에 단열재 원료로 활용될 수 있을 것으로 판단하였다. 다만, 국내에서 재제조된 진공단열재를 이용하여 건축분야에 적용한 실제 사례연구는 찾아보기 어렵다. 그러므로, 가설건축물 내 재제조 진공단열재를 활용하고, 단열효과를 측정/검증하는 연구가 후속적으로 이루어져야 할 것이다.

진공단열재 심재(core material)의 활용성 마련 측면에서, 심재와 우레탄을 함께 발포함으로써 단열재로 활용될 수 있는 방안을 모색하였다. 일명 ‘뽀칠’이라 불리는 작업으로 우레탄과 심재(유리섬유/글라스울)를 함께 발포하는 실험도 실시하였다. 그 결과, 폴리우레탄 내 존재하는 수분이 글라스울/유리섬유와 얽히면서 부피가 축소(수축)되고, 최종적으로 경화되어 우레탄과 진공단열재 심재는 혼합적으로 사용이 어려운 것으로 판단되었다(Fig. 4).



Fig. 4. Test results for utilizing urethane and glass wool as external-wall finishing materials (hardening phenomenon observed).

2.2.2. 콜드체인

앞서 언급한 바와 같이, 재제조 진공단열재의 활용성 측면은 건축 분야뿐만 아니라 콜드체인(아이스박스, 보냉박스 등) 분야의 활용성도 검토되어야 한다. 본 연구를 통해 제작한 제품을 이용하여 보냉박스를 자체 제작(시제품)하였고, 일반 시중에서 판매하는 보냉박스(시중품)를 구매하여 보냉효과를 비교·분석하였다.

시중에서 판매 중인 보냉박스와 자체 제작한 보냉박스에 동일 중량(20 kg)의 드라이아이스를 채워 최초 열화상카메라(FLIR社, FLIR C3)를 이용하여 온도측정을 실시하였다. 최초 측정 온도는 각각 -15°C (시제품), -11°C (시중품)를 나타내었다. 위 조건에서 24시간마다 온도를 측정하였다. 최종적으로 120시간 이후 각각의 보냉박스 온도를 측정한 결과, -0.3°C (시제품), 18.1°C (시중품)로 각각 측정되었다. 24시간 이후 시중품 보냉박스의 온도가 상온으로 올라간(18.1°C) 반면, 자체 제작

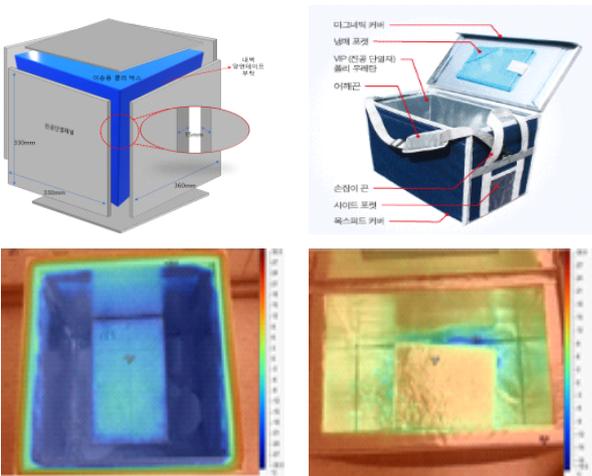


Fig. 5. Cooling box product and temperature measurement results (left: prototype, right: commercial product).

한 보냉박스(-0.3°C)는 여전히 냉동효과가 유지되는 것으로 관찰되었다(Fig. 5). 위 실험을 토대로, 재제조 진공단열재의 단열효과 및 지속성은 시중품과 비교하더라도 품질적으로 우수하며 시장경쟁력을 갖출 수 있는 것으로 판단하였다[10].

3. 재제조 진공단열재의 환경성

3.1. 환경성분석 범위 정의

3.1.1. 목적 및 기능단위

환경성 분석의 목적은 폐냉장고에서 회수한 진공단열재를 이용하여 재제조 제품으로의 생산이 가능하므로, 잠재적인 진공단열재 재사용 시장 규모를 고려하여 환경적 영향을 정량적으로 분석·추정하는 데 있다. 전과정평가(LCA) 기법을 활용하여 환경성을 분석하는 과정에서 국제표준문서(ISO 14040:2006, 14044:2006)를 참고하여 용어와 방법론을 선정하였다[11,12].

본 연구에서는 전과정평가를 통해 재제조에서 비롯된 자원의 절약과 이로 인한 대체효과를 분석하였다. 이를 위해, 유럽 공동연구센터(JRC, Joint Research Centre)에서 발표한 순환 발자국공식(CFF, Circular Footprint Formula) 및 PEF (product environmental footprint) 방법론을 적용하였다. 상기 방법론 내 재사용 또는 재활용 부분의 물질회수 공식을 차용하였으며, 다만 재생원료의 품질에 대한 계수 보정은 적용하지 않았다[13].

재제조 진공단열재의 환경성분석을 위해 분석 범위 및 기능/기능단위(Functional unit)에 대한 설정을 수행하였다. 진공단열재가 내장된 폐냉장고로부터 진공단열재를 회수를 실시하였다. 재활용센터에 입고된 750리터 이상급 양문형 냉장고를 대상으로 진공단열재 내장(사용) 유/무를 먼저 판단하고, 진공단열재가 내장된 경우 외판 절단을 통해 진공단열재를 회수하였다. 그 결과, 냉장고 1대당 실제 회수된 진공단열재 중량은 약 2.105 kg로 조사되었다. 이때 회수한 진공단열재는 냉장고(1대) 양측면 및 후면(총 3면)에서 회수한 중량을 합산하였다[2,8].

진공단열재 구성물질은 선행연구를 참고하여 Table 1에 정리하였다[2]. 본 연구에서는 7개의 주요물질 또는 산화물로 구성된 것으로 설정하였으며, 각각의 원료물질 및 비율을 산정하였다. 본 환경성 연구에서의 기준흐름은 폐냉장고 수집·재활용을 통해 원료물질(진공단열재)의 회수와 재제조를 통한 진공단열재 생산에 해당한다. 기능단위는 재제조 진공단열재 1kg으로 설정하였다(Table 1).

Table 1. Components and weights in the vacuum insulation panel (VIP) (1 kg)

Material	Proportion (wt.%)	Weight (kg)	Function
Al	2.0	0.0200	Outer material
SiO ₂	55.2	0.5520	Core material
Ca(NO ₃) ₂	23.0	0.2300	
Na ₂ O	13.8	0.1380	
Ca	5.88	0.0588	
Li	0.06	0.0006	Getter/adsorbent
Ba	0.06	0.0006	
SUM	100.0	1.0000	-

3.1.2. 분석 시나리오 및 가정

국내 전기·전자제품 생산자책임기구(이순환커버넌스)의 통계자료 및 연구 보고서에 근거하여 진공단열재가 내장된 폐냉장고의 국내 총 예상 발생량은 2023년 기준으로 약 203,242대 수준(구간)으로 추정되었다[5]. 다만, 실제로 진공단열재가 내장된 폐냉장고가 수집·재활용되었는지 사실 여부를 판단하기 어려우므로, 국내 각 재활용센터에서 재활용이 이루어졌을 것이라고 가정하였다.

국내에서 폐냉장고를 재활용하는 재활용센터는 총 13개 사업장이 존재하고, 203,242대 냉장고를 균등하게 나누어 처리할 경우, 연간 약 15,600대를 재활용하는 것으로 가정하였다. 즉, 재활용센터 1개 지점에서 연간 약 15,600대의 진공단열재 냉장고를 재활용한다고 가정하고, 재제조 목적으로 회수 가능한 진공단열재를 약 32,838 kg으로 추정하였다(Table 2).

전술한 바와 같이, 진공단열재 재제조를 위해서는 원료물질

인 진공단열재를 폐냉장고로부터 회수하는 것이 필수적이다. 전과정평가를 통한 환경성 분석 단계에서도 재활용센터 내부에서 운용 중인 가열·분리장치의 작동 시나리오를 재제조 범위에 포함하였다.

운송의 경우, 재활용센터를 기준으로 진공단열재의 in(입고)/out(출고) 시나리오를 마련하였다. 운반 중량(32,838 kg)을 고려하여 편도 100 km, 11 t 트럭) 6회(왕복 3회)로 설정하였으며, 계산의 용이성을 위하여 진공단열재 운반 중량(ton)과 운송거리(km)를 곱하여 ‘ton×km’ 단위로 작성한 후, 운송 LCI DB를 활용하여 계산하였다.

전과정 관점에서 본 연구대상에서 포함된 범위 Flow chart는 Fig. 6에 자세히 기술하였다. 원료 채굴/가공 단계는 1차데이터는 존재하지 않으므로 2차데이터(LCI DB)를 활용하였으며, 재제조를 통한 진공단열재 재사용 시나리오에 따른 잠재 감축량을 산정하는 데 활용하였다. 온실가스 배출량 산정을 위해 운송(2차데이터) 및 재제조(1차데이터) 단계를 연구범위

Table 2. Information for weight of target materials and scenario conditions for LCA

Material	Weight (kg)	Scenario/condition
Al	656.8	
SiO ₂	18,126.6	
Ca(NO ₃) ₂	7,552.7	- Number of collected EoL refrigerators in Korea: 203,242 units/year
Na ₂ O	4,531.6	
Ca	1,930.9	- Processing capacity of one recycling center: 15,600 units/year
Li	19.7	- Recoverable vacuum insulation panels (VIPs): 32,838 kg/year
Ba	19.7	
SUM	32,838	

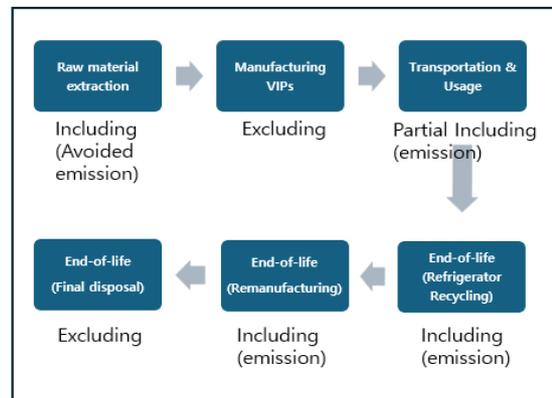


Fig. 6. LCA Flow chart in this study.

에 포함시켰다. 이를 토대로, 실제 자료 수집이 가능한 재제조 진공단열재의 생산 과정에서의 투입물과 산출물 계산 및 시물레이션을 수행하였다. 다만, 한계점으로는 진공단열재 전문 제조업체에서 운영하는 ‘열풍/건조공정’ 설비의 정확한 전력 사용 정보가 부족하여 본 연구에서 배제하였다.

3.1.3. Gate-to-Gate 데이터

본 연구에서의 투입물(input)은 원료인 진공단열재를 비롯하여 전력, 경유, 등유, 상수, 유기물/폐기물 운송(7.5-11.6 t 기준)으로 계산하였으며, 배출물(output)은 재제조 원료물질리튬, 바륨, 산화나트륨, 알루미늄, 이산화규소, 질산칼슘, 칼슘으로 설정하였다. 마찬가지로 연소에 따른 대기배출물(output)인 carbon dioxide (fossil), carbon monoxide(fossil), dinitrogen monoxide, methane(fossil), nitrogen oxides, NMVOC에 대한 데이터를 산정하였다(Table 3).

Table 3. Gate-to-Gate data information

Category	Name	Functional unit	Unit
In	Vacuum insulation panel	1.00E+00	kg
In	Diesel	6.09E-03	kg
In	Tap water	7.61E-06	kg
In	Transportation (inbound)	2.00E-01	ton×km
In	Electricity	2.10E-01	kWh
In	Transportation (outbound)	2.00E-01	ton×km
In	Kerosene	1.90E-03	kg
Out	Carbon dioxide (fossil)	2.04E-02	kg
Out	Carbon monoxide (fossil)	2.78E-06	kg
Out	Dinitrogen monoxide	1.60E-07	kg
Out	Methane (fossil)	6.65E-06	kg
Out	Nitrogen oxides	1.42E-06	kg
Out	NMVOC	5.59E-05	kg
Out	Li	6.00E-04	kg
Out	Ba	6.00E-04	kg
Out	Na ₂ O	1.38E-01	kg
Out	Al	2.00E-02	kg
Out	SiO ₂	5.52E-01	kg
Out	Ca(NO ₃) ₂	2.30E-01	kg
Out	Ca	5.88E-02	kg

대기배출물 정보는 실제 진공단열재 처리량과경유(0.825 kg/L), 등유(0.797 kg/L) 등 화석연료량과 에너지 밀도를 고려하여 적용하였다[14].

3.2. 분석 및 결과

3.2.1. 전과정 목록분석

환경성 분석에 활용된 전과정평가(LCA) 분석 프로그램은 OpenLCA Ver 1.11.0(GreenDelta 제공)를 활용하였다(Table 4)[15].

전과정목록분석(life cycle inventory analysis) 단계에서는 본 연구에 필요한 지역적/시간적/기술적 유효성을 확보할 수 있는 Life cycle index(LCI) DB를 분석하였다. 본 연구에서는 Ecoinvent Ver 3.8을 활용하였으며, 에너지, 용수, 그리고 재제조 공정에 필요한 부문으로 나누어 전과정목록분석을 실시하였다(Table 5).

전기(electricity)의 경우, 지역적 조건을 충족할 수 있도록 한국 사례를 토대로 개발된 DB를 사용하였으나, 그 외 목록들은 국내 LCI DB 부재 및 기술적/시간적 한계점을 극복하기 위함을 목적으로 지역적 허용범위가 넓은 데이터베이스(row/GLO)를 활용하였다.

3.2.2. 탄소감축 잠재량

본 연구에서는 국내 재활용센터 1개 지점을 기준으로, 진공 단열재가 내장된 폐냉장고를 연간 15,600대 처리했을 때 회수 가능한 진공단열재를 약 32,838 kg으로 추정하였다. 이에 앞

Table 4. Overview of LCA analysis in this study

Category	Contents
Contribution analysis	-
Product system	Vacuum insulation panel
Reference process	Remanufacturing
Reference process location	Rest-of-world (RoW)
Product	VIP
Amount	32,838.0 kg
Impact method	IPCC 2007
Normalization & weighting	None
Allocation method	Defaults
Cutoff	None

Table 5. Life Cycle Inventory (LCI) analysis results (Ecoinvent 3.8)

Category	Region	LCI DB data name	GWP (kgCO ₂ -eq)
Electricity	KR	Electronic, low voltage [kWh] {KR} market for electricity, low voltage cut-off, S	0.69552
Diesel	RoW	Diesel [kg] RoW diesel production, petroleum refinery operation cut-off, S	0.44540
Kerosene	RoW	Kerosene [kg] RoW kerosene production, petroleum refinery operation cut-off, S	0.44582
Tap Water	RoW	Tap water[kg] {RoW} market for tap water cut-off, S	0.00102
Lithium (Li)	RoW	Lithium [kg] GLO lithium production, market. Transport included cut-off, S	77.96299
Barium (Ba)	RoW	Barium [kg] GLO barium oxide production, market. Transport included cut-off, S	2.37528
Calcium (Ca)	RoW	Calcium [kg] GLO calcium carbide production, market. Transport included cut-off, S	4.52909
Aluminum (Al)	RoW	Aluminium, primary, ingot [kg] RoW aluminium production, primary, ingot cut-off, S	20.69420
Sodium oxide (Na ₂ O)	RoW	Sodium oxide [kg] GLO sodium oxide production, market. Transport included cut-off, S	3.55976
Calcium Nitrate (Ca(NO ₃) ₂)	RoW	Calcium nitrate [kg] GLO calcium nitrate production. Transport included cut-off, S	2.82334
Silicon dioxide (SiO ₂)	RoW	Silicon dioxide [kg] GLO silicon dioxide production, rough estimation. Transport included cut-off, S	1.96539
Transportation	Row	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 [1.00 t×km]	0.22236

서, 기능단위 수준에서 온실가스 배출량과 대체효과에 따른 잠재적 감축효과를 살펴보았다.

기능단위에서 계산한 결과, 신재 대체효과가 없는 기본 (baseline) 시나리오에서 3.21E+00 kg CO₂-eq, 신재 대체효과 시나리오에서는 -2.87E+00 kg CO₂-eq로 산출되었다. 위 결과를 활용하여 국내 단일 재활용센터의 연간 재제조량 (32,838 kg)을 적용하여 재활용센터 사업장 단위로 분석을 수행하였다.

그 결과, 재활용센터의 연간 온실가스 배출량과 신재 대체 효과는 각각 1.06E+05 kg CO₂-eq와 -9.43E+04 kg CO₂-eq로 산출되었다(Table 6).

진공단열재 재제조를 위한 기능단위 기반으로 탄소배출량을 분석한 결과, 투입물(input) 요소 중 탄소배출이 가장 큰 물질은 전력(1.46E-01 kg CO₂-eq), 운송(4.45E-02 kg CO₂-eq), 경유(2.71E-03 kg CO₂-eq), 등유(8.49E-04 kg CO₂-eq), 상수(7.80E-09 kg CO₂-eq) 사용 순이었다.

반면, 배출물/생성물에서 신재 생산을 대체하여 탄소배출 감축효과가 가장 큰 물질은 이산화규소(-1.08E+00 kg CO₂-eq), 질산칼슘(-6.49E-01 kg CO₂-eq), 산화나트륨(-4.91E-01 kg CO₂-eq), 알루미늄(-3.31E-01 kg CO₂-eq), 칼슘(-2.66E-01 kg CO₂-eq), 리튬(-4.68E-02 kg CO₂-eq), 바륨(-1.43E-03 kg

Table 6. Results of carbon emissions and avoided emission for key inputs and outputs

Category	Emission	Avoided emission
	(kg CO ₂ -eq/VIP kg)	
Diesel	2.71E-03	-
Tap water	7.80E-09	-
Transportation (inbound)	4.45E-02	-
Electricity	1.46E-01	-
Transportation (outbound)	4.45E-02	-
Kerosene	8.49E-04	-
Lithium (Li)	4.68E-02	-4.68E-02
Barium (Ba)	1.43E-03	-1.43E-03
Sodium Oxide (Na ₂ O)	4.91E-01	-4.91E-01
Aluminum (Al)	4.14E-01	-3.31E-01
Silicon Dioxide (SiO ₂)	1.08E+00	-1.08E+00
Calcium Nitrate (Ca(NO ₃) ₂)	6.49E-01	-6.49E-01
Calcium (Ca)	2.66E-01	-2.66E-01

Table 7. A result of sensitivity analysis for key inputs and outputs

Category	Sensitivity proportion (%)	Sensitivity rank
Silicon dioxide (SiO ₂)	33.95	1
Calcium nitrate (Ca(NO ₃) ₂)	20.35	2
Sodium oxide (Na ₂ O)	15.42	3
Aluminum (Al)	12.96	4
Calcium (Ca)	8.34	5
Electricity	4.57	6
Lithium (Li)	1.47	7
Transportation (inbound)	1.39	8
Transportation (outbound)	1.39	9
Diesel	0.08	10
Barium (Ba)	0.04	11
Kerosene	0.03	12
Tap water	0.00	13

CO₂-eq) 순이었다. 즉, 탄소 감축 잠재량에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 물질은 이산화규소(SiO₂)로써 -3.624E+04 kg CO₂-eq 인 것으로 분석되었다.

한편, 전체 탄소배출량을 기준으로 각 요소별 탄소 배출 기여도를 살펴보기 위해 민감도 분석을 실시한 결과, 탄소배출의 영향도가 가장 높은 물질은 이산화규소(33.95%)로 나타났으며, 질산칼슘(20.35%), 산화나트륨(15.42%), 알루미늄(12.96%), 칼슘(8.35%) 물질이 뒤를 이었다. 상위 5개 물질의 탄소 배출 누적 합계는 전체의 90%(91.02%) 이상을 차지하였으며, 위 결과를 통해 진공단열재에 사용되는 원료물질의 채굴/가공 및 생산단계에서 탄소배출이 다량 발생함을 유추할 수 있었다 (Table 7).

4. 결론

본 연구에서는 낮은 열전도율과 단열효과로 다양한 산업 분야에서 각광받는 소재인 진공단열재의 자원순환 방안을 고찰하였다. 특히 사용이 종료된 냉장고에서 회수한 진공단열재를 재제조하기 위한 공정 프로세스를 실제 기업 사례를 통해 파악하였고, 진공단열재 배출량 통계에 근거하여 국내 재활용 센터에서 1년간 진공단열재 및 재제를 통해 기여할 수 있는 탄소 감축 잠재량을 분석하였다. 본 연구의 결과 요약은 다음

과 같다.

첫째, 폐냉장고로부터 회수한 진공단열재는 심재(core material)의 재단, (열풍)건조, 진공 포장, 에이징(숙성) 등의 공정을 거쳐 재사용이 가능한 진공단열재를 재제조할 수 있었으며, 열전도율 측면에서도 신제품과 유사한 수준인 0.002 W/m·K 수준을 확보할 수 있었다.

둘째, 재제조된 진공단열재를 이용하여 콜드체인 제품인 보냉상자의 시제품으로 제작한 결과 시중에서 판매하는 일반 아이스박스보다 단열효과의 우수성과 시간적 지속성이 더 우수한 것으로 판단되었다. 다만, 건축용 단열재로의 활용성을 담보하기 위해서는 실제 유사 시공 사례연구에 참여하여 객관적인 단열효과 우수성 자료를 확보할 필요가 있다.

셋째, 2023년 국내 진공단열재 냉장고의 발생량 추정값을 203,242대로 가정하고, 이를 국내 재활용센터 13개 지점에서 각각 나누어 처리(15,600대/센터)한다는 가정으로 환경성 분석을 실시하였다. 결과적으로 연간 약 32,838 kg의 진공단열재를 단일 재활용센터에서 회수할 수 있었으며, 궁극적으로 재제조를 통해 연간 약 -94,282 kg CO₂-eq의 잠재적인 탄소 감축효과를 발생시킬 수 있는 것으로 추정하였다.

넷째, 전과정평가 시스템경계 설정 부분에서 진공단열재 제조 공정 중 열풍-건조 설비에 대한 정확한 전기용량을 포함하지 못했다는 한계점이 존재한다. 또한, 재제조 시나리오에 따른 회피효과 중심으로의 분석 위주로 연구가 수행된 점도 한계점으로 볼 수 있다. 향후 연구에서는 미흡한 데이터의 확보 및 정확한 할당(allocation)을 통해 결과를 신뢰성을 확보할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

This work was supported by the Korea Environment Industry & Technology Institute (KEITI) through the R&D project on the recyclability of non-recyclable products, funded by the Korean Ministry of Environment (MoE) (2020003090001). Additionally, this paper was partly supported the research work “BA2024-01”, funded by the Korea Environment Institute (KEI).

References

1. The Business Research Company. Vacuum insulation global market report 2024. The Business Research Company: London (2024).
2. Park, J., Ko, K.T., Kim, S.D., Lee, M.Y., Hwang, A.,

- Kim, K. Development of a vacuum insulation panel detection system for end-of-life refrigerators in Korea: a practical approach. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 26(3), pp. 1713-1726 (2024).
3. Tao, W.H., Sung, W.F., Lin, J.Y. Development of vacuum insulation panel systems. *Journal of Cellular Plastics* 33(6), pp. 545-556 (1997).
 4. Phagare, M. Asia pacific vacuum insulation panel market report 2024. *Cognitive Market Research* 1, pp. 1-200 (2024).
 5. E-cycle Governance. Statistical data on target management system (Internal report, unpublished).
 6. Park, J., Yoon, S., Jang, C., Choi, J., Yoo, J., Lee, C. Development of integrated recycling system for securing recyclable availability of vacuum insulation panel (VIP) from the refrigerator. *Proceedings, 2024 Domestic Conference*, 199, Sports park-gil, Daegwallyeong-myeon, Pyeongchang, Korea, 11-12 November 2020, p. 17 (2020).
 7. Park, J., Kim, Y., Kim, S. A study on the detecting technology for vacuum insulation panel (VIPs) in End-of-life refrigerator. *Proceedings, 2024 Domestic Conference*, 38, Sinhwayeoksa-ro 304beon-gil, Andeok-myeon, Seogwipo-si, Jeju, Korea, 3-5 November 2021, p. 371 (2021).
 8. Metropolitan Electronics Recycling Center. Development of integrated recycling system for securing recyclable availability of vacuum insulation panel (VIP) from the refrigerator—Final R&D Report (2023).
 9. International Standard Organization (ISO). ISO/DIS 16478:2023 Thermal insulation products — Vacuum insulation panels (VIPs) — Specification (2023).
 10. Korea Electronics Recycling Cooperative. A study on the recycling of vacuum insulation panels in end-of-life refrigerators (2019).
 11. International Standard Organization (ISO). ISO 14040: 2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (2006).
 12. International Standard Organization (ISO). ISO 14044: 2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (2006).
 13. EU Joint Research Centre (JRC). Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC115959> (accessed 27 September 2024).
 14. Korea Law Information Center. Environmental Product Declaration (EPD) Target Products and Preparation Guidelines. <https://law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulId=26196&efYd=0> (accessed 27 September 2024).
 15. OpenLCA. <https://www.openlca.org/greendelta/> (accessed 27 September 2024).

