



전기자동차 인버터 부품 개발 단계에서 방열판의 소재변경에 따른 탄소배출량 예측 방법론 연구

장명진^a, 유경선^a, 문덕영^{b,*}, 민경택^{a,c,*}

A Study on Methodology for Predicting Carbon Emissions Caused by Material Changes in Heat Sinks During the Development of Electric Vehicle Inverter Components

Myungjin Jang^a, Kyung-Sun Yoo^a, Duk-Young Moon^{b,*}, Kyungtaek Min^{a,c,*}

^a Department of Nano and Semiconductor Engineering, Tech University of Korea

^b Industrial Transformation Solution Support Center, Tech University of Korea

^c Department of Carbon-Neutral AI Convergence Engineering, Tech University of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 October 2024
Revised 6 November 2024
Accepted 22 November 2024

Keywords:

CBAM
Global warming
Green house gas
Carbon neutrality
Carbon emissions analysis

ABSTRACT

This study aimed to develop an effective carbon management strategy by comparing aluminum and copper as heat sink materials in the production of inverter modules for electric vehicles. Power consumption data for both materials were collected throughout the production process, and emissions were calculated using the rated power and processing time per unit. The analysis revealed that aluminum emits 0.00593 tCO₂e, while copper emits 0.01164 tCO₂e, resulting in a 51% reduction with aluminum. This result supports the use of aluminum as a sustainable material. Using this approach, manufacturers can optimize material selection and processes from the early stages, allowing for better emissions control throughout the product's lifecycle and contributing to sustainable manufacturing practices.

1. 서론

1.1 국제사회에서의 탄소중립

국제사회에서의 탄소중립(carbon neutrality)은 “기후변화”를 넘어 “기후위기”로 전환됨에 따라 심각한 이슈로 확대되고 있다^[1]. 환경 문제의 대응을 위해 2015년 파리기후변화협정이 채택되었으며, 산업화 이전 대비 글로벌 평균 온도 상승을 2°C 이하로 제한 및 가능하면 1.5°C로 더욱 제한하는 것을 목표로 하고 있다^[2,3]. 협정

에 따라 각 참여국은 자발적으로 국가별 결정 기여(nationally determined contributions 이하 NDCs)를 설정하고, 이를 5년마다 갱신하여 단계적으로 목표를 강화해 나가도록 요구하고 있어, 각국은 탄소중립을 달성하기 위해 다양한 정책과 법안을 마련하여 대비하고 있다^[3]. 최근 개최된 유엔기후변화협약(UNFCCC) 당사국총회(COP26)에서는 65개국이 석탄 발전의 점진적 중단을 발표했으며, 미국이 주도하는 인도-태평양경제프레임워크(IPFE)에서는 12개국과 협력하여 친환경 경제를 핵심 정책 요소 중 하나로 채택하

* These authors contributed equally to this work.

^b Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-1784

E-mail address: mdy881203@tukorea.ac.kr (Duk-Young Moon)

^{a,c} Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-0719

E-mail address: k.min@tukorea.ac.kr (Kyungtaek Min)

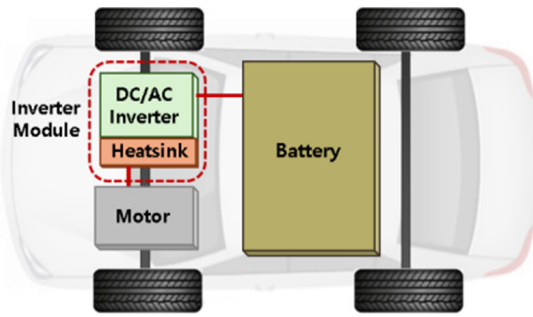


Fig. 1 Schematic diagram of electric vehicles

였다^{3,4)}. 이러한 정책은 기후변화 속도 저하를 위한 필수 정책이며, 국내 기업들에게도 중요한 과제로 부각되고 있다⁴⁾.

1.2 탄소중립과 친환경자동차

수송 분야에서는 배기가스 등 환경 규제에 대해 효과적으로 대응하기 위한 대안으로 전기자동차의 부품 개발이 적극 추진되고 있다⁵⁾. 전국 미세먼지 발생 물질은 지역에 따라 10%에서 30%가 내연기관 자동차에서 발생한다⁶⁾. 환경 규제를 위해 세계 주요국에서는 내연기관 자동차로 인한 극심한 대기오염, 온실가스 배출 문제를 해결하고 친환경자동차 시장 주도를 통한 내연기관 자동차 판매금지⁶⁾가 선언되었다. 국제에너지기구(international energy agency 이하 IEA)에서는 전세계 전기자동차는 2030년 1억 4500만대 보급을 전망했으며⁷⁾, 국내 환경부에서는 온실가스감축목표에 따라 2030년까지 전기차 420만대 보급을 예상하고 있다^{8,9)}.

1.3 전기자동차용 인버터 방열모듈 개요

파워트레인(power train)은 차량에서 연료의 화학 에너지를 기계적 에너지로 변환하여 자동차의 이동을 제어하는 시스템이다. 전기자동차에서 파워트레인의 핵심 부품에는 배터리, 인버터 그리고 모터가 있으며¹⁰⁾, Fig. 1은 앞서 언급한 전기자동차의 핵심 부품의 개략도를 나타낸다. 핵심 부품 중 인버터는 전기차의 배터리로부터 발생한 직류전력(DC)을 교류전력(AC)으로 변환하여 모터에 공급하는 중요한 역할을 한다^{10,11)}. 인버터는 주행 시 모터의 속도 정밀 제어 및 회생제동 시 배터리 전력 변환 역할도 수행하므로 주행거리 향상과 모터 및 배터리 수명에도 큰 영향을 준다¹²⁾.

기술 발전에 따른 인버터의 성능 향상에 따라 발열량 또한 증가하고 있어, 이를 효과적으로 냉각하는 방열모듈의 설계와 재료의 선택이 중요한 이슈로 떠오르고 있다¹³⁾. 본 연구에서는 전기자동차 인버터 방열관 재료로 알루미늄과 구리를 적용해 탄소배출량을 정량적으로 도출함으로써, 각 재료가 환경적 측면에 미치는 영향을 비교하고자 한다.

2. 탄소배출량 산정 방법론

2.1 기존 방법론 현황

기업에서는 흔히 조직 혹은 제품 단위별 전과정평가(life cycle assessment, LCA)¹⁴⁾ 및 이를 기반으로 한 탄소발자국 산정(ISO14067)¹⁵⁾ 등의 방법론을 적용하여 온실가스 배출량을 산정하고 있다¹⁶⁾. 해당 방법론은 제품 완성 이후 기업의 지속가능경영 보고서 등의 참고자료로 사용되는 대표적인 분석자료이다¹⁷⁾. 전과정평가는 제품의 원료 채취부터 사용 후 폐기까지의 전과정을 분석하여 환경 영향을 평가하는 방법이며, 탄소발자국 산정은 조직 수준의 온실가스 배출량 산정 및 보고에 대한 표준방법론이다. 전과정평가 및 탄소발자국 산정 방법론은 완제품을 기준으로 부품별 원료 채취부터 제조, 유통, 사용과 폐기에서 전과정에 걸친 환경 영향을 분석하기에 정책 및 규제 대응에 필수적인 탄소발자국 보고서 작성 및 제출이 가능하다¹⁸⁾. 그러나 제품 제작 전과정 범위의 데이터 수집이 필요함에 따라, 완제품 제작 이전 특정 부품의 시제품을 제작하는 단계에서 탄소배출량을 신속하게 예측하기에는 많은 시간이 소요된다. 현실적으로 기업은 제품 양산 이전, 개발 초기 단계에서 부품의 원재료별 달라지는 탄소배출량을 신속하게 예측하여 비교가 가능한 방법론을 사용할 필요가 있다.

2.2 방법론 연구

본 논문에서는 탄소국경조정제도(carbon border adjustment mechanism 이하 CBAM) 방법론¹⁹⁾을 참고하여 탄소배출량을 산정하였다. CBAM이란 유럽연합(EU) 역내로 수입되는 상품에 대하여 EU 온실가스 배출권거래제(EU Emission trading system 이하 ETS) 대상 시설군에서 생산되는 상품에 대해 탄소 비용을 동등하게 부과하여, EU 내에서 생산된 제품과의 공정한 경쟁을 통해 탄소누출(carbon leakage) 문제를 해결하고자 마련된 방법론이다^{19,20)}. 2024년 12월 31일까지인 CBAM 배출량 산정방법의 유예기간 동안에는 EU 방식과 범위 및 정확도가 유사한 국내 배출량 산정 방법론이 인정된다²⁰⁾. 따라서 해당 연구에서는 국내 배출량 산정 방법론인 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」(환경부고시 제2023-221호)의 배출활동별 온실가스 배출량 세부산정방법 및 기준을 참고하였다. 유예기간 이후에도 동일한 방법론에서 원료별로 EU 집행위원회에서 공표하는 기본값을 매개변수로 적용하여 탄소배출량을 산정할 수 있다.

온실가스 배출량 산정 과정에서는 산정 등급(tier system)이 적용되며, 매개 변수별 측정불확도에 따라 Tier 1에서 Tier 4로 구분된다. 이러한 매개 변수별 세부 기준은 각각의 등급은 각 공정에서 적용되는 측정 방법, 데이터 수집 방식, 계수의 정확도 등에 따라 달라진다. Tier 1은 전 세계 공통 IPCC 가이드라인에 따른 가장

기본적인 수준의 산정을 의미하며, Tier 2는 국가 고유 배출계수를 활용하여 산정하는 방법을 의미한다. Tier 3은 사업자가 사업장 및 감축기술단위의 배출계수 등 시험·분석을 통하여 개발하여 산정하며, Tier 4는 굴뚝자동측정기기 등 배출가스의 연속측정방법을 활용하여 산정하는 방법론이다^[21]. 산정 등급이 높을수록 더 정밀한 측정 데이터와 구체적인 매개 변수가 요구되며, 이는 각 제조 공정에서 발생하는 배출량을 보다 정확하게 산정하는 데 중요한 역할을 한다.

배출활동별 온실가스 배출량 등의 세부산정방법 및 기준에 의해 전력 사용으로 인해 발생하는 온실가스 배출 산정은 Tier 1과 Tier 2의 방법론을 활용하여 산정하도록 명시되어있다^[22].

온실가스 배출량 산정 방법은 수식 (1)과 같으며, 공정에서 사용한 전력 사용량(Q)과 Tier 산정 등급별 전력 배출계수(EF_j) 및 배출 보고대상 기체별 지구온난화지수(GWP_j) 값의 곱으로 산출된다. 국내 전력 소비 보고대상 온실가스에는 이산화탄소(CO₂), 아산화질소(N₂O), 메탄(CH₄) 등이 있으며, Tier 1등급은 IPCC 가이드라인에 따른 전 세계 기본 전력 배출계수를 곱하여 배출량을 산정할 수 있다^[22].

$$E_{tCO_2e} = Q \times EF_j \times GWP_j \quad (1)$$

E_{tCO_2e} : 전력사용에 따른 온실가스 배출량(tCO₂e/MWh)

Q : 전력 사용량(MWh)

EF_j : Tier 산정 등급별 기체 전력 배출계수(tGHG/MWh)

GWP_j : 기체별 지구온난화지수

본 논문에서는 국내 온실가스종합정보센터에서 전력 사용 보고 대상 필요 온실가스 국가 고유 전력배출계수가 제공되었기에 국가 고유 전력배출계수를 매개 변수로 활용한 Tier 2 산정 등급 방법론을 적용하였다. 이는 수식 (1)을 기반으로 전력 사용량(Q)과 온실가스 발생 기체별 국가 고유 전력배출계수 및 지구온난화지수 값의 곱으로 배출량을 산출할 수 있다. Table 1은 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 각각의 국가 고유 전력배출계수 값^[22]과 지구온난화지수 값이며^[23], 이를 바탕으로 수식 (1)의 계산을 통해 이산화탄소 환산 톤(tCO₂e)으로 변환하였다.

Fig. 2의 순서도와 같이 각 공정의 정격전력량과 사이클타임으

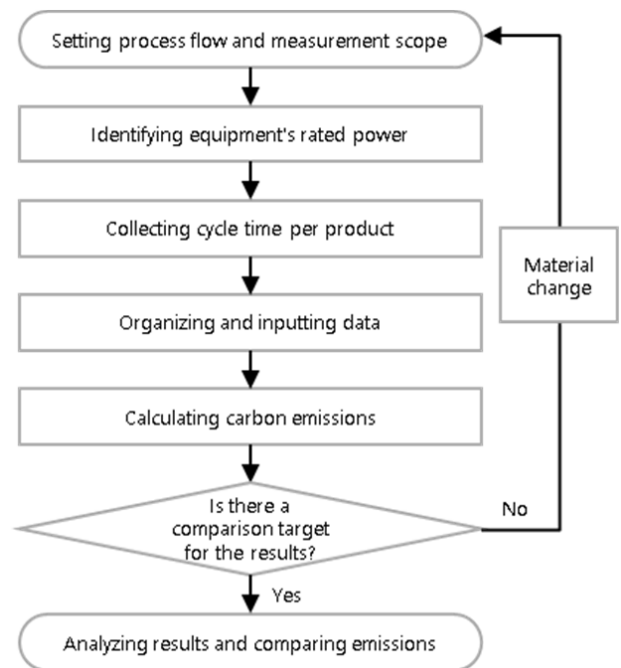


Fig. 2 Methodological sequence for calculating carbon emissions during prototype production

Table 2 Information about billet used heat sink

Ingredients	Size (mm)	Weight (g)	Density (g/cm ³)
Aluminum	10*44*200	235.84	2.65
Copper	10*44*200	788.48	8.96

로 전력사용량을 구한 후 기체별 전력배출계수 및 지구온난화지수 값을 활용하여 탄소배출량이 산정된다. 이후 재료의 변경을 통해 재료 변경 전 설비별 전력 배출량(baseline emissions, BE)과 재료 변경 후 설비별 전력 배출량(project emissions, PE)을 산출하여 재료별 배출량의 차이와 감축률을 산정하였다.

2.3 방열판 소재 선정

알루미늄은 상용 금속재료 중에서 은과 구리 다음으로 전기 및 열전도도가 우수하고 소재의 경량화에 적합한 장점을 가지므로 전기/전자 산업 등에서 널리 사용되고 있다^[24]. 경제성을 고려한다면 알루미늄에 비해 전도도가 우수한 금속재료는 구리가 유일하며^[24], 산업적 측면에서 경제성과 경량화 두 가지 모두를 고려해보았을 때 두 재료는 방열부품소재로 적합하다고 알려져있다. 이에 앞서 언급한 두 재료를 인버터 방열모듈의 방열판 재료로 선택했을 때 공정을 기반으로 탄소배출량을 예측하고, 이를 비교해보았다. Table 2는 D사의 자동차용 인버터 방열판에 사용된 원재료 정보이며, 동일한 크기의 빌렛에서 중량 235.84 g, 밀도 2.65 g/cm³의 알루미늄과 중량 788.48 g, 밀도 8.96 g/cm³의 구리를

Table 1 GWP and country-specific power emission factor (average from 2014 to 2016)

Classification	CO ₂ (tCO ₂ /MWh)	CH ₄ (kgCH ₄ /MWh)	N ₂ O (kgN ₂ O/MWh)
EF	0.4747	0.0125	0.0100
GWP	1	21	310

Table 3 Inverter heat sink module details

Part of module	Weight of Al material (g)	Weight of Cu material (g)
Housing	673.75	
Volt (M14)	28.22	
Self tapping insert (M14)	8.63	
Self tapping insert (M5)	20.84	
Self tapping inser t(M4)	16.42	
O ring (An109)	0.22	
Heat sink (Pin-Fin)	72.86	219.07
Total mass	820.95	967.16

사용하였다.

완성된 방열모듈 시제품의 총중량은 Table 3에 나타난 바와 같이 알루미늄 소재를 적용했을 때 820.95 g, 구리 소재를 적용했을 때 967.16 g으로 측정되었다. 다른 재료의 중량은 동일하며, 방열판에서의 재료 차이로 인해 알루미늄 재료에 비해 구리 재료를 적용했을 때 146.21 g 더 큰 중량을 가졌고, 총중량에서도 마찬가지로 같은 값만큼의 무게 차이가 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 D사의 인버터용 방열모듈 공정 순서도를 나타낸다. 제품 제작 순서는 방열판 가공, 표면처리, 사출 공정, 조립 및 검사 단계까지 진행되었고, 조립 및 검사를 마지막으로 공정 순서도는 크게 4단계 순서로 분류하였으며, 방열판 가공 단계 (A)에서 알루

미늄 재료를 적용한 방열모듈의 공정 시 빌렛 예열, 금형 예열의 공정이 생략됨을 알 수 있다. 그 이유는 알루미늄의 용점이 660°C 임에 반해, 구리의 용점은 1,084°C로^[25], 알루미늄보다 상대적으로 높은 용점을 가짐에 따라 구리 재료의 적용 시 방열판의 단조 및 가공을 위해서는 예열이 필수적으로 진행되어야 하기 때문이다.

3. 분석 결과

제품 공정 정보에 따라 데이터 수집은 설비분류, 공정, 제조모델에 따른 설비별 전력량, 공정시간 등의 정보를 취합하여 각 공정 정보를 기반으로 탄소배출량을 분석할 수 있도록 하였다. 동일한 공정이라도 재료의 특성에 따라 설비가 가동되는 시간이 다르기에 탄소배출량은 공정별 전력량과 가동 시간에 따라 달라질 수 있다. 정확한 사이클타임을 기록하는 작업이 중요하다고 판단하여 수집 자료의 신뢰성 확보를 위해 각 공정별로 설비 정보, 가동 시간을 매공정마다 수기로 기록하여 공정 순서도를 토대로 데이터를 확보하여 표로 나타내었다.

두 재료는 같은 공정 단계로 진행되는 한편, 공정 단계별 정격전력량의 차이가 발생한다. Table 4에서 보여지는 바와 같이 알루미늄 재료 사용 시 빌렛 예열 및 금형 예열 공정이 생략되는 것을 알 수 있다.

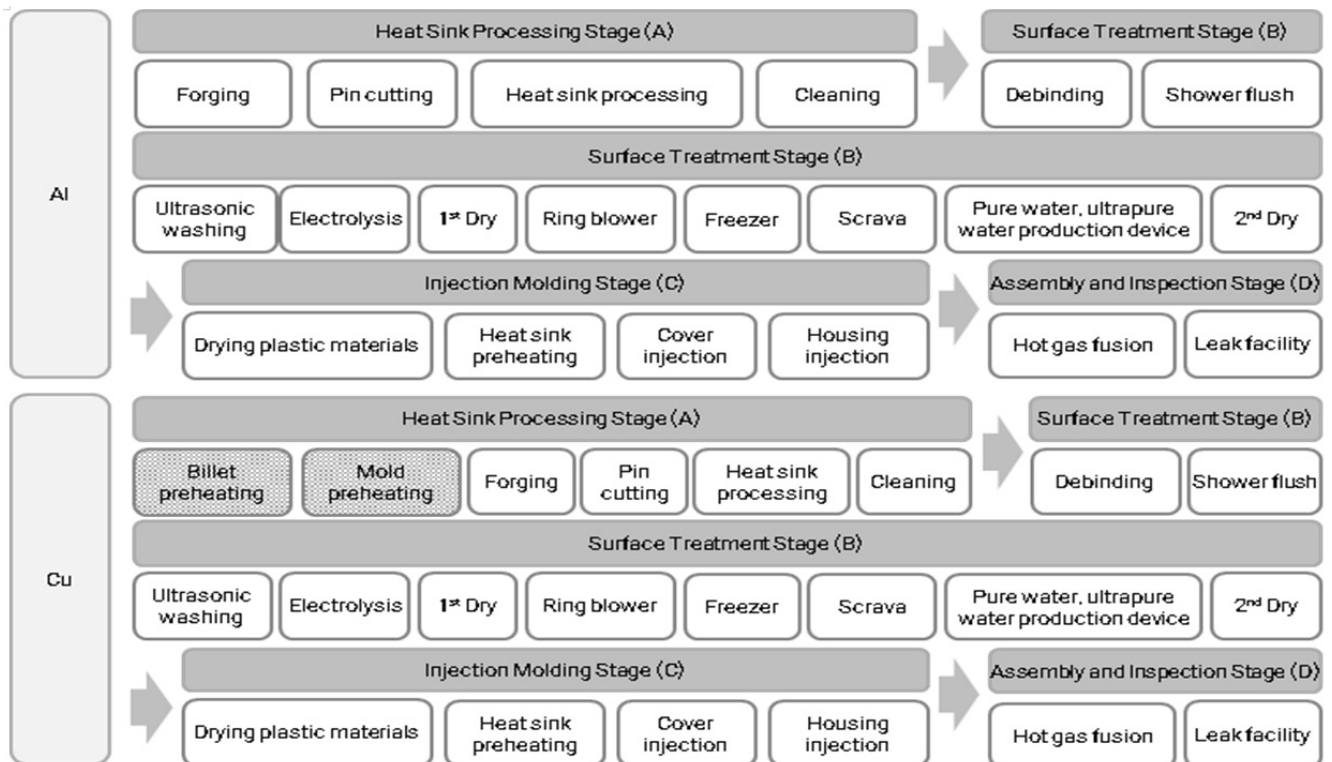


Fig. 3 Inverter heat sink process flow chart

Table 4 Rated power for each process facility

Process	Manufacturing process	Rated power for Al (kW)	Rated power for Cu (kW)
A	Billet preheating	-	18
	Mold preheating	-	51
	Forging	263.264	
	Pin cutting	18	
	Heat sink processing	16.11	
	Cleaning	80	
B	Debinding	2.25	
	Shower flush	0.53	
	Ultrasonic washing	27	
	Electrolysis	60	
	1 st Dry	0.68	
	Ring blower	15	
	Freezer	2.4	
	Scrava	87.5	
	Pure water, ultrapure water production device	11.7	
	2 nd Dry	2.8	
C	Drying plastic materials	8	
	Heat sink preheating	3	
	Cover injection	43	
	Housing injection	64	
D	Hot gas fusion	34	
	Leak facility	2	

Table 5 Production cycle time by material application

Process	Manufacturing process	Production cycle time for Al (s)	Production cycle time for Cu (s)
A	Billet preheating	-	54
	Mold preheating	-	54
	Forging	30	180
	Pin cutting	15	
	Heat sink processing	183	
	Cleaning	10	
B	Debinding	2640	
	Shower flush	1320	
	Ultrasonic washing	1320	
	Electrolysis	19800	
	1 st Dry	19800	
	Ring blower	28800	
	Freezer	3600	
	Scrava	28800	
	Pure water, ultrapure water production device	3600	
	2 nd Dry	28800	
C	Drying plastic materials	120	
	Heat sink preheating	50	40
	Cover injection	60	57
	Housing injection	85	
D	Hot gas fusion	46	
	Leak facility	190	

Table 5는 제품 1개당 생산을 진행할 때 공정별 수집한 사이클 타임 정보이다. 대분류 중 방열관 가공 단계 (A)에서 알루미늄은 빌렛 예열 및 금형 예열 공정이 생략되어 구리와와 공정 차이를 보인다. 마지막 단계인 조립 및 검사 단계 (D)에서 두 재료 모두 236초로 가장 낮은 공정시간을 기록했으며, 두 재료 모두 표면처리 단계 (B)에서 총 138,480초로 가장 높은 공정시간이 소요됨을 확인할 수 있었다. 단, 표면처리 단계 (B)에서는 200개의 제품이 동시에 진행되어 수집된 사이클타임 정보로, 최종 계산된 탄소배출량 데이터를 제품 1개 단위로 할당하여 계산하였다.

앞서 언급한 공정별 설비의 전력량과 수집된 제품 1개당 사이클 타임을 기반으로 Table 6에 나타낸 값과 같이 공정별 탄소배출량을 산출하였다. Fig. 4는 각 공정 단계에서 발생하는 탄소배출량의 비교를 나타낸 그래프로, 알루미늄 재료 사용 시 빌렛 예열과 금형 예열 공정이 생략된 방열관 가공 단계 (A)에서 특히 큰 배출량의 차이를 보였다.

한편, 사출 공정 단계 (C)에서는 방열관 예열, 커버사출 공정에서 알루미늄 재료가 구리 재료를 적용했을 때 보다 더 높은

탄소배출량이 산정되었는데, 이는 약 0.000127 tCO₂e 만큼의 차이로 전체 탄소배출량 차이에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 확인된다.

Table 7에서 보여지는 바와 같이 모든 공정의 탄소배출량을 합산한 결과, 알루미늄은 0.00593 tCO₂e, 구리는 0.01164 tCO₂e로, 알루미늄 재료의 적용 시 0.00571 tCO₂e 만큼의 탄소배출량이 감축되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 인버터 방열모듈 제조 과정에서 알루미늄과 구리의 공정 데이터를 수집하여 탄소배출량을 비교 분석하는 방법을 제시하였다. 방법론은 공정별로 설비의 전력량과 수집된 사이클타임 데이터를 기반으로, 국가전력배출계수를 이용한 탄소배출량을 이산화탄소 등가량(CO₂e)으로 통합하여 산출하였다.

알루미늄과 구리 재료는 모두 동일한 설비에서 진행되지만, 재료의 특성에 따라 생략되는 제조 공정 및 공정시간 등에서 차이가 받

Table 6 Production carbon emissions by material application

Process	Manufacturing process	Carbon emissions for Al(tCO ₂ e)	Carbon emissions for Cu(tCO ₂ e)
A	Billet preheating	-	0.000129
	Mold preheating	-	0.000366
	Forging	0.001049	0.006293
	Pin cutting	0.000036	
	Heat sink processing	0.000391	
	Cleaning	0.000106	
	B	Debinding	0.000004
Shower flush		0.0000005	
Ultrasonic washing		0.000024	
Electrolysis		0.000789	
1 st Dry		0.000009	
Ring blower		0.000287	
Freezer		0.000006	
Scrava		0.001673	
Pure water, ultrapure water production device		0.000028	
2 nd Dry		0.000054	
C		Drying plastic materials	0.000127
	Heat sink preheating	0.000002	0.000016
	Cover injection	0.000343	0.000325
	Housing injection	0.000722	
D	Hot gas fusion	0.000208	
	Leak facility	0.00005	

Table 7 Total carbon emissions by material application

Process	Total carbon emissions for Al (tCO ₂ e)	Total carbon emissions for Cu (tCO ₂ e)
A	0.00158	0.00732
B	0.00287	0.00287
C	0.00121	0.00119
D	0.00026	0.00026
Whole process	0.00593	0.01164

로 알루미늄 재료를 적용한 경우 탄소배출량이 0.00574 tCO₂e 만큼 적었다. 한편, 사출 공정 단계에서는 알루미늄이 구리보다 0.00002 tCO₂e 만큼 더 많은 탄소배출량이 발생하였다. 전체적으로 알루미늄을 적용했을 때의 탄소배출량은 0.00593 tCO₂e, 구리를 적용했을 때의 탄소배출량은 0.01164 tCO₂e로 알루미늄 재료의 사용 시 0.00571 tCO₂e 만큼 더 적은 탄소배출량이 발생함을 확인하였다.

이를 통해 전력량 기반의 탄소배출량 산정에 있어 알루미늄을 사용한 부품 제조가 구리에 비해 환경적으로 더 나은 선택임을 확인할 수 있었다. 전기자동차용 인버터 방열모듈 시제품 1개 생산 시 알루미늄 재료의 적용은 구리에 비해 약 51%의 탄소배출량이 감축되었으며, 이러한 감축률은 대규모 전기자동차 생산 시 누적되어 더 큰 감축 효과로 이어질 것이다.

해당 방법론을 기반으로 제조업체에서 재료 선택에 따라 개발 초기 단계부터 탄소배출 데이터의 관리가 가능하며, 양산 이후 제품 생애 주기의 종합적인 LCA 방법론과 지속 가능한 경영 실현 시에도 기반 데이터로의 활용이 가능하다.

결과적으로 본 방법론을 통해 제조업체는 더욱 효율적인 탄소 감축 전략을 수립하고 지속 가능한 생산 시스템을 구축할 수 있다. 이는 기업이 환경적 책임을 다하는 동시에 경제적 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2024년도 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탄소중립특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (DX기반 탄소공급망 환경 전문인력 양성).

이 연구는 동양피스톤(주)의 공정 데이터를 기반으로 수행된 연구임.

References

- [1] Yoon, S., Kim, H.-K., Chon, Y.-W., 2023, A Study on the GHG Scope 3 Emissions Management Status of the Companies Through CDP Comparative Analysis, Journal of the Society of

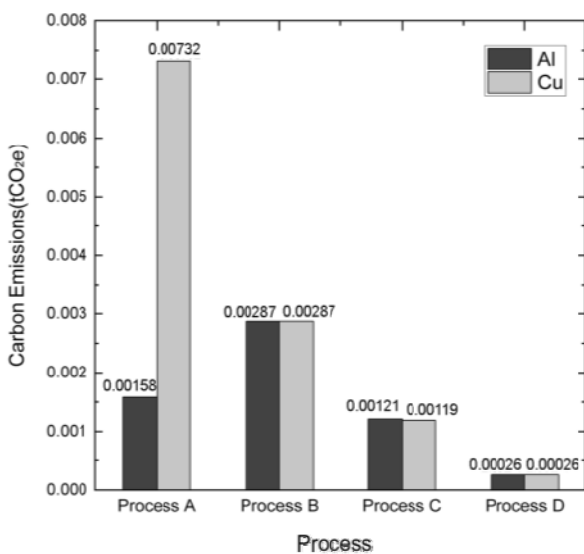


Fig. 4 Comparison of carbon emissions from process A to D

생한다. 단계별로 방열관 가공 단계에서 발생한 탄소배출량은 재료가 알루미늄과 구리인 경우, 각각 0.00158 tCO₂e, 0.00732 tCO₂e

- Disaster Information, 19:3 554-561, <https://doi.org/10.15683/KOSDI.2023.9.30.554>.
- [2] Lee, S.-Y., Woo, J.-M., Cho, J.-H., Lee, Y.-H., Yang, S.-W., Choi, Y.-S., 2022, Research on Action Plans to Achieve Carbon Neutrality by 2050, Chungbuk Research Institute, Republic of Korea.
- [3] Hwang, I.-C., Kim, G.-U., Baek, J.-R., Son, W.-I., 2020, Seoul's '2050 Carbon Neutral' Strategy to Implement the Paris Agreement, Seoul Research Institute, Republic of Korea.
- [4] Kim, E.-M., Lee, S.-H., 2023, viewed 11 June 2024, Golbal Efforts to Archieve Carbon Neutrality in the Industrial Sector and Implications: Focusing on SMEs, <https://www.kiep.go.kr/gallery.es?act=view&mid=a10101030000&bid=0001&list_no=10856&cg_code=C05&act=view&list_no=10856&cg_code=C05>.
- [5] Kim, H.-S., 2021, Electric Vehicle Battery Thermal Management Technology, Journal of the KSME, 61: 40-45, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10528857>>.
- [6] Kang, C.-G., Jeon, S.-Y., 2020, How Far have Electric and Hydrogen Vehicles come in Reducing Fine Dust, Gyeonggi Research Institute Issue & Diagnosis, 404 1-25, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09307376>>.
- [7] International Energy Agency, 2024, viewed 14 October 2024, Global EV Outlook 2024-Moving towards Increased Affordability, <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>>.
- [8] Kim, H.-S., 2011, Direction for Improving Eco-friendly Vehicle Distribution Policy, Korea Development Institute, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11844096>>.
- [9] Bae, C.-S., 2019, Prospects for Battery Electric Vehicles and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles, Monthly Electrical Journal, 508 37-43, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08000491>>.
- [10] Yang, C.-S., 2011, Inverter Technology for Electric Vehicles, Lighting and Electrical Equipment, 25:4 22-30.
- [11] Korea Technology & Information Promotion Agency for SMEs., 2023, viewed 12 June 2024, Small and Medium Business Strategic Technology Roadmap 2024~2026 「Implementation of carbon neutrality: eco-friendly cars」, <<https://smroadmap.smtech.go.kr/mpsvc/intgrprt/mpsvcIntgrprtList.do>>.
- [12] Hyundai Motor Company, 2020, viewed 8 October 2024, [Electric Vehicle Encyclopedia A to Z] Easily understand the driving principles of electric vehicles, <<https://www.hyundai.co.kr/story/CONT0000000000000906>>.
- [13] Seo, J.-H., Kim, D.-W., Jeong, T.-Y., Jeong, T.-H., Lee, M.-Y., 2014, Study on the Cooling Control Algorithm of Electronic Devices for an Electric Vehicle: Part 1 Effectiveness Analysis of General Control Logic, Journal of the Korean Society of Industrial-Academic Technology, 15:4 1850-1858, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.4.1850>.
- [14] KS ISO, 2021, Environmental management - Life cycle evaluation - Principles and basic structure, KS I ISO 14040, Korea Standards Association, Republic of Korea.
- [15] KS ISO, 2020, Greenhouse Gases - Product Carbon Footprint - Requirements and guidelines for quantification, KS I ISO 14067, Korea Standards Association, Republic of Korea.
- [16] Lee, J.-S., Lim, Y.-J., Kim, J.-Y., Oh, S.-J., 2022, viewed 9 September 2024, Carbon Footprint International Standardization and Policy Trends, National Green Technology Research Institute, <<https://www.nigt.re.kr/gtck/annualall.do?mode=view&boardNo=17&articleNo=2972>>.
- [17] Kim, D.-H., 2022, A Study on the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) Methodology for the Sustainability Assessment of Vehicles, Doctorate Thesis, Kunkook University, Republic of Korea.
- [18] Kim, H.-C, 2021, Climate Change and Life Cycle Assessment of Automobiles, Doctorate Thesis, Kunkook University, Republic of Korea.
- [19] Kim, S.-J., 2022, A Study on the Korean Exporting Company's countermeasure to the Introduction of the EU Carbon Border Tax, The Journal of Korea Research Society for Customs, 23:3 121-141.
- [20] Korea Environment Corporation, 2023, viewed 9 September, CBAM Explanation Written in an Easy-to-understand manner, <<https://esg.kosmes.or.kr/esgplatform/board/board13View.do?idx=1210>>.
- [21] Ministry of Environment, 2024, viewed 9 October 2024, Guidelines for Reporting and Certification of Greenhouse Gas Emissions Trading System, Ministry of Environment (Notice No. 2024-155, August 9, 2024, partially revised, Attached Table 5), <<https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulId=2075025&efYd=0#J2801083>>.
- [22] Ministry of Environment, 2024, viewed 9 October 2024, Guidelines for Reporting and Certification of Greenhouse Gas Emissions Trading System, Ministry of Environment (Notice

No. 2024-155, August 9, 2024, partially revised, Attached Table 6), <<https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulId=2075025&efYd=0#J2801083>>.

[23] Ministry of Environment, 2023, viewed 9 October 2024, Guidelines for Reporting and Certification of Greenhouse Gas Emissions Trading System (Presidential Decree No. 33913, December 12, 2023, amended by other laws, Attached Table 2), <<https://www.law.go.kr/LSW//lsBylInfoP.do?bylSeq=15996657&lsiSeq=256653&efYd=20231212>>.

[24] Kim, N.-H., Kim, J.-M., 2015, Interfacial Characteristics of Al/Cu Hybrid Materials Prepared by Compound Casting, Journal of Korea Foundry Society, 35:6 141-146, <https://doi.org/10.7777/jkfs.2015.35.6.141>.

[25] OnlineMetals.com, 2024, viewed 20 November 2024, Melting Point of Metal, <https://www.onlinemetals.com/en/melting-points#which_metal_has_the_lowest_melting_point>.



Myungjin Jang

M.Sc. Candidate in the Department of Nano and Semiconductor Engineering, Tech University of Korea.

Her research interests are Carbon Neutrality and Carbon Emissions Analysis.

E-mail: dal4014@tukorea.ac.kr



Kyung-Sun Yoo

Research Professor in the Department of Nano and Semiconductor Engineering, Tech University of Korea.

His research interests are Smart Factory, Carbon Neutrality, Carbon Emissions Analysis, Energy Analysis.

E-mail: yks077@tukorea.ac.kr



Duk-Young Moon

Research Professor in the Industrial Transformation Solution Support Center, Tech University of Korea.

His research interests are Carbon Neutrality, Carbon Emissions Analysis, Energy Analysis.

E-mail: mdy881203@tukorea.ac.kr



Kyungtaek Min

Associate Professor in the Department of Nano and Semiconductor Engineering, Tech University of Korea.

His research interests focus on the Design of opto-electronic Structures and the Development of Novel Materials for High-efficiency Energy Devices.

E-mail: k.min@tukorea.ac.kr