

Dell 컴퓨터 125종 사례 기반 탄소배출량 산정 비교:
PAIA와 ISO 14040 기반 방법론의 차이 분석이동휘¹, 김민주², 박지환^{3*}¹탄소중립연구조합 연구기획팀, ²탄소중립연구조합 사업전략팀, ³한국환경연구원 순환경제연구실Carbon Footprint Assessment of 125 Dell Computer Models:
A Comparative Analysis of PAIA and ISO 14040-Based MethodologiesDongwhi Lee¹, Minju Kim², Jihwan Park^{3*}¹Research Planning Team, Net Zero Research Association, Korea²Business Strategy Team, Net Zero Research Association, Korea³Division of Circular Economy, Korea Environment Institute, Korea

ABSTRACT

This study investigates how differences in LCA (life cycle assessment) methodologies affect the carbon footprint results of computer products and highlights the need for a consistent, product-specific framework. Using official Dell reports, 125 products were analyzed with Dell Product Carbon Footprint Version 1 (Dell PCF) and PAIA (Product Attribute to Impact Algorithm) methods. The average footprint was 411 ± 385 kgCO₂eq, with up to a 38-fold variation between models and 10-fold differences even among identical-spec products. The PAIA method yielded a maximum of 2,971 kgCO₂eq, while Dell PCF's maximum was 406 kgCO₂eq—mainly due to differing system boundaries and data sources. Although component specs like CPU (central processing unit) and SSD (solid state drive) showed weak correlations, energy use and weight were strongly linked to emissions. The study proposes a framework with seven key elements to improve reliability and comparability in carbon footprint assessments.

Key words: personal computer, life cycle assessment, carbon footprint, variability, uncertainty

요약

본 연구는 전과정평가 방법론의 차이가 컴퓨터 제품의 탄소발자국 결과에 미치는 영향을 분석하고, 일관된 제품별 평가 체계의 필요성을 제시한다. Dell의 공식 보고서를 기반으로 125개 제품을 Dell PCF와 PAIA 방법으로 분석하였으며, 평균 탄소배출량은 411 ± 385 kgCO₂eq로 나타났다. 모델 간 최대 38배, 동일 사양 제품 간에도 최대 10배 차이를 보였고, PAIA 방법에서는 최대 2,971 kgCO₂eq, Dell PCF는 406 kgCO₂eq를 기록하였다. 이러한 차이는 시스템 경계, 데이터 출처, 부품 분류 기준의 차이에 기인한다. 중앙처리장치, 솔리드 스테이트 드라이브 등의 사양과 탄소배출량 간 상관관계는 낮았으나, 에너지 소비와 총중량은 높은 상관관계를 보였다. 이에 본 연구는 7가지 요소를 포함한 제품별 프레임워크를 제안하며, 이는 평가의 신뢰성과 비교가능성을 높이고, 표준화 기반 마련에 기여할 수 있다.

주제어: 컴퓨터, 전과정평가, 탄소발자국, 변동성, 불확실성

Date Received: Jul. 16, 2025, Date Revised: Aug. 8, 2025, Date Accepted: Aug. 11, 2025

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

© Copyright 2025 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.

1. 서 론

컴퓨터는 초기의 단순 계산기에서 출발하여, 지속적인 기술 혁신을 바탕으로 현재는 다양한 형태와 기능을 갖춘 범용 정보처리 기기로 진화하였다[1]. 특히 20세기 후반 이후 디지털 기술의 고도화는 컴퓨터를 산업 전반의 핵심 기반 기술로 정착시키는 데 중요한 역할을 하였으며, 제조, 금융, 의료, 교육, 물류, 통신 등 거의 모든 분야에서 중심적 기능을 수행하게 하였다[2].

이러한 기술의 광범위한 적용은 환경 영향의 측면에서도 중요한 함의를 지닌다. 컴퓨터 및 관련 정보기술 기기의 생산, 사용, 폐기 과정에서의 에너지 소비와 온실가스 배출은 지속가능성과 탄소중립 논의에서 점점 더 주목받고 있으며, 이에 따라 제품 전과정에 걸친 환경영향 분석, 즉 전과정평가의 중요성도 커지고 있다.

탄소배출량 산정은 제품의 전체 수명주기에서 발생하는 온실가스 배출량을 정량화하는 과정으로, 대표적으로 국제표준화기구(ISO)가 제정한 ISO 14040 시리즈 또는 산업계 주도의 PAIA 방법론이 활용된다[3-5]. ISO 14040 기반 전과정평가는 제품 또는 서비스의 전체 수명주기, 즉 원료 채굴, 부품 및 제품 제조, 유통, 사용, 폐기 및 재활용 단계에서의 자원 소비와 환경 영향을 체계적으로 분석하는 방법론이다. 이 방법론은 다음의 네 가지 주요 단계로 구성된다: (1) 목적 및 범위 정의, (2) 전과정 목록분석, (3) 전과정 영향평가, (4) 해석. 각 단계는 상호 유기적으로 연결되어 반복적인 개선을 유도하며, 결과의 신뢰성과 투명성을 확보하기 위해 데이터 품질 및 가정의 명시가 중요하게 요구된다.

반면, PAIA는 제품의 주요 속성(예: 질량, 재료 종류, 에너지 소비량 등)을 활용하여, 사전 정의된 알고리즘에 따라 환경영향을 신속하게 산정하는 방법으로, ISO 14040 기반의 정밀한 데이터 수집 과정을 단순화하여 효율성과 비교 가능성을 높이는 데 초점을 둔다. PAIA는 이른바 간소화된 탄소배출량 산정 접근의 대표적인 사례로, 복잡한 제품구조와 짧은 제품 개발 주기를 갖는 정보통신기술 산업과 같은 분야에서 정밀한 탄소배출량 산정의 한계를 보완하기 위해 개발되었다. 이 방식은 전체 수명주기를 고려하되, 온실가스 배출에 주요하게 기여하는 핵심 부품과 공정에 분석의 초점을 맞춤으로써, 필요한 수준의 정확도를 유지하면서도 데이터 수집 및 계산에 필요한 자원을 절감한다.

이러한 간소화된 탄소배출량 산정은 다양한 정의가 존재하지만, 공통적으로 정밀 탄소배출량 산정에 비해 일정 수준의 단순화를 수반하며, 스크리닝 평가, 정보공개용 환경성 표시

등에 효과적으로 활용된다. 다만, ISO 14040이 요구하는 데이터 기반의 정밀성, 절차적 엄밀성, 투명성 확보 측면에서는 일부 한계가 존재하여, 정책적 결정이나 공식 인증 목적의 정량 평가에는 신중한 적용이 요구된다.

최근 컴퓨터의 환경 영향에 대한 관심이 높아지면서, 데스크톱과 노트북을 대상으로 한 전과정평가 기반 연구들이 활발히 수행되고 있다. 예를 들어, Ferreira et al.은 데스크톱이 노트북보다 높은 탄소발자국(679.1 kg CO₂eq vs. 286.1 kg CO₂eq)을 가지며, 특히 제조 단계가 전체 배출의 주요 원인이라고 분석했다[6]. 또한 최신 모듈형 노트북에 대한 Fraunhofer IZM의 전과정평가 조사 결과, 생산 단계에서 전체 탄소발자국의 70% 이상이 발생하는 것으로 분석되었다[7].

비록 컴퓨터의 환경영향평가를 위한 다양한 연구가 진행되고 있지만, 컴퓨터의 기술적 특성과 수명주기 구조를 반영한 전과정평가 접근은 여전히 보완이 필요한 상황이다. 컴퓨터는 구성 부품의 다양성, 사용 조건의 이질성, 기술 진화 속도 등으로 인해, 제조·사용·폐기 전 과정에서 일반 소비재와 다른 환경적 특성을 지닌다. 예를 들어, Teehan & Kandlikar는 데스크톱 컴퓨터에 대한 전과정평가 리뷰에서 인쇄회로기판과 집적회로 제조 단계의 영향이 매우 불확실하고, 연구마다 설정한 가정에 따라 결과 간 편차가 큼을 지적하였다[8]. 또한 Englhardt et al.은 전과정평가 수행에 자주 활용되는 데이터들이 구체성이 부족하거나, 설계 초기 단계에서 충분히 반영되지 못하는 한계를 지적하며, 제품별 시나리오 기반 접근의 필요성을 강조하였다[9].

이러한 한계점들은 본 연구의 출발점이자 문제의식으로 작용하였으며, 기존 지구온난화 잠재력 산정 연구를 종합 분석하고, 변동성의 원인을 규명하며, 향후 산정 시나리오의 개선 방향을 제시하려는 연구 목적과도 밀접하게 연관된다.

본 연구는 컴퓨터의 지구온난화 잠재력에 대한 기존의 산업 보고서를 종합적으로 검토·분석하는 것을 주요 범위로 한다. 연구의 주요 목적은 컴퓨터 제품에 대한 전과정평가에서 나타나는 변동성의 주요 원인을 규명하고, 보다 일관성 있고 비교 가능하며 투명한 산정 시나리오 개발을 위한 기초 정보를 제공하는 데 있다. 나아가 연구에 적용된 재료 및 방법을 간략히 서술하며, 특히 온실가스 배출 정량화의 기본 원리, 관련 공정 구조, 주요 요건 등을 중심으로 설명한다. 변동성의 원인을 규명하기 위해 과학적 연구 및 산업 보고서 분석을 제시한다. 마지막으로 컴퓨터에 대한 제품별 산정 규칙의 개발을 위한 주요 고려사항 및 권고안을 제시한다.

2. 분석 자료 및 방법론

2.1 제조사 보고서 수집 및 포함 기준

이 리뷰는 2025년 7월까지 Dell 공식 홈페이지에서 제공된 PAIA 및 Dell PCF 방법론 기반의 컴퓨터 지구 온난화 잠재력에 대한 전과정평가 산정 결과를 포함하였다[10]. 제조업체의 보고서는 다음 키워드를 결합하여 식별하였다. "수명 주기 평가", "전과정평가", "수명 주기 분석", "탄소 발자국", "환경 영향", "온실 가스 배출", "컴퓨터", "데스크탑". 리뷰의 정확성과 관련성을 확보하기 위해 일련의 포함 기준을 적용하였다. 필요한 경우, 스피커나 키보드와 같은 액세서리의 영향과 같이 장치와 관련 없는 값은 제거하였다. 명시된 선정 기준에 따라, 최종적으로 125개의 결과 보고서가 이 검토에 포함되었다.

2.2 제품별 데이터 표준화 및 분석 절차

비교 가능성을 확보하기 위해 제조사 보고서를 기반으로 수집한 데이터를 일관된 기능 단위로 표준화하고 통계 분석하였다. 특히 중앙처리장치의 경우, Primate Labs에서 개발한 Geekbench 벤치마크 도구를 활용하여 Geekbench 중앙처리장치 점수로 일반화하였다[11]. 표준화가 불가능한 데이터는 제외하였다. 분석 절차는 다음과 같다. 첫째, 정량화 가정을 요약하였다. 둘째, 전과정평가 결과를 부품 수명 주기 단계로 구분하였다. 셋째, 제조 컴퓨터의 영향을 kgCO_2eq 단위로 분석하였다. 넷째, 제조 컴퓨터의 변동 원인을 파악하였다.

공개적으로 이용 가능한 공급업체 탄소배출량 산정 결과를 수집한 후, 방법론에 따른 결과를 다음과 같이 비교하였습니다.

- (1) 전체 탄소배출량에서 수명 주기 단계의 상대중 비중 비교
- (2) 생산 단계의 가장 큰 탄소배출원과 그 변동성 파악
 - a. 하위 구성품 분류 및 영향 분석
 - b. 산정 시나리오 영향 분석

2.3 제품별 탄소배출량 산정 프레임워크

본 연구는 ISO 14067, IEC 62725 등 국제적으로 공인된 Type III 환경성 선언 관련 표준에 기반하여, 컴퓨터 제품에 대한 제품별 탄소배출량 산정 프레임워크를 구성하였다[12, 13]. 이 프레임워크의 주요 목적은 전과정평가 기반 산정의 일관성과 비교 가능성을 확보하기 위한 고정화된 시나리오와 핵심 매개변수를 정립하는 데 있다. 이를 위해 다음 일곱 가지 항목에 중점을 두었다:

- (1) 기능 단위
- (2) 참조 수명

- (3) 사용 시나리오
- (4) 폐기 처리 시나리오
- (5) 포함/제외할 주요 흐름 요소
- (6) 고려할 영향범주
- (7) 재활용 단계의 할당 규칙

3. 결과 및 논의

3.1 컴퓨터 전과정 탄소배출량

Fig. 1과 2는 Dell 컴퓨터 제품 125종의 수명주기 단계별 탄소배출량 및 각 단계의 기여도를 정리한 것이다. 제품별 산정은 PAIA 방법론과 ISO 14040에 기반한 Dell PCF 방법론을 각각 적용하였으며, 사용 수명은 제품에 따라 2년 또는 4년으로 설정되었다.

탄소배출량은 제품별로 $78\sim 2,971 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ 범위에서 나타났다. 125종 제품의 평균 탄소배출량과 표준편차는 $411\pm 385 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ 였다.

수명주기 단계별로는 생산 단계가 $58\pm 11\%$ 로 가장 높은 비중을 차지하였고, 다음으로 사용($35\pm 11\%$), 운송($7\pm 7\%$), 폐기($1\pm 3\%$) 단계 순으로 나타났다. 생산 단계 내 주요 배출원은 메인보드($25\pm 10\%$), 디스플레이($22\pm 7\%$), 전원공급장치($15\pm 8\%$)이었다.

주요 부품별 탄소배출량이 총 탄소배출량에 미치는 영향을 파악하기 위해 상관관계 분석을 수행한 결과, 새시($R^2=0.78$), 디스플레이($R^2=0.73$), 전원공급장치($R^2=0.73$)는 비교적 강한 상관관계를 보였다(Fig. 3).

또한, 제품의 물리적 특성과 사용단계 에너지 소비가 총 탄소배출량에 미치는 영향을 파악하기 위해 상관관계를 분석한 결과, 에너지 소비량($R^2=0.98$)과 총 무게($R^2=0.64$)와의 상관관계도 높게 나타났다(Fig. 4).

이는 제품 설계와 주요 부품 선택이 전과정 탄소배출량에 중대한 영향을 미침을 시사한다.

3.2 방법론 및 부품 특성에 따른 탄소배출량 산정 변화

Table 1은 컴퓨터 제품에 대한 탄소배출량 산정 시 고려된 요소들을 정리한 것이다. 산정은 수명주기 관점에서 생산, 사용, 운송, 폐기 단계로 구분하였으며, 각 단계는 지역별 전력믹스 및 제품 사양을 반영하여 평가되었다. 특히 생산 단계에서는 기능 중심의 제조 공정 세분화를 통해 부품별 배출 기여도를 분석하였다.

산정 방법론은 26개 제품에 대해 Dell PCF, 99개 제품에

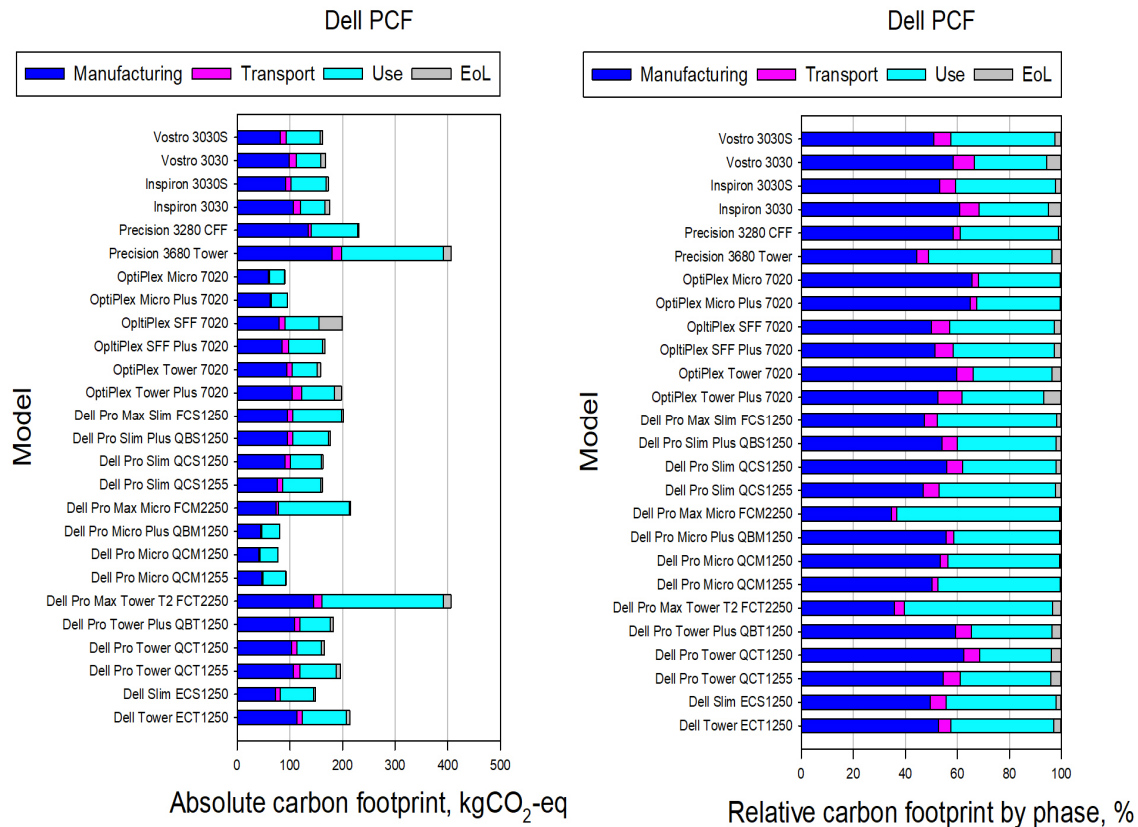


Fig. 1. Carbon footprint assessment based on the Dell PCF methodology per computer by life cycle phase.

대해 PAIA를 적용하였다. 두 방법론은 생산 단계 항목 구성에서 뚜렷한 차이를 보였다. Dell PCF는 메인보드, 디스플레이, 전원공급장치 등 11개 부품을 기반으로 분석한 반면, PAIA는 배터리, 조립체, 재료 등 13개 항목을 포함하였다. 또한 사용 수명은 일부 제품군(예: Wyse 3040 시리즈)에 대해 2년, 그 외 제품에 대해 4년으로 설정되었다.

Fig. 1은 Dell PCF 방법론과 4년의 사용 기간 조건 하에서 26개 제품의 탄소배출량을 나타낸다.

탄소배출량은 제품에 따라 77.6~406 kgCO₂eq 범위를 보였으며, 전체 탄소배출량 중 생산 단계(53±8%)의 비중이 가장 높았고, 그 다음은 사용(39±9%), 운송(5±2%), 폐기(4±5%) 단계 순이었다. 특히, 생산 단계 내에서는 메인보드와 기계부품이 각각 15±6%와 10±4%를 차지하며 주요 배출원으로 확인되었다. 그러나 주요 부품별 탄소배출량이 총 탄소배출량에 미치는 기여도를 파악하기 위해 상관관계 분석을 수행한 결과, 생산 단계에서 전기기계부품($R^2=0.80$)과 기계부품($R^2=0.77$) 부문이 총 탄소배출량과 유의미한 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다(Fig. 5).

중앙처리장치는 Geekbench 점수를 기준으로 2,986~17,010 범위를 보였고, 솔리드 스테이트 드라이브는 256~2,048 GB, 디램은 8~64 GB, 에너지 소비량은 25.4~146 kWh/yr 수준이었다(Table 1).

Fig. 6에서는 총 탄소배출량뿐 아니라, 생산 및 사용 단계별 탄소배출량과 중앙처리장치 Geekbench 점수, 솔리드 스테이트 드라이브/디램 용량, 에너지 소비량, 총 무게 간의 관계를 시각화하였다.

제품의 물리적 특성과 사용단계 에너지 소비가 총 탄소배출량에 미치는 영향을 파악하기 위해 상관관계를 분석한 결과, 중앙처리장치 Geekbench 점수, 솔리드 스테이트 드라이브 및 디램 용량과 컴퓨터의 탄소배출량 간에는 유의미한 상관관계가 관찰되지 않았다. 예를 들어, 최고 사양의 Precision 3280 CFF(i9-14900, 중앙처리장치 점수 17,010, 2048 GB 솔리드 스테이트 드라이브, 64 GB 디램) 제품의 총 탄소배출량은 231 kgCO₂eq였으며, 상대적으로 사양이 낮은 Dell Pro Max Micro FCM2250(Intel Ultra 5 255, 중앙처리장치 점수 15,815 점, 256 GB 솔리드 스테이트 드라이브, 8 GB 디램)의

Dell 컴퓨터 125종 사례 기반 탄소배출량 산정 비교

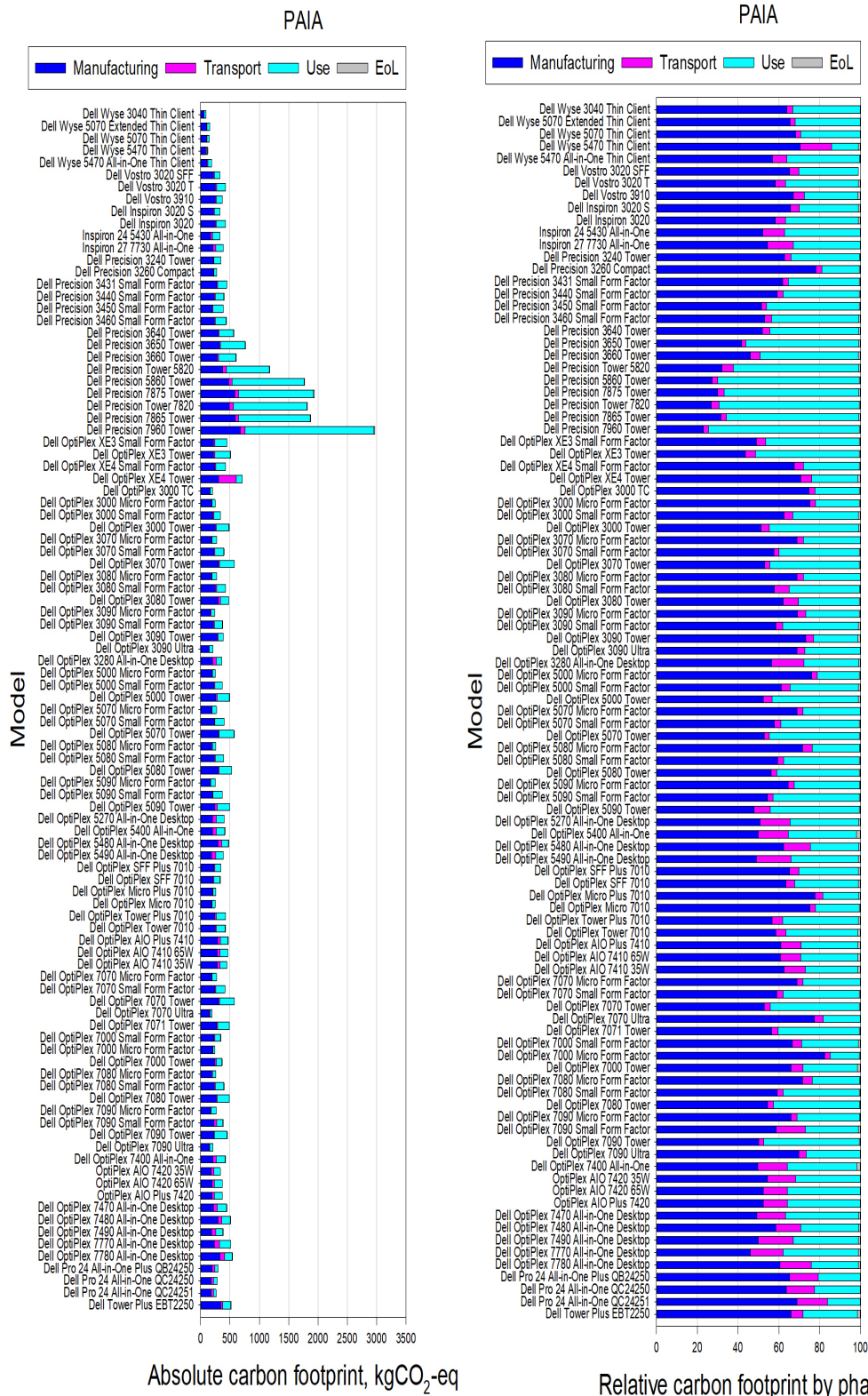


Fig. 2. Carbon footprint assessment based on the Dell PCF methodology per computer by life cycle phase.

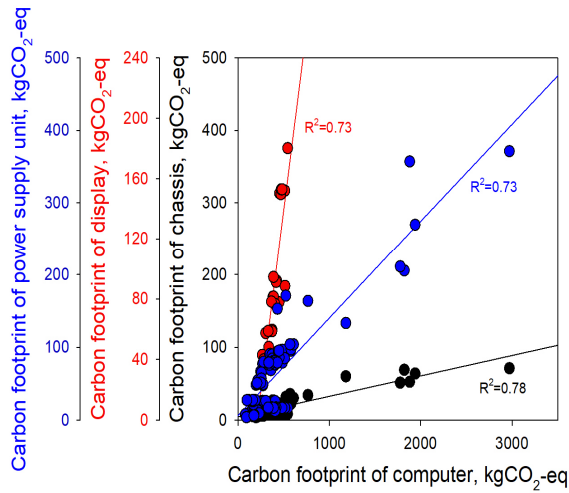


Fig. 3. Linear correlation analyses for the carbon footprint of computer versus carbon footprint of the power supply unit, display, and chassis.

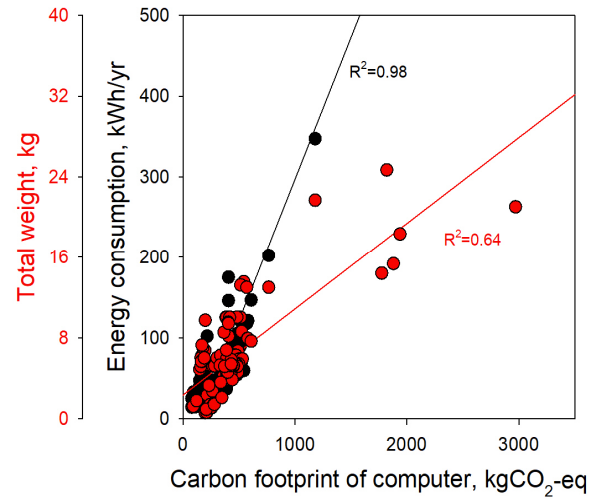


Fig. 4. Linear correlation analyses for the carbon footprint of computer versus carbon footprint of energy consumption and total weight.

Table 1. Comparison of carbon footprint assessment results and assumptions between the Dell PCF and PAIA methodologies for computers

Parameters	Dell PCF (n=26)	PAIA (n=99)
Range of carbon footprint (kgCO ₂ eq)	77.6~406	196~2,971
Manufacturing phase (%) ^a	53±7.6	59±12
Use phase (%) ^a	39±9	34±12
Transport phase (%) ^a	5±2	7±8
EoL phase (%) ^a	4±5	1±0
Main contributors	Mainboard, mechanicals	Mainboard, display
Linear relationship between carbon footprint of computer and main contributors (R ²)	Electromechanicals (0.80), Mechanicals (0.77)	Chassis (0.78), Power supply unit (0.72), Display (0.74)
Range of Geekbench score	2,986~17,010	704~20,055
Range of solid state drive capacity (GB)	256~2,048	32~1,000
Range of DRAM capacity (GB)	8~64	8~16
Energy consumption (kWh/yr)	25.4~146	16.7~1,096.3
Total weight (kg)	1.1~9.7	0.6~24.7
Assumption of life span	Wyse 시리즈 2년, 나머지 4년	4년
Main components	11 main components (display, power supply unit, DRAM, etc.)	13 main components (battery, optical disc drive, materials, etc.)
Data sources	Primary or secondary data	Secondary data

^a평균 및 표준편차 값은 각각 Dell PCF 방법론이 적용된 24개 제품과 PAIA 방법론이 적용된 99개 제품을 대상으로 산출되었다.

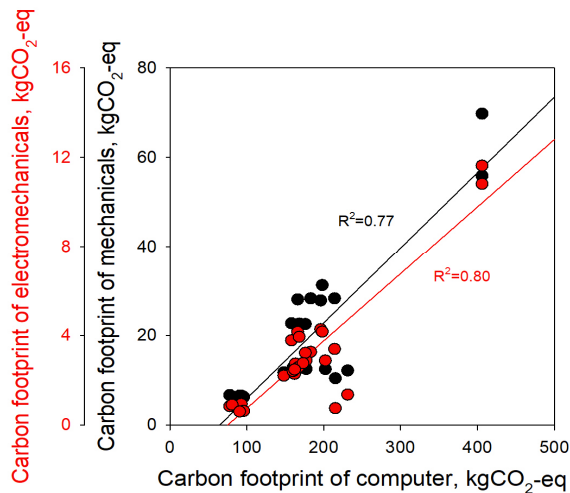


Fig. 5. Linear correlation analyses for the carbon footprint of computer versus carbon footprint of electromechanicals and mechanicals (Dell PCF, 4-year lifetime assumption).

탄소배출량도 215 kgCO₂eq로 유사한 수준을 보였다.

반면, 제품의 에너지 소비량과 총 탄소배출량 간에는 높은 상관관계($R^2=0.88$)가 나타났다. 이는 부품의 성능 향상이 곧 바로 탄소배출 증가로 이어지지 않으며, 주요 부품의 에너지 소비가 탄소배출에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 또한, 중앙처리장치 Geekbench 점수와 솔리드 스테이트 드라이브/디램 용량은 생산 및 사용 단계의 탄소배출량과도 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 이러한 결과는 다음과 같은 원인에서 기인할 수 있다. 첫째, 제조 공정 세분화 항목에서 부품별 특수성이 충분히 반영되지 않았을 가능성이 있으며, 둘째, 부품 사양과 탄소배출량 간의 연결성을 정량적으로 반영할 수 있는 신뢰성 있는 탄소배출량 데이터베이스(DB)가 부족하기 때문이다. 특히, 주요 부품별로 정교한 전과정목록 데이터가 충분히 구축되지 않은 점은 컴퓨터의 구성 요소별 탄소배출량 분석의 정밀도를 제한하는 요인으로 작용할 수 있다.

Fig. 2는 PAIA 방법론과 4년의 사용 기간을 기준으로 분석한 99개 컴퓨터 제품의 탄소배출량 결과를 제시한다.

탄소배출량은 제품에 따라 196~2,971 kgCO₂eq의 넓은 범위를 보였으며, 수명 주기 단계별 비중은 생산 단계가 높은 PAIA와 같은 경향을 보였다. 하지만, 생산 단계 내에서는 메인보드와 디스플레이가 각각 28±10%와 17±8%를 차지하며, 주요 배출원으로 확인되었고, 새시($R^2=0.78$), 전원공급장치($R^2=0.72$), 디스플레이($R^2=0.74$)가 탄소배출량과 비교적 높은 상관관계를 보였다(Fig. 7).

반면, 생산 단계에서 가장 높은 배출 비중을 차지한 메인보

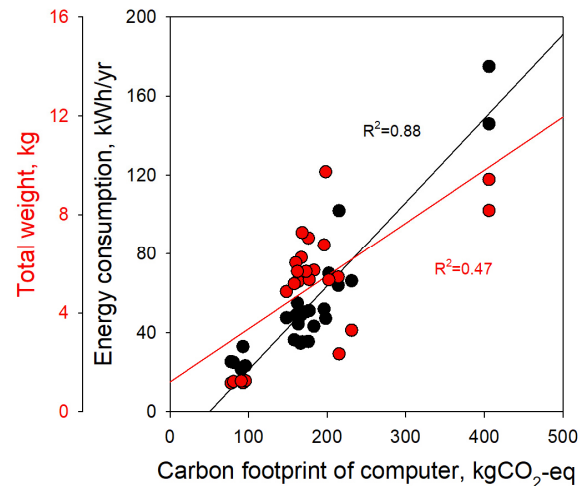


Fig. 6. Linear correlation analyses for the carbon footprint of computer versus carbon footprint of CPU performance(Geekbench score), SSD capacity, DRAM capacity, and energy demand (Dell PCF, 4-year lifetime assumption).

드는 총 탄소배출량과의 상관관계가 상대적으로 낮은 수준($R^2=0.51$)에 그쳤다. 이는 메인보드 자체의 배출 기여도는 크지만, 제품 간 사양 편차나 산정 방식의 정밀도 부족으로 인해 총 탄소배출량의 설명력에는 한계가 있음을 보여준다. 이러한 결과는 주요 부품별 정교한 전과정목록 데이터의 구축 및 제품 사양 반영 수준의 개선이 필요함을 시사한다.

중앙처리장치는 Geekbench 점수를 기준으로 704~20,055 범위를 보였고, 솔리드 스테이트 드라이브는 32~1,000 GB, 디램은 8~16 GB, 에너지 소비량은 16.7~1,096.3 kWh/yr 수준으로 확인되었다(Table 1).

제품의 물리적 특성과 사용단계 에너지 소비가 총 탄소배출

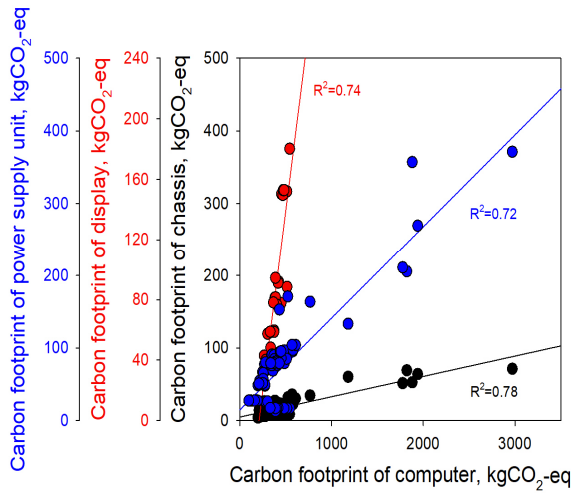


Fig 7. Linear correlation analyses for the carbon footprint of computer versus carbon footprint of the chassis, display, and power supply unit (PAIA, 4-year lifetime assumption).

량에 미치는 영향을 파악하기 위해 상관관계를 분석한 결과, 에너지 소비량($R^2=0.98$), 총 무게($R^2=0.64$)가 높은 상관관계를 보였지만, 중앙처리장치 성능 점수($R^2=0.18$), 솔리드 스테이트 드라이브 용량($R^2=0.15$), 디램 용량($R^2=0.19$)은 컴퓨터의 총 탄소배출량과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다(Fig. 8).

예를 들어, Dell Precision 7960 Tower(Xeon W5-3423, 중앙처리장치 점수 12,272, 512GB 솔리드 스테이트 드라이브, 16GB 디램)은 전체 제품 중 가장 높은 탄소배출량인 2,971 kgCO₂eq를 기록하였으나, 동일한 중앙처리장치 점수 및 저장장치·메모리 사양을 가진 Dell Pro 24 All-in-One QC24250 (Intel Ultra 5 235, 중앙처리장치 점수 13,293, 512GB 솔리드 스테이트 드라이브, 16GB 디램)은 단 282 kgCO₂eq에 그쳤다. 이는 비슷한 부품 사양을 갖춘 제품 간에도 최대 약 10배(약 952%)의 탄소배출량 차이가 발생할 수 있음을 의미한다.

또한 본 연구에서는 PAIA 방법론과 Dell PCF 방법론을 적용하여 동일 제조사 내 컴퓨터 제품의 탄소배출량을 비교하고, 방법론 간 결과 차이의 원인을 고찰하였다. 전체 125개 컴퓨터 제품을 대상으로 산정한 결과로, 99개 제품에는 PAIA 방법론이, 26개 제품에는 Dell PCF 방법론이 적용되었다. 수명주기 단계별 배출 기여도는 두 방법론 모두 생산 단계가 가장 높은 비중을 차지하였고, 그 다음으로 사용, 운송, 폐기 순이었다(Table 1).

그러나 총 탄소배출량 수준에는 뚜렷한 차이가 존재했다. PAIA 방법론 적용 시 최대 탄소배출량은 2,971 kgCO₂eq에

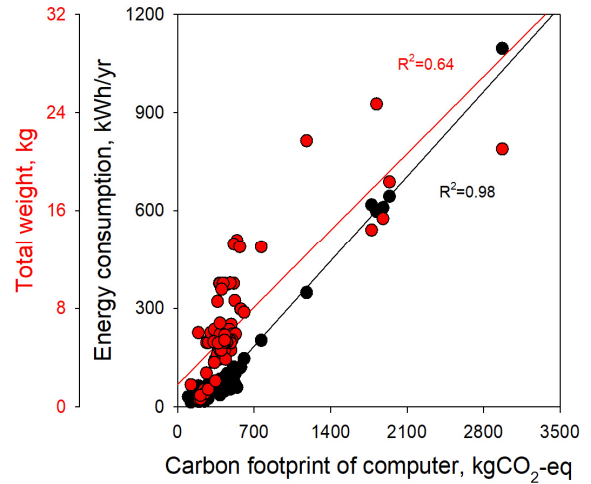


Fig 8. Linear correlation analyses for the carbon footprint of computer versus carbon footprint of the energy consumption, total weight, CPU performance (Geekbench score), SSD capacity and DRAM capacity (PAIA, 4-year lifetime assumption).

달한 반면, Dell PCF 방법론은 406 kgCO₂eq 수준에 그쳤다. 더욱이, 동일한 부품 사양을 가진 Dell 제품이라 하더라도 적용된 방법론에 따라 탄소배출량 산정 결과는 크게 달랐다. 예를 들어, Intel 300 프로세서, CPU 성능 점수 2,986, 256GB SSD, 8GB DRAM이라는 동일한 사양을 가진 Dell Pro Tower QCT1250은 Dell PCF 방법론 적용 시 166 kgCO₂eq로 산정된 반면, 유사 사양의 OptiPlex AIO 7420 65W에 PAIA 방법론을 적용한 결과는 371 kgCO₂eq로, 약 2.2배의 차이를 보였다. 이는 산정 시나리오의 세부 구성(예: 부품 분류 체계, 데이터 출처, 시스템 경계 등) 차이에서 기인한 것

로 보이며, 구체적인 산정 로직이 공개되지 않은 상황에서는 동일 제품 간 결과 비교도 어렵다는 점을 시사한다.

실제로 두 방법론은 탄소배출량 산정을 위한 핵심 요소들, 즉 시스템 경계 설정, 부품 분류의 정밀도, 사용 수명 가정, 데이터 출처 등에서 상이한 접근방식을 취하고 있다. PAIA 방법론은 간소화된 탄소배출량 산정 접근으로, 산업 평균값 또는 기본 계수를 기반으로 한 간소화된 계산 구조를 채택한다. 이는 제품의 주요 속성(예: 질량, 재료 구성, 에너지 소비량 등)을 활용하여, 사전 정의된 알고리즘에 따라 빠르고 일관된 산정을 수행할 수 있도록 설계되었으며, 분석 효율성과 제품군 간 비교 가능성 확보에 중점을 둔다. 이 과정에서 일부 부품(예: 배터리, 어셈블리 등)은 세부 사양 구분 없이 단순화된 집계 방식으로 처리되어, 결과의 민감도가 낮게 나타나는 경우가 많다.

반면, Dell PCF 방법론은 ISO 14040 기반의 정밀한 탄소배출량 접근에 따라 공급망 전반에서 수집된 1차 데이터를 적극 활용하며, 메인보드, 그래픽카드, 디스플레이 등 주요 부품 단위로 세분화된 전과정목록 분석을 수행한다. 이와 같은 정밀한 분석은 제품 구조와 공급망 특성을 반영한 투명한 배출량 산정이 가능하게 하며, 결과의 신뢰성을 높인다.

이러한 차이는 두 방법론이 각기 다른 부품 구성 항목에 대해 중심적으로 배출 기여도를 부여하고 있으며, 총 탄소배출량의 민감도 구조에도 영향을 미치고 있음을 보여준다. 예컨대 PAIA는 에너지 소비량과 총질량에 민감한 반면, Dell PCF는 부품별 소재 및 제조 위치 등 공급망 요인에 더 민감하게 반응한다[7].

결론적으로, 동일 제조사의 유사 사양 컴퓨터 제품이라 할 지라도 적용된 전과정평가 방법론에 따라 탄소배출량 산정 결과가 상이하게 도출될 수 있음을 본 연구는 실증적으로 제시하였다. 이러한 차이는 단순한 수치적 오차라기보다, 전과정평가 결과의 신뢰성, 비교 가능성, 정책 활용성에 있어 방법론 선택이 구조적 영향을 미친다는 점을 명확히 보여준다. 따라서 향후에는 표준화된 제품별 산정 전략 수립과 더불어, 고정밀 전과정목록 데이터베이스 구축, 그리고 주요 가정 항목(수명, 시나리오, 시스템 경계 등)에 대한 통합적 시나리오 프레임워크 개발이 병행되어야 할 것이다.

3.3 컴퓨터 제품 산정 프레임워크 제안

앞선 분석에서 확인된 바와 같이, 컴퓨터 제품의 탄소배출량 산정 결과는 적용된 방법론과 가정에 따라 유의미한 편차를 보인다. 본 연구의 핵심 목적은 이러한 변동성의 주요 원인을 규명하고, 제품별 특성을 반영한 산정 시나리오를 통해 결

과의 신뢰성과 비교 가능성을 향상시키는 데 있다.

전과정평가 방법론은 일반적인 프레임워크에서부터 특정 제품군에 특화된 탄소배출량 산정 지침까지 다양하게 존재하지만, 실무자 해석의 다양성과 데이터 활용의 불균형으로 인해 여전히 결과의 일관성이 떨어지는 문제점이 지속되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 먼저 제품별 특수성을 반영한 접근과 데이터 활용 원칙에 대한 명확한 정의가 선행되어야 한다. 예를 들어, 디스플레이 모듈, 인쇄회로기판, 집적회로 등 주요 부품에 대해서는 1차 또는 집계된 1차 데이터를 활용하고, 기타 부품에 대해서는 2차 데이터를 사용하는 방식이 적절하다.

제조 단계에서는 구성 부품별 공정을 기반으로 한 프로세스 트리를 적용하여 정교한 산정 시나리오를 설계해야 한다. 새시의 경우, 주요 재료(예: 강, 알루미늄, 열가소성수지 등)의 질량과 배출계수를 바탕으로, 인쇄회로기판은 면적과 층 수에 기반하여, 집적회로는 칩 면적을 기준으로 탄소배출량을 산정하며, 필요시 마스크 레이어 수, 와이어 재질, 패키지 크기 등 추가 인자를 고려할 수 있다.

또한, 제품 간 탄소배출량 결과의 비교 가능성과 분석 일관성을 제고하기 위해 다음의 일곱 가지 핵심 요소에 대한 체계적인 정의와 적용이 요구된다.

- (1) Functional unit: 제품의 주요 기능을 반영한 정량적 비교 단위.
 - 제품의 기능을 나타내는 성능 지표(처리속도, 메모리 용량, 하드디스크 용량 등)
 - 사용 기간 상태(정상적인 사용/서비스 시간 및 수명)
- (2) Reference service life: 제품의 평균 사용 수명. 표준화된 시간 경계를 설정하는 기반.
- (3) Use scenario: 제품의 운용 조건과 사용 행태(전력 소비, 사용 시간, 지역 전력 믹스 등).
- (4) EOL treatment scenario: 지역별 회수율, 재활용 비율, 소각·매립 조건 등을 반영한 폐기 단계 모델링.
- (5) Reference flow elements: 배출에 실질적 영향을 주는 주요 구성 요소만 포함하고, 기타 요소는 생략 가능.
- (6) Impact categories and indicators: 기후변화를 기본으로 하되, 자원 고갈 등 선택적 영향범주 명시.
- (7) Allocation rule for recovery operations: 질량, 에너지 기준 우선 할당, 불가피 시 경제적 기준 보완 적용.

이러한 구조적 접근은 실무자 간 해석 차이를 줄이고, 컴퓨터 제품의 환경 성능에 대한 과학적 비교를 가능하게 하며, 산업 전반의 탄소배출량 확보에 기여할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 컴퓨터 제품의 탄소배출량 산정에 있어 전과정평가 방법론 및 주요 가정의 차이가 결과에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. Dell PCF와 PAIA라는 상이한 산정 방법론을 동일 제조사의 125개 제품에 적용하고, 각 제품의 부품 사양, 에너지 소비량, 수명 주기 단계별 배출 기여도를 비교함으로써, 제품 간 방법론 간 결과의 변동성을 정량적으로 도출하였다.

분석 결과, 전체 제품의 평균 탄소배출량은 $411 \pm 385 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ 로 나타났으며, 제품 유형 및 설계, 에너지 소비량 등에 따라 최대 38배에 달하는 차이가 존재했다. 특히, 동일한 중앙처리장치, 솔리드 스테이트 드라이브, 디램 사양을 가진 제품 간에도 설계 구조나 냉각 방식 등의 차이에 따라 최대 10배 이상의 탄소배출량 차이가 발생하였다. 이는 단순한 하드웨어 사양만으로는 탄소배출량을 설명하기 어렵고, 실제 사용 단계에서의 에너지 소비와 설계 방식이 중요한 결정 요인임을 시사한다.

또한, 방법론 간 비교 결과 PAIA 적용 제품의 최대 탄소배출량은 $2,971 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ 에 달한 반면, Dell PCF 적용 제품은 $406 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ 를 넘지 않았다. 이는 시스템 경계, 부품 분류 체계, 데이터 출처 등 산정 시나리오의 구성 차이가 결과에 중대한 영향을 미친다는 점을 보여준다. 특히 PAIA는 산업 평균 기반의 계수화 방식에 의존한 반면, Dell PCF는 공급망 기반의 1차 데이터를 활용하여 부품별 배출을 보다 정밀하게 반영하였다.

이러한 분석을 바탕으로, 본 연구는 제품 특성을 반영한 일관된 탄소배출량 산정을 위해 7가지 핵심 요소—(1) 기능 단위, (2) 참조 수명, (3) 사용 시나리오, (4) 폐기 시나리오, (5) 주요 흐름 요소, (6) 영향범주, (7) 재활용 단계 할당 규칙—를 정의하고, 이를 기반으로 제품별 맞춤형 산정 시나리오의 필요성을 제시하였다. 해당 프레임워크는 제품 간 탄소배출량 산정 결과의 비교 가능성과 전과정평가 수행의 일관성을 높이며, 표준화된 컴퓨터 제품 산정 프레임워크 개발에 활용될 수 있다.

향후 연구에서는 다양한 전자제품 유형에 본 연구의 접근을 확장·적용하고, 주요 부품별 정밀한 전과정목록 데이터 확보를 통해 제품별 환경성과 분석의 신뢰성을 제고하는 것이 중요하다. 특히, 산업계와의 협력을 통해 공급망 기반 1차 데이터 활용을 확대하고, 실무 적용이 가능한 표준화된 탄소배출량 산정 시나리오 개발로 이어지는 연구가 요구된다.

사 사

This work was supported by the R&D program of MOTIE/KEIT (RS-2024-00432415).

References

1. Brynjolfsson, E., McAfee, A. The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. W. W. Norton & Company: New York (2014).
2. Ceruzzi, P.E. A history of modern computing. MIT Press: Cambridge, MA (2003).
3. International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. ISO: Geneva (2006).
4. International Organization for Standardization (ISO). ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. ISO: Geneva (2006).
5. MIT Material Systems and Laboratory. Intended uses and limitations of the PAIA model. https://p1-ofp.static.pub/ShareResource/social_responsibility/PAIA_Intended_Use/PAIA_Intended_Use.pdf (accessed 12 September 2025).
6. Ferreira, M., Domingos, I., Santos, L., Barreto, A., Ferreira, J. Environmental and economic assessment of desktop vs. laptop computers: A life cycle approach. Sustainability 17(10), p. 4455 (2025).
7. Baur, S.-J., Proske, M., Poppe, E. Life cycle assessment of the Framework Laptop 2022. Fraunhofer IZM: Berlin (2023).
8. Teehan, P., Kandlikar, M. Sources of variation in life cycle assessments of desktop computers. Journal of Industrial Ecology 16(S1), pp. S182-S194 (2012).
9. Enghardt, Z., Tran, T., Luebke, M., Baumer, E.P.S. Incorporating sustainability in electronics design: Obstacles and opportunities. Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, arXiv preprint (2025).
10. Dell. Product carbon footprint Dell USA. <https://www.dell.com/en-us/dt/corporate/social-impact/advancing-sustainability/climate-action/product-carbon-footprints.htm>

#tab0=0&%23pcfs (accessed 12 September 2025).

11. Geekbench. Geekbench 6 (2025). <https://www.geekbench.com/>
12. International Organization for Standardization (ISO). ISO 14067: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. ISO: Geneva (2018).
13. International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 62725: Analysis of quantification methodologies of greenhouse gas emissions for electrical and electronic products and systems. IEC: Geneva (2013).