

전기자동차용 차세대 이차전지의 전과정 평가: 리뷰

최강현¹, 최호재¹, 류태안², 조현근^{1,3}, 장용철², 노고산^{1,*}¹충남대학교 응용화학공학과, ²충남대학교 환경공학과, ³한전 전력연구원

Life Cycle Assessment Studies on Next-Generation Secondary Batteries for Electric Vehicles: Review

Kanghyun Choi¹, Hojae Choi¹, Tae-an Ryu², Hyeongeun Cho^{1,3}, Yong-Chul Jang², Kosan Roh^{1,*}¹Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Korea²Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Korea³KEPRI (Korea Electric Power Research Institute), Korea

ABSTRACT

This study critically reviews life cycle assessment (LCA) studies on next-generation secondary batteries (rechargeable battery) for electric vehicle (EV) applications, focusing on lithium-ion batteries (LIBs) with silicon nanowire/nanotube (SiNW/SiNT) anodes, all-solid-state batteries (ASSBs), and lithium-sulfur (Li-S) batteries. The reviewed work is analyzed in terms of how the goal and scope of the LCA are defined, how life cycle inventories (LCIs) are constructed, and how the environmental impacts are assessed. The energy-intensive manufacturing process of next-generation secondary batteries is a factor in their higher environmental impact compared to conventional LIB manufacturing processes. This suggests that the superiority of LCI can vary depending on the method used to construct the LCI and the assumptions surrounding the manufacturing process. Moreover, most LCA works of these emerging battery systems employ heterogeneous functional units, rely on laboratory-scale studies at low technology readiness levels using bottom-up inventory modelling, and are restricted to cradle-to-gate system boundaries. These characteristics hinder a consistent comparison of environmental impacts across battery chemistries, resulting in substantial uncertainty due to limited data quality. Based on these findings, the paper underlines the need for partial standardization of functional units and system boundaries, systematic inclusion of the use phase, and more rigorous sensitivity and scenario analyses in LCAs of next-generation secondary batteries. It further proposes that future studies adopt top-down LCI construction approaches in which desirable LCA outcomes are first set as targets, and the process conditions and LCI datasets required to meet these targets are subsequently inferred in a backward manner.

Keywords: life cycle assessment (LCA), electric vehicles (EVs), silicon nanowire/nanotube anodes (SiNW/SiNT anodes), all-solid-state batteries (ASSBs), lithium-sulfur batteries (Li-S batteries)

요약

본 연구에서는 실리콘 나노와이어/나노튜브(SiNW/SiNT) 음극 기반 리튬이온전지(Lithium-Ion Battery, LIB), 전고체 이차전지(All-Solid-State Battery, ASSB), 리튬-황(Li-S) 이차전지를 대상으로 수행된 전기자동차용 차세대 이차전지 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA) 연구를 종합적으로 리뷰하였다. 이를 위해 선행연구의 LCA 분석 목적 및 범위 정의, 전과정 목록(Life Cycle Inventory, LCI) 구축 방법, 그리고 전과정 환경영향 평가를 중심으로 분석하였다. 차세대 이차전지의 에너지 집약적 제조

Date Received: Dec. 7, 2025, Date Revised: Dec. 23, 2025, Date Accepted: Dec. 24, 2025

* Corresponding author : Kosan Roh, Tel: +82-42-821-5684, E-mail: ksroh@cnu.ac.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.

공정이 기존 LIB 제조공정 대비 더 높은 환경영향을 나타내는 요인이었고, 이는 LCI를 구성하는 방식과 제조공정의 가정에 따라 우위가 바뀔 수 있음을 알 수 있다. 또한, 대부분의 차세대 이차전지를 대상으로 한 LCA연구는 서로 상이한 기능단위를 정의하고 있으며, 기술 성숙도가 낮은 실험실 단위 연구에 기반한 Bottom-up 방식을 수행하였고, Cradle-to-gate 분석에 머무르고 있다. 이는 이차전지 간 공정한 환경영향의 비교를 어렵게 만들고, 낮은 데이터 품질로 인해 결과의 불확실성이 크다는 한계를 발생시킨다. 이러한 분석을 바탕으로, 본 논문은 기능단위 및 시스템 경계의 부분적 표준화, 사용단계의 체계적 반영, 민감도 및 시나리오 분석의 강화가 차세대 이차전지의 LCA 연구에서 필수적임을 강조한다. 또한, 향후 연구에서는 LCA결과를 이상적인 목표 기준치로 설정하고, 해당 기준치를 충족하기 위해 데이터를 역으로 추산하는 Top-down 방식의 LCI 분석을 제안한다.

주제어: 전과정평가, 전기차, 실리콘 나노와이어·나노튜브 음극, 전고체 이차전지, 리튬-황 이차전지

1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

전 세계적으로 전기자동차(electric vehicles, EVs) 보급 확대와 에너지 전환 정책이 가속화되면서 이차전지에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 2022년 약 700GWh 수준이었던 전 세계 이차전지 수요는 2030년까지 약 4,700GWh에 이를 것으로 전망되며, 이 중 자동차 부문은 약 4,200GWh로써 전체 중 91%에 해당하는 비율로 예측된다[1]. 이는 이차전지가 특정 산업의 에너지 저장 수단에 머무르지 않고, 전 지구적 에너지 시스템 전환의 핵심 요소로 자리 잡고 있음을 시사한다.

이러한 변화에 대응하여 유럽연합(EU)을 비롯한 주요국은 배터리 여권제도 등 관련 정책과 환경적 규제를 빠르게 정비하고 있다. EU는 2025년까지 폐배터리의 재활용 효율성 및 물질 회수율에 대한 계산 및 검증 방법론과 관련 문서화 체계를 마련함으로써, 이차전지 전 주기 관리를 제도적으로 강제하고자 하는 움직임을 보이고 있다[2].

기술 성숙도가 낮아 설계 단계에서의 자유도가 큰 차세대 이차전지의 경우, 초기 단계부터 전과정 평가(life cycle assessment, LCA)를 통해 잠재적인 환경 부하를 진단하고, 이를 저감할 수 있는 설계 방향을 제시하는 것이 이차전지의 경쟁력 측면에서 중요하다. 따라서 차세대 이차전지 기술 개발은 단순히 에너지 효율이나 성능 개선에 국한되어서는 안 되고, 재료 채굴에서 제조, 사용, 폐기에 이르는 전 과정에 이르는 평가를 통해 환경적 부하를 최소화하고 지속가능성을 확보하는 것이 필수적이다.

Fig. 1과 Fig. 2는 2006년부터 2024년까지 출판된 차세대 이차전지 유형별 LCA 논문 편수 분포와 연도별 출판 추이를 각각 나타낸 것으로, 다양한 종류의 차세대 이차전지를 대상으로 LCA 연구가 점차 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히, EV용 이차전지로 활용 가능성이 높은 실리콘 나노와이어/나노튜브(SiNW/SiNT) 음극재 기반 리튬이온전지(lithium-

ion battery, LIB), 전고체 이차전지(all-solid-state battery, ASSB), 리튬-황(Li-S) 이차전지 등 고에너지 밀도를 갖춘 차세대 이차전지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이들 차세대 이차전지는 기존의 상용 LIB를 대체할 가능성을 지닌 기술로 평가되며, 세계 각국의 대규모 국가 프로젝트를 통해 활발히 연구되고 있다. 대표적으로 독일이 주도하는 유럽 이차전지 혁신 프로젝트는 총 29억 유로 규모의 예산이 투입되었으며, 이차전지 수명주기 평가에 중점을 두고 있다[2].

차세대 이차전지를 대상으로 한 LCA 연구의 중요성이 점차 커지고 있음에도 불구하고 기존 LIB에 대한 LCA 관련 리뷰 논문 수 대비 EV용 차세대 이차전지 대상 LCA 리뷰 논문 수는 매우 적고[3], 특히 여러 종류의 차세대 이차전지에 대한 분석은 전무한 것을 확인하였다. 이에, 본 논문에서는 SiNT/SiNW 기반의 LIB, 전고체전지, 그리고 리튬-황 전지를 중심으로 차세대 이차전지에 관한 LCA 연구 동향을 선행 연구사례를 중심으로 리뷰한다. 특히, ISO 14040/44에서 명시하는 4개의 LCA 수행 단계별로 차세대 이차전지 LCA 연구 현황을 분석하고, 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

2. 차세대 이차전지의 종류별 특성과 기술 개요

본 절에서는, EV용 이차전지로 활용 가능성이 높은 실리콘 SiNW/SiNT 음극재 기반 LIB, 전고체 이차전지, 리튬-황 이차전지의 기술적 특징을 정리하고, 기존 LIB 대비 LCA 과정에서 발생할만한 제조공정에서 이슈를 분석하였다.

2.1 SiNW, SiNT 음극재 기반 LIB 기술 개요

상용 LIB의 음극재로 주로 사용하는 흑연의 낮은 이론적 용량은 전기차 시장의 지속적인 수요를 감당하기에 한계가 명확하며, 이를 대체할 새로운 소재의 개발이 많은 관심을 받고 있다. 새로운 음극재 소재가 흑연을 완전히 대체할 수 있다면 [4], LIB의 에너지 밀도는 40% 이상 향상될 수 있으며, 이는

LIB의 다른 구성 요소를 최적화하는 것보다 훨씬 크기 때문이다[5]. 따라서 전통적인 흑연 음극재를 대체할 다양한 소재가 연구되었으며, 이 중에서도 실리кон은 매우 높은 이론 용량(3,579~4,200mAh/g, $\text{Li}_{15}\text{Si}_4\text{-Li}_{22}\text{Si}_5$ 기준), 안정적인 작동 전압($\sim 0.4 \text{ V vs. Li}^+/\text{Li}$), 풍부한 매장량, 환경친화적 특성으로 인해 차세대 이차전지 기술로 주목 받고 있다[6-10].

실리кон 입자의 전기화학적 특성을 향상시키는 한 가지 방법은 나노 크기의 실리кон 입자를 제조하여 실리кон의 팽창·수축에 따른 부정적인 영향을 완화하는 것이다[11, 12]. 실리кон의 크기 제어와 구조 최적화는 리튬·탈리튬화 과정에서의 구조 유지에 크게 기여하며, 나노 크기의 실리кон은 마이크로 크기의 실리кон에 비해 일반적으로 사이클 수명을 크게 향상시킬 수 있다[13]. 대표적으로 SiNTs와 SiNWs는 앞에서 언급한 특징들 외에도 대량 생산이 가능하다는 장점이 있다.[14] LCA 수행 시 나노 입자 배출의 정량적인 측정과 이에 따른 환경 영향의 반영은 주요한 과제로 제시되고 있다.

2.2 전고체 이차전지 기술 개요

Fig. 3은 산화물계 전고체전지의 구조를 보여준다. 전고체 전지는 일반적으로 복합 양극-고체 전해질-리튬 금속(또는 흑

연) 음극 구조를 사용한다 [15, 16]. 리튬 금속은 흑연 대비 약 10배 높은 이론 용량($3,862 \text{ mAh g}^{-1}$)을 나타내지만 액체 전해질과의 낮은 안정성·덴드라이트 형성 문제로 적용이 어렵다. 하지만 전고체전지는 전해질의 기계적 강도와 비가연성 덕분에 리튬 금속의 음극 적용 시에 화재 위험이 낮다[17, 18]. 이에 따라 셀 기준 기존 LIB의 약 $200\text{--}300 \text{ Wh kg}^{-1}$ 를 넘어 약 $350\text{--}500 \text{ Wh kg}^{-1}$ 의 고에너지 밀도를 달성할 잠재력이 보고되었다[19, 20]. 또한 고체 전해질의 넓은 전위 안정창은 고전압 양극과의 조합을 가능하게 해 에너지 밀도 향상에 기여한

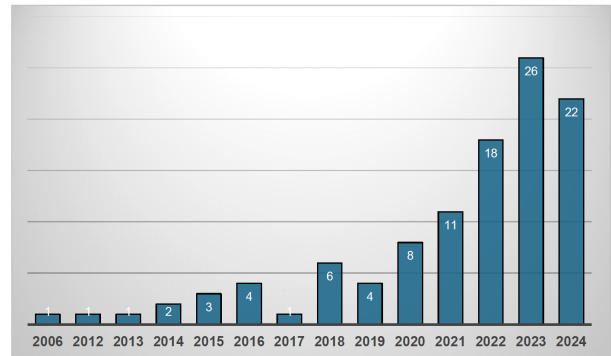


Fig. 2. Number of previous publications on LCA of next-generation batteries by year.

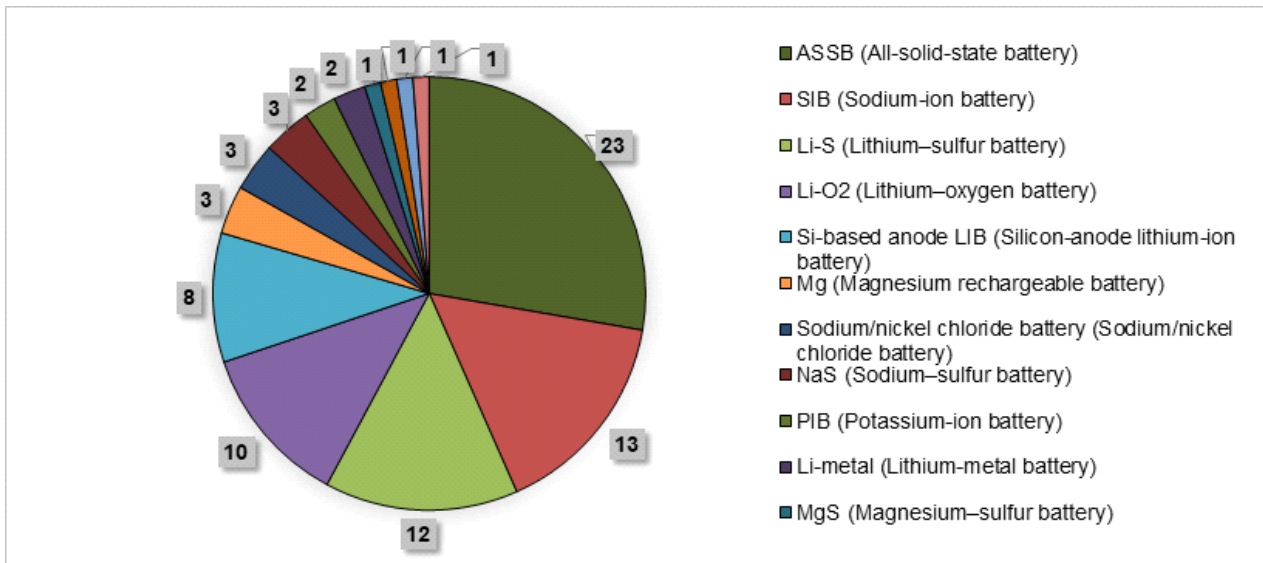


Fig. 1. Distribution of LCA studies categorized by battery type in our survey between 2006 and 2024. Search keywords (Web of Science & Google Scholar): 'Sodium ion battery LCA', 'Na ion battery LCA', 'Potassium ion battery LCA', 'K ion battery LCA', 'Silicon battery LCA', 'SiNW LCA', 'SiNT LCA', 'LiS battery LCA', 'lithium sulfur battery LCA', 'Li-air LCA', 'LiO₂ LCA', 'Lithium metal LCA', 'Ca ion battery LCA', 'Calcium ion battery LCA', 'Mg ion battery LCA', 'Magnesium ion battery LCA', 'Zn ion battery LCA', 'Zinc ion battery LCA', 'Al ion battery LCA', 'Aluminum ion battery LCA', 'Solid state battery LCA', 'Anode free battery LCA', 'Bipolar battery LCA', 'Redox flow battery LCA', 'Next generation battery LCA'.

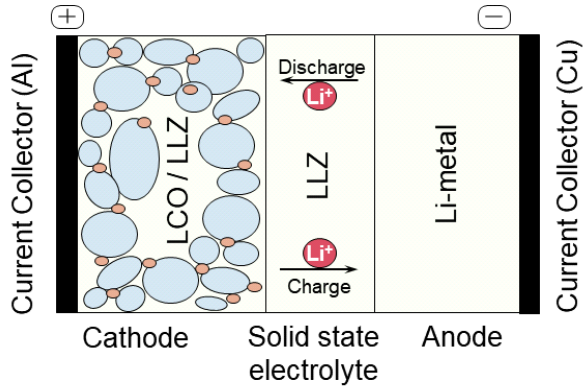


Fig. 3. Schematic illustration of an ASSB.

다[20,21].

황화물계는 상온 이온전도도가 $10^{-3} - 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ 로써 매우 높고[15,22,23], 낮은 소결 온도와 우수한 가공성으로 테이프 캐스팅 및 슬러리 코팅에 유리하다 [24,25]. 그러나 황화물계는 높은 전압에서 구조적으로 불안정하며 수분에 매우 민감하여 공기 노출 시 황화수소 발생과 전도도 저하가 발생하는 문제가 남아 있다. 산화물계의 상온 이온전도도는 통상 $10^{-4} - 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 로 보고되며 [26, 27], 최대 ~6 V의 전위 안정창, 우수한 공기 안정성 및 리튬 금속과의 상대적으로 낮은 반응성을 보인다[28,29]. 다만 1,000°C 이상의 고온에서 소결이 필수적이고 전극- 전해질 접촉 불량, 계면 반응 및 공극 형성에 따른 저항 증가의 단점이 있다[30]. 마지막으로, 고분자계는 용액 공정이 가능하고 박막화·적층에 유리하며 조성에 따라 전압 안정성 5 V 이상과 우수한 계면 적합성을 달성할 수 있다 [31]. 그러나 상온 전도도가 $10^{-6} - 10^{-5} \text{ S cm}^{-1}$ 수준으로 낮아 고온 운전이 요구되는 경우가 많다 [32, 33].

이러한 전고체전지의 종류마다 제조 공정이 상이하여 LCA 수행 시 공정 에너지, 설비 가동 시간, 수율·스크랩율, 용매 및 전극재 사용량도 달라진다. 이는 LCA 결과의 불확실성이 커지는 결과로 이어진다.

2.3 Li-S 전지 기술 개요

리튬-황(lithium-sulfur, Li-S)전지는 기본적으로 양극에 황(S)을, 음극에 리튬(Li)을 사용하는 구조이며(Fig. 4), 황 원자 1개당 2개의 Li 원자와 반응하여 높은 이론 용량(1,675mAh/g)과 에너지 밀도(2,600Wh/kg)를 나타낸다[34, 35]. 이는 LIB보다 다섯 배 큰 중량당 에너지 용량으로써, 높은 에너지 밀도와 이론 용량뿐만 아니라 친환경적인 소재로 인해 주목받고 있다.

또한 황은 2025년 미국 지질조사국(MSGS)의 보고서에 따

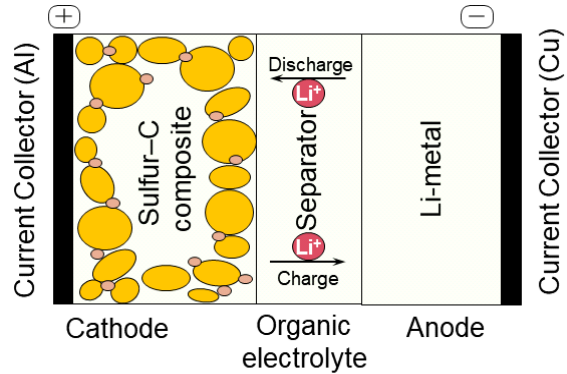


Fig. 4. Working principle of a Li-S battery.

르면, 전 세계 자원량이 50억 톤으로 추정되며, 현재 매장량과 공급량 모두 안정적이라는 평가를 받고 있다. 리튬의 전 세계 자원량이 1억 1,500만 톤 수준이기 때문에 리튬과 비교시 황은 차세대 배터리 산업에서 매력적인 물질이라고 볼 수 있다[36].

그러나 폴리설파이드 셔틀 효과와 같은 기술적 문제들로 인해 본격적인 상용화에는 어려움이 있다[37]. 리튬-황전지의 충방전 과정에서 만들어진 리튬폴리설파이드(Li_2S_n)의 용출 시 이차전지 내에 여러 문제가 발생할 수 있으며 이를 폴리설파이드 셔틀 효과(polysulfide shuttle effect)라고 한다. 이에 따라, 이차전지 자체의 용량 감소, 리튬 음극 표면 손상, 사이클 수명 저하가 발생한다. 따라서 폴리설파이드가 리튬 음극과 반응하지 않도록 제어하는 것은 성능 유지에 매우 중요하다[38, 39].

결론적으로 황은 자원이 풍부하고 비용이 낮은 장점이 있지만 기존 양극재와는 다른 반응 특성을 가지므로 LCA 측면에서 리튬-황 배터리는 양극 소재의 반응 특성과 공정 차이로 인해 기존 LIB와는 다른 환경 영향을 나타낼 수 있으므로, 정밀한 평가가 요구된다.

3. 차세대 이차전지의 LCA 연구사례 분석

본 절에서는 이차전지의 LCA 과정 및 특징을 정리하고, 차세대 이차전지(실리콘 SiNW/SiNT 음극재 기반 LIB, 전고체 이차전지, 리튬-황 이차전지)의 선행연구를 LCA의 각 단계(목적 및 범위 설정, LCI 분석, 해석)에 따라 분석하였다. 각 단계에서 기존 LIB와 비교해서 차세대 이차전지가 가지는 특징과 이슈를 나타내었다.

3.1 EV용 이차전지의 LCA

Fig. 5는 LIB의 전과정 시스템 경계를 보여준다. 생산·제조 단계는 시스템 경계로 보면 주로 Cradle-to-gate 영역, 즉

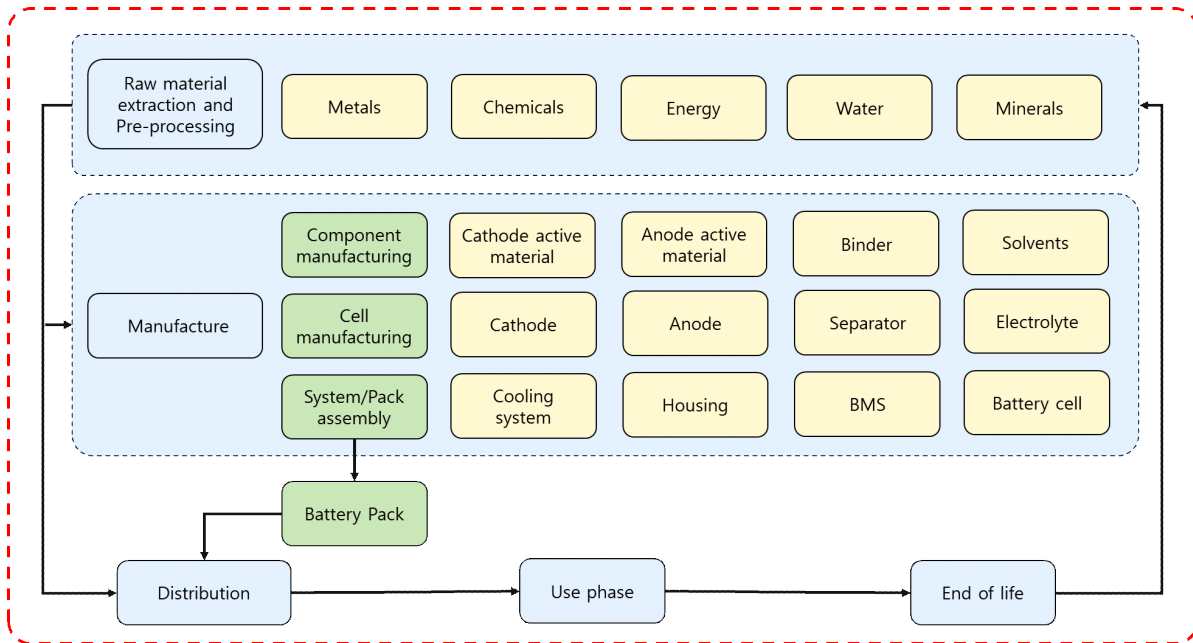


Fig. 5. Major life-cycle stages for vehicle and stationary batteries.

이차전지의 원료 채굴 → 소재·부품 생산 → 셀·팩 제조까지를 포함한다. 많은 LIB의 LCA에서 재료 생산과 배터리 제조가 Cradle-to-gate 에너지 소비량의 대부분을 차지한다고 보고하며, 에너지 소비량 추정치는 생산 1kWh당 수백 MJ 범위에 해당하는 것으로 알려져 있다[40]. 원료 채굴 및 소재 생산 단계는 이차전지의 양극 소재 금속(Ni, Co, Mn, Li, Fe, P 등)이 주요 환경부하를 차지하며, 이외에도 음극 소재(흑연)의 열처리 과정, 집전체(Al, Cu) 제조 등이 있다. 다음으로 셀·모듈·팩 제조 단계는 전극 활성물질 제조, 전극 제조, 셀 조립 및 셀 피닝, 모듈/팩 조립으로 인해 많은 에너지가 소모된다[41].

Cradle-to-grave 경계에서는 사용단계와 폐기·재활용까지 포함하며, 사용단계에서 EV용으로 고려할 때 배터리의 온도, 주행습관, 충·방전 패턴 등 변수가 매우 다양하다. 실제 배터리의 성능과 수명은 운전 조건에 따라 크게 달라지기 때문에 실제 데이터가 없다면 반영이 어렵다. 재활용 단계 또한, 기술 성숙도가 낮으며, 회수된 금속이 실제 생산을 얼마만큼 대체하는지(credit) 불확실한 실정이다[40].

3.2 목적 및 범위 정의

전기자동차의 경우 전기모터를 동력원으로 삼기 때문에 주행 중 환경영향을 발생시키지 않는다. 그러나 전기자동차를 구동하는 에너지원인 전기를 생산하는 과정에서 발생하는 환경영향은 반드시 고려되어야 한다. 일반적으로, 전기는 발전소에

서 다양한 환경영향을 배출하면서 생산되므로, 발전과정에서 발생하는 온실가스는 전기자동차와 관련된 온실가스 배출량에 포함하여야 한다 [42]. 따라서 전기자동차용 이차전지의 LCA 수행에 있어서 사용단계의 포함 여부를 명시해야 한다.

그러나 차세대 이차전지의 낮은 기술 성숙도, 산업 데이터의 부재 등의 이유로 사용단계를 제외하고 LCA 수행을 진행하는 것이 일반적이다. 이러한 선행연구들은 선정된 제품의 전체 흐름을 비교할 수는 없지만 사용 전 단계에 집중하여 숨은 환경이슈를 규명하거나 후속 연구의 문헌적 기반이 된다는 점에서 의의가 있다.

본 연구에서 검토한 24편의 차세대 이차전지 LCA 연구 논문들을 이차전지 종류, 시스템 경계, 기능 단위, 영향지표 관점에서 Table 1과 같이 요약했다. 차세대 이차전지의 LCA에서는 기능단위(functional unit, FU)와 시스템 경계의 정의가 연구 목적과 기술 성숙도 및 데이터 가용성에 따라 달라지며, 결과 비교의 해석에 결정적인 영향을 미친다. Fig. 6를 보면 이차전지 FU는 일반적으로 셀 1개, 팩 1개, 용량 1kWh, 전달에너지 1kWh 등 다양하여 각 연구 간 결과 비교를 어렵게 한다. 일반적으로 EV에 들어가는 팩 단위의 용량 1kWh가 사용되며 사용 단계를 포함하는 경우 주행거리 1km 및 전달 에너지 1kWh를 활용하는 경우도 있다.

Table 1. Summary of 24 publications on LCA of next-generation secondary batteries

Author (Publication year)	Battery type (Cathode/Anode/Electrolyte)	System boundary	Functional unit	Primary data	Impact indicator
Accardo et al. (2024) [43]	NCM622/SiNWs/LiPF6	Cradle-to-gate	1 kWh (cell)	1	GWP, AP, FEP, FETP, ADP-fossil, ADP-elements
Wang et al. (2022)[44]	NCM111/SiNWs, SiNTs/LiPF6	Cradle-to-Grave	1 km, 1 kWh (pack)	2	GWP, FDP, FETP, FEP, HTP, METP, MEP, MDP, ODP, PMFP, POFP, TAP, TETP
Wang et al. (2019) [45]	NCM111/SiNWs, SiNTs/LiPF6	Cradle-to-gate	1 kg (anode), 1 kWh (pack)	1	GWP, FDP, FETP, FEP, HTP, METP, MEP, MDP, ODP, PMFP, POFP, TAP, TETP
Deng et al. (2018) [46]	NCM111/SiNTs/LiPF6	Cradle-to-Grave	1 km	2	GWP, FDP, FETP, FEP, HTP, METP, MEP, MDP, ODP, PMFP, POFP, TAP, TETP
Wu et al. (2018) [47]	NCM111/SiNWs/LiPF6	Cradle-to-gate	1 kg (anode), 1 kWh (pack), 1 kWh (energy delivered)	2	FDP, GWP, TAP, HTP, FEP, PMFP, MDP, MEP
Li et al. (2014) [14]	NCM111/SiNWs/LiPF6	Cradle-to-Grave	1 km	1	HTP, TETP, POFP, ODP, EP, AP, GWP, ADP
Li et al. (2013) [48]	Lithium Foil/SiNWs/LiPF6	Cradle-to-Grave	1 km	1	GWP, AP, EP, ODP
Troy et al. (2016) [49]	LCO-LLZO/Li-metal/ LLZO	Cradle-to-gate	1 cell	1,2	CED, GWP, ODP, POCP, AP, PMFP, IR, EP, FETP, HTP-c, HTP-nc, RDP
Zhang et al. (2022) [50]	NMC811/ Li-metal/ LATP	Cradle-to-gate	1 cell	1,2	GWP, AP, ODP, POFP, PMFP, EP, FETP, HTP-c, HTP-nc, FDP
Rietdorf et al. (2022) [51]	NMC811/ Li-metal/LiGPS,LiPS	Cradle-to-Grave	1 kWh (cell)	1,2	WS, LU, MDP, FDP, AP, TEP, MEP, FEP, FETP, IR, POCP, ODP, HTP-nc, HTP-c, GWP
Lastoskie and Dai (2015) [52]	MO, LCO, NCM, LVO, SVO, NCA, LNMO, CuMn / C-Li / LiPON	Cradle-to-gate, Well-to-Wheel	1 Wh (cell)	2	CED, GWP, HTP, PMFP, FEP, POFP, WDP, MDP
Schreiber et al. (2023) [53]	NMC-LATP/ Li-metal/ LLZO+LATP	Cradle-to-gate	1 cell	1,2	GWP, PMFP, FDP, WS, FETP, FEP, HTP-c, HTP-nc, IR, LU, METP, MEP, MDP, POCP, ODP, AP, TETP
Liu et al. (2024) [54]	NMC/ Li-metal/ LLZO	Cradle-to-gate	1 kg, 1 kWh (pack)	2	CF / WF / MF / EF / HF
Batuecas et al. (2024) [55]	FePO4/Na-metal/ NASICON	Cradle-to-gate	1 cell	2	ADP, ADP-fossil, GWP, ODP, HTP, FETP, METP, TETP, POCP, AP, EP
Smith et al. (2021)[56]	NMC622/ Li-metal/ LLZTO	Cradle-to-gate	50 MJ (energy delivered)/ 1 kg (cell)	2	GWP, FETP, TETP, HTP, METP, FEP, MEP, AP, CED
Keshavarzmoha et al. (2018)[57]	FeS ₂ / Li-metal/ Li ₂ S-P ₂ S ₅	Cradle-to-gate	80 kWh (pack)	1,2	GWP, ODP, POFP, AP, EP, HTP-c, HTP-nc, PMFP, ETP
Deng et al. (2017)[58]	GSC&GO/ Li-metal/ LiTFSI	Cradle-to-Grave	1 km	1,2	GWP, FDP, ODP, POFP, PMFP, TAP, FEP, MEP, FETP, METP, TETP, HTP, MDP

Table 1. Continued

Author (Publication year)	Battery type (Cathode/Anode/Electrolyte)	System boundary	Functional unit	Primary data	Impact indicator
Wolff et al. (2019)[59]	Sulfur-carbon complex /Li-metal/ LiTFSI+DME+DOL+LiNO ₃	Cradle-to-Grave	1 km	2	ADP, AP, EP, GWP, POCP, MDP, PED
Feng et al. (2024)[60]	Sulfur-carbon complex/Li-metal /LiTFSI	Cradle-to-gate	1 kWh (pack)	1,2	GWP, ODP, POFP, EP, FETP, METP, HTP, TETP, ADP, ADP-fossil
Benveniste et al. (2023)[61]	Sulfur-carbon complex/Li-metal/ LiTFSI	Cradle-to-Grave	1 kWh (pack)	1,2	ADP, AP, EP, GWP, POCP, MD, PED
Lopez et al. (2021)[62]	NaCMC-sulfur, graphene-CNT-Co-sulfur, Li ₂ S-graphene, MgB ₂ -sulfur, Co ₉ S ₈ -sulfur	Cradle-to-gate	1 kWh (pack)	2	ODP, ADP, FETP, POCP, TAP, METP, FDP, GWP, TETP, HTP, EP
Benveniste et al. (2019)[63]	Sulfur-carbon complex/Li-metal /TEGDME	Cradle-to-gate, Cradle-to-Grave	1 cell, 22 kWh (pack)	1	AP, EP, GWP, ODP, POCP, ADP, ADP-fossil
Arvidsson et al. (2018)[64]	CMK-3+Sulfur/ Li-metal /LiTFSI+DIOX+DME	Cradle-to-gate	1 kWh (cell)	2	GWP
Teah et al. (2024)[65]	Li ₂ S8-CNT/Li-metal /LiTFSI+LiNO ₃ +DME+DOL	Cradle-to-gate	1 kWh (pack)	1,2	GWP, HTP-c, HTP-nc, FETP, METP, TETP, ADP, ADP-fossil, AP

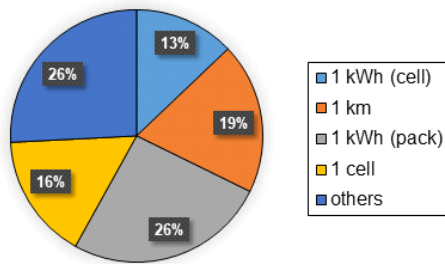


Fig. 6. Distribution of FUs in LCA of SiNW, SiNT, lithium-sulfur, and solid-state batteries.

3.2.1. 기능단위

SiNWs 및 SiNTs처럼 음극재에 따른 환경영향을 중점적으로 분석하는 경우에는 음극재 1kg를 기능단위로 정의한다. 그러나 이차전지의 셀·팩 개수 또는 질량을 기능단위로 한 LCA는 제품이 제공하는 실제 서비스 기능을 직접 반영하지 못한다[66]. 또한 전고체전지에서 셀 외 구성(BMS·냉각시스템·하우징)이 팩 질량의 약 30%를 차지한다는 보고가 있어, 실제 전기차 구동 시스템을 제대로 반영하려면 BMS·냉각·하우징을 포함하는 팩 단위 분석이 필요하다[3].

한편, 차세대 이차전지 기술 간의 비교가 이루어질 때는 이차전지 팩 수명 동안의 전달 에너지 1 kWh를 채택하여 기술

간 격차를 줄이려는 시도도 가능하다[46]. Smith et al. [56]은 사용단계 데이터의 부재로 사용단계를 포함하지 않았지만, 이차전지 셀에 전달되는 50 MJ 에너지와 1 kg 두 개의 기능단위를 정의하여 방전에너지 사이클을 통해 기존 LIB와 전달에너지 효율을 비교하고자 했다.

리튬-황 전지에서는 1km와 1kWh가 주로 기능단위로 정의되었으며, Benveniste et al. [63]의 연구에서는 Cradle-to-gate에서 코인셀 1개를 기능단위로, Cradle-to-Grave에서는 22kWh 용량의 리튬-황전지 시스템 1개를 기능단위로 설정하였다. Heng Yi Teah et al. [65]은 BatPaC 모델을 활용하여 설계된 100kWh 전기차 이차전지 팩을 기준으로 전체 시스템을 모델링한 뒤, 이를 용량 1kWh 단위로 정규화(normalization)함으로써 환경영향을 표준화된 단위로 환산할 수 있었으며, 이를 통해 다양한 차세대 이차전지 기술들의 정량적 비교 및 분석이 가능하도록 하였다. 이러한 접근은 차세대 이차전지 간의 환경 영향을 평가하는데 있어 일관된 기준을 제공한다.

3.2.2 시스템 경계

SiNW와 SiNT 기반 LIB를 위한 LCA 4편의 논문에서 시스템 경계는 몇 가지 가정 및 제약을 도입한 후 Cradle-to-grave로 설정되었다. 이차전지의 수명 종료 단계(end-of-life, EoL)에 대해서는 시나리오 분석 시 재활용된 소재들을 사용

할 때 기대 가능한 환경적 크레딧을 고려했다[43, 46]. 이는 차세대 이차전지 기술의 상용화 가능성을 환경적 측면에서 바라볼 때 중요한 역할을 한다. 다만 SiNWs와 SiNTs의 경우 EoL 단계의 개선보다 공정 과정에서 발생하는 나노입자 오염 물질에 대한 정량적 평가 및 고온 공정에 의한 환경적 영향을 줄이기 위한 노력이 중요하다.

9편의 전고체전지 LCA 관련 논문 중 7편이 시스템 경계를 Cradle-to-gate로 설정했는데, 이는 상용화가 어려운 기술적 제약이 있어 사용 단계를 포함하기 어려웠던 것으로 사료된다. Rietdorf et al.[51]은 데이터 부재를 이유로 사용 단계와 EoL을 제외한다고 명시하면서도, 높은 에너지 밀도로 인한 질량 저감에 따른 사용 단계 에너지 소비 감소의 잠재적 이점을 논의했다.

리튬-황 전지 대상 LCA 연구는 총 8편이 확인되었으며, 이 중 Cradle-to-Grave를 적용한 논문은 4편, Cradle-to-gate를 적용한 논문은 4편이었다. Benveniste et al. [63]의 연구는 기능 단위에 따라 시스템 경계를 분리하여 설정한 점이 특징적이다. 먼저, 초기 단계에서는 실험실 수준에서 제작된 코인셀의 생산 공정을 중심으로 Cradle-to-gate에 대한 LCA를 수행하였다. 이후 해당 데이터를 바탕으로 스케일업(scaling-up) 과정을 통해 22kWh 용량의 EV 이차전지 팩으로 확장한 후, 실제 주행 조건을 가정한 Cradle-to-Grave LCA를 추가로 수행하였다. 이 이차전지는 약 1,000회의 충·방전 수명을 기준으로 하여 총 150,000km의 주행 거리를 지원할 수 있는 것으로 가정했으며, 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량은 총 14,600kg CO₂-eq으로 분석되었다.

3.3 LCI 분석

3.3.1 이차전지 생산단계

LCI 분석은 목적 및 범위 정의에서 설정한 요건에 따라 데이터 수집 및 검증과정을 거치고 이를 토대로 환경영향을 일으키는 원인이 될 수 있는 환경부하를 정량적으로 계산하여 목록화하는 과정이다[42]. 차세대 이차전지 LCA 선행연구에서는 LCI 분석을 위한 다양한 분석 기법을 활용했다. 가장 일반적인 방법은 기존 문헌의 데이터와 상용 LCI DB를 활용하는 방법으로 모든 논문이 실험실 단위 데이터를 포함하고 있었다.

SiNTs, SiNWs LCA의 초기 선행연구는 추출 및 제조 단계의 데이터가 충분하지 않았기 때문에 대부분 실험실 데이터를 바탕으로 한 화학양론적 계산의 비중이 컸다. 대표적으로 Li et al.[48]은 SiNWs의 나노입자에 대한 평가 지표와 방법이

부재하여 일부 소재 가공, 부품 제조 및 이차전지 제조에 대한 LCI 데이터는 이론적 계산치와 실험적 데이터가 혼합된 형태를 사용하였다.

전고체전지에서는 LCI 데이터의 부재를 해결하기 위해 Rietdorf et al.[51]은 Ecoinvent에 Li₂S, P₂S₅, GeS₂, Ge를 문헌값으로 전구체 LCI를 모델링했다고 명시했다. 또한, Batuecas et al. [55]은 일부 LCI는 데이터베이스 부재로 proxy 데이터를 사용했는데, 화학적 유사성을 근거로 PVDF 대신 PVDC로 대체하고 YSZ는 순수 ZrO₂ 1 kg과 동등하다고 가정했다. 또한, FePO₄는 화학양론 반응식 모델로 LCI를 구성해 질량수치를 도출하였다. 전고체전지 중 NASICON 제조 에너지는 열처리 온도(500℃)구간에서 DSC(differential scanning calorimetry)로 얻은 열유량을 적분해 필요한 열량을 계산하여 추정하였다. Zhang et al.[50]은 공정별 (전력×시간×사용계수) 합산을 통한 Bottom-up 방식으로 제조 에너지를 계산했고 핫 플레이트 에너지 소비량의 경우 실측치를 사용했다.

실험실 데이터의 경우, 상용화 시점과 가장 상이한 값은 제조에너지로, SiNWs, SiNTs 대상 LCA 연구에서는 이차전지 제조에 필요한 전력소비량을 계산할 때 파일럿 공장의 실측 데이터를 사용하거나[46], 실제 산업조건을 모델링하여 데이터의 불확실성을 낮추고[14], EV에서의 사용 단계까지 포함하는 방식을 채택했다. 이는 이차전지 구성 요소의 상당부분이 기존 LIB와 유사하기 때문에 다른 차세대 이차전지의 LCA 연구보다 상대적으로 수월하게 진행될 측면이 있다고 판단된다. 마찬가지로, Smith et al. [56]은 전고체 이차전지 유형의 열·전기 에너지 소비량이 기존 LIB 공정과 동일(문헌 [44] 기반)하다고 가정하되, 전고체 전지의 전해질 생산은 별도로 계산하여 세라믹 공정의 높은 에너지 사용량을 반영했다. Keshavarzmoha et al. [57]은 기존 LIB와 다른 포메이션 사이클은 제외하고 건조실 공정만 추가하여 황화물계 전고체전지의 제조에너지 LCI를 분석했다.

리튬-황 전지에서 Deng et al.[58]의 연구는 실험 데이터와 이론적 모델링을 결합한 하이브리드 LCI 분석 모델을 구축하여 리튬-황 전지 재료의 LCI를 작성한 연구이다. 그래핀-황 복합체(GSC)와 그래핀 옥사이드(GO)는 실험실 기반 제조 실험과 Hummers 방법[16]을 바탕으로 LCI를 모델링했으며, 재료 투입량은 산업용 원심분리기 효율 98.5%를 가정한 뒤 실험실 단위 데이터를 선행 외삽하여 결정했다.

Wang et al.[44]은 SiNWs 및 SiNTs의 기존 LCA 연구 데이터를 바탕으로 LCI를 분석할 수 있는 Excel 기반의 평가 프로그램 개발했다. 음극재 및 이차전지 팩의 무게, 생애주기 동안의 운행거리를 입력하면 생산, 사용, 최종 폐기 단계의 환

경영향 평가가 가능하다. 분석 결과, 이차전지의 환경영향은 사용, 생산, 최종 폐기 단계의 순으로 크게 나타났다. 이는 제조·생산 단계에서 환경영향이 가장 크게 나타났다고 발표한 다른 연구들과 차이점을 보였다.

차세대 이차전지의 경우, 사용 후 폐기 단계는 관련 데이터의 부재로 시스템 경계에 포함되지 않거나 가정을 통해 일정 부분만 LCI에 포함되고 있다. 특히 재활용된 소재들은 품질이 높지 않아 이차전지 제조·생산에 활용될 수 없기 때문에 시나리오 분석 시 가산점을 부여하는 방식으로 평가가 제한된다 [43, 46].

전고체 전지의 핫스팟(hot spot)인 고체 전해질의 목표 두께를 바탕으로 질량을 역추적하는 방식을 도입할 수도 있다. Rietdorf et al.[51]은 산정한 전해질 층의 체적에 재료 밀도, 층 내 각 구성, 공극률을 곱해 재료별 질량을 추정하여 LCI를 분석했다. Lastoskie and Dai [52]는 폴리머 두께 고정 후 나머지 층 두께를 조정해 ‘Sakti3’의 실제 원소 조성과 합치되도록 역산했다. 또한, Schreiber et al. [53]은 PVD/Sol-gel 증착 가능 범위의 상한인 동시에 테이프 캐스팅 가능 범위의 하한 구간에 해당하는 분리막 두께를 설정하여 실험적으로 구현되지 않은 셀을 설계하고 LCA를 수행했다.

결론적으로, 차세대 이차전지 관련 LCI 분석의 특징은 유사한 proxy 데이터를 사용하거나 화학양론 또는 기존 문헌 내용을 기반으로 모델링하는 경우가 많았다. 제조 에너지는 실측 데이터가 없는 경우 실험 장비의 측정값 기반 Bottom-up 방식을 통해 에너지 소비량을 추정하거나 LIB 가정 차용에 의존하며, 이에 따른 불확실성이 크므로 가정의 투명한 공개, 민감도 분석, 파일럿 계측 데이터 축적, 표준 단위공정 데이터DB 구축이 필수적이다.

3.3.2 사용 단계

전통적인 내연기관 차량과 EV를 비교했을 때, EV는 생산 단계가 더 크지만, GWP, TETP, FDP와 같은 주요 지표에서는 사용단계가 지배적이라고 명시하고 있다[67, 68]. 따라서, 차세대 이차전지의 사용단계에 대한 LCI 구성은 기존 LIB와 비교하기 위해서 필수적이다. 하지만, 아직 상용화되지 않은 차세대 이차전지 기술의 LCA 연구 수행 시 데이터의 부족이 필연적으로 존재한다. 따라서 분석 과정에서 수반되는 합리적인 가정들을 명확히 기술하는 것 역시 중요하다. 대부분의 전기자동차용 이차전지의 사용 단계에서 공통적으로 언급되는 가정들은 전기자동차의 무게, 서비스 기간 및 주행 거리, 이차전지 팩의 용량 및 충방전 효율, 그리고 충전에 활용되는 전력

량을 포함한다. 예를 들어, 대상 국가를 미국으로 선정 시, 45%의 고속도로와 55%의 도시 주행을 가정하고 전비는 164.8Wh/km(미국 환경보호청 EPA, 2013년도 기준), 전력 변환 및 송배전 효율은 91.4%(미국 에너지정보청 EIA, 2013년도 기준)가 사용된다[14, 46, 48]. Deng et al.[46]은 이차전지 팩을 구성하고 요소별로 데이터를 종합적으로 계산하기 위해 Argonne National Lab의 BacPac 소프트웨어를 활용했다. 이를 통해 연구의 기준이 되는 이차전지 팩이 1회 충전으로 320km의 전기자동차 주행이 가능한 120kW 출력을 내도록 설계했으며, 이는 미국 에너지부(DoE)의 2020년 목표를 충족하기 위함이다.

이처럼 시스템 경계에 사용 단계가 포함되는 경우, 기준이 되는 이차전지 셀 또는 팩이 분석하는 것이 유의미할 정도로 충분한 용량을 갖추었는지 선제적으로 판단하는 것이 매우 중요하다. 즉, 차세대 이차전지도 기존의 LIB를 탑재한 전기자동차가 내연기관 차량 대비 환경적 이점을 갖기 위해서 사용된다는 목적성에 부합하기 위해 요구되는 성능을 만족해야 LCA 연구가 유의미해진다. 한편, Deng et al.[46]은 SiNTs의 사용 단계 LCI 분석 시 용량 저하율(decay rate)을 기준으로 삼았다. NCM-SiNT 이차전지를 사용하는 중형차를 10년 동안 미국에서 운행할 경우 약 200,000km를 주행할 수 있다 [69]. 이때 주행거리 T는 (식 1)의 공식으로 계산된다[38]:

$$T = D_0(c - (rc^2)/2). \quad (\text{식 1})$$

여기서 D_0 는 1회 충전에 따른 초기 주행 거리이며, c 는 충·방전 횟수(cycling number), r 은 용량 붕괴율(capacity decay rate)을 의미한다. 이차전지의 교체 기준을 용량 30%의 손실로 두고 초기 주행 거리를 320km로 가정한다면 200,000km 주행거리를 만족하기 위한 용량 붕괴율 r 은 0.04% 이하여야 한다. 현재 실험실 단계에서 제조할 수 있는 SiNTs 음극재의 용량 붕괴율은 0.004% 미만까지 구현되었기 때문에 [70], SiNTs는 사용 단계를 시스템 경계에 포함하기에 충분한 성능을 가지고 있다고 볼 수 있다[46].

검토된 전고체전지 LCA 논문 중 사용단계를 다룬 경우는 1개밖에 없었으며, 이는 관련 데이터 부재 때문이다. Lastoskie and Dai [52]는 BEV 120,000 miles/10년 운행을 기능단위로 설정하고, US ABC(US Advanced Battery Consortium) 목표치인 40kWh 팩을 가정했다. 유럽 표준 주행 사이클을 Vehicle Simulation Program(VSP)으로 모사하여 km당 에너지 소비량을 구했으며, DoD 80%와 충전 손실 10%를 반영해 실제 그리드 전기 소비량으로 환산했다. 팩 질량은 셀 에너지 밀도에 의존하기 때문에 전고체 전지의 높은

에너지 밀도가 차량 질량을 낮추고 주행 전력을 절감할 수 있다. 전고체 전지의 낮은 이온전도도, 전기화학적 안정성, Li 금속 호환성, 제조 공정의 업 스케일링 등의 과제를 극복했다고 가정된 낙관적인 시나리오에서는 전고체 전지가 LIB보다 환경적으로 우세한 것으로 분석되었다.

리튬-황 전지 연구 중 Deng et al.[58]은 미국 환경보호청(EPA)의 도시 주행 사이클(UDDS)과 고속도로 연비 시험 사이클(HWFET) 패턴을 활용하여 리튬-황 전지를 탑재한 전기 자동차의 실제 주행 중의 전기 소비를 시뮬레이션했다. 이를 통해 NCM-Graphite 기반 LIB 대비 온실가스 배출량을 4.3% 감소시킬 수 있다는 결과를 발표했다. Wolff et al.[59]은 이차 전지의 성능 실험 데이터를 바탕으로 선형 회귀 기반 공식을 사용해 총 사용 가능 에너지와 주행 거리를 산출하고 사용 단계에서의 온실가스 배출량을 계산했다.

한편, 사용 단계에서의 환경영향을 저감하는 가장 좋은 방법은 충·방전에 사용되는 전기의 재생 에너지 비중을 높이는 것이다. 그리드 믹스 내 재생 전원의 비율이 증가하면 동일한 전기에너지 소비를 전제로 하더라도 온실가스를 포함한 주요 환경영향 지표가 낮아질 것이다. 따라서 대상 국가 혹은 지역에 맞는 그리고 믹스 데이터를 사용하여 해당 지역의 세분화된 접근이 필요할 것이다.

3.4. 해석

3.4.1 LCA 결과 해석

Fig. 7은 기존 LIB와 리뷰된 차세대 이차전지의 논문에서 제공하는 GWP의 수치를 비교한 그래프이다. LIB도 실험실 단위 여부 및 데이터 출처에 따라 굉장히 넓은 범위로 나오는 것을 볼 수 있다. Li-S 및 Si 음극 기반 이차전지는 논문 내에서 동일한 저자가 비교했을 때 기존 LIB 대비 GWP 수치가 약간 우세하게 나왔다. 이는 에너지 집약적 제조공정으로 인한 차이였고, 전고체 이차전지는 전해질 종류(황화물, 산화물 등)에 따라 양극의 종류 및 제조공정까지 달라지기 때문에 가장 큰 GWP 편차를 보였다.

다른 환경영향 지표도 살펴보면, NCM 계 SiNTs 이차전지는 GWP와 FDP 측면에서 LIB와 유사한 환경영향을 보이기 때문에 향후 지속 가능한 개발을 위해서는 이러한 환경영향을 개선할 수 있는 잠재적 방안을 찾는 것이 필요하다[46]. Deng et al.[46]은 이차전지의 대규모 생산을 고려할 경우 전극 합성에 사용되는 재료의 효율성을 높이는 것이 가능함을 제시했다. 대표적으로 마그네슘 열환원 반응의 효율을 32%에서 65%로 향상시키고, 주형(template) 1kg 당 사이클로hex산의 사용량을 12.5kg으로 줄일 수 있다. 이러한 대규모 생산 시나리오의 환경영향에서는 GWP, FDP, ODP, PMFP, POFP, TAP, TETP 등 다양한 환경 영향 범주에서 15%~50%의 개선 효과가 나타나며, 이는 고주행 거리와 낮은 환경영향을 동시에 달성할 수 있음을 의미한다.

Accardo et al[43]은 SiNW를 포함하여 LIB, SiCPAN (silicon-polyacrylonitrile), 전고체전지, 리튬-황전지를 대상으로 최악의 시나리오와 최적의 시나리오 분석을 진행하였다. 그

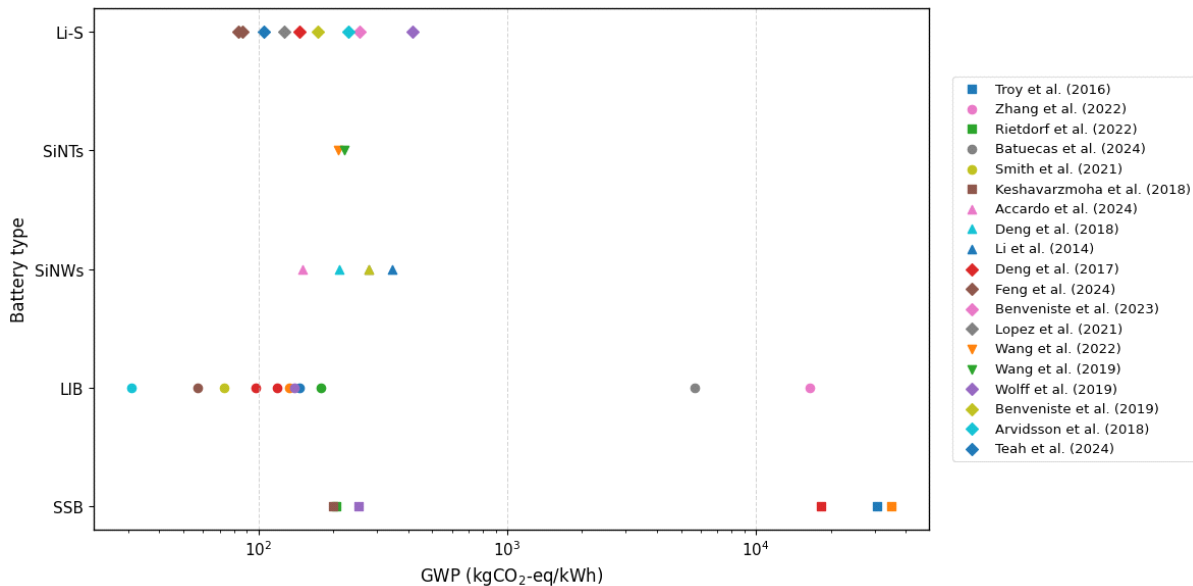


Fig. 7. Comparison of GWP of LIBs and next-generation secondary batteries.

결과 SiNWs는 LIB와 비교했을 때 두 시나리오 조건 모두에서 대부분의 환경영향 범주가 더 높은 값을 나타냈다. 특히 최악의 시나리오에서는 HTP-c를 제외하고는 모든 환경영향에서 불리한 결과가 나타났는데, 이는 SiNW 합성의 촉매로 사용되는 질산의 생산, 촉매 제조 공정 중 발생하는 폐기물의 처리, 그리고 산성화 영향이 큰 불화수소의 생산 때문인 것으로 나타난다.

SiNTs와 SiNWs를 비교하는 경우에는 SiNWs가 전반적으로 더 높은 환경영향을 보였다. 이는 사용 단계에서의 전기에너지 소모에 따른 GWP뿐만 아니라 이차전지 생산 단계에서의 독성 화학물질 사용이 HTP와 TETP에 큰 영향을 미쳤기 때문이다[44]. 다른 연구에서도 SiNWs의 환경영향이 SiNTs 혹은 다른 차세대 이차전지들 대비하여 큰 것으로 보고하고 있다[43,44,46]. SiNWs 제조는 에너지 집약적인 생산 단계이며[47], 용량은 SiNWs가 SiNTs보다 큰 반면 에너지 밀도가 낮아 동일한 이차전지 용량을 달성하기 위해 더 많은 양의 활성물질이 필요한 것이 주된 이유이다[45].

황화물계 전고체 전지를 대상으로 수행한 LCA 연구[3]에서는 LiPS(분리막) · LiGPS(고체 전해질) 합성과 양극 활물질(NMC811) 제조 전력 및 열처리가 핫스팟으로 확인되었는데, 특히 건조실 공정에서 전력 투입이 커졌다. Keshavarzmoh et al.[57]은 포매이션 사이클, 집전체, 냉각시스템 생략으로 인해 환경지표에서 절감효과는 있었으나, 건조실로 인해 GWP 및 CED가 각각 73%, 75%를 차지하여 LIB보다 높은 값을 보였다. 이를 통해 수분에 민감한 황화물계에서 건조실의 에너지 소비가 전고체전지 환경영향의 핫스팟 중 하나임을 알 수 있다.

산화물계 전고체 전지를 대상으로 한 모든 LCA 연구에서는 제조단계에서의 GWP와 CED가 LIB보다 높았는데, 이는 세라믹 전해질 합성 및 고온 소결 과정에서의 높은 전기 및 열 에너지 소비량 때문이며, 이러한 고온 소결은 높은 TAP와 PMF로도 이어졌다. Schreiber et al. [53]은 LLZO/LATP 제조에 쓰이는 La, Zr, Al, Ti 같은 희소금속 기어로 LIB 대비 ADP지표 부담이 컸다. Zhang et al.[50]은 LATP 합성에 쓰이는 전구체(Al, Ti, P) 사용 및 LATP 용매처리로 인해 HTP 및 EP 지표가 크게 분석되었다. 이와 반대로, Batuecas et al. [55]은 NASICON 전해질을 대상으로 LCA를 수행했으며, 희소금속을 사용하지 않기 때문에 LIB대비 낮은 독성지표를 보였으나 GWP 및 CED는 여전히 더 높았다.

Lastoskie and Dai [52]는 박막계의 LiPON 전해질을 분석했는데 진공 증착방식 덕분에 용매 건조 및 드라이룸 단계가 생략되지만, 진공 증착의 전기에너지 소모로 인해 환경성이 좋지 않았다. 하지만 전고체 전지의 에너지 밀도를 기존 LIB대

비 2배로 가정하면 GWP가 LIB보다 낮아질 수 있음을 보였다. Liu et al. [54]은 고분자계가 기존 LIB 대비 유일하게 GWP, CED 지표가 낮았는데, 이는 제조공정이 저온 용액 캐스팅, *in-situ* 중합 등으로 에너지 소비량이 낮기 때문이었다. 반면에 전구체 합성 영향으로 HTP, EP 등은 LIB와 비슷하거나 다소 높았다. 이를 통해 전고체 이차전지에서 기존 LIB대비 에너지 집약적 공정이 존재하여 에너지 사용량이 높음을 예측할 수 있고, 고체 전해질에 사용되는 희귀금속(La, Zr, Ti 등)은 금속고갈 지표와 독성 지표를 높이는 요인임을 알 수 있었다.

리튬-황 전지의 경우, 양극은 황, 음극은 리튬을 주 재료로 사용한다. 양극과 음극 두 측면에서 분석했을 때 모든 리튬-황 전지 대상 LCA 분석에서는 음극이 양극에 비해 더 큰 환경적 영향을 유발한다는 결과를 보고했다. Deng et al.[58]은 산업화 단계에 있는 NCM-Graphite 기반 LIB와 실험실 수준에서의 리튬-황전지를 대상으로 LCA를 수행했다. 그 결과, ODP를 제외한 모든 환경영향 범주에서 리튬-황 전지가 더 낮은 수치를 보였다. 이는 황 기반 양극재의 상대적인 친환경성과 자원 채굴의 감소 등 여러 요인에 기인한 것으로 볼 수 있다. 리튬-황 전지가 여타 항목 대비 ODP 지표에서 더 높은 수치를 보이는 원인은 LiTFSI 전해질 합성 시 사용되는 메틸클로라이드 때문이다. 메틸클로라이드는 염소 기반의 특성을 가지는 할로젠계 유기화합물로, 대기 중에서 분해될 경우 Cl · 라디칼을 방출하며, 이는 성층권의 오존 분자를 파괴하는 주요 원인 물질로 작용하기 때문에 높은 ODP 수치로 이어진 것으로 해석된다.

Sergio Lopez et al. [62]은 서로 다른 다섯 가지 고성능 리튬-황전지의 양극 소재에 대해 LCA를 수행했다. 연구된 양극 소재들은 각각 높은 황 적재량(1.5-15mg/cm)을 실현한 연구들을 기반으로 한다. 분석 결과, 가장 환경 영향이 낮은 양극은 NaCMC-sulfur이며 Graphene-CNT-Co-sulfur가 가장 높은 환경 영향을 나타냈다. Graphene-CNT-Co-sulfur 양극은 복잡한 다성분 조성을 가지고 있으며, 이를 제조하기 위해 고온에서 아르곤 하에 소성을 수행하고 강한 염산(HCl)을 사용하는 등의 공정이 수반되어 높은 환경 영향을 나타내는 요인으로 분석되었다.

SiNTs 및 SiNWs 기반 전지는 에너지 집약적 제조공정과 생산 단계에서의 독성 물질 사용이 주요 핫스팟으로 나타났다. 유사하게 전고체 이차전지에서도 드라이룸, 고온 소결, 진공 공정 등 제조 단계의 높은 에너지 사용이 환경영향을 지배하는 경향이 관찰되었으며, 희귀금속을 포함하는 전해질 합성은 자원 고갈 및 독성 지표에 추가적인 부담을 유발하였다. 반면

리튬-황 전지는 양극보다 음극의 리튬 금속과 전해질 염 생산이 환경부담에 더 크게 기여하는 것으로 정리된다.

3.4.2 민감도 분석

민감도 분석은 변수 변화에 따른 결과의 견고성을 검증하는 방법으로, 차세대 이차전지와 같이 기술 성숙도가 낮은 기술을 대상으로 하는 LCA 수행 시 매우 중요하다. 검토된 논문에서 민감도 분석은 지역별 차이, 이차전지 성능, 대량 생산 시나리오, 공정 최적화, 재활용 영향 등의 요소를 통해 이루어질 수 있다.

3.4.2.1 용량 및 사이클 수명

Wu et al.[47]은 SiNWs의 이론 용량에 대해 1287/1,930/3,088/3,860 mAh/g으로 나누어 민감도 분석을 진행한 결과, 이론 용량에 가까울수록 환경영향이 감소함을 보이지만, FEP 만을 제외하고 모든 영향 범주에서 LIB보다 높은 환경영향을 보였다. 또한, 사이클 수명도 935/1,006/2,000/3,000 회로 나누어 민감도 분석 결과, SiNWs는 LIB와 유사한 수준의 환경 영향을 달성하려면 사이클 수명이 최소 3000회에 도달해야 했다. 이처럼 SiNWs는 환경적 측면에서 LIB에 비해 특별한 장점이 보이지 않았다[47]. Deng 등[46]은 이차전지의 대규모 생산으로 인해 LIB 팩에 비해 높은 주행거리와 낮은 환경영향을 동시에 달성할 수 있다고 언급한다. 또한, SiNWs 생산은 용매 기반 합성의 SiNTs의 생산보다 3배 높은 이산화탄소 배출을 보일 만큼 비효율적이었다. Smith et al. [56]은 초기 생산단계에서 배출량이 높은 전고체 이차전지는 수명이 짧으면 불리하지만, 2,800 사이클 이상 수명이 보장될 때 LIB와 GWP, CED 지표가 역전되는 지점이 있었다.

3.4.2.2 대량 생산 시나리오

차세대 이차전지는 대부분 실험실 규모 데이터를 사용하기 때문에 제조공정의 스케일업은 상용화 단계에서 기존 LIB와 환경성을 비교하는데 있어 매우 중요하다. Troy et al. [49]는 산업 스케일에 대한 시나리오 분석 결과, 산업 스케일에서는 열공정의 친환경 에너지원 전환, 용매배출 감소 및 재활용, 전해질 두께 감소를 가정했으며, 각각 GWP 기준으로 산업 스케일에서 약 96%까지 각각 감소했으며, 전해질(LLZ) 제조와 열공정이 환경적 핫스팟이었다. 또한, Zhang et al.[50]는 제조공정 데이터를 추정하기 위해 상용 장비의 정격전력(kW)과 시간에 따른 처리량(kg/h) 데이터를 사용해 셀 당 에너지를 환산하였다. 이를 통해 실험실 단위 대비 공정 에너지 소비가 약

최대 50%까지 감소함을 보였고, 그에 GWP가 최대 16.2% 개선되었다. Feng et al.[60]은 LSB와 A-LSB(전고체 리튬-황 이차전지)의 산업화 생산 공정에서의 두 가지 핵심 변수인 생산 단계의 전기 소비량과 이차전지 제조 시의 원자재 활용률을 중심으로 $\pm 10\%$ 범위 내에서 분석을 진행하였다. 분석 결과, A-LSB는 고체전해질의 소결(sintering) 공정으로 인해 에너지 소비 및 탄소배출이 LSB보다 약 27.67% 더 높았으며, 이로 인해 GWP, ADP, ADPF, ODP 지표에서 큰 변동폭을 보였다.

3.4.2.3 지역별 차이 (그리드 믹스, 습도 등)

Keshavarzmoh et al.[57]은 공장 위치의 습도가 커질수록 건조실의 에너지 사용량이 커진다는 것을 통해 건조한 지역일수록 환경적으로 유리함을 밝혔다. 이는 반응 수율 및 운송 거리에 대한 민감도보다 훨씬 큰 영향을 가지며 습한 지역에서 CED, GWP가 각각 26%, 34% 상승했다. 또한, 제조 에너지가 많이 요구되는 차세대 이차전지 특성상, 친환경 에너지로의 대체는 기존 LIB보다 저감효과가 크다고 할 수 있다.

3.4.2.4 제조 공정 및 이차전지 스펙 변화

전고체 이차전지에서는 제조 공정 대체 이외에도 전해질 두께에 따른 민감도 분석을 한 논문이 많이 존재했다. Zhang et al.[50]은 LATP 두께 감소를 위해 sol-gel 공정을 tape casting으로 대체한다고 가정했다. tape casting에는 볼 밀링 및 추가 소결이 필요하여 전력 352 MJ/kg이 들지만, LATP 두께를 0.02 mm(20 μm)까지 낮춤으로써 GWP, AP, ETP 등 모든 지표가 기존 액체전해질 코인셀과 유사한 수준까지 내려갔다. Lastoskie et al.[52]은 양극 3 μm 에서 GWP 및 CED가 가장 낮은 결과를 보였다. 또한, Rietdorf et al.[51]은 황화물계의 제조공정을 *in-situ* anode(초기 충전 시 음극 집전체 위 Li의 자발 증착)로 대체하면 GWP 최대 46% 저감되어 가장 큰 민감도를 보였다. Sergio Lopez et al. [62]의 연구에서 전해질/황 비율에 대한 민감도 분석을 수행하였는데, 분석 결과, E/S = 4로 설계한 Li-S 이차전지는 기존 고전해질 시스템 대비 11~71%까지 환경영향이 감소하였다.

결론적으로, 차세대 이차전지의 민감도 분석 결과, 제조공정 및 스케일, 이차전지의 성능에 따라 기존 LIB의 환경적 지표를 역전할 수 있음을 보였고, 이는 환경적 관점에서 이차전지의 설계 및 제조공정의 연구방향을 시사했다.

4. 요약

해당 연구에서는 기존 이차전지의 LCA 리뷰 논문에서 다

루지 않았던 여러 종류의 차세대 이차전지를 EV용 관점에서 비교 및 분석을 했다는 의의가 있다. 차세대 이차전지는 기술 초기단계에서 LCA를 수행하는 것은 많은 추측과 가정으로 인해 상당한 불확실성을 유발하고 논문 간 환경적 우위를 비교하기 어렵게 만든다. 논문 간 비교를 어렵게 만드는 큰 요인 중에서 기능 단위를 뽑을 수 있는데, 기능 단위를 셀 갯수로 하는 경우, 셀의 용량을 명시하더라도 냉각시스템, BMS 등을 포함하지 않기 때문에 팩의 용량으로 단순히 스케일업을 할 수 없다. 음극 소재, 양극 소재, 전해질 등으로 비교하는 경우, 셀의 제조 에너지부터 포함되지 않기 때문에 불확실성은 더 커지므로 이차전지 간 환경성을 비교하기 위해서는 주행거리 1 km 및 전달에너지 1 kWh가 바람직하다고 볼 수 있다. 하지만, 사용단계에서 주행 시나리오 가정, 모델링 방식 등으로 인해 정확한 추산이 어려워 대부분 이차전지 LCA 연구는 현실적으로 용량 1 kWh의 기능단위를 사용하고 있는 논문이 대다수이다. 향후 이차전지 LCA가 고도화됨에 따라 표준 사용 시나리오를 통합하고 정확도가 높은 모델링 방식을 표준화를 한다면, 주행거리 1 km 및 전달에너지 1 kWh 기능단위를 사용하여 이차전지 간 비교가 가능해질 것이다.

차세대 이차전지의 경우, 셀에서 팩까지 확장할 때 높은 에너지 밀도 및 낮은 부피로 인해 셀 하우징 및 냉각 시스템의 질량흐름이 기존 LIB 대비 낮을 확률이 크다. 따라서 셀 단위의 실험데이터의 경우 LIB의 LCI 데이터를 이용하여 보수적인 분석을 하고 팩 패키징에 관한 데이터가 확보될 경우 해당 파트를 추가하는 것이 바람직하다.

본 LCA 리뷰에 따르면, 낮은 기술 성숙도 때문에 다수의 연구가 물질흐름과 에너지 요구량을 여러 가정으로 추정하고 이에 대한 민감도 분석을 수행한다. 그 결과, 기존 LIB 대비 GWP 지표의 역전 여부는 제조공정, 이차전지 스펙에 따라 의존했다. 하지만, 기본적으로 전고체 이차전지, SiNWs, SiNTs는 에너지 집약적 공정이 LIB 대비 추가로 필요하기 때문에 산업 스케일도 더 높은 배출량을 보일 것으로 예측된다. 리튬-황 이차전지는 자원 및 독성 관련 환경영향 지표에서는 기존 LIB보다 우위를 보이지만 높은 E/S, LiTFSI 전해질, Li-metal 사용으로 인해 LIB대비 환경영향 지표마다 우위가 다를 수 있다. 하지만 차세대 이차전지는 공통적으로 에너지 밀도가 높다는 장점이 있기 때문에 기능단위에 따른 LCI의 적은 질량흐름으로 환경적으로 유리할 수 있다. 또한, LCA를 사용단계까지 본다면, 용량 '1 kWh'의 기능단위를 사용할 때 차세대 이차전지의 높은 에너지 밀도는 사용 단계에서 차량 무게를 줄이므로, 기존 LIB와 같은 사이클 수명과 효율을 가질 수 있다면 더 높은 전비를 가질 수 있다.

EV용 이차전지의 LCA에서 사용단계는 모델링 방식과 LCI 데이터 출처에 따라 생산 및 제조단계의 배출량보다 높은 결과를 보이는 논문들이 존재한다. 따라서 사용단계 배출을 좌우하는 그리드 믹스의 탄소집약도를 낮추는 것이 핵심이다. 사용단계 GHG 배출량은 통상 다음과 같이 산정한다:

$$\begin{aligned} & \text{전기차의 전비(kWh/km)} \times \text{총 이동거리(km)} \\ & \times \text{배출계수(CO}_2\text{eq/kWh)} \end{aligned} \quad (\text{식 } 2)$$

식 2를 통해 그리드 믹스 배출계수는 전기차용 이차전지 LCA에서 매우 중요한 요인이며, 국가별로 다른 그리드믹스 배출계수는 최대 약 130.7배까지 배출량의 차이에 기여한다 [71]. 따라서, 전기차 시장이 확대됨에 따라 친환경 그리드 믹스를 확보하는 것이 환경성 우위를 확보할 수 있을 것이다.

차세대 이차전지의 경우 기존 LIB보다 그리드 믹스 배출계수가 더 중요하다고 할 수 있는데, 에너지 집약적인 제조공정이 많기 때문에 이를 친환경 에너지로 대체한다면 더 큰 이점을 가져갈 수 있을 것이다.

5. 기존 연구의 한계점 및 향후 연구방향

5.1 실험실 데이터의 한계

차세대 이차전지 LCA 연구는 LCI의 데이터 품질 측면에서 여러 한계를 가진다. 대부분의 연구가 실험실 스케일의 물질수지, 화학양론 계산, 문헌 기반 추정치, 상용 LCI 데이터베이스의 proxy를 결합하는 bottom-up 방식을 사용하였으며, 실제 파일럿 공정이나 산업 스케일에서 측정한 1차 데이터는 매우 제한적이다. 이로 인해 제조단계 에너지 수요, 수율·스크랩율 등 핵심 지표에 큰 불확실성이 존재하며, 연구 간 결과 비교 역시 어렵다는 한계가 있다.

또한, 기능단위와 시스템 경계의 설정이 논문마다 상이하다는 점도 중요한 제약이다. 전고체 이차전지와 리튬-황 이차전지의 경우에는 상용화 이전 단계라는 이유로 대부분 cradle-to-gate에 한정된 평가를 수행하였고, 사용단계와 재활용단계를 포함한 cradle-to-grave 분석은 극히 제한적이다. 이로 인해 고에너지밀도, 경량화, 수명 향상 등 차세대 이차전지의 잠재적 이점이 실제 EV 시스템 수준에서 어느 정도로 실현될 수 있는지에 대한 정량적 검증이 불충분하다는 점이 현재 차세대 이차전지 LCA 논문들의 한계점이라 할 수 있다.

5.2 사용단계와 재활용단계 분석 데이터 한계

사용단계 및 재활용단계에 대한 동적·전망적 LCA가 확대되어야 한다. 현재 대부분의 연구는 고정된 그리드 배출계수와

이상적인 수명을 가정하지만, 실제로는 재생에너지 비율, 지역별 그리드 믹스 배출계수는 시간에 따라 변한다. 또한, EV 데이터베이스에 따르면 전기차의 전비가 온도 및 주행습관에 따라 약 2배 이상의 차이가 나기 때문에 사용 시나리오를 어떻게 가정하느냐는 사용단계 배출량에 큰 영향을 끼친다[72]. 향후 연구에서는 EV 실주행 데이터, 지역별 전력 믹스 전망에 따른 가정을 ISO 지침 및 디지털 배터리 여권(Digital Battery Passport, DBP)과 같은 국제 표준 지침에서 요구하는 정보를 포함한 시나리오 분석을 수행해야 한다. 또한, 폐배터리의 직접 재사용 및 재활용과정에서 희귀 금속(Li, Co, Mn, Ni 등)의 회수 경로에 대한 정량적 모델링이 필요할 것이다.

5.3 민감도 분석 및 향후 연구방향

차세대 이차전지의 민감도 분석은 데이터의 부족을 보완하는 수준을 넘어, LCA에서 고려해야 할 핵심 변수를 선정하는 강력한 도구가 될 수 있다. 현재까지의 연구들은 원재료 추출 및 확보 단계부터 데이터를 구축하여 LCA를 수행하고, 부족한 데이터들은 적절한 가정과 민감도 분석으로 보완하는 Bottom-up 방식을 취해 왔다. 그러나 이러한 전통적인 접근법은 단순한 데이터의 취합에 그치는 한계가 발생할 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 이미 상용화된 LIBs의 최종 LCA 결과를 이상적인 목표 기준으로 설정하고, 해당 기준치를 충족하기 위한 사용단계 이전의 데이터를 역추산하는 Top-down 방식이 진행되어야 한다. 이후 동일한 기준을 차세대 이차전지에 적용하면, 기술 간 상대적인 환경 성능을 LIB 대비 허용 가능한 상한·하한 범위로 제시할 수 있으며, 민감도 분석을 통해 어떤 공정 변수가 목표 기준치 달성에 가장 큰 영향을 미치는지를 체계적으로 규명할 수 있다. 이러한 연구 과정에서 목표 기준치 달성에 큰 영향을 주는 핵심 변수들의 민감도 분석이 이루어진다면, 보다 적극적이고 실질적인 LCA 연구가 가능할 것이라 기대된다.

사 사

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2022M3J5A1056072, 2022M3J5A1056117, RS-2024-00447869).

기호설명

GWP: Global Warming Potential
ODP: Ozone Depletion Potential

POCP: Photochemical Ozone Creation Potential
POFP: Photochemical Ozone Formation Potential
AP: Acidification Potential
PMFP: Particulate Matter Formation Potential
IR: Ionizing Radiation
EP: Eutrophication Potential
FEP: Freshwater Eutrophication Potential
MEP: Marine Eutrophication Potential
TEP: Terrestrial Eutrophication Potential
FETP: Freshwater Ecotoxicity Potential
METP: Marine Ecotoxicity Potential
TETP: Terrestrial Ecotoxicity Potential
HTP: Human Toxicity Potential
HTP-c: Human Toxicity Potential, carcinogenic
HTP-nc: Human Toxicity Potential, non-carcinogenic
ADP-elements: Abiotic Depletion (elements)
ADP-fossil: Abiotic Depletion (fossil fuels)
ADP: Abiotic Depletion Potential
FDP: Fossil Depletion Potential
MDP: Mineral Depletion Potential
CED: Cumulative Energy Demand
PED: Primary Energy Demand
RDP: Resource Depletion Potential
WS: Water Scarcity
WDP: Water Depletion Potential
WU: Water Use
LU: Land Use
CF: Carbon Footprint
WF: Water Footprint
MF: Material Footprint
EF: Ecological Footprint
HF: Human Footprint
TAP: Terrestrial Acidification Potential

References

1. McKinsey's Battery Accelerator Team. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. McKinsey & Company. (2023).
2. IPCEI. Transnational cooperation projects with major synergies. IPCEI Batteries. <https://www.ipcei-batteries.eu/technology-fields> (2025).

3. Temporelli, A., Carvalho, M.L., Girardi, P. Life cycle assessment of electric vehicle batteries: An overview of recent literature. *Energies* 13, p. 2864 (2020).
4. Culebras, M., Collins, G.A., Beaucamp, A., Geaney, H., Collins, M.N. Lignin/Si hybrid carbon nanofibers towards highly efficient sustainable Li-ion anode materials. *Engineered Science* 17, pp. 195-203 (2022).
5. Thackeray, M.M., Wolverton, C., Isaacs, E.D. Electrical energy storage for transportation-approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science* 5, pp. 7854-7863 (2012).
6. Jin, Y., Zhu, B., Lu, Z., Liu, N., Zhu, J. Challenges and recent progress in the development of Si anodes for lithium-ion battery. *Advanced Energy Materials* 7, p. 1700715 (2017).
7. Ko, Y., Bae, J., Chen, G., Baird, M.A., Yan, J., Klivansky, L., Kim, D.-M., Trask, S.E., Rodrigues, M.-T.F., Carroll, G.M. Topological considerations in electrolyte additives for passivating silicon anodes with hybrid solid-electrolyte interphases. *ACS Energy Letters* 9, pp. 3448-3455 (2024).
8. Lee, H.-J., Moon, J.-S., Byeon, Y.-W., Yoon, W.Y., Kim, H.-K., Ahn, J.-P. Lithiation pathway mechanism of Si-C composite anode revealed by the role of nanopore using *in situ* lithiation. *ACS Energy Letters* 7, pp. 2469-2476 (2022).
9. Li, Y., Yan, K., Lee, H.-W., Lu, Z., Liu, N., Cui, Y. Growth of conformal graphene cages on micrometre-sized silicon particles as stable battery anodes. *Nature Energy* 1, pp. 1-9 (2016).
10. Zhou, Y., Feng, W., Xu, Y., Liu, X., Wang, S., Lv, Z., Li, X., Burcar, E., Wang, Z., Yang, Z. Development of silicon-based anode for lithium-ion batteries and its application in solid-state electrolytes. *Engineered Science* 28, p. 1060 (2023).
11. Kim, H., Seo, M., Park, M.-H., Cho, J. A critical size of silicon nano-anodes for lithium rechargeable batteries. *Journal name missing*, p. (2010).
12. Li, H., Huang, X., Chen, L., Zhou, G., Zhang, Z., Yu, D., Mo, Y.J., Pei, N. The crystal structural evolution of nano-Si anode caused by lithium insertion and extraction at room temperature. *Solid State Ionics* 135, pp. 181-191 (2000).
13. Zhao, J., Cai, F., Wang, B., Ren, J., Guo, Z., Du, Y., Helal, M.H., El-Bahy, Z.M., Wang, Z., Sha, J. Advances and future perspectives on silicon-based anodes for lithium-ion batteries. *Advances in Colloid and Interface Science*, p. 103543 (2025).
14. Li, B., Gao, X., Li, J., Yuan, C. Life cycle environmental impact of high-capacity lithium ion battery with silicon nanowires anode for electric vehicles. *Environmental Science & Technology* 48, pp. 3047-3055 (2014).
15. Doerrer, C., Capone, I., Narayanan, S., Liu, J., Grovenor, C.R., Pasta, M., Grant, P.S. High energy density single-crystal NMC/Li-PS-Cl cathodes for all-solid-state lithium-metal batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13, pp. 37809-37815 (2021).
16. Pandey, R., Iyer, R.K., Kelly, J.C. A Review on Solid State Batteries: Life Cycle Perspectives. p. (2024).
17. Randau, S., Weber, D.A., Kotz, O., Koerver, R., Braun, P., Weber, A., Ivers-Tiffée, E., Adermann, T., Kulisch, J., Zeier, W.G. Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries. *Nature Energy* 5, pp. 259-270 (2020).
18. Machin, A., Diaz, F., Cotto, M.C., Duconge, J., Marquez, F. Recent advances in dendrite suppression strategies for solid-state lithium batteries: from interface engineering to material innovations. *Batteries* 11, p. 304 (2025).
19. Janek, J., Zeier, W.G. A solid future for battery development. *Nature Energy* 1, pp. 1-4 (2016).
20. Puls, S., Nazmutdinova, E., Kalyk, F., Woolley, H.M., Thomsen, J.F., Cheng, Z., Fauchier-Magnan, A., Gautam, A., Gockeln, M., Ham, S.-Y. Benchmarking the reproducibility of all-solid-state battery cell performance. *Nature Energy* 9, pp. 1310-1320 (2024).
21. Gotz, R., Streng, R., Sterzinger, J., Steeger, T., Kaye, M.M., Vitort, M., Bandarenka, A.S. All-solid-state Li-ion batteries with commercially available electrolytes: A feasibility review. *InfoMat* 6, p. e12627 (2024).
22. Schweiger, L., Hogrefe, K., Gadermaier, B., Rupp, J.L., Wilkening, H.M.R. Ionic conductivity of nanocrystalline and amorphous Li₁₀GeP₂S₁₂: The detrimental im-

- pact of local disorder on ion transport. *Journal of the American Chemical Society* 144, pp. 9597-9609 (2022).
23. Choi, Y.J., Kim, S.-I., Son, M., Lee, J.W., Lee, D.H. Cl- and Al-doped argyrodite solid electrolyte Li₆PS₅Cl for all-solid-state lithium batteries with improved ionic conductivity. *Nanomaterials* 12, p. 4355 (2022).
24. Emley, B., Liang, Y., Chen, R., Wu, C., Pan, M., Fan, Z., Yao, Y. On the quality of tape-cast thin films of sulfide electrolytes for solid-state batteries. *Materials Today Physics* 18, p. 100397 (2021).
25. Sakuda, A., Kuratani, K., Yamamoto, M., Takahashi, M., Takeuchi, T., Kobayashi, H. All-solid-state battery electrode sheets prepared by a slurry coating process. *Journal of The Electrochemical Society* 164, p. A2474 (2017).
26. Aote, M., Deshpande, A., Parchake, K., Khapekar, A. Investigation of the doping effects of Sr-Ta on the ionic conductivity of garnet Li₇La₃Zr₂O₁₂ solid electrolyte. *Ionics* p. 1-11 (2025).
27. Wang, Y., Chen, Z., Jiang, K., Shen, Z., Passerini, S., Chen, M. Accelerating the development of LLZO in solid-state batteries toward commercialization: A comprehensive review. *Small* 20, p. 2402035 (2024).
28. Zallocco, V.M., Freitas, J.M., Bocchi, N., Rodrigues, A.C.M. Electrochemical stability of a NASICON solid electrolyte from the lithium aluminum germanium phosphate (LAGP) series. *Solid State Ionics* 378, p. 115888 (2022).
29. Wang, S., La Monaca, A., Demopoulos, G.P. Composite solid-state electrolytes for all-solid-state lithium batteries: progress, challenges and outlook. *Energy Advances*, p.11-36 (2025).
30. Sazvar, A., Hajibandeh, M., Vafaei, P., Hosseinzadeh, E., Jabbari, M. Review of recent progress in sintering of solid-state batteries: Application and modelling. *Journal of Energy Storage* 101, p. 113863 (2024).
31. Bocharova, V., Chen, X.C., Jeong, S.P., Zhou, Z., Sacci, R.L., Keum, J.K., Gainaru, C., Rahman, M.A., Sahori, R., Sun, X.-G. Single ion conducting hairy nanoparticle additive to improve cycling stability of solid polymer electrolytes. *ACS Applied Energy Materials* 6, pp. 8042-8052 (2023).
32. Xue, Z., He, D., Xie, X. Poly(ethylene oxide)-based electrolytes for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A* 3, pp. 19218-19253 (2015).
33. Ramkumar, B., Aravindan, V., Ramasamy, H., Ajeya, K.V., Ryu, J.-G., Jung, H.-Y., Lee, Y.-S. Ternary metal oxide filled PEO-based polymer electrolyte for solid-state lithium metal battery: The role of filler particle size. *Solid State Sciences* 132, p. 106958 (2022).
34. Choi, Y., Chung, H. Technology trends for lithium secondary batteries. *Electronics and Telecommunications Trends* 38, pp. 90-99 (2023).
35. Li, Y., Li, Q., Chai, J., Wang, Y., Du, J., Chen, Z., Rui, Y., Jiang, L., Tang, B. Si-based anode lithium-ion batteries: A comprehensive review of recent progress. *ACS Materials Letters* 5, pp. 2948-2970 (2023).
36. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2025. USGS Numbered Series. <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2025> (2025).
37. Santos, E.A., Barros, L.M., Peluso, A.F.V., Galantini, I., Goncalves, J.M., Maciel Filho, R., Zanin, H. Trends in ionic liquids and quasi-solid-state electrolytes for Li/S batteries: A review on recent progress and future perspectives. *Chemical Engineering Journal* 493, p. 152429 (2024).
38. Shin, Y.J., Lee, W.Y., Kim, T.Y., Moon, S.-G., Jin, E.M., Jeong, S.M. Preparation and electrochemical properties of freestanding flexible S/CNT/NiO electrodes for Li/S batteries. *Korean Chemical Engineering Research* 60, pp. 184-192 (2022).
39. Wang, X., Hao, X., Zhang, H., Xia, X., Tu, J. 3D ultraviolet polymerized electrolyte based on PEO modified PVDF-HFP electrospun membrane for high-performance lithium-sulfur batteries. *Electrochimica Acta* 329, p. 135108 (2020).
40. Porzio, J., Scown, C.D. Life-cycle assessment considerations for batteries and battery materials. *Advanced Energy Materials* 11, p. 2100771 (2021).
41. Ellingsen, L.A.W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A.K., Valøen, L.O., Strømman, A.H. Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. *Journal of Industrial Ecology* 18, pp. 113-124 (2014).
42. Kim Ik, H.T. Environmental Life Cycle Assessment.

- Woo-yong, J. (Ed.), p. 44 (2022).
43. Accardo, A., Garofalo, A., Dotelli, G., Spessa, E. Prospective LCA of next-generation cells for electric vehicle applications. *IEEE Access* 12, pp. 19584-19597 (2024).
 44. Wang, F., Intrator, C., Salopek, N., Yuan, C. An environmental sustainability analysis tool for next generation lithium ion batteries of electric vehicles. *Procedia CIRP* 105, pp. 489-494 (2022).
 45. Wang, F., Deng, Y., Yuan, C. Comparative life cycle assessment of silicon nanowire and silicon nanotube based lithium ion batteries for electric vehicles. *Procedia CIRP* 80, pp. 310-315 (2019).
 46. Deng, Y., Ma, L., Li, T., Li, J., Yuan, C. Life cycle assessment of silicon-nanotube-based lithium ion battery for electric vehicles. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 7, pp. 599-610 (2018).
 47. Wu, Z., Kong, D. Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries with lithium metal, silicon nanowire, and graphite anodes. *Clean Technologies and Environmental Policy* 20, pp. 1233-1244 (2018).
 48. Li, B., Li, J., Yuan, C. Life cycle assessment of lithium ion batteries with silicon nanowire anode for electric vehicles. *Proceedings of the 2013 International Symposium on Sustainable Systems & Technology*, Cincinnati, OH, USA (2013).
 49. Troy, S., Schreiber, A., Reppert, T., Gehrke, H.-G., Finsterbusch, M., Uhlenbruck, S., Stenzel, P. Life cycle assessment and resource analysis of all-solid-state batteries. *Applied Energy* 169, pp. 757-767 (2016).
 50. Zhang, J., Ke, X., Gu, Y., Wang, F., Zheng, D., Shen, K., Yuan, C. Cradle-to-gate life cycle assessment of all-solid-state lithium-ion batteries for sustainable design and manufacturing. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 27, pp. 227-237 (2022).
 51. Rietdorf, C., De la Rua, C., Kiemel, S., Mieke, R. Cradle-to-gate life cycle assessment of cylindrical sulfide-based solid-state batteries. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 29, pp. 1992-2003 (2024).
 52. Lastoskie, C.M., Dai, Q. Comparative life cycle assessment of laminated and vacuum vapor-deposited thin film solid-state batteries. *Journal of Cleaner Production* 91, pp. 158-169 (2015).
 53. Schreiber, A., Rosen, M., Waetzig, K., Nikolowski, K., Schiffmann, N., Wiggers, H., Kupers, M., Fattakhova-Rohlfing, D., Kuckshinrichs, W., Guillon, O. Oxide ceramic electrolytes for all-solid-state lithium batteries?cost-cutting cell design and environmental impact. *Green Chemistry* 25, pp. 399-414 (2023).
 54. Liu, Z., Li, X., Zhang, H., Huang, K., Yu, Y. Are solid-state batteries absolutely more environmentally friendly compared to traditional batteries-analyzing from the footprint family viewpoint. *Journal of Cleaner Production* 447, p. 141452 (2024).
 55. Batuecas, E., Martinez-Cisneros, C.S., Serrano, D., Varez, A. Life cycle assessment of lab-scale solid sodium-ion batteries: A sustainable alternative to liquid lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage* 80, p. 110355 (2024).
 56. Smith, L., Ibn-Mohammed, T., Astudillo, D., Brown, S., Reaney, I.M., Koh, S.L. The role of cycle life on the environmental impact of $\text{Li}_{6.4}\text{La}_{3.4}\text{Zr}_{1.4}\text{Ta}_{0.6}\text{O}_{12}$ -based solid-state batteries. *Advanced Sustainable Systems* 5, p. 2000241 (2021).
 57. Keshavarzmohammadian, A., Cook, S.M., Milford, J.B. Cradle-to-gate environmental impacts of sulfur-based solid-state lithium batteries for electric vehicle applications. *Journal of Cleaner Production* 202, pp. 770-778 (2018).
 58. Deng, Y., Li, J., Li, T., Gao, X., Yuan, C. Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources* 343, pp. 284-295 (2017).
 59. Wolff, D., Canals Casals, L., Benveniste, G., Corchero, C., Trilla, L. The effects of lithium sulfur battery ageing on second-life possibilities and environmental life cycle assessment studies. *Energies* 12, p. 2440 (2019).
 60. Feng, T., Guo, W., Li, W., Hua, L., Zhao, F. Lithium-sulfur batteries for next-generation automotive power batteries: Carbon emission assessment and sustainability study in China. *Journal of Energy Storage* 102, p. 114199 (2024).
 61. Benveniste, G., Sanchez, A., Rallo, H., Corchero, C., Amante, B. Comparative life cycle assessment of Li-sul-

- phur and Li-ion batteries for electric vehicles. *Resources, Conservation & Recycling Advances* 15, p. 200086 (2022).
62. Lopez, S., Akizu-Gardoki, O., Lizundia, E. Comparative life cycle assessment of high performance lithium-sulfur battery cathodes. *Journal of Cleaner Production* 282, p. 124528 (2021).
63. Benveniste Perez, G., Canals Casals, L., Corchero Garcia, C., Amante Garcia, B. Life cycle assessment of Li-sulfur batteries for electric vehicles. EVS32?32nd International Electric Vehicle Symposium, Lyon, France, 19-22 May, pp. 1-11 (2019).
64. Arvidsson, R., Janssen, M., Svanstrom, M., Johansson, P., Sanden, B.A. Energy use and climate change improvements of Li/S batteries based on life cycle assessment. *Journal of Power Sources* 383, pp. 87-92 (2018).
65. Teah, H.Y., Zhang, Q., Yasui, K., Noda, S. Life cycle assessment of lithium-sulfur batteries with carbon nano-tube hosts: Insights from lab experiments. *Sustainable Production and Consumption* 48, pp. 280-288 (2024).
66. Philippot, M., Smekens, J., Van Mierlo, J., Messagie, M. Life cycle assessment of silicon alloy-based lithium-ion battery for electric vehicles. *WIT Transactions on the Built Environment* 182, pp. 129-139 (2019).
67. Notter, D.A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., Althaus, H.-J. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. ACS Publications (2010).
68. Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strömman, A.H. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology* 17, pp. 53-64 (2013).
69. Fehrenbacher, K. Why Tesla's new battery pack is important. *Fortune*, New York, USA, 24 August (2016).
70. Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C.N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., Morari, M. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings* 45, pp. 15-27 (2012).
71. Chen, Q., Lai, X., Chen, J., Huang, Y., Guo, Y., Wang, Y., Han, X., Lu, L., Sun, Y., Ouyang, M. A critical comparison of LCA calculation models for the power lithium-ion battery in electric vehicles during use-phase. *Energy* 296, p. 131175 (2024).
72. EV Database. Tesla Model 3 Long Range AWD. All vehicles. <https://ev-database.org/car/1992/Tesla-Model-3-Long-Range-AWD> (2023).