ICT 기반 배터리 여권 시스템을 통한 사용 후 배터리의 디지털 전환 : 부품 수준 정보화와 탄소 감축 연계 프레임워크

김선혁 [1], 권구영 [1], 강민석 [1], 최병철 [2], 김말희 [2], 이충호 [2], 정 훈 [2], 허태욱 [2]
국립공주대학교, 한국전자통신연구원

seonh@kongju.ac.kr, htw398@etri.re.kr

Digital Transition of End-of-Life Batteries through ICT-Enabled Battery Passport System: A Component-Level Information Framework for Integrated Carbon Reduction

Seon Hyeog Kim[1], Gu-Young Kwon[1], Min-Seok Kang[1],
Byeong Cheol Choi[2], Marie Kim[2], Chungho Lee[2], Hoon Jeong[2], Tae-wook Heo[2]

Kongju National Univ[1]., Electronics and Telecommunications Research Institute[2].

요 약

본 논문은 사용 후 배터리의 재사용 및 재활용을 위한 핵심 도구로 주목받는 배터리 여권(Battery Passport)의 기술적 한계를 보완하고, 정보 신뢰성 및 탄소 감축 가능성을 강화할 수 있는 ICT 기반 디지털 전환 프레임워크를 제안한다. 기존 배터리 여권은 제품 단위 중심의 정적 정보에 국한되어 있어, 부품 수준에서의 탄소배출 추적, 잔존 수명 진단, 재사용 적합성 평가가 어렵다는 문제가 있다. 본 연구에서는 BMS, IoT, 클라우드, 블록체인, 디지털 트윈 기반 기술을 통합하여 부품별 상태 데이터를 실시간 수집하고, 모듈형 정보 구조와 메타데이터 기반 구성 방식을 통해 규제 변화에 유연하게 대응할 수 있는 구조를 설계하였다. 특히 탄소(LCA), 사회적 영향(S-LCA), 순환성(Circularity Indicator)을 통합한 Multi-dimensional Impact Passport 개념을 제시함으로써, ESG 경영 및 글로벌 규제 대응 측면에서 실효성 높은 정보 체계를 제안한다. 제안된 구조는 향후 ISO/IEC 63330 등 국제 표준과의 정합성을 기반으로, 지속가능한 배터리 생태계 조성에 기여할 수 있다.

Ⅰ. 서 론

전기차(EV) 및 에너지저장장치(ESS)의 확산으로 인해 리튬이온 배터리의 수요는 급격히 증가하고 있으며, 이에 따른 자원 소비 및 환경 부담 또한 심화되고 있다. 특히 사용 후 배터리의 적절한 관리와 재사용, 재활용은 순환경제 실현과 탄소중립 달성 측면에서 핵심 과제로 부상하고 있다. 이에 대응하기 위해 유럽연합(EU)을 중심으로 배터리 전 생애주기(Life Cycle)에 대한 정보 이력을 관리하는 '배터리 여권(Battery Passport)' 제도의 도입이 추진되고 있다 [1-3].

그러나 준비되고 있는 배터리 여권 시스템은 배터리 제품 단위 중심의 정적 정보 등록에 초점을 두고 있으며, 부품 수준의 열화 상태, 소재 정보, 탄소 기여도 등 세부 정보가 체계적으로 반영하기에는 어려움이 있다 [1],[4],[5]. 이로 인해 사용 후 배터리의 재사용 가능성 판단, 탄소 감축 효과의 정량적 분석, 잔존 가치 기반 재활용 전략 수립 등이 제한되고 있다.

본 논문에서는 이러한 한계를 보완하고자, ICT 기술 기반(BMS, 클라우드, 블록체인, 디지털트윈 등)의 배터리 여권 시스템을 활용하여 사용 후 배터리의 정보 신뢰성, 추적 가능성, 탄소 감축 가능성을 통합적으로 분석할 수 있는 설계 구조를 제안한다. 특히 정적 정보 외에도 동적 진단 데이터를 반영할 수 있는 부품 단위 정보화 프레임워크의 필요성과 규제 변화에 유연하게 대응 가능한 메타데이터 기반 프레임워크를 제시한다. [1].

Ⅱ. 본론

1. 배터리 여권의 개념 및 정책 동향

배터리 여권은 배터리의 원자재, 제조, 사용, 회수, 재활용에 이르기까지의 전주기 정보를 디지털화하여 기록·공유할 수 있도록 설계된 시스템이다 [2],[4]. EU 는 2023 년 제정된 'Battery Regulation 2023/1542'를 통해 여권 시스템을 2027 년부터 의무화하였으며 [3], 주요 대상은 산업용 및 전기차용 배터리이다. 여권 정보에는 소재 조성, 생산 공정, 수명 상태, 탄소 배출, 재사용 여부 등 다양한 항목이 포함된다. 현재는 제품 단위 중심으로 구성되어 있어 부품별 세분화된 정보 관리에는 한계가 있다 [1], [5].

2. 부품 단위 정보화 구조의 필요성과 확장 방향

사용 후 배터리의 적절한 가치 평가와 순환 활용을 위해서는 부품 단위 수준의 소재 구성, 열화 이력, 환경 기여도, 재사용 가능성 등을 구조화된 형태로 기록하고 판단할 수 있는 체계가 필요하다 [6-8]. 특히 양극재, 음극재, 전해질, 리드탭 등 주요 부품은 각각의 제조 공정, 사용 특성, 탄소 배출 기여도가 상이하므로, 구성 요소별 이력 추적이 가능해야 한다 [9], [10]. 모든 정보는 생산 단계에서의 MES(Manufacturing Execution System), 배터리 시스템의 BMS(Battery Management System), IoT 센서, FEMS(Factory Management System)과 같은 공정의 모니터링 시스템을 통해

수집되고, 각 부품은 고유 ID 를 부여받아 모듈 단위로 여권에 통합된다. 이를 통해 탄소추적(LCA), 재사용 적합성 분류, 자원 회수 최적화 등을 효과적으로 수행할 수 있다 [1].

또한, 이러한 부품 단위 정보는 단순한 모니터링을 넘어 디지털 트윈 기반의 시뮬레이션, AI 기반의 수명 예측, 상태 기반 재사용 판단 등 고도화된 기능과 연계되어야 한다. 이를 통해 배터리 재사용·재제조 과정의 경제성과 환경 영향을 동시에 고려하는 정량적 의사결정이 가능해진다.

3. ICT 기반 디지털 전환 프레임워크 구성 요소

제안하는 프레임워크는 다음의 기술 계층으로 구성된다:

① **데이터 수집 계층**: 센서/BMS 기반 부품별 열화 및 사용 이력 실시간 수집
② **저장 및 신뢰성 확보 계층**: 클라우드 기반 여권 저장소 + 블록체인 기반 위·변조 방지
③ **분석 및 해석 계층**: 디지털 트윈 기반 성능 예측, AI 기반 SOH 추정 및 재사용 분류
④ **연계 및 활용 계층**: 재사용/재활용 판단, ESG 및 탄소 리포트 자동화 API 연동

제안하는 프레임워크는 ISO/IEC 63330 기반 수명 평가 체계 및 UL 1974, KC 10031 등의 국내외 기준과 호환 가능한 모듈형 여권 정보 구조를 전제로 설계되어야 하며 [6-8], 정보 항목은 메타데이터 기반으로 동적으로 구성되어 향후 규제 변경에 따른 자동 동기화가 가능해야 한다. 이로써 급변하는 글로벌 규제 환경에도 유연하게 적응할 수 있는 구조적 유연성과 확장성을 확보할 수 있다 [1].

4. Multi-dimensional Impact Passport

본 연구에서는 단일한 탄소 배출 추적 체계를 넘어서, 탄소(LCA) + 사회적 LCA(S-LCA) + 순환성 지표(Circularity Indicator)를 통합 관리할 수 있는 다차원 배터리 여권 구조(Multi-dimensional Impact Passport) 개발의 필요성을 제안한다 [1]. 다차원 배터리 여권 구조는 각 부품별 정보에 기반해 재활용 우선순위, 유해성, 재사용 권장 여부를 종합 판단할 수 있으며, 단일 지표가 아닌 다차원 환경·사회·자원 기준에서 배터리의 지속가능성을 평가할 수 있다 [11],[12].

이러한 접근은 기업의 ESG 경영 요구에 대응할 뿐 아니라, 정책 입안자 및 인증 기관이 정량적이고 과학적인 기준으로 배터리 회수·재사용 전략을 수립하는 데 기여할 수 있다. 또한 메타데이터 기반 설계는 정보 항목 간 상호참조, 분류 체계 간 호환성, 데이터 추가·삭제의 유연성까지 제공할 수 있어, 배터리 여권의 기능적 진화를 뒷받침할 수 있다.

Ⅲ. 결론

본 논문은 ICT 기반 기술(BMS, 센서, 클라우드, 디지털 트윈, 블록체인)을 통합하여 부품 단위까지 세분화된 배터리 여권 시스템 구조를 설계함으로써, 기존 제품 중심 시스템의 한계점을 보완하고자 제안하였다. 특히 정보 신뢰성, 추적성, 탄소 감축 가능성 측면에서 구조적 확장이 가능하며, 규제 변화 대응 및 ESG 연계까지 포함하는 종합적 체계로 제안된다.

제시된 프레임워크는 향후 ISO/IEC 63330 과의 정합성을 확보한 모듈형 구조로 발전 가능하며, Multi-dimensional Impact Passport 로의 확장을 통해 배터리 생애주기의 다양한 영향 요소를 종합적으로 평가할 수 있다. 향후 연구에서는 실증 적용을 통한 구조 타당성 검증, 국가 간 상호운용성 강화, 정보 공유 거버넌스 설계가 주요 과제가 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

※ 본 연구는 2024/2025 년도 기획재정부(MOEF)의 재원으로 한국개발연구원(KDI)의 경제혁신 파트너십 프로그램(EIPP)의 헝가리 지원사업과 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임. (No.RS-2025-04752996)

참 고 문 헌

[1] Korea Development Institute and Hungarian Government, *Development of Battery Life Cycle Management and Traceability System (Phase 2)*, Executive Summary, 2023–2024.

[2] European Parliament and Council, *Regulation (EU) 2023/1542 on batteries and waste batteries*, Official Journal of the European Union, Jul. 2023.

[3] Global Battery Alliance, *Battery Passport: Green & Digital Tracing Infrastructure for a Sustainable Battery Value Chain*, 2022.

[4] Global Battery Alliance and SYSTEMIQ, *Battery Passport Specifications Report*, Version 1.0, Dec. 2022.

[5] Roundtable on Battery Passport Implementation, *Final Summary Report*, Loughborough University, Sep. 2023.

[6] Underwriters Laboratories, *UL 1974: Standard for Evaluation for Repurposing Batteries*, Northbrook, IL, USA, 2022.

[7] International Electrotechnical Commission, *IEC 63330:2021: Reuse of lithium-ion batteries*, Geneva, Switzerland, 2021.

[8] Korea Agency for Technology and Standards, *KC 10031:2022 – Guidelines for Reuse Evaluation of Lithium-ion Batteries*, Ministry of Trade, Industry and Energy, Republic of Korea, 2022.

[9] Ascend Elements, *Decarbonization Path: Up to 90% Reduction in Carbon Footprint through Recycled Cathode Material*, Technical Briefing, 2023.

[10] Fraunhofer ISI, *The Global Environmental Impact of Lithium-Ion Battery Production*, Karlsruhe, Germany, 2022.

[11] Ellen MacArthur Foundation, *Circular Economy in Electric Vehicle Battery Chains*, 2021.

[12] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2023*, Paris, France, 2023.