

전기차 폐배터리 진단/해체 기술 동향 및 향후 친환경적 개발 전략

변채은 · 서지현 · 이민경 · Yamada Keiko · §이상훈

계명대학교 환경학부

Current Trend of EV (Electric Vehicle) Waste Battery Diagnosis and Dismantling Technologies and a Suggestion for Future R&D Strategy with Environmental Friendliness

Chaceun Byun, Jihyun Seo, Min kyoung Lee, Yamada Keiko and §Sang-hun Lee

School of Environment, Keimyung University, Korea

요 약

전기차 수요의 증가로 향후 폐차 혹은 배터리 노후화로 인한 폐배터리 배출량 급증이 예상됨에 따라 이에 대한 적정 관리가 시급한 실정이다. 기술개발 측면에서는 데이터 기반 진단 등 다양한 폐배터리 진단 및 관리 기술이 주목을 받고 있다. 또한 로봇기반 자동 해체 기술은 산업 현장에서의 Test 검증 및 향후 배터리 관련 데이터베이스와의 연동이 필요한 것으로 보인다. 특히 향후 폐배터리 순환과정에서의 효율화와 동시에 안전성/친환경성 제고를 위한 다양하고 선진적인 배터리 진단 및 평가기법 개발 및 보급이 중요하다. 또한 리튬 관련 화학물질 배출이동에 대한 데이터베이스화와 배터리 연소시 가스유출위험 및 소방안전에 관한 평가 및 대처가 중요할 것으로 보인다. 더 나아가 데이터 기반 진단/분류/해체 과정을 재활용/최종폐기와 연계된 다양한 관점에서의 폐배터리 전주기 관리 최적화 등에 향후 더 많은 연구개발이 필요하다고 판단된다. 그리고 일련의 데이터는 차후 배터리 생산 시 환경적 부담을 감소시키고 재이용/재활용이 원활하도록 청정설계 및 제조에 기여해야 한다. 또한 이러한 최적화는 전기차 배터리의 향후 기술 및 시장 변동을 감안하여 추진되어야 한다.

주제어 : 전기차, 전기차 폐배터리, 데이터 기반 관리, 환경, 안전

Abstract

Owing to the increasing demand for electric vehicles (EVs), appropriate management of their waste batteries is required urgently for scrapped vehicles or for addressing battery aging. With respect to technological developments, data-driven diagnosis of waste EV batteries and management technologies have drawn increasing attention. Moreover, robot-based automatic dismantling technologies, which are seemingly interesting, require industrial verifications and linkages with future battery-related database systems. Among these, it is critical to develop and disseminate various advanced battery diagnosis and assessment techniques to improve the efficiency and safety/environment of the recirculation of waste batteries. Incorporation of lithium-related chemical substances in the public pollutant release and transfer register (PRTR) database as well as in-depth risk assessment of gas emissions in waste EV battery combustion and their relevant fire safety are some of the necessary steps. Further research and development thus are needed for optimizing the lifecycle management of waste batteries from various aspects related to data-based diagnosis/classification/disassembly processes as well as reuse/recycling and final disposal. The

· Received : August 2, 2022 · Revised : August 8, 2022 · Accepted : August 9, 2022

§ Corresponding Author : Sang-hun Lee (E-mail : shlee73@kmu.ac.kr)

School of Environment, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

idea here is that the data should contribute to clean design and manufacturing to reduce the environmental burden and facilitate reuse/recycling in future production of EV batteries. Such optimization should also consider the future technological and market trends.

Key words : EV (Electric vehicle), waste EV battery, data-driven management, Environment, Safety

1. 서 론

기존 내연기관 자동차로 인한 환경오염과 기후변화 문제로 인해 최근 전기 자동차의 생산 및 보급이 활발하게 진행되고 있다. 전기자동차는 내부에 탑재된 전기차 배터리에서 발생하는 전기에너지로 구동된다¹⁻⁵⁾. 전기차 배터리는 대부분 리튬이온 배터리로 크게 양극(Cathode)재, 음극(Anode)재, 전해액 및 분리막 등으로 구성되어 있다¹⁻³⁾. 양극재는 리튬 화합물이 많이 사용되며, 여타 다양한 금속 성분의 함량에 따라 배터리의 특성이 달라진다. 예를 들어 배터리 및 양극재의 전기화학적 특성에 큰 영향을 미치는 양극활물질(Cathode active material)에는 리튬 외에도 니켈, 망간, 코발트, 알루미늄 등 다양한 금속성분이 포함될 수 있다^{1,2)}. 음극은 양극에서 나온 리튬이온을 저장, 방출하고 외부회로를 통해 전류를 흐르게 한다. 음극 활물질에는 graphite 같은 흑연이 많이 쓰인다¹⁻³⁾. 전해액은 염, 용매 및 첨가제 등이 포함되어 리튬이온의 양극/음극 간 이동을 돕는 매개체 역할을 한다. 분리막은 양극/음극을 서로 분리하며 분리막 공극(Pore)은 이온이 이동하는 통로역할을 한다(참고로 양극과 음극이 서로 접촉하면 폭발 등 심각한 안전문제가 발생할 수 있다⁵⁾).

전기차 배터리는 일반적으로 대략 10년 이내의 수명을 지니는데^{6,7)}, 수명이 다하거나 폐차 후에 해당 배터리는 폐배터리가 되어 배출된다⁸⁾. 이런 식으로 전기자동차의 수요 및 활용도 증가에 따라 향후 전기차 폐배터리 배출량도 급증할 것으로 예측되고 있으며⁹⁻¹¹⁾, 이러한 추세라면 향후 관리 및 처리를 감당할 수 없을 수도 있다⁹⁾. 또한, 수명이 다한 폐배터리 내부에는 리튬 망간 니켈 등 각종 유해하지만 고가인 소위 유해성 유가성분이 포함되어 있다^{2,8,12,13)}. 즉, 폐배터리를 제대로 처리하지 않을 경우 환경오염 및 안전문제를 야기할 것이나, 적절한 관리를 통해 상기 유가성분이 잘 회수된다면 환경적/경제적으로 큰 편익을 가져다 것이 분명하다. 더구나 우리나라는 유가금속 거의 전부를 수입에 의존하고 있어 폐배터리의 회

수를 통한 유가금속 등 자원화 물질의 확보가 더욱 절실하다. 이에, 국내에서도 폐배터리 순환 관련 기업간 협업이나 연구개발, 정보공유 그리고 법규신설이나 표준화 등 제도 구축 및 정비가 활발하게 진행 중이다^{4,15)}, 향후 최적 관리 방안 도출을 위해서는 다각적으로 고민할 부분이 많을 것이다. 이에 본 연구에서는 전세계적으로 폐배터리 관리 및 처리에 필요한 신규 기술개발 추세에 대해 소개하였다. 여기서 유가금속 회수를 위한 재활용 기술은 상당 부분 이미 상용화되어^{2,4,16)}, 본 연구에서는 보다 upstream에서의 진단 및 해체기술개발 동향에 비중을 두었다. 추가적으로 기존 연구에서 상대적으로 미진한 폐배터리의 환경/안전문제에 대해서도 거론하였다. 그리고 이에 관련 되어 향후에 필요하게 될 연구 및 개발 방향에 대해 논의하였다.

2. 최적 순환 전략

원래 국내 자동차 폐차 및 재활용 시스템은 휘발유나 경유 등을 연료로 이용하는 내연기관 차량에 맞추어져 있다. 내연기관 차량 내부에도 시동을 위한 (납)배터리가 있지만 운행시에는 엔진 내부에서 가연성 연료를 폭발시켜 나오는 에너지로 차량이 구동된다. 전기차는 별도의 연료 없이 배터리에서 발생시킨 전력으로 차량을 구동하기 때문에, 내연기관 자동차내 배터리와는 제원, 구조 및 성능이 전혀 다르다¹⁷⁾. 폐배터리의 순환전략은 주로 재사용과 재활용이 거론되며 폐기물 관리 측면에서의 원칙에 따르면 재사용이 당연히 재활용(및 최종폐기)에 우선된다^{1,6,18)}. 재사용에는 배터리 팩을 해체 후 선별/재조립하는 법과 배터리 그대로 재사용 하는 방법이 있다. 첫번째 방법의 경우 재사용이 불가능한 모듈과 셀을 해체하여 적절한 부품을 선별하여 재사용할 수 있지만, 분리 시 비용과 시간이 들며, 해체 등의 작업 시 안전문제가 있다^{1,2,6,18)}. 두번째 방법의 경우 비용과 시간이 절감되지만, 해당 폐배터리의 진단평가 등이 정확하게 이루어져야 하며 원형 그대로

로 재사용된 배터리도 쓸 수 있는 적당한 수요처도 있어야 된다는 제약이 존재한다.

재사용 방안은 폐배터리의 잔존에너지를 필요로 하는 ESS(Energy storage system) 분야로 주로 거론된다. 블룸버그 New Energy Finance에 따르면 전세계 전기차 폐배터리(더 정확히는 잔존에너지를 포함하는 중고배터리)에 함유된 (전력)에너지는 2025년까지 연간 180 GWh 이상이 될 것으로 예상되었다^{1,19)}. 이러한 추세를 따르면, 이후 2030년까지 200 GWh 정도의 에너지가 발생되며, 이는 금액으로 3백억불의 가치에 상당할 것으로 추정되었다²⁰⁾. 따라서 ESS 등으로 활용가능한 잔존에너지 용량을 가진 폐배터리는 해체 이후의 처리가 필요한 재활용보다는 재사용으로 유도하고, 활용이 불가할 정도로 성능이 저하된 시점에서 재활용 또는 폐기하는 것이 경제적/환경적으로 바람직하다고 언급하였다^{21,22)}. 마지막으로 재활용은 해체 및 추가적 처리를 통해 주로 폐배터리 내 유가 금속 등을 회수하여 새로운 배터리나 다른 제품의 원자재로 이용하는 것이다. 추가처리는 주로 파쇄(crushing), 분류(classification) 및 선별(separation) 등과 이후 열적/화학적 처리를 통해 양극활물질 내 유가금속 등을 회수하는 방식이다^{1,2,4,5,16)}.

3. 데이터 기반 폐배터리 진단 고효율화

전기차 배터리가 일정 성능 기준을 충족할 수 없을 때, 차량에서 제거된다^{6,8)}. 이에 관련된 보편적인 성능기준은 90년도 USABC(The United States Advanced Battery Consortium LLC.)에 의해 처음 언급되었으며, 이에 따르면 배터리가 원래 잔존성능(정확히는 배터리의 SoH(State of Health) 기준)의 80% 정도일 때 더 이상 사용을 불가하여 교체해야 한다고 명시되어 있다^{6,23)}. 그러나 이러한 옛날 기준은 현재 배터리 기술의 발전에 따라 변경되고 있는 추세이다⁶⁾. 즉 최근에는 보다 낮은 SoH에도 재이용이 가능할 것으로 보고 있다^{6,24,25)}. 참고로, 국내 전기차 폐배터리의 경우 통상적으로 SoH 60%-80%을 기준으로 전기차용 배터리로 재사용 혹은 재활용을 고려하는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 또한 앞서 언급한 바와 같은 일종의 성능 기준치는 배터리의 전기화학반응 메커니즘 발전성을 비롯한 제원의 변화를 고려해야 하며 이에 대한 적절한 성능평가가 이루어져야 한다⁶⁾. 물론 배터리 제조업체 등과의 정보

공유가 원활하면 실측 이전에 교체 기준에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다. 반면, 현재와 같이 배터리에 대한 상세정보가 미진한 상황에서는 해당 폐배터리의 잔류 성능 및 잔존가치를 평가하기 위해서는 일종의 실측 기반 테스트가 반드시 필요할 것이다^{6,26)}. 이러한 다양한 배터리의 검사 및 분류 기술은 각각의 장단점이 존재하는데 통상적으로 정확성 vs. 효율성/신속성 측면에서 거론된다. 즉 (기존에 흔히 사용되었던) 빠른 분류 기법은 실측기반의 평가 지표를 기반으로 하는 경우가 일반적이는데 이 경우 지표선택이 부적절하면 정확성이 떨어질 수밖에 없다²⁷⁾. 배터리의 핵심 성능을 측정하는 가장 보편적인 기술은 쿨롱계수방식이며²⁸⁾, 다른 기술로는 EIS(electrochemical impedance spectroscopy) 등이 있다⁶⁾. 이외에 새로운 연구개발 및 실용화 주제 중 하나는 상기 배터리 진단 실측 데이터를 다른 데이터(예를 들면 배터리의 사용 행적 데이터) 등과 함께 데이터베이스화하여 이를 활용하는 것이다^{6,14,29)}. 여기에는 최적 의사결정을 위한 각종 기계학습이나 인공지능 기법이 적용될 수 있다. 일례로 Lai et al.은 5,000개의 배터리 셀을 선별하기 위한 신경망 기반 데이터를 구축했다^{6,30)}. 이는 주요 인자로 배터리 사용시간 중 전압 및 용량 프로파일을 사용하였으며, 기존의 접근 방식보다 훨씬 높은 효율성을 보였다. Zhou et al.은 training을 거친 SVM(support vector machine)로 실측진단 데이터를 분석하여 약 97%의 정확도로 다량의 배터리 부품을 자동 선별하였다^{6,31)}. 이러한 기계학습 기반 데이터 분석 시스템은 기존 방식보다 높은 정확성을 보이겠지만 알고리즘/코딩 과정에 비용(인건비 혹은 상용 프로그램 사용시 관련 구매/보안/업그레이드 비용) 및 시간이 소요된다는 단점도 지적된다^{1,6,18)}.

국내의 경우 국내 제주테크노파크의 전기차배터리산업화센터를 예로 들면, 폐배터리의 외관, 전해액의 유출, 및 연기나 불꽃 발생 등을 육안(혹은 카메라 영상이나 X선 등 배터리 내외부 형태 확인이 가능한 기기도 활용 가능)으로 확인한다. 외형검사를 통과하면 충방전시험 등을 진행한다. 이를 통해 잔존용량(SoC: State of Charge 배터리 충전률)이나 잔존수명(SoH) 등 성능지표를 산출하고 발열 등 안전관련 검사를 진행하여 등급을 나눈다. 이후 우수한 폐배터리는 에너지저장장치(ESS)에 재사용되고 여타 폐배터리는 모듈별로 해체 후 상세진단을 다시 받는다⁹⁾. 이 때 배터리를 일일이 검사하는데 이로 인해 현재

배터리 진단검사는 장시간이 소요된다고 한다⁹⁾. 미래에 폐배터리의 양이 급증 시 이러한 검사가 보다 신속하지 않으면 인력이나 비용 추가가 불가피할 것이다. 따라서 국내의 업체들도 보다 기존방식에서 벗어나 다양하고 효율적인 기술을 개발하고 있다. 일례로 한 국내업체는 배터리 관리 시스템(BMS)를 활용하여 배터리 관련 주요 성능 지표에 대한 진단 및 성능검사 시간을 5분으로 단축하였다고 보고하였다. 이는 기존의 물리적인 방식이 아닌 배터리 관리 정보(BMS: Battery management system)를 활용한 진단평가 방식이다³²⁾.

4. 효율 및 안전성 제고를 위한 로봇기반 배터리 해체

폐배터리 진단 및 분류가 완료된 다음, 필요시 배터리 해체작업이 수반된다. 또한 현재 국내외를 막론하고 장시간(2-3시간 혹은 그 이상) 수작업으로 해체가 진행되고 있는 것으로 보이며, 이런 작업은 시간 및 인건비 소요 이외에도 안전이 문제시된다^{4,5)}. 이는 전술한 바와 같이 폐배터리가 잔존 에너지를 함유할 경우, 해체 및 파분쇄 등의 작업 중에 발생할 수 있기 때문이며, 차량운전 중 사고 이외에도 기계적 충격이 가해질 수 있는 해체/파쇄 등의 작업에서의 단락이나 화재/폭발 등의 문제가 거론된다¹⁾. 따라서 전처리 전 배터리를 안정화시키는 작업이 반드시 필요하며, 일례로 배터리를 brine(염수) 용액에 담그는 방안 등이 많이 쓰인다^{1,33,34)}.

안정화 이후에도 기술측면에서 안전하고 신속한 해체 및 전처리를 위해 로봇 등 자동화기술의 도입이 고려되고 있다^{1,4,6,14,35)}. 물론 기존 폐전기전자제품의 경우에도 해체 작업 시 로봇이 실용화된 사례가 있다. 그 중 Apple사의 iPhone을 자동 해체하는데 쓰이는 로봇 Daisy가 일례이다³⁶⁾. 반면 폐배터리는 최근까지도 주로 수작업으로 해체되는 것으로 알려졌는데, 이는 폐배터리 해체 관련 안전 리스크, 설계사양의 다양성, 성능측면에서의 불확실성, 자동해체의 복잡성 및 관련 데이터의 부족 등으로 인해 자동 해체 기술개발이 쉽지 않아 아직 현장에서는 인력동원이 불가피한 것으로 보인다^{4,18)}. 참고로, 로봇의 폐배터리의 해체를 위해서는 배터리 해체 부위의 자동 인식 및 해체 방안 도출에 computer vision, 인공지능/기계학습과 클라우드 기반 데이터 처리 등 다양한 기법이 동원되며^{1,6)},

안전한 원거리에서 로봇의 움직임 감시할 전문 인력 배치도 필요할 것이다¹⁾. 구체적으로는 로봇 기반 전기차 폐배터리 자동 해체의 핵심기술은 폐배터리의 상태예측, 분해의사결정 및 표적탐지 등이 거론되고 있다.¹⁸⁾ 일례로 Choux et al.가 연구한 Lab-scale 폐배터리 로봇기반 해체 작업순서를 살펴보면³⁷⁾, (1) 폐배터리(전체 및 주요 부품 포함) image capturing에서 시작되며, 해당 작업에서는 같은 이미지 객체에 대해서 각도를 달리하여 여러 장의 image를 capture하는데, 이 중에서 대상 물체의 속성을 파악하고 정확한 3차원 좌표계산에 가장 유용한 image를 추출하는 작업도 포함된다. (2) 추출된 이미지에서 target 객체(해체를 위한 나사 부분 등)를 별도로 검출하고 주어진 이미지와 인공지능 및 빅데이터 등을 이용하여 최적의 해체 과정을 자동으로 도출한다(의사결정 과정). (3) 의사결정 결과에 맞는 로봇 동작을 위하여 target 객체의 정확한 위치를 산정하고 해체작업을 실시한다. (4) 해체작업을 실시하면서 해체작업 완료시점까지 상기의 순서를 계속 반복한다. 로봇 자동화 해체 작업에 클라우드 기반의 데이터를 이용하여 해체방식 및 작업 관련 정보 입수, 공유 및 최적화 수행할 수 있다^{1,6,18)}. 현재 관련 기술은 대체적으로 특정 case(폐배터리, 로봇이나 데이터 처리 기법 등 지칭 가능)를 이용한 학술연구 수준이나 향후에는 실제 현장조건에서의 Test를 통해 해당 기술의 검증이 필요할 것으로 보고 있다¹⁸⁾. 이들 기술은 표준화 등 제도정비 이후에 다량의 폐배터리 확보가 가능한 시점에서의 비용 대비 효과 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 파분쇄 등 기계적 처리에 수반되는 환경안전 문제

해체 이후의 재활용에 필요한 기계적 처리과정은 크게 파쇄(crushing), 분급(classification) 및 선별(separation) 과정으로 구분된다⁵⁾. 특히 파쇄/분급은 폐배터리를 작고 일정한 입상체로 부수는 과정으로 배터리 내부에 존재하는 유가성분을 표면으로 노출시켜 기계적 처리 이후의 건습식(pyrometallurgical and hydrometallurgical) 공정을 원활하게 하는데 매우 중요하다. 이 과정에서 polyvinylidene fluoride(PVDF) 등의 바인더를 분해하여 주요 부품을 쉽게 박리시키기 위해 가온(400°C 이상)과정이 수반될 수 있다^{5,38)}. 또한 기계적 전처리 중 파분쇄 장치내 불활

성 기체를 주입하여 배터리 연소나 폭발을 방지한다⁵⁾. 그럼에도 폐배터리의 잔존 에너지로 인해 단락 등 급격한 발전이 발생할 경우 감전 및 열폭주(thermal runaway) 등의 안전위험이 존재한다^{5,35)}. 열폭주는 그 자체도 문제지만 그로 인해 배터리내 함유된 플라스틱, 바인더(polyvinylidene fluoride) 및 LiPF₆(salt lithium hexafluorophosphate) 등이 연소되어 메탄, 에탄, 프로판 등의 휘발성 가스 및 일산화탄소 및 불산(HF) 같은 독성(noxious or carcinogenic) 가스가 발생되면, 작업자 안전 및 환경을 위협할 수 있다는 점도 유의할 문제이다^{5,35,39)}. 또한, 배터리내 불소화합물은 물과 접촉 시 환경과 인체 및 생태계의 건강에 또 다른 형태의 악영향을 미칠 수 있다^{5,39)}. 리튬 배터리에서의 가스 배출 관련 과거 연구를 살펴보면, Crafts et al.은 1°C/min의 승온율로 최대 200°C까지의 가온조건에서 비상업용 리튬 전지에서 배출되는 배기가스 성분을 보고하였다⁴⁰⁾. 테스트 대상 전지는 NCO 양극재와, blended graphite 음극재 및 EC(Ethylene carbonate)와 DEC(Diethyl carbonate)가 혼합된 전해질을 함유하고 있었다. Test 결과 배기 가스의 대부분은 완전연소의 결과인 이산화탄소였으나 그 외에 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄, 에틸렌, 에탄, 프로필렌 등 열분해 산물의 다양한 탄화수소(VOC: Volatile organic compound)도 포함되어 있었다고 언급하였다⁴⁰⁾. 또한 Roth et al.이 수행한 연구에서도 유사한 결과가 관찰되었으며, 추가적으로 Ethyl fluoride(C₂H₅F) 발생도 관측되었다⁴¹⁾.

보다 최근 연구를 살펴보면, Dreikmann et al.은 신규 및 노후 리튬배터리의 파분쇄 및 기계적 선별공정에서 배출된 가스에 대해 연구하였다⁵⁾. 예를 들어, 안정화 과정에서 열적 전처리(최대 300°C)가 포함될 수 있는데 이 과정에서 전해질이나 가연성 물질의 휘발 및 부분 연소 등으로 인해 가스가 생성될 수 있다⁴²⁾. 해당 연구결과에서도 가연성 물질 연소에 따른 이산화탄소가 주로 배출되었지만, 저산소 환경에서의 열분해나 휘발의 경우에는 가연성 가스가 배출될 수 있다고 언급하였다. 예를 들면, 전해질에 포함될 수 있는 DMC(Dimethyl carbonate)나 EMC(Ethyl methyl carbonate) 같은 가연성 물질은 가열시 화재나 폭발 위험을 증대시킨다고 하였다^{5,35)}. 또한 배터리내 고분자 물질 등의 열분해에서 발생하는 메탄, 에탄이나 프로판 같은 가스는 환경 및 기후변화 측면에서 악영향을 끼칠 수 있다³⁵⁾. 그리고 전기차 배터리에 전해질로 많이 쓰이는

lithium hexafluorophosphate(LiPF₆)염과 PVDF 바인더의 분해과정에서 일산화탄소와 불화수소 같은 독성가스가 생성될 수도 있다^{5,43)}. 심지어 어떤 실험에서는 비교적 낮은 온도인 60°C 정도에도 배터리의 일부 양극/음극재 성분이 (공기 중) 수분과 결합 시 불화수소나 다른 독성가스의 생성이 관측되었다⁵⁾. 해당 연구자는 가스 이외에도 양극활성물질로 자주 쓰이는 니켈 및 코발트 산화물도 부분 발암성을 지닌다고 지적하였다⁵⁾. 추가적으로 기계적 처리 이전의 배터리의 안정화 과정에서 이러한 가스배출은 가온 파분쇄 등 특정 실험조건에서 관측되어 일반 폐배터리에서는 상기 결과와 같이 급격한 가스배출은 발생되지 않을 것으로 보인다. 그러나 폐배터리가 부적절하게 방치되면 일반적인 환경조건(해체 및 폐기 과정 포함)에서도 위에서 언급된 가스가 서서히 배출되어 환경오염을 야기시킬 수 있다. 또한 기계적 처리 이전의 안정화 단계에서도 Brine discharge 중에 Brine(염수) 용액 내 전해반응으로 인해 수소 이외에도 염소 등이 가스화되어 공기 중으로 배출될 수 있으며 이 경우 유해성을 나타낼 수도 있다³⁴⁾. 물론, 이는 폐배터리의(순환과정의 각 단계별) 배출량이나 기술개발에 따른(주로 양극활물질내) 성분변화에 따라 폐배터리의 환경적 유해성도 변화할 수 있다. 지금까지 언급했던 폐배터리 관련 환경안전측면의 주요 이슈를 Fig. 1에 도시하였다.

6. 향후 관련 기술개발 전략

현재 전기차 폐배터리 관리는 환경적/경제적 측면에서 모두 문제시되고 있으며, 이에 우선적으로 배터리 전 과정에서 표준화, 라벨링 및 관련 정보공유를 위한 제도 구축과 정비가 필요하다. 이는 각 배터리의 셀, 모듈이나 팩이 표준화될 경우 사용 후 재이용/재활용을 위한 분류 및 해체 작업 등에 당연히 도움이 되기 때문이다. 배터리(및 부품)별로 제조사, 제원 및 특징 등이 라벨링될 수 있다면 재이용/재활용을 원활하게 하는데 크게 기여할 것이다. 정보공유 측면에서는 블록체인 기술이나 배터리 여권 같은 기술 혹은 제도를 도입하여 해당 배터리의 생산, 상태 및 행적을 추적할 수 있는 방안이 각국에서 이미 도입되고 있다^{1,15)}. 그리고 이러한 전기차 배터리 순환과정은 데이터베이스화하여 차후 새로운 배터리 설계에 반영되어야 하며, 이를 통해 향후 생산될 배터리의 환경오염 저

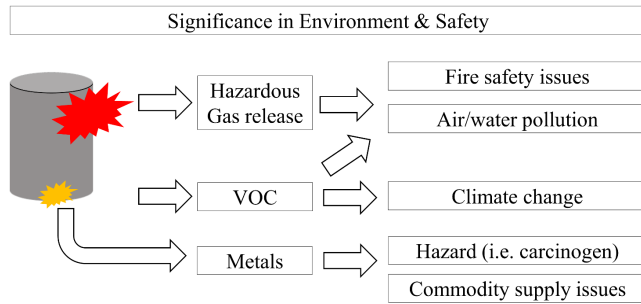


Fig. 1. Environmental and safety issues from handling (waste) batteries.

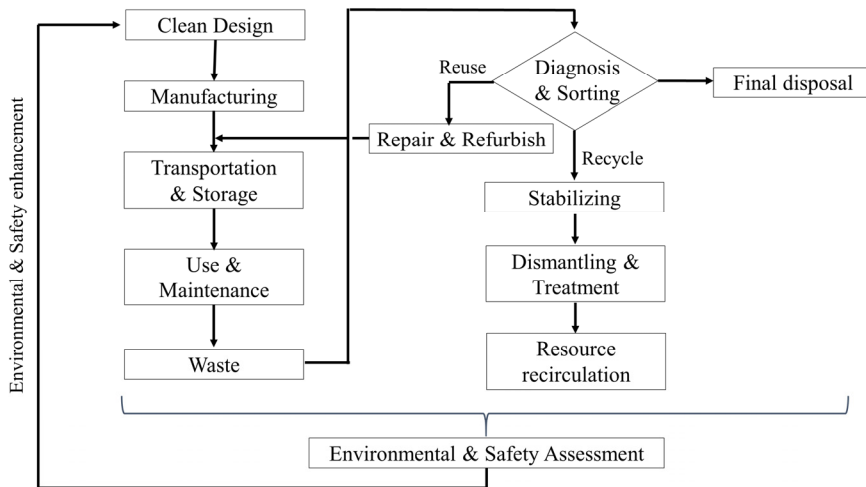


Fig. 2. A schematic demonstration of the entire technological processes for EV battery with environmental & safety assessment.

감 및 재이용/재활용을 보다 원활히 할 수 있는 방향으로 기여해야 할 것이다. 예를 들면, 폐배터리 부품뿐 아니라 해체/처리 시 우선적으로 이용되는 Tool이나 공정에 대한 정보를 파악하여 향후 생산될 배터리가 순환과정에 유입되면 가능한 비용이나 환경안전 측면에서 부담이 적은 Tool이나 공정을 거쳐 재이용/재활용이 가능하도록 해야 한다(Fig. 2 참조). 이러한 과정은 배터리 관련 상세 데이터 시스템 구축과 제조/운송/해체 업체 간의 관련 정보공유 및 협력구도가 선행되어야 할 것이다. 또한 보안이 필요한 정보는 정보보안을 통해 보호하여 기업의 수익성을 보장하는 대신, 보안 및 정보공유 미진으로 인해 환경안전 등의 피해가 발생한다면 그 책임 또한 보안을 요구한 기업에게 지도록 하는 방안이 강구되어야 할 것이다. 또한, 환경안전 측면에서 배터리 내에 주요 성분인 리튬(리튬화합물 포함)의 경우 아직 국내 화학물질 배출이동량

데이터베이스에서 공개하고 있지 않아⁴⁴⁾, 향후 업데이트에서는 이러한 내용(리튬 및 관련 화학물 배출이동 정보 파악 및 관련 배출량/배출계수 산정 등)이 고려되는 것이 바람직할 것이다. 또한 환경안전측면에서는 전술한대로 배터리 연소시 화재/폭발뿐 아니라 유해성 가스 유출에 대한 사항을 보다 상세히 조사하고 그에 따른 환경과 소방 안전 등의 측면에 대한 위험성 평가 및 대응방안도 마련해야 할 것으로 생각된다.

7. 결 론

최근 배터리를 탑재한 전기차 생산의 급증으로 인해 향후 다량 배출될 폐배터리의 적정 관리방안 도출이 시급하다. 폐기물 관리의 범용 원칙에 따라 전기차 폐배터리도 폐배터리의(원형 그대로 혹은 해체를 통한) 재이용을 우

선으로 고려하고, 재이용이 불가할 정도로 노후화된 이후 적절한 처리를 통한 유가금속 회수 등의 재활용 그리고 마지막으로 폐기처분 순서로 우선순위를 두는 것이 바람직할 것이다. 현재 폐배터리 관련 국내에서는 재이용/재활용을 위한 협업구도 구축, 기술개발 표준화 및 정보 공유 진행 등 다양한 방안이 고려 및 실행 중이다. 현재 가장 시급한 사항 중 하나는 효율적이고 안전한 폐배터리 진단평가 기술개발인 것으로 보인다. 해외에서는 빅데이터 기반 비표준 폐배터리 최적 관리 및 로봇 기반 Lab-scale 배터리 자동 해체기술 등에 연구개발이 진행중인데 이는 산업 현장에서의 Test를 통한 검증이 필요할 것이다. 또한 이러한 기술의 활용은 배터리 관련 진단평가, 표준화, 추적(배터리 여권) 혹은 라벨링 같은 시스템과 연동되어야 할 것이다. 전기차 배터리의 향후 기술적 진보, 가격적 변동 및 원자재 공급여건을 감안하여 향후 폐배터리의 다량배출 시점에서의 배터리 제원 및 시장여건에 맞춰 재이용/재활용 시스템이 최적화되는 것이 바람직할 것이다. 이외에도 향후 폐배터리 운송/해체 뿐 아니라 재활용/회수 및 최종 처분에 걸친 전주기에 걸쳐 데이터 축적 및 최적 관리방안 확장 필요하다. 여기서 수집된 데이터는 배터리 관련 각 부문과 공유되어야 하지만 특히 차후 생산되는 배터리가 보다 환경친화적이고 재이용/재활용이 용이하도록 하는 소위 청정 생산에 기여하도록 해야 할 것이다. 또한 전주기내 각 세부단계별 안전성 및 환경성 측면에 대한 사항도 더 상세히 평가되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 대구녹색환경지원센터의 환경기술개발 연구과제 지원으로 수행되었다.

References

- Shahjalal, M., Roy, P.K., Shams, T., et al., 2022 : A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues, Energy, 241, 122881.
- KDB (Korea Development Bank), 2019 : Current trends of reuse and recycling Industry and technology on waste lithium batteries (translated from Korean), KDB Monthly Report in Nov. 2019.
- Samsung SDI Co., 2022 : URL: <https://www.samsungsdi.co.kr/column/all/detail/56455.html?idx=56455> (assessed 12 July 2022).
- IIT (Institute for International Trade of Korea), 2022 : Current trends and issues of electric vehicle battery recycling industry: focusing on Chinese cases (translated from Korean), Trade focus in Nov. 2022. URL: <https://www.kita.net/cmmrcInfo/internationalTradeStudies/researchReport/focusBriefDetail.do?no=2302&Classification=5> (Accessed 10 July, 2022)
- Diekmann, J., Hanisch, C., Froböse, L., et al., 2017 : Ecological recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles with focus on mechanical processes, J. Electrochem. Soc., 164(1), pp.A6184–A6191.
- Zhu, J., Mathews, I., Ren, D., et al., 2021 : End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries, Cell Rep. (Physical Science), 2, 100537.
- Zhao, G., 2017 : Reuse and Recycling of Lithium-Ion Power Batteries, pp. 37–257. John Wiley & Sons, USA.
- DoE (Department of Environment - Korea) : URL: <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000174875> (assessed 10 July, 2022).
- Samsung Securities, 2022 : E-Waste industry: EV battery being the core of E-waste market (translated from Korean), Sector update report on April 12th, 2022. URL : https://www.samsungpop.com/common.do?cmd=down&saveKey=research.pdf&fileName=2020/2022041207195199K_02_01.pdf&contentType=application/pdf (Accessed 8 August 2022).
- Hi Investment&Securities Co., Ltd., 2022 : Li-Cycle (LICY US Equity), Global company brief report on June 6th, 2022. URL : [https://m.hi-ib.com:442/upload/R_E14/2022/06/\[07065234\]_221038.pdf](https://m.hi-ib.com:442/upload/R_E14/2022/06/[07065234]_221038.pdf) (Accessed 8 August 2022).
- Hana Financial Investment Co., Ltd., 2021 : Battery weekly double speed (translated from Korean), Weekly Report on Dec. 13th, 2021. URL : https://www.hanaw.com/download/research/FileServer/WEB/industry/industry/2021/12/12/Battery_Weekly_2021.12.13.pdf (Accessed 8 August 2022).
- Chosun Newspaper, 2022 : URL: <https://biz.chosun.com/industry/car/2022/05/06/YOJWBFI.NMBHAJNWB5FTNGKXU/> (assessed 10 July, 2022).
- NIER (National Institute of Environmental Research in Korea), 2021 : Designation notice of hazardous materials (listed on Dec. 28th 2021). URL : <https://nier.go.kr/NIER/cop/bbs/selectNoLoginBoardList.do> (Accessed July 10, 2022).
- Samjong KPMG Economic Research Institute Inc., Business Focus: Battery circular economy, EV battery market rising and its responding business strategy (translated from Korean), Research report in March 2022. URL : <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/kr/pdf/2022/busin>

- ess-focus/kr-bf-recycling-battery-20220311_Final.pdf (Accessed 8 August 2022).
15. DoE (Department of Environment in Korea), 2022 : URL : <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156511785> (Accessed 9 July 2022).
 16. Sung Eel HiTech Co. Ltd., 2022 : URL : <https://www.sungeelht.com/html/12> (Accessed 8 August 2022).
 17. Song, H.H., 2019 : Life cycle assessment of greenhouse gas emissions for light-duty vehicles in South Korea, *Auto Journal*. URL : https://www.ksae.org/func/download_journal.php?path=L2hvbWUvdmlldHVhbC9rc2FhL2h0ZG9jcy91cGxvYWQvam91cm5hbC8yMDIxMDUwMzE0MTc0MS41ODM4LjEwLjkucGRm&filename=S1NBRUFKXzIwMjE0MzA1XzE3LTlyLnBkZg==&bsid=48270 (Accessed July 22, 2022).
 18. Meng, K., Xu, G., Peng, X., et al., 2022 : Intelligent disassembly of electric-vehicle batteries: a forward-looking overview, *Resour. Conserv. Recycl.*, 182, 106207.
 19. Stringer, D., Jie, M., 2018 : Where 3 million electric vehicle batteries will go when they retire. URL: <https://www.bloomberquint.com/technology/where-3-million-electric-vehicle-batteries-will-go-when-they-retire> (Accessed 11 July 2022).
 20. Lovell, J., 2019 : Storage: retirement home for old EV batteries?, URL : <https://www.energycouncil.com.au/analysis/storage-retirement-home-for-old-ev-batteries/> (Accessed 11 July 2022).
 21. Pagliaro, M., Meneguzzo, F., 2019 : Lithium battery reusing and recycling: a circular economy insight, *Elsevier Ltd Heliyon*, 5(6), e01866.
 22. Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., et al., 2019 : Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles, *Nature*, 575(7781), pp.75–86.
 23. Hunt, G., 1996 : USABC electric vehicle battery test procedures manual (U.S. Council for Automotive Research). http://www.uscar.org/guest/article_view.php?articles_id=74 (Accessed 11 July 2022).
 24. Saxena, S., Le Floch, C., MacDonald, J., et al., 2015 : Quantifying EV battery end of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models, *J. Power Sources*, 282, pp.265–276.
 25. Xu, X., Mi, J., Fan, M., et al., (2019). Study on the performance evaluation and echelon utilization of retired LiFePO4 power battery for smart grid, *J. Clean. Prod.*, 213, pp.1080–1086.
 26. Ai, N., Zheng, J., Chen, W.Q., 2019 : U.S. end-of-life electric vehicle batteries: dynamic inventory modeling and spatial analysis for regional solutions, *Resour. Conserv. Recycl.*, 145, pp.208–219.
 27. Li, X., Zhang, L., Liu, Y., et al., 2020 : A fast classification method of retired electric vehicle battery modules and their energy storage application in photovoltaic generation, *Int. J. Energy Res.*, 44, pp.2337–2344.
 28. Ng, K.S., Moo, C-S., Chen, Y-P., et al., 2009 : Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries, *Appl. Energy*, 86(9), pp.1506–1511.
 29. Liao, Q., Mu, M., Zhao, S., et al., 2017 : Performance assessment and classification of retired lithium ion battery from electric vehicles for energy storage, *Int. J. Hydrogen Energy*, 42, pp.18817–18823.
 30. Lai, X., Qiao, D., Zheng, Y., et al., 2019 : A rapid screening and regrouping approach based on neural networks for large-scale retired lithium-ion cells in second-use applications, *J. Clean. Prod.*, 213, pp.776–791.
 31. Zhou, Z., Duan, B., Kang, Y., et al., 2020 : An efficient screening method for retired lithium-ion batteries based on support vector machine, *J. Clean. Prod.*, 267, 121882.
 32. Youngiltech Co., 2021 : URL : http://youngiltech.com/?ckattempt=1&uid=154&mod=document&page_id=924 (assessed 9 July 2022).
 33. Liu, C., Lin, J., Cao, H., et al., 2019 : Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: a critical review, *J. Clean Prod.*, 228, pp.801–813.
 34. Exponent Failure Analysis Associates, 2011 : Lithium-ion batteries hazard and use assessment, The Fire Protection Research Foundation: Final Report.
 35. Tan, W.J., Chin, C.M.M., Garg, A., et al., 2021 : A hybrid disassembly framework for disassembly of electric vehicle batteries, *Int J Energy Res.*, 45, pp.8073–8082.
 36. Apple, 2018 : Apple adds Earth Day donations to trade-in and recycling program. URL: <https://www.apple.com/newsroom/2018/04/apple-adds-earth-day-donations-to-trade-in-and-recycling-program/> (Accessed 11 July 2022).
 37. Choux, C., Bigorra, E.M., Tyapin, I., 2021 : Task Planner for Robotic Disassembly of Electric Vehicle Battery Pack, *Metals*, 11, 387.
 38. Sun, L., Qiu, K., 2011 : Vacuum pyrolysis and hydrometallurgical process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries, *J. Hazard. Mater.*, 194, 378.
 39. Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., et al., 2017 : Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires, *Nature Sci. Rep.*, 7, 10018.
 40. Crafts, C., Borek, T., Mowry, C., 2000 : Safety Testing of 18650-Style Lithium-ion Cells, Sandia National Laboratories, SAND2000-1454C.
 41. Roth, E.P., Crafts, C.C., Doughty, D.H., et al., 2004 : Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Thermal Abuse Performance of 18650 Li-

Ion Cells, Sandia Report: SAND2004-0584.

42. Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., et al., 2012 : Development of a recycling process for Li-ion batteries, J. Power Sources, 207, 173.
43. Campion, C.L., Li, W., Lucht, B.L. 2005 : Thermal de-

composition of LiPF₆-based electrolytes for lithium-ion batteries. J Electrochem Soc., 152(12), A2327.

44. PRTR (Pollutant Release and Transfer Register in Korea), 2020 : URL : <https://icis.me.go.kr/prtr/prtrInfo/mtrSearch.do> (Accessed 13 July 2022).

변재은

- 현재 계명대학교 환경학부 학생
-

서지현

- 현재 계명대학교 환경학부 학생
-

이민경

- 현재 계명대학교 환경학부 학생
-

Yamada Keiko

- 일본 나가사키대학 생산과학연구과 박사
 - 현재 계명대학교 환경학부 조교수
-

이상훈

- 퍼듀대학교 Biological Engineering 박사
 - 현재 계명대학교 환경학부 환경과학전공 조교수
 - 당 학회지 제27권6호 참조
-