Research Article
Korean J Life Cyle Assess 2024;25(2):55-64
https://doi.org/10.62765/kjlca.2024.25.2.55

전과정평가학회지
Korean Journal of Life Cycle Assessment
pISSN: 1229-599X, eISSN: 3058-5937

전기차 배터리 디자인의 재제조성(Remanufacturability) 평가 모델

서정민, 곽민정*

숭실대학교 산업 · 정보시스템공학과

Evaluating Remanufacturability of Electric Vehicle Batteries

Jeong Min Seo, Minjung Kwak*

Department of Industrial and Information Systems Engineering, Soongsil University, Korea

ABSTRACT

The demand for electric vehicles (EVs) is increasing worldwide, and with mandatory recycling of End-of-life batteries, interest in remanufacturing used batteries is also growing. The product structure and physical properties of batteries, determined during the design process, are critical factors in the feasibility, profitability, and environmental impact of battery remanufacturing. This study presents a model to evaluate the remanufacturability of EV batteries from economic and environmental perspectives by integrating considerations of battery design, the quantity and quality of recoverable used batteries, and market demand for remanufactured batteries.

Key words: electric vehicle battery, end-of-life vehicle, remanufacturing, circular economy, eco-design, life cycle assessment

요 약

전기차 수요가 증가하고 폐배터리 회수가 의무화되면서 폐배터리 재제조에 대한 관심이 증가하고 있다. 배터리 설계 과정에서 결정되는 배터리의 제품 구조 및 물성은 배터리 재제조의 용이성과 수익성, 환경적 효과를 결정하는 핵심 요인이다. 본 연구에서는 전기차 배터리의 디자인, 회수 가능 폐배터리의 양과 품질수준, 재제조 배터리에 대한 시장 수요 등을 통합적으로 고려하여 전기차 배터리의 재제조성을 경제적, 환경적 측면에서 평가하는 모델을 제시한다.

주제어: 전기차 배터리, 폐자동차, 재제조, 순환경제, 에코디자인, 전과정평가

1. 서 론

International Energy Agency에 따르면, 2030년까지 전기차의 시장 점유율이 급격히 증가하여 약 2억 2천만 대에 이를 것으로 예상된다[1]. 글로벌 전기차 시장의 성장에 따라 전기차 배터리 시장도 함께 확대되고 있으며, 증가하는 배터리 수요와 폐배터리 처리 문제에 대응하기 위한 배터리 재활용에 대한 관심도 높아지고 있다. EU는 2035년까지 내연기관 자동차 판매를 중단하고, 전기차 인프라 구축과 생산 과정의 투명성 강화, 배터리 재활용 촉진을 위한 다양한 제도를 도입하고 있다. 미국은 전기차 구매 시 세금 공제를 제공하며, 배터리 소재 추적과 재활용을 강조하는 정책을 시행하고 있다[2]. 2023년 기준 폐배터리 시장 규모는 약 5억 2,800만 달러에 달하며, 2030년까지 90억 달러로 성장할 것으로 전망된다[3]. 국내 전기차 시장도 성장하고 있으며, 정부는 전기차 보조금 지급과 충전소 설치 의무화 등의 정책을 통해 이를 지원하고 있

Date Received: Nov. 15, 2024, Date Revised: Dec. 12, 2024, Date Accepted: Dec. 16, 2024
* **Corresponding author**: Minjung Kwak, Tel: +82-2-828-7033 E-mail: mkwak@ssu.ac.kr
† 본 논문은 제1저자의 석사학위 졸업논문(2025)을 바탕으로 재구성된 논문임.
ⓒ Copyright 2024 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.

다. 폐배터리 관리 역시 강화되어, 지역별 거점 수거 센터 운영과 의무 수거가 진행되고 있다[4].

재제조(remaufacturing)는 폐배터리 재활용의대안 중 하나로 폐배터리를 수리하고 부품을 교체하거나 재가공하여 원래의 성능으로 복원하는 과정이다. 재제조된 배터리는 부품을 재사용한다는 측면에서 신품보다 낮은 비용으로 생산 가능하고 자원 소모와 폐기물을 줄이는 경제적, 환경적 이점을 지닌다[5].

배터리 재제조에 대한 관심이 증대되면서 관련 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 주요 연구 주제로는 배터리 해체 비용 평가, 해체 순서 최적화, 재제조 수익성 분석, 배터리 분해 및 재활용의 자동화 등이 논의되고 있다[6-8]. 그러나 기존 연구는 특정 배터리 설계를 가정하여 진행되는 경우가 많아, 전기차 제조사마다 다양한 배터리 설계를 체계적으로 반영하기 어렵고, 배터리 설계가 재제조 의사결정에 미치는 영향을 평가하는 데 한계가 있다. 또한, 폐배터리의 물량과 품질수준, 재제조 배터리의 가격 및 시장 수요 등 배터리 재제조를 둘러싼 다양한 시장 요인을 반영한 통합적 접근이 부족한 상황이다.

배터리 설계 특성(종류, 구조, 물질 구성)을 고려하여 재제조 수익성과 환경성을 평가하기 위해, 본 연구에서는 트랜지션 매트릭스(transition matrix)를 활용한 배터리 재제조성 평가 모델을 제시한다. 이 모델은 폐배터리의 잔존수명(State of Health: SOH)에 따라 변하는 회수 비용, 재사용 가능한 부품의 회수율, 재제조 배터리의 가격 및 시장 수요 등을 고려하여 최적의 폐배터리 회수량, 분해 수준, 재제조 배터리 생산량, 재활용 전략 등을 통합적으로 최적화한다.

트랜지션 매트릭스는 재제조 과정의 분해, 재가공(reconditioning), 재조립 작업의 투입물-산출물 관계를 나타내며, 배터리 설계특성을 반영한 수리적 모델링을 지원한다. 지금까지 트랜지션 매트릭스를 활용한 다양한 재제조 연구가 존재했지만, 배터리에 적용된 사례는 없었다.

본 연구에서는 제안한 최적화 모델의 실효성을 입증하기 위해 선행 연구에서 수집한 배터리 데이터를 기반으로 재제조성 평가 사례 연구를 진행하였다. Fig. 1은 본 연구의 개요를 도식화한 것이다.

이어지는 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 배터리 재제조 관련 이론적 배경을 살펴본다. 3장에서는 배터리 재제조성 평가 모델을 설명하고, 4장에서는 사례연구 결과 및 시사점을 논한다. 5장에서는 연구의 결론 및 시사점을 제시한다.

2. 이론적 배경

2.1. 전기차 배터리의 구조

전기차 배터리는 일반적으로 상부 및 하부 하우징, 배터리

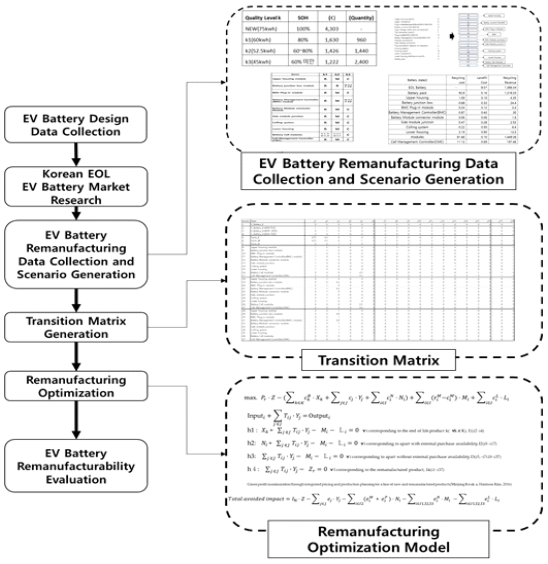

Fig. 1. Overview of the study.

접합 상자(battery junction box, BJB), 배터리 관리 컨트롤러(battery management controller, BMC), BMC 플러그인 모듈, 배터리 모듈 커넥터, 사이드 모듈 접합부, 냉각 시스템, 배터리 팩 등의 주요 모듈로 구성되며, 배터리 팩은 배터리 셀이 결합된 셀 모듈과 셀 모듈 컨트롤러(cell module controller, CMC)의 두 부품으로 다시 나눌 수 있다[9].

상부와 하부 하우징은 배터리를 외부 충격과 열로부터 보호하며, BJB는 고전압을 관리하는 중요한 부품이다. BMC는 전압, 온도, 전류를 모니터링하여 배터리 수명을 최적화한다. 모듈 커넥터와 사이드 모듈 접합부는 배터리 모듈 간의 전기적, 물리적 결합을 담당하며, 냉각 시스템은 배터리의 적정 온도를 유지한다. 배터리 팩은 전기차에 전력을 공급하는 핵심 구성요소이다.

2.2. 배터리 재제조 프로세스

재제조 프로세스는 폐배터리 회수(매입)으로부터 시작되며, 전기차 배터리의 품질수준에 따라 회수비용이 달라진다. 전기차 배터리의 품질수준은 SOH를 기준으로 구분된다[10]. 국내 배터리 SOH 평가는 거점 수거 센터에서 이루어지며, 평가 결과에 따라 kWh당 가격을 통해 기본 가격이 책정된다[11].

회수한 폐배터리는 모듈 혹은 부품 단위로 해체하고, 모듈/부품별 품질수준에 따라 그대로 또는 재가공을 거쳐 재사용할 수 있다. 재사용이 불가한 경우에는 신품으로 교체되며, 교체된 폐부품은 물질재활용하여 판매한다. 모듈/부품별 재사용 가능성은 배터리 SOH에 따라 달라진다. 일반적으로 SOH가

80% 이상일 경우 분해 시 대부분의 부품이 그대로 재사용이 가능하다. SOH 60% 이상 80% 미만은 부품 단위 재사용이 가능하나 일부 부품은 재사용을 위해 재가공 작업을 필요로 한다. SOH 60% 미만은 대부분의 부품이 재사용 불가하여 물질재활용된다[10].

배터리 재제조 프로세스의 최적화를 위해 기존 연구에서는 배터리 해체 비용 평가, 배터리 해체 순서 및 해체 수준 최적화, 재제조 수익성 분석, 배터리 해체 및 재활용의 자동화 등을 주제로 다양한 연구가 진행되었다. 예를 들어, Rosenberg et al.[12]은 배터리 팩을 분해할 때 각 부품의 결합을 해체하는 데 소요되는 비용과 시간을 측정하여 인건비를 평가했다. Lander et al.[13]은 배터리 해체를 모듈 수준에서 분석하여 분해 비용을 평가했다. Baazouzi et al.[6]은 배터리 해체 순서 최적화연구를 수행했고, Alfaro-Algaba와 Ramirez[7]는 배터리 분해 단계별 비용과 환경 영향을 분석하여 재제조 시 이득을 평가했다. Choux et al.[8]은 배터리 모듈의 재제조 및 재활용 데이터를 수집했다. Kay et al.[14]은 로봇을 이용한 하이브리드 배터리 분해 방법을 연구하여 인간의 직접 분해를 보완하는 방안을 제시했다.

그러나 이러한 연구들은 특정 배터리 설계를 가정하여 진행되는 경우가 많아, 배터리 설계의 특성을 체계적으로 고려하는 데 한계가 있다. 또한, 주로 분해와 같은 재제조 과정 중 일부 프로세스에 집중하는 경향이 있으며, 폐배터리의 물량과 품질 수준, 재제조 배터리의 가격 및 시장 수요 등 재제조와 관련된 다양한 시장 요인을 포괄하는 통합적 재제조성 분석이 부족한 실정이다. 특히, 수익성과 환경성을 동시에 고려한 재제조성 분석은 아직 초기 단계에 머물러 있어 이에 대한 연구가 시급하다.

3. 배터리 재제조성 평가 모델

3.1. 트랜지션 매트릭스

본 논문에서는 배터리 디자인의 재제조성 평가를 위해 Kwak and Kim[15]이 제시한 트랜지션 매트릭스 기법을 활용한다. 트랜지션 매트릭스는 제조/재제조 과정에서의 제품 상태 변화 및 물량 흐름 관계를 나타내는 매트릭스로서, 프로세스 최적화의 주요 도구로서 활용된다. 본 논문에서는 트랜지션 매트릭스를 활용하여 재제조 과정을 수학적으로 모델링한다.

Fig. 2는 배터리 재제조에 대해 본 연구에서 수립한 트랜지션 매트릭스를 보여준다. 배터리 재제조 과정에서 발생 가능한 제품 상태로는 제품, 모듈, 부품 등이 있으며, 이들은 트랜지션 매트릭스의 각 행에 대응된다. 예를 들어, Fig. 2의 트랜지션 매트릭스에서 행 i2-i4는 SOH가 다른 폐배터리 세 종류(SOH 80% 이상(k1), 60~80%(k2), 60% 미만(k3))를 의미하며, i5-i7은 품질수준이 다른 배터리 팩 세 종류(재사용 가능 수준(R), 재제조 가능 수준(M), 재활용 가능 수준(C))를 의미한다. 배터리 팩 해체로 얻을 수 있는 i8-i37은 배터리 셀 모듈과 CMC를 포함하여 배터리를 구성하는 10개의 모듈을 나타낸

item(i)	State	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	j8	j9	j10	j11	j12	j13	j14	j15	j16	j17	j18
i1	V_Battery_R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
i2	V_Battery_k1(≥80%)	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i3	V_Battery_k2(60%~80%)	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i4	V_Battery_k3(<60%)	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i5	Packs_R	0.75	0.5	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
i6	Packs_W	0.25	0.5	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i7	Packs_N	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i8	Upper housing module	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
i9	Battery junction box module	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
i10	BMC Plug-in module	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
i11	Battery Management Controller(BMC)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
i12	Battery Module connector module	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1
i13	Side module junction	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1
i14	Cooling system	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1
i15	Lower housing	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1
i16	Battery Cell modules	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0
i17	Cell Management Controller(CMC)	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
i18	Upper housing module	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i19	Battery junction box module	0	0	0.2	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i20	BMC Plug-in module	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i21	Battery Management Controller(BMC)	0	1	0.2	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
i22	Battery Module connector module	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
i23	Side module junction	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
i24	Cooling system	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
i25	Lower housing	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
i26	Battery Cell modules	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
i27	Cell Management Controller(CMC)	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
i28	Upper housing module	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i29	Battery junction box module	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i30	BMC Plug-in module	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i31	Battery Management Controller(BMC)	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i32	Battery Module connector module	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i33	Side module junction	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i34	Cooling system	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i35	Lower housing	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i36	Battery Cell modules	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i37	Cell Management Controller(CMC)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 2. Example transition matrix for battery remanufacturing.

다. 품질수준에 따라 재사용이 가능한 i8-i17, 재제조가 가능한 i18-i27, 재활용이 가능한 i28-i37로 구분된다.

트랜지션 매트릭스의 열은 재제조 과정에서 수행되는 해체, 재가공, 재조립 등의 공정을 표현한다. 각 열은 제품 상태의 전환을 일으키는 트랜지션으로, 투입물을 산출물로 전환하는 역할을 한다. 각 열의 수치 중 음수는 작업의 투입물을, 양수는 산출물을 나타낸다. 예를 들어, 트랜지션 j1은 배터리의 분해 작업을 나타낸다. 품질수준이 k1인 폐배터리(i2) 한 개를 분해할 경우, 바로 재사용이 가능한 배터리 팩(i5) 0.75개와 재제조가 필요한 배터리 팩(i6) 0.25개, 그리고 바로 재사용 가능한 나머지 모듈 i8-i15이 각 1개씩 생성됨을 의미한다. 마찬가지로 트랜지션 j2와 j3는 품질수준이 k2와 k3인 배터리의 해체 작업을 나타낸다.

트랜지션 j4-j6는 배터리 팩의 분해 과정을 나타낸다. j7-j16는 재가공 과정을, j17은 재사용 가능한 셀 모듈이 배터리 팩으로 결합되는 과정을, j18은 최종적으로 배터리 팩과 나머지 모듈을 결합하는 과정을 나타낸다.

특정 재제조 프로세스는 트랜지션 수행횟수의 조합으로 표현할 수 있다. 이는 트랜지션 별 소요비용과 환경영향을 고려하여 비용과 환경영향을 최소화하기 위한 트랜지션의 최적 조합을 찾을 수 있음을 의미한다. 따라서 트랜지션의 최적 조합을 찾는 최적화 모형을 통해 배터리 디자인의 재제조성을 평가할 수 있으며, Fig. 3과 같이 서로 다른 배터리 디자인에 대해 평가를 수행할 경우 재제조 관점에서 어떤 배터리 디자인이 더 나은지 정량적 비교 분석이 가능하다.

3.2. 재제조성 평가를 위한 최적화 모형

배터리 재제조성 평가를 위한 최적화 모형은 식 (1)~식 (3)과 같다. 수식에 사용된 기호 및 변수 정의는 Table 1과 같다.

최적화 모형은 주어진 배터리 디자인과 시장 상황 하에서 기대할 수 있는 최대 재제조 수익을 평가한다. 이는 Kwak and Kim[15]의 모형을 배터리 재제조에 맞게 수정한 것으로, 물질

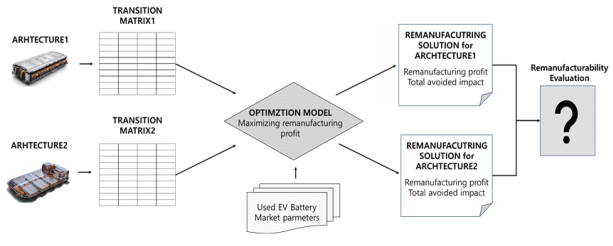

Fig. 3. Design evaluation framework based on transition matrix.

재활용 가치가 높은 배터리의 특성을 반영하여 최적화를 수행한다.

식 (1)은 최적화 모형의 목적함수로서 재제조를 통해 기대할 수 있는 경제적 순수익을 나타낸다. 경제적 순수익은 크게 재제조 배터리의 판매수익, 재제조 비용(폐배터리 회수비용, 분해 · 재가공 · 재조립 프로세스 비용, 교체용 부품 구매비용), 물질재활용 순수익(판매수익-비용), 폐기비용의 네 가지 요소로 결정된다.

식 (2)와 식 (3)은 최적화 모형의 제약조건을 나타낸다. 식 (2)는 폐배터리 회수량과 재제조 생산량에 대한 제약조건들로, 다음의 세 가지 조건을 충족하도록 제약한다: 첫째, 각 품질수준별 폐배터리 회수량은 시장 내 회수가능량을 초과할 수 없

Table 1. Mathematical notation

Indices	
i	State or entity (product, module, or component)
j	Remanufacturing transition
k	EOL battery quality level
Decision variables	
X_k	Take-back quantity of batteries with quality level k
Y_j	Number of times transition j is performed
N_i	External purchase quantity of entity i
L_i	Disposal quantity of entity i
Z	Production quantity of remanufactured batteries
Parameters	
T_{ij}	Value of transition matrix cell (i, j)
c_k^B	Take-back cost of EOL batteries with quality level k
c_j	Processing cost per transition j
c_i^N	External purchase cost per unit of entity i
r_i^M	Material recycling revenue per unit of entity i
c_i^M	Material recycling cost per unit of entity i
c_i^L	Disposal cost per unit of entity i
a_k	Available quantity of EOL batteries with quality level k
d_r	Market demand for remanufactured batteries
I_N	Environmental impact from new battery production
e_j	Environmental (env.) impact per transition j
e_i^M	Unit env. impact from material extraction of entity i
e_i^P	Unit env. impact from production of entity i
e_i^R	Unit env. impact from material recycling of entity i
e_i^L	Unit env. impact from disposal of entity i
e_a	Unit env. impact from reassembly process

$$maximize\ P_r \cdot Z - (\sum_{k\in K} c_k^B \cdot X_k + \sum_{j\in J} c_j \cdot Y_j + \sum_{i\in I} c_i^N \cdot N_i) + \sum_{i\in I} (r_i^M - c_i^M) \cdot M_i - \sum_{i\in I} c_i^L \cdot L_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &g1: X_k \le a_k \ \forall \text{ 폐배터리 } k\,(k \in K) \\ &g2: Z \le d \\ &g3: Z \le \sum_{k\in K} X_k \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &h1: X_k + \sum_{j\in J} T_{ij} \cdot Y_j - M_i - L_i = 0 \quad \forall \text{ 폐배터리, } I1(i2-i4) \\ &h2: N_i + \sum_{j\in J} T_{ij} \cdot Y_j - M_i - L_i = 0 \quad \forall \text{ 외부 구매가 가능한 부품, } I2(i8-i17) \\ &h3: \sum_{j\in J} T_{ij} \cdot Y_j - M_i - L_i = 0 \quad \forall \text{ 외부 구매가 불가능한 제품, } I3(i5-i7, i18-i37) \\ &h4: \sum_{j\in J} T_{ij} \cdot Y_j - Z = 0 \quad \forall \text{ 재제조 배터리, } I4(i1-i37) \end{aligned} \quad (3)$$

$$Total\ avoided\ impact = I_N \cdot Z - \sum_{j\in J} e_j \cdot Y_j - \sum_{i\in I2} (e_i^M + e_i^P) \cdot N_i - \sum_{i\in I1,I2,I3} e_i^R \cdot M_i - \sum_{i\in I1,I2,I3} e_i^L \cdot L_i \quad (4)$$

$$I_N = \sum_{i\in I2} (e_i^M + e_i^P) + e_a \quad (5)$$

다(*g*1). 둘째, 재제조 배터리 생산량은 시장 내 수요를 초과하지 않는다(*g*2). 셋째, 재제조 생산량은 회수한 폐배터리 총량을 초과하지 않는다(*g*3).

식 (3)은 재제조 프로세스 상의 투입물-산출물의 관계에 대한 제약식이다. 재제조 과정에서 등장 가능한 모든 상태의 제품/모듈/부품 i에 대해, 외부로부터의 회수 혹은 구매로 인한 투입물($Input_i$)과 재제조 과정 중 획득 혹은 소비된 i의 총 물량($\Sigma_j T_{ij} \cdot Y_j$), 재제조 이후 최종 산출물($Output_i$) 간의 관계를 식 (6)과 같이 제약한다. 즉, 재제조를 위해 외부로부터 유입된 투입물과 재제조 과정으로 인해 획득/소비된 총 변화량의 합은 최종 산출물과 같아야 함을 의미한다.

$$Input_i + \sum_{j\in J} T_{ij} \cdot Y_j = Output_i \quad (6)$$

식 (3)에서 제약식 *h*1은 트랜지션 매트릭스의 I1(i2-i4) 범위에 해당하는 폐배터리 k에 대한 제약식으로 폐배터리 회수량 중 일부는 전환되고, 남는 양은 배터리 상태 그대로 물질재활용되거나 폐기됨을 의미한다.

제약식 *h*2는 *I*2(i8-i17) 범위에 해당하는 모듈또는 부품에 대한 제약식이다. *I*2 내의 모듈/부품은 재사용 가능 품질수준을 지니며 외부로부터 신품 구매가 가능하다. 따라서 *h*2는 각 i에 대해 외부로부터의 구매량, 폐배터리 해체과정에서의 획득량, 재가공 후 획득량의 총합이 재조립에서의 소모량, 물질재활용량, 폐기량의 총합과 같도록 제약한다.

제약식 *h*3는 외부 구매가 불가능한 I3(i5-i7, i18-i37) 모듈 및 부품에 대한 제약식이다. 제약식 *h*2와 유사하게 폐배터리 해체로부터의 획득량, 재가공 후 획득량의 총합은 재조립에서의 소모량, 물질재활용량, 폐기량의 총합과 같음을 의미한다.

제약식 *h*4는 재제조 배터리에 대한 제약식으로 재제조 프로세스를 통해 산출된 배터리 양이 결정변수 Z와 같음을 제약한다.

한편, 식 (4)는 신제품 생산 대비 재제조를 통해 감축할 수 있는 총 회피 환경영향, Total avoided impact를 평가한다. 재제조품 생산 측면만 고려한 선행연구들과는 달리 물질 재활용과 폐기로 인한 환경영향까지 반영하여 Total avoided impact를 산정한다. 식 (4)에서 I_N은 신제품 한 단위를 생산할 때 발생하는 환경영향으로서 식 (5)와 같이 계산된다. 모듈과 부품을 만들기 위해 새로운 물질을 채굴하면서 발생하는 환경영향(e_i^M), 모듈/부품을 생산하면서 발생하는 환경영향(e_i^P), 모듈/부품 결합 시 발생하는 환경영향(e_a)의 총합으로 계산된다.

4. 사례 연구

4.1. 데이터 수집 및 주요 가정

사례연구는 기존 문헌에서 제시한 배터리 재제조 관련 자료를 수집하여 수행하였다. 모든 비용 수치는 계산의 편의성을 위해 유로(€) 단위로 통일하였다.

사용 후 배터리 발생량과 판매 비용은 2024년의 국내 상황

을 반영하여 Table 2와 같이 설정하였다. Kim [11]에 따르면, 2024년 국내 사용 후 배터리 발생량은 약 14,000개로 예상되며 이중 연구에서 가정한 NMC622의 경우 30% 수준인 약 4,800개로 추정된다. 2030년까지 배터리 잔존 용량 kWh당 예상 비용은 약 15달러이다. 현재 국내 거점 센터에서 배터리 판매는 경매 매각 방식으로 이루어지며, 수요와 공급 시장이 완전히 형성되지 않아 책정된 비용 2~3배 높은 가격으로 판매되고 있다. 이에 따라 배터리 회수비용은 잔존 용량을 기준으로 경매 투찰율의 최소 가격 수준인 책정 비용의 2배로 가정하였다[16].

배터리 디자인, 재제조에 필요한 분해 비용, 재가공 비용 및 조립 비용은 Alfaro-Algaba and Ramirez[7]의 연구를 기반으로 Audi A3 E-tron의 재제조 사례를 분석하여 설정하였다.

배터리의 기본 구성요소는 상부 하우징, BJB 모듈, BMC 플러그인 모듈, BMC 모듈 커넥터, 사이드 모듈 접합부, 냉각 시스템, 하부 하우징, 배터리 셀 모듈, CMC 등 10개 부품으로 정의하였으며, 트랜지션 매트릭스를 Fig. 2와 같이 수립하였다.

폐배터리 해체 과정에서 획득가능한 부품 비율은 Table 3과 같이 가정하였다. 일반적으로 k1 품질의 배터리는 SOH가 80% 이상이며, 1~5년 사용된 배터리로 모든 배터리 모듈이 재사용 가능하다. 이 경우, R이 0.75, M이 0.25 비율임을 가정하였다. SOH가 60~80%인 k2 수준의 배터리는 BJB만 재사용 가능하고(R), 배터리 셀 모듈을 제외한 나머지 모듈은 재가공 후 재사용 가능 상태(M)로 가정하였다. 배터리 셀 모듈은 R과 M의 비율을 각 0.5로 가정하였다. k3 수준의 배터리는 상태가 가장 좋지 않아, BJB와 BMC 모듈만 재제조하고, 나머지 부품은 모두 재활용하는 것으로 가정하였다.

Table 3의 신품 가격(c_i^N)은 재제조 시 교체에 활용되는 배터리 예비 부품의 가격을 나타낸다. 부품별 가격의 실데이터를 구할 수 없어 선행 연구의 모듈 가격을 바탕으로 다른 부품들의 신품 가격 비율을 추정하였다.

Table 4는 트랜지션 매트릭스의 각 트랜지션별 소모비용으로서, 재제조 과정에서의 분해, 재가공, 재조립 작업에서 발생하는 비용을 나타낸다.

Table 2. Take-back price assumptions

Quality level k	SOH	c_k^B(€)	a_k(unit)
New (75 kwh)	100%	4,303	-
k1 (60 kwh)	80%	1,630	960
k2 (52.5 kwh)	60~80%	1,426	1,440
k3 (45 kwh)	Below 60%	1,222	2,400

Table 3. Quality and price assumptions for battery components in remanufacturing

State i	Quality level			c_i^N(€)
	k1	k2	k3	
Upper housing	R	M	C	23.21
BJB module	R	R	M 0.2 C 0.8	120.59
BMC plug-in module	R	M	C	8.53
BMC module	R	M	M 0.2 C 0.8	178.22
Battery module connector	R	M	C	1.547
Side module junction	R	M	C	11.95
Cooling system	R	M	C	34.15
Lower housing	R	M	C	64.83
Battery cell module	R 0.75 M 0.25	R 0.5 M 0.5	C	213.44
CMC	R	M	C	26.68

한편 전기차 배터리는 전체 차량의 50% 이상의 무게와 40% 이상의 비용을 담당하며, 물질재활용을 통해 얻을 수 있는 이득이 타 제품보다 높다는 특징을 지닌다. 재활용 시 얻을 수 있는 이익은 Choux et al.[8]의 연구를 바탕으로 설정하였다. NMC622 배터리 모듈의 물질구성을 참고하여 물질재활용 시의 예상 수익을 산정하였으며, 분해 수준에 따라 보정하였다. 선행 연구에 따르면, 제품을 모듈 및 셀 단위로 분해하여

Table 4. Transition cost assumptions

Transition j	c_j (€)	Transition j	c_j (€)
1	2.24	10	30
2	2.24	11	1.6
3	2.24	12	2.53
4	1.53	13	6.4
5	1.53	14	12.15
6	1.53	15	39.6
7	4.35	16	5.4
8	22.6	17	3.53
9	3.4	18	5.1

재활용할 경우 회수율이 100%에 도달할 수 있는 것으로 나타났으며, 배터리를 분해하지 않고 통째로 재활용할 경우 약 80%의 재활용 효율을 얻을 수 있는 것으로 보고되었다[8]. 이를 반영하여 모듈/부품별 재활용 수익을 Table 5와 같이 가정하였으며, 재활용 비용과 폐기비용은 Alfaro-Algaba와 Ramirez [7]의 자료에 근거하여 설정하였다.

총 회피 환경영향을 계산하기 위한 환경영향파라미터는 전과정평가(life cycle assessment, LCA)를 통해 정량화할 수 있다. 전기차 배터리의 환경영향은 생태계, 기후, 수질, 대기질, 토양 및 생물 다양성 등 다양한 요소를 포함한다[17]. 사례 연구에서는 Alfaro-Algaba and Ramirez[7]의 선행연구에서 Eco-Indicator 99 방법론으로 Human health, Ecosytem quality, Resources 세 가지 영향 범주에 대해 산정한 전기차 배터리 LCA 결과에 근거하여 환경영향 파라미터(단위: mPt)를 Table 6 및 Table 7과 같이 가정하였다.

마지막으로 전기차 재제조 배터리판매 가격은 신품 대비 생산 비용이 약 30~60% 절감될 수 있음을 고려하여[18], 신품 가격의 50% 수준에 해당하는 €2,150로 가정하고, 재제조품 수요는 국내 재제조 시장이 아직 미비함에 따라 정확한 수요를 추정할 수 없어 전체 회수량의 25% 수준인 1,200개로 가정하였다.

4.2 최적화 결과 및 재제조성 평가

4.1장에서의 가정을 토대로 최적화 모형을 적용한 결과, 최적 재제조 프로세스가 Table 8과 같이 도출되었다.

시장의 재제조 배터리 수요가 1,200개인 상황에서는 회수 가능한 품질수준별 폐배터리를 전량(960개(k1), 1,440개(k2), 2,400개(k3)) 매입하여 총 1,200개의 재제조 배터리를 생산한다.

k1 품질의 사용 후 배터리 960개는 전량 해체되어 재제조에 투입되고, 부족한 모듈과 부품은 k2 품질의 폐배터리 240개를 해체하여 충당한다. 이때, 재사용할 수 있는 BJB모듈은 재가공 없이 바로 재사용하여 추가 비용이 들지 않으며, 외부 구매 비용이 더 저렴한 배터리 모듈 커넥터의 경우 신품을 매

Table 5. Recycling and diposal assumptions

State i	r_i^M(€)	c_i^M(€)	c_i^L(€)
EOL battery	1,386.54	-	8.57
Battery pack	1,318.25	92.8	5.16
Upper housing	4.35	1.09	0.10
BJB module	24.4	0.68	0.33
BMC plug-in module	3.4	0.24	0.12
BMC	30	0.87	0.43
Battery module connector	1.6	0.06	0.06
Side module junction	2.53	0.47	0.28
Cooling system	6.4	0.22	0.50
Lower housing	13.5	3.19	0.90
Battery cell module	1,449.36	81.66	5.10
CMC	197.46	11.13	0.69

Table 6. Environmental impact assumptions for battery remanufacturing (unit: mPt)

State i	e_i^M	e_i^P	e_i^L	e_a
Battery pack	6,031.34	4,322.55	13,168.8	10,029.8
Upper housing	2,965	157.5	645	30.35
BJB module	3,610.8	1,737.7	592.4	221.19
BMC plug-in module	1,620	90	74.4	2.24
BMC	4,859.4	2,597.4	812.4	328.8
Battery module connector	560	12	9.6	0.56
Side module junction	2,064	181.44	216.96	6.5
Cooling system	5,040	453	446	12.5
Lower housing	9,525	874.5	763	18.75
Battery cell module	5,307.58	3,803.84	11,588.6	8,826.25
CMC	723.76	518.7	1,580.26	1,203.58

Table 7. Environmental impact assumptions for transitions in battery remanufacturing (unit: mPt)

Transition j	e_j	Transition j	e_j
1	124.62	10	2,597.4
2	124.62	11	12
3	124.62	12	181.44
4	88.32	13	453
5	88.32	14	874.5
6	88.32	15	3,803.84
7	157.5	16	518.7
8	1,737.7	17	88.32
9	90	18	124.62

Table 8. Optimal solution for the number of transitions in battery remanufacturing

Transition j	Y_j	Transition j	Y_j
1	960	10	240
2	1,440	11	0
3	2,400	12	240
4	240	13	240
5	960	14	240
6	2,400	15	0
7	240	16	0
8	0	17	0
9	240	18	1,200

입하여 재제조에 투입한다. 회수한 폐배터리 중 나머지는 물질 재활용에 사용된다. 배터리 혹은 배터리 팩 상태로 그대로 재활용하기보다 해체를 거쳐 재활용하는 것이 더 나은 대안임을 시사한다.

4,800개의 폐배터리를 회수하여 1,200개의 재제조품을 생산하고 잔여 배터리에 대한 물질 재활용을 수행함으로써 얻을 수 있는 총 순수익은 €187만 3,275, 총 회피 가능 환경 영향은 244,482 kPt로 나타났다. 이는 주어진 시장환경에서 대상 배터리 디자인이 달성할 수 있는 최대수익성과 환경성을 의미하며, 배터리 디자인의 재제조성 평가척도로 활용될 수 있다.

한편, Fig. 4는 시장환경의 변화에 따라 동일 재제조 배터리 재제조성이 달리 평가될 수 있음을 시사한다. 예를 들어, 재제조품 수요가 동일한 상황에서 재제조품 판매가격이 기존 신품의 50% 수준(Baseline)에서 신품의 40%로 바뀌면(Scenario 1), 최적 재제조 수량에는 변화없이 이득이 단순 감소한다. 그

Optimization results		Baseline	Scenario1	Scenario2	Scenario3
Parameter setting	Price ratio of remanufactured products	50%	40%	30%	50%
	Price of remanufactured products	2150	1,720	1,290	2150
	Available amount of k1 battery	960	960	0	960
	Available amount of k2 battery	1440	1440	1440	1440
	Available amount of k3 battery	2400	2400	2400	2400
	Demand of Remanufactured products	1200	1200	1200	2400
Optimal solution	Remanufactured k1 battery	960	960	0	960
	Remanufactured k2 battery	240	240	0	1,440
	Remanufactured k3 battery	0	0	0	0
	Recycled k1 battery	0	0	0	0
	Recycled k2 battery	1,200	1,200	1200	0
	Recycled k3 battery	2,400	2,400	2400	2,400
	Total amount of remanufacturing	1,200	1,200	0	2,400
	Remanufacturing profit(€)	1,873,275	1,357,275	1,272,153	2,391,656
	Total avoided impact(kPt)	244,482	244,482	-	563,301

Fig. 4. Changes in remanufacturability based on market conditions.

러나 판매가격이 신품의 30% 수준으로 더 낮아지면(Scenario 2), 회수 비용과 재제조 비용이 판매 가격을 초과하면서 k2와 k3 품질의 배터리만 회수하여 모두 물질 재활용한다. 만약 판매가격이 신품 대비 50%를 유지하면서 수요가 2,400개로 증가한다면(Scenario 3), 기존에 물질 재활용되던 k2 품질 배터리들이 재제조된다. 즉, 재제조품 판매 가격이 회수 비용보다 충분히 높을 경우에는 고품질 배터리를 최대한 활용하여 재제조품 수요를 충족하고, 재제조품 판매 수익이 재활용 이익보다 낮을 경우에는 저품질 배터리를 활용한 재활용이 선택된다.

배터리 디자인의 재제조성 판단은 재제조품 수요, 판매가격, 회수가능량, 재활용 이익구조의 영향을 동시에 받는다(Fig. 5). 본 논문에서 제안한 재제조성 평가는 트랜지션 매트릭스를 활용하여 제품 디자인의 특성을 체계적으로 반영함과 동시에, 시장상황에 따라 변화하는 변수들을 고려하여 재제조 프로세스 최적 흐름을 결정하고 이를 통해 재제조 수익과 회피가능 환경영향을 산출한다는 점에서 의의를 지닌다.

제안한 방법론의 검증을 위해 Table 9와 같이 SOH 수준에 따른 기존 단순 처리 방식(k1, k2 품질수준 순으로 수요만큼 재제조하고 나머지는 물질재활용)과의 비교를 수행하였다. 트랜지션 매트릭스 기반 최적화 모델을 사용할 경우, 단순 처리 방식 대비 재제조 이득과 회피 환경영향이 모두 상승함을 확

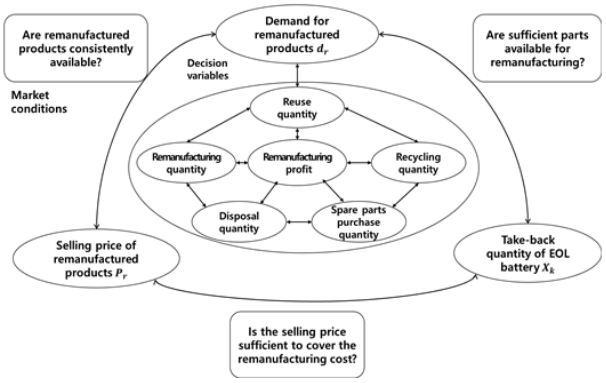

Fig. 5. Factors influencing remanufacturability of end-of-life batteries.

Table 9. Validating the proposed method against the simple state-of-health approach

	Simple processing by SOH level	Proposed method with transition matrix
Remanufacturing profit (€)	1,850,597	1,873,275
Total avoided env. impact (kPt)	242,901	244,482

인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 트랜지션 매트릭스를 활용한 전기차 배터리 재제조성 평가 모델을 제안하고, 선행 연구 데이터를 기반으로 사례 연구를 수행하였다. 배터리 설계는 폐배터리 재제조성을 결정하는 핵심 요인으로, 본 연구에서는 배터리 설계와 시장 상황을 체계적이고 통합적으로 고려하여, 경제적·환경적 관점에서 재제조성을 평가할 수 있는 최적화 모델을 개발하였다.

다만, 재제조 가능성 판단에 영향을 미치는 다양한 요인에 대해 실제 데이터보다는 선행 연구 문헌에 의존하였고, 시장 상황에 대한 가정을 바탕으로 연구를 진행하여 전기차 시장의 변동성을 충분히 반영하지 못하는 확정적 접근법을 적용한 한계가 있었다. 이러한 한계는 향후 연구에서 보완이 필요하다.

앞으로 실데이터 수집, 트랜지션 매트릭스 작성 자동화, 재제조 배터리 수요 및 사용 후 배터리 공급의 민감도 분석, 재제조 공정의 자동화 기술 반영, 배터리 구성 물질별 재활용 방식 구체화 등에 대한 추가 고려를 통해 전기차 배터리 설계 및 재제조 시장 활성화, 나아가 순환경제 실현에 기여할 수 있는 모형으로 발전시킬 수 있을 것이다.

특히 전기차 배터리 재제조 기업과 전기차 생산 기업 등 관련 기업 간의 협력을 통해 배터리 재제조에 대한 정확한 데이터베이스가 구축된다면, 이를 활용하여 배터리 디자인의 재제조 수익성 분석, 연구개발(R&D), 새로운 비즈니스 모델 창출 등에 기여할 수 있을 것이다.

References

1. Kim, Y., Lim, J., Park, G., Lim, O.T. Electric vehicle market and battery-related technology research trends. Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society 30(4), pp. 362-368 (2019).
2. Patil, G., Pode, G., Diouf, B., Pode, R. Sustainable decarbonization of road transport: Policies, current status, and challenges of electric vehicles. Sustainability 16(18), p. 8058 (2024).
3. Xiao, J., Jiang, C., Wang, B. A review on dynamic recycling of electric vehicle battery: Disassembly and echelon utilization. Batteries 9(1), p. 57 (2023).
4. Woo, P., Hwang, M., Mo, Y., Kim, Y. A proposal for ensuring safety and vitalization in used Li-battery industry. The Korean Institute of Electrical Engineers 72(4), pp. 231-236 (2023).
5. Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A.I., Collis, G.E., Mahon, P.J., Ruther, T., Hollenkamp, A.F. A review on battery market trends, second-life reuse, and recycling. Sustainable Chemistry 2(1), pp. 167-205 (2021).
6. Baazouzi, S., Rist, F.P., Weeber, M., Birke, K.P. Optimization of disassembly strategies for electric vehicle batteries. Batteries 7(4), p. 74 (2021).
7. Alfaro-Algaba, M., Ramirez, F.J. Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing. Resources, Conservation and Recycling 154, p. 104461 (2020).
8. Choux, M., Pripp, S.W., Kvalnes, F., Hellstrom, M. To shred or to disassemble − A techno-economic assessment of automated disassembly vs. shredding in lithium-ion battery module recycling. Resources, Conservation and Recycling 203, p. 107430 (2024).
9. Belingardi, G., Scattina, A. Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles − Challenges and solutions. Vehicles 5(2), pp. 498-514 (2023).
10. Lee, S. Current status and implications of the end-of-use EV battery industry in Korea. KDB Future Strategy Research Institute (2022).
11. Kim, Y. Analysis of the effects of recycling and reuse of used electric vehicle batteries in Korea. Economic and Environmental Geology 57(1), pp. 83-91 (2024).
12. Rosenberg, S., Huster, S., Baazouzi, S., Gloser-Chahoud, S., Al Assadi, A., Schultmann, F. Field study and multi-method analysis of an EV battery system disassembly. Energies 15(15), p. 5324 (2022).
13. Lander, L., Tagnon, C., Nguyen-Tien, V., Kendrick, E., Elliott, R.J., Abbott, A.P., Edge, J.S., Offer, G.J. Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs. Applied Energy 331, p. 120437 (2023).
14. Kay, I., Farhad, S., Mahajan, A., Esmaeeli, R., Hashemi, S.R. Robotic disassembly of electric vehicles' battery modules for recycling. Energies 15(13), p. 4856 (2022).
15. Kwak, M., Kim, H. Green profit maximization through integrated pricing and production planning for a line of

new and remanufactured products. Journal of Cleaner Production 142, pp. 3454-3470 (2017).
16. Jeong, H. The value of used batteries has increased by 400%. Electronic Times (2023). Available from: https://www.etnews.com/20230516000242 (accessed 17 May 2023).
17. Jiang, T., Wang, H., Jin, Q. Comparison of three typical lithium-ion batteries for pure electric vehicles from the perspective of life cycle assessment. Clean Technologies and Environmental Policy 26(2), pp. 331-350 (2024).
18. Charter, M., Gray, C. Remanufacturing and product design. International Journal of Product Development 6(3-4), pp. 375-392 (2008).