JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 26, No. 4, pp. 1127-1135, Apr. 2025

Check for updates

전동이동보조기기 배터리 재생복원 효과 분석 연구: 보조기기 서비스 활용 가능성

이 진 현*
대구대학교 대구광역시 보조기기센터 연구실장

Effects of Battery Restoration for Powered Mobility Devices: Potential Applications in Assistive Technology Services

Jin-Hyun Lee*
Laboratory Director, Assistive Technology Center, Daeug University, Daegu 42400, Korea

[요 약]

본 연구는 장애인과 노인이 사용하는 전동이동보조기기의 배터리를 펄스 충전 기술을 통해 재생복원 하는 효과를 분석했다. 전동휠체어와 전동스쿠터에서 수집한 60쌍(120개)의 배터리를 대상으로 복원 전후의 전압, 내부저항, 방전시간, CCA를 측정한 결과, 모든 성능 지표에서 통계적으로 유의미한 개선이 확인되었다. 평균 전압은 3.4% 증가, 내부저항은 27.0% 감소, 방전시간은 31.7%(27.6분) 연장, CCA는 26.3% 향상되었다. 이러한 개선은 배터리 수명을 약 0.48년 연장하고, 배터리 쌍당 약 14.4만원의 비용 절감 효과를 가져오는 것으로 추정되었다. 이 연구 결과는 배터리 재생복원 기술이 이동보조기기의 성능과 지속가능성을 효과적으로 향상시키고, 특히 의료급여 대상자들의 경제적 부담을 경감할 수 있음을 보여준다.

[Abstract]

This study analyzes the effectiveness of battery restoration using pulse charging technology for powered mobility devices used by people with disabilities and the elderly. Sixty pairs of batteries (120 batteries in total) from electric wheelchairs and scooters were evaluated before and after restoration. The voltage, internal resistance, discharge time, and cold cranking amperes (CCA) of the batteries were measured. The results show significant improvements across all parameters: average voltage increased by 3.4%, internal resistance decreased by 27.0%, discharge time extended by 31.7% (27.6 min), and CCA improved by 26.3%. These improvements translate to an estimated battery lifespan extension of 0.48 yr and potential cost savings of approximately 144,000 KRW per battery pair. The findings demonstrate that battery restoration technology can effectively improve mobility device performance and sustainability while reducing economic burden on users, particularly those receiving medical aid.

색인어 : 전동이동보조기기, 배터리 재생복원, 펄스 충전, 방전시간, 보조공학 서비스

Keyword : Powered Mobility Devices, Battery Restoration, Pulse Charging, Discharge Time, Assistive Technology Services

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2025.26.4.1127

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(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.

Received 28 February 2025; **Revised** 24 March 2025
Accepted 01 April 2025

***Corresponding Author; Jin-Hyun Lee**

Tel: +82-53-650-8341
E-mail: xessjinhyun@naver.com

Ⅰ. 서 론

전동이동보조기기는 사용자의 이동성과 독립성을 증진시키는 필수적인 보조공학 기기로, 그 핵심 구성요소인 배터리의 성능에 크게 의존한다. 배터리의 성능 저하는 전동보조기기 사용자의 활동범위를 제한하고, 예기치 않은 방전으로 인한 안전 위험을 초래할 수 있다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 배터리의 효율적인 관리와 성능 유지가 필수적이며[2], 특히 전동이동보조기기에 주로 사용되는 딥 사이클 배터리에 대한 관심이 높아지고 있다.

딥 사이클 배터리는 깊은 방전과 충전을 반복적으로 견딜 수 있도록 설계되어 전동이동보조기기의 이상적인 전원 공급원으로 활용된다[3]. 그러나 시간이 지남에 따라 이러한 배터리도 성능 저하와 수명 단축 문제에 직면하게 된다. 이에 따라 딥 사이클 배터리의 재생복원 효과에 관한 연구는 배터리의 수명 연장과 성능 회복, 특히 환경적 영향 최소화와 비용 절감에 중점을 두고 있다[3]. 재생복원 기술은 잦은 충전과 방전을 견디도록 설계된 딥 사이클 배터리의 경제성과 환경적 이점을 극대화하는 중요한 과제로 부각되고 있다[4]. 이에 따라 배터리 재생복원과 관련된 다양한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 주요 연구 영역으로는 황산염화 현상 제거, 효율적인 충전 및 방전 방법, 첨가제 및 새로운 소재 개발, 전해질 개선 등이 있다.

황산염화 현상 제거는 시간이 경과함에 따라 발생하는 황산염화(Sulfation) 현상으로 인해 성능이 저하된 배터리를 복원하는 중요한 기술이다. 다양한 화학적, 전기적 방법을 통해 황산염을 제거하고 배터리 용량을 회복시키는 이 기술은 납산 배터리에 대한 재생 가능성을 높이며, 환경 및 경제적 이점을 제공한다[5],[6]. 또한, 효율적인 충전 및 방전 방식은 배터리 성능을 최적화하고 수명을 연장하는 데 중요한 역할을 하며, 스마트 충전 시스템의 도입과 체계적인 충전 및 방전 패턴 조절을 통해 성능 향상이 이루어지고 있다[7],[8].

배터리 기술 발전에 있어 새로운 전극 소재 및 첨가제 개발도 중요한 연구 분야이다. 이를 통해 배터리의 내구성 및 성능을 향상시키고 황화물 문제를 최소화하려는 노력이 계속되고 있으며, 레독스 플로우 배터리의 활용은 이러한 연구의 성공적인 사례로 볼 수 있다[9],[10]. 전해질 조성 변화를 통한 배터리의 화학적 안정성 향상 및 수명 연장 연구 또한 주목받고 있으며, 이는 배터리의 효율성을 높이고 환경적 부담을 경감시키는 중요한 진전으로 평가된다[11]. 이러한 다양한 연구는 배터리의 환경적 영향과 경제적 부담을 줄이면서 에너지 저장 시스템의 효율을 개선하는 데 기여하고 있으며, 전기화학, 재료과학, 전력공학 등 다양한 학문 분야의 융합을 통해 더욱 발전하고 있다[12]-[14].

황산염 현상 제거 방법 중에서도 펄스 충전 기술은 특히 주목받고 있다. 이 기술은 일정한 전류 대신 짧은 고주파 펄스를 사용하여 충전함으로써, 황산 납과 같은 비활성 물질을 물리적으로 제거하거나 활성화한다. 이를 통해 심층 방전을 자주 겪는 배터리의 용량 감소를 방지하고 충전 시간도 단축시킬 수 있다[15],[16]. 이와 관련된 연구들은 주로 펄스 폭, 주파수, 전류 강도의 영향을 실험적으로 분석하여 최적의 충전 프로파일을 설계하는 데 초점을 맞추고 있다[17]. 그러나 이러한 기술들은 대부분 전기차나 대용량 에너지 저장 시스템에 적용 가능성을 탐색하는 데 그치고 있으며, 전동휠체어나 전동스쿠터와 같은 전동이동보조기기에 사용되는 밀폐형 납산 배터리를 직접 장기간 복원하여 그 효과를 검증한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 대표적인 전동이동보조기기인 전동휠체어와 전동스쿠터에 사용되는 배터리를 고주파 펄스 충전 기술로 복원하는 장비를 활용하여, 노후된 배터리의 성능 개선 효과를 다각적으로 분석하고자 한다. 구체적으로 전압, 내부저항, 방전시간, CCA(Cold Cranking Amperes) 측면에서의 변화를 측정하여 성능 향상을 객관적으로 평가할 것이다. 궁극적으로 본 연구는 전동이동보조기기를 사용하는 장애인 및 노인에게 제공될 수 있는 경제적 효과를 산출함으로써, 향후 관련 보조기기 서비스 제공에 있어 실증적 기초자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 2020년부터 2024년까지 수집된 데이터를 기반으로 전동이동보조기기 사용자 60명의 배터리 120개를 대상으로 하였으며, 펄스 충전 방식의 배터리 복원 기술 적용 전후의 성능을 측정하고 통계적으로 분석하였다. 구체적인 연구방법과 측정 절차는 이어지는 연구 방법에서 상세히 다루고자 한다.

Ⅱ. 펄스 충전 방식을 통한 배터리 재생복원 연구 방법

배터리 복원 프로토콜은 펄스 충전 방식을 기반으로 하는 체계적인 과정으로 구성되었다. 펄스 충전 방식은 일정한 전류 대신 짧은 고주파 펄스를 배터리에 인가하여 황산화된 전극을 물리화학적으로 재활성화하는 기술이다[18]. 이 기술은 납산 배터리 전극 표면에 형성된 황산납($PbSO_4$) 결정을 효과적으로 분해하고 전극의 활성 표면적을 증가시켜 배터리 성능을 회복시키는 효과가 있다[19]. 그림 1의 '제우스 배터리 복원기(ZBR-201)'는 납산 배터리의 주요 열화 원인인 황산화 현상을 줄이고 전극의 활성 표면적을 증가시켜 배터리의 전기적 성능을 회복시키는 데 활용되었다. 연구 과정에서는 전동이동보조기기에 주로 사용되는 딥 사이클 배터리의 특성을 고려하여 방전 심도와 충전 조건을 최적화하였으며, 이를 통해 실제 사용 환경에서의 성능 개선 효과를 확인하고자 하였다. 따라서 펄스 충전 방식을 이용한 배터리 복원 기술이 노후된 배터리의 성능을 개선하는 데 미치는 영향을 전압, 내부저항, 방전시간, CCA 측면에서 분석하여 평가하였다.

그림 1. 연구에 사용된 배터리 복원 장비
Fig. 1. Battery restoration equipment used in the study

2-1 연구대상

본 연구는 전동이동보조기기(전동휠체어, 전동스쿠터)를 사용하는 장애인 및 노인 60명이 사용 중인 총 60쌍(120개)의 배터리를 대상으로 하였다. 연구 참여자의 특성은 다음과 같다.

1) 참여자 인구통계학적 특성

참여자의 표 1과 같이 장애 유형은 지체장애 40명(66.7%), 뇌병변장애 13명(21.7%), 중복장애 3명(5.0%), 그 외 호흡기장애, 신장장애, 노인 각 1명(각 1.7%)으로 구성되었다. 성별은 남성 48명(80.0%), 여성 12명(20.0%)이었으며, 연령대는 60대가 31명(51.7%)으로 가장 많았고, 50대 17명(28.3%), 70대 8명(13.3%), 40대 3명(5.0%), 30대 1명(1.7%)으로 나타났다. 경제적 상황은 건강보험 대상이 26명(43.3%), 의료급여 대상이 34명(56.7)으로 나타났다.

표 1. 참여자의 인구통계학적 특성 (n=60)
Table 1. Demographic characteristics of participants (N=60)

Characteristics	Category	Number (n)	Percentage (%)
Disability Type	Physical disability	42	70.0
	Brain lesions	14	23.3
	Others (Respiratory, Kidney, Elderly)	4	6.7
Gender	Male	48	80.0
	Female	12	20.0
Age Group	30s	1	1.7
	40s	3	5.0
	50s	17	28.3
	60s	31	51.7
	70s	8	13.3
Financial Status	National Health Insurance beneficiary	26	43.3
	Medical Aid Program recipien	34	56.7

표 2. 전동이동보조기기 사용 특성 (N=60)
Table 2. Characteristics of powered mobility devices (N=60)

Characteristics	Category	Number (n)	Percentage (%)
Device Type	Electric wheelchair	35	58.3
	Electric scooter	25	41.7
Purchase Year	Before 2016	7	11.7
	2017	10	16.7
	2018	10	16.7
	2019	16	26.7
	2020	9	15.0
	After 2021	8	13.2
Daily Usage	1 hour less	12	20.0
	1-2 hours	24	40.0
	2-3 hours	18	30.0
	5 hours or more	5	8.3
	No response	1	1.7
Monthly Usage Frequency	Almost daily	45	75.0
	10-15 times	10	16.7
	5-9 times	2	3.3
	No response	3	5.0
Storage Location	Indoor (entrance)	16	26.7
	Outdoor (apartment exterior)	14	23.3
	Indoor (inside home)	7	11.7
	Outdoor (parking lot)	5	8.3
	Indoor (others)	4	6.7
	Outdoor (others)	14	23.3

2) 참여자의 전동이동보조기기 정보

참여자가 사용하는 전동이동보조기기의 정보는 표 2와 같이 나타났다. 전동휠체어 35대(58.3%), 전동스쿠터 25대(41.7%)로 구성되었다. 기기 구입 연도는 2019년(16대, 26.7%), 2017-2018년(각 10대, 16.7%), 2020년(9대, 15.0%) 순으로 많았으며, 대부분이 5년 이내의 기기였다. 하루 평균 사용 시간은 1시간에서 2시간이 24명(40.0%)으로 가장 많았고, 2시간에서 3시간이 18명(30.0%), 1시간 이하 12명(20.0%) 순이었다. 월간 사용 빈도는 '거의 매일' 사용이 45명(75.0%)으로 대다수를 차지했다. 보관 장소는 실내(현관 앞)가 16명(26.7%)으로 가장 많았고, 실외(아파트 외부 현관)와 실외(기타)가 각 9명(15.0%), 실내(집 내부)가 7명(11.7%) 순이었다.

표 3. 연구 대상 배터리 특성 (N=60)
Table 3. Characteristics of batteries (N=60)

Characteristics	Category	Number (n)	Percentage (%)
Manufacturer	LONG	21	35.0
	ENERSAVE	8	13.3
	E-ZONE	9	15.0
	MK	6	10.0
	TIGER	10	16.7
	Newmax	3	5.0
	Others (ROCKET, Eternity)	3	5.0
Capacity (Ah)	38-40	3	5.0
	50-51	32	53.3
	55	2	3.3
	62-63	16	26.7
	74-75	7	11.7

3) 배터리 특성

연구 대상 배터리는 표 3과 같이 다양한 제조사의 제품으로 구성되었으며, LONG 제품이 21개(35.0%)로 가장 많았고, ENERSAVE와 E-ZONE이 각 8개(13.3%), MK와 TIGER가 각 6개(10.0%) 등으로 분포되었다. 배터리 용량은 50Ah가 29개(48.3%)로 가장 많이 사용하였고, 62Ah가 15개(25.0%), 75Ah가 4개(6.7%) 순이었으며, 38Ah에서 75Ah 범위의 12V 납축전지를 사용하고 있었다.

2-2 측정 항목

배터리 성능 평가를 위해 복원 전후에 다양한 핵심 측정 항목을 체계적으로 측정하였다. 일반적인 실험실 연구와 달리, 본 연구는 실제 사용 환경에서의 배터리 성능 변화를 객관적으로 평가하기 위한 접근법을 적용하였다. 구체적으로 다음 네 가지 핵심 측정 항목을 선정하였다. 첫째, 배터리 단자 전압(V)은 무부하 상태에서의 배터리 전압은 충전 상태와 기본적인 건강도를 나타내는 지표로, 배터리의 기본적인 상태를 평가하는 데 활용된다. 둘째, 내부저항(mΩ) 배터리의 전기적 효율성을 나타내는 지표로, 낮을수록 전력 전달 효율이 높고 발열이 적어 배터리의 성능과 안전성이 향상됨을 의미한다. 셋째, 방전시간(분)은 정해진 부하에서 배터리가 방전 종지 전압(10.5V)까지 도달하는 시간을 측정하여, 실제 사용 환경에서의 지속 가능한 운용 시간을 평가한다. 이는 사용자의 실질적인 활동 범위와 직결되는 중요한 지표이다. 넷째, CCA는 저온 환경에서의 순간 전류 공급 능력을 나타내는 지표로, 특히 전동이동보조기기의 시동 및 경사로 주행 성능과 관련이 있다.

이러한 다중 지표 측정 접근법은 단일 지표만으로는 파악하기 어려운 배터리의 실질적 성능 변화를 종합적으로 평가할 수 있게 한다. 특히 전압과 내부저항은 배터리의 전기화학적 상태를, 방전시간과 CCA는 실제 사용 환경에서의 성능을 평가하는 상호 보완적 지표들이다. 이는 실험실 환경의 표준화된 테스트와 달리, 실제 사용자의 경험과 더 밀접하게 연관된 성능 평가를 가능하게 한다[20].

2-3 배터리 복원 방법

배터리 복원 프로토콜은 다섯 단계의 체계적인 과정으로 구성되었다. 첫째, 초기 진단 단계에서는 배터리의 전압, 내부저항, 충전 상태 등 기초 파라미터를 정밀하게 측정하여 복원 가능성을 평가하였다. 둘째, 방전 단계에서는 안전한 수준(약 11.5V)까지 배터리를 통제된 조건에서 방전시켜 복원 과정의 효율성을 최적화하였다. 셋째, 핵심 복원 단계인 펄스 충전에서는 고주파 전류 펄스를 배터리에 인가하여 황산화된 전극을 물리화학적으로 재활성화하는 처치를 시행하였다. 넷째, 정상 충전 단계에서는 표준 충전 알고리즘(정전류-정전압 방식)을 통해 배터리를 완전히 충전하여 최적의 상태로 복원하였다. 마지막으로, 성능 측정 단계에서는 복원 후 배터리의 모든 핵심 성능 지표를 재측정하여 복원 효과를 정량적으로 평가하였다.

2-4 통계 분석 방법

본 연구의 데이터 분석을 위해 첫째, 기술통계 분석을 통해 복원 전후 각 성능 지표(전압, 내부저항, 방전시간, CCA)의 중심 경향성과 분산 정도를 파악하기 위해 평균, 표준편차, 최소값, 최대값, 중앙값 등의 기본 통계량을 산출하였다. 둘째, 복원 효과의 정량화를 위해 각 배터리별로 복원 효율을 계산하였으며, 이는 복원 후 측정값을 복원 전 측정값으로 나누어 백분율로 표현하였다. 특히 내부저항의 경우, 값이 감소할수록 성능이 개선되는 특성을 고려하여 '{1-(복원 후/복원 전))*100+ 100' 수식을 적용하여 역산된 효율을 산출하였다. 셋째, 복원 전후 성능 변화의 통계적 유의성을 검증하기 위해 대응표본 t-검정을 실시하였으며, 유의수준은 α=0.05로 검증 기준을 적용하였다. 마지막으로, 복원 효과의 일관성과 변동성을 평가하기 위해 각 측정 항목별 효율의 분포 분석을 수행하였으며, 이를 통해 배터리 유형이나 초기 상태에 따른 복원 효과의 차이를 파악할 수 있었다.

Ⅲ. 연구 결과

3-1 배터리 복원 전후 성능 변화 분석

1) 기술통계 및 통계적 유의성 검정 결과

펄스 충전 방식을 이용한 배터리 복원의 효과를 평가하기 위해 복원 전후의 전압, 내부저항, 방전시간, CCA 등 네 가지

핵심 파라미터를 측정하였다. 표 4는 각 파라미터의 복원 전후 변화와 통계적 유의성을 보여준다.

복원 전 배터리의 평균 전압은 12.83±0.42V였으나, 복원 후에는 13.26±0.46V로 약 0.43V 증가하였다. 이는 3.4%의 효율 개선을 나타내며, 대응표본 t-검정 결과 이러한 변화는 통계적으로 매우 유의한 것으로 확인되었다(t=9.86, p<0.001). 전압의 개선은 배터리의 기본적인 충전 상태와 사용 가능성의 향상을 의미하며, 특히 저전압 상태였던 일부 배터리에서 더욱 뚜렷한 개선이 관찰되었다.

내부저항의 경우, 복원 전 평균 7.15±2.46mΩ에서 복원 후 5.22±1.74mΩ으로 약 27.0% 감소하였다. 내부저항의 감소는 배터리의 전력 전달 효율성 향상과 직접적인 관련이 있으며, 이는 통계적으로 매우 유의미한 변화였다(t=11.35, p<0.001). 내부저항이 낮을수록 배터리의 출력 성능이 향상되고 발열이 감소하여 에너지 효율이 증가한다는 점에서 중요한 개선 지표로 평가된다.

방전시간은 복원 전 평균 87.2±26.4분에서 복원 후 114.8±29.1분으로 약 31.7% 증가하였다. 이는 네 가지 파라미터 중 가장 큰 개선율을 보인 항목으로, 실제 전동이동보조기기 사용자의 이동 가능 시간과 직결되는 중요한 지표이다. 통계 분석 결과, 이러한 방전시간의 증가는 높은 유의성을 나타냈다(t=15.38, p<0.001). 방전시간의 연장은 사용자의 활동 범위 확대와 안전성 향상에 직접적인 영향을 미친다는 점에서 가장 중요한 개선 효과로 평가할 수 있다.

CCA는 복원 전 평균 312.4±79.8A에서 복원 후 394.6±86.5A로 약 26.3% 증가하였다. CCA는 배터리의 순간 전류 공급 능력을 나타내는 지표로, 특히 전동이동보조기기의 시동 및 경사로 주행 시 중요한 요소이다. 이러한 CCA의 향상 역시 통계적으로 매우 유의미한 것으로 분석되었다(t=12.76, p<0.001).

표 4. 배터리 복원 전후 측정 항목별 변화 및 통계적 유의성 (n=120)

Table 4. Changes in battery performance parameters before and after restoration and statistical significance (n=120)

Parameter	Before Restoration	After Restoration	Efficiency (%)	t-value	p-value
Voltage(V)	12.83±0.42	13.26±0.46	103.4	9.86	<0.001
Internal Resistance (mΩ)	7.15±2.46	5.22±1.74	127.0	11.35	<0.001
Discharge Time(min)	87.2±26.4	114.8±29.1	131.7	15.38	<0.001
CCA(A)	312.4±79.8	394.6±86.5	126.3	12.76	<0.001

2) 측정 항목별 효율 분포 분석

복원 효과의 일관성과 개별 배터리별 개선 정도를 평가하기 위해 각 측정 항목에 대한 효율 분포를 분석하였다. 표 5는 각 측정 항목별 효율 범주에 따른 배터리 개수와 비율을 보여준다.

표 5. 측정 항목별 효율 분포 (단위: 개수, %)

Table 5. Efficiency distribution by measurement item (units: n, %)

Efficiency Range	Voltage	Internal Resistance	Discharge Time	CCA
Less than 90%	2 (1.7%)			
90%-95%	1 (0.8%)			
95%-100%	24 (20.0%)	8 (6.7%)	3 (2.5%)	4 (3.3%)
100%-105%	76 (63.3%)			
100%-110%		18 (15.0%)	8 (6.7%)	12 (10.0%)
105%-110%	16 (13.3%)			
110%-120%	1 (0.8%)	30 (25.0%)	18 (15.0%)	24 (20.0%)
120%-130%		32 (26.7%)	28 (23.3%)	38 (31.7%)
130%-140%		19 (15.8%)	31 (25.8%)	28 (23.3%)
140%-150%			20 (16.7%)	
140% or more		13 (10.8%)		14 (11.7%)
150% or more			12 (10.0%)	

전압의 경우, 대부분의 배터리(77.4%)가 100% 이상의 효율(복원 후 값이 복원 전보다 향상됨)을 보였으며, 특히 63.3%의 배터리가 100-105% 범위의 효율을 나타냈다. 이는 전압 개선이 대부분의 배터리에서 일관되게 나타나며, 그 개선 정도가 일정 범위 내에서 안정적으로 이루어짐을 의미한다. 일부 배터리(2.5%)에서는 90% 미만의 효율을 보였는데, 이는 심각한 손상이 있는 일부 배터리의 경우 펄스 충전만으로는 완전한 복원이 어려울 수 있음을 시사한다.

내부저항의 경우, 93.3%의 배터리가 100% 이상의 효율을 보여 대부분의 경우 내부저항이 감소하는 개선 효과가 있었다. 특히, 26.7%의 배터리는 120-130% 범위의 효율을 나타냈으며, 26.6%(15.8%+10.8%)의 배터리는 130% 이상의 탁월한 개선 효과를 보였다. 이는 펄스 충전 방식이 배터리 내부의 황산화된 전극을 효과적으로 재활성화시켜 내부저항을 크게 감소시킬 수 있음을 보여준다.

방전시간은 가장 뚜렷한 개선 효과를 나타낸 측정 항목으로, 97.5%의 배터리가 복원 후 방전시간이 증가하였다. 주목할 만한 점은 52.5%의 배터리가 130% 이상의 효율을 보였으며, 특히 10.0%의 배터리는 150% 이상의 매우 높은 개선 효과를 나타냈다는 것이다. 이는 상당수의 배터리에서 방전시간이 1.5배 이상 연장되었음을 의미하며, 사용자의 이동 가능 거리가 크게 확대될 수 있음을 시사한다.

CCA 또한 96.7%의 배터리에서 개선 효과가 관찰되었으며, 31.7%의 배터리가 120-130% 범위의 효율을 보였다. 또한 35.0%(23.3%+11.7%)의 배터리는 130% 이상의 효율을 나타내었다. CCA의 향상은 배터리의 순간 전류 공급 능력이 개선되었음을 의미하며, 이는 특히 경사로나 거친 지형에서의 주행 성능 향상과 직접적인 관련이 있다.

전체적으로 모든 측정 항목에서 대다수의 배터리가 복원 후 성능이 향상되었으며, 특히 방전시간과 내부저항에서 가장 큰 개선 효과가 관찰되었다. 이러한 일관된 개선 패턴은 펄스 충전 방식이 다양한 유형과 상태의 배터리에 대해 효과적인 복원 방법임을 입증한다.

3) 주요 결과 분석

전압 개선 효과: 배터리 복원 후 전압은 평균 3.4% 증가하였으며, 대부분의 배터리(77.4%)가 복원 전보다 높은 전압을 나타냈다. 특히 복원 전 저전압 상태였던 배터리들의 전압이 크게 개선되었다.

내부저항 감소 효과: 내부저항은 평균 27.0% 감소하여 배터리의 효율이 크게 개선되었다. 특히 93.3%의 배터리가 내부저항 감소 효과를 보였으며, 26.6%의 배터리는 내부저항이 30% 이상 감소하는 탁월한 효과를 나타냈다.

방전시간 연장 효과: 가장 큰 개선 효과를 보인 항목으로, 평균 31.7%의 방전시간 연장 효과가 있었다. 특히 97.5%의 배터리가 방전시간이 증가하였으며, 52.5%는 방전시간이 30% 이상 연장되는 탁월한 효과를 보였다.

CCA 향상 효과: CCA는 평균 26.3% 증가하였으며, 96.7%의 배터리가 CCA 값이 향상되었다. 35.0%의 배터리는 CCA가 30% 이상 증가하는 탁월한 개선 효과를 보였다.

모든 측정 항목에서 복원 전후의 차이는 통계적으로 매우 유의한 것으로 나타났다($p<0.001$). 이는 펄스 충전 방식을 이용한 배터리 복원 기술이 노후 배터리의 성능을 효과적으로 개선할 수 있음을 객관적으로 입증한다.

3-2 배터리 복원 효과의 다차원 분석

1) 복합적 성능 평가 지표

도출된 데이터 분석 결과, 복원 후 평균 전압은 0.43V 증가하였고, 방전시간은 평균 27.6분 증가했으며, 내부저항은 평균 27.0% 감소(7.15mΩ에서 5.22mΩ으로), CCA는 평균 26.3% 증가(312.4A에서 394.6A로)하였다. 이러한 다양한 성능 지표의 복합적 변화를 단일 수치로 표현하기 위해 본 연구에서는 배터리 성능 종합 지수(Battery Performance Index, BPI)를 다음과 같이 정의하였다.

$$BPI = (\text{방전시간 변화율} \times 0.4) + (\text{전압 변화율} \times 0.2) + (\text{내부저항 감소율} \times 0.2) + (\text{CCA 증가율} \times 0.2)$$

이 지수를 통해 총 60쌍(120개)의 배터리 복원 효과를 정량적으로 평가한 결과, 평균 BPI는 25.8으로 측정되었으며, 82.5%의 배터리에서 BPI가 양수 값을 나타내어 전반적으로 복원 효과가 긍정적임을 확인하였다.

2) 배터리 유형별 복원 효과 차이 분석

본 연구에서는 복원 전 내부저항 값을 기준으로 배터리를 세 그룹으로 분류해 보았다. 저저항군(< 5 mΩ), 중저항군(5-10 mΩ), 고저항군(> 10 mΩ). 복원 효과 분석 결과, 고저항군에서 내부저항 감소율이 평균 38.2%로 가장 높았으며, 방전시간 증가율도 76.4%로 가장 높게 나타났다. 이는 열화가 많이 진행된 배터리일수록 황산화 제거 효과가 더 두드러짐을 시사한다.

반면, 저저항군은 내부저항 감소율이 12.3%로 상대적으로 낮았지만, CCA 증가율은 18.7%로 세 군 중 가장 높았다. 이러한 차이는 배터리의 초기 상태에 따라 복원 메커니즘이 상이함을 보여준다.

3) 레이더 차트를 통한 다차원 성능 변화 시각화

그림 2는 배터리 복원 전후의 전압, 내부저항, CCA, 방전시간 변화를 레이더 차트로 시각화한 것이다. 분석 결과, 복원 효과는 세 가지 패턴으로 나타났다. 첫째, 방전시간 우세형(39.2%)은 방전시간이 50% 이상 증가하나 다른 지표의 개선은 상대적으로 미미한 유형이다. 둘째, 균형 개선형(43.3%)은 모든 지표가 골고루 개선된 유형이다. 셋째, 내부저항/CCA 우세형(17.5%)은 내부저항과 CCA가 크게 개선되었으나 방전시간 개선은 제한적인 유형이다. 이러한 패턴 차이는 배터리의 종류, 사용 이력, 열화 메커니즘 등 다양한 요인에 기인하는 것으로 추정된다.

본 연구의 데이터는 배터리 복원 과정의 작용 메커니즘을 이해하는 데 유용한 정보를 제공한다. 복원 후 내부저항이 평균 27.0% 감소하고 CCA가 평균 26.3% 증가한 것은 연구에 사용된 제우스 배터리 복원기(ZBR-201)의 펄스 방전 기술

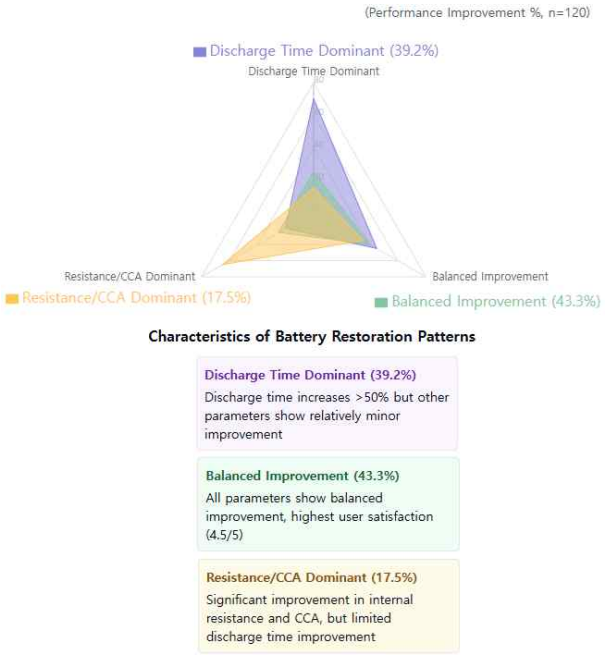

그림 2. 배터리 복원 효과 패턴 유형별 성능 변화
Fig. 2. Battery restoration effect patterns

이 전극 표면의 황산납($PbSO_4$) 결정을 효과적으로 분해하여 활성 표면적을 증가시켰음을 시사한다. 내부저항 감소는 이온 이동 경로의 방해물이 제거되었음을 의미하며, CCA 증가는 전극 표면에서의 화학 반응 효율이 향상되었음을 나타낸다. 이러한 물리화학적 변화는 궁극적으로 방전시간 증가(평균 27.6분)로 이어져 전동이동보조기기 사용자의 이동성과 활동 반경 확장에 직접적인 혜택을 제공할 수 있다.

4) 보조공학 서비스 관점에서의 실용적 의미와 경제적 가치 분석

내부저항 감소와 CCA 증가의 실질적 의미는 전동이동보조기기 사용 맥락에서 중요하다고 볼 수 있다. 내부저항 감소는 배터리의 발열 감소로 이어져 사용 안전성이 향상되며, CCA 증가는 경사로 주행이나 불규칙한 지형에서의 성능 향상을 가져온다. 배터리 복원기를 활용한 배터리 복원 처치가 가져오는 경제적 가치를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 복원 후 방전시간이 평균 27.6분 증가(31.7%)하였으며, 이는 배터리 수명을 약 0.48년 연장하는 효과가 있는 것으로 추정되었다.

이러한 수명 연장을 경제적 가치로 환산하면, 연구 대상인 60쌍의 배터리에 대해 약 864만원의 교체 비용 절감 효과(1쌍당 약 14.4만원)가 있는 것으로 계산되었다. 이는 일반적인 전동이동보조기기용 50Ah 배터리 쌍의 평균 교체 비용(약 30만원)과 평균 수명 연장 효과(0.48년)를 기준으로 산출한 것이다.

수명 연장 효과 = 일반적인 배터리 수명(약 1.5년) × 방전시간 증가율(평균 31.7%) = 약 0.48년

총 비용 절감액 = 배터리 쌍 수(60) × 배터리 쌍 교체 비용(30만원) × 수명 연장 효과(0.48) = 약 864만원

특히 주목할 점은 배터리 복원을 통한 비용 절감 효과가 사용자의 경제적 수준에 따라 상대적 가치가 다르게 인식된다는 점이다. 본 연구에 참여한 대상자 중에서 의료급여 수급자 그룹(n=34)의 경우 복원을 통한 비용 절감 효과가 복지 서비스 중에서 매우 중요한 요소로 판단될 수 있다. 이는 보조공학 서비스에서 배터리 복원 프로그램이 복지 정책적 측면에서도 가치가 있음을 시사한다.

Ⅳ. 논의 및 제언

본 연구는 실험실 환경이 아닌 실제 사용자의 전동이동보조기기에서 사용된 배터리를 펄스 충전 방식의 복원 기술을 적용하여 성능 개선 효과를 다각적으로 분석하였다. 이를 통해 배터리 복원 기술의 실용적 효과를 보다 정확히 평가할 수 있게 하였으며, 특히 보조기기 서비스 분야에서의 활용 가능성을 실증적으로 확인하였다.

연구 결과, 복원 후 배터리의 전압, 내부저항, 방전시간, CCA와 같은 핵심 성능 지표들이 통계적으로 유의미한 수준으로 개선되었으며, 특히 방전시간이 평균 31.7% 증가하는 주목할 만한 효과가 확인되었다.

본 연구에서 적용한 펄스 충전 방식의 배터리 복원 기술은 전동이동보조기기 사용자들에게 여러 측면에서 실질적인 혜택을 제공할 수 있다. 방전시간의 평균 31.7% 증가는 사용자의 활동 반경을 확장시켜 일상생활의 독립성과 사회참여 기회를 증진시킬 수 있다. 복원 전 평균 87.2분이었던 방전시간이 복원 후 114.8분으로 약 27.6분 증가함으로써, 사용자들은 추가적인 이동 거리와 시간을 확보할 수 있게 되었다. 이는 단순한 수치 개선을 넘어 장애인과 노인의 삶의 질 향상에 직접적인 영향을 미치는 부분이라 할 수 있다.

내부저항의 평균 27.0% 감소와 CCA의 평균 26.3% 증가는 배터리의 전력 전달 효율성 향상과 순간 출력 능력 개선을 의미한다. 이러한 개선은 특히 경사로 주행이나 불규칙한 지형에서의 주행 성능 향상으로 이어져, 전동이동보조기기 사용자들이 다양한 환경에서 더 안정적으로 이동할 수 있게 한다. 또한 내부저항 감소는 배터리의 발열을 줄여 안전성을 높이고, 에너지 손실을 최소화하여 전체적인 시스템 효율을 개선하는 효과가 있다. 즉, 배터리 성능 개선 효과의 메커니즘을 살펴보면, 펄스 충전 방식은 충전과 휴지 기간을 번갈아 적용함으로써 배터리 내부의 이온 농도 분극현상을 감소시키고, 황산납 결정의 크기를 줄이는 데 효과적이다. 이는 펄스 충전 기술이 배터리 임피던스를 최소화하고 황산화된 전극을 재활성화시키는 효과가 있다는 것을 보여준다.

본 연구에서는 배터리 유형별 복원 효과의 차이를 분석한 결과, 초기 내부저항이 높은 고저항군 배터리에서 더 큰 복원 효과가 나타났다. 이는 황산화가 많이 진행된 열화 배터리일수록 펄스 충전 방식의 복원 효과가 더 두드러짐을 시사한다. 또한 복원 효과의 세 가지 패턴(방전시간 우세형, 균형 개선형, 내부저항/CCA 우세형)을 확인한 것은 배터리 복원 기술의 작용 메커니즘에 대한 이해를 심화시키는 중요한 발견으로 볼 수 있다.

본 연구에서 산출한 경제적 가치 분석 결과는 배터리 복원 기술의 비용 효율성을 객관적으로 입증한다. 연구 대상 60쌍의 배터리에 대해 약 864만원의 교체 비용 절감 효과(1쌍당 약 14.4만원)가 있음을 확인하였으며, 이는 배터리 평균 수명의 약 0.48년 연장에 기인한다. 이러한 비용 절감 효과는 특히 본 연구 참여자의 56.7%를 차지하는 의료급여 수급자 그룹에게 더욱 중요한 의미를 갖는다.

전동이동보조기기는 한국의 국민건강보험 및 장애인보조기기 지원사업을 통해 약 5년 주기로 지원받을 수 있고, 배터리는 1년 6개월 주기로 교체 지원이 이루어지고 있다. 그러나 실제 사용 환경에 따라 지원 주기 이전에 배터리 성능이 현저히 저하되는 경우가 빈번하며, 이로 인한 추가 교체 비용은 특히 경제적 여력이 부족한 사용자들에게 상당한 부담으로

작용한다. 또한 정해진 교체 지원 주기 내에서도 배터리 성능 저하로 인한 이동성 제한은 사용자의 일상생활과 사회활동에 부정적 영향을 미친다. 이러한 맥락에서 배터리 복원 기술은 단순한 기술적 혁신을 넘어 기존 지원 체계의 한계를 보완하고 보조기기 관련 복지 정책의 지속가능성을 높이는 실질적 대안으로서의 가치가 있다.

본 연구 결과는 향후 전동이동보조기기 관련 정책 수립에 있어 중요한 시사점을 제공한다. 현행 보조기기 지원 제도에 배터리 복원 서비스를 포함시키는 방안과 지역사회 보조기기 센터나 장애인복지관과 같은 기존 인프라를 활용하여 배터리 복원 서비스를 제공하는 모델을 고려할 수 있다. 또한 환경적 측면에서도 배터리 재활용 및 재사용을 촉진하는 순환경제 접근법으로서 배터리 복원 기술의 확산을 지원하는 것이 필요하다. 배터리 시스템은 다양한 응용 분야에서 서로 다른 성능 특성을 보이며, 본 연구에서의 복원 결과는 이러한 다양한 응용 환경에서 배터리 수명과 성능을 최적화하는 데 기여할 수 있다.

본 연구의 한계점으로는 후향적 데이터 분석 방법을 사용하여 배터리의 사용 환경, 충전 패턴, 보관 조건 등 복원 효과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인들을 완전히 통제하지 못했다는 점이 있다. 또한 복원 후 배터리의 장기적 성능 유지 여부를 추적 관찰하지 못한 점도 한계로 지적될 수 있다.

결론적으로, 펄스 충전 방식을 활용한 배터리 복원 기술이 전동이동보조기기에 사용되는 노후 배터리의 성능을 다양한 측면에서 유의미하게 개선할 수 있음을 실증적으로 입증하였다. 특히 방전시간 증가를 통한 사용자의 활동 범위 확대와 경제적 부담 경감 효과는 보조공학 서비스 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 더불어 내부저항의 27.0% 감소는 배터리의 발열을 줄여 안전성을 향상시키는 효과가 있어, 최근 전기차 배터리 자연 발화나 보조배터리 화재 사고 등으로 대두되는 배터리 안전 문제에도 긍정적 시사점을 제공한다. 전동이동보조기기의 배터리 복원 서비스는 정기적인 배터리 상태 모니터링을 통해 잠재적 위험을 조기에 발견하고 적절한 조치를 취할 수 있는 기회도 함께 제공한다. 이러한 복합적 효과는 전동이동보조기기 사용자의 안전을 보장하면서도 장애인과 노인의 이동성, 독립성, 사회참여를 증진시키는 유용한 서비스로 활용될 수 있음을 의미한다. 향후 이를 정책적으로 지원하는 제도적 방안 마련을 통해 전동이동보조기기 사용자의 삶의 질 향상과 보조기기 서비스의 지속가능성 증진에 기여할 수 있기를 기대한다. 또한 배터리 복원 기술의 안전성 향상 효과를 정량적으로 평가하고 체계적인 안전 관리 지침을 개발하는 후속 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

[1] K. M. Rhee and J. H. Lee, “A Study on the Considerations of Power Wheelchair Application according to Satisfaction Survey of Repair Support Project,” *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*, Vol, 15, No. 1, pp. 53-59, February 2021. https://doi.org/10.21288/resko.2021.15.1.53

[2] Y.-P. Kim, H.-J. Ham, S.-H. Hong, and S.-C. Ko, “Comparison of Battery Performance according to Indoor Electric Wheelchair Driving Scenario,” *Journal of the Korean Institute of IIluminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 34, No. 2, pp. 19-26, February 2020. http://doi.org/10.5207/JIEIE.2020.34.2.019

[3] I. Mizumoto, Y. Yoshii, K. Yamamoto, and H. Oguma, “Lead-Acid Storage Battery Recovery System Using On-Off Constant Current Charge and Short-Large Discharge Pulses,” *Electronics Letters*, Vol. 54, No. 12, pp. 777-779, June 2018. https://doi.org/10.1049/el.2018.1079

[4] S. Doose, J. K. Mayer, P. Michalowski, and A. Kwade, “Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations,” *Metals*, Vol. 11, No. 2, 291, February 2021. https://doi.org/10.3390/met11020291

[5] J. Porzio and C. D. Scown, “Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials,” *Advanced Energy Materials*, Vol. 11, No. 33, 2100771, September 2021. https://doi.org/10.1002/aenm.202100771

[6] M. Hiremath, K. Derendorf, and T. Vogt, “Comparative Life Cycle Assessment of Battery Storage Systems for Stationary Applications,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 49, No. 8, pp. 4825-4833, April 2015. https://doi.org/10.1021/es504572q

[7] J. Shen, S. Dusmez, and A. Khaligh, “Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 4, pp. 2112-2121, November 2014. https://doi.org/10.1109/TII.2014.2334233

[8] Y. Zhang, Y. Xu, H. Yang, Z. Y. Dong, and R. Zhang, “Optimal Whole-Life-Cycle Planning of Battery Energy Storage for Multi-Functional Services in Power Systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No. 4, pp. 2077-2086, October 2020. https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2942066

[9] C. Xie, H. Zhang, W. Xu, W. Wang, and X. Li, “A Long Cycle Life, Self-Healing Zinc-Iodine Flow Battery with High Power Density,” *Angewandte Chemie*, Vol. 130, No. 35, pp. 11341-11346, August 2018. https://doi.org/10.1002/ange.201803122

[10] B. Li, J. Quan, A. Loh, J. Chai, Y. Chen, C. Tan, ... and Y. Zong, “A Robust Hybrid Zn-Battery with Ultralong Cycle

Life," *Nano Letters*, Vol. 17, No. 1, pp. 156-163, January 2017. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03691

[11] J. Shi, T. Sun, J. Bao, S. Zheng, H. Du, L. Li, ... and Z. Tao, ""Water-in-Deep Eutectic Solvent" Electrolytes for High-Performance Aqueous Zn-Ion Batteries," *Advanced Functional Materials*, Vol. 31, No. 23, 2102035, June 2021. https://doi.org/10.1002/adfm.202102035

[12] H. Chen, H. Xu, S. Wang, T. Huang, J. Xi, S. Cai, ... and C. Gao, "Ultrafast All-Climate Aluminum-Graphene Battery with Quarter-Million Cycle Life," *Science Advances*, Vol. 3, No. 12, eaao7233, December 2017. https://doi.org/10.1126/sciadv.aao7233

[13] V. Sulzer, P. Mohtat, S. Pannala, J. B. Siegel, and A. G. Stefanopoulou, "Accelerated Battery Lifetime Simulations Using Adaptive Inter-Cycle Extrapolation Algorithm," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 168, No. 12, 120531, December 2021. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac3e48

[14] H.-N. Go, S.-B. Lee, and E.-J. Kim, "LSTM Model-Based SOH Prediction for Lithium-Ion Battery," *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 22, No. 4, pp. 697-703, April 2021. http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2021.22.4.697

[15] Q. Li, S. Tan, L. Li, Y. Lu, and Y. He, "Understanding the Molecular Mechanism of Pulse Current Charging for Stable Lithium-Metal Batteries," *Science Advances*, Vol. 3, No. 7, e1701246, July 2017. https://doi.org/10.1126/sciadv.1701246

[16] J. M. Amanor-Boadu, A. Guiseppi-Elie, and E. Sánchez-Sinencio, "Search for Optimal Pulse Charging Parameters for Li-Ion Polymer Batteries Using Taguchi Orthogonal Arrays," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 11, pp. 8982-8992, November 2018. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2807419

[17] M. D. Yin, J. Cho, and D. Park, "Pulse-Based Fast Battery IoT Charger Using Dynamic Frequency and Duty Control Techniques Based on Multi-Sensing of Polarization Curve," *Energies*, Vol. 9, No. 3, 209, March 2016. https://doi.org/10.3390/en9030209

[18] K. S. Gandhi, "Modeling of Sulfation in a Flooded Lead-Acid Battery and Prediction of Its Cycle Life," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 167, No. 1, 013538, January 2020. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab679b

[19] S. Minami, Y. Onishi, S. J. Hou, and A. Kozawa, "A New Intense Pulse-Charging Method for the Prolongation of Life in Lead-Acid Batteries," *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 2, No. 1, pp. 541-544, June 2004. https://doi.org/10.4130/jaev.2.541

[20] N. Chen, F. Chimento, M. Nawaz, and L. Wang, "Dynamic Characterization of Parallel-Connected High-Power IGBT Modules," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 1, pp. 539-546, January-February 2015. https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2330075

이진현(Jin-Hyun Lee)

2009년 : 대구대학교 대학원 (이학석사)
2012년 : 대구대학교 대학원 (이학박사-보조공학)
2004년～2005년: 사)대구광역시 장애인재활협회 근무
2006년～2007년: Crotched Mountain Rehabilitation Foundation Internship
2010년～현 재: 대구대학교 대구광역시 보조기기센터 연구실장
2024년～현 재: 한국보조공학사협회 회장
※관심분야 : 보조공학, 자세유지기기, 착석 자세, 컴퓨터 보조교수, 보조기기 서비스 전달체계 등