

# 데이터 기반 배터리 성능열화 예측을 위한 스웰링 지표 분석 연구

방주형<sup>\*,1</sup> · 여태경<sup>\*,2</sup> · 김현우<sup>\*,3</sup> · 소홍윤<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>한양대학교 융합기계공학과, <sup>†</sup>한양대학교 나노과학기술연구소

<sup>1</sup>tinypenguin@naver.com, <sup>2</sup>ytk3936@naver.com, <sup>3</sup>grimtuba@hanyang.ac.kr,

<sup>†</sup>hyso@hanyang.ac.kr

## A study on swelling indicator analysis for data-driven prediction of battery performance degradation

Joohyung Bang<sup>\*,1</sup>, Taegyeong Yeo<sup>\*,2</sup>, Hyunwoo Kim<sup>\*,3</sup>, Hongyun So<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup> Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

<sup>†</sup> Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University

### 요 약

리튬 이온 배터리를 안정적으로 사용하기 위해서는 장기간 운용에 따른 열화 양상을 파악하고 예측할 수 있는 기술이 필수적이다. 본 연구에서는 배터리 스웰링 센서를 활용한 스웰링 데이터 기반 성능열화 예측 방법을 제안하였다. 스웰링 거동의 변화를 통해 배터리의 성능 열화가 가속되는 지점을 조기에 탐지할 수 있음을 확인하였다. 이는 데이터 기반 인공지능 배터리 상태 예측 모델로의 적용 확장을 위한 기반으로, 상용 대용량 전기차 및 ESS 기술에 적용 가능할 것으로 기대된다.

### I. 서 론

최근 차량 전동화 및 에너지 저장 시스템의 급속한 확산으로 인해 리튬 이온 배터리는 고성능 에너지 저장 매체로서 그 중요성이 지속적으로 증대되고 있다. 그러나 배터리 운용 과정에서 발생하는 전기화학적 부반응의 축적은 에너지 저장 성능의 점진적 저하를 유발하며, 이러한 열화가 특정 시점 이후 급격히 진행될 경우 안전성 저하로 이어질 가능성이 있다. 따라서 배터리의 열화 진행 양상을 조기에 인지하고 향후 성능 변화를 예측할 수 있는 진단 및 예측 기술에 대한 요구가 커지고 있다. 본 연구는 배터리 열화 과정에서 나타나는 기계적 응답 중 하나인 스웰링 거동이 내부 부반응과 밀접하게 연관되어 있다는 점에 착안하였다. 이를 위해 변형 추종성이 우수한 스펀지 구조 기반 스웰링 센서를 제작하고, 장기 충·방전 열화 시험에 적용하여 실제 운용 조건과 유사한 환경에서 배터리 부피 변화를 연속적으로 계측하였다. 수집된 스웰링 시계열 데이터를 바탕으로 성능 열화가 비선형적으로 전이되는 특이 구간을 식별할 수 있는 데이터 기반 분석 프레임워크를 제안하였으며, 이를 통해 배터리 열화가 가속되는 Knee point의 조기 탐지가 가능함을 확인하였다. 나아가 본 연구에서 제시한 스웰링 지표는 추가적인 전기화학적 파라미터와의 결합 없이도 열화 진행 특성을 반영할 수 있는 물리 기반 입력 변수로서 활용 가능성을 보였으며, 향후 기계학습 및 인공지능 기반 배터리 상태 예측 모델로의 확장 가능성을 제시한다. 열화 시험 종료 후 수행한 셀 분해 분석을 통해 관측된 스웰링 특성과 내부 열화 반응 간의 상관관계를 검증함으로써, 스웰링 데이터의 예측 지표로서의 타당성을 추가적으로 확인하였다.

### II. 본론

리튬 이온 배터리는 사용 기간이 누적됨에 따라 동일한 운용 조건에서도 열화 양상이 단일 메커니즘으로 유지되지 않고 단계적으로 변화하는 특성을 보인다. 이는 반복적인 충·방전 과정 중 내부에서 지배적인 전기화학적 부반응이 시간에 따라 점진적으로 대체되기 때문이다. 이러한 열화 메커니즘의 전이 구간은 이후 급격한 성능 저하로 이어질 가능성이 높아, 배터리 용량이

비선형적으로 감소하기 시작하는 시점을 사전에 식별할 수 있는 진단 지표의 확보가 중요하다. 본 연구에서는 고온 조건에서의 가속 충·방전 열화 시험을 수행하고, 이 과정에서 실시간으로 계측된 배터리 스웰링 센서 신호의 동적 거동 변화를 분석하였다. 특히 스웰링 신호의 특성이 뚜렷하게 전이되는 구간을 기준으로 내부 열화 반응의 변화 가능성을 판단하고, 해당 시점 전후의 용량 감소 거동과의 상관관계를 비교 분석하였다.

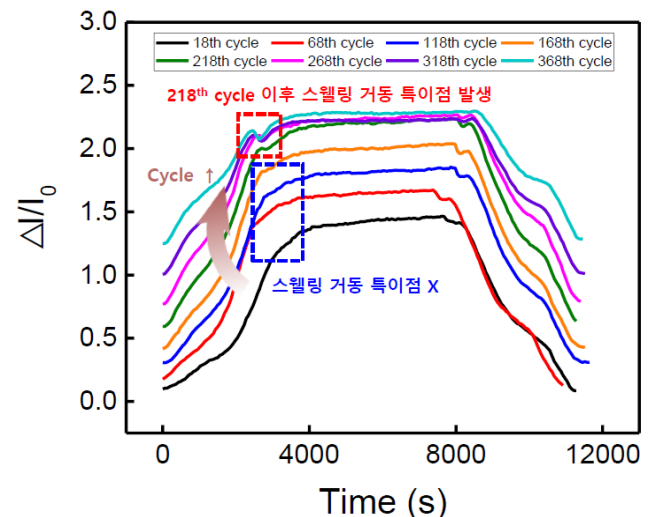


Figure 1. 충방전 Cycle에 따른 스웰링 거동 예시

그 결과, 스웰링 신호 기반 지표를 통해 배터리의 State of Health(SOH) 저하가 본격적으로 가속되는 Knee point를 조기에 식별할 수 있음을 확인하였으며, 제안된 지표가 배터리 장기 상태 진단 및 열화 예측을 위한 유효한 물리 기반 입력 변수로 활용될 수 있음을 검증하였다. (Fig. 1)

### III. 결론

본 연구에서는 개발된 배터리 스웰링 센서를 활용하여, 배터리의 장기간 열화 거동에 따른 스웰링 지표의

특이점을 활용한 가속열화 지점 예측이 가능함을 확인하였다. 이는 배터리 수명 진단 기술, 전기차 및 ESS 시스템 점검 시점 판단 등 다양한 활용이 가능할 것으로 예상된다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 교육부(MOE)와 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. 202525438601)

## 참 고 문 헌

- [1] (1) J. Bang, B. Chun, M. Kim, J. Lim, Y. Han, and H. So, 2025, "Rapid thermal runaway detection of lithium-ion battery via swelling-based state-of-charge monitoring using piezoresistive sponge sensor" eTransportation, Vol. 24, 100404.