


3차년도 주요 결과물

(과제명) 대규모 분산 에너지 저장장치 인프라의 안전한 자율운영
및 성능 평가를 위한 지능형 SW 프레임워크 개발
(과제번호) 2021-0-00077

- 결과물명 : 배터리 수명 추정을 위한 건전성 지표 선정
- 작성일자 : 2023년 11월 14일

과학기술정보통신부 SW컴퓨팅산업원천기술개발사업
“3차년도 주요 결과물” 로 제출합니다.

수행기관	성명/직위	확인
충남대학교	김종훈/교수	

정보통신기획평가원장 귀하

사용권한

본 문서에 대한 서명은 한국전자기술연구원 내부에서 본 문서에 대하여
수행 및 유지관리의 책임이 있음을 인정하는 것임.

본 문서는 작성, 검토, 승인하여 승인된 원본을 보관한다.

작성자 : 이미영 일자 : 2023. 11. 13

검토자 : 한동호 일자 : 2023. 11. 14

승인자 : 김종훈 일자 : 2023. 11. 14

제 · 개정 이력

버전	변경일자	제.개정 내용	작성자
1.0	2023-11-13	최초 등록	이미영

목 차

1. 개요	-----1
2. 상관도 분석에 따른 건전성 지표 선정 및 알고리즘 구축	-----2

1. 개요

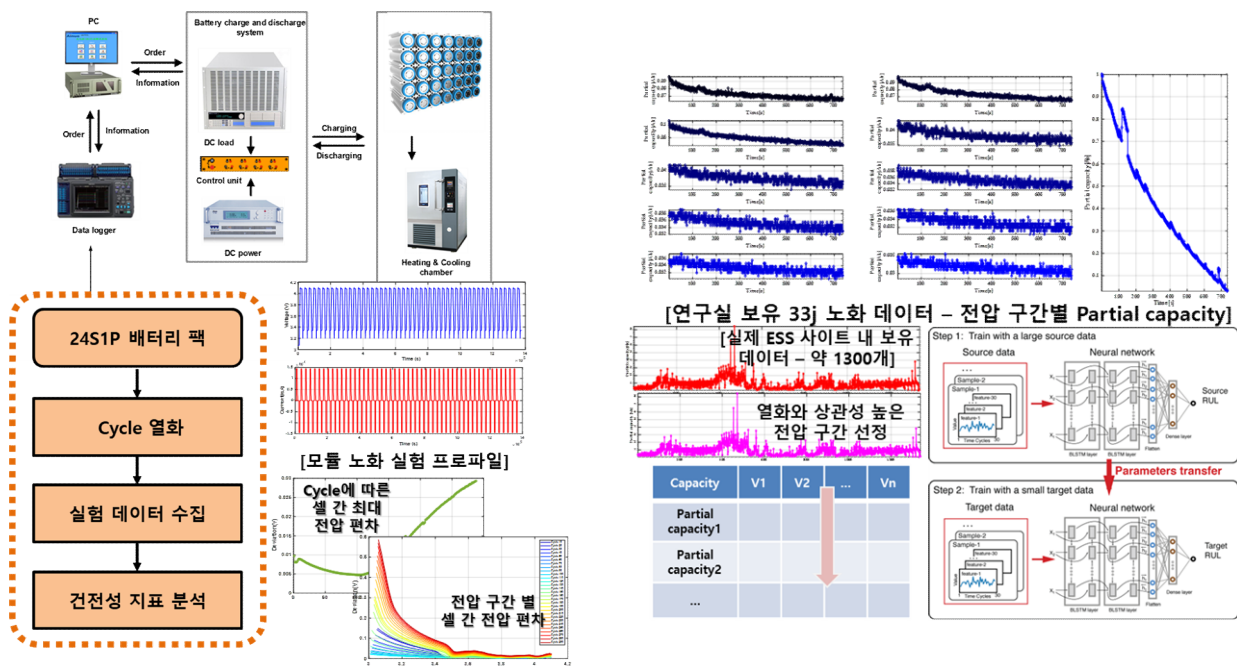
□ 목적

- 본 기술문서의 목적은 현 과제에서 개발 목표로 하는 대규모 분산 ESS 인프라의 안전한 자율운영 및 성능 평가를 위한 건전성 지표 SW 프레임워크 개발임. 실제 운영 ESS 데이터 기반 배터리 수명 추정을 위해 모의로 연구실 기보유 데이터를 활용하여 건전성 지표 선정 및 상관도 분석을 진행함. 배터리 충전 및 방전 주기에서 발생하는 전압, 전류 및 온도 데이터를 기반으로 배터리 노화를 대변하는 건전성 지표를 선정함. 또한 배터리 수명과 연관성이 높은 주요 SOC 범위를 선정하기 위해 상관도 분석 진행 후 건전성 지표를 종합적으로 평가함. 이를 통해 선정된 건전성 지표를 기반으로 실제 운영 ESS 데이터에 적용하여 안전한 자율운영 및 성능 평가를 위한 지능형 SW 프레임워크 개발이 목적임.

□ 범위

- 연구실 보유 노화 데이터를 수집하고 배터리 수명과 연관성이 높은 건전성 지표를 선정하여 이를 컨소시엄 내 기관에 공유함.

□ 시스템 개요



연구실 노화 데이터 수집 및 건전성 지표 기반 수명 예측 알고리즘

- 데이터 분석을 위한 환경(Chamber/Logger/Charger) 구축 및 노화 데이터 수집
- 수집된 배터리 노화 데이터 기반으로 건전성 지표를 선정하여 실제 운영 ESS에 적용함

2. 상관도 분석에 따른 건전성 지표 선정 및 알고리즘 구축

□ 1-1 건전성 지표 SW

- 배터리의 충전 및 방전 과정에서 발생하는 노화 현상을 평가하고 건강 상태를 추정하기 위해 배터리 노화 상태를 대변하는 건전성 지표를 도출하였다. 충전 및 방전 과정에서 발생하는 전압, 전류, 온도 데이터를 기반으로 건전성 지표를 정의하고, 이러한 건전성 지표와 배터리 수명 간의 연관성을 파악하기 위해 상관도 분석을 수행하였다. 실제 운영 ESS 데이터 양이 한정적이며, 건전성 지표를 추출하기 어려워 실제 운영 ESS에 탑재된 33j 배터리와 동일한 실험실 기보유 33j 배터리 데이터를 사용하였다. 33j 배터리 기반으로 온도, 전압의 변화 및 충전/방전 시간의 변화량 등 여러 건전성 지표를 도출하였다. 도출된 건전성 지표 중 배터리 수명과 상관도 분석을 진행하여 연관성이 높은 배터리의 건전성 지표를 종합적으로 평가하고, 배터리 수명과 연관성이 높은 주요 SOC(State of Charge) 범위를 선정하였다. 배터리 충전 및 방전 과정에서 발생하는 전압, 전류, 온도 데이터 기반 건전성 지표 선정과 배터리 수명 추정 및 예측 알고리즘 흐름도는 그림 1에 나타내었다.

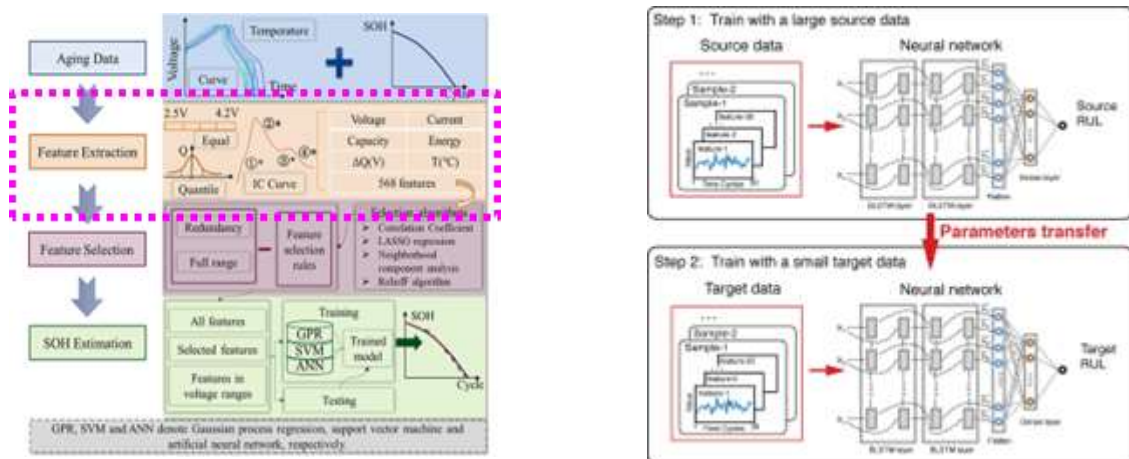


그림 1 건전성 지표 기반 배터리 수명 추정 및 예측 알고리즘

- 배터리 수명과 추출된 여러 건전성 지표와의 상관도 분석을 진행한 결과 상위 건전성 지표 중 첫 번째 건전성 지표인 온도 변화량/전압 변화량(DTV)을 도출하였다. 온도는 배터리 작동 특성에 큰 영향을 미치며 높은 온도에서의 배터리 운영은 노화가 가속화됨을 확인하였다. 배터리 노화에 따른 건전성 지표 DTV 추출은 그림 2에 나타내었다.

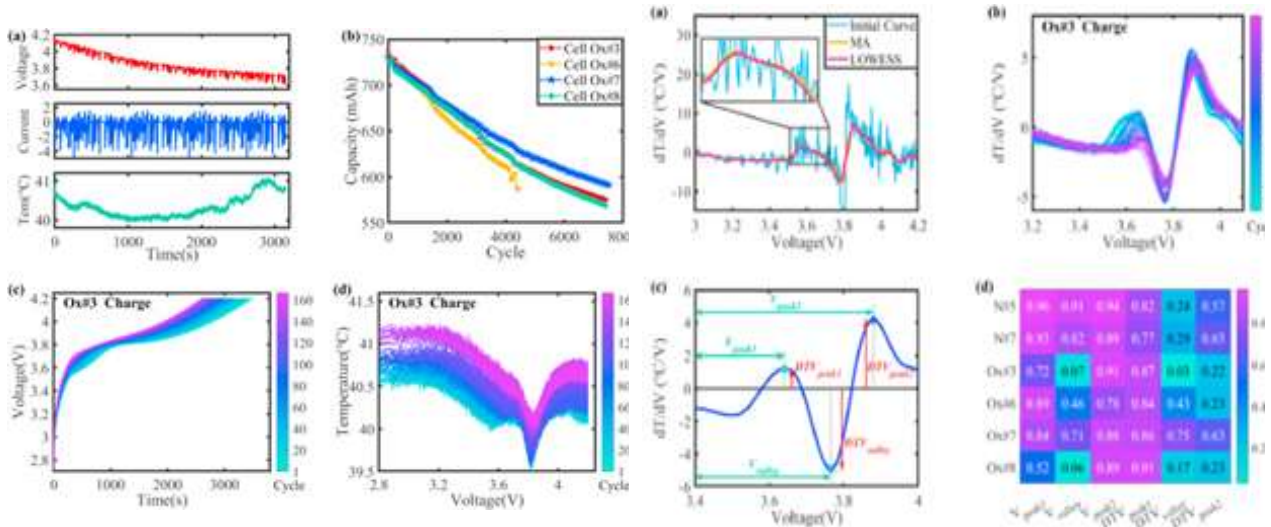


그림 2 배터리 건전성 지표 - 온도 변화량/전압 변화량(DTV)

o MVF(Mean voltage fall off)는 만충부터 만방까지의 방전 곡선에서 평균 전압과 최대 전압의 차이를 통해 산출된 지표이며, 이는 사이클이 증가할수록 방전 구간에서의 평균 전압은 감소하고 충전 구간에서의 평균 전압은 증가하기 때문에 노화에 따른 지표로써 사용할 수 있다. 하지만 해당 평균 전압 산출 방식은 만충부터 만방까지의 전압을 모두 누적하여 평균하기 때문에 타 방법에 비해 계산량이 많다. 따라서 사이클에 따른 충전 및 방전 시간을 세부적으로 나눠 계산량을 줄였고 정의된 충전 및 방전 구간에서 추출한 MVF 중 충전 및 방전 용량과 상관관계가 높은 구간의 MVF를 파악하여 해당 MVF로 선정하였다.

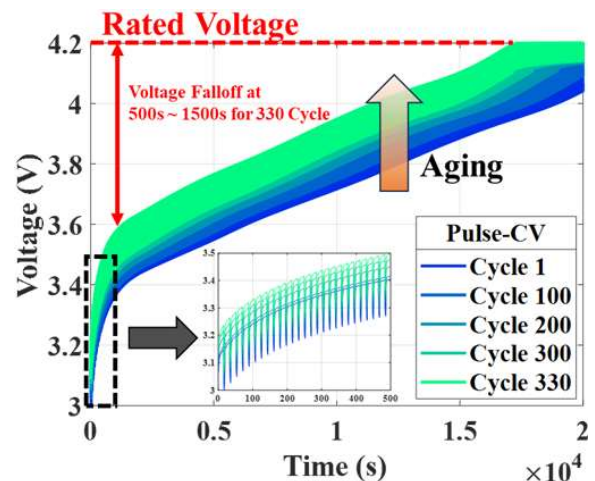
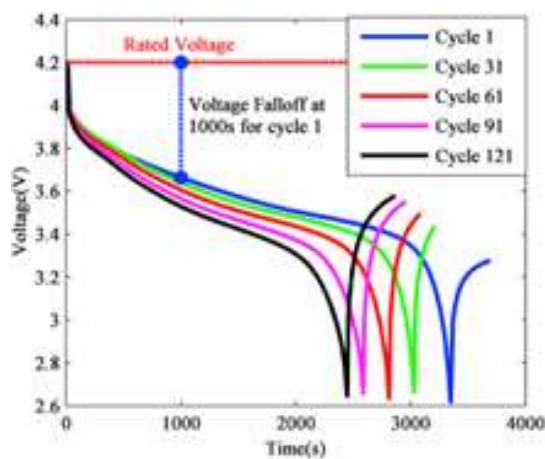
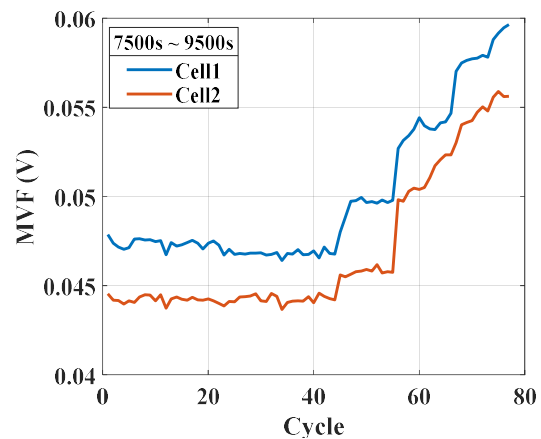
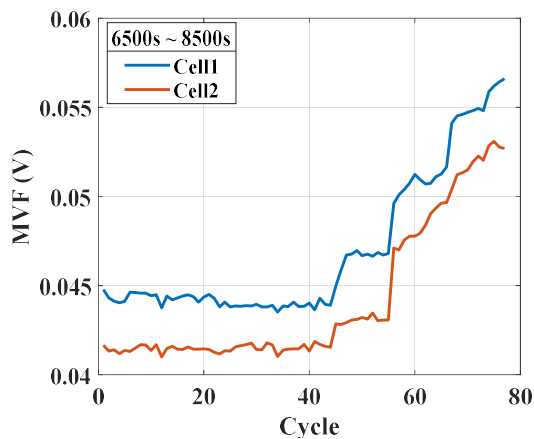
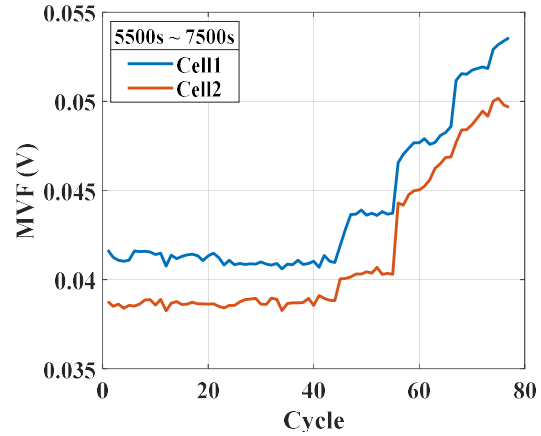
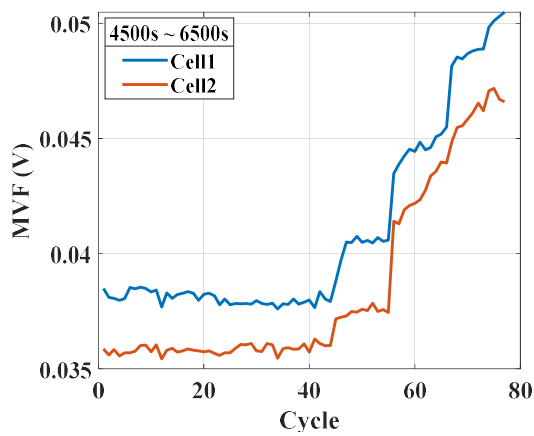
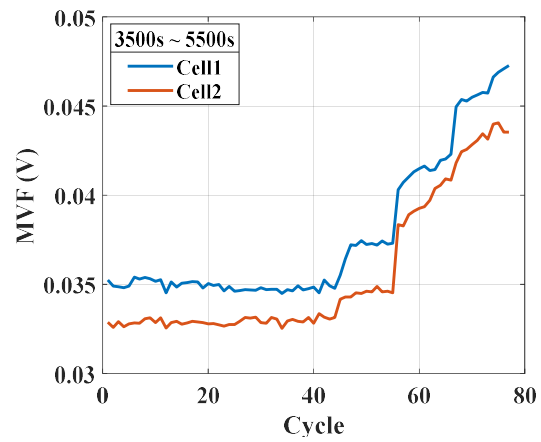
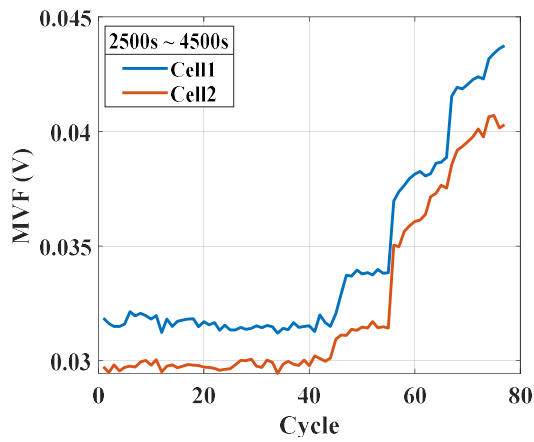
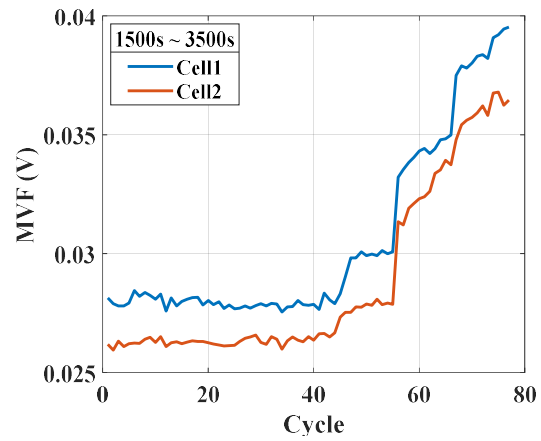
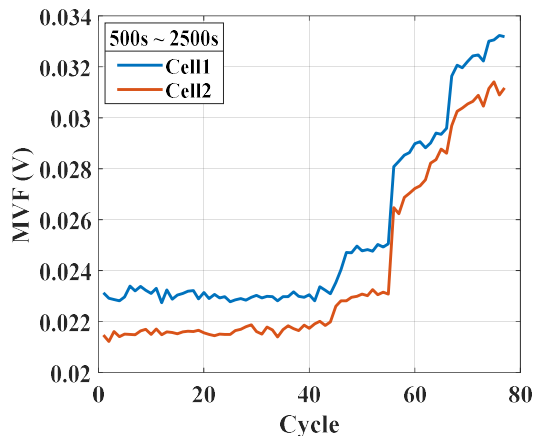


그림 3 참고 문헌들에서 제안하는 배터리 건전성 지표 MVF



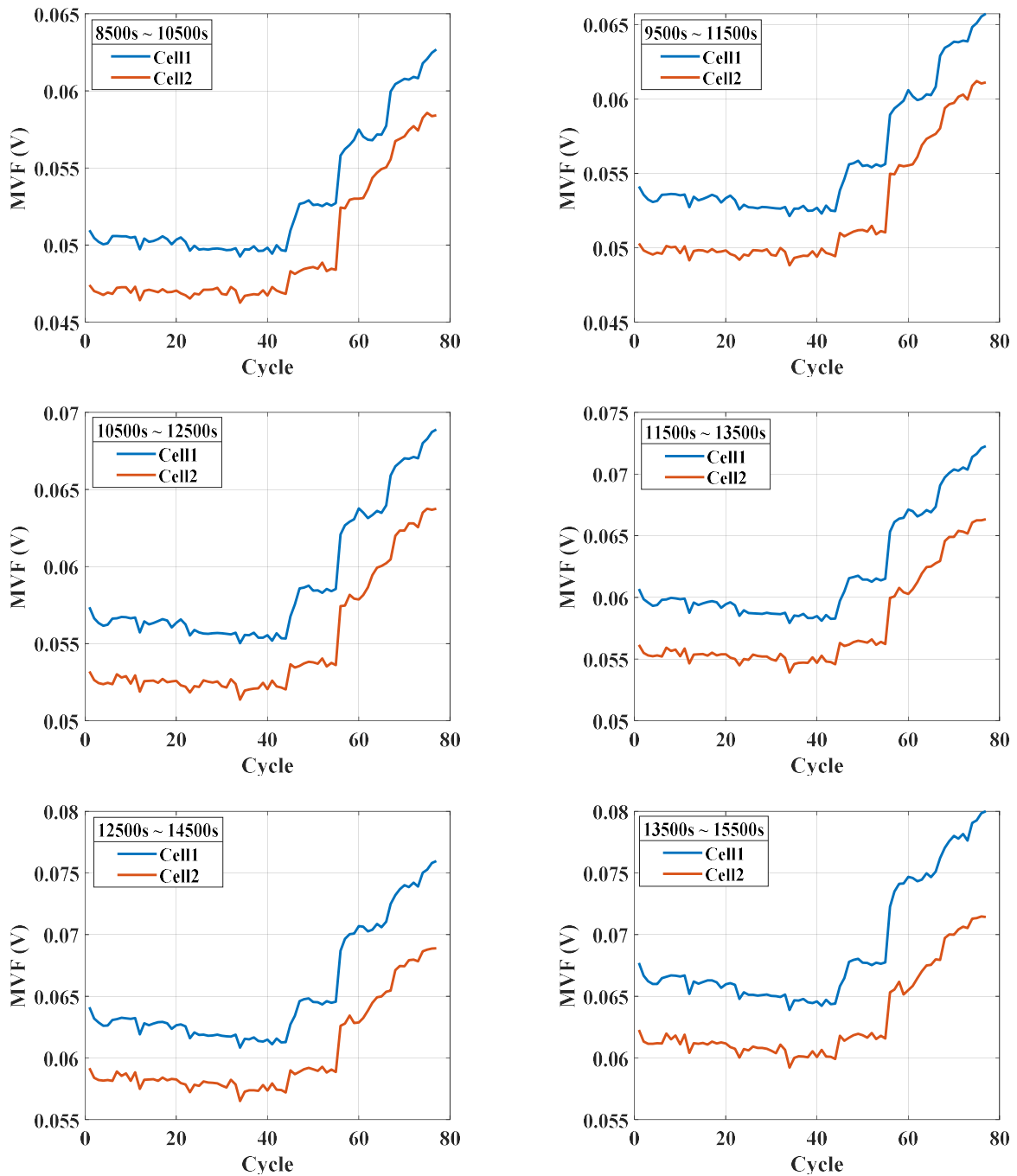
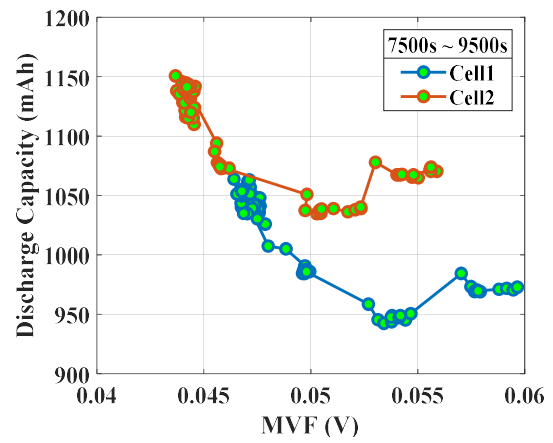
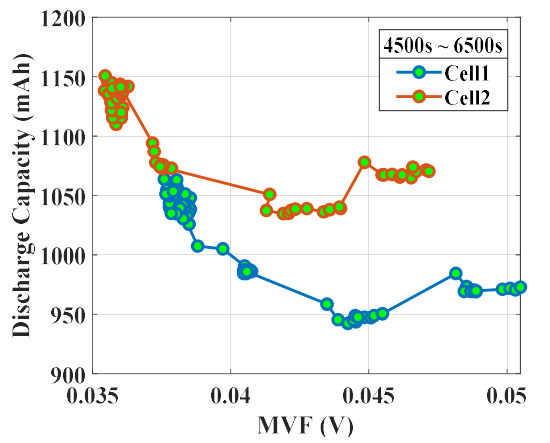
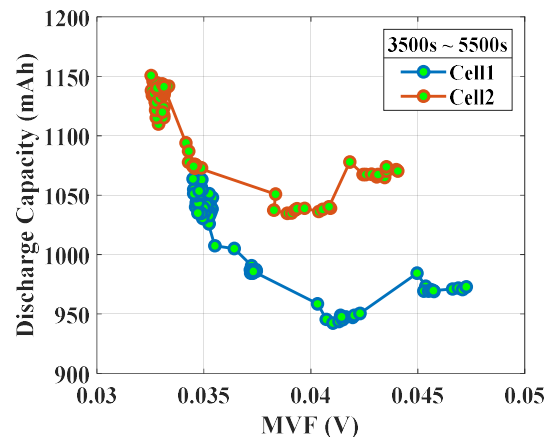
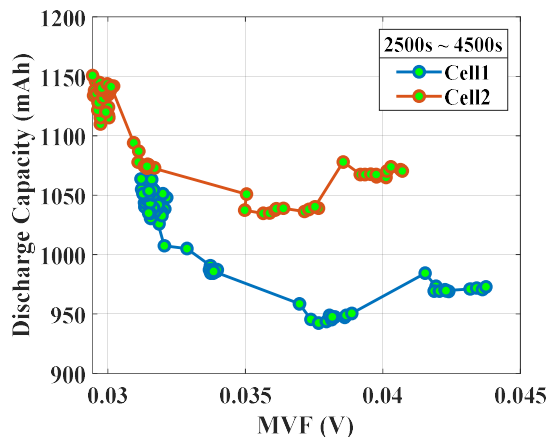
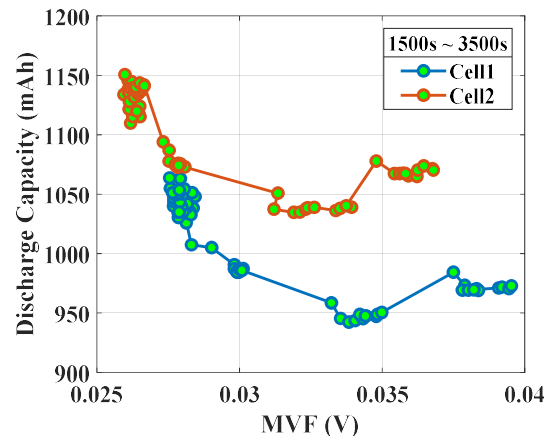
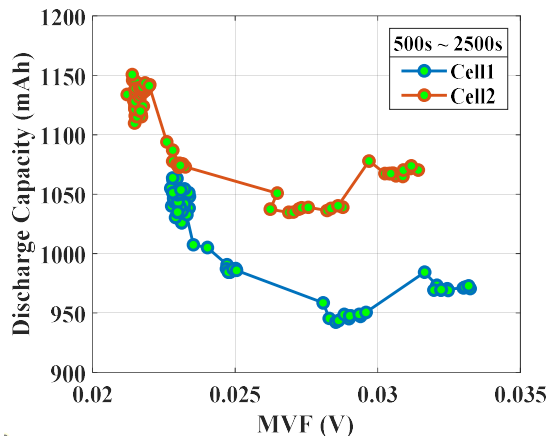


그림 4 방전 시간대 별 사이클에 따른 MVF 경향성

- 배터리가 충전/방전 사이클을 반복하면서 점차적으로 성능이 저하되고 방전 용량이 감소하는 경향을 보였다. 다양한 시간대에서의 MVF 값과 용량 감소량의 상관관계를 분석하면, 어떤 시간대에서 MVF와 용량 감소량 사이에 높은 상관관계를 가진 케이스를 파악할 수 있었다. 따라서 상관관계가 높은 시간대를 해당 건전성 지표의 대표 케이스로 설정함으로써, 해당 시간대의 MVF값을 기준으로 배터리 용량 감소 추정이 가능하였다.



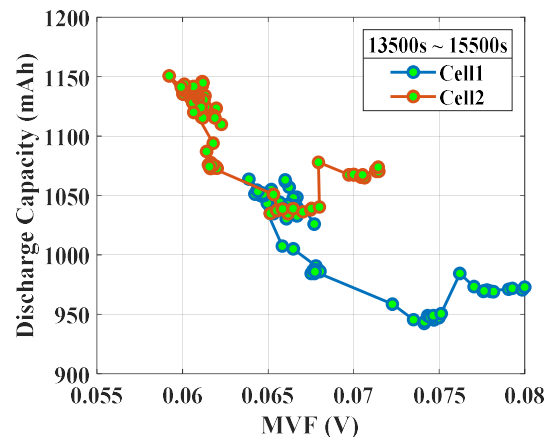
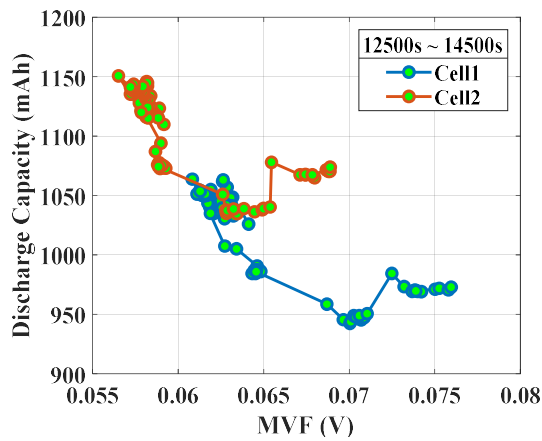
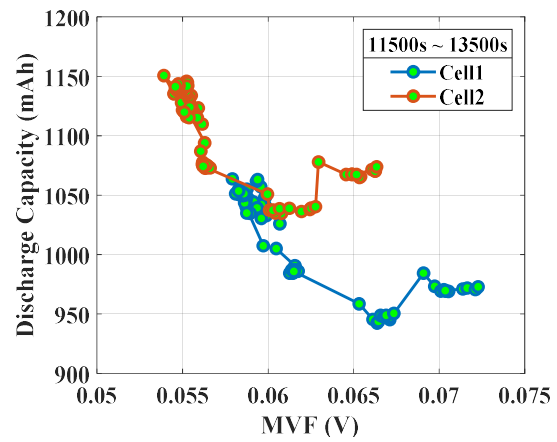
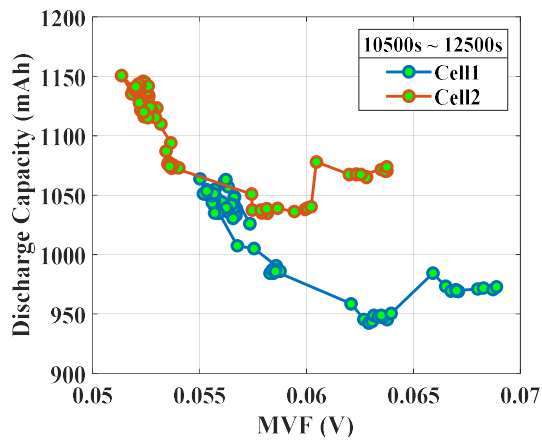
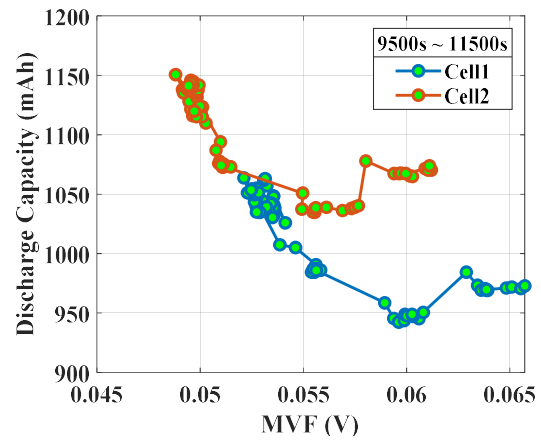
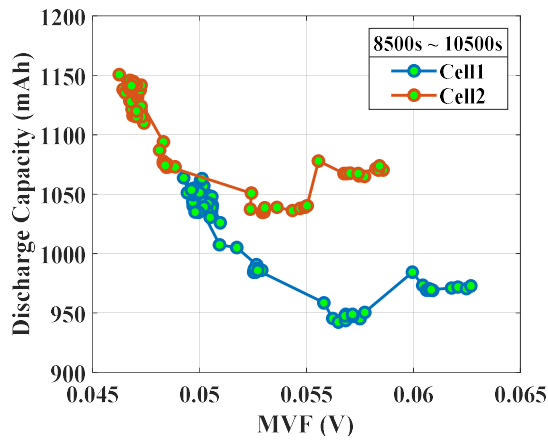


그림 5 방전 시간대 별 배터리 방전 용량 감소와 MVF 상관 관계

- 배터리 충전/방전 주기가 증가하면 화학적 반응으로 인해 배터리 내부 저항이 증가하고, 이로 인해 방전 용량이 감소하는 경향성이 존재한다. 또한 열화가 진행되면 방전에서의 전압 하강이 커져 MVF가 증가하는 경향성을 확인하였다.

- o 건전성 지표 MVF와 배터리 방전 용량의 상관계수는 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)를 사용하여 도출하였다.

$$r_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

X,Y는 Vector이며 각 Vector의 표본평균을 구해 각 원소를 빼서 표준화 진행

두 변수의 선형 상관관계를 계량화한 수치로 결과값은 -1 ~ 1사이의 값이며, 양의 상관관계일수록 1에 가깝고, 음의 상관관계일수록 -1에 가깝다. 상관관계가 없을수록 0에 가깝게 산출된다. 배터리 열화가 진행될수록 방전 용량은 감소하지만 전압 강하가 커져 MVF가 증가하므로 음의 상관관계이기 때문에 상관계수를 음수로 표시하였다. Cell1과 Cell2는 동일한 노화 프로파일로 시험 진행했지만, 초기 용량이 서로 다르기에 방전 용량과 MVF 값에서 차이가 발생하여 배터리 용량을 추정할 수 있는 건전성 지표의 방전 시간대가 다르게 나타났었다. 따라서 시험 환경 및 측정 기기의 노이즈와 시험 오류 등을 고려하여 배터리 용량을 추정하기에 적합한 건전성 지표의 방전 시간대를 찾아야 한다. 다음과 같은 표는 각 셀 별 여러 방전 시간대의 방전 용량과 MVF의 상관계수를 나타내었다.

방전시간	Cell1의 방전용량과 MVF 상관계수	Cell2의 방전용량과 MVF 상관계수
500s ~ 2500s	- 0.8345	-0.7858
1500s ~ 3500s	-0.8274	-0.7861
2500s ~ 4500s	-0.8276	-0.7890
3500s ~ 5500s	-0.8307	-0.7909
4500s ~ 6500s	-0.8334	-0.7913
5500s ~ 7500s	-0.8373	-0.7900
6500s ~ 8500s	-0.8421	-0.7874
7500s ~ 9500s	-0.8450	-0.7841
8500s ~ 10500s	-0.8470	-0.7801
9500s ~ 11500s	-0.8491	-0.7749
10500s ~ 12500s	-0.8510	-0.7686
11500s ~ 13500s	-0.8519	-0.7627

- o 건전성 지표 DCIR과 배터리 용량 및 종지 전압 비교하여 배터리 노화 특성을 반영하지 파악하였다. 사이클이 진행될수록 전체 용량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 배터리는 충전 및 방전 사이클이 반복됨에 따라 분극 현상으로 인해 내부저항이 증가하게 된다. 내부 저항이 증가하게 되면 전하가 완전히 전극으로 이동하는 것을 방해하게 되며, 사용 가능 용량이 감소하게 된다. 또한 내부 저항이 증가함에 따라 충전 종지 전압 또한 증가하게 된다. 따라서 충전 종지 전압과 내부 저항은 배터리 노화 특성을 반영한다.

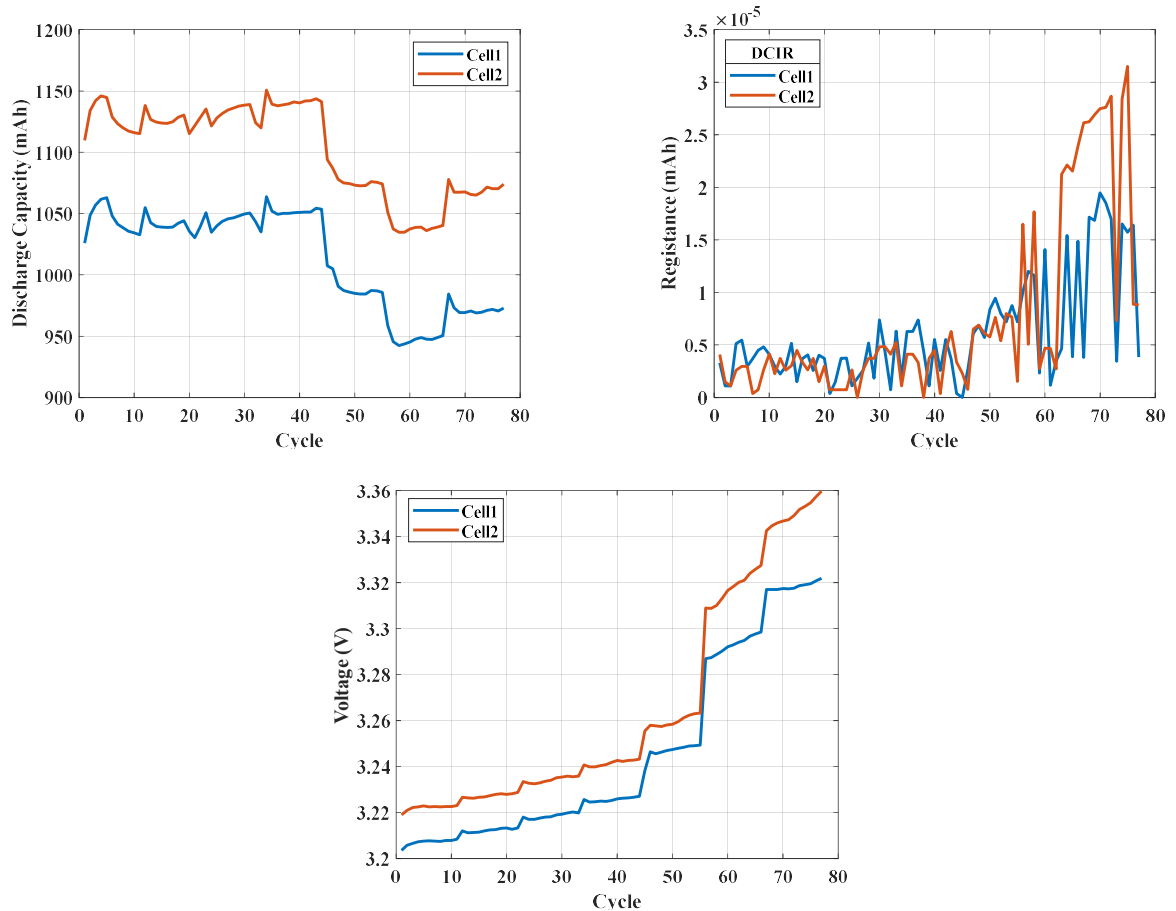


그림 6 사이클에 따른 배터리 용량, 내부 저항 및 충전 종지 전압

Cycle	1	10	20	30
전압(V)	3.218	3.222	3.227	3.235

Cycle	40	50	60	70	77
전압(V)	3.242	3.258	3.316	3.346	3.359

- o TIEDVD(Time interval of equal discharging voltage difference)는 특정 전압 영역에서의 경과 시간을 의미하며, 이는 동일 전류가 흐르고 있을 때, 설정된 전압 영역에서의 시간 정보를 통해 노화를 판단하는 지표를 의미한다. 미소 용량은 특정 전압 범위에서 충전 용량의 누적을 통해 산출된 지표를 의미하며, 만충전과 만방전이 수행되지 않는 어플리케이션에서 사용할 수 있는 방법이다.

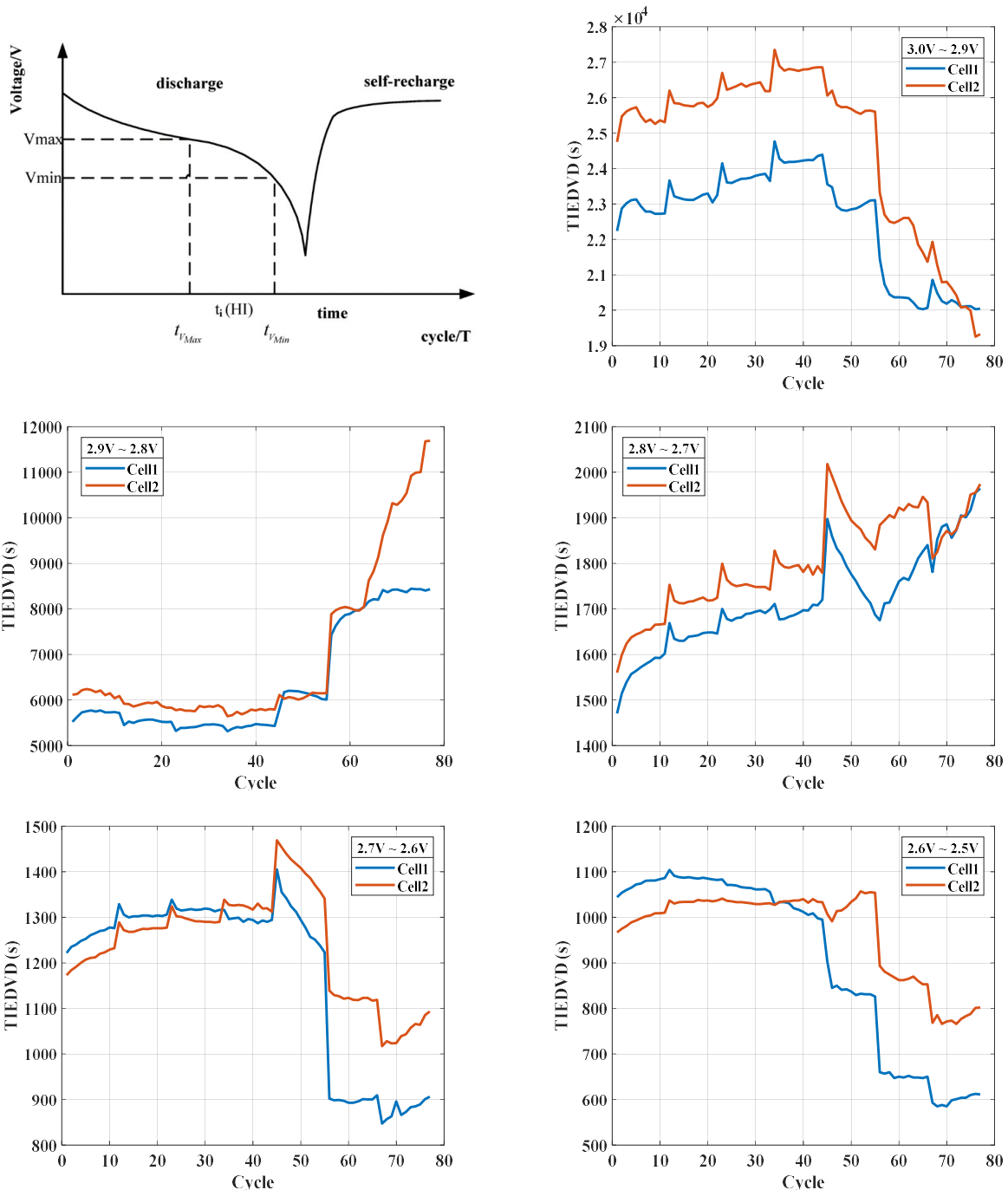


그림 7 방전 시간대 별 사이클에 따른 TIEDVD 경향성

방전 전압 구간	Cell1상관계수	Cell2상관계수
3.0V ~ 2.9V	0.879378	0.770487
2.9V ~ 2.8V	-0.887440	-0.677979
2.8V ~ 2.7V	-0.679445	-0.745177
2.7V ~ 2.6V	0.8333660	0.4925218
2.6V ~ 2.5V	0.9350092	0.7093752

- o 배터리의 방전 과정에서 특정 전압 이하로 방전되는 시간을 측정하는 것으로 해당 방전 시간을 통해 배터리의 건강 상태와 성능을 평가하는데 사용하였다. 각 전압 구간 별 TIEDVD 그래프를 보면 배터리 용량이 감소함에 따라 TIEDVD 또한 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Cell1과 Cell2의 초기 용량이 다르기에 TIEDVD의 시간이 다르게 나타난다. 하지만 상관분석 결과 2.9V - 2.6V 전압 구간을 제외하고 0.7 이상의 상관관계를 보인다. 따라서 TIEDVD는 배터리 용량에 관계없이 건강지표로써 활용 가능하였다.

- o Partial capacity는 부분적인 배터리 용량을 나타내며, 배터리 노화와 연관성이 높은 전압 구간을 확인하기 위하여 상관관계 분석을 진행하였다.

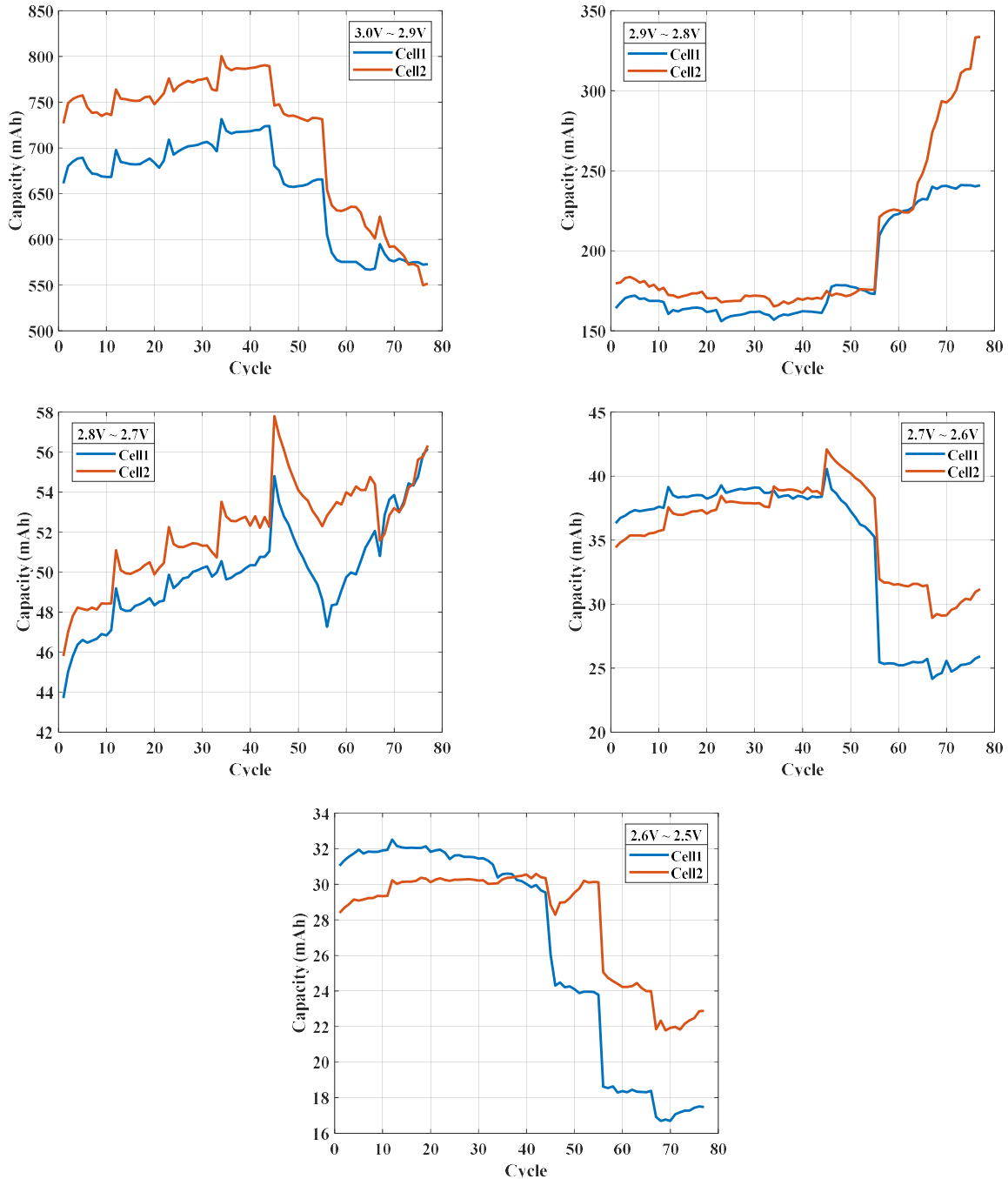


그림 8 방전 시간대 별 사이클에 따른 미소용량 경향성

방전 전압 구간	Cell1상관계수	Cell2상관계수
3.0V ~ 2.9V	0.925772	0.831789
2.9V ~ 2.8V	-0.86640	-0.643512
2.8V ~ 2.7V	-0.47142	-0.583381
2.7V ~ 2.6V	0.865378	0.607805
2.6V ~ 2.5V	0.943514	0.777579

- 방전 용량, 내부 저항, 온도 편차, 미소용량, MVF, TIEDVD를 산출하였고 이를 용량과의 상관 분석을 진행하였을 때 그림 10과 같으며, 상관 분석을 통해 산출된 상관 계수는 용량과 얼마나 선형적인 관계가 있는지 나타내는 지표이다. 이를 통해 방전 용량과 얼마나 관계가 있는지 확인하였다.

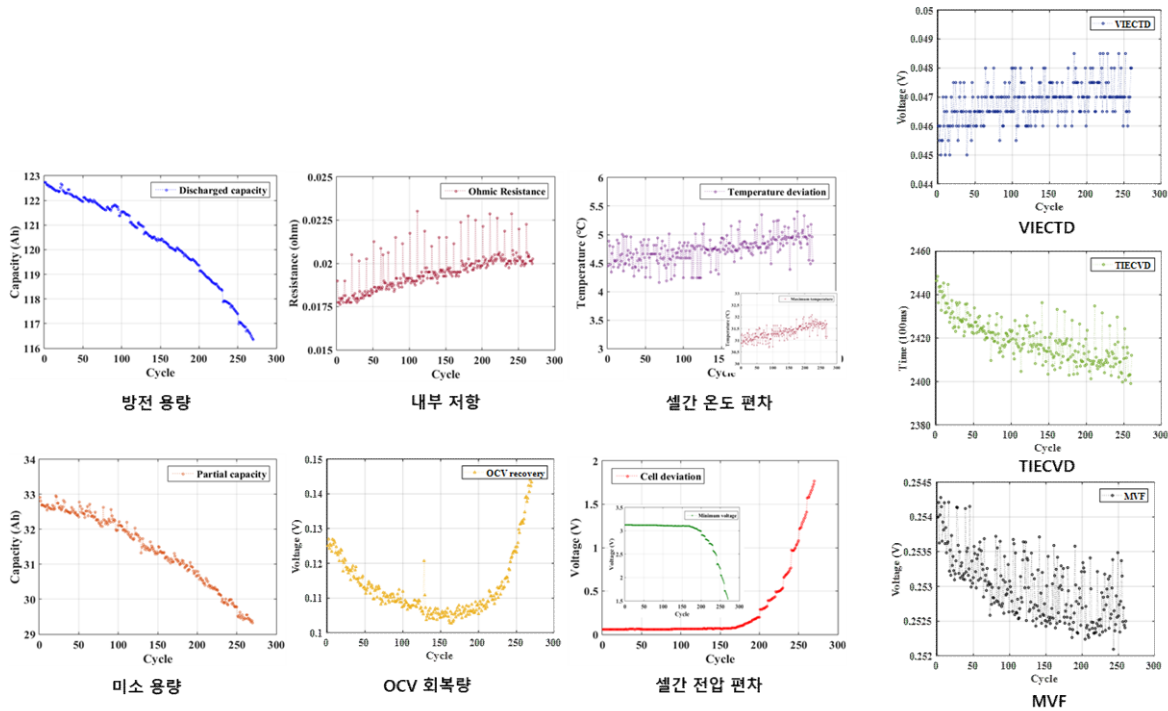


그림 9 건전성 지표 산출

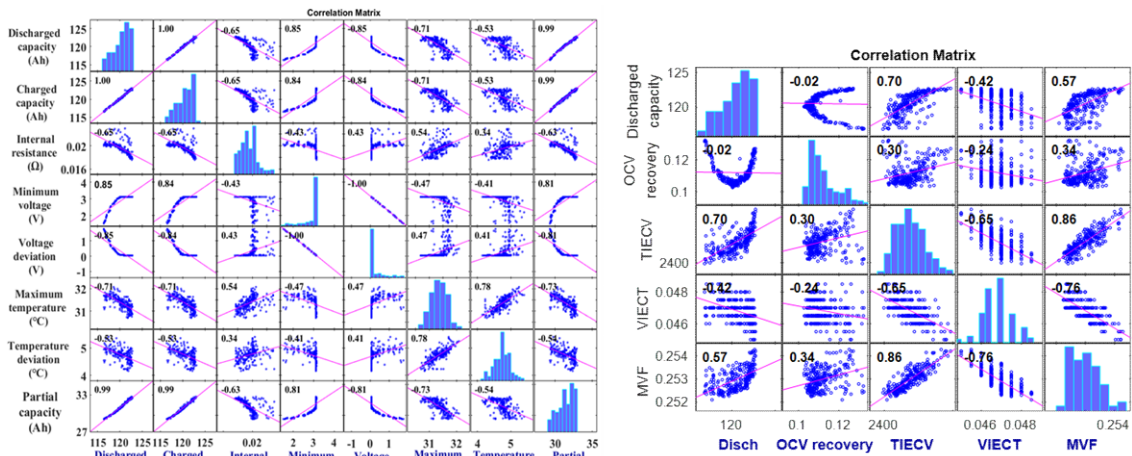


그림 10 방전 용량과 건전성 지표와의 상관 관계

- 상관 분석 결과 방전 용량과 선형적 관계를 가지고 있는 상위 3개의 파라미터는 미소 용량, TIECVD, 내부 저항 순으로이며, 해당 건전성 지표를 기반으로 배터리 용량 추정을 할 수 있었다.

- ESS 실제 운영 데이터에서 배터리 수명을 평가하기 위해 MVF 및 TIEDVD 건전성 지표를 활용하였다. 이러한 건전성 지표를 적용하여 배터리의 수명과 밀접한 관련이 있는 SOC가 30%에서 70%까지의 범위를 선정하였다. ESS의 운영일이 증가함에 따라 MVF 및 TIEC(D)VD 지표의 변화 경향을 선형적으로 확인하면서, 이 범위에서의 SOC 값이 배터리 수명 추정에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다. 특히, 태양광 ESS의 경우 날씨 조건에 따라 충전이 제한될 수 있는 시나리오를 고려하여 건전성 지표 도출 영역이 달라질 수 있음을 확인하였다.
- DCIR의 경우, ESS 운용 중 휴지 후 전류 인가로 인한 전압 변화량을 측정하였다. 운용 중에는 지연 시간 동안 전압이 거의 변하지 않는 경우를 고려하여 rough한 시간 영역을 선정하였고 이를 통해 수 초 동안의 전압 변화가 미미한 경우를 보완하였다.

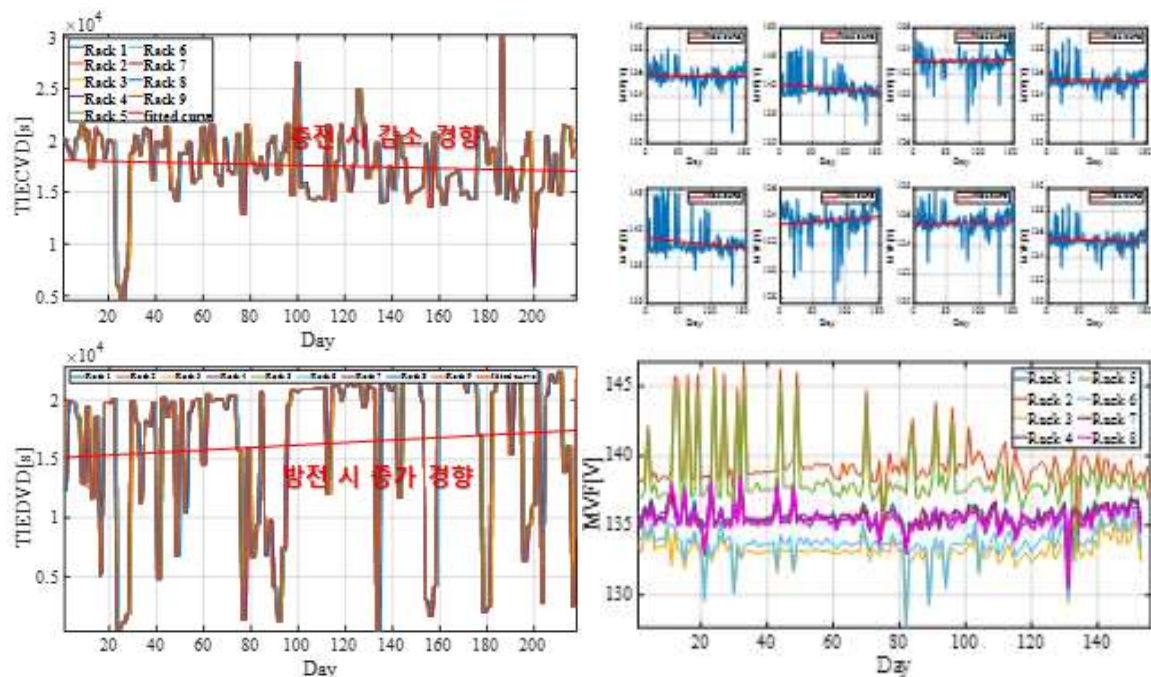


그림 11 판리 ESS Bank 1 데이터 기반 건전성 지표 경향성 분석

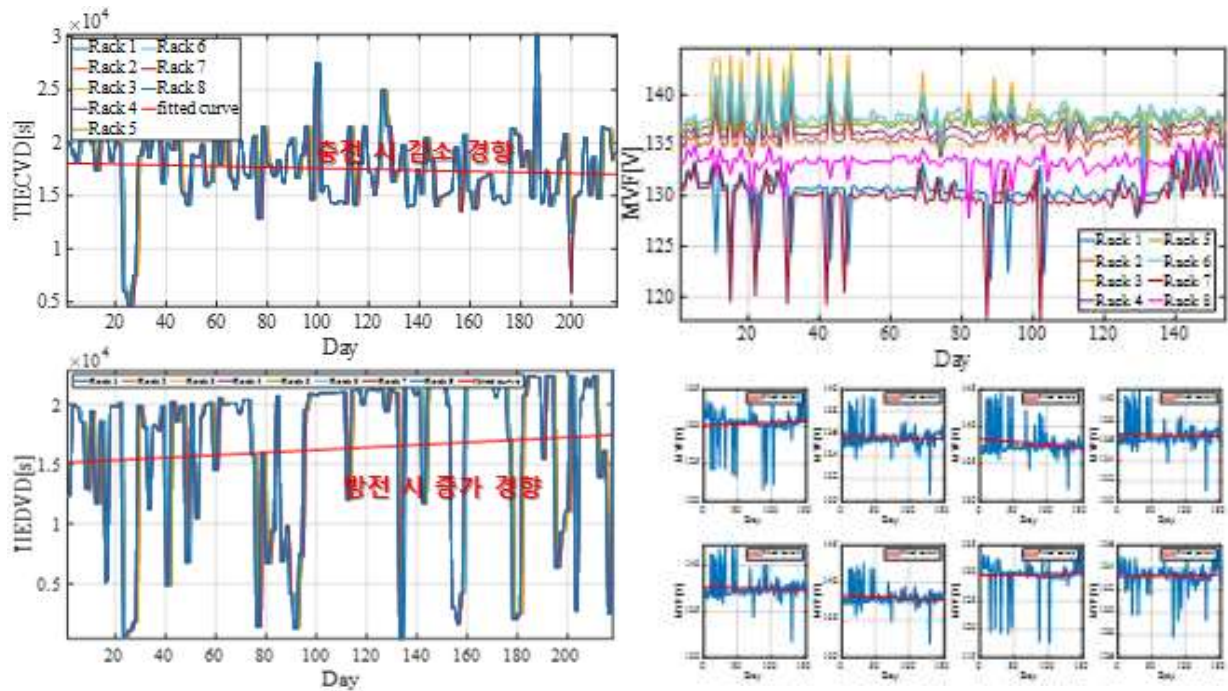


그림 12 판리 ESS Bank 2 데이터 기반 건전성 지표 경향성 분석

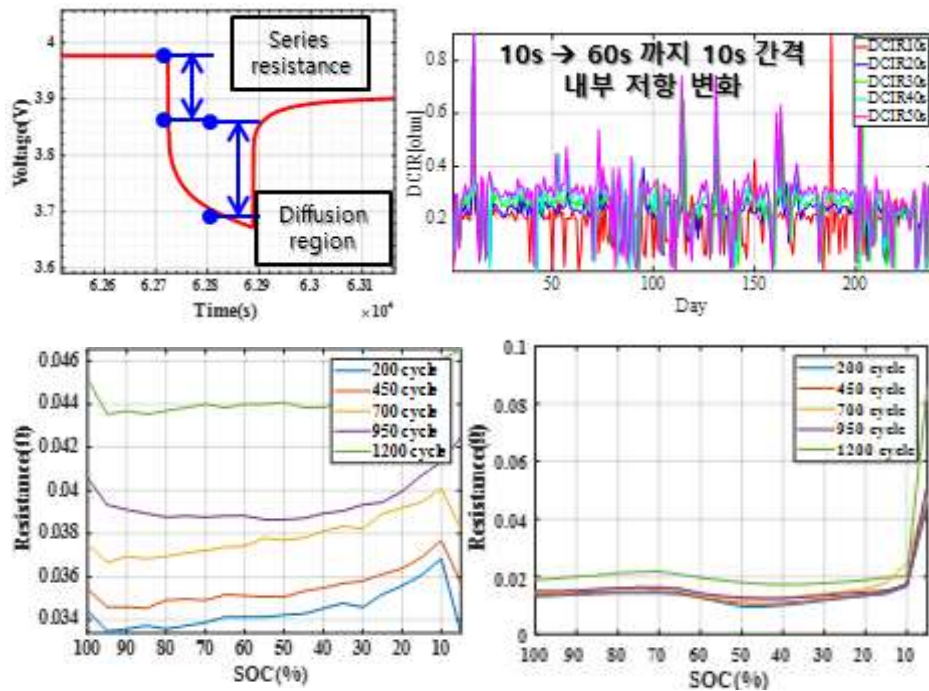


그림 13 ESS 충전 구간 DCIR 변화

- o SoNA(State-of-nonlinear aging) 지표를 적용하여 배터리 수명 감소의 가속화에 따라 열화 경향이 변하는 지점, 즉 Knee point를 식별하였다. 33j 열화 데이터를 적용하여 사이클에 따른 용량을 정규화하고 이를 도식화하여 면적을 계산하였다. 이 결과로부터 SOH(State of Health) 80% 지점 이후에서 기울기 역전 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 배터리의 수명이 진행됨에 따라 열화의 영향이 더 크게 나타나는 시점을 나타내며, SoNA 지표를 통해 이를 감지하고 평가할 수 있었다.

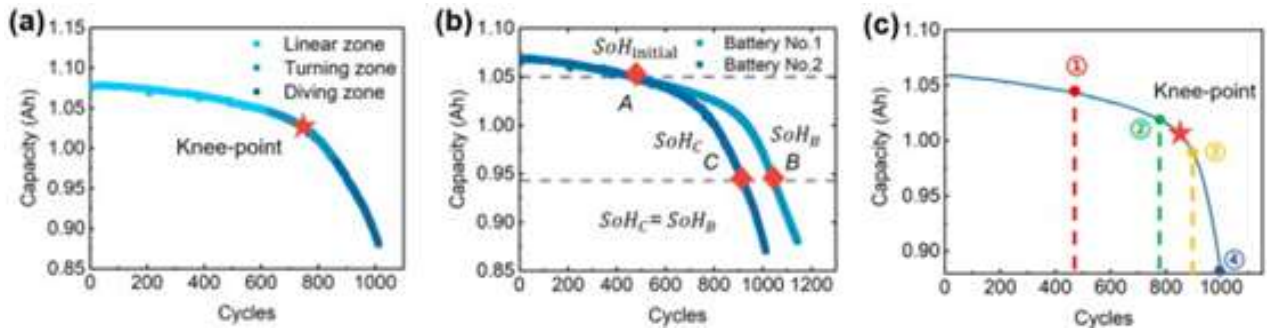


그림 14 레퍼런스 기반 배터리 열화 데이터 내 Knee point 지점

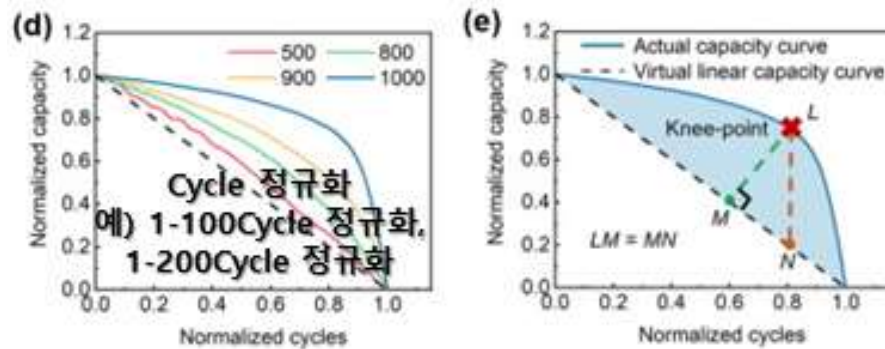


그림 15 레퍼런스 기반 SoNA 계산 방안

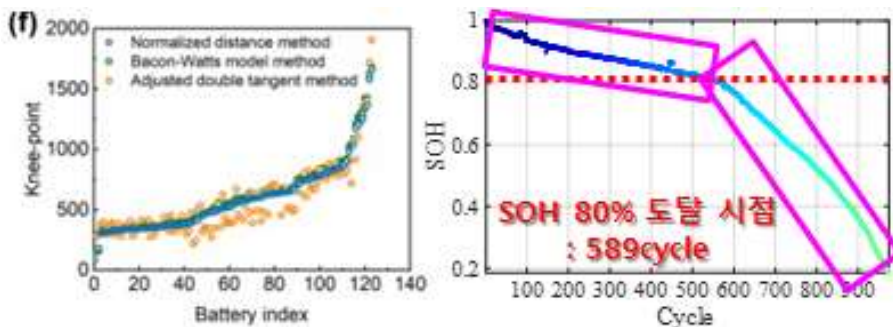


그림 16 33j 열화 데이터 SOH 경향

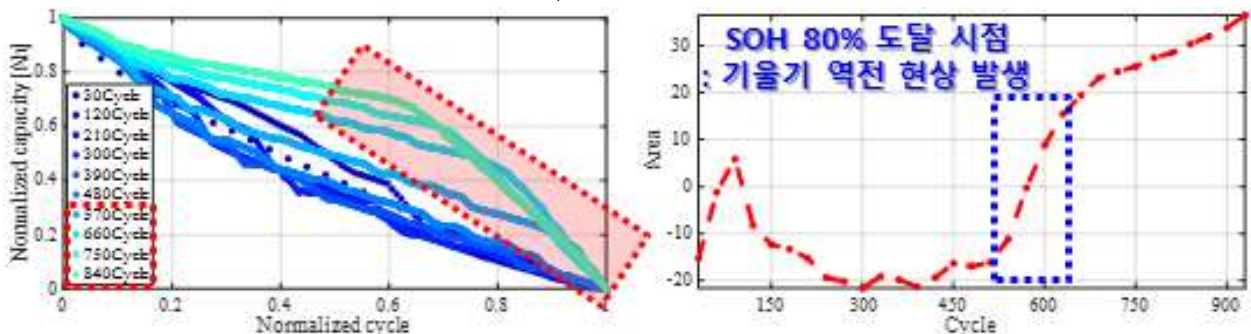


그림 17 충남대학교 연구실 보유 33j 데이터 기반 SoNA 면적 계산 결과