

# 가중치 적용 Savitzky-Golay 필터 기반 IC curve 도출을 통한 V2G 충전 패턴에 따른 리튬이온 배터리 열화 메커니즘분석

공태현\*, 이미영\*, 김종훈\*  
 충남대학교 에너지저장변환연구실\*

## Weighted Savitzky-Golay Filter-Based IC Curve Derivation for Analysis of Lithium-Ion Battery Degradation Mechanism According to V2G Charging and Discharging Patterns

Taehyeon Gong\*, Miyoung Lee\*, Jonghoon Kim\*  
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University\*

### ABSTRACT

본 논문은 V2G(Vehicle-to-Grid) 패턴에 따른 열화 메커니즘 분석을 위하여 Gaussian Weighted Savitzky-Golay Filter(SGW) 기반 ICA(Incremental capacity analysis) 분석 방법을 제안한다. 기존 SG 또한 열화 메커니즘을 정량적으로 분석을 진행하였고 각각의 리튬 손실(Loss of lithium inventory; LLI), 활물질 손실(Loss of active material; LAM)은 약 5%, 2% 발생하였고 V2G 충전 패턴에 따라 발생하는 주요 열화 메커니즘은 LAM인 것으로 확인하였다.

### 1. 서론

친환경 에너지 발전으로의 변화와 이에 따른 전기 자동차를 이용한 전력 공급 및 저장하는 기술인 V2G(Vehicle-to-Grid) 기술의 중요성이 부각되고 있다. V2G에 따른 추가적인 충전은 배터리의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문은 V2G 충전 패턴에 따른 배터리의 열화 메커니즘을 증분 용량 분석(Incremental capacity analysis; ICA) 기반으로 진행하였다. ICA는 전기적 신호를 바탕으로 전기화학적인 배터리 열화 메커니즘을 분석할 수 있다. 그러나 이 기법은 측정 과정에서 발생하는 노이즈에 취약한 단점이 존재한다. ICA를 활용하여 배터리의 열화 메커니즘을 정밀하게 분석하기 위해서는 정확한 측정이 필요하며, 이를 위해 필터 알고리즘 등의 처리가 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 Gaussian Weighted Savitzky-Golay Filter(SGW) 필터 알고리즘을 적용한 ICA 기법을 활용하여 V2G 충전 패턴에 따른 배터리 열화를 분석하고, 이를 통해 V2G 패턴에 따른 열화 메커니즘을 분석 진행하였다.

## 2. V2G 패턴에 따른 배터리 열화 및 ICA 분석을 위한 전기적 특성 실험

### 2.1 V2G 충전 패턴 설계

본 논문에서 실제 전기 자동차 사용자의 일주일간 주행 패턴을 고려하여 그림 1과 같이 실험 프로파일을 설계했다. 평일 경우 UDDS(Urban dynamic drivings), 주말의 경우 HWFET(High way fuel economy test) 속도 프로파일로 설계하였다. C-rate 조절을 및 휴지 시간 제어를 통하여 가속 열화를 구현하였고 V2G 가속 패턴의 경우 주 5회, V2G 일반 패턴의 경우 주 2회 충전으로 설계 하였다.

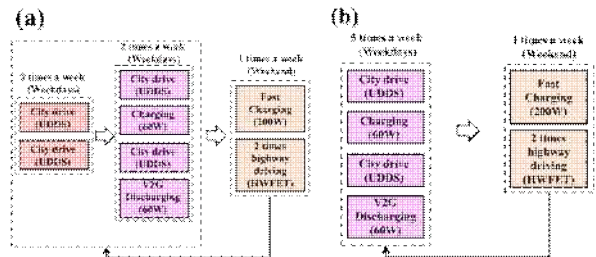


그림 1 (a) V2G 가속 패턴 주행 프로파일, (b) V2G 일반 패턴 주행 프로파일  
 Fig. 1 (a) V2G Savage Pattern Driving Profile, (b) V2G Nomal Pattern Driving Profile

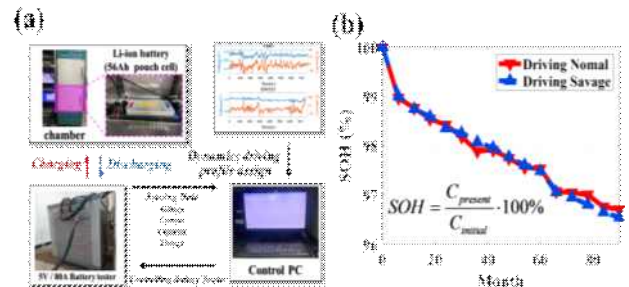


그림 2 (a) EV 주행 고려 V2G 패턴에 따른 전기적 특성 실험 구성, (b) V2G 패턴에 따른 SOH  
 Fig. 2 (a) Experimental Setup for EV Driving Considerations in V2G Patterns, (b) SOH according to V2G pattern

## 2.2 실험 구성 및 V2G 패턴에 따른 열화 메커니즘 분석을 위한 전기적 특성 실험

배터리는 C-rate/온도/방전 심도(Depth of discharge; DOD), SOC 등 여러 환경 조건에 따라 그 열화 메커니즘이 상이하다. 본 논문에서는 V2G 패턴에 따른 열화 메커니즘 분석을 위하여 그림 2(a)와 같이 항온 항습 챔버를 통한 상온(25°C), 충전/방전, 이를 제어 및 데이터 수집을 위한 PC가 사용되었다. 실험 프로파일은 V2G 환경을 고려 실제 주행을 모사한 가속 열화 프로파일을 통하여 배터리 열화 실험을 진행하였고 각 사이클마다 Cell 성능 평가 시험(Reference performance test; RPT)을 진행하여 전기적 특성을 추출 및 평가하였으며 SOH는 그림 2(b)에 나타났다. SOH는 가속 패턴의 경우 96.6%, 일반 패턴의 경우 96.7%로 나타났다.

### 3. 가중치 적용 ICA 기반 V2G 충방전 패턴에 따른 열화 메커니즘 분석

#### 3.1 Gaussian weighted Savitzky-Golay Filter(SGW) 기반 IC curve 도출

V2G 충방전 패턴에 따른 리튬이온 배터리의 열화 메커니즘 분석을 위하여 용량 실험의 방전 구간에서 식 (1)을 통하여 IC Curve를 도출하였다. ICA는 IC Curve를 통해 도출되는 각 Peak, Area 변화 분석을 통하여 열화 메커니즘을 분석하는 기법이다. 원본 IC 데이터는 과도한 노이즈를 포함하고 있기 때문에 필터링 기법인 Savitzky-Golay(SG) 필터에 Gaussian Weight를 적용하여 노이즈 제거를 진행했다.<sup>[1]</sup> SG는 식 (2),(4)로 도출되며 식 (5)에서 도출된 Gaussian Weight을 적용한 SGW는 식 (3),(4)를 통해 도출 했다. 그림 3과 같이 SGW는 SG 대비 발생하는 최대 오차를 0.09%에서 0.025%로 개선했다.

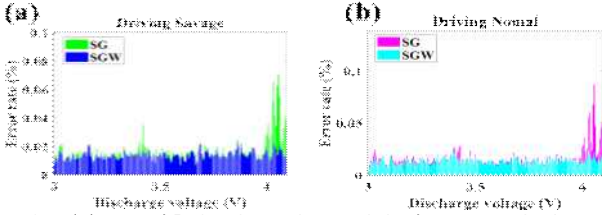


그림 3 (a) V2G 가혹패턴의 SG 및 SGW 필터 적용 ICA 오차 비교, (b) V2G 일반패턴의 SG 및 SGW 필터 적용 ICA 오차 비교  
Fig. 3 (a) Comparison of ICA Errors with SG and SGW Filters in V2G Savage Patterns, (b) Comparison of ICA Errors with SG and SGW Filters in V2G Nomal Patterns

$$\frac{dQ}{dV} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V} = I \cdot \frac{dt}{dV} \quad (1)$$

$$\sum_{j=-m}^m (y_{i+j} - P(x_{i+j}))^2 \quad (2)$$

$$\sum_{j=-m}^m w_{i+j} (y_{i+j} - P(x_{i+j}))^2 \quad (3)$$

$$\hat{y}_i = \sum_{j=0}^n \sum_{i=-m}^m c_j y_{i+j} \quad (4)$$

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(i-k)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

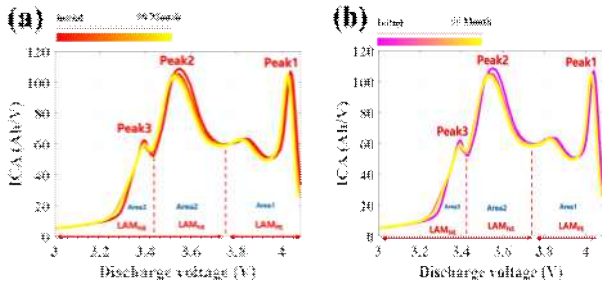


그림 4 (a) V2G 가혹 패턴 열화에 따른 IC curve 변화, (b) V2G 일반 패턴 열화에 따른 IC curve 변화  
Fig. 4 (a) Changes in IC curve due to deterioration of V2G Savage pattern, (b) Changes in IC curve due to deterioration of V2G Nomal pattern

표 1 IC Peak 기반 열화 메커니즘 분석 방법  
Table 1 Analysis of IC Peak-based degradation Mode

Degradation mode	ICA Peaks		
	①	②	③
LLI	↓	↓ / ←	←
LAM <sub>PE</sub>	←	↓	↓
LAM <sub>NE</sub>	↓	↓	↓

$$G_{LAM} = \frac{\left| \max\left(\frac{dQ}{dV}\right) \Big|_1 - \left| \max\left(\frac{dQ}{dV}\right) \Big|_n \right|}{\left| \max\left(\frac{dQ}{dV}\right) \Big|_1} \quad (6)$$

$$G_{LLI} = \frac{\left| \max(Q) \Big|_1 - \left| \max(Q) \Big|_n \right|}{\left| \max(Q) \Big|_1} \quad (7)$$

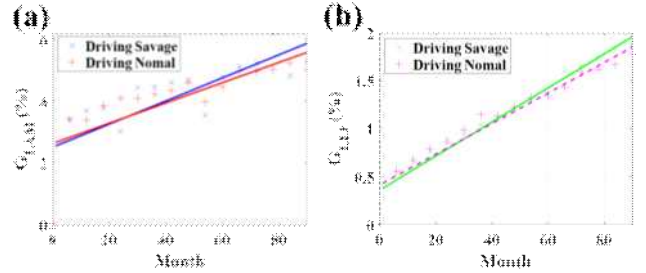


그림 5 (a) V2G 패턴에 따른 LAM 감소율, (b) V2G 패턴에 따른 LLI 감소율  
Fig. 5 (a) LAM reduction rate according to V2G pattern, (b) LLI reduction rate according to V2G pattern

#### 3.2 ICA 기반 V2G 패턴에 따른 열화 메커니즘 분석

SGW 기반 열화에 따른 IC curve는 그림 4와 같이 도출 진행하였다. 리튬이온 배터리의 열화 메커니즘은 표 1을 통하여 분석 진행하였다. V2G 가혹 및 일반 조건에서 모두 Peak 1은 아래로 감소하지만, 왼쪽으로 이동하는 것은 거의 볼 수 없다. 이를 통하여 Peak 1은 LLI, LAM<sub>NE</sub>의 감소가 발생했음을 알 수 있고, Peak 2,3의 왼쪽으로 이동 및 Peak의 감소를 통하여 LLI, LAM<sub>PE</sub>, LAM<sub>NE</sub> 모두 발생했음을 알 수 있다. 또한 식 (6),(7)을 통하여 각 열화 메커니즘에 대한 정량적 분석을 진행했다.<sup>[2]</sup> 그림 5와 같이 LLI, LAM은 가혹조건이 모두 컸으며 LAM은 0.29%, LLI는 0.1% 크게 나타났다. 또한 두 패턴 모두 LAM의 경우 5% 정도 발생하였고 LLI의 경우 2% 정도 발생한 것으로 보아 V2G 패턴에 따른 주요 열화 메커니즘은 LAM으로 나타난다.

### 4. 결론

V2G 충방전 패턴에 따른 열화 메커니즘 분석 결과는 V2G 가혹 조건이 일반 조건에 비해 LAM은 0.29%, LLI은 0.1% 크게 나타났다. SOH가 94% 정도 진행되어 V2G 패턴에 따른 완전한 열화 메커니즘을 분석할 수 없었다. 하지만 두 패턴 모두 LAM이 지배적인 열화 메커니즘임을 확인 할 수 있었다. 향후 추가적인 실험을 통하여 배터리 열화를 진행하여 열화 메커니즘 분석을 진행할 예정이다.

본 논문은 산업기술평가관리원의 재원으로 인지컨트롤스(No. 20015572, 전기차 급속 충전 및 고출력 운전 대응을 위한 상변화 물질 적용 배터리 팩 열관리 기술 개발) 및 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. 2022-1711152629, 대규모 분산 에너지 저장장치 인프라의 안전한 자율운영 및 성능 평가를 위한 지능형 SW 프레임 워크 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

### 참고 문헌

- [1] Oxby, Paul W. "An Optimal Weighting Function for the Savitzky-Golay Filter." arXiv preprint arXiv:2111.11667 (2021).
- [2] Maures, Matthieu, et al. "Impact of temperature on calendar ageing of Lithium-ion battery using incremental capacity analysis." Microelectronics Reliability 100 (2019): 113364.