

# 데이터 표준화를 통한 전기자동차용 리튬이온배터리의 열화 평가 알고리즘

노성은, 정재범, 곽충근, 박찬욱, 노대석  
한국기술교육대학교  
e-mail:roseongun@naver.com

## Deterioration Evaluation Algorithm of Li-ion Battery for EV through Data Standardization

Seong-Eun Rho, Jae-Beom Jung, Chung-Guen Kwak, Chan-Wook Park, Dae-Seok Rho  
Korea University of Technology and Education

### 요약

리튬이온배터리는 상대적으로 높은 에너지 밀도와 장기 수명 특성 등의 우수한 성능을 가지고 있어, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)와 전기자동차(EV, electric vehicle)에 주로 사용되고 있다. 하지만, 최근 ESS 화재사고가 빈번하게 발생하고 있어, 리튬이온배터리의 안전성을 강화하기 위한 체계적인 연구의 필요성이 요구되고 있다. 여기서, ESS와 전기자동차 등에서 주로 적용되는 중대형 리튬이온배터리는 크게 파우치형과 각형으로 분류되며, 배터리 내부 및 외부 형태에 따라 서로 다른 열화특성을 가지고 있다. 이에 따라 수백 사이클 단위의 충·방전 시험을 수행하는 경우, 시험 데이터는 배터리의 형태에 따라 분석 과정에서 편차가 발생하여, 동일한 조건에서 배터리의 열화 특성을 비교 및 분석하기 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위하여, 리튬이온배터리의 형태에 따른 열화 특성을 제시하고, 배터리의 충·방전 Raw 데이터 모델링을 수행한다. 또한, 선형보간법을 바탕으로 수치해석 상용 프로그램인 MATLAB S/W를 사용하여 리튬이온배터리의 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있는 열화 평가 알고리즘을 제안한다. 상기의 모델링 및 알고리즘을 바탕으로 중대형 배터리의 열화 특성을 평가한 결과, 배터리 열화율은 배터리의 형태에 따라 주변온도, 배터리의 내부구조, 열전도성 등의 다양한 요인에 영향을 받을 수 있음을 알 수 있었다.

### 1. 서론

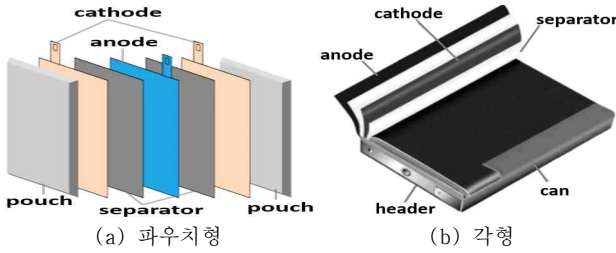
다양한 종류의 이차전지 중 리튬이온배터리는 상대적으로 높은 에너지 밀도와 장기수명 등의 우수한 성능으로 인해 에너지저장장치와 전기자동차 등에서 활발하게 사용되고 있다. 여기서, 리튬이온배터리는 내부 및 외부 형태에 따라 상이한 열화 특성을 가지며, 열화 특성은 주변온도와 열전도에 따라 다르게 발생할 가능성이 있고, 높은 주변 온도환경에서 충·방전을 수행할 경우 용량[Ah] 감소의 원인이 된다[1]. 이에 따라 중대형 배터리는 충·방전 시험 시 Raw 데이터를 분석하는 과정에서 편차가 발생하여, 동일한 조건에서 배터리의 열화 특성을 비교 및 분석하기 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위하여, ESS와 전기자동차 등에서 주로 적용되는 중대형 리튬이온배터리의 형태에 따른 열화특성을 제시하고, 배터리의 충·방전 Raw 데이터 모델링을 수행한다. 또한, 선형보간법을 바탕으로 수치해석 상용프로그램인 MATLAB S/W를 사용하여 배터리의 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있는 열화 평가 알고리즘을 제안한다. 이를 바탕으로 중대형 배터리의 열화 특성을 평가한 결과,

배터리 열화율은 배터리의 형태에 따라 주변온도, 배터리의 내부 구조, 열전도성 등의 다양한 요인에 영향을 받을 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

### 2. 전기자동차용 리튬이온배터리 형태에 따른 구조적 열화 특성

전기자동차용 리튬이온배터리는 상대적으로 높은 에너지 밀도와 장기 수명 등의 우수한 성능으로 인해 에너지저장장치(ESS, energy storage system)와 전기자동차(EV, electric vehicle)에 사용되고 있다. 여기서, ESS와 전기자동차 등에서 주로 적용되는 전기자동차용 리튬이온배터리는 그림 1과 같이 크게 파우치형과 각형으로 분류되며, 배터리 내부 및 외부 형태에 따라 서로 다른 열화특성을 가지고 있다. 먼저, 파우치형 배터리는 내부에 빈 공간이 적기 때문에 내부의 열 관리가 비교적 어려운 구조이며, 외부는 얇은 파우치 필름으로 밀봉되어 있어 열전도가 금속에 비해 비교적 낮아 주변온도에 따른 영향이 적은 편이다. 또한, 각형 배터리는 내부에 빈 공간이 존재하기 때문에 내부의 열관리가 파우치형보다 비교적

쉬운 구조이며, 외부는 파우치 필름에 비해 열전도가 높은 알루미늄 금속(can)으로 밀봉되어 주변온도에 따른 영향을 받기 쉬운 편이다. 이러한 내부 및 외부 형태에 따른 배터리의 열화 특성은 주변 온도와 열전도에 따라 다르게 발생할 가능성이 있으며, 높은 주변 온도환경에서 충·방전을 수행할 경우 용량[Ah] 감소의 원인이 되므로, 배터리의 형태 및 주변 온도에 따른 열화 특성 해석이 요구됨을 알 수 있다.



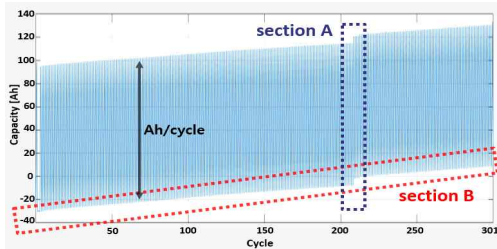
[그림 1] 전기자동차용 리튬이온배터리의 구조

### 3. 데이터 표준화를 통한 전기자동차용 리튬이온배터리의 열화 평가 알고리즘

#### 3.1 충·방전 시험 데이터의 평가방안

##### 3.1.1 Raw 데이터의 특성

서로 다른 형태의 배터리 열화 특성은 수백 사이클 단위의 충·방전 시험을 통하여 방전용량[Ah]의 변화에 따른 배터리의 열화율을 비교하여 평가한다. 그러나, 수백 사이클 단위의 충·방전 Raw 데이터의 배터리 용량 특성은 충·방전 사이클에 따라 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 사이클 당 용량(Ah/cycle)은 충전 및 방전 시에 각각 양의 값과 음의 값으로 적산하여 산정한다. 여기서, 그림 2의 section A와 같이, 충·방전 Raw 데이터는 분석 과정에서 편차 등으로 인해 부정확하게 처리될 가능성이 있다. 또한, 그림 2의 section B는 충전 용량과 방전용량의 차이로 인하여, 충·방전 사이클이 증가함에 따라 잔량이 누적되어 배터리의 열화율을 평가하는데 오차를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 2] 사이클에 따른 충·방전 시험 데이터 용량특성

한편, 제조사별로 배터리의 구성, 전압 범위, 시험방법 등이 상이하기 때문에, 동일한 조건에서 서로 다른 형태를 갖는 배터리는 표 1과 같이 열화 특성을 비교 및 분석하기 어려운 실

정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위하여, 충·방전 Raw 데이터를 대상으로 선형보간법을 통해 데이터 처리 과정에서 발생할 수 있는 부정확한 데이터를 보정하고, 이를 바탕으로 배터리의 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있는 열화 평가 알고리즘을 제시한다.

[표 1] 제조사별 충·방전 데이터 구성

type	제조사	시험방법	용량 [kwh]	전압범위 [v] [정격]	구성	c-rate
cell	A	152 사이클 50~100% 충·방전	0.2379	3.66~4.26 [3.7]	-	0.3C (18.9A)
	B	105 사이클 50~100% 충·방전	0.2331	3.85~4.18 [3.7]	-	0.5C (31.5A)
	C	105 사이클 50~100% 충·방전	0.2331	2.5~4.2 [3.66]	-	0.5C (32.5A)
module	A	300 사이클 0~100[%] 충·방전	6.5268	42~58.8 [51.8]	14S 2P	0.3C (37.8A)
	B	300 사이클 0~100[%] 충·방전	3.552	48~65.6 [59.2]	16S 1P	0.5C (30A)
	D	103 사이클 0~100[%] 충·방전	10.445	48~54.8 [51.2]	16S 2P	0.5C (102A)

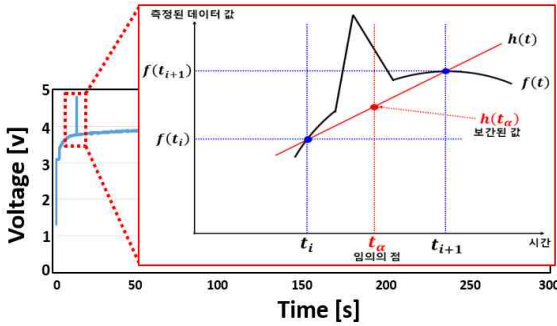
##### 3.1.2 선형보간법을 통한 데이터 표준화

데이터 처리 과정에서 발생한 부정확한 데이터는 일반적으로 충·방전 데이터를 측정하는 장비의 오차와 시험조건에 따른 편차로 인해 발생되며, 분석 결과의 신뢰성을 낮출 가능성이 있다. 상기의 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 수치 해석 상용프로그램인 MATLAB S/W를 사용하여, 데이터를 보정하는 선형보간법을 적용하여, 충·방전 Raw 데이터의 처리와 분석을 수행한다. 먼저, 선형보간법은 그림 3과 같이, 2개의 Raw 데이터 값을 통과하는 직선 형태의 보정 함수( $h(t)$ )를 구하고, 임의의 변수값에 대한 해를 산정하는 방식이다. 여기서, 원함수  $f(t)$ 는 임의의 변수  $n$ 개의 점  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 에 대한 함수값이며, 보정 함수  $h(t)$ 는 식 (1)과 같이 원함수  $f(t)$ 의 임의의 두 점( $t_i, f(t_i)$ )과 ( $t_{i+1}, f(t_{i+1})$ )을 지나는 직선으로 나타낸다. 또한, 부정확한 데이터의 임의의 점  $t_\alpha$ 에 대한 원함수 값은  $f(t_\alpha)$ 이지만, 선형보간법을 이용하여 추정치 값을 산정하면  $h(t_\alpha)$ 와 같다. 따라서, 본 논문에서는 데이터 처리 과정에서의 손실 및 에러로 생성된 부정확한 데이터를 선형보간법을 통해 가공, 처리하여, 충·방전 Raw 데이터에 대한 오차를 최소화하는 방안을 제시한다.

$$h(t) = \frac{f(t_{i+1}) - f(t_i)}{t_{i+1} - t_i} * (t - t_i) + f(t_i) \quad (1)$$

여기서,  $h(t)$  : 임의의  $t$ 값에 대한 선형보간 값,  $f(t)$  : 임

의  $t$ 값에 대한 원함수 값,  $t_i$  :  $i$ 번째 시간,  $t_{i+1}$  :  $i+1$ 번째 시간,  $i$  :  $0 \sim M$ 사이의 임의의 수,  $M$  : 데이터 샘플링 범위



[그림 3] 선형보간법

### 3.2 열화 평가 알고리즘

상기에서 제시한 바와 같이, 충·방전 Raw 데이터를 바탕으로 서로 다른 형태의 배터리 열화 특성의 평가는 표준모델이 없기 때문에 오차가 발생할 확률이 높다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 충·방전 시험 데이터의 평가 모델링을 바탕으로 배터리의 열화 평가 알고리즘을 제시한다. 이에 대한 상세한 절차는 다음과 같다.

[Step 1] 충·방전 진행시간, 사이클 수, 배터리의 전압, 전류, 온도 등의 수집된 배터리의 충·방전 Raw 데이터를 정의된 데이터 모델링에 맞게 표준화하고, 단위 사이클을 기준으로 분류한다.

[Step 2] [Step 1]에서 수행된 표준화 데이터를 바탕으로, 데이터 보정이 필요한 경우에는 [Step 3]으로 이동하고, 필요하지 않은 경우에는 [Step 4]로 진행한다.

[Step 3] 데이터 처리 과정에서의 손실 및 에러로 생성된 부정확한 데이터는 식 (1)의 선형보간법에 의하여 보정을 수행하고, [Step 4]로 진행한다.

[Step 4] 전체 시간대( $t_{max}$ )까지 [Step 2]와 [Step 3]의 절차를 반복하며, 전체 시간대( $t_{max}$ )까지 수행한다.

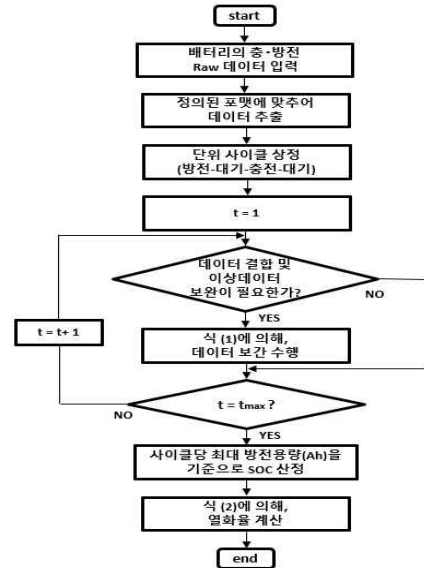
[Step 5] 충·방전 사이클에 따른 용량변화를 산정하기 위하여, 방전용량은 사이클마다 정의된 포맷에 저장하고, 충전 용량은 각 사이클의 초기값을 0으로 설정한다.

[Step 6] 방전용량[Ah]의 변화에 따른 배터리의 열화율을 하기의 식 (2)를 사용하여 산정한다.

$$D[\%] = \left(1 - \frac{Ah_{dis.fin}}{Ah_{dis.ini}}\right) * 100 \quad (2)$$

여기서,  $D[\%]$  : 배터리의 열화율,  $Ah_{dis.fin}$  : 배터리의 최종 방전용량,  $Ah_{dis.ini}$  : 배터리의 초기 방전용량

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우 차트로 나타내면 그림 4와 같다.



[그림 4] 전기자동차용 리튬이온배터리의 열화 평가 알고리즘

## 4. 시험 결과 및 분석

### 4.1 시험 조건

충·방전 시험은 KBIA 10104-03의 전기적 시험 기준에 따라 진행하며, 배터리의 형태별 충·방전 시험 조건을 나타내면 표 2와 같다. 또한, 데이터 포맷의 개수 차이는 해당 데이터에 파우치형 배터리의 온도항목이 존재하기 때문이다.

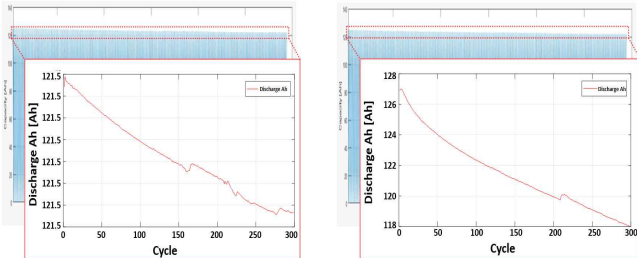
[표 2] 배터리의 형태별 충방전 시험 조건

	파우치형	각형
데이터 포맷 개수	15개	13개
충전 및 방전 샘플링 타임 [s]	1	1
휴지기간의 샘플링 타임 [s]	10	10
사이클 횟수	300	300
주변온도[°C]	23, 50	23, 50
SOC [%]	0-100	0-100
용량 [kwh]	6.53	3.55
전압범위 [V]	42 ~ 58.8	48 ~ 65.6
구성	14S 2P	16S 1P
충전 상한 전압 [V]	58.8 (6.3A Cut-off)	65.6 (3.0A Cut-off)
방전 중지 전압 [V]	42	48

## 4.2 배터리 형태별 열화 특성 분석

### 4.2.1 파우치형 배터리

주변 온도조건에 의한 배터리 형태별 열화 특성을 분석하기 위하여, 300 사이클을 수행한 파우치형 배터리의 주변온도 조건에 의한 충·방전 데이터 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5(a)는 23°C의 주변 온도조건에서 300cycle 충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 124.91~121.82Ah로 3.09Ah 감소되어, 배터리의 열화율은 2.36%로 산정됨을 알 수 있다. 또한, 그림 5(b)는 50°C의 주변 온도조건에서 300cycle 충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 126.28Ah~118.2Ah로 8.08Ah 감소되어, 배터리의 열화율이 7.02%로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 파우치형 배터리의 열화율은 23°C에 2.36%이고, 50°C의 경우 7.02%임을 알 수 있으며, 주변온도 조건에 따라 배터리의 열화율이 291[%] 증가됨을 알 수 있다.

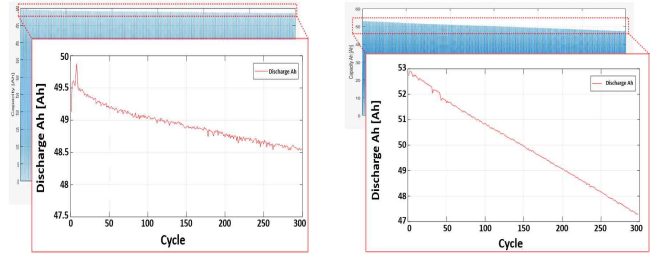


(a) 23°C에서의 방전용량 (b) 50°C에서의 방전용량

[그림 5] 파우치형 배터리의 사이클에 따른 방전용량

### 4.2.2 각형 배터리

주변 온도조건에 의한 배터리 형태별 열화 특성을 분석하기 위하여, 300 사이클을 수행한 각형 배터리의 주변온도 조건에 의한 충·방전 데이터 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6(a)는 23°C의 주변 온도조건에서 300cycle 충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 49.13~48.55Ah로 0.58Ah 감소되어, 배터리의 열화율은 1.21%로 산정됨을 알 수 있다. 또한, 그림 6(b)는 50°C의 주변 온도 조건에서 300cycle 충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 52.73~47.72Ah로 5.01Ah 감소되어, 배터리의 열화율이 10.32%로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 각형 배터리의 열화율은 23°C에 1.21%이고, 50°C의 경우 10.32%임을 알 수 있으며, 주변온도 조건에 따라 배터리의 열화율이 858[%] 증가됨을 알 수 있다.



(a) 23°C에서의 방전용량 (b) 50°C에서의 방전용량

[그림 6] 각형 배터리의 사이클에 따른 방전용량

## 4.3 종합분석

상기에서 분석한 파우치형과 각형 배터리의 주변온도에 따른 열화특성을 정리하면 표 3과 같다. 여기서, 23°C의 경우, 배터리의 열화는 각형에 비해 파우치형 배터리에 더 크게 발생함을 알 수 있다. 즉, 내부의 열관리가 비교적 쉬운 구조인 각형 배터리에 비해, 파우치형 배터리는 내부 빈 공간이 적기 때문에 주변온도 보다 내부온도의 영향이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한, 50°C의 경우, 배터리의 열화는 파우치형에 비해 각형 배터리에 더 크게 발생함을 알 수 있다. 즉, 각형 배터리의 경우, 외함이 알루미늄 금속으로 밀봉되어, 금속에 비해 비교적 낮은 열전도를 가진 얇은 파우치 필름으로 덮여있는 파우치형 배터리에 비해, 내부온도보다 주변온도의 영향이 크게 발생함을 알 수 있다.

[표 3] 주변온도 조건에 따른 배터리 형태별 열화특성

종류	파우치형		각형	
주변온도[°C]	23	50	23	50
열화율[%]	2.36	7.02	1.21	10.32

## 5. 결 론

본 논문에서는 선형보간법을 통해 데이터 처리 과정에서 발생한 부정확한 데이터를 보정하고, 표준화된 포맷으로 분류하여 배터리의 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있는 열화 평가 알고리즘을 제시한다. 이를 바탕으로, 데이터 포맷이 상이한 충·방전 시험 데이터를 표준화하여 열화 특성을 분석한 결과, 동일한 조건으로 열화율을 비교 및 분석할 수 있어, 본 논문에서 제시한 배터리 열화 평가 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 이민행, 이예빈, 유현상, 김기영, 노대석, "MATLAB/SW를 이용한 배터리 충·방전 시험의 데이터 표준화 알고리즘에 관한 연구", 대한전 기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, 105-106P, 2022.10