

MATLAB S/W를 이용한 배터리 형태에 따른 열화율 평가 알고리즘

이민행, 이예빈, 임민규, 조성덕, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:dlalsgod97@koreatech.ac.kr

An Evaluation Algorithm of Degradation Rate for Battery Type Using MATLAB S/W

Min-Haeng Lee, Ye-Bin Lee, Min-Gyu Lim, Sung-Duck Cho, Dae-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요약

최근, 국내외에서 전기자동차(electric vehicle, EV)와 에너지저장장치(energy storage system, ESS)에 적용되는 중대형 배터리의 수요가 급격하게 늘어나고 있다. 이에 따라 관련 시장 규모도 기하급수적으로 증가하고 있지만, EV 및 ESS에서 빈번하게 발생하는 화재 사고로 인하여 중대형 배터리의 안전성 검증을 강화하기 위한 체계적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내 중대형 배터리 중에서 일반적으로 활용되는 NMC 계열의 각형 및 파우치형 배터리를 대상으로 서로 다른 외기온도 조건에서 수백 사이클의 충·방전 시험을 수행하고, 수집한 데이터를 바탕으로 온도에 따른 열화 특성을 분석한다. 또한, 배터리는 충·방전 사이클이 증가할수록 열화로 인하여, 충·방전 소요 시간이 감소하기 때문에 수집된 데이터의 오차가 발생할 가능성이 있으므로, 수치해석 프로그램인 MATLAB S/W를 사용하여 수집된 데이터 보간 및 1초 간격으로 측정된 데이터의 표준화를 수행한다. 이를 바탕으로 모듈 타입의 충·방전 시험을 수행한 결과, 알루미늄 캔으로 외함이 구성된 B사의 각형 배터리는 절연체로 코팅된 A사의 파우치형 배터리에 비해 고온에서 열화율이 높으며 외부 환경온도의 영향이 큰 것을 알 수 있었다.

1. 서론

일반적으로 배터리는 설계 조건과 필요 사양에 따라 단위 셀을 형성하고, 모듈과 팩의 형태로 구성된다. 그리고, ESS와 전기자동차 등에서 사용되는 중대형 배터리는 크게 벽돌 형태의 각형과 얇은 카드 형태의 파우치형 배터리로 구분되며, 서로 다른 전기적 특성을 가지고 있다[1]. 이때, 부분적으로 모듈에 열화가 발생할 경우, 열화가 가장 빠르게 진행된 모듈이 과충전 및 과방전 위험에 노출될 수 있으므로, 이러한 현상을 검증하기 위한 실험적인 연구가 요구되고 있다[2]. 여기서, 배터리의 특성을 분석하기 위해서는 수백 사이클 단위의 1충·방전 데이터가 필요하지만, 배터리의 충·방전 사이클이 증가할수록 배터리의 열화에 따른 충·방전 소요 시간이 감소하기 때문에, 수집된 데이터의 오차가 발생한다. 또한, 수집된 Raw data는 제조사의 배터리 형태별로 충·방전 c-rate, 시료 개수, 그리고 측정된 샘플링 타임과 사이클 수가 모두 다르기 때문에, 그에 따른 데이터 표준화가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 국내 중대형 배터리에 사용되는 배터리 중 범용으로 활용되는 NMC계열 각형 및 파우치형 배터리를 대상으로

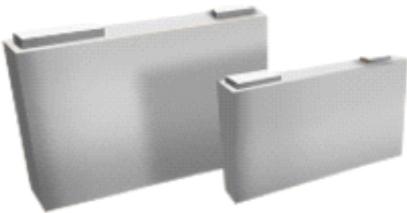
23°C와 50°C의 외기온도 조건에서 충·방전 사이클을 반으로 적용하여 얻은 데이터를 열화 특성 분석 알고리즘을 이용하여, 온도에 따른 열화를 분석한다. 배터리의 열화 분석은 일정한 사이클 단위로 성능시험의 결과값을 보간법을 통하여 표준화하여 성능변화를 확인하고, 배터리의 열화에 따른 상관관계를 분석한다. 시뮬레이션을 수행한 결과, A사의 경우, 열화율은 23°C 및 50°C에서 각각 열화율 2.356[%], 7.017[%]임을 알 수 있다. 또한, B사의 경우, 23°C에서는 열화율이 1.212[%]로 A사에 비해 낮지만, 50°C에서는 열화율이 10.317[%]로 높은 외기온도 조건에서 열화현상이 A사에 비해 더 크게 발생한 것을 알 수 있다. 따라서, 외기온도 조건에 따른 배터리의 열화 특성을 확인할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

2. 배터리 형태에 따른 특성

2.1 각형(Prismatic-type) 배터리

ESS와 전기자동차 등에서 사용되는 중대형 배터리는 크게 벽돌 형태의 각형과 얇은 카드 형태의 파우치형으로 나누어

지며, 서로 다른 형태의 배터리 특성을 가지고 있다. 먼저, 각형 배터리는 그림 1과 같이 납작하고 각진 상자 모양을 가지며, 사각형이라는 모양적 특성으로 소재를 적층해 공간을 활용하기 때문에 외부 공간 활용 측면에서 장점이 있다. 하지만, 각형 배터리 내부에는 양극과 음극, 분리막 등의 배터리 소재를 쌓은 뒤 돌돌 말아 만든 젤리롤을 탑재하기 때문에, 외형은 사각이지만 젤리롤은 원형이므로 내부 공간 활용 측면에서 불리하고, 에너지 밀도가 상대적으로 낮은 특성이 있다. 또한, 배터리의 외부는 알루미늄 캔으로 둘러싸여 내구성이 뛰어나고 안전성이 높지만, 온도 전도도가 높은 알루미늄 금속 외관을 사용하고 있어 냉각 효과는 좋지만, 열 방출이 어려워 냉각 장치를 별도로 설계한다는 단점이 있다.



[그림 1] 각형 배터리

2.2 파우치형(Pouch-type) 배터리

파우치형 배터리는 그림 2와 같이 얇은 카드 형태의 형상으로 배터리 소재를 필름으로 패키징 한 형태를 가지며 내부 공간 활용 측면에서 장점이 있다. 한편, 각형 배터리와는 달리 젤리롤을 사용하지 않고 소재를 겹층으로 쌓아 올린 구조이므로 에너지 밀도가 상대적으로 높지만, 사용되지 않는 공간이 적어 열 관리가 어렵다. 또한, 파우치형은 배터리 셀을 모듈로 만드는 과정에서 각 셀을 보호하는 금속을 추가해야 하므로, 내구성이 떨어지고 열에 취약한 단점이 있다.



[그림 2] 파우치형 배터리

3. MATLAB S/W에 의한 배터리 열화 평가 알고리즘

3.1 Raw data 보간법

본 논문에서는 MATLAB S/W 내의 interp1 함수를 사용하여 데이터 가공 및 보간을 수행하고, 이를 바탕으로 1초 간격으로 가공된 전류, 전압, 온도 및 모듈별 출력 데이터를 표준화한다. 구체적으로, 배터리 충·방전 표준 데이터 ($f(t_c)$)는 식 (1)과 같다[3]. 따라서, 정의된 단위 사이클(방전-휴지-충전-휴지)을 바탕으로, 입력된 Raw data는 전체 충·방전 사이클에서 단위 사이클 중 충전 후, 방전 후, 휴지기간의 데이터에 대하여 식(1)을 사용하여, 1초 간격으로 데이터 가공 및 보간을 수행한다. 또한, 데이터 측정 과정에서의 데이터 손실, 에러로 인한 기록 중지, 사이클 마다 잔량 적산 등과 같이 데이터 결함 및 이상데이터 보완이 필요한 부분은 식(1)에 의해 데이터 보간을 수행한다.

$$f(t_c) = f(t_s) + \frac{f(t_e) - f(t_s)}{t_e - t_s} * (t_c - t_s) \quad (1)$$

여기서, $f(t_n)$: n번째 표준 데이터, t_n : n번째 시간, t_c : 표준화하고자 하는 시간 구간, t_s : 구간 시작 시간, t_e : 구간 마지막 시간, n : 0 ~ M사이의 임의의 수, M : 데이터 샘플링 범위의 수

3.2 열화 특성 분석 알고리즘

상기에서 제시한 MATLAB S/W의 interp1 함수의 선형보간법을 사용하여 배터리 충·방전 Raw data의 보간 및 표준화 과정과 모듈의 열화 분석 과정에 대한 상세한 절차는 다음과 같다.

[Step 1] 충·방전 진행시간, 샘플링 타임, 시료 및 사이클 수, 모듈의 전압, 전류, 온도 등의 배터리 충·방전 Raw data를 입력한다.

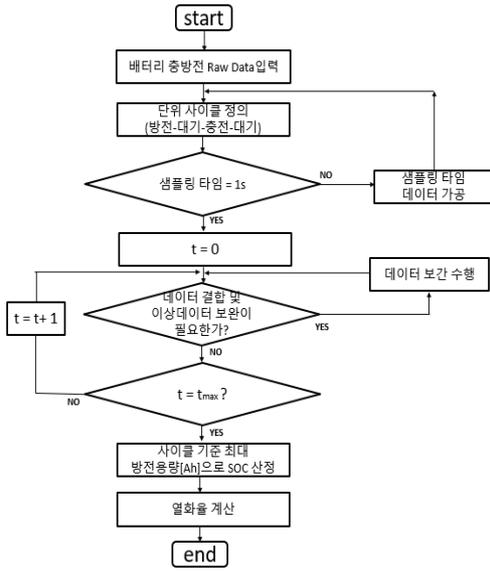
[Step 2] 단위 사이클(방전-휴지-충전-휴지)을 정의한 후, 샘플링 타임의 일관성을 위하여, 전체 충·방전 사이클에서 단위 사이클 중 충전 후, 방전 후, 휴지기간의 데이터에 대하여, 1초 간격으로 데이터를 가공한다.

[Step 3] [Step 2]에서 가공된 데이터의 정의된 단위 사이클(방전-휴지-충전-휴지)을 기준으로, 식(1)에 의해 데이터 결합 및 보완을 위한 데이터 보간을 수행한다.

[Step 4] 전체 시간대(t_{max})까지 [Step 3]의 절차를 반복한다.

[Step 5] 사이클 수에 따른 방전용량[Ah]의 감소(열화)를 확인할 수 있도록, 사이클 수를 기준으로 최대 방전용량[Ah]으로 SOC를 산정한다. 이를 바탕으로, 열화율을 계산한다.

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우 차트로 나타내면 그림 3과 같다.



[그림 3] 열화율 평가 알고리즘

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 국내 중대형 배터리에 사용되는 배터리 중 범용으로 활용되는 NMC 계열의 각형과 파우치형 배터리에 대하여, 23°C와 50°C의 일정한 외기온도에서 충·방전 사이클을 반복적으로 적용하여 수집한 데이터의 표준화를 적용한 후, 이를 바탕으로 온도에 따른 열화 특성을 분석한다. 제조사별 충·방전 시험 데이터는 표 1과 같다. 여기서, 배터리 타입은 모두 모듈형이며, 제조사는 A사와 B사로 나누어지며, 모든 충·방전 시험은 KBLA 10104-03의 전기적 시험 기준에 따라 시험한다. A사의 모듈 데이터는 14S 2P로 구성된 파우치형 모듈에 대해서 23°C, 50°C의 온도에서 각각 SOC 0~100%까지 약 300 사이클 동안 충·방전을 수행하였으며, 이때, c-rate는 0.3[c], 측정시간 단위는 1초이다. 그리고, A사의 SOC는 42V에서 0%이고, 58.8V에서 100%이며, 이 사이에서 완전충전 및 완전방전을 수행한다. 또한, B사의 모듈 데이터는 16S1P로 구성된 각형 모듈에 대해서, 23°C, 50°C의 온도에서 각각 SOC 0~100%까지 약 300사이클 동안 충·방전을 수행하였으며, 이때, c-rate는 0.5[c], 측정시간 단위는 1초이다. 그리고, B사의 SOC는 48V에서 0%이고, 65.6V에서 100%이며,

이 사이에서 완전충전 및 완전방전을 수행한다.

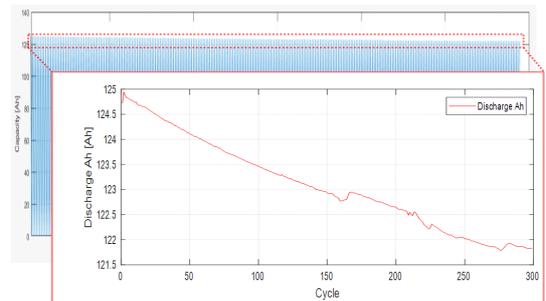
[표 1] 제조사별 충·방전 시험 데이터

	A사	B사
type	module	
형태	파우치형	각형
사이클 횟수	300사이클	
외부온도	23°C, 50°C	
SOC [%]	0-100	
샘플링 타임 [s]	1	
용량 [kwh]	6.5268	3.552
전압범위 [V]	42 ~ 58.8, (51.8)	48 ~ 65.6, (59.2)
구성	NMC 14S 2P	NMC 16S 1P
c-rate [C]	0.3 (37.8A)	0.5 (30A)
충전 상한 전압 [V]	58.8 (6.3A Cut-off)	65.6 (3.0A Cut-off)
방전 종지 전압 [V]	42	48

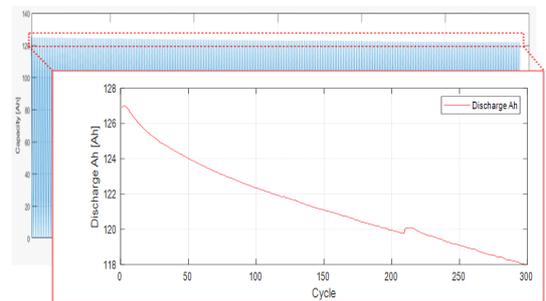
4.2 열화 특성 분석

4.2.1 A사의 배터리 열화특성

A사의 파우치형 배터리의 충·방전 데이터에서 사이클에 따른 방전용량[Ah] 감소 및 열화 특성을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4(a)는 23°C의 외기온도 조건에서 방전용량이 124.91Ah ~ 121.82Ah으로 열화율이 2.356%임을 알 수 있다. 또한, 그림 4(b)는 50°C의 외기온도 조건에서 방전용량이 126.28Ah ~ 118.2Ah으로 열화율이 7.017%임을 알 수 있다.



(a) 23°C에서의 방전용량

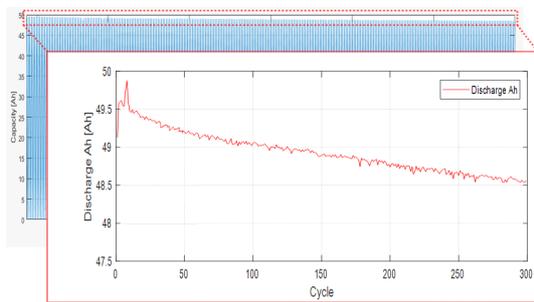


(b) 50°C에서의 방전용량

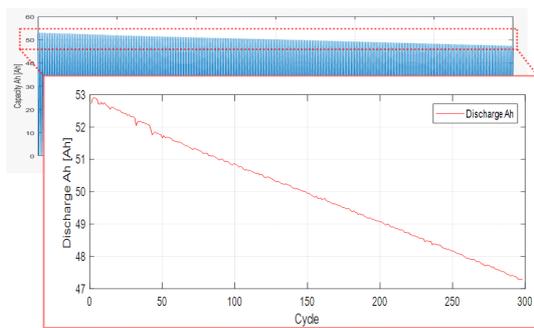
[그림 4] A사 모듈의 사이클에 따른 방전용량

4.2.2 B사의 배터리 열화특성

B사의 각형 배터리의 충·방전 데이터에서 사이클에 따른 방전용량[Ah] 감소 및 열화 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5(a)는 23°C의 외기온도 조건에서 방전용량이 49.13Ah ~ 48.55Ah으로 열화율이 1.212%임을 알 수 있다. 또한, 그림 5(b)는 50°C의 외기온도 조건에서 방전용량이 52.73Ah ~ 47.72Ah으로 열화율이 10.317%임을 알 수 있다. B사의 경우, 23°C의 외기온도 조건에서는 300 사이클 이후 열화율이 1.212%로 A사에 비해 낮지만, 50°C의 외기온도 조건에서는 열화율이 10.317%로 높은 온도 조건에서 열화현상이 A사에 비해 더 크게 발생한 것을 알 수 있다. 이는 c-rate의 차이에 영향이 있을 수 있지만, B사의 경우 각형 모듈의 외함이 알루미늄 캔으로 이루어져 절연체로 코팅된 A사의 파우치형 외함에 비해, 외부 환경온도의 영향이 큰 것으로 확인된다. 또한, 이온이 움직이며 화학 반응을 하는 배터리 셀 내부로의 열전도의 차이로 인한 영향으로 판단된다.



(a) 23°C에서의 방전용량



(b) 50°C에서의 방전용량

[그림 5] B사 모듈의 사이클에 따른 방전용량

4.3 종합분석

A사와 B사의 모듈별 충·방전 데이터의 표준화 결과를 정리하면 표 2와 같다. A사의 경우, 열화율은 23°C 및 50°C에서 열화율 2.356[%], 7.017[%]임을 알 수 있다. B사의 경우, 23°C에서는 300 사이클 이후 열화율이 1.212[%]로 A사에 비해 낮지만, 50°C에서는 열화율이 10.317[%]로 높은 외기온도 조건

에서 열화현상이 A사에 비해 더 크게 발생한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 c-rate의 차이에 영향이 있을 수 있지만, B사의 경우 각형 외함이 알루미늄 캔으로 이루어져 절연체로 코팅된 A사의 파우치형에 비해, 외부 환경온도의 영향이 큰 것으로 보이며, 배터리 셀 내부로의 열전도 차이로 인한 영향으로 확인된다.

[표 2] 제조사별 충·방전 데이터 분석결과

	A사		B사	
c-rate [C]	0.3 (37.8A)		0.5 (50A)	
온도 [°C]	23	50	23	50
열화율 [%]	2.356	7.017	1.212	10.317

5. 결 론

본 논문에서는 측정 항목 중, 열화 특성 분석을 위하여 배터리 상태추정기술과 잔존수명예측에 요구되는 항목만을 선별하여, 모듈별로 표준 데이터 항목을 제시하고, 표준화를 수행하였다. 특히, 샘플링타임이 서로 다른 경우 선형보간법을 이용하였으며, SOC 및 사이클별 열화율을 계산하였다. 모듈 타입의 충·방전 시험 결과, B사의 경우 각형 외함이 알루미늄 캔으로 이루어져 절연체로 코팅된 A사의 파우치형에 비해 고온에서 열화율이 높으며 외부 환경온도의 영향이 큰 것으로 확인되었다. 즉, 각형 셀로 구성된 모듈이 파우치형 셀로 구성된 모듈에 비해 배터리 셀 내부로의 열전도가 크기 때문에 발생한 현상으로 고려된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, No.20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 정재범, 임민규, 김진용, 노대석, “운용환경요인을 고려한 리튬이온전지의 외부단락 특성 연구”, 한국산학기술학회 논문지, Vol. 22, No. 8 pp. 663-672, 2021.
- [2] 최성문, 한병길, 이후동, 김미영, 노대석, “EV용 이동형 전원공급장치의 구형 및 경제성 평가에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, Vol. 21, No. 12 pp. 77-86, 2020.
- [3] 박재범, 김병기, 송석환, 노대석, “이차전지의 상태 감시 및 수명 예측 알고리즘 개발”, 한국산학기술학회 논문지, Vol. 14, No. 1 pp. 369-377, 2013.