

중대형 배터리의 형태에 따른 열화 패턴분석에 관한 연구

이민행¹, 김지명¹, 노성은¹, 유경상², 김찬수², 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교, ²한국에너지기술연구원 전력시스템연구팀

A Study on the Analysis of Deterioration Patterns by Battery Type

Min-Haeng Lee¹, Ji-Myung Kim¹, Seong-Eun Rho¹,
Kyung-Sang Ryu², Chan-Soo Kim², Dae-Seok Rho^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

²Korea Institute of Energy Research Electric Power System Research Team

요약 리튬이온배터리는 상대적으로 높은 에너지 밀도와 장기 수명특성 등의 우수한 성능을 가지고 있어, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)와 전기자동차(EV, electric vehicle) 등에 주로 사용되고 있다. 여기서, ESS와 EV 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 시험 장비, 저장 방식에 의해 편차가 발생하여, 동일한 조건에서 배터리의 열화 특성을 비교 및 분석하기 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위하여, ESS와 EV 등에서 주로 적용되는 중대형 리튬이온배터리의 형태에 따른 열화 특성을 제시하고, 배터리의 충·방전 Raw 데이터 모델링을 수행한다. 또한, 선형보간법을 바탕으로 수치해석 상용프로그램인 MATLAB S/W를 사용하여 중대형 배터리의 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.

Abstract Li-ion battery has excellent performance such as relatively high energy density and long lifespan, and is mainly used in ESS and EV market. Where, medium and large-sized Li-ion batteries are categorized into a pouch-type and a prismatic-type, which are mainly used in ESS and EV market, and they have different degradation characteristics depending on the internal and external structure. Therefore, in the case of performing charge and discharge with several hundred cycles, the test data may be difficult to compare and analyze the degradation characteristics of the battery under the same conditions, because it may be varied by test equipment and storage methods during the analysis process according to the type of the battery. Therefore, this paper propose the degradation characteristics based on the type of the Li-ion battery and performs the modeling of raw data to overcome the problems above mentioned. And also, this paper presents a degradation evaluation algorithm, which evaluates accurately the degradation characteristics of the medium and large-sized batteries based on the linear interpolation method using MATLAB S/W. From the simulation results based on the proposed modeling and algorithm, it is confirmed that the degradation rate of battery may be affected by various factors such as the ambient temperature, the internal structure of the battery, and thermal conductivity according to the type of battery.

Keywords : ESS, EV, Li-ion Battery, SOC, Charge Temperature, Module, Pouch-type, Prismatic-type, Interpolation Method, Raw Data

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원의 지원(20213030160080, (에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No. CPS22131-100)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received April 25, 2023

Revised June 1, 2023

Accepted June 2, 2023

Published June 30, 2023

1. 서론

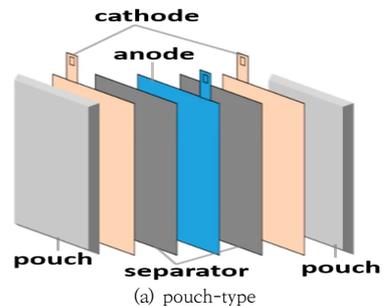
여러 종류의 이차전지 중 리튬이온배터리는 상대적으로 높은 에너지 밀도와 장기 수명특성 등의 우수한 성능으로 인해 에너지저장장치(ESS, energy storage system)와 전기자동차(EV, electric vehicle) 등에 주로 사용되고 있다. 여기서, ESS와 EV 등에서 주로 적용되는 중대형 리튬이온배터리는 크게 파우치형과 각형으로 분류되며, 배터리 내부 및 외부 형태에 따라 서로 다른 열화 특성을 가지고 있다. 먼저, 파우치형 배터리는 내부에 빈 공간이 적기 때문에 내부의 열관리가 비교적 어려운 구조이며, 외부는 얇은 파우치 필름으로 밀봉되어 있어 열전도가 금속에 비해 비교적 낮아 주변온도에 따른 영향이 적은 편이다[1]. 또한, 각형 배터리는 내부에 빈 공간이 존재하기 때문에 내부의 열관리가 파우치형보다 비교적 쉬운 구조이며, 외부는 파우치 필름에 비해 열전도가 높은 알루미늄 금속으로 밀봉되어 주변온도에 따른 영향을 받기 쉬운 편이다[2]. 이러한 내부 및 외부 형태에 따른 배터리의 열화 특성은 주변온도와 열전도에 따라 다르게 발생할 가능성이 있으며, 높은 주변 온도환경에서 충·방전을 수행할 경우 용량[Ah] 감소의 원인이 된다. 이에 따라 중대형 배터리는 충·방전 시험 시 Raw 데이터를 분석하는 과정에서 시험 장비, 저장 방식에 의해 편차가 발생하여, 동일한 조건에서 배터리의 열화 특성을 비교 및 분석하기 어려운 실정이다[3-5].

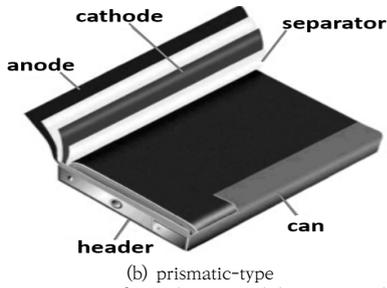
따라서, 상기의 문제점을 해결하기 위하여 본 논문의 2장에서는 ESS와 EV 등에서 주로 적용되는 중대형 리튬이온배터리의 형태에 따른 열화특성을 제시하고, 3장에서는 배터리의 충·방전 Raw 데이터 모델링을 수행한다. 또한, 선형보간법을 바탕으로 수치해석 상용프로그램인 MATLAB S/W를 사용하여 중대형 배터리의 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있는 열화 평가 알고리즘을 제안한다. 한편, 4장에서는 상기에서 제시한 모델링과 알고리즘을 바탕으로 중대형 배터리의 열화 특성을 평가한 결과, 배터리 열화율은 배터리의 형태에 따라 주변온도, 배터리의 내부구조, 열전도성 등의 다양한 요인에 영향을 받을 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

2. 중대형 배터리의 형태에 따른 구조적 열화 특성

리튬이온배터리는 상대적으로 높은 에너지 밀도와 장기 수명특성 등의 우수한 성능으로 인해 에너지저장장치와 전기자동차에 사용되고 있다. 여기서, ESS와 EV 등에서 주로 적용되는 중대형 리튬이온배터리는 Fig. 1과 같이 크게 파우치형과 각형으로 분류되며, 배터리 내부 및 외부 형태에 따라 서로 다른 열화특성을 가지고 있다. 먼저, 파우치형 배터리의 내부는 Fig. 1(a)와 같이, 양극(anode), 음극(cathode), 분리막(separator)이 얇은 층으로 구성되어 있어, 내부 공간 활용 측면에서 유리하여 에너지 밀도가 각형보다 상대적으로 높지만, 빈 공간이 적기 때문에 내부의 열관리가 비교적 어려운 구조를 가지고 있다. 또한, 파우치형 배터리의 외부는 얇은 파우치 필름으로 밀봉되어 있어 외부 충격에 대한 안전성은 떨어지지만, 열전도가 금속에 비해 비교적 낮아 주변온도에 따른 영향은 적은 편이다[6,7].

한편, 각형 배터리의 내부는 Fig. 1(b)와 같이 각진 금속상자(can) 속에 양극판과 음극판, 분리막이 젤리롤(jellyroll) 형태로 구성되는데, 내부 공간 활용 측면에서 불리하여, 에너지 밀도가 파우치형보다 상대적으로 낮은 구조이다. 하지만, 각형 배터리의 내부는 빈 공간이 존재하기 때문에 열관리가 파우치형보다 쉬운 장점을 가지고 있다. 또한, 각형 배터리의 외부는 알루미늄 금속(can)으로 밀봉되어 외부 충격에 대한 안전성이 높지만, 파우치형에 비해 열전도가 높은 금속을 사용하여 주변온도에 따른 영향을 받기 쉽고, 열 방출도 어려워 냉각 장치를 별도로 설치해야 하는 단점을 가지고 있다[8,9]. 이러한 내부 및 외부 형태에 따른 배터리의 열화 특성은 주변온도와 열전도에 따라 다르게 발생할 가능성이 있으며, 높은 주변 온도환경에서 충·방전을 수행할 경우 용량[Ah] 감소의 원인이 되므로, 배터리의 형태 및 주변온도에 따른 열화 특성 해석이 요구됨을 알 수 있다.





(b) prismatic-type
Fig. 1. Structure of medium and large-sized battery

3. 선형보간법을 이용한 중대형 배터리의 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[10]. 그러나, 수백 사이클 단위의 충·방전 Raw 데이터의 배터리 용량 특성은 충·방전 사이클에 따라 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 사이클 당 용량(Ah/cycle)은 충전 및 방전 시에 각각 양의 값과 음의 값으로 적산하여 산정한다. 여기서, Fig. 2의 section A와 같이, 충·방전 Raw 데이터는 분석 과정에서 편차 등으로 인해 부정확하게 처리될 가능성이 있다. 또한, Fig. 2의 section B는 충전용량과 방전 용량의 차이로 인하여, 충·방전 사이클이 증가함에 따라 잔량이 누적되어 배터리의 열화율을 평가하는데 오차를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

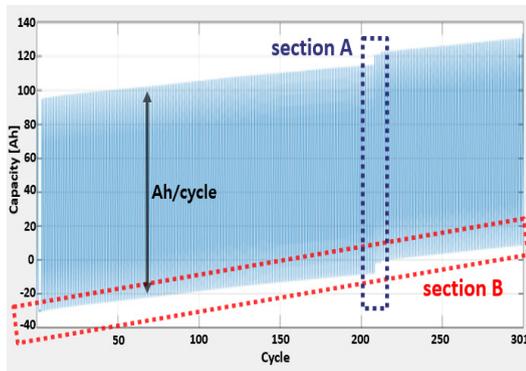


Fig. 2. Capacity characteristics of charge and discharge with cycles

한편, 제조사별로 배터리의 구성, 전압 범위, 시험방법 등이 상이하기 때문에, 동일한 조건에서 서로 다른 형태를 갖는 배터리의 열화 특성을 비교 및 분석하기 어려운 실정이다. 즉, Table 1과 같이, 배터리 제조사 별로 배터리의 구성, 전압 범위, c-rate 등 서로 다른 조건에 따라 충·방전 시험을 수행하므로, 각 제조사별 충·방전 데이터는 서로 상이한 특성을 나타낸다. 여기서, 배터리 셀에 대한 충·방전 시험은 제조사 A, B, C의 배터리를 각각 152, 105, 105 사이클을 진행한 것이며, 시험 방법은 SOC 50-100[%] 기준으로 전압 범위는 각각 3.66~4.26[V], 3.85~4.18[V], 2.5~4.2[V]이며, c-rate는 A의 셀 시험에서 18.9[A]로 0.3[c-rate], B의 셀 시험에서 31.5[A]로 0.5[c-rate], C의 셀 시험에서 32.5[A]로 0.5[c-rate]이다.

Table 1. The conditions of charge and discharge by manufacturers

type	manufac-turer	test method	rated capacity [kWh]	voltage range [V]	struct-ure	C-rate
cell	A	152 cycles SOC 50-100[%] charge/discharge	0.2379	3.66~4.26	-	0.3 (18.9[A])
	B	105 cycles SOC 50-100[%] charge/discharge	0.2331	3.85~4.18	-	0.5 (31.5[A])
	C	105 cycles SOC 50-100[%] charge/discharge	0.2331	2.5~4.2	-	0.5 (32.5[A])
module	A	300 cycles SOC 0-100[%] charge/discharge	6.5268	42~58.8	14S2P	0.3 (37.8[A])
	B	300 cycles SOC 0-100[%] charge/discharge	3.552	48~65.6	16S1P	0.5 (30[A])
	D	103 cycles SOC 0-100[%] charge/discharge	10.445	48~54.8	16S2P	0.5 (102[A])

한편, 배터리 모듈에 대한 충·방전 시험은 제조사 A, B, D의 배터리를 각각 300, 300, 103 사이클을 진행한 것이며, 시험 방법은 SOC 0-100[%] 기준으로 전압 범위는 각각 42~58.8[V], 48~65.6[V], 48~54.8[V]이며, c-rate는 A의 모듈 시험에서 37.8[A]로 0.3[c-rate], B의 모듈 시험에서 30[A]로 0.5[c-rate], C의 모듈 시험에서 102[A]로 0.5[c-rate]를 상정한다. 상기에서 제시한 바와 같이, 제조사마다 데이터의 구성방식이 다르기 때문에, 이러한 차이점은 데이터 분석 및 평가 방법에 영향을 미친다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을

해결하기 위하여, 충·방전 Raw 데이터를 대상으로 선형 보간법을 통해 데이터 처리 과정에서 발생할 수 있는 부정확한 데이터를 보정하고, 이를 바탕으로 배터리의 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있는 열화 평가 알고리즘을 제시한다.

3.1.2 Raw 데이터 모델링

배터리의 충·방전 Raw 데이터는 Table 2와 같이, 시험 장비나 저장 방식에 따라 데이터를 구성하는 요소가 결정된다. 여기서, Raw 데이터 구성항목은 배터리 충·방전 시험에서 실험 조건과 목적에 따라 다양하게 제시된다. 먼저, A~F열은 순서대로 각각 데이터 시퀀스, 채널 정보, 스텝 번호, 배터리 타입, 배터리 상태, 코드를 나타내고, I~AH열은 각각 전압과 전류, 용량, 전력, 온도, 내부 저항 등의 데이터 항목을 나타낸다. 또한, AI~S열은 각각 현재 사이클 수, 전체 사이클 수, 평균 전류, 평균 전압을 나타내고, U열과 Y열은 각각 충전용량과 충전전력, V열과 Z열은 각각 방전용량과 방전전력을 나타낸다. 즉, Raw 데이터 구성항목은 배터리의 성능 평가 및 분석을 위해 필요한 정보들을 대상으로 하고 있다.

Table 2. Components of raw data in battery

column	items	column	items
A	Data Sequence	AH	Temp(°C)
B	Channel	AI	Cur-cycle
C	StepNo	AJ	Tot-cycle
D	Type	R	Avg. Crt
E	State	S	Avg. Vtg
F	Code	T	Capa. Sum(Ah)
G	StepTime(sec)	U	Char. Cap.(Ah)
H	TotTime(sec)	V	Dischar. Cap.(Ah)
I	Voltage(V)	W	Start Time
J	Current(A)	X	End Time
K	Capacity(Ah)	Y	Char. WattHour(Wh)
L	Power(W)	Z	DisChar. WattHour(Wh)
M	WattHour(Wh)		
N	Impedance(mΩ)		

하지만, 충·방전 Raw 데이터의 분석은 처리방식에 따라 정확성과 신뢰성에 영향을 미칠 가능성이 있고, 시간과 비용도 증가할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 충·방전 Raw 데이터의 정확한 분석과 효율적인 처리를 위하여, 충·방전 Raw 데이터의 포맷에 대한 표준화 모델링을 제시한다. 먼저, 배터리의 측정 항목은 열화 특성분석과 관련된 항목만을 선별하고, 용이한 분석을 위해 표준화된 포맷으로 모델링하면 Table 3과 같다. 여기서, A~J열

은 배터리의 형태에 관계없이 모두 공통된 항목이며, K~N열은 해당 데이터 구조에서 항목이 존재하는 경우에만 값을 적용한다. 그리고, 열화 특성 분석에 필요한 항목은 A~J열의 포맷에 모델링된 데이터를 바탕으로 방전 사이클에 따른 용량 변화를 산정하기 위하여 표준화된 포맷의 O~Q 열에 저장한다. 또한, 충·방전 사이클에 따른 용량변화를 산정하기 위하여, 방전용량은 사이클마다 Q열에 저장하고, 충전용량은 각 사이클의 초기값을 0으로 설정하여 용량 잔량에 따른 적산 오차를 감소시킨다.

Table 3. Modeling of data format in battery

column	items	note
A	TotTime[s]	total time interval
B	StepTime[s]	charge and discharge duration
C	Type	mode of operation (charge/discharge/rest)
D	Voltage[V]	voltage
E	Current[A]	current
F	Capacity[Ah]	cumulative current
G	WattHour[Wh]	cumulative watt-hour
H	SOC[%]	charging capacity
I	CurCycle	current cycle
J	TotCycle	cumulative cycle
K	Temp_CH1[°C]	battery temperature
L	Temp_CH2[°C]	
M	Temp_CH3[°C]	
N	Temp_CH4[°C]	
O	Cycle	cycle
P	Discharge Ah[Ah]	discharge capacity per cycle
Q	Degradation[%]	degradation rate

3.1.3 선형보간법

데이터 처리 과정에서 발생한 부정확한 데이터는 일반적으로 충·방전 데이터를 측정하는 장비의 오차와 시험 조건의 다양한 편차로 인해 발생된다. 이러한 부정확한 데이터는 분석 결과의 신뢰성을 떨어지게 하고, 작업시간을 지연시키는 원인이 될 가능성이 있다. 상기의 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 수치해석 상용 프로그램인 MATLAB S/W를 사용하여, 데이터를 보정하는 선형보간법을 적용하여, 충·방전 Raw 데이터의 처리와 분석을 수행한다. 먼저, 선형보간법은 Fig. 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 Eq. (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, 부

정확한 데이터의 임의의 점 t_α 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.

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

where, $h(t)$: linear interpolation value for t value, $f(t)$: original function value for t value, t_i : time interval of i -th, i : arbitrary number between 0 and M , M : data sampling range

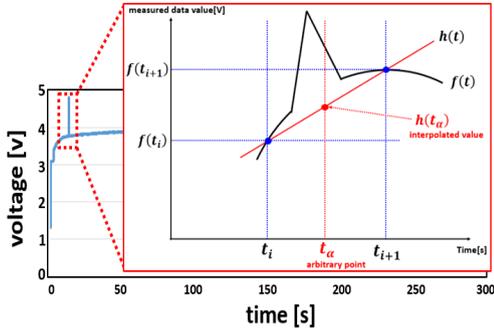


Fig. 3. Concept of linear interpolation method

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 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 상기의 3.1절에서 제시한 충·방전 시험 데이터의 평가 모델링을 바탕으로 배터리의 열화 평가 알고리즘을 제시한다. 이에 대한 상세한 절차를 나타내면 다음과 같다.

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

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

[Step 3] 데이터 처리 과정에서의 손실 및 에러로 생성된 부정확한 데이터는 Eq. (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, 충전용량은 각 사이클의 초기 값을 0으로 설정한다.

[Step 6] 하기의 Eq. (2)와 같이, 방전용량[Ah]의 변화에 따른 배터리의 열화율을 산정한다[11].

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

where, $D[\%]$: degradation rate of battery, $Ah_{dis.fin}$: final discharging capacity of battery, $Ah_{dis.ini}$: initial discharging capacity of battery

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우 차트로 나타내면 Fig. 4와 같다.

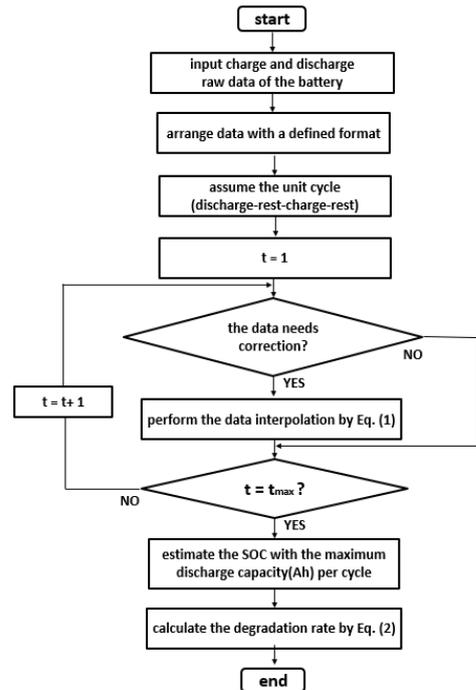


Fig. 4. Degradation evaluation algorithm of the battery

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 Table 4와 같다. 여기서, 상기의 3.1.2절과 같이, 파우치형과 각형 배터리의 측정 항목은 열화 특성분석과 관련된 항목만을 추출하고, 표준화된 데이터 포맷으로 모델링하면 각각 15개, 13개로 산정되며, 이 개수 차이는 해당 데이터에 파우치형 배터리의 온도항목이 존재하기 때문이다. 따라서, 파우치형 배터리는 14S2P로 구성된 모듈에 대해서 23[°C], 50[°C]의 일정한 주변온도에서 각각 SOC 0~100[%]까지 약 300cycle 동안 충·방전을 수행하고, 각형 배터리는 16S1P로 구성된 모듈에 대하여, 23[°C], 50[°C]의 일정한 주변온도에서 각각 SOC 0~100[%]까지 약 300cycle 동안 충·방전을 수행한다.

Table 4. Charge and discharge test conditions with type of battery

type	pouch	prismatic
number of data formats	15	13
sampling time during charge/discharge period [s]	1	1
sampling time during rest period [s]	10	10
total number of cycles	300	300
ambient temperature[°C]	23, 50	23, 50
SOC [%]	0-100	0-100
capacity[kwh]	6.53	3.55
voltage range[V]	42~58.8	48~65.6
structure	14S2P	16S1P
charging upper limit voltage [V]	58.8 (6.3A, Cut-off)	65.6 (3.0A, Cut-off)
discharging cut-off voltage[V]	42	48

4.2 선형보간법에 의한 충·방전 시험 데이터의 특성 분석

데이터 보정의 정확성과 일관성을 확인하기 위하여, 보정 전과 후의 데이터 행을 비교하면 Fig. 5와 같다. 여기서, Fig. 5(a)는 보정 전 충·방전 Raw 데이터의 행을 나타낸 것으로, 총 데이터는 7,029,900행이고, 그 중에서 충전 데이터는 3,522,000행, 방전 데이터는 3,507,900행으로 구성된다. 또한, 데이터 처리과정에서 발생한 부정확한 데이터를 본 연구에서 제시한 선형보간법에 의하여 데이터를 보정하여 나타내면 Fig. 5(b)와 같다. 여기

서, 총 데이터 행 수는 7,006,467행이고, 충전 데이터는 3,510,260행, 방전 데이터는 3,496,207행으로 구성된다. 따라서, 데이터 처리 과정에서 발생한 부정확한 데이터는 본 논문에서 제시한 알고리즘에 따라 삭제 및 보정됨을 알 수 있고, 데이터 행 분석을 통해 보정된 데이터의 행 개수가 보정 전 충·방전 Raw 데이터의 실제 행 개수와 유사하여, 본 논문에서 제시한 충·방전 시험 데이터의 평가방안이 유효함을 알 수 있다.

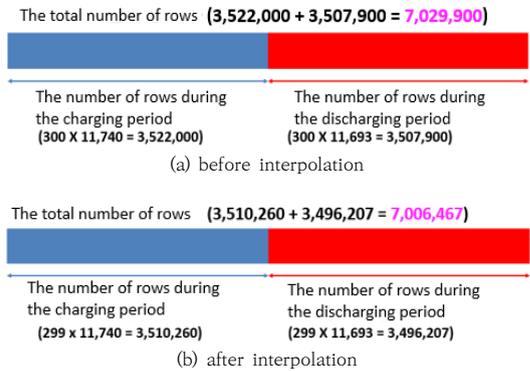


Fig. 5. Characteristics of the data row in pouch-type battery (23[°C])

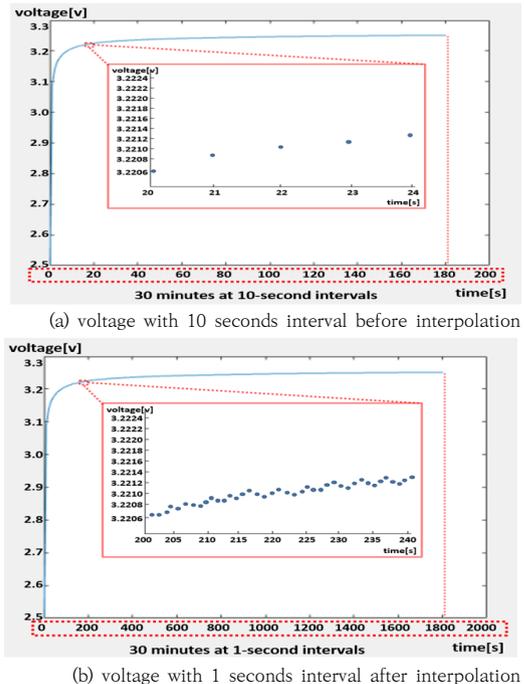


Fig. 6. Voltage characteristics in the rest period (30 minutes)

한편, 충·방전 시험에 대한 전압 데이터는 충전과 방전 동안에 1초 간격으로 수집하지만, 휴지시에는 10초 간격으로 수집하기 때문에, 샘플링 타임의 일관성을 위하여, 동일한 간격으로 보간하여 나타내면 Fig. 6과 같다. 여기서, Fig. 6(a)는 샘플링 타임이 10초 간격인 휴지기간의 보간 전 전압 데이터이고, Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 전압 데이터를 선형보간법을 이용하여 1초 간격으로 보정한 전압데이터를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 휴지기간 동안의 샘플링 타임을 10초에서 1초 간격으로 보간함으로써, 충전과 방전 그리고 휴지기간에 대한 데이터가 일관성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 배터리 형태별 열화 특성 분석

4.3.1 파우치형 배터리

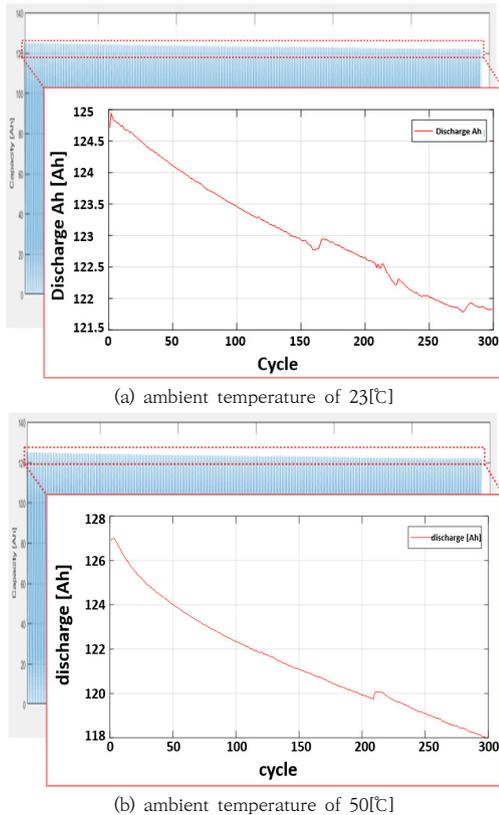


Fig. 7. Discharge capacity with cycles in pouch-type battery

주변 온도조건에 의한 배터리 형태별 열화 특성을 분석하기 위하여, 총 300cycle을 수행한 파우치형 배터리의 충·방전 데이터의 특성을 나타내면 Fig. 7과 같다. 여

기서, Fig. 7(a)는 23[°C]의 주변 온도조건에서 300cycle 충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 124.91~121.82[Ah]로 3.09[Ah] 감소되어, 배터리의 열화율은 2.36[%]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(b)는 50[°C]의 주변 온도조건에서 300cycle 충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 126.28~118.2[Ah]로 8.08[Ah] 감소되어, 배터리의 열화율이 7.02[%]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 파우치형 배터리의 열화율은 23[°C]에 2.36[%], 50[°C]의 경우 7.02[%]임을 알 수 있으며, 주변 온도조건에 따라 배터리의 열화율이 291[%] 증가됨을 알 수 있다.

4.3.2 각형 배터리

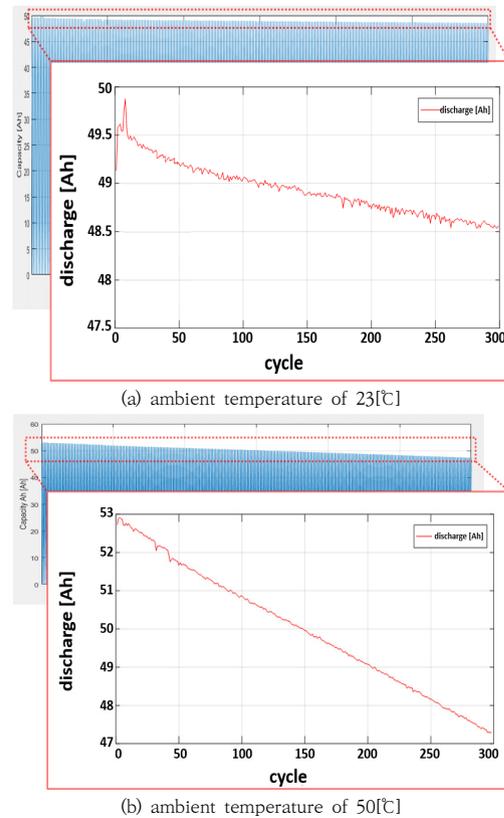


Fig. 8. Discharge capacity with cycles in prismatic-type battery

주변 온도조건에 의한 배터리 형태별 열화 특성을 분석하기 위하여, 총 300cycle을 수행한 각형 배터리의 충·방전 데이터의 특성을 나타내면 Fig. 8과 같다. 여기서, Fig. 8(a)는 23[°C]의 주변 온도조건에서 300cycle

충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 49.13~48.55[Ah]로 0.58[Ah] 감소되어, 배터리의 열화율은 1.21[%]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 8(b)는 50[°C]의 주변 온도조건에서 300cycle 충·방전 시험을 수행한 특성이며, 이때, 배터리의 방전용량은 52.73~47.72[Ah]로 5.01[Ah] 감소되어, 배터리의 열화율이 10.32[%]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 각형 배터리의 열화율은 23[°C]에 1.21[%], 50[°C]의 경우 10.32[%]임을 알 수 있으며, 주변 온도조건에 따라 배터리의 열화율이 858[%] 증가됨을 알 수 있다.

4.4 종합분석

상기에서 분석한 파우치형과 각형 배터리의 주변 온도조건에 따른 열화특성을 나타내면 Table 5와 같다. 여기서, 23[°C]의 경우, 파우치형과 각형 배터리의 열화율은 각각 약 2.36[%], 1.21[%]로 산정되어, 낮은 주변 온도에서 배터리의 열화는 각형에 비해 파우치형 배터리가 더 크게 발생함을 알 수 있다. 즉, 내부의 열관리가 비교적 쉬운 구조인 각형 배터리에 비해, 파우치형 배터리는 내부 빈 공간이 적기 때문에 주변온도보다 내부온도의 영향이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한, 50 [°C]의 경우, 파우치형과 각형 배터리의 열화율은 각각 약 7.02[%], 10.32[%]로 산정되어, 높은 주변온도에서 배터리의 열화는 파우치형에 비해 각형 배터리에 더 크게 발생함을 알 수 있다. 즉, 금속에 비해 비교적 낮은 열전도를 가진 얇은 파우치 필름으로 덮여있는 파우치형 배터리에 비해, 각형 배터리는 알루미늄 금속으로 밀봉되어 내부온도보다 주변온도의 영향이 크게 발생함을 알 수 있다.

Table 5. Degradation rates of battery types with ambient temperature conditions

type	pouch		prismatic	
	23	50	23	50
ambient temperature[°C]	23	50	23	50
degradation[%]	2.36	7.02	1.21	10.32

5. 결론

본 논문에서는 ESS와 EV 등에서 주로 적용되는 증대형 리튬이온배터리를 대상으로 배터리 형태에 따른 열화 특성을 평가하기 위하여, Raw 데이터 모델링과 선형보

간법을 이용한 증대형 배터리의 열화 평가 알고리즘을 제시한다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 데이터 처리 과정에서 발생한 부정확한 데이터는 본 논문에서 제시한 알고리즘에 따라 삭제 및 보정되고, 데이터 행 분석을 통해 보정된 데이터의 행 개수가 보정 전 충·방전 Raw 데이터의 실제 행 개수와 유사함을 확인할 수 있어, 본 논문에서 제시한 충·방전 시험 데이터의 평가방안이 유효함을 알 수 있다.
- (2) 파우치형 배터리의 온도가 23[°C], 50[°C]인 경우, 열화율은 각각 2.36[%], 7.02[%]로 산정되어, 주변 온도조건에 따라 배터리의 열화율이 291[%] 정도 증가됨을 알 수 있다. 또한, 각형 배터리의 온도가 23[°C], 50[°C]인 경우, 열화율은 각각 1.21[%], 10.32[%]로 산정되어, 주변 온도조건에 따라 배터리의 열화율이 858[%] 정도 증가됨을 알 수 있다.
- (3) 파우치형 및 각형 배터리의 열화율을 평가한 결과, 내부의 열관리가 비교적 쉬운 구조인 각형 배터리에 비해, 파우치형 배터리는 내부 빈 공간이 적기 때문에 주변온도보다 내부온도의 영향이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한, 금속에 비해 비교적 낮은 열전도를 가진 얇은 파우치 필름으로 덮여있는 파우치형 배터리에 비해, 각형 배터리는 알루미늄 금속으로 밀봉되어 내부온도보다 주변온도의 영향이 크게 발생함을 알 수 있다.
- (4) 본 논문에서 제시한 열화 평가 알고리즘을 바탕으로 배터리 형태별 주변온도에 따른 열화특성을 평가한 결과, 파우치형 배터리는 주변온도보다 내부온도의 영향이 더 크게 발생하고, 각형 배터리는 내부온도보다 주변온도가 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 즉, 배터리의 열화특성은 배터리의 형태, 내부구조, 열전도성, 주변온도 등의 다양한 요인에 영향을 받을 수 있음을 알 수 있었다.

References

[1] Korea Commit of investigation for ESS fire accidents, "A result of investigation for ESS fire accidents" in MOTIE, KOREA, June 2019. http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161771&bbs_cd_n=81¤t

[Page=11&search_key_n=title_v&cate_n=&dept_v=&search_val_v=ESS](#)

- [2] Zeyu Chen. "Temperature rise prediction of lithium-ion battery suffering external short circuit for all-climate electric vehicles application", Applied Energy 213(2018), pp.375-383, March 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.068>
- [3] J. B. Jung, M. G. Lim, J. Y. Kim, D. S. Rho. "Characteristics of External Short-Circuit in Li-ion Battery Considering Operation and Environment Factors", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.22, No.8, pp.663-672, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2021.22.8.663>
- [4] J. A. Shen, H. D. Lee, J. M. Kim, H. S. Choi, D. S. Rho. "A Study on Implementation of Battery Management System for Enhancing Safety of Sharing Electric Kickboard", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.22, No.10, pp.775-783, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2021.22.10.775>
- [5] S. M. Choi, B. G. Han, H. D. Lee, M. Y. Kim, D. S. Rho. "Implementation and Economic Evaluation of Movable PowerSupply Device for Electric Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.21, No.10, pp.77-86, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.12.77>
- [6] J. B. Jung, M. G. Lim, J. Y. Kim, D. S. Rho. "Characteristics of External Short-Circuit in Li-ion Battery Considering Operation and Environment Factors", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.22, No.8, pp.663-672, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2021.22.8.663>
- [7] M. C. Jung, J. M. Kim, D. H. Tae, D. S. Rho. "Operation Algorithm of Battery Management System for Li-ion Battery Considering Self-energy Balancing Phenomenon", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 70, no. 10, pp. 1443~1451, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2021.70.10.1443>
- [8] S. Y. Hwang, S. M. Choi, J. A. Shen, H. S. Choi, D. S. Rho, "The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers", vol. 71, no. 12, pp. 1787~1795, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.12.1787>
- [9] H. S. Choi, T. H. Jeong, D. H. Tae, H. D. Lee, D. S. Rho, "Design and Implementation of 2-Port Surge Protection Device for Control Power Supply System in Energy Storage System" The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 69, no. 8, pp. 1278~1285, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.8.1278>
- [10] H. Y. Shin. "Algorithm for Optimal Sizing of Energy Storage System Paired with Photovoltaic Generation Considering Lithium-Ion Battery Degradation", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 68, No. 6, pp. 7.
DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2019.68.6.701>
- [11] J. M. Kim, H. D. Lee, D. H. Tae, Marito Ferreira,

Ji-Hyun Park, Dae-Seok Rho. "Implementation of Battery Management System for Li-ion Battery Considering Self-energy Balancing", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 21, No. 3 pp. 585-593, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.585>

이 민 행(Min-Haeng Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 석사과정 재학 중

〈관심분야〉

전기저장장치, 전력 및 배전계통, 신재생에너지

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

노 성 은(Seong-Eun Rho)

[준회원]



- 2022년 8월 : 한국외국어대학교 정보통신공학과 (공학사)

〈관심분야〉

배전계통 운용, 마이크로그리드, 전기저장장치

유 경 상(Kyung-Sang Ryu)

[정회원]



- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 동대학원 전기전자 통신공학과 (공학석사)
- 2020년 8월 : 제주대학교 전기공학과 박사 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국에너지 기술연구원/연구원 재직중

<관심분야>

배터리 운용관리시스템, 분산전원 연계기술, EMS

김 찬 수(Chan-Soo Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 경희대학교 환경학과 (이학사)
- 2000년 3월 : 일본 히로시마대학 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 2003년 3월 : 일본 히로시마대학 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 2012년 10월 ~ 현재 : 한국에너지 기술연구원 책임연구원

<관심분야>

신재생에너지, 전기저장장치, 에너지재료

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[중신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석