

리튬이온배터리의 내부저항 시험장치 모델링에 관한 연구

정재범*, 임민규***, 신건*, 한병길*, 노대석*

*한국기술교육대학교

**한국배터리안전연구원

e-mail:ktljjb@koreatech.ac.kr

A Study on Modeling of Equipment for Internal Resistance of Li-ion Batteries

Jae-Beom Jung*, Min-Gyu Lim***, Jian Shen*, Byeong-Gill Han*, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

**Korea Battery Safety Testing-Labs

요 약

최근, 몇 년간 전 세계적인 전기자동차(EV, electric vehicle) 및 에너지저장장치(ESS, energy storage system) 시장이 급격하게 확대되고 있다. 이에 따라, 사용 중인 배터리 및 사용후 배터리의 재사용을 위하여, 배터리의 성능과 안전성을 측정하고 예측하는 진단기술의 필요성이 날이 증가하고 있다. 특히, 사용 환경에 따라 달라질 수 있는 배터리 특성과 최근 몇 년간 화재사고가 지속적으로 발생함에 따라, 배터리 상태를 정확하게 진단할 수 있는 다양한 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 배터리의 열화 상태 추정을 위한 리튬이온배터리의 등가회로를 제안하고, 방전율 기반의 개방회로 전압을 추정하여 시간 및 충전율에 따른 중대형 배터리 셀의 1차 RC ladder 등가회로 모델링을 수행하며, 이를 바탕으로 배터리 모듈 및 팩 단위의 모델링을 제시한다. 상기의 모델링을 바탕으로 온도에 따른 리튬이온배터리의 AC IR과 DC IR의 특성을 평가하고 실측값과 비교 분석한 결과, 시뮬레이션 값과 실측값의 오차가 최대 2.97% 이내로 발생하여, 본 논문의 유효성을 확인할 수 있다.

1. 서 론

현재 국내외 전기자동차 및 에너지저장장치 시장이 급격하게 성장하고 있다. 전 세계 전기자동차 보급량은 2020년 600만대에서 2030년 전체 자동차 판매량의 27%인 2,600만대 규모로 성장이 예상되며, 국내의 경우 2020년 누적 기준 약 13.5만대 규모에서 『2030년 국가로드맵』 기준 2030년 300만대로 확대할 예정이다. 특히, 2021년 10만대, 2022년과 2023년 16만대의 전기자동차가 신규로 등록되는 등 관련 시장이 지속적으로 증가하고 있다. 따라서, 운용 중인 배터리의 현재 상태를 측정하고 성능 및 안전성을 예측하는 배터리 진단 수요와 더불어, 사용후 배터리와 같은 배터리 재사용 및 재활용을 위한 진단 수요가 증가할 것으로 예상된다. 특히, 사용후 배터리는 운용환경 및 사용자에게 따라 달라지는 배터리의 열화 특성으로 인해 전수검사가 필수로 요구되며, 전수검사 시간의 감소를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 1차 ladder RC 등가회로를 방전율 기반 개방회로 전압(OCV, open circuit voltage) 및 임피던스

산정 및 Matlab을 통해 상용화된 리튬이온배터리 셀의 등가회로를 정식화를 제안하고, 방전율 기반 개방회로 전압을 추정하여 시간 및 충전율에 따른 상용화 중대형 배터리 셀의 1차 RC ladder 등가회로 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 정식화 및 모델링을 바탕으로, 내부저항 시험장치를 모델링하여 실측값과 비교한 결과, 오차가 거의 발생하지 않아 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있다.

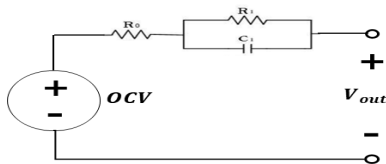
2. 리튬이온배터리 등가회로 모델링

배터리는 인가되는 충전 및 방전 전류에 따라 전압 및 내부저항이 짧은 시간동안 끊임없이 변화하는 특성을 가진다. 따라서, 배터리의 진단은 배터리의 비선형적이고 동적인 특성을 반영하여 상태를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 해당 특성을 반영하기 위해 다양한 모델링 방법 개발 및 활용을 통해 SOC(state of Charge) 및 SOH(state of health)와 같은 배터리 상태 지표의 정확성을 향상시킬 수 있다. 배터리의 성능을 추정하고 설계에 반영하기 위해 통상 전기화학적 모델, 수학적 모델, 등가회로 모델 등을 사용하고 있다.[1] 이 중 등가회로 모델은 배터리의 상태 변화를 분석하고 추정하는 것이

용이하여 배터리의 열화(degradation)을 전기적 소자의 파라미터에 반영하는 방법으로 널리 사용되고 있다. 다만, 배터리의 전기화학적 특성을 나타내는 정확도가 타 모델에 비해 낮아, 등가회로 모델 개선을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

2.1 등가회로 모델링 사례 분석

등가회로 모델은 전류 및 전압 특성을 반영하여 전기적 소자인 저항과 커패시터를 통해 모델링되며, linear model, Thevenin 등가회로 모델, RC ladder 모델 등이 있다.[1] 본 논문에서는 그림 1과 같이 1차 RC ladder 모델을 사용하여 등가회로를 모델링하고 이를 검증하기 위한 일련의 방법을 제안한다. 그림 1 내 전압원(voltage source)인 개방회로 전압은 통상 전해질 이온의 평형상태 도달까지 휴지 후 측정하는 방식으로 측정이 진행되어왔다.[2] 휴지 시간은 길게는 하루까지 가져가며 정확성을 높이기 위해 방전 후 반복 측정을 진행하기도 하며, SOC별 OCV table을 얻기 위해서 많은 시간이 소요되는 것이 일반적이다. 전기적 소자는 직렬저항인 R_0 , 확산저항인 R_1 , 확산 커패시터인 C_1 으로 구분된다. 직렬저항 R_0 은 배터리 내부의 도통 저항성분을 나타내며 전류 변화에 순간적으로 반응하는 특성을 나타낸다. 확산저항 R_1 과 확산 커패시터 C_1 은 배터리 내부 물질로 인한 전기화학적 반응 중 확산을 모사하기 위해 사용된다. 또한, 외부전압인 V_{out} 은 외부로 노출되어 있는 배터리 셀의 단자에서 측정되는 전압으로, 통상 개방회로 전압을 추정하기 위해 실시간으로 측정되는 측정값이다.



[그림 1] 1차 RC Ladder 등가회로

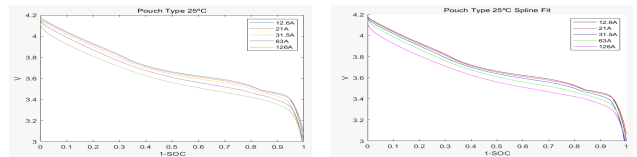
2.2 방전을 기반 등가회로 모델링

상기 언급한 바와 같이 1차 RC ladder 모델 내 개방회로 전압을 추정하기 위해, 대부분 충전 혹은 방전 전류 차단 후 일정 휴지시간을 갖고 반복적으로 측정하는 것이 일반적이다. 해당 방법으로 개방회로 전압을 측정할 경우, 휴지시간의 일관성 및 측정기기의 오차뿐만 아니라 장기간 시험시간이 소요되어 본 논문에서는 방전을 기반으로 개방회로 전압을 추정하고, 이를 통해 임피던스를 추정하는 방식으로 등가회로 모델링을 수행한다.

2.3 등가회로 시간변수 추정

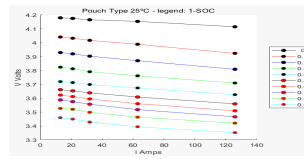
본 논문에서는 기존 개방회로 전압 측정방법과 다르게 그

림 2(a)와 같이 정격용량 대비 $0.2 I_{ta}$, $0.33 I_{ta}$, $0.5 I_{ta}$, $1.0 I_{ta}$, $2.0 I_{ta}$ 등 5가지 방전 전류를 적용한 Constant Current 방전시험 후 그림 2(b)와 같이 외삽법 적용을 위한 fitting을 적용하고, 그림 2(c)와 같이 외삽법 적용하여 OCV를 추정하고 그림 2(d)와 같이 SOC(%)별 OCV 곡선을 추정한다. 이때, 각 SOC(%)는 전처리 시 측정된 시료의 방전용량 대비 10% 단위로 나누어 측정된 값을 기준으로 사용한다.



(a) 방전율에 따른 측정 전류

(b) 외삽법 적용을 위한 fitting

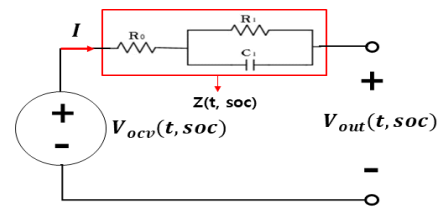


(c) 외삽법 적용 OCV 추정

(d) SOC별 OCV 곡선 추정

[그림 2] 방전율 기반 방전곡선의 외삽법을 이용한 OCV 추정

상기에서 진행한 시간 및 SOC에 따른 개방회로 전압을 기반으로, 그림 3과 같이 개방회로 전압은 시간 및 SOC에 따른 $V_{ocv}(t, soc)$ 로 추정하고, 배터리 외부로 노출된 단자를 통해 측정된 전압 $V_{out}(t, soc)$ 와 측정 전류 기반 시간에 따른 임피던스 $Z(t, soc)$ 를 추정한다. 이 때, 임피던스 $Z(t, soc)$ 는 직렬저항 R_0 , 확산저항 R_1 , 확산커패시터 C_1 의 시간변수를 포함한다.



[그림 3] 전류에 따른 시간변수를 고려한 등가회로

그림 3 내 등가회로 기준으로 합성임피던스 Z 를 식 (1)과 같이 유도할 수 있고, 식 (2)와 식(3)과 같이 라플라스 변환을 통해 시간에 따른 임피던스 $Z(t)$ 를 유도하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

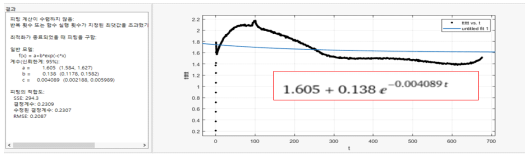
$$Z = \frac{R_0 + R_1 + j\omega R_0 R_1 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1}, \quad j\omega = s \quad (1)$$

$$\rightarrow L^{-1}(Z) = L^{-1}\left[R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s}\right] \quad (2)$$

$$\rightarrow L^{-1}[Z(t)] = R_0\delta(t) + \frac{1}{C_1}e^{-\frac{1}{R_1C_1}t} \quad (3)$$

$$\rightarrow Z(t) = R_0 + \frac{1}{C_1}e^{-\frac{1}{R_1C_1}t} = A + Be^{-\alpha} \quad (4)$$

상기에서 추정된 임피던스 및 수식 기준, 실측한 시험결과를 시간에 따른 결과값 측정 후 Matlab을 통해 유도하면 그림 4와 같다. 이에 따라, 식 (4)을 참고하여 유도값과 비교하면, 직렬저항 R_0 는 1.605 [mΩ], 확산저항 R_1 은 0.564 [μΩ], 확산 커패시터 C_1 은 7.246 [mF]으로 추정할 수 있다.

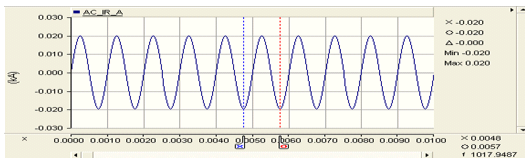


[그림 4] 전류에 따른 시간변수를 고려한 등가회로

3. 리튬이온배터리 내부저항 시험장치 모델링

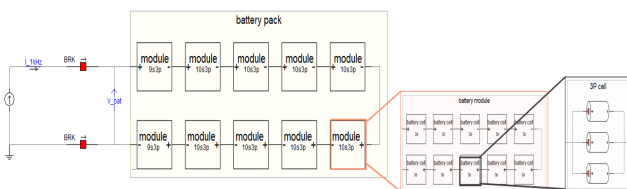
3.1 AC IR 시험장치 모델링

상기에서 모델링한 등가회로를 바탕으로 배터리의 성능을 확인하는 대표적인 시험인 교류 저항시험을 통해 이를 검증한다. 이를 위해 국제표준에서 제안한 방법과 동일하게 피크 전압은 20mV 이하로 설정하고, 주파수는 1kHz를 적용한 결과는 그림 5와 같다.



[그림 5] 등가회로 검증을 위한 전류 source 파형

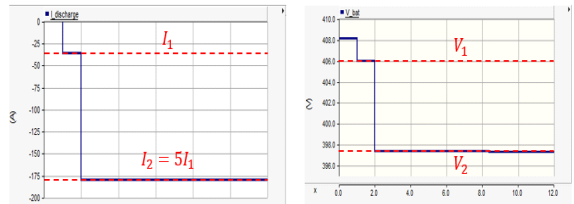
상기에서 설정한 전류 source 및 등가회로를 반영하여 검증을 위한 배터리 셀 회로를 구성하고 배터리 팩 단위로 확장한 결과는 그림 6과 같다. 전류원에서 나오는 교류 전류를 인가하면서 양단 전압 측정하면서, 측정된 전압을 실시간 교류 전류로 나누는 방식으로 AC IR을 측정한다.



[그림 6] 배터리 팩 단위 등가회로 확장 및 AC IR 모델링

3.2 DC IR 시험장치 모델링

배터리의 내부저항을 확인하는 다른 대표적인 시험인 직류 저항시험을 통해 이를 검증한다. 이를 위해 국내 및 국외표준에서 제안한 방법과 동일하게 방전전류를 변경하면서 전압을 측정하는 방법은 그림 7과 같다.

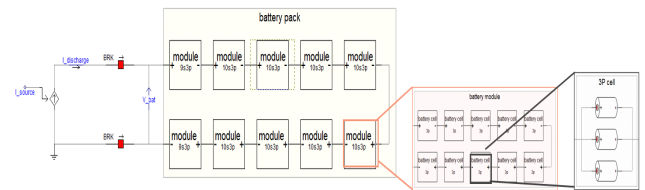


[그림 7] 등가회로 검증을 위한 DC 전류 및 전압 측정

상기에서 얻어진 전압 측정값을 기반으로 DC IR 값을 구하는 방법은 식 5와 같다. 전류 변경 전후에 측정된 전압값의 차이를 전류값의 차이로 나누면서 DC IR(Ω)을 측정한다.

$$DCIR = \frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} (\Omega) \quad (5)$$

상기에서 설정한 전류 source 및 등가회로를 반영하여 검증을 위한 배터리 셀 회로를 구성하고 배터리 팩 단위로 확장한 결과는 그림 8과 같다. 앞서 언급한 바와 같이 전류원에서 나오는 직류 전류를 변경하면서 양단 전압 측정고, 측정된 전압을 전류의 변화값으로 나누는 방식으로 DC IR을 측정하도록 모델링을 구현한다.

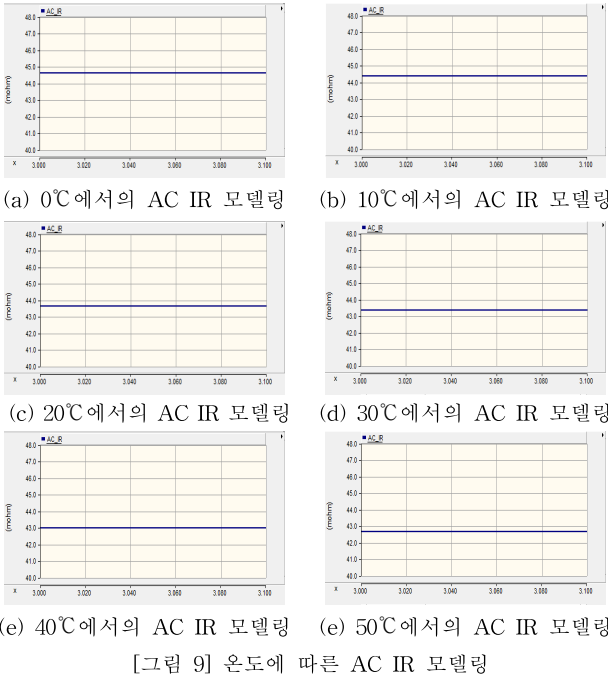


[그림 8] 배터리 팩 단위 등가회로 확장 및 DC IR 모델링

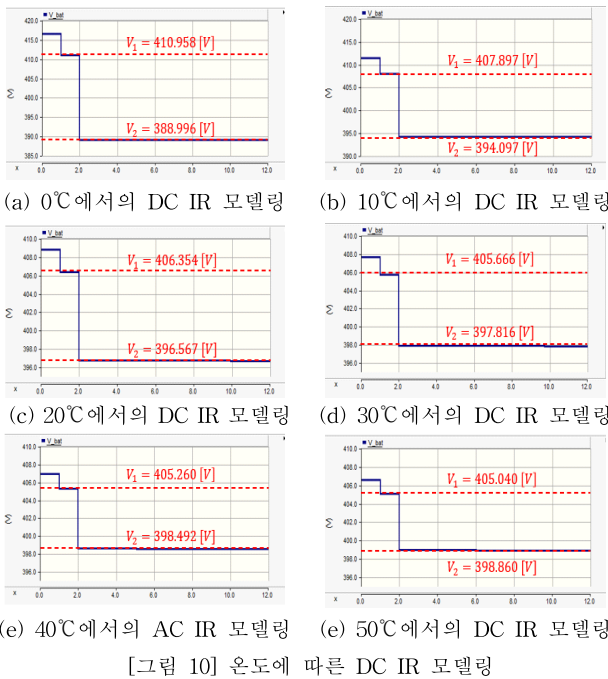
4. 시뮬레이션 및 시험결과 분석

4.1 시뮬레이션에 의한 결과 분석

상기에서 모델링한 내부저항 모델링에 대한 유효성 확인을 위해 모델링으로 얻어진 값을 실제 배터리 내부저항 시험을 통해 측정된 실험값을 통해 이를 검증한다. 이를 위해, 먼저 온도에 따른 내부저항의 변화를 AC IR 시험을 모델링과 실험값을 비교하기 위해 그림 9와 같이 모델링을 수행한다.



추가적으로 모델링의 유효성을 확인하기 위해, 온도에 따른 DC IR 시험을 모델링과 실측값을 비교하기 위해 전류를 36A에서 180A로 올리면서 측정한 전압값은 그림 10과 같이 모델링을 수행한다.



4.2 시험결과에 의한 비교분석

상기 모델링으로 얻어진 AC IR 값을 검증하기 위해 배터리 팩의 실측값을 온도에 따라 측정한 후 비교한 결과는 표 1과 같다. 온도에 따른 모델링 및 실측값은 42.6 ~ 45.1 [mΩ]로 온도별 오차율은 최대 1.56% 이내로 AC IR 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

효성을 확인할 수 있다.

[표 1] 온도에 따른 AC IR 모델링 및 측정값 비교

온도(°C)	모델링 값(mΩ)	실측값(mΩ)	오차율(%)
0	44.613	45.100	1.08%
10	44.366	43.683	1.56%
20	43.618	43.333	0.66%
30	43.338	42.692	1.51%
40	42.980	42.650	0.77%
50	42.635	42.317	0.75%

상기 모델링으로 얻어진 DC IR 값을 검증하기 위해 배터리 팩의 실측값을 온도에 따라 측정한 후 비교한 결과는 표 2와 같다. 온도에 따른 모델링 및 실측값은 42.9 ~ 157.2 [mΩ]로 온도별 오차율은 모두 2.97% 이내로 DC IR 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

[표 2] 온도에 따른 DC IR 모델링 및 측정값 비교

온도(°C)	모델링 값(mΩ)	실측값(mΩ)	오차율(%)
0	152.514	157.189	2.97%
10	95.833	97.958	2.17%
20	67.257	68.397	1.67%
30	54.514	55.093	1.05%
40	47.000	47.666	1.40%
50	42.917	43.389	1.09%

5. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 사용후 배터리의 열화특성을 평가하기 위하여 1차 ladder RC 등가회로를 방전을 기반 개방회로 전압 및 임피던스 산정 및 Matlab을 통해 상용화된 리튬이온배터리 셀의 등가회로의 정식화를 제안한다. 또한, 방전을 기반 개방회로 전압을 추정하여 시간 및 충전율에 따른 상용화 중대형 배터리 셀의 1차 RC ladder 등가회로 모델링을 수행하고 팩 단위로 확장한 후 내부저항 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 정식화 및 모델링을 바탕으로, AC IR 및 DC IR 시험법을 이용하여 리튬이온배터리의 온도에 따른 내부저항 특성을 분석한 결과, 시뮬레이션과 실측값의 오차가 거의 발생하지 않아 본 논문에서 제안한 정식화 및 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Jaegu Kim, "Enhanced Equivalent Circuit Modeling for Li-ion Battery Using Recursive Parameter Correction", M.S. degree paper Sungkyunkwan University (2016), October, 2016
 [2] Seungwoo Kim, "Estimated Performance Analysis of SOC by Electric Equivalent Circuit Modeling Design of Battery Pack", Power Electronics Conference, pp85-87, November. 2020