

온도 조건에 따른 리튬이온배터리의 내부저항 특성에 관한 연구

정재범^{*,**}, 유현상^{*,**}, 최성문^{*}, 이승호^{*}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교 전기공학과, ^{**}(주)시스피아

ktlijb@koreatech.ac.kr

A Study on Internal Resistance Characteristics of Li-ion Battery According to Temperature Conditions

Jae-Beom Jung^{*,**}, Hyun-Sang You^{*,**}, Sung-Moon Choi^{*}, Seung-Ho Lee^{*} and Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

^{**}Cispia Co. Ltd

요약

최근, 국내외에서 전기자동차와 에너지저장장치에 적용되는 중대형 이차전지의 수요가 급격하게 증가하고, 이에 따라 시장 규모도 기하급수적으로 확대되고 있다. 또한, 사용후 배터리 분야에서는 배터리의 성능과 안전성을 확보할 수 있는 신속하고 유효성 있는 평가 방안에 초점을 두고 다양한 연구가 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리의 1차 RC Ladder 등가회로 모델을 바탕으로 배터리 내부 파라미터를 산정하고, PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여 배터리 부, 내부저항 측정장치부, 등으로 구성된 내부저항 시험장치의 모델링을 수행하며, 이를 바탕으로 배터리 셀 및 팩의 AC IR(internal resistance)과 DC IR을 측정하는 내부저항 시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 모델링 및 시험장치를 바탕으로 온도 조건에 따른 내부저항 특성을 평가한 결과, AC IR과 DC IR은 온도 조건에 따라 각각 6[%], 70[%] 정도의 편차가 발생하여, 내부저항을 통해 배터리의 열화를 평가하는 경우 온도 조건을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다. 또한, 본 논문에서 제안한 리튬이온배터리의 등가회로와 내부저항 시험장치의 모델링이 배터리의 내부저항을 바탕으로 온도 조건에 따른 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

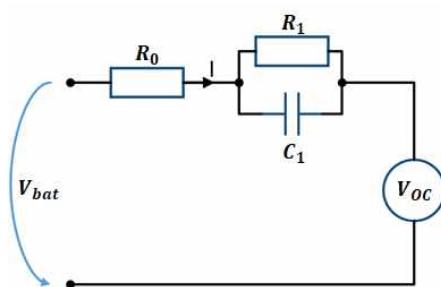
최근, 전 세계 전기자동차 보급량은 2020년 600만대에서 2030년 전체 자동차 판매량의 27[%]인 2,600만대 규모로 증가하고 있으며, 국내에서도 2020년 누적 기준 약 13.5만대 규모에서 2021년 10만대, 2022년 16.4만대, 2023년 16.2만대가 각각 보급되는 등 지속적으로 성장하고 있다. 이에 따라, 전기자동차 사용후 배터리(used battery)도 기하급수적으로 늘어날 것으로 예상되고 있으며, 더불어, 사용후 배터리와 같은 재사용 및 재활용을 위한 진단 수요가 증가하고 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 내부저항을 바탕으로 리튬이온배터리의 열화 특성을 평가하기 위하여, 1차 RC Ladder 등가회로 모델을 바탕으로 전력계통 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여, 배터리 부, AC IR(internal resistance)과 DC IR을 산정하는 내부저항 측정장치부 등의 내부저항 시험장치의 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 배터리 셀 및 팩의 AC IR과 DC IR을 측정하는 내부저항 시험장치를 구현한다.

상기에서 제시한 모델링 및 시험장치를 바탕으로 온도 조건에 따른 내부저항 특성을 평가한 결과, AC IR과 DC IR은 온도 조건에 따라 각각 6[%], 70[%] 정도의 편차가 발생하여, 내부저항을 통해 배터리의 열화를 평가하는 경우 온도 조건을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다. 또한, 본 논문에서 제안한 리튬이온배터리의 등가회로와 내부저항 시험장치의 모델링이 배터리의 내부저항을 바탕으로 온도 조건에 따른 열화 특성을 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

2. 리튬이온배터리의 등가회로 구성

리튬이온배터리의 등가회로는 전류 및 전압 특성을 반영하여 전기적 소자인 전압원(voltage source)과 저항, 커패시터로 나타낼 수 있으며, 주로 linear 모델, Thevenin 모델, RC ladder 모델 등이 사용되고 있다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 1차 RC ladder 등가회로 모델을 적용하여, 배터리 셀의 내부 파라미터를 산정하고, 이를 바탕으로 배터리 팩 단위의 등가회로를 제안한다. 먼저, 등가회로의 전압원인 개방회로 전압(V_{OC})은 충·방전을 수행하지 않는 무부하 상태의 배터리 단자전압으로, 전해

질 이온의 평형상태 도달까지 장시간 휴지 후 배터리의 단자 전압(V_{bat})을 측정하여 구할 수 있으며, SOC(state of charge)에 따라 변하는 특성을 갖는다. 한편, 배터리의 내부 임피던스는 직렬 저항(R_0), 확산 저항(R_1), 확산 커패시터(C_1) 등으로 구성된다. 여기서, 직렬 저항은 배터리 내부의 도통 저항 성분을 나타내며, 전류 변화에 즉각적으로 반응하는 특성을 나타낸다. 또한, 확산 저항과 커패시터는 배터리 내부 물질의 전기화학적 반응에서 확산(diffusion)을 모의하기 위해 사용된다.

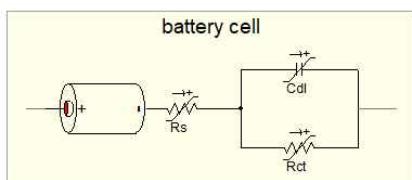


[그림 1] 리튬이온배터리 셀의 1차 RC Ladder 등가회로의 구성

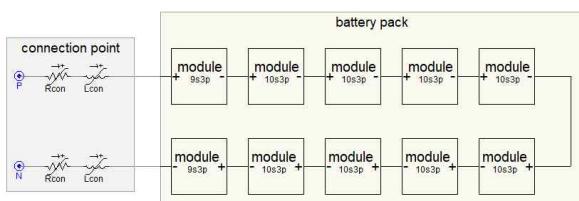
3. 리튬이온배터리 내부저항 시험장치의 모델링

3.1 배터리부 모델링

상기에서 제시한 1차 RC ladder 등가회로의 내부 임피던스를 바탕으로, 배터리부를 모델링하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 2의 (a)는 리튬이온배터리 셀의 모델링을 나타내는데, PSCAD/EMTDC의 배터리 라이브러리와 직렬 저항, 확산 저항, 확산 커패시터 등으로 구성된다. 또한, 그림 2의 (b)는 배터리 셀을 98S3P로 연결한 배터리 팩을 나타내며, 연결부 저항을 고려하여 모델링을 수행한다.



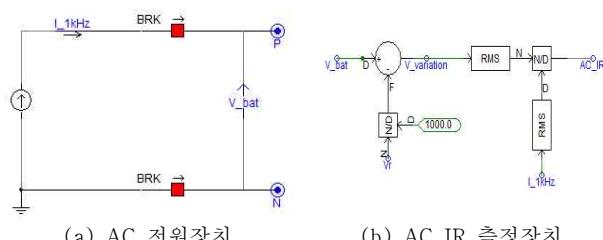
(a) 배터리 셀



[그림 2] 배터리부 모델링

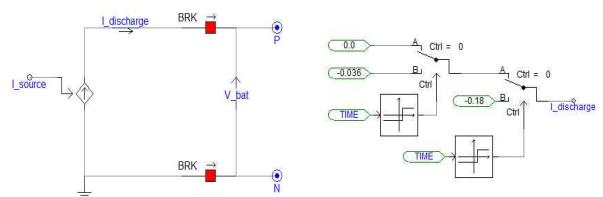
3.2 내부저항 측정장치부 모델링

본 논문에서는 리튬이온배터리 팩의 내부저항 특성을 평가하기 위하여, AC IR과 DC IR 측정 방법을 채용한다. 먼저, 1[kHz]의 주파수에서 내부저항을 측정하는 AC IR 측정장치부를 모델링 하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3의 (a)는 배터리 팩 양극에 1[kHz]의 교류 전류를 인가하는 AC 전원장치를 나타내는데, 배터리의 전압변동을 측정하여 피크 전압이 20[mV] 이하로 유지되도록 전류를 제한한다. 또한, 그림 3의 (b)는 배터리의 전압변동을 통해 내부저항을 구하는 AC IR 측정장치를 나타낸다. 즉, 측정전압과 배터리의 정격전압의 차를 인가 전류로 나누어 AC IR을 산정한다.



[그림 3] AC IR 측정장치부 모델링

한편, 방전시 발생하는 전압강하를 바탕으로 내부저항을 산정하는 DC IR 측정장치부를 모델링하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 4의 (a)는 배터리 팩 양극에 직류 전류를 인가하는 DC 전원장치를 나타내고, 그림 4의 (b)는 전류 제어장치로 방전 전류를 배터리의 정격용량 기준 0.2 C-rate에서 1 C-rate로 증가시켜 내부저항에 의한 전압변동을 측정한다.

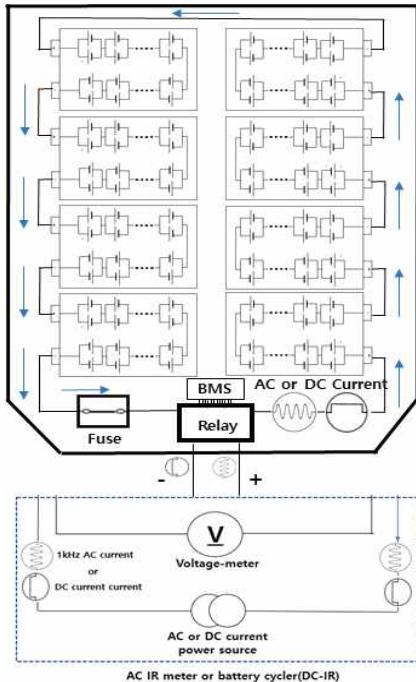


[그림 4] DC IR 측정장치부 모델링

4. 리튬이온배터리 내부저항 시험장치의 구현

리튬이온배터리 팩 내부저항 시험장치는 그림 5과 같이, AC 및 DC 전원부, 계측부, 리튬이온배터리 팩, 퓨즈, 텔레이, BMS(battery management system) 등으로 이루어진 배터리 부로 구성된다. 여기서, 이 장치는 배터리 팩 외부로 연결된 커넥터와 고전류 도선의 양극과 음극에 내부저항 측정을 위한 전류를 인가하여 전압 변동에 따른 저항을 측정하도록 구성한다. 또한,

배터리 팩 단위 내부저항 측정의 경우, 셀의 시험과는 다르게 전원부에서 인가된 전류가 배터리 팩 내부의 연결부, 퓨즈와 릴레이 등을 통과하므로 배터리 셀의 열화와 더불어 배터리 전류 경로 내 이상을 감지할 수 있다.



[그림 5] 배터리 팩 내부저항 측정장치의 구성

5. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

5.1 시뮬레이션 및 시험 조건

리튬이온배터리의 내부저항을 통해 SOH에 따른 열화를 평가하기 위한 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, AC IR은 IEC 62620의 시험방법에 따라 1[kHz]의 정현파 전압을 인가하여 측정하며, DC IR은 방전전류를 0.2 C-rate에서 1 C-rate로 변경한 시점에서의 전압변동을 통해 산정한다. 또한, SOH에 따른 배터리 팩의 열화특성을 평가하기 위하여, 충·방전 효율이 100[%]에서 87.5[%]까지 2.5[%] 단위로 감소한 지점에서 내부저항을 측정한다. 한편, 배터리 팩의 사양은 표 2와 같다.

[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

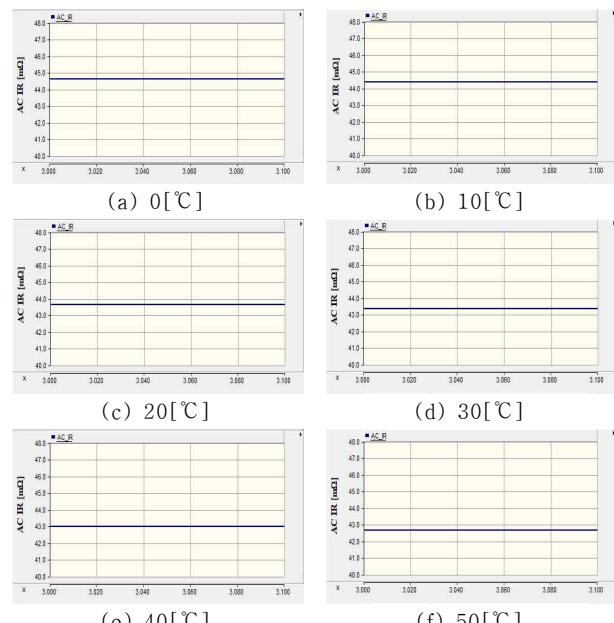
항목		내역	
내부저항 측정 방법	AC IR	입력 전류 주파수 [kHz]	1
	DC IR	방전 전류 [C-rate]	0.2, 1
주변 온도 [°C]		0, 10, 20, 30, 40, 50	

[표 2] 리튬이온배터리의 사양

항목	내역
배터리 셀	정격 전압 [V]
	정격 용량 [Ah]
배터리 팩	정격 전압 [V]
	정격 용량 [kWh]

5.2 PSCAD/EMTDC 모델링에 의한 내부저항 특성

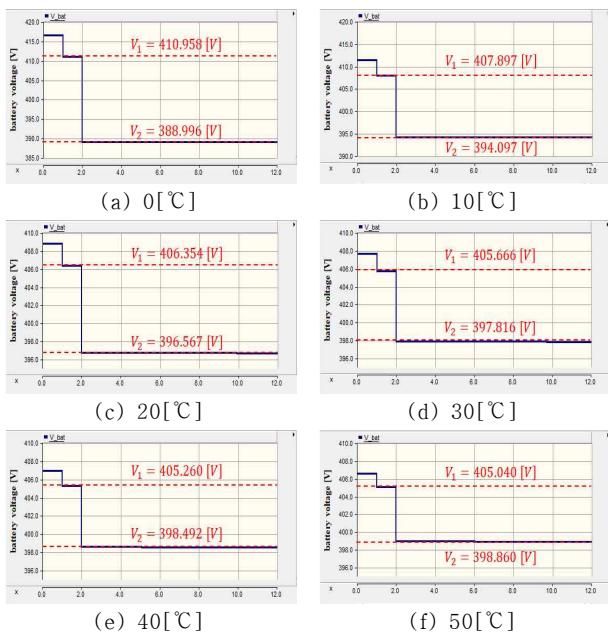
상기의 3장에서 제시한 내부저항 시험장치의 모델링을 바탕으로, 온도 조건에 따른 AC IR의 운용특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 6의 (a)와 같이 0[°C]에서 배터리 팩의 AC IR은 44.61[mΩ]로 산정되고, 그림 6의 (b)와 같이 10[°C]에서 44.36[mΩ]로 약간 감소함을 알 수 있다. 또한, 그림 6의 (c), (d), (e), (f)는 온도 조건이 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C]인 경우의 AC IR의 운용특성을 나타내는데, 각각 43.62[mΩ], 43.34[mΩ], 42.98[mΩ], 42.64[mΩ]로 산정되어, 온도가 증가할수록 AC IR이 다소 감소함을 알 수 있다.



[그림 6] 모델링에 의한 온도 조건에 따른 AC IR 특성

한편, 온도 조건에 따른 DC IR의 운용특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 (a)와 같이 0[°C]에서 배터리 팩의 DC IR은 152.51[mΩ]로 산정되고, 그림 7의 (b)와 같이 10[°C]에서 95.83[mΩ]로 크게 감소함을 알 수 있다. 또한, 그림 7의 (c), (d), (e), (f)는 온도 조건이 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C]인 경우의 DC IR의 운용특성을 나타내는데, 각각 67.26[mΩ], 54.51[mΩ], 47.00[mΩ], 42.92[mΩ]으로 산정되며, 상온에 비해 저온에서 매우 큰 값으로 변동하여, 온도가 증가함에 따라 DC IR은 AC IR보다 비교적 큰 변동폭을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서, 온도 조건에 따른 배터리의 열화를 내부저항에 의해 평

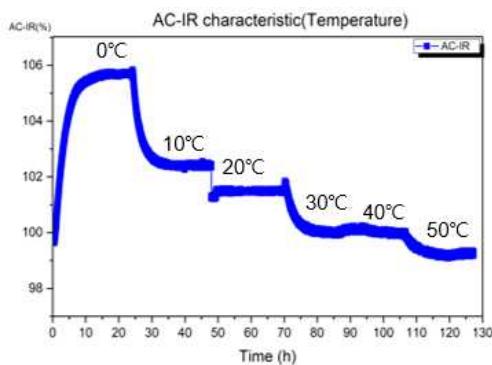
가하는 경우, DC IR이 더 효과적임을 알 수 있다.



[그림 7] 모델링에 의한 온도 조건에 따른 DC IR 특성

5.3 시험장치에 의한 내부저항 특성

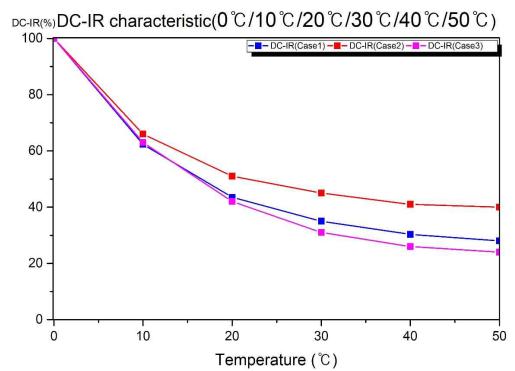
배터리의 온도 조건에 따른 AC IR 측정 방법에 의한 내부저항 특성은 그림 8과 같다. 실제 상용화된 전기자동차의 배터리로 상온(25[°C]) 기준 AC IR 측정값을 기준점으로 시험한 결과, 온도별로 방치시간에 관계없이 AC IR 측정값이 포화되는 것을 확인할 수 있고, 온도가 증가함에 따라 내부저항 값이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 온도 증가에 의해 배터리 팩 내부의 도체와 배터리 셀의 저항계수(ρ)가 감소하여, 전체 저항이 작아지는 것을 나타내며, 이에 따라 AC IR 측정 방법은 상온 대비 최대 6[%] 정도의 분포도가 발생함을 알 수 있다.



[그림 8] 시험장치에 의한 온도 조건에 따른 AC IR 특성

한편, 배터리의 온도 조건에 따른 DC IR 측정 방법에 의한 내부저항 특성은 그림 9와 같다. 실제 상용화된 전기자동차의 배터리로 0[°C] 기준 DC IR 측정값을 기준점으로 시험한 결과, 온도

가 증가함에 따라 내부저항 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 온도별로 최대 70[%] 정도의 분포도를 가지는데, 이는 AC IR과 동일하게 배터리 팩 내부의 도체와 배터리 셀의 저항계수에 기인하는 요인과 더불어 실제 전류가 흐르며 충·방전이 이루어지는 DC IR에서는 배터리 화학적 특성이 더 크게 작용한 것으로 평가된다. 따라서, AC IR과 DC IR은 온도 조건에 따라 각각 6[%], 70[%] 정도의 편차가 발생하여, 내부저항을 통해 배터리의 열화를 평가하는 경우, 온도 조건을 고려해야 함을 알 수 있다.



[그림 9] 시험장치에 의한 온도 조건에 따른 DC IR 특성

6. 결 론

본 논문에서는 리튬이온배터리의 1차 RC Ladder 등가회로 모델을 바탕으로 배터리 내부 파라미터를 산정하고, PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여 배터리부, 내부저항 측정장치부, 등으로 구성된 내부저항 시험장치의 모델링을 수행하며, 이를 바탕으로 배터리 팩의 AC IR과 DC IR을 측정하는 내부저항 시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 모델링 및 시험장치를 바탕으로 온도 조건에 따른 내부저항 특성을 평가한 결과, AC IR과 DC IR은 온도 조건에 따라 각각 6[%], 70[%] 정도의 편차가 발생하여, 내부저항을 통해 배터리의 열화를 평가하는 경우 온도 조건을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2025년도 정부(소방청, 산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구로 관련 부처 및 기관에 감사드립니다. (RS-2025-25395160, 리튬배터리 제조사업장의 전주기 화재 안전 관리시스템 기술 개발)

참고문헌

- [1] 김태현, 최찬주, 한진협, “사용후 배터리 재활용 국내·외 시장 동향 및 에너지정책 분석”, 에너지기후변화학회지, Vol.19, No.1, pp.244–267, 2024