

전기차 사용후 배터리 내부저항 평가 방안에 관한 연구

정재범***, 임민규***, 김남현**, 김현재**, 노대석*

*한국기술교육대학교

**한국산업기술시험원

e-mail:jjb@ktl.re.kr

A Study on Assessment of Internal Resistance with used Batteries for Electric Vehicle

Jae-Beom Jung***, Min-Gyu Lim***, Nam-Hyun Kim*, Hyun-Jae Kim*, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

**Korea Testing Laboratory

요약

최근, 국내외에서 전기자동차(electric vehicle, EV) 시장의 확대에 따라, 가까운 미래에 사용후 배터리의 급격한 증가가 예상되고 있다. 이에 따라, 국내 관계부처 등에서 전기차 폐전지에 대한 활용 체계 확립을 위한 제도적 지원체계를 마련하고 있으며, 특히 재사용(repurposing) 분야에서는 사용후 배터리의 성능과 안전성을 확보할 수 있는 유효성 있는 평가 방안에 초점을 두고 다양한 연구가 진행되고 있다. 사용후 배터리의 재사용은 통상 사용된 EV용 배터리를 에너지 저장장치(energy storage system, ESS) 분야에서 활용되는 것이 대부분이며, 사용 환경에 따라 달라질 수 있는 배터리 특성과 최근 몇 년간 지속적으로 발생하고 있는 EV 및 ESS용 중대형 배터리 화재사고에 따라 재사용 전 전수 검사가 필수적으로 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 비교적 신속한 검사 특성을 갖고 있는 내부저항 측정 방법의 다양한 동작 메커니즘을 제시하고, 이를 바탕으로 중대형 배터리 셀 및 팩의 내부저항 측정용 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로, 실제 NMC 계열의 상용화된 중대형 배터리에 적용하여, 충전도(state of charge, SOC), 건전도(state of health, SOH)에 따른 내부저항을 실측한 결과, 배터리 재사용을 위한 내부저항 측정 및 안전성 평가에 유효함을 알 수 있었다.

relay, BMS 등으로 구성된 배터리 팩의 내부저항 시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 메커니즘과 구현한 시험장치를 바탕으로 다양한 시나리오별 배터리 셀 및 팩의 내부저항을 평가한다.

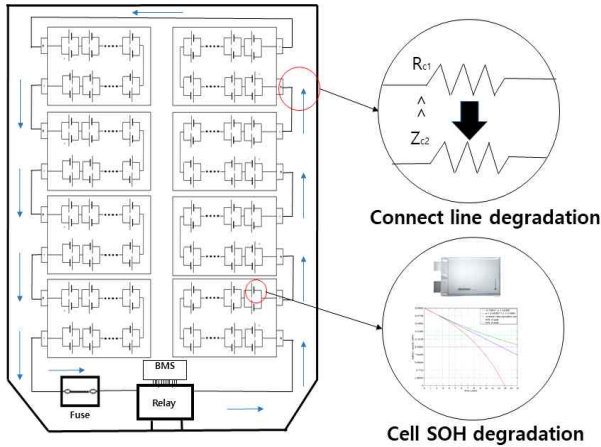
1. 서론

최근 국내외 환경규제와 소비자의 환경의식 강화로 탄소중립 달성을 위해 다양한 방안이 모색되고 있는 가운데, 국내외 전기차 시장의 급격한 확장으로 향후 사용후 배터리 배출량의 폭발적인 증가가 예상되고 있다. 한편, 사용후 배터리는 운용환경 및 사용자에 따라 달라지는 배터리의 열화 특성으로 인해 전수검사가 필수로 요구되며, 전수검사 시간의 감소를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 즉, 비교적 신속한 검사 특성을 갖는 내부저항 측정 방법을 이용하여, 사용후 배터리의 성능과 안전성에 영향을 줄 수 있는 열화 특성을 평가하는 것이 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 내부저항 측정방법으로 IEC 61960-3, IEC 62620, ISO 12405-4, UL 1974 등의 표준을 근거하여 AC IR 과 DC IR의 측정 메커니즘을 제시한다. 한편, 상기에서 제시한 메커니즘을 바탕으로 배터리의 내부저항을 평가하기 위하여, AC 및 DC 전원부, 계측부, 리튬이온배터리 셀 등으로 구성된 배터리 셀의 내부저항 시험장치와 AC 및 DC 전원부, 계측부, 리튬이온배터리 셀, fuse,

2. 사용후 리튬이온배터리의 내부저항 특성

배터리의 내부저항은 일반적으로 배터리의 특성을 나타내는 주요 지표로 사용되고 있다. 즉, 배터리는 열화가 진행될수록 내부저항이 높아지게 되고, 줄열(Joule Heat)에 따른 에너지 손실과 방전 말단 전압(discharge termination voltage) 강하으로 인하여 배터리의 성능에 악영향을 끼칠 가능성이 있다. 또한, 배터리의 내부저항은 제조공정상 문제가 발생할 경우 값이 달라질 수 있어, 대부분의 배터리 제조공정에서 내부저항을 핵심적인 평가항목으로 적용하는 것이 일반적이다. 한편, 사용후 배터리의 내부저항 측정은 상기의 표준을 바탕으로 [그림 1]과 같이 배터리의 열화를 평가하기 위해 사용된다. 여기서, 배터리 열화는 크게 배터리 셀 자체의 열화와 접

속부 열화로 구분된다. 먼저, 셀의 열화는 셀 내부 리튬 이온의 이동에 따른 내부 화학적 변화에 기인하며, 높거나 낮은 주변 온도 및 고전류로 해당 열화가 가속될 수 있다.



[그림 1] 전기차 배터리의 열화 종류

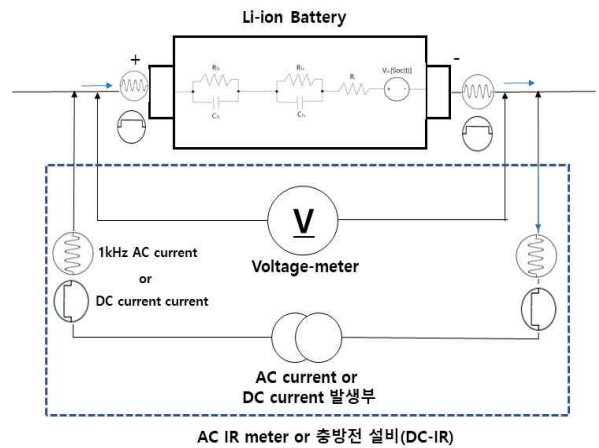
한편, 접속부 열화는 배터리가 사용된 제품의 지속적인 진동·충격과 같은 물리적인 요인으로 발생할 수 있으며, 열화로 인해 높아진 임피던스에 따른 상승된 저항열이 배터리 셀에 영향을 미쳐 안전에 위해를 가할 수 있다. 또한, 접속부 열화에 의한 임피던스는 접속부의 리액턴스 성분을 포함하고 있어 측정 방법에 따라 변동될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 내부저항의 측정에 사용되는 AC IR 및 DC IR의 메커니즘을 분석하고, 이를 바탕으로 시험장치를 구현하여 사용 후 배터리의 성능과 안전성을 효과적이고 효율적으로 평가할 수 있는 방안을 제시한다.

3. 내부저항 측정 메커니즘 및 시험장치 구현

3.1 AC IR 측정 메커니즘 및 시험장치 구현

AC IR은 주파수를 가변하면서 측정하는 방법과 특정 주파수에서 측정하는 방법이 있으나, 본 논문에서는 여러 국제표준에 제시되어 있는 1kHz 주파수에서 측정하는 AC IR 방법을 적용한다. 여기서, AC IR은 간편하고 신속한 측정 방법으로 배터리 셀 제조공정 등에서 사용되고 있으며, 입고 및 출고 검사 등에도 널리 사용되고 있고, 휴대용 기기에 사용되는 배터리를 대상으로 하는 IEC 61960-3과 ESS를 포함하는 산업용 배터리의 IEC 62620 표준 내 셀 등에도 적용되고 있다. 한편, AC IR 측정방법은 그동안 대부분 휴대용 소형기기에 사용되는 셀 및 소형 팩 단위로만 사용되었으므로, 중대형 모듈 혹은 팩 단위의 고전압 배터리 측정 방법에 대한 다양한 연구가 요구되고 있으며, 특히 중대형 배터리의 재사용을 위한 중대형 셀 및 이를 활용한 모듈 및 팩 등에 대한 측정 방법

이 시급한 상황이다. 또한, AC IR 측정 방법은 높은 주파수의 AC 전류를 이용하는 만큼 리액턴스 성분까지 측정할 수 있는 장점이 있으므로, 접속부가 존재하는 중대형 모듈과 팩 단위의 고전압 배터리의 열화를 정확하게 측정할 수 있다. 한편, 중대형 배터리 셀의 내부저항 측정을 위한 시험장치의 구성은 [그림 2]와 같다. 여기서, 내부저항 시험 장치는 배터리 셀 외부로 도출된 양극과 음극에 내부저항 측정을 위한 AC 및 DC 전류를 인가하여 일정 시간 동안의 전압 변동에 따른 저항을 측정하며, AC 및 DC 전원부, 계측부, 리튬이온배터리 셀 등으로 구성된다.



[그림 2] 배터리 셀 내부저항 측정 구성도

3.2 DC IR 측정 메커니즘 및 시험장치 구현

DC IR 측정 방법은 일정한 직류 전류를 주입한 후 전압 변동을 측정하여 해당 전류에 의하여 저항을 계산하는 방식이다. 짧은 시간동안 전류(I_1)로 방전하여 전압(U_1)을 측정하고, 다시 증가된 방전전류(I_2)로 전압(U_2)을 측정하여, 상기의 전압 변동분을 바탕으로 식 (1)과 같이 저항(R_{dc})을 산정한다.

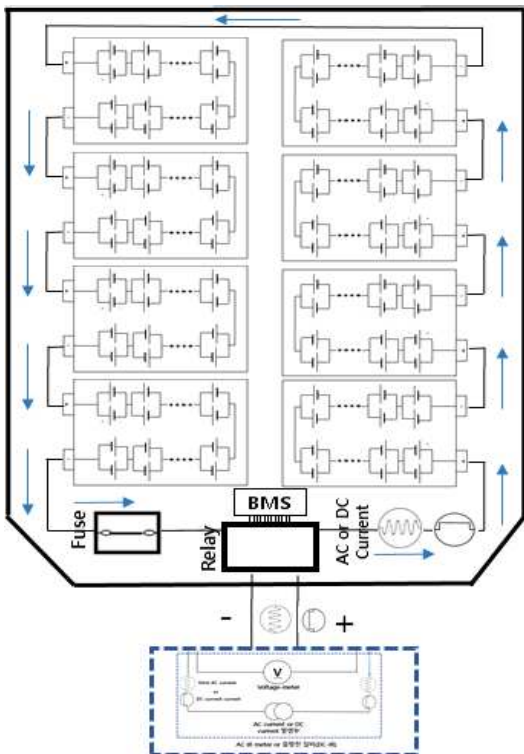
$$R_{dc} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} (\Omega) \quad (1)$$

R_{dc} : 내부 저항, U_1, U_2 : 측정된 전압, I_1, I_2 : 방전 전류

상기와 같이 방전을 수행하면서 측정하는 방법 외에 충전을 수행하며 내부저항을 구하기도 한다. 하지만, DC IR 방법은 내부저항 측정 중에 배터리가 직류전류에 의하여 부분적으로 충전, 방전이 이루어지므로 SOC가 변동되어 반복 측정 시 오차가 발생하고, 충·방전 설비 준비 및 전류 경로 형성을 위한 고정 등 시험 준비 시간 소요 등의 단점이 있다.

한편, 중대형 배터리 팩의 내부저항 시험장치는 [그림 3]과 같이, AC 및 DC 전원부, 계측부, 리튬이온배터리 셀, fuse,

relay, BMS 등으로 이루어진 배터리부로 구성된다. 여기서, 이 장치는 배터리 팩 외부로 연결된 커넥터와 고전류 도선의 양극과 음극에 내부저항 측정을 위한 전류를 인가하여 전압 변동에 따른 저항을 측정하도록 구성한다. 한편, DC IR 측정 방법은 실제 사용 조건과 동일하게 전류를 흘리면서 측정할 수 있으므로 사용상 고전류 특성 및 이에 따른 열화를 측정할 수 있으며, 인버터 등과 연결된 대용량 배터리의 경우 별도의 시험설비를 연결하지 않고 현장평가가 가능하다는 점에서 AC IR 측정 방법에 비해 장점을 가지고 있다. 한편, DC IR 측정 방법은 소형 및 중대형 셀과 팩 단위로 활용되어 왔으나, 재사용 배터리의 SOC, SOH 등과 같은 조건에 따른 측정값의 신뢰성에 대한 연구가 요구되고 있다.



[그림 3] 배터리 팩 내부저항 측정 구성도

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서는 상용화된 NMC 계열 중대형 배터리로 각 조건별 내부저항 측정을 통해 배터리의 내부저항 특성을 제시한다. 각 시험별 조건에 따라 SOC를 설정하는 방법은 IEC 62660-1에 따라 표준 충전 후 안정화 시간을 거쳐 방전하는 절차에 따라 수행한다. 여기서, SOC에 따른 내부저항 측정을 위한 SOC 선정값은 관련 국제표준을 바탕으로 [표 1]과 같이 상정한다.

[표 1] 표준 내 SOC 조건 및 시험조건 산정

standards	SOC for AC IR	SOC for DC IR
UL 1974	-	20%, High
ISO 12405-4	-	20~80%
IEC 62620	(50 ± 10)%	(50 ± 10)%
Test SOC	0/25/50/100%	20/50/80%

한편, SOH에 따른 내부저항 측정을 위해, IEC 62620에서 제시한 절차에 따라 용량 측정을 수행한 후 내부저항을 측정한다.

4.2 SOC에 따른 내부저항 특성

SOC에 따라 배터리의 AC IR 측정 방법에 의한 내부저항 특성은 [표 2]와 같다. 실제 상용화된 전기자동차의 배터리로 SOC 0% 일 때 측정값을 기준으로 시험한 결과, SOC가 높아질수록 AC IR 측정값이 다소 감소하는 경향은 있으나, 최대 3% 정도로 DC IR에 비하여 감소폭이 크지 않음을 알 수 있다. 특히, SOC 0%와 25%에서 측정된 AC IR의 내부저항 분포도는 모두 1.8% 이내임을 알 수 있다.

[표 2] SOC 조건에 따른 AC IR 특성

soc(%) sample	0%	25%	50%	100%
no. 1	100.00	98.21	97.51	96.58
no. 2	100.00	98.77	98.21	96.98
no. 3	100.00	99.58	98.10	98.03

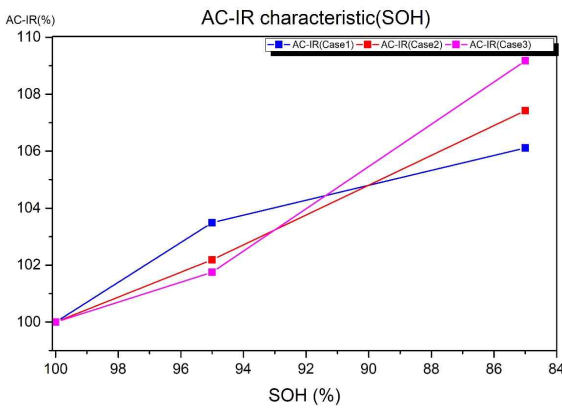
한편, SOC에 따라 배터리의 DC IR 측정 방법에 의한 내부저항 특성은 [표 3]과 같다. 실제 상용화된 전기자동차의 배터리로 SOC 20% 일 때 측정값을 기준으로 시험한 결과, SOC 50%일 때 DC IR 측정값이 최대값 대비 5% 내외의 분포도를 나타내고 있다. 반면에 SOC 20% 및 80%인 경우, SOC 50%보다 높은 DC IR 측정값을 가지는데, 이는 전압-전류 방전곡선 내 SOC 50%가 상대적으로 기울기가 작은 평탄한 구간에 위치하는 리튬이온배터리 특성에 기인한 것으로 평가된다. 따라서, SOC에 따른 AC IR과 DC IR에 의한 측정값이 다소 큰 분포도를 보이므로, 내부저항 측정 시 특정 SOC 범위를 지정하여 측정하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

[표 2] SOC 조건에 따른 DC IR 특성

soc(%) sample	20%	50%	80%
no. 1	100.00	94.94	98.64
no. 2	100.00	95.73	99.71
no. 3	100.00	98.28	102.02

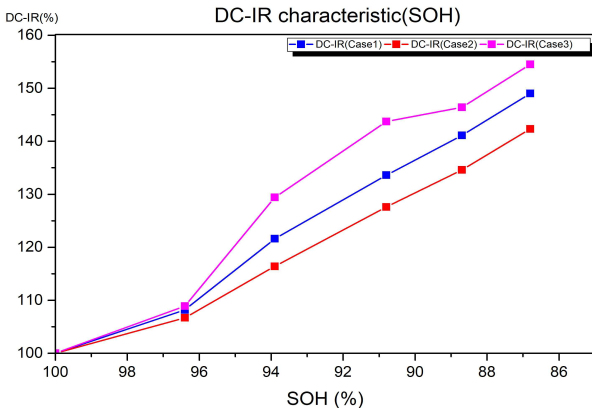
4.3 SOH에 따른 내부저항 특성

AC IR 측정 방법에 의하여 SOH를 고려한 배터리의 내부저항 특성은 [그림 4]와 같다. 실제 상용화된 전기자동차의 배터리로 초기 SOH 100%의 AC IR 측정값을 기준으로 시험한 결과, SOH가 낮아질수록 AC IR 측정값은 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 배터리 셀 열화에 따른 내부저항이 증가하는 특성을 AC IR 측정을 통해 확인할 수 있는데, 열화가 진행됨에 따라 AC IR 측정값이 초기 대비 7% 내외로 증가하는 것을 확인할 수 있다.



[그림 4] SOH 조건에 따른 AC IR 특성

한편, DC IR 측정 방법에 의하여 SOH를 고려한 배터리의 내부저항 특성은 [그림 5]와 같다. 실제 상용화된 전기자동차의 배터리로 초기 SOH 100%의 DC IR 측정값을 기준으로 시험한 결과, SOH가 낮아질수록 DC IR 측정값은 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 배터리 셀 열화에 따른 내부저항이 증가하는 특성을 DC IR 측정을 통해 확인할 수 있는데, 열화가 진행됨에 따라 DC IR 측정값이 초기 대비 50% 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, SOH에 따른 AC IR 측정값에 비해 DC IR 측정값이 더 큰 분포도가 발생하여, 배터리 셀 자체 열화를 진단하는데 있어 DC IR 측정 방법이 더욱 효과적인 것을 알 수 있다.



[그림 5] SOH 조건에 따른 DC IR 특성

5. 결 론

본 논문에서는 국내 중대형 이차전지에 사용되는 배터리 중 가장 널리 사용되는 NMC계열 리튬이온배터리를 대상으로, 배터리 재사용을 위한 내부저항 측정을 SOC, SOH 등 다양한 시험 조건에 따라 수행하고, 이를 분석한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. SOC 시험조건에 따른 AC IR, DC IR 측정 방법은 각각 최대 3%, 5% 내외의 분포도를 보이므로, 내부저항 측정 시 특정 SOC 범위를 지정하여 측정하는 것이 바람직함을 확인할 수 있다. 한편, SOH 시험조건에 따른 AC IR, DC IR 측정 방법은 각각 7%, 50% 정도의 분포도를 보이므로, 배터리 셀 자체 열화를 진단하는데 있어 DC IR 측정 방법이 더욱 효과적인 것을 알 수 있다. 상기의 결과에 따라, 배터리 재사용을 위한 내부저항 측정 시 SOC 조건을 준수하고, 셀 자체의 열화 진단은 DC IR 측정 방법이 적합함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 ‘(No.20215910 100030)ESS 설치공간의 화재예방·차단 시스템 및 유지관리 가이드라인 개발’ 과제의 일환으로 진행된 연구로서, 관계부처에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Kim, D. H. Tae, I. M. Lee, G. P. Lim, D. S. Rho, "A Study on Modeling of Leakage Current in ESS Using PSCAD/EMTDC", Korea Academy Industrial Cooperation Society, vol. 22, no. 2, pp. 810-818, 2021.
- [2] A. S. Mussa, A. Liivat, F. Marzano, M. Klett, B. Philippe, C. Tengstedt, G. Lindbergh, K. Edstrom, R. W. Lindstrom, P. Svens, "Fast-charging effects on ageing for energy-optimized automotive iNi1 / 3Mn1 / 3Co1 / 3O2 / graphite prismatic lithium-ion cells", Journal of Power Sources, vol. 422, pp. 175-184, 2019.
- [3] T. Mori, "Advanced Technologies for Impedance-based Performance Estimation and Deterioration Diagnosis of Lithium-ion batteries", Kogyo Zairyo, vol. 69, no. 7, pp. 30-35, 2021