

사용후 배터리의 재사용을 위한 내부저항 측정 평가 방안에 관한 연구

정재범^{***}, 임민규^{**}, 김남현^{**}, 장정윤^{**}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교

^{**}한국산업기술시험원

e-mail:jjb@ktl.re.kr

A Study on Assessment by Internal Resistance Measurement for Repurposing using Used Battery

Jae-Beom Jung^{***}, Min-Gyu Lim^{**}, Nam-Hyun Kim^{**}, Jeong-Yoon Jang^{**}, Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Korea University of Technology and Education

^{**}Korea Testing Laboratory

요약

전 세계적인 전기차(EV, electric vehicle) 시장의 확대에 따라, 가까운 미래에 사용후 배터리의 급격한 증가가 예상되고 있다. 이에 따라 국내 관계부처 등에서, 전기차 폐전지에 대한 재활용 체계 확립을 위한 지속적인 지원체계를 마련하고 있으며, 에너지저장장치(ESS, energy storage system) 분야에서 재사용하는 방안이 가장 유력한 대안으로 떠오르고 있다. 하지만, 사용후 배터리는 사용 환경에 따라 달라질 수 있는 배터리 특성과 최근 몇 년간 지속적으로 발생하고 있는 ESS 배터리 사고 상황에 따라, 재제조 전의 전수 검사가 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라, 전수 검사시간 소요에 따른 양산성 확보에 어려움이 예상되고 있으며, 이를 개선하기 위해 검사의 유효성과 경제성을 확보하기 위한 다양한 시험방법에 관한 연구의 필요성이 커지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 비교적 신속한 검사 특성을 갖고 있는 내부저항 검사 방법의 동작 원리 및 활용 사례, 시험장치를 구현한다. 또한, 실제 전기자동차용 중대형 배터리에 적용하여 SOC, 온도 및 연결부 열화에 따른 내부저항을 실측한 결과, 내부저항 측정 평가에 대한 본 논문의 유효성을 확인할 수 있었다.

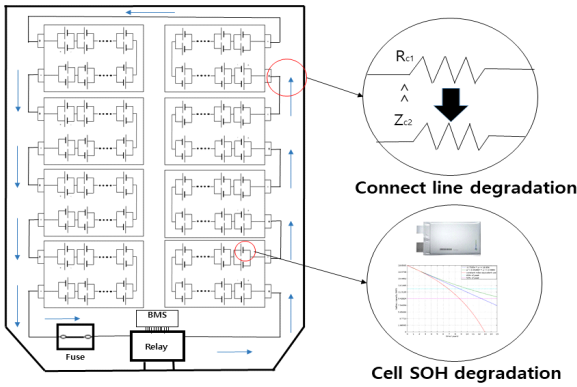
항 검사 방법의 동작 원리 및 활용 사례, 측정 메커니즘을 알아보고, 또한 실제 사용후 배터리를 활용하여 온도와 연결부 열화와 같은 변수에 따른 실측치를 통해 유효성을 확인한다.

1. 서론

현재 국내외 전기차 시장의 급격한 확장으로 인해 향후 사용후 배터리 배출량 증가가 예상되고 있다. 특히 세계 전기차 보급량은 2020년 600만대에서 2030년 전체 자동차 판매량의 27%인 2,600만대 규모로 성장이 예상되며, 국내의 경우 2020년 누적 기준 약 9.3만대 규모에서 『2030년 국가로드맵』 기준 2030년 300만대로 확대할 계획을 갖고 있어 사용후 배터리 규모 역시 크게 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 관계부처 등에서 전기차 폐전지에 대한 재활용 체계 확립을 위한 지속적인 활동이 진행 중으로 『수도권 대기환경 개선에 관한 특별법』과 『대기환경 보전법』 개정을 통한 2021년 등록차량부터 전기차 배터리 반납의무 폐지를 통해 사용후 배터리 민간 시장 확대를 도모하고 있다. 특히 국내에서 반납되는 전기차 배터리는 2030년까지 107,520대 가량으로 예상되어, 사용후 배터리 시장 활성화를 위해 신속·정확한 성능평가검사 및 진단 기술 등에 대한 연구가 시급한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 비교적 신속한 검사가 가능한 내부저

2. 내부저항 측정 원리 및 사례 분석

배터리의 내부저항은 통상 배터리의 특성을 나타내는 주요 지표로 사용되고 있다. 일반적으로 배터리가 열화 될수록 내부저항이 높아지게 되고, 줄열(Joule Heat)에 따른 에너지 손실과 방전 말단 전압 하강으로 배터리 성능은 악화된다고 알려져 있다. 또한 배터리 제조공정상 문제가 발생할 경우 내부저항 값이 달라질 수 있어, 대부분의 배터리 제조공정에서 내부저항을 측정항목으로 적용하는 것이 일반적이다. 현재, 사용후 배터리 관련 표준으로 국제표준인 IEC 63330가 제정 중에 있고, 해외 표준으로는 UL1974는 제정 완료되었으며, 국내에서는 사용후 배터리 실증특례 대상 임시 안전기준(안)을 기반으로 신규 KC 제정을 진행하고 있으며, 상기의 모든 표준에서 내부저항 평가 항목을 포함하고 있다.



[그림 1] 중대형 배터리 팩의 열화 종류

사용후 배터리에서 내부저항 측정은 [그림1]과 같이 배터리의 열화를 감지하기 위해 사용된다. 배터리 내 열화는 크게 배터리 셀 자체의 열화와 연결부 열화로 나눌 수 있다. 셀의 열화는 익히 알려진 바와 같이 셀 내부 리튬 이온의 이동에 의해 기인하며, 높거나 낮은 환경온도 및 고전류로 열화가 가속될 수 있다. 연결부 열화의 경우 배터리가 사용된 제품의 지속적인 진동·충격과 같은 물리적인 요인으로 발생할 수 있으며, 열화로 인해 높아진 임피던스에 따른 높은 저항열로 인해 안전에 위해를 가할 수 있다.

2.1 AC-IR 동작 원리 및 사례 분석

통상 AC-IR은 주파수를 가변하면서 측정하는 방법과 특정 주파수에서 측정하는 방법이 있으나, 본 논문에서는 여러 국제표준상 사용되는 1kHz 주파수에서 측정하는 AC-IR 방법으로 특정하도록 한다. 앞서 설명한 바와 같이 AC-IR은 간편하고 빠른 측정 방식으로 배터리 셀 제조공정 등에서 널리 사용되고 있으며, 입고 및 출고 검사 등에도 널리 사용되고 있다. 국제 표준 중 휴대용(Portable)기기에 사용되는 배터리를 대상으로 하는 IEC 61960과 ESS를 포함하는 산업용 배터리에 적용되는 IEC 62620 표준 내 셀 등에 AC-IR 항목이 적용되고 있다. 표준에서 적용되는 AC-IR의 주파수는 1KHz 부근으로 최대값(Peak)은 20mV를 넘지 않도록 하며, 측정값이 제조사가 제시한 값 이하가 되는 것을 판단 기준으로 삼고 있다.[2,3] 이에 따라, 앞서 설명한 제조공정 혹은 입고출고 검사에서도 해당 표준 등을 기준으로 1kHz의 주파수를 적용하여 AC-IR을 측정하는 것이 일반적이다. 대부분의 제조공정에서는 표준과 다르게 상한값과 하한값을 지정하여, 특정 범위를 벗어나면 불량으로 처리하는 것이 일반적이다. 한편, AC-IR은 그동안 대부분 휴대용 소형기기에 사용되는 셀 및 소형 팩 단위로 측정해왔기 때문에, 모듈 혹은 팩 단위의 고전압 배터리 측정 결과에 대한 다양한 연구가 요구되고 있으며 특히 중대형 배터리 셀 및 이를 활용한 모듈 및 팩에 대한 연구가 시급한 상황이다.

2.2 DC-IR 동작 원리 및 사례 분석

DC IR 방식은 일정한 직류 전류를 흘린 후 전압 변화를 측정 후 해당 전류로 나누어 저항을 계산하는 방식으로, 통상 짧은 시간동안 전류(I₁)로 방전하며 전압(U₁)을 측정 후, 상승된 방전전류(I₂)으로 방전하며 전압(U₂)을 측정 후 식(1)과 같이 DC-IR R_{dc}를 계산하는 방식이 일반적이다.

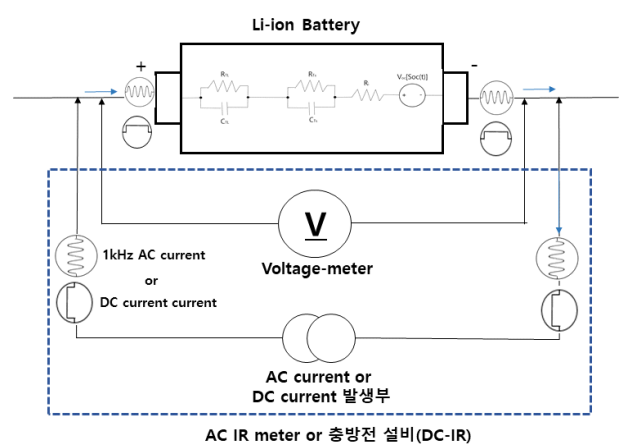
$$R_{dc} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} \quad (\Omega) \quad \text{식 (1)}$$

저항 측정 중 배터리가 직류전류에 따라 실제 충전, 방전이 이루어지므로 충전심도(SOC, state of charge)가 달라져 반복 측정 시 재현성이 다소 떨어지고, 충·방전 설비 준비 및 전류 경로 형성을 위한 고정 등 시험 준비 시간 소요 등의 단점이 있다.

3. 배터리 내부저항 시험장치 구현

3.1 배터리 셀 내부저항 시험장치 구현

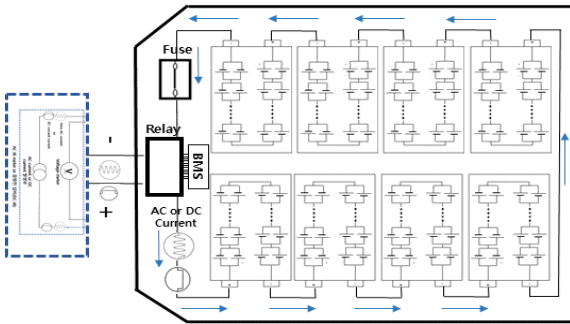
배터리 셀의 내부저항 시험 시 NMC 계열의 중대형 배터리 셀을 사용하며, 내부저항 시험을 위한 시험장치를 [그림 2]과 같이 구성한다. 배터리 셀의 내부저항 측정을 통해 셀 내부의 열화(degradation)에 따른 내부저항 증가에 따른 내부저항 증가를 확인할 수 있다. 내부저항이 증가할 경우 전류에 따른 전압 하락폭이 커져 수명에 악영향을 끼치게 된다. 특히, 리튬이온배터리의 성능을 확인할 수 있는 널리 알려진 SOH(State Of Health)를 측정하는 것이 중요하네, 이 SOH 값은 통상 측정된 용량을 정격용량으로 나눠 계산할 수 있다.[4] 현재 특정 주파수로 측정된 AC-IR 값으로 SOH를 추정하는 것은 어려우나, 열화정도가 높을 경우 배터리 셀 모델별로 특정 상한값을 제시할 수 있을 것으로 보인다.



[그림 2] 배터리 셀의 내부저항 측정 개념도

3.2 배터리 팩 내부저항 시험장치 구현

배터리 팩의 내부저항 시험 시 실제 전기자동차에 사용되는 배터리 팩을 사용하며, 내부저항 시험을 위한 시험장치를 [그림 3]과 같이 구성한다. 배터리 팩 단위 내부저항 측정의 경우, 앞서 언급한 배터리 셀의 열화와 더불어 배터리 전류 경로 내 이상을 감지할 수 있다. 배터리 팩 내부에는 전기적 연결을 위한 수많은 연결부가 있는데, 해당 부분이 열화 등을 통해 접촉 불량에 발생한 경우 내부저항을 통해 검출할 수 있다. 다만, 상기 2가지의 유효성을 적용하기 위해서는 많은 연구가 요구되며, 특히 셀 열화의 경우 다양한 배터리의 시험을 통해 많은 통계적 데이터를 확보하는 것이 바람직하다.

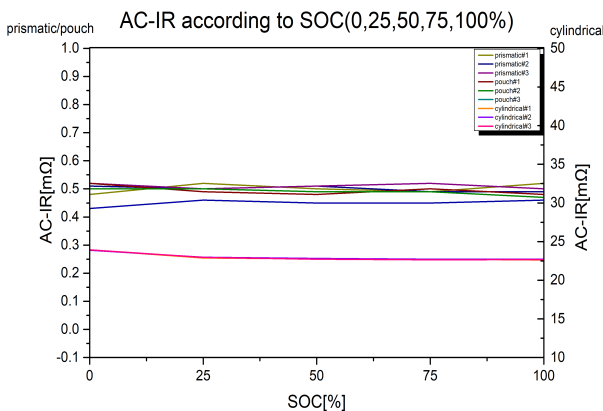


[그림 3] 배터리 팩의 내부저항 측정 개념도

4. 전기차 배터리의 내부저항 특성 분석

4.1 SOC에 따른 내부저항 특성

SOC에 따라 배터리 셀의 AC-IR을 측정된 결과는 [그림 4]와 같다. 시험 결과의 신뢰도를 높이기 위해, 원통형, 각형, 파우치형 배터리를 적용하여 시험을 수행한 결과, SOC에 따른 AC-IR 측정값은 큰 유의차가 없는 것으로 나타난다. SOC가 높아질수록 AC-IR이 다소 감소하는 경향은 있으나, 5% 내외의 편차로 크지 않은 것으로 확인된다.



[그림 4] SOC에 따른 셀의 AC-IR 측정결과

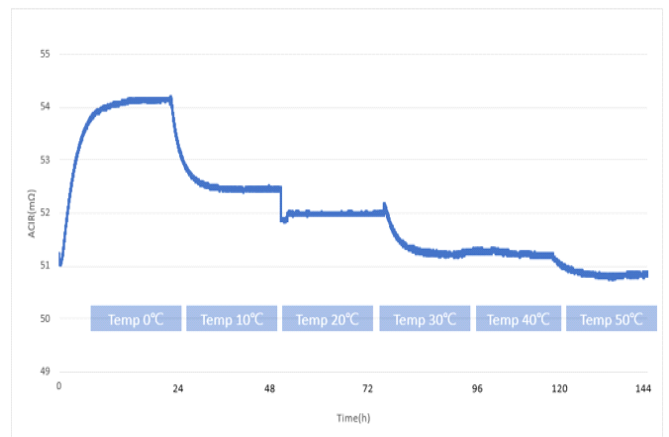
SOC에 따라 배터리 팩의 AC-IR을 측정된 결과는 [표 1]과 같다. 실제 주행을 진행한 전기자동차의 배터리로 시험한 결과, 셀과 동일하게 SOC가 높아질수록 AC-IR이 다소 감소하는 경향은 있으나, 최대 3% 내외 편차로 크지 않은 것으로 보인다. 특히 SOC 0%와 25%에서 측정된 AC-IR의 차이는 모두 1.8% 이내로 나타나 큰 유의차가 없는 것으로 결과가 확인된다.

[표 1] SOC에 따른 팩의 AC-IR 측정결과

items	pack AC-IR measurement(mΩ)			
	0%	25%	50%	100%
sample#1	44.12	43.33	43.02	42.61
sample#2	44.08	43.54	43.29	42.75
sample#3	43.08	42.90	42.26	42.23

4.2 온도 및 방치에 따른 내부저항 특성 분석

배터리 팩의 온도 및 방치시간에 따른 내부저항 특성은 [그림 5]와 같다. 온도별로 방치시간에 관계없이 AC-IR 측정값이 포화되는 것을 확인할 수 있고, 온도가 증가함에 따라 측정값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 배터리 팩 내부의 도체와 배터리 셀의 비저항계수(ρ)가 온도 증가에 따라 작아짐에 따라 전체 저항이 감소하는 것으로 보인다. 본 시험결과에 따라, 각 표준에서 AC-IR을 측정하는 온도조건을 명시해야 하며, 내부저항 측정 시 명시된 온도조건을 준수해야 함을 확인할 수 있다.



[그림 5] 온도에 따른 AC-IR 변화 그래프

4.3 연결부 열화에 따른 내부저항 특성

연결부 열화를 모사한 상황을 토크값 변경하여 체결부를 열화시킨 후 내부저항을 검사한 결과는 [표 2]과 같다. 체결부 열화 전후를 비교한 결과, DC-IR 측정값은 1% 미만의 증가

율을 보이는 반면, AC-IR은 SOC에 관계없이 100% 이상의 저항 증가율을 보이고 있다. 이를 통해, 배터리 셀을 연결하는 체결부 열화를 확인하는데 AC-IR 측정 방법이 DC-IR보다 효과적임을 확인할 수 있다.

[표 2] 체결부 열화 후 내부저항 검사 결과

SOC	시험방법	정상상태 내부저항(mΩ)	체결부 열화 내부저항(mΩ)	증가율(%)
30%	AC-IR	44.09	95.95	117.62
	DC-IR	104.70	105.63	0.89
90%	AC-IR	42.93	180.17	319.68
	DC-IR	101.59	102.28	0.68

5. 결 론

본 논문에서는 내부저항 검사 방법의 동작 원리 및 활용사례, 측정 메커니즘을 확인한 결과, 내부저항 측정을 통해 배터리 셀의 열화 및 연결부의 접촉 불량 등의 열화를 확인할 수 있으며, 연결부 열화를 확인에 있어 AC-IR 측정방법이 DC-IR에 비해 유효성이 있음을 확인하였다. 또한, SOC에 따른 내부저항 확인 결과, SOC 증가에 따라 AC-IR이 다소 감소하나 배터리 셀과 팩 모두 큰 유의차는 없는 것으로 확인된다. 더불어, 온도에 따른 AC-IR 값의 변화를 확인하여 명시된 온도조건을 준수해야 함을 확인할 수 있으며, 저전압 배터리에 사용되는 내부저항 측정방법을 중대형 모듈 혹은 팩 단위의 추가적인 연구가 요구되고 있음을 확인할 수 있다. 향후 제정되는 사용후 배터리 표준에 내부저항 측정 항목이 반영될 경우, 본 논문의 결과를 통해 시간 및 절차 간소화를 통해 제품 양산성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행 중인 ‘(20019231)전기차 사용후전지의 내부 이력정보를 활용한 평가기법 개발’ 과제의 일환으로 진행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Jae-beom Jung, “A Study on Assessment Method by AC-IR for Re-purposing of EV Battery”, Journal of The KIEE Fall Conference(2021), October, 2021
 [2] IEC 61960-3:2017 Secondary cells and batteries

containing alkaline or other non-acid electrolytes
 [3] IEC 62620:2014 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes-secondary lithium cells and batteries.
 [4] Takumi Mori, “Advanced Technologies for Impedance-based Performance Estimation and Deterioration Diagnosis of Lithium-ion batteries”, for Kogyo Zairyo 69 (7) pp30-35, 2021
 [5] John Wang, “Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickle-cobalte-manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation”, Journal of Power Sources 269 pp937-948, June, 2014