

EV 폐배터리의 효율적인 잔존용량 측정 방법에 관한 연구

진진택*

*한국폴리텍대학 전기공학과

e-mail:jinfind@kopo.ac.kr

A Study on Efficient Residual Capacity Estimation Methods for Retired Electric Vehicle Batteries

Jin-Taek Jeon*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea Polytechnic

요 약

최근 전기자동차 보급 확대에 따라 폐배터리 발생량이 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 폐배터리의 재사용 및 재활용을 위한 기술 개발의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 기존 국내 및 국제 표준의 용량 측정 방법은 저온 및 고율 조건을 포함하거나 단순 용량 측정에 의존하여, 폐배터리의 실제 잔존용량을 정확하게 평가하는 데 한계를 가진다. 따라서, 폐배터리의 내부저항 증가와 셀 불균형을 반영할 수 있는 효율적인 잔존용량 측정 방법이 요구된다. 이에 본 논문에서는 기존 국내외 표준인 USABC, ISO-12405 및 SAE-J1798의 시험 조건을 분석하고, 폐배터리 잔존용량 평가에 적합한 새로운 측정방법을 제안한다. 또한, 시뮬레이션을 통해 각 표준에 따른 용량 평가 결과를 비교하고, 제안한 측정방법의 적용 가능성을 검토한다. 제안한 측정 방법은 기존 표준 대비 폐배터리의 기준 잔존용량에 근접한 결과를 나타내어, 평가 정확도와 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

최근 전기자동차 보급 확대에 따라 폐배터리 발생량이 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 폐배터리의 재사용 및 재활용 산업이 빠르게 성장하고 있다. 글로벌 전기차 폐차대수는 2040년 약 4,227만대에 이를 것으로 전망되며, 폐배터리 시장 규모 또한 지속적으로 확대되고 있다. 또한 국내의 경우 전기차 누적 등록대수가 급증함에 따라 2030년을 전후로 연간 10만 개 이상의 폐배터리가 배출될 것으로 예상된다. 이러한 추세는 폐배터리의 효율적인 관리 및 활용 기술의 필요성을 더욱 증가시키고 있다. 그러나 폐배터리의 재사용을 위해서는 잔존용량(State of Health, SOH)을 정확하게 평가하는 것이 필수적이다. 기존의 용량 측정 방법은 저온 및 고율 조건을 포함하거나, 단순 용량 측정에 의존하는 경우가 많아 실제 잔존용량을 과소평가하거나 폐배터리의 열화 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 따라서 폐배터리의 내부저항 증가, 셀 불균형 등의 특성을 고려한 효율적이고 신뢰성 높은 잔존용량 측정 방법이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 전기자동차 폐배터리의 효율적인 잔존용량 측정 방법을 제안하고, 기존 국내 및 국제표준의 한계를 분석한다. 또한, 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 폐배터리 팩의 시뮬레이션 조건을 이용한 비교 분석을 수행하고, 이를 통해 폐배터리

재사용 판정에 적용 가능한 개선된 평가 방법을 제시한다.

2. EV 폐배터리의 잔존용량 측정방법

2.1 국내 잔존용량 측정방법

국내에서 폐배터리 검사를 위한 표준규격으로는 한국전기협회에서 제안한 단체표준(SPS-C KBIA-10702-01-7416)이 있다. 이 단체표준은 전기자동차의 구동용으로 사용되었던 리튬이온 배터리 또는 모듈을 대상으로 하며, 재사용 가능성 판단을 위한 검사방법을 규정한다. 표 1은 단체표준에서 제시한 용량 측정 규격을 나타낸다.

표 1에 따라, 국내 단체표준은 배터리 검사 시 기준 온도를 25℃로 설정하고, 방전 전류(C-rate)를 C/3로 규정한다. 또한, 방전 종료 조건은 1/20 C로 설정하고 있으며, 시험은 필요에 따라 최대 5회까지 반복하여 수행할 수 있다. 이러한 조건은 표준온도와 비교적 낮은 방전율을 기반으로 하므로, 폐배터리의 실제 잔존용량에 근접한 값을 산출하는 데 유리하다. 또한 시험 절차가 단순하여 산업 현장에서 적용성이 높다.

그러나 국내 단체표준은 용량검사 절차가 단순하고 현장 적용성이 높다는 장점에도 불구하고 몇 가지 한계를 있다. 먼저, 저온 조건이 용량 측정 조건에 포함될 경우 내부저항 증가와 단자전압

강하에 의해 잔존용량이 과소평가될 수 있다. 또한, 폐배터리의 열화 특성을 나타내는 DCIR과 셀 간 불균형 상태를 나타내는 SOB를 별도의 평가 항목으로 반영하지 않으므로, 단순 용량값만으로 재사용 가능성을 판단하는 데 한계가 있다. 아울러 반복시험 횟수에 대한 최적 기준이 명확하지 않아 필요 이상으로 시험 시간이 증가할 수 있으며, 대량 폐배터리 선별을 위한 고속 평가 방법이 부족하다.

따라서 국내 단체표준은 25 °C, C/3 조건을 기반으로 한 기준 용량 측정에는 적합하지만, 폐배터리의 실제 재사용 가능성을 정밀하게 평가하기 위해서는 DCIR, SOB, 온도상승률 및 고속 선별 조건과 같은 보조지표를 추가할 필요가 있다. 즉, 기존 국내 표준의 단순성과 현장 적용성을 유지하면서도, 폐배터리의 내부저항 증가와 셀 불균형을 반영할 수 있는 보정 절차를 결합하는 방향으로 개선되어야 한다.

[표 1] 단체표준 용량 검사 규격

Index	SPC-C KBIA 10702-01-7416	NOTE
Definition of room temperature	-	-
Capacity measurement	Rest : EV 1~4 hour Discharge current : EV C/3 Cutt-off 1/20 C Temperature : -25 °C	-
Life Cycle Test	Repeat up to 5 times at 25 °C	up to 5 times at needed
Target	Battery pack and several modules only	-

2.2 국외 잔존용량 측정방법

국제적으로 배터리 성능검사를 위한 표준규격으로는 USABC, ISO-12405 및 SAE-J1798이 있다. 이들 표준은 전기자동차용 배터리의 용량 및 성능을 평가하기 위한 시험 조건을 제시하고 있으며, 시험 대상, 온도 조건, 방전 전류 및 반복시험 조건에서 차이가 있다. USABC는 배터리 셀 및 팩을 대상으로 하며, SAE-J1798은 모듈 단위의 검사 규격 및 조건을 정의한다. 반면 ISO-12405는 배터리 팩을 대상으로 하며, 도로 차량의 추진용 리튬이온 배터리 팩 및 시스템에 대한 시험 절차를 규정한다. 표 2은 용량검사에 대한 국제표준을 나타낸다.

USABC는 자동차용 배터리의 성능 한계를 검증하기 위한 규격으로, 저온 조건과 고율 방전 조건을 포함한다. 특히 -30 °C와 1C 조건은 배터리의 출력 한계와 저온 운용 가능성을 확인하는 데 유용하지만, 폐배터리의 기준 잔존용량을 측정하는 조건으로 적용할 경우 내부저항 증가와 단자전압 강하에 의해 용량이 크게

과소평가될 수 있다. 따라서 USABC는 폐배터리의 안전성 및 스트레스 검증에는 활용 가능하나, 잔존용량 측정의 기준 표준으로 적용하기에는 한계가 있다.

SAE-J1798은 모듈 단위의 배터리 평가에 적합한 규격이다. 이 표준은 25 °C 조건에서 C/3, C/2 및 1C 방전 조건을 제시하므로, 시험 절차가 비교적 단순하고 측정 재현성이 높다는 장점을 가진다. 그러나 평가 대상이 주로 모듈에 한정되고, 다양한 온도 조건을 충분히 반영하지 못하므로 실제 폐배터리의 운용 환경을 포괄하기에는 부족하다. 따라서 SAE-J1798은 모듈 단위의 비교 평가에는 유용하지만, 폐배터리 팩의 잔존용량 기준 평가 표준으로 사용하기에는 현실성이 낮다.

ISO-12405는 배터리 팩을 대상으로 하며, 25±2 °C의 기준 온도와 함께 -25 °C, 0 °C, 18 °C, 25 °C, 40 °C의 다양한 온도 조건을 포함한다. 또한 용량 측정 방법으로 C/3, C/2 및 1C의 방전 전류 조건을 제시하고, 25 °C 조건에서 2회 반복시험을 수행하도록 규정한다. 이러한 점에서 ISO-12405는 팩 단위 평가, 온도 다양성, 반복성 및 자동차 산업 적용성을 모두 고려한 규격으로 볼 수 있다. 따라서 USABC와 SAE-J1798에 비해 정확성, 현실성 및 재현성 측면에서 균형이 우수하며, 폐배터리 잔존용량 검사의 기본 표준으로 가장 적합하다.

그러나 ISO-12405를 폐배터리 잔존용량 평가에 그대로 적용하는 데에는 몇 가지 한계가 있다. 먼저, -25 °C에서 40 °C까지의 다양한 온도 조건을 모두 수행할 경우 시험시간과 시험 에너지가 크게 증가한다. 또한 저온 및 고율 조건은 배터리의 실제 열화량 뿐만 아니라 내부저항 증가와 분극 현상에 따른 전압강하를 함께 반영하므로, 이를 용량 산정 조건에 포함하면 잔존용량이 왜곡될 수 있다. 즉, ISO-12405는 용량 평가 조건과 성능 검증 조건이 혼합되어 있어 폐배터리의 기준 잔존용량 판정에는 별도의 조건 분리가 필요하다.

아울러 ISO-12405는 폐배터리의 고유한 열화 특성을 충분히 반영하지 못한다. 폐배터리는 사용 이력에 따라 내부저항이 증가하고, 셀 간 전압 및 용량 편차가 커지는 특성을 가진다. 그러나 ISO-12405에는 DCIR, SOB 및 SOC-OCV 기반 보정 절차가 명확히 포함되어 있지 않다. 따라서 ISO-12405를 기반으로 하되, 기준 용량검사는 25±2 °C, C/3, 60분 휴식, 2회 반복 조건으로 설정하고, 저온-고율 조건은 안전성 및 운용한계 검증 항목으로 분리해야 한다. 또한 DCIR, SOB 및 SOC-OCV 보조지표를 추가함으로써 폐배터리의 실제 재사용 가능성을 보다 정밀하게 평가할 수 있도록 개선할 필요가 있다.

[표 2] 용량검사에 대한 국제표준

I dex	USABC	ISO-12405	SAE-J1798
Issuer	USABR, DOE	ISO	SAE
BEV and HEV test procedures	Same	Different	Same
Definition of room temperature	30 °C	(25±2) °C	(25±2) °C
Capacity measurement	Rest : at least 1 hour Discharge current : C/3, C/2, 1C Temperature : -30°C~-52°C	Rest : BEV 60 min, HEV 30 min Discharge current : BEV C/3, C/2, 1C; HEV 1C Temperature : -25°C, 18°C, 0°C, 25°C, 40°C	Discharge current : C/3, C/2, 1C
Life Cycle Test	1 Time at specific temperature	2 times at 25°C	-
Target	Both cell and Battery pack	Battery pack only	Module
Note	Focus on automotive batteries stringent	Comparatively less stringent	-

2.3 제안한 잔존용량 측정방법

국내외 표준의 단점을 보완하기 위하여, 본 연구에서는 폐배터리 잔존용량 평가에 적합한 측정방법을 제안한다. 제안한 측정방법은 국내 단체표준 및 국제표준의 시험 조건을 기반으로 하되, 폐배터리의 잔존용량 평가에 적합하도록 재구성한 시험 절차로 나타낼 수 있다. 기존 표준은 용량 평가와 성능 검증 조건이 혼합되어 있어 저온 및 고온 조건에서 내부저항 증가와 분극 현상이 함께 반영되며, 이로 인해 잔존용량이 과소평가될 수 있다. 이에 제안 측정방법은 25±2 °C, C/3 조건을 기준 용량 평가로 설정하고, 온도에 따라 성능 및 안전성 검증 항목으로 분리하여 적용한다. 여기서, 기준 용량에 따른 SOH는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SOH(\%) = \frac{Q_{measured}}{Q_{nominal}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, $Q_{measured}$: 측정된 방전용량[Ah], $Q_{nominal}$: 정격용량[Ah]

또한, 제안 측정방법은 폐배터리의 열화 특성을 반영하기 위하여 DCIR과 SOB를 포함한다. DCIR은 식 (2)와 같이, 펄스 전류 인가 전후의 전압 차이를 이용하여 산정할 수 있다.

$$R_{DCIR} = \frac{V_o - V_t}{I_{pulse}} \quad (2)$$

여기서, V_o : 전류인가직전전압[V], V_t : 펄스인가후전압[V], I_{pulse} : 펄스전류[A]

한편, SOB는 셀 간 전압 불균형을 나타내는 지표로서 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$SOB = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{avg}} \quad (3)$$

여기서, V_{max} : 셀 전압의 최대값[V], V_{min} : 셀 전압의 최소값[V], V_{avg} : 셀 전압의 평균값[V]

따라서, 제안 측정방법은 단순 용량 측정 결과에 DCIR 및 SOB를 함께 반영함으로써, 내부저항 증가와 셀 불균형에 따른 조기 차단 가능성을 고려할 수 있다.

또한, SOC-OCV 추정은 식 (4)와 같이 개방회로전압을 이용하여 충전상태를 산정하는 방법으로 나타낼 수 있다.

$$SOC = f(OCV) \quad (4)$$

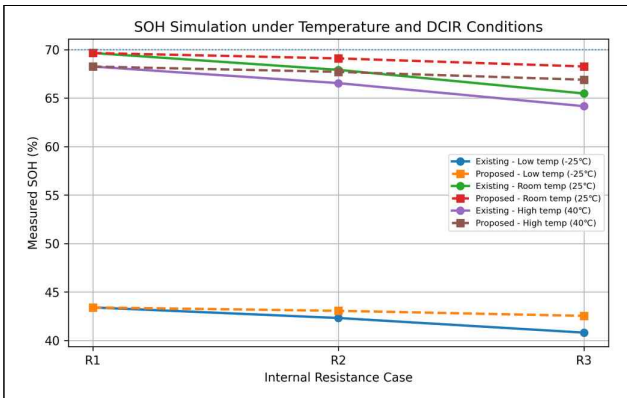
여기서, $f(OCV)$: 배터리 화학계에 따른 OCV-SOC 관계함수

한편, 제안 측정방법은 25 °C, C/3, 2회 반복을 기준 시험으로 설정하고, 필요 시 C/2 조건의 고속 선별시험과 저온-고온 조건의 추가 검증시험을 적용할 수 있다. 따라서, 제안 측정방법은 기존 국내 및 국외 표준 대비 시험시간을 단축하면서도 DCIR, SOB 및 SOC-OCV 정보를 함께 활용하여 정확도와 재현성을 동시에 확보할 수 있는 개선된 평가 방법으로 판단된다.

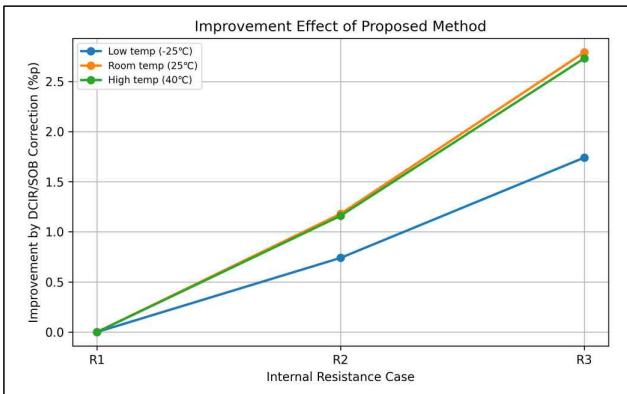
[표 3] 용량검사에 대한 제안한 측정방법

I dex	Proposed measurement method
Issuer	Research Proposed (Based on ISO-12405)
BEV and HEV test procedures	Same (Unified for EV second-life evaluation)
Definition of room temperature	(25±2) °C
Capacity measurement	Reference Test: Rest: 60 min Discharge current: C/3 Temperature: 25±2°C Fast Screening: C/2 (optional) Stress Test (separated): 1C, -25°C / 40°C
Life Cycle Test	2 times at 25°C (optimized repeat)
Target	Battery pack (primary), Module (optional)
Additional evaluation	DCIR measurement (pulse test) SOB (cell imbalance) SOC-OCV estimation
Note	Optimized for second-life batteries (Accuracy + Efficiency + Field applicability)

온도 및 DCIR 조건에 따른 잔존용량 평가 특성은 그림 1, 2와 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 그림 1은 저온(-25 °C), 상온(25 °C) 및 고온(40 °C) 조건에서 내부저항 변화에 따른 SOH 추정 특성을 나타낸다. 기존 표준은 내부저항이 증가할수록 측정 SOH가 감소하는 경향을 나타내며, 특히 저온 조건에서는 내부저항 증가와 전압강하에 의해 잔존용량이 크게 감소함을 알 수 있다. 반면, 제안한 측정방법은 DCIR 및 SOB 보정을 적용함으로써, 내부저항 증가 조건에서도 실제 SOH에 보다 근접한 결과를 나타낸다. 또한, 그림 2는 제안한 측정방법의 개선 효과를 나타내며, 내부저항이 증가할수록 기존 표준 대비 SOH 추정 오차 감소 효과가 증가하는 특성을 나타낸다. 특히, 내부저항이 크게 증가한 R3 조건에서는 약 2.7 %p 이상의 개선 효과를 나타내어, 제안한 측정방법이 폐배터리의 내부저항 증가와 셀 불균형 영향을 효과적으로 보정할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 1] 온도·DCIR 조건별 SOH 곡선 그래프



[그림 2] 제안방법 개선 효과 그래프

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 시뮬레이션 조건

폐배터리 잔존용량 평가 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 X와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 기준 배터리는 전기자동차용 폐배터리 팩을 모의하기 위하여 50 Ah, 360 V로 설정하고, 실제 열화 상태를 반영하기 위하여 True SOH는 70 %로 설정

한다. 또한, 온도 조건은 저온(-25 °C), 상온(25 °C) 및 고온(40 °C)으로 구분하고, 내부저항 조건은 정상 상태인 R1, 열화 상태인 R2 및 심화 열화 상태인 R3로 구분한다. 한편, 기준 시험은 C/3 방전전류, 60분 휴지 및 2회 반복 조건으로 설정한다. 또한, 제안한 측정방법은 기준 시험조건에 DCIR 및 SOB 보정을 추가한 형태로 구성한다. 따라서, 본 시뮬레이션은 온도 변화와 내부저항 증가에 따른 기존 표준의 잔존용량 평가 특성을 분석하고, 제안한 측정방법의 보정 효과를 검증하기 위하여 수행한다.

[표 4] 시뮬레이션 조건

Item	Condition
Reference Battery	50 Ah, 360 V
True SOH	70 %
Temperature Condition	Low temp. -25 °C, Room temp. 25 °C, High temp. 40 °C
Internal Resistance Condition	R1 Normal, R2 Aged, R3 Severely Aged
Reference Test	C/3, 60 min, 2 cycles
Proposed Method	Reference Test + DCIR/SOB Correction

3.2 제안한 측정방법의 특성

시뮬레이션 조건을 바탕으로 온도 및 DCIR 조건에 따른 표준별 잔존용량 평가 특성은 표 5와 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 저온(-25 °C) 조건에서는 모든 표준에서 측정 SOH가 크게 감소하는 특성을 나타낸다. 이는 저온 환경에서 내부저항이 증가하고 단자전압 강하가 크게 발생하여, 실제 잔존용량보다 낮은 값으로 평가되기 때문으로 판단된다. 특히 R3 조건과 같이 내부저항 열화가 심한 경우에는 기존 표준의 측정 SOH가 약 40 % 수준까지 감소하여, 잔존용량이 크게 과소평가될 수 있음을 알 수 있다.

또한, 상온(25 °C) 조건에서는 기존 표준의 측정 SOH가 실제 SOH 70 %에 비교적 근접하게 나타난다. 그러나 내부저항 조건이 R1에서 R3로 악화될수록 측정 SOH가 점차 감소하는 경향을 보이며, 이는 내부저항 증가와 셀 간 불균형에 의해 조기 차단이 발생할 가능성이 있기 때문이다. 한편, 제안한 측정방법은 동일한 온도 및 방전 조건에서 DCIR 및 SOB 보정 항목을 적용하므로, R2 및 R3 조건에서도 기존 표준보다 높은 SOH 값을 나타낸다.

고온(40 °C) 조건에서는 저온 조건에 비해 SOH 감소폭은 작지만, 내부저항 열화가 증가할수록 측정 SOH가 감소하는 특성을 나타낸다. 특히 R3 조건에서 기존 표준은 약 63.4~64.5 %의 SOH를 나타내는 반면, 제안한 측정방법은 66.9 %로 나타나 기존 표준 대비 개선된 결과를 보인다. 따라서, 제안한 측정방법은 온도 변화와 내부저항 열화 조건에서도 DCIR 및 SOB 보정을 통해 실제 SOH에 보다 근접한 잔존용량 평가가 가능함을 알 수 있다.

[표 5] 온도 및 내부저항 조건에 따른 각 표준별 결과

Temperature	DCIR Condition	KBIA SOH (%)	USABC SOH (%)	ISO-12405 SOH (%)	SAE-J1798 SOH (%)	Proposed Method SOH(%)
-25 °C	R1	43.5	42.8	43.2	43.0	43.4
-25 °C	R2	42.3	41.7	42.0	41.9	43.1
-25 °C	R3	40.8	39.9	40.5	40.2	42.5
25 °C	R1	69.7	69.6	69.8	69.5	69.9
25 °C	R2	67.9	67.5	68.0	67.6	69.1
25 °C	R3	65.5	64.8	65.7	65.0	68.3
40 °C	R1	68.3	68.0	68.4	68.1	68.3
40 °C	R2	66.5	66.0	66.7	66.2	67.7
40 °C	R3	64.2	63.4	64.5	63.8	66.9

4. 결 론

본 논문에서는 국내의 표준의 시험조건을 분석하고, 이를 바탕으로 폐배터리 잔존용량 평가를 위한 제안 측정방법을 제시하였다. 제안한 측정방법은 25 ± 2 °C, C/3, 60분 휴지 및 2회 반복 조건을 기준 용량검사로 설정하고, DCIR 및 SOB 보정을 추가하여 폐배터리의 내부저항 증가와 셀 불균형을 반영하도록 구성하였다.

시뮬레이션 검증 결과, 저온(-25 °C) 조건에서는 내부저항 증가와 단자전압 강하에 의해 모든 표준에서 측정 SOH가 크게 감소하였으며, 고온(40 °C) 조건에서도 내부저항 열화가 증가할수록 측정 SOH가 감소하는 특성을 확인하였다. 반면, 제안한 측정방법은 DCIR 및 SOB 보정을 통해 R2 및 R3 조건에서도 기존 표준보다 높은 SOH 값을 나타내어, 온도 변화와 내부저항 열화 조건에서 폐배터리 잔존용량 평가의 정확도와 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 윤영삼, 전기자동차(EV) 폐배터리 기술자료집 국립환경과학원, 2024.12