

DOD 조건 별 노화에 따른 ICA 기반 배터리 내부 상태 분석

김태윤*, 이상력*, 한동호*, 김종훈*
 충남대학교 에너지장변환연구실

Analysis of the internal condition of the battery according to aging of various stress factor conditions based on ICA

Taeyoon Kim*, Sangryuk Lee*, Dongho Han*, Jonghoon Kim*
 Energy Storage and Conversion Lab, Chungnam National University*

ABSTRACT

리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 출력 밀도를 자랑하며 에너지 저장 시스템(Energy Storage System; ESS) 및 전기자동차(Electric Vehicle; EV)의 핵심 에너지원으로 주목받고 있다. 하지만 배터리는 사용과정에서 충전 및 방전이 반복됨에 따라 그 성능과 용량이 점진적으로 감소한다. 이로 인해 결국 수명의 임계점(End-of-Life; EOL)에 도달하여 교체가 필요하게 된다. 본 논문에서는 증분 용량 분석법(Incremental Capacity Analysis; ICA)을 이용해 IC 곡선(IC curve)에서 나타나는 피크 값들을 분석하여 방전 깊이(Depth of Discharge; DOD) 조건에 따른 배터리의 노화와 내부 상태 변화를 분석하였다.

1. 서 론

지구 온난화 방지를 위한 전 세계적인 노력의 일환으로, 많은 국가들이 이산화탄소 배출 감소를 목표로 신재생 에너지 및 전기자동차(EV)와 같은 친환경 에너지원의 사용을 적극적으로 확대하고 있다. 이러한 추세 속에서, 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 낮은 자재 방전률, 그리고 긴 수명과 같은 특징을 가지고 있어 에너지 저장 시스템(Energy Storage System; ESS) 및 전기자동차(Electric Vehicle; EV) 등 다양한 분야에서 핵심 에너지원으로 주목받고 있다. 배터리는 사용과정에서 충전 및 방전이 반복됨에 따라 그 성능과 용량이 점진적으로 감소한다. 이로 인해 결국 수명의 임계점(End-of-Life; EOL)에 도달하여 교체가 필요하게 된다. ESS와 EV의 전반적인 성능은 배터리의 수명과 직결되어 있으며, 배터리를 적시에 교체하지 않을 경우 안전 사고로 이어질 수 있다는 점에서 배터리 수명의 정확한 예측은 시스템의 안정성을 보장하는 데 있어 결정적인 역할을 한다. 이에 따라 배터리의 건강 상태(State-of-health; SOH)를 정확히 평가하기 위한 여러 건강 지표(Health Indicator; HI)가 개발되어 왔다. 이 중 증분 용량 분석(Incremental Capacity Analysis; ICA)은 정전류 충전 또는 방전 시험 데이터를 사용하여 배터리의 전도성 손실, 활성 물질의 감소, 리튬 저장소의 축소와 같은 전기화학적 변화를 비파괴적으로 분석할 수 있는 방법으로 각광받고 있다. 본 논문에서는 ICA 곡선(IC curve)에서 나타나는 피크 값들을 분석하여 방전 깊이(Depth of Discharge; DOD) 조건에 따른 배터리의 노화와 내부 상태 변화를 분석하였다.

2. 증분 용량 분석법

2.1 배터리 셀 열화 시험

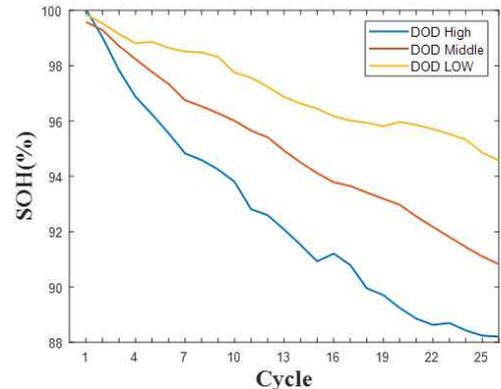


그림 1. DOD 조건별 SOH 변화 그래프
 Figure 1. graph of SOH change by DOD condition

본 논문에서는 리튬이온 배터리의 DOD 조건 별 노화 실험 진행을 위해 INR 21700-33J 원통형 셀을 사용하였다. 실험 장비는 배터리의 충전 및 방전을 위한 충/방전기와 온도를 유지해 줄 수 있는 챔버, 데이터를 측정하는 데이터 로거 및 호스트 컴퓨터로 구성하였다. INR 21700-33J 원통형 셀의 사양은 표 1에 나타내었다.

표 1 INR 21700-33J 원통형 셀 규격
 Table 1 NR 21700-33J Cylindrical Cell Specifications

item	specification
nominal capacity	3270mAh
nominal voltage	3.56V
discharge cut-off voltage	3V
charge cut-off voltage	4.2V

배터리 열화 시험은 충전 상한 전압을 4.2V, 방전 하한 전압을 3V로 선정하였고, 충 방전은 정전류-정전압(Constant current-Constant voltage; CC-CV) 충전 및 정전류(Constant current; CC) 방전 방법을 이용하였으며, 충 방전 전류는 1C-rate(3.2A)를 적용하였다. 충전과 방전 사이에 휴지 1시간을 적용하였다. DOD Low(20%), DOD M(50%), DOD H(80%)의 조건으로 Cap test (1회)-Aging test(50회)를 총 27회 반복하였다. 그림 1은 DOD 조건별 SOH 변화 그래프이다.

2.2 증분 용량 분석

증분 용량 곡선은 일전 전압 변화에 따른 용량의 변화량을 전체 전압 영역에서 나타낸 곡선으로 식(1)과 (2)를 이용하여 나타낸다.

$$Q = It \quad (1)$$

$$IC(Ah/V) = dQ/dV \approx \Delta Q/\Delta V \quad (2)$$

증분 용량을 근사화하기 위한 일정한 전압 구간은 0.1mV로 설정하였다. DOD 조건 별 노화에 따른 증분 용량 곡선의 결과는 그림 1과 같으며, DOD 조건에 따라 IC 곡선의 특징이 상이함을 확인하였다.

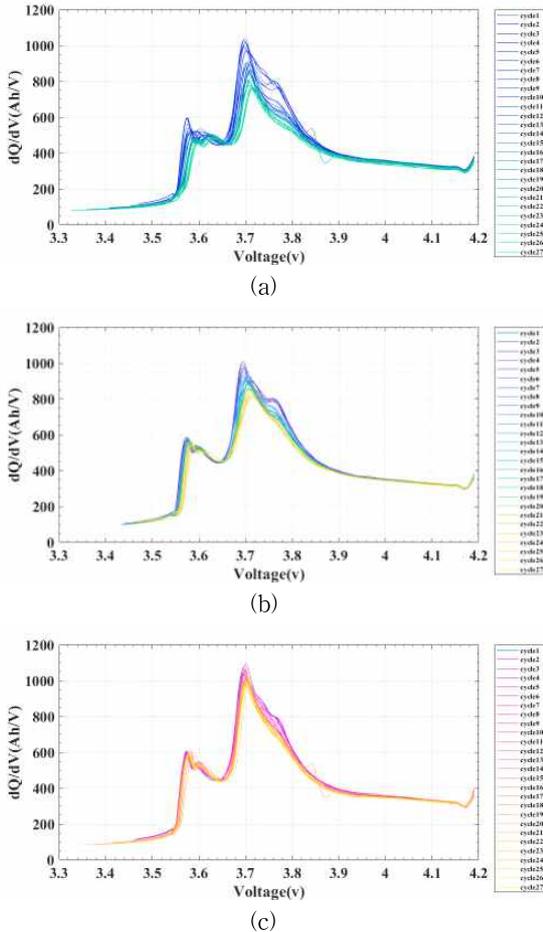


그림 1 DOD 조건 별 IC 및 SOH 그래프
(a) DOD High (b) DOD middle (c) DOD LOW
Fig. 1 IC and SOH Graph by DOD Condition
(a) DOD High (b) DOD middle (c) DOD LOW

그림 2.(a)는 DOD 조건 별 Peak1의 감소폭을 나타내었다. DOD High의 조건에서 SOH의 감소 정도와 Peak1의 감소폭이 가장 크다. SOH의 감소폭을 동일하게 하기 위해 마지막 cycle 기준 SOH의 감소폭이 가장 적은 DOD Low의 SOH 정도를 기준으로 잡았을 때, DOD High의 경우 6.2%, DOD Middle의 경우 4.7%, DOD Low의 경우 5.2%로 SOH의 감소폭이 동일한 경우에도 DOD High의 감소폭이 가장 크다.

그림 2.(b)는 DOD 조건 별 Peak2의 감소폭을 나타내었다. DOD High의 조건에서 Peak 2의 감소폭이 가장 크다. 그림 2.(a)의 경우와 마찬가지로 SOH의 감소폭을 동일하게 하기 위해 DOD Low의 SOH 감소폭을 기준으

로 잡았을 때, DOD High의 경우 12.1%, DOD Middle의 경우 11.5%, DOD Low의 경우 9.12%로 SOH의 감소폭이 동일한 경우에도 DOD High의 감소폭이 가장 크다.

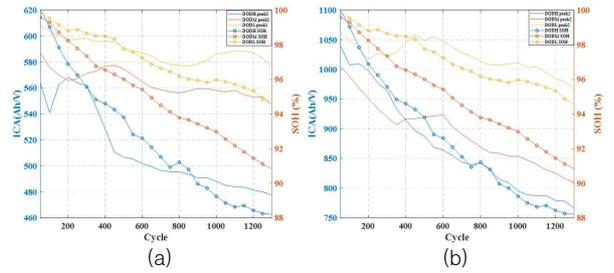


그림 2. 증분 용량 분석으로부터 추출된 노화에 따른 각 Peak 변화
(a) Peak1 (b) Peak2
Figure 1. Each peak change with aging extracted from incremental capacity analysis (a) Peak1 (b) Peak2

그림 3 은 DOD 조건 별 Peak의 전압 강하를 나타내었다. DOD High의 경우 Peak 1은 초기에 비해 60mV 증가하고, Peak 2의 경우 초기 Peak에 비해 18mV 증가하였지만, SOH 감소폭을 동일하게 하였을 경우 DOD 조건 별 차이가 작게 나타났다.

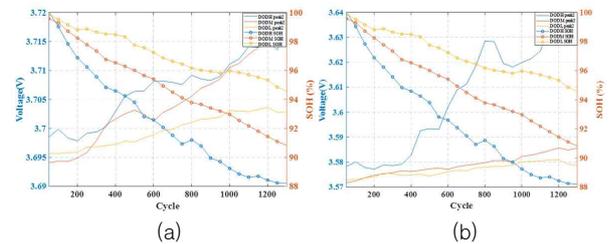


그림 3. 증분 용량 분석으로부터 추출된 노화에 따른 각 Peak 전압 강하 증가폭 (a) Peak1 (b) Peak2
Figure 3. Increase in each peak voltage drop with aging extracted from incremental capacity analysis (a) Peak1 (b) Peak2

3. 결론

본 논문에서는 DOD 조건 별 노화에 따른 ICA 기반 배터리 내부 상태 분석을 진행하였다. 실험 데이터 기반 IC curve를 통해 DOD 조건 별 Peak의 변화 폭을 분석하였다. 추후 SOC, C-rate 및 변동성을 고려한 노화 인자 도출을 통한 배터리 건강상태(State-of health; SOH) 예측을 진행할 계획이다.

본 논문은 지투파워(폐배터리 진단기술 솔루션 반영 및 UBESS 설계)와 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20210501010020, MMC타입 ESS 및 재생에너지 연계 고압형 허브스테이션 핵심기기 개발을 받아 의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] David Anseán & Víctor Manuel García (2019). Lithium-Ion Battery Degradation Indicators Via Incremental Capacity Analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, 55(3), 2992-3002
- [2] Daniel-Ioan Stroe & Erik Schaltz (2019). Lithium-Ion Battery State-of-Health Estimation Using the Incremental Capacity Analysis Technique. IEEE Transactions on Industry Applications, 56(1), 678-685