

# 고용량 리튬 이온 전지의 정전력 출력에 따른 충전 상태와 에너지 상태의 변화에 관한 연구

한승윤\*, 김재원\*, 송현철\*\*, 이성준\*\*\*, 김종훈\*  
 충남대학교 에너지저장변환실험실\*, 한화디펜스\*\*, 조선대학교\*\*\*

## Research on State of Charge and State of Energy variation through constant power discharge in high capacity lithium ion battery

Seungyun Han\*, Jaewon Kim\*, Hyeoncheol Song\*\*, Seongjun Lee\*\*\*, Jonghoon Kim\*  
 Chungnam National University\*, Hanwha Defense\*\*, Chosun University\*\*\*

### ABSTRACT

다양한 기기에 적용된 리튬 이온 전지의 출력은 전력으로 계산되며, 리튬 이온 전지는 전류 기반의 해석뿐만 아니라 전력 기반의 해석 또한 필수적이다. 본 논문은 리튬 이온 전지의 정전력 입력과 출력에 따른 전류 관점의 분석과 전력 관점의 분석을 수행하였다. 리튬 이온 전지에서 정전력 입력 및 출력 시, 충전 상태와 에너지 상태 변화의 차이를 및 용량과 에너지 변화를 분석하였다.

### 1. 서 론

최근 전기기기의 휴대성에 대한 이슈가 발생함에 따라 에너지 저장 장치의 중요성이 증가하고 있다. 에너지 저장 장치는 다양한 방법으로 에너지를 저장하고, 부하의 필요에 따라 저장한 에너지를 출력한다. 대표적인 에너지 저장 장치로는 리튬 이온 전지가 있다. 리튬 이온 전지는 낮은 자가 방전율, 높은 전력 밀도, 높은 에너지 밀도, 넓은 사용 온도 범위 등의 장점이 있다<sup>[1]</sup>. 리튬 이온 전지는 일반적으로 3.3V 이상의 정격 전압을 가지며, 이는 같은 전류에서 높은 전력을 출력할 수 있음을 말한다. 리튬은 6.941g/mol의 에너지를 가진다. 이는 다른 에너지 저장 장치에 비해 높은 에너지 밀도이며 고용량 리튬 이온 전지를 적용하는 주된 이유이다.

대부분 전기기기의 경우 전력을 기준으로 운용된다. 전기자동차는 속도에 따른 전력을 모터를 통해 출력하고, 전력 시스템의 에너지 저장 장치는 주어진 역할에 따라 시스템에서 요구된 전력 출력을 계산하고 이에 맞춰 동작한다. 이 외에도 많은 기기에서 전력을 기준 단위로 에너지 저장 시스템을 설계하고 운용한다. 그러나, 전력이 아닌 전류 기준으로 계산 시, 높은 비선형성을 가진 리튬 이온 전지의 특성을 정확히 반영하기에 어려움이 있다. 그러므로, 리튬 이온 전지의 전력 관점 분석과 해석은 앞으로 전기기기에 에너지를 안정적으로 공급함에 있어 필수적이다.

리튬 이온 전지를 사용하기 위해서는 내부 상태를 알아야 한다. 본 논문에서 내부 상태는 두 가지로 분류하며 충전 상태(State of Charge; SOC)와 에너지 상태(State of Energy; SOE)로 분류한다. SOC는 전류를 기준으로 한 리튬 이온 전지의 용량 상태를 비율로 나타낸다. 이와 달리, SOE는 전력을 기준으로 한 리튬 이온 전지의 에너지 상태를 비율로 나타낸다. 두 내부 상태 모두 0~100% 사이의 값을 가지며, 그 이상



그림 1 실험 장비 구성  
 Fig. 1 Experimental Setup

표 1 Samsung INR 21700-50E 사양  
 Table 1 Samsung INR 21700-50E Specification

Item	Specification
Nominal voltage	3.6V
Charge cut-off voltage	4.2V
Discharge cut-off voltage	2.5V
Standard charge current	2.45A
Max discharge current	9.8A

또는 이하로 충전과 방전 시, 과전압 현상이 발생할 수 있다. 리튬 이온 전지에서 SOC는 전류의 입출력에 따라 계산된다. 방전 전류를 (+)로 계산 시, SOC는 식 (1)과 같이 나타낸다. 식 (1)에서 SOC<sub>k</sub>는 k번째 시각의 SOC를 말하고 SOC<sub>0</sub>은 초기 SOC를 말한다. I(t)는 리튬 이온 전지에 인가된 전류를 의미한다. C<sub>n</sub>은 리튬 이온 전지의 용량을 말한다. SOC는 초기 SOC에서 충전 전류가 인가되면 증가하고, 방전 전류를 출력하면 감소한다<sup>[1,2]</sup>. SOC와 달리 SOE는 전력의 입출력에 따라 계산된다. 방전 전력을 (+)로 계산 시, SOE는 식 (2)와 같이 나타낸다. 식 (2)의 SOE<sub>k</sub>는 k번째 시각의 SOE를 말하고, SOE<sub>0</sub>은 초기 SOE를 말한다. P(t)는 리튬 이온 전지에 인가된 전력을 의미한다. Q<sub>n</sub>은 리튬 이온 전지의 에너지량을 의미한다. SOC와 같이 SOE 또한 충전 전력이 인가되면 증가하고, 방전 전력을 출력하면 감소한다<sup>[3,4]</sup>. 본 논문에서는 정전력 출력에 따른 SOC와 SOE의 변화를 분석하고 정전력의 크기 변화에 따른 용량과 에너지 보유 비율에 대해 분석한다.

$$SOC_k = SOC_0 - \int_0^k \frac{I(t)}{C_n} dt \tag{1}$$

$$SOE_k = SOE_0 - \int_0^k \frac{P(t)}{Q_n} dt \tag{2}$$

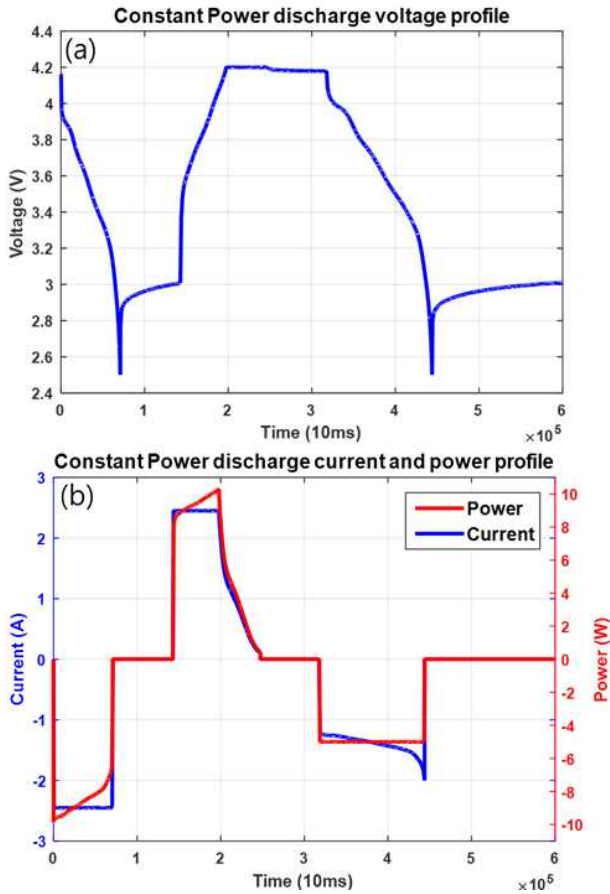


그림 2 정전력 방전 시험 프로파일 (a) 전압, (b) 전류와 전력  
 Fig. 2 Constant power discharge profile  
 (a) voltage, (b) current and power

## 2. 정전력 실험

실험 장비 구성은 그림 1과 같다. 실험에 사용된 전지는 Samsung社 INR 21700-50E 리튬 이온 전지를 사용한다. 실험 프로파일은 그림 2와 같다. 표 1은 INR 21700-50E의 사양이다. 충전은 정전류-정전압으로 방전은 정전력으로 수행한다. 그림 2는 5W 정전력 방전 시험 프로파일이다. 그림 2 (a)는 전압 프로파일이고, 그림 2 (b)는 전류와 전력 프로파일이다. 그림 2 (b)에서 정전류 모드에서는 전력이 비선형적으로, 정전력 모드에서는 전류가 비선형적으로 거동하는 것을 확인할 수 있다. 방전 시, 정전력의 크기는 리튬 이온 전지의 최대 연속 방전 전류(9.8A)와 방전 제한 전압(2.5V)을 고려해 설정한다. 본 논문에서 방전 시, 정전력은 5W, 10W, 15W, 20W를 진행하였다. 실험을 통해 정전력 크기 변화에 따른 리튬 이온 전지의 상태 변화를 확인한다.

## 3. 실험 결과

본 논문은 리튬 이온 전지의 정전력 출력에 따른 상태 변화를 분석하기 위해 5W, 10W, 15W, 20W의 크기로 4.2V에서 2.5V까지 방전하였다. 그림 3은 방전 중 SOC와 SOE의 변화를 전력 크기별로 분석한 것이다. 그림 3을 통해 SOC와 SOE의 변화에 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는

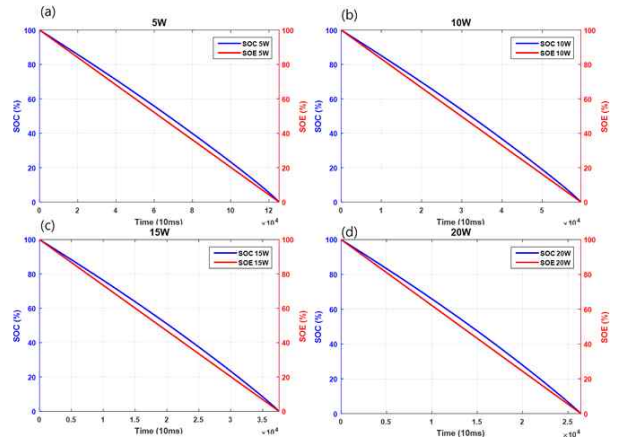


그림 3 전력 크기별 SOC와 SOE의 비교  
 (a) 5W, (b) 10W, (c) 15W, (d) 20W  
 Fig. 3 Comparison between SOC and SOE per power  
 (a) 5W, (b) 10W, (c) 15W, (d) 20W

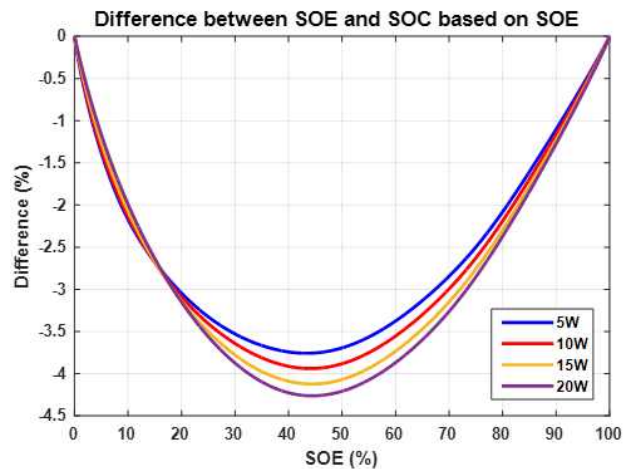


그림 4 전력 크기별 SOC와 SOE 편차  
 Fig. 4 Deviation between SOC and SOE per power

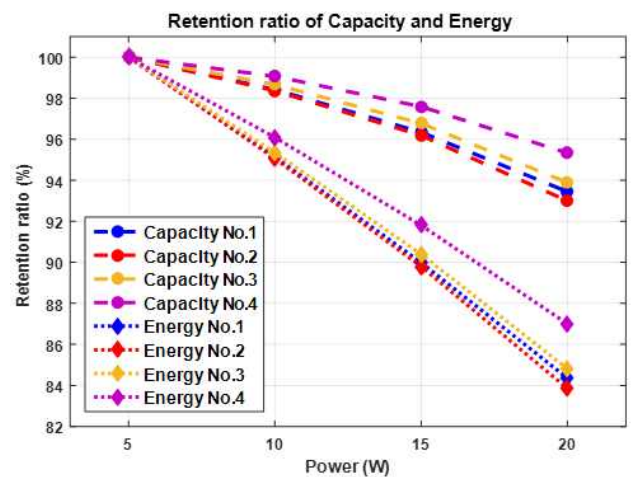


그림 5 전력 크기별 용량 및 에너지 보유 비율  
 Fig. 5 Retention ratio of capacity and energy per power

SOC와 SOE의 편차를 SOE를 기준으로 나타낸 것으로 전력의 크기가 증가함에 따라 SOC와 SOE의 편차가 증가한다. 또한,

*SOE*의 중간 영역에서 편차가 증가한다. 정전력 실험 결과 5W에서 최대 3.75%, 10W에서 최대 3.93%, 15W에서 최대 4.12%, 20W에서 최대 4.26%를 나타낸다. 그림 5는 리튬 이온 전지 4개의 정전력의 크기에 따른 용량 보유 비율과 에너지 보유 비율을 나타낸 그래프이다. 가장 낮은 5W 정전력 방전을 기준으로 10W, 15W, 20W까지의 변화율을 분석한다. 그림 5를 통해 용량 보유 비율은 에너지 보유 비율에 대비해 약 10% 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 용량은 20W 정전력 방전 시, 5W 용량 기준 최대 92.99%까지 감소하였다. 이에 비해 에너지는 20W 정전력 방전 시, 5W 에너지 기준 최대 83.85%까지 감소하였다. 용량의 변화에 비해 에너지의 변화가 큰 것은 전력 기준으로 구동하는 전기기기와 에너지 저장 장치에 있어 가용 에너지 분석의 중요성을 명시한다.

#### 4. 결 론

본 논문은 고용량 리튬 이온 전지의 정전력의 크기 변화에 따른 *SOC*와 *SOE* 변화의 차이를 분석하였으며, 용량과 에너지 보유량의 변화를 분석하였다. *SOC*와 *SOE*의 편차는 *SOE* 기준 가운데 영역에서 정전력의 크기가 증가함에 따라 벌어졌다. 또한, 정전력의 크기가 커질수록 에너지와 용량 보유율이 감소하였으며, 용량 보유율의 변화보다 에너지 보유율의 변화가 급격한 것을 확인했다. 이는 전력 기반으로 구동되는 시스템에서 부하 조건이 변화할 때 리튬 이온 전지의 최적 운용 방법에 대해 용량뿐만 아니라 에너지의 변화를 필수적으로 고려해야 하는 것을 명시한다. 추후 리튬 이온 전지의 환경 조건과 부하 조건을 고려한 에너지 변화를 추정하는 알고리즘을 설계하여 전력 시스템 및 대용량 에너지 저장 장치의 최적 운용 및 제어 분야에 관하여 추가 연구를 진행할 것이다.

본 논문은 한화디펜스와 국토교통부 교통물류사업의 연구비 지원(20TLRP-C135446-01, 택배차량용 디젤 트럭의 하이브리드 개조기술 개발 및 실용화)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Bo Ning, "Adaptive sliding mode observers for lithium-ion battery state estimation based on parameters identified online", *Energy*, Vol. 153, pp. 732-742, 2018, April.
- [2] Jiani Du, "Adaptive sliding mode observer for lithium-ion battery state of charge and state of health estimation in electric vehicles", *Control Engineering Practice*, Vol. 54, pp. 81-90, 2016, September.
- [3] Linfeng Zheng, "Novel methods for estimating lithium-ion battery state of energy and maximum available energy", *Applied Energy*, Vol. 178, pp. 1-8, 2016, June.
- [4] Kaiyuan Li, "A Practical Lithium-Ion Battery Model for State of Energy and Voltage Responses Prediction Incorporating Temperature and Ageing Effects", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 65, No. 8, pp. 6696-6708, 2017, December.