

# 신형전지의 충/방전특성 모델링에 관한 연구

김 병기, 노 대석  
 한국기술교육대학교  
 e-mail: dsrho@kut.ac.kr

## A Study on the Charging/Discharging Modeling of New Typed Secondary Battery

Byeongki Kim, Daeseok Rho  
 Korea University of Technology and Education

### 요 약

최근, 2차전지로서는 타 전지에 비하여 고 에너지 밀도와 고 전압의 특성을 갖고 있는 리튬2차전지가 가장 많이 활용되고 있으며, 이 특성 때문에 전기자동차, 우주왕복선, 분산전원의 한 형태인 전력 저장장치에까지 그 이용이 증대되고 있다. 시스템의 최적성능을 보장하기 위해서는 용도별 싸이클 수명성능을 고려한 충방전 설계 및 이를 위한 전기적 등가모델의 정확성이 필수적이다. 따라서, 본 논문에서는 상용 리튬이차전지의 실제 실험 데이터에 근거하여 충/방전 심도 함수를 도출하고, 리튬이차전지의 수명성능평가를 위한 충/방전 특성 모델을 제안하고, 이의 타당성을 입증하였다.

### 1. 서 론

전지의 특성을 모델링하는 방법으로는 간단한 수식으로 전지의 충/방전 특성을 실험데이터에 일치시키는 Peukort's law, 부하전류의 선형2차 함수로 이차전지의 효율을 계산한 방법, 리튬전지의 방전 특성을 모델링하기 위해 통계적인 방법을 이용한 방법이 여기에 있다. 또한, 추상적 등가화방법으로, 전기회로 모델, 이산 시간 함수 모델, 확률적 모델 등이 이용되고 있다. 이 방법에는 특히 PSpice와 VHDL과 같은 상용 시뮬레이션 툴에서 전기적인 요소만으로 구성되므로 이차전지의 전기화학적 특성을 정확하게 표현하는 데는 한계가 있다. 전술한 바와 같이 기존의 제안된 방법들에는 각각 장단점이 있음을 알 수 있지만, 리튬이차전지의 모델링에 있어서 고려해야할 점은 그 구성이 간단하며, 계산 시간이 오래 걸리지 않고, 결과를 빠르게 예측할 수 있는 비선형 이차전지의 모델이라는 점이다. 따라서 본 논문에서는 상용 리튬이차전지의 실제 실험 데이터를 기반으로 충/방전 심도 함수를 도출하고, 이것을 이용하여 온도, 수명을 포함하는 리튬이차전지의 충/방전모델을 제안하기로 한다.

### 2. 리튬이차전지의 전기적 등가모델

리튬이차전지의 충/방전, 온도 특성 및 수명 특성을 만족하는 전기적 모델에는 그림 3.1과 같이 전지 내부전압, 내부저항 및 내부 커패시턴스로 구성되는 등가 모델이 고려될 수 있다. 여기서, E는 전지의 내부 기전력, v는 전지의 단자전압, C는 전지내부의 다공질 전극의 과도특성을 나타내는 커패시턴스, R1 및 R2는 전지의 내부저항이다.

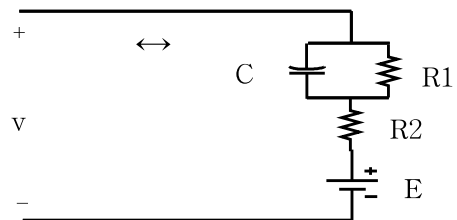


Fig. 1 Equivalent circuit representation of lithium-ion battery.

그림 1의 모델에서 전지내부전압 E는 온도와 전극에서 활용 가능한 활성물질의 양에 의존하는 것으로 이것은 전

지의 방전심도(State of Discharge) 또는 충전심도(State of Charge)로 표현할 수 있다. 따라서 전지내부전압 E를 방전(또는 충전)전류 i, 온도T, 시간 t 및 방전심도 SOD (또는 충전심도 SOC)의 함수로 나타내는 다음과 같은 식으로 등가화 할 수 있다.

$$E[i(t), T(t), R(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k SOD^k [i(t), T(t), R(t), t] + \Delta E(T) \quad (1)$$

$$SOD[i(t), T(t), R(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha [i(t)] \cdot \beta [T(t)] \cdot \gamma [R(T)] \cdot i(t) dt \quad (2)$$

- SOD** : 방전심도 ( State of Discharge)
- c<sub>k</sub>** : SOD함수의 k항의 계수
- ΔE(T)** : 기준 온도에 대한 전압 보상 값 [V]
- Q<sub>r</sub>** : 기준 방전 용량 [mAh]
- i** : 방전 전류 [mA]
- i<sub>r</sub>** : 기준 방전 전류 [mA]
- R<sub>int</sub>** : 내부저항 [Ω ]
- T** : 전지 온도 [K]
- v** : 전지의 단자 전압 [V]
- α** : 기준 방전전류에 대한 용량보정계수
- β** : 기준 방전온도에 대한 온도 보정계수
- γ** : 기준 Cycle에 대한 Cycle보정계수

**(1) 방전전류변화에 따른 방전특성 모델링**

방전특성을 대한 모델링에서는 1 cycle, 25 °C의 상온에서 1.0 C방전전류를 기준(α=1, β=1, γ=1, ΔE(T)=0)으로 하여 상기의 식(1)(2) 및 하기의 식(3)으로부터 SOD의 계수인 c<sub>k</sub>를 구함으로써 이것을 기준 방전특성곡선으로 하여 0.2 C, 0.5 C, 2.0 C방전전류에 대한 방전특성곡선을 모델링 할 수 있다.

$$v[i(t), T(t), R(t), t] = E[i(t), T(t), R(t), t] - R_{int} i(t) \quad (3)$$

먼저, 위에 식에서 v[i(t), T(t), R(t), t]는 방전전류, 온도, 충/방전 cycle에 따라 시간 함수로 나타내진 단자전압의 값이며, 본 논문에서는 실험데이터의 전압을 의미한다.

$R_{int} i(t)$  항에서  $i(t)$ 는 방전 전류이며  $R_{int}(R_1+R_2)$  값은 특성실험에서 얻어진 데이터들(0.2 C, 0.5 C, 2.0 C)의 초기전압의 변동치를 그 때의 방전전류 변화량으로 나누어 구해진 값의 평균값으로 전지의 내부 저항을 의미한다. 실험 데이터 상에서 대상전지에 대한 내부저항 ( $R_{int}$ )의 값은 방전전류(기준 1.0 C, 1.306 A)를 기준으로 하였을 때 0.0247 Ω으로 산출 되었다. 두 번째로 임의의 방전전류에 대한 방전특성곡선을 구하기 위한 보정계수인 α값과 온도에 대한 보정계수인 β값과 방전전류 i(t)로 구성되는 방전심도(SOD)는 기준 특성곡선인 1.0C 용량 값인  $Q_r$ 을 기준으로 한 정규화 된 값으로 나타낼 수 있다. 여기에서 i(t)=I=일정이므로 측정값이 초단위로 얻어진 데

$$\text{이러인 경우, 방전심도인 SOD는 } SOD = \frac{t}{3600} \cdot \frac{\alpha\beta\gamma \cdot I}{Q_r}$$

로 표현될 수 있다. 이렇게 구해진 식(2)의 SOD를 식(1)에 대입하여 전지의 내부 기전력 E를 계산하여 얻을 수 있으며, 식의 k=0일 때(t=0)의 값은 식에서 보듯이  $E = c_0 SOD^0 + \Delta E(T)$ 로 되기 때문에 기준온도에서  $\Delta E(T) = 0$ 이므로 방전초기시의 개방단자전압으로 된다. 행렬계산상의 편의를 위해 각 t=0일 때의 값들은 식(1)의 왼쪽 편으로 이항시켜 계산할 수 있다.

그러면, 식 (1), (2), (3)에 의거하여 국내 모기업 리튬2차 전지제품의 1.0C 방전전류에 대한 방전특성곡선을 모델링하기로 한다. 먼저, 주어진 10초단위의 방전특성 실험데이터로부터 120초 간격으로 하여 식(2)로부터 30개의 방전심도 데이터를 추출하고, 이로부터 30x30의 SOD행렬을 구한다. 이로부터 식(1)의 E를 구한 후, 측정된 전압데이터와 내부 저항 값과 방전전류로부터 식(3)을 완성시켜 SOD의 계수인 c<sub>k</sub>를 구한다. 이 때, 기준 온도(25°C의 상온)에서 기준 방전전류에 대한 방전특성곡선이므로 α=1, β=1, ΔE(T)=0으로 된다. 그럼 2는 계산된 c<sub>k</sub>에 의해 모델링된 방전특성과 실험데이터의 방전 특성을 비교한 것이다. 다음은 이 모델링된 1.0C의 방전특성곡선을 가지고 0.2C, 0.5C, 2.0C의 방전특성곡선을 구하는 방법에 대하여 제안하기로 한다. 먼저, 기준 방전특성곡선(1.0C)에 대한 방전 초기시의 전압강하를 알아야 하는데, 이때 각 방전전류별 초기 방전 시 전압 변동은 표 1과 같다.

Table 1. Variations of batter voltage at the beginning of discharge.

| 방전률   | 실제 방전전류[A] | 총 방전 용량 [mAh] | 방전 초기 전압 변동치[V]<br>( $i_r - i$ ) $R_{int}$ |
|-------|------------|---------------|--|
| 2.0 C | 2.608      | 1304          | -0.045                                     |
| 1.0 C | 1.304      | 1306          | -  |
| 0.5 C | 0.659      | 1318          | +0.045                                     |
| 0.2 C | 0.262      | 1310          | +0.055                                     |

이 전압강하만큼 1.0C의 방전특성곡선을 선형이동하면, 세로축의 방전전압이 3.0V가 될 때의 가로축 SOD값이 1.0으로 되지 않는다. 따라서 이를 1.0으로 만들어 주기위한 보정계수가 필요하게 되는 데, 이것이 용량보정계수인 α이다. 이 α값은 a/b의 관계식으로 구할 수 있는데, a는 기준 방전특성곡선인 1.0 C의 모델링된 방전특성그래프를 전압강하만큼 이동시켰을 때 방전전압 3.0 V시의 SOD축상의 SOD값을 나타내는 것이고, b는 근사화 하여 구하고자 하는 방전특성곡선의 실험데이터의 방전전압3.0V시의 SOD축 상의 SOD값을 나타내는 것이다.

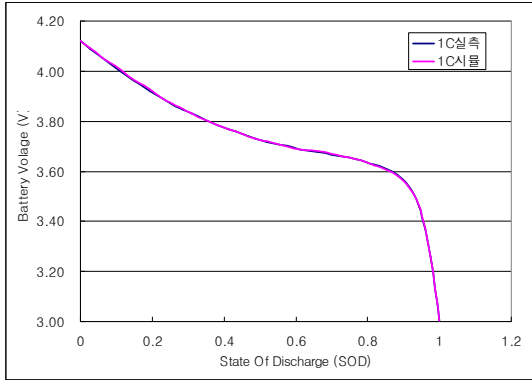


Fig. 2 Curve of discharge at 1.0 C.

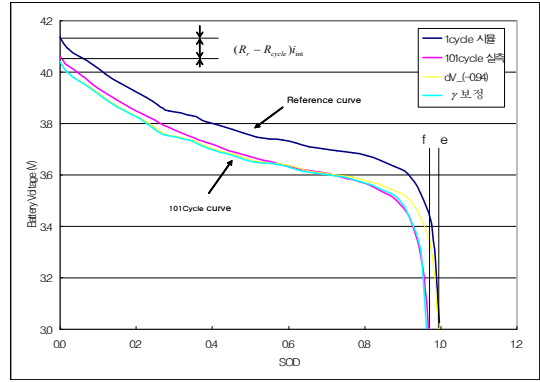


Fig. 3 Curve of discharge at 1 cycle.

(2) 수명 특성을 고려한 방전특성 모델링

리튬이차전지에 있어서 수명 특성은 전지의 효율을 평가 할 수 있는 중요한 요소이다. 수명 특성이란 충/방전 횟수가 증가함에 따라 활성 이온의 감소로 인하여 단자 전압과 용량의 감소로 나타나며 그 감소율은 전지의 전체 용량과 관계한다. 본 논문에서는 단자 전압의 감소 요인을 전지의 내부저항의 증가로 등가화하여 다음의 식(3)과 같이 수명특성을 고려한 방전특성 모델링 방법을 제안한다.

$$v[i(t), T(t), t] = E[i(t), T(t), t] - R_{int, cycle} i(t) \quad (4)$$

여기서,  $R_{int, cycle}$ 는 어느 사이클에서의 전지 내부저항 ( $R_1+R_2$ )으로 식 (4)는 충/방전 사이클에 따라서 전지의 내부저항이 점점 증가하는 것을 고려한 모델링 방법이다. 따라서, 수명에 따른 충/방전 특성의 실험데이터로부터 수명에 따른 내부 저항 값의 변화를 알아내면, 수명특성에 대한 모델을 얻을 수 있다. 또한 주어진 실험데이터를 가지고 충/방전 사이클 1 cycle, 101 cycle, 201 cycle, 301 cycle, 401 cycle, 500 cycle에 해당하는 내부 저항 값을 기준 1 cycle에 대한 각 사이클에서의 초기전압차를 이용하여 구하고, 보정계수  $\gamma$ 를 이용한다.

방전 횟수에 대한 보정계수  $\gamma$ 는 e/f로 표현할 수 있으며 e는 기준 1 cycle에 대한 각 사이클에서의 전압강하만큼 이동시켜 방전의 경우 방전전압 3.0V시의 SOD축 상의 SOD값을 나타내고, 충전의 경우 충전전압 4.2V시의 SOC축 상의 SOC값을 나타내게 된다. 또한, f값은 각 사이클에서의 실험치 대해 방전의 경우 방전전압 3.0V시의 SOD축 상의 SOD의 값을 나타내고, 충전의 경우 충전전압 4.2V시의 SOC축 상의 SOC값을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

(1) 방전전류변화에 따른 방전특성 모델링

주어진 방전 조건은 0.2 C, 0.5 C, 1.0 C, 2.0 C이며 1.0 C를 기준 방전 곡선으로 하여 각각의 조건에서의 방전 전류 값에 따른 전압강하 또는 전압 상승 값을 보상하고, 계산된 보정계수  $\alpha$ 를 적용하여 모델링된 값을 실험데이터의 값과 비교한 것이 그림 4, 5이다. 각 조건에서의 보정계수  $\alpha$ 값은 그림 4.1과 같다. 그림에서 보듯이 모델링 결과는 실험 데이터와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

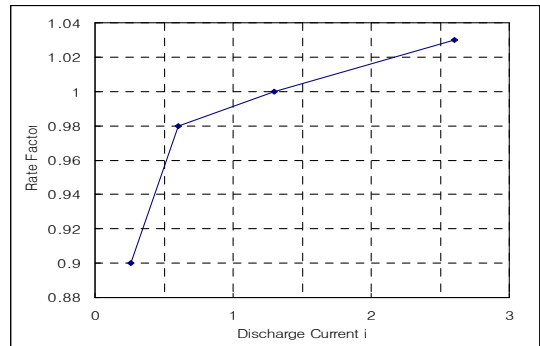


Fig. 4 Rate factor  $\alpha$  at discharge current  $i$ , reference (1306 mA).

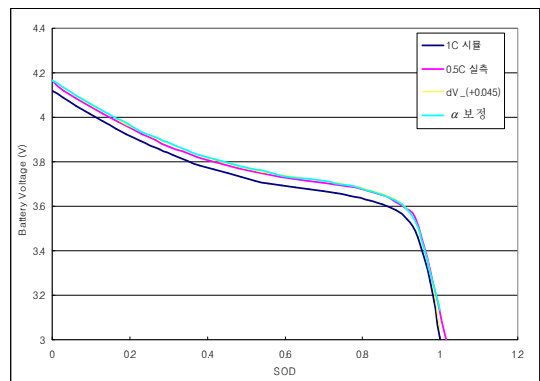


Fig. 5 Comparison between the simulation results and the experiment data at 0.2 C.

## 2) 수명특성을 고려한 방전특성모델링

## 4. 결론

수명특성을 고려한 방전특성모델링은 기준 방전특성곡선(1 Cycle)으로부터 내부저항  $R_{int, cycle}$ 의 증가에 따른 단자 전압 보상과 계산된 용량보정계수  $\gamma$ 를 적용하여 구하여질 수 있으며, 모델링된 값과 실험 데이터를 비교한 것은 그림 6, 7이다. 각 Cycle에 대한 용량 보정계수  $\gamma$ 는 그림 3과 같다. 수명 특성에서의 용량 보정계수  $\gamma$ 는 그림 6에서 보듯이 충/방전 횟수에 비례하는 것을 알 수 있다. 이것은 충/방전 횟수가 증가 할수록 전지의 내부저항 또한 비례하여 증가하는 것을 의미한다. 모델링된 결과, 각각의 사이클에서 결과 값은 실험 데이터에 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히, 기준(1.0C, 25°C, 1Cycle) 방전특성의 모델링 결과는 실험데이터와의 비교에 있어서 평균오차가 0.1%미만으로 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 충방전 심도, 전압 및 용량 보정계수를 이용하여 충방전 조건, 온도변화, 수명특성에 따른 리튬2차전지의 충방전 특성을 모델링하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에 의하여 얻어진 충방전특성 곡선은 실험데이터와 거의 일치함을 확인할 수 있었으나, 저온(-20°C)에서의 방전특성 모델링 값은 실험 데이터와 약간의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 제안된 리튬이차전지의 모델링 방법은 모델링 구성이 쉽고, 충방전 특성 결과를 빠르게 산출 할 수가 있다는 장점이 입증되어, 다른 종류의 2차전지에도 그 확대적용이 기대 된다.

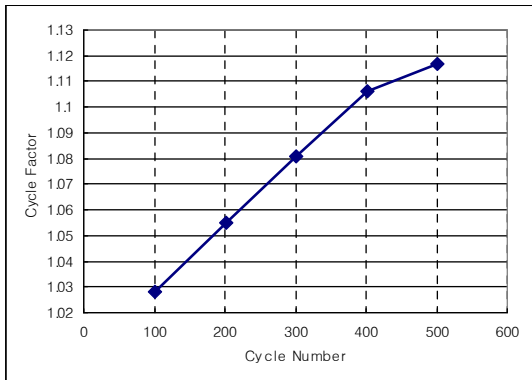


Fig. 6 Cycle factor  $\gamma$ , reference(1 cycle).

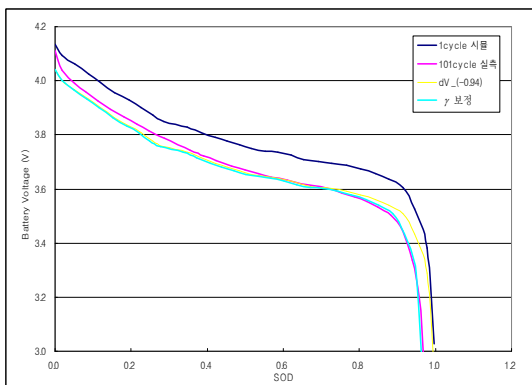


Fig. 7 Comparison between the simulation results and the experiment data at 101 cycle.

## 참고문헌

- [1] K.C. Syracuse and W.D.K. Clark, "A Statistical Approach to Domain Performance Modeling for Oxyhalide Primary Lithium Batteries," Proc. 12th Ann. Battery Conf. Applications and Advances, IEEE Press, 1997, pp. 63-170.
- [2] S. Gold, "A PSPICE Macromodel for Lithium-Ion Batteries," Proc. 12th Ann. Battery Conf. Applications and Advances, IEEE Press, 1997, pp. 215-222.
- [3] L. Benini et al., "Discrete-Time Battery Models for System-Level Low-Power Design," IEEE Trans. VLSI Systems, vol. 9, no. 5, 2001, pp. 630-640.
- [4] C.F. Chiasserini and R.R. Rao, "Energy Efficient Battery Management," IEEE J. Selected Areas in Comm., vol. 19, no. 7, 2001, pp. 1235-1245.