

## 리튬전지의 총방전 특성 모델링

강희영, 김기철, 김유진, 김재연  
 충북대학교 전기공학과

### Charge/Discharge Characteristic Modeling of Lithium Secondary Battery

Hee-Young Kang, Ki-Chul Kim, You-jin Kim, Jae-Eon Kim  
 Dept. of Electrical Engineering, Chungbuk National University

**Abstract** - 정보통신매체의 발달로 인한 이차전지의 사용이 증가됨에 따라 향상된 이차 전지의 개발이 요구되고 있는 현재에서 기존 이차전지의 총방전 특성을 시험의 중요성이 부각되고 있다. 이런 시점에서 이차전지의 총방전 특성과 싸이클 및 다이내믹 특성을 컴퓨터상의 시뮬레이션을 통해 신뢰할만한 모델링 기법을 제시하는 것이 이 논문의 목적이다.

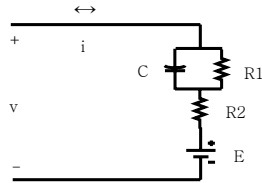
#### 1. 서 론

본 논문에서는 리튬이차전지를 전기적으로 등가화 하고 전지 내부의 기전력(E)을 방전심도 SOD(또는 충전심도 SOC)함수로 표현하는 모델링 기법을 제안하고자 한다. 먼저 주어진 조건 하에서의 실험 데이터의 분석을 통해 전지의 총/방전 특성, 온도 특성, 수명 등 특성을 고려하여 전기적 등가회로를 구성하고 그것을 기반으로 하여 이를 수학적으로 등가화 한다. 수학적 등가화 방법을 바탕으로 리튬이차전지의 총/방전 특성, 온도 특성, 수명 특성을 모델링 한다. 모델링 된 리튬이차전지의 특성곡선에 방전 전류, 충전 전류, 온도, 총/방전 사이클에 따른 보정계수를 적용하여 시뮬레이션 된 값과 실험 데이터를 비교함으로써 모델링의 유효성을 검증하였다. 방전 특성은 방전전류 1.0 C를 기준 방전곡선으로 하여 2.0 C, 0.5 C, 0.2 C에서 시뮬레이션 하였으며, 충전 특성은 충전전류 0.5 C를 기준 충전곡선으로 하여 2.0 C, 1.0 C, 0.2 C에서 각각 시뮬레이션 하였다. 온도 특성은 일정 방전전류(1.0 C)하에서 25 ℃를 기준으로 하여 0℃, -10℃, -20℃에서 시뮬레이션 하였다.[1, 2] 마지막으로, 수명 특성은 1 사이클을 기준으로 101, 201, 301, 401, 501사이클에서 시뮬레이션 하여 각각의 실험 데이터와 비교하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 리튬 이차전지의 전기적 등가모델

일반적으로 리튬2차전지의 특성은 제조업체로부터 제공된 총방전 및 싸이클 데이터로 표현되는데, 이들은 전지의 단자전압, 총방전 전압/전류, 싸이클 등으로 구성된다. 리튬2차전지의 총방전 및 싸이클 특성을 만족하는 시험평가모델에는 다음의 그림과 같은 전지 내부전압, 내부저항 및 내부 커패시턴스로 구성되는 전기적 모델이 고려될 수 있다.



〈그림 1〉 리튬2차전지의 전기적 등가 모델

〈그림1〉에서 E는 전지의 내부전압, v는 전지의 단자전압, C는 전지 내부의 다공질 전극의 과도특성을 나타내는 커패시턴스, R1 및 R2는 전지의 내부저항이다.

〈그림1〉의 모델에서 전지내부전압 E는 온도와 전극에서 활용 가능한 활성물질의 양에 의존하는 것으로 이것은 전지의 방전심도(State of Discharge) 또는 충전심도(State of Charge)로 표현할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 전지내부전압 E를 방전(또는 충전)전류 i, 온도T, 시간t 및 방전심도 SOD (또는 충전심도 SOC)의 함수로 나타내는 다음과 같은 식으로 등가화 할 수 있다.[2, 3, 5]

$$v[i(t), T(t), R(t), t] = E[i(t), T(t), R(t)] - R i(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$E[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k SOD^k [i(t), T(t), t] + \Delta E(T) \dots\dots\dots (2)$$

$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha [i(t) \cdot \beta T(t) \cdot \gamma R(t)] \cdot i(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

- SOD: 방전심도 (State of Discharge)로서 0~1.0의 값을 갖음.
- ck : 방전심도의 다항식 계수
- c0 : k=0 일 때의 값으로 전지의 개방전압 E 에 해당함.
- ΔE(T): 기준온도에 대한 전압보상 값 [V]
- Qr : 기준 방전전류에 대한 방전용량 [mAh]
- T : 전지 온도[K]
- α : 기준 방전전류에 대한 용량보정계수
- β : 기준 방전전류에 대한 온도보상계수
- γ : 기준 Cycle에 대한 Cycle 보정계수

##### 2.2 방전특성

방전특성을 대한 모델링에서는 1 cycle, 25 ℃의 상온에서 1.0 C방전 전류를 기준(α=1, β=1, γ=1, ΔE(T)=0)으로 하여 식(2)의 SOD의 계수인 ck를 구하고, 이것을 기준 방전특성곡선으로 하여 0.2 C, 0.5 C, 2.0 C방전전류에 대한 방전특성곡선을 모델링 할 수 있다.

먼저, (1), (2), (3)식에서 v(i(t), T(t), R(t), t)는 방전전류, 온도, 총/방전 cycle에 따라 시간 함수로 나타내진 단자전압의 값이며 본 논문에서는 실험데이터의 전압을 의미한다. Ri(t) 항에서 i(t)는 방전 전류이며 R 값은 특성실험에서 얻어진 데이터들(0.2 C, 0.5 C, 2.0 C)의 평균값으로 이 값은 0.0247 옴이 되었다.

두 번째로 임의의 방전전류에 대한 방전특성곡선을 구하기 위한 보정 계수인 α값과 온도에 대한 보정계수인 β값과 방전전류 i(t)로 구성되는 방전심도(SOD)는 기준 특성곡선인 1.0C 용량 값인 Qr을 기준으로 한정규화 된 값으로 나타낼 수 있다. 여기에서 i(t)=I=일정 이므로 측정값이 초단위로 얻어진 데이터인 경우, 방전심도인 SOD는  $SOD = \frac{t}{3600} \cdot \frac{\alpha \beta \gamma}{Q_r}$  로 표현될 수 있다.

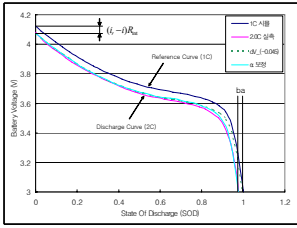
계산된 식(2)로부터 얻어진 ck에 의해 1.0C 기준 방전특성곡선을 시뮬레이션하고 이 시뮬레이션 된 1.0C의 방전특성곡선을 가지고 0.2C, 0.5C, 2.0C의 방전특성곡선을 시뮬레이션 한다. 먼저, 기준 방전특성곡선(1.0C)에 대한 방전초기시의 전압강하를 알아야 하는데, 이때 각 방전전류별 초기 방전 시 전압 변동은 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 방전전류별 초기 방전 시 전압 변동

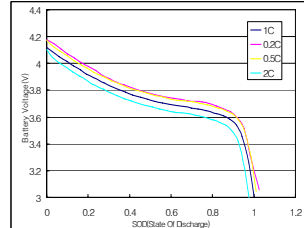
방전률	실제 방전전류 [A]	총 방전 용량 [mAh]	방전 초기 전압 변동치[V]
2.0 C	2.608	1304	-0.045
1.0 C	1.304	1306	-
0.5 C	0.659	1318	+0.045
0.2 C	0.262	1310	+0.055

이 전압강하만큼 1.0C의 방전특성곡선을 선형이동하면, 세로축의 방전 전압이 3.0V가 될 때의 가로축 SOD값이 1.0으로 되지만 이를 1.0으로 만들어 주기위해 보정계수 α가 필요하다.

이 α값은 a/b의 식으로 구할 수 있는데, a는 기준 방전특성곡선인 1.0 C의 시뮬레이션 그래프를 전압강하만큼 이동시켰을 때 방전전압 3.0 V 시의 SOD축 상의 SOD값을 나타내고, b는 근사 화하여 구하고자 하는 방전특성곡선의 실험데이터의 방전전압3.0V시의 SOD축 상의 SOD값을 나타내는 것이다.[2, 4]



〈그림 2〉 방전을  $r_r$ 에서의 기준 특성 곡선을 이용한 방전 전류  $i$ 의 방전 특성 곡선의 근사화

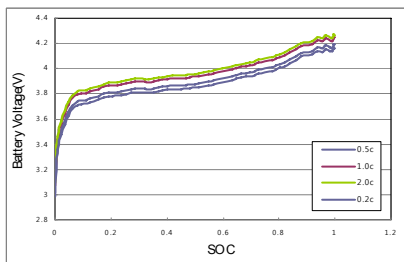


〈그림 3〉 0.2C, 0.5C, 1C, 2C 방전의 방전 특성곡선

### 2.3 충전특성

충전특성에 대한 모델링은 방전특성과 동일한 방법으로 진행되지만 여기에서는 0.5C 충전전류(0.659 mA)를 기준 충전특성곡선으로 하였다 이때 가로축은 방전이 아닌 충전이기 때문에 SOC (State of Charge)로 나타낸다. 그래프 상에서 방전특성은 차단전압 3.0V까지의 그래프가 아래로 향하는 반면 충전은 4.2V까지 완전히 충전된 상태로 충전 곡선이 위로 향하는 것을 볼 수 있다.

위에서 구해진 0.5 C 충전특성곡선을 전압강하만큼 선형이동 시키고, 보정계수  $\alpha$ 를 이용하여 0.2 C, 1.0 C, 2.0 C의 충전특성곡선을 구한다. 방전의 경우와 마찬가지로  $a/b$ 의 식을 사용하게 되는데 이때  $b$ 는 구하고자 하는 충전특성곡선의 실측데이터의 충전전압 4.2 V시의 SOC축 상의 SOC값을 나타내고,  $a$ 는 기준 충전특성곡선을 전압강하만큼 이동시켰을 때의 충전전압 4.2 V시의 SOC축 상의 SOC값을 나타낸 것이다.



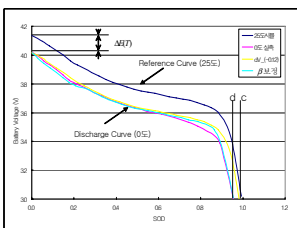
〈그림 4〉 t 0.2C, 0.5C, 1C, 2C 충전의 충전특성 곡선

〈그림4〉에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 된 결과는 실측된 결과와 충전말기 부분 즉, 4.2V에 달한 후부터 0.1C의 충전전류가 흐르기까지의 직선부분에서 약간의 오차가 있음을 확인할 수 있다.

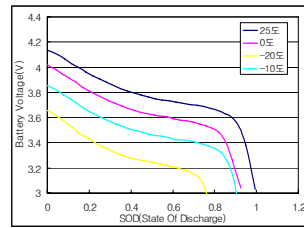
### 2.4 온도특성

온도는 기준 온도 25 °C로 하고, 이를 기준으로 앞에서 계산된 용량 보정계수를 대입하여 각각의 온도 (-10°C, -20°C, 10°C)에서의 방전 특성 곡선을 시뮬레이션 할 수 있다.

여기에서 온도특성 곡선의 보정계수인  $\beta$ 는  $c/d$ 로 표현되는 데,  $c$ 는 방전시의  $a$ 와 마찬가지로 온도변화에 따른 방전초기의 전압강하만큼 이동하였을 때 방전전압 3.0V시의 SOD축 상의 SOD값을 나타낸 것이고,  $d$ 는 구하고자 하는 온도의 실험 데이터에서 방전전압 3.0V시의 SOD축 상의 SOD값을 나타낸 것이다.



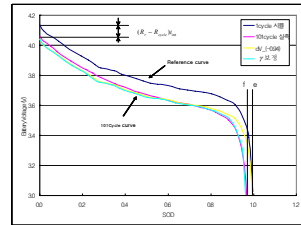
〈그림 5〉온도  $T_r$ 의 기준 특성 곡선을 이용한 온도 T의 방전 특성 곡선 근사화



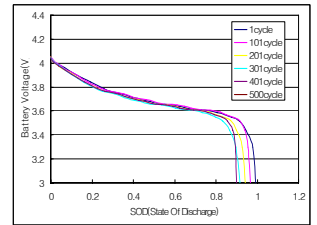
〈그림 6〉 -10°C, -20°C, 1°C, 10°C의 방전 특성곡선

### 2.5 수명특성

수명특성 모델링은 기준 방전특성곡선(1 Cycle)으로부터 내부저항 R의 증가에 따른 단자 전압 보상과 계산된 용량보정계수  $\gamma$ 를 적용하여 얻어진다.  $\gamma$ 는  $e/f$ 로 표현할 수 있으며  $e$ 는 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,  $f$ 값은 각 사이클에서의 실측치 대해 방전의 경우 방전전압 3.0V시의 SOD축 상의 SOD의 값을 나타내고, 충전의 경우 충전전압 4.2V시의 SOC축 상의 SOC값을 나타낸다.



〈그림 7〉 1 cycle의 기준 특성 곡선을 이용한 cycle 방전 특성 곡선의 근사화



〈그림 8〉 1 cycle, 101 cycle, 201 cycle, 301 cycle, 401 cycle, 500 cycle에서의 방전 특성 곡선

## 3. 결 론

본 논문에서는 충/방전 심도를 이용하여 리튬이차전지의 충/방전 특성, 온도특성, 수명특성을 모델링 하였다.

기준 충/방전특성곡선은 시뮬레이션 된 결과가 실험데이터와 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있으며 용량 보정계수를 적용한 시뮬레이션 결과 또한 실험 데이터에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 저온 특성(-20°C)에서의 시뮬레이션 값은 실험 데이터와 약간의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

제안된 리튬이차전지의 등가회 모델은 실험 데이터를 기반으로 하여 전지의 특성을 정확하게 표현할 수 있으며 구성하기가 쉽고 결과를 빠르게 도출 할 수가 있다. 따라서, 이 모델링 기법은 다른 전지에도 적용이 가능하며 다른 종류의 리튬계 이차전지의 충/방전, 온도, 수명특성을 충분히 표현 할 수가 있다.

본 논문에서는 일정 방전 전류 하에서 이차전지의 정적특성만을 모델링 하였다. 이러한 정적특성은 전지의 효율이나 용량, 수명 등을 평가하는데 유용하다. 그러나, 이차전지를 전원으로 하는 대부분의 부하는 시간에 따라 다양하게 변한다. 특히 전자기기의 경우에는 펄스파의 부하가 대부분이다. 따라서, 향후 연구과제로는 정적 특성을 바탕으로 리튬이차전지의 동적 특성 모델에 대한 연구가 필요하다.

## [참 고 문 헌]

- [1] S. Gold, "A PSPICE Macromodel for Lithium-Ion Batteries," Proc. 12th Ann. Battery Conf. Applications and Advances, IEEE Press, pp. 215-222, 1997.
- [2] L Gao, "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation", IEEE Transaction Component and Packaging Technologies, Vol. 25, No. 3, 2002
- [3] G.G. Botte, V.R. Subramanian, and R.E. White, "Mathematical Modeling of Secondary Lithium Batteries," Electrochimica Acta, vol. 45, nos. 15-16, 2000, pp. 2595-2609.
- [4] R. Rao, S. Vrudhula, and D. Rakhmatov, "Analysis of Discharge Techniques for Multiple Battery Systems," Proc. 2003 Int'l Symp. Low Power Electronics and Design, ACM Press, 2003, pp. 44-47.
- [5] D. Linden and T. Reddy, Handbook of Batteries, 3rd ed., McGraw-Hill, 2001.