

# The Implementation of a Battery Simulator with Atypical Characteristics of Batteries

Dong Sung Lee<sup>†</sup> · Seong-Won Lee<sup>††</sup>

## ABSTRACT

The recent trend of performance increase in the smart mobile devices demands more power consumption and lower battery life time. Among three battery models of mathematical model, electrochemical model and electric model, the Thevenin's equivalent circuit with non-linear function model of SOC in the electrical model is widely used. However, the OCV results have only limited accuracy because of the characteristic shift caused by temperature and age and atypical impedance property that cannot be expressed by electrical components. In this paper, the new battery model that improves the accuracy of the existing models is proposed. In the proposed simulator the mathematical model for SOC characteristic is improved and the adjustment for the temperature, the age of battery and atypical electrical characteristics. In the experimental results of predicting the battery in the static and dynamic state, the proposed simulator shows improved MSE comparing to the results of the existing methods.

**Keywords :** Battery Management System, BMS Simulator, Discharging Simulator

## 비정형적 배터리 특성을 포함한 배터리 시뮬레이터의 구현

이 동 성<sup>†</sup> · 이 성 원<sup>††</sup>

### 요 약

최근 스마트 모바일 기기에서의 고성능화 추세는 더 많은 소비 전력을 요구하게 되어 배터리 사용 시간의 감소로 이어지고 있다. 이에 배터리 관리의 중요성과 그 연구에 필요한 정확한 배터리 모델링 방법이 중요해지고 있다. 배터리 모델은 크게 수학적 모델, 전기화학적 모델, 전기적 모델로 구분된다. 그중 전기적 모델에서 전기적 소자를 사용한 테브닌 등가회로와 SOC의 비선형 함수 모델을 사용하는 것이 일반적이나, 온도나 사용연한에 따른 특성 변화, 전기적 소자로 표현할 수 없는 비정형적 저항성분 등의 존재로 OCV 결과 출력의 정확성에 한계가 존재한다. 본 논문에서는 기존의 모델의 정확성을 향상시키기 위하여 배터리의 SOC 특성을 나타내는 수학적 함수 모델을 개선하고 온도, 수명, 그리고 전기적 특성의 비선형성을 포함하는 새로운 배터리 모델을 제안한다. 또한 제안한 모델을 구현한 시뮬레이터를 사용하여 정적 전류 상태와 동적 전류 상태에서의 배터리의 방전 결과를 예측한 결과, 기존 방법 대비 실측값과의 MSE가 개선된 결과를 보였다.

**키워드 :** 배터리 관리 시스템, 배터리 관리 시스템 시뮬레이터, 방전 시뮬레이터

### 1. 서 론

최근 스마트 모바일 기기들은 멀티미디어 데이터 전송, 고해상도 디스플레이, 멀티태스킹 작업을 제공할 수 있는 강력한 계산 성능을 연속으로 요구하고 있다. 이러한 고성능화는 사용자에게 편의를 제공하지만, 한편으로 기기의 소

비 전력을 증가시키는 원인이 되고 있다. 따라서 스마트 기기에서 배터리 연속 사용 시간은 중요한 이슈가 되고 있다. 이에 국·내외 관련업체들은 모바일 기기의 구동 시간을 향상시키기 위해 많은 노력을 하고 있으며 그를 위하여 기기의 전력원인 배터리의 잔량을 높은 정확도로 파악할 수 있는 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)을 필요로 한다.

배터리를 구성하는 화학물질은 소모성으로, 충·방전의 반복과 과충전, 과방전 등에 의해 수명이 단축되고, 저장용량을 감소시킨다[1]. 이렇게 변화되는 특성들에 대응할 수 있는 BMS를 구성하기 위해서는 실제 배터리의 SOC(State Of Charge), SOH(State Of Health), 온도에 따른 OCV

\* 본 연구는 2014년도 광운대학교 교내학술연구비 지원과 산업통상자원부의 산업핵심기술개발사업(10049095)의 지원 및 Silicon Mitus의 지원으로 이루어졌음.

† 준 회원: 광운대학교 컴퓨터공학과 석사과정

†† 종신회원: 광운대학교 컴퓨터공학과 부교수

Manuscript Received: September 19, 2014

Accepted: October 7, 2014

\* Corresponding Author: Seong-Won Lee (swlee@kw.ac.kr)

(Open Circuit Voltage) 변화 특성에 대한 정확한 자료가 필요하다[2-4]. 실제 실험을 통해 배터리의 특성을 모두 분석하여 배터리의 상태를 파악하는 방법은 충·방전 특성에 따른 정확한 값을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 상당히 많은 데이터를 사용해야 하므로 구현에 제한이 많다. 따라서 배터리를 모델링하여 이용하는 연구방법이 필수적이다.

배터리 모델링 방법은 크게 전기화학적 모델과 수학적 모델, 전기적 모델로 나눌 수 있다. 전기화학적 모델은 배터리의 화학적 특성과 물리적 특성을 복합적으로 고려하여 모델을 구성하는 방법으로 예측 신뢰도가 높다[5, 6]. 하지만 이 방법은 배터리의 정확한 화학적 구조 및 물리적 상태 정보를 필요로 하기 때문에 모델 환경을 구성하기가 어렵다.

또 다른 방법으로는 수학적 모델이 있다. 이 방법은 배터리 런타임(Battery Runtime), 효율성, 용량의 변화에 대한 자료의 확률적·통계적 특성을 이용하여 SOC에 따른 OCV를 추정하는 방법이다. 이 방법은 성능의 신뢰도가 높아 자동차, 조선, 항공 쪽에서 많이 사용되고 있으며 최근에는 이차전지 분야에서도 많이 적용되고 있다. 하지만, 수학적 모델은 배터리의 과도응답 및 환경변수, 개개의 변이에 따른 비정상적 특성을 모델링할 수 없는 단점이 있다[7].

전기적 모델은 배터리의 화학적 특성을 회로적인 관점으로 해석하는 방법이다. 배터리의 산화-환원 반응을 저항과 커패시터로 이루어진 회로에 가해지는 전압의 응답으로 해석하여 배터리의 전압과 전류값을 예측하는 방법이다. 전기적 모델에는 세부적으로 임피던스 모델, 런타임 모델 그리고 테브닌 모델이 있다. 임피던스 모델은 주파수 측면에서 임피던스의 값을 추정하는 방법이다. 하지만 배터리의 런타임을 추정하지 못하고 SOC가 고정된 상태에서 측정해야 한다는 단점이 있다. 런타임 모델은 배터리의 SOC를 추정하여 직류응답과 런타임을 추정할 수 있다. 하지만 전류·전압에 대한 배터리의 과도응답을 분석하지 못하는 단점이 있다. 테브닌 모델은 전기적 모델에서 가장 많이 사용되는 방법이다. 이 방법은 전류에 의한 배터리 과도응답 분석이 가능하나, SOC를 추정하지 못하고 직류응답 분석을 하지 못하는 한계가 있다.

Min-Chen은 테브닌 모델과 런타임 모델의 결합을 통해 기존 테브닌 모델의 단점인 직류응답 문제를 해결하고, 과도응답의 정확성을 높인 개선된 테브닌 모델을 제안했다[8]. 하지만, SOH, 온도 등의 배터리 내·외부 환경변수에 영향을 받는 SOC의 특성에 의해 추정값의 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다. 또한, SOC에 영향을 받는 배터리 내부 임피던스(Internal Impedance)의 비선형적인 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다. 한편, Michael은 Min-Chen의 방법을 기반으

로 시뮬레이션 구현이 쉽도록 Simulink를 이용한 Lithium-Ion Hybrid Power System Testbed를 제안했다[9]. 이 방법에서는 자가방전(Self-Discharging)을 제외한 간략화된 상태 방정식을 구성하였다. 또한 Min-Chen이 수식으로 추정한 저항과 정전용량을 실험을 통해 추정된 값들의 평균값으로 근사화하여 시뮬레이션에 보다 쉽게 접근할 수 있도록 하였다. 하지만 배터리 내·외부 환경변수에 따른 특성 변화를 고려하지 않아 그에 따른 특성 변화에 대해 확인할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 실제 배터리가 갖는 SOC의 OCV에 대한 비선형적 특성에 대한 수학적 모델을 개선하고 Min-Chen의 개선된 테브닌 모델을 기반으로 실측값의 임피던스 테이블을 결합한 모델을 제안한다. 이 방법은 SOC, 온도, SOH에 의한 OCV의 비정상성을 추정하지 못하는 기존의 전기적 모델의 단점을 보완하며, 과도응답 분석에 대한 정확성을 개선하기 위해 실측값의 비선형적인 변화 특성을 추가로 반영하였다. 또한, MATLAB/Simulink 기반의 배터리 시뮬레이터를 제안하여 실제 배터리의 동작과 비교하였다.

본 논문의 구성은 2절에서 기존의 Min-Chen이 제안한 모델과 Min-Chen의 모델을 개선하여 제안한 Michael의 모델을 소개하고 3절에서 본 논문에서 제안하는 모델을 설명한다. 4절에서는 리튬이온 배터리의 방전실험과 제안모델, Min-Chen의 방법과의 모델 정확도 비교를 통해 성능을 검증하고 5절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## 2. 배경지식 및 기존 연구

### 2.1 Min-Chen 모델

전기적 모델에서 대표적인 방법인 테브닌 모델은 SOC와 OCV에 대한 분석을 하지 못하기 때문에, 상수 또는 테이블을 이용해서 회로를 구성한다. 그렇기 때문에 과도응답 분석이 가능하나, 직류응답의 분석은 하지 못하는 문제점을 가지고 있다.

Min-Chen은 배터리 직류 해석과 런타임 분석이 가능한 런타임 모델과 과도응답 분석이 가능한 테브닌 모델을 결합한 개선된 테브닌 모델을 제안했다. 제안한 방법은 런타임 모델을 통해서 테브닌 모델의 단점인 전원부 문제를 Fig. 1의 배터리 런타임 부분을 통해 해결하였다. 여기서  $C_{Capacitor}$ 는 배터리 모델의 사용 가능한 용량을 나타낸다.  $C_{Capacitor}$ 는 전류의 방향에 따라 증가 또는 감소되며 이것은 전류에 의해 충전 또는 방전되는 과정을 회로적 해석 방법으로 모델링한 것이다.

$$C_{Capacitor} = 3600 \cdot Capacity \cdot f_1(Cycle) \cdot f_2(Temp) \quad (1)$$

equation (1)에서  $Cycle$ 은 배터리의 방전횟수이며,  $Temp$ 는 배터리의 온도이다.  $Cycle$ 과  $Temp$ 에 의한 배터리 특성을 반영하기 위해서는 다차원 배열의 테이블이 사용되어야 하나, 계산과정에서의 복잡도와 많은 시간비용으로 인하여 equation (1)의  $C_{Capacitor}$ 는  $Cycle$  관련 함수  $f_1$ 과  $Temp$  관련 함수  $f_2$ 에 값을 상수로 근사화하여 적용하였다. 하지만, 간략화된 수식은 SOH, 온도에 따른 비선형적 특성을 갖는 OCV 값을 정확히 반영하지 못하는 한계점을 가지고 있다.

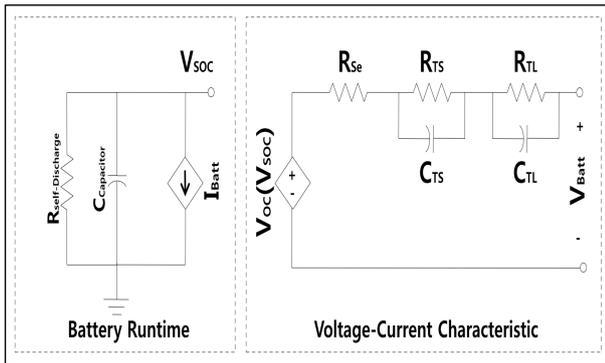


Fig. 1. Min-Chen's Purpose Model Schematic

$$V_{oc}(SOC) = -1.031 \times e^{-35 \times SOC} + 3.685 + 0.2156 \times SOC - 0.1178 \times SOC^2 + 0.3201 \times SOC^3 \quad (2)$$

equation (2)는 equation (1)을 통해 계산된  $V_{SOC}$ 값을 전압-전류 특성 파트의 전압원으로 입력되어 OCV로 도출된다. OCV값은  $R_{se}$ ,  $R_{ts}(C_{ts})$ ,  $R_{tl}(C_{tl})$ 를 거쳐 단자전압  $V_{Batt}$ 을 출력하게 된다. Min-Chen의 모델은 파라미터  $R_{ts}$ ,  $R_{tl}$ ,  $C_{ts}$ ,  $C_{tl}$ ,  $R_{se}$ 에 대해서 SOC의 비율 대비 상위 80% 이상은 상수로 반영하고, 하위 20%만 내부 임피던스의 변화가 반영되어 배터리의 SOC에 의한 OCV값 특성 변화 반영에 한계를 가지고 있다.

2.2 Michael 모델

Michael은 Min-Chen의 개선된 테브닌 등가회로 방법을 이용하여 MATLAB/Simulink 기반의 Lithium-Ion Hybrid Power System Testbed를 제안했다. Michael은 기존의 런타임 모델 부분에서 장시간 방치 시 배터리의 SOC에 영향을 주는 Self-Discharge에 대해 실험 목적과 부합하지 않아 제외하였다. Michael은 배터리의 출력전압  $y$ 를 equation (3)과 같이 구성하였다.

$$y = g(x_1) + x_2 + x_3 + R_{se} u \quad (3)$$

equation (3)에서 변수  $g(x_1)$ 는 equation (2)를 통해 도출된 회로의 OCV이고, 이는 Fig. 1에서  $V_{OC}$  부분에 해당된다.

$x_2$ 는 Fig. 2의 R, C의 병렬구조 Short-Term Response에 인가되는 전압이고,  $x_3$ 는 Long-Term Response에 인가되는 전압이다.  $R_{se}U$ 는 배터리 내부저항  $R_{se}$ 에 전류  $U$ 가 인가되어  $R_{se}$ 에 걸리는 전압을 나타낸다. 이를 바탕으로, 추정된 R, C 값을 적용하여 Fig. 2의 회로도와 같이 MATLAB/Simulink 기반의 Hybrid Power System Testbed를 통해 방전 곡선을 예측한다. 하지만, 이 모델은  $R_{se}$ 가 상수로 고정되어 있고, SOC에 따른 내부 임피던스의 비선형적 특성을 출력전압에 반영하지 못하여 실측값 대비 출력 단자전압을 정확히 추정하는 데 한계가 있다. 그리고 온도와 SOH에 따른 배터리의 화학적, 물리적 특성의 변화를 고려하지 않으므로 그에 따른 방전 특성 변화 추이를 파악하기 어려운 문제점이 있다.

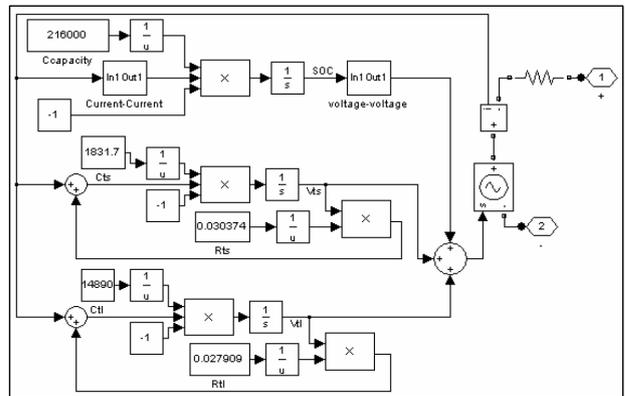


Fig. 2. Michael's Schematic

2.3 배터리의 환경변수에 따른 특성

Min-Chen 모델이나, Michael 모델에서 고려하지 못한 배터리 OCV에 영향을 미치는 환경변수는 SOC, SOH, 온도가 있다. Fig. 3은 온도에 따라 비선형적으로 변화하는 SOC-OCV 특성을 보여준다.

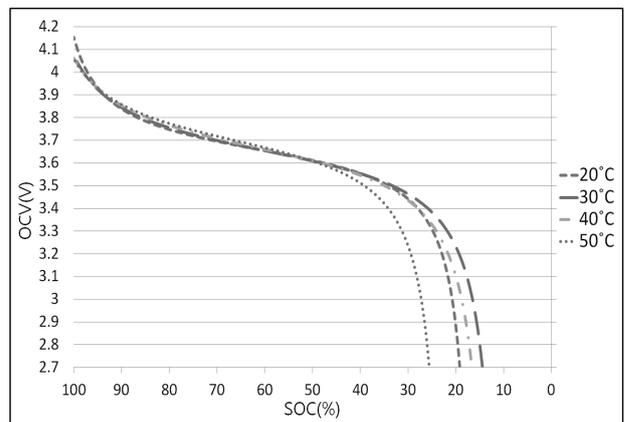


Fig. 3. Graph of temperature characteristic to SOC[10, 11]

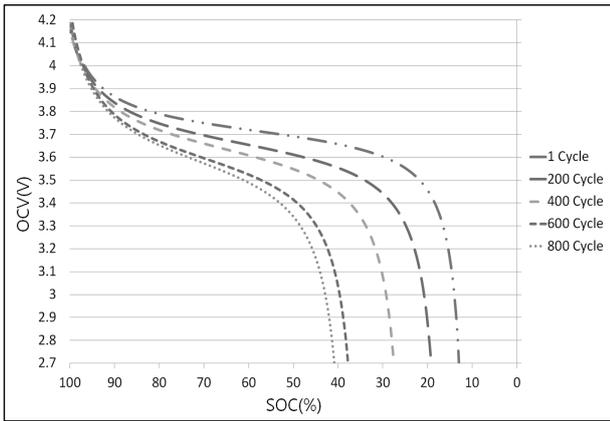


Fig. 4. Graph of SOH characteristic to SOC[10, 11]

배터리는 0°C ~ 40°C에서 정상동작을 하며, 40°C 이상에서는 일시적으로 SOC가 증가하는 추세를 보이거나, 배터리 구성원인 양극, 음극, 전해질, 분리막에 영향을 주어 SOC가 정상범위보다 빠르게 감소하는 특성을 보이게 된다. 또한, 배터리는 평균 500회에서 1,000회 사이에 총 용량 대비 80% 수준까지 유지되는 상태를 사용가능 상태로 본다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 SOH가 증가할수록 배터리의 사용 가능한 용량은 감소한다[10, 11]. 600, 800 cycle의 경우 40% 부분에서 SOC의 갑작스러운 전압강하(Voltage Drop)가 발생한다.

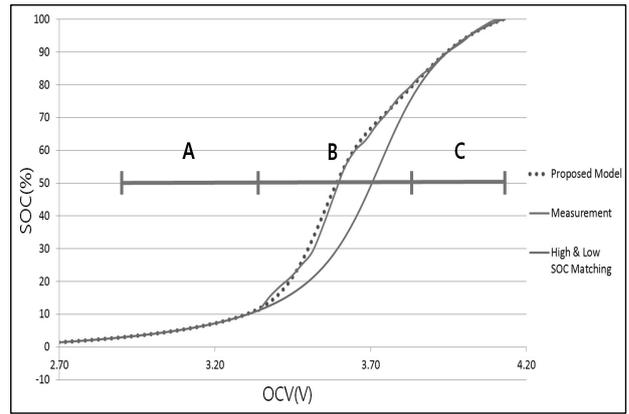


Fig. 5. Experimental Value Approximation Using Mathematical Model

### 3. 제안 기법

#### 3.1 수학적 모델을 이용한 OCV 방전곡선 추정

본 논문에서는 이러한 환경변수에 따른 비선형적 특성을 추가로 반영하기 위해 수학적 모델을 구성하고, 테이블로 적용하여 SOC에 대한 OCV값을 출력한다. 하지만, SOH와 온도 변화에 따른 SOC-OCV 실험이 적절한 실험환경 구성을 하기 어려운 문제점 때문에 제한된 조건의 실험 결과와 배터리 제조사에서 제공하는 자료들을 토대로 구현하였다.

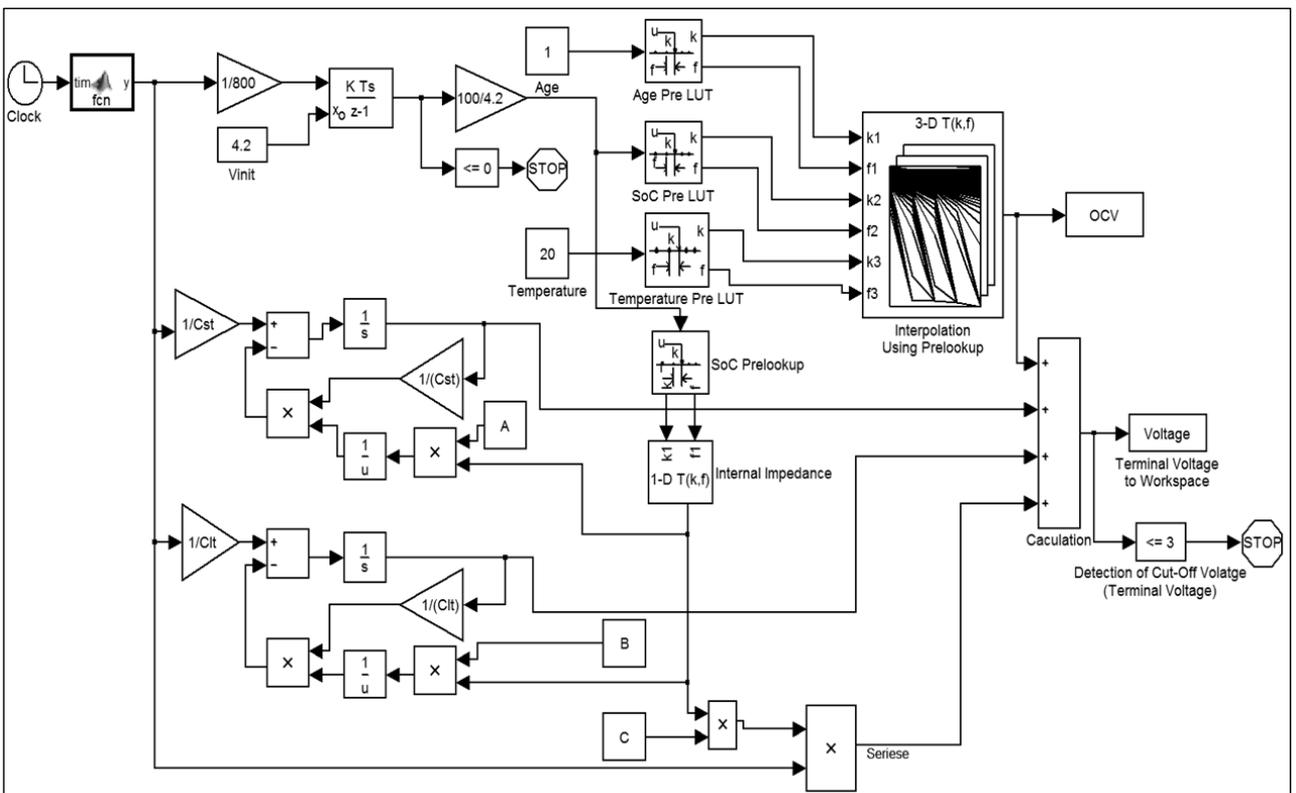


Fig. 6. Proposed Battery Simulator

equation (4)는 제안하는 수학적 모델을 나타낸다. Fig. 5는 equation (4)를 이용하여 실측값을 추정된 과정을 나타내고 있다. equation (4)에서 Arctangent 함수를 통해 SOC-OCV의 함수특성에 대해 알 수 있다.

$$p_1 \times \tan^{-1}((p_2 \times OCV) + p_3) + p_4 + p_5 \times e^{-\frac{(OCV - p_6)^2}{(p_7)^2}} \quad (4)$$

먼저, Arctangent 함수는 Low SOC를 결정하는 A구간과 High SOC를 결정하는 C구간으로 구성되어 추정 곡선이 실측값에 매칭이 되도록 조정하는 역할을 한다. 배터리의 주 가용범위인 4V~3V에서 Arctangent 함수는 배터리의 물리적, 화학적 상태의 비선형적인 특성을 추정할 때 오차가 발생한다. B 구간에서는 Gaussian 함수를 사용하여 실측값과 Arctangent 함수값의 오차를 보정하여 SOC를 결정한다.

### 3.2 RC Network를 반영한 Terminal Voltage 추정

본 논문에서는 배터리의 비선형적인 특성 변화를 추가로 반영하기 위해 Min-Chen의 개선된 테브닌 방법을 기반으로 하고, 실제 측정한 내부 임피던스값을 테이블로 적용하였다.

$$V_{TV} = V_{OCV} + V_{se} + V_{st} + V_{lt} \quad (5)$$

equation (5)는 SOC, SOH, 온도에 따른 비정형적인 OCV와 SOC의 영향을 받는 내부 임피던스  $R_{se}$ 에 걸리는 전압  $V_{se}$ 와, 과도응답 특성에 따른  $V_{st}$ ,  $V_{lt}$ 를 계산하여 최종적으로 배터리 단자 전압  $V_{TV}$ 를 도출한다.

$$\begin{aligned} R_{st} &= Impedance [SOC] \times \alpha \\ R_{lt} &= Impedance [SOC] \times \beta \\ R_{se} &= Impedance [SOC] \times \gamma \end{aligned} \quad (6)$$

equation (6)에서  $R_{st}$ ,  $R_{lt}$ ,  $R_{se}$ 는 SOC에 따라 변하는 내부 임피던스 테이블과 각 임피던스의 출력 기여 비율을 나타내는 상수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 로 구성되었다.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 의 값은 실측값에 부합되도록 실험을 통하여 결정하였다.

### 3.3 시뮬레이터의 구현

Fig. 7은 본 논문에서 제안하는 방전곡선 추이를 예측하는 시뮬레이터의 회로도이다. 본 시뮬레이터는 Mathworks사의 MATLAB/Simulink를 사용하여 제작되었다. 시뮬레이터에 전류, 전압, SOH, 온도, 정전류 또는 동적 변화에 관한 내용을 입력하면 SOC를 추정하고 추정된 SOC를 이용하여 SOC, SOH, 온도에 따라 특성 변화를 보이는 OCV를 출력

한다. 최종적으로는 OCV와 SOC에 따라 비선형적인 특성을 보이는 내부 임피던스, 과도응답과정을 거쳐 배터리 단자 전압을 출력한다[12]. 다음으로, equation (4)를 통해서 SOC 대비 OCV의 값을 추정한다. 본 논문에서 제안하는 시뮬레이터에는 equation (4)를 사용하여 SOC-OCV값을 테이블화하고 1, 200, 400, 600, 800사이클과 20, 30, 40, 50°C에 대한 OCV값을 Pre-LUT 기법과 3차 보간 방법(Cubic Interpolation)을 적용하여 값을 추정하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

실험은 배터리 방전 과정에서 각 모델링 기법의 추정 정확도 비교를 수행하였다. 먼저, SOC, SOH, 온도에 따라 비정형적인 특성을 보이는 OCV값에 대한 추정 성능을 비교하기 위해 기존의 Min-Chen 방법과 제안한 수학적 모델방법의 예측 결과를 MSE(Mean Square Error)와 최대오차를 사용하여 비교하였다. 또한, 동적 전류(Dynamic Current) 상황에서의 터미널 전압값의 예측 성능을 검증하기 위해 4단계의 전류값을 갖는 동적 방전 실험을 통하여 제안하는 시뮬레이터가 실제 배터리의 최종 터미널 전압값을 기존 방법보다 더 정확히 추정하는지 확인하였다.

실험방법은 리튬이온 18650, 14500규격의 800, 2200, 2600 mAh 용량의 배터리를 0.2 C-rate에서 1 C-rate 방전 속도로 완전방전 방법과 10분간 방전 후 1시간 휴식을 취하는 방식을 통하여 Terminal Voltage와 OCV를 측정하였다.

Fig. 7은 리튬이온 배터리 15세트를 제조사별로 총 3회 방전 실험을 통해 추출한 결과값의 평균을 보여준다. 그래프를 통해 배터리는 제조사에 따라 같은 규격이라도 용량에 관한 특성이 조금씩 상이함을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 배터리마다 최소, 최대 전압값 및 잔존용량에 따라 OCV값이 조금씩 차이가 날 수 있음을 고려하여 실험을 진행하였다.

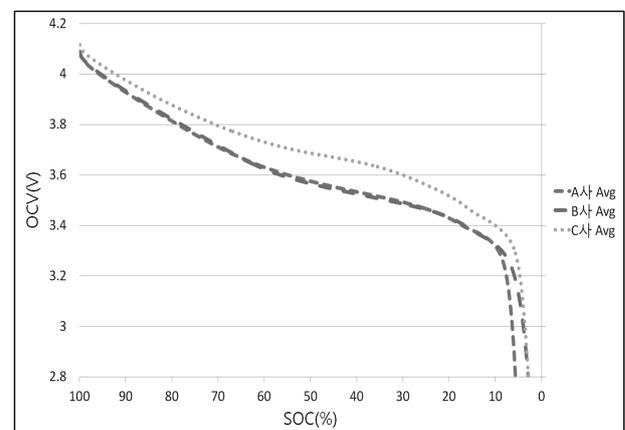


Fig. 7. Battery Experiments Average Graph

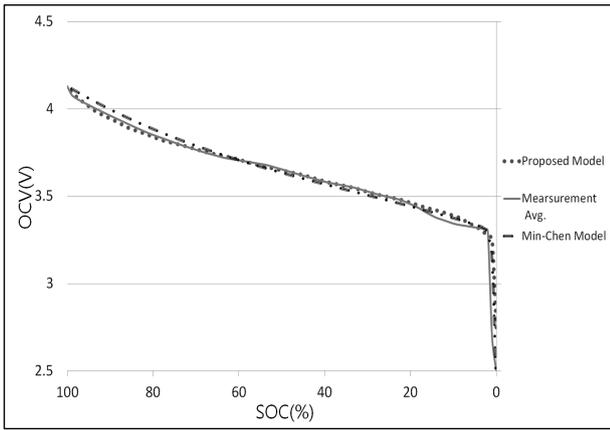


Fig. 8. Compare with Proposed, Min-Chen and Measurement Model

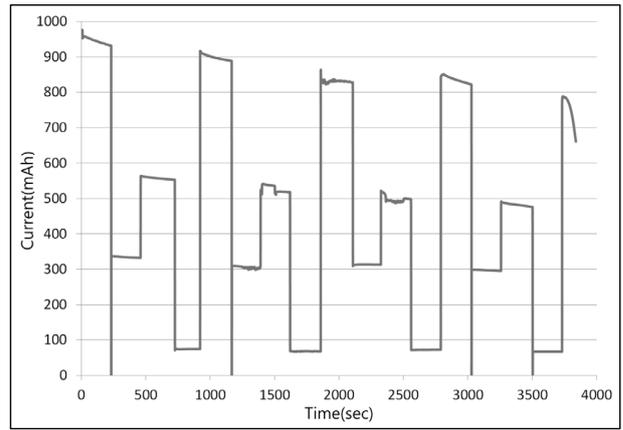


Fig. 11. Dynamic Current Scenario

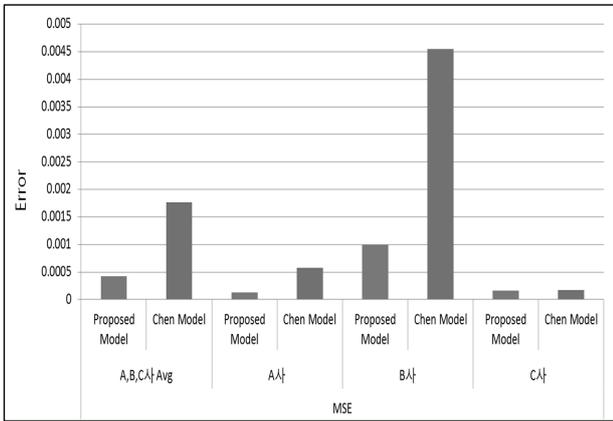


Fig. 9. MSE Graph

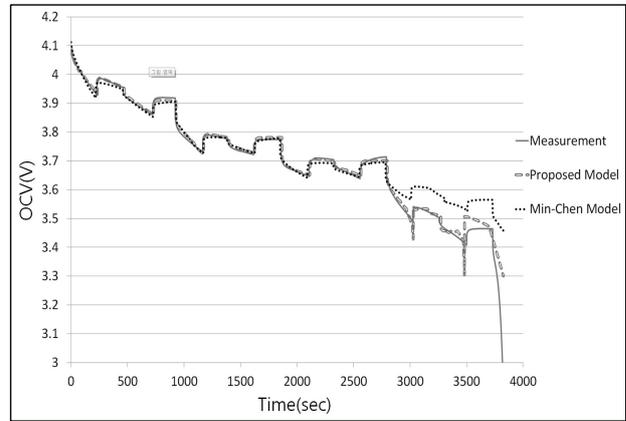


Fig. 12. Compare of Experimental Graph and Model Graph

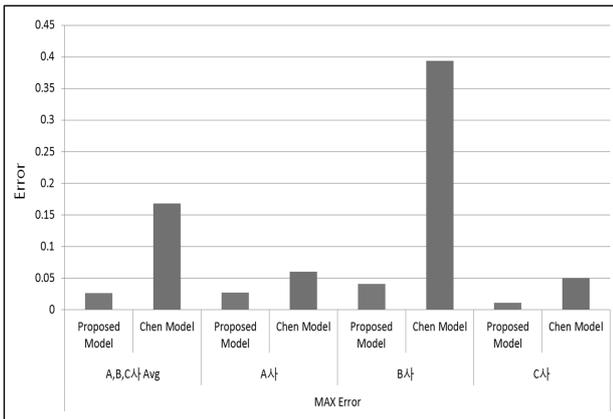


Fig. 10. Compare to Max Error

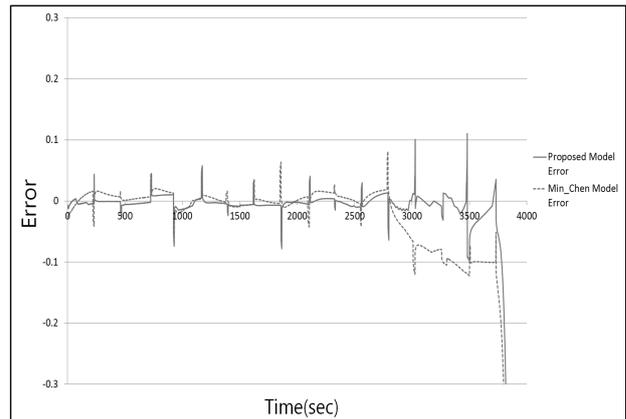


Fig. 13. Dynamic Load Experiments Error

또한, 실제 배터리의 주 가용 범위가 4V~3V 사이에서 형성되기 때문에 본 논문에서 제안한 모델의 주 범위도 동일하게 적용하였다.

Fig. 8은 A, B, C사의 배터리를 각각 5개씩 측정하여 추정한 SOC의 평균 OCV값 대비 제안모델과 Min-Chen 모델의 비교 실험 결과이다.

Fig. 9는 기존 OCV 모델, 제안된 OCV 모델의 예측값들과 각 제조사의 OCV 실측값과의 오차를 MSE로 나타낸 그래프이다. 제안한 모델이 Min-Chen의 방법에 비해 실측값을 기준으로 MSE가 평균 75.7% 감소함을 보였다. Fig. 10은 실험 측정값 대비 최대 오차를 나타낸다.

Fig. 11은 리튬이온 배터리를 970 mAh, 330 mAh, 560 mAh, 80 mAh의 4단계 전류를 각각 10분 단위로 변경하여 동적 방전 실험에 따른 단자 전압 출력 상태를 확인하기 위한 소비전류의 그래프이다.

Fig. 12는 실제 방전 실험의 출력 전압값과 제안한 모델의 시뮬레이션값, Min-Chen 방법의 시뮬레이션값을 보여주고 있다. 전체적으로 Min-Chen의 방법에 비해 제안한 모델이 실측값을 더 잘 추정하고 있음을 보이고 있다. 특히, 1000~2500seconds 지점에서 제안한 방법은 4단계 전류변화에 따라 SOC의 비정형적인 특성을 포함한 과도응답과 OCV 변화를 잘 추정하고 있으나, 기존 Min-Chen의 방법은 내부 파라미터에 대해 상당부분을 상수로 가정하는 영향으로 추정 오차가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 12에 대한 오차 그래프이다. 0~2500(초) 사이에서 제안한 모델은 Min-Chen의 모델 대비 39.9% 개선되었고, 하방 한계지점인 2500~4000(초) 구간에서는 제안한 모델이 Min-Chen의 모델 대비 82.2%를 개선하였다. 실험 결과를 통해 제안한 모델이 배터리의 비정형적 특성을 기존 방법보다 더 실측값에 가깝게 추정하고 있음을 보였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 수학적 모델과 전기적 모델을 이용하여 방전곡선 추이를 예측하는 개선된 시뮬레이터를 제안하였다. 기존 Min-Chen의 모델보다 개선된 수학적 모델을 통해 배터리 방전에 따른 SOC-OCV를 추정할 수 있었다. 또한 배터리의 양단전압 측정 시 배터리 내부 저항을 상수화 또는 간략화하여 정확도가 낮아지는 한계점을 개선하기 위해 배터리 방전실험을 통해 얻어진 실제 SOC에 따른 내부 임피던스 테이블을 적용하여 기존 방법의 단점을 개선하였다. 그러나 수식의 정확도를 높이기 위해서 기존 Min-Chen이 제안한 모델에 비해 계산량이 많아지는 단점이 있었고, 실험 결과에서 배터리 동작 전압의 하방한계인 3V 근처에서 비정형적으로 감소하는 실측값의 OCV를 추정하는 데 한계를 보였다. 향후 한계점 근처의 OCV 추정 오차를 줄이는 연구의 보완이 필요하다.

## References

[1] Xing, Y. Ma, E. Tsui, K.L., and Pecht, M., "Battery management system in electric and hybrid vehicles," *Energies*, Vol.4, No.11, pp.1840-1857, 2011.  
 [2] Yevgen Barsukov, Challenges and solution battery fuel gauging, <http://www.ti.com/lit/ml/slyp086/slyp086.pdf>

[3] Hogi Kim, Sangjin Heo, and Gubae Kang, "Modeling and state observer design of HEV li-ion battery," *The KIPE Transactions*, Vol.13, No.5, pp.360-368, 2008.  
 [4] Hogi Kim, Sangjin Heo, and Gubae Kang, "Modeling and characteristic analysis of HEV li-ion battery using recursive least square estimation," *The KSAE Transactions*, Vol.17, No.1, pp.130-136, 2009.  
 [5] Godfrey Sikha, Ralph E. White, and Branko N. Popov, "A Mathematical model for a lithium-ion battery/electrochemical capacitor hybrid system," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.152, No.8, pp.1682-1693, 2005.  
 [6] V. Ramadesigan, P. W. C. Northrop, S. De, S. Santhanagopalan, R. D. Braatz, and V. R. Subramanian, "Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.159, No.3, pp.R31-R45, 2011.  
 [7] W.-Y. Chang, "The State of charge estimating methods for battery: a review," *ISRN Applied Mathematics*, 2013.  
 [8] M. Chen, G. A Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.21, No.2, pp. 504-511, 2006.  
 [9] M. Knauff, et. al., "Simulink model of a lithium-ion battery for the hybrid power system testbed," *Proceedings of the ASNE Intelligent Ships Symposium*, Philadelphia, PA, USA, pp.1-8, 2007.  
 [10] P. Ramadass, B. S. Haran, R. E. White, and B. N. Popov, "Capacity fade of sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: part I. cycling performance," *Journal of Power Sources*, Vol.112, No.2, pp.606-613, 2002.  
 [11] P. Ramadass, B. S. Haran, R. E. White, and B. N. Popov, "Capacity fade of sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: part II. capacity fade analysis," *Journal of Power Source*, Vol.112, No.2, pp.614-620, 2002.  
 [12] L. Benini, "Discrete-time battery models for system-level low-power design," *IEEE Transaction on VLSI System*, Vol.9, No.5, pp.630-640, 2001.



## 이 동 성

e-mail : shineleeds1@gmail.com

2012년 대전대학교 컴퓨터공학과(학사)

2013년~현 재 광운대학교 컴퓨터공학과 석사과정

관심분야 : Battery Management System, SoC 설계



## 이 성 원

e-mail : swlee@kw.ac.kr

1988년 서울대학교 제어계측공학과(학사)

1990년 서울대학교 제어계측공학과(석사)

2003년 Univ. of Southern California(박사)

1990년~2004년 삼성전자 반도체 부문

시스템 LSI 책임연구원

2005년~현 재 광운대학교 컴퓨터공학과 부교수

관심분야: 영상신호처리, 신호처리 SoC, 컴퓨터구조