

## 리튬폴리머 전지의 전기적 모델링

林栽寬<sup>\*</sup>, 林德英<sup>\*</sup>, Novie Ayub Windarko<sup>\*</sup>, 崔載昊<sup>†</sup>, 鄭教範<sup>\*\*</sup>

### Electrical Modeling of Lithium-Polymer Battery

Jae-Kwan Im, Deok-Young Lim, Novie Ayub Windarko, Jaeho Choi, and Gyo-Bum Chung

#### 요 약

전기 장치용 리튬폴리머 전지의 전기적 모델링은 전기에너지 공급시스템의 특성을 파악하는데 매우 중요하다. 본 논문은 리튬폴리머 전지의 동적특성을 모사하기 위한 전기적 등가 모델을 제안하였다. 리튬폴리머 전지의 충/방전 실험은 Maccor 8500 충방전시험장치를 사용하였다. 측정된 데이터를 이용하여 전지의 R-C 값을 선정하였으며, 선정된 값은 다항식 함수와 지수 함수를 사용하여 수식으로 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 제안된 모델의 타당성을 검증하였다

#### ABSTRACT

Electrical modeling of lithium-polymer battery is very important for electric energy supply system. In this paper, electric equivalent circuit of lithium-polymer battery is proposed to simulate its dynamic characteristics. Maccor 8500 charge/discharge system is used to obtain the experimental data of lithium-polymer battery. Model parameters are calculated by using Matlab. This paper defines a R-C model for charging/discharging of battery and polynomial functions are used for OCV (Open Circuit Voltage) modeling. The proposed model is simulated with PSiM and then compared the simulation results with the experimental results to verify the validity of the proposed model.

**Key Words** : Li-polymer battery, Battery electrical modeling, Battery OCV, PSiM battery model

### 1. 서 론

높은 에너지 밀도와 긴 수명을 가지는 리튬폴리머 전지는 휴대용 장치, 전기 자동차등에서 점점 사용이 증가하고 있는 추세이다. 전지를 모델링하기 위해서는 온도등과 같은 환경에 따른 전지의 특성분석이 요구된다. 화학적 기반의 모델은 전지의 내부 동작을 자세히

나타 낼 수 있지만, 전기적 특성을 가지는 시스템 레벨 설계에는 적합하지 않다<sup>[1],[2]</sup>.

반면에 전기적 기반에서 전지 모델을 사용하면, 전기 회로의 시뮬레이션을 더 간단하게 해석할 수 있다는 장점을 가지지만<sup>[3]</sup>, 전극의 감소 등과 같은 화학적 특성을 반영할 수 없다는 단점이 있다.

본 논문에서는 리튬폴리머 전지의 전기적 기반의 모델을 제시하고 실험 측정값을 기반으로 각 파라미터값을 결정하는 방법을 제시한다. 제시된 모델은 과도 현상에 대한 해석 및 개방 회로 전압과 SOC와의 관계에 중점을 두어 접근하였으며, 이러한 방법은 전지의 과도 상태의 특성을 파악하고 시스템에 적용하였을 때 시스템의 과도 상태와 정상 상태에서의 동작을 해석할 수

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 충북대 전기공학부 교수

E-mail : choi@cbnu.ac.kr

<sup>\*</sup>학생회원, 충북대 전기공학과 석사과정

<sup>\*\*</sup>정회원, 홍익대 전자전기공학과 교수

접수일자 : 2010. 10. 22

1차 심사 : 2010. 11. 10

심사완료 : 2011. 1. 19

있다는 장점을 가진다. 또한 제안된 모델은 개방 회로 전압의 변화에 따라 전지의 SOC를 추정할 수 있다는 장점도 가지고 있으며 전지의 전기적 특성에 대한 정확성도 높일 수 있다<sup>[4]</sup>.

전지의 동작특성은 독립적으로 시스템의 동작을 보장하기 때문에 전지의 이용 가능한 에너지를 파악하여 SOC를 계산해 내어야 한다. SOC는 전체 용량을 이용 가능한 용량으로 나눈 값으로 정의되며, 단위는 %를 사용한다. 그러나 이러한 방법으로 계산된 SOC의 단점은 전체 용량이 점차적으로 감소한다는 점에 있을뿐만 아니라 전지의 온도 변화, 충/방전 반복 및 전류 크기의 변화에 따라 전체 용량이 변한다는 점이다.<sup>[5]</sup>

제안된 모델에서의 SOC 추정 방법은 개방 회로 전압을 이용하기 때문에 전체 용량의 변화에 따른 오차를 줄일 수 있다는 장점을 가진다.

전지 모델의 특성은 화학적이고 기하학적인 파라미터로 표현되며 전지의 충/방전 회로는 고정된 임피던스를 요구하기 때문에 전압과 전류패턴은 이상적인 전지의 동작을 정의해야만 한다.<sup>[6]</sup> 그렇기 때문에 전지의 관리 회로는 전지의 충/방전시의 SOC와 SOH에 따라 제어해야 한다. 하지만 이것의 단점은 온도 및 방전 전류, 반복횟수에 따라 변화되는 에너지 밀도를 파악하지 못한다는 점에 있다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는 온도, 방전 전류의 크기, 반복횟수에 따른 수명 변화를 그래프로 나타내었으며, 이러한 특성에 대하여 수식으로 나타내어 변화되는 용량을 추정할 수 있도록 하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 방전 전류의 크기변화에 따른 전지의 특성을 파악하였다.<sup>[7]</sup>

전지의 모델링에 사용되는 임피던스는 파라미터에 민감하고, 제안된 파라미터는 모델의 단순화를 위하여 최소한으로 사용하였으며 그 오차율은 5%이내이다.

또한 과도상태에서 응답 특성은 실제 실험과 시뮬레이션을 비교하여 오차값을 나타내었으며, 그 특성이 타당하다는 것을 나타내고자 한다.

실험에 사용된 리튬폴리머 전지는 4.2V, 40Ah의 전지를 사용하였고, 충/방전 기기는 Maccor 8500을 사용하였다.

## 2. 전지의 전기적 모델링<sup>[9]</sup>

리튬폴리머 전지는 SOC에 따라 개방 회로 전압(open circuit voltage: 개방 회로 전압,  $V_{ocv}$ ) 형태가 비선형적으로 변하게 된다. 그림 1은 실험 데이터의 분석을 통하여 SOC와 개방 회로 전압간의 관계를 나타낸 것으로 그 차이는 SOC 20%에서 최대 전압차가 나

며 그 값은 30mV로 매우 작게 나타난다. 그렇기 때문에 모델에 적용할 때는 평균값을 이용하여도 무방하다. 그리고 실제 히스테리시스 곡선은 SOC 0%에서는 3.4V 이하로 내려오고 100%에서는 4.2V 이상이어야 하지만 그렇게 나타나지 않은 이유는 전지의 안정성을 고려하여 SOC가 0%와 100%로 가지 않고 약 2~3%와 97~98%정도까지만 충/방전하게 설정이 되어 있기 때문이다.

그림 2는 0.5C-rate 충전 실험을 통하여 얻은 그래프이며, 그림 3은 그림 2의 한 부분을 확대한 것이다. 그림 3의 짧은 시간 영역은 1초 정도의 구간이 되며 이 구간에서  $R_s$ 의 값을 구할 수 있으며, 긴 시간 영역은 충전시간 중 1초를 제외한 나머지 시간으로  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 를 구하는 구간이 된다. 또한 그림 1에서 확인할 수 있듯이 리튬폴리머 전지의 개방회로 전압은 충전상태에 따라 변화하는 것을 알 수 있다.

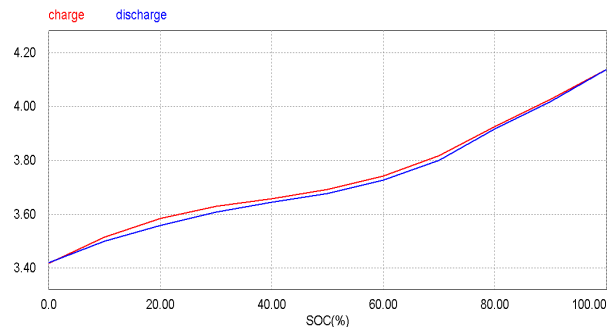


그림 1 충/방전에 따른 SOC-OCV 히스테리시스 곡선  
Fig. 1 SOC-OCV hysteresis curve of charging and discharging

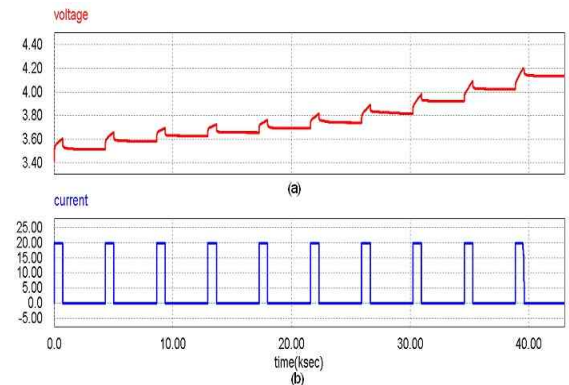


그림 2 리튬폴리머 전지의 충전 실험 파형(0.5C-rate)  
(a) 전압, (b) 전류  
Fig. 2 Experiment for charge of Li battery(0.5C-rate)  
(a) Voltage, (b) Current

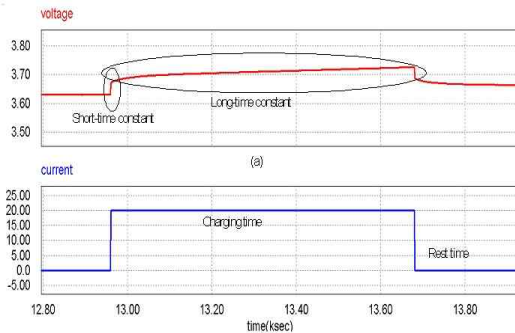


그림 3 리튬폴리머 전지의 충전 실험 확대 파형  
(a) 전압, (b) 전류

Fig. 3 Experiment enlarge wave for charge of Li battery (a) Voltage, (b) Current

본 논문에서는 리튬폴리머 전지의 특성을 표현하기 위해 그림 1과 같이 SOC에 따른 개방 회로 전압을 변화하여 적용하였으며, 이에 따른 파라미터  $V_{OCV}$ ,  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 의 값들 역시 SOC에 따라 변화한다고 가정하였다.

실제로 짧은 시간 영역과 긴 시간 영역을 정확하게 표현해 내기 위해서는 수개의 R-C 병렬 회로를 필요로 하지만, 계산이 복잡해지고 모델에 적용하기 어렵기 때문에 본 논문에서 제안된 모델은 2개의 R-C회로를 사용하였다. 그 이유는 2개의 R-C회로를 통하여 전지를 표현하여도 오차를 5% 이내로 실제 모델과 거의 근사하게 표현해 낼 수 있기 때문에 2개의 R-C회로와 1개의  $R_s$ 를 이용하여 표현했다.

### 2.1 제안된 전지의 전기적 등가회로

전지의 과도상태에 대한 특성을 표현하기 위해 사용한 등가회로는 그림 5와 같다. 등가회로는 분극 현상 및 자기방전/자기충전을 나타내는 내부저항  $R_s$ 와 충/방전 전류에 의한 손실저항  $R_1$ ,  $R_2$  및 이중층의 커패시턴스  $C_1$ ,  $C_2$ 로 구성되며, 모든 파라미터들은 SOC에 따라 각각 다른 값을 적용하였다. 그 이유는 정확한 과형을 표현해 내기 위해 SOC에 따라 변화되는 파라미터들을 적용한 것이다. 전지의 개방회로 전압은 무부하 정상상태에서의 전지 단자전압이며, SOC와는 비선형 함수로 표현된다.<sup>[9]</sup>

선형영역에서  $R_s$ 의 값을 구하기 위하여 사용된 식은 다음과 같다.

$$V_{R_s}(SOC) = V_{R_{s2}}(SOC) - V_{R_{s1}}(SOC) \quad (1a)$$

$$R_s(SOC) = \frac{V_{R_{s1}}(SOC)}{I} \quad (1b)$$

여기서,  $V_{R_{s1}}$ 은 전류 투입 직전의 전압이고,  $V_{R_{s2}}$ 은 선형구간이 끝날 때의 전압으로 약 1초 후의 전압이 되며 이것은 그림 5에 나타내었으며,  $V_{R_s}$ 는 선형구간에서의 전압차이다.

그림 6은 충/방전에 따른 전지의 등가회로로 충전과 방전시의 전지에 적용되는 회로가 다르기 때문에 그림 5와는 다르게 표현된다.  $R_{s,dsc}$ ,  $R_{1,dsc}$ ,  $C_{1,dsc}$ ,  $R_{2,dsc}$ ,  $C_{2,dsc}$ 는 방전할 때,  $R_{s,ch}$ ,  $R_{1,ch}$ ,  $C_{1,ch}$ ,  $R_{2,ch}$ ,  $C_{2,ch}$ 는 충전할 때의  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ 의 값이다. 충/방전에 따른 등가회로를 따로 나타낸 이유는 충전과 방전에 따른 R과 C의 값이 서로 다르기 때문이다.

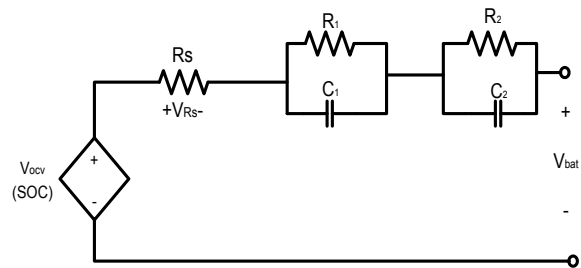


그림 4 전지의 전기적 등가 회로  
Fig. 4 Electric equivalent circuit of Battery

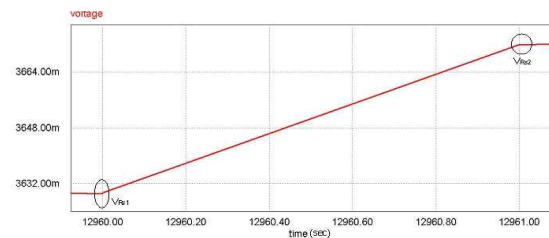


그림 5 실험파형에서의 선형구간  
Fig. 5 Linear part of experiment wave

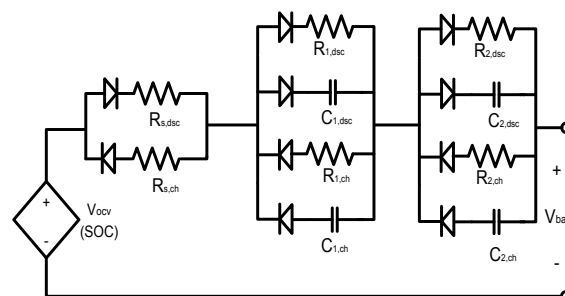


그림 6 충/방전 특성을 고려한 전지의 등가 회로  
Fig. 6 Battery equivalent circuit for charge and discharge characteristics

### 2.2 개방 회로 전압

개방 회로 전압은 그림 1과 같이 SOC에 따라 값이 변한다. SOC는 전기장치의 전기에너지 시스템의 특성을 결정하는 중요한 요소이며 개방 회로 전압과 비선형 함수 관계를 갖는다. 개방회로 전압은 일반적으로 30분 이상의 휴식 시간 이후의 전압을 측정하여 구한다.<sup>[7]</sup>

리튬폴리머이온 전지의 충전 과정에서의 개방 회로 전압과 SOC 관계는 히스테리시스 특성을 가지며, 히스테리시스 특성은 다항식 함수를 이용하여 수학적 함수로 표현할 수 있다.

Takacs 함수의 경우에는 SOC를 추정함에 있어서는 우수성을 가지지만, 이는 Ni-Mh 전지와 같이 강한 히스테리시스 특성을 가지는 곳에서 적용하기에 적합하다. 하지만 리튬폴리머 전지의 경우에는 그림 1에서 보이는 바와 같이 히스테리시스 특성이 약하게 나타나기 때문에 충/방전에 따른 개방 회로 전압의 평균값을 사용하여도 무방하다.<sup>[10]</sup> 다항식 함수로 개방 회로 전압의 히스테리시스 곡선의 충/방전 루프를 표현할 수 있으며, 표현된 식은 다음과 같다.

$$1.013x^3 - 1.157x^2 + 0.8687x + 3.426 \quad (2)$$

여기에서,  $x$ 는 SOC이다.

### 2.3 과도 응답

스텝으로 변동하는 부하전류에서 전지의 전압응답은 그림 2의 긴 시간 영역과 같이 매우 느리다. 응답커브는 그림 3의 c 부분과 같이 곡선의 종속 전압강하를 포함되기 때문에 과도 응답은 제안된 모델과 같이 R-C 연결에 의해 특성을 나타낼 수 있다. 회로에 직렬 연결된  $R_s$ 와 두 개의 R-C 병렬연결은 각각  $R_1, C_1, R_2, C_2$ 로 나타낸다.

$R_s$ 는 스텝응답에서의 순간적인 전압강하를 나타내며  $R_1-C_1$ 과  $R_2-C_2$ 는 각각 짧은 시간과 긴 시간에서의 응답특성을 나타내며 그림 2에 보이는 바와 같다.

이론적으로 제안된 모델의 모든 파라미터는 SOC, 전류, 온도와 반복횟수 (cycle number) 등을 고려한 함수로 표현되어야 하지만 본 논문에서는 전류와 SOC를 고려하여 나타내었다.

## 3. 전지 파라미터 추출 및 추정

실험은 충/방전 장치인 Maccor 8500을 사용하였다. 전지의 충/방전 특성을 파악하기 위하여 전류를 변화하는 방법을 사용하였으며 전류변화는 0.25, 0.5, 0.75, 1C-rate 충전을 하였고, 각각의 충전에 0.5, 1, 1.5, 2C-rate인 4가지 패턴으로 전류를 변화하여 방전을 하였다. 이에 대한 데이터는 충/방전 실험장치를 통하여

표 1 충전시 다항식 함수의 파라미터  
Table 1 Parameters for polynomial function at charge

|          | p1                   | p2                   | p3                   | p4                  | p5                  | p6                  | p7                  |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $R_{s1}$ | 0.504                | -1.567               | 1.897                | -1.122              | 0.3322              | -0.04425            | 0.002911            |
| $R_{s2}$ | -0.06264             | 0.1603               | -0.1573              | 0.077               | -0.02013            | 0.002365            | 0.001031            |
| $C_1$    | $2.423 \times 10^5$  | $-6.607 \times 10^5$ | $5.544 \times 10^5$  | $-2.28 \times 10^5$ | $4.437 \times 10^4$ | -3399               | 317.3               |
| $R_2$    | 0.1876               | -0.2434              | -0.04418             | 0.134               | -0.02167            | -0.00976            | 0.003437            |
| $C_2$    | $-6.281 \times 10^7$ | $1.597 \times 10^8$  | $-1.506 \times 10^8$ | $6.431 \times 10^7$ | $-1.21 \times 10^7$ | $9.233 \times 10^5$ | $3.149 \times 10^4$ |

표 2 방전시 다항식 함수의 파라미터  
Table 2 Parameters for polynomial function at discharge

|          | p1                   | p2                  | p3                   | p4                   | p5                  | p6                  | p7                  |
|----------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $R_{s1}$ | -0.1183              | 0.2431              | -0.1535              | 0.02399              | 0.001573            | 0.001612            | 0.001545            |
| $R_{s2}$ | -0.3375              | 0.8243              | -0.7258              | 0.2696               | -0.03314            | -0.002091           | 0.002315            |
| $C_1$    | $7.729 \times 10^8$  | $-2.74 \times 10^9$ | $3.878 \times 10^9$  | $-2.754 \times 10^9$ | $1.022 \times 10^9$ | $-1.82 \times 10^8$ | $1.056 \times 10^7$ |
| $R_2$    | -0.5553              | 1.276               | -0.9869              | 0.2492               | 0.02917             | -0.02052            | 0.003028            |
| $C_2$    | $-4.208 \times 10^7$ | $1.324 \times 10^8$ | $-1.634 \times 10^8$ | $1.001 \times 10^8$  | $-3.17 \times 10^7$ | $4.796 \times 10^6$ | $-2.39 \times 10^5$ |

1초 단위로 전압과 용량 (capacity)을 확인할 수 있으며 데이터는 엑셀로 저장되어 있다. 충전 방식은 10% 충전 후 1시간의 휴식 시간 (rest-time)을 갖는 방식을 하였다. 휴식 시간을 가지는 이유는 SOC에 따른 개방 회로 전압을 확인하기 위해서이다.

파라미터 추출을 통하여 나온 파라미터를 식으로 표현하기 위해서 다항식 함수와 지수 함수를 이용하여 표현하였다. 모든 식은 커브 피팅을 이용하여 구하였으며, 오차율이 5% 이하가 되는 값을 찾아내어 적용하였다.

지수함수의 수식은 식 (13), (14)와 같으며 다항식 함수는 식 (15)와 같다. 충전시의 상수는 표 1에, 방전시의 상수는 표 2에 나타났다.<sup>[8],[11]</sup>

$$R_{1,charge}(x) = 0.002494 \cdot \exp(-15 \cdot x) + 0.001665 \cdot \exp(0.8212 \cdot x) \quad (13)$$

$$R_{1,discharge}(x) = 0.1706 \cdot \exp(-7.405 \cdot x) - 0.09215 \cdot \exp(-5.84 \cdot x) \quad (14)$$

$$f(x) = p_n + (p_{n-1} \times x) + (p_{n-2} \times x^2) + \dots \quad (15)$$

여기에서  $x$ 는 SOC이며,  $f(x)$ 는  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ 이고,  $R_{s1}$ 은 전류가 투입되는 순간의 선형영역 구간,  $R_{s2}$ 는 전류 투입이 멈추는 순간에서의 선형 영역 구간의 저항 값이다.<sup>[12]</sup>

위의 식을 이용하여 각각의 파라미터를 추정할 수 있다.  $R_1$ 의 경우에는 다항식 함수보다 지수 함수를 사용하는 것이 간단하며 오차를 역시 약 3% 정도를 가지기 때문에 지수함수로 표현하였다.

#### 4. PSiM 모델 및 시뮬레이션

리튬 폴리머 전지의 제시된 PSiM 모델은 그림 7과 같다. 제안된 모델은 직렬 연결부, 병렬연결부, 용량입력부 및 SOC 시작점을 입력하여 결정할 수 있으며, SOC를 추정하는 부분을 가지고 있다. 실제 실험 시간은 약 40000초 정도로 장시간 시뮬레이션을 수행하여야 하기 때문에 PSiM의 Look-up 테이블을 이용하여 시간을 설정하는 부분을 만들어서 시뮬레이션을 실행하여 시간을 단축하였으며 단자 전압 및 충/방전 전류를 측정할 수 있도록 만들었다. 또한 Look-up 테이블을 이용하여 SOC에 따라 변화되는 개방회로 전압과  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  값을 입력하였다. Subsystem에서는 회로를 구성한 것이 아닌 script block을 이용하여 회로를 구성한 형식이며 구성된 회로의 입력은

Look-up 테이블의 각 파라미터들로 이루어졌다. 또한 출력을 통하여 각 파라미터가 정확히 입력이 되고 있는지를 확인할 수 있도록 하였다.

리튬폴리머 전지의 전기적 모델링을 위한 충/방전 실험은 10%의 SOC를 변화시켜 개방회로 전압을 측정하였다. 10% SOC 증감함에 따른 개방회로 전압 측정을 위하여 충/방전 후 약 1시간 정도의 휴식시간을 두어 자기 충/방전 시간을 충분히 가지도록 하여 SOC 값의 변화에 의한 개방회로 전압을 검출할 수 있도록 하였으며, 전압-전류 관계식을 산출하여 모델링을 하였다.

그림 8은 리튬폴리머 전지의 데이터 중 0.5C-rate의 데이터를 이용해 나온 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과는 10% SOC부터 100% SOC까지 나타났다. 그림 9는 과도 상태에서의 파형으로 그림 8의 한 부분을 확대한 것이다.

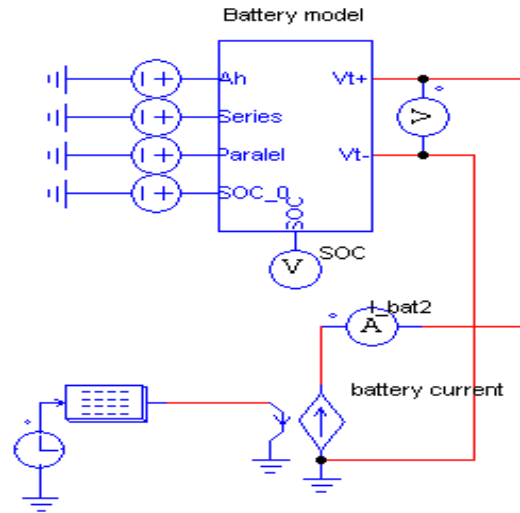


그림 7 PSiM에서의 전지 모델  
Fig. 7 Proposed battery model in PSiM

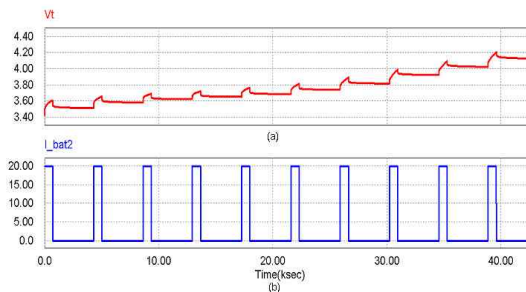


그림 8 시뮬레이션 결과 (a) 전압, (b) 전류  
Fig. 8 Simulation result(0.5C-rate charging)  
(a) Voltage, (b) Current

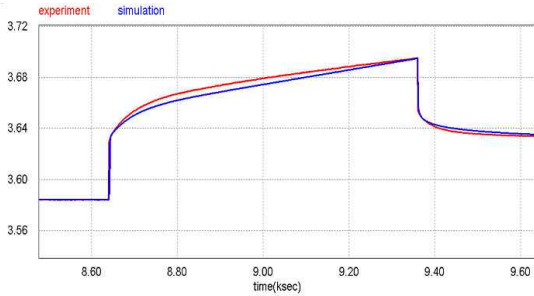


그림 9 과도 상태 영역에서의 시뮬레이션 결과 비교  
Fig. 9 Comparative simulation result in transient state

## 5. 개발 모델 및 시뮬레이션 평가

### 5.1 실험 수행

실험은 셀을 이용하여 수행하였다. 그 이유는 리튬 폴리머 전지 모듈의 경우에는 위험성 (폭발, 화재)에 대한 보호회로를 만들어 놓아 실험조건에 합당하지 않을 수 있기 때문에 셀을 이용하여 전지의 특성을 파악하였다. 그림 10은 실험에 사용된 전지의 셀 그림을 보인다.



그림 10 실험에 사용된 리튬폴리머 전지  
Fig. 10 Li-polymer battery for using experiment

실험은 1차적으로 전지의 안정 상태 및 기본 상태를 확보하기 위해 0.5 C-rate의 일정한 전류로 완전 충전하고 30분간의 휴식 시간을 가진 후 다시 동일한 C-rate로 방전을 하는 과정을 3번 반복하여 전지의 안정 상태 및 기본 특성을 파악하였다.

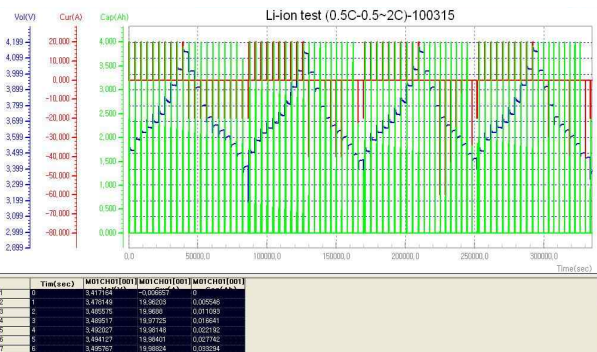


그림 11 실험 그래프  
Fig. 11 Experimental graph

### 5.2 시뮬레이션 비교 평가

시뮬레이션을 통하여 구해진 그래프를 실험 결과와 비교하여 타당성을 증명하였다. 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때 그림에서 확인할 수 있듯이 오차값은 약 30mV 정도로 매우 유사함을 알 수 있다. 오차값에서 전류투입이 시작되는 구간과 끝나는 구간에서 오차값이 크게 나오는 이유는 시간을 PSiM C블록을 이용하여 입력하였기 때문에 약간의 차이가 발생하는 것이다.

시뮬레이션은 실험과 동일하게 0.25, 0.5, 0.75, 1 C-rate의 충전과 0.5, 1, 1.5, 2 C-rate 방전에 대하여 실행하였으며, 실험에서 얻은 동일한 C-rate에 대하여

네 번 반복한 데이터들에 대하여 각각 파라미터를 구하였으며, 구해진 파라미터의 평균을 이용하여 최종 모델링을 수행하였다.

충전시의 시뮬레이션 파형은 그림 12~그림 15에 나타냈으며, 방전 모델의 시뮬레이션 파형은 그림 16~그림 19에 나타내었다.

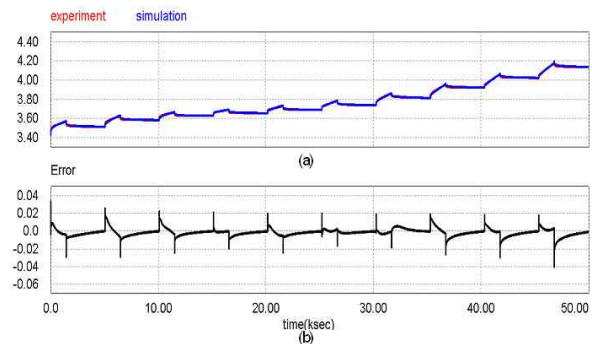


그림 12 실험과 시뮬레이션 결과 비교(0.25C-rate charge)  
(a) 전압 비교, (b) 오차  
Fig. 12 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

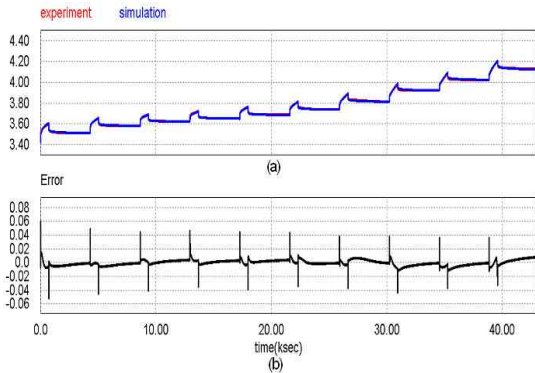


그림 13 실험과 시뮬레이션 결과 비교(0.5C-rate charge)  
(a) 전압, (b) 오차  
Fig. 13 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

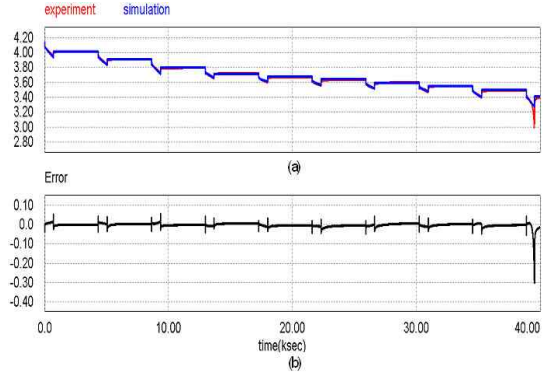


그림 16 실험과 시뮬레이션 결과 비교 (0.5 C-rate discharge)  
(a) 전압, (b) 오차  
Fig. 16 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

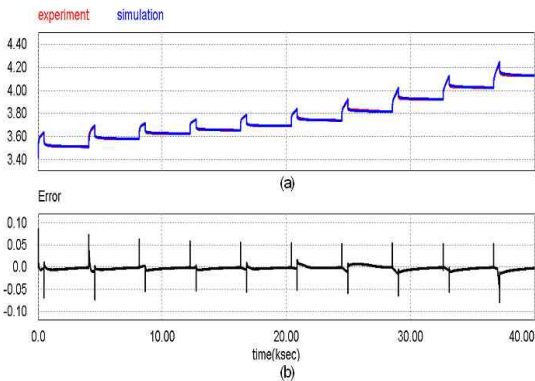


그림 14 실험과 시뮬레이션 결과 비교(0.75C-rate charge)  
(a) 전압, (b) 오차  
Fig. 14 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

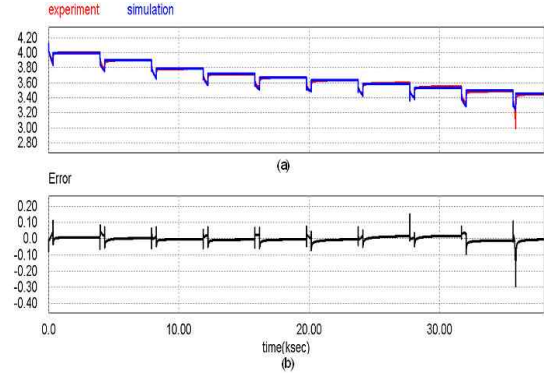


그림 17 실험과 시뮬레이션 결과 비교 (1 C-rate discharge)  
(a) 전압, (b) 오차  
Fig. 17 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

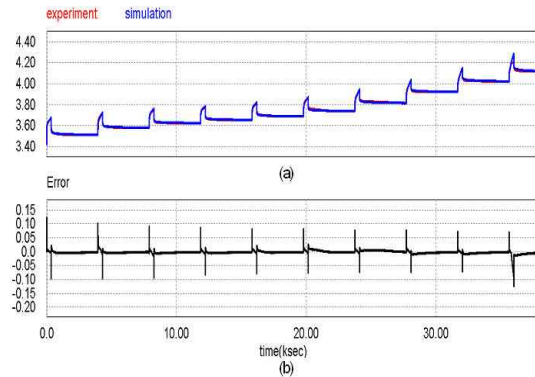


그림 15 실험과 시뮬레이션 결과 비교(1C-rate charge)  
(a) 전압, (b) 오차  
Fig. 15 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

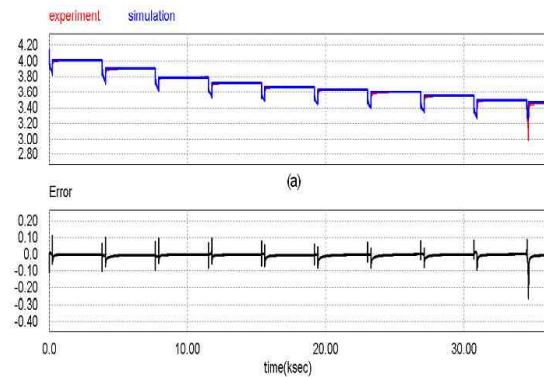


그림 18 실험과 시뮬레이션 결과 비교(1.5 C-rate discharge)  
(a) 전압, (b) 오차  
Fig. 18 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

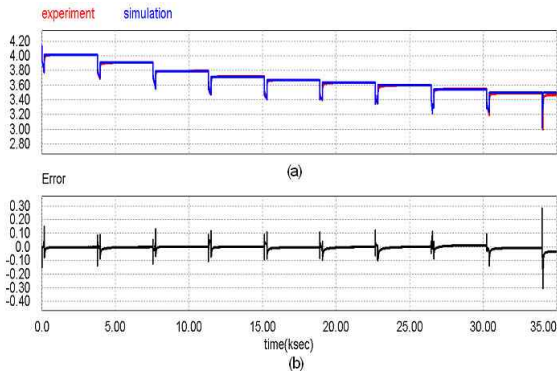


그림 19 실험과 시뮬레이션 결과 비교 (2 C-rate discharge)  
(a) 전압 비교, (b) 오차

Fig. 19 Comparative result of simulation with that of experiment (a) Voltage, (b) Error

방전 시뮬레이션 결과에서 마지막 부분에 20A로 방전시키는 부분이 있는데 이는 전지를 큰 C-rate로 방전했을 경우 전지에 약간의 잔존 용량이 남아 있기 때문에 이를 제거하기 위하여 실행한 것이다.

PSiM 결과과형에서 검정색으로 나타난 그래프는 실험과 시뮬레이션을 비교한 오차를 나타낸 것으로 시뮬레이션이 실험을 잘 추정해 나가는 것으로 확인 할 수 있다.

충전과 방전의 C-rate가 다른 이유는 전지가 확보할 수 있는 구간 안에서 4가지 경우에 대한 실험을 하기 위해서이다. 논문에서 실험한 전지는 충전시에는 1C-rate, 방전시에는 2C-rate까지 안정성 및 그 특성을 확보할 수 있기 때문이다.

위의 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있듯이 시뮬레이션은 실험 과형을 잘 추정하는 것으로 확인되었다. 이를 통하여  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ 에 대한 값들이 타당함을 증명하였다.

## 6. 결 론

본 논문은 리튬폴리머 전지의  $V_{ocv}$ 와 SOC의 히스테리시스 특성을 고려한 전기적 모델을 제안하였으며, 시뮬레이션 연구를 위한 PSiM 모델을 개발하였다. 실험에 사용된 리튬폴리머 전지는 4.2V, 40Ah의 전지를 사용하였고, 충방전 기기는 Maccor 8500을 사용하였다.

측정된 값을 기반으로 Matlab/cftool을 사용하여 리튬폴리머이온 전지의 SOC에 따른 개방회로 전압,  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 의 파라미터를 구하였으며, 각각의 파

라미터들은 PSiM Look-up 테이블을 사용하여 대입하였다. 만들어진 PSiM 모델은 시뮬레이션 연구를 수행할 수 있도록 개발하였다.

또한 2개의 R-C회로를 사용하여도 실제 과도 상태를 잘 추정하는 것을 확인하였다.

본 연구는 지식경제부의 전력산업원천기술개발 사업의 연구결과로 수행되었음  
(과제번호 2009T100200742)

## 참 고 문 헌

- [1] S. C. Hageman, "Simple Pspice models let you simulate common battery types", *EDN*, pp. 117-132, 1993, Oct.
- [2] V. H. Johnson, A. A. Pesaran, and T. Sack, "Temperature-dependent battery models for high-power lithium-polymer-ion batteries", *Battery Thermal Manag*, Assessment, 2002.
- [3] Karen L. Butler, Mehrdad Ehsani and Preyas Kamath, "A Matlab-Based Modeling and Simulation Package For Electric and Hybrid Electric Vehicle Design", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 6, pp. 1770-1778, 1999, Nov.
- [4] L. Gao and S. Liu, "Dynamic lithium-Ion Battery Model for System Simulation", *IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies*, Vol. 25, pp. 496-505, 2002, Sept.
- [5] A. Cuadras and O. Kanoun, "SoC Li-ion Battery Monitoring with Impedance Spectroscopy", *Conf Rec. of IEEE IMCS*, pp. 1-5, 2009.
- [6] S. Abu-Sharkh and D. Doerffel, "Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-polymer-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 130, pp. 266-274, 2004.
- [7] Gang Ning and Baranko N. Popov, "Cycle Life Modeling of lithium-polymer-Ion Batteries", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 151, No. 2, pp. A1584-A159, 2004, Sept.
- [9] Chen Min and Rincon-Mora G. A., "An accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance", *IEEE Tans. on Energy conversion*, Vol. 21, No. 2, pp. 104-111, 2005.
- [10] C. B. Zhu, M. Coleman, and W. G. Hurley, "State of Charge Determination in a Lead-Acid Battery: Combined EMF Estimation and Ah-balance Approach", *Conf Ref. of IEEE PESC*, pp. 1908-1914, 2004.
- [11] Novie Ayub Windarko and Jaeho Choi, "SOC Estimation Based on OCV for NIMH Batteries Using an Improved



Takacs Model”, *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No. 2, pp. 181-186, 2010.

- [12] Ryan C. Kroeze and Philip T. Kerein, “Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations”, *Conf. Ref. of IEEE PESC*, pp. 1336-1342, 2008.
- [13] Stephan Buller, “Impedance-Based Simulation Models of Supercapacitors and Li-Ion Batterues for Power Electronic Applications”, *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 41, No. 3, pp. 742-747, 2005.



#### **정교범(鄭敎範)**

1959년 12월 20일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Univ. of Florida(공박). 1992년~1993년 Virginia Tech (Post Doc.). 1993년~1995년 한국전기연구소 선임연구원. 1995년~현재 홍익대 전자·전기공학과 교수.

### 저 자 소 개



#### **임재관(林裁寬)**

1985년 12월 11일생. 2009년 충북대 전기자컴퓨터공학부 전기공학과 졸업. 2010년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



#### **임덕영(林德英)**

1982년 1월 1일생. 2008년 충북대 전기전자컴퓨터공학부 전기공학과 졸업. 2010년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



#### **Novie Ayub Windarko**

received his B.E and M.E in Electrical Engineering from Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya Indonesia, in 1999 and 2006, respectively. He has been with the Electronic Engineering Polytechnic Institute of Surabaya, Indonesia, since 2000. He was a Visiting Researcher in Tokyo Institute of Technology, Japan, from 2002 to 2003. Currently, he is working towards his Ph. D. at the School of Electrical Engineering, Chungbuk National University.



#### **최재호(崔載昊)**

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기공학부 교수. 1993년, 1998년, 2003년, 2009년, University of Toronto 객원교수. 2005년~2008년 당 학회 부회장. JPE 편집위원장.