

PI 상태관측기를 이용한 리튬폴리머 배터리 SOC 추정

이준원¹, 조종민¹, 김성수², 차한주[†]

The State of Charge Estimation for Lithium-Polymer Battery using a PI Observer

Junwon Lee¹, Jongmin Jo¹, Sungsoo Kim², and Hanju Cha[†]

Abstract

In this study, a lithium polymer battery (LiPB) is simply expressed by a primary RC equivalent model. The PI state observer is designed in Matlab/Simulink. The non-linear relationship with the OCV-SOC is represented to be linearized with 0.1 pu intervals by using battery parameters obtained by constant-current pulse discharge. A state equation is configured based on battery parameters. The state equation, which applied Peukert's law, can estimate SOC more accurately. SOC estimation capability was analyzed by utilizing reduced Federal Test Procedure (FTP-72) current profile and using a bi-directional DC-DC converter at temperature (25 °C). The PI state observer, which is designed in this study, indicated a SOC estimation error rate of $\pm 2\%$ in any of the initial SOC states. The PI state observer confirms a strong SOC estimation performance despite disturbances, such as modeling errors and noise.

Key words: Lithium-polymer battery, State-of-charge, PI observer, Battery parameter estimation

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염을 최소화시킬 수 있는 친환경차에 대한 관심이 뜨겁다. 세계 각국들은 탄소배출량을 줄이기 위한 정책을 세우며 각 나라에서 전기 자동차 산업에 대한 투자를 꾸준히 지원해오고 있다. 하이브리드 자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV)는 기존의 내연기관 자동차와 다르게 배터리가 추가적으로 구성되어 있어 연비 저감의 효과를 누릴 수 있으며, 전기 자동차(Electric Vehicle, EV)는 순수 배터리를 동력원으로 삼기 때문에 대기오염 물질 및 이산화탄소 저감을 위한 친환경 초록도시 구현에 있어서 필수적이다. HEV/EV는 리튬이온 배터리 기술이 진보하여 항속 거리가 증가함에 따라 효율적으로 운전하기 위한 주행전략을 제공하

는 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)이 중요한 개발 요소라고 할 수 있다. BMS에서는 배터리의 충전상태(State Of Charge, SOC)로 주행 전략을 도모하고 안정성을 확보하기에 정확하게 SOC를 예측해야 한다. 하지만 리튬이온 배터리의 전기화학적 변화와 파라미터의 비선형성으로 인해 SOC를 예측하기에는 매우 어려운 문제이다. SOC 추정에 관한 연구는 현재 활발히 진행되고 있으며 많은 기법들이 여러 문헌에 소개되어 있다^{[1][2]}. 배터리의 내부 임피던스를 측정하는 전기 화학적 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)^[3]은 매우 높은 정확도를 갖지만 오프라인 기법으로 HEV/EV와 같은 어플리케이션에 사용하기에는 적합하지 않다. 배터리에 흐르는 총 방전 전류를 시간에 대해 적분하는 전류적산법(Coulomb counting)은 구현하기에 간편하지만 초기 SOC를 정확히 알고 있어야 하며 순간적인 총방전 전류가 흐를 때 오차가 누적되는 단점이 있다. 또한, 개방회로전압(Open Circuit Voltage, OCV)을 이용하여 SOC를 추정하는 방법은 별도의 알고리즘이 필요 없는 이점이 있지만 긴 휴지시간을 필요로 하여 실시간으로 SOC를 추정하기는 어렵다. SOC를 추정하는 방법 중 배터리 모델을 이용하는 방법이 있으며, 이 방법은 배터리 모델로 입력되는

Paper number: TKPE-2015-20-2-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895

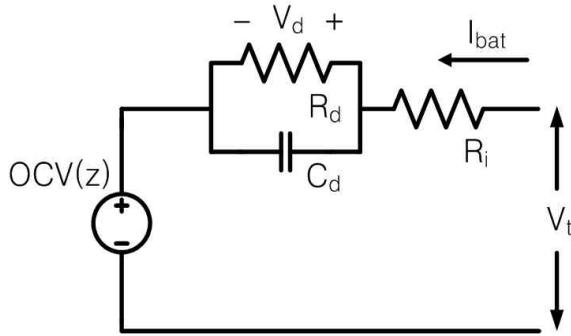
¹ Dept. of Electrical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

² Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

Manuscript received Jan. 23, 2015; accepted Mar. 6, 2015

— 본 논문은 2014년 추계학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2014년 추계학술대회 외부장학금 수혜논문임

Fig. 1. The 1st order R-C equivalent circuit.

값과 배터리 모델의 파라미터에 의해 계산되는 출력 값과 실제 배터리에서 측정되는 값과의 오차를 이용하여 어떠한 알고리즘에 의해 보상하게 된다. 배터리 모델 기반의 SOC 추정 방법은 Luenberger Observer, Sliding mode Observer, Kalman Filter와 같이 다양한 기법들이 있다^{[4][5][6]}. 위의 모델 기반의 기법들은 배터리 모델의 오차에 의해 SOC 추정 성능이 결정되기 때문에 정확한 배터리 모델이 필요하나 실제 구현에 있어 어려움이 있다. 배터리를 정교하게 모델링하더라도 그에 따라 시스템의 차수가 증가하기 때문에 계산량이 증가하여 SOC 연산시간이 오래 걸리게 된다.

본 논문은 리튬 폴리머 배터리를 1차 R-C 등가모델로 단순화하여 표현하였고, 모델 기반의 SOC 추정기법 중 비례-적분 상태관측기(PI observer)를 구성하여 리튬폴리머 배터리의 SOC를 추정하는 기법에 대해 설계한 뒤 실험을 통해 검증하였다.

2. 배터리 모델링

2.1 배터리 모델

배터리의 동적거동을 표현하기 위하여 배터리 내부에서 발생하는 화학적 변화를 나타내는 전기적 등가회로는 그림 1과 같다.

배터리는 내부저항 R_i , 분극현상을 나타내는 충·방전 전류에 의한 이온화 손실저항 R_d , 이중층 커패시턴스 C_d 와 z 에 따른 비선형 함수로 나타나는 개방회로전압(OCV)로 구성된다. 여기서 z 는 SOC를 지칭하는 약어이다. 충·방전 전류에 대한 배터리 단자전압 V_t 의 동적 응답은 시상수($\tau=R_d \times C_d$)로 나타나며 식 (1)과 같이 표현된다^[7].

$$V_t = OCV(z) + I_{bat} (R_i + R_d(1 - e^{-t/\tau})) \quad (1)$$

z 와 분극전압(V_d)의 1차 미분 관계로 정의되는 상태변수 방정식은 식 (2)와 같다.

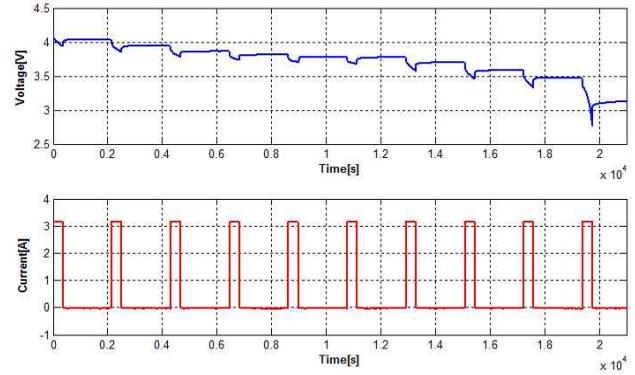


Fig. 2. Experiment for discharge of LiPB(1C-rate, 25°C).

$$\begin{cases} \dot{V}_d = -\frac{1}{R_d C_d} V_d + \frac{1}{C_d} I_{bat} \\ \dot{z} = \frac{1}{C_p} I_{bat}^k \end{cases} \quad (2)$$

여기서 C_p 와 k 는 Peukert 용량과 계수로 2.2절에 그 의미를 기술하였다.

1차 R-C 모델에서 사용된 파라미터는 그림 2에서 보이는 바와 같이 정전류 펄스방전을 통하여 구해진다^[8]. 실험에 사용한 리튬폴리머 배터리는 정격용량 3200mAh, 정격전압 3.7V이다. 1C-rate 펄스방전 실험에서 배터리의 컷오프 전압은 각각 4.2V와 2.7V로 설정하였고, 펄스 전류원의 크기는 3.2A, 펄스폭은 360s이다. 배터리에 정전류 펄스원이 인가될 때 나타나는 단자전압의 변화를 이용하여 R_i , R_d , C_d 를 구할 수 있다. 전류가 인가되는 시점에 전압 강하의 크기로 내부저항 R_i 를 계산할 수 있고, 전류가 인가되는 동안 시정수를 갖고 전압 강하가 일어나게 되는데 이 전압 강하의 크기로 분극저항 R_d 와 시정수 τ 를 구할 수 있다.

배터리 파라미터는 SOC, C-rate, 온도에 따라 결정되는 요소이기 때문에 각각의 조건을 고려하여 실험을 진행하였다. 그림 3은 25°C 환경에서 C-rate와 SOC의 변화에 따른 배터리 파라미터이다. 배터리 파라미터는 C-rate와 SOC에 대해 비선형성을 갖고 있고 낮은 SOC에서 배터리 내부저항 R_i 와 분극저항 R_d 가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.2 Peukert 법칙

Peukert 법칙은 배터리를 정전류로 방전하였을 때 전류의 크기에 따른 배터리 용량변화를 나타낸다. 그림 4에서 알 수 있듯이 방전전류가 I_1 에서 I_2 로 커지면 실제 배터리 용량은 C_1 에서 C_2 로 줄어들게 된다. 즉 배터리 용량은 전류의 크기와 반비례 관계를 갖는다^[9]. 배터리 용량 C 는 방전전류 I 와 배터리의 잔존용량이 완전히 없어지는데 걸리는 시간 T 의 곱으로 나타난다. 따라서 방전전류의 크기가 증가하면서 배터리 용량이 줄어드는 것은 방전시간 T 가 줄어든다는 것을 의미한다. 배터리

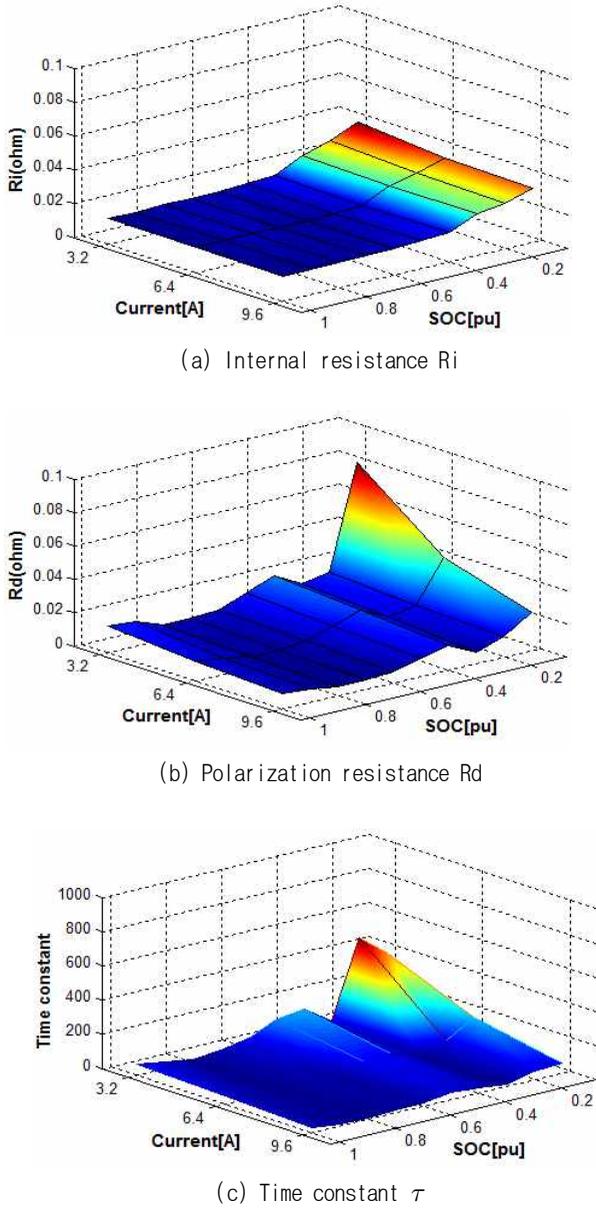


Fig. 3. Battery parameters in terms of SOC and current(25°C).

용량 3200mA을 1C-rate(3.2A)로 방전하게 되면 1시간이 걸리지만 전류의 크기를 증가시켜 2C-rate로 방전하면 30분이 걸리는 것이 아니라 이보다 더 적은 시간에 방전종지전압에 다다르기 때문에 배터리 용량이 줄어 들었다고 할 수 있다.

$$I^k T = C_p \tag{3}$$

$$SOC = Initial_SOC - \frac{\int I^k dt}{C_p} \tag{4}$$

식 (3)에 1C-rate, 2C-rate, 3C-rate의 실험결과를 적용하면 전류의 크기에 관계없이 일정한 배터리 용량 (Peukert capacity, C_p)과 계수(Peukert coefficient, k)를

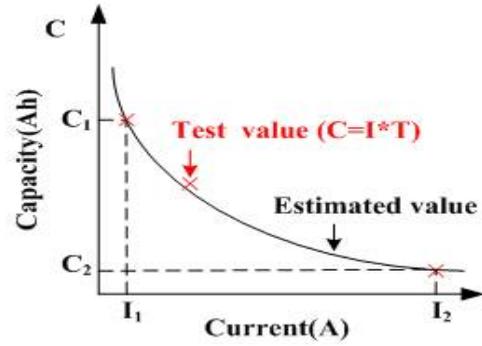


Fig. 4. Battery capacity versus discharge rate.

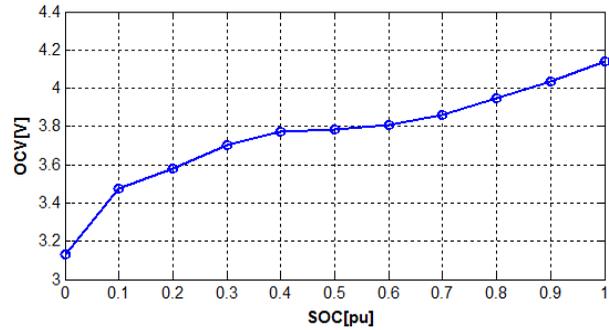


Fig. 5. OCV versus SOC curve of LiPB(25°C).

구할 수 있다. 실험에 사용된 리튬폴리머 배터리의 Nominal capacity는 3200mA이지만 C_p 는 3229mA이고, k 는 1.018 이다. Peukert coefficient k 가 1에 가까울수록 배터리용량은 방전전류에 영향을 덜 받는다고 말할 수 있다. 하지만 Peukert coefficient k 는 그 수치가 작더라도 식 (4)와 같은 전류적산법으로 구한 SOC가 긴 시간 동안 입력되는 전류를 적산하게 된다면 무시할 수 없는 요소이다.

2.3 OCV-SOC 관계

개방회로전압은 10펄스 형태의 정전류 방전 실험을 통해 취득할 수 있다. SOC 0.1pu 간격으로 데이터를 취득하여 선형화하였는데 그림 5에서 보이는바와 같이 SOC에 대해 비선형적인 형태로 나타난다. 배터리는 부분적으로 충·방전 되는 과정에서 SOC에 대한 개방회로 전압이 히스테리시스 특성을 보인다. 배터리마다 그 크기가 다르게 나타나지겠지만 리튬폴리머 배터리의 충전 OCV와 방전 OCV는 최대 20mV 정도 차이가 난다^[10]. 본 논문에서는 리튬이온배터리의 방전 OCV곡선으로 PI 상태관측기를 설계하여 SOC 추정 오차를 감소하였다.

SOC를 0.1pu 간격으로 선형화하는 과정에서 $(i-1) \cdot 0.1pu \leq SOC_i \leq i \cdot 0.1pu, 1 \leq i \leq 10$ 과 같이 설정하였을 때 개방회로전압은 수식 (5)와 같이 주어진다. 여기서 a_i 는 i 번째 구간에서의 기울기이며, b_i 는 i 번째 구간에서 y 절편이다.

$$OCV_i = a_i \cdot SOC_i + b_i \tag{5}$$

TABLE I
OCV PARAMETERS OF THE RELATIONSHIP
BETWEEN SOC AND OCV

i^{th}	1	2	3	4	5
SOC _i	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5
a_i	3.42	1.08	1.22	0.7	0.08
b_i	3.132	3.258	3.338	3.494	3.742
SOC _i	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1
a_i	0.2	0.48	0.8	0.94	1.04
b_i	3.694	3.526	3.302	3.19	3.1

배터리의 동역학적 표현 식 (2)를 이용하면 식 (6)과 같이 상태방정식의 기본형으로 표현이 가능하다. 상태변수 $x = [V_d \text{ SOC}]^T$ 입력 $u = [I_{bat} \ I_{bat}^k]^T$ 출력 $y = V_t - b_i$ 로 2.2절에서 소개한 Peukert 용량과 계수가 적용되었다.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (6)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_d C_d} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_p} \end{bmatrix}, C = [1 \ a_i], D = [R_i \ 0]$$

3. PI 상태관측기 설계

배터리 파라미터를 취득한 뒤 상태방정식으로 표현하고 PI 상태관측기를 설계하였다. SOC를 추정하는 과정은 실제 시스템에서 나오는 출력과 실제 시스템을 모사한 배터리 모델에서 나오는 값의 차이를 이용하여 배터리 모델의 상태변수를 추정하게 된다. 출력으로부터 상태변수를 추정하는 과정이기 때문에 시스템 매트릭스의 관측가능성(Observability)을 확인한 뒤 적절한 피드백 방법을 선정하여 추정하는 상태변수에 보상을 해야 한다. 피드백 방법에 따라 Luenberger Observer, Sliding mode Observer와 같은 여러 관측기의 형태가 존재하는데 본 논문에서는 SOC 추정시간을 단축시키면서 OCV-SOC가 갖는 비선형적인 관계를 선형화하는 과정에서 발생하는 오차, 배터리의 화학적 반응을 전기적 등가회로로 변환하는 과정에서 발생하는 오차, 외부로부터 들어오는 측정상의 오차를 최소화하기 위하여 비례이득(K_p)만들 사용하는 Luenberger Observer에 적분이득(K_i)을 추가하여 관측기를 구성하였다. 그림 6의 PI 상태 관측기 블록다이어그램에서 \tilde{x} 는 상태변수의 추정치를 의미하며, w 는 배터리 단자전압과 추정된 단자전압 차의 적분으로 정의된다. 배터리 단자전압 측정 시 외부로부터 들어오는 오차는 그 크기와 시간에 따른 함수 $N \cdot d(t)$ 로 표시하였다. PI 상태 관측기의 상태변수와

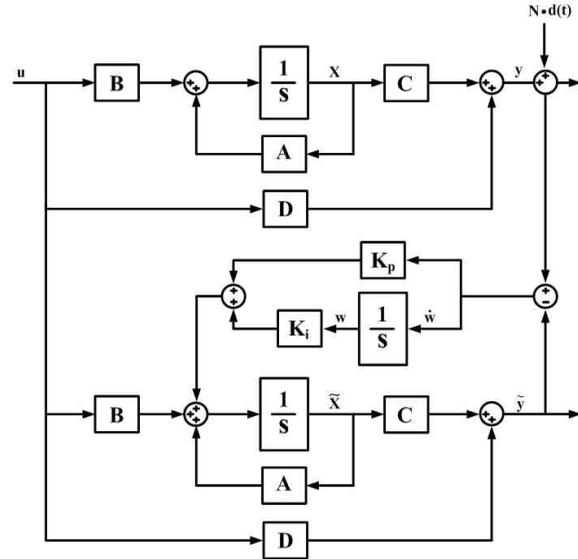


Fig. 6. PI Observer block diagram.

출력방정식은 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_p(y - C\tilde{x} + Nd) + K_i w \\ \dot{w} = y - C\tilde{x} + Nd \end{cases} \quad (7)$$

실제 시스템과 추정 시스템의 오차 $e = x - \tilde{x}$ 로 표현하면 오차방정식은 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} \dot{e} = (A - K_p C)e - K_i w - K_p Nd \\ \dot{w} = Ce + Nd \end{cases} \quad (8)$$

이 방정식은 다음과 같이 행렬식 (9)로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - K_p C & -K_i \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_p N \\ N \end{bmatrix} d \quad (9)$$

응답성을 높이기 위하여 K_p 를 높게 설정하면 외란의 영향이 상태변수의 추정오차에 크게 작용하여 SOC추정성능을 저하시킨다. 따라서 K_p 를 작게 설정하여 외란의 영향을 줄이게 되면 행렬식 (10)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - K_p C & -K_i \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 사용된 이득(K_p, K_i)은 시스템이 2개의 상태변수를 갖기에 $K_p = \begin{bmatrix} K_{p1} \\ K_{p2} \end{bmatrix}$, $K_i = \begin{bmatrix} K_{i1} \\ K_{i2} \end{bmatrix}$ 로 치환하게 되면 최종적인 오차행렬식 (11)이 주어진다. 오차행렬식에서 매트릭스의 극점이 좌반면(LHP)에 위치하면 이 오차행렬식은 점근적으로 안정하다고 할 수 있다. 즉 오차 e 와 w 가 0이 되면 상태변수의 추정치가 실제 값에 수렴한다는 것을 의미한다.

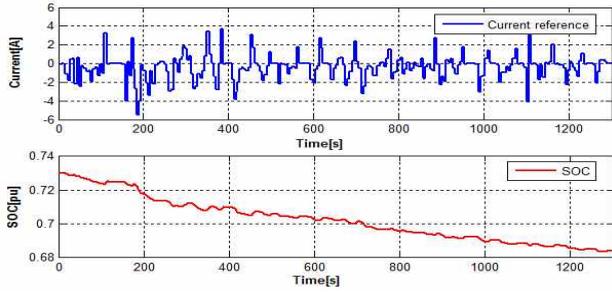


Fig. 7. Current and SOC according to scaled down FTP-72 1 Cycle.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_d C_d} - K_{p1} & -K_{p1} a_i & -K_{i1} \\ -K_{p2} & -K_{p2} a_i & -K_{i2} \\ 1 & a_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ w \end{bmatrix} \quad (11)$$

4. 실험 결과

3장에서 설계한 PI 상태관측기를 검증하기 위하여 Matlab/Simulink에서 시뮬레이션을 수행 하였다. 2.1절에서 제시한 식 (1)로 Matlab/Simulink에서 배터리 모델을 구성한 뒤 출력 y 를 나타내었다. 이때 외부로부터 들어오는 외란은 시뮬레이션 과정에서는 생략하게 된다. 추정 시스템의 출력 \tilde{y} 는 식 (1)에서 사용된 파라미터를 이용하여 A,B,C,D 매트릭스로 나타낼 수 있다. 따라서 시뮬레이션 모델과 추정 시스템은 동일한 모델이며 OCV-SOC가 갖는 비선형적인 관계를 선형화하는 과정에서 발생하는 오차도 존재하지 않게 된다. 다만 시뮬레이션 모델과 1C-rate로 설계한 PI 상태관측기 모델의 오차에서 발생하는 에러를 SOC 추정 상태변수에 피드백하게 된다. SOC 추정성능을 검증하기 위하여 그림 7에 나타난 축소된 FTP-72 전류 레퍼런스를 사용하였다.

FTP-72는 국내 연비 인증 드라이빙 사이클로 현재 미국과 대한민국에서 도심 주행 모드로 사용된다. 주행시간은 1300초, 최대 속도는 90km/h이며, 최대 방전 전류와 충전전류는 167.4A, 111A이다. 실험에 사용된 배터리 용량에 맞게 실차 스케일의 1/30로 축소하여 사용하였다. 축소된 FTP-72 전류 레퍼런스가 1사이클 인가되면 배터리의 SOC는 0.73pu에서 0.68pu로 하강한다. 전류 레퍼런스의 크기를 축소하면서 SOC의 가용 범위가 줄어들어 실제 시뮬레이션에는 축소된 FTP-72 전류 레퍼런스의 5 사이클을 반복하여 사용하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 SOC가 0.73pu에서 0.49pu로 줄어들 때 실제 SOC와 추정된 SOC의 오차를 확인할 수 있다. 전반적으로 SOC 오차율이 $\pm 2\%$ 안에 들어오는 것을 확인할 수 있으며, 전류의 크기가 커질 때 증가한다. 여기서 사용된 실제 SOC는 전류적산법으로 취득하였다. 전류적산법은 고성능의 전류 센서와 초기 SOC를 알고 있을 경우에 실험실 환경에서 구현하기 쉽고 정확하기 때문이다.

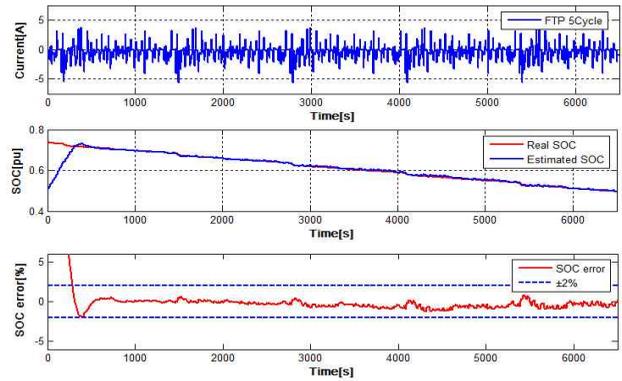


Fig. 8. Estimated SOC using PI observer(Simulation Model).

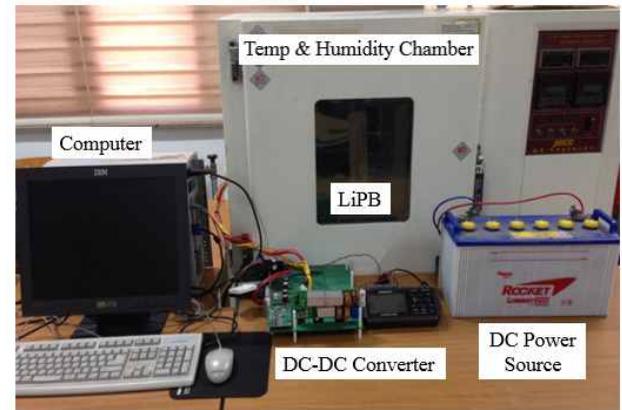


Fig. 9. Experimental setup for battery test.

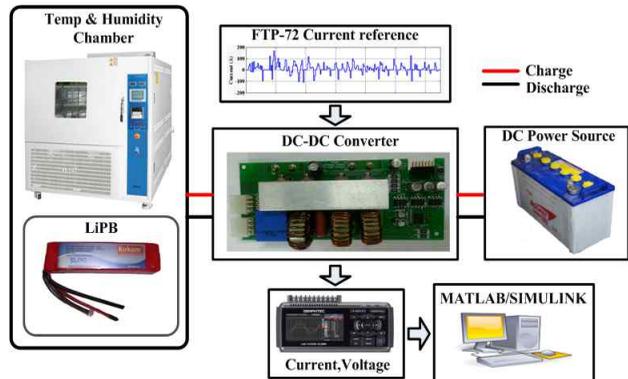


Fig. 10. Configuration of experimental system.

배터리 모델과 다르게 실제 배터리는 측정 노이즈와 같이 외부로부터 들어오는 외란과 OCV-SOC가 갖는 비선형적인 관계를 선형화하는 과정에서 발생하는 오차도 존재하게 된다. 따라서 PI 상태관측기의 출력 y 는 이러한 요소를 포함해야하기 때문에 그림 10과 같은 실험장치를 이용하여 실제 배터리를 검증하였다. 양방향 DC-DC컨버터로 축소된 FTP-72 전류레퍼런스를 생성하여 배터리에 인가하였다. 이 때 배터리는 항온항습 챔버에 넣어 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 실험 과정 중 충·방전 전류에 의한 배터리 온도 변화는 무시하였는데, 챔버가 갖는 열용량이 커서 인가되는 전류에 의한

TABLE II
SPECIFICATIONS OF BATTERY TEST SYSTEM

DC-DC Converter	Capacity	150W
	Input	12V, 12.5A
	Output	2~5V, 30A
LiPB (SLPB8043128H4)	Nominal Capacity	TYPE. 3,200mAh
	Nominal Voltage	3.7V
	Max. Voltage	4.2V±0.03V
	Cut-off Voltage	2.7V
DC Power Source	Lead-acid Battery	12V, 125A
Data logger (GL220)	Voltage range	10V
	Sampling interval	10ms
	A/D Converter	16bits
Temp & Humidity Chamber	Temperature Range	-20°C ~ +60°C

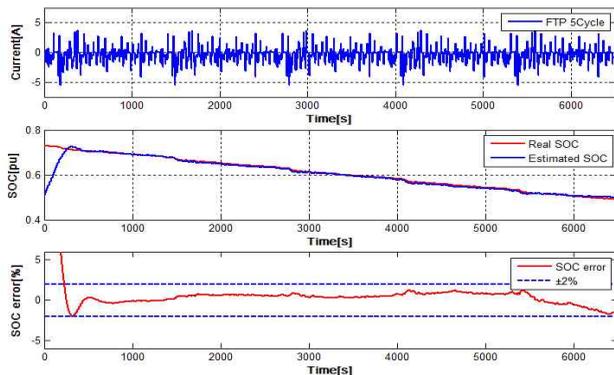


Fig. 11. Estimated SOC using PI observer(Real Battery).

배터리의 온도변화가 무시할 수준이기 때문이다. 실제 배터리의 입력과 출력을 구성할 전류와 전압의 데이터는 데이터로거 GL220을 이용하여 취득하였다.

그림 11은 실제 배터리의 실험결과로 취득한 추정된 SOC오차이다. 양방향 DC-DC 컨버터로 리튬폴리머 배터리에 다음과 같은 FTP-72 전류레퍼런스를 인가하면 배터리는 전체적으로 SOC가 줄어들게 되는데 이 때 PI 상태관측기는 임의의 초기 SOC(0.5pu)로 설정하였음에도 불구하고 SOC 추정오차가 전반적으로 ±2%안에 들어오는 것을 확인할 수 있다.

추정오차가 ±2%안에 있지만, 5400s 이후부터 오차율 궤적의 기울기가 음으로 바뀌는 지점이 존재하게 되는데 이 점은 SOC 0.5pu이다. 이는 2.3절에서 나타낸 SOC에 따른 OCV를 측정하는 과정에서 발생하는 측정 오차에 기인한다. 그중 0.5pu 이하에서 측정오차가 커지는 이유는 SOC 0.4pu-0.5pu 사이에서는 OCV의 크기 변화가 거의 없기 때문이다. OCV가 1-2mV라도 잘못

측정되면 SOC 추정오차율은 증가하게 된다. 실험실 환경에서 측정 장비의 성능에 제한이 있기 때문에 SOC 0.5pu 이하에서 SOC 추정오차율의 궤적이 바뀌는 것은 필연적인 결과라고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 리튬폴리머 배터리를 1차 R-C 등가모델로 단순화하여 표현하였고, PI 상태관측기를 Matlab/Simulink에서 설계하였다. OCV-SOC가 갖는 비선형적인 관계를 0.1pu 간격으로 선형화하여 표현하였으며 정전류 펄스방전으로 구한 배터리 파라미터를 이용하여 상태방정식을 구성하였다. 상태방정식에는 Peukert 법칙이 적용되어 보다 정확하게 SOC를 추정 할 수 있게 하였다. 설계과정을 검증하기 위하여 상온(25°C)에서 양방향 DC-DC 컨버터를 이용하여 리튬폴리머 배터리에 축소된 FTP-72 전류 레퍼런스를 인가한 뒤, SOC 추정능력을 분석하였다. PI 상태관측기는 임의의 초기 SOC 상태에서도 SOC 추정 오차율 ±2% 안으로 나타났다. 이는 본 논문에서 설계한 PI 상태관측기가 모델링 에러나 노이즈와 같은 외란에도 강인한 SOC 추정능력이 있는 것으로 확인된다.

본 연구는 산업통상자원부에서 시행한 산업융합 기반구축사업 ‘그린카 부품 상용화지원을 위한 가상개발환경(VIDE) 개발’(과제번호: 10035209)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

References

- [1] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications," *J. Power Sources*, Vol. 96, pp. 113 - 120, 2001.
- [2] H. R. Eichi and M. Y. Chow, "Adaptive parameter identification and state-of-charge estimation of lithium-ion batteries," *Proceedings of 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, QC, Canada*, pp. 4012 - 4017, Oct. 25 - 28, 2012.
- [3] F. Huet, "A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 70, pp. 59-69, 1998.
- [4] G. L. Plett, "Extended kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs - Part 2. Modeling and identification," *Journal of Power Sources*, Vol. 134, pp. 262-276, 2004.

- [5] I. S. Kim, "State of charge estimator using sliding mode observer for hybrid electric vehicle lithium battery," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 324-331, Aug. 2007.
- [6] H. G. Kim, S. J. Heo, and G. B. Kang, "Modeling and state observer design of HEV li-ion battery," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, pp. 360-368, Oct. 2008.
- [7] M. Daowd, N. Omar, B. Verbrugge, P. V. D. Bossche, and J. V. Mierlo, "Battery models parameter estimation based on MATLAB/ Simulink@," EVS-25 Shenzhen, China, Nov. 2010.
- [8] S. I. Kong, D. S. Kim, and H. J. Cha, "NiMH battery modeling and test considering C-rate, temperature and SOC," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 413-414, July 2012.
- [9] D. Doerffel and S. A. Sharkh, "A critical review of using the peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, [Online]. 155(2), pp. 395 - 400, Apr. 2006.
- [10] J. K. Im, D. Y. Lim, Novie Ayub Windarko, J. H. Choi, and G. B. Chung, "Electrical modeling of lithium-polymer battery," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 16, No. 2, pp. 199-207, Apr. 2011.



이준원(李俊愿)

1989년 1월 24일생. 2014년 충남대 전기전자 통신공학교육과 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



조종민(趙鍾珉)

1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김성수(金聖壽)

1959년 1월 20일생. 1981년 서울대 농공과(기계) 졸업. 1983년 미국 Univ. of Iowa 기계공학과 졸업(석사). 1988년 미국 Univ. of Iowa 기계공학과 졸업(공학박). 1988년~1993년 Center for CAD, Univ. of Iowa 선임연구원. 1993년~현재 충남대 메카트로닉스공학과 교수.



차한주(車翰周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station (공학박). 1990년~2001년 LG산전연구소 책임연구원. 2009년 미국 United Technology Research Center 방문교수. 2005년~현재 충남대 전기공학과 교수.

충남대 전기공학과 교수.