

# 하이브리드 전기자동차용 리튬이온 배터리 모델링 및 상태 관측기 설계

金浩冀<sup>†</sup>, 許相珍<sup>\*</sup>, 姜求培<sup>\*\*</sup>

## Modeling and State Observer Design of HEV Li-ion Battery

Ho-Gi Kim, Sang-Jin Heo and Gu-Bae Kang

### 요 약

하이브리드 전기자동차용 리튬이온 배터리 시스템의 모델링 및 모델기반 상태 관측기 설계에 관한 연구를 수행하였다. 배터리의 동적 특성을 모사하기 위한 모델은 전기적 등가회로로 단순화하여 제안하였다. 모델 파라미터는 최소 자승 이론에 의거 다양한 운전조건에 따라 추정하였고, 실험 검증하였다. 검증된 모델을 기반으로 하는 비례-적분(PI) 제어의 상태 관측기를 구성하였고, 제어 이득 선정방법을 제안하였다. 제안된 상태 관측기의 강인성은 시뮬레이션 및 실험에 의거 다양한 운전조건 변동에 따른 민감도를 분석하여 검증하였다.

### ABSTRACT

A lumped parameter model of Li-ion battery in hybrid electric vehicle(HEV) is constructed and system parameters are identified by using recursive least square estimation for different C-rates, SOCs and temperatures. The system characteristics of pole and zero in the frequency domain are analyzed with the parameters obtained from different conditions. The parameterized model of a Li-ion battery indicates highly dependent of temperatures. To estimate SOC and polarization voltage, a Luenberger state observer is utilized. The P- or PI-gains of observer based on a suitable natural frequency and damping ratio is adopted for the state estimation. Satisfactory estimation accuracy of output voltage and SOC is especially obtained by a PI-gain. The feasibility of the proposed estimation method is verified through experiment under the conditions of different C-rates, SOCs and temperatures

**Key Words** : HEV(Hybrid Electric Vehicle), Li-ion Battery, SOC(State of Charge), C-rate(Charge Rate), Parameter Identification, Least Square Estimation, Luenberger Observer

### 1. 서 론

하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle,

HEV)의 전기 구동모터 동력원인 배터리시스템은 주행 중 충방전 운전전략에 따라 전류 및 출력이 순시적으로 변동하는 동적 부하를 받게 된다. 배터리의 입출력 전류는 순시 최대  $\pm 20C$ -rate(Charge Rate) 또는 그 이상 도달할 수 있으며, 사용온도는  $-30^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$  범위에 이른다<sup>[1]</sup>. 이와 같은 운전 조건 및 환경에서 과충방전에 의한 배터리 손상을 방지하고, 연비 및 동력향상을 꾀하는 주행전략을 도모하기 위하여, 배터리 상태치의 실시간 관측 알고리즘 개발을 통한 적절한 충

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 현대자동차(주) HEV개발실 연구위원

E-mail : hogikim@hyundai-motor.com

<sup>\*</sup>정회원, 현대자동차(주) HEV개발실 연구원

<sup>\*\*</sup>정회원, 현대자동차(주) HEV개발실 선임연구원

접수일자 : 2008. 7. 25 1차 심사 : 2008. 8. 20

심사완료 : 2008. 8. 26

전량( State of Charge, SOC) 및 유효 출력의 예측은 HEV 배터리 관리시스템에 있어 필수적이다<sup>[2]</sup>.

일반적으로 배터리의 전기화학적 동적 특성은 Randle 회로와 유사한 RC회로의 1개 또는 2개의 조합으로 이루어진 전기적 등가모델로 표현된다<sup>[3,4,6,7]</sup>. 배터리 파라미터는 전기화학적 상태로 결정되며, 배터리에 인가되는 부하전류의 크기(C-rate), SOC 및 온도변동에 크게 의존하여 변동된다. 모델의 선정은 충분한 모델 정확도와 함께, 모델 파라미터 식별 방법의 실시간 적용성을 고려한 복잡하지 않은 모델 계산이 중요한 기준이 된다.

모델 파라미터는 임피던스 스펙트로스코피(Impedance Spectroscopy)를 이용한 주파수 분석<sup>[1]</sup> 또는 시간응답특성<sup>[6,7]</sup>을 이용한 시험측정으로 off-line에서 추정될 수 있으며, on-line 파라미터 추정 방법으로는 칼만 필터(Kalman Filter)가 많이 적용되고 있다<sup>[4]</sup>.

On-line 배터리 상태치 추정 방법으로도 대표적으로 칼만 필터 방법이 연구되고 있으며, 상태 추정과 병행하여 배터리 파라미터를 실시간 식별하기 위한 이중 칼만 필터 구조를 제안하고 있다<sup>[4,5]</sup>. 이러한 이중 칼만 필터 구조는 이득 설정 및 적용, 실시간 모델 파라미터 식별에 따른 복잡한 관측기 구조 및 이에 따른 많은 계산량으로 인해 실차 적용이 매우 제한적이다. 다른 방법으로 인공 신경망<sup>[8]</sup>이나 퍼지 로직<sup>[9]</sup>을 사용한 방법이 보고되고 있으나, 계산량이 많고 신뢰성 때문에 실제 배터리 관리시스템에 거의 적용되지 않고 있다.

본 논문에서는 하이브리드용 리튬이온 배터리 시스템에 대한 on-line 파라미터 추정을 하지 않는 모델기반 비례-적분(PI) 상태 관측기 구조를 제안하였다. 관측기내 모델은 설계점에서의 고정 파라미터를 이용하였다. 강인한 관측기 설계를 위한 설계점 선정 및 이득설정 방법을 제시하기 위하여, 다양한 운전조건에서 주파수 대역폭 변동 분석을 off-line에서 수행하였다. 제안된 상태 관측기의 강인성은 운전조건 변동에 따른 민감도를 분석하여 검증하였다.

## 2. 배터리시스템 모델링

운전 조건에 따른 배터리의 전기화학적 동적 특성은, Randle 회로에서 Warburg 임피던스를 무시하고, 그림 1과 같이 등가회로로 단순화하여 모델링하였다. 등가 회로는 배터리 내부저항  $R_i$ , 분극현상을 나타내는 이온화 손실저항  $R_{ct}$ 와 이중층의 커패시턴스  $C_{dl}$ 로 구성된다.

배터리 개방회로전압(Open Circuit Voltage)  $v_e$ 은 무부하 정상상태의 배터리 단자전압이며, 배터리 내의 잔존 에너지 용량 즉, SOC의 비선형 함수로 표현된다. 그림 2에 SOC별로 측정된 개방회로 전압을 도시하였다.

등가모델로부터 단자전압  $v_t$ 는 다음과 같다.

$$v_t = v_e(SOC) + iR_i + v_p \quad (1)$$

여기서  $v_p$ 는 분극전압으로 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{v}_p = -\frac{1}{R_{ct}C_{dl}}v_p + \frac{1}{C_{dl}}i \quad (2)$$

SOC는 배터리 공칭용량(Nominal Capacity) 대비 잔용량으로 정의되며, 잔용량은 상온에서 C/30비율로 방전 가능한 Ah값이다. SOC를  $z(t)$ 로 표시하면, 다음 식으로 정의된다.

$$\dot{z} = \frac{\eta_i}{C_n}i \quad (3)$$

여기서  $\eta_i$ 와  $C_n$ 은 배터리 충방전 효율과 공칭용량을 각각 나타낸다.

SOC의 함수인 개방회로전압  $v_e(z)$ 은 다음과 같이 선형화한다.

$$v_e(z) = v_e(z_0) + \left. \frac{\partial v_e(z)}{\partial z} \right|_{z_0} (z - z_0) \quad (4)$$

선형화 점에서의 미소 변화량  $v_t - v_e(z_0)$ ,  $z - z_0$ 는 각각  $\delta v_t$ ,  $\delta z$ 로 표시할 수 있으며, 식 (1)의 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_t = v_{e0}z + v_p + iR_i \quad (5)$$

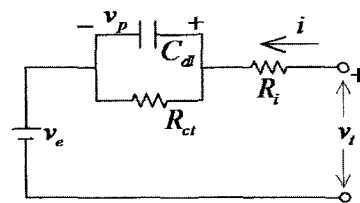


그림 1 배터리시스템 등가 회로 모델

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a Li-ion battery

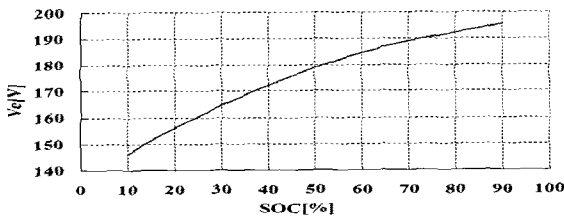


그림 2 SOC에 따른 개방회로전압(온도 : 25°C)  
Fig. 2 Measured open circuit voltage as a function of SOC at 25°C

여기서 
$$v_{e0} = \left. \frac{\partial v_e(z)}{\partial z} \right|_{z_0}$$

식 (2), (3)과 (5)를 상태치  $x = [z \ v_p]^T$ , 입력  $u = i$ , 출력  $y = v_t$ 인 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + bu \\ y &= c^T x + du \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{ct}C_{dl}} \end{bmatrix}$ ,  $b = [\eta_i/C_n \ 1/C_{dl}]^T$   
 $c^T = [v_{e0} \ 1]$ ,  $d = R_i$

배터리 부하전류를 입력으로 하고, 단자전압과 개방회로전압 차이를 출력으로 하는 주파수 영역 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{v_t - v_e(SOC)}{i} = \frac{R_i(s + \omega_z)}{s + \omega_p} \quad (7)$$

여기서  $\omega_p = 1/(R_{ct}C_{dl})$ 와  $\omega_z = \omega_p(1 + R_{ct}/R_i)$ 는 각각 전달함수의 극점과 영점으로, 배터리의 동적거동 특성을 나타내게 된다.

### 3. 모델 파라미터 식별

#### 3.1 최소 자승법

제안된 모델 식(7)은 이산 시간(Discrete Time)에서 ARMA(AutoRegressive Moving Average) 모델로 변환하면 식 (8)로 표현되며, 모델 파라미터는 최소 자승법을 이용하여 추정하였다<sup>[10]</sup>.

$$y_k = \psi_k^T \theta \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \theta &= [(1 - \omega_p T_s) \ R_i \ R_i(\omega_z T_s - 1)]^T \\ y_k &= v_t(k) - v_e(k), \ \psi_k = [y_{k-1} \ i_k \ i_{k-1}]^T \end{aligned}$$

여기서  $\theta$ 는 파라미터 벡터,  $y_k$ 는 출력 벡터,  $\psi_k$ 는 시스템 행렬,  $T_s$ 는 샘플링 시간을 나타낸다.

순차적 최소 자승법에 의한 추정 파라미터 벡터  $\hat{\theta}_k$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + K_k(y_k - \psi_k^T \hat{\theta}_{k-1}) \quad (9)$$

여기서  $K_k$ 는 보정 이득(Correction Gain)을 나타낸다.

#### 3.2 모델 파라미터 식별

시험추정은 133kW/±300A급 충방전 장치(Digatron) 및 항온항습 챔버를 이용하였고, 충방전 전류 패턴을 대상 배터리에 인가하여, 단자전압 및 온도를 측정하였다. 충방전 전류 패턴은 최소 자승법을 이용한 모델 식별에 일반적으로 사용되고 있는 그림 3의 PBRs(Pseudo Random Binary Sequence)로 하였다<sup>[11]</sup>. C-rate 변동은 저온(약 0°C 이하)에서 배터리 내부저항의 급격한 증가로 인하여 단자전압 상한치에 도달하여 5C 이하로 제한하여 수행하였다. 대상 배터리는 HEV용 리튬이온 배터리로 공칭용량은 5.3Ah이고, 공칭전압은 180V이다. 최대 허용 충방전 전류는 200A이고, 최대 출력은 17.8kW이다.

그림 4에 5C, SOC 80% 및 실온에서 식 (9)에 의한 파라미터 추정 응답과 측정 단자전압을 시뮬레이션 결과와 비교하여 도시하였다. 시뮬레이션에 의한 단자전압 최대 오차 ±0.1V 범위내에서 모델 파라미터는 수사이클 관측 후에 정상상태로 수렴하였다( $R_i = 0.11$  [Ω],  $R_{ct} = 0.06$  [Ω],  $C_{dl} = 78.99$  [F]).

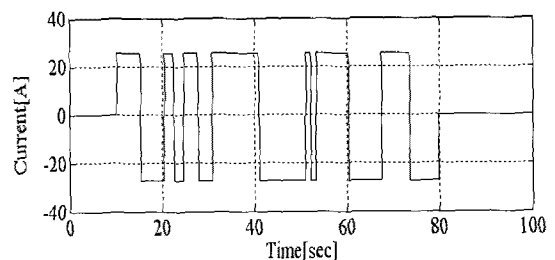


그림 3 배터리 부하전류 파형 (5C-rate)  
Fig. 3 Dynamic input current profile

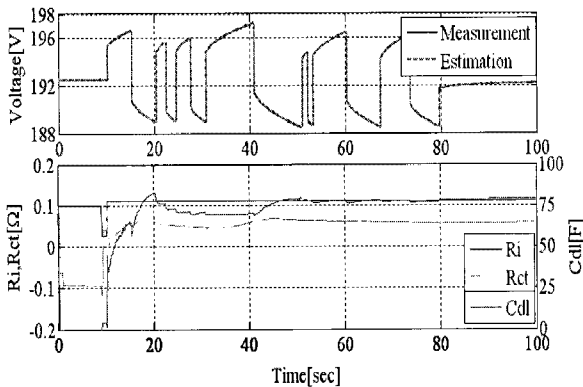


그림 4 파라미터 추정응답 및 시뮬레이션 단자전압 (SOC=80%, T=25°C)

Fig. 4 Recursive parameter estimation and simulated voltage response

### 3.3 모델검증

모델 정확도를 검증하기 위하여, 추정 파라미터를 식 (1), (2) 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5에 운전조건 5C, SOC 80% 및 실온(25°C)에서의 충방전 부하전류에 따른 시뮬레이션 결과를 실험 결과와 비교 도시하였다. 충방전에 따른 저항차이 및 히스테리시스 등의 모델 불확실성에도 불구하고, 시뮬레이션 결과는 ±0.5V(0.5%, 단자 전압기준 : 198V)의 오차범위 내에서 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

두 번째 모델 검증은 저온(-10°C)에서 수행하여, 결과를 그림 6에 도시하였다. 단자전압 제한을 고려하여 1C-rate로 하였다. 단자전압 추정 오차는 최대 1.5%로, 실온대비 저온에서 모델 정확도가 제한적임을 알 수 있다.

제안된 모델에 배터리의 비선형적인 특성과 고주파 성분이 반영되지 않았음에도 불구하고, 리튬이온 배터리의 동적 거동 특성 예측 및 실시간 적용에 적합한 것으로 판단된다.

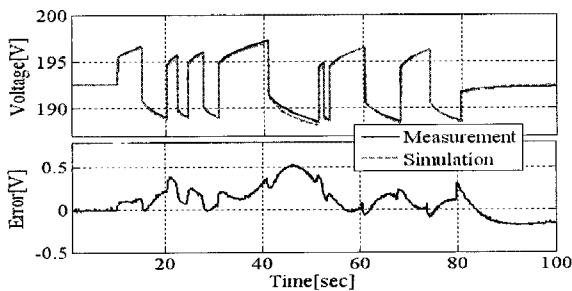


그림 5 시험 및 시뮬레이션에 의한 단자전압 응답 비교 (SOC=80%, T=25°C)

Fig. 5 Measured and simulated voltage response

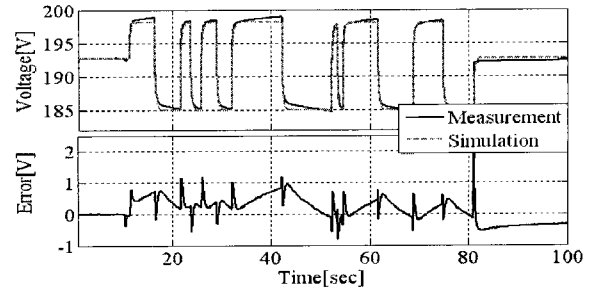


그림 6 시험 및 시뮬레이션에 의한 단자전압 응답 비교 (SOC=80%, T=-10°C)

Fig. 6 Measured and simulated voltage response

## 4. 배터리 특성 분석

배터리 동적 거동 특성을 예측하기 위한 목적으로, 운전조건 변동에 의한 모델 파라미터의 변동 영향도를 평가하였다. 모델 파라미터의 변동은 주파수 영역에서 전달함수의 극점 및 영점으로 분석하였다.

### 4.1 C-rate별 영향도 분석

그림 7은 SOC 80%, 25°C의 조건에서 부하 전류의 C-rate를 1C에서 5C로 변동 시 파라미터 변동을 나타냈다. C-rate 증가에 의해 극점이 24% 증가하였는데, 이는 배터리 전극에서 이온화 반응 손실 감소로 빠른 분극현상을 보이는 배터리 특성으로 추정된다. 또한 영점도 19% 증가하였다. 반면 전해질 저항 성분인 내부저항은 2.3% 감소하고 있다.

### 4.2 SOC별 영향도 분석

그림 8은 5C-rate, 25°C의 조건에서 SOC를 30%~80%로 변동 시 파라미터 변동을 나타냈다. SOC 80%에서 극점이 상대적으로 16% 감소됨을 보여 주고 있다. 영점은 극점과 마찬가지로 9% 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 SOC가 높을수록 내부저항은 8% 감소함을 보이고 있다.

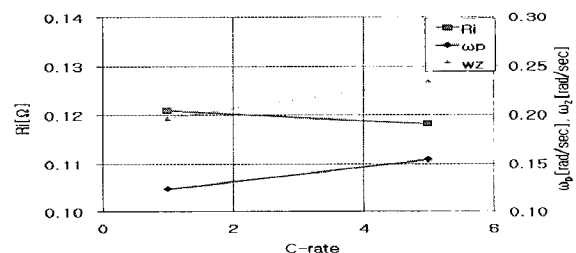


그림 7 C-rate에 따른 파라미터 변동 (SOC=80%, T=25°C)

Fig. 7 Parameter variation as a function of C-rate

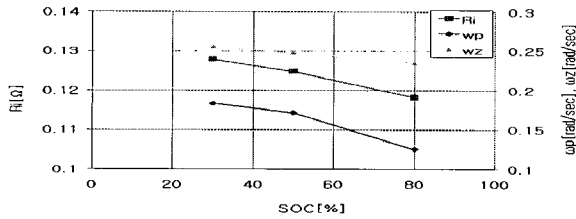


그림 8 SOC에 따른 파라미터 변동 (5C-rate, T=25°C)  
Fig. 8 Parameter variation as a function of SOC

### 4.3 온도별 영향도 분석

그림 9는 1C-rate, SOC 80%의 조건에서 온도 -20 ~ 25°C로 변동 시 파라미터 변동을 나타냈다. 온도가 저하됨에 따라 내부저항은 지수적으로 증가하여, 실온(25°C)대비 최대 18배까지 증가하였다. 또한 극점 및 영점도 증가하여 각각 최대 6.6, 5.4배까지 증가하였다. 이는 저온에서 이온화 반응 손실분이 급속히 증가하나, 동시에 이중층 커패시턴스의 급격한 감소로 인해 빠른 분극효과로 나타나는 것으로 추정된다.

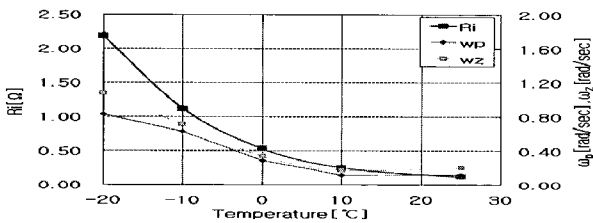


그림 9 온도에 따른 파라미터 변동 (SOC=80%, 1-Crate)  
Fig. 9 Parameter variation as a function of temperature

## 5. 모델기반 상태 관측기 설계

선형 상태 관측기의 상태방정식은 다음 식과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + bu + L(y - \hat{y}) \quad (10)$$

여기서  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ 는 각각  $x$ ,  $y$ 의 추정치를 나타내며,  $L$ 은 관측기 제어이득 벡터를 나타낸다.

모델 파라미터가 배터리 시스템과 이상적으로 일치하는 경우, 식 (6)과 (10)은 오차벡터  $e = x - \hat{x}$ 의 오차방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{e} + (Lc^T - A)e = 0 \quad (11)$$

선형 관측기 설계는 모델 오차에도 불구하고, 관측 시스템이 안정되고 오차가 허용범위 내에 수렴할 수 있게 관측기 제어 이득 벡터  $L$ 을 선정하여야 한다.

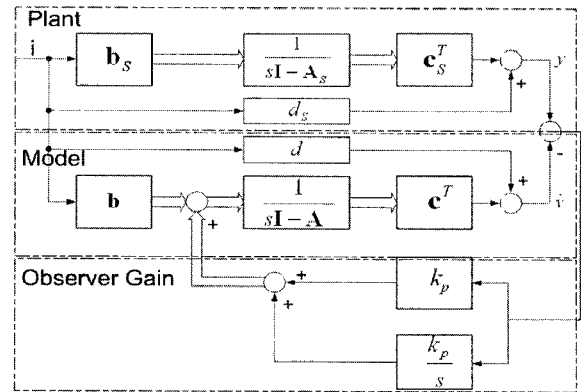


그림 10 상태 관측기 도식도  
Fig. 10 Block diagram of state observer

### 5.1 비례제어

배터리 시스템과 모델 파라미터가 이상적으로 일치하는 경우, 비례제어에 의한 오차방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e} + (k_p c^T - A)e = 0 \quad (12)$$

여기서  $k_p = [k_{p1} \ k_{p2}]$ 는 SOC 관측이득  $k_{p1}$ 과 분극전압 관측이득  $k_{p2}$ 로 구성된다.

주파수 대역폭  $\omega_n$ 과 감쇠계수  $d_n$ 을 갖는 배터리 관측기의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$s^2 + 2d_n \omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (13)$$

식 (12)와 (13)의 계수비교로 비례제어이득은 다음과 같이 계산된다.

$$k_{p1} = \frac{\omega_n^2}{v_{e0} \omega_p}, \quad k_{p2} = 2d_n \omega_n - \omega_p - \frac{\omega_n^2}{\omega_p} \quad (14)$$

여기서 비례이득이 양수를 갖기 위한 조건은 다음과 같다.

$$d_n > 1, \quad \omega_n = \omega_p (d_n \pm \sqrt{d_n^2 - 1}) \quad (15)$$

### 5.2 비례-적분 제어

PI 제어에 의한 오차방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{e} + (k_p c^T - A)\dot{e} + k_i c^T e = 0 \quad (16)$$

여기서  $k_i = [k_{i1} \ k_{i2}]$ 는 적분제어이득으로 SOC

관측이득  $k_{i1}$  과 분극전압 관측이득  $k_{i2}$  로 구성된다.

식 (16)의 3차 특성 방정식을 갖는 관측기는 3개의 극점 실수부가 동일한 값을 갖도록 극점을 배치하게 되면, 오버슈트 없이 가능한 한 가장 빠른 시간 내에 정상상태에 도달하는 과도응답 특성을 갖게 된다<sup>[12]</sup>. 따라서 주파수 대역폭  $\omega_n$  과 감쇠계수  $d_n$  을 갖는 배터리 관측기의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$(s^2 + 2d_n\omega_n s + \omega_n^2)(s + \omega_n) = 0 \tag{17}$$

식(16), (17)의 계수비교로 아래의 관계식 (18)에서  $k_{i1} = k_{i2}$ 로 설정하여 각각의 관측이득을 구한다.

$$\begin{aligned} v_{e0}\omega_p k_{i1} &= \omega_n^3 \\ \omega_p + v_{e0}k_{p1} + k_{p2} &= (2d_n + 1)\omega_n \\ \omega_p + v_{e0}k_{p1} + k_{p2} &= (2d_n + 1)\omega_n \end{aligned} \tag{18}$$

### 6. 상태 관측기 민감도 분석

배터리 관측기의 주파수 대역폭  $\omega_n$  은 배터리 시스템의 극점주파수  $\omega_p$  보다 충분히 커야 한다. 일반적으로  $\omega_n$  이 너무 작으면, 상태 관측에 있어 추정 지연이 발생하며, 너무 크면 측정 잡음 또는 고려되지 않은 모델링 오차에 의해 관측기가 불안정해 질 수 있다.

운전조건 변동 따른 관측기 제어이득 선정과 이에 따른 강건성 검증은 목적으로 민감도 분석을 수행하였다. 관측기내 모델 파라미터 계산은 다음의 3가지 경우에 대하여 고찰하였다.

- Case ① : 고정 모델 파라미터 적용
- Case ② : 내부저항  $R_i$  적응(Adaptation)
- Case ③ : 파라미터( $R_i, R_{ct}, C_{dl}$ ) 적응

#### 6.1 C-rate 변동에 대한 민감도 분석

그림 11은 1C-rate(SOC 80%, 10°C) 운전조건에서 상태 관측기 유무에 따른 추정 단자전압 응답을 나타냈다. 관측기 대역폭  $\omega_n$  은 극점주파수를 고려하여 1.5rad/sec로 선정하였고, 비례이득이 양수를 갖는 조건에서 감쇠계수  $d_n$  는 2.5로 하였다

단지 모델에 의한 단자전압 추정과 대비하여, 관측기 적용시 단자전압 RMS(Root Mean Square) 오차는 비례제어와 PI 제어 관측을 통해 각각 80%, 86% 감소됨을 알 수 있다.

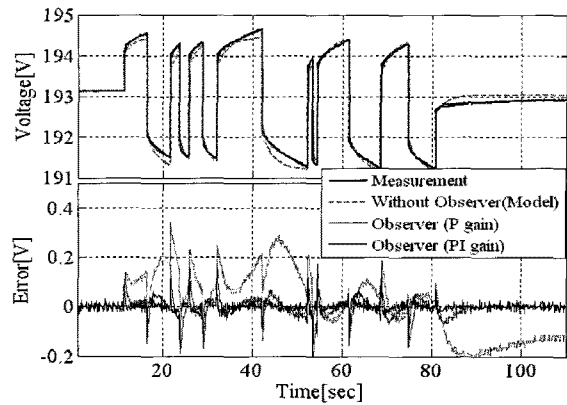


그림 11 관측기 추정 단자전압 및 추정오차 (1C, SOC 80%, 10°C)

Fig. 11 Estimated terminal voltage & estimation error

표 1은 C-rate별 제어이득을 나타낸다. 1, 3C-rate (SOC 80%, 10°C)에서 관측기를 각각 설계하고, 교차 운전하여 민감도를 분석하였다

그림 12 a)는 3C에서 관측기를 설계하고, 1C 조건으로 운전하여 추정한 단자전압 RMS 오차를 나타낸다. b)는 그 반대로 1C 조건에서 관측기를 설계하고, 3C 조건으로 시뮬레이션을 수행한 결과의 RMS 오차를 나타낸다. 단순 모델에 의한 단자전압 추정오차를 100%로 정의하여 비교기준으로 하였다.

모델 기반 관측기 적용시 전반적으로 오차가 50%이상 감소되었다. 교차검증 결과 극점 주파수가 큰 3C-rate에서의 모델 파라미터를 이용한 관측기 설계시 운전조건 변동에 강인한 응답성을 보이고 있다. PI제어는 모델 파라미터를 적응(Adaptation)한 관측기에 상응하는 오차 감소 효과를 보이며, 전반적으로 시스템 파라미터 변동에 강인한 특성을 보인다.

표 1 C-rate별 제어이득 ( $\omega_n=1.5\text{rad/sec}, d_n=2.5$ )  
Table 1 Observer gain as a function of C-rate

제어이득		1C-Rate	3C-Rate
P 제어	$k_{p1}$ (SOC/V·sec)	3.1	2.5
	$k_{p2}$ (1/sec)	0.3	0.4
PI 제어	$k_{p1}$ (SOC/V·sec)	17.2	13.9
	$k_{p2}$ (1/sec)	0.6	0.7
	$k_{i1}$ (SOC/V·sec <sup>2</sup> )	0.7	0.6
	$k_{i2}$ (1/sec <sup>2</sup> )	0.7	0.6

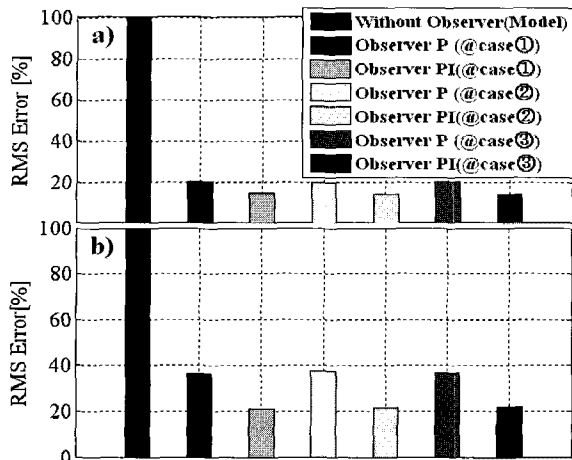


그림 12 관측기 추정 단자전압 RMS 오차 (C-rate 변동)

a) 설계점 : 3C, 운전조건 : 1C (SOC 30%, 10°C)  
 b) 설계점 : 1C, 운전조건 : 3C (SOC 80%, 10°C)

Fig. 12 Estimated terminal voltage RMS error

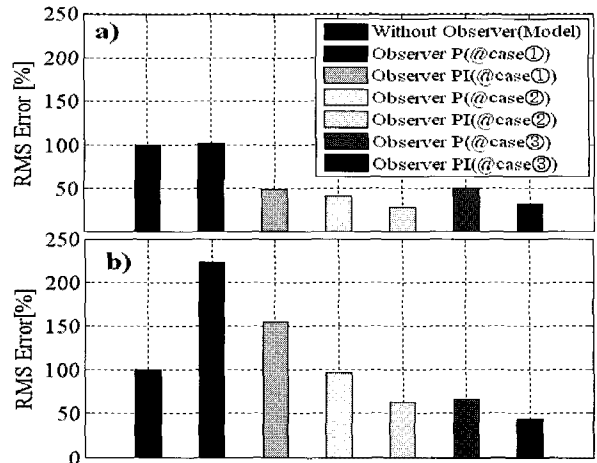


그림 13 관측기 추정 단자전압 RMS 오차 (SOC 변동)

a) 설계점 : SOC 80%, 운전조건 : SOC 30%  
 b) 설계점 : SOC 30%, 운전조건 : SOC 80%

Fig. 13 Estimated terminal voltage RMS error

### 6.2 SOC변동에 대한 민감도 분석

표 2는 SOC별 제어이득을 나타낸다. SOC 30%와 80%(3C-rate, 10°C)에서 관측기를 각각 설계하고, 교차 운전하여 민감도를 분석하였다.

그림 13 a)는 SOC 80%에서 관측기를 설계하여 30% 조건에서 운전한 결과이고, b)는 그 반대로 30%에서 설계하여 교차 운전한 결과이다.

SOC 30%에서 더 큰 극점주파수 및 개방회로전압의 선형화 계수를 갖고 있어 실제적으로 더 큰 관측기 대역폭을 갖게 선정할 수 있으나, 비교목적으로 관측기 대역폭을 1.5rad/sec로 동일하게 선정하였다. SOC 80%에서의 관측기를 설계하여 SOC 30%에서 운전하였음에도 불구하고, SOC 30% 모델과 거의 동등한 RMS 오차를 보이고 있다. 적분 제어 또는 내부저항 적용에 의한 관측기는 추가적인 오차 감소에 기여하는 개선효과를 보이며, 특히 적분 제어는 모델 파라미터 변동에 강인한 특성을 나타내고 있다.

표 2 SOC별 제어이득 ( $\omega_n=1.5\text{rad/sec}, d_n=2.5$ )  
 Table 2 Observer gain as a function of SOC

	제어이득	SOC 30%	SOC 80%
P 제어	$k_{p1}(\text{SOC/V}\cdot\text{sec})$	0.4	2.5
	$k_{p2}(1/\text{sec})$	0.7	0.4
PI 제어	$k_{p1}(\text{SOC/V}\cdot\text{sec})$	2.2	13.9
	$k_{p2}(1/\text{sec})$	0.9	0.7
	$k_{i1}(\text{SOC/V}\cdot\text{sec}^2)$	0.1	0.6
	$k_{i2}(1/\text{sec}^2)$	0.1	0.6

### 6.3 온도변동에 대한 민감도 분석

그림 14는 10°C(3C-rate, SOC 80%)에서 PI-제어 관측기를 설계하여 25°C(1C-rate, SOC 80%)에서 운전할 때의 단자전압 오차를 나타낸다. 10°C 모델을 이용한 단자전압 추정오차는 최대 1.8V(0.9%, 단자 전압기준 : 198V)를 보인다. 내부저항을 적용하지 않은 관측기 적용 시 이보다 더 큰 단자전압 오차(2.4V)를 보인다. 이는 온도변동에 따른 배터리 내부저항 모델오차에 주로 기인하는 것으로 추정된다. 반면에 정상상태 오차는 적분제어의 효과로 오차 제로(zero)에 빠르게 수렴하여 모델보다 월등히 우수한 성능을 보인다. 그림 16 a)는 관측기 추정 단자전압 RMS 오차를 나타내며, 내부저항을 적용한 PI-제어 관측기 적용 시, 25°C 모델 대비 RMS 오차는 66% 개선되었다.

그림 15는 10°C(3C-rate, SOC 80%)에서 PI-제어 관측기를 설계하여 0°C(1C-rate, SOC 80%)에서 운전할 때의 단자전압 오차를 나타낸다. 과도구간에서의 추정 최대오차(1.8V)는 내부저항 모델오차에 주로 기인하는 것으로 추정된다. 정상상태 오차는 적분제어의 효과로 오차 제로(zero)에 빠르게 수렴하고 있다. 그림 16 b)는 관측기 추정 단자전압 RMS 오차를 나타내며, 내부저항을 적용한 PI-제어 관측기 적용 시 RMS 오차가 0°C 모델보다 50% 감소 향상되었다.

이로부터 배터리 내부저항 적용 모델을 기반으로 하는 PI 제어구조를 갖는 관측기는 배터리의 온도 변동에 따른 광역의 극점주파수 변동에도 불구하고 강건성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

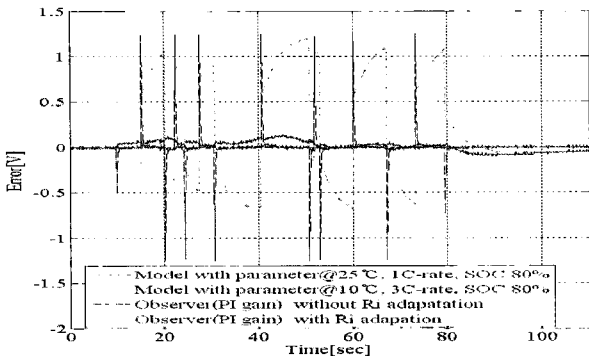


그림 14 온도변동에 따른 관측기 단자전압 추정오차  
(설계점 : 10°C(3C, SOC 80%), 운전조건 : 25°C(1C, SOC 80%))  
Fig. 14 Estimated terminal voltage and error

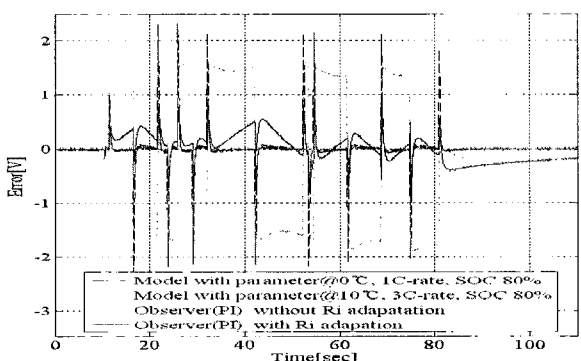


그림 15 온도변동에 따른 관측기 단자전압 추정오차  
(설계점 : 10°C(3C, SOC 80%), 운전조건 : 0°C(1C, SOC 80%))  
Fig. 15 Estimated terminal voltage and error

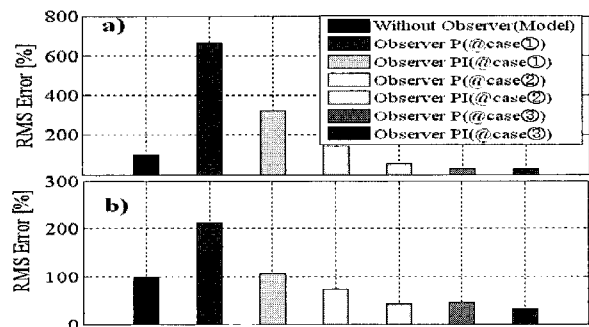


그림 16 관측기 추정 단자전압 RMS 오차 (온도 변동)  
a) 설계점 : 10°C(3C, SOC 80%), 운전조건 : 25°C(1C, SOC 80%)  
b) 설계점 : 10°C(3C, SOC 80%), 운전조건 : 0°C(1C, SOC 80%)  
Fig. 16 Estimated terminal voltage RMS error

7. 결 론

본 논문에서는 하이브리드용 리튬이온 배터리 시스템의 모델링 및 모델기반 상태 관측기 설계를 수행하였다. 제한된 상태 관측기의 강인성은 시뮬레이션 및 실험에 의거 다양한 운전조건 변동에 따른 민감도를 분석하여 검증하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HEV용 고출력 리튬 이온 배터리의 동적 거동은 간단한 RC 1차 회로 모델로 실측치와 0.5%(25°C기준) 오차범위 내에서 잘 예측되었다.
- 2) 운전조건(C-rate, SOC, 온도)에 따라 내부저항 및 극점주파수는 가변성을 갖게 되며, 특히 온도 변화에 가장 민감하게 변동하여, 시험 조건하에서 실온 대비 내부저항은 18배, 극점 주파수는 6.6배 증가하였다.
- 3) C-Rate 및 SOC변동에 선형의 모델 기반 상태관측기를 설계하여, 단자전압 RMS 오차가 50% 감소하는 개선효과를 얻었다. 특히 적분 제어는 시스템 파라미터 변동에 강인한 특성을 보이며, 추가적인 오차 감소 개선효과를 보였다.
- 4) 배터리 내부저항 적응 모델을 기반으로 하는 PI 제어구조를 갖는 관측기로 배터리의 온도 변동에 따른 광역의 시스템 극점주파수 변동에도 불구하고 강인한 상태관측이 가능하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. Buller, "Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems", Dissertation, RWTH Aachen, ISBN 3-8322-1225-6, 2002.
- [2] 남중하, 최진홍, 김승중, 황호석, 김재웅, "하이브리드 전기자동차용 배터리 ECU 설계 및 잔존용량 알고리즘에 관한 연구", *전력전자학회 논문지*, 제9권 제4호, pp. 319-325, 2004. 8.
- [3] 김일송, "슬라이딩모드 관측기를 이용한 하이브리드 자동차용 리튬배터리 충전량 예측방법", *전력전자학회 논문지*, 제12권 제4호, pp. 324-331, 2007. 8.
- [4] G. L. Plett, "Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-based HEV Battery Packs, Part 2. Modeling and Identification", *J. Power Sources*, 134, pp. 262-276, 2004.
- [5] G. L. Plett, "Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-based HEV Battery Packs, Part 3. State and Parameter Estimation", *J. Power Sources*, 134, pp. 277-292, 2004.
- [6] B. Schweighofer, K. M. Raab and G. Brasseur, "Modeling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 4, pp. 1087-1091, 2003.
- [7] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 2, pp. 504-511, 2006.



- [8] C. C. Chan, E. W. C. Lo, S. Weixiang, "The Available Capacity Computation Model Based on Artificial Neural Network for Lead-Acid Batteries in Electric Vehicles", *J. Power Sources*, 87, pp.201-204.
- [9] P. Singh, C. Fennie, D. Reisner, A. Salkind, "A Fuzzy Logic Approach to State-of-Charge Determination in High Performance Batteries with Applications to Electric Vehicles", *Electric Vehicle Symposium*, EVS-15, 1998.
- [10] G. F. Franklin and J. D. Powell, "Digital Control of Dynamic Systems", ISBN 0-201-02891-3, 1980.
- [11] K. J. Aström and B. Wittenmark, "Computer Controlled Systems", ISBN 0-13-164319-3, 1984.
- [12] W. Oppelt, "Kleines Handbuch Technische Regelvorschlage", VEB Verlag Technik Berlin, 1953.

## 저 자 소 개



### **김호기(金浩冀)**

1959년 1월 9일생. 1981년 한양대 공대 기계공학과 졸업. 1984년 서울대 대학원 기계설계학과 졸업(석사). 1994년 베를린 공대 기계공학과(공박). 1995년~현재 현대자동차(주) 하이브리드개발실 연구위원.



### **허상진(許相珍)**

1975년 2월 20일생. 2003년 울산대 공대 기계공학과 졸업. 2005년 울산대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2005년~현재 현대자동차(주) 하이브리드개발실 연구원.



### **강구배(姜求培)**

1973년 12월 18일생. 1996년 경북대 공대 전자공학과 졸업. 1998년 포항공과대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전자전기공학과(공박). 2003년~현재 현대자동차(주) 하이브리드개발실

선임연구원.