

# 최소 자승법을 이용한 하이브리드용 리튬이온 배터리 모델링 및 특성분석

김 호 기\* · 허 상 진 · 강 구 배

현대자동차(주) 하이브리드개발실

## Modeling and Characteristic Analysis of HEV Li-ion Battery Using Recursive Least Square Estimation

Hogi Kim\* · Sangjin Heo · Gubae Kang

Hybrid Vehicle Development Division, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-705, Korea

(Received 30 May 2008 / Accepted 21 August 2008)

**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, SOC's and temperatures. The system characteristics of pole and zero in frequency domain are analyzed with the parameters obtained from different conditions. The parameterized model of Li-ion battery indicates highly dependant of temperatures. The system pole and internal resistance changes 6.6 and 18 times at -20°C, comparing with those at 25°C, respectively. These results will be utilized on constructing model-based state observer or an on-line identification and an adaptation of the model parameters in battery management systems for hybrid electric vehicle applications.

**Key words** : Hybrid electric vehicle(하이브리드 전기자동차), Li-ion battery(리튬 이온 배터리), BMS(배터리 관리 시스템), Least square method(최소 자승법), SOC(충전량), C-rate(충전율), Pole(극점), Zero(영점)

### 1. 서 론

하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV)의 구동계는 엔진과 전기모터로 구성된다. 전기모터의 동력원인 배터리시스템은 주행 중 충방전 운전전략에 따라 전류 및 출력이 순시적으로 변동하는 지속적인 동적 부하를 받게 된다. 배터리의 입출력 전류는 순시 최대  $\pm 20C$ -rate(Charge rate) 또는 그 이상 도달할 수 있으며, 사용온도는 -30°C ~ 50°C 범위에 이른다.<sup>1)</sup>

이와 같은 운전 조건 및 환경에서 배터리의 과충방전에 의한 배터리 손상을 방지하고, 연비 및 동력 향상을 꾀하는 주행전략을 도모하기 위해 적정한

충전량(State of Charge, SOC)범위 내에서 운용은 필수적이다.<sup>2)</sup> 그러므로 HEV 차량의 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)은 배터리의 SOC, SOH(State of Health) 및 단자전압 허용치 범위 내에서의 가용 출력을 정확히 예측하여야 한다.

한편 배터리 상태치는 전기화학적 상태로 결정되어진다. 이와 같은 전기화학적 상태는 배터리에 인가되는 부하전류의 크기(C-rate), 배터리 SOC 및 내부온도에 의존하여 변동된다. 운전조건에 따라 변동하는 상태치를 추정하기 위해 배터리에 인가되는 부하전류를 입력으로 하고, 단자 전압을 출력으로 하는 모델링 및 모델 파라미터 식별에 대한 방법이 연구되어 왔다.<sup>3-6)</sup>

일반적으로 배터리의 전기화학적 동적 특성은

\*Corresponding author, E-mail: hogikim@hyundai-motor.com

Randle 회로와 유사한 RC의 1개 또는 2개의 조합으로 이루어진 전기적 등가모델로 표현된다.<sup>1,3-6)</sup> 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)<sup>1)</sup>를 이용한 주파수 분석 또는 시간응답특성<sup>3-5)</sup>을 이용한 시험측정으로 추정될 수 있으나, 이는 off-line에서의 배터리 정적특성 분석에 주로 활용되고 있다. On-line 모델 파라미터 추정에 대표적으로 칼만 필터링(Kalman Filtering)<sup>6)</sup>에 의한 시스템 식별방법이 있다. 칼만 필터링 방법은 정확한 상태 예측을 위한 모델이 복잡해지고, 실시간 파라미터 추출에서의 변동하는 제어이득설정 및 모델 계산이 매우 복잡한 단점을 갖고 있다. 또한 배터리 시스템의 운전조건, 특히 온도변동에 따른 시스템의 특성분석 없이 파라미터 식별 알고리즘(Algorithm)을 적용하고 있어, BMS 관측기의 강건한 제어이득 설계 또는 실시간 파라미터 식별을 위한 단순화 목적의 파라미터 적응(Adaptation) 전략 수립이 불가능한 실정이다. 다른 방법으로 인공 신경망<sup>7)</sup>이나 퍼지 로직<sup>8)</sup>을 사용한 방법이 보고되고 있으나, 계산량이 많고 신뢰성 때문에 실제 배터리 관리시스템에 거의 적용되지 않고 있다.

본 논문에서는 HEV용 리튬이온 배터리의 동적 거동특성 예측 목적으로 실시간 적용성을 고려하여 전기회로 모델을 단순화하여 제안하였다. 모델 파라미터는 순차적 최소자승법(Recursive Least Principle)에 의거 다양한 부하 및 운전조건에 따라 추정하였고, 실험결과와 비교 분석하여 검증하였다. 배터리 동적거동은 주파수 영역에서 전달함수의 극점과 영점으로 특성화하였다. 최종적으로 운전조건변동에 따른 파라미터 변동의 영향도를 규명하여, 주파수 영역에서 대역폭 및 진폭 변동으로 분석하였다. 이는 향후 배터리 관리 시스템에서 모델기반 상태 관측기의 강건 설계 또는 파라미터 적응을 위한 제어전략수립의 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

## 2. 배터리 모델링

운전 조건에 따른 배터리의 전기화학적 동적 특

성을 비교 분석하기 위해서, Randle 회로에서 Warburg 임피던스를 무시하고 Fig. 1과 같이 등가 전기회로로 단순화하였다. 등가 전기회로는 배터리 내부저항  $R_i$ , 분극현상을 나타내는 충방전 전류에 의한 이온화 손실저항  $R_{ct}$  및 이중층의 커패시턴스  $C_{dl}$ 로 구성된다.

또한 배터리 개회로 전압(Open Circuit Voltage)  $v_e$ 은 무부하 정상상태에서의 배터리 단자전압이며, 배터리 내 잔존 에너지 용량 즉 SOC의 비선형적 함수로 표현된다. Fig. 2에 SOC별로 측정된 개회로 전압  $v_e$  (SOC)을 도시하였다.

등가 모델로부터 배터리 단자전압  $v_t$ 은 다음 식 (1) 과 같다.

$$v_t = v_e(SOC) + iR_i + v_p \tag{1}$$

where  $v_p$ : polarization voltage

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

상기 식 (1), (2)로부터 배터리 부하전류를 입력으로 하고, 단자전압을 출력으로 하는 주파수 영역 전달함수는 다음 식과 같다.

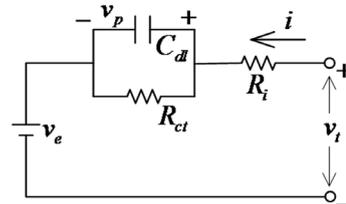


Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a Li-ion battery

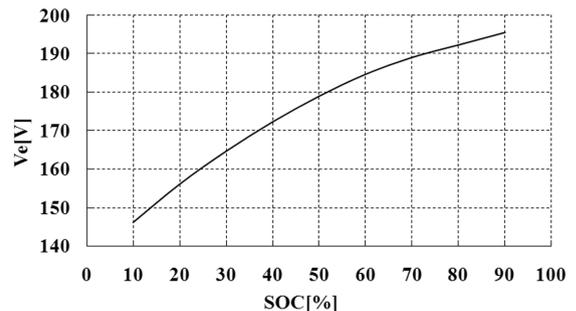


Fig. 2 Measured open circuit voltage as a function of SOC at 25°C

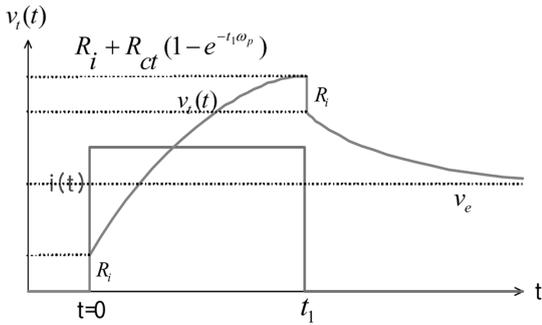


Fig. 3 Terminal voltage response according to unit step current input

$$\frac{v_t - v_e(SOC)}{i} = \frac{R_i(s + \omega_z)}{s + \omega_p} \quad (3)$$

where  $\omega_p$  : pole,  $\omega_z$  : zero

$$\omega_p = \frac{1}{R_{cd}C_{dl}}, \quad \omega_z = \omega_p \left(1 + \frac{R_{cd}}{R_i}\right) \quad (4)$$

$\omega_p, \omega_z$  는 각각 전달함수의 극점과 영점으로, 배터리의 동적 거동을 특성을 나타내게 된다.

부하전류에 대한 단자전압의 변동은 최소위상 시스템(Minimum Phase System)의 특성을 갖으며, 단자전압의 진폭은 단위 부하전류의 주파수 증가에 따라  $\omega=0$ 에서  $R_i + R_{cd}$ ,  $\omega=\infty$ 에서  $R_i$ 에 비례하여 감소하는 특성을 갖고 있다.

Fig. 3에 스텝 입력 부하전류에 대한 단자전압의 시간응답을 도시하였다. 이와 같은 스텝응답에서 DCIR(Direct Current Internal Resistance)은 식 (5)과 같이 정의되며, USABC 시험기준에 의거 전류인가 시간( $t_1$ )은 10sec이다.<sup>9)</sup>

$$DCIR = R_i + R_{cd}(1 - e^{-t_1\omega_p}) \quad (5)$$

### 3. 모델 파라미터 추출

#### 3.1 최소 자승법

제안된 모델의 파라미터는 시스템 식별(system identification)에 의해 추정될 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 널리 알려진 최소 자승법을 적용하여 모델 파라미터를 추정하였다. 시스템 식별을 위한 ARMA(AutoRegressive Moving Average) 모델은 식 (1)과 (2)를 다음 식으로 변환하여 나타낸다.

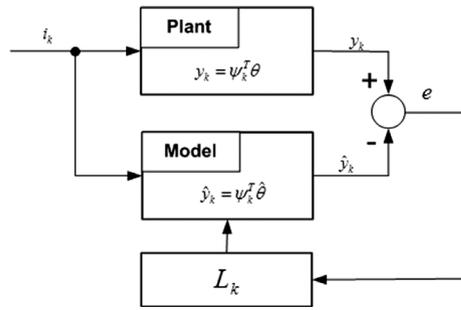


Fig. 4 Block diagram for parameter estimation

$$y_k = \psi_k^T \theta \quad (6)$$

where  $\theta$  : parameter vector,  $y_k$  : output vector,

$\psi_k$  : system matrix,  $T_s$  : sampling time(sec)

$$\theta = [(1 - \omega_p T_s) \quad R_i \quad R_i(\omega_z T_s - 1)]^T$$

$$y_k = v_t(k) - v_e(k)$$

$$\psi_k = [y_{k-1} \quad i_k \quad i_{k-1}]^T$$

순차적 최소 자승법에 의한 추정 파라미터 벡터  $\hat{\theta}_k$  는 다음과 같이 구해진다.<sup>10)</sup>

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + L_k(y_k - \psi_k^T \hat{\theta}_{k-1}) \quad (7)$$

여기서  $L_k$ 는 보정 이득(Correction Gain)을 나타내며, Fig. 4에 ARMA 모델에 의한 모델 파라미터 관측기를 도시하였다.

#### 3.2 시험장치 구성

시험측정은 상용의 133kW/±300A급 충방전 장치(Digatron)를 이용하여, 임의의 충방전 전류 패턴을 대상 배터리에 인가하여, 단자전압 및 온도를 측정한다.

대상 배터리는 HEV용 리튬이온 배터리로 공칭 용량은 5.3Ah이고, 공칭전압은 180V이다. 최대 허용 충방전 전류는 200A이고, 최대 출력은 17.8kW이다. 운전온도 조건에 따른 배터리 특성분석을 위하여 배터리는 -40°C ~ 150°C 범위 내에 조정이 가능한 항온항습 챔버 내에 장착하였다.

모델 파라미터 추정은 컴퓨터를 충방전 장치에 Fig. 5와 같이 인터페이스하여 식 (7)에 의해 수행하였다. 샘플링 시간은 1sec로 하였다.

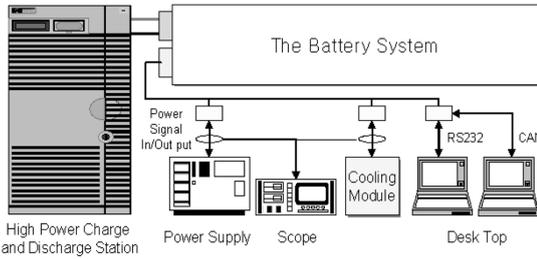


Fig. 5 Experimental setup for parameter estimation

### 3.3 모델 파라미터 추출 시험결과

제안된 모델의 파라미터를 추출하기 위하여 Fig. 6 과 같은 펄스 형태의 충방전 전류 패턴을 선정하였다. 시험은 충방전 비율 1C ~ 10C, SOC 상태 30% ~ 80% 및 온도 -20 ~ 25°C 로 변동하여 수행하였다.

Fig. 7은 5C, SOC 80% 및 실온(25°C)에서의 식 (7)에 의한 파라미터 추정 응답을 나타낸다. 모델 파라미터는 수 사이클 관측 후에 정상상태로 수렴하였다( $R_i=0.11[\Omega]$ ,  $R_{ct}=0.06[\Omega]$ ,  $C_{dl}=78.99[F]$ ).

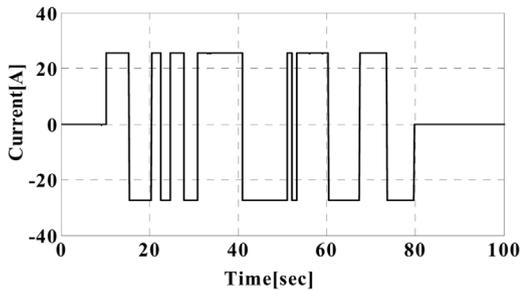


Fig. 6 Dynamic input current profile

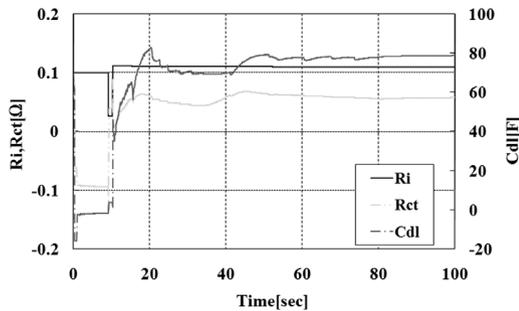


Fig. 7 Recursive parameter estimation (SOC=80%, T=25°C)

### 3.4 모델 검증

시뮬레이션 모델 정확도를 검증하기 위하여, 추

정 파라미터를 식 (1), (2)의 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

운전조건 5C, SOC 80% 및 실온(25°C)에서의 충방전 부하전류에 따른 시뮬레이션 결과를 Fig. 8에 실험결과와 비교 도시하였다. 충방전에 따른 저항 차이 및 히스테리시스 등의 모델 불확실성에도 불구하고, 시뮬레이션 결과는  $\pm 0.5V(0.5\%$ , 단자전압 기준: 198V)의 오차범위 내에서 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

두 번째 모델 검증은 저온(-10°C)에서 단자전압 제한 특성을 고려하여 1C-rate로 시험을 수행하였고, 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 첫 번째 시험과 마찬가지로 시뮬레이션에 의한 추정 단자전압은 측정 결과와 전반적으로 잘 일치함을 보이고 있다. 다만 단자전압 추정 오차는 최대 1.5%로, 실온대비 저온에서 모델 정확도가 제한적임을 알 수 있다.

마지막으로 실 차량 도심 주행시 측정치와 시뮬

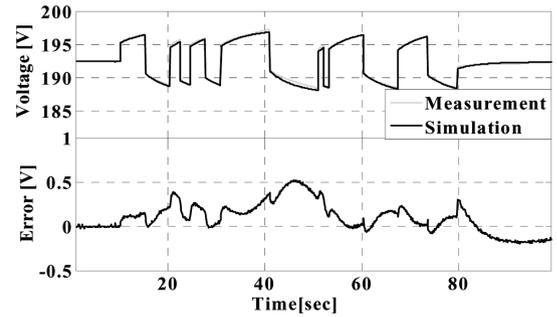


Fig. 8 Measured and simulated voltage response to the current in Fig. 6 (SOC=80%, T=25°C)

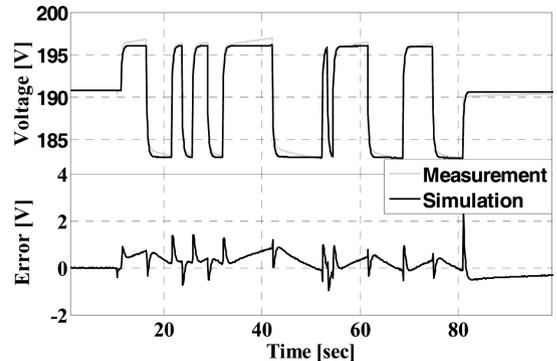


Fig. 9 Measured and simulated voltage response to the current in Fig. 6 (SOC=80%, T=-10°C)

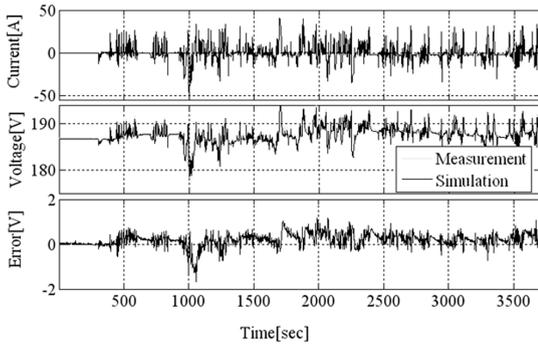


Fig. 10 Measured and simulated voltage response according to urban-mode

레이션에 의한 추정 단자전압을 Fig. 10에 비교하였다. 단자전압 추정 오차는 최대 1.5V(0.8%)로 대상 시험결과와 유사한 수준으로 확인되었다.

검증결과 배터리시스템은 광범위한 운전조건 변동에 최대 1.5% 내 단자전압 오차의 정확도로 모델 되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 1차 RC 모델은, 배터리의 비선형적인 특성과 고주파 성분의 모델 불확실성에도 불구하고, 리튬이온 배터리의 동적거동 특성 예측 및 실시간 적용에 적합한 것으로 판단된다.

#### 4. 결과 분석

운전조건에 따른 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

Fig. 11에 SOC 80%, 온도 25°C의 조건에서 부하 전류의 C-rate를 1C에서 5C로 변동 시 파라미터 변동을 나타냈다. C-rate 증가에 의해 극점  $\omega_p$ 이 24% 증가하였는데, 이는 배터리 전극에서 이온화 반응 손실 감소로 빠른 분극현상을 보이는 배터리 특성으로 추정된다. 또한 영점  $\omega_z$ 도 19% 증가하였다. 반면 전해질 저항 성분인 내부저항은 2.3% 감소하고 있다. 이는 C-rate 증가에 따라 DCIR이 감소함을 의미한다.

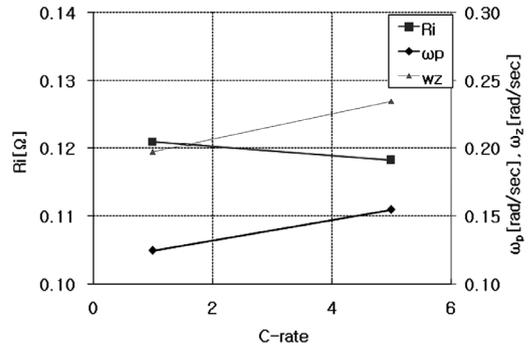


Fig. 11 Parameter variation as a function of C-rate (SOC=80%, T=25°C)

##### 4.2 SOC별 영향도 분석

Fig. 12는 5 C-rate, 온도 25°C의 조건에서 SOC를 30%에서 80%로 변동 시 파라미터 변동을 나타냈다. SOC 80%에서 극점이 상대적으로 16% 감소됨을 보여 주고 있다. 이는 이온화 반응 손실분 증가로 분극 현상이 지연되는 효과로 추정된다. 영점은 극점과 마찬가지로 9% 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 SOC가 높을수록 내부저항은 8% 감소함을 보여주고 있다.

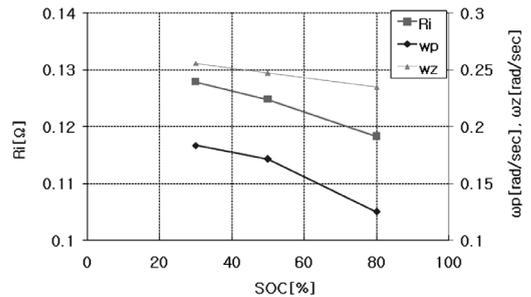


Fig. 12 Parameter variation as a function of SOC (5C-rate, T=25°C)

##### 4.3 온도별 영향도 분석

Fig. 13은 1C-rate, SOC 80%의 조건에서 온도 -20~25°C로 변동 시 파라미터 변동을 나타낸다. 온도가 저해됨에 따라 내부저항은 지수적( $R_i = 0.554e^{-0.06 \times Temp}$ )으로 증가하여, 실온(25°C)대비 최대 18배까지 증가하였다. 또한 극점 및 영점도 증가하여 각각 최대 6.6, 5.4배 까지 증가하였다. 이는 저온에서 이온화 반응 손실분이 급속히 증가하나, 동시에 이중층 커

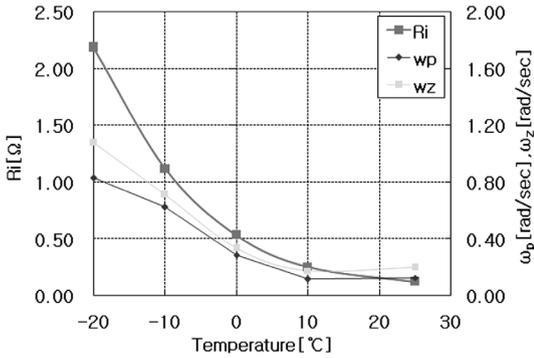


Fig. 13 Parameter variation as a function of temperature (SOC=80%, 1-Crate)

패시턴스  $C_{dl}$ 의 급격한 감소로 결과적으로 빠른 분극효과로 나타나는 것으로 추정된다.

#### 4.4 결과요약

식 (3)의 전달함수에서와 같이 내부저항  $R_i$  및 분극현상의 극점  $\omega_p$ 는 배터리 단자전압의 동적 거동을 나타낸다. 배터리 파라미터는 운전조건 즉, C-rate, SOC 및 운전온도에 의존하여 광범위한 변동을 보여 주었다. 이러한 배터리 운전조건에 따른 모델 파라미터 및 극점 주파수( $\omega_p$ ) 대역의 변동을 Fig. 14에 도식적으로 나타내었다.

단자전압 동적 응답은 부하전류 주파수의 함수로서, 진폭은 부하전류의 저 주파수 대역( $\omega \leq \omega_p$ )에서는 총 저항  $R_i + R_{ct}$ 에 비례하고,  $\omega_p \leq \omega \leq \omega_z$  주파수 대역에서는 점차 감소하며, 고 주파수 대역( $\omega \geq \omega_z$ )에서  $R_i$ 에 비례하는 특성을 보인다.

특히 운전조건 중 낮은 온도에서 급격한 배터리 내부저항의 급격한 증가와 배터리 분극현상에 따른 큰 폭의 극점 주파수 증대를 보여주고 있다. 특성 분석 결과 SOC 80% 및 1 C-rate의 동일 조건하에 -20°C에서 실온(25°C)대비 내부저항은 18배 증대되었으며, 극점 주파수는 6.4배 증가하였다.

HEV 차량은 가속 시 동력 보조를 위한 배터리 방전과 감속 시 회생제동에 의한 배터리 충전을 수행한다. 일반적으로 이와 같이 충방전에 의한 부하전류의 주파수는 0.3rad/sec 이상(장등관 기준 : 20sec 이하)이다. 상온(25°C)에서는 0.3rad/sec 이상의 주파수를 갖는 부하전류가 인가되더라도, 최대 극점 주

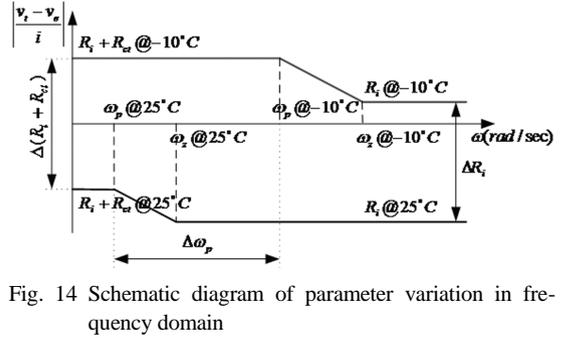


Fig. 14 Schematic diagram of parameter variation in frequency domain

파수 대역은 0.3rad/sec보다 크지 않기 때문에 단자전압의 변동에 미치는 영향은 크지 않다. 반면에 저온상태(0°C이하)에서는 동일 주파수의 부하전류가 인가될 시 배터리 극점 주파수 및 진폭의 급격한 증가로 인해 단자전압의 변동 진폭이 훨씬 크게 된다. 특히 냉 시동 시 단자전압은 큰 내부저항과 함께, 급격한 분극현상에 의해 작은 C-rate에서도 단시간 내 상하한 값에 이를 수 있다.

HEV 차량의 2차 전지로 리튬이온 배터리 시스템은 Ni-MH 비해 상대적으로 월등한 출력 및 에너지 밀도를 갖고 있어 하이브리드와 같은 고출력 적용에 적합한 차세대 전지로 적용될 예정이다. 하지만 Ni-MH 배터리 시스템과 마찬가지로 리튬이온 배터리는 저온에서 급격한 내부 특성의 변화에 의해 가용 출력범위가 좁아지는 특성을 보여주고 있다. 따라서 이러한 파라미터 변동, 즉 내부저항 및 극점 주파수 대역폭의 변동은 BMS 관측기의 강건 이득설계 또는 on-line 파라미터 식별 전략수립에 가장 중요한 영향인자로서 고려되어야 된다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 하이브리드용 배터리 시스템의 실시간 동적 특성 예측을 목적으로 배터리 모델을 제안하였다. 모델 파라미터는 고출력 리튬이온 배터리 시스템을 대상으로 최소 자승법을 이용하여 추정하였다. 제안된 모델은 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하여 검증하였고, 다양한 운전조건에 따른 배터리 파라미터의 변동을 주파수 영역에서 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HEV용 고출력 리튬 이온 배터리의 동적 거동은

간단한 RC 1차 회로 모델로 실측치와 0.5%(25°C 기준) 오차범위 내에서 잘 예측되어, 실제 주행에 적용할 수 있는 수준이다.

- 2) 배터리의 동적 거동은 내부저항  $R_i$  및 극점 주파수  $\omega_p$ 에 의해 결정되어 지며, 저 주파수 대역 ( $\omega \leq \omega_p$ )의 부하전류 입력에 의해 더 큰 단자전압 동특성을 보이게 된다.
- 3) 운전조건(C-rate, SOC, 운전온도)에 따라 내부저항  $R_i$  및 극점 주파수  $\omega_p$ 는 가변성을 갖게 되며, 특히 온도 변화에 가장 민감하게 변동하여, 시험 조건하에서 실온 대비 내부저항은 18배, 극점 주파수는 6.6배 증가하였다.

제안된 배터리의 단순 모델 및 모델 파라미터 변동에 따른 배터리 주파수 대역폭은 BMS 내 모델 기반 관측기 강건설계 및 on-line 파라미터 식별 전략 수립에 중요한 기준자료로 활용될 수 있다.

### References

- 1) S. Buller, Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems, Ph. D. Dissertation, RWTH Aachen, 2002.
- 2) H. Yeo, D. H. Kim, T. C. Kim, C. S. Kim, S. H. Hwang and H. S. Kim, "Development of Regenerative Braking Control Algorithm for a 4WD Hybrid Electric Vehicle," Transactions of KSAE, pp.38-47, 2005.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) L. Gao and S. Liu, "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation," IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies, Vol.25, No.32, pp.495-505, 2002.
- 6) G. L. Plett, "Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-based HEV Battery Packs, Part 2. Modeling and Identification," J. Power Sources, Vol.134, pp.262-276, 2004.
- 7) C. C. Chan, E. W. C. Lo and S. Weixiang, "The Available Capacity Computation Model Based on Artificial Neural Network for Lead-Acid Batteries in Electric Vehicles," J. Power Sources, Vol.87, pp.201-204.
- 8) P. Singh, C. Fennie, D. Reisner and 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.
- 9) IEEL(Idaho National Engineering & Environmental Laboratory), "Freedom CAR Battery Test Manual for Power-Assist Hybrid Electrical Vehicles, DOE/ID-11069, 2003.
- 10) G. F. Franklin and J. D. Powell, Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley, 1980.