

# Computational Simulation on Power Prediction of Lithium Secondary Batteries by using Pulse-based Measurement Methods

## 펄스 측정법에 기반한 리튬이차전지 출력 측정에 관한 전산 모사

Joonam Park<sup>\*1</sup>, Seoungwoo Byun<sup>\*1</sup>, Williams Agyei Appiah<sup>\*</sup>, Sekyung Han<sup>\*\*</sup>, Jin Hyeok Choi<sup>\*\*\*</sup>, Myung-Hyun Ryou<sup>\*††</sup>, Yong Min Lee<sup>†</sup>

박주남<sup>\*1</sup>, 변승우<sup>\*1</sup>, Williams Agyei Appiah<sup>\*</sup>, 한세경<sup>\*\*</sup>, 최진혁<sup>\*\*\*</sup>, 유명현<sup>\*††</sup>, 이용민<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Department of Chemical and Biological Eng., Hanbat National Univ., 125 Dongseodaero, Yuseong-gu, Daejeon, 305-719, Korea

<sup>\*\*</sup> Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 702-701, Korea

<sup>\*\*\*</sup> KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34056, Korea

<sup>†</sup> These authors contributed equally to this work.

<sup>†</sup> E-mail: yongmin.lee@hanbat.ac.kr; Tel : +82-42-821-1549; Fax: +82-42-821-1692

<sup>††</sup> E-mail: mhryou@hanbat.ac.kr; Tel.: +82-42-821-1534; Fax: +82-42-821-1692

### Abstract

시간대별 효율적인 전력 운영과 전력품질 향상을 위해 ESS (Energy Storage System)의 보급이 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 ESS용 전원으로 리튬이차전지의 채용이 급격히 늘어남에 따라, 리튬이차전지의 수명 및 출력 열화 거동을 측정 및 예측하는 기술이 시급히 요구되고 있다. 특히, ESS 운영에 있어 핵심 특성인 리튬이차전지 출력은 측정이 어려울 뿐만 아니라, 정확한 측정을 위해서는 많은 시간이 소요되는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 ESS용 리튬이차전지 단전지를 전산 모델링 한 후, 펄스 측정법을 적용하여 충전상태에 따른 방전 및 충전시의 직류저항(DC-IR)과 출력을 예측한다. 또한, 두 가지 펄스 측정법인 HPPC (Hybrid Pulse Power Characteristics)와 J-Pulse (JEVS D 713, Japan Electric Vehicle Association Standards)의 결과를 비교 분석한다.

Energy storage systems (ESSs) have been utilized widely in the world to optimize the power operation system and to improve the power quality. As lithium secondary batteries are the main power supplier for ESSs, it is very important to predict its cycle and power degradation behavior. In particular, the power, one of the hardest electrochemical properties to measure, needs lots of resources such as time and facilities. Due to these difficulties, computer modelling of lithium secondary batteries is applied to predict the DC-IR and power value during charging and discharging as a function of state of charge (SOC) by using pulse-based measurement methods. Moreover, based on the hybrid pulse power characteristics (HPPC) and J-Pulse (JEVS D 713, Japan Electric Vehicle Association Standards) methods, their electrochemical properties are also compared and discussed.

**Keyword:** Energy Storage System, Lithium Secondary Battery, Computer Modeling, Computational Simulation, Power

### I. 서론

최근 에너지 수요 증가에 따른 추가 전력 확보 및 운영 최적화, 그리고 전력품질 향상의 중요성이 높아지고 있으며, 이에 대한 해결책 중 하나로 전력망에 ESS (Energy Storage System)를 도입하는 것이다. 이 방법은 부하평준화(Load Leveling) 및 순동예비력(Spinning Reserve) 확보뿐만 아니라 피크부하배분(Peak Shaving) 효과를 얻을 수 있으며, 주파수 조정(Frequency Regulation) 및 신재생 에너지 출력 (Renewable Energy) 안정화와 같은 전력 품질향상에 기여하고 있다 [1]-[3]. 이러한 요구에 부응하기 위해서는 전력운영방식에 적합한 이차전지를 선택하여 ESS를 구성하는 것이 중요하다. 리튬이차전지는 고출력 및 고에너지밀도 특성뿐만 아니라 낮은 자가방전율과 높은 에너지 전환효율이란 장점으로 인해 ESS의 전원으로 채용률이 빠르게 증가하고 있다 [1][4][5]. 이 때, ESS 운영방식에 적합한 리튬이차전지의 선택과 운영

최적화를 위한 실측 데이터를 확보하는 것이 매우 중요하다. 하지만, 고가의 리튬이차전지를 제조하고 각종 데이터를 실험적 방법으로 확인하는 것은, 시간뿐만 아니라 개발 비용 측면에서 매우 부담이 크다 [1][4]. 위와 같은 어려움을 극복할 수 있는 효율적인 방법이 특정 리튬이차전지를 전산 모델링하고, 원하는 전기화학적 특성을 전산 모사로 도출하는 것이다. 즉, 실제 일어나는 물리화학적 현상들을 반영한 방정식으로 모델을 구축하여 이를 컴퓨터로 계산하고 해석하는 것을 의미한다. 초기 리튬이차전지에 대한 전산 모델링 및 모사는 Newman 그룹 [6]-[8]에 의해 주도적으로 진행되었으며, 이들은 전산 모델링과 모사로 예측된 데이터와 실측 데이터를 비교하여 상당히 일치하는 결과를 제시하였다. 그로 인해, 여러 연구그룹이 다양한 리튬이차전지 시스템에 적용하고 있으나, ESS 적용을 위한 출력 측정 관점에서는 선행 연구가 제한적이다. 본 연구에서는 ESS용 리튬이차전지로 가장 많이 적용되고 있는 흑연(Graphite)

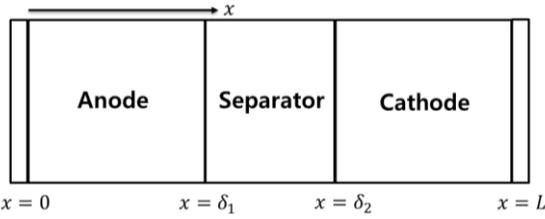


Fig. 1. Schematic diagram of lithium secondary battery and dimensions for computer modelling.

/NCM(LiNi<sub>0.3</sub>Co<sub>0.3</sub>Mn<sub>0.3</sub>O<sub>2</sub>) 전극 설계를 Newman 모델에 적용하여 전산 모델링을 진행한다. 이를 전산 모사하여 다양한 충전상태에서의 충전 및 방전 직류저항과 출력 값 예측을 시도하였다. 이 때, 두 가지 펄스를 이용한 출력 측정법(HPPC; Hybrid Pulse Power Characterization, J-Pulse; JEVS D 713, Japan Electric Vehicle Association Standards)법을 적용하여, 측정법간 차이를 비교 분석하였다 [9][10].

## II. 리튬이차전지의 전산 모델링

### A. ESS용 리튬이차전지의 단전지 특성

현재 상용화된 리튬이차전지는 Fig. 1에 도식한 바와 같이 집전체(Current Collector) 위에 음극(Anode) 및 양극(Cathode)이 도포되어 있고, 이 두 전극(Electrode) 사이에 다공성 분리막(Separator)을 위치하고 있으며, 전극과 분리막 기공내에 액체 전해액(Electrolyte)이 함침된 전지 시스템을 이룬다. 본 연구에서 전산 모델링 된 단전지는 ESS용 전지로서, 음극은 흑연, 양극으로는 리튬전이금속 산화물인 NCM, 분리막은 폴리에틸렌(Polyethylene)계의 막으로 선택하였으며, 전해질은 리튬염으로 LiPF<sub>6</sub>을 도입한 카보네이트계 유기용매 혼합액을 적용하였다. 위와 같이 적용된 물질의 물리화학적 물성 및 설계값은 Table 1. 및 Fig. 2 에 정리하였다.

### B. 지배 방정식 및 반응속도 방정식

리튬이차전지내에서 발생하는 물리화학적 현상을 수치적으로 해석하기 위해서 네 개의 지배 방정식과 한 개의 반응속도 방정식이 사용된다 [6]-[8][11][12]. 지배 방정식은 전극 내 활물질(Active Material)을 의미하는 고체상(Solid Phase)과 전극 및 분리막 내부 기공에 함침된 액체 전해액을 의미하는 액체상(Liquid Phase)으로 나뉘지며, 각 물질 균형 방정식(Material Balance Equation)과 전하 균형 방정식(Charge Balance Equation)으로 나뉘지게 되어 총 네 개의 지배 방정식을 이용하여 각 상들의 농도(Concentration) 및 전위(Potential) 값을 계산하게 된다. 이렇게 계산된 농도 및 전위 값은 반응속도 방정식인 버틀러-볼머식(Butler-Volmer Equation)에 적용되어 전류 밀도(Current Density) 값을 계산하는 데 사용된다. 그리고, 다시 그 값을 네 개의 지배 방정식으로 돌려주게 된다.

#### 1) 물질 균형 방정식

Fick의 확산 법칙(Fick's Second Law)을 기반으로 한 물질 균형 방정식은 고체상과 액체상에서의 시간에 따

Table 1. Physical properties of lithium secondary battery for computer modelling

Parameters	Unit	Value
Thickness of anode	μm	54
Thickness of separator	μm	15
Thickness of cathode	μm	57
Reaction rate constant of anode	m s <sup>-1</sup>	2×10 <sup>-11</sup>
Reaction rate constant of cathode	m s <sup>-1</sup>	2×10 <sup>-11</sup>
Electrical conductivity of anode	S m <sup>-1</sup>	100
Electrical conductivity of cathode	S m <sup>-1</sup>	100
Graphite particle radius	μm	3.18
LiNi <sub>0.3</sub> Co <sub>0.3</sub> Mn <sub>0.3</sub> O <sub>2</sub> particle radius	μm	4.75
Solid phase diffusion coefficient in anode	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	1.45×10 <sup>-13</sup>
Solid phase diffusion coefficient in cathode	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	5×10 <sup>-13</sup>
Volume fraction of solid phase in anode		0.72
Volume fraction of liquid phase in anode		0.25
Volume fraction of solid phase in cathode		0.55
Volume fraction of liquid phase in cathode		0.39
Volume fraction of liquid phase in separator		0.35
Li ion transference number		0.363
Initial solid phase lithium concentration in anode	mol m <sup>-3</sup>	2,230
Initial solid phase lithium concentration in cathode	mol m <sup>-3</sup>	45,780
Maximum solid phase lithium concentration in anode	mol m <sup>-3</sup>	27,870
Maximum solid phase lithium concentration in cathode	mol m <sup>-3</sup>	49,761
Initial liquid phase lithium concentration	mol m <sup>-3</sup>	1,500
Initial potential of liquid phase	V	0.264
Initial potential of solid phase	V	3.43
Temperature	K	298.15

른 농도 값을 계산하며, 고체상 및 액체상의 물질 균형 방정식은 다음의 식과 같다.

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} (D_s \frac{\partial c_s}{\partial r}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_l \frac{\partial C_l}{\partial t} = \varepsilon_l^\alpha D_l \nabla^2 c_l + a_s \left( \frac{1-t_+}{F} \right) j \quad (2)$$

식 (1)은 전극의 활물질을 구형으로 가정하여 활물질 표면의 리튬 농도를 계산하는 물질 확산 방정식이며, c<sub>s</sub>는 고체상의 리튬 농도, D<sub>s</sub>는 고체상의 확산계수(Diffusion Coefficient), t와 r은 시간과 활물질의 반지름을 의미한다. 식 (2)는 전극 및 분리막의 기공 구조를 고려하여 전해액 내의 리튬이온 농도를 계산하는 물질 확산 방정식이며, c<sub>l</sub>는 액체상의 리튬이온 농도, D<sub>l</sub>는 액체상의 확산계수, a<sub>s</sub>는 구형 전극 활물질의 표면적, ε<sub>l</sub><sup>α</sup>에서 상첨자 α는 브로그만 지수(Bruggmann Exponent)로 기공 구조내에서 물질 이동시 그 영향을 반영하기 위한 계수이고 ε<sub>l</sub>은 전극 및 분리막의 공극률이면서 동시에 전해질의 부피분율을 의미한다.

#### 2) 전하 균형 방정식

Ohm의 법칙(Ohm's Law)을 기반으로 한 전하 균형 방정식은 고체상과 액체상에서의 전위 값을 계산하는데 사용되며, 고체상 및 액체상의 전하 균형 방정식은 다음의 식과 같다.

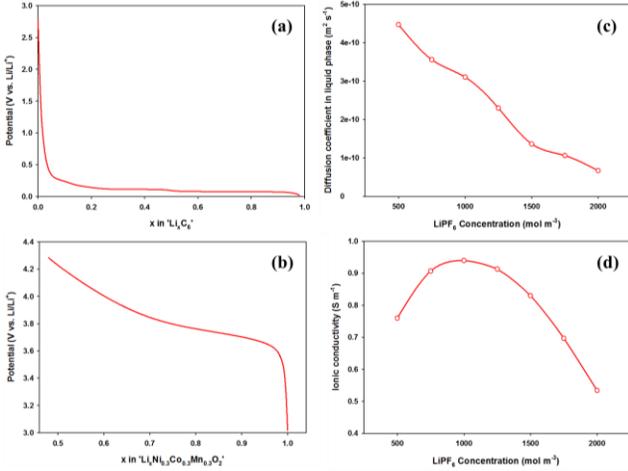


Fig. 2. Equilibrium potentials of (a) anode and (b) cathode as a function of “ $x$ ” and (c) diffusion coefficients and (d) ionic conductivities in the liquid phase depending on  $\text{LiPF}_6$  concentrations.

$$\varepsilon_s^\alpha \sigma_s \nabla^2 \phi_s = a_s j \quad (3)$$

$$-\varepsilon_l^\alpha k_l \nabla^2 \phi_l + \varepsilon_l^\alpha k_l \frac{2RT(1-t_+)}{F} \nabla^2 \ln c_l = a_s j \quad (4)$$

$\phi_s$ 와  $\phi_l$ 는 고체상과 액체상의 전위,  $\sigma_s$ 와  $k_l$ 는 고체상의 전기전도도(Electrical Conductivity)와 액체상의 이온전도도(Ionic Conductivity)를 각각 의미한다. 식 (3)은 전자의 흐름에 관한 식이며, 반면 식 (4)는 이온의 흐름을 나타내나, 전하의 흐름을 고려하는 관점에서는 같은 맥락이다. 실제 전자의 흐름은 전극의 구조에 따라 영향을 받으므로 상수  $\varepsilon_s^\alpha$ 의 값으로 보정하며, 이온의 흐름 또한 식 (2)에서와 동일한 방법으로 방정식 내에서 기공 구조를 고려한다. 전하 균형 방정식을 확인 시 시간에 대한 해석은 진행하지 않으며, 그 이유는 전하 이동의 경우 확산의 경우보다 매우 빠르기 때문이다.

### 3) 버틀러-볼머식

전류 밀도  $j$ 는 전극 활물질과 전해액 계면 사이에서 산화환원 반응에 따라 생성되며, 이는 다음 식인 버틀러-볼머식으로 계산 가능하다.

$$j = Fk(c_{\max} - c_s)^{0.5} c_s^{0.5} \left( \frac{c_l}{c_{l,ref}} \right)^{0.5} \left[ \exp\left(\frac{0.5F\eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{0.5F\eta}{RT}\right) \right] \quad (5)$$

$$\eta = \phi_s - \phi_l - U \quad (6)$$

$c_{\max}$ 는 전극 활물질이 보유할 수 있는 리튬 농도의 최대값으로 양론적으로 쉽게 구할 수 있으며, 이론 용량으로 동일하게 환산될 수 있다. 그러나, 실제 활물질의 특성(결정 구조, 입자 크기와 형태, 등) 및 전극 설계에 따라 상용 용량이 결정되게 된다. 또한, Fig. 2의 결과와 같이 각 활물질에 열역학적으로 고유한 평형 전위

Table 2. Boundary conditions

Description	Boundary condition
Material (solid phase)	$D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big _{r=0}$ and $-D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big _{r=R_s} = \frac{j}{F}$
Material (liquid phase)	$\frac{\partial c_l}{\partial x} \Big _{x=0} = \frac{\partial c_l}{\partial x} \Big _{x=L} = 0$
Charge (solid phase)	$\frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big _{x=0}$ and $\varepsilon_s^\alpha \sigma_s \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big _{x=L} = \pm \frac{I}{A}$
Charge (liquid phase)	$\frac{\partial \phi_l}{\partial x} \Big _{x=0} = \frac{\partial \phi_l}{\partial x} \Big _{x=L} = 0$

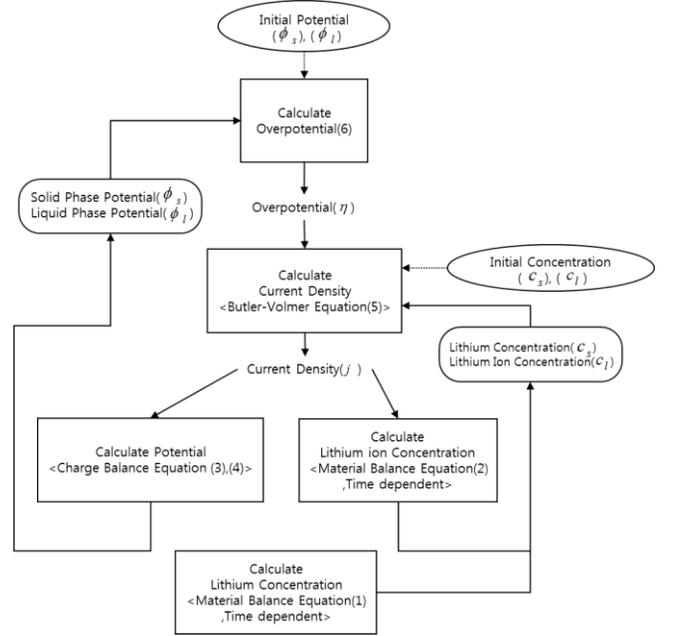


Fig. 3. Lithium secondary battery modeling simulation process.

(Equilibrium Potential)  $U$ 값이 존재하며, 식 (3), (4)에서 계산된 전위 값이 식 (6)에 대입되어 과전압(Overpotential)  $\eta$ 이 계산된다. 이와 같이 계산된 과전압과 산화환원 반응속도 상수  $k$  및 식 (1), (2)에서 계산된 농도 값을 식 (5)에 대입하여 새로운 전류 밀도 값을 계산하고, 이 과정을 반복하게 된다. 1, 2차 편미분방정식은 유한요소법(Finite Element Method) [13]-[15]으로 이산화하여 계산하고, 이를 버틀러-볼머식과 함께 Newton 법으로 반복 계산하였다. 이 때, 준 2차원(Pseudo-2-dimension) 해석 모델을 적용하였으며, 이에 따른 이산화 과정에 필요한 경계조건을 Table 2.에 정리하였고, COMSOL Multiphysics 5.0을 시뮬레이션 툴로 사용하였다. 이와 같은 과정은 Fig. 3에 정리하였다.

## III. 결과 및 고찰

상기 제시된 리튬이차전지 시스템을 전산 모델링한 후, 각 출력측정법 운영에 필요한 충방전 패턴 알고리즘을 구성하여 전산 모사하였다. HPPC법은 미국 Freedom CAR Battery Test Manual에서 제안된 출력측정법

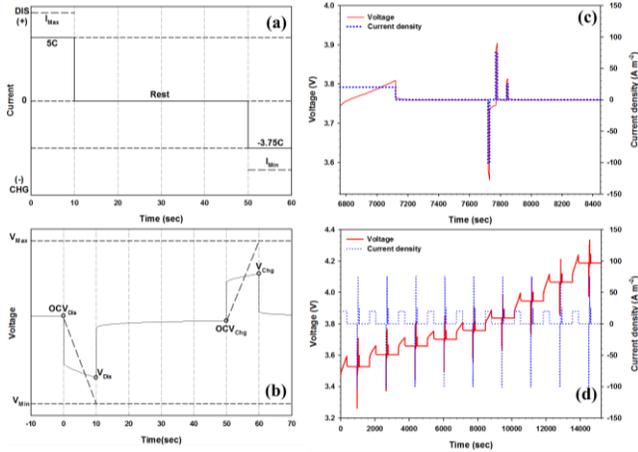


Fig. 4. (a)-(b) Measurement principle of HPPC and its representative voltage profile. (c) simulated voltage profile at SOC 50%. (d) full range voltage profile during HPPC measurement from SOC 10% to SOC 90%.

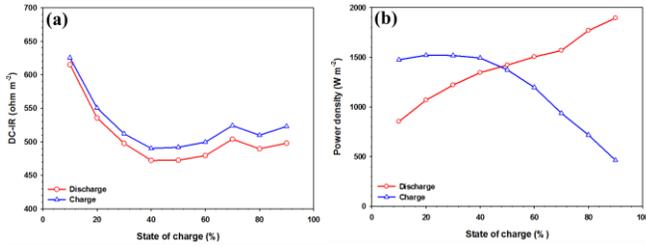


Fig. 5. (a) DC-IR (b) power values based on HPPC simulation.

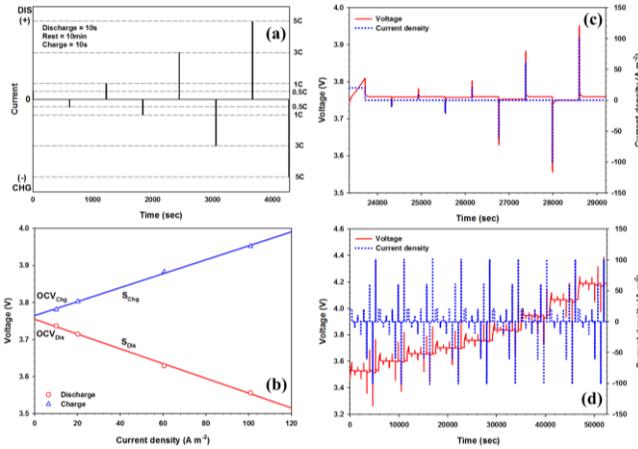


Fig. 6. (a)-(b) Measurement principle of J-Pulse and its representative voltage profile. (c) simulated voltage profile at SOC 50%. (d) full range voltage profile during J-Pulse measurement from SOC 10% to SOC 90%.

으로, SOC (State of Charge, 충전상태)에 따른 출력값을 빠른 시간 내에 측정할 수 있는 장점이 있다. Fig. 4(a),(b)는 HPPC법의 측정원리를 도식화한 그림이며, Fig. 4(c)는 이를 적용해서 얻어진 SOC 50%에서의 전산 모사 결과이다. Fig. 4(d)는 SOC 10%부터 90%까지 SOC를 10%씩 증가시켜가면서 HPPC법을 적용한 전산 모사 결과를 보여 준다. 본 논문에서 사용된 HPPC법은 5C 정전류(Constant Current)로 10초간 방전한 다음 40초 휴지 시간(Rest Time)

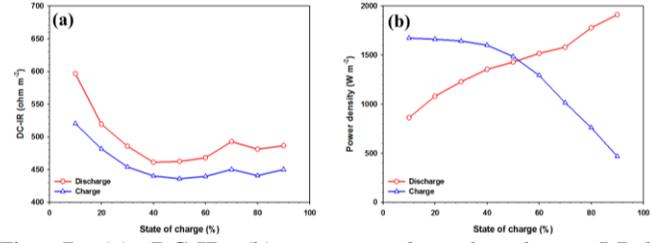


Fig. 7. (a) DC-IR (b) power values based on J-Pulse simulation.

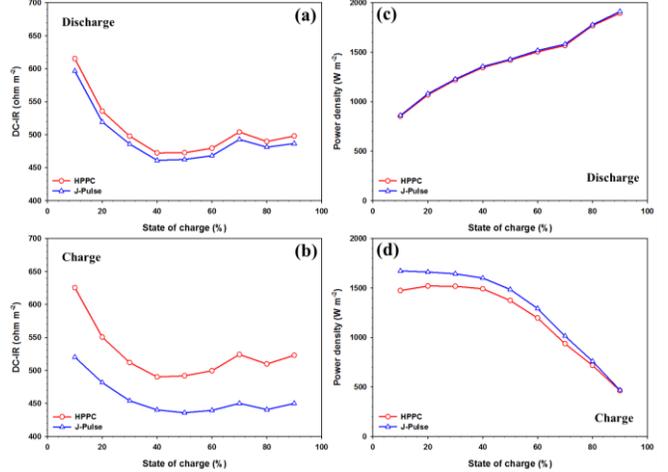


Fig. 8. Comparison of (a) discharge DC-IR, (b) charge DC-IR, (c) discharge power, (d) charge power simulated by HPPC and J-pulse.

후, 3.75C 충전을 10초 진행한다. 이 때, 방전 및 충전 전후의 전압변화량을 측정하고, 이를 적용 전류값으로 나눠줌으로써 식 (7), (8)에 적용하여 방전과 충전 직류저항 (DC-IR)인  $R_{Dis}$ 와  $R_{Chg}$ 를 각각 구할 수 있다. 이 직류저항 값과 방전 및 충전 중지전압 (Cut-off Voltage, 2.7 V for discharge and 4.4 V for charge)을 식 (9), (10)에 적용하면 방전 및 충전시의 출력값  $P_{Dis}$ 와  $P_{Chg}$ 를 구할 수 있다. 이에 대한 자세한 원리는 Lee et al.의 논문에 상세히 설명되어 있다 [10]. 위와 같은 방식으로 얻어진 충전 및 방전시 SOC별 직류저항과 출력값은 Fig. 5에 나타내었다.

$$R_{Dis} = (OCV_{Dis} - V_{Dis}) / I_{Dis} \quad (7)$$

$$R_{Chg} = (V_{Chg} - OCV_{Chg}) / I_{Chg} \quad (8)$$

$$P_{Dis} = V_{Min} \times (OCV_{Dis} - V_{Min}) / R_{Dis} \quad (9)$$

$$P_{Chg} = V_{Max} \times (V_{Max} - OCV_{Chg}) / R_{Chg} \quad (10)$$

SOC에 따른 충전 및 방전 직류저항의 변화를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 두 직류저항 모두 SOC 30% 이상에서는 유사한 값을 나타내고 있으나, SOC가 20% 이하의 낮은 충전 상태에서는 두 직류저항 모두 약 10~20% 증가하는 결과가 확인되었다. 즉, 충전 상태가 낮아짐에 따라 충방전 방향에 상관없이 리튬이차전지의 직류저항이 증가하는 경향은 나타낸다는 것이다. 또한, 모든 SOC 영역에서 충전 직류저항이 방전 직류저항보다 크게 예측되었다. 앞서 언급한 바와 같이 이렇게 확보한 직류저항값을 식 (9)와 (10)을 이용하면, 충전 및 방전 출력값

으로 변환할 수 있고, 이를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 충전 출력은 SOC가 높아짐에 따라 감소하고, 방전 출력은 그 반대의 경향성을 잘 나타내고 있다. 이는 상용화된 리튬이차전지의 출력 특성과 일치하는 결과이다. 또한, SOC 50% 부근에서 충전 출력과 방전 출력이 교차되는 현상이 예측되었다. 하지만, 실제 리튬이차전지 시스템에서는 전극 활물질 종류, 전극 설계, 그리고 전지 설계 등에 따라 교차되는 SOC가 달라질 수 있음이 보고된다. 이와 같이, HPPC법으로 리튬이차전지의 직류저항 및 출력값을 예측한 결과는 실제 전지에서와 유사한 특성을 나타내었다. 그러나, 실제 출력값은 10 초 수준의 짧은 시간 동안 전기에너지를 저장하거나 저장된 전기에너지를 모두 방출하기 때문에, 흐르는 전류값이 매우 높아지게 된다. 그 결과, 전지의 과전압이 매우 커지는 문제점이 발생하여, HPPC법과 같이 하나의 전류값으로 출력값을 예측하는 것은 한계가 있다. 이러한 단점이 보완하고자 일본전동차량협회에서는 다양한 전류값에서의 전압강하를 기반으로 출력을 측정하는 J-Pulse법을 제안하였다. 이 방법은 전류값을 점점 증가시키면서 단전지의 전압변화를 외삽함으로써, 실제 출력 거동 조건에서의 직류저항 및 출력값을 예측할 수 있다.

Fig. 6(a),(b)는 J-Pulse법의 측정원리를 도식화한 그림이며, (c)는 이를 적용해서 얻어진 SOC 50%에서의 전산 모사 결과이다. Fig. 6(d)는 SOC 10%부터 90%까지 SOC를 10%씩 증가시켜가면서 J-Pulse법을 적용한 전산 모사 결과를 보여준다. J-Pulse법에서 적용된 전류값은 0.5 C, 1 C, 3 C, 5 C로 충방전 모두 동일하게 적용하였으며, 각 전류 사이에 10 분의 휴지 시간을 주었다. J-Pulse법에서 직류저항값을 구하기 위해서는 전류값에 따른 전압값을 이용하여 일차 방정식으로 회귀선을 구하면, 기울기가 곧 직류저항  $S_{Dis}$ 와  $S_{Chg}$ 가 된다. 이 값을 식 (11), (12)에 적용하여 방전 및 충전시의 출력값  $P_{Dis}$ 와  $P_{Chg}$ 를 구할 수 있다. 위와 같은 방식으로 얻어진 충전 및 방전시 SOC 별 직류저항과 출력값은 Fig. 7에 나타내었다.

$$P_{Dis} = V_{Min} \times (V_{Min} - OCV_{Dis}) / S_{Dis} \quad (11)$$

$$P_{Chg} = V_{Max} \times (V_{Max} - OCV_{Chg}) / S_{Chg} \quad (12)$$

Fig. 7에 정리한 바와 같이 J-Pulse법으로 직류저항과 출력값을 예측한 결과, HPPC법으로 예측한 Fig. 5의 결과와 전반적으로 유사한 경향성을 나타낸다. 즉, SOC가 20% 이하의 낮은 충전 상태에서는 두 직류저항 모두 약 10~20% 증가하는 경향성이 HPPC법과 일치한다. 하지만, 충전 직류저항이 방전 직류저항보다 낮게 예측되는 결과가 도출되었으나, 이에 대한 원인은 추후 분석이 필요하다. 하지만, SOC 50% 부근에서 충전 출력과 방전 출력이 교차되는 현상도 동일하게 관찰되었다.

Fig. 8은 HPPC법과 J-Pulse법의 충전 및 방전에 따른 직류저항과 출력값을 비교한 그래프이다. 전반적으로 HPPC법으로 예측된 직류저항값이 높게 도출되었으며, 출력값은 직류저항의 역수의 개념으로 도출되기 때문에 J-Pulse법에서 높게 예측되었다. 방전 직류저항은 두 측정법간의 차이가 미미하고 그 경향성이 유사하였으나, 충전 직류저항은 SOC에 따라 적게는 약 50 ohm m<sup>2</sup>부터

크게는 약 100 ohm m<sup>2</sup>까지 차이가 발생하였다. 이와 같은 차이에 대해서는 직류저항값을 도출할 때 J-Pulse법이 HPPC법보다 낮은 전류값을 고려하였기 때문이라고 예상되나, 추후 전류값 변화에 따른 영향에 대한 연구가 진행되어야 한다. 또한, 상용화된 리튬이차전지 단전지를 이용한 실측 데이터를 확보하여, 전산 모사된 결과와의 비교 연구도 진행되어야 한다. 하지만, 리튬이차전지 전산 모델링과 모사를 기반으로 하여 직류저항과 출력값을 예측할 수 있었고, 두 측정법 간에 유사한 경향이 도출되었다는 점에서 본 연구의 의미를 찾을 수 있다.

#### IV. 결론

ESS용 리튬이차전지를 COMSOL Multiphysics 5.0을 이용하여 전산 모델링 후, 펄스 출력 측정법인 HPPC법과 J-Pulse법을 이용하여 전산 모사를 성공적으로 진행하였다. 특히, 전산모델링 된 리튬이차전지에서 SOC에 따른 충전 및 방전 직류저항을 도출하고, 이를 출력값으로 환산할 수 있었다. 그 결과, 상용화된 리튬이차전지와 유사한 수치 및 SOC에 따른 경향성이 확인하였다. 구체적인 결과로는 두 측정법 모두 SOC20% 이하의 낮은 충전 상태에서 충전 및 방전 직류저항 모두 10~20% 증가하는 동일한 경향성을 나타내었다. 충전 및 방전 직류저항값의 차이 관점에서는 HPPC법에서는 충전 직류저항이 높게 예측되었으나, J-Pulse법에서는 반대의 경향성이 확인되었다. 측정법간의 직류저항 차이에 관해서는 J-Pulse법으로 예측된 값이 HPPC법보다 낮게 도출되었는데, 이는 J-Pulse법이 HPPC법보다 낮은 전류값을 고려하였기 때문이라고 예상된다. 하지만, 추후 상용화된 리튬이차전지의 실측 데이터를 확보하여, 본 연구에서 전산 모델링의 적절성을 확인하고 개선하는 연구가 진행되어야 한다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. [과제번호:R14XA02-27]

This research was supported by Korea Electric Power Corporation (KEPCO) through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. (grant number: R14XA02-27)

#### REFERENCES

- [1] Cho, J., Jeong, S. & Kim, Y., "Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, 48, pp.84-101, June, 2015.
- [2] Hongjae Myung., "Consideration for Technical Trend of Large Scale BESS PCS," *Power Electronics Annual Conference, The Korean Institute of Power Electronics, Koera, yesan, 2011*, pp.273-272
- [3] Geon-Pyo Lim, Hyun-Gyu Han, Byung-Hoon Chang, Seung-Kwon Yang, Yong-Beum Yoon, "Demonstration to Operate and Control Frequency Regulation of Power System by 4MW Energy Storage System," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers P*, 2014, pp.169-177

- [4] Divya, K. & Østergaard, J., "Battery energy storage technology for power systems An overview," *Electric Power Systems Research*, 79, pp.511-520, September, 2009.
- [5] Poullikkas, A. "A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, pp.778-788, July, 2013.
- [6] Doyle, M., Fuller, T. F. & Newman, J., "Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell," *Journal of the Electrochemical Society*, 140, pp.1526-1533, January, 1993.
- [7] Doyle, M., Newman, J., Gozdz, A. S., Schmutz, C. N. & Tarascon, J. M., "Comparison of modeling predictions with experimental data from plastic lithium ion cells," *Journal of the Electrochemical Society*, 143, pp.1890-1903, June, 1996.
- [8] Mao, J., Tiedemann, W. & Newman, J., "Simulation of temperature rise in Li-ion cells at very high currents," *Journal of Power Sources*, 271, pp.444-454, August, 2014.
- [9] Hyewon Lee & Yong Min Lee., "Principles and Comparative Studies of Various Power Measurement Methods for Lithium Secondary Batteries ," *Journal of the Korean Electrochemical Society*, 10(3), pp.115-123, August, 2012.
- [10] Younghoon Kim, Songhun Yoon, "Electrochemical Characterization Methods for Lithium Secondary Batteries," *Polymer Science and Technology*, 23(3), pp.307-312, June, 2012.
- [11] Sukbeom You, Joosik Jung, Kyeong-Beom Cheong and Jooyoung Go., "Numerical Simulation of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles," *Journal of Mechanical Science and Technology B*, 35(6), pp.649-656, March, 2011.
- [12] Dae-Hyun Lee & Do-young Yoon., "Computational Modeling of Charge-Discharge Characteristics of Lithium-Ion Batteries," *Journal of Energy Engineering*, 20(4), pp.278-285, November, 2011.
- [13] Wang, C.-W. & Sastry, A. M., "Mesoscale modeling of a Li-ion polymer cell," *Journal of The Electrochemical Society*, 154(11), A1035-A1047, August, 2007.
- [14] Vyroubal, P., Maxa, J., Kazda, T. & Vondrák, J., "The Finite Element Method in Electrochemistry Modelling of the Lithium-Ion Battery," *ECS Transactions, Journal of Power Sources*, U.S. San Francisco, 2014, 48, pp.289-296
- [15] Xu, M., Zhang, Z., Wang, X., Jia, L. & Yang, L., "A pseudo three-dimensional electrochemical-thermal model of a prismatic LiFePO<sub>4</sub> battery during discharge process," *Energy*, 80, pp.303-317, February, 2015.