

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.8.807>ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

고율 방전용 리튬 전지의 한계 방전 전류 예측을 위한 전기화학 시뮬레이션

김성종* · 이영신**

* 충남대학교 기계설계공학과

Electrochemical Simulation for Limited-Discharge Current Prediction of Li-ion Secondary Cell Using High-Rate Discharge

Simon Kim* and Young Shin Lee**

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received February 10, 2015 ; Revised June 2, 2015 ; Accepted June 10, 2015)

Key Words: Li-ion Secondary Cell(리튬 이온 셀), Electrochemical Simulation(전기화학 시뮬레이션), Limit Discharge Current(한계 방전 전류)

초록: 리튬 전지는 에너지 밀도가 높고, 소형화 및 경량화가 가능한 이차전지로서 저장된 화학 에너지를 전기화학적 반응을 통해 전기 에너지로 변환하는 장치로 노트북, 휴대폰, 파워-툴 및 자동차 등에 널리 사용되고 있는 에너지원이다. 특히, 파워-툴이나 자동차와 같은 응용분야에서는 고율 충방전을 필요로 하는데, 본 논문에서는 리튬 전지의 고율 방전 특성에 대해서 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 전기화학 시뮬레이션을 진행하여 실험 결과와 유사한 전기화학 모델을 완성하게 되었다. 또한, 이러한 전기화학적 해석 모델을 이용하여 고율 방전용 리튬 전지의 한계 방전 전류가 63A 정도라는 것을 해석적으로 예측 할 수 있었고, 이를 바탕으로 고율 방전 시 리튬 전지의 거동에 대해서 이해할 수 있게 되었다.

Abstract: Li-ion batteries are energy sources that are widely used in applications such as notebooks, cellular phones, power tools, and vehicles. They are devices in which stored chemical energy is changed to electrical energy by electrochemical reactions. They have a high energy density, small size, and are lightweight. In particular, power tools and vehicles require high charge/discharge rates. Therefore, in this paper, we perform electrochemical simulations using a commercial finite-element analysis program to determine the high discharge-rate characteristics of Li-ion cells. In addition, by performing high discharge-rate simulations, we found that the limited discharge current was 63 A. Based on the results obtained, we investigate the behavior of Li-ion cells with a high rate of discharge.

1. 서론

전지(Battery)는 전기화학적 산화/환원 반응(Redox)에 의해 활물질(Active material) 내에 직접적으로 포함되어 있는 화학 에너지를 전기 에너지로 변환하는 에너지 저장 장치이다. 이차 전지(Rechargeable battery)는 이러한 경로를 반대로 진행시켜서 재충전할 수 있다.⁽¹⁾ 리튬 전지는 양/음극 활물질 내 리튬 이온의 삽입(Intercalation)이 가능한 화합물로 이루어져 있는

셀(Cells)로 구성되어 있다. 이것은 양/음극 전극 사이에서 리튬 이온을 주고/받으면서 충/방전이 되는 것이다. 양극은 층상 구조(Layered structure), 터널 구조(Tunneled structure) 및 스피넬 구조(Spinel structure)를 주로 사용하고, 음극은 층상 구조(Layered structure)인 그래파이트를 주로 사용한다.⁽²⁾ 이렇게 구성된 리튬 셀은 충/방전을 통해서 전기화학적 특성을 가지게 되는데, 고율 방전 특성이 필요한 분야에서 사용할 경우 방전 특성에 따라서 셀 구성이 결정되고, 이를 바탕으로 팩(Pack)이 구성되는 것이다. 보다 적은 셀로 구성하여 고율 방전 특성을 만족할 수 있다면 상용화와 가격 측면에서 상당한 장점이

† Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

있을 것이라 판단된다.

리튬 셀의 전기화학 시뮬레이션을 통한 성능 예측은 많이 알려져 있는 상태이며, 해석을 위한 모델도 다양하게 연구가 진행되어 왔다. 최근 국내에서도 양극 활물질의 특성에 대한 연구,⁽³⁾ 세계적인 자동차 전지 업체 중 하나인 SDI 에서 전기 자동차용 전지의 전기화학적 특성을 예측하기 위한 수학적 모델 연구,⁽⁴⁾ 충전 특성을 바탕으로 수명을 해석적으로 예측하기 위한 연구⁽⁵⁾와 전기 자동차용 전지의 열 특성 개선을 위한 열 모델링⁽⁶⁾ 등 다양하게 연구되어지고 있다.

본 논문에서는 고율 방전용 리튬 전지에 대한 수학적 모델을 제시하고, 상용 유한 요소 해석 프로그램인 COMSOL™ 을 이용하여 전기화학적 방전 특성을 해석하고, 원형 리튬 전지를 이용하여 실험 결과와 비교하여 1 차원 해석 모델을 검증하였다. 실험에 사용된 원형 리튬 전지는 양극 활물질인 NMC 이고, 음극 활물질이 그래파이트로 구성되어 있으며, 파워-툴과 자동차용으로 개발된 제품을 구입한 후 충/방전기를 이용하여 방전 특성을 측정하였다. 그리고, 검증된 해석 모델을 이용하여 한계 방전 전류를 해석적으로 예측하였으며, 예측된 결과를 바탕으로 리튬 전지의 거동에 대해서 이해할 수 있었다.

2. 수학적 모델

2.1 지배방정식

본 논문에서는 고율 방전용 리튬 리튬 셀의 고출력 특성을 해석적으로 표현하기 위한 전기화학적 1 차원 해석 모델의 개념도가 Fig. 1 과 같다. 셀이 방전 시 음극에서 리튬 이온이 분리막을 통과하여 양극으로 이동하게 되는데, 이것을 전기화학적 이론으로 설명하기 위해서 J.Newman⁽⁷⁾이 정리한 이

론을 바탕으로 지배방정식을 정리해 보았다. 리튬 셀에 대한 전기화학적 설명을 위해서는 다공성 전극 이론(Porous electrode theory), 농축 용액 이론(Concentrated solution theory) 및 전극 반응 속도론(Electrode kinetics theory)에 대한 이해가 필요하다. 이러한 3 가지의 이론을 이용하여 정리하면, Table 1 내의 식 (1)부터 (6)까지의 리튬 셀의 일반적인 전기화학적 지배 방정식(Governing equations)을 구성할 수 있다.

여기서, 고체 상(Solid phase)은 구형이라고 가정된 활물질 내에서의 리튬 이온의 거동을 의미하며, 액체 상(Liquid phase)은 방전 시 음극에서 양극으로 전해액(Electrolyte)의 농도 구배에 의한 리튬 이온 거동을 의미한다.

리튬 셀의 전기화학적 지배방정식에 적용된 3 가지 이론 중 첫번째인 다공성 전극 이론(Porous electrode theory)은 공극 구조를 가지는 양극과 음극 활물질 내에 존재하는 리튬 이온이 전해질이라는 매개체를 이용하여 물질 전달이 이루어지는 복잡한 구조를 해석하기 위한 것이다. 활물질은 Fig. 2.1 의 개략도에서 표현된 것 같이 구형이라고 가정하고, 활물질 내에서의 물질 전달을 표현하였다. Table 1 의 지배방정식 (1)의 σ 는 전기 전도도, 식 (3)의 κ 는 이온 전도도 그리고, 식 (4)의 D_{eff} 는 확산 계수를 나타내는데, 공극을 가지는 전극 내의 굴곡 효과(Tortuosity effect)를 포함한 것으로 각각 $\sigma^{eff} = \sigma \epsilon_1^p$, $\kappa^{eff} = \kappa \epsilon_2^p$ 및 $D_{eff} = D_2 \epsilon_2^p$ 로 표현될 수 있다. 여기서, ϵ_1 와 ϵ_2 는 각각 고체 상(Solid phase)의 체적 분율과 전해액의 체적 분율을 나타내며, 첨자 p 는 Bruggeman 지수(exponents)를 나타내는데, 이는 효율적인 전도성을 구할 때 많이 사용되는 표현이다.

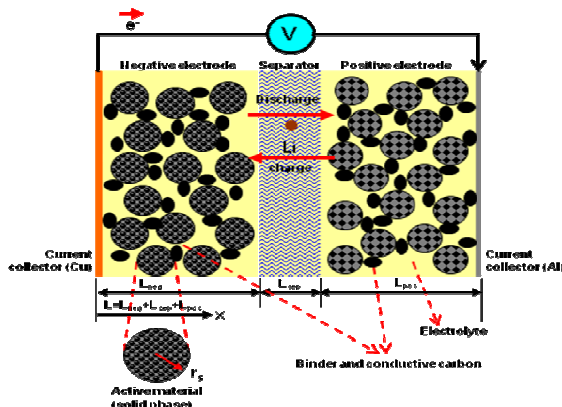


Fig. 1 Schematic of 1-D analytical model

Table 1 Governing equations of a Li-ion cell

Contents		Conservation equations
Solid phase	Potential	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right) = a_i$ (1)
	Mass transfer	$\frac{\partial c_1}{\partial t} = \frac{D_1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_1}{\partial r} \right)$ (2)
Liquid phase	Potential	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2Rk_c}{F} (t_+ - 1) \left(1 + \frac{d \ln f_{\pm}}{d \ln c_2} \right) \sqrt{ \ln c_2 } \right) = -a_i$ (3)
	Mass transfer	$\epsilon \frac{\partial c_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial c_2}{\partial x} \right) + \frac{1-t_+}{F} a_i$ (4)
Surface reaction (Butler-Volmer equation)		$i_s = i_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT} \right) - \exp \left(\frac{\alpha_c F \eta}{RT} \right) \right]$ (5) where, $i_0 = k(c_2)^{\gamma_c} (c_{1,max} - c_{1,surf})^{\gamma_a} (c_{1,surf})^{\gamma_c}$ $\eta = \Phi_1 - \Phi_2 - U(c_{1,surf}) - R_{SEI} t_s$
Temperature		$c_p \frac{dT}{dt} - \dot{Q} = - \int_V \sum_i a_i U_i dv - IV$ (6)

두번째로, 농축 용액 이론(Concentrated solution theory)은 전해질에 의해 발생하는 물질 전달 과정을 다루기 위해 채택되었다. Table 1의 지배방정식 (3)에서는 확산 전도도(Diffusional conductivity)를 아래 식처럼 정의할 수 있다.

$$\kappa_D^{eff} = \frac{2RT\kappa^{eff}}{F} (t_+ - 1) \left\{ 1 + \frac{\partial(\ln f_{\pm})}{\partial(\ln c_2)} \right\} \quad (7)$$

여기서, f_{\pm} 는 전해액의 몰의 활동도 계수(Molar activity coefficient)를 의미하고, 전해액의 이온 전도도(κ)는 전해액 조성에 의해 결정되는 계수를 의미한다.

마지막 세번째로, 전극 반응 속도론(Electrode kinetics theory)은 리튬의 삽입과 탈이에 대한 반응 속도를 나타내며, 일반적으로 Table 1의 지배방정식 (5)와 같이 Butler-Volmer 식에 의해 정의될 수 있다. 여기서, 교환 전류 밀도(i_0)는 전해액과 활물질 내에서의 리튬 농도의 함수로 표현되며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$i_0 = k(c_2)^{\alpha_a} (c_{1,max} - c_{1,surf})^{\alpha_a} (c_{1,surf})^{\alpha_c} \quad (8)$$

여기서, c_1 과 c_2 는 각각 고체 상(Solid phase)인 활물질과 액체 상(Liquid phase)인 전해액 내의 체적대비 평균 리튬 농도를 나타내며, $c_{1,surf}$ 는 전극과 전해액 계면에서 면적대비 평균 고체 상태의 리튬 농도를 나타내며, $c_{1,max}$ 는 활물질 내에서의 리튬의 최대 농도를 나타낸다. 상수 k 는 표준 농도 하에서의 교환전류 밀도(Exchange current density)에 의해서 결정되는 값이다. 또한, 국부적 표면 과전압(Local surface overpotential, η)은 개방 회로 전압(Open circuit potential, U)에서 활물질(Solid phase)과 전해액(Liquid phase) 사이의 전압 차이에 의해서 정의될 수 있다.

$$\eta = \Phi_1 - \Phi_2 - U(c_{1,surf}) - R_{SEI} i_s \quad (9)$$

여기서, 개방 회로 전압(Open circuit potential)은 충전 상태(State of charge, $SOC = c_{1,surf} / c_{1,max}$)와 온도에 의해서 정의된다.

2.2 경계조건

지금까지 논의된 지배방정식을 풀기 위한 경계조건(Boundary conditions)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

고체상 내 전위에 대한 지배방정식 (1)의 경계 조건은,

$$-\sigma_{neg}^{eff} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sigma_{pos}^{eff} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{I}{A} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \Big|_{x=L_{neg}} = \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \Big|_{x=L_{neg}+L_{sep}} = 0 \quad (11)$$

고체상 내 물질 전달에 대한 지배방정식 (2)의 경계조건은,

$$\frac{\partial c_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad -D_s \frac{\partial c_1}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = \frac{i_s}{F} \quad (12)$$

액체 상인 전해액 내 전위에 대한 지배방정식 (3)의 경계조건은,

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (13)$$

액체 상인 전해액 내 물질 전달에 대한 지배방정식 (1)의 경계조건은,

$$\frac{\partial c_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial c_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (14)$$

이다.

2.3 해석 모델

이러한 전기화학 이론식을 이용하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 COMSOL™을 이용하여 고출력 셀에 대한 방전 특성을 해석하였다. Fig. 1의 개념도

Table 2 Material properties for 1-D analysis model

Description		Symbol	Unit	Value	Ref
Bruggeman tortuosity exponent	Neg.	p	N/A	1.5	[9]
	Pos.			1.5	[9]
Li diffusion coefficient in solid phase	Neg.	D_s	cm^2/s	$4.5 \cdot 10^{-10}$	[11]
	Pos.			$6.0 \cdot 10^{-10}$	[11]
Electrode conductivity	Neg.	σ	S/cm	1.0	[9]
	Pos.			0.1	[9]
Exchange current Density	Neg.	k	mA/cm^2	3.6	[9]
	Pos.			2.6	[9]
SEI resistivity	Neg.	R_{SEI}	$\Omega \cdot cm^2$	0	[9]
	Pos.			0	[9]
Li diffusion coefficient in electrolyte phase		D_{eff}	cm^2/s	$6.0 \cdot 10^{-6}$	[10]
Transference number		t_+	N/A	0.38	[10]
Ionic conductivity		κ	mS/cm	0~20	[10]
Heat transfer coefficient		h	$W/m^2 \cdot K$	0.002	[9]
Series resistance		R_0	Ω	0.01	N/A

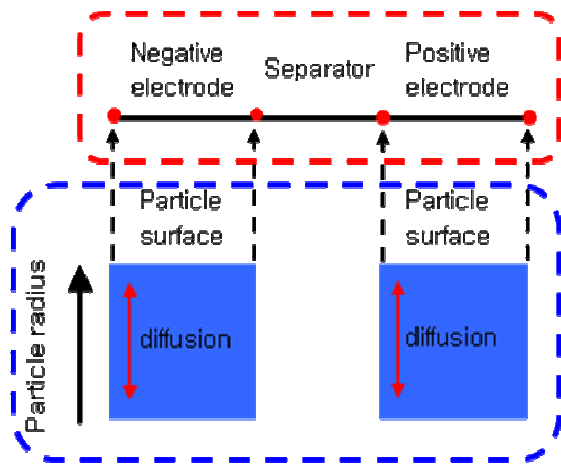


Fig. 2 1-D analysis model for a Li-ion cell

를 바탕으로 1 차원 유한 요소 해석 모델을 완성하였으며, Fig. 2 는 1 차원적으로 표현된 리튬 전지 해석 모델을 보여주고 있다. 해석에 사용된 물성값들은 Table 2 에 기록해 놓았다.

해석에 사용된 경계 조건(Boundary conditions)은 전류의 균형을 위해서, 음극의 전위를 0V 로 정의하고, 양극에서의 전류 밀도가 설정되었다. 본 해석 모델에서, 전류 밀도는 방전에 의해서 진행되며, 전류가 음극으로 이동한 후 최종 충전 상태에서 마무리된다. 분리막과 맞닿는 내부 경계조건은 절연이다. 전해액의 이온 전하 균형을 위해서 집전체의 경계조건은 절연으로 정의하였다. 절연 조건은 활물질의 균형에도 적용되었다.⁽⁸⁾

3. 전기화학 해석

3.1 해석 결과

고율 방전용 리튬 전지에 대한 전기화학 해석 결과와 실험 결과를 Fig. 3 에 비교해 놓았다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 방전 프로파일이 실험 결과와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 평균 전위를 기준으로 해석과 실험 결과값을 비교해보면, 최대 0.77% 오차 범위 내에서 유사한 값을 가진다. Fig. 4 는 고율 방전 시 발생하는 셀 내부 온도 프로파일을 보여주고 있다. 저율 방전에서는 해석과 실험 결과값이 유사하게 표현되는데 고율 방전인 30A 에서는 해석 결과값이 실험값보다 높게 표현되는 것을 볼 수 있다. 이는 실제 측정값은 전극 표면에서의 온도가 아닌 전극을 감싸고 있는 케이스 표면을 측정했기 때문이다. 또한, 고율 방전 시 순간적인 리튬 이동에 의해 발생하는 저항에 의한 열 상승이 전극을 감싸고 있는 케이스 표면까지 전달되는데 시간이 소요되기 때문이다.

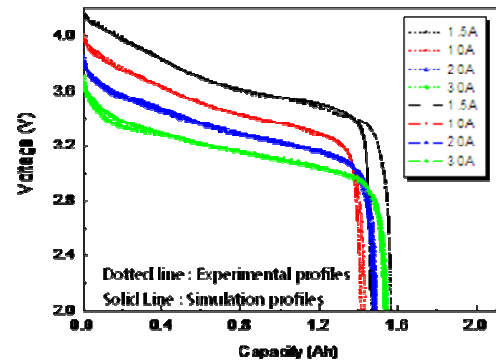


Fig. 3 Discharge capacity vs. voltage profiles

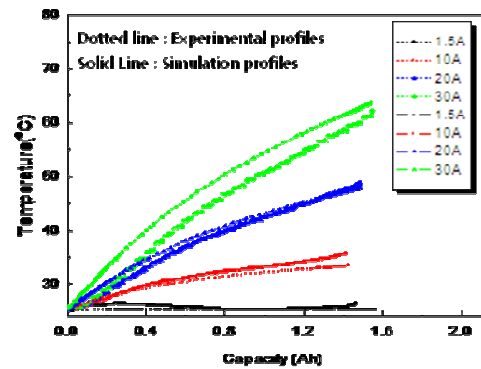


Fig. 4 Discharge capacity vs. temperature profiles

하지만, 저율 방전 시에는 전극의 온도 상승과 케이스 표면의 온도 상승 폭의 차이가 크지 않기 때문에 해석과 실험 결과값이 유사하게 표현되는 것이다. 따라서, 저율 방전 시 온도 특성에 대한 해석과 실험 결과값이 유사하기 때문에 해석 모델은 타당하다고 판단할 수 있으며, 해석 결과값이 전극의 온도값을 더 명확히 표현하고 있다고 판단된다.

본 해석과 실험 결과의 비교를 통해서, 해석 모델의 타당성을 검증하였으며, 이 모델을 이용하여 리튬 전지의 한계 방전 전류에 대해서 다음 장에서 예측해 보았다.

4. 한계 방전 전류 예측

지금까지 논의된 전기화학 해석 모델을 이용하여 리튬 전지의 한계 방전 전류를 예측해 보았다. 한계 방전 전류가 갖는 의미는 순간적으로 어느 정도까지 방전을 허용할 수 있는냐를 판단하는 기준으로 적용 장비에서 순간적인 전류(Inrush current)가 흐를 때 장비를 보호할 수 있는 정도는 리튬 전지가 감당을 해야 한다.

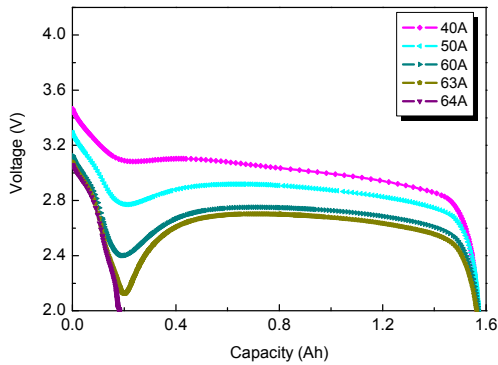


Fig. 5 Limit discharge current

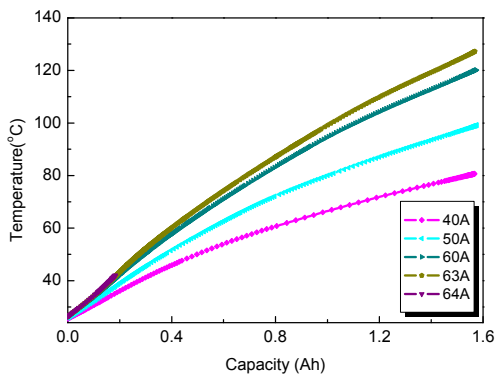


Fig. 6 Temperature profile on limit discharge current

순간 흐르는 전류의 기준값은 없지만 일반적으로 파워-툴의 순간 전류는 60A 정도로 이를 감당하지 못할 경우 전지를 병렬로 연결하여 순간 전류값을 낮게 만들어 주게 된다. 따라서, 한계 방전 전류는 높을수록 전지의 병렬 구조가 필요없게 되기 때문에 비용적인 측면과 기술적인 측면에서 모두 중요한 요소이다.

해석 결과, 고율 방전용 리튬 전지의 한계 방전 전류가 63A 로 나타났고, 연속 방전을 했을 경우, 전극 내 온도는 120°C 이상을 보이고 있다. 그러나, 한계 방전 전류로 연속해서 장비를 구동할 경우 전극 내 전해액의 분해 작용에 의한 가스 발생으로 전지의 수명이 단축되기 때문에 이를 권장하지는 않는다. 다만, 앞에서 설명하였듯이 순간 전류가 60A 이상 흘러도 이를 리튬 전지가 감당할 수 있다는 의미로 받아들여지면 될 것이다.

5. 고찰

한계 방전 전류 구간에서의 리튬 전지 내 전극의 거동을 확인하기 위해 각 구간별 해석 결과를 확인해 보았다. Fig. 7(a)는 전기화학 해석으로 얻은 한계 방전 전류 63A 에서의 방전 프로파일이며, 이를 3 구간으로 나누어서 Fig. 7(b), (c), (d)에 리

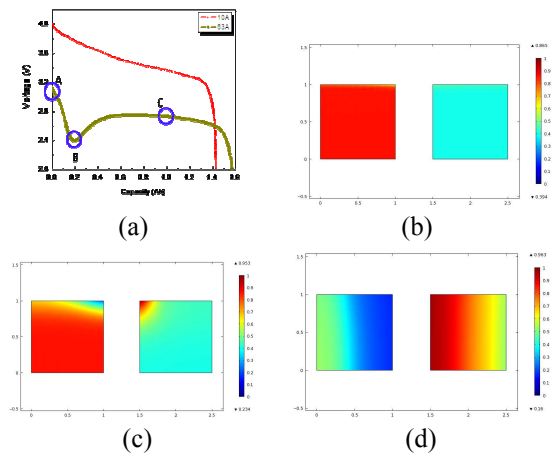


Fig. 7 Concentration distribution at each position

튬 이온의 농도 구배에 대한 해석 결과를 표현해 놓았다. Fig. 7(b)는 63A 로 방전이 시작되는 위치에서의 음극(왼쪽)과 양극(오른쪽)의 농도 구배를 나타내고 있다. 이러한 초기 상태에서 순간적으로 63A 의 전류로 리튬 전지를 방전할 경우에 나타나는 전압 강하 구간을 표현한 리튬 농도 구배 분포가 Fig. 7(c)이다.

방전 시 리튬이 음극(왼쪽)에서 빠져 나가면서 양극(오른쪽) 내 국부적인 스트레스가 발생하는 것을 리튬 농도 구배로 확인할 수 있다. 즉, 국부적인 양극 내 스트레스로 인해 전극 내 전위차가 발생하면서 전압 강하가 발생한 것을 알 수 있으며, 이러한 전압 강하가 2.0V 이하가 될 경우 장비 구동이 불가능한 상태가 되는 것이다. 이렇게 순간 방전 구간이 지나고 안정 구간으로 들어가게 되면 양/음극 모두 균일하게 리튬 이온이 이동하고 있는 것을 Fig. 7(c)의 농도 구배로 확인할 수 있다.

6. 결론

리튬 전지의 한계 방전 전류를 상용 유한요소 해석 프로그램인 COMSOL™ 을 이용하여 예측하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 리튬 전지의 고율 방전 특성을 표현할 수 있는 전기화학적 해석 모델을 완성하였으며, 실험값과 비교하여 0.77%의 오차를 확인하였다. 또한, 고율 방전 중 발생하는 온도 특성도 실험값과 비교하여 유사하다는 것을 검증하였다.

(2) 전기화학 해석 모델을 이용하여 리튬 전지의 한계 방전 전류를 시뮬레이션 한 결과 63A 로 나타났으며, 만약 63A 로 연속 방전을 했을 경우에는 전극의 온도가 120°C를 넘어 전해액 분해반응에 의한

가스 발생 우려가 있기 때문에 연속 방전으로 사용은 어려울 것으로 보인다. 그러나, 순간 방전 전류가 60A 이상 흐를 경우에 리튬 전지가 이를 감당할 수 있는 수준이라는 것을 검증하였다.

(3) 고율 방전 시 순간적으로 전극 내 리튬이 균일하게 빠져 나오지 못하고 불균일하게 빠져 나오면서 전압 강하가 심하게 나타나는 것을 해석 결과로 확인할 수 있었다.

참고문헌

(References)

- (1) Linder, D. and Reddy, T.B., 2002, "Handbook of Batteries I," McGraw-Hill companies Inc.
- (2) Linder, D. and Reddy, T.B., 2002, "Handbook of Batteries II," McGraw-Hill companies Inc.
- (3) Kim, S. and Kim, D., 2013, "Study of Li-ion Diffusion and Phase Transition in Cathode of Li-ion Battery," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.37, No.7, pp.665~667.
- (4) You, S., Jung, J., Cheong, K.B. and Go, J., 2011, "Numerical Simulation of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.35, No.6, pp. 649~656.
- (5) Sim, S.H., Gang, J.H., An, D., Kim, S.I., Kim, J.Y., and Choi, J.H., 2013, "Remaining Useful Life Prediction of Li-ion Battery Based on Charge Voltage Characteristics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.37, No.4, pp.313~322.
- (6) Han, J., Park, J., Yu, S. and Kim, S., 2014, "One-Dimension Thermal Modeling of NiMH Battery for Thermal Management of Electric Vehicles," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.38, No.3, pp.227~234.
- (7) Newman, J., 1991, "Electrochemical Systems," 2nd ed., Prentice hall, New Jersey.
- (8) COMSOL Multiphysics, 2008, "Rechargeable Lithium-ion Battery," Solved with COMSOL multiphysics 3.5a.
- (9) Ang, W.F., Kwon, O.J. and Wang, C.Y., 2010, "Electro Chemical-thermal Modeling of Automotive Li-ion Batteries and Experimental Validation Using a Three-electrode Cell," *International Journal of Energy Research*, Vol.34, pp.107~115.
- (10) Ole Valøen, L. and Reimers, J., 2005, "Transport Properties of LiPF₆ Based Li-ion Battery Electrolytes," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.152, p.A882.
- (11) Wang, Y., Li, H., He, P., Hosono, E. and Zhou, H., 2010, "Nano Active Materials for Lithium-ion Batteries," *The Royal Society of Chemistry 2010 Nanoscale*, 2010, Vol.2, pp.1294~1305.