

등가물성 및 집중용량법을 이용한 리튬-이온 전지의 열해석

이 희 원* · 박 일 석**

* 경북대학교 기계공학부

Thermal Analysis of Lithium-ion Cell Using Equivalent Properties and Lumped Capacitance Method

Hee Won Lee* and Il Seouk Park**

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received March 27, 2013 ; Revised May 3, 2013 ; Accepted May 20, 2013)

Key Words: Lithium-ion Cell(리튬-이온 전지), Thermal Analysis(열해석), Equivalent Properties(등가물성), Lumped Capacitance Method(집중용량법)

초록: 일반적으로 전기자동차(Electric Vehicle, EV)의 배터리로는 리튬-이온 전지가 많이 사용된다. 리튬-이온 전지는 충전이 가능한 이차 전지의 일종으로 마이크로 스케일의 극판과 분리막이 반복하여 적층된 구조를 가지고 있다. 이와 같은 미세구조로 인해 상세해석모형을 적용하는 것은 지나치게 많은 비용이 소모되는 일이다. 본 연구에서는 리튬-이온 전지를 하나의 등가물성으로 나타내는 방법을 제시하고 있으며, 185.3Ah 전지와 20Ah 전지에 이를 적용하여 그 결과를 이전자료와 비교하고 있다. 또한 집중용량법을 적용한 계산 결과를 함께 제시하여 유한요소법(FEM)이나 유한체적법(FVM)의 사용 없이 손쉽게 전지의 열적 거동을 확인할 수 있는 방법을 제시하였다.

Abstract: In general, the battery module of an electric vehicle (EV) consists of lithium-ion cells. A lithium-ion battery is a secondary rechargeable battery, and it consists of numerous stacked plates that serve as electrodes and separators. Owing to these microstructural features, its numerical analysis is very expensive. Therefore, this study aims to present a simplified thermal analysis model using equivalent thermal properties, and we compare the experimental results with numerical results for 185.3Ah and 20Ah cells. Furthermore, we show the thermal behavior of cells without the finite element method (FEM) or finite volume method (FVM) by adopting the lumped capacitance method (LCM).

- 기호설명 -

ϵ : 방사율

A : 면적 [m^2]

하첨자

C_p : 비열 [$J/kg \cdot K$]

amb : 외부공기

E : 작동전압 [V]

c : 대류

E_{oc} : 개방회로전압 [V]

eqv : 등가

h_c : 대류열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]

g : 발열

I : 전체전류 [A]

i : 요소

k : 열전도도 [$W/m \cdot K$]

Joule : 줄

L : 길이 [m]

n : 방향

T : 온도 [K]

parallel : 병렬

Vol : 부피 [m^3]

r : 복사

ρ : 밀도 [kg/m^3]

reaction : 반응

σ : 스테판-볼츠만 상수

series : 직렬

surf : 표면

tot : 전체

† Corresponding Author, einstein@knu.ac.kr

1. 서 론

최근 석유자원의 고갈과 환경규제가 심해지면서 전기자동차(EV)에 대한 관심이 높아졌고, 그로 인해 전기자동차의 성능을 결정하는 핵심요소인 배터리에 관한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다. 전기자동차의 배터리로는 에너지 밀도가 높고 기억효과가 없는 리튬-이온 전지가 주로 사용되고 있다.

Bernardi 등⁽¹⁾은 배터리 내부반응들에 관한 연구를 통해 배터리 내부의 열적 특성을 잘 나타낼 수 있는 일반적인 에너지보존 방정식을 제시하였고, 이를 이용해서 LiAl/FeS 전지를 수치해석 하였다. Song 등⁽²⁾은 리튬 폴리머 전지의 반응과정에서 온도의존변수들을 모두 고려한 수치해석 모델을 제시하였으며, 그 방법을 적용하여 해석한 결과를 실험자료와 비교하였다. Chen 등⁽³⁾은 리튬 폴리머 전지의 방전율(C-rate)에 따른 열전도 현상에 관한 연구를 통해 높은 방전율에서는 열 관리 시스템이 필요하다는 것을 확인하였으며, Kumaresan 등⁽⁴⁾은 여러가지 리튬 이온 전지들의 작동온도와 방전율(C-rate)에 따른 열전도도 및 전압변화를 연구하였다.

이전의 연구들에서 전지를 해석하기 위해 사용한 해석모델들은 미시적(microscopic)관점에서 전지를 묘사함으로써 전지의 특성을 잘 표현할 수 있었다. 하지만 이 해석모델을 이용하여 수백 개의 전지들이 집적되어 구성되는 배터리 팩을 해석하기에는 시간상 비효율적이다. 이에 Chen 등⁽⁵⁾은 리튬-이온 전지의 열적 거동을 나타낼 수 있는 3차원 열 모델을 제시하는 과정에서 등가물성을 이용하여 전지를 세 부분으로 나타내는 비교적 간단한 모델을 제시하였지만, 이 모델 역시 배터리팩 해석에 적용하기에는 해석시간상의 문제로 인해 적합하지 못하다.

따라서 본 연구에서는 거시적 관점에서 리튬-이온 전지를 하나의 등가물성으로 나타내는 방법을 제시함으로써 배터리팩 해석에 적합한 해석모델을 제시하고 있으며, 등가물성을 이용한 3차원 열전달 수치해석결과와 실험결과를 비교하고 있다. 또한 3차원 열전달 해석 대신 집중용량법(LCM, Lumped Capacitance Method)을 이용한 0차원 열전달 해석을 시도함으로써, 유한요소법(FEM, Finite Elements Method)이나 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)의 적용 없이 간편하게 전지의 열적 거동을 예측하는 방법을 제시하고 있다.

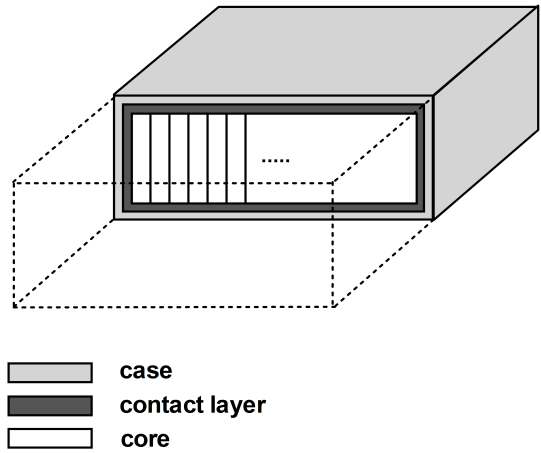


Fig. 1 Schematic structure of Lihium-ion battery

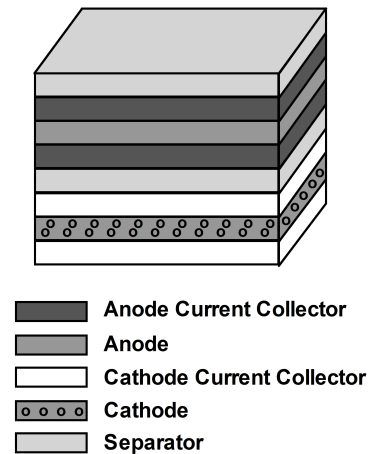


Fig. 2 Composition of core

2. 리튬-이온 구조

일반적으로 리튬-이온 전지는 Fig. 1과 같이 크게 case, contact layer, core로 나누어 모델링 할 수 있다. case는 전지의 용기를 말하며, contact layer는 전해질로 채워져 있는 얇은 층을 말한다. core는 전지에서 전기-화학 반응이 일어나는 핵심 영역으로 Fig. 2와 같은 구조로 구성된 얇은 판들이 적층되어 구성되는데, 판의 수가 많기 때문에 수치해석에 있어 많은 시간이 소요되는 영역이다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 수치해석을 위해 core 영역을 식 (1)~(4)를 이용하여 하나의 물질로 대체하였다.

$$\rho_{eqv} = \frac{\sum_i \rho_i Vol_i}{\sum_i Vol_i} \tag{1}$$

$$\rho_{eqv} C_{p,eqv} = \frac{\sum_i \rho_i C_{p,i} Vol_i}{\sum_i Vol_i} \quad (2)$$

$$k_{eqv,series} = \frac{\sum_i L_i}{\sum_i (L_i/k_i)} \quad (3)$$

$$k_{eqv,parallel} = \frac{\sum_i A_i k_i}{\sum_i A_i} \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도, C_p 는 비열, k 는 열전도도, Vol 은 부피, L 은 길이, A 는 면적을 나타낸다. 리튬-이온 전지의 열전도도의 경우, 구조상 이방성이므로 직렬방향(식 (3))과 병렬방향(식 (4))으로 나누어 계산하였다. 직렬방향은 core의 얇은 판들을 뚫고 지나가는 방향이며, 병렬방향은 판에 평행한 방향이다.

이후 case, contact layer 그리고 core에 관해 식 (1)과 (2)를 다시 적용하여 등가밀도와 비열을 계산하고, 식 (5)를 이용하여 각 방향에 대한 등가 열전도도를 계산함으로써 최종적으로 리튬 이온 전지를 하나의 물질로 나타내는 등가물성들을 구하였다.

$$q_n'' = -k_{eqv,n} \frac{\Delta T}{L} \quad (5)$$

q_n'' 은 n 방향으로의 열 유속, $k_{eqv,n}$ 은 n 방향의 등가열전도도, L 은 n방향의 길이 그리고 ΔT 는 양 끝단에서의 온도 차이를 나타낸다.

3. 3차원 열전달 및 집중용량법

집중용량법을 적용하기에 앞서 본 연구에서는 다음의 3차원 열전도 방정식을 이용하여 전지 내부의 열전달 과정을 수치해석 하였다.

$$\rho C_p Vol \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\partial T}{\partial z}) + Q_g \quad (6)$$

여기서 T 는 온도, t 는 시간을 나타낸다. 전지의 표면에서는 식 (7)과 같이 전지 내부의 전도에 의한 열유속과 전지외부의 대류, 복사에 의한 열유속의 연속조건을 경계조건으로 사용한다.

$$-k_n A_n \frac{\partial T}{\partial n} = Q_c + Q_r = h_c A_{tot} (T_{surf} - T_{amb}) + \epsilon \sigma A_{tot} (T_{surf}^4 - T_{amb}^4) \quad (7)$$

h_c 는 대류열전달계수, ϵ 는 방사율, σ 는 스테판-

볼츠만 상수, T_{surf} 는 전지표면온도, T_{amb} 는 외부 공기온도를 나타낸다. 또한 배터리 내부에서 발생하는 발열량은 전지 내부의 전기적 저항에 의한 주열 열(Joule heating)과 화학반응에 의한 반응열의 합으로 나타나며 식 (8)⁽¹⁾과 같다.

$$\begin{aligned} Q_g &= Q_{Joule} \pm Q_{reaction} \\ &= I(\eta \pm T \frac{dE_{oc}}{dT}) \\ &= I((E_{oc} - E) \pm T \frac{dE_{oc}}{dT}) \\ \eta &= IR, R = (E_{oc} - E)/I \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 I 는 전류량, η 는 분극(polarization), R 은 전기저항, E_{oc} 는 개방회로전압(OCV, Open Circuit Voltage), E 는 작동전압을 나타낸다. 식 (8)의 η 는 개방회로전압과 작동전압의 차이를 나타내는 값으로써, 식 (9)과 같이 표현할 수 있으며 항상 양의 값을 가진다. 반응열($Q_{reaction}$)은 충전과정일 경우 '+' 부호를 방전과정일 경우 '-' 부호를 사용하는데, 일반적으로 dE_{oc}/dT 는 음의 값을 가지기 때문에 리튬 이차 전지의 경우 충전과정에서는 흡열반응이 일어나며 방전과정에서는 발열반응이 일어난다.

단위 전지의 충·방전 과정에서 전지의 구조상 대부분의 영역에서 발열 및 흡열반응이 일어나며, 전지내부는 거의 균일한 온도분포를 가지게 된다. 이에, 앞서 구한 등가물성과 식 (10)의 집중용량법을 적용하면 식 (6)의 3차원 열전도방정식을 푸는 대신 간단하게 전지의 온도이력을 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_{eqv} C_{p,eqv} Vol \frac{\partial T}{\partial t} &= Q_{Joule} + Q_{reaction} - Q_c - Q_r \\ &= I(\eta - T \frac{dE_{oc}}{dT}) - h_c A_{tot} (T_{surf} - T_{amb}) \\ &\quad - \epsilon \sigma A_{tot} (T_{surf}^4 - T_{amb}^4) \end{aligned} \quad (10)$$

본 연구에서는 왼쪽항의 시간에 따른 온도변화항은 명시적 시간 적분 방법(explicit time integration scheme)을 이용하여 계산하였다.

4. 수치해석

본 논문에서는 등가물성을 적용한 열모델의 정확성을 확인하기 위해 용량이 각각 185.3Ah, 20Ah인 전지를 수치해석하고, 그 결과를 실험 자료와 비교하였다.

4.1 185.3Ah Cell

185.3Ah 전지의 사양은 Table 1과 같으며, 앞서 제시한 방법을 이용하여 등가물성을 계산하였다. 등가물성을 계산하는데 있어, 각 요소들의 물성 값은 Chen 등⁽⁵⁾의 자료를 이용하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 전지 내부의 발열량은 Fig. 3의 실험 자료를 이용하여 계산하였다.

모델링에 있어, 185.3Ah 전지의 격자는 정확한 계산결과를 얻기 위해 다양한 크기를 사용하였다. 충분한 격자의존도 시험 후, 방전율(C-rate)이 1C와 3C인 조건에서 수치해석을 하고 그 결과를 Chen 등⁽⁵⁾의 결과와 비교하였다. 경계조건은 주위 온도 300K, 대류항계수 $6W/m^2 \cdot K$, 방사율은 0.25로 주었다.

Fig. 4는 방전심도(DOD, Depth Of Discharge)에 따른 전지의 최소/최대 온도변화를 비교한 그래프이며, 실선은 Chen 등⁽⁵⁾의 결과이고 점선은 등가물성치를 이용하여 수치해석 한 결과이다. Chen 등⁽⁵⁾의 결과와 수치해석 결과가 매우 유사한 열적 거동을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 방전율이 높을수록 전지의 온도는 높아지고 최소/최대 온도의

Table 1 Specification of 185.3Ah Cell⁽⁵⁾

Size of cell	193.2mm x 102.4mm x 102.4mm
Theoretical capacity	185.3Ah
Ambient temperature	300K
dE_{oc}/dT	$-0.00022VK^{-1(3)}$
Initial temperature	300K

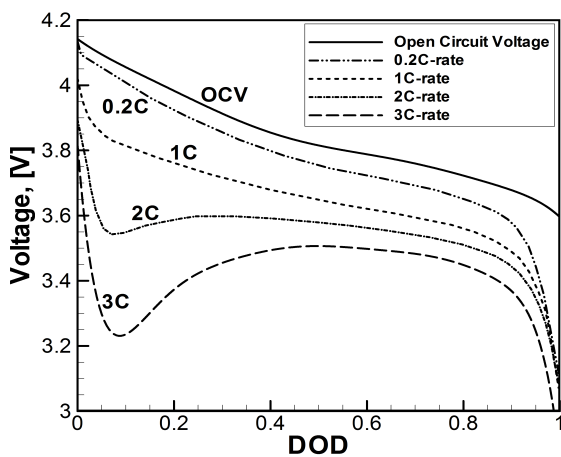


Fig. 3 Experimental results about the 185.3Ah cell voltage depending on the DOD⁽⁵⁾

격차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 높은 방전율로 전지를 방전할 경우, 전지의 열관리시스템이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

두 번째로는 앞서 구한 등가물성과 집중용량법을 적용하여 계산한 전지의 온도 이력을 Fig. 5에 나타내었으며 대류, 복사 및 발열조건은 앞의 3차원 열전도해석의 경우와 같다. 집중용량법의 경우에는 전지의 최대온도와 거의 유사한 열적 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 전지의 충·방전 과정에서 최소온도는 전지의 표면에 나타나고 실험적으로 쉽게 측정이 가능하지만, 최대온도는 실험적으로 계측하기 어렵다. 전지를 열해석하는 목적 중 하나가 전지내부의 최대온도를 확인하는 것인데, 집중용량법을 이용할 경우 유한체적법 혹은 유한요소법을 적용하지 않고 비교적 간단히 전지의 최대온도를 예측할 수 있다.

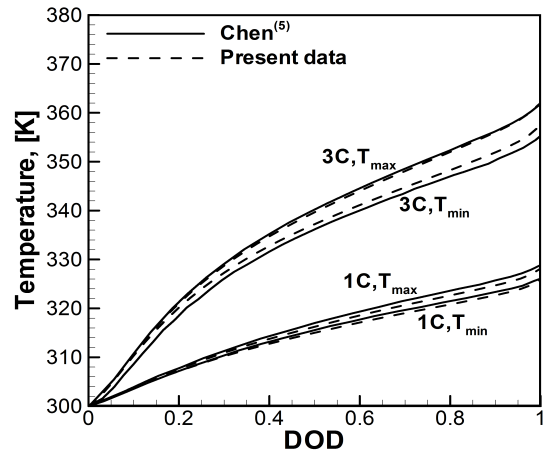


Fig. 4 Comparison of previous results with present numerical data for 185.3Ah cell

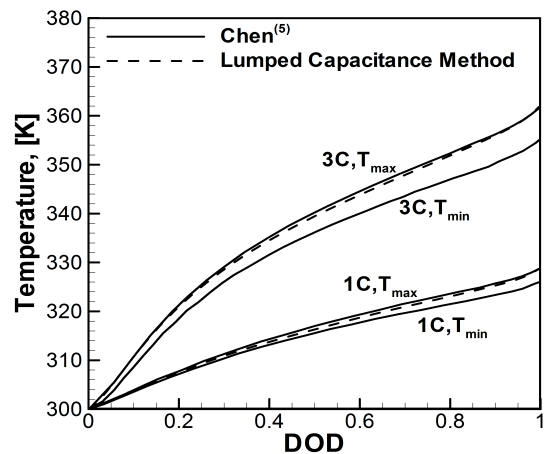


Fig. 5 Comparison of previous results with LCM data for 185.3Ah cell

Table 2 Thermal properties of 185.3Ah Cell

Properties	case	contact layer	core	equivalent
Density (kg/m ³)	2770 ⁽⁵⁾	1129.95 ⁽⁵⁾	1994.23	2000.05
Specific heat (J/kg·K)	875 ⁽⁵⁾	2055.1 ⁽⁵⁾	1232	1226.23
Thermal conductivity (W/m·K)	k _x	170 ⁽⁵⁾	0.6 ⁽⁵⁾	1.035
	k _y			24.840
	k _z			24.840
				4.791
				19.566
				19.566

Table 3 Specification of 20Ah Cell

Size of cell	22mm x 115mm x 103mm
Theoretical capacity	20Ah
Ambient temperature	298K
dE _{oc} /dT	-0.00005VK ⁻¹⁽⁷⁾
Initial temperature	298.7K

4.2 20Ah Cell

20Ah 전지의 특성은 Table 3과 같으며, 앞서 제시한 방법을 이용하여 구한 등가물성의 경우, 밀도는 2015.97kg/m³, 비열은 1759.8J/kg·K, 열전도도는 각각 직렬방향 k_x=4.640 W/m·K, 병렬방향 k_y=26.496, k_z=26.034 W/m·K이다. Fig. 6은 방전 심도에 따른 온도변화를 나타낸 그래프로써, 방전율(C-rate)이 3C, 4C, 8C인 조건에서 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 6에서 실선은 실험결과를 나타내며, 점선은 등가물성치를 이용하여 수치해석한 결과를 나타낸다. 실험결과는 전지의 표면온도를 나타내는 최소온도이며 수치해석결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 또한 20Ah 전지의 경우, 비교적 적은 용량과 얇은 두께로 인해 상대적으로 최소/최대 온도간의 차이가 작다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 집중용량법에 의한 계산결과와 3차원 열전달해석 결과를 비교한 그래프로써, 최소/최대 온도간 차이가 작아서 분간하기 어렵지만 집중용량법의 결과는 전지의 최대온도에 보다 근접한 온도 이력을 보이는 것을 확인할 수 있다.

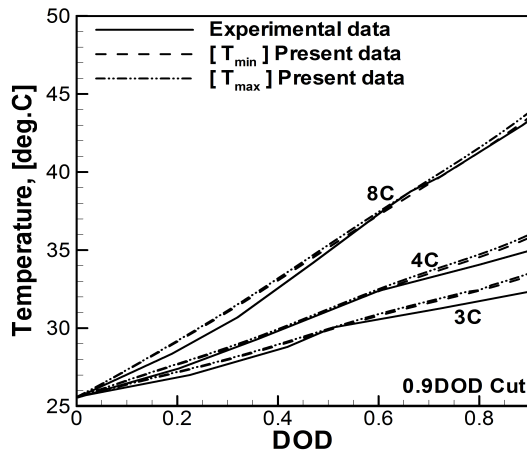


Fig. 6 Comparison of experimental results with present numerical data for 20Ah cell

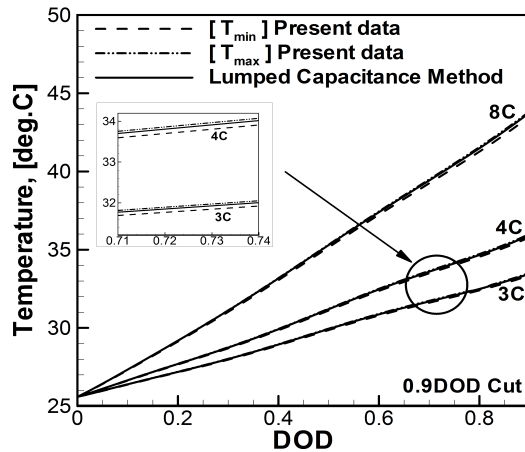


Fig. 7 Comparison of present numerical with LCM data for 20Ah cell

5. 결론

본 연구에서는 등가물성을 이용하여 리튬-이온 전지를 간단히 해석할 수 있는 방법을 제시하고 있으며, 해석방법의 유효성을 확인하기 위해서 185.3Ah 전지와 20Ah 전지를 해석하고 그 결과를 이전자료와 비교하였다. 그 결과, 리튬-이온 전지를 하나의 등가물성으로 나타내어 해석하는 방법이 유효하다는 것을 확인할 수 있었다.

또한 등가물성을 이용하여 집중용량법으로 계산한 결과를 이전자료와 비교해 보았다. 그 결과, 집중용량법의 경우 전지 내부의 최대온도 거동을 잘 표현한다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 집중용량법을 이용할 경우 유한체적법이나 유한요소

법을 적용하지 않고도 비교적 손쉽게 전지 내부의 최대온도 거동을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 방법은 향후 여러 개의 단위 전지를 연결한 배터리 모듈에 확대 적용될 예정이며, 최종적으로 방전율(C-rate)을 향상시킬 수 있는 모듈 디자인에 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2012년도 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(No. C0055987) 및 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Bernardi, D., Pawlikowski, E. and Newman, J., 1985, "A General Energy Balance for Battery Systems," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 132, pp. 5~12.
- (2) Song, Li. and Evans, J. W., 2000, "Electrochemical-Thermal Model of Lithium Polymer Batteries," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 147, pp. 2086~2095.
- (3) Chen, Y. and Evans, J. W., 1993, "Heat Transfer Phenomena in Lithium/Polymer-Electrolyte Batteries for Electric Vehicle Application," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 140, pp. 1833~1838.
- (4) Kumaresan, K., Sikha, G. and White, R. E., 2008, "Thermal Model for a Li-Ion Cell," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 155, pp. a164~a171.
- (5) Cehn, S. C., Wan, C. C. and Wang, Y. Y., 2004, "Thermal Analysis of Lithium-ion Batteries," *J. Power Sources*, Vol. 140, pp. 111~124.
- (6) Botte, G. G., Subramanian, V. R. and White, R. E., 2000, "Mathematical Modeling of Secondary Lithium Batteries," *Electrochimica Acta*, Vol. 45, pp. 2595~2690.
- (7) Lu, W., I. Liu, B. J. and Amine, K., 2007, "Thermal Properties of $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4/\text{LiMn}_2\text{O}_4$ Cell," *J. Power Sources*, Vol. 174, pp. 673~677.
- (8) Min, J. K. and Lee, C. H., 2012, "Numerical Study on the Thermal Management System of a Molten Sodium-Sulfur Battery Module," *J. Power sources*, Vol. 210, pp. 101~109 .