

## 리튬 이온 전지 팩의 열적 거동 모델링

이재신<sup>†</sup>

아주대학교 에너지 시스템 학부

(2010년 12월 10일 접수, 2011년 2월 7일 수정, 2011년 2월 14일 채택)

## Modeling of the Thermal Behavior of a Lithium-Ion Battery Pack

Jaeshin Yi<sup>†</sup>

Dept. of Chemical Engineering and Division of Energy Systems Research, Ajou University,  
Suwon 443-749, Republic of Korea

(Received 10 December 2010, Revised 7 February 2011, Accepted 14 February 2011)

### 요 약

전기자동차(Electric Vehicle, EV)와 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV)의 성능과 수명주기 비용은 배터리 팩에 좌우된다. 팩 내부의 비정상적인 온도분포는 전지간의 전기적인 불균형을 가져오고 팩의 성능을 떨어뜨리기 때문에 팩 내부의 온도 균일성은 EV와 HEV용 전지 팩의 최적 성능을 위한 중요한 요소이다. 본 연구에서는 EV와 HEV용 리튬이온전지 팩의 열적 거동을 예측하기 위해 삼차원 전산 모사를 하였다. 전지 팩의 열전도도는 각종 구성요소의 열전도 저항이 직렬과 병렬로 연결되어 있는 것으로 간주하였다. 셀에서의 열 발생량은 전지내부의 전기화학적 반응에 의한 반응열과 전류의 흐름과 내부저항에 의한 열을 고려하여 계산 하였다.

**주요어** : 하이브리드 전기자동차, 전기자동차, 리튬 이온 전지 팩, 열적 거동 모델링

**Abstract** — The performance and life-cycle costs of electric vehicle(EV) and hybrid electric vehicle(HEV) depend inherently on battery packs. Temperature uniformity in a pack is an important factor for obtaining optimum performance for an EV or HEV battery pack, because uneven temperature distribution in a pack leads to electrically unbalanced battery cells and reduced pack performance. In this work, a three-dimensional modeling was carried out to investigate the effects of operating conditions on the thermal behavior of a lithium-ion battery pack for an EV or HEV application. Thermal conductivities of various compartments of the battery were estimated based on the equivalent network of parallel/series thermal resistances of battery components. Heat generation rate in a cell was calculated using the modeling results of the potential and current density distributions of a battery cell.

**Key words** : Hybrid electric vehicle, Electric vehicle, Lithium-ion battery pack, Thermal modeling

### 1. 서 론

리튬 이온 전지의 경우 다른 전지들에 비해 높은 에너지 밀도, 고전압, 낮은 자가방전을 등의 장점을

가지고 있지만 리튬 이온 전지는 NiMH와 같은 다른 전지들에 비해 안정성 확보가 상대적으로 불리하여 일반 차량에 적용이 어려웠다 [1-2]. 하지만 최근에 고용량, 경량화에 대한 요구가 증대되었고 안정성을 확보하는 기술이 강화되어 리튬이온 전지가 차세대 전기자동차용 배터리로 각광받고 있다 [3].

리튬이온 전지의 경우 가혹한 조건(과충전, 과전류

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Dept. of Chemical Engineering and Division of Energy Systems  
Research, Ajou University, Suwon 443-749, Republic of Korea  
E-mail : regret@ajou.ac.kr

충전, 외부열)이나 충·방전시 반응에 의한 반응열 (Reaction heat)와 전기 저항에 의한 열(Ohmic heat)등의 발열에 의해 발화 및 발연 등이 일어날 수 있는 안정성의 문제를 가지고 있다. 특히 전기자동차가 요구하는 용량 및 출력을 충족시키기 위해서는 제한된 공간 내에 수 백개의 전지를 직렬 또는 병렬로 연결하여야 하는데, 이때 전지의 열 발생에 의해 Thermal runaway 현상이나 전지 팩의 비정상적인 온도 분포로 인한 전지의 밸런스 문제가 다른 휴대용 장치용 리튬이온 전지와 비교 할 수 없을 정도로 크다 [4-5]. 특히 전지 팩의 비정상적인 온도 분포는 전지의 수명이 단축되고 짧게는 전지의 성능을 제대로 활용하지 못하게 된다. 때문에 전기자동차의 실용화를 앞당기기 위해서는 보다 체계적인 전지 팩의 열관리 기술이 요구된다 [6].

본 연구에서는 리튬 이온 전지 팩의 열적 특성을 잘 표현해 줄 수 있는 simulation program 개발을 목표로 정하고, 3차원 해석을 통해 리튬 이온 전지 팩 내부의 온도 분포를 예측하기 위한 수학적 모델을 제시하였다.

## 2. 수학적 모델

본 연구에서는 14 Ah급 리튬 이온 전지가 직렬로 연결된 전지 팩 내의 온도분포를 모사함으로써 제한된 공간 내에서 열의 분산을 최대화 할 수 있는 최적의 조건을 찾아낼 수 있도록 하는데 목적이 있다. 본 연구에서 해석 대상으로 삼은 전지 팩의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 한 팩에는 2개의 모듈이 나란히 위치하여 있고, 하나의 모듈은 48개의 14 Ah급 리튬 이온 전지(Cell)와 전지를 고정해주는 Cartridge로 구성되어 있

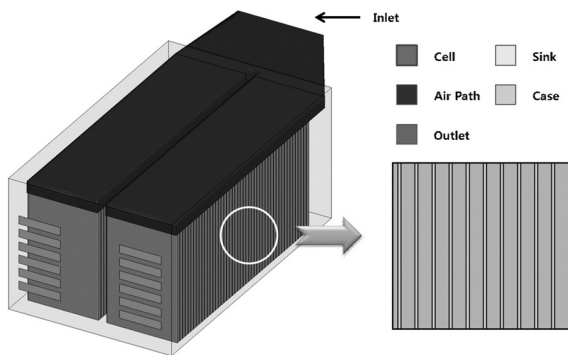


Fig. 1. Schematic diagram of a battery pack.

다. 팩의 모든 전지는 직렬로 연결되어 있다. 이때 전지 사이를 연결해주는 탭 부분에서 발생하는 많은 열을 해결하기 위해 모듈의 윗부분에 Air path가 위치해 있다.

### 2-1. 전지 팩의 열적 특성

리튬 이온 전지는 Fig. 2와 같이 여러 장의 양극판, 양극 집전체, 음극, 음극 집전체, 그리고 분리막이 중첩되어 있다. 이런 복잡한 구조를 전부 고려하기 힘

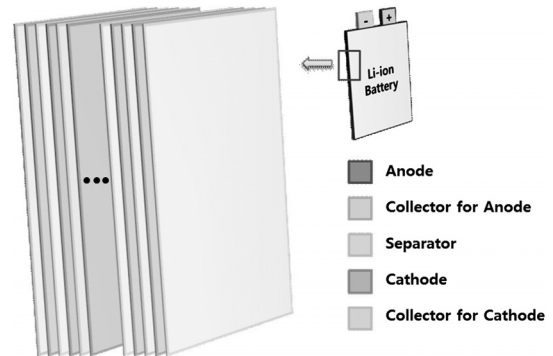


Fig. 2. Schematic diagram of a Li-ion battery.

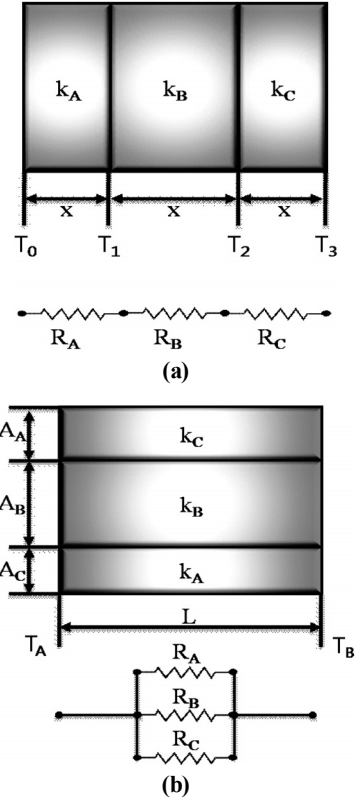


Fig. 3. Equivalent thermal resistance networks (a) for the serial resistances and (b) for the parallel resistances.

들므로 수치모사를 하기 위해서는 이 구조의 열전도 특성을 저해하지 않는 범위 내에서 단순화시키는 방법의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 전기저항 등가식을 이용한 열전도 이론을 사용하여 전지의 열적 특성을 단순화시켜 유한 체적법에 근거하여 해석할 때 사용하는 전지의 영역(Zone)의 수와 격자(Mesh)의 요소(Element) 수를 줄일 수 있었다. 열의 전달은 온도 구배와 열전도도에 정비례하고 두께에 반비례 하므로 저항이론을 이용하여 전기 회로와 같은 방식으로 해석할 수 있다 [7-8]. 열전도도는 각각의 축 방향의 구성물질의 배치에 따라 다르다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 열이 흐르는 방향에 따라 열전도 저항이 병렬 혹은 직렬로 연결되어 있는 것으로 간주하면 다음과 같은 식으로 각 축방향의 열전도도를 계산할 수 있다.

직렬 저항( $k_x$ )의 경우

$$R = R_A + R_B + R_C \quad (1)$$

$$\frac{x}{k_x} = \frac{x_A}{k_A} + \frac{x_B}{k_B} + \frac{x_C}{k_C} \quad (2)$$

$$k_x = \frac{(x_A + x_B + x_C)k_A \cdot k_B \cdot k_C}{x_A \cdot k_B \cdot k_C + x_B \cdot k_A \cdot k_C + x_C \cdot k_A \cdot k_B} \quad (3)$$

병렬 저항( $k_y, k_z$ )의 경우

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \quad (4)$$

$$\frac{A \cdot k_y}{L} = \frac{A_A \cdot k_A}{L} + \frac{A_B \cdot k_B}{L} + \frac{A_C \cdot k_C}{L} \quad (5)$$

$$k_y = \frac{A_A \cdot k_A + A_B \cdot k_B + A_C \cdot k_C}{A} \quad (6)$$

## 2-2. 지배방정식

다음은 팩의 열적거동 해석을 위하여 고체 영역에서

사용된 에너지 방정식이다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \dot{Q} \quad (7)$$

위 식 (7)에서 열전도도를 나타내는  $k_{ij}$ 는 다음 식 (8)과 같이 표현되며 앞서 열저항 등가식으로부터 얻어진 값을 사용하였다. 열저항과 전산 모사에 필요한 각 부분의 물성값들은 Table 1에 나타내었다. 단위 부피당의 발열량을 나타내는  $\dot{Q}$ 는 전지 내부의 전기화학적 반응에 의한 반응열과 전류의 흐름과 내부저항에 의한 열(Ohmic heat)을 고려하여 계산하였다 [9-10].

$$k_{ij} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

비압축성 난류 유동, 유체의 물성치는 일정하다고 가정할 때, 유체영역에서의 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다 [11].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (10)$$

여기서  $\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \bar{v} + \bar{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \bar{v} I \right]$  이며,  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  이다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

여기서  $k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$  이다.

**Table 1.** Thermal properties of a battery pack.

Zone	Density [kg/cm <sup>3</sup> ]	Specific heat [J/Kg · K]	Thermal conductivity [W/cm · K]		
			$k_x$	$k_y$	$k_z$
Cell	2.479	877.3	0.0952	3.1	3.1
Sink	0.667	1667	0.0033	0.028	0.028
Air	$1.255 \times 10^{-3}$	1006.43	0.00242		

난류유동을 해석하기 위해서 본 연구에서는 표준  $k-\varepsilon$  모델을 사용 하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

여기서 난류의 일률은 다음과 같다.

$$G_k = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (14)$$

각각의 상수 값들은 공기와 물의 경우 잘 맞는 것으로 알려진 다음과 같은 표준  $k-\varepsilon$  모델의 기본값을 사용하였다. :

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.44, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

### 2-3. 경계조건 및 초기조건

전지 팩의 초기 온도는 26°C로 모두 일정하다. 아래 면의 경우 단열로 가정하였으며, 나머지 표면의 경계 조건은 자연대류로 가정하였다. 이때의 대류 열전달 계수값은 10 W/m<sup>2</sup>·s이다. 팩의 강제대류 냉각 효과에 대한 해석의 입구 속도는 1.9 m/s, 출구에서의 압력은 대기압으로 가정하였다. 유동에서는 입구와 출구를 제외한 모든 벽면을 no-slip 경계조건으로 가정하였다.

### 2-4. 계산 방법

수학적 모델에 사용된 편미분방정식의 수치 해를 얻기 위해 Fluent 6.3을 이용하여 3차원 전산모사를 하였다. Fig. 4는 팩의 자연대류 냉각 효과에 대한 해석을 위한 격자이고, Fig. 5는 팩의 강제대류 냉각 효과에 대한 해석을 위한 격자(mesh)이다. 고체영역의 격자는 정열 격자인 헥사 격자(hexahedral)로 구성을 하였고 유체영역의 격자는 비정열 격자인 테트라 격자(tetrahedral)를 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 대류가 일어나는 표면이나 유체와 고체의 경계면과 같이 온도의 구배가 큰 부분은 격자를 세밀하게, 그렇지 않은 영역에서는 성글게 조절하여 해석의 정밀도를 높여 주었다. 또한 공기의 유동의 변화가 큰 부분도 격

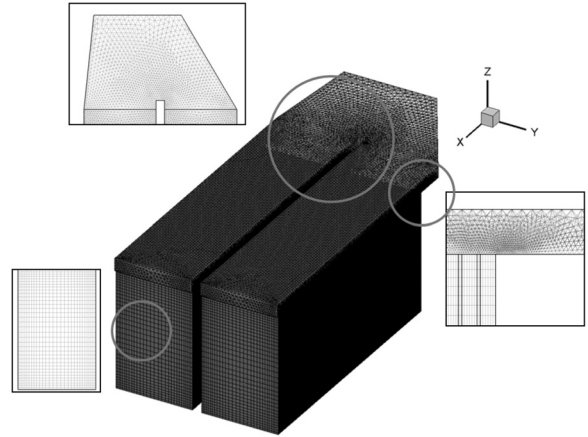


Fig. 4. Mesh of a battery pack without case(node : 966, 493).

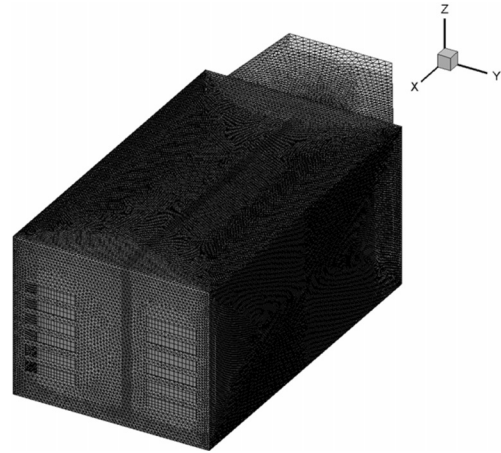


Fig. 5. Mesh of a battery pack with case(node : 1,325, 660).

자를 세밀하게 조절하였다.

## 3. 결과 및 토의

별도의 냉각을 해주지 않았을 경우에 전지 팩의 열적 거동을 알아보기 위하여 강제 대류가 아닌 자연대류의 조건에서 모델을 해보았다. Fig. 6은 자연대류 조건에서 2C-rate로 29분간 완전방전 한 후의 전지 팩의 온도분포 모델링 결과이다. (a)는 표면의 온도분포이며, (b)는 전지 팩 내부의 온도 분포를 보기 위한 온도 등위면이다. (a)에서는 X축으로 온도분포 차이가 Z축과 Y축에 비해 상대적으로 큰 것을 확인 할 수 있는데 X축으로 열전도도가 Z축과 Y축으로의 열전도도에 비해 낮고, 낮은 열전도도를 가지고 있는 Sink가 X축으로의 열전달을 방해하기 때문이다. (b)에서 보

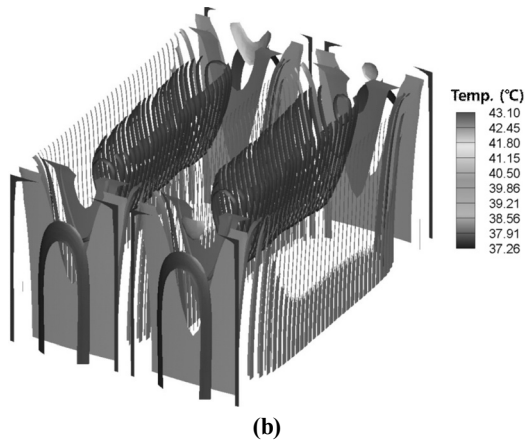
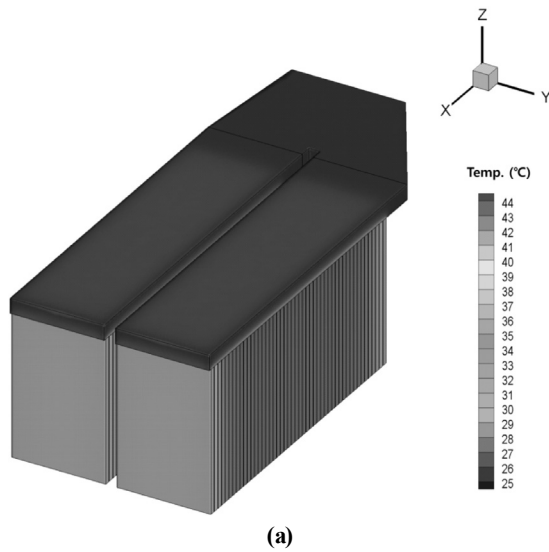


Fig. 6. (a) Temperature contours and (b) isothermal surfaces within the battery pack at discharge time of 29 min during discharge with 2C rate for the case of natural convection.

면 알 수 있듯이 최고 온도점이 중앙 윗부분에 위치하고 있다. 이는 전극판에서 생성된 전류가 음극에서 양극으로 흐르고 전도성 그리드를 따라 탭을 통하여 흘러나가기 때문에 탭이 위치한 윗부분에서 저항에 의한 열 발생량이 많기 때문이다. 온도의 균일성을 높이기 위해서는 탭이 위치한 윗부분의 냉각이 필요한 것을 알 수 있다.

공기를 이용한 강제대류시 전지 팩의 냉각 효과를 알아보기 위하여 26°C의 공기를 공기를 1.9 m/s의 속도로 강제대류 냉각시 전지 팩의 열적 거동을 알아보았다. 전지 팩의 온도 분포는 유동장이 어떻게 형성되느냐에 따라 크게 달라진다. Fig. 7은 Inflow에서 1.9 m/s

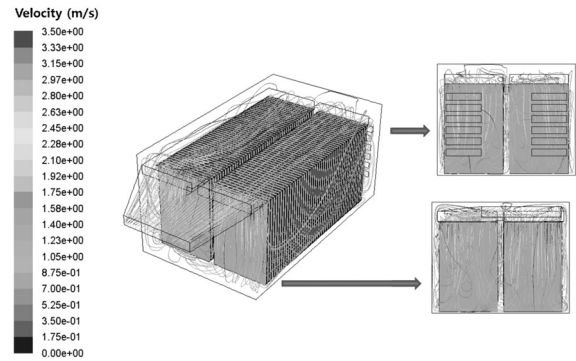


Fig. 7. Pathline of air for inlet flow velocity of 1.9 m/s.

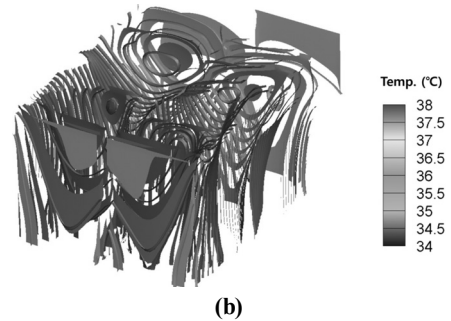
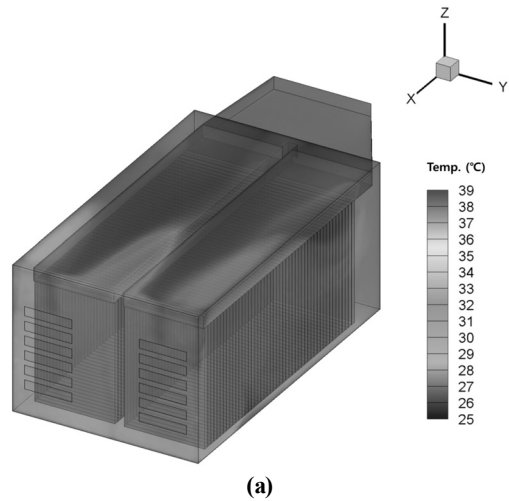


Fig. 8. (a) Temperature contours and (b) isothermal surfaces within the battery pack at discharge time of 29 min during discharge with 2C rate for the case of Forced convection with inlet velocity of 1.9m/s.

의 유입속도로 공기가 유입될 때의 유적선을 표시한 것이다. 그림을 보면 전지 팩의 앞면과 뒷면에서 상대적으로 유속이 빠르게 형성되어 냉각 효과가 가장 클 것으로 쉽게 예상 할 수 있다.

Fig. 8은 1.9 m/s의 유입속도로 공기가 유입될 때 2C-rate로 29분간 완전방전 한 후의 전지 팩의 온도

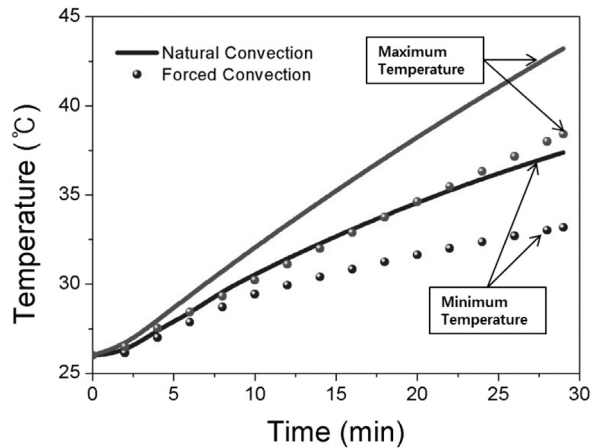


Fig. 9. Variation of minimum and maximum temperatures of battery pack.

분포 모델링 결과이다. (a)는 표면의 온도분포이며, (b)는 전지 팩내부의 온도 분포를 보기 위한 온도 등위면이다. Fig. 6의 자연대류 냉각 효과와 비교하여 전지 팩의 온도가 전체적으로 5-6°C가량 낮아지고, 최고 온도점이 중앙에서 Outlet쪽으로 이동이 된 것으로 보아 냉각의 효과가 있음을 확인 할 수 있다. 하지만 여전히 탭이 위치한 위쪽에 나타나는 것을 고려해 볼 때 냉각의 효율을 높이고 온도의 균일성을 높이기 위해서 냉각공기의 유입유량의 증가나 유로의 개선 등이 필요 할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 방전시간에 따른 전지 팩의 최소온도와 최고온도를 나타낸 그래프이다. Line은 자연대류 냉각의 결과이고 Symbol은 강제대류 냉각의 결과이다. 붉은 선은 최고온도이고, 파란 선은 최소온도이다. 방전시간이 증가함에 따라 열 소실량이 열 발생량을 따라가지 못해 전지 팩의 온도가 계속 상승하는 것을 볼 수 있다. 높은 C-rate나 높은 주변온도 등의 과도한 상태일 경우나 충·방전이 연속적으로 일어나는 상태일 경우에 별도의 냉각을 고려하지 않으면 위험하다는 것을 쉽게 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 리튬 이온 전지 팩 내의 열적 거동을 예측 할 수 있는 시뮬레이션을 개발하였다. 전지 내부의 전기화학적 반응에 의한 반응열과 전류의 흐름

과 내부저항에 의한 열을 고려하여 자연대류를 통한 냉각과 강제대류를 통한 냉각의 경우로 나누어 전지 팩의 열적 거동을 살펴보았다. 계산결과로부터 정성적으로 타당하게 해석 할 수 있음을 확인 하였다.

향후 실제 전지 팩의 실험결과와 본 연구와의 비교를 통해 신뢰성을 높일 예정이며, 공기의 유속, 온도 및 냉각 공기 유로의 변화에 따른 전지 팩 내의 온도분포를 개선하여 리튬 이온 전지 팩의 설계 및 열관리에 효과적으로 활용할 계획이다.

#### 감사의 글

본 연구는 EIG Ltd. 지원으로 수행되었으며, 지식경제부와 한국에너지기술평가원의 에너지·자원기술개발사업-효율향상분야 중대형과제인 “광역에너지 네트워크 최적화 및 통합관리 시스템 개발”과제(과제번호: 2007-E-ID25-P-02-0-000)의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 사용기호

$k$	kinetic energy per unit mass [J/kg]
$k_{eff}$	effective thermal conductivity [J/kg]
$k_{ij}$	thermal conductivity matrix [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$P$	Pressure [Pa]
$\dot{Q}$	heat-generation rate per volume of the cell [ $J/m^3 \cdot s$ ]
$\vec{v}$	velocity vector [m/s]

#### 그리스 문자

$\rho$ : density [ $kg/m^3$ ]

$\mu$ : viscosity coefficient [ $N \cdot s/m^2$ ]

$\varepsilon$ : Turbulent dissipation rate [ $m^2/s^3$ ]

$\tau$ : Stress tensor [Pa]

#### 참고문헌

1. Armand, M. 외: “Building better batteries”, Nature, Vol. 451, 652-657, (2008).
2. Balakrishnan, P.G. 외: “Safety mechanisms in lithium-ion batteries”, Journal of Power Sources, Vol. 155, 401-414, (2006).

3. Stewart, S. G. 외: "Modeling the Performance of Lithium-Ion Batteries and Capacitors during Hybrid-Electric-Vehicle Operation", *Journal of The Electrochemical society*, Vol. 155(9), A664-A671, (2008).
4. Spotnitz, R. 외: "Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 113, 81-100, (2003) => abuse.
5. Maleki, H., 외: "Thermal analysis and modeling of a notebook computer battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 115, 131-136, (2003).
6. Kizilel, R. 외: "An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs", *Journal of Power Sources*, Vol. 194, 1105-1112, (2003).
7. Bennett, C. O. and Myers, J.E.: "Momentum, Heat, and Mass Transfer", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, NY, (1982).
8. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.: "Transport Phenomena". John Wiley & Sons, Inc., NY, (1960).
9. Kwon, K. H. 외: "A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 163, 151-157, (2006).
10. Kim U. S. 외: "Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 182(2), 630-638, (2008).
11. Fluent V 6.3 User's Guide, Fluent Inc., (2006).