

## 전기자동차용 축전지의 열적 특성 모델링

윤창연 · 신치범<sup>†</sup> · 양철남\* · 박성용\* · S. V. Bereznoj\*\*

아주대학교 화학공학과

\*고등기술연구원

\*\*on leave from Physical Technical Department, St. Petersburg State Technical University, Russia  
(2000년 2월 22일 접수, 2000년 7월 3일 채택)

## Modeling of the Thermal Behavior of an Electric-Vehicle Battery

Chang-Yeon Yun, Chee Burm Shin<sup>†</sup>, Cheol-Nam Yang\*, Seong-Yong Park\* and S. V. Bereznoj\*\*

Dept. of Chem. Eng., Ajou University

\*Institute for Advanced Engineering

\*\*on leave from Physical Technical Department, St. Petersburg State Technical University, Russia  
(Received 22 February 2000; accepted 3 July 2000)

### 요 약

전기자동차용 축전지의 다양한 작동조건, 주변환경 및 설계인자들이 축전지의 열적 거동에 미치는 영향을 예측하기 위한 3차원 모델링을 수행하였다. 축전지의 열전도도는 각종 구성요소의 열전도저항이 직렬 및 병렬로 연결된 것으로 간주하였으며, 전극내에서 열이 균일하게 발생하는 것으로 가정하여 축전지의 열적 특성을 해석하였다. 작동 조건에 따른 최대 온도를 제시함으로써 축전지가 작동한계온도 범위 내에서 작동할 수 있는지를 판단할 수 있도록 하였다. 또한, 축전지의 특정부분의 표면온도를 측정하는 것만으로 내부의 최고 온도 예측을 가능하게 함으로써 축전지를 제어할 수 있는 기초자료로 사용할 수 있게 하였다. 본 연구의 결과는 전기자동차용 축전지의 최적 열관리 기술 개발에 효과적으로 활용될 수 있다.

**Abstract** – A three-dimensional modeling was carried out to investigate the effects of operating conditions, ambient conditions, and design factors on the thermal behavior of an electric-vehicle(EV) battery. 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 was assumed to be uniform throughout battery electrodes. The maximal temperatures within the battery at various operating conditions were calculated in order to check whether the operating temperature of the battery is within acceptable range. In addition, the relation between the surface temperature of the specific region and the maximal temperature of the battery interior was obtained so that the measurement of the surface temperature may be used to predict the maximal temperature of the interior. The results of this study may be useful for the optimal design of the thermal management system of an EV battery.

Key words: Modeling, Electric-Vehicle Battery, Thermal Behavior, Finite Element Method

### 1. 서 론

도시의 대기 오염문제가 심각해지면서 그 주된 요인인 자동차 배기가스에 대한 규제가 강화되고 있는 실정이다. 배기가스에 대한 규제로 가솔린 차량의 배기가스 중 HC, NO<sub>x</sub>, CO의 배출량을 기준 이하로 규제하는 LEV, ULEV를 도입하고 있고 미국 California주의 경우 2003년부터는 대미 수출물량의 10%를 무공해 차량(zero emission vehicle)으로 충당해야 한다는 대기 환경규제 법안[1]을 만드는 등 배기가스가 전혀 없는 전기 자동차의 도입을 선진국에서는 의무화하고 있는 실정이다. 초기의 EV(electric vehicle)에는 lead-acid 축전지가 널리 사용

되었으나 energy density가 약 35 Wh/kg으로 주행거리가 약 100-150 km 정도밖에 안 되는 단점을 보완하고자 최근에는 nickel/metal hydride(Ni/MH) 축전지가 널리 사용되고 있다. Ni/MH 축전지도 energy density가 67 Wh/kg 정도(주행거리 200-300 km)로 가솔린 차량의 1/4-1/3 정도밖에는 안되지만 Li-polymer 축전지를 EV에 사용하기에는 아직 어려운 점이 많기 때문에 2000년 초에 생산될 EV에는 Ni/MH 축전지가 적용될 것으로 예상되고 있다[2].

EV에는 좁은 공간에 많은 양의 축전지를 배치해야 하기 때문에 충·방전시 발생하는 열의 분산이 문제된다. 축전지의 성능은 내부온도에 영향을 받으며, 온도가 비정상적으로 분포될 경우 증발과 응축에 의하여 온도가 높은 부분에서 낮은 부분으로 전해질 중 물의 이동이 발생한다. 이러한 경우 단기적으로는 전극과 격리판의 건조에 의한 성능저

<sup>†</sup>E-mail: cbshin@madang.ajou.ac.kr

하를 예측할 수 있다. Ni/MH 축전지의 경우 lead-acid 축전지에 비하여 발열량이 훨씬 많기 때문에 보다 체계적인 열관리 기술이 요구되고 있다[3].

본 연구에서는 전기 자동차용 축전지의 열적 특성을 잘 표현해 줄 수 있는 simulation program 개발을 목표로 정하고, 그 첫 번째 단계로서 cell과 module에 관해서는 3차원 해석을 통해 Ni/MH 축전지 내부의 온도 분포를 예측하기 위한 수학적 모델을 제시하였다. 유한요소법에 근거하여 전산모사를 수행하였고, 전극 탭부분과 축전지의 최고온도간의 상관관계 그래프를 제시함으로써 전극 탭부분의 온도를 측정하는 것만으로도 축전지의 최고 온도를 예측할 수 있게 하였다.

## 2. 해석 모델

본 연구는 90Ah급 Ni/MH로 구성된 battery pack 내의 온도분포를 모사함으로써 제한된 공간 내에서 열의 분산을 최대화 할 수 있는 최적의 조건을 찾아낼 수 있도록 하는데 목적이 있다. 그 첫 단계로 single cell과 module에서는 정상상태에 어떠한 온도분포를 형성하게 되는지 알아보았다.

본 연구의 수학적 모델에 적용된 기본적인 가정은 다음과 같다.

- 축전지의 열전도도는 각종 구성 요소의 열전도지향이 직렬 및 병렬 연결된 것으로 간주하여 구한다.
- 전극 내에서 열이 균일하게 발생된다.
- Module의 경우 방열판에 의한 방열 효과가 고려되었다.

Fig. 1은 본 전산모사의 해석 대상으로 삼은 90 Ah급 Ni/MH cell의 개략도이다. Casing은 열전도도를 좋게 하기 위해서 SUS로 되어 있고 표면에는 단락(短絡)을 방지하기 위해서 내·외부 표면이 비닐로 코팅이 되어 있다. 그리고 내부에는 Fig. 1의 오른쪽에서 보듯이 여러 장의 양극판과 음극판이 중첩이 되어 있고 그 사이는 격리판에 의해서 분리되어 있다. 이런 복잡한 구조를 수치모사하기 위해서는 이 구조의 열전도 특성을 나타낼 수 있는 방법의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 전기 저항 등가식을 이용한 열전도 이론을 사용하여 축전지의 열적특성을 유한요소법에 근거하여 해석할 때 사용하는 유한 요소 격자(mesh)의 요소(element) 수를 줄일 수 있었다. 열의 전달은 온도 구배와 열전도

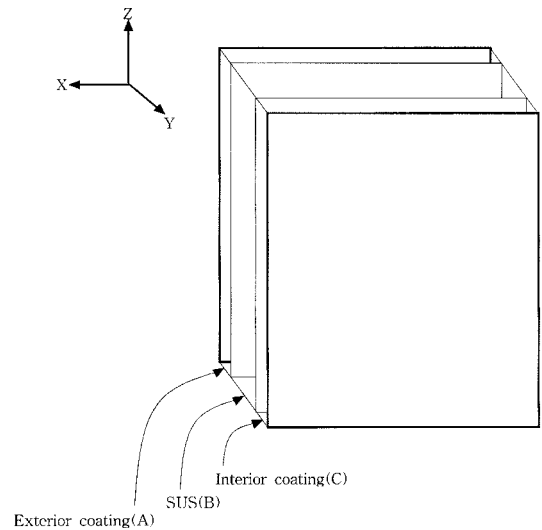


Fig. 2. Schematic of multilayer casing.

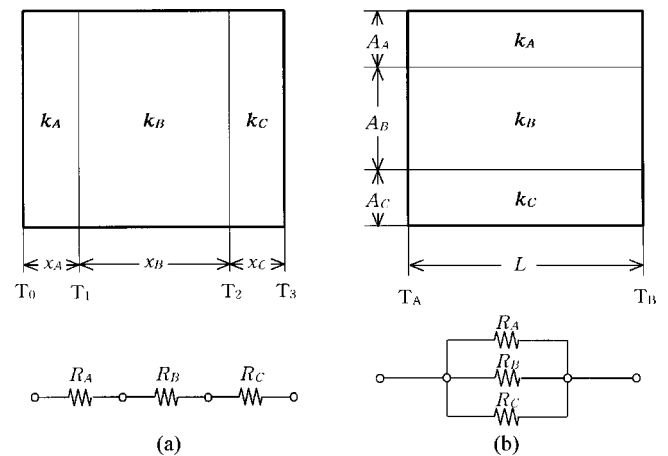


Fig. 3. Equivalent thermal resistance networks (a) for the serial resistances and (b) for the parallel resistances.

도에 정비례하고 두께에 반비례하므로 저항이론을 이용하여 전기 회로와 같은 방식으로 해석할 수 있다[4, 5]. Casing의 경우를 예로 들어보면 Fig. 2에서와 같이 열전도도가 각각의 축 방향에 따라 다르다는 것을 알 수 있다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 X, Z축의 경우에는 전기 저항이 병렬로 연결된 것으로 고려할 수 있고, Y축의 경우에는 직렬로 연결되어 있는 것으로 간주하고 계산하면 다음과 같은 식으로 각 축방향의 열전도도를 계산할 수 있다. 열저항과 전산 모사에 필요한 각 부분의 물성값들은 Table 1에 나타내었다.

<직렬 저항의 경우:  $k_Y$ >

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

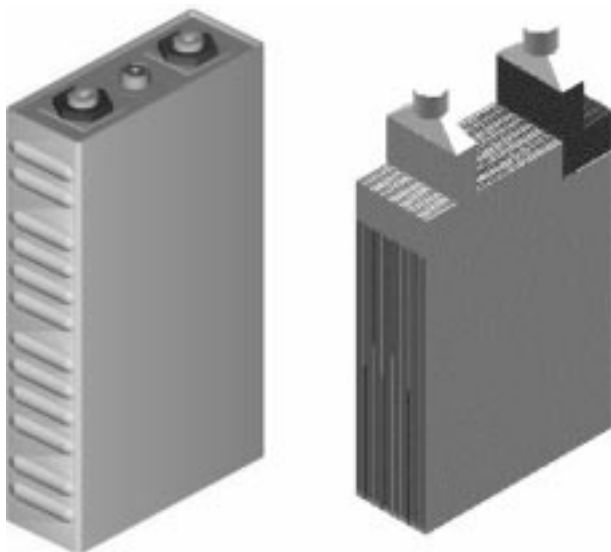
$$\frac{x}{k_Y} = \frac{x_A}{k_A} + \frac{x_B}{k_B} + \frac{x_C}{k_C} \quad (2)$$

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

<병렬 저항의 경우:  $k_X, k_Z$ >

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

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



Cell dimension : 9.55×3.55×17.5 [cm×cm×cm]

Fig. 1. Schematic diagram of a cell.

Table 1. Parameters used in calculations

	$\rho \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$	$C_p \left[ \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \right]$	$k \left[ \frac{\text{W}}{\text{cm} \cdot \text{K}} \right]$	References
• Tab	8.91	0.4605	$7.931 \times 10^{-1}$	9, 12
• Ni electrode	3.097	1.559	$2.028 \times 10^{-2}$	2, 9
• MH electrode	4.800	3.199	$1.634 \times 10^{-2}$	2, 9, 12
• Vent(Al)	2.70	0.9025	2.73	9
• H <sub>2</sub> (1 atm)	$8.974 \times 10^{-5}$	14.304	$1.722 \times 10^{-2}$	10, 11
• Separator	1.107	3.161	$5.323 \times 10^{-3}$	2, 9, 12
• Casing(SUS)	0.93	2.301	$3.287 \times 10^{-3}$	2, 9, 12
• Interior coating	1.35	1.674	$2.077 \times 10^{-3}$	2, 9, 12
• Exterior coating	8.027	0.502	$1.630 \times 10^{-1}$	2, 9

$$k_X(\text{or } k_Z) = \frac{A_A \cdot k_A + A_B \cdot k_B + A_C \cdot k_C}{A} \quad (6)$$

다음은 cell 및 module의 온도분포를 구하기 위하여 사용된 지배방정식이다.

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

위 식 (7)에서 열전도도를 나타내는 matrix  $k$ 와 전지 내부에서의 단위 부피당의 발열량을 나타내는  $\dot{Q}$ 는 다음과 같이 식으로 표현된다[6].

$$k = \begin{bmatrix} k_X & 0 & 0 \\ 0 & k_Y & 0 \\ 0 & 0 & k_Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{Q} = -\frac{1}{V_{cell}} \left[ \int_{V_a} a_a \cdot i_a \cdot U_a \cdot dV + \int_{V_c} a_c \cdot i_c \cdot U_c \cdot dV \right] - a_{cell} \cdot i_{app} \cdot V - \Delta H_{rxn} \cdot r \quad (9)$$

Cell을 여러 개를 직렬로 연결하여 12 V를 낼 수 있도록 만든 것을 module이라 부르는데 Fig. 4에 개략도를 나타내었다. Module에 사용된 지배 방정식은 cell의 경우와 동일하다. Fig. 4에서 보듯이 열의 효과적인 분산을 위해서 module의 양 끝면에는 방열판이 설치되어 있고 cell과 cell사이에는 4개의 세로로 가는 플라스틱 판을 끼워 넣음으로써 틈을 만들어 놓았다. 따라서 이 각각의 부분과 상·중·하 binding 부분에는 열전도도의 값을 바꾸어 줌으로써 그 효과를 충분히 나타내게 하였다. 이때 플라스틱 판에 의해서 생기는 홈에서의 공기의 유동은 홈이 1 mm로 상당히 좁기 때문에 이 부분에서의 열전도도는 laminar 영역에 있다는 가정으로 계산한 값을 사용하였다[7]. 나머지

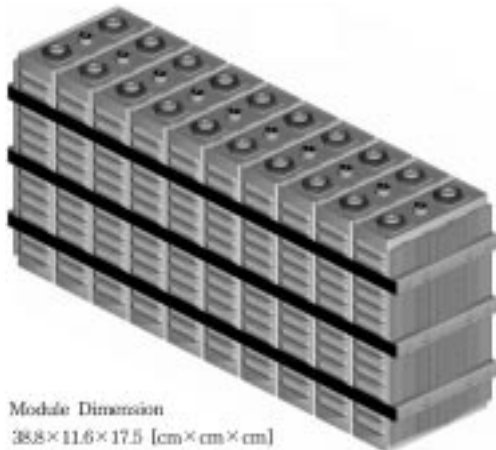


Fig. 4. Schematic diagram of a module.

부분에서의 열전도도는 앞에서와 마찬가지로 열저항 등가식으로부터 얻어진 값을 사용하였다.

### 3. 수치해석 방법

Fig. 5와 6에 본 전산모사의 해석 대상으로 삼은 90 Ah급 Ni/MH cell과 module의 유한 요소법 해석에 사용된 finite element mesh를 나타내었다. 지배방정식과 경계조건들을 만족시키는 해를 구하기 위하여 Galerkin 유한요소법이 사용되었고[8] cell의 경우 사용된 trilinear hexahedral element의 수는 2,968개이며 node의 수는 3,726개이다. Module의 경우는 symmetry를 이용하여 5 cell을 모사하고자 했으나 컴퓨터의 memory 용량의 한계로 인하여 3 cell을 모사하였다. Module에 사용된 element의 수는 10,008개이며 node 수는 11,586개이다.

그림에서 보는 바와 같이 표면이나 중간에 상이 바뀌는 부분같이 온도의 구배가 클 것이라고 예상되는 부분은 mesh를 세밀하게, 그렇지 않은 영역에서는 mesh를 성글게 조절하였다. 또한 cell과 cell사이에 플

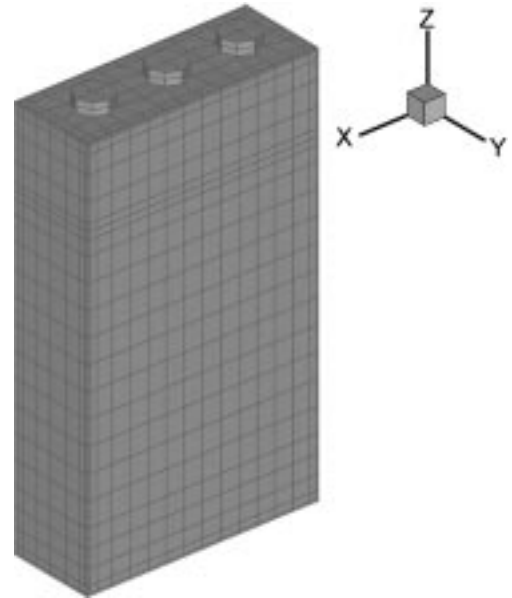


Fig. 5. Finite element mesh of a cell.

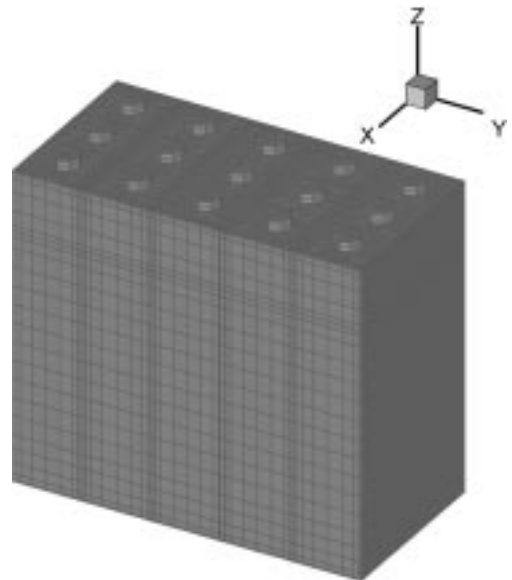


Fig. 6. Finite element mesh of a module.

라스틱 판에 의하여 형성되는 작은 홀들도 그 영향이 작지 않으므로 그 효과를 충분히 고려할 수 있도록 하였다. 계산은 SUN UltraSPARC 143 Workstation에서 수행하였으며, 소요되는 CPU time은 cell의 경우 1.5분, module의 경우 36분이었다.

#### 4. 결과 및 토의

Single cell을 전산모사하는데 필요한 기본적인 변수는 전극에서의 발열량과 축전지를 냉각시킬 외부 공기의 온도이다. 전극의 발열량은 축전지의 종류와 작업 조건에 따라서 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 식 (9)로부터 구한 1C로 방전할 때의 발열량을 기준( $\approx 0.01[\text{W}/\text{cm}^3]$ )으로 하되 좀더 가혹한 조건의 발열량도 함께 수행하였다. 그리고 대기의 온도는 계절에 따라 차이가 크므로  $20^\circ\text{C}$ 를 기준 온도로 하되  $10^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ 의 경우도 고려하여 전산모사를 실시하였다. 이때 사용된 축전지 외부표면에서의 대류 열전달 계수값은  $0.0005[\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}]$ 이다[9].

Fig. 7에서는 주어진 조건하에서 정상상태에 도달했을 때의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 축전지의 최고온도는 전극판이 모여있는 중앙 하단부에서 형성되는 것을 볼 수 있다. 그리고 cell의 상부에서는 수소기체의 영향을 받아 전도도가 좋은 전극탭을 따라 상부로 열이 전달됨을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 한 cell 내에서 각 축방향으로 온도 구배가 어떻게 형성되는지를 잘 나타내 준다. (a)의 경우는 X축 방향으로의 온도구배를 나타낸 것이다. 좌우의 양극과 음극의 물질이 서로 다르기 때문에 수치적으로는 약간의 차이를 보이나 대칭을 이루었고 그 차이는 무시할 만하였다. Y축 방향의 온도구배를 나타낸 (b)의 경우는 정확히 좌우 대칭을 이루었고, Z축 방향인 (c)에서는 수소기체의 영향을 받아서 5.5 cm 부근에서 최고 온도를 형성하였고 전극이 끝나는 지점인 13.4 cm 부근에서는 상이 바뀌면서 심한 온도 변화를 보였다.

Table 2는 발열량이 0.01, 0.02, 0.04  $\text{W}/\text{cm}^3$ 일 때 주변 유체의 온도가 각각 10, 20,  $30^\circ\text{C}$ 인 경우 cell 내의 최고 최저 온도값이 어떻게 형성되는지를 나타낸 것이다. 발열량이 낮은 경우에는 대기중에서 작동시켜도 성능저하없이 사용할 수 있지만 발열량이 큰 경우에는 single cell 일지라도 별도의 냉각을 고려해 주지 않으면 위험하다는 것을 쉽게 예측할 수 있다.

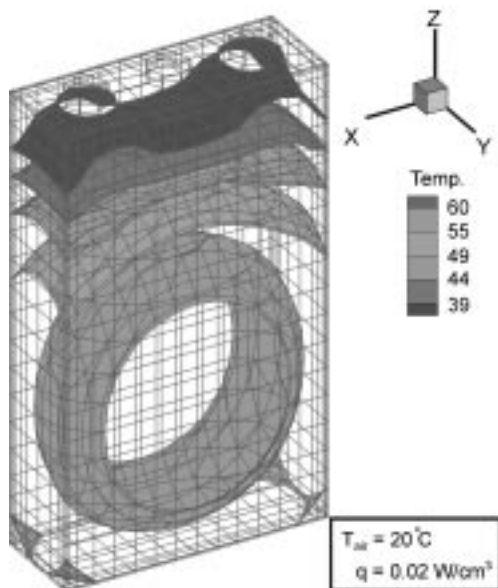


Fig. 7. Isothermal surfaces distributions at steady state.

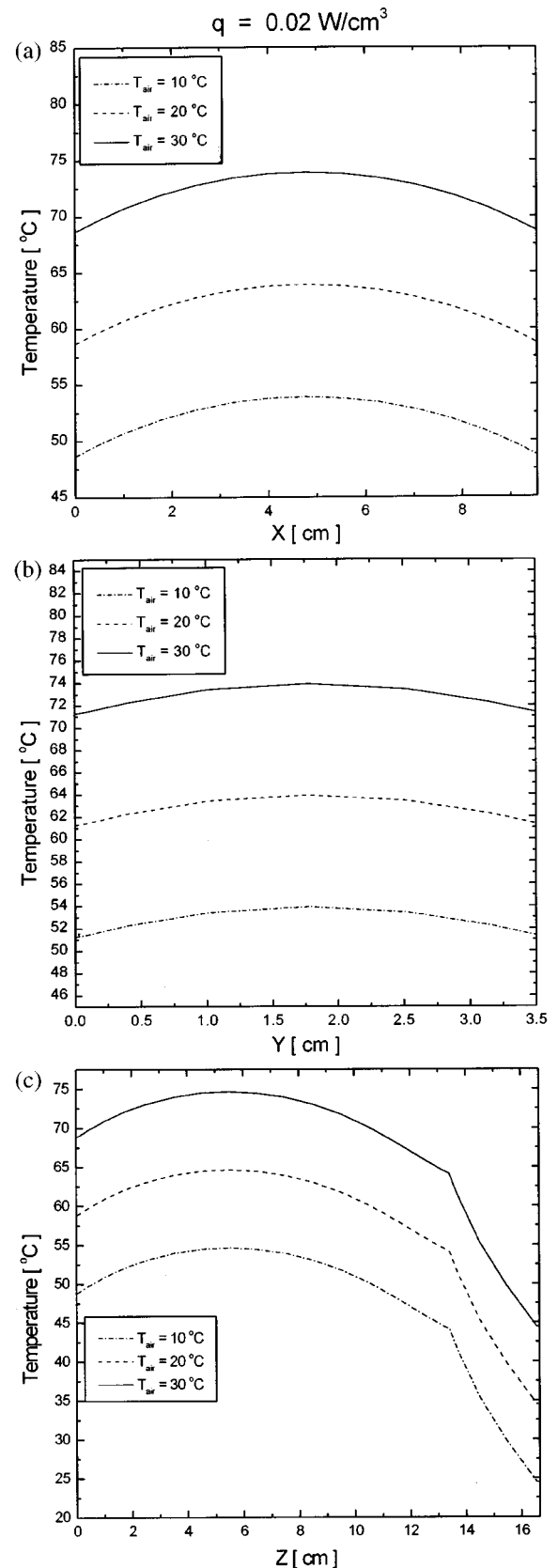
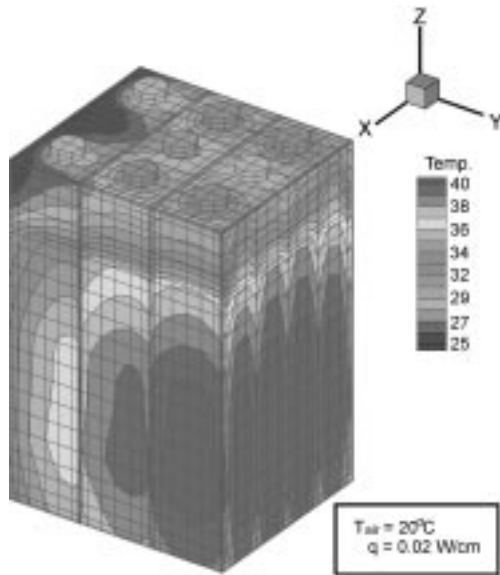


Fig. 8. Isothermal surfaces and temperature distributions along x, y and z directions in a Ni/MH cell.

Module의 경우도 single cell의 경우와 마찬가지로  $0.01[\text{W}/\text{cm}^3]$ ,  $20^\circ\text{C}$ 를 기준으로 온도와 발열량을 바꾸어 가며 전산모사를 수행하였다. 특히

**Table 2. Maximal and minimal temperatures of a cell for various heat generation rates and air temperatures**

Heat generation rate[W/cm <sup>3</sup> ]	Air temperature [°C]	Max. temperature of a cell[°C]	Min. temperature of a cell[°C]
q=0.01	T=10	32.3	17.2
	T=20	41.0	27.2
	T=30	52.3	37.2
q=0.02	T=10	54.6	24.3
	T=20	64.6	34.3
	T=30	74.6	44.3
q=0.04	T=10	99.3	38.7
	T=20	109.3	48.7
	T=30	119.3	58.7

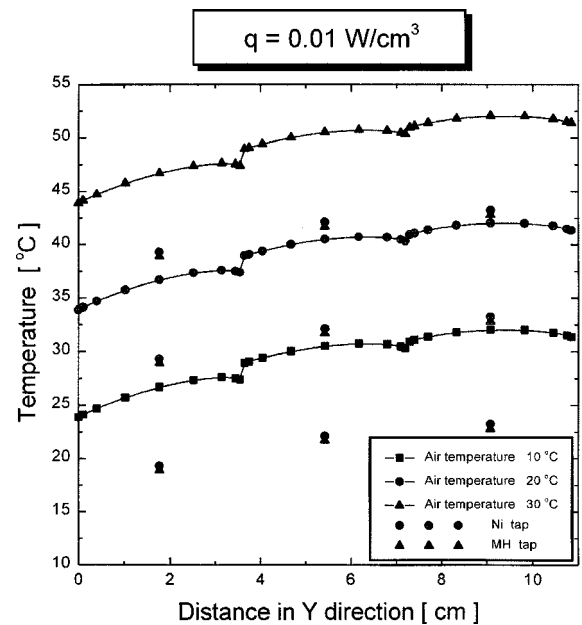
**Fig. 9. Surface temperature distribution of a module at steady state.**

module의 경우 양쪽 끝에 달린 방열판과 cell과 cell사이에 완충을 위하여 사용되는 플라스틱 판 때문에 형성되는 홀이 전체 온도분포도에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서도 살펴보았다.

Fig. 9는 발열량이 0.01[W/cm<sup>3</sup>], 유체온도 20 °C인 경우 정상상태에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 먼저 방열판의 효과를 살펴보면, Fig. 9에서 보는 바와 같이 좌측에 부착되어 있는 방열판은 두 번째 cell까지는 온도 분포도에 상당한 영향을 주는 것으로 나타났고 세 번째 cell까지는 약하게 영향을 미치나 네 번째 cell부터는 그리 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 실제로 module에서 최고 온도점은 다섯, 여섯 번째 cell에서 나타나는 것을 고려해 볼 때 현 방열판의 위치는 적합하지 않다는 것을 알 수 있다. 온도의 균일성을 높이기 위해서는 별도의 방법이 도입되어야 할 것으로 판단된다.

다음으로 플라스틱 판에 의해서 형성되는 홀의 효과를 살펴보면, 비록 1 mm 밖에 안되는 작은 홀이지만 그 틈을 통해 배출되는 열량은 작지 않음을 알 수 있다. Fig. 9에서 우측면이 등온선이 등심원을 형성하지 않고 상당히 뾰족날쭉한 것을 볼 수 있는데, 이는 플라스틱 판에서는 열전달이 더딘 반면에 홀에서는 자연대류에 의해서 열이 빠져나가기 때문이다. 또한 Fig. 9에서 cell과 cell사이에서 온도 구배가 형성되는 정도를 보고도 그 효과의 정도를 알아 볼 수 있다.

축전지의 온도가 작동 온도 범위를 넘어가지 않게 유지시키려면 축전지내부의 최고 온도를 측정해야 한다. 그런데 불행히도 최고 높은 온

**Fig. 10. Maximum temperature distributions along Y axis and corresponding temperature of tabs.**

도가 형성되는 지점은 전지의 내부, 중앙 하단부이다. 이 부분은 cell의 내부이기 때문에 온도 측정이 거의 불가능하다. 따라서 cell의 내부 온도의 측정 대신에 외부의 특정 부분의 온도를 thermistor를 이용하여 측정함으로써 내부에 형성되는 최고온도를 유추할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 외부의 온도를 측정하는 부분은 cell의 case 중앙 하단부나 전극 탭부분이 선정될 수 있다. 본 연구에서는 전극 탭부분의 온도와 최고 온도가 존재하는 지점의 Y축 방향의 온도 분포를 Fig. 10과 같이 도시함으로써 탭부분의 온도나 특정부위의 표면온도를 측정하는 것만으로 module내에서의 최고 온도 분포를 예측할 수 있도록 하였다. 이 자료는 축전지의 과충전과 급 방전시 단시간내에 많은 양의 발열로 인해 작동온도 범위를 넘어설 경우 축전지의 수명 저하가 야기되지 않도록 축전지를 제어할 수 있는 기초자료로 사용될 수 있다.

## 5. 결 론

전기자동차용 축전지의 열적 거동을 예측하기 위하여 cell 및 module 해석을 위한 simulation program이 개발되었다. Cell과 module의 경우는 3차원 유한요소법이 사용되었으며, 축전지의 열적 특성을 충분히 나타내면서 계산에 사용되는 유한 요소의 수를 줄이기 위하여 각종 축전지 구성요소의 열전도 저항이 직렬 및 병렬로 연결된 것으로 간주하였다. 이러한 해석을 통하여 축전지의 충·방전율과 같은 작동조건과 주변의 공기 온도와 같은 인자들이 축전지의 열적 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 다양한 작동 조건에 따른 최대·최소 온도를 제시함으로써 cell이 작동한계온도 범위내에서 작동하는지 여부를 판단할 수 있도록 하였으며, 필요에 따라 별도의 냉각장치의 부착여부를 고려할 수 있게 하였다. 또한, 측정하기 힘든 전지 내부의 최고온도를 탭 부근처럼 측정이 용이한 외부의 특정부분의 온도만을 측정함으로써 축전지에서의 최고온도를 예측할 수 있게 하여 온도제어에 필요한 기초자료로 이용할 수 있게 하였다. 또한 실험에 사용한 module에서 방열판의 위치는 열을 효과적으로 제거해주는 하나 최고온도가 module 중앙부분에 형성되는 것으로 고려해볼 때 열의 분산에는 그 위치가 적합하지 않음을 알 수 있었다. 이 연구의 결과는 전기 자동차용 축전지의 최적 열관리 기술 개발에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감 사

본 연구는 산업자원부의 G7 전기자동차 개발사업분야 중 “차량 및 시스템 기술 개발”과제 사업으로 지원되었습니다. 저자 중 S. V. Bereznoj는 '99 러시아 및 동구권 과학 기술자 유치사업(99러유06-016)에 의하여 아주대학교에서의 체재비를 지원받았습니다.

## 사용기호

$A$	: heat-transfer area [ $\text{m}^2$ ]
$a_a$	: interfacial area of solid-phase particles per unit volume of porous anode [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]
$a_c$	: interfacial area of solid-phase particles per unit volume of porous cathode [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]
$a_{cell}$	: geometric electrode surface area per unit volume of cell [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]
$C_p$	: cell heat capacity at constant pressure [ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ]
$i_a$	: local interfacial current per unit area of solid-phase particle for anode [ $\text{A/m}^2$ ]
$i_c$	: local interfacial current per unit area of solid-phase particle for cathode [ $\text{A/m}^2$ ]
$i_{app}$	: applied cell current per unit area of projected electrode [ $\text{A/m}^2$ ]
$k_i$	: thermal conductivity along $i$ -direction( $i=x, y, z$ ) [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ]
$\dot{Q}$	: heat-generation rate per volume of the cell [ $\text{J/m}^3 \cdot \text{s}$ ]
$r$	: reaction rate per unit volume of the cell [ $\text{mol/m}^3 \cdot \text{s}$ ]
$U_a$	: local enthalpy potential of anode [V]
$U_c$	: local enthalpy potential of cathode [V]
$V$	: cell potential [V]
$V_{cell}$	: volume of the cell [ $\text{m}^3$ ]

## 그리스 문자

$\Delta H_{rxn}$	: heat of reaction, $-2.89 \times 10^5$ [J/mol]
$\rho$	: cell density [ $\text{kg/m}^3$ ]

## 하첨자

$a$	: anode
$c$	: cathode
$x$	: x-direction
$y$	: y-direction
$z$	: z-direction

## 참고문헌

1. California Air Resource Board: “Low-Emission Vehicles/Clean Fuels and New Gasoline Specifications-Progress Report,” (1989).
2. Crompton, T. R.: “Battery Reference Book,” Butterworths, London(1990).
3. Wu, M. S., Wang, Y. Y. and Wan, C. C.: *J. of Power Sources*, **74**, 202 (1998).
4. Bennett, C. O. and Myers, J. E.: “Momentum, Heat, and Mass Transfer,” 3rd ed., McGraw-Hill, New York, NY(1982).
5. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.: “Transport Phenomena,” John Wiley & Sons, Inc., New York(1960).
6. Botte, G. G., Johnson, B. A. and White, R. E.: *J. Electrochem. Soc.*, **146**(3), 914(1999).
7. Gartling, D. K.: *Comput. methods Appl. Mech. Engrg.*, **12**, 365(1977).
8. Hughes, T. J. R.: “The Finite Element Method,” Prentice-Hall, New Jersey, NJ(1987).
9. Perry, R. H.: “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook,” 6th ed., McGraw-Hill, New York, NY(1984).
10. Welty, J. R., Wicks, C. E. and Wilson, R. E.: “Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer,” 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, NY(1984).
11. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, R. E.: “The Properties of Gases and Liquids,” 4th ed., McGraw-Hill, New York, NY(1987).
12. Dean, J. A.: “Lange’s Handbook of Chemistry,” 13th ed., McGraw-Hill, New York, NY(1973).