

전기자동차용 Ni/MH 전지 Module의 열관리기술

김 준 범

울산대학교 화학공학과

(1997년 9월 20일 접수, 1997년 11월 20일 채택)

Thermal Management of a Ni/MH Battery Module for Electric Vehicle

Junbom Kim

Department of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received September 20, 1997, Accepted November 20, 1997)

요 약 : 전기자동차의 동력원으로 사용되는 90Ah급 Nickel/Metal hydride 전지 11개로 구성된 module의 온도특성을 상용 software인 NISA II를 사용하여 해석하였다. 전지 module에 대한 element수를 감축하기 위하여 열전도도가 다른 여러 층을 통하여 전달되는 열흐름에 대한 해석을 전기저항 등가식을 사용하여 단순화하였으며, Cartesian coordinate의 축별로 다른 열전도도를 삽입하는 orthotropic model을 사용하였다. 전지 module의 온도를 낮추기 위하여 알루미늄 재질의 cooling fin을 전지와 전지사이에 삽입하여 실험을 수행하였고, 전지 module 최외곽에 위치한 fin에 의한 최고온도의 강하 효과는 미미하다는 결과를 얻었다. 전지 module내 전지별 온도차이를 극소화하기 위하여 cooling fin의 개수와 두께, 그리고 측면 fin의 복합적인 영향에 대한 실험을 수행하였으며, 1mm 두께의 알루미늄 fin을 4개 사용하여 module내 전지별 최고온도의 차이를 3°C 이내로 줄일 수 있었다.

Abstract : Temperature distribution of battery module consists of 11 batteries of 90Ah rate is analyzed using commercial software NISA II. Equivalent thermal resistance network is used to reduce the number of element in calculating heat transfer through a medium composed of several different thermal conductivity layers. Orthotropic model is used to put different thermal conductivity values according to Cartesian coordinate. Aluminum cooling fins are inserted in the middle of batteries to reduce battery module temperature. The cooling fin at the end of the module does not necessary in reducing maximum temperature. Combined effect of front and side cooling fin is analyzed to reduce the temperature difference among batteries. The maximum temperature difference among batteries is reduced within 3°C when 4 aluminum cooling fin of 1mm thickness is inserted in battery module.

1. 서 론

대도시 대기 오염의 주원인인 자동차 배기가스의 저감방안은 시급한 과제로 대두되고 있으며, 그 한 예로 대기 오염수치의 상승에 따른 주의보 및 경보 발령이 빈번해지는 것을 들 수 있다. 미국 California주의 대기 환경규제법안에 따라 2003년부터는 대미 수출물량의 10%를 무공해 차량(zero emission vehicle)으로 충당하여야 하며[1], 여타의 주에서도 이에 상응한 규제를 마련 중에 있다. 전기 자동차는 전지, 컨트롤러, 모터를 이용한 단순한 구조로 이루어져 있어 유지와 보수가 간편하다는 장점이 있다[2~4].

전지는 전기 자동차의 성능을 좌우하는 주요 요소이며 가격도 고가이므로 전지의 온도 관리를 통한 성능유지 방안은 중요하다. 이동용 전원인 전지와 연료전지의 적정온도 유지는 작동

시 발생하는 열을 관리할 수 있는 시스템의 설계를 통하여 이루어질 수 있다. 시스템을 model화하여 온도분포를 산정하는 열관리 설계는 1960년대에 Gidaspow와 Baker에 의하여 시도되었으며[5], Lee와 Christianson은 전기자동차에 장착되는 nickel/iron 전지의 3차원 model에 의한 열관리 설계를 하였고[6], Cho와 Halpert는 lithium 1차 전지의 정상상태와 극한 운전상태에 대한 열관리 설계를 수행하였다[7]. Baumann과 Bolwin은 alkaline hydrogen/oxygen 연료전지의 초기 시동시의 온도분포와 냉각 시스템 오작동시의 온도분포 산정을 통하여 안전한 재시동 방법을 제시하였다[8].

본 연구에서는 90Ah급 nickel/metal hydride(Ni/MH) 전지 11개로 구성된 전지 module의 온도거동을 상용 software인 NISA II를 사용하여 해석하였다. Module 구성요소의 수를 줄이기 위한 방법으로 전기저항 등가식을 이용한 열전도 이론을 사용하

여 요소의 수를 대폭적으로 줄일 수 있었다. 구성요소의 열전도도는 Cartesian coordinate의 각 축에 따라 다른 값을 갖는 orthotropic model을 사용하였다[9]. 급속 충전과 방전시에 발생할 수 있는 전지의 비정상적인 온도 상승을 방지하기 위하여 전지와 전지 사이에 비중이 적고 열전도도가 높은 알루미늄 재질의 cooling fin을 삽입하였다. 이와 같은 passive cooling 방법은 extra energy를 소모하지 않는 매우 효율적인 방법이라 할 수 있다. 중심부 전지의 온도 강하를 위하여 측면에도 cooling fin을 삽입하고 온도 거동을 관찰하였다. 전지 module의 온도 저감대책과 아울러 module내 전지간 온도 편차를 최소화하기 위하여 전지 사이의 cooling fin 개수와 측면 fin의 복합적인 영향에 대해서도 실험을 수행하였다.

2. 이론적 연구

2.1 Number of element reduction

전기자동차의 동력원으로 사용되는 Ni/MH 전지 1개를 구성 요소별로 세분화할 경우 72,000개의 element가 생성되었다. 본 연구에서는 전지 11개를 일렬로 배치한 module에 대하여 실험을 수행하였다. Module의 중심부를 열 대칭면으로 채택하여도 전체 element의 수는 396,000개에 달하여 실험 용량을 초과하는 문제점이 발생한다. 이의 해결을 위하여 전지 구성부품중 인접한 요소를 통합하는 방법을 사용하였다. 열전도도가 다른 3개층을 통하여 열이 전달될 경우를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 Q는 열량, λ는 열전도도, T는 온도, L은 두께를 나타내며, R은 전기회로로 변환하였을 경우의 저항을 나타낸다. 열의 전달은 온도 차이와 열전도도에 정비례하고 두께에 반비례하므로 저항 이론을 이용하여 다음과 같은 전기회로로 해석할 수 있다[10~13].

$$Q = \frac{\Delta T \cdot \lambda}{L} = \frac{\Delta T}{R} \tag{1}$$

각 층을 통과하는 열의 양은 동일하므로 다음의 식 (2)가 성립한다.

$$Q = \frac{T_0 - T_1}{R_1} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} = \frac{T_2 - T_3}{R_3} \tag{2}$$

여기에서 $R_1 = \frac{L_1}{\lambda_1}$, $R_2 = \frac{L_2}{\lambda_2}$, $R_3 = \frac{L_3}{\lambda_3}$ 이다.

Fig. 1의 전기회로에서 볼 수 있는 바와 같이 전체 저항은 개개 저항의 합이므로 다음의 식 (3)이 성립한다.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \tag{3}$$

Fig. 1의 3개층에 대한 직렬 평균 열전도도(λ)는 식 (2)와 (3)을 이용하여 구할 수 있으며 결론식은 다음의 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{L}{\lambda} &= \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} \\ &= \frac{L_1 \lambda_2 \lambda_3 + L_2 \lambda_1 \lambda_3 + L_3 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \\ &= \frac{(L_1 + L_2 + L_3)(L_1 \lambda_2 \lambda_3 + L_2 \lambda_1 \lambda_3 + L_3 \lambda_1 \lambda_2)}{(L_1 + L_2 + L_3) \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \end{aligned}$$

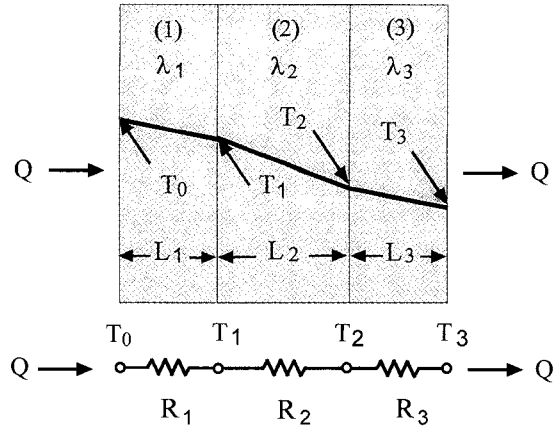


Fig. 1. Series type equivalent thermal resistance network.

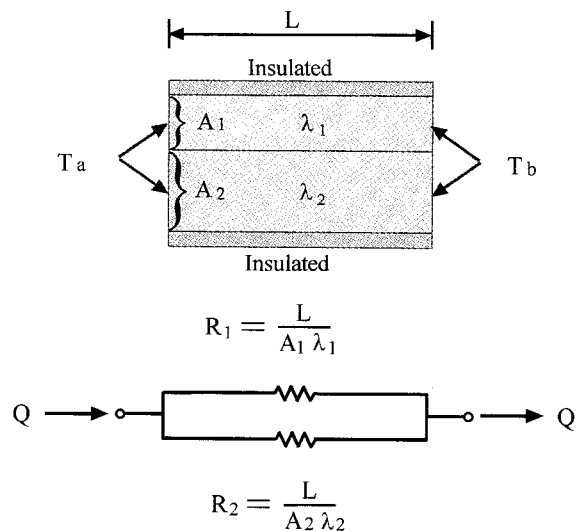


Fig. 2. Parallel type equivalent thermal resistance network.

$$\lambda = \frac{(L_1 + L_2 + L_3) \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{L_1 \lambda_2 \lambda_3 + L_2 \lambda_1 \lambda_3 + L_3 \lambda_1 \lambda_2} \tag{4}$$

Fig. 2에는 열전도도가 다른 2개층 각각을 통하여 열이 전달되는 경우를 나타내었으며, 이는 전기회로의 병렬저항 연결로 해석할 수 있다. 이 경우의 열이동량은 열전도체의 단면적에 정비례하므로 다음 식 (5)와 같은 저항등가식이 성립한다.

$$R = \frac{L}{A\lambda} \tag{5}$$

여기에서 A는 열전도체의 단면적이다. 저항의 병렬 연결은 다음의 식 (6)으로 해석할 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{6}$$

Fig. 2의 2개층에 대한 병렬 평균 열전도도(λ)는 식 (5)와 (6)

Table 1. Thermal Conductivity of Battery Component (Isotropic model)

Material	$\lambda \left[\frac{W}{cm \cdot K} \right]$	References
Nickel electrode	2.028×10^{-2}	14,15,16,17,18
Metal hydride electrode	1.634×10^{-2}	18,19
Separator	5.323×10^{-3}	14,17,18,19,20
Nickel tab	7.831×10^{-1}	18,19
Inside vinyl	3.287×10^{-3}	18,19
Outside vinyl	2.077×10^{-3}	18
Case	1.630×10^{-1}	18,19
KOH (30wt%)	5.665×10^{-3}	14,18,19
Hydrogen (1atm)	1.722×10^{-3}	18,19,21,22
Aluminum cooling fin	2.221	18,19

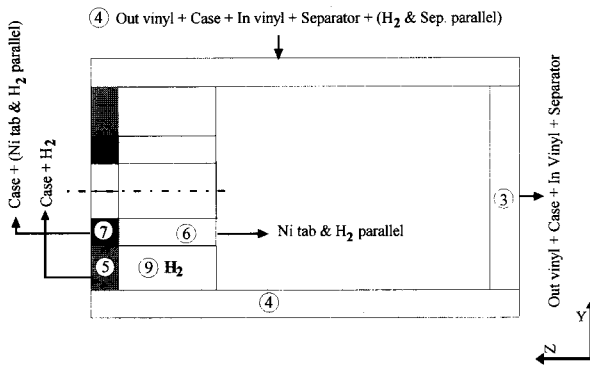


Fig. 3. Schematic diagram of battery (yz-axis).

을 이용하여 구할 수 있으며 결론식은 다음의 식 (7)과 같다.

$$\frac{A\lambda}{L} = \frac{A_1\lambda_1}{L} + \frac{A_2\lambda_2}{L}$$

$$A\lambda = A_1\lambda_1 + A_2\lambda_2$$

$$\lambda = \frac{A_1\lambda_1 + A_2\lambda_2}{A} \tag{7}$$

전지 구성부품의 요소 통합 이전의 열전도도를 Table 1에 나타내었다. 전지 극판과 평행한 방향의 단면을 Fig. 3에 나타내었으며 두께가 얇은 요소를 위주로 통합을 실시하였다. 전지의 옆면인 ④번의 y축방향 열이동에 대한 열전도도의 산정은 다음과 같이 수행하였다. 전극을 감싸고 있는 격리판 봉투와 여타 공간의 수소는 병렬저항이고, 이를 격리판, 내부비닐, case 및 외부비닐과 직렬저항으로 연결하여 평균 열전도도를 산정하였다. ④번 요소의 x 및 z축 방향의 열전도도의 계산은 y축 방향 계산시의 직렬은 병렬로, 병렬은 직렬저항으로 변환하여 산정하면 된다. 전지 극판과 수직인 방향의 단면을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에는 전지 구성요소의 반을 나타낸 것이므로, 11개 전지로 구성된 module을 열 대칭면을 이용하여 한쪽만을 계산할 경우 element의 수는 Fig. 4의 경우에 11배가 된다. 전지 밑

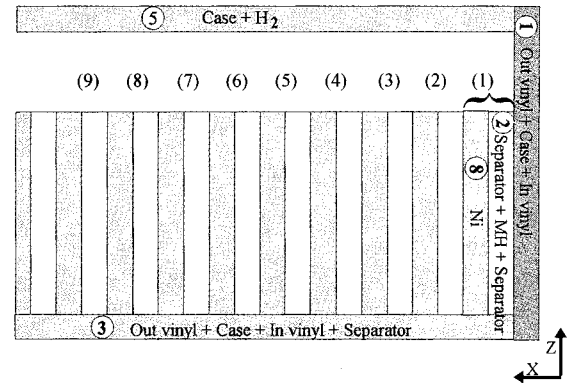


Fig. 4. Schematic diagram of battery (xz-axis).

부분의 ③번 요소의 계산은 Fig. 3의 경우와 동일하다.

2.2 Governing equation

전지 내부에서는 전도에 의한 열흐름 방식을, 전지와 외부기체와의 계면에서는 대류에 의한 방식을 채택하였다. 전도에 의한 열전달에서 각 방향에 다른 열전도도가 달라 orthotropic model을 사용하여야 하므로 다음 식 (8)의 미분형 에너지수지식을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q = 0 \tag{8}$$

위의 식에서 x, y, z는 Cartesian coordinate의 축이고, λ_x , λ_y , λ_z 는 각 방향에 대한 열전도도이며, q 는 열발생량이다. 계면에서의 대류에 의한 열전달은 다음의 식 (9)를 사용하였다.

$$q = h (T_s - T_f) \tag{9}$$

여기에서 q 는 단위면적당의 열흐름량이고, h 는 대류 열전달계수이다. T_s 는 전지 최외곽 요소의 온도이며, T_f 는 외부기체 즉 공기의 온도를 나타내고 있다.

3. 결 과

3.1 전지 구성요소의 element 통합

전지 구성요소의 element수 감축을 위하여 전기저항 등가이론을 이용하여 산정한 각 element의 x, y, z 방향별 열전도도를 Table 2에 나타내었다. 전산모사 실험의 기본조건으로는 대류 열전달계수가 $0.01[W/cm^2 \cdot K]$ 이고, 니켈 전극의 열발생량은 $0.1[W/cm^3]$ 이며, 외부대기의 온도는 $25^\circ C$ 로 가정한 수치를 NISA II에 대입하여 배터리 내부온도를 산정하였다. Fig. 4에 보여준 전지 부분에 대하여 유한요소법을 적용하였으며 element수에 따른 전지의 최고온도와 최저온도를 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 전지 1/2개에 대하여 36,000개의 element를 사용하고 열전도도가 방향축에 무관한 isotropic model을 사용하였을 경우의 최고온도는 $63.55^\circ C$ 이고 최저온도는 $27.40^\circ C$ 이었다. Element를 11,600개로 통합한 후, 즉 개수를 1/3로 줄인 후 열전도도를 isotropic으로 사용한 경우의 최고온도는 $71.99^\circ C$ 로

Table 2. Thermal Conductivity of Battery Component (Orthotropic model)

Element	Thermal conductivity (circuit analyzed) [$\frac{W}{cm \cdot K}$]		
	x-direction	y-direction	z-direction
①	6.219×10^{-3}	9.887×10^{-2}	9.887×10^{-2}
②	8.480×10^{-3}	9.526×10^{-3}	9.526×10^{-3}
③	6.354×10^{-2}	6.354×10^{-2}	5.391×10^{-3}
④	2.762×10^{-2}	5.386×10^{-3}	2.762×10^{-2}
⑤	1.454×10^{-2}	1.454×10^{-2}	1.869×10^{-3}
⑥	1.991×10^{-3}	1.076×10^{-1}	1.076×10^{-1}
⑦	1.120×10^{-1}	1.120×10^{-1}	1.106×10^{-1}
⑧	2.028×10^{-2}	2.028×10^{-2}	2.028×10^{-2}
⑨	1.722×10^{-3}	1.722×10^{-3}	1.722×10^{-3}
⑩	2.221	2.221	2.221

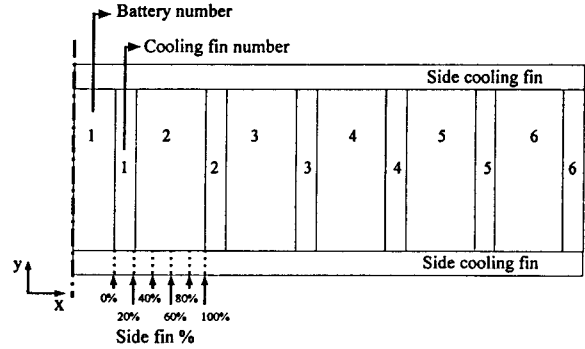


Fig. 6. Cooling fin location in battery module.

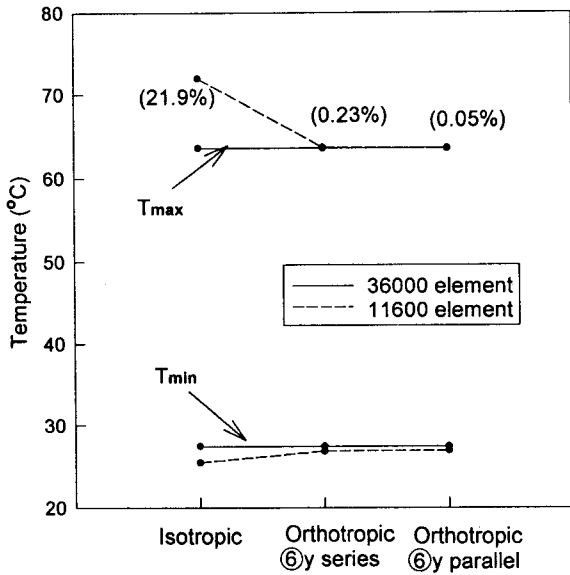


Fig. 5. Temperature difference between isotropic and orthotropic model.

실제 경우와 21.9%의 오차가 발생하여 사용이 곤란함을 알 수 있다. Element 개수를 1/3로 줄인 후 방향에 따른 열전도도를 각각 삽입하여 orthotropic model로 산정하였을 경우의 최고 온도는 63.53°C로 실제 경우와 0.05%의 오차로 거의 동일하므로 향후 온도분포 산정의 기준 모델로 선정하였다. Fig. 3의 ⑥번 요소의 y축방향 열전도도를 직렬저항으로 잘못 대입하였을 경우의 최고온도는 63.64°C로 0.23% 오차를 보였다. 이로부터 Fig. 3과 4의 각 영역에 대한 방향별 열전도도에 다른 수치가 삽입될 경우 실제의 온도분포와의 오차가 커짐을 알 수 있었다. Element의 수를 11,600개로 통합하였을 때의 최저온도는 실제 경우와 비교하였을 때 0.53°C의 차이를 보여 최고온도보다는 정확도가 떨어지는 결과를 얻었으나 본 연구의 목적은 전지 내부 최고

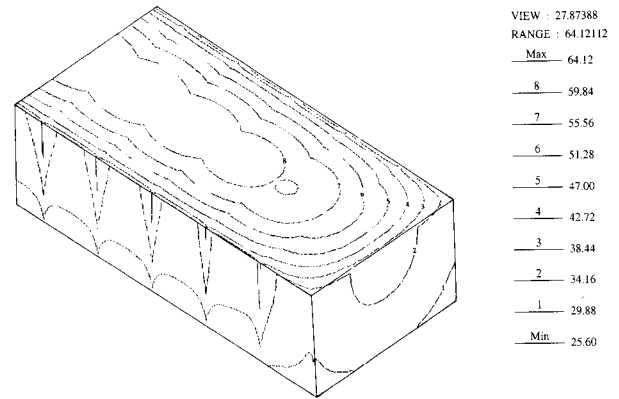


Fig. 7. Temperature contour plot of battery module (No fin).

온도의 저감이므로 orthotropic model의 사용에는 문제가 없었다.

3.2 전지 사이의 cooling fin의 영향

전지 11개로 구성된 module은 가운데 전지를 기준으로 좌우 대칭이므로 중심선을 기준으로 한쪽에 대해서 model을 적용하였으며 이를 Fig. 6에 나타내었다. 전지와 cooling fin의 number는 중심부의 것을 1번으로 외곽의 것을 6번으로 지정하였다. 전지의 열방출을 증진시키기 위한 방안으로 전지 측면부에도 cooling fin을 넣어 시험하였다. 실험시 주위 대기 온도는 25°C이고, 니켈 전극의 열발생량은 0.1[W/cm³]이며, 대류열전달 계수는 0.01[W/cm²·K]를 기본 조건으로 설정하였다.

측면 fin은 제외하고 전지와 전지 사이에 알루미늄 재질의 cooling fin을 삽입한 경우를 실험하였다. Fin을 사용하지 않은 경우의 온도등고선은 Fig. 7에 나타내었고, 1mm 두께의 알루미늄 cooling fin 5개를 전지 사이에 삽입한 경우의 온도등고선은 Fig. 8에 나타내었다. 최고온도가 발생하는 지점인 전지 높이의 중간부분을 절단하여 module 내부의 온도분포를 관찰하였다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 fin이 없는 경우에는 module의 중심에 위치한 1번 전지의 최고온도가 가장 높았고 외곽에 위치한 전지일수록 온도가 낮았다. 이로부터 Fig. 6의 1번 전지에서 발생한 열은 x축 방향으로 방출되기 어렵다는 것을 알 수 있으며, 따라서 y 및 z축 방향으로의 열방출을 용이하게 하기 위하여 cooling fin이 사용되었다. Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 fin을 5개 사용하였을 경우에 module내 온도분포가 전반적으로 낮아졌으며 fin을 사용하지 않은 경우보다 최고

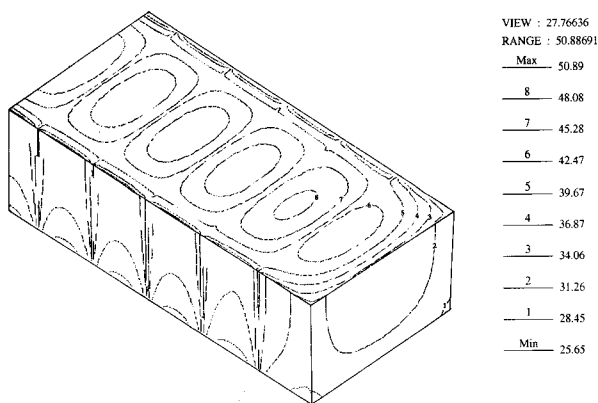


Fig. 8. Temperature contour plot of battery module. (5 aluminum fin of 1mm thickness)

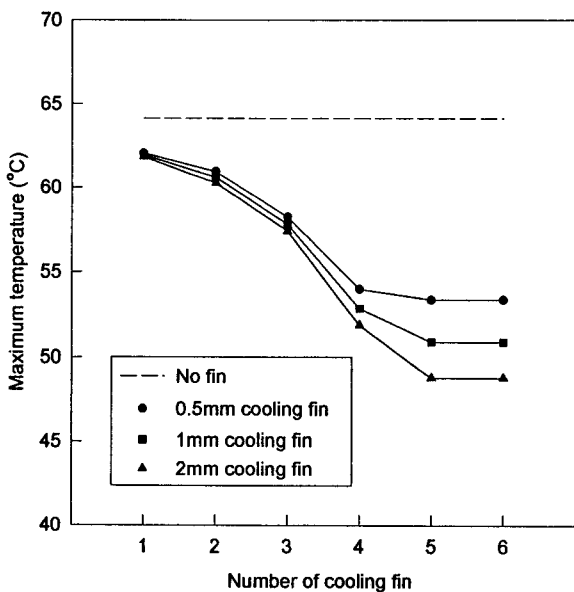


Fig. 9. Effect of cooling fin number and thickness on maximum temperature of battery module.

온도가 13°C 가량 저하되었다.

Cooling fin의 개수와 두께에 따른 module내 최고온도를 Fig. 9에 나타내었다. Cooling fin이 없는 경우의 전지 최고온도는 64.12°C이었다. Cooling fin의 개수를 증가시킬수록 전지 최고온도의 수치는 감소하였으며 1mm 두께의 fin을 5개 사용하였을 경우 최고온도를 50.89°C까지 강하시킬 수 있었다. 3가지 두께의 cooling fin의 경우 모두 5개의 fin과 6개의 fin의 온도 결과가 거의 동일하였다. 따라서 전지 module 최외곽의 fin에 의한 최고온도의 강하 효과는 거의 없다는 결론을 얻을 수 있었다. Fin의 두께가 0.5mm인 경우에는 5번 fin의 추가에 따른 온도강하가 0.62°C로 그 효과가 다소 미미하였다. Fin의 개수를 증가 시킴에 따른 온도강하 효과는 4번 fin의 경우가 가장 우수하였다. Fin의 두께를 증가시킬수록 절대온도 수치는 강하하였으나 부피증가에 비교한 온도강하 효과는 감소하였다.

0.5mm 두께의 cooling fin을 사용하였을 경우의 module내

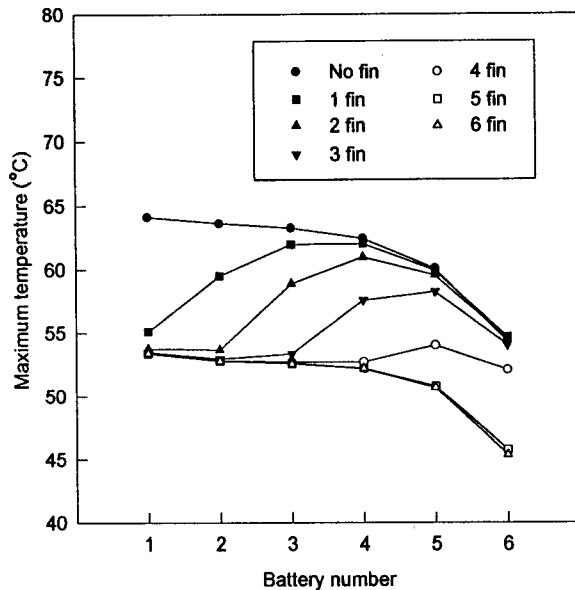


Fig. 10. Maximum temperature of battery on module (0.5mm cooling fin).

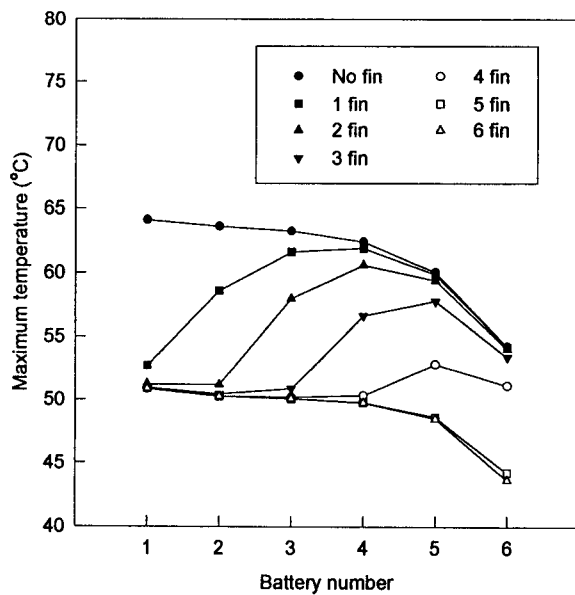


Fig. 11. Maximum temperature of battery on module (1mm cooling fin).

전지별 최고온도의 수치를 Fig. 10에 나타내었다. 5~6개의 fin을 사용한 경우가 전지의 온도는 가장 낮았으나 6번 전지의 온도가 1번 전지보다 8.04°C 낮아 전지별 성능차이를 유발시킬 요인이 있다. 최고온도의 차이면에서는 4개의 fin을 삽입하였을 경우가 전지별 온도차이가 1.92°C로 줄어서 성능균등화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 1mm 두께의 cooling fin을 사용하였을 경우의 module내 전지별 최고온도의 수치를 Fig. 11에 나타내었다. 6개의 fin을 사용한 경우 전지별 최고온도의 차이는 7.26°C로 0.5mm fin의 경우보다 감소하였으나 4개의 fin을 사용한 경우의 전지별 최고온도의 차이는 2.64°C로 증가하였다.

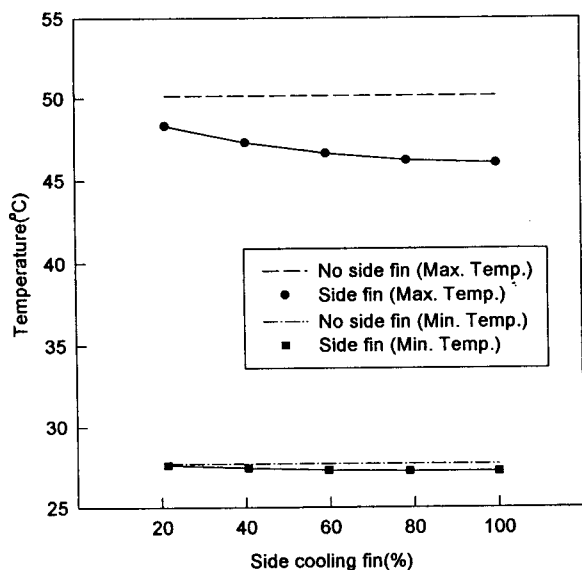


Fig. 12. Effect of side cooling fin size on battery temperature.

1 mm 두께의 fin을 1개 사용한 경우에 1번과 2번 전지의 온도를 상당부분 낮출 수 있었다. 1 mm 두께의 fin을 3개 사용한 경우와 같이 fin을 좌우에 갖고 있는 전지는 fin이 없는 경우보다 10°C 이상의 온도강하 효과를 얻을 수 있었다. Fin을 5개 사용한 경우와 6개 사용한 경우의 최고온도는 거의 동일하지만 5번과 6번 전지의 온도분포는 fin을 6개 사용한 경우가 다소 낮게 나타났다. Module내 최고온도 수치의 저감책도 중요하지만 높은 온도를 나타내는 영역의 부피 축소도 이에 못지 않게 중요하다 하는 것을 알 수 있다. 전지 module의 온도저감을 위해서는 두꺼운 cooling fin을 사용하는 것이 유리하고, cooling fin의 위치에 따른 fin의 두께를 조절하여 전지별 최고온도의 차이를 축소시킬 수 있을 것이다.

3.3 측면 cooling fin의 영향

Cooling fin이 전지 측면을 덮는 정도에 따른 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fin은 1 mm 두께의 것을 사용하였으며, 측면 fin의 크기는 Fig. 6의 하부에 %의 단위를 이용하여 나타내었다. 전지의 측면도 fin으로 100% 덮었을 경우 4°C 정도의 온도강하 효과를 더 얻을 수 있었다. 20%의 측면 fin을 사용하였을 경우도 2°C 정도 최고온도가 감소하여 fin 부피증가에 비교한 온도강하 효과는 우수하였다. 측면 fin에 의한 전지내 최저온도의 강하는 0.5°C 이하로 미미하였다.

전지 사이의 전면 fin의 개수와 측면 fin의 복합적인 관계를 시험하였으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. X축에는 전지 사이의 전면 fin의 개수를 나타내었다. Fig. 13의 case 1은 전지 사이의 전면 fin의 개수에 대하여 측면 fin을 100% 사용한 경우이고, case 2는 전면 fin의 개수와는 별개로 1번부터 6번 전지까지 측면 fin을 100% 사용한 경우이다. 전면 fin 1개에 대하여 측면 fin을 100% 사용한 경우가 전면 fin 1개만 사용한 경우보다 최고온도는 0.21°C 감소하였고 1번과 2번 전지의 고온 영역은 다소 줄었으나 3~6번 전지의 온도분포의 저감에는 거의 영향을 미치지 못하였다. 전면 fin 5개에 대하여 측면 fin을 100%

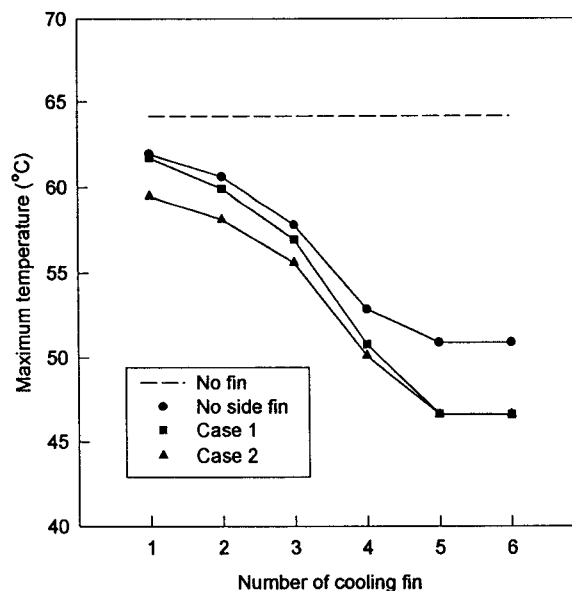


Fig. 13. Effect of cooling fin location on maximum temperature of battery module.

% 사용한 경우에는 전면 fin만 5개 사용한 경우보다 최고온도는 4.23°C나 대폭 감소하였고 전반적인 온도영역도 저온으로 형성된 결과를 얻을 수 있었다. 전면 fin의 개수가 3개 이하인 경우에는 module 측면을 fin으로 전부 덮은 것이 온도강하 효과가 다소 높았다. 전면 fin의 개수가 4~6개인 경우에는 전면 fin 개수에 대하여 측면을 덮은 것이 측면을 전부 덮은 것과 최고온도가 비슷하였다. 전지 module내 최고온도의 저하를 위해서는 4개 이상의 전면 fin을 사용하는 것이 효과가 크므로 전면 fin의 개수에 대하여 측면 fin을 삽입하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

4. 결 론

- 1) 열전도에 대한 전기저항 증가식을 사용하여 전지 module내 요소의 수를 396,000개에서 127,600개로 대폭 감축할 수 있었으며 99.95% 이상의 신뢰도 있는 orthotropic model을 구축하였다.
- 2) Module내 전지 사이마다 1mm 두께의 알루미늄 cooling fin을 삽입하여 13°C 정도의 온도강하 효과를 산출할 수 있었으며, 적어도 4개 이상의 fin을 사용하는 것이 온도강하에 유리할 것으로 사료된다.
- 3) Module의 최외곽 cooling fin에 의한 최고온도의 강하 효과는 극히 미미하였으므로 이를 제거하여도 무방할 것으로 사료된다.
- 4) Module내 전지별 성능을 비슷하게 유지하기 위해서는 온도의 균등화가 이루어져야 하며, 1mm 두께의 알루미늄 cooling fin을 4개 사용하였을 경우 전지별 최고온도의 차이를 3°C 이내로 줄일 수 있었다.
- 5) 전지 사이의 전면 cooling fin 이외에도 측면에 fin을 설치하여 4°C 정도의 온도강하 효과를 더 얻을 수 있었다. 전면 fin의 개수에 대하여 측면을 fin으로 덮는 것이 온도강하 효과에

대한 에너지 밀도의 관점에서 유리할 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 통상산업부에서 시행한 G7 차세대자동차 기술개발 사업비 지원에 의해 수행된 결과이며, 자동차부품연구원과 현대자동차 중앙연구소에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. California Air Resource Board, "Low-Emission Vehicles/Clean Fuels and New Gasoline Specifications-Progress Report", (1989).
2. E. H. Wakefield, "History of the Electric Automobile", Society of Automobile Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, (1994).
3. B. Bates, "Electric Vehicles : a Decade of Transition", Society of Automobile Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, (1992).
4. L. E. Unnewehr and S. A. Nasar, "Electric Vehicle Technology", John Wiley & Sons, Inc., New York (1982).
5. D. Gidaspow and B. S. Baker, *AIChE*, **11**, 825 (1965).
6. J. Lee, K. W. Choi, N. P. Yao, and C. C. Christianson, *J. of the Electrochem. Soc.*, **133**, 1287 (1986).
7. Y. I. Cho and H. Frank, and G. Halpert, *J. of Power Sources*, **21**, 183 (1987).
8. A. Baumann, S. Hauff, and K. Bolwin, *J. of Power Sources*, **36**, 185 (1991).
9. "Verification Manuals for NISA II Numerically Integrated Elements for System Analysis", Engineering Mechanics Research Corporation, Troy, Michigan (1996).
10. M. N. Özisik, "Heat Transfer", McGraw-Hill, New York (1985).
11. I. R. Welty, R. E. Wilson, and C. E. Wicks, "Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer", 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1976).
12. C. O. Bennett, and J. E. Myers, "Momentum, Heat, and Mass Transfer", 3rd ed., McGraw-Hill, New York (1982).
13. R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, "Transport Phenomena", Wiley International ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1960).
14. S. U. Falk and A. J. Salkind, "Alkaline Storage Batteries", John Wiley & Sons, Inc., New York (1969).
15. J. Fellner, Personal communication, Wrightpeterson Airforce Base, Dayton, Ohio.
16. J. P. Zagrodnik, Personal communication, Johnson Controls Advanced Battery Group, Inc., Butler, Wisconsin.
17. H. S. Lim, Personal communication, Hughes Aircraft Co., Los Angeles, California.
18. R. H. Perry and C. H. Chilton, "Chemical Engineers Handbook", 5th ed., McGraw-Hill, New York (1973).
19. J. A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", 13th ed., McGraw-Hill, New York. (1985).
20. R. C. Weast, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 1st student ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida (1988).
21. C. A. Schaffer, *I&EC*, **50**, 1585 (1958).
22. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, and B. E. Polling, "The Properties of Gases and Liquids", 4th ed., McGraw-Hill, New York (1987).