

공기 유동에 따른 Ni-MH 배터리 모듈의 효과적인 냉각에 관한 연구

안치영 · 김태신[†] · 김준범*

울산대학교 생명화학공학부, [†]세방전지

(2011년 11월 17일 접수 : 2011년 11월 28일 채택)

Study for Effective Cooling of Ni-MH Battery Module Using Forced Air Flow

Chiyeong Ahn, Taesin Kim[†], and Junbom Kim*

School of Chemical Engineering & Bioengineering, University of Ulsan, Daehak-ro 102, Nam-gu, Ulsan 680-749, Korea
[†]Sebang Global Battery Co.,Ltd. 500-5 Hanam-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 506-250, Korea

(Received November 17, 2011 : Accepted November 28, 2011)

초 록

본 연구에서는 10개의 배터리로 구성된 모듈에 대한 열관리 전산모사를 수행하였다. 배터리의 구조를 단순화 하였고, 전기저항 등가식을 이용한 열전도 이론을 사용하였다. 2.6 mm의 좁은 배터리 사이의 간격에 대한 격자의 신뢰도 검증 실험을 진행하였고, 그 결과 배터리 사이에 최소 3개 이상 나누어진 격자의 형태가 필요하였다. 크게 모듈의 후면에서 공기가 유입되는 형태, 모듈의 상부에서 공기가 유입되는 형태 그리고 모듈의 하부에 공기가 유입되는 형태로 나누어 팬과 공기흡입구의 위치에 따른 모듈의 효과적인 냉각방법을 모색하였다. 배터리의 성능에 영향을 미치는 모듈의 최고온도와 배터리간의 온도 차이를 비교하였고, 공기의 유속을 비교하여 유체의 거동을 확인하였다. 모듈의 하부에서 공기가 유입되는 경우, 40.27°C로 가장 낮은 최고온도를 보였고, 모듈의 상부에서 공기가 유입되는 경우에 0.73°C로 가장 적은 온도편차를 보였다.

Abstract : In this study, computational simulation was performed for thermal management of modules consisting of 10 batteries. Simplified structure and equivalent thermal resistance network was applied to maintain the thermal properties. Verification test of the mesh were in progress to ensure the reliability of 2.6 mm in the narrow gap between the battery, resulting in at least three divided mesh between the shape of the grid was required. Type of air from rear of the module, type of air from top of the module and type of air from bottom of the module were applied and effective cooling methods are discussed based on the location of fan and air intake of the modules. Maximum temperature and temperature differences of modules that directly affect the performance of the module were compared, and also behavior of the fluid was confirmed by comparing the air flow. The best maximum temperature is shown type of air from bottom of the module to 40.27°C and type of air from top of the module shows smallest temperature difference 0.73°C.

Keywords : Ni-MH, Thermal management, Cooling methode, Hybrid vehicle, Forced convection

*E-mail: jbkim@ulsan.ac.kr

1. 서 론

최근 에너지의 사용량이 증가함에 따라 에너지 저장장치에 대한 관심이 커지고 있다. 그 중 리튬 이온(Li-ion) 배터리나 니켈메탈하이드라이드(Nickel metal hydride; Ni-MH) 배터리와 같은 이차전지는 일차전지와 달리 여러 차례 충전과 방전이 가능하기 때문에 에너지 효율 높아 각광받는 에너지 저장장치이다.¹⁻⁵⁾ 그러나 이차전지는 충전과 방전시에 많은 열이 발생하고, 모듈 및 팩의 형태로 조립을 할 경우에 열 발생량의 합은 더욱 커진다.⁶⁻⁸⁾ 특히 급속 충전과 높은 방전율이 반복되는 경우, 배터리의 물성은 온도에 크게 의존하므로 성능과 직접적으로 연관되며, 이러한 열을 효과적으로 냉각하지 못할 경우, 배터리의 수명이 단축된다.^{9,10)} 니켈메탈하이드라이드 배터리는 하이브리드 승용차 또는 버스의 에너지 보조원으로, 그 응용분야가 다양하며 연구가 많이 진행되고 있다.^{9,11)} 배터리 모듈을 차량에 탑재하였을 경우, 하이브리드 자동차의 특성 및 차량 운전자의 운전습관에 따라 배터리의 열 발생량이 다르다.^{10,11)} 이러한 열을 효과적으로 관리하기 위해서는 배터리의 팩에 팬을 장착하여 공기의 강제순환 방법 등이 사용된다.¹²⁾

본 연구에서는 팬과 공기 흡입구의 위치를 변경하는 방법을 통해 3차원의 모듈화 된 팩을 효과적으로 냉각시키는 방법을 구현하였다.

2. 실 험

본 연구에서는 하이브리드 승용차에 에너지 보조원으로 쓰이는 10개의 니켈메탈하이드라이드로 이루어진 배터리 모듈을 하나의 팩으로 하여 전산모사를 진행하였다.

2.1. 조건 설정

본 연구에 적용된 Ni-MH 배터리는 100 Ah 급이고, 폴리페닐렌옥사이드(PPO)로 제작된 케이스에 니켈 전극과 메탈하이드라이드 전극이 폴리프로필렌(PP)으로 제작

된 분리막을 경계로 여러 차례 적층되어있는 구조이다. 전해질로 수산화칼륨(KOH)이 사용되었고, 방전시 부반응으로 생성되는 수소 또한 해석에 고려하였다. 효과적인 시뮬레이션을 위해 각 배터리를 구성하고 있는 물질을 단순화 하였고 단순화 된 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 그러나 이러한 단순화는 실제 배터리의 열 흐름 거동과 다른 모습을 보일 수 있다. 그러므로 실제와 유사한 현상규명을 위해 구조는 단순화 하면서, 열성분과 관련된 물성은 유지하기 위하여 전기저항 등가식을 이용한 열전도 이론을 사용하였다.¹³⁾ 이 열전도 이론을 사용하면 배터리의 형상이 모든 방향으로 동일한 길이를 가진 형태가 아니므로 방향에 따라 다른 열전도도를 갖는다. 따라서 실제 해석에서는 x, y, 및 z 방향으로 모두 다른 물성을 갖는 직교이방성 모델을 적용하였고 각 방향에 따른 열전도도를 Table 1에 나타내었다. Fig. 1의 넘버링은 Table 1의 열적 특성을 가진다. Fig. 1(a)는 배터리의 전

Table 1. Calculated thermal conductivity for orthotropic model

Materials	Thermal conductivity(10 ⁻³ W/cm·K)		
	x-direction	y-direction	z-direction
① C _b + KOH	2.965	2.965	2.543
② 2S + ME + 2S	9.164	9.164	2.876
③ C _b + 2S	2.153	2.128	2.153
④ C _b + S + H ₂ + S	2.187	2.187	2.179
⑤ C _b	2.200	2.200	2.200
⑥ MTH	48.14	48.14	1.830
⑦ NTH	45.26	45.26	1.823
⑧ Steel	162.7	162.7	162.7
⑨ Hydrogen(H ₂)	1.722	1.722	1.722
⑩ Ni electrode	24.67	24.67	24.67

C_b = battery case, S = Separator, ME = MH electrode, MTH = Tap of MH electrode with hydrogen, NTH = Tap of Ni electrode with hydrogen

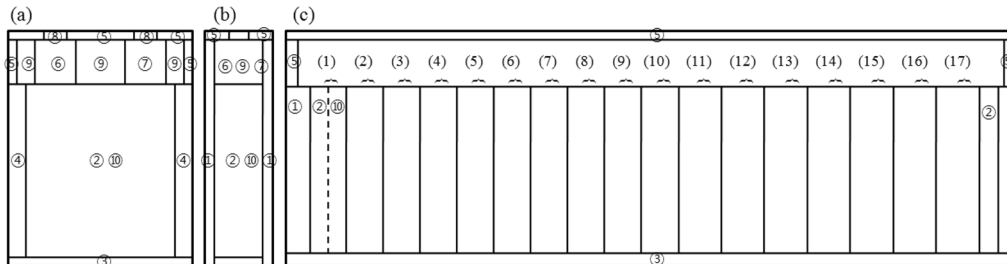


Fig. 1. Simplified structure of unit nickel metal hydride battery.

면을 나타내었고, Fig. 1의 (b)와 (c)는 배터리의 측면을 나타내었다. Fig. 1(c)는 배터리에 적층된 17장의 전극을 확대하여 나타낸 형태이다. 각 배터리의 발열원은 극주로 가정하였고, 발열량은 아래 식(1)에 의해 계산되었다.

$$Q = E_{rh} + H_d + E_J \quad (1)$$

여기서 E_{rh} 는 가역 열 효과(Reversible heat effect), H_d 는 Ni-MH 전극 내부의 수소해리열, E_J 는 배터리 내부의 줄효과(Joule effect)를 나타낸다. 계산 결과 각 극주에 적용되는 발열량은 각각 53455 W/m^3 이며, 이 때 방전률은 10 C rate 이고 5분 동안 방전하는 가혹조건이다.

배터리 사이의 격자 신뢰도 평가에는 Fig. 1에 표시한 단위 전지 두 개를 사용하였고, 두 배터리의 간격은 실제 모듈에서의 간격인 2.6 mm 로 동일하게 구성하였다. 이와 같은 좁은 간격에서 적은 격자수로 신뢰도 있는 공기의 유동을 나타내기 위해 배터리 사이의 요소 해석을 실행하였다. 해석에는 사용된 유체는 $26.85^\circ\text{C}(300 \text{ K})$ 의 공기로 가정하였다. 배터리는 $0.3 \times 0.156 \times 0.191 \text{ m}^3$ 의 시스템에서 일정 유속의 공기로 냉각을 유도하여 배터리 사이의 유동을 확인하였고, 유동에 따른 유속의 벡터 분포와 최고온도 분포를 바탕으로 본 연구에 사용할 배터리 사이의 최소 격자수를 설정하였다. 배터리 사이는 한 칸부터 다섯 칸까지 나누어 해석을 진행하였다.

모듈 냉각의 해석에 사용된 단순화된 형상은 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 배터리는 총 10개가 적용되었고, 순서대로 넘버링(1~10)을 하였다. 배터리 모듈의 냉각에 필요한 팬은 상용 축류 팬을 적용했으며 모듈을 감싸고 있는 배터리 하우징 팩에는 경우에 따라 1개 또는 2개가 적용되었다. 팬의 목표 유량은 $45 \text{ m}^3/\text{h}$ 이고 배터리 내부의 공기를 외부로 내보낸다. 분당 회전 속도는 2500 rpm 이며, 작동 가능 온도는 $-10 \sim 70^\circ\text{C}$ 이다. 팬은 일정 유량으로 공기를 강제 순환하지 않고 주위 압력에 의해 순환 유량이 결정된다. 따라서 이러한 성질을 적용하기 위해 팬의 경계조건은 압력과 유량과의 관계를 나타

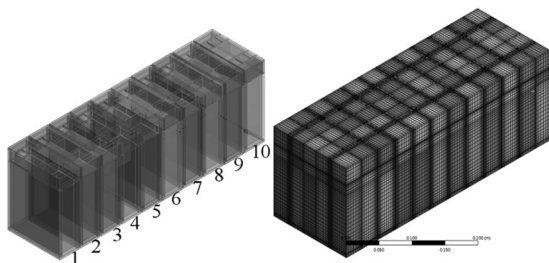


Fig. 2. Applied geometry and mapped mesh for thermal management of nickel metal hydride battery module.

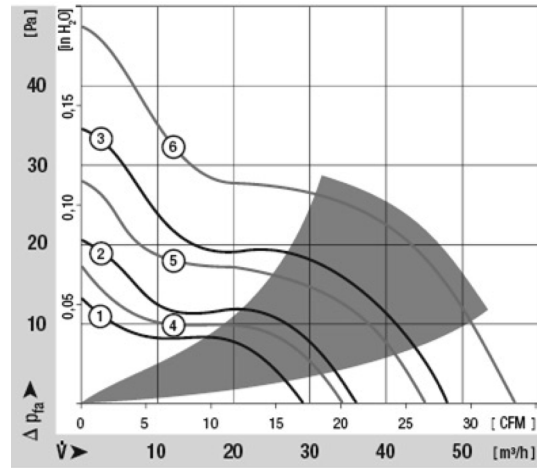


Fig. 3. Characteristic curve of applied fan.

내는 팬의 특성 곡선을 적용하였고 Fig. 3의 ⑤와 같다. 또한 특성곡선의 식은 (2) 같다.

$$F(x) = -0.0388x^2 + 1.9544x - 8.7445 \quad (2)$$

유입 온도는 $26.85^\circ\text{C}(300 \text{ K})$ 로 하였고, 입구 조건은 내부 유동에 따라 속도가 변하는 pressure inlet을 경계 조건으로 하였다. 하우징 팩의 크기는 $450 \times 166 \times 156 \text{ mm}^3$ 이다. 내부유동의 지배 방정식은 비압축성 Navier-Stokes equation과 Energy equation을 사용하였으며, 난류해석을 고려하여 realize k-epsilon모델을 사용하였고 알고리즘은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)를 사용하였다.¹⁴⁾ Fig. 2에 나타난 바와 같이 모두 정렬격자를 사용하였으며 요소의 개수는 $510,204$ 개 이고 해석에 필요한 요소의 최소화를 위해 간격이 좁은 영역과 넓은 영역의 격차는 그레이딩 기법을 사용하여 해석의 신뢰도 향상을 모색하였다. 배터리 팩 냉각의 해석에는 ANSYS ver. 13.0의 Fluent를 사용하였다.

2.2. 전산모사 해석 모델

하이브리드 자동차 및 기타 구조에서 불가피하게 모듈의 특정 면에 한정하여 공기흡입구를 설치해야 할 경우를 가정하여 세 가지 경우의 해석을 진행했다. 공기가 모듈의 후면 및 측면에서 유입되는 경우(case 1), 모듈의 상부에서 유입되는 경우(case 2) 그리고 모듈의 하부에서 유입되는 경우(case 3)로 나누어 진행하였다.

공기가 모듈의 후면 및 측면에서 유입되는 경우에는 다시 4가지 경우로 나누어 해석을 진행하였다. 모듈의 후면에서만 들어가는 경우를 case 1-1로 표기하였고, 모듈의 후면뿐만 아니라 좌, 우측에 각각 1, 3, 5개씩 흡

입구가 추가 된 경우를 case 1-2, 3, 4로 표기하였다. 모두 모듈의 전면부에 1개의 팬이 적용된 형태이고, 이때 후면 흡입구의 면적은 $77 \times 18.82 \text{ mm}^2$ 이고, 측면 흡입구의 면적은 $10.3 \times 106 \text{ mm}^2$ 이다. 모듈의 상부에서 유입되는 경우는 다시 3가지 경우로 나누어 해석했다. 케이스 상부 중앙에 2개의 흡입구에서 공기가 유입되는 경우를 case 2-1로 표기하였고, case 2-1의 해석을 바탕으로 높은 온도가 관측된 영역에 2개의 흡입구를 추가 설치한 경우를 case 2-2로 표기하였다. case 2-3은 모든 배터리의 상부에 공기의 유입이 일어나도록 하였다. 이 경우 케이스 상부에 적용된 공기흡입구의 면적은 $77 \times 27.7 \text{ mm}^2$ 이고, 팬은 냉각의 효율을 높이기 위해 모듈의 전면과 후면에 총 두 개가 적용되었다. 모듈의 하부에서 유입되는 경우, 팬을 두 개 적용했을 경우(case 3-1)와 팬을 한 개 적용한 경우(case 3-2)로 나누어 해석을 진행하였다. 두 경우 모두 공기흡입구는 배터리 사이에 $2.6 \times 84 \text{ mm}^2$ 의 면적으로 총 9개가 적용되었다. 기타 구조적인 영향에 의해 배터리의 앞, 뒤, 좌 그리고 우측면을 사용하지 못하는 경우를 위해, case 3-1의 배터리 후면에서 팬이 제거된 형태(case 3-2)를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 배터리 사이의 격자 간격

최소의 격자로 신뢰도 있는 해석을 얻기 위해 두 배터리 사이의 격자를 나누었고, 유속분포와 최고온도를 관찰하였다. Fig. 4(a)은 두 배터리 사이를 1개($n = 1$)부터 5개($n = 5$)까지 나눈 격자의 모습을 보여준다. Fig 4(b)는 유속 벡터의 분포를 관찰한 결과이다. 배터리 사이에 격자의 간격이 5개인 경우가 가장 정밀하므로, 이와 유사

한 분포를 보이는 것은 $n = 3$ 과 4이었다. $n = 1$ 과 2의 경우, 벡터의 방향이나 크기가 $n = 5$ 의 분포와 상이한 결과를 보였다.

두 배터리 사이의 유동은 냉각에 영향을 미치는 요소 중 하나이므로 배터리의 최고온도 분포를 바탕으로 신뢰도 있는 격자의 구조를 판단하였다. Fig. 5는 배터리 사이 격자의 간격별 최고온도를 나타낸다. $n = 2$ 인 경우에는 다른 경우와 온도 편차가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 유속의 벡터 분포와 온도 편차를 분석한 결과, 배터리 사이에 최소한 3개 이상의 격자 구조가 삽입되었을 경우, 신뢰도 있는 해석이 가능한 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 좁은 공간의 격자를 구성하였고, 모듈의 냉각에 대한 해석을 진행하였다.

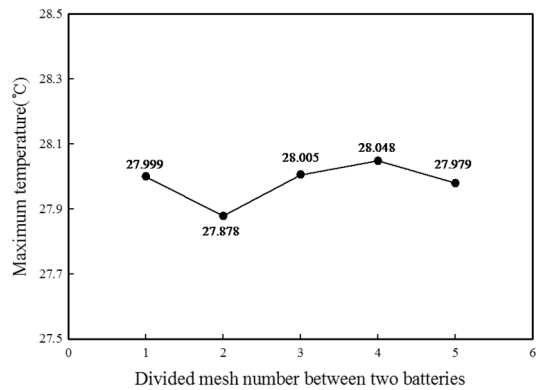


Fig. 5. Maximum temperature according to the divided number between two batteries.

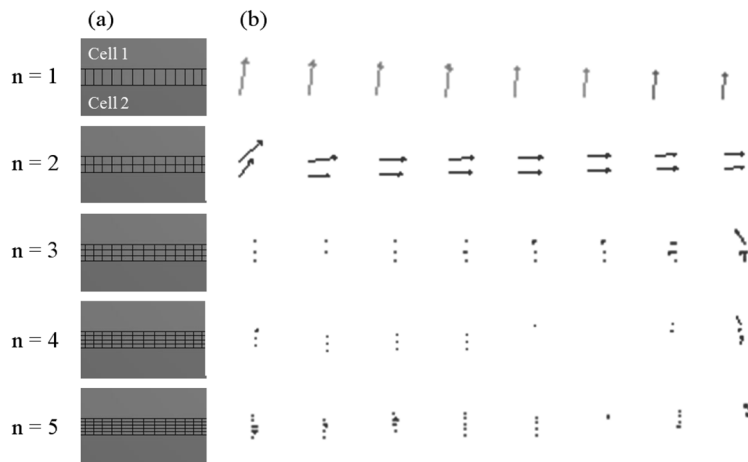


Fig. 4. Air velocity vectors according to the divided number between two batteries.

3.2. 모듈의 후면 및 측면에서 공기가 유입되는 경우 (case 1)

Fig. 6는 배터리 모듈의 후면 및 측면에서 26.85°C (300 K)의 온도로 공기가 유입되는 경우의 온도 분포를 나타낸다. 측면에 공기 흡입구가 없는 경우(case 1-1), 외부 공기와 가장 먼저 접촉하는 10번 배터리가 가장 낮은 온도(38.90°C)를 보였다. 공기 흡입구 쪽에 위치한 배터리로부터 유입된 공기가 점차 가열되어 팬에 가까워질수록 냉각 효과가 떨어지는 결과가 나타났다. 이 경우, 모듈에서 최고온도는 48.28°C이고 배터리간의 온도 차이는 최고 9.38°C를 보였다. 이와 같은 현상을 개선하기 위하여, 모듈의 측면에 공기흡입구를 설치하여 해석을 진행하였다. 먼저 모듈의 좌우측면에 공기흡입구를 각각 한 개씩 설치한 경우(case 1-2), 공기흡입구에 근접한 5번과 6번 배터리가 약 6°C정도 감소하여 냉각의 효과가 가장 컸다. 45.94°C의 최고온도를 보였으며 최고온도와 최저온도의 차이는 4.92°C로 나타났다. 모듈의 측면에 공기흡입구가 없는 경우와 비교하였을 때, 최고온도가 2.34°C 감소하였고 4.46°C의 온도편차 감소가 있었다. 최고온도를 보인 8번과 45.51°C의 3번 배터리의 냉각을 위해 배터리의 바로 뒤쪽에서 공기가 유입되도록 공기흡입구를 설치하였다. 해석결과, 0.38°C의 최고온도 감소가 있었고, 온도 편차도 0.8°C 감소하였다. 측면의 공기흡입구를 등간격으로 5개를 배치한 경우(case 1-4), 최고온도는 측면에 공기흡입구가 3개인 경우보다 0.46°C 상승한 46.02°C를 보였으며, 온도 편차도 0.88°C 상승하였다. 온도 편차가 커진 이유는 10번 배터리가 3면에서 공기의 유입을 받아 다른 배터리에 비해 냉각이 많이 된 것으로 판단된다. 따라서 10번 배터리를 제외한 1~9번 배터리의 온도 차이는 2.02°C이며 이는 case 1의 해석 전체에서 가장 낮은 결과이다. 하지만 1~9번 배터리의 온도 차이가 개선이 되었더라도, 10번 배터리의 온도 또한 모듈

전체의 온도분포에서는 중요한 요소이므로 개선이 필요하다.

3.3. 모듈의 상부에서 공기가 유입되는 경우(case 2)

Fig. 7은 모듈의 상부에서 공기가 유입 되었을 경우의 각각 case에 대해 온도 분포를 나타낸다. 이 때, 팬은 모듈의 전면과 후면에 각각 1대씩 적용되었다. 먼저 공기가 케이스 상부의 중앙에서 모듈 내부로 삽입되는 경우(case 2-1), 공기가 유입되는 모듈 중앙의 배터리가 가장 낮은 온도(38.00°C)를 보였다. 그러나 배터리간의 온도차가 6.47°C로 case 1-2~4와 비교시 다소 높았으며, 이와 같은 배터리 간 온도차를 개선하고자 case 2-2는 case 2-1에서 높은 온도를 보인 2번과 9번 배터리의 상부에 공기 흡입구를 설치하여 해석을 진행하였다. 최고온도는 44.47°C에서 40.70°C로 3.77°C 감소되었고, 온도 편차가 6.47°C에서 1.70°C로 감소하여 case 2-1에 비해 온도분포가 크게 개선된 결과를 보였다. 측면 공기흡입구 삽입의 경우와 비슷한 맥락으로 case 2-3은 모든 배터리의 상부에 공기흡입구를 설치(case 2-3)하여 냉각 해석을 수행하였다. 해석 결과, 공기가 상부에서 유입된 경우 중 가장 적은 온도 편차(0.73°C)를 보였으나 최고온도는 case 2-2의 최고온도(40.70°C) 보다 1.94°C 높은 42.64°C를 보였다. 이는 Fig. 8의 유속 분포로 판단할 수 있다. 배터리 상부의 공기흡입구가 4개인 case 2-2와 10개인 Case 2-3의 경우, 각각 유속이 4.18 m/s와 2.38 m/s이다. 따라서 유속이 빠른 경우(case 2-2)에 배터리와 부분적으로 열의 교환이 더 잘 일어나는 것으로 판단된다. 또한 case 2-3의 경우, 팬과 가까운 1번과 10번 배터리 상부의 공기흡입구에서 다른 흡입구보다 많은 양의 공기 유동이 일어나 결과적으로 case 2-2보다 최고온도가 상승된 결과를 가져온 것으로 판단된다.

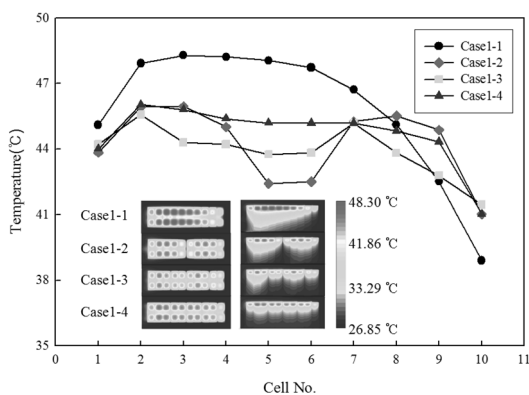


Fig. 6. Temperature distribution and horizontal and vertical cross sectional contour(insert) of case 1.

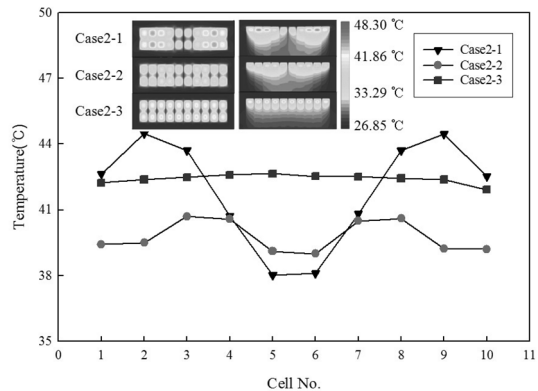


Fig. 7. Temperature distribution and horizontal and vertical cross sectional contour(insert) of case 2.



Fig. 8. Vertically cross sectional velocity contours of case 2-2 and case 2-3.

3.4. 모듈의 하부에서 공기가 유입되는 경우(case3)

Fig. 9는 모듈의 하부에서 공기가 유입 되었을 경우에 대해 온도 분포를 나타낸다. 2개의 팬이 장착되어 있는 경우(case 3-1)는 40.27°C의 최고온도와 1.06°C의 배터리 간의 온도편차를 보였고, 팬이 모듈 전면부에 하나만 장착된 경우(case 3-2)는 40.50°C의 최고 온도와 1.63°C의 온도편차를 나타냈다. 두 경우 모두 Fig. 9에 나타난 바와 같이 온도 분포가 거의 대칭적인 형태로 배터리의 온도 분포를 보였으며, 1번과 10번 배터리의 온도를 제외하면 모두 40°C 이하의 온도를 보인다. Table 2에 나타난 바와 같이, 모듈의 하부에서 공기가 유입되는 경우가 모든 경우에 대하여 최고온도가 가장 낮았고, 배터리간의 온도 편차도 1~2°C의 안정적인 분포를 보였다. 배터리의 사이에서 공기가 유입되므로, 2번~9번 배터리에 비해 1번과 10번 배터리는 공기 유동에 의한 영향이 근소한 것으로 판단된다. 냉각에 대한 근거를 판단하기 위해 유속분포를 관찰한 결과, 팬의 영향으로 인해 두 경우의 유속 분포는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 근소하게 다른 양상을 보였

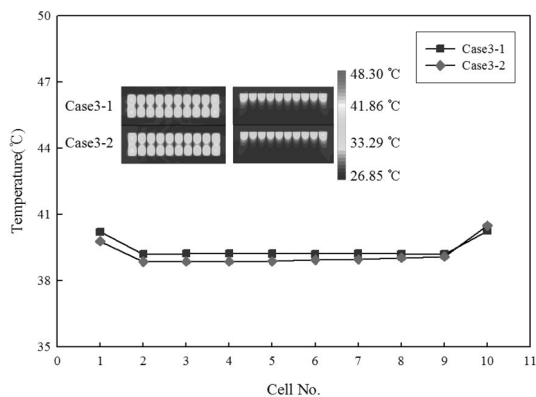


Fig. 9. Temperature distribution and horizontal and vertical cross sectional contour(insert) of case 3.

Table 2. Summary of maximum temperatures and temperature differences of each case

Condition	T _{max.} (°C)	ΔT (°C)
Case1-1	48.28	9.38
Case1-2	45.94	4.92
Case1-3	45.56	4.12
Case1-4	46.02	5.00
Case2-1	44.47	6.47
Case2-2	40.70	1.70
Case2-3	42.64	0.73
Case3-1	40.27	1.06
Case3-2	40.50	1.63

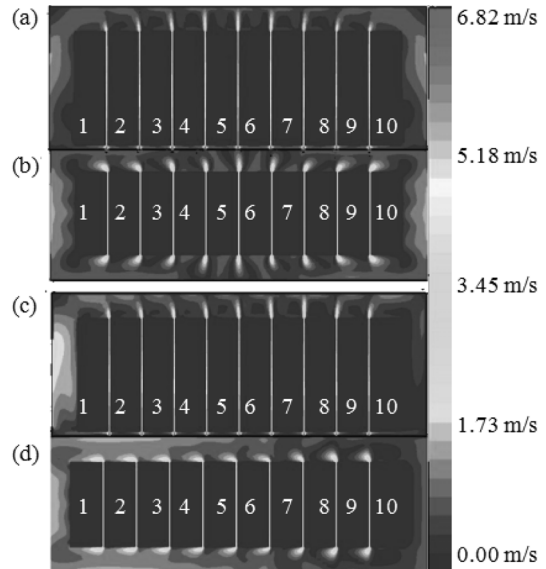


Fig. 10. Vertically cross sectional (a) and horizontally cross sectional (b) velocity distribution of case 3-1 and vertically cross sectional (c) and horizontally cross sectional (d) velocity distribution of case 3-2.

지만 두 경우 모두 배터리 사이의 공간으로 공기가 빠르게 유입되는 형태를 보였다. 따라서, 유입되는 공기가 배터리 벽면을 타고 올라오면서 빠른 속도로 열의 교환이 이루어지고 뜨거운 유체가 팬에 의해 모듈로 구성된 팩 밖으로 배출되는 것을 확인하였다. 그러나 팬이 한 개가 적용된 경우에 수평 단면의 경우 유체의 거동이 모두 팬의 방향으로 배출되는 반면, 수직 단면의 유속 분포는 대칭적인 형태로 나타나는 현상을 규명하기 위하여, 유속의 벡터(vector)와 유적선(pathline)을 분석하였으며 Fig. 11에 나타내었다. 벡터의 방향으로 미루어 볼

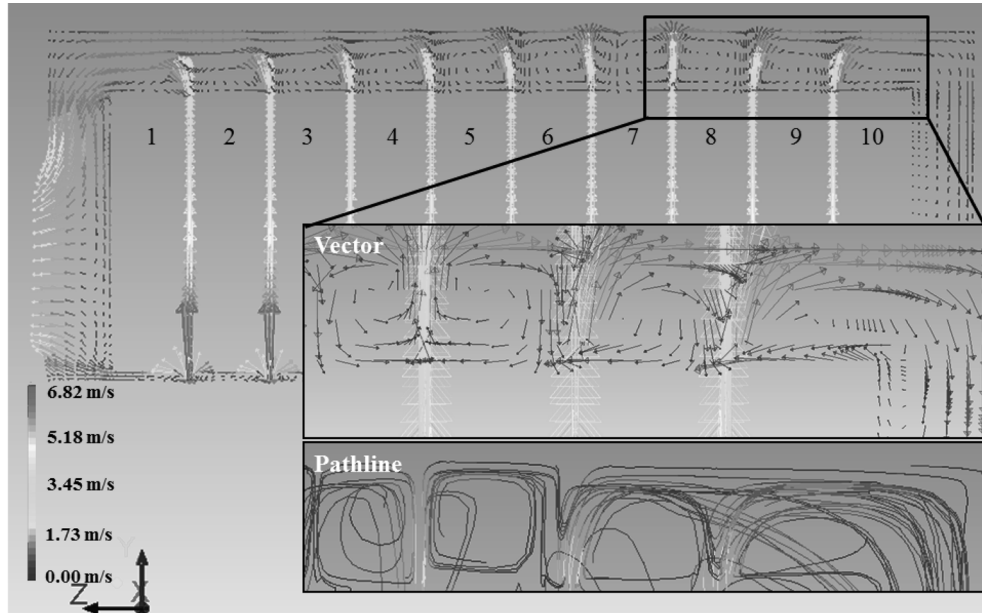


Fig. 11. Velocity vector distribution and pathline(insert) of case 3-2.

때, 배터리 아래의 공기 흡입구에서 빠른 속도(~ 6.82 m/s)로 올라온 공기가 모듈 시스템 천장의 벽과 만나 벽을 타고 사방으로 흩어지는 것으로 나타났다. 흩어진 공기는 배터리 위쪽 공간에서 와류를 형성하고, 배터리 사이의 공기가 연속적으로 수직형태로 거동하는 것을 가능하게 하는 것으로 판단된다. 그러나 9번과 10번 배터리 사이로 흡입된 공기는 10번 배터리 뒤쪽으로 공기의 흐름이 존재하지 않으므로 벡터의 방향이 10번 배터리의 뒤쪽으로 나타났다. 이는 유체가 10번 배터리 뒤쪽으로 흐르는 것을 의미하며, 수직 단면의 유속 분포가 대칭적인 형태로 보이는 것을 가능하게 하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 신뢰도 있는 해석을 위해 배터리 사이의 공간에 필요한 최소 격자의 간격을 확인하였고, 공기가 모듈의 후면과 측면에서 유입되는 형태(case 1), 모듈의 상부에서 유입되는 형태(case 2) 그리고 모듈의 하부에 유입되는 형태(case 3)로 나누어 배터리 모듈의 냉각 해석을 진행하였다.

그 결과, 배터리 사이의 공간에는 최소 3개 이상 나누어진 격자가 요구 되었다. 냉각 효과는 모듈의 최고 온도 및 모듈을 구성하는 배터리간 온도 편차와 유동해석을 바탕으로 결과를 분석하였다. 공기가 모듈의 하부에 유입

되는 경우, 모듈의 후면에서 유입되는 경우에 비해 최고 온도는 48.28°C 에서 40.27°C 로 8.01°C 만큼 감소하였고, 온도 차이는 9.38°C 에서 1.06°C 로 8.32°C 감소된 결과를 얻었다. 공기흡입구를 모듈의 상부에 설치한 경우, 상부 흡입구의 개수가 늘어날수록 배터리간의 온도 차이는 감소($\Delta T = 0.73^{\circ}\text{C}$)했다. 그러나 최고온도는 40.70°C 에서 42.64°C 로 오히려 증가한 결과를 보였으며, 이는 다른 흡입구보다 팬과 가까운 공기 흡입구에서 많은 유동이 일어나 냉각에 한계가 있는 것으로 나타났다. 공기 흡입구가 모듈의 하부에 설치된 경우, 팬의 개수가 2개일 경우와 1개일 경우에 최고온도와 배터리간 온도차이는 각각 40.27°C , 40.50°C 및 1.06°C , 1.63°C 로 나타났다. 두 경우 모두 좁은 공기유입구에서 빠른 속도로 올라온 유체에 의해 빠른 열교환이 일어났으며, 팬이 1개만 적용된 경우에도 배터리 상부에 형성된 와류에 의해 팬이 2개 적용된 경우와 비교적 적은 적은 차이의 최고온도와 온도편차를 형성하는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. J. H. Lee, K. H. Lee, and J. H. Choi, 'Design of charge and discharge monitoring system for secondary batteries of hybride electric vehicle', *J. Korea Soc. Computer and information*, **15**, 157 (2010).
2. D. B. Nah and H. S. Shin, 'HEV: A Review', *J. energy engineering*, **19**, 39 (2010).

3. U. Köhler, 'Applications-transportation|hybrid electric vehicles: batteries', *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 269 (2009).
4. S. Amjad, S. Neelakrishnan, and R. Rudramoorthy, 'Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicle', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 1104 (2010).
5. K. Smith and C. Y. Wang, 'Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles', *J. Power Sources*, **160**, 662 (2006).
6. R. Kizilel, R. Sabbah, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, 'An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs', *J. Power Sources*, **194**, 1105 (2009).
7. A. A. Pesaran, 'Battery thermal models for hybrid vehicle simulations', *J. Power Sources*, **110**, 377 (2002).
8. J. B. Kim, 'Cooling efficiency improvement of battery pack for electric vehicle(I)', *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 113 (2003).
9. M. S. Wu, Y. Y. Wang, and C. C. Wan, 'Thermal behaviour of nickel/metal hydride batteries during charge and discharge', *J. Power Sources*, **74**, 202 (1998).
10. W. B. Gu and C. Y. Wang, 'Thermal-electrochemical modeling of battery systems', *J. Electrochem. Soc.*, **147**, 2910 (2000).
11. S. R. Ovshinsky, M. A. Fetcenko, and J. Ross, 'A Nickel Metal Hydride Battery for Electric Vehicles', *Science*, **260**, 176 (1993).
12. J. G. Sung and J. D. hoy, 'Hybrid-Electric Transit Buses in the USA : Status, Issues and Benefits', *Journal of KSAE*, **33**, 45 (2011).
13. J. B. Kim, 'Thermal management of a Ni/MH battery module for electric vehicle', *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **8**, 1034 (1997).
14. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, ANSYS, Inc., (2009).