

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.12.801>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 공기 유로 형상에 따른 공랭식 전기자동차 배터리 시스템의 냉각 성능 예측

정 석 훈\* · 서 현 규\*\*†

\* 공주대학교 기계설계공학과, \*\* 공주대학교 기계자동차공학부

### Predictions of the Cooling Performance on an Air-Cooled EV Battery System According to the Air Flow Passage Shape

Seok Hoon Jeong\* and Hyun Kyu Suh\*\*†

\* Dept. of Mechanical Design, Kongju Nat'l Univ.

\*\* Dept. of Mechanical Engineering & Automotive Engineering, Kongju Nat'l Univ.

(Received July 24, 2016 ; Revised September 23, 2016 ; Accepted October 16, 2016)

**Key Words:** Direct Battery Air-cooled System(배터리 직접 공랭식 시스템), Air Flow Geometry(공기유로 형상), Heat Source(열원), Thermal Management System(열관리 시스템)

**초록 :** 본 논문은 전기자동차 배터리 시스템에 공기를 이용한 직접 냉각 방식을 적용하여, 공기 유로 형상에 따른 냉각 성능을 비교 연구하였다. 이를 위해, 배터리 냉각 시스템에서 모듈의 배치 형상과 발열량을 고정하고, 입·출구 면적 및 외부 Case 형상을 변경하여, 이에 따른 냉각 성능 결과를 수치 해석적으로 비교 분석하였다. 해석 결과는 배터리 내부의 공기 유동 유선(Stream line), 속도장 분포(Velocity field), 온도 분포(Temperature distributions)를 정리하여 제시하였다. 해석 결과, 외기온도 25°C에서 안정적인 배터리 작동온도인 50°C 이하를 만족하기 위해서는 공기의 유입 체적이 400m<sup>3</sup>/h 이상이 되어야 함을 확인할 수 있었다. 또한, 출구 부근의 Diffuser 형상을 가지는 해석 조건에서 냉각이 끝난 공기의 배출이 원활히 진행되면서 냉각 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다.

**Abstract:** This paper aims to compare and study the cooling performance of a battery system in accordance with the inlet and outlet geometry of the air passage in an EV. The arrangement and the heat source of the battery module were fixed, and the inlet/outlet area and its geometry were varied with the analysis of the cooling performance. The results of this study provide suggestions for the air flow stream line inside of a battery, the velocity field, and the temperature distributions. It was confirmed that the volume flow rate of air should be over 400 m<sup>3</sup>/h, in order to satisfy conditions under 50°C, which is the limit condition for stable operation. It was also revealed that the diffuser outlet geometry can improve the cooling performance of battery system.

- 기호설명 -

$C_p$  : 정압비열(J/kg · K)

$Q$  : 열 방출량(W)

$T$  : 온도(K)

$u$  : 속도벡터(m/s)

$V$  : 체적(m<sup>3</sup>)

$k$  : 열전도율(W/m · K)

$\mu$  : 유체의 동점도(pa · s)

$\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

#### 1. 서 론

엄격한 배기 배출물 규제(Euro-6) 시행에 따라 자동차 동력기술 연구 분야에서 배기 배출물 저감 기술개발에 대한 필요성이 제기되었다. 하이

† Corresponding Author, [hksuh@kongju.ac.kr](mailto:hksuh@kongju.ac.kr)

브리드 자동차(Hybrid electric vehicle)는 일반 내연기관 자동차에 비해 동일 출력 대비 낮은 배기량의 엔진을 사용하여 연비가 기존의 자동차에 비해 월등히 좋다.<sup>(1)</sup> 또한, 고부하 운전조건에서 부족한 출력을 모터가 제공하여 NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> 등의 배기 배출물 특성이 기존 기관보다 우수하다.<sup>(2,3)</sup>

하이브리드 및 전기자동차 배터리는 운행 중 충전과 방전을 반복하면서 발열한다. 이때, 모터의 연료탱크에 해당하는 배터리가 구동 적정온도를 초과하게 되면 급격한 성능저하를 보이는 단점이 있고,<sup>(4,5)</sup> 배터리 모듈의 최고온도가 60°C 이상부터 열적 노화가 진행되는 문제점이 있다.<sup>(6)</sup> 배터리를 이용하는 친환경 전기, 하이브리드 자동차에서 배터리의 냉각 효율은 배터리의 수명과 성능을 좌우하는 중요한 인자로 분류되어 많은 실험적, 해석적 연구가 진행되고 있다.<sup>(7,8)</sup>

최근 하이브리드 자동차 연구에서 배터리 열관리 시스템의 연구는 실험적 연구에 많은 어려움이 따르고 있다. 전기 또는 하이브리드 자동차를 직접 운행 할 공간을 확보하고, 이에 실험 장비를 장착하여 직접 운행하려면 시간, 공간, 금전적으로 한계가 있다. 위와 같은 이유로 최근 전기자동차 및 하이브리드 자동차 배터리의 해석 신뢰도 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.<sup>(9,10)</sup> 이전의 연구들에서 알 수 있듯이 배터리의 적정 운전 온도는 보통 -30°C~70°C로 이보다 좁은 온도범위에서 운전해야 하며, 극한 조건에서 배터리의 수명이 현저하게 저하되는 것을 알 수 있다. 또한, 이전의 연구들은 발열부 냉각에서 직접 냉각을 하지 않고 히트 싱크, 플레이트 등의 방법으로 배터리 모듈을 냉각하는 방법을 사용하고 있는 연구가 대부분이었다.

본 연구에서는 공기를 이용한 직접 냉각 방식을 적용하여 배터리 열관리 시스템의 최적화 설계를 연구 목적으로 하였다. 따라서, 공랭식 냉각 시스템<sup>(11)</sup>에서 냉각이 필요한 모듈의 형상은 고정하고, 공기의 유입구와 유출구의 형상과 면적을 변형하여, 전기자동차용 배터리 팩의 냉각 성능을 수치 해석적으로 예측하였다. 이를 위하여 배터리 해석 조건 내부의 공기유동 유선(Stream line), 속도장(Velocity field), 온도분포(Temperature distributions)를 정리하고 각 해석 조건의 최고온도를 그래프로 표시하여 냉각 성능을 수치화하였다.

## 2. 수치해석 모델 및 해석 조건

### 2.1 수치해석 대상

해석대상인 Li-ion 배터리모듈의 형상은 Fig. 1과 같이 배터리 모듈 형상을 적용하였다. 크기는 190mm×198mm×295mm(L×V×H)의 직육면체 형태를 하고, 모든 해석 조건에 같은 간격으로 18개의 모듈을 배치 설계하였다. 배터리 해석 조건 내의 모듈의 위치는 모두 동일하고, 모듈의 하부 극 군에서 발열이 심하므로 아래로부터 74mm 부분에서 발열이 발생하도록 하였다. 배터리 케이스의 높이는 500mm로 모두 동일하게 설계하였다. 배터리 냉각에 사용되는 공기의 흐름을 결정짓는 입구와 출구의 형상을 서로 다르게 설계하였다. 배터리 모듈에 대한 자세한 제원은 Table 1과 같다.

### 2.2 각 해석 조건별 설계조건

모든 해석 조건은 같은 입구면적을 가지도록

Table 1 Specifications of battery module

Description	Specification
Nominal voltage(V)	18 (Max. 20.5)
Rated capacity(A)	122.5
Discharging end voltage(V)	15
Charging voltage(V)	20.5 ± 0.05
Charging current(A)	61.25
Discharging current(A)	61.25
Operating temperature(°C)	-25 ~ 65

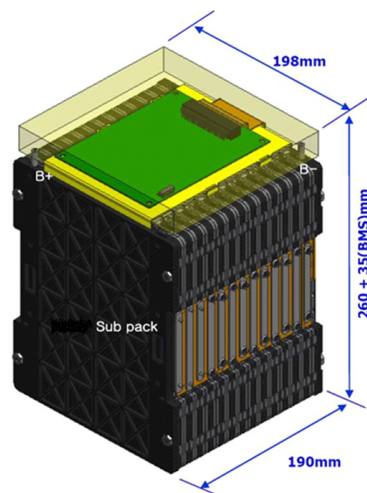


Fig. 1 Schematics of battery module

설계하였다. 해석 조건 1은 기본이 되는 형상으로 입구와 출구의 형상변화가 없으며 본 연구에서 냉각 성능 및 효율 비교의 기준이 되는 해석 조건이다. 해석 조건 2는 입구부분에서 Diffuser 형상을 가지고 있다. 이 조건은 기본 해석 조건보다 더 넓은 열 교환체적을 가졌을 때 냉각 성능에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 설계하였다. 해석 조건 3은 공기 유입부에 Nozzle 형상을 설계하여 발열이 최고로 발생 할 것으로 예상되는 각 모듈의 사이 공간에 유량을 집중시켰을 때 냉각 성능에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 설계하였다. 해석 조건 4는 출구부근에서 Diffuser 형상을 하여 출구면적이 넓어지면서 열 교환이 끝난 공기가 원활하게 배출되기 위한 설계를 하였다. 해석 조건 5는 입구 형상의 변화 없이 출구를 Nozzle 형상으로 설계하여 발열이 심한 중앙부의 공기 압력차를 증가시키는 형태가 냉각 성능에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 설계하였다. 해석 조건 6은 해석 조건 2와 유입구 형상은 비슷하지만, 열 교환이 끝나는 부근에서 급격히 면적이 좁아지는 형상을 추가하고, 유출구에서 Diffuser 형상을 한 형태로 유로가 전체적으로 고르게 형성되는 설계가 냉각 성능에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 설계하였다. 각

해석 조건에 대한 자세한 형상은 Fig. 2와 같다.

2.3 수치해석 조건

각 해석 조건들은 동일한 외부 온도 조건과 배터리 모듈 발열량 조건에서 유입구의 공기유량을 변경하여 해석을 진행하였다. 이때, 발열량 15W는 이전의 연구결과<sup>(14)</sup>를 참고하여 결정하였다. 발열량은 극군 하부로부터 약 1/3지점인 74 mm 지점에서 15 W의 열량으로 발열을 하는 것으로 가정하고 대류 및 전도 열전달 방정식을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 자세한 경계조건을 Table 2에 나타냈다. 각 해석 결과를 특징별로 3가지로 분류하여 정리하였다. 첫 번째로 입구 형상이 변하고 출구 형상에는 변화가 없는 해석 조건(case1, case2, case3)의 결과를 비교하여, 입구 형상이 냉각 성능에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 두 번째로 출구 형상이 변하는 해석 조건(case1, case4, case5)을 비교하여, 출구 형상이 모듈의 냉각 성능에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 마지막으로, 냉각 성능 향상을 위해 입구의 형상과 출구면적이 같고, 출구 형상이 다른 해석 조건(case2, case6)을 비교하여 냉각 성능에 미치는 결과를 비교하였다. 각 조건별 배터리의 운전 한계온도는 50℃로 고정하여 수치해석 연구를 수행하였다.

2.4 지배방정식

수치해석에 있어 지배방정식은 수치해석 자료의 신뢰도와 결과에 중요한 역할을 한다. 유체의 열유동 수치해석에서 지배방정식은 발열부의 발열량과 외부로의 열전도, 유체의 유동과 열대류로 분류할 수 있다.

수치해석에서 단위 체적 발열량( $Q$ )은 모듈 1개의 전체발열량( $P_{tot}$ )을 체적( $V$ )으로 나누면 나오는 값으로 식 (1)과 같다. 다음 열전도, 유체의 유동, 열대류에 대한 지배방정식은 Navier-Stokes 방정

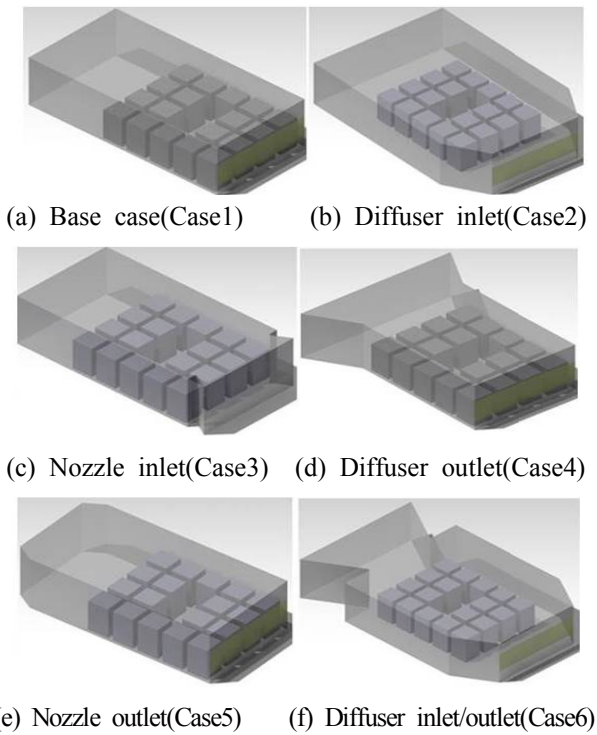


Fig. 2 Schematics of battery pack and cases

Table 2 Condition for numerical analysis

Case	Heat source (W)	Ambient air temperature (K)	Inlet area (m <sup>2</sup> )	Outlet area (m <sup>2</sup> )	Inlet flow rate (m <sup>3</sup> /h)
Case 1	15	298.15	0.222	1	100,
Case 2				1.5	200,
Case 3				1	300,
Case 4				1.5	400,
Case 5				0.8	500
Case 6				1.5	

식을 기본으로 하여 계산하였다. 이때, 유체의 미소체적( $dm$ )을 3차원 유동방정식에 가속도로 미분하면 미소체적( $dm$ )에 가해지는 힘을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$Q = \frac{P_{tot}}{V} \tag{1}$$

$$d\vec{F} = dm \frac{D\vec{V}}{Dt} = dm \left[ u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right] \tag{2}$$

식 (2)를 3차원 응력 직각좌표계에서 속도구배와 유체성질의 향으로 표현하면, 열역학 상태방정식에 의하여 밀도와 온도에 연관된다. 이 식들을 미분형 운동방정식에 대입하면 다음과 같다.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \right] \tag{3}$$

식 (3)에서 각 방향 (x, y, z)에 따라  $2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V}$  항이 들어가고, 직각좌표계에 맞게 부분 적분을 넣어주면 3방향에 대한 미분형 운동방정식이 나온다. 이 식을 3차원에서 간단히 나타내면 식 (4)로 나타낼 수 있다. 이때,  $\rho$ =밀도,  $\nabla$ =3차원미분,  $u$ =속도벡터를 뜻한다. 식 (4)를 이용하여 속도벡터  $u$ (m/s)를 곱하면 유체의 흐름 식 (5), 에너지 보존 방정식 식 (6), 열전도도  $k$ 를 곱하면 열전도식 (7), 에너지 소산율  $\epsilon$ 을 곱하여 유동과 대류식 (8), 온도에 따른 동점도  $\mu_T$ 를 이용하여 압력에 따른 열전도율  $P_k$ 를 유도하여 열전도에 대한 식 (9)가 추가되며 다음과 같다.

$$F = \rho \nabla u \tag{4}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot u)I - \frac{2}{3}\rho kI] + F \tag{5}$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{6}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \tag{7}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{e1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{e2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \epsilon = \epsilon p \tag{8}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \tag{9}$$

$$P_k = \mu_T \left[ \nabla : (\nabla u + (\nabla u)^t) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u$$

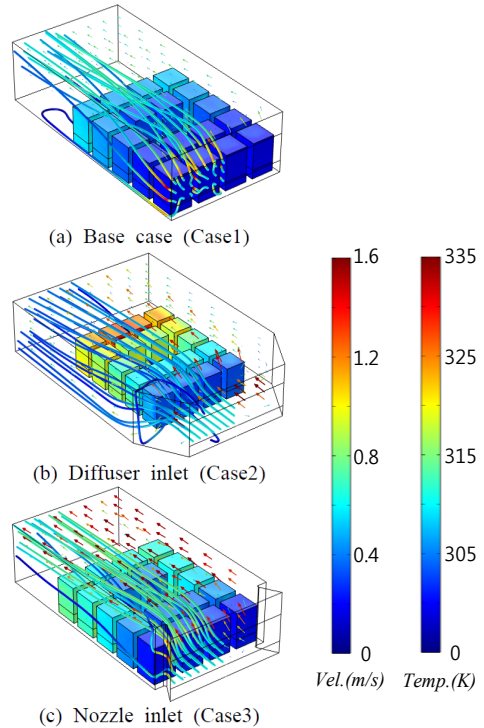
해석에서 지배방정식에서 각 항의단위는  $\rho$  = 밀도(kg/m<sup>3</sup>)이며  $C_p$  = 정압비열(J/kg·K),  $u$  = 속도 벡터(m/s),  $T$  = 온도(K),  $k$  = 열전도율(W/m·K),  $Q$  = 열 방출량(W),  $\mu$  = 유체의 동점도(pa·s)이다.

### 3. 수치 해석 결과

#### 3.1 입구 형상에 따른 냉각 특성

같은 조건에서 Case의 외부 형상 차이가 냉각 성능에 어떤 영향을 미치는지 판단하고, 최적의 형상을 찾기 위해 동일한 출구 면적을 가지는 해석 조건별로 입구 형상을 변경하면서 내부유동을 비교하고 모듈 전체에서 최고온도를 비교하였다.

출구면적이 1m<sup>2</sup>로 동일하고, 입구 형상이 변하는 해석 조건 1, 해석 조건 2, 해석 조건 3의 온도분포, 공기의 유동을 Fig. 3에 나타내었다. 해석 조건 3번은 공기 입구에 Nozzle 부분을 만들어 공기의 유동을 조금 더 배터리 발열부에 집중하고자 설계하였다. 그러나, 해석 결과 해석 조건 1



**Fig. 3** Effect of inlet geometry on the temperature distributions (heat source = 15W, inlet flow rate = 500m<sup>3</sup>/h)

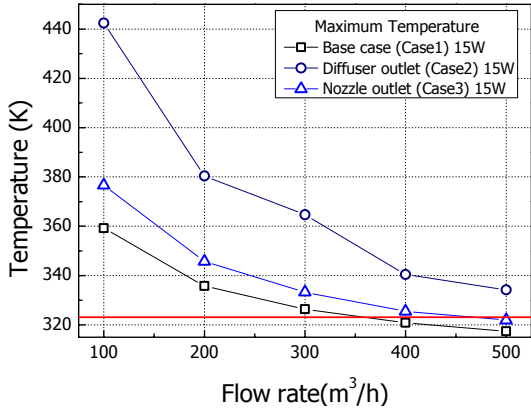


Fig. 4 Effect of inlet geometry on the maximum temperature of battery module (heat source =15W)

보다 냉각 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 아래로부터 74mm 부분에 위치하는 발열부에 집중되어야 하는 공기유동이 배터리의 발열부가 아닌 상부에 집중되기 때문으로 사료된다. 입구가 좁아지면서 유속은 빨라질 수 있으나 압력 차가 큰 배터리의 상부에 공기가 집중되어 냉각 성능에는 오히려 악영향을 미치는 것이라 판단된다. 또한, 해석 조건 2는 입구 형상을 Diffuser 부분을 만들어 더 넓은 체적의 유로를 형성하였으나, 발열부 이외에 공기가 집중되면서 냉각 성능에는 오히려 악영향을 미쳐 비교 해석 조건 중 가장 나쁜 냉각 성능을 보였다.

Fig. 4는 해석 조건 1, 해석 조건 2, 해석 조건 3의 냉각 성능 해석결과에서 공기유입량에 따른 모듈 전체에서 최고온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 동일 공기 유량 조건에서 해석 조건 1의 냉각 성능이 가장 좋고, 해석 조건 3, 해석 조건 2 순으로 냉각 성능이 우수한 것을 관찰할 수 있었다.

### 3.2 출구 형상에 따른 냉각 특성

출구 형상이 냉각 성능에 미치는 영향을 해석 조건 1, 해석 조건 4, 해석 조건 5, 즉, 기본 형상, Diffuser 출구 형상 및 Nozzle 출구 형상, 총 3가지를 비교하였다. Fig. 5에서 나타낸 온도분포, 공기의 유동장을 보면 해석 조건 5의 출구에서 중앙의 유속이 다른 곳보다 비교적 빠른 것을 관찰할 수 있었다. 이는 좁아지는 출구 형상으로 인한 압력차가 발생하면서 공기의 유속이 빨라진 것으로 예상된다. 그러나, 전체적인 온도분포에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

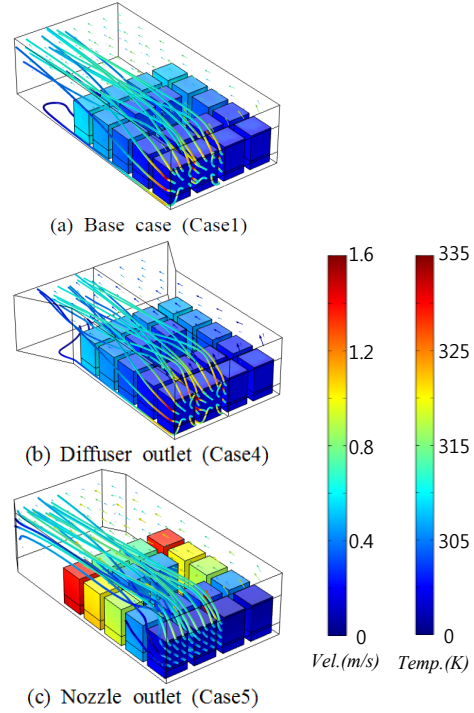


Fig. 5 Effect of outlet geometry on the temperature distributions (heat source=15W, inlet flow rate=500m³/h)

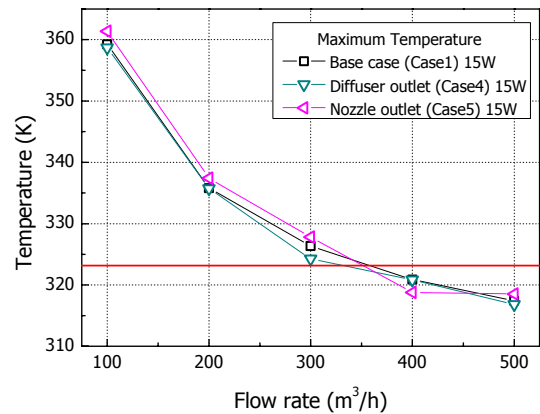


Fig. 6 Effect of outlet geometry on the maximum temperature of battery module (heat source = 15W)

Fig. 6은 해석 조건 1, 해석 조건 4, 해석 조건 5의 냉각 성능 해석결과에서 모듈 전체에서 최고 온도를 나타낸 그래프이다. 해석 결과 그래프를 보면 유입구의 유량이 400m³/h일 때 해석 조건 5번의 최고온도가 역전하는 것을 볼 수 있다.

이는 앞서 확인한 바와 같이 출구의 Nozzle 형상이 오히려 공기 속력 증가로 냉각 성능이 좋아지는 것이라고 판단된다. 그러나, 유량이 증가하거나 감소하는 조건에서 냉각 성능이 저하되는

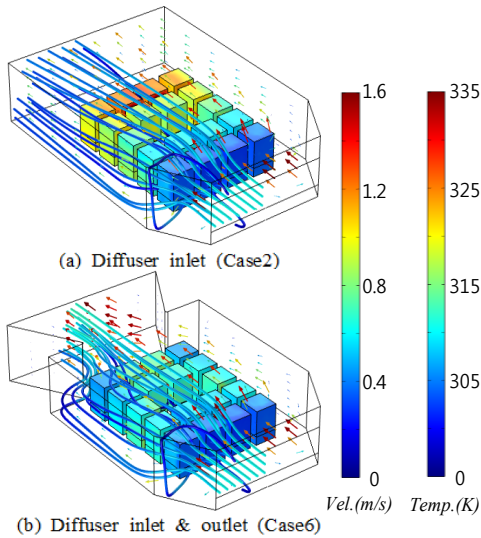


Fig. 7 Effect of outlet geometry change on the battery cooling performance (heat source = 15W, inlet flow rate=500m<sup>3</sup>/h)

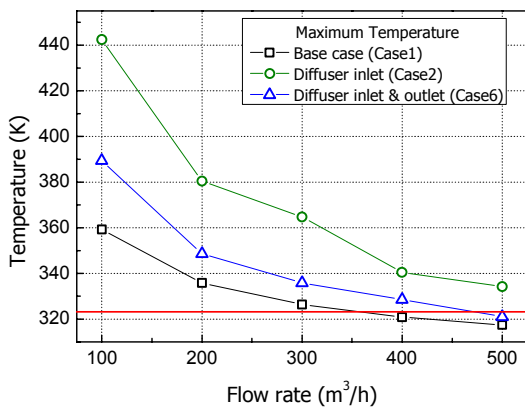


Fig. 8 Effect of outlet geometry change on the maximum temperature of battery module (heat source = 15W)

것을 볼 때 특정 구간에서만 냉각 성능이 개선된 것으로 판단되며, 3가지의 해석 조건에서 모두 온도 편차가 5°C 이하로 출구 형상은 냉각 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.3 냉각 성능 향상 방안 설계

냉각 성능이 가장 떨어지는 해석 조건 2에서 같은 출구면적일 때 출구 형상 변경으로 냉각 성능 향상이 가능한지 확인하기 위해 출구면적을 1.5m<sup>2</sup>으로 고정하고, 출구 형상을 Diffuser 형상으로 변경하여, 모듈의 중앙으로 냉각 공기를 집중하였다. Fig. 7에서 나타낸 온도분포, 공기의 유동을 보면 해석 조건 6의 경우 중앙으로 냉각 공기

가 집중되고, 냉각 성능 향상에 좋은 효과를 보였다. 또한, 다른 해석 조건들과 달리 출구의 Diffuser 형상이 마지막 모듈의 온도까지 낮추는 효과로 모듈의 전체적인 온도가 비슷한 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 8에 기본 조건인 해석 조건 1, 해석 조건 2, 해석 조건 6에서 모듈 전체에서 최고온도를 비교하여 나타내었다. 모든 조건에서 해석 조건 2의 냉각 효율이 가장 떨어지는 것을 확인할 수 있었고, 출구 형상을 변경한 해석 조건 6의 냉각 성능이 개선된 것을 확인하였다. 그러나, 기본 조건인 해석 조건 1보다는 냉각 성능이 떨어지는 것을 관찰하였고, 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서 전기자동차용 공랭식 냉각 시스템의 공기의 유입구와 유출구의 형상이 냉각 효율에 미치는 영향을 수치 해석적으로 연구를 수행하였다. 연구 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 외기온도 25°C에서 배터리 모듈 하나의 발열조건이 15W 일 때 안정적인 운행온도인 50°C를 유지하기 위해서는 약 400m<sup>3</sup>/h 이상의 공기의 유입체적이 필요하였다.

(2) 모든 해석 조건에서 공기의 유입량이 증가할 때 냉각 성능은 상승하였다. 입구 형상에 따라 비교하였을 때, Nozzle 입구 형상보다는 기본형상의 냉각 효율이 우수하였고, Diffuser 입구 형상이 가장 안 좋은 결과를 보였다.

(3) 출구 형상이 냉각 효율에 미치는 영향은 출구가 Nozzle 형상일 때, 특정 구간에 대해 온도 감소 효과가 있었으나, 그 영향이 5°C 이하로 미비한 것으로 판단된다. 따라서 출구 형상이 냉각 성능에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

(4) Diffuser 입구 형상인 경우, 출구 형상을 Diffuser로 변경한 결과, 냉각 효율은 배터리의 모듈의 중앙으로 유량이 집중되어 냉각 성능이 개선되는 것을 알 수 있었다.

(5) Diffuser 출구 형상인 해석 조건 4가 냉각 성능이 가장 좋은 것으로 판단된다. 이는, 발열하는 부분에 공기가 집중되고, 출구부근의 Diffuser 형상이 냉각이 끝난 공기의 배출이 원활히 진행되어 냉각 성능이 개선된 것이라고 판단된다.

참고문헌  
(References)

- (1) 2012, "Automotive Technology and Outlook," *Auto Journal of KSAE*, Vol. 34, No. 6, pp. 47~53.
- (2) Kim, J. M., 2013, "Comparative Analysis of Maximum Driving Range of Electric Vehicle and Internal Combustion Engine Vehicle," *Transactions of the KSAE*, Vol. 21, No. 3, pp. 105~112.
- (3) Lee, D. S., 2013, "Optimization of Battery Power Distribution to Improve Fuel Consumption of Fuel Cell Hybrid Vehicle," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 3, pp. 31~36.
- (4) Won, J. P. and Lee, H. S., 2011, "The Need to Develop Thermal Management System Technologies of Electric Driven Vehicles (EV, PHEV, FCEV)," *Auto Journal of KSAE*, Vol. 33, No. 12, pp. 22~28.
- (5) Lee, G. E., Ko S. Y., Hong, S. C., Ahn K. Y., Nam J. D. and Kim H. S., 2011, "Development of Control Strategy and Performance Verification for Battery/Supercapacitor Hybrid ESU in Room and Low Temperatures," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp. 2622~2627.
- (6) Park, S. J., 2013, "Hybrid and Electric Vehicle Thermal Management System Simulation," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 42, No. 10, pp. 48~57.
- (7) Lee, D. R., 2013, "Forced Heat Transfer Characteristics of HEV Battery for Different Structures," *Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 174~178.
- (8) Jang, I. H., Park, J. Y., Kim, D. H. and Yun, S. S., 2010, "Analysis of Cooling Efficiency According to Inlet/Outlet Position of HEV Battery Module," *KSME Annual Conference Proceedings*, pp. 3457~3460.
- (9) Lee, J. S., Yang, K. Y., Kuk, J. Y. and Park, J. C., 2011, "An Analytical Approach for the Battery Cooling of Hybrid Battery Package," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp. 508~514.
- (10) Park, J. H., Choi, B. K., Kim, S. G. and Jeong, J. H., 2011, "Study on the Prediction Methodology of Cooling Performance in HEV Battery Package Using CFD," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp. 2790~2794.
- (11) Kim, J. Y., Choi, W. C. and Lee, S. J., 2013, "Battery Swappable Smart Electric Bus Energy Consumption Predictive Simulation Verification for Smart Transportation System," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp. 1805~1810.
- (12) Suh, H. K., 2013, "Effect of Inlet Geometry on the Cooling Performance of Battery Pack for an Electric Vehicle," *Journal of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 679~684.
- (13) Jang, I. H., Choe, J. H., Park, J. Y. and Seol, S. Y., 2010, "Analysis of Forced Cooling Efficiency According to case of HEV Battery Module," *KSME Annual Conference Proceedings*, pp. 252~257.
- (14) Suh, H. K., 2013, "Numerical Analysis of Internal Flow and Temperature Distributions of Battery for the Electric Vehicle," *Journal of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 15, No. 6, pp. 813~818.