

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.6.403>

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

하이브리드/전기 자동차용 수냉식 배터리 셀의 냉각성능에 관한 수치 해석적 연구

권 화 빈* · 박 희 성**

* 창원대학교 기계공학부

Numerical Investigation of Cooling Performance of Liquid-cooled Battery in Electric Vehicles

Hwabhin Kwon and Heesung Park**

* Dept. of Mechanical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

(Received December 7, 2015 ; Received March 11, 2016 ; Accepted March 20, 2016)

Keyword : Battery(배터리), Coolant Flow Channel(냉각수 유동 채널), Antifreeze(부동액), Design Optimization(최적화), Heat Transfer(열전달)

초록: 리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 안정적인 충전/방전 특성을 내재하고 있어 하이브리드 및 전기자동차에 보편적으로 사용된다. 리튬 이온 배터리의 효율은 배터리 자체의 온도 특성에 직접적인 영향을 받으므로, 열을 효율적으로 냉각하는 기술이 요구된다. 본 논문에서는 수냉식 배터리 냉각 시스템의 냉각 성능과 펌프 소모동력에 관한 전산유체해석을 수행하였다. 이를 위해 배터리 셀의 냉각수 유량 및 냉각 채널의 특성에 따른 냉각 성능을 수치적으로 예측하였다. 이를 바탕으로 250개 배터리 셀을 기준으로 유량 및 차압에 의한 소모동력을 계산하였다. 이러한 연구는 차세대 하이브리드 및 전기자동차의 시간에 따른 배터리의 온도 변화 및 충/방전 효율 최적화 기술에 적용할 수 있는 기초 연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: Lithium-ion batteries are commonly employed in hybrid electric vehicles (HEVs), and achieving high energy density in the battery has been one of the most critical issues in the automotive industry. Because liquid cooling containing antifreeze is important in automotive batteries to enable cold starts, an effective geometric configuration for high-cooling performance should be carefully investigated. Battery cooling with antifreeze has also been considered to realize successful cold starts. In this article, we theoretically investigate a specific property of an antifreeze cooling battery system, and we perform numerical modeling to satisfy the required thermal specifications. Because a typical battery system in HEVs consists of multiple stacked battery cells, the cooling performance is determined mainly by the special properties of antifreeze in the coolant passage, which dissipates heat generated from the battery cells. We propose that the required cooling performance can be realized by performing numerical simulations of different geometric configurations for battery cooling. Furthermore, we perform a theoretical analysis as a design guideline to optimize the cooling performance with minimum power consumption by the cooling pump.

1. 서 론

전 세계적으로 친환경자동차 개발이 활발히 이루어지고 있다. 현재까지 친환경자동차용 에너지 저장장치에 사용되는 배터리로써 가장 각광받고 있는

리튬 이온 전지는 에너지밀도가 높아 경량화에 이점이 있고 전해질의 반응 효율이 높다. 또한 기억 효과가 없어 수명이 길다는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾

이러한 리튬 이온 전지를 사용한 파워트레인을 이용하여 상용화 되는 기술은 기존의 엔진과 전기 모터 기술을 채용한 하이브리드 전기 자동차 (Hybrid Electric Vehicle: HEV)⁽²⁾와 전기모터만으로 동작하는 전기 자동차(Electric Vehicle: EV)가 있다.

† Corresponding Author, heesungpark@changwon.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

하이브리드 자동차와 전기자동차는 배기규제와 높은 유가로 인해 대한민국을 포함한 미국, 유럽, 중국 등 전 세계에서 확산되고 있으므로 신진기술 확보에 노력을 기울여야 한다.⁽²⁾

전기자동차와 하이브리드 자동차는 구동을 위한 대용량의 배터리가 요구되고, 배터리 발열에 대한 냉각기술의 필요성도 증가한다. 배터리 냉각 시스템의 기계적 오류가 발생하면 자동차의 화재⁽³⁾ 또는 배터리 셀의 온도 불균형 증가로 배터리의 수명이 감소하거나 배터리 팩의 열폭주가 나타날 수 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 그러므로 안정성을 고려하여 배터리의 동작 허용 온도를 55 °C 이하로 제한한다.⁽⁷⁾

T. Yiksel과 J. Michalek⁽⁸⁾은 배터리 냉각과 수명과 관계를 규명하였고, H. Teng 등⁽⁹⁾은 이로 인해 HEV/EV용 배터리의 열적 관리 시스템을 이용하여 온도의 균일성 및 냉각 성능을 확보할 수 있음을 제안하였다.⁽³⁾ N. Javani 등⁽¹⁰⁾은 PCM(Phase change materials)방식을 이용하여 배터리 냉각방식을 제시하였고, H. Park⁽¹¹⁾은 공냉식을 사용한 하이브리드 전기 자동차에 리튬-이온 배터리 냉각을 제안하였다. 또한 나노입자유동을 이용하여 전기 자동차 배터리용 냉각수로 사용하는 기술도 개발되고 있다.⁽¹²⁾ 저밀도 에너지 배터리에서는 공냉식과 수냉식이 모두 가능하나, 고밀도 배터리에서는 냉각수를 활용한 수냉식 시스템이 가장 효율적인 열관리 방법이다.⁽⁵⁾ 고밀도 전기 배터리의 무게는 차량에 따라 250~500 kg으로 무겁고 이에 비례하여 부피도 증가한다. 효율적인 공간활용을 위해 배터리 셀을 직사각형 형태로 만들어 적층한 스택을 사용하는 방식이 많아지고 있다.^(5,13)

전기자동차용 배터리의 냉각 시스템에 따른 추가적인 전력을 소비하므로 자동차의 연비가 감소한다. 그러므로 내부의 전력을 최소화 하는 냉각방식을 제시하려고 한다. 따라서, 냉각을 위한 소모 전력을 최소화 시키기 위한 냉각 판의 구조를 수치해석적으로 연구하였고, 유동경로 내부에 벽의 수를 변화하며 각각의 냉각특성을 예측하였다. 특히 자동차에 사용되는 배터리는 작동 온도 범위가 영하의 저온도 포함되므로 프로필렌 글리콜(Propylene glycol: PG)가 포함된 냉각수를 사용한다. 프로필렌 글리콜과 물의 혼합액을 사용하여 전기자동차용 배터리의 냉각 성능 및 소모 전력을 예측하였다.

2. 수치해석

2.1 해석조건 및 계산영역

전기자동차의 배터리는 Fig. 1과 같은 작은 배터

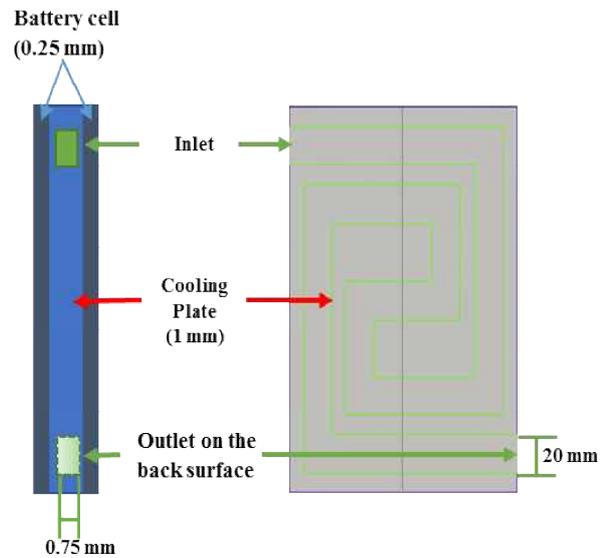


Fig. 1 Detail of cooling plate

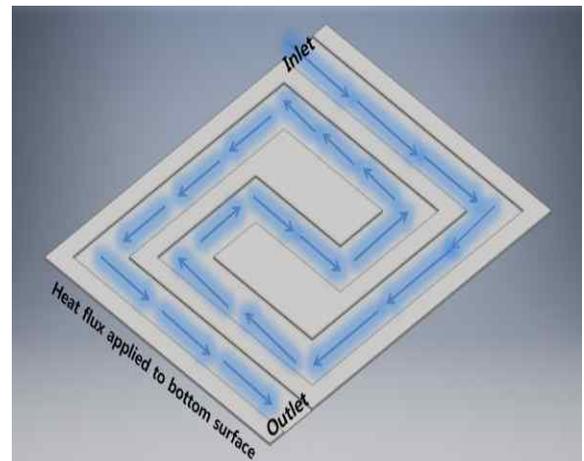


Fig. 2 Numerical calculation domain

리 셀의 집합체이다. 이러한 각각의 셀($t=0.25$ mm)에 Fig. 1과 같은 냉각 판($t=1$ mm)을 삽입하여 각각의 셀 사이에서 열전달을 유도하는 방식으로 설정되었다. 이러한 굽은 형태의 냉각수 채널 형상 구성은 이전 논문의 결과를 참고하여 선택하였다.⁽¹⁴⁾

Fig. 2에는 배터리 셀과 냉각유로를 나타내었다. 냉각수 입구와 출구는 서로 다른 반대 방향에 위치해 있으며 냉각유로에 의해 배터리 셀이 냉각된다.

Table 1에 나타낸 바와 같이 수치해석 모델을 선정하고, 냉각 판과 배터리의 재질은 알루미늄으로 가정하였다. 냉각수의 유동경로 내부에 내벽을 설정하고 벽의 수를 최대 6개까지 변화시켰고, 내벽의 두께와 유로 및 격벽의 비율을 일정하게 고정하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 총 여섯 가지

Table 1 Design specifications

Properties	Value
Battery cell thickness [mm]	0.25
Width [mm]	160
Height [mm]	200
Coolant channel thickness [mm]	1
Coolant channel width [mm]	20
Coolant Channel wall width [mm]	2
Heat conductivity [W/m·K]	202
Heat capacity [J/kg·K]	871
Density [kg/m ³]	2719

Table 2 Properties of coolant at 295 K

PG content [wt %]	0 %	50 %
Heat capacity [J/(kg·K)]	4181	3633
Density [kg/m ³]	999	1053
Viscosity [10 ⁻⁵ Pa·s]	8.9	1900
Thermal Conductivity [W/(m·K)]	0.59	0.34

케이스에 대해 수치해석을 진행하였다.

2.2 수치해석 방법

열 유동 해석에 사용되는 물성치는 Table 2에 정리하였고, 각 물성치는 온도 변화를 고려하였다.

하이브리드 자동차용(270 V, 1400 Wh, 20 Ah) 리튬이온 배터리 셀의 평균 발열량을 500 W/m²으로 가정하여 수치해석을 수행하였다.⁽¹⁵⁾

상용 해석 소프트웨어(COMSOL)를 이용하여 배터리 셀의 냉각에 대한 온도분포, 유량 및 압력분포를 계산하였다.

수력직경을 이용하여 최대 레이놀즈 수를 계산⁽⁹⁾했을 때 1100이므로 냉각수에 의한 유동은 층류 유동의 가정이 타당하다. 그러므로 냉각수는 비압축성과 정상상태로 해석하였다. 열유동 해석 모델의 도메인에 격자를 직육면체 요소로 격자계를 구성하였다. 식 (1) ~ (3)의 비압축성 유체의 연속방정식과 Reynolds-Average Navier-Stokes equations (RANS)를 이용하여 유한 요소법으로 이산화하였다. 해석 결과의 타당성을 입증하기 위하여 수렴 조건은 10⁻⁴으로 설정하였고, 식 (4)를 이용하여 정상상태의 열전달을 검증하였다.

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F} \quad (1)$$

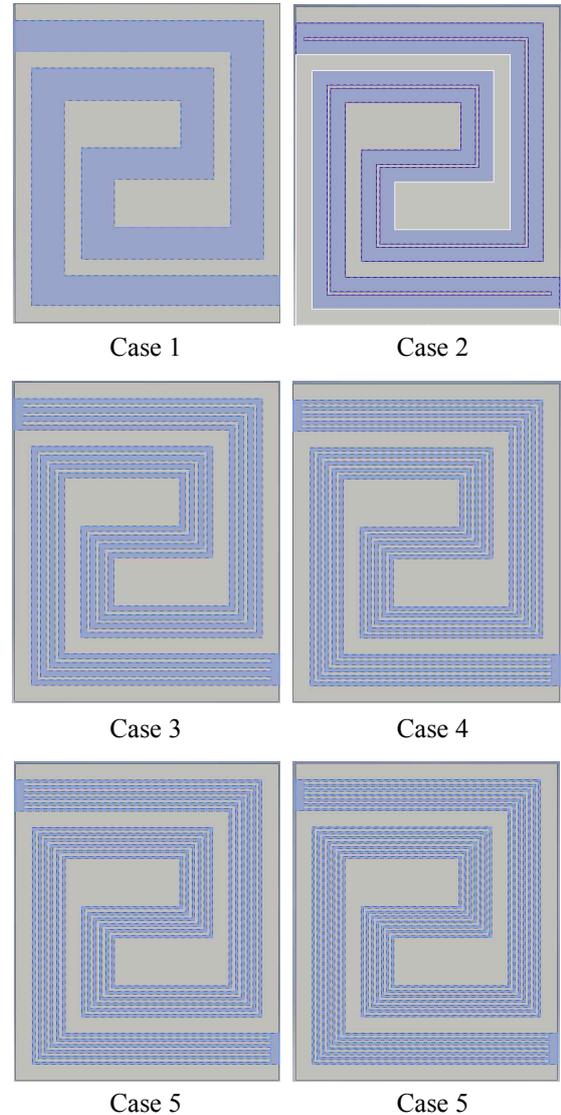
$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (4)$$

Table 3 Boundary conditions

Inlet temperature [K]	313.15 ⁽⁷⁾
Representative flow rate [L/min]	0.0175
Outlet	Pressure outlet
Inward heat flux [W/m ²]	500 W/m ²
External walls	Adiabatic condition

**Fig. 3** The coolant passages for the simulated cooling plates

격자의 개수를 1,980,214개까지 증가시켜가며 해석 영역상의 출구온도 변화를 Fig. 4와 같이 비교하였다. 그 결과 348,410개 이상에서 온도가 균일하게 해석 되었다. 그렇지만 유동 및 열 경계층의 정확한 해석을 위해 611,487개의 격자를 사용하였다. 초기 배터리 온도를 외기 온도인 40 °C (313.15 K)⁽⁷⁾으로 설정하고 아래 면에서 열 유속으로 인한

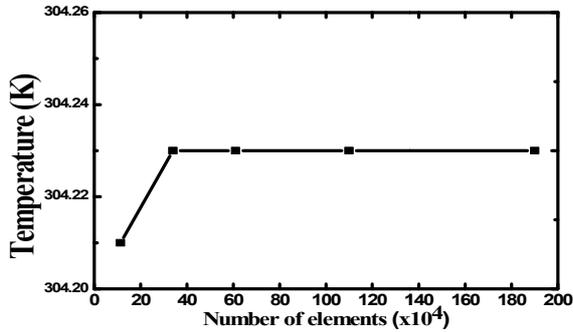


Fig. 4 Mesh verification

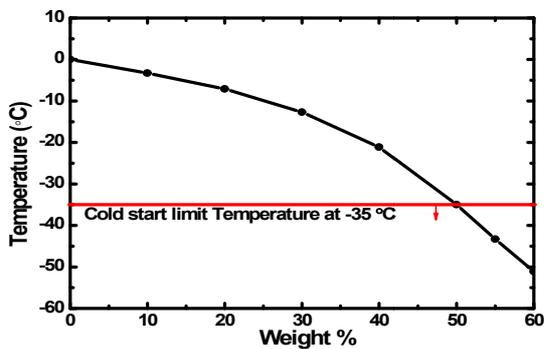


Fig. 5 Cold start up range with respect to wt %⁽¹⁶⁾

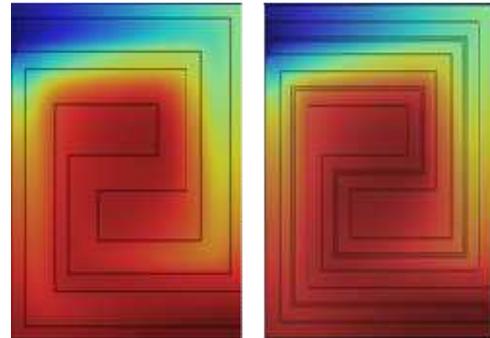
발열에 대하여⁽¹⁵⁾ 열 및 유동 분포에 관한 수치 해석을 수행하였다.

이러한 수치 해석 결과를 이용하여 250개의 셀을 가진 배터리 팩의 유량, 압력강하 및 온도분포를 계산하여 냉각을 위한 펌프 소모 전력을 예측하였다.

3. 결과 및 토의

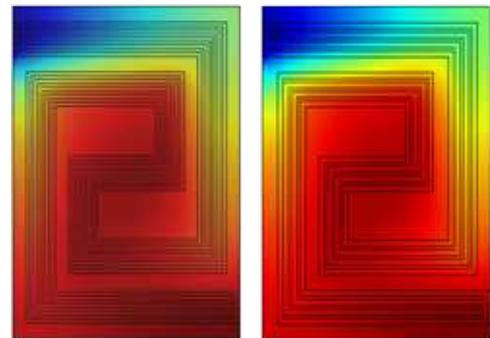
자동차에 쓰이는 냉각수는 작동범위가 영하의 온도도 포함하기 때문에 열지 않는 성질이 중요하다. 자동차 산업에서 영하의 저온에서도 사용 가능한 성질을 냉시동이라고 한다. 프로필렌 글리콜의 함량에 따른 냉시동 범위를 Fig. 5와 같이 표시하면 60 wt % 일 때는 223.15 K (-51 °C)까지 액체의 상태로 냉각을 할 수 있다. 이상적인 자동차용 유체의 작동범위는 238.15 K (-35°C)⁽¹⁷⁾이므로 본 연구는 냉시동의 기준을 충족하는 50 wt % 냉각수를 적용하였다.

Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 냉각 채널 내의 격벽 개수가 변화할 때 온도 분포가 Fig. 6과 같이 계산되었다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 0.01626 L/min에서 Case 6의 경우 최소 냉각 기준 온도인 328.15 K보다 낮은 328.12 K이었고, Case 1에서 Case



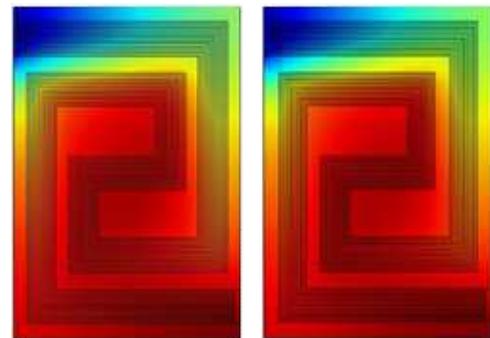
(a) Case 1

(b) Case 2



(c) Case 3

(d) Case 4



(e) Case 5

(f) Case 6

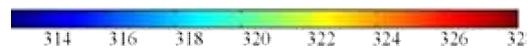


Fig. 6 Temperature distributions for the simulated cases (0.01626 L/min)

5의 경우는 328.15 K보다 높게 계산되었다. 계산된 최대온도를 Fig. 7에 표시 하였다. 유동장 내부의 내벽이 증가할수록 열전달 효율이 증가하여 배터리의 온도가 감소하였다. 계산된 결과를 선형 보간하여 냉각 최소기준 온도인 328.15 K을 만족하는 Case별 유량을 Table 4와 같이 정리하였다. 배터리 셀 내부의 유동에 대한 차압을 수치해석 방법으로 계산하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 유동장 내부에 내벽의 수가 많거나 유량이 증가할수록 입/출

Table 4 Flow characteristics for desired cooling performance

Case	Flow rate [L/min]	ΔP [kPa]	Pump power [W]
Case 1	4.15	200	12.73
Case 2	4.17	218	13.93
Case 3	4.11	315	19.86
Case 4	4.09	396	24.89
Case 5	4.08	498	31.16
Case 6	4.06	584	36.37

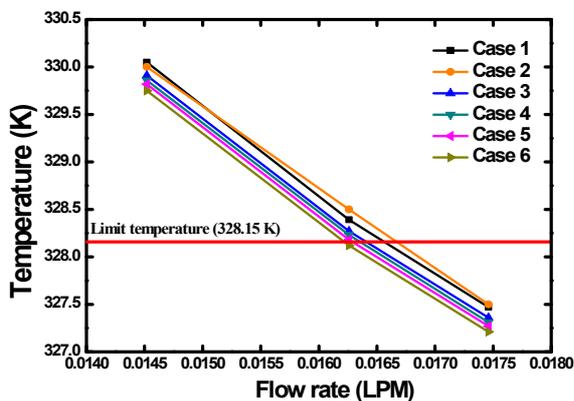


Fig. 7 Maximum temperatures for the simulated cases

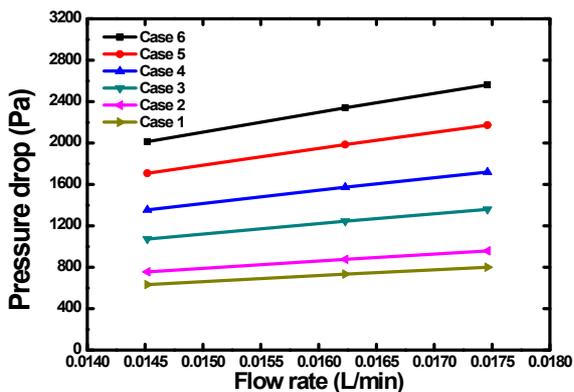


Fig. 8 Pressure drop for the simulated cases

구의 차압이 커지는 것을 알 수 있다.

배터리 냉각을 위한 펌프 소모 전력은 체적유량과 압력의 곱으로 계산된다.⁽¹⁸⁾ 250개의 배터리 셀로 이루어진 배터리 팩을 구동하기 위한 펌프를 고려하였다.^(19, 20) 펌프 용량은 12 V / 20 W이므로, 이를 기준으로 소모전력을 예측하였다.

Fig. 9에는 250개의 셀로 구성된 배터리 팩의 냉각에 필요한 펌프소모전력을 표시하였다. Case 1과 같은 냉각채널의 격벽을 적용한 경우 펌프의 소모전력을 12.73 W로 가장 낮은 값을 보였다. 반면에

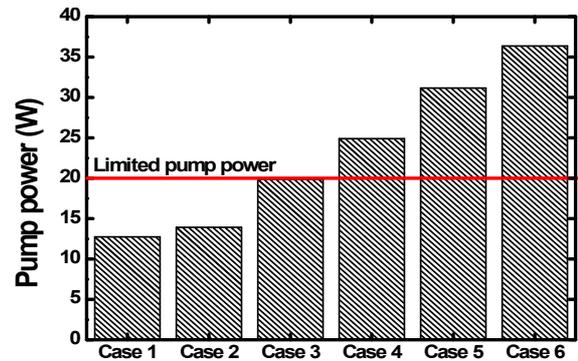


Fig. 9 Required pump power for the different cases

Case 2~Case 6과 같이 격벽의 개수가 증가하는 경우 펌프 소모전력은 13.93W~36.37 W로 예측되었다. 특히 Case 1의 경우 펌프용량을 만족시키는 유량, 차압의 관계를 나타냈으나, Case 4~6의 경우 펌프 용량을 초과하였다. 따라서 펌프의 용량과 냉각성능을 비교한 결과 250개의 셀을 55 °C 이내로 유지하기 위해 Case 1과 같은 냉각관을 적용하면 12.73 W의 전력이 소모된다.

4. 결 론

본 논문은 배터리 냉각방식 중 수냉식에 대하여 온도분포와 압력분포에 대한 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 최대 허용온도 (55°C)를 유지하기 위한 프로필렌 글리콜(50 wt %)을 사용한 수냉식 배터리 셀 냉각에 대한 수치해석을 수행하였다.

(1) 배터리 셀에 대하여 냉각수 유량이 0.01746 L/min일 때 유로 내벽의 개수를 증가시키면 냉각 성능이 증가하나 내부의 차압도 역시 증가하였다. 즉 단일 내벽의 경우 최대온도가 327.5 K (54.35°C), 차압이 200 kPa이나, 6개 내벽의 경우 최대 327.21 K (54.06°C), 차압은 584 kPa로 계산 되었다.

(2) Case 1과 같이 단일 냉각유로를 적용한 250개의 배터리 셀로 구성된 배터리 팩의 최대 온도를 55 °C 이내로 유지하기 위해서는 12.73 W의 펌프소모전력이 필요할 것으로 예측된다.

(3) 본 연구에서 제시한 수치해석 기법 및 결과에 대한 검증을 위해 실험적인 연구가 더 필요하다.

후 기

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율 연구 과제 연구비 지원으로 수행 된 결과임.

참고문헌
(References)

- (1) Jeong, T., Sun, J., Kim, S. and Noh, Y., 2014, "Analysis of the Cooling Performance and Characteristic Using Lithium-ion Battery for Eco-friendly Vehicle," *KSAE sector General Conference 2014*, pp. 1192~11929.
- (2) Kwon, M. S., 2007, "Development Status and Trends of Environmental Friendly Vehicles," *KSAE HEV and FCEV Workshop*, pp. 1~11.
- (3) Oh, H. and Park, S., 2014, "Effect of Coolant Flow Characteristics in Cooling Plates on the Performance of HEV/EV Battery Cooling Systems," *Transactions of KSAE*, Vol. 22, No. 3, pp.179~185.
- (4) Park, J. and Lee, K., 2009, "The Safety of Lithium Ion Polymer Battery System for Hybrid Electric Vehicle," *Auto Journal KSAE*, Vol. 31, No. 1, pp. 44~48.
- (5) Jarrett, A. and Kim, I. Y., 2011, "Design Optimization of Electric Vehicle Battery Cooling Plates for Thermal Performance," *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 23, pp. 10359~10368
- (6) Mahamud, R. and Park, C., 2011, "Reciprocating Air Flow for Li-ion Battery Thermal Management to Improve Temperature Uniformity," *Journal of Power Source*, Vol. 196, pp. 5685~5696.
- (7) Tong, W., Somasundaram, K., Birgersson, E., Munjumdar, A. S. and Christopher, Y., 2015, "Numerical Investigation of Water Cooling for a Lithium-ion Bipolar Battery Pack," *International Journal of Thermal Science*, Vol. 94, pp. 259~269.
- (8) Yuksel, T. and Michal, J., 2012, "Development of a Simulation Model to Analyze the Effect of Thermal Management on Battery Life," *SAE Technical Paper*, No. 2012-01-0671.
- (9) Teng, H., Ma, Y., Yeow, K. and Thelliez, M., 2011, "An Analysis of a Lithium-ion Battery System with Indirect Air Cooling and Warm-Up," *SAE Int. J. Passeng. Cars-Mech. Syst.*, Vol. 4, Issue 3, pp. 1343~1357.
- (10) Javani, N., Dincer, I., Naterer, G. F. and Rohrauer, G. L., 2014, "Modeling of Passive Thermal Management for Electric Vehicle Battery Packs with PCM Between Cells," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, issue 1, pp. 307~316
- (11) Park, H., 2013, "A Design of Air Flow Configuration for Cooling Lithium Ion Battery in Hybrid Electric Vehicles," *Journal of Power Sources*, Vol. 239, pp. 30~36.
- (12) Sonage, B. K. and Mohanan, P., 2015, "Miniaturization of Automobile Radiator by Using Zinc-water and Zinc Oxide-water Nanofluid," *J. Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, pp. 2177~2185.
- (13) Kim, G. H. and PESARAN, A. A., 2015, "Battery Thermal Management Design Modeling," *22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Conference and Exhibition*, Yokohama, Japan.
- (14) Yu, S. H., Sohn, S., Nam, J. H. and Kim, C. J., 2009, "Numerical Study to Examine the Performance of Multi-pass Serpentine Flow-fields for Cooling Plates in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *J. Power Sources*, Vol.194, pp. 697~703.
- (15) Murashko, K. A., Mityakov, A. V., Pyrhönen, J., Mityakov, V. Y. and Sapozhnikov, S. S., 2014, "Thermal Parameters Determination of Battery Cells by Local Heat Flux Measurements," *J. Power Sources*, Vol. 271, pp. 48~54.
- (16) Ryu, T., Lee, E. and Choi, J., 1999, "Comparison of Engine and Vehicle Cooling Performances with Ethylene Glycol Coolant and Propylene Glycol Coolant," *Journal of KSAE*, Vol. 7, pp. 193~201.
- (17) Lee, J. H. and Yoo, D. W., 2014, "A Study on the Stress and Endurance Life Depending on the Load and Temperatures for Automobile spindle," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, pp. 329~330.
- (18) Reznania, A., Rosendahl, L. A. and Andreasen, S. J., 2012, "Experimental Investigation of Thermoelectric Power Generation Versus Coolant Pumping Power in a Microchannel Heat Sink," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, issue 8, pp. 1054~1058.
- (19) Li, J. and Mazzola, M. S., 2013, "Accurate Battery Pack Modeling for Automotive Applications," *J. Power Sources*, Vol. 237, pp. 215~228.
- (20) Choi, J. Y., Park, S. Y., Sung, S. Y., Hahn, C. and Ha, B., 2013, "Analysis of Teardown Benchmark About Nissan Leaf Electric Vehicle," *KSAE Sector General Conference*, pp. 1746~1746.