

고속 충전을 위한 이차전지모듈 냉각시스템 기술 개발

강석준¹ · 김미주² · 성동길² · 오미영³ · 배준수^{4*}

¹전북대학교 융합기술경영학과, ²(주)CORN,
³(재)전북테크노파크 이차전지소재융합팀, ⁴전북대학교 산업정보시스템공학과

(2022년 7월 28일 접수 : 2022년 8월 8일 수정 : 2022년 8월 11일 채택)

Development of Secondary Battery Module Cooling System Technology for Fast Charging

Seok Jun Kang¹, Miju Kim², Donggil Sung², Miyoung Oh³, and Joonsoo Bae^{4*}

¹Management of Technology, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Jeonju-si, 54896 Korea

²CORN, 40, Techno-daero 4-gil, Hyeonpung-eup, Dalseong-gun, 43020 Korea

³Secondary Battery Materials Convergence Team, Jeonbuk Technopark, 224,
Wanjudan 6-ro, Bonddong-eup, Wanju, Jeonbuk, 55315 Korea

⁴Industrial and Information Systems engineering,
Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Jeonju-si, 54896 Korea

(Received July 28, 2022 : Revised August 8, 2022 : Accepted August 11, 2022)

초 록

하이브리드 자동차 및 전기 자동차(하이브리드 및 전기자동차)용 배터리 팩은 고용량 대면적 셀을 적용하기 때문에 배터리 셀의 평균 온도는 중요한 관리 기준이 된다. 최근에는, 배터리 충전 시간을 줄이기 위한 고속 충전 기술이 요구되고 있으며, 이에 따른 셀과 전장부품의 발열로 인해 배터리 팩 성능 및 수명의 저하가 발생한다. 따라서, 고속 충전에 따른 배터리 팩의 성능저하를 방지하기 위해 효과적인 배터리 냉각시스템이 필요하다. 본 연구에서는 파우치형 고속 충전용 배터리 셀 적용 냉각시스템 및 모듈 설계를 도출하고 배터리의 효율을 극대화할 수 있는 냉각성능을 분석하였다. 베이퍼챔버 냉각시스템을 적용한 모듈의 온도 편차 분석 결과 모듈 내 온도 편차는 5.82 °C로 기존 알루미늄 냉각판 대비 낮은 온도를 보여 우수한 냉각시스템 효과를 보였다.

Abstract : Because high power with large size cell is used for the battery pack of hybrid electric vehicles and electric vehicles (HEV and EV), average temperature in a battery cell is the important criteria of the thermal management of the battery pack. Furthermore, fast charging technology is required to reduce battery charging time. Since battery pack performance and lifespan are deteriorated due to the heat of cells and electronic components caused by fast charging, an effective cooling system is required to reduce performance deterioration. In this study, a cooling system and module design applied to a pouch-type for fast charging battery cell are investigated, and the cooling performance that can maximize the efficiency of the battery was analyzed. The result shows that the vapor chamber cooling system has better cooling performance, the temperature drop in the module was 5.82 °C compared with aluminum cooling plates.

Keywords : Vapor chamber, Cooling system, Fast charging, Thermal management, Pouch-type battery

*E-mail: jsbae@jbnu.ac.kr

1. 서 론

지구온난화에 따른 기후변화 위기가 현실로 다가오면서 온실가스 감축은 시대적 과제로 떠올랐다. 탄소 배출량과 흡수량을 같게 하는 탄소중립이 목표로 제시되면서 이를 위해 신재생에너지 전환에 박차를 가하고 있는 상황이다.¹⁻³⁾ 이에 따라 자동차 업계는 내연기관 자동차 단종 선언 및 친환경자동차의 개발을 활발히 진행 중에 있으며, 내연기관의 가장 효과적인 대체 수단으로 전기자동차가 대두되었다. 전기자동차는 배기규제와 높은 유가로 인해 우리나라를 포함한 미국, 유럽, 중국 등 전 세계에서 확산되고 있으며, 이에 따라 전기자동차용 배터리에 대한 개발 및 연구가 활발히 진행되고 있다.⁴⁻⁶⁾

전기자동차 배터리 용량은 1회 충전 주행거리와 직결되기 때문에 설계 가능한 최대용량의 배터리를 탑재하고 있으나, 대용량의 배터리는 상대적으로 많은 충전시간을 필요하게 된다. 대용량 배터리시스템을 탑재한 전기자동차의 고속 충전은 큰 열에너지를 발생시키고 모듈 내 또는 팩 내 온도편차로 셀 간 내부 저항의 불균형을 만들며 성능차이를 일으킬 뿐만 아니라 배터리팩의 수명까지도 저하시킬 수 있다. 따라서 배터리시스템 전체의 성능, 수명, 안전성 등을 위해서 효율적인 열관리 기술의 연구는 필수적이다.⁷⁻¹⁰⁾

기존의 파우치형 배터리 셀이 적용된 냉각시스템으로는 첫 번째, 케빈 내 공기를 이용하는 방법으로 셀을 직접 냉각하는 직접공냉식 방법과 알루미늄 냉각판을 냉각하는 간접공냉식 방법이 있다. 그리고 두 번째, 냉각수를 이용한 방법으로 냉각수가 셀을 직접 냉각하는 직접수냉식 방법과 알루미늄 냉각판을 냉각하는 간접수냉식 방법이 있다.⁴⁾ 냉각판의 재질은 흔히 알루미늄, 구리 등의 금속 기반 냉각판을 많이 적용하고 있다. 하지만, 무게와 가격 측면 및 냉각판의 구조상 다수의 셀이 밀집되어 있어서 배터리 팩의 중심에 위치한 셀의 온도가 타 셀들에 비해 과도하게 상승할 수 있는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 냉각판의 구조 개선이 필요하다.⁶⁻⁸⁾

본 연구에서는 파우치형 고속 충전용 배터리 셀에 적용되는 배터리 냉각시스템의 냉각 성능을 확인하기 위해 냉각시스템을 설계하였다. 베이퍼챔버는 내부에 냉매가 존재하고 상변화에 의한 냉각 방식으로 증발부에서 증발한 액체가 방열부에서 응축하여 수로구조를 따라 다시 증발부로 회귀하는 프로세스를 반복하면서 대량의 열을 방열하는 구조로서, 형상에 제약이 없고 평면상 온도 균일도가 높으며 열 분산 효과가 매우 뛰어나다. 이에 따라 본 연구는 파우치형 고속 충전용 배터리 셀 적용 냉각시스템 설계를 도출하고 배터리의

효율을 극대화할 수 있는 냉각성능을 분석하였다.

2. 실 험

2.1 베이퍼챔버 냉각시스템 제작

베이퍼챔버를 적용한 냉각시스템을 제작하기 위해서 베이퍼챔버와 냉각유로를 설계하였으며 기존 냉각시스템과의 비교를 위해 베이퍼챔버 대신 알루미늄 냉각판을 적용한 냉각시스템을 함께 제작하였다. 알루미늄 냉각판은 열 전도율이 우수하고 가벼워 전기자동차 배터리 모듈에 냉각 플레이트로써 사용되고 있어 냉각시스템의 비교군으로 사용했다.

베이퍼챔버와 알루미늄 냉각판은 동일한 크기로 제작되었으며(L: 290 mm, H: 101.35 mm, D: 14.5 mm, T: 2.5 T) 효율적인 모듈의 열관리를 위해 셀 당 1개의 베이퍼챔버 또는 알루미늄 냉각판을 적용하여 냉각시스템을 제작하였다. 베이퍼챔버는 냉매와의 반응성과 효과적인 냉각효과를 고려하여 SUS 재질(STS430RE)로 제작되었으며 내부에 모세관이 존재한다. 모세관을 형성하기 위해 가공된 판재를 에칭한 후 용접을 통해 제작하였고, 냉매는 물을 사용하며 냉매의 상변화가 빠르게 일어나도록 하기 위해 내부 환경을 진공으로 형성시켰다. 제작된 베이퍼챔버는 냉각유로와 열교환을 원활히 하도록 L자 형태로 제작되었으며 동일한 크기로 알루미늄 냉각판을 제작하여 비교 실험을 진행하였다. 모듈 전체를 냉각하는 냉각유로는 4개의 Nipple과 2개의 유로를 형성하도록 설계하였다. IN/OUT 부를 통해 냉각수가 흐르면서 상단에 위치한 베이퍼챔버와의 열 교환을 통해 모듈의 효과적인 냉각이 이루어질 것으로 예상된다.

2.2 배터리 모듈 제작 및 기초 성능 분석

모듈 제작에는 SK 셀(E710, Korea)을 사용했으며, 4S 1P로 구성하였다. 냉각시스템의 성능을 비교하기 위해 각각의 모듈에 베이퍼챔버 및 알루미늄 냉각판을 적용하였으며, 가장 발열이 발생하는 부분인 4 포인트에 열전대를 부착하여 고속 충전 시 셀의 온도 변화를 측정하였다. 냉각유로 상단에 모듈을 고정하기 위해서 점착식 방열패드를 부착하였다. 테스트를 위해 제작한 모듈의 사양은 Table 1과 같으며, 실험에 사용된 셀의 기초 성능 특성 및 냉각판별 온도 특성을 분석하였다.

Table 1. Specifications of cell and module

셀		모듈	
제조사	SK	셀 구성	1P 4S
모델명	E710	공칭전압(V)	14.6
공칭전압(V)	3.65	용량(Ah)	71

2.3 총방전 테스트 및 냉각 성능 평가

모듈 하단에 위치한 냉각유로에 냉각수를 흐르게 하기 위해 칠러(HH55L, 제이오텍)를 이용하였으며, 정확한 비교 평가를 위해 실험환경을 동일하게 설정하여 시험을 진행하였다. 시험 시작 시 냉각수 온도는 20 °C, 유량은 15.2 L/min으로 설정하였으며, 대기온도는 상온으로 설정하였다.

베이퍼챔버와 알루미늄 냉각판으로 각 제작된 모듈을 4가지 항목에 따라 시험을 진행하였다. 두 모듈의 냉각시스템 성능 평가를 위해 총방전기(PCS100-100, PNE Solution)를 사용해 고속충전을 실시하였으며, 데이터 로거(DAQ970A, Keysight)를 사용해 온도특성을 분석하였다. 시험조건은 0.3 C-rate로 방전 후 3 C-rate로 충전 및 10.8–16.6 V의 전위 범위에서 시험을 진행하였으며, 충전과 방전 단계 사이에 30분의 휴지 단계를 두었다. 냉각시스템 적용에 따른 모듈의 냉각 성능을 확인하기 위해 각 모듈 내 최고/최저 관리온도 편차를 측정 하였고 동일한 방법으로 알루미늄 냉각판을 적용하여 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 베이퍼챔버 구조

Fig. 1은 앞서 언급한 베이퍼챔버를 적용한 배터리 모듈 냉각시스템에 대한 모식도이며, (a)는 베이퍼챔버를 적용한 시스템 개략도, (b)와 (c)는 각 시스템을 설명하는 구조와 냉각 유로 분해도이다. 폴리우레탄 패드, 셀, 냉각판을 1세트로 구성하였으며, 내부에 냉매가 존재하여 상변화에 의한 냉각을 하는 냉각판의 특성을 고려하여 모듈을 완성하였다.

Fig. 2(a)는 베이퍼챔버 방열 원리로서, 증발부에 열이 가해지면 내부의 냉매가 기화하게 되고 증발한 액체가 방열부에서 응축하게 된다. 응축된 냉매는 수로 구조를 따라 다시 증발부로 회귀하고 이러한 프로세스를 반복하면서 대량의 열을 방열하는 시스템이다. 이때, 베이퍼챔버의 내부는 진공상태로 매우 낮은 온도에서도 냉매가 상변화를 일으키는 것을 가능하게 한다. 국부적으로 발생된 열을 진공 공간상의 냉매 증발 및 응축 현상을 이용하여 방열판 전면에 열을 순간적으로 고르게 확산시켜 냉각성능을 극대화 한다. 본 실

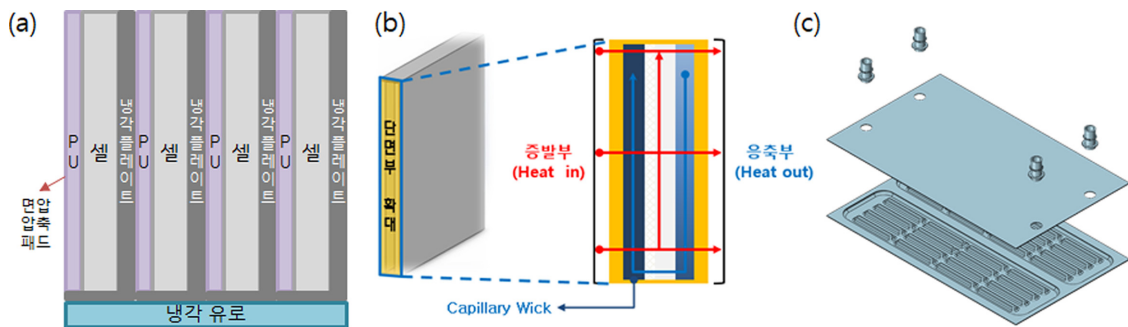


Fig. 1. The schematic of vapor chamber: (a) structure, (b) detailed cross-sectional diagram and (c) exploded view.

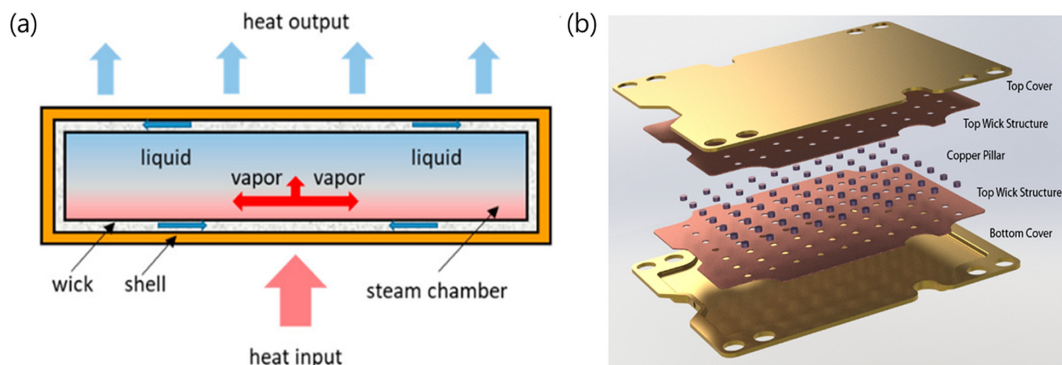


Fig. 2. The mechanism of vapor chamber: (a) heat sink and (b) detailed structure.

험에서 냉매로 사용된 물은 진공상태일 경우 상온에서 기화하므로 냉매의 냉각 프로세스가 정상적으로 작동함을 예상할 수 있다. 베이퍼챔버는 형상에 제약이 없고 평면상 온도 균일도가 높아 열 분산 효과가 매우 뛰어나다. 따라서 넓은 면적에서 발생하는 열을 방열하는 데에 효과적이며 파우치형 셀에 적용했을 때 우수한 성능을 나타낼 것으로 사료된다.

3.2 베이퍼챔버 냉각 효과

모듈 제작 전 베이퍼챔버 효과를 테스트하기 위해 기존에 사용되는 냉각판(알루미늄, 구리)과 비교 분석하였다. Table 2에 따라 세라믹 히터 위에 동일조건에서 54 W 전력을 인가하였고, 3 포인트에서 온도를 측정하여 온도 편차를 비교 분석하였다(Fig. 3). C (가운데) 지점을 비교했을 때는 온도 차이가 없었으나, A 나 B 지점에서 베이퍼챔버의 온도편차가 8.92, 5.15 °C로 가장 낮은 것을 알 수 있다. 이는 베이퍼챔버의 최소 열전도도 약 5,000 W/m·K로 알루미늄 (218 W/m·K) 및 구리(400 W/m·K) 냉각판의 열전도도는 보다 10배 이상 높기 때문에¹¹⁾, 베이퍼챔버 구조에서 열 확산이 고르게 분포가 되는 것이고, 이를 반대로 얘기하면 냉각도 고르게 분포가 되어 빠르게 냉각시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 4과 Fig. 5은 베이퍼챔버와 알루미늄 냉각판으로 제작된 각 모듈의 용량과 전압편차를 나타내었다.

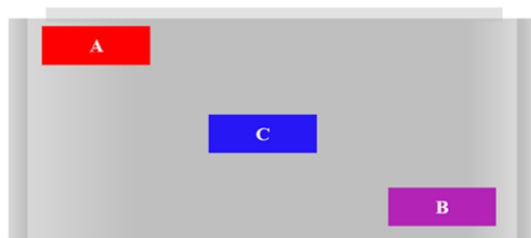


Fig. 3. Temperature area at 3 point by thermocouple.

Table 2. Temperature distribution of plate and vapor chamber

		알루미늄 냉각판	구리 냉각판	베이퍼챔버
Size		260×190×1.5 T		
Heater Temp. (°C)	Ⓐ상	95.48	84.12	77.97
	Ⓑ하	84.09	80.55	74.21
Ⓒ Plate Temp. (°C)		69.05	70.15	69.06
ΔT (°C)	Ⓐ - Ⓒ	26.43	13.97	8.92
	Ⓑ - Ⓒ	15.04	10.40	5.15
Power (W)		54		
Heat Source		Ceramic Heater		
Data Logger		IR-CAMERA (COX-320)		

방전 용량은 베이퍼챔버 71.413 Ah, 알루미늄 냉각판 71.651 Ah로 측정되었고, 모듈의 전압편차 또한 큰 차이가 없어 동일한 셀로 제작되었음을 확인하였다.

베이퍼챔버의 냉각효과를 확인하기 위해 기존에 연구¹²⁾된 냉각챔버와 수냉식 냉각을 적용한 파우치형 배터리 모듈 해석 결과를 분석하였다. 배터리의 발열량을

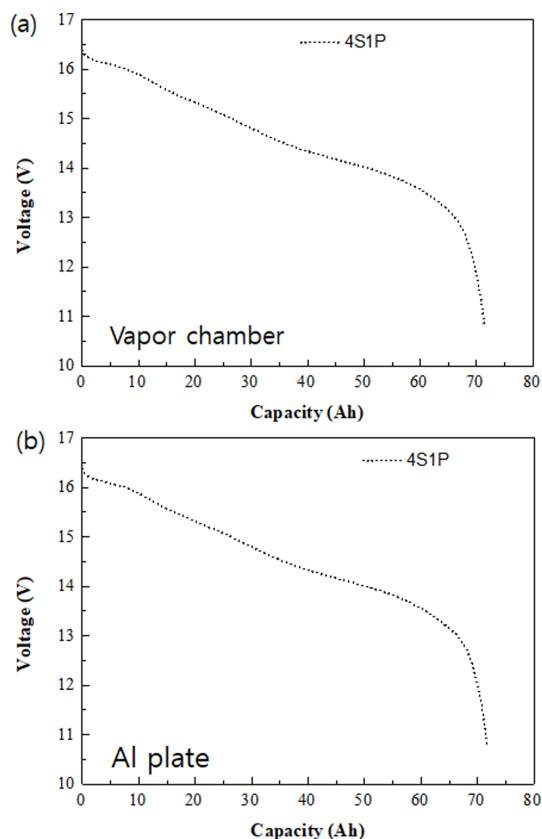


Fig. 4. Discharge capacity of battery module with (a) vapor chamber and (b) Al plate measured at 0.3 C-rate using cycler.

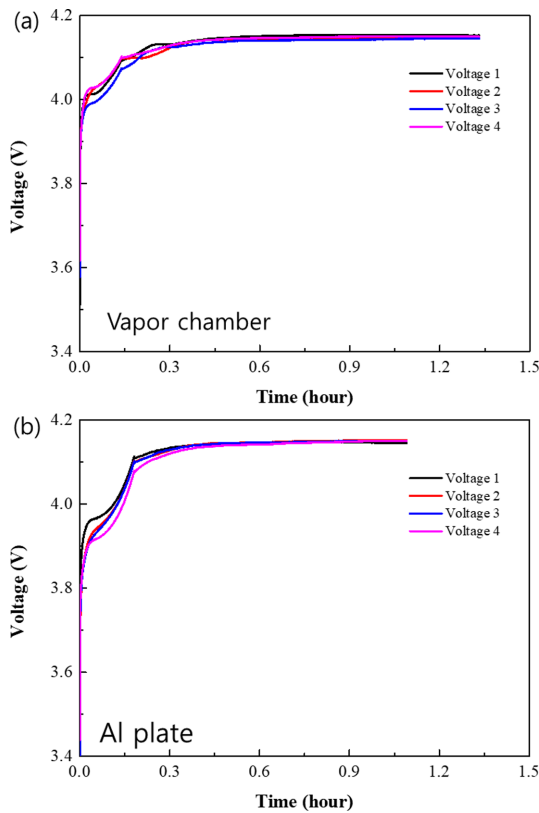


Fig. 5. Voltage deviation of battery module with (a) vapor chamber and (b) Al plate measured at various 0.3 C-rate.

5 C-rate를 기준으로 $225,000 \text{ W/m}^3$ (O. Elsewifty 그룹¹¹⁾의 배터리 물성치) 및 열전도도를 베이퍼챔버 열전도도 구간인 15, 5000, 30000 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 적용하여 분석한 결과 수냉식 냉각을 적용하지 않은 배터리 모듈의 평균온도(61°C) 대비 수냉식 냉각을 사용하였고, 냉각챔버의 열전도도를 적용함에 따라 배터리 모듈의 평균온도는 각각 45.5 , 36.5 , 36.2°C 까지 낮아졌다. 따라서 파우치 배터리 베이퍼챔버 구조의 냉각방식은 배터리 모듈의 온도를 안정하게 유지시키는 효과적인 냉각 방식임을 확인하였고, 실제 셀에 적용하여 냉각 성능을 분석하였다.

베이퍼챔버와 알루미늄 냉각판을 냉각시스템에 적용하여 제작된 모듈의 3 C-rate 고속 충전 시 온도변화를 Fig. 6에 나타냈다. 베이퍼챔버를 적용한 모듈의 경우, 최고 온도가 51.53°C 로 나타났으며 알루미늄 냉각판 모듈에 비해 약 4.6°C 가량 낮은 것을 확인하였다. 또한, 최고 온도가 나타난 시점의 최저온도와의 온도차는 5.82°C 로 베이퍼챔버를 적용한 모듈의 온도편차가 알루미늄 냉각판 적용 모듈(6.57°C)에 비해 낮

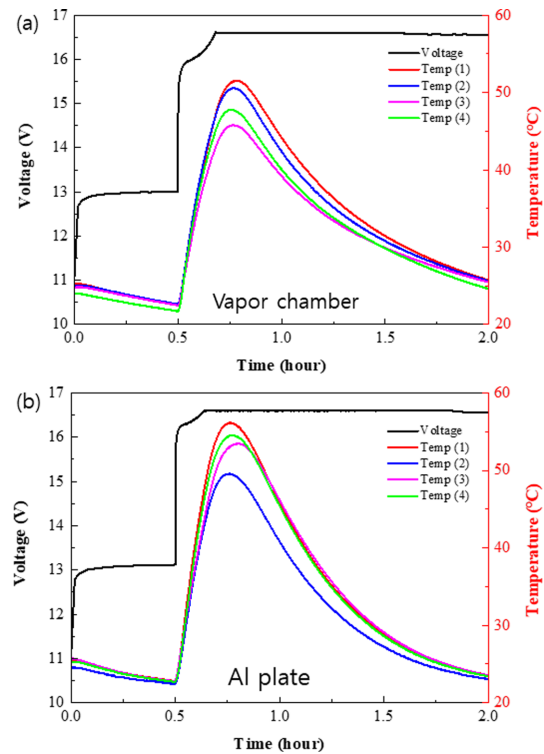


Fig. 6. Temperature of battery module with (a) vapor chamber and (b) Al plate measured at 0.3 C-rate discharge/3 C-rate charge.

은 것으로 나타났다. 베이퍼챔버를 적용한 모듈의 음극부 온도차(1, 2 point)는 1°C , 양극부의 온도차(3, 4 point)는 1.9°C 인 것에 반해 알루미늄 냉각판을 적용한 모듈의 경우 음극부 온도차(1, 2 point)가 6.57°C , 양극부의 온도차(3, 4 point)가 1.38°C 로 매우 불균일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 베이퍼챔버를 적용한 냉각시스템이 기존 전기자동차 배터리 모듈에 적용된 냉각시스템에 비해 배터리의 열관리에 효과적이고 냉각 효과가 우수한 것을 확인하였다.

이러한 실험 결과를 통해 베이퍼챔버를 적용한 모듈이 셀의 발열을 낮추는 것뿐만 아니라 셀의 온도편차를 균일하게 유지함으로써 모듈의 안전성을 높이는 데 기여한 것으로 볼 수 있다. 이는, 앞서 연구된 배터리 물성치를 적용한 모듈 냉각효과 해석 결과를 셀 적용을 통해 확인하였고, 실험된 베이퍼챔버의 구조적 특성이 반영된 효과로 베이퍼챔버 내부의 냉매의 냉각 프로세스가 정상적으로 작동함으로써 온도 균일도가 높아 열 분산 효과가 나타난 것으로 사료된다.

위 실험결과를 고속 충전으로 1 cycle 시험을 진행한 결과이며 cycle 수가 증가하게 되면 모듈 내부의

온도는 더 큰 폭으로 상승할 것이라 예상된다. 따라서, 연속적인 충방전을 진행하게 되면 베이퍼챔버를 적용한 모듈과 알루미늄 냉각판을 적용한 모듈의 최고온도와 내부 온도편차는 더 큰 차이를 보일 것이며 베이퍼챔버 적용 시 보다 균일하고 안정된 냉각 성능을 가능하게 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 전기자동차 배터리의 고속 충전 시에 발생하는 발열을 효과적으로 제어하여 배터리 전체의 성능, 수명, 안정성 등을 향상시키기 위한 배터리 냉각 시스템 설계에 관한 연구로써 배터리 온도에 영향을 미치는 배터리 냉각시스템의 성능을 확인하기 위해 핵심 부품인 베이퍼챔버를 설계하여 냉각시스템에 적용해 냉각 성능을 분석하였다. 기존 전기자동차에 사용되는 알루미늄 냉각판과의 비교를 통해 베이퍼챔버의 냉각 성능을 충방전 시 확인하였으며, 베이퍼챔버를 사용하였을 때 가장 낮은 온도 편차를 보였고, 냉각판의 재질과 냉각시스템의 구조에 따라 높은 냉각 성능의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 베이퍼챔버 냉각 시스템을 적용하여 모듈 관리온도 및 온도 편차 측정 결과 최고관리 온도는 4.6 °C 낮아졌고, 모듈 내 온도 편차는 5.82 °C로 알루미늄 냉각판과 비교 시 낮은 온도를 보여 우수한 냉각시스템 효과를 알 수 있었다. 본 연구를 기반으로 베이퍼챔버의 재질과 냉각 유로 설계 변수를 적용한 추후 연구를 통해 최적의 베이퍼챔버 냉각시스템을 전기자동차 배터리 팩에 적용 시 보다 균일하고 우수한 냉각을 가능하게 할 것으로 판단된다.

References

1. S. G. Lee and B. J. Park, Applications and impact of V2G technology for electric vehicle and charging infrastructure, *J. Convergence Cult. Technol.*, **5**(2), 367 (2019).
2. K. Chen, S. Wang, M. Song, and L. Chen, Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **111**, 943 (2017).
3. H. S. See and H. M. Cho, Thermal management system for electric vehicle batteries and technology trends, *J. Energy Eng.*, **23**(2), 57 (2014).
4. B. Y. Kim and D.-R. Lee, Optimization design for augmentation of cooling performance utilizing leading-edge materials in electric vehicle battery cells, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **37**(7), 529 (2020).
5. H. Oh and S. Park, Effect of coolant flow characteristics in cooling plates on the performance of HEV/EV battery cooling systems, *Trans. Korea Soc. Automot. Eng.*, **22**(3), 179 (2014).
6. T. Otgonpurev, G.-S. Ko, and Y. C. Park, A study on the thermal characteristics of cooling system for securing battery stability in electric vehicle, *Trans. Korea Soc. Geotherm. Energy Eng.*, **16**(2), 7 (2020).
7. S. Baek and S. Park, Thermal analysis of a battery cooling system with aluminum cooling plates for hybrid electric vehicles and electric vehicles, *Trans. Korea Soc. Automot. Eng.*, **22**(3), 60 (2014).
8. R. Zhao, S. Zhang, J. Liu, and J. Gu, A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system, *J. Power Sources*, **299**, 557 (2015).
9. S. B. Hyun, B. Y. Kim, J. H. Song, and D.-R. Lee, A study on heat radiation performance for different layout of electric vehicle secondary battery cell, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **37**(4), 271 (2020).
10. E. Jiaqiang, M. Yue, J. Chen, H. Zhu, Y. Deng, Y. Zhu, F. Zhang, M. Wen, B. Zhang, and S. Kang, Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle, *Appl. Therm. Eng.*, **144**, 231 (2018).
11. O. Elsewify, M. Souri, M. N. Esfahani, E. Hosseinzadeh, and M. Jabbari, A new method for internal cooling of a large format lithium-ion battery pouch cell, *Energy*, **225**, 120139 (2021).
12. M. J. Kim, H. H. Cho, and D. H. Shin, Numerical analysis of cooling chamber for pouch battery using cooling chamber, *Proceedings of 2021 KSMPE Autumn Conference*, December 1-3, Jeju, Korea (2021).