

## 2.3 kW급 전기자동차 배터리팩용 냉각 장치의 열전달 특성에 관한 해석적 연구

성동민\*, 박용석\*\*, 성홍석\*\*, 서정세\*#

\*경상국립대학교 기계항공공학부, \*\*LT정밀(주)

### Numerical Analysis of Heat Transfer Characteristics of Cooling System for 2.3 kW EV Battery Pack

Dong-Min Seong\*, Yong-Seok Park\*\*, Hong-Seok Sung\*\*, Jeong-Se Suh\*#

\*School of Mechanical & Aero Space Engineering, Gyeongsang National Univ., \*\*LT Precision Co., LTD.

(Received 23 February 2022; received in revised form 27 February 2022; accepted 18 March 2022)

#### ABSTRACT

The improvement in the battery performance and life using a battery thermal management system directly affects the improvement in the performance, life, and energy efficiency of electric vehicles. Therefore, this study numerically analyzed the heat exchange processes between the coolant inside the cooling plate channel and the heat generated by the battery. The cooling performance was analyzed based on the average temperature, temperature uniformity, and the maximum and minimum temperature differences of the battery. A performance difference existed depending on the coolant inlet temperature but showed the same tendency of cooling performance according to the shape of each plate's channel. Type 1 showed the best results in terms of battery temperature uniformity, which is the most important measure of battery performance; Type 2 showed the best results in terms of the average temperature of the battery; and Type 3 showed the best results in terms of the maximum and minimum temperature differences of the battery compared with that of the other cooling plates.

**Keywords** : Cooling Plate(쿨링플레이트), Numerical Analysis(수치해석), Liquid Cooling(수냉각방식), BMS(배터리관리시스템), Electric Vehicle(전기자동차)

#### 1. 서 론

전기차의 중요 부품인 배터리의 성능 및 수명 향상은 전기차 차량의 성능으로 이어지기에 배터리 열관리 부분에서 다양한 연구가 진행되고 있다. 배터리가 적절한 온도 범위 내에서 제어되지 않으면 국부적인 온도 상승으로 인해 출력이나 가속 시 방

전 출력량, 회생 제동에 의한 에너지 충전성능과 수명 등에 악영향을 미친다. 그러므로 효과적인 배터리 열관리 시스템에 의한 배터리 성능, 수명향상은 전기차의 성능, 수명, 연비 향상에 직접적인 영향을 미치게 된다.<sup>[1]</sup> BMS(Battery Management System)는 xEV의 에너지저장장치의 핵심부품으로 배터리를 보호 및 관리하여 안정성 및 신뢰도 높은 운용을 확보하기 위해 사용된다.<sup>[2]</sup> 그리고 전기차 주행거리 증대와 동력성능의 향상으로 인해 주요 부품에서의 발열량이 증가하는 추세이다. 따라서

# Corresponding Author : [jssuh@gnu.ac.kr](mailto:jssuh@gnu.ac.kr)  
Tel: +82-55-772-1625, Fax: +82-55-772-1577

효율적인 열관리를 위해 공랭식에서 수냉각 방식으로 열관리 시스템이 변경되어 가고 있다.<sup>[3]</sup> 수냉각 방식 중 배터리 주변부에 3D 형상의 복잡한 채널을 형성하여 냉각시키는 방식이 있다.<sup>[4]</sup> 배터리 주변을 고르게 냉각시켜주는 이점이 있으나, 구조적 복잡성으로 인한 생산단가 상승으로 대량생산에 적합하지 못한 단점이 있다. 또한, 파라핀(paraffin)이라는 화학물질을 이용하여 배터리 온도를 낮추는 방식이 있으나, 친환경을 위한 전기차 생산이 환경오염을 가중시키는 문제가 발생한다.<sup>[5]</sup> 한편, 배터리 간 써멀패드 역할을 담당하는 플레이트를 배터리 사이에 설치하여 배터리와 패드 전체를 냉각수가 흐르는 시스템 내부에 삽입하는 방식이 존재한다.<sup>[6]</sup> 배터리 냉각에는 유리한 구조이나 전체 냉각 시스템의 부피 및 무게 증가와 더불어 대량의 냉각수 유량이 사용되어 전체 시스템 에너지 소비량이 증가하는 문제가 있다.

본 연구에서는 대량생산에 적합한 프레스단조 방식으로 생산될 수 있는 쿨링플레이트를 설계하고 최소의 유량으로 최대의 배터리 열관리 효율을 가질 수 있도록 연구하고자 한다. 나아가 전기자동차용 배터리 열관리 냉각시스템 중 쿨링플레이트 내 냉각수 유동으로 수냉각-간접방식의 효율을 향상시키기 위한 방안으로 채널 형상에 따른 최적화된 냉각수 유입온도와 냉각수 유량이 존재할 것이라 예상하고 Fig. 1과 같이 쿨링플레이트의 채널 내부에서 유동하는 냉각수와 방열하는 배터리 간의 열교환을 수치 해석적으로 살펴보고, 배터리의 평균온도, 온도 균일도와 최고·최소온도차를 분석하여 냉각성능을 살펴보고자 한다.

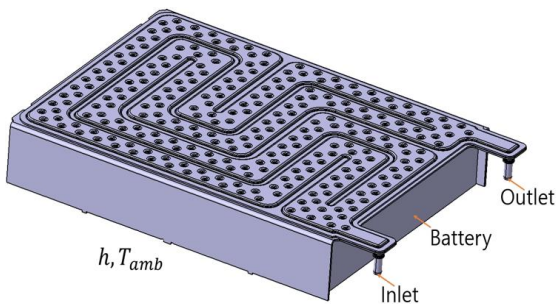


Fig. 1 The schematic shape of the battery cooling system

## 2. 수치해석

### 2.1 문제설정

본 연구 대상인 배터리의 쿨링플레이트는 Fig. 2와 같은 형상으로 이루어져 있으며, 쿨링플레이트의 입구로 냉각수가 흐르면서 U-프레임을 통해 배터리팩의 열을 흡수한다. 배터리로부터 더 많은 열을 흡수하기 위해 Fig. 2와 같이 한 개 이상의 채널(channel)로 구성하였으며, 쿨링플레이트, 배터리팩과 U-프레임이 서로 안정적으로 고정되어 있으며  $L_h \times L_v$ 의 크기로 설정하였다. 또한, 얇은 AI 판재 형식인 쿨링플레이트의 휨 현상을 방지하고 내구성을 극대화하기 위해 Fig. 2와 같이 다수의 엠보싱을 설치하였다. 배터리팩의 효율을 고려한 발열량은 2.3kW로 하였으며, 외기온도  $T_{amb}$ , 대류 열전달계수  $h$ 로 설정하였다. 따라서 배터리팩에서 발열량은 두 가지의 경로로 방출되며, 배터리팩에서 외기로, 배터리팩에서 U-프레임을 거쳐 Fig 3과 같이 쿨링플레이트 내부 채널의 냉각수를 통해 방출되는 경로이다.

배터리팩 주위 공기의 대류 열전달계수는 차량 내 폐쇄된 환경에 설치된다는 점을 고려하여  $2W/m^2 \cdot K$  가정하였다. 배터리와 쿨링플레이트 주변의 3차원 유동을 고려하여 3차원 정상상태에서 수치해석을 하고자 한다. 시스템을 구성하는 고체 내 전도 열전달 방정식으로 적용했으며, 쿨링플레이트 내부로 흐르는 유체의 유동에 대한 지배방정식과 관련된 방정식은 참고문헌<sup>[5, 6]</sup>에 자세히 언급되어 있다.

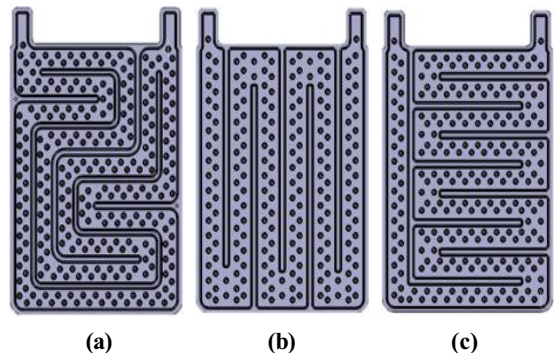


Fig. 2 Schematic design of the cooling plate channel: (a) Type 1, (b) Type 2, (c) Type 3

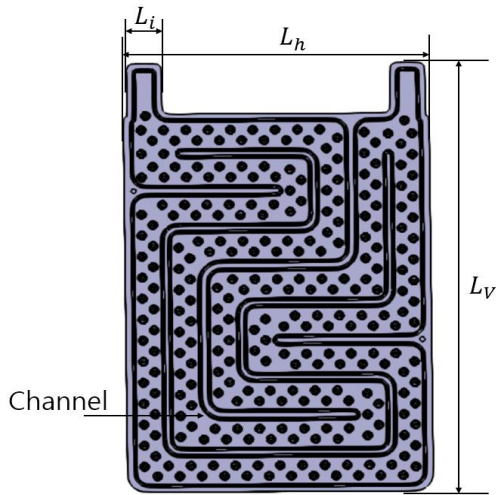


Fig. 3 Dimension of the cooling plate channel

## 2.2 해석조건 및 방법

배터리팩의 최적화된 방열 능력을 지닌 쿨링플레이트를 선정하는 데 있어, 냉각수 유입온도를 20°C, 24°C로, 냉각수의 유량을 1lpm, 2lpm, 3lpm, 4lpm로 변경하는 방식으로 진행하였다.

배터리와 쿨링플레이트 주위의 공기는 300K의 온도, 2W/m<sup>2</sup>·K의 대류 열전달계수로 설정하였다. 그리고 배터리 가동 시 온도가 80°C까지 증가하는 것을 실험 측정하여 배터리의 발열량을 2.3 kW로 설정하였다. 또한, 배터리팩, U-프레임과 쿨링플레이트의 재질은 알루미늄(Al)으로 하였으며, 각 요소는 접촉 열저항이 없는 매끈한 소재로 가정하였다. 쿨링플레이트의 크기 및 외부 공기의 온도 등에 대한 기본조건은 Table 1과 같다.

간접 수냉각 방식인 쿨링플레이트 내에서 열이 전달되는 메커니즘을 수치 해석하고자 유한체적법에 기초하여, 지배방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 등의 방정식을 이산화하였으며, 대수 방정식을 상용 CFD 프로그램 Star-CCM+을 사용하여 해를 구했다. 채널 내 냉각수의 대류항은 Segregated Model을 적용하였으며, 난류는 내부 유동 특성을 잘 반영하고자  $k-\epsilon$  표준모델을 적용하여 속도장 및 온도장 등을 계산하였다.

다면체(polyhedral)격자를 바탕으로 계산에 적용했으며, 얇은 형상으로 많은 곡선부를 갖는 U-프레임

Table 1 Configuration reference conditions for a cooling plate size with water cooling

Specification	Physical Values
Cooling Plate Size ( $L_h \times L_v$ )	411 mm×611.5 mm
Port Size of Cooling Plate ( $L_i$ )	47 mm
Height of Channel	2.5 mm
Heat Source	2300W
Coolant Inlet Temperature, $T_{in}$	20°C, 24°C
Coolant Volume Flow Rate	2 lpm
Ambient Air Heat Transfer Coefficient, $T_{amb}$	2W/m <sup>2</sup> ·K
Ambient Temperature	300K
Thermal Conductivity of Al, $k$	237W/m <sup>2</sup> ·K
Density of Coolant (water), $\rho$	997.561kg/m <sup>3</sup>

과 쿨링플레이트는 정밀한 계산을 위해 기본 메쉬 크기를 0.005m로, 최소 메쉬 크기를 10%로 적용하였다. 또한, Curve Control 기능을 사용하여 메쉬를 최적화하여 수치해석의 정확도를 높였다.

본 연구의 수치해석에 사용된 수치적 모델에 대한 검증은 참고문헌<sup>7, 8)</sup>에 자세히 언급되어 있으며, 실험 결과와 본 연구에서 적용된 수치적 모델에 의한 해석 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 3. 해석결과 및 고찰

### 3.1 채널 형상과 냉각수 유량에 따른 배터리 평균온도 영향

냉각수 유입온도가 일정할 때, 냉각수 유량과 채널의 영향에 따라 배터리 평균온도가 가장 낮은 채널 형상을 선정하고자 한다. Table 1의 조건을 기준으로 냉각성능 정도를 분석하고자 하며, 실선은 Type 1, 점선은 Type 2며 일점쇄선은 Type 3로 각 쿨링플레이트의 채널 형상에 따른 배터리 평균온도를 나타낸다.

Fig. 4의 상단 그래프는 냉각수가 유입할 때의 온도, 입구 온도가 20°C일 때의 유량과 채널 형상에 따른 배터리 평균온도 변화를 나타내었다. 먼저, Fig 4(a) 그래프를 보면, Type 1과 Type 3은 1lpm 대비 기준유량인 2lpm에서 6.9°C 이상의 배터리 평균온도를 냉각시켜주는 비교적 큰 차이의 냉각 효과를 확인할 수 있다. 쿨링플레이트 내의 냉각수 유입 온도가 일정할 때, 냉각수 유량과 쿨링플레이트 채널 형상에 따라 냉각성능 정도가 상이하다. 냉각수 유량이 증가할수록 배터리 온도가 더욱 낮아지게 되나, 특정 유량 이상에서는 증가한 유량 대비 냉각성능 향상 폭이 낮음을 확인할 수 있다. 한편, 채널 형상이 다름에도 불구하고 Type 1과 Type 3은 선형적으로 거의 일치하는 냉각성능을 확인할 수 있다. 또한, Type 2는 체적유량에 따른 평균온도 분포가 선형적임을 확인할 수 있다.

하단 그래프, Fig 4(b)는 냉각수 입구 온도가 24°C일 때 채널 형상과 유량에 따른 배터리 평균온도를 나타내었다. Type 1과 Type 3은 기준 냉각수 유입온도와 마찬가지로 쿨링플레이트의 채널이 다름에도 불구하고 매우 유사한 냉각성능을 확인할 수 있다. 나아가 기준유량, 2lpm 에서는 1lpm 대비 평균 6°C가량의 비교적 큰 냉각 효과를 확인할 수 있다.

### 3.2 채널 형상과 냉각수 유량에 따른 배터리 온도 균일도 영향

배터리 균일도가 높을수록 배터리의 온도 불균형 정도가 낮아짐을 의미하며, 배터리의 국부적인 최고·최소 온도 격차가 줄어든다는 것을 의미한다. 따라서 배터리의 내구성, 안전성과 안정성 향상의 기준 척도가 되는 배터리 온도 균일도가 채널 형상과 냉각수 유량에 따른 영향을 파악하고자 한다.

냉각수 유입온도와 채널 형상에 따른 배터리 온도 균일도를 Fig. 5에 나타내었다. 배터리 온도 균일도 중에서, 냉각수 유입온도 20°C는 Fig. 4(a), 24°C는 Fig. 5(b)로 나타냈다.

먼저, Fig. 5(a)를 보면 Type 1과 Type 3은 유량에 따라 배터리 온도 균일도가 상승함을 알 수 있다. 배터리 평균온도를 냉각시켜주는 그래프 결과

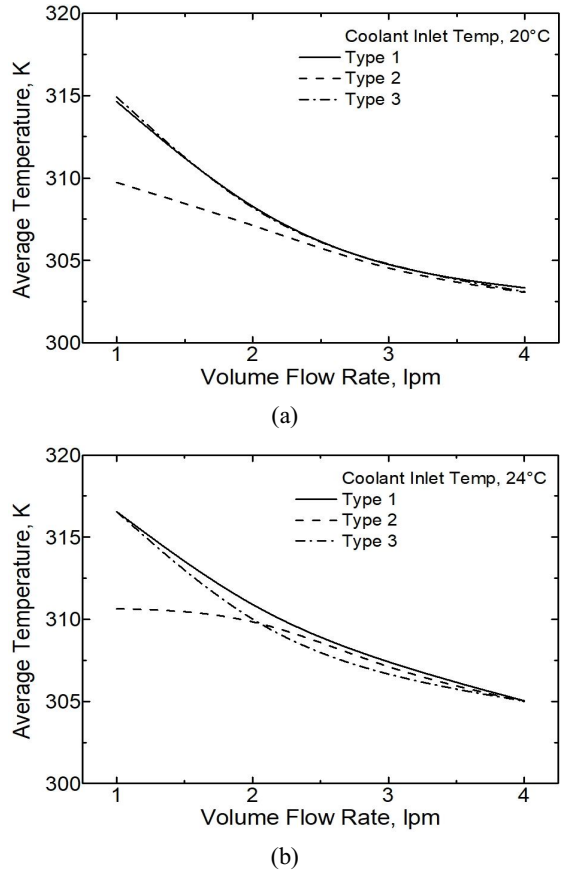
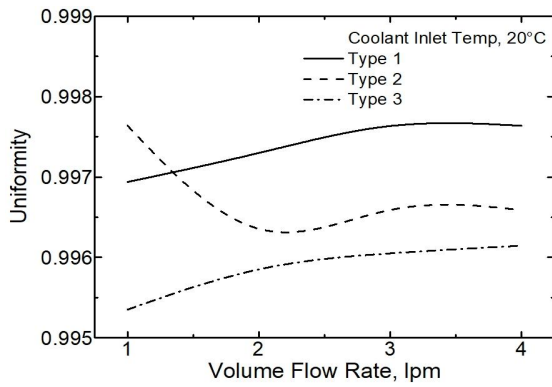
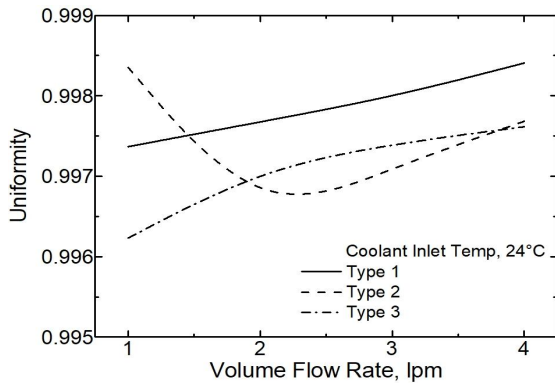


Fig. 4 Average temperature of battery according to channel type and coolant volume flow rate for coolant inlet temperature: (a) 20°C, (b) 24°C

값(Fig. 4)은 거의 일치하지만, Type 1과 Type 3은 균일도 측면에서 0.001정도의 차이가 발생함을 알 수 있다. 한편, Type 2는 냉각수 유량을 1lpm에서 기준유량으로 증가시켰을 때, 배터리 온도 균일도가 낮아졌으나, 이후 3lpm이상 유량을 증가시켰을 때 배터리 온도 균일도가 상승함을 확인할 수 있다. 채널 형상과 유량에 따라 배터리 평균온도를 냉각시키는 정도와는 별개로, 얼마나 안정적으로 배터리 온도를 균일하게 냉각시켜주는 것은 각 채널 비교를 통해 또 다른 차원의 문제임을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)를 보면 모든 채널 형상에서 Fig. 4(a)대비 우수한 배터리온도 균일도를 보여주었다.



(a)



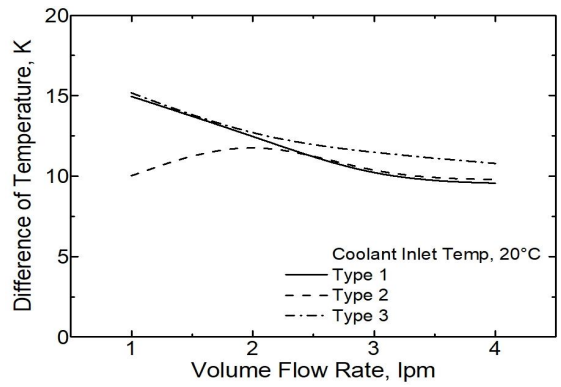
(b)

Fig. 5 Temperature uniformity of battery according to channel type and coolant volume flow rate for coolant inlet temperature: (a) 20°C, (b) 24°C

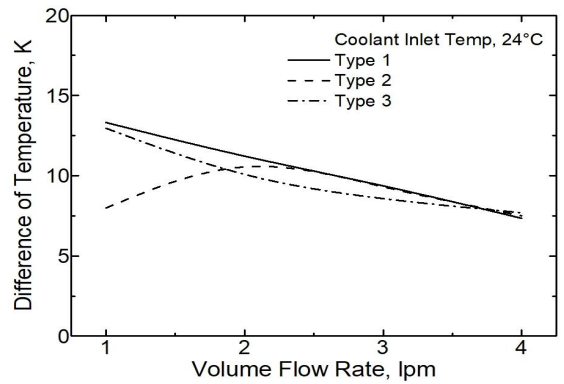
### 3.3 채널 형상과 냉각수 유입온도에 따른 배터리 최고·최소 온도차 영향

냉각수 유입온도와 채널 형상에 따른 배터리 최고·최소온도 차를 Fig. 6에 나타내었다. 냉각수 유입온도에 따른 각각의 배터리 최고·최소 온도차를 그래프로 나타내었다.

먼저, Fig. 6(a) 그래프를 보면, 채널 모두의 경우에서 유량이 증가할수록 배터리 최고·최소 온도차가 낮아짐을 확인할 수 있다. Type 1채널의 경우, 1lpm과 기준유량에서는 Type 3과 유사한 배터리 온도차를 보이나, 2lpm이상에서는 Type 2와 유사한 배터리 온도차 값을 확인할 수 있다. 동시에 Type 1과 유사한 온도차 경향을 보여준다. 이러한



(a)



(b)

Fig. 6 Difference between max and min temperature of battery according to channel type and coolant volume flow rate for coolant inlet temperature: (a) 20°C, (b) 24°C

온도 균일도 특성은 채널 형상으로부터 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 6(b) 그래프를 보면 1~3 lpm일 때, Type 1보다 Type 3에서 배터리 온도차가 낮게 나타났으며, Type 2에서는 20°C와 마찬가지로 채널 형상의 구조적 특성으로 인해 동일한 온도차 분포 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

냉각수 유입온도가 일정할 때, 채널 형상에 따라 배터리의 국부적인 열집중 현상을 해소시킬 수 있는 냉각성능이 서로 다르다. 따라서 배터리의 최고·최소온도차(差) 결과값이 다름을 확인할 수 있다. 기준유량과 냉각수 유입온도로 분석한 결과, 균일

도 그래프(Fig. 5)값이 상승할수록 최고·최소 온도 격차가 낮아짐을 확인할 수 있다. 배터리의 평균온도를 낮춰주는 성능과는 별개로, 배터리의 내구성, 안정성과 안전성을 향상시키기 위해서는 배터리의 최고·최소 온도 격차를 낮춰야 하며 이러한 결과값은 배터리 온도균일도와 상관관계가 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 배터리의 안정성, 안전성과 내구성 향상을 위해 배터리 열관리시스템에 사용되는 여러 형상의 쿨링플레이트와 그 내부 채널에 흐르는 냉각수 온도 및 유량에 따른 배터리 열전달 과정을 수치 해석적으로 살펴보았다. 수치 해석적 결과에서 쿨링플레이트 각 채널 형상에 따라 배터리의 평균온도, 온도 균일도와 최고·최소 온도차에서 우위를 점하는 플레이트가 다름을 확인하였다.

배터리 평균온도 해석에서는 1lpm에서의 가장 좋은 냉각성능을 지닌 쿨링플레이트인 점파 기준유량부터 유량이 증가할수록 Type 1, Type 3과의 배터리 평균 온도차가 매우 미소함을 고려하여 Type 2가 가장 우수한 특성을 보였다.

배터리의 전체 온도 균일도 측면에서는 냉각수 유입온도와 유량에 관계없이 Type 1이 가장 우수한 특성을 보였다.

배터리의 국부적인 최고·최소온도차 해석에서는 Type 3이 가장 우수한 특성을 보였다. Type 2의 경우, 다른 Type의 쿨링플레이트 대비 온도차가 작으나, 단일 특성 분석에 있어, 기준유량 2lpm에서 냉각수 유입온도와 관계없이 구조적 특성으로 인해 최고·최소 온도차가 가장 크다는 것을 확인하였다.

본 실험을 통해 배터리 수명 및 성능향상을 위한 쿨링플레이트의 냉각성능이 내부 채널 형상 및 각 분석 기준에 따라 적절한 냉각수 유량이 존재함을 알 수 있다. 더불어 채널 형상이 발열된 배터리 온도를 고루 냉각시키는 데 상당한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 나아가, 냉각수 유입온도가 상승하더라도, 각 플레이트 채널 형상에 따른 냉각 성능의 경향성은 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

#### 5. 후 기

본 과제는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력 기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-003)

#### REFERENCES

1. Kim, T. W., Park, S. J., "Electric Vehicle Battery Thermal Management System", J. The Soc. of Air-Conditioning and Refrigerating engineers of Korea, Vol. 44, No. 11, pp. 28-41, 2015.
2. KOR Ministry of SMEs and Startups, "SME Technology Roadmap Strategy Report Future Car 20 18-2020", pp. 9~15, pp. 449-468, 2017.
3. Kim, M. S., "The importance of integrated thermal management system for electric vehicles", J. The Korean Soc. of Automotive Engineers, Vol. 41, No. 6, pp. 62-64, 2019.
4. Wiriyasart, S., Hommalee, C. et al., "Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules," elsevier-Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 18, pp. 2-8, 2020.
5. Mohsen, A., Joris J. et al., "A novel liquid cooling plate concept for thermal management of lithium-ion batteries in electric vehicles," elsevier-Energy Conversion and Management, Vol. 231, pp. 1-14, 2021.
6. Wei, Li., Xiongbn, P. et al., "Multi-objective design optimization for mini-channel cooling battery thermal management system in an electric vehicle," wiley-Int J. Energy Res., pp. 1~13, 2019.
7. Lee, C. H., Suh, J. S., "Numerical Analysis on the Freezing Process of Internal Water Flow in a L-Shape Pipe," J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol. 17, No. 6, pp. 144-150, 2018.
8. Park, Y. S., Suh, J. S., "Numerical Analysis of Freezing Phenomena of Water in a U-Type Tube," J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol. 18, No. 12, pp. 52-58, 2019.