



## 배터리 열폭주 방지용 냉각기술 수치 평가

# Numerical Evaluation of Cooling Technology for Preventing Thermal Runaway in Batteries

정주영\* · 권태순\*\* · 박원희\*\*\* · 이덕희\*\*\*\*

Jung, Juyeong\*, Kwon, Taesoon\*\*, Park, Won-Hee\*\*\*, and Lee, Duckhee\*\*\*\*

### Abstract

The growth of the energy market due to global eco-friendly policy issues is leading to the growth of the lithium-ion battery market related to the energy storage system (ESS). However, if a fire occurs in an ESS using lithium-ion batteries, it is difficult to penetrate fire extinguishing agents due to the structural characteristics of lithium-containing electrical fire and cell-unit batteries. For this reason, ESS needs to study fire prevention and diffusion prevention systems; in this paper, computational fluid dynamics (CFD) are utilized to evaluate the cooling properties of PCM and thermoelectric devices, which are easy to apply in practice. In the PCM model, the correlation between the mass of the PCM and its temperature rise time confirmed that temperature control through PCM is possible when the temperature of the heating battery is out of the normal range. In the thermoelectric module, the numerical results of the model with an output of 40 W under the input power of 200 W confirmed that the heating value and the output of the thermoelectric module can create thermal equilibrium in a short time.

**Key words** : CFD, Battery, Energy Storage System, Thermal Runaway, Cooling Technology

### 요 지

전 세계적인 친환경 정책 이슈로 인한 에너지 시장의 성장은 ESS (Energy storage system)와 관련된 리튬이온전지 시장의 동반 성장을 불러오고 있다. 그러나 리튬이온전지를 사용한 ESS에서 화재사고가 발생하면 리튬이 함유된 전기화재 특성과 셀 단위 전지를 하우징하여 관리하는 구조적 특성으로 인해 화재 발생시 소화 약제의 침투가 어려워 기존 소화 시스템으로의 대처한계가 명확하다. 이러한 이유로 ESS는 화재 사전예방 및 확산방지 시스템에 대한 연구가 필요하며, 이 논문에서는 Computational fluid dynamics (CFD)를 활용하여 실제 적용이 용이한 냉각제인 Phase change material (PCM)과 열전소자의 냉각특성을 평가하였다. PCM을 활용한 냉각모델에서는 PCM의 질량과 승온 시간의 상관관계 분석을 통해 발열전지의 온도가 정상범위에서 벗어났을 때 PCM을 통한 온도조절이 가능함을 확인하였으며, 열전소자를 활용한 냉각모델에서는 200 W의 발열 조건에서 출력이 40 W인 모델의 해석결과를 통해 발열량과 열전소자의 출력이 단시간에 열평형을 이룰 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : CFD, 배터리, ESS, 열폭주, 냉각기술

\*교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원 스마트공인시험실 주임기술원(Tel: +82-31-460-5526, Fax: +82-31-460-5579, E-mail: [sleepii88@krri.re.kr](mailto:sleepii88@krri.re.kr))  
Corresponding Author, Member, Assistant Engineer, Smart Testing Department, Korea Railroad Research Institute

\*\*한국철도기술연구원 철도중대사고연구실 책임연구원(E-mail: [klez@krri.re.kr](mailto:klez@krri.re.kr))

Senior Researcher, Railroad Accident Research Department, Korea Railroad Research Institute

\*\*\*정회원, 한국철도기술연구원 철도중대사고연구실 책임연구원(E-mail: [whpark@krri.re.kr](mailto:whpark@krri.re.kr))

Member, Senior Researcher, Railroad Accident Research Department, Korea Railroad Research Institute

\*\*\*\*정회원, 한국철도기술연구원 철도중대사고연구실 책임연구원(E-mail: [dhlee27@krri.re.kr](mailto:dhlee27@krri.re.kr))

Member, Senior Researcher, Railroad Accident Research Department, Korea Railroad Research Institute

## 1. 서론

전 세계적으로 친환경 정책, 높은 출력 응답 속도, 고효율 에너지변환, 고에너지 밀도 등의 장점을 바탕으로 리튬이온 전지의 시장이 확대되고 있다. 특히, Energy Storage System (ESS)이 활발히 활용되면서 북미, 유럽, 일본 시장에서 성장하고 있고, 2030년에 30 GWh 이상의 리튬이온전지가 보급될 것으로 예측된다. 그러나 ESS 화재사고 발생 시 국내 화재사고 사례 기준 5~10 MWh 배터리의 화재진화에 평균 3시간 이상이 소요되며, 리튬이 함유된 전기화학 특성으로 인해 소화약제 제한과 낮은 소화율로 화재 진화에 한계가 있고, 국내외 모두 대량의 주수로 진압을 하고있어서 소화기 아닌 확산방지활동에 그치는 수준이다(FILK, 2019). 2019년 6월에 발표된 산업통상자원부의 “ESS 사고원인 조사결과 및 안전강화 대책 발표”에 따르면 2차전지 화재의 원인은 전기충격에 대한 보호시스템 미흡, 운영환경관리미흡, 설치 부주의 및 ESS 통합제어·보호체계 미흡을 사고원인으로 밝혔으며 이는 전지의 비정상적인 발열 원인으로 전지가 약 60-80 °C 이상이 되면 전지작동 및 전해질의 열분해가 시작되어 열폭주의 직접적인 원인이 된다(DTI, 2017; Ma et al., 2018). 또한 ESS는 효율적인 운영을 위해 셀 단위 전지를 하우징하여 관리하기 때문에 화재발생시 소화약제의 침투가 어려워 기존 소화시스템으로 대처에 한계가 명확하다. 이러한 이유로 ESS는 화재 사전예방 및 확산방지 시스템에 대한 연구가 필요하며, 이 논문에서는 Computational fluid dynamics (CFD)를 활용하여 실제 적용이 용이한 냉각제인 PCM과 열전소자의 냉각특성을 평가하였다.

## 2. 리튬이온전지 안전기술 동향

리튬이온 전지의 독특한 화재 특성은 열폭주(Thermal runaway), 재발화(Reignition) 그리고 이로 인한 급격한 화재 확산으로 요약할 수 있다. 전지 내부의 온도가 상승하게 되어 70 °C 이상의 온도가 되면 음극 표면의 보호막으로 작용하던 SEI 층(Solid electrolyte interphase)이 열적 파괴되고 신규 활물질이 전해질에 노출되며, 이는 발열 현상을 더욱 촉진해주는 역할을 하게 된다. 전지 내부의 추가적인 온도 상승은 양극과 음극을 격리하는 역할을 수행하는 폴리올레핀(Polyolefin)에 열적 상변화와 열 수축을 초래하며 (~130 °C), 이는 양극과 음극의 직접적인 접촉을 초래한다(internal short-circuit, ISC). 또한 직접적인 단락은 폭발적인 발열 반응을 촉진하게 되며, 양극 활물질은 분해되며 자체적으로 산소를 발생시키게 되고, 이는 발화 연소를 더욱 촉진하여 배터리 내부 온도 상승의 원인이 된다(DTI, 2017).

국내보다 ESS 및 2차전지 보급시기가 앞선 해외에서는 2010년대 초반부터 화재사고가 확인되고 있으며, 크기는 MW 단위의 대규모 용량 발전시설부터 수십 kW 수준의

설비까지 다양하게 사고가 발생하고 있다. 미연방 항공국(Federal aviation administration, FAA)에 따르면 1991년부터 2018년까지 약 206건의 배터리 화재사고가 보고되었으며 2016년 31건, 2017년 46건으로 증가추세에 있다. 이외에 2차전지 적용분야 전반의 사례를 보면 네덜란드에서 2017~2018년 사이에 발생한 배터리 화재사고의 경우 약 40%가 배터리 또는 충전기 관련, 전기자전거(약 16%), 휴대전화(약 14%), 장난감(8%), 컴퓨터(6%), 전동공구(3%)로 나타나 사용량 증대와 함께 여러 분야에 걸쳐 화재사고의 원인이 되고 있음을 알 수 있다. 화재사고의 주된 원인이 되는 ESS 열폭주는 안전관리기술인 Battery thermal management systems (BTMS)를 통해 상당부분 해결 가능하나 예상치 못한 고열원 발생 또는 외부환경요인 등으로 BTMS가 감당하기 어려운 상황이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 열폭주를 예방하기 위한 예측 또는 감지기술 적용이 필요하며 관련 연구들이 방법론 및 기기설계 측면에서 진행 중에 있다(Zhang et al., 2018).

BTMS 연계형 냉각기술중 공냉시스템(Air cooling system)은 저렴한 비용으로 단순하게 구현가능한 장점이 있어 Zolot et al. (2001), Kelly et al. (2002), Zolot et al. (2002)는 Honda와 Toyota의 EV차량에 다양한 형태의 공기냉각실험을 수행하였으며, NiMH 전지에 공기냉각방식을 채택하였다. 그러나 전지 두께가 두꺼워질 경우 과부하 조건에서 발열이 증가하게 되며, 특히 열전도율이 낮은 폴리머를 외장으로 사용한 경우에 전지 코어의 냉각효과가 떨어지는 점 또한 보고되고 있다. 이러한 공랭식 시스템의 장단점으로 인해 냉각효율을 높이기 위한 공기냉각 개량시스템의 연구가 계속해서 수행되고 있다.

Lv et al. (2019)은 Battery thermal management (BTM)을 구성하는데 있어 냉각 튜브와 전지 표면 사이의 열 전달력을 향상시키기 위해 산화그래핀(GO)과 실리카 겔(SG)을 활용하여 전지 셀 사이의 빈 공간을 채워 넣고 물을 회전시키는 수냉시스템(Liquid cooling system)이 개발하였다. 전지 사이에 채워진 GO-SG는 향상된 열 전도도를 가지고 있어 발생된 열을 효과적으로 전달시켜줄 수 있었다. Khateeb et al. (2005)은 냉각을 위해 공기 또는 액체를 사용하지 않고 액체/고체 간 상변화에 의한 큰 잠열을 이용하는 상변화 물질(phase change material, PCM) 적용에 관한 연구를 진행하였다. 리튬이온 및 리튬폴리머 전지모듈에 적용을 검토한 결과에서 안정적인 온도상승 저하가 가능한 것으로 보고된 사례가 있으며, 전기 스쿠터용 리튬이온전지에 파라핀 오일(용융온도 41~44 °C)을 적용한 연구 결과도 존재한다. 그러나 타 냉각유체 대비 PCM의 열전도율 한계로 인해 실용화를 위해서는 개선이 필요하다.

앞서 언급한 기술들의 단점을 보완하고 장점을 살리기 위해 혼합방식의 냉각기술 관련 연구들이 수행되고 있다. 이 중 하나는 Mehrabi-Kermani et al. (2019)의 연구로 PCM과

방열판을 통한 공기냉각을 결합한 연구사례이다. PCM의 낮은 열전도율로 인한 열 방출특성의 한계를 열전도율이 높은 방열판을 통한 공기냉각으로 효율을 개선한 사례이며, 파라핀 오일을 방열판 공기 냉각이 통합 된 구리 폼(copper foam)에 내장되도록 설계되었다. 이 모듈은 특히 적절한 온도 범위에서 더 긴 작동 시간 동안 전지 팩에 대한 우수한 열 성능을 보여주며, 상전이 소재(Phase-transition smart material)가 있을 때와 없을 때 구리 폼의 존재는 축 방향 열유속(heat flux)의 균일한 분포를 이루도록 해 주어 전도에 의한 열 분포를 개선시키는 데 있어서 구리 폼이 효과적으로 역할을 한 것을 보여주었다.

기술동향에서 살펴본 여러 논문을 통해 냉각시스템에 관한 연구는 활발하게 수행되고 있으나 냉각에 적용된 재료 혹은 시스템의 열적 특성 분석에 관한 연구는 미흡하다. 이러한 이유로 이 논문에서는 실제 적용성이 우수한 PCM 소재와 열전소자의 모델별 냉각특성을 분석하였다.

### 3. 모델기반 열폭주 예방 기술 분석 및 평가

2차전지 열폭주 방지를 위해 수행된 여러 연구중, 실제 설계와 전지 모듈, 팩 단계로의 적용이 간편한 PCM과 열전소자를 이용한 냉각특성을 분석하였다. 전지 셀 단위 열특성 모델을 분석하기 위해 스택 방식의 전지 모듈을 설계하고 해석을 위한 기본 경계조건을 실제와 비슷하게 가정하였다. 해석은 3D로 수행하였으며 PCM 모델의 경우, 양 끝단은 단열조건, 윗면과 앞, 뒷면은 자연대류에 의한 냉각, 아랫면은 강제대류에 의한 냉각조건으로 설정하고, 열전소자 모델의 경우 양 끝단에 냉각조건 설정을 제외하면 기타 조건은 PCM모델과 동일하다. 설계된 전지 모듈의 기본구성은 전지 셀과 냉각을 위한 재료, 냉각판으로 구성되어 있다. 냉각성능 확인을 위해서 기본구성에 PCM, 열전소자를 추가하여 해석을 수행하였으며, 각각의 결과를 분석하고자 한다. Table 1은 해석에 필요한 전지 모듈의 주요 물성값이며, Eqs. (1), (2)는 해석에 필요한 질량보존과 에너지 방정식이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (2)$$

#### 3.1 PCM을 활용한 모듈 해석 결과

설계된 모듈의 열특성 분석을 위해 검증된 상용프로그램인 ANSYS Fluent를 활용하였으며, 해석모델은 Fig. 1과 같다. 모델의 양 끝단은 단열조건, 하단부는 강제대류 나머지는 자연대류 조건을 적용하였으며, 해석 대상 전지 셀(파우치형, 46 Ah)의 충/방전 과정에서 측정되는 표면온도를 열-전기 화학모델(COMSOL Multiphysics)에 기반하여 전지의 발열량을 산출하였다. 대상 전지의 10C 충/방전을 통해 산출된 40~50 °C 온도 상승구간 평균 발열량은 200 W이며, 이를 해석 발열 조건으로 사용하였다. 열원이 되는 전지에서 발열 시 PCM 두께에 따른 냉각성능을 분석하기 위해 PCM의 두께는 2, 5, 10 mm로 설정하였다. PCM은 53.7 °C에서 상변화를 시작하여 190 kJ/kg의 잠열을 흡수한 후에 액체 상태가 되며, 상변화 동안 지연되는 열에너지 전달을 통해 어느 정도의 냉각성능을 얻을 수 있는지 분석하려 한다. 전지가 정상상태로 작동 중일 때를 50 °C로 상정하였으며, 전지의 불안정화 방지 온도인 60 °C를 목표 냉각온도로

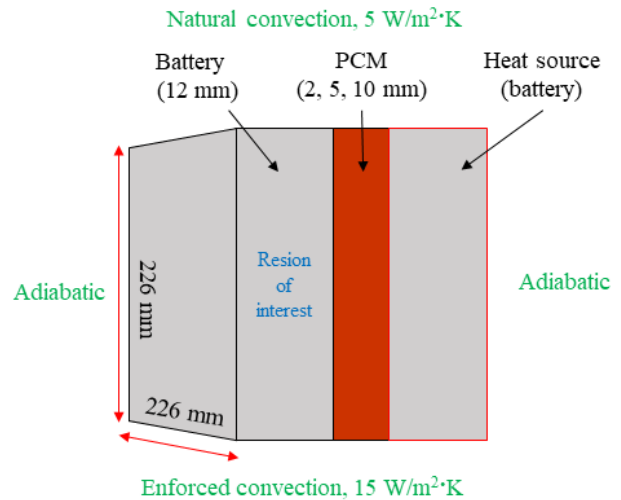


Fig. 1. Schematic of PCM Model

Table 1. Thermal Properties of Battery Module

Material	Density [kg/m³]	Specific heat [J/(kg · K)]	Thermal conduction [W/(m · K)]
Cooling plate (Aluminum)	2,700	903	238
Battery	3,231	1,176.096	44.072
PCM (solid)	910	2.0	0.24
PCM (liquid)	790	2.15	0.22

Note: PCM latent heat: 190 kJ/kg, PCM melting temperature: 53.7 °C

설정하였다. 온도 측정 대상은 Fig. 1의 관심영역(PCM 왼쪽 전지)이다.

해석 결과, PCM이 포함되지 않은 모델의 전지가 240초 후에 60 °C에 도달하였기 때문에 각 모델의 온도분포는 240초를 기준으로 비교되었다. Fig. 2에서 볼 수 있는 것처럼 PCM의 두께(질량)가 증가할수록 관심 전지의 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Figs. 3, 4의 막대그래프와 PCM 질량에 따른 목표 온도 도달 그래프를 통해 PCM 질량 증가에 따른 온도 상승 시간이 선형관계에 있음을 확인하였으며, Fig. 5와 같이, 각 모델이 60 °C에 도달하는 동안 모든 PCM이

액화된 것을 확인하였다. 마지막으로 Table 2에서 볼 수 있는 것처럼 PCM 질량 증가분과 각 모델의 60 °C 도달시간 차이를 통해 PCM의 단위 질량 당 목표 온도 지연시간이 3.3초임을 확인하였다. 이렇게 PCM의 질량과 온도 상승 시간의 상관관계 분석을 통해 발열 전지의 온도가 정상범위에서 벗어났을 때 PCM을 통한 온도조절이 가능함을 확인하였다. PCM 10 mm 적용으로 PCM 미적용 경우 대비, 최대 1,585초 이상의 시간지연이 가능하였으며 PCM과 연계된 냉각장치를 통해 PCM적용두께 저감 및 냉각효율 향상이 가능할 것으로 판단된다.

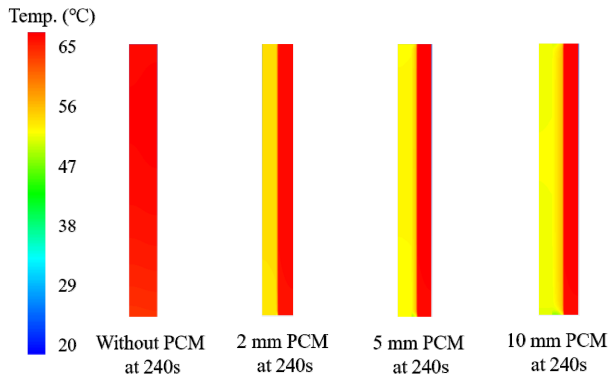


Fig. 2. Temperature Contour of PCM Model

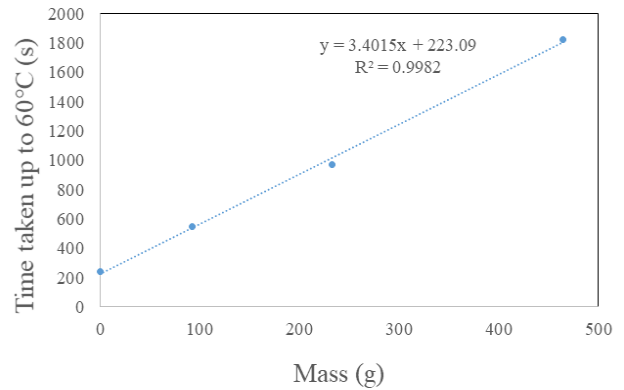


Fig. 4. Temperature Rise According to Mass of PCM

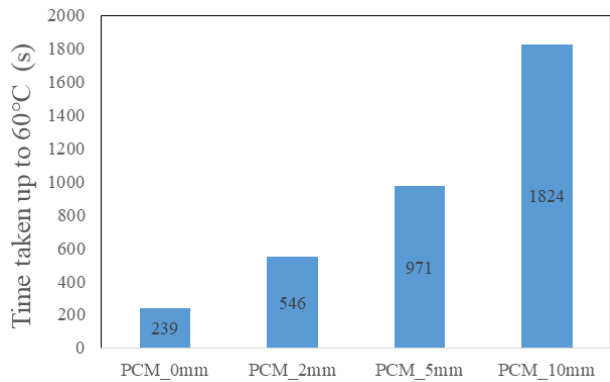


Fig. 3. Time Taken Up to 60 °C for Each Model

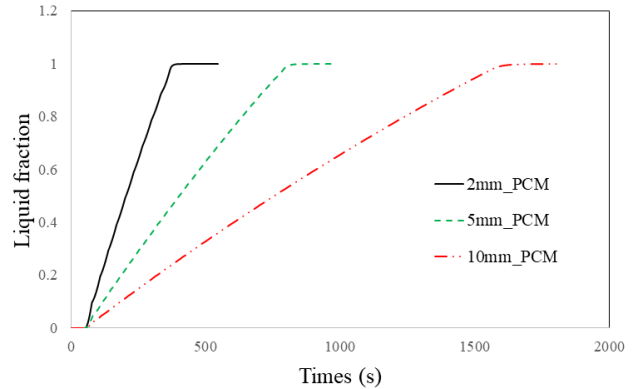


Fig. 5. Solid-liquid Phase Change Rate by Each Model

Table 2. Time to Reach Target Temperature According to Increase in Mass of PCM

Model	Time to reach 60 °C (s)	Time difference (s)	Increase in mass of PCM (g)	Temp. rise delay time per mass (s/g)
without PCM	239	-	-	3.3 (average)
2 mm PCM	546	307	92.96	
5 mm PCM	971	732	139.44	
10 mm PCM	1,824	1,585	232.40	

### 3.2 열전소자를 활용한 모듈 해석 결과

설계된 전지모듈의 양 끝단에 열전소자를 활용한 냉각방식을 적용하기 위하여 Fig. 6과 같이 파워치형 전지 20개로 구성된 모듈을 설계하였다. 모듈 하단부는 강제대류, 모듈의 양끝단은 10~180 W의 출력으로 열전소자가 동작하며 나머지는 모두 자연대류 조건이다. PCM 냉각모델에서와 같이 10번째 전지 셀에서 10C 충전/방전 시 발열조건(200 W)을 적용하여 발열부 전지온도의 75 °C 도달시점을 해석모델의 최고온도로 설정하였다. 이 온도를 60 °C 이하로 냉각시키기 위해 양 끝단의 열전소자가 10, 20, 40, 100, 120, 180 W의 출력으로 작동된다. 열전소자의 냉각조건이 적용되지 않은 해석모델(Fig. 7; Initial temp. contour)의 초기 온도분포에서 각각의 열전소자 출력값을 적용하였을 때 어느 정도 시간 후에 목표 온도인 60 °C 이하로 냉각되는지를 확인하였다. 추가로, 해석을 진행하기 위해 격자 최적화 작업을 수행하였으며, 사용된 총 격자 수는 96만개이다.

해석 모델의 10번째 전지 셀에서 200 W의 에너지가 발생된지 3시간 후 설계모델의 최고온도는 75 °C이며, Fig. 7과 같이 출력조건이 서로 다른 열전소자를 작동시켜 모델별 3시간 후 온도분포와 60 °C 도달시간을 분석하였다. Fig. 8과 Table 3의 열전소자 출력에 따른 온도 그래프와 해석 결과를 통해 10~40 W 출력의 열전소자 성능으로는 해석모

델을 60 °C 이하로 냉각할 수 없었으며, 100~180 W의 출력에서는 해석모델이 60 °C가 되는 시간은 15분 미만이었다. 열전소자 출력이 40 W인 모델의 해석결과를 통해 발열량과 열전소자의 출력이 단시간에 열평형을 이룰 수 있음을 확인하였으며, 해석결과를 통해 약 40~50 W 사이에서 냉각장치의 전지 열폭주 예방 최적 조건이 달성될 것이라고 예상된다.

열전소자 모듈 해석 결과는 실제 사용되는 전지모듈의 형태와 전지 용량 차이 등의 이유로 이 논문에서 수행된 결과를 일반화할 수 없지만 다른 전지모듈에 필요한 냉각장치 성능을 대략적으로 가늠할 수 있는 기초 자료로 활용할 수 있으며, 냉각장치의 최소전력을 통한 열폭주 온도

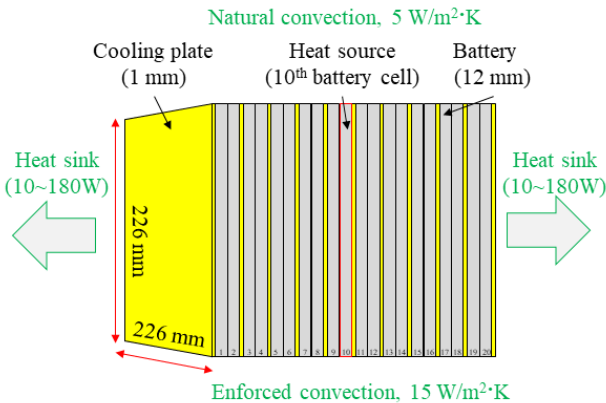


Fig. 6. Schematic of Thermoelectric Module

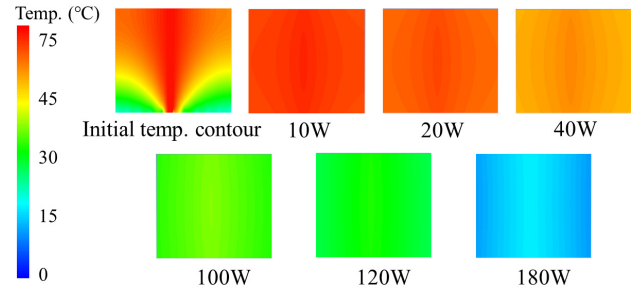


Fig. 7. Temperature Contour at 180 min.

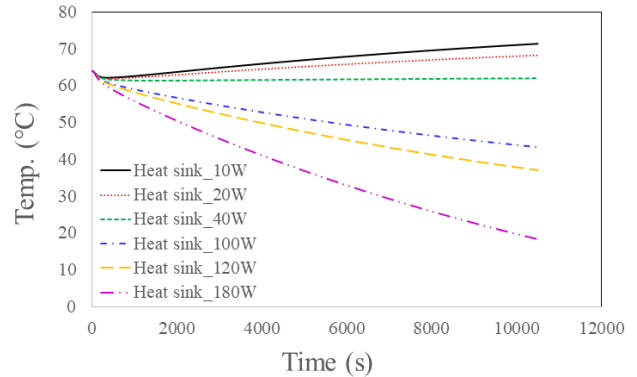


Fig. 8. Temperature Changes Over Time According to Power of Thermoelectric Module

Table 3. Time to Reach Target Temperature According to Power of Thermoelectric Module

Power of thermoelectric module (W)	Target temperature (60 °C)	Time reach to target temp. (s)
10	62.15 °C (X)	378
20	61.99 °C (X)	459
40	61.37 °C (X)	1,505
100	O	637
120	O	505
180	O	331

이하에서의 열평형 조건을 최적조건으로 판단하였다. 마지막으로, 전지의 발열량과 열전소자의 냉각성능에 관한 상관관계 데이터를 축적한다면 전지 모듈이 정상상태를 벗어난 온도상승을 보일 때 급속냉각을 통한 전지 안정화와 같은 적절한 대응을 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

ESS 화재 사고 발생 시 리튬이온전지의 화재특성으로 인한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 진행중에 있다. 소화약제의 침투가 어려운 ESS 시스템의 한계로 인하여 화재 전 단계에서의 안전관리 관련 기술이 개발되고 있으나 냉각에 적용된 재료 혹은 시스템의 열적 특성분석에 관한 연구는 미흡하다. 이러한 이유로 이 논문에서는 CFD를 활용하여 리튬이온전지의 열폭주 방지용 소재별 냉각특성을 분석하였으며, 여러 가지 냉각 소재들 중, 실제 장비로의 적용이 용이한 PCM과 열전소자를 채택하여 해석을 수행하였다. PCM을 활용한 모델에서는 PCM의 질량과 온도상승 시간의 상관관계 분석을 통해 PCM의 질량 증가에 따른 온도상승 시간이 선형관계에 있음을 확인하였으며, 관심온도인 60 °C 도달 시간과 PCM 질량 변화량을 비교하여 PCM의 단위 질량당 목표 온도 지연시간은 3.3초임을 확인하였다. 이를 통해 개별 전지셀의 온도가 정상범위에서 벗어났을 때 PCM을 통한 온도조절이 가능함을 확인하였으며, PCM 적용량 조절을 통해 PCM 미적용 모델 대비 최대 26분 가량 온도상승 지연이 가능하였다.

열전소자를 활용한 모델에서는 전지 초기온도 75 °C에서 200 W의 발열조건을 적용하였을 때 냉각특성 분석을 위해 열전소자의 출력별 60 °C 도달 시간을 분석하였다. 해석결과, 열전소자 출력이 40 W인 모델을 통해 발열량과 열전소자의 출력이 단시간에 열평형을 이룰 수 있음을 확인하였으며, 약 40~50 W 사이에서 냉각장치의 전지 열폭주 예방 최적조건이 달성될 것이라고 예상된다. 또한, 전지의 발열량과 열전소자의 냉각성능에 관한 상관관계 데이터를 축적한다면 리튬이온전지 모듈이 정상상태를 벗어난 온도상승을 보일 때 조기에 효율적인 대응을 할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 리튬이온전지 기반 ESS가 시설물에 적용되는 고정식과 함께 교통수단(전기차, 철도차량 및 선박 등)에 확장되어 사용량이 증가하고 있다. 열폭주 시에 진압이 어려운 ESS 화재특성을 고려하면 사고가 발생할 경우 막대한 사회적 피해가 예상된다. 따라서 다양한 환경(온도, 습도 및 분진 등)에서 운용되는 ESS의 특성을 고려하여 장기사용에 따른 안전확보가 요구되며, 열폭주의 가장 주요한 원인 중 하나인 전지모듈의 안정적인 온도관리를 위한 냉각기술을 적용한다면 ESS 화재발생 및 이로 인한 교통수단의 안전사고의 발생 등을 관리할 수 있다. 본 연구에서는 전지 모듈 단위에서 안정적인 온도관리를 위해 적용 가능한 냉각기술

평가를 수행하였으며, 향후 냉각 소재별 특성분석, 전지모듈 최적화 배치, 실제 열폭주 데이터를 통한 수치해석 등을 통하여 화재발생 예방 및 확산방지 시스템 구축에 기여가 가능할 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업(PK2102A1/PK2102A5)에 의해 수행되었습니다.

#### References

- Danish Technological Institute (DTI). (2017). *Project BLUE BATTERY, Part I: Analysis of fire risk scenarios of existing and upcoming large maritime battery systems*.
- Fire Insurers Laboratories of Korea (FILK). (2019). *A study on fire safety Countermeasures for energy storage system*. Service report, pp. 9-16.
- Kelly, K.J., Mihalic, M., and Zolot, M. (2002). Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing. *17th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, pp. 19.
- Khateeb, S.A., Amiruddin, S., Farid, M., Selman, J.R., and Al-Hallaj, S. (2005). Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation. *Journal of Power Sources*, Vol. 142, pp. 345-353.
- Ly, Y., Zhou, D., Yang, X., Liu, X., Li, X., and Zhang, G. (2019). Experimental investigation on a novel liquid-cooling strategy by coupling with graphene-modified silica gel for the thermal management of cylindrical battery. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 159, 113885.
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., et al. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review, *Progress in Natural Science. Materials International*, Vol. 28, pp. 653-666.
- Mehrabi-Kermani, M., Houshfar, E., and Ashjaee, M. (2019). A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 141, pp. 47-61.
- Zhang, J., Zhang, L., Sun, F., and Wang, Z. (2018). An overview on thermal safety issues of lithium-ion batteries for electric vehicle application. *IEEE*, Vol. 6, pp. 23848-23863.

Zolot, M., Pesaran, A.A., and Mihalic, M. (2002). *Thermal evaluation of Toyota Prius battery pack*. No. 2002-01-1962, SAE Technical paper.

Zolot, M.D., Kelly, K., Keyser, M., Mihalic, M., Pesaran, A., and Hieronymus, A. (2001). Thermal evaluation of the Honda insight battery pack. *36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*.

---

<b>Received</b>	■	August 27, 2021
<b>Revised</b>	■	August 30, 2021
<b>Accepted</b>	■	September 7, 2021