

전기차 화재 실험 및 대응방안에 관한 연구

An Experiment Study on Electric Vehicle Fire and Fire Response Procedures

남기훈¹, 이준식^{2*}

Ki-Hun Nam¹, Jun-Sik Lee^{2*}

〈Abstract〉

Lithium-ion batteries (LIB) are widely used in various sectors, such as transportation (e.g., electric vehicles (EV)) and energy (e.g., energy storage facilities) due to their high energy density, broad operating temperature (-20 °C ~ 60 °C), and high capacities. LIBs are powerful but fragile on external factors, including pressure, physical damage, overheating, and overcharging, that cause thermal runaway causing fires and explosions. During a LIB fire, a large amount of oxygen is generated from the decomposition of ionogenic materials. A water fire extinguisher that helps with cooling and suffocating must be essentially required at the same time. In fact, however, it is difficult to suppress LIB fires in the case of EVs because a LIB is installed with a battery pack housing that interrupts direct extinguishing by water. Thus, this study aims to investigate effective fire extinguishing measurements for LIB fires by using an EV. Relevant documents, including research articles and reports, were reviewed to identify effective ways of LIBs fire extinguishing. A real-scale fire experiment generating thermal runaway was carried out to figure out the combustion characteristics of EVs. This study revealed that the most effective fire extinguishing measurements for LIB fires are applying fire blankets and water tanks. However, there is still a lack of adequate regulation and guidelines for LIB fire extinguishment. Taking this into account, developing functional fire extinguishment measurements and available regulatory instruments is an urgent issue to secure the safety of firefighters and citizens.

Keywords : EV Fire, Fire, LIB, Fire Response

1 정회원, 주저자, 창신대학교 소방방재공학과, 조교수

1 Dept. of Fire & Disaster Preventinon Engineering, Changshin University

2* 정회원, 교신저자, 창신대학교 항공기계공학과, 조교수
E-mail: jslee@cs.ac.kr

2* Corresponding Author, Dept. of Aeronautical & Mechanical Engineering, Changshin Univeristy

1. 서론

지금까지 화석연료는 우리 사회에 주요 에너지 원으로 사용되고 있다. 하지만 화석연료는 우리가 사용하는 에너지원으로 변환되는 과정에서 이산화탄소 등 지구온난화와 환경오염을 유발하는 물질을 발생시킨다[1][2]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 화석연료를 대체할 수 있는 친환경 에너지와 에너지 저장장치에 대한 연구와 개발이 지속적으로 이루어져 왔다.

리튬이온배터리(Lithium-ion battery, LIB)는 높은 에너지 저장성, 광범위한 사용온도 범위, 높은 출력 등의 장점을 가지고 있어 전기차 등의 운송수단, 에너지저장소 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[3][4]. 리튬이온배터리를 사용하는 전기자동차는 지구온난화와 환경오염의 주요 원인으로 알려진 내연기관 자동차를 대체 할 수 있는 방안으로써 그 수요가 급증하고 있다.

하지만 리튬이온배터리를 사용하는 전기차는 새로운 형태의 문제점을 야기하고 있다. 리튬이온배터리는 외부 충격 및 가열, 물리적 손상, 과충전 등에 의해 열폭주와 함께 화재와 폭발이 발생하고 있다. 전기차 화재는 리튬이온배터리가 가진 물리·화학적 특성 및 구조적 특성으로 인해 A, B, C급 화재특성을 모두 나타내며 심부화재로 분류할 수 있다[5]. 또한, 조건에 따라 화재와 폭발이 함께 발생할 수 있으며 화재 발생 및 확산에 대한 예측이 매우 어려운 구조이다.

이러한 특성으로 인해 전기차 화재 발생 시 기존의 소화방법으로 진화가 매우 어렵다. 2019년 부천시와 2020년 대구에서 발생한 전기차 화재는 진화에 약 2시간이 소요되었으며 사용된 물의 양은 약 4만리터 이상이 사용되었다. 또한, 전기차 화재 사고건수를 보면 2020년 11건에서 2022년 44건으로 4배 증가하였으며 앞으로 전기차 보급

이 더욱 증가할 것으로 예상되고 있어 화재건수도 증가할 것으로 예측되고 있다[6].

또한, 최근 공동주택의 주차장이 지하주차장으로 만들어지면서 전기충전장소도 지하주차장에 함께 설치되고 있다. 이로 인해 전기차 화재가 발생할 경우 대형화재로 이어질 수 있어 별도의 스프링클러설비와 제연설비를 설치하고 있다. 하지만 기존에 지어진 지하주차장, 터널 등의 경우에는 이러한 시스템들이 설치되어 있지 않아 더 큰 문제를 야기 할 수 있어 이에 대한 대책 마련이 시급한 상황이다.

이에 본 연구에서는 전기 자동차 화재에 특성에 대한 기존 연구를 분석하고 현재 전기자동차 화재 시 대응방법에 대해 조사 및 분석하였다. 또한, 전기차 실화재 실험을 통해 전기차 화재 대응방법에 대한 실효성을 검증하였다. 본 연구에서 사용한 질식소화포와 수조방식의 진화방법이 전기차 화재 진화 시 효과성을 나타냈으며 차후 개선방법을 도출하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 리튬이온배터리 전기자동차의 화재특성

리튬이온배터리는 리튬이온을 사용하는 전지를 의미하며 양극, 음극, 전해액, 분리막으로 구성되어 있다. 양극재 종류에 따라 NCM (LiNiMnCoO_2), LFP(LiFePO_4), LCO(LiCoO_2), LMO(LiMn_2O_4), NMC (LiNiMnCoO_2) 등으로 나눌 수 있으며 셀 모양에 따라 각형, 파우치형, 원통형으로 구분된다[7][8]. 이러한 리튬이온 배터리는 구성물질과 모양에 따라 화재의 형태는 조금씩 달라지지만 기본적인 화재발생과정은 거의 동일하다.

리튬이온배터리의 화재발생과정을 보면 제조상 결함, 외부충격, 과충전, 외부 전극간 단락 등에 의해 분리막이 손상되면서 양극과 음극이 직접 접촉되면서 단락이 발생한다[7-9]. 이때 급격한 온도 상승과 함께 유기용매인 전해액이 열분해 되면서 인화성 가스가 발생하고 셀에 설치되어 있는 벤트(vent) 또는 셀의 파열이 발생하면서 가스가 외부로 방출(off-gas)되게 된다. 이후 외부로 유출된 인화성 가스가 점화되면서 화재가 발생한다. 이러한 현상을 열폭주라고 한다. 열폭주가 발생하면 인접 셀로 열이 확산되기 쉬워 연속적으로 열폭주가 발생하게 되면서 급격한 화재 확산이 발생한다.

리튬이온배터리 전기차 화재의 특성을 화재분류, 화재형태, 연소생성물로 나눌 수 있다. 화재분류측면에서 A, B, C 급이 동시에 나타나는 복합 화재로 분류할 수 있다. S. Yuan (2021)의 경우 셀의 재질인 스텐레스, 알루미늄의 연소를 포함시켜 D급 화재까지 분류하고 있다[7]. 화재형태를 보면 열폭주 이후 인화성가스가 벤트(vent) 또는 셀의 파열이 발생한 부분으로 급격하게 분출되면서 점화가 이루어지면서 Jet fire 형태를 보인다[7]. 화재 발생 과정에서 발생하는 가스는 주로 메탄, 에탄, 프로펜, 에틸렌 등의 탄화수소계 가스(hydrocarbon gas)와, 수소, 이산화탄소, 일산화탄소, 독성가스인 HF, POF₃ 등이 생성된다[10-11]. Wang (2018)의 연구를 보면 생성가스 중 일산화탄소와 이산화탄소가 가장 높은 비중을 나타내는 것으로 연구가 되었다[12]. 또한, 연소과정에서 산소가 발생하는 것으로 연구되고 있다. 이러한 지금까지 연구는 리튬이온배터리를 외부에 노출시킨 상태에서 실험을 한 결과로 전기차의 경우 실화재 실험에서는 다르게 나타날 수 있다.

이러한 리튬이온 배터리 전기차화재의 특성과 함께 전기차의 구조와 리튬이온배터리의 하우징과 덮개에 대한 부분이 화재진화에 필요한 소화약제

및 소화방법을 결정하는 중요한 요소가 된다.

2.2 전기차 화재 소화방법

리튬이온 배터리는 다양한 원인에 의해 배터리 내부 분리막이 파괴되면서 전해질 용액이 반응하면서 열폭주가 발생한다. 이후 off gas 가 발생하면서 주변 점화원에 의해 화재 및 폭발이 발생한다. 이때 방출된 가스가 환경조건에 따라 바로 화재로 이어질 수 있지만 방출된 가연성가스가 바로 점화되지 않고 체류하면서 폭발로 이어질 수 있는 위험이 존재한다.

리튬이온배터리 화재 진화를 위한 소화약제 및 소화방법에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 수계 및 가스계 소화약제, 분말소화약제, 액화팽창질석 등 다양한 소화약제에 대한 리튬이온배터리에 대한 적용성에 대한 연구가 이루어졌다[7][13-14]. 연구 초기에는 주로 소화약제를 리튬이온배터리의 셀 또는 모듈단위에 직접분사하여 소화하여 소화약제의 적용성 및 소화방법에 대한 연구가 이루어졌다. 이러한 연구를 통해 물, 침윤 소화약제, Novec-1230, 액체팽창질석 등 다양한 소화약제가 적용성이 있는 것으로 나타났다[7][13-17].

하지만 이러한 소화약제와 소화방법에 대한 연구는 실제 화재현장에서 적용하기가 어렵다. 전기자동차에 설치된 리튬이온배터리팩은 하우징과 외부덮개로 덮혀져 있어 소화약제가 직접적으로 화재가 발생한 셀로 침투하기가 매우 어렵다. 또한, 화재발생 조건에 따라 폭발이 발생할 수 있어 접근이 어려우며 재발화의 위험이 있기 때문에 소화약제의 농도가 일정시간 유지되는 것이 반드시 필요하다.

또한, 리튬이온배터리는 열폭주 단계에서 발생하는 전해질 물질의 화학반응은 인화성 가스의 발

생 뿐만 아니라 산소를 발생하기 때문에 냉각과 질식소화 성능을 모두 만족해야 한다. 이러한 냉각 및 질식소화 효과를 동시에 나타낼 수 있는 대표적인 소화약제는 물이다. 지금까지 연구에서도 물 소화약제가 가장 좋은 효과성을 나타내고 있다 [18,19]. 그 이유는 물 소화약제는 자체적인 소화능력 뿐만 아니라 다양한 형태로 분사가 가능하기 때문에 대상물의 화재 형태에 따라 냉각 및 질식소화효과를 극대화 할 수 있다.

하지만 전기차에 사용되고 있는 리튬이온배터리는 구조상 직접적으로 내부로 소화약제가 침투할 수 없는 구조로 되어 있다. 이로 인해 외부에서 다양한 형태로 물을 주수하더라도 내부로 침투할 수 없어 소화가 거의 불가능한 실정이다. 더욱이 한 개의 셀에서 시작된 연소는 인접 셀로 확산되면서 화재를 더욱 확산시키고 환경 조건에 따라 폭발까지 발생하고 있다.

전기차 화재의 가장 큰 문제점은 소화약제가 연소물에 직접 작용을 할 수 없다는 것이다. 전기차 화재 진화 방법은 냉각 및 질식소화 성능이 동시에 작용하여야 한다. 전기차 화재가 발생하기 시작한 초기 소방에서는 질식소화포를 이용한 방법을 사용하였다. 질식소화포는 연소물을 덮어 산소를 차단하는 효과를 통해 화재를 진화하는 장치이다. 하지만 질식소화포 사용 시 리튬이온배터리의 전해질 물질이 분해되면서 산소가 발생하기 때문에 큰 효과를 발휘하지 못한다. 하지만 질식소화포는 인접 차량 및 가연물에 연소 확대를 막고 연기를 차단하는 효과를 발휘할 수 있다. Peter (2022)의 전기차 실화재 실험에서 질식소화포 사용 시 열방출율(Heat Release Rate, HRR)을 낮추는 것으로 나타났다[2]. 하지만 질식소화포 제거 후 다시 재발화하는 것으로 나타나 직접적으로 화재를 진화하는 방법으로는 사용이 불가능하다. 질식소화포는 직접적으로 전기차 화재를 소화 할

수는 없지만 화재의 확산을 막고 연소속도 및 열방출율을 감소시킬 수 있는 역할을 할 수 있는 것으로 판단된다.

질식소화포를 이용한 전기차화재의 소화가 어려워지면서 하부에 물을 주수할 수 있는 노즐 및 관창이 개발과 수조형태의 소화방법이 개발되었다. 또한, 물을 리튬이온 배터리에 직접 주수할 수 없기 때문에 리튬이온 배터리 자체를 물에 잠기게 해서 소화하는 수조방식이 개발되었다. 수조 방식은 화재가 발생한 전기차에 벽을 세우거나 만들어진 수조를 차량에 설치하는 하여 수조형태를 만들고 수조 내부에 물을 넣어 소화하는 방식이다. 수조방식은 셀 내부로 물이 직접 침투하여 소화할 수 있는 장점과 재발화를 막을 수 있는 장점을 가지고 있어 최근 주로 사용하는 방식이다.

질식소화포와 수조방식은 현장에서 하나의 방법만 선택해서 사용하는 것 보다는 두가지 방법을 함께 사용하는 것이 더 효율적이며 소방대원들의 안전을 확보할 수 있는 방법이다. 특히, 화재 초기 질식소화포를 이용할 경우 인접 차량 등의 가연물로 확산을 막을 수 있으며 질식소화를 통해 일정시간 내부 온도를 낮출 수 있어 수조를 사용하기 이전 사용이 가능하다. 또한, 물이 가지고 있는 질식소화작용의 효율성을 더 높일 수 있는 방식이다.

3. 실험방법

본 연구에서는 전기자동차화재 발생 시 대응방법의 효과성을 검증하기 위해 실화재 실험을 진행하였다. 실험대상물인 전기차는 H사에서 판매하고 있는 모델로 Table 1과 같다.

실험은 배터리 내 셀 표면에 히터를 설치하여 방법, 차량 하부에 외부열원에 의한 방법, 차량

Table 1. Specification of the lithium-ion battery used in the Experiment

model	LGES E63b
total cell	294
nominal capacity	180 Ah
nominal voltage	356V
operation voltage range	330~410V
nominal energy capacity	64 kWh
operation temperature range	-35 ~ 60°C
Type of cooling	water cooling

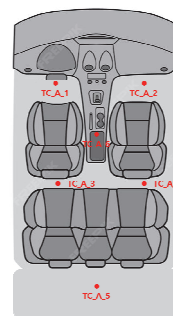
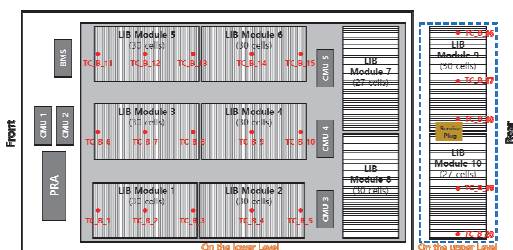


Fig. 2 Location of sensor in the EV



modify by author[20]



Fig. 1 The layout of LIB modules and location of sensor in pack

내부 연소에 의한 방법으로 진행하였다. 실험은 히터를 이용한 가열, 외부 열원, 내부화재 순으로 진행하였다. 배터리 온도를 측정하기 위해 Fig. 1 과 Fig. 2와 같이 K-type (0.32mm, -270°C ~ 1372°C) 열전대를 20개 지점에 설치하였으며 차량 내부에 6개 지점, 차량 외부 2개 지점에 설치 하였다. 차량 외부온도를 측정하기 위해 열화상 카메라와 데이터로거(model GL-840), 캡톤 필름 히터(KHR 220V 100W 200x90cm, 최대온도

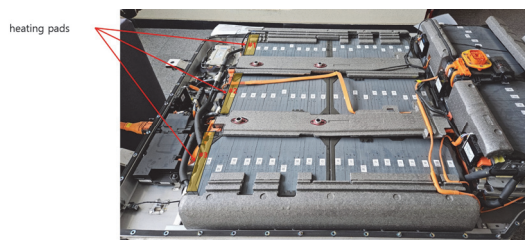


Fig. 3 Location of heating pads in the EV

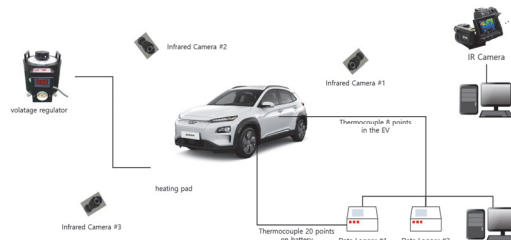


Fig. 4 Experimental setup for EV fire

180°C, 두께 0.3mm), 비디오 레코더를 활용하여 실험장치를 구성하였다(Fig. 5). 캡톤 필름 히터는 Fig. 3과 같이 각 모듈의 첫 번째와 두 번째 셀 사이에 설치하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5를 보면 히터에 의한 가열이 시작된 후

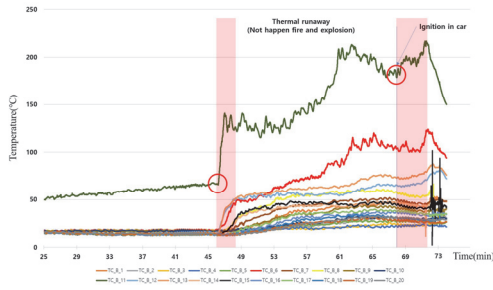


Fig. 5 EV battery of temperature changes

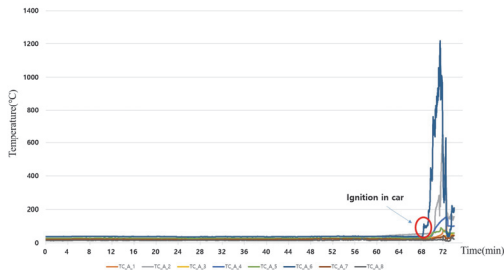


Fig. 6 EV interior of temperature changes

약 46분~47분 사이에 히터가 설치된 지점(TC_B_11)의 온도가 약 60 °C에서 140°C까지 급격하게 상승하였다. 이후 온도가 210°C까지 지속적으로 상승하였다. 온도가 급격하게 상승한 지점은 열폭주가 발생한 지점으로 판단되지만 화재나 폭발이 동반되지는 않았다. 또한, 같은 모듈 내부에서 TC_B_12, TC_B_13의 온도가 함께 급격하게 상승하였으며 이는 같은 모듈 내부에서 열폭주 이후 열 열확산이 발생한 것을 의미한다. 열폭주 이후 열 확산은 인접 모듈인 Module 3에서도 나타났으며 TC_B_6 지점에서도 온도가 급격하게 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 열폭주가 발생하면서 같은 모듈 내부에서 열의 확산이 발생한 것을 의미하며 인접모듈까지의 열 확산이 발생한 것으로 지금까지의 관련 연구결과와도 동일하다. 열폭주 이후 약 63분부터 온도가 떨어졌으며 이는 열폭주 이후 충분한 열이 인접셀과 모듈로



Fig. 7 Using the fire blanket and movable water container



Fig. 8 Completion of EV vehicle fire suppression

전달되지 않으면서 나타난 현상으로 판단된다.

약 68분경 질식소화포 및 소화수조의 성능을 확인하기 위해 차량 내부에 화재를 발생시켰으며 급격한 연소가 진행되면서 배터리까지 열이 확산되었다. 내부에 연소 및 리튬배터리에 열 확산이 이루어진 이후 주수소화, 질식소화포 및 하부관찰을 이용한 진화, 수조를 사용한 진화가 이루어지면서 리튬이온배터리의 온도가 급격하게 감소하였으며 이는 리튬이온배터리 및 차량 연소 진화가 완료되었음을 의미한다(Fig. 7).

Fig. 6은 차량 내부 온도변화를 나타내는 것으로 차량내부에 화재를 발생시킨 후 급격하게 온도가 상승하였다. 이후 주수소화, 질식소화포, 하부관찰을 이용한 진화, 수조를 사용한 진화가 이루어지면서 급격하게 온도가 하강하였으며 최종적으로 진화가 완료되었다(Fig. 8).

5. 결론

전기차 화재를 진화하기 위해서는 질식 및 냉각소화가 동시에 작용해야 한다. 또한, 구조적인 특징으로 인해 셀의 내부까지 소화약제를 침투시켜야 하며 재발화의 위험이 높아 일정시간 소화능도를 유지해야 한다. 이러한 기준을 만족할 수 있는 소화약제 및 방법은 물을 사용하여 화재가 발생한 전기차의 리튬이온배터리부분을 침수시키는 방법이다. 본 연구에서는 이러한 조건을 만족할 수 있는방법의 도출을 위해 질식소화포와 소화주조를 활용한 방법의 효율성을 도출하였다. 또한, 실제 질식소화포 및 소화주조를 활용하여 실제 전기차 화재를 재현하여 실험한 결과에서도 화재진화의 효율성을 증명하였다. 이러한 연구결과는 전기차 화재 현장 대응시 진화대원들의 안전확보와 신속한 전기차 화재진화에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 2023학년도 창신대학교 교내연구비(과제번호 창신-2023-011) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1074289)

참고문헌

- [1] A. Dorsz, and M. Lewandowski, "Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures," *Energy*, vol. 15, no. 1 (2022).
- [2] P. Sturm, P. Föbleitner, D. Fruhwirt, R. Galler, R. Wenighofer, S. F. Heindl, S. Krausbar, and O. Heger, "Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels," *Fire Safety Journal*, vol. 134 (2022).
- [3] L. B. Diaz, X. He, Z. Hu, F. Restuccia, M. Marinescu, J. V. Barreras, Y. Patel, G. Offer and G. Rein, "Review—Meta-Review of Fire Safety of Lithium-Ion Batteries: Industry Challenges and Research Contributions," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167 (2020).
- [4] L. Kong, C. Li, J. Jiang and M. G. Pecht, "Li-ion battery fire hazards and safety strategies," *Energies*, vol. 11, no. 9, (2018).
- [5] Y. Zhou, J. Bai, Z. Wang, J. Wang, W. Bai, "Inhibition of thermal runaway in lithium-ion batteries by fine water mist containing a low-conductivity compound additive", *Journal of Cleaner Production*, vol. 340 (2020).
- [6] National Fire Research Institute, "Electrical Vehicle Fire Response Guide," National Fire Research Institute (2023) Available: https://www.apes.or.kr/information/43?sst=wr_datetime&sod=desc&sop=and&page=2=
- [7] S. Yuan, C. Chang, S. Yan, P. Zhou, X. Qian, M. Yuan, and K. Liu, "A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 62, pp.262-280, (2021).
- [8] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246–267, (2018).
- [9] W. K. Chow and C. L. Chow, "Electric vehicle fire hazards associated with batteries, combustibles and smoke," *International Journal of Automotive Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 165-171 (2022).
- [10] M. Chen, Y. He, M. Chen and Y. Richard, "Experimental Study on the Combustion Characteristics of Primary Lithium Batteries Fire," *Fire Technology*, vol. 52 no. 2, pp. 365-385, (2016).

- [11] Q. Wanga, P. Pinga, X. Zhaoa, G. Chub, J. Suna, and C. Chen, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 208 pp.210-224, (2012).
- [12] A. Wang, S. Kadam, H. Li, S. Shi and Y Qi, "Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries," *Computational Materials*, vol. 4, no. 1, (2018).
- [13] X. Li, M. Zhang, Z. Zhou, Y. Zhu, K. Du, and X. Zhou, "A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium ion battery fires," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 42, (2023).
- [14] P. Kritzer, H. Doring, and B. Emermacher, "Improved Safety for Automotive Lithium Batteries: An Innovative Approach to include an Emergency Cooling Element," *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 4 no. 2, pp. 192-207, (2014).
- [15] T. Liua, C. Taob, and X. Wang, "Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules," *Applied Energy*, vol. 267, (2020).
- [16] P. Lou, W. Zhang, Q. Han, S. Tang, J. Tian, Y. Li, H. Wu, Y. Zhong, Y. C. Cao, and S. Cheng, "Fabrication of fire-response functional separators with microcapsule fire extinguishing agent for lithium-ion battery safety," *Nano Select*, vol. 3, no. 5 pp. 947-955, (2022).
- [17] A. O. Said, and S. I. Stoliarov, "Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent", *Fire Safety Journal*, vol. 121, (2021).
- [18] DET NORSKE VERITAS (U.S.A.) INC, "Considerations for ESS Fire Safety," DET NORSKE VERITAS (U.S.A.) INC, (2017).
- [19] J. Xua, P. Guob, Q. Duana, X. Yuc, L. Zhanga, and Y. Liu, "Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fires," *Applied Thermal Engineering*, vol. 171, (2020).
- [20] S. W. Kang, M. J. Kwon, J. Y. Choi, and S. K. Cho, "Full-scale fire testing of battery electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 332, (2023).

(접수: 2024.01.05. 수정: 2024.01.16. 게재확장: 2024.01.25.)