

전기자동차 배터리 화재원인 및 대응방안에 관한 연구

이준우, 이재광, 차서현, 라현수, 배진용
동신대학교

A Study on the Cause and Response Measures of EV(Electric Vehicle) Battery Fires

Jae-Gwang Lee, Joon-Woo Lee, Seo-Hyun Cha, Hyun-Su La, Jin-Yong Bae
Dongshin University

Abstract - This paper will discuss the causes and response measures of EV(Electric Vehicle) battery fires. In this study, we will analyze the causes of increased demand for EV and thermal runaway of lithium-ion batteries, and study ways to effectively respond to EV fires.

1. 서 론

최근 탄소(CO₂)배출, 미세먼지 저감을 위한 전 세계적인 정책으로 전기자동차 보급 및 수요가 증가되고 있다. 하지만 전기자동차의 공급이 확대됨에 따라서 리튬-이온 배터리의 전기적 특성으로 인하여 전기자동차 배터리 화재 및 폭발 사고가 증가하고 있다. 본 논문에서는 배터리 화재 동향, 국내·외 관련 규정, 자료, 특허 및 논문 등을 참고하여, 전기자동차 배터리 폭발 및 화재 원인과 방지 대책에 대하여 살펴보려고 한다[1-13].

2. 본 론

2.1 전기자동차 수요 전망 및 화재동향

그림1은 전 세계 전기자동차 수요증감률을 나타낸다[1].



<그림1> 전 세계 전기자동차 수요 증감률[1]

그림 1에서는 전 세계 전기자동차 시장은 2023년 1,689만대에서 2030년 6,130만대로 매년 37.56%의 성장률로 급격하게 증가할 것을 전망되고 있다[1].

그림 2는 국내 전기자동차 배터리 화재 동향을 나타낸다[2]. 그림 2로부터 전기자동차 보급이 증가함에 따라 배터리 화재가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 2> 전기자동차 배터리 화재동향[2]

주된 전기자동차 배터리 화재원인으로 전기적 요인(18건) > 부주의(15건) > 교통사고(9건) > 기계적 요인(4건) > 기타(33건)으로 분석되었다.

전기자동차 배터리의 화재 사고는 전기자동차에 대한 부정적 인식의 증가와 더불어 소비자의 선택에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 나타나고 있다. 더불어 전기자동차의 안정성 및 소방 관련 규제 등의 강화로 전기자동차에 화재 안정성을 개선해야 한다[2-3].

탄소배출 저감 및 친환경 자동차 정책으로 내연기관 자동차의 배출가스 규제를 강화하면서, 전기자동차(전기차 및 수소차)의 개발에 대한 관심이 증가하였다. 그로 인해 전체 자동차 시장에서 순수 전기자동차의 점유율은 9.9%로 현재는 약 10대 중 1대가 전기자동차로 운행 중에 있다[4].

그림 3은 전기자동차 배터리 과충전으로 인한 화재 사진을 나타낸다[5-6]. 전기자동차 충전 시에 배터리 관리 시스템(BMS)을 통하여 적절하게 배터리 충전을 차단하지 못하고 과충전 되는 경우, 배터리 화재로 확산되는 현상이 일어날 수 있다.



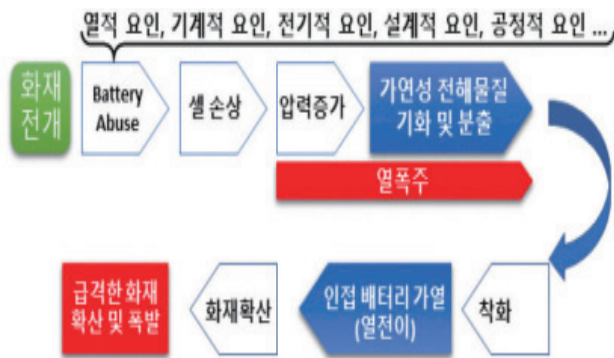
<그림 3> 전기자동차 배터리 과충전으로 인한 화재[5].

전기자동차 배터리의 과충전은 양극의 전위 상승으로 발열을 동반한 전해질의 산화 발열반응이 발생하며, 배터리 내부 전해질의 리튬-이온 농도가 증가함으로 인하여 화재가 발생한다. 전기자동차 과충전으로 인한 화재의 원인은 리튬-이온 배터리가 동작하는 과정에서 기계적이나 전기적에 의해 배터리 누적 손상도가 증가하면 화재 발생 확률도 함께 증가하는 것으로 연구되었다[6].

전기자동차 배터리에 과충전이 발생하면, 배터리에서 발열 현상이 일어나며, 전해질이 가연성 가스로 증발하면서, 배터리의 외부가 부풀어 오르는 현상이 발생한다. 일반적으로 과충전시 배터리 내부에서는 처음에 전해액과 마이너스극의 환원 반응이 일어나서 전해액의 열분해, 산화분해 등 발열이 일어나고, 과충전 방지 보호회로의 유무(有無)에 관계없이 급격하게 가연성 가스가 증가하는 경우, 폭발이 발생할 수 있다[7].

2.2 전기자동차 배터리 화재발생 메커니즘

그림 4는 전기자동차 리튬-이온 배터리 화재발생 메커니즘을 나타낸다[2].

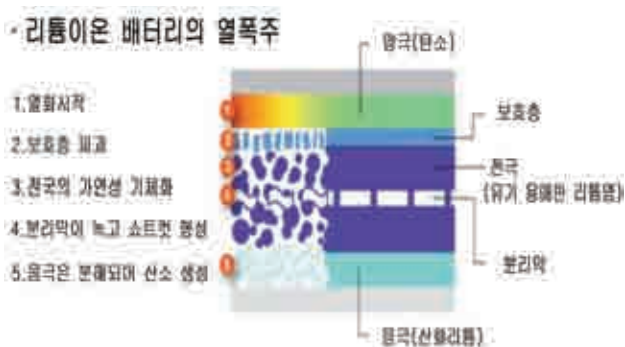


<그림 4> 리튬-이온 배터리 화재발생 메커니즘[2]

전기자동차 배터리의 열폭주 메커니즘은 셀 손상 → 내부 압력 상승 → 오프가스 발생 → 분리막 손상 → 열폭주 → 연기 발생 및 점화 → 화재 및 폭발로 발생한다[3].

전기자동차의 수요가 증가함에 따라 전기차에서 리튬-이온 배터리의 사용이 압도적으로 증가하고 있으며, 전동킥보드, 전기오토바이 및 다양한 모빌리티 분야에서 리튬-이온 배터리의 사용이 더욱 확대되고 있으며, 전기적 요인과 부주의 등으로 인하여 전기자동차 배터리의 열폭주로 화재가 발생한다[2,8-9].

그림 5는 전기자동차 배터리 열폭주 메커니즘을 나타낸다[10].



<그림 5> 전기자동차 배터리 열폭주[10]

전기자동차 배터리가 비정상적인 상태인 경우, BMS(배터리 관리 시스템)의 제어 범위를 초과하여 자발적인 발열반응인 열폭주 단계로 전개될 가능성이 높으며, 과충전의 경우 배터리 셀의 전압을 BMS에서 효과적으로 모니터링·제어할 수 없는 경우가 발생할 수 있다.

전기자동차 배터리 과충전에 의한 배터리 내부의 전압 상승과 전극과 전해질 계면에서의 부반응에 따른 전해질 분해 및 가연성 가스발생에 의한 내압 상승 등 비정상적인 반응이 시작됨과 동시에 발열반응에 의한 분리막의 소손이 발생된다. 이는 전기자동차 배터리에서 양극과 음극이 직접 접촉하게 되는 내부 단락(Internal Short circuit)을 형성하고, 내부 단락에 의한 대용량의 전류 이동에 따른 급격한 발열반응이 추가되어 연쇄반응을 초래하게 된다.

국내 리튬-이온 배터리 화재 발생 건 중 23건이 충전 상태(SoC) 90% 이상에서 발생한 점을 고려하면, 과충전이 현재 화재발생과 매우 상관관계가 있으며[11-12], 가열폭주 온도(188℃→527℃), 과충전 열폭주 온도(110℃→317℃)로 상승함을 통하여 배터리 화재 및 폭발이 시작된다[5].

2.3 전기자동차 배터리 화재대응 장비 보유현황

표 1은 2023년 기준 전국 전기차 화재진압 장비 보유 현황을 나타낸다[13].

<표 1> 전기자동차 화재 대응 장비 보유현황[13]

질식소화덮개				
연번	지역	현보유	이동식 수조	상방향 방사 장치
계	-	443	48	237
1	서울	46	8	1
2	부산	28	11	12
3	대구	11	5	4
4	인천	23	0	11
5	광주	17	0	0
6	대전	19	0	0
7	울산	15	2	0
8	세종	14	2	0
9	경기	17	7	173
10	강원	29	3	0
11	충북	19	0	0
12	충남	31	1	0
13	전북	19	0	11
14	전남	43	3	0
15	경북	32	0	1
16	경남	59	0	0
17	제주	6	0	0
18	창원	15	0	24

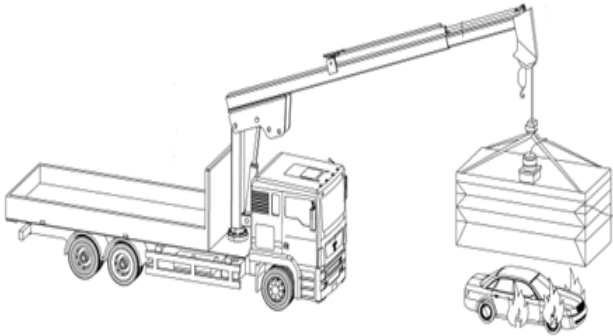
전기자동차 배터리의 열폭주 현상을 제어하기 위하여 골든타임이 중요하며, 빠른 시간 안에 전기자동차 배터리의 열을 낮추기 위해서는 각 지역별로 화재 진압 장비를 충분히 보유해야

한다.

하지만, 전기자동차 배터리 화재대응 장비는 가격이 고가이고, 전기자동차 화재를 방지하기 위하여 이동식 수조 또한 설치 시간이 오래 걸리며, 설비 바닥이 평탄하지 않으며, 경사진 도로의 경우 설치가 불가능하다는 문제점이 있다[14].

2.4 전기자동차 화재 대응 방안

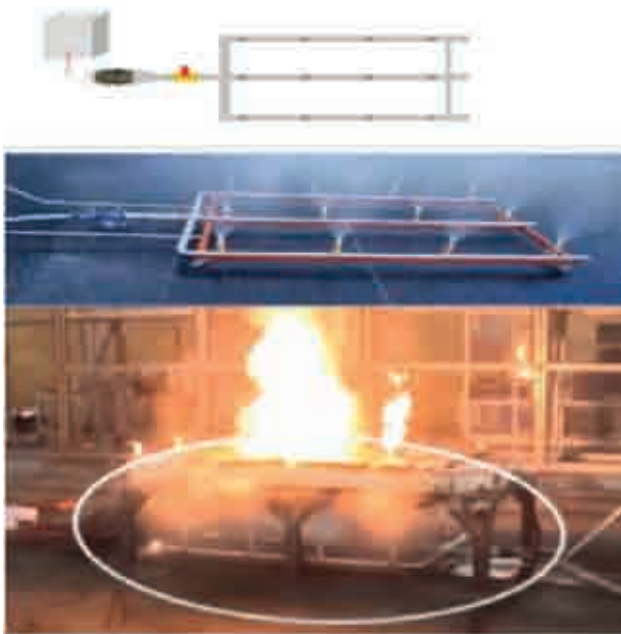
그림 6은 전기자동차 화재진압용 이동 바스켓 특허기술을 나타낸다[15].



<그림 6> 전기자동차 화재진압용 이동 바스켓[15]

그림 6으로부터 화재 차량을 커버하여 화재 확산을 방지하고, 차량의 주위를 에워싸는 바스켓을 설치하고, 그 이후에 차량을 향해 용수를 분사하는 것을 기술적 특징으로 한다[15].

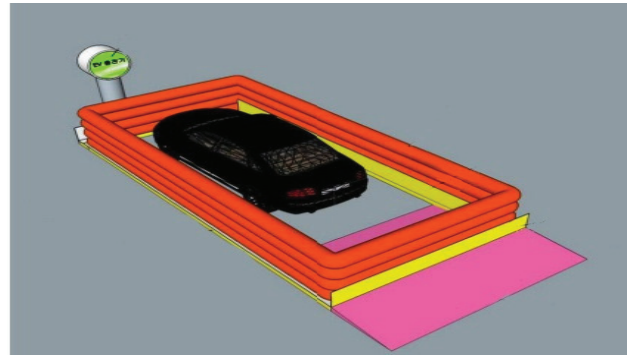
그림 7은 전기자동차 화재 진압용 상방향 직수장치를 나타낸다[16-17].



<그림 7> 상방향 직수장치[16-17]

그림 7로부터 전기자동차 차량 하부에 부착된 배터리팩을 집중적으로 식힐 수 있으며, 일반적으로 수 시간이 필요한 전기차 화재 진화시간을 효과적으로 단축할 수 있다. 이로 인하여 열폭주 현상 진화 시간을 약 16분 정도로 감소시킬 수 있으며, 한번의 고정으로 하루 배터리에 집중적으로 물을 분사할 수 있으므로 소방관들의 화재진압 안정성을 높일 수 있는 장점이 있다[16-17].

그림 8은 천장 모듈형 질식 소화포를 나타낸다[18].



<그림 8> 전기자동차 충전소의 화재진압 수조[18]

그림 8은 전기자동차를 충전중 화재가 발생하면 2차 사고를 보다 빠르고, 효과적으로 방지할 수 있는 충전소의 화재진압 수조를 나타낸다. 전기자동차 배터리에서 화재가 발생하면, 튜브에 바람을 주입하여 빠르게 화재진압용 수조를 만들 수 있으며, 물을 채움으로 인하여 화재를 방지할 수 있는 것을 특징으로 한다[18].

그림 9는 전기자동차 화재방지를 위한 천장 모듈형 질식 소화포를 나타낸다[19].



<그림 9> 천장 모듈형 질식 소화포[19]

그림 9는 전기자동차 충전 구역에 설치된 질식 소화포를 활용하여, 화재 발생 시 천장에 구비된 질식 소화포가 내려와서 전기자동차를 빠르게 덮음으로 인하여 화재 확산을 방지(2차 사고)하고, 인근에 주차된 자동차로 화재 확산을 방지함으로써 인하여 피해를 최소화할 수 있으며, 전기차 화재 시 상황을 감지하는 무인 카메라 시스템을 바탕으로 동작하는 것을 특징으로 한다[19].

3. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 화재원인 및 대응방안에 대하여 연구하였다. 전기자동차 수요가 증가함으로 인하여 배터리의 화재 및 폭발 사고도 증가하고 있다. 본 연구에서는 전기자동차 화재발생 메커니즘, 전기자동차 배터리 열폭주 및 리튬이온 배터리의 화재발생 메커니즘에 대하여 조사하였다. 또한 전기자동차 화재대응 보유장비를 현황을 살펴보고[13], 전기자동차 화재를 대응하는 방법으로 전기자동차 화재진압용 이동 바스켓[15], 상방향 직수장치[16-17], 전기자동차 충전소의 화재진압 수조[18], 천장 모듈형 질식 소화포[19] 기술에 대하여 살펴보았다. 지구온난화 방지를 위한 탄소배출 저감 정책으로 전기자동차의 보급은 더욱 활발하게 증가하는 가운데 전기자동차의 화재를 신속하게 제어함과 동시에, 화재시 운전자 보호, 대응방안 및 전기자동차 전용 소화제 및 소화 방식에 대한 지속적인

연구가 필요하며, 이를 통하여 전기자동차 보급의 촉진과 더불어 전기자동차에 대한 전반적인 신뢰성과 안전성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgement

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-002)

[참고문헌]

- [1] Global EV and LIB Market Forecast Report, "Global Electric Vehicle Market Size," SNE Research, Mar. 2022.
- [2] Sun-Kyoung Jeoung, "Electric Vehicles Fire Safety," Auto Journal 전문가 칼럼, pp. 45-48, Jun. 2023.
- [3] 국토교통부 보도자료, "자동차 등록대수 2,500만대 돌파... 2명당 1대 보유," Apr. 2022.
- [4] 경향신문 기사, "10대 중 1대는 순수 전기차 ... 점유율 9.9%," 21, Feb. 2023.
- [5] Battery Explosion Experiment! This is How EV Batteries Explode. When will All-solid-state Batteries be Available?. Available online : <https://www.youtube.com/watch?v=LaV2NDpaSLI> (accessed on 4 Oct. 2023).
- [6] Yong-Taek Han, et. al., "A Study on the Fire Risk due to Overcharging of Self-made Lithium-ion Battery Packs," Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 10, No. 1, pp. 73-81, Jun. 2022.
- [7] Eui-Pyeong Lee, "Analysis of Car Fire Cases Related to a Lithium Battery and Cause Investigation Technique," Fire Sci. Eng, Vol. 33, No. 2, pp. 98-106, Apr. 2019.
- [8] Xing-Yan Yao, et. al., "Reliability of Cylindrical Li-ion Battery Safety Vents," IEEE Access, Vol. 8, pp. 101859-101866, May 2020.
- [9] Bum-ju Lee, et. al., "A Study on Explosion and Fire Risk of Lithium-Ion and Lithium-Polymer Battery," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 42, No. 4, pp. 855-863, Apr. 2017.
- [10] Battery Thermal Runaway of Lithium-ion Batteries Material , "<http://www.sateng.co.kr/business/battery.php>," (accessed on 4 Oct. 2023).
- [11] Sang-Ho Park, et. al., "A Study on Thermal Runaway Suppression Technology in Abnormal State for Energy Storage System(ESS) Using Lithium Secondary Battery," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 36, No. 6, pp. 26-35, Jun. 2022.
- [12] Beom-Jun Kim, et. al., "Fire Prevention and Early Extinguishing Technology of Lithium-ion Battery Pack Applied to Urban Air Mobility(UAM) and Drone System," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 26, No. 6, pp.454-461, Jun. 2023.
- [13] 동아일보 신문기사, "불나면 잘 안 꺼지는 전기차...전용 화재 진압 장비로 대처한다," 01. Jun. 2023.
- [14] Hyung-Sik Kim, et. al., "Experimental Study on Fire Characteristics of Adjacent Electric Vehacles," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 23, No. 4, pp 343-350, Apr. 2022.
- [15] 대한민국 등록특허공보 제10-2573296호, "전기자동차 화재 진압용 이동 바스켓," Sep. 2023.
- [16] 국립소방연구원, "전기자동차 화재대응 가이드," Mar. 2023.

[17] Electric car fire stuck! Rapid Evolution Device 'Development Video' Obtained. Available online : <https://www.youtube.com/watch?v=LaV2NDpaSLI> (accessed on 4 Oct. 2023).

[18] 대한민국 등록특허공보 제10-2431474호, "전기자동차 충전소의 화재진압 구조," Aug. 2022.

[19] 걱정마 전기차 화재 인터넷 사이트, "전기차 화재안전 AI 솔루션," Available online : <http://evcsafety.com/solution> (accessed on 4 Oct. 2023).