

전기자동차 화재 시 탑승자의 인명 안전을 위한 배터리 사출방안에 관한 연구

신수인, 이동영, 권도엽, 한정현, 서봉균, 정태림, 이민주, 최승규
 건양대학교 재난안전소방학과
 e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

A Study on Battery Ejection Methods for Safety of Occupants in the Event of an Electric Vehicle Fire

Su-In Sin, Dong-Young Lee, Do-Yeop Kwon, Jeong-Hyun Han, Bong-Gyun Seo,
 Tae-Lim Jung, Min-Ju Lee, Seung-Kyou Choi
 Department of Disaster Safety & Fire, Konyang University

전 세계에서는 지구온난화에 따른 기후변화를 늦추기 위한 정책의 일환으로 온실가스를 배출하는 내연기관 자동차를 줄이고 친환경 자동차의 보급을 적극적으로 추진하고 있다. 우리나라에서도 온실가스를 감축하기 위한 전 세계적 추세에 따라 친환경 전기자동차의 적극적인 보급 정책으로 급격하게 증가하고 있다. 전기자동차의 보급이 증가함에 따라 화재 사고가 꾸준히 발생하여 인명과 재산 피해를 발생시키고 있어 이에 대한 대책이 요구된다. 전기자동차의 동력원으로 쓰이는 리튬 계열 배터리 화재는 온도상승에 따른 열폭주 현상으로 인하여 폭발적으로 연소하는 특성이 있어 사실상 적응성이 있는 소화약제가 없는 관계로 화재진압에 큰 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 전기자동차 배터리의 온도와 화재를 센서로 감지하고 배터리팩을 자동차 외부로 사출하는 방안을 제안한다. 또한, 제안한 방안을 적용한 사출장치 시뮬레이터를 구현하여 시험 분석한 결과, 전기자동차 화재에 따른 인명과 재산 피해 경감에 유용함을 확인하였다.

1. 서 론

세계적으로 지구온난화에 따른 기후변화를 늦추기 위하여 온실가스를 배출하는 내연기관 자동차를 줄이고, 친환경 자동차의 보급을 늘리는 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 유럽의회에서는 지구온난화에 대응하기 위하여 온실가스를 배출하는 내연기관 자동차 판매를 금지하는 법이 도입되고 있으며, 탄소 무배출 차량 판매 의무화 정책의 시행으로 전기자동차의 보급이 늘어나고 있다.

또한, IEA의 2022년도 전 세계 전기자동차 시장 현황보고서에 따르면 2016년 2,300,000대, 2017년 3,700,000대, 2018년 5,800,000대, 2019년 7,100,000대, 2020년 11,300,000대로 전년 대비 63% 늘어난 수치로 보급량이 급증하고 있다.

친환경 전기자동차의 보급이 증가함에 따라 배터리 화재 사고도 꾸준히 발생하여 인명과 재산 피해가 증가하고 있다. 최근 5년간 국내 전기자동차 화재 발생 현황을 살펴보면 2017년에는 1건 2020년에는 10건으로 매년 큰 폭으로 증가하고, 재산 피해 역시 2017년도 55천 원에서 2020년 359,321천 원으로 화재 건수와 비례하여 피해액이 큰 폭으로 증가하고 있어 이에 대한 대책이 요구된다.

한편, 전기자동차의 동력원으로 쓰이는 리튬 계열 배터리

화재는 온도상승에 따른 열폭주 현상으로 인하여 폭발적으로 연소하는 특성이 있어 사실상 적응성이 있는 소화약제가 없는 관계로 화재진압에 큰 어려움이 있다.

이에 본 논문에서는 전기자동차 배터리의 온도와 화재를 센서로 감지하고, 배터리팩을 자동차 외부로 사출하는 방안을 제안한다. 또한, 제안한 방안을 적용한 배터리 사출장치 시뮬레이터를 구현하여 시험 분석한 결과, 전기자동차 화재에 따른 인명과 재산 피해 경감에 유용함을 확인한다.

2. 전기자동차의 화재 현황 및 사례분석

2023년 국립소방연구원의 국내 전기자동차 화재통계에 따르면 표 1과 같이 2017년 1건, 2018년 2건, 2019년 3건, 2020년 11건, 2021년 24건, 2022년 44건으로 전기자동차 화재 발생이 매년 증가하고 있다.[1]

[표 1] 연도별 전기자동차 화재 사고 현황

연도 항목	2017	2018	2019	2020	2021	2022
화재 사고 건수	1	2	3	11	24	44

인명피해 및 재산 피해 역시 표 2와 같이 2020년 0건에 360,740천 원, 2021년 1건 878,094 천 원, 2022년 4건에 907,504 천원으로 해마다 증가하고 있다.[2]

[표 2] 전기자동차 화재 사고로 인한 인명 및 재산 피해 현황

년도 항목	2020	2021	2022
인명피해 합계	0	1	4
사망	0	0	1
부상	0	1	3
재산 피해액(천원)	360,740	878,740	907,054

국내외 전기자동차 화재사례를 분석하면 표 3과 같이 2020년 10월 아파트 지하 주차장에서 충전 중에, 2023년 1월 테슬라 서비스센터에 주차된 전기자동차에 화재가 발생하여 약 3 시간 만에 진압되었고, 해외 사례에서는 2019년 9월 오스트리아 레온슈타인에서 주행 중 배터리팩이 위치한 차량 하부에서 화재가 발생하여 소방 인력이 현장에 도착했을 때는 이미 전소된 상태였다.[3]

[표 3] 국내외 전기자동차 배터리팩 화재사례

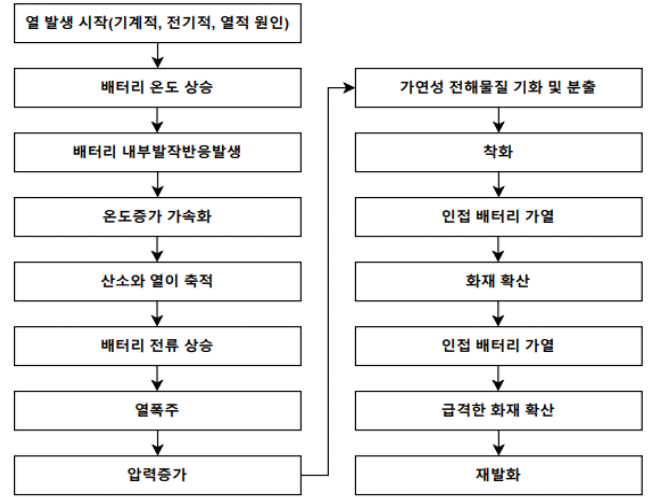
일자	사고 개요 및 원인
2020.10	대구광역시 달성군 아파트의 지하주차장 화재발생, 전기 자동차 충전 중에 열폭주
2023.01	서울 성동구 테슬라 서비스센터에서 화재발생, 전력 감소 및 주행불가 경고 메시지 및 시동 꺼짐 현상
2019.09	오스트리아 레온슈타인에서 차량 주행 중, 배터리에서 화재 발생

국내외로 발생한 전기자동차 화재사례를 분석하면 공통적으로 나타난 원인은 리튬이온배터리의 열폭주 현상이다. 이에 따라 화재진압이 매우 어려운 한계성이 있어 화재 초기에 대응할 수 있는 대책이 요구된다.

3. 전기자동차 배터리팩의 화재 특성 분석

전기자동차 배터리팩에 주로 쓰이는 리튬이온배터리의 화재는 기계적, 전기적, 열적 원인에 의해 배터리 온도가 상승하고 분리막이 손상되면서 열폭주 현상이 발생한다. 리튬이온 배터리에서 화재가 시작되는 열폭주 현상은 그림 1과 같이 크게 세 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계로는 셀 진압 초과(과충전), 높은 온도에 노출된 배터리, 배선 결함으로 인한 외부 단락 또는 물리적 손상으로 인한 배터리 온도 상승으로 시작된다. 두 번째 단계에서는 발열반응이 배터리 내부에서부터 발생하게 되고, 온도 증가가 가속화된다. 세 번째 단계는 산소와 열이 축적되는 동시에 시작된다. 이 단계에서는 다른

환경의 개입 없이 온도상승이 지속되어 배터리 전류가 상승하게 되며, 이는 더 많은 열상승으로 인하여 열폭주 현상이 발생하고, 화재로 이어지며 인접 셀이 재발화를 반복하는 화재 특성을 보인다.[4]



[그림 1] 전기자동차 배터리팩의 화재메커니즘

현재 리튬이온배터리의 화재진압에 적합한 소화약제가 없어 일반 내연기관 차량 화재의 물을 끄는 것보다 약 100배에 달하는 물을 소비하고 있다. 왜냐하면 내연기관 차량은 엔진룸을 열어 화재 발생 지점에 방수하거나 차량 내부의 가연물에 물을 뿌려 화재진압이 가능하기 때문이다. 그에 반면 전기자동차는 전복 사고 방지를 위해 배터리팩이 차량 하부에 위치하여 물을 방수하기 어렵고, 리튬이온배터리의 열폭주 현상으로 재발화 위험성이 높다. 화재진압과 재발화를 방지하는 방법은 배터리의 에너지를 “0”으로 만드는 것이다.[5]

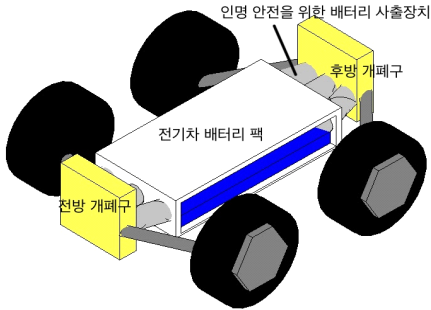
현재 배터리의 에너지를 “0”으로 만드는 최선의 방법은 이동식 수조에 장시간 차량을 침수시켜 배터리를 완전히 방전시키는 것이 가장 효과적이라고 말한다.[6] 하지만 이 방법은 주변에 충분한 공간과 시간이 확보되어야 하는 만큼 효과적인 소화 방법이라고 할 수 없다.

이에 따라 전기자동차 배터리팩 화재로부터 인명을 보호하기 위한 적절한 방안이 요구된다.

4. 전기자동차 화재로부터 인명 안전을 위한 배터리팩 사출방안 및 알고리즘

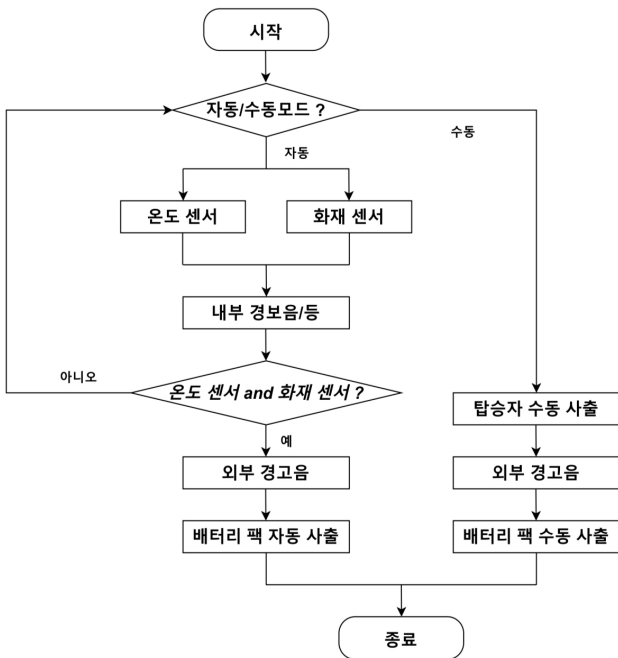
전기자동차 화재로부터 인명 안전을 위한 방안은 배터리팩 화재가 차량에 전파되기 전 하부에 위치한 배터리팩을 차량으로부터 분리시켜 2차 피해를 방지하는 것이다. 그림 2는 차량과 배터리를 분리할 수 있는 전기자동차 배터리 사출장치

구조도를 나타낸 것으로, 배터리팩을 사출시킬 수 있는 사출 장치에 의해 차량의 전방 및 후방으로 분리시킨다.



[그림 2] 전기자동차 배터리 사출장치 구조도

전기자동차 배터리팩의 화재가 차량에 전파되기 전 배터리팩을 차량으로부터 분리시키는 사출장치 운용 알고리즘을 제시하면 그림 3과 같다.



[그림 3] 전기자동차 배터리 사출 알고리즘

제시한 알고리즘을 구체적으로 설명하면,

- [Step1] 초기설정 단계는 자동모드와 수동모드로 구분된다.
- [Step2] 자동모드 단계에서는 배터리팩의 온도 감지 센서와 화재 감지 센서가 설정된 온도 값의 실시간 편차를 비교하여 이상 여부를 판단한다.
- [Step3] 이상 현상이 감지되면 탑승자에게 경보등과 경보음으로 위급상황임을 인지시킨다.
- [Step4] 온도 감지 센서와 화재 감지 센서 두 개가 동시에 작동하고 있을 경우 Step5로 넘어가고, 두 개가 동시에 작동하

고 있지 않을 때는 Step1의 수동모드로 넘어간다.

[Step5] 차량 외부의 경고음이 울리며 주변의 차량들과 사람들에게 위급상황임을 알린다.

[Step6] 배터리팩이 자동으로 차량에서 사출된다.

[Step2-1] 수동모드 단계에서는 탑승자가 위급상황임을 인지하였으나, 감지기의 미작동 및 오작동으로 배터리팩이 자동으로 사출이 되지 않을 때 탑승자의 판단으로 수동 사출시킬 수 있다.

[Step2-2] 자동모드와 마찬가지로 배터리팩 사출 전 차량 외부의 경고음이 울리며 주변의 차량들과 사람들에게 위급상황임을 알린다.

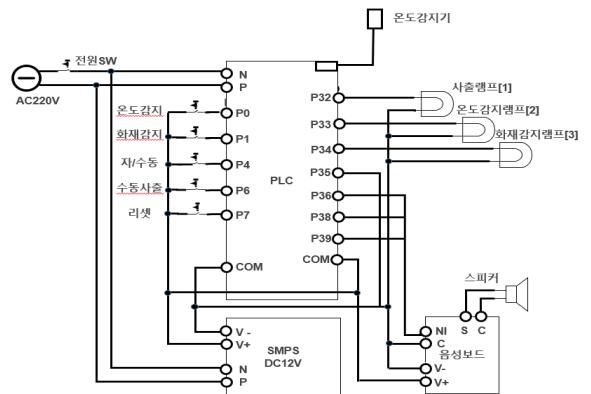
[Step2-3] 배터리팩이 차량에서 사출된다.

상기 사출장치 운용 알고리즘에 따라 전기자동차의 배터리팩을 외부로 분리시키면 화재에 따른 인명사고를 예방할 수 있다.

5. 전기자동차 배터리팩 사출장치의 구현 및 시험 결과분석

전기자동차 화재의 인명 안전을 위한 배터리팩 사출방안 및 운영알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여 시뮬레이터를 구현한다.

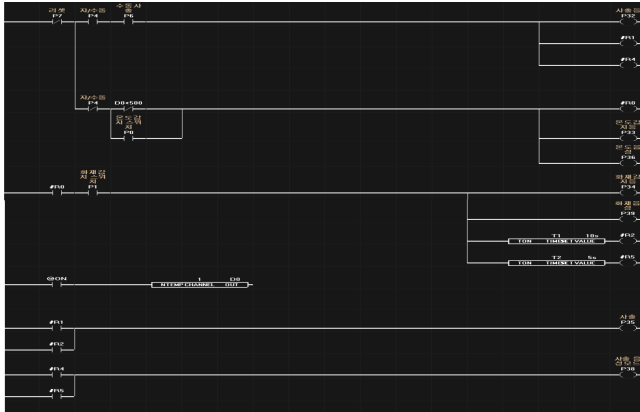
전기자동차 배터리팩 사출장치 시뮬레이터의 회로도 그림 4과 같고 PLC 레더도는 그림 5과 같이 입력장치에는 P0(온도 감지), P1(화재 감지), P4(자/수동), P6(수동사출), P7(리셋)으로 구성되고, 출력장치는 P32(사출 램프), P33(온도 감지 램프), P34(화재 감지 램프), P35(사출기 작동), P36(온도 감지 경보음), P39(화재 감지 경보음), P38(사출 경고음)로 구성된다.



[그림 4] 전기자동차 배터리팩 사출장치 시뮬레이터 회로도

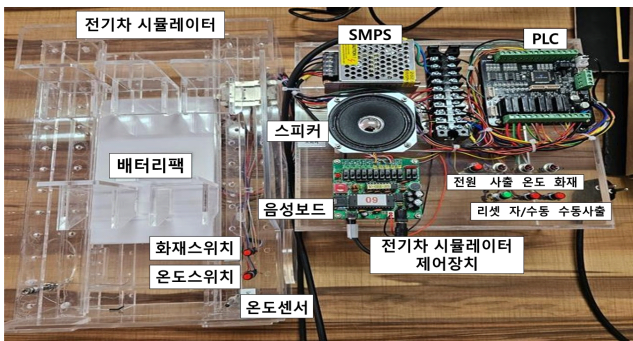
자동모드는 온도 감지기가 설정 온도 값에 도달 시 P33과 P36이 출력된다. 이후 화재가 감지되면 P34와 P39가 작동하

게 되고, P38이 작동하게 된다. 일정 시간 후에 P35가 작동하게 되어 배터리팩이 사출된다. 한편, 수동모드는 P4를 입력할 때 수동모드로 전환된다. 수동모드에서는 자동모드와 다르게 P0와 P1이 작동하지 않아도 P6를 누르게 되면 사출 경고음인 P38이 작동하게 되고, 일정 시간 후에 P35가 작동하여 강제적으로 배터리팩을 사출시킬 수 있다.



[그림 5] 전기자동차 배터리팩 사출장치 PLC 레더도

전기자동차 배터리팩 사출장치를 실제로 구현한 시뮬레이터는 그림 6과 같다. 전기자동차 시뮬레이터는 배터리팩과 화재 스위치, 온도 스위치와 온도 감지 센서로 구성되며, 제어장치는 전력을 공급해 주는 SMPS와 각종 스위치, 램프, PLC, 경보음 및 경고음이 녹음 된 음성보드와 음성 출력을 위한 스피커로 구성된다.



[그림 6] 전기자동차 배터리팩 사출장치 구현 시뮬레이터

전기자동차 화재의 인명 안전을 위한 배터리팩 사출 방안의 유용함을 확인하기 위하여 그림 6의 시뮬레이터로 온도 이상 감지 시험과 화재 발생 감지 시험을 진행하였다.

시험 조건은 조명을 제외한 냉난방기 및 시뮬레이터 전원을 모두 차단하고, 온도센서를 3분 이상 안정화 후 시험한다.

시험 첫 단계로는 리튬이온배터리의 적절한 온도 범위(25℃ ~ 40℃)인 최댓값 40℃를 온도 이상 현상으로 가정하고, 두 번째 단계로 정상 작동 온도 범위의 최댓값 200도에서 열

폭주 현상으로 인해, 화재가 발생한다고 가정한다.

[표 4] 시험 결과(℃, 일 건, %)

온도	시험항목	시험 횟수	감지 횟수	사출 횟수	감지율
40	온도 감지	5	5	0	100
	화재 감지		0		
200	온도 감지	5	5	5	100
	화재 감지		5		

시험 결과를 분석하면 표 4와 같이 온도별로 5번씩 테스트한 결과 모두 감지에 성공하였고, 배터리팩을 성공적으로 분리하여 본 논문에서 제시한 전기자동차 배터리팩 사출 방안의 유용함을 확인하였다.

6. 결론

전기자동차의 보급이 증가함에 따라 화재 사고가 꾸준히 발생하여 인명과 재산 피해를 발생시키고 있어 이에 대한 대책이 요구된다. 전기자동차의 동력원으로 쓰이는 리튬 계열 배터리 화재는 온도상승에 따른 열폭주 현상으로 인하여 폭발적으로 연소하는 특성이 있어 사실상 적응성이 있는 소화약제가 없는 관계로 화재진압에 큰 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 전기자동차 배터리의 온도와 화재를 센서로 감지하고, 배터리팩을 자동차 외부로 사출하는 방안을 제안하였다. 또한, 제안한 방안을 적용한 사출장치 시뮬레이터를 구현하여 시험 분석한 결과 전기자동차 화재에 따른 인명과 재산 피해 경감에 유용함을 확인하였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] IEA(국제에너지기구), 전기차 시장 현황보고서, 2023
- [2] 소방청, 전기차 및 내연기관 차량 화재 현황, 2022.05
- [3] 국립소방연구원, 전기차 화재 대응 가이드, 2023.03
- [4] 유정식, 전기자동차 화재위험성 분석에 따른 화재진압 및 대응 방안에 관한 연구, 석사학위논문, pp.18-30, 2022.12
- [5] 최승규, 소방시스템 적용을 위한 ESS 저장실의 화재메커니즘에 관한 연구, 대한전기학회 논문지, pp.1-2, 2021.04
- [6] 신정훈, 전기자동차 파워형 배터리 열관리 시스템의 냉각 성능 향상에 대한 연구, 한국산학융합학회 논문지, pp.2-3, 2022.10