

지하 주차장 전기 자동차 화재 대응을 위한 소방차 제어 알고리즘 및 시스템 설계에 관한 연구

송제호*, 두길수**, 박의준***

*전북대학교 융합기술공학부(IT응용시스템공학)

**(주)휴버스

***전북대학교 IT응용시스템공학과

e-mail:songjh@jbnu.ac.kr

A Study on Firefighting Vehicles Control Algorithms and System Design for Electric Vehicle Fire Response in Underground Parking Lots

Je-Ho Song*, Du-Gil Su**, Eui-Jun Park***

*Dept. of Convergence Technology Engineering(IT Applied System Engineering),
Chonbuk National University

**Hubus Inc.

***Dept. of IT Applied System Engineering, Chonbuk National University

요약

본 논문에서는 지하 주차장에서 발생하는 전기 자동차 화재에 대응하기 위한 전용 소방차 시스템을 제안하였다. 전기차 화재는 리튬이온 배터리의 열폭주로 인해 장시간 고온이 유지되고 재발화 가능성이 높아 기존 소화 방식만으로는 진압이 어렵다. 특히 지하 주차장은 밀폐 구조와 장비 접근성의 한계로 피해가 더욱 확대된다. 제안된 소방차 시스템은 메카넘 휠 기반 전방향 구동 부와 접이식 구조를 적용하여 협소한 공간에서도 기동성이 확보되며, 내부 물 분사와 가스 배출 장치를 통해 화재 진압과 냉각, 유해가스 확산 차단이 가능하다. 이를 통해 전기 자동차 화재 초기 대응력 향상과 인명 및 재산 피해 최소화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

최근 전기 자동차의 수요가 증가하고, 이에 따라 보급도 계속하여 확산되는 추세이다. 하지만, 전기차의 보급이 확대됨에 따라 전기차 화재 사고 발생도 늘어나고 있다. 이러한 전기차 화재는 특수 화재로 분류되는 배터리 화재의 특성상 진화가 어려워 주변 차량에도 피해가 확산될 수 있으며 지하 주차장과 같은 폐쇄된 공간에서는 그 피해가 더욱 커지게 된다.

전기 자동차 화재는 배터리 열폭주(thermal runaway)로 인해 내부 온도가 수백도 이상 고온으로 치솟으며 불이 꺼진 것처럼 보여도 배터리 내부에서 재발화 가능성이 있다.[1,2] 따라서 전기차 화재를 진압하는 가장 효과적인 방법은 다량의 물을 투입하여 배터리 내부까지 냉각시켜 온도를 낮추는 것이다.

하지만, 협소한 지하 주차장 내부로는 소방차 등 화재 진압 차량이 진입하기 어렵고 밀폐된 구조로 인해 화재 시 발생하는 유독 가스 등이 농축되기가 쉽다. 따라서, 현장에서 직접 배터리를 냉각시키고 화재 차량을 외부와 차단시켜 화재와 유독 가스 등의 확산을 막을 방안이 강구된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 지하 주차장 환경

에 특화된 전기 자동차 화재 진압용 소방차 시스템을 설계하고자 한다. 제안하는 시스템은 협소한 공간에서도 기동성이 확보된 특수 소방 차량을 기반으로, 화재 발생 차량에 빠르게 접근하여 격리시킨 뒤 냉각 및 차단 작업을 수행하도록 설계된다. 이를 통해 지하 주차장에서의 전기차 화재 대응력을 강화하고, 인명 및 재산 피해를 최소화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본론

2.1 시스템 구성

전기 자동차 화재의 주요 원인은 차량 내부의 리튬이온 배터리 (Lithium-Ion Battery)의 열폭주이다. 배터리에 내부 단락, 충격, 고온 환경 등의 영향으로 급격한 발열이 발생하면 열폭주로 이어지게 되며 한 셀에서 시작되어 인접한 셀로 전달되어 연쇄적 폭발 및 화재로 확산된다. 외부의 화염이 꺼지더라도 내부 셀은 여전히 고온·불안정 상태이므로 시간이 지나 다시 재발화의 가능성이 있다.

이러한 전기 자동차 화재가 밀폐된 구조인 지하 주차장에서 발생하게 되면 소방차 등 화재 진압용 대형 장비의 진입이 어렵거나

나 늦어지고, 차량이 밀집되어 있어 인접 차량으로 빠르게 확산될 수 있으며 재발화 관리에 어려움이 있다.

따라서, 지하 주차장에서 전기차 화재 발생 시 차량을 완전히 덮고, 소화를 진행할 수 있는 전용 소방차가 필요하다. 전용 소방차 시스템은 공간이 협소한 지하 주차장에서 빠르게 이동할 수 있도록 전, 후, 좌, 우, 대각선 이동이 가능하며 제자리에서 회전이 가능한 구동 시스템이 필요하다.

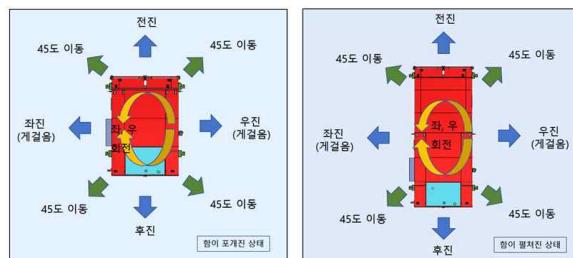
전용 소방차 시스템은 단순히 화재 차량을 덮고 냉각하는 기능에 그치지 않고, 지하 주차장이라는 특수한 환경에서 요구되는 다기능 제어와 안정적인 주행 성능을 동시에 확보해야 한다.[3,4] 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 기술을 적용하고자 한다.

첫째는 접이식 구조 및 확장·축소 제어 시스템으로 화재 발생 전까지는 최소한의 공간만 차지하도록 축소된 상태로 대기하다가, 화재 발생 시에는 확장하여 차량을 모두 덮을 수 있도록 설계된다. 소방차의 축소·확장 상태에 따라 상이한 주행 알고리즘을 적용하여 협소한 공간에서도 원활히 동작하도록 한다.

소방차의 구동부는 전, 후, 좌, 우뿐만 아니라 대각선 이동 및 제자리 회전이 가능한 메카님 휠을 적용하여 소방차가 주차된 차량들 사이를 빠르고 유연하게 이동할 수 있도록 한다. 메카님 휠 기반의 전방향 구동 시스템은 좁은 통로와 장애물이 많은 지하 주차장에서 화재 차량에 신속히 접근할 수 있도록 하여 초기 진압 시간을 획기적으로 단축시킨다. 그럼 1은 지하 주차장 전기 자동차 화재 진압용 소방차의 모습을 나타내었고, 그림 2는 소방차의 축소 및 확장 상태 매커니즘을 나타내었다.



[그림 1] 지하 주차장 전기 자동차 화재 진압 소방차



[그림 2] 지하 주차장 전기 자동차 화재 진압 소방차 시스템 개요도

또한, 내부 화재 진압 및 배연 시스템을 통해 화재 차량을 소방차 내부에 수납한 후 물 분사 시스템을 작동시켜 차량을 침수·냉각하며, 동시에 고온의 연기와 유독가스를 배출·필터링하여 확산을 차단한다. 이를 통하여 지하 주차장 내 가스 농도를 낮추고 구

조·화재 진압 인원의 안전을 확보한다.

소방차 내부에는 온도 및 가스 센서가 설치되어 화재 진행 상황을 실시간으로 감지하고, 제어 시스템이 자동으로 물 분사 및 환기 기능을 수행할 수 있다. 또한 유선 리모컨 및 무선 통신 프로토콜을 적용하여 화재 현장에 직접 접근이 위험한 상황에서도 원격으로 제어가 가능하다.

이러한 시스템 구성 요소들은 지하 주차장 내부에서 발생한 전기 자동차 화재 진압에 있어서 빠른 대응, 화재 확산 차단, 배터리 냉각, 유해가스 배출, 소방인력 안전 확보 등을 가능하게 한다.

2.2 전기 자동차 화재 진압 소방차 시스템

지하 주차장에서 발생한 전기 자동차 화재를 효과적으로 진압하기 위하여 우선 소방차 내부에 설치될 온도 센서와 가스 센서의 위치 및 수량을 결정하여 화재 상황을 정밀하게 감지할 수 있도록 하며, 차량 이동을 위한 구동 모터와 접이식 구조 확장·축소 장치, 셔터문 개폐 모터, 리프팅 모터 등 주요 구동 장치의 사양을 설계한다. 동시에 물 분사 시스템과 가스 배출 시스템을 제어 보드와 연동할 수 있는 인터페이스를 마련하여 전체적인 시스템 아키텍처를 확립한다.

이후에는 고온 환경에서도 안정적으로 동작할 수 있는 프로세서와 PCB 기반의 제어 보드를 제작하고, 각종 구동 모터와 컨트롤러를 구성하여 축소·확장, 전방향 이동, 셔터 개폐, 리프팅 등 다양한 동작을 정확히 제어할 수 있는 하드웨어 플랫폼을 완성한다. 또한 버튼과 조그 방식을 혼합하여 직관적인 방식으로 조작할 수 있는 유선 리모컨을 제작하여 기본 제어 기능을 확보하고, 무선 제어 프로토콜을 함께 설계하여 현장 접근이 어려운 상황에서도 원격 운용 가능성을 보장한다.

화재 차량 접근 이후에는 소방차 전면부 셔터문을 개방한 뒤 소방차가 이동하여 차량을 내부로 수납하고, 밀폐된 공간에서 물 분사 시스템을 작동시켜 화염을 제거하고 배터리를 침수시켜 냉각시킨다. 동시에 배출·필터링 시스템을 가동하여 화재로 발생한 유독가스를 외부로 배출하고 지하 주차장 내 가스 농도를 저감하여 인명의 안전을 확보한다. 물 분사 시스템의 경우 옥내 소화전 등의 외부 급수 장치와 연동하여 장시간 분사가 가능하도록 설계함으로써, 배터리 열폭주에 따른 재발화 위험을 원천 차단한다.

3. 결론

본 논문에서는 전기 자동차 보급 확산에 따라 심각한 사회적 문제로 부각되고 있는 지하 주차장 전기차 화재에 대응하기 위한 전용 소방차 시스템의 설계를 제안하였다. 전기차의 리튬이온 배터리의 열폭주 특성은 단순한 외부 불꽃의 소화만으로는 진압이 불가능하며, 다량의 냉각수 공급을 통해 장시간의 온도 제어가

필수적이다. 특히 지하 주차장은 밀폐된 구조로 인해 소방 장비의 접근이 어려워 화재 확산과 인명 피해 위험이 더욱 크기 때문에, 이에 특화된 대응 방안이 반드시 필요하다.

제안된 전기 자동차 화재 진압용 소방차 시스템은 협소한 공간에서도 기동성이 확보되는 메카님 휠 기반의 구동부, 화재가 발생하지 않은 평소에는 공간 차지를 줄이고, 화재 발생 시에는 차량을 완전히 덮고 수납할 수 있는 접이식 구조, 내부의 물 분사 및 유독가스 배출 시스템, 그리고 원격 제어 기능을 포함하여 지하 주차장의 환경적 제약 조건을 극복할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 화재 발생 초기에 빠른 접근과 격리, 배터리의 장시간 냉각, 가스 확산 차단이 가능하며 결과적으로 인명 피해 및 화재 확산 방지에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Sun, Peiyi, et al. "A review of battery fires in electric vehicles." *Fire technology* 56.4 (2020): 1361–1410.
- [2] Bisschop, Roeland, et al. *Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles*. 2019.
- [3] 방성혁, “지하주차장 내 전기자동차 화재·피난 시뮬레이션 연구”, *Journal National Heritage*, Vol 10.1, pp. 13–20, 4월, 2025
- [4] Sturm, Peter, et al. "Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels." *Fire Safety Journal* 134 (2022): 103695.

본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 산학연 Collabo R&D사업 지원에 의한 연구수행 결과물임을 밝힙니다. [과제 번호 : RS-2025-02315632]