

지하도로 내 전기차 화재 대응지침 구축

Establishment of the Fire Response Guideline for Electric Vehicles on Underground Roads

강 동 효* · 조 성 우** · 김 해*** · 유 호 인**** · 윤 일 수*****

* 주저자 : 아주대학교 교통공학과 석사과정

** 교신저자 : 자동차안전연구원 결합조사본부 본부장

*** 공저자 : 한국도로공사 교통처 차장

**** 공저자 : 한국도로공사 국가ITS지원센터 차장

***** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Donghyo Kang* · Seong-Woo Cho** · Hae Kim***

Ho-In You**** · Ilsoo Yun*****

* Dept. of Transportation Eng., Ajou Univ.

** Korea Automobile Testing & Research Institute, Korea Transportation Safety Authority

*** Division of Transportation, Korea Expressway Corporation

**** ITS Cooperative Center for National Highway, Korea Expressway Corporation

***** Dept. of Transportation System Eng., Ajou Univ.

† Corresponding author : Seong-Woo Cho, katriman@kotsa.or.kr

Vol. 22 No.5(2023)
October, 2023
pp.92~107

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.5.92>

Received 23 May 2023
Revised 21 June 2023
Accepted 6 October 2023

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

최근 전기차의 지속적인 보급 증가와 함께 전기차 화재사고 역시 급증하는 추세를 보이고 있다. 전기차 화재는 내연기관 차량의 화재에 비해 장기간 지속되며, 2차적인 폭발의 위험 및 다량의 연기를 발생시키는 문제들을 지니고 있는 사고이다. 특히, 반밀폐 공간인 지하도로 내에서의 전기차 화재는 기존 전기차 화재의 문제를 증폭시킬 우려가 있다. 하지만 현재 국내에는 지하도로 내부에서 발생하는 전기차 화재에 대한 관련 대응지침이 부재하다. 이에 본 연구에서는 일반인 대상 설문조사를 통해 화재사고에 대한 인지 수준을 확인하였으며, 지하도로 내 전기차 화재와 관련된 이해관계자들로부터 전기차 화재 특성 및 주요 고려 사항을 도출하였다. 이를 통해 지하도로 내 전기차 화재 대응지침을 구축하였다.

핵심어 : 전기차, 지하도로, 차량 화재, 지침

ABSTRACT

Recently, along with the continuous increase in the supply of electric vehicles, electric vehicle fire accidents are also showing a rapidly increasing trend. Electric vehicle fires last for a long time compared to fires in internal combustion engine vehicles and have problems with the risk of secondary explosions and the generation of large amounts of smoke. In particular, electric vehicle fires in underground roads, which are semi-enclosed spaces, may amplify the problems of existing electric vehicle fires. On the other hand, there are no domestic response guidelines for electric vehicle fires occurring inside underground roads. Therefore, an awareness of fire accidents was confirmed through a survey of the general public, and electric vehicle fire characteristics and primary considerations were derived from stakeholders related to electric vehicle fires in underpasses. Through this, the guidelines for responding to electric vehicle fires on underground roads were established.

Key words : Electric car, Underground road, Vehicle fire, Guideline

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 정부는 2019년 ‘미래자동차 산업 발전 전략’, 2020년 ‘한국판 뉴딜 종합계획’ 등의 친환경 정책을 발표하고 친환경 차량에 보조금을 지원하고 있다. 이에 힘입어 국내 전기차의 보급이 지속적으로 증가하는 추세이다. 그 결과, 국내 전기차 등록 대수는 가파르게 증가하고 있으며 2019년 말 89,918대에서 2022년 말 389,855대로 매년 50% 이상의 증가율을 보이고 있다¹⁾. 하지만 이에 따라 전기차 화재사고 건수 역시 증가하는 추세이며 2019년 7건에서 2022년 44건으로 늘어나고 있다(National Fire Agency, 2023).

전기차 화재사고는 일반적인 내연기관 차량과는 전혀 다른 화재 특성을 가지고 있으며 발생 건수가 지속적으로 증가하고 있어 화재사고 관련 대책이 필요하다. 다만, 전기차 화재사고의 발생 비율은 2017년부터 2022년까지 전기차 보급 대수 대비 0.011%로 내연기관 차량의 화재사고 발생 비율인 0.019%에 비해 낮지만, 한 번 발생할 경우 상대적으로 더 큰 사고 피해를 유발하게 된다(National Fire Agency, 2022). 특히 소방 호스를 사용해 화재 차량에 물을 뿌리는 냉각소화 방식의 경우 전기차 1대당 소방차 2대 분량의 물이 필요하며 폭발 위험성이 있는 전기차 배터리가 지하차도 및 터널과 같이 밀폐된 도로에서 화재 발생 시 2차 사고에 대한 피해가 증가할 우려가 있다. 일반적으로 전기차 화재사고는 주차 및 충전 중이나 충돌 시 발생하며, 확률은 낮지만 주행 중에도 발생 가능하다. 실제로 2022년에는 44건의 전기차 화재 중 24건이 도로에서 발생하였다(National Fire Agency, 2023). 또한, 국내 터널의 총연장은 2,452km(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022)로 긴 편이기에 터널 내부에서 충돌 및 주행 중 사고가 발생할 확률이 높고, 실제 국내 터널 내 화재사고는 2015~2018년의 4년간 총 113건이 발생하기도 하였다. 또 다른 반밀폐 공간인 지하주차장의 경우 전기차 충전기 사용 및 전기차의 장시간 정차로 인해 화재 가능성이 상대적으로 높아 「전기차 전용주차구역 소방안전가이드」(Busan Metropolitan City Fire & Disaster Headquarters, 2022)와 같은 화재 대응지침서가 존재하지만, 지하도로를 대상으로 하는 대응지침은 부재한 실정이다. 이에 본 연구는 지하도로 내 전기차 화재사고에 대한 대책으로, 화재사고와 관련된 이해관계자들을 선정하고 이들을 대상으로 이해관계자별 전기차 화재사고 대응지침을 구축하는 것을 목적으로 한다. 화재사고에 대한 대응지침 구축을 통해 지하도로 내 전기차 화재사고 발생 시 인명 및 재산 피해를 최소화시키고자 한다. 최종적으로 정책적 제언을 통해 전기차 이용의 안전성을 확보하고 화재사고의 피해를 최소화시키고자 한다.

2. 연구의 범위 및 연구절차

본 연구의 공간적 범위로써는 국내의 터널 및 지하차도와 같은 반밀폐된 지하도로를 대상으로 하며 지하주차장 역시 전기차 화재 대응지침이 적용 가능한 구간으로 설정하였다. 시간적 범위는 설문조사를 실시하고, 전기차와 지하도로 내 화재사고 관련 조사 시기인 2023년으로 설정하였다. 연구의 내용적 범위에는 전기차 및 지하도로 내 화재사고 관련 자료와 일반인 및 전문가 대상 설문조사의 내용이 포함된다. 연구의 수행 절차는 연구 계획 수립, 관련 연구 고찰, 사고 이해관계자 설정, 일반인 대상 설문조사, 대응지침 구축 방법론 설정, 전기차 화재사고 대응지침 초기 구축, 전문가 설문조사, 그리고 최종 지침 구축 순으로 구성하였다. 최종 지침 구축 단계는 전문가 주요 의견 도출, 대응지침 수정, 그리고 정책적 제언 순으로 이루어진다. 전체적

1) <https://stat.molit.go.kr/portal/cate/statFileView.do?hRsId=58&hFormId=&hSelectId=&sStyleNum=&sStart=&sEnd=&hPoint=&hAppr=&ofIleName=&rFileName=&midpath=>의 자료를 참고함

인 연구의 절차는 다음 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Research procedure

II. 관련 이론 및 연구 고찰

1. 관련 이론 고찰

1) 전기차 화재사고 현황

국내의 전기차 화재사고는 2020년 11건, 2021년 24건, 2022년 44건으로 최근 3년간 총 79건이 발생하였으며, 매년 2배가량 증가하고 있다(National Fire Agency, 2023). 국내 차량 화재 피해에 대한 현황은 <Table 1>과 같다. 2022년 전기차 화재의 경우, 내연기관 차량 화재보다 화재 발생 확률은 낮지만, 화재 건수 당 인명 피해 발생 확률이 2.3배 높았으며 재산피해 역시 2.4배 이상 큰 것으로 조사되었다.

<Table 1> Domestic vehicle fire damage statistics

Types	Internal combustion engine vehicles			Electronic vehicles		
	No. of fires	loss of life (person)	Property damage (1000 won)	No. of fires	loss of life (person)	Property damage (1000 won)
2020	4,465	172	32,898,031	11	0	360,740
2021	4,411	147	33,077,773	24	1	878,084
2022	4,512	178	38,632,167	44	4	907,054

Source : National Fire Agency(2023)

2) 전기차 화재 특성

전기차 화재 유형은 배터리 열폭주와 배터리 외부 충격으로 분류된다. 배터리 열폭주는 배터리 내부 결함 뿐만 아니라 외부 고온 및 운영상 미흡으로 발생하며, 특히 배터리 완충 시 배터리 내부 압력이 높아져 위험성이 증가한다. 배터리 외부 충격으로 인한 화재는 교통사고 발생과 같이 차체에 물리적 압력이 가해지며 발생한다(National Fire Research Institute, 2021). 배터리의 셀(cell) 하나에서 문제 발생 시 주변 셀들에 열전도하여 800℃ 이상까지 온도가 치솟는 열폭주가 발생한다. 이러한 현상으로 전기차 화재는 쉽게 진화되지 않으며 장기간 지속되는 특징을 갖는다. 화재가 발생하는데 소요되는 시간은 국립소방연구원의 재현 실험 결과, 충돌 27초 후 화염이 발생하고 모든 모듈에 전이되기까지 약 7분 정도였다. 전기차 화재로 인해서는 가연성 유기용매 분출과 탄화수소 계열의 가연성 가스 및 유해가스가 발생하며, 주수소화²⁾ 이후 감전의 위험도 준

2) 화재 발생 지점에 물을 분사하여 냉각시키는 소화의 방법

재한다(National Fire Research Institute, 2023). 또한 전기차 화재는 화염이 위로 향하는 내연기관 차량과는 다르게 방출되는 압력 및 가연성 가스의 영향으로 화염이 수평으로 진행하여 화재 규모가 상대적으로 크다.

3) 전기차 화재 진화

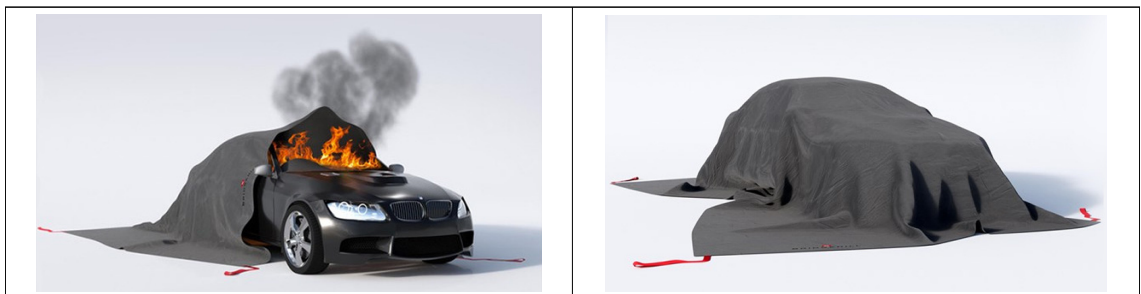
전기차 화재사고의 지속적인 증가에 따라 국내에서는 「전기자동차 화재대응 안내서」(National Fire Research Institute, 2021)를 작성하는 등 전기차 화재 진화 관련 연구가 활발히 진행 중에 있다. 해당 자료에 따르면 전기차 화재 진화에는 평균 약 27분, 최대 2시간 11분이 소요되었다. 소방 인력은 평균 33.4명이 투입되었다. 화재 진화의 방식으로는 주수소화가 열 냉각에 가장 효과적이며, 차량 하부 배터리팩 부위에 지속적인 주수를 하여 주변 배터리로 전달되는 열을 차단하고 열폭주의 확산을 방지하는 방식을 주로 사용한다. 다만 일반적인 소화기 및 소화전(A, B, C형)의 사용은 효과가 없으며, 전기차 전용 소화기(D형)가 일부 효과를 보인다. 이동식 수조를 이용한 침수 수조 안정화 방식은 1차적인 화재 진압에 효과적이며 2차 화재 예방과 보관의 목적으로 사용 가능하다. 침수 수조 안정화는 튜브형과 조립식의 두 가지 방식이 존재한다(National Fire Research Institute, 2023). 차량을 들거나 주변 환경의 영향을 받는 기존 이동식 수조의 단점을 없애고, 화재 진화 능력은 발달시킨 형태의 이동식 수조가 활용되고 있다. 다음 <Fig. 2>와 <Fig. 3>은 이동식 수조의 사용 모습을 나타낸 예시이다.



<Fig. 2> Portable water tank use(prefabricated)

<Fig. 3> Portable water tank use(tube type)

이 외에 질식소화덮개의 활용이 가능하다. 질식소화덮개는 연기 및 열기의 확산을 막아 밀폐된 공간에서 효과적이지만 단독으로는 전기차 화재 진화에 효과가 작고, 장기간 사용 시 오히려 가연성 가스의 축적으로



Source : Hanju Trading Co, <https://hanju911.com/firefighting/?idx=49>

<Fig. 4> Examples of car fire blanket use

폭발을 유발할 위험이 존재하여 반드시 주수소화와 병행하여 사용해야 한다(Seoul Metropolitan Fire & Disaster Headquarters, 2022). 다음 <Fig. 4>는 질식소화덮개의 사용 모습을 나타낸 예시이다.

현재까지 연구된 전기차의 화재 진화 방식 중 질식소화덮개로 화재가 발생한 차체를 덮은 후 배터리가 매립된 내부로 수관을 연결하여 지속적인 주수를 통해 열폭주가 전이 되지 않는 100℃ 이하로 냉각하는 방식이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다(National Fire Research Institute, 2021).

4) 지하도로 내 화재 특성

지하도로 내에서의 차량 화재사고는 열의 탈출이 제한되며 상대적으로 고온의 화재를 유발한다. 특히 유독가스의 확산 및 열축적, 외부와의 밀폐성으로 인한 폐쇄감으로 심리적인 불안감과 피난 경로 중첩을 야기하여 피난과 구조를 위한 소방대 진입에 제한이 발생한다(Kim et al., 2013). 반밀폐 공간인 지하도로는 개방 공간에 비해 상대적으로 다량의 연기가 발생하며, 외부와 연결된 출입구의 용량이 작고 한정되어 있어 비상시 내부 상황을 파악하기 어렵다. 협소한 내부 공간과 시야 확보의 제한으로 인해 지하도로 내에서 차량들이 유턴 및 후진 시 2차 사고가 발생할 위험 역시 매우 크다. 또한, 화재 차량 주변에 차량들이 정차해 있을 시에는 화재가 확대되어 대형화재로 이어질 가능성 역시 존재한다. 국내에서는 2020년 2월 17일 사매2터널에서의 화재사고 발생으로 사망 5명, 중경상 43명 등 48명의 사상자와 차량 16대 전소 등의 큰 피해가 발생한 사례가 존재한다.

5) 지하도로 내 화재 관련 지침

국내 지하도로 내 화재 관련 지침은 현재 국토교통부에서 제시하고 있는 「국토교통분야 재난발생 시 국민 행동 요령」 중 터널화재 부분에 제시되어 있다. 이외에 「터널 안전관리대책」(Seoul Metropolitan Government, 2022)에서는 지하도로 내부 화재에 대한 대응 수칙 및 방재시설 설치의 내용이 포함되어 있으며, 지하도로 내부 방재시설에 대한 구체적인 설치 관련 지침은 「지하도로 설계 지침」(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2023), 「도로터널 내화 지침」(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021a)가 있다.

2. 관련 연구 고찰

1) 대응지침 수립 관련 연구

전기차 및 지하도로 내부의 화재사고는 일반적인 차량 화재사고에 비해 사고 심각도가 크며, 이에 따라 관련된 안전 계획 및 소방활동 전략을 수립하는 다양한 연구가 진행 중이다. 본 연구에서는 지하도로 내 전기차 화재 대응지침 구축에 앞서 관련 화재들의 화재 대응 수칙 관련 연구들을 조사하였다.

Kim and Lee(2017)은 도로 터널 화재 발생 시 소방대원이 효과적인 소방활동 전략을 수립하는데 유용한 화재시나리오와 터널 분류 모델을 개발하였다. 73건의 국내의 터널 화재사고 사례의 사고유형을 네 가지(단순화재-확산없음, 단순화재-확산있음, 충돌화재-확산없음, 충돌화재-확산있음)로 분류하여 각각의 사례에 따른 소방 진압 활동을 조사하였다. 이를 통해 터널 분류 모델 정립 및 소방활동 전략 수립을 위한 화재시나리오를 개발하여 터널 화재 시의 소방활동 계획 수립이 용이하도록 전략을 제시하였다. Park and Ryu(2022)은 터널 내 수소전기차 화재사고의 위험성 분석과 안전대응 기술을 확보하고자 하였다. 터널 및 지하주차장 등 반밀폐 공간에서의 수소전기차 화재 및 폭발에 대한 현장대응력 강화를 위한 소방안전 기술 개발을 위해 실험과 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 해석으로 관련 제도 개선과 안전 기술을 제시하였다.

2) 화재 관련 연구

앞선 문헌 조사를 통해 전기차와 지하도로 내부에서의 화재사고 특성을 조사하였지만, 추가적인 내용을 보완하기 위해 화재 특성들을 확인한 연구들을 조사하였다.

Kim et al.(2022)은 전기차 화재의 진행 양상과 전이 특성, 배터리 폭발 시점 및 현상 등에 대해 분석하였다. 분석 결과 1차, 2차, 3차 폭발로 파손된 부품으로 인한 안전사고가 발생할 수 있는 가능성을 확인하였다. 해당 결과에 따라 밀폐 또는 반밀폐 공간 화재 예방 및 대응 시스템 개발 등의 해결책 마련 및 화재 진압을 위한 사고 시나리오 기반의 대응전술 등 화재진압기법 개발을 요구하였다. Sturm et al.(2022)은 터널 내 전기차 화재의 특성 및 독성 배출의 영향에 대한 연구를 위해 전기차와 디젤 차량의 연소 과정을 비교하였다. 전기차 화재가 터널 이용자와 터널 구조에 미치는 영향을 확인하였으며, 열 방출 및 독성 물질의 생성과 방출량을 측정하였다. 연구 결과, 화재로 발생하는 탄화수소 등의 다양한 유독 가스의 농도는 고도와 비례하며 도로로부터 1.6m 높이의 농도는 임계값 이하였다. 전기차의 열 방출률은 디젤 차량의 두 배 수준으로 화재 발생 시 많은 열을 발생시킨다는 것을 확인하였으며, 이로 인한 고온이 터널 구조에 심각한 손상을 초래한다는 것을 확인하였다. Pistillo(2023)은 시뮬레이션을 활용하여 수소전기차와 내연기관 차량의 도로 터널 내 화재 특성을 비교하였다. CFD 시뮬레이션을 통해 실제 도로 터널 구간 및 차량 모델을 구현하여 분석한 결과, 수소전기차 화재 시 터널 상단부의 최대 온도는 1,175°C로 내연기관 차량의 450°C에 비해 매우 높았으며 수소전기차의 화재 시뮬레이션에서 고온의 분포가 공간적으로 넓게 나타나는 특징을 확인하였다. 이때 도로 터널 내의 환기율을 정상 유속에서 2배로 증가시킬 경우 터널 상단부의 평균 온도가 1,070.8°C에서 406°C로 감소함에 따라 환기 시설의 중요성을 강조하였다.

3. 시사점 및 기존 연구와의 차별성

선행연구 검토 결과, 전기차 화재 및 지하도로 내부 화재 모두 다량의 연기와 고온의 화재를 발생시키며, 소화 및 구조 활동 등에 제한이 따른다는 것을 확인하였다. 특히, 지하도로 내에서 전기차의 화재사고가 발생할 경우 피해 규모는 극대화되므로 이를 최소화하기 위한 대응지침의 필요성을 확인하였다. 하지만 현재 지하도로 내에서 발생하는 전기차 화재의 위험성 및 특성을 확인하는 연구는 다양한 방법으로 진행된 것에 비해 대응지침에 대한 연구 및 실제 지침은 부재한 실정이었다. 따라서 기존 화재 대응지침에 관련 연구 결과를 반영하여 새로운 지침을 구축할 필요가 있다고 판단하였다. 이에 본 연구에서는 지하도로 내에서 발생하는 전기차 화재사고에 대한 피해를 최소화하고자 관련 자료조사를 통해 화재의 특성을 파악하고, 지하도로 전기차 화재사고 이해관계자를 설정하여 각각에 맞는 대응지침을 새롭게 구축하고자 한다.

Ⅲ. 대응지침 구축 방법론

1. 지하도로 전기차 화재사고 이해관계자 설정

지하도로 화재사고 대응지침을 구축하기에 앞서, 구축에 필요한 관련 사항들을 정의하였다. 지하도로 내 전기차 화재사고 상황에는 다양한 이해관계자가 존재하며 이들은 각자 화재 발생 시 수행해야 할 행동 수칙이 상이하기에 대응 방식 차이에 따른 구분 및 각각의 대응지침이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지하도로 내 전기차 화재에 대한 이해관계자를 ‘전기차 운전자’ 및 ‘일반 운전자’, ‘소방관’, ‘터널 관리자’의 네 가지

그룹으로 구분하였다. ‘전기차 운전자’는 지하도로 등 반밀폐 공간 내에서 화재가 발생한 전기차의 운전자이며, 전기차 외에도 하이브리드차와 같이 전기 배터리를 모터로 구동하는 모든 차량을 포함한다. ‘일반 운전자’는 전기차 화재가 발생한 지하도로 내부에서 주행 중이거나, 진입하려는 차량의 운전자이다. ‘일반 운전자’의 차량에는 내연기관 차량 및 전기, 하이브리드, 가솔린 차량 등 차량의 종류와 관계없이 모든 차량이 포함된다. ‘소방관’은 전기차 화재가 발생한 지하도로에 출동하거나, 출동 준비를 하는 소방관으로 화재 진압을 위한 소방대원 및 인명 구출을 위한 구조대원을 모두 포함한다. ‘지하도로 관리자’는 전기차 화재가 발생한 지하도로의 관리자 및 관리팀의 인원을 의미한다.

2. 화재 관련 주요 사항 도출

지하도로 화재사고 이해관계자별 대응지침을 구축하기 이전, 기존에 존재하는 전기차 및 지하도로 화재 관련 대응지침에 추가 및 수정해야 할 부분을 조사하였다. 사전에 조사한 전기차 및 지하도로 내부 화재 관련 자료들을 종합하여 일반적인 차량 화재와 구분되는 주요 사항들을 도출하였으며, 이를 기존 지침과 종합하여 지하도로 내 전기차 화재 대응지침을 1차적으로 수립하는 데 사용하였다. 자료조사를 통해 도출한 주요 사항들은 다음과 같다.

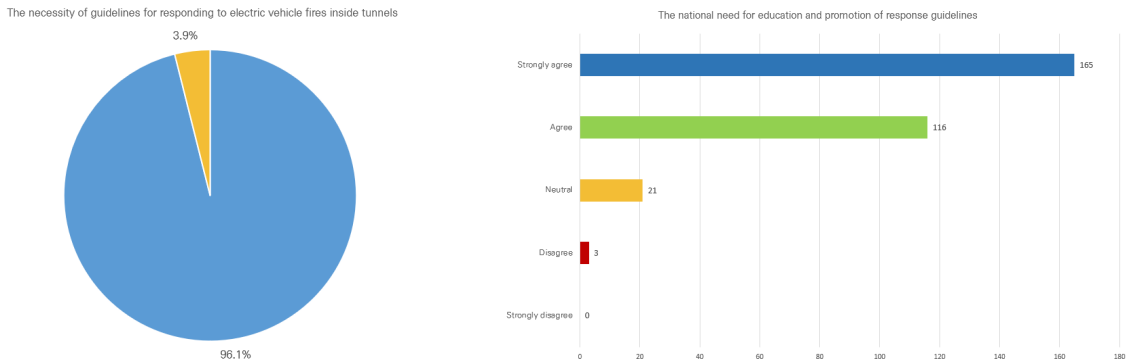
- 전기차종별 배터리 종류 및 설치 위치 상이
- 사고 발생 지점 및 유형에 따른 이동식 구조 사용 방식 상이
- 일반적인 소화 및 소화전(A, B, C형)을 이용한 화재 진압 불가
- 장기간 화재 지속 및 다량의 화염과 연기 발생
- 여러 차례의 전기차 배터리 폭발 위험 존재
- 주수소화 시 불화수소 등의 유독성 물질 발생
- 화재 진압 시 일반 화재사고에 비해 수십 배의 인력 및 시간 소모
- 협소한 내부 공간에 따른 내부 공간 확보 필요
- 다량의 연기 발생에 따른 시야 확보 등 제한사항 발생
- 화재로 발생한 고온 및 유독가스는 터널 상단부에 위치

3. 일반인 대상 설문조사

본 연구를 통한 대응지침 구축 전, 일반인들을 대상으로 전기차 및 지하도로 화재에 대한 인지 수준과 지침의 필요성 등을 조사하였다. 설문은 2023년 4월 3~5일의 3일간 운전면허를 보유한 305명의 일반인을 대상으로 진행하였다. 전체 설문 응답자 중 친환경 차량을 운전하는 인원은 전체 응답자의 31.5%이며, 전기차 운전 경험이 있는 응답자는 32%였다. 설문을 통해 일반인들의 전기차 및 지하도로 화재의 특성 및 주의사항 인지 여부, 대응지침 필요성 등을 조사하여 본 연구에서 구축하고자 하는 대응지침의 필요성을 확인하였다.

설문조사 결과, 전체 응답자 중 76.7%가 배터리 폭발 및 화재의 장기간 지속 등의 전기차 화재 특징에 알고 있었지만, 55.7%의 인원이 전기차 화재 관련 주의사항을 알지 못한다는 것을 확인하였다. 특히 전기차를 운전해본 경험이 있음에도 전기차 화재 관련 주의사항을 인지하지 못하고 있는 인원이 31.2%에 달하는 등 관련 교육 및 홍보가 부족한 실정이었다. 또한, 지하도로 내부 화재 관련 주의사항을 알지 못하는 인원 역시 43%로 나타났다. 이때, 전기차 및 지하도로 내 화재 관련 주의사항을 알고 있는 응답자 중 89.7%의 정보 획득

특 경로가 뉴스와 인터넷임에 따라 이를 활용한 교육 및 홍보가 필요할 것으로 사료된다. 지하도로 내 전기차 화재의 필요성에 대해서는 전체 응답자의 96.1%가 대응지침의 구축이 필요하다고 주장하였으며, 이에 대한 국가적 교육 및 홍보 진행에 대해서는 92.1%가 긍정적인 입장을 보였다. 일반인 대상의 설문조사 결과 중 대응지침의 구축 필요성 및 국가적인 교육과 홍보의 필요성 조사 결과는 다음 <Fig. 5>와 같다. 앞선 결과를 종합하였을 때, 현재 운전자 중 다수가 전기차 및 지하도로 화재사고에 대한 주의사항을 인지하지 못하고 있는 실정이며, 지하도로 내 전기차 화재에 대한 적절한 대응지침 구축과 관련 교육 및 홍보에 대한 필요성을 주장하는 의견이 대부분임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 현재 부재한 지하도로 내 전기차 화재사고에 대한 대응지침을 구축하고 이를 교육 및 홍보에 적극적으로 활용하여 관련 사고의 피해를 최소화하고자 한다.



<Fig. 5> Survey results among the public

4. 사고 대응지침 초기 구축

대응지침 구축의 필요성을 확인함에 따라 앞선 자료조사 결과를 기반으로 사고 이해관계자별 대응지침을 1차적으로 구축하였다. 전기차 및 일반차량 운전자에 대한 지침은 국토교통부의 「국토교통분야 재난발생 시 국민행동 요령」 중 터널화재 부분을 기반으로, 소방관에 대한 지침은 「전기자동차 화재대응 안내서」 및 「전기자동차 화재대응 가이드」(National Fire Research Institute, 2023), 지하도로 관리자는 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」을 기반으로 사전에 도출한 주요 사항을 반영하여 수정 및 보완하였다. 기존 전기차 및 일반 운전자 관련 대응지침에서 ‘화재 발생 즉시 차량 내 소화기 또는 소화전을 사용하여 화재를 진압한다’의 항목은 도출한 주요사항 중 일반 소화 장비를 통해 화재 진압이 불가하다는 점을 반영하여 제외하였다. 또한, 전기차 화재로 인한 유독가스 및 고온은 터널 상단부에 위치하므로 몸을 숙인 채 대피하는 내용을 추가하였다. 소방관 대응지침에서는 전기차별 배터리 위치가 상이하므로 이를 사전에 숙지해야 하는 지침과 협소한 지하도로 내부의 효율적인 활용을 위한 적정 대수의 소방차 출동, 신속한 터널 출입 차단 관련 지침을 추가하였다. 지하도로 관리자의 대응지침에는 안내 방송 등을 통한 전기차 화재 전달의 내용을 추가하였다. 이를 통해 전기차 운전자 9개, 일반 운전자 8개, 소방관 9개, 지하도로 관리자 8개의 총 34개 항목으로 구성된 지하도로 내 전기차 화재 대응지침을 1차적으로 구성하였으며, 대응지침의 내용은 다음과 같다.

- 전기차 운전자

- 화재 발생 시 터널 밖 갓길에 정차시키는 것이 최우선이지만 제한될 경우 비상주차대나 측벽쪽으로 차량을 정차시킨 후 시동을 꺼 배터리로의 전기에너지 공급을 차단시켜야 함
 - 전기차 충돌 발생 시 최대한 신속히 차량에서 하차해야 함
 - 화재 발생 즉시 119에 신고하고, 화재 발생 차량의 전기차 여부와 차종을 정확히 알려야 함
 - 신고 시 화재 발생의 원인이 주행 중 발화인지 혹은 충돌에 의한 발화인지 정확히 알려야 함
 - 전기차의 경우 소화기 등을 이용한 일반적인 방법은 효과가 미비하여, 주변에 소화기나 소화전이 있더라도 초기 진화보다는 신고와 대피를 우선으로 해야 함
 - 배터리의 추가 폭발 위험이 있으므로 적정 이격거리를 두고 신고를 진행해야 함
 - 대피 시에는 몸을 숙이고 피난연결로 및 지하도로 외부로 향해 연기 반대 방향으로 이동해야 함
 - 주변 상황을 인지하기 힘들 경우 지하도로 내부 경보음 및 안내 방송에 따라 대피해야 함
 - 전기차 화재는 장기간 지속되므로 피난연결로 등을 통해 터널에서 완전히 대피해야 함
- 일반 운전자
 - 터널 진입 전 화재 관련 안내 방송이나 가변정보 표지판의 정보 확인 시 진입을 자제해야 함
 - 전기차 화재는 지속시간이 매우 긴 만큼 주변 차량으로의 화재 확산 가능성이 크고, 이에 따라 터널에 이미 진입한 경우 신속히 통과해야 함
 - 화재의 확산으로 터널 통과에 제한이 발생해 터널 내에 정차하는 경우 최대한 측벽 쪽으로 밀착하여 정차하며 시동은 끄고, 키는 꼽은 상태로 문을 닫고 대피해야 함
 - 전기차의 2차 폭발을 대비하여 화재 차량과 최대한 이격하여 정차시켜야 함
 - 신고 시에는 인식이 가능한 경우 전기차 여부와 차종을 알려야 함
 - 초기진화는 효과가 미비하므로 대피를 우선으로 해야 함
 - 터널 내 유턴 및 후진은 사고 발생 확률이 높으므로 차를 내부에 정차시킨 후 대피해야 함
 - 이외의 대피 방식은 전기차 운전자 지침의 7~9와 같음
- 소방관
 - 신고 접수 시 차량이 전기차인지 확인하고, 전기차인 경우 차종을 확인하여 미리 배터리 및 battery system assembly(BSA)의 위치와 화재 특성을 인지해야 함
 - 정확한 사고 위치를 파악하여 이동식 수조의 방식 중 알맞은 것을 준비해야 함
 - 재발하나 2차 폭발을 유발하는 차량의 이동은 자제하며 이동식 수조를 사용해야 함
 - 화재 진압 시 배터리와 BSA의 정확한 위치를 파악하여 상, 하부 관통형 관창으로 냉각소화를 진행해야 함
 - 터널 내부는 연기의 확산에 의한 피해가 큰 만큼 질식소화덮개를 사용해야 함
 - 사전에 필요한 수량을 파악하고, 적정 대수의 소방차를 출동시켜야 함
 - 민간인들의 대피를 돕고, 전기차 화재로 인한 불화수소 등 유독가스의 확산과 감전을 방지하기 위해 주변 접근을 철저히 차단해야 함
 - 터널로의 일반 차량 진입을 철저히 차단하여 터널 내부에 충분한 공간을 확보해야 함
 - 기타 전기차 소화 관련 내부 지침에 대해 철저히 숙지해야 함
- 지하도로 관리자
 - 자동화재설비를 통한 화재 감지가 기본이지만 CCTV 및 자동사고감지설비를 통해 상시로 터널 내부

- 의 이상 상황을 감시하며 신속한 대응을 준비해야 함
- 화재 발생 전기차 여부 및 차종을 확인하여 이를 주변 유관기관에 알려야 함
 - 화재 차량 주변 CCTV를 집중적으로 감시하여 2차 폭발 등 특이사항 발생 현황을 확인해야 함
 - 제어 가능한 방재설비, 제연설비, 통신설비 등을 모두 작동시켜 화재의 확산을 막고 민간인의 대피를 도와야 함
 - 터널진입차단설비 및 입구정보 가변정보 표시판을 통해 터널 진입을 철저히 차단하고 방송설비 등으로 터널 내에 전기차 화재가 발생하였음을 알려야 함
 - CCTV 등으로 시민들의 대피를 확인하고 방송 및 경보음을 통해 지속적으로 안내해야 함
 - 안내 방송 시 화재 차량이 전기 차량임을 알리고, 앞선 전기차 운전자와 일반 운전자들이 수행해야 할 수칙들을 알려야 함
 - 대량의 연기 발생에 대응하기 위해 제연설비를 신속하고, 지속적으로 작동시켜야 함

5. 전문가 대상 조사

1) 개요

1차적으로 구축한 지침을 보다 정확하게 구축하기 위해 화재 관련 전문가를 대상으로 설문조사를 진행하였다. 설문은 1차적으로 구축한 대응지침 및 화재 관련 현황을 위주로 진행하였으며 현재 사용 중인 화재 대응지침 및 연구 현황, 지침 수정사항들을 조사하였다. 이후 설문결과를 종합하여 1차적으로 구축한 지침 내용을 보완하고 실제 상황에 적용 가능한 적절한 대응지침을 구축하였다. 전문가 설문조사는 국립소방연구원의 전기차 화재 전문가 및 국내 터널 관리자를 대상으로 진행하였다.

2) 전기차 화재 전문가 대상 자문

전기차 화재 관련 조사는 국립소방연구원의 전기차 및 배터리 화재 전문가를 대상으로 자문의 형식으로 진행하였다. 사전에 구축한 대응지침과 관련 자료조사를 중심으로 자문을 진행한 결과를 통해 전기차 화재와 관련한 주요 의견을 아래와 같이 도출하였다.

- 배터리 열폭주는 내부 결함 외에도 외부 고온이나 운영상 미흡으로 발생
- 전기차 충돌 이후 즉시 또는 순간적으로 화염이 분출되며 화재 발생
- 주행 중 배터리의 문제 발생 시 오프가스 배출이나 진단코드 등을 통해 사전에 인지 가능하며, 인지 시 신속한 대피 필요
- 배터리팩 하부에 주수를 통한 간접냉각 방식이 효과적이라는 결과가 일부 확인
- 현재 전기차 폭발에 대비한 이격거리 기준이 정립되지 않아 최대한 멀리 대피할 것을 권고
- 배터리 자체가 에너지원이므로 시동과는 무관하게 에너지 준위를 유지하며, 에너지 공급 행위는 충전 중인 상황만이 해당
- 현장에서 이동식 수조는 화재진압수단이 아닌 1차 진압 이후 재발화 방지 및 보관 목적으로 사용
- 관통형 관창을 통한 배터리 냉각소화는 오히려 열폭주를 가속화시킬 수 있어 권고 사항이 아님

자문을 통해 도출한 주요 의견을 기반으로 1차적으로 구축한 대응지침의 내용을 수정하였다. 주행 중 오프가스 배출 및 진단코드 등을 통한 배터리 문제 발생과 충돌 이후 즉시 화염이 발생하는 점을 통해 신속한

인지 및 대피 사항을 추가하였으며, 이격거리 기준 미확립 사항을 근거로 최대한 멀리 대피하는 것을 권고하는 지침을 추가하였다. 또한, 소방관의 화재진압 과정에서 효과를 보인 배터리팩 하부에 주수를 통한 간접냉각 방식을 추가하였으며, 열폭주의 가속화 우려가 있는 관통형 관창 사용은 지침에서 제외하였다.

3) 터널 관리자 대상 설문조사

지하도로 관리자 대상 대응지침의 경우 터널 관리자들이 숙지하고 있는 기존 대응지침 및 터널 관련 전문 지식이 추가적으로 필요하다 판단하여 이들을 대상으로 설문조사를 진행하였다. 설문은 활용 중인 터널 내부 화재 및 전기차 화재 관련 대응지침의 존재 여부와 화재 발생 시 대응 방식, 전기차 화재 대비 별도의 소방장비 존재 유무, 사전에 구축한 대응지침의 수정사항 및 기타 요구사항을 중심으로 진행하였다. 설문조사는 2023년 4월 7~16일의 10일간 국토교통부 및 도로공사 산하의 터널 관리자 46명을 대상으로 진행하였다. 설문조사 결과, 기타 요구사항 중 가장 많은 인원이 요구한 사항은 화재 특징 및 일반차량 화재와 구분하지 못하는 문제로 총 8명이 관련 자료 제공 및 교육을 요구하였으며, 다음으로 6명의 인원이 화재 발생 시 CCTV를 활용한 상황 파악에 제한이 발생한다고 답하였다. 추가로 설문조사에서 모든 응답자가 현재 활용하는 화재 대응지침이 존재한다고 답하였지만, 전기차 화재 관련 지침의 경우 1명만이 존재한다고 답하여 이에 대한 개선이 필요한 실정이었다. 또한, 전기차 화재를 대비한 소방장비 역시 1곳만이 포소화설비를 배치한 것을 제외하면 존재하지 않는 실정이었다. 설문결과에 따른 터널 관리자의 주요 의견은 다음과 같다.

- 터널 내 화재와 관련하여 「도로터널 사고 주요상황 대응 현장조치 행동 매뉴얼」, 「소화 및 구조활동 계획서」 등 전문 대응지침이 존재함
- 전기차 화재에 대한 별도의 대응지침은 부재함
- 일반차량과 전기차 화재를 구분 지을 수 있는 교육 및 자료, 혹은 신규 장비가 필요함
- 화재 발생 시 터널 관리자의 경우 유관기관에 상황전파 후 각종 방재시설을 운영하며 관리소에 상주하여 상황을 모니터링하고, 필요시 일부는 현장출동하여 대피 지원 및 소화활동 등을 지원함
- 대부분 화재 신고 접수 후 10~20분 이내에 터널로 소방차량이 도착함
- 현재 대부분 터널에서 전기차 화재를 대비한 별도의 소방시설이 존재하지 않음
- CCTV 등을 통한 화재 차량의 전기차 여부 구분은 매우 제한됨
- 화재 발생 시 초동대응 조치가 많아 안내수칙까지 동시에 전파할 시간적, 물리적 한계가 발생함

지하도로 관리자 주요 의견을 도출한 결과, 터널 내 화재사고 대응지침이 존재하므로 이에 대한 철저한 숙지 요구에 대한 항목을 추가하였다. 또한, CCTV의 활용이 화재 발생 시 제한되므로 관련 내용을 지침에서 제외하였으며, 현재 전기차 화재의 특성이나 일반차량 화재와의 차이에 대한 지식이 부족한 실정으므로 이에 대하여 사전에 충분한 숙지를 요구하는 항목을 추가하였다.

IV. 최종 대응지침 구축

1. 최종 지침 구축

전문가 대상 조사를 통해 얻은 주요 의견을 종합한 후 이를 1차적으로 구축한 지침의 내용에 반영하였으

며 최종적으로 구축한 지침은 전기차 운전자 10개, 일반 운전자 8개, 소방관 10개, 지하도로 관리자 8개로 총 36가지의 항목으로 구성된다. 지하도로 내 전기차 화재의 최종 대응지침은 다음과 같다.

• 전기차 운전자

- 주행 중 오프가스 배출 및 진단코드를 통해 차량의 문제 발견 시 신속히 대피해야 함
- 화재 발생 시 터널 밖 갓길에 정차시키는 것이 최우선이지만 제한될 경우 비상주차대나 측벽쪽으로 차량을 정차시켜야 함
- 전기차 충돌 발생 시 즉시 또는 순간적으로 화염이 분출되므로 신속히 차량에서 하차해야 함
- 화재 발생 즉시 119에 신고하고, 화재 발생 차량의 전기차 여부와 차종을 정확히 알려야 함
- 신고 시 화재 발생의 원인이 주행 중 발화인지 혹은 충돌에 의한 발화인지 정확히 알려야 함
- 전기차의 경우 소화기 등을 이용한 일반적인 방법은 효과가 미비하여, 초기진화보다는 신고와 대피를 우선으로 해야 함
- 다수의 배터리 폭발 위험이 있으므로 최대한 멀리 떨어져서 신고를 진행해야 함
- 대피는 일반적인 터널 내 대피 방식과 동일하게 몸을 숙인 채 연기 반대방향으로 이동해야 함
- 주변 상황을 인지하기 힘들 경우 터널 내부 경보음이나 안내 방송 등에 따라 대피해야 함
- 전기차 화재는 장기간 지속되므로 피난연결로 등을 통해 터널에서 완전히 대피해야 함

• 일반 운전자

- 터널 진입 전 터널 외부 안내 방송 및 가변정보 표지판의 정보 확인 시 진입을 중지해야 함
- 주변 차량으로의 화재 확산 가능성이 큰 만큼 터널 내부에 있는 경우 신속히 통과해야 함
- 화재의 확산으로 터널 통과에 제한이 발생해 터널 내에 정차하는 경우 최대한 측벽 쪽으로 밀착하여 정차하며 시동은 끄고, 키는 쥘 수 있는 상태로 문을 닫은 채 대피해야 함
- 차량 정차 시 화재 차량의 추가적인 폭발을 대비하여 최대한 이격하여 정차시켜야 함
- 신고 시에는 인식이 가능한 경우 전기차 여부와 차종을 알려야 함
- 초기진화는 효과가 미비하므로 대피를 우선으로 해야 함
- 터널 내 유턴 및 후진은 사고 발생 확률이 높으므로 차를 터널 내부에 정차시킨 후 대피해야 함
- 대피 방식은 전기차 운전자 지침의 8~10을 따라야 함

• 소방관

- 신고 접수 시 차량이 전기차인지 확인하고, 전기차인 경우 차종을 확인하여 미리 배터리 및 BSA의 위치와 화재 특성을 인지해야 함
- 정확한 사고 위치를 파악하여 이동식 수조의 방식 중 알맞은 것을 준비해야 함
- 재발화 및 폭발을 유발하는 차량의 이동은 자제해야 함
- 초기진화 시 이동식 수조를 사용해야 함
- 배터리와 BSA의 정확한 위치 파악 후 하부 주수소화를 통한 간접냉각을 진행해야 함
- 질식소화덮개를 동시에 사용하여 터널 내부 연기의 확산을 방지해야 함
- 현장 출동 전 화재 진화에 필요한 수량 파악 후 적정 대수의 소방차를 출동시켜야 함
- 민간인들의 대피를 돕고, 전기차 화재로 인한 불화수소 등 유독가스의 확산과 감전을 방지하기 위해 화재 차량 주변으로의 접근을 철저히 차단해야 함

터널로의 일반 차량 진입을 철저히 차단하여 터널 내부에 충분한 공간을 확보해야 함
 기타 전기차 및 지하도로 화재 진압에 대한 내부 지침을 철저히 숙지해야 함

- 지하도로 관리자
 - 화재 확인 시 즉시 이를 유관기관에 전파하며, 확인 가능한 경우 전기차 화재임을 알려야 함
 - 작동 가능한 모든 제연설비(차단막, VMS, 환기설비, 비상방송, 물분무설비 등)를 작동시켜야 함
 - 현장에 출동하여 일반인 대피 및 소화활동을 지원하며, 관리자가 다수인 경우 일부는 관리소에 상주하며 상황을 모니터링해야 함
 - 2차 폭발 등으로부터 일반인을 보호하기 위해 화재 차량과 최대한 먼 곳으로 대피시키며, 피난 연결로 등의 위치를 알려야 함
 - 터널진입차단설비 및 입구정보 표지판을 통해 터널 진입을 철저히 차단하고 방송설비 등으로 터널 내에 전기차 화재가 발생하였음을 알려야 함
 - 안내 방송 시 화재 차량이 전기차임을 알리고, 앞선 전기차 운전자와 일반 운전자들이 수행해야 할 수칙들을 알려야 함
 - 차량의 화재 초기 발화 위치 등을 통해 화재 발생 차량의 종류(내연기관 및 전기차) 파악방법을 사전에 숙지해야 함
 - 지하도로 및 전기차 화재에 대한 내부 지침을 철저히 숙지해야 함

2. 정책적 제언

본 연구를 통해 지하도로 내 전기차 화재 대응지침을 새롭게 구축하였지만, 전문가 대상 조사 결과 현재 상황에서는 해당 화재에 대응하기에 부족한 부분들이 다수 존재하였다. 먼저 터널 관리자 대상 설문조사 응답자의 대부분이 내연기관과 전기차 화재 특성을 초기에 구분 짓지 못하는 문제가 있었다. 화재 발생 시 차종 파악은 신속한 화재 진압을 가능하게 하는 정보이므로 반드시 숙지해야 한다. 이를 위해서는 국가적인 교육 및 홍보를 통해 전기차 화재의 성상 및 초기 발화 위치 등에 대한 매뉴얼을 배포하여 관련 전문 지식에 대한 인식을 높일 필요가 있다고 판단된다. 또한, 현재 CCTV의 성능으로는 연기 발생 시 차종 구분에 제한이 발생하므로 더 나은 장비나 차종 구분을 위한 별도의 감지 설비 역시 필요할 것으로 생각된다. 다음으로 현재 지하도로 내부에 존재하는 소화설비의 적응성이 전기차 화재에 대응하기에는 매우 부족하다는 단점이 있다. 설문 결과, 대부분의 터널은 화재 신고 시 소방대의 도착시간이 10~20분 내외이기에 그 이전에 초기 대응을 위한 장비가 필요하지만, 현재 국내 지하도로의 소화기는 A, B, C형으로 전기차 화재의 초기진화에는 효과가 없다. 이에 따라 D형 이상의 전기차 전용 소화기 및 포소화설비와 같이 전기차 화재에 대응 가능한 별도의 소화설비가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 터널 관리자들의 설문에서 다수의 인원이 초동조치를 하는 과정에서 전기차 화재 사실에 대한 안내 방송과 대피 안내의 진행까지는 시간적, 물리적 한계가 발생함을 강조하였기에 사전에 전기차 화재 관련 안내 방송을 제작할 필요가 있을 것으로 사료된다.

위와 같은 제언을 통해 지하도로 내 전기차 화재에 대한 대응을 사전에 충분히 하고, 본 연구에서 제시한 사고 대응지침을 적용할 경우 해당 화재의 피해를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 최근 증가하는 전기차 대수와 이에 따른 전기차 화재 증가에 주목하였으며, 특히 사고 피해가 큰 지하도로 내에서의 전기차 화재에 대한 대응지침의 필요성을 인지하였다. 현재 지하도로 내부에서 발생하는 전기차 화재는 별도의 대응지침이 존재하지 않아 화재 발생 시 큰 피해를 야기할 우려가 존재한다. 이에 따라, 지하도로 내 전기차 화재사고에 대한 대응지침을 구축하여 전기차 사용의 안전성 증대 및 화재 발생 시의 피해 최소화를 목적으로 한다.

대응지침 수립에 앞서 지하도로 내 전기차 화재사고의 사고 이해관계자를 행동 수칙 차이에 따라 ‘전기차 운전자’ 및 ‘일반 운전자’, ‘소방관’, ‘터널 관리자’의 네 가지로 구분하였다. 이후 일반인을 대상으로 설문조사를 실시하여 본 연구의 필요성을 확인하였다. 다음으로 사전 조사를 통해 전기차의 배터리 폭발 위험, 초기 소화의 어려움 등과 같은 여덟 가지의 주요 화재 특징을 도출하였고, 이를 기반으로 대응지침을 1차적으로 구축하였다. 1차적으로 구축된 지침의 내용을 추가적으로 보완하고자 국립소방연구원의 전기차 화재 관련 전문가와 국내 국토교통부 소속 터널 관리자들을 대상으로 화재 관련 자문 및 설문조사를 진행하였다. 조사 결과를 기반으로 사전 구축 지침의 내용을 수정 및 보완하여 실제 상황에 적용이 가능한 최종적인 지하도로 내 전기차 화재 대응지침을 제시하였다. 대응지침은 전기차 운전자 10개, 일반 운전자 8개, 소방관 10개, 지하도로 관리자 8개로 총 36가지의 항목으로 구성되었다.

본 연구에서는 새롭게 구축된 대응지침을 실제 상황에 적용하고, 화재사고에 대해 사전에 대비해야 할 사항들을 정책적으로 제언하여 지하도로 내 전기차 화재사고로 인한 피해를 최소화하고자 한다. 특히, 정부에서 대응지침 관련 교육 및 홍보를 적극적으로 진행하여 사고 이해관계자들의 충분한 숙지를 돕고자 한다.

본 연구의 한계점 및 향후 연구과제는 다음과 같다. 먼저, 현재 전기차 화재 관련 연구는 정확하게 정립되지 않고 지속적으로 진행 중이기 때문에 현재의 대응지침은 추가적인 연구 결과에 따라 유동적인 변화가 필요하다. 특히 전기차의 폭발 피해 범위에 대한 정확한 연구가 부재하여 화재 발생 차량과의 안전한 이격거리 관련 기준이 아직 정립되지 않았으며, 전기차 화재에 대한 최적 진압 방식 역시 여전히 연구가 진행 중이다. 이에 따라 향후 전기차 화재와 관련된 추가적인 연구 결과들이 제시되는 대로 대응지침에 대한 수정이 필요할 것으로 사료된다. 다음으로 본 연구에서 구축한 대응지침이 범용성 있게 사용되기 위해서는 전기차 화재 사고의 발생이 잦은 지하주차장에서도 적용할 수 있어야 한다. 하지만 현재 구축한 대응지침은 지하주차장 내 전기차 화재에 일부만 적용 가능하여 향후 연구를 통해 지하주차장에서도 활용할 수 있도록 보완할 필요가 있다고 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(22AMDP-C162419-02, 자율주행기술개발혁신사업).

REFERENCES

- Asiailbo, https://m.asiailbo.co.kr/etnews/?fn=view&no=481819&cid=21050600#_enliple, 2023.10.12.
- Busan Metropolitan City Fire & Disaster Headquarters(2022), *Fire safety guide to parking areas for electric vehicles*, pp.7-21.
- Choi, A., Lee, S., Park, T. and Kim, H.(2021), “Comparative analysis of real fires for electric vehicles and gasoline vehicles”, *The Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 21, no. 6, pp.119-124.
- Choi, T., Yeun, Y., Yun, C., Kim, M., Choi, J., Lee, S. and Kim, N.(2002), “The temperature distribution and the smoke flow behaviour during road tunnel fire”, *The Korean Tunneling and Underground Space Association*, vol. 4, no. 1, pp.37-43.
- Economic Review, <https://www.econovill.com/news/articleView.html?idxno=600060>, 2023.01.26.
- HANJU Trading Co., <https://hanju911.com/firefighting/?idx=49>, 2022.12.21.
- Kim, B., Kim, C. and Kim, D.(2015), “Agent-based evacuation simulations of road tunnels in the event of a fire”, *The Korean Society of Civil Engineers*, vol. 35, no. 5, pp.1157-1163.
- Kim, H. and Lee, J.(2017), “Scenarios for effective fire fighting operations during tunnel fires”, *Korean Institute of Fire Science & Engineering*, vol. 31, no. 5, pp.107-116.
- Kim, H., Lee, S., Kim, T. and Choi, A.(2022), “Experimental study on fire characteristics of adjacent electric vehicles”, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, vol. 23, no. 4, pp.343-350.
- Kim, Y., Kim, J., Lee, Y. and Lee, Y.(2013), “A Study of System Improvement and Risk Analysis of Underground Space”, *Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp.6-11.
- Kmib, https://news.kmib.co.kr/article/view.asp?arcid=0017148912&code=61121211&stg=ws_real, 2022.12.21.
- Kyunghyang, <https://m.khan.co.kr/economy/auto/article/202304032141005#c2b>, 2023.06.26.
- Lee, B., Lee, H., Kim, B., Jeong, Y. and Cho, D.(2020), “Proposal for response to fire site of eco-friendly vehicle”, *The Korean Institute of Communications and information Science*, pp.41-42.
- Lim, O., Kang, S., Kwon, M. and Choi, J.(2021), “Full-scale fire suppression tests to analyze the effectiveness of existing lithium-ion battery fire response procedures for electric vehicle fires”, *Fire Science and Engineering*, vol. 35, no. 6, pp.21-29.
- Ministry of Land, <http://m.molit.go.kr/safety/sub4.jsp>, 2022.11.30.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2021a), *Guidelines for road tunnel fire resistance*, pp.4-10.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2021b), *Guidelines for the installation and management of road tunnel disaster prevention and Ventilation facilities*, pp.1-52.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2022), *Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics*, pp.13-14.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2023), *Design Guidelines for underpass road*, pp.249-341.
- National Assembly Budget Office(2022), *Analysis on the eco-friendly vehicles policy*, pp.17-20.
- National Fire Agency(2023), *Current Status of Electric Vehicle Fire by Year in the Last 3 Years*.
- National Fire Agency, <https://www.nfa.go.kr/nfa/releaseinformation/beforehand/officialist/?boardId>

