

인접한 전기자동차의 화재 성상에 관한 실험 연구

김형식, 이수호, 김태동, 최아영*
국립소방연구원

Experimental Study on Fire Characteristics of Adjacent Electric Vehacles

Hyung-Sik Kim, Soo-Ho Lee, Tae-Dong Kim, A-Young Choi*
National Fire Research Institute

요 약 최근 온난화, 대기오염 등 환경적인 문제의 심각성이 대두됨에 따라 세계 각국은 친환경 정책의 일환으로 전기자동차의 보급을 확대하고 있다. 이와 비례하여, 전기자동차 화재도 지속적으로 발생하고 있지만, 전기자동차 화재의 특성을 파악하기 위한 실물화재 실험연구가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 전기자동차의 화재 특성을 도출하고자 1대의 전기자동차 실물화재 실험을 실시하였다. 또한, 주차장과 같이 인접한 전기자동차에서 발생하는 화재특성을 비교하기 위해 0.5 m 간격으로 이격된 전기자동차 2대에서 발생하는 화재특성을 도출한 결과 배터리가 고온 또는 화염에 노출되어 발열 반응이 가속됨에 따라 여러 차례의 폭발에 의한 안전사고가 발생할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 전기자동차 화재진압에 필요한 장비와 대응기법 개발에 활용하고, 향후 실험데이터를 기반으로 화재양상을 예측하는 기법개발 추가 연구를 수행할 예정이다.

Abstract Countries worldwide have been expanding the supply of electric vehicles as part of their eco-friendly policies to overcome the increasing environmental problems such as global warming and air pollution. Subsequently, electric vehicle fires also continue to increase in proportion with the number of electric vehicles. But, there is insufficient research conducting fire experiments to understand the characteristics of electric vehicle fires. Hence, this research conducted a fire test on an electric vehicle to derive its fire characteristics. In addition, this research compared the fire characteristics of adjacent electric vehicles such as the ones in parking lots. This comparison was performed by deriving the fire characteristics of two electric vehicles placed 0.5 m apart. Subsequently, the exothermic reaction was found to have accelerated as the battery was exposed to high temperatures or flames. This study also found that accidents can occur in adjacent electric vehicles due to multiple explosions caused by the fire. Further, we plan to use this study to develop equipment and countermeasures necessary for fire suppression in electric vehicles. We also plan to conduct additional research in the future to develop techniques for predicting fire patterns based on experimental data.

Keywords : Electric Vehicle, Fire Test, Full Scale, Explosion, Fire Risk

본 논문은 소방청 소방대응력향상을 위한 연구개발지원사업의 연구과제(1761002000)로 수행되었음.

*Corresponding Author : A-Young Choi(National Fire Research Institute)

email: safetysobang@korea.kr

Received November 17, 2021

Accepted April 1, 2022

Revised February 9, 2022

Published April 30, 2022

1. 서론

1.1 친환경 자동차 동향

전 세계적으로 온난화 대기 오염 등 환경에 대한 문제의 심각성이 매년 크게 부각되고 있다. 특히, 휘발유 또는 경유 등 석유계 물질을 이용한 자동차는 완전연소 시 산소와 결합하여 대표적인 온난화 요인인 수증기와 이산화탄소(CO₂)를 생성할 뿐만 아니라, 불완전 연소 시 다양한 유해물질이 배출되어 대기오염의 주범이 되고 있다. 대기오염의 저감과 온실가스 배출을 억제할 수 있는 자동차 산업의 규제 강화 등을 위해 EU의 탄소중립 정책 발표 및 시행 등 국가별로 다양한 친환경 정책을 수립하여 추진 중이다. 전기자동차는 에너지 효율성, 낮은 배기가스 배출 등의 장점을 필두로 일반 내연기관 자동차를 대체할 수 있는 수단으로 부상하고 있다. 매년 국내·외 자동차 업계에서 새롭게 출시되는 전기자동차의 종류가 다양해지고, 관련 산업이 발전하고 있으며, Fig. 1에서 보면 전기자동차 판매량이 매년 평균(2020-2025)적으로 180만 대씩 판매량이 늘고 있는 것으로 분석 된다[1].

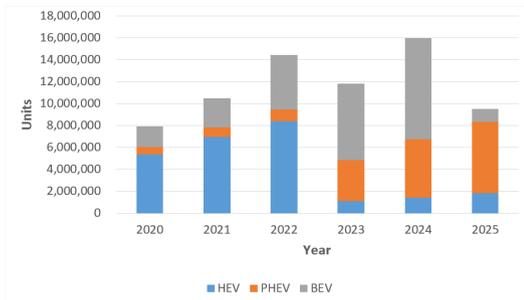


Fig. 1. Electric Vehicle Market: XEV Sales Estimates, Global, 2020-2025

우리나라도 친환경자동차법에 따라, 5년 단위 기본계획을 시행한다. Table 1과 같이 해당 계획에 따르면 2030년까지 자동차 온실가스 24 % 감축을 목표로 2025년까지 친환경자동차 283만대(신차판매 51 %), 2030년

Table 1. Korea's eco-friendly vehicle supply plan

Division	2020	2025	2030
Battery Electric Vehicles(BEV)	135,000	1,130,000	3,000,000
FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)	11,000	200,000	850,000
Hybrid Electric Vehicle(HEV)	674,000	1,500,000	4,000,000
Total	820,000	2,830,000	7,850,000

까지 785만대(전체 신차판매 83 %) 보급하고, 2025년 전기자동차 보급 대수의 50 % 이상 수준인 50만기 이상으로 충전기를 확대·설치할 예정이다[2].

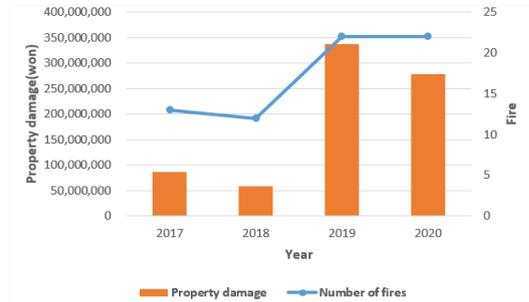


Fig. 2. Trends in Electric Vehicle Fires

전기자동차는 고전압 배터리, 모터, 기타 전기적인 시스템 등 기존 내연기관과 다른 구조와 특정 배터리 열화로 배터리 내부 SEI(Solid Electrolyte Interface)가 분해되면서 온도가 증가하고, 리튬이 전해액의 유기용매와 반응하여 가연성 탄화수소가스가 배출되어 발생한 열과 가연성가스에 의해 연소·폭발하는 열폭주 현상 등과 같은 따른 위험성을 지니고 있으나 일반적인 자동차의 위험성도 일부 가지고 있다. 특히, 고전압 배터리 사용으로 사고 발생 시 감전의 위험성, 폭발 및 내부 전해액 누출로 소방대원 2차 피해 가능성이 상존한다. 그리고 각 제조사 차량별로 고전압 배터리의 모양, 크기, 장착 위치 및 긴급차단 스위치 등의 위치가 다르므로 신속하게 전원을 차단하는 조치가 어려운 실정이다.

1.2 친환경자동차 화재 사례[3,4]

1.2.1 광주시 무등산 도로 전기자동차 화재

Fig. 3은 무등산 도로에서 전기자동차 앞부분에서 갑작스럽게 발화되어 전소된 화재이며, 사제 블랙박스를 개조, 설치하여 사용자 과실에 의한 배터리 화재이다.



Fig. 3. Fire while driving on road(2016)

1.2.2 구미시 구미역 전기버스 화재

Fig. 4는 승객 10여명이 탑승한 전기버스가 구평동 종점으로 이동하던 버스에서 BMS의 오작동에 따른 과부하가 원인으로 상층부에 설치된 배터리팩에서 화재가 발생하였다.



Fig. 4. Fire scene of electric bus(2016)

1.2.3 오스트리아 고속도로 충돌화재

Fig. 5는 고속도로에 설치된 콘크리트 벽에 충돌하여 전기자동차 전면 배터리에서 화재가 시작되었으며, 총 35명의 소방공무원이 투입되어 화재를 진압하였으나, 진압이 완료된 차량을 보관하던 중 재발화되어 2차 추가 사고가 발생하였다.



Fig. 5. Crashed on a concrete construction barrier in austria at high speed and started a fire(2017)

1.2.4 방콕(탈링찬) 전기자동차 충전 중 화재

Fig. 6은 개인 주택에서 가정용 배터리 충전 키트를 이용하여 배터리를 충전하던 전기자동차에서 화재로 화염이 주택으로 전이되어 많은 재산피해를 발생시킨 사건이다.



Fig. 6. Fire was intense and damaged the owner's house(2018)

1.3 연구 목적 및 방법

전기자동차의 보급 등이 활발히 진행되고 있는 상황으로 엔진 기반의 내연기관 자동차와 달리 고전압 배터리를 이용하여 모터를 구동할 수 있도록 설계되어 충전 중 화재, 운전 중 자연 발화, 충돌에 의한 화재 등 다양한 형태로 화재가 지속적으로 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 전기자동차 1대에서 발생한 화재의 온도 특성을 비교군으로 설정하고, 2대가 인접한 상태에서 화재가 발생할 경우 화재가 진행되는 양상과 전이 특성, 배터리가 폭발하는 시점 및 현상 등에 대해 분석하고자 한다. 분석한 결과는 화재가 진행되는 상황에 따라 소방공무원이 효과적으로 화재를 진압하고, 피해를 최소화하는데 사용이 가능하다[5].

2. 본론

2.1 실험 시나리오

최근 전기자동차 비율이 증가하면서 주차장 등 전기자동차가 인접된 공간에서 화재가 발생할 우려가 있다. 본 실험에서는 인접된 전기자동차에서 발생하는 화재확산 매커니즘 및 온도 특성을 도출하고자 실험 시나리오를 설계하였다. 비교군은 전기차 1대에서 나타나는 온도 특성이며, 실험군은 0.5 m로 이격된 전기자동차 2대에서 나타나는 온도 특성이다.

실험은 자동차 화재의 특성상 높은 발열량, 폭발 등 2차 사고를 고려하여 개방된 외부 공간에서 실험을 진행하였다.

2.2 실험 설계 및 장치 구성

2.2.1 실험용 차량 선정

실험에 사용한 차량은 데이터의 신뢰성을 확보할 수 있도록 동일한 차종의 전기자동차 3대로 선정하였다. 모든 자동차는 100 % 완충된 상태이며, 세부 제원은 Table 2와 같다.

Table 2. Specifications of tested cars

Division		Description
Battery	Power	330V Lithium ion polymer
	Capacity	16.4kWh
Powertrain	Type	Electric motor
	Max power	50.0Kw
	Max torque	167.0Nm
Dimensions	Overall Length	3,595mm
	Overall Width	1,595mm
	Overall Height	1,710mm
	Wheel Base	2,520mm

2.2.2 점화원 위치

본 실험에 사용되는 자동차는 배터리가 하부에 탑재되어 있으며, 화재가 쉽게 전이될 수 있도록 플라스틱 재질의 앞·뒤 범퍼와 인접한 1열 우측 타이어와 2열 좌측 타이어 부근에 (W)30 cm × (L)30 cm × (H)10 cm 크기의 정사각형 팬에 담긴 액체연료(등유 2 L)에 각각 점화하여 차체로 전이시키는 방식으로 채택하였다.

2.2.3 계측장비 설치

Fig. 7처럼 외부에서 화재실험을 진행하는 점을 고려하여 바람에 의한 데이터의 오측정을 최소화할 수 있도록 실험체 주변에 (L)2 m × (H)2.4 m 크기의 방풍벽을 연결, 사각형 구조로 가연물 주변에 설치하였다.

화재가 진행되는 상황을 육안으로 확인하기 위해 CCTV 8대(IP 8M, HIKVISION)와 열화상카메라, 일반 카메라를 설치하여 녹화하였다. 또한, 열전대(K-type)의 위치 및 높이를 일정하게 배치하여 데이터를 1초 단위로 실시간 저장하였다. Fig. 8과 같이 열전대는 전기자동차의 외부 온도를 측정하기 위해 총 16개 지점을 선정하여 설치하였다.

화재 발생 시 온도가 일정하게 측정될 수 있도록 자동차를 기준으로 앞, 뒤, 전, 후에 각 4개의 거치대를 사용하여 거치대별 높이 0.5 m, 1.5 m에 2개씩 부착하였으며, 자동차와 거리는 0.5 m, 1.5 m로 설정하여 이격시켰다.



Fig. 7. Experiment setting

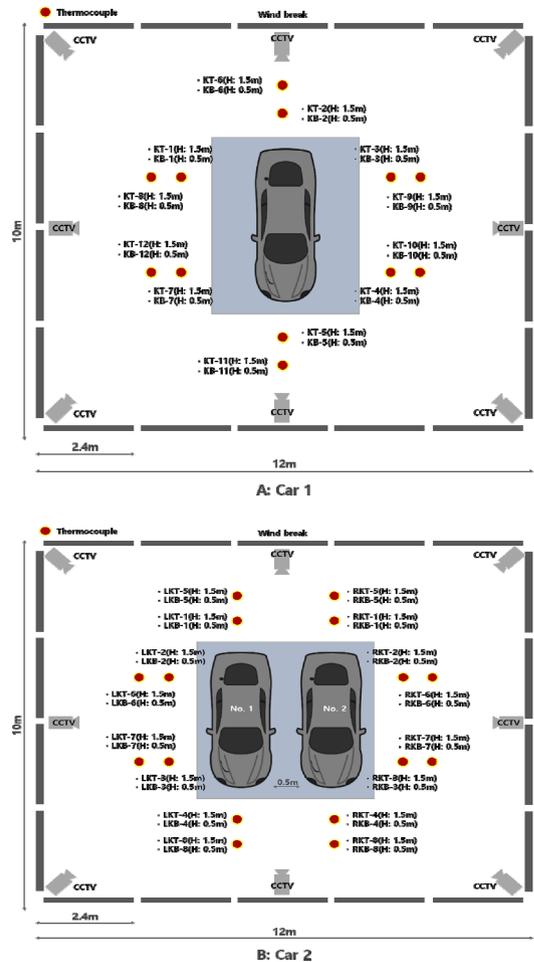


Fig. 8. Experimental set-up for the fire tests on a vehicle (A: 1 Car, B: 2 Cars)

2.3 실험 결과

실험 당일 기상 조건은 평균기온 9.5 ℃, 최고기온 16.1 ℃, 최저기온 4 ℃, 상대습도 69.6 %, 평균풍속 3.1 m/s(최대 6.9 m/s)로 측정되었다[6]. 본 실험은 외부 점화원에 의한 4 Door 경형 전기자동차 화재확산 양상, 다수(2대)의 자동차가 인접해 있을 때 화염이 전이되는 현상 등을 확인할 수 있었다.

2.3.1 전기자동차 1대 연소 실험

Fig. 9와 Table 3,4를 보면 최초 점화(1,2차 점화 동시에 진행) 2분 경과, 2열 좌측 타이어 부근의 front 및 Rear 범퍼와 타이어가 화염에 의해 289.8 ℃로(KT-2) 온도가 급격하게 상승하였으며, 전반적으로 주변의 온도가 상승하는 성장기에 진입하였다.

또한, 점화 6분 후 663.2 ℃로(KB-4) 최성기에 도달하였다. 최성기 이후 약 4분 뒤 자동차의 내장재 등의 가연물이 화재로 대부분 소멸되고 작은 화염과 연기가 다량 발생하는 쇠퇴기에 접어들었다.

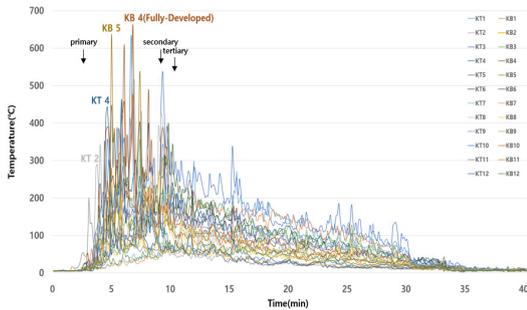


Fig. 9. The temperature at thermocouples KT1~KB12

Table 3. Burning process of fire recorded by cameras(A: 1 Car)

Stage	Camcoder	Thermo-Graphic Camera
1 Incipient		
2 Growth		

3 Fully-Developed		
4 Decay		

Table 4. Battery explosions of recorded by cameras (A: 1 Car)

Stage	Camcoder	Thermo-Graphic Camera
Primary		
Secondary		
Tertiary		

배터리는 자동차에서 발생하고 있는 화염이 전이되어 내부에 열 축적, 안전장치인 분리막 파손 등의 원인으로 점화 후 약 4분 뒤에 Front 범퍼 하단 부근에서 1차 폭발하였으며, 1차 폭발 후 6분이 경과한 시점에서 2차, 3차 연쇄 폭발하였다.

2.3.2 전기자동차 2대 연소 실험

점화는 전기자동차 1대 연소 실험과 동일하게 실시하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 최초 1번 차량의 2열 좌측 타이어에서 화염이 시작되어 약 3분 후 Rear 범퍼에 화재가 전이되었으며, 5분이 경과하였을 때 732.6 ℃(LKT-6)까지 온도가 급상승하였다. 또한, 최초 점화 후 1분 뒤에 1열 우측 타이어에 2차 점화된 후 3분 경과, 1열 도어 부근의 온도가 769.9 ℃(LKT-3) 측정되었다.

화재는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 최초 점화 후 2분

뒤에 배터리 내 고온·고압가스에 의한 다량의 화염 분출로 인접한 차량에서 첫 번째 점화된 차량 시간의 약 10분 후 Rear 범퍼로 전이되었다. 약 20분간 연소 후 첫 번째 점화된 차량의 배터리가 폭발하여 폭음과 함께 배터리 팩을 구성하고 있는 케이스 등 주변의 부품 파편이 비산되었고, 화재 최성기(RKT-1: 1128.6 ℃)에 도달하였다.

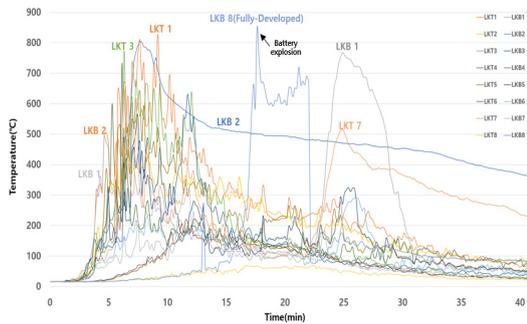


Fig. 10. The temperature at thermocouples LKT1~LKB8

Table 5,6과 같이 CCTV 및 열화상카메라로 확인한 결과 최초 점화 이후 1번 차량의 배터리 폭발까지 약 20분 정도 소요되었으나, 2번 차량은 그로부터 8분 뒤 28분에 격렬한 폭발음을 동반하여 폭발하였다. 영상에서 육안으로 확인한 결과, 폭발 시 발생하는 압력으로 배터리를 보호하는 커버의 파편이 파괴되어 비산되었고, 두 차량의 연소된 시간은 약 50분 정도 후 완전히 연소되었다.

또한, Fig. 12와 같이 전기자동차가 화재로 전소할 때까지 관찰한 결과, 대부분 플라스틱으로 구성되어 있는 앞뒤 범퍼 및 내장재(가죽 등)는 화재가 종료되었으나, 배터리 팩은 철재 등으로 덮여 있고, 고온의 열을 장시간 방출하여 화재가 쉽게 진화되지 않는 것을 확인하였다.

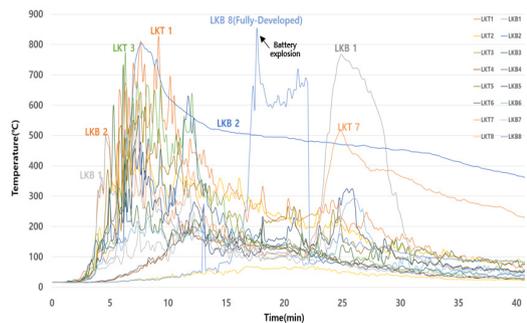


Fig. 11. The temperature at thermocouples RKT1~RKB8

Table 5. Burning process of fire recorded by cameras (B: 2 Cars)

Stage	Camcoder	Thermo-Graphic Camera
1 Incipient		
2 Growth		
3 Fully-Developed		
4 Decay		

Table 6. Battery explosions of recorded by cameras (B: 2 Cars)

Stage	Camcoder	Thermo-Graphic Camera
Primary		
Tertiary		



Fig. 12. Instant photographs during the fire in the battery

3. 결론

전기자동차 화재는 다양한 내·외부 요인에 의해 화재가 드물게 발생하고 있지만, 실제 화재가 발생할 경우 일반 내연기관 자동차와 달리 대용량 배터리의 열 폭주 현상 등으로 화재진압에 큰 어려움을 겪고 있다.

본 연구에서는 매뉴얼 또는 지침에서 미포함된 전기자동차의 화재 발생, 확산, 전이, 폭발 등 육안으로 확인할 수 있는 영상을 확보하고, 시간대별 온도변화를 기록하고 측정하였다. 실험결과는 첫 번째 차량은 연소 시작된 지 3분만에 차량에 연소확산되어 최성기는 769.9 ℃에 이르렀고, 인접한 두 번째 차량은 첫 번째 차량에서 10분 정도 후 연소가 전이되어 최성기는 1128.6 ℃까지 도달하였다.

또한, 실화재 실험에서 나타난 현상으로 배터리가 고온 또는 화염에 노출되어 발열 반응이 가속화됨에 따라 1차, 2차, 3차 등 폭발하여 파손된 부품이 운전자 또는 소방대원의 신체를 타격하거나 화상 등 안전사고가 발생할 수 있다는 사실을 확인하였다. 전기자동차 화재의 핵심은 다량의 물을 주수하여 배터리의 열을 낮추고, 화재가 주변으로 확산되는 것을 방지하는 것이다.

전기자동차 실물화재 기초 실험결과를 미루어 보았을 때 화재를 효과적으로 진압하기 위한 전용 소화약제, 배터리 커버 파괴 및 내부에 직접 주수 가능한 진압장비 개발, 충전소 및 밀폐 또는 반밀폐 공간 화재 예방·대응 시스템 개발 등의 해결책 마련이 시급한 상황으로 화재를 진압하기 위한 사고 시나리오를 기반으로 대응전술 등 화재진압기법 개발하고, 교육·훈련 강화에 주력해야 할 것으로 판단된다.

현재 전기자동차는 에너지와 환경 문제를 동시에 해결할 수 있는 수단으로 급부상하고 있지만, 전기자동차 화재의 위험성에 대해 정성적으로 이해를 돕고, 온도의 변화와 배터리가 폭발하는 시점과 형상 및 화염이 전이되는 것을 확인할 수 있는 실물 화재실험 데이터는 부족한 실정이다. 이에 따라 향후 배터리 셀에 대한 열폭주 실험 및 공간적(밀폐, 반밀폐, 개방) 특성을 변수로 적용한 실험 연구로 다양한 결과를 도출하여 전기자동차 화재 예방과 진압 방면에서 유용한 데이터를 제공하여 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Global Electric Vehicle Market Outlook, USA, Frost & Sullivan, pp.1-50.
- [2] Korea's eco-friendly vehicle supply plan, Republic of Korea, Ministry of Trade, Industry and Energy. 2021.
- [3] D. N. Jeong, "A study on the plans of a incident response for Eco-Friendly cars". Master's thesis, University of Seoul, Seoul, pp.47-50, 2019.
- [4] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu & X. Huang, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles", *Fire Technology*, Vol.56, No.4, pp.1361-1410, 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- [5] L. Dayan, Z. Guoqing, Z. Hui, Y. Zhichao, G. Yunji & J. Xiaohui, "Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire". *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol.10, pp.315-324, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2017.08.001>
- [6] E. P. Lee, "Analysis of Car Fire Cases Related to a Lithium Battery and Cause Investigation Technique", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol.33, No.2, pp.98-106, 2019.

김 형 식(Hyung-Sik Kim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 호서대학교 안전공학 전공 (공학석사)
- 2015년 2월 ~ 2018년 2월 : 호서대학교 안전공학(박사수료)
- 2016년 3월 ~ 2021년 12월 : 소방청 국립소방연구원 선임연구원
- 2021년 12월 ~ 현재 : 경찰청 치안정책연구소 연구관

<관심분야>

안전공학, 장비성능, 재난대응

이 수 호(Soo-Ho Lee)

[정회원]



- 2012년 2월 : 경북대학교 건축공학 전공(공학석사)
- 2016년 2월 : 경북대학교 건축공학 전공(공학박사)
- 2016년 3월 ~ 2018년 10월 : 소방청 중앙소방학교 책임연구원
- 2018년 10월 ~ 현재 : 소방청 국립소방연구원 연구사

<관심분야>

피난, 소방장비, 전략기획, 시설물 안전

김 태 동(Tae-Dong Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 경일대학교 금융증권학과(학사)
- 2022년 2월 : 한서대학교 항공시스템 공학(석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 국립소방연구원 연구원

<관심분야>

소방장비, 항공시스템, 딥러닝, 드론

최 아 영(A-Young Choi)

[정회원]



- 2011년 2월 : 국립금오공과대학교 고분자공학 전공(공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 소방청 국립소방연구원 선임연구원

<관심분야>

소방장비, 소방안전, 재난대응, 유해물질 분석