

리튬 이온 배터리 화재 대응 우선순위의 데이터 기반 분석 및 교육모델 개발

김용주, 박호현

To cite this article : 김용주, 박호현 (2026) 리튬 이온 배터리 화재 대응 우선순위의 데이터 기반 분석 및 교육모델 개발, 한국재난정보학회논문집, 22:1, 321-332

① earticle에서 제공하는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 학술교육원은 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다.

② earticle에서 제공하는 콘텐츠를 무단 복제, 전송, 배포, 기타 저작권법에 위반되는 방법으로 이용할 경우, 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

www.earticle.net

리튬 이온 배터리 화재 대응 우선순위의 데이터 기반 분석 및 교육모델 개발

Data-Driven Analysis of Response Priorities and Educational Model Development for Lithium-Ion Battery Fires

김용주¹ · 박호현^{2*}Yong-Joo Kim¹, Ho-Hyun Park^{2*}¹Graduate Student, Department of ICT Convergence Safety, The Graduate School of Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea²Professor, Department of ICT Convergence Safety, The Graduate School of Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea

*Corresponding author: Ho-Hyun Park, hohyun@cau.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: This study aims to analyze firefighters' risk perception and quantify response priorities for lithium-ion battery fires to improve field response quality and Standard Operating Procedures (SOPs). **Method:** An empirical survey was conducted with 102 active firefighters using convenience sampling. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the relative weights of core actions including danger zone control, battery cooling, power cut-off, and site information check, with logical consistency verified ($CR = 0.010$). **Result:** The analysis revealed a significant gap between high risk awareness ($M = 3.58$) and relatively low confidence in ICT-based data utilization ($M = 2.74$) and environmental pollution control ($M = 2.48$). AHP results established the response hierarchy with 'Danger Zone Control' (32.3%) as the top priority, followed by 'Battery Cooling' (27.2%), 'Power Cut-off' (26.6%), and 'Site Info Check' (13.9%). **Conclusion:** Based on these findings, a 3-module education program and a practical "1-2-3 Response Card" are proposed. This study suggests a standardized 4-step SOP including Danger Zone Control, Battery Cooling, Power Cut-off, and Site Info Check to maximize firefighter safety and minimize secondary disaster damage.

Keywords: Lithium-ion Battery, Firefighter Perception, AHP, Response Priority, Electric Vehicle Fire

요약

연구목적: 본 연구는 리튬이온 배터리 화재의 특수 위험성에 대응하여 소방관의 인식을 분석하고, 설문 조사 결과를 기반으로 초기 대응 우선순위를 정량화하여 교육모델 개선 방향을 제시하는 데 목적이 있다. **연구방법:** 현직 소방공무원 102명을 대상으로 설문조사를 실시하였으며, 계층분석법(AHP)을 적용하여 위험구역 통제, 배터리 냉각, 전원 차단, 현장 정보 확인 등 핵심 대응 요소의 상대적 가중치를 산출하고 논리적 타당성을 검증하였다($CR = 0.010$). **연구결과:** 분석 결과, 배터리 화재의 위험 인식($M = 3.58$)은 높으나 ICT 정보 활용 능력($M = 2.74$)과 오염물질 통제 역량($M = 2.48$)은 상대적으로 낮은 '인식-역량 격차'가 확인되었다. AHP 결과, 초기 5분 대응 우선순위는 위험구역 통제(32.3%)가 최우선이었으며, 배터리 냉각(27.2%), 전원 차단(26.6%), 현장 정보 확인(13.9%) 순으로 나타났다. **결론:** 분석 결과를 토대로 3단계 모듈형 교육 프로그램과 현장용 '1-2-3 대응카드'를 제안하였다. 이는 향후 SOP를 '위험구역 통제 → 배터리 냉각 → 전원 차단 → 현장정보 확인' 체계로 표준화하여 소방대원의 안전 확보와 과학적 재난 대응 체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어: 리튬 이온 배터리, 소방관 인식, 계층분석법, 대응 우선순위, 전기차 화재

Received | 26 January, 2026

Revised | 9 March, 2026

Accepted | 13 March, 2026



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

최근 전 지구적인 탄소중립 정책에 따라 전기차(EV), 에너지저장장치(ESS), 그리고 개인용 모빌리티 보급이 급격히 확대되면서 리튬 이온 배터리는 현대 사회의 핵심 에너지원으로 자리 잡았다(Park et al., 2024). 우리나라의 경우 2023년 기준 전기차 등록 대수가 54만 대를 넘어섰으며, 관련 법령에 따라 공동주택 내 충전 시설 설치 의무화 비율이 지속적으로 확대되고 있는 추세이다(Im, 2024). 그러나 이러한 양적 성장과 비례하여 리튬 이온 배터리 화재 사고 역시 빈번하게 발생하고 있으며, 2017년 1건에 불과했던 국내 전기차 화재가 2024년에는 44건으로 증가하는 등 사회적 안전을 위협하는 새로운 재난 요인으로 급부상하고 있다(Im, 2024). 특히 2024년 8월 인천 청라 아파트 지하주차장에서 발생한 전기차 화재는 대규모 단지의 주거 기능을 일시적으로 마비시킬 만큼 막대한 사회적 파급력을 보여주었으며, 2025년 9월 국가정보자원관리원 화재 사고는 UPS 시스템의 배터리 폭발로 인해 국가 중요 데이터와 전산 시스템에 심각한 영향을 미치며 배터리 화재가 국가 핵심 기반 시설까지 위협할 수 있음을 실질적으로 증명하였다. 이는 공동주택이라는 ‘밀집 주거 공간’과 국가 핵심 시설이라는 ‘사회적 기반 시설’에 대한 화재 대응 전략이 대상물의 건축적 특성과 피해 파급력에 따라 다변화되어야 함을 시사하며, 배터리 화재가 단순히 진압의 차원을 넘어 국가적 재난 관리 체계의 관점에서 세밀하게 다루어져야 할 필요성을 뒷받침한다. 화재 발생 시 방출되는 불산(HF) 등 치명적인 유독가스와 농연은 다수 사상자 발생 위험을 높이며, 배터리 내부의 분리막 손상으로 인한 폭발적 연소 확대는 소방 활동에 심각한 장애를 초래한다(Oh et al., 2019). 특히 인구의 60% 이상이 공동주택에 거주하는 국내 주거 환경 특성상 지하 주차장에서의 화재는 협소한 공간, 배연의 어려움, 진입로 제한 등의 제약 조건으로 인해 소방대원의 방향 감각 상실 및 고립 가능성을 극대화한다. 또한 화염 진입 이후에도 배터리 내부에 남아 있는 잔존 에너지(Stranded Energy)로 인해 재발화가 빈번하다(Lee, 2019). 그러나 현재까지 밀폐된 지하 공간에서 ‘냉각 소화’와 최신 질식 소화포 등을 활용한 ‘질식 소화’(Ha et al., 2023) 중 어떤 방법이 더 효율적인지에 대한 실증적 합의나 구체적인 매뉴얼은 부재한 실정이다. 현장에서 화재를 직접 마주하는 소방대원들의 인식 역시 이러한 위험성을 반영하고 있다. 선행 연구에 따르면 소방대원들은 지하 주차장 전기차 화재에 대해 매우 높은 위험 인식(4.00점)을 가지고 있으나, 이에 반해 실제 대응 방법의 효과성이나 현장 활동에 대한 자신감(3.36점)은 보통 수준에 머물러 있다(Im, 2024). 이러한 인식 격차는 리튬 이온 배터리 화재 대응과 관련된 체계적인 교육 시간이 연간 3시간 미만으로 극히 제한적이며, 현장에서 사용되는 재난현장 표준작전절차(SOP)에 배터리 화재의 특성을 반영한 전문적인 대응 전략이 구체화되지 않았기 때문에 발생한다. 특히 화재 초기 5분 이내의 신속한 의사결정이 대원의 안전과 직결됨에도 불구하고, 현장 정보와 지휘 체계 간의 데이터 연계가 표준화되지 않아 대원별, 부서별로 판단의 편차가 발생하는 구조적 한계가 존재한다.

본 연구는 소방대원의 안전 확보와 화재 피해 최소화를 위해 현직 소방공무원을 대상으로 화재 초기 대응 행동의 인식을 실증적으로 분석하고자 한다. 특히 계층분석법(AHP)을 적용하여 ‘배터리 냉각’, ‘전원 차단’, ‘현장 정보 확인’, ‘위험 구역 통제’ 등 핵심 대응 요소 간의 상대적 가중치를 산출하고, 이를 바탕으로 정량적 우선순위를 확립한다. 또한 배터리 관리 시스템(BMS)와 충전 프로토콜(OCPP) 등 ICT 정보를 활용한 실시간 관계 연계 방안을 검토하여 화재 발생 초기 골든타임 내에 정확한 판단을 내릴 수 있는 기술적 근거를 제시하고자 한다. 분석 결과를 토대로 제안된 현장용 ‘1-2-3 대응 카드’와 ‘3단계 모듈형 소방 교육 모형’은 소방관의 대응 자신감을 향상시키고, 기존의 직관적 대응에서 탈피한 과학적 재난 대응 체계 구축에 실질적으로 기여할 것이다. 이는 실화 실험 없이도 표준화된 절차 학습을 지원하여 교육 효율성을 극대화하며, 향후 소방청의 재난현장 표준작전절차(SOP)의 고도화 및 지하 공간 안전 기준 수립을 위한 핵심적인 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

Table 1은 2023년 1월부터 2025년 10월까지 서울특별시에서 발생한 리튬 이온 배터리 관련 화재를 연도별·기기유형별로 정리한 표이다. 리튬 이온 배터리 화재는 2023년 68건에서 2024년 153건으로 약 125%의 급격한 증가세를 보였으며, 2025년 10월 기준 이미 전년도와 동일한 발생 건수를 기록하는 등 그 위험성이 심화되고 있다. 본 통계의 분석 범위는 시민 생활과 밀접한 배터리 기반 이동형 기기(PM, 전기차, 전기이륜차) 및 휴대용 제품군으로 한정하였다. 본 연구의 서론에서 언급한 대규모 에너지저장장치(ESS) 화재 사례는 리튬 이온 배터리 열 폭주의 치명적인 위험성을 단적으로 보여주는 지표이지만, 본 통계의 실무적 분석 범위(Table 1)는 소방대원이 일상적인 현장에서 가장 빈번하게 직면하며 초기 대응 전략 수립이 시급한 ‘배터리 기반 이동형 기기’ 및 ‘생활 밀착형 기기’의 통계에 국한하였다. 대형 고정 시설물인 ESS는 별도의 전문 대응 체계를 갖춘 산업용 설비임을 고려하여, 본 통계 분석 및 교육 모델 개발의 범위에서는 분리하여 고찰하였다(Park et al., 2024).

Table 1. Comprehensive fire status of lithium-ion battery related incidents in Seoul (2023. 1 - 2025. 10)

구분	항목 / 연도	화재건수(건)	인명피해(명)	재산피해(천원)
연도별 추이 (리튬 이온 배터리 화재)	2023년	68	10	468,783
	2024년	153	10	633,550
	~ 2025년 10월	153	29	481,798
	소계(A)	374	49	1,584,131
기기 종류별 (배터리 기반 이동형 기기)	개인형 이동장치(PM)	96	6	411,329
	전기 이륜자동차	20	3	14,399
	전기차	19	0	269,878
	소계(B)	135	9	695,606

리튬 이온 배터리 화재 현황

리튬 이온 배터리 화재의 열역학적 성상 및 위험성

리튬 이온 배터리(Lithium-ion Battery)는 고에너지 밀도와 우수한 충전 성능을 바탕으로 다양한 산업 분야에 확산되었으나, 물리적 충격이나 전기적 과충전 및 제조 결함 시 발생하는 열폭주(Thermal Runaway) 현상은 기존 화재와는 다른 독특한 성상을 보인다(Park et al., 2018). 열폭주 단계에 진입하면 배터리 내부의 전해액 분해와 금속 산화가 격렬하게 진행되며 수소(H), 일산화탄소(CO), 불화수소(HF) 등 폭발성과 독성이 강한 가연성 오프 가스(Off-gas)가 대량 방출된다(Kim et al., 2019). 이러한 가스는 밀폐된 공간에서 폭발성 분위기를 조성할 뿐만 아니라, 소방대원의 눈과 점막을 자극하고 시야를 저하시켜 인명 검색 및 진입 경로 확보에 치명적인 장애를 초래한다. 또한, 표면 화염을 진압한 이후에도 모듈과 팩 단위로 밀집된 전지 내부에 잔존 에너지(Stranded Energy)가 남아 연쇄적인 열 전이를 일으키며 재발화가 빈번하게 발생하는 특성을 지닌다.

지하주차장 및 밀폐 공간의 화재 특수성

지하주차장은 건축 구조상 개방구가 적고 배연 설비의 가동 효율이 낮아 화재 발생 시 농연과 열기가 급격히 축적되는 가혹한 환경이다(Lim, 2024). 특히 전기차 화재는 가시거리(130초 이내), 온도(300초), 산소 농도(500초 이내) 등이 매우 짧은 시간 내에 인명 안전 한계치에 도달하므로 화재 발생 초기 5분 이내의 의사결정 품질이 대원의 안전과 피해 규모를 좌우한다

(Im, 2024). 지하 공간의 특성상 소방차량의 직접 진입이 어렵고 무전 통신 장애가 발생할 가능성이 높아, 소방대원들은 건축물 내 소방시설을 적극 활용하거나 장거리 호스 연장을 통해 화점까지 접근해야 하는 물리적 제약을 안고 있다. 따라서 지하 주차장 내 리튬 이온 배터리 화재 대응은 단순 진압을 넘어 공간적 특성에 적합한 안전 구역 설정과 체계적인 배연 관리가 필수적으로 병행되어야 한다.

소방대원의 인식 구조 및 현장 대응 역량

재난 현장에서 활동하는 소방대원들은 교통사고, 건물 붕괴 등 극한 환경에 반복 노출되며 높은 수준의 심리적 압박과 스트레스를 경험한다. 선행 연구에 따르면 지하주차장 전기차 화재에 대한 소방대원의 위험 인식은 평균 4.00점으로 매우 높은 반면, 대응 효과 인식(3.12점)과 현장 활동 자신감(3.36점)은 상대적으로 낮은 수준에 머물러 있다(Im, 2024). 이러한 인식 간의 간극은 리튬 이온 배터리 화재 대응 교육이 연간 3시간 미만으로 극히 제한적이며, 실무 중심의 체계적인 훈련 기회가 부족한 현 실정을 반영한다. 특히 소방대원의 자신감이 높을수록 대응 방법의 효과를 긍정적으로 평가하고 위험 인식을 관리하는 경향이 있으므로, 정밀한 교육 수요 파악을 통한 대원의 자기효능감 증진이 시급하다.

재난현장 표준작전절차(SOP)와 ICT 연계 대응

현재 소방청의 재난현장 표준작전절차(SOP)에는 지하층 화재대응절차(SOP 217) 및 전기사고 대응절차 등이 명시되어 있으나, 리튬 이온 배터리 고유의 위험성과 ICT 기반 정보 활용을 통합한 세부 프로토콜은 미비한 실정이다. 실제 화재 현장에서는 배터리 관리 시스템(BMS)이나 충전 프로토콜(OCPP)을 통해 생성되는 온도 상승 및 전압 편차와 같은 유의미한 전조 신호를 실시간으로 공유받거나 해석하는 데 한계가 있다. 관제-지휘-현장 간의 데이터 흐름 표준화는 초기 판단의 질을 좌우하며, 열화상 카메라 정보를 통한 Hotspot 판독 등 과학적 장비의 연계는 의사결정 리드타임을 단축하는 핵심 자원이다. 따라서 기존 SOP의 고도화를 위해서는 정량화된 우선순위와 ICT 기반의 체크리스트가 체계적으로 보완되어야 한다.

의사결정 지원 도구로서의 계층분석법(AHP)

계층분석법(AHP, Analytic Hierarchy Process)은 다수의 평가 기준이 존재하는 복잡한 의사결정 문제를 계층화하여 각 요소 간의 상대적 가중치를 산출하는 대표적인 다기준 의사결정 기법이다. 정량적인 분석이 곤란한 분야에서 전문가나 실무자의 정성적 지식을 활용하여 논리적 일관성을 유지하면서 중요도를 산출할 수 있다는 점에서 신뢰성이 높다. 본 연구에서는 리튬 이온 배터리 화재 대응의 핵심 요소인 배터리 냉각, 전원 차단, 위험구역 통제, 현장 정보 확인 등의 상대적 가중치를 도출하기 위해 AHP를 활용하며, 일관성 비율(CR) 검증을 통해 응답 데이터의 타당성을 확보함으로써 현장 중심의 정량적 가이드라인을 수립하고자 한다.

연구 방법

연구 설계 및 절차

본 연구는 리튬 이온 배터리 화재 시 소방대원의 인식 수준을 정량화하고, 초기 대응 행동의 객관적 우선순위를 도출하기 위해 실증적 설문조사와 계층분석법(AHP, Analytic Hierarchy Process)을 결합한 혼합 연구 설계(Mixed Method Design)

를 채택하였다. 연구는 기초 자료 조사 및 문제 제기, 설문 도구 설계 및 전문가 타당성 검증, 현직 소방공무원 대상 자료 수집, 데이터 분석 및 우선순위 도출, 최종 교육 모형 제안의 5단계 절차로 수행되었다.

연구 대상 및 자료 수집

본 연구의 모집단은 리튬 이온 배터리 화재 현장에서 직접 의사결정과 진압 활동에 참여하는 현직 소방공무원으로 설정하였다. 표본에는 화재진압, 화재조사, 구조, 구급, 행정 등 다양한 직무 분야와 경력을 가진 대원 102명을 포함하였으며, 표집은 편의표집(Convenience Sampling) 방식으로 이루어졌다. 자료는 익명성과 자발적 참여를 보장하는 온라인 모바일 설문을 통해 수집하였고, 수집된 응답은 모두 무기명으로 처리하여 연구 목적 외에는 사용하지 않았다.

측정 도구의 구성

연구에 사용된 측정 도구는 관련 선행 연구를 기초로 본 연구의 목적에 맞게 수정 및 보완된 구조화된 설문지로, 총 6개 영역 30문항으로 구성되었다.

1) 배경 정보(Area A): 응답자의 성별, 연령, 직무, 근속연수 등 4개 항목을 통해 표본의 인구통계학적 특성을 파악한다. 2) 위험 인식(Area B): 리튬 이온 배터리의 열폭주 및 재발화 특성, 오프 가스의 유해성, 감전 위험 등에 대한 이해도를 5점 리커트 척도(Likert Scale)로 측정한다. 3) 효과 인식(Area C): ICT 기반 정보 장치(BMS, OCPP) 및 절연 장비 활용 등 초기 대응 기술의 유효성에 대한 인식을 파악한다. 4) 현장 대응 자신감(Area D): 초기 5분 내 우선순위 판단 능력 및 주요 장비 조작 능력 등 대원의 자기효능감을 측정한다. 5) ICT 및 현장 정보 이해(Area E): ICT 데이터 해석 및 실시간 정보를 활용한 위험성 평가 역량을 파악한다. 6) AHP 쌍대비교(Area F): 화재 초기 대응의 핵심 4요소인 ① 배터리 냉각, ② 전원 차단, ③ 위험구역 통제, ④ 현장 정보 확인 간의 상대적 중요도를 9점 척도로 평가하도록 설계하였다.

자료 분석 방법

본 연구의 데이터 분석은 통계 패키지 프로그램인 SPSS 27.0과 Microsoft Excel을 활용하여 수행되었다. 구체적인 분석 절차는 다음과 같다. 첫째, 소방공무원의 일반적 특성과 인식 수준을 파악하기 위해 빈도분석(Frequency Analysis)과 기술 통계(Descriptive Statistics)를 실시하였다. 둘째, 측정 도구의 내적 일관성을 검증하기 위해 Cronbach's α 계수를 산출하여 신뢰도를 평가하였다. 셋째, AHP 기법을 적용하여 초기 대응 행동 간의 상대적 가중치를 도출하였다. 각 응답자의 쌍대비교 행렬로부터 고유벡터(Eigenvector)를 산출하고 이를 기하평균(Geometric Mean) 방식으로 통합하였다(Jeong et al., 2024). 특히 분석 결과의 논리적 타당성을 확보하기 위해 일관성 비율(CR, Consistency Ratio)을 산출하였으며, $CR \leq 0.10$ 인 유효 응답 데이터를 선별하여 분석의 신뢰도를 확보하였다.

연구 결과

응답자의 일반적 특성

본 연구에서는 응답자들의 평가와 의사결정을 통해 리튬 이온 배터리 화재 대응의 중요도 및 우선순위 평가지표를 결정하기 위해 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석 방법을 사용하였다. 이를 위해 화재조사 및 화재진압 등 실무 경험을 보유한

현직 소방공무원 102명을 대상으로 설문조사를 수행하였으며, 회수된 설문지 102부 전량을 유효 표본으로 선정하여 최종 분석에 활용하였다.

응답자의 일반적 특성을 나타낸 Table 2의 분석 결과에 따르면, 성별 분포는 남성이 78명(76.5%), 여성이 24명(23.5%)으로 나타나 소방 조직의 인력 구성 특성상 남성 비율이 높게 나타났다. 연령대별로는 30대가 51명(50.0%)으로 가장 많았으며, 40대가 32명(31.4%), 50대 이상이 17명(16.7%), 20대가 2명(2.0%) 순으로 조사되었다. 이는 소방 조직 내에서 실무의 중추적인 역할을 담당하는 30, 40대 계층이 설문에 대다수 참여하였음을 의미하며, 따라서 본 연구 결과가 현장의 실질적인 의견을 충실히 반영하고 있다고 판단된다.

Table 2. General characteristics of the respondents

구분	항목	빈도(명)	비율(%)
성별	남성	78	76.5
	여성	24	23.5
연령	20대	2	2.0
	30대	51	50.0
	40대	32	31.4
	50대 이상	17	16.7
직무	화재조사	33	32.4
	화재진압	31	30.4
	행정	18	17.6
	구급	13	12.7
	구조	7	6.9
근속연수	0~5년	10	9.8
	6~10년	25	24.5
	11~15년	38	37.3
	16년 이상	29	28.4
합계		102	100.0

직무별 분포를 살펴보면 화재조사 업무 담당자가 33명(32.4%)으로 가장 높은 비율을 차지하였고, 화재진압 31명(30.4%), 행정 18명(17.6%), 구급 13명(12.7%), 구조 7명(6.9%) 순으로 나타났다. 근속연수는 11~15년이 38명(37.3%)으로 가장 많았고, 16년 이상 장기 근속자가 29명(28.4%)으로 뒤를 이었으며, 6~10년(24.5%), 0~5년(9.8%) 순으로 확인되어 현장 경험이 풍부한 전문가 집단의 인식이 연구 결과에 충실히 반영되었음을 알 수 있다.

측정 도구의 신뢰도 및 기술통계 분석

본 연구는 설문 문항의 내적 일관성을 검증하기 위해 Cronbach's α 계수를 산출하였다. 산출 과정은 다음과 같다. 우선, 각 요인별(위험 인식, ICT 이해, 대응 자신감, 효과 인식)로 구성된 다항목 척도 데이터를 수집한 후, 통계 프로그램(SPSS 27.0)을 활용하여 문항 간 평균 공분산과 분산의 비율을 분석하였다. 일반적으로 사회과학 연구에서 Cronbach's α 값이 0.6 이상이면 신뢰도가 수용할 만한 수준으로, 0.7 이상이면 높은 것으로 간주한다.

Table 3의 분석 결과에 따르면 ‘위험 인식(Risk Perception)’ 요인의 신뢰도 계수는 0.811, ‘ICT 및 현장 정보 이해(ICT Understanding)’ 요인은 0.853으로 매우 높은 신뢰도를 보였다. 이는 리튬 이온 배터리의 열폭주 위험성과 BMS(배터리 관리 시스템) 등 ICT 정보 활용에 대한 문항들이 일관되게 측정되었음을 의미한다. ‘대응 자신감(Self-Efficacy)’ 요인 또한 0.735로 양호한 신뢰도로 수용 가능한 수준으로 나타났다. 다만, ‘효과 인식’ 요인의 경우 0.517로 다소 낮게 나타났으나, 이는 해당 요인의 문항 수가 2개로 적고 탐색적 성격이 강한 문항으로 구성되었기 때문으로 판단되며, 연구의 전체적인 타당성을 저해하지는 않는 것으로 해석된다.

Table 3. Reliability analysis results of the measurement tools

요인명(Factors)	문항 번호	문항 수(건)	신뢰도 계수 (Cronbach's α)	비고
위험 인식(Risk Perception)	5, 6, 7, 8	4	0.811	신뢰도 높음
ICT 및 현장 정보 이해(ICT Understanding)	17, 18, 19, 20	4	0.853	신뢰도 매우 높음
대응 자신감(Self-Efficacy)	13, 14, 15, 16	4	0.735	신뢰도 양호
효과 인식(Effect Perception)	9, 10	2	0.517	신뢰도 낮은 수준

주요 변수의 기술통계 분석

본 연구에서는 리튬 이온 배터리 화재에 대한 소방관들의 인식 수준을 파악하기 위해 주요 변수인 위험 인식, 대응 자신감, ICT 및 현장 정보 이해도를 측정하였다. 각 문항은 5점 리커트 척도(1점: 전혀 그렇지 않다~5점: 매우 그렇다)로 구성되었으며, 이에 대한 기술통계 분석 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Descriptive statistics analysis of lithium-ion battery fire perception

구분	설문 항목	평균(M)	표준편차(SD)
위험 인식	열폭주와 재발화의 개념 이해	3.79	1.05
	오프 가스(가연성·유독성 가스) 위험성 이해	3.72	1.11
	배터리 잔류전압에 의한 감전 위험 인식	3.51	1.15
	EV/ESS 화재와 일반 화재의 차이 이해	3.29	1.30
소계	위험 인식 전체 평균	3.58	-
대응 자신감	화재 현장 전원 차단 수행 능력	3.46	1.06
	초기 5분 대응 우선순위 판단 능력	3.01	1.15
	열화상 카메라 활용 전조증상 파악	2.97	1.06
	오염 소화수 및 전해액 누출 통제	2.48	1.09
소계	대응 자신감 전체 평균	2.98	-
ICT 이해	열화상 카메라 활용 재발화 위험 판단	2.96	1.11
	BMS(셀 온도/전압) 정보 활용 능력	2.74	1.12
	관제실 경보(OCPP/BMS) 정보 활용	2.66	1.11
	잔존 전류 및 충전 상태 확인 능력	2.61	1.1
소계	ICT 이해 전체 평균	2.74	-

위험 인식: 높은 인지 수준과 학습 효과

첫째, ‘위험 인식’ 수준은 전체 평균 3.58점으로 3개 요인 중 가장 높게 나타났다. 세부적으로는 ‘열폭주와 재발화 개념 이해’($M=3.79, SD=1.05$)와 ‘오프 가스 위험성 이해’($M=3.72, SD=1.11$)가 상위권을 차지했다. 이는 최근 전기차 보급 확대와 함께 빈번해진 화재 사고 사례, 그리고 소방 조직 내에서 지속적으로 이루어진 이론 교육이 효과를 거두고 있음을 의미한다. 즉, 현장 대원들은 리튬 이온 배터리 화재가 일반 화재와 달리 물리적·화학적 위험하다는 사실은 충분히 ‘인지(Awareness)’하고 있는 단계로 판단된다.

대응 자신감: 환경적 대응 절차의 부재

둘째, 대응 자신감(Self-Efficacy)은 전체 평균 2.98점으로 위험 인식에 비해 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 특히 ‘화재 현장 전원 차단 수행’(3.46점)에 대한 자신감은 비교적 높았으나, ‘오염 소화수 및 전해액 누출 통제’(2.48점)에 대한 자신감은 가장 낮게 나타났다. 이는 환경적 2차 피해 방지에 대한 구체적인 대응 매뉴얼이나 훈련이 부족함을 방증한다.

ICT 이해: 기술적 활용 역량의 한계

셋째, ‘ICT 및 현장 정보 이해’ 수준은 전체 평균 2.74점으로 모든 요인 중 가장 낮게 분석되었다. ‘열화상 카메라를 활용한 재발화 판단’(2.96점)을 제외하고는, ‘BMS 정보 활용’(2.74점), ‘관제실 정보 활용’(2.66점), ‘잔존 전류 확인’(2.61점) 등 고도화된 ICT 정보를 현장에서 활용하는 능력은 3점(보통) 미만으로 나타났다. 이는 기술적 장비의 보급 부족 혹은 이를 해석할 수 있는 전문 교육의 부재에 기인한 것으로 해석된다.

종합하자면, 현재 소방관들은 리튬 이온 배터리 화재의 위험성은 명확히 인지하고 있으나(High Awareness), 이를 기술적으로 통제하거나 데이터를 기반으로 대응하는 실행 역량(Low Technical Readiness)에는 분명한 간극(Gap)이 존재한다. 특히 오염수 처리와 ICT 정보 활용 분야에서의 낮은 자신감은 단순한 이론 교육만으로는 해결하기 어려움을 시사한다. 따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 교육 모형은 단순 지식 전달을 넘어, ‘데이터(BMS, 열화상) 해석 역량 강화’와 ‘환경적 2차 피해 방지 실습’을 핵심 커리큘럼으로 구성해야 한다는 통계적 타당성을 확보하였다.

AHP(계층화 분석)를 통한 초기 대응 우선순위 도출

리튬 이온 배터리 화재 발생 시 ‘초기 5분(Golden Time)’ 내에 수행해야 할 핵심 대응 활동의 상대적 중요도를 도출하기 위해 AHP 분석 평가항목은 관련 선행연구 분석과 소방 전문가 그룹의 타당도 검증 결과를 바탕으로 도출되었다. 특히, 지하 주차장 전기차 화재 현장의 특수성을 반영하기 위해 전문가 패널 8인의 델파이 조사를 통해 타당도 지수(CVI) 0.83 이상으로 검증된(위험 인식, 효과 인식, 대응 자신감 및 임무 기준) 요인들을 평가 항목의 기초로 선정하였다(Im, 2024). 이러한 다단계 선정 과정을 통해 분석 모델의 내용 타당도를 확보하였다. 평가 항목은 선행 연구 및 델파이 조사를 통해 선정된 ① 배터리 냉각, ② 전원 차단, ③ 위험구역 통제, ④ 현장 정보 확인의 4가지 요인이다.

일관성 검증(Consistency Verification)

AHP 분석의 타당성을 확보하기 위해서는 응답의 논리적 모순 여부를 판단하는 일관성 비율(Consistency Ratio, CR) 검증이 선행되어야 한다. 일반적으로 CR 값이 0.1(10%) 이내일 때 판단의 합리성이 인정된다. 개별 응답자의 데이터를 분석한

결과, 복잡한 쌍대비교의 특성상 개인 차원에서는 일관성이 결여된 경우가 다수 발생하였다. 이에 본 연구에서는 Saaty (1980)가 제안한 방법에 따라 전체 응답자의 쌍대비교 값을 기하평균(Geometric Mean)하여 집단 의사결정 행렬(Group Decision Matrix)을 재구성하였다. 집단 행렬을 토대로 분석한 결과, 일관성 지수(CR)는 0.010으로 산출되었다. 이는 기준치인 0.1보다 현저히 낮은 수치로, 소방관 집단 전체의 의사결정 구조가 매우 강력한 논리적 일관성을 갖추고 있음을 의미하며, 도출된 가중치 결과의 신뢰성을 통계적으로 확보하였다.

초기 대응 활동 간 상대적 중요도 및 가중치 분석 결과

화재 초기 대응 활동의 우선순위를 규명하기 위해, 4가지 핵심 요인을 대상으로 계층화 분석(AHP)을 실시하였다. 각 평가 항목에 대한 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 통해 요인 간의 상대적 중요도(Weight)를 산출하였으며, 이를 바탕으로 현장 대응의 효율성을 높이기 위한 우선순위를 도출하였다. 분석 결과, 각 항목별 가중치와 이에 따른 순위는 다음과 같이 나타났다.

Table 5의 분석 결과, 응답의 일관성을 검증하기 위한 CR 값은 0.010으로 나타났으며, 이는 기준치인 0.10 이하로, 분석 결과의 논리적 일관성이 확보되었음을 의미한다. ‘위험구역 통제(Danger Zone Control)’가 가중치 0.323(32.3%)으로 리튬 이온 배터리 화재 시 가장 최우선으로 고려해야 할 활동으로 선정되었다. 이는 리튬 이온 배터리 화재 특유의 ‘폭발적 열폭주’와 ‘오프 가스 확산’ 위험으로 인해, 소방대원과 시민의 안전을 확보하는 물리적 통제가 무엇보다 선행되어야 한다는 현장의 인식이 반영된 결과로 해석된다. 2순위는 ‘배터리 냉각(Battery Cooling)’으로 가중치 0.272(27.2%)를 기록했다. 이는 열폭주 전이를 억제하기 위한 실질적이고 유일한 진압 방법인 지속적 냉각 주수의 중요성이 반영된 결과이다. 3순위는 ‘전원 차단(Power Cut-off)’으로 가중치 0.266(26.6%)으로 나타났다. 전기차 및 ESS 화재 시 발생할 수 있는 고전압 시스템에 의한 감전 위험을 배제하기 위한 절차로, 냉각 주수와 근소한 차이로 높게 평가되었다. 반면, ‘현장 정보 확인(Site Info Check)’은 가중치 0.139(13.9%)로 가장 낮은 우선순위를 보였다. 앞서 기술통계 분석에서 ICT 이해도가 낮게 나타난 것과 맥을 같이 하는 결과이다. 급박한 초기 5분의 상황에서 BMS 데이터나 관제실 정보를 확인하는 절차가 물리적 방어(통제, 냉각)보다 후

Table 5. Priorities of initial response activities derived from AHP analysis

우선순위(Rank)	평가 항목(Factors)	가중치(weight)	비중(%)
1	위험구역 통제(Danger Zone Control)	0.323	32.3%
2	배터리 냉각(Battery Cooling)	0.272	27.2%
3	전원 차단(Power Cut-off)	0.266	26.6%
4	현장 정보 확인(Site Info Check)	0.139	13.9%
검증	일관성 비율(Consistency Ratio, CR)	0.010	적합(CR < 0.1)

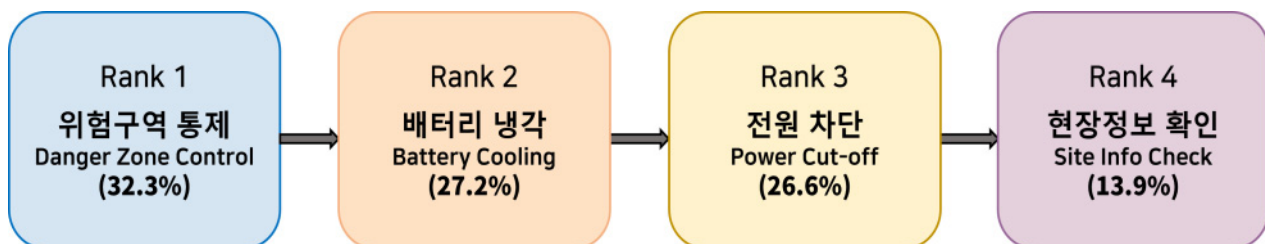


Fig. 1. Initial 5-minute response priority flow for lithium-ion battery fires

순위로 밀리는 현실적인 한계가 드러난 것이다. 이러한 AHP 분석을 통해 도출된 정량적 가중치를 바탕으로, 리튬 이온 배터리 화재 초기 5분 내에 수행해야 할 표준화된 대응 우선순위 흐름도를 도식화하면 다음 Fig. 1과 같다.

결론

본 연구는 급증하는 리튬 이온 배터리 화재에 대응하여 현직 소방공무원 102명의 인식을 정량적으로 분석하고, AHP 기법을 통해 초기 대응의 우선순위를 도출하였다. 분석 결과, 소방관들은 배터리 화재의 이론적 위험성에 대해서는 높은 이해도($M=3.58$)를 보였으나, ICT 기반 정보 활용 능력($M=2.74$)과 오염물질 통제 역량($M=2.48$) 등 실질적인 기술적 대응 자신감은 상대적으로 부족한 것으로 확인되었다. AHP를 통한 초기 5분 대응 우선순위 분석 결과는 ‘위험구역 통제(32.3%)’가 최우선 순위로 도출되었으며, 이어 배터리 냉각(27.2%), 전원 차단(26.6%), 현장 정보 확인(13.9%) 순으로 나타났다. 이는 폭발 및 유독가스 확산 위험이 높은 리튬 이온 배터리 화재의 특성상, ‘적극적인 진압’보다는 ‘선제적 안전 확보’가 우선되어야 한다는 실무 현장의 판단을 잘 반영한 결과이다. 반면, ICT 정보 활용이 최하위로 나타난 것은 정보의 낮은 가독성과 접근성에 기인한 것으로, 향후 과학적 재난 대응을 위해 해당 분야의 보완이 시급함을 시사한다.

본 연구의 결과를 바탕으로 리튬 이온 배터리 화재 대응 품질 향상을 위해 다음과 같은 교육모델과 현장 적용 방안을 제안한다.

첫째, 단계별 순환형 교육 모델의 구축 및 시행이다. 이는 도출된 AHP 우선순위와 소방대원의 인식 수준을 결합하여, 단순 지식 전달을 넘어 실무 역량을 단계적으로 강화하기 위한 순환형 교육 체계이다(Fig. 2). 상세 모델은 다음과 같다.

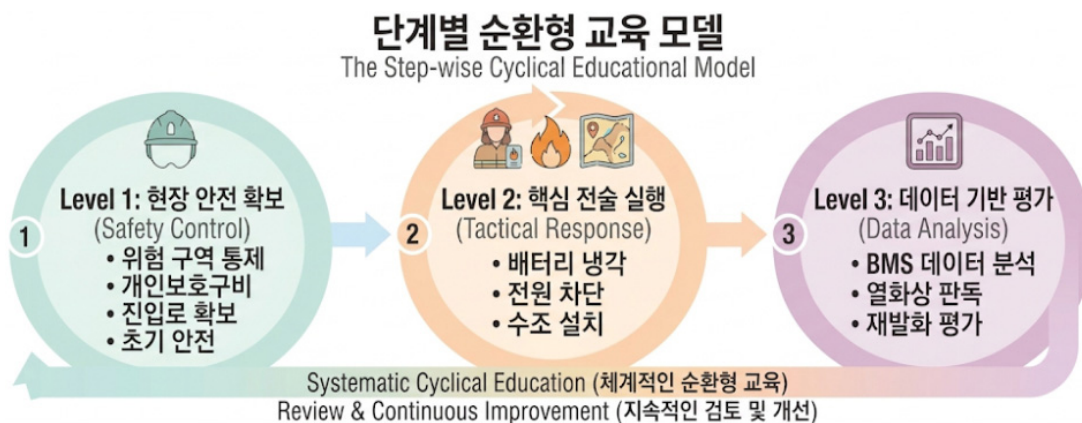


Fig. 2. The Step-wise cyclical educational model

1단계: 현장 안전 확보 모듈(Safety Control)은 AHP 분석 결과 1순위로 도출된 ‘위험구역 통제(32.3%)’ 역량 강화를 목표로 한다. 리튬 이온 배터리의 열폭주 성상 이해와 PPE 착용 기준, 초기 진입 판단력을 배양하는 기초 단계이다.

2단계: 핵심 전술 대응 모듈(Tactical Response)은 ‘배터리 냉각(27.2%)’ 및 ‘전원 차단(26.6%)’ 활동을 중심으로 실물 화재 진압 전술과 ‘1-2-3 대응 카드’ 활용 능력을 배양한다.

3단계: 데이터 분석 및 평가 모듈(Data Analysis)은 대원들이 가장 낮은 자신감을 보였던 ‘현장 정보 확인(13.9%)’ 역량과

낮은 ICT 이해도($M=2.74$)를 보완하기 위한 전문 단계이다. 열화상 카메라 정보를 활용한 재발화 위험 판독 및 BMS 데이터 해석을 통한 과학적 위험 평가 역량을 강화하며, ‘오염 소화수 및 전해액 누출 통제’를 별도 교육하여 환경적 2차 피해 방지 역량을 고도화한다.

둘째, 현장 대응 매뉴얼(SOP)의 개정이다. 본 연구에서 도출된 정량적 데이터를 근거로 Fig. 1과 같이 화재 초기 5분 내 대응 단계를 ① 위험구역 통제 → ② 배터리 냉각 → ③ 전원 차단 → ④ 현장 정보 확인(ICT 기반 위험평가) 순으로 표준화할 것을 제안한다. 또한, 현장에서 직관적으로 활용할 수 있도록 Fig. 3의 ‘1-2-3 대응 카드’를 보급해 긴박한 상황에서 의사결정 리드타임을 단축할 필요가 있다. 이를 위해 Fig. 1의 Rank 2와 Rank 3를 통합하여 하나의 Step 2로 재구성하였다.

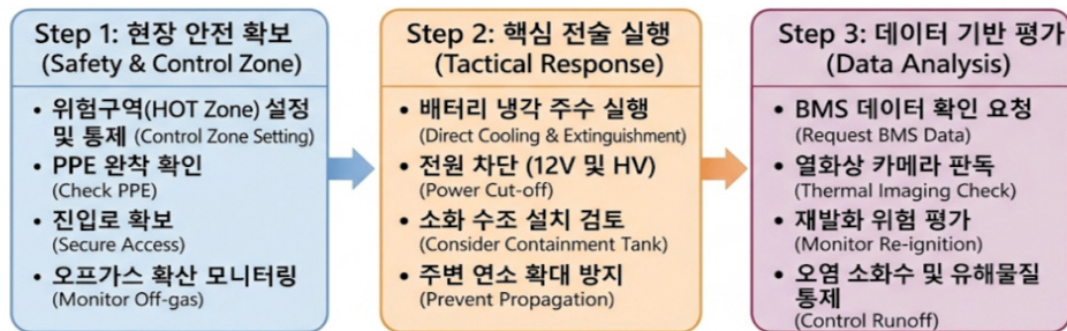


Fig. 3. '1-2-3 Response card' for battery fires

본 연구는 리튬 이온 배터리 화재라는 새로운 사회적 재난에 대응하기 위해 현직 소방관의 인식을 실증적으로 분석하고, 과학적 의사결정의 우선순위를 정량화하였다는 점에서 의의가 크며, 결론에서 제안한 단계별 순환 교육 프로그램과 ‘1-2-3 대응 카드’가 실제 현장에 적용된다면, 소방대원의 안전 확보는 물론 초기 대응의 효율성을 극대화하여 인명 및 재산 피해를 최소화하는 데 크게 기여할 것으로 기대된다. 다만 후속 연구에서는 효과 인식 요인의 신뢰도를 보다 높이기 위해 관련 문항을 보완·확장할 필요가 있으며, 장비 유형 및 전술별 실제 화재 진압 효과를 반영한 확인적 요인분석과 구조모형 검증을 통해 측정도구의 구조적 타당성을 더욱 정교하게 재검증할 필요가 있다.

References

- [1] Ha, T.-W., Park, P.-K. (2023). “The study on next-generation fire blanket for electric vehicle fires.” *Korean Journal of Hazardous Materials*, Vol. 11, No. 1, pp. 45-51.
- [2] Im, S. (2024). “Analysis of the current status, perception, and confidence of firefighters in responding to electric vehicle fires in underground parking lots.” *The Korean Journal of Emergency Medical Services*, Vol. 28, No. 3, pp. 135-151.
- [3] Jeong, W. S., Pyun, Y. B., Yun, H. S., Lee, J. J. (2024). “Research on vulnerability assessment indicators and weights for ship accident using AHP analysis.” *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 20, No. 3, pp. 609-619.
- [4] Kim, S.-K., Choi, S.-G., Jin, S.-Y., Bang, S.-S. (2019). “An experimental study on fire risks due to overcharge and external heat of ESS lithium battery.” *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 59-69.

- [5] Lee, E.-P. (2019). "Analysis of car fire cases related to a lithium battery and cause investigation technique." *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 2, pp. 98-106.
- [6] Lim, O.K. (2024). "Fire risk mitigation strategies for electric and hydrogen vehicle car parks." *Fire Science and Engineering*, Vol. 38, No. 2, pp. 46-55.
- [7] Oh, E.-Y., Min, D.S., Han, J.Y., Jung, S., Kang, T.-S. (2019). "Consequence analysis of toxic gases generated by fire of lithium ion batteries in electric vehicles." *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 23, No. 1, pp. 54-61.
- [8] Park, K.-M., Kim, J.-H., Park, J.-Y., Bang, S.-B. (2018). "A study on the fire risk of ESS through fire status and field investigation." *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 6, pp. 91-99.
- [9] Park, N.-K., Ham, S.-H. (2024). "A study of institutional improvements for responding to electric vehicle fires: Focusing on the case of Seoul." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 20, No. 1, pp. 32-39.
- [10] Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, US.