

친환경 차로 각광 받는

전기차의 미래 안전 대책 토론회

전기차 화재 원인 분석 및 해결 방안 모색

2024.09.05 (목)

서울특별시의회 제2대회의실
(서소문별관 2동 2층)

주최



서울특별시의회
Seoul Metropolitan Council

주관



서울특별시의회 교통위원회 | 국민의힘 윤영희 의원 | ^{민생}민주당 정준호 의원

현장속으로 시민결연

친환경차로 각광받는

전기차의 미래 안전 대책 토론회

전기차 화재 원인 분석 및 해결 방안 모색

친환경차로 각광받는 전기차의 미래, 안전 대책 토론회

발제문

배터리 열폭주 원리 및 안전

응용동역학 및 지능형 수명예지 연구실
한양대학교 기계공학부 교수

오기용

서울특별시 시의회 토론회
2024. 09. 05.

배터리 열폭주 원리 및 안전



오기용 교수
응용동역학 및 지능형 수명예지 연구실
기계공학부, 한양대학교

HANYANG UNIVERSITY

Contents



- 1 배경 및 필요성
- 2 열폭주란?
- 3 열폭주 완화 관련 연구
- 4 결론

배경 및 필요성

리튬이온 배터리 화재 사고 증가



에너지저장시스템 화재
미국, 샌프란시스코, 2022
@KTVU FOX2





주차된 전기 자동차 화재
상하이, 중국, 2019
@KTVU FOX2



전기 스쿠터 화재
영국, 런던, 2023
@London Fire Brigade



전기 오토바이 주행 중 화재
간저우, 중국, 2018
@CGTN

아리셀 배터리 공장 화재, 31명 사망
연합뉴스 2024.06.24.



대치역 배터리 화재, 1시간 폐쇄
연합뉴스 2024.07.01.



우도 전기 오토바이 화재, 37대 전소
MBC News 2024.07.02.

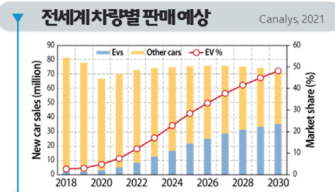


배터리 화재의 근본 원인은 배터리 열폭주 현상

배경 및 필요성

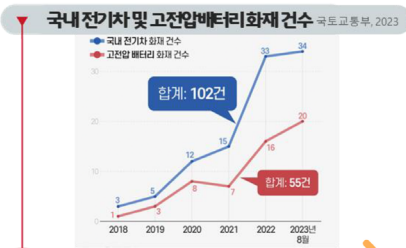
전기차 포비아 확산

전세계차량별 판매 예상



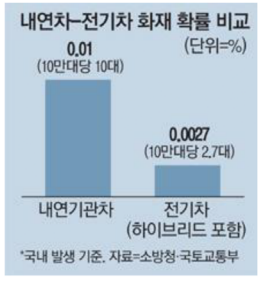
Canalys, 2021

국내 전기차 및 고전압배터리 화재 건수



국토교통부, 2023

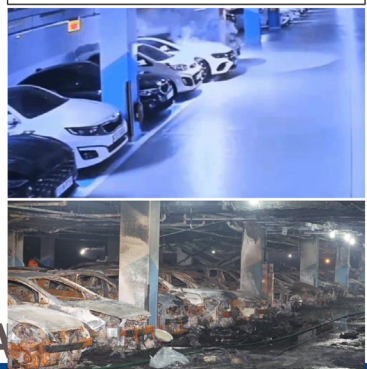
내연차-전기차 화재 확률 비교



(단위=%)

전기차의 급속한 보급 및 증가

인천 청라동 아파트 지하주차장 전기차 화재 사고
연합뉴스 2024.08.01.



전기차 화재 사고 증가

화재 피해액 비교

연도	내연기관차		전기차	
	사고	평균 피해액	사고	평균 피해액
2020년	3,761	6,978	11	32,795
2021년	3,639	6,829	24	36,587
2022년	3,782	17,024	43	21,241
2023년	3,816	8,280	72	20,333
평균	-	9,778	-	27,739 (약 3배)

화재 시 소요 소방력 비교

내연기관차	vs.	전기차
1 시간	소요시간	8 배 → 8 시간
2~3 명	소요인력	2.5 배 → 7 명
1 TON	필요 소화수	110 배 → 110 TON
적음	재발화 위험	22시간 후에도 재발화 → 높음

1 배경 및 필요성



해외 전기차 화재 및 리콜 사례

충돌시험 3주 후 볼트 화재 발생, 안전 조사 촉발
(Volt fire 3 weeks after crash prompts safety probe)
CNN 2011.11.11.

미국 도로교통안전국(NHTSA)에 의해 수행된 충돌시험



@ NHTSA

충돌시험 후 주차된 차량에서 발생한 화재사고



쉐보레 볼트 EV 화재에 대한 모든 것
(Everything we know about the Chevy Bolt EV fires)
electrek 2021.7.28.

Model 2020		Model 2019		Model 2018		Model 2017	
Los Angeles, CA	2021.08.16	Miami, FL	2020.06.29	Belmont, MA	2019.03.17	Kiev, Ukraine	2019.09.20
Chandler, AZ	2021.07.25	Vienna, VA	2020.07.04	Tracy, CA	2020.08.05	Maplecrest, NY	2020.06.25
Glen Elyn, IL	2021.07.25	Port St Lucie, FL	2020.10.06	Ashburn, VA	2021.03.01	Temecula, California	2020.06.30
Bound Brook, NJ	2021.07.02	Jacksonville, FL	2020.10.16	Therford, VT	2021.07.01	Langenfeld, Germany	2020.11.01
Monroe, NJ	2020.10.21						

2020년 11월 리콜

- 배터리의 소프트웨어 업데이트를 통해 배터리 충전량을 90%로 제한

2021년 5월 리콜

- 특정 주행 패턴을 가진 차량의 배터리 모듈 교체
- 및 추가적인 소프트웨어 업데이트

2021년 8월 리콜 및 생산 중단

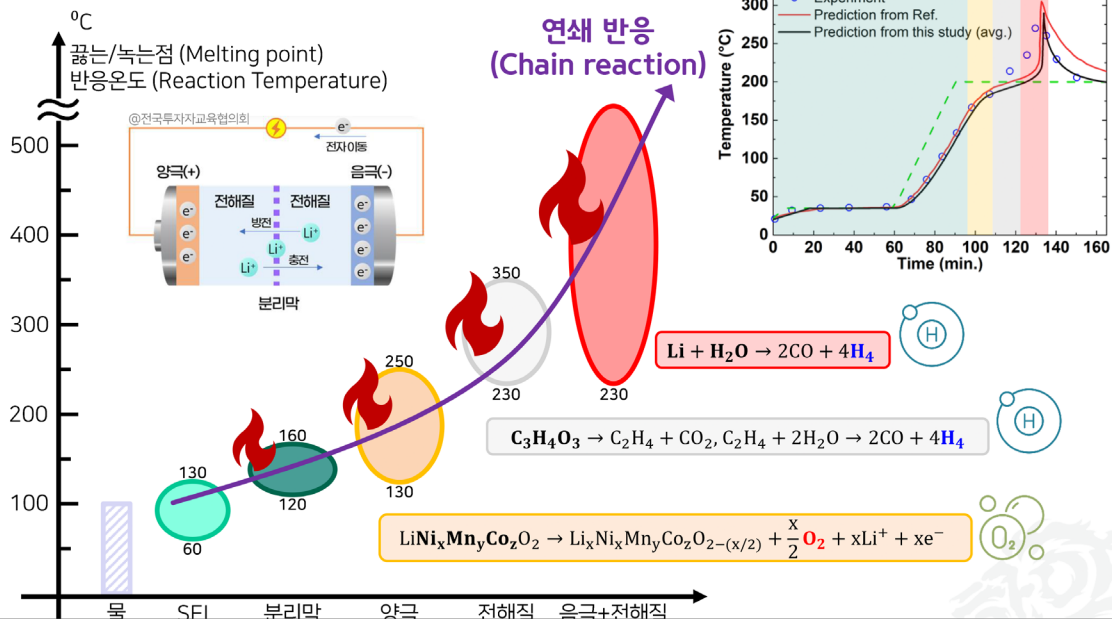
- 2017-2022년형 쉐보레 볼트 전세를 대상으로 리콜
- (생산 중인 모든 배터리 모듈은 교체)

전기차 포비아를 확산시키는 열폭주는 무엇인가?

2 열폭주란?



리튬 이온 배터리의 열폭주 현상



열폭주는 가연성 물질로 구성된 배터리 요소의 연쇄적 연소에 의해 발생

2 열폭주란?

↗ 연쇄반응 기반의 열폭주 에너지
HYU
@ 한국전기연구원 차세대전지연구센터

✓ 에너지밀도

다이너마이트(재료)	2,083 Wh/kg (7,500 J/g)
TNT(재료)	1,162 Wh/kg (4,184 J/g)
수류탄 (K413)	385 Wh/kg (1,386 J/g)
리튬이온전지	290 Wh/kg (1,044 J/g) 수류탄 (K413)의 75.3%
납축전지	30 Wh/kg (108 J/g)

| 7

2 열폭주란?

↗ 열폭주 원인
HYU

④ 기계적 남용 (mechanical abuse)

@Feng, Xuning, et al. Energy Storage Materials, 2018

④ 기계적 남용 (mechanical abuse)

천공 / 충격 / 압축 / 굽힘

@Huang, Shan, et al. Journal of The Electrochemical Society, 2021

One electrode plate

Stage 1

- *Cathode in short with Cu & Anode
- *High resistance of cathode
- *Low ISC current
- *Slow heat generation
- *Slow local temperature rise

Stage 2

- *Al foil in short with Cu & Anode
- *Low resistance of Al & good contact
- *High ISC current
- *Rapid local heat generation
- *Rapid local temperature rise

Stage 3

- *Al foil ruptured
- *High contact resistance of Al & nail
- *Low ISC current
- *Slow heat generation
- *Temperature drops due to heat loss

2 열폭주란?

HYU

➔ 열폭주 원인

@Feng, Xuning, et al. Energy Storage Materials, 2018

✓ 전기적 남용 (electrical abuse)

과충전 / 과방전 / 단락

@Ren, Dongsheng, et al. Journal of power sources, 2017

SOC 0~1.2 SOC 1.2~1.4 SOC 1.4~1.6 SOC 1.6~

2 열폭주란?

HYU

➔ 열폭주 원인

@Feng, Xuning, et al. Energy Storage Materials, 2018

✓ 열적 남용 (thermal abuse)

고온 노출 / 자체 발열

@Ren, Dongsheng, et al. Energy Storage Materials, 2021

Stage I Stage II Stage III

자기발열 분리막 수축 및 내부 단락 양극 및 음극의 화학반응

2 열폭주란?

➔ 열폭주 전파

열폭주 제어 난해

화재

열폭주 정지 가능

가열

남용

연기 / 가스 발생

열폭주는 연쇄 반응(chain reaction) 발생 이후 제어 난해

2 열폭주란?

➔ 열폭주 전파

EV
(Allegro microsystems)

Battery Pack
(Chevy Spark EV)

Module
(NISSAN 7)

Cell
(A123)

재발화 재발화 재발화

모듈 간 재발화 지연 모듈 간 재발화 지연

④국립소방연구원

| 12

2 열폭주란?



@국립소방연구원

전기차 화재 특성

특정 셀에서 발생 (충전)

- 충전 중 배터리팩에서 화재가 발생하는 경우에는 대부분 셀 하나에서 열폭주가 시작
- ESS화재도 동일한 경향



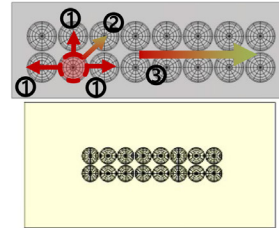
@내손안에서올



@SBSNews

수평화염

- 높은 압력에 의한 가연성 가스 분출과 함께 화염이 수평으로 전파되는 특성



폭발위험

- 가연성 가스가 다량 발생되며 경우에 따라 폭발 발생

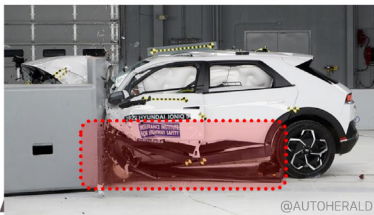
@화재보험협회



13

복수 셀에서 발생 (충돌)

- 충돌의 경우 배터리팩 외함의 손상으로 복수의 셀에서 열폭주가 발생되고 이로 인해 급속도로 화재가 발생



@AUTOHERALD

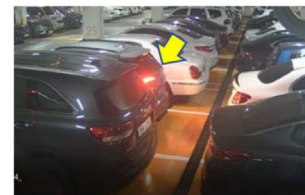
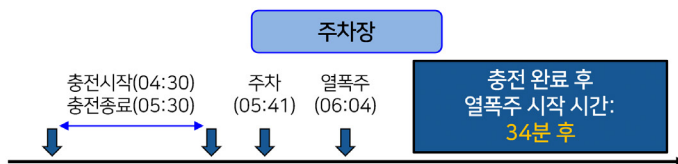
2 열폭주란?



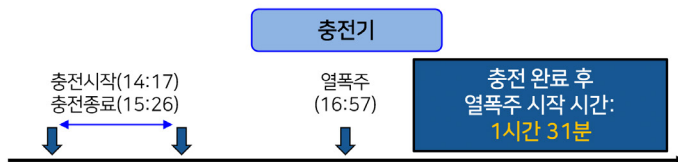
@국립소방연구원

전기차 화재 타임라인

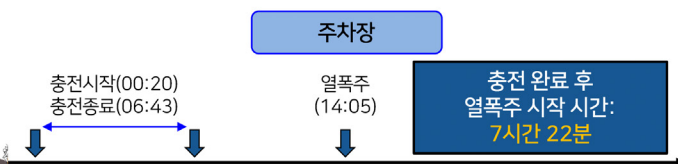
세종 (코나)



부산 (다니고벤)




김해 (아이오닉일렉트릭)



14


2 열폭주란?

➔ 열폭주 소화 특성




@국립소방연구원

✓ 질식소화

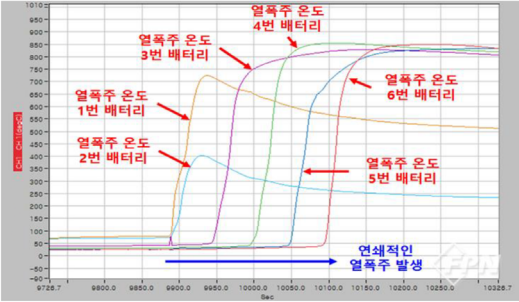


@한컴라이프케어

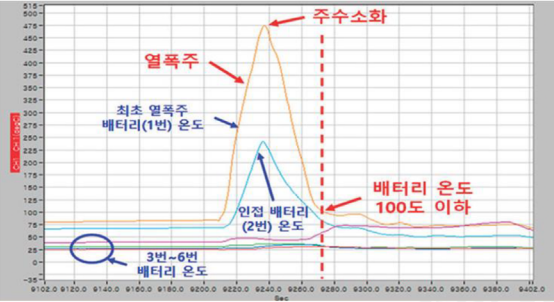
✓ 냉각소화




@한국방송뉴스



열폭주의 근본 원인인 온도를 낮추지 못하기 때문에 모든 배터리가 연소될 때까지 기다려야 함.




주수소화를 통해 온도를 낮춰 추가적인 화학 반응을 방지함.


| 15

3 열폭주 완화 관련 연구


➔ 최근 국내외 연구 동향



열폭주 방지 최적 설계
지능형 열관리 시스템

1. 배터리 소재


배터리 소재 연구를 통한 안정성 향상



안정성이 높은 소재 개발


2. 배터리 시스템

배터리 관리 시스템 기반 열폭주 완화




3. 화재 대응

열폭주 조기 진압 연구를 통한 피해 최소화



지능형 조기 진압 시스템


| 16

3 열폭주 완화 관련 연구

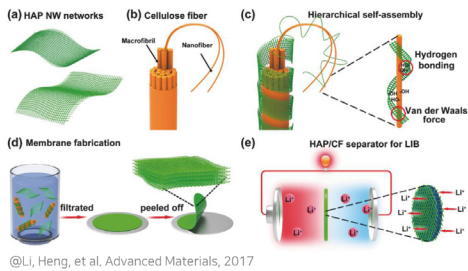


1. 배터리 소재

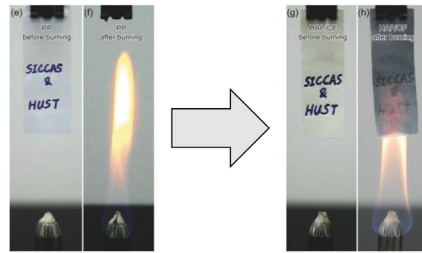
✓ 내열성 분리막 코팅 공정 개발 (중국):

나노와이어 (HAP NWs)와 셀룰로오스 섬유 (CFs)를 결합하여 700 °C의 고온에서도 구조적 안전성을 유지하는

새로운 분리막을 개발

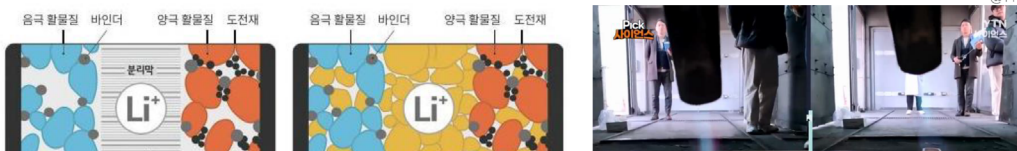


@Li, Heng, et al, Advanced Materials, 2017



✓ 전고체 배터리 개발:

가연성 액체 전해질을 열 안정성과 구조적 견고성이 높은 불연성 고체 전해질로 대체



@YTN

열적 안전성 확보를 위한 배터리 소재 연구

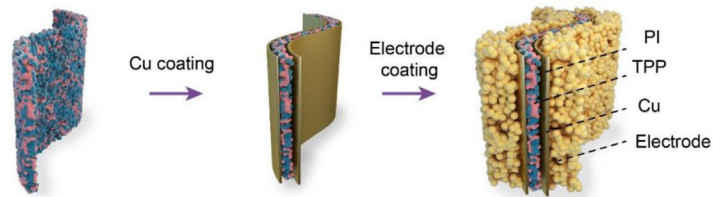
3 열폭주 완화 관련 연구



1. 배터리 소재

✓ 자가 소화 소재 개발 (미국):

마이크로캡슐 형태의 방화제 코팅 기술을 적용한 열에 반응하여 화재를 자가 소화하는 배터리 개발




@Ye, Yusheng, et al, Nature Energy, 2020



열폭주 억제를 위해 다양한 측면에서 소재 개발 연구

3 열폭주 완화 관련 연구



2. 배터리 시스템

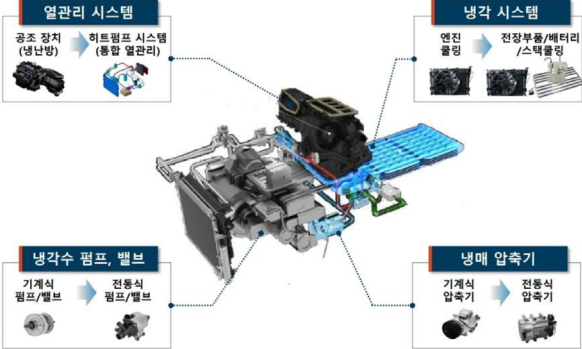
✓ **공랭식 열관리 시스템 개발 (한온시스템):**
 PTC 히터, 히트 펌프, 전기 히터 난방, 외부 컨덴서, 그리고 냉각장치 냉방을 이용한 최적 열관리 시스템 개발

열관리 시스템

공조 장치 (냉난방) → 히트펌프 시스템 (통합 열관리)

냉각 시스템

연진 물링 → 전장부품/배터리 /스택물링



냉각수 펌프, 밸브

기계식 펌프/밸브 → 전동식 펌프/밸브

냉매 압축기

기계식 압축기 → 전동식 압축기


@한온시스템

✓ **다양한 열관리 시스템 개발:**

현대 모비스	아이오닉 & 레이 탑재 공기냉각 방식 배터리 열관리시스템 개발
현대 위아	배터리 열관리 효율 증가를 위한 구동 부품/배터리 냉각 담당장치를 통합한 냉각수 허브 모듈 개발
GM	역 부사 능력 향상을 위한 배터리 셀 사이 역저도성 재료 상인

배터리 최적 열관리 시스템을 위한 산업계의 활발한 연구

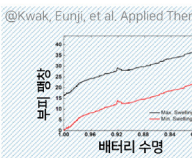
3 열폭주 완화 관련 연구



2. 배터리 시스템

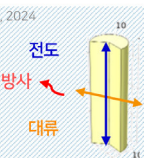
✓ **물리 기반 모델링 기술 개발 (한양대):**
 열폭주 현상 해석 및 정량적 분석 가능 물리 모델을 통한 열폭주 전파 억제 가능 최적설계

@Kwak, Eunji, et al. Applied Thermal Engineering, 2024



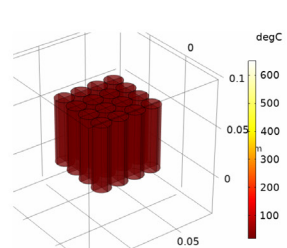
(1) 배터리 상태

전도, 방사, 대류




(2) 열역학 법칙

3D visualization of temperature distribution in a battery pack.

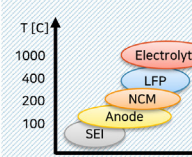


Q, 발열량




(3) 연쇄 반응

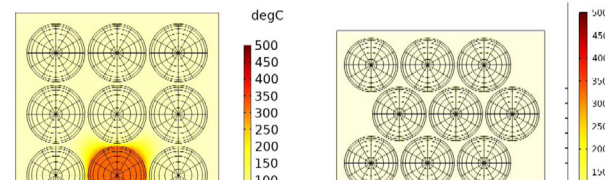
T 온도



(4) 가스 및 압력



물리 모델을 이용한 최적설계



Digital twin 기반 열폭주 분석 및 대응 전략 연구

3 열폭주 완화 관련 연구



3. 화재 대응

- ✓ **전기차 화재진압 시스템 개발 (탱크테크):**
드릴 랜스 장치를 적용한 전기차 화재 모니터링 시스템 개발



@ABC특허법률사무소



@KNN

- ✓ **열폭주 확산 방지 기술 개발 (세이프랩코리아, 반도건설):**
무인 전자동 시스템을 이용한 전기차화재 초기 대응 및 완전소화 기술 개발



ADP @세이프랩코리아



@반도건설

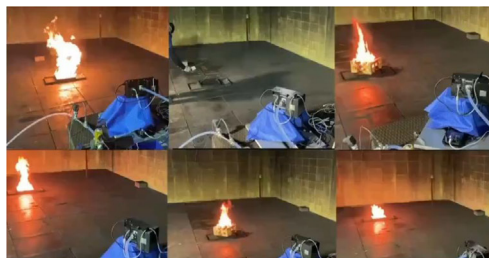
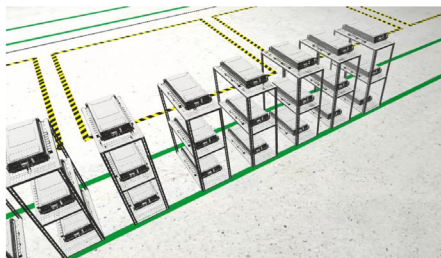
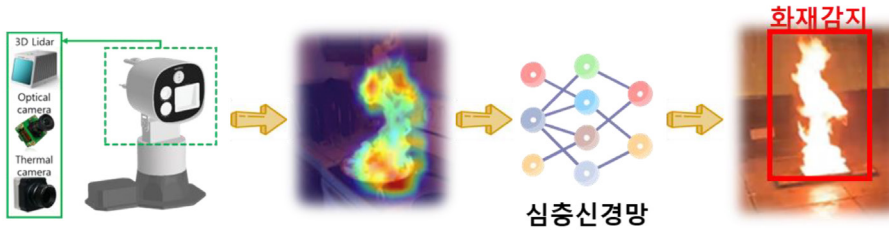
| 21

3 열폭주 완화 관련 연구



3. 화재 대응

- ✓ **화재 조기 감지 및 소화 시스템 개발 (안국-한양대):**
다중센서 기반 지능형 화재감지 및 실시간 배터리 소화 시스템 개발



열폭주 피해 최소화를 위한 조기 대응 및 진압 연구

@Electrochemical Energy Reviews
@Firechief Global
@서울경제

지피지기 백전백승

배터리,
아는 만큼 안전하게 사용할 수 있다.

고온 노출

과도한 충격

내부 단락

정부-회사-사용자

과충전 및 과방전

열화에 의한 결함

Thank you

친환경차로 각광받는 전기차의 미래, 안전 대책 토론회

발제문

편리하고 안전한
서울시 전기차 및 충전인프라 방향

서울특별시 기후환경본부

친환경차량과장

정삼모



SEUL M! SOUL

Contents

편리하고 안전한 서울시 전기차 및 충전인프라 방향

 <p>1</p> <p>서울시 전기차 보급 및 충전인프라 확충</p>	 <p>2</p> <p>서울시 전기차 충전기 통합관리 체계 구축</p>	 <p>3</p> <p>서울시 전기차 화재 예방 대책</p>
--	---	--

서울특별시



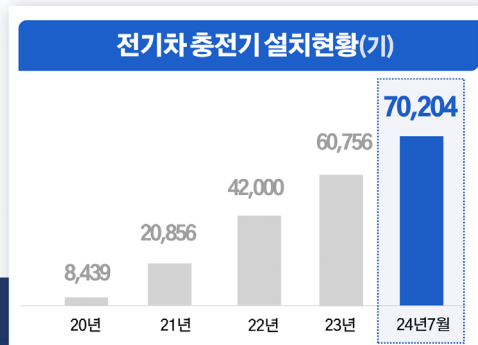
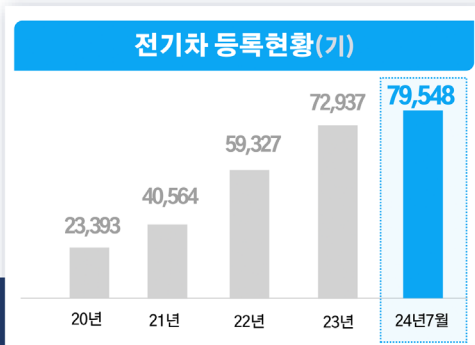
1 서울시는 대기질 개선과 탄소 중립을 목표로 전기차 보급 및 충전인프라 확충에 집중해 왔습니다.

SEOUL MY SOUL

그 결과, 서울시 전기차 및 충전기는 급격히 증가하였습니다.

전기차는 현재 약 8만대가 등록, 전기차 보급률은 평균 20% 이상 증가하였고
 전기차 충전기는 현재 급속 5천기, 완속 6만5천기 약 7만기가 설치되어,

“ 충전기 1기당 전기차 1.1대로
 전국 1.7대에 비해 수량적인 충전인프라 우수 ”



*국토부 통계누리, 전기이륜차 제외

SEUL M SOUL

“ 서울시는 내연기관 차량의 **전기차 전환**으로
 대기질 개선과 온실가스 감축에 기여하겠습니다 ”

'26년 전기차 10% 시대 전환

전기차 보급

'21년 5.2만대 >> '26년 40만대

생활권 5분 충전망 구축

'21년 2만기 >> '26년 22만기
전기차42만대충전가능

'26년까지

승용 26만대 화물 2만5천대

택시 2만대 버스 4천3백대

이륜 8만7천대

'30년까지

서울 등록차량
4대 중 1대를 전기차로


서울특별시

3

SEUL M SOUL

2026년까지 “**전기차 10% 시대, 40만대 보급**” 을 실현하기 위해


“ **충전인프라 확대로 승용차 27만대 보급** ”



전기 시내버스
4천3백대
(21년부터 전기버스 구매의무)



전기 화물차
2만5천대
(신규 택배용화물차의 100% 전환)



전기 이륜차
8만7천대
(배달용 이륜차는 100% 전환)

>> 특히, 주행거리가 길고 아파트·주택가 등 거주지를 드나드는
 버스, 택배·배달차량 등은 “**전기차로 집중전환 추진**”

서울특별시

4

SEOUL MY SOUL

2026년까지 “전기차 생활권 5분 충전망, 22만기 구축” 을 위해

“ 급속충전기 1만기, 완속충전기 21만기 보급 ”



급속충전기
1만기



완속충전기
21만기



배터리교환형 충전소
3천대



상용차의 전기차 전환을 위해 “급속충전기 선제적 보급”,
배달용 이륜차 교체를 위해 “배터리 교환형 충전소 확대”

서울특별시

5

2 서울시는 믿고 신뢰하는 충전서비스를
제공하기 위해 통합관리 체계를 구축하고
서울형 충전기 인증제를 시행합니다.



6

“ 충전기 고장, 충전서비스 품질을 높이기 위해 사후관리를 강화하도록 하겠습니다. ”

**충전사업자 난립(52개),
통합관리 부재로
고장방지 및 부정확한 정보 표출**

경향신문
[전기차, 아직은 ①]"배터리 잔량 5%, 고장난 충전기 앞 망연 자실"...공용인프라는 아직 '느림보']

“ 충전기 통합관리를 통해 정확한 충전정보 제공으로 시민불편을 해소하겠습니다. ”

통합관리체계 구축

서울형 급속충전기 인증제

7

① 통합관리 체계 구축

“ 시가 직접 통합 운영, 신고창구 일원화하여 고장발생 시 신속히 대응 ”

✓ 서울시 내 모든 급속충전기를 시 운영시스템으로 통합

현행

➡

관내

시보조사사업자충전기관리(약1천기) 관내 공공 민간충전기 통합연동(약3천기)

✓ 고장코드 표준화로 충전기 고장 여부 등 상태정보 정확히 파악(3분 이내)

충전기 파워모듈 고장

고장정보 파악 불가

➡


충전기 파워모듈 고장

302 : 파워모듈 고장 (충전속도 지연)

내비앱 정보 표출

✓ QR기반 신고창구 일원화로 즉시 신고 및 신속 수리 체계 도입

8



② 서울형 급속충전기 관리 인증제

“서울형 급속충전기 관리 인증제 실시로
충전기 품질과 신뢰성 향상”


인증제 도입


- 충전기능, 통신기능 및 관리기능 3개 분야, 18개 항목 종합적 평가(9월부터)

전기·통신 전문가, 제조사 등으로 구성된
인증심의위원회를 거쳐 진행

길도우미 앱 표출

- 인증충전기 길도우미 앱 표출로 시민들이 인증 받은 충전기 쉽게 선택(11월말)




9




"서울시 인증제"

기존 충전기 정보 (네이버)



인증제 표출 및 충전정보 개선 예시 (네이버)



서울시 인증제

- ✓ 내비 앱에서 "서울시 인증여부" 표출로 시민들이 우수한 인증 충전기 우선 사용
- ✓ 충전사업자 인증제 참여 확대로 올바른 충전기 운영관리 체계 마련

3

전기차 화재에 대한 불안과 불편이 없도록 예방 조치와 신속한 대응 체계를 마련하겠습니다.

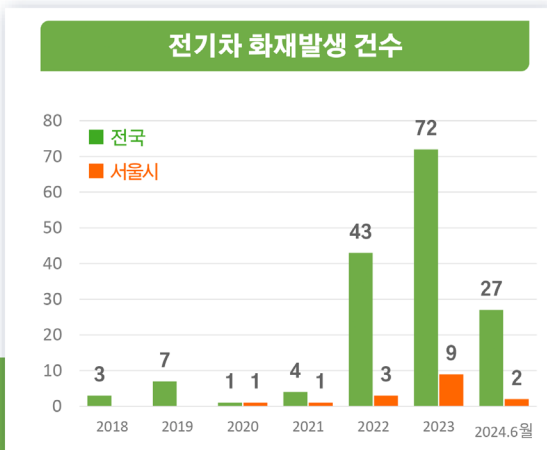


SEOUL M! SOUL

전기차 보급 증가로 전기차 화재도 증가하고 있습니다.

최근 **공동주택 지하주차장**에서 발생한 **전기차 화재**는 입주민과 전기차 사용자들에게 **큰 불안감**을 주고 있으며, **전기차 포비아**에 대한 **우려**가 커지고 있음

“ '18년 부터, '24년 상반기까지 전국 화재는 총 187건 발생, 서울시는 16건 발생 ”



서울특별시

전기차 화재의 주요 원인...

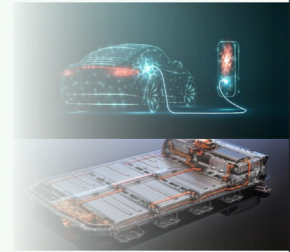
외부 충격 및 교통사고 (51건)

- 교통사고로 인해 전기차 배터리가 직접적으로 손상될 경우, 배터리 셀 내부의 화학 물질이 외부와 접촉하면서 화재가 발생
- 도로 위의 장애물, 차량 밑바닥 마찰, 고온의 표면 등 외부 요인으로 배터리 손상, 배터리 외부 케이스 손상시키고, 내부 셀에 영향을 주어 화재 발생



배터리 결함 및 손상 (51건)

- 제조 과정에서 발생할 수 있는 배터리 결함이나 불량(전극간의 미세한 손상, 불순물)으로 내부 단락 발생, 이로 인해 과열이 발생하여 화재
- 과도한 충전 등에 의해 화재 발생



원인미상 (58건)

- 차량 전소 등으로 공식적인 원인 파악 불가



전기차 화재의 주요 원인...

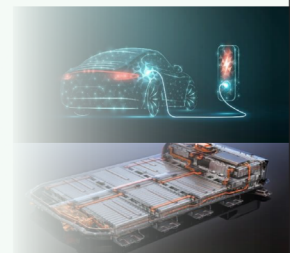
외부 충격 및 교통사고 (51건)

- 교통사고로 인해 전기차 배터리가 직접적으로 손상될 경우, 배터리 셀 내부의 화학 물질이 외부와 접촉하면서 화재가 발생
- 도로 위의 장애물, 차량 밑바닥 마찰, 고온의 표면 등 외부 요인으로 배터리 손상, 배터리 외부 케이스 손상시키고, 내부 셀에 영향을 주어 화재 발생



배터리 결함 및 손상 (51건)

- 제조 과정에서 발생할 수 있는 배터리 결함이나 불량(전극간의 미세한 손상, 불순물)으로 내부 단락 발생, 이로 인해 과열이 발생하여 화재
- 과도한 충전 등에 의해 화재 발생



원인미상 (58건)

- 차량 전소 등으로 공식적인 원인 파악 불가



SEOUL M! SOUL


서울시의 전기차 화재 예방 대책

충전 제한이 전기차 화재에 대한 완전한 해결책이 될 수 없더라도
전기차 주차를 전면 금지하는 여론 확산되는 상황에서 현실적인 대안

“ 서울시는 중앙정부의 전기차 화재 예방 대책에 발 맞춰,
지자체 만이 할 수 있는 역할을 적극적으로 찾고 실행하도록 하겠습니다. ”

1) 전기차 충전율 제한 도입

- 공동주택 지하주차장 배터리 충전율 90% 이하 전기차만 출입 권고
 - 과 충전으로 인한 배터리 과열과 화재 위험 감소
 - “공동주택 관리규약 준칙 개정 시행”... 9월 말
- 공공시설 급속 충전율 80% 제한
 - 9.23일 부터 시가 운영하는 공영주차장 등 공공시설 급속충전기 충전율 80% 제한



16

SEOUL M! SOUL

서울시의 전기차 화재 예방 대책

“ 또한, 관련 기관·제조사 등과 협력을 통해
다양한 화재 예방 대책을 시행하도록 하겠습니다. ”

2) 배터리 사전진단

시스템 구축

- 전기차 제조사 협업 주차중인 차량의 상태정보 실시간 모니터링
- 이상징후 발생 시 사전진단, 즉각 대응 조치

3) 소방시설 긴급 점검

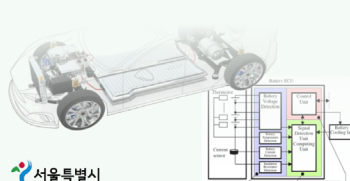
긴급점검·제도개선

- 서울시내 공동주택 스프링클러 설비 등 소방시설 유지관리 상태 긴급 점검(9월말)
- 소방시설 점검 체크리스트 제작 배포, 자율적인 안전점검 강화 지도


4) 안전시설기준 마련

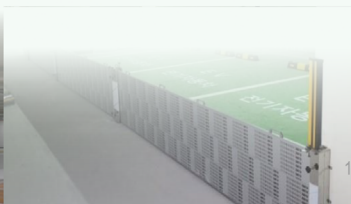
건축심의기준 개정(10월까지)

- 신축시설 지상 충전시설 설치 원칙, 지하의 경우 주차장 최상층 설치
- 전용주차구역 3대 이하 격리 방화벽 구획, 주차구역마다 차수판 설치 계획



서울특별시





16

친환경 차로 각광받는

전기차의 미래 안전 대책 토론회

전기차 화재 원인 분석 및 해결 방안 모색