

전기자동차 배터리 팩 시스템의 열 안전성 향상 기술

| 저자 | 이봉현 전기수소차PD / KEIT
 이평찬 박사 / 한국자동차연구원
 정선경 본부장 / 한국자동차연구원

SUMMARY

전기자동차 배터리 팩 시스템의 열 안전성 향상 기술 개발 배경

- ★ 환경규제 강화 및 탄소중립 사회로의 전환으로 내연기관 자동차에서 전력기반 자동차로 산업 패러다임 전환
- ★ 리튬이차전지는 EV의 전력원으로 적용되고 있으나, '19년 이후 수차례 화재 사고가 발생하는 등 안전성 문제가 국민적 관심사로 부각됨
- ★ 최근 개발되고 있는 고용량 리튬이차전지의 경우, 열적 안전성이 낮아져 배터리 셀 스트레스 등으로 인해 셀 손상이 발생하여 열폭주 및 화재, 열전이로 이어질 확률이 높아짐

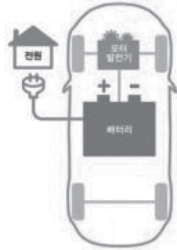

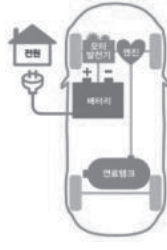

시사점 및 정책제안

- ★ 배터리 열폭주는 설계 오류, 제조 결함, 과충전, 센서 결함 등 다양한 원인으로 배터리 셀에 스트레스가 발생하여, 내부 온도가 관리되지 않아 과열되어 발생
- ★ 배터리 화재를 막기 위해서는 열폭주 전에 감지 및 제어를 통한 예방 구간과 셀간 전이를 방지하는 억제 구간으로 나눌 수 있음
- ★ 배터리 용량 증가 등 전기차의 배터리 팩의 에너지 밀도 향상 기술에 관한 연구에 치중하고 있어, 배터리 팩 시스템 차원의 열폭주 대응 기술이 부족
- ★ 전기차용 배터리의 열폭주 및 열전이 관련 시험에 관한 국제 인증 및 표준 제정이 진행 중으로 국내 산업의 선제적 대응 필요

1. 전기자동차 배터리 팩 열 안전성 향상 기술 개요

전기자동차

★ 전기자동차(Electrically Propelled Vehicle)는 이차전지 또는 연료전지 등으로부터 공급받은 전기에너지를 차량의 구동 동력원으로 사용하는 자동차로 정의하며, 전기와 엔진동력을 동시 또는 선택적으로 사용하는 하이브리드 자동차를 포함 [1]

구분	BEV	FCEV	PHEV	HEV
명칭	순수 전기차	수소전기차	플러그인하이브리드 차	하이브리드 자동차
구조				
구동원	모터	모터	모터(주) + 엔진(보조)	모터(보조) + 엔진(주)
에너지	전기(배터리 저장)	수소 → 전기	전기 + 화석연료	전기 + 화석연료*
특징	배터리 저장 에너지로 주행	수소를 연료로 전기 생산	외부전원으로 배터리 충전 가능	외부전원으로 배터리 충전 불가

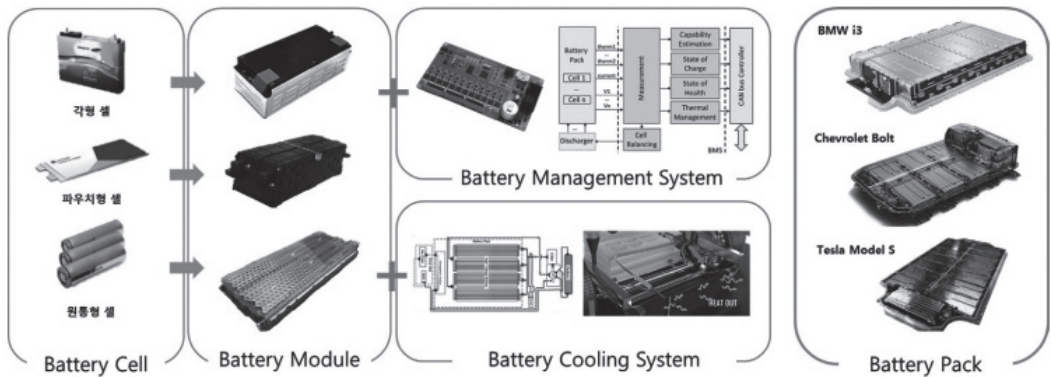
(출처 : BEV(Battery Electric Vehicle), FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle))

| 그림 1. 전기구동차의 종류 및 특징 [1] |

전기자동차 배터리 팩 개요 [2]

★ 배터리 팩은 전기자동차에서 필요한 전기동력을 공급하기 위해 전기에너지를 저장하는 장치로, 배터리 셀, 모듈, 배터리관리장치, 냉각 장치 및 케이스 등으로 구성

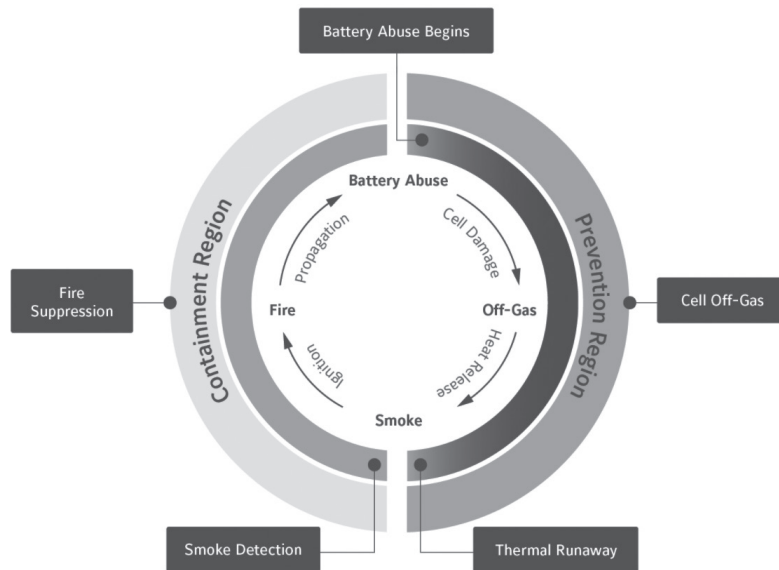
- 배터리 셀 : 양극, 음극, 전해액, 분리막 등으로 구성되어 전기에너지를 저장 또는 공급하는 최소 단위
- 배터리 모듈 : 직렬 또는 병렬로 연결되는 다수의 셀로 구성되어 외부 충격, 열, 진동으로부터 배터리 셀을 보호하기 위해 프레임에 넣은 조립체
- 배터리 관리장치(Battery Management System, BMS) : 배터리 셀의 전압, 전류 및 온도를 모니터링하여 최적의 상태로 유지 및 관리하고 배터리 문제를 사전에 발견하는 등의 역할을 하는 제어장치
- 냉각장치 : 배터리 총방전시 배터리 셀 자체에서 발생하는 열을 외부로 방출하여 배터리 최적 성능 및 안전성을 유지하기 위한 장치
- 팩 케이스 : 차량 주행 및 주차시 발생할 수 있는 외부의 물리적, 화학적 충격으로부터 배터리 팩 시스템을 보호하기 위한 단위 부품



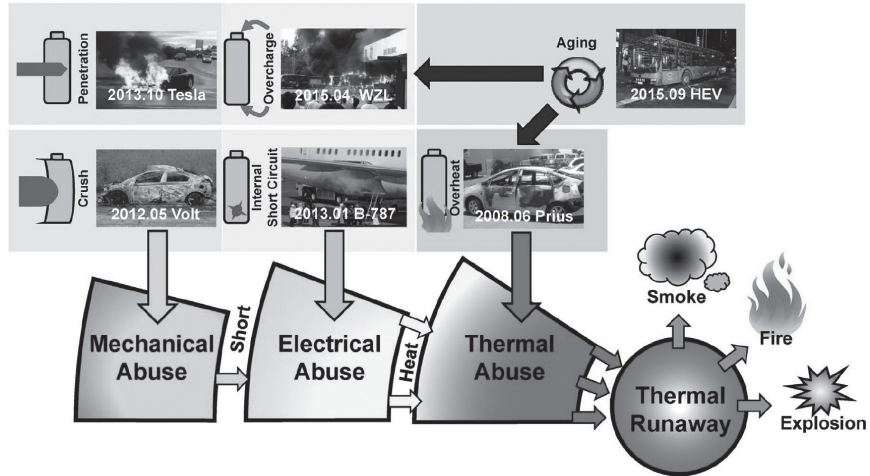
| 그림 2. 전기차 배터리팩 시스템 구성도 [2] |

// 배터리 화재

- ★ 배터리 화재는 배터리 셀 스트레스 및 Abuse로 셀 손상이 발생하여 열폭주 및 화재, 열전이로 이어져 화재 확산·폭발로 전개
 - 셀 스트레스 및 Abuse를 감지·제어하지 못하여 내부 온도 상승으로 셀 손상 발생 → 내부 압력 상승 → 오프가스 발생 → 제어 불가시 전지 분리막 손상으로 내부 단락 진행 → 열폭주 → 연기 발생 및 점화 → 인접 셀에 전이 → 모듈/시스템 레벨 전이 단계로 진행 [3]
 - Abuse 조건은 크게 기계적, 전기적, 그리고 열적 abuse로 나뉠 수 있음 [4]
- ★ 배터리 화재를 막기 위해서는 열폭주 전에 감지 및 제어를 통한 예방 구간과 셀간 전이를 방지하는 억제 구간으로 나뉠 수 있음 [3]
 - 예방 구간 : 셀의 오프가스를 조기 감지 및 내부 압력 상쇄 필요
 - 억제 구간 : 단위셀의 열폭주가 주위 셀의 열폭주로 이어지지 않도록 열 및 화염 차단 필요
- ★ GTR(Global Technical Regulation) 및 ISO 등 전기자동차용 배터리 국제 인증 및 국제 표준에서 열폭주 및 열전이 관련 시험 평가 규정이 제정 진행 중



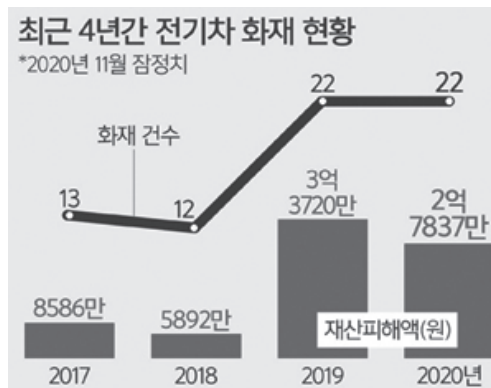
| 그림 3. 배터리 화재 단계 [3] |



[그림 4. 사고로 인한 리튬이차전지의 abuse 조건 예 [4]]

★ xEV 시장이 성장함에 따라 관련된 안전 규정이 체계적으로 정립 및 강화되고 있음에도 이차전지의 잘못된 사용과 취급 등으로 전기차의 화재 사고가 지속적으로 발생

- 최근 4년간 EV 발화 사건은 증가 추세이며, 배터리 관련 부품에 의한 것으로 추정되는 전기적 요인이 가장 높은 비율 차지
 - ※ 4년간 EV 화재 현황 : '17년 13건, '18년 12건, '19년 22건, '20년(11월 잠정치) 22건
- 최근 개발되고 있는 고용량 이차전지의 경우 Ni 함량이 80% 이상으로 양극 소재의 열적 안전성은 낮아짐
- 제조업체는 안전한 설계 기준을 요구하고, 정부는 전기차에 대한 안전기준을 재검토해 화재 사고에 대비를 촉구

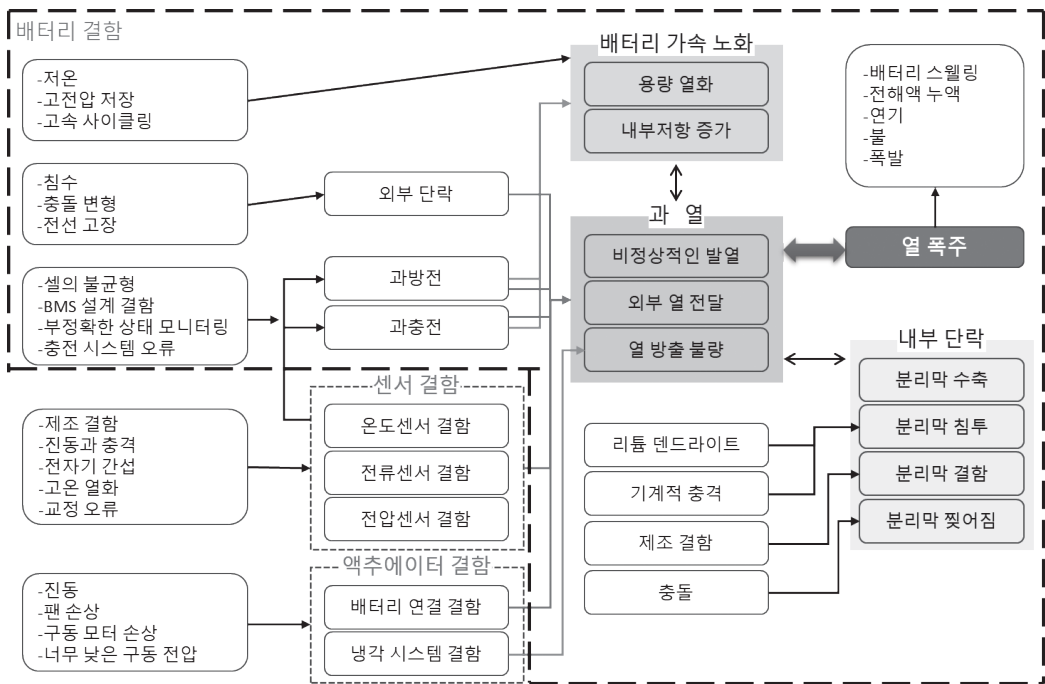


[그림 5] 전기차 화재 발생 현황 [5]

/// 배터리 열폭주

★ 열폭주는 설계 오류, 제조 결함, 과충전, 센서 결함 등 다양한 원인으로 배터리 셀에 스트레스가 발생하여, 내부 온도가 관리되지 않아 과열되어 발생

- 배터리 화재는 리튬이차전지 셀 1개의 열폭주로부터 발생하여 확산



| 그림 6. 리튬이차전지 배터리 시스템의 다양한 결함 예 [6] |

2. 배터리 팩 시스템의 열 안전 관리 기술 동향

// 열폭주 모델링

- ★ EV의 열악한 작업 조건으로 인해 열, 전기 및/또는 기계적 abuse 문제로 인해 열 폭주가 발생할 수 있으며 따라서 배터리 시스템과 해당 차량의 안전이 크게 손상될 수 있음
- ★ 온도 폭주가 연쇄적인 발열 반응을 일으킬 때 배터리 셀 내부에서 열 폭주가 발생할 수 있으며, 이는 온도를 더욱 높이고 더 해로운 반응을 촉발
- ★ 이러한 상승된 온도는 적시에 발산되지 않고 점진적으로 축적된 열이나 단기간에 외부에서 유발된 과도한 반응으로 인해 발생할 수 있음
- ★ 다양한 트리거 조건에서 열 폭주의 모델링을 검토하는 연구가 진행 중이며, 트리거 테스트 모델은 다음과 같음
 - Oven Test : 배터리 셀을 단계별 상승된 고온에 노출
 - Short Circuit : 배터리 셀의 단자를 가로지르는 저저항 연결 또는 다른 전위를 갖는 층 사이의 내부 단락
 - Overcharge Test : 특정 전압 한계까지 강제로 충전
 - Nail : 일정한 속도로 전지 셀을 관통
 - Crush Test : 내부 단락이 발생할 때까지 배터리 셀을 압착
 - 상기 언급한 abuse 조건은 순차적 또는 동시에 발생할 수 있으며, 상호관계가 복잡하게 얽혀 있음

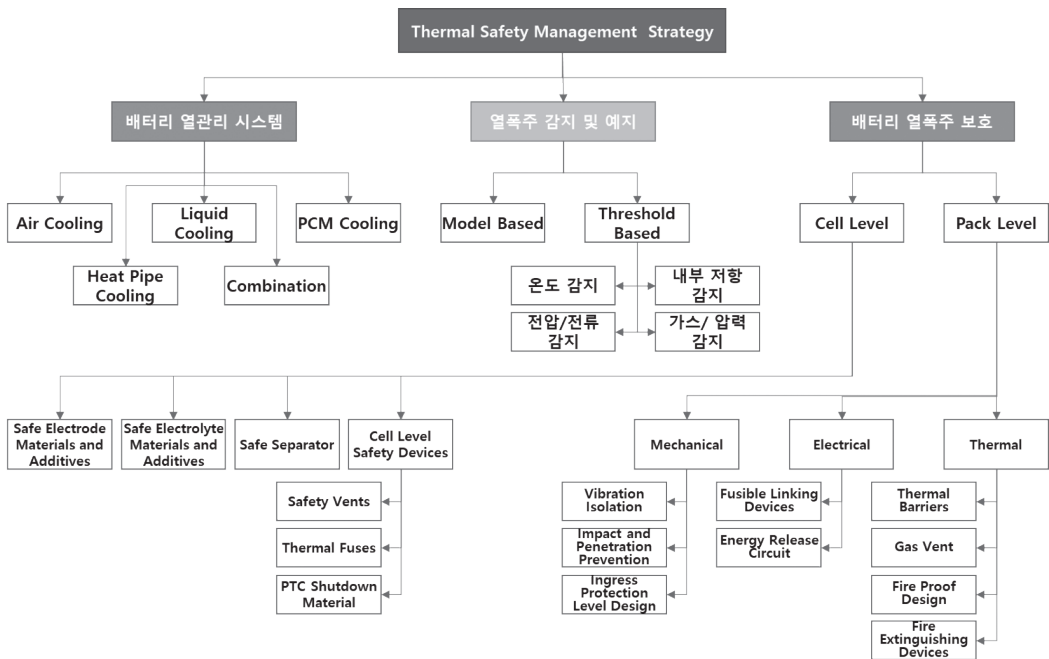
// 배터리 Abuse의 테스트 기술

- ★ Abuse 테스트는 자동차 사고의 영향을 재현하도록 설계하고 있으며, 기존 배터리 abuse 테스트는 다음과 같이 나눌 수 있음
 - Thermal Abuse Tests : simulated fuel fires, thermal stability, overheat, 등
 - Electrical Abuse Tests : short circuit, overcharge, overdischarge, 등
 - Mechanical Abuse Tests : mechanical shock, vibration, drop, nail penetration, immersion, crush, 등

/// 배터리 열 안전 관리 전략

★ 배터리 열폭주라는 심각한 문제를 해결하기 위해 배터리 시스템의 예방 및 보호를 위한 효율적인 방법을 개발하기 위해 연구를 추진 중

- 일반적인 리튬이차전지의 열 안전 관리 전략은 [그림 6]과 같음



| 그림 6. 리튬이차전지의 열 안전 관리 전략 [7] |

- ★ 배터리 열관리 시스템(BTMS)은 냉각 또는 가열 기능을 통해 적절한 온도 범위 내에서 리튬이차전지 작동을 제어하는 역할을 함
 - 대부분의 BTMS가 열폭주 이벤트 초기 단계에서 온도 상승을 억제할 수 있어야 하기 때문에 냉각 기능을 강조하고 있음
 - 일반적으로 BTMS는 열 전달 매체에 따라 공기 냉각, 액체 냉각, 상변화 물질, 히트 파이프 등으로 나뉨
- ★ 일반적인 BTMS는 극도로 높은 온도 환경에서도 열 발생 및 열 축적 문제를 해결할 것으로 예상되나, 열폭주 현상을 방지하기 위해 시기 적절하고 효과적으로 대응하지 못할 수 있어 열폭주 전에 조기 경고 및 보호 기능을 향상시키는 예측 및 감지 기술을 개발하여 BTMS와 함께 작동하도록 기술 개발 중
 - 배터리 열폭주를 감지하기 위해 등가회로와 전기화학적 열 결합 모델을 사용하거나, 에너지 보존법칙과 푸리에 법칙에 기반한 배터리 열폭주 예측을 위한 모델 기반 방법을 제시 [7]
 - 배터리 열폭주를 예측하기 위해 전압, 전류, 온도, 내부저항 등을 모니터링하는 방식이 일반적으로 연구됨
 - BMS에서 수집된 전압 및 온도 정보를 사용하여 열폭주 전파를 예측하는 방법을 제시함. 이 방법은 주로 4단계로 구성됨. (1) 배터리 셀을 모니터링하여 다양한 온도 범위에서 온도 상승률을 테스트하여 열 폭주 상태인지 여부를 판단. (2) 배터리 전압을 감지하고 전압 강하율을 계산하고 0.2V/min 미만인 경우 비가역적인 열 폭주 현상을 결정. (3) 열폭주 셀과 인접한 셀을 감지하고 (1) 및 (2)를 수행하여 열폭주 또는 비가역적 고장이 발생하는지 여부를 평가. (4) 단계 (3)에서 열폭주 셀이 발견되면 BMS는 열폭주 전파 경보를 발령 [7]
 - 내부 저항 및 임피던스의 증가를 기반으로 배터리 충전 중 열폭주 이벤트를 감지하는 연구도 진행 중
 - 테슬라는 배터리 팩 압력 및 배터리 팩 절연저항과 같은 작동 상태를 모니터링하여 배터리 열폭주를 감지하는 일련의 방법에 대한 특허를 보유
- ★ 배터리 열폭주 보호는 셀 및 시스템 수준에서 배터리 시스템 내 열폭주의 발생을 방지하고 전소되는 결과를 완화하기 위해 사용됨
 - 셀 수준에서 열폭주를 방지하기 위해 전극, 전해질, 분리막을 개발하고 있음. 대표적인 기술이 전고체 배터리 기술임
 - 팩 시스템 수준에서 살펴보면, 잠재적인 외부 스트레스로부터 배터리 시스템을 격리하고, 배터리 시스템 내부의 열폭주 전이를 방지하고, 열폭주가 발생할 때 신속히 에너지를 방출하는 세 가지 측면에서 연구되고 있음
 - 테슬라는 배터리 셀 표면에 팽창성 물질, 배터리 팩의 열차단 배리어 플레이트, 배터리 팩과 차량 실내사이에 다층 열차단 층을 적용하는 전략을 보유
 - 열폭주 전이를 완화하기 위해 fusible link wires와 조정가능하고 부러지기 쉬운 부품을 사용하여 배터리 셀과 모듈을 과전류, 단락, 기계적 압착 및 과열 조건에서 분리할 수 있는 구조를 연구
 - 배터리 팩의 배기구 또한 가스 방출량에 따라 빠른 가스 방출이 가능하도록 설계 기술 검토

3. 배터리 팩의 열폭주 및 열전이 방지 기술 개발 방향성

- ★ 향후 전기차의 화재 안정성이 중요해짐에 따라, 앞으로는 배터리 팩의 열 안전성 향상 등에 초점을 맞추어 개발이 진행될 것으로 보임. 특히,
 - 배터리 셀의 열폭주를 감지하기 위한 센싱 기술 개발
 - 배터리 팩 내 압력 상승 방지 및 유해 가스 배출을 위한 구조 시스템 기술 개발
 - 배터리 내부 열전이 지연을 위한 구조 및 친환경 불연 소재 기술 개발
 - 열폭주 및 열전이 방지 적용 기술의 가격 경쟁력 확보 등이 앞으로의 개발 방향성이라 할 수 있음

4. 결론 및 시사점

- // 전기차 화재 발생 증가에 따른 열 안전성 문제 해결 시급
- ★ '19년 이후 수차례 화재사고가 발생하고 있어 전기차의 안전성 문제가 국민적 관심사로 부각됨. 정부는 전기차에 대한 안전기준을 재점검해 화재 사고에 대비를 촉구하고 있음
- ★ 배터리 팩의 고용량화에 따라 열적 안전성은 상대적으로 낮아지고 있어 이에 대한 현실적인 대책이 요구됨
 - 셀 에너지 밀도를 250Wh/kg에서 350Wh/kg으로, 팩 에너지 밀도를 130Wh/kg에서 200Wh/kg으로 개발이 진행
 - 배터리 셀의 이상 반응은 언제든지 발생할 수 있기 때문에 화재 확산 및 폭발 전에 열폭주를 감지하고 방지하는 것이 그 어느 때보다 중요
- ★ 기존 연구개발은 xEV 초기 시장 창출을 위해 성능 향상 및 가격 인하를 유도할 수 있는 부품 기술을 중점적으로 지원
- ★ 향후 열폭주 및 열전이에 대한 시험 평가 표준이 제정 및 개정될 것으로 보여, 이에 대한 국내 산업의 선제적 대응이 요구되고 있음
- ★ 국가의 미래 신산업인 친환경차 산업의 글로벌 시장 점유율 확보를 위해서는 범국가적 차원에서의 대책이 요구되며, 이를 위해 국내 관련 중소기업 육성 및 개발 지원에 관련한 적극적인 계획이 필요함

[참고문헌]

1. “2022년 산업기술 R&D 전략”, KEIT R&D 전략기획단
2. “전기자동차 배터리 팩 고밀도화 기술”, 이백행, 고윤기(2021), PD 이슈리포트, 2021-3월호 이슈4, KEIT
3. <https://www.energy-storage.news/preventing-thermal-runaway-in-lithium-ion-energy-storage-systems/>
4. X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, X. He, “Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review”, *Energy Storage Materials*, 10, 2018, 246.
5. 세계일보, 2021.01. <https://m.segye.com/view/20210113515970>
6. M.S. Hossain Lipu, M.A. Hannan, Tahia F. Karim, Aini Hussain, Mohamad Hanif Md Saad, Afida Ayob, Md. Szal Miah, T.M. Indra Mahlia, “Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook”, *Journal of Cleaner Production*, 292, 2021, 126044.
7. J. Zhang, L. Zhang, F. Sun, Z. Wang, “An overview on thermal safety issues of lithium-ion batteries for electric vehicle application”, *IEEE Access*, 6, 2018, 23848.

[국내외 주요 기술개발 현황]

연구기관명	프로젝트명	개요	연구기간
(주)대진첨단소재	<ul style="list-style-type: none"> 미래 친환경 저장장치용 화재억제형 고안전성 모듈 소재 개발 및 실증 	<ul style="list-style-type: none"> 화재확산지연을 위한 소화기능이 탑재된 복합 방열소재 개발 고안전성 모듈 제작 및 열전지 확산방지 시나리오 개발 및 검증 PM용 고안전성 팩 개발 및 안전성 실증 	2014.12.- 2021.04.