

전기자동차 충전 중 발생한 화재 연구

지도교수 박성지 교수님
대전보건대학교 경찰과학수사과
3학년 이수연

목차

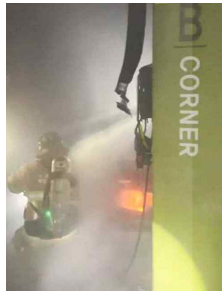
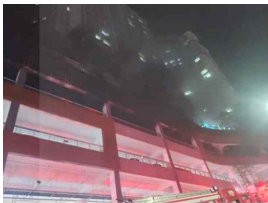
- 사건 개요
- 사건 현장
- 화재원인 검토
- 열폭주란?
- Bms 데이터
- 결론
- Q&A

사건개요

2023년 4월 00일 늦은 저녁에 부산시 소재 아파트 지하 주차장에서 전기자동차인 MAIV M1이 충전 중에 화재가 발생하였다

차량 소유자는 화재 발생 2일 전 주차장에 차를 세워두었다가 다섯 시간 후 충전 가능한 주차 구역으로 이동, 충전기를 꽂고 자택으로 이동하였다

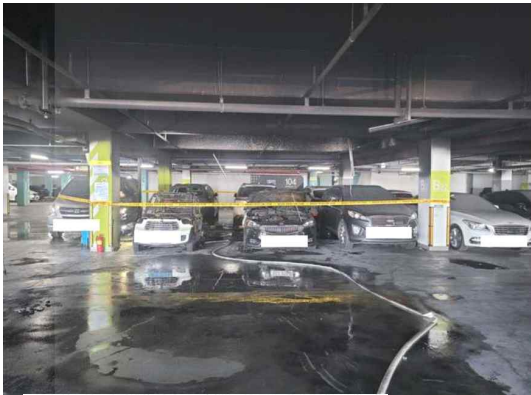
사고현장



화재현장 도착시 주차장 공간으로 검은 연기 분출

초진단계) 화재진압 모습
(배터리가 있는 하부에서 계속 불꽃 발생)

사고현장



지하1층 주차장 발화지점 주변 전경



최초 신고자 사진촬영 (가스 배출 및 차량 중간부 불꽃 관찰)



최초 신고자 사진촬영 (차량 외부 화염)

피해상황과 원인 추정

전기차는 전소되고 인근 차량 5대가 반소 및 부분소 피해 발생하였고,
주차장 천장과 그 외 주차 차량에 그을음 피해 발생

전기차 배터리에서 열폭주가 일어나면서 발화된 것으로 추정되나 배터리
열폭주의 정확한 원인에 대해서는 판단하기 어려움

전기차 뒤쪽 주차 차량 피해



화재원인 검토



운전석 방향과 후면부에서 관찰 시
전면부에 비해 소훼가 심함

화재원인 검토



차량 좌석 앞쪽의 계기판과
핸들 주변 차량 마감재는 소실
되었으나 페달이 있는 하단부는
소훼가 덜한 편임

차량 앞쪽 계기판 및 페달 주변 (하부 쪽이 소훼가 덜함)

화재 원인 검토

- 배터리팩 상부커버 소훼 형상관찰시 운전석에 비해 조수석에서 강한 화염에 의한 백화현상이 관찰되고 알루미늄 재질의 커버가 파손되어 벌어짐
 - 현장 복원시 결합부 및 배선에서 전기적 특이점은 식별되지 않음
- 충전기 전원코드 접속 상태 (전기적 특이점 발견되지 않음)



배터리팩 전원 접속부(전기적 특이점 관찰 안됨)



구동모터

인버터

충전장치

차량 후방 충전과 관련된 주요 부품 소훼 형태

화재원인 검토

커버를 분리하여 배터리팩 내부 관찰 시
배터리와 동박 등이 외부로 이탈해 있는 것이 보임,
이는 배터리 내부에서 열폭주가 일어났음을 추정



차량 좌석 주변 및 좌석아래에 있는 배터리팩



조수석 쪽 배터리팩 내부 배터리 및 금박 이탈

열폭주

리튬이온 배터리에서 내부 화학반응이 발생하여 발열반응이 일어나고 인근 셀을 가열시켜 연쇄적으로 화학반응이 전이되는 현상

배터리는 제일 작은 단위를 셀이라고 하고, 이 셀을 직렬로 여러 개를 연결한 것을 모듈이라고 함, 모듈을 여러 개 모은 것을 팩이라고 함



열폭주 현상.

열폭주

일반적인 전기자동차의 경우, 차량 밑면 전체에 배터리가 배치되며 전압도 약 400V의 고전압 배터리가 장착되는 반면, 이 사건 차량의 경우 배터리 전압이 약 80V에 불과하여 언론에서 접하는 승용차의 열폭주 현상과는 현저한 차이가 있다

일반 전기자동차와는 달리 저용량의 배터리 팩이 장착되었고, 배터리 팩의 우측 셀에서 화학반응이 발생하여 좌측으로 이동되던 중 전기가 멈춘 상황으로 보이며 이로 인하여 전원접속부는 손상되지 않은 상황으로 판단된다

Bms 데이터

- 로그기록에서 절연저항은 배터리 팩의 절연저항으로, 34M Ω 부터 60M Ω 까지 일정하지 못하고 불안정한 상태임

- 오류 메시지는 대부분 Cell UVP와 Cell UTP이며, UVP는 배터리 셀 중 하나 이상의 전압이 너무 낮아졌음을 의미하는데 이 경고의 메시지는 배터리 셀에서 과방전, 배터리의 불균형 및 배터리의 노화 및 열화가 진행되었음을 의미함. UTP는 배터리 셀의 온도가 너무 낮아졌음을 의미하는데 0°C 이하로 떨어지는 경우 성능이 저하됨

(사진 참조)

NO	Kine	Time	Ah	Code	Type	Value	Spec	Pos
1	Fault	2623h 58m 18s	31498679	81	Warning Release	Cell UVP	3.307 V	3.200 V -
2	Fault	2623h 58m 25s	31499012	65	Warning Occur	Cell UVP	3.033 V	3.100 V -
3	Fault	2623h 58m 35s	31499250	81	Warning Release	Cell UVP	3.230 V	3.200 V -
4	Fault	2624h 01m 24s	31502958	65	Warning Occur	Cell UVP	3.060 V	3.100 V -
5	Fault	2624h 01m 30s	31502989	81	Warning Release	Cell UVP	3.259 V	3.200 V -
6	Fault	2624h 01m 52s	31503620	65	Warning Occur	Cell UVP	3.095 V	3.100 V -
7	Fault	2624h 01m 58s	31503634	81	Warning Release	Cell UVP	3.219 V	3.200 V -
8	Fault	2731h 10m 29s	32664768	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-0.7 °C	0.0 °C -
9	Fault	2732h 02m 06s	32667408	85	Warning Release	CH Cell UTP	2.0 °C	2.0 °C -
10	Fault	2768h 31m 07s	32954415	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-0.1 °C	0.0 °C -
11	Fault	2774h 36m 20s	32954415	85	Warning Release	CH Cell UTP	2.0 °C	2.0 °C -
12	Fault	2805h 31m 02s	33257137	65	Warning Occur	Cell UVP	3.076 V	3.100 V -
13	Fault	2805h 31m 07s	33257382	73	Warning Occur	Pack UVP	61.7 V	62.0 V -
14	Fault	2805h 31m 17s	33257746	76	Warning Occur	Low SOC	9.90%	10.00% -
15	Fault	2805h 31m 18s	33257776	89	Warning Release	Pack UVP	64.1 V	64.0 V -
16	Fault	2805h 31m 28s	33257934	81	Warning Release	Cell UVP	3.379 V	3.200 V -
17	Fault	2806h 23m 58s	33260454	92	Warning Release	Low SOC	16.40%	20.00% -
18	Fault	2863h 43m 01s	33668544	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-0.1 °C	0.0 °C -
19	Fault	2874h 45m 59s	33671471	85	Warning Release	CH Cell UTP	2.0 °C	2.0 °C -
20	Fault	2884h 07m 28s	33671622	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-0.1 °C	0.0 °C -
21	Fault	2885h 48m 21s	33672413	85	Warning Release	CH Cell UTP	-0.8 °C	2.0 °C -
22	Fault	2909h 32m 43s	33905341	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-7.1 °C	0.0 °C -
23	Fault	2910h 02m 45s	33906739	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-6.8 °C	0.0 °C -
24	Fault	2911h 18m 45s	33910613	85	Warning Release	CH Cell UTP	2.0 °C	2.0 °C -
25	Fault	2921h 05m 53s	33952492	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-0.1 °C	0.0 °C -
26	Fault	2925h 49m 47s	33962797	85	Warning Release	CH Cell UTP	-4.4 °C	2.0 °C -
27	Fault	2939h 52m 07s	34371547	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-0.8 °C	0.0 °C -
28	Fault	2940h 20m 38s	34373001	85	Warning Release	CH Cell UTP	0.5 °C	2.0 °C -
29	Fault	2941h 11m 07s	34382760	69	Warning Occur	CH Cell UTP	-5.1 °C	0.0 °C -
30	Fault	2943h 36m 45s	34386630	85	Warning Release	CH Cell UTP	2.0 °C	2.0 °C -

<-로그기록에서 오류메시지의 종류.

Bms 데이터

- 오류메시지는 첫번째 사진과 같이 UVP 및 UTP로서 대부분 2번 셀에 집중되어 있음.
2번 셀에서 저전압경고 및 저온경고가 집중되어 나타나는 점으로 보아 셀의 기능이 저하 및 열화된 것으로 보임. 이러한 셀은 충전할 때 전압이 올라가면서 열이 발생할 수 있음.

- 최종 로그기록인 두번째 사진을 보면, 4031h57m 시간대에 절연저항이 44657kΩ에서 15kΩ으로 급격히 떨어지는 현상이 확인되므로 이때 기능이 저하된 셀에서 절연 파괴가 발생한 것으로 판단됨.

CellMax	CellMaxPos	CellMin	CellMinPos	Cell Ave	TempMax	TempMaxPos	TempMin	TempMinPos
3.347 V	3	3.307 V	2	3.336 V	28.4 °C	1	26.1 °C	2
3.120 V	3	3.033 V	2	3.097 V	28.5 °C	1	26.2 °C	2
3.282 V	3	3.230 V	2	3.269 V	28.6 °C	1	26.4 °C	2
3.151 V	3	3.060 V	2	3.127 V	30.0 °C	1	27.6 °C	2
3.315 V	3	3.259 V	2	3.302 V	30.1 °C	1	27.7 °C	2
3.174 V	3	3.095 V	2	3.154 V	30.2 °C	1	27.8 °C	2
3.278 V	3	3.219 V	2	3.262 V	30.4 °C	1	28.0 °C	2
3.489 V	1	3.484 V	2	3.487 V	-0.1 °C	4	-0.7 °C	1
3.576 V	10	3.567 V	19	3.570 V	4.8 °C	3	2.0 °C	2
4.084 V	1	4.083 V	2	4.083 V	1.6 °C	3	-0.1 °C	2
4.081 V	1	4.079 V	2	4.080 V	3.8 °C	3	2.0 °C	2
3.116 V	3	3.076 V	6	3.099 V	13.3 °C	3	12.4 °C	2
3.105 V	3	3.064 V	15	3.086 V	13.4 °C	3	12.5 °C	2
3.223 V	3	3.196 V	6	3.210 V	13.7 °C	3	12.7 °C	2
3.222 V	3	3.193 V	15	3.209 V	13.7 °C	3	12.7 °C	2
3.388 V	3	3.379 V	11	3.383 V	13.8 °C	3	12.9 °C	2
3.439 V	1	3.435 V	2	3.438 V	13.1 °C	3	12.3 °C	2
4.081 V	1	4.080 V	2	4.080 V	1.0 °C	3	-0.1 °C	2
4.077 V	1	4.074 V	2	4.075 V	4.0 °C	3	2.0 °C	2
4.072 V	1	4.071 V	2	4.071 V	1.0 °C	3	-0.1 °C	2
4.071 V	1	4.071 V	2	4.071 V	0.3 °C	3	-0.8 °C	2
3.807 V	1	3.802 V	2	3.806 V	-7.0 °C	1	-7.1 °C	2
3.803 V	10	3.798 V	2	3.801 V	-6.5 °C	3	-6.8 °C	2
3.891 V	10	3.880 V	2	3.885 V	6.7 °C	3	2.0 °C	2
4.093 V	4	4.090 V	2	4.092 V	0.9 °C	3	-0.1 °C	2
4.089 V	15	4.086 V	2	4.087 V	-3.4 °C	3	-4.4 °C	2
3.486 V	7	3.480 V	2	3.483 V	-0.1 °C	3	-0.8 °C	2
3.529 V	10	3.523 V	2	3.526 V	2.8 °C	3	0.5 °C	2
3.609 V	1	3.606 V	2	3.608 V	-4.9 °C	3	-5.1 °C	1
3.669 V	10	3.663 V	2	3.664 V	5.7 °C	3	2.0 °C	2

<- 2번셀에서 대부분의 오류가 검출됨

BMS 로그기록

-146.3 A	61.9 V	13.717 V	3.321 V	3	3.078 V	2	3.099 V	31.0 °C	4	30.2 °C	1	30.5 °C	-39 °C	0 °C	29 °C	41700 kΩ	0x00 00 00
-50.9 A	64.2 V	13.724 V	3.220 V	3	3.202 V	2	3.212 V	31.2 °C	4	30.3 °C	2	30.7 °C	-39 °C	0 °C	29 °C	44657 kΩ	0x00 00 00
0.1 A	71.9 V	13.690 V	3.700 V	10	3.694 V	2	3.697 V	16.1 °C	4	15.9 °C	2	16.0 °C	-38 °C	0 °C	18 °C	15 kΩ	0x00 00 00
0.0 A	73.9 V	13.554 V	3.702 V	10	3.696 V	2	3.699 V	16.1 °C	4	15.9 °C	2	16.0 °C	-38 °C	0 °C	18 °C	60000 kΩ	0x00 00 00
12.2 A	71.9 V	13.676 V	3.700 V	10	3.695 V	2	3.698 V	16.1 °C	4	15.9 °C	1	15.9 °C	-38 °C	0 °C	18 °C	15 kΩ	0x00 00 00
0.0 A	76.0 V	0.000 V	3.800 V	1	3.800 V	1	3.800 V	0.0 °C	0	0.0 °C	0	0.0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 kΩ	0x00 00 00

화재조사보고서에서 전원접속부의 상태는 양호하여 전기적 특이점이 관찰되지 않는다고 하였으므로 최초 발화부는 전원접속부를 배제할 수 있고 배터리 우측에서 소훼정도가 심한 상태이이고 화재 발생 직전 배터리 내부 절연상태가 급격히 저하된 점으로 보아 셀 내부 분리막이 손상되면서 화학반응으로 인한 발열로 인하여 인근 셀에 전이되고 화재가 발생한 상황으로 판단됨.

화재원인 결론

- 전기차 충전기와 전원코드접속부, 차량후방에 위치한 충전장치, 인버터, 구동모터 부위는 발화원이 아닌 것으로 판단됨
- 배터리팩 커버의 소훼형태로 판단시 조수석 방향의 배터리팩 내부에서 열에 의해 취약해진 알루미늄 재질의 커버가 압력에 의해 파손이 일어나면서 오프가스가 외부로 배출된 것으로 추정
- 배터리 셀 외부로 이탈한 배터리 및 동박의 형태로 보아 배터리 내부에서 열폭주가 일어나면서 급격한 화염이 외부로 분출되어 발화된 것으로 추정
- 배터리 셀은 세로방향으로 배치되어 있고 우측 셀에서 상부 커버가 손상되어 내부 부품과 금속편이 이탈되어 있으나 좌측 셀에서는 상부커버가 손상되지 않은 점을 보아 우측 셀에서 발열된 상황으로 판단됨

화재원인 결론

- 소화된 상태의 이 사건 차량의 전면부는 상대적으로 양호한 상태이고 중앙부분 및 뒷부분이 심하게 소훼된 상태이고, 중앙부분에 위치하고 있는 배터리 팩의 커버에서 우측부분에 심한 수열현상이 관찰되고, 배터리 팩의 우측 뒤쪽 모서리에서 내부 열에너지가 토출되면서 커버가 녹아 변형된 흔적이 식별되며 조수석 하부 플로어 패널이 심하게 소훼된 점으로 보아 배터리 팩 조수석 부분에서 최초 발화된 것으로 판단됨.
- BMS 로그기록을 보면 배터리 내부 절연저항의 변화가 심하며 2번 셀에서 저전압경고 및 저온경고가 지속적으로 검출되었고 특히 화재 발생 직전에는 절연저항이 급격히 떨어졌으며, 화재조사보고서에 의하면 배터리 팩 내부 전원연결부에서는 전기적 특이점이 없는 것으로 확인되었으므로 배터리 팩 내부 우측 셀에서 절연파괴가 일어나면서 화학반응에 의해 발열되었고 주변 셀에 전이되어 최종적으로 화염에 의해 이 사건 차량이 전소된 상황으로 판단됨.

감사합니다
Q&A