

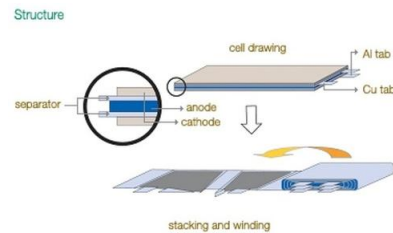
## Li-Polymer 배터리 사고원인 분석기법에 관한 연구

이기연, 방선배, 김동욱, 김재현, 박진영, 박광욱  
한국전기안전공사 전기안전연구원

### Study on the Analysis Technique of Accident Cause for Li-Polymer Battery

Ki-Yeon Lee, Sun-Bae Bang, Dong-Ook Kim, Jae-Hyun Kim, Jin-Young Park, Kwang-Muk Park  
Electrical Safety Research Institute(subsidiary of KESCO)

**Abstract** - 본 논문에서는 휴대용 IT 기기 및 EV, ESS 등 사용이 급증하고 있는 리튬 폴리머 배터리의 화재사고 원인 분석기법에 대하여 나타내었다. 사고 원인 분석기법은 사례분석을 통하여 외형 및 탄화패턴 분석을 통한 발화 추정위치로 외력에 의한 사고 및 내부 절연 열화에 의한 사고 원인 분석 등을 나타내었다. 사고원인 분석은 배터리 안전성 확보와 사고 재발 방지를 위한 대책 마련에 필수적인 기술로 향후 증가하는 제품사고에 대한 분석기법 개발에 기초연구로 활용하고자 한다. 본 논문에서 제시한 분석기술과 향후 내부 절연 열화 원인 분석 기법을 개발하여 리튬 계열 배터리에서 발생하는 사고에 대하여 정확한 원인 분석에 활용할 것이다.



<그림 1> Li-Polymer 배터리 구조

## 1. 서 론

2014년 스마트폰 국내 보급률은 81%이며, 전세계 보급률은 38.6% 이상 차지하고 있다. 이와 같이 휴대용 IT 기기 시장이 확대되고 수요가 증가함에 따라 안정적인 전원을 위한 신뢰성 확보와 소형화, 경량화, 고에너지 밀도를 위한 리튬 계열 배터리의 공급이 증가하고 있다. 또한, 전세계의 CO2 삭감 등 환경 문제를 배경으로 PV 등의 재생가능 에너지 보급이나 EV의 실용화가 기대되고 있어 대용량 배터리의 사용이 증가할 것으로 기대되고 있다[1-3].

리튬 계열 배터리는 액체 전해질을 사용하는 리튬 이온과 고체, 고분자 전해질을 사용하는 리튬 폴리머가 있으며, 최근에는 폭발 위험성이 높은 리튬 이온보다 비교적 안전한 리튬 폴리머 사용이 증가하고 있는 추세이다. 하지만 리튬 폴리머 배터리는 폭발의 위험은 적지만 화재의 위험은 존재한다. 최근 스마트폰에서 발생한 폭발 및 화재사고 유형을 살펴보면 리튬 이온 배터리의 경우 폭발 사고를 동반하며 화재가 발생하고 있으며, 리튬 폴리머 배터리의 경우 폭발은 아니지만 발화에 의한 화재사고가 종종 발생하고 있다.

본 논문에서는 태블릿PC에서 발생한 리튬 폴리머 배터리 화재사고에 대한 원인을 분석하였다. 사고원인 분석은 배터리 외형 및 내부구조의 탄화패턴 분석을 통하여 발화 추정위치를 분석하였으며, 발화 추정 위치에서 발생 가능한 화재원인을 분석하였다. 또한, 사고사례 분석을 통하여 사고 원인 분석 절차를 정립하였다. 화재 원인은 내부 양극에서 발생한 Dendrite 등으로 인한 절연열화로 분석되었으며, 향후 절연열화 원인을 분석하는 기법을 개발하고자 한다.

## 2. Li Polymer 배터리 사고원인 분석

### 2.1 Li-Polymer 배터리 내부 구조

리튬이온 배터리는 이차 전지의 일종으로 방전 과정에서 리튬 이온이 음극에서 양극으로 이동하며, 충전시 리튬 이온이 양극에서 음극으로 다시 이동하여 제자리를 찾아 에너지가 저장된다. 리튬 폴리머 배터리는 리튬이온 배터리의 전해질로 폴리머를 사용한 것으로 넓은 의미로는 전해질 이 외에 음극과 양극의 활성 물질에 전도성 고분자 등을 이용한 것도 포함된다. 현재 휴대기기용으로 사용되고 있는 리튬 폴리머 배터리는 Polyethylene glycol이나 Polyvinylidene fluoride로 구성된 폴리머에 전기분해액을 포함시켜 교질화(겔화)한 것으로, 본질적으로는 리튬 이온 전지와 큰 차이가 없지만 전해질이 준 고체 상태이기 때문에, 용액이 잘 새어나오지 않는다는 장점이 있다. 또한, 다른 방식의 2차 전지에 비해 상당히 가볍고, 메모리 효과도 매우 적으며, 모양도 비교적 자유롭게 만들 수 있기 때문에 이용이 증가하고 있다.

그림 1은 리튬 폴리머 배터리의 내부 구조를 나타낸 것으로 음극과 양극 사이에 분리판을 적층하고 감아서 만든 형태로 되어 있다.

### 2.2 사고 Li-Polymer 배터리의 외형 및 탄화 패턴 분석

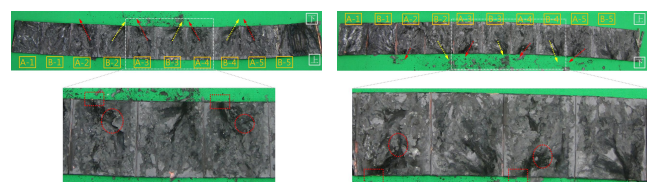
소손된 리튬 폴리머 배터리의 외형은 그림 2에 나타내었으며, (a)의 정면 좌측에서 열에 의한 탄화패턴이 많이 나타났다. 또한, (c)에 나타낸 film case를 제거한 후 정면 하단부에서 하부 방향으로 화염이 진행된 탄화 패턴이 나타났다.



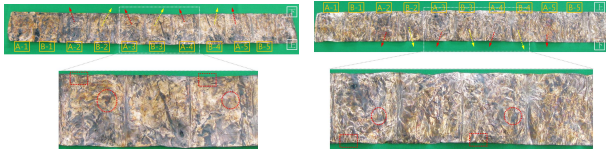
(a) 정면 (b) 후면 (c) 정면(film case 제거후) (d) 후면(film case 제거후)  
<그림 2> 사고 Li-Polymer 배터리 외형

그림 3과 4는 소손된 리튬 폴리머 배터리의 적층면 내부의 탄화패턴을 나타낸 것으로, 그림 4는 그림 3에 대하여 탄화된 양극과 분리판을 제거한 후 음극 소재만 나타낸 것이다.

그림 3과 4에 대한 배터리의 외형은 외력에 의한 적힘 현상은 없으며, [A]면과 [B]면에 반복적으로 유사한 탄화 패턴이 나타났다. 또한, [A]-3과 [A]-4 적층 면에서 [A]-1과 [A]-5 적층면으로 갈수록 탄화 패턴이 약하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 외측에 대하여 [A]면 기준으로 ○으로 표시한 우측 중앙부에서 □로 표시한 좌측 하부로 화염이 진행되었다.



(a) 내측 (b) 외측  
<그림 3> 배터리 내부 적층면 탄화 패턴



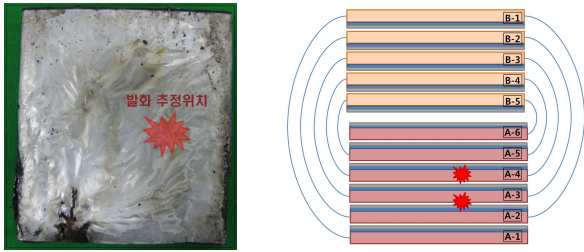
(a) 내측 (b) 외측  
**〈그림 4〉 배터리 내부 음극 적층면 탄화 패턴**

그림 5는 배터리 음극의 탄화 패턴에 화염 진행 방향을 분석한 것으로 [A]-3 적층면의 내측과 외측에 나타난 탄화 패턴으로부터 (c)와 같이 배터리 외형에 대한 화염 진행방향을 우측 중간부분에서 좌측 하단부 배터리가 터진 방향으로 진행했음을 알 수 있다.



(a) 내측(A-3) (b) 외측(A-3) (c) 정면(커버방향)  
**〈그림 5〉 배터리 음극 탄화패턴에 따른 화염 진행 방향 분석**

그림 4와 5로부터 배터리의 최초 발화 추정위치는 그림 6에 나타난 것과 같이 배터리 내부 적층면의 가장 많은 수열흔이 나타난 [A]-3 또는 [A]-4 적층면에서 발화가 시작되었으며, [A]와 [B]면의 반복적인 탄화패턴 분석을 통하여 배터리 우측 중간부분에서 발화가 시작되어 화재가 진행된 것을 알 수 있다.



(a) 정면(커버방향) (b) 배터리 적층 구조  
**〈그림 6〉 배터리의 발화 추정 위치 분석**

이상과 같이 탄화패턴 분석결과, 배터리는 외력에 의한 손상 흔적은 없었으며, 내부에서 외부로 과열된 상태로 내부 적층면에서 발화가 시작되었다. 배터리 내부의 발화는 분리판의 절연상태 저하로 발화된 것으로 추정된다.

### 2.3 배터리 내부 절연 열화 원인 분석

리튬 계열 배터리는 강한 충격과 고열에 노출되거나, 보호회로 없이 사용 또는 고장 상태로 사용시 과충전, 과방전에 의해 화재, 폭발 사고가 발생할 수 있기 때문에 안전성 문제로 인하여 보호회로를 적용하고 있다. 보호회로(PCM)는 셀이 일정 전압 이하 또는 이상으로 상태를 방지하는 것으로 보통 최저 2.5~2.6[V], 최대 4.1~4.2[V] 이내로 제한한다. 또한, BMS는 PCM의 기능에 셀 밸런싱 기능을 포함한 것이며, 일부 제품은 안전성 확보를 위하여 BMS에 온도감지 센서와 사이클 메모리 등 특수 기능을 포함하여 설계한다.

배터리 내부 분리판의 절연상태를 저하시키는 요인은 여러 원인으로 발생할 수 있지만, 본 논문에서는 배터리 내부 dendrite 현상에 의한 절연열화에 대하여 나타내었다.

그림 7은 과충전에 의한 리튬 이온들이 양극 위에 형성되어 쌓이고 리튬 금속 사슬을 형성하는 과정을 나타낸 것으로 Dendrite는 제조과정에서 매우 작은 금속 불순물이 내부에 들어가거나, 배터리 충전, 방전시 리튬 이온들이 전극 사이를 이동하면서 발생할 수 있다. 또한, Dendrite는 금속 및 먼지 입자가 성장하여 나타나는 것으로, 양 전극 위에 형성되어 지속적인 성장으로 내부 단락을 일으켜 배터리의 파괴 및 화재를 초래할 수 있다. 배터리는 양극과 음극 두 개의 전극을 갖고 있는데, 두 개의 전극을 절연성 폴리머에 의하여 분리시키고 있다. 이 상태에서 양극에 바늘과 같은 형상으로 성장되는 dendrite는 분리판을 파괴, 통과하여 양극과 음극의 단락에 의한 사고로 화재를 일으킬 수 있다[4].



(a) 초기 (b) 형성 후

**〈그림 7〉 Dendrite 진행 형태**

### 2.4 리튬 폴리머 배터리 사고원인 분석기법

이상과 같이 리튬 폴리머 배터리의 화재사고에 대하여 외형분석 및 배터리 내부 분해 검사를 통하여 발화 위치를 분석하였다.

본 논문에서는 발화 추정위치 분석을 통하여 배터리 내부에서 발화가 시작된 것을 확인하였지만, 배터리 내부 양극과 음극이 소손되어 내부 절연열화 원인은 분석하지 못하였다. 지금까지 리튬 계열 배터리의 소손 원인 배터리의 과열 상태, 즉 내부에서 외부 방향으로 화염이나 폭발의 흔적에 의한 상태 분석과 배터리 외부의 외력에 의한 찌힘 현상 유무에 따라 배터리 고장여부 또는 사용자 과실 여부를 분석하는 것이 대부분이었다. 하지만 배터리 문제와 사용자 과실에 어떠한 과정으로 발화가 시작되었는지 증명하는 분석은 없었으며, 내부 단락 등에 의해 발화가 시작된 것으로 추정하였다.

본 논문에서는 배터리 내부에서 발화된 적층구조 분석을 통하여 발화 원인을 분석하였다. 비록 배터리 내부의 절연 열화 원인은 분석하지 못하였지만 사고 사례 분석을 통하여 사고 원인 분석기법을 정립하였다.

리튬 폴리머 배터리의 사고원인 분석은 다음과 같다.

- 1) 외력에 의한 찌힘 등 외형 및 탄화패턴 분석
- 2) 배터리 내부 분해 검사를 통한 내부 탄화패턴 분석
- 3) 발화 추정 위치 분석
- 4) 발화 추정 위치에 대한 SEM 및 EDX 분석을 통한 성분분석
- 5) 분리판에 대한 열 특성 분석 등
- 6) 종합 분석

이상과 같이 음극 및 분리판의 성분분석 및 분리판의 열 특성 분석을 통하여 정확한 발화원인을 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 소손된 리튬 폴리머 배터리의 외형 및 탄화패턴 분석과 배터리 내부 분해 검사를 통하여 발화 추정위치를 분석하였다. 배터리의 소손 상태가 심하여 정확한 내부 절연 열화 원인은 분석하지 못하였지만 향후 발생하는 리튬 폴리머 배터리의 화재사고 발생시 사고원인 분석기법을 정립하였다.

향후 음극 및 분리판의 SEM, EDS 등을 이용한 성분분석과 열 특성 분석을 통하여 내부 절연 열화 원인 분석기법을 정립하고자 한다. 또한, 화재가 발생한 제품에 사용되는 리튬 폴리머 배터리는 2개의 배터리가 병렬로 연결되어 사용하는 제품으로 사고난 배터리 외의 연결되어 있는 배터리에서 과전류로 인한 흔적이 분석되었다. 사고 형태와 분석결과에 따라 병렬 연결 배터리와 사고물 사이에 과전류 방지장치가 있었을 경우 사고의 영향을 줄일 수 있을 것이며, 화재로 이어지지 않고 단순 제품 고장이 발생했을 것으로 추정된다.

따라서, 리튬 폴리머 배터리의 정확한 사고원인 분석을 통하여 사고 분석기법 정립과 추가 연구를 통하여 리튬 폴리머 배터리를 사용하는 제품의 안전성 확보를 위한 구조적 개선 방향을 정립할 것이다.

### [참 고 문 헌]

[1] www.eMarketer.com, “전세계 스마트폰 보급률”, 2014  
 [2] 김선준, 박시홍, “2-4 Cell 리튬이온 멀티 배터리 보호회로 Analog Front End(AFE) IC 설계”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템분회 추계학술대회 논문집, 217-220, 2011  
 [3] 편집부, “고용량 리튬이온 배터리 개발 등”, 전기의 세계, 제59권 제2호, 9-11, 2010  
 [4] phys.org, “Stanford scientists create a ‘smart’ lithium-ion battery that warns of fire hazard”, 2014