

# ESS (에너지 저장장치) 배터리 화재사례를 통한 감식기법 및 연소 확산방지에 관한 연구

## A Study on the Identification Technique and Prevention of Combustion Diffusion through ESS (Energy Storage System) Battery Fire Case

이정일\*

Jung-Il Lee\*

Professor, Director, Fire Education &amp; Training Division / Fire Marchall, National Fire Service Academy, Gongju, Republic of Korea

\*Corresponding author: Jung-Il Lee, gydhhh@korea.kr

### ABSTRACT

**Purpose:** To identify internal self ignition and ignition caused by external flames in energy storage rooms, and to analyze the difference between ignition due to overheating and ignition caused by external heat sources. **Method:** membrane melting point measurement, battery external hydrothermal experiment, battery overcharge experiment, comparative analysis of electrode plate during combustion by overcharge and external heat, overcharge combustion characteristics, external hydrothermal fire combustion characteristics, 3.4 (electrode plate comparison) / 3.5 (overcharge) / 3.6 (external sequence) analysis experiment. **Result:** Since the temperature difference was very different depending on the position of the sensor until the fire occurred, it is judged that two temperature sensors per module are not enough to prevent the fire through temperature control in advance. **Conclusion:** The short circuit acts as an ignition source and ignites the mixed gas, causing a gas explosion. The electrode breaks finely due to the explosion pressure, and the powder-like lithium oxide is sparked like a firecracker by the flame reaction.

**Keywords:** Energy Storage System (ESS), Membrane Melting Point Measurement, Battery External Hydrothermal Experiment, Battery Overcharge Experiment, Overcharge and External Hydrothermal Overcharge Combustion Characteristics, External Hydrothermal Fire Combustion Characteristics

### 요약

**연구목적:** 에너지 저장실의 외부 화염에 의한 내부자기 점화 및 점화를 식별하고, 과열로 인한 점화와 외부 열원에 의한 점화의 차이를 분석하는 것이다. **연구방법:** 분리막 녹는점 측정, 배터리 외부 수열 실험, 배터리 과충전 실험, 과충전과 외부수열에 의한 연소 시 전극 판 비교분석, 과충전 연소 특징, 외부수열 화재 연소특징, 3.4(전극판 비교)/ 3.5(과충전)/ 3.6(외부수열) 분석 실험을 하였다. **연구결과:** 화재 발생 시까지 센서의 위치에 따른 온도 차이가 극심했으므로 기존처럼 한 모듈 당 온도 센서 두 개로는 측정값이 부족해 온도제어를 통한 화재를 사전에 방지할 수 없다고 판단한다. **결론:** 단락이 점화원으로 작용하여 혼합가스에 착화돼 가스폭발이 발생하고, 폭발 압력에 의해 전극이 잘게 파손되며, 가루형태의 리튬산화물이 불꽃반응에 의해 폭죽과 유사한 불꽃이 분출되었다.

**핵심용어:** 에너지 저장장치, 분리막 녹는점 측정, 배터리 외부 수열 실험, 배터리 과충전 실험, 과충전과 외부수열과충전 연소 특징, 외부수열 화재 연소특징

Received | 8 April, 2020

Revised | 10 April, 2020

Accepted | 16 June, 2020

 OPEN ACCESS

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.

## 서론

Table 1의 ESS (에너지 저장장치)는 생산된 전기를 저장 장치(배터리 등)에 저장했다가 전력이 필요할 때 공급하여 전력 사용 효율을 향상시키는 시스템으로, 2018년 1,253개소에서 2019년 12월 기준 전국 ESS 설치 현황은 총 1,954개소이며, 2020년 6월 현재 2,055개소로 전국적으로 설치가 늘어나고 있는 추세이다.

**Table 1.** Nationwide ESS installations (2019)

계	서울	부산	인천	대구	광주	대전	울산	세종	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주
1,954	61	48	39	37	29	26	50	15	164	112	138	242	277	328	211	129	48

그러나 ESS는 한정된 공간에 많은 에너지를 저장해야 한다는 특성에 의하여 필연적으로 많은 양의 배터리들을 밀집되게 배치시켜야 하는데 이러한 특성이 ESS실에 화재가 날 경우에 연쇄적으로 연소가 확대 되는 등의 더욱 큰 피해를 주고 있다. 실제로 ESS 화재가 최근 1년 6개월간 총 21건(17년 8월 ~ 19년 12월)이 발생으로 재산피해는 무려 496억, 부상 2명이 발생했으나 화재 감식기법의 부족으로 화재원인을 밝히지 못하고 있다.

본 연구는 최근 발생한 태양광 발전소 ESS실 전소 사례를 통해 ESS실의 화재원인을 밝혀낼 수 있는 감식기법에 대하여 연구함으로써 조사 착안점을 정리하고 더 나아가 ESS실에 화재가 발생했을 경우 연소 확대를 지연 혹은 차단시켜 인명피해와 재산피해를 줄일 수 있는 방법에 대하여 연구하고자 한다.

## ESS (Energy Storage System)의 개요

### ESS (Energy Storage System)의 구성

ESS는 배터리와 BMS, PCS, EMS 등 다양한 제품들을 목적에 따라 하나의 시스템으로 연동하여 통합적으로 관리와 통제, 제어를 하는 종합적인 시스템이다. 배터리는 PCS를 거쳐 전기를 저장하였다가 필요할 때 전기를 방전하는 역할을 하는 구성부품이고, BMS는 배터리의 충전상태 등을 외부 인터페이스를 통해 알려주고 과충전 등의 보호기능을 수행한다. PCS는 발전원에서 전력을 입력받아 배터리에 저장하거나 계통으로 방출하기 위하여 전기의 특성을 변환한다. EMS는 배터리의 상태 모니터링과, PCS의 상태를 모니터링 및 제어를 하며, 컨트롤센터 등에서 ESS를 모니터링하고 제어하기 위한 운영시스템이다.



**Fig. 1.** Short battery (class W) ~ correlations of the Battery System (MW Class)

Fig. 1과 같이 ESS의 전지시스템은 단전지(W급)인 배터리 셀(cell)을 여러 개를 모아 하나의 모듈(module)로 만들고 이 모듈(module)을 직렬 또는 병렬로 연결한 랙(rack)이 집합되어 구성한다.

## ESS (Energy Storage System)의 화재사례 및 실험

### 화재사례

Table 2는 최근 ESS설비에서 발생한 화재사례이다. ESS 화재가 발생하였고 태양광 연계를 용도로 하는 사업장에서 대부분 화재가 발생하여 화재건수에서 절반 이상의 비율을 차지하고 있으며 화재사고 원인은 BMS 오류, PCS 파손, 부실공사부 주의 등이고, 배터리 과충전, 열 발생, 고온다습, 서지아크 및 EMI 등 전형적인 안전보호설계 미흡으로 추정되고 있다.

Table 2. ESS fire occurrence status

Number	Date of occurrence	Business establishment	Purpose	Manufacturer	Property damage	Cause of accident
1	2018. 11. 12.	Cheonan solar power plant	photovoltaic linkage	LG chemistry	2 hundred million	under investigation
2	2018. 11. 12.	YeongJu solar power plant	photovoltaic linkage	LG chemistry	7 hundred million	under investigation
3	2018. 11. 22.	Mungyeong solar power plant	photovoltaic linkage	LG chemistry	8 hundred million	under investigation
4	2018. 11. 22.	Guchang solar power plant	photovoltaic linkage	LG chemistry	4 hundred million	under investigation
5	2018. 12. 17.	Jecheon cement plant	in the factory	LG chemistry	41 hundred million	under investigation

Fig. 2는 문경 태양광발전설비 화재, 거창 풍력발전소화재, 거창 감악산 ESS실이 전소되었다. ESS화재 위험성으로 실에 서는 2차 전지 중 가장 많이 사용되는 리튬 이온 배터리는 에너지밀도가 높아 과열 및 방전, 과전류 등 화재 위험성 상존하고 있다. ESS화재 특징으로 CCTV 등을 통해 배터리실에서 최초 착화된 사실을 확인하여도, 배터리의 폭발·화재의 정확한 원인을 규명하기 어려우며, 화재 발생 시 무방비로 노출된 태양광 패널 등 발전설비로 화재가 확대되어 대규모 재산피해 발생되고 있다.

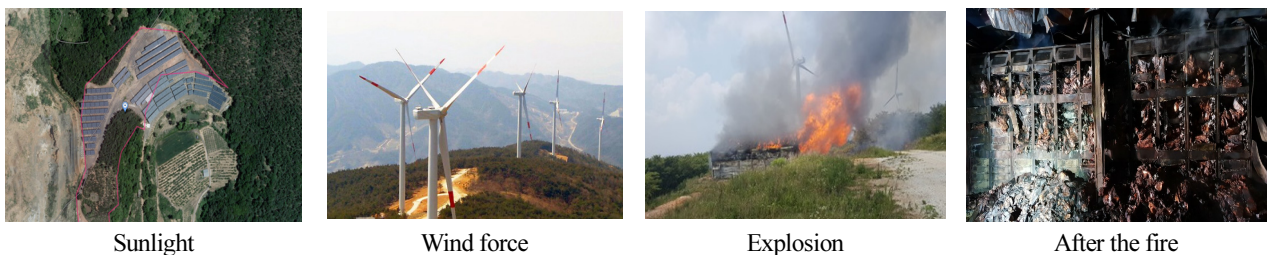


Fig. 2. Complete combustion of ESS room

Table 3은 최근 5년간 ESS 관련 화재발생 현황으로 화재발생은 계속 증가추세이다. 원인으로 첫째, ESS설치 증가이다. 산업부의 2차 전지 신산업 정책과 풍력·태양력 등 에너지 정책이 맞물려 ESS설치가 폭발적으로 증가하고 있는데 풍력·태양력 발전기의 간헐적 전력 생산 약점을 보완하기 위해 ESS활용 장려(실제 정부에서 태양광·풍력 발전과 ESS연계 설치 시 최고수준의 보조금 지급)하고 있으며, 둘째, 설계 감리 부실이다. 일부 언론에서 국내 공기업 중 ESS발주 시 설계 감리 등에 대한 전문업체 발주가 전무(全無)한 사실 등의 부실 지적한바 있다. 셋째, 시스템적 특성이다. 태양광발전과 ESS의 경우 일반적인 부하 특성과 다르게 고장이나 화재가 발생한 경우에도 전기를 계속 생산하거나 계속 전기 공급이 이루어져 사고 가능성 높다.

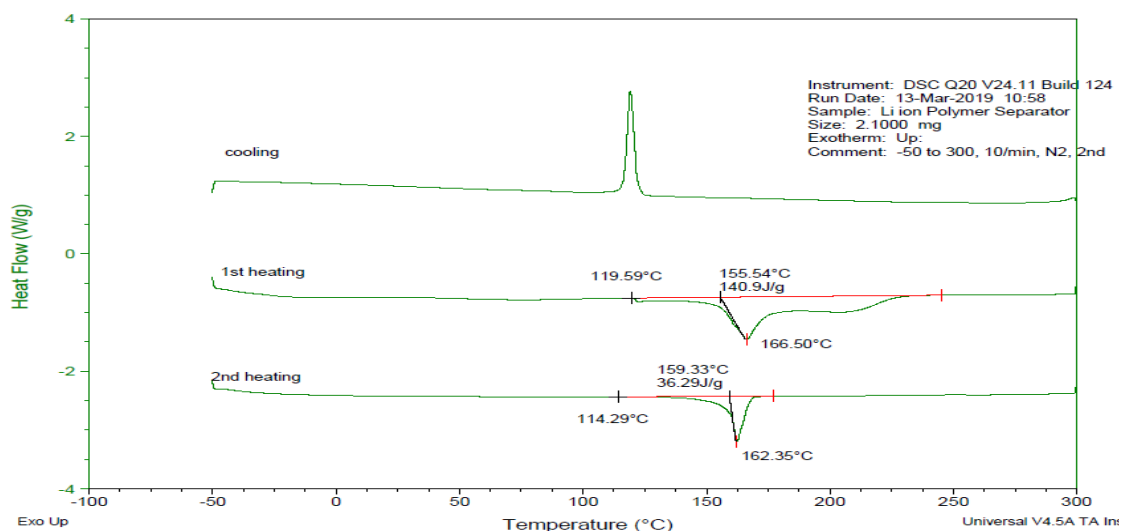
**Table 3.** The number of fires continues to increase [Unit: case]

Year	Solar Power Generator/Generator	Battery/battery	Sub total
2015	72	39	111
2016	91	74	165
2017	55	79	134
2018	87	97	184
2019	112	91	203

### 화재실험

#### 분리막 녹는점 측정

리튬이온 폴리머 배터리의 알루미늄 외피를 제거하고 분리막을 분리하여 밀봉 후 비열 및 열용량측정기(Differential Scanning Calorimetry)에 넣고 시료를 가열해서 녹인 후 냉각한 다음 다시 가열해서 녹였을 때 녹기 시작하는 점을 분석하는 방법으로 녹는점을 측정한다.



**Fig. 3.** Melting point of lithium-ion polymer battery separator

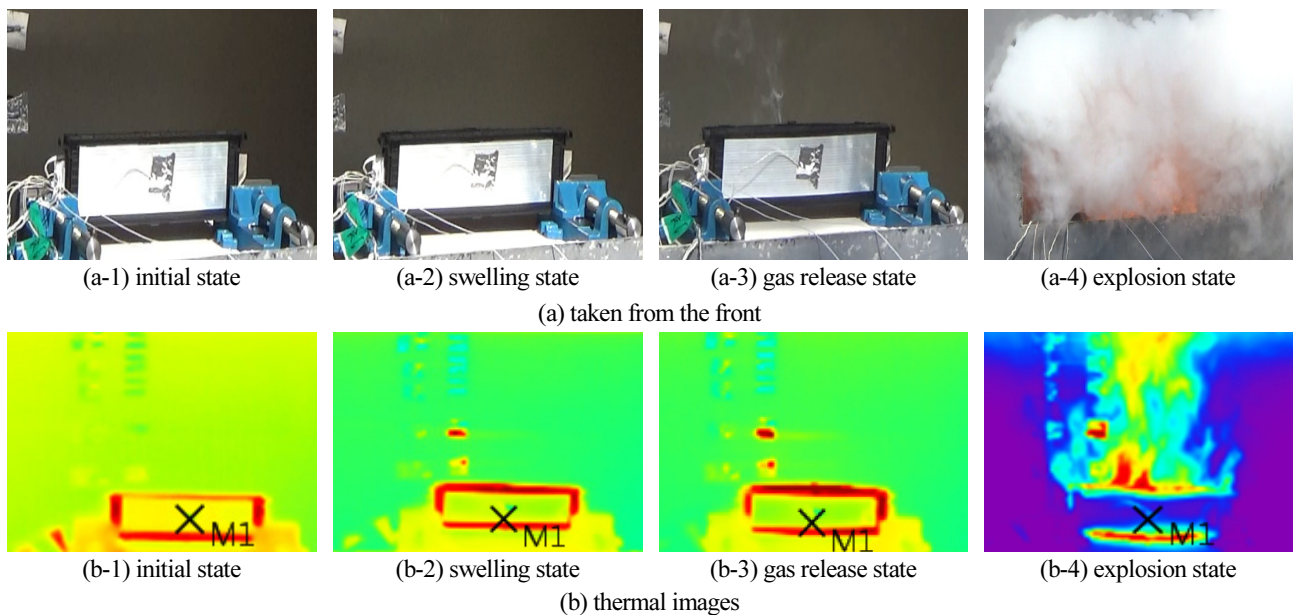
첫 번째 가열과 두 번째 가열의 그래프 형태가 다른 이유는 시료가 한번 녹으면서 시료의 형태가동을 위해 가해졌던 열 이력들이 제거되기 때문에 두 개의 그래프가 같은 시료이지만 서로 다른 형태로 나타나게 된 것이다. 같은 시료를 총 2회 반복해서 측정하였는데, 녹는점에 대한 두 개의 결과가 큰 차이가 없게 나타났다. 두 번째 가열 후 연이어 두 번째 가열시 비열(물질 1g을 1°C 올리는데 드는 열)의 차이가 100 J/g이상 큰 것으로 보아 열이 축적되어 안정화되지 않는 배터리 분리막은 작은 열로도 다시 녹는점에 도달할 수 있다는 것을 알 수 있었다. Fig. 3의 실험결과는 Table 4의 표와 같다.

**Table 4.** Melting point of lithium-ion polymer battery separator

	Division	Specific heat (J/g)	Melting starts (°C)	Melting point (°C)
1 time	First heating	139.3	124.84	166.50
	Second heating	36.69	125.18	162.35
2 time	First heating	140.9	119.59	166.50
	Second heating	36.29	114.29	162.35

**배터리 외부 수열 실험**

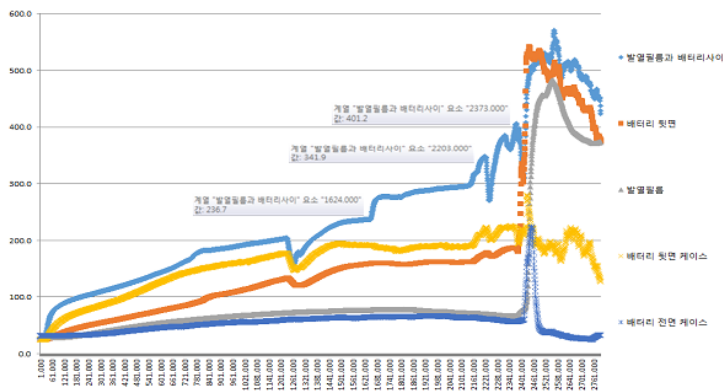
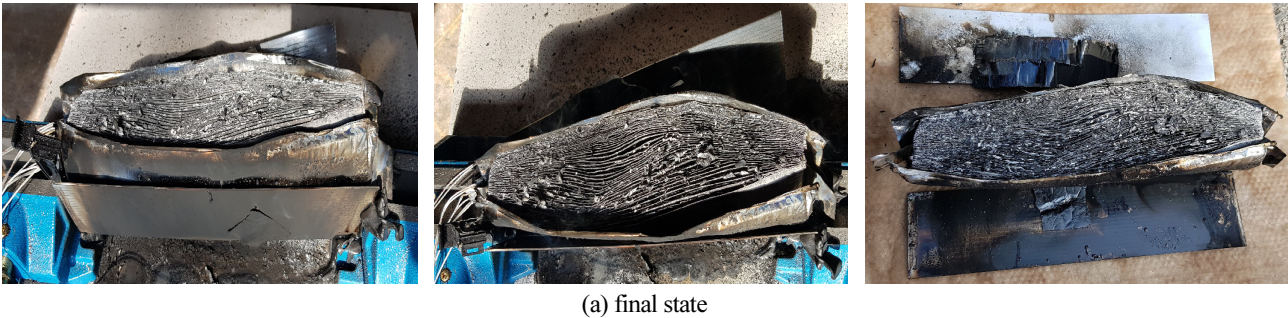
배터리 근처에 화염이나 열원이 있는 상황을 발열 히터 필름들을 통해 외부 수열을 가하는 방식으로 재연 실험을 한다. 배터리에 열을 가하는 방식은 전압에 따라 열을 높여줄 수 있는 발열히터 필름을 배터리에 부착하는 방법으로 수행한다. 이를 통해 배터리의 폭발 온도와 폭발 전·후의 현상과 연소 잔해물의 특징을 분석한다. 발열필름의 규격은 가로 × 세로(170 mm × 60 mm) 크기이고 열 패드에 인가하는 전압은 300 V로 고정한다.



**Fig. 4.** Experimental results of lithium polymer battery heating test.

분석결과

Fig. 4는 배터리 셀에 외부 수열이 가해졌을 경우의 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 정면에서 촬영한 영상을, Fig. 4(b)는 정면에서 측정한 열화상 이미지를 나타낸 것이다. 1,624초에 배터리 온도 236°C에 스웰링 현상이 시작했다. 2,203초, 341°C에서는 배터리에서 혼합가스가 다량 분출되었고, 2,373초, 401°C에서는 폭발이 일어나면서 화염에 노출되는 것을 볼 수 있었다. 위 배터리 녹는점 실험에서 얻은 기준 값 보다 월등히 높은 온도에서 배터리의 특이점(스웰링, 가스방출, 폭발적 연소)이 보이는 것은 발열 필름 단면적(170 mm × 60 mm)보다 배터리 단면적(300 mm × 100 mm)이 3배 정도 커서 열손실이 크고 외부온도 등의 영향을 받은 것으로 판단되며, 배터리의 폭발적인 연소 원인은 외부 수열에 의한 과도한 열 흡수로 인하여 알루미늄으로 감싸진 배터리 내부의 온도와 압력이 서서히 증가함과 동시에 분리막이 녹아내려 전극끼리 맞닿게 되는 데, 결국 쇼트가 나서 Fig. 4(a-4)과 같이 배터리의 파열과 함께 전해질 혼합 가스가 급격히 방출되면서 열 폭주로 이어진 것으로 보인다.



(b) temperature graph of battery heating test

Fig. 5. Final state and thermal waveform of lithium polymer battery heating test

Fig. 5는 외부 수열 실험에 따른 배터리의 최종 상태와 온도-시간 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 보듯이 배터리 외부 보호막이 압력과 열에 의하여 완전히 파손되었고 내부의 48개의 전극이 전부 노출되어 보이는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)의 배터리가열 온도 그래프에서 보듯이 외부 수열에 의한 배터리 파손에는 배터리 내부의 전극들이 끊어지거나 절단이 나지 않고 본래 원형 그대로 연소가 된 모습을 볼 수 있다. 또한 배터리가 폭발이 일어나 화재가 난 후에 불씨와 파편이 비산되지 않는 모습 또한 볼 수 있었다.

### 배터리 과충전 실험 및 분석결과

파워 서플라이를 이용하여 4.2 V로 완충된 배터리 셀에 과충전을 유도하여 실험한다. 실험은 외부 수열 실험과 마찬가지로 실제 태양광 발전 배터리 모듈에서 사용되는 케이스 안에 배터리를 넣고 충전을 수행한다. 완충된 배터리의 경우 내부 전하가가는 전압의 크기와 동일한 전압(4.2 V)을 가하면, 전위차가 없어 충전이 이루어지지 않기 때문에 충전전압보다 높은 전압인 8 V로 인가한다. 이를 통해 배터리에 과충전이 가해졌을 때의 온도 변화와 폭발 전압, 폭발 전·후의 현상과 폭발 후 전극 판의 소손상태를 분석한다. 또한 오실로스코프(Wave surfer 64Xs-A, Lecroy Co., USA)를 이용하여 폭발 시 전류변화를 측정한다.

#### 분석결과

Fig. 6은 배터리에 과충전을 가하였을 때의 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6는 정면에서 측정한 캠코더 영상을, Fig. 7는 정면에서 측정한 열화상카메라 이미지를 나타낸 것이다. 약 1200 초에 배터리 온도 58°C에서 눈에 띄는 배터리 스웰링, 즉 배터리의 부풀음 현상이 일어났다.



Fig. 6. Experimental results of lithium polymer battery overcharging test.

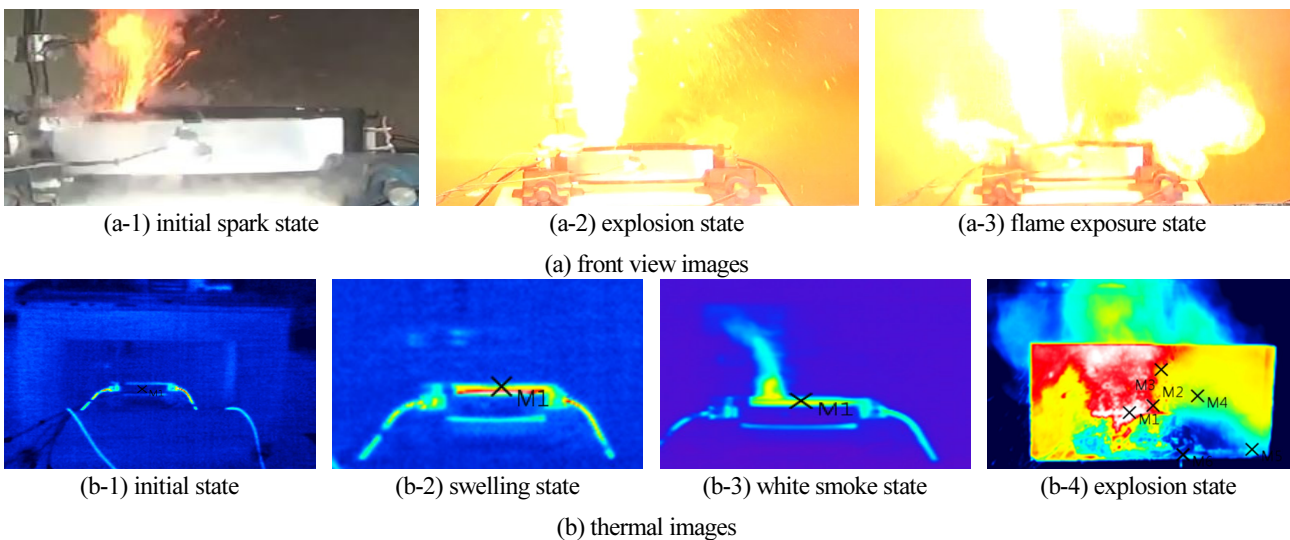


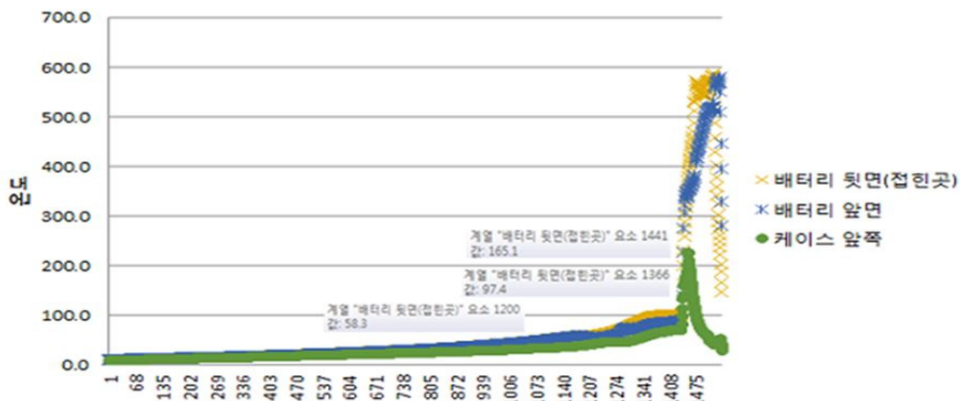
Fig. 7. Camcorder front view and Thermal images

Fig. 7의 실험결과는 1334초, 97°C에서는 배터리 피복인 알루미늄 파우치가 파열되면서 전해액에서 기화된 가스가 방출되어 나왔고, 1440초, 165°C에서는 배터리 내부에서는 분리막이 녹으면서 단락이 일어나 분해되어 기화된 전해액 가스에 착화되어 폭죽과 유사한 불꽃이 3초간 극렬히 타오른 후 약 124초간 연소가 지속된 뒤 소강상태에 접어들었다. 최대 온도는 942.5°C이상으로 나타났다. 과충전으로 인한 배터리의 화염은 외부 수열로 인한 배터리 화염과 달리 불티가 많이 날리는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 8(a)를 보면, 배터리 안 48 개의 전극이 부수어짐 없이 온전히 연소되었던 외부 수열로 인한 배터리 화재와는 달리 과충전으로 인한 배터리 화재는 전극이 모두 파괴되었다는 것을 알 수 있는데, 이 때문에 화재 시 파편이 많이 날렸던 것으로 확인된다. 폭발 자체도 과충전으로 인한 폭발의 위력이 외부 수열로 인한 폭발보다 훨씬 더 컸다. 폭발이 발생한 원인은 밀폐된 배터리 내부에서 단락이 점화원으로 작용하여 전해액이 분해되어 기화된 가스에 착화돼 가스폭발이 발생하고, 폭발압력에 의해 전극이 파손된 것으로 분석된다. 또한 Fig. 8(b)은 과충전 실험에 따른 배터리의 최종 상태와 온도-시간 그래프를 나타낸 것이다. 벤트 구간인 97.4°C까지 온도가 완만히 상승하다가 165.1°C에서 가파르게 상승되는 것으로 보아 내부 분리막이 녹으면서 전극의 단락이 발생된 것으로 판단된다.



(a) Final state



(b) Temperature graph of battery overcharging test

Fig. 8. Final state and graph of lithium polymer battery overcharging test

### 과충전과 외부수열에 의한 연소 시 전극 판 비교분석

과충전으로 연소된 배터리의 전극 판은 모두 잘게 부서진다. 이와 달리 외부수열(외부화염) 연소된 배터리의 전극 판은 벌어지고 부서지지 않고 대체로 형태를 유지한다. 이러한 차이는 과충전으로 연소시킬 때 전압의 차이와 상관없이 나타나는 현



상이며, 외부수열(화염)에 의한 연소에서도 온도의 차이와 상관없이 연소 잔해물에서 나타나는 공통된 현상으로 두 화재를 구분할 수 있는 중요한 특징점이다.

## 결론

본 연구는 ESS에 사용되는 리튬이온 폴리머 배터리가 내부조건 및 주위환경에 의해 폭발 및 화재가 발생할 수 있는 가능성과 예방에 대한 실험적 논문으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 과충전 및 외부수열에 의해 배터리의 온도가 상승하게 되는데 현상에 있어서 차이가 존재한다. 과충전의 경우 벤트구간에서 혼합가스가 외부로 분출될 때 처음에는 조금씩 나오다가 폭발 직전에 가셔야 양이 많아진다. 또한 단락이 점화원으로 작용하여 혼합가스에 착화돼 가스폭발이 발생하고, 폭발 압력에 의해 전극이 잘게 파손되며, 가루형태의 리튬산화물이 불꽃반응에 의해 폭죽과 유사한 불꽃이 분출되는 특징을 보인다. 외부수열(외부화염) 경우 전해액이 기화되면서 벤트구간에서 혼합가스가 외부로 분출될 때 처음에는 조금 나오지만 과충전과 달리 점점 양이 많아지면서 폭발 전에 다량의 가스를 분출되며, 배터리가 폭발하는 경우에는 높은 순간압력의 방출이 아닌 지속적인 내압상승에 의한 폭발로 전극의 파손이 일어나지 않는다.

둘째, 열 차단 소재 차이에 따른 배터리 발열 방지 실험은 셀 단위 화재 방지 실험으로 배터리가 일정한 온도에 노출되어도 열을 차단시켜 배터리의 발열(스웰링, 벤트)을 막아 화재를 방지하는데 목적이 있다. 이번 실험을 통해 확인한 것은 셀을 보호하는 카트리지(중심부 알루미늄 판, 둘레 플라스틱)는 열 방출은 우수하나 열전도율이 높아 외부에서 열을 가하자 열 차단 소재를 넣지 않는 경우보다 스웰링 현상이 일찍 나타났으며, 카트리지(알루미늄 판)와 셀 사이에 방열시트를 넣고 열을 가해 보니 열 차단 효과가 있어 스웰링 현상이 지연되었으나 이후 카트리지에 부착된 방열시트에 열이 축적되면서 방열시트에서 연기가 발생하는 한계가 있었다(화재 미발생). 그러나 배터리의 시간당 온도 변화율은 방열 시트가 가장 우수하다는 결과가 도출되었다. 같은 방법으로 실리콘 판(IT)을 넣고 실험해 보니 열 차단효과가 방열 시트에 비해서는 낮지만 우수하였고 연기도 발생되지 않고 스웰링 현상도 가장 오래 지연되었다.

실험 결과 화재 발생 시까지 센서의 위치에 따른 온도 차이가 극심했으므로 기존처럼 한 모듈 당 온도 센서 두 개로는 측정 값이 부족해 온도제어를 통한 화재를 사전에 방지할 수 없다고 판단한다.

## References

- [1] Park, K.M. (2018). A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation.
- [2] Jung, C.D. (2018). A Study on the fire pattern of Lithium-ion · polymer Battery
- [3] Lee, H.S. (2015). Explosion and Fire Risk of Mobile Phone Batteries, Hoseo University.
- [4] Shin, S.k. (2018). A Study on Actual Survey and Establishment of Related Standards for Responding to ESS Fire.
- [5] Lee, B.J. (2017). A study on Explosion and Fire Risk of Lithium-Ion and Lithium-Polymer Battery.
- [6] Choi, S.D. (2010). Lithium-Ion Polymer Battery Technology for Electric Vehicle Application.
- [7] Kim, K.W. (2018). Analysis of Heat Heneration Characteristics by Indentation of a Lithium-Ion Battery Cell Using Coupled Mechanical-Electrical-Thermal Simulation, Konkuk University Graduate School.
- [8] <http://www.firedata.go.kr>