

[Research Paper]

## 화재현황 및 현장조사를 통한 ESS의 화재 위험성 연구

박광목<sup>†</sup> · 김재현<sup>\*</sup> · 박진영<sup>\*\*</sup> · 방선배<sup>\*\*\*</sup>

한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원, <sup>\*</sup>한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원,  
<sup>\*\*</sup>한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원, <sup>\*\*\*</sup>한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원

## A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation

Kwang-Muk Park<sup>†</sup> · Jae-Hyun Kim<sup>\*</sup> · Jin-Yeong Park<sup>\*\*</sup> · Sun-Bae Bang<sup>\*\*\*</sup>

Assistant Researcher, Korea Safety Research Institute, <sup>\*</sup>Junior Researcher, Korea Safety Research Institute,  
<sup>\*\*</sup>Assistant Researcher, Korea Safety Research Institute, <sup>\*\*\*</sup>Senior Researcher, Korea Safety Research Institute

(Received October 4, 2018; Revised November 1, 2018; Accepted November 16, 2018)

### 요 약

최근 국내 ESS의 보급이 늘어나면서 화재사고 또한 발생하고 있다. 2018년 7월까지 총 7건이 발생하였다. 7건 모두 리튬이온배터리로 구성된 ESS 시스템으로 발화 이후 자동소화설비 또는 소방서에 의해 진화되지 못하고 전소되었다. 본 논문에서는 최근 발생한 ESS 화재현황 및 현장조사를 바탕으로 ESS 화재의 특징을 파악하고 발화원인을 환경적, 전기적, 열적 요인으로 나누어 분석하였다. 그 결과 ESS 화재가 시스템의 설치환경과 상관관계가 있음을 파악하였다. 국내의 리튬이온배터리 시험표준 및 ESS 시설기준 조사에서는 국내외 동향 및 차이점을 파악하였다. 화재현황 및 현장조사, 국내외 시설기준 조사 등을 토대로 ESS 화재 시 화재 확산을 방지하고 예방하기 위한 대책을 제시하였다.

### ABSTRACT

Recently, the spread of ESS in Korea has increased and a fire accident has also occurred. By July 2018, there were a total of 7 cases. All 7 cases were ESS systems consisting of lithium-ion batteries and were burned down. Both the automatic fire extinguisher and the fire department were not able to digest. In this paper, the characteristics of ESS fire are analyzed based on recent ESS fire situation and field investigation, and the cause of fire is divided into environmental, electrical and thermal factors. As a result, it was found that the ESS fire was correlated with the installation environment of the system. In the domestic and overseas lithium ion battery test standard and ESS facility standard survey, the trends and differences of domestic and overseas facilities standards were identified. Based on the fire status and field investigation, and domestic and overseas facility standard survey, measures were suggested to prevent and prevent the spread of fire in ESS fire.

**Keywords :** ESS, Li-ion battery, Thermal runaway, Ignition, Facility standards

### 1. 서 론

Energy Storage System (ESS)는 생산된 전력을 저장해 두었다가 전력이 필요한 시기에 전력계통 및 부하에 전력을 공급하는 시스템을 의미한다. 환경문제와 더불어 새로운 에너지 패러다임의 변화에 따라 스마트그리드의 핵심요소로서 주목받아온 ESS는 신재생에너지의 확대와 전력수요관리를 위한 보급정책으로 수요가 빠르게 증가하는 중이다<sup>(1-3)</sup>.

최근 정부의 3020 이행계획에 따르면 태양광발전 설비는 2030년에 가면 30.8 GW에 이를 것으로 전망하고 있으며, 당연히 ESS도 증가할 것으로 보인다<sup>(4)</sup>. 산업통상자원부 보도자료에 의하면 2018년 상반기 ESS는 전년 동기(89 MWh) 대비 20배 증가한 1.8 GWh가 보급되었으며, 이는 지난 6년간의 총 보급량(1.1 GWh)을 훨씬 상회하는 수준이다<sup>(5)</sup>. 2018년 8월까지 국내 전체 ESS 설치 개소는 총 1008 개소이다<sup>(6)</sup>.

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: km\_park@kesco.or.kr, TEL: +82-63-716-2358, FAX: +82-63-716-9660

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

**Table 1.** ESS Fire Status

Region	Purpose	Capacity (MWh)	Completion Date	Occurrence Date	Installation Location	Loss (Hundred Illion)	Manufacturer	ESS Type
Jeonbuk Gochang	Wind	17	Under Construction	2017.8.2	Outside	15	A	Liion
Gyeongbuk Gyeongsan	Frequency	12		2018.5.2	Outside	23	B	
Jeonnam Yeongam	Wind	15	2015.12.15	2018.6.2	Outside	88	B	
Jeonbuk Gunsan	Solar	19		2018.6.15	Outside	9	C	
Jeonnam Heanam	Solar	3	2017.12.22	2018.7.12	Outside	2.5	C	
Gyeongnam Geochang	Wind	9.6	2016.12.29	2018.7.21	Outside	30	B	
Sejong	Demand	18	Under Construction	2018.7.28	Outside	30	B	

ESS의 보급이 늘어나면서 화재사고 또한 발생하고 있다. 2018년 7월 12일에는 전남 해남군 송지면에 위치한 태양광 발전소에서 화재가 발생하여 리튬이온배터리 306대가 소손되면서 소방서 추산 5억원 상당의 재산피해가 발생했다. 2018년 7월 21일에는 거창 풍력 ESS 화재로 건축설비 1동 연면적 340 m<sup>2</sup>가 전소되면서 약 30억 원의 재산피해가 발생했다. 2018년 6월 2일에는 12 MW 규모 전남 영암 풍력 발전소 6월 15일에는 19 MW 규모 전북 군산 태양광발전소에서 ESS가 화재로 인해 각각 전소되었다. 올해에만 6건의 ESS에서 화재가 발생하였으며, 2017년 8월에 발생한 고창 전력연구원 전력시험센터 ESS 화재를 포함하여 현재까지 총 7건의 화재가 발생하였다<sup>7)</sup>.

ESS의 종류에는 여러 가지가 있으나, 현재 본격적으로 상용화된 것은 리튬이온배터리이다. 리튬이온배터리는 높은 에너지 밀도와 가연성 전해질로 구성되어 있어 일단 발화되면 진화가 쉽지 않을 것으로 판단된다. 현장조사를 실시한 전북 군산, 전남 해남, 경남 거창 화재 건의 경우 자동 소화설비가 작동하였음에도 불구하고 모두 전소되었다.

ESS 도입 및 확산이 빨랐던 일본이나 미국, 유럽도 이미 우리나라와 동일한 화재사고를 경험하였다. 2011년 일본 기업의 공장, 2012년 미국 하와이의 풍력발전소, 2017년 벨기에 등에서 화재가 발생하였으며, 소화되지 못하고 모두 전소되었다<sup>8)</sup>. 국외의 경우 ESS 화재를 경험한 후 화재를 예방하고 확산을 방지하기 위한 시설기준을 준비하고 있다. 2018년 6월에는 Underwriter Laboratories (UL)에서 UL9540에 열 폭주 방지 항목을 포함시킨 UL9540a “Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems”를 제정하였다. National Fire Protection Association (NFPA)에서는 2017년 NFPA1 “Fire Code” Chapter52에 ESS 설치관련 요구사항을 추가시켰다. 또한 ESS 설치를 위한 NFPA855 “Standard for the Installation of Stationary Energy Storage System”을 2017년 8월에 초안

을 승인하였으며, 2020년에 신설 예정이다. International Fire Code (IFC)에서는 2018년에 배터리 랙 간격 및 벽부의 이격거리를 규정하였다<sup>9-10)</sup>.

본 논문에서는 최근 발생한 ESS 화재현황 및 현장조사를 바탕으로 ESS 화재의 특징 및 ESS의 발화원인을 분석하였다. 또한 리튬이온배터리의 시험표준 및 국내외 시설기준을 조사하였다. 결론에서는 ESS 발화 및 화재 시 확산을 저감하기 위한 방안을 제시하였다.

## 2. ESS 화재현황 및 현장조사

### 2.1 ESS 화재현황

산업부 사고현황 기준으로 현재 ESS 화재는 총 7건이 발생하였다. Table 1은 ESS 화재현황을 나타낸 것이다. 2018년에만 6건으로 5월 이후 집중 발생하였다. 인명피해는 없었으나, 평균 약 28억원의 재산피해가 발생하였다. 전북 고창, 전남 영암, 전북 군산, 전남 해남, 경남 거창은 신재생시스템 연계용이며, 경북 경산은 주파수 조정용, 세종은 피크제어용이다. 주로 10 MWh 이상의 대용량 시스템에서 발생하였다. 야외에 설치된 컨테이너 또는 우레탄재질의 조립식패널 구조물에서 기온이 상승하는 여름철에 집중 발생하였다. 전북 고창과 세종 건은 준공 완료 전에 발생하였으며, 준공일이 확인된 전남 영암은 2015년 12월, 전남 해남은 2017년 12월, 경남 거창은 2016년 12월로 사용 후 3년 이내에 모두 화재가 발생하였다.

2017년 8월에 발생한 전북 고창 건은 유관기관 및 산학연 전문가로 구성된 조사단 원인분석결과 및 국과수 감정 보고서에서 의하면 잠정적으로 공조 설비 미가동 등의 ESS 시스템 관리 소홀이 발화원인으로 추정되었다<sup>11)</sup>. 2018년 7월에 발생한 경남 거창 건의 경우 국과수에 의해 CCTV 영상이 확인되어 배터리 모듈에서 최초 발화한 것으로 잠정 결론이 내려진 상태이다.

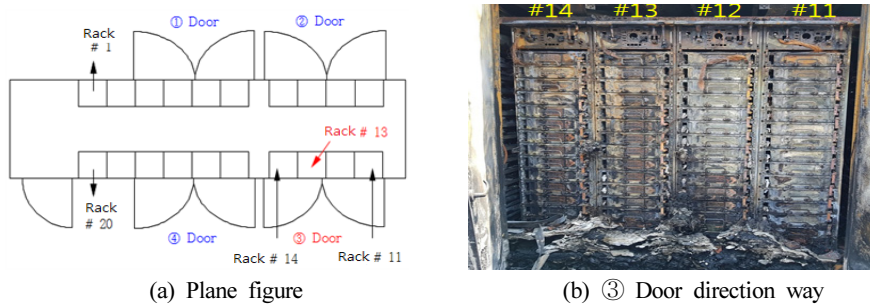


Figure 2. Gunsan ESS fire condition.

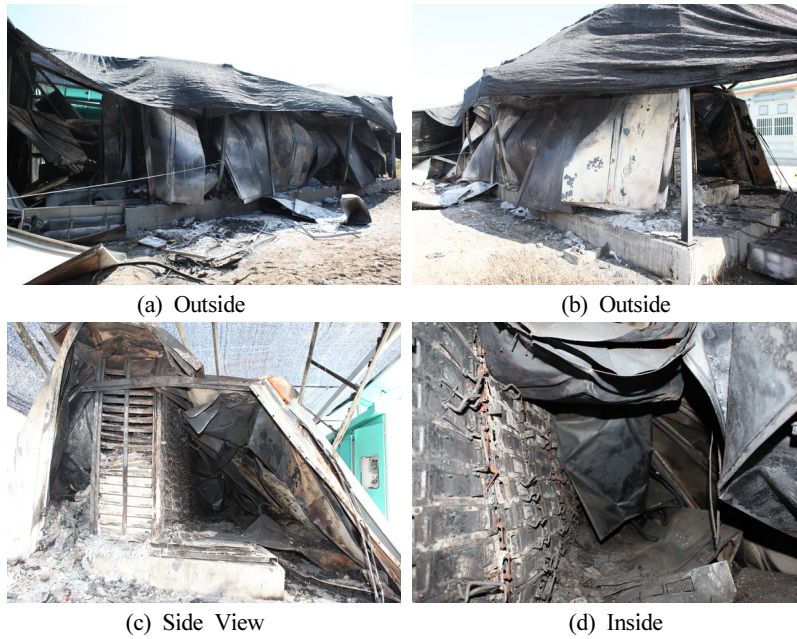


Figure 3. Haenam ESS fire condition.

## 2.2 ESS 화재 현장조사

### 2.2.1 전북 군산 ESS화재

총 7건의 ESS 화재 중 전북 군산, 전남 해남, 경남 거창 건에 대해 현장조사를 실시하였다. 전북 군산에서는 2018년 6월 2일 14시 38분경 ESS 컨테이너 설비 총 6기 중 1기 내부에서 연기가 발생하였다. Figure 2 (a)는 ESS 컨테이너 설비의 평면도를 나타낸 것이다. Energy Management System (EMS) 로그데이터에 의하면 14시경 ESS는 충전 완료되었다. 이후 약 30분이 지난 시점에서 ③번 출입문 측에 설치된 13번 랙의 배터리모듈 통신이 끊겼다. 출동한 소방서 조사관은 컨테이너 각각의 출입문에서 축수로 열을 감지하였다. ①, ②, ④번 출입문은 미지근했던 반면 ③번 출입문에서 높은 열이 감지되었다. 연기의 강도가 세지면서 소방서에서는 내부 자동 소화설비에 의해 진화가 되지 않았다고 판단한 후 ③번 출입문을 개방하고 소화를 실시하였으나, 진화에 실패하였다.

Figure 2 (b)는 ③번 출입문 방향의 배터리모듈 및 랙 소손상태를 나타낸 것이다. 소손범위가 넓지 않았음에도 불

구하고 특정 화염 패턴은 식별되지 않았으며, 화염패턴에 의한 발화추정은 불가하였다. 출입문 쪽은 공간이 협소하며 배터리모듈 외의 가연성 물질은 식별되지 않았다. 배터리모듈의 경우 산발적으로 모듈 간 연결단자 부위가 집중적으로 소손되어 있다. 각각의 연결단자 부위는 홀 형태로 파손되어 있으며, 다수의 단자가 용융되어 있는 상태이다. 단자 및 홀 부근에는 내부에서 분출된 것으로 판단되는 물질들이 붙어있으며, 아크와 내부 압력상승에 의한 폭발 형태를 보이고 있다. ESS 전단 Battery Control Panel (BCP)의 차단기는 트립된 상태였다. 배터리 랙 및 모듈 간 간격은 전혀 없는 상태이다. 컨테이너 내부는 중간 통로를 제외하고 여유 공간이 거의 없는 상태이다.

### 2.2.2 전남 해남 ESS화재

2018년 7월 12일 16시 25분경 우레탄 재질의 조립식패널 ESS 건축설비에서 화재가 발생하였다. 소방서에서는 확산 방지에 주력하였으며, 전소 이후 자연 소화되었다. Figure 3은 화재현장의 소손상태를 나타낸 것이며, Figure 4는 평면

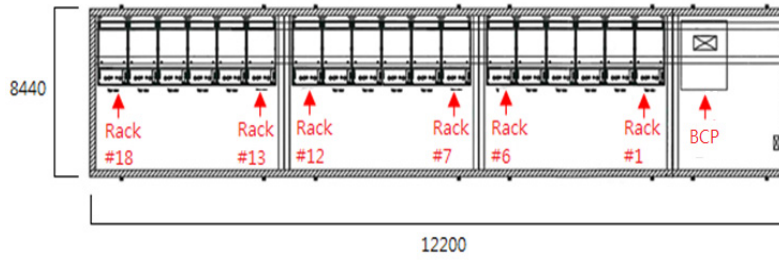


Figure 4. Plane figure.

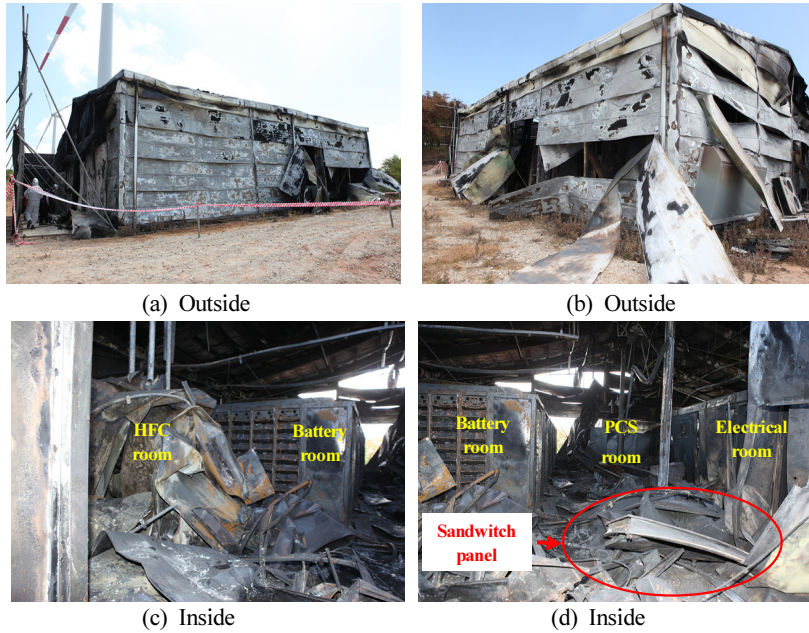


Figure 5. Geochang ESS fire condition.

도를 나타낸 것이다. 외부상태로 판단할 때 발화 당시 높은 열기로 내부 압력이 팽창 후 소화구멍이 개방되면서 급격한 산소유입에 의해 백드래프트 현상이 발생한 것으로 판단된다. 특정 화염 패턴은 식별되지 않았으며, 화염패턴에 의한 발화추정은 불가하였다. 구조물 만곡의 정도 등으로 판단할 때 10번, 11번 랙 배터리 모듈 부근이 가장 높은 열기가 발생했던 것으로 추정된다. EMS 로그데이터에 의하면 16시 충전완료 후 약 23분이 지난 16시 23분경 통신이 끊겼다. 배터리 완충 이후 약 30분 이내에 화재가 발생한 것으로 추정된다.

ESS실은 배터리모듈 외에 가연성 물질은 식별되지 않았다. 배터리 모듈 간 연결단자 부위는 흠 형태로 파손되고 용융되어 있는 상태로 단자 및 흠 부근에는 내부에서 분출된 것으로 판단되는 물질들이 붙어있다. 아크와 내부 압력 상승에 의한 폭발 형태로 군산 ESS 화재와 동일한 소손형태를 나타내고 있다. ESS 전단 BCP의 차단기는 트립된 상태였다. PCS 및 AC계통의 변압기 및 차단기는 외형상태 확인결과 특이점이 발견되지 않았다.

### 2.2.3 경남 거창 ESS화재

2018년 7월 21일 11시 14분경 거창 감악산 풍력발전단지 내 ESS실에서 화재가 발생하여 ESS 건축설비 1동 340 m<sup>2</sup> 이 전소되었다. 소방서에서는 확산 방지에 주력하였으며, 전소 이후 자연 소화되었다. Figure 5는 화재현장의 소손상태를 나타낸 것이며, Figure 6은 평면도 및 출화지점을 나타낸 것이다. ESS실은 전기실과 PCS실, 배터리실, HFC 소화약제실 4개로 구획되어 있다. 내부는 ESS실을 구획화한 샌드위치패널 등이 열에 의해 형상을 알 수 없을 정도로 일그러지고 바닥에 주저 앉은 상태이다. 전기실은 ESS용 전원과 소내용 전원으로 구분되어 있다. 소손범위가 광범위하여 발화지점을 추정하기 어려운 상태이나, 배터리실 내부에 설치되어있던 CCTV 데이터 확인결과 ESS 5번뱅크 9번 랙 상단 배터리모듈에서 최초발화된 것으로 확인되었다. ESS는 총 6개의 뱅크로 구성되어 있으며, PCS 1대당 2개의 뱅크가 병렬로 연결되어있다. EMS 로그데이터에 의하면 통신이 끊기기 전 5번 뱅크 9번 랙 배터리 모듈의 최고온도가 96 °C로 확인되었다. 온도 측정은 배터리모듈별로 측정되나, EMS에서는 랙 기준으로 최고와 최저온도만 확인되어 정확

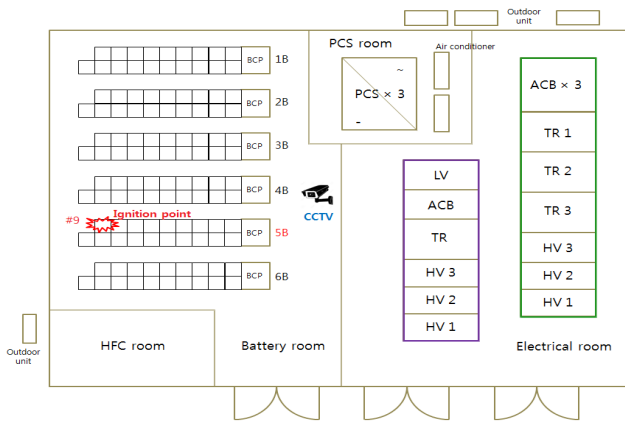


Figure 6. Plane figure & ignition point.

히 몇 번 모듈의 측정온도인지는 알 수 없었다.

### 2.3 ESS 화재의 특징 및 원인분석

#### 2.3.1 ESS 화재의 특징

Table 2는 ESS 화재사례의 특징을 나타낸 것이다. 고온이 지속되는 여름철에 집중 발생하였다. 열대야 현상이 발생하는 7~8월에만 총 7건 중 4건의 화재가 발생하였으며, 야외에 구축된 컨테이너나 우레탄 재질의 조립식패널 구조물에서 화재가 발생하였다. 화재는 자동소화시설 및 소방서에 의해 진화되지 못하고 모두 전소되었다.

영암 풍력, 군산 태양광, 해남 태양광 발전소 ESS화재의 경우 에너지 밀도가 가장 높은 충전 완료(SOC 100%) 이후 화재가 발생하였다. 전남 영암은 16시 충전완료 후 약 13분이 지난 시점, 전북 군산은 14시 충전완료 후 38분이 지난 시점, 전남 해남은 14시 충전완료 후 25분이 지난 시점에서

화재가 발생하였다.

2017년 고창의 A제조사, 2018년 군산과 해남의 C제조사 제품은 배터리모듈 간 연결이 부스바 형태의 커넥터로 되어있으며 연결단자 부위가 집중적으로 손상되어 있다. 각각의 연결단자 부위는 홀 형태로 파손되고 용융되어 있다. 단자 및 홀 부근에는 내부에서 분출된 것으로 판단되는 물질들이 붙어있으며, 아크와 내부 압력상승에 의한 폭발 형태를 보이고 있다.

ESS 설치상태를 보면 협소한 공간 안에 배터리모듈이 가득 채워져 있다. 설치된 배터리 랙 및 모듈 간 간격은 전혀 없다. 각각의 배터리모듈이 내부에서 발생한 열을 방열 하더라도 인접한 배터리모듈에 열이 가해진다. 임의의 배터리모듈에서 발화되면 구조적으로 열 폭주 연쇄반응에 의해 전소될 수밖에 없는 상황이다.

일부의 로그데이터만 남고 대부분의 로그데이터가 소실되었다. Figure 7은 ESS 설비 구성을 도식화한 것으로 로그 데이터의 이동경로를 나타낸 것이다. 각각의 배터리모듈에는 배터리 충방 상태 관리 및 제어를 위한 Battery Management System (BMS)가 장착되어 있으며, 랙 상부 또는 하부의 스위치기어 내부에는 배터리 모듈을 전체적으로 관리하는 랙 BMS가 있다. 랙 BMS 전단에는 ESS 시스템을 전체적으로 관리하는 PMS가 있다. ESS 시스템에서 측정되는 모든 데이터는 PMS에 기록된다. 그 중 일부의 정보가 서버를 통해 EMS에 전달된다. ESS실이 전소될 경우 PMS는 위치상 모두 소실되는 실정이다.

#### 2.3.2 원인분석

##### (가) 환경적 요인

열에 취약한 리튬이온배터리는 고온의 환경에서 열 폭주의 잠재성을 안고 있다. 2017년 전북 고창 ESS화재의 경

Table 2. ESS Fire Feature

	Feature	Content	Remark	
1	Occurrence season	Summer	Especially July & August	
2	Occurrence location	Outside	Container or Urethane Panel	
3	Occurrence Time	Immediately After SOC 100%	Yeongam	16:13 (16:00 SOC 100%)
			Gunsan	14:38 (14:00 SOC 100%)
			Heanam	16:25 (16:00 SOC 100%)
4	Battery Module Terminal Damage Condition	Hole Shape Damage	Gochang (A), Heanam (C)	
		Melting		
		Erupted Inside Material		
5	Distance Between Rack & Rack, Module & Module	No Gap	Radiant Heat Problem	
6	Log Data	Disappearance	Except EMS Data	
7	Damage Situation	Total Destruction		

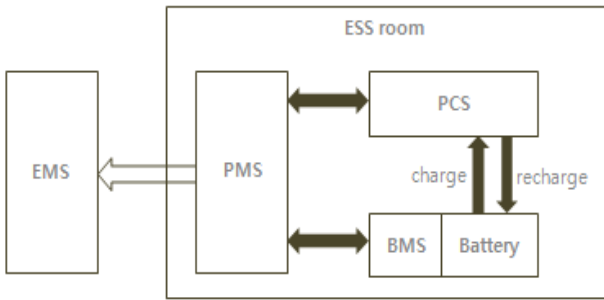


Figure 7. ESS composition & log data path.

우 연일 고온과 열대야 현상이 발생하는 8월 초에 발생한 화재로 공조 설비 동작 없이 배터리모듈이 방치되었던 점으로 판단할 때 배터리 셀이 열적 스트레스를 견디지 못하고 열 폭주를 일으킨 것으로 판단된다. 총 7건의 ESS 화재 모두 야외에 설치되어있는 컨테이너나 우레탄패널 구조물 내에 설치된 ESS에서 발생하였다. 이처럼 ESS화재는 환경적 요인과의 상관관계를 보이고 있다.

영암, 군산, 해남의 경우 에너지 밀도가 가장 높은 SOC 100% 완충 직후에 화재가 발생하였다. Sandia 연구소 보고서에 의하면 리튬이온배터리는 SOC가 높을수록 열 폭주 시작 온도를 감소시키며 100% SOC에서는 80 °C, 0% SOC에서는 130 °C에서 자기발화를 개시한다<sup>(12,13)</sup>. 리튬이온배터리 제조사 B는 최근 거창 ESS 화재 이후에 리튬이온배터리 구매고객에게 ESS SOC를 70% 이내로 가동할 것을 권고하였다<sup>(14)</sup>.

(나) 전기적 요인

화재발생 당시 기상청 데이터를 확인해보자 날씨를 맑았으며, 낙뢰 이력은 확인되지 않는다. 현장조사를 실시한 화재건의 경우 ESS실과 전기실이 동일 건물 내에 있던 경남 거창 건을 제외하고 AC계통 설비는 소손되지 않았으며, 외형상 특이점을 발견하지 못했다. 외부에서 이상전압 등의 침투는 없었던 것으로 추정된다. 참고로 AC계통에는 서지흡수기가 설치되어 있다.

DC계통에서 ESS 뱅크 BCP의 차단기는 모두 트립되어 있었다. 해남 ESS 화재건과 관련하여 BCP 차단기 용량을 살펴보면 1,200 Vdc, 1,600 A이다. 한국전기안전공사 사용 전검사시 제출된 시험성적서<sup>(15)</sup> 확인결과 충전 중지 전압은 1,200 Vdc의 80% 수준이며, 전류 값의 경우 방전 시 1,048.5 A으로 1,600 A의 65%수준이다. BCP 용량설계에서는 오류가 없었던 것으로 판단되며, BCP는 발화 이후에 트립된 것으로 판단된다. Table 3은 해남 ESS 리튬이온 배터

Table 3. ESS System Efficiency Result

Final Discharge Voltage	Discharge Power	Final Charge Voltage	Discharge Power	Efficiency
714.0 V	83.181 kW (0.5CP)	999.6 V	83.181 kW (0.5CP)	97.58%

리 랙 시험성적서의 효율시험 결과를 나타낸 것이다<sup>(15)</sup>. 시험방법에는 한국전기산업협회 단체표준인 KBIA-1014-02 (2015)를 적용하였다. 충전 및 방전출력은 0.5 ItA와 제조사가 제시한 정격전압의 곱으로 산출된 출력 값이 적용되었다.

지락에 의한 발화를 고려해 볼 수 있으나, ESS 시스템 DC계통에는 접지를 하지 않기 때문에 만약 DC계통에서 지락에 의한 아크로 발화가 되기 위해서는 접지가 되어 있는 배터리모듈 외함이나 배터리 랙에 2상이 모두 접촉되어야 가능하다. 제품제조상의 문제, 설치 부주의, 높은 습도에 의해 발생할 가능성이 있을 수 있다.

랙 상부 또는 하부에 설치된 스위치기어 내부에는 DC Contactor가 장착되어있다. DC Contactor는 Power Management System (PMS)에 의해 스위칭 되어 전원을 투입하거나 차단한다. 경남 거창건의 경우 EMS 로그데이터 상에서 5번 뱅크 9번 랙 배터리 모듈의 최고온도가 96 °C로 확인되었는데, 만약 PMS 오류나 DC Contactor 자체적으로 오작동이 발생하였다면 배터리 온도가 계속 상승함에도 전원이 계속 투입되었을 가능성이 있다.

(다) 열적 요인

배터리모듈의 소손상태를 보면 외부에서 가해진 충격형태는 보이지 않는다. 단자 및 홀 부근의 소손형태를 보면 아크와 내부 압력상승에 의한 폭발 형태를 보이고 있다. 배터리모듈 내부에서 발화가 진행된 것으로 추정된다.

리튬이온배터리는 다른 셀 화학물질에 비해 매우 높은 에너지 밀도를 가지고 있다. 가연성 전해질이 포함되어 있기 때문에 고온의 환경에 노출될 경우 스스로 가열하게 된다. Fire Protection Research Foundation 보고서에 의하면 리튬이온배터리를 이루고 있는 구성요소 중 음극 합체의 경우 80~90 °C 범위에서 자기발열을 개시한다. 단일환경에서 100% SOC의 경우 약 2일 후면 열 폭주가 발생한다. 전해질 상태 및 SOC에 따라 다르긴 하나, 단일 환경에서 자기발열 상태가 장시간 지속될 경우 리튬이온배터리는 결국 열 폭주에 이르게 된다<sup>(16)</sup>.

리튬이온배터리의 양극과 음극의 단락을 방지하는 분리막의 경우 주성분이 폴리에틸렌 계열로 열분석 데이터에 의하면 중량이 줄어드는 흡열피크가 130~150 °C 사이에서 발생한다. 배터리 셀을 오븐에 넣으면 150 °C 이상에서 전극 사이의 단락을 발생시키고 셀의 열 폭주가 몇 분 이내에 시작한다<sup>(17)</sup>.

Table 4는 국내외 리튬이온배터리 시험표준의 고온테스트의 기준온도를 나타낸 것이다. UL 1642에서는 70 °C에서 2시간, 130 °C에서 10분간 시험을 실시하며, IEC 62133에서는 75

**Table 4.** Lithium-ion Cell Temperature Test Condition

Test Standard	Test Temperature	Test Time	Note
SPS-KBIA-10104-01	85 °C	3 Hours	100% SOC
UL 1642	70 °C	2 Hours	
	130 °C	10 Minutes	
IEC 62133	75 °C	4 Hours	
	130 °C	10 Minutes	
IEEE 1725	130 °C	1 Hours	

**Table 5.** Lithium-ion Cell Test Standard

Test Standard	Title
SPS-KBIA-10104-01	Lithium Secondary Battery for Battery Energy Storage Device – Single Cell and Battery System – Safety Test
SPS-KBIA-10104-02	Lithium Secondary Battery for Battery Energy Storage Device – Single Cell and Battery System – Performance Test
UL 1642	Lithium Batteries
IEC 62133	Secondary Cells and Batteries Containing Alkaline or Other Non-acid Electrolytes Safety requirements for Portable Sealed Secondary Cells, and for Batteries made from Them, for use in portable Applications
IEEE 1725	Standard for Rechargeable Batteries for Cellular Telephones

°C에서 4시간, 130 °C에서 10분간 시험을 실시한다. IEEE 1725에서는 130 °C에서 1시간 실시한다. 국내 단체표준 KBIA-10104-01의 경우에는 85 °C에서 3시간을 실시한다<sup>(18-21)</sup>.

### 3. 리튬이온배터리 시험표준 및 ESS 시설기준

#### 3.1 국내외 시험표준

Table 5는 국내외 리튬이온배터리 시험표준을 나타낸 것이다. 국내 리튬이온배터리에 대한 시험표준에는 한국전지산업협회와 한국스마트그리드협회에서 운영하는 단체표준이 있다. 한국전지산업협회는 KBIA-10104-01 배터리에너지저장장치용 리튬이차전지-단전지 및 전지시스템 안전성 시험, KBIA-10104-02 배터리에너지저장장치용 리튬이차전지-단전지 및 전지시스템 성능시험을 가지고 있다. 한국스마트그리드협회 단체표준에서는 전기에너지저장시스템과 관련하여 SGSF-025-5-1 전기에너지저장시스템 일반 요구사항, SGSF-025-5-2 전기에너지저장시스템 시험방법이 있다. 기본적으로 국내에서 ESS를 설치하고 운영하기 위해서는 단체표준에 준하는 배터리의 안전 및 성능 시험성적서가 필요하다.

국외의 경우에는 소방과 관련하여 미국의 NFPA 1, Fire Code, Chapter, 52 Stationary Storage Battery Systems에 정의되어 있다. 시험표준에는 UL 1642 Lithium Batteries, IEC 62133 Secondary cells and batteries, IEEE 1725 Standard for Rechargeable Batteries for Cellular Telephones 등이 있다.

#### 3.2 국내외 시설기준

대한전기협회에서는 전기설비기술기준에 전기저장장치에 대한 정의와 발전소에 전기저장장치를 추가적으로 정의하였고, 최소한의 전기저장장치의 안전을 위한 시설기준을 2014년 12월 18일에 고시하였다. 제53조의3에서는 전지저장장치의 사용 목적에 따라 전력계통 또는 부하에 전기를 안정적으로 공급할 수 있도록 필요한 보호 및 제어장치를 갖추고 전기저장장치의 특성에 따라 폭발 등의 우려가 없도록 시설하도록 규정하고 있다.

ESS는 전기사업법 제63조에 근거하여 사용전검사를 실시한다. ESS는 전기설비기술기준 및 판단기준 제8장 지능형전력망 제4절 이차전지를 이용한 전기저장장치의 시설을 충족해야 한다. Table 6은 전기설비기술기준 및 판단기준 제8장 제4절의 항목을 나타낸 것이다. 제295조는 전기저장장치 일반 요건, 제296조는 제어 및 보호장치, 제297조는 계측장치에 대해서 규정하고 있다. 또한 사용전검사에서는 PCS 및 랙 단위의 ESS시스템과 배터리 단일 셀의 시험 성적서를 확인하고 있다. 그러나 배터리 랙 및 모듈 간 이격거리, 공조 설비의 적정용량 등과 같은 구체적인 시설기준은 현재 없는 상태이다<sup>(22)</sup>.

산업부에서는 최근 ESS화재사고의 재발방지 대책의 일환으로 10 MWh 이상 사업장 58개소를 최우선으로 안전관리 체계, 화재대응 등에 대해 민·관 합동으로 실태조사를 7월말까지 실시하였고, 나머지 ESS 설치 사업장에 대해서도 현재 절연상태, 배터리 온습도 등에 대해 전수조사 중이다. 실태조사결과와 연구용역 등을 통해 ESS 안전성에

**Table 6.** Domestic Facility Standard

Facility Standard		Title
Chapter 8 Section 4	Article 295	General Requirements for Electrical Storage Devices
	Article 296	Control and Protection Devices
	Article 297	Measuring Device

관한 제도개선 대책을 마련할 예정이다<sup>5)</sup>.

국외의 경우 UL에서는 2018년 UL9540a을 통해 리튬이온 전지의 열 폭주 현상에 대한 시험기준을 강화하였다. IFC에서는 2018년에 모듈 및 랙 단위 화재 시 연소 범위를 최소화하기 위해 ESS 랙 간격 및 벽부 최소이격거리를 1미터 이상 되도록 규정하였다. NFPA에서는 2020년에 NFPA855를 신설하여 전기저장장치에 대한 설치기준 및 소화설비 기준을 신설할 예정이다<sup>9,10)</sup>.

### 4. 화재 예방 대책

ESS 화재현황 및 현장조사, 국내외 시험표준 및 시설기준 등을 토대로 ESS 화재를 예방하기 위한 대책을 다음과 같이 제시하고자 한다.

- 1) ESS가 설치된 공간에 외부의 열이 영향을 미칠 수 없도록 구조물을 설계하는 것이 필요하다. 또한 ESS 간 이격거리를 확보하여 배터리모듈의 방열이 잘 될 수 있도록 하여야 한다. 이격거리를 확보함으로써 발화가 되더라도 피해를 최소화 할 필요가 있다.
- 2) 열 폭주를 방지하고 조기감지를 위해서는 모듈 내 각각의 셀 온도를 측정할 필요가 있다. 제조사마다 사양은 다르겠지만, 보통 전압의 경우는 각각의 셀을 모니터링 하지만, 온도의 경우는 모듈 내 몇몇 지점에 한하여 측정하고 있다.
- 3) 정확한 원인분석 및 화재예방을 위한 로그데이터 확보를 위해 PMS가 소실되지 않는 위치에 설치되거나, EMS에서 전체 로그데이터를 받아 모니터링 하여 분석할 필요가 한다.
- 4) 연구를 위한 실증환경을 조성할 필요가 있다. ESS 시스템의 발화원인이 배터리 자체적인 문제인지, 전기설비상의 문제인지, 소프트웨어상의 문제인지를 파악하고 각각에 대해 적절한 대응방안을 마련할 필요가 있으며, 진단기술 개발 등에 활용할 필요성이 있다.

### 5. 결 론

ESS 화재현황 및 현장조사를 통해 ESS 화재의 특징을 파악하고 발화 원인을 환경적 요인, 전기적 요인, 열적 요인 등으로 나누어 분석하였으며 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) ESS화재는 환경적 요인과의 상관관계를 보이고 있다. 총 7건의 ESS 화재가 고온이 지속되는 여름철에 집중 발생하였으며, 열대야 현상이 발생하는 7~8월에만 4건의 화재가

발생하였다. 아외에 설치되어있고 축열이 쉬운 컨테이너나 우레탄 재질 조립식패널 구조물에서 화재가 발생하였다.

- 2) 10 MWh가 넘는 대용량 시스템에서 주로 발생하였으며, 에너지 밀도가 높고 열적으로 취약한 상태인 SOC 100% 직후에 화재가 발생하였다.
- 3) 협소한 공간 안에 설치된 배터리 랙 및 모듈 간 간격이 전혀 없다. 각각의 배터리모듈 내부에서 발생한 열이 방열되더라도 인접한 배터리모듈에 열이 가해진다. 임의의 배터리모듈에서 발화되면 구조적으로 열 폭주 연쇄반응에 의해 전소될 수밖에 없는 상황이다.
- 4) EMS에 저장된 일부의 로그데이터만 남고 대부분의 로그데이터가 소실되었다.
- 5) 자동소화설비가 작동했음에도 불구하고 소화되지 못하였으며 전소되었다.

이미 국외에서는 리튬이온배터리의 열 폭주를 막고 확산을 방지하기 위한 시설기준을 준비하고 있다. 미국의 경우 2018년에 UL9540에 열 폭주 방지 항목을 포함시킨 UL9540a를 제정하였다. International Fire Code (IFC)에서는 모듈 및 랙 단위 화재 시 연소 범위를 최소화하기 위해 배터리 랙 간격 및 벽부 최소이격거리를 1미터 이상 되도록 규정하였다. NFPA에서는 2020년에 NFPA855를 신설하여 전기저장장치에 대한 설치기준 및 소화설비 기준을 신설할 예정이다.

국제적 시설기준이 강화되고 있듯이 국내 ESS 관련된 시설기준도 조속히 재검토하여 ESS 화재를 예방하고 화재 확산을 막기 위한 대책을 강구하여야 한다. ESS에 대하여 랙 간 이격거리를 규정하고 불연소재의 배터리모듈 외함을 사용하여 화재확산을 막아 설비 전소를 방지할 필요가 있다. 보수유지 및 진단기술 또한 개발되어야 한다. 안전에 대한 제도적 기준에 따라야 하며, ESS산업 관련 정부정책과 관련기관, 입법기관, 시험인증기관, 제조사 및 관련 업체, ESS 사용자 모두가 필요로 하는 안전기준이어야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.20151210000050)

### References

1. Y. S. Yoon, J. H. Choi, Y. L. Choi, Y. T. Shin and J. B.



- Kim, "A Study on the Economic Analysis Method of Energy Storage System", Proceedings of 2015 Summer Annual Conference, The Korea Institute of Electrical Engineers, pp. 1637-1638 (2015).
2. S. S. Shin, I. P. Park, J. J. Shin, G. H. Kim and H. S. Kim, "A Study on Installation Regulations and Standardization of Electrical Energy Storage Systems", Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 596-606 (2015).
  3. K. I. Hwang, "Survey on Network Protocols for Energy Network Infrastructure based on Smart Utility Networks", Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 119-124 (2012).
  4. KIEE NEWS, "Domestic Market also Opens for Home Use ESS", The World of Electricity, Vol. 66, No. 12, pp. 8-9 (2017).
  5. Energy New Industry division, "With the Spread of Renewable Energy, the Market in the First Half of the Year Expanded 20 Times", Ministry of Trade, Industry and Energy (2018).
  6. <http://mbiz.heraldcorp.com/view.php?ud=20180820000388#cb>.
  7. <http://www.e2news.com/new/articleView.html?idxno=201475>.
  8. A. Barowy and P. Gandhi, "UL9540A, Notable ESS Installation Fires", Underwriters Laboratories (2018).
  9. D. Conover, "DOE OE Energy Storage Systems Safety Roadmap", PNNL-SA-126115, Pacific Northwest & Sandia National Laboratories (2017).
  10. D. Conover, "DOE OE Energy Storage Systems Safety Roadmap", PNNL-SA-135093, Pacific Northwest & Sandia National Laboratories (2018).
  11. <http://www.e2news.com/new/articleView.html?idxno=202019>.
  12. E. P. Roth, C. C. Crafts and D. H. Doughty, "Thermal Abuse Studies on Lithium Ion Rechargeable Batteries", Sandia Report: SAND2000-2711C., Sandia National Laboratories (2000).
  13. E. P. Roth, "Final Report to NASA JSC: Thermal Abuse Performance of MOLI, Panasonic, and Sanyo 18650 Li-Ion Cells," Sandia Report: SAND2004-6721, Sandia National Laboratories (2005).
  14. <http://www.ekn.kr/news/article.html?no=377637>.
  15. Korea Testing Laboratory, "Test Report", 17-022285-01-4, Korea Testing Laboratory (2017).
  16. C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White and R. Thomas, "Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment", Fire Protection Research Foundation (2011).
  17. S. S. Zhang, "A Review on the Separators of Liquid Electrolyte Li-ion Batteries", Journal of Power Sources, pp. 351-364 (2007).
  18. KBIA-10104-01, "Lithium Secondary Battery for Battery Energy Storage-single Cell and Battery System-safety Test" (2013).
  19. UL 1642, "Lithium Batteries" (1995).
  20. IEC 62133, "Secondary Cells and Batteries Containing Alkaline or other Non-acid Electrolytes Safety Requirements for Portable Sealed Secondary Cells, and for Batteries made from Them, for use in Portable Applications" (2002).
  21. IEEE 1725, "Standard for Rechargeable Batteries for Cellular Telephones" (2006).
  22. Ministry of Trade, Industry and Energy, "Electrical Equipment Technical Standards and Judgment Standards", Notification 2018-26 (2018).