리튬이온 배터리 제조시설의 위험도 분류 및 방재기준 연구

A Study on the Hazard Categorization and Loss Prevention Standards of Lithium-ion Battery Manufacturing Occupancies

정범진* · 윤명오** · 이준***

Jeong, Beomjin*, Yoon, Myongo**, and Lee, Jun***

Abstract

As the demand of lithium-ion batteries rapidly increases, battery manufacturers are also dealing with massive losses due to battery fires. Lithium-ion batteries have high fire load due to flammable electrolyte and plastic materials inside, and it is very difficult to extinguish such fires owing to the thermal runaway and re-ignition characteristics of lithium-ion batteries. Although some research projects have been conducted, fire protection standards have yet to be issued for manufacturing occupancies. Therefore, this study presents the categorization of occupancy hazards for each process of lithium-ion battery manufacturing and proposes appropriate standards by reviewing the characteristics of battery fires, global fire codes, and previous research results.

Key words : Lithium-ion Battery, Thermal Runaway, Hazard Categorization, Loss Prevention Standard

요 지

리튬이온 배터리의 수요가 급증함에 따라 이를 대량으로 생산하는 산업시설에서도 배터리 화재로 인한 사고사례와 재산 손실이 발생하고 있다. 리튬이온 배터리는 내부의 인화성 전해액, 플라스틱 재료로 인해 화재하중이 높고 열폭주 및 재발화 특성으로 인해 화재 시 진압이 어렵다. 리튬이온 배터리 관련 방재기준은 아직 연구단계이며, 특히 제조시설에 대한 소방대책은 제시되지 않고 있다. 본 연구에서는 배터리 화재의 특성, 화재사례, 선진 방재기준, 선행 연구결과에 대한 분석을 통해 리튬이온 배터리 제조시설의 주요 공정별 화재 위험도를 분류하고, 적절한 참고 기준을 제시하였다.

핵심용어 : 리튬이온 배터리, 열폭주, 위험도 분류, 방재기준

1. 서 론

리튬이온 배터리(Li-ion Battery, LiB)는 1990년대 초 처음 상업화 된 이후 높은 에너지 밀도, 낮은 메모리 효과, 낮은 에너지 손실률 등의 장점으로 인해 현재는 대표적인 2차전지로 널리 사용되고 있다. 특히, 스마트폰, 태블릿, 노트북 등 휴대기기의 사용량이 증가하고, 점차 고용량의 2차전지를 요구함에 따라 리튬이온 배터리의 크기와 충전량도 이에

따라 증가하고 있다. 또한, 리튬이온 배터리 기술의 발전과 함께 과거 화석연료를 동력원으로 삼았던 자동차, 발전기 등 전통적인 수요처가 전기자동차(EV) 및 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS) 등으로 기술이 대체되어 가면서 리튬이온 2차전지의 응용분야와 수요는 급격히 증가되는 추세이다. Fig. 1은 이러한 수요 변화와 시장규모 증가를 잘 나타내고 있다.

*정회원, 서울시립대학교 재난과학과 박사과정(E-mail: beomdi@gmail.com)

Member, Ph.D Candidate, Department of Disaster Science, University of Seoul

**정회원, 서울시립대학교 건축공학과 교수

Member, Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

***교신저자, 정회원, 한국교통연구원 부연구위원(Tel: +82-44-211-3199, Fax: +82-44-211-3199, E-mail: junlee@koti.re.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Research Fellow, Korea Transport Institute

Fig. 1. Global LiB Market Forecast (Source: SNE Research, 2014)

리튬이온 배터리의 광범위한 사용과 대용량화에 따라 2006년 일본 S社の 노트북 배터리 발화사고 및 대규모 리콜 사태, 스마트폰 배터리 발화사고 등 화재사고 사례가 다수 발생하게 되었고 리튬이온 배터리의 화재 위험성이 점차 알려지게 되었다.

그러나, 소비자가 사용하는 최종 제품에서의 사고 뿐만 아니라 리튬이온 배터리의 생산과정과 보관·취급하는 제조과정에서도 대량의 배터리로 인한 화재 위험성이 잠재되어 있다. 2008년 국내 배터리 제조 공장의 대형 화재로 대규모 물적 피해와 매출 손실을 입은 사례가 있으며, 최근 몇 년간 중국 배터리 제조 공장의 화재 및 미국 전기자동차용 배터리 공장의 화재로 공장이 전소하는 등 주요 배터리 제조 또는 취급업체들은 대부분 크고 작은 화재 사고를 이미 경험하고 있다.

리튬이온 배터리와 관련된 화재 사고는 이후에 기술할 리튬이온 배터리만의 독특한 화재 특성에 기인하며, 이것은 비교적 잘 알려지지 않은 새로운 위험으로 인식되고 있다. 이에 따라, 2000년대 중반의 잦은 화재사고 발생 이후 지난 10여 년간 National Fire Protection Association (NFPA) 등 다양한 해외 관련기관에서 지속적인 연구가 이루어지고 있지만, 현재까지도 ESS를 제외하면 리튬이온 배터리 화재에 대응 가능한 공식적인 소방·방재 기준이나 가이드라인은 제시되고 있지 않다.

배터리 산업계에서는 크고 작은 화재사고를 통해 반복적으로 큰 손실을 입고 있음에도 불구하고, 그 화재 특성과 위험도를 정확히 인식하지 못하여 소방·방재 대책이 부적합하거나, 혹은 현재의 방호수준을 개선하고자 하여도 참고할 만한 방재기준이 없어 손실 예방을 위한 소방·방재 대책 수립에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

본 연구에서는 리튬이온 배터리 화재의 특성과 화재사고 사례, 선진 화재안전 기준 및 방재기준, 리튬이온 배터리 관련 선행연구 결과에 대한 문헌 검토를 통해 리튬이온 배터리 제조시설의 화재 위험도를 분류하고, 적절한 참고 기준을 제시하고자 한다.

2. 리튬이온 배터리의 화재 위험성

2.1 리튬이온 배터리의 구성요소

리튬이온 배터리는 제조사의 관점에서는 크기와 외부 패키징 형태로 분류한다.

크기에 따라 분류하면 소형 전지와 중대형 전지로 나눌 수 있다. 소형전지는 대표적으로 휴대폰 등 휴대형 소형 전자기기에 들어가는 제품들이고, 중대형 전지는 자동차용 배터리 팩이나 최근 각광받고 있는 에너지저장장치(ESS)에 들어가는 비교적 크기가 큰 배터리이다.

배터리의 외부 패키징 형태에 따라서는 파우치형, 원형, 각형으로(Fig. 2에서 반시계방향으로) 분류한다.

Fig. 2. Li-ion Battery Packaging (Source: LG Chem)

그러나, 크기나 형태와 상관없이 리튬이온 배터리는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 기본적으로 아래와 같은 구성요소로 이루어져 있다(Chung and Cho, 2010).

Fig. 3. Li-ion Battery Components (Source: Samsung SDI)

- 양극(Positive electrode)
  - 리튬코발트 산화물, 알루미늄 호일

- 음극(Negative electrode)
  - 흑연, 구리 호일
- 분리막(Separator)
  - 다공성 폴리에틸렌 또는 폴리프로필렌 필름
- 전해액(Electrolyte)
  - 리튬염(LiPF₆, LiBF₄, LiClO₄)과 유기용매(EC, PC, DMC, DEC 등)의 혼합물
- 케이스(Enclosures)
  - Hard case: 니켈도금강, 알루미늄
  - Soft pouch: 알루미늄호일 + 다층적층필름(Nylon, PA, PBT, PP, PE 등)

리튬이온 배터리의 구성요소들을 정량적으로 분석한 연구결과(Ribiere et al., 2012)에 따르면 파우치형 배터리의 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 전해액이 약 11%, 분리막과 패키징 재료로 쓰이는 폴리에틸렌 등 고분자 재료가 약 10% 가까이 차지하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4. Mass Distribution of LiB (2.9Ah, pouch) (Source: Ribiere et al., 2012)

FM Global의 실험 결과(Ditch and de Vries, 2013)에 의하면 150 W 이하의 작은 크기(small-format)의 리튬이온 배터리의 경우 셀당 2~5 g의 전해액이 들어 있으며, 이것은 무게로는 5~10%를 차지하는 것이다. 전해액으로 가장 많이 사용되는 Di-Methyl Carbonate (DMC)와 Di-Ethyl Carbonate (DEC)는 인화점이 각각 18℃, 25℃로서 국내외 관련기준에 따라 인화성 액체로 분류되는 위험물이다(Mikolajczak et al., 2011).

배터리가 착화할 경우 대부분의 발열량은 이러한 전해액과 폴리에틸렌 등의 플라스틱 성분이 주로 연소하면서 대부분 발생 할 것이며, 리튬이온 배터리의 충전율(State of Charge, SOC)이 높을수록, 즉 저장된 전기에너지의 양이 많을수록 발열량은 비례적으로 증가하게 된다(Ribiere et al., 2012).

리튬이온 배터리의 구성요소를 분석해 본 결과 A, B, C급의 화재특성을 모두 갖고 있음을 알 수 있다.

분리막, 파우치 등의 플라스틱 재질이 연소하면서 보이는 A급 일반 가연물 화재의 특성이 있다.

또한, 과거의 2차전지와는 달리 전해액으로서 인화성 액체에 해당하는 유기용매가 들어 있으므로 B급 유류화재의 특성도 있다.

그리고 자체적으로 충전된 전기 에너지를 갖고 있어 점화원으로 작용할 수 있는 C급 전기화재로 분류할 수도 있다.

이러한 A, B, C급의 특성을 복합적으로 갖고 있어 화재 대응의 측면에서는 매우 어려운 문제가 된다.

2.2 화재 특성

리튬이온 배터리의 독특한 화재특성은 “열폭주(thermal runaway)”와 “재발화(reignition)”로 요약할 수 있다(Morcos and Vollweiler, 2017).

“열폭주”는 배터리 셀의 자기 발열로 인한 급격한 온도상승을 의미한다. 열폭주는 양극과 음극 사이의 고분자 분리막의 붕괴로부터 시작된다. 최근 들어 배터리에 여러 겹이 들어가는 분리막의 두께가 얇아수록 배터리 용량을 증가시킬 수 있기 때문에 이러한 위험이 증가하는 것으로 알려져 있다.

분리막으로 주로 사용되는 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌과 같은 폴리올레핀 계열의 고분자는 녹는점이 125~160℃로서, 고온에서 안정성이 취약하다. 분리막이 분해되면 양극과 음극이 직접 접촉되면서 내부에 충전된 에너지의 급격한 방출과 함께 유기 용매인 전해액이 열분해 되고, 이로 인해 인화성 가스가 발생한다. 가스 팽창으로 인해 압력이 일정 수준 이상으로 높아지면 배터리 셀 밖으로 가스와 전해액이 누출되면서 발화하게 된다.

열폭주의 원인으로는 기계적인 충격으로 인한 분리막의 천공, 과충전 및 과방전과 같은 전기적 요인, 제품 자체의 결함 등이 있으며, 또한 배터리와 무관한 외부 화재로 인한 착화도 가능하다.

“재발화”는 한번 배터리에서 화재가 시작되었다가 소화 활동에 의해 화염이 진압된 뒤에도 일정 시간 경과 후 다시 불꽃을 내면서 연소가 시작되는 현상이다. 다량의 배터리 셀이 집합된 형태에서 화재가 발생한 경우 일단 초기 화염이 제거되었다 할지라도 최초 발화된 배터리와 인접한 다른 배터리 셀이 전도열 또는 복사열에 의해 열적 손상을 받아 자체적인 전기 에너지에 의해 열폭주가 시작되고 다시 발화하게 된다.

일반 소비자가 사용하는 배터리 셀은 그 수량이 많지 않아 쉽게 소화가 가능하지만, 리튬이온 배터리를 대량으로 취급하는 제조시설, 대규모 창고 또는 최근 급증하는 에너지 저장시설(ESS)은 리튬이온 배터리의 화재시 재발화의 위험성이 존재한다.

이것은 제조시설이나 물류창고, ESS에서는 다량의 리튬이온 배터리가 연속적으로 존재 또는 배치되거나 포장, 보관되기 때문이다.

소형전지의 경우 1개의 표준 팔레트(pallet) 위에 약 2만개의 파우치형 배터리가 박스포장 상태로 적재되기도 한다. 특히, 폴리머 파우치형의 경우 외부 하드 케이스가 없고 파우치는 얇고 터지기 쉬워서, 배터리를 다량 적재하면 하나

의 배터리 셀에서 발화된 열폭주가 인접된 셀로 연속적으로 확산되기 쉽다.

2.3 화재 사례

리튬이온 배터리가 세계적으로 처음 이슈가 되었던 것은 2006년 일본 S社에서 배터리를 납품한 DELL 노트북의 발화 사고이다(Bang, 2006). 1991년 세계 최초로 리튬이온 배터리를 개발한 S社는 이 사건으로 410만대의 노트북 배터리를 리콜 하였다.

2008년에는 국내 대기업의 휴대폰 배터리 제조공장에서 대규모 화재가 발생하여 매출 손실만 약 800억원, 물적피해를 포함하면 1,000억 원 이상의 손실을 입은 것으로 알려졌으며 복구 기간도 수개월에 이르렀다.

2017년 5월에는 미국 애리조나에 위치한 전기 자동차용 배터리 모듈을 생산하는 Gruber Motor Company에서 화재가 발생하여 공장동 1개가 완전히 전소되었다. 화재의 전파 속도가 매우 빨랐고 화세가 거세어 Fig. 5와 같이 지붕까지 붕괴되었다. 당시 소화활동에 참여했던 소방관들은 리튬이온 배터리의 폭발을 두려워하여 적극적인 소화활동을 전개하지 못하였다.

Fig. 5. Gruber Motor Company Fire (Source: Flickr)

3. 리튬이온 배터리 관련 방재기준 검토

3.1 UN 위험물 운송기준

항공운송과정 도중에 리튬이온 배터리에서 발생하는 화재는 소화시설의 한계로 인해 항공기 안전에 치명적인 결과를 초래할 수 있어 일찍이 국제 운송기준에서 위험물(Dangerous Goods, DG)로 규제되기 시작했다.

2006년 미국 필라델피아 UPS 화물 운송기 전소사건, 2010년 두바이에서 리튬배터리를 적재한 항공기의 화재로 추락 사건이 발생하는 등 여러 차례 리튬배터리 관련 항공기 화재가 발생하였다(Joe, 2013).

Table 1에서 보는 바와 같이 UN 위험물 운송기준에는 리튬이온 배터리만 운송되거나 노트북 등 기기에 장착되어

운송될 경우 위험물로 분류하여 여객기 화물실 또는 화물기에 탑재할 수 있는 포장방법과 단일 포장 무게를 규제하고 있다.

Table 1. UN Code for Lithium Battery (Joe, 2013)

Battery	packed without equipment	packed with equipment
Li-ion	UN 3480	UN 3481
Li-metal	UN 3090	UN 3091

또한, 2016년 4월 1일부터는 기기에 장착되지 않고 항공운송으로 발송되는 모든 리튬이온 배터리는 충전율(SOC) 30%를 초과할 수 없게 되었다(International Lithium Battery Regulation, UPS).

3.2 NFPA 13

리튬이온 배터리에 대한 적절한 소방·방재 대책을 세우기 위해서는 우선 적합한 화재 위험도 분류가 필요하다. 우리나라의 경우 위험물안전관리법상으로 관리하는 인화성고체, 인화성액체, 폭발성물질 등 특정 지정물질을 제외하면 국가화재안전기준에서는 소방대상물, 즉 장소의 용도(occupancy)에 따라 위험도를 따로 구분하여 소방기준을 마련하고 있지 않다. 다만 건축물의 내화구조 여부에 따라, 또는 아파트, 랙크식 창고 등에는 스프링클러 헤드의 수평거리를 다르게 지정하는 방식으로 간접적으로 위험도를 차등화 하는 정도이다(Yoo, 2016).

용도별 화재위험평가와 관련하여 다중이용업소의 안전 관리에 관한 특별법 시행령 제11조 “화재유발지수”에 따라 소방당국에서 소방시설의 보완조치를 명령할 수 있도록 되어 있으나, 이것은 다중이용업소라는 특정용도에 한하여 적용되고 있다.

따라서, 국내 화재안전기준에서 다루고 있지 않은 특정 산업용도나 위험물품에 대한 방호기준은 국제적으로 널리 통용되는 선진 방재기준을 참고하고 있다.

대표적인 화재안전기준인 미국 방화협회 코드 NFPA 13 (2016)을 보면 건물의 용도별 위험도를 5가지로 분류하여 각기 다른 스프링클러 기준을 부여하고 있으며, NFPA에서는 그 예시를 아래와 같이 하고 있으나 이것이 절대적인 기준은 아니다.

- (1) 경급위험용도(light hazard) 그룹 (LH)
예: 교회, 교육시설, 병원, 박물관, 보육원, 요양원, 사무실, 주거시설, 식당 등
- (2) 중급위험용도(Ordinary hazard) 그룹 1 (OH1)
예: 주차장, 상품진열대, 제과점, 주류공장, 전자제품 공장, 세탁소, 식당의 주방

- (3) 중급위험용도(Ordinary hazard) 그룹 2 (OH2)
예: 일반화학공장, 플라스틱조립, 상업시설 등
- (4) 상급위험용도(Extra hazard) 그룹 1 (EH1)
예: 가연성 유류 취급, 합판 제조 등
- (5) 상급위험용도(Extra hazard) 그룹 2 (EH2)
예: 인화성액체 도장, 플라스틱 생산시설 등

국내 화재안전기준과 비교하면, 스프링클러 살수밀도 (sprinkler density)로 환산할 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 내화구조의 공장용도는 업종과 상관없이 NFPA 기준으로 중급위험용도(OH2)와 유사한 수준임을 알 수 있다. Fig. 6에서 적색 그래프는 우리나라 화재안전기준, 청색 그래프는 NFPA 기준에 따른 살수밀도를 나타낸다.

Fig. 6. Sprinkler Density (mm/min) Comparison (Source: Yoo, 2016)

이 밖에 방호 대상물의 용도가 창고일 경우 적재품 (commodity)에 따른 세분화된 분류에 따라 스프링클러 방호 기준을 달리 적용하고 있다.

창고 적재품의 경우 Class I, II, III, IV 및 Group A 플라스틱으로 구분하고 있으며, Class 숫자가 커질수록 화재하중이 크고, Class IV보다는 Group A 플라스틱의 화재 위험도가 높은 것으로 정의하고 있다. 다량의 인화성 액체를 취급하는 경우에는 NFPA 30 Flammable and Combustible Liquids Code에서 별도 방호기준을 규정하고 있다.

그러나, NFPA 13 Table A.5.6에 따르면 가연성 전해액이 포함된 리튬이온 2차전지는 아직 NFPA 13 기준에 따른 특정 “Commodity”로 분류되지 않고 있다(Table 2는 NFPA 일부 발췌).

Table 2. NFPA 13 Table A.5.6 (excerpt)

Examples of Commodities Not Addressed
Batteries
- Lithium and other similar exotic metals
- Lithium-ion and other rechargeable batteries that contain combustible electrolyte

3.3 FM Data Sheets

미국 보험사인 FM Global 社도 보험 고객사의 화재로

인한 손실을 최소화하기 위해 다양한 산업용도에 대한 방재 기준을 가지고 있는데, 그 기준은 FM Global Property Loss Prevention Data Sheets, 줄여서 FMDS라고 불리고 있다. FMDS에서는 소방대상물을 크게 창고용도(Storage Occupancy)와 창고외용도(Non-storage Occupancy)로 나누어 방재기준을 규정하고 있다. Table 3은 FM Global의 창고 외 용도에 대한 위험도 분류이다(FMDS 3-26, 2014). 이것은 NFPA 13의 건물 용도별 화재위험도와 유사한 것으로 HC (Hazard Category) 1, 2, 3으로 분류하며, 숫자가 커질수록 화재 위험도가 높은 것을 의미한다.

Table 3. FMDS 3-26 Hazard Categories Based on Occupancy

Category	Description	Examples
HC-1	Lightly loaded non-storage and non-manufacturing areas with ordinary combustibles	Hospitals Apartments Offices Restaurant
HC-2	Lightly and moderately loaded non-storage, non-manufacturing, and manufacturing areas with ordinary combustibles.	Electrical mfg. Mercantile areas Metalworking Theater Utility rooms
HC-3	Heavily loaded areas with or without plastics.	Cable mfg. Plastics processing

Table 4는 FMDS의 화재위험도 분류별 스프링클러의 살수밀도를 나타낸 것이다. 스프링클러 살수밀도를 기준으로 NFPA 위험도 그룹과 비교하면 HC-1, 2, 3은 각각 경급, 중급(OH2), 상급(EH1) 위험용도에 해당함을 알 수 있다(Fig. 6 참조).

Table 4. FMDS 3-26 Sprinkler Densities for Hazard Categories

Category	Density (mm/min)	Ceilings
HC-1	4	up to 9 m
HC-2	8	up to 9 m
HC-3	12	up to 9 m

창고 적재품의 경우 아래와 같이 플라스틱의 발포 여부 (expanded or unexpanded)와 종이 포장(cartoned or uncartoned) 여부에 따라 좀 더 세분화된 분류를 하고 있다.

- Noncombustible
- Class 1, 2, 3, 4
- Cartoned Unexpanded Plastic (CUP)
- Cartoned Expanded Plastic (CEP)

- Uncartoned Unexpanded Plastic (UUP)
- Uncartoned Expanded Plastic (UEP)

Table 5에서 보는 바와 같이 FMDS 8-1의 적재품 분류(Commodity Classification)를 확인한 결과 전통적인 건전지나 황산 등의 비가연성 전해액이 들어있는 자동차용 배터리 등은 위험도가 낮은 Class 1이나 Class 2로 분류하고 있다(FMDS 8-1, 2015). 반면에, 리튬이온 배터리는 분류표에서 제외하고 있거나 미분류(N/A)로 되어 있다.

Table 5. FM Data Sheet 8-1 (excerpt)

Item	Category	Material	Class
1	Batteries	Batteries, dry cell (not lithium or lithium-ion), uncartoned	Class 1
2	Batteries	Batteries, wet cell (non-ignitable electrolyte, e.g., automobiles, boats), uncartoned	Class 1
3	Batteries	Batteries, dry cell (not lithium or lithium-ion), cartoned	Class 2
4	Batteries	Batteries, wet cell (non-ignitable electrolyte, e.g., automobiles, boats), cartoned	Class 2
5	Batteries	Batteries (plastic casing), empty	UP
6	Batteries	Batteries, wet-cell (non-ignitable electrolyte), large vehicles (e.g., truck)	UP
7	Batteries	Li-ion cells and batteries	N/A

리튬이온 배터리는 비교적 최근에 등장한 신기술이자 새롭게 등장한 위험이므로 이에 대한 충분한 경험이나 연구 결과가 확보되지 못해 NFPA에서와 마찬가지로 FM Global 기준에도 아직까지 반영이 되지 않은 것으로 보인다.

그러나, 2017년에 처음으로 최근 각광받는 리튬 2차전지의 응용 분야인 에너지저장장치(ESS)와 관련된 방재기준이 제정되었다. ESS란 일종의 대형 배터리 시스템으로 중대형 리튬이온 배터리가 수백 개에서 수천 개씩 랙 형태로 집합된 형태이다.

Fig. 7은 옥외 설치형 ESS의 일반적인 외형으로서 컨테이너와 같은 모습이다.

이 새로운 기준 FMDS 5-33 Energy Storage System에 의하면 권장 방호수단으로서 NFPA 기준에 의한 상급위험용도(EH1) 및 기존 FMDS 분류 기준상의 HC-3와 동일한 수준의 스프링클러 살수밀도(12mm/min)를 제시하고 있다.

Fig. 7. Exterior ESS Enclosures (Source: FMDS 5-33, 2017)

3.4 화재실험 연구 동향

DNV社의 연구결과(Warner, 2017)에 따르면 여러 소화약제를 이용한 리튬이온 배터리 소화실험에서 물을 기반으로 한 약제가 가장 우수한 결과를 얻었다. 화염을 제거하는데 성공하더라도 리튬이온 배터리의 재발화 특성 때문에 여러 번 많은 양의 물을 주수해서 충분히 냉각시켜야만 발화한 셀에서 주변 배터리 셀로 열이 더 이상 전파되지 않고 완전한 소화가 가능하다. DNV社에서는 가스계 소화설비가 설치되었다 하더라도 물을 기반으로 한 스프링클러 설비로 보완하는 것을 권장한다. 리튬 배터리의 소화방법과 관련한 가장 큰 오해는 리튬은 금속성 물질이므로 물과 반응하여 폭발적인 연소가 일어난다는 믿음이다. 이것은 “리튬이온” 배터리와 “리튬메탈” 배터리를 혼동하여 생긴 오해이다. 리튬이온 배터리에 들어 있는 리튬 성분은 코발트 산화물로서 활성 리튬 금속과는 다르며 물과 반응하지 않는다(Nam, 2003). 이를 명확히 하기 위해 FMDS 5-33에서는 다음과 같이 명시하고 있다. “Unlike lithium batteries, lithium-ion batteries are not water-reactive.”

FM Global에서는 리튬이온 배터리 창고에 대한 실물 화재실험(Ditch and de Vries, 2013; Ditch, 2016)을 수행하여 3단 랙에 적재된 리튬이온 배터리 화재를 조기반응형 스프링클러(ESFR)로 소화시키는데 성공하였다. 이것은 FMDS 8-9 (2015)의 Table 8 Cartoned Unexpanded Plastic에 대한 스프링클러 방호기준과 거의 유사한 조건이었다.

4. LiB 제조 공정별 위험도 분류

리튬이온 2차전지는 전극형태와 전해질의 종류, 외장재의 종류에 따라 다양한 공정으로 구분될 수 있으나 기본적으로 전극공정, 조립공정, 화성공정으로 크게 구분할 수 있다. 전기에너지를 가진 배터리의 형태는 후공정에 해당하는 화성공정에서 나타나게 된다.

4.1 전극 공정

전극공정은 배터리의 양극과 음극을 형성하는 공정으로서 활물질에 도전제, 바인더 등을 넣고 섞어주는 양극믹싱, 음극믹싱이 있다. 이렇게 섞인 슬러리 상태의 물질을 극판의 기재가 되는 금속 호일(foil)에 도포해 주는 코팅공정을 거치게 된다. 이후 프레스 기계를 통과하며 기재와 활물질을 압착시키고, 라미네이팅 등의 과정을 거쳐 필요한 제품 스펙별로 절단하는 슬리팅 공정으로 구성된다.

본 공정의 초반부인 믹싱공정은 일종의 화학공장과 비슷하며, 후반부인 코팅, 프레스, 라미네이팅 등은 필름 제조공정과 유사하다. 다만, 양극믹싱 공정에서는 국내 위험물안전관리법상 제3석유류에 해당하는 극성용매를 사용하므로 NFPA 위험도 분류상으로는 상급위험용도(EH1) 기준으로 방호하는 것이 필요하다. FMDS의 위험도 분류상으로는 HC-3에 해당한다.

4.2 조립 공정

전극공정에서 만들어진 양극과 음극 사이에 분리막을 넣어 롤형태로 말아 양극과 음극이 반복적으로 겹쳐진 상태를 “젤리롤”이라고 한다. 이것을 원형, 각형 등 배터리 제품 형태에 따라 다양한 용기에 담아 전지의 형태를 만든다. 이때 습도 관리가 중요해서 “드라이룸”이라고 부르는 일종의 클린룸 환경에서 전해액을 주입하는 것이 가장 중요한 공정이다.

본 공정에서 사용되는 전해액은 前 공정인 극판공정에서 언급된 양극믹싱에 비해 상대적으로 사용되는 양은 적으나, 인화점이 매우 낮은 인화성 액체에 해당하므로 화재위험성은 매우 높다고 할 수 있다. 국내 위험물안전관리법상으로는 제1석유류에 해당한다.

그러나, 전해액 공급실은 대체로 건물 외부에 위치하며, 파이프라인을 통해 공급되기 때문에 드라이룸 내에 저장되는 양은 중간 버퍼용으로서 그리 많지 않다. NFPA 위험도 분류상으로는 중급위험용도(OH2) 기준으로 방호하는 것이 필요하다. FMDS의 위험도 분류상으로는 HC-2에 해당한다.

4.3 화성 공정

화성공정은 조립공정에서 배터리의 형태를 갖춘 리튬이온 배터리가 비로소 2차전지로서의 기능을 갖도록 활성화시키는 공정이다. 화성공정은 다시 충방전 공정과 에이징 공정으로 구분된다.

충방전 공정에서는 일정한 시간 간격으로 배터리의 충전과 방전을 반복하여 배터리를 활성화 시킨다. 리튬이온배터리의 열폭주(thermal runaway) 원인 중 하나인 과충전과 과방전은 충방전 공정에서 일어날 수 있으며 대형 화재의 잠재위험이 있는 공정이다.

에이징 공정은 상온 또는 일정 온도와 습도에서 배터리를 일정 기간 보관함으로써 전지 내부에 전해액을 충분히 분산시켜서 이온의 이동이 최적화 될 수 있도록 한다. 에이징이라

고 하는 것은 전기 에너지가 충전된 완성된 배터리 상태로 대량 보관하는 것이나 다름없기 때문에 전기적 에너지 밀도가 매우 높고, 배터리 트레이 등 플라스틱 화재하중이 가장 집중된 공정이라고 할 수 있다.

화성 공정은 충방전 전기설비를 제외하면 리튬이온 배터리가 거의 대부분의 화재하중을 차지한다. 즉, 제조공정이 아니라 리튬이온 배터리의 대형 창고로 간주하여 방호기준을 수립하는 것도 가능하다. Fig. 8은 에이징 공정의 일반적인 예시로서 대형 랙 창고와 유사한 형태임을 알 수 있다.

Fig. 8. Battery Aging System (Source: DAIFUKU CO.)

가연물의 종류와 양의 측면에서 접근해보면 소형 배터리 1셀당 5 g씩 전해액(인화성액체)이 포함되어 있다 할지라도 1개의 표준 팔레트 당 약 20,000개의 셀이 적재되므로 팔레트 당 약 100 kg 이상의 위험물과 플라스틱 필름 가연물이 섞인 것으로 볼 수 있다. 만약 제조공정이 소형이 아니라 중대형 배터리를 제조하는 곳이라면 위험물과 플라스틱 가연물의 양은 10배 이상 증가할 수 있다. 예를 들어 2.7 Ah 짜리 소형 파우치형 배터리에는 전해액이 약 4 g 포함되어 있으나, 20 Ah 짜리 파우치형 배터리에는 전해액이 약 38 g 포함되어 있다(Ditch, 2016).

폴리머 파우치형 리튬이온 배터리는 가연성 플라스틱 필름을 봉지재로 사용하고 있다. 적어도 이러한 타입의 배터리를 생산하는 에이징 공정은 많은 양의 플라스틱과 인화성 전해액으로 인한 높은 화재하중을 고려할 때, 상급위험용도를 넘어서는 인화성액체 취급공정으로 분류하여 NFPA 30 (2018) Flammable and Combustible Liquids Code 또는 FMDS 7-29 (2014) Ignitable Liquid Storage in Portable Containers를 기준으로 방호 대책을 수립하는 것이 타당할 것이다.

5. 결 론

여러 선행 연구 결과와 국제 방재기준에 대한 검토, 리튬이

은 배터리 생산시설의 주요 공정을 분석한 결과 제시된 공정별 화재위험도와 참조해야 할 관련 방재기준은 다음과 같다.

(1) 前 공정

리튬이온 배터리가 제조되는 과정에서 前공정에 해당하는 전극공정과 조립공정은 NFPA 기준으로 각각 상급위험용도(EH1)와 중급위험용도(OH2)에 해당하며, 국내 화재안전 기준에 따라 설계 할 경우에도 이와 유사한 수준으로 방호가 가능하다. 단, 제3석유류를 취급하는 양극믹싱 공정은 포소 화설비로 방호할 수 있다.

(2) 後 공정

배터리의 형태가 갖추어진 이후 전기적 에너지가 저장되기 시작하는 後공정인 화성공정부터는 리튬이온 배터리의 고유한 화재 위험에 노출되기 시작한다. 화성공정에서 또 하나의 문제점은 충방전 설비를 전기시설로 간주하여 스프링클러 오작동으로 인한 수손 피해 우려와 리튬이온 배터리가 금속성이라는 오래된 오해 때문에 리튬이온 배터리의 화재특성에는 적합하지 않은 가스계 소화설비를 설치하는 경우가 많다는 것이다. 그러나, 리튬이온 배터리 화재는 재발화의 특성 때문에 냉각효과가 가장 우수한 스프링클러 등 수계 소화설비로 진압하는 것이 타당하며, NFPA 기준상 상급 위험용도(EH1) 기준에 따라 화성공정을 방호하는 것이 필요하다.

(3) 추가 고려사항

화재시 쉽게 녹을 수 있고 발열량이 높은 플라스틱 필름 봉지재에 인화성 전해액이 들어 있는 폴리머 파우치형 배터리는 화재하중이 대단히 높기 때문에, 이것을 대량 생산하는 제조 시설의 에이징 공정은 NFPA 30 및 FMDS 7-29 등의 위험물 취급시설 및 위험물 창고 방재기준을 참조하여 방호하는 것이 바람직하다.

References

Bang, J.M. (2006). Loss lesson of SONY laptop battery recall. *Risk Management*, Issue Paper (1), Samsung Loss Control Center.

Chung, Y.M., and Cho, W.I. (2010). Lithium-ion battery technology trends and forecast. *Ceramist*, Vol. 13, No. 5, pp. 7-14.

Ditch, B. (2016). *Development of protection recommendations for li-ion battery bulk storage: Sprinklered fire test*. Research Technical Report, FM Global.

Ditch, B., and de Vries, J. (2013). *Flammability characterization of lithium-ion batteries in bulk storage*. Research

Technical Report, FM Global.

FM Global Property Loss Prevention Data Sheets (FMDS) 3-26. (2014). *Fire protection water demand for nonstorage sprinklered properties*.

FM Global Property Loss Prevention Data Sheets (FMDS) 5-33. (2017). *Electrical energy storage systems*.

FM Global Property Loss Prevention Data Sheets (FMDS) 7-29. (2014). *Ignitable liquid storage in portable containers*.

FM Global Property Loss Prevention Data Sheets (FMDS) 8-1. (2015). *Commodity classification*.

FM Global Property Loss Prevention Data Sheets (FMDS) 8-9. (2015). *Storage of class 1, 2, 3, 4 and plastic commodities*.

Joe, H.M. (2013). A study on air transportation of lithium batteries. *Journal of Aviation Development of Korea*, No. 60, pp. 127-143.

Mikolajczak, C., Kahn, M., White, K., and Long, R. (2011). *Lithium-ion batteries hazard and use assessment*. Fire Protection Research Foundation.

Morcos, A., and Vollweiler, J. (2017). *Increased use of lithium-ion batteries*. FM Global, White Paper.

Nam, S. (2003). *Sprinkler protection of lithium batteries in storage and ageing rooms*. FM Global.

NFPA 13. (2016). *Standard for the installation of sprinkler systems*. National Fire Protection Association.

NFPA 30. (2018). *Flammable and combustible liquids code*. National Fire Protection Association.

Warner, N. (2017). *Overview of a year of battery fire testing by DNV GL for consolidated edison, NYSERDA and FDNY*. NFPA 855 Committee Meeting.

Ribière, P., Grugeon, S., Morcrette, M., Boyanov, S., Laruelle, S., and Marlair, G. (2012). Investigation on the fire-induced hazards of li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 5271-5280.

Yoo, H.J. (2016). Understanding of NFPA standards (3). *KEPA Webzine*, No. 60, Korean Fire Protection Association.

Received	October 13, 2018
Revised	October 17, 2018
Accepted	December 12, 2018