

셀소재를 고려한 리튬2차전지 제조공정 위험성 평가 방법 연구

김태훈*†

Research on Risk Assessment of Lithium-ion Battery Manufacturing Process Considering Cell Materials

Taehoon Kim*†

†Corresponding Author

Taehoon Kim

Tel : +82-32-835-8289

E-mail : kths@inu.ac.kr

Received : November 23, 2021

Revised : February 17, 2022

Accepted : March 7, 2022

Abstract : Lithium-ion batteries (LIBs) have attracted much interest for their high energy density (>150 mAh/g), high capacity, low self-discharge rate, and high coulombic efficiency. However, with the successful commercialization of LIBs, fire and explosion incidents are likely to increase. The thermal runaway is known as the major factor in battery-related accidents that can lead to a series of critical conditions. Considering this, recent studies have shown an increased interest in countering the safety issues associated with LIBs. Although safety standards for LIB use have recently been formulated, little attention has been paid to the safety around the manufacturing process for battery products. The present study introduces a risk assessment method suitable for assessing the safety of the LIB-manufacturing process. In the assessment method, a compensation parameter (Z-factor) is employed to correctly evaluate the process's safety on the basis of the type of material (e.g., metal anode, liquid electrolyte, solid-state electrolytes) utilized in a cell. The proposed method has been applied to an 18650 cell-manufacturing process, and three sub-processes have been identified as possibly vulnerable parts (risk index: >4). This study offers some crucial insights into the establishment of safety standards for battery-manufacturing processes.

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : risk assessment, lithium-ion batteries, RAC matrix, manufacturing process safety, Z-factor

1. 서론

화석 연료 고갈, 탄소중립 선언, 신재생 에너지 수요 증가 등에 따라 다양한 형태의 에너지를 전기화학적으로 저장하고 필요할 때 쓸 수 있는 에너지저장기술들이 큰 주목을 받고 있다. 특히 리튬 2차전지(Lithium-ion batteries)는 높은 에너지밀도, 높은 용량, 높은 작동 전압, 낮은 자체 방전율, 메모리 효과 부재 및 일부 친환경 소재 사용 등의 이유로 스마트폰, 랩톱 컴퓨터, 휴대용디지털기기 등의 핵심에너지원으로 널리 활용되고 있다¹⁻⁴⁾. 리튬 2차전지의 수요량은 2016년 21GWh에서 2030년 1,300GWh로 많이 늘어날 전망이다⁵⁾. 최근 전기차(EV/HEV/PHEV) 및 무인 드론 등 새로운 전기

운송수단이 선보이면서 주행거리를 늘리기 위한 고용량/고에너지밀도의 리튬 2차전지 개발을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 이에 따라 현재 널리 상용화가 되어 있는 Li(Ni_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33})O₂ (NCM111) 양극재를 개량한 고-니켈(Ni-rich) 양극재(예. Li(Ni_{0.5}Mn_{0.2}Co_{0.3})O₂, Li(Ni_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2})O₂, Li(Ni_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1})O₂ 등)가 큰 관심을 받고 있다^{6,7)}. 그러나 현재 널리 쓰이고 있는 NCM 계열 2차전지들은 사이클 중 용량의 비가역적 감소 및 전압 저하와 같은 고질적인 문제들을 안고 있다^{8,9)}. 또한 고-니켈 양극재의 경우 고용량을 확보하기 위해서 높은 전압까지 충전해야만 하는데 이 과정에서 전극재와 전해질의 격렬한 반응으로 불안정한 (solid-electrolyte interphase)막이 전극재 계면에 형성되면서 리튬이온의

*인천대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Incheon National University)

† 2021년 행정안전부에서 주최하고 한국안전학회에서 주관한 재난안전 논문공모전 수상작입니다.

이동을 차단하거나 전해질 속에 여러 부산물을 생산하여 전지의 수명을 크게 감소시킨다¹⁰⁻¹²). 지속적인 충·방전은 음극재의 SEI 막에서 리튬덴드라이트(lithium dendrite)의 성장을 촉진시켜 내부단락을 일으키고 배터리 화재 및 폭발의 주원인이 되는 열폭주(thermal runaway)를 개시한다¹³⁻¹⁵). 미국과 유럽에서 전기차 화재사고(예. Tesla Model S 및 Model X 화재 사고)가 잇따라 보고되고 있으며 국내에서도 최근 전기차 수요가 증가하면서 리튬이온배터리 발화에 의한 전기차 화재 및 폭발 사고들이 보고되고 있다¹⁵⁻¹⁷). 또한, 대용량 리튬 2차전지를 이용하는 에너지저장장치(ESS) 사고도 2017년부터 잇달아 보고가 되어 이들 사고에 대해서 민관합동 조사와 위험성 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 전기차 배터리에 대해서는 정부가 올해 7월부터 대폭 강화된 안전기준을 내놓았다. 이들 사고는 공통적으로 배터리 열폭주에 의해서 발생한 것으로 보고가 되고 있다. 반면 대량의 배터리 소재를 취급하고 셀(cell)을 조립하는 리튬 2차전지 생산시설과 관련된 위험분석 및 대응연구는 거의 없는 실정이다. 2차전지를 충·방전하는 화성공정(formation process)은 배터리 열폭주에 의한 화재 및 폭발이라는 동일한 수준의 잠재적 위험성을 갖는다. 또한, 많은 용량의 인화성 및 가연성 재료와 배터리 셀이 한곳에 보관된 상태이기 때문에 화재 시 언제든지 큰 인명피해로 이어질 수 있다.

본 연구에서는 리튬 2차전지와 관련된 화재 및 폭발 사고사례를 통해 열폭주 메커니즘에 의한 2차전지만의 고유의 위험성 특성을 살펴본다. 이러한 분석을 통해 위험성평가코드(RAC)를 기반으로 세부공정 및 기능소재에 따른 2차전지 제조공정에 대한 위험성 분석기법을 제안하여 배터리 제조공정과 관련된 안전표준 마련에 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 주요 사고사례

2021년 2월 중국 허난성에서 중국 최대 배터리 메이커인 CATL의 한 계열사 공장(Brunp Recycling Technology)에서 리튬 2차전지가 폭발하여 1명이 사망하고 6명이 큰 부상을 당하는 사고가 발생하였다. 이 공장은 연간 6만5천가량의 배터리 양극활물질 전구체(precursor)를 생산하는 곳으로, 화재의 원인은 쓰레기장에 버려진 알루미늄 집전체 포일에 불이 붙으면서 발생한 것으로 추정된다.

2021년 7월 호주 빅토리아주에서 TESLA 에너지저장시설인 테슬라메가팩(Tesla Megapack)에서 큰 화재가 발생하여 소방관 150명, 소방차 총 30대가 동원되어 나



Fig. 1. Tesla Megapack factory fire (source: The Sydney Morning Herald, 2021)¹⁸).

홀이 지나서야 화재가 진압되었다. 당시에 1개의 배터리 리에서 시작된 불이 주변의 배터리팩으로 옮겨 붙으면서 13t가량의 배터리를 연소한 것으로 파악된다.

2021년 6월 미국 일리노이주 모리스(Morris)에 위치한 한 공장에서 대형 화재가 발생하여 지역 주민들이 대피하였다. 화재의 원인은 창고에 보관되었던 리튬 2차전지의 발화로 분석되고 있다. 모바일용 소형 배터리에서 전기차용 배터리까지 100t 정도가 보관된 것으로 추정하고 있으며, 독성이 강한 검은 연기를 뿜어내며 소방관들은 화재 진화의 어려움을 겪은 것으로 보고된다. 화재 진화를 위해서 물을 계속 쏟아부으면 배터리가 젖어 단락(short)이 발생하고 재발화가 되어서 화재가 지속되어 진압에 어려움을 겪었다고 알려졌는데, 이는 리튬 2차전지의 대표적인 화재특성이다.

2.2 리튬 2차전지의 구조와 작동원리

리튬 2차전지는 산화-환원 반응을 통해서 화학에너지를 전기에너지로 변환시킬 수 있는 장치로 양극재(cathode), 음극재(anode), 전해질(electrolyte) 및 분리막(separator)으로 구성되어있다. 양극재로는 전이금속 산화물(transition metal oxide)을 주로 사용하고 음극재로는 탄소기반의 그라파이트(graphite) 재료를 많이 사용한다. 리튬이온의 수송을 담당하는 전해질은 일반적으로 유기용매에 리튬염을 녹인 액체 전해질을 사용한다. 이 액체 전해질은 일반적으로 인화성이 높은 물질로 발화의 위험이 있다. 분리막은 다공성 폴리머 물질로 전자의 이동은 차단하지만, 리튬이온의 수송은 가능하도록 해야 한다. 충전 시 산화반응이 일어나면서 양극재의 리튬이온이 빠져나와 음극으로 이동하여 삽입되며, 방전 시 양극과 음극의 화학퍼텐셜 차이에 의해 리튬이온이 음극으로부터 탈리가 되어 전해질을 통해 화학퍼텐셜 준위가 상대적으로 낮은 양극으로 삽입이 되면서 외부 도선으로 전자가 흘러 전원을 공급한다 (Fig. 2).

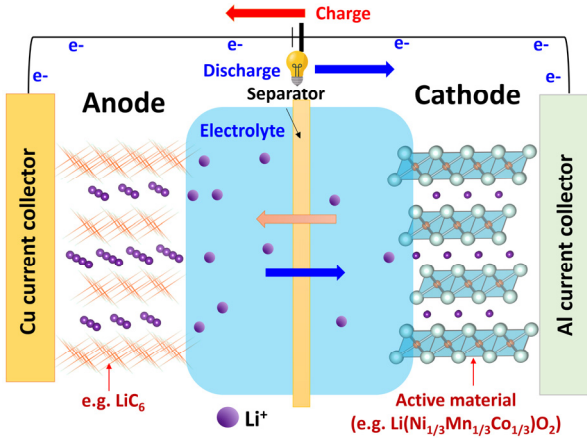


Fig. 2. Illustration of a lithium-ion battery working principle.

2.3 열폭주(thermal runaway) 메커니즘의 이해

미국 국제안전과학기술 업체 UL에서 제정한 UL9540A 표준은 열폭주 화재 확산 평가를 위한 시험방법을 다루고 있다¹⁹⁾. UL9540A에 의하면 열폭주(thermal runaway)란 통제를 벗어난 셀(cell)이 스스로 발화하는 것을 의미한다. 열폭주는 2차전지의 열적 안정성과 직접적인 상관관계를 갖고 있으며 고에너지밀도 리튬 2차전지일수록 열적 안정성이 낮은 특성이 있어 열폭주로 인한 폭발 및 화재 위험성이 큰 편이다. Fig. 3과 같이 셀이 오용조건에 일정 시간 이상 노출되면 열폭주가 개시되어 연쇄반응을 통하여 열폭주에 이르게 된다. 먼저 전극재에 형성되어 있던 SEI막이 분해되고 음극과 전해질이 격렬하게 반응하면서 온도가 상승함에 따라 양극과 전해질 간의 격렬한 산화·환원반응으로 이어지게 된다. 이러한 화학반응은 발열반응으로서 셀 내부 온도 상승의 핵심 요소이다. 또한, 다공성 폴리머로 만들어진 일반적인 분리막은 이 과정에서 손상이 될 수 있으며 100°C 이상의 범위에서 녹을 수 있다. 이러한

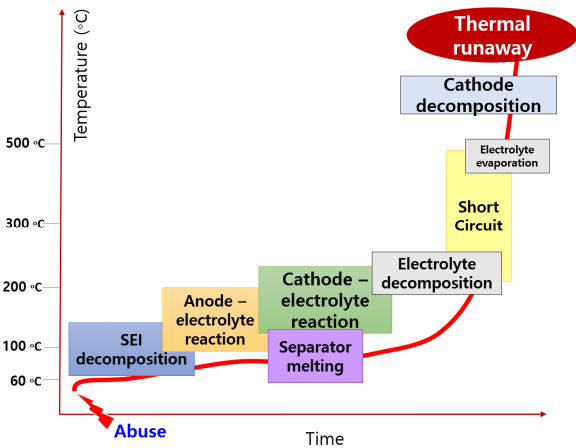


Fig. 3. Chain reactions of thermal runaway process.

과정들이 추가적인 온도 상승을 일으키며 분리막 손상 때문에 물리적으로 분리가 되어야 할 음극재와 양극재가 서로 닿게 되어 내부단락으로 이어질 수 있는 것이다. 다른 한편으로, 음극과 전해질 간의 격렬한 반응은 리튬 덴드라이트의 성장을 가속하여 분리막 관통을 통한 내부단락을 초래할 수 있다. 추가적인 온도 상승으로 이어져 200°C 내외에 도달하게 되면 전해질은 격렬하게 분해가 되어 불안정한 불순물들이 대량으로 만들어지고 분해되면서 또다시 많은 열이 발생한다. 단락이 셀 전체에 걸쳐 발생되면 온도가 폭발적으로 상승하여 배터리 양극재 분해가 시작되는 매우 높은 온도에 도달한다. 이처럼 리튬 2차전지의 열폭주는 소재들 간의 연쇄반응으로 이어지면서 통제할 수 없는 상태에 이르게 되는 것이다. 열폭주가 발생하는 원인은 제조 및 소재 결함, 설계 이상, 사용상 부주의, 오남용 등으로 그 원인이 다양하며 일반적으로 오용조건(abuse conditions) 네 가지를 기준으로 설명한다.

2.3.1 기계적 오용(Mechanical abuse)

2차전지의 기계적 오용은 외부적인 힘에 의한 배터리 손상 및 변형을 의미한다. 전기차(xEVs) 주행 중 충돌사고에 의한 배터리팩(battery pack) 변형은 셀 내부 분리막 손상으로 이어질 뿐만 아니라 내부단락(internal short circuit, ISC)을 일으키고 전해질 누수를 초래하여 화재에 이르게 한다. 특히 셀 전체가 금속성 물질에 의해 관통이 되었다면 격렬한 내부단락으로 열에 의해서 온도가 급상승한다. 셀 관통시 내부단락에 의한 발열 거동을 평가하는 국제표준 인증시험으로 GB/T 31485-2015와 SAE J2464-2009가 있다^{13,20)}.

2.3.2 전기적 오용(Electrical abuse)

충격에 의한 배터리팩 변형 및 손상, 침수, 외부 전도성 물질에 의한 오염, 전기충격 등에 의한 외부단락(external short circuit)은 전기적 오용의 대표적인 경우다. 외부단락에 의한 셀 과열은 대부분 저항열(ohmic heat) 발생에 의한 것으로 파악된다. 과충전(overcharge)도 전기적 오용으로 분류가 된다. 배터리관리시스템(battery management system, BMS)의 오동작 및 시스템 오류로 셀충전시 상한 충전전압을 초과하여 저항열과 화학적인 부반응에 의해서 셀 내부의 온도가 급격하게 상승한다. 과충전 중에는 Li⁺이 음극으로 과잉 삽입(excessive intercalation)되어 리튬 덴드라이트의 성장을 촉진함으로써 분리막을 관통하여 내부단락으로 이어질 확률이 높아지게 된다. 또한 과충전은 양극재의 구조를 불안정하게 만들며 열과 산소를 발생시켜 전해질의 분해를 가속해 셀 내부에 다량의 가스를 생성한다.

과충전이 셀에 미치는 영향은 전류의 세기에 따라 다르다. 높은 전류값을 가지고 과충전을 하면 셀은 폭발에 이르지만 낮은 전류값을 이용한 과충전은 셀팽윤(cell swelling)만을 일으킨다. NCM 계열의 리튬 2차전지를 고전압으로 충전하여 일정 범위의 충전상태(State of charge, SOC)를 넘어가게 되면 열폭주 현상이 발생한다¹³⁾. 일반적으로 상용화되어 있는 NCM 2차전지의 상한 충전전압은 SOC가 100%일 때 4.2V ~ 4.5V이다. 4.5V 이상으로 충전을 하게 되면 SOC는 100%를 이미 초과하고 5V 이상에서는 140~150% SOC에 도달하여 과충전상태가 된다. 열폭주 현상은 170% SOC에서 시작되면서 전지의 기능이 완전히 상실된다. 또 다른 전기적 오용의 사례로 과방전(overdischarge)이 있다. 배터리팩 내에 전압이 가장 낮은 셀은 전압이 일정 이상 유지되는 이웃 셀에 의해서 강제적으로 방전될 수 있다^{13,20)}. 일반적으로 BMS 모니터링 오류로 과방전이 되면 셀의 용량 저하를 일으킬 뿐만 아니라 음극에서 Li⁺의 과도한 탈리(delithiation)를 유도하여 SEI 분해를 가속하고 셀 팽윤의 원인이 되는 CO 및 CO₂ 가스를 생성한다. 이러한 상태에서 다시 충전하게 되면 음극 표면에 새로운 SEI 불순물이 형성되어 배터리의 전기화학적 성능과 안정성을 크게 저하한다. 또한, 과방전시 양극재 형태 변형으로 인하여 일부 Li⁺의 삽입/탈리가 불가능해지면서 배터리용량이 급속도로 저해된다. 과방전은 전극재 뿐만 아니라 집전체(current collector)에도 큰 영향을 끼친다. 특정 전압 미만으로 과방전이 되면 구리 집전체는 용해가 되면서 Cu²⁺가 음극재 내부로 스며들어 간다. Cu²⁺는 충·방전중 지속해서 축적되고 성장하면서 분리막을 뚫고 내부단락을 일으키는 것으로 파악된다.

2.3.3 열적 오용(Thermal abuse)

국지과열(local overheat)은 열적 오용의 대표적인 경우이다^{13,15)}. 전지 내에 국지과열은 전지커넥터가 느슨해지면서 주로 발생한다. 가령 전기차내에 탑재되어 있는 배터리팩의 경우 평상시 자동차의 진동에 의해 커넥터가 느슨해질 수 있다. 또한 국지과열은 셀 내부 전극재와 집전체간 결합이 약해지면서 발생할 수도 있다. 느슨해진 전극재-집전체 경계면에서 지속적인 충·방전으로 인하여 열이 발생하면서 열폭주로 이어질 수 있다. 다른 한편으로는 화재사고로 인하여 외부연소 및 고온 환경에 일정 시간 이상 노출이 되면 전해질을 연소시켜 열폭주를 초래할 수도 있다^{21,22)}.

2.3.4 내부단락(Internal short circuit)

내부단락(ISC)은 열폭주를 일으키는 가장 흔하고 직

접적인 유발원인으로 분리막이 파손되어 음극과 양극이 물리적으로 연결될 때 발생한다^{13,15,20)}. 배터리가 외부 충격에 의해서 변형이 되거나 지속적인 충·방전으로 리튬 덴드라이트가 성장하거나 화재에 의한 외부연소 상황에 놓이게 되면 분리막은 어떤 경우든 파손되어 내부단락이 발생하고 고온 발열 때문에 액체전해질이 기화되어 화재가 발생하고 폭발을 동반하게 된다. 따라서 내부단락은 배터리의 기계적 오용, 전기적 오용, 열적 오용과 직접적인 상관관계를 가지며 열폭주에 이르게 하는 결정적인 요소이다. 하지만 모든 내부단락이 반드시 열폭주로 이어지는 것은 아니다. 내부단락은 자가 방전율과 발열량을 기준으로 크게 세 가지 단계(Level I, II, III)로 구분된다. Level I에서는 셀의 전압강하가 매우 느리며 자가 방전되는 정도가 아주 낮고 온도변화가 거의 없다. Level II에서는 전압강하가 매우 빠르며 눈에 띄는 온도 상승이 보이고 열이 발생한다. Level III에서는 배터리 전압은 0에 이르고 엄청난 양의 열이 발생하면서 즉각 열폭주로 이어진다. 흔히 Level I을 ‘자가소화’ 구간이라고 하며 내부단락이 발생하더라도 열폭주로 이어지지 않는다.

2.4 리튬 2차전지 제조공정

2차전지 제조공정은 크게 전극공정, 조립공정, 화성공정으로 구분되며 세부 공정은 원통형(cylindrical), 각형(prismatic), 파우치형(pouch) 등 셀 형태별로 조금씩 상이하다.

2.4.1 전극공정(Electrode process)

전극공정은 양극활물질과 음극활물질을 각각 알루미늄 집전체와 구리집전체에 도포하는 공정으로 세부적으로 믹싱(mixing) - 코팅(coating) - 압연(press) -

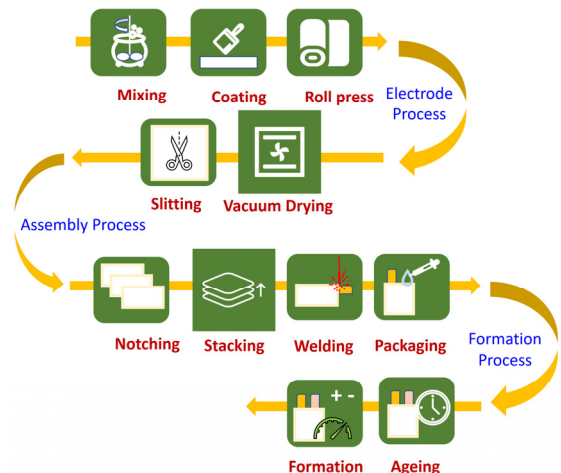


Fig. 4. Schematic of a lithium-ion battery manufacturing process.

슬리팅(slitting) - 진공건조(vacuum drying) 공정으로 분류할 수 있다. 믹싱단계에서는 활물질을 용매, 폴리머 바인더, 도전체와 혼합하여 슬러리(slurry)를 만든다. 코팅공정에서 슬러리는 알루미늄(양극) 또는 구리(음극) 집전체에 도포하여 일정한 두께로 코팅하고 용매를 건조하여 증발시킨다.

이어서 압연공정에서는 롤프레스(roll press)를 사용하여 활물질과 집전체가 최대한 밀착이 되어 에너지밀도를 높일 수 있도록 압연한다. 셀유형이나 규격에 맞춰 슬리터를 이용하여 전극 폭을 잘라내고 장시간 동안 진공 건조를 통해 수분을 완전히 제거한다.

2.4.2 조립공정(Assembly process)

조립공정은 전극공정을 통해 제조된 양극재와 음극재를 분리막 및 전해질과 함께 조립하여 셀을 만드는 단계이다. 세부적으로 노칭(notching) - 와인딩(winding) or 스택킹(stackng) - 탭웰딩(tab welding) - 패키징(packng)으로 구분되며 셀유형(원통형/각형/파우치형)에 따라 공정이 약간씩 상이하다. 노칭 공정은 탭을 접지하기 위한 부분을 남기고 규격에 따라 셀 모양에 맞추어 자르는 공정이다. 다음 단계에서 원통형 셀이나 각형 셀은 양극재와 음극재 사이에 분리막을 삽입하고 돌돌말아 젤리-롤(Jelly-Roll)을 만들어주는 와인딩 공정을 거친다. 반면에 파우치형 셀은 음극재, 분리막, 양극재를 순서대로 쌓거나 접는 방식으로 스택킹 및 폴딩 공정을 거친다. 탭웰딩 공정에서는 양극과 음극 하단의 무지부에 각각 알루미늄탭과 구리탭을 접합한다. 마지막으로 패키징 공정에서는 전해액을 주입하여 각 셀의 형태에 맞는 케이스로 밀봉한다. 파우치형 셀의 경우 최초 충·방전시 가스가 차기 때문에 이를 제거해주는 디개싱(degassing) 공정이 추가된다.

2.4.3 화성공정(Formation process)

화성공정은 조립된 셀을 최초 사이클링을 시켜 전기적으로 셀을 활성화하는 공정이다. 이어 셀 안정화(aging)를 통해 전극재/분리막 내부에 전해액이 균일하게 분산되도록 특정 온도와 습도에서 일정 기간 보관을 한다. 마지막으로 2차전지의 등급을 분류하고 불량을 선별하면 공정이 마무리된다.

3. 공정 위험분석

3.1 위험성평가코드(Risk Assessment Code, RAC)

미국 국방부의 시스템 안전성 적용 표준(MIL-STD-882E)은 잠재위험을 식별하고 분류할 수 있도록 함으

로써 작전 및 작업 중 사고 발생에 의한 사망이나 부상 혹은 직업병으로부터 인명을 보호할 수 있도록 제정된 표준으로 위험성평가코드(RAC)를 포함한다²³⁾.

Table 1. Severity ranking for risk assessment

Ranking	Severity	Consequences
I	Catastrophic	Result in death or permanent disability / key resource damage and major system loss
II	Critical	Injuries or disability more than 3 months (or permanent) / key resource damage and major system loss
III	Marginal	Minor injury or illness less than 3 months / minor resources damage or system loss that can be counteracted
IV	Negligible	First aid or minor medical treatment / Little damage or no loss of resources and system

Table 2. Probability ranking for risk assessment

Ranking	Likelihood	Probability
A	Frequent	Likely to occur often
B	Likely	Will occur several times
C	Occasional	Likely to occur sometime
D	Rarely	Unlikely to occur, but possible
E	Improbable	So unlikely, but probability is not zero

RAC에서는 위험 강도와 발생 가능 빈도를 가지고 위험등급을 정한다. Table 1의 피해는 시스템 오류, 장비결함, 외부의 환경적 원인, 규격을 벗어난 작동 환경 및 사람에 의한 조작 실수를 포괄한다. Table 2는 위험 발생의 가능 빈도를 표시한 것으로 위험 강도와 함께 조합하여 위험등급분류 매트릭스를 구성할 수 있다. 리튬 2차전지 기술은 에너지, 화학, 전기화학, 재료, 화공, 기계 등 여러 응용 분야가 어우러진 융합기술의 집약체인 만큼이나 위험성 평가의 관점에서 2차전지 생산공장은 비교적 복잡하고 까다로운 대상이라고 할 수 있다. 2차전지 자체의 잠재적 위험성은 열폭주로 인하여 화재 및 폭발을 일으킬 수 있다는 점이다. 리튬 2차전지를 조립하고 충·방전으로 활성화시켜 일정 기간 보관하는 시설에서도 같은 성격의 잠재적 위험성이 존재한다고 가정할 수 있다. 시설의 용도와 재료의 위험성이 결합한 화재 안전표준이 있다면 2차전지 생산공장에 대한 위험성 평가가 수월하겠지만 국내에서는 장소 유형(예. 배터리 제조시설)에 따른 위험도를 구분할 수 있는 기준은 없다. 다만 위험물안전관리법상으로 위험물의 종류에 따라 저장·취급 및 운반과 이에 따른 안전관리에 관한 사항을 규정하고 있다.

3.2 2차전지 제조공정을 위한 위험성평가 기법 제안

2차전지 생산공장에서의 화재 발생 가능성을 중심으로 위험도를 평가하고자 할 때 먼저 공정을 세부적으로 구분할 필요가 있다. 같은 전극 공정이라도 믹싱과정에서의 위험도와 진공건조 과정에서의 위험도는 그 수준이 크게 다르다. 전극 공정의 경우 믹싱과정에서 혼합된 슬러리의 인화성 용매 때문에 화재발생 가능성이 있지만 진공건조 과정은 2차 건조 과정으로 대부분의 용매(예. NMP)가 진공 분위기에서 완벽하게 제거가 되는 과정이다. 따라서 믹싱단계에서의 위험강도 범주는 II - 발생빈도 범주는 C라고 할 수 있는 반면에 진공건조 단계에서의 위험강도 범주는 IV - 발생빈도 범주는 E로 등급 차이가 크다. 또한, 세부 배터리 기술 및 핵심소재가 무엇인지에 따라 잠재 위험성 수준이 달라질 수 있음을 고려해야 한다. 미국 방화협회 코드 NFPA 13의 리튬이온기반 에너지저장 장치를 위한 스프링클러 살수 가이드(Sprinkler Protection Guidance for Lithium-Ion Based Energy Storage Systems, 2019)에 따르면, 양극활물질이 LiFePO₄ (LFP) 인 경우 단일 스프링클러로 3667초 만에 진압할 수 있지만 LiNiO₂ (LNO) / LiMn₂O₄ (LMO)의 경우 4개의 주 스프링클러와 36개의 보조 스프링클러가 6000초 이상 작동해야 진압이 가능하다²⁴⁾. 이로 미루어 볼 때 제조된 배터리의 세부기술유형에 따라서도 위험성 수준이 크게 달라질 수 있다는 것을 판단할 수 있다. 가령 일반 리튬2차전지(음극재: 그라파이트 또는 실리콘계열)와 차세대 2차전지인 리튬메탈전지(음극재: 리튬금속) 또는 리튬공기전지(리튬금속 음극재 및 공기반응)는 완전 동일한 공정과 제조시설을 갖더라도 작동기술에 의존적인 세부 소재 종류에 따라 잠재 위험성의 수준 차이가 상당히 클 수 있다. 따라서 2차전지 생산공장을 일반적인 RAC 기법이나 위험물안전관리법 기반으로 위험물의 종류에 따라 안전 등급을 평가하는 것은 그 한계가 분명하다. NFPA 13에서는 시설의 용도별 위험도를 분류하여 스프링클러 기준을 부여하고 있다²⁴⁾. 경급 위험(light hazard) - 중급위험 그룹1 (ordinary hazard group 1) - 중급위험 그룹2 (ordinary hazard group 2) - 상급위험 그룹1 (extra hazard group 1) - 상급위험 그룹 2 (extra hazard group 2)로 5단계로 분류가 된다. 경급 위험에 속하는 시설로는 가연물의 하중이 낮고 열방출률이 상대적으로 적은 공공시설, 교육시설, 종교시설, 주택 및 사무실 등이 있다. 중급위험 그룹1에 속하는 시설로는 가연성이 낮고 가연물의 양이 중간 정도가 되며 적재 높이가 2.4 m 이하로 열방출률이 중간 수준의 주차장 시설, 통조림공장, 전자제품 공장, 세탁소,

식당주방, 전시실 등이 있다. 중급위험 그룹2는 그룹1과 비슷한 용도의 시설이지만 상위위험도를 갖는 그룹으로 기계공장, 제과공장, 금속가공시설, 정비차고, 담배제조공장, 사료공장, 타이어제조공장 등이 이에 속한다. 가연성과 저장물의 양이 모두 중간 정도이며 적재 높이가 3.7 m 이하 열방출률은 중간 이상인 시설에 해당한다. 상급위험 그룹1은 가연성과 저장물의 양이 모두 크거나 인화성이나 가연성 물질이 소량이어도 분진 등과 같은 환경이 존재할 수 있어 열방출률이 높고 화재로 급격히 성장할 수 있는 환경을 가진 시설을 포함한다. 제재소, 합판 제조공장, 금속압출 공장, 가연성 유류 취급 시설 등이 이에 속한다. 상급위험 그룹1에서는 가연성 및 인화성 물질을 포함하고 있는데 대부분 가연성 고체재료에 초점을 맞추고 있다. 반면 상급위험 그룹2는 가연성 또는 인화성 액체가 상당량 저장되어 있으며 작업장소에 가연성·인화성 물질이 일상적으로 사용되고 열차폐시설(heat shield)이 필요한 장소를 포함한다. 인화성액체분무도장 시설, 플라스틱 제조공장, 아스팔트처리 시설, 스틸생산공장 등이 이 범주에 속한다. 미국 NFPA 13의 스프링클러 설비 적용을 기반으로 한 위험도 분류 방식에는 리튬 2차전지 제조 시설과 직접 관련된 내용은 없으나 시설용도 및 적용 재료에 따라 위험도를 구분하고 있다는 점에서 그 의미가 크다. 재료의 가연성 및 인화성 여부와 저장물의 양, 열방출률, 적재물 크기를 기준으로 등급을 분류한 방법은 리튬 2차전지 제조시설의 위험도 평가에 활용할만한 방식이다. 다만, 앞서 언급했듯이, 리튬 2차전지는 에너지, 화학, 전기화학, 재료, 화공, 기계 등 여러 기술이 융복합되어 만들어진 형태로 제조공정의 평가는 더욱 정교한 방식으로 이루어질 필요가 있다고 생각된다.

본 연구에서는 RAC 기법을 중심으로 NFPA 13의 스프링클러 설비를 기반으로 한 등급 평가를 참고해서

Table 3. RAC matrix for process safety assessment

Severity	Probability				
	Frequent	Likely	Occasional	Rarely	Improbable
Catastrophic (I)	1	1	2	3	4
Critical (II)	1	2	3	4	5
Marginal (III)	2	3	4	5	6
Negligible (IV)	3	4	5	6	6

Table 4. Safety assessment for lithium-ion battery manufacturing process

Process name	Risk scenario	Severity	Probability	Risk index	Z-factor	Corrected risk index
Electrode process: before mixing (solvent is a pure liquid)	The solvent of the electrode slurry is flammable, and can produce explosive compounds when it is exposed to air while encountering heat. (Ignited by an electric spark)	I	D	3	1.0	3
Electrode process: during mixing (slurry phase)	Fire on electrode slurry mixed with a flammable solvent. (Ignited by an electric spark)	III	D	5	1.0	5
Electrode process: coating	Fire during slurry coating on Al or Cu-film. (Ignited by an electric spark)	III	D	5	1.0	5
Electrode process: coating	Fire during the drying process of the electrode slurry. (Ignited by an electric spark)	IV	D	6	1.0	6
Electrode process: roll press	Fire during the roll pressing of the electrode. (Ignited by an electric spark)	IV	E	6	1.0	6
Electrode process: slitting	Fire during the slitting process of the electrode. (Ignited by an electric spark)	IV	E	6	1.0	6
Electrode process: vacuum drying	Fire during the vacuum drying process of the electrode. (Ignited by an electric spark)	IV	E	6	1.0	6
Assembly process: notching	Fire occurs by the chemical reaction of electrode with H ₂ O due to a humid control system error or an external water leakage during the notching process in the dry room. (Heat generation from intense chemical reaction with water)	IV	E	6	1.0 (Transition metal oxide cathode)	6
					1.0 (Graphite based anode)	6
					1.0 (Si based anode)	6
					0.3 (Li-metal anode)	1.8
Assembly process: winding or stacking/folding	Fire occurs by the chemical reaction of electrode with H ₂ O due to the humid control system error or an external water leakage during the winding or stacking/folding process. (Heat generation from intense chemical reaction with water)	IV	E	6	1.0 (Transition metal oxide cathode)	6
					1.0 (Graphite based anode)	6
					1.0 (Si based anode)	6
					0.3 (Li-metal anode)	1.8
Assembly process: tab welding	Fire on electrode by sparks or abnormal heating during tab welding. (Electric spark or excessive heat)	IV	E	6	1.0	6
Assembly process: tab welding	Fire occurs by the chemical reaction of electrode with H ₂ O due to the humid control system error or an external water leakage during the tab welding in the dry room. (Heat generation from intense chemical reaction with water)	IV	E	6	1.0 (Transition metal oxide cathode)	6
					1.0 (Graphite based anode)	6
					1.0 (Si based anode)	6
					0.3 (Li-metal anode)	1.8
Assembly process: packaging (electrolyte injection)	Fire occurs by sparks due to the malfunction of equipment during the electrolyte injection. The electrolyte injector is located outside of the dry room, and it is also connected to the external storage tank. (Ignited by an electric spark)	I	C	2	1.0 (Organic liquid electrolyte)	2
					2.0 (Polymer electrolyte)	4
					2.5 (Solid-state electrolyte)	5
					1.0 (Graphite based anode)	1
Formation process: charge and discharge	Fire occurs during battery cycling by over-charge or over-discharge due to the equipment malfunction or system error during the formation process. It triggers the thermal runaway. (Thermal runaway by over-charge or over-discharge)	I	B	1	0.8 (Si based anode)	0.8
					0.5 (Li-metal anode)	0.5
					3.0 (Solid-state electrolyte)	3
					1.0 (Liquid or polymer electrolyte)	3
Formation process: ageing	Fire occurs by thermal runaway of the batteries at the storage area due to the temperature control problem, external heat or product defects. (Thermal runaway by heat or product defects)	I	D	3	1.5 (Solid-state electrolyte)	4.5

2차전지 제조공장에 최적화된 위험도 분석 접근 방법을 제시한다. 우선 Table 1의 위험강도와 Table 2의 빈도를 조합하여 위험등급분류 매트릭스(Table 3)를 구성하여 위험도 지수(risk index)를 정한다. 지수1은 가장 큰 위험도를 표시한 것으로 수용 불가능한 위험도를 의미한다. 지수2와 3은 각각 큰 위험도와 중간 위험도를 나타내고, 지수4는 수용 가능한 위험도를 의미한다. 지수5, 6은 위험도를 무시할 수 있는 수준이다. 지수1, 2에 가까운 공정은 대안을 찾거나 선제 대응방법을 모색해서 위험도 지수를 떨어뜨리도록 해야 한다. 지수3, 4는 검토후 용인이 가능한 수준을 의미하고 지수 5, 6은 검토 없이 공정을 그대로 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 리튬 2차전지 제조공정의 위험도 분석은 Table 4에서 정리하였다. 위험강도(severity)는 열폭주 혹은 연소 과정에서 셀 소재별 에너지 방출량에 근거하고 있고 개별 공정과 연관된 주요 소재들을 분석하여 에너지 방출량의 정량치가 크고 온도 범위가 넓은 소재들에 대해서 높은 위험등급을 부여하였다. 전극공정의 슬러리 혼합 직전에 NMP는 가연성 유기용매(액체)로 공기에 노출되며 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다. 또한 화재 발생시 가연성 가스나 증기 발생이 가능하므로 위험강도는 최고 수준인 I등급으로 산출하였다. 다만 공정에서 이러한 용매 상태의 노출은 매우 짧은 시간에 이루어지기 때문에 이로 인한 폭발의 빈도수는 D 등급으로 평가되었다. 기본적으로 혼합후 슬러리 상태로 진입하면 위험성은 III등급으로 떨어지고 소재가 완전히 고체 상태로 변하면서 위험등급은 가장 낮게(IV) 평가되었다. 소재 상태의 변화에 따라 유기용매나 가연성 액체가 외부 오염조건에 노출이 될 수 있는 확률은 거의 없으므로 위험빈도도 고체 상태로 가면서 매우 낮아지고 있다(probability=E등급). 전극재는 슬러리 상태에서 코팅이 되면서 초벌 건조를 하여 NMP가 제거되도록 한다. 추가 건조 과정에서 잔여 NMP까지 모두 완벽하게 제거가 되면 진공건조 과정에서 전극재 내에 LiH, Li₂O와 같은 불순물까지 없애도록 하고 있다. 따라서 진공건조 공정에서는 가연성 물질이 없는 고체 전극재를 다루기 때문에 공정의 위험성은 최하위(risk index=6) 등급으로 평가할 수 있다. 중간 공정인 조립 공정(assembly process)은 노칭, 와인딩 또는 스택킹/폴딩과 같은 세부 공정으로 구성되어있는데, 부품을 결합하는 과정으로 물리적 외형변화 외에는 전극공정 후반부와 동일한 상태로 위험강도는 IV, 빈도는 E등급으로 산출되었다. 그러나, 조립 공정의 마무리 단계인 전해질 주입 공정은 가연성이 높은 전해 물질(예. LiPF₆ in ethylcarbonate + diehtylcarbonate)의 사용으로

화재 위험성이 매우 높다. 또한, 조립 작업을 통하여 외부 환경에 상대적으로 빈번하게 노출될 수 있으므로 사고 발생시 큰 피해를 입을 수 있어 위험지수는 2번째로 높은 2등급으로 분류되었다. 마지막 공정인 화성 공정(formation process)에서는 안정적인 SEI막을 유도하고 배터리의 작동 환경을 준비하는 과정으로 배터리 충·방전을 하면서 동시에 많은 전기화학 셀들이 보관된 상태이다. 따라서 외부 환경에 노출도 빈번하고 위험강도가 가장 높은 상태라고 판단할 수 있다. 전지를 구성하는 요소들이 원재료로 존재할 때보다, 셀로 조립된 후 충·방전을 하게 되는 것만으로 열폭주 개시의 여지를 남겨두는 것이다. 이때 열폭주 발생시 셀 내부 거의 모든 소재에서 연쇄적인 발열 반응이 일어나고 최대 에너지 방출량에 도달하기 때문에 가장 높은 수준의 위험지수(risk index=1)를 갖는다. 이어 리튬 2차전지의 제조공정을 세분화시켜 위험요소가 있는 작업 내용을 요약하고 공정별로 위험 강도 및 빈도를 산정한다(Table 4). 또한 'Z인자 (Z-factor)'를 추가하여 공정상황 및 재료특성에 맞게 위험지수를 보정(corrected risk index) 할 수 있도록 한다.

4. 위험성 분석 적용

전기차용 리튬 2차전지인 18650 cell를 제조한다고 가정할 때 본 연구에서 제안한 방법으로 생산공장의 위험도를 분석한다. 상용 18650 cell의 주요 규격과 구성 소재는 Table 5에서 확인할 수 있다.

양극재의 경우 활물질은 LiCoNiAlO₂ (NCA)이다. NCA의 경우 전이금속산화물 형태로 원료 상태로 보관하거나 공기나 수분 노출시 화재로 이어질 수 있는 반응은 없다. 다만 셀 상태로 오랫동안 연속 충·방전을 하거나 과충전을 하는 경우 O²는 산소가스로 변환되어



Fig. 5. A commercial 18650 cell.

Table 5. Key specifications and components of a commercial 18650 cell

Category	Composiiton or specification
Cathode	LiCoNiAlO ₂
Anode	Graphite
Electrolyte	LiPF ₆ C ₃ H ₄ O ₃ (EC) C ₅ H ₁₀ O ₃ (DEC)
Cell capacity	2900 mAh
Weight	48.0 g
energy density	577 Wh/l or 207 Wh/kg
Cell type	Cylindrical 18650
Maximum outside diameter	18.5 mm
Maximum inside diameter	6.5 mm
Cell length	65.3 mm

열폭주로 이어질 수 있는 핵심 요소라는 것을 이해할 필요가 있다. 음극활물질은 카본계열의 그래파이트(graphite) 소재로 공기나 수분과의 격렬한 반응성이 전혀 없고 비인화성 물질이다. 전해질 성분은 리튬염(LiPF₆)이 액체 카보네이트 화합물(EC/DEC)에 용해된 전형적인 유기 전해질로 인화성 및 가연성이 높은 물질이다. 외형은 18650의 규격을 가진 원통형 셀로 에너지밀도가 높은 편이다. 따라서 많은 수의 셀을 한 장소에 같이 보관하는 에이징 공정은 화재 및 폭발로 이어질 수 있어 매우 위험하다고 판단할 수 있다. 해당 cell의 생산공정과 관련한 구체적인 위험도 평가는 Table 6에서 확인할 수 있다. NCA셀 전극재 슬러리 제조를 위한 물질 혼합 이전 단계에서 NMP, Polyvinylidene

fluoride (PVDF), carbon black, NCA 활물질 등의 원재료가 준비된다. 이 중에서 유기용매인 NMP는 가연성 물질로 공정에 많은 양이 투입되기 때문에 화재 발생 시 큰 인명피해로 이어질 수 있다. 또한, 연소 시 NMP는 열방출량이 상대적으로 높은 수준으로 위험강도는 I등급으로 평가가 될 수 있다. 원재료들은 전용 시설에 완전 밀폐가 된 상태에서 보관되고 혼합 단계에 이르기까지 노출 빈도수가 낮은 편이라 빈도는 D등급으로 분류한다. 믹싱 단계에서는 원재료들이 모두 혼합되면서 슬러리 상태로 만들어진다. 장비 이상에 의한 전기 스파크와 같은 상황이 발생하여도 카본도전체와 전이 금속산화물이 주요 물질로 구성된 슬러리 상태에서 큰 화재로 번지는 것은 가능성이 매우 낮다. 다만 초기에 완전혼합이 이루어지지 않은 상태에서 점화원이 있는 경우 유기용매에 의해 연소할 수 있겠지만 작업자의 부상 수준이나 시설의 피해 수준이 매우 낮을 것으로 판단된다(위험강도: III등급). 본 공정에서는 여러 건조 과정을 거치고 슬러리가 고체 상태로 변하면서 위험강도와 빈도수가 매우 낮은 수준으로 산출되어 위험지수는 최저등급(=6등급)으로 분류된다. 이렇게 제조된 NCA전극재는 노칭을 통해서 부품 모양으로 가공되고 와인딩(winding) 또는 스택킹(stackng)을 통해 내부 소재를 층층이 쌓는 방식으로 조립이 진행되고 웰딩(welding)을 통해서 배터리 탭(tab)을 부착한다. 이러한 일련의 과정들은 코팅된 전극재의 물리적 외형변화만을 주는 것이기 때문에 위험등급의 큰 변화 없이 위험지수는 6등급으로 유지된다. 하지만, 조립공정의 최종

Table 6. Risk assessment of a commercial 18650 cell manufacturing process

Process name	Risk scenario	Severity	Probability	Risk index	Z-factor	Corrected risk index
NCA electrode process: before mixing (solvent is a pure liquid)	The solvent (NMP, N-Methyl-2-pyrrolidone) of the NCA electrode slurry is flammable, and can produce explosive compounds when it is exposed to air while encountering heat. (Ignited by an electric spark)	I	D	3	1.0	3
NCA electrode process: during mixing (slurry phase)	Fire on NCA electrode slurry mixed with a flammable solvent (NMP, N-Methyl-2-pyrrolidone). (Ignited by an electric spark)	III	D	5	1.0	5
NCA electrode process: coating	Fire during slurry coating on Al or Cu-film. (Ignited by an electric spark)	III	D	5	1.0	5
NCA electrode process: coating	Fire during the drying process of the electrode slurry. (Ignited by an electric spark)	IV	D	6	1.0	6
NCA electrode process: roll press	Fire during the roll pressing of the electrode. (Ignited by an electric spark)	IV	E	6	1.0	6
NCA electrode process: slitting	Fire during the slitting process of the electrode. (Ignited by an electric spark)	IV	E	6	1.0	6
NCA electrode process: vacuum drying	Fire during the vacuum drying process of the electrode. (Ignited by an electric spark)	IV	E	6	1.0	6

Table 6. Continued

Process name	Risk scenario	Severity	Probability	Risk index	Z-factor	Corrected risk index
Assembly process: notching	Fire occurs by the chemical reaction of electrode with H ₂ O due to a humid control system error or an external water leakage during the notching process in the dry room. (Heat generation from intense chemical reaction with water)	IV	E	6	1.0 (Transition metal oxide cathode)	6
					1.0 (Graphite based anode)	6
Assembly process: winding or stacking/folding	Fire occurs by the chemical reaction of electrode with H ₂ O due to the humid control system error or an external water leakage during the winding or stacking/folding process. Heat generation from intense chemical reaction with water)	IV	E	6	1.0 (Transition metal oxide cathode)	6
					1.0 (Graphite based anode)	6
Assembly process: tab welding	Fire on electrode by sparks or abnormal heating during tab welding. (Electric spark or excessive heat)	IV	E	6	1.0	6
Assembly process: tab welding	Fire occurs by the chemical reaction of electrode with H ₂ O due to the humid control system error or an external water leakage during the tab welding in the dry room, (Heat generation from intense chemical reaction with water)	IV	E	6	1.0 (Transition metal oxide cathode)	6
					1.0 (Graphite based anode)	6
Assembly process: packaging (electrolyte injection)	Fire occurs by sparks due to the malfunction of equipment during the electrolyte (LiPF ₆ in DC/EC) injection. The electrolyte injector is located outside of the dry room, and it is also connected to the external storage tank. (Ignited by an electric spark)	I	C	2	1.0 (LiPF ₆ + carbonate based organic liquid electrolyte)	2
Formation process: charge and discharge	Fire occurs during battery cycling by over-charge or over-discharge due to the equipment malfunction or system error during the formation process. It triggers the thermal runaway. (Thermal runaway by over-charge or over-discharge)	I	B	1	1.0 (Graphite based anode)	1
Formation process: ageing	Fire occurs by thermal runaway of the batteries at the storage area due to the temperature control problem, external heat or product defects. (Thermal runaway by heat or product defects)	I	D	3	1.0 (Liquid or polymer electrolyte)	3

단계인 전해질 주입(electrolyte injection) 과정에서는 화재사고 발생 시 위험강도가 I등급으로 치명적일 수 있다. Table 5에서 나와 있는 것처럼, 전해질은 LiPF₆가 C₃H₄O₃ (EC)와 C₅H₁₀O₃ (DEC)에 혼합된 상태로 가연성이 매우 높은 물질이고 대용량으로 보관되기 때문에, 점화되면 피해 규모가 상당히 클 것으로 예상된다(위험강도: I등급). 또한, 전해질 주입 공정은 배터리의 케이싱(casing)이 개봉된 상태에서 주입이 되는 과정으로 외부 노출이 빈번할 수 있어 빈도수는 C등급으로 분석된다. 따라서 본 세부공정은 위험지수가 2등급으로 안전을 위한 각별한 주의가 필요하다.

마지막 화성공정(formation process)에서는 안정적인 SEI막을 유도하고 NCA배터리의 작동 환경을 준비하는 과정으로 배터리 충·방전을 실시한다. 다량의 셀(혹은 팩)들이 보관된 상태로 화재사고 발생 시 가장 치명적인 피해를 일으킬 수 있는 환경이다. 하지만 외부 점화원에 의한 화재 이상으로 위험한 것은 셀 자체 내부의 열폭주에 의한 사고이다. 화성공정의 충·방전은 필수 작업이기 때문에 사고의 가능성이 매우 크고

(빈도: B등급) 열폭주 개시시 셀 내부 거의 모든 소재에서 연쇄적인 발열반응이 일어나고 최대 에너지 방출량에 도달할 수 있어 가장 높은 수준의 위험지수(risk index=1)를 갖는다. 실제 상용화되어있는 리튬 배터리에 관한 위험 평가로 표준 소재를 사용하였기 때문에 Z-factor는 모두 1.0으로 특별한 보정이 없다(Table 6).

5. 결론

리튬 2차전지는 에너지밀도가 높고 일반적으로 인화성이 높은 유기액체 전해질을 사용하기 때문에 화재 및 폭발의 위험성이 크다. 이러한 2차전지를 제품으로 제조하는 공정에서도 동일한 위험성이 내재하고 있지만, 이와 관련하여 안전성을 평가하고 위험 예방에 관한 사항을 규정한 곳은 아직 없는 실정이다. 본 연구에서는 RAC기법을 중심으로 세부공정 및 핵심소재에 따른 2차전지 제조공정에 대한 위험성 분석기법을 제안하고 있다. 특히 음극재와 전해질의 종류에 따라 화재 및 폭발로 이어질 수 있는 위험성 차이가 크다. 이러한

부분을 보정하고자 Z인자(Z-factor)를 도입하였고 원통형 18650 셀 제조에 제안 분석기법을 적용해보았다. 그 결과化成공정 충·방전 공정(=위험지수1)이 가장 위험한 것으로 분석되었고, 패키징 중 전해질 주입(=위험지수2) 공정이 그 뒤를 이었다. NCA전극공정 중 믹싱 전과化成공정 중 안정화 단계는 위험지수3으로 분석되어 중간위험도를 표시하고 있다. 따라서 이들 공정은 수용가능한 위험도인 위험지수4를 초과하기 때문에 안전을 위한 선제대응 방법이나 개선방법을 찾을 필요가 있다. 향후 정확한 위험성 평가를 위해서 활물질 에너지밀도와 에이징 시 보관 중량, 독성가스 발생율(예. LiF, HF등), 리튬금속에 의한 분진폭발 항목 등을 추가하여 배터리 공정과 관련된 안전표준 제정 시 본 평가기법을 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

Acknowledgement: This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2021R1F1A1051969).

References

- 1) J. B. Goodenough and K. -S. Park, "The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 135, No. 4, pp. 1167-1176, 2013.
- 2) T. Kim, W. Song, D. Y. Son, L. K. Ono and Y. Qi, "Lithium-ion Batteries: Outlook on Present, Future and Hybridized technologies", *J. Mater. Chem. A*, Vol. 7, No. 7, pp. 2942-2964, 2019.
- 3) Bloomberg New Energy Finance, "Electric Vehicle Outlook 2017 Bloomberg New Energy Finance's Annual Long-term Forecast of the World's Electric Vehicle Market", Bloomberg New Energy Finance, 2017.
- 4) A. Manthiram, J. C. Knight, S. T. Myung, S. M. Oh and Y. K. Sun, "Nickel-Rich and Lithium-Rich Layered Oxide Cathodes: Progress and Perspectives", *Adv. Energy Mater.*, Vol. 6, No. 1, pp. 1501010, 2016.
- 5) M. D. Radin et al., "Narrowing the Gap between Theoretical and Practical Capacities in Li-Ion Layered Oxide Cathode Materials", *Adv. Energy Mater.*, Vol. 7, No. 20, pp. 1602888, 2017.
- 6) A. Manthiram, J. C. Knight, S. T. Myung, S. M. Oh and Y. K. Sun, "Nickel-Rich and Lithium-Rich Layered Oxide Cathodes: Progress and Perspectives", *Adv. Energy Mater.*, Vol. 6, No. 1, pp. 1501010, 2016.
- 7) W. Lee, S. Muhammad, T. Kim, H. Kim, E. Lee, M. Jeong, S. Son, J. H. Ryou and W. S. Yoon, "New Insight into Ni-Rich Layered Structure for Next-Generation Li Rechargeable Batteries", *Adv. Energy Mater.* 8, pp. 1701788, 2018.
- 8) J. P. Pender et al., "Electrode Degradation in Lithium-Ion Batteries", *ACS Nano*, Vol. 14, No. 2, pp. 1243-1295, 2020.
- 9) J. S. Edge et al., "Lithium Ion Battery Degradation: What You Need to Know", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 23, No. 14, pp. 8200-8221, 2021.
- 10) W. Li et al., "Dynamic Behaviour of Interphases and Its Implication on High-energy-density Cathode Materials in Lithium-ion Batteries", *Nat. Commun.*, Vol. 8, No. 1, pp. 14589, 2017.
- 11) S. J. An, J. Li, C. Daniel, D. Mohanty, S. Nagpure and D. L. Wood, "The State of Understanding of the Lithium-ion-attery Graphite Solid Electrolyte Interphase (SEI) and Its Relationship to Formation Cycling", *Carbon N. Y.*, Vol. 105, pp. 52-76, 2016.
- 12) G. Cherkashinin, M. Motzko, N. Schulz, T. Späth and W. Jaegermann, "Electron Spectroscopy Study of Li [Ni,Co,Mn]O₂ Electrolyte Interface: Electronic Structure, Interface Composition, and Device Implications," *Chem. Mater.*, Vol. 27, No. 8, pp. 2875-2887, 2015.
- 13) X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia and X. He, "Thermal Runaway Mechanism of Lithium Ion Battery for Electric Vehicles: A Review", *Energy Storage Mater.*, Vol. 10, pp. 246-267, 2018.
- 14) H. Wang et al., "A Comparative Analysis on Thermal Runaway Behavior of Li (Ni_xCo_yMn_z)O₂ Battery with Different Nickel Contents at Cell and Module Level", *J. Hazard. Mater.*, Vol. 393, No. February, p. 122361, 2020.
- 15) X. Feng, D. Ren, X. He and M. Ouyang, "Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries", *Joule*, Vol. 4, No. 4, pp. 743-770, 2020.
- 16) Q. Wang, B. Mao, S. I. Stoliarov and J. Sun, "A Review of Lithium ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 73, pp. 95-131, 2019.
- 17) E. Lee, "Analysis of Car Fire Cases Related to a Lithium Battery and Cause Investigation Technique", *Fire Sci. Eng.*, Vol. 33, No. 2, pp. 98-106, 2019.
- 18) The Sydney Morning Herald, "<https://www.smh.com.au/business/the-economy/fire-breaks-out-during-testing-of-victorian-big-battery-near-geelong-20210730-p58eh4.html>",

Retrieved on 09.20.2021.

- 19) UL 9540A, "Standard for Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems", Underwriters Laboratories Inc., 2019.
- 20) Y. Chen, Y., Kang, Y. Zhao, L. Wang, J. Liu, Y. Li, Z. Liang, X. He, X. Li, N. Tavajohi and B. Li, "A Review of Lithium-ion Battery Safety Concerns: The Issues, Strategies and Testing Standards", J. Energy Chem. Vol. 59 pp. 83-99, 2021.
- 21) H. Lee, S. Hong, J. Lee and M. Park, "Analysis of Effect of Surface Temperature Rise Rate of 72.5 Ah NCM Pouch-type Lithium-ion Battery on Thermal Runaway Trigger Time", J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 5, pp. 1-9, 2021.
- 22) H. Ko and E. Lee, "Combustion Characteristics of Ionized Fuels for Battery System Safety", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 1, pp. 22-27, 2018.
- 23) MIL-STD-882E, "Department of Defense Standard Practice: System Safety", U.S. Department of Defense (DoD) Systems Engineering (SE), 2012.
- 24) NFPA 13, "Standard for the Installation of Sprinkler Systems", National Fire Protection Association, 2016.