

군용 리튬2차전지 안전성 강화를 위한 제도적 방안 연구

이종창*, 김상덕, 최한얼

*국방기술품질원

e-mail:ljc9612@dtaq.re.kr

A Study on Enhancing the Safety of Military Lithium Secondary Batteries

Lee Jong Chang*, Kim Sang Deok, Choi Haner

*Defense Agency for Technology and Quality

요약

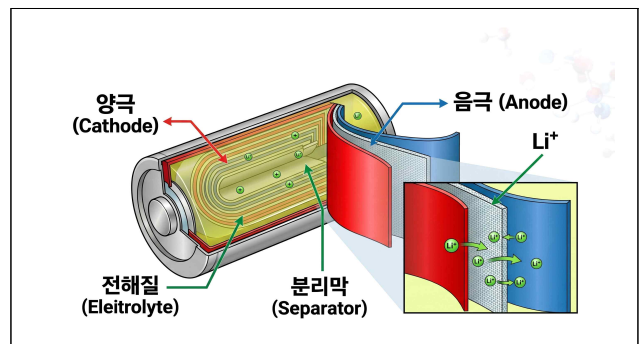
본 연구는 군용 리튬2차전지의 열폭주 연쇄 폭발 위험을 통제할 표준화된 검증 프로세스와 관리 지침이 부재함을 식별하고, 사용자 관점의 안전 확보 방안을 제안하였다. 이를 해결하기 위해 민수 안전 표준과 군 특수 시험을 결합한 '시험 항목 테일러링'과 '전수명주기 안전관리 기준'을 제도화함으로써, 단순한 사고 예방을 넘어 무기체계의 절대적인 운용 신뢰성과 장비의 생존성을 보장하고자 한다.

2. 리튬2차전지 구조 및 화재 매커니즘

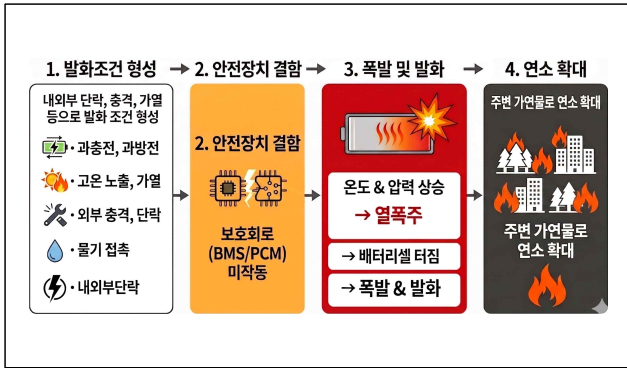
1. 서론

과거 군용으로 주로 사용되었던 니켈-카드뮴(Ni-Cd) 전지는 구조적 견고함과 저온 특성이 우수했으나, 메모리 효과(Memory Effect)로 인한 용량 감소와 환경 오염 문제라는 명확한 단점이 존재했다. 이를 극복하며 등장한 리튬 2차 전지는 메모리 효과가 없고 효율이 뛰어나지만, 과충전 및 물리적 충격 시 열폭주(Thermal Runaway) 위험이 크다는 특성이 있다. 열폭주 및 화재의 위험이 있음에도 리튬2차전지가 여전히 주력으로 사용되는 이유는 동일 부피 대비 높은 에너지 밀도와 제조 공정의 성숙도에 따른 우수한 경제성 때문이다.[1] 이러한 리튬 기반 전지는 민수 분야에서 개인이 소량 사용할 때는 위험 제어가 비교적 용이하다. 하지만 부대 내에서 대량의 전지를 밀집하여 저장하고 운용할 경우, 단 한 번의 사고가 연쇄 폭발로 이어져 막대한 인적·물적 피해를 초래할 수 있다. 그럼에도 불구하고 현재 무기체계 운용 현장에서는 이를 체계적으로 제어할 수 있는 검증 과정이 미비하며, 전수명 주기를 관리할 실질적인 지침이 부재한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 대량의 리튬2차전지를 안전하게 운용하기 위한 검증 프로세스의 정립과 관리 지침 수립의 필요성을 연구하고 제안하고자 한다.

리튬2차전지는 에너지 밀도를 결정하는 양극(Cathode), 리튬이온을 수용하는 음극(Anode), 이온의 이동 통로인 전해액(Electrolyte), 그리고 두 극의 직접적인 접촉을 막는 분리막(Separator)의 4대 핵심 요소로 구성되어 있다. 이러한 구조는 고효율 전력 공급에는 유리하나, 구조 내부에 인화성 전해질과 산소를 포함한 양극재가 공존하고 있어 잠재적인 화재 위험성을 내포하고 있다.[2] 특히 군 운용 환경에서 빈번히 발생하는 물리적 충격(외부 압착, 관통, 낙하 등)이나 전기적 남용(외부 단락, 과충전, 과방전 등)이 가해질 경우, 내부 분리막이 손상되면서 양극과 음극이 직접 맞닿는 단락 현상이 발생한다. 이는 전지 내부의 화학 에너지가 순식간에 열 에너지로 전환되는 자기 발화, 즉 열폭주 현상의 시발점이 된다.



[그림 1] 리튬이온전지 구조



[그림 2] 리튬2차전지 화재 발생 메커니즘

열폭주의 과정은 단계적으로 진행된다. 먼저 외부 충격으로 전지 내부 온도가 상승하면, 특정 온도(약 130°C ~ 150°C)에서 분리막이 용융되며 내부 단락이 가속화된다. 이후 전해액이 기화하며 내부 압력이 급격히 상승하고, 양극 구조가 붕괴되면서 자체적으로 산소가 방출된다. 이 과정에서 발생하는 열은 수초 내에 수백 도까지 치솟으며 폭발적인 발화로 이어진다. 이러한 열폭주 화재는 전지 자체에서 산소를 공급하며 연쇄 반응을 일으키기 때문에 일반적인 질식 소화 방식으로는 진압이 매우 어렵다.[3] 따라서 개인이 소량으로 사용하는 민수용 전지와는 달리, 군부대와 같이 대량의 전지를 밀집 저장하는 환경에서는 초기 발화를 억제하고 연쇄 폭발을 차단할 수 있는 엄격한 검증과 관리 지침의 수립이 필수적이다.

3. 리튬2차전지 표준 및 규격화 현황

현재 민수 분야에서는 리튬2차전지의 성능과 안전성을 검증하기 위한 체계적인 국제 표준이 확립되어 있다. 성능 측면에서는 소형 및 휴대용 기기를 대상으로 하는 IEC 61960과 산업용 및 대형 기기를 대상으로 하는 IEC 62620이 대표적이며, 이를 통해 방전 특성과 에너지 효율 등을 검증할 수 있다. 이와 마찬가지로 안전성 측면에서도 IEC 62133과 IEC 62619이 존재한다. 나아가, 운송 및 취급 시의 안전을 보장하기 위해 IEC 62281 및 UN 38.3 규격이 전 세계적으로 통용되고 있다.[4-8]

국방분야에서 사용되는 규격화가 완료된 전지는 국방표준종합시스템(KDSIS)에 등록되어 관리되어지고 있다. 관련된 규격을 살펴보면 앞서 제시된 민수표준을 준용하거나, 더 나아가 전자파 적합성(MIL-STD-461) 및 환경(MIL-STD-810) 시험 등의 가혹한 요구조건을 충족하도록 규격화하여 운영하고 있다. 그러나 이러한 수준의 요구사항은 일부 특정 전지에만 한정되어 적용되고 있다.

[표 2] 리튬 2차전지 국제 표준 및 주요 평가항목(성능, 안전성)

	주요 국제표준	주요 평가항목
성능	IEC 61960-3 (휴대기기용 리튬 이차전지 셀 및 전지)	방전 성능 사이클 수명 전하 유지 및 용량 회복 내부저항
	IEC 62620 (산업용 리튬 이차전지 셀 및 전지)	온도별 방전성능 고율 방전 성능 장기 신뢰성 및 사이클 수명 전하 유지 및 용량 회복 에너지 효율 내부 저항
안전	IEC 62133-2 (소형 휴대기기용 안전)	외부 단락 과충전 및 강제방전 열 노출 기계적 압착 및 낙하
	IEC 62619 (산업용/대형 장비용 시스템 안전)	열전이 BMS 기능 안전성 내부 단락
운송 및 취급	IEC 62281 / UN 38.3 (운송 및 취급 안전)	고도 극한 온도변화 진동 및 기계적 충격

전장에서 운용되는 군용 전지는 일반 민수 환경보다 훨씬 가혹한 조건에 상시 노출된다. 따라서 민수 표준은 군용 전지가 갖추어야 할 하한선이 되어야 함에도 불구하고, 실제 국방규격 작성 시 이를 충분히 반영하지 않거나 누락하는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 결과적으로 전지의 신뢰성과 사용자의 안전을 확보하기 위해서는 모든 군용 리튬2차전지에 대해 민수 표준 이상의 엄격한 기준을 필수적으로 적용하도록 '시험항목 테일러링'의 제도적 장치를 마련할 필요가 있다.

4. 사용자 중심의 표준화 제안

군 운용 환경은 잦은 물리적 충격, 극한의 온도 변화, 전자기 간섭 등 다양한 위험 요인이 존재하며, 사소한 취급 부주의도 대규모 연쇄 사고로 이어질 가능성이 매우 높다. 따라서 군용 리튬2차전지의 잠재적 위험을 완벽히 통제하기 위해서는 제조 및 공급자 중심의 획득 관점에서 벗어나, 실제 운용 환경에 입각한 사용자 중심의 표준화가 필수적이다. 따라서 단순한 성능 검증을 넘어, 현장에서 전지를 직접 다루는 행위 자체에 대한 실무적 표준화가 확립되어야 한다. 이는 전지의 개발 단계부터 저장, 운용, 폐기에 이르는 전수명주기 전반에 걸친 안전관리 기준을 의미한다. 특히, 이러한 기준은 공학적 전문 지식이 부족한 사용자가 현장에서 즉각적이고 정확하게 실천할 수 있도록 직관적인 안전 가이드라인 형태로 제공되어야 할 것이다. 이러한 사용 표준화를 통하여 발생 가능한 인적 오류를 최소화하고, 궁극적으로 무기체계의 절대적인 신뢰성과 사용자의 생존성을 보장하는 핵심 토대가 될 것이다.

5. 결론

참고문헌

본 연구에서는 군용 리튬2차전지의 열폭주 메커니즘과 공격 현황을 분석하고, 대규모 연쇄 폭발 위험을 예방하기 위한 사용자 중심의 체계적 안전관리 방안을 제안하였다. 리튬 2차 전지는 우수한 에너지 밀도와 효율성으로 인해 현대 무기체계의 주요 동력원으로 자리 잡았으나, 가혹한 전장 환경과 밀집 저장이라는 군의 특수성으로 인해 사고 발생 시 그 피해 규모는 매우 치명적이다. 그럼에도 불구하고 현재의 국방 규격은 일부 전지에만 특정 시험 조건을 적용하고 있으며, 전수명주기를 아우르는 표준화된 관리 지침은 여전히 미비한 실정이다.

이에 본 연구는 다음의 두 가지 핵심 방안을 강조한다. 첫째, 모든 군용 리튬 전지에 대해 민수 표준을 상회하는 '시험 항목 테일러링'의 제도화가 필요하다. 둘째, 야전에서 전지를 직접 취급하는 사용자가 이해하고 실천할 수 있는 직관적인 '전수명주기 안전관리 기준'이 수립되어야 한다. 이를 통하여 사용자의 환경에서 발생할 수 있는 잠재적 화재 위험을 사전 차단할 수 있으며 나아가 무기체계의 절대적인 운용 신뢰성을 확보할 수 있다.

- [1] 김덕한, “리튬이온배터리의 폭발위험성과 페리튬 2차전지의 저장·보관 시 이격거리에 관한 연구”, 인하대학교, 8월 2021년
- [2] 이봉우, “ESS시스템의 화재원인 분석과 해결 방안 연구”, 한양대학교, 2월, 2020년
- [3] 과학기술정보통신부, “연구실 내 배터리 취급·관리 매뉴얼”, 4월, 2025년
- [4] 산업표준심의회, “리튬 일차 및 이차전지 셀과 전지의 운송을 위한 안전”, KS C IEC 62281, 10월, 2024년
- [5] 산업표준심의회, “산업용으로 사용되는 리튬이차전지 셀 및 전지”, KS C IEC 62620, 12월, 2021년
- [6] 산업표준심의회, “산업용 리튬이차전지 셀 및 전지의 안전 요구사항”, KS C IEC 62619, 12월, 2021년
- [7] 산업표준심의회, “휴대기기용 리튬이차전지 셀 및 전지”, KS C IEC 61960-3, 12월, 2021년
- [8] 산업표준심의회, “휴대기기용 밀폐식 이차전지 셀 및 이차전지 구성품의 안전 요구사항”, KS C IEC 62133-2, 12월, 2021년