

9V 배터리의 단락회로 분석

출처 FIRE & ARSON INVESTIGATOR 2010년 1월호
번역 유승현 한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 전기시스템팀

“트랜지스터” 또는 “트랜지스터 라디오” 배터리라고 부르고 어디에서나 흔히 볼 수 있는 9V PP3 건전지는 일반적으로 작은 크기로 인한 내부위험 또는 소각하여 폐기할 때에 발생하는 폭발 위험 이외의 중대한 위험을 내포하지 않는 것으로 알려져 있다. 후자의 위험은 모든 다른 배터리에도 적용된다. 그러나 약간 높은 에너지 밀도와 PP3 배터리 단자의 구조는 일부 사례에서 배터리의 낮은 내부 임피던스와 결합하여 단락 물질에 충분한 열을 발생시켜서 그것과 접촉하고 있는 가연물을 손상시키거나 점화시킬 수 있는 단락위험을 발생시킬 수 있다. 이 현상을 증명하기 위해 이 논문은 PP3 건전지의 단락시험에서 기록된 자료와 관찰사항을 기술한 것이다. 이 시험에는 2개 세트의 배터리, 완전 충전된 새 배터리와 완전 방전되지 않은 배터리(이 문서에서 “일부 사용된 배터리”라고 한다)를 사용하였다.

1. 머리말

일반적으로 9V 배터리는 PP3 배터리로 알려져 있다.(사진 1 참조) PP3라는 명칭은 직사각형 배터리 상부의 접속단자 유형을 말한다. PP3 배터리는 소형 패키지와 휴대용 트랜지스터 라디오, 기타 반도체 상품에 수납되어 1.5V 셀보다 상대적으로 고밀도 에너지를 발생시킬 수 있는 작은 배터리 수요를 충족시키기 위해 개발되었다. 크기와 에너지 밀도가 장점인 PP3는 대중적인 배터리 유형의 하나가 되었다. PP3 배터리는 연기감지기, 알람시계, 소형 라디오, 휴대용 전기 계측기 및 기타 전기 기기에서 폭넓게 사용되고 있다. 작은 크기로 인해 선반, 서랍, 상자, 바지 또는 셔츠 주머니, 휴지통 등 우리가 상상할 수 있는 모든 장소에 저장되거나 있을 수 있다.(사진 2 참조)



사진1. 전형적인 PP3 9V 배터리



사진2. PP3 배터리의 일반적인 저장 장소는 책상 서랍이다. 사진은 배터리 단자 가까이 있는 금속 펜 클립과 기타 금속 물질을 보여준다.

2. 구조

PP3 배터리는 6개의 작은 5V셀(AAAA셀, [사진 3] 참조) 또는 직렬로 연결된 직사각형 셀(사진 4)로 이루어져 있다. PP3 배터리의 한 가지 특징은 단자 중심사이의 거리가 0.5in(12.7 mm)인 플러스 및 마이너스 단자 모두가 상부에 있다는 점이다. 단자간의 최소 거리는 일반적으로 0.22in(5.88mm)이다. 숫 단자는 플러스 단자이다. 단자 구조로 인하여 다른 배터리 유형에 존재하지 않는 회로 단락 가능성이 있다. 이 사실은 PP3 배터리를 이용한 장난이나 시험으로 알 수 있으며 그것은 단자에 혀를 접촉시켜 회로를 구성시키는 것이다. 이는 가벼운 쇼크를 발생시켜 접촉하는 사람이 배터리를 재빨리 떼도록 한다. 시험자가 쇼크를 느끼지 않으면 배터리는 방전된 것이다.



사진3. 직렬로 연결된 6개의 AAAA 1.5V 셀을 분해한 PP3 배터리



사진4. 6개의 1.5V 직각 셀을 분해한 PP3 배터리



사진5. 9V PP3 배터리의 단자 간격

3. 위험성

PP3 9V 배터리의 저장 및 폐기에 대한 제조자 경고 표지는 배터리(무해한 것으로 보이지만)가 위험이 없는 것은 아니라는 것을 보여준다. 이 경고 표지에 규정된 항목은 <표 1>의 안전 관련 권고사항의 일부 또는 전부에 대해 사용자들에게 알려준다. 이 권장사항들의 일부는 화재와 전혀 관련되지 않은 사항(예 : 어린이 손에 닿지 않게 보관하시오)으로 여기에서 논의하지 않는다. 걱정하지 않는 폐기로 인한 화재 위험은 여기서 언급하지 않고 단자를 바꿔서 사용하였을 때(거꾸로 끼워 넣었을 때)의 위험 역시 언급하지 않는다. 그러나 기타 나머지 항목은 일반적으로 단락 회로 또는 과부하 상태의 배터리 작동과 관련된 전기적인 문제와 관련이 있다. 구체적으로, 마지막 4개의 항목은 회로가 단락되거나 매우 낮은 임피던스에서 부하가 걸렸을 때의 배터리 성능과 관련이 있을 수 있다. 이러한 문제는 화재 분야에서 잘 이해하지 못할 수 있으며 배터리 구조 또는 전기적인 특성과 관련되어 있다.

[표 1]

9V PP3 배터리 경고사항
안전한 장소에 보관하십시오.
재활용하십시오.
적절하게 폐기하십시오.
어린이 손에 닿지 않게 보관하십시오.
사용되거나 다른 유형의 배터리와 혼용하지 마시오.
화상의 우려가 있으므로 호주머니에 배터리를
포장하지 않는 상태로 운반하지 마시오.
거꾸로 설치하지 마시오.
부적절하게 연결하지 마시오.
단자가 단락되지 않게 보호하십시오.

구체적으로, PP3 배터리 단자의 위치는 배터리가 사용되지 않거나 적절하지 않게 저장되어 있는 경우 다양한 위험을 발생시킬 수 있다. 특히 배터리의 2개 단자가 노출된 경우, 어떠한 도체도 단자가 서로 근접하여 있음으로 해서 단락시킬 수 있으며, 그 결과 배터리를 방전시키고, 단락시키는 매체에서 매우 큰 열을 방출시킬 수 있다. 예를 들어, 서바이벌 강좌를 듣는 사람들은 PP3 배터리의 단자에 철솜(steel wool) 또는 철솜으로 된 청소용 패드(예: SOSTM 패드, Brillo 패드 또는 기타 비슷한 것)를 접촉시켜 불을 피우는 것을 배운다.

PP3 배터리의 작은 크기와 오래된 형태는 사람들이 이들의 사용과 관련하여 위험이 거의 없거나 전혀 없는 것으로 생각하게 할 수 있으나 PP3 배터리(그리고 기타 이와 비슷한 건전지)가 화재를 일으킨 자료가 있다. 예를 들어 Babrauskas는 그의 저서 점화 핸드북(P. 743)에서 “자동차용 배터리보다 훨씬 작은 배터리는 폭발과 관련이 있다”고 기술하고 있다. 그는 또한 “작은 9V 알카라인 배터리가 항공화물에서 폭발한 적이 있다; 이는 보통 단자가 단락되어 발생한다”라고 기술하고 있다. PP3 배터리의 잠재적인 폭발 가능성은 다음 사례에서 설명하고 있다. 명확히 하기 위해 아래 기술된 리튬 PP3 배터리를 포함하는 모든 사고는 최근 리튬이 되었던 리튬이온 충전지가 아닌 일반적인 건전지와 관련이 있다.

2007년 10월 30일 보안 및 위험물 미국 연방 항공 사무국은 배터리와 관련된 항공사고에 대한 보고서를 개정하여 발표했다. 2007년 2월 10일 고도 상승 중인 여객기에서 여객실 상부 짐칸에서 연기가 발생하였다. 이 사고는 영상음향장치와 함께 가방에 포장된 헐거워진 배터리가 원인이었다. 가방에 있던 배터리는 훼손된 9V Energizer™사의 리튬 PP3 금속 배터리였으며 화재의 원인일 확률이 높았다. 2005년 3월 25일 운송보안사무국(TSA, Transportation Security

Administration)의 검색직원은 승객의 검색화물에서 혼소하고 있는 배터리를 발견하였다. 24개의 9VEnergizer™ PP3 산업용 배터리가 다른 헐거워진 금속체와 함께 판지 박스 내부에서 발견되었다. 배터리 대부분은 헐겁게 포장되었고, 그 중 일부만이 단자가 보호되어 있었다. 금속체와 단자가 접촉되어 있을 개연성이 높았다. 금속체 하나는 육안으로 보았을 때 탄화되었고, PP3 배터리 중 하나는 뜨거웠다. 2004년 10월 29일 Ultralife™사의 9V PP3 리튬 배터리는 여객기 출발 직후 카메라맨의 손에서 폭발하듯이 파열하였다. 전해진 바에 의하면 카메라맨은 배터리를 충전하고 있었다. 폭발한 배터리에서 파편이 튀었으며 시트를 발화시켰다.

이 논문과 관련하여 PP3 배터리를 평가하는 중에, 2가지의 서로 관련있는 흥미로운 사건이 12시간의 차이를 두고 동일한 사무실에서 발생하였다. 그 사고는 1.5주일 전에 회로 단락 시험에서 사용되었던 2개의 PP3 배터리가 관련되어 있다. 배터리 하나는 저자의 책상에 있었고 PP3 배터리 내부의 6개의 셀의 구조를 보여주기 위해 사진을 촬영하기 위한 목적으로 열어 두었다. 책상에 놓여 있던 배터리의 셀 중 하나는 1주일이 지나 전기적, 기계적 또는 어떤 다른 형태의 접촉도 이루어지지 않은 상태에서 폭발적으로 파열하였다.(사진 6 참조) 폭발은 6개의 직렬로 연결된 셀에서 셀 하나가 파열하고 전극은 1m 비산할 정도로 강력했다. 폭발 직후, 적외선 온도계로 나머지 파열된 셀의 온도를 측정하였고 실내 온도에서 큰 온도 변화는 없었다.



사진6. 중간이 파열된 셀



사진7. 접촉되지 않은 배터리의 파열된 셀

당일 저자는 바닥에서 PP3 배터리의 하부 검정 플라스틱과 가황섬유(fishpaper) 절연체를 발견하였다. 박스 위 유리판에 1주일 넘게 접촉되지 않은 상태로 놓인 두 번째 배터리를 검사하였고 하나의 셀이 폭발적으로 파열하였음을 발견하였다. 이 폭발은 하부 플라스틱과 가황섬유 절연체를 비산시켰다. 파열된 셀의 전극은 일부 케이스 밖으로 나왔고 각 셀을 직렬로 연결한 금속 조각편에 부착되어 있었다.(사진 7 참조)

이 두 건의 사고는 실내온도가 22.2°C인 동일한 사무실에서 전기적, 기계적 또는 어떤 다른 종류의 접촉도 없는 상태에서 발생하였다. PP3 배터리 하나는 하나의 셀이 노출된 채로 개방되어 있었고 다른 배터리의 금속케이스는 손상되지 않았다.

세 번째 사고는 9V PP3 배터리 연구 도중에 발생하였고 실험업무와는 관련되지 않았다. 이 사고는 저자 사무실 건물의 무선 창문 보안 경보 센서에서 발생하였다. 주보안 제어판넬은 이 센서에 배터리 저전압 경보를 발하였다. 센서의 플라스틱 보호 케이스를 제거하자, PP3 배터리(회로기판에 연결) 셀 중 적어도 하나가 파열하였다. 배터리와 커버가 서로 가까이 있는 구조로 인해 배터리 케이스의 하부 플라스틱은 배터리에 부착된 채로 남아있었다. 배터리는 6.48V를 가리켰다. [사진 8]은 센서 회로 기판에 부착된 상태의 파열된 배터리를 보여준다.



사진8. 센서 회로의 파열된 배터리

그러나 위에서 기술한 바와 같이 PP3 배터리의 폭발적인 파열 가능성은 이 장치에서 나타나는 유일한 위험이 아니다. 아마도 잠재적인 실패 사례가 단자의 단락과 연관되어 있을 것이다. 많은 도체가 PP3 배터리 단자의 단락위험이 있는 접촉물이 될 수 있다: 이것에는 종이클립, 열쇠고리, 종이를 묶는 쇠 등을 포함한다. PP3 배터리가 바지 주머니의 열쇠와 같은 물체를 가열시키고(2건의 사고) 배터리가 서랍에 있는 뾰족한 물체(가위)를 가열시킨 구두 보고가 있다. 이 사고에서 배터리는 사람의 피부에 접촉했을 때 불쾌감을 줄 수 있는 온도까지 단락 물질을 가열시킨다. 단락 물질은 질량, 구조, 전기적인 저항뿐만 아니라 전원의 용량까지도 (이러한 PP3 배터리 경우에서와 같이) 가열되는 온도를 결정한다. 이와 같은 변수가 변화할 때 가열되는 온도가 몇 도가 되는가가 주요 관심사이다. 이 문제를 확인하고 실증하기 위해서 몇 가지 시험을 실시하였다.

4. 시험과 시험 절차

이러한 실증 시험은 모두 배터리 단자를 직접 단락시켜 단락 물체의 성능을 평가하는 것을 포함한다. 관련된 자료는 온도, 단락 전류 및 전압이다. 서로 다른 크기, 전기 저항을 가진 몇몇의 다른 물질을 시험체로 선택하였다. 모든 시험체는 쉽게 접촉할 수 있고 PP3 배터리의 단자를 단락시킬 수 있다. 저항은 시험 시료의 선택만으로 변화한다. 우리가 선택한 구조는 길이와 단면적의 비율이 큰 (가느다란) 것이다. 열전달 측면에서 배터리 단자와 접촉한 가느다란 전선은 주변으로 열이 전달될 수 있는 것보다 더욱 빨리 열을 발생시키도록 한다. 그러므로 단락 전선의 온도는 붉게 달아오르는 온도까지 크게 상승한다. 시험에 사용하기 위한 가느다란 전선의 선택은 예외적인 것이 아니다. 공구상자와 서랍에는 금속 슐, 철습 또는 일부가 풀려있는 연선이 있을 수 있다. 단락 전선에 열을 발생시키는 전원은 9V PP3 배터리에서 공급되었다. 새 배터리는 도달할 수 있는 온도의 상한계를, 사용 중인 배터리는 일정시간 동안 사용되었던 배터리에서 발생할 수 있는 온도를 나타낸다. 완전 방전된 배터리는 시험하지 않았다.

2건의 일반 시험을 수행하였다.

- 일반적인 물체에 대한 주관적인 시각 비교 시험
- 장비를 설치한 시험

첫 번째 시험은 장비가 없는 상태에서 관찰하기 위한 것이다.

가. 시각적인 비교 시험

몇몇의 단락 도체를 사용한 시각 시험을 수행하였고 도체 성능의 시각적인 관찰을 기록하였다. 이들 단락물질의 일부 또는 모두는 장비를 사용할 수 있지만 이 시험에서는 장비를 설치하지 않았다. 이 시험은 주관적인 설명을 목적으로 한 것이다. 초기 시험에서 단락 도체를 고정시키기 위해 연필 2개를 사용하였다. 점화 가능성을 평가하기 위해 단락 도체의 상부에 솜(cotton ball)과 종이 건본을 두었다. 단락 도체가 붉게 달아오를 때마다, 면은 점화되었고 종이는 혼소를 시작하였다.(사진 9 참조) 또한 도체가 붉게 달아오를 때마다, 나무 연필은 즉시 점화되었다.(사진 10 참조) 이 시험의 목적이 연필이 전소되는 것을 보기 위한 것이 아니기 때문에 연필의 불꽃은 즉시 소화시켰다. 시험 결과는 <표 2>에 나타났다. (☞)

(다음 호에 계속 연재됩니다)



사진9. 솜의 점화

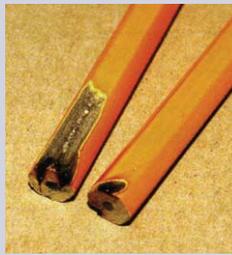


사진10. 연소된 연필

[표 2] 단락 도체의 온도 상승 결과

단락 물질	지름	가닥 수	결과
철제 브러쉬	0.007in(1.77mm)	2	붉게 달아오름.
구리 16AWG	0.011in(2.79mm)	1	변화 없음.
종이클립	0.045in(11.4mm)	1	변화 없음.
니켈 +5% 알루미늄	0.0095in(2.41mm)	1	붉게 달아오름.
니켈 +10% 크롬	0.0095in(2.41mm)	1	붉게 달아오름.
알루미늄 호일	폭 0.125(31.7mm)	1	변화 없음.
철솜	0,001in(0,254mm)	다량	붉게 달아오름.