

9V 배터리의 단락회로 분석(2)

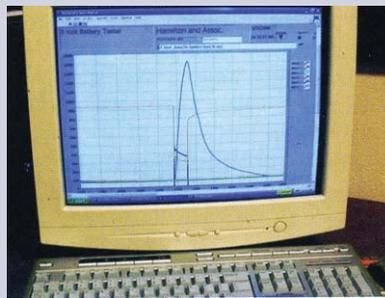
출처 FIRE & ARSON INVESTIGATOR 2010년 1월호

번역 유승현 한국화재보험협회 대구경북지부

(지난호에 이어서)

나. 장비를 설치한 온도 시험

일반적인 금속으로 PP3 배터리의 단자를 단락시켰을 때 그 결과를 알아보기 위해 일반적인 철술 가닥과 장비를 사용하는 시험을 수행하였다. 와이어 가닥은 길이가 약 1.5in.(38.1mm)이고 두께는 약 0.007in.(1.77mm)이다. 새 9V PP3 배터리는 한 가닥의 철 와이어가 용융되어 끊어지는 결과가 나왔다. 몇몇 시험 후 PP3 배터리는 충분히 방전되어 한 가닥의 와이어가 밝게 달아올랐으나 용융되지 않았다. 여러 방법으로 모든 장비를 사용하는 시험은 두 가닥의 철 와이어를 사용하여 수행하였다. 관련 변수를 측정하기 위해 National Instruments PCI-6036E 자료 수집 카드(card)를 사용하였다. 그것은 표준 Labview6 소프트웨어를 사용하여 코딩된 프로그램으로 제어되었다. 프로그램은 초당 8000번 200개의 자료를 샘플링하였다. 자료는 초당 10번의 속도로 평균하여 도시(plot)하고 기록하였다.(사진 11 참조) 샘플링된 채널은 <표 3>에 나타난다.



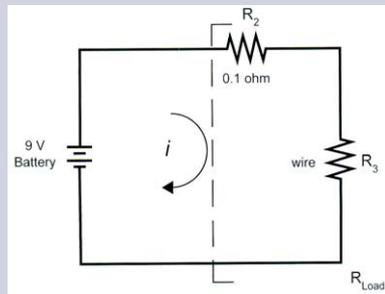
[사진 11] PC 모니터의 차트

[표 3] 샘플링된 열전대 위치

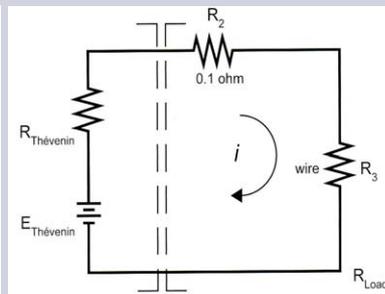
채널	신호	위치	단위
0	열전대0	주위	°F (°C)
1	열전대1	배터리 클립 단자	°F (°C)
2	열전대2	배터리 케이스 측면	°F (°C)
3	열전대3	단락 전선	°F (°C)
4	아날로그	배터리 전압	V
5	아날로그	배터리 전류	A

열전대(TC) 측정값은 2개의 서로 다른 유형의 전선이 어떤 온도에 노출되었을 때 발생하는 전압에 기초하고 있다.(Seebeck 효과) 열전대는 회로가 완성되었을 때 배터리 전압이 접합부 전압과 중첩되기 때문에 배터리에 직접 연결할 수 없다. 이러한 효과를 제거하기 위해 열전대는 고온 시멘트로 코팅하여 단락 전선으로부터 차단시켰다. 이 고온의 시멘트는 온도정격이 1550°F (843.3°C)이다. 단락 전선 온도에 영향을 받지 않도록 시멘트 절연물은 가능한 작게 만들었다. 시멘트의 크기는 약 0.118in(2.997mm) × 0.118in(2.997mm) × 0.0905in(2.298mm)이다.

시험 회로는 [그림 1]과 같이 배터리에 연결된 간단한 단락 전선이다. 배터리로부터의 전류를 측정할 수 있도록 최정밀급 0.1Ω의 저항을 회로와 직렬로 설치하였다. 단락 전선의 유효 저항은 약 0.7Ω로 계산되었다. 이 단순화된 분석에서 배터리는 [그림 2]와 같이 저항 0.1Ω이 션트(shunt) 측정기로 사용된 일반적인 테브낭 등가회로를 나타내는 선형 장치로 가정한다. 테브낭 등가회로는 배터리에 부하가 있을 때의 실제 동작을 나타낸다. 배터리에서 부하측으로 전송되는 최대 전력 전달은 부하 저항(측정된 저항에 단락 전선의 저항을 더한 값)이 테브낭 저항과 동일할 때 이루어진다. 이 조건에서 부하는 전원(즉, 배터리)에 정합한다고 말한다. 테브낭 계산은 <표 4>에 있다. 9V PP3 배터리에 대해서 테브낭 저항은 2.22Ω으로 계산되었다. 몇몇 9V 배터리의 내부 임피던스에 대한 제조자의 사양은 1.7, 2.0 및 2.76Ω이다.



[그림 1] 실제 회로



[그림 2] 테브낭 등가 회로

[표 4] 테브낭 등가 시험 회로

$V_{\text{battOC}} =$		9.35V	측정(평균)
$V_2 =$		0.42V	측정(평균)
$V_{\text{battSC}} =$		3.35V	측정(평균)
$I_{\text{sc}} =$		4.2A	측정(평균)
$V_3 = V_{\text{battSC}} - V_2 =$	$3.35\text{V} - 0.42\text{V} =$	2.93V	계산
$R_3 = V_3 / I_{\text{sc}} =$	$2.93\text{V} / 4.2\text{A} =$	0.698Ω	계산
$R_2 =$		0.102Ω	측정
$R_{\text{th}} = V_{\text{battOC}} / I_{\text{sc}} =$	$9.35\text{V} / 4.2\text{A} =$	2.226Ω	테브낭 등가 저항
$E_{\text{th}} = I_{\text{sc}}(R_{\text{th}} + R_2 + R_3) =$	$4.2\text{A}(2.22\Omega + 0.102\Omega + 0.698\Omega) =$	12.71V	테브낭 등가 전압

V_{battOC} = 개방회로 배터리 전압

$V_2 = R_2$ 의 전압

V_{battSC} = 단락회로 배터리 전압

I_{sc} = 단락회로 전류

$V_3 = R_3$ 전압

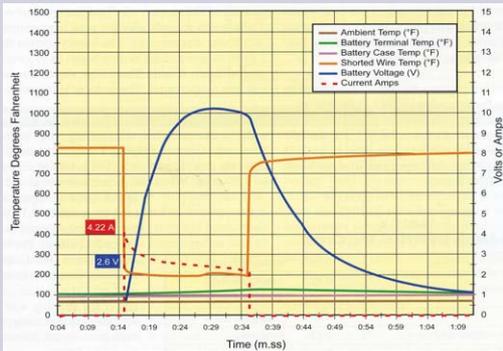
Ω = 옴

R_{th} = 테브낭 등가 저항

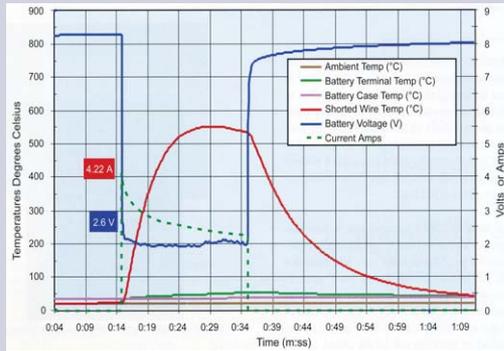
E_{th} = 테브낭 등가 전압

시험 부하 저항과 테브낭 저항을 비교하는 것은 2가닥 와이어 가닥의 부하가 전원과 정합되지 않는 것을 의미한다. 부하가 전원과 정합된다면 배터리에서 와이어로 더 큰 전력이 출력되기 때문에 훨씬 더 높은 온도가 측정될 수도 있다. 실제 조건에서 정합이 발생했다고 가정할 수 없기 때문에 최대 전력 전송을 위해 전원에 연결된 부하를 최적화하거나 튜닝하기 위해 노력할 필요가 없다. 더구나, 붉게 달구어진 단락 전선으로 결과가 나타났다.

“사용된 배터리”로부터의 컴퓨터 자료는 다음과 같다. 차트 1(°C)에서 X축은 시간을 나타낸다. 자료가 매 0.1초마다 기록되지만, X축의 그리드 표시는 0.05초 간격이다. Y축은 온도를 나타낸다. 시험은 실온 또는 70°F(21.1°C)에서 시작한다. 배터리의 전압과 전류는 차트 오른쪽 Y축에 표시되어 있다. 검정색 선은 배터리의 전압을 나타낸다. 사용된 9V 배터리는 약 8.2V에서 시작한다. 녹색 파선은 배터리 전류이고 회로가 완성되기 전에는 0V이다.



[도표 1] 온도와 전기적인 성능.
사용된 PP3 9V 배터리 단락회로 분석



[도표 2] 온도와 전기적인 성능.
PP3 9V 새 배터리 단락회로 분석

회로를 구성하였을 때, 배터리의 전압은 약 2.6V로 떨어졌고(그리고 단계적으로 1.8V로 감소되었다.) 배터리의 전류는 약 4.22A까지 상승하였다.(그리고 단계적으로 약 2.0A까지 감소하였다.) 회로를 구성한 후 14초에 단락된 선의 온도(붉은색 선)는 1025°F(551°C)에 도달하였다. 최고 온도에 도달한 후 약 7초에 회로는 차단되었다. 배터리의 전류는 2A에서 0A로 떨어졌고 배터리의 전압은 1.8V에서 약 8V로 회복하였다. 단자와 케이스의 온도가 미약하게 상승하였다. 주변 온도는 변하지 않았다. “새 배터리” 시험으로부터 얻은 자료의 분석은 단락 전선이 7초 또는 8초 후 녹아 없어진 것과 같은 것과 유사하다. [도표 2]는 자료를 보여준다. 새 9V 배터리는 약 9.35V에서 시작한다. 회로가 구성되었을 때 배터리 전압은 약 3.34V까지 떨어졌고(그리고 2.57V까지 감소하였다.) 배터리 전류는 5A까지 증가하였다.(2.42A까지 감소하였다.)

단락 전선(붉은색 선)의 온도는 냉각을 시작하기 전에 최대 온도에서 안정화되지 않는다. 결론은 단락 전선이 녹아 없어지지 않았다면 최고 온도는 훨씬 높았을 것이라는 점이다. 그럼에도 불구하고

기록된 최대 온도는 1418°F(770°C)이었다. 회로를 끊자, 배터리의 전류는 2.42A에서 0으로 떨어졌고, 배터리는 8.83V까지 전압을 회복하였다. [사진 12]는 초기단계의 달궂힌 전선을 보여준다.



[사진 12] 초기단계에서 붉게 달아오른 단락된 전선

5. 맺음말

〈표 2〉와 같이, 몇몇의 단락 도체를 9V PP3 배터리의 단자에서 온도 상승 시험을 하였다. 그 결과는 단락물체의 질량, 구조, 저항에 따라 변했으며 온도는 뜨거운 정도에서 붉게 달아오르는 정도까지 변했다. 점화 가능성을 평가하기 위해 단락 도체의 상부에 일반적인 솜과 종이를 놓았다. 단락 도체가 붉게 달아오를 때마다, 면은 점화하였고 종이는 훈소하기 시작했다. 추가 실험할 때, 단락도체를 고정시키기 위해 2개의 나무 연필이 사용되었다. 도체가 붉게 달아오를 때마다, 나무 연필은 거의 바로 점화되었다. 사용된 배터리와 새 배터리의 [도표 1]과 [도표 2]는 장비를 사용하는 온도 시험의 결과이다. 장비를 사용한 시험 자료는 회로를 구성하였을 때, 사용된 배터리의 전압은 8.27V에서 2.6V로 떨어졌고, 더욱 중요한 것은 전류가 0A에서 4.22A로 증가하였다. 사용된 배터리에서 단락 전선의 최고 온도는 1025°F(551°C)이었다. 회로를 구성하였을 때, 새 배터리의 전압은 9.35V에서 3.34V로 떨어졌고 전류는 0A에서 5A로 증가하였다. 새 배터리에서 단락 전선의 기록된 최대 온도는 1418°F(770°C)였다.(단락 전선은 녹아 없어졌다.) 단락 전선이 녹아 없어지지 않았다면, 최고 온도는 훨씬 높았을 것이다.

사용된 배터리와 새 배터리 단락 도체의 기록된 온도는 NFPA 921에 언급된 고체의 점화온도 범위 270°~450°C(518°~842°F)보다 높았다. 화재의 원인을 판단할 때는 상황, 조건, 가연물, 점화원, 산화물이 결합되는 상황을 고려하는 것은 화재 조사관의 몫이다. 화재 조사관은 “잠재적인 점화원은 그것이 화재의 점화원이 아니라는 분명한 증거가 있을 때에만 고려대상에서 제외되어야 한다”는 것을 항상 기억해야 한다. ☹