

리튬이온배터리의 전기계측 핸드북
~기초지식부터 응용까지~

*Electrical Measurements of Lithium Ion Batteries:
Fundamentals and Applications*

제 01 판

리튬이온배터리의 전기계측 핸드북
~기초지식부터 응용까지~

HIOKI

히오기코리아 주식회사

목차

머리말.....	3
1. 리튬이온배터리 제조공정의 개요	4
2. 전극재료와 전극의 제조공정재료, 전극의 제조.....	5
-1. 배터리 조립전 공정의 전극재료와 전극의 품질검사의 중요성.....	5
-2. 전극 슬러리 분산도의 품질검사.....	6
-3. 전극시트 제작시의 전극시트의 품질검사	7
-4. 전극시트의 금속이물검사	9
3. 셀 조립.....	10
-1. 단자/tab-lead 용접부의 저항값 검사단자/tab-lead 용접부의 저항측정.....	10
(1) 측정전류	10
(2) 4 단자법에 의한 저항측정.....	10
(3) 열기전력의 영향.....	11
-2. 주액전 전극 간, 전극 - 외장 간의 절연저항검사	13
(1) 절연저항값의 측정범위	14
(2) 전압출력성능	14
(3) 택트타임(takt time).....	14
(4) 콘택트 체크기능	16
(5) 미세단락 체크기능	16
-3. 외장전위측정 (라미네이트형 리튬이온배터리).....	17
(1) 전위측정기의 입력저항	20
(2) 확실한 프로빙.....	20
(3) 노이즈 대책	21
4. 셀 완성품 (셀의 성능평가).....	22
-1. 예비충전과 충방전 특성시험	22
-2. 에이징 공정에서의 개방전압 (OCV)측정.....	23
-3. 배터리의 임피던스 측정	25
(1) 측정방식	27
(2) 유도자계의 영향.....	27
(3) 인가 전류값	28
(4) 측정주파수와 최대입력전압	29
(5) 배터리단자로의 콘택트	30
(6) 배터리 테스터의 선정 포인트	31
5. 모듈, 팩 배터리(실용 레벨에서의 성능평가)	34
-1. 모듈, 팩 배터리의 총저항검사	34
(1) 모듈화 공정에서의 셀 배터리 단자 (tab)끼리의 용접 · 연결의 품질관리 (저항측정)	34
(2) 모듈, 팩의 총저항검사	36
-2. BMS 기관검사.....	37
-3. 전기자동차의 배터리 실부하 시험	41
끝맺음.....	44

머리말

리튬이온배터리 (LIB) 는 이차전지 중에서도 특히나 뛰어난 성능을 지니어 여러 산업분야에서 널리 이용되고 있습니다. 과거에는 주로 휴대전자기기의 전원용도로 사용되었지만, 최근에는 고정형 축전시스템, 자동차의 동력 등으로 용도가 확대되면서 더더욱 고성능화, 저비용화가 요구되고 있습니다.

그 중에서도 특히 세계 각국의 자동차 전동화 정책의 급속한 추진의 영향으로 EV, xEV (HEV, PHEV) 등 전기자동차용 배터리의 수요가 급증하고 있습니다.

전기자동차에 탑재되는 배터리는 대단히 고성능이 요구됩니다. 자동차의 특성과 그와 관련하여 배터리에 요구되는 요소를 나열해 보면 아래와 같습니다.

- 장거리 주행 : 높은 에너지 밀도 (대용량화 그리고 소형, 경량화)
- 단시간 충전 : 대전류 충전을 받아들일 수 있을 것 (뛰어난 대전류 특성)
- 장기간 사용 : 배터리 긴 수명화 (반복 충방전의 성능 향상)
- 안전성 향상 : 발화하지 않을 것 (배터리의 내부단락방지, BMS 등에 의한 보호기능)
- 차량의 가격 절감화 : 재료가격의 억제, 생산성이 높을 것 (저렴한 재료 개발, 수율개선)

이러한 배터리 특성을 실현하기 위해서는 배터리 제조의 각 공정에서 여러 계측과 검사를 실시해 그 공정의 제조품의 품질을 보증할 필요가 있습니다. 또한 제조에 한정하지 않고, 연구개발 및 완성품 검사에서도 계측과 검사는 여러 과정에서 꼭 필요합니다.

대표적인 계측장치와 검사장치로는 충방전 시험기, 임피던스 측정장치, 절연저항시험장치, 고정밀도 전압계를 들 수 있습니다. HIOKI 에서는 전기계측영역에서 배터리에 요구되는 계측과 검사에 적합한 장치들을 다수 제공하고 있습니다.

본 서에서는 재료, 제조의 각 공정, 완성품 등에 대해 성능평가를 위해 필수적인 계측 · 검사장치의 선택 포인트에 대해 소개합니다.

1. 리튬이온배터리 제조공정의 개요

우선 리튬이온배터리의 생산공정과 각 공정에서 실시되는 검사를 그림 1 에 간단히 나타냈습니다. 리튬이온배터리가 완성되기까지의 공정은 크게 다음과 같이 구분할 수 있습니다.

- 재료, 전극의 제조
- 배터리 셀의 조립
- 배터리 셀 완성품의 성능검사
- 모듈, 팩 (assembled battery)의 조립
- 모듈, 팩 (assembled battery)의 성능검사

다음 페이지에서 각 공정에서 필요한 평가항목과 거기에 사용되는 계측장치를 설명하도록 하겠습니다.



그림 1 공정별 검사항목

2. 전극재료와 전극의 제조공정재료, 전극의 제조

-1. 배터리 조립전 공정의 전극재료와 전극의 품질검사의 중요성

배터리셀이 완성되기까지의 공정은 크게 [재료제조], [슬러리 제작], [전극제작], [배터리조립]으로 나눌 수 있습니다.

목표사양을 충족하는 배터리를 안정적으로 생산하기 위해서는 각 공정에서 품질이 확보되어야 하는 것이 매우 중요합니다. 앞선 공정에서 불량품을 가려낼 수 있다면 그만큼 생산효율에 기여할 수 있기 때문입니다. 관리해야 하는 품질지표는 많이 있지만 여기서는 다음 사항에 대해 설명하도록 하겠습니다.

- 슬러리 제작 : 재료의 비율 및 배합상태
- 전극제작 : 건조조건과 전극밀도의 차이
- 조립공정 : 불순물 혼입 정도

각 프로세스의 엄격한 관리는 개발공정에서는 프로세스 변경과 개선으로 이어지고, 생산공정에서는 고품질 고수율로 안정적인 생산으로 이어집니다.

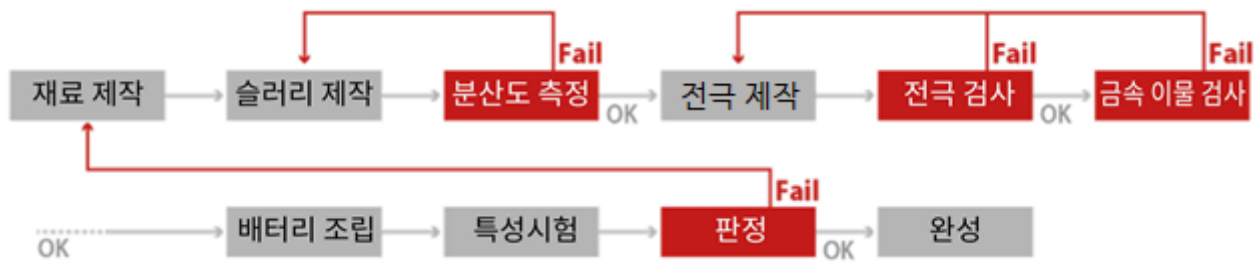


그림 2 배터리의 조립공정 검사

-2. 전극 슬러리 분산도의 품질검사

지금의 리튬이온배터리 전극시트는 활물질, 도전조제, 고분자 바인더, 유기용매로 이루어진 전극 슬러리로부터 제작됩니다.

배터리의 고용량화를 위해서는 도전조제의 비율을 줄이고, 활물질 비율을 올릴 필요가 있습니다. 한편으로 배터리의 내부저항을 줄이기 위해서는 충분한 전자전도성을 지니는 것이 중요해 적절한 도전조제량이 필요합니다. 이러한 균형(Trade-off)에 의해 활물질:도전조제비율의 최적화가 중요합니다.

또한, 최근 연구에서 양호한 배터리 특성을 얻기 위해서는 전극 슬러리 내의 각 물질이 균일하게 분산되어 있는 것이 매우 중요하다는 것이 시사되었습니다¹⁻³⁾. 활물질의 각 입자표면이 전해액과 확실하게 접촉되어 있으면 반응면적이 커져 배터리 특성이 더욱 좋아집니다. 또한, 전자전도의 경로(path)가 되는 도전조제도 적절하게 분산되어 있어야 합니다. 슬러리를 혼합할 때 전단력(shearing force)이 너무 낮으면 도전조제가 제대로 풀리지 않습니다. 반대로 너무 높으면 도전조제가 미세하게 흩어져버려 양호한 전자전도를 얻을 수 없습니다. 또한 도전조제가 뭉친 곳에는 배터리에 탑재된 후 충방전을 할 때 전하가 집중되게 됩니다. 전극 전체에 균일하게 배터리 반응이 일어나야 하므로 이러한 현상은 바람직하지 않습니다. 전극 슬러리 내의 활물질과 도전조제의 입경분포(particle size distribution)와 분산성을 관리하는 것이 중요하다고 할 수 있습니다.

HIOKI에서는 임피던스 측정을 이용한 전극 슬러리의 새로운 해석방법을 제안드리고 있습니다. 기존의 직류법이나 광학식으로는 구현이 어려운, 도전조제의 전자전도성과 활물질의 입경·분산에 유래하는 용량성분을 해석할 수 있습니다.

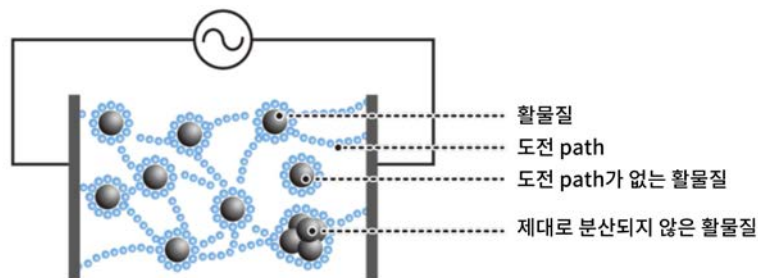


그림 3 전극 슬러리의 임피던스 측정

-3. 전극시트 제작시의 전극시트의 품질검사

전극시트 제작과정에서는 먼저 슬러리를 금속박(집전체)에 얇게 도포합니다. 그 다음, 용매를 열풍으로 증발시켜 건조시킵니다. 그리고 합재층의 강도향상과 전기전도를 좋게 하기 위해 금속물을 이용해 press 합니다. 이러한 전극 제작과정에서 배터리 성능에 관한 몇 가지 포인트가 있습니다.

첫번째로, 슬러리를 도포할 때의 두께의 균일성입니다. 두께가 균일하지 않으면 배터리 반응에 편차가 생깁니다. 또한 슬러리 안에 기포가 섞여 있으면 기포가 튀어 그 주변부의 슬러리만 얇아지는 현상도 나타납니다. 도포시의 품질관리와 이상검지를 위해서는 도막의 중형방향의 두께의 편차를 측정할 필요가 있습니다. 이 두께 측정에는 비접촉식 두께 측정기를 사용합니다.

두번째로, 슬러리 내의 입자가 충분히 얇게 분산되어 있어야 한다는 것입니다. 제대로 분산되어 있지 않으면 각 입자가 제 기능을 발휘하지 못해 배터리 성능도 좋아지지 않습니다. 분산상태가 안 좋은 경우, 각 입자는 슬러리 내에서 덩어리로 뭉쳐지는 현상도 종종 나타납니다. 덩어리된 상태에서 슬러리를 도포하면 도막이 꺾여나가 골격이 보이게 됩니다. 카메라를 사용한 화상검사를 통해 이 골격을 검출해 슬러리 특성의 평가지표로 삼는 방법이 알려져 있습니다.

또한, 건조시킨 전극의 합재층은 약하기 때문에 금속물로 press 해 기계적 강도를 높일 필요가 있습니다. 이는 활물질을 집전체에 흡수시켜 전기전도를 좋게 하는 효과도 있습니다. 프레스압을 높게 하면 집전체와 합재층의 접촉저항(계면저항)을 낮출 수 있습니다. 그러나 프레스압이 너무 높으면 전해액이 침투하기 어려워져 배터리 자체의 저항값이 높아져 배터리의 입출력 특성에 영향을 미칩니다. 반대로 프레스압이 너무 낮으면 합재층은 충분한 기계적 강도를 얻지 못해 충방전을 반복하는 동안에 무너지고 맙니다. 이는 배터리 수명저하로 이어집니다. 따라서 적절한 프레스압을 설정해 유지할 필요가 있습니다.

HIOKI에서는 전극시트를 저항평가를 통해 관리하는 방법으로써 전극저항 측정 시스템 RM2610을 제안드리고 있습니다 (그림 4). RM2610은 합재층 표면에서 전류를 인가해 그 전류분포가 이루는 표면전위분포를 측정해 연산함으로써 합재층의 체적저항률과 집전체와 합재층의 접촉저항(계면저항)을 따로 분리해 구할 수 있는 장치입니다.

RM2610으로 전극시트의 “합재층의 체적저항률”과 “접촉저항”을 지표로 하여 배터리셀 조립전 단계에서 전극 평가가 가능해집니다. 전극시트 제작공정의 품질을 보증하여 리튬이온배터리의 발전·개선을 위한 개발시간 단축과 생산시 수율향상을 기대할 수 있습니다.



그림 4 전극저항 측정 시스템 RM2610

여기서 예전부터 실시되어 오던 방법으로 4 탐침법에 의한 측정 (그림 5)과, 관통저항측정 (그림 6) 이 있어 소개하겠습니다. 4 탐침법에서는 전극의 한쪽면에서 4 개의 탐침을 갖다대어 4 단자저항측정을 실시하고, 관통저항측정에서는 너비가 있는 평판금속으로 전극을 끼워 2 단자저항측정으로 전기저항을 측정합니다.

이들 측정법에서는 합재층과 접촉저항(계면저항)의 분리가 불가능합니다. 그럼에도 불구하고 전극의 특성을 반영한 저항값을 얻을 수 있는 방법이라서 전극제작공정의 정성적(qualitativ) 품질지표로 널리 이용되고 있습니다. 단, 일반적으로 측정의 재현성이 떨어지기 때문에 측정조건을 엄격하게 관리해야합니다.

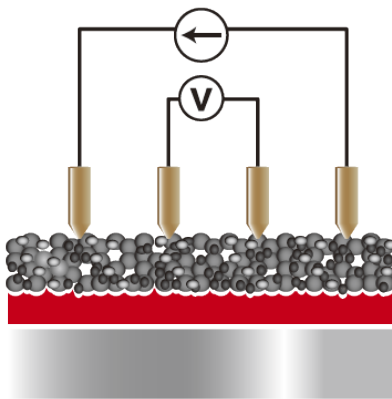


그림 5 4 탐침법에 의한 측정

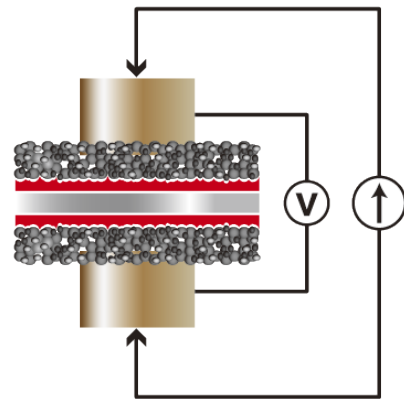


그림 6 관통저항측정

-4. 전극시트의 금속이물검사

전극시트의 제조과정에서는 금속가루의 혼입이 없도록 엄격하게 관리해야 합니다. 금속가루가 혼입되는 원인으로는 다음을 들 수 있습니다.

- 제조장치의 함체 등 제조현장에 있는 금속 파편
- 전극을 소정의 크기로 잘라내는 공정에서 생기는 찌꺼기(bur)
- 작업자의 옷에 붙은 금속가루의 유입

금속가루가 혼입되면 배터리 동작시에 내부단락의 원인이 될 수 있습니다. 예를 들어, 철, 구리, 니켈 등의 금속이 혼입되면 충전시에 전해액에 용출되어 그것이 음극에서 수지상(dendritic pattern)으로 석출됩니다¹. 일련의 반응으로 용량이 열화되는 것 외에도 최악의 경우 대규모로 양극과 음극이 단락되어 폭발하는 등의 큰 사고로 이어지는 원인이 되기도 합니다 (그림 7).

혼입을 막는 대책으로써 이물검출장치를 사용해 직접적으로 이물을 검출하는 방법이 실용화 되고 있어 소개드립니다. 이물검출장치로는 다음과 같은 종류가 있습니다.

- 카메라를 이용한 화상검사장치 : 넓은 범위를 비교적 저렴한 가격으로 검사 가능합니다. 금속만 검출하는 것이 어렵지만², 가능한 장치도 있습니다. 전극내부에 축적된 이물은 검출이 어렵다는 단점이 있습니다.
- X 선에 의한 금속이물검출 : 금속 외에도, 수지 등의 이물도 검출 가능합니다. 이니셜 비용, 보수비용과 함께 다른 검사와 비교하면 비싼 편입니다.
- 자기 센서에 의한 금속이물검출 : 미세한 금속조각을 검출하려면 센서와 전극시트를 최대한 근접시킬 필요가 있습니다. 자성을 지닌 금속이물 이외에는 검출이 불가능합니다.

위와 같이, 각 방법은 장단점이 있기 때문에 목적에 맞게 각 장치를 구분해 사용하거나, 여러방법을 병용할 필요가 있습니다.

전극시트를 권회(捲回)하기 직전에 검사함으로써 배터리셀에 혼입되는 금속이물을 확실하게 차단할 수 있습니다. 또는 복수의 공정에서 검사하여 어느 공정에서 어떤 이물이 혼입되었는지 특정하는 등의 방법도 있습니다.

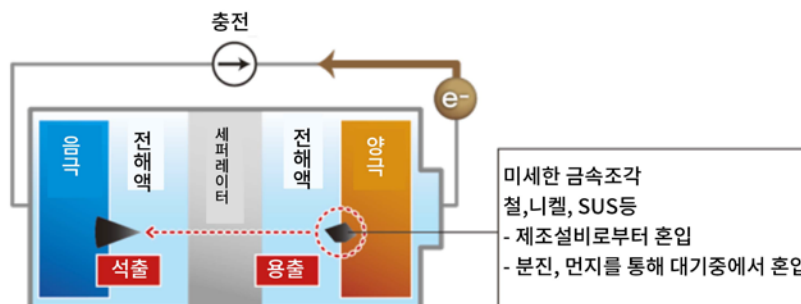


그림 7 이물혼입에 의한 배터리 내부의 단락

¹ 수지상으로 석출되는 금속을 덴드라이트(dendrite)라고 부릅니다.

² 배터리 성능에 영향을 주지 않는 이물이 혼입된 셀까지 불량품으로 보는 것은 overkill 입니다. 수율 악화로 이어집니다.

3. 셀 조립

-1. 단자/tab-lead 용접부의 저항값 검사단자/tab-lead 용접부의 저항측정

고성능 배터리셀의 특성을 발휘하기 위해서는 배터리 에너지를 입출력하는 단자 (tab-lead)의 용접품질도 중요합니다 (그림 8). 특히 전기자동차 용도에서는 출력의 손실을 최소화하는 것과, 발열을 최소한으로 억제하는 것이 요구됩니다. 따라서 용접부의 저항은 $0\ \Omega$ 에 가까운 초-저저항이 이상적입니다.

일반적으로 용접부의 저항은 $0.1\ m\Omega$ 이하의 order 로 양품과 불량품을 판별합니다. $1\ \mu\Omega$ 이하의 분해능을 지닌, 저저항측정에 최적인 저항계를 선택해야 합니다.

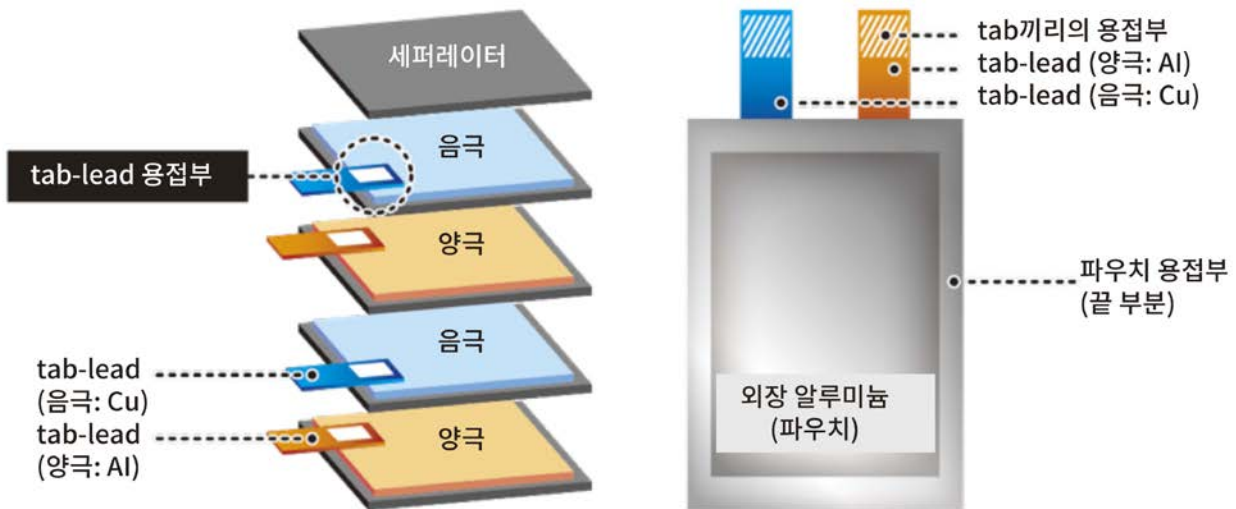


그림 8 라미네이트형 리튬이온배터리의 tab-lead

그러면 이어서 저저항 측정의 주의점에 대해 알아보겠습니다.

(1) 측정전류

우선, 측정대상 (여기서는 용접부)에 정전류전원에서 전류를 흘려보내 저항성분에 발생하는 전압값을 측정합니다. 옴의 법칙을 이용해 계산하여 저항값을 알 수 있습니다. 이 저항측정방법에 특화된 것이 저항계라 불리는 측정기입니다. 일반적으로 저저항측정에서는 큰 측정전류를 흘려보냄으로써 정확한 측정이 가능합니다. 측정대상의 저항값이 $1\ m\Omega$ 이하인 경우에는 적어도 $100\ mA$, 가능하다면 $1\ A$ 이상의 전류를 흘려보낼 수 있는 저항계를 추천합니다.

(2) 4 단자법에 의한 저항측정

저저항측정에서 측정 프로브의 배선저항과 프로브 선단의 접촉저항의 영향은 매우 크기 때문에 무시할 수 없습니다. 특히 측정 프로브의 접촉부분에 발생하는 접촉저항은 환경조건에 따라서는 수 Ω 에서 수십 Ω 에 달하는 경우도 있습니다.

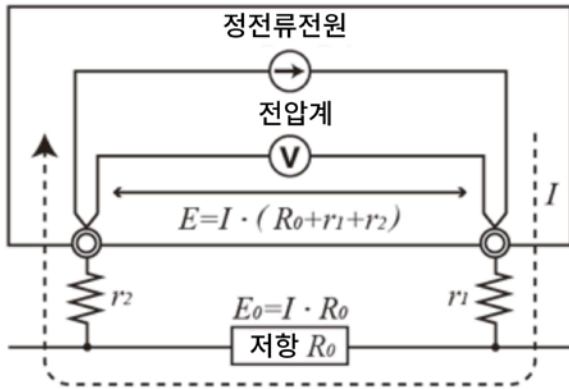
2 단자법에서 측정하면 측정전류 I 가 측정대상의 R_0 뿐만 아니라 배선저항과 접촉저항인 r_1 과 r_2 에도 흐르기 때문에 관측되는 전압 E 는 $E = I(R_0 + r_1 + r_2)$ 가 됩니다. 이 식에서 옴의 법칙에 의해 산출되는

저항값은 $R_0 + r_1 + r_2$ 가 되고 맙니다 (그림 9).

이 문제를 해결하기 위해 4 단자법을 이용합니다. 4 단자법에서는 측정전류를 흘려보내는 단자와 전압을 측정하는 단자가 구분되어 있습니다. 측정전류 I 는 저항 R_0 에는 흐르고 전압측정단자인 r_3, r_4 에는 흐르지 않습니다. 다시말해, r_3, r_4 부분에는 전압이 발생하지 않습니다. 그 결과, 전압계의 측정전압 E 와 측정대상의 양끝에 발생하는 전압 E_0 는 동일해지므로 r_1, r_2, r_3, r_4 의 영향을 받지 않고 정확하게 저항을 측정할 수 있습니다 (그림 10).

이러한 이유로, mΩ 급의 저저항을 측정할 경우에는 4 단자법 저항계를 선택해야 합니다.

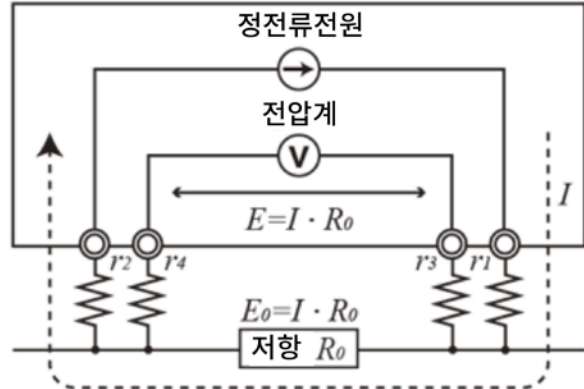
2단자법 저항 측정기



r_1 과 r_2 에 전류 I 가 흐르므로 $E \neq E_0$ 이 됨

그림 9 2 단자법에 의한 저항측정

4단자법 저항 측정기



r_3 과 r_4 에 전류가 흐르지 않으므로 $E = E_0$ 이 됨

그림 10 4 단자법에 의한 저항측정

(3) 열기전력의 영향

열기전력이란 이종 금속의 접촉부분에 생기는 전위차를 말합니다. 측정대상의 금속부에 프로브를 접촉하는 것에 의해 발생하며, 저항측정에 오차를 발생시키는 요인입니다. 특히 측정대상의 저항값 R_X 가 작을 경우에는 측정전류 I_M 를 흘려보내어 검출되는 전압 $R_X I_M$ 이 작기 때문에, 열기전력 V_{EMF} 의 영향이 커집니다(그림 11). 이 열기전력의 영향을 해결하려면 측정전류를 반전시켜 양방향과 음방향 2 회 측정해 연산으로 열기전력의 영향분을 제거하는 방법이 있습니다.

측정전류를 양방향으로 흘려보냈을 때의 검출전압에서, 음방향으로 흘려보냈을 때의 검출전압을 빼는 것으로 열기전력의 영향을 받지 않는 저항값을 얻을 수 있습니다 (그림 12, 식(1)). 저항계 RM3545 에서는 OVC 기능 (OVC: Offset Voltage Compensation)으로 열기전력의 영향을 취소할 수 있습니다.

$$\frac{(R_X I_M + V_{EMF}) - (-R_X I_M + V_{EMF})}{2I_M} = R_X \quad (1)$$

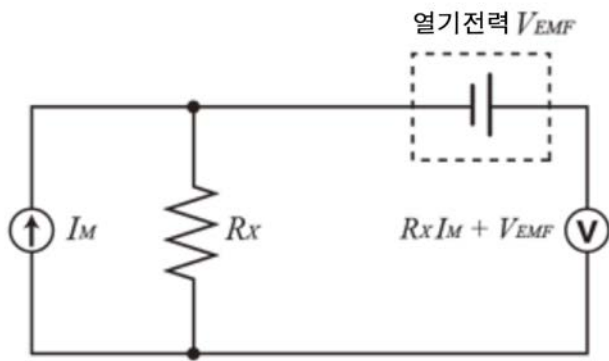


그림 11 열기전력에 의한 오차의 발생

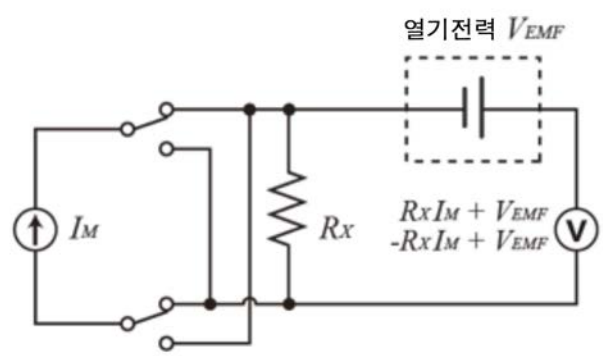


그림 12 전류반전법에 의한 열기전력의 취소

-2. 주액전 전극 간, 전극-외장 간의 절연저항검사

리튬이온배터리에서 절연되어야 하는 부분이 제대로 절연되어 있지 않은 경우, 즉 절연저항이 부족하면 배터리 수명 저하나 발화사고를 일으킬 수 있습니다. 절연저항이 낮아지는 주요 원인은 금속이물혼입과 세퍼레이터 파괴 등입니다.

절연되어야 하는 부분으로는 주로 전극-전극 간, 전극-외장 간을 들 수 있습니다³.



그림 13 절연저항시험기 ST5520에 의한 배터리셀의 절연저항검사

충분한 절연저항이 확보되어 있는 지 확인하기 위해 전해액을 주입하기 전의 배터리셀에서는 반드시 절연저항검사를 실시합니다. 절연저항검사에는 절연저항계를 이용합니다. 절연저항계란 저항계의 일종으로 고저항측정에 특화된 것이라고 할 수 있습니다⁴.

절연저항계는 절연체에 고전압을 인가해서 흐르는 미소전류를 검출해 저항값을 구합니다. pA (피코 암페어), fA (펨토 암페어) 급의 미소전류를 정확하게 검출할 수 있는 고감도 전류계가 내부에 탑재되어 있습니다.

절연저항측정에서는 측정신호가 매우 작기 때문에 측정값이 외래 노이즈나 누설전류에 크게 영향을 받습니다. 측정환경을 정비하는 것은 물론, 측정값의 안정성도 중요합니다.

관례적으로 절연저항계라 하면 10 GΩ 정도까지 측정할 수 있는 장치를 말합니다. 더 높은 저항 (전형적으로 $TΩ = 10^{12} Ω$ 이상)을 측정할 수 있는 절연저항계는 특별히 초고저항계라 불러 구별합니다⁴. 본 서에서는 “절연저항계” “초고저항계”의 2 종류로 크게 나눠 설명합니다. 이들 2 종류는 비용도 많이 차이 나기 때문에 절연상태의 양불판정기준에 맞춰 적절한 절연저항계를 선택하는 것이 좋습니다.

³ 특히 음극-외장 간의 절연불량은 확실하게 불량품이라 판정해야 합니다. 이에 대해서는 다음 페이지의 “외장전위측정”에서 자세히 설명합니다.

⁴ 초고저항계는 초절연계 또는 피코암미터라고 부르는 경우도 있습니다.

HIOKI에서는 절연저항계로 절연저항시험기 ST5520, 초고저항계로 초절연계 SM7110 시리즈를 제공하고 있습니다. 요구사항에 맞춰 최적의 측정기를 선택하기 위해 다음에 열거한 포인트를 참고해 주십시오.

(1) 절연저항값의 측정범위

절연불량판정의 임계값 이상의 절연저항값을 측정할 수 있는 측정기를 선택해야 합니다. 특히 수 GΩ 이상이 양불판정의 임계값이 되는 경우에는 측정 레인지가 충분한지 확실하게 확인하십시오.

- 판정 임계값이 수 MΩ에서 수 GΩ로, 수%정도의 측정 정확도가 요구되는 경우: ST5520
- 판정 임계값이 수 kΩ에서 수백 TΩ으로, 더 고정확도 판정을 하고자 할 경우: SM7110, SM7120

(2) 전압출력성능

절연저항측정시에 인가하는 전압의 레벨이 최적인 것을 선택하십시오.

- 1000 V 이하: ST5520, SM7110
- 2000 V 이하: SM7120

또한, 배터리셀의 정전용량에도 주의하십시오. 배터리셀은 수백 pF에서 수 μ F 이상의 정전용량을 지니는 경우가 있어 그러한 셀을 측정하는 경우, 인가되는 전압에 overshoot이 발생하는 경우가 있습니다. Overshoot이 발생하면 설정한 시험전압이 안정되어 출력되기까지 시간이 필요합니다. 이는 후술할 택트타임에도 악영향을 주는 요인이 됩니다. 또한 overshoot이 있으면 설정전압보다 높은 전압이 피시험물에 인가되기 때문에 피시험물이 파손될 우려도 발생합니다.

HIOKI 절연저항시험기와 초절연계는 용량성 부하에 대해서도 출력전압의 overshoot을 억제하도록 설계되어 있어 배터리의 절연저항검사에 적합합니다.

(3) 택트타임(takt time)

대량의 배터리셀을 효율적으로 검사하기 위해서는 검사의 택트타임이 짧은 것이 중요합니다. 택트타임을 결정짓는 절연저항계의 스펙은 다음과 같습니다.

a. 전류용량 (전류제한)

전류용량이란 측정회로에 인가 가능한 전류의 한계값입니다. 측정기의 제품사양에서는 “충전전류” “전류 제한” “전류 리밋” “측정전류” “정격전류”와 같은 표현으로 규정되어 있습니다. 배터리셀과 같은 용량성 피시험물의 경우, 이 전류용량이 작으면 측정전압을 인가하기 시작해 측정을 개시할 수 있게 되기까지 시간이 길어집니다. 요구하는 택트타임과 비교해 충분히 큰 전류용량을 지닌 측정기를 사용하는 것이 중요합니다.

절연저항측정에서는 피시험물에 정전압을 인가합니다. 전압을 인가하면 주액전 셀의 전극-전극간, 또는 전극-외장 간의 절연층에 전하가 축적되어 갑니다⁵. 이 때 용량성 피시험물에 전하가 충전되는 시간 $t[s]$ 은 피측정물의 용량 $C[F]$, 회로를 흐르는 전류 $I[A]$, 시험전압 $V[V]$ 에 의해 다음과 같이 표현됩니다.

⁵ 이처럼 절연부분이 충전되어 가는 현상을 유전흡수라고 부릅니다.

$$t = \frac{CV}{I} \quad (2)$$

t : 방전시간 C : 피시험물의 용량 V : 인가전압 I : 충전전류

피시험물의 용량 C 와 시험전압 V 는 공정마다 정해져 있습니다. 따라서 절연저항측정을 개시할 수 있게 되기까지의 시간은 측정기가 회로에 흘러보낼 수 있는 전류의 크기에 반비례한다는 것을 알 수 있습니다. 즉, 측정전압을 인가하기 시작해 측정을 개시할 수 있게 되기까지의 시간을 단축하려면 절연저항계의 전류용량이 큰 절연저항계를 사용해야 합니다.

HIOKI 절연저항계의 전류용량은 다음과 같습니다.

ST5520 : 최대 1.8 mA 까지

SM7110, SM7120 : 최대 50 mA 까지 (리밋 전류값은 가변)

b. 방전기능 (전하흡수기능)

방전기능이란 절연저항 시험 중에 피시험물의 절연층에 축적된 전하를 방전시키기 위한 기능입니다. 방전이 불충분하면 잔류전하에 의한 감전사고나 피시험물의 고장으로 이어질 수 있습니다. 따라서 측정 종료 후에 방전기능으로 피시험물의 전하를 흡수할 필요가 있습니다. 대부분의 절연저항계에는 방전기능이 탑재되어 있으며 방식으로는 저항방전방식과 정전류방식의 2종류가 있습니다. 배터리셀처럼 용량성 피시험물의 경우는 정전류방식쪽이 더 빠르게 방전시킬 수 있습니다.

[저항방식의 방전에 걸리는 시간]

$$t = CR \ln \left(\frac{V_0}{V_1} \right) \quad (3)$$

[정전류방식의 방전에 걸리는 시간]

$$t = \frac{C(V_0 - V_1)}{I} \quad (4)$$

t : 방전시간 C : 피시험물의 용량 R : 방전저항 V_0 : 충전상태의 피시험물의 단자 간 전압
 V_1 : 방전상태의 피시험물의 단자 간 전압 I : 방전전류

HIOKI 절연저항시험기 ST5520 과 초절연계 SM7110, SM7120 은 정전류방식의 방전기능이 탑재되어 있습니다.

ST5520 : 10 mA 정전류 방전

SM7110, SM7120 : 전류 리밋 설정에서 설정한 전류값으로 정전류 방전 (최대 50mA)

(4) 콘택트 체크기능

측정 프로브와 측정대상물의 전기적 접촉(콘택트)이 이뤄지지 않은 경우, 물론 피시험물의 절연저항값은 계측되지 않습니다. 하지만 오픈상태이기 때문에 절연저항계의 표시값은 매우 큰 값이 되고 표시값만 봐서는 양품과 구별되지 않습니다(그림 14). 그리되면 절연불량인 배터리라도 잘못 양품이라 판정할 우려가 있습니다. 따라서 측정 전에 프로브가 올바르게 접촉되었는지 확인하는 것이 중요합니다. 프로브가 측정대상물과 콘택트 되어 있는지 확인하는 기능을 콘택트 체크기능이라고 부릅니다. 시장으로 유출되는 불량품을 확실하게 방지하기 위해 콘택트 체크기능이 탑재된 절연저항계를 선택하는 것이 좋습니다.

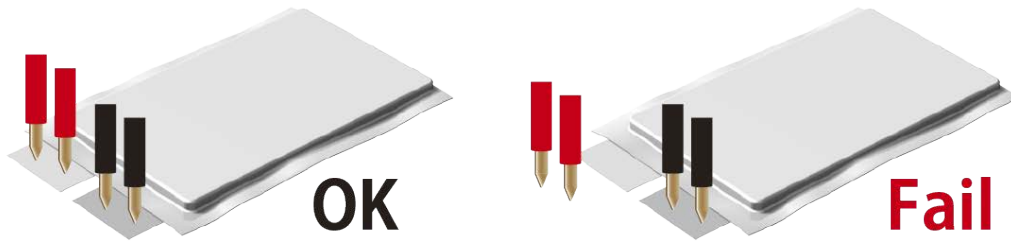


그림 14 올바른 콘택트 상태(좌)와 잘못된 콘택트 상태(우)

(5) 미세단락 체크기능

금속 이물이나 찌꺼기(burr) 등에 의해 극히 일부분의 영역만 도통되어 있는 상태를 미세단락(마이크로 쇼트)라고 부릅니다⁶. 미세단락이 생긴 배터리에 절연저항측정을 위해 고전압⁷을 인가하면 미세 단락영역에 전계(electric field)가 집중되어 미세단락이 타 끊어지는 경우가 있습니다. 이 경우, 측정에 의해 미세단락상태가 “개선”되기 때문에 양품이라 판단합니다(그림 15). 하지만 이러한 미세단락이 존재하는 배터리는 충방전을 반복하는 사이에 대규모 단락에 이를 위험이 있어 불량품이라 판정해야만 합니다.

이를 피하기 위해 절연저항측정에 앞서, 미세단락이 개선되지 않도록 저전압(수 V 정도)을 인가해 미세단락상태를 검출하는 것이 효과적입니다. 이러한 기능을 갖춘 절연저항계를 선택하는 것이 좋습니다.

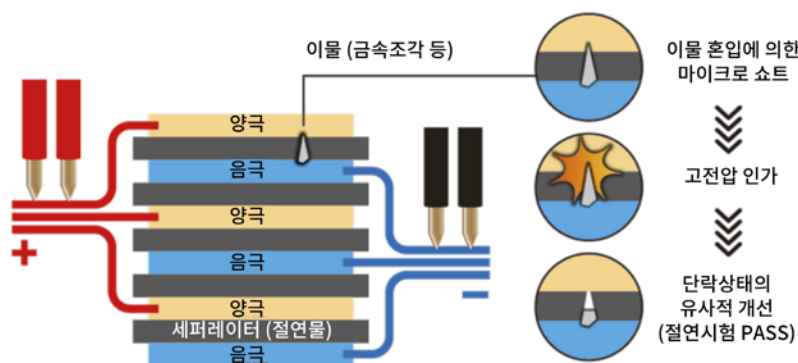


그림 15 고전압 인가에 의한 미세단락의 일시적인 개선

⁶ 리튬이온배터리 업계에서는 미세단락이라 하면 대부분의 경우 “Dendrite 의 성장에 의해 양극과 음극이 도통되는 현상”을 가리킵니다. 절연성능시험의 문맥에서는 조금 더 일반적인 의미를 담아, “절연되어야 하는 부분이 도통되어 있지만 도통영역은 지극히 작기 때문에 절연성능시험을 위해 대전압을 인가하면 도통영역이 끊겨 절연불량을 검출할 수 없게 되는 상태”를 미세단락이라고 부릅니다. 여기서는 이러한 의미로 사용하므로 주의해 주십시오.

⁷ 주액전 절연저항측정에서는 100 V 에서 200 V 정도의 전압을 인가하는 것이 일반적입니다.

-3. 외장전위측정 (라미네이트형 리튬이온배터리)

그림 16 에 나타난 것과 같은 라미네이트형 리튬이온배터리에서 효과적인 외장전위측정에 의한 절연검사에 대해 설명합니다.

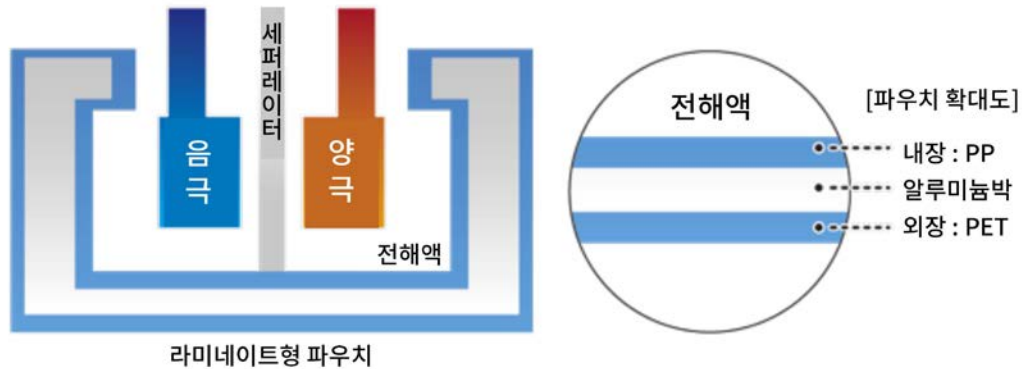


그림 16 라미네이트형 리튬이온배터리의 구조도 예

전해액의 주액전 절연성을 확인했어도 주액후에 새로운 전기적 경로가 형성되어 절연불량이 되는 경우가 있습니다. 그러므로 주액후에 절연상태를 확인하는 것이 대단히 중요합니다. 하지만 여기서 주액전과 동일하게 고전압으로 절연저항측정을 실시하면 배터리 특성에 지장이 없는 상태를 “불량품”이라 판정해버릴 수 있고, 고전압 인가에 의해 전해액의 분해를 초래할 수도 있습니다.

예를 들어 그림 17 좌측처럼, 음극과 외장 알루미늄 간에 절연불량을 일으킨 경우를 생각해 봅시다. 그리고 그림 17 우측처럼 외장 알루미늄의 수지필름에 균열이 발생해 전해액과 외장 알루미늄 간에 도통되었다고 합시다. 이때, 그림 17 우측 안의 화살표로 나타난 것과 같은 전류경로가 발생합니다. 외장 알루미늄-전해액 계면에서는 알루미늄은 음극에 대해 전위가 높기 때문에 환원반응이 일어나 Li-Al 합금이 생성됩니다. 이 Li-Al 합금은 매우 약하기 때문에 외장 알루미늄에 pin hole 이 생기는 원인이 됩니다. 이 pin hole 을 통해 수분이 들어가면 리튬이온배터리의 수명이 현저히 떨어지게 됩니다 (그림 18). 즉, 고품질 배터리 제조를 위해서는 음극-외장 알루미늄 간의 절연불량은 반드시 검출해야 합니다.

한편, 양극-외장 간에 절연불량이 있고, 전해액-외장이 단락된 경우를 생각해 봅시다. 이때에는 알루미늄 쪽이 전위가 낮아지므로 산화반응이 되어 Li-Al 합금은 생성되지 않습니다(그림 19). 리튬이온배터리의 수명에 영향을 주지 않기 때문에 “양품”이라 판정해도 좋을 것입니다 (표 1.(3)).

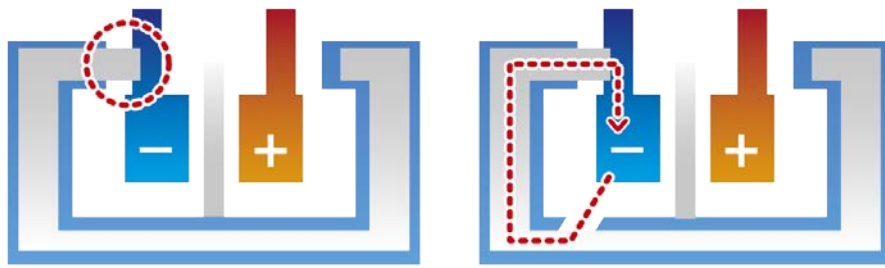


그림 17 음극의 절연불량과 파우치 내부의 균열 발생에 의해 형성되는 전류경로

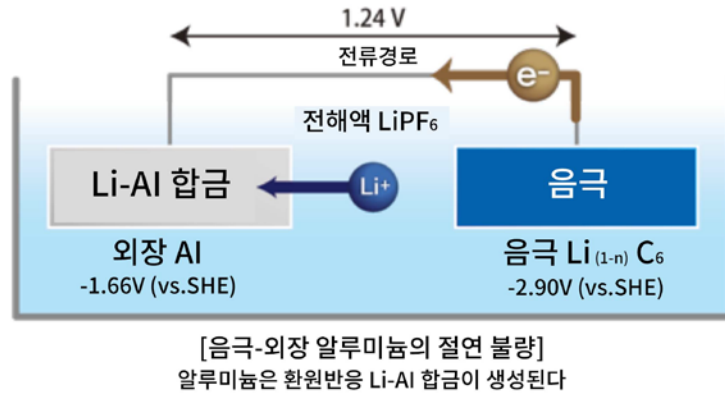


그림 18 음극 - 외장 알루미늄 간의 절연불량에 의해 일어나는 반응

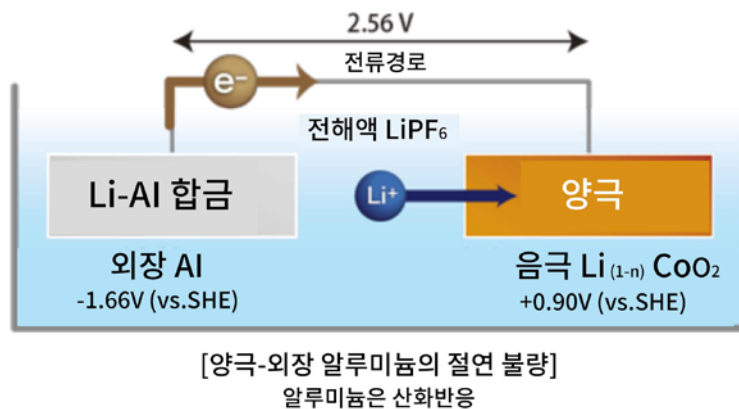


그림 19 양극 - 외장 알루미늄 간의 절연불량에 의해 일어나는 반응

라미네이트형 리튬이온배터리에서는 음극과 외장 알루미늄 간의 절연불량을 검출하기 위해 양극과 외장 알루미늄 간에 생기는 전위차를 측정해 판단하는 것이 효과적입니다. 이 전위차를 이후부터 간단히 “외장전위”라 칭합니다. 절연불량상태에 따라 외장전위의 전압값은 다릅니다. 내부절연불량 패턴과 외장전위의 관계를 표 1에 정리했습니다.

이처럼, 표 1.(5)과 같은 음극 - 외장 알루미늄 간의 절연불량은 확실하게 검출해야 합니다. 이때 외장 알루미늄의 전위는 음극과 동일해지므로, 외장전위는 (양극전위)-(음극전위), 즉 배터리 전압과 같은

정도의 값이 됩니다. 다시말해, 외장전위가 배터리 전압에 가까운 경우에는 음극과 외장 알루미늄 간의 절연불량을 의심할 수 있습니다.

내부의 절연상태가 정상적인 배터리에서는 표 1.(1) 처럼 외장전위가 발생하지 않습니다. 이때에 0 V 를 검출하려면 전압계의 High-Low 단자 간에 10 M Ω 에서 10 G Ω 의 저항 (R_{IN}) 을 연결해 두는 것이 유효합니다. 통상, 전압계의 입력저항은 10 M Ω - 10 G Ω 이므로 이 입력저항이 R_{IN} 의 값이 됩니다 (그림 20).

한편, 양극-음극 간이 단락된 경우 (표 1.(2))에도 정상적인 배터리와 마찬가지로 외장전위는 발생하지 않기 때문에 전위는 일정하지 않습니다. 즉, 양극-음극 간의 단락은 외장전위측정으로는 검출할 수 없습니다. 그렇지만 이는 중대한 사고의 원인이 될 수 있는 절연불량입니다. 주액 전에 양극-음극 간의 절연저항검사를 실시해 확실하게 검출해 둘 필요가 있습니다.

또한, 표 1. (4)처럼, 절연코팅의 균열만 발생한 경우를 생각해 봅시다. 외장전위에는 (양극전위)-(외장 알루미늄의 전위)가 나타납니다. 외장 알루미늄의 전위는 -1.7 V (vs. SHE⁸)정도입니다. 양극 전위는 배터리 전압과 양극 활물질에 따라 다르지만, 예를 들어 배터리 충전율이 비교적 높을 때의 LiCoO₂ 라면 대략 +0.9 V (vs. SHE) 정도일 것입니다. 이때는 그 차이인 2.6 V 정도의 외장전위가 측정되게 됩니다. 절연코팅의 균열 자체는 배터리 특성에 영향을 주지 않기 때문에 양품이라 판단해도 무관합니다.

양극-외장 알루미늄 간이 단락된 경우 (표 1.(3))도 마찬가지로, 배터리 특성에 영향을 주지 않기 때문에 양품이라 판단해도 됩니다. 이때는 당연히 외장전위는 0 V 가 되므로 정상품과 동일한 값이 됩니다.

이처럼, 외장전위가 배터리 전압에 가까운 경우에 불량품이라 판단함으로써 음극-외장 알루미늄 간의 절연불량은 확실하게 검출할 수 있습니다.

⁸ SHE (표준수소전극, Standard Hydrogen Electrode) 에 대한 상대전위임을 나타냅니다. SHE 에 대한 상대전위는 표준전극전위라 부릅니다.

표 1 라미네이트형 리튬이온배터리의 내부절연불량 패턴과 양불판정

	절연불량위치	원인	현상	양불판정	외장전위	검사방법
(1)	절연 불량 없음 	-	-	양품	일정하지 않음 (0V)	-
(2)	양극-음극 간 	dendrite의 세퍼레이터 관통 금속입자의 혼입 위빙(waving)	자가방전의 증대 이상 발열	불량품	일정하지 않음 (0V)	절연저항
(3)	양극-외장 알루미늄 간 	금속입자의 혼입 외장의 seal 불량	배터리 특성에 영향 없음	양품	0V	외장전위
(4)	전해액-외장 알루미늄 간 	절연 코팅의 균열	배터리 특성에 영향 없음	양품	$\sim 2.6V$ {+0.9 - (-1.7)}	외장전위
(5)	음극-외장 알루미늄 간 	금속입자의 혼입 외장의 seal 불량	경시변화 등에 의해 외장 알루미늄의 절연코팅에 균열이 발생하면 배터리가 열화된다	불량품	$\sim 3.8V$ {+0.9 - (-2.9)}	외장전위

외장전위측정을 실시할 때 다음 3 가지 점에 대해 주의가 필요합니다.

(1) 전위측정기의 입력저항

측정기의 입력저항이 낮은 경우는 관측되는 전압이 분압되어 불량품과 양품의 판정이 어려워집니다. 즉, 더 정확한 검사를 위해서는 전압계의 입력저항이 높은 편이 좋다고 할 수 있습니다.

예를 들어, 절연저항이 $10\text{ M}\Omega$ 인 경우에 R_{IN} 이 $10\text{ M}\Omega$ 이면 외장전위는 절반으로 분압되고 맙니다. 입력저항이 더 높은 전압계를 사용할 필요가 있습니다. $10\text{ G}\Omega$ 이상의 입력저항을 추천합니다. 하지만 이렇게 높은 입력저항을 지닌 측정기는 많지 않습니다. 일반적인 전압계나 디지털 멀티미터의 입력저항은 $10\text{ M}\Omega$ 인 것이 대부분이므로 선정시에 주의가 필요합니다.

(2) 확실한 프로빙

외장전위측정에서는 외장전위가 0 V 에 가까운 배터리를 양품이라 판정합니다. 한편 그림 21 에 나타난 것처럼, 프로브가 측정대상에 연결되지 않은 경우도 동일하게 입력저항 R_{IN} 이 존재하기 때문에 저항계는 0 V 를 표시합니다. 그 결과, 콘택트 미스에 의해 불량품을 양품이라 오판정해 불량품의

시장유출을 일으킬 수 있습니다. 특히 외장 알루미늄쪽은 절연필름의 코팅이 있기 때문에 접촉불량이 발생하기 쉬워 주의해야 합니다.

HIOKI 전압계 DM7275/DM7276은 콘택트 체크기능이 있어 콘택트 상태를 확인한 후 측정할 수 있습니다. 콘택트 체크기능을 지닌 측정기를 사용해 콘택트 상태를 확인한 후 측정하는 것이 중요합니다.

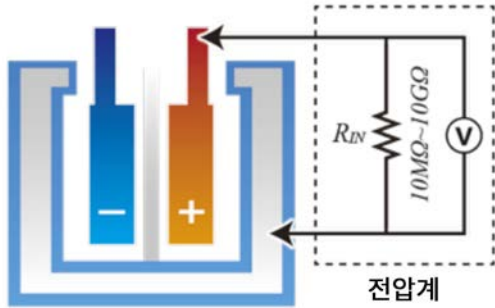


그림 20 전압계의 입력저항 (R_{IN}) 이 연결된 상태

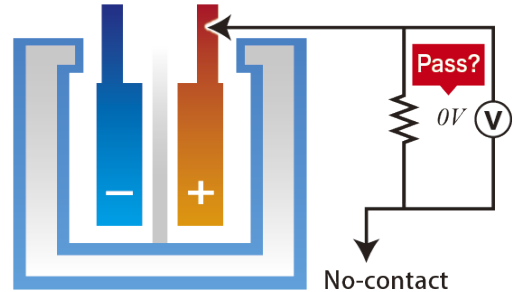


그림 21 콘택트 미스에 의한 오판정 예

(3) 노이즈 대책

외장전위측정은 출력저항이 높은 경로를 측정하게 됩니다. 외래 노이즈가 많은 환경하에서는 측정값에 편차가 커져 오판정의 우려가 있습니다. 이 대책으로써 측정 케이블은 실드선을 이용해 외래 노이즈의 영향을 잘 받지 않도록 할 필요가 있습니다. 또한 상용전원의 hum 노이즈의 영향을 줄이기 위해 전압계의 적분시간은 전원주파수에 동기된 설정으로 하는 것도 중요합니다.



그림 22 실드선

4. 셀 완성품 (셀의 성능평가)

-1. 예비충전과 충방전 특성시험

전해액 주액후는 음극 집전체의 용출을 막기 위해 신속하게 예비충전을 실시해야 합니다. 예비충전에서 사용하는 충방전 시험기에는 예비충전에 충분한 출력전압과 전류용량이 필요합니다. 셀 주액후 배터리 전압이 마이너스 전위가 되는 경우도 있기 때문에 마이너스 전압에서도 충전 가능한 기능을 지닌 충방전 시험기가 좋습니다.

예비충전은 음극 표면에 균일한 SEI 피막 (Solid Electrolyte Interphase)을 형성하기 위해 작은 전류값으로 실시합니다. 또한 SEI는 충방전을 반복하면 서서히 두꺼워 집니다. 그 형성상태는 임피던스 변화로도 판단할 수 있습니다.

충방전 시험기는 배터리의 여러 특성을 평가하기 위해 다양한 충방전 모드가 필요합니다. 가장 기본적인 용량측정은 정전류 정전압 (CC-CV)모드에서의 충전과 정전류 (CC) 모드에서의 방전입니다. 그 외에, 펄스 충방전 모드는 휴대폰 등의 단시간에 대전류를 필요로 하는 기기의 실제 부하를 모의한 전류 패턴으로 방전해 실제 사용시의 용량을 검사하는 경우에 주로 사용됩니다. 또한 더 상세하게 실제 부하의 시뮬레이션이 가능한 충방전 시험기도 있으며 예를들어 모터의 인버터 전류의 고주파 리플 등도 모의할 수 있습니다. 이들 외에도 배터리 용도에 따라 정저항 방전모드나 정전력 모드 등 실제 사용을 모의한 시험이 실시되는 경우도 있습니다.

배터리의 내부저항은 배터리 상태를 알기 위한 중요한 지표입니다. 내부저항측정에는 교류법과 직류법의 2 종류가 있습니다. 교류법은 교류신호를 배터리에 인가했을 때의 전류와 전압변화로부터 임피던스를 구합니다. 이에 반해 직류법은 개시 직후 또는 방전정지 직후의 전압변화와 전류로부터 저항값을 구합니다. 따라서 직류법으로 내부저항을 측정하려면 급준하게 전류를 주입/차단 가능하고 전압변화를 고속으로 취득할 수 있는 충방전기가 필요합니다.

배터리 특성은 온도에 따라 변화하기 때문에 충방전 특성시험에서는 배터리의 온도관리도 중요합니다. 그러므로 정확하게 배터리 특성을 알아보려면 항온조가 꼭 필요합니다. 항온조가 설정온도가 된 후에 휴지시간을 두어 배터리 내부까지 온도가 균일해 지도록 하는 것이 일반적입니다. 배터리의 부피(열용량)에 따라 휴지시간을 결정합니다.

또한, 방전전력의 회생기능을 갖춘 충방전시험기도 있어 방전전력을 계통측에 회생하거나 그대로 충전전류에 이용하는 것도 가능합니다. 충방전시험기는 매우 큰 전력을 소비하므로 절전이나 방열절감에 도움이 됩니다.

충방전시험기에 요구되는 최대출력전력은 셀용과 모듈·팩 배터리용에서 크게 다릅니다. 목적에 따라 출력전압과 충방전전류를 기준으로 선정하십시오.

-2. 에이징 공정에서의 개방전압 (OCV)측정

배터리를 방치하면 서서히 dendrite가 성장해 양음극 간에 미세단락이 발생하는 경우가 있습니다. 이러한 배터리는 장차 대규모 단락에 이를 우려가 있기 때문에 제조공정에서 확실하게 제거해 둘 필요가 있습니다. 양음극 간의 미세단락이 발생하면 배터리의 개방전압 (OCV, Open-Circuit Voltage)이 변화하므로 전압값에 의한 검사가 효과적입니다. 일반적으로 배터리 예비충전 후 에이징 공정에서 OCV의 변화량을 측정해 검사를 실시합니다. 또한 dendrite 외에 전극표면에 부착한 도전체가 야기하는 미세단락에 대해서도 이전 공정의 절연검사에서는 발견되지 않는 경우가 있어 에이징 공정의 OCV 측정으로 검사가 필요합니다.

OCV의 변화량은 매우 작기 때문에 장시간 에이징이 필요합니다. 적어도 100 시간에서 200 시간, 길 경우에는 몇 주간의 에이징 전후에 OCV 측정을 실시해 양불판정을 내리는 것이 일반적입니다. 또한 미세한 전압변화를 검출하기 위해 OCV 측정에는 뛰어난 정확도와 정밀도를 지닌 전압계가 필요합니다.

시간경과와 함께 양품과 불량품 간의 OCV 차가 커져 검출이 쉬워집니다. 하지만 필요이상으로 긴시간동안 에이징을 실시하면 생산성 저하의 원인이 됩니다 (그림 24). 사용하는 전압계의 정확도와 정밀도가 좋다면 단시간의 에이징으로 정확하게 양품과 불량품 판정이 가능합니다. 특히 타겟이 되는 셀 전압 (4 V 부근)에서 정확하게 측정할 수 있는 디지털 멀티미터나 전압계를 선택하는 것이 중요합니다. 측정기에 따라 레인지 구성 등이 다르기 때문에 분해능과 표시 자릿수만으로는 단순히 성능을 비교할 수 없으니 주의하십시오. 측정하려는 셀 전압 (4 V 부근)에서 정확도를 계산해 측정오차를 산출한 다음, 가능한 한 높은 측정 정밀도를 지닌 측정기를 선택하는 것이 좋습니다.

HIOKI의 고정밀도 직류전압계 DM7276 (그림 25)는 9 ppm이라는 뛰어난 전압 기본 측정정확도와 1년간의 정확도 보증기간으로 에이징 공정에서 효율적이면서 경제적인 불량 셀 검출을 실현합니다.

표 2 전극표면에 부착하는 도전체의 종류

-1	금속 이물혼입 (dendrite의 원인)
-2	전극을 절단했을 때의 집전체의 부스러기
-3	절단시에 발생하는 활물질층의 가루
-4	집전체 측면의 찌꺼기(burr)

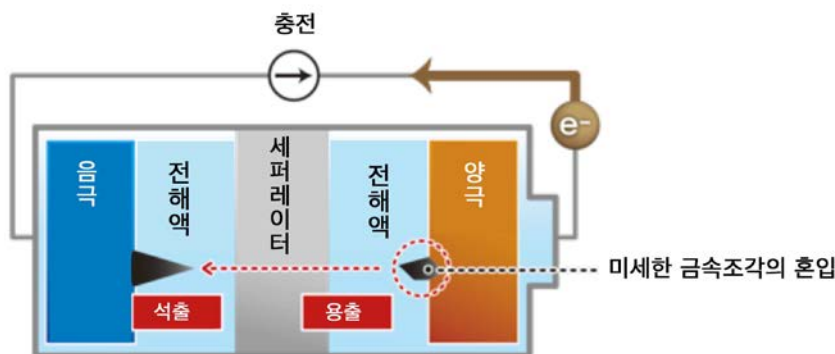


그림 23 dendrite 성장에 의한 세퍼레이터의 파괴

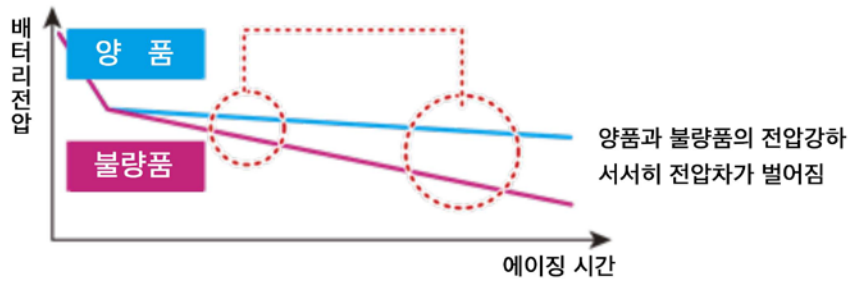


그림 24 에이징 중 배터리 전압의 변화



Precision DC Voltmeter
DM7276

그림 25 직류전압계 DM7276

-3. 배터리의 임피던스 측정

배터리의 내부저항값에 따라 배터리 특성은 크게 변화합니다. 내부저항이 높으면 그만큼 에너지 손실이 커지기 때문에 배터리의 성능은 악화됩니다. 또한 사용 중 배터리의 발열이 커지므로 조기 열화로도 이어집니다. 일반적으로 내부저항이 작은 배터리쪽이 특성이 좋은 배터리라고 할 수 있습니다. 배터리의 내부저항값은 배터리 특성을 나타내는 지표로 널리 이용되고 있습니다.

배터리의 내부저항측정에는 교류법과 직류법의 2 종류가 있습니다.

직류법은 배터리를 일정전류로 방전해 방전전류값과 특정 타이밍에서의 전압강하로부터 내부저항을 산출하는 방법입니다. 주로 실제 사용시를 상정한 대전류 특성을 검사하기 위해 이용됩니다.

이에 반해 교류법에 의한 내부저항측정에서는 배터리에 미세한 교류신호를 인가해 배터리의 저항성분과 리액턴스성분을 각각 분리해 측정합니다. 소형장치에서 간단히 우수한 재현성으로 측정이 가능한 점과 단시간에 측정을 실시할 수 있다는 점에서 리튬이온배터리 등 이차배터리의 성능 및 품질평가에서는 이 방법이 널리 이용되고 있습니다. 참고로 직류법에서는 배터리를 방전시키기 때문에 측정에 따라 배터리의 충전율이 변화합니다. 이를 원치 않을 경우에는 교류법을 선택하는 것이 좋겠습니다.

통례적으로 직류법으로 측정한 저항값을 DC-IR, 교류법으로 측정한 저항값을 AC-IR 이라고 부릅니다⁹. 또한 교류법에 의한 내부저항측정을 간단히 “임피던스 측정”이라고 부르는 경우도 많아 이후부터 이 명칭으로 기술합니다.

여기서 일반적으로 저항측정에 사용하는 저항계, 또는 임피던스 측정에 사용하는 임피던스 미터(LCR 미터)에서는 배터리 측정이 불가능한 것에 주의해야 합니다(그림 26). 배터리 측정이 가능한 임피던스 미터를 특별히 배터리 테스터라고 부르며 구별합니다. 배터리 테스터는 보통, 임피던스에 추가적으로 배터리 전압도 측정 가능합니다.

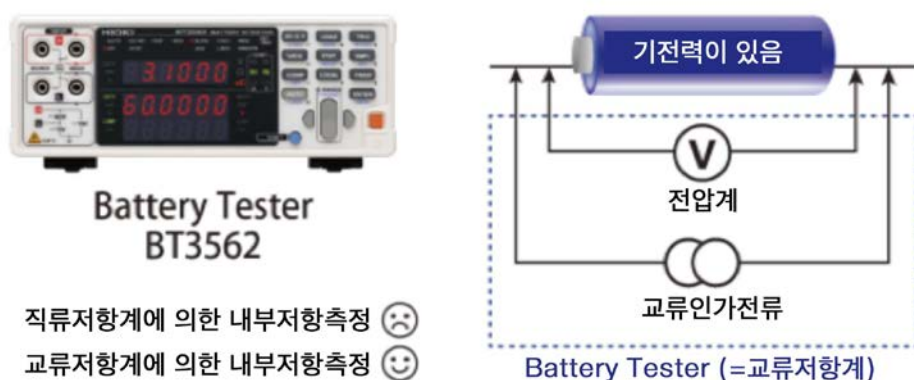


그림 26 배터리 테스터 (교류저항계)에 의한 배터리의 내부저항측정

검사라인의 출하검사나 수입(□□)검사에서는 특정 주파수 (대개의 경우 1 kHz)에서 임피던스 측정을 실시하는 것이 일반적입니다. 저항성분과 리액턴스 성분을 각각 분리해 저항성분만 실효저항값으로

⁹ IR: Internal Resistance (내부저항)

표시합니다. 단시간에 검사 가능하기 때문에 양산검사나 수입검사에는 특히 적합하다고 할 수 있습니다.

1 kHz 의 임피던스 측정에 대해서는 포터블 기기용 리튬이차배터리에 관한 규격인 JIS C 8711:2013 안에 “팩 배터리의 교류내부저항의 측정방법”으로 기재되어 있습니다. 또한 이 내용을 이어받는 형태로 IEC61960-3:2017 에도 동일하게 규정되어 있습니다⁵⁾. 규격내용을 아래에 발췌했습니다.

주파수 $1.0 \pm 0.1 \text{ kHz}$ 의 교류실행전류 I_a 를 팩 배터리에 1~5 초간 통전해 교류실행전압 U_a 를 측정한다.

모든 전압측정은 통전에 이용하는 접점과는 별개로 배터리 단자에서 실시한다.

팩 배터리의 교류내부저항 R_{ac} 은 다음 식으로 구한다.

$$R_{ac} = \frac{U_a}{I_a}$$

여기에, R_{ac} : 교류내부저항 [Ω]

U_a : 교류실행전압 [V]

I_a : 교류실행전류 [A]

주기 1 교류전류로 측정할 경우, 중첩되는 교류 피크 전압은 20 mV 미만이 바람직하다.

주기 2 이 방법은 규정하는 주파수에서 저항에 거의 동일한 임피던스 측정에 이용하는 것이 일반적이다.

또한 단일주파수가 아닌, 주파수를 스위치하면서 임피던스를 측정하는 방법도 널리 알려져 있습니다. 측정결과는 cole•cole•plot 이라 불리는 그래프로 나타내는 것이 일반적입니다 (그림 27).

주파수대역에 따라 임피던스를 지배하는 물리현상이 다릅니다. 예를들어, 고주파 (~1 kHz)에서는 전해액 속의 이온이동, 저주파 (<1 Hz)에서는 이온의 전극내 확산, 중간 주파수 (1 Hz - 수백 Hz)에서는 이온의 전하교수반응(□□□□□□)과 같은 현상이 임피던스에 주로 기여합니다. 즉, cole•cole•plot 을 상세하게 해석함으로써 배터리의 각 부분에서 생기는 현상을 각각 평가할 수 있습니다. 대표적인 해석방법으로써 그림 28 과 같은 등가회로모델을 사용한 등가회로해석이 알려져 있습니다⁶⁾. 여기서는 배터리 내부에서 생기는 각 현상이 각각 다른 등가회로소자로 모델링 되어 있습니다. 해석을 통해 얻어지는 각 소자의 값은 그 소자가 대표하는 물리현상의 특성을 나타내는 값이라고 생각할 수 있습니다.

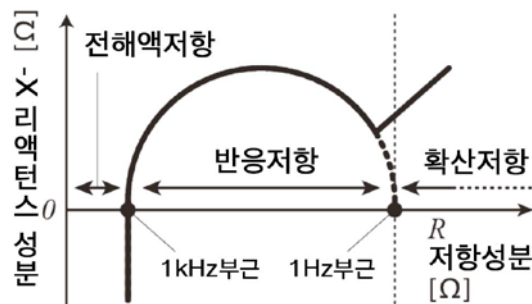


그림 27 리튬이온배터리의 cole•cole•plot 예

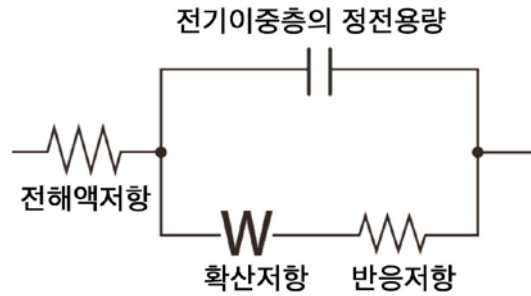


그림 28 배터리의 등가회로 예

HIOKI에서는 배터리 전압 및 측정주파수범위에 따라 여러 배터리 임피던스 측정기를 제공하고 있습니다. 여기서는 측정기와 측정방법을 결정하는 포인트에 대해 소개합니다. 특히 대용량 리튬이온배터리의 내부 임피던스는 $1\text{ m}\Omega$ 이하로 매우 작아 정확한 측정이 쉽지 않습니다. 측정장치의 선정과 측정방법에는 주의가 필요합니다.

(1) 측정방식

저-임피던스 측정에는 일반적으로 2 단자법이 아닌 4 단자법이 이용됩니다. 측정 프로브의 배선저항과 접촉저항의 영향을 받지 않고 정확하게 안정적으로 측정할 수 있습니다¹⁰.

(2) 유도자계의 영향

인가전류에 의해 주위 금속에는 와전류가 흘러 유도자계가 발생합니다. 이 유도자계가 전압측정선이 만드는 루프 내에 들어가면 측정오차가 되기 때문에 주의가 필요합니다 (그림 29). 이러한 현상은 직류에서는 발생하지 않고 교류측정 특유의 현상입니다.

예를 들어, EV 용 대형 배터리의 경우, 배터리 크기가 크기 때문에 전극 간의 거리도 길어집니다. 따라서 전압측정선이 만드는 루프의 면적도 커집니다. 이러한 배터리를 측정하면 배터리의 금속부에서 측정전류에 의한 유도자계가 발생해 측정오차의 원인이 됩니다.

유도자계의 영향을 줄이기 위해서는 다음과 같은 방안을 생각할 수 있습니다.

a. 케이블 꼬기

전류 케이블끼리, 전압 케이블끼리 각각 가급적 케이블 전체적으로 꼬는 것(트위스트)이 효과적입니다. 전류 케이블을 꼬면 전류에 의해 생기는 자계는 취소되고 외부에 세어 나가는 자계를 줄일 수 있습니다. 또한 전압 케이블을 꼬면 자계가 흘러들어가는 루프의 면적을 줄일 수 있기 때문에 효과적입니다. 게다가 와전류의 영향과 그 외 외부자계의 영향도 줄일 수 있습니다.

b. 케이블과 배터리를 금속에서 멀어지게 한다

전류와 금속의 거리가 커지면 그만큼 유도자계의 영향을 줄일 수 있습니다. 측정설비의 금속과 측정설비가 놓여있는 테이블의 금속부에 주의해 가능한 한 거리를 떼어 놓으십시오.

¹⁰ 4 단자법에 대해서는 3.-1 도 참조해 주십시오..

c. 4 단자페어법 채택

4 단자법이 아닌 4 단자페어법의 측정장치를 선정하는 것도 유효합니다 (그림 30). 4 단자페어법에서는 측정전류의 실드부분에 반대방향으로 동일한 양의 전류가 흐릅니다. 따라서 전류가 만들어내는 자계는 거의 외부로 새어나가지 않게 되어 영향을 최소화할 수 있습니다.

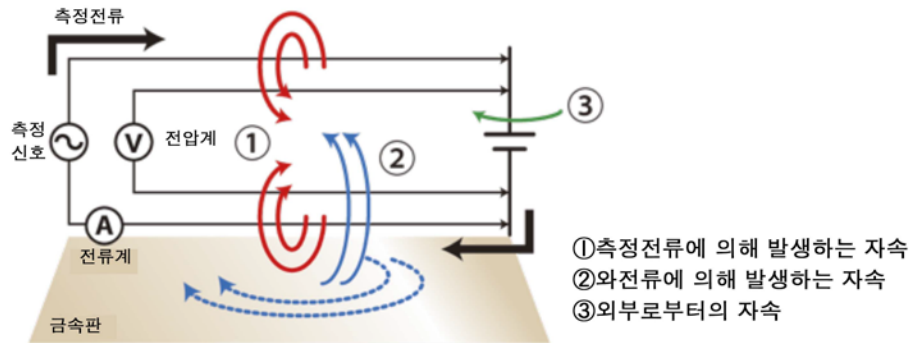


그림 29 4 단자법

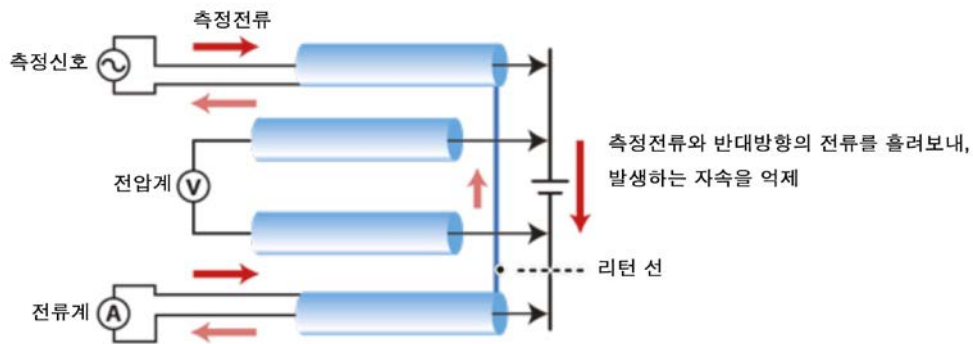


그림 30 4 단자페어법

d. 측정주파수 변경

측정주파수를 낮게 하는 것도 효과적입니다. 위에서 언급한 것처럼, 현재 일반적으로 임피던스 측정에 사용되는 것은 1 kHz 입니다. 와전류의 영향은 주파수가 높을수록 커져 1 kHz 의 경우 측정값에 대한 영향도 작지 않습니다. 예를 들어 주파수를 1/10 인 100 Hz 로 하면 와전류의 영향량도 꽤 작아지게 할 수 있습니다. 주파수를 낮게 설정하면 그만큼 테스트타임이 길어지므로 적절하게 주파수를 결정하는 것이 좋습니다.

(3) 인가 전류값

측정을 위해 인가하는 전류값은 배터리의 임피던스 값에 맞춰 결정해야 합니다. 배터리의 임피던스가 낮을수록 안정된 측정을 위해서 큰 인가전류가 필요해집니다. 단, 배터리의 I-V 특성은 선형이 아니기 때문에 (그림 31), 너무 큰 전류를 인가하면 비선형성이 나타나 바람직하지 않습니다. 배터리의 양끝에 발생하는 교류전압진폭은 선형성이 유지되는 레벨로 억제해야 합니다 (그림 32).

일반적으로 전기화학적 계통으로 교류 임피던스 측정을 실시할 경우에는 인가하는 교류전압을 20 mV_{p-p} 미만으로 억제해야 한다고 여겨집니다. 다시말해, 배터리의 임피던스가 $1 \text{ m}\Omega$ 인 경우, 인가하는 전류는 최대 7 A_{rms} 정도입니다 (식(5)). 실제로 인가전류값을 검토할 때에는 배터리 전압의 변동이 $5\sim 10 \text{ mV}_{p-p}$ 정도가 되는 전류값을 적절한 값으로 보고 측정값의 S/N가 나쁜 경우에는 전류값을 올려보는 식으로 하면 좋습니다. 충분한 S/N가 확보된다면 전류값을 작아도 문제없습니다.

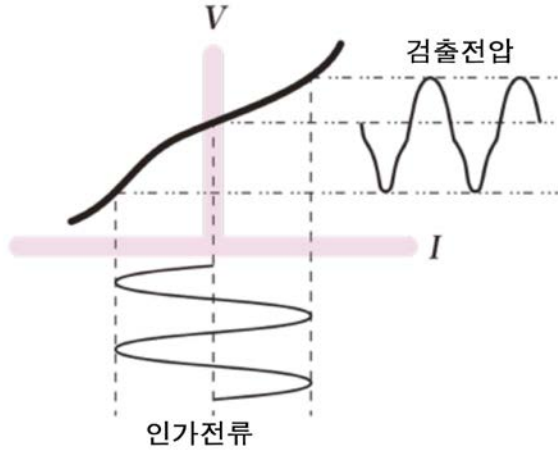


그림 31 측정전류가 너무 큰 경우의 검출전압의 왜곡

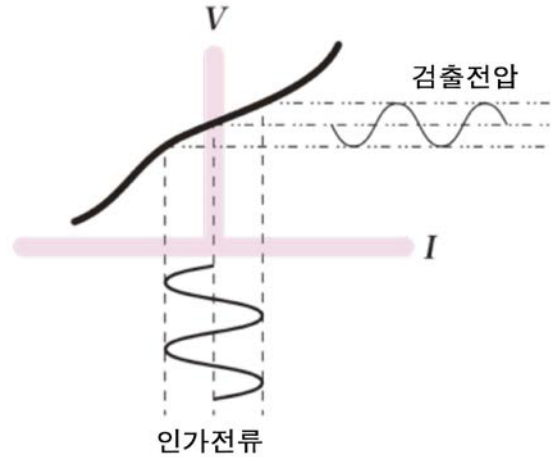


그림 32 측정전류가 적절한 경우의 검출전압

$$\frac{20.0 [\text{mV}]}{2\sqrt{2}} \div 1.0 [\text{m}\Omega] \doteq 7.0 [\text{A}_{rms}] \quad (5)$$

(4) 측정주파수와 최대입력전압

임피던스 측정장치에는 JIS C 8711 에 기재된 것과 같은 1 kHz 단일주파수 전용장치와, 주파수 스위칭기능을 지닌 장치가 있습니다. 후자는 cole · cole · plot 이나 등가회로해석 등 배터리의 상세 특성평가에 사용됩니다. 주파수 스위칭측정을 실시하고자 할 경우, 배터리의 종류에 따라 주파수특성이 다르기 때문에 필요에 따라 측정주파수대역을 지닌 측정장치를 선정해야 합니다. 또한 저주파 임피던스 측정에서는 측정전류에 따라 배터리가 충전되게 됩니다. 측정개시, 정지를 적절한 타이밍에 실시하지 않으면 측정 전후에 배터리의 충전율이 변화하게 됩니다. 이를 방지하기 위해 측정신호의 제로 크로스 정지기능이 유효합니다 (그림 33).

또한, 배터리 전압에 따라 적합한 측정장치를 선정해야 합니다. 측정장치의 최대입력전압은 셀 검사용에서는 5 V 정도, EV 용 팩 배터리 검사용에서는 최대 1000 V 정도입니다. 입력전압의 정격에 주의가 필요합니다.

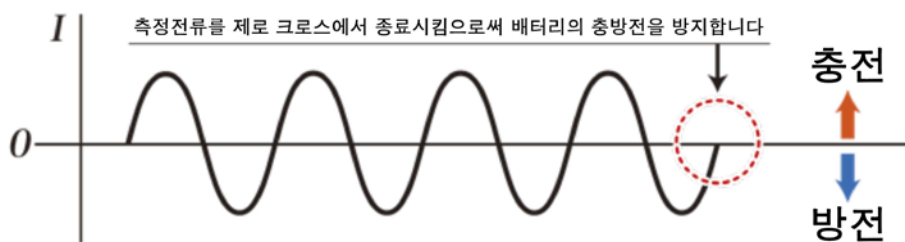


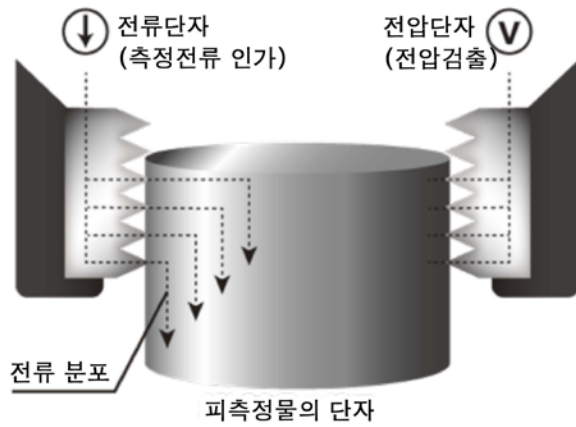
그림 33 측정신호의 제로 크로스 정지기능

(5) 배터리단자로의 콘택트

저-임피던스를 측정할 때는 측정단자의 콘택트 방법에도 주의가 필요합니다.

4 단자법이나 4 단자페어법의 경우, 측정전류를 인가하는 전류단자와 전압강하를 검출하는 전압단자가 있습니다. 전류단자주변은 전위경사가 급준해, 전압단자의 위치 어긋남에 의한 측정값 변동이 커집니다. 따라서 저저항을 재현성 좋게 측정하려면 다음의 4 가지 사항이 중요합니다(그림 34, 그림 35, 그림 36).

- 전압단자와 전류단자를 일정 거리 이상 떼어놓는다
- 측정 시에는 그 거리를 일정하게 유지한다
- 측정대상과 프로브는 한 점에서 콘택트한다
- 매회 같은 장소에 콘택트한다



- ☹ 전류단자와 전압단자의 콘택트 위치가 가깝다
☹ 다점에서 콘택트하고 있다

그림 34 다점 콘택트에 의한 영향

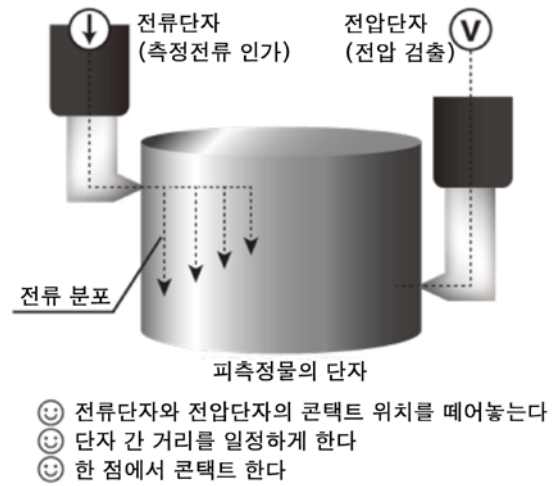


그림 35 재현성이 좋은 콘택트 방법

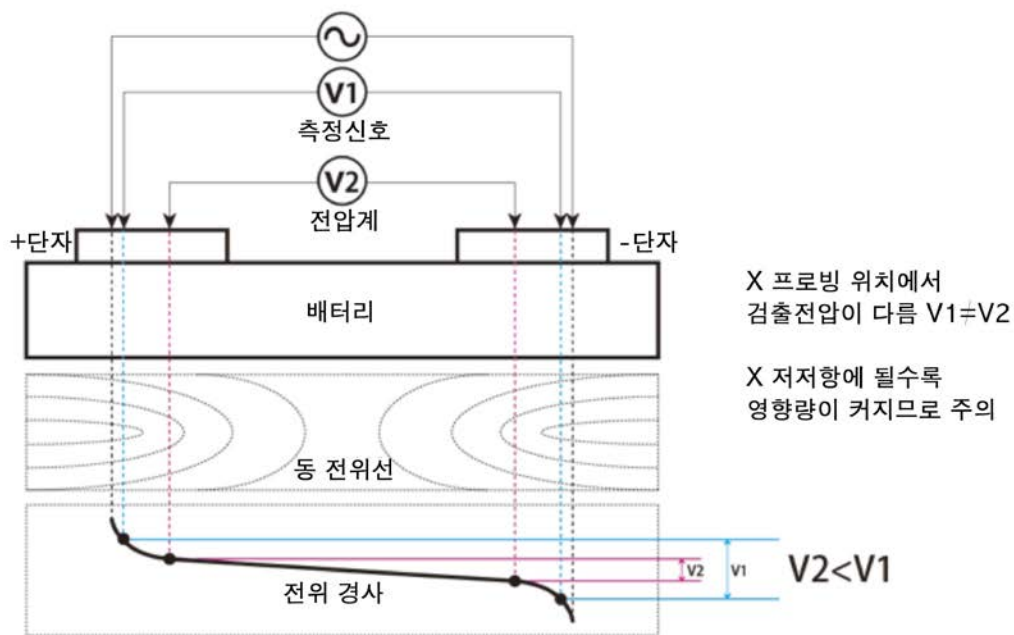


그림 36 전류단자와 전압단자의 콘택트 위치의 영향

(6) 배터리 테스터의 선정 포인트

이러한 내용을 바탕으로 HIOKI가 제공하는 배터리 테스터를 선정할 때의 포인트를 정리해봤습니다.

- 측정 주파수

1 kHz 단일주파수 전용 : 3561, BT3562, BT3563, BT3564, BT3554

주파수 스윙 가능 : BT4560 (0.1 Hz - 1050 Hz※), IM3590 (0.001 Hz - 200 kHz)

※ 특주로 0.01 Hz - 1050 Hz 까지 확장 가능

검사라인의 출하검사나 수입(□□)검사에서는 주파수 포인트를 혼합해 배터리의 내부저항을 검사하기 때문에 1 kHz 단일주파수 전용 측정기를 사용합니다. 입력전압이나 임피던스 범위에 따라 사용할 측정기를 선정하면 됩니다.

배터리 내부의 상세 특성을 평가하려면 주파수를 스윕 가능한 측정기가 좋다고 할 수 있습니다. 넓은 주파수 범위로 측정하고 싶을 때는 IM3590, 주파수를 스윕하면서 정확하게 저-임피던스를 측정하고 싶을 때는 BT4560 을 선정하십시오 (그림 37).

• 측정 가능한 임피던스 범위

0.1 $\mu\Omega$ - 100 m Ω : BT4560※

0.1 $\mu\Omega$ - 3000 Ω : BT3562, BT3563, BT3564

1 $\mu\Omega$ - 3 Ω : BT3554

10 $\mu\Omega$ - 3 Ω : 3561

10m Ω - 10 Ω : IM3590

※특주로 최대 3 Ω 까지 확장 가능

일반적으로 배터리크기가 커질수록 내부저항이 낮아집니다. 차재용 배터리처럼 대형 배터리는 내부저항이 1m Ω 을 하회하는 것이 나와 있으므로, 저저항을 보다 정확하게 측정할 수 있는 BT4560 이나 BT3562 를 선정하면 됩니다.

• 기타

측정기를 휴대해 측정하고 싶을 때는 포터블형 BT3554 가 좋습니다 (그림 38).

BT3554 를 제외한 모든 배터리 테스터는 전환기 SW100x 시리즈를 사용해 다채널 측정이 가능합니다. 복수 배터리의 내부저항을 측정하고 싶을 때 유효합니다.



그림 37 배터리 임피던스 미터 BT4560 과 케미컬 임피던스 아날라이저 IM3590



Battery Tester
BT3554

그림 38 배터리 테스터 BT3554

5. 모듈, 팩 배터리(실용 레벨에서의 성능평가)

-1. 모듈, 팩 배터리의 총저항검사

완성된 셀 배터리는 셀 단품으로 기기에 탑재되는 경우도 있으나 대부분의 경우 2 개-수십개의 셀이 합쳐져 모듈화, 팩화 됩니다 (그림 39). 팩의 충전압은 소형기기용이라면 수 V 에서 수십 V 입니다. 최근에는 xEV 나 전동카트 등 전동차가 증가함에 따라 수십 V 에서 수백 V 의 고전압 팩의 실용화도 추진되고 있습니다. 팩의 충전압으로써는 24 V, 48 V, 72 V, 300 V 등이 보급되고 있습니다.

2019 년 현재, 일본에서 가장 보급된 시판 EV 에는 192 개의 라미네이트형 셀 배터리가 2 병렬 (차종에 따라서는 3 병렬) 96 직렬상태로 연결된 팩이 탑재되고 있습니다. 충전압은 350 V 정도입니다.



그림 39 라미네이트형 리튬이온배터리의 형태 예

복수의 단일 셀 배터리를 연결해 사용하는데 있어서 다음과 같은 전기검사가 필요합니다.

(1) 모듈화 공정에서의 셀 배터리 단자 (tab)끼리의 용접 · 연결의 품질관리 (저항측정)

a. 저전압 모듈에서 정확하게 측정하고 싶은 경우 (직류저항계 RM3545)

모듈화 공정에서는 금속 부스바의 체결과 용접 등으로 복수 셀 배터리 단자(tab)끼리를 연결합니다. 배터리에 대전류가 흐르면 미세한 저항값이라도 큰 에너지 손실로 이어지므로 배터리 성능을 극대화하려면 단자끼리의 연결품질이 대단히 중요합니다. 용접저항은 매우 작은 저항인 것이 좋습니다. 셀 배터리의 내부저항은 일반적으로 21700 원통형 리튬이온배터리에서는 20 mΩ 정도, 대형 라미네이트형 리튬이온배터리에서는 1 mΩ 이하입니다. 따라서 용접저항도 0.1 mΩ 이하의 초-저저항에서의 품질관리가 요구됩니다. 1 μΩ 이하의 분해능을 지니고 저저항 측정에 적합한 저항계를 선택할 필요가 있습니다 ¹¹.

용접부분 양 끝은 동전위이므로 제대로 측정된 경우에는 측정단자 간에 전압이 발생하지 않습니다. 이러한 상황에서 고정밀도로 용접저항을 측정하기 위해서는 직류저항계를 사용하는 것이 좋습니다. 특히 HIOKI 직류저항계 RM3545 는 영점 조정 없이 정확하게 0 Ω 을 측정하는 것이 특징으로 용접저항의 고정밀도 품질관리에 최적이라고 할 수 있습니다 ¹².

¹¹ 3.1 “단자/tab-lead 용접부의 저저항측정”도 참조해 주십시오..

¹² 저저항을 정확하게 측정하는 방법에 대해서는 참고문헌 ⁸⁾ 도 참조해 주십시오.

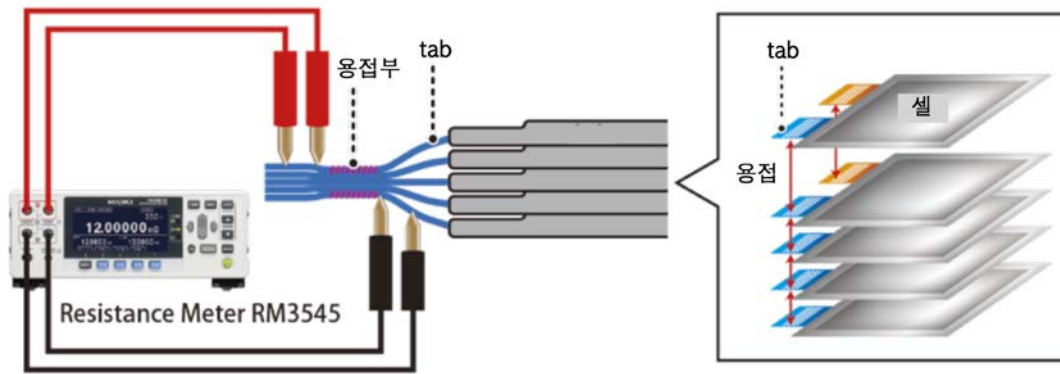


그림 40 복수 셀의 tab 용접부의 저항측정

b. 고전압 모듈에서 안전하게 측정하고 싶은 경우 (배터리 테스터 BT3562/BT3563/BT3564)

배터리 모듈의 용접저항측정에서는 검사대상이 전압을 지니고 있다는 것에 주의가 필요합니다. 예를 들어 20 셀이 직렬로 연결된 모듈의 경우, 모듈의 단자간 전압은 최대 74 V 정도 발생하게 됩니다. 부스바를 잘못 연결한 경우나 측정 프로브를 잘못 단자에 댄 경우에는 모듈의 전압이 계측기에 입력될 우려가 있습니다. 통상, 직류저항계는 이러한 전압입력을 상정하지 않으므로 과대한 전압입력으로 인해 계측기가 고장날 수 있습니다.

더욱 안전성을 중시하고 이러한 과대입력에 의한 고장을 방지하려면 높은 내압성과 고정밀도 저항측정성을 겸비한 BT3562 (60V) / BT3563 (300V) / BT3564 (1000V) 등의 배터리 테스터 (교류저항계)를 직류저항계 대신에 사용할 것을 권장합니다. 아주 작은 저저항을 측정하게 되므로 배터리 테스터를 사용할 경우에는 정확한 영점 조정을 실시하는 것이 좋습니다.

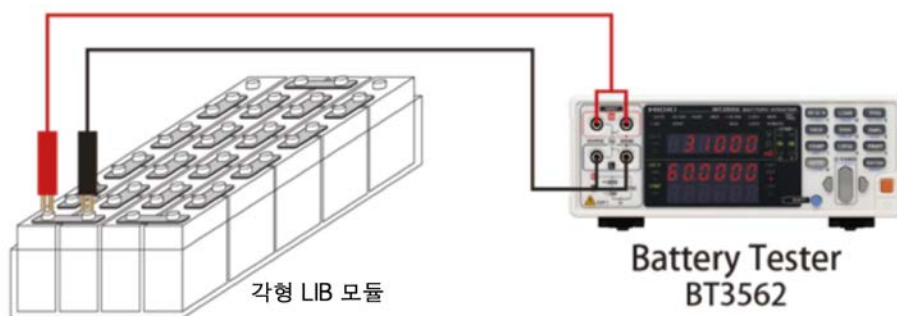


그림 41 안전하게 저항측정이 가능한 배터리 테스터 BT3562 시리즈

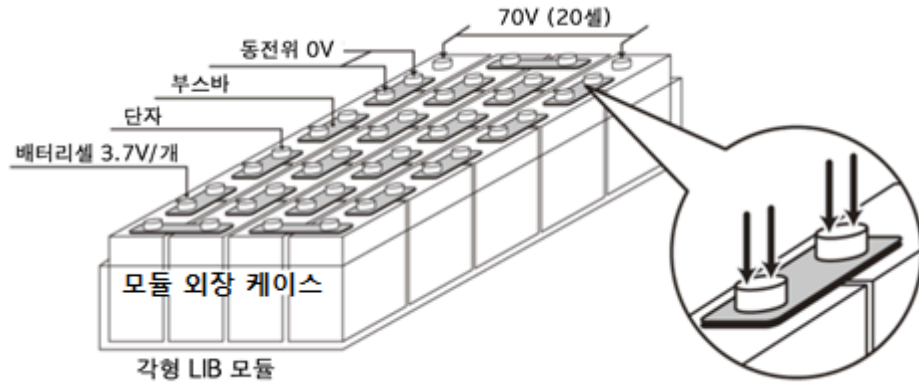


그림 42 각형 LIB 모듈의 부스바 연결부의 저항측정

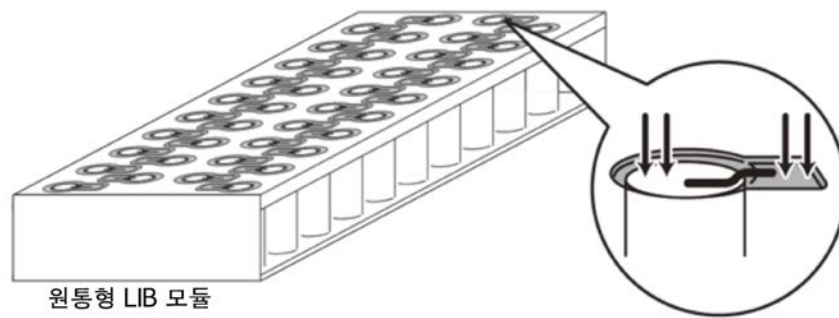


그림 43 원통형 LIB 모듈의 부스바 용접부의 저항측정

(2) 모듈, 팩의 총저항검사

완성된 배터리는 최종 평가로써 총저항측정과 OCV 측정을 실시해 배터리의 완성도를 평가합니다. 이 검사는 주로 배터리의 출하검사나 수입검사에서 실시됩니다. 총저항은 배터리의 내부저항도 포함하므로 교류법으로 검사해야 합니다. 셀 배터리의 전압은 4 V 정도이고, 모듈과 유닛 배터리의 전압은 48 V 나 350 V, 1000 V 등이 상정됩니다. 측정대상의 충전압, 대지간 전압을 상회하는 정격입력전압의 측정장치를 선택할 필요가 있습니다.

- 3561 : 20 V 이하
- BT3562 : 60 V 이하
- BT3563 : 300 V 이하
- BT3564 : 1000 V 이하

-2. BMS 기관검사

배터리 팩 안에는 각 셀을 감시, 제어하기 위한 BMS 기관이 탑재되어 있습니다¹³. 배터리의 성능을 최대한 이끌어내기 위해서는 BMS에 의한 최적의 배터리 제어가 꼭 필요합니다.

BMS에는 다음의 역할이 있습니다.

• 셀 전압 측정

셀 전압의 과전압과 저전압, 즉 배터리의 과충전과 과방전을 검출하기 위해서 셀 전압을 측정합니다. 이를 통해 배터리 팩을 안정적인 전압범위에서 사용할 수 있습니다.

• 셀 밸런스

셀 특성에는 반드시 개체차가 존재합니다. 때문에 배터리 충전시의 충전량, 사용시의 방전량과 누설전류에 따라 사용 중인 각 셀의 잔량에 편차가 나타날 수밖에 없습니다. 이러한 상태의 배터리 팩과 모듈에 대해 각 셀의 잔량이 동일해지도록 조절하는 기능이 셀 밸런스입니다. 이를 통해 셀이 과충전 혹은 과방전 등의 이상상태가 되는 것을 방지합니다.

셀 밸런스에는 “active 셀 밸런스”와 “passive 셀 밸런스”의 2가지 방법이 있습니다.

active 셀 밸런스는 트랜스를 사용해 잔량이 많은 셀에서 잔량이 적은 셀 혹은 대원(□□)의 충전회로로 에너지를 이동시켜(회생한다) 각 셀의 밸런스를 취하는 방법입니다. 한편, passive 셀 밸런스는 저항을 사용해 잔량이 많은 셀을 방전시켜 잔량이 적은 셀에 맞추는 방법입니다. 에너지 효율 측면에서는 active 셀 밸런스쪽이 우수하지만, active 셀 밸런스를 실시하려면 많은 부품이 필요하기 때문에 비용과 고장율(신뢰성) 측면에서는 passive 셀 밸런스를 이기지 못합니다. 현재는 passive 셀 밸런스가 주로 이용됩니다.

• 배터리의 온도측정

배터리의 이상발열을 검출하기 위해 표면온도를 측정합니다. 또한 배터리특성은 온도의존성이 있기 때문에 배터리 잔량 추정을 위해서도 필요한 경우가 있습니다.

• 배터리의 SOC (State of Charge), SOH (State of Health)의 추정

배터리를 더 안전하게 사용하기 위해서 배터리 잔량 및 열화 정도를 추정하는 기능이 있는 BMS가 있습니다. 추정방법은 다방면에 걸쳐 있으며 다양한 연구, 개발이 이루어지고 있습니다.

상기 이외에도 충전전류나 배터리 팩의 충전압을 측정해 이상검출을 하는 경우도 있습니다.

이처럼 BMS에는 복잡하고도 중요한 기능이 다수 탑재되어 있어 그 기능 검사 또한 매우 중요합니다. BMS 개발 시는 물론이고, 중요한 기능은 제조 시에도 검사가 실시됩니다.

BMS의 동작을 검사하려면 BMS를 배터리 혹은 배터리에 상당하는 어떤 디바이스에 연결할 필요가 있습니다. 배터리 실물을 사용해 검사하는 것은 물론 가능합니다 (그림 44). 그러나 배터리 특성은 배터리상태 (충전상태, 온도, 열화정도 등)에 따라 크게 다르기 때문에 동일조건에서 검사를 반복할 수가 없습니다. 정량적인 시험을 실시하기에는 적합하지 않다고 할 수 있습니다. 또한 여러 상태의 배터리로 기능의 동작을 확인할 필요가 있지만 임의의 특성을 지닌 배터리를 실제로 만드는 것은 일단

¹³ BMS는 Battery Management System의 약어입니다. BMU (Battery Management Unit)라 부르는 경우도 있습니다.

불가능합니다. 배터리 전압을 변화시키는 것만 해도 실제로 배터리를 충방전해야 하기 때문에 시간이 걸리고 비효율적입니다. 재현성이 요구되는 정량적 검사를 실시하고자 할 경우는 배터리 실물 사용은 피하는 편이 좋을 것입니다.

배터리 실물을 사용하지 않고 검사를 실시하는 것도 가능합니다. 먼저 전원장치를 BMS 에 연결하는 것을 생각할 수 있습니다. 배터리의 거동을 모의한 전압을 전원장치에서 BMS 에 입력해 BMS 가 제대로 배터리 거동을 포착하는지 검사하는 것이 가능합니다. 그러나 예를 들어 배터리 전압의 모니터 기능을 확인하려면 배터리의 셀 수만큼 전원장치를 나열해야 합니다. 전류, 온도와 같은 계측값도 모의하려면 더 많은 전원장치가 필요합니다. 그리고 이들 다수의 전원장치를 배터리 거동을 모의하도록 복잡하게 제어할 필요가 있어 실제로는 꽤 많은 시간과 비용이 발생합니다.

그 밖에도, 최근 고정밀도가 되어가는 BMS IC 의 검사를 하려면 높은 전압출력 정밀도가 요구되지만 시판되는 전원장치 중에서 그러한 정밀도를 실현할 수 있는 것은 많지 않습니다. 전압 정밀도의 경우는 전원장치와 병렬로 고정밀도 전압계나 멀티미터를 연결하면 불가능 한 것도 아니지만, 사용하는 기기의 수가 더 늘어나게 되어 제어는 더욱 복잡해집니다. 또한 비용이 배가 되는 것도 문제이므로 대규모 검사를 실시하기에는 실용적이지 않다고 할 수 있습니다.

따라서 위와 같은 문제를 해결할 수 있는 다채널 고정밀도 전압발생기가 실용화 되고 있습니다. BMS 검사에 특화된 것도 있어 그러한 장치는 1 대당 채널 수도 많고 제어가 더 쉽도록 되어 있습니다 (그림 45).

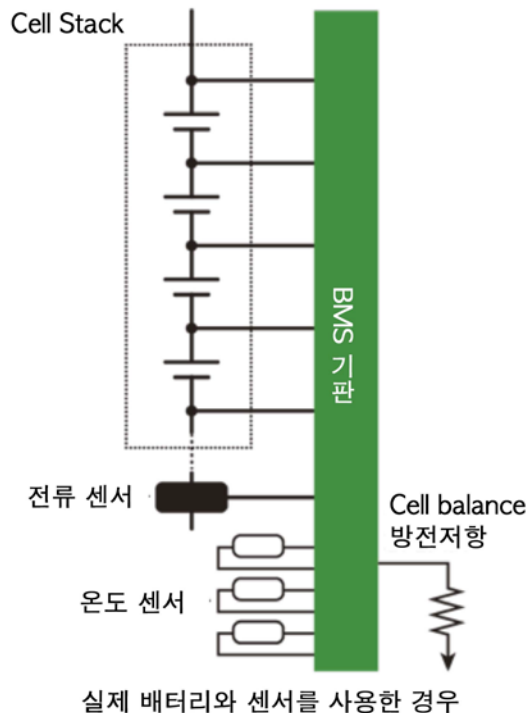


그림 44 실제 배터리와 센서를 사용한 평가장치

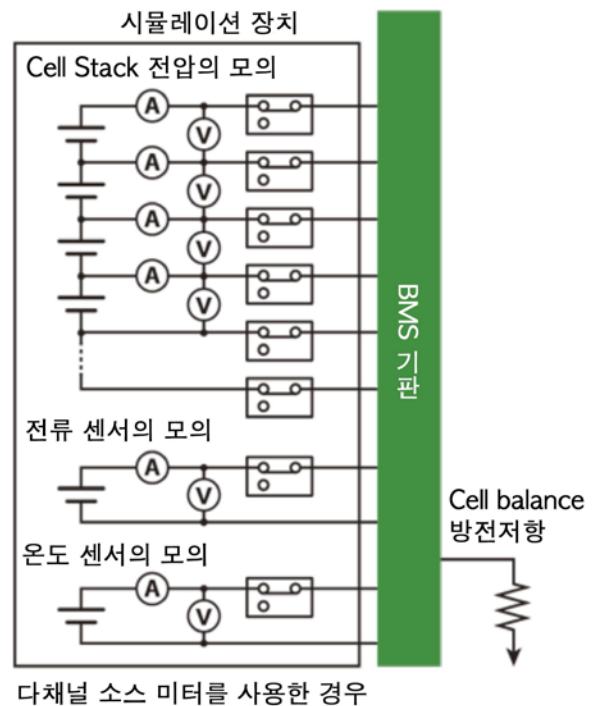


그림 45 시뮬레이션 장치의 구성 예

BMS 검사장치의 선정에 앞서, 다음 항목에 주의해야 합니다.

- 정확도 사양

전술한 바와 같이, 최근 BMS IC는 고정밀도화 되어가고 있습니다. 따라서 BMS 검사장치는 고정확도에 전압 발생, 측정 가능한 것이 좋습니다. 적어도 IC의 전압측정 정밀도보다 고정확도여야 합니다.

- 최대출력전류

BMS 검사장치에는 셀 밸런스 시에 BMS에 흐르는 전류값 이상의 출력성능을 지닌 것이 필요합니다.

active 셀 밸런스는 비교적 대전류(수 A)에 의한 밸런싱 방식이기 때문에 BMS 검사장치에는 대전류를 출력할 수 있는 것이 좋습니다. 또한 잔량이 적은 셀에는 잔량이 많은 셀에서 전류가 공급되기 때문에 쌍방향 전원(싱크 기능이 있는 것)이 요구됩니다.

한편 passive 셀 밸런스는 active 셀 밸런스와 비교해 작은 전류(수백 mA)에 의한 밸런싱 방식이기 때문에 active 셀 밸런스만큼 출력전류가 요구되지 않습니다. 또한 passive 셀 밸런스는 저항에 의한 방전만 해당되므로 소스 기능만으로 충분합니다.

- 대지간 전압 (최대 연결 가능 전압)

BMS의 기관구성으로써 배터리 팩 전체에 대해 1장의 BMS기판이 연결된 것과, 모듈마다 BMS기판이 연결된 것의 2 가지 패턴이 있습니다. 이 중에서 특히나 전자의 경우, 검사 시에 배터리 팩을 모의한 검사장치의 필요성이 높아집니다. 대규모 배터리 팩인 경우는 직렬 연결되는 셀의 수도 많기 때문에 복수의 BMS 검사장치를 직렬로 연결해 검사하게 됩니다. 여기서 BMS 검사장치는 무한정 직렬 연결이 가능한 것이 아님에 주의하십시오. 모의가 가능한 최대전압은 제품사양에 규정되어 있는 최대 연결 가능 전압 또는 대지간전압까지이며, 이것이 팩 전체 전압보다 낮아야만 합니다.

- 미소전류측정

BMS는 배터리를 더 효율적으로 사용하기 위해 셀 밸런스 회로의 스위치부의 누설전류와 대기전류(전원이 켜져 있을 때 비동작시의 전류값) 및 암전류(전원이 켜지지 않았을 때의 전류값)가 더 작아지도록 설계되어 있습니다. 동작시 전류뿐 아니라 이러한 미소전류에 대해서도 설계대로 거동을 하고 있는지 검사가 요구되는 경우가 있습니다. 하지만 셀 밸런스 때의 전류와 비교하면 대기전류나 암전류는 매우 작기 때문에 셀 밸런스 전류를 측정하는 전류 레인지에서는 정밀하게 측정할 수 없습니다. 최소 분해능에 묻혀버리게 되어 거의 측정되지 않는 경우도 있습니다. 동작전류용과는 별개로 미소전류를 측정하기 위한 레인지가 있는 검사장치가 적합합니다.

- 단선 모의

배터리-BMS 간의 접속 케이블의 단선 혹은 BMS 기판의 부품불량 등에 의해 배터리와 BMS IC 간의 전기적 연결이 끊긴 경우, BMS IC는 셀 전압 측정과 셀 밸런스가 되지 않습니다. 이 경우, 과충전과 과방전 등에 의해 배터리가 위험한 상태가 될 우려가 있습니다. 따라서 대부분의 BMS에는 이러한 단선상태를 신속하게 검출하는 기능이 실장되어 있습니다. 단선상태를 모의한 기능이 있는 검사장치를 사용함으로써 단선 검출 시험이 용이해집니다.

• 저항 발생

대부분의 경우, BMS 에서의 배터리 온도측정에는 thermistor 가 이용됩니다. 이 경우, thermistor 의 전기저항값을 측정해 그것을 온도로 환산하는 형태로 온도측정이 이루어집니다. 그러므로 온도측정회로의 검사를 실시하는 경우에는 저항발생기능이 있는 검사장치가 편리합니다.



그림 46 HIOKI 의 BMS 검사장치

-3. 전기자동차의 배터리 실부하 시험

전기자동차처럼 고속이면서 대전류 부하로 배터리를 사용하는 경우에는 실제로 배터리 팩을 장치에 탑재한 상태에서 특성을 측정하는 것도 중요합니다. 임피던스 측정과 충방전 용량측정과 같은 시험만으로는 고속 대전류에서 사용한 경우의 배터리 특성은 정확하게 파악되지 않습니다. 실제로 사용하는 부하에서 시험을 실시하는 것이 효과적입니다.

이러한 시험에서는 파워 아날라이저 (전력측정장치)를 사용하는 것이 효과적입니다. 예를 들어 그림 47 과 같이, 배터리 팩에 추가로 후단의 인버터나 모터에서의 전류·전압도 함께 측정하는 것이 일반적입니다. 이러한 구성으로 배터리의 실부하 특성 외에도, 인버터나 모터 등 후단의 component 에서 소비되는 에너지 및 에너지 변환효율도 함께 측정합니다.

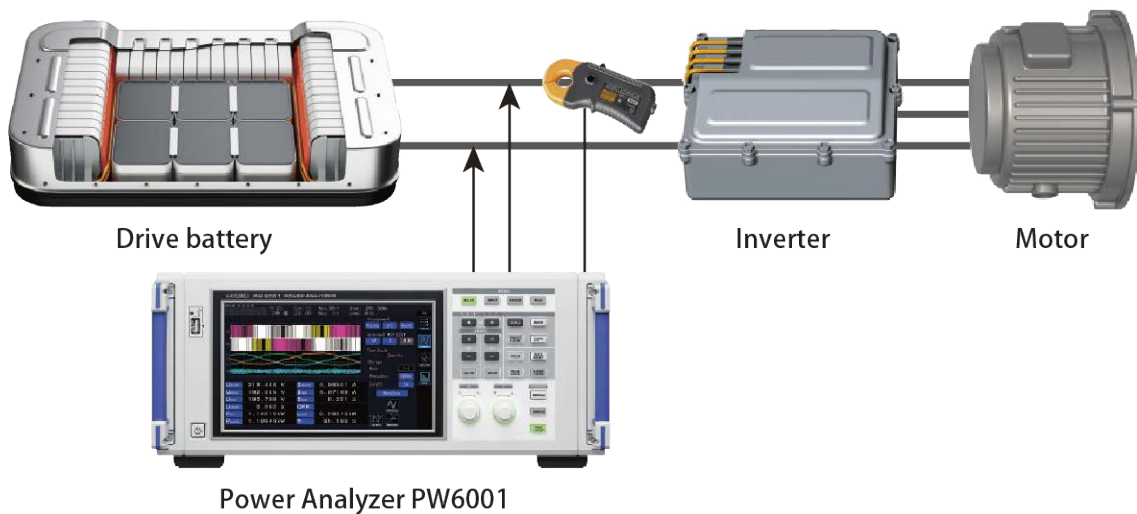


그림 47 EV 용 인버터 모터의 전력측정

배터리의 실부하 특성을 측정하기 위한 파워 아날라이저에 요구되는 성능에 대해 설명하겠습니다.

(1) 전류측정방식

전류측정에는 션트저항으로 측정하는 방식(직결식)과 전류 센서로 측정하는 방식(센서식)의 2 가지가 있습니다. 일반적으로 직결식은 저전류를 측정하는데 적합하고, 센서식은 고주파나 대전류를 측정하는데 적합합니다. 모터용 인버터의 입력측에는 대전류가 흐르고 전류에는 고주파 리플이 중첩되어 있어 전류 센서를 사용하는 것이 효과적입니다. .

전류 센서는 크게 2 종류로 나뉘는데, 각각 관통형과 클램프형이라고 부릅니다 (그림 48). 관통형은 주파수 대역, 측정 정밀도, 안정성의 모든 면에서 매우 뛰어납니다. 하지만 센서에 케이블을 통과시켜야 해서 준비작업이 번거롭습니다. 또한 실제 완성차에 전류 센서를 설치하는 것은 매우 어려워 완성차 시험에서는 관통형 전류 센서를 사용하는 것이 비현실적입니다. 테스트 벤치 계측 등, 배선이 어느정도 자유로운 상황에서 고정밀도 전력을 측정하는 경우는 관통형 전류 센서가 적합하다고 할 수 있습니다.

한편 클램프형은 주파수대역과 측정 정밀도는 관통형보다 떨어지지만, 센서 설치가 용이한 점이 장점입니다. 완성차에서 시험을 할 경우는 클램프형을 선택하는 것이 좋습니다. 또한 관통형만큼 고정밀도가 요구되지 않는 시험이라면 클램프형의 편리성이 시험의 효율 향상에 크게 기여할 것입니다.



그림 48 관통형 전류 센서 (좌)와 클램프형 전류 센서 (우)의 예

(2) 측정대역과 정확도

모터용 인버터의 입력측에는 대전류가 흐르고 전류에는 고주파 리플이 중첩되어 있습니다. 정확한 전력측정을 위해서는 파워 아날라이저와 전류 센서의 정격전류, 정격전압, 측정주파수 대역이 적절한 것이 중요합니다. 전류 센서의 정격전류는 전류의 피크값으로 규정되어 있는 것과, 실효값으로 규정되어 있는 것이 있습니다. 전류의 피크값으로 규정되어 있는 센서를 부하전류의 실효값을 기준으로 선택하면 정격 부족이 되고 마므로 선택 시에는 주의가 필요합니다.

인버터 입력의 전력해석에는 특히 측정주파수 대역에 주의해야 합니다. 인버터에서는 고주파 리플전류가 발생합니다. 이 리플전류는 배터리 팩의 발열의 원인이 되어 성능열화에 영향을 미치므로 평가할 필요가 있습니다. 리플 전류의 주파수대역은 인버터 스위칭 주파수의 고조파도 포함하므로 정확하게 평가하려면 인버터 스위칭 주파수의 5 배이상의 대역을 지닌 전류 센서를 사용하는 것이 바람직합니다.

리플 전류의 크기는 식(6)으로 나타내는 전류 리플률 I_{rf} 로 평가됩니다. 인버터의 성능을 나타내는 중요한 파라미터입니다.

$$I_{rf} = \frac{I_{pk+} - I_{pk-}}{2 \times |I_{dc}|} \times 100 [\%] \quad (6)$$

I_{pk+} : 전류 최대값 I_{pk-} : 전류 최소값 I_{dc} : 전류 단순 평균값

(3) 신연비기준 WLTP 가 요구하는 기능

지금껏 오랜세월동안 자동차 연비에 관한 시험 사이클·시험방법은 각국·지역마다 달라, 파워 트레인 개발에 있어서는 각각의 연비시험에 대응할 필요가 있었습니다. 최근 세계통일규격으로 승용자동차 등의 국제표준배출가스·연비시험방법 (WLTP : Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) 이 성립되어 시험방법의 통일화가 추진되고 있습니다. WLTP 의 시행시기에 대해서는 각국의 판단에 일임되어 있습니다. 수출 부흥을 위한 표준적인 시험법으로써 각국에서 채택의 검토가 이뤄지고 있습니다. 기업레벨에서는 이미 표준적인 시험방법으로 널리 활용되고 있습니다.

WLTP 에 따른 시험에서는 EV, xEV (HEV, PHEV), FCV 에 대해 정해진 패턴에 따라 주행했을 때에 배터리가 소비하는 전력량 [Wh]을 완성차 상태에서 측정할 필요가 있습니다. 연축 배터리, 연료 배터리, 주행용 리튬이온배터리 및 니켈수소배터리의 전부가 대상입니다. 사회적으로 자동차의 환경부하경감을

강하게 요구하는 배경이 있어 이 측정을 통해 CO₂ 배출량을 구하는 것이 목적입니다.

WLTP 에 따른 시험을 실시하는 경우는 WLTP 의 요구사항을 만족하는 전류 센서와 전력량계를 선정해야 함에 주의하십시오. 전력계측에 사용하는 파워 아날라이저와 전류 센서에 대해 WLTP 가 요구하는 성능을 표 3 에 정리했습니다. 대전류부터 미소전류까지ダイナ믹하게 변동하는 부하전류의 고정확도 측정이 필수적입니다. HIOKI 가 제공하는 고정확도 클램프형 전류 센서와 고정확도 전력계에 의해 구축되는 전력계측 시스템은 다음과 같은 특징점이 있어 WLTP 에 따른 전력측정에 적합합니다.

- 고정확도 클램프형 전류 센서 : 완성차 상태에서 측정하기 때문에 클램프형 전류 센서를 사용하는 것이 적절합니다. HIOKI 가 제공하는 고정확도 클램프 전류 센서는 WLTP 의 요구 측정 정확도를 충분히 커버합니다.
- 뛰어난 측정 정확도를 지닌 전력계 : 전류와 전력의 적산값을 정확하게 구하기 위해 DC 에서 고정확도인 것과, 데이터 갱신이 빠른 것이 중요합니다. HIOKI 의 고정확도 전력계는 DC 의 측정 정확도를 중요시하고 있어 뛰어난 DC 특성을 지니고 있습니다. 또한 데이터 갱신율은 최속 10 ms 이면서 그 상태에서도 최고 정확도를 유지할 수 있다는 점이 장점입니다.
- 위상보정기능 : 전류 센서의 고주파 위상특성을 전력계측에서 연산적으로 보정할 수 있습니다. 이는 HIOKI 가 전류 센서와 전력계 둘 다 개발하는 제조사이기 때문에 가능한 일이며, 리플 전류의 주파수대역을 포함한 고주파에서의 전력측정성능을 대폭 향상시켰습니다.

표 3 WLTP 의 요구사항⁷⁾

측정항목	측정 정확도	측정 분해능
전력[Wh]	±1 %	0.001 kWh
전류[A]	±0.3 % of full scale or ±1 % of reading	0.1 A
전압[V]	±0.3 % of full scale or ±1 % of reading	0.1 V

끝맺음

본 서에서는 주로 리튬이온배터리의 생산공정에서의 성능평가에 필요한 측정장치 선정시의 주의점에 대해 알아보았습니다. 대형 리튬이온배터리가 실용화되고 그 용도는 매년 확대되고 있습니다. 높은 안전성과 고출력, 수명의 장기화 등 향후 더욱 고성능 배터리가 요구되고 있습니다. 고성능 배터리의 안정적 공급을 위해 생산공정의 품질관리는 매우 중요합니다.

참고문헌

- 1) E. Ligneel, B. Lestriez, O. Richard, D. Guyomard, J. Phys. Chem. Solids, 67, 1275 (2006)
- 2) T. J. Patey, A. Hintennach, F. La Mantia, P. Novák, J. Power Sources, 189, 590 (2009)
- 3) C.-C. Li, Y.-S. Lin, J. Power Sources, 220, 413 (2012)
- 4) 히오키전기주식회사, 절연저항측정의 입문서 (2018)
- 5) JIS C 8711:2013 포터블 기기용 리튬이차배터리
IEC 61960-3:2017 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Secondary lithium cells and batteries for portable applications – Part 3: Prismatic and cylindrical lithium secondary cells and batteries made from them
- 6) 小山 昇(監修), リチウムイオン二次電池の性能評価、日刊工業新聞社 (2019)
- 7) ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2016/3, Proposal for amendments to global technical regulation No. 15 on Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)
- 8) 히오키전기주식회사, 저항측정의 입문서 Vol.1 (2017)

HIOKI 소개

HIOKI 에 대해서

히오키전기주식회사(HIOKI)는 1935 년에 설립된 전기계측기 제조사입니다. 기록장치 · 전자측정기 · 현장측정기 · 자동시험장치의 4 분야를 축으로, 독자적인 기술을 탑재한 제품을 선보여 왔습니다. 나가노현 우에다시에 본사를 두고 연구개발 · 생산 · 보수 서비스를 집약해 고품질 계측기와 고객중심 서비스를 제공하고 있습니다.

제품보증 · 수리에 대해서

고객의 구입일을 기점으로 제품보증기간 중에 HIOKI 책임에 의한 제품 결함 및 고장이 발생한 경우, 무상 수리 또는 신품 교체해드립니다.

교정 · 조정에 대해서

계측기를 안심하고 사용하기 위해 1 년에 1 번정도 정기적인 교정을 권장합니다. 계측기의 교정(일반교정)을 의뢰하시면 ISO9001 에 준거해 HIOKI 의 전문가가 교정을 하고 결과를 보고드립니다. 이때 표준기가 표시하는 이상적인 값과 계측기가 표시하는 값에 오차가 있으면 계측기의 어긋남을 수정하는 “조정”을 실시할 수도 있습니다. HIOKI 에서는 교정과 함께 조정을 하실 것을 권장드립니다.

JCSS 교정 (ISO/IEC17025 인정 교정) 에 대해서

일반교정 외에 ISO/IEC17025 에 준거한 JCSS 교정 서비스를 제공하는 계측기도 있습니다. JCSS 교정을 실시할 때 발행되는 교정증명서는 국제 MRA 에 대응하므로 국내외적으로 유효합니다.

히오키코리아 주식회사 영업점 안내

홈페이지 : www.hiokikorea.com 대표메일 : info-kr@hioki.co.jp

서울 본사 : 서울시 강남구 테헤란로 322 한신인터밸리 24 동관 1705 호 Tel : (02) 2183-8847 Fax : (02) 2183-3360

대전 사무소: 대전광역시 유성구 테크노 2 로 187, 314 호 Tel : (042) 936-1281 Fax : (042) 936-1284

부산 사무소: 부산시 동구 중앙대로 240 현대해상 부산사옥 5 층 Tel : (051) 464-8847 Fax : (051) 462-3360

수리 센터 : 대전광역시 유성구 테크노 2 로 187, 314 호 Tel : (042) 936-1283

A_UG_BT0001K01