

저항측정 입문서

Resistance Measurement Handbook

제 01 판

머리말

본서에서는 전기의 기본식인

$$V = IR$$

의 안에서 R : 저항에 착목해 측정대상의 성질로부터 측정의 주의점에 대해 설명합니다.

“저항”이라 하더라도 측정대상은 안정적인 저항기부터 불안정한 절연저항까지 다양해 각각의 특성에 맞춰 주의가 필요합니다. 또한 저항값이 $k\Omega$ 을 밑도는 경우와 $M\Omega$ 을 상회하는 경우 사이에는 측정방법과 포인트가 크게 다릅니다.

적절한 측정방법을 이해하는데 본서가 유용하기를 바랍니다.

《목차》

머리말	2
1. 저항이란	3
-1. 저항이란	3
-2. 여러가지 저항들	4
2. 저항의 측정방법	6
-1. 결선에 따른 분류	6
-2. 측정주파수에 따른 분류	7
3. 저항측정의 오차요인	8
-1. 배선저항의 영향	8
-2. 기전력의 영향	9
-3. 열잡음의 영향	11
-4. 누설전류의 영향	12
-5. 유도체흡수의 영향	12
-6. 마찰잡음의 영향	13
-7. 섬세한 측정대상	14
-8. 외래잡음의 영향	15
-9. 온도 · 습도 · 바람의 영향	17
-10. 프로빙 방법	18

1. 저항이란

-1. 저항이란

여기서 말하는 “저항”이란, “전기저항”을 말합니다. 저항은 전류가 흐르기 어려운 정도를 나타내는 것으로, 단위는 [Ω :옴]입니다. 저항의 역수 [$1/\Omega$]를 컨덕턴스(conductance)라 하고 단위는 [S: 지멘스] 입니다. 컨덕턴스는 전기화학 등 일부 분야를 제외하고 사용되는 경우가 적습니다.

단자 간에 전위차 V 가 생기면 전하 (전자 혹은 정공)는 다른 극성의 전극을 향해 이동합니다. 이 이동을 방해하는 것이 저항입니다. 옴의 법칙에 의해 전류 I 는 아래 식으로 나타냅니다.

$$I = \frac{V}{R}$$

이는 전위차 V 가 클수록, 또 저항 R 이 작을수록, 전류 I 가 많이 흐른다는 것을 의미합니다.

저항값 R 은

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \text{여기서 } \rho: \text{저항률}, l: \text{길이}, S: \text{단면적}$$

의 식으로 나타내며, 길거나 얇은 것일수록 저항이 커지게 됩니다. 이처럼 물리적 크기에 따라 저항값이 다르지만, 그 저항값은 대략 그림 3의 범위에 있다고 봐도 좋습니다.

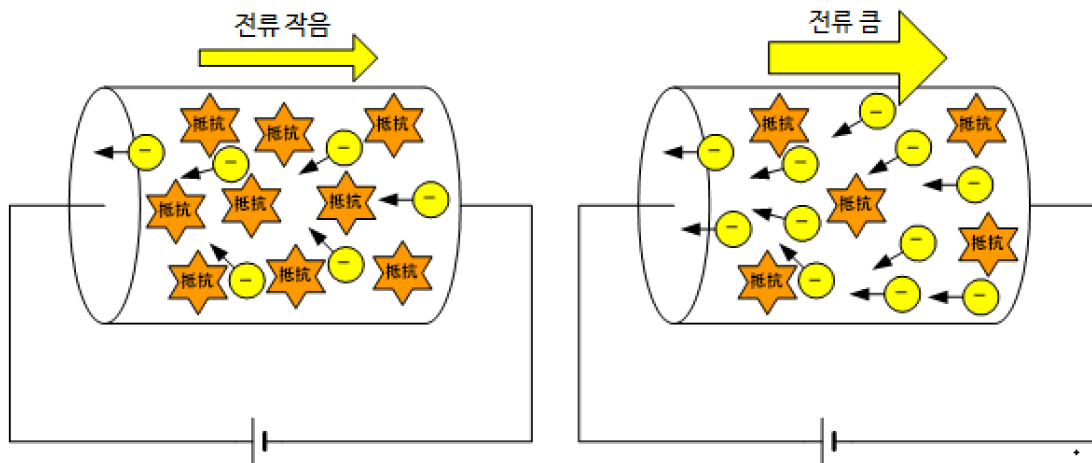


그림 1 저항이 큼

그림 2 저항이 작음



그림 3 여러 측정대상과 저항값

-2. 여러가지 저항들

➤ 저항기

우리 주변의 전기제품에 사용되는 저항기는 $1\Omega \sim 10M\Omega$ 이 일반적입니다. 특수한 용도로는 배터리나 모터의 전류검출 등에 사용되는 셉트 저항기가 $0.1m\Omega \sim 1\Omega$ 정도입니다. 고전압을 취급하는 회로에서는 V^2/R 에 따른 발열을 피하고자 $1G\Omega$ 전후의 저항기도 사용되고 있습니다.

➤ 전선

전선은 길어질수록 저항값이 커지기 때문에 도체저항에는 $[\Omega/m]$ 이라는 단위가 사용됩니다. 장치 내 배선에서 사용되는 AWG24 (0.2sq) 에서 약 $90m\Omega/m$ 으로 큰 한편, 전력 케이블의 경우는 AGW6 (14sq) 에서 $1.3m\Omega/m$, 150sq 에서 $0.13m\Omega/m$ 로 저항값이 대폭 작아집니다.

전선피복은 전류가 흐르기 어려운 재질이어야 합니다. 전선이 길어질수록 누설전류의 경로가 늘어나기 때문에 전선피복의 절연저항에는 $[\Omega \cdot m]$ 이라는 단위가 사용됩니다. 절연재료로는 염화비닐 (PVC), 폴리에틸렌 (PE), 테플론 (TE) 등이 사용됩니다. 절연저항은 일반적으로 염화비닐에서 $10G\Omega/m$ 이상, 폴리에틸렌에서 $100G\Omega/m$ 이상, 테플론에서 $1000G\Omega/m$ 이상입니다.

➤ 스위치, 릴레이의 접점저항

수십 암페어의 전류가 흐르는 선로에서는 $1m\Omega$ 저항이 존재하는 것만으로도 와트 단위의 전력을 소비하게 됩니다. 따라서 차단기 등의 대전류 선로의 스위치 접점은 $1m\Omega$ 을 훨씬 밑도는 저항값입니다. 파워 릴레이나 차단기 등은 대전류 선로에서 사용하는 것을 전제로 합니다. 따라서 통전전류가 마이크로 암페어대까지 작아지면 접점이 서서히 부식해 전혀 도통하지 않게 되는 경우가 있어 주의가 필요합니다.

일반 전자회로용 스위치는 통전전류가 1A 이하이기 때문에 접점저항은 수십 $m\Omega$ 입니다. 통전전류가 마이크로 암페어대라도 안정적인 접촉을 얻을 수 있도록 접점에 금도금이 되어 있는 것이 일반적입니다.

도전성 고무를 이용한 스위치는 누르는 힘에 따라 저항값이 크게 변화합니다. 접촉저항은 $1k\Omega$ 전후로 꽤 높지만, 접점의 내구성이 매우 높다는 것이 특징입니다.

개방상태의 접점에서는 저항값이 $10M\Omega$ 이상이 됩니다. 초기의 절연저항은 케이스의 절연재질에 크게 좌우되고, 어느 정도 사용한 상태에서는 접점의 부스러기나 주변 먼지에 의해 열화되어 저항값이 내려갑니다.

➤ 커넥터의 저항

스위치, 릴레이의 접점저항과 마찬가지로, 대전류 선로와 신호용에서는 요구사항이 다릅니다.

대전류 접점의 커넥터에서는 접촉저항을 낮추는 것에 무게를 두어 설계합니다. 신호용 접점에는 금도금이 사용되고 미세한 부하에서의 안정성이 중시됩니다.

커넥터의 하우징에는 폴리아미드 (PA, 나일론) 및 폴리브티렌 테레프타레이트 (PBT) 등이 사용됩니다. 폴리아미드는 절연성이 낮기 때문에 고저항 측정에서는 주의해야 합니다.

➤ 전지 (배터리), 전기이중층 커패시터 (EDLC)의 내부저항 (IR)

배터리나 전기이중층 커패시터의 내부저항 (IR: Internal Resistance) 은 대전류를 내보내기 쉬운 정도와 상관이 있습니다. 10A 급 대전류를 흘려보내는 배터리의 내부저항은 $1m\Omega$ 전후로 매우 작은 한편, 코인형 리튬이온 배터리는 내부저항이 100Ω 을 넘는 경우도 흔합니다.

배터리의 내부저항에는 주파수특성이 있고, 또 전압과 전류의 위상이 다르기 때문에 그림 4 와 같은

Cole-Cole plot 이라 부르는 도법에 의해 평가됩니다. 제조공정의 출하검사에서는 간이적으로 1kHz에서의 실효저항 (실축 성분)으로 관리합니다.

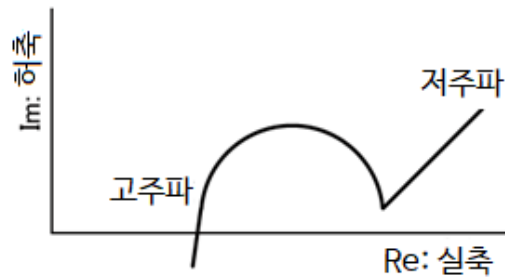


그림 4 배터리의 임피던스

➤ 콘덴서 (캐패시터)

콘덴서는 전극 간에 전하를 축적하는 소자이므로 전극 간의 저항값이 높을수록 좋은 콘덴서라고 할 수 있습니다. 따라서 콘덴서의 경우, 전극 간 저항값을 “절연저항”이라 부르고 관리합니다. 세라믹 콘덴서의 절연저항은 10GΩ 이상, 전해 콘덴서는 100kΩ 이상이 일반적입니다. 한편, 콘덴서에서 순간적으로 전류를 내보내는 능력을 “등가직렬저항”이라 합니다. 세라믹 콘덴서의 등가직렬저항은 10mΩ 이하, 전해 콘덴서는 10mΩ~1Ω 이 일반적입니다.

2. 저항의 측정방법

저항측정방식에 대해 전압계 · 전류계 등의 결선방식에 따른 분류와, 측정하는 주파수에 따른 분류에 대해 설명합니다.

-1. 결선에 따른 분류

측정방식에는 크게 브리지법과 전압강하법이 있습니다.

➤ 브리지법

전자회로기술이 발달하지 않았던 1980 년도 이전에는 브리지법이 주류였습니다 (그림 5). 왜냐하면 브리지법은 복잡한 전자회로를 필요로 하지 않고 고감도 검류계와 고정밀도 기준저항으로 간단히 구현할 수 있기 때문입니다. 브리지법으로는 저저항에 특화된 켈빈 더블 브리지법 (그림 6) 과 인덕터나 콘덴서 (캐패시터)에 대응한 교류 임피던스법 등 여러 방식들이 고안되었습니다. 이제는 각각 저저항계, LCR 미터로 대신하게 되었습니다.

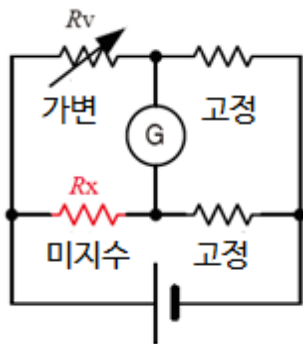


그림 5 휘트스톤 브리지

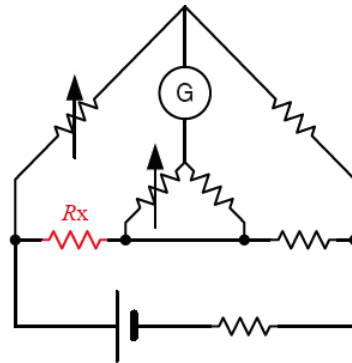


그림 6 켈빈 더블 브리지

➤ 전압강하법

전압전류계법이라고도 하며, 전자회로의 발전과 함께 주류가 된 방식입니다. 고정밀도 전류계로 전류 I 를 측정하고, 전압계로 전압 V 를 측정해 옴의 법칙에 따라 $R=V/I$ 식으로 저항을 구합니다.

그림 7 은 저저항을 측정할 경우의 결선입니다. 저저항측정에서는 전류계에 의한 전압강하의 오차가 문제가 됩니다. 전류계의 전압강하를 검출하지 않도록, 측정대상 R_x 양끝에서 전압을 검출합니다.

그림 8 은 고저항을 측정할 경우의 결선입니다. 고저항측정에서는 전압계쪽으로 흐르는 누설전류가 문제가 됩니다. 전압계의 누설전류가 영향을 주지 않도록, 측정대상 R_x 와 직렬로 전류계를 배치하고 전압계에서는 R_x 와 전류계를 포함한 전압강하를 측정합니다.

전압강하법에 사용되는 전류계 · 전압계로는 고정밀도 디지털 멀티미터 (DMM) 가 사용되는데, 저항측정 전용기 (이하, 저항계)는 이들을 일체화 시킨 구성으로 되어 있습니다. $1k\Omega$ 을 밑도는 저항 측정기는 접촉저항의 변동 등에 의해 검출전압이 변동하는 것을 피하기 위해, 정전류원과 전압계로 구성됩니다. 한편, $1M\Omega$ 이상의 고저항에서는 정전류로 측정하면 부유용량의 충전에 너무 시간이 걸리기 때문에 정전압원과 전류계로 구성하는 편이 바람직합니다. 범용 LCR 미터에서는 폭넓은 측정대상에 대응할 수 있도록 출력저항이 수십 Ω 인 전원과, 전류계, 전압계의 조합으로 구성되어 있습니다.

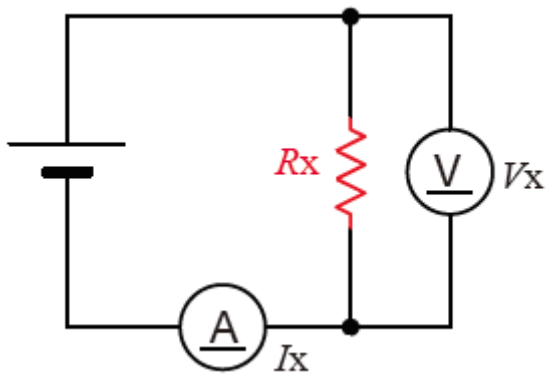


그림 7 전압강하법 (저저항)

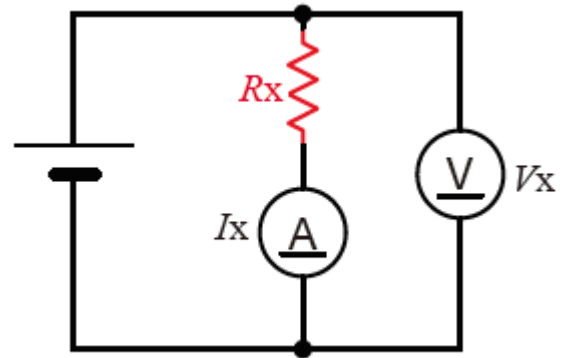


그림 8 전압강하법 (고저항)

참고문헌 “전기공학 핸드북” 일본전기학회

-2. 측정주파수에 따른 분류

측정방식에는 전원 · 전류계 · 전압계가 직류신호를 취급하는 직류방식 (그림 9)과 교류신호를 취급하는 교류방식 (그림 10)이 있습니다. 직류방식을 채택하는 계측기로는 디지털 멀티미터 (DMM), 직류 저저항계, 절연저항계 등이 있고, 교류방식을 채택하는 측정기는 LCR 미터나 교류 저저항계 등이 있습니다.

일반적으로 직류방식은 고정밀도 측정이 가능합니다. 측정회로를 구성하는 기준전압원과 기준저항기 · 앰프는 직류영역일수록 안정적으로 취급할 수 있는데다가, 측정기의 교정에 사용하는 표준기도 직류에서의 정밀도가 높게 되어 있습니다. 또한 절연저항측정을 교류로 실시하려 하면 전류의 대부분은 부유용량을 흘려버리기 때문에 정밀도가 현저히 떨어지게 됩니다.

교류방식은 “직류로 측정할 수 없는 경우”에 이용됩니다. 예를 들어, 콘덴서는 직류가 통하지 않기 때문에 정전용량 (콘덴서의 임피던스)을 직류로 측정할 수 없습니다. 또한 배터리의 내부저항측정 등 직류의 기전력이 있는 상황에서도 교류방식이 이용됩니다.

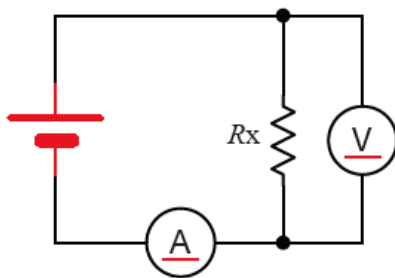


그림 9 직류방식

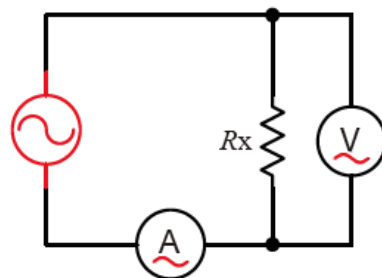


그림 10 교류방식

3. 저항측정의 오차요인

저항을 안정적으로 측정하기 위한 몇 가지 비법이 있습니다. 여기서는 안정적인 측정을 방해하는 다음과 같은 요인에 대해 설명합니다.

배선저항의 영향
 기전력의 영향
 열잡음의 영향
 누설전류의 영향
 유전체흡수의 영향
 마찰잡음의 영향
 섬세한 측정대상
 외래잡음의 영향
 온도 · 습도 · 바람의 영향
 프로빙 방법

1. 배선저항의 영향

측정을 하려면 반드시 측정기에서 측정대상까지 배선을 해야 합니다. 표 1 에 배선저항의 예를 나타냈습니다. 계측기 제조사의 정품 측정리드는 AWG20~AWG24 의 선재를 사용하므로 왕복으로 수백 m Ω의 저항값에 이르기기도 합니다. 배선재료로는 구리선이 사용되는 경우가 많은데, 구리선에는 0.4%/℃의 온도의존성이 있습니다. 따라서 배선저항의 영향을 10m Ω 이하로 관리하는 것은 불가능하다고 할 수 있습니다.

측정 프로브와 측정대상이 접촉하는 부분에는 접촉저항이 발생합니다. 금도금된 신품 프로브를 강하게 갖다 댄다면 접촉저항을 1mΩ 이하로도 억제할 수 있습니다. 하지만 사용하면 할수록 표면이 납땀이나 기름, 녹, 먼지 등으로 오염되기 때문에 프로브의 수명이 다할 무렵에는 1 Ω을 웃도는 경우도 흔히 있습니다. 또한 측정대상이 도전성 고무와 같은 경우, 접촉저항은 1kΩ 이상에도 달합니다.

그림 11 에 나타낸 2 선식 저항측정에서는 측정대상의 저항값 R_X 에 배선저항 (혹은 접촉저항) R_{C1} 과 R_{C4} 이 가산됩니다. 위에서 서술한 이유로 인해, 2 선식으로 1 Ω을 밑도는 저항을 안정적으로 측정하기란 어렵습니다.

측정값 = $R_{C1} + R_X + R_{C4}$. . . 2 선식의 경우

배선저항의 영향을 크게 줄이기 위해서 그림 12 의 4 선식 저항측정이 있습니다. 일반적으로 전압계의 입력저항은 매우 커, R_{C2} 과 R_{C3} 에 측정전류가 유입되는 일은 없습니다. 측정전류 I 는 R_{C1} 에서 흘러나와 R_X 에서 R_{C4} 로 흐릅니다. 전압계에서는 측정대상 R_X 양끝의 전압강하를 검출하기 때문에 $R_{C1} \sim R_{C4}$ 의 영향을 받지 않고 측정할 수 있습니다. 고정밀도 저항계의 경우, 전압계의 입력저항은 100GΩ 이상이 확보됩니다.

측정값 = R_X . . . 4 선식의 경우

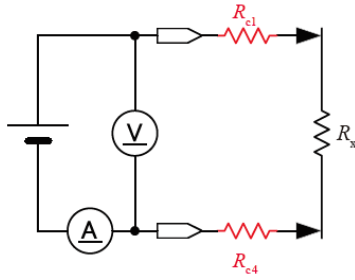


그림 11 2 선식 저항측정

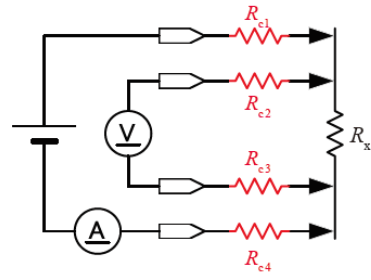


그림 12 4 선식 저항측정

표 1 선재의 저항값 예

AWG	sq	저항
AWG28	0.08sq	220mΩ/m
AWG26	0.12sq	140mΩ/m
AWG24	0.2sq	90mΩ/m
AWG22	0.3sq	58mΩ/m
AWG20	0.5sq	38mΩ/m
AWG18	0.75sq	23mΩ/m
AWG16	1.25sq	15mΩ/m

-2. 기전력의 영향

【오차의 발생】

저항측정에서는 측정대상 R_x 에 측정전류 I_x 를 흘려보내 측정대상의 전압강하 $R_x I_x$ 를 검출합니다. 이 전압을 검출하는 경로에 “기전력”이 발생하면 측정값에는 오차가 가산되게 됩니다 (그림 13). 기전력의 예로써 다음을 들 수 있습니다.

- 열기전력
- 배터리의 기전력
- 전압계의 오프셋 전압

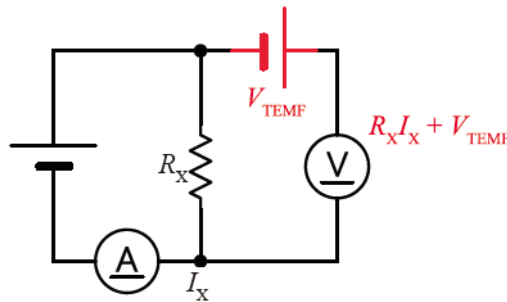


그림 13 직류의 검출전압에 기전력이 가산됨

열기전력이란 종류가 다른 금속의 연결부분에 생기는 전위차를 말합니다 (그림 14). 구체적으로는 프로브와 측정대상이 접촉하는 부분, 측정기와 측정리드의 연결부분에 발생합니다. 열기전력의 크기는 측정환경의 온도에 따라서 달라지고, 온도차가 클수록 열기전력이 커집니다. 일반적으로 측정 프로브의 재질과 측정대상의 재질이 다르고, 계측기의 온도와 측정대상의 온도도 다릅니다. 측정대상을 손에 들면 측정대상이 열을 받고, 프로브가 손의 열기로 온도가 상승하는 경우도 있습니다. 이러한 영향에 주의를

기울어도 열기전력을 $1\mu\text{V}$ 이하로 제어하기란 매우 어렵습니다. 또한 복수의 측정대상을 전환하기 위해 싱글 · 스테이블 · 릴레이를 사용할 경우, 릴레이의 코일에 의해 릴레이 접점이 열을 받아 접점에는 $10\mu\text{V}$ 전후의 열기전력이 발생합니다. 예로써, 열기전력이 $10\mu\text{V}$ 있는 상황에서 참 저항값이 1Ω 인 측정대상을 측정전류 1mA 로 측정한 경우, 측정기는 아래와 같이 표시합니다.

$$\frac{1\Omega \times 1\text{mA} + 10\mu\text{V}}{1\text{mA}} = 1.01\Omega$$

참 측정값에 대해 1%나 되는 오차를 포함하게 됩니다.

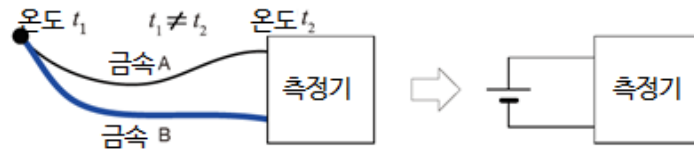


그림 14 열기전력의 발생

전압계의 오프셋 전압은 $1\mu\text{V} \sim 10\text{mV}$ 로 다양합니다. 계측기의 오프셋 전압은 계측기의 정기적인 영점조정으로 취소할 수 있습니다.

배터리의 전류공급능력의 지표로써 내부저항 (IR: Internal Resistance)이 있습니다. 배터리의 내부저항을 측정할 경우의 기전력은 열기전력의 비율이 아닙니다 (그림 15). 건배터리의 공칭전압은 1.5V , EV용 배터리 모듈은 수백 V나 되는 기전력을 보유합니다.

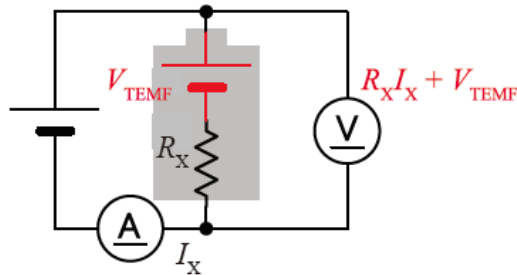


그림 15 배터리의 기전력의 영향

【기전력 경감방법】

기전력의 영향을 줄이는 방법으로써 다음이 있습니다.

- 큰 측정전류로 검출전압을 높인다
- 검출신호를 교류로 한다

앞서 열기전력의 예에서 측정전류를 1mA 에서 100mA 로 한다면, 오차는 0.01%로 줄일 수 있습니다.

$$\frac{1\Omega \times 100\text{mA} + 10\mu\text{V}}{100\text{mA}} = 1.0001\Omega$$

단, 측정대상에는 R^2 의 전력이 가해지기 때문에 주의가 필요합니다.

그림 16 처럼, 검출신호를 교류로 하는 것은 근본적인 해결방법입니다. 열기전력 · 배터리의 기전력 둘 다, 초 단위의 짧은 시간에서는 안정된 직류로 여겨져, 검출신호를 교류로 하면 주파수영역에서의 분리가 가능해집니다. OVC 기능 (OVC: Offset Voltage Compensation) 이 탑재된 측정기에서는 측정전류를 펄스파형으로써 열기전력을 배제합니다. 펄스파형에는 측정전류를 ON/OFF 하는 방식과, 측정전류의 극성을 반전시키는 방식의 2 종류가 있습니다.

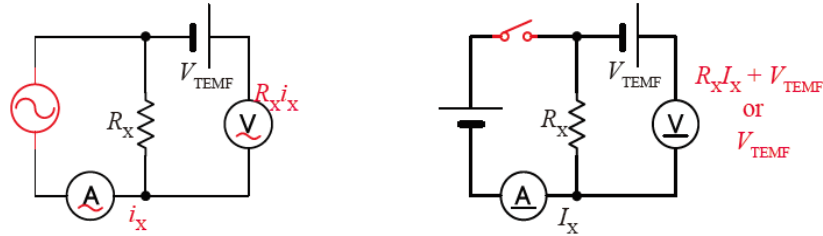


그림 16 검출신호를 교류로 하는 방식

3. 열잡음의 영향

열잡음이란 저항값을 지닌 물체가 본질적으로 가지고 있는 잡음입니다. 열잡음 v_{TN} 의 크기는 다음의 식으로 나타냅니다.

$$v_{TN} = \sqrt{4kTBR}$$

k : 볼츠만 정수 1.38×10^{-12} , T : 절대온도 [K]

B : 대역폭 [Hz], R : 저항값 [Ω]

저항측정시에는 그림 17 처럼 검출전압 $R_x I_x$ 에 열잡음 v_{TN} 가 가산됩니다.

열잡음의 크기는 계측시간을 1 초로 했을 경우, 다음과 같습니다.

100 Ω : 약 10nV_{PP}

1M Ω : 약 1 μ V_{PP}

10G Ω : 0.1mV_{PP}

정의식을 통해 알 수 있듯이, 대처방법으로는 다음의 2 가지를 생각할 수 있습니다.

- 고전압(대전류)로 측정해 검출전압을 열잡음보다 충분히 크게 한다
- 계측에 시간을 들여, 대역폭 B 를 작게 한다

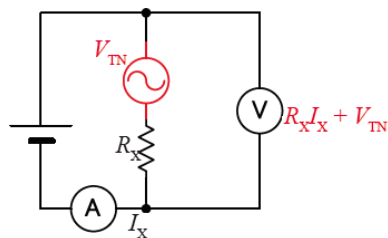


그림 17 열잡음의 영향

4. 누설전류의 영향

전압계의 입력저항과 측정 케이블의 절연저항이 작으면 측정대상 이외에도 전류가 흘러 오차가 됩니다 (그림 18).

【전압계의 입력저항】

일반적인 전압계의 입력저항은 $10\text{M}\Omega$, 커도 $10\text{G}\Omega$ 정도입니다.

전압계의 입력저항이 문제가 되는 고저항 측정에서는 그림 8 처럼 전압계의 누설전류가 영향을 주지 않는 위치에 전류계를 삽입하거나, 정전압을 인가해 전류를 측정하는 것이 유효합니다.

【케이블의 절연저항】

케이블의 절연저항은 재질과 흡습의 정도에 따라 크게 다릅니다.

일반적으로 사용되는 케이블 피복의 절연저항은 다음과 같습니다.

불소수지 (PTFE) > 폴리에틸렌 (PE) > 염화비닐 (PVC) > 나일론(PA)

$1\text{G}\Omega$ 을 초과하는 고저항 측정에, 염화비닐이 피복된 케이블을 사용하면 케이블이 접촉하는 것만으로 큰 오차가 됩니다. 또한 케이블끼리 직접 접촉하지 않더라도 절연성이 낮은 케이블을 도전매트나 금속 프레임에 놓거나 손으로 만지기만 해도 마찬가지로 오차가 발생합니다.

케이블의 절연저항에 대해서는 고절연 케이블을 사용하는 것을 물론, 전류검출라인을 가드(실드)하는 것이 중요합니다 (그림 19). 절연저항 R_C 로부터의 누설전류를 가드선에 우회시킴으로써 전류계로 유입되는 것을 억제합니다. 가드 이용은 노이즈 대책에도 매우 효과적입니다.

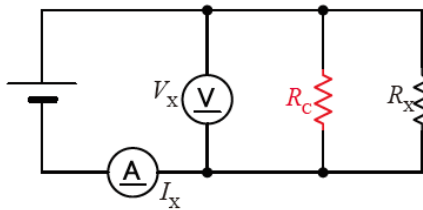


그림 18 누설의 영향

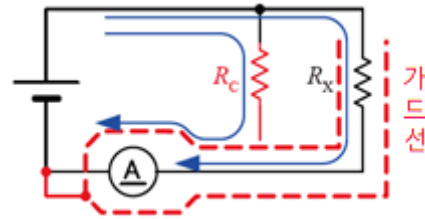


그림 19 누설전류에 대한 대처

5. 유도체흡수의 영향

고저항을 측정하는 경우에 수십 초에서 수 분 동안이나 측정값이 계속 상승하는 경우가 있습니다. 예를 들어, 케이블의 피복이 염화비닐이거나, 측정대상이 고유전율계 콘덴서인 경우입니다. 이는 절연체 내부의 전하가 다른 속도로 분극해 나가는 과정에서 흐르는 흡수전류가 한 요인입니다 (그림 20).

케이블이 원인인 경우에는 흡수전류가 작은 테플론이나 폴리에틸렌 케이블로 하면 해결됩니다. 또한, 전류검출라인을 가드한 케이블을 사용하는 것도 매우 유효합니다. 아울러 앞서 설명한대로, 전압을 인가해 전류를 계측하는 것이 중요합니다.

고유전율계 콘덴서처럼, 측정대상 자체의 유전체흡수가 클 경우에는 충분한 시간을 두고 측정하는 것밖에 없습니다.

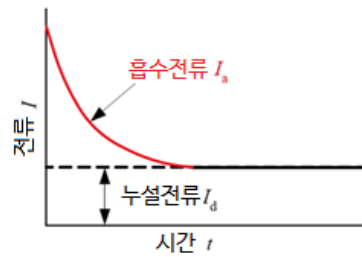


그림 20 유전체흡수에 의한 누설전류의 추이

출처: “電氣材料” 難波典之, 金子文隆著

6. 마찰잡음의 영향

측정 케이블을 조금 움직인 것만으로 측정값이 크게 변동하는 경우가 있습니다. 이는 케이블의 도체와 절연피복의 마찰에 의한 정전기가 원인이라 여겨집니다. 마찰에 의해 발생한 전하는 그림 21 처럼 임피던스가 낮은 부분에 전류로써 흐릅니다. 저항 R_x 에 마찰에 의한 전류 I_F 가 흐른 경우, $R_x I_F$ 의 노이즈 전압이 발생하므로 이 현상은 고저항 측정에서 현저히 나타납니다.

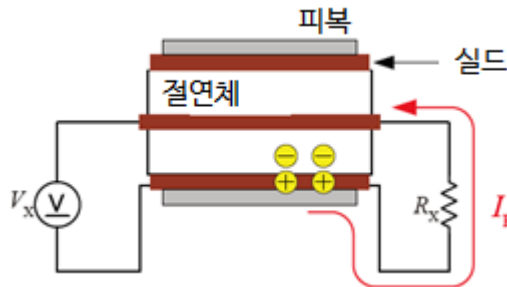


그림 21 마찰잡음에 의한 노이즈 발생

마찰잡음의 대책은 무엇보다도 측정 케이블의 진동과 굴곡을 피하는 것입니다. 케이블의 대책으로써 그림 23 처럼 실드의 내층에 반도체층을 두는 방법이 있습니다. 매끄러운 반도체층을 덮으로써, 실드층이 마찰대전효과가 큰 절연층과 닿는 것을 방지해, 마찰잡음의 발생을 억제합니다.

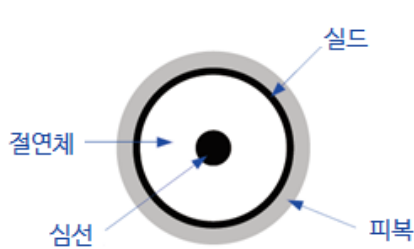


그림 22 일반적인 실드선

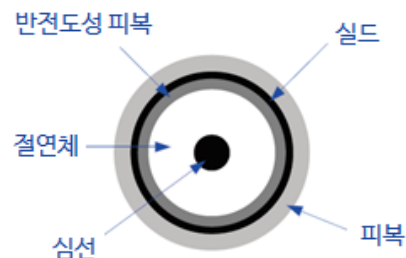


그림 23 잡음이 적은 케이블의 예

그림 24는 절연체가 폴리에틸렌 케이블과 잡음이 적은 케이블을, 각각 그림 21의 결선으로 굴곡했을 때의 잡음을 비교한 것입니다. 케이블의 선단을 100M Ω 으로 종단했기 때문에 마찰에 의한 전류는 발생전압/100M Ω 이 됩니다.

일반적인 폴리에틸렌 케이블에서는 200pA~300pA 나 되는 잡음전류가 발생한 것에 비해, 잡음이 적은 케이블은 거의 노이즈가 관측되지 않습니다.

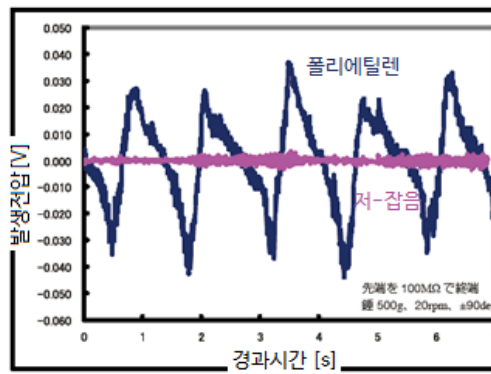


그림 24 케이블을 굴곡했을 때의 마찰잡음

7. 섬세한 측정대상

하드디스크의 헤드에 사용되는 자기저항효과소자 (MR 소자), 신호용 접점, EMI 대책용 페라이트 비즈 및 에어백의 Inflator 등은 미세한 측정전류 · 전압에 의해 특성이 변화하기 때문에 측정시에는 주의가 필요합니다.

단 3.5inch 인 하드디스크 드라이브에는 1 테라바이트나 되는 정보가 기록되어 있고, 그 자기정보를 읽어내는 MR 소자에서는 마이크로와트의 전력밖에 허용되지 않습니다. 따라서 1mA 를 초과하는 전류로 측정해버리면 소자가 쉽게 파괴되고 맙니다.

신호용 접점에 생긴 이물(산화피막 등의 오염물질)은 100mV 를 초과하는 전압에 의해 쉽게 파괴됩니다. 따라서 장기간 사용으로 열화된 접점을 고전압으로 측정하면 절연에 가까운 불량접점도 도통하여 “양품”이라 오판정 할 가능성이 증가합니다 (그림 25).

신호라인의 노이즈 대책에 이용되는 페라이트 비즈는 100mA 정도의 전류로 파괴되지는 않습니다. 하지만 자성체는 수십 mA 의 전류로 자화(magnetization)하여 임피던스 특성이 변화하고 맙니다.

에어백의 Inflator 에 내장된 Initiator 는 100mA 를 초과하는 전류에 의해 착화(firing)되버립니다.

이러한 소자측정에는 프로브를 측정대상에 연결하지 않은 상태의 전압(개방전압)을 20mV 로 억제한 측정기가 이용되고, Dry circuit test 라 불립니다.

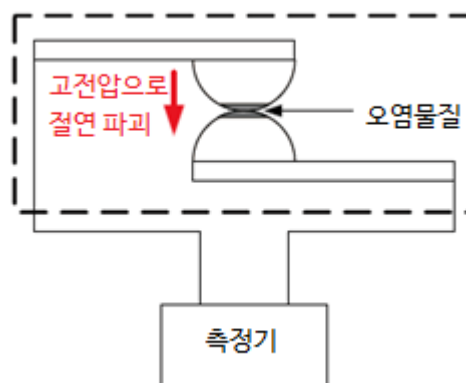


그림 25 오염된 신호용 접점을 고전압으로 측정

8. 외래잡음의 영향

노이즈는 그림 26 처럼 분류됩니다. 여기서는 실제로 문제되는 경우가 많은 유도 노이즈와 전도 노이즈에 대해 설명합니다.

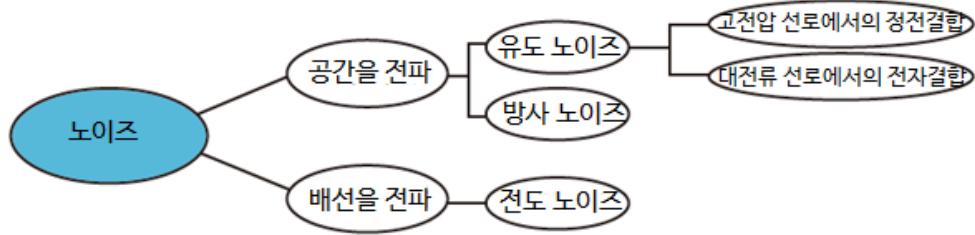


그림 26 노이즈의 분류

(1) 유도 노이즈의 영향

전원코드나 형광등, 전자밸브, 컴퓨터의 디스플레이 등에서는 큰 노이즈가 발생합니다. 저항측정에 영향을 미치는 노이즈원으로는 다음이 있습니다.

- 고전압 선로에서의 정전결합
- 대전류 선로에서의 전자결합

a. 고전압 선로에서의 정전결합

고전압 선로에서 유입되는 전류는 결합된 정전용량에 따라 크게 다릅니다. 예를 들어, 100V 상용전원라인과 저항측정용 배선이 1pF 로 정전결합된 경우, 대략 38nA의 전류가 유기됩니다.

$$I = \frac{V}{Z} = 2\pi \cdot 60\text{Hz} \cdot 1\text{pF} \cdot 100\text{V}_{\text{RMS}} = 38\text{nA}_{\text{RMS}}$$

1Ω 저항기를 100mA로 측정할 경우, 이 영향은 단 0.4ppm이므로 무시해도 상관없습니다.

한편, 1MΩ을 10μA로 측정할 경우 0.38%의 영향이 됩니다. 이처럼, 고전압 선로에서의 정전결합은 고저항 측정에서 주의해야 하며, 배선과 측정대상을 정전 실드하는 것이 유효합니다(그림 27).

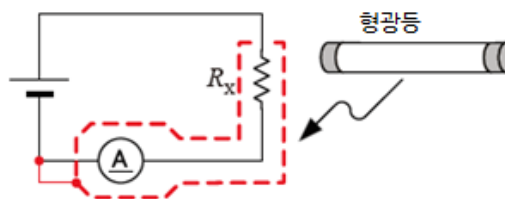


그림 27 고전압 배선 근처에서는 정전 실드

b. 대전류 선로에서의 전자결합

대전류 선로에서는 자계가 발생합니다. 턴 수가 큰 트랜스나 초코일에서는 더욱 큰 자계가 방출됩니다. 자계에 의해 유기되는 전압은 거리나 면적에 영향을 받습니다. 1A의 상용전원선에서 10cm 떨어진 10cm² 루프에는 대략 0.75μV 전압이 발생합니다.

$$v = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_0 I S}{2\pi r} \right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} f I}{r}$$

$$v = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60\text{Hz} \cdot 0.001\text{m}^2 \cdot 1\text{A}_{\text{RMS}}}{0.1\text{m}} = 0.75\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

1mΩ 저항기를 1A 로 측정할 경우, 그 영향은 0.07%입니다. 한편, 고저항측정은 검출전압을 크게 하기 쉽기 때문에 그다지 문제가 되지 않습니다.

전자결합의 영향은 노이즈의 발생원과 저항측정의 전압검출배선을 떼어 놓고, 각각을 꼬는 것(트위스트)이 유효합니다 (그림 28).

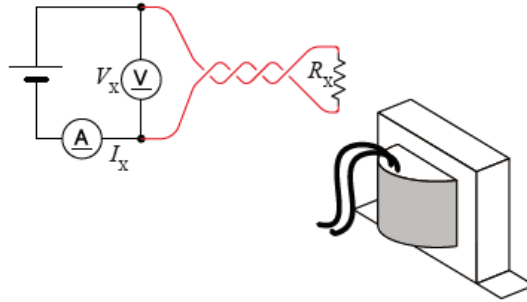


그림 28 대전류 배선 근처에서는 꼬기

(2) 전도 노이즈의 영향

측정대상과 측정리드에 중첩되는 유도 노이즈와는 다른 경로의 노이즈로써 전도 노이즈가 있습니다. 전도 노이즈란 전원배선이나 USB 등 제어배선에 중첩되는 노이즈를 가리킵니다.

전원배선에는 모터, 용접기, 인버터 등 여러 기기들이 연결되어 있습니다. 이들 설비가 가동 중 또는 기동 · 정지할 때마다 전원배선에는 큰 스파이크 전류가 흐릅니다. 이 스파이크 전류와 전원배선의 배선 임피던스에 의해 전원배선과 전원의 어스배선에는 큰 스파이크 전압이 발생해 계측기에 영향을 주는 경우가 있습니다.

마찬가지로, 컨트롤러의 제어배선에서도 노이즈가 주입되는 경우가 있습니다. 컨트롤러의 전원에서 침입한 노이즈나, 컨트롤러 내부의 DC-DC 컨버터 등에서 발생하는 노이즈가 USB 나 EXT I/O 배선을 경유해 계측기에 침입합니다 (그림 29).

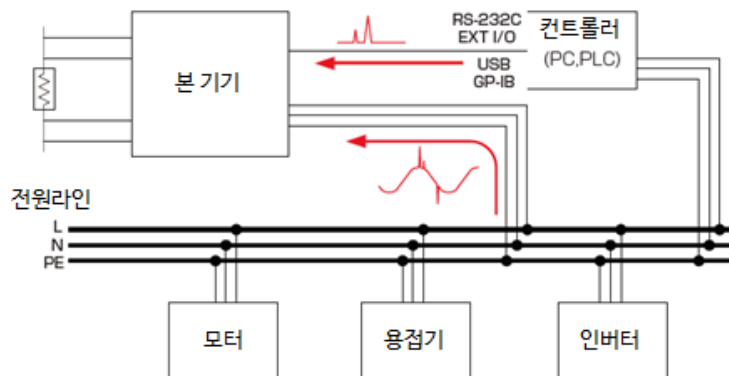


그림 29 전도성 노이즈의 침입

전도 노이즈는 HIOKI 3145 노이즈 하이로거 등으로 모니터링하면서 대책을 세우면 효과적입니다. 또한 침입경로가 특정된 경우에는 그림 30에 나타난 대책이 유효합니다.

a. 전원배선을 분리한다

동력계나 용접기 등은 본 기기와 별개 계통의 전원으로 하는 것이 바람직합니다.

b. 침입로에 코먼 모드 필터 (EMI 초크) 를 삽입한다

코먼 모드 필터는 가급적 임피던스가 높은 것을 선택하고 많이 넣을수록 효과가 커집니다.

c. 절연한다

제어배선은 광절연함으로써 높은 효과를 얻을 수 있습니다.

전원배선도 노이즈 컷 트랜스로 절연하면 효과가 있습니다. 단, 절연 앞뒤로 어스배선을 공통으로 해버리면 효과가 덜한 경우가 있으므로 주의가 필요합니다.

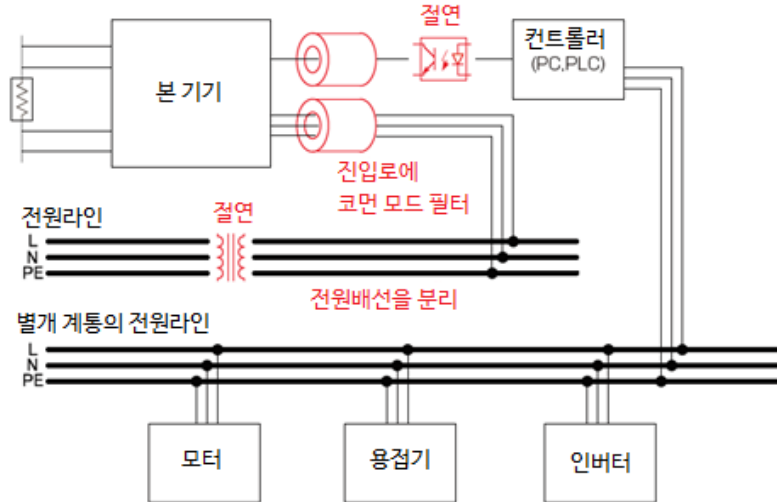


그림 30 전도성 노이즈의 대책

9. 온도 · 습도 · 바람의 영향

측정 정밀도가 엄격히 요구되는 경우, 측정환경에도 주의를 기울여야 합니다.

(1) 온도의 영향

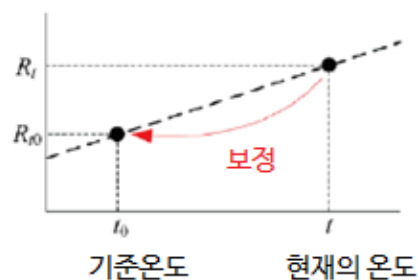
모터나 트랜스, 솔레노이드 등에 이용되는 구리선에는 약 0.4%/℃의 온도의존성이 있어 여름과 겨울 사이에 측정값이 5~10%나 차이납니다.

따라서 구리선처럼 온도의존성이 있는 저항값을 측정할 경우, 특정온도(기준온도)의 저항값으로 보정하는 “온도보정”이라 불리는 방법이 채택됩니다. 제품 출하시와 수입(☒☒)시에 판정기준을 맞추기 위해서라도 권선의 저항값은 온도 보정된 저항값으로 관리할 필요가 있습니다.

온도 보정에 이용되는 온도측정에는 백금측온저항체와 열전대 외에도, 측정대상의 온도를 직접 측정하는 방사온도계가 이용됩니다.

$$R_t = R_{t_0} \times \{ 1 + \alpha_{t_0} \times (t - t_0) \}$$

R_t 실측한 저항값 [Ω]
 R_{t_0} 보정 저항값 [Ω]
 t_0 기준온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 t 현재의 주변온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 α_{t_0} t_0 일 때의 온도계수 [$1/^{\circ}\text{C}$]



(2) 바람의 영향

측정대상과 온도계의 열시정수가 다르면 그림 31 처럼 에어컨 등의 바람의 영향으로 온도계의 지시와 측정대상의 온도가 다릅니다. 때문에, 대형 트랜스를 온도 보정하면서 측정하면 온도 보정은 생각만큼의 효과를 얻지 못하는 경우가 있습니다.

또한, 미소전압으로 측정할 경우에는 바람에 의해 열기전력이 불안정해집니다.
어느 경우든, 바람을 차단해 온도변화를 막는 조치가 필요합니다.

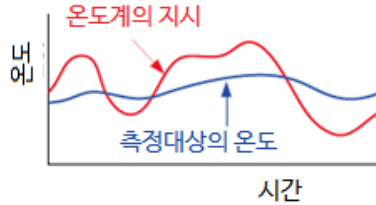


그림 31 측정대상의 열시정수가 클 경우

(3) 습도의 영향

1MΩ 을 초과하는 고저항 측정에서는 습도가 큰 적입니다.

누설의 경로에는 측정대상 자체의 표면 (그림 32), 커넥터 부분 (그림 33), 케이블 등 여러 경로가 있습니다. 난연성(불에 잘 타지 않는 성질)을 중시한 나일론 커넥터나, 내후성(각종 기후에 견디는 성질)을 중시한 염화비닐 케이블을 사용할 경우에는 주의가 필요합니다.

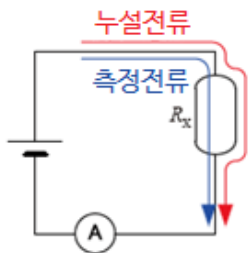


그림 32 측정대상표면의 누설



그림 33 커넥터의 누설

10. 프로빙 방법

측정대상이 판자나 블록처럼 폭이나 두께가 있는 경우나, 100mΩ 을 밑도는 전류검출저항기 (센트 저항기)에서는 클립형 리드와 편형 리드에 의한 정확한 측정이 어려워집니다. 이들을 사용한 경우, 접촉압과 접촉각도에 따라 측정값이 수 %~수십%나 변동하는 경우가 있습니다.

예를 들어 W300 × L370 × t0.4 인 금속판을 측정한 경우, 같은 부분을 측정해도

0.2mm 피치 편형 리드 1.1mΩ

0.5mm 피치 편형 리드 0.92 ~ 0.97mΩ

클립형 리드 0.85 ~ 0.95mΩ

식으로 측정값이 크게 차이납니다.

또한, 전류검출저항기에서는 프린트 배선판에 실장한 상태에서의 저항값을 규정하고 있기 때문에, 전류검출저항기의 단자부분을 편형 리드로 측정해도 원하는 저항값을 얻을 수 없습니다. 그 원인은 프로브와 측정대상의 접촉저항이 아닌, 측정대상의 전류분포에 있습니다.

그림 34 는 금속판의 등전위선을 plot 한 예입니다. 마치 일기예보의 기압배치도와 바람의 관계와 비슷한데, 등전위면의 간격이 조밀한 부분은 전류밀도가 높고, 널찍한 부분은 전류밀도가 낮습니다. 이 그림에서 전류의 주입점 부근은 전위경사가 큰 것을 확인할 수 있습니다. 이는 한창 전류가 금속판에 퍼지고 있는 중이라 전류밀도가 높아져 있기 때문입니다. 때문에 전압검출단자를 전류주입점 부근에 배치하면 근소한 접촉위치의 차이로 측정값이 크게 바뀌게 됩니다.

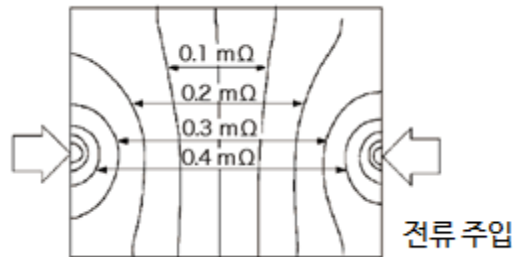


그림 34 금속판의 등전위선
(W300mm × L370mm × t0.4mm)

*끝점에 1A 전류를 주입해 50μV 마다 등전위선을 plot

이러한 영향을 피하기 위해서는 전류주입점의 안쪽에서 전압을 검출하는 것이 바람직합니다. 대체로 측정대상의 폭(W) 또는 두께(t)의 3 배이상 안쪽이라면 전류분포가 균일하다고 할 수 있습니다.

그림 35 처럼 SENSE 단자는 SOURCE 단자로부터 $3W$ 또는 $3t$ 이상 안쪽에 배치하는 것이 좋습니다.

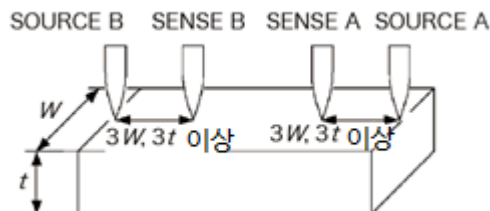


그림 35 측정대상에 폭이나 두께가 있는 경우의 프로빙 위치

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