

전기저항 측정에서의 누설효과

유광민, 한권수, 김한준, 강전홍, 박영태
한국표준과학연구원

The leakage effect in electrical resistance measurements

Kwang Min Yu, Kwon Soo Han, Han Jun Kim, Jeon Hong Kang, Young Tae Park
Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS)

Abstract - 고정밀급 저항 및 센서류를 사용할 때 정확한 전기저항의 측정이 요구되므로 누설전류 혹은 누설저항 효과는 중요한 측정오차로 나타난다. 그 누설효과를 측정하는 두 가지 방법들에 의한 측정결과와 여기서 제안하는 방법의 결과를 서로 비교하였다. 세 가지 방법 모두 비슷한 결과를 나타내었으나 제시한 방법의 결과가 조금 더 크게 나타났다. 그 원인은 누설경로가 생기는 부분들에 대한 해석의 차이와 수 pA 정도의 작은 누설전류로 인하여 시간적으로 보다 안정된 상태에서 측정이 되어야 한다는 점에서 비롯된다고 생각된다.

1. 서 론

높은 정확도의 전기저항을 측정하거나 저항값이 높은 고저항을 측정할 때, 일반적으로 많이 사용하는 저항계 혹은 DMM(Digital Multimeter) 대신에 저항비교 방법을 사용한다. 즉, 값을 알고 있는 저항(기준저항)과 측정하고자 하는 저항(미지저항)을 서로 비교하여 저항측정기가 가지고 있는 여러 오차를 상쇄시켜서 저항값을 정확하게 측정하는 것을 의미하며, 가장 널리 사용하는 방법은 전위차 방법과 저항브리지 방법이 있다. 전위차 방법은, 두 비교저항을 정전류나 정전압을 공급할 수 있는 전원과 같이 직렬로 연결하여 각각의 저항에 나타나는 전압을 DMM과 같은 전압계로 측정하는 것으로서 두 저항에 같은 전류를 공급하므로 결국 저항비가 전압비로 나타나게 된다. 그러므로, DMM의 직선성과 분해능이 전체 측정분해도에 결정적 역할을 하며, 여러 센서의 전기량 측정에서와 같이 1 V 이하의 저항의 변화를 10⁻⁷ 이상으로 측정하려면 상용 DMM의 전압잡음 문제로 인하여 수십 nV 이하로 측정하기는 쉽지 않다. 그러한 문제를 없애기 위한 방법으로서 1966년에 MacMartin과 Kusters에 의하여 전류비교기 브리지(direct current comparator bridge, 약칭 DCC bridge)가 개발되었다. 그 방법의 원리는, toroidal core에 1차측 권선과 2차측 권선을 감고 별도로 감지 코일을 감은 다음, 1차측 전류원에 1차측 권선과 기준저항을 연결하고 동시에 2차측 전류원에 2차측 권선과 미지저항이 연결된 구조를 가지고 출발한다. 먼저, 1차측에 전류를 흘려 2차측에 같은 자속이 유지되도록 하여 두 권선사이에 자속 balance를 이루면서, 동시에 두 전류에 의하여 비교저항에 생기는 전압의 차이를 검류계 혹은 nanovoltmeter로 감지하여 2차측 전류원에 feedback 시켜서 결국엔 전압 balance도 같이 이루는 것이다. 결과적으로, 얻고자 하는 저항비는 전류비 혹은 권선비로 주어지게 되므로, 그 권선비만 정확하게 알고 있으면 미지저항값을 정확하게 알 수 있게 된다. 또한, 권선비는 시간에 따른 변화가 거의 없으므로 반 영구적으로 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 현재까지 상용 저항측정장비 중 DCC bridge가 가장 정확하며, 국내를 포함하여 전세계적으로 측정표준기관(National Metrology Institute, 약칭 NMI) 과 교정기관들에서 널리

사용되고 있다. DCC bridge는 상온에서 동작되는 반면, 더 정확한 측정을 위하여 액체헬륨에서 동작되는 저온 전류비교기 브리지(cryogenic current bridge, 약칭 CCC bridge)가 NMI들에서 사용되고 있다. 이 브리지는 액체헬륨에서 동작되므로 전압잡음을 수십배로 크게 줄이게 되며, SQUID로 감지하므로 측정분해능도 DCC bridge에 비하여 뛰어나다. 그러한 장점을 가지고 있는 DCC bridge를 사용하여 저항의 변화를 10⁻⁸ 정도로 측정할 경우, 중요한 오차요인은 권선비 오차와 누설전류 및 power 효과 등으로 생각할 수 있다. 권선비 오차는 binary step-up 방법을 사용하여 알 수 있고, power 효과는 저항에 가해지는 전류로 인하여 생기는 Joule 열(자체가열) 효과이므로 전류에 따른 저항비 변화를 측정하여 linear fitting curve로부터 power가 영이 될 때의 저항비로부터 알 수 있다. 반면, 누설전류는 전원부, 권선, 회로 등 시스템의 여러 부분을 통하여 ground(GND)로 빠져 나가므로 측정이 쉽지 않다. 또한, 비교저항들의 단자 사이의 절연이 나빠져서 누설전류가 그 절연을 통하여 분류될 수도 있다. 이 경우는 electrometer나 teraohmmeter를 사용하여 직접 누설저항을 측정하여 그 누설전류를 알 수 있으므로, 결과적으로 여기서의 주된 관심은 측정시스템의 누설효과에 있으며, 본 논문에서는 몇 가지 누설전류를 측정하는 방법들을 분석하고 더욱 간단하게 측정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 DCC bridge의 누설경로

저항비교 측정에 직접 관련된 누설경로를 그림 1에 나타내었다. 이들 중 권선에서 GND로 빠져 나가는 누설전류는(대부분 상용장비에서는)그 권선근처에 GND를 놓음으로서 해결이 된다. 권선 사이의 누설도 권선저항이 비교저항들에 비하여 작으므로 역시 측정에 별 영향을 주지 않는다. 단지, 비교저항 및 사용된 케이블과 커넥터 및 저항 case를 통하여 시스템 GND로 빠져 나가는 누설전류가 문제가 된다. 기준저항 R₂가 미지저항 R₁에 비하여 작을 경우, 그림에서와 같이 작은 양에 비례하여 기준저항쪽으로 누설이 되어 GND로 빠져 나가며, 그 누설전류는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_L = \frac{V(R_1)}{R_L} \tag{1}$$

그 누설전류에 대한 저항비 오차는 다음 식으로 정리될 수 있다.

$$\Delta\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = \frac{(R_W + R_2)}{R_L} \tag{2}$$

여기서, R_W은 전압차이를 측정하기 위하여 두 저항을 연결할 때의 연결저항이다.

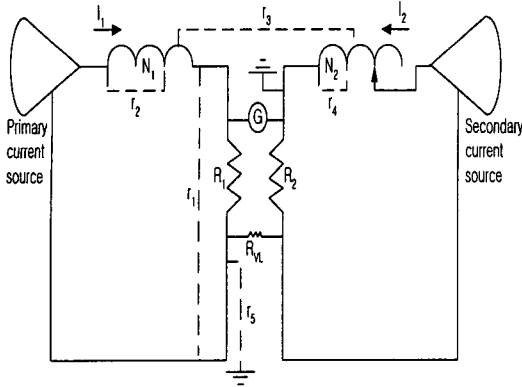


그림 1 DCC bridge의 누설경로

2.2 실험 및 결과

누설효과는 누설저항을 측정하면 되며 그 누설저항을 알기 위하여 통상적으로 많이 사용하는 방법은 1:1 교환 방법으로서 처음 두 비교저항을 브리지에 연결하여 저항비를 얻은 다음 두 저항을 서로 교환하여 다시 저항비를 얻고 두 저항비를 더하여 2로 나누면 그 값이 이상적일 때의 비율 1과의 차이로서 곧 누설효과로 주어진다. 예를 들면, 기준저항을 1 kΩ으로 하고 미지저항을 10 kΩ으로 하였을 때, 누설효과는 같은 10 kΩ을 연결하여 1:1 교환법으로 비교하여 얻은 누설효과의 0.1배가 된다. 이 방법은 두 단계를 거치게 되고 실제의 저항비교 상태가 아니므로 대략적인 누설효과의 범위 정도를 아는 데 사용된다. 다음으로, 식 (2)의 R_{VT} 의 연결저항 대신에 decade 저항과 같은 임의의 가변저항을 부하(load)로 사용하여 그 부하에 따른 저항비를 얻어 linear fitting을 하면 얻어진 직선의 기울기가 곧 누설저항이 되며, 그 결과는 그림 2에서 나타난 바와 같으며, 얻어진 누설저항은 $2.6 \times 10^{11} \Omega$ 으로 나타났다.

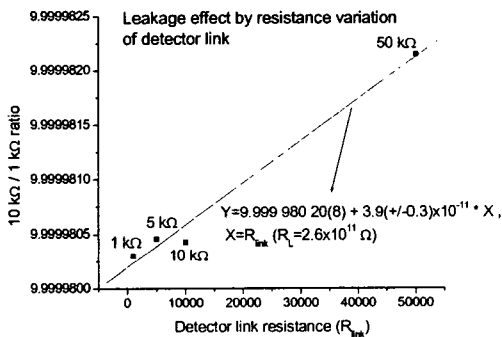


그림 2 부하를 연결저항으로 사용하여 얻은 누설저항 효과

그리고, 위에서 언급된 두 가지 방법과는 다르게, 저항의 전류(혹은 전압)입력 단자와 GND 사이에, 짐작되는 누설효과에 해당하는 고저항(simulation 저항)을 연결하여 저항비를 측정된 값과 simulation 저항없이 원래의 저항비 측정상태에서의 값을 서로 비교하여 같은 값이 될 때의 누설저항을 찾아내는 방법을 사용하여 위에서 언급된 두 가지 방법과 비교하였으며, 측정결과를 그림 3에서와 같이 그래프로 나타내었다.

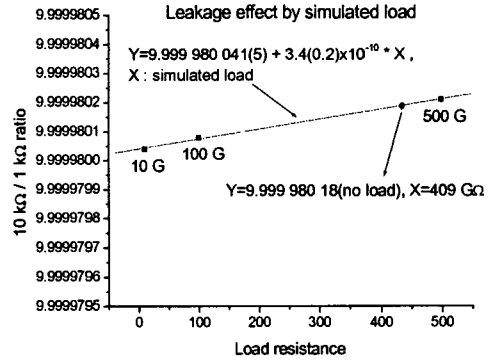


그림 3 실제 누설저항을 가정한 simulation 저항을 사용하여 얻은 누설저항 효과

위의 2 가지 방법에 의한 누설저항 측정 이외에 1:1 교환 방법에 대하여 직접 측정한 측정결과는 $1.4 \times 10^{11} \Omega$ 으로서 저항비 오차로 나타내면, 7×10^{-9} 이 된다. 이상의 결과를 정리하여 보면, 1:1 교환 방법과 부하저항을 사용한 결과에 비하여, simulation 저항을 사용하였을 경우에 더 큰 누설저항 효과가 나타났다. 아직, 그 원인을 구체적으로 알아내지는 못하였지만, 3 가지 방법 모두의 결과에 대한 누설저항이 대체로 $10^{11} \Omega$ 이상이 되므로 측정전류를 흘렸을 때 수 pA 정도의 아주 적은 누설전류(유전물질의 변위전류)로 인하여 안정된 상태에서 balance가 이루어지지 못하여 올바른 측정값이 얻어지지 못한 원인을 생각하고 있으며, 3 가지 방법에서의 시스템의 누설경로에 대한 고려에서 비롯되는 것도 한 원인이라고 생각한다. 현재 누설효과를 알아내기 위한 가장 확실한 방법을 찾기 위하여 3 가지 방법을 분석 중에 있으며, 발표 때 결론을 나타내고자 한다.

3. 결 론

전기저항을 측정할 때 직접 측정하기 어려운 누설저항 효과에 대한 3 가지 측정방법을 비교하였으며, 10 kΩ과 1 kΩ을 비교할 경우 저항의 전압 입력단자와 시스템 접지 사이의 누설저항은 $10^{11} \Omega$ 이상으로서 10^{-8} 이하의 저항비 오차를 가지게 됨을 알 수 있었다. 또한, 누설전류는 수 pA 이하가 되므로 측정할 때 보다 시간적으로 안정된 상태에서 측정하여야 정확한 측정이 가능함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.P.MacMartin and N.L.Kusters, "A direct current comparator ratio bridge for four-terminal resistance measurements", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.IM-15, pp. 212-220, 1966
- [2] N.L.Kusters and M.P.MacMartin, "A direct current comparator bridge for high resistance measurements", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.IM-22, pp. 382-386, 1973
- [3] Randolph E. Elmquist, "Leakage Current Detection in Cryogenic Current Comparator Bridges", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.IM-42, pp. 167-169, 1993