2단자 계단식 저항기의 4단자 측정기술

4-Terminal Measurement Technique of 2-Terminal Decade Resistor

이 상 화[†] · 장 석 명^{*}
 (Sang-Hwa Lee · Seok-Myeong Jang)

Abstract - We present a technique for measuring low resistance ranges of a decade resistor with a 4-Terminal connection. With the technique the accuracy of 0.8 % was obtained for a 1 m Ω resistance of the decade resistor. We suggested a proper pattern 4-Terminal measurement results with several 4-Terminal pattern and adapters. Additionally, we should that precise measurements for low resistance can be made using a digital multimeter(DMM) only.

Key Words : Decade resistor, 2-terminal measurements, 4-terminal measurements, Power effect, Low resistance measurement using the DMM

1. 서 론

계단식 저항기(decade resistor)는 1 m Ω ~ 10 T Ω 의 낮은 저항과 높은 저항을 포함하는 넓은 저항 범위를 가지고 있으며, 전기계측과 전기적 특성 측정을 위하여 간단하고도 신속하게 사용 할 수 있는 특징과 장점을 가지고 있는 저항기이다. 그런 특징을 활용하여 이공계 대학과 산업체에서 여러 용도로 많이 사용하고 있다. 즉, 전류를 측정하거나 제한할 경우, 각종 실험, 연구 또는 생산공정에 있어서의 시험 설비로서 사용할 경우, 절연저항계와 접지저항계를 정확하게 시험 측정할 경우, 휘스톤 브리지를 포함한 각종 정밀측정 브리지[1][2]에 내장하여 저항을 정밀하게 측정할 경우 등에서 사용하고 있다. 그런데, 대부분의 계단식 저항기는 2단자로 구성되어 있는 반면 낮은 저항 범위의 저항 측정기들은 입력단자가 4단자로 구성되어 있다. 실제로 낮은 저항을 측정할 때는 4 단자로 측정하여야 하므로 계단식 저항기의 낮은 저항을 사용할 경우는 2단자 측정방법 대신에 4단자 측정방법[3][4]으로 바꾸어야 한다. 대학과 산업체에서는 그런 측정기술을 잘 활용하지 못하고 있으며, 실제 측정을 할 경우 많은 오차를 가진 결과를 얻게 된다. 그러한 기법에 대하여 이론적으로는 그 측정법과 개념이 알려져 있으나 주로 표준저항에 적용되어 왔으며[5], 계단식 저항기에는 아직까지 발표되지 않고 있다. 본 논문에서는 그 4단자 방법을 낮은 저항 범위의 계단식 저항기에 적용하여 정확도가 높고 안정된 측정결과를 얻을 수 있음을 소개하고자 한다. 또한, 1 m Ω 과 같은 낮은 저항을 4단자로 측정할 때 측정전압이나 측정저항이 낮아서 전류-전압법을 사용하지만 디지털 멀티미터(DMM)만을 사용하여 직접 측정할 수 있음을 나타내고자 한다.

2. 본 론

2. 4단자 저항 측정기술

2.1 전류-전압법

1 Ω 이하의 낮은 저항값을 가지는 표준저항이나 금속시편을 정밀측정하려면 그림 1에서 보인 바와 같은 4단자 방법을 적용한다[6][7]. 2단자 측정법에 비하여 4단자 측정법의 장점은 측정 리드선 저항과 연결할 때 생기는 접촉저항 효과가 무시된다는 것이다. 즉, 2단자로 측정하면 측정기의 입력단자에 연결되는 저항값과 연결 리드선 저항 및 접촉저항이 같이 합쳐진 값이 얻어진다. 반면에, 4단자 측정에서는 알고자 하는 그 저항값에 해당하는 위치에 전압단자가 정확하게 연결이 되고 실제 4단자 측정에서는 그 전압단자를 통하여 흐르는 전류는 정의에 따라서 거의 무시되고 저항 양단에 걸쳐 나타나는 전압값만 얻어지게 된다. 따라서, 연결 리드선의 길이와 종류 등과는 무관하게 측정할 수 있고, 접촉저항의 영향도 없게 된다. 물론, 접촉에서 생기는 열기전력 효과는 있을 수 있으나 전류의 극성을 순방향과 역방향으로 연속적으로 바꾸어 측정하여 평균함으로써 그 효과를 없앨 수 있다.

그림 1 4 단자식 전류인가-전압측정 방법(약칭 전류-전압법)
 Fig. 1 The 4-terminal method by current source and voltage measurement for a resistance measurement (shortly, current-voltage method)

[†] Corresponding Author : Division of Physical Metrology, Center for Electricity and Magnetism, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Korea.

E-mail : shlee@kriss.re.kr

^{*} Dept. of Electrical Engineering, Chungnam national University, Korea.

Received : November 1, 2013; Accepted : November 14, 2013

2.2 DMM을 이용한 직접 측정 방법

그림 2 DMM을 이용한 저항 측정에서의 리드 선 연결 모습
Fig. 2 The connecting configurations for lead wires in a resistance measurement using a DMM

그림 2의 2 wire 측정은 일반적인 연결방법이지만 저항이 아주 낮을 경우는 4 wire 측정방법으로 연결하여야 한다. 이것은 기본적으로 그림 1에서 보인 것과 같고, 차이점은 별도의 전류원과 전압계가 없이 DMM 자체에 그 기능이 내장되어 있어서 4 개의 DMM 입력단자에 연결하여 저항값을 바로 읽을 수 있는 것에 있다. DMM 측정방법을 계단식 저항기의 100 mΩ 이하의 낮은 저항범위에 적용하려면 DMM의 가장 낮은 저항 범위인 2 Ω 범위에 놓고 측정하는 것이 좋으며, 그 범위에서의 DMM 측정전류는 직류 100 mA 정도이다. 그러므로, 1 mΩ 측정에서 100 mA에 대하여 측정전압은 0.1 mV 이고, 0.1 % 수준으로 측정하려면 최소한 100 nV 이하는 읽어야 하며, 정밀한 측정기술과 그 범위에서 기준저항으로부터의 정확한 교정을 필요로 한다.

3. 실험 장치 및 4 단자 구성

낮은 저항을 측정하기 위하여 그림 3에 보인 바와 같이 전류-전압법으로 측정시스템을 구성하였다. 그 방법에서는 정전류원(calibrator)을 사용하여 계단식 저항기에 일정한 전류를 인가하고, 그 양단에 생기는 전압을 전압계(digital multimeter, DMM)로 측정하는 것이다. 그리고, 표준저항은 이론적인 4단자 정의에 맞게 4개의 단자가 그림 4에 보인 것처럼 구성되어 있으나 계단식 저항은 2단자로 구성되어 있어서 저항 측정할 때 리드선 저항과 접촉저항 효과를 포함하게 되어 있다. 그래서 그 4단자 정의에 맞게 구성하기

위하여 그림 5와 같이 3 가지 패턴을 생각하였으며, 또한 별도의 adapter를 만들어 실험하였다. 본 실험에서는 전류-전압법 이외에 그림 2와 같이 DMM 직접 측정방법을 생각하여 mΩ 범위의 낮은 저항값 결정에 적용하였다.

그림 3 전류-전압법의 실제 구성
Fig. 3 The picture for a current-voltage method

그림 4 표준 저항기와 계단식 저항기
Fig. 4 A standard resistor and a decade resistor

그림 5는 단자 결선방법을 바꾸어 실험한 실제 결선을 나타내었다. Pattern 1의 경우 계단식 저항기의 저항단자 양단에 U형 연결단자를 결합하여 4단자를 구성한 모양이고, Pattern 2의 경우 바나나 케이블의 측면에 또 하나의 케이블을 결선하여 4단자를 구성한 모양이다. Pattern 3의 경우는 바나나 케이블의 위에서 다른 케이블을 결선한 모양을 나타내었다. Adapter 1은 상용 단자를 개조하여 바나나 단자를 납땜하여 결선한 모양이고, Adapter 2는 동축케이블과 BNC T-terminal 을 조합하여 구성한 단자이다. Adapter 3는 순동을 가공한 몸체에 바나나 단자를 납땜하여 제작한 단자이다.

4. 실험 결과

4.1 DMM 측정방법에 의한 영점저항 측정

표 1에는 각 패턴에 따른 영점저항의 측정값을 나타내었다. 측정결과는 전류를 인가한 후 측정값이 안정된 후에 측정하였다. 그림 5는 실제 측정에서 4단자 결선 방법의 예를 나타내었다. 패턴 1의 방법으로 결선했을 때 영점저항이 가장 작게 측정되었으며, adapter 2를 사용하였을 경우 영점저항이 가장 크게 측정되었다.

1) Pattern 1

2) Pattern 2

3) Pattern 3

4) Adapter 1

5) Adapter 2

6) Adapter 3

그림 5 단자의 패턴에 따른 결선 실험

Fig. 5 The experiment for zero resistances of a decade resistor with different terminal patterns and adapters

표 1 단자의 결선 패턴에 따른 영점 저항값의 차이 결과
Table 1 The measurement results for zero resistances with terminal patterns

단자 결선 패턴	패턴 1	패턴 2	패턴 3	adapter 1	adapter 2	adapter 3
영점 저항값 (mΩ)	2.76	4.39	4.34	6.05	9.70	4.38

또한 각각의 결선 방법에서 시간의 변화에 따른 영점저항의 상대적인 변화를 그림 6에 나타내었다. 그래프의 Only Wire는 두 개의 wire를 직접 계단식 저항기의 터미널에 결선하고, 전류-전압법을 사용하여 측정한 결과이다. 패턴 1의 방법, 패턴 2의 방법, 패턴 3의 방법, adapter 3을 사용하여

결선 했을 때의 결과는 DMM의 4단자 결선 방법을 사용하여 얻은 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 패턴 1의 방법을 사용했을 때 영점저항과 변화가 가장 작은 것으로 나타났다. adapter 1과 adapter 2를 사용한 결과는 영점 저항값만 나타내었는데, 실제 실험에서 안정도가 좋지 않아 그래프로 나타내지 못했다.

4.2 계단식 저항기의 mΩ저항 측정

mΩ 범위의 저항의 Power 효과를 표 1에 나타내었으며, 직관적인 표현을 위해 그림 7에 그래프로 나타내었다. 그래프에서 역삼각형 도형(2nd Step of 10 mΩ dial)은 오른쪽 Y축을 사용하였고, 사각형 도형(1st Step of 1 mΩ dial)은 왼쪽 Y축을 사용하였다.

그림 6 단자의 결선방법에 따른 영점 저항의 변화 비교

Fig. 6 The graphical illustration for the zero resistance variations with the different terminal patterns and adapters

표 2 계단식 저항기의 mΩ저항범위의 전류-전압법과 DMM의 True Ω기능을 사용한 결과의 Power효과 비교

Table 2 The comparison for power effects of mΩ ranges in a decade resistor using a current-voltage method and the True Ω function of a DMM

공급전류 및 측정방법	1 mΩ		10 mΩ	
	100 mA (True Ω기능)	0.01 mW	9.8944	0.1 mW
1 A (전류-전압법)	0.9427	1 mW	9.9063	10 mW
3 A (전류-전압법)	0.9439	10 mW	9.9120	90 mW
5 A (전류-전압법)	0.9479	25 mW	9.9281	250 mW
측정값의 최대 차이	0.0059	0.63 %	0.0337	0.34 %

그림 7 mΩ저항의 Power 효과 실험결과

Fig. 7 Power effects for mΩ ranges of a decade resistor

4.3 불확도 분석

4.2절에서 언급한 DMM의 True Ω기능을 사용한 방법과 전류-전압법을 사용하여 실험한 결과에 대한 불확도를 ISO 불확도 표현지침에 의거하여 나타내었다[8].

표 3 DMM의 True Ω기능을 사용한 방법과 전류-전압법을 사용하여 실험한 결과에 대한 불확도

Table 3 The uncertainties in measurement using the True Ω function of a DMM and a current-voltage

1) True Ω기능을 사용한 측정불확도

1) The measurement uncertainty using the True Ω function

불확도 요인	불확도	
	1 mΩ	10 mΩ
DMM True Ω기능의 안정도 불확도 (1년)	2000×10^{-6}	2100×10^{-6}
표준저항기의 명세서에 의한 불확도	5.97×10^{-6}	6.05×10^{-6}
반복측정에 의한 불확도	27.97×10^{-6}	4.22×10^{-6}
합성불확도	2000.2×10^{-6}	2100×10^{-6}
확장불확도 ($k = 2$)	4001×10^{-6}	4200×10^{-6}

2) 전류-전압법을 사용한 측정불확도

2) The measurement uncertainty using a current-voltage method

불확도 요인	불확도	
	1 mΩ	10 mΩ
DMM의 전압(전류)측정 기능의 안정도 불확도 (1년)		
1A		1.8×10^{-6}
3A		1.5×10^{-6}
5A		2.2×10^{-6}
DMM의 전압(저항)측정 기능의 안정도 불확도 (1년)		
1A	209×10^{-6}	22.1×10^{-6}
3A	73×10^{-6}	8.54×10^{-6}
5A	46×10^{-6}	5.84×10^{-6}
전류 모니터용 셉트저항의 불확도	6.22×10^{-6}	
반복측정에 의한 불확도		
1A	5.65×10^{-6}	2.88×10^{-6}
3A	1.18×10^{-6}	0.43×10^{-6}
5A	0.71×10^{-6}	3.14×10^{-6}
Zener Standard의 불확도	0.084×10^{-6}	
합성불확도		
1A	210×10^{-6}	23.2×10^{-6}
3A	73.3×10^{-6}	10.7×10^{-6}
5A	46.5×10^{-6}	9.4×10^{-6}
확장불확도 ($k = 2$)		
1A	420×10^{-6}	47×10^{-6}
3A	147×10^{-6}	22×10^{-6}
5A	93×10^{-6}	19×10^{-6}

4.2 기준값과 비교

DMM 측정방법으로 얻은 측정결과를 정확도가 높은 상용 직류 전류 비교기식 저항브리지(Direct Current Comparator resistance bridge, DCC resistance bridge, 불확도: 0.0001 %)를 사용하여 측정한 결과와 비교하였으며, 표 4에 두 결과를

비교하여 나타내었다. 사용된 브리지는 4 단자 측정방법을 사용하였고 1 mΩ에서 5 nΩ 이하의 정확도를 가지고 있다.

표 4 2단자와 4단자 측정결과 비교

Table 4 Measurement results for 1 mΩ and 5 mΩ of a decade resistor using 2-terminal and 4-terminal configuration of a DMM and a DCC resistance bridge

결선방법	2단자		4단자	
명목 저항값 (mΩ)	1	5	1	5
DMM 측정결과 (mΩ)	0.941	4.726	0.982	4.926
기준값(DCC resistance bridge) (mΩ)	0.9896	4.9325	0.9896	4.9325
기준값과 측정결과 차이 (%)	5.21	4.36	0.74	0.12

5. 분석 및 discussion

계단식 저항기의 1 mΩ과 5 mΩ 범위에 대하여 DMM으로 측정한 값과 브리지로 측정한 값과의 차이가 2 단자 측정의 경우 약 5 % 정도이고, 4 단자 측정의 경우 1 % 이하로 나타났다. 이 결과는 낮은 저항 측정에서 4 단자 측정의 중요성을 잘 보여주고 있다. 그리고, 같은 4 단자 측정이라도 여러 연결 패턴과 adapter들을 사용하여 측정한 결과 그 그래프를 보면, 연결 리드 선을 DMM과 저항에 바로 연결하여 얻어진 영점 저항값과 패턴 1 및 패턴 3은 비슷한 저항값과 저항변화를 가진 반면에 패턴 2는 계속 변하는 저항값을 가지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 패턴 2의 경우 계단식 저항기의 단자와 리드 선의 끝부분에 부착되어 있는 바나나 모양 잭(jack) 사이의 접촉저항의 변화로 사료되며 바나나 잭의 스프링 부분이 처음 계단식 저항기의 단자와 접촉 후 점점 접촉상태가 변화하여 나타나는 양상이라고 판단된다. adapter 3의 경우도 접촉상태가 좋지 않아 영점저항값 변화가 심한 것으로 보이며, 나머지 adapter 1과 3도 같은 양상이나 그 변화가 너무 심하여 그래프에서 제외하였다. 또한 전류-전압법을 이용한 방법과 DMM의 True Ω 기능을 사용하여 전류를 변화시켜 저항기의 Power 효과를 측정한 결과에서 최대 0.6 % 이내에 일치함을 확인하였다.

6. 결 론

계단식 저항기의 1 mΩ까지의 낮은 저항범위를 DMM을 이용하여 안정적이고 정확하게 측정할 수 있는 연구결과를 나타내었으며, 1 mΩ을 4 단자로 측정하여 0.8 % 이하의 정확도를 얻었다. 또한, 계단식 저항기의 2단자를 4 단자로 변환하는 여러 패턴과 adapter를 구상하여 만들었고, 그들을 4 단자 측정에 적용하였을 때 나타나는 여러 양상을 조사하였고 그로부터 가장 적절한 4 단자 패턴을 제시하였다. 이 결과들은 계단식 저항기의 낮은 저항범위를 정밀하게 측정할 때 적용할 수 있으며, 일반적으로 낮은 저항 측정에 적용이 어려운 DMM을 사용하여 그 범위에서 정밀하게 측정할 수

있음을 제시한 것에 그 의미를 둘 수 있다.

References

- [1] L.C.A. Henderson, "A new technique for the automatic measurement of high value resistors," J. Phys. E. Sci. Instrum. 20 (1987) 492 - 495
- [2] Forest K. Harris, "Electrical Measurements", Robert E. Krieger Publishing Company, 1975.
- [3] Fluke, "Calibration: Philosophy in Practice" Second Edition, 1994.
- [4] KEITHLEY, "6th Edition, Low Level Measurements Handbook", 2006.
- [5] Jack C. Riley, "The Accuracy of Series and Parallel Connections of Four-Terminal Resistors," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-16, No. 3, pp. 258-268, 1968
- [6] G. Rietveld, C. V. Koijmans, L. C. A. Henderson, M. J. Hall, S. Harmon, P. Warnecke, and B. Schumacher, "DC conductivity measurements in the van der Pauw geometry," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 52, no. 2, pp. 449 - 453, Apr. 2003
- [7] Ernest Houtzager and Gert Rietveld, "Automated Low-Ohmic Resistance Measurements at the μΩ/Ω Level," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 56, no. 2, pp. 406 - 409, Apr. 2003
- [8] ISO/IEC GUIDE 98-3:2008, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).

저 자 소 개

이 상 화 (李 相 和)

1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대학교 전자공학과 졸업(학사), 2011년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2012년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 1985년 ~ 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전기자기센터 선임연구원
Tel : 042-868-5151
E-mail : shlee@kriss.re.kr

장 석 명 (張 錫 明)

1976년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1978년 ~ 현재 충남대학교 전기공학과 전임교수
주 관심분야 : 전기기기설계, 고속 전동기 시스템의 분석, 자기부상열차, 신재생 에너지 시스템(풍력발전기, 플라이휠 에너지 저장장치)