

고저항 정밀측정용 자동화 시스템의 제작

류제천, 강전홍, 유권상, 유광민  
한국표준과학연구원 전자기 연구부

The Development of an accurate, automated measurement system of high value resistors

Je Cheon Ryu, Jeon Hong Kang, Kwon Sang Ryu, Kwang Min Yu  
Korea Research Institute of Standards and Science

**Abstract** - An automatic measurement system of high value resistance standards(10 MΩ and 1 GΩ) was developed. A system has been assembled with programmable dc calibrators in two of the arms. An electrometer is used to measure the difference in currents flowing through the remaining two arms of the bridge consisting of unknown and standard resistors. Type A standard uncertainty was 2 ppm in the 10 MΩ, 1 ppm in the 1 GΩ.

1. 서 론

현재 표준저항의 소급절차는 다음과 같다. 먼저 양자 홀저항으로부터 Current Comparator Resistance Bridge를 이용하여 1 Ω에 값을 준 다음, 이 1 Ω로부터 Hamon transfer나 여러 방식의 ratio 전달 방식을 이용하여 10 kΩ, 10 MΩ, 1 GΩ 순서로 저항값을 소급한다. 그러나 고저항으로 갈수록 측정오차가 증가하므로써 더욱 정밀한 측정기술이 필요하게 된다.

산업계에서는 고저항 박막 소자들의 증가함과 함께 고저항에 대한 정밀한 측정을 필요로 하며, 국제적으로는 고저항에 대한 표준저항의 확립 때문에 정밀측정이 시급한 실정이다. 이에 본 연구는 국제적 수준의 정밀도만큼 고저항 값을 측정할 수 있는 시스템을 제작하는 것을 목표로 하였으며, 본 시스템으로 러시아에서 제작한 10 MΩ, 1 GΩ의 고저항을 측정한 결과 수 ppm 내의 불확도내에서 일치하는 측정값을 얻을 수 있었다.

2. 본 론

2.1 Manual Bridge Circuit

지금 사용되고 있는 고저항 측정방법으로는 Digital Teraohmmeter와 같은 단일측정기기를 사용하거나 1:10 이나 1:100 과 같은 브릿지를 사용하는 비율전달 방식이 있다. 그러나 Teraohmmeter는 0.1~0.05 % 정도의 큰 오차를 가지기에 정밀측정용으로 사용되는 것은 보통 브릿지 방법이다. 그리고 여러 브릿지중 가장 일반적으로 사용되는 정밀저항 측정용 휘스톤 브릿지<sup>(1)</sup>의 구성은 그림 1과 같으며, 측정오차는 0.01 ~ 0.005 % 정도이다.

그림 1의  $R_1, R_2$ 는 ratio arms로 보통  $10^4 \sim 10^7 \Omega$  정도로 측정저항인  $R_X$ 보다 작은 값을 가지는 표준저항이며,  $R_5$ 는  $R_X$ 와 직접 비교하기 위한 표준저항이다. 측정방법은, 전원(V)에서 적정 전압을 출력한 뒤 decade resistance box  $\Delta$ 를 조절하여 검류계(G)의 눈금을 '0'로 만든다. 이때 식(1)로부터 측정저항  $R_X$ 를 알 수 있다.

$$R_2 / (R_1 - \Delta) = R_X / R_5 \quad (1)$$

이러한 manual bridge circuit에서 고저항 측정시에 ratio arms  $R_1, R_2$  값의 선택에 따라 생기는 오차는 크게 두가지가 있다. 첫째는 자체가열효과에 의한 저항

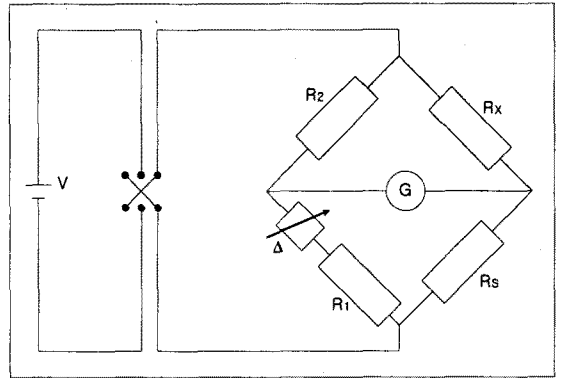


그림 1. Manual bridge circuit.

값의 변화이며, 둘째는 회로내의 누설저항과 누설용량에 의한 효과이다. 그래서 첫 번째의 오차를 줄이기 위해서는 적절한 측정전압 범위를 선택해야 하며, 두 번째의 오차를 최소화하기 위해 저항의 guard 단자와 guard 회로를 이용하여 누설효과를 줄일 수 있으나 근본적으로는 없앨 수 없다.

그래서 본 연구에서는  $R_1, R_2$ 를 DC Voltage Calibrator로 대체한 modified bridge circuit<sup>(2)</sup>를 제작하여 측정오차를 대폭 줄인 정밀측정을 하였다.

2.2 Modified Bridge Circuit

2.2.1 구성

본 시스템은 앞서 기술한 manual bridge circuit에 의한 고저항 측정시의 여러 측정오차를 줄이기 위해 제작하였으며, 개략적인 구성은 그림 2와 같다. manual bridge circuit에서 2개의 저항으로 구성된 ratio arms 대신에 낮은 출력 임피던스를 가지는 2개의 DC Voltage Calibrator(Fluke 5440B, EDC 521), 검류계 대신에 Digital Electrometer(Keithley 617)를 사용하였다. Modified bridge circuit에서 회로가 balancing 상태일 때 식 (2)로부터 측정저항  $R_X$ 를 구할 수 있다.

$$V_X / V_S = R_X / R_5 \quad (2)$$

이때  $V_X$  값을 결정하기 위해 GUI(Graphical User Interface) 언어인 HP VEE로 PID tuning routine을 작성하여 시스템을 계측, 제어하였다.

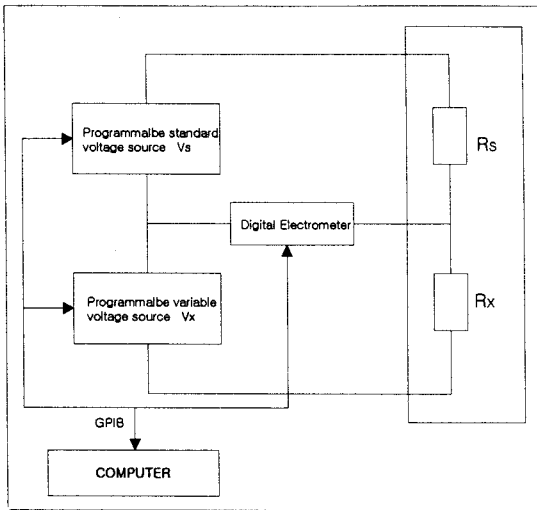


그림 2. Modified bridge circuit.

### 2.2.2 Balancing

측정저항값의 1 ppm 단위까지 electrometer의 범위를 정한다음 먼저 측정시스템의 null 전류값을 정한다. 이때 null 전류값은 이상적으로는 voltage source가 standby상태일 때 zero를 나타내어야 하지만 실제로는 전압원의 출력 impedance 효과와 회로의 누설저항 및 용량에 의해 electrometer에 전류가 흐르게 된다. 그러므로 이를 보정해주기 위해서는 두가지 방법을 사용할 수 있다. 첫째는, 아주 작은 출력 impedance와 안정된 출력을 가지는 전압원을 사용하는 것이다. 그러나 이는 기기선택에 제한적으로 사용할 수가 있을 것이다. 둘째는 software적인 방법으로 null을 찾는 것으로, 먼저 그림 2의  $V_S$  에  $+V_1$  Volt,  $V_X$  에  $-V_2$  Volt 의 전압을 가한 뒤의 전류값  $I_+$ 를 측정하고, 다음 반대로  $V_S$  에  $-V_1$  Volt,  $V_X$ 에  $+V_2$  Volt 의 전압을 가한 뒤의 전류값  $I_-$ 를 측정한다. 그리고 두 값의 평균값을 식 (2)와 같이 구한다.

$$I_{null} = (I_+ + I_-) / 2 \quad (3)$$

이 평균값( $I_{null}$ )이 측정시스템의 null 전류값이 되는 것이다. 이 방법의 장점은 DC Voltage Calibrator의 선택시 출력임피던스보다는 출력전압의 안정도만 고려할 수 있다는 것이다.

Modified bridge circuit에서 가변전원( $V_X$ )을 변화시켜가며 electrometer에서 읽는 전류가 앞서 결정된 null 전류와 일치할 때의 값을 결정하는 balancing 과정은 여러 방법으로 할 수 있다. Manual로 전원( $V_X$ )을 가변시키며 측정하는 방법과 GPIB interface를 사용하여 프로그래밍으로 가변전원( $V_X$ )을 변화시키며 제어하는 automatic 방법이 있다. 본 시스템에서는 측정시간의 감소 및 반복측정에 의한 측정오차의 감소를 위하여 automatic 측정법을 사용하였다<sup>(3)</sup>.

즉 앞서 결정된 null 전류를 SV(Setting Value), 현재 출력전류를 PV(Process Value)로 정한뒤 적당한 PID 값을 입력한 뒤에 제어를 시작하면 가변전원( $V_X$ )의 값이 조금씩 바뀌어가며 PV가 SV를 찾아간다. 이를 10회정도 실시한 뒤 SV-PV에 대한 전압을 그래프화 한 것이 그림 3이다. 그림 3의 점들을 fitting 처리하여 얻은 곡선이 식 (4)와 같다.

$$y = -99.01466 + (-9.891)x \quad (4)$$

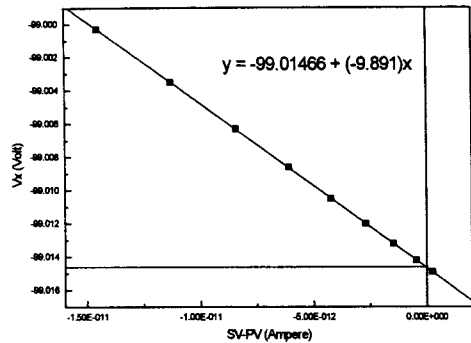


그림 3. SV-PV에 대한 가변전압 ( $V_X$ ).

식 (4)에서  $x$ 의 값이 0이 되는 점, 즉  $SV = PV$  인 balancing 전류에서의 전압( $V_X$ )은 99.01466 Volt가 된다. 이 값을 식(2)에 대입하면 바로 측정저항  $R_X$ 의 값을 구할 수 있다. 이러한 모든 과정은 HP VEE 언어로 작성된 PID tuning routine에 의하여 제어되었다. 이 routine에 의하여 짧은 시간에 정확한 계측과 다양한 저항값의 측정에 쉽게 응용할 수 있게 되었다.

### 2.3 결과

본 시스템을 이용하여 러시아에서 제작한 10 MΩ, 1 GΩ 의 두 저항을 20 °C/35 %의 환경에서 측정하였다 (표 1의 KRISS). 이때 nominal ratio는 1:10 으로 하였고, 측정전압은 10 MΩ에서 10 Volt, 1 GΩ에서 100 Volt를 사용하였다. 그리고 러시아 국립표준연구소(VNIIM)에서의 측정결과와 비교하여 표 1에 정리하였다.

표 1. VNIIM 과 KRISS 의 측정결과 비교.

		10 MΩ	1 GΩ
Measurement Value	VNIIM	9.999 67 MΩ	1.000 035 GΩ
	KRISS	9.999 65 MΩ	1.000 033 GΩ
Type A STD uncertainty	VNIIM	0.5 ppm	2 ppm
	KRISS	1 ppm	0.5 ppm
Type B STD uncertainty	VNIIM	1.5 ppm	4 ppm
	KRISS	3.7 ppm	7.6 ppm
Combined STD uncertainty	VNIIM	1.6 ppm	4.5 ppm
	KRISS	3.9 ppm	7.6 ppm
Expanded uncertainty (k=2)	VNIIM	3.2 ppm	9 ppm
	KRISS	7.8 ppm	15.2 ppm

표 1에서 KRISS와 VNIIM과의 측정값은 2 ppm 내의 일치도를 보였다. 그리고 type A standard uncertainty는 1 GΩ에서 KRISS가 VNIIM보다 조금 작으나 type B standard uncertainty를 포함한 전체적인 불확도는 KRISS가 더 크다. 이를 이해하기 위해 표 2에 KRISS의 STD uncertainty를 전체적으로 정리하였다.

### 3. 결론

본 연구소에서 고저항 정밀측정 시스템을 제작하였다. 이 시스템은 두 대의 DC Voltage Calibrator와 Digital Electrometer, 표준저항  $R_S$ , 측정저항  $R_X$ 로 구성하였다. 그리고 계측제어프로그램은 HP VEE 언어를 작성한 PID tuning routine을 사용하였다. 측정결과 type A 표준 불확도는 10 MΩ에서 1 ppm, 1 GΩ에서 0.5 ppm으로 시스템은 안정적임을 알 수 있었다. 그러나 확장불확도는 각각 7.8 ppm, 15.2 ppm으로 다소 큰 값을 가지나, 이는 dc voltage calibrator와 electrometer의 안정도에 크게 의존하므로 기기의 선택에 따라 더욱 개선할 수가 있을 것이다. 측정시스템은 매우 안정적인 상태이며, 앞으로 측정기기의 선택에 따라 더욱 작은 오차로 측정할 수 있을 것이며, 1 GΩ 이상 100 TΩ 영역까지의 고저항도 정밀측정할 수 있을 것으로 생각된다.

표 2. KRISS의 STD uncertainty.

		Nominal Resistance	
		10 MΩ	1 GΩ
Type A STD uncertainty		1 ppm	0.5 ppm
Type B STD uncertainty	STD Resistor	1ppm (1 MΩ)	1 ppm (100 MΩ)
	TEMP Correction	< 0.5 ppm	1 ppm
	Ratio Accuracy & Linearity	2 ppm	6.8 ppm
	Detector Linearity	2 ppm	2 ppm
	Detector Stability	2 ppm	2 ppm
	Leakage Current	1 ppm	1 ppm
Combined STD uncertainty (RSS)		3.9 ppm	7.6 ppm
Expanded uncertainty (k=2)		7.8 ppm	15.2 ppm

### [참고 문헌]

1. William David Cooper, "ELECTRONIC INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNIQUES", p158, 1979.
2. Lesley C A Henderson, "A new technique for the automatic measurement of high value resistors", J.Phys. E: Sci. Instrum. 20, 1987.
3. Dean G. Jarrett, "Automated Graded Bridge for Calibration of Multimegohm Standard Resistors from 10 MΩ to 1 TΩ", IEEE TRANS. ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, 46(2), 1997.

표 2에서 보듯이 전체적으로 불확도가 커지는 것은 시스템을 구성하는 DC Voltage Calibrator와 Digital Electrometer의 안정도나 직선성에 크게 의존하기 때문이다. 그러므로 더욱 안정된 기기를 사용한다면 현재보다 더 작은 불확도를 가지고 측정할 수가 있을 것이다. 또한 1 GΩ이 10 MΩ보다 더 큰 값의 저항임에도 불구하고 type A STD uncertainty가 작은 원인은 측정전압의 차이로 이해할 수가 있다. 측정전압이 커지면 측정오차로 작용하는 회로의 누설저항이나 누설용량에 의한 오차를 감소시키므로써 보다 정확한 측정을 할 수가 있을 것이다. 현재 상용되고 있는 여러 브릿지 회로는 측정전압이 제한되어 있는 반면에 본 시스템의 측정전압은 dc voltage calibrator의 출력에만 상관하므로 다양한 저항값의 측정, 특히 고저항의 측정에 유리하다는 것을 알 수 있다.