

교류저항 표준기 제작과 그 특성

김한준, 이상화, 강전홍, 유광민, 한상옥*
한국표준과학연구원, *충남대학교

Development and Its Properties of Resistance Standards for Using Alternative Current

Han Jun Kim, Sanghwa Lee, Jeon Hong Kang, Kwang Min Yu, Sang Ok Han*
KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science), *Chungnam Univ.

Abstract : Resistance standards from 1 Ω to 100 kΩ, with calculable frequency dependencies of up to 1 MHz, have been developed for the calibration of commercial inductance-capacitance-resistance (LCR) meters and impedance analyzers. The resistors are designed on the basis of single bifilar loops. The typical resistance change from dc to 1 MHz is from 200 to 800 μΩ/Ω. According to the measurement results, the frequency dependencies of the resistors are severaltimes lower than the measurement uncertainty of commercial LCR meters.

Key Words : calibration, ac resistor, frequency dependencies, LCR meters, bifilar

1. 서 론

일반적으로 저주파수 대역에서 임피던스 (전기저항, 전기용량, 인덕턴스) 측정에 많이 사용되고 있는 LCR 미터와 임피던스 분석기들은 많은 발전을 하여 주파수 대역은 10 MHz 대역까지, 임피던스는 1 Ω~100 MΩ의 대역까지 측정할 수 있게 되었다. 그러나 이러한 기기의 교정은 현재 저항값 및 전기용량값 공히 주파수 1 kHz에서만 되고 있다. 더 높은 주파수에서의 교정은 Suzuki^[1] 혹은 Callegaro^[2]로에 의해서 제안된 방법으로 1 pF에서 1 nF의 범위의 전기용량값에서 만 수행되었다.

한편 전기저항에서는 주파수 1 MHz에서 주파수에 대한 저항의 변화가 약 0.01 %가 넘지 않는 100 Ω나 1 kΩ의 동축구조형 저항이 넓은 주파수대역에서 정확한 저항 측정을 위한 기준으로 사용된다.^{[3][4]} 이러한 저항들이 Thompson-Lampard cross capacitor^{[5][7]}이론에 기반하여 Ω의 단위를 생산해보고자 연구된 calculable frequency dependencies 기능을 갖춘 저주파수용 저항기의 고주파수용 version이다. 본 연구에서는 주파수 1 MHz까지 LCR 미터와 임피던스 분석기의 교정을 위하여 bifilar 형의 저항을 기본으로 한 주파수 응답이 계산이 가능한 저항표준기를 개발하였다.

2. 제 작

일반적으로 저항을 제작하기 위한 저항선으로 상업화된 것은 길이 당 저항값이 매우 크게 제작이 되기 때문에 bi-filar 형으로 저항표준기를 제작하기에는 1 Ω이나 10 Ω의 nominal 값은 너무 작다. 따라서 이 두 resistor는 얇은 tape 형의 크로뮴, 바나듐, 갈륨으로 합금된 저항 element를 사용하여 제작하였고 100 Ω부터 10 kΩ까지의 저항은 저항선을 이용하여 제작하였으며, 마지막으로 100 kΩ은 Fused silica 판을 사용하여 한쪽면에는 저항

wire를 반대쪽 면에는 ceramic 필름위에 저항물질을 두께 1 μm로 deposit 하여 저항선을 만든 다음 fused silica 판을 기준으로 중간점에서 welding 함으로서 bi-filar 구조의 저항 component를 제작하였다.

표 1. Information about resistance element and supporter.

nominal value	type of bi-filar	parameters of resistance element	parameters of supporter
1 Ω	tape	Manganin tape $\rho=0.47 \times 10^{-6} \Omega\cdot m$, Thickness: 25 μm, width: 3 mm	Thickness: 0.15 mm (0.06 mm fiber-glass cloth + 접착제), $\epsilon_r=2.6 \sim 3.5$
10 Ω	tape	chromium, vanadium, gallium alloy tape, $\rho=1.8 \times 10^{-6} \Omega\cdot m$, Thickness: 3 μm, width: 5 mm	mica 0.060 mm, $\epsilon=6.4$
100 Ω	bi-filar	Nikrothal LX, $\rho=1.3 \times 10^{-6} \Omega\cdot m$, Diameter: 42 μm	Fused silica: $t=3$ mm $\epsilon=3.8$ $\tan \delta \leq 1 \times 10^{-5}$
1 kΩ	bi-filar 4 section	Nikrothal LX, $\rho=1.3 \times 10^{-6} \Omega\cdot m$, Diameter: 35 μm	Fused silica: tube, Outer dia.= 15 mm, Thickness= 1.3 mm $\epsilon=3.8$ $\tan \delta \leq 1 \times 10^{-5}$
10 kΩ	bi-filar	Micro-wire coated with glass, $\rho=1.2 \times 10^{-6} \Omega\cdot m$, Diameter: 25 μm (include glass-coated), Diameter: 3-8 μm (except glass-coated)	Fused silica: plate, Thickness= 3 mm $\epsilon=3.8$ $\tan \delta \leq 1 \times 10^{-5}$
100 kΩ	bi-filar, one side: wire, the other side: resistance line deposited on the ceramic plate	One side: chromium, vanadium, gallium alloy wire, $\rho=1.8 \times 10^{-6} \Omega\cdot m$, The other side: deposit Thickness: 1 μm	Fused silica: plate $t=4$ mm, $\epsilon=3.8$ $\tan \delta \leq 1 \times 10^{-5}$ Ceramic: plate $t=1.2$ mm, $\epsilon=3.8$

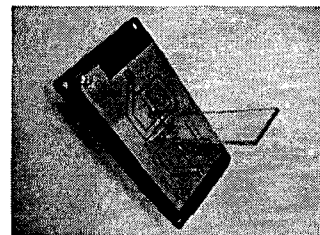


그림 1. Inside of a 100 Ω resistor.

제작된 저항 element들은 4-terminal-pair의 구조로 BNC 터미널을 사용하여 알루미늄 상자에 결합하였다. 표1은 사용된 저항재료와 지지대에 대한 자료의 정보들이고, 그림1은 100 Ω 저항의 내부모습이다.

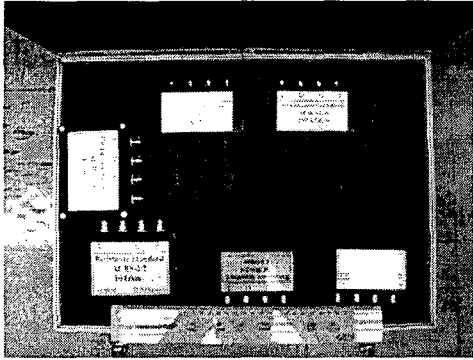


그림 2. Developed resistors.

3. 결과 및 검토

저항에서 주파수에 영향을 받는 요소는 무한히 많다고 할 수 있다. 이것을 수식으로 정리해 보면

$$R_f = R_0[1 + \delta_{RZ}(f)] \quad (1)$$

로 쓸 수 있다.

여기서 R_0 : 직류 저항 값,

$\delta_{RZ}(f)$: 주파수에 의해 저항 값에 영향을 주는 모든 error parameter 들에 의한 total error율.

a_i : 측정값에 영향을 미치는 error 요소들 이다.

표 2. Analysis of total error by calculation.

nominal value	total error, $\delta_{RZ}(1 \text{ MHz})$, %	time constant, τ , $\times 10^{-4}$, sec	parameters of error, $\times 10^{-4}$						
			δ_{R0}	δ_{ec}	δ_{esc}	δ_{sh}	δ_M	δ_c	δ_{end}
1 Ω	≤0.06	9 ± 3	5	0.5	≤0.001	-0.1	±1	≤0.001	-
10 Ω	≤0.03	2 ± 2	1	0.05	≤0.001	0.5	±0.5	≤0.001	-
100 Ω	≤0.02	1 ± 1	0.8	0.003	≤0.001	≤0.001	±0.5	-0.01	-
1 kΩ	≤0.02	1 ± 1	0.5	≤0.001	-	≤0.001	±1	-0.01	-
10 kΩ	≤0.05	1 ± 1	0.9	-	-	-0.004	±0.5	-0.4	-
100 kΩ	≤0.10*	3 ± 3	0.6	-	-	-0.4	±0.5	±10*	≤0.001

측정 주파수가 저항의 공진 주파수의 10 %이내일 경우에는 많은 error 요소들 중에서 거의 대부분이 미치는 영향은 무시할 수 있어지고 단지 몇 개의 요소만을 고려해 주면 되는데 이때 상기 식 (1)의 total error를 항은 표 2와 같이 정리될 수가 있다.

여기서

δ_{R0} : 저항 element 양 단자에서 나타나는 L과 C에 의한 오차요인

δ_{ec} : 저항 element 자체에서 나타나는 eddy current에 의한 오차요인

δ_{esc} : screen에서 나타나는 eddy current에 의한 오차요인

δ_{sh} : bi-filar 지지대의 유전율에 의해서 저항 element와 shunt 연결되는 C에 의한 오차요인

δ_M : 4-TP 연결단자에서 발생하는 상호인덕턴스에

의한 오차요인

δ_c : 4-TP의 전압, 전류의 high 측 단자와 Low 단자사이에서 발생하는 전기용량 C에 의한 오차요인

δ_{end} : bi-filar 저항 element의 길이가 유한하므로 기본 이론과의 차이에서 발생하는 오차요인.

표2는 상기 식(1)의 오차요인들을 측정 혹은 분석한 결과를 정리한 것이다.

4. 결론

개발된 저항표준기들은 일반적으로 상품화 된 LCR 미터와 임피던스 분석기들을 1 MHz까지 교정하고 분석하는데 유용한 기기로서 사용이 되어 질 수 있을 것이다. 개발된 저항기들의 주파수 계수는 LCR 미터들의 측정불확도보다 수배정도 작은 것으로 분석이 되었으며 되었으며 이것은 개발된 저항표준기를 사용하여 상기한 기기의 교정에 충분히 사용이 가능함을 의미한다. 좀더 정밀한 측정장비들을 사용하여 좀더 정확한 주파수 특성을 분석해 볼 필요는 있다.

참고 문헌

- [1] K. Suzuki, "A new universal calibration method for four-terminal-pair-admittance standards," *IEEETrans. Instrum. Meas.*, vol.IM-40, pp. 474-476, Apr. 1991.
- [2] L. Callegaro and F. Durbiano, "Four-terminal-pair impedances and scattering parameters," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. 523-529, 2003.
- [3] Sh. Awan, B. Kibble, I. Robinson and P. Giblin, "A new four-terminal-pair bridge for traceable impedance measurements at frequencies up to 1 MHz," *IEEETrans.Instrum.Meas.*,vol.IM-50, no. 2, pp. 282-285, Apr. 2001.
- [4] Sh. Awan, B. Kibble, "Towards accurate measurement of the frequency dependence of capacitance and resistance standards up to 10 MHz," *IEEETrans.Instrum.Meas.*,vol.IM-54, no. 2, pp. 516-520, Apr. 2005.
- [5] R. J. Haddad, "A resistor calculable from dc to $\omega = 10^5$ rad/sec," M. Sc. Thesis, George Washington Univ., Washington, DC, p. 57, 1969.
- [6] D. L. H. Gibbings, "A design for resistors of calculable a.c./d.c. resistance ratio," *ProceedingsI.E.E.*,v.110,no. 2, pp. 335-347, Feb. 1963.
- [7] Yu. P. Semenov, I. Klebanov, R. D. Lee and H. J. Kim, "Bifilar ac-dc resistor using a microwire," *IEEETrans. Instrum. Meas.*, vol.IM-46, no. 2, pp. 333 - 336, Apr. 1997.