

직류/교류 저항표준기 제작 및 그 특성

김한준, 강전홍, 유광민, 한상옥*
한국표준과학연구원, 충남대학교*

Development and Characteristics of DC/AC Resistance Standard

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

Abstract : 교류에서의 전기저항값은 저항 elements 사이에서 나타나는 stray 전기용량과 elements의 길이에서 유도되는 인덕턴스의 영향으로 직류에서의 저항값과 차이를 보이게 된다. 이러한 직류와 교류에서의 저항값 차이가 대단히 작게 나면서 직류에서와 측정하는 교류에서의 저항값의 차이를 계산에 의해서 산출할 수 교류저항 표준기가 개발되었다. 개발된 교류저항표준기는 bi-filar 구조의 1 kΩ으로서, 1.6 kHz에서 직류/교류 저항값의 차이는 0.02 μΩ/Ω보다 작으며, 시정수는 1 kHz에서 $(8 \pm 2) \times 10^{-10}$ 으로 측정되었다. 개발된 교류저항 표준기는 교류저항 국가표준에 최상급 표준기로 사용이 되어질 것이다.

Key Words : Resistance standard, Bi-filar, Calculable, ime constants, ac resistance, Stray capacitance

1. 서론

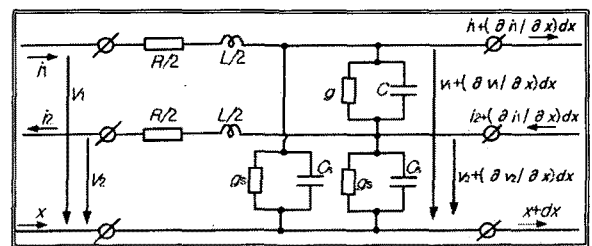
직류저항의 국가표준은 QHR로부터 소급이 된다. 그동안의 집중적인 연구로 직류에서의 QHR은 10^{-8} order의 불확도로 측정을 할 수 있게 되었다^[1-2]. 한편 교류저항은 전기용량 국가표준으로부터 소급시키는 방법과 직류저항으로부터 소급시키는 2가지의 방법이 있다. 이 중에서 직류저항 즉 QHR로부터 소급을 시키기 위해서는 반드시 직류에서의 저항값과 측정하고자 하는 주파수에서 저항값의 차이를 알 수 있는 표준기가 필요하다. 직류/교류저항을 비교하기 위한 이상적인 것은 직류와 교류에서 같은 저항값을 갖는 주파수에 독립적인 것(1×10^{-8} 이하)것이고, 계산으로 직류와 교류에서의 저항차이를 계산할 수 있어야 한다. 이러한 것은 단순한 모양의 평면형 구조, coaxial wire 혹은 bi-filar wire 저항선, shield된 직선형의 저항선 등으로 제작하는 방법이 있다. 본 연구에서는 bi-filar wire 방법을 사용하여 1 kΩ 교류저항 표준기를 제작하였고 그 특성을 분석하였다.

2. 제작

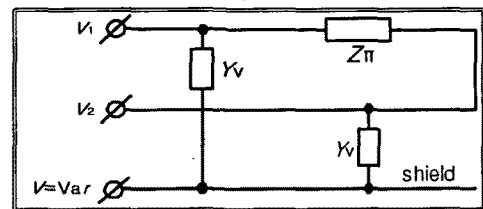
2.1 디자인

본 연구에서 제작된 것은 쉴드 된 하나의 bi-filar 저항선으로 제작 즉 도체 상자 내에 "U"자 형의 저항선이 설치된 구조이다. 이 구조는 single loop 모델로서 볼 수 있고, 두선 중심사이 간격과 선의 길이의 비는 20~25 배보다 크

다. 이 경우는 무한대 길이의 저항선에 적용되는 방정식과의 오차는 수 % 이내이며, 길이에서의 edge 효과는 실제적으로 무시할 수 있다. 그림 1에 쉴드된 단일 bifilar 저항의 모델을 보였다.



(a)



(b)

그림 1. 쉴드 된 단일 bifilar 저항 모델

(a) 단일 3선 시작점으로부터 길이 x지점에서의 길이 dx의 element. (b) 등가 π회로

외부 쉴드도 하나의 균일한 선으로 볼 수 있으므로 이 모델은 그림 1과 같이 3개의 균일한 선으로 취급할 수가 있다. 그림 1의 모델로부터 아래의 식(1)을 유도할 수가

있다.

$$Z_{\pi} \approx R \left[1 + \frac{2}{3} \omega^2 (\tau_L \tau_C - \frac{1}{5} \tau_C^2) - \frac{1}{3} \omega^2 \tau_s \left(\tau_L - \frac{3}{10} \tau_C + \frac{1}{40} \tau_s \right) \right] + j\omega R \left\{ \tau_L - \frac{1}{3} \tau_C + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \left(\tau_L - \frac{6}{5} \tau_C \right) + \frac{1}{6} \tau_s \left[1 - \omega^2 \tau_L \left(\tau_L - \frac{9}{5} \tau_C + \frac{3}{20} \tau_s \right) \right] \right\}$$

$$Y_V \approx \frac{1}{24} \omega^3 \tau_s C_s \left(1 + \frac{1}{5} \omega^2 \tau_L \tau_s \right) + \frac{1}{2} j\omega C_s \left[1 + \frac{1}{12} \omega^2 \tau_s \left(\tau_L - \frac{1}{10} \tau_s \right) \right] \quad (1)$$

여기서 시정수 $\tau_L = L/C$, $\tau_C = RC$ 및 $\tau_s = RC_s$ 이고, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 이다. 또 L , R , C , C_s 는 각각 인덕턴스, 저항, 도체사이의 전기용량 및 도체와 쉴드사이의 전기용량이다. 따라서 임의의 쉴드 potential VS를 갖는 bifilar 저항의 complex 임피던스는

$$Z_{AB} = \frac{Z_{\pi}}{1 + KY_V Z_{\pi}} \quad (2)$$

여기서 $K = V_2/(V_1 - V_2)$, $0 \leq K \leq 1$ 이고 $(V_1 - V_2)$ 는 bifilar 저항의 터미널에서 전압차이다.

원형의 단면을 갖는 bilifar 저항의 주파수에 따른 저항의 변화를 추정하기 위해서는 아래 식 (3)이 사용되어진다.¹³⁾

$$R_{ac} = R_0 \left\{ 1 + \frac{(\omega \sigma \mu)^2}{192} \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{d}{a} \right)^2 + \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{d}{a} \right)^4 + \dots \right] \right\} \quad (3)$$

여기서 d 는 도체의 직경, a 는 도체사이 축사이의 간격, σ 는 저항선의 전기도전율, μ 는 저항선의 자기투자율이며 R_0 는 직류에서의 저항값이다. 즉 $a \rightarrow \infty$ 이면 식(3)은 하나의 절연된 도체의 교류저항을 계산하는 식이 된다.

2.2 제작

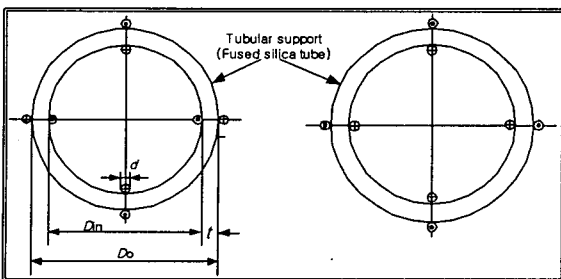


그림 2. 4개의 bifilar가 직렬로 연결된 제작된 1 kΩ 교류저항기의 연결도

제작에 사용된 저항선의 특성은 표 1과 같다.

표 1. 저항선의 특성 및 저항의 구조.

bifilar type	conductor	support
wire 4 sections	Nikrothal LX $\rho = 1.3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ $d = 0.04 \text{ mm}$	Fused silica $t = 1.3 \text{ mm}$ $\epsilon = 3.8$

표1과 같은 저항선을 사용하여 실린더 형의 fused silica에 bifilar 4개를 그림 2의 왼쪽 그림처럼 연결하였다. 선이 접혀지는 구조로 된 저항은 몇 개의 전류의 방향이 바뀌는 점이 발생하고 각각의 선들 사이 및 선과 쉴드사이에서 발생하는 전기용량은 저항의 주파수 특성에 영향을 준다. 주파수에 따른 영향은 아래 식 (4)을 적용할 수 있다.¹⁴⁾

$$R_{4TP} \approx R \left[1 + k^2 (1-k)^2 R^2 \omega^2 C_1^2 \right] \quad (4)$$

여기서 R 은 선 저항, C_1 은 lumped 전기용량이고 k 는 선의 시작점에서부터 선이 접힌 점까지 선길이이다. 식 (4)는 n 개의 선이 직렬로 연결된 저항에서의 적용할 수 있도록 식 (5)로 전환되어 진다.

$$R_{4TP} \approx R \left[1 + \frac{R^2 \omega^2 C_1^2}{n^2} \sum_{i=1}^{n-1} i^2 \left(1 - \frac{i}{n} \right)^2 \right] \quad (5)$$

제작된 저항은 온도가 $(28 \pm 0.01)^\circ \text{C}$ 로 유지되는 항온조 내에서 유지하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 교류저항기는 수학적 계산에 의해서 직류에서 1 kHz 까지의 주파수 correction factor가 0.02×10^{-6} 보다 작게 나타났으며, 시정수는 $(8 \pm 2) \times 10^{-10}$ 으로 계산되었다. 한편 제작된 저항의 단자는 4 terminal pair의 구조로 하였다.

4. 결론

QHR로부터 소급된 직류저항 국가표준으로부터 교류저항 국가표준을 소급하기 위하여 bi-filar 구조의 직류/교류 저항값의 차이가 대단히 작게 나오도록 설계된 직류/교류 저항 변환 표준기가 제작이 되었다. 이 저항 표준기는 몇 개의 parameter를 측정함으로써 직류와 측정하고자 하는 주파수(본 논문에서는 1 kHz)에서의 저항값의 차이를 계산 할 수가 있어서 앞으로 교류저항 국가표준의 primary 표준기로 사용이 된다. 제작된 표준기의 직류에서 1 kHz 까지 주파수 correction factor는 $(0.02 \pm 0.02) \mu\Omega/\Omega$ 보다 작게 나타났으며, 시정수는 $(8 \pm 2) \times 10^{-10}$ 으로 계산되었다.

참고 문헌

- [1] F. Delahaye, "AC measurements of the quantized Hall resistance from 1 Hz to 1.6 kHz", *Metrologia*, vol. 31, pp. 367-373, 1995.
- [2] J. Melcher, P. Warnecke and R. Hanke "Comparison of precision AC and DC measurements with the quantized Hall resistance", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 42, pp. 292-294, 1993.
- [3] P. A. Iokin, *Theory of Electrical Engineering*, Moscow, Russia: Higher School Publication, p. 384 Band 2(in Russian), 1976.
- [4] D. L. H. Gibbings, "A design for resistors of calculable ac/dc resistance ratio", *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 110, no. 2, pp. 335-347. Feb., 1963.