

금속 비저항의 정밀측정 방법

강전홍*, 유광민*, 박영태*, 이상화*, 유권상*
한국표준과학연구원*

Principle Measurement Method of Metals Resistivity

Jeon Hong Kang*, Kwang Min Yu*, Young Tae Park*, Sang Hwa Lee*, Kwan Sang Ryu*
Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)*

Abstract - 금속의 비저항 측정방법은 4단자 방법, van der Pauw 방법, Four-Point Probe(FPP) 방법, eddy current 방법 등이 있다. 이들의 측정방법은 다르지만 동일한 시료에 대해 평가한 비저항은 측정 불확도 범위 내에서 일치하여야 한다. 이에 따라 균질한 비자성 금속(STS 316)을 선정한 후 비저항을 평가한 결과 4단자와 van der Pauw 방법에 의한 비저항(도전율)은 각각 $75.86 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.273 %IACS)과 $75.84 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.273 %IACS)로서 거의 동일한 결과를 나타냈으며, Four Point Probe(FPP) 방법은 $75.91 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.271 %IACS), eddy current 방법은 $76.63 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.25 %IACS)으로 나타났다.

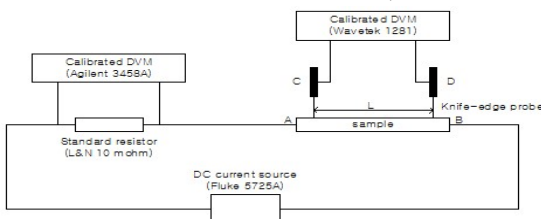
1. 서 론

전기산업에서 저항 표준의 필요성은 구리선에 대하여 일찍부터 인식되었으며, 이에 따른 연구결과가 최초로 공식적인 세계표준으로 받아들여진 것은 1914년 3월 Boeing 사가 발행한 보고서로 "20 °C의 온도에서 길이 1 m, 일정한 단면적(1 mm²)을 갖는 열처리된 구리선의 저항은 1/58 Ω 즉, 0.017 241 Ω" 으로 발표되었다. 그 후 이 값을 100 %IACS (International Annealed Copper Standard)로 정의하여 이를 적용하여 사용되고 있다[1]. 금속 비저항 측정방법은 4단자 방법[2], van der Pauw 방법[3], Four-Point Probe(FPP) 방법[4] 및 eddy current 방법[5] 등이 있으며, 이들 중 4단자 방법과 van der Pauw 방법이 비교적 정확한 측정방법으로 알려져 있다. Eddy current 방법을 제외한 측정 방법은 자성 및 비자성 금속에 모두 적용 가능하고, DC 전류를 이용하는 공통점이 있다. Eddy current 방법은 교류자장에 의해 기전력이 유도되는 원리를 적용한 것으로 재료의 표면효과, 교류전류 효과, 두께 효과로 인하여 측정 불확도[6]가 큰 단점이 있지만 비자성 금속의 도전을 측정에 간편하고 쉽게 사용되는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 STS 316시료에 대해 비저항(도전율) 정밀 측정방법을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 4단자 방법

4단자 방법은 시료가 바(bar) 또는 봉 형상 모두 정밀측정이 가능한 방법으로 본 연구에서는 폭 20 mm, 두께 10 mm, 길이 400 mm의 바(bar) 형상으로 가공하여 사용하였다. 그림 1처럼 비저항 측정 장치를 구성하여 직류(DC) 전류를 시료(A, B)에 공급하고, 시료의 양단 두 지점(C, D)에서 생기는 전위차(V)를 측정하여 저항(R)을 구하고 식 (1)에 의하여 비저항(ρ)을 구하는 방식이다.



<그림 1> 4단자 측정시스템의 구성도

전극 C와 D는 시료의 두 지점 간격(L)의 전위차(V)를 정확하게 측정하기 위하여 knife edge 전극으로 제작하였고, 필요에 따라 전극의 간격(L)도 조절 할 수 있도록 하였다. 시료의 단면적을 구하기 위해 두께(t)와 폭은 교정된 digital micrometer를 사

용하였다. 전압계의 offset에 의한 영향을 해소하기 위하여 전류를 정방향과 역방향으로 공급한 후 평균하였으며, 전기비저항은 다음 식 (1)에 의하여 계산된다.

$$\rho = RA/L \quad (\mu\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1)$$

여기서, ρ : 시료의 비저항($\mu\Omega \cdot \text{cm}$), R : 측정저항(Ω), A : 시료의 단면적(cm^2), L : 측정 전극 C와 D간의 간격(mm)이며, 전기 전도도(σ)는 식 (2)로서 구해진다.

$$\sigma = 1/\rho \quad (\text{MS/cm}) \quad (2)$$

그리고, 전기 전도도(σ)를 백분율 단위인 %IACS로 나타낼 경우에는 식 (3)으로 계산된다. 여기에서 적용되는 순수한 구리(Pure-Copper)의 비저항(ρ)은 20 °C에서 $1.7241 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 표 1은 4단자법에 의한 비저항 측정결과이다.

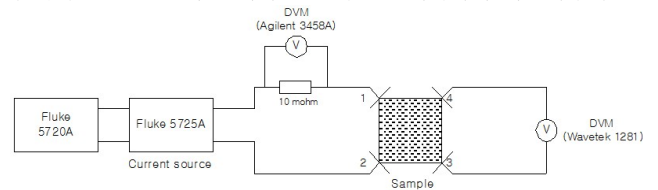
$$\%IACS = (1/\rho) \times 1.7241 \mu\Omega \cdot \text{cm} \quad (3)$$

<표 1> 비저항 측정결과

A (mm)	L (mm)	R ($\mu\Omega$)	Resistivity (ρ) ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Conductivity (σ) (MS/cm)	Conductivity ratio (%IACS)
330.5	240.4	551.7	75.86	0.013 18	2.273

2.2 van der Pauw method

그림 2와 같이 측정시스템을 구성하여 한쪽 면(1, 2)에 전류(I)를 공급하고 반대 면(3, 4)에서 전압(V)을 측정하여 비저항(ρ)을 구하는 방법이다. 시료는 두께가 3 mm이고, 정사각 형상(67 mm × 67 mm)으로 가공하여 비저항을 평가하였다. 또한 시료의 크기에 따라 전극 구성이 용이하도록 지그를 제작하여 사용하였다.



<그림 2> van der Pauw 측정시스템의 구성도

측정은 시료의 1과 2사이에 10 A의 전류를 공급하고 반대 방향의 3과 4의 위치에서 전위차(V)를 측정하여 저항(R_A)을 구한다. 그리고 같은 방법으로 1과 4사이에 전류를 가해주고 2와 3의 위치에서 전위차(V)를 측정하여 저항(R_B)을 구한다. 여기에서 저항(R_A , R_B)은 오옴의 법칙($R = V/I$)에 의해 저항을 구하고 식 (4)에 의하여 비저항을 구한다.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{\pi d}{\ln(2)} \frac{R_A + R_B}{2} f(r) \quad (4)$$

여기에서 R_A/R_B 가 1 % 이내이면 $f(r) = 1$ 이다. 여기서, ρ : 전기 비저항($\mu\Omega \cdot \text{cm}$), d : 시료의 두께(mm), σ : 전기 전도도(MS/cm)이다.

이와 같은 실험으로부터 각 시료의 두께별 전기비저항 측정결과를 표 2에 나타냈다.

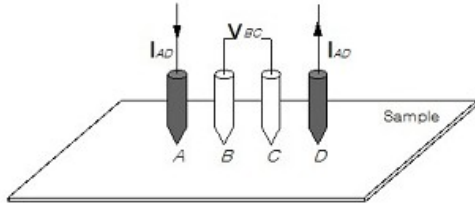
<표 2> 비저항 측정결과

시료의 두께	Resistivity(ρ) ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Conductivity(σ) (MS/cm)	Conductivity ratio (%IACS)
3.073 mm	75.84	0.013 18	2.273

2.3 Four-Point Probe method

FPP(Four-Point Probe)방법은 동일선상에 놓인 4개의 핀을 시료의 표면에 접촉시켜 저항을 측정하고, 기하학적 보정계수를 적용하여 면저항을 측정하는 방식이다[2]. Single configuration의 측정원리는 그림 3에서 핀 A, D에 전류(I_{AD})를 흘리고 핀 B, C에서 전압(V_{BC})을 측정하여 저항 $R_a = V_{BC}/I_{AD}$ 를 구하고, 면저항($R_s = k_a \times R_a$)을 구하는 방법이다.

여기서, $k_a = F(D/S) \times F(t/S)$ 이며, $F(D/S)$: 핀 간격에 대한 시료 크기 보정인자, $F(t/S)$: 핀 간격에 대한 시료의 두께 보정인자이다.



〈그림 3〉 Single-configuration

반도체 비저항 측정에 사용되는 상용 probe의 최대 사용 전류는 100 mA로서 금속 비저항이 수~수십 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 인 점을 감안할 때 적어도 100 mA이상의 전류를 시료에 흘려주어야 한다. 따라서 상용 probe를 사용하기에는 부적합 하므로 최대 10 A까지 전류를 흘릴 수 있는 probe (probe 간격: 5.0 mm)를 제작하였다. 실험은 van der Pauw 방법에서 사용된 시료를 사용하여 비저항을 측정하였으며, 표 3에 나타냈다. 전류원과 전압계는 상기의 4단자와 van der Pauw 방법에서 사용된 측정기를 사용하였으며, probe 간격에 따라 사용된 전류는 10 A 였다.

〈표 3〉 비저항 측정결과

시료의 두께	Resistivity(ρ) ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Conductivity(σ) (MS/cm)	Conductivity ratio (%IACS)
3.073 mm	75.91	0.013 17	2.271

2.4 Eddy current method

Eddy current에 의한 측정방법은 교류자장에 의해 기전력이 유도되는 원리를 적용한 디지털 전도도미터를 사용하여 비저항(도전율)을 측정하는 것이다. 측정방법은 표면이 평탄한 시료에 probe를 위치시키면 비저항(도전율)이 지시되는 것으로 국가 표준으로부터 교정되지 않은 전도도 미터를 사용하여 4단자 방법에서 사용된 STS 316 시료에 대해 측정하였다. 측정값은 상기의 세 방법보다 상이하게 나타났으며 이것은 측정기가 갖고 있는 측정 정확도와 직선성에 따른 원인으로 판단된다. 따라서 이러한 전도도 미터는 반드시 주기적인 교정을 통하여 그 측정 정확도를 확인하고 교정 성적서를 참고하여 보정하여야 한다. 또한 전도도 미터를 사용할 때에는 시료에 대한 두께 의존성이 있으므로 에 따라 적합한 probe를 확인하여 사용하여야 한다. 교정하지 않은 전도도 미터를 사용하여 측정된 결과는 표 4와 같다.

〈표 4〉 비저항 측정결과

시료의 두께	Resistivity(ρ) ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Conductivity(σ) (MS/cm)	Conductivity ratio (%IACS)
10 mm	76.63	0.013 05	2.25

3. 결 론

전류원, 전압계, 표준저항, 길이 및 두께 측정기 등을 사용하여 금속 비저항의 정밀측정 방법에 대해 고찰한 결과 시료의 두께는 비저항과 직접 비례하므로 정밀가공이 요구된다. 또한 4단자와 van der Pauw 방법에 의한 비저항(도전율)은 각각 $75.86 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.273 %IACS)과 $75.84 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.273 %IACS)로서 거의 동일한 결과를 나타냈으며, 측정 불확도는 0.25 %였다. Four Point Probe(FPP) 방법은 $75.91 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.271 %IACS)였으며, 측정 불확도는 0.45 %였다.

Eddy current 방법으로 평가한 비저항은 $76.63 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (2.25 %IACS)으로 나타났으며, 측정 불확도는 0.93 %였다. 또한 비접촉식 비저항 측정방법으로서 산업현장에서 가장 간편하게 사용할 수 있는 장점이 있으나 비자성 금속에 한정하여 사용하는 단

점이 있다. 본 연구결과로부터 금속의 비저항 평가는 시료의 크기와 형태에 따라 정밀측정이 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] ASTM B193-78, Resistivity of electrical conductor materials (1978).
- [2] NIST Technical Note 1531, DC conductivity Measurements of Metals. (2004).
- [3] van der Pauw, "A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape", *Philips Res. Rep.*, vol. 13, pp.1-9, 1958
- [4] ASTM F84, "Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers with In-Line Four-Point Probe"
- [5] A.R.Jones, Sr., "Eddy-Current Characterization of Materials and Structure", ASTM STP 722, American Society of Testing and Materials, pp. 94-118, 1981.
- [6] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO