

금속 전기비저항의 정밀측정에 관한 연구

강전홍, 유광민, 김한준, 한상옥\*, 박강식\*\*, 이세현\*\*\*  
 한국표준과학연구원, 충남대학교\*, 대덕대학교\*\*, 한국폴리텍 대전대학교\*\*\*

A study on the Precision Measurement of Metal Electrical Resistivity

Kang Jeon Hong, Yu Kwang Min, Kim Han Jun, Han Sang Ok\*, Park Kang Sic \*\*, Lee Sae Hun \*\*\*  
 KRISS, \*Chungnam University, \*\*Daeduk University, \*\*\*Korea Polytechnic

**Abstract** - 금속의 전기 비저항 측정방법은 일반적으로 4단자, van der Pauw, Four-Point Probe(FPP), eddy current 방법 등이 있다. 이들의 측정방법들은 각각 다르지만 동일한 시료에 대한 전기 비저항 측정값은 거의 같은 결과를 나타내야 한다. 금속 전기 비저항의 정밀측정에 대한 연구를 위하여 비자성 금속인 STS 316 시료를 선정하여 측정된 결과 4단자와 van der Pauw 방법으로 측정된 비저항은 각각  $75.86 \mu\Omega(2.273 \%IACS)$ ,  $75.80 \mu\Omega(2.275 \%IACS)$ 이며, 측정 불확도는 0.25 %로서 거의 동등한 결과를 나타냈고, Four Point Probe(FPP) 방법으로 측정된 비저항은  $75.36 \mu\Omega(2.288 \%IACS)$ , 측정 불확도는 0.45 %, eddy current 방법으로 측정된 비저항은  $76.63 \mu\Omega(2.25 \%IACS)$ , 측정 불확도는 0.64 %로 나타났다.

1. 서 론

전기산업에서 저항 표준의 필요성은 copper선에 대하여 일찍부터 인식되었으며, 이에 따른 연구결과가 최초로 공식적인 세계표준으로 받아들여진 것은 1914년 3월 Boeing 사가 발행한 보고서로 그 내용의 일부에서 “20 ℃의 온도조건에서 길이 1 m, 일정한 단면적(1 mm<sup>2</sup>)을 가지는 표준 열처리된 구리선의 저항은 1/58 ohm 즉, 0.017 241 ohm”으로 발표되었다. 그 후 이 값을 100 %IACS (International Annealed Copper Standard)로 정의하였고, 금속산업의 발달과 함께 copper선 이외에 다른 금속의 전기 비저항(도전율)에 대한 연구가 진행되고 있다. 우리나라 국가표준기관인 한국표준과학연구원에서는 DC(Direct Current)에 의한 전기 비저항(도전율) 정밀측정방법을 통하여 표준소급을 유지하고 있으며, 다양한 비자성 금속에 대한 전기 도전율 인증표준물질(CRM: Certified Reference Material)을 개발 및 보급하고, 전도도 미터(Conductivity Meter)의 교정은 물론 각종 금속 및 박막 시료에 대한 비저항 시험검사 등을 지원하고 있다. 항공우주산업을 비롯한 자동차, 선박, 철강, 건설, 전기 등 금속산업의 현장에서는 다양한 종류의 자성 또는 비자성 금속 재료들이 널리 사용되고 있으며, 사용 용도에 따라 전기 비저항(도전율)에 대한 정밀 측정이 요구되고 있다. 비저항(도전율) 측정방법은 보편적으로 4단자 방법, van der Pauw 방법, Four-Point Probe(FPP) 방법 및 eddy current 방법이 있으며, 이들 중 4단자 방법과 van der Pauw 방법이 측정의 정밀·정확도가 가장 높은 방법으로 알려져 있다. 4단자 방법은 시료의 크기와 형상을 일정한 두께로 정밀 가공하여야 하며, van der Pauw 방법은 두께가 일정한 sheet 형태이면 어느 정도의 크기와 형상에 구애 받지 않고 정밀 측정할 수 있다. FPP 방법은 반도체 공정에서 주로 사용되는 방법이지만 금속에도 적용하여 사용할 수 있으며, 측정원리는 측정단자들이 일직선상의 four-pin으로 이루어져 있어서 시료의 국부적 영역에서도 도전율 측정

이 가능한 장점이 있다. 상기의 측정 방법들은 자성 및 비자성 금속에 모두 적용이 가능하고, DC 전류를 이용하는 공통점이 있다. 마지막으로 eddy current 방법은 교류자장에 의해 기전력이 유도되는 원리를 적용한 conductivity meter를 사용하여 비저항(도전율)을 측정하는 방법으로 이것은 재료의 표면효과 및 교류전류 효과로 인하여 측정의 정확도가 떨어지는 단점이 있지만 비자성 금속의 도전율 측정에 가장 간편하고 쉽게 사용되는 방법이다. 따라서 본 연구는 국가표준으로부터 소급성이 유지된 전류원 및 전압계 등의 측정기들을 사용하여 이들 각각에 대한 전기 비저항(도전율) 정밀측정방법에 대하여 논하고 그 측정 결과를 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험준비

실험에 사용된 시료는 STS 316 비자성 금속을 사용하였으며, 실험환경은 온도 (23.0±1.0) ℃, 습도 (50±5) %였다. 시료의 두께는 전기 비저항과 밀접한 관계가 있으며, 측정 불확도에 미치는 영향이 매우 크므로 시료의 두께를 균일하게 가공하여야 한다. 또한 시료의 두께를 정확하게 측정하기 위하여 0.05 %의 정확도를 갖는 digital micrometer 두 대를 그림 1처럼 시료를 사이에 두고 ball 과 ball 이 접촉하는 원리를 이용하여 제작한 후, 길이의 국가표준으로부터 소급성이 유지된 gage block으로부터 두께측정기를 교정 및 보정한 후 측정하였다.

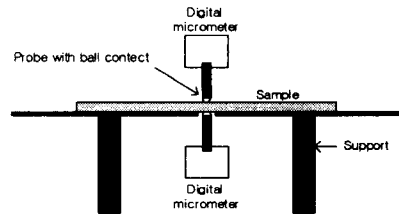


그림 1. 두께 정밀 측정 장치

또한, 4단자 측정방법에서 전극 길이(L)의 측정은 gage block으로부터 교정된 digital micrometer를 사용하여 측정하였다. DC전류원은 안정된 직류전류를 시료에 흘려주기 위하여 Fluke사의 5720A와 5725A amplifier를 사용하였으며, 전류의 정확도는 50 μA이다. 전압계(digital voltmeter)는 Agilent 3458A, Wavetek 1281을 사용하였으며, 100 μV range에서의 정확도는 8 μV/V이다. 직류 전류원에서 흐르는 전류를 정확하게 측정하기 위하여 표준저항(L&N 10 mΩ)을 사용하였으며, 정확도는 10 μΩ/Ω이다.

## 2.1.1 측정방법

### 2.1.1.1 4단자 측정방법 [1]

본 연구에서 4단자 측정방법은 시료가 바(bar) 형상이나 봉 형상 모두 정밀측정이 가능하나 본 연구에서는 폭 20 mm, 두께 10 mm, 길이 400 mm의 바(bar) 형태로 가공하여 실험에 사용하였다. 실험은 그림 2처럼 측정회로를 구성하여 시료에 직류(DC) 전류를 공급하고, 시료의 양단 두 지점에서 생기는 전위차를 측정하여 저항을 계산한 후 식 (1)에 의하여 비저항을 구하는 방법이다.

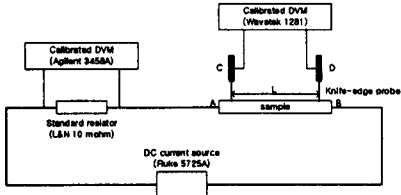


그림 2. 측정 구성도

정밀 측정을 위하여 제작된 측정 시스템은 시료의 크기와 형상에 따라 전극의 구성이 용이하도록 하였으며, 이 장치는 폭 50 mm, 두께 30 mm, 시료의 길이가 500 mm 이하의 시료에 대하여 실험이 편리하도록 제작하였다. 실험은 전류원으로 부터 전류를 그림 2의 전극 A, B 방향으로 공급하고, 전극 C와 D에서 전위차를 측정하여 저항을 구하였다. 전극 C와 D는 시료의 두 지점 전극 길이(L)의 전위차를 정확하게 측정하기 위하여 knife edge 전극으로 제작하였고, 필요에 따라 전극의 길이(L)도 좌우로 조절 되도록 하였다. 그리고 knife edge 전극이 시료의 표면에 수직방향으로 접촉되도록 설계하여 전위차 측정은 물론 전극 길이(L)를 정확하게 측정할 수 있도록 하였다. 시료의 두께(t)와 전극의 길이(L)는 국가 표준으로부터 소급성이 유지된 gage block을 사용하여 0.05%의 정확도를 갖는 digital micrometer를 교정한 후 측정하였다. 전극 C와 D의 전위차를 정확하게 측정하기 위해서는 반드시 knife edge 형태의 전극을 사용하여야 전극의 길이 측정으로부터 측정 불확도를 줄일 수 있으며, 평균 전위차를 정확하게 측정할 수 있다. 핀(pin) 전극을 사용하는 경우에는 pin의 위치는 시료의 중심에서 측정하여야 측정 오차를 줄일 수 있으나 pin 전극의 위치가 같은 거리라 할지라도 시료의 가장자리 방향으로 갈수록 전위차가 각각 다르게 나타나기 때문에 측정 불확도의 원인이 된다. 이것은 시료에 공급되고 있는 전류 밀도가 고르지 않기 때문에 나타나는 현상으로 추정되며, 전극 C와 D간의 평균 전위차를 측정하기 위해서는 knife edge 전극을 사용하여야 정확한 측정을 할 수 있다. 또한 본 실험에 사용된 모든 측정기는 제작사에서 권하는 예열 시간(4시간)을 준수하여 측정 하였으며, offset에 의한 측정정확도를 줄이기 위하여 전류를 정방향과 역방향으로 시료에 흘려 전극 양단(C, D)에서 전위차를 각각 측정하여 저항을 계산한 후 평균값을 취하였다. 또한, 측정은 10분 간격으로 6회 측정하여 평균값과 표준편차를 구하였으며, 그 측정 결과로부터 전기 비저항은 다음 식 (1)에 의하여 계산된다.

$$\rho = \frac{RA}{L} (\Omega \cdot \text{m}) \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ : 시료의 전기 비저항( $\Omega \cdot \text{m}$ ),  $R$ : 측정저항( $\Omega$ ),  $A$ : 시료의 단면적( $\text{m}^2$ ),  $L$ : 측정 전극 C와 D간의 길이( $\text{m}$ )이며, 전기 전도도( $\sigma$ )는 식 (2)로서 구해진다.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} (\text{S/m}) \quad (2)$$

그리고, 전기 전도도( $\sigma$ )를 백분율 단위인 %IACS로 나타낼 경우에는 순수한 구리 (Pure-Copper)가 100% 일 때, %IACS 단위는 다음 식 (3)으로 계산된다. 여기에서

적용되는 순수한 구리(Pure-Copper)의 비저항( $\rho$ )은 20°C에서 1.7241  $\mu\Omega \cdot \text{m}$ 이다.

$$\%IACS = \left(\frac{1}{\rho}\right) \times 1.7241 \mu\Omega \cdot \text{m} \quad (3)$$

상기의 식 (1)(2)(3)으로부터 계산된 결과는 표 1과 같으며, 측정 불확도는 표 2와 같다.

표 1. 측정결과

Resistivity( $\rho$ ) ( $\mu\Omega \cdot \text{m}$ )	Conductivity( $\sigma$ ) (MS/m)	Conductivity ratio (%IACS)
75.86	0.013 18	2.273

표 2. 측정불확도 분석

불확도 요인	표준 불확도	합성 표준불확도	확장 불확도 ( $k=2$ )
Area(A)	0.07 %	0.124 %	0.25 %
length(L)	0.08 %		
Voltmeter(V)	0.05 %		
Current source(I)	0.005 %		
Type A	0.04 %		

### 2.1.1.2 van der Pauw 방법 [2]

이 방법은 아래의 그림 3처럼 시료의 형상에 따라 임의의 네 점에 전극을 구성하여 비저항을 쉽게 측정할 수 있는 방법이다. 시료는 2 mm 두께의 사각 형상으로 된 67 mm x 67 mm를 정밀 가공하여 그림 3과 같은 측정 시스템을 구성하여 비저항을 측정하였다. 시료가 그림 3의 각 모서리(1, 2, 3, 4)에 위치하도록 측정 jig를 제작하였으며, 이것은 시료의 크기에 따라 전극 구성이 용이하도록 설계되었다.

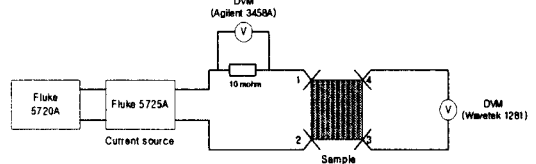


그림 3. 측정 system

실험은 제작된 측정 jig에 시료를 넣은 후 각 모서리의 전극을 크기에 맞게 조절하여 고정시키고, 시료의 1과 2사이에 10 A의 전류를 가해주고 반대 방향의 3과 4의 위치에서 전위차를 측정하여 저항( $R_A$ )을 계산한다. 그리고 같은 방법으로 1과 4 사이에 전류를 가해주고 2와 3의 위치에서 전위차를 측정하여 저항( $R_B$ )을 계산한다. 이와 같은 방법으로 두께가 다른 각각의 시료를 측정하여 그 측정결과로부터 전기 비저항은 다음 식(4)에 의하여 계산된다[2].

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

여기에서  $R_A/R_B$ 가 1% 이내이면  $f(r)=1$ 이다. 여기서,  $\rho$ : 전기 비저항( $\Omega \cdot \text{m}$ ),  $d$ : 시료의 두께(mm),  $\sigma$ : 전기 전도도(S/m)이다. 이와 같은 실험으로부터 전기 비저항을 측정된 결과를 표 3에 나타냈으며, 불확도 분석 결과를 표 4에 나타냈다.

표 3. 측정결과

시료의 두께	Resistivity( $\rho$ ) ( $\mu\Omega \cdot \text{m}$ )	Conductivity( $\sigma$ ) (MS/m)	Conductivity ratio (%IACS)
2.046 mm	75.80	0.013 17	2.275

표 4. 측정불확도 분석

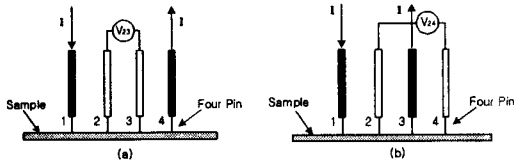
불확도 요인	표준 불확도	한성 표준불확도	확장 불확도 ( $k=2$ )
Thickness	0.10 %	0.123 %	0.25 %
Voltmeter (V)	0.05 %		
Current source (I)	0.005 %		
Type A	0.05 %		

2.1.1.3 4-Point Probe(FPP)방법 [3]

이 FPP측정방법은 그동안 주로 single configuration method을 사용하여 왔으나 최근에는 probe spacing 변화나 가장자리 영향으로부터 측정 정확도가 향상된 dual configuration method을 사용하고 있다. Single configuration method은 그림 4의 (a)에서 pin 1, 4에 전류를 공급하고 pin 2, 3에서 전압( $V_{23}$ )을 측정하여 면저항( $R_s = k_a \times R_a$ )과 비저항( $\rho = R_s \times t$ )을 구한다.

여기서,  $k_a = F_2(D) \times F(t/S) \times F_{SP}$ ,  $R_a = V_{23}/I_{14}$ 이며,  $F_2(D)$ : 직경보정인자,  $F(t/S)$ : 시료의 두께와 probe spacing의 두께 보정인자,  $F_{SP}$ : probe spacing에 대한 보정인자이다. Dual configuration method은 그림 4의 (b)에서 pin 1, 3에 전류를 공급하고 pin 2, 4에서 전압( $V_{24}$ )을 측정하여 면저항( $R_s = k_a \times R_b$ )과 비저항( $\rho = R_s \times t$ )을 구하는 방법이다.

여기서,  $k_a = -14.696 + 25.173(R_a/R_b) - 7.872(R_a/R_b)^2$ ,  $R_b = V_{24}/I_{13}$ 이며,  $1.20 \leq R_a/R_b \leq 1.32$ 이다.



상용 FPP용 probe의 최대 사용 전류는 100 mA이나, 금속의 비저항은 수~수십  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$  로서 정확한 측정을 위해서 보다 큰 전류를 공급하여 측정해야 한다. 따라서 본 연구는 FPP방법을 금속의 비저항 측정에 적용하기 위하여 DC 10 A 까지 사용 가능한 probe (probe spacing: 5.0 mm)를 제작하여 dual configuration 기술을 적용하여 비저항을 측정하였다. 측정결과에서 비저항 측정결과는 표 5에 나타냈으며, 측정 불확도 분석 결과를 표 6에 나타냈다.

표 5. 측정결과  
(probe spacing: 5.0 mm, applied current: dc 10 A)

시료의 두께	Resistivity ( $\rho$ ) ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )	Conductivity ( $\sigma$ ) (MS/cm)	Conductivity ratio (%IACS)
2.046 mm	75.36	0.013 27	2.288

표 6. 측정불확도 분석

불확도 요인	표준 불확도	한성 표준불확도	확장 불확도 ( $k=2$ )
Thickness	0.10 %	0.225 %	0.45 %
Voltmeter (V)	0.05 %		
Current source (I)	0.005 %		
Type A	0.125 %		

2.1.1.4 Eddy current method [4]

이 측정방법은 비접촉식 측정방법으로 비파괴적이며, eddy current 원리에 의한 측정기술을 적용하여 만든 electrical conductivity meter를 사용하여 4단자와 van der Pauw 방법으로 측정된 값을 기준으로하여 비교 측정하였으며, 그 측정결과는 표 7과 같으며, 불확도 분석 결과를 표 8에 나타냈다.

표 7. 측정결과

Reference values (%IACS) (A)	Measured values	
	%IACS (B)	Deviation (B-A)
SUS 316	2.273	-0.02

표 8. 측정불확도 분석

불확도 요인	표준 불확도	한성 표준불확도	확장 불확도 ( $k=2$ )
Accuracy	0.40 %	0.464 %	0.93 %
Reference sample	0.125 %		
Type A	0.2 %		

3. 결 론

국가표준으로부터 소급성이 유지된 측정기기(전류원, 전압계, 표준저항 등)를 사용하여 ASTM 및 KSM의 시험 규격에 따라 금속 전기 비저항을 정밀 측정 하였으며, 그 결론은 다음과 같다[5].

1. 시료의 두께는 전기 비저항 측정에 있어서 정밀·정확도 및 측정 불확도에 밀접한 관계가 있으므로 정밀 가공이 요구된다.
2. 4단자와 van der Pauw 방법으로 측정된 비저항은 각각  $75.86 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  (2.273 %IACS),  $75.80 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  (2.275 %IACS)로 유사하게 나타났으며, 측정 불확도는 0.25 %였다.
3. 4-Point Probe(FPP)방법을 적용한 금속 비저항은  $75.36 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  (2.288 %IACS), 측정 불확도는 0.45 %로 나타났다.
4. 상기의 측정 방법 모두 자성 및 비자성 금속에 모두 적용할 수 있는 장점이 있다.
5. Eddy current method는 산업현장에서 가장 쉽고 편리하게 사용할 수 있는 장점이 있으나 비자성 금속에 국한하여 사용되는 단점이 있다. 또한 측정된 비저항은  $76.63 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  (2.25 %IACS)였으며, 측정 불확도는 0.64 %로서 전기 비저항 측정방법 중 가장 크게 나타났다.
6. 본 연구에서 가장 정확한 금속의 전기 비저항 측정방법은 4단자와 van der Pauw 방법으로 평가되었다.

[참 고 문 헌]

[1] ASTM B193-78, Resistivity of electrical conductor materials (1978).  
 [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 F 1529-97, "Standard Test Method for Sheet Resistance Uniformity Evaluation by In-Line Four-Point Probe with the Dual-Configuration Procedure," 1997.  
 [4] A.R.Jones, Sr., "Eddy-Current Characterization of Materials and Structure", ASTM STP 722, American Society of Testing and Materials, pp. 94-118, 1981.  
 [5] Jeon Hong Kang, Kwang Min Yu, Han Jun Kim, Sang Ok Han, "Comparisons of Precision Measurement Methods for Metallic Resistivities", Vols. 321-323, pp.1465-1469, 2006.