

측정방법에 따른 비자성체의 전기도전을 비교

강전홍, 유광민, 김한준, 한상옥*, 김종석**, 박강식***

한국표준과학연구원, 충남대학교*, 한밭대학교**, 대덕대학교***

Electrical Conductivity Comparison according to Measurement Methods.

Jeon Hong Kang, Kwang Min Yu, Han Jun Kim, Sang Ok Han*, Jong Suk Kim**, Kang Sik Park***

KRISS, Chungnam Univ.*, Hanbat Univ.** , Daeduck Univ.***

Abstract

최근 항공우주산업을 비롯한 자동차, 선박, 철강, 건설, 전기, 국방, 금속산업 등 산업의 현장에서 첨단소재들을 널리 사용하고 있으며, 특히 비자성 금속재료에 대한 도전을 특성의 정밀분석이 요구되고 있다. 따라서 본 연구는 비자성 재료의 전기 도전율에 대해 널리 사용되고 있는 3가지의 측정방법을 통하여 정확한 측정과 함께 비교 분석하였으며, 이 측정방법에 따라 평가된 도전을 측정결과는 0.5 %이내의 정확도에서 일치하고 있는 것으로 나타났다.

Key Words : 도전율, 전기전도도, van der Pauw, 4단자 측정법, 비접촉식 전기전도도 측정

1. 서 론

본 연구에서 적용된 비 자성체 금속의 전기 도전을 측정방법에는 크게 3가지의 상용측정 방법으로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 4단자 측정방법으로서 시편 양단에 전류를 흘리고 시편의 양단 사이 두 지점에서 생기는 전압을 측정하여 저항을 구하는 방법이고, 두번째는 van der Pauw 측정방법으로서 4각 시편의 각 모서리에 전극을 구성하여 한 쪽 편에 전류를 흘리고 맞은 편에서 전압을 측정하여 저항을 구하는 방법이다. 그리고 세번째는 상기의 2가지 방법 모두 직류 전류를 사용하여 측정하는 접촉식 측정방식인 것에 비해 eddy current

에 의한 원리를 이용한 방법으로서 비접촉식 측정 방법이며 휴대용으로 간편하게 도전을 측정할 수 있는 장비로 digital conductivity meter가 그 예이다. 특히 항공우주산업에서 많이 사용하고 있는 비접촉식 conductivity meter는 알루미늄 합금에 대한 도전을 측정을 광범위하게 적용할 수 있으며 이러한 conductivity meter를 교정하기 위한 도전을 표준시편도 여러 범위(1~110 %IACS)가 있다. 항공기의 부품에 사용되는 알루미늄 및 알루미늄 합금의 전기도전을 측정은 항공기의 안전에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며 이에 따라서 전기도전의 소급성과 측정불확도는 매우 중요하게 취급된다. 오늘날 항공우주산업을 비롯한 선박, 자

동차, 철강, 전기전자 기기용 소재 등의 금속산업에서 사용되는 전기도전율의 취급은 그 적용대상에 따라서 매우 중요하게 여겨지고 있다. 이에 따라 본 연구는 전기도전율 측정방법에 따른 정밀 측정방법과 그에 따른 불확도평가 등에 대하여 비교분석 하였다.

2. 정밀측정방법

2.1 4단자 측정기술

4단자 측정기술은 바(bar)형태의 시료에 직류전류를 가해주고 양단의 두 지점에서 생기는 전압을 측정하여 저항을 구하는 방법으로서 제작된 4단자 측정전극의 구조는 그림 1과 같다. 또한 전극에 사용된 재료는 접촉이 잘 되도록 도전율이 좋은 구리(Copper)를 사용하였다.

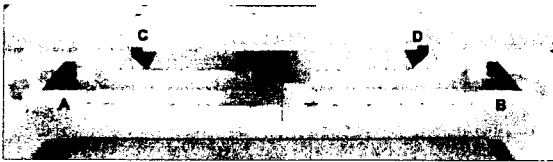


그림 1. 제작된 4단자 측정전극

제작된 전극의 구조는 폭 50 mm와 높이 30 mm 그리고 시료의 길이(290 mm~500 mm)에 따라 좌우로 조절 되도록 하였고, 그림 1에서 보여지는 양쪽 전극 A와 B는 가해주는 전류가 고루 분포되어 전달될 수 있도록 바(bar)형태로 제작하고 양쪽에서 볼트로 조절하여 전극을 고정하도록 하였다. 그리고 전극 C와 D는 시료의 양단 두 지점에서 전압을 측정하기 위한 것으로 45°각도의 knife모양(폭 30 mm)의 날을 세우고 지지대에 고정시켰으며 필요에 따라 좌우 길이(ℓ)도 조절되도록 하였다. 또한 길이(ℓ)측정에서 비롯되는 오차를 최대한 줄이고 정밀한 전압을 측정하기 위하여 시료의 표면에 수직방향으로 knife 전극의 날이 고루 닿도록 하였다. 일반적으로 전압 측정 전극은 핀(Pin)이나 바(Bar) 같은 형태로 구성하여 측정하기도 하나 측정의 정밀 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 핀 전극의 경우에는 핀의 위치가 시편의 중심에서 측정값과 가장자리 쪽으로 움직여서 측정값이 각각 다르게 나타나기 때문에 오차의 원인이 되기도 하

며, 바(bar)형태의 경우에는 전극 형상에 따라서 전압측정거리(ℓ)에서 비롯되는 오차가 측정 정확도에 큰 영향을 미치게 되므로 일반적으로 knife edges 전극형태를 사용한다. 본 연구에서 시료의 준비는 정밀 정확한 측정을 위하여 균질성이 좋은 재료를 선택하였고, 표면의 상태가 매끄럽고 시료의 단면적 등이 되도록 일정하게 가공하였다. 기준 시료(길이 300 mm×폭 30 mm×높이 10 mm)는 상기의 시료조건을 만족하는 구리(Cu), 아연(Zn), Steel 등 3종류에 대하여 평가하였다. 실험환경은 온도 20 °C±1 °C, 상대습도 50 %이하의 조건에서 실행되었으며, 실험에 사용된 모든 측정기는 제작사에서 권하는 내용에 따라 예열 시간(1~4시간)을 준수하였다. 실험은 dc current source (Fluke 5720A, 5725A, 불확도: 0.002 %)를 이용하여 A와 B전극에 실험대상의 시료를 장착시키고 dc 10 A의 전류를 가한 후 digital Voltmeter (Keithley 182, 1 nV의 분해능)로 시료의 양단(C, D)에서 각각의 전압을 측정하였다. 측정은 전류를 정방향과 역방향으로 가해주고 10분 간격으로 10회 반복하여 전압을 측정하였으며, 그 평균값을 취하고 type A의 불확도 평가에 적용하였다. 또한 각각의 시료에 대하여 측정된 저항 값을 토대로 식(1)(2)(3)에 의해 도전율을 계산하였으며, 전기 비저항은 일반적으로 식 (1)에 의해 계산된다.

$$\rho = R\left(\frac{A}{\ell}\right) \quad (1)$$

여기서, ρ 는 시료의 전기비저항($\rho: \mu\Omega \cdot \text{cm}$), R 은 측정저항(Ω), A 는 시료의 단면적(cm^2), ℓ 은 전압측정간격 C와 D간의 거리(mm)이며, 전기전도도(σ)는 식 (2)로서 구해진다.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

그리고 전기전도도를 백분율 단위로 나타낼 때에는 순수한 구리(Pure-Copper)의 전기전도도를 100 %로 하여 나타내고, %IACS 단위로 나타내면 식 (3)으로 적용된다[1].

여기서, 적용되는 순수한 구리(Pure-Copper)의 비저항값은 20 °C에서 1.7241 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이다.

$$\%IACS = \left(\frac{1.7241}{\rho} \right) \times 100 \quad (3)$$

2.2 van der Pauw 측정기술

van der Pauw 측정기술은 상기 3종류의 동종 시료에 대하여 사각 형태의 시료(50 mm×50 mm×10 mm)로 만들고 시료의 각 모서리에 전극이 형성되도록 그림 2와 같은 측정전극을 제작하였다. 전극은 사방으로 조절될 수 있도록 설계되어 시료의 크기에 따라 전극의 구성이 용이하도록 하였고 각각 네 모서리에 구성된 전극의 재료는 구리(copper)를 사용하여 접착이 잘 되도록 하였다.

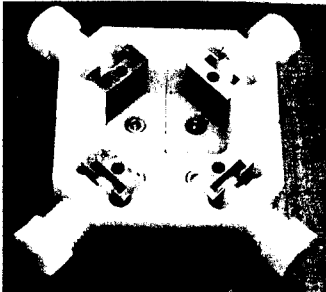


그림 2. 제작된 van der Pauw 측정전극

측정방법은 제작된 측정전극에 시료를 넣은 후 네 모서리의 전극에 고정시키고 그림 3의 (a)에서 보여지는 것처럼 1과 2사이에 전류를 가해주고 마주보는 방향의 3과 4의 위치에서 전압을 측정하여 저항 R_A 를 구한다. 그리고 같은 방법으로 그림(b)처럼 1과 4사이에 전류를 가해주고 2와 3사이에서 전압을 측정하여 저항 R_B 를 계산한다. 잘 알려진 van der Pauw 방식의 측정기술은 전기용량 계산에 적용되는 Lampard의 계산방법과 유사하며 계산은 다음 식(4)와 같다[2][3].

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

여기서, d 는 시료의 두께, σ 는 전기 비저항 (MS/m), $f(r)$ 은 ratio $r = R_A/R_B$ 에 의존하며 그 비율 값이 1 %내에 있으면 1과 같다고 보거나 무시할 수 있다. 측정에 사용한 기기는 상기의 2.1항에서 사용한 dc current source와 voltmeter를 사용하였으며 측정방법은 동일하였다.

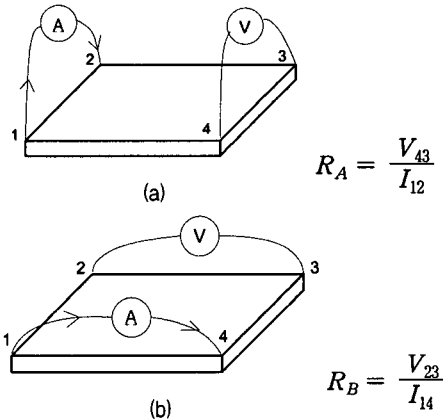


그림 3. van der Pauw 기술에 의한 측정방법

2.3 Eddy current method 측정기술

이 eddy current에 의한 측정방법[4]은 패러데이와 렌츠의 법칙에 의해 유도되는 기전력을 이용하는 측정기술로 본 연구에서는 오늘날 많이 사용되고 있는 휴대용 전기 도전을 측정기(conductivity meter, model : HOCKING 3000DL)를 사용하여 2.1항의 환경에서 시료를 측정하고 비교평가에 적용하였다. 측정은 기기 자체의 도전을 표준시편을 이용하여 gain을 조절한 후 각각 10회씩 측정하여 평균값을 취하고 불확도 평가에 적용하였다.

3. 측정결과와 불확도

상기 3가지의 측정방법에 의한 측정결과를 표 1에 나타냈으며 4단자 측정방법에 의한 결과를 기준으로 대부분 0.5 %이하의 범위에서 측정값을 보이고 있다. 따라서 3가지의 측정방법 모두 0.5 % 이하의 정확도를 보이고 있으므로 측정시의 편의에 따라 어느 방법을 취하더라도 측정결과에 대하여 0.5 %의 정확도 범위 내에서 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 실험환경이나 시료의 가공상태 및 균질성, 측정기기의 성능 등 필수적인 측정요건이 갖추어 졌을 때 한한다.

시료의 종류	측정값 (%IACS)		
	4단자	van der Pauw	Eddy current
Cu	101.7	101.5	101.8
Zn	29.60	29.55	29.7
steel	2.275	2.268	2.25

표 1. 측정방법에 따른 도전을 측정결과

그리고 상기의 도전을 측정결과는 시료의 장기 안정도를 제외한 측정당시의 측정결과이다. 본 연구에서 4단자 및 van der Pauw 측정방법에 의한 측정결과를 분석하면 시료의 가공상태에 따라 정확도에 커다란 영향을 미치게 됨을 알 수 있었다.

즉 시료의 두께와 단면적은 식 (1)과 (4)에서도 알 수 있듯이 측정값에 미치는 영향이 거의 지배적이므로 되도록 0.1 %이하의 정밀 가공이 요구된다. 그리고 4단자 측정방법이 비교적 정확한 측정방법으로 널리 알려져 있으나 최근에는 van der Pauw 방법 및 eddy current 방식에 의한 비접촉식 전기 도전을 측정기인 conductivity meter를 많이 사용하고 있다. 특히 휴대용으로서 누구나 쉽고 간편하게 사용할 수 있는 장점이 있으나 정밀측정시 주기적인 교정이 요구된다. 그리고 불확도는 type A와 type B요인을 적용하여 평가하였으며, 그 결과를 표 2에 나타냈다. 불확도 요인으로는 type A, 시료의 두께 및 면적, 측정기 등이 불확도에 큰 영향을 미치는 요인으로 검토되었으며, 실험환경이 안정하게 유지된 상태였으므로 온도 및 환경요인에 의한 불확도는 제외하였다.

불확도 요인	측정불확도		
	4단자	van der Pauw	Eddy current
type A	0.1 %	0.1 %	0.1 %
두께 및 면적	0.2 %	0.1 %	-
측정기	0.1 %	0.1 %	0.29 %
불확도 (k=2)	0.49 %	0.35 %	0.61 %

표 2. 불확도 평가결과

4. 결론

전기도전을 측정은 시료의 두께와 단면적에 따라 측정의 정밀 정확도에 많은 영향을 주고 있는 것으로 나타났으며, 측정 시료의 준비는 되도록 0.1 %이하의 정밀가공이 요구된다. 또한 향후 여러 범위의 도전을 재료에 대한 지속적인 평가와 아울러 장기안정도에 대한 평가도 필요하다. 측정방법에 따른 도전을 측정결과는 4단자 측정방법에 의한 측정결과를 기준으로 측정정확도는 3가지 방법모두 대부분 0.5 % 이하의 범위에서 일치하였다. 최근에는 국가표준기관인 KRISS에 의뢰하는 도전을 측정기(conductivity meter)와 표준시편에 대하여

보다 정확한 측정불확도와 교정품질을 요구하므로 본 연구는 상용측정방법에 의한 비교분석을 통하여 보다 고품질의 교정서비스를 제공하는 기반을 마련하게 되었다.

참고 문헌

- [1] Dodd, C.V., Deeds, W.E., and Luquire, J.W., International Journal of Nondestructive Testing, Vol. 1, p.48, 1969.
- [2] van der Pauw, "A method of measuring specific resistivity and holl effect of discs of arbitrary shape," *Philips Res. Rep.*, vol. 13, pp. 1-9, 1958
- [3] "DC Conductivity Measurements in the van der Pauw Geometry" Gert Rietveld, vol 52, 2003.
- [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.