van der Pauw method를 이용한 금속도전율 표준시편 개발

Development of Conductivity Standards for Metals using the van der Pauw Method

강 전 홍* · 유 광 민* · 이 상 화*

(Jeon-Hong Kang · Kwang-Min Yu · Sang-Hwa Lee)

Abstract - The widely-used measurement methods for conductivity of non-magnetic metals are van der Pauw method, Two Point Probe method and Eddy Current method. Among them a more simpler and easier method is the Eddy Current method and an instrument using the method is a Conductivity Meter which can measure a conductivity by contacting its probe on a sample surface. However, conductivity standards are essentially needed to confirm the meter's performance or to calibrate it. In this study, six kinds of the standards which are made of Cu, Al-1, Al-2, brass, Zn and SUS-316 are developed and conductivity ranges for the standards are 2.27 %IACS ~ 101.6 %IACS with measurement uncertainty of less than 0.3 %.

Key Words : van der Pauw method, Two point probe method, Resistivity, Certified Reference Material, Conductivity ratio, Uncertainty

1. 서 론

전력산업에서 고전압 및 대전류 차단기의 스위칭 소재로 주로 사용되는 비철금속은 도전율 특성이 매우 중요시되고 있으며, 가장 많이 사용되는 금속은 구리(Cu)와 알루미늄(Al) 등이다. 금속 도전율의 표준은 시험온도 20 °C, 길이 100 cm, 1 mm²의 일정한 단면적을 가진 구리선의 저항이 1/58 Ω이며, 이때의 비저항(ρ)은 1.7241 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 이다. 이것을 100 %IACS (International Annealed Copper Standard)로 정의[1][2]하고, 이 값을 기준으로 구리 외에 각종 금속의 도전율을 평가하며 직류기술[3]을 이용한다. 철금속과 비철금속 등 다양한 종류의 금속재료들은 선박 및 항공우주산업, 국방산업을 비롯한 많은 분야에서 널리 사용되고 있으며, 용도에 따라 도전율 특성이 요구된다. 각종 금속의 도전율 특성은 철금속의 경우에는 주로 Two Point Probe method로, 비철금속의 경우에는 시편의 형태에 따라 Two Point Probe method, van der Pauw method, Eddy Current method 등으로 평가한다. 비철금속의 도전율 평가방법중 Two Point Probe method나 van der Pauw method는 시편의 단면적이 도전율 계산시에 곧바로 적용되므로 시편의 두께와 폭을 균일하게 가공하여야 시편의 단면적에 의한 측정 불확도를 줄일 수 있다. 이와 같은 시편준비의 불편 때문에 비철금속의 도전율은 주로 Eddy Current method가 적용된 도전율 측정기(conductivity meter)를 널리 사용하고 있으며, 금속의 표면에 프로브를 접촉시키면 도전율이 지시되어 쉽게 측정할

수 있다. 그러나 측정값에 대한 신뢰를 얻기 위해서는 국가 표준기관이나 교정기관으로부터 주기적으로 교정받아 사용하여야 한다. 이에 따라 국가표준기관이나 교정기관에서 도전율 측정기를 교정하려면 여러 종류의 도전율 표준시편을 반드시 갖추어야 한다. 도전율 표준시편의 용도는 도전율 측정기를 교정하는데 사용될 뿐 만 아니라 측정기의 성능을 확인하는데 사용된다. 일반적인 도전율 측정기의 측정범위는 1 %IACS ~ 110 % IACS 이며, 이 측정범위에서 측정정확도와 직선성 특성을 확인하기 위해서는 1 %IACS ~ 110 % IACS 범위에 해당하는 도전율 표준시편이 필요하다. 따라서 본 연구는 Cu, Al-1, Al-2, Brass, Zn, Sus-316 등 6종류의 순도가 좋은 금속시편을 선정한 후, van der Pauw method를 이용하여 도전율 정밀평가 방법에 대하여 기술하였다. 이들 금속시편의 도전율은 국가표준으로부터 소급된 직류 전류원, 직류 전압계, 온도계 및 표준저항과 본 연구에서 개발된 van der Pauw 전극구성장치, 온도조절용 챔버, 두께 측정장치 등을 사용하여 평가하였다. 또한 개발된 도전율 표준시편 값에 대한 유효성 확인은 van der Pauw method로 평가된 측정값과 도전율 측정기로 측정한 값을 비교하여 일치도를 확인하였다.

2. 본 론

2.1 van der Pauw Method

van der Pauw method[4]는 그림 1의 (a)(b)로부터 저항 R_A , R_B 를 구하고 식 (1)(2)에 의해 도전율을 계산하는 원리이다. 즉 그림 1의 (a)와 같이 시료의 1, 2전극에 전류를 공급하고, 마주보는 3, 4 전극의 위치에서 전위차를 측정하여 R_A 를 구한다. 또한 그림 1의 (b)와 같이 시료의 1, 4 전극에 전류를 공급하고, 마주보는 2, 3 전극의 위치에서 전위차를 측정하여 R_B 를 구한다[4].

* Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science

† Corresponding Author : Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science

E-mail : jhkang@kriss.re.kr

Received : October 2, 2013; Accepted : October 16, 2013

그림 1 van der Pauw 방법
Fig. 1 van der Pauw method

van der Pauw method에 의한 전기 비저항은 식 (1)로부터 구해지며, 도전율은 식 (2)로서 계산된다.

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

여기서, ρ : 전기 비저항($\mu\Omega \cdot \text{cm}$), σ : 전기 전도도(S/cm), d : 시료의 두께(cm), $f(r) = \frac{R_A}{R_B}$ 이며, R_A 와 R_B 의 비가 1 %이하의 범위이면 $f(r)$ 은 1이다[5].

$$\% \text{IACS} = \frac{1}{\rho} \times 1.7241 \mu\Omega \cdot \text{cm} \quad (2)$$

2.2 전극제작 및 측정장치

van der Pauw method에 의한 금속의 도전을 평가를 위하여 그림 2와 같이 전극 구성장치를 제작하였다[6]. 이것은 시료의 크기에 따라 편리하게 전극을 구성할 수 있으며, 사각시료 형태 뿐 만 아니라 원형시료 형태도 사용할 수 있도록 설계되었다.

그림 2 van der Pauw 전극
Fig. 2 van der Pauw electrode

측정장치는 그림 3의 (1)과 같이 $18^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$ 범위의 온도조절이 가능한 제작된 챔버 내부에 전극이 형성된 시료를 위치시킨다. 그림 3의 (2)와 같이 챔버 내부의 온도가

$20.0^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 온도 조절장치를 설정한 후 1시간 이상 유지시켜 시편이 온도에 충분히 적응되도록 하였다. 또한 van der Pauw method로 시편의 저항 측정을 위해 그림 4와 같이 직류 전류원(Fluke 5720A/5725A, 정확도: 0.005 %)과 표준저항(L&N, 정확도: 0.002 %) 및 직류 전압계(Fluke 8508A, 정확도: 0.001 %)를 결선하고 정밀측정을 위해 4시간 이상 예열시킨다. 직류 전류원은 시편에 10 A의 전류를 공급하는 용도이며, 표준저항은 실제로 시편에 흐르는 전류를 확인하기 위한 것이다. 직류전압계는 표준저항 양단의 전압을 측정하여 시편에 흐르는 전류를 모니터링 한다. 또한 시편에 전류를 공급하거나 전압을 측정하는 단자는 그림 3의 (2) 앞 판넬의 전류단자 및 전압단자에 연결하여 측정한다.

(1)

(2)

그림 3 van der Pauw 측정장치와 온도조절장치

Fig. 3 van der Pauw measurement apparatus and temperature controller

그림 4 van der Pauw 측정시스템

Fig. 4 van der Pauw measurement system

2.3 시편의 선정 및 가공

연구에 사용된 도전율 표준시편용 시료는 99.9 %의 순도를 갖는 6종류(Cu, Al-1, Al-2, Brass, Zn, CUS-316)를 선정하여 약 100 mm × 100 mm × 7 mm 와 비슷한 크기의 정사각형 구조로 정밀 가공하였다. 시편의 두께를 일정하게 가공하여야 식 (1)에서 처럼 시편 두께에 따른 측정 불확도를 줄일 수 있다. 즉 두께의 불균일은 측정불확도에 큰 영향을 준다. 또한 시편의 형태를 정사각형 구조로 가공한 이유는 van der Pauw 전극으로 구성이 용이하며, 식 (2)에서 처럼 R_A 와 R_B 의 비 $f(r)$ [4]가 1 %이하가 되면 $f(r)$ 이 1이 되어 도전율 계산이 편리하기 때문이다.

2.4 두께 측정기 제작 및 도전율 측정

van der Pauw method에 의한 금속 도전율 측정시 시편의 두께는 측정 불확도 요인중의 하나이다. 따라서 시편 두께의 정밀측정을 위하여 그림 5와 같이 디지털 마이크로미터 두 대의 구전극과 구전극이 닿는 접점측 측정원리를 이용하여 그림 6과 같은 두께 측정장치를 개발하였다[7]. 이 두께측정 장치의 측정범위는 수십 μm ~ 수십 mm이며, 측정 정확도는 0.1 % 이하이다. 시편의 두께 측정은 그림 5, 6과 같이 오른쪽 스위치를 누르면 전극이 상하로 움직이며 그 사이에 시료를 위치시킨 후, 스위치를 놓으면 표시창에 두께가 지시되어 누구나 쉽고 편리하게 사용할 수 있다.

van der Pauw method에 의한 도전율 측정은 그림 1의 (a)에서 R_A 와 (b)에서 R_B 를 구하기 위하여 그림 4와 같이 측정시스템을 구성한 후 직류 전류원으로 10 A를 시편에 공급하고 직류 전압계로 시편 양단의 전위차를 측정하여 저항(R_A , R_B)을 구한다. 이와 같은 방법으로 방향과 위치를 바꿔가며 측정한 후 저항의 평균값을 취하고, 식 (2)로부터 시편의 도전율을 평가하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 그림 7의 (1)은 본 연구에서 사용된 6종류의 금속시편을 나타냈으며, 그림 7의 (2)는 도전율 측정기를 교정할 때 사용이 편리하도록 평가된 도전율 값을 각각의 시편에 표시하였다.

표 1은 6종류의 금속 표준시편에 대한 도전율 평가결과와 일치도 및 불확도를 나타냈다. 평가된 도전율 표준시편 값에 대한 일치도는 국가표준기관에서 교정받은 도전율 측정기로 비교 측정한 결과이며, 일치도는 0.1 %이하이다. 또한 표준

그림 5 두께 측정원리

Fig. 5 Thickness measurement principle

그림 6 두께 측정장치

Fig. 6 Thickness measurement apparatus

(1)

(2)

그림 7 개발된 도전율 표준시편

Fig. 7 Developed conductivity standards

표 1 도전율 평가결과

Table 1 Evaluated results of conductivity ratio

시편	표준시편 (%IACS)	도전율 측정기 (%IACS)	일치도 (%)	불확도 (k = 2)
Cu	101.6	101.7	0.098	0.3 %
AL-1	62.00	62.05	0.081	0.3 %
AL-2	48.32	48.36	0.083	0.3 %
Brass	22.48	22.50	0.089	0.3 %
Zn	3.622	3.625	0.083	0.2 %
SUS-316	2.268	2.270	0.088	0.2 %

시편에 대한 측정불확도[8,9]는 측정에 사용된 직류 전류원, 표준저항 및 직류 전압계, 시편의 두께 측정기 등을 고려하여 평가한 결과 0.3 %이하로 나타났다.

3. 결 론

비철금속 관련산업에서 도전을 측정에 널리 사용되고 있는 도전을 측정기(conductivity meter)는 국가표준기관이나 교정기관에서 주기적으로 교정받아 사용하여야 한다. 본 연구에서 개발된 금속 도전을 표준시편은 6종류(Cu, AL-1, AL-2, Brass, Zn, SUS-316)로서 도전을 측정기를 교정하거나 성능을 확인하기 위한 용도로 사용된다. 개발된 도전을 표준시편의 범위는 약 2.268 %IACS ~ 101.6 %IACS이며, 측정 불확도는 0.2 % ~ 0.3 %로 평가되었다. 따라서 일반적으로 사용되는 도전을 측정기의 정확도는 0.5 %정도이므로 본 연구에서 개발된 도전을 표준시편은 교정용 표준시편으로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 그 동안 교정에 사용되는 도전을 표준시편은 주로 외국의 도전을 측정기 제조사에서 제공되는 시편을 사용하였으나 향후에는 본 연구에서 개발된 표준시편으로 대체할 수도 있다. 또한 표준시편의 장기안정도와 재현성 등의 주기적인 평가를 통하여 표준시편에 대한 특성을 추적할 필요도 있다.

References

- [1] A. Jones, "Development of Non-ferrous Conductivity Standards at Boeing", Eddy Current Nondestructive Testing, NBS special publication 589, Jan. 1981.
- [2] A. Jones, Sr., Eddy-Current Characterization of Materials and Structure, ASTM STP 722, American Society of Testing and Materials, pp. 94-118, 1981.
- [3] Michael D. Janezic, "DC Conductivity Measurements of Metals", NIST Technical Note 1531, Jan. 2004.
- [4] 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.
- [5] Gert Rietveld, DC Conductivity Measurements in the van der Pauw Geometry, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 52. No. 2, April 2003.
- [6] Patentee: Jeon Hong Kang, Patent No. 10-0653576 : "METAL CONDUCTIVITY MEASUREMENT ELECTRODE AND TEMPERATURE CONTROLLER USING van der Pauw METHOD"
- [7] Patentee:: Jeon Hong Kang, Patent No. 10-0749388, "APPARATUS FOR MEASURING THE THICKNESS OF PLATE AND CIRCLE TYPE SAMPLE",
- [8] ISO/IEC GUIDE 98-3:2008, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
- [9] EA-4/02, "Expression the uncertainty of measurement in calibration", 1999.

저 자 소 개

강 전 홍 (姜 鎭 洪)

1963년 2월 8일생, 2008년 충남대학교 전기공학과졸업(공학박사). 1987년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전기자기센터 선임연구원

Tel : 042-868-5152

E-mail : jhkang@kriss.re.kr

유 광 민 (劉 珖 民)

1960년 9월 29일생, 2012년 충남대학교 물리학과졸업(이학박사), 1986년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전기자기센터 선임연구원

Tel : 042-868-5153

E-mail : kmyu@kriss.re.kr

이 상 화 (李 相 和)

1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대학교 전자공학과 졸업(학사). 2011년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2012년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 1985년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전기자기센터 선임연구원

Tel : 042-868-5151

E-mail : shlee@kriss.re.kr