

Van der Pauw 측정법을 이용한 금속 도전율의 직류와 교류특성

論 文
56P-4-1

DC and AC Characterization of Metals Conductivity using the van der Pauw Measurement Method

姜 銓 洪[†] · 韓 相 玉^{*}
(Jeon-Hong Kang · Sang-Ok Han)

Abstract - The van der Pauw technique is one of the popular methods for determining the conductivity of flat metal samples. Traceability of the national standard for the conductivity has been achieved by direct current measurement techniques in national measurement institutes of many countries. But recently, alternative current measurement techniques for determining the conductivity of flat metal samples is also interested. In this study, we measured the conductivity of non-ferrous and ferrous flat metals at alternative current using van der Pauw technique. As measurement results, the conductivities of the samples were decreased according to increasing the test frequency even though the decreasing ratio was different.

Key Words : Electrical Resistivity & conductivity, Van der Pauw, % IACS, Uncertainty, Direct Current (DC), Alternative Current (AC)

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 그 내용의 일부에서 “20 °C에서 길이 100 cm, 1 mm²의 일정한 단면적을 가진 표준 열처리된 구리선의 1/58 Ω = 0.017 241 Ω”으로 발표되었으며, 이때의 비저항(ρ)은 1.7241 μΩ·cm 이다. 그 후 이 값을 100 % International Annealed Copper Standard(이하 IACS)로 정의[1][2]하였고, 금속산업의 발달과 함께 구리선 이외에 다른 금속의 도전율에 대한 연구가 진행되고 있다. 항공우주산업을 비롯한 자동차, 선박, 철강, 건설, 전기 등 금속산업의 현장에서는 다양한 종류의 자성 또는 비자성 금속 재료들이 널리 사용되고 있으며, 사용 용도에 따라 도전율에 대한 정밀측정이 요구되고 있다. 일반적인 비자성 금속의 도전율은 (1 ~ 110) % IACS 범위로서 도전율에 대한 특성시험은 주로 직류에 의한 측정기술[3]을 이용하여 평가되어왔으나 금속의 사용 범위가 점차 다양화 되고 광범위해 짐에 따라 교류측정기술에 의한 도전율 특성에도 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 본 연구는 다양한 금속들 중 Ti-64, brass, SUS-316 steel 등 3종의 비자성 금속과 (주)포스코에서 생

산된 P-steel 1종의 자성금속을 선정하여 금속 도전율에 대한 직류와 교류 특성을 van der Pauw 방법으로 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 측정 시스템

직류 및 교류 특성에 대한 도전율 측정을 위하여 van der Pauw method에 의한 측정시스템[4]을 그림 1과 같이 구성하였다. 사용된 시료는 가로 50 mm, 세로 50 mm, 두께 8 mm의 사각형이고, 실험환경은 온도 (23.0 ± 1.0) °C, 습도 (50 ± 5) %였다.

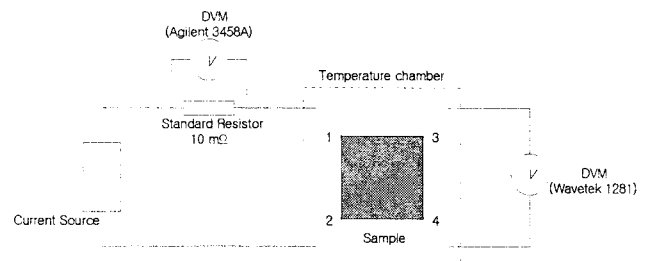


그림 1 측정 시스템

Fig. 1 Measurement system

측정에 사용한 전류원은 안정된 전류를 시료에 흘려주기 위하여 Fluke사의 5720A와 5725A를 사용하였으며, 직류 전류원의 불확도는 50 μA/A 이고, 교류 전류원의 불확도는 100 μA/A 이다. 디지털 볼트미터(DVM)는 Agilent사의 3458A와 Wavetek사의 1281을 사용하였으며, 직류 100 mV

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣部
先任研究員

E-mail : jhkang@kriss.re.kr

^{*} 正會員 : 忠南大學校 工大 電氣工學科 教授 · 正博

接受日字 : 2007年 7月 17日

最終完了 : 2007年 10月 1日

범위에서의 측정 불확도는 12 $\mu\text{V}/\text{V}$ 이다. 그리고 직류 전류원에서 시료에 흘려준 전류의 양을 정확하게 알기 위해서는 표준저항(Model: L&N 10 m Ω)을 그림 1과 같이 직렬로 연결하고, 표준저항의 양단에서 전압을 측정하면 흘려준 전류를 정확하게 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 표준저항의 불확도는 10 $\mu\Omega/\Omega$ 이며, 사용된 모든 측정기기는 국가측정 표준으로부터 소급성이 유지되었다. 금속의 전기 도전율 시험은 % IACS의 정의에 따라 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 실시하도록 되어 있으므로 온도 (18.0 ~ 28.0) $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 온도 안정도가 ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 로 조절이 가능한 챔버와 도전을 측정전극을 그림 2와 같이 제작하였다[5]. 측정은 챔버 내부에 시료를 넣고 전극을 형성한 후, 온도를 20.0 $^{\circ}\text{C}$ 로 맞추어 챔버 내부의 온도가 골고루 분포 및 유지되도록 하였다. 또한 내부의 온도를 정확하게 확인하기 위하여 교정된 온도계(Guildline 9340)를 사용하여 챔버 내부로 통하는 홀에 온도센서를 삽입하여 내부의 온도가 (20.0 \pm 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 인지 확인하고 측정하였다.

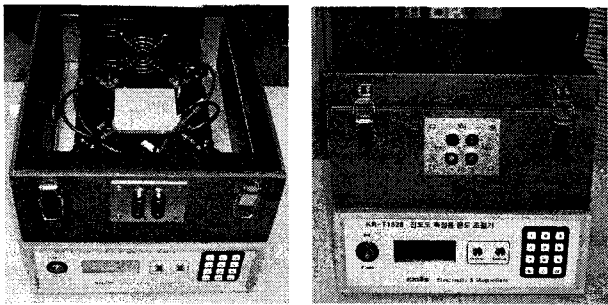
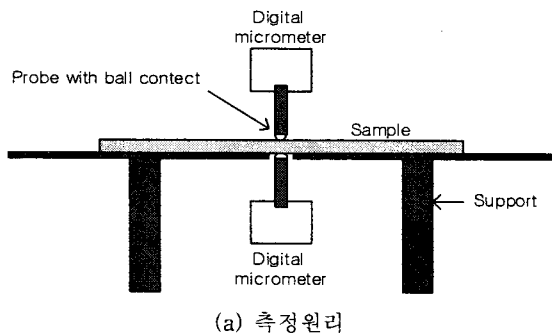
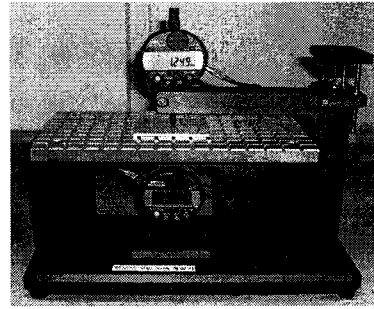


그림 2 제작된 온도 조절장치와 챔버
Fig. 2 Temperature controller and chamber

금속의 도전율은 시료의 두께와 직접 비례하는 관계가 있으므로 정밀·정확한 측정을 위해서는 시료의 두께를 균일하고 정밀하게 가공하여야 하며, 두께를 정확하게 측정하여야 측정 불확도를 줄일 수 있다. 두께를 정밀 측정하기 위하여 그림 3처럼 디지털 마이크로미터 두 대를 ball과 ball 전극이 수직으로 마주보게 하는 측정원리(a)를 이용하여 두께 측정 장치(b)를 설계 제작하였다[6]. 또한 두께 측정기에 장착된 디지털 마이크로미터는 국가측정표준으로부터 두께의 소급성이 유지된 게이지 블록을 사용하여 시료의 두께를 비교 측정하였다.



(a) 측정원리



(b) 제작된 두께 측정장치

그림 3 두께 측정장치
Fig. 3 Thickness measurement apparatus

2.2. 측정

측정은 그림 1처럼 van der Pauw method로 측정 시스템을 구성하여 직류에 의한 도전율을 측정 후, 교류의 저주파수 범위 10 Hz ~ 1 kHz에서 도전율을 측정하였다. 측정은 그림 4의 (a)에서처럼 저항 R_A 는 시료의 1, 2전극에 전류를 흘리고, 마주보는 3, 4 전극의 위치에서 전위차를 측정하여 R_A 를 구한다. 그리고 그림 4의 (b)에서처럼 저항 R_B 는 시료의 1, 4 전극에 전류를 흘리고, 마주보는 2, 3 전극의 위치에서 전위차를 측정하여 R_B 를 구한다[4]. 여기에서 시료에 흘려준 전류는 표준저항의 양단에서 전압을 측정하면 오옴의 법칙에 따라 $I = \frac{V}{R}$ (A)에 의해 흘려준 전류를 쉽게 알 수 있다. 즉, 국가측정표준으로부터 소급성이 유지된 표준저항의 값은 10.000 03 m Ω 이고, 저항 양단에서 측정된 전압은 100.0003 mV 이므로 흘려준 전류는 10.000 00 A가 된다.

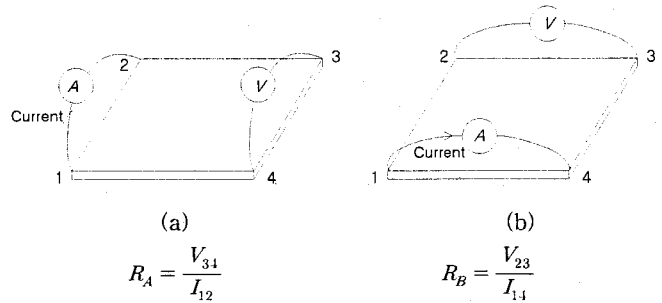


그림 4 van der Pauw 측정법

Fig. 4 van der Pauw measurement method

따라서 van der Pauw method에 의해 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), $f(r) = \frac{R_A}{R_B}$ 로서 R_A 와 R_B 가 1%이하의 범위에서 일치하면 무시할 수 있다[7].

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

2.3 측정결과

비자성 금속시료 3종(Ti-64, brass, SUS-316) 및 자성금속 1종(P-steel)에 대한 도전율을 측정된 결과를 그림 5,6,7,8과 표 1,2,3,4에 나타냈다. 그림에 나타낸 것처럼 직류특성에 비해 교류특성은 측정 주파수가 증가함에 따라 도전율이 서서히 또는 급격하게 감소하는 특성을 나타내고 있으며, 이것은 측정 주파수의 증가에 따라 도체 표면으로 전류가 집중하여 흐르는 표피효과(skin effect)로 판단된다. Ti-64의 도전율은 직류에서 100 Hz 범위까지는 아주 완만하게 감소하는 반면에 100 Hz 이상부터 1 kHz 범위에서는 급격하게 감소하였다. Brass와 P-steel의 도전율은 직류에서 1 kHz의 측정 주파수 범위까지 급격하게 감소하는 것으로 나타났으나 SUS-316 steel은 서서히 감소하는 특성을 보였다. 이러한 결과로서 시료의 종류마다 측정 주파수에 대한 도전율 특성이 각각 다를 수 있다. 측정불확도는 측정된 도전율의 결과 값에 포함될 수 있는 범위로서 반복 측정된 결과로부터 나타나는 A형 표준불확도(u_A)와 측정에 사용된 모든 측정기의 불확도인 B형 표준불확도(u_B)를 RSS(root sum square)하여 평가된다. 즉, 합성표준불확도 $u_C = \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2}$ 이며, 확장불확도(U)는 최종 측정결과를 나타내는 것으로서 산출된 합성표준불확도와 포함인자의 곱으로서 $U = k \cdot u_C$ 로 계산된다. 여기에서 k 는 유효자유도로부터 얻어진 포함인자이며 그 값은 2 이다[8][9][10].

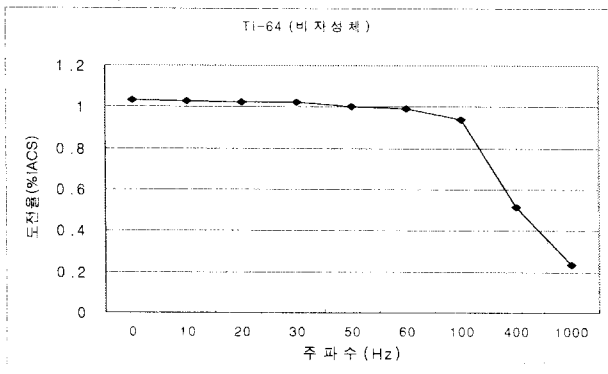


그림 5 Ti-64의 직류와 교류 도전율
Fig. 5 DC and AC conductivity ratio of Ti-64

표 1 Ti-64의 직류와 교류도전율
Table 1 DC and AC conductivity ratio of Ti-64

측정 주파수(Hz)	도전율 (%IACS)	불확도 ($k=2$)
DC	1.032	0.2 %
10	1.030	1.0 %
20	1.025	
30	1.020	
50	1.003	
60	0.991	
100	0.939	
400	0.516	
1000	0.234	

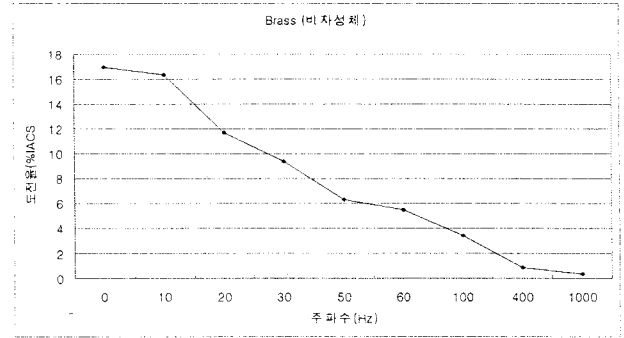


그림 6 Brass의 직류와 교류 도전율
Fig. 6 DC and AC conductivity ratio of brass

표 2 Brass의 직류와 교류 도전율
Table 2 DC and AC conductivity ratio of brass

실험 주파수(Hz)	도전율 (%IACS)	불확도 ($k=2$)
DC	16.97	0.2 %
10	16.35	1.0 %
20	11.71	
30	9.38	
50	6.30	
60	5.47	
100	3.42	
400	0.870	
1000	0.357	

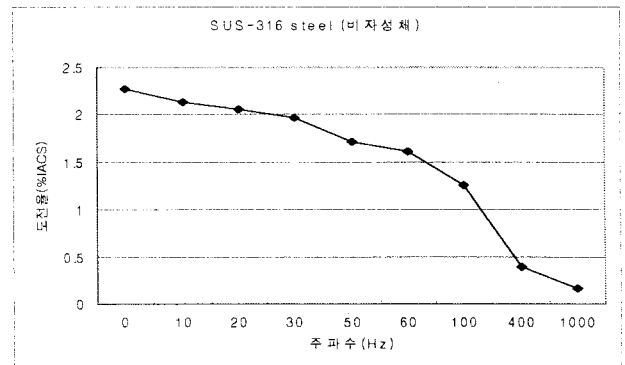


그림 7 SUS-316의 직류와 교류 도전율
Fig. 7 DC and AC conductivity ratio of SUS-316

표 3 SUS-316 steel의 직류와 교류 도전율
Table 3 DC and AC conductivity ratio of SUS-316

측정 주파수(Hz)	도전율 (%IACS)	불확도 ($k=2$)
DC	2.271	0.2 %
10	2.13	1.0 %
20	2.05	
30	1.97	
50	1.71	
60	1.61	
100	1.26	
400	0.390	
1000	0.163	

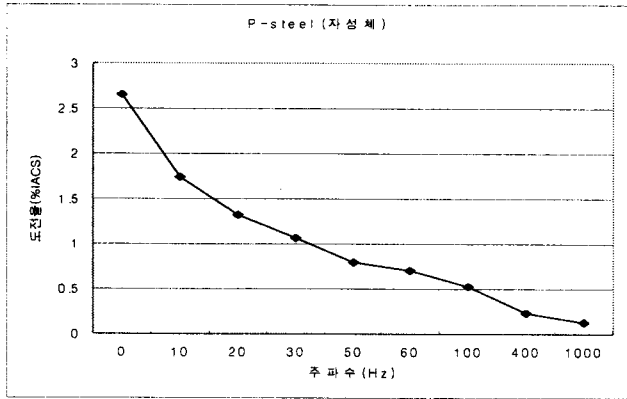


그림 8 P-steel의 직류와 교류 도전율

Fig. 8 DC and AC conductivity ratio of P-steel

표 4. P-steel의 직류와 교류 도전율

Table 4. DC and AC conductivity ratio of P-steel

실험 주파수(Hz)	도전율 (%IACS)	불확도 (k=2)
DC	2.658	0.2 %
10	1.75	1.0 %
20	1.32	
30	1.06	
50	0.790	
60	0.710	
100	0.530	
400	0.230	
1000	0.128	

4. 결 론

본 연구에서 나타난 금속의 도전율은 직류 특성을 기준으로 볼 때 자성 및 비자성체 모두 주파수가 점차 증가함에 따라 도전율이 점점 또는 급격히 감소하는 특성을 나타냈다. 이것은 주파수가 증가 할수록 도체 표면으로 전류가 집중하는 표피 효과(skin effect)에 의한 것으로 판단할 수 있으며, 금속내부에서의 전류의 흐름과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 직류는 금속 내·외부의 전체에서 흐르지만 교류는 주파수가 증가 할수록 표면에 집중되어 흐른다는 것을 의미한다. 연구 결과로서 티타늄(Ti-64)시료의 경우 60 Hz 까지는 도전율이 서서히 감소하였으나 100 Hz 이상부터는 급격하게 감소하는 것으로 나타났으며, brass와 P-steel의 경우 10 Hz 이상부터는 도전율이 급격하게 감소하는 특성을 나타냈다. 또한 SUS-316은 brass에 비해 상대적으로 완만한 감소 추세를 보였다. 따라서 교류에서 사용되는 금속인 경우 주파수 특성을 고려하여 설계하여야 할 것으로 생각되며, 표피 효과를 잘 이용하면 도전율이 좋은 금이나 은을 전체 도체로 사용할 필요 없이 외부에 코팅함으로써 도전율을 높일 수 있으므로 경제적인 효과도 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [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] 발명자: 강전홍, 유광민, 김한준, 특허 제 10-0653576 호, 발명의 명칭: "밴더파우법을 이용한 금속 도전율 측정전극 및 온도 조절장치"
- [6] 발명자: 강전홍, 유광민, 김한준, 특허 제 10-0749388 호, 발명의 명칭: "관형 및 원형 시료의 두께 측정장치"
- [7] Gert Rietveld, DC Conductivity Measurements in the van der Pauw Geometry, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 52. No. 2, April 2003.
- [8] ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 1991.
- [9] EA-4/02, "Expression the uncertainty of measurement in calibration", 1999.
- [10] KRIS-99-079-ET, "측정불확도 평가 및 표현방법", 1999.

저 자 소 개



강 전 홍 (姜 鎭 洪)

1963년 2월 8일생, 1998년 대전한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 충남대학교 전기공학과 박사과정, 1988년~2007년 현재: 국표준과학연구원 기반표준부 전·자기그룹, 선임연구원

Tel : 042-868-5152

E-mail : jhkang@kriss.re.kr



한 상 옥 (韓 相 玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기) 졸업, 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업 (공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수, 1989년 일본 나고야대 객원교수, 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5655

E-mail : sohan@cnu.ac.kr