

비자성체의 전기전도도 정밀측정

*강전홍, 김한준, 유광민, **한상옥, ***김종석, †박강석,
*한국표준과학연구원, **충남대학교, ***대전한밭대학교, †대덕대학교

The Precision Measurement for Electrical Conductivity of Non-magnetic Materials

*J.H.Kang, H.J.Kim, K.M.Yu, **S.O.Han, ***J.S.Kim, †K.S.Park
*KRISS, **ChungNam Univ., ***Taejon HanBat Univ., †Daeduk College.

Abstract

본 연구는 항공, 선박, 자동차, 철강, 철도, 건설 산업 등에서 필수적으로 사용되고있는 여러 비자성 금속의 전기전도도에 대하여 4단자 측정방법 및 비접촉 측정방법에 의한 정밀측정원리를 적용하여 전기전도도를 측정할 결과 4단자 측정방법의 경우 ±0.1 %이하의 표준편차 범위 내에서 안정된 값을 보였고, 그 결과를 비접촉 측정방법(eddy current원리를 활용한 전기전도도 측정기)으로 측정한 결과와 상호 비교하였으며, 두 측정방식에 따른 전기전도도 측정결과는 최대 1.5 %이내에서 일치하였다.

1. 서 론

전기산업에서 저항 표준의 필요성은 구리(Copper)선에 대하여 일찍부터 인식되었으며 이에 따른 연구결과가 최초로 공식적인 세계표준으로 받아들여진 것은 1914년 3월 Boeing사가 발행한 보고서의 내용을 살펴보면 “20 °C에서 길이 1 m의 일정한 단면적 1 mm²을 가진 표준 열처리된 구리선의 1/58 ohm = 0.017241...ohm”으로 발표되었다. 그 후 이 값을 100 % IACS (International Annealed Copper Standard)로 정의하였고 금속산업의 발달과 함께 Copper선 이외의 다른 금속에 대한 전기전도도 인증표준물질(Certified Reference Materials : CRM)을 만들고 유지하는 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 또한 항공, 선박, 자동차, 철강, 철도산업 등에서는 지속적으로 신 금속 소재를 개발하고 있으며 이러한 금속소재들의 전기전도도는 기본적으로면서도 필수적인 특성이므로 전기전도도 측정에 관한 산업계의 관심과 요구는 점점 증가하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 이러한 필요성과 산업체에서 널리 사용되고있는 전기전도도 측정기들의 교정문제를 해결하고 전기전도도 CRM을 개발하여 산업체에 보급하기 위한 연구의 목적을 두고있다.

2. 시료준비 및 실험방법

2.1 시료준비

비자성 금속에 대한 전기전도도를 평가하기 위하여 6종류 10종의 비자성 금속시료를 선정하였으며, 그 시료의 종류는 Pure-Copper 1종, Deoxidized-Copper 3종, Al-6061 1종, Al-2024 1종, Brass 3종, Titanium-64 1종 등이다. 이때 Pure-Copper만은 직경 45 mm, 길이 500 mm인 봉 상태의 시료이며 나머지의 금속은 500 mm(길이)×50 mm(폭)×8 mm(두께)의 막대(bar)형태의 시료이다. 이러한 시료를 실험실의 측정환경(온도 23±1 °C, 습도 50 %이하)에서 충분히 적응시켜 온·습도에 의한 영향을 최대한 줄였다. 또한 전기전도도의 안정도를 측정하기 위하여 120일(4개월)동안 6회에 걸쳐 4단자 측정방법으로 비저항을 측정하여 전기전도도를 계산하였으며 eddy current를 이용한 비접촉식 측정방법으로도 전도도를 측정하여 비교 검토하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 4단자 측정방법에 의한 전기전도도

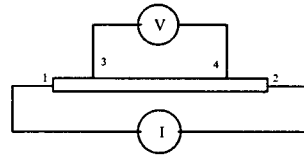


그림 1. 4단자 측정방법

금속시료 전기비저항의 정밀측정을 위하여 그림 1과 같은 4단자법을 사용하였다. 즉 current source(Fluke 382A)를 사용하여 probe 1과 2의 시료 양단에 1 A의 전류를 흘리고 probe 3과 4의 양단에 걸리는 전압을 Nano-voltmeter(Keithley 181)로 측정하여 저항 값을 알 수 있다. 이때 주울 heating을 피하기 위하여 시료에는 순간적으로 전류를 흘려주었으며, probe 3과 4 사이의 거리(l)는 버어니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 또한 시료마다 전압측정 probe 3과 4사이의 간격을 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm로 하여 각각 측정하였으며 전류는 +, - 교대로 흘려주며 각각의 평균값을 구하였다. 그리고 전기비저항은 온도에 민감하게 의존하므로 모든 측정은 23±1 °C의 실험 환경에서 측정하였으며 이러한 방법으로 측정된 저항 값으로부터 식 1에 의해 전기비저항을 계산할 수 있다.

$$\rho = R \left(\frac{S}{l} \right) \tag{1}$$

식 1의 ρ 는 시료의 전기비저항($\rho: \mu\Omega \cdot \text{cm}$), R 은 측정 저항, S 는 시료의 단면적, l 은 전압측정 probe 3, 4 간의 거리이며 전기전도도는 식 2와 같이 구할 수 있다. 본 연구에서는 식 3과 같이 Pure-Copper의 전기전도도를 100 %로 했을 때의 %IACS 단위로 금속의 전기전도도를 구하였다[1].

식 3에서 1.7241은 Pure-Copper의 비저항값이다.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{2}$$

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

이와 같은 방법으로 얻어진 각 금속의 전기전도도 측정 결과는 그림 2와 같다. x축의 거리(Length)는 전압측정 probe 3과 4간의 거리이며, y축의 %IACS는 4개월 동안 20일 간격으로 6회에 걸쳐 측정한 값들이다. 그 측정 결과를 보면 같은 종의 금속(특히 Copper)내에서도 각기 다른 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 전기전도도가 열처리과정과 장력강도에 의존하는 값임을 고려할 때 금속 제조공정의 열처리와 가공과정에서 생긴 영향과 재료성분의 불균일성으로 인하여 발생하는 것으로 추정된다. 그리고 측정결과에 대한 측정 불확도를 평가하면 표준 불확도 $u_A = 0.10$ %로 고려할 때 시스템

의 불확도 $u_B=0.60\%$ 이다. 따라서 합성 표준불확도 $u_C=0.61\%$ 이며, 확장불확도 $U=1.22\%$ 가 된다.

이러한 불확도의 발생원인은 시료의 특성, 측정환경, 측정시스템 등으로 나누어 생각해 볼 수 있으나 측정시스템에 대한 내용을 살펴보면 다음과 같다. 즉 측정시스템에서 전류원 current source의 불확도는 0.20% , 전압측정 기인 nano-voltmeter의 불확도는 0.10% , probe간 거리의 불확도는 0.05% , 단면적의 불확도는 0.55% 이다. 따라서 본 연구에서 버니어 캘리퍼스로 측정된 금속시편의 단면적이 가장 큰 불확도의 원인이 될 수 있다.

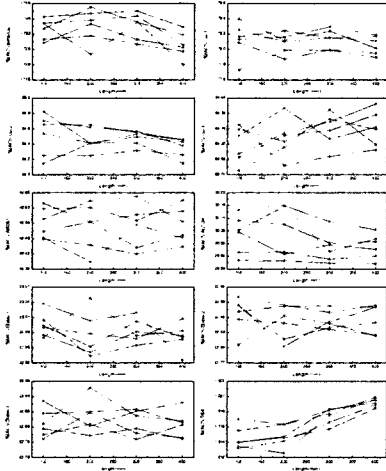


그림 2. 4단자법으로 측정한 각 금속의 전기전도도

2.2.2 비접촉 측정방법에 의한 전기전도도

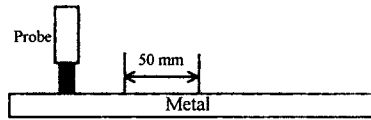


그림 3. 비접촉 측정방법

4단자 측정방법에 의한 정밀측정결과와 비교하기 위하여 eddy current를 이용한 비접촉식 전기전도도 측정기인 Sigmatest D($\pm 1\%$ 의 절대불확도)를 사용하여 전기전도도를 측정하였다. 측정원리는 그림 3과 같이 평행한 금속표면에 수직으로 놓인 진동수 f 의 N 회 감은 코일의 impedance를 간단히 표시하면 식 4와 같다 [2].

$$Z_{\text{Coil}} = \frac{i\omega\mu N^2 r \mu}{(\ell_2 - \ell_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \frac{1}{a^3} J^2(r_1, r_2) \times [A(\Delta, r_1, r_2, d_c)] \quad (4)$$

$$\alpha_0 = [a^2 - \bar{r}^2 \omega^2 \mu_0 \epsilon_0]^{1/2} \quad (5)$$

위 식에서 α 는 적분변수, μ_0 는 빈공간의 투자율, ϵ_0 는 진공의 유전율, J 는 Bessel 함수, A 는 변수들의 다항식이다. 이때 금속이 비자성이며 코일의 반경이 0.01 m 이고, 주파수가 100 kHz 일 때 식 5의 $\bar{r}^2 \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ 의 값은 8×10^{-10} 보다 작은 값이다. 그러므로 식 5의

$\bar{r}^2 \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ 항을 무시하면 $\alpha_0 = \alpha$ 로 가정할 수 있다. 이러한 가정에 식 4의 코일 impedance는 lift-off (Δ), 금속의 전기전도도(σ), 진동수(f)만의 함수로 나타낼 수 있다. 그리고 lift-off와 $\omega\sigma$ 가 항상 일정한 값을 유지한다면 코일의 inductance로부터 금속의 전기전도도를 측정할 수 있다. 즉 다른 전기전도도의 금속들에서 다른 두 진동수의 코일 inductance를 L_1, L_2 라 할 때 $\omega\sigma$ 가 일정하다면 코일의 inductance는 변하지 않을 것이며 식 5는 식 6과 같이 전개할 수 있다[3]. 즉, 식 6에 따르면 진동수의 함수로 전기전도도를 측정할 수 있는 것이다.

$$\omega\sigma = \text{const}, L_1 = L_2, R_2 = (\omega_2/\omega_1)R_1 \quad (6)$$

예를 들면 측정하고자 하는 금속의 전기전도도를 σ' , 진동수를 f' 라 하면 식 6에 따라서 식 7과 같이 유도할 수 있다.

$$\sigma' = \sigma_{\text{std}} \times \left(\frac{f_{\text{std}}}{f'} \right) \quad (7)$$

이 식으로부터 코일 진동수 f' 를 측정함으로써 금속의 전기전도도 σ' 을 계산할 수 있다. 이때 반드시 σ_{std} , f_{std} 를 결정하기 위하여 표준시료로 보정한 뒤에 측정하여야 한다. 이 표준시료를 eddy-current의 표준시료(CRM)로 정하고 일반적인 측정시스템은 R 과 L 로 구성된 eddy-current bridge를 이용하여 f' 에 따른 코일의 inductance L 를 측정하여 금속의 전기전도도를 결정한다. 이와 같은 원리로 제작된 비접촉식 전기전도도 측정기인 Sigmatest D는 측정 주파수가 60 kHz 용의 probe이며 먼저 101.09% , 46.42% , 1.038% IACS의 표준시료(미국 ZETEC사)를 사용하여 전도도 측정기를 교정하였다. 그리고 그림 3과 같이 시료를 50 mm 간격으로 9군데로 나누어 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하며 각 지점에서 전기전도도를 측정한 후 이 결과를 평균하였으며 그 결과를 그림 4에 나타냈다.

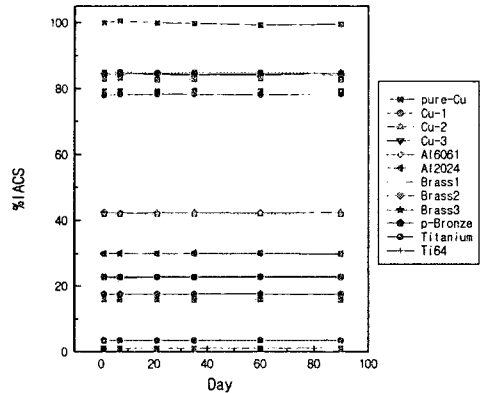


그림 4. 비접촉식으로 측정한 각 금속의 전기전도도

비접촉식 방법에 의한 측정결과로 보면 Al-2024나 Brass-2와 같은 시료는 측정 위치에 따라 %IACS가 연속적으로 증가하거나 감소하는 현상을 나타내고 있다.

이와 같은 결과가 나타나는 원인은 앞서 언급한 측정 오차의 여러 요인 중 시료의 특성(hard spots, voids, inclusion)에 의한 시료의 불균질성, 미세한 흠, 금(flaws)이 가장 큰 원인이 되는 것으로 생각된다. 따라서 이와 같은 현상 중 본 연구의 비접촉식 측정에서 나타나는 특이한 결과에 대한 연구는 시일을 두고 앞으로 지속적인 측정과 함께 다른 물성에 관한 연구가 병행되어 추진되어야 명확해질 것으로 생각된다.

3. 결론

측정결과를 보면 Brass, Al-2024, Ti64등은 측정방법에 의한 전기전도도의 차이가 ± 0.5 %이내로 일치하고 있으나 Al-6061과 Copper등은 최대 ± 1.5 %까지 오차가 발생하였다. 이러한 결과에 대한 원인은 앞서 간단히 언급했듯이 시료의 특성, 측정환경, 측정시스템에 의한 오차의 발생으로 나눌 수가 있으며 각각에 대하여 오차를 발생시키는 원인과 정밀측정을 위한 보정 방법을 검토하였다. 먼저 시료의 특성으로는 CRM용으로 사용하기 위한 금속시료는 금속 내부가 균질하고 특히 측정 probe와 접촉하는 금속표면이 깨끗하여야 하며 평행하도록 정밀하게 가공되어야 한다. 또한 측정시에는 시료의 노화(aging)와 함께 grain direction(알갱이 방향), stratification(성층)을 고려하거나 보정해 주어야 한다. 둘째 측정결과에 큰 영향을 미치는 요인중의 하나가 측정 금속과 함께 실험실 내의 환경이다. 공기중에 놓여진 금속은 주변의 공기흐름에 발생하는 공기전류(air currents)에 의해 금속시편의 다른 부분들 사이에 온도차가 생겨서 실험오차의 원인이 될 수도 있다. 이를 보완하기 위해서는 일정한 온도를 유지하는 기름용액이 담긴 상자안에 금속시료를 넣고 밀폐시킨 상태에서 측정함으로써 air currents와 어떠한 복사력도 피하여 정밀한 측정을 할 수가 있다. 또한 측정기기에 발생하는 전자기파 노이즈의 완벽한 차폐에 대한 방법도 고려하여야 할 것이다. 셋째로 측정시스템의 문제이다. 먼저 4단자 측정방법에 의한 측정에서 가장 큰 불확도를 가지는 길이는 버어니어 캘리퍼스 대신에 레이저-간섭계로 측정한다면 측정 불확도를 크게 줄일 수 있을 것이다. 비접촉식 측정에서는 식 6에서 살펴보았듯이 lift-off(Δ)가 일정해야 한다. 그러나 측정에서 큰 오차 요인의 하나가 이 lift-off(Δ)의 차이에 의해 발생한다. 그러므로 이러한 lift-off(Δ)효과를 최대한 줄이면서 측정한다면 측정 불확도를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 정밀한 probe의 설계와 bridge회로의 제작은 근본적인 요소가 될 것이다. 결론적으로 본 연구에 나타난 여러 비자성 금속들의 두 측정방식에 의한 전기전도도 측정결과와의 차이가 모두 최대 1.5 %이내에 있으므로 가까운 시일 내에 측정 불확도가 훨씬 줄어진 정도의 오차 범위 내에서 산업체의 측정기들의 교정과 CRM을 보급할 수 있을 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.R. Jones, Sr., Eddy-Current Characterization of Materials and Structure, ASTM STP 722, American Society of Testing and Materials, pp. 94-118, 1981.
- [2] Dodd, C.V., Deeds, W.E., and Luquire, J.W., International Journal of Nondestructive Testing, Vol. 1, p.48, 1969.
- [3] George Free, Eddy-Current Characterization of Materials and Structure, ASTM STP 722, American Society of Testing and Materials, pp. 121-128, 1981.