2006년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2006. 7. 12 - 14

Four Point Probe 방법을 이용한 전기비저항의 두께효과

강전홍, 김한준, 유광민, 한상옥*, 김종석**, 박강식***, 류제천#
한국표준과학연구원, 충남대학교*, 한밭대학교**, 대덕대학교***, (주)KMC#

Thickness effect of electrical resistivity using Four Point Probe

J.H.Kang, H.J.Kim, K.M.Yu, S.O.Han*, J.S.Kim**, K.S.Park***, J.C.Ryu#
KRISS, ChungNam Univ.*, HanBat Univ.**, Daeduk Univ.***, KMC#

Abstract - 금속의 전기비저항 측정은 4단자 방법, van der Pauw 방법, Four Point Probe(FPP) 방법 등이 있으며, 이들의 정확한 측정방법을 고찰하고, 그 중 FPP 방법에 의한 비저항의 두께효과를 비교 분석하기 위하여 비자성 금속 SUS 316을 두께별로 가공한 후 실험하였다. 그 결과 4단자 및 van der Pauw 방법으로 측정된 도전율은 각각 2.273 %IACS으로 나타났으며, FPP방법으로 측정된 도전율은 probe spacing 5.0 mm, dc current 10 A에서 시료의 두께가 2 mm일 때 2.288 %IACS, 3 mm일 때 2.271 %IACS로서 상기 두 방법으로 측정한 결과와 0.5 %이내에서 일치하였으나, 시료가 5 mm 및 11 mm 에서는 매우 큰 오차를 나타냈다.

1. 서 론

오늘날 항공우주산업을 비롯한 자동차, 선박, 철강, 건설, 전기 등 금속산업의 현장에서 다양한 종류의 자성 또는 비자성 금속 재료들이 널리 사용되고 있으며, 사용 용도에 따라 전기 비저항에 대한 정확한 측정값이 요구되고 있다. 이에 따라 사용되는 전기 비저항 측정방법은 보편적으로 4단자 방법[1], van der Pauw 방법[2]을 주로 사용하고 있으나, Four Point Probe(FPP)방법[3]으로도 금속의 비저항 측정이 가능하다. 4단자 방법과 van der Pauw 방법은 측정의 정밀·정확도가 높은 방법이지만 재료의 크기와 형상을 정밀 가공하여야 하므로 산업 현장에서의 적용은 거의 불가능하다. 반면에 FPP 방법은 지질탐사, 재료의 역학적 특성, 전기적 특성 및 반도체 공정의 품질관리에 많이 사용되는 비파괴적 방법으로서 산업현장에서 적용이 용이하고, 측정단자들이 일직선상의 four pin으로 이루어져 있어서 재료의 국부적 영역(local area)에서 비저항 측정이 가능한 장점이 있다. 또한 dual configuration 기술을 사용하면 시료의 크기에 따른 가장자리 효과를 무시할 수 있어 정확한 측정을 할 수 있으므로 정밀·정확한 비저항 측정이 가능하다. 그러나 핀 간격에 따른 시료의 두께는 전기비저항의 측정 결과에 미치는 영향이 크므로 시료를 두께별로 가공하여 비저항을 측정하고 비교 평가하였다.

2. 본 론

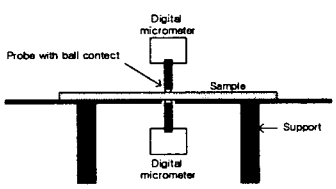
2.1 시료의 선정 및 실험환경

본 연구에 사용된 시료는 SUS 316 비자성 금속이며, 실험환경은 온도 23.0 ℃ ± 1.0 ℃, 상대습도 50 ± 3 %였다.

2.2 사용기기

2.2.1 두께 측정기

시료의 두께는 전기비저항과 직접 비례하는 관계가 있으며, 측정 불확도에 미치는 영향이 매우 크므로 시료의 두께를 균일하게 가공하여야 한다. 시료의 두께를 정확하게 측정하기 위하여 1 ㎛의 정확도를 갖는 디지털 마이크로미터 두 대를 그림 1처럼 시료를 사이에 두고 ball 과 ball 이 접촉하는 방식으로 제작하였다. 두께 측정은 길이의 국가표준으로부터 소급성이 유지된 gage block으로부터 마이크로미터를 보정한 후 시료의 중심으로부터 각 방향 10 mm 간격으로 측정하여 평균하였다.



<그림 1> 두께 측정장치

2.2.2 4 단자 측정방법에서의 전극 길이 측정기

국가표준으로부터 소급성이 유지된 gage block으로부터 교정된 디지털 마이크로미터를 사용하여 전극의 길이(l)을 측정하였으며, 이 마이크로미터는 1 ㎛의 분해능과 정확도를 갖는다.

2.2.3 DC current source

안정된 dc current를 공급하기 위하여 사용된 기기는 Fluke 5720A와 5725A amplifier를 사용하였으며, 전류의 불확도는 50 ㎂/A이다.

2.2.4 Digital Voltmeter (DVM)

DC current source로부터 시료에 전류를 공급한 경우, 두 전극 사이의 전위차를 정확하게 측정하기 위하여 교정된 digital voltmeter(Agilent 3458A, Wavetek 1281)를 사용하였으며, DC 100 ㎷ range에서의 불확도는 12 ㎂/V이다.

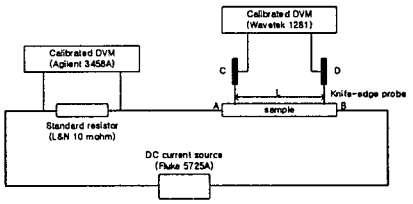
2.2.5 Standard Resistor

직류 전류원으로부터 공급되는 전류를 정확하게 측정하기 위하여 표준저항 (L&N 10 mΩ)을 사용하였으며, 불확도는 10 ㎲/Ω이다.

2.3 측정방법 및 결과

2.3.1 4단자 측정방법

4 단자 측정 방법은 바(bar) 형상(폭 30 mm, 두께 10 mm, 길이 400 mm)의 시료에 직류 전류를 공급하고, 시료의 양단 두 지점에서 생기는 전위차를 측정하여 저항을 계산한 후 식 (1)에 의하여 비저항을 계산하는 방법으로서 측정 등가회로는 그림 2와 같다.



<그림 2> 4단자 측정 등가회로

정확한 측정을 위하여 시료의 크기와 형상에 따라 전극의 구성이 용이하도록 측정시스템을 제작하였으며, 이 장치는 폭 50 mm, 높이 30 mm, 전극의 길이(30 ~ 500 mm)의 시료에 대하여 실험이 편리하도록 하였다. 실험은 dc current source로부터 10 A를 그림 2의 전극 A에서 B방향으로 공급하고, 전극 C와 D에서 전위차를 측정하여 저항값을 계산하였다. 전극 C와 D는 시료의 두 지점 전극 길이(l)의 전위차를 정확하게 측정하기 위하여 knife edge(45°, 폭 30 mm)전극을 제작하였으며, 필요에 따라 전극의 길이(l)도 좌우로 조절 되도록 하였다. 그리고 knife edge전극이 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 국가표준으로부터 소급성이 유지된 gage block을 사용하여 1 ㎛의 정확도를 갖는 digital micrometer를 교정한 후 측정하였으며, 전극 C와 D의 전위차를 정확하게 측정하기 위해서는 knife edge 전극을 사용하는 것이 유리하다. 본 실험에 사용된 모든 측정기기는 제작사에서 권하는 예열시간을 준수하여 측정 하였으며, dc current를 정방향과 역방향으로 공급하여 전압을 측정한 후 저항을 계산하고 다음의 식 (1)에 의하여 비저항을 계산하였다.

$$R=\frac{\rho\times\ell}{A},\quad \rho=\frac{R\times A}{\ell} \tag{1}$$

여기서, ρ: 시료의 전기 비저항(㎛Ω·㎝), R: 측정저항(Ω), A: 시료의 단면적(㎠), l: 측정 전극 C와 D간의 길이(mm)이며, 전기전도도(σ)는 식 (2)로서 구해진다.

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

전기 전도도(σ)를 백분율 단위인 %IACS로 나타낼 경우에는 순수한 구리(Pure-Copper)가 100 % 일 때, %IACS 단위는 다음의 식 (3)으로 계산된다. 여기에서 적용되는 순수한 구리(Pure-Copper)의 비저항(ρ)은 20 ℃에서 1.7241 μΩ·㎝이다.

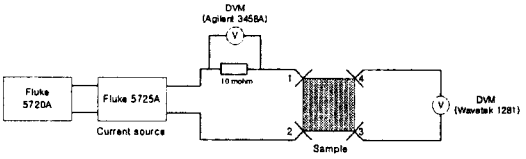
$$\%IACS = \frac{1}{\rho} \times 1.7241 \ \mu\Omega \cdot cm \qquad (3)$$

상기의 식 (1)(2)(3)으로부터 계산된 도전율은 2.273 %IACS, 불확도(k=2)는 0.25 %로 나타났다.

2.3.2 van der Pauw 측정방법

이 방법은 시료의 형상에 따른 전기 비저항의 측정값에 대한 영향은 거의 없으나, 시료의 두께는 비저항과 직접적인 관계가 있다.

따라서 시료의 두께에 따른 전기 비저항을 비교 분석하기 위하여 두께 2 mm, 3 mm, 5 mm, 11 mm의 사각 형상으로 된 시료 (67 mm × 67 mm)을 정밀 가공하여 준비하고, 그림 3과 같은 측정 등가 회로를 구성하여 실험하였다.



<그림 3> 측정 등가회로

실험은 제작된 측정 jig에 시료를 넣은 후 각 모서리의 전극을 크기에 맞게 조절하여 고정시키고, 시료의 1 과 2 사이에 10 A의 전류를 가해주고 반대 방향의 3과 4의 위치에서 전위차를 측정하여 저항(R_A)을 계산한다. 그리고 같은 방법으로 1과 4사이에 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 산출된다.

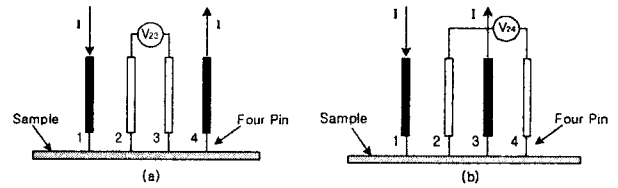
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{\pi d}{\ln(2)} \frac{R_A + R_B}{2} f(r) \qquad (4)$$

여기서, ρ: 비저항(resistivity, Ω·㎝), σ: 전기전도도(conductivity, S/㎝), d: 시료의 두께, $f(r)$: R_A/R_B의 비율 이다. 상기와 같은 실험방법으로 각 시료의 두께에 대한 전기 비저항을 측정한 평균 도전율은 2.273 %IACS, 불확도는 0.25 %이었다.

2.3.3 Four Point Probe 측정방법

FPP측정방법은 주로 single configuration기술을 사용하여 왔으나 최근에는 probe spacing 변화나 가장자리 영향으로부터 측정오차가 적은 dual configuration 기술을 사용하고 있다. 그 이론적인 면에서의 single configuration기술은 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 구하는 방법이다.

여기서, $k_a = F_2(D) \times F(t/S) \times F_{SP}$, $R_a = V_{23}/I$이며, $F_2(D)$: 직경보정인자, $F(t/S)$: 시료의 두께와 probe spacing의 두께 보정인자, F_{SP}: probe spacing에 대한 보정인자이다. Dual configuration기술은 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, $k_a = -14.696 + 25.173(R_a/R_b) - 7.872(R_a/R_b)^2$, $R_b = V_{24}/I$ 이며, $1.20 \le R_a/R_b \le 1.32$이다.



<그림 4> FPP 측정방법

반도체에 사용되는 FPP용 상용 probe의 최대 사용 전류는 100 mA 이나, 금속의 비저항은 수~수십 μΩ·㎝ 로서 보다 큰 측정 전류를 필요로 하기 때문에 금속의 비저항 측정에 적용하여 사용하기에는 부적합하다. 따라서 FPP 방법을 비파괴적으로 금속의 비저항 측정에 적용하기 위하여 dc 10 A까지 사용 가능한 probe (probe spacing: 2.5 mm, 5.0 mm)를 제작하여 시료의 두께에 따라 dual configuration 기술을 적용하여 비저항을 측정하였다. 그 결과 probe spacing과 시료의 두께에 따라 비저항 측정값은 큰 차이를 보였으며, 시료의 두께는 probe spacing 에 비해 약 50 %이상 얇아야 정확한 측정값을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한, probe spacing 에 따라 사용 되는 적정 전류는 probe spacing 2.5 mm 는 1 A이며, probe spacing 5.0 mm는 10 A 였다. Probe spacing과 시료의 두께에 따른 비저항 측정결과를 표 1에 나타냈다. 표 1의 측정결과에서 기준값은 4단자 방법과 van der Pauw 방법으로부터 얻어진 평균값이다.

<표 1> 측정결과

(probe spacing: 2.5 mm, applied current: dc 1 A)

시료두께 (측정된 값)	비저항 (μΩ·㎝)	전도도 (MS/㎝)	도전율 (%IACS)
2 mm (2.046 mm)	76.54	0.013 06	2.252
3 mm (3.073 mm)	81.44	0.012 28	2.117
5 mm (5.396 mm)	85.40	0.011 71	2.019
11 mm (11.319 mm)	-	-	-
기준값	75.86	0.013 18	2.273

(probe spacing: 5.0 mm, applied current: dc 10 A)

시료두께 (측정된 값)	비저항 (μΩ·㎝)	전도도 (MS/㎝)	도전율 (%IACS)
2 mm (2.046 mm)	75.36	0.013 27	2.288
3 mm (3.073 mm)	75.91	0.013 17	2.271
5 mm (5.396 mm)	81.25	0.012 31	2.122
11 mm (11.319 mm)	84.20	0.011 88	2.048
기준값	75.86	0.013 18	2.273

2.3.4 측정결과의 비교

상기 3가지의 측정방법으로 실험된 측정의 정확도와 불확도를 표 2에 정리하였다.

<표 2> 측정결과의 비교 (기준값: 2.273 %IACS)

측정방법	측정결과 (%IACS)	확장 불확도 (k=2)
4단자	2.273	0.25 %
van der Pauw	2.273	0.25 %
FPP (probe 2.5 mm, 1 A) (시료의 두께 2 mm)	2.252	0.45 %
FPP(probe 5.0 mm, 10 A) (시료의 두께 3 ㎜)	2.271	0.45 %

3. 결 론

국가표준으로부터 소급성이 유지된 측정기기(전류원, 전압계, 표준저항 등)를 사용하여 전기 비저항 측정방법에 따라 평가한 결론은 다음과 같다.

1. 금속비저항 측정에 있어서 가장 정확한 측정방법은 4단자 방법과 van der Pauw 방법으로서 측정 불확도는 0.25 %이나 파괴적인 측정방법이므로 현장적용이 어려운 단점이 있다.
2. van der Pauw 방법에서 도전율은 시료의 두께(2, 3, 5, 11 mm)에 따라 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.
3. Four Point Probe(FPP) 방법의 dual configuration 기술을 적용하면 현장 적용이 가능할 것으로 판단되며, 측정의 정밀·정확도를 높이기 위해서는 시료의 두께가 probe spacing 보다 약 50 % 이하가 되어야 한다. 또한 dc current의 사용 적정전류는 probe spacing이 2.5 mm인 경우 1.0 A, 5.0 mm인 경우 10 A이었고, 측정 불확도는 0.45 %로 나타났으며, 시료의 두께에 따라 측정 정확도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

[1] ASTM B193-78, Resistivity of electrical conductor materials (1978).

[2] van der Pauw, Philips Res. Rep, vol. 13(1958), p. 1-9.

[3] ASTM F 1529-97, "Standard Test Method for Sheet Resistance Uniformity Evaluation by In-Line Four-Point Probe with the Dual-Configuration Procedure," (1997).