금도금의 전류효율에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향

손인준^{1,*}·손호상¹·김경태²

¹경북대학교 금속신소재공학과

²재료연구소 분말기술연구실

Effect of Potassium Persulfate on Current Efficiency for Gold Plating

Injoon Son^{1,*}, Ho-Sang Sohn¹, and Kyung Tae Kim²

¹Department of Materials Science and Metallurgical Engineering Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

²Powder & Ceramic Materials Division, Korea Institute of Materials Science, Gyeongnam 51508, Republic of Korea

Abstract: In this study, the effect of potassium persulfate on current efficiency for gold plating was investigated using electrochemical techniques. The current efficiency in the low-current-density range greatly decreased when potassium persulfate was added to the gold plating solution. However, the current efficiency in the high-current-density range did not change with the addition of potassium persulfate. The measured contact resistances of the resulting gold-plated layers showed almost similar values, regardless of the addition of potassium persulfate, suggesting that potassium persulfate does not affect the property of the gold layers. Linear sweep voltammetry and partial polarization curves showed that the persulfate ion was reduced when the noble potential was more than that of the gold ion. Therefore, the current efficiency for gold plating decreased when potassium persulfate was added in the low-current-density range because at such a current-density the reduction of persulfate preferentially occurs.

(Received November 18, 2015; Accepted April 5, 2016)

Keywords: electroplating, gold plating, current efficiency, potassium persulfate, connector

1. 서 론

전자부품용 커넥터란 어떤 기능을 나타내는 부품들을 서로 접속시키기 위한 연결부품을 말하며, 인쇄회로기판(printed circuit board), 연성회로케이블(flexible printed cable), 터치패널(touch panel), LCD모듈(LCD module), 카메라모듈(camera module), 메모리(memory)와 같은 전자부품들을 서로 연결시키기 위해서 AV기기, 모바일 기기, 자동차 부품, 의료기기, 산업기기 등에 널리 적용되고 있다. 최근 스마트폰, 스마트TV와 같은 다양한 기능을 나타내는 전자기기의 출현으로 그 내부에 사용되는 전자부품의 수가 크게 증가하여, 높은 접속신뢰성이 요구되는 전자부품용 커넥터의 수요도 크게 늘어나고 있다. 또한, 전자제품의 고 성능화 및 소형화를 실현하기 위해서 커넥터의 형태 또한 경박단소의 방향으로 진행되고 있다.

한편, 커넥터가 높은 접속신뢰성을 나타내기 위해서는 낮은 접촉저항 값과 우수한 내식성이 요구된다. 이를 만족시키는 재료로는 백금(Pt), 금(Au), 은(Ag), 팔라듐(Pd), 로듐(Rh) 등과 같은 귀금속(noble metal)이 있으며, 그 중에서도 부식 환경에서 우수한 내식성과 낮은 접촉저항 값을 나타내는 금(Au)이 가장 널리 사용되고 있다 [1-11]. 커넥터 표면에 금을 형성시키는 방법으로는 대량생산이 가능하고 두께 조절이 용이한 전기도금법이 적용되고 있으며, 그 적용 두께는 약 60~800 nm 정도이다 [12-14].

최근 금 가격의 지속적인 상승으로 인하여 커넥터 접촉부(contacting area)에만 금도금을 실시하는 부분도금법이 널리 적용되고 있다 [15-16]. 커넥터의 부분도금은 원형 또는 사각형의 백금 애노드 노즐로부터 도금하고자 하는 커넥터의 개소에 도금액을 고속으로 분사시키는 방법으로 실시되고 있으나, 도금액의 고속분사로 인하여 커넥터의 금도금 필요부분 이외의 개소에도 금도금층이 형성된다. 따라서 금도금 필요부분외의 금의 석출을 억제할 수 있다면, 전자부품용 커넥

*Corresponding Author: Injoon Son

[Tel: +82-53-950-5563, E-mail: ijson@knu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Fig. 1. Schematic illustrations of (a) the selective gold-plating method by jet spraying for an electronic connector and (b) the relationship between the distance of connector and the current density.

터에 사용되는 금의 사용량을 크게 절감할 수 있다. 그림 1에 도금액의 고속분사를 이용한 부분 금도금 방법과 커넥터의 위치에 따른 전류밀도와와의 관계를 나타내었다. 애노드 노즐에서 고속 분사된 금 도금액과 커넥터 표면에 직접 닿는 부분(금도금 필요부)이 높은 전류밀도 영역에 해당되며, 분사된 금 도금액이 커넥터의 아래 쪽으로 흘러내리는 부분(금도금 불필요부)은 낮은 전류밀도 영역에 해당된다. 즉 낮은 전류밀도 영역의 금의 석출을 선택적으로 억제할 수 있다면, 금도금 불필요부의 금 석출을 억제하여 전자부품용 커넥터에 사용되는 금의 사용량을 절감할 수 있을 것으로 판단하였다.

전기도금과 같이 캐소드 표면에서의 금속이온의 석출반응과 같은 전극반응을 억제하기 위한 인히비터(inhibitor) 또한 금의 석출반응을 억제할 수 있을 것으로 예상되나, 금 도금 불필요부인 낮은 전류밀도 영역만 선택적으로 금의 석출반응을 억제한다는 것은 어려운 것으로 판단된다. 왜냐하면 인히비터는 전극표면에 균일하게 흡착되어 전극반응을 억제하기 때문에, 낮은 전류밀도 영역에서 높은 전류밀도 영역에 걸쳐서 균일하게 작용할 것으로 예상되며, 낮은 전류밀도 영역에서만 선택적으로 전극반응을 억제하는 인히비터 또한 아직까지 보고된 사례가 없다. 본 연구에서는 낮은 전류밀도 영역에서 금의 석출반응을 억제하기 위해서, 금의 석출반응보

다 우선적으로 환원반응이 일어나는 물질을 첨가하는 방법을 고안하였다. 즉, 금의 석출전위보다 더 귀한(noble) 전위에서 환원반응이 일어나는 물질을 첨가하면 선택적으로 낮은 전류밀도 영역에서의 금 석출에 대한 전류효율을 저하시킬 수 있다고 판단하였다. 이러한 물질의 조건으로 1)가용성의 유기 또는 무기 화합물이며, 환원전위가 시안화금이온의 석출전위($\text{Au}(\text{CN})_2^- + e^- = \text{Au} + 2\text{CN}^-$, $E^\circ = -0.61 \text{ V vs NHE}$) 보다 더 귀한 곳에 위치할 것, 2)도금과정에서 금 도금층에 공석되지 않으며, 첨가 전후에 접촉저항과 같은 도금층의 물성이 변하지 않을 것 등이 요구된다. 이러한 조건을 만족시키는 후보 물질로서 과황산칼륨($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e^- = 2\text{SO}_4^{2-}$, $E^\circ = +2.01 \text{ V vs NHE}$)을 도출하여, 금도금의 전류효율에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향을 조사하였다. 또한, 과황산칼륨 첨가에 의해서 금도금의 석출효율이 변화하는 요인을 전기화학측정을 통하여 해석하였으며, 금도금층의 접촉저항에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향에 대해서도 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 구연산($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 0.238 M, 구연산칼륨($\text{C}_6\text{H}_5\text{K}_3\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 0.424 M, 시안화금칼륨($\text{KAu}(\text{CN})_2$) 0.021 M을 함유하는 수용액을 500 mL 제조하여 금도금액으로 사용하였다. 금도금액의 pH는 구연산 및 수산화칼륨(KOH)으로 5.5로 조정하였으며, 전해온도 40 °C, 마그네틱 회전자를 사용하여 도금액을 교반(500 rpm)하면서 전기화학측정 및 금도금을 실시하였다. 금도금의 전류효율에 미치는 과황산칼륨($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) 첨가의 영향을 조사하기 위해서, 선형주사전위법(LSV, Linear Sweep Voltammetry)와 정전해법에 의한 분극곡선을 측정하였다. LSV는 참조전극으로 은/염화은전극(포화 KCl, +0.199 V vs NHE)을 사용하여 +1.0 V에서 -1.0 V까지 귀한(noble)전위에서 비한(base)전위 방향으로 스캔속도 20 mV/sec로 측정하였다. 과황산칼륨 첨가에 따른 금 석출반응의 분극거동을 조사하기 위해서 전류밀도 10~2000 A/m²의 범위에서 정전류전해(HOKUTO DENKO, HA-151B)를 실시하여 분극곡선을 측정하였다. 애노드와 캐소드에는 각각 2 cm²의 백금을 사용하였으며, 전기량은 0.6~4.8 C의 범위에서 전해를 실시하였다. 얻어진 금도금층은 시판의 금박리액(Young In Plachem Co. Ltd., GPS-100)을 사용하여 40~50 °C에서 용해시킨 후, 원자흡광분광기(Perkin Elmer, AAnalyst 200)를 사용하여 금의 농도를 분석하여 전류효율 및 금 석출반응의 부분분극곡선을 나타내었다. 수소발생 반응의 전류효

Fig. 2. Polarization curves in gold-plating solutions containing without persulfate and with 0.01 M persulfate by linear sweep voltammetry.

율(%)은 100에서 과황산칼륨의 환원반응의 전류효율과 금 석출반응의 전류효율을 빼서 계산하였다.

또한, 간이 고속 금도금 장치를 사용하여 전류밀도에 따른 금도금층의 두께와 전류효율에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향을 조사하였다. 간이 고속 금도금 장치는 내화학성 마그네틱 펌프(WiLo, PM-0.5NM)를 사용하여 7 L/min의 유량으로 금도금액이 직경 6 mm의 백금 애노드 노즐에서 시편으로 고속 분사되는 방식으로 200~7000 A/m²의 범위에서 5 초간 금도금을 실시하였다. 얻어진 금도금층의 평균두께는 형광X선 도금두께 측정기(Helmut Fisher, XDLM-C4)로 5회 측정하여 평균값을 나타내었으며, 전류효율은 이 평균두께로부터 계산하여 나타내었다.

금도금층의 접촉저항은 비커스케일의 금도금 장치를 이용하여 10 cm²의 동(copper) 시편 위에 시판의 광택니켈도금액(ATOTECH, MAKROLUX-NF)을 사용하여 니켈도금을 약 2 µm 실시한 후, 100 A/m²의 정전류전해법으로 금도금층을 0.1 µm 형성시킨 후 측정하였다. ASTM-B667 [17]에 근거하여 제작한 접촉저항 측정기를 사용하였으며, 하중변화(0.098 N~0.49 N)에 따른 접촉저항을 5회 측정하여 그 평균치를 그래프로 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 2에 전극전위를 +1.0 V에서 -1.0 V까지 비한 방향으로 20 mV/s의 속도로 이동하였을 때의 과황산칼륨 첨가에 의

한 분극곡선의 변화를 나타내었다. 과황산칼륨을 첨가하지 않은 금도금액의 경우, 약 -0.85 V 부근에서 시안화금이온의 환원반응에 의한 전류피크가 관찰되었다. 과황산칼륨을 0.01 M을 첨가한 경우에는 -0.85 V 부근의 시안화금이온의 환원반응 외에 약 -0.30 V에서 과황산이온의 환원반응으로 판단되는 피크가 관찰되었다. 즉, 과황산이온의 환원반응은 시안화금이온의 환원전위보다 좀 더 귀한 전위에서 일어나는 것을 알 수 있다.

그림 3에 부분 분극곡선에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향을 나타내었다. 과황산칼륨을 첨가하지 않은 금도금 용액의 경우(a), 약 -0.80 V에서 금이온의 환원반응과 수소이온의 환원반응에 의한 전류가 흐르기 시작하여, 음극과전압이 증가함에 따라서 전 전류(total current)가 지수함수적으로 증가하는 거동을 나타내었다. 수소이온의 환원반응은 음극과전압의 증가에 대해서 지수함수적으로 증가하는 거동을 나타내었으나, 금이온의 환원반응은 음극과전압이 증가함에 따라서 전류가 더 이상 증가하지 않는 확산한계에 도달하는 것을 알 수 있다. 한편, 과황산칼륨을 첨가한 금도금액의 경우(b, c)에는, 낮은 전류밀도 영역에서는 과황산이온의 환원반응에 의한 것으로 판단되는 전류가 금이온의 환원전위보다 귀한 전위영역에서 흐르기 시작하며, 금의 석출전위(-0.8 V)보다 비한 전위영역에서는 과황산칼륨을 첨가하지 않는 용액과 거의 유사한 거동을 나타내었다. 금이온 환원반응의 부분분극곡선은 과황산칼륨 첨가 유무에 상관없이 약 -0.8 V에서 전류가 증가하기 시작하여 -1.2 V보다 비한 전위에서는 거의 일정한 전류값을 나타내었다. 이는 금 석출반응이 확산한계에 도달하였기 때문이라고 생각된다. 과황산칼륨 첨가 유무에 상관없이 금이온 환원반응의 전류밀도는 거의 동일한 거동을 나타내고 있으며, 이는 금이온의 석출거동에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향이 거의 없음을 나타낸다. 또한, 수소발생 반응에 대한 부분분극곡선도 과황산칼륨 첨가에 의해서 거의 변화가 없으므로, 수소이온의 환원반응에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향 또한 거의 없음을 알 수 있다. 한편, 과황산이온의 환원반응에 대한 부분분극곡선은 과황산이온의 농도가 증가함에 따라서 환원전위가 좀 더 귀한 방향으로 이동하였으며, 확산한계전류 또한 좀 더 높은 값을 나타내었다.

그림 4에 과황산칼륨 첨가에 따른 전류밀도별 전류효율의 변화를 나타내었다. 과황산칼륨을 첨가하지 않은 금도금액에서는 전류밀도가 증가함에 따라서 전류효율이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 전류밀도가 증가할수록 금의 석출 전류는 확산한계에 도달하여 일정하게 되는 반면, 수소이온

Fig. 3. Total and partial polarization curves in gold-plating solutions (a) without persulfate, and with (b) 0.01 M persulfate and (c) 0.02 M persulfate.

Fig. 4. Effect of current density and persulfate concentration on the current efficiency of gold plating.

의 환원반응에 의한 전류는 계속 지수함수적으로 증가하기 때문에 전류효율은 전류밀도가 증가할수록 감소하였다고 생각된다. 한편 과황산칼륨을 첨가한 금도금액에서는 $10\sim 100\text{ A/m}^2$ 의 낮은 전류밀도 영역에서는 전류효율이 크게 저하되었으며, 전류효율 감소의 정도는 과황산칼륨 농도가 증가할수록 더 큰 경향을 나타내었다. 즉, 과황산칼륨 첨가에 의해서 낮은 전류밀도 영역에서의 금이온 환원반응의 전류효율이 우선적으로 저하됨을 알 수 있다. 한편, $500\sim 2000\text{ A/m}^2$ 의 높은 전류밀도 영역에서는 과황산칼륨 첨가에 의한 석출효율의 저하가 거의 나타나지 않았다.

도금액을 커넥터의 필요부분에만 고속으로 분사하여 금도금을 실시하는 실제 커넥터 도금장비에서도 유사한 거동이 나타나는지 확인하기 위해서 간이 고속 도금장치를 이용하여 전류밀도 변화에 따른 금도금층 두께 및 금도금의 전류효율을 조사하였다. $200\sim 7000\text{ A/m}^2$ 의 전류밀도에서 5 초간 도금한 시편의 도금 두께를 측정된 결과를 그림 5에 나타내었

Fig. 5. Effect of current density and persulfate concentration on the thickness of the gold layer plated for 5 sec using a jet-spraying plating cell.

Fig. 6. Effect of current density and persulfate concentration on the current efficiency for gold plating calculated from gold thickness in Fig. 5.

다. 과황산칼륨을 첨가하지 않은 도금액에서는 전류밀도가 증가할수록 도금두께는 증가하는 경향을 나타내었으며, 3000 A/m^2 이상에서는 확산한계에 도달하여 더 이상 금 도금층의 두께가 증가하지 않았으며, 거의 일정한 값을 나타내었다. 과황산칼륨을 첨가한 도금액에서는 200~1000 A/m^2 의 낮은 전류밀도 영역에서는 금도금층의 두께가 크게 저하되었으며, 그 정도는 과황산칼륨 농도가 증가할수록 더 큰 경향을 나타내었다. 한편, 5000~7000 A/m^2 의 높은 전류밀도영역에서는 과황산칼륨 첨가의 유무에 상관없이 거의 같은 금 도금

Fig. 7. Variation of contact resistances as a function of load and persulfate concentration on 0.1 μm gold layers.

두께를 나타내었다. 이는 과황산칼륨 첨가가 낮은 전류밀도 영역의 금도금 두께를 우선적으로 저하시킬 수 있다는 것을 시사하며, 높은 전류밀도 영역에서는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 과황산칼륨은 낮은 전류밀도 영역의 금도금층의 두께를 효율적으로 저하시킬 수 있다는 것을 시사한다.

그림 6에 과황산칼륨 첨가에 따른 전류효율의 영향을 나타내었다. 과황산칼륨을 첨가하지 않은 도금액에서는 전류밀도가 증가할수록 전류효율은 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 부분분극곡선(그림 2)에서도 제시되었듯이, 전류밀도가 증가할수록 금의 석출전류는 확산한계에 도달하여 일정하게 되는 반면, 수소발생 전류는 계속 증가하기 때문에 전류효율은 전류밀도가 증가할수록 감소하였다고 판단된다. 과황산칼륨을 첨가하면 낮은 전류밀도 영역의 전류효율이 크게 저하되었으며, 특히 200~600 A/m^2 의 전류밀도영역에서는 전류효율이 0%를 나타내었다. 즉, 과황산칼륨을 첨가하면 낮은 전류밀도 영역에서 금이 전혀 석출되지 않음을 알 수 있다.

그림 7에 금도금층의 접촉저항에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향을 나타내었다. 금 도금층의 접촉저항은 증가할수록 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 하중이 증가할수록 프로브의 접촉면적이 증가하였기 때문이라고 판단된다. 한편, 과황산칼륨 첨가에 의해서 금도금층의 접촉저항은 거의 같은 값을 나타내었으며, 이는 금도금층의 접촉저항에 미치는 과황산칼륨의 영향이 거의 없음을 시사한다. 즉, 과황산칼륨은 금도금에서 낮은 전류밀도 영역에서의 금의

Fig. 8. Partial polarization curves showing non-gold plating mechanism at low-current-density ranges in a gold-plating solution containing persulfate.

석출효율에만 영향을 미치며, 접촉저항과 같은 금도금층의 물성에는 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 도금과 같은 금속이온의 석출과정에서 석출금속의 미세조직에 영향을 미치는 인자로는 석출과전압이 있다. 석출과전압의 크기가 석출금속의 핵생성 속도 및 성장속도에 영향을 미치며 도금층의 미세조직에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [18]. 그림 4의 부분 분극곡선에서 알 수 있듯이, 금의 부분분극곡선은 과황산칼륨 첨가에 의해서 거의 변하지 않았다. 즉 과황산칼륨 첨가에 의해서 금의 석출과전압이 변하지 않았기 때문에, 얻어지는 도금조직 또한 변화가 없어서 접촉저항이 변하지 않았다고 생각된다.

그림 8에 과황산칼륨 첨가에 의해서 낮은 전류밀도 영역에서의 금의 석출이 억제되는 매커니즘을 각각의 반응의 부분 분극곡선을 이용하여 나타내었다. 금이온의 환원반응, 즉 금의 석출반응은 수소이온의 환원반응과 거의 동일한 전위에서 일어나며, 금이온의 환원전류(i_{Au})는 음극과전압이 커짐에 따라서 확산한계에 도달하여 거의 일정한 값을 나타내었다. 수소이온의 환원반응에 대한 전류(i_{H_2})는 음극과전압에 커짐에 따라서 지수함수적으로 증가하였다. 한편, 과황산이온의 환원전위는 금의 석출전위보다 더 귀한 전위에 위치하고 있으며, 낮은 첨가농도에서는 음극과전압이 증가함에 따라서, 확산한계에 도달하여 일정한 전류밀도 값을 나타내었다(그림 3). 전기도금과 같은 환원반응에서는 환원전위가 귀한 반응이 우선적으로 일어나므로, 낮은 전류밀도 영역에서는 가장 귀한 환원전위를 가지는 과황산이온의 환원반응이 우선적으로 일어남을 알 수 있다. 본 연구에서도 $200\sim600\text{ A/m}^2$ 의 낮은 전류밀도 영역에서의 금도금의 전류효율은 0%를 나타내었다(그림 6). 한편, 높은 전류밀도 영역에서는 전극전위가

금의 석출전위 및 수소이온의 환원전위보다 더 비한(base) 곳에 위치하여 금이온의 환원반응, 수소이온의 환원반응 및 과황산이온의 환원반응이 동시에 일어난다. 과황산이온의 환원전류는 확산한계에 도달하여 금이온의 환원전류 및 수소이온의 환원전류에 비해서 낮은 값을 나타내므로, 높은 전류밀도 영역에서의 금의 전류효율은 과황산칼륨 첨가에 의해서 거의 변화하지 않았다(그림 3). 따라서 금이온의 석출전위보다 좀 더 귀한 전위에서 환원하는 과황산이온을 첨가함으로써 낮은 전류밀도 영역에서의 금의 석출효율을 선택적으로 저하시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 도금액을 고속으로 분사하여 부분 금도금을 실시하는 커넥터의 도금공정에서 금도금 필요부 이외의 금도금 불필요부, 즉 낮은 전류밀도 영역의 금의 석출을 억제하여 금사용량을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 금도금의 전류효율에 미치는 과황산칼륨 첨가의 영향을 전기화학적 기법을 사용하여 조사하였다. 과황산칼륨 첨가에 의해서 낮은 전류밀도 영역에서의 금 전류효율이 우선적으로 저하되는 것을 알 수 있었다. 한편, 높은 전류밀도 영역에서의 금 전류효율은 과황산칼륨 첨가의 영향이 거의 없었다. 금도금층의 접촉저항은 과황산칼륨 첨가에 의해서 거의 변하지 않았으며, 이는 과황산칼륨은 금도금층의 물성에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 나타낸다. 과황산칼륨은 금의 석출전위보다 더 귀한 전위에서 환원하므로, 낮은 전류밀도 영역에서는 과황산이온의 환원반응이 우선적으로 일어나서 금의 전류효율이 저하되었음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 (재)산학협동재단 학술연구비 지원사업과 미래창조과학부 기초연구지원사업 신진연구자지원사업(NRF-2014R1A1A1007848)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. C. S. Back, H. K. Chang and H. C. Kim, *J. Korean Inst. Surf. Eng.* **25**, 107 (1992).
2. J. G. Han and T. M. Kang, *J. Korean Inst. Surf. Eng.* **25**, 309 (1992).

3. M. Antler, *IEEE T. Compon. Hybr.* **10**, 420 (1987).
4. J. P. Yue, F. Z. Yang, Z. Q. Tian and S. M. Zhou, *T. I. Met. Finish.* **89**, 249 (2011).
5. S. Uemiya, T. Endo, R. Yoshiie, W. Katoh and T. Kojima, *Mater. Trans.* **48**, 1119 (2007).
6. A. Abys, G. F. Breck, H. K. Straschil, I. Boguslavsky and G. Holmbom, *Plat. Surf. Finish.* **86**, 108 (1998).
7. Z. Ratajewicz and C. Saneluta, *Plat. Surf. Finish.* **84**, 60 (1997).
8. J. A. Abys, J. J. Maisano, I. V. Kadija, E. J. Kudrak and S. Nakahara, *Plat. Surf. Finish.* **83**, 43 (1996).
9. I. H. Moon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **19**, 325 (1981).
10. J. K. Kim, D. J. Jang, K. I. Ju, E. H. Lee, S. Y. Um and T. W. Nam, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **46**, 443 (2008).
11. J. W. Lee and H. C Lee, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **37**, 381 (1999).
12. P. Goodman, *Gold Bull.* **35**, 21 (2002).
13. I. Christie and B. Cameron, *Gold Bull.* **27**, 12 (1994).
14. Y. Okinaka and M. Hoshino, *Gold Bull.* **31**, 3 (1998).
15. J. Zahavi and M. Halliwell, *Met. Finish* **83**, 61 (1985).
16. E. D. Winters, *Plat. Surf. Finish.* **66**, 61 (1979).
17. ASTM B667, "Standard Practice for Construction and Use of a Probe for Measuring Electrical Contact Resistance", p.1, ASTM (2009).
18. M. Paunovic, M. Schlesinger, *Fundamentals of Electrochemical Deposition*, pp126, John Wiley & Sons, New York (1998).