

용해도 낮은 금속을 이용한 전기 전도성 잉크

한국남*, 김남수⁺

(논문접수일 2007. 6. 21, 심사완료일 2007. 9. 12)

Conductive Inks Manufactured with the Help of Low Melting Metals

Kenneth N. Han*, Nam-soo Kim⁺

Abstract

In this investigation, various factors affecting manufacturing conductive inks are presented, examined and discussed. The discussion includes inherent difficulties in making conductive inks successful and at the same time offers ways in which these difficulties might be overcome. One of the solutions to overcome such difficulties is to use low melting metals and alloys. This aspect is also detailed.

Key Words : Conductive ink(전도성 잉크), Nano ink(나노 잉크), Low-melting metal(저용융성 금속), Direct write(직접 인쇄)

1. 서론

미립자 및 나노 크기의 금속 입자를 사용한 나노잉크는 높은 전기전도도, 간단한 공정 및 낮은 열처리 온도가 가능하여 다양한 분야를 위하여 연구되어 왔다. 지금까지의 많은 상용화 연구는 전기전도성이 큰 금속 입자를 우선 제조한 후 이 금속입자들을 물 또는 유기성 매체에 분산하여 잉크로 사용하는 것이 주 연구 목적이었다⁽¹⁻⁷⁾. 미립자의 금속 잉크는 많은 정보를 작은 면적에 간편하게 기록할 수 있어 현재의 전통적인, 스크린 프린팅, 에칭 등 24단계의 복잡한 전통적인 전자회로 제조기법⁽⁸⁾보다 훨씬 효과적으로 빠른 시간 내에 원하는 형상 제조가 가능하리라 예상된다. 같은 양의 정보를 훨씬 작은 회로에 기재할 수 있는 기능적인 요소

가 기존의 공정을 대체할 수 있는 수준까지 도달한다면, 경제적인 파급효과는 대단하여, 산업 전반에 걸쳐 환경 친화적이며 경제성이 뛰어난 나노잉크를 사용한 공정이 기존의 프로세스를 대체할 것으로 예상된다.

여기 기술한 전기전도성 잉크제조의 연구 목적은 소위 "Direct Write Technology(DWT)"라고 하는 직접인쇄 공정에 사용되는 핵심요소 기술을 개발하고자 하는 것이다. 직접인쇄기술은 근래에 세계적으로 많은 연구자들이 활발하게 연구하는 대상으로 궁극적으로 현재의 전자 회로를 제조하는 방법을 대체하는 혁신적인 공정이 될 것이라는 기대로 잉크젯방식^(9,10), 스프레이방식⁽¹¹⁾, 레이저를 이용한 방식^(12,13), 에어로졸방식⁽¹⁴⁾, 직접 접촉 패터닝 방식⁽¹⁵⁾ 등 많은 부분에서 활발한 연구가 이루어지고 있다.

* 서경대학교 환경나노기술센터 (KennethHan@skuniv.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 성북구 정릉동 16-1

+ 서경대학교, 환경나노기술센터/전자공학과

이러한 직접인쇄기술의 핵심요소인 나노잉크의 구성물인 금속 미립자는 그 크기가 나노 크기이기 때문에 이를 이용하여 회로를 구성하면 작은 면적에 많은 정보를 저장할 수 있는 장점이 있다. 그러나 그 공정을 완성함에는 기술적으로 극복해야 할 많은 문제가 있다. 직접인쇄방식에 사용되는 전기전도성 잉크가 갖추어야 할 조건과 그 조건을 만족시키기 위한 이론적 또는 실험적으로의 접근성에 대하여 검토하고 성공적인 결과를 도출하기 위해 필요한 여건을 기존의 방법과 비교 검토하여 그 문제점과 앞으로의 연구진행 방향을 제시하는 것에 이 논문의 중점을 두고 있다.

2. 전도성에 영향을 주는 요소 및 그 대책

직접 인쇄방식을 위한 전기전도성 잉크가 갖추어야 할 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 미세한 글자를 패터닝 할 수 있는 정확도(25 μm 폭으로 1-2 μm 깊이)
- 낮은 열처리 온도(섭씨 200도 이하)
- 다양한 회로 기판과의 높은 접착력
- 높은 전기전도성(구리의 50-70%의 전도도)
- 낮은 점성도
- 경제성
- 다양한 직접인쇄방식에 적용가능성

지금까지 상용화를 위한 가장 큰 걸림돌과 이를 극복하기 위한 연구자들이 주력하는 문제는 직접인쇄 방법 및 열처리 한 후 잉크의 전기전도성이 만족한 값을 갖지 못하는 부분이다. 전기 전도성이 비교적 좋은 금속들은 은, 동, 금 그리고 알루미늄이라고 말할 수 있다. 금속을 나노 크기로 만드는 방법은 다양하다.

그 방법으로는 레이저/프라즈마 법, 전기화학법, 진공열분해법 및 습식처리법 등이 있다⁽¹⁶⁻¹⁹⁾. 본 연구소에서는 습식법을 이용하여 금속 분말을 나노 크기로 제조하고 있다⁽²⁰⁾. 이 습식 방법은 상대적으로 다른 기술에 비해 간단하면서도 나노 입자를 만드는데 효과적인 방법이다. 예를 들어 금속복합물을 증류수에 용해한 후 환원제를 첨가하면 금속이 이온 상태에서 환원되어 최초에는 원자크기로 존재하나 안정성이 낮아 입자가 서로 모여 큰 입자로 성장한다. 이렇게 큰 입자가 되는 과정 중에 분산제를 첨가하면 그 입자의 크기가 조절되는 기술이다. 분산제로는 녹말, 소듐 시리케트, 및 여러 가지 고분자 등을 사용하나 그 결과 물질이 전기전도성에 미치는 영향을 잘 고려해서 사용하여야 한다. 표 1에 여러

Table 1. Emf, melting point, and conductivity values of various substances^(21,22)

Metal/ion	EMF (volts SHE)	Melting pt (deg-C)	Conductivity $\times 10^6$ (ohm ⁻¹ cm ⁻¹)
Au/Au ⁺⁺⁺	1.5	1064.6	0.452
Pt/Pt ⁺⁺	1.19	1771.8	0.096
Ag/Ag ⁺	0.799	960.8	0.630
Cu/Cu ⁺⁺	0.337	1084.4	0.596
Sb/SbO ⁺	0.212	630.8	0.028
H ₂ /H ⁺	0.0	-259.2	0.108
Pb/Pb ⁺⁺	-0.126	327.4	0.048
Sn/Sn ⁺⁺	-0.136	231.8	0.091
Ni/Ni ⁺⁺	-0.250	1452.8	0.143
In/In ⁺⁺	-0.269	156.6	0.116
Co/Co ⁺⁺	-0.277	994.8	0.172
Cd/Cd ⁺⁺	-0.403	321	0.138
Fe/Fe ⁺⁺⁺	-0.440	1535.7	0.093
Ga/Ga ⁺⁺⁺	-0.529	29.7	0.067
Al/Al ⁺⁺⁺	-1.663	660.1	0.377

가지 금속의 산화/환원도를 기록하였다. 우선 이들 금속을 미립자로 만드는 것이 중요한 과정이다. 금속들의 전기전도도, 그 용융점 및 산화/환원도 (redox potential)를 표 1에 기재 하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 그 산화도에 적당한 환원성을 가진 환원제를 조합함으로써 금속 잉크에 사용가능한 미립자를 만들 수 있다.

환원제로서 표 2에 기재된 것이 이런 용도에 많이 적용되는 화학약품들이다. 이들의 산화/환원도(redox potential)의 크기가 물론 금속의 산화/환원도 보다 훨씬 작아야 금속을 환원시키는데 효과가 있게 된다.

표 2에서 보는 바와 같이 금, 은 등 소위 noble metal 들은 환원시키기 쉬우나 철, 동, 니켈 등은 환원시키기 상대적으로 어렵다. 그 뿐만 아니라 이들 금속은 환원이 되어도 그 입자크기가 작은 활성 금속이어 표면 산화가 일어나거나, 소수성(hydrophobic) 표면을 가지게 되어 용액에 잘 분산되지 않는 문제가 있다.

2.1 환원제

금속 나노 입자 조성에 가장 중요한 역할을 하는 것은 환원제의 역할이다. 그 응용에 따라서 사용가능한 환원제를 상

Table 2. Commonly used reducing agents with reactions and their reducing potentials

$H_2S \rightarrow S + 2H^+ + 2e$	(0.142V)
$H_2SO_3 + H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e$	(0.172V)
$HCOOH \rightarrow CO_2 + 2H^+ + 2e$	(-0.199V)
$N_2H_4 + 4OH^- \rightarrow N_2 + 4H_2O + 4e$	(-1.16V)
$NaBH_4 + 4H_2O \rightarrow NaOH + H_3BO_3 + 8H^+ + 8e$	(-0.350V)
$NaBH_4 + O_2 + 2H_2O \rightarrow NaOH + H_3BO_3 + 4H^+ + 4e$	(-1.928V)

기의 표 2에 기재하였고 직접인쇄방법으로의 적용에 따른 단점을 검토할 것이다. 표 2에 기술된 환원제가 표 1에서 보는 금속 중 안티모니(Sb), 이상의 금속들을 이론상으로는 쉽게 환원시킬 수 있다고 볼 수 있으나 사실상 그 반응속도가 매우 느리며 특별한 촉매나 온도의 증가 등 부가적인 조치가 있어야 환원 반응이 일어난다. 이 표에 의하면 hydrazine (N_2H_4)이나 sodium borohydride($NaBH_4$)가 우수한 환원제로 쓸 수 있음을 보여주고 있으나 이들은 직접 인쇄시 전기 전도성에 좋지 않은 역할을 하거나 또는 용액 pH의 과격한 상승 등의 문제점을 유발한다. 용액의 pH 상승은 금속 미립자 제조에 악영향을 미치는데 그 이유 중의 하나로는 높은 pH에서는 금속입자의 산화도가 증가하게 되며 입자가 서로 응집(coagulation)하는 문제점을 야기한다.

2.2 농도의 영향

금속 나노 입자를 제조하는데 중요한 또 다른 공정변수 중 하나는 용액 속에 있는 금속이온의 농도이다. 농도가 낮으면 낮을수록 그 입자의 크기는 작아지게 되는데 직접인쇄 기술에 적용하기 위해서는 높은 이온농도를 필요로 한다. 다시 말하면 작은 입자를 만들기 위하여는 농도가 낮아야 하며 직접인쇄방법에 적용하기 위해서는 농도가 높아야하는 모순에서 연구자와 사용자는 절충조건을 찾게 된다.

예를 들어 전기 전도성 잉크를 직접인쇄에 응용하여 1미크론(μm^2) 넓이의 회로를 만들었다고 가정하자. 100 나노미터(nanometer)크기의 입자가 $1\mu m \times 1\mu m \times 1\mu m$ 의 부피 속에 들어 있다는 가정 하에, 직접인쇄 후 용액속의 물이 증발하여 기판위에 침전되어 단층(monolayer)을 형성한다면, 금속이 차지하는 면적은 금속이온농도에 따라 변하게 된다. 용액속의 농도에 따른 금속입자가 차지하는 면적을 계산한 결과를 다음 표 3에 나타내었다.

은(비중: 10.5)을 예로 계산을 하였고 첫 번째 열의 ppm

Table 3. Concentration of nano-particles and the % area occupied by them after precipitation forming a mono-layer

ppm	Adj ppm	no. of particles	area of particles ($10^{-11} cm^2$)	% area of particles
1000	1003	0.18	1.43	0.14
5000	5032	0.92	7.19	0.72
10000	10105	1.84	14.4	1.44
20000	20384	3.71	29.1	2.91
40000	41381	7.53	59.1	5.91
100000	110070	20.03	157	15.72
300000	408152	74.28	583	58.31
400000	620752	112.97	887	88.68
450000	749558	136.40	1070	107.08

은 실험실에서 상용하는 ppm의 개념으로 mg의 금속을 1000ml의 용액에 가한 것이며 둘째 열의 adjusted ppm은 mg 금속이 10^6 mg의 전체 용액에 들어 있는 실질적인 양으로 실제 ppm 값이 된다. 5000ppm까지의 금속 농도에서는 기판을 덮은 구형금속입자가 단층 형성에 1%도 되지 않는 상태로 이런 상태에서는 높은 전기전도도를 기대할 수 없다. 이런 농도의 잉크를 사용한다면 최소 100회 정도로 되풀이하여 써야 된다는 결론이다. 이론적으로는 400,000ppm 이상의 금속입자를 첨가하여야 최소한 원하는 전기전도도를 기대할 수 있다.

2.3 금속 입자 접촉의 문제

높은 전기전도도를 달성하기 위한 또 다른 문제점으로 결합 없이 동일한 크기의 구형입자에 의해 최대한 표면을 단층으로 덮을 수 있는 면적은 이론적으로 91%로 단층 도포된 기판에서, 입자와 입자사이의 공간과 입자들의 접촉에 의한 저항까지 고려한다면 높은 전도도를 얻기 위하여서 많은 연구가 필요할 것으로 예상된다. 접촉된 입자사이의 접촉저항은 전도도에 큰 영향을 미친다. 이러한 문제점을 확인하기 위해서는 금속 입자 사이의 전기적 접촉 저항을 직간접으로 확인하는 것이다. 전도성 잉크를 사용한 후 수분을 증발하며 금속입자 간의 접촉가능성을 높이기 위하여 열처리를 하는 것이 일반적인 경우이다. 이때 주의해야 할 것은 열처리 당시 온도가 낮아 기판에 영향을 미쳐서는 안되고, 또한 기판과 입자사이에 화학적 반응이 일어나서도 안된다. 그러기 위

하여서는 온도가 섭씨 200도 이하가 되면 효과적이다. 이 온도에서 금속이 용해 된다면 금속 입자간의 전기 접촉을 향상 시킬 수 있다.

이 전기적 접촉 문제를 극복 하기 위해 본 연구소에서는 다음과 같은 연구를 수행하고 있다. 전기전도성 잉크로 쓰이는 은이나 동 입자 외에 용해도가 비교적 낮은 금속을 이들과 함께 용액에 투입하여 금속입자가 단층을 형성하게 한 후 온도를 200°C 정도로 가열하여 용해도가 낮은 금속 입자를 용융시킴으로써 전기전도도를 향상시키는 것이다. 이렇게 함으로써 전기전도성은 높일 수 있으나 녹는점이 낮은 금속들은 그 자체의 전기전도성이 비교적 낮으므로 전체의 합금의 전기전도도는 낮아진다. 이런 복합 물질은 서로가 직렬 및 병렬로 연결되어 있어 그 계산을 쉽게 할 수 있다. 예를 들어 열개의 복합물질들이 병렬로 연결되어 있을 경우 그 복합 저항은 다음과 같이 계산이 되며 따라서 그 전기전도성도 계산이 된다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_{10}} \quad (1)$$

여기서 R은 복합 저항이며, R₁, R₂, ... R₁₀ 등은 각 물질의 개개의 저항을 표시한다. 저항과 전도성은 식 2와 같이 계산이 된다.

$$C = \frac{\ell}{RA}; C_1 = \frac{\ell}{R_1 A_1} \text{ and } A = 10A_1 \quad (2)$$

식 2에서, ℓ은 두 전극의 거리를 말하며, A는 그 단면적을 말한다. A₁, A₂, ... A₁₀는 각 구성 물질의 단면적을 표시한다. 따라서 전체의 전기 전도성은 식 3에 의하여 계산이 되는 것이다.

$$\frac{CA}{\ell} = \frac{C_1 A_1}{\ell} + \frac{C_2 A_1}{\ell} + \dots + \frac{C_{10} A_1}{\ell} \quad (3)$$

반면에, 만약 10개의 물질이 직렬로 연결이 되어 있으면, 그 전체의 전기전도도의 계산은 다음같이 된다.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{10} \quad (4)$$

그 전체 저항은 식 5에 의하여 계산이 된다.

$$\frac{\ell}{CA} = \frac{\ell}{C_1 A_1} + \frac{\ell}{C_2 A_1} + \dots + \frac{\ell}{C_{10} A_1} \quad (5)$$

예를 들어 동미립자(0.596×10⁶ ohm⁻¹cm⁻¹)와 서로 다른 금속들(M1=0.116×10⁶ ohm⁻¹cm⁻¹, M2=0.06×10⁶ ohm⁻¹cm⁻¹ 및 M3=0.006×10⁶ ohm⁻¹cm⁻¹)을 바인더와 필러로 사용했다고 가정하고, 서로 다른 입자간의 접촉 저항은 없다고 가정한다. 금속을 동의 함량을 10, 20, 30, 40, 50 및 100%(편의상 volume% 가정)로 변화시키며, 이론적인 전기전도도를 직렬 및 병렬로 각각 계산한 값을 표 4와 5에 나타내었다. 이 계산에서 두 금속의 밀도가 비슷한 값을 갖는다고 가정하였다. 그림 1에 동과 제2의 금속이 극단적으로 직렬 또는 병렬로 접촉할 때의 모습을 보여주고 있다. 그림 1의 두 가지 극단적인 경우를 기준으로 표 4와 표 5의 직렬 병렬 복합물질의 전기전도도를 측정하였다. 일반적인 재료의 분포는 그림 1의 직렬과 병렬의 혼합된 형태로 나타날 것으로 예상된다.

표 4 및 5에서 보는 바와 같이 제 2(M1, M2 및 M3) 금속 함량이 전체적인 복합금속의 전기전도도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 이 보다 더욱 중요한 것은 입자의 배열 방식이다. 표 4에서 보는 바와 같이 입자가 무작위하게 섞여 직렬에 가까운 배열을 할 경우 동을 M3와 배합하면, 동 함량이 60%에 이룸에도 불구하고 전체적인 전기전도도는 동별크상태의 2%를 초과할 수 없는 매우 낮은 전기전도도를 갖게 된다. 한편 입자들의 층간배열(병렬)로 분포할 수 있다면, 제 2금속의 전기전도도가 0.116×10⁶ ohm⁻¹cm⁻¹일 때의 전체 전기전도도가 동의 함량 40% 인데도 동의 50% 이상이 됨을 볼 수 있다. 이론적으로 더 나아가서 제 2의 금속의 전기전도도가 0.006×10⁶ ohm⁻¹cm⁻¹이라는 아주 적은 값일 때(M3) 병렬구조로 입자를 복합금속으로 할 수 있다면, 그 전체의 전기전도도는 동의 함량의 40%인데 동의 41% 이라는 값을 준다. 이러한 배열방식에 대한 연구는 전기전도성 잉크로서의 응용이 매우 중요함을 알 수 있다.

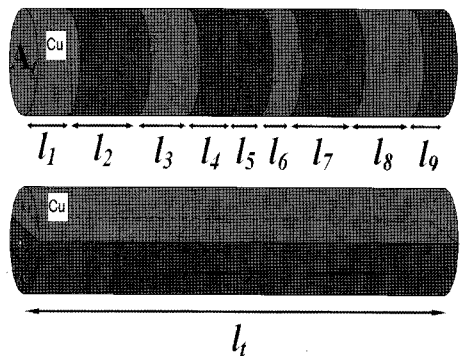


Fig. 1. Schematic of the way copper and the other metal are connected in series and parallel

Table 4. The overall conductivity of two component alloys as a function of % copper. Two metals are assumed to be connected in series

Cu volume %	% conductivity of Cu		
	Cu + M1	Cu + M2	Cu + M3
10	21	11	1
20	23	12	1
30	26	14	1
40	29	16	2
50	33	18	2
60	38	22	2
100	100	100	100

Table 5. The overall conductivity of two component alloys as a function of % copper. Two metals are assumed to be connected in parallel

Cu volume %	% conductivity of Cu		
	Cu + M1	Cu + M2	Cu + M3
10	28	19	11
20	36	28	21
30	44	37	31
40	52	46	41
50	60	55	51
60	68	64	60
100	100	100	100

3. 결론

본 논문에서 전기전도성이 좋은 잉크를 제조하는데 필요한 여러 가지 문제점에 대해 언급하였다. 습식법에 의한 나노 잉크 제조시에 환원제의 선택이 중요한 변수 가운데 하나임을 지적하였다. 그 환원제는 산화/환원도(redox potential) 및 직접인쇄 후 이들이 주는 전기전도도에 미치는 영향을 고려하여 선택하여야 한다.

전기전도성이 탁월한 잉크 개발에 중요한 여건은 금속입자의 농도 및 배열방식이다. 여기서 농도가 너무 작으면 직접인쇄 사용 후 그 전기전도도가 작고 너무 크면 잉크로서의 특성을 잃게 되므로 긴밀한 조정이 필요하게 된다.

상기의 조건을 다 만족했다 하더라도 입자간의 전기 접촉이 불충분하면 높은 전도도를 얻을 수 없다. 전기적 접촉을 향상시키기 위하여 녹는점이 낮은 금속과 제 2의 금속과 전기전도도가 높은 금속을 바인더 또는 필러를 사용하여 제조할 때, 입자간의 접촉방식에 대하여 이론적인 계산을 하였고, 그 결과 전체의 전기전도성을 향상 시킬 수 있는 좋은 방법을 설명하였다.

후 기

본 논문은 서울특별시가 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합 공정 및 장비개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- (1) Cima Nanotech, n.d., viewed March 2007, <<http://www.cimananotech.com/formulations.aspx>>.
- (2) Cabot, n.d., viewed March 2007, <<http://www.cabot-corp.com>>.
- (3) ANP, n.d., viewed March 2007, <<http://www.anapro.com/English/default.asp>>.
- (4) Harima Chemicals, Inc., n.d., viewed March 2007, <<http://www.harima.co.jp/>>.
- (5) Ulvac Technologies, Inc., n.d., viewed March 2007, <<http://www.ulvac.com/>>.
- (6) Collins Ink Corporation, n.d., viewed March 2007, <<http://www.collinsink.com/>>.
- (7) Sumitomo Electric Industries, Ltd., n.d., viewed March 2007 <<http://www.sei.co.jp>>.
- (8) Terrill, R., 1997, "Laser ablation patterning for low cost 3D die packaging," *IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings (Proceedings of the 1997 IEEE Aerospace Conference, 3, Snowmass Village, CO, 1997)*, pp. 481~488.
- (9) Fuller, S. B., Wilhelm, E. J., and Jacobson, J. M., 2002, "Ink-Jet Printed Nanoparticle Microelectromechanical Systems," *J. of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11. No. 1, pp. 54~60.
- (10) Lee, H. H., Chou, K., and Huang, K., 2005, "Inkjet Printing of Nanosized Silver Colloids," *Nanotechnolozgy*,

- Vol. 16 pp. 2436~2441.
- (11) Curtis, C. J., Miedaner, A., Rivkin, T., Alleman, J., Schulz, D. L., and Ginley, D. S., 2000, "Direct Write Metallizations for Ag and Au," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 624, pp. 59~64.
- (12) Ehrlich, D. J., Aucoin, R., Burns, M. J., Nill, K., and Siverman, S., 2000, "Real-World Applications of Laser Direct Writing," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 624, pp. 9~14.
- (13) Fitz-Gerald, J. M., Chrisey, D. B., Piqu, A., Auyeung, R. C. Y., Mohdi, R., Young, H. D., Wu, H. D., Lakeou S., and Chung, R., 2000, "Matrix Assisted Pulsed Laser Evaporation Direct Write (MAPLE DW): A New Method to Rapidly Prototype Active and Passive Electronic Circuit Elements," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 624, pp. 143~154.
- (14) Optomec, n.d., viewed March 2006, <<http://www.optomec.com>>.
- (15) nScript, Inc., n.d., viewed March 2006, <<http://www.nscriptinc.com>>.
- (16) Daun, K. J., Stagg, B. J., Liu, F., Smallwood, G. J., and Snelling, D. R., 2007, "Determining Aerosol Particle Size Distributions Using Time-Resolved Laser-Induced Incandescence," *Appl. Phys. B*, Vol. 87, No. 2, pp. 363~372.
- (17) Grumelli, D., Vericat, C., Benitez, G., Vela, M. E., Salvarezza, R. C., Giovantetti, L. J., Ramallo-Lopez, J. M., Requejo, G. G., Craievich, A. G., and Shon, Y. S., 2007, "Thio-Cahpped Gold Nanoparticles on Graphite: Spontaneous Adsorption and Electrochemically Induced Release," *J. Phys. Chem. C*, Vol. 111, No. 19, pp. 7179~7184.
- (18) Junichi, S., Kuniaki, A., Hiroaki, O., Kuniaki, M., and Toshihiko, O., 2007, *Method and Apparatus for Producing Metallic Ultrafine Nanoparticles by Vacuum Evaporation and Condensation*, US Patent: 2007062333.
- (19) Wilcoxon, J. P., Williamson, R. L., and Baughman, R., 1993, "Optical Properties of Gold Colloids Formed in Inverse Micelles," *J. Chem. Phys.*, Vol. 98, No. 12, pp. 9933-9950.
- (20) Han, K .N., Kim, N. S., and Lee, H. J., 2005, *Manufacturing of Nano-Metal Powder in Aqueous Media*, Korea Patent: 10-2005-0088675.
- (21) Arne Standnes, n.d., viewed March 2007, <<http://www.standnes.no/chemix/periodictable/electrical-conductivity -elements.htm>>.
- (22) West, R. C., 1985, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press.