

리드선의 제조공정 특성분석에 관한 연구[†] -온도, 전류밀도, 첨가제에 의한 전기 도금공정 중심으로-

이 도 경

금오공과대학교 신소재·시스템공학부

Characteristic Analysis for Lead-wire Process -Focus on Electro-gilding Process by Temperature, Current Density, and Additions-

Do-Kyung Lee

Material & Systems Engineering, Kumoh National Institute of Tech.

In this paper, we proposed the optimal process conditions on the electro-gilding process. The responses are plating thickness and Sn proportion. The factors are temperature, current density, and addition. We minimized the total number of experiments based on the principle of dividing into small part. We grouped the factors using the plating process information which we already knew. We did Hull Cell test to find relationship between plating solution and electric effects, and applied ANOVA and RSM to estimate the optimal process conditions.

Keywords : 실험계획법, 소분의 원리, 반응표면분석, 전기도금

1. 서 론

리드선(lead wire)은 전자부품의 일종인 축전지나 저항기 등의 전자부품을 회로 기판에 용접할 수 있도록 하는 필수 부품이다.

현재 산업공학의 품질경영 분야에서 기업체의 주요 관심사 중 하나가 '식스 시그마'이며, 식스 시그마의 목표 중 하나가 산포의 축소에 의한 3.4 ppm의 불량률 달성이다. 그러나 이 정도의 낮은 불량률 달성은 규격이 μm 단위로 설정되는 전기전자산업 CTQ들의 특성상 공정 조건의 산포 축소로만은 일반적으로 쉽지 않다.

공정 특성상 이전 공정까지의 발생 산포를 커버할 수 있는 경우는 예외지만, 일련된 프로세스에서 바로 전(前) 공정까지에서 발생 산포는 다음 공정에 추가 누적되어

후 공정으로 갈수록 산포는 점점 커지는 경우가 일반적이다. 그러므로 단일 공정의 산포를 최소화 하기 위해서는 궁극적으로 이를 구성하는 기본 단위들의 최소화가 선행되지 않으면, 이후 공정에서는 이의 산포를 줄이는 것이 일반적으로 불가능하다.

거의 모든 전기전자제품들은 리드선이 포함된 기본 부품인 저항기, 콘덴서 등으로 구성되어 있으므로, 이들 제품들의 전기적 특성 산포는 기본적으로 리드선의 품질에 의해 영향을 받고 있다. 또한, 전기전자제품이 아니더라도, 이들 제품을 가공하는 설비의 구성 및 관리는 전기전자 방식이다. 제품 산포는 설비 정밀도를 능가할 수는 없다. 결국 CTQ들의 극한적 산포 축소를 위해서는 설비 정밀도를 결정하는 기본 요소 중 하나인 리드선의 품질 향상이 필요하다. 리드선이 동일 저항을 유지하지

[†] 본 연구는 2001년도 금오공과대학교 연구비 지원에 의해 수행되었음.

못하면, 제품 특성에 산포가 발생하며, 설비의 경우 공정조건의 일관된 유지가 불가능하다.

저항기 및 콘덴서의 PCB 기판 장착 시, 리드선에 의한 주요 특성들로서 신뢰성의 균일성, 두께의 균일성, 산화방지 효과로 인한 부식 및 변색 방지, 납땀성(Soldering), 전기적 안정성과 시간 경과에 따른 신뢰성, 기계적 강도, High Frequency에서의 안정성, 그리고 전류 효율 특성 등이다. 본 연구의 대상인 도금공정은 이러한 모든 특성들에 영향을 미치는 중요 공정이다.

국내 리드선 제조사들은 국내 뿐 아니라 수출에도 많은 노력을 기울이고 있다. 용융성, 접합성, 그리고 균질성을 갖춘 고품질의 리드선을 생산하여 수입업체의 검사를 통과하기 위해서는 해당 특성을 구현하는 공정 조건을 분석해야 한다.

도금공정은 도금액, 인가 전압, 이송 속도, 첨가제 등의 여러 조건에 의해 그 특성이 결정된다.

도금액은 도금공정에서 가장 중요하며, 이를 구성하는 첨가제는 주로 일본에서 수입하고 있다. 도금산업의 특성상 첨가제의 성분은 제조 약품회사의 비밀 사항으로 되어있어, 이의 성분비를 변경하여 도금의 상태를 분석할 수는 없는 상황이다.

본 연구에서는 핵심 공정인 도금공정에 대해, 도금공정의 중요 특성치인 도금두께와 체크 사항인 Sn의 함유율을 최적화하는 공정 조건을 실험계획법을 통하여 도출하고자 한다.

현재 첨단 제품이 아닌 경우, 한국의 대부분 공장에서는 원가 절감의 방안 중 하나로 현장에서 말하는 ‘인덱스 단축’ 즉, 공정 및 작업 시간의 단축에 치중하고 있으며, 본 연구에서도 이러한 배경에서 도금공정의 효율적 조건을 찾아 공정시간의 단축에 그 목적이 있다.

2. 도금 공정

2.1 리드선 제조공정 구성

전체 리드 와이어 제조공정 순서 : 원자재(동선)-탈지-수세-산세-수세-태선기-중선기(신선기)-세선기-극세선기-1단 도금-2단 도금-수세-중화-수세-건조-권치-검사-연화공정-냉각-산세-수세-건조-환원-권치-검사

2.2 전기 도금공정의 절차

전기 도금공정의 전공정은 탈지공정이며, 탈지를 거친 리드선을 Sn과 Pb를 정해진 비율(Pb와 Sn이 1 : 19)에 의해 전기 도금하는 공정이다.

- 1) 탈지공정 : 2단의 NaOH 용액에 전기를 걸어 수소 가스를 발생시키고 수세에 의해 가성소다 성분 제거한 후 MSA 용액으로 산세를 거친다.
- 2) 전기도금 : 6개의 전기 도금조를 2단으로 구성. 각 도금조는 도금할 동선을 음극(-)에, 양전극(+)에는 총 24개의 기판을 설치 (다단식의 경우 각 도금조당 23개의 Sn과 1개의 Pb의 24개 solder로 구성된다)하여 도금한다.
- 3) 공정 제어 : 공정에 영향을 미치는 여러 조건들(인가 전압, 이송 속도 등)을 고정시키고 도금액의 온도에 의해 도금두께를 관리하고 있다.
- 4) 도금액의 성분 : MSA-100ml, Pb 이온액-5ml, Sn이온액-140ml, 첨가제-40ml, 물 : 1liter

2.3 도금 공정의 특성

금속 표면의 성질을 향상시키는 모든 공정 즉, 도금, 양극산화, 화성처리, 도장, 표면 강화 등, 많이 이용되며 용융방식과 전기방식이 있으나 현대에서는 전기 도금이 주이다.

도금의 목적은 제품의 외관을 아름답게 하는 장식용, 재료의 부식 방지를 목적으로 하는 부식방지, 그리고 제품의 기계적 성질을 개선하여 금속 표면을 여러 가지 용도에 맞도록 하는 데 있다.

전기 도금의 원리는 전해질의 수용액 중에서 전기 분해가 일어날 때, 음극에는 도금할 물체를 연결하고 양극에는 도금할 금속을 도금액 속에 매달아 전해 석출시키는 것을 말한다.

도금공정은 제품의 재질, 형태, 크기, 도금의 종류에 따라 다르며 이와 같은 공정의 적합성은 도금의 품질이나 생산량, 생산단가에 많은 영향을 주게 되므로 신중히 검토하여 선택하여야 한다.

도금공장에서는 직류 전원을 필요로 하며 직류 전원으로서 직류발전기, 금속정류기 등을 사용한다. 정류시 전류 파형이 도금에 미치는 영향이 크므로 각각의 공정마다 적합한 정류기를 선택하여야 하며, 현장에서는 실리콘(Si)정류기가 많이 쓰이고 있다.

도금 작업시 필요한 단위는 표면적의 크기, 용액의 부피, 약품의 질량, 도금피막의 두께, 전류밀도, 도금시간 등을 나타내는 데 쓰이며 단위는 μm , dm^3 , min , ℓ , g , A/dm^2 , ppm 등이 있다.

2.4 Pb와 Sn의 합금 성분 효과분석

Pb와 Sn은 구리선이 공기중의 산소와 결합하여 산화됨으로서, 전류의 흐름이 왜곡되지 않도록 방지한다. Pb

는 리드선의 Cu가 전자부품(레지스터나 콘덴서와 같은)과 기판에 부착시키는 보조 역할을 수행한다.

Pb가 그 용점 근처에 오면 성질이 액체와 유사한 성질을 취하기 때문에, 다른 물질과 접촉 마찰 시, 눌러지면서 두께의 변화나 박리 현상이 발생한다. Sn은 Pb와 유사 성질을 갖지만 Pb에 비해 용점이 높다.

만일 접촉 마찰이 심할 경우, 일부의 리드선의 표면 도금층의 Pb와 Sn 시료가 Cu 전도체로부터 이탈되며, 리드선의 표면 도금 상태가 거칠어진다. 이러한 거친 리드선의 표면은 심한 소음과 진동의 원인이 되며, 심한 경우 리드선을 부품으로 제조하는 콘덴서나 레지스터가 이송 공정 중에 이탈현상이 발생한다.

3. 연구 방법

3.1 실험의 설계

전체 실험의 목적은 온도와 전류밀도 그리고 첨가제의 3인자에 대해 도금두께와 Sn의 함유율(Sn%)의 두 반응값 변화를 분석하여 도금액의 최적 공정조건을 결정하는 것이다.

반응값 중 도금두께가 주 반응값이며 전류 효율성 면에서 망대특성을 갖는다. Sn%는 부차적인 반응값으로서 체크 항목이며, 95%의 망대특성(규격 하한, 상한 : 92-98%)을 갖는다.

3인자 요인배치법을 실시하는 경우, 인자들의 수준수가 온도와 첨가제양의 경우 6이며 전류밀도의 경우 4로서 반복을 하지 않더라도 실험회수가 144가 되어 전체 실험 수를 줄여야 했다.

실험수의 축소는 일반적인 일부실시법 대신, 소분의 원리를 이용하여 두 가지의 실험으로 분할했다. 실험의 분할 기준은 3인자들 중에서 전류밀도는 온도와 첨가제 모두와 연관성을 보이고 있으나, 온도와 첨가제의 교호작용이 미미하다는 기존 정보를 이용하였다. 그러므로 3인자들을 완전히 2개의 그룹으로 구분은 불가능하지만, 온도와 전류밀도, 첨가제와 전류밀도에 의한 각기 24회의 실험 수를 갖는 두 개의 반복이 없는 2원배치법으로 설계하였다. 두 가지의 실험 내용은 아래와 같다.

실험-1 : 온도와 전류밀도의 변화에 따른 Sn%와 도금두께 변화를 측정하며, 인자들의 수준은 다음과 같다.

- 온도(단위 : °C) - 20, 25, 30, 35, 40, 45
- 전류밀도(단위 : A/dm²) - 7.5, 10, 15, 20

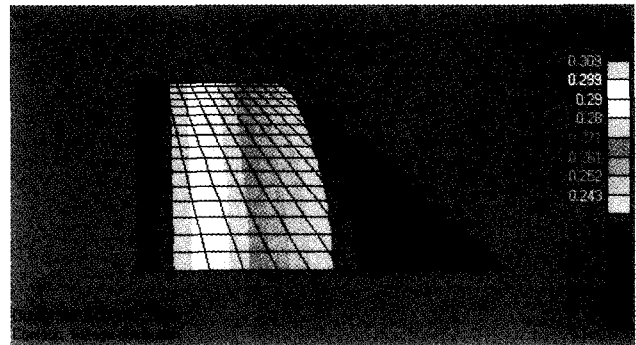
실험-2 : 첨가제 투입량과 전류밀도의 변화에 따른 Sn%와 도금두께의 변화를 측정하며, 인자들의 수준은 다음과 같다.

- 전류밀도(단위 : A/dm²) - 7.5, 10, 15, 20
- 첨가제 투입량(단위 : ml) - 1, 2, 3, 4, 5, 6

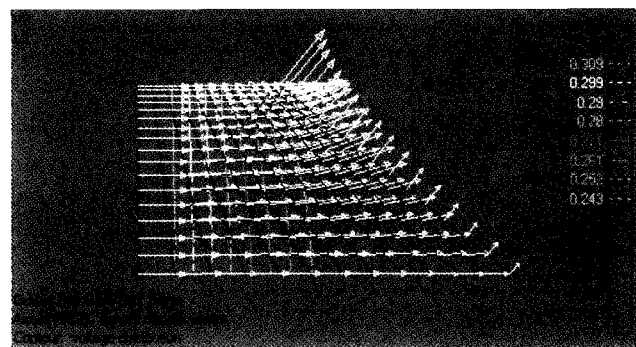
3.2 실험 방법 및 절차

전기 작용상태(음극 전류밀도, 온도)와 도금액(주성분, 광택제, 첨가제 및 불순물)이 도금의 특성에 미치는 영향 검사를 위한 Hull Cell 테스트를 실시했다.

Hull Cell은 사다리꼴의 도금조로서, 상단과 하단의 길이 각기 4.4, 12.1cm 높이가 6.4 cm이다. 그러므로 3개의 직각과 40°의 예각을 갖는다. 도금조에 전해 용액을 붓고 전압을 인가하면, 40°의 각도에 의해 인가된 전류밀도는 한쪽 전극에서 반대 방향의 전극으로 가면서 전형적으로 0.5mA/cm²에서 60mA/cm²로 변화한다. 이들 간의 관계를 <그림-1, 2>에 나타내었다.



<그림 1> 전위-전류의 등고선(0.5A/dm²)



<그림 2> 전위-전류의 벡터(0.5A/dm²)

도금액의 품질은 전극을 따라서 변화된 전류밀도에 의해 구리에 적출된 품질에 의해 결정된다. 전극의 잠재 전류곡선에 대해 Tafel의 비선형 방정식에 의한 계산이

요구된다.

동재료 특성과 전극에 속한 도금막의 성장 방향 그리고 도금시간에 따라 도금 두께는 현재의 전류 밀도에 의해 계산된다.

실험 절차는 다음과 같다. 1)양극판과 음극판의 전처리. 2)Hull Cell에 전처리된 양극과 음극을 설치하고 크램프를 각 극판에 연결. 3)탈지된 Hull Cell 시편 준비 및 줄긋기. 4) 3% 황산을 사용해 표면 활성화. 5)Hull Cell 시험조에 투입. 6)시편을 꺼내어 상태 분석 및 자료 측정. 7)보관을 위한 라카 코팅작업.

<표-1> 온도와 전류밀도의 변화에 의한 Sn%

	7.5A/dm ²	10A/dm ²	15A/dm ²	20A/dm ²
20℃	93.56	93.11	93.54	93.94
25℃	93.71	93.17	93.55	93.93
30℃	93.75	93.09	92.80	93.71
35℃	93.54	93.20	92.63	93.08
40℃	93.59	93.35	93.46	93.50
45℃	93.50	93.67	93.53	93.93

3.3 실험분석 절차

실험-1에서는 2원배치법에 의한 분산분석으로 요인별 유의성을 검정한다. 본 연구는 도금두께에 대한 최적 공정조건을 선정과 이 때의 Sn%가 규격 이내인가의 체크가 목적이므로 2차로 반응표면분석을 실시하여, 온도와 전류밀도의 최적 조건을 추정한다.

실험-2에서는 온도에 대해 실험-1의 결과대로 조건을 지정하며, 첨가제와 전류밀도에 대해 분산분석으로 요인별 유의성을 검정한 후, 그 결과에 따라 2차로 반응표면분석을 실시하여, 전류밀도와 첨가제의 최적 조건을 추정한다.

<표-2> 온도와 전류밀도에 의한 도금두께 (μm)

	7.5A/dm ²	10A/dm ²	15A/dm ²	20A/dm ²
20℃	7.96	10.88	10.77	9.95
25℃	7.63	9.92	10.25	10.62
30℃	7.66	10.92	10.25	10.71
35℃	8.19	9.87	14.98	15.28
40℃	7.96	10.88	10.77	9.95
45℃	7.63	9.92	10.25	10.62

<표-3> 도금두께에 대한 분산분석(μm)

요 인	DF	SS	MS	F	P
첨 가 량	5	18.10	3.62	2.50	0.077
전 류 밀 도	3	45.66	15.22	10.52	0.001
오 차	15	21.70	1.45		
전 체	23	85.46			

4. 실험결과 분석

4.1 가정 검토

본 실험에서는 등분산성을 가정하였다. 실험-1, 2의 자료들이 정규성 검토에서는 만족스럽지 않았으나, 이는 생산공정에서와 같은 관리 상태가 아닌 인자 조건들을 인위적으로 변화시키는 실험이므로 분석 결과에 심각한 오류를 주지는 않을 것으로 판단했다.

예상과 같이 두 인자 모두 유의하였으며, 측정값이 주어진 범위에서 2차함수 형태를 보이므로 반응표면 분석을 실시했으며, 그 결과는 <표-4, 5>와 같다.

4.2 온도와 전류밀도 실험 분석

온도와 전류밀도에 의한 Sn%와 도금두께 실험자료는 각기 <표-1>, <표-2>와 같다.

<표-1>의 결과 24가지 총 실험에서 Sn 함유율은 주어진 규격을 모두 만족시키고 있음으로, 온도와 전류밀도에 의한 도금두께에 대한 분석이 가능했으며 도금두께에 대한 측정결과는 <표-2>와 같다. 도금두께에 대한 2원요인배치법에 의한 분산분석 결과는 <표-3>에 나타내었다.

<표-4> 도금두께 반응표면 추정 회귀계수

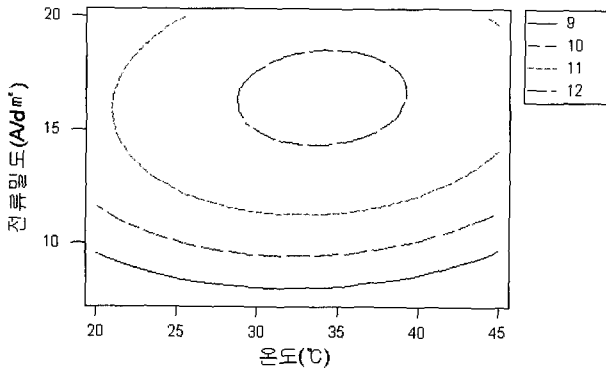
항 목	Coef	SE Coef	T	P
상 수 항	-6.076	6.51	-0.93	0.363
온 도	0.421	0.32	1.29	0.210
전 류 밀 도	1.352	0.55	2.42	0.026
온 도 ²	-0.007	0.00	-1.48	0.154
전 류 밀 도 ²	-0.045	0.01	-2.46	0.024
온도*전류밀도	0.004	0.00	0.49	0.627

S=1.448 R-Sq=55.8% R-Sq(adj)=43.6%

<표-5> 도금두께에 대한 회귀식의 분산분석

Source	DF	SS	Adj MS	F	P
Regression	5	47.7	9.54	4.55	0.007
Linear	2	29.8	7.23	3.45	0.054
Square	2	17.3	8.68	4.14	0.033
Interaction	1	0.5	0.51	0.24	0.627
Residual error	18	37.7	2.09		
Total	23	85.4			

반응표면분석 결과 도금두께의 최적화 조건은 온도 33℃, 전류밀도 16.3A/dm²이며, 이때 도금두께의 추정값은 12.2μm이다. <그림-3>에 관계 등고선그림을 나타내었다.



<그림 3> 전류밀도와 온도에 의한 도금두께의 반응표면

4.3 첨가제와 전류밀도 실험 분석

앞의 실험-1의 결과에 의해 온도를 33℃로 고정하고, 첨가제와 전류밀도에 대한 Sn%와 도금두께 실험결과는 다음과 같다.

<표-6> 첨가량과 전류밀도에 대한 Sn%

	7.5A/dm ²	10A/dm ²	15A/dm ²	20A/dm ²
1ml	93.13	93.27	93.61	94.15
2ml	93.01	92.83	93.77	93.45
3ml	93.29	93.91	92.40	93.71
4ml	93.14	93.75	92.65	93.88
5ml	93.22	92.31	92.78	93.34
6ml	92.86	92.56	91.82	93.18

<표-6>의 결과 24가지 실험에서 첨가량 6ml, 전류밀도 15A/dm²의 한 경우를 제외하고 Sn%는 주어진 규격

을 모두 만족시킴으로, 첨가량과 전류밀도에 의한 도금두께에 대한 분석을 수행했으며 측정결과는 <표-7>에 2원요인배치법에 의한 분산분석 결과는 <표-8>에 나타내었다.

<표-7> 첨가량과 전류밀도에 대한 도금두께 (μm)

	7.5A/dm ²	10A/dm ²	15A/dm ²	20A/dm ²
1ml	8.36	12.28	10.61	9.96
2ml	8.13	11.12	10.05	10.69
3ml	9.07	11.36	15.78	11.78
4ml	10.32	12.33	13.69	18.27
5ml	9.14	10.29	12.64	10.26
6ml	10.58	13.95	11.06	11.94

<표-8> 도금두께에 대한 분산분석

요 인	DF	SS	MS	F	P
첨 가 량	5	38.01	7.60	2.44	0.083
전류밀도	3	37.03	12.34	3.96	0.029
오 차	15	46.76	3.12		
전 체	23	121.80			

예상대로 첨가량과 전류밀도 모두 유의했으며, 반응표면분석 실시 결과는 다음 <표-9>와 같다.

<표-9> 도금두께 반응표면 추정 회귀계수

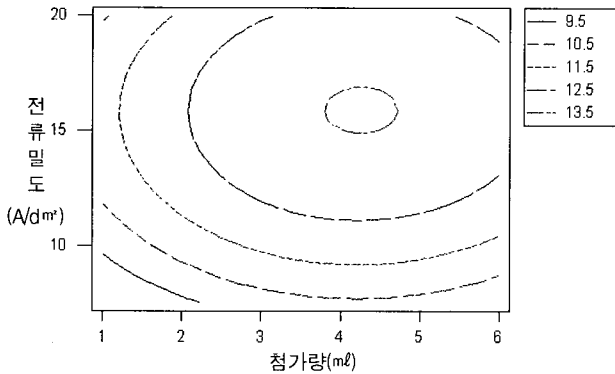
항 목	Coef	SE Coef	T	P
상 수 항	-1.591	5.32762	-0.29	0.769
첨 가 량	1.811	1.36772	1.32	0.202
전류밀도	1.418	0.73500	1.93	0.070
첨 가 량 ²	-0.219	0.16700	-1.31	0.207
전류밀도 ²	-0.045	0.02566	-1.75	0.096
첨가량*전류밀도	0.003	0.05081	0.06	0.948

S=2.041 R-Sq=38.5% R-Sq(adj)=21.4%

<표-10> 도금두께에 대한 회귀식의 분산분석

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
RegerSSION	5	46.8	9.36	2.25	0.094
Linear	2	26.8	10.29	2.47	0.113
Square	2	19.9	9.98	2.40	0.119
Iteration	1	0.0	0.01	0.00	0.948
Residual Error	18	74.9	4.16		
Total	23	121.8			

반응표면분석 결과 도금두께의 최적화 조건은 첨가제 량 4.32ml, 전류밀도 15.70A/dm²이며 이때 도금두께의 추정값은 13.54μm이다. <그림-4>에 관계 등고선그림을 나타내었다.



<그림 4> 전류밀도와 첨가량에 의한 도금두께의 반응표면

5. 결론

본 연구는 리드선의 품질을 높이기 위해, 전체 공정 중 핵심인 전기 도금공정의 최적 조건을 찾고자했다. 분석 대상은 도금 특성 중 가장 중요한 도금두께와 점검 사항인 Sn 함유율이다.

이들 특성들을 결정하는 공정조건은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 비교적 공정 제어가 쉬우면서 영향력이 많은 도금액 온도, 전류밀도, 그리고 첨가제의 투입량 3가지를 대상으로 효율적인 실험계획법을 통해 최적 공정 조건을 도출했다.

실험의 설계에서는 기존의 공정 정보를 바탕으로 소분의 원리를 이용하여 두 가지의 실험으로 분할함으로써 실험회수를 대폭 축소했다.

실험 방법은 전기 작용상태(전류 밀도, 온도)와 도금액이 도금의 특성에 미치는 영향 검사를 위한 Hull Cell 테스트를 실시했다.

자료분석은 인자들의 유의성 검정을 위한 분산분석과 최적조건 선정을 위해 반응표면분석을 적용했다.

분석 결과에서 Sn%의 경우, 온도와 전류밀도 그리고 첨가제의 수준 범위를 광범위하게 변화시켜도 전체 실험을 통해 2% 이내의 매우 적은 변화를 나타내었으며, 규격인 92-98%를 충족시킴을 확인할 수 있었다.

도금두께는 온도에 대해 p-value가 0.077이므로 유의한 영향을 미치고 있으며, 선형 및 2차 효과가 조금 존재했다. 온도의 최적 조건은 33℃이다. 첨가제 양은 1-6ml로

절대기준에서 6배까지 증가시켜 보았으나, p-value가 0.083으로서 예상보다는 미치는 영향도가 작았다. 그러므로 본 실험에서의 첨가제 투입량의 최적 조건은 4.32ml이지만, 첨가제와 도금두께 및 제반 조건들에 대한 비용분석에 따라 첨가제의 소량 투입도 가능하리라 생각된다.

전류밀도는 실험-1, 2에서 p-value가 0.001과 0.029로서 온도와 첨가제에 비해 많은 영향을 미치며, <그림-3, 4>에서와 같이 선형 및 2차 효과 모두 매우 유의하였다. 전류밀도의 최적 조건은 실험-1에서 15.70 A/dm², 실험-2에서 16.3A/dm²로서 두 실험 사이에 큰 차이가 없었다. 따라서 평균인 16.0A/dm²을 적용함이 무난할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 첨가제의 양과 온도 그리고 전류밀도에 의한 도금공정 상태를 분석할 수 있었으며, 이의 결과로써 리드선의 고품질화 및 원가절감이 기대된다. 추후 이송속도와 같은 조건의 추가와 함께, 리드선의 품질특성인 도금 표면의 치밀도와 제품 완성 후 나타나는 황변색의 원인을 파악에 관한 연구가 필요하리라 생각된다.

또한, 본 연구가 보다 현장 적용성을 갖기 위해서는, 앞으로 본 결과를 현장에 적용하여 이에 의한 원가절감 효과 파악이 추후 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 김광훈, 도금액 분석을 위한 정량분석, 동화기술교역, 1999년
- [2] 이도경, “온도 및 첨가제 변화에 의한 도금의 영향,” 중소기업청 기술보고서, 1998.11
- [3] 이수진 외, 금속재료공학, 골드, 2002
- [4] 홍순형, 전자용 금속재료개론 2 : 전자부품용 금속재료, 명현, 1999년
- [5] www.finishinginfo.co.kr/data/
- [6] www.shinpoongmetal.com/worksheet/PUR%20Pd-LS.htm