ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol. 49, No. 5, 2016.
http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.5.447

<연구논문>

반구형 부스바를 이용한 전해연마액 수명연장을 위한 공정 최적화

김수한[a], 이승헌[a], 조재훈[b], 임동하[c], 최중소[a,*], 박철환[a,*]

[a]광운대학교 화학공학과, [b]한국생산기술연구원 그린공정소재그룹, [c]한국생산기술연구원 에너지플랜트그룹

Process Optimization for Life Extension of Electropolishing Solution using Half Round Bus Bar

Soo Han Kim[a], Seung Heon Lee[a], Jaehoon Cho[b], Dong-Ha Lim[c], Joongso Choi[a,*], Chulhwan Park[a,*]

[a]Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea
[b]Green Process and Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan 31056, Korea
[c]Energy Plant Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Busan 46742, Korea

(Received August 15, 2016 ; revised September 5, 2016 ; accepted September 30, 2016)

Abstract

In this study, we intended to extend the life of electropolishing solution through the reduction of electric resistance by improving the electrolysis efficiency. The optimum conditions were obtained by half round bus bar and Taguchi method. As the main control factors in the electropolishing process, current density, polishing time, electrolyte temperature and flow rate were selected. The electrolyte temperature was the most significant to the electrolysis efficiency. The optimum conditions for the life extension of electropolishing solution were as follows: current density, 45 A/dm^2; polishing time, 6 min; electrolyte temperature, 70 ºC; flow rate, 11 L/min. As a results of ANOVA of SN ratios, it was found that the electrolyte temperature was significant factor at the 90% confidence level.

Keywords : Electropolishing, Half round bus bar, Life extension, SN ratio, Taguchi

1. 서 론

반도체 및 LCD 제조 공정 등에 사용하는 고순도 화학물질이나 부식성 물질을 이송하기 위하여 사용하는 스테인레스 스틸(STS) 튜브 및 파이프는 내면에 이물질이 정체하지 않을 정도로 매끄럽고 표면 거칠기가 낮아야 한다. 튜브 및 파이프 이송관 내면을 매끄럽게 연마하는 방법에는 기계적으로 표면을 연마하는 기계연마와 전기화학적인 방법으로 연마하는 전해연마가 있다[1-3]. 기계연마는 연마재나 연마석 등의 물리적인 도구나 기구를 이용하여 표면을 깎아내는 방법으로 표면 거칠기는 낮고 매끄러우나 미세한 홈이 생겨 연마 후 미세한 입자가 홈에 잔존할 수 있고, 고순도 화학물질이나 부식성 물질이 이송 중 정체할 수도 있다. 이러한 미세 입자는 반도체 제조 공정 중 불순물로 작용하여 불량을 야기할 수 있고 정체된 화학물질과 부식성 물질은 이송관 부식의 원인이 되기도 한다[1,3-5]. 전해연마는 이러한 기계연마의 단점을 보완한 비접촉식 가공법으로 기계적 가공과 달리 미세 입자가 발생하지도 않고 표면에 미세 홈이 없어 파티클이나 이송 물질이 정체하지 않는다. 특히 반도체 및 LCD 제조 공정에는 강한 부식성 물질이 많이 사용되므

*Corresponding Authors : Joongso Choi, Chulhwan Park
Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University
Tel : +82-2-940-5173
E-mail : jschoi@kw.ac.kr (J. Choi), chpark@kw.ac.kr (C. Park)

로 이러한 물질이 정체될 경우 부식 발생 및 제조 공정 중 불량 발생 우려가 크다[5]. 따라서 반도체 및 LCD 제조 공정 중 이송관으로 사용되는 스테인레스 스틸 튜브 및 파이프 전해연마에 있어서 내부 표면 거칠기를 낮추고 매끄럽게 하는 것은 관련 공정의 안정화 및 제품 품질면에서 매우 중요하다.

스테인레스 스틸 튜브 전해연마에 사용하는 전해연마액은 사용에 한계가 있으며, 이는 전해연마 시 용해되어 나오는 금속이온들 때문이다[6]. 전해연마 시 용해되는 금속이온은 스테인레스 스틸의 주요 성분인 Fe, Cr, Ni 등이 대부분이며 STS에 미량으로 들어있는 다른 금속들도 용해된다. 전해연마액을 사용하여 지속적으로 전해연마를 하게 되면 STS 중의 금속 성분들이 이온으로 용해되어 전해연마액 중에 축적되며, 소량일 경우에는 전해연마에 영향을 크게 미치지 않으나, 축적된 양이 일정한 농도 이상이 되면 금속 슬러지를 형성하여 전해연마를 방해하게 되고, 전해연마 효과 및 운전 효율을 감소시킨다[6]. 전해연마 효과가 감소되어 일정한 품질을 유지할 수 없으면 전해연마액 수명이 다한 것이다.

사용에 한계가 있는 전해연마액 수명을 연장하기 위한 방법은 전해연마액 중에 용해되어 있는 Fe, Cr, Ni 등의 금속이온을 전착법으로 제거하는 방법과 전해연마 시 금속이온이 과도하게 용해되지 않도록 전기사용량을 최소한으로 하는 방법이 있다[6]. 금속이온 전착법은 전해연마액이 강산으로 구성되어 pH가 낮고 철의 전착이 쉽지 않아 효과가 낮다[6]. 페러데이 법칙에 따르면 전기분해 시 양극 및 음극에서 용해 또는 석출하는 물질의 양은 전기량(전류×시간)에 비례하므로 전류를 낮추거나 연마 시간을 단축하면 전해연마 시 최소한의 전기량을 사용하여 전해연마액 수명을 연장할 수 있다[7]. 전기량을 최소로 하는 방법은 전해연마 시 전해효율을 높이면 더 효과적이다. 전해연마 시 전기가 흐르는 경로인 전해액, 튜브, 부스바 등의 전기 저항을 낮추면 전해효율을 높일 수 있다. 전기 저항을 낮추기 위하여 전해액 중에 전도성 이온을 증가시키거나 튜브 및 부스바 간 접촉 면적을 크게 하거나 접촉력을 강하게 하면 전기 접촉 저항을 감소시킬 수 있다[8]. 일반적으로 사용되는 선 접점 부스바는 튜브와 접촉하는 접점이 두 개의 선 접점이므로 전류 인가 시 전류가 두 곳에 집중하게 되어 전체적으로 균일한 전해연마가 어렵다. 튜브 전체 내면을 전해연마하기 위하여 과도한 전류를 공급하게 되어 금속 용해량이 증가하게 되고 전해연마액 수명을 단축시킨다. 반면, 반구형 면 접점 부스바(그림 1)는 선 접점 부스바에 비하여 스테인레스 튜브에 전류를 공급하는 접촉 면적이 상대적으로 크다. 선 접점 부스바는 전기 접점이 2개의 선으로 되어 있고, 반구형 면 접점 부스바는 튜브 외경 절반과 전기 접점을 가진다.

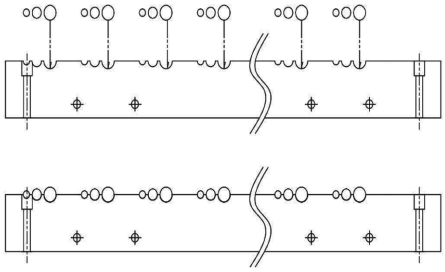

Fig. 1. Half round bus bar.

본 연구에서는 Taguchi 기법을 이용하여 전해연마 시 스테인레스 스틸 튜브에 전류를 공급하는 부스바를 접촉 면적이 큰 반구형 면 접점 부스바로 하여 전기 접촉 저항을 감소시켜 전해효율을 향상시키고 전해연마액 수명을 연장하고자 하였다. 주요 제어인자로 연마 시간, 전류밀도, 전해액 온도, 유량을 선정하고 직교배열표를 작성하여 실험을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료 및 장치

반구형 부스바(그림 1)와 Taguchi 기법을 이용하여 전해연마액 수명연장 최적 공정 조건을 찾기 위하여 본 연구에서는 인산(85% w/w), 황산(98% w/w), DIW(deionized water), 첨가제(additive agent)로 EP-2를 사용하였다. 인산은 동양제철화학의 제품을 사용하였으며, 황산은 한화케미컬, DIW는 DIW 제조 장치를 이용하여 생산하였으며, EP-2는 일본 오쿠노 케미칼의 제품을 사용하였다. 전해연마 실험 장치는 그림 2와 같으며 1/2″ × 1.24T × 1,000 mm 튜브 5본을 동시에 전해 연마할 수 있고 유량을 1 L/min에서 40 L/min 조정할 수 있다. 부스바는 그림 1과 같은 반구형 부스바로 튜브 외경과 동일한 곡률 반경을 가진 반구형 홈을 부스바에 가공하여 전해연마 시 튜브와 면 접점으로 접촉할 수 있도록 하였다. 전해연마에 사용된 정류기는 구수중전기의 15 V-300 A 정류기를 사용했으며, 전극봉은 재질이 동(순도 98.0% 이상)이고 직경, 가이드 간격 및 길이는 각각 4 mm, 10 cm 및 25 cm였다. 전해연마에 사용한 튜브 재료는 반도체 배관용으로 사용되는 STS 316 L로 주요 화학 성분은 Fe, Ni, Cr, Mo이며 소량의 C, Si, Mn, P, S 등이 함유되어 있다. 튜브의 전해

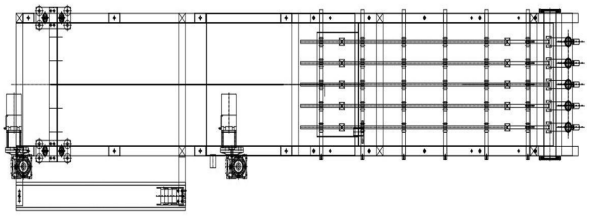

Fig. 2. Electropolishing apparatus.

연마 전 표면 거칠기는 평균적으로 10 ~ 15 μinRa, 튜브 1본의 내부 면적은 약 3.21 dm^2였다. 반도체 및 LCD 제조 공정 등에 사용하기 위한 STS 튜브 내면의 표면 거칠기는 10 μinRa이하(SEMI E49.4-0298)이다[9]. 따라서 전해연마 후 튜브 내면 표면 거칠기가 10 μinRa이하가 되기 위해서는 표면 거칠기 개선율이 35% 이상이 되어야 전해연마가 효율적으로 진행되었다고 할 수 있다.

2.2. 실험방법 및 분석

반구형 부스바를 이용하여 전해연마액 수명연장 최적 공정 조건을 찾기 위하여 Taguchi 기법과 직교배열표를 이용하였다. Taguchi 기법은 종래의 제어하기 어려운 환경조건, 생산조건, 공정조건 등의 원인 등을 잡음인자라고 하고, 품질 특성치에 영향을 미치는 제어인자 중 영향력이 큰 인자와 작은 인자를 찾아 잡음인자들의 영향이 최소가 되는 최적조합을 찾는 방법이다[10-14]. 실험 수행시간과 비용을 최소화하기 위하여 직교배열의 실험계획을 이용하여 데이터를 얻고 이 데이터를 손실함수나 잡음비(SN비)로 유도하여 품질 특성치에 둔감한 인자들의 최적 조건을 찾는다[12,14]. Taguchi 기법에서는 각 실험의 특성치 y를 직접 분석하지 않고 SN비(Signal to noise ratio)를 새로운 특성치로 하여 분석하는 것으로 신호입력과 잡음이 시스템의 산출물에 어느 정도의 영향을 주는지를 알 수 있다[11]. SN비는 신호 대 잡음의 비율을 의미하는 것으로, 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로서 다음과 같이 나타낸다.

$$SN\text{비} = \frac{\text{신호의 힘}(power\ of\ signal)}{\text{잡음의 힘}(power\ of\ noise)} \quad (1)$$

SN비는 제품 특성에 따라서 정의가 다르나 값이 클수록 좋다. 손실함수의 종류별로 SN비는 다르게 정의되며 값이 크면 신호의 힘이 크고 잡음의 힘이 적어 산출물에 영향을 적게 미치므로 항상 값이 클수록 좋다. 품질 특성치인 튜브 내면의 표면 거칠기 개선율은 크면 클수록 좋기 때문에 망대특성을 이용하였다. 망대특성에 대한 SN비를 구하는 것은 식은 다음과 같다[15,16].

Table 1. Control factors and levels

Control factors (Symbols)	Unit	Levels (Real values)		
Current density (A)	A/dm^2	1 (35)	2 (45)	3 (55)
Time (B)	min	1 (4)	2 (5)	3 (6)
Temp. (C)	℃	1 (60)	2 (65)	3 (70)
Flow rate (D)	L/min	1 (7)	2 (11)	3 (15)

$$SN\text{비} = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right] \quad (2)$$

제어인자로는 전해연마에 직접적으로 영향을 주는 전류밀도, 연마 시간, 전해액 온도, 유량으로 하였으며, 특성치는 표면 거칠기 개선율로 하였다. 각 제어인자의 수준은 표 1과 같이 등 간격 3수준으로 하였다. 직교배열표 내측에는 제어인자를 배열하고 외측에는 3회 반복실험을 배열하여 3수준 직교배열표 $L_9(3^4)$를 작성하여 실험을 수행하였다.

스테인레스 스틸 튜브를 전해연마하기 위하여 먼저 인산과 황산을 주성분으로 하는 전해연마액을 건욕 하였으며, 여기에 첨가제로 EP-2를 추가하였다. 스테인레스 스틸 튜브를 전해연마하기 위하여 그림 2와 같이 튜브 5본을 전해연마 장치에 장착하였다. 튜브는 면 접촉이 되도록 반구형 부스바 위에 장착하였으며, 튜브 앞단과 뒷단에 보조튜브를 장착하여 튜브 양쪽 끝부분도 전해연마가 가능하도록 하였다. 전해연마 장치의 반구형 부스바 위에 튜브 장착이 완료되면 튜브 내에 전해연마 전극봉을 넣은 후 튜브 내로 전해연마액을 순환시켰다. 전해연마액이 튜브 내로 순환되면 전류를 인가하여 전해연마를 시작하고 전해연마 전극봉을 일정한 속도로 이동시키면서 튜브 내면을 전해 연마하였다.

전해연마 후 튜브 내의 전해연마액을 제거하고 DIW로 튜브 내면 및 외면을 세척하였다. 튜브에 잔존하는 전해연마액을 완전히 제거하기 위하여 상온의 DIW로 3회 반복하여 세척하였으며, 다시 DIW (60 ℃)로 2회 세척 후 N_2 가스로 건조하였다. 파티클의 영향을 최소화하기 위하여 청정도가 Class 100인 클린룸에서 전해연마된 튜브의 표면 거칠기를 측정하였다. 튜브 내면 표면 거칠기는 일본 Mitutoyo사의 모델 175를 사용하여 측정하였다. 튜브 내면 거칠기를 측정하기 위하여 전해연마된 튜브를 고정하고 튜브 내면에 측정기의 스타일러스를 넣어서 측정하였다. 측정은 튜브를 90°씩 돌려가면서 4곳

의 표면 거칠기를 측정하여 평균값을 구하였다. 그리고 전해연마 전과 후의 표면 거칠기 값을 비교하여 표면 거칠기 개선율을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

Taguchi 직교배열표에 근거한 실험계획법에 따라 전해연마 실험을 진행하였다. 전해연마 실험은 오차를 최소화하기 위하여 각 실험조건에서 3회 반복하여 외측 실험결과로 나타내었다. 실험결과는 전해연마 전의 표면 거칠기를 측정하고 전해연마 후 표면 거칠기를 측정하여 표면 거칠기가 개선된 정도를 백분율로 표시하여 표면 거칠기 개선율을 결과 값으로 표시하였다. 실험결과에 따른 표면 거칠기 개선율 값을 표 2에 나타내었다.

표 2의 표면 거칠기 개선율에서 얻어진 SN비(표 3)로부터 일반 선형 모형을 이용하여 분산분석한 결과 분산분석의 오차를 구할 수 없었기 때문에 F-검정을 할 수 없었다. 변동이 가장 작은 인자인 유량을 오차항으로 하여 다시 분산분석한 결과를 표 4에 나타내었다. 유량을 오차항으로 한 분산분석 결과, 전류밀도, 연마 시간, 전해액 온도의 F값이 각각 3.17, 2.71, 18.35였다. 그리고 전류밀도, 연마 시간, 전해액 온도의 P값이 각각 0.240, 0.269, 0.052였다. 전해액 온도의 P값이 0.052이므로 신뢰수준 90%에서 유의하였다. 그러므로 전해액 온도가 표면 거칠기 개선율에 가장 큰 영향을 미치는 유의한 인자임을 알 수 있다. 전류밀도 및 연마 시간은 전해액 온도만큼 표면 거칠기 개선율에 유의하지는 않았으나 각각 신뢰수준 75%, 70%에서 유의하였

Table 2. Improvement rate of roughness in the electropolishing

Exp. No.	Current density	Time	Temp.	Flow rate	Roughness		Improvement rate of roughness(%)
	A/dm^2	min	^{o}C	L/min	μinRa		
	A	B	C	D	Before electropolishing	After electropolishing	
1	1 (35)	1 (4)	1 (60)	1 (7)	13.51	9.02	33.21
2	1 (35)	1 (4)	1 (60)	1 (7)	10.24	6.08	40.63
3	1 (35)	1 (4)	1 (60)	1 (7)	10.45	6.78	35.13
4	2 (45)	3 (6)	1 (60)	2 (11)	11.13	5.80	47.89
5	2 (45)	3 (6)	1 (60)	2 (11)	13.50	6.46	52.12
6	2 (45)	3 (6)	1 (60)	2 (11)	10.44	5.34	48.82
7	3 (55)	2 (5)	1 (60)	3 (15)	11.69	6.04	48.31
8	3 (55)	2 (5)	1 (60)	3 (15)	13.35	9.52	28.68
9	3 (55)	2 (5)	1 (60)	3 (15)	12.49	7.46	40.23
10	2 (45)	1 (4)	2 (65)	3 (15)	12.50	5.31	57.50
11	2 (45)	1 (4)	2 (65)	3 (15)	12.08	5.51	54.33
12	2 (45)	1 (4)	2 (65)	3 (15)	13.00	5.42	58.32
13	1 (35)	2 (5)	2 (65)	2 (11)	10.14	5.10	49.65
14	1 (35)	2 (5)	2 (65)	2 (11)	12.18	5.64	53.71
15	1 (35)	2 (5)	2 (65)	2 (11)	12.21	6.78	44.43
16	3 (55)	3 (6)	2 (65)	1 (7)	12.69	4.79	62.29
17	3 (55)	3 (6)	2 (65)	1 (7)	11.35	4.88	56.96
18	3 (55)	3 (6)	2 (65)	1 (7)	11.66	3.68	68.44
19	2 (45)	2 (5)	3 (70)	1 (7)	13.40	5.46	59.25
20	2 (45)	2 (5)	3 (70)	1 (7)	11.46	4.63	59.61
21	2 (45)	2 (5)	3 (70)	1 (7)	11.62	4.35	62.54
22	3 (55)	1 (4)	3 (70)	2 (11)	11.75	4.28	63.55
23	3 (55)	1 (4)	3 (70)	2 (11)	12.01	4.08	66.00
24	3 (55)	1 (4)	3 (70)	2 (11)	12.26	3.93	67.96
25	1 (35)	3 (6)	3 (70)	3 (15)	14.42	6.43	55.38
26	1 (35)	3 (6)	3 (70)	3 (15)	12.08	5.13	57.48
27	1 (35)	3 (6)	3 (70)	3 (15)	14.16	5.77	59.27

Table 3. SN ratios of improvement rate of roughness

Exp. No.	Inner array				Outer array: Improvement rate of roughness (%)			SN ratios
	Current density	Time	Temp.	Flow rate	R1	R2	R3	
	A/dm^2	min	°C	L/min				
	A	B	C	D				
1	1 (35)	1 (4)	1 (60)	1 (7)	33.21	40.63	35.13	31.11
2	1 (35)	2 (5)	2 (65)	2 (11)	49.65	53.71	44.43	33.77
3	1 (35)	3 (6)	3 (70)	3 (15)	55.38	57.48	59.27	35.16
4	2 (45)	1 (4)	2 (65)	3 (15)	57.50	54.33	58.32	35.06
5	2 (45)	2 (5)	3 (70)	1 (7)	59.25	59.61	62.54	35.62
6	2 (45)	3 (6)	1 (60)	2 (11)	47.89	52.12	48.82	33.89
7	3 (55)	1 (4)	3 (70)	2 (11)	66.55	66.00	67.96	36.50
8	3 (55)	2 (5)	1 (60)	3 (15)	48.31	28.68	40.23	31.23
9	3 (55)	3 (6)	2 (65)	1 (7)	62.29	59.96	68.44	36.02

Table 4. Re-analysis of variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Current density	2	3.8810	3.8810	1.9405	3.17	0.240
Time	2	3.3271	3.3271	1.6636	2.71	0.269
Temp.	2	22.4993	22.4993	11.2496	18.35	0.052
Error	2	1.2258	1.2258	0.6129		
Total	8	30.9332				

Table 5. Response of the SN ratios

	Current density (A)	Time (B)	Temp. (C)	Flow rate (D)
Level 1	33.35	34.22	32.08	34.25
Level 2	34.86	33.54	34.95	34.72
Level 3	34.58	35.03	35.76	33.82
Delta	1.51	1.49	3.68	0.90
Rank	2	3	1	4

다. 최소전류 전해연마 최적 조건을 도출하기 위하여 분산분석을 통하여 표면 거칠기 개선율의 SN비에 대한 반응표를 구하였다(표 5). 표 5의 반응표에서 4개 제어인자에 대한 SN비의 상대적인 크기를 비교하여 각 인자의 변위 크기를 델타(delta)로 나타내었다. 이 변위 크기인 델타는 각 제어인자의 SN비에 대한 가장 큰 평균값과 가장 작은 평균값의 차이를 나타낸 것으로 델타 값이 가장 큰 것을 1, 그 다음 큰 값을 2, 3, 4순으로 하여 표시하였다. 따라서 표면 거칠기 개선율에 가장 큰 영향을 주는 인자는 델타 값이 가장 큰 3.68로 전해액 온도였다. 그 다음으로 영향을 주는 인자는 순서대로 델타 값이 1.51인 전류밀도, 델타 값이 1.49인 연마 시간, 델타 값이 0.90인 유량이었다. 유량이 표면 거칠기 개선율에 가장 작은 영향을 미쳤으며, 이는 앞서 SN비 분산분석에서 설명한 바와 동일하다.

표 3에서 전류밀도 및 전해액 온도에 따른 SN비를 살펴보면 동일 전류밀도에서 전해액 온도가 증가하면 SN비가 증가한다. 이때 연마 시간의 영향은 크지 않다. 연마 시간이 증가하더라도 전해액 온도가 높으면 SN비가 크기 때문이다. 그리고 연마 시간과 전해액 온도에 따른 SN비를 살펴보면, 동일 연마 시간에서 전해액 온도가 증가하면 대체적으로 SN비도 증가하였으나 6 min에서는 70 °C의 SN비 값이 35.16으로 65 °C의 SN비 값인 36.02보다 낮았다. 이것은 70 °C에서 전류밀도가 35 A/dm^2 이고 65 °C에서 전류밀도가 55 A/dm^{2}로 전류밀도 차이가 커서 전류밀도의 영향을 받았기 때문이다. 표 5에서 SN비를 살펴보면 전해액 온도는 수준이 올라가면서 SN비가 증가하는데 반하여 전류밀도, 연마 시간, 유량은 수준이 올라가더라도 SN비는 증가하기도 하고 감소하기도 하였다. 이것은 전해액 온도가 다른 인자들에 비하여 영향력이 크다는 것을 의미한다. 전해연마에 사용하는 전해연마액은 주성분이 강산인 고농도의 황산과 인산으로 구성되어 점성이 높다. 전해연마액의 점성이 높으면 전해연마 시 이온이 이동이 활발하지 않으므로 전기저항성이 크게

되고 전류효율이 떨어져 전해연마 효과가 떨어진다[5,7]. 반대로 전해연마액의 온도가 높아지면 점성이 낮아져 이온의 이동이 활발해져 전기저항이 떨어지고 전해연마 되는 금속 표면에 새로운 전해연마액이 공급되므로 전류효율이 향상되어 전해연마 작용이 활발하게 일어난다[5,7]. 전해연마 시 금속 표면에 용융 및 재 용착에 의한 돌기가 생성되었다가 사라지는데 전해연마 온도가 높아지면 점성이 낮아져 전해연마 작용이 활발해져 금속 표면에 고점성 산화층을 형성시키고 돌출부를 우선적으로 용해시키므로 전해연마 효과가 높아진다[5,7]. 전류밀도가 높으면 동일시간 내에 이온이동이 많아지고 연마 시간이 길면 이온 이동량이 증가하여 표면 거칠기 개선율을 향상시킬 수 있으나 전해온도가 낮으면 전해액의 점성이 높아져 이온 이동이 활발하지 않게 되어 용해작용이 떨어진다[5,7]. 이러한 결과를 종합하여 최적 공정 조건을 도출하면 SN비가 가장 큰 수준조합은 $A_2B_3C_3D_2$이다. 반구형 부스바의 최적 공정 조건에서 SN비를 추정하면[12],

$$\begin{aligned}\hat{\mu}(A_2B_3C_3D_2) &= \mu + a_2 + \widehat{b_3} + c_3 + d_2 \\ &= \widehat{\mu + a_2} + \widehat{\mu + b_3} + \widehat{\mu + c_3} + \widehat{\mu + d_2} - 3\hat{\mu} \\ &= 34.86 + 35.03 + 35.76 + 34.72 - 3(34.26) \\ &= 37.58\end{aligned}$$

이다. 최적 공정 조건에서 SN비가 얼마나 개선되었는지 알아보기 위해 선 접점 부스바의 최적 공정 조건 $A_3B_3C_1D_1$에서 SN비를 추정하여 비교하였다. 선 접점 부스바의 최적 공정 조건에서 SN비를 추정하면[12],

$$\begin{aligned}\hat{\mu}(A_3B_3C_1D_1) &= \mu + a_3 + \widehat{b_3} + c_1 + d_1 \\ &= \widehat{\mu + a_3} + \widehat{\mu + b_3} + \widehat{\mu + c_1} + \widehat{\mu + d_1} - 3\hat{\mu} \\ &= 34.58 + 35.03 + 32.08 + 34.25 - 3(34.26) \\ &= 33.15\end{aligned}$$

이다. 반구형 부스바와 선 접점 부스바의 최적 공정 조건에서 SN비를 비교하면 반구형 부스바 최적 공정 조건에서 SN비가 4.43 더 크다. Taguchi 기법을 이용하여 최적 공정 조건을 찾는 연구에서 SN비 값이 크면 클수록 좋기 때문에 반구형 부스바 최적 공정 조건이 선 접점 부스바 최적 공정 조건보다 효과적이라는 것을 알 수 있다.

SN비 값이 최대가 되는 수준조합($A_2B_3C_3D_2$)이 최적 공정 조건이므로 반구형 부스바 사용 시 최적 수준조합은 전류밀도 45 A/dm^2, 연마 시간 6 min, 전해액 온도 70 ℃, 유량 11 L/min였다. 유의하지 않는 제어인자는 제품의 생산성, 경제성 등을 고려하여 작업자가 판단할 수 있다. 반구형 부스바의 최적 공정 조건에서 전해연마 시 금속이 용해되는 양은 페러데이 법칙에 따라 양극을 통과한 전기량(전류 × 시간)에 비례하므로 튜브 1본(면적: 3.21 dm^2) 전해연마 시 전류밀도 45 A/dm^2, 연마 시간 6 min이 소요되므로 52,002 C의 전기가 소모된다[7]. 반면, 기초 연구를 통해 얻어진 선 접점 부스바의 최적 공정 조건($A_3B_3C_1D_1$)인 전류밀도 55 A/dm^2, 연마 시간 6 min, 전해액 온도 60 ℃, 유량 7 L/min에서 튜브 1본(면적: 3.21 dm^2) 전해연마 시 63,558 C의 전기가 소모된다. 따라서 튜브 1본(면적: 3.21 dm^2) 전해연마 시 11,556 C의 전기량을 감소시킬 수 있다. 전해연마에 사용되는 전기량을 감소시키면 페러데이 법칙에 따라 전해연마액 중에 용해되어 축적되는 불순물(금속 슬러지)을 줄일 수 있어 전해연마액 수명을 연장할 수 있고 전해연마액 사용량을 감소시킬 수 있다[6,7]. 본 연구에서는 전해연마 시 반구형 부스바를 적용하여 전기 접촉 저항을 감소시키고 전해연마에 필요한 전기량을 감소시켜 금속 용해량을 저감시킬 수 있었으며, 이를 통하여 전해연마액 수명 연장의 결과를 도출하였다.

4. 결 론

본 연구에서 반구형 부스바와 Taguchi 기법을 이용하여 전해액 수명 연장을 위한 최적 공정 조건을 도출하였다. Taguchi 기법에 따라 망대특성 SN비를 산출한 결과, 전해액 온도의 영향이 가장 컸으며, 유량의 영향이 가장 작았다. 전해연마액 수명을 연장할 수 있는 최적 공정 조건은 전류밀도 45 A/dm^2, 연마 시간 6 min, 전해액 온도 70 ℃, 유량 11 L/min였다. 반구형 부스바 사용 시 접촉 면적에 따른 전기 접촉 저항 감소로 전해효율이 향상되어 전해액 수명을 연장시킬 수 있었다. 향후 연구에서는 전기 접촉 저항을 한층 더 감소시켜 전해효율을 향상시킬 수 있는 전해연마장치의 고안 및 최적 공정 조건 도출이 필요하다.

Acknowledgements

이 논문은 2016년도 광운대학교 교내 학술연구비와 2016년도 한국생산기술연구원 내부연구사업(환경에너지소재 및 기능성 접착소재 플랫폼 기술개발)의 지원을 받아 수행되었음.

References

[1] H. L. Kellner, K. J. Gatchel, Electroplating engineering handbook, L. J. Durney, Fourth Ed, Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York (1984) 61-78.

[2] D. E. Ward, Electroplating engineering handbook, L. J. Durney, Fourth Ed, Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York (1984) 100-120.

[3] H. T. Yeom, J. S. Lee, Plating and surface treatment, Moonyeondang, Seoul (1999) 77-119.

[4] S. J. Lee, J. J. Lai, The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel. J. Mater. Process. Tech., 140 (2003) 206-210.

[5] E. S. Lee, Machining characteristics of the electropolishing of stainless steel(STS316L), Int. J. Adv. Manuf. Tech., 16 (2000) 591-599.

[6] A. P. Davis, C. Bernstein, P. M. Gietka, Waste minimization in electropolishing: Process control, Proc. of 27th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference: Hazardous and Industrial Wastes, (1995) 62-71.

[7] M. Paunovic, Modern electroplating: Part A. Electrochemical aspects, M. Schlesinger, M. Paunovic, fourth Ed, John Wiley & Sons, Inc. New York (2000) 13-16.

[8] Japan's vocational training center, Plating technology: Electroplating, Third Ed, Sehwa, Seoul (1996) 31-38.

[9] SEMI, SEMI Standards: SEMI E49.4-0298-Guide for high purity solvent distribution systems in semiconductor manufacturing equipment, SEMI, San Jose (2004) 1-3.

[10] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, H. H. Hassan, Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, J. Mater. Process. Tech., 145 (2002) 84-92.

[11] H. C. Kim, Introduction to design of experiments, Hanol Publishing, Seoul (2007) 363-391.

[12] S. H. Park, J. W. Kim, Modern design of experiments using Minitab, Minyoungsa, Seoul (2013) 529-553.

[13] M. Nalbant, H. Gökkaya, G. Sur. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning, Mater. Design, 28 (2007) 1379-1385.

[14] Y. W. Cho, M. K. Park, The parameter optimization decision of surface roughness using Taguchi method, J. Soc. Korea. Ind. Syst. Eng., 21 (1998) 221-227.

[15] J. E. Chung J. K. Ahn, A Study of robust design of FCM gasket using Taguchi method, J. Korea. Acad. Industr. Coop. Soc., 14 (2013) 3177-3183.

[16] Y. S. Kim, K. S. Chang, Impact toughness improvement of an undercarriage track shoe using the Taguchi orthogonal array experiment, J. Korea. Acad. Industr. Coop. Soc., 16 (2015) 1611-1619.