

## 구형 부스바를 이용한 전해연마액의 폐산 폐기물 감소를 위한 공정 최적화

김수한<sup>1</sup>, 조재훈<sup>2</sup>, 박철환<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 화학공학과, <sup>2</sup>한국생산기술연구원 그린공정소재그룹

### Process Optimization for Reduction of Waste Acids of Electropolishing Solution using Round Bus Bar

Soo Han Kim<sup>1</sup>, Jaehoon Cho<sup>2</sup>, Chulhwan Park<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

<sup>2</sup>Green Process and Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

**요약** 본 연구에서는 전류효율 향상을 통하여 전해연마 공정 중 발생하는 폐산 폐기물 발생량을 감소시키고자 하였다. 구형 부스바와 Taguchi 기법을 이용하여 전해연마 공정의 최적 조건을 도출하였다. 전해연마 공정 중 전류효율에 영향을 미치는 제어인자로 전류밀도, 전해연마 시간, 전해액 온도, 유량을 선택하였다. 각 제어인자에 대하여 3수준을 고려하여 직교 배열표를 작성하여 실험을 수행하였다. Taguchi 기법에 따라 망대특성 SN비를 산출한 결과 전류밀도가 가장 큰 영향을 미치고 전해연마 시간이 가장 적은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 폐산 폐기물 발생량을 최소화할 수 있는 최적 조건은 전류밀도 45 A/dm<sup>2</sup>, 전해연마 시간 4 min, 전해액 온도 65 °C, 유량 7 L/min였다. 분산분석 결과 전류밀도, 전해액 온도, 유량이 신뢰수준 95%에서 유의함을 확인하였다. 구형 부스바 사용으로 접촉 면적 및 접촉력 증가로 전류효율이 향상되어 폐산 폐기물 발생량을 감소시킬 수 있었다. 부스바의 형태(선 접점 부스바, 반구형 면 접점 부스바, 구형 면 접점 부스바)에 따른 전류효율의 영향과 관련한 비교 연구가 향후 진행될 예정이다.

**Abstract** In this study, we attempted to reduce the generation of waste acids in the electropolishing process by improving the current efficiency. The optimum conditions of the electropolishing process when using the round bus bar were determined by the Taguchi method. The current density, polishing time, electrolyte temperature and flow rate were selected as the control factors for the current efficiency in the electropolishing process. An orthogonal array was created by considering three levels for each factor and experiments were carried out. The larger-the-better SN ratios were calculated by the Taguchi method. The current density was the most important factor affecting the current efficiency and the polishing time was the least important one. The optimum conditions to minimize the generation of waste acids were a current density of 45 A/dm<sup>2</sup>, polishing time of 4 min, electrolyte temperature of 65 °C and flow rate of 7 L/min. The results of the ANOVA confirmed that the effects of the current density, electrolyte temperature and flow rate are significant at the 95% confidence level. The increase in the contact area and contact force afforded by using the round bus bar improved the current efficiency which, in turn, reduced the amount of waste acids generated. Further research is planned to investigate the effect of the type of bus bar on the current efficiency.

**Keywords** : ANOVA, Electropolishing, Reduction of waste acids, Round bus bar, SN ratio, Taguchi

<sup>\*</sup>Corresponding Author : Chulhwan Park(Kwangwoon Univ.)

Tel: +82-2-940-5173 email: chpark@kw.ac.kr

Received July 27, 2016

Revised (1st August 5, 2016, 2nd August 8, 2016, 3rd August 10, 2016)

Accepted August 11, 2016

Published August 31, 2016

## 1. 서론

전해연마는 금속 표면 가공법의 일종으로 여러 산업 분야에 사용되고 있다. 전해연마는 금속 표면 거칠기를 개선시켜 표면을 매끄럽게 하는 가공법으로 기계연마 시 발생하는 부식 유발 물질인 비결정질 층을 생성하지 않으므로 기계연마에 비하여 내식성이 더 강하다[1,2]. 일정한 품질을 가지는 스테인레스 스틸(STS) 튜브 및 파이프를 제조하기 위해서는 전해연마에 사용하는 전해연마액의 관리가 매우 중요하다. 전해연마액은 강산인 황산과 인산 및 물, 첨가제로 구성되어 있으며, 전해연마 시 용해되어 나오는 금속들이 축적되면 연마를 방해하는 금속 슬러지를 형성하고 운전 효율 및 전해연마 품질을 저하시켜 더 이상 사용할 수 없으므로 폐기하여야 한다[3]. 전해연마액 폐기물은 강산과 중금속으로 구성되어 있어 환경오염 부담이 크며 일반적인 폐산보다 처리가 어렵고 비용이 많이 든다. 전해연마액 폐산 폐기물을 감소시키고 장시간 사용하기 위한 방법으로 전해연마액 중에 용해되어 있는 금속을 전착하여 제거하는 방법과 전해연마 시 전해연마 시간을 줄여 과도하게 용해되는 크롬, 철, 니켈의 양을 줄이는 방법이 있다[3]. 금속을 전착하여 제거하는 방법은 철의 전착이 어렵고, pH가 낮아 효과적이지 않다[3]. 전해연마 시간을 줄여 과도하게 용해되는 금속을 감소시키는 방법은 전해연마액의 노화를 늦추어 폐산 폐기물 발생량을 감소시킬 수 있다. 이 방법은 전해연마 시 전류량을 감소시키는 방법으로 전류효율을 향상시키면 더 효과적이다. 전류 인가 시 접촉 면적을 크게 하고 접촉력을 강하게 하면 전기 접촉 저항이 감소하여 전류효율을 높일 수 있다[4].

본 연구에서는 전해연마 대상물(스테인레스 스틸 튜브)에 전류를 공급하는 부스바로 구형 면접점 부스바를 사용하여 전류효율을 높이고 전기사용량을 감소시켜 폐산 폐기물 발생량을 감소시키고자 하였다. 구형 면접점 부스바는 선접점 부스바나 반구형 면접점 부스바와 달리 접촉 면적이 크고, 접촉력이 강한 부스바이다(Fig. 1). 선접점 부스바는 전해연마 되는 튜브 외면과 전기 접점이 선으로 되어 있고, 반구형 부스바는 튜브 둘레를 따라 절반 정도 접촉할 수 있는 면으로 되어 있다. 구형 면접점 부스바는 전기 접촉 저항을 감소시키고 전류효율을 향상시키기 위하여 Fig. 1과 같이 튜브 둘레 전체면과 접촉할 수 있으며, 조임쇠를 사용하여 접촉력을 강화시킨 부스바이다. 전류효율 향상으로 폐산 폐기물 발생량을 감

소시키고, 품질손실비용을 줄이기 위하여 현장에서 많이 사용하는 Taguchi 기법을 이용하여 최적 공정 조건을 도출하고자 하였다[5]. 전해연마에 영향을 미치는 제어인자로 전류밀도, 전해연마 시간, 전해액 온도, 유량을 선정하고 3수준 직교배열표를 작성하여 실험을 수행하였다.

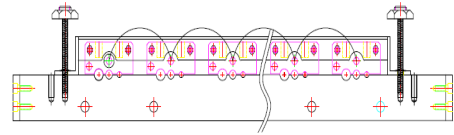


Fig. 1. Round bus bar.

## 2. 본론

### 2.1 전해연마

전기화학 반응을 이용한 전해연마는 금속 표면처리법의 일종으로 연마하고자 하는 금속 대상물을 양극으로 하고 상대 전극을 음극으로 하여 전류를 인가하면 양극에서 금속이 용해되고 금속 산화층을 형성시켜 표면 광택 및 내부식성, 표면거칠기 개선 등을 향상시키는 방법이다[6]. 전해연마 반응은 전류 인가 시 금속 표면 미세 돌출부에 전류가 집중되어 우선적으로 용해하고, 오목부는 점성을 가지는 산화층이 형성되어 전류 흐름이 원활하지 않아 용해 작용이 감소하여 표면 평탄화 작용이 일어나 전해연마가 된다[2,7,8]. 전해연마 시 전류효율은 양극에서 용해되는 금속량과 페러데이 법칙에 따라 용해되는 이론적인 용해량과의 비로 나타낼 수 있다[9]. 전해연마 시 전류효율에 영향을 미치는 인자는 전해연마 대상물 성분, 모양, 전해액 종류 및 농도, 극간거리, 전해연마액 온도, 전류밀도, 전해연마 시간, 교반 정도, 부스바 형태, 전극 체결 방법, 전기 접촉 저항 등이 있다.

### 2.2 Taguchi 기법

Taguchi는 제품이 고객에게 배달된 이후 손실특성치의 변동과 부작용으로 인해 사회에 주는 손실을 금액으로 평가하여 품질을 정의했다. Taguchi 기법은 직교배열표를 이용한 실험계획법으로 제어하기 어려운 인자를 잠음인자라 하고 제어가 가능한 인자 중 영향력이 큰 인자를 찾아 제어하기 어려운 잠음인자의 영향에 둔감한 조건을 찾아가는 강건설계 방법이다[5,10-12].

전해연마에서는 품질 특성치가 표면거칠기 개선율이

며, 값이 크면 좋으므로 손실함수 중 망대특성으로 SN 비 값을 구하였다. 망대특성 SN비는 다음 식(1)으로 구할 수 있다[13,14].

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

표면거칠기 개선율에 영향을 미치는 인자에는 여러 가지가 있으나, 본 실험에서는 전류밀도, 전해연마 시간, 전해액 온도, 유량을 선정하였다. 직교배열표 내측 배열에는 제어인자와 각 수준을 배치하고, 외측 배열에는 신뢰성을 높이기 위하여 3회 반복실험을 배치하였다. 제어 인자에 대한 수준은 등간격 3수준으로 하였다. Table 1 은 실험에 적용한 제어인자 및 수준을 나타낸 표이다. 본 연구는 4개 제어인자에 대한 3수준 표준형 직교배열표  $L_9(3^4)$ 를 이용하여 실험을 수행하였다.

Table 1. Factors and levels

Symbols	Factors	Level 1	Level 2	Level 3
A	Current density (A/dm <sup>2</sup> )	35	45	55
B	Polishing time(min)	4	5	6
C	Electrolyte temp.(°C)	60	65	70
D	Flow rate(L/min)	7	11	15

### 3. 실험

#### 3.1 실험재료 및 장치

본 연구에서 사용한 전해연마액은 85% 인산(동양제철화학), 98% 황산(한화케미칼), EP-2(오쿠노 케미칼), DIW(deionized water)로 구성되었다. 스테인레스 스틸 튜브를 전해연마하기 위한 장치는 Fig. 2와 같은 전해연마 장치로 1/2"×1.24 T×1,000 mm 크기의 튜브 5분을 전해연마 할 수 있다. 튜브에 전류를 공급하는 구형 부스바는 Fig. 1과 같이 튜브 둘레 전체면과 접촉하고 양쪽에서 부스바를 조일 수 있도록 되어 있다. 구형 부스바는 선접점 부스바 및 반구형 부스바에 비하여 접촉 면적 및 접촉력이 큰 부스바이다. 전해연마에 사용된 정류기는 15 V, 300 A(구수중전기)의 용량을 가지고 있다. 전해연마에 사용된 전극봉은 동봉으로 전체 길이가 25 cm, 직경 4 mm, 가이드 간격 10 cm이다. 전해연마용 튜브는

재질이 STS 316L로 조성은 Table 2와 같고, 전해연마 되는 튜브 1본의 내부 면적은 약 3.21 dm<sup>2</sup>이다.

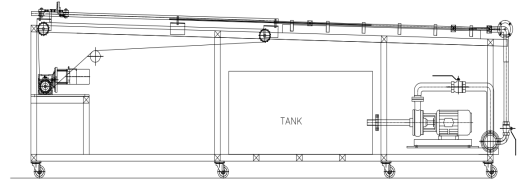


Fig. 2. Electropolishing apparatus.

Table 2. Composition of STS 316L

Symbols for element	Composition(% w/w)
C	≤0.03
Si	≤1.00
Mn	≤2.00
P	≤0.04
S	≤0.03
Mo	2.0~3.0
Ni	12.0~16.0
Cr	16.0~18.0
Fe	balance

#### 3.2 실험방법 및 분석

전해연마액을 준비한 후 전해 연마하고자 하는 튜브 5분을 Fig. 2의 전해연마 장치와 Fig. 1의 구형 부스바에 고정하였다. 전해연마액을 튜브 내로 순환시키고 전극봉을 튜브 내로 넣어 전류를 인가하면서 이동하여 내면을 전해 연마하였다. 튜브 내면 전해연마 후 DIW로 튜브를 세척하고 N<sub>2</sub> 가스로 건조한 후 클린룸에서 표면거칠기를 측정하였다. 표면거칠기는 일본 Mitutoyo사의 모델 175로 측정하고 전해연마 전·후의 표면거칠기를 이용하여 표면거칠기 개선율을 계산하였다.

### 4. 결과 및 검토

#### 4.1 결과

직교배열표에 따라 실험을 진행하였으며, 신뢰성을 높이기 위하여 각 조건에서 반복 실험하여 품질 특성치인 표면거칠기 개선율 값을 구하였다(Table 3). 또한, 품질 특성치인 표면거칠기 개선율 값이 클수록 좋기 때문에 망대특성 SN비를 구하는 식 (1)을 이용하여 Table 3과 같은 SN비 값을 얻었다.

Table 3. SN ratios of improvement rate of roughness

Exp. no.	Inner array				Outer array: Improvement rate of roughness(%)			SN ratio
	A	B	C	D	R1	R2	R3	
1	35	4	60	7	54.41	45.29	53.88	34.09
2	35	5	65	11	55.21	45.47	52.55	34.08
3	35	6	70	15	46.90	42.29	36.42	32.30
4	45	4	65	15	49.65	59.32	54.78	34.67
5	45	5	70	7	53.83	60.65	61.47	35.32
6	45	6	60	11	53.86	58.01	55.24	34.91
7	55	4	70	11	54.18	61.07	40.58	33.92
8	55	5	60	15	52.44	49.36	44.98	33.74
9	55	6	65	7	53.89	60.69	63.32	35.40

4.2 검토

Table 4는 품질 특성치인 표면거칠기 개선율에 영향을 미치는 제어인자에 대한 SN비의 반응표이다. 델타(Delta) 값은 각각의 제어인자 동일 수준에서 평균 중 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이를 나타낸 것이다. Rank는 제어인자 중 SN비에 대한 영향이 큰 순서이다. 이러한 관점에서 표면거칠기 개선율 SN비에 가장 큰 영향을 주는 인자가 전류밀도(델타 값 1.48)였으며, 가장 작은 영향을 주는 것은 전해연마 시간(델타 값 0.18)이었다.

Table 4. Response of SN ratios

	Factors			
	A	B	C	D
Level 1	33.49	34.23	34.24	34.94
Level 2	34.97	34.38	34.72	34.30
Level 3	34.35	34.20	33.85	33.57
Delta	1.48	0.18	0.87	1.37
Rank	1	4	3	2

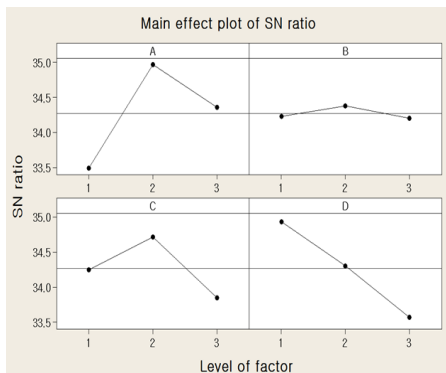


Fig. 3. Main effect plot of SN ratios.

Fig. 3는 Table 4의 반응표를 그림으로 나타낸 것으로 표면거칠기 개선율에 대한 SN비의 주효과이다. A항(전류밀도)의 변동이 가장 큰 것으로 나타났으며 이는 표면거칠기 개선율에 가장 큰 영향을 미침을 의미한다.

Table 5는 일반 선형 모형을 사용하여 표면거칠기 개선율의 SN비에 대한 분산분석 결과를 나타낸 표이다. Table 6은 제어인자 중 변동이 작은 인자에 대하여 풀링(pooling)을 한 분산분석 결과 값이다. 변동이 작은 B항을 오차항으로 하고 분산분석 결과, A항(전류밀도), C항(전해액 온도), D항(유량)의 F값이 각각 60.94, 20.96, 51.70였다. 그리고 A, C, D항에 대한 P값이 각각 0.016, 0.046, 0.019였다. 따라서 A, C, D항 모두 신뢰수준 95%에서 유의하다고 할 수 있다. B항은 표면거칠기 개선율에 유의하지 않았다.

Table 5. Analysis of variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	3.30821	3.30821	1.65410	*	*
B	2	0.05429	0.05429	0.02714	*	*
C	2	1.13764	1.13764	0.56882	*	*
D	2	2.80672	2.80672	1.40336	*	*
Error	0	*	*	*		
Total	8	7.30685				

Table 6. Analysis of variance for SN ratios after pooling

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	3.3082	3.3082	1.6541	60.94	0.016
C	2	1.1376	1.1376	0.5688	20.96	0.046
D	2	2.8067	2.8067	1.4034	51.70	0.019
Error	2	0.0543	0.0543	0.0271		
Total	8	7.3069				

표면거칠기 개선율에 유의한 영향을 주는 제어인자의 최적 수준조합은 SN비 값이 최대가 되는 수준이다. 그리고 유의하지 않은 인자는 제품의 생산성, 비용, 경제성 등을 고려하여 작업자가 판단한다. 따라서 표면거칠기 개선율이 최대가 되는 최적 수준조합은  $A_2B_1C_2D_1$ 이다. B(전해연마 시간)항은 2수준에서 표면거칠기 개선율에 대한 SN비 값이 최대가 되지만 유의한 영향을 주지 않으므로 생산성, 비용, 경제성을 고려하여 1수준으로 하였다. 전해연마 시 용해되는 금속량은 페러데이 법칙에 따라 통과한 전기량(전류\*시간)에 비례하므로 전해연마 시간이 짧으면 전해연마액 중에 축적되는 금속성분을 더 감소시킬 수 있기 때문이다[9].

본 연구에서 구형 부스바 적용 시 최적 조건인 전류밀도 및 전해연마 시간, 전해액 온도, 유량은 각각 45 A/dm<sup>2</sup>, 4 min, 65 °C, 7 L/min이며, 전해연마 시 10,800 C/dm<sup>2</sup>의 전기가 소모된다. 구형 부스바 적용 전 선접점 부스바에서 전류밀도 및 전해연마 시간, 전해액 온도, 유량은 각각 55 A/dm<sup>2</sup>, 6 min, 60 °C, 7 L/min이며, 전해연마 시 19,800 C/dm<sup>2</sup>의 전기가 소모된다. 따라서 구형 부스바를 적용한 최적 조건에서 전류효율 향상에 따른 전기량 감소로 전해연마 시 폐산 폐기물 발생량의 저감이 가능하다. 본 연구에서 전기사용량을 감소시킨 것은 접촉 면적 확대 및 접촉력 강화로 전기 접촉 저항 감소에 따른 전류효율 향상 때문이다. 전류효율 향상으로 전해연마 시 최적 수준조합에서 전기량과 관계된 전류밀도와 전해연마 시간이 모두 유의한 영향을 미칠 것으로 예상되었다. 그러나 Table 4의 SN비 주변응표나 Table 6의 분산분석표에서 전해연마 시간은 SN비에 가장 적은 영향을 미치고 표면거칠기 개선율에 유의하지 않음을 보였다. 이러한 원인은 기본적으로 구형 부스바 적용에 따른 전기 접촉 저항 감소로 전류효율이 향상되었기 때문이다.

## 5. 결론

본 연구에서 전해연마액 폐산 폐기물 발생량을 감소시키기 위하여 구형 부스바와 Taguchi 기법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Taguchi 기법에 따라 망대특성 SN비를 산출한 결과 전류밀도가 가장 큰 영향을 미치고, 상대적으로 전해연마 시간이 가장 작은 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- 2) 망대특성 SN비에 대한 분산분석을 한 결과 전류밀도, 전해액 온도, 유량이 신뢰수준 95% 에서 유의함을 확인하였다.
- 3) 폐산 폐기물 발생량을 최소로 할 수 있는 최적 조건은 전류밀도 45 A/dm<sup>2</sup>, 전해연마 시간 4 min, 전해액 온도 65 °C, 유량 7 L/min였다.
- 4) 구형 부스바 사용 시 접촉 면적 및 접촉력 증가로 전류효율이 향상되어 폐산 폐기물 발생량을 감소시킬 수 있었다.
- 5) Taguchi 기법과 직교배열표를 이용하여 폐산 폐기물 발생량을 감소시킬 수 있는 최적 조건을 구하는데 소요되는 시간과 비용의 축소가 가능하였다.

## References

- [1] H. T. Yeom, J. S. Lee, Plating and surface treatment, pp. 77-119, Moonyeondang, 1999.
- [2] R. Rokicki, T. Hryniewicz, "Enhanced oxidation - dissolution theory of electropolishing", Transactions of the IMF, vol. 90, no. 4, pp. 188-196, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/0020296712z.00000000031>
- [3] 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, pp. 62-71, 1995.
- [4] Japan's vocational training center, Plating technology: Electroplating, pp. 31-38, Sehwa, 1996.
- [5] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, H. H. Hassan, "Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters", Journal of Materials Processing Technology, vol. 145, no. 1, pp. 84-92, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00865-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00865-3)
- [6] F. Nazneen, P. Galvin, D. W. Arrigan, M. Thompson, P. Benvenuto, G. Herzog, "Electropolishing of medical-grade stainless steel in preparation for surface nano-texturing", Journal of Solid State Electrochemistry, vol. 16, no. 4, pp. 1389-1397, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10008-011-1539-9>
- [7] D. Landolt, "Fundamental aspects of electropolishing", Electrochimica Acta, vol. 32, no. 1, pp. 1-11, 1987. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0013-4686\(87\)87001-9](http://dx.doi.org/10.1016/0013-4686(87)87001-9)
- [8] E. S. Lee, "Machining characteristics of the electropolishing of stainless steel(STS316L)", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 16, no. 8, pp. 591-599, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s001700070049>
- [9] M. Paunovic, Modern electroplating: Part A. Electrochemical aspects, pp. 13-16, John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [10] S. H. Park, J. W. Kim, Modern design of experiments using Minitab, pp. 529-553, Minyoungsa, 2013.
- [11] M. Nalbant, H. Gökçaya, G. Sur, "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning", Materials & design, vol. 28, no. 4, pp. 1379-1385, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.008>
- [12] Y. W. Cho, M. K. Park, "The parameter optimization decision of surface roughness using Taguchi method", Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol 21, no. 46, pp. 221-227, 1998.
- [13] J. E. Chung J. K. Ahn, "A Study of robust design of FCM gasket using Taguchi method", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 14, no. 7, pp. 3177-3183, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.7.3177>
- [14] Y. S. Kim, K. S. Chang, "Impact toughness improvement of an undercarriage track shoe using the Taguchi orthogonal array experiment", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 16, no. 3, pp. 1611-1619, 2015.

---

**김 수 한(Soo Han Kim)**

[정회원]



- 2000년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 ~ 현재 : 광운대학교 화학공학과 박사과정

<관심분야>

금속표면처리, 청정기술, 전기화학

---

**조 재 훈(Jachoon Cho)**

[정회원]



- 2001년 8월 : 조선대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 서강대학교 화공생명공학과 (박사수료)
- 2009년 12월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 그린공정소재그룹 선임연구원

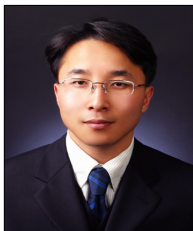
<관심분야>

친환경소재 및 연료, 청정기술, 공정최적화

---

**박 철 환(Chulhwan Park)**

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 2003년 11월 ~ 2004년 12월 : Univ. of Cambridge(UK) 화학공학과 Post-Doc.
- 2005년 1월 ~ 2007년 2월 : 한국생산기술연구원 환경에너지본부 선임연구원
- 2007년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

청정기술, 공정최적화, 생물공정설계, 친환경소재