



&lt;연구논문&gt;

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

한국표면공학회지  
J. Korean Inst. Surf. Eng.  
Vol. 49, No. 4, 2016.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.4.363>

## 산업현장 적용을 위한 스테인레스 스틸의 전해연마 특성

김수한<sup>a</sup>, 이승헌<sup>a</sup>, 조재훈<sup>b</sup>, 김상범<sup>b</sup>, 최종소<sup>a,\*</sup>, 박철환<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>광운대학교 화학공학과, <sup>b</sup>한국생산기술연구원 그린공정소재그룹

## Electropolishing Characteristics of Stainless Steel for Industrial Application

Soo Han Kim<sup>a</sup>, Seung Heon Lee<sup>a</sup>, Jaehoon Cho<sup>b</sup>, Sang Bum Kim<sup>b</sup>,  
Joongso Choi<sup>a,\*</sup>, Chulhwan Park<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea  
<sup>b</sup>Green Process and Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),  
Cheonan 31056, Korea

(Received August 12, 2016 ; revised August 25, 2016 ; accepted August 29, 2016)

### Abstract

For the industrial application of electropolishing process, we investigated electropolishing characteristics of stainless steel through increasing the specimen size or electrode gap. In this study, we performed a set of experiment with the specimen size of 10 cm × 10 cm and the electrode gap of 1 cm or more. In the view of the electropolishing process, the electrolyte temperature and the polishing time were most important factors compared with the current density and the electrode gap. Especially, the electrolyte temperature most importantly affected surface roughness and current efficiency on electropolishing characteristics. For the industrial application of electropolishing process, it should be considered for important factors such as electrolyte temperature, polishing time, current density and electrode gap, etc.

*Keywords* : Current density, Electrode gap, Electrolyte temperature, Electropolishing, Industrial application, Polishing time

## 1. 서 론

금속표면을 매끄럽고 광택이 나게 하는 연마 중 전기화학적인 방법을 이용한 것이 전해연마이다[1-3]. 전해연마는 금속 표면의 마무리 공정으로 주로 사용된다. 전해연마는 기계연마와 달리 가공변질 층이나 버(burr), 미세한 연마 흠과 파티클이 발생하지 않아 의료용 기구, 반도체 장비, 식품위생용품, 정밀화학 장치 등 많은 분야에서 사용되고 있다[2-4]. 전해연마는 표면을 매끄럽고 광택이 나게 하는 효과 외에도 내식성 향상, 표면 응력 제거, 디버링

등이 있다. 특히 전해연마에 사용되는 스테인레스 스틸은 전해연마에 의해 크롬산화층 형성으로 내식성이 필요한 식품 및 의료용 제품, 반도체 및 화학약품 제조 장치 등에 많이 사용된다[3-5]. 전해연마와 관련한 다양한 연구가 진행되어 오고 있으며, 이러한 연구들은 주로 금속종류, 전해액 조성이나 전류밀도 변경에 따른 특성과 표면 변화에 관한 것이다[2,3,5,6]. 또한 전해연마 특성 연구 시 사용하는 양극 평판 시편 크기는 가로, 세로가 1 cm × 1 cm나 직경이 1 cm 이내이고, 극간거리는 0.5 mm, 1 mm, 2 mm 등 1 cm 이내가 대부분이었다[3-8]. 이러한 크기의 시편과 극간거리는 실제로 산업현장에서 사용되는 전해연마 대상물의 크기나 모양, 작업성, 생산성 등의 특성을 많이 반영하지 못한다. 전해연마 대상물이 의료용기구와 같이 작거나 미세한 것도 있

\*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)

지만 기계부품이나 구조물, 전자제품 케이스, 식품 위생용품 등과 같이 크기가 크거나 다양한 모양을 지니고 있는 것도 있다. 전해연마 특성을 산업현장에 적용하기 위한 시편 크기와 극간거리 증가와 관련한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 극간거리를 1 cm 이상, 평판 시편 크기를 10 cm × 10 cm 이상으로 하여 실제로 산업현장에 적용 가능한 스테인레스 스틸의 전해연마 특성을 연구하고자 하였다. 전해연마 특성인 표면거칠기 개선율에 영향을 미치는 주요인자로 전류밀도, 전해액 온도, 연마 시간, 극간거리를 선정하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 전해연마액 내 양극과 음극을 넣고, 펌프를 설치하여 전해연마액을 순환시켜 교반할 수 있는 전해연마장치를 구성하였다(그림 1). 전해연마액은 인산(55%)과 황산(35%), 물(10%) 등으로 구성하였다. 전해연마에 사용된 양극 시편은 평판 스테인레스 스틸(STS 304)로 조성은 표 1과 같다. 전해연마 대상물인 평판 시편 크기는 가로, 세로 10 cm × 10 cm, 두께 0.5 mm로 이전 전해연마 연구에 사용했던 시편보다 큰 것을 사용하였다. 음극은 동판을 사용하였으며, 양극보다 면적을 2배 크게 하였다. 15 V, 300 A 용량을 가진 정류기를 전

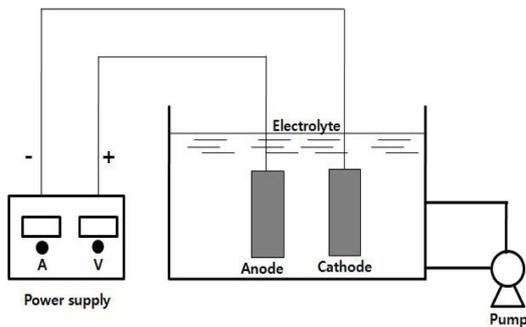


Fig. 1. Electropolishing apparatus.

Table 1. Composition of STS 304

Symbols for element	Composition(% w/w)
C	≤0.08
Si	≤1.00
Mn	≤2.00
P	≤0.045
S	≤0.03
Ni	8.0 ~ 10.5
Cr	18.0 ~ 20.0
Fe	balance

해연마에 사용하였다. 전해연마는 음극에 동판을 연결하고 양극에 평판 스테인레스 스틸을 연결하여 전해연마액에 침적시켜 일정한 극간거리를 유지하도록 한 후 전류를 인가하여 전해 연마하였다. 전해연마액은 펌프를 이용하여 지속적으로 순환시켰으며 전해연마 조건을 변경하며 실험을 진행하였다. 전해연마 특성치인 표면거칠기 개선율과 전류효율을 조사하기 위하여 전해연마 전·후의 표면거칠기와 무게를 측정하였다. 표면거칠기는 일본 Mitutoyo사의 모델 175를 사용하여 3곳을 측정 후 평균값을 구하였고, 시편 무게는 OHAUS사의 AV4102를 이용하여 측정하였다. 표면거칠기 개선율은 전해연마 전·후 표면거칠기 변화량을 전해연마 전 표면거칠기 값으로 나누어 백분율로 표시하였으며, 전류효율은 전해연마 전·후 무게 변화량을 페러데이 법칙에 따라 계산된 이론적인 변화량으로 나누어 백분율로 표시하였다[9].

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 극간거리가 전해연마에 미치는 영향

극간거리가 전해연마에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전류밀도 50 A/dm<sup>2</sup>, 전해액 온도 60°C, 연마 시간 5 min으로 하고, 극간거리는 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 cm로 변화시켜 실험을 진행하였다. 극간거리 변화에 따른 표면거칠기 개선율과 전류효율을 그림 2에 나타내었다. 표면거칠기 개선율 최대값은 극간거리가 2.5 cm에서 40.37%였다. 그리고 전류효율 최대값은 극간거리가 12.5 cm에서 33.55%, 최소값은 2.5 cm에서 31.94%로 1.61%의 차이를 보였다. 표면거칠기 개선율이 우수한 극간거리인 2.5 cm에서의 전해연마 전·후의 표면거칠기는 각각 5.37 μmRa와 3.20 μmRa였으며, 전류효율이 큰 12.5 cm에서의 전해연마 전·후 시편 무게는 각각 112.79 g과 111.33 g였다. 극간거리가 증가하면서 표면거칠기 개선율

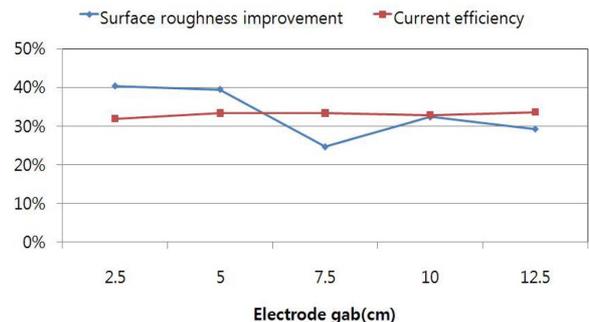


Fig. 2. Surface roughness improvement and current efficiency according to electrode gab.

이 점진적으로 감소하다가 약간 증가하였고 이후 다시 감소함을 보였다. 전반적으로 극간거리 증가에 따라 표면거칠기 개선율은 감소하였다. 전해연마 시 금속 표면에서 용융 및 재용착에 의하여 돌기가 형성되었다가 제거되면서 표면이 매끄럽게 되는데 극간거리가 증가하면 전해연마가 제대로 되지 않아서 표면거칠기가 좋지 않게 된다. 이는 극간거리가 증가하면 낮은 전류밀도에서 전류가 영향을 많이 미치지 못하기 때문에 재용착 과정에서 생성된 돌기가 제거되기 어렵기 때문이다[4,8]. 전류효율은 극간거리가 증가함에 따라 초기에는 조금 증가하였으나 일정하게 유지되었다. 이에 따라 극간거리 변화는 전류효율에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

### 3.2. 전류밀도가 전해연마에 미치는 영향

전류밀도가 전해연마에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전해액 온도 60°C, 연마 시간 5 min, 극간거리 2.5 cm로 하고 전류밀도는 30, 40, 50, 60, 70 A/dm<sup>2</sup>로 변화시켰다. 전류밀도 변화에 따른 표면거칠기 개선율과 전류효율을 그림 3에 나타내었다. 표면거칠기 개선율의 최대값은 전류밀도 50 A/dm<sup>2</sup>에서 50.00%, 최소값은 30 A/dm<sup>2</sup>에서 41.18%로 차이는 8.82%였다. 그리고 전류효율 최대값은 전류밀도 30 A/dm<sup>2</sup>에서 42.12%, 최소값은 70 A/dm<sup>2</sup>에서 30.20%로 차이는 11.92%였다. 표면거칠기 개선율이 우수한 전류밀도인 50 A/dm<sup>2</sup>에서의 전해연마 전·후의 표면거칠기는 각각 6.13 μinRa와 3.07 μinRa였으며, 전류효율이 큰 30 A/dm<sup>2</sup>에서의 전해연마 전·후 시편의 무게는 각각 113.07 g과 111.97 g였다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 전류밀도가 증가하면서 표면거칠기 개선율이 증가하나 특정 전류밀도 이상에서는 변화가 크지 않았다. 전류밀도가 증가하면 금속표면에서 용착 및 재용착에 의한 돌기 생성 및 제거가 진행되면서 표면거칠기가 개선되는데 전류

밀도가 증가하면 짧은 시간 내 생성된 돌기나 돌출부가 제거되어 더 이상 전류밀도가 증가하더라도 표면거칠기가 크게 개선되지 않기 때문이다[4,8]. 그리고 전류효율은 전류밀도가 증가함에 따라 지속적으로 감소하였으나 특정 전류밀도 이상에서는 변화가 크지 않았다. 전류밀도가 증가하면 표면거칠기 개선율이 증가하고 전류효율은 감소하지만 특정 전류밀도 이상에서는 전류밀도가 전해연마 특성에 미치는 영향이 적으므로 경제성이나 생산성을 고려하여 실제 산업현장에 적합한 전류밀도를 선정하는 것이 중요하다.

### 3.3. 전해액 온도가 전해연마에 미치는 영향

전해액 온도가 전해연마에 미치는 영향을 조사하기 위하여 극간거리 2.5 cm, 전류밀도 50 A/dm<sup>2</sup>, 연마 시간 5 min으로 하고 전해액 온도는 40, 50, 60, 70, 80°C로 변화시키면서 실험을 진행하였다. 전해액 온도 변화에 따른 표면거칠기 개선율과 전류효율을 변화를 그림 4에 나타내었다. 표면거칠기 개선율의 최대값은 전해액 온도 80°C에서 53.85%, 최소값은 40°C에서 0.00%로 차이는 53.85%였다. 그리고 전류효율 최대값은 전해액 온도 80°C에서 42.28%, 최소값은 40°C에서 25.96%로 차이는 16.32%였다. 80°C에서의 전해연마 전·후의 표면거칠기는 각각 4.77 μinRa와 2.20 μinRa였으며, 전해연마 전·후 시편의 무게는 각각 113.34 g과 111.50 g였다. 전해액 온도가 증가하면서 표면거칠기 개선율이 초기에 급격하게 증가하고 50°C 이후에는 완만하게 증가하였다(그림 4). 이것은 전해액이 특정 온도 이상이 되어야 전해연마에 따른 표면거칠기가 개선될 수 있음을 의미한다. 전류효율은 전해액 온도가 증가함에 따라 지속적으로 증가하였다. 전해액 온도 증가에 따라 표면거칠기 개선율과 전류효율은 증가하였으나 낮은 온도에서 표면거칠기는 개선되지 않았다. 이것은 전해액 온도가 낮으면 점성

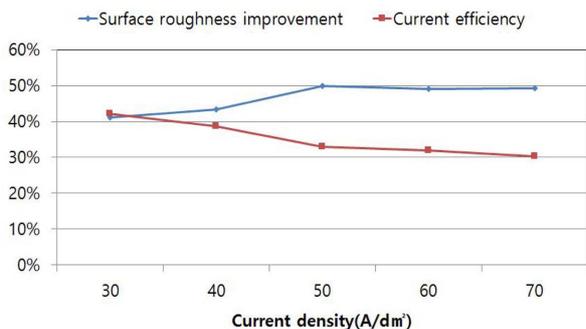


Fig. 3. Surface roughness improvement and current efficiency according to current density.

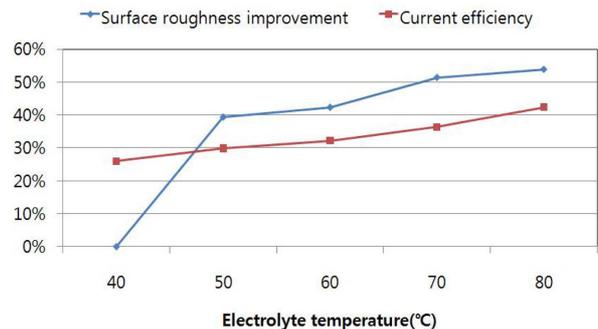


Fig. 4. Surface roughness improvement and current efficiency according to electrolyte temperature.

이 높아져 전해액 내에서 전류 흐름이 용이하지 않고 전기저항이 커져서 금속 표면의 돌출부를 우선적으로 용해시키는 용해작용이 원활하게 일어나지 않기 때문인 것으로 보인다[2,9]. 특정 온도 이상이 되어 전해액의 점성이 낮아지고 전자 및 금속이온의 이동이 원활해지면 금속표면에 형성된 돌출부를 선택적으로 우선 용해시키면서 금속 표면거칠기가 개선되기 때문이다[2,9]. 따라서 전해연마 시 매끄럽고 광택이 나는 표면을 얻고 전류효율을 높이기 위해서는 전해액 온도를 특정 온도 이상의 조건을 적용하여 전해연마 효과를 향상시킬 수 있다.

### 3.4. 연마 시간이 전해연마에 미치는 영향

연마 시간이 전해연마에 미치는 영향을 조사하기 위하여 극간거리 2.5 cm, 전류밀도 50 A/dm<sup>2</sup>, 전해액 온도 60°C으로 하고 연마 시간을 1, 3, 5, 7, 9 min으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 연마 시간에 따른 표면거칠기 개선율과 전류효율을 그림 5에 나타내었다. 표면거칠기 개선율 최대값은 연마 시간 9 min에서 55.77%, 최소값은 1 min에서 24.26%로 차이는 31.51%였다. 그리고 전류효율 최대값은 연마 시간 1 min에서 43.65%, 최소값은 7 min에서 33.48%로 차이는 10.17%였다. 표면거칠기 개선율이 가장 우수한 연마 시간인 9 min에서의 전해연마 전·후의 표면거칠기는 각각 5.20  $\mu\text{mRa}$ 와 2.30  $\mu\text{mRa}$ 였으며, 전류효율이 가장 큰 1 min에서의 전해연마 전·후의 시편의 무게는 각각 113.25 g과 112.87 g였다. 연마 시간이 증가하면서 표면거칠기 개선율이 지속적으로 증가하였다(그림 5). 이것은 연마 시간이 증가하면 전류 공급도 증가하여 금속 표면의 돌출부를 지속적으로 용해시키면서 표면거칠기가 개선되기 때문이다[4]. 전류효율은 연마 시간이 증가하면서 지속적으로 소폭 감소하였다. 이것은 전류가 지속적으로 공급되더라도 초기에 큰 돌출부를 대부분 용해시킨 후 돌출부 용해효과가 감소되어

금속을 용해시키지 못하고 산소가스를 생성하는데 소모시키기 때문인 것으로 보인다[2]. 연마 시간이 증가하면 표면거칠기 개선율은 증가하지만 전류효율은 감소하므로 경제성이나 생산성을 고려하여 실제 산업현장에 적합한 연마 시간을 선정해야 한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 스테인레스 스틸(STS) 평판으로 극간거리를 1 cm 이상, 평판 시편 크기를 10 cm × 10 cm 이상으로 하여 실제 산업현장에 적용 가능한 전해연마 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전해액 온도를 변수로 할 때 표면거칠기 개선율을 최대값과 최소값의 차이가 53.85%, 전류효율 차이가 16.32%로 전해연마 특성에 가장 큰 영향을 미쳤다.
- 2) 연마 시간을 변수로 할 때 표면거칠기 개선율 최대값과 최소값의 차이는 31.51%, 전류효율 차이는 10.17%로, 극간거리 변수의 표면거칠기 개선율 차이 15.69%, 전류효율 차이 1.61%에 비해 전해연마 가공 특성에 더 많은 영향을 미쳤다.
- 3) 전류밀도 변화에 따른 표면거칠기 개선율 최대값과 최소값의 차이는 8.82%, 전류효율 차이는 11.92%로 전해연마 특성에 영향을 적게 주는 것으로 나타났다.
- 4) 이전 연구와는 달리 산업현장에 전해연마 특성을 반영할 수 있도록 시편크기나 극간거리를 증가시킬 경우, 전해연마 주요인자인 전류밀도나 극간거리보다 전해액 온도와 연마 시간이 전해연마 특성에 더 많은 영향을 미쳤다.
- 5) 실제 산업현장에서의 생산성과 경제성을 고려한 전해연마 공정의 최적 조건 도출은 반드시 필요하다.

## Acknowledgements

이 논문은 2015년도 광운대학교 교내 학술연구비와 2016년도 한국생산기술연구원 내부연구사업(환경에너지소재 및 기능성 접착소재 플랫폼 기술개발)의 지원을 받아 수행되었음.

## References

- [1] D. Landolt, Fundamental aspects of electropolishing, *Electrochim. Acta.*, 32 (1987) 1-11.
- [2] R. Rokicki, T. Hryniewicz, Enhanced oxidation-

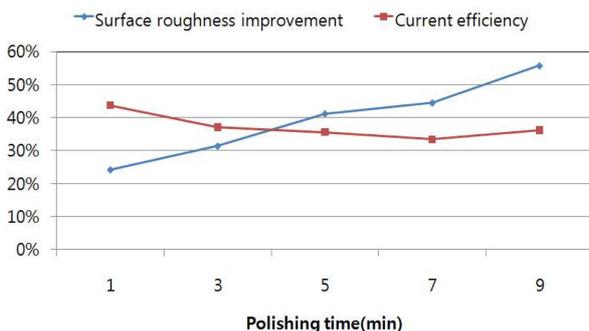


Fig. 5. Surface roughness improvement and current efficiency according to polishing time.

- dissolution theory of electropolishing, T. IMF., 90 (2012) 188-196.
- [3] 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, J. Solid State Electr., 16 (2012) 1389-1397.
- [4] E. S. Lee, Machining characteristics of the electropolishing of stainless steel(STS316L), Int. J. Adv. Manuf. Tech., 16 (2000) 591-599.
- [5] S. J. Lee, J. J. Lai, The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel. J. Mat. Process. Tech., 140 (2003) 206-210.
- [6] J. K. Lee, J. H. Park, T. H. Song, K. K. Ryoo, Y. B. Lee, A study on mirror surface manufacturing process for solar cell, J. Kor. Acad. Industr. Coop. Soc., 4 (2003) 47-49.
- [7] J. M. Park, W. C. Kim, Effect of electropolishing process on corrosion resistance of Co-Cr alloy, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 49 (2010) 199-204.
- [8] J. B. Song, E. S. Lee, J. W. Park, A study on the machining characteristics of electropolishing for stainless steel, Kor. Soc. Mec. Eng., 23 (1999) 279-286.
- [9] M. Paunovic, Modern electroplating: Part A. Electrochemical aspects, M. Schlesinger, M. Paunovic, fourth Ed, John Wiley & Sons, Inc. New York (2000) 13-16.