



전해연마를 이용한 STS 304의 부식방지 효과 연구

오재환, 김우혁, 조혜원, 박병관, 윤상화, 유봉영*

한양대학교 재료화학공학과

Study on Corrosion Resistance Enhancement in STS 304 through Electrochemical Polishing

JaeHwan Oh, WooHyuk Kim, HyeWon Cho, ByungKwan Park, SangHwa Yoon, Bongyoung Yoo*

Department of Materials Science and Chemical Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea

(Received 08 April, 2024 ; revised 20 May, 2024 ; accepted 21 May, 2024)

Abstract

The 304 stainless steel has good corrosion resistance, so it is used in various industries. However, in an environment like seawater, stainless steel can be damaged by chloride ions, resulting in surface corrosion such as pitting and crevice corrosion. Electropolishing is a technique that smooths the surface and creates a passivation layer that can resist corrosion. In this study, electropolishing was applied as a surface finish to increase the smoothness of the metal surface and its corrosion resistance. We confirmed the topology of the electropolished surface of stainless steel by optical microscope and evaluated the corrosion resistance characteristics of electropolished stainless steel through a potentiodynamic experiment.

Keywords : STS 304; Electropolishing; Corrosion resistance.

1. 서 론

오스테나이트 스테인리스강은 우수한 내식성을 가지고 있어 주방용 조리기구, 배관, 선박 등 다양한 분야에서 사용되고 있는 합금 중 하나이다. 하지만 해안가 주변같이 염소 이온에 노출이 되는 경우 염소 이온의 부동태 막(passivation layer) 파괴로 인해 공식(pitting)이나 틈 부식(crevice corrosion)같은 국부적 부식이 발생할 수 있고 이러한 부식은 스테인리스 강의 내식성을 떨어뜨리는 요인이 된다 [1]. 특히 304 계열 스테인리스 강 의 경우 316 계열 스테인리스 강에 비해 몰리브

덴이 없어 더욱 내식성이 떨어지게 된다 [2]. 따라서 적절한 표면처리를 통해 내식성을 향상시킬 필요가 있는데 그 중 대표적인 방법 중 하나가 전해연마이다. 전해연마는 전기화학적 방법을 이용하여 금속을 용해시켜 금속 표면을 평탄하게 만드는 연마 방법 중 하나이다. 어떠한 기계적인 도구도 사용하지 않기 때문에 기계적 연마와는 달리 표면에 응력이나 표면 파손을 일으키지 않다는 장점을 가지고 있다. 또한 전해연마는 표면을 평탄화 하여 부식이 생길 장소를 줄일 뿐만 아니라 금속 표면에 전체적으로 새로운 부동태 막을 형성시켜 부식방지에 효과를 주는 연마방법으로 알려져 있다 [3]. 본 연구에서는 전해연마 방법을 이용하여 금속 표면의 평탄화가 시간에 따라 얼마나 진행되는지 확인하고, 염소 이온이 노출된 환경에서 STS

*Corresponding Author : Bongyoung Yoo
Department of Materials and Chemical Engineering,
Hanyang University
Tel: +82-31-400-5229; E-mail: byyoo@hanyang.ac.kr

304 스테인리스 강이 전해연마가 진행된 정도에 따라 부식 방지 효과가 얼마나 되는지 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

전해연마 실험은 3 전극 시스템을 통해 진행되었다. 전류밀도를 일정하게 하기 위해 작업전극으로 STS 304시편을 테이프를 이용해 1 cm × 1 cm 영역이 드러나게 사용하였으며, 상대전극으로는 백금전극(3 μm Pt plated on Ti)을, 기준전극으로는 Ag/AgCl(3.0 M KCl saturated)을 사용하였다. 전해액으로는 인산 (H₃PO₄, 85%, Junsei) 55%, 황산(H₂SO₄, 95%, Junsei) 14%, 물 (Deionized water) 31%를 혼합한 용액을 사용하였다. 전해연마 실험은 25°C에서 일정하게 유지하여 진행하였다. 0.0 V (vs. open circuit, 0.3 V)에서 3.0 V (vs. Ag/AgCl)까지 1.0 mV/s의 속도로 선형주사전위법 (Linear sweep voltammetry, LSV) 분석을 통해 전압구간마다 해당용액에서 시편에 발생하는 전기화학적 특성을 관찰하였고 전해연마 조건에 부합하는 전압구간에서 전해연마를 진행하였다. 전해연마 처리 전 후의 시편은 광학현미경 (Optical Microscope, OM, RH-2000, HIROX)을 이용하여 표면 형상을 관찰하였다. 전해연마를 진행한 후 부식실험은 염소이온 환경을 조성하기 위해 2.0 M NaCl (99.5%, Daejung Chemical & Metals) 수용액에서 동전위 분극 실험을 통해 이루어졌다. 동전위 분극 실험은 30°C에서 10 mV/

s의 속도로 -1.0 V(vs. open circuit)로부터 1.0 V(vs. open circuit)의 전압구간에서 진행하였다. 이후 공식 전압과 부식 전류 밀도를 계산하여 전해연마의 부식방지에 효과에 대한 전기화학적 특성을 확인하였다. 선형주사전위법, 일정전위법, 동전위 분극실험과 전기화학 분석은 VersaSTAT 4 (AMETEK Co.)을 통해 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전압 구간에 따른 전기화학적 거동 및 전해연마 구간 설정

그림 1은 0.0 V(vs. open circuit)에서 3.0 V(vs. Ag/AgCl)까지 1.0 mV/s로 전압을 변화시키며 전류밀도를 측정하여, 각 구간에서의 전기화학 반응을 알아보기 위한 선형주사전위 그래프이다. 전압 구간에 따라 크게 네 영역으로 나누어 각각 식각 영역, 부동태화 영역, 한계전류밀도 영역, 기체 발생 영역으로 나타낼 수 있다. 0 V에서 1.2 V의 전압에서는 STS 304 스테인리스 강의 부동태막으로 인해 금속용출이 매우 천천히 일어나다가, 1.2 V에서 1.4 V의 전압에서는 식 (1)에 의한 산화반응이 일어나게 되어 전류밀도가 증가하는 모습을 보인다 [4]. 1.4 V에서 1.6 V의 전압에서는 새로운 부동태 막 형성으로 인하여 전류밀도가 증가하지 않다가 1.6 V 와 1.85 V 사이 전압에서는 전류밀도가 일정한 한계전류밀도 영역이 나타난다 [5]. 전해연마는 보통 한계전류밀도 영역 구간에서 금속

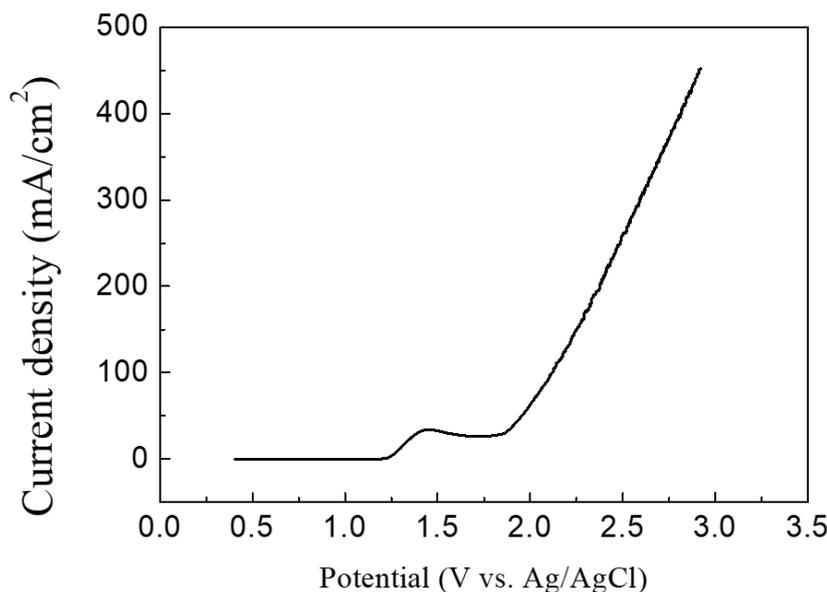
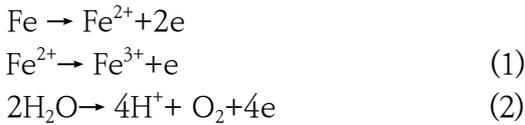


Fig. 1. Linear sweep voltammetry of STS 304 sample in 55% H₃PO₄, 14% H₂SO₄ from 0.0 V(vs. open circuit) to 3.0 V(vs. Ag/AgCl). Scan rate : 1.0 mV/s.



Fig. 2. Surface topology of STS 304 sample (a) non-electropolishing (b) electropolishing 15 min (c) electropolishing 25 min. Scale bar is 70 μm

표면과 용액 사이에서의 금속 이온의 물질 전달 한계(Mass Transport Limitation)에 의해 일어난다 [6]. 금속 표면에서 valley에서의 금속 용해속도가 peak에서의 금속 용해속도보다 느리기 때문에 단차가 줄어들고 이전에 비해 더 매끄러운 표면을 갖게 된다. 1.85 V 이상의 전압 인가 시, STS 304 시편의 표면에서 물 분해에 따른 산소 기체 발생(식 (2))으로 다시 전류밀도가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이 구간에서는 기체에 의한 공식이 발생할 수 있다 [5]. 따라서 한계 전류 밀도 영역인 1.8 V 조건에서 전해연마를 진행하였다.



3.2. 표면 형상

그림 2는 각각 전해연마 전 시편과 각 용액에서의 전해연마 조건에서 전해연마 15분, 25분 진행한 시편들을 OM을 통해 관찰한 표면 형상이다.

전해연마 전 시편에서는 스크래치와 같은 거친 표면 형상이 관찰되었으나 전해연마를 진행한 시편은 전에 비해 평탄한 표면 형상이 관찰되었다. 전해연마를 15분 진행한 시편의 경우 결정립이 두드러지게 관찰되는 것을 확인하였다. 이는 상대적으로 높은 표면 에너지를 가진 결정립계(Grain boundary)에서의 금속 용출이 활발하게 이뤄진 결과로 사료된다. 25분 진행한 시편의 경우에도 결정립이 관찰되긴 하였지만 전해연마가 더욱 진행됨에 따라 결정립 간의 단차가 줄어들어 더욱 매끄러운 표면 형상이 관찰되었다.

3.3. 부식저항성

그림 3과 표 1은 각각 전해연마로 인한 부식저항성의 효과를 나타내기 위해 동전위 분극 그래프와 부식전위와 공식전위, 부식전류밀도를 나타낸 표이다. 전해연마 전 후의 부식전위는 큰 차이를 보이지 않았으나, 전해연마 전 후의 공식전위를 비교해보면 전해연마를 오래 진행시킬수록 그렇지 않은 시편보다 공식전위가 더 높은 것을 확인할 수

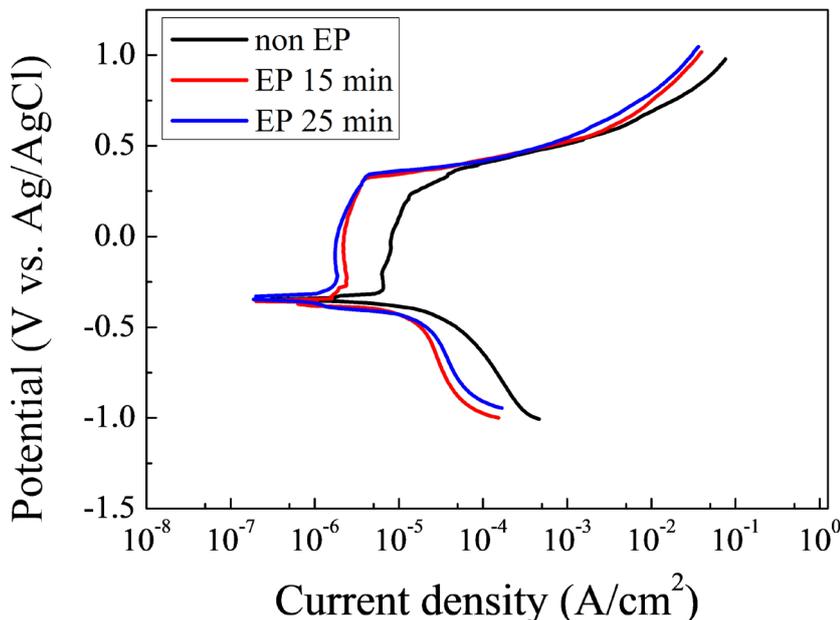


Fig. 3. Potentiodynamic polarization curves of STS 304 sample in 2.0 M NaCl from -1.0 V(vs. open circuit) to 1.0 V(vs. open circuit). Scan rate : 10 mV/s

Table 1. Corrosion potential, pitting potential and corrosion current density of STS 304 sample

	Non-Electropolishing	Electropolishing 15min	Electropolishing 25min
Corrosion potential (mV)	-345	-354	-335
Pitting potential (mV)	231	313	333
Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	4.96	2.14	1.43

있었다. 공식전위값이 증가할수록 국부적 부식 중 하나인 공식 발생의 저항을 높일 수 있으므로 전해연마를 통해 국부적 부식의 저항을 높일 수 있다. 또한 부식전류밀도를 비교하였을 때 전해연마 전 부식전류밀도는 $4.96 \mu\text{A}$, 15분 전해연마한 시편의 부식전류밀도는 $2.14 \mu\text{A}$, 25분 전해연마한 시편의 부식전류밀도는 $1.43 \mu\text{A}$ 로 전해연마를 오래 진행시킬수록 부식전류밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 전해연마를 하지 않은 시편보다 공식 등 국부적인 부식이 적고 국부적 부식은 균일 부식에 비해 그 속도가 빠르기 때문에 전해연마를 한 시편의 부식전류밀도가 더 낮은 결과로 이어지는 것으로 사료된다 [3]. 전해연마를 더 오래 진행시킨 시편의 부식전류 밀도가 낮아진 것 또한 전해연마 시간이 길어질수록 시편이 더 매끈한 표면을 갖게 되어 국부적 부식이 발생할 수 있는 공간을 줄일 수 있기 때문이다. 따라서 304 스테인리스강에 전해연마 처리를 하게 되면, 전체적인 부식의 속도가 줄어들어 전해연마가 부식방지의 효과가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

전해연마 방법을 통해 STS 304 스테인리스강의 부식 방지 효과를 관찰하였다. 전압에 따른 전기화학 반응의 변화를 알아보기 위해 LSV 실험을 통해 전해연마 구간을 설정하였고, 1.8 V에서 황산과 인산의 혼합 용액에서 전해연마를 진행하였다. 전해연마를 진행한 시편은 표면의 결함이 감소하여 매끈한 표면을 갖는 것을 광학현미경을 통해 확인할 수 있었다. 또한 표면의 결함이 줄어들어 따라 염소이온 환경에서 분극 실험을 진행하였을 때 부식전류 밀도가 전해연마 전에 비해 줄어든 결과를 확인할 수 있었다. 따라서 STS 304 스테인리스강의 전해연마는 표면을 매끄럽게 할 뿐만 아니라 염소이온 환경에서 부식방지 또한 효과가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

acknowledgement

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업

기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(20017379) 및 산업통상자원부(1415181061)와 KSRC 지원 사업인 미래반도체소자 원천기술개발사업(20019469)의 연구 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-차세대지능형반도체기술개발(소자)사업 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00258557)

References

- [1] Q. Yang, J. Luo, Effects of hydrogen and tensile stress on the breakdown of passive films on type 304 stainless steel, *Electrochimica Acta*, 46 (2001) 851-859.
- [2] D. Wang, R. Jia, S. Kumseranee, S. Punpruk, T. Gu, Comparison of 304 and 316 stainless steel microbiologically influenced corrosion by an anaerobic oilfield biofilm consortium, *Engineering Failure Analysis*, 122 (2021) 105275.
- [3] S.J. Lee, J.J. Lai, The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (2003) 206-210.
- [4] W. Han, F. Fang, Eco-friendly NaCl-based electrolyte for electropolishing 316L stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 58 (2020) 1257-1269.
- [5] E.S. Lee, Machining characteristics of the electropolishing of stainless steel (STS316L), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16 (2000) 591-599.
- [6] G. Yang, B. Wang, K. Tawfiq, H. Wei, S. Zhou, G. Chen, Electropolishing of surfaces: theory and applications, *Surface Engineering*, 33 (2017) 149-166.