

## 오스테나이트 스테인리스강 저속인장시험편의 최적 전해연마 특성

최민재<sup>†</sup> · 조은별 · 김동진

한국원자력연구원 재료안전기술연구부, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111  
(2023년 11월 22일 접수, 2023년 12월 12일 수정, 2023년 12월 12일 채택)

### Optimal Electropolishing Condition of Austenitic Stainless Steel Specimens for Slow Strain Rate Tensile Testing

Min-Jae Choi<sup>†</sup>, Eun-Byeoul Jo, and Dong-Jin Kim

Materials Safety Technology Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero-989, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

(Received November 22, 2023; Revised December 12, 2023; Accepted December 12, 2023)

Irradiation-assisted stress corrosion cracking (IASCC) is one of the main degradation mechanisms of austenitic stainless steels, which are used as reactor internal materials. Slow strain rate testing (SSRT) has been widely applied to evaluate the IASCC initiation characteristics of proton-irradiated tensile specimens. Tensile specimens require low surface roughness for micro-crack observation, and electropolishing is the most important specimen pre-treatment process used for this. In this study, optimal electropolishing conditions were examined through analyzing results of polarization experiments and surface roughness measurements after electropolishing. Corrosion cell and electropolishing equipment were fabricated for polarization tests and electropolishing experiments using SSRT specimens. The experimental parameters were electropolishing time, current density, electrolyte temperature, and stirring speed. The optimal electropolishing conditions for SSRT tensile specimens made of type 316 stainless steel were evaluated as a polishing time of 180 seconds, a current density of 0.15 A/cm<sup>2</sup>, an electrolyte temperature of 60 °C, and a stirring speed of 200 RPM.

**Keywords:** Electropolishing, Surface roughness, Austenitic stainless steel, SSRT, Polarization

#### 1. 서론

원자로 내부구조물은 핵연료 및 제어봉 집합체를 지지, 정렬하고 구조물에 작용하는 다양한 하중을 원자로 용기로 전달하는 역할을 한다. 이러한 내부구조물은 냉각재가 노심을 통과하고 노내 중성자속 감시설비를 안 내할 수 있도록 설계되어 있으며 1차 계통수에 의한 부식을 방지하기 위해 오스테나이트계 스테인리스강으로 제작된다 [1,2]. 압력용기 내에서 고온 및 유체 유동 등의 환경에 상시 노출되어 있고 장기간 중성자 조사를 받는 내부구조물 재료는 조사 취화, 부피 팽윤 등의 열화 현상뿐만 아니라 조사유기응력부식균열(Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking, 이하 IASCC)이 발

생할 수 있어, 이에 대한 다양한 평가와 연구가 진행되어 왔다 [3]. 1차 계통수 내에서 외부응력 혹은 잔류응력과 중성자 조사 환경이 복합적으로 작용해 발생하는 IASCC는 입계를 따라 균열의 개시 및 전파가 이루어진다는 특징이 있으며, 중성자 조사에 의한 재료의 국부 변형이 슬립에 과도한 변형을 유발하고 입계 전위의 형성에 기여하여 입계에서 균열이 개시된다고 연구되었다 [4]. IASCC 개시 기구를 규명하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔으나 중성자 조사에 의해 발생하는 IASCC의 근원적인 특징으로 인해 조사재를 직접 취급할 수 있는 실험 시설 내에서만 연구 수행이 가능한 어려움이 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 중성자 조사재를 대체할 수 있는 양성자 조사재를 활용하여, 중성자 조사재와 양성자 조사재의 IASCC 개시 거동을 비교 분석하는 연구와 양성자 조사량에 따른 IASCC 개시 민감도 평가 연구가 수행되었다 [5,6].

<sup>†</sup>Corresponding author: mjchoi@kaeri.re.kr

최민재: 선임연구원, 조은별: 석사과정, 김동진: 책임연구원

양성자 조사제를 이용한 IASCC 개시민감도 평가 및 개시 기구 규명 연구는 소형 인장 시험편을 저속인장시험(Slow Strain Rate Testing, 이하 SSRT) 수행하여 시험편 표면에서 발생하는 입계 균열의 양상 평가와 균열 밀도 분석을 통해 이루어진다. 시험 조건에 따라 미세한 입계 균열의 관측이 수반되어야 하므로, 연구에 사용되는 시험편은 매우 낮은 수준의 표면 조도가 요구되며 이를 위해 시험편 전처리에 전해연마가 필수적으로 수반된다. 일반적인 금속 시험편의 경우 전기화학 실험 장치 내에서 전극과 연결하여 분극 실험을 수행하면  $E_{corr}$  지점 이후의 양극분극곡선을 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있는데, Anode 지배 분극 현상이 나타나는 영역에서 전위의 증가에 따라 활성화 상태(Active state), 부동태 상태(Passive state), 과부동태 영역(Trans-passive state)으로 나눌 수 있다. 활성화 상태에서는 낮은 전류밀도로 에칭(Etching) 현상이 나타나 미세 조직 관측에 활용되고, 전압의 증가에 따른 전류밀도 변화가 작은 부동태 상태에서는 전해연마 효과를 발생시킬 수 있으며, 전위를 더 증가시켜 과부동태 영역으로 진입하게 되면 높은 부식 전류로 인해 피팅(Pitting)이 발생할 수 있다 [7]. 시험편에 과부동태 영역의 전위를 인가하여 다소 높은 전류밀도로 실험을 진행하면 짧은 시간 내에 전해연마를 수행할 수 있지만 피팅 발생의 가능성이 있기 때문에 일반

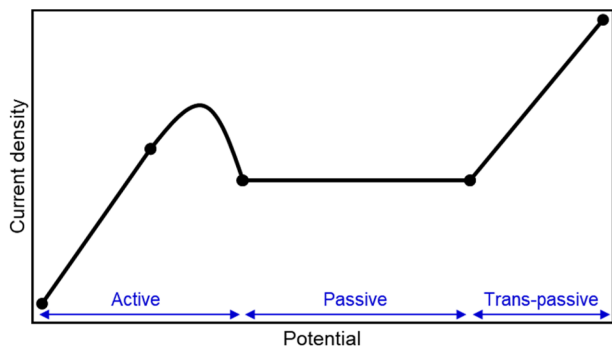
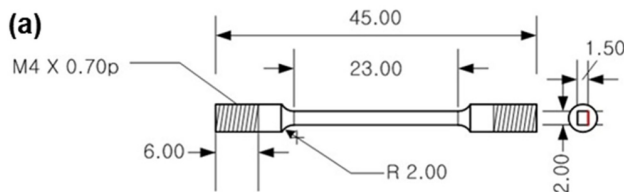


Fig. 1. Schematic graph of anodic polarization curve for general metallic materials

Table 1. Chemical composition of Type 316 stainless steel (wt%)

SS316H	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	P	N	S	Fe
wt%	0.049	16.82	10.29	2.12	0.59	0.57	0.22	0.027	0.023	0.002	Balance



적으로 부동태 영역의 평지(plateau) 구간의 전류밀도를 사용하거나 이보다 약간 높은 값을 적용하여 전해연마를 수행하는 것이 일반적이다 [8-11].

본 연구에서는 원자로 내부구조물에 주로 사용되는 소재인 Type 316 오스테나이트 스테인리스강의 SSRT 실험을 위한 소형 인장시험편을 전처리함에 있어 수십 nm 수준의 낮은 표면 조도를 확보하기 위한 최적의 전해연마 특성을 평가하고자 하였다. 복잡한 시험편 형상으로 인하여 일반적인 분극 실험 장비로는 전기화학 특성 평가 및 전해연마 수행이 어려운 관계로 시험편 형상에 맞게 실험용 지그를 설계, 제작하여 전기화학 실험 장치를 구성하였다. 전해질 온도와 교반속도를 다르게 하여 분극 곡선을 도출한 후 최적 범위의 전해연마 공정 변수를 확립하였고, 전류밀도, 연마시간의 추가 변수를 고려하여 전해연마 실험을 수행한 후 표면 조도 측정을 통해 SSRT 실험용 인장시험편의 최적 전해연마 특성 평가를 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 시험편

실험에서 사용된 Type 316 스테인리스강의 화학조성은 Table 1과 같으며, SSRT 시험용 인장시험편의 도면과 이미지는 Fig. 2와 같다. 인장시험편은 Fig. 2a와 같이 총 길이 45 mm, 표점거리(gauge length) 23 mm, 너비와 폭 각각 2.0 mm, 1.5 mm의 크기로 제작되었으며, Fig. 2b와 같이 제작 후에는 표면 연마 등의 전처리가 진행되지 않은 상태이다. 표점거리 이내에서 관측이 수행되는 관계로 전해연마 수행 전 해당 영역을 #1000, #1200, #1500, #2000, #4000 SiC 사포로 연마한 후 1 μm 알루미나 파우더 현탁액을 사용하여 경면 연마 진행하였다. 전기화학 실험 시 노출되는 표면을 표점거리 내 단면으로 제한하기 위하여 시험편의 4면 중 경면 연마 표면을 제외한 나머지 3면을 매니큐어로 마스킹하여 최종적으로 23 mm × 2.0 mm의 연마면만이 노출되도록 하였다.



Fig. 2. SSRT specimen: (a) drawing and (b) image



Fig. 4는 제작된 작업전극이 적용된 분극실험 장치의 모식도와 이를 이용한 SSRT 시험편의 분극 실험 수행 과정을 보여준다. 분극실험 시작 전 전위의 안정화를 위해 1시간 정도 침지한 후 개방회로전위(Open-circuit potential, OCP)를 측정하였다 [13]. 개방회로전위를 기준으로 +2.3 V까지 1.667 mV/s의 주사속도(Scan rate)로 양극 분극시켜 측정하였다. 전류 인가를 위해 전위 가변기(Solartron, 1287A)를 사용하였고 히팅 맨틀을 사용하여 전해질 온도와 교반 속도를 제어하였다. 전해연마 용액은 선행연구를 참고하여 25 vol% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 50 vol% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 25 vol% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>의 혼합 용액을 사용하

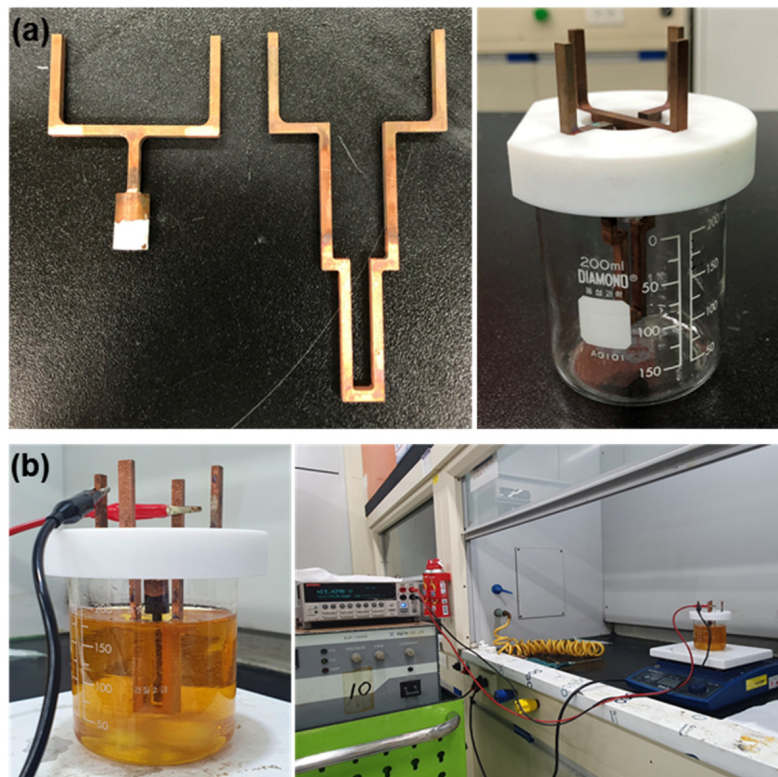
였다 [14]. 전해질 온도와 교반 유무에 따른 전위-전류 밀도 그래프의 차이를 비교하기 위하여 교반을 하지 않거나 200 RPM으로 교반을 하면서 전해질 온도를 60, 70, 80 °C로 증가하여 분극실험을 수행하였고, 교반속도의 영향을 평가하기 위해 0에서 400 RPM으로 교반속도를 증가하여 분극실험을 수행하였다. 분극실험의 상세한 실험 조건을 Table 2에 정리하였다.

**Table 2. Polarization test conditions**

Specimen	Type 316 stainless steel
Surface treatment	SiC sand paper and 1 μm Alumina polishing
Surface area	0.46 cm <sup>2</sup>
Electrolyte	25 vol% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 50 vol% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + 25 vol% C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>
Scan rate	1.667 mV/sec
Scan range	OCP ~ +2.3 V
Temperature	25, 60, 70, 80 °C
Stirring speed	0, 100, 200, 300, 400 RPM

**2.3 전해연마**

SSRT 시험편에 전해연마를 수행하기 위해서는 양극의 시험편 표면에 직접 닿지 않으면서 매우 가깝게 위치하는 음극이 필요하다. 양극의 SSRT 시험편을 고정하면서 표면에 가깝게 음극이 위치할 수 있는 구리 소재의 전해연마 실험용 지그를 Fig. 5와 같이 제작하였다. 양극에는 시험편을 고정할 수 있도록 나사 소켓 홀더 형태로 제작되었고, 음극은 전해연마면에 가까이 위치할 수 있도록 시험편 사이즈에 맞게 설계되었으며, 양극과 음극이 접촉하지 않으면서 단단히 고정되도록 테프론 재질의 거치대를 제작하여 비커에 고정한 후 양극과 음극이 비커 내에 위치할 수 있도록 하였다. 전압, 전류, 저항을 직류 전압으로 변환하여 인가하기 위해 디지털멀티미터(Keithley, 2651A)를 사용하였다. 전해질은 분극실험과 마찬가지로 25 vol% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 50 vol%



**Fig. 5. (a) Jigs for electropolishing of SSRT specimen and (b) electropolishing experiment**

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 25 vol% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub> 용액을 사용하였으며, 전류밀도, 전해질 온도, 전해연마 시간의 변화에 따른 전해연마 후의 표면 조도를 비교하였다. 분극실험 결과를 기반으로 하여 전해연마 시의 전류밀도는 0.05, 0.15, 0.5, 1, 2 A/cm<sup>2</sup>으로 설정하였고 전해질 온도는 40, 50, 60, 70, 80 °C로 설정하였으며 전해연마 시간은 120, 180, 240, 300 초로 설정하였다 [9,15]. 교반속도는 분극실험 결과에 따라 200 RPM으로 설정하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 분극실험 결과

전해질 온도와 교반 유무가 전위-전류밀도 곡선에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전해질 온도 60, 70, 80 °C에서 교반 유무에 따른 분극실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 분극곡선에서 활성화, 부동태, 과부동태 영역이 나타나는 것을 확인하였으며, 전해질 온도 60, 70 °C에서는 비슷한 경향의 결과가 도출되었고 80 °C에서는 전위에 따른 전류밀도 증가폭이 크게 나타났다. 전해질 온도 80 °C 조건은 plateau 구간이 다소 짧고 실험 시 기포발생 현상이 일부 나타나는 관계로 전해연마 온도로는 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 온도 증가에 따른 분극곡선의 변화보다 교반 유무에 따른 변화가 더 크게 나타났으며 이는 강제 교반으로 인한 전해질 내 이온의 이동도 증가에 기인한다. 전해질 온도 60, 70 °C에서 교반을 하였을 때 약 1.5 ~ 2.0 V 구간에서 안정적인 plateau 구간이 측정된 것을 바탕으로, 최적의 교반 속도를 도출하기 위해 전해질 온도 60, 70 °C 조건에서 교반 속도를 0, 100, 200, 300, 400 RPM으로 증가시키면서 분극실험을 수행하였다. 실험 결과 Fig. 7과 같이 전해질 온도 60, 70 °C 조건에서 모두 교반 속도

가 증가할수록 전류밀도가 상승하였다. 교반 속도 200 RPM부터 분극곡선의 진동이 발생하여 300, 400 RPM에서는 진동의 폭이 다소 크게 나타나며 부동태 영역도 짧아지므로 300 RPM 이상의 교반 속도는 적합하지 않은 것으로 판단하였고 200 RPM의 교반 속도가 적합한 것으로 평가하였다. 전해질 온도 60 °C 실험에서 가장 안정적인 분극곡선 양상을 보여주었고, 이에 따라 SSRT 시험편의 전해연마를 위한 최적 전해질 온도는 60 °C, 교반 속도는 200 RPM, 전류밀도는 약 0.15 A/cm<sup>2</sup>일 것으로 추정하였다.

#### 3.2 전해연마 실험 결과

분극실험을 통해 추정된 최적 전해연마 실험 조건을 바탕으로, 전해연마 시 실험 변수가 표면조도에 어떠한 영향을 미치는지 평가하기 위하여 연마 시간, 전류밀도,

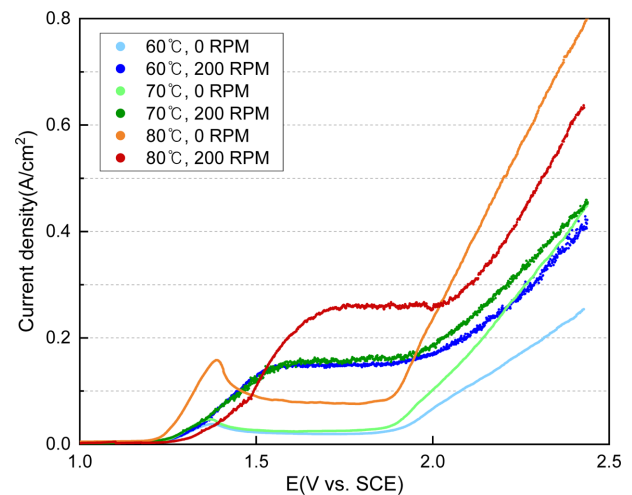


Fig. 6. Polarization curves by electrolyte temperature and stirring speed

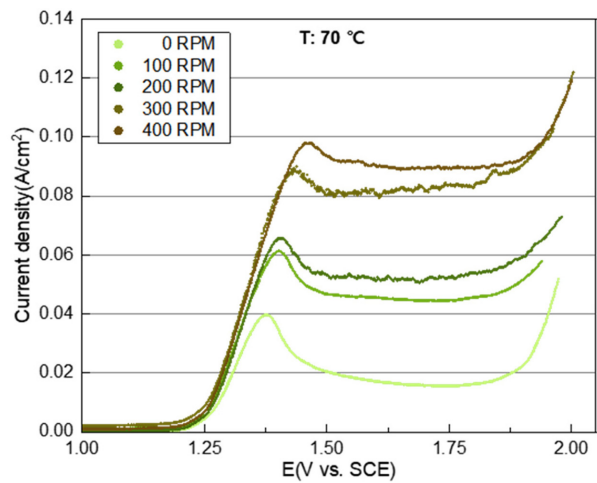
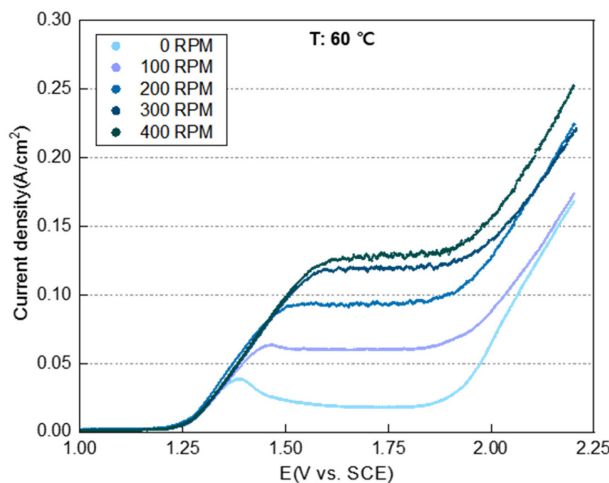


Fig. 7. Polarization curves by stirring speed

전해질 온도, 교반 속도를 변화시키면서 전해연마 실험을 수행하였고 연마 완료된 시험편의 표면 조도를 3D 표면 측정기(Nanosystem, NV3200)를 이용해 측정하였다. 먼저 분극 실험에서 도출된 최적 전해연마 조건인 전류밀도 0.15 A/cm<sup>2</sup>, 전해질 온도 60 °C, 교반 속도 200 RPM의 조건에서 연마시간을 120, 180, 240, 300초로 증가하면서 전해연마 실험을 수행한 후 표면조도를 측정하였다. Fig. 8의 측정 결과에서 120초의 연마 후에는

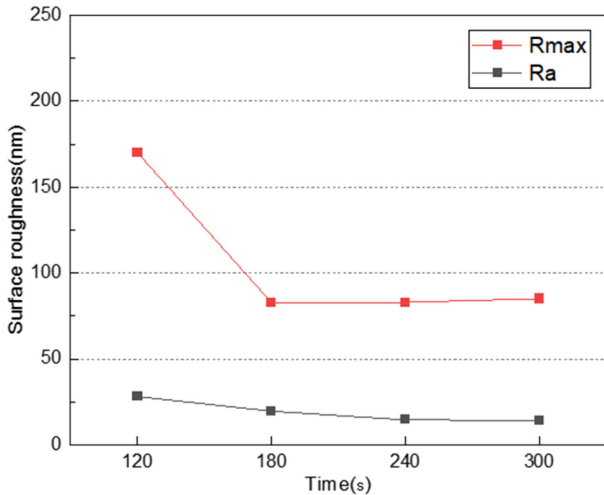


Fig. 8. Surface roughness measurement results by electropolishing time

R<sub>a</sub>, R<sub>max</sub> 값이 상대적으로 높게 나타났고, 180초 이상에서는 연마 시간이 길어져도 유사한 R<sub>a</sub>, R<sub>max</sub> 값이 측정되었다. 이는 전해연마가 진행되면서 시간에 따라 전류 공급이 증가하여 금속 표면의 돌출부를 지속적으로 용해시키면서 표면조도가 개선되다가 일정 수준이상 연마가 진행되면 큰 돌출부를 용해시킨 후 용해효과가 감소하여 조도 개선 효과가 크지 않은 것으로 판단된다 [17]. 연마 시간 180초 이상에서 비슷한 수준의 표면조도 결과를 나타냈고 R<sub>max</sub> 값은 180초에서 최소값을 보였으므로 최적의 전해연마 시간을 180초로 설정하였다.

전류밀도가 표면조도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전해질 온도 60 °C, 교반 속도 200 RPM, 연마 시간 180초의 조건에서 0.05, 0.15, 0.5, 1, 2 A/cm<sup>2</sup>로 전류밀도를 변화시키면서 전해연마 실험을 수행하였다. Fig. 9a와 같이 전류밀도에 따른 전해연마 수행 후의 표면을 광학현미경으로 관측한 결과 전류밀도 0.05 A/cm<sup>2</sup> 조건에서 표면 에칭이 관찰되었고 주사전자현미경(SEM)으로 에칭에 의해 구분된 결정립계를 확인하였다(Fig. 9c). 전류밀도 0.15 A/cm<sup>2</sup>, 0.5 A/cm<sup>2</sup> 조건에서는 전해연마가 잘 이루어졌으며, 1 A/cm<sup>2</sup> 이상에서는 과부동태 영역으로서 표면에서의 피팅 발생으로 인한 결함이 관측되었다. 표면조도 측정 결과 에칭이 발생한 0.05 A/cm<sup>2</sup>에서 R<sub>a</sub>, R<sub>max</sub> 값이 가장 높게 측정되었고 전해연마가 수행되는 0.15 A/cm<sup>2</sup>부터 과부동태 영역인 2 A/cm<sup>2</sup>까지는 20 nm 수준으로 R<sub>a</sub> 값이 유지되었으나 R<sub>max</sub> 값은

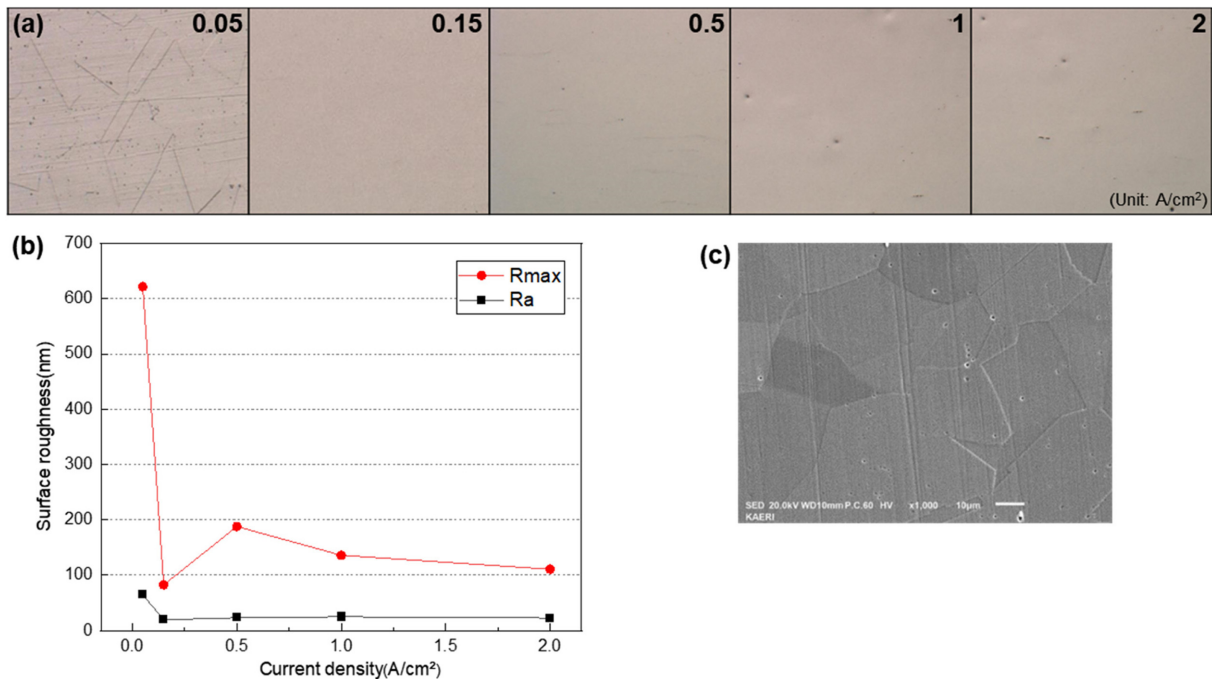


Fig. 9. Electropolishing results by current density: (a) OM observations, (b) surface roughness measurement and (c) SEM image of the etched surface at 0.05 A/cm<sup>2</sup>

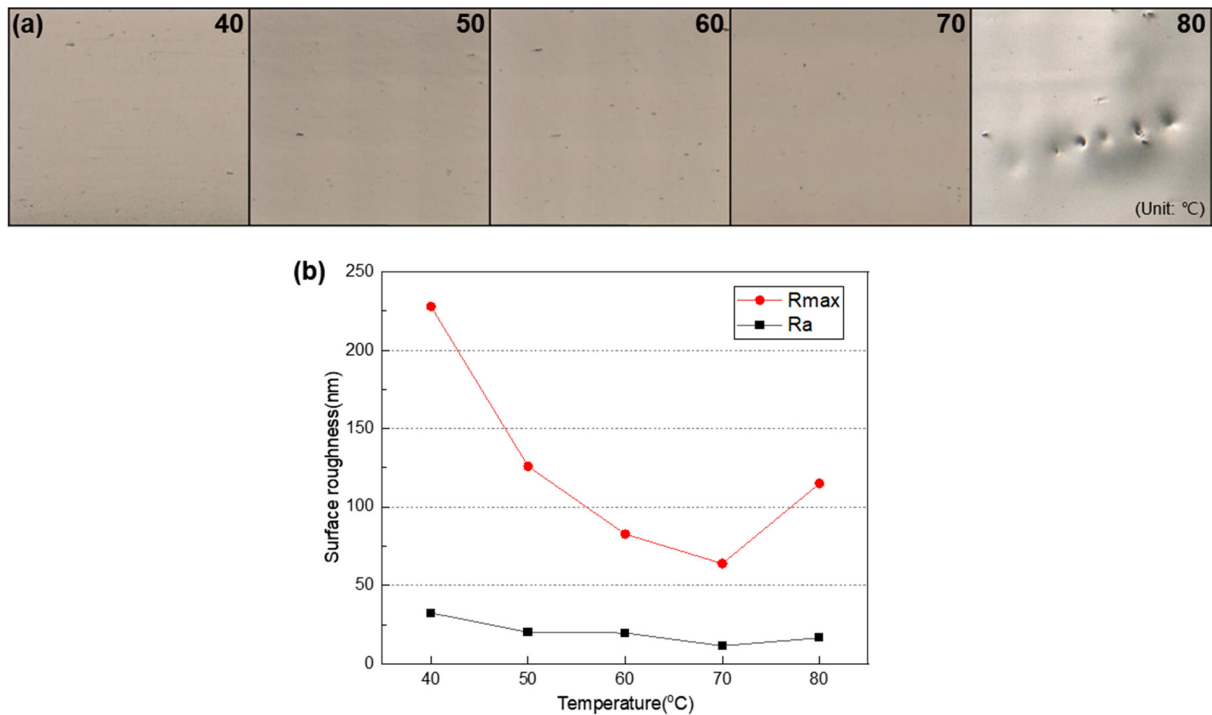


Fig. 10. Electropolishing results by electrolyte temperature: (a) OM observations and (b) surface roughness measurement

0.15 A/cm<sup>2</sup>보다 0.5 A/cm<sup>2</sup>이상에서 다소 높게 측정되었다. 과부동태 영역에서의 높은 전류밀도를 사용하면 짧은 시간 내에 전해연마가 충분히 이루어질 수 있기 때문에 [9] 측정 결과에서 0.5 A/cm<sup>2</sup>이상의 높은 전류밀도에서도 낮은 R<sub>a</sub>값이 도출되었으나, 피팅으로 인한 결함으로 R<sub>max</sub>값이 높게 측정된 것과 광학 관측에서 피팅 결함이 다수 관찰되는 것으로 보아 0.5 A/cm<sup>2</sup>이상의 전류밀도는 전해연마에 적합하지 않은 것으로 판단하였다. 따라서 최소의 R<sub>a</sub>, R<sub>max</sub>값을 나타내는 0.15 A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도가 최적 전해연마 조건으로 평가되었다.

전해질 온도에 따른 전해연마 후 표면조도의 비교를 위하여 전류밀도 0.15 A/cm<sup>2</sup>, 연마 시간 180초, 교반 속도 200 RPM의 조건에서 전해질 온도를 40, 50, 60, 70, 80 °C로 증가하면서 전해연마 실험을 수행하였다. Fig. 10a와 같이 전해연마 후 표면의 광학현미경 관측 결과 40 °C에서는 연마가 제대로 이뤄지지 않았으며 50 °C에서는 전해연마가 진행되나 그 정도가 부족하였다. 이는 전해질 온도가 낮으면 점성이 높아져 전해질 내에서 전류 흐름이 용이하지 않고 저항이 커져서 금속 표면의 돌출부를 용해시키는 용해 작용이 원활하게 일어나지 않기 때문이다 [16]. 전해질 온도 60, 70 °C에서는 우수한 전해연마 표면 상태를 보였으며 80 °C에서는 높은 온도로 인한 기포발생으로 인하여 표면 굴곡 및 결함이 관측되었다. 표면조도 측정 결과 Fig. 10b와 같이 전해질 온도가 40 °C에서 70 °C로 증가할수록 표면 조도 R<sub>a</sub>,

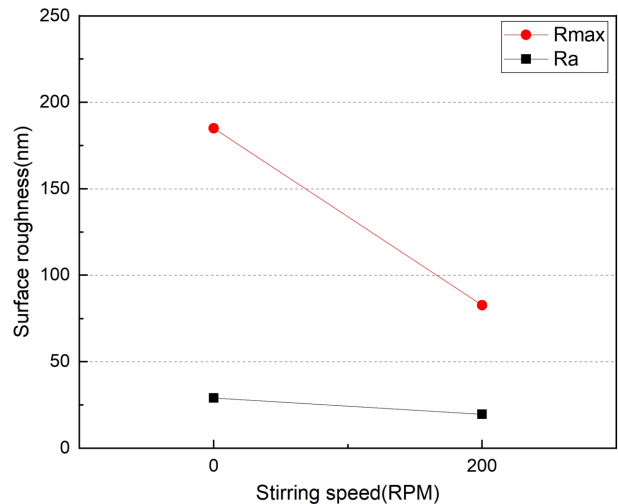


Fig. 11. Surface roughness measurement results by stirring speed

R<sub>max</sub>값이 작아졌으며 80 °C에서는 표면 굴곡으로 인해 R<sub>a</sub>, R<sub>max</sub>값이 증가하였다.

마지막으로 전류밀도 0.15 A/cm<sup>2</sup>, 전해질 온도 60 °C, 연마 시간 180초의 조건에서 200 RPM으로 교반한 경우와 교반하지 않은 경우의 전해연마 후 표면조도를 비교하였다. Fig. 11의 측정결과와 같이 교반 시 R<sub>a</sub>, R<sub>max</sub>값 모두 작아지며 특히 R<sub>max</sub>값이 큰 폭으로 작아진다. 따라서 SSRT 시험편의 전해연마를 위해서 200 RPM 수준의 교반이 수반되어야 하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 원자로 내부구조물 재료인 Type 316 스테인리스강의 IASCC 개시 특성 평가를 위한 SSRT 인장시험편의 전처리 방법인 전해연마의 적용을 위한 최적 실험 조건을 평가하고자 하였다. 분극실험을 통해 전해연마를 위한 최적 전류밀도는  $0.15 \text{ A/cm}^2$ , 전해질 온도는  $60^\circ\text{C}$ , 교반 속도는  $200 \text{ RPM}$ 으로 추정하였다. 해당 실험 조건을 바탕으로 연마시간을 증가시키면서 전해연마 실험을 수행한 결과 최적 연마시간은 180초인 것으로 판단되었다. 전류밀도의 변화에 따른 전해연마 실험 결과  $0.05 \text{ A/cm}^2$ 에서는 에칭이 관측되었고  $1 \text{ A/cm}^2$  이상에서는 피팅이 관찰되었으며  $0.15 \text{ A/cm}^2$ 에서 가장 낮은 표면조도가 측정되었다. 전해질 온도에 따른 전해연마 실험 결과  $40, 50^\circ\text{C}$ 에서는 연마가 잘 이루어지지 않았고  $80^\circ\text{C}$ 에서는 높은 온도로 인한 기포 발생으로 표면 조도가 높아졌으며  $60, 70^\circ\text{C}$ 에서는 낮은 표면조도가 측정되었다. 균일한 전해연마 품질을 얻기 위해서는 교반이 수반되어야 하는 것으로 판단되었고, 따라서 실험 결과를 바탕으로 한 Type 316 스테인리스강 SSRT 인장시험편의 최적 전해연마 특성은 연마시간 180초, 전류밀도  $0.15 \text{ A/cm}^2$ , 전해질 온도  $60^\circ\text{C}$ , 교반 속도  $200 \text{ RPM}$ 으로 평가되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-00143718).

#### References

1. S. S. Hwang, S. W. Kim, D. J. Kim, M. J. Choi, and Y. S. Lim, Material Degradation and its Management of Reactor Internals in PWR, *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, **12**, 1 (2016). Doi: <http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2016.12.1.001>
2. S. S. Hwang, M. J. Choi, S. W. Kim, and D. J. Kim, Review of Factors Affecting IASCC Initiation of Stainless Steel in PWRs : A Korean Study, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 210 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.4.210>
3. Y. S. Lim, D. J. Kim, S. S. Hwang, M. J. Choi, and S. W. Cho, Effects of Proton Irradiation on the Microstructure and Surface Oxidation Characteristics of Type 316 Stainless Steel, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 158 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.3.158>
4. Z. Jiao, J. T. Busby, and G. S. Was, Deformation Microstructure of Proton-irradiated Stainless Steels, *Journal of Nuclear Materials*, **361**, 218 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.12.012>
5. K. J. Stephenson and G. S. Was, Comparison of the Microstructure, Deformation and Crack Initiation Behavior of Austenitic Stainless Steel Irradiated in-reactor or with Protons, *Journal of Nuclear Materials*, **456**, 85 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.08.021>
6. P. Deng, Q. Peng, E. H. Han, W. Ke, and C. Sun, Proton Irradiation Assisted Localized Corrosion and Stress Corrosion Cracking in 304 Nuclear Grade Stainless Steel in Simulated Primary PWR Water, *Journal of Materials Science & Technology*, **65**, 61 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.068>
7. Z. U. Rahman, K. M. Deen, L. Cano, and W. Haider, The Effects of Parametric Changes in Electropolishing Process on Surface Properties of 316L Stainless Steel, *Applied Surface Science*, **410**, 432 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.081>
8. T. S. Hahn and A. R. Marder, Effect of Electropolishing Variables on the Current Density-Voltage Relationship, *Metallography*, **21**, 365 (1988). Doi: [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(88\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0026-0800(88)90001-8)
9. J. W. Park, E. S. Lee, and J.B. Song, *Proc. Korean Society of Machine Tool Engineers Conf.*, p. 186, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers (1998). <https://koreascience.kr/article/CFKO199811919741031.page>
10. S. J. Lee and J. J. Lai, The Effects of Electropolishing (EP) Process Parameters on Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **140**, 206 (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00785-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00785-4)
11. W. Han and F. Fang, Fundamental Aspects and Recent Developments in Electropolishing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **139**, 1 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2019.01.001>
12. H. S. Jun, M. S. Thesis, pp. 36-40, ChoSun University, Gwangju (2008).
13. C. L. Alexander, C. Liu, A. Alshanoon, R. M. Katona, R. G. Kelly, J. Carpenter, C. Bryan, and E. Schindelholz, Oxygen Reduction on Stainless Steel in Concentrated Chloride Media, *Journal of The Electrochemical Society*, **165**, 869 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1149/2.0181813jes>
14. W. Han and F. Fang, Two-step Electropolishing of 316L



- Stainless Steel in a Sulfuric Acid-free Electrolyte, *Journal of Materials Processing Technology*, **279**, 116 (2020).  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116558>
15. S. H. Kim, S. K. Lee, and E. S. Lee, *Proc. Korean Society for Precision Engineering Conf.*, p. 139, Korean Society for Precision Engineering (2010). <https://koreascience.kr/article/CFKO201030533376992.page>
  16. S. H. Kim, S. H. Lee, J. H. Cho, S. B. Kim, J. S. Choi, and C. H. Park, Electropolishing Characteristics of Stainless Steel for Industrial Application, *Journal of Korean Institute Surface Engineering*, **49**, 363 (2016). Doi: <http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.4.363>
  17. E. S. Lee, Machining Characteristics of the Electropolishing of Stainless Steel(STS316L), *The International Journal of Advances Manufacturing Technology*, **16**, 591 (2000). Doi: <https://doi.org/10.1007/s001700070049>