

다구찌 설계를 이용한 듀플렉스 스테인리스강 S31083용 DL-EPR 시험용액의 최적화

정광후¹ · 김성종^{2,†}

¹한국해양수산연수원 목포분원, 전라남도 목포시 고하대로 597
²목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학교로 91
(2021년 4월 9일 접수, 2021년 4월 14일 수정, 2021년 4월 15일 채택)

Optimization of DL-EPR Test Solution for Duplex Stainless Steel S31083 Using Taguchi Design

Kwang-Hu Jung¹ and Seong-Jong Kim^{2,†}

¹Mokpo branch, Korea institute of maritime and fisheries technology, Goha-daero, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58625, Korea

²Division of marine engineering, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received April 09, 2021; Revised April 14, 2021; Accepted April 15, 2021)

This study aims to optimize the DL-EPR test solution for duplex stainless steel S31083 using the Taguchi design. The test solution parameters applied to the Taguchi design are H_2SO_4 , NaCl, KSCN concentration, and temperature. In the experimental design, an orthogonal array of 4 levels 4 factor $L_{16}(4^4)$ was used. Output values for the orthogonal array were used for resolution (degree of sensitization) and selective etch (I_a) values. The optimal test solution conditions were selected by comparing the normalized S/N ratio for the two reaction properties. As a result, the H_2SO_4 and NaCl were identified as the main factors influencing the sensitivity measurement, but the delta statistics showed that the KSCN concentration and temperature had relatively low influence. The optimal condition was identified as 1.5 M H_2SO_4 +0.03 M KSCN+1.5M NaCl at 30 °C. The degree of sensitization presented a tendency to depend on the heat treatment temperature and time in the optimal test solution. This investigation confirmed the possibility of optimizing the experiment solution for the DL-EPR test of stainless steel using the Taguchi technique.

Keywords: Taguchi design, Duplex stainless steel, DL-EPR test, Test solution optimization

1. 서론

입계 부식(Intergranular corrosion, IGC)은 스테인리스강에서 발생하는 가장 공격적인 부식 형태이다. IGC는 다양한 환경적 요인과 구조적 변화에 따라 발생할 수 있지만, 주요 원인은 예민화(sensitization) 현상이다. 예민화는 스테인리스강이 일정 온도 범위에서 열화되거나 용접 작업 과정에서 발생한다.

예민화는 결정립계에 Cr-탄화물(carbide)과 같은 2차상(secondary phase)이 형성됨에 따라 주변부에 Cr 및 Mo의 고갈을 유발하며 [1], 이에 따라 해당 부분의 내식성은 저하된다. 이에 따라 고갈 영역은 사용환경에서 우

선적으로 부식이 발생하며, 결과적으로 입계부식으로 진행된다.

IGC를 평가하는 방법으로는 옥살산(oxalic acid) 시험, Strauss 시험, 그리고 double-loop electrochemical potentiokinetic reactivation (DL-EPR) 시험 등과 같은 다양한 표준이 존재한다 [2]. 이 중 DL-EPR 시험은 가장 정량적으로 예민화도를 측정할 수 있는 방법이다. 오스테나이트계 304 스테인리스강에 대한 표준화된 시험법이 존재한다. 그러나 각 스테인리스강은 미세조직과 화학조성이 다르기 때문에, 동일 시험법을 통한 예민화도 측정은 불가능하다. 이를 해결하기 위해 많은 연구자들이 각 스테인리스강을 위한 개선된 시험법을 제안하고 있는 실정이다. Mojtaba Momeni *et al.* [3]은 스테인리스 304강의 예민화도 측정 해상도 향상을 위한 개선된 DL-EPR 시험조건을 제안하였다. Gonzalez

[†]Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

정광후: 교수, 김성종: 교수

et al. [4]은 UNS N06690강의 예민화도 측정을 위한 DL-EPR 시험을 제안하였다. 이와 같이 다양한 강종에 대한 새로운 DL-EPR 시험법에 대한 연구가 진행되고 있다.

듀플렉스(duplex) 스테인리스강은 금속 조직학적으로 페라이트와 오스테나이트(austenite) 상이 동등한 비율로 혼합된 미세조직을 가진 강종이다 [5]. 1930년에 최초로 개발되어 해양환경산업, 석유화학산업, 그리고 각종 탈황설비 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이에 따라 최근 듀플렉스 스테인리스강에 대한 DL-EPR 시험법 연구가 많이 진행되고 있다. Hong *et al.* [6]과 Sun *et al.* [7]은 듀플렉스 스테인리스강에 대한 예민화 측정에 관한 연구와 개선된 시험법을 제안하였다.

DL-EPR 시험법 개선에 있어 영향을 미치는 변수에는 수용액 성분 그리고 분극 속도 등이 있다. 그 중 수용액 조성은 측정값의 해상도에 영향을 미치는 핵심 인자로 고려되고 있으며, 수용액 최적화를 위한 다양한 연구가 진행되었다. 그러나 예민화도는 다중 매개 변수를 가지는 반응값이기 때문에, 개별적인 요인을 연구하는데 매우 많은 횟수의 시험을 요구하고 있다.

이와 같이 다중 매개 변수에 영향을 받는 반응값에 대한 문제를 해결하기 위해 다구찌(Taguchi) 설계가 다양한 분야에서 사용되고 있다. 다구찌 설계의 최종 목적은 성능 특성에 대한 잡음의 영향이 가장 적은 매개 변수의 선정하는 것이다 [3]. 이 과정은 매개 변수의 설정을 체계적으로 변경하고, 각 테스트 결과에 대한 잡음요인의 영향을 비교하는 것이다. 결론적으로 최소한의 실험을 통해 사용자가 요구하는 특성값을 구하는 것이며, 이를 통해 최소한의 실험으로 시간과 비용을 줄일 수 있다.

본 연구의 목적은 듀플렉스 스테인리스강의 예민화 측정을 위한 DL-EPR 시험 수용액을 최적화하는 것이다. 다중 매개 변수에 대한 개별적 분석 및 해석에서 발생하는 실험횟수와 비용을 최소화하기 위해 다구찌 설계를 적용하였다.

2. 연구방법

Table 1. Designed factors and their levels

Parameters	Level			
	1	2	3	4
A: H ₂ SO ₄ concentration, mol (sulfuric acid 98%, Daejung chemical)	0.5	1	1.5	2
B: KSCN concentration, mol (potassium thiocyanate 99%, shinyo chemical)	0.01	0.02	0.03	0.04
C: NaCl concentration, mol (sodium chloride 99.5%, Daejung chemical)	0.5	1	1.5	2.0
D: Temperature, °C	20	25	30	35

2.1 재료 및 열처리

본 연구에 사용된 듀플렉스 스테인리스강 S31803의 화학조성은 0.02 wt% C, 0.27 wt% Si, 1.8 wt% Mn, 0.04 wt% P, 0.001 wt% S, 22.54 wt% Cr, 3.25 wt% Mo, 5.54 wt% Ni, 0.15 wt% Cu, 0.15 wt% N, 그리고 나머지는 Fe이다. 등온 열화는 일정온도(700 °C, 750 °C, 800 °C)로 승온된 전기 열처리로부터 최대 12시간까지 수행하였으며, 열처리 후 시편은 상온의 청수에서 퀀칭 처리하였다. 열처리 판재는 10 mm × 10 mm × 4 mm의 크기를 가진 미소 시편으로 가공하였으며, 열처리 과정에서 생성된 표면 스케일 제거를 위해 표면 연마를 수행하였다.

2.2 Double loop electrochemical potentiokinetic reactivation 시험

DL-EPR 시험은 작동전극, 대극, 그리고 기준전극으로 구성된 3 전극 부식셀과 전기화학측정 장비(VSP potentiostat, Biologic)를 통해 수행하였다. 작동전극용 열처리 시편은 #2000 연마지까지 표면을 연마하였으며, 1 µm 알루미늄 파우더를 사용하여 경면 연마를 수행하였다. 시험 전 각 시편은 표면 이물질 및 유분 제거를 위해 증류수와 에탄올에서 초음파 세척을 실시하였다. 작동전극의 시편은 자체 제작한 거치대를 사용하여 반응면적 1 cm²을 노출시켰다. 대극과 기준전극은 20 mm × 20 mm 크기의 백금망과 Ag/AgCl(sat. by KCl)을 사용하였다. DL-EPR 시험에서 사용된 수용액은 Table 1에 제시된 L₁₆(4⁴) 직교배열표에 따라 제조되었다. 시험 공정에서 개로전위(open circuit potential)는 시편을 수용액에 2분간 침지 후 계측하였다. 분극은 기준전위 기준 +300 mV에 도달된 후 개로전위까지 역방향으로 수행하였다. 분극속도는 1.667 mV/s로 동일하다. 전기화학 측정값에 대한 신뢰성 확보를 위해 각 실험은 2회 이상 수행하였다. DL-EPR 시험을 통한 예민화도는 활성화구간의 전류밀도정점(I_a)과 재활성화구간의 전류밀도정점(I_r)을 계측하여, equation (1)로부터 산출하였다.

$$DOS = I_r / I_a \times 100 \quad (1)$$

2.3 다 반응특성 다구찌 설계

DL-EPR 시험용액의 최적화 과정에서 사용된 다구찌 설계는 MINITAP® 소프트웨어 통해 구동되었다. 다구찌 설계에서 실험조건 행렬은 표준화된 직교배열표를 사용하였다. DL-EPR 시험을 통한 스테인리스강의 예민화도 측정 시 해상도와 재현성에 영향을 미치는 시험용액의 주요 인자는 H_2SO_4 농도(A), Potassium thiocyanate (이하 KSCN) 농도(B), NaCl 농도(C), 그리고 작동온도(D)이며, 각 인자는 4수준으로 구성하였다. 일반적으로 DL-EPR 시험을 통한 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강과 듀플렉스 스테인리스강의 예민화도 평가에서 부동태 파괴제(dep passivator) 역할의 HCl과 NaCl 주로 사용된다. 사전연구 [8,9]에 의하면, 수용액에 첨가된 HCl과 NaCl은 재 활성화 과정에서 크롬 고갈 영역에서 부동태 피막의 손상을 유발한다. 따라서 상대적으로 우수한 내식성을 가진 일부 스테인리스강과 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강의 IGC에 대한 감수성을 정량적으로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 표준화된 수용액 조성(H_2SO_4 , KSCN)에 NaCl을 첨가하였다. 그 이유는 HCl은 용액의 pH 변화를 유발하고, 이는 통계적 기법에서 제어되지 않는 외부인자로 작용할 수 있기 때문이다. 상세한 인자와 수준, 그리고 인자수준 조절에 사용된 화학약품에 대한 상세사항은 Table 1과 같다. 인자수준은 ASTM

Table 2. L_{16} orthogonal array with design factors and their levels

Exp. No.	Factors			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

G108 [10]과 ISO 12732 [11]에서 제시한 표준 시험용액과 사전연구 [12,13]를 통해 선정었다. 4인자 4수준에 대한 완전요인설계에서 필요한 시험은 총 256회(4^4)이다. 그러나 다구찌 설계와 직교배열표를 사용하면, 시험 횟수를 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 $L_{16}(4^4)$ 직교배열을 사용하였으며, 그 상세는 Table 2에 제시하였다. 다구찌 설계에서 개선을 위한 정도(손실함수)를 나타내는 측정치로 S/N 비(signal to noise ratio)가 사용된다. S/N 비는 그 목적에 따라 망대(higher than better), 망소(lower the better), 그리고 공칭(nominal the better) 3가지로 분류된다. 본 연구에서는 수용액의 최적화를 위해 각 특성치를 망대와 망소 특성으로 변환하였다. 직교배열표에 제시된 모든 실험은 750 °C에서 3시간 등온 열화된 시편을 사용하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 DL-EPR 곡선

듀플렉스 스테인리스강은 750 °C 노출됨에 따라 입계 주변의 금속 화합물(σ , χ , Laves)이 석출되는 예민화 현상이 발생한다 [14,15]. DL-EPR 시험에서, I_a 는 활성화 구간에서 전체 면적(입계, 입내)에서 발생하는 산화반응에 대한 전류밀도값이며, I_r 는 재활성화 구간에서 상대적으로 내식성이 취약한 국부적 부위(입계)의 부식손상에 대한 값이다 [16]. 따라서 열처리된 시료에 대한 DL-EPR 시험에서 명확한 I_a 와 I_r 값이 나타나지 않는 것은 평가 대상에 대한 수용액의 특성(부식성)이 적절하지 않다는 것을 의미한다. Fig. 1은 직교배열표의 일부 조건에 대한 DL-EPR 시험 곡선을 나타낸 것이다. 모든 조

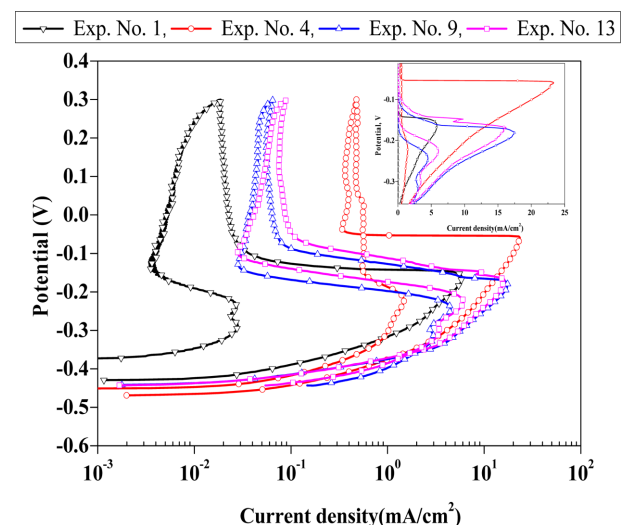


Fig. 1. DL-EPR curves for some experimental condition in L_{16} orthogonal array

전에서 전류밀도 정점(peak) I_a 와 I_r 이 관찰되었으나, 그 값은 매우 큰 차이를 나타냈다. 각 인자수준이 가장 낮은 조건 1과 상대적으로 높은 조건 13에 대한 예민화도는 1과 35.59로 매우 큰 차이를 나타냈다. 또한, 각 시험용액의 조건에 따라 부동태 범위와 전류밀도 정점은 다른 전위에서 나타났다. 이는 각 인자수준(수용액 조성)이 측정 해상도와 전기화학적 거동에 영향성을 미친다는 것을 의미한다.

3.2 다구찌 설계

Table 3은 직교배열표에 따라 수행된 DL-EPR 시험의 반응값과 그에 대한 S/N(signal to noise) 비를 나타낸 것이다. 일반적으로 DL-EPR 시험을 이용한 예민화도 측정 시, 결과값에 대한 해상도, 그리고 선택적 예칭(예민화 부위에 대한 적절한 부식성)이 만족되어야 한다 [16]. 단순 예민화 크기에 대한 망대 특성(해상도)을 통해 조건이 선정될 경우, 선택적 예칭성을 만족시키는 것이 어렵다. DL-EPR에서 선택적 예칭성은 용액의 자체의 부식성에 기인한다. 예를 들어, 시험용액의 부식성이 너무 약한 경우, 명확한 I_a 와 I_r 이 나타나지 않는다 [17]. 반면, 수용액의 부식성이 너무 강한 경우, 예민화도와 관계없이 전체 표면에서 부식반응이 발생함에 따라 매우 큰 예민화 값이 측정될 수 있다. DL-EPR시험에서 선택적

예칭성은 시료의 예민화에 영향을 받지 않는 I_a 값으로 간주할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 예민화도(해상도)와 I_a (선택적 예칭성)의 다 반응특성을 사용하여, 최적의 수용액 조건을 선정하였다. 다구찌 설계에서 S/N 비는 해결하고자 하는 문제에 따라 다양하게 정의된다. 높은 해상도 특성을 선정하기 위해, 예민화도(해상도)는 equation (2)과 같이 망대특성의 S/N 비로 변환하였다. 적절한 수준의 선택적 예칭성을 선정하기 위해, I_a 는 equation (3)과 같이 망소특성의 S/N 비로 변환하였다.

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_i \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (2)$$

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_i y_i^2\right) \quad (3)$$

여기에서 y 는 반응특성(예민화도, I_a)이며, n 은 각 실험에 대한 반복횟수이다. 직교배열에서 각 인자와 수준은 독립적이기 때문에, 각기 다른 인자 수준에 대한 영향도를 확인할 수 있다.

Table 4는 예민화도와 I_a 값의 S/N 비를 통해 계산된 델타통계 결과를 나타낸 것이다. 델타 통계량은 각 요인의 평균값 중 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이를 나타내며, 그 값은 반응특성에 대한 영향도를 나타낸다. S/N 비에 대한 델타통계에서 예민화도에 가장 큰 영향

Table 3. Experimental results on the L_{16} orthogonal array

No.	Exp.	Larger than better		Smaller than better	
		DOS, %	S/N ratio	I_w , mA/cm ²	S/N ratio
1	1		0	5.864	-15.3639
2	0.58216		0	5.325	-14.5264
3	2.204872	6.867669		13.833	-22.8183
4	6.338564	16.03982		23.3474	-27.3648
5	1.218248	1.714713		7.716	-17.7478
6	2.544272	8.111269		12.7644	-22.12
7	7.855204	17.90315		11.05	-20.8672
8	10.07958	20.06884		17.342	-24.782
9	25.78674	28.22793		17.509	-24.8652
10	33.01904	30.37529		21.742	-26.746
11	1.321714	2.422749		6.885	-16.7581
12	2.463926	7.832553		7.346	-17.321
13	37.59032	31.50152		16.193	-24.1865
14	13.45238	22.57598		14.28	-23.0946
15	26.46807	28.45444		26.633	-28.5084
16	7.856258	17.90431		16.14	-24.1581

Table 4. Response table of mean S/N ratio for DOS and I_a

Larger than better				
Level	Factors			
	A	B	C	D
1	4.552	15.361	7.11	12.078
2	11.949	14.091	8.326	12.323
3	17.215	13.912	19.435	14.215
4	25.109	15.461	23.955	20.208
Delta	20.557	1.549	16.845	8.13
Rank	1	4	2	3
Smaller than better				
Level	Factors			
	A	B	C	D
1	-20.02	-20.54	-19.6	-19.16
2	-21.38	-21.62	-19.53	-20.06
3	-21.42	-22.24	-23.89	-22.87
4	-24.99	-23.41	-24.79	-25.71
Delta	4.97	2.87	5.27	6.55
Rank	3	4	2	1

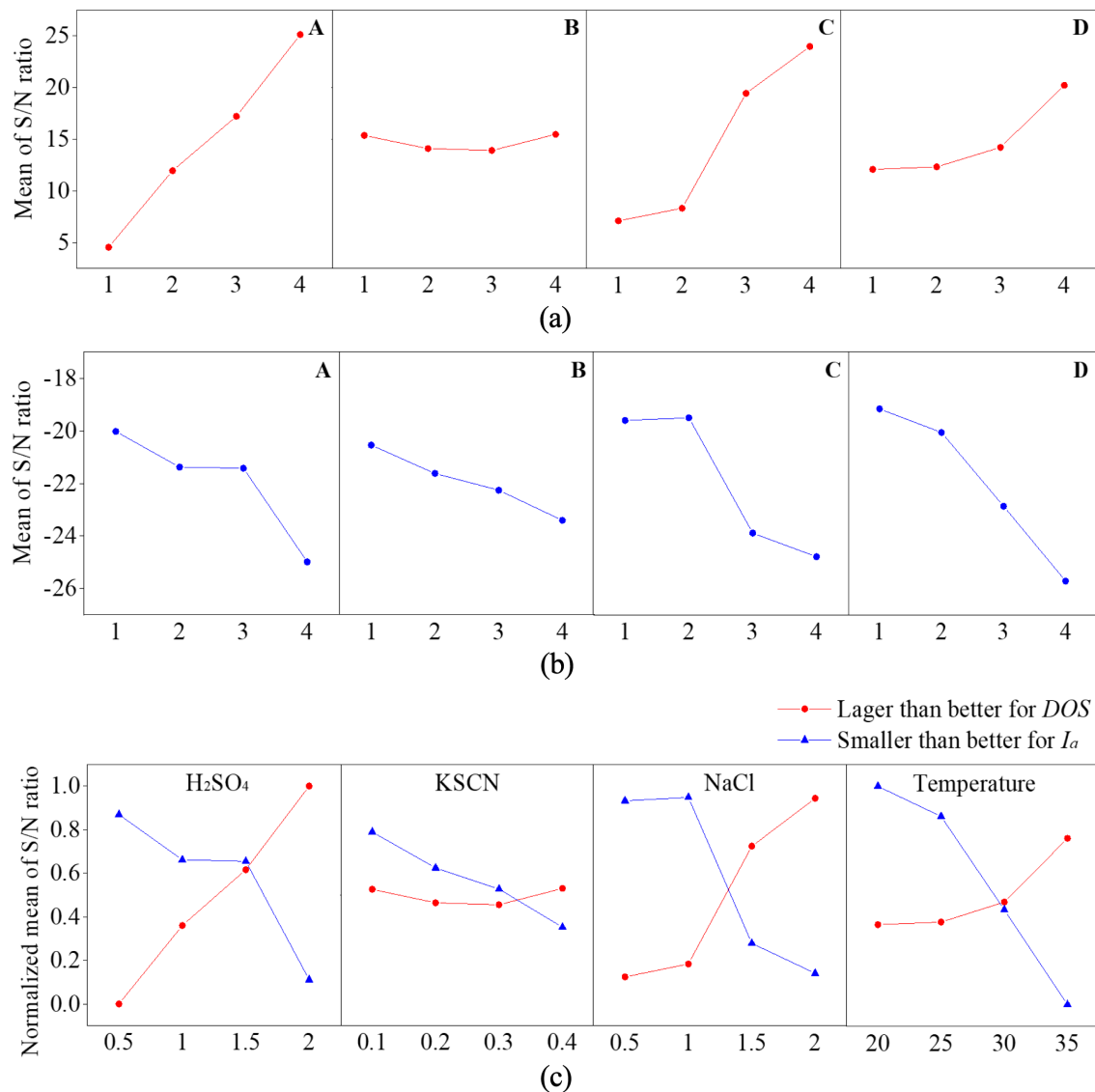


Fig. 2. Main effect plot for S/N ratio: a) DOS is larger than better, b) I_a is smaller than better, c) normalized S/N ratio for Fig. 2(a,b)

을 주는 인자는 A (H₂SO₄), C (NaCl), B (KSCN), 그리고 D(온도) 순으로 확인되었으며, H₂SO₄와 NaCl 수준에 따른 반응값의 변동량이 전체 변동량의 대부분을 차지했다. 따라서 DL-EPR 시험법을 이용한 S31803 강의 예민화도 평가용액에서 H₂SO₄와 NaCl 농도의 조절이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 특히, NaCl은 2 수준(1 M) 이상에서 예민화도와 I_a 에 대한 매우 큰 감응성을 나타냈다. 이는 예민화도 평가를 위한 NaCl의 최소농도가 1 M 이상임을 나타낸다. I_a 에 가장 큰 영향을 나타내는 인자는 B (KSCN), A (H₂SO₄), C (NaCl), 그리고 D(온도) 순으로 확인되었으나, S/N 비 변동량은 명확한 차이를 나타내지 않았다.

Fig. 2는 반응특성에 대한 각 인자수준의 평균 S/N 비를 나타낸 것이다. Fig. 2a에서 각 인자수준이 높아짐에 따라 평균 S/N가 증가하는 경향을 나타냈다. 단순히 예민화도 특성을 고려한 최적 수준조합은 A4B4C4D4이다. 그러나 DL-EPR 시험에서 최적의 수용액은 시험값에 대한 해상도와 선택적 예민성을 동시에 만족시켜야 한다. 따라서, 예민화도의 망대 특성과 I_a 의 망소특성이 적절한 특성을 나타내는 수준조합을 요구한다. 따라서 높은 해상도와 적절한 선택적 예민성을 가지는 새로운 최적 수준을 선정하기 위해, Fig. 2a, b의 S/N 비를 equation (4)와 같이 0과 1 사이의 값을 가지도록 정규화하였다.

$$X = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (4)$$

여기에서 X 는 정규화된 S/N 비, x 는 정규화되지 않은 S/N 비, x_{\max} 과 x_{\min} 는 각 S/N 비의 최대·최소값이다. Fig. 2c는 두 특성의 정규화된 S/N 비를 그래프를 동시에 나타낸 것이다. 여기에서, 각 인자 수준에서 정규화된 S/N 비의 차이가 클수록 하나의 반응특성으로 편향된 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2c에서 각 인자에서 정규화된 S/N 비의 각 편차가 가장 작은(그래프의 교점) 수준을 최적 수준으로 선정하였다. 두 특성의 S/N 비를 고려한 새로운 최적화 조건은 A3B3C3D3이다.

3.3 검증시험

선정된 수용액의 성능은 750 °C에서 열처리된 S31803 강에 대한 DL-EPR 시험을 통해 확인하였다. Fig. 3은 단순 예민화도에 대한 망대특성을 통해 선정된 조건(A4B4C4D4)과 최적화된 조건(A3B3C3D3)에서 수행된 DL-EPR 시험 결과값을 나타낸 것이다. A4B4C4D4 조건에서는 미 열처리된 시편에서 약 1.6%의 예민화도를 나타냈으며, 열처리 시간이 경과함에 따라 예민화도는 급격하게 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 용액의 강한 부식성으로 인해 재활성 구간에서 예민화 부위에 대한 선택적 에칭과 추가적인 표면 용해반응이 발생한 것으로 사료된다. 또한, 타 사전연구결과와도 비교해볼 때

매우 큰 결과값이다 [6,18]. 반면, 최적 조건에서는 미 열화 시편에서 1% 이하로 예민화도가 나타나지 않았으며, 열처리 시간 경과에 따라 예민화도는 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 시간에 따른 예민화도 증가는 시험용액의 적정한 선택적 에칭성에 기인한 것이며, 6 시간 열화 시편의 경우, A3B3C3D3 조건에서 A4B4C4D4 조건보다 큰 예민화도가 계속됨에 따라 높은 해상도를 확인할 수 있었다.

위와 같이 각 조건의 특성은 Fig. 4의 표면 입계부식

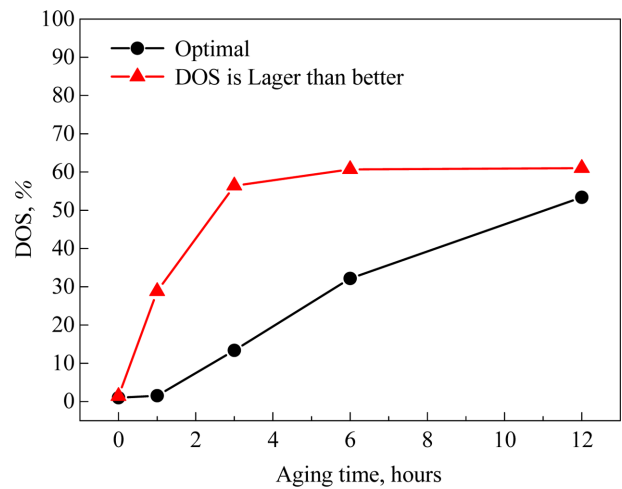


Fig. 3. DL-EPR test value(DOS) with various conditions

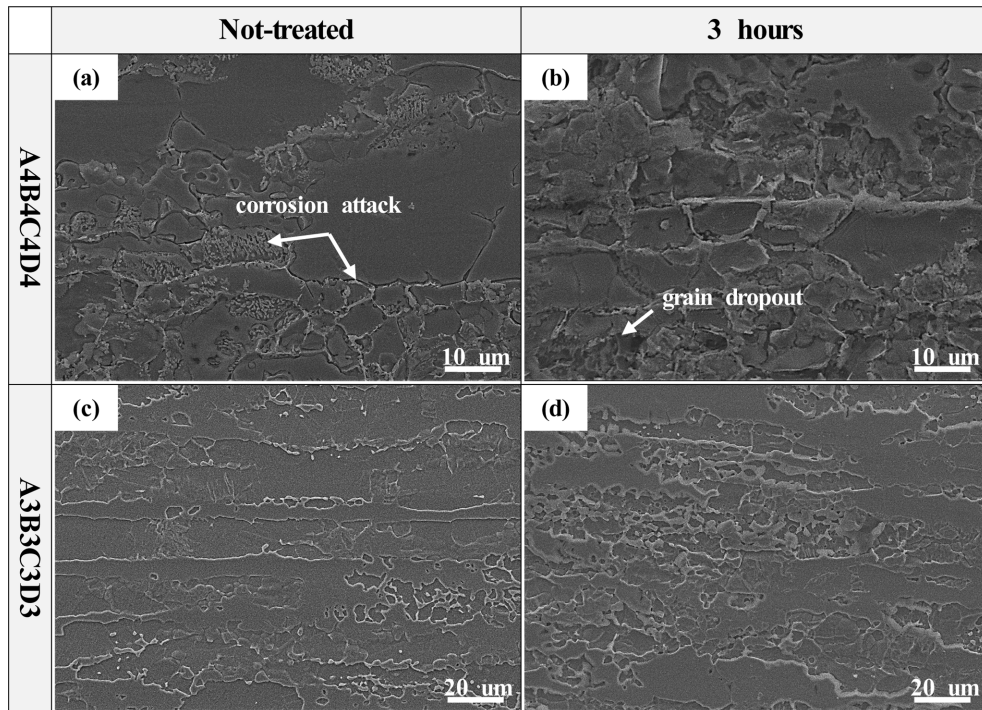


Fig. 4. Surface morphologies after DL-EPR test: a) not-treated specimen under A4B4C4D4, b) 3 hours specimen under A4B4C4D4, c) not-treated specimen under A3B3C3D3, d) 3 hours specimen under A3B3C3D3

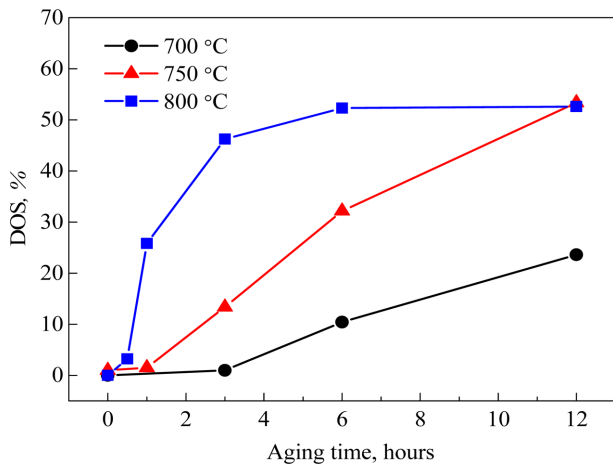


Fig. 5. DL-EPR test values with various temperature and time under modified optimum condition

(intergranular corrosion, IGC) 손상부를 통해 확인되었다. 단일 특성에 대한 최적 조건(A4B4C4D4)의 경우(Fig. 4a), 미 열화 시편의 일부에서 입계부식과 입내 공식 손상이 관찰되었다. 3시간 열처리 시편에서는 극심한 입계손상으로 인해 결정탈리(grain dropout) 현상이 발생하였다(Fig. 4b). 결정탈리 현상은 화학용액 침적시험에서 흔히 관찰되는 입계손상의 대표적인 증거이다 [19,20]. 그러나 평가 대상을 고려한 적절한 조건에서 수행된 DL-EPR 시험에서는 거의 관찰되지 않는다. 최적조건(A3B3C3D3)의 경우, 미 열화시편은 에칭효과에 의한 미세조직이 식별되었으나(Fig. 4c), 입계부식은 관찰되지 않으며, 3시간 열처리 시편에서는 입계 부위에 대한 선택적 부식손상이 관찰되었다(Fig. 4d).

4. 결론

본 연구에서는 다 반응특성 다구찌 설계를 이용한 듀플렉스 스테인리스강 S31803에 대한 DL-EPR 시험용액의 매개변수(H_2SO_4 , KSCN, NaCl, 온도) 최적화를 수행하였다.

DL-EPR 시험에서 측정값에 영향을 미치는 주요 인자는 H_2SO_4 농도와 NaCl로 확인되었으며, KSCN 농도와 온도는 비교적 낮은 영향성을 나타냈다. 특히, NaCl은 최소 1M 이상에서 예민화도에 대한 감응성을 나타냈다. 예민화도와 선택적 에칭성의 두 반응특성을 고려한 S31803 용 DL-EPR 수용액은 1.5M H_2SO_4 + 0.03M KSCN + 1.5M NaCl이며, 작동온도는 30 °C로 확인되었다. 최적 용액에서 수행된 검증시험 결과, 예민화도는 온도와 시간에 따른 경향성을 나타냈으며, 다구찌 설계를 이용한 DL-EPR 시험용액 선정에 대한 가능성을 확인할 수 있었다.

Acknowledgements

이 논문은 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박 배출 대기오염 물질 동시저감 후처리시스템 실증 및 인증체계 구축).

Reference

1. Y. E. Kim, J. S. Park, D. M. Cho, S. G. Hong, and S. J. Kim, Analysis of the Corrosion Behavior According to the Characteristics of Sigma Phase Formed in Super Austenitic Stainless Steel, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 203 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.203>
2. H. P. Kim and D. J. Kim, Intergranular Corrosion of Stainless Steel, *Corrosion Science and Technology*, **17**, 183 (2018). Doi: <http://dx.doi.org/10.14773/cst.2018.17.4.183>
3. M. Momeni, M. H. Moayed, and A. Davoodi, Tuning DOS measuring parameters based on double-loop EPR in H_2SO_4 containing KSCN by Taguchi method, *Corrosion Science*, **52**, 2653 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.015>
4. M. E. Gonzalez, M. A. Rodríguez, M. A. Kappes, R. M. Carranza, and R. B. Rebak, Optimization of the Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Method for Detecting Sensitization of Nickel Alloy 690, *Corrosion*, **74**, 210 (2017). Doi: <https://doi.org/10.5006/2562>
5. S. K. Ahn, J. S. Kim, and K. T. Kim, Development Trends of Duplex Stainless Steels for the Process Industries and It's Weldability, *Journal of Welding and Joining*, **28**, 22 (2010).
6. J. Hong, D. Han, H. Tan, J. Li, and Y. Jiang, Evaluation of aged duplex stainless steel UNS S32750 susceptibility to intergranular corrosion by optimized double loop electrochemical potentiokinetic reactivation method, *Corrosion Science*, **68**, 249 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.024>
7. L. Sun, Y. Sun, C. Lv, Y. Liu, N. Dai, Y. Jiang, and D. D. Macdonald, Studies on the degree of sensitization of hyper-duplex stainless steel 2707 at 900 °C using a modified DL-EPR test, *Corrosion Science*, **185**, 109432 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109432>
8. H. B. Li, Z. H. Jiang, Z. R. Zhang, Y. Cao, and Y. Yang, Intergranular corrosion behavior of high nitrogen austenitic stainless steel, *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, **16**, 654 (2009). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1674-4799\(10\)60008-8](https://doi.org/10.1016/S1674-4799(10)60008-8)
9. N. Lopez, M. Cid, M. Puiggali, I. Azkarate, and A. Pelayo, Application of double loop electrochemical potentiodynamic reactivation test to austenitic and duplex stainless steels, *Materials Science and Engineering A*, **229**, 123 (1997). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00008-7)

10. ASTM G108-94, Standard Test Method for Electrochemical Reactivation (EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels (1994).
11. ISO 12732, corrosion of metals and alloys-electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Cihal's method) (2006).
12. S. Zhang, Z. Jiang, H. Li, H. Feng, and B. Zhang, Detection of susceptibility to intergranular corrosion of aged super austenitic stainless steel S32654 by a modified electrochemical potentiokinetic reactivation method, *Journal of Alloys and Compounds*, **695**, 3083 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.342>
13. S. Zhang, H. Li, Z. Jiang, B. Zhang, Z. Li, J. Wu, S. Fan H. Feng, and H. Zhu, Effects of Cr and Mo on precipitation behavior and associated intergranular corrosion susceptibility of superaustenitic stainless steel S32654, *Materials Characterization*, **152**, 141 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.04.010>
14. N. Ebrahimi, M. Momeni, M. H. Moayed and A. Davoodi, Correlation between critical pitting temperature and degree of sensitisation on alloy 2205 duplex stainless steel, *Corrosion Science*, **53**, 637 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.10.009>
15. V. S. Moura, L. D. Lima, J. M. Pardal, A. Y. Kina, R. R. A. Corte, and S. S. M. Tavares, Influence of microstructure on the corrosion resistance of the duplex stainless steel UNS S31803, *Materials Characterization*, **59**, 1127 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.09.002>
16. B. Deng, Y. Jiang, J. Xu, T. Sun, J. Gao, L. Zhang, W. Zhang, and J. Li, Application of the modified electrochemical potentiodynamic reactivation method to detect susceptibility to intergranular corrosion of a newly developed lean duplex stainless steel LDX2101, *Corrosion Science*, **52**, 969 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.020>
17. M. F. Maday, A. Mignone, and M. Vittori, The application of the electrochemical potentiokinetic reactivation method for detecting sensitization in inconel 600. The influence of some testing parameters, *Corrosion Science*, **28**, 887 (1988). Doi: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(88\)90037-6](https://doi.org/10.1016/0010-938X(88)90037-6)
18. J. Gong, Y. M. Jiang, B. Deng, J. L. Xu, J. P. Hu, and J. Li, Evaluation of intergranular corrosion susceptibility of UNS S31803 duplex stainless steel with an optimized double loop electrochemical potentiokinetic reactivation method, *Electrochimica Acta*, **55**, 5077 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.03.086>
19. J. K. Kim, Y. H. Kim, S. H. Uhm, J. S. Lee, and K. Y. Kim, Intergranular corrosion of Ti-stabilized 11 wt% Cr ferritic stainless steel for automotive exhaust systems, *Corrosion Science*, **51**, 2716 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.07.008>
20. S. Kumar, B. S. Prasad, V. Kain, and J. Reddy, Methods for making alloy 600 resistant to sensitization and intergranular corrosion, *Corrosion Science*, **70**, 55 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.12.021>