

불특정 공식손상을 가진 316L 스테인리스강의 기계적 물성치 예측을 위한 다중선형회귀 적용

정광후¹ · 김성종^{2,†}

¹목포해양대학교 승선실습과정부, 전남 목포시 해양대학교로 91

²목포해양대학교 기관시스템공학부, 전남 목포시 해양대학교로 91

(2023년 2월 04일 접수, 2023년 2월 11일 수정, 2023년 2월 12일 채택)

Application of Multiple Linear Regression to Predict Mechanical Properties of 316L Stainless Steel with Unspecified Pit Corrosion

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

¹Division of cadet training, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

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

(Received February 04, 2023; Revised February 11, 2023; Accepted February 12, 2023)

The aim of this study was to propose a multiple linear regression (MLR) equation to predict ultimate tensile strength (UTS) of 316L stainless steel with unspecified pit corrosion. Tensile specimens with pit corrosion were prepared using a potentiostatic acceleration test method. Pit corrosion was characterized by measuring ten factors using a confocal laser microscope. Data were collected from 22 tensile tests. At 85% confidence level, total pit volume, maximum pit depth, mean ratio of surface area, and mean area were significant factors showing linear relationships with UTS. The MLR equation using these three significant factors at a 85% confidence level showed considerable prediction performance for UTS. Determination coefficient (R^2) was 0.903 with training and test data sets. The yield strength ratio of 316L stainless steel was found to be around 0.85. All specimens with a pit corrosion presented a yield ratio of approximately 0.85 with R^2 of 0.998. Therefore, pit corrosion did not affect the yield ratio.

Keywords: Multiple linear regression, 316L stainless steel, Unspecified pit, Mechanical properties

1. 서론

스테인리스강은 우수한 기계적 강도와 내식성으로 인해 다양한 산업 환경에서 널리 사용되고 있다. 스테인리스강의 내식성은 일반적으로 표면에 형성된 Cr 산화막에 기인한다. 그러나, 염화물이 존재하는 해수 환경 등에서는 Cr 산화피막은 매우 불안정하며, 쉽게 손상된다 [1,2]. 이에 따라 피막 손상부에 집중적으로 발생하는 국부부식의 일종인 공식(pit corrosion)이 발생한다. 공식은 준안정 상태에서 안정 상태로 발전하며, 급격한 성장으로 관통 손상까지 유발할 수 있다. 따라서, 공식 손상은 스테인리스강 구조물 및 장비의 수명을 크게 감소시키는 대표적인 원인으로 간주되고 있다. 공식 수명

을 미리 예측하는 것은 매우 중요하며, 공식수명에 대한 예측 모델은 필수적이다. 금속의 공식 깊이를 예측하는 기존 모델은 대부분 식 (1)의 power-law 모델에 기반하고 있다 [3].

$$d(t) = kT^n \quad (1)$$

여기에서 k 와 n 은 모델에 대한 상수이며, d 는 공식의 최대깊이, T 는 시간을 나타낸다. 현재까지, 이를 기반으로 예측 대상과 적용 환경에 적합한 모델 수립과 수정에 대한 연구가 진행되고 있다 [4]. 또한, 현장에서 부식을 실시간으로 관측할 수 있는 방안에 대한 지속적인 연구가 진행되고 있다 [5]. 이와 같이 공식 깊이 등의 부식 정도를 예측하기 위한 다양한 모델이 연구되고 있으나, 공식이 발생한 강재의 내구성을 평가 또는 예측하는 연

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

정광후: 교수, 김성종: 교수

구는 매우 드물다. 또한, 공식 메커니즘은 매우 복잡하고, 많은 요인의 영향을 받기 때문에 예측에 어려움이 있다. 일부 연구자들은 유한요소법 [6-8], 수치해석 [9], 기계학습 [10], 공학 실험 [11,12] 등을 통해 공식 손상이 발생한 강재에 대한 기계적 특성을 평가 또는 예측하는 연구를 수행하였다. 그러나, 대부분의 연구가 기계적 친공 또는 밀링을 통해 가공한 균일하고 정렬한 공식 손상을 모사한 금속에 대해 수행되었다. 공식은 균일 부식과 같이 단순 부피 체적의 손실률을 반영하여 강도를 예측하기에는 상당한 어려움이 있으며, 실제 산업 현장에 적용된 스테인리스강에 생성된 공식은 불규칙성과 무작위성을 나타낸다 [13-15]. 또한, 동일한 환경에 노출된 스테인리스강이라도 각 공식은 서로 다른 기하학적 형태, 직경 대 깊이 비율, 최대 깊이, 공식 밀도 등의 다양한 손상매개 변수를 가지며, 강도에 미치는 영향도 다양하게 나타난다 [16]. 따라서, 공식 손상이 스테인리스강의 내구성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 예측하기 위해서는 다양한 손상매개 변수가 고려되어야 한다.

현재 다양한 연구 및 산업 분야에서 다양한 연속적인 어떤 값을 추정하는 회귀(regression) 문제에 신경회로(neural network), 선형 및 비선형회귀가 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 불규칙적이고 무작위로 분포된 공식 손상이 있는 316L 스테인리스강의 인장강도를 예측하기 위해, 다양한 회귀 모델 중 다중 선형회귀모델을 적용하였다. 다중 선형회귀는 여러 개의 독립변수와 하나의 종속 변수의 선형 관계를 모델링 하는 것이다. 대상소재인 316L 스테인리스강은 304 계열에 2~3% Mo 함량을 첨가한 스테인리스강으로 해수 환경에서 널리 사용되고 있으며, 다양한 산업 현장에서 장기 사용으로 인한 공식손상 사례가 빈번하게 보고되고 있다 [2,17,18].

본 연구의 목적은 공식손상을 가진 316L 스테인리스

강의 기계적 물성치를 예측하기 위한 다중선형회귀(Multiple linear regression, MLR) 모델을 제안하는 것이다. 가속 시험법을 통해 불규칙적이고 무작위의 공식 손상을 가진 316L 인장시험편을 제작하였으며, 3D 프로파일 데이터를 기반으로 각 시험편의 공식 손상을 다양한 측정변수로 정량화하였다. 손상 측정변수는 공식 손상된 316L 스테인리스강의 최대인장강도(ultimate tensile strength, UTS)와 항복강도(yield tensile strength, YS)를 예측하기 위한 다중 선형회귀 모델의 훈련데이터로 사용되었다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 인장시험

본 연구에서 사용된 오스테나이트 스테인리스 316L 강의 화학조성은 0.01 wt% C, 0.56 wt% Si, 1.06 wt% Mn, 0.03 wt% P, 0.01 wt% S, 16.17 wt% Cr, 2.05 wt% Mo, 10.07 wt%. Ni, 1.32 wt% N, 그리고 나머지는 Fe이다. 3 mm 두께의 316L 판재는 인장시험편으로 가공하였으며, 인장시험편에 대한 상세 규격은 Fig. 1과 같다. 인장시험(R&B, RB 301 UNITECH)은 상온에서 2 mm/min의 변위제어를 통해 실시하였다. 응력-변형률 곡선으로부터 UTS와 YS를 산출하였으며, 연신율은 별도의 변위측정기(extensometer)를 통해 측정하였다.

2.2 부식손상 시험편 제작

인장시험편 평행부에 인위적인 공식손상을 만들기 위해, 시험편에 일정 전압을 인가하는 정전위 시험법이 사용되었다. 정전위 시험은 작동전극(인장시험편 평행부), 대극(20 mm × 20 mm Pt mesh), 그리고 기준전극(Ag/AgCl sat. by KCl)으로 구성된 3 전극 부식 셀과 전원장치(Bio-logic, VSP)를 통해 수행되었다. 인장시험편은 평행부 상면에 공식손상을 만들기 위해, 상면을 제외

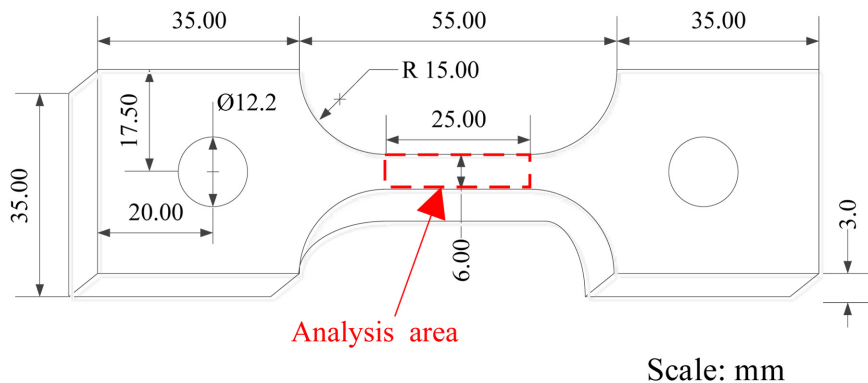


Fig. 1. Schematic diagram for tensile specimen

한 나머지 부분은 절연테이프를 통해 마스킹 처리하였다. 일반적으로 스테인리스강의 공식 손상은 노출 환경에서의 임계공식전위보다 높은 전위에서 생성된다. 따라서, 정전위 시험은 35 °C의 3.5% NaCl 수용액에 노출된 인장시편 평행부에 임계공식전위 0.2 V부터 최대 0.5 V까지의 전위를, 0.5시간에서 최대 12시간까지 인가하였다. 정전위 시험을 통해 불특정하고 무작위로 분포된 공식을 가진 총 25개의 인장시편이 제작되었다. 22개의 시편은 MLR 모델의 훈련데이터로 사용되었으며, 3개의 시편은 MLR 모델의 검증데이터로 사용되었다.

2.3 공식 손상 측정

공식 손상은 Fig. 1의 표시된 120 mm² 넓이의 손상부위를 대상으로, 레이저 공초점 현미경(OLYMPUS, LEXT OLS5100)을 통해 측정되었다. 공식 손상에 대한 측정 항목은 분석부위의 공식손상 총 개수 (A), 평균 손상체적 (B), 평균 표면적 (C), 평균 영역 (D), 평균 깊이 (E), 평균 표면적비 (F), 총 손상체적 (G), 총 손상표면적 (H), 총 영역 (I), 그리고 최대 손상깊이 (J)이다. 각 손상에 대한 측정은 레이저 공초점 현미경에 내장된 분석 소프트웨어를 통해 수행되었다.

2.4 다중 선형회귀(Multiple linear regression) 모델

독립변수인 공식 손상의 다양한 측정값이 종속변수의 기계적 물성치에 미치는 영향을 정량화하고, 예측하기 위한 선형회귀분석을 수행하였다. 선형회귀식의 생성과 분석은 상용 통계소프트웨어 Minitab 19가 사용되었다. 본 연구에서 생성된 선형회귀 모델에 구조는 식 (2)와 같다.

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

여기에서, β_0 와 β_i 는 수학적 모델에 대한 바이어스(bias)와 상수(weight)이며, x_{ij} 는 각 항에 대한 입력변수이다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 손상변수 측정

Fig. 2는 인가 전위와 시간에 따른 316L 스테인리스강의 전체 인장시편의 평행부 표면을 나타낸 것이며, Fig. 3은 레이저 공초점 현미경을 통해 분석된 일부 시험편의 평행부에 대한 3D 프로파일링 이미지를 나타낸 것이다. 일반적으로 공식 손상의 모양은 광범위하지만, 일반적으로 금속은 원뿔형(conical)과 반구형(hemispherical) 형태의 공식이 발생한다. 본 연구에서도 공식 손상의 모

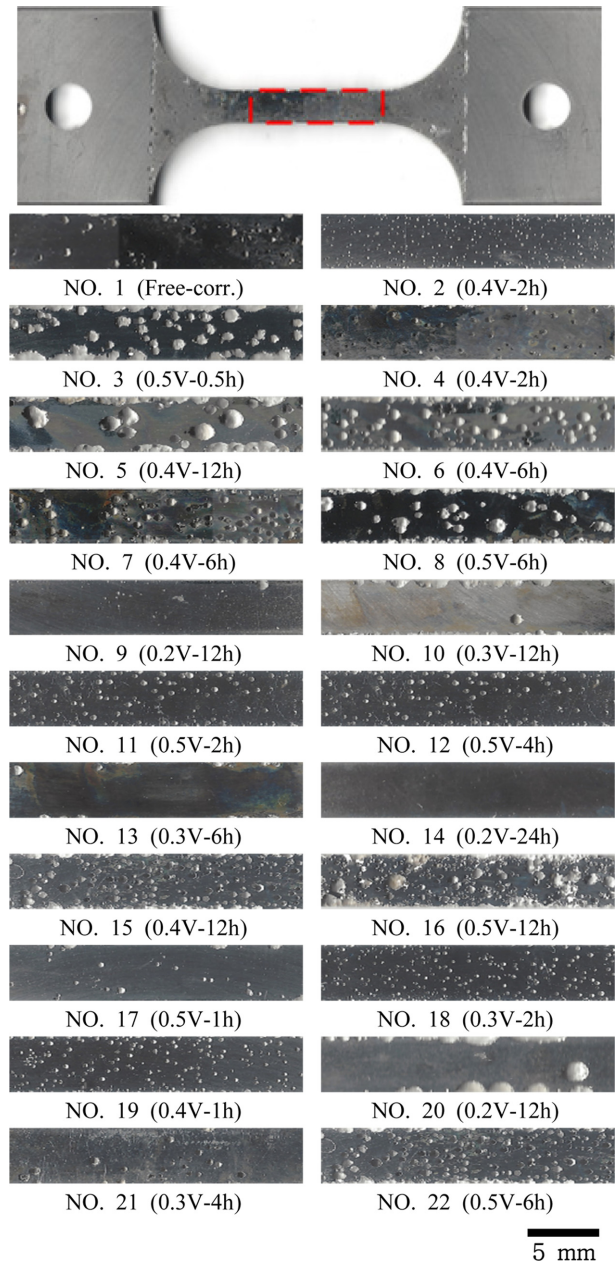


Fig. 2. Parallel part of corroded specimens with pit corrosion

양은 대부분 시편에서 원뿔형과 반구형을 나타냈으며, 인가 전위와 시간이 증가할수록 공식밀도는 증가하는 경향을 나타냈다. 반면, 분포와 크기는 서로 다른 인가 전압과 시간에서 불규칙적이고 무작위로 나타났다. Table 1은 3D 프로파일 데이터를 기반으로 각 시편의 공식 손상에 대하여 10개의 손상매개변수로 측정할 결과이다.

3.2 인장시험

Fig. 4는 각 인장시편에 대한 응력-변형률 곡선을 나

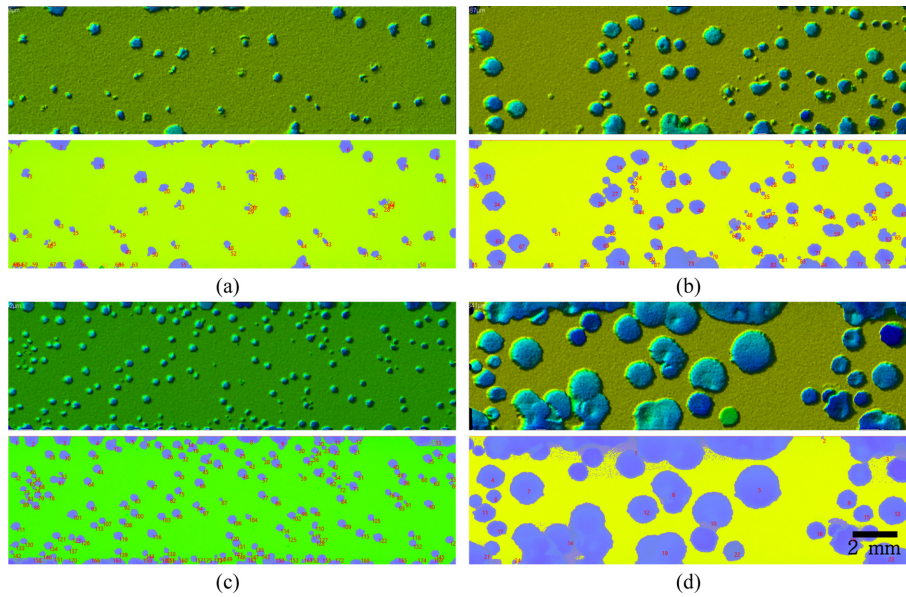


Fig. 3. 3D profile of parallel part of corroded specimens in Fig. 2: (a) specimen 4, (b) specimen 7, (c) specimen 10, (d) specimen 22

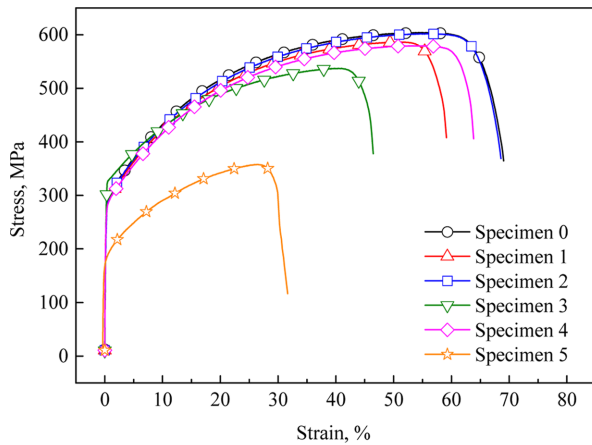
Table 1. Results of pit measurement for tensile test specimens

No.	A [EA]	B [mm ³]	C [mm ²]	D [mm ²]	E [%]	F	G [%]	H [%]	I [%]	J [%]
0 (free-corr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	79	0.03	0.37	0.11	11.23	3.62	0.56	29.6	7.11	18.47
2	195	0.00	0.09	0.04	5.83	2.43	0.15	17.11	5.84	10.51
3	53	0.34	2.33	0.80	11.69	2.48	4.94	123.4	35.33	27.13
4	68	0.02	0.38	0.09	11.96	4.05	0.43	25.82	5.13	19.86
5	27	1.24	6.12	1.58	34.91	8.23	9.29	165.1	35.63	81.12
6	95	0.24	1.78	0.45	22.31	5.28	6.23	169.1	35.67	44.26
7	85	0.11	1.08	0.26	19.85	4.33	2.55	92.16	18.73	31.92
8	37	0.39	2.55	0.81	24.53	3.44	3.96	94.53	24.98	37.47
9	21	0.03	0.19	0.07	4.25	1.98	0.16	3.99	1.23	23.12
10	15	0.61	3.46	0.98	32.90	3.93	2.56	51.93	12.28	61.68
11	129	0.02	0.37	0.11	13.83	3.49	0.02	0.67	11.61	18.88
12	211	0.02	0.32	0.09	13.71	3.27	0.98	66.8	14.99	33.96
13	15	0.18	1.39	0.40	21.67	3.30	0.77	20.88	5.00	33.35
14	10	0.00	0.03	0.02	1.34	1.39	0.00	0.31	0.19	2.70
15	134	0.14	1.31	0.30	23.96	4.90	5.19	175.80	33.41	42.03
16	94	0.28	2.13	0.66	20.31	4.37	7.22	200.20	51.98	42.25
17	193	0.01	0.22	0.07	10.32	3.40	0.53	42.24	10.80	15.67
18	23	0.04	0.51	0.19	10.07	2.82	0.26	11.8	3.71	14.97
19	175	0.02	0.28	0.10	10.25	2.98	0.73	49.81	14.44	15.24
20	15	0.90	3.78	1.40	23.57	2.46	3.75	56.75	17.45	38.78
21	39	0.04	0.57	0.12	15.10	4.88	0.40	22.19	3.84	26.09
22	24	1.41	7.08	2.45	25.33	3.24	9.41	170	49.00	33.41
Test 1	41	0.4	2.83	3.64	24.24	3.71	4.56	116	33.44	33.02
Test 2	58	0.42	2.84	3.57	32.51	4.15	6.79	164.9	42.27	70.57
Test 3	17	0.52	2.94	3.97	22.22	2.74	2.43	49.88	17.68	28.69

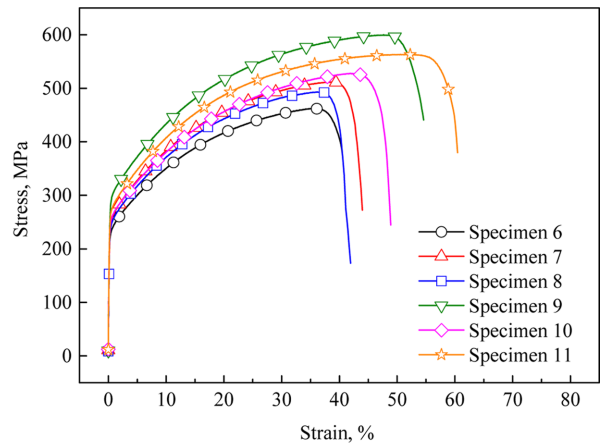
A: Total pit number, B: Mean pit volume, C: Mean surface area, D: Mean area, E: Mean pit depth, F: Mean ratio of surface area, G: Total pits volume, H: Total surface area, I: Total area, J: Max. pit depth

타낸 것이다. Fig. 4a의 공식 손상이 없는 시험편(시편 0, free-corr.)과 비교하여, 공식 손상된 시험편의 응력-변형을 곡선은 명백한 기계적 물성치 저하를 나타냈다 [1]. 일반적으로 강재의 응력-변형을 곡선은 탄성 - 항복 - 경화 - 연화 단계로 구분된다. Fig. 4a에 제시된 시편 0

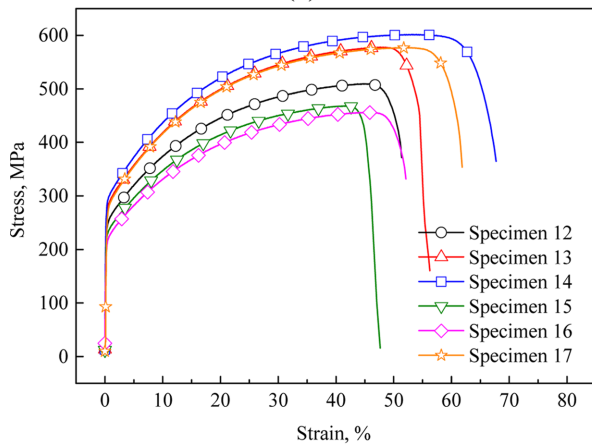
과 시편 5의 응력-변형을 곡선에서, 공식 손상된 시험편은 최대 인장강도 이후 발생하는 연화 단계가 짧아지는 경향을 나타냈다. 이는 소성변형 과정에서 공식부 손상 주변에 응력이 축적됨에 따라 시험편의 취성적인 거동을 나타내는 것을 의미한다 [16].



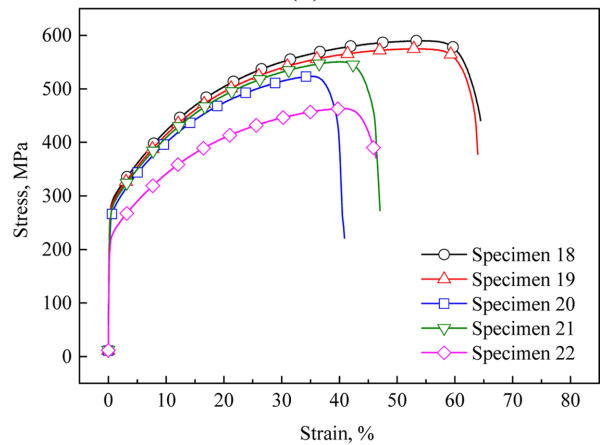
(a)



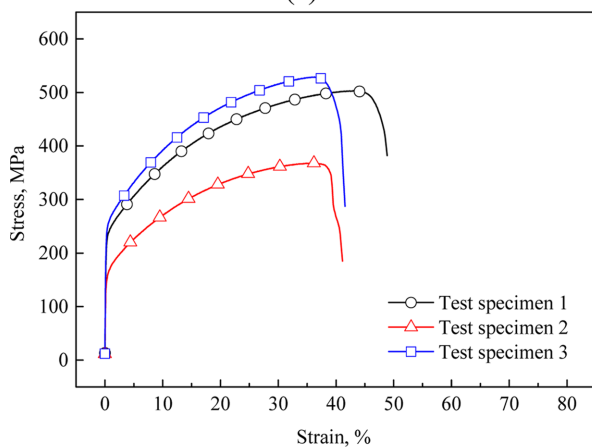
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 4. Stress-strain curves for the tensile test specimens

Table 2. Mechanical properties for tensile test specimens

Sample	Condition	UTS, MPa	YS, MPa	Elongation, %
0	Free-corr.	604	513.37	38.47
1	0.4V-2h	586.29	493.08	36.09
2	0.5V-0.5h	601.84	511.26	37.69
3	0.5V-2h	537.29	460.94	24.06
4	0.4V-2h	579.34	493.08	36.09
5	0.4V-12h	357.76	299.98	13.05
6	0.4V-6h	461.97	391.99	18.47
7	0.4V-6h	511.42	435.26	20.37
8	0.5V-6h	493.08	417.42	18.74
9	0.2V-12h	599.69	509.52	26.78
10	0.3V-12h	527.64	448.78	21.9
11	0.5V-2h	563.29	479.52	33.27
12	0.5V-4h	509.37	433.1	25.89
13	0.3V-6h	577.65	490.71	27.87
14	0.2V-24h	601.45	511.4	38.35
15	0.4V-12h	468.08	398.07	22.23
16	0.5V-12h	456.2	388.51	26.09
17	0.5V-1h	576.96	491.05	33.97
18	0.3V-2h	589.87	501.56	35.8
19	0.4V-1h	575.01	489.11	35.98
20	0.2V-12h	523.55	442.13	18.5
21	0.3V-4h	550.79	466.98	22.31
22	0.5V-6h	463.37	393.3	21.85

Table 2는 각 시편의 응력-변형률 곡선으로부터 산출된 기계적 물성치를 나타낸 것이다. YS는 응력-변형률 곡선에서 명확한 항복점이 식별되지 않아 0.2% off-set을 통해 산출하였다. 공식손상이 없는 인장시편 (시편 0)은 UTS 604 MPa, YS 513.37 MPa, 연신율 38.47%을 나타냈다. 반면, 가장 낮은 기계적 물성치를 나타낸 시편 5는 UTS 357.76 MPa, YS 299.98 MPa, 연신율 13.05%로 각 59.2%, 58.4%, 33.9%의 가장 큰 감소폭을 나타냈다.

3.3 MLR 모델을 통한 UTS 예측

Fig. 5는 다양한 손상변수 중 종속변수인 UTS에 유의한 영향을 주는 인자에 대한 파레토(pareto) 차트를 나타낸 것이다. 유의 인자에 대한 분산분석(analysis of variance, ANOVA) 결과는 Table 3에 제시하였으며, 유의인자에 대한 신뢰수준은 85% ($\alpha=0.15$)로 설정하였다. ANOVA는 통계학에서 서로 다른 변수의 평균에서 분

산값을 비교하는 통계적 방법이다. 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares, SS)으로 나타내고, 이를 실험과 관련된 요인별 SS로 분해하여, 오차에 대해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 이후 제곱합을 자유도 (degree of freedom, DF)로 나누면 해당 요인의 제곱평균(Mean squares, MS)이 된다. F 값은 평균제곱(mean square, MS)에 대한 오차 제곱평균의 비로 정의되며, 해당 모델에 대한 인자의 영향성 크기를 나타낸다. UTS 변화에 영향을 미치는 유의 변수는 영향성 크기에 따라 총 손상체적 (G), 최대손상깊이 (J), 평균 표면적비 (F), 평균 영역 (D)로 나타냈으며, 나머지 변수는 UTS와 선형관계에서 유의한 관계를 나타내지 않았다. 식 (3)은 Table 1의 공식 손상인자 중 유의 손상변수로 생성된 MLR 모델을 나타낸 것이다. 회귀 모델의 성립과정 중 85% ($\alpha=0.15$) 신뢰수준에서 유의하지 않는 손상 변수는 제외하였다.

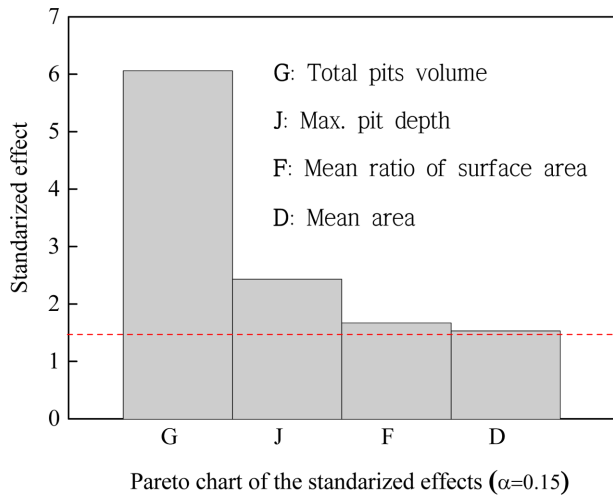


Fig. 5. Pareto chart for significant factors in the MLR for UTS

Table 3. The result of ANOVA for regression equation

Source	DF	SS	MS	F-value	P-value
Regression	4	82240.3	20560.1	72.03	0.000
D	1	676.6	676.6	2.37	0.141
F	1	802.7	802.7	2.81	0.111
G	1	10496.2	10496.2	63.77	0.000
J	1	1695.2	1695.2	5.94	0.025
Error	18	5138.2	285.5		
Total	31	87378.5			

$$UTS = 620.91 + 17.8D - 7.12F - 15.18G - 1.009J \quad (3)$$

$$Elongation = 38.21 - 0.3642J \quad (4)$$

Fig. 6은 훈련데이터에 대한 실제 UTS와 식 (3)의 MLR 모델로부터 산출된 예측 UTS 간의 관계를 나타낸 것이며, 데이터의 산포가 중앙선(Y=T)에 가까울수록 높은 적합성을 의미한다. Fig. 6과 같이, 각 데이터는 중앙선에 가깝게 산포되어 있으며, 이를 통해 높은 적합성을 확인할 수 있었다. 또한, MLR 모델의 적합성은 결정계수 R^2 을 통해 판단할 수 있다. $R^2=1$ 은 모델로부터 산출한 예측값과 훈련데이터 간의 완벽한 적합을 나타낸다. 식 (3)의 MLR 모델은 결정계수 0.903이며, 훈련데이터에 대하여 상당히 높은 적합도를 나타냈다. 반면, 식 (4)의 연신율은 본 연구에서 적용된 공식 손상변수와 선형관계를 모델링한 경우, 약 0.663의 결정계수를 나타내어 상대적으로 낮은 적합도를 나타냈다. 이는 앞선 Fig. 4의 응력-변형률 곡선과 같이, 인장시편의 변형과정에서 공식손상이 불확실한 취성과괴를 유발함에 따라 공식손상 변수

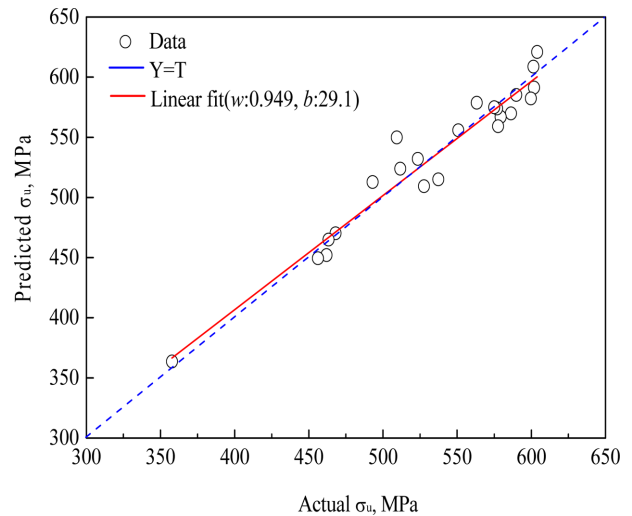


Fig. 6. Relationship between the actual and predicted UTS from the Eq.(3)

와 높은 적합도의 선형관계를 나타내지 않는 것으로 사료된다 [19,20]. 추가로 기계적 물성치와 손상 변수 간의 2차수 이상의 비선형회귀식에 대한 모델링을 고려하였으나, 선형회귀와 비교하여 낮은 적합도를 나타내었다.

3.4 UTS와 YS 관계

항복비(Yield strength ratio)는 최대 인장응력과 항복응력 간의 비를 나타내며, 산출식은 식 (5)과 같다.

$$\text{Yield strength ratio} = YS_{0.2}/UTS \quad (5)$$

본 연구에서 사용된 316L 인장시편의 항복비는 약 0.85를 나타냈다. 식 (6)은 UTS와 YS 간의 선형 관계식을 나타낸 것이다.

$$YS_{0.2} = -4.2 + 0.857 \cdot UTS \quad (6)$$

식 (6)에 대한 UTS와 YS의 선형 적합도는 $R^2=0.9986$ 으로 매우 높은 적합성을 나타냈다. 또한, 식 (6)의 UTS 항에 대한 상수는 0.857로 산출되었으며, 316L 공식 손상유무에 관계없이 모든 시편의 항복비는 유의한 차이를 나타내지 않았다. 이는 공식 손상이 강재 자체의 항복비에는 영향을 나타내지 않는 것을 의미한다. 따라서, MLR 모델을 통해 UTS를 예측하고, 예측된 UTS값에 항복비를 대입함으로써 YS에 대한 예측이 가능하다.

3.5 MLR 모델의 검증

UTS 예측을 위한 MLR 모델은 훈련데이터에 대한

Table 4. Validation of actual and predicted value. validation test conditions non-included in Table 2

Test No.	UTS				YS	
	Actual	Predicted	95% CI	95% PI	Actual	Predicted
1	502.43	506.46	497.17 ~ 515.74	469.76 ~ 543.15	426.37	438.23
2	367.83	430.03	397.22 ~ 462.85	381.69 ~ 478.37	309.22	372.73
3	528.8	554.12	539.51 ~ 568.72	515.73 ~ 592.5	448.5	479.08

결정계수 0.903으로 높은 적합성을 나타내었으나, 훈련 데이터에 포함되지 않은 조건에 대한 예측성능의 검증이 필요하다. Table 4는 훈련데이터에 포함되지 않은 3개의 인장시험편에 대한 MLR 모델의 예측값과 실제값을 나타낸 것이다. 검증시험 1과 3(Test 1 and 3)은 실제값과 예측값이 매우 근사한 결과를 나타냈으며, 95% 신뢰구간(confidence interval band, CI band)과 예측구간(prediction interval, PI)을 모두 만족하였다. 반면, 검증시험 2 (Test 2)는 실제값 (430.03 MPa)과 예측값 (367.83 MPa)에서 다소 큰 차이를 나타내었으며, 95% 수준의 예측구간과 신뢰구간의 하한값을 벗어나는 결과값을 나타냈다. 이는 공식 손상 정도가 커질수록 소성변형 구간에서 손상부 응력 집중에 의한 취성 거동과 언더컷(undercut) 공식 모양과 같은 불안정한 요인이 작용한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 공식 손상을 가진 316L 인장 시험편의 UTS를 예측하기 위해 다중 선형회귀식을 제안하였다. 불규칙적이고 무작위성의 공식 손상을 가진 316L 시험편은 손상정도에 따라 최대인장강도, 항복강도, 그리고 연신률의 명백한 저하를 나타냈다. 각 시험편의 공식 손상은 총 10개의 손상특성으로 계측되었으며, 그 중 총 손상체적, 최대손상깊이, 평균 표면적비, 그리고 평균 영역이 85% 신뢰수준에서 UTS와 유의한 선형관계를 나타내는 것으로 나타났다. UTS 예측을 위해 제안된 MLR 모델은 훈련 데이터에 대하여, $R^2=0.903$ 의 상당히 높은 적합성을 나타냈다. 316L의 항복비는 공식 손상에 유의한 영향을 받지 않는 것으로 확인되었으며, 다중 선형회귀식을 통해 예측된 최대인장강도에 항복비를 대입하여, 항복강도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2021년도 목포해양대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 연구결과임.

References

1. Y. Park, J. Yu, S. G. Sim, C. Jeong, Correlation of Surface Oxide Film Growth with Corrosion Resistance of Stainless Steel, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 152 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.3.152>
2. M. H. Boo, J. W. Lee, J. H. Lee, Selective Corrosion of Socket Welds of Stainless Steel Pipes Under Seawater Atmosphere, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 224 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.224>
3. M. E. A. B. Seghier, B. Keshtegar, K. F. Tee, T. Zayed, R. Abbassi, N. T. Trung, Prediction of maximum pitting corrosion depth in oil and gas pipelines, *Engineering Failure Analysis*, **112**, 104505 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104505>
4. J. Dai, H. B. Li, H. Feng, Z. H. Jiang, J. D. Qu, Y. Zhao, T. Zhang, Revealing significant effect of nitrogen on prolonging pitting corrosion lifetime of martensitic stainless steel by modelling approach, *Corrosion Science*, **203**, 110369 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110369>
5. S. Y. Cho, H. G. Na, H. R. Cho, J. J. Moon, T. J. Ahn, H. Jang, Corrosion and Photo-Reflection Behavior of Aluminum and Stainless Steel During Immersion Test in Salt Solution, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 109 (2020).
6. F. Ahmadi, A. R. Ranji, H. Nowruzi, Ultimate strength prediction of corroded plates with center-longitudinal crack using FEM and ANN, *Ocean Engineering*, **206**, 107281 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107281>
7. L. Feng, J. He, L. Hu, H. Shi, C. Yu, S. Wang, S. Yang, A parametric study on effects of pitting corrosion on steel plate's ultimate strength, *Applied Ocean Research*, **95**, 102026 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.102026>
8. Y. Zhang, Y. Huang, Q. Zhang, G. Liu, Ultimate strength of hull structural plate with pitting corrosion damage under combined loading, *Ocean Engineering*, **116**, 273 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.02.039>
9. Z. Zhao, H. Zhang, L. Xian, H. Liu, Tensile strength of Q345 steel with random pitting corrosion based on

- numerical analysis, *Thin-walled structures*, **148**, 106579 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106579>
10. D. Ok, Y. Pu, A. Incecik, Artificial neural networks and their application to assessment of ultimate strength of plates with pitting corrosion, *Ocean Engineering*, **34**, 2222 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.06.007>
 11. T. Nakai, H. Matsushita, N. Yamamoto, Effect of pitting corrosion on strength of web plates subjected to patch loading, *Thin-walled structures*, **44**, 10 (2006). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2005.09.004>
 12. T. Nakai, H. Matsushita, N. Yamamoto, H. Arai, Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report), *Marine structures*, **17**, 403 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2004.10.001>
 13. K. M. Deen, M. A. Virk, C. I. Haque, R. Ahmad, I. H. Khan, Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion, *Engineering Failure Analysis*, **17**, 886 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.023>
 14. R. E. Melchers, Extreme value statistics and long-term marine pitting corrosion of steel, *Probabilistic Engineering Mechanics*, **23**, 482 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.probenmech.2007.09.003>
 15. A. Rahbar-Ranji, Stress analysis of a randomly undulated plate due to corrosion in marine structures, Yokohama National University (2001).
 16. J. Sheng, J. Xia, Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel, *Construction and Building Materials*, **131**, 90 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.037>
 17. H. X. Yu, X. L. Xu, Z. W. Yu, Pitting-corrosion on internal wall of tee-pipe joined with main-pipe for seawater tank-washing system of a tanker, *Engineering Failure Analysis*, **104**, 439 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.013>
 18. N. Larché, P. Dezerville, D. L. Flour, Corrosion and corrosion management investigations in seawater reverse osmosis desalination plants, *Desalination and Water Treatment*, **51**, 1744 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714666>
 19. M. Mokhtari, R. E. Melchers, Reliability of the conventional approach for stress/fatigue analysis of pitting corroded pipelines—development of a safer approach, *Structural Safety*, **85**, 101943 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.101943>
 20. R. Songbo, G. Ying, K. Chao, G. Song, X. Shanhu, Y. Liqiong, Effects of the corrosion pitting parameters on the mechanical properties of corroded steel, *Construction and Building Materials*, **272**, 121941 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121941>