

녹 면적율과 부식피트 형상비를 이용한 도장강재의 인장강도 추정법

장도¹ · 유훈² · 정영수³ · 김인태^{4*}

¹석사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, ²수석연구원, 국토안전관리원, 안전성능연구소,

³연구교수, 부산대학교, 지진방재연구센터, ⁴교수, 부산대학교, 사회환경시스템공학과

Estimation Method of Tensile Strength of Painted Steel Using Percentage in Rust Area and Corrosion Pit Shape Ratio

Zhang, Tao¹, Yoo, Hoon², Jeong, Young Soo³, Kim, In Tae^{4*}

¹Graduate Student(Master Course), Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Principal Researcher, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Jinju, 52856, Korea

³Research Professor, Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Yangsan, 50612, Korea

⁴Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract - This study investigated a method for evaluating the residual tensile strength of corrosion-damaged painted steel by visual inspection. The tensile strength of 18 tensile test specimens and 45 corrosion-damaged model specimens with 5 percentages of rust areas (3 %, 10 %, 16 %, 33 %, and 50 %) and 3 corrosion pit shape ratios (0.25, 0.5, and 1.0) were evaluated based on the minimum cross-sectional area, and compared with the tensile test and nonlinear finite element analysis results. As a result, it was verified that the tensile strength of corrosion-damaged model specimens can be estimated within 5 % error using the minimum cross-sectional area. The tensile strength was calculated using this method for the additional 9,000 corrosion-damaged model specimens with 500 specimens each for the percentage in rust areas and the corrosion pit shape ratios, and the tensile strength reduction level was examined according to the percentage and the shape ratio. As a result, a method for estimating the tensile strength reduction level according to the percentage in rust area ratio and the corrosion shape ratio was presented, and the reduction level based on ASTM and ISO rust rating grade is also presented.

Keywords - Painted steel, Percentage in rust area, Corrosion pit shape ratio, Finite element analysis, Simple method, Tensile strength

1. 서론

도장 강재의 부식은 도막의 방청성능을 저하시키고, 강재 단면이 감소하여 구조 안전성능을 저하시킨다. 부식손상된 도장 강재의 인장강도는 실험적 및 해석적으로

평가되고 있다. 실험적 연구는 강부재에서 부식손상된 부분을 절취하여 인장실험을 통하여 평가하고 있다^{[1],[4]}. 그리고 해석적 연구는 강부재의 부식손상된 부분, 그 주변의 도막, 녹 층을 완전히 제거한 후 강재의 표면형상을 측정하고 기하학적 형상모델 생성 및 유한요소해석을 실시하여 인장강도를 평가할 수 있다^[2]. 또한 강재의 표면형상을 측정하고 이를 이용하여 유효두께를 산출하고 간편식을 이용하여 인장강도를 추정할 수 있다^{[1],[3],[4]}.

이와 같은 3가지 방법으로 부식손상된 도장강재의 인장강도를 평가할 수 있지만, 이를 위해서는 부재를 절단하거나, 표면 녹 제거 후 표면형상을 측정해야 한다는 어려움이 있다. 따라서 강교량의 안전점검 또는 정밀안전

Note.-Discussion open until October 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 17, 2023; revised on March 30, 2023; approved on March 31, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2497 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. itkim@pusan.ac.kr

진단 등의 상태 안전성능 평가 및 내구성능 평가에 이를 적용하는 것은 곤란한 실정이다.

이에 Kim *et al.*^[5]은 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침’(이하 ‘세부지침’)의 표면열화나 발청 등의 평가에 사용되고 있는 녹 발생 면적율을 이용한 도장 강재의 인장강도 추정법에 대해 실험적으로 검토하였다. 그 결과 녹 면적율의 육안 상태평가에 의한 잔존 인장강도 추정법을 제시하였다. 그리고 인장실험에 사용한 시편 수가 각각 1개씩으로 실험 데이터 수가 제한되어 추가 데이터의 확보 및 분석 등에 의한 적용성 검토가 필요함을 제시하였다.

본 연구는 육안점검에 의한 잔존 인장강도 추정법 검토의 후속 연구로서, 먼저 인장시편을 대상으로 유한요소해석을 실시하고 인장실험결과와 비교하여 유한요소해석방법의 타당성을 검증하였다. 그리고 부식피트의 분포를 변화시킨 다양한 부식손상 모델시편에 대한 파라메트릭 유한요소해석과 극한응력과 최소단면적을 이용한 간이법으로 인장강도를 평가하여 간이법의 적용성을 검증하였다. 최종적으로 녹 면적율 3%, 6%, 10%, 16%, 33%, 50%와 부식피트 형상비 0.25, 0.5, 1.0에 대해 각각 500개씩 부식손상 모델시편 9,000개를 생성하고 간이법으로 인장강도를 평가하여, 녹 면적율과 부식피트 형상비를 이용한 잔존 인장강도 추정법을 제안하였다.

2. 인장실험 및 유한요소해석

2.1 인장실험시편 제작 및 인장실험 결과

강교량이 놓여진 부식환경, 적용된 도장계, 공용연수 등에 따라 강부재에 발생한 녹의 분포 및 밀도는 다양하다. ASTM D610^[6]에 따르면, 녹은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 점상(spot) 녹, 일반(general) 녹, 점(pinpoint) 녹과 이들의 조합(hybrid) 녹의 4가지로 분류할 수 있다. 녹 발생에 의한 단면감소는 점상 녹에 의해 가장 크게 발생할 것으로 추정되어, 인장시편 제작시의 녹 분포와 밀도에 적용하였다.

인장시편은 구조용 강재(KS SM 355A)로 KS B 0801-7에 준하여 제작하였다(Fig. 2, Fig. 3 참조). 그리고 시편 중앙부의 가로 60 mm와 세로 40 mm의 편면에 기계 가공으로 부식 피트를 가공하여 부식손상(녹 발생)을 모사하였다.

부식손상 모사의 편의를 위하여 ASTM D 610의 녹 면적율별 샘플을 시편 중앙부의 60 × 44 mm²에 중첩하여 여러 개의 원으로 이상화하였다. 녹 면적율은 ASTM D 610에 제시된 3%, 10%, 16%, 33%, 50%로 하였으며 원의 좌표와 지름은 Table 1과 같다.

Nakai *et al.*^[7]은 선박에 발생한 부식피트를 측정하였

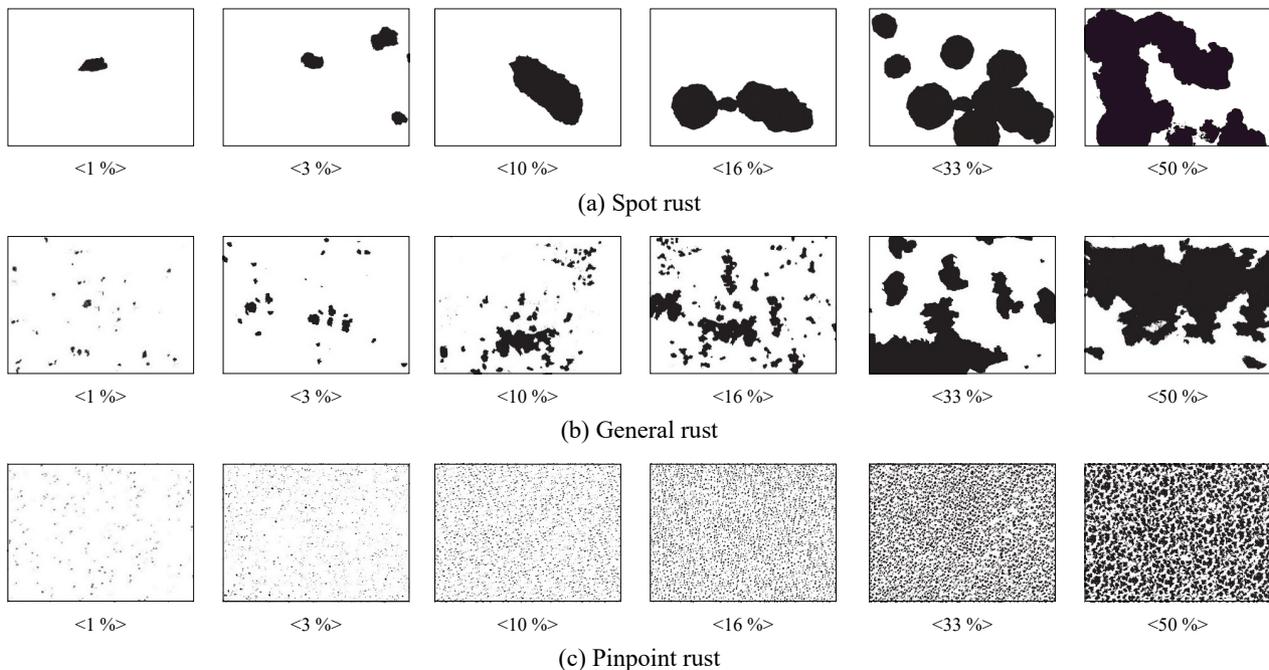
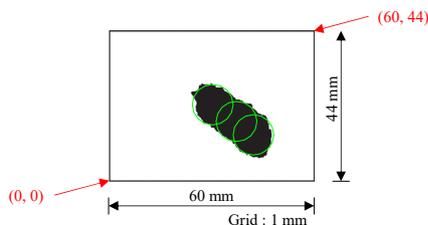


Fig. 1. Visual samples of percentages of rusted surface areas (ASTM D 610)

Table 1. Coordinates and diameters of corrosion pits in the visual samples (Unit: mm)

| Percentage of rusted surface areas | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>D</i> |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| 3 % | 27 | 27 | 6 |
| | 48 | 33 | 6 |
| | 50 | 34 | 6 |
| | 54 | 9 | 4 |
| | 57 | 28 | 2 |
| 10 % | 30 | 23 | 12 |
| | 37 | 18 | 12 |
| | 42 | 14 | 12 |
| 16 % | 15 | 13 | 14 |
| | 25 | 14 | 6 |
| | 34 | 15 | 12 |
| | 42 | 12 | 14 |
| 33 % | 48 | 9 | 8 |
| | 5 | 38 | 8 |
| | 9 | 26 | 8 |
| | 19 | 13 | 14 |
| | 28 | 30 | 10 |
| | 29 | 14 | 6 |
| | 33 | 6 | 12 |
| | 38 | 14 | 14 |
| 50 % | 43 | 25 | 12 |
| | 45 | 12 | 14 |
| | 52 | 8 | 12 |
| | 10 | 35 | 16 |
| | 15 | 8 | 16 |
| | 15 | 22 | 16 |
| | 24 | 37 | 12 |
| | 26 | 10 | 10 |
| | 31 | 32 | 14 |
| | 33 | 4 | 8 |
| 50 % | 37 | 25 | 12 |
| | 43 | 5 | 8 |
| | 44 | 25 | 14 |
| | 50 | 6 | 12 |
| | 56 | 3 | 6 |



으며, 그 결과 부식피트의 형상은 원뿔 모양과 유사하고, 반경과 깊이의 비는 0.2에서 0.5 사이에 분포함을 제시하였다. 이에 본 연구에서는 Fig.4와 같이 부식피트 형상비는 부식피트의 깊이와 반경비(d/r)로 0.25, 0.5 및 1.0로 설정하였다.

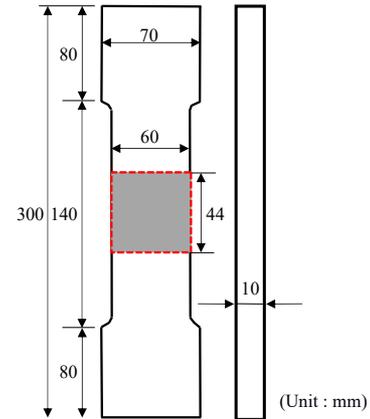
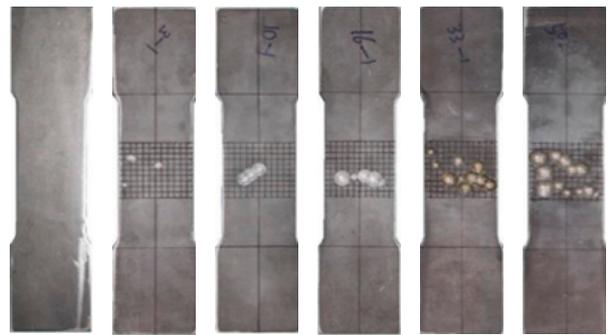


Fig. 2. Dimension of test specimen



(a) 0 % (b) 3 % (c) 10 % (d) 16 % (e) 33 % (f) 50 %

Fig. 3. Specimens with an aspect ratio of 1.0

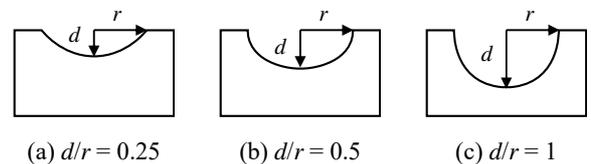


Fig. 4. Aspect ratio of depth to radius (d/r)

인장시편은 녹 면적율 3 %, 10 %, 16 %, 33 %, 50 %, 부식형상비 0.25, 0.5, 1.0의 각각 1개씩 15개를 제작하였다. 그리고 기준시편으로 무(無)부식(녹 면적율 0 %)을 모사한 시편 3개도 제작하였다. 단, 녹 면적율은 시편 중앙부 60 × 44 mm²에 대한 부식피트의 표면적 비율이다. 시편 18개의 인장실험 결과를 Fig. 5(a)에 하중-변위 곡선으로 나타냈으며, 파단형상을 Fig. 6에 나타냈다.

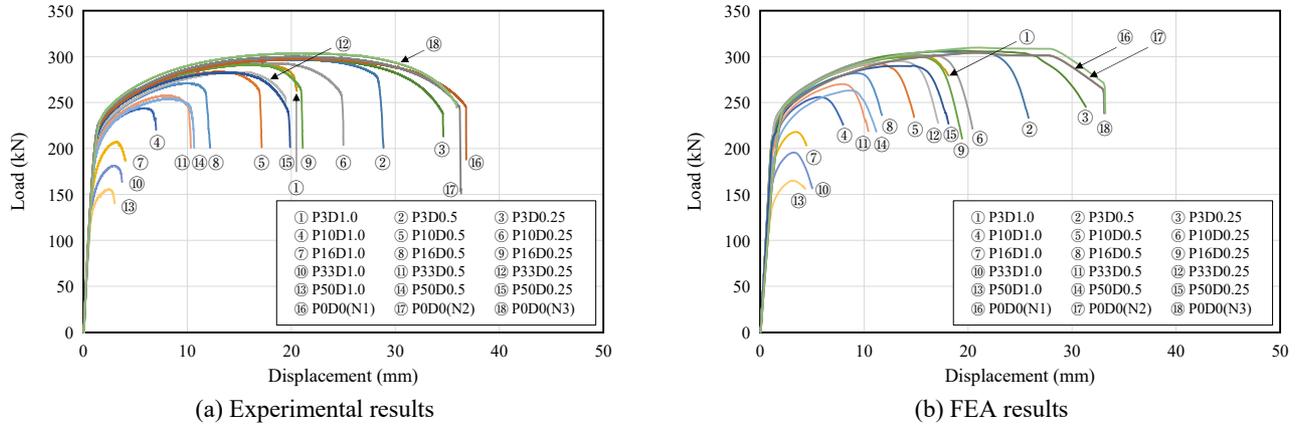


Fig. 5. Load-displacement curves

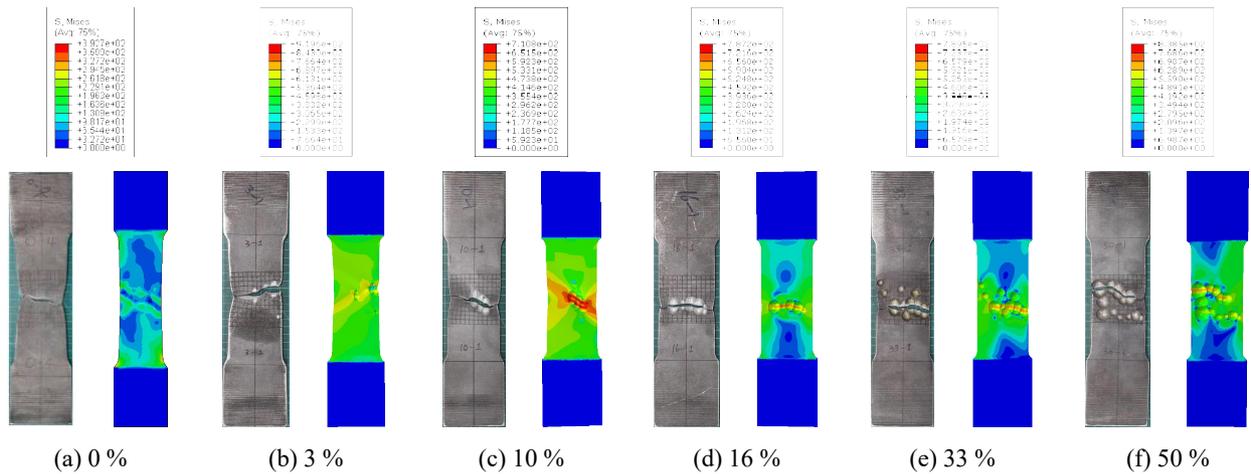


Fig. 6. Failure mode (left: experiment, right: FEA)

2.2 인장시편의 유한요소해석

2.2.1 유한요소해석 조건

인장시편의 유한요소해석에는 ABAQUS 유한요소 상용소프트웨어를 사용하였다. Fig. 7에 나타낸 것과 같이 해석모델의 기하학적 형상은 solid 요소(C3D10)를 이용하여 인장시편과 동일하게 인장시편 전체를 모델링하였다. 그리고 부식손상부 $60 \times 44 \text{ mm}^2$ 의 요소 크기는 1 mm로 하고 그 이외 영역은 4 mm로 하였다.

유한요소해석에서는 von Mises 항복 기준과 등가소성 변형경화규칙을 적용하여 재료의 비선형성을 고려하였다. 그리고 무부식 시편의 인장실험 결과에 근거하여 탄성계수와 푸아송비는 각각 205 GPa와 0.3으로 하였으며, 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 진변형률과 진응력을 계산하여 적용하였다^{[8]-[15]}. 경계조건은 인장실험과 동일하게 양단 그림면에 대해 적용하였으며, 일단 축 변위를 제외하고 양단 고정으로 하였다.

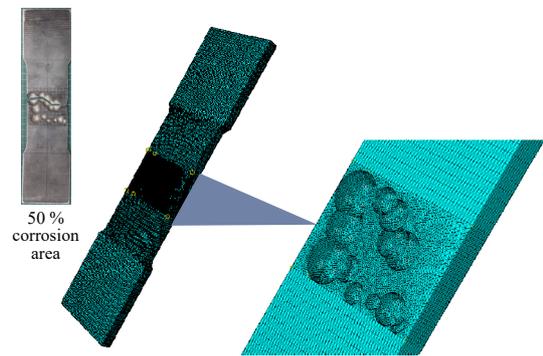


Fig. 7. ABAQUS mesh segmentation (P50D1.0)

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2)$$

2.2.2 인장시편의 유한요소해석 결과

인장시편의 인장실험과 유한요소해석 결과를 Fig. 5, Fig. 6 및 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Comparison of error between experimental results and FEA results

| Rust percentage | Symbol of specimens | Shape ration of corrosion pits | Yield load P_Y (kN) | | | Ultimate load P_U (kN) | | |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------|-----------|--------------------------------|--------|-----------|
| | | | Experiment | FEA | Error (%) | Experiment | FEA | Error (%) |
| 3 % | P3D1.0 | (1:1) | 223.09 | 227.37 | -1.92 | 291.38 | 301.06 | -3.32 |
| | P3D0.5 | (1:0.5) | 221.92 | 227.24 | -2.40 | 296.58 | 305.24 | -2.92 |
| | P3D0.25 | (1:0.25) | 206.84 | 207.48 | -0.31 | 297.85 | 306.86 | -3.02 |
| 10 % | P10D1.0 | (1:1) | 189.41 | 197.06 | -4.04 | 243.31 | 255.79 | -5.13 |
| | P10D0.5 | (1:0.5) | 211.04 | 215.08 | -1.91 | 283.05 | 291.53 | -3.00 |
| | P10D0.25 | (1:0.25) | 218.03 | 222.54 | -2.07 | 292.69 | 301.62 | -3.05 |
| 16 % | P16D1.0 | (1:1) | 151.53 | 145.84 | 3.76 | 206.59 | 217.48 | -5.27 |
| | P16D0.5 | (1:0.5) | 200.22 | 198.79 | 0.72 | 270.72 | 281.24 | -3.89 |
| | P16D0.25 | (1:0.25) | 206.25 | 202.80 | 1.67 | 290.90 | 298.99 | -2.78 |
| 33 % | P33D1.0 | (1:1) | 163.11 | 157.77 | 3.27 | 180.90 | 194.50 | -7.52 |
| | P33D0.5 | (1:0.5) | 190.93 | 197.84 | -3.62 | 257.18 | 269.17 | -4.66 |
| | P33D0.25 | (1:0.25) | 207.63 | 214.59 | -3.35 | 282.74 | 294.33 | -4.10 |
| 50 % | P50D1.0 | (1:1) | 126.15 | 132.84 | -5.31 | 154.87 | 163.75 | -5.74 |
| | P50D0.5 | (1:0.5) | 195.03 | 197.73 | -1.38 | 253.98 | 262.70 | -3.43 |
| | P50D0.25 | (1:0.25) | 215.41 | 217.56 | -1.00 | 282.56 | 290.15 | -2.68 |
| 0 % | P0D0 | N1 | 220.82 | 221.95 | -0.51 | 297.13 | 300.91 | -1.27 |
| | P0D0 | N2 | 221.13 | 221.78 | -0.30 | 299.47 | 303.29 | -1.28 |
| | P0D0 | N3 | 220.58 | 222.61 | -0.92 | 303.33 | 308.55 | -1.72 |

Fig. 6에 나타난 것과 같이 인장실험에 의한 파단형상은 녹 면적율과 부식형상비에 따라 다르지만, 폭방향으로 부식피트를 연결하는 형태로 나타났다. 그리고 유한요소 해석에 의한 소성영역의 분포도와 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 수행한 유한요소해석에 의해 인장시편의 파단형상을 정도 높게 모사할 수 있음을 확인하였다.

녹 면적율과 부식형상비에 따른 인장시편별 항복하중과 극한하중을 Table 2에 나타냈다. 무부식 인장시편의 경우 인장실험에 대한 해석결과의 오차율은 2 %, 녹 면적율별 부식형상비 0.25와 0.5의 경우에는 모두 오차율이 5 % 이내로 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 녹 면적율별 부식형상비 1.0의 경우에는 최대 약 7.52 %의 오차율이 발생하였다. 따라서, 녹 면적율 3 %, 10 %, 16 %, 33 %, 50 %와 부식형상비 0.25와 0.5인 경우에는 유한요소해석 오차율 5 % 이내로 항복강도와 극한강도를 추정할 수 있음을 확인하였고, 부식형상비 1.0의 경우에는 오차율 약 8 % 이내로 항복하중과 극한하중이 평가됨을 확인하였다.

3. 파라메트릭 유한요소해석

3.1 부식 인장시편 생성

인장시편 18개를 대상으로 인장실험과 유한요소해석을 실시하였다. 녹 면적율 3 %, 10 %, 16 %, 33 %, 50 %와 부식형상비 0.25, 0.5, 1.0에 대해 각각 1개씩의 인장시편을 생성한 것으로 그 결과의 적용은 매우 제한적이라 할 수 있다. 그리고 녹 면적율이 동일한 경우에도 부식피트의 위치 및 분포에 따라 인장강도는 달라질 것이다^{[12],[14],[15]}. 또한 다양한 녹 면적율과 부식형상비에 대한 유한요소해석 모델시편을 생성하여 해석하는 것에는 많은 시간이 소요되므로, 본 연구에서는 상용 유한요소해석 소프트웨어를 사용하는 것과 동등한 정도를 가지는 간편식을 이용한 인장강도 추정법에 대해 검토한다.

본 절에서는 부식손상된 인장시편의 극한하중을 극한강도와 최소단면적의 곱으로 정도 높게 계산할 수 있는 지에 대해 검토하고자 한다.

3.2 간이식을 이용한 극한하중 계산

먼저 인장실험에서 얻은 극한하중과 식 (3)으로 계산된 극한하중을 비교하였다. 인장강도(극한강도)는 무부식 시편의 인장실험으로 산출된 526 MPa이다. 최소단면적은 부식손상부 $60 \times 44 \text{ mm}^2$ 을 축방향으로 1 mm 간격으로 절단하여 계산된 45개 단면적의 최솟값으로 녹 면적율과 부식형상비별 최소단면적을 도출하였다(Fig. 9 참조). 그리고 식 (3)으로 각 인장시편의 극한하중을 계산하였다.

$$P_u \text{ (kN)} = A_{\min} \text{ (mm}^2\text{)} \cdot \sigma_u \text{ (MPa)} \quad (3)$$

인장실험에 사용된 시편 개수가 각각 1개씩으로 매우

제한적이므로 녹 면적율 3 %, 16 %, 50 %와 부식형상비 0.25, 0.5, 1.0에 대해 각각 5개씩의 부식모델 시편을 추가 생성하였다.

부식모델 시편 45개에 대해 인장시편과 동일한 방법으로 유한요소해석을 실시하였다. 그리고 부식모델 시편의 극한하중을 식 (3)으로 계산하여 Fig. 10에 나타냈다.

Fig. 10에 나타낸 것과 같이, 식 (3)으로 계산한 극한하중은 녹 면적율에 따른 부식형상비 0.25와 0.5의 경우에는 실험결과 또는 유한요소해석결과와 오차율 5 % 이내로 잘 일치한다. 한편, 부식형상비 1.0의 경우에는 해석결과와 비교하여 오차율이 10 %를 초과하는 경우도 있다. 이는 Fig. 8(e)에 나타낸 것과 같이 부식형상비가 1.0인 경우 파단면이 평평한 평면보다는 Z자 형태와 같이

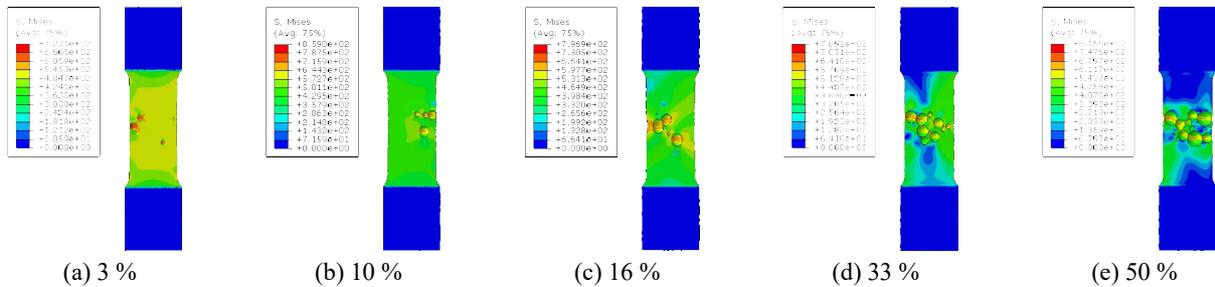


Fig. 8. Stochastic model analysis result

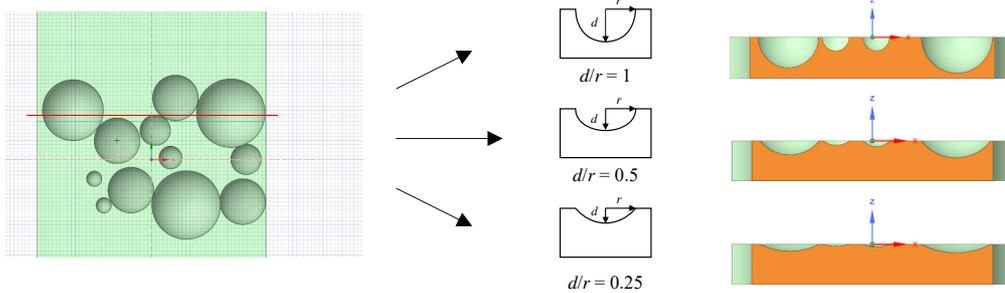


Fig. 9. Determining the minimum cross-sectional area for different levels of corrosion depth

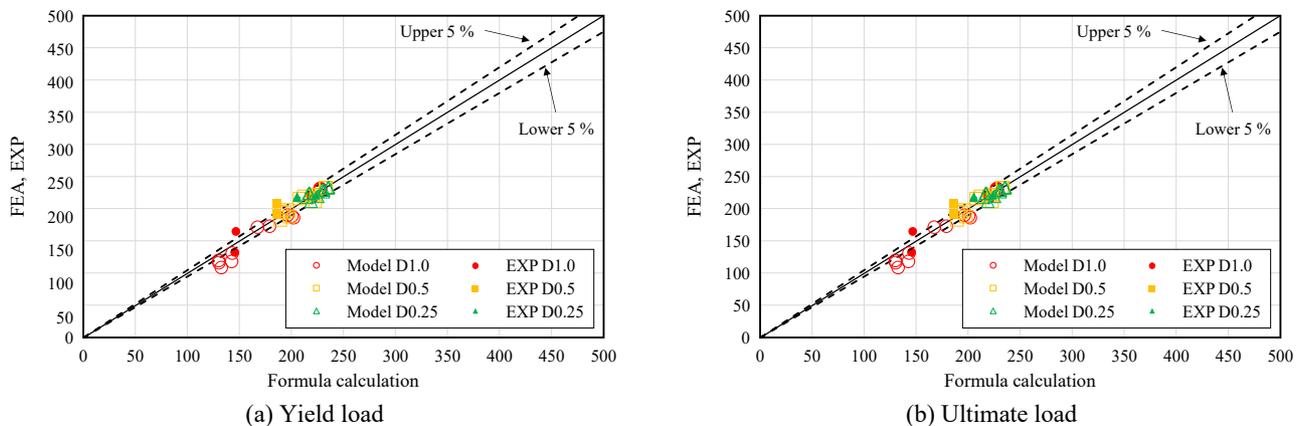


Fig. 10. Comparison of ultimate loads obtained from test, FEA and Eq. (3)

입체적으로 발생하지만, 식 (3)에서 사용한 최소단면적은 축방향에 수직으로 절단된 최소단면적을 사용하므로 실제 파단형상이 고려되지 않았음에 기인하는 것으로 추정된다. 한편 Nakai *et al.*^[7]이 제시한 실제 강구조물에 발생하고 있는 부식형상비가 0.2 - 0.5임을 고려하면, 실제 강구조물의 극한하중은 5 % 이내로 추정할 수 있을 것이다. 단 본 연구에서는 극단적인 경우 또는 부식형상비에 따른 영향을 검토하기 위하여 부식형상비가 1.0인 경우에 대해서도 검토하였다. 따라서, 본 연구의 인장시편의 극한하중은 녹 면적을 50 % 이하 및 부식형상비 0.5 이하의 경우, 식 (3)을 이용하여 오차율 5 % 이내로 극한하중을 평가할 수 있음을 확인하였다.

3.3 부식시뮬레이션과 인장강도 평가

녹 면적율에 따른 도장강재의 인장강도 추정법을 검토하려면 다양한 부식피트의 분포(위치)에 대한 검토가 필수적이다. 본 연구에서는 녹 면적율 3 %, 10 %, 16 %, 33 %, 50 %에 대해 부식피트의 분포를 변화시켜 각각 500개씩의 부식모델시편을 생성하였다. 각각의 녹 면적율에 대해 Table 1과 동일한 지름과 개수를 사용하였

며, Python의 rand 함수를 통해 각 원(부식피트)의 중심점의 좌표값에 대해 난수를 생성하고 이를 각 원의 중심점 좌표로 하였다. 단 각 원은 부식손상부 내에 위치하도록 하였다. 그리고 각각의 원은 서로 겹치지 않는 것으로 하여, 녹 면적율과 부식형상비 별 각각 500개씩의 부식손상 모델시편을 생성하였다(Fig. 11 참조).

부식모델 시편은 최소단면적은 앞에서 설명한 것과 같이 부식손상부 44 × 60 mm²를 축 방향으로 1 mm씩 절단하고 단면적을 계산하여 45개 단면적 중 최솟값을 각 시편의 최소단면적으로 하였다. 부식모델 시편은 각각 500개씩 생성하였으며, 생성한 모델 개수의 적절성을 검토하기 위해 시편 수에 따른 극한하중의 변화를 녹 면적율 3 %와 형상비 1.0에 대해 산출하여 Fig. 12에 나타냈다. 부식모델 시편 수가 100개 이상이면 시편 수에 따른 극한하중의 변화는 거의 없음을 확인하였으며, 본 연구에서는 500개씩의 부식모델 시편을 이용하여 검토하였다.

녹 면적율과 부식형상비별 부식모델 시편 500개의 극한하중을 식 (3)으로 계산하여 그 빈도 분포를 Fig. 13에 나타냈으며, 이들 데이터는 정규분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 부식모델의 극한하중 평균값과 표준편차를 산출하여 Fig. 14에 나타냈다. Fig. 14에 나타낸 것

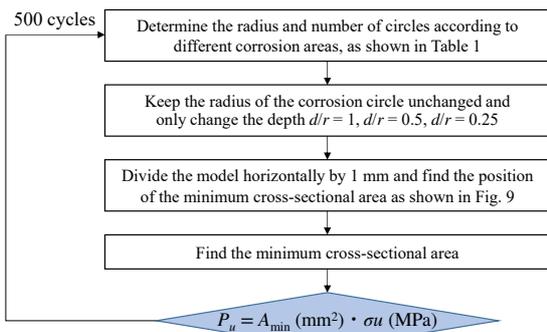


Fig. 11. Corrosion simulation and calculating minimum cross-sectional area

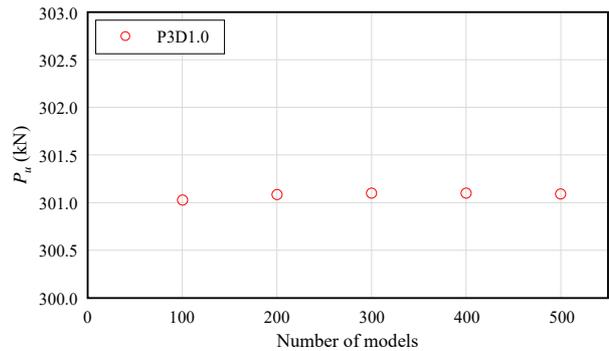
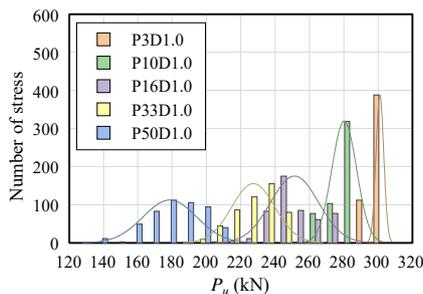
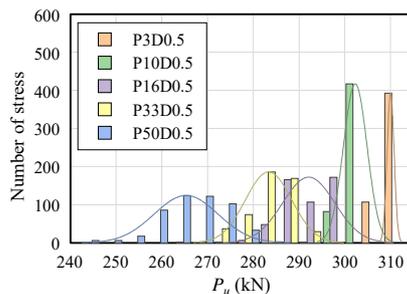


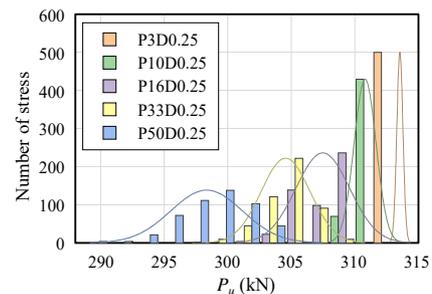
Fig. 12. Average ultimate load corresponding to different number



(a) Corrosion radius to depth ratio of 1



(b) Corrosion radius to depth ratio of 0.5



(c) Corrosion radius to depth ratio of 0.25

Fig. 13. Distribution of ultimate loads

과 같이 녹 면적율이 증가하면 인장시편의 극한하중은 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 녹 면적율과 부식형상비가 0.25, 0.5, 1.0으로 증가함에 따라 표준편차도 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다.

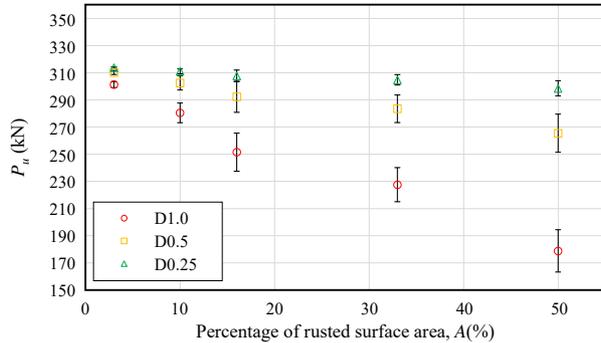


Fig. 14. Ultimate load mean and mean deviation

4. 녹 면적율에 따른 인장강도 평가법

4.1 인장강도 평가식 산출

부식모델 시편 500개씩을 이용하여 녹 면적율과 부식형상비에 따른 잔존 인장강도 추정법을 검토하였다. 즉, 녹 면적율과 부식형상비에 따른 500개의 극한하중의 평균값을 이용하여 잔존 인장강도 추정법을 검토하였다. 평균 극한하중비(P_r)는 인장실험으로 구한 무부식 시편의 평균 극한하중에 대한 식 (3)으로 계산한 부식모델 시편의 평균 극한하중의 비이다.

녹 면적율에 따른 극한하중비는 Fig. 15과 같으며, 부식형상비에 따른 평균 극한하중비는 Fig. 16과 같다. 그리고 각각의 데이터를 이용하여 선형, 지수, 로그 및 다항식 형태의 회귀곡선식을 적용하여 각각의 결정계수를 비교하였다. 그 결과 평균 극한하중비와 녹 면적율의 상관관계는 식 (4)의 회귀곡선식으로 나타낼 수 있으며, 평균 극한하중비와 부식형상비의 상관관계는 식 (5)로 정량화할 수 있음을 확인하였다. 회귀곡선식의 결정계수가 가장 큰 경우의 각 계수는 Tables 3-4와 같다.

$$P_r = \alpha e^{\beta A} + (100 - \alpha) \quad (4)$$

$$P_r = \gamma R^2 + \epsilon R + 100 \quad (5)$$

여기서, 극한하중비(P_r)는 부식 시편의 극한하중에 대한 무부식 시편의 극한하중의 백분율이고, R , α , β , A , γ , ϵ 은 상수이다.

Table 3. Constants of regression equation (Eq. (4)) of ultimate load ratio

| R | α | β | Determination coefficients |
|------|----------|---------|----------------------------|
| 0.25 | 32.486 | -0.0032 | 0.983 |
| 0.5 | 35.976 | -0.0109 | 0.983 |
| 1.0 | 85.183 | -0.0135 | 0.982 |

Table 4. Constants of regression equation (Eq. (5)) of ultimate load ratio

| A | γ | ϵ | Determination coefficients |
|-----|----------|------------|----------------------------|
| 3 | -3.685 | -0.460 | 0.995 |
| 10 | -7.371 | -3.396 | 0.998 |
| 16 | -13.238 | -6.773 | 0.999 |
| 33 | -17.771 | -9.911 | 0.999 |
| 50 | -26.533 | -16.693 | 0.999 |

각 $p-\delta$ 곡선을 사용하여 P_r 를 계산하고 Figs. 15-16에 녹 면적율(A)과 부식피트 형상비(R)에 대해 나타냈다.

식 (4), 식 (5) 및 Tables 3-4의 상수를 사용하여 녹 면적율과 부식형상비에 해당하는 극한하중 비율을 계산할 수 있다. 예를 들어, 녹 면적율이 25 %이고 부식형상비가 0.75인 인장강재의 극한하중비는 Fig. 17과 아래 절차로 계산할 수 있다.

- (1) 25를 식 (4)의 A 에 대입하고 부식형상비(R_i)가 0.25, 0.5, 1.0일 때의 극한하중비(P_{r1} , P_{r2} , P_{r3})를 계산 (Fig. 17(a) 참조).
- (2) 부식형상비와 극한하중비 (R_i , P_{ri})의 (0.25, 98), (0.5, 91) 및 (1.0, 76)의 3점으로부터 구한 회귀곡선식을 통해 식 (4)와 식 (5)에서 상수(γ , ϵ) 결정.
- (3) (2)에서 얻은 상수($\gamma = -14.47$, $\epsilon = -9.92$)을 식 (4)에 대입하고 부식형상비 0.75를 식 (4)의 R 에 대입하여 최종 극한하중비($P_r = 84.42$)을 계산.

위 절차를 통해 본 연구의 검토대상인 녹 면적율 3 %, 6 %, 10 %, 16 %, 33 %, 50 %와 부식형상비 0.25, 0.5, 0.75, 1.0뿐만 아니라, 이외의 임의의 녹 면적율과 부식형상비에 대한 극한하중비도 계산할 수 있을 것이다.

4.2 녹 면적율에 따른 인장강도 평가

임의의 녹 면적율과 부식형상비에 대한 잔존 극한하

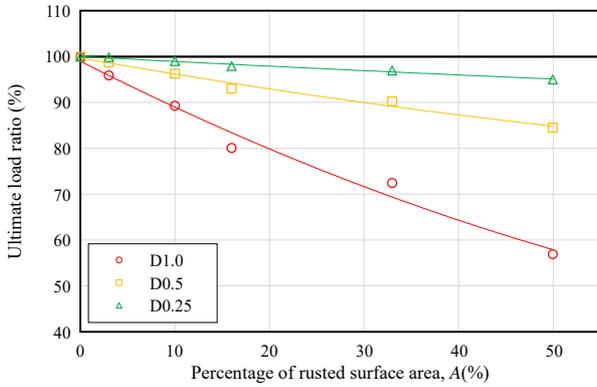


Fig. 15. Ultimate load ratio vs. percentage of rusted surface area

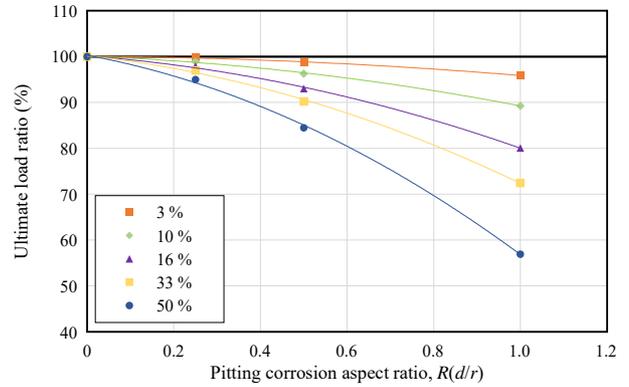
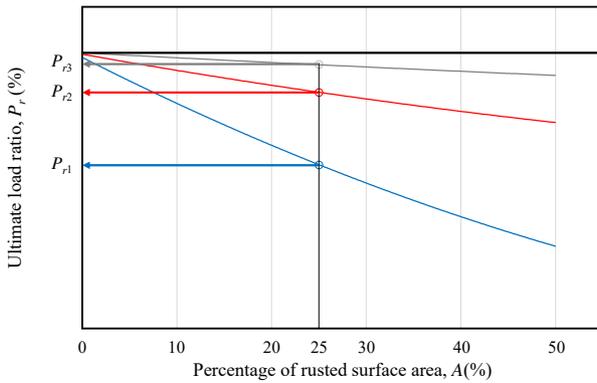
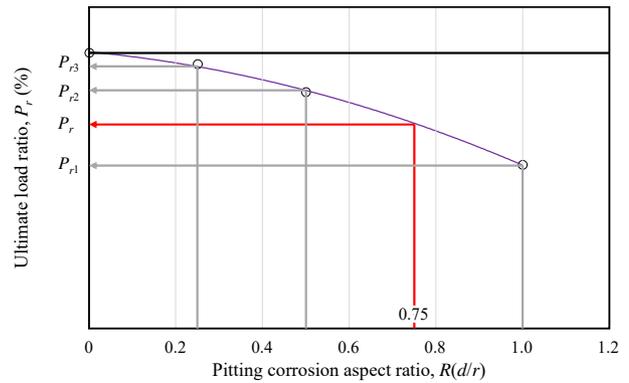


Fig. 16. Ultimate load ratio vs. pitting corrosion aspect ratio



(a) Eq. (4): $P_r = \alpha e^{\beta A} + (100 - \alpha)$



(b) Eq. (5): $P_r = \gamma R^2 + \epsilon R + 100$

Fig. 17. Procedure to calculate ultimate load ratio for other cases

중 계산방법을 제시하였다. 따라서 부식손상된 도장 강재의 표면 녹 면적을 이용하여 도장 강재의 잔존 인장강도를 추정할 수 있을 것이다.

녹 면적율과 녹 등급에 따른 잔존 인장강도 추정법의 활용방법을 제시하기 위해 ASTM과 ISO의 녹 등급에 근거하여 잔존 인장강도를 평가하였다. Table 5에 나타낸 것과 같이, ASTM D610은 녹 면적율을 기준으로 녹 등급을 0~10등급으로 분류하고 있으며, ISO의 경우 Ri0 ~ Ri5등급으로 분류하고 있다. 그리고 ASTM과 ISO의 녹 등급에 대응하는 녹 면적율은 8등급(0 - 0.3, 0.3 - 1, 1 - 3, 3 - 10, 10 - 16, 16 - 33, 33 - 50, 50 - 100)으로 각 등급의 녹 면적율에 대한 인장강도 감소율을 계산하여, 그 결과 녹 면적율, ASTM과 ISO의 녹 등급에 따른 인장강재의 평균 극한하중 감소율을 Table 5에 나타냈다. 예를 들면, 녹 면적율 1% - 3%(ASTM 5등급, ISO Ri3등급)이고 부식형상비가 0.5인 경우 평균 극한하중 감소율은 1% - 2%이며, 잔존 극한하중은 98% - 99%로 인장강도 감소는 거의 발생하지 않음을 추정할 수 있다. 그리고 녹 면적율

은 33% - 50%(ASTM 1등급, ISO Ri5등급)이고 부식형상비가 0.5인 경우 평균 극한하중 감소율은 9% - 15%이고 잔존 극한하중은 85% - 91%로 추정할 수 있다.

녹 면적율과 부식형상 별 각각 500개의 데이터로 계산한 평균 극한하중비와 표준편차(S)를 이용하여 이들 500개 데이터의 95% 신뢰구간 하한치(평균 극한하중비 - 2S)을 계산하였다. 이 값을 이용하여 녹 면적율, ASTM과 ISO의 녹 등급과 부식형상비에 따른 극한하중 감소율을 계산하여 Table 6에 나타냈다. 예를 들면, 녹 면적율이 10%(ASTM 4등급, ISO Ri4등급)이고 부식형상비가 0.5인 경우 극한하중 감소율의 하한값은 2% - 5%이고 잔존 극한하중은 95% - 98%로 추정할 수 있다.

이와 같이 Table 5와 Table 6를 이용하면, 녹 면적율 또는 ASTM 및 ISO 녹 등급에 따른 극한하중 감소율 또는 잔존 극한하중을 추정할 수 있을 것이다. 단, 여기서 부식형상비의 측정이 곤란한 경우에는 Nakai *et al.*^[7]의 결과에 근거하여 부식형상비를 0.5로 설정함으로써 극한하중을 안전측으로 평가할 수 있을 것이다.

Table 5. Reduction in tensile strength according to rusting grade and pitting corrosion aspect ratio

| Percentage of rusted surface area | Rusting grade | | Pitting corrosion aspect ratio d/r | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------|--------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | ASTM | ISO | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| 0 - 0.3 | 10 - 7 | Ri0 - Ri1 | - | - | - | ≤ 1 | ≤ 1 |
| 0.3 - 1 | 6 | Ri2 | - | - | ≤ 1 | 1 - 2 | 1 - 3 |
| 1 - 3 | 5 | Ri3 | - | - | ≤ 1 | 2 - 3 | 3 - 6 |
| 3 - 10 | 4 | Ri4 | - | 1 - 2 | 2 - 5 | 4 - 10 | 6 - 15 |
| 10 - 16 | 3 | - | - | 1 - 4 | 3 - 10 | 7 - 19 | 11 - 29 |
| 16 - 33 | 2 | - | - | 2 - 5 | 6 - 13 | 12 - 23 | 20 - 36 |
| 33 - 50 | 1 | Ri5 | - | 4 - 9 | 11 - 19 | 20 - 34 | 33 - 53 |
| 50 - 100 | 0 | - | - | $9 \leq$ | $19 \leq$ | $34 \leq$ | $53 \leq$ |

Table 6. Reduction in tensile strength according to corrosion grade and pitting aspect ratio ($m - 2S$)

| Percentage of rusted surface area | Rusting grade | | Pitting corrosion aspect ratio d/r | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------|--------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | ASTM | ISO | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| 0.3 | 10 - 7 | Ri0 - Ri1 | - | - | - | ≤ 1 | ≤ 1 |
| 1 | 6 | Ri2 | - | - | ≤ 1 | 1 - 2 | 1 - 3 |
| 3 | 5 | Ri3 | - | - | ≤ 1 | 2 - 3 | 3 - 6 |
| 10 | 4 | Ri4 | - | 1 - 2 | 2 - 5 | 4 - 10 | 6 - 15 |
| 16 | 3 | - | - | 1 - 4 | 3 - 10 | 7 - 19 | 11 - 29 |
| 33 | 2 | - | - | 2 - 5 | 6 - 13 | 12 - 23 | 20 - 36 |
| 50 | 1 | Ri5 | - | 4 - 9 | 11 - 19 | 20 - 34 | 33 - 53 |
| $100 \leq$ | 0 | - | - | $9 \leq$ | $19 \leq$ | $34 \leq$ | $53 \leq$ |

5. 결론

본 연구에서는 인위적으로 부식손상을 모사한 인장시편 18개의 인장실험 결과, 부식손상 모델시편 45개의 유한요소해석 결과, 부식손상 모델시편 9,000개의 간이식 결과를 비교하여 육안점검에 의한 도장강재의 잔존 인장강도 추정법을 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 인장시편 18개의 인장실험과 유한요소해석 결과를 비교하여 녹 면적율 3 %, 10 %, 16 %, 33 %, 50 %와 부식형상비 0.25 및 0.5인 경우에는 비선형 유한요소해석으로 오차율 5 % 이내로, 부식형상비 1.0의 경우에는 오차율 약 8 % 이내로 인장강도를 추정할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 인장시편 18개 및 부식손상 모델시편 45개의 인장실험, 유한요소해석 및 간이식(식 (3)) 결과를 비교하여, 간이식에 의한 극한하중은 녹 면적율에

따른 부식형상비 0.25 및 0.5의 경우 인장실험 또는 유한요소해석 결과와 오차율 5 % 이내로 잘 일치하였다. 따라서, 부식손상된 강재의 극한하중은 축방향 최소단면적을 이용하여 추정할 수 있음을 확인하였다.

- (3) 부식손상 모델시편 9,000개를 이용하여 임의의 녹 면적율과 부식형상비에 대한 잔존 인장강도 추정 절차를 제시하였다. 그리고 ASTM과 ISO의 녹 등급에 근거한 부식손상된 도장강재의 잔존 인장강도 평가법(Tables 5-6)을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 국토안전관리원과 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2020R1I1A1A0105202812)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Kim, I.T., Chang, H.J., and Cheung, J.Y. (2010) An Experimental Study on the Evaluation of Residual Tensile Load-Carrying Capacity of Corroded Steel Plates of Temporary Structure, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.399-409 (in Korean).
- [2] Kim, I.-T., and Dao, D.K. (2022) F.E.M Analysis of Static Tensile Properties of Corroded Steel Structure at Connections, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.1614-1622.
- [3] Appuhamy, J.M.R.S., Kaita, T., Ohga, M., and Fujii, K. (2011) Prediction of Residual Strength of Corroded Tensile Steel Plates, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.11, No.1, pp.65-79.
- [4] Matsumoto, M., Shirai, Y., Nakamura, I., and Shiraiishi, N. (1989) A Proposal of Effective Thickness Estimation Method of Corroded Steel Member, *Bridge Foundation and Engineering*, Kensetutosyo, Vol.23, No.12, pp.19-25 (in Japanese).
- [5] Kim, H.-S., Jeong, Y.-S., Dao, D.K., and Kim, I.-T. (2018) An Approach for Evaluating Tensile Strength of Painted Steel Plates from the Surface Rusting Grade, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, Taylor & Francis, Vol.53, No.7, pp.510-516.
- [6] American Society for Testing and Materials (2012) *Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces* (ASTM D610-08: 2012), USA.
- [7] Nakai, T., Matsushita, H., Yamamoto, N., and Arai, H. (2004) Effect of Pitting Corrosion on Local Strength of Hold Frame of Bulk Carriers (1st Report), *Marine Structures*, Elsevier, Vol.17, No.5, pp.403-432.
- [8] Huang, Y., Zhang, Y., Liu, G., and Zhang, Q. (2010) Ultimate Strength Assessment of Hull Structural Plate with Pitting Corrosion Damnification Under Biaxial Compression, *Ocean Engineering*, Elsevier, Vol.37, No.17-18, pp.1503-1512.
- [9] Ramberg, W., and Osgood, W.R. (1943) *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*, NACA Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, USA.
- [10] Bäker, M. (2018) How to Get Meaningful and Correct Results from Your Finite Element Model, *arXiv*, arXiv:1811.05753v1.
- [11] Ahmmad, M., and Sumi, Y. (2010) Strength and Deformability of Corroded Steel Plates Under Quasi-Static Tensile Load, *Journal of Marine Science and Technology*, Springer, Vol.15, No.1, pp.1-15.
- [12] Wang, R., Ajit Sheno, R., and Sobey, A. (2018) Ultimate Strength Assessment of Plated Steel Structures with Random Pitting Corrosion Damage, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 143, pp.331-342.
- [13] Pavlović, M., Marković, Z., Veljković, M., and Buđevac, D. (2013) Bolted Shear Connectors vs. Headed Studs Behaviour in Push-out Tests, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.88, pp.134-149.
- [14] Paik, J.K., Lee, J.M., and Ko, M.J. (2003) Ultimate Compressive Strength of Plate Elements with Pit Corrosion Wastage, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Sage, Vol.217, No.4, pp.185-200.
- [15] Zhao, Z., Zhang, H., Xian, L., and Liu, H. (2020) Tensile Strength of Q345 Steel with Random Pitting Corrosion Based on Numerical Analysis, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.148, 106579.

요약: 본 연구에서는 육안 상태평가에 의한 부식손상된 도장강재의 잔존 인장강도 추정법을 검토하였다. 먼저 3%, 10%, 16%, 33%, 50%의 녹 면적율과 0.25, 0.5, 1.0의 부식피트 형상비를 인위적으로 모사한 인장실험 시편 18개와 부식손상 모델시편 45개를 대상으로 최소면적을 이용한 간이식으로 인장강도를 평가추정하여, 인장실험 및 비선형 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그 결과 간이식을 이용하여 부식손상된 강재의 인장강도를 오차율 5% 이내로 추정할 수 있음을 검증하였다. 그리고 녹 면적율 3%, 10%, 16%, 33%, 50%와 부식피트 형상비 0.25, 0.5, 1.0에 대해 각각 500개씩 부식손상 모델시편 9,000개를 생성하고 간이식으로 인장강도를 계산하여 녹 면적율과 부식형상비에 따른 인장강도 감소율을 검토하였다. 그 결과 임의의 녹 면적율과 부식형상비에 따른 부식손상된 인장강재의 인장강도 감소율을 추정하는 방법을 제시하였고, ASTM과 ISO의 녹 등급에 따른 인장강도 감소율도 제시하였다.

핵심용어: 도장강재, 녹 면적율, 부식피트 형상비, 유한요소해석, 간이식, 인장강도