Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.38, No.5, pp.285-295, October, 2026

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2026.38.5.285

부식 피트가 있는 강소선의 응력집중과 인장강도 변화의 상관성

김수종[1] · 박찬현[1] · 안진희[2*]
[1]박사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, [2]교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과

Correlation between Stress Concentration and Tensile Strength of Steel Wire with Corrosion Pit

Kim, Su Jong[1], Park, Chanhyun[1], Ahn, Jin-Hee[2*]
[1]Ph.D Student, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea
[2]Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

Abstract – In this study, the effects of corrosion pit characteristics on the stress concentration factor and tensile strength of steel wires were investigated. Finite Element Analysis models were generated to evaluate the changes in the stress concentration factor and tensile load according to variations in corrosion pit depth, length, width, and longitudinal angle. The stress concentration factor was evaluated under elastic material conditions, while nonlinear material properties were applied to assess the tensile performance of corroded steel wires. The analysis results showed that the stress concentration factor generally increased with increasing pit depth, whereas its variation with pit length and width depended on the geometric configuration of the corrosion pit. The tensile load decreased with increasing cross-sectional loss, and its reduction did not always follow the variation in the stress concentration factor. These results indicate that the tensile performance of corrosion-damaged steel wire is determined not only by stress concentration but also by the geometric characteristics and effective cross-sectional loss of corrosion pits.

Keywords – Steel wire, Corrosion pit , Finite element analysis (FEA), Stress concentration factor (SCF), Tensile strength

1. 서 론

구조물 건설에 사용되는 강연선이나 케이블은 구조물의 단면효율성이나 장대 지간 확보를 가능하게 하는 대표적인 구조 부재로 사용되고 있다. 최근 강재 및 강선 제작 기술의 발달로 고강도 강연선이나 케이블이 다양한 구조물에 사용되고 있다. 하지만 강연선이나 케이블이 적용된 구조물은 사용기간이 증가할 경우, 재료열화 및 환경적 요인 등에 의해 성능저하가 발생할 수 있다. 이러한 성능저하는 구조물 전체의 안전성 및 사용성에 영향을 줄 수 있으며, 나아가 강연선 및 케이블의 손상이나 파단으로 이어져 구조물의 붕괴까지 발생할 수 있다[1,2]. 이러한 강연선 및 케이블 부재에서 나타날 수 있는 부식손상이나 피로균열 등은 유지관리 기간이 증가함에 따라 발생할 수 있다[3]. 일반적으로 케이블 부재의 건전성을 확보하기 위하여 아연도금, 콘크리트 충진 및 설치 환경조건 개선 등의 방법을 통하여 부식 및 단면손상이 발생하지 않도록 관리하고 있다. 하지만 불확실한 환경조건의 변화나 시공상 문제로 인해 유지관리 과정에서 케이블 부재의 손상 또는 파단된 부재들이 발견되는 경우도 보고되고 있다[4].

이에 따라 최근에는 강연선 및 케이블 부재의 부식손상에 따른 성능변화를 평가하기 위한 연구가 수행되고 있다. 부식에 따른 단면적 감소를 기준으로 잔존 인장하중과 항복하중을 예측한 연구에서는 부식량 증가에 따른 잔존 성능 저하 경향이 제시되었다[5]-[7]. 한편 부식손상으로 인한 응력집중계수(Stress Concentration Factor, SCF)[8]-[11]와 피트 형상에 따른 인장성능을 분석한 연구도 수행되었다[12],[13]. 하지만 기존 연구는 응력집중계

Note.-Discussion open until April 30, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 24, 2026; revised on September 29, 2026; approved on September 30, 2026.
Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-55-772-3293 Fax. +82-55-772-3209
E-mail. jahn@gnu.ac.kr

수와 잔존 인장하중을 독립적으로 다루고 있어, 동일한 부식피트 조건에서의 응력집중계수와 인장하중 관계에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 부식피트 형상 변화에 따른 응력집중계수와 인장하중을 확인하고, 응력집중계수와 인장하중비의 관계를 비교 및 분석하는 것을 목적으로 하였다. 부식피트의 길이방향 크기, 폭방향 크기 및 길이방향 각도를 매개변수로 설정하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한 피트의 길이방향 각도를 고려하여 응력집중계수와 최소단면적 감소율이 인장하중 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 강선 표면 부식 피트 형상 및 구조해석 모델

2.1 강선 표면 부식 피트 형상 및 부식피트 매개변수

본 연구에서는 강선 표면에 발생하는 국부적인 부식손상을 반타원형으로 단순화하고 부식피트의 깊이, 폭, 길이 및 길이방향 각도를 주요 형상 변수로 설정하였다. 이는 부식피트의 크기뿐만 아니라 길이방향으로 손상이 확장되는 정도와 단면 형상의 변화가 응력집중 및 인장강도에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다. 특히 부식피트의 깊이는 최소단면적 감소와 직접적으로 관련되는 주요 변수이며, 길이 및 폭은 동일한 깊이를 갖는 손상이라도 응력집중의 분포와 크기에 차이가 발생할 수 있도록 형상 변수로 고려하였다. 본 연구에서는 강선 지름(D_S)을 기준으로 부식피트의 깊이(D), 폭(W_T) 및 길이(W_L)를 Fig. 1과 같이 정의하였다. 부식피트의 실제 형상 특성을 고려하기 위하여 길이-깊이비 및 폭-깊이 비를 주요 형상 변수로 설정하였다. 선행연구에서는 3차원 레이저 스캐닝을 활용하여 케이블 강선 표면에 발생한 부식피트의 형상을 분석하였으며, 그 결과 길이–깊이 및 폭–깊이 비율은 대부분 0.5–10 범위에 분포하고 일부 부식피트에서는 최대 18까지 나타나는 것으로 보고되었다[14]. 또한 부식피트의 각도 역시 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 실제 관찰된 부식피트의 형상 특성을 반영하기 위해 다양한 형상비 조건을 고려하였다. 또한 강연선을 대상으로 수행된 기존 연구에서는 부식 수준에 따라 피트 깊이가 강선 지름의 20 % 이상까지 다양하게 나타나는 것으로 보고되었다. 따라서 본 연구에서

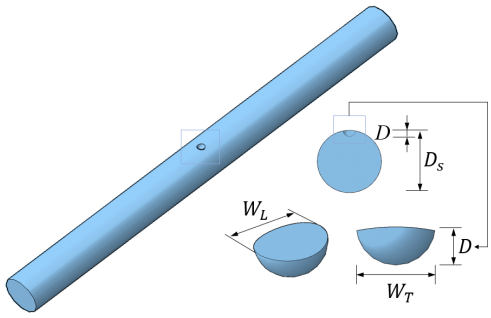


Fig. 1. Definition of corrosion pitting dimension

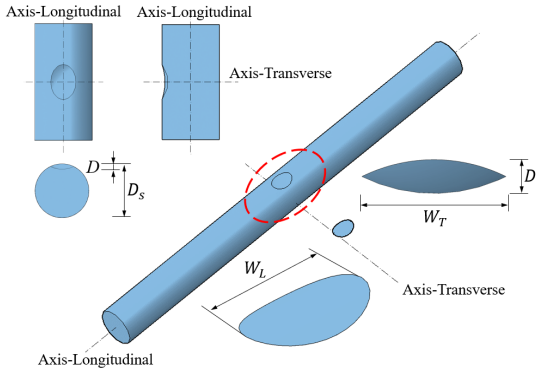


Fig. 2. Parameters for longitudinal direction

는 강연선에서 발생할 수 있는 부식손상 수준을 고려하여 피트 깊이를 강선 지름의 0.5 %–20 % 범위로 설정하였다[4],[7].

Fig. 2는 부식피트의 전체적인 크기 변화에 따른 응력집중계수와 인장강도 변화를 평가하기 위한 유한요소 해석모델로, 피트 깊이(D)는 강선 지름(D_S)을 기준으로 0.5 %, 1 %, 5 %, 10 %, 20 %로 설정하였다. 길이방향(W_L) 크기는 깊이에 대한 비율로 최대 10배까지 증가시켰다. 이때 부식피트의 폭(W_T)은 피트 깊이에 비례하여 증가하도록 설정하였다.

Fig. 3는 폭(W_T)을 제한한 상태에서 길이방향(W_L) 크기 변화에 따른 응력집중계수와 인장강도 변화를 평가하기 위한 유한요소해석 모델이다. 피트 깊이(D)는 강선 지름(D_S)의 5 %, 10 %, 20 %로 설정하였다. 피트 폭(W_T)은 깊이의 2배로 고정하였으며, 피트 길이(W_L)는 깊이(D)에 대한 비율로 변화시켰다. 이를 통해 피트 발생 위치에서의 최소 잔존 단면적을 동일하게 유지한 상태에서, 손상 영역의 길이방향 확대가 응력집중 및 인장 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

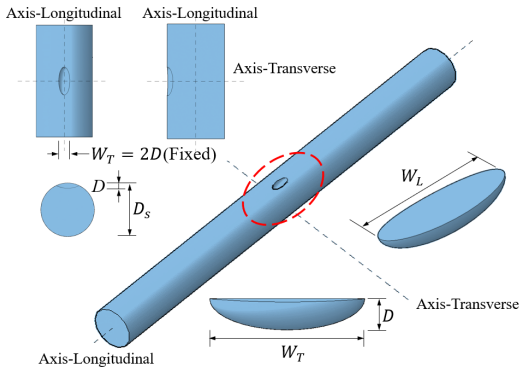


Fig. 3. Parameters for longitudinal direction (W_T Fixed)

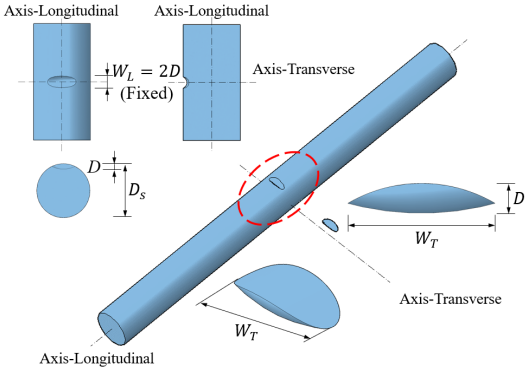


Fig. 4. Parameters for transverse direction (W_L Fixed)

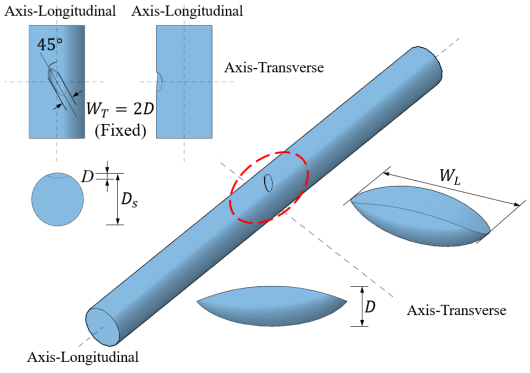


Fig. 5. Parameters for longitudinal angular change

Fig. 4는 부식피트의 길이(W_L)를 제한한 상태에서 폭방향(W_T) 크기 변화에 따른 응력집중계수와 인장강도 변화를 평가하기 위한 유한요소해석 모델이다. 피트 깊이(D)는 강선 지름(D_S)의 5 %, 10 %, 20 %로 설정하였다. 피트 길이(W_L)는 깊이의 2배로 고정하였으며, 피트 폭(W_T)은 깊이(D)에 대한 비율로 변화시켰다. 이를 통해 폭방향 확대에 따른 단면손실과 응력집중의 변화를 분석하였다.

Fig. 5는 폭이 제한된 부식피트의 길이방향 각도 변화에 따른 응력집중계수와 인장강도 변화를 평가하기 위한 유한요소해석 모델이다. 피트 깊이(D)는 강선 지름(D_S)의 10 %로 고정하고, 폭(W_T)은 깊이의 2배로 고정하였다. 피트 길이(W_L)는 깊이(D)에 대한 비율로 변화시켰으며, 피트의 길이방향 각도를 주요 매개변수로 설정하여 피트의 길이방향 각도에 따른 응력집중계수와 인장강도의 변화를 비교하였다.

2.2 강선의 응력집중 및 인장강도 해석을 위한 유한요소 해석 모델

강선 표면에서 발생하는 부식피트의 형상 및 기하학적 배치에 따른 응력집중계수와 인장강도 변화를 평가하기 위하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 부식피트 주변에 발생하는 국부적인 응력집중은 요소의 크기 및 형태에 따라 달라질 수 있으므로, 본 해석에 앞서 요소 크기 및 형태에 따른 영향성을 사전에 검토하였다. 응력집중 해석 모델과 인장강도 해석 모델의 경우 해석 목적 및 강선 부재의 거동 특성을 고려하여 각각 구성하였다. 두 해석 모델은 동일한 부식피트 형상을 적용하였으며, 해석 목적에 따라 요소 크기와 모델 길이를 다르게 설정하였다. 응력집중계수를 평가하기 위하여 해석모델의 길이는 15 mm, 인장강도 평가를 위한 해석모델의 길이는 50 mm로 선정하였다. 응력집중 해석의 경우 탄성범위 내에서 응력집중계수의 변화를 확인하기 위하여 탄성계수는 PC 강선의 탄성계수인 195,000 MPa로 적용하였으며[15], 포아송비는 0.3을 적용하였다. 인장강도 해석에 필요한 항복강도와 인장강도는 부식손상이 없는 소선의 인장시험 결과를 제시한 선행연구를 참고하여 해석 대상 강연선의 재료특성으로 항복강도는 1,650 MPa, 인장강도는 1,880 MPa로 적용하였다[16].

Fig. 6에 부식피트의 응력집중계수 확인을 위한 유한요소해석의 형상 및 모델링 그리고 응력집중 해석 결과를 나타내었다. 부식피트에 의한 응력집중은 요소의 종류와 크기에 따라 해석결과가 달라질 수 있으므로, 본 해석에 앞서 요소의 종류와 크기에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하였다. 피트 깊이 0.5 mm, 폭 1.0 mm의 부식피트를 대상으로 글로벌 요소 크기 0.2 mm와 피트 요소 크기 0.2 mm–0.01 mm를 적용하였고, C3D8R,

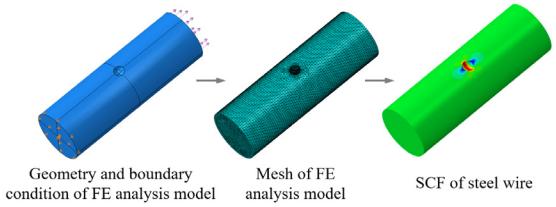


Fig. 6. FE analysis geometry, model, and results for stress concentration analysis on corrosion pitting

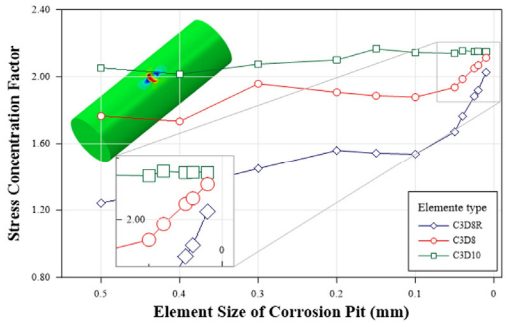


Fig. 7. SCF change depending on element type and size

C3D8 및 C3D10 요소의 해석결과를 비교하였다[17]. 그 결과, Fig. 7에 나타낸 것과 같이 응력집중계수의 수렴성과 해석 효율을 고려하여 C3D10 요소와 피트의 요소 크기 0.05 mm로 유한요소해석을 수행하였다. 응력집중계수(SCF)는 식 (1)에 따라 계산되며, 유한요소해석에서 작용하중 1 MPa에 의하여 발생하는 최대 응력으로 응력집중계수를 확인하였다. 식 (1)에서 $f_{\max}$는 최대 수직응력으로 정의하였으며, $f_{nominal}$은 공칭응력으로 부식피트가 형성되지 않은 단면적을 기준으로 축방향 수직응력으로 정의하였다. 최대응력이 부식피트 최저점에서 발생하도록 부식피트 형상을 설정하였으며, 피트 가장자리에서 급격한 곡률 변화가 발생하는 것을 방지하기 위해 부식피트 폭은 깊이의 2배 이상으로 설정하였다.

$$SCF = \frac{f_{\max}}{f_{nominal}} \tag{1}$$

Fig. 8은 부식피트를 가진 강선의 인장강도 평가를 위한 유한요소해석 모델의 재료특성, 형상 및 모델링 조건과 하중-변형률 해석결과를 나타낸 것이다. 탄성구간과 항복 이후의 소성거동을 고려할 수 있도록 유한요소해석 모델에 탄성–소성 재료모델을 적용하였으며,

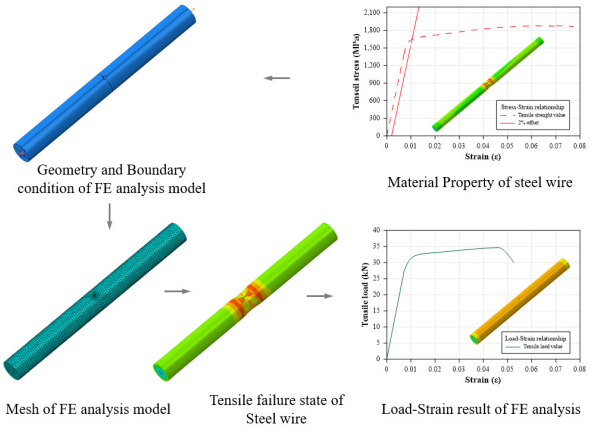


Fig. 8. FE analysis material properties, geometry, model, and results for tensile strength analysis

항복 이후의 재료거동은 참고문헌의 인장시험 결과를 바탕으로 설정하였다[16]. Fig. 6과 Fig. 8의 해석모델의 경계 조건은 한쪽 단부를 고정하고 반대쪽 단부에 인장력을 재하하는 방식으로 구성하였다. 응력집중 해석의 경우 1 MPa의 인장하중을 적용하였고, 인장강도 해석의 경우 최대 5.0 mm의 변위를 적용하여 해석을 수행하였다. 또한 변위 제어 방식으로 해석을 수행하면서 시험체의 반력–변위 관계를 확인하고, 별도의 파괴손상 모델을 적용하지 않고 최대 반력값을 최대 인장하중으로 정의하여 산정하였다. 이를 통해 최대하중에 도달하는 시점을 기준으로 Fig. 8과 같이 부식손상에 따른 인장강도 변화를 평가하였다.

3. 강선의 응력집중 및 인장하중 변화 결과

3.1 부식피트 형상에 따른 강선 응력집중 및 인장하중

3.1.1 부식피트 크기

강선 표면 부식피트의 형상변화에 따른 유한요소해석 결과를 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 부식피트의 깊이는 강선 지름을 기준으로 정의하였으며, 피트의 길이방향 크기는 깊이에 대한 비율이 최대 10배까지 증가하도록 설정하였다. 원형 단면을 갖는 강선의 특성을 고려하여 피트의 폭보다 길이방향 크기의 변화를 주요 변수로 설정하였다. Fig. 9에 나타난 것과 같이 응력집중계수는 1.355–2.455의 수준으로 나타났으며, 피트의 길이-깊이비가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 특

히 피트 깊이가 강선 지름의 20%인 경우 길이-깊이비가 10배까지 증가함에 따라 응력집중계수는 최대 24.15 % 감소하였다. 반면, 길이-깊이비가 10배인 조건에서 피트 깊이가 지름의 20 %까지 증가함에 따라 응력집중계수는 최대 27.12 % 증가하였다. 따라서 피트의 깊이가 증가할수록 응력집중계수는 증가하는 반면, 길이방향으로 피트가 확대될수록 응력집중계수는 감소하는 경향을 확인하였다.

부식피트의 깊이에 대한 길이방향 비율에 따른 인장하중 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 피트 깊이가 강선 지름의 1 %까지는 인장하중의 변화가 거의 나타나지 않았으며, 5 %에서는 0.45 %의 미소한 감소가 나타났다. 그러나 피트 깊이가 지름의 10 % 이상으로 증가하면 길이-깊이비가 10배까지 증가함에 따라 인장하중은 최대 7.90 % 감소하였다. 이러한 결과는 부식피트에 의한 단면적 감소의 영향으로 판단되며, 인장하중의 감소 경향이 최소단면적의 감소와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

3.1.2 부식피트 길이방향 크기(피트 폭 제한)

강선 표면 폭이 제한된 부식피트의 길이방향 형상 변화에 따른 유한요소해석 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 정리하여 나타내었다. 피트 폭은 깊이의 2배로 제한하였으며, 피트의 길이방향 크기는 깊이에 대한 비율로 최대 5.5배까지 증가하도록 설정하였다. 이를 통해 부식피트의 길이방향 확장에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하였다. Fig. 11에 나타난 것과 같이 응력집중계수는 1.314–2.499 수준으로 나타났으며, 폭이 제한된 피트의 길이-깊이 비가 증가할수록 응력집중계수가 감소하는 경향을 보였다. 특히 피트 깊이가 지름의 20%인 경우 길이-깊이비가 5.5배까지 증가함에 따라 응력집중계수는 최대 34.17 % 감소하였다. 따라서, 폭이 제한된 피트에서도 깊이가 증가할수록 응력집중계수는 증가하며, 피트의 길이방향 확장은 응력집중계수를 감소시키는 것을 확인하였다.

폭이 제한된 부식피트의 깊이와 길이방향의 비율로 인장강도를 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 피트 깊이

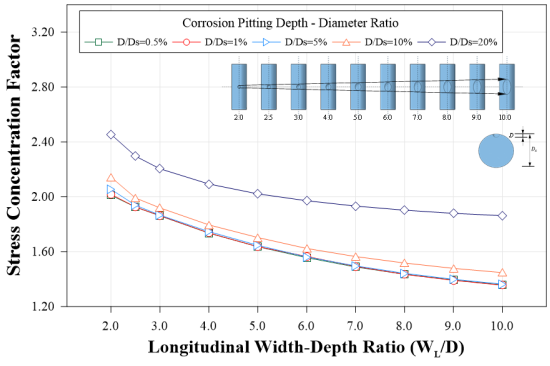


Fig. 9. SCF of corrosion pitting with longitudinal direction

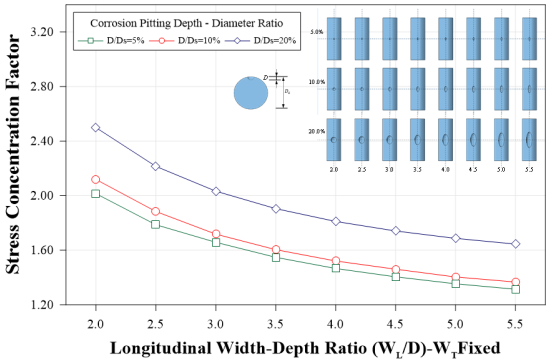


Fig. 11. SCF of corrosion pitting with longitudinal direction (W_T Fixed)

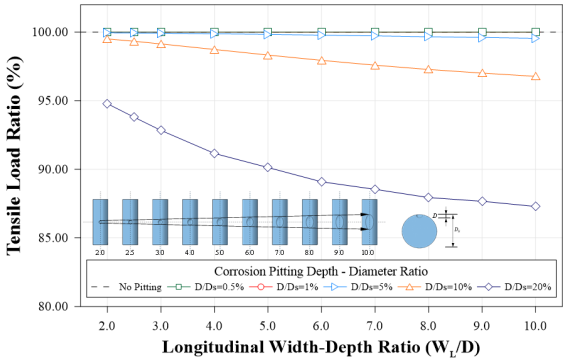


Fig. 10. Tensile load ratio of corrosion pitting with longitudinal direction

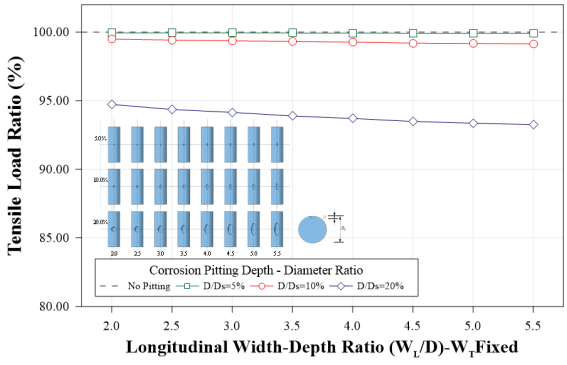


Fig. 12. Tensile load ratio of corrosion pitting with longitudinal direction (W_T Fixed)

가 강선 지름의 5 %인 경우 길이방향으로 피트가 확대되어도 최소단면적이 일정하게 유지되어 인장하중의 변화가 거의 나타나지 않았다. 폭이 제한되지 않은 경우와 비교하면, 동일한 피트 깊이와 길이에서 인장하중은 깊이 5 %, 10 %, 20 % 조건에서 각각 0.08 %, 0.86 %, 3.58 % 감소하였다. 특히 폭이 제한된 피트는 동일한 최소단면적을 갖더라도 길이방향 크기가 증가함에 따라 인장하중이 감소하는 것을 확인하였다.

3.1.3 부식피트 폭방향 크기(피트 길이 제한)

강선 표면의 길이가 제한된 부식피트의 폭방향 형상 변화에 따른 유한요소해석 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 피트의 폭은 깊이에 대한 비율로 증가시키고, 길이는 깊이의 2배로 제한하여 폭방향 변화에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하였다. Fig. 13에 나타난 것과 같이 응력집중계수는 1.422–2.880의 수준으로 나타났으며, 피트 깊이가 강선 지름의 20 %인 경우 폭방향 크기가 증가함에 따라 최대 17.57 % 증가하였다. 따라서 길이가 제한된 피트에서 깊이에 대한 폭의 비가 증가할수록 응력집중계수가 증가하는 것을 확인하였다.

길이가 제한된 부식피트의 깊이에 대한 폭방향 비율에 따른 인장하중 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 피트 깊이가 강선 지름의 5 %인 경우에도 폭이 증가함에 따라 단면적 감소로 인하여 인장하중이 감소하는 경향이 나타났다. 길이가 제한되지 않은 경우와 비교하면 동일한 피트 깊이와 길이에서 인장하중은 깊이 5 %, 10 %, 20 % 조건에서 각각 0.03 %, 0.19 %, 0.09 % 수준으로 감소하였다. 이는 길이가 제한된 피트에서 폭방향 확대에 따른 단면적 감소로 인하여 인장하중이 상대적으로 감소한 것으로 판단된다.

3.1.4 부식피트의 길이방향 각도(피트 폭 제한)

강선 표면에 발생한 폭이 제한된 부식피트의 길이방향 각도 변화에 따른 유한요소해석 결과를 Fig. 15과 Fig. 16에 정리하여 나타내었다. 피트의 길이방향 크기는 깊이에 대한 비율로 증가하고 폭은 깊이의 2배로 제한하여 길이방향의 크기와 각도에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하였다. Fig. 15에 나타난 것과 같이 응

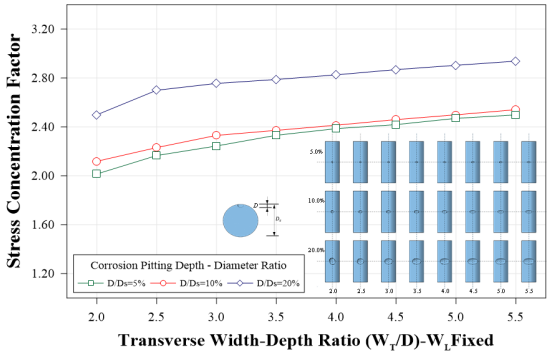


Fig. 13. SCF of corrosion pitting with transverse direction (W_L Fixed)

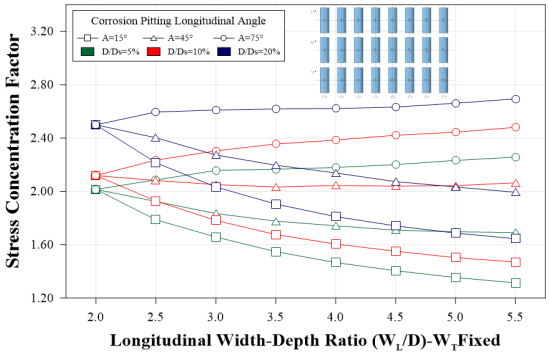


Fig. 15. SCF of corrosion pitting with longitudinal angular change

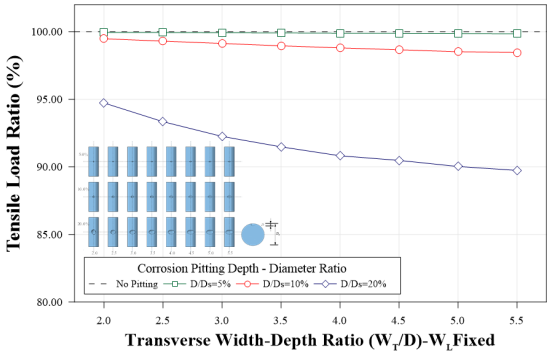


Fig. 14. Tensile load ratio of corrosion pitting with transverse direction (W_L Fixed)

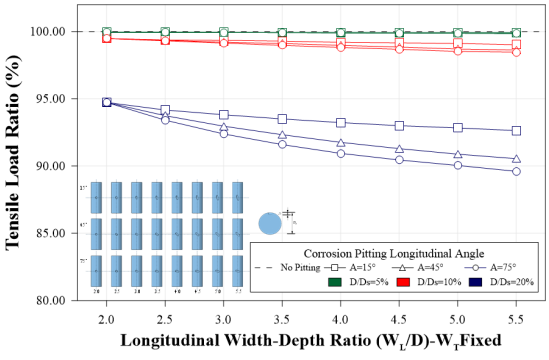


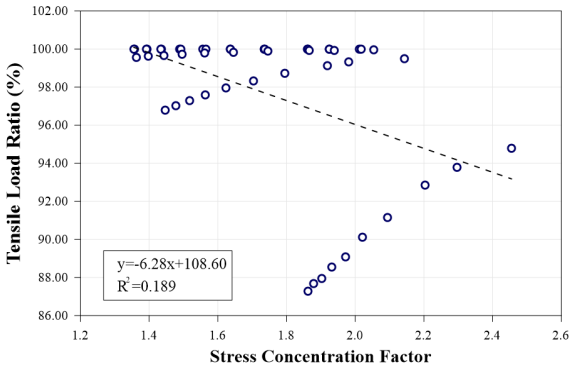
Fig. 16. Tensile load ratio of corrosion pitting with longitudinal angular change

력집중계수는 길이방향 각도에 따라 1.314–2.880 수준으로 나타났으며, 피트 깊이가 강선 지름의 20 %인 경우 길이방향 크기 증가에 따라 각도 15°에서는 최대 44.20 % 감소한 반면, 75°에서는 최대 15.25 % 증가하였다. 따라서 폭이 제한된 피트에서는 길이방향 각도가 45°보다 작은 경우 응력집중계수가 감소하고, 45°보다 큰 경우 증가하는 경향을 보였다. 또한 피트의 길이방향 크기가 증가할수록 각도에 따른 응력집중계수의 변화폭도 증가하는 것으로 나타났다.

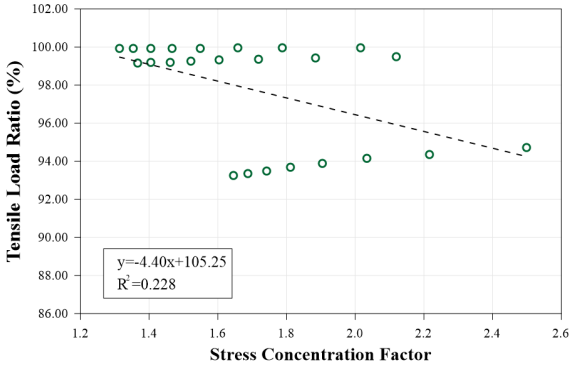
폭이 제한된 부식피트의 깊이에 대한 길이방향 비율에 따른 인장하중 변화를 Fig. 16에 나타내었다. 길이방향 각도가 증가할수록 피트에 의한 단면적 감소로 인하여 인장하중이 최대 2.09 % 감소하였으며, 길이방향 크기가 증가함에 따라 최대 5.12 % 감소하였다. 특히 피트 깊이가 강선 지름의 20 %인 조건에서 각도 15°와 75°를 비교하면, 각도 증가에 따라 인장하중은 평균 2.11 %, 단면적은 평균 3.16 % 감소하였다. 이는 길이방향 각도 증가에 따른 최소단면적 감소의 영향으로 판단되며, 각도 변화에 따른 인장하중의 감소는 응력집중계수뿐만 아니라 단면손실의 영향을 함께 받는 것으로 판단된다.

3.2 응력집중계수와 인장하중의 상관관계 회귀분석

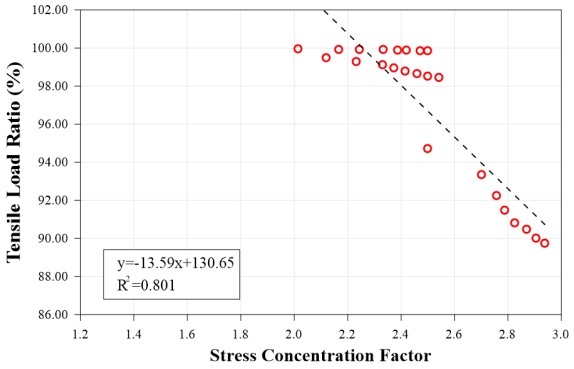
유한요소해석을 통해 확인한 응력집중계수와 인장하중 값을 활용하여 선형회귀분석을 수행하고 R^2를 통해 응력집중계수와 인장하중비의 상관관계를 정량적으로 검토하였다. Fig. 17에서 부식피트 형상 조건별 응력집중계수와 인장하중비에 대한 회귀분석 결과를 나타내었다. 부식피트의 전체적인 크기 변화의 경우 응력집중계수와 인장하중의 상관관계는 $R^2=0.189$, 폭이 제한된 부식피트의 길이방향 크기 변화는 $R^2=0.228$로 나타나 두 조건 모두 상관성이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 두 조건 모두 부식피트 깊이에 따라 응력집중계수와 인장하중비가 상관성을 가지는 것으로 나타나, 동일한 응력집중계수 수준에서도 피트 깊이와 최소단면적에 따라 인장하중 수준이 크게 달라질 수 있음을 확인하였으며, 이러한 부식 피트가 발생한 경우 응력집중계수만으로는 인장하중 변화의 연관성을 확인하기 어려울 수 있음을 알 수 있다. 하지만 길이가 제한된 부식피트의 폭방향 크기 변화의 경우 응력집중계수와 인장



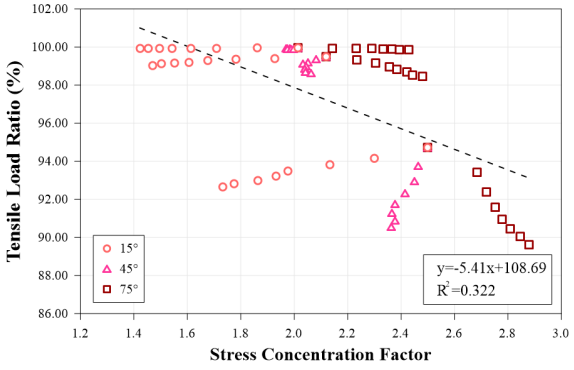
(a) Corrosion pitting with longitudinal direction



(b) Corrosion pitting with longitudinal direction (W_T Fixed)



(c) Corrosion pitting with transverse direction (W_L Fixed)



(d) Corrosion pitting with longitudinal angular change

Fig. 17. Linear regression between SCF and tensile load ratio

하중비의 상관관계가 $R^2=0.801$로 나타나 다른 부식피트의 경우와 비교하여 상대적으로 상관성이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 부식피트의 폭방향 확장이 최소단면적 감소와 응력집중계수 증가에 영향을 주므로 응력집중계수와 인장하중이 유사한 경향으로 나타난 것으로 판단된다. 부식피트의 길이방향 각도 변화의 경우, 부식피트의 길이방향 각도 15°, 45°, 75° 결과를 함께 회귀분석한 결과 $R^2=0.322$, 각도별로 구분하여 회귀분석한 결과, 45°에서 $R^2=0.851$, 75°에서 $R^2=0.847$, 15°에서는 $R^2=0.273$로 나타났다. 이러한 결과는 부식피트의 전체적인 크기 변화와 동일하게 부식피트 깊이에 따라 응력집중계수와 인장하중비가 상관성을 가지며, 강선 부식피트의 길이방향 각도가 커질수록 최소단면적이 감소하게 되어 응력집중계수와 인장하중비의 관계가 변화하게 되는 것으로 판단된다.

강선 부식피트의 응력집중계수와 인장하중의 상관관계를 검토한 결과, 상관관계가 피트 깊이 및 형상 조건에 따라 상이하게 나타나며, 응력집중계수와 인장하중의 관계만으로 부식피트 형상 변화에 따른 전체적인 인장강도 변화를 설명하기 어렵다. 따라서 부식피트의 형상 변화에 따른 강선의 인장강도 변화를 파악하기 위해서 응력집중계수와 인장하중의 관계를 부식 피트 형상변화와 함께 분석하는 것이 필요함을 알 수 있다.

3.3 부식피트 형상에 따른 강선의 응력집중과 인장하중의 상관관계 분석

3.3.1 부식피트 크기

강선 표면에서 발생하는 부식피트의 형상변화에 따른 응력집중계수와 인장하중의 변화를 3차원 곡면으로 Fig. 18과 같이 정리하여 나타내었다. 해석 결과, 피트의 크기가 증가함에 따라 인장하중이 최대 7.90 % 감소하였으며, 피트의 깊이가 깊어짐에 따라 인장하중이 최대 9.80 % 감소하는 것으로 나타났다. 응력집중계수의 경우, 피트의 크기가 커질수록 피트형상이 완만해지면서 응력집중계수가 감소하고, 피트의 깊이가 깊어질수록 최소단면적이 감소하면서 응력집중계수가 증가하였다. 피트의 형상변화와 응력집중계수의 변화가 복합적으로 작용하여 인장하중이 감소하고 있음을 확인하였다. 특히 동일 깊이 조건에서도 피트 폭 및 길이 확장

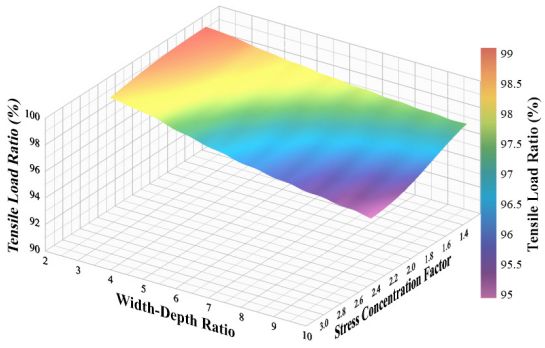


Fig. 18. Correlation between SCF and tensile load ratio of corrosion pitting with longitudinal direction

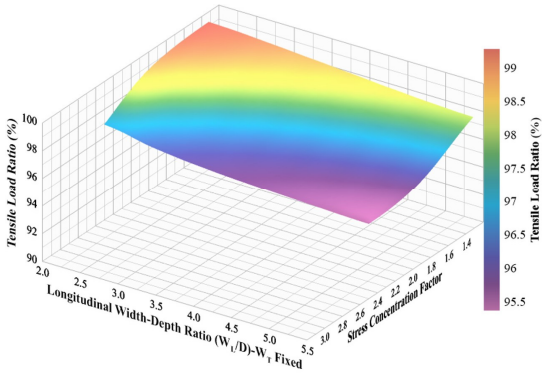


Fig. 19. Correlation between SCF and tensile load ratio of corrosion pitting with longitudinal direction (W_T Fixed)

에 따라 손상 영역이 증가하고 최소단면적이 감소하는 것이 인장하중 감소의 지배적 요인인 것으로 판단된다.

3.3.2 부식피트 길이방향 크기(피트 폭 제한)

폭이 제한된 피트의 길이방향 형상 변화에 따른 응력집중계수와 인장하중의 변화를 3차원 곡면으로 Fig. 19과 같이 정리하여 나타내었다. 피트의 길이방향 크기가 증가함에 따라 인장하중이 최대 1.55 % 감소하였으며, 피트의 깊이가 깊어짐에 따라 인장하중이 6.66 % 감소하는 것으로 나타났다. 피트의 길이방향 크기가 커질수록 피트형상이 완만해져 응력집중계수가 감소하고, 피트의 깊이가 깊어질수록 응력집중계수가 증가하였다. 피트의 형상변화와 응력집중계수의 변화에 따라 인장하중이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 부식피트가 길이방향으로 확대되더라도 피트의 최대 깊이와 폭이 동일하게 제한된 조건에서는 최소단면적의 감소가 미소하므로 인장하중의 변화가 상대적으로 크지 않은 것으로 판단된다.

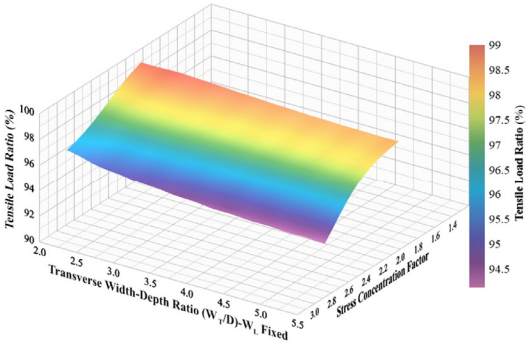


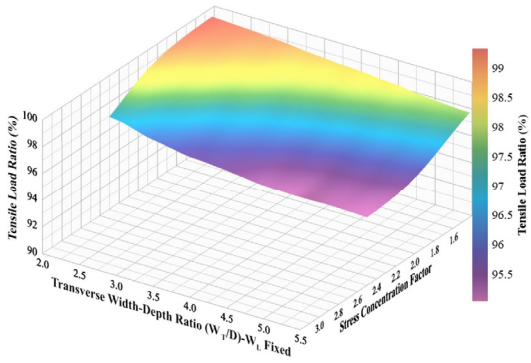
Fig. 20. Correlation between SCF and tensile load ratio of corrosion pitting with transverse direction (W_L Fixed)

3.3.3 부식피트 폭방향 크기(피트 길이 제한)

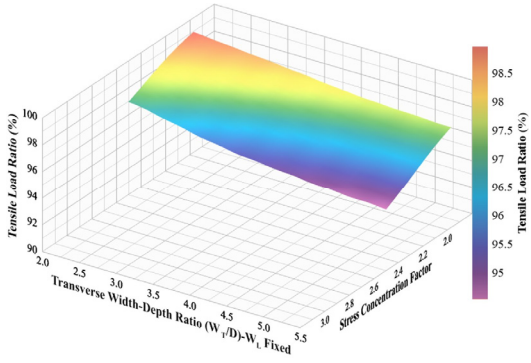
길이가 제한된 피트의 폭방향 형상 변화에 따른 응력집중계수와 인장하중의 변화를 3차원 곡면으로 Fig. 20와 같이 정리하여 나타내었다. 피트의 폭방향 크기가 증가함에 따라 인장하중은 최대 5.27 % 감소하였으며, 피트의 깊이가 증가함에 따라 인장하중이 최대 10.12 % 감소하는 것으로 나타났다. 피트의 폭방향 크기가 커지고 깊이가 깊어짐에 따라 응력집중계수가 증가하였으며, 이러한 피트의 형상 변화와 응력집중계수의 변화로 인하여 인장하중이 감소하고 있음을 확인하였다. 특히 부식피트의 폭방향 크기가 증가함에 따라 최소단면적이 감소하여 인장하중의 감소가 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다. 부식피트의 폭방향 크기 변화로 인한 단면손실과 응력집중계수의 변화가 인장하중 감소에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.3.4 부식피트의 길이방향 각도 변화(피트 폭 제한)

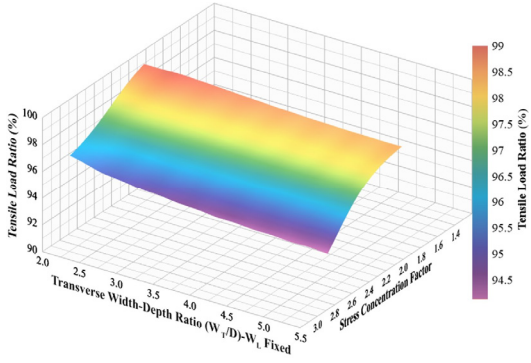
폭이 제한된 부식피트의 길이방향 각도 변화에 따른 응력집중계수와 인장하중의 변화를 3차원 곡면으로 Fig. 21과 같이 각도별로 정리하여 나타내었다. Fig. 21에 나타난 것과 같이 폭이 제한된 피트의 길이방향 각도가 15도인 경우 길이방향 크기가 증가하는 경우와 유사한 거동을 보이며, 피트의 길이방향 크기의 변화에 따라 응력집중계수와 인장하중이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 폭이 제한된 피트의 길이방향 각도가 45도인 경우 응력집중계수의 변화폭이 상대적으로 조밀하게 형성되어 3차원 곡면의 영역이 축소되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면, 폭이 제한된 피트의 길이방향 각도가 75도인 경우에는 길이방향-깊이 비가 5.5배까지



(a) 15° longitudinal angular change



(b) 45° longitudinal angular change



(c) 75° longitudinal angular change

Fig. 21. Correlation between SCF and tensile load ratio of corrosion pitting with longitudinal angular change

증가하더라도 인장하중의 감소율은 최대 1.02 % 수준으로 동일한 각도에서 길이방향의 변화는 상대적으로 미소한 것을 확인하였다. 결과적으로 길이방향 각도가 증가함에 따라 최소단면적의 감소로 인하여 응력집중계수가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 피트의 길이방향 각도 변화에 따른 단면손실과 응력집중계수의 변화가 인장하중 감소에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

모든 부식피트 형상에서 피트의 깊이 증가가 인장강

도 감소에 가장 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 피트의 길이방향의 확장보다 폭방향의 확장이 강연선의 인장강도에 미치는 영향이 더 클 것으로 판단된다. 강선의 인장강도 저하는 응력집중계수의 변화만으로 결정되는 것이 아니라 부식피트의 형상에 따른 응력집중 및 최소단면적 감소가 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다. 따라서 부식된 강선의 인장강도를 평가하기 위해서는 최대 부식깊이나 응력집중계수와 같은 단일 지표만을 고려하기보다 피트의 형상을 함께 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강연선 표면에 발생할 수 있는 다양한 부식피트의 형상이 응력집중계수와 인장강도에 미치는 영향을 확인하였다. 부식피트의 형상특성은 강선의 최소단면적 감소와 응력집중 변화에 영향을 줄 수 있으며 발생한 부식피트로 인하여 강선의 인장하중 저하 수준을 정량적으로 비교하였으며, 본 연구결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 부식피트의 깊이가 증가할수록 응력집중계수는 최대 27.12 %까지 증가하고 이에 따른 인장하중의 감소가 커지는 경향을 확인하였다. 특히 피트 깊이가 강선의 10 % 이상이 되는 경우 인장하중의 감소 폭이 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 단면적 감소의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 피트의 길이방향과 크기가 증가할수록 응력집중계수는 최대 24.15 %까지 감소하는 것을 확인하였다. 피트의 크기가 길이방향으로 증가할수록 응력집중계수 및 인장하중이 감소하는 것으로 판단된다.

(2) 폭이 제한된 피트의 경우 동일한 최소단면적을 가지더라도 피트의 길이방향 크기가 증가함에 따라 인장하중이 감소하였다. 또한, 길이가 제한된 부식피트의 경우 폭방향 증가는 최소단면적 감소와 응력집중계수를 증가시켜 인장하중의 감소가 발생하는 것을 확인하였다. 부식피트의 폭방향 크기가 증가하는 경우 강선의 인장강도 저하에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(3) 응력집중계수와 인장하중의 상관관계 분석 결과, 부식피트의 폭방향 확장과 길이방향 각도가 45°, 75°인 경우 R^2가 0.8 이상으로 나타났으며, 응력집중계수와 인장하중의 상관관계를 확인하였다. 하지만 부식피트의 전체적인 크기 변화와 폭이 제한된 길이방향 조건, 부식피트의 길이방향 각도가 15°인 경우에는 R^2가 0.19–0.32 수준으로 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 상관관계는 부식피트 깊이 및 형상 조건에 따라 상이하게 나타나며, 응력집중계수와 인장하중의 관계만으로 부식피트 형상 변화에 따른 인장강도 변화를 설명하기 어렵다. 따라서 부식피트의 형상 변화에 따른 강선의 인장강도 변화를 파악하기 위해서 응력집중계수와 인장하중의 관계를 부식 피트 형상변화와 함께 분석할 필요가 있다.

본 연구는 단일 직선 강선을 대상으로 이상화된 부식피트를 적용하여 부식피트의 형상변화로 인하여 발생하는 응력집중계수와 인장강도 변화를 분석하였다. 피트의 형상 변화에 따른 인장강도는 최소단면적과 응력집중의 복합적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 부식피트가 발생한 강선의 인장강도를 평가하기 위해서는 최소단면적뿐만 아니라 피트의 형상과 방향에 따른 응력집중 특성 등을 함께 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 단일 강선을 대상으로 부식피트의 형상 변화에 따른 영향을 분석하였으므로, 강연선에 존재할 수 있는 다중 피트, 소선 간 접촉 및 나선형 배치 등을 반영하지 못하였다는 한계가 있다. 따라서 본 연구결과를 케이블 및 강연선에 적용하기 위해서는 이러한 조건들이 인장강도에 미치는 영향을 검토할 필요가 있으며, 향후 다중 부식피트, 소선 간 상호작용, 나선형 배치 등을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌(References)

[1] Darmawan, M.S., and Stewart, M.G. (2007) Spatial Time-Dependent Reliability Analysis of Corroding Pretensioned Prestressed Concrete Bridge Girders, *Structural Safety*, Elsevier, Vol.29, No.1, pp.16–31.

[2] Anania, L., Badalà, A., and D'Agata, G. (2018) Damage and Collapse Mode of Existing Post Tensioned Precast Concrete Bridge: The Case of Petrulla Viaduct, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.162, pp.226−244.

[3] Shu, Q., Wang, K., Yuan, G., Zhang, Y., Lu, L., and Liu, Z. (2020) Assessing Capacity of Corroded Angle Members in Steel Structures Based on Experiment and Simulation, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.244, 118210.

[4] Li, R., Miao, C., Zhang, Y., Wang, Y., and Chen, X. (2021) Corrosion Characteristics and Damage Constitutive Model of Galvanized Steel Wires for Bridge Cables, *Structures*, Elsevier, Vol.34, pp.3414−3426.

[5] Chen, Y., Qin, W., Wang, Q., and Tan, H. (2021) Influence of Corrosion Pit on the Tensile Mechanical Properties of a Multi-Layered Wire Rope Strand, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.302, 124387.

[6] Franceschini, L., Vecchi, F., Tondolo, F., Belletti, B., and Montero, J. S. (2022) Mechanical Behaviour of Corroded Strands under Chloride Attack: A New Constitutive Law, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.316, 125872.

[7] Wang, L., Li, T., Dai, L., Chen, W., and Huang, K. (2020) Corrosion Morphology and Mechanical Behavior of Corroded Prestressing Strands, *Journal of Advanced Concrete Technology*, JCI, Vol.18, No.10, pp.545−557.

[8] Park, K.M., Jeong, Y.S., and Kim, I.T. (2023) An Experimental Study on Fatigue Life Evaluation of Corroded Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.5, pp.229−237 (in Korean).

[9] Cerit, M. (2013) Numerical Investigation on Torsional Stress Concentration Factor at the Semi Elliptical Corrosion Pit, *Corrosion Science*, Elsevier, Vol.67, pp.225−232.

[10] An, L.-S., Park, Y.C., and Kim, H.-K. (2019) A Numerical Study of the Tensile Stress Concentration in a Hemi-ellipsoidal Corrosion Pit on a Plate, *International Journal of Steel Structures*, Springer, Vol.19, No.2, pp.530−542.

[11] Park, C., Kwon, T.-Y., Kim, I.-T., Ahn, J.H. (2026) Analysis of Stress Concentration Factor Changes through Corrosion Surface Irregularity Based on Spatial Statistics, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.38, No.2, pp.71−80 (in Korean).

[12] Zhang, T., Yoo, H., Jeong, Y.-S., and Kim, I.T. (2023) Estimation Method of Tensile Strength of Painted Steel Using Percentage in Rust Area and Corrosion Pit Shape Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.2, pp.91−101 (in Korean).

[13] 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).

[14] Zhu, T., Cheng, S., He, H., Feng, K., and Zhu, J. (2025) Extraction of Corrosion Damage Features of Serviced Cable Based on Three-Dimensional Point Cloud Technology, *Materials*, Vol.18, No.15, 3611.

[15] Korean Agency for Technology and Standards (2019) Uncoated Stress-Relieved Steel Wires and Strands for Prestressed Concrete, KS D 7002:2019, KATS (in Korean).

[16] Lee, J. (2019) *Analytical Evaluation of Mechanical behavior of Corroded Strands*, Master's Thesis, Chung-Ang University (in Korean).

[17] Dassault Systems Simulia (2016) *Abaqus/CEA User's Guide*, DSS, USA.

요 약 : 본 연구에서는 강선 표면에 발생하는 부식피트의 형상 및 특성이 강선의 응력집중계수와 인장강도에 미치는 영향을 분석하였다. 부식피트의 깊이, 길이, 폭 및 길이방향 각도를 주요 변수로 설정하고, 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과, 부식피트의 깊이가 증가할수록 응력집중계수는 증가하였으며, 길이와 폭 및 방향각의 변화에 따라 서로 다른 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 피트가 길이방향으로 확대될 경우 응력집중계수와 인장하중은 감소하였으며, 폭방향 확대는 최소단면적의 감소로 인하여 응력집중계수가 증가하고 인장하중이 감소하는 것을 확인하였다. 부식피트의 형상에 따른 인장강도 저하는 최소단면적과 응력집중의 영향을 복합적으로 받으며, 잔존성능 평가시 최소단면적뿐만 아니라 피트의 깊이, 폭, 길이 및 방향에 따른 형상과 응력집중 특성을 함께 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강선, 부식 피트, 유한요소해석, 응력집중계수, 인장강도