

# 공간통계에 기반한 부식표면 불규칙성에 따른 응력집중계수 변화 분석

박찬현<sup>1</sup> · 권태윤<sup>1</sup> · 김인태<sup>2</sup> · 안진희<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>박사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, <sup>2</sup>교수, 부산대학교, 사회기반시스템공학과, <sup>3</sup>교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과

## Analysis of Stress Concentration Factor Changes Through Corrosion Surface Irregularity Based on Spatial Statistics

Park, Chanhyun<sup>1</sup>, Kwon, Tae-Yun<sup>1</sup>, Kim, In Tae<sup>2</sup>, Ahn, Jin-Hee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student (Ph.D Course), Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

**Abstract** – In this study, Finite element analyses were conducted to investigate variations in the stress concentration factor caused by uncertainty and irregularity in corrosion surfaces. Corrosion surfaces were generated using the mean corrosion depth, standard deviation, and spatial correlation parameters, namely the sill and range. The irregularity of corrosion surfaces was modeled by varying the probability distributions, mean corrosion depths, and standard deviations. The irregularity of corrosion surface geometry was considered by generating multiple corrosion surfaces under identical conditions, and the corresponding stress concentration factors were analyzed. The analysis results showed that the maximum stress did not necessarily occur at the location of the maximum corrosion depth. For the same mean corrosion depth and standard deviation, the location of maximum stress and the stress concentration factor varied depending on the probability distribution and surface geometry. It was found that the stress concentration factor was predominantly governed by the maximum corrosion depth induced by surface irregularity.

**Keywords** – Corrosion, Stress concentration factor, Probability distribution, Semi-variogram, Finite element analysis (FEA)

### 1. 서론

강재는 온도, 상대습도 및 염화물 등과 같은 노출환경의 영향으로 강구조물 표면에서 부식손상이 발생하게 되며, 부식손상이 발생한 강구조물의 경우 내구성 및 구조적 성능저하가 발생할 수 있다. 이러한 강재의 부식손상은 노출환경 및 조건에 따라 부식형상이 불규칙하고 다양하게 나타나므로 동일한 환경 및 시간에 노출되더라도 손상 수준이 다르게 나타날 수 있으며, 동일한 부재 내에서 발생하는 부식손상도 부식형상과 깊이가 상이하게 나타날 수 있다<sup>[1]</sup>. 부식손상이 발생한 강

재에 하중이 작용할 경우 부식표면의 불규칙성으로 인하여 불균등한 응력이 발생하고, 이로 인하여 평균응력보다 상대적으로 큰 응력집중이 부식된 강재 표면에서 나타날 수 있다. 이러한 강재 부식으로 인한 표면의 불규칙성과 응력 집중 현상은 피로균열을 일으킬 수 있으며, 발생한 피로균열의 진전으로 강재의 파괴나 파단을 유발할 수 있다<sup>[1],[2]</sup>. 따라서, 부식된 강구조물의 효과적인 구조적 안전성 확보 및 유지관리를 위해서는 부식으로 인한 표면의 불규칙성과 불확실성에 따른 응력집중계수를 정량적으로 검토하거나 평가할 필요가 있다.

국내에서는 부식표면의 형상을 고려하여 부식손상이 발생한 부재의 구조적 성능변화와 피로강도 및 응력집중계수를 평가하기 위한 연구들이 수행되었다<sup>[3]-[6]</sup>. 부식된 강재의 표면형상을 고려한 피로강도를 평가하기 위하여 대기환경에 노출된 부재의 부식표면 형상을 측정하고 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통하여 응력집중계수를 계산하였으며, 부식손상 수준에 따라 응력집중계수가 선형적으로 증가하고

Note.-Discussion open until October 31, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 7, 2026; revised on April 8, 2026; approved on April 8, 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

있음을 확인하고 피로강도를 평가하였다<sup>[5]</sup>. 국외에서도 부식표면에서 발생하는 국부적인 응력집중 효과를 분석하기 위해 대기부식 실험을 통해 표면 부식 형상과 응력집중의 상관관계를 규명하는 연구가 진행되었다<sup>[7]-[9]</sup>.

본 연구에서는 불규칙한 부식표면의 특성을 고려하기 위하여 확률특성을 활용하여 부식표면 데이터를 생성하고, 생성된 부식표면을 대상으로 인장하중 상태에서 나타날 수 있는 응력상태 및 응력집중계수 변화를 정량적으로 확인하고자 하였다. 기존의 연구들은 한정된 시험체를 대상으로 분석함에 따라 다양한 부식표면의 형상과 특성을 충분히 반영하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Kriging과 Semi-variogram을 활용하여 불확실성을 가진 부식표면을 모사하고 다양한 수준의 부식손상 표면을 생성하여 유한요소해석에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하였다. 이를 위해 부식표면의 평균 부식깊이, 표준편차 및 Semi-variogram으로 분석된 공간 상관 데이터를 활용하여 부식손상의 불규칙성과 불확실성을 모사하는 부식표면을 생성하였다. 부식표면은 표면이 가지는 불규칙한 특성을 고려하여 Normal분포, Log-normal분포, Gumbel분포에 따라 부식표면을 생성하였으며, 생성된 부식표면을 대상으로 유한요소해석을 통하여 인장하중 상태에서 나타나는 부식표면의 응력형태와 응력집중계수의 변화를 확인하였다.

## 2. 부식표면의 불규칙성

### 2.1 확률분포에 따른 부식표면

부식표면은 환경조건 등에 따라 발생하는 불규칙성과 비정형성으로 인하여 부식표면의 형상을 특정하기 어렵다<sup>[10]</sup>. 따라서 본 연구에서는 부식표면이 가지는 불규칙성에 따른 응력집중계수의 변화 수준을 분석하기 위하여 확률분포에 기반한 부식표면을 생성하였다. 부식표면의 특성은 특정 하나의 분포만을 따르지 않으며, Normal분포, Log-normal분포, Gumbel분포, Weibull분포 등 다양한 형태의 분포로 나타날 수 있다<sup>[11]-[13]</sup>. Normal분포는 평균값에 가장 많은 데이터가 집중되어 나타나며, Normal분포를 나타내는 부식표면의 경우 극단적으로 깊은 피트가 많이 나타나지 않으며 상대적

로 변동성이 적은 부식형상을 지니고 있을 것으로 판단할 수 있다. Log-normal분포는 오른쪽 꼬리가 긴 비대칭 분포를 나타내며, Log-normal분포를 따르는 부식표면의 경우 상대적으로 깊은 피트가 국부적으로 발생할 것으로 판단된다. Gumbel분포는 극치값 분포에 기반하며 상대적으로 가장 깊은 피트와 같은 극단적인 값이 발생하게 되며, Gumbel분포를 따르는 부식표면의 경우 가장 깊은 피트의 발생으로 인하여 응력집중 및 균열이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.2 불규칙성을 반영한 부식표면 생성 방법

#### 2.2.1 Semi-Variogram

본 연구에서는 부식표면의 불규칙성을 고려한 표면을 생성하기 위하여 공간통계에 기반하여 Kriging과 Semi-variogram을 활용하여 부식표면을 생성하였다. Kriging은 지구통계학의 한 방법으로 지질학, 환경과학 등과 같은 분야에서 널리 사용되고 있으며, Fig. 1과 같이 관측 지점 간의 거리와 공간 상관성에 따라 가중치를 결정하고, Variogram모델을 활용하여 측정되지 않은 지점을 예측하거나 불규칙하게 분포된 데이터의 공간 패턴을 보간하는 방법이다<sup>[14],[15]</sup>. 수치모델인 Semi-variogram은 두 지점 간의 거리( $h$ )에 따른 데이터 차이의 분산을 정량화하는 함수로, 데이터 차이의 제곱 평균의 절반인  $\gamma(h)$ 로 정의되며 식 (1)과 같이 나타낸다<sup>[16],[17]</sup>.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}[Z(u_a) - Z(u_a + h)]^2 \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 두 관측 지점 간의 거리를 의미하며,  $N(h)$ 는 데이터 쌍의 개수,  $z$ 는 부식깊이를 의미하며, 식 (1)은 거리  $h$ 에 따른 부식깊이의 공간적 변동성을 정량화한다. 이를 바탕으로 미관측  $x_0$  지점에서의 예측된 부식

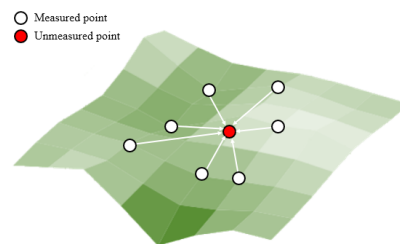


Fig. 1. Concept of kriging method

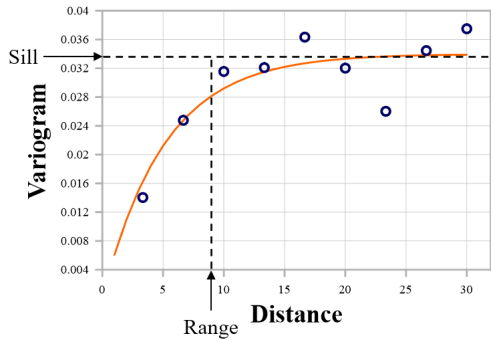


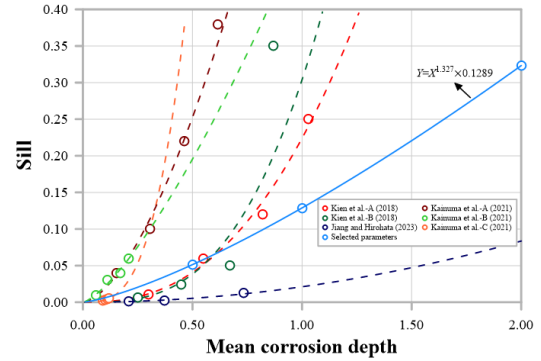
Fig. 2. Relationship of sill, range

깊이  $Z^*(x_0)$ 는 식 (2)와 같이 관측 데이터  $Z(x_i)$ 와 가중치  $\lambda_i$ 의 조합으로 산출된다.

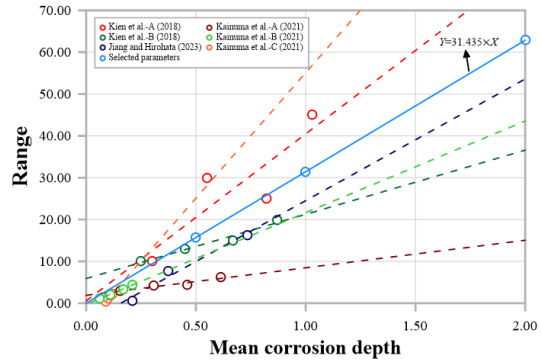
$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

Range 이내에 있는 지점은 더 높은 가중치를 받으며, Range를 벗어나 Sill에 도달한 지점은 상관성이 없는 것으로 판단되어 가중치가 낮아지게 된다. 이러한 Kriging의 계산 원리를 통해 부식표면 데이터에서 추정된 Sill, Range를 활용하여 Node와 Node 사이의 미관측 지점의 부식깊이를 예측함으로써 부식표면을 생성하였다<sup>[14]</sup>. 여기서, Sill이란 Fig. 2와 같이 Semi-variogram의 값이 수렴하는 상한값으로 전체적인 변동성 수준을 나타내며, Range는 공간적 상관성이 실질적으로 소멸하는 특성 거리로 상한값인 Sill에 도달하는 거리의 의미한다<sup>[16],[17]</sup>.

선행 연구에서 다양한 강재표면에서 측정한 부식표면 데이터를 Semi-variogram을 통해서 공간적 상관구조를 분석하였으며, 이를 통해 부식표면의 공간적 변동성을 나타내는 Sill, 공간적 상관성이 유지되는 거리의 범위를 의미하는 Range와 같은 파라미터를 제시하였다<sup>[18]-[21]</sup>. 본 연구에서는 실제 부식형상에 기반하여 부식표면을 재현하고 생성된 부식표면의 신뢰성을 확보하기 위해서 선행 연구에서 제시된 공간적 상관성 파라미터를 활용하여 평균 부식깊이에 따른 Sill과 Range의 범위를 확인하였다. 각 연구에서 분석된 Sill과 Range를 Fig. 3와 같이 나타내었으며, 본 연구에서는 선행 연구들에서 확인된 Sill, Range 값의 평균값을 평균부식 두께에 대하여 Fig. 3와 같이 적용하였다.



(a) Sill-Mean corrosion depth relationship



(b) Range-Mean corrosion depth relationship

Fig. 3. Relationship of sill, range and mean corrosion depth

선행 연구에서 분석된 부식표면의 공간 상관성 데이터를 평균 부식깊이에 따라 분석한 결과, 평균 부식깊이가 유사한 경우에도 부식표면이 가지는 공간적 상관성이 매우 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 부식손상이 발생한 시편 내에서도 측정 위치나 측정 영역의 크기에 따라 부식표면의 공간적 상관성이 달라질 수 있으며, 강재의 재질, 노출환경 등에 의해서도 달라질 수 있음을 확인하였다. Sill과 Range는 각각 독립적이지 않으며, 부식표면의 공간적 변동성을 결정하는 상호변수로 고려하였다. 본 연구에서는 부식표면이 가지는 불규칙성을 반영하기 위하여 평균 부식 깊이와 표준편차 외에도 부식표면 데이터의 확률분포를 변수로 고려하여 부식표면을 생성하였다. 이를 통해 단순히 임의의 난수를 이용하여 부식표면을 생성하는 것이 아닌 실제 부식표면의 통계적 특성과 공간적 상관구조를 고려하고자 하였으며, 이를 통하여 생성된 부식표면을 바탕으로 부식표면의 불규칙성이 강재의 응력 집중에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 부식표면 생성에 사용된 주요 파라미터는 Table 1에 정리하여 제시하였으며, 평균부식깊이는 MCD

(Mean Corrosion Depth), 표준편차는 STD (Standard Deviation)으로 나타내었다.

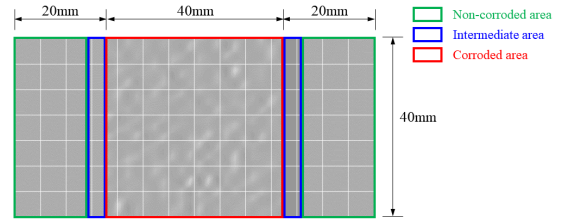
**Table 1.** Generation of corrosion surface parameters

MCD (mm)	STD	Sill (mm <sup>2</sup> )			Range (mm)		
0.5	0.025	0.03	0.10	0.3	12.0	30.0	40.0
	0.050						
	0.075						
	0.100						
1.0	0.025	0.03	0.10	0.3	12.0	30.0	40.0
	0.050						
	0.075						
	0.100						
2.0	0.025	0.03	0.10	0.3	12.0	30.0	40.0
	0.050						
	0.075						
	0.100						

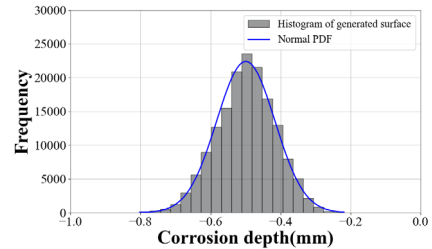
2.2.2 확률분포 기반 부식표면 생성

본 연구에서는 선행 연구의 대기환경에 노출된 강재의 부식표면 정보에 대한 공간 상관성 데이터를 활용하여 확률분포의 변화에 따른 부식표면을 생성하였다. 생성된 부식표면은 Fig. 4와 같이 40 mm×40 mm로 생성하였으며, 부식이 없는 영역과 부식손상으로 인한 단면감소로 급격한 단면 변화를 방지하기 위한 중간 영역으로 구분하였다. 선행 연구의 강재 부식표면 정보를 활용하여 평균 부식깊이, 표준편차와 공간적 상관성을 결정하는 Sill, Range 값을 활용하였으며, Normal분포, Log-normal분포, Gumbel분포를 가지는 부식표면을 생성하고, 생성된 부식표면 데이터의 히스토그램과 각 확률분포의 확률밀도함수를 비교하여 Fig. 5에서 나타내었다. Fig. 5와 같이 Normal분포, Log-normal분포, Gumbel분포를 고려하여 생성된 부식표면 특성은 각 확률모델의 특성을 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

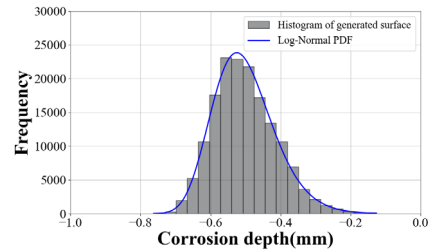
Fig. 6에 나타난 바와 같이 동일한 평균 부식깊이에 대해서도 부식표면이 가지는 표면 특성에 따라 부식표면의 국부적인 형상에서 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 표준편차가 증가함에 따라 국부적으로 부식 형상이 발생하고, 최대 부식깊이가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 생성된 부식표면의 최대 부식깊이를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 부식표면의 최대 부식깊이가 나타나는 단면을 Fig. 7에서 각각의 분포에 대하여 나



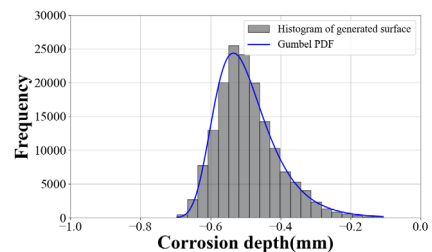
**Fig. 4.** Configuration and dimension of generation surface



(a) Normal distribution



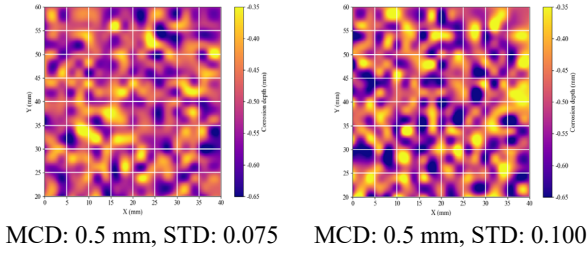
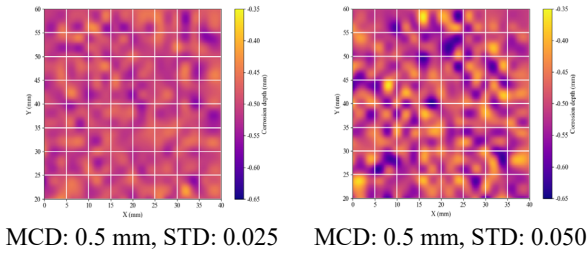
(b) Log-normal distribution



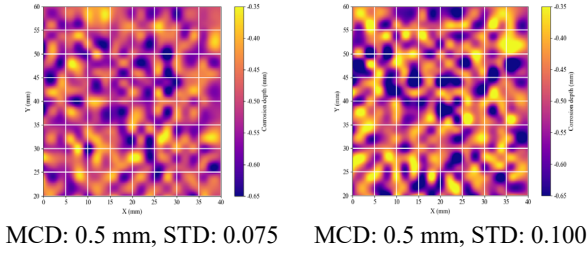
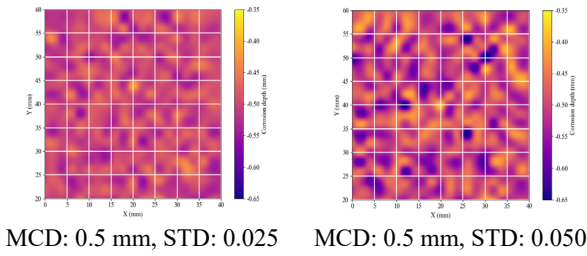
(c) Gumbel distribution

**Fig. 5.** Histogram and PDF of generated corrosion surface (MCD: 0.5 mm, STD: 0.100)

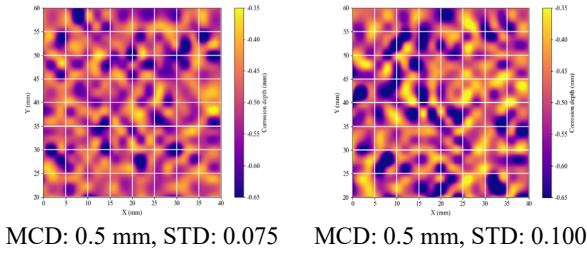
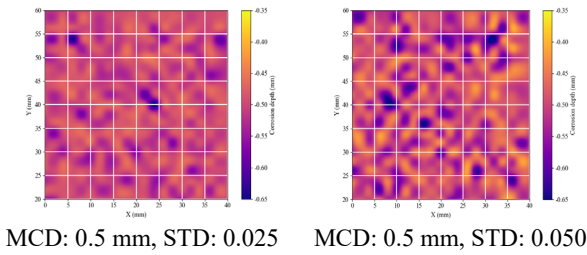
타내었으며, 이를 통해 동일한 평균 부식깊이를 갖는 경우에도 국부적인 형상차이와 최대 부식깊이의 위치와 크기가 다른 것을 확인할 수 있다. 평균 부식깊이는 부식손상 수준을 대표하는 지표로서, 평균적인 단면손상을 반영하므로 비교적 완만한 형상을 나타낸다. 그러나 최대 부식깊이를 포함하는 단면에서는 급격한 깊이 변화가 발생하고 있으며 표준편차가 증가할수록 최대 부식깊이를 갖는 단면과 평균 부식깊이 단면의 차이가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Normal distribution

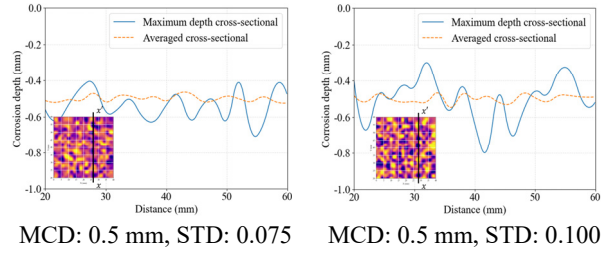
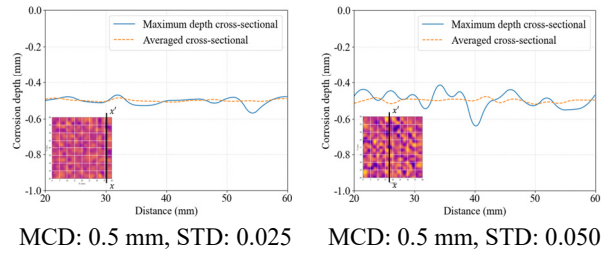


(b) Log-normal distribution

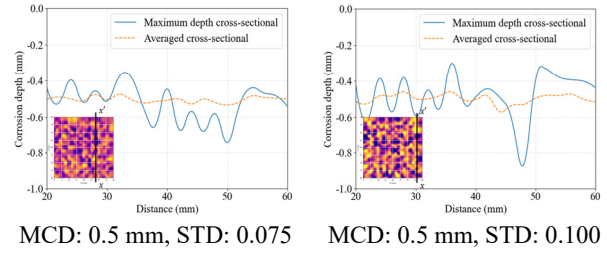
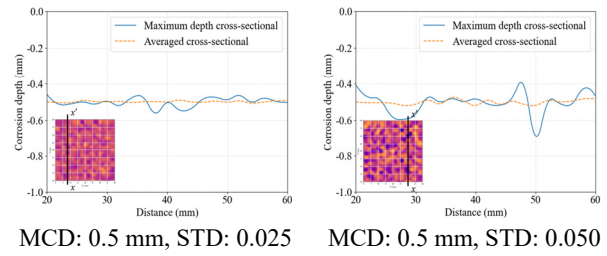


(c) Gumbel distribution

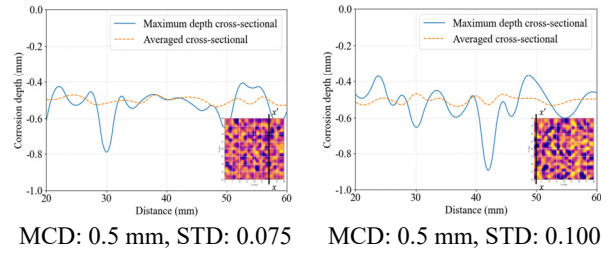
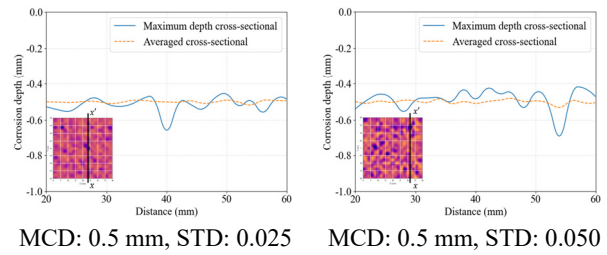
Fig. 6. Corrosion surfaces generated based on probability distributions



(a) Normal distribution



(b) Log-normal distribution



(c) Gumbel distribution

Fig. 7. Maximum depth cross-sectional and average cross-sectional of corrosion surface

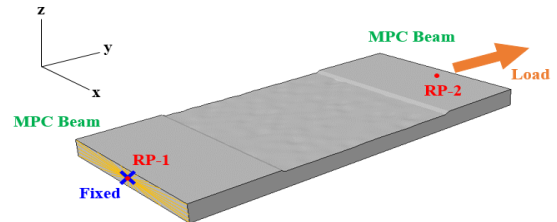
**Table 2.** Maximum corrosion depth of the generated surface

Maximum corrosion depth													
MCD	Distribution	Standard deviation											
		0.025					0.050						
		0.5	Normal	-0.571	-0.568	-0.634	-0.572	-0.574	-0.639	-0.672	-0.668	-0.668	-0.638
	Log-Normal	-0.560	-0.615	-0.572	-0.618	-0.649	-0.688	-0.730	-0.717	-0.741	-0.796		
	Gumbel	-0.656	-0.616	-0.591	-0.615	-0.596	-0.688	-0.861	-0.783	-0.709	-0.810		
1.0	Normal	-1.070	-1.068	-1.098	-1.087	-1.065	-1.158	-1.147	-1.155	-1.165	-1.125		
	Log-Normal	-1.068	-1.189	-1.123	-1.200	-1.197	-1.201	-1.228	-1.262	-1.339	-1.299		
	Gumbel	-1.113	-1.110	-1.113	-1.122	-1.170	-1.192	-1.263	-1.233	-1.202	-1.266		
2.0	Normal	-2.078	-2.073	-2.077	-2.075	-2.086	-2.149	-2.133	-2.161	-2.133	-2.145		
	Log-Normal	-2.079	-2.150	-2.128	-2.109	-2.232	-2.159	-2.274	-2.354	-2.643	-2.342		
	Gumbel	-2.121	-2.123	-2.151	-2.089	-2.177	-2.197	-2.198	-2.171	-2.251	-2.191		
Standard deviation													
MCD	Distribution	0.075					0.100						
		0.5	Normal	-0.708	-0.705	-0.727	-0.733	-0.718	-0.802	-0.761	-0.801	-0.852	-0.795
			Log-Normal	-0.740	-0.973	-0.897	-0.935	-1.089	-0.873	-1.198	-1.026	-1.374	-0.985
	Gumbel	-0.789	-0.796	-0.875	-0.728	-0.778	-0.892	-0.932	-0.980	-0.975	-0.977		
1.0	Normal	-1.268	-1.291	-1.231	-1.257	-1.195	-1.298	-1.348	-1.347	-1.327	-1.330		
	Log-Normal	-1.277	-1.443	-1.390	-1.479	-1.350	-1.304	-1.616	-1.881	-1.577	-1.652		
	Gumbel	-1.349	-1.398	-1.320	-1.316	-1.375	-1.342	-1.448	-1.483	-1.524	-1.466		
2.0	Normal	-2.244	-2.229	-2.207	-2.204	-2.215	-2.318	-2.308	-2.282	-2.301	-2.335		
	Log-Normal	-2.215	-2.453	-2.443	-2.411	-2.415	-2.295	-2.664	-2.529	-2.455	-2.689		
	Gumbel	-2.429	-2.296	-2.448	-2.356	-2.302	-2.596	-2.444	-2.665	-2.360	-2.631		

2.3 부식표면이 적용된 유한요소해석 모델

본 연구에서는 부식표면의 공간통계 분석으로 생성된 부식표면에 대한 유한요소해석을 통하여 부식표면 특성에 따른 표면 응력 및 응력집중계수 변화를 정량적으로 분석하였다. 표면응력 특성을 상세하게 확인하기 위하여 유한요소해석 모델의 부식표면 Mesh를 생성된 부식표면 데이터에 맞춰 가로 및 세로 방향으로 각각 0.1 mm×0.1 mm 간격으로 결정하고, Mesh 높이는 부식표면이 가지는 변동성으로 인하여 기준면을 기준으로 부식표면까지의 높이를 동일한 간격으로 세분화하여 다층 구조로 형성하였다.

부식 형상은 대칭성이 존재하지 않고, 표면의 최대 깊이 위치나 중심점을 명확히 정의하기 어려운 특성을 가지고 있으며, 부식으로 인해 양단의 면적이 서로 달라짐에 따라 하중 작용 시 부가적인 모멘트가 발생할 가능성이 존재한다. 이를 고려하여, 유한요소해석 모델의 길이방향인 y축 방향으로만 거동하고 x축 및 z축 방향의 변위가 발생하기 않도록 구속하여 불필요한 회전이나 비대칭적인 거동을 방지하였다. Fig. 8과 같이 한쪽 끝단은 모든 방향의 변위를 구속한 완전 고정조건을



**Fig. 8.** Boundary condition and load of finite element analysis model

적용하였으며, 반대쪽 단면에 대해 y축 방향으로 1 MPa 인장하중을 적용하였다. 본 연구에서 부식표면의 형상으로 인하여 발생하는 응력집중 현상을 응력집중계수를 통해서 정량적으로 평가하였다. 응력집중계수는 식 (3)과 같이 공칭단면적을 기준으로 산정된 공칭응력 대비 부식표면에서 발생한 최대 응력의 비로 정의하였다. 유한요소해석은 탄성 범위 내에서만 거동하도록 하중을 적용하여 수행하였으며, 강재의 재료 물성치는 일반 구조용 강재의 특성을 반영하여 탄성계수는 210,000 MPa, 포아송비는 0.30을 적용하였다.

$$SCF = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \tag{3}$$

### 3. 유한요소해석 결과

#### 3.1 부식표면의 불규칙성에 따른 표면응력

본 연구에서는 부식표면 데이터의 확률분포 특성과 표면 변동성이 강재의 응력집중계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Normal분포, Log-normal분포, Gumbel 분포를 따르는 부식표면을 생성하고 이에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 평균 부식깊이와 표준편차를 변수로 설정하여 생성한 부식표면의 불규칙성을 모사하였다. 유한요소해석 결과를 통해 평균 부식깊이가 0.5 mm 인 경우 표준편차의 변화에 따른 응력분포를 Fig. 9에서 각각의 확률분포에 대해 정리하여 나타내었다. 최대 응력은 최대 부식깊이가 발생한 위치에서 발생한 경우도 있었지만 부식으로 인한 단면감소와 부식표면의 변동성으로 인하여 최대 부식깊이가 아닌 곳에서도 최대 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 평균 부식깊이와 표준편차를 가지더라도 확률분포의 유형과 부식표면을 생성할 때마다 바뀌는 형상으로 인하여 응력이 집중되는 위치와 응력집중계수가 다르게 나타나는 것을 확인하였다.

#### 3.2 부식표면의 불규칙성에 따른 응력집중계수 분석

Fig. 10에서 각각의 확률분포를 따르는 부식표면의 응력집중계수를 평균 부식깊이에 대해서 나타내었다. Fig. 10과 같이 모든 확률분포에서 평균 부식깊이가 증가함에 따라 응력집중계수가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 평균 부식깊이의 증가로 인하여 유효단면이 감소하여 응력이 집중되는 것으로 판단된다. 또한, 표준편차가 높을수록 응력집중계수가 높게 나타났으며, 이는 표준편차의 증가로 인하여 최대 부식깊이가 증가하여 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 단면감소만 발생하고 부식손상이 나타나지 않은 단면의 응력집중계수도 Fig. 10에 나타내었으며, 평균 부식깊이가 증가할수록 부식표면에서 나타날 수 있는 응력집중계수의 범위가 증가하는 것을 확인하였다. 평균부식깊이가 2.0 mm 인 Normal분포의 경우 부식되지 않은 표면과 비교하여 응력집중계수가 최대 1.43배 증가하였으며, Log-normal 분포는 응력집중계수가 최대 1.70배까지 증가하는 것으로 나타났다. 평균부식깊이가 2.0 mm인 Gumbel분

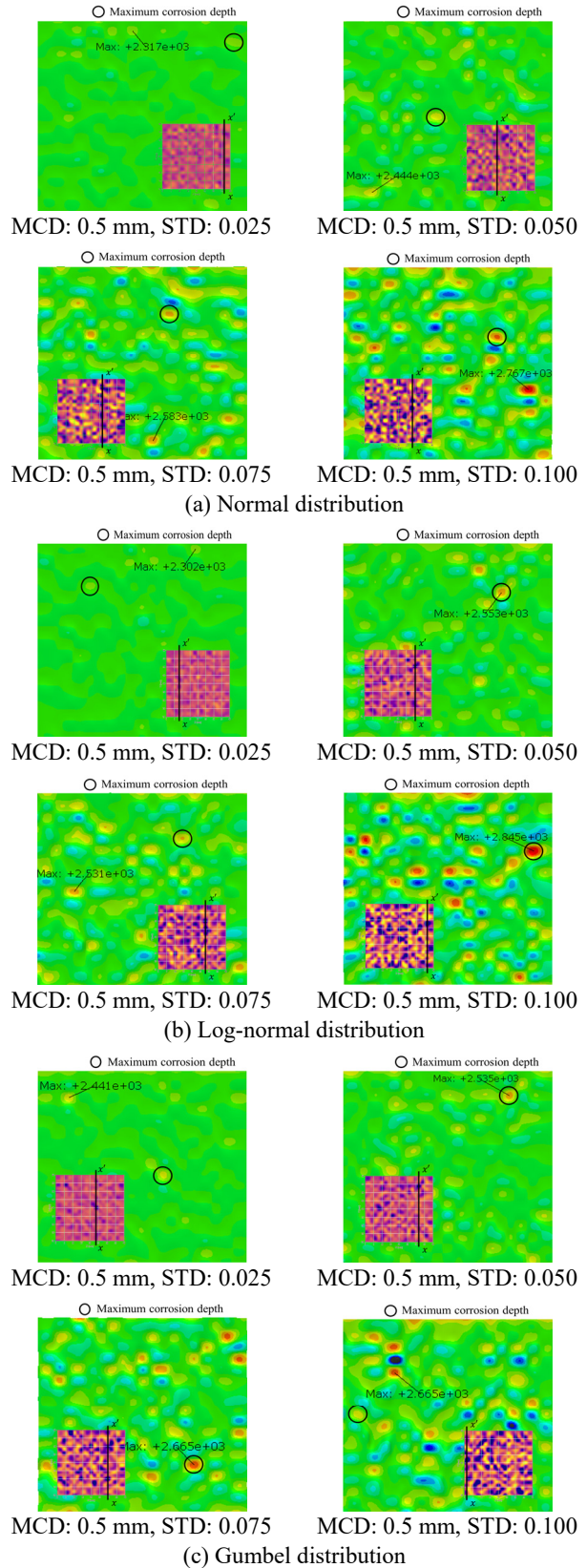


Fig. 9. FE analysis results according to changes in standard deviation

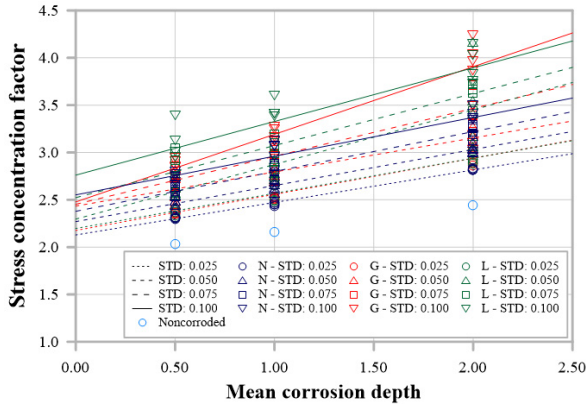


Fig. 10. Relationship between stress concentration factor and mean corrosion depth

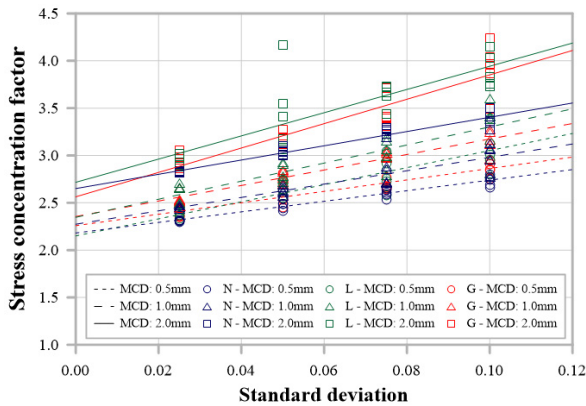


Fig. 11. Relationship between stress concentration factor and standard deviation

포의 경우 부식되지 않은 표면과 비교하여 응력집중계수가 최대 1.73배까지 증가할 수 있음을 확인하였으며, 부식표면이 Gumbel분포를 따르는 경우 동일한 평균 부식깊이와 표준편차를 가지더라도 응력집중계수가 가장 크게 나타날 수 있음을 확인하였다.

Fig. 11에서는 확률분포에 따른 부식표면의 응력집중계수를 표준편차에 대해서 나타내었으며, 최대 부식깊이가 상대적으로 깊게 나타나는 Gumbel분포에서 응력집중계수가 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 확률분포의 유형에 따라 평균 부식깊이가 증가할 경우 표준편차의 변화에 따른 응력집중계수의 상승폭이 증가하는 것을 확인하였다. Normal분포의 경우 평균 부식깊이가 2.0 mm일 때 표준편차가 0.025-0.100 수준으로 증가함에 따라 응력집중계수가 평균적으로 19.76 % 증가하였으며, Log-normal분포는 동일한 경우 응력집중계수가 평균적으로 33.06 % 증가하였다. Gumbel분포도 동일하게 평균 부식깊이가 2.0 mm인

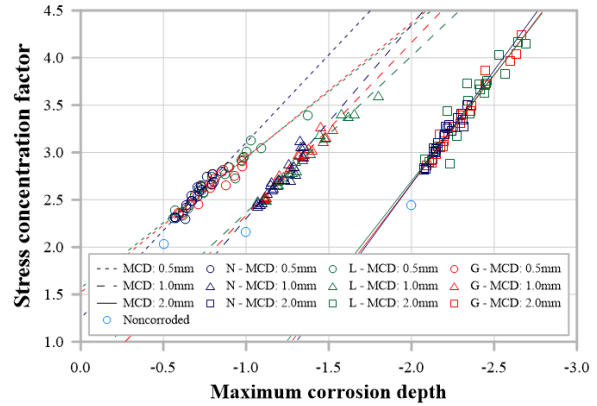


Fig. 12. Relationship between stress concentration factor and maximum corrosion depth

경우 표준편차의 증가에 따라 응력집중계수가 평균적으로 33.13 % 증가하여 가장 크게 상승하는 것을 확인하였다.

Fig. 12에서는 부식의 불규칙성에 따른 부식표면의 응력집중계수를 최대 부식깊이에 따라 나타내었다. Fig. 12와 같이 동일한 평균 부식깊이와 표준편차를 가지더라도 부식표면의 형상에 따라 최대 부식깊이는 다르게 나타날 수 있으며, 부식표면의 응력집중계수는 표면 전체의 전반적인 손상 수준이나 변동성보다 최대 부식깊이에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서, 부식표면의 확률분포가 극값이 발생할 수 있는 Gumbel분포나 Weibull분포와 같은 극치분포를 나타내는 경우에는 최대 부식깊이의 증가로 인하여 응력집중현상이 발생할 수 있으므로 강구조물의 유지관리 측면에서 부식표면의 확률적 특성을 함께 고려한 정량적 평가가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강제 부식표면의 불규칙성에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하기 위하여 다양한 확률분포를 따르는 부식표면을 생성하고, 이에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 생성된 부식표면은 공간적 상관성을 나타내는 Sill과 Range를 사용하여 부식표면의 공간적 특성을 반영하고자 하였으며, 평균 부식깊이와 표준편차를 변수로 설정하여 부식의 불규칙성과 불확실성에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하였다.

- (1) 유한요소해석 결과, 최대 응력은 최대 부식깊이가 발생한 위치에서만 나타나지 않았으며, 부식으로 인한 단면 감소와 표면 형상 및 변동성의 영향으로 다른 위치에서도 최대 응력이 발생할 수 있는 것을 확인하였다. 또한, 동일한 평균 부식깊이와 표준편차에서도 확률분포 유형과 부식표면 형상에 따라 응력집중 위치와 응력집중계수가 달라지는 것을 확인하였다.
- (2) 모든 확률분포에서 평균 부식깊이가 증가함에 따라 응력집중계수는 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 평균 부식깊이 증가에 따른 유효 단면 감소로 인하여 응력이 집중되는 것으로 판단된다. 동일한 평균 부식깊이에서 표준편차가 증가할수록 응력집중계수가 증가하는 경향이 나타났으며, 표준편차의 증가에 따라 응력집중계수가 최대 33.13 % 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 부식되지 않은 표면과 비교하여 응력집중계수가 최대 1.73배까지 증가할 수 있음을 확인하였다.
- (3) 동일한 평균 부식깊이와 표준편차에서도 부식표면이 가지는 확률분포에 따라 최대 부식깊이가 다르게 나타났으며, 부식표면의 응력집중계수는 표면 전체의 전반적인 손상 수준이나 변동성보다 최대 부식깊이에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

본 연구에서 부식표면의 불규칙성과 불확실성을 공간적 상관성과 평균 부식깊이, 표준편차 및 확률분포를 활용하여 모사하고 이에 따른 응력집중계수 변화를 분석하였다. 생성되는 부식표면은 생성할 때마다 형상이 달라지며 최대 부식깊이도 달라질 수 있으므로, 제한된 표본의 표면 결과만으로 분포별 최대 부식깊이의 특성을 일반화하기에는 한계가 있다. 향후에는 다양한 확률분포에 대한 많은 부식표면을 생성하여 최대 부식깊이의 통계적 분포와 변동성에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌(References)

- [1] To, D., Umezawa, O., and Shinohara, T. (2018) Detection of Surface Roughness Evolution of Carbon Steel Subjected to Outdoor Exposure and Constant Humidity Corrosion Tests, *Materials Transactions*, Vol.59, No.8, pp.1239-1243.
- [2] Zhang, H., Ha, L., Li, Q., and Beer, M. (2017) Imprecise Probability Analysis of Steel Structures Subject to Atmospheric Corrosion, *Structural Safety*, Elsevier, Vol.67, pp.62-69.
- [3] Mun, J.-M., Jeong, Y.-S., Jeon, J.-H., Ahn, J.-H., and Kim, I.-T. (2017) Experimentally Evaluating Fatigue Behavior of Corroded Steels Exposed in Atmospheric Environments, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.3, pp.193-204 (in Korean).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Kim, S.K., Kim, M.S., Kim, I.T., and Huh, J. (2026) Evaluation of Axial Compressive Critical Load for Pitting-Corroded Circular Tubular Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.38, No.1, pp.9-17 (in Korean).
- [7] Kainuma, S., Jeong, Y.S., and Ahn, J.H. (2014) Investigation on the Stress Concentration Effect at the Corroded Surface Achieved by Atmospheric Exposure Test, Elsevier, *Materials Science and Engineering: A*, Vol.602, pp.89-97.
- [8] Huang, Y., Wei, C., Chen, L., and Li, P. (2014) Quantitative Correlation between Geometric Parameters and Stress Concentration of Corrosion Pits, *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, Vol.44, pp.168-178.
- [9] Persson, B. N. J. (2023) Surface Roughness-Induced Stress Concentration, *Tribology Letters*, Vol.71, 66.
- [10] Xia, M., Wang, Y., and Xu, S. (2021) Study on Surface Characteristics and Stochastic Model of Corroded Steel in Neutral Salt Spray Environment, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.272, 121915.
- [11] Rivas, D., Caleyó, F., Valor, A., and Hallen, J. M. (2008) Extreme Value Analysis Applied to Pitting Corrosion Experiments in Low Carbon Steel: Comparison of Block

- Maxima and Peak Over Threshold Approaches, *Corrosion Science*, Vol.50, No.11, pp.3193-3204.
- [12] Sun, M., Zhang, Y., Cui, X., Fan, F., Zeng, B., and Dai, K. (2025) Experimental and Numerical Simulation Study of Tensile Mechanical Properties of Corroded Carbon Steel Utilizing Galvanostatic Corrosion and 3D Scanning, *Structures*, Elsevier, Vol.71, 108132.
- [13] Li, Y.M., Zheng, S.S., Tian, Z.X., and Yang, S. (2025) Study on the Degradation of Mechanical Properties and Constitutive Model of Corroded Q235 Steel, *Structures*, Elsevier, Vol.80, 109923.
- [14] Wackernagel, H. (2003) *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, Springer Science & Business Media, USA.
- [15] Oliver, M.A., and Webster, R. (1990) Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems, *International Journal of Geographical Information System*, Vol.4, No.3, pp.313-332.
- [16] Curran, P.J. (1988) The Semivariogram in Remote Sensing: An Introduction, *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, Vol.24, No.3, pp.493-507.
- [17] Olea, R.A. (2006) A Six-Step Practical Approach to Semivariogram Modeling, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol.20, No.5, pp.307-318.
- [18] Jiang, F., and Hirohata, M. (2023) Geostatistical Analysis and Deep Learning Based Prediction for Corrosion Surfaces of Steel Plates, *Journal of JSCE*, Vol.11, No.2, 22-15017.
- [19] Kainuma, S., Yang, M., Xie, J., and Jeong, Y.S. (2021) Time-Dependent Prediction on the Localized Corrosion of Steel Structure Using Spatial Statistical Simulation, *International Journal of Steel Structures*, Vol.21, No.3, pp.987-1003.
- [20] Nguyen, T.P., and Dao, K. (2025) Random Laws of Kriging Method for Simulation of Characteristic of Corroded Surface, *Journal of Materials & Construction*, Vol.15, No.1, pp.66-73.
- [21] Kien D.D. (2018) *Time-Dependent Corrosion Characteristics and Tensile Behavior of Corroded Steel Members in Contact with Concrete*, Ph.D. Dissertation, Pusan National University Korea.

---

**요약**: 본 연구에서는 부식표면이 가지는 불확실성과 불규칙성에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하기 위하여 평균 부식 깊이, 표준편차, 공간적 상관성을 나타내는 지표인 Sill과 Range를 활용하여 부식표면을 생성하고 유한요소해석을 수행하였다. 확률분포와 평균 부식깊이 및 표준편차의 변화를 통해 부식표면의 불규칙성을 모사하였으며, 생성할 때마다 형상이 달라지는 부식표면으로 인하여 동일한 조건에서 부식표면을 생성하여 부식표면의 불규칙성에 따른 응력집중계수를 분석하였다. 분석 결과, 최대 응력은 항상 최대 부식깊이 위치에서 발생하지 않았으며, 동일한 평균 부식깊이와 표준편차를 가지더라도 확률분포 및 표면 형상에 따라 최대 응력 위치와 응력집중계수가 달라지는 것을 확인하였다. 응력집중계수는 표면의 불규칙성으로 인하여 발생하는 최대 부식깊이에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

**핵심용어**: 부식, 응력집중계수, 확률분포, Semi-variogram, 유한요소해석

---