

지중매설물 밀집도와 이력지반함몰의 상관성 분석을 통한 위험도 등급 분석 기법에 관한 연구

A Study of Ground Subsidence Risk Grade Analysis Based on Correlation Between the Underground Utility Structure Density and Recorded Ground Subsidence

최 창 호¹ Choi, Changho

김 진 영² Kim, Jin-Young

강 재 모² Baek, Sung-Ha

Abstract

Several studies have been conducted to analyze the risk of ground subsidence occurring in urban areas. Recently, the correlation between the density of underground utilities (*i.e.*, the quantity of buried utilities in the analysis area) and the recorded ground subsidence has been explored to analyze such risk through. Choi et al. (2021) proposed an algorithm to optimize the correlation between the ground subsidence and normalized linear density of underground pipelines. In this study, the optimization algorithm was modified for analysis based on the risk grade. The analysis results using the modified optimization algorithm were compared with the correlation analysis results between the density of underground utilities and recorded ground subsidence presented by Choi et al. (2021). Compared with Choi et al. (2021), three analysis results showed equal or higher accuracy in the correlation analysis with recorded ground subsidence according to risk grade. In particular, for R100, it was divided into five grades and compared with the ratio of the recorded ground subsidence that occurred in grades 4 or higher. As a result, Choi et al. (2021) showed that 86% of recorded ground subsidence occurred in grades 4 or higher, whereas this study showed 93%. It was confirmed that the accuracy of the modified optimization algorithm was improved. The modified optimization algorithm can be applied to develop a ground subsidence risk map for each grade in an urban area, which can be used as basic data for decision-making for underground utility maintenance.

요 지

도시에서 발생하는 지반함몰의 위험도를 분석하기 위한 연구가 다양하게 진행되었다. 최근에는 지하매설물의 밀도(즉, 해석 공간의 지중에 설치되어있는 시설물의 물량)와 지반함몰 발생의 상관성을 통해 해당 지역의 위험도 등급을 분석하는 연구가 다수 진행되었다. Choi et al.(2021)은 지하매설물의 정규선형밀도 개념을 바탕으로 지반함몰과 정규선형밀도의 상관성을 최적화하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서는 위험도 등급을 기준으로 분석할

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech., Tel: +82-31-910-0785, chchoi@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

수 있도록 최적화 알고리즘을 보완하였다. 보완된 알고리즘을 활용한 해석결과를 Choi et al.(2021)에서 제시한 지하매설물 설치 밀도와 이력지반함몰의 상관성 해석결과와 비교하였다. 3개의 해석결과는 Choi et al.(2021)과 비교하여 위험도 등급에 따른 이력지반함몰과의 상관성 분석에서 동등 이상의 정확도를 나타냈다. 특히, R100의 경우 5개 등급으로 구분하여 4등급 이상에서 발생한 이력지반함몰의 비율을 비교한 결과 Choi et al.(2021)는 86%, 본 연구는 93%의 이력지반함몰이 정규선형밀도 4등급 이상의 지역에서 발생하여 제안된 최적화 알고리즘의 정확도가 향상됨을 확인하였다. 본 연구를 통해 제안된 등급 기준 최적화 알고리즘은 도심지에서 지반함몰 위험도 지도를 제시된 등급별로 분석하고, 지하매설물 유지보수 투자를 위한 의사결정 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Ground subsidence, Optimization, Risk grade, Sinkhole, Utility pipeline density

1. 서론

지난 2021년 12월 고양시에서 지반침하와 함께 상가 건물의 붕괴위험이 발생하여 입주민이 대피하고 시민이 불안감에 빠지는 사고가 발생하였다(YTN 2021). 이외에도 2014년 8월 송파구 석촌 지하차도 아래쪽에 길이 80m 규모의 대형 공동(빈굴)이 발견되었고, 같은 시기에 공사가 진행 중이었던 제 2롯데월드 전면도로에 지반함몰이 다수 발생하고 석촌 호수의 수위가 낮아지면서 시민들의 불안감이 증폭되었다. 정부는 도심지에서 발생하는 땅꺼짐 사고를 방지하고, 지하공간의 안전한 활용을 위해 ‘지하안전관리에 관한 특별법’을 2018년부터 전면시행하고 있다(Han, 2018).

도심지에서 발생하는 지반함몰의 대다수가 지하에 매설된 관로주변의 지반에서 발생하는 것으로 보고되었다(Kim, 2022). 도심지에서의 사고를 예방하기 위해 지반 침하 및 함몰 위험도를 예측하고 관로의 유지관리에 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 대표적으로 Choi et al.(2016)과 Park et al.(2017)은 상수도 및 하수관로의 구조건전도와 누수 등의 결함을 센싱하여 지반함몰 위험도를 분석할 수 있는 방안을 제시하였다. Kim et al.(2018)과 Kwak et al.(2019)은 하수관로 주변지반의 안전도 분석에 초점을 맞추어, 관로의 설치 상태, 강우, 연식 등과 지반함몰 위험도의 로지스틱 회귀 모델을 통해 위험도를 예측하는 연구를 수행하였다. Choi et al.(2021)과 Kim et al.(2021)은 서울시 지하매설물 정보를 분석하고 지하매설물의 선형밀도와 이력지반함몰 발생의 상관성을 분석하고, 위험도를 예측할 수 있는 최적화 모델을 제시하였다.

Choi et al.(2021)은 도심지 지하공간에 매설되어 있는 6종 시설물(상수도관로, 하수관로, 전력지중관로, 가

스관로, 열배관, 통신관로)의 GIS기반 공간정보 데이터를 활용하여, 대상지역의 하부에 설치되어 있는 선형밀도를 분석하고, 2010~2015년 사이에 발생한 이력지반함몰의 위치와 상관관계를 분석하였다. 선형밀도는 공간분석(spatial analysis)에서 활용되는 방법으로, 관심지역 셀 주위의 임의의 반경 내에 설치되어 있는 지하매설물 길이를 단위 면적당의 크기로 정의한다(ArcGIS 2022). 6종 지하매설물에 따라 설치깊이, 직경, 기능 등이 상이하기 때문에 관심 셀에서 선형밀도는 임의의 반경 내에서 각 매설물 길이별로 가중치를 설정하여 분석해야 한다. Choi et al.(2021)은 이력지반함몰 데이터와 지하매설물 선형밀도의 상관성을 높일 수 있도록 6종 지하매설물의 가중치를 결정하는 최적화 알고리즘을 제안하였다.

공간상의 위험도 분석은 등급을 구분하여 제시하는 것이 일반적이다(Kwon and Kim, 2014). 본 연구에서는 Choi et al.(2021)이 제안한 알고리즘을 보완하여, 제시된 위험도 등급에 따라 이력지반함몰과 매설물 밀도의 상관관계를 향상시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다. 수정된 알고리즘은 Choi et al.(2021)이 제시한 1km × 1km 대상 지역의 위험도를 분석하는데 적용되고, 결과의 상호비교를 통해 정확도의 향상정도를 제시한다.

2. 지하매설물 선형밀도 산정

지하공간에 설치된 매설물의 선형밀도는 ArcGIS에서 제공하는 공간분석 기능을 활용하였다(ArcGIS, 2021). 본 절에서는 Choi et al.(2021)에서 제안한 선형밀도(line density)와 정규선형밀도(normalized line density)에 대하여 요약 설명한다. 선형밀도(line density)는 공간상에서 단위 셀 주변에 설치된 구조물의 밀도특성을 나타내

며, 해당지역 내에 포함된 선의 공간적인 밀집 정도를 나타낼 수 있는 지표로 단위면적당 길이로 산정한다. Fig. 1은 셀(grid cell)별로 선형밀도(ρ)를 계산하는 개념을 보여준다. 개념적으로 원내에 위치하는 선들의 길이의 합을 산정하고 이를 원의 면적으로 나누어 선형밀도(ρ)를 계산한다. L_1 과 L_2 는 원 안에 설치되어 있는 2개 매설물의 공간상의 길이를 나타내며, 각 매설물의 특성에 따라 가중치 w_1 과 w_2 를 가정할 수 있다. 이때의 선형밀도(ρ)는 식 (1)을 통해 산정할 수 있다.

$$\rho = \frac{w_1 L_1 + w_2 L_2}{A_R} \quad (1)$$

여기서, A_R 은 해당 셀에 영향을 미치는 원의 반지름 R 로부터 계산된 원의 면적이다. Fig. 1과 식 (1)로부터 셀(grid cell)의 크기, R 의 크기, 가중치 w_1 과 w_2 를 결정하여 선형밀도를 산정할 수 있다.

Choi et al.(2021)은 대상 지역의 정규 선형밀도를 산정하기 위해 식 (2)를 제안하였다.

$$\rho_n = \frac{w_1 L_1 + w_2 L_2 \dots + w_n L_n}{n \cdot A_R} \quad (2)$$

where, w_1, w_2, \dots, w_n : weight factors

L_1, L_2, \dots, L_n : length of each buried structures

n : number of buried structure types

R : radius of affecting zone

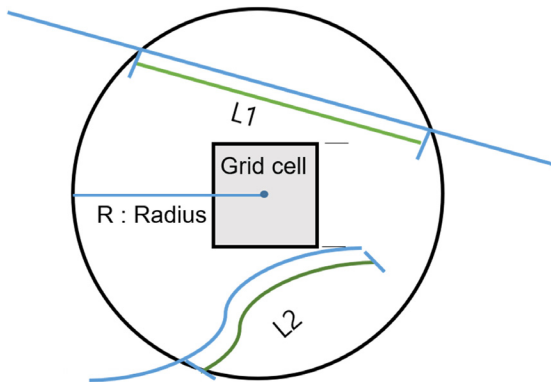


Fig. 1. A raster cell and the circular neighborhood used to determine the length for the line density redrawn from ArcGIS (2022) (Choi et al. (2021))

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1.0 \quad (3)$$

식 (2)에서 ρ_n (정규선형밀도)는 고려 대상 지하매설물 종류의 개수로 정규화된 선형밀도 값으로 정의할 수 있으며, 식 (3)으로부터 n 개 매설물별 weight factor의 합은 1.0으로 제한된다.

본 연구에서는 기본적으로 지반함몰이 발생된 위치에서 정규선형밀도가 높게 분포된다는 가정 하에 최적화 알고리즘을 제안한다. 식 (3)을 충족하고 정규선형밀도가 높게 분석될 수 있도록 6종 지하매설물(상수관, 하수관, 전력 지중관로, 천연가스배관, 통신선로, 열 배관)의 w_1, w_2, \dots, w_6 을 랜덤으로 생성하였다. Choi et al.(2021)에서 적용한 100,000세트의 동일한 랜덤 벡터를 본 해석에 활용하였다.

3. 이력지반함몰 데이터를 활용한 위험도 등급 분석 알고리즘

본 절에서는 Choi et al.(2021)에서 제시한 이력지반함몰 데이터 기반의 최적 정규선형밀도 분석 알고리즘을 요약하여 설명하고, 위험도 등급을 기반으로 최적화하기 위하여 보완된 Error 함수를 제시한다.

식 (4)는 지반함몰이 발생한 셀에서 정규선형밀도를 100,000세트의 랜덤 $w_i = [w_1; w_2; w_3; w_4; w_5; w_6]$ 로 산정하기 위한 일반식이다.

$$\rho_{ns} = \rho_{sh} \cdot w_i \quad (4)$$

여기서, ρ_{ns} : 지반함몰이 발생한 셀에서 정규선형밀도, ρ_{sh} : 지반함몰이 발생한 셀에서 선형밀도, Dot product(\cdot): Matrix multiplication을 의미한다. Choi et al.(2021)은 ‘지반함몰이 발생한 지점의 ρ_n 은 해석 대상 구역에서 상대적으로 높은 값을 갖는다’는 전제하에 최적화(optimization)를 위한 Error 함수를 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$Err^k = \| 1 - N_{ps}^k \| \quad (5)$$

앞서 설명한 바와 같이 공간상의 위험도 분석은 등급을 구분하여 제시하는 것이 일반적이다(Kwon and Kim, 2014). 본 논문에서는 ‘지반함몰이 발생한 지점에서 지반함몰 위험도 등급이 가장 높다’는 가정 하에 식 (6)의

Error 함수를 새롭게 제안한다. 새로운 Error 함수의 제시가 Choi et al.(2021)과 차별화되는 부분이다.

$$Err^k = \| GN - G_{ps}^k \| \quad (6)$$

식 (6)에서 GN 은 구분하고자 하는 위험도 등급의 개수이다(e.g, 5등급으로 분류하고자 하면 $GN=5$ 이고, 5등급이 가장 위험한 등급이다). 인덱스 k 는 랜덤 $w_i - set$ 의 순번이며, G_{ps}^k 는 지반함몰 발생위치에서 k 번째 $w_i - set$ 을 적용할 때 위험도 등급이다. 따라서 식 (6)은 ‘지반함몰이 발생한 지점에서 지반함몰 위험도 등급이 가장 높다’는 전제하에 Error의 Norm을 나타낸다. G_{ps}^k 은 아래의 sub-function을 통해 산정된다.

function $G_{ps}^k = \text{normdensity2grade}(N_{ps}^k, GN)$

ρ_n^k 은 해석영역에 w_i^k 를 적용할 경우의 정규선형밀도로서 최대값은 $Max(\rho_n^k)$ 로 정의되며, N_{ps}^k 은 지반함몰이 발생한 위치에서 w_i^k 를 적용할 때 $Max(\rho_n^k)$ 으로 정규화된 선형밀도의 비율(0~1.0)로 정의된다(식 (7) 참조).

$$N_{ps}^k = \frac{\rho_{ns}^k}{Max(\rho_n^k)} \quad (7)$$

ρ_{ns}^k 는 지반함몰 발생위치에서 w_i^k 를 적용하여 산정한 정규선형밀도이며, ρ_n^k 는 식 (8)과 같이 해석영역의 모든 셀에 w_i^k 를 적용할 경우의 정규선형밀도이다. 식 (8)에서 ρ_{raw} 는 ArcGIS로 산정한 매설물별 선형밀도이다.

$$\rho_n^k = \rho_{raw} \cdot w_i^k \quad (8)$$

따라서, sub-function ‘normdensity2grade’는 지반함몰이 발생한 위치에서 정규화된 선형밀도 N_{ps}^k 의 위험도 등급을 등급 개수 GN 을 적용하여 산정하는 역할을 수행한다.

식 (6)을 통해 100,000개 세트의 Error Norm을 분석하고, 식 (9)와 식 (10)을 통해 Error가 최소인 $w_{grade} - set$ 을 결정한다.

$$k_{grade} = \text{find}(\text{Min}(\text{Err})) \quad (9)$$

$$w_{grade} = w_i^{k_{grade}} \quad (10)$$

식 (9)의 k_{grade} 는 100,000개의 $w_i - set$ 중에서 식 (6)의 Error가 최소화 될 때의 인덱스로 정의된다. Table 1은 식 (4)~식 (10)을 구현하기 위한 Pseudo-code를 보여준다.

Table 1. Pseudo-code to obtain optimal $w_i - set$ for finding higher correlation between risk grade and ground subsidence modified from Choi et al. (2021)

Pseudo-code	Description
for $k = 1 : 100,000$	
$\rho_n^k = \rho_{raw} \cdot w_i^k$	% ρ_n^k : normalized line density with k^{th} $w_i - set$ % ρ_{raw} : line density obtained from ArcGIS % w_i^k : k^{th} $w_i - set$
$\rho_{n_{max}}^k = \max(\rho_n^k)$	% $\rho_{n_{max}}^k$: maximum scalar value of ρ_n^k
$\rho_{ns}^k = \rho_{sh} \cdot w_i^k$	% ρ_{ns}^k : normalized line density at the locations of ground subsidence % ρ_{sh} : line density at the locations of ground subsidence
$N_{ps}^k = \frac{\rho_{ns}^k}{\rho_{n_{max}}^k}$	% N_{ps}^k : normalized ρ_{ns}^k with $\rho_{n_{max}}^k$
$G_{ps}^k = \text{normdensity2grade}(N_{ps}^k, GN)$	% G_{ps}^k : risk grade at ground subsidence locations
$Err^k = \text{norm}(GN - G_{ps}^k)$	% Err^k : grade error norm with k^{th} $w_i - set$
end	
$k_{grade} = \text{find}(\text{Min}(\text{Err}))$	% k_{grade} : Index where Err is minimum
$w_{grade} = w_i^{k_{grade}}$	% w_{grade} : $w_i - set$ at the index of k_{grade}

4. 위험도 등급별 지하매설물 선형 밀도와 이력지반함몰의 상관성 분석 결과

본 절에서는 ‘지반함몰이 발생한 지점에서 지반함몰 위험도 등급이 가장 높다’라는 전제하에 제안된 지반함몰 위험도 분석 알고리즘을 실제로 발생한 이력지반함몰 데이터에 적용하여 지하매설물 밀도와 상관관계를 비교한다. 또한, 분석결과를 Choi et al.(2021)에서 제시한 알고리즘을 적용한 결과와 비교하여 위험도 분석 정확도의 향상정도를 파악하였다. 대상지역은 Choi et al. (2021)에서 제시한 서울시 송파구 일대이며, $1\text{km} \times 1\text{km}$

대상 지역을 선정하여 6종 지하매설물의 선형밀도 데이터를 분석하고, 해당 지역에서 2010~2015년 사이에 발생한 29건의 지반함몰 위치데이터와 공간상에서 매설물 밀집도의 상관관계를 분석하였다.

Fig. 2는 2010~2015 기간 동안 발생한 29개의 이력지반함몰을 빨간색 점들로 보여준다. Table 2는 해당 지역에 설치된 6종 지하매설물(상수관로, 하수관로, 전력지중관로, 가스관로, 열 배관, 통신관로)의 총 설치길이와 단위 관로의 개수를 제시한다.

Fig. 3은 29개 이력지반함몰 위치에서 정규선형밀도 분석 결과를 5개 등급으로 구분하여 보여준다. 첫 번째

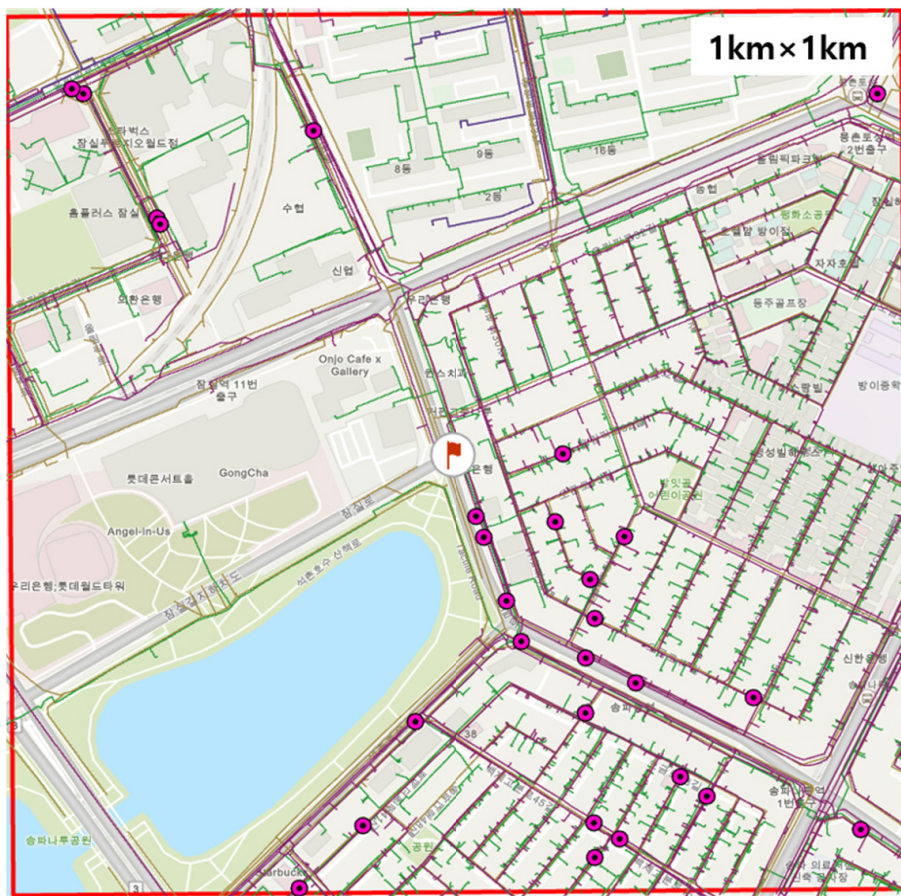


Fig. 2. $1\text{km} \times 1\text{km}$ map of analysis region and 29 ground subsidence locations with magenta circle symbol (Choi et al. (2021))

Table 2. Length and number of unit for 6 buried utility structures (Choi et al. (2021))

Buried structures	Total length (m)	No. of unit pipe (ea)	Avg. unit length (m)	Portion to total (%)
Water	35,246	2,840	12,41056	23.48
Sewer & Storm water	26,630	873	30,50401	17.74
Power	18,727	816	22,94975	12.48
Natural Gas	32,772	3,363	9,744871	21.83
Heat	2,298	28	82,07143	1.53
Communication	34,443	636	54,15566	22.94
Total	150,116	8,556	-	100

열은 최적화 알고리즘을 적용하지 않은 $w_i = 1/6$ 경우, 두 번째 열은 Choi et al.(2021)에서 제안한 w_{opt} (정규선형밀도를 기준으로 최적화된 w_i)을 적용한 경우, 세 번째 열은 본 연구에서 제안한 w_{grade} (등급 기준으로 최적

화된 w_i)을 적용한 해석결과이다. Table 3은 6종 지하매설물(상수관로, 하수관로, 전력지중관로, 가스관로, 통신관로, 열 배관)별로 가중치($w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6$)를 보여주며, w_{opt} 는 식 (5)로 최적화한 경우이고 w_{grade} 는 식

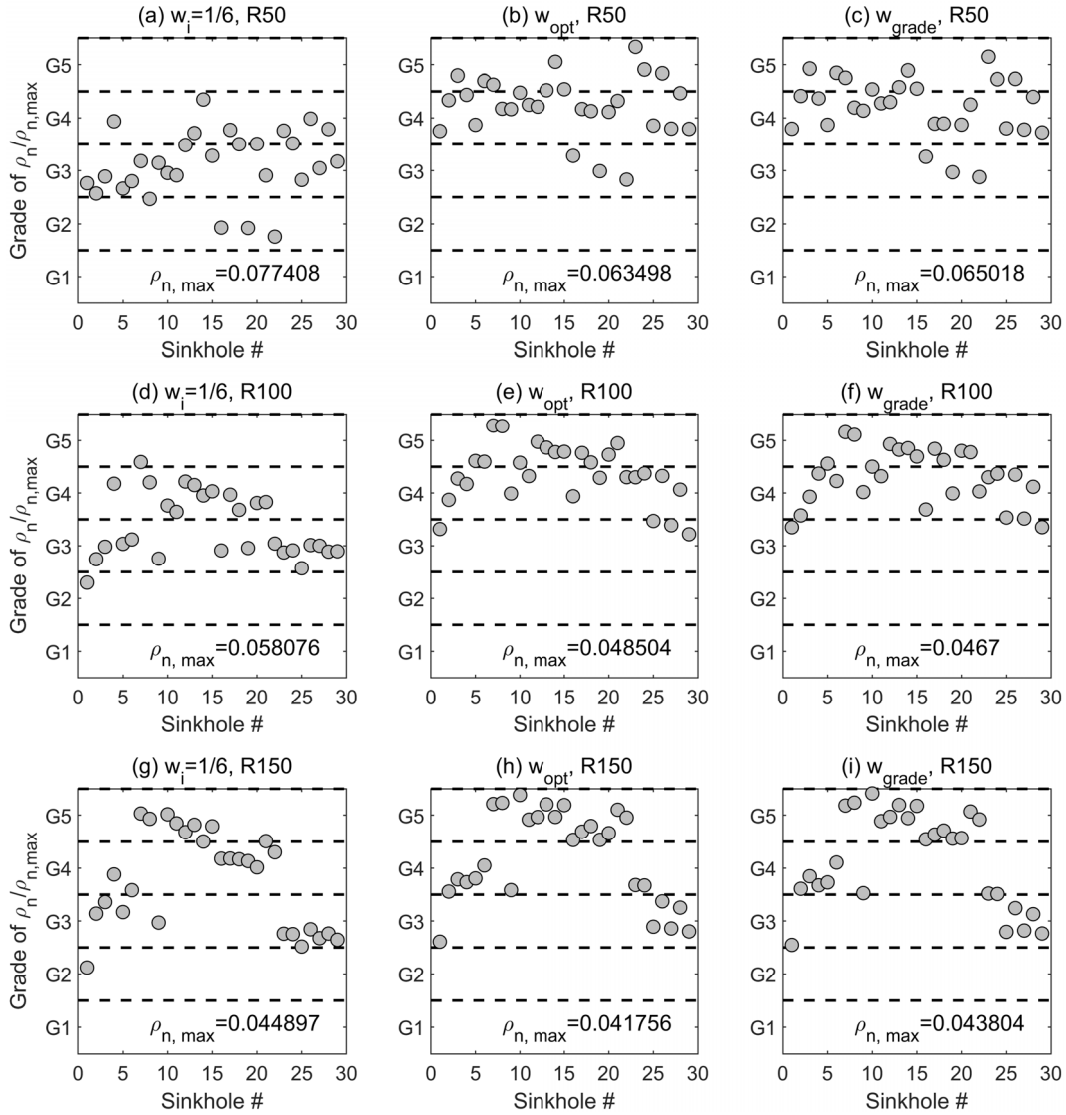


Fig. 3. Comparison of grades of $\frac{\rho_n}{\rho_{n,max}}$ at 29 sinkhole locations, first column $w_i = \frac{1}{6}$, second column w_{opt} (Choi et al. (2021)) and third column w_{grade} with R: 50m, 100m, 150m for this study

Table 3. w_{grade} and w_{opt} out of 100,000 w_i -set obtained from minimizing Error functions (Eq. (5) and Eq. (6)) with the variation of R

Radius (Cell 10m)	Type	w_1 (Water)	w_2 (Sewer)	w_3 (Power)	w_4 (Gas)	w_5 (Communication)	w_6 (Heat)
R50	w_{opt}	0.2064	0.4107	0.0271	0.2851	0.0673	0.0034
	w_{grade}	0.2629	0.4237	0.0111	0.2615	0.0367	0.0041
R100	w_{opt}	0.0202	0.6381	0.0012	0.2287	0.1007	0.0112
	w_{grade}	0.0049	0.6391	0.0643	0.1690	0.0937	0.0290
R150	w_{opt}	0.0023	0.5529	0.0659	0.1861	0.1423	0.0505
	w_{grade}	0.0502	0.5155	0.0389	0.1825	0.1610	0.0520

(6)을 적용하여 최적화한 경우이다. Fig. 3의 각 열의 위에서부터 R 은 각각 50m, 100m, 150m을 적용한 결과이며, 본 연구에서는 Fig. 1의 셀 크기(Grid cell)의 가로, 세로 길이를 10m로 설정하였고, 자세한 공간분석 내용은 Choi et al.(2021)을 참조한다. 첫 번째 열과 비교하면 두 번째 및 세 번째 열의 최적화 알고리즘을 적용하여 선형밀도분석에 활용할 경우 이력지반함몰이 일어난 위치에서 정규선형밀도의 등급이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 최적화 알고리즘을 적용하면 이력지반함몰 발생 위치와 지하매설물 밀도의 상관성에 대한 정확도를 향상시킬 수 있음을 의미한다.

본 연구는 위험도 등급(grade)을 기준으로 Error 함수를 제안한 점이 Choi et al.(2021)과 차별화 된다. Fig. 3의 데이터를 보다 명확히 이해하기 위하여 Table 4에 5개 등급별로 이력지반함몰의 발생개수를 분석하였다. Table 4에서 제시된 바와 같이 2개의 최적화 알고리즘 (w_{opt} & w_{grade})을 적용할 경우 이력지반함몰은 모두 위험등급 3이상에서 발생한 것으로 분석되었다. Choi et al.(2021)의 최적화 알고리즘과 본 연구의 최적화 알고리즘의 차이는 4등급 이상의 지하매설물 정규선형밀도 지역에서 나타난다. Table 3의 $R50$ 과 $R150$ 에서 2개의 최적화 알고리즘을 적용할 경우 각각 90%와 79%의 이력지반함몰이 4등급 이상에서 동등하게 발생되었다. 하지만, $R100$ 의 경우 Choi et al.(2021)은 86%, 본 연구의 경우 93%의 이력지반함몰이 4등급 이상에서 발생하였다. 이는 본 연구에서 제안한 Error 함수인 등급기준의 최적화 알고리즘을 적용할 경우, 관심 지역에서 지반함몰 위험도 등급 결정에 있어 보다 정확한 결과를 제시한다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 $R100$ 해석결과에 대하여 식 (5)와 식 (6)의 Error 함수를 상호 비교하여 보여준다. Fig. 4(a)와 4(b)

는 각각 식 (5)와 식 (6)에 대하여 100,000세트의 랜덤 w_i 을 적용한 경우 Error 함수의 해석결과이다. Error 함수 식 (5)와 식 (6)을 100,000세트의 랜덤 w_i 에 적용할 경우 각각 랜덤 세트의 인덱스 $k=24,073$ (심볼 ‘+’)와 $k=41,509$ (심볼 ‘*’)에서 Error가 최소화 되는 것으로 나타났다. 즉, Fig. 4(a)(식 (5))의 ‘+’에서 최소 Error Norm이 분석되었고, 이때의 인덱스 k 를 식 (6)에 적용하여 발생하는 Error Norm을 Fig. 4(b)에 ‘+’로 표기하였다. 마찬가지로 Fig. 4(b)(식 (6))의 ‘*’에서 최소 Error Norm이 분석되었고, 이때의 인덱스 k 를 식 (5)에 적용하여 발생하는 Error를 Fig. 4(a)에 ‘*’로 표기하였다. Fig. 4(a)에

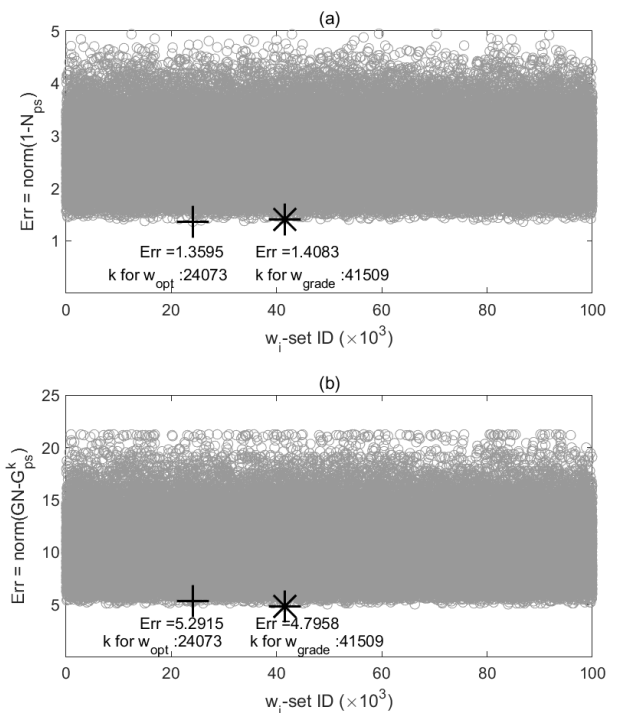


Fig. 4. Graphical comparison of Error Norms and its index out of 100,000 random weight factor set; (a) Error function Eq. (5) and (b) Error function Eq. (6)

Table 4. Number of ground subsidences corresponding to 5 grades at 29 sinkhole locations with $w_1, w_2, \dots, w_6 = \frac{1}{6}$, w_{opt} and w_{grade}

Radius	R50			R100			R150		
	Choi et al. (2021)		This study	Choi et al. (2021)		This study	Choi et al. (2021)		This study
	$w_i = \frac{1}{6}$	w_{opt}	w_{grade}	$w_i = \frac{1}{6}$	w_{opt}	w_{grade}	$w_i = \frac{1}{6}$	w_{opt}	w_{grade}
G1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G2	4	0	0	1	0	0	1	0	0
G3	15	3	3	15	4	2	11	6	6
G4	10	17	16	12	12	15	8	8	8
G5	0	9	10	1	13	12	9	15	15
% ($\geq G4$)	34	90	90	45	86	93	59	79	79

Table 5. Comparison of Error Norm between Error functions Eq. (5) and Eq. (6)

Radius (Cell 10m)	Optimized $w_i - set$	$Err = \ 1 - N_{ps}\ $ Eq. (5)	$Err = \ GN - G_{ps}^k\ $ Eq. (6)	$\left \frac{Eq(6) - Eq(5)}{Eq(5)} \right (%)$
R50	$w_{opt} (k^+ = 33838)$	1,4931	1,5237	-
	$w_{grade} (k^+ = 86066)$	5,3852	5,2915	0,4
R100	$w_{opt} (k^+ = 24073)$	1,3595	1,4083	-
	$w_{grade} (k^+ = 41509)$	5,2915	4,7958	3,5
R150	$w_{opt} (k^+ = 79685)$	1,6675	1,7177	-
	$w_{grade} (k^+ = 10110)$	5,6569	5,6569	0

* Index out of 100,000 random $w_i - set$

서 Error의 Norm을 보면 식 (5)를 적용한 경우 1.3595, 식 (6)로부터 구한 k 를 적용한 경우는 1.4083으로 나타났다. 본 연구의 등급기준으로 최적화 할 경우 ‘지반함몰이 발생한 지점의 정규선형밀도(ρ_n)는 해석 대상 구역에서 상대적으로 높은 값을 갖는다’라는 가정 하에 최적화한 경우보다 Error Norm이 다소 큰 것으로 분석되었다. 하지만, Fig. 4(b)에서 식 (6)을 적용한 결과를 보면 Error Norm이 각각 5.2915와 4.7958로 나타나 위험도 등급 기준으로 최적화 알고리즘을 적용하면 Error의 Norm이 작아지는 것을 알 수 있다. 즉, 위험도 등급을 구분하기 위한 최적화 알고리즘에는 식 (6)의 등급기준 Error 함수가 보다 적합한 것으로 분석되었다. Table 5는 R50, R100, R150의 경우 식 (5)와 식 (6)을 적용한 경우의 Error값을 상호 비교하여 보여준다. 앞서의 결과와 유사하게 R100의 경우 5개의 위험도 등급 기준으로 해석하면, Choi et al.(2021) 대비 3.5%의 Error 감소 효과를 나타냈고, R50과 R150의 경우 동등 이상의 Error 감소 효과를 나타냈다.

5. 결론

본 논문에서는 Choi et al.(2021)이 제안한 지하에 설치되어 있는 매설물의 선형밀도(line density)와 지반함몰 위험도의 상관관계를 최적화하기 위한 보완연구를 수행하였다. Choi et al.(2021)은 지하매설물의 정규선형밀도 개념을 도입하고, ‘지반함몰이 발생한 위치에서 정규선형밀도가 높다’는 가정 하에 Error 함수를 제안하였다. 하지만, 도심지 재해를 관리하는 측면에서는 위험도 등급을 구분하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 위험도 등급 기준을 바탕으로 ‘지반함몰이 발생한 지역에서 위험도 등급이 높다’는 가정을 통해 Error 함

수를 보완하였다. 두 종류의 Error 함수를 적용하고 이력지반함몰과 지하매설물 밀도의 등급을 상호 비교하기 위하여, Choi et al.(2021)에서 활용한 2010~2015년 사이에 발생한 29개 이력지반함몰과 선형밀도의 상관관계를 비교 분석하였다. $1km \times 1km$ 지역에 대한 정규선형밀도를 분석하고, 두 종류의 Error 함수를 통해 5단계 위험도 등급에서 발생한 이력지반함몰 발생 건수를 분석하여 다음과 같은 주요 결론을 도출했다.

- (1) R50, R100, R150의 선형밀도 데이터를 활용하여, Error 함수(1)은 ‘지반함몰이 발생한 위치에서 정규선형밀도가 높다’, Error 함수(2)는 ‘지반함몰이 발생한 지역에서 위험도 등급이 높다’는 가정을 바탕으로 제안되었다. 5개 등급으로 구분하여 4등급 이상에서 발생한 지반함몰의 비율을 비교하였다. R100의 경우에서 Error 함수(1)의 경우 86%, Error 함수(2)의 경우 93%의 이력지반함몰이 4등급 이상에서 발생하여 제안된 Error 함수의 정확도가 향상됨을 알 수 있다. R50과 R150의 경우 Error 함수(1)과 Error 함수(2)의 정확도가 유사하게 나타났다. 분석 결과로부터 본 연구를 통해 제안된 ‘지반함몰이 발생한 지역에서 위험도 등급이 높다’는 가정의 Error 함수가 ‘지반함몰이 발생한 위치에서 정규선형밀도가 높다’는 가정의 Error 함수와 비교하여 보다 정확한 등급별 위험도 분석 결과를 제시하는 것으로 나타났다.
- (2) 도심지 재해를 예측하기 위한 위험도 분석은 등급을 구분하여 해석하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구를 통해 제안된 등급 기준 최적화 알고리즘은 도심지에서 지반함몰 위험도 지도를 등급별로 분석하는데 적용될 수 있으며, 이를 바탕으로 지하매설

물 유지보수 투자를 위한 의사결정 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원(22주요-대1-임무) 지하공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발(3/3) 지원으로 수행되었으며, 2022년도 국방대학교 안보과정 논문/정책연구보고서의 일환으로 작성되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. ArcGIS (2022), <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-line-density-works.htm>.
2. Choi, C., Kim, J., Kang, J., and Park, Y. (2016), "Ground Subsidence Risk Analysis with Intensity and Duration of Rainfall", *Proc. of 3rd International Conference on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*, GEOTEC HANOI 2016 in Hanoi, Vietnam.
3. Choi, C., Kim, J., Baek, S-H, and Kang, J. (2021), "A Study on the Optimization Algorithm for Correlation Analysis of the Underground Utility Structure Density in Urban Areas and Recorded Ground Subsidence", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.10, pp.77-87.
4. Han, Y. (2018), "Proposal of the Development Direction on the Special Act on Underground Safety Management for Preparation of the Proactive Underground Safety Management System", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.7, pp.17-27.
5. Kim, K., Kim, J., Kwak, T-Y., and Chung, C-K. (2018), "Logistic Regression Model for Sinkhole Susceptibility due to Damaged Sewer Pipes", *Natural Hazards*, Vol.93, pp.765-785.
6. Kim, J., Kang, J., and Choi, C. (2021), "Correlation Analysis of the Occurrence of Ground Subsidence According to the Density of Underground Pipelines", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.22, No.11, pp.23-29.
7. Kim, J. S. (2022), "The Causes and Countermeasures of Urban Ground Subsidence", *National Assembly Research Service, current issues and analysis*, No. 240, Jan. 13, 2022.
8. Kwon, H-J and Kim, G-W (2014), "Rock Slope Failure Analysis and Landslide Risk Map by Using GIS", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.12, pp.15-25.
9. Kwak, T-Y, Chung, C-K, Kim, J., Lee, M., and Woo, S-I (2019), "Experimental Assessment for the Effect of Burial Depth on the Formation of Underground Cavities and Ground Cave-ins by Damaged Sewer Pipes", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.11, pp.37-49.
10. Park, S., Kwak, P., Lee, H., and Choi, C. (2017), Development of Leakage Test Facility for Leak Signal Characteristic Analysis in Water Pipeline, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol.31, No.5, Oct. 2017.
11. YTN (2021), "The Collapse Risk of a Commercial Building Near to iLSan Madu-subway Station", *YTN-News*, Dec. 31, 2021.

Received : August 25th, 2022

Revised : August 30th, 2022

Accepted : August 30th, 2022