

지하매설물 속성정보를 활용한 지반함몰 영향인자 분석

Analysis of Ground Subsidence Influencing Factors Using Underground Facility Property Information

강재모[†] · 이성열¹⁾ · 김진영²⁾ · 공명식³⁾
Jaemo Kang · Sungyeol Lee · Jinyoung Kim · Myeongsik Kong

Received: November 7th, 2023; Revised: November 8th, 2023; Accepted: December 21st, 2023

ABSTRACT : Ground subsidence mainly occurs in urban areas with high population density, so it is necessary to clearly identify the cause of occurrence and prepare in advance. The main cause of ground subsidence is reported to be the creation of cavities in the ground due to damage to underground pipes, but the property information and influencing factors of underground pipes to predict and prepare for ground subsidence are not properly established. Therefore, in this study, factors showing a significant correlation with the occurrence of ground subsidence were selected among the underground facility property information and a regression equation was proposed through logistic regression analysis. For this purpose, data on underground structures and ground subsidence history information in the target area were collected, and the target area was divided into grids of 100m x 100m in size using QGIS. The underground facility attribute information and ground subsidence history information contained within the grid were extracted. Then, preprocessing was performed to construct a dataset and correlation analysis was performed. As a result, factors excluding the year of sewer pipes and communication pipes and the average depth of communication pipes, heat pipes, and gas pipes were found to have a significant correlation with ground subsidence. In addition, a regression equation for whether ground subsidence occurred in the target area is proposed through logistic regression analysis.

Keywords : Ground subsidence, Underground facilities, Influential factor, Correlation analysis

요지 : 지반함몰은 인구 밀집도가 높은 도심지에서 주로 발생하므로, 발생 원인을 명확히 파악하여 사전에 대비할 필요가 있다. 지반함몰의 주요 발생원인은 지하매설관의 손상으로 인한 지반 내 공동 생성으로 보고되어 있으나, 지반함몰 발생을 예측하여 대비하기 위한 지하매설관의 속성정보 및 영향인자가 올바르게 구축되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지하매설물 속성정보 중 지반함몰 발생과 유의미한 상관성을 나타내는 인자를 선정하고, 로지스틱 회귀분석을 통해 회귀식을 제안하였다. 이를 위해, 대상지역의 지하매설물 및 지반함몰 이력정보의 데이터를 수집하였고, 대상지역을 QGIS를 활용하여 100m×100m 크기의 Grid로 구분하였다. Grid 내부에 포함되어 있는 지하매설물 속성정보와 지반함몰 이력정보를 추출하여 전처리를 수행하고 데이터셋을 구축하여 상관분석을 수행하였다. 그 결과, 하수관과 통신관의 매설년도와 통신관, 열배관, 가스관의 평균심도를 제외한 인자가 지반함몰과 유의미한 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 로지스틱 회귀분석을 통해 대상지역의 지반함몰 발생 여부 회귀식을 제안하였다.

주요어 : 지반함몰, 지하매설물, 영향인자, 상관분석

1. 서론

지반함몰은 인구밀도가 높은 도심지를 중심으로 발생하므로 사고발생 시 커다란 혼란을 야기할 수 있다. 따라서 지반함몰의 원인을 정확히 파악하고 사전에 대비해야 한다.

서울시 조사에 따르면 2010년~2014년 사이에 발생한 지반함몰 사고의 원인으로는 지하매설물의 손상과 주변 굴착 공사 등으로 나타났으며, 전체 사고 중 약 86%가 지하매설관 손상으로 발생한 것으로 나타났다. 지하매설물의 손상 발생

시 손상부로 물길이 형성되어 주변 지하수위 및 강우에 의한 침투수 등이 토립자의 운반을 동반하여 지하매설물 내부로 유입된다(Mukunoki et al., 2009). 이러한 과정에서 지반 내 공동이 발생되고 점진적으로 확장되어 지반 상부의 하중을 이기지 못하고 붕괴되는 메커니즘을 보이고 있다(Kuwano et al., 2006). 지반함몰을 발생시키는 원인을 확인하기 위해 영향 인자 검출을 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 하수관 파손, 지하수위 변동, 지반 특성 등이 주된 영향 인자로 도출된 바 있다(Tohda & Hachiya, 2005; Meguid

† Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher (Corresponding Author : jmkang@kict.re.kr)

1) Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Postdoctoral Researcher

2) Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher

3) Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Research Specialist

& Dang, 2009). 특히, Kaddoura & Zayed(2017)는 하수관로 주변 공동을 대상으로 가중치법을 수행한 결과, 흙의 특성은 공동을 형성하고 확장시키는 주된 인자로 모래, 실트 및 점토 등의 세립토가 내부 침식에 매우 취약하다는 연구가 발표된 바 있으며, Renuka & Kuwano(2011)은 실내 모형실험을 통해 사질토의 공동발생 메커니즘을 규명한 연구를 발표하였다. Lee et al.(2022)은 하수관로 데이터와 지반함몰 발생이력 정보를 활용하여 Pearson 상관분석을 통해 지반함몰에 영향을 미치는 하수관 속성정보를 제시하였으며, Kim (2018)은 하수관로 속성정보에 따른 지반함몰 발생에 대한 로지스틱 회귀식을 제시하였다. 또한, Kim et al.(2021)은 지반함몰 발생을 야기하는 영향인자 분석을 위해 관로의 밀집도와 지반함몰 발생이력 사이의 상관분석을 수행하였으며, Kim et al.(2017)은 하수관로를 중심으로 관로 속성정보와 지반함몰 이력사이의 상관분석을 수행하였다.

선행 연구들을 통해 제시된 영향인자들은 지반함몰의 메커니즘을 이해하고, 정밀한 예측을 수행하는데 필요한 정보들이지만, 이러한 인자들의 정보들이 도시 전역에 대해 조사되고 데이터로 구축되어 있지는 않은 실정이고, 현행 유지관리 체계와 정보수집의 난이도, 예산 등을 고려할 때 실제 지하안전관리에 활용하기에는 큰 어려움이 있을 것으로 판단된다. 지반함몰의 위험을 조기에 예측하고 지하안전관리에 활용하기 위해서는 현재 지하안전관리를 위해 지자체를 중심으로 구축되어 있는 지하정보 중 지반함몰 발생과 관련한 인자들을 선별하고, 이러한 실제 가용한 정보들을 활용하여 지반함몰의 위험을 예측할 수 있는 현실적인 모델 제시가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 지자체를 중심으로 구축된 지하정보의 종류와 특성을 확인하고, 가용한 정보들을 활용하여 지반함몰의 위험을 예측하기 위한 사전 연구로 각각의 인자들과 지반함몰과의 상관성을 확인하고자 하였으며, 대상 지역의 지반함몰 발생 확률 도출이 가능한 로지스틱 회귀식을 제시하고자 한다. 지반함몰에 대한 조사가 활발히 이루어진 지자체 실제 운영 데이터를 확보하여 6중(상수, 하수, 가스, 난방, 통신, 배전지중) 지하매설관의 속성정보 중 노후연도, 구경, 매설심도, 매설관의 밀집도를 연구에 활용하였으며, 밀집도의 경우 지하매설관의 위치·선형 정보를 가공하여 100m×100m 크기의 Grid로 구분된 기준 범위 내에 지하매설관이 차지하는 면적의 비율을 밀집도로 정의하여 사용하였다. 대상 구간에 발생한 지반함몰 이력을 종속 변수로 하여 독립 t 검정 및 Pearson 상관분석을 통해 지하매설물 속성정보와 지반함몰 발생 여부와의 통계적 유의성을 확인하였으며, 이항 로지스틱 회귀분석을 통하여 대상지역의 지반함몰 위험도 발생 확률 로지스틱 회귀식을 도출하고자 하였다.

2. 통계분석

2.1 독립표본 t 검정(Independent Samples t-test)

본 연구에서는 독립표본 t 검정을 통해서 대상지역의 지반함몰 발생여부에 따른 지하매설물 특성 차이를 살펴보았다. 독립표본 t 검정은 두 개의 독립적인 표본 집단으로 두 모집단 간에 나타나는 평균의 차이를 검정하기 위한 방법이다. 두 모집단의 등분산성 여부에 따라 t 통계량과 유의수준에서 차이를 나타내며, 등분산성에 대한 검정은 Levene 통계량을 이용한다(Toni et al., 2015).

2.2 Pearson 상관분석

대상지역의 6중 지하매설물 속성정보와 지반함몰 이력정보 간의 Pearson 상관분석을 실시하였다. Pearson 상관분석은 독립변수와 종속변수 사이의 선형관계 정도를 -1 ~ +1 사이의 값으로 나타내어 파악하고, 상관 정도가 클수록 -1 또는 +1에 가깝게 나타난다. 상관관계는 Eq. (1)와 (2)를 통해 산출된다(Pearson, 1895).

$$Corr(X, Y) = \rho(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

s_{xy} : X와 Y변수의 공분산

s_x : X변수의 표준편차

s_y : Y변수의 표준편차

Pearson 상관분석을 통해 상관계수를 산출한 뒤, 두 변수간의 상관계수가 통계적으로 유의미한지 판단하기 위해서 Eq. (3)을 통해 모집단의 상관관계에 대한 가설을 검정한다. 검정통계량이 0.05 이하로 나타나면 두 변수간의 상관성은 유의미하다고 판단할 수 있다(Pearson, 1901).

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (3)$$

2.3 로지스틱 회귀분석

본 연구에서는 도심지의 지반함몰 예측을 위한 상관관계를 분석하기 위해 지반함몰 관련 영향인자와 지반함몰 발생 여부와의 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 로지스틱 회귀

분석은 다수의 독립변수와 종속변수 사이의 상관성을 분석하여 함수로 나타내며, 선형 결합을 통해 종속변수를 예측하는데 활용되는 분석방법이다. 일반적으로 이진문제를 해결할 때 활용되며, Eq. (4) ~ (6)과 같이, 최대우도법을 통해 회귀식이 도출된다(Sandro, 2013).

$$\log_e\left(\frac{p}{1-p}\right) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_i x_i + \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{p}{1-p} = e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_i x_i + \epsilon} \quad (5)$$

$$p = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_i x_i + \epsilon}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_i x_i + \epsilon}} \quad (6)$$

- p : 사건발생확률
- e : 자연상수
- β : 로지스틱 회귀분석 계수
- x_i : 영향인자 변수
- ϵ : 오차항

3. 연구 방법 및 데이터

3.1 연구 방법

본 연구는 지반함몰에 대한 조사가 적극적으로 이루어지는 ○○시를 대상지역으로 설정하였으며, 면적에 따른 지반함몰 발생 횟수를 고려하여, QGIS 3.26.3 프로그램을 통해 대상지역을 100m×100m 크기의 Grid로 구분하였다. 그리고 Grid 내부에 포함되어 있는 6종 지하매설물 속성정보(노후년도, 관경, 매설심도)와 관로 밀집도, 지반함몰 이력정보를

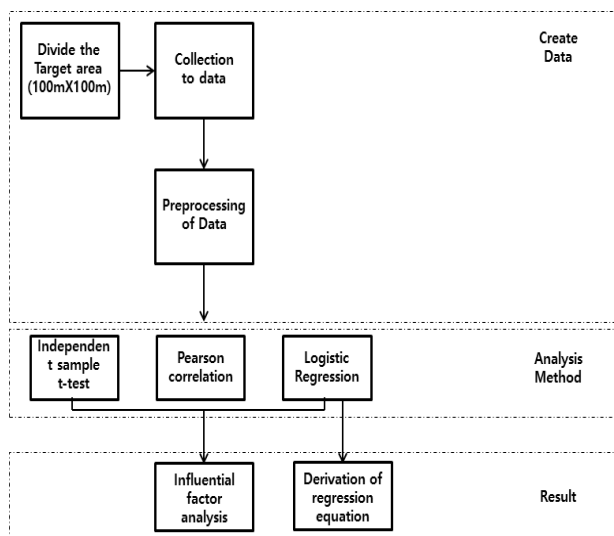


Fig. 1. Flow chart

수집하고 추출하였다. 추출한 데이터를 바탕으로 오류값 및 결측값에 대한 전처리를 진행하고, SPSS 28.0을 활용하여 지반함몰 여부에 따른 지하매설물 속성정보가 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 t 검증을 통해 확인하였다. 또한, Pearson 상관분석은 계산이 간단하여 해석이 용이한 특성을 갖고 있어(Person, 1985), 지하매설물 속성정보와 지반함몰과의 Pearson 상관분석을 통해 지반함몰 영향인자의 상관성을 확인하였다. 대상지역의 지반함몰 발생 확률을 도출할 수 있는 로지스틱 회귀분석을 통해 유의미한 영향인자를 선정하고 로지스틱 회귀식을 도출하였다. Fig. 1은 연구의 흐름도를 나타낸 것이다.

3.2 데이터

대상지역을 100m×100m 크기의 Grid 61,707개로 구분하고, 6종(상수, 하수, 가스, 통신, 난방, 배전지중관) 지하매설물에 대한 위치정보, 노후년도, 관경, 매설심도, 밀집도와 지반함몰 이력데이터를 DB화 하였다.

독립변수로는 지반함몰의 영향인자인 지하매설물의 노후년도, 관경, 매설심도, 밀집도로 선정하였고, 해당 데이터의 오류값 및 결측값에 대한 전처리 과정을 수행하였다. 데이터의 전처리는 노후년도와 관경, 매설심도의 데이터가 '0' 이거나 음수의 경우 결측치로 판단하여 제거하고, 노후년도가 1920년 이전으로 일괄 표기되어 있는 데이터를 1946년(가장 노후화된 관)으로 치환하는 방법을 적용하였다. 또한

Table 1. Data list

| Category | Item |
|---|---------------------------------|
| Grid | Grid Number |
| | Number of ground subsidence |
| Ground Subsidence | Occurrence of ground subsidence |
| | |
| Water supply pipeline | Diameter |
| | Burial Depth |
| | Year |
| Sewer pipeline | Diameter |
| | Burial Depth |
| | Year |
| Underground power distribution pipeline | Diameter |
| | Burial Depth |
| | Year |
| Communication pipeline | Diameter |
| | Burial Depth |
| | Year |
| District heating pipeline | Diameter |
| | Burial Depth |
| | Year |
| Gas pipeline | Diameter |
| | Burial Depth |
| | Year |
| Total Density | Total Density |

Table 2. Data descriptive statistics

| Category | | MIN | MAX | M | SD |
|---|---------------|--------|---------|--------|--------|
| Water supply pipeline | Diameter | 15.00 | 2400.00 | 318.77 | 417.83 |
| | Burial Depth | 0.10 | 25.00 | 1.44 | 0.76 |
| | Year | 1.00 | 68.00 | 28.18 | 11.05 |
| Sewer pipeline | Diameter | 150.00 | 3000.00 | 609.45 | 231.36 |
| | Burial Depth | 0.02 | 21.55 | 1.27 | 1.03 |
| | Year | 2.00 | 77.00 | 40.92 | 27.30 |
| Underground power distribution pipeline | Diameter | 50.00 | 300.00 | 164.72 | 27.12 |
| | Burial Depth | 0.10 | 11.00 | 1.14 | 0.50 |
| | Year | 1.00 | 42.00 | 11.62 | 7.63 |
| Communication pipeline | Diameter | 1.00 | 1000.00 | 92.16 | 18.51 |
| | Burial Depth | 0.20 | 1500.00 | 2.42 | 39.30 |
| | Year | 1.00 | 63.00 | 29.51 | 11.48 |
| District heating pipeline | Diameter | 20.00 | 1100.00 | 322.17 | 230.68 |
| | Burial Depth | 0.50 | 6.70 | 1.48 | 0.28 |
| | Year | 2.00 | 38.00 | 20.81 | 10.10 |
| Gas pipeline | Diameter | 20.00 | 750.00 | 162.62 | 93.78 |
| | Burial Depth | 0.10 | 6.50 | 1.10 | 0.50 |
| | Year | 1.00 | 49.00 | 25.28 | 8.99 |
| Total Density | Total Density | 0.00 | 0.25 | 0.09 | 0.05 |

밀집도는 6종 지하매설물의 밀집도를 Join하여 전체 밀집도로 활용하였다. 종속변수인 지반함몰 이력정보는 point 형태의 데이터를 DB화 하였고, 총 9,478개의 데이터를 수집하였다. Table 1은 본 연구에서 활용한 데이터를 나타낸 표이며, Table 2는 활용한 데이터 최솟값(Min), 최댓값(Maxt), 평균(M) 및 표준편차(SD)를 나타낸 데이터의 기술통계이다.

3.3 지하매설물의 밀집도

지반함몰은 지하매설물의 밀집도와 유의미한 상관관계를 보이는 것으로 보고되어 있다(Kim et al., 2021). 따라서 본 연구에서도 지반함몰 영향인자로 6종 지하매설물의 밀집도를 활용하였다. 밀집도는 QGIS 프로그램을 활용했으며, 100m 크기의 가상원을 그리고 원 내부를 통과하는 지하매설물의 길이를 합하여 원의 면적을 나눈 값으로 산출하였다.

Table 3. Results of independent variable t test

| Pipeline | | Ground subsidence | Ave | SD | t |
|--------------------------------|--------------|-------------------|--------|--------|-----------|
| Water supply | Diameter | Non Occurrence | 306.42 | 420.86 | -14.28*** |
| | | Occurrence | 389.05 | 392.86 | |
| | Burial Depth | Non Occurrence | 1.44 | 0.79 | -4.36*** |
| | | Occurrence | 1.49 | 0.61 | |
| | Year | Non Occurrence | 27.77 | 10.79 | -15.61*** |
| | | Occurrence | 30.49 | 12.13 | |
| Sewer | Diameter | Non Occurrence | 604.26 | 231.02 | -9.43*** |
| | | Occurrence | 641.33 | 230.91 | |
| | Burial Depth | Non Occurrence | 1.30 | 1.06 | 13.99*** |
| | | Occurrence | 1.13 | 0.78 | |
| | Year | Non Occurrence | 40.99 | 27.54 | 1.18 |
| | | Occurrence | 40.54 | 25.85 | |
| Underground power distribution | Diameter | Non Occurrence | 163.70 | 27.50 | -10.01*** |
| | | Occurrence | 168.59 | 25.25 | |
| | Burial Depth | Non Occurrence | 1.15 | 0.50 | 5.91*** |
| | | Occurrence | 1.09 | 0.48 | |
| | Year | Non Occurrence | 11.31 | 7.45 | -7.13*** |
| | | Occurrence | 12.98 | 8.26 | |
| Communication | Diameter | Non Occurrence | 91.52 | 17.69 | -11.60*** |
| | | Occurrence | 95.46 | 21.97 | |
| | Burial Depth | Non Occurrence | 2.31 | 34.93 | -.47 |
| | | Occurrence | 2.84 | 52.56 | |
| | Year | Non Occurrence | 29.50 | 11.46 | -.35 |
| | | Occurrence | 29.56 | 11.54 | |
| District heating | Diameter | Non Occurrence | 315.55 | 230.18 | -5.60*** |
| | | Occurrence | 367.98 | 229.13 | |
| | Burial Depth | Non Occurrence | 1.48 | 0.29 | .46 |
| | | Occurrence | 1.47 | 0.24 | |
| | Year | Non Occurrence | 20.96 | 10.06 | 2.78** |
| | | Occurrence | 19.81 | 10.31 | |
| Gas | Diameter | Non Occurrence | 157.35 | 90.65 | -22.63*** |
| | | Occurrence | 192.10 | 104.89 | |
| | Burial Depth | Non Occurrence | 1.09 | 0.50 | -1.77 |
| | | Occurrence | 1.12 | 0.46 | |
| | Year | Non Occurrence | 24.92 | 9.03 | -18.83*** |
| | | Occurrence | 27.31 | 8.49 | |
| Total Density | | Non Occurrence | 0.09 | 0.05 | -79.03*** |
| | | Occurrence | 0.13 | 0.04 | |

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

4. 연구 결과

4.1 지반함몰 여부에 따른 지하매설물 속성정보

본 연구에서는 지반함몰 여부에 따른 6종 지하매설물 속성정보의 통계적 유의성 및 평균을 확인하기 위하여 독립 표본 t 검정을 수행한 결과를 Table 3에 나타냈다. t 검정 값이 통계적으로 유의(P<0.05)하면 해당 속성정보가 지반함몰 발생에 유의미한 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 따라서 하수관의 노후년도, 통신관의 매설심도, 노후년도, 난방관과 가스관의 매설심도를 제외한 속성정보가 지반함몰 발생에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 유의미한 속성정보 중 대부분 관경과 노후년도, 밀집도는 클수록, 매설심도는 작을수록 지반함몰이 발생하는 것으로 나타났다.

4.2 Pearson 상관분석

수집한 데이터를 활용하여 Pearson 상관분석을 통해 지반함몰과 지하매설물 속성정보 사이의 상관관계를 확인했으며, 그 결과는 Table 4에 나타났다. 상관계수의 유의확률이 P<0.05일 경우, 해당 영향인자는 지반함몰과 유의미한 상관성을 나타낸다고 판단할 수 있다.

결과를 살펴보면, 하수관의 노후년도, 통신관의 매설심도

Table 4. Result of pearson correlation analysis

| Category | Ground Subsidence |
|---------------------------------|-------------------|
| Water supply Diameter | .071*** |
| Water supply Burial Depth | .023*** |
| Water supply Year | .088*** |
| Sewer Diameter | .056*** |
| Sewer Burial Depth | -.058*** |
| Sewer Year | -.006 |
| Power distribution Diameter | .073*** |
| Power distribution Burial Depth | -.044*** |
| Power distribution Year | .084*** |
| Communication Diameter | .079*** |
| Communication Burial Depth | .006 |
| Communication Year | .002 |
| District heating Diameter | .075*** |
| District heating Burial Depth | -.006 |
| District heating Year | -.038** |
| Gas Diameter | .133*** |
| Gas Burial Depth | .018 |
| Gas Year | .096*** |
| Total Density | .240*** |

** p<0.01, *** p<0.001

및 노후년도, 난방관과 가스관의 매설심도를 제외한 속성정보가 지반함몰과 유의미한 것으로 나타났다. 이는 독립 t 검정과 동일한 결과이다. 또한, 지반함몰과 가장 높은 상관성을 나타내는 속성정보는 6종 지하매설물의 밀도로 나타났으며, 상수관의 직경, 매설심도, 노후년도, 하수관의 직경, 배전지중관의 직경, 노후년도, 통신관 및 난방관의 직경, 가스관의 직경, 노후년도는 양의 상관성을 나타냈고, 하수관 및 배전지중관의 매설심도와 난방관의 노후년도는 음의 상관성을 나타냈다.

대부분의 지하매설물 속성정보와 지반함몰 사이의 유의미한 상관성을 보이는 것으로 나타났으나, 상관도는 낮게 도출되었다. 이는 광범위한 지역을 대상으로 분석을 수행하였고, 다양한 원인이 복합적으로 작용하여 발생하는 지반함몰 특성(Sato & Kuwano, 2010)에 기인하여 나타난 현상으로 추측된다.

4.3 로지스틱 회귀분석

지반함몰 발생여부를 종속변수로 설정하고, 지하매설물 속성정보를 독립변수로 설정하여 이항 로지스틱 분석을 실시하였다. 로지스틱 모형의 적합성을 판단하기 위해 Log-Likelihood Ratio와 Hosmer-Lemeshow 지수를 살펴본 결과 각각 182.098 (p<0.001), 7.783(p>0.05)으로 모형이 적합한 것으로 나타났다.

지하매설물 속성정보가 지반함몰 발생 여부를 설명하는 회귀식의 설명력은 Nagelkerke R²를 활용하였으며, 0.282로 나타났다. 로지스틱 회귀분석의 결과는 Table 5와 같다.

로지스틱 회귀분석 결과, 지반함몰과 유의미한 영향을 미치는 인자는 가스관로의 직경과 6종 지하매설물의 밀집도로 나타났다. 가스관로 직경의 Exp(B)는 1.004로 나타났으며, 이는 직경이 1cm 증가하면 지반함몰 발생은 1.004배 증가하며, 6종 지하매설물의 밀집도가 1.0이 늘어날수록 지반함몰 발생은 18543.096배 증가한다고 해석할 수 있다. 가스관로의 직경과 밀집도를 활용하여 도출된 로지스틱 회귀식은 Eq. (7)과 같다. 로지스틱 회귀분석 결과, Pearson 상관분석에서 상관도가 높은 2개의 인자인 가스관로와 6종 전체밀도만을 활용하여 회귀식이 도출되었으며, 상관도가 낮은 인자들의 영향을 반영하기 위해서는 추후 추가적인 분석을 통한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

$$p = \frac{e^{-8.529164 + 0.003599 \times \text{가스관로 구경} + 9.827853 \times 6\text{종 전체 밀도}}}{1 + e^{-8.529164 + 0.003599 \times \text{가스관로 구경} + 9.827853 \times 6\text{종 전체 밀도}}} \quad (7)$$

Table 5. Results of logistic regression analysis

| Category | B | S.E. | Wald | EXP (B) | p |
|---------------------------------|-----------------------|-------|------------------|------------|---------|
| Water supply Diameter | 0.000593 | 0.001 | 1.196 | 1.001 | 0.274 |
| Water supply Burial Depth | -0.224974 | 0.626 | 0.129 | 0.799 | 0.720 |
| Water supply Year | 0.015482 | 0.016 | 0.925 | 1.016 | 0.336 |
| Sewer Diameter | -0.000055 | 0.001 | 0.004 | 1.000 | 0.949 |
| Sewer Burial Depth | -0.058195 | 0.190 | 0.094 | 0.943 | 0.759 |
| Sewer Year | 0.010026 | 0.010 | 1.095 | 1.010 | 0.295 |
| Power distribution Diameter | 0.004259 | 0.008 | 0.322 | 1.004 | 0.571 |
| Power distribution Burial Depth | -0.013856 | 0.578 | 0.001 | 0.986 | 0.981 |
| Power distribution Year | 0.007285 | 0.033 | 0.048 | 1.007 | 0.826 |
| Communication Diameter | 0.022110 | 0.024 | 0.878 | 1.022 | 0.349 |
| Communication Year | 0.032480 | 0.017 | 3.708 | 1.033 | 0.054 |
| District heating Diameter | 0.001358 | 0.001 | 2.471 | 1.001 | 0.116 |
| District heating Year | 0.029562 | 0.022 | 1.812 | 1.030 | 0.178 |
| Gas Diameter | 0.003599 | 0.002 | 3.999 | 1.004 | 0.046* |
| Gas Burial Depth | 0.056728 | 0.554 | 0.010 | 1.058 | 0.918 |
| Gas Year | 0.011118 | 0.020 | 0.318 | 1.011 | 0.573 |
| Total Density | 9.827853 | 4.360 | 5.081 | 18,543.096 | 0.024* |
| Constant | -8.529164 | 2.935 | 8.446 | 0.000 | 0.004** |
| Log-Likelihood Ratio | Hosmer&Lemeshow (H-L) | | Nagelkerke R^2 | | |
| 182.098*** | 7.783 (p>0.05) | | 0.282 | | |

5. 결 론

본 연구는 지반함몰에 대한 조사가 활발히 이루어지고 있는 ○○시를 대상으로 6종 지하매설물의 위치정보와 속성 정보 및 지반함몰 이력정보를 수집하고 전처리 과정을 통해 DB를 구축하였다. 구축된 DB를 활용하여 독립표본 t 검정을 통해 지반함몰과 지하매설물 사이의 통계적 유의성을 확인하였고, Pearson 상관분석을 실시하여 지반함몰 발생에 영향을 미치는 지하매설물 속성정보를 확인하고 상관도를 확인했으며, 로지스틱 회귀분석을 통해 대상지역의 지반함몰 발생 로지스틱 회귀식을 제시하였다. 본 연구의 요약과 결론은 다음과 같다.

- (1) 독립변수 t 검정 및 Pearson 상관분석을 통해 ○○시의 지하매설물 속성정보와 지반함몰 발생과의 통계적 유의성을 확인한 결과, 하수관의 노후년도, 통신관의 매설심도 및 노후년도, 난방관과 가스관의 매설심도를 제외한 속성정보가 지반함몰 발생에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (2) Pearson 상관분석 결과, 6종 지하매설물의 밀집도가 지반함몰 발생에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 나타났으며, 대부분의 지하매설물 속성정보는 상관계수가 낮게 나타났다.
- (3) 로지스틱 회귀분석 결과, 지반함몰 발생 여부와 유의한 상관성을 나타내는 지하매설물 속성정보는 가스관의 관경과 6종 지하매설물의 밀집도로 나타났다. 또한, 두 인자를 활용하여 대상지역의 지반함몰 위험도를 예측 가능한 로지스틱 회귀식을 도출하였다.

본 연구는 지하매설물의 속성정보와 밀집도가 지반함몰에 미치는 영향을 확인하고 지반함몰 발생 영향인자를 확인하기 위하여 통계적 분석을 수행하였다. 독립변수 t 검정 및 Pearson 상관분석, 로지스틱 회귀분석에서 공통적으로 유의미한 상관성을 보이는 인자는 6종 지하매설물의 밀집도로 나타났다. 이는, 밀집도가 지반함몰과 유의미한 영향을 미친다는 기존연구와 동일한 결과이다. 또한, 독립변수 t 검정 및 Pearson 상관분석 결과, 대부분의 지하매설물 속성정보가 지반함몰과 유의미한 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 지하매설물 속성정보 및 밀집도 데이터를 기계학습 및 통계분석 등 다양한 기법에 활용한다면 높은 신뢰도의 지반함몰 위험도 예측이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업) 사업으로 수행되었습니다(지하 공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발(5/5)).

References

1. Kaddoura and Zayed (2017), Void erosion prediction model for sewer pipelines, International Congress on Underground Infrastructure, Water Management and Trenchless Technology, pp. 114~127.
2. Kim, J. Y., Kang, J. M. and Choi, C. H. (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 (In Korean).
3. Kim, J. Y., Kang, J. M., Choi, C. H. and Park D. H. (2017), Correlation analysis of sewer integrity and ground subsidence, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 6, pp. 31~37 (In Korean).
 4. Kim, K. Y. (2018), Susceptibility Model for Sinkholes Caused by Damaged Sewer Pipes Based on Logistic Regression, Master's thesis, Seoul National University.
 5. Kuwano, R., Horii, T., Kohashi, H. and Yamauchi, K. (2006), Defects of sewer pipes causing cave-in's in the road. In *Proceedings of the 5th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*, Phuket, Thailand, 16-17 November, pp. 347~353.
 6. Lee, S. Y., Kim, J. Y., K., J. M. and Baek, W. J. (2022), Comparison of machine learning models to predict the occurrence of ground subsidence according to the characteristics of sewer, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 23, Issue. 4, pp. 5~10.
 7. Meguid and Dang (2009), The effect of erosion voids on existing tunnel linings, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.24, Issue. 3, pp.278~286.
 8. Mukunoki, T., Kuwano, N., Otani, J. and Kuwano, R. (2009), Visualization of three dimensional failure in sand due to water inflow and soil drainage from defected underground pipe using X-ray CT, *Soils Found.*, Vol. 49, pp. 959~968.
 9. Pearson, K. (1895), Note on regression and inheritance in the case of two parents, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 58, No. 347, pp. 240~242.
 10. Pearson, K. (1901), On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *Philosophical Magazine*, Vol. 2, No. 11, pp. 559~572.
 11. Renuka, S. and Kuwano, R. (2011), Formation and evaluation of loosened ground above a cavity by laboratory model test with uniform sand, *Proc. of 13th International Summer Symposium*, Uji, Japan, pp. 211~214.
 12. Sato, M. and Kuwano, R. (2010), Model tests for the evaluation of formation and expansion of a cavity in the ground, *Proc. of 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, pp. 581~586.
 13. Sandro, S. (2013), Understanding logistic regression analysis, *Biochemia Medica*, Vol. 24, No. 1, pp. 12~18.
 14. Tohda, J. and Hachiya, M. (2005), Response and design of buried pipelines subjected to differential ground settlement, *Proceedings of the 16th International Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1659~1662.
 15. Toni, R. and Roeland, V. H. (2015), The t test and beyond: Recommendations for testing the central tendencies of two independent samples in research on speech, language and hearing pathology, *Journal of Communication Disorders*, Vol. 58, pp. 158~168.