

지중관로 매설 밀집도에 따른 지반함몰 발생 상관 분석

Correlation Analysis of the Occurrence of Ground Subsidence According to the Density of Underground Pipelines

김진영¹⁾ · 강재모[†] · 최창호²⁾
Jinyoung Kim · Jaemo Kang · Changho Choi

Received: September 10th, 2021; Revised: September 13th, 2021; Accepted: September 24th, 2021

ABSTRACT : Recently, ground subsidence has been steadily occurring mainly in downtown areas, threatening the safety of citizens. Under the road, various underground facilities such as water supply pipe, sewage pipe, and communication pipe are buried. Due to the aging of these underground facilities and the reckless development of the underground, it is acting as a cause of ground subsidence. Although there is a result of analyzing the risk of ground subsidence according to the deterioration of the existing pipeline, there is no result of analyzing the risk of ground subsidence using the density of pipelines indicating ground disturbance. Therefore, in this study, the density of the underground space was analyzed using the data of six types of representative underground pipelines in Seoul, and a study was conducted on whether there is a correlation with the ground subsidence. As a result, it was found that the density of underground facilities is high in the area where the ground subsidence occurred, indicating that the density of pipelines have an effect on the ground subsidence.

Keywords : Ground subsidence, Underground pipeline, Density analysis, Pipeline density, Ground disturbance rate

요지 : 최근 도심지를 중심으로 지반함몰이 꾸준히 발생되고 있어 시민들의 안전을 위협하고 있다. 도로 하부에는 상수관로, 하수도관로, 통신관로 등 각종 지하 시설물이 매설되어 있다. 이러한 지하시설물의 노후화와 지하 난개발로 인해 지반함몰의 원인으로 작용하고 있다. 기존 관로의 노후도에 따라 지반함몰 발생 위험도를 분석된 결과가 있지만 지반 교란상태를 나타내는 관로의 밀집도를 활용한 지반 함몰 위험도를 분석한 결과는 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 서울시의 대표 지하 관로 6종 데이터를 활용하여 지하공간의 밀집도를 분석하여 지반함몰과 상관성이 있는지에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 지반함몰 발생 지역에서 는 지하 시설물의 밀집도가 높은 것으로 나타나 지반함몰에 관로의 밀집도가 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 지반함몰, 지중 매설관로, 밀도 분석, 관로 밀집도, 지반 교란도

1. 서 론

2014년도 석촌 지하차도 인근 지반함몰 발생 이후로 최근 지반침하 현상이 지속적으로 발생됨에 따라 이슈화 되면서 서울시를 중심으로 정부 및 지자체에서는 발생 현황 및 대응 방안에 대해 발표하였다. 서울시(2017)에서 발표한 지반침하 현상의 원인을 살펴보면 하수관로 손상(84.5%), 상수관로 손상(1.7%), 인접 굴착 공사 등 기타(13.8%) 순으로 하수관로에 의한 지반함몰이 가장 많은 것으로 보고되었다. 또한 서울시 도로관리 기술 백서(2017)에서는 하수관로 손상(51%), 상수관 손상(13%), 굴착복구 미흡(25%), 공사 중 함몰(11%)로 지반침하 발생 원인을 제시하였다. 이처럼 매설관로의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다. 국토교통부에서

는 지반침하 안전관리 매뉴얼(2015)을 발간하여 주요 발생 원인에 따른 대응 방안을 제시하였으며, 환경부(2015)에서는 하수관로 정밀조사 매뉴얼을 발간하여 지반 침하의 가장 큰 원인으로 지목 받고 있는 노후 하수관로의 내부 진단 방법을 구체화하였다. 또한 굴착 복구공사의 시간부족으로 인한 품질저하 예방 및 양질의 뒷채움재 사용으로 지반침하를 예방하기 위한 개선사항에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Kim(2017) 등은 하수관로의 레거시 데이터를 활용하여 관로의 건전도와 도로함몰 발생과의 상관관계 분석에 대한 연구가 수행되었다. 현재까지 지반함몰에 관련된 보고 및 분석에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. Table 1은 2011년부터 2015년부터 전국적으로 지반함몰이 발생한 현황을 정리한 것으로 서울시가 전체 발생건수의 약 90%를

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

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

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

Table 1. Current status of ground subsidence in downtown areas (2016)

	2011	2012	2013	2014	2015	Sum
Sum	573	723	898	858	1035	4087
Seoul	572	691	850	779	733	3625
Busan	1	5	-	11	11	28
Daegu	-	-	-	5	7	12
Incheon	-	1	-	3	7	11
Gwangju	-	17	37	19	11	84
Daejeon	-	-	-	-	12	12
Ulsan	-	1	1	5	21	28
Sejong	-	-	-	1	3	4
Gyeonggi		4	6	15	122	147
Gangwon					27	27
Cungbuk				2	13	15
Chungnam			1	3	7	11
Jeonbuk		4		2	7	13
Jeonnam			1	2	14	17
Gyeongbuk				3	6	9
Gyeongnam			2	8	26	36
Jeju					8	8

차지하는 것을 알 수 있고 경기도, 광주광역시 등이 뒤를 이었다. 이는 서울시에서 지반함몰에 대해 선제 대응하여 발생 건수가 정리되어 있기도 하지만, 도시화율이 높은 서울시가 가지고 있는 도시 특성에 의한 것도 원인이라고 판단된다.

현재 지반 함몰 사고가 상당한 규모로, 또한 지속적으로 발생하는 이유는 지하에 매설되어 있는 관로들의 노후화가 진행되고 있기 때문이다. 더불어 우리나라의 전체 인구 중 50퍼센트 이상이 도심지에 집중되어 있어, 상수도 관로, 하수관로, 통신선로와 같은 지하 매설물의 개발 수요가 도시를 중심으로 편중되어 지하공간의 난개발, 지하시설물의 과밀화, 노후화 등으로 인한 지하 공간 관련 재난사고에 대한 위험이 해를 거듭할수록 더 심각해지고 있다. 그렇기 때문에 각 인자들과의 상관성 분석을 통해 지하공간의 위험도를 예측하여 사전에 재난에 대해 예측 할 수 있는 기술이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 여러 인자들 중 하나인 지하매설물 밀집도에 따른 지반함몰 발생과의 관계를 분석한다.

2. 지반함몰 발생 원인 분석

도심지의 지반함몰 발생 주요 원인은 ①상수도 등 지하매설물, ②굴착 복구 미흡, ③공사장 지하수 유출로 나타

Table 2. Causes of ground subsidence (2010.01~2014.07)

Cause	Sum
Sewer damage	2,636 (84.5%)
Water pipe damage	52 (1.7%)
Construction in nearby area	431 (13.8%)
Sum	3,119 (100%)

낼 수 있다. 지하매설물의 경우 관로의 노후화로 인해 관의 연결부 등이 손상되며, 손상된 부분을 통해 토사가 유실되어 지반함몰이 발생하게 된다. 또한 지하에 관을 매설한 경우 되메우기가 제대로 되지 않아 지하에 빈 공간이 형성되게 되며, 이 공간을 통해 토사가 유출되어 지반함몰이 발생하게 된다. 또한 굴착 공사 시에 지하수위까지 굴착이 이뤄지는 경우 차수대책이 적절히 이뤄지지 않으면서 지하수가 토류벽 틈새를 통하여 유입되면서 토사가 함께 유실되어 지반함몰이 발생하게 된다. 서울시에서 발표한 지반함몰의 발생 원인 분석을 보면 하수관 손상 84.5% 상수관 손상 1.7%, 인접굴착공사 13.8%로 관로 손상이 주된 이유인 것을 확인할 수 있다.

도시화율이 높은 일본에서도 지반함몰이 빈번하게 발생하여 지반함몰에 관련된 연구가 많이 수행되어 있다. 기존 연구에서 지반함몰의 근본적인 원인으로 지하매설물의 밀집도, 매설관 주변 토질 조건, 지하수 및 굴착 공사 이력 등이 원인이라고 분석하였고, 직접적인 원인으로서는 지하매설물의 노후화, 강우나 지진 등의 자연 재해가 원인이라고 분석하였다.

특히 기존 연구에서는 지하시설물의 밀집도가 지반함몰에 대한 영향이 크다고 발표하였으며, 한정된 공간에서 지하시설물이 밀집되어 있다는 것은 그 장소에 매설관을 설치한 이력이 많다는 것을 의미하며, 이는 해당 지역에 개착 및 되메우기 공정이 많이 많다는 것을 나타내 지반함몰 발생 가능성이 높다는 것을 의미한다. 특히 공사 시 되메움 불량으로 인해 지반함몰 발생 가능성이 높다고 분석하였다.

Table 3. Types of ground subsidence in Japan

Cause	Type	Note
Indirect cause	Density of underground pipelines, Soils prone to loss (silt and sand) Geological and groundwater impacts construction history, etc.	Beneficial for creating cavity in the ground
Direct cause	Aging of underground infrastructure, natural disasters such as rainfall and earthquake	Accelerating underground cavity formation and expansion

3. 분석 대상 지역 관로 및 지반함몰 발생 현황

본 연구에서는 서울시의 Legacy Data를 활용하여 서울시 내에서 발생한 대형 지반함몰이 발생한 5곳 주변 1km × 1km의 관로 밀집도와 지반함몰 발생 현황을 분석하였다.



Fig. 1. Large ground subsidence occurrence area -red box (1km x 1km)

3.1 개요

대상 지역은 총 5지역으로 지하철 역 인근 4곳, 대형 호수 옆 1곳을 대상 지역으로 선정하였으며, 5지역 모두 대형 지반함몰이 발생한 이력이 있는 곳이다. 밀집도 분석 대상 관로는 총 6개의 관으로 상수관로, 하수관로, 통신선로, 천연가스배관, 전력지중관로, 열배관이다. 본 논문에서는 5 지역을 편의상 A~E지역으로 구분한다.

3.2 지반함몰 발생 이력

전체 구역에서 2010년부터 2015년까지 5지역에서 보고된 지반함몰 발생건수는 총 83건으로 A구역에서 27건, B구역에서 7건, C구역에서 19건, D지역에서 1건, E지역에서 29건으로 보고되었다. 발생원인은 하수관에 관련된 건이 48건, 빗물받이에 의한 함몰이 8건, 되메우기 및 다짐 불량 6건, 기타 및 원인 미상이 21건으로 나타났다. 원인에 대한

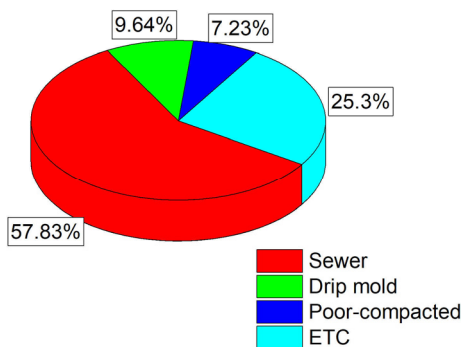


Fig. 2. Causes of ground subsidence in the target area

비율은 Fig. 2와 같다.

위와 같이 분석 대상지역에서는 하수관로가 원인인 지반함몰이 가장 많았고, 하수관로가 원인인 경우 관로 매설 공사 중 다짐 불량으로 인한 토사 유출이 원인이 되는 것이 대부분인 것을 확인할 수 있다.

3.3 대상지역 관로

3.3.1 A 지역

A지역의 대상관로 수는 총 7,888개로 분석 대상 관로 중 열배관은 없는 것으로 나타났으며 Table 4와 같이 5종의 관로 총 관로의 길이는 약 195,800m로 구성되어 있다.

3.3.2 B 지역

B지역의 대상관로 수는 8,556개로 분석 대상관로 6종이 모두 매설되어 있는 것으로 확인되었다. 6종 시설물의 총 길이는 약 150,116m로 나타났다.

3.3.3 C 지역

C지역의 대상관로 수는 4,287개로 분석 대상관로 6종이 모두 매설되어 있는 것으로 나타났으며, 6종 시설물의 총 길이는 약 153,463m로 나타났다.

3.3.4 D 지역

D지역의 대상관로 수는 모두 5,599개로 분석 대상관로 중 열배관을 제외하고 5종의 관이 매설되어 있는 것으로 나타났으며, 5종 시설물의 총 길이는 약 115,392m로 나타났다.

3.3.5 E 지역

E지역의 대상관로 수는 모두 1,232개로 분석 대상관로 6종이 모두 매설되어 있는 것으로 나타났으며, 6종 시설물의 총 길이는 62,893m로 나타났다.

Table 4. The status of pipelines buried in the ground (SpotA~E)

Spot	Total extension	Water pipe	Sewer	Communication pipe	Nature gas pipe	Power pipe	Heat pipe
A	195,800	O	O	O	O	O	X
B	150,116	O	O	O	O	O	O
C	153,463	O	O	O	O	O	O
D	115,392	O	O	O	O	O	X
E	62,893	O	O	O	O	O	O

4. 관로 밀집도에 따른 지반함몰 발생 현황 결과

4.1 밀도 분석 방법

밀도 분석 종류에는 점, 선, 면 데이터를 활용하여 밀도 분석을 하는 방법들이 있다. 본 연구에서는 관로가 선형이기 때문에 선형 밀도 분석을 통해 관로의 밀집도를 분석하고자 한다. 관로의 밀집도를 분석하기 위해서는 Fig. 3 및 Eq. (1)과 같이 단위 면적에 해당하는 관로의 길이를 계산하여 표현하고자 하는 셀에 밀도를 계산한다.

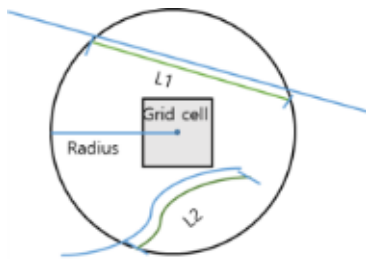


Fig. 3. Line density analysis method

$$\text{Density} = ((L1 * V1) + (L2 * V2)) / (\text{area of circle}) \quad (1)$$

여기서, L1, L2 = 선의 길이
V1, V2 = 가중치

여기서, Grid cell과 radius는 임의로 조정 가능하며, V1, V2와 같이 중요도에 따라 가중치를 줄 수 있다. 본 연구에서는 분석 시에 ArcGIS에서 제공하는 Grid cell 크기와 radius를 사용하였다.

4.2 대상지역 관로별 밀도 분석 결과

4.2.1 A 지역

A지역 관로 별 밀도 분석을 수행한 결과 Line Density가 높은 곳에서 즉, 관로가 많이 매설된 곳에서 지반함몰이 발생한 것을 알 수 있다. 특히 상수관로, 하수관로, 천연가스 배관의 밀집도가 높은 곳에서 지반함몰 발생이 많이 발생한 것을 확인할 수 있다.

4.2.2 B 지역

B지역 관로 별 밀도 분석을 수행한 결과 Line Density가 높은 곳에서 즉 관로가 많이 매설된 곳에서 지반함몰이 발생한 것을 알 수 있다. 밀도 분석 결과 상수관로가 많이 매설된 지역에서 지반함몰이 많이 발생한 것을 확인할 수 있다.

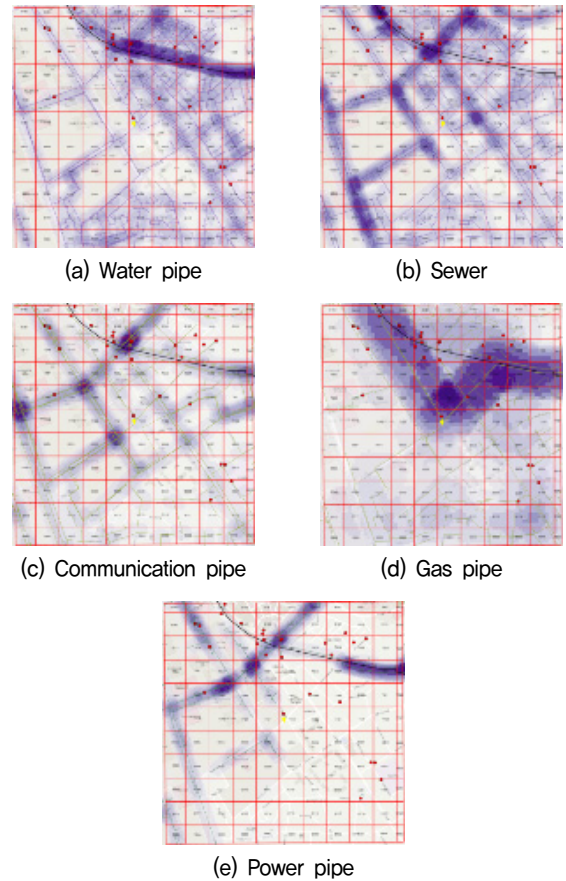


Fig. 4. Line density analysis (Spot A)

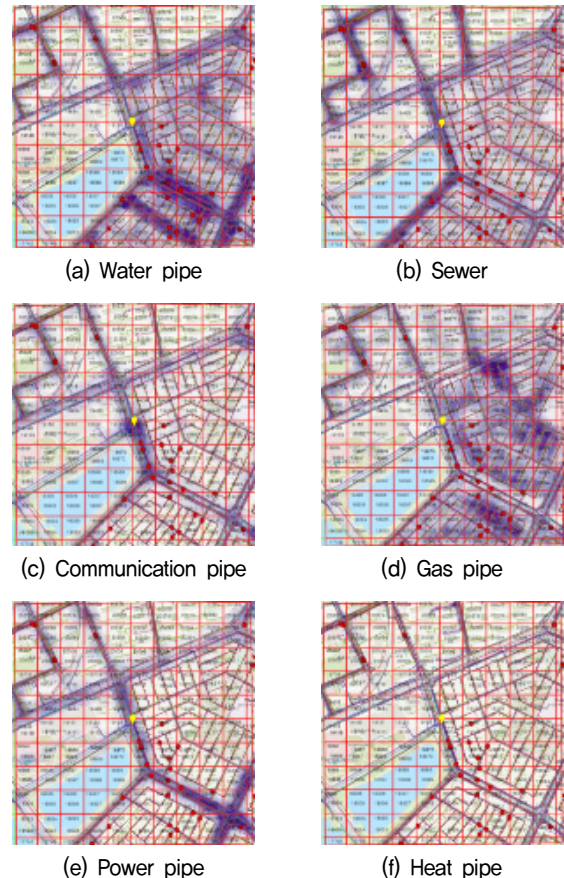


Fig. 5. Line density analysis (Spot B)

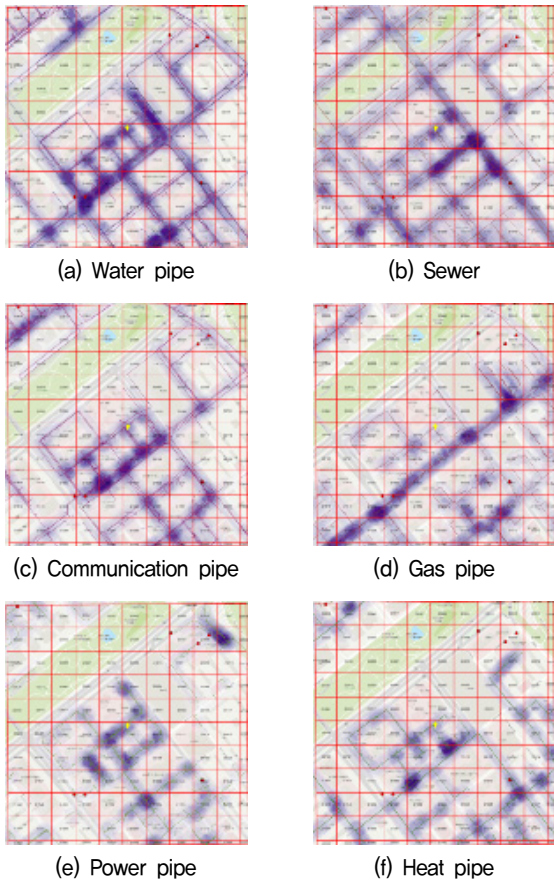


Fig. 6. Line density analysis (Spot C)

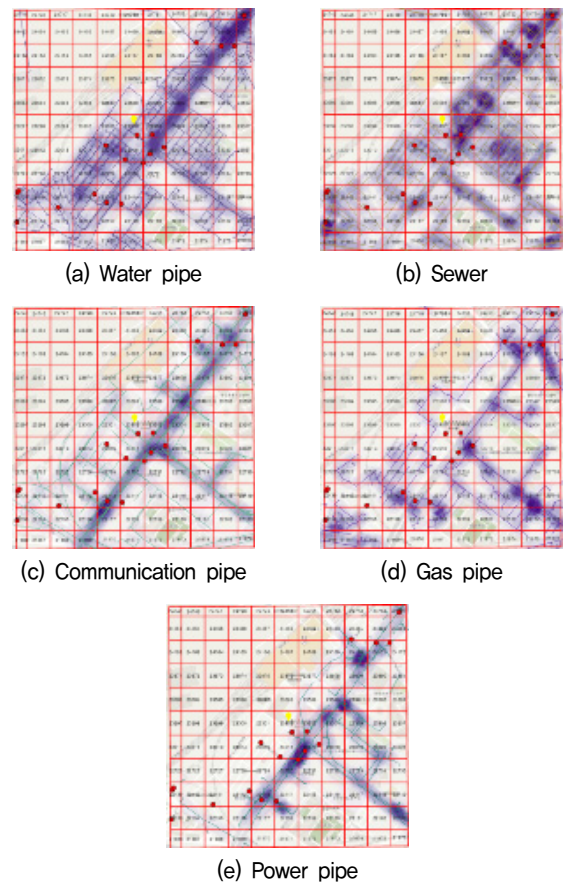


Fig. 7. Line density analysis (Spot D)

4.2.3 C 지역

C지역 관로 별 밀도 분석을 수행한 결과 C지역은 지반함몰 발생 건수가 상대적으로 적지만 Line Density가 높은 곳에서 즉, 관로가 많이 매설된 곳에서 지반함몰이 발생한 것을 알 수 있다. 상수관로가 많이 밀집되어 있는 곳에서 지반함몰 발생이 일어난 것을 확인할 수 있지만 일부 지역에서는 밀집도가 상대적으로 낮은 곳에서 발생한 것을 확인할 수 있다.

4.2.4 D 지역

D지역 관로 별 밀도 분석을 수행한 결과 Line Density가 높은 곳에서 즉, 관로가 많이 매설된 곳에서 지반함몰이 발생한 것을 알 수 있다. 특히 상수관로, 하수관로, 천연가스 배관의 밀집도와 지반함몰 발생과 상관성이 높은 것으로 나타났다.

4.2.5 E 지역

E지역 관로 별 밀도 분석을 수행한 결과 E지역은 공원이 다수 분포되어 있어 많은 관로가 매설되어 있지 않은 것으로 나타났다. 또한, 지반함몰 발생 건수 또한 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 관로 밀집도가 낮은 지역에서는

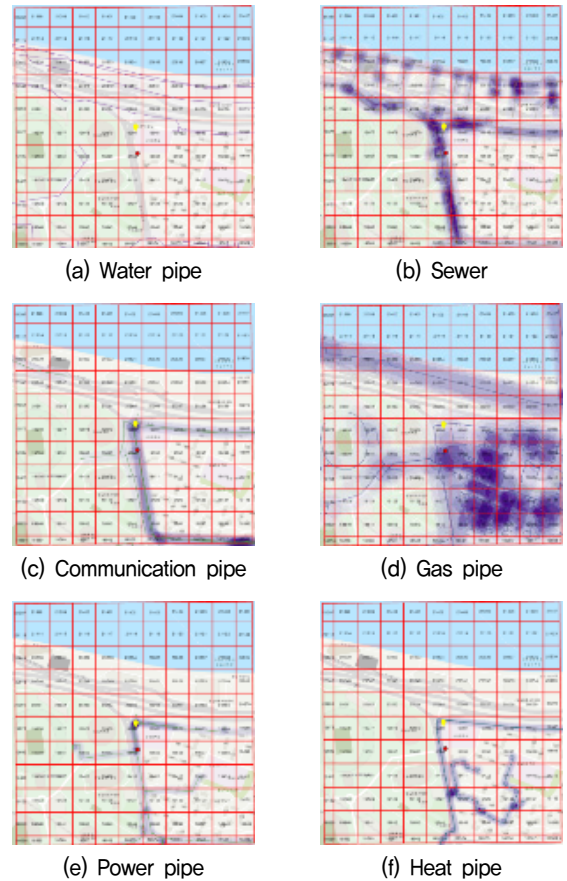


Fig. 8. Line density analysis (Spot E)

지반함몰이 많이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있어 지반함몰과 밀집도가 상관성이 있는 것을 확인할 수 있다.

4.3 대상지역 매설관의 밀도 분석 결과

밀집도와 지반함몰과의 상관성을 살펴본 결과 대상지역의 매설관로 별 밀집도와 지반함몰과의 상관성을 분석해보니 특정 매설관의 영향으로 지반함몰이 발생한 것이 아닌 것을 확인할 수 있었다. 대상 지역의 모든 관을 동일 관으로 가정하고 밀집도 분석을 수행한 결과 상관성이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

5개의 지역에서 지반함몰이 가장 많이 발생한 Spot B 지역의 밀집도를 계산하여 정량화하였다. 밀도 분석 방법은 Cell 크기는 1m × 1m로 분석하였고, Radius는 100m, Class는 Table 5와 같이 등도수(Quantile)로 총 6개로 구성하였다. 등급이 높을수록 지반함몰이 발생 위험도가 커지는 것을 의미한다.

Table 5. Line density table and range

Lable	Range
1	≤ 0.0
2	≤ 0.025074
3	≤ 0.07164
4	≤ 0.146862
5	≤ 0.207756
6	≤ 0.456706

Table 6과 같이 밀도 분석 후 밀집도를 6개의 등급으로 나눈 결과 지반함몰이 발생한 지점에서의 등급은 모두 등급

Table 6. Density analysis result and grade

No	Density	Grade	No	Density	Grade
1	0.210277	6	16	0.132864	4
2	0.192206	5	17	0.303933	6
3	0.221984	6	18	0.278816	6
4	0.319056	6	19	0.132192	4
5	0.200838	5	20	0.279292	6
6	0.213765	6	21	0.223834	6
7	0.249121	6	22	0.116955	4
8	0.182619	5	23	0.302643	6
9	0.245949	6	24	0.28004	6
10	0.228238	6	25	0.216067	6
11	0.224018	6	26	0.287224	6
12	0.277318	6	27	0.236626	6
13	0.298422	6	28	0.263829	6
14	0.357356	6	29	0.248349	6
15	0.258423	6			

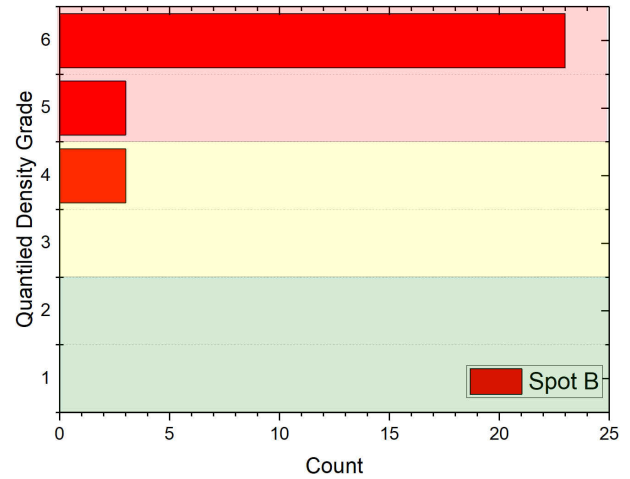


Fig. 9. Pipeline density grade (Ground subsidence hazard grade)

이 다소 높은 4,5,6 등급에서 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 지반함몰과 관로의 밀집도가 상관성이 높은 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 관로의 매설 밀집도와 지반함몰과의 상관성을 분석하기 위하여 공간분석을 통하여 상관성을 분석하였다. 본 연구에서 얻을 수 있는 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 국내·외 문헌조사를 통해 지반함몰과 지중 매설관로의 상관성이 있는 것으로 나타났으며 그 중에 관로의 밀집도 즉 지반 교란도와 지반함몰과의 상관성이 높은 것으로 분석되었다.
- (2) Legacy Data를 활용하여 관로 별 밀집도와 지반함몰 상관성 분석 결과 지반함몰이 발생한 지점에서 밀집도가 높은 것을 확인할 수 있었고 관별 밀집도와 지반함몰 상관성은 낮은 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 지하에 매설되어 있는 6중 매설관을 단일관으로 치환하여 밀집도를 분석하여 지반함몰 발생 결과와 비교한 결과 관로 밀집도와 즉 지반 교란도와 지반함몰 상관성은 높은 것으로 나타났다.

매설관의 밀집도와 지반함몰의 상관성을 분석한 결과, 밀집도가 높은 지역일수록 지반함몰의 발생 가능성이 높은 것으로 확인되었다. 이는 지중관로의 공사 시 수행되는 개착 및 퇴메우기 공정에 따른 지반 교란의 영향으로 판단된다. 따라서 관로 매설 공사를 하는 경우 시공 시 양질의 퇴

메우기 재료를 사용해야 하며, 충분한 다짐을 통해 지반의 다짐도를 만족시켜야 할 것으로 생각된다. 또한 추가 연구를 통해 지반함몰 발생 영향인자 중 하나로 밀집도를 고려하여 지반함몰 예측 모델을 만드는 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (21주요-대1-임무) 지하공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발(2/3) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Kim, J. Y. (2017), Correlation analysis of sewer integrity and ground subsidence, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 6, pp. 31~37.
2. Ministry of Environment (2015), "Sewage pipeline scrutiny manual".
3. Ministry of Land (2015), Infrastructure and Transport, "Ground Subsidence Safety Management Manual".
4. Seoul Institute (2016), "The Road Subsidence Conditions and Safety Improvement Plans in Seoul.
5. Seoul Metropolitan City (2014), "'Road Depression' Cause Investigation, a Special Management Measures Announced".
6. Seoul Metropolitan City (2017), Road management technology white paper.