

하수관로 주변 도로함몰 위험도 평가 방법에 관한 연구

A Study on Risk Evaluation Method of Ground Subsidence around Sewer

김진영¹⁾ · 최창호[†]

Jinyoung Kim · Changho Choi

Received: June 5th, 2018; Revised: June 14th, 2018; Accepted: June 18th, 2018

ABSTRACT : Recently, road subsidence has been increasing in urban areas, threatening the safety of citizens. In the lower part of the road, various road facilities such as water supply and drainage pipelines and telecommunication facilities are buried, and the deterioration of the facilities causes the road subsidence. In particular, in the case of old sewer pipes which are attracting attention as a main cause of road subsidence, the management of sewer pipe replacement, repair and reinforcement is being performed depending on the burial year. Therefore, in this study, we tried to suggest a reliable road subsidence risk assessment method considering various sewer specifications and surrounding environment information and CCTV exploration result and GPR exploration result.

Keywords : Ground Subsidence, Sewer, CCTV exploration, GPR exploration

요지 : 최근 도심지를 중심으로 도로함몰이 증가하고 있어 시민들의 안전을 위협하고 있다. 도로 하부에는 상하수도관로, 전기 통신시설 등 각종 도로시설물이 매설되어 있는데 이 시설물의 노후화가 도로 함몰의 원인으로 작용하고 있다. 특히, 도로함몰의 주된 원인으로 주목받고 있는 노후 하수관의 경우 단순히 매설연도에 의존하여 하수관 교체 및 보수보강 등의 관리가 이뤄지고 있으며, 하수관 상태에 의한 도로함몰의 위험성은 고려되지 않는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 하수관 제원 및 주변 환경 정보 및 CCTV 탐사 결과 및 GPR 탐사 결과를 고려한 신뢰성 있는 도로함몰 위험도 평가 방안을 제시하고자 하였다.

주요어 : 도로함몰, 하수관로, CCTV 탐사, GPR 탐사

1. 서론

최근 들어 도심지를 중심으로 도로함몰이 빈번하게 일어나고 있다. 도로함몰에 대한 원인으로 상하수도관로의 손상, 인접 지역 굴착 공사 등 여러 가지 원인이 제시되고 있지만 노후 상하수도 관로에 의한 도로함몰이 가장 많이 일어나는 것으로 나타나고 있다. 하지만 매년 반복적으로 발생하는 도로함몰에 대한 대책은 발생 이후의 피해 복구에만 급급한 실정이다. 따라서 도로함몰로 인해 발생하는 인적 물적 피해를 줄이기 위해 위험지역 사전 예측 모델이 필요하다.

최근 서울시에서 발생한 도로함몰 현황을 보면 Table 1과 같이 2012년부터 2016년까지 5년간 약 3,857건, 평균 775건의 도로함몰이 발생하였으며, 해마다 증가하는 추세에 있음을 알 수 있다.

서울시를 중심으로 조사된 도로함몰 발생 원인을 보면, 약 70% 이상이 하수관의 손상으로 인해 발생하는 것을 확인할 수 있으며(Seoul, 2016), 일본의 경우도 1999년부터

2009년까지 10년간 발생한 도로함몰의 30~50%가 하수관 손상으로 인해 발생한 것으로 조사되었으며, 하수관의 부설 연수가 30년을 넘으면 도로함몰의 위험도가 급격히 증가하는 것으로 확인된 바 있다(Kim, 2014).

빈번해지는 도로함몰 사고에 대응하여 환경부에서는 2015년 한 해 동안 전국 하수관의 30%를 차지하는 20년 이상 노후관로 약 40,000km 구간을 대상으로 정밀조사를 실시했으며, 노후관로 내부 진단방법을 구체화한 ‘하수관로 정밀

Table 1. Number of ground subsidence of Seoul (Seoul, 2016)

	sum	ave	'12	'13	'14	'15	'16
No. of ground subsidence	3,857	771	691	850	779	734	803
No. of cases caused by sewer	2,853 (74%)	567 (74%)	612 (89%)	753 (89%)	525 (67%)	504 (69%)	459 (57%)

1) Research Specialist, Construction Automation Research Center, Korea Institute of Construction Technology

† Research Fellow, Construction Automation Research Center, Korea Institute of Construction Technology (Corresponding Author : chchoi@kict.re.kr)

조사 매뉴얼(Ministry of Environment, 2015)'을 발간하여 매뉴얼에 맞게 일부 시행되고 있지만 전체 시설물을 대상으로 한 CCTV 조사 및 GPR 탐사 등의 직접적인 조사방법은 시간상, 예산상의 이유로 국토 전 구간에 대한 광역적이고 상시적인 도로함몰 위험을 예측하기에는 한계가 따른다.

국토부에서는 도로함몰로 인한 도심지형 재난 피해를 예방하고 종합적인 지하시설물 관리를 위한 일환으로 「지하시설물의 안전관리에 대한 특별법」을 공포하고, 2018년 1월부터 시행 중이며, 이와 연계한 지하안전정보체계 구축의 일환으로 지하 공간 통합지도와 지하 공간 안전관리시스템을 구축하고 있다.

위와 같은 다양한 정보 들을 분석하여 도로함몰 위험 예측 모델을 구성해 위험지역을 사전에 예측하고, 복구 방안을 마련한다면 도로함몰로 인한 피해를 줄일 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 국토부에서 통합관리하고 있는 하수관로 제원 및 하수관로 주변 환경 분석, 하수관로 탐사 결과를 바탕으로 도로함몰 위험도를 평가하기 위한 최적 기법 연구를 수행하였다.

2. 하수관로 주변 도로함몰 위험도 분석 방법

하수관로 주변 도로함몰 위험도를 평가하기 위해서는 크게 3단계로 정의하였다. 첫 번째 방법으로는 지하공간 통합 지도의 GIS 정보를 토대로 관리되는 하수관로 Legacy Data

대상으로 영향 인자들에 대한 가중치를 분석하여 평가하는 간접 상태평가를 1차 도로 함몰 위험도로 산정한다. 다음은 1차 평가 결과를 기반으로 지반침하 발생이 높은 곳을 우선적으로 관내 CCTV 촬영을 통해서 보다 직접적인 방법으로 하수관로 건전도 분석을 실시한다. 마지막 단계로는 CCTV 탐사 결과에 따른 도로함몰 위험도 분석 결과를 분석하여 위험지역을 우선으로 관내 GPR 탐사를 실시하는 3차 진단으로 제시하였다(Fig. 1).

2.1 Legacy Data를 이용한 하수관로 주변 도로함몰 위험도 분석 방법

지하 공간 통합지도를 통해 구축될 하수관로 관련 데이터는 Table 2에 나타난 것처럼 관로 관리정보, 재원, 매설정보, 통수정보 등이 있으며, 기존 도로함몰 데이터 분석을 통해 각각의 정보들에 대한 영향인자를 도출하고 AHP 분석을 통하여 각 항목에 대한 가중치를 부여했다.

Table 2에 나타난 하수관로 구축 데이터 중 도로 함몰과 높은 상관관계를 보이는 인자를 추출하고 도로함몰 관련 추가 인자를 선정하여 도로함몰 위험도를 간접적으로 평가하고자 했다. 평가방법은 Eq. (1)과 같이 각각의 인자들이 도로함몰에 미치는 영향도를 산정하여 각 인자의 총합을 위험도로 표현했다.

$$Factor1 \times IF_1 + Factor2 \times IF_2 + Factor3 \times IF_3 + \dots = SRI_s \quad (1)$$

여기서, $Factor_x$: 도로함몰 영향인자

IF_x : 영향력 지수

SRI_s : 하수관 주변 도로함몰 위험도

위의 식과 관련하여 AHP 분석을 위한 항목을 설정하였다. 분석 항목은 하수관 GIS Data에서 취득 수 있는 자료 중 앞서 분석한 하수관로 제원 중 도로함몰과 연관이 있다

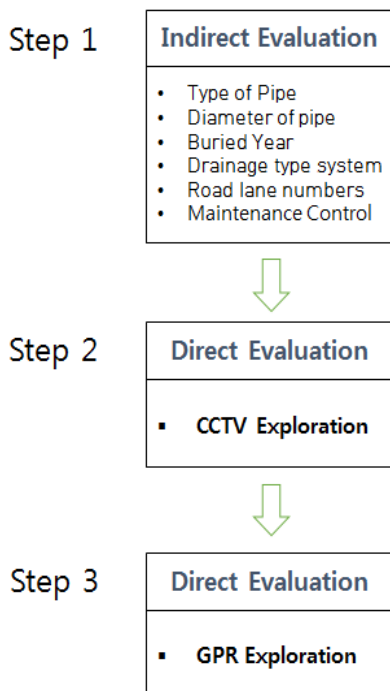


Fig. 1. Ground subsidence risk evaluation surrounding sewer

Table 2. Sewer layer of underground space integrated map

	List	Item
1	Sewer management information	Topography mark, Management number, Area code, Map number, Management agency code, Construction number, Start and end point manhole management number
2	Sewer data	Installation data, Sewer expense, Texture, Scale, Conformation, Pipe size, Extension
3	Sewer burying information	Start and end point, sewer invert elevation Mean slope, Lane passage number
4	Sewer discharge Information	Storm and sewage drainage area, Velocity of flow

고 판단되는 항목 4개(Factor 1~4)와 추가적으로 하수관로 주변 환경 영향인자 2개(Factor 5~6)로 구성하였다.

- Factor 1 : 관중
- Factor 2 : 관경
- Factor 3 : 매설년수
- Factor 4 : 배수형태
- Factor 5 : 관 매설 주변도로 현황
- Factor 6 : 유지관리 이력정보

위와 같은 항목을 대상으로 쌍대비교 설문지를 만들어 전문가들 총 25명에게 배포하였다. 설문지의 내용은 선정된 지수들의 상대적 중요도를 판단하는 내용으로 구성되어 있으며, 평가항목들의 쌍대비교를 묻는 형식으로 작성하였다. 설문 분석을 위하여 각 평가항목 간의 상대적 분석도(가중치)와 일관성 지수(CI : Consistency Index)를 검토하였다. 일관성 지수가 낮은 CI 0.1 이상인 2건을 제외하고 23건의 전문가 설문결과를 분석하였다. 분석 결과 도로함몰에 영향을 미치는 Factor 들의 중요도는 매설년수→관중→유지관리 이력→주변도로→배수형태→관경 순으로 나타났다. 각 항목별 가중치는 Table 3과 같다.

위험도 판정은 3등급으로 구분되며 각 항목의 값의 합으로 평가하며 A등급은 75점 이상, B등급은 50점 이상, C등급은 50점 미만으로 평가한다. 각 항목별 도로함몰 위험도 등급은 아래와 같다.

- A 등급 : 도로함몰 위험도 낮음
- B 등급 : 도로함몰 위험도 보통
- C 등급 : 도로함몰 위험도 높음

(CCTV 탐사 우선 대상 지역)

위에 제시한 가중치를 바탕으로 서울시 OO 지역의 하수관로 GIS Data 및 주변 환경 인자 등 Legacy Data를 분석하여 도로함몰 위험도를 산정하였다. 대상 지역의 하수관로 연장은 총 24,227m로 총 910개의 관로로 구성되어 있다. 해당지역의 하수관로는 30년 이상 된 관이 13,114m로 전체의 54%를 차지하는 것으로 나타나 하수관로 정밀조사가 필요한 하수관이 많은 것으로 나타났다. 해당 지역의 관중은 대부분 흙관(80%)으로 나타났으며, 하수관로의 직경은 450mm 가 약 40%로 가장 많이 나타났다. 배수 형식은 매설년도의

Table 3. Weighting factors analysis result

	Type of pipe	Diameter of a pipe	Buried year	Removal system	Lane passage number	Maintenance control
Weight	0.1639	0.1270	0.2670	0.1352	0.1458	0.1653
Ranking	2	6	1	5	4	3

영향으로 대부분 합류식(82%) 관로로 나타났다.

앞에서 제시한 인자들의 가중치를 이용해 해당 지역의 도로함몰 위험도를 분석한 결과 가장 위험한 등급인 C등급이 약 80% 정도로 높게 나왔으며, B등급 약 19%, A등급 약 1%로 대부분 도로함몰 위험지역으로 나타났다.

2.2 관내 CCTV 탐사를 통한 도로함몰 위험도 분석 방법

하수관로 건설 후 20년이 경과된 관로, 공사 지역 주변에 매설된 관로, 2개 이상 중첩되는 관로가 정밀조사 대상 하수관로이다. 하수관로 CCTV 조사는 장치를 관로 내부로 투입하여 관로의 전반적인 파손상태를 조사하고, 영상으로 기록하여 촬영 후 분석, 활용하는 방법으로 인력 진입이 불가능한 작은 관이나, 진입 시 위험한 관로를 대상으로 수행한다. 현재 노후 하수관로를 대상으로 하수관로 갱생을 위해 Fig. 2와 같이 CCTV 장치를 사용해 관로 내부에서 조사를 실시하고 있다. 이를 바탕으로 환경부는 2015년에 지반침하 대응 하수관로 정밀조사 매뉴얼을 배포하여 정밀조사가 필요한 지역에서는 이에 따른 매뉴얼로 하수관로 조사를 시행하고 있다.

환경부에서 정의한 지반침하와 관련된 하수관로의 결함은 Table 4, Table 5와 같이 구조적 및 운영적 내부결함으로 구분했으며, 세부적인 결함을 나타내기 위해 구조적 내부결함 18개 항목, 운영적 내부결함 5개 항목으로 총 25개 항목으로 분류하였다(Ministry of Environment, 2015).

도로함몰 위험도 산정은 하수관로 당 구조적 및 운영적 내부결함 이상항목을 찾아내 이상 항목의 결함정도에 따라 점수화하고 등급 점수에 따라 맨홀과 맨홀 사이의 하수관로에 대한 양호도를 판정하게 된다. 구조적 결함 등급 및 운영적 결함 등급은 총 3가지로 나뉜다.

- A 등급 : 경미, 중간 정도의 노후, 이상 정도는 낮음
- B 등급 : 보통, 중간 정도의 노후, 이상이 있음
- C 등급 : 심각, 노후, 이상이 진행

(GPR 탐사 우선 대상 지역)



Fig. 2. Exploration device used in the sewer

Table 4. Sewer structural defect item

No.	Structural defect item
1	Lateral, Protruding
2	Lateral, Sealing faulty
3	Joint, Open
4	Joint, Faulty
5	Joint, Displaced
6	Crack, Longitudinal
7	Crack, Circumferential
8	Crack, Multiple
9	Dipped pipe
10	Pipe, Holed
11	Tomo
12	Surface damage
13	Pipe, Broken
14	Pipe, Collapsed
15	Deformed pipe
16	Deformed plastic pipe
17	Protective lining defective
18	Obstruction, Permanent
19	Reversed flow inclination
20	Infiltration present

Table 5. Sewer operational internal defect item

No.	Operational internal defect item
1	Obstruction, Temporary
2	Encrustation deposits
3	Debris, Silty
4	Debris, Greasy
5	Root intrusion

A 등급은 도로함몰 위험도가 낮으며, B 등급은 상대적으로 도로함몰 위험도가 보통이며, C 등급은 도로함몰 위험도가 높은 것으로 판정한다. 구조적 내부결함과 운영적 내부결합의 두 개의 등급 중 더 낮은 등급을 대상 하수관의 위험도로 평가한다.

Legacy Data를 이용한 하수관로 주변 도로함몰 위험도 분석 지역과 같은 지역을 대상으로 1단계 분석 결과 중 위험지역이 많이 포함되어 있는 지역을 대상으로 하수관로 정밀조사 매뉴얼을 준수하여 조사를 실시하고 보고서를 작성하였다. 대상 조사 구간은 총 9,837m이며 큰 대로변 등 조사 위험지역에서는 조사를 실시하지 않았다. 하수관로 정밀조사 결과는 구조적 내부결합, 운영적 내부 결함 결과를 이용해서 분석하였으며 두 개의 결과 값 중 낮은 값을 결과 값으로 이용했다.

분석 결과 A 등급은 7%, B 등급은 8%, C 등급은 85%로 대부분 위험 지역으로 나타나 간접평가인 1단계 분석에서

위험지역인 하수관로는 CCTV 탐사 결과를 이용한 위험도 분석 역시 대부분 위험지역으로 나타났다.

2.3 하수관내 GPR 탐사를 통한 도로함몰 위험도 분석 방법

일반적으로 GPR(Ground Penetration Rada) 탐사에서는 반사법이 가장 널리 적용되며 Fig. 3에 나타난 GPR 탐사 모식도와 같이 측선을 따라 일정 간격으로 반사면에서 반사된 이벤트를 측정한다.

GPR 탐사는 기존 고주파수 전자기파를 지표에 투과시켜 지층 경계(매설물과 지반, 공동과 지반, 각종 지장물과의 경계 등)에서 반사되어 돌아오는 반사파를 측정하는 방식으로 비전문가도 결과 영상으로 이상체의 여부 판단 가능하다는 장점이 있으며, 암거 1m 주변의 이상체를 파악하기 위해서는 고주파수(약 1~2GHz)를 사용하며 암거 2~3m 주변을 파악하기 위해서는 약 100MHz~1GHz 안테나를 사용하여야 한다. 지표투과레이더(Ground Penetration Radar, GPR) 장비는 전자기파를 지표면이나 구조물의 표면으로 입사시킨 후 반사되어 돌아오는 파를 수신하는 장치이다. GPR 탐사는 1) 천부 공동 탐지에 효과적(주 대상 깊이 3m 이내)이며, 2) 반사된 전자파의 진폭을 이용하여 공동 또는 기타 반사 이벤트 구별이 가능하며, 3) 반사 이벤트 자체가 지하 구조로 해석될 만큼 높은 해상도를 보이며, 특별한 처리 없이도 바로 결과 제공할 수 있는 장점이 있어 공동을 정확도 높게 감지하여 도로함몰을 예방할 수 있다.

환경부에서 제시한 하수관로 정밀조사 매뉴얼(Ministry of Environment, 2015)에서는 Fig. 4와 같이 관경 1,000mm를 기준으로 인력에 의한 육안조사와 CCTV 조사를 실시하고 공동 및 지반 침하의 우려가 있는 구간을 대상으로 GPR, 내시경 등의 추가 조사를 실시하도록 규정하고 있다.

GPR 탐사 구간은 CCTV 탐사 결과 중 도로함몰 위험도가 높은 하수관을 대상으로 우선적으로 실시한다. 현재 국내에서 도로함몰 탐사를 위한 GPR 기술은 Fig. 5와 같이 일반적으로 도로 위나 지상에서 실시하여 지반의 이상 유무

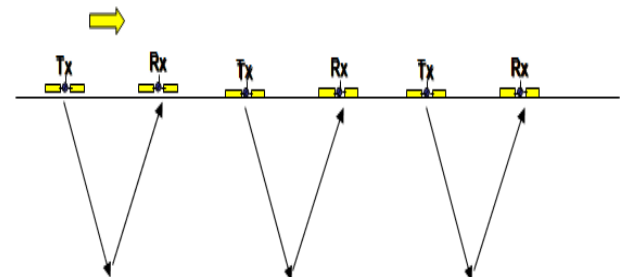


Fig. 3. GPR reflection method diagram

정도를 해석할 수 있다.

다른 방법으로 하수관로 내에서 Fig. 6과 같은 GPR 탐사 장치를 사용해 관로 안에서 관로 배면의 공동의 유무 및 크기를 파악해 도로함몰 위험도를 산정 할 수 있다.

관내 GPR 탐사는 Fig. 7과 같이 하수관거 내 진입 및 주행이 가능한 자주식 로봇에 CCTV와 GPR 안테나(수·발신기)를 부착하여 하수관거 건전도 계측을 위한 정밀탐사를 수행 수행하는 방식이다.

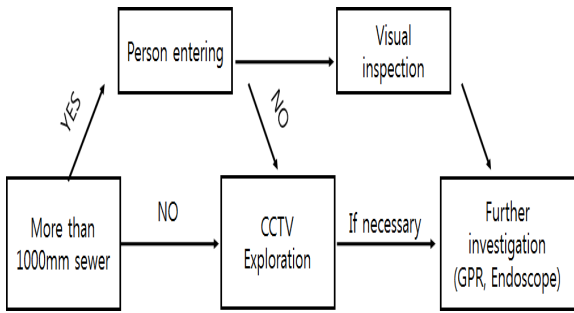


Fig. 4. Flowchart of sewer close investigation



Fig. 5. GPR device in sewer



Fig. 6. GPR device in sewer

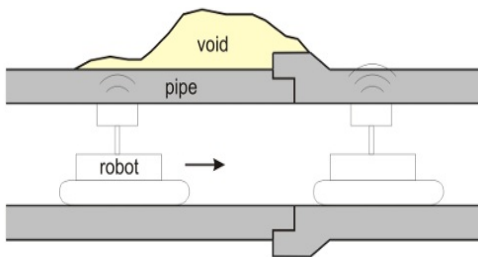


Fig. 7. GPR exploration pattern diagram

하수관 내부에서 배면의 공동을 탐지하기 위한 GPR 장치는 중심 주파수가 2GHz로, 이러한 GPR 안테나와 데이터 수집 및 디지털화를 위한 로깅 장치를 무인 장치를 이용해 하수관 내부에서 원하는 지점으로 이동할 수 있다.

장비 운용 후 Fig. 8에 나타난 것처럼 GPR 탐사 결과를 분석해 공동 유무 및 공동 크기를 산정할 수 있다. 그림에 나타난 것처럼 GPR 탐사는 1) 천부 공동 탐지에 효과적(주 대상 깊이 3m 이내)이며, 2) 반사된 전자파의 진폭을 이용하여 공동 또는 기타 반사 이벤트 구별이 가능하며, 3) 반사 이벤트 자체가 지하 구조로 해석될 만큼 높은 해상도를 보이며, 특별한 자리처리 없이도 바로 결과 제공할 수 있는 장점이 있다.

이 결과를 이용해 공동 유무 및 공동 크기에 따라 도로함몰 위험도를 산정할 수 있다.

일반적으로 관내에서 정확한 조사가 필요한 경우 조사 전에 고압 살수기 등을 이용하여 관로 세정작업을 수행해야 한다. 이와 같이 관로 상태가 불량하고, 퇴적물이 쌓인 관에서는 관내 GPR 탐사가 어렵기 때문에 본 연구에서는 해당 지역의 관로 건전도가 양호하며, 도로함몰 위험 등급이 낮은 하수관을 대상으로 GPR 탐사를 실시하였다. 해당 하수관로는 GPR 탐사 결과 Fig. 9에 나타난 것처럼 공동 또는 기타 이벤트가 발생되지 않은 것으로 보이며, 1단계, 2단계에서 지반함몰 발생 위험도가 낮은 하수관로 배면에서 공동이 존재하지 않아 위험지역이 아닌 것으로 판단되었다.

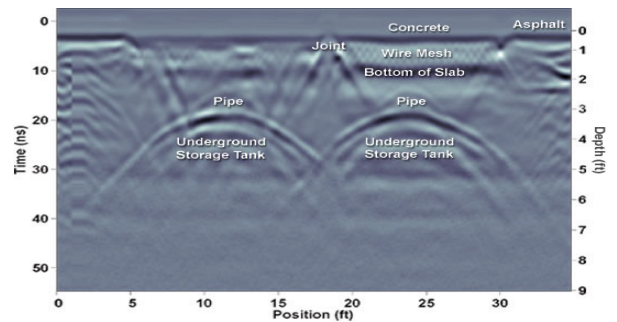


Fig. 8. Indicator GPR exploration reflection event result cross section

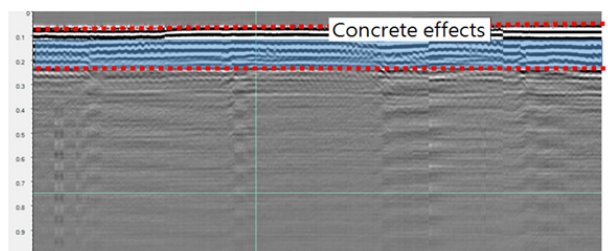


Fig. 9. GPR exploration results

3. 결 론

하수관로에 의한 도로함몰 위험도를 판단하기 위해 하수관로의 지하공간 통합지도 상의 데이터를 이용한 위험도 평가와 탐사 장치를 이용한 단계별 위험도 평가 방법을 제시하였다. 본 연구에서 얻을 수 있는 결론은 정리하면 다음과 같다.

- (1) 하수관로 주변 도로함몰 위험도 산정을 위해 하수관망도를 이용한 하수관로의 제원을 분석한 결과 매설연도, 직경, 관경, 관중, 매설깊이, 배제방식 중 매설 깊이를 제외하고 나머지 항목들을 도로함몰과 관련이 있는 항목으로 추출하였다.
- (2) 항목별 가중치를 산정하기 위해 AHP 분석을 실시했으며, 추출한 항목 이외로 도로함몰과 관련이 있는 항목으로 하수관로 주변 도로, 유지관리 이력을 추가하여 분석을 한 결과, 매설연수→관중→유지관리이력→주변지반→배수형태→관경 순으로 나타났다.
- (3) 하수관로 간접상태평가 결과를 통해 도로함몰 위험도가 높은 지역을 우선으로 CCTV 탐사 한 결과 간접상태평가 결과와 CCTV 탐사 결과와 연관성이 있는 것으로 나타났다. 이는 매설연도에만 의존하지 않고 관로 간접 상태 평가 결과를 활용해 CCTV 탐사 우선순위를 설정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 CCTV 탐사 결과 중 위험지역을 우선적으로 선정해 관내 GPR 탐사를 시행하

면 보다 경제적이고 효율적인 방법으로 위험지구를 파악해 유지 보수를 할 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같은 분석을 통해 하수관로의 노후도뿐만 아니라 도로함몰에 영향을 미치는 인자를 분석하여 도로함몰 위험도 산정 및 하수관로 유지보수 우선순위의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업의 일환으로 수행되었으며 [융합연구단-14-2-ETRI, 사물인터넷(IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발], 한국건설기술연구원 주요사업의 일환으로 수행되었습니다 [18주요-대4-기획 스마트 토공 자동화를 통한 건설생산성향상 핵심기술 기획연구].

References

1. Kim, Y. R. (2014), Subsidence occurrence and countermeasure by sewer, Water Journal, Vol. 11.
2. Ministry of Environment. (2015), Sewer pipe inspection manual.
3. Seoul. (2016), 2016 Road management technology white paper: Road management by smart system.