

위험도 기반의 하수관로 CCTV 조사 우선순위 결정 연구

손주영* · 이재현** · 오재일***

Son, Jooyoung*, Lee, Jaehyun**, Oh, Jeill***

Sewer CCTV Inspection Prioritization Based on Risk Assessment

ABSTRACT

Most sewer lines buried in the city are likely to be collapsed due to serious aging. Also, due to the high concentration of development and high population density and traffic, the collapse of the sewer will cause enormous social and economic damage. Therefore, proactive maintenance is required to prevent accidents caused by deteriorated sewer pipe. In order to utilize limited budget effectively, risk-based prioritization methods should be proposed that simultaneously consider the consequence of failure and the probability of failure. In this study, the method of risk-based prioritization of sewer was examined by reviewing various cases of overseas studies and applied to the urban sub-catchment. First, the impact factors that can be secured through the sewer GIS DB in Seoul were derived, and the weight, sub-criteria, and impact score of each impact factor were determined and the consequence of failure was calculated by weight sum method. In addition, the probability of failure was calculated by dividing the service life by the estimated useful life, and the consequence of failure and the probability of failure were classified into five grades by the Jenks natural breaks classification method. The prioritization method was applied to sub-catchment in the Seoul to derive a risk matrix and a risk grade. As a result, 26% of all subjects were selected as the inspection priority subjects with 4-5 risk grade. Therefore, using the risk-based CCTV prioritization methodology, it will be possible to systematically determine the objects that need investigation first.

Key words : CCTV inspection, Critical sewer, Prioritization, Risk-based inspection, Sewer condition assessment

초록

도시 내 매설된 대다수의 하수관로는 노후가 심각하게 진행되어 파손의 가능성이 높다. 또한, 도시개발의 집중도가 높아 인구밀도나 통행량이 많으므로 하수관로가 붕괴되면 사회·경제적으로 막대한 피해를 입게 된다. 따라서 관로 파손에 의한 사고를 예방하기 위해 사전적인 유지관리가 필요하며, 한정된 재원의 효율적인 활용을 위해 파손의 가능성과 피해의 규모를 동시에 고려한 위험도 기반의 우선순위 결정방안이 제시되어야 한다. 본 연구에서는, 다양한 해외 연구사례를 검토하여 위험도 기반의 하수관로의 조사 우선순위 결정 방법을 도출하였고 도시집 배수분구에 적용·검토하였다. 우선, 서울시 하수관로 GIS DB를 통해 확보 가능한 영향인자를 도출하고, 각 영향인자들의 가중치, 구분항목, 영향점수를 결정하여 가중치 환산법으로 하수관로 파손결과를 산정하였다. 또한, 하수관로의 예상 내용연수 대비 사용연수를 계산하여 파손가능성을 도출하였으며, 내츄럴 브레이크 방법으로 파손결과와 파손가능성을 5등급으로 구분하였다. 위 방법을 서울시 내 위치한 소규모 배수분구에 적용하여 위험도 매트릭스와 위험도 등급을 도출하였으며, 그 결과 전체 대상의 26%가 위험도 4-5등급인 CCTV조사 우선대상으로 선정되었다. 따라서 위험도 기반의 CCTV 우선순위 결정방법을 활용하여 조사가 우선적으로 필요한 대상을 체계적으로 결정할 수 있을 것이다.

검색어 : CCTV 조사, 중점관리 하수관로, 조사 우선순위, 위험도 기반 조사, 하수관로 상태평가

* 정희원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정 (Chung-Ang University · jyson08@gmail.com)

** 중앙대학교 토목공학과 박사과정 (Chung-Ang University · jhl85@daum.net)

*** 종신회원 · 교신저자 · 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수 (Corresponding Author · Chung-Ang University · ohjeill@cau.ac.kr)

Received February 7, 2017/ revised March 25, 2017/ accepted April 6, 2017

1. 서론

과거 도시 개발과 함께 보급된 사회기반시설물들은 대부분 사용연수가 오래되어 시설물 노후에 대비한 유지관리 방안이 필요하다. 특히 하수관로는 사용연수 20년이 지난 노후관로가 전체 관로의 절반 이상을 차지하고 있으며, 최근 노후 하수관로에 기인한 지반침하가 빈번히 발생하고 있어 사회·경제적인 피해에 대한 우려가 심화되고 있다(MOE, 2015a). 그러나 재정사업을 통해 노후 하수관로 전체를 대상으로 평가하고 개보수하기에는 시·군 재정 부족으로 재원의 확보가 어렵다(MOE, 2015c). 따라서 관리가 필요한 주요 하수관로만을 관리 대상으로 선정하고 노후 하수관로 정밀조사지원 예산을 배정하여 자본의 투자 효율성을 높여야 할 것이다.

노후 하수관로의 체계적인 유지관리와 투자계획을 수립하기 위해서는 전략적 자산관리(SAM, Strategic Asset Management)를 단계적으로 수행하여 최소의 비용으로 최대의 서비스 수준을 제공해야 한다(WERF, 2007). 기존 데이터를 정리하고 검토하는 자산관리의 초기 단계부터 위험도에 기반한 조사 우선순위 선정기준을 정립하여 운영유지관리의 효율을 극대화해야 한다(US-EPA, 2009; US-EPA, 2015). 위험도는 하수관로 정보와의 유기적으로 연계되며, CCTV 조사의 우선순위를 결정하거나 상태평가 결과를 이용하여 보수 계획을 수립하는데 활용된다(Syachrani et al., 2011).

이때, 위험도 기반의 하수관로 우선순위를 설정하기 위해서는 파손결과(CoF, Consequence of Failure)와 파손가능성(PoF, Probability of Failure) 두 가지 요소를 활용하여 위험도 매트릭스를 구성하고 위험도 등급으로 구분한다(US-EPA, 2015). 일반적으로 파손결과를 산정하기 위해 파손에 영향을 미치는 환경적, 경제적, 사회적 영향인자들을 선별하고 그에 따른 영향인자들의 가중치와 점수를 할당하여 합산하는 방법인 가중치 환산법(WSM, Weighted Sum Method)을 사용한다(Salman and Salem, 2012). 일부 연구에서는 전문가 의견과 베이지안 기반의 네트워크 모델을 사용하여 하수관로 파손 영향을 분류하고 평가하는 방법을 제안하였다(Hahn et al., 2002). 또한, 파손가능성을 산정하는 방법은 하수관로의 내용연수 대비 사용연수의 비로 계산하는 간단한 방법부터, 데이터 마이닝 기법인 랜덤 포레스트(random forests)와 환경인자들을 활용하여 누락된 사용연수 자료를 보완하는 방법까지 존재한다(Toy, 2014; Harvey and McBean, 2014). 더 나아가 보수 의사결정지원을 위해 CCTV 조사를 통해 파악한 하수관로의 상태등급을 다양한 노후도 모델(결정적, 통계적, 인공지능 모델 등)에 적용하여 하수관로의 파손가능성을 산정하는 방법도 제안되었다(Kley and Caradot, 2013).

이처럼 해외에서는 하수관로의 우선순위를 선정하기 위해 파손결과와 파손가능성을 산정하는 다양한 연구사례가 존재한다. 하지

만 국내에는 관련 연구사례가 아직 존재하지 않고 하수 범람에 의한 침수피해나 수질오염의 가능성이 있는 지역을 하수도정비중점관리대상으로 선정하는 방법을 제안하고 있을 뿐, 노후 관로의 파손 위험성을 정량화하기 위한 기준이 정립되어있지 않다(MOE, 2013).

따라서 본 논문에서는 노후 하수관로의 조사 우선순위를 결정하는 다수의 선행 연구 사례를 분석하여 국내 하수관로에 적합한 위험도 기반의 하수관로 조사 우선순위 결정 방법을 제안하였다. 서울시 하수관로 GIS 데이터를 사용하여 파손결과의 영향인자를 선별하고 가중치 및 구분항목과 점수산정식을 도출하였으며 사용연수를 활용하여 파손가능성을 결정하였다. 최종적으로, 관로 노후화가 심각하여 관리가 시급한 배수분구를 대상으로 제안된 조사 우선순위 방법을 적용하여 검토하였다.

2. 위험도 산정 기준 설정

2.1 파손결과(CoF) 산정 방법

우선, 위험도 기반의 하수관로 조사 우선순위를 결정하기 위해서는 파손에 의해 사회·경제·환경적으로 미치게 되는 파손결과를 정량적으로 도출할 수 있어야 한다. 하지만 하수관로 파손으로 인한 보건환경, 교통통제, 서비스 등에 대한 간접편의 산정이 불확실하고 교체 및 수리를 위한 표준화된 사공비를 산정하는 것이 어렵기 때문에 정확한 파손결과 값을 도출하는 것은 쉽지 않다(Kleiner et al, 2004; Salman and Salem, 2012; Syachrani et al, 2013). 본 논문에서는 다수의 문헌검토를 기반으로 서울시 GIS DB에 적합한 파손결과 산정 영향인자 항목을 도출하고 전문가 의견을 수렴하여 가중치 및 산정기준을 결정하였다.

2.1.1 파손결과 영향인자 항목 결정

도시개발의 집중도와 인구밀도가 매우 높은 대도시에서 하수관로의 기능상실 및 파손이 발생하는 경우 사회·경제적으로 막대한 피해를 야기할 수 있다. 예를 들어, 통행량이 많은 도로에서 굴착작업이 이루어지는 경우 심각한 교통 혼잡을 야기하며, 도로가 갑작스럽게 붕괴하는 경우에는 인명 피해까지 발생할 가능성이 있다(WRc, 2001).

이처럼, 파손에 의한 피해 규모를 결정할 수 있는 영향인자들을 다양한 연구사례를 통해 검토하였다. 영국 WRc (Water Research centre)의 하수관로 개보수 매뉴얼은 관로를 보수하기 위한 목표설정, 상태평가, 위험도 평가의 수행 방법을 제시하였으며, 하수관로 상태평가의 기초적인 틀을 마련하였다. 영향인자에 따라 순차적으로 우선순위가 높은 하수관로를 갈음해 나가며, 다양한 연구에서 해당 방법을 적용하여 우선순위를 설정하였다(Halfawy, 2008;

Ward and Savić, 2012). Lukas와 Merrill (2006)는 조사 우선순위 결정 프로그램인 SCRAPS (Sewer Cataloging Retrieval And Prioritization System)를 개발하였다. 이 프로그램에서는 전문가의 지식기반 데이터를 수집한 후, 파손결과와 파손가능성을 산정하고 하수관로 조사 우선순위를 결정하였다. McDonald와 Zhao (2001)는 6가지의 영향 요소로 위치, 토질, 매설심도, 환경, 관 특성, 지진의 영향요인을 제시하였고, 가중치에 의한 배점 방식으로 총점을 계산하여 우선순위를 결정하였다. Baah et al. (2015)은 위험도 매트릭스를 구성하여 위험도를 산정하는 방법과 GIS DB를 활용하여 시각적으로 표현하는 방법을 제시하고 있다. 11가지 항목에 대해 점수를 산정한 뒤, 각 항목의 가중치를 곱한 총 합계를 비교하여 파손 결과 등급을 도출하였다. Salman과 Salem (2012)은 GIS DB와 전문가의 의견을 수립하여 경제적, 사회적, 환경적으로 영향을 미치는 16가지의 요인들을 도출하였다. 도출된 요인은 관련 지자체 및 관련 전문가의 의견을 통해 영향정도에 대한 가중치를 설정하였다.

Table 1에서는 각 연구 사례에서 사용되고 있는 영향인자들을 종합하여 활용 유무를 비교하였다. 총 9가지의 영향인자가 대표적으로 사용되고 있으며, 이 중, 환경, 평균심도, 교통량, 토지이용현황, 하천과의 거리는 대부분의 사례에서 활용되고 있었다. 활용빈도가 높은 영향인자는 파손결과를 산정하는 데 있어 반드시 포함되어야 하고 가중치 또한 상대적으로 크게 설정되어야 할 것으로 판단된다.

현재 서울시는 총 하수관로 374,055개소, 총 연장 10,557 km에 대한 GIS DB 구축을 완료하였으며 지속적인 유지관리 및 개선을 수행하고 있다(Seoul Metropolitan Government, 2015). 선별된 영향인자에 대해 서울시 하수관로의 확보된 데이터는 Table 2와 같다. 하수관로를 식별하기 위한 고유번호, 해당 위치를 구분하기 위한 처리구역, 배수구역, 배수분구를 등의 기본 정보를 확보하였다. 하수관로의 파손결과를 결정하기 위한 영향인자인 배제방식과 환경, 평균심도는 기 구축되어 있는 서울시 하수관로 GIS DB를 활용하여 확보하였다. 그 외에 간선구분, 하천과의 거리, 토지이용 형태, 차선 수, 지반조건은 GIS 프로그램을 활용해 직접적으로

Table 1. Consequence of Failure Impact Factors in Other Researches

No.	Impact factor	WRc ¹⁾	Ward ²⁾	SCRAPS ³⁾	Mcdornald ⁴⁾	Baah ⁵⁾	Salman ⁶⁾
1	Sewer function type	O	O		O		O
2	Pipe diameter	O	O	O	O	O	O
3	Pipe type	O	O	O			
4	Burial depth	O	O	O	O	O	O
5	Distance from river	O	O	O		O	O
6	Land use	O	O	O	O	O	O
7	Traffic	O	O	O		O	O
8	Detour	O	O	O			
9	Ground condition	O	O	O	O		

¹⁾WRc, 2001; ²⁾Ward and Savic, 2012; ³⁾Lukas and Merrill, 2006; ⁴⁾McDonald and Zhao, 2001; ⁵⁾Baah et al., 2015; ⁶⁾Salman and Salem, 2012

Table 2. Consequence of Failure Impact Factors and Other Data on Variety GIS Database of Seoul

GIS code name		Description	Data source (the number of data)
1	IDN	Pipe ID	Sewerage GIS DB of Seoul (374,865)
2	DL_SM_CDE	Sewer service area code	
3	DN_SM_CDE	Catchment code	
4	DN_CM_CDE	Sub-catchment code	
5	TY_JL_CDE	Sewer function type	
6	OM_PE_DTR	Pipe diameter (mm)	
7	ARE_DEP	Burial depth (m)	
8	MAIN_TYPE	Sewer type	Derived from GIS DB of Seoul (326,730)
9	RV_NM	Distance from river (m)	Calculated from GIS DB of Seoul (188,242)
10	SURF_USE	Land use	Obtained form biotope map of Seoul (374,503)
11	LINE_TRAF	Number of road	Calculated from GIS DB of Seoul (325,570)
12	ROCK_TYPE	Ground condition	Digital map of Seoul (370,295)

산정하거나 토지이용현황자료나 수치지형도 등을 통해 확보하였다. 제시된 영향인자 중, 교통량과 교통 우회로 존재여부는 교통량을 간접적으로 파악할 수 있는 차로 수로 대체하여 활용하였다.

2.1.2 파손결과 영향인자 가중치 및 산정기준 결정

앞에서 검토한 다수의 연구사례에서 가중치 환산법을 사용하여 파손결과를 결정하고 있었다. 가중치 환산법(WSM, Weighted Sum Method)은, 다양한 영향인자들이 파손결과에 미치는 영향의 크기에 따라 점수를 합산하여 우선순위를 결정하는 방법으로 다기준 의사결정기법(MCDM, Multi-Criteria Decision Making)의 일종이다(Salman and Salem, 2012). 이러한 가중치 환산법은 산정 결과에 대한 직관적인 이해가 용이하며 파손결과 점수를 연속된 수로 표현하여 크기 순서대로 파악할 수 있는 장점이 있다.

마찬가지로, 본 연구에서도 가중치 환산법을 적용하여 영향인자를 점수화하여 각 인자에 대한 가중치를 부여하고 전체 영향인자에 대한 가중 평균으로 피해결과를 산정하였다. 여기서 피해결과 영향인자의 가중치, 구분기준 및 점수는 기본적으로 기존 연구사례를 검토하여 설정하였다(McDonald and Zhao, 2001; Salman and Salem, 2012; Baah et al., 2015). 이후, 문헌검토를 통해 기초적으로 결정된 영향인자의 가중치와 점수에 대한 객관성을 확보하기 위해 델파이 워크숍(Delphi workshop)을 시행하였다(US-EPA, 2005). 2회에 걸친 전문가 회의를 통하여 파손결과의 영향요인의 가중치와 점수를 수정 보완하여 최종적인 값을 결정하였다. Table 3에서와 같이, 해당 영향인자가 파손결과에 미치는 영향정도를 판단하기 위하여 0.8과 1로 가중치를 배분하였고 하수관로의 고유 특성보다는 관로가 매설된 지역에 대한 영향인자들의 가중치를 더 높게 설정하였다. 또한 각 영향인자의 영향정도를 세부적으로 구분하기 위한 범주를 설정하고 해당 범주에 대한 영향점수를 1점부터 최대 5점까지 부여하였다.

기초적인 가중치 환산법으로 모든 영향인자들의 파손결과 값을 비교하는 것은 영향인자 데이터가 누락된 경우도 있기 때문에 불가능하다. 따라서 영향인자 데이터가 누락이 되더라도 동일한 조건에서 파손결과를 비교하기 위해서 표준점수로 표현하였다. 아래 Eq. (1)과 같이, 가중치 값을 확보된 영향인자 가중치의 합으로 나누어 표준화하고 영향인자 점수를 범주의 최대값으로 나누어 표준화한다. 표준화된 두 값을 곱한 후 모든 영향인자들에 대해 합하면 0에서 1까지의 범위로 해당 하수관로의 파손결과를 도출할 수 있다.

$$CoF(P_i) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{W_j}{\sum(W)} \times \frac{S_{ij}}{\max(S_j)} \right) \quad (1)$$

Table 3. Weight, Sub-criteria and Performance Values of CoF Impact Factors

Impact factor	Weight (W _j)	Impact factor sub-criteria	Impact score (S _{ij})
Sewer function type	0.8	combine sewer	1
		storm sewer	2
		sanitary sewer	3
		intercepting sewer	4
Pipe diameter (mm)	0.8	diam. < 500 mm	1
		500 mm ≤ diam. < 700 mm	2
		700 mm ≤ diam. < 1000 mm	3
		1000 mm ≤ diam. < 1800 mm	4
		1800 mm ≤ diam.	5
Burial depth (m)	0.8	depth < 1 m	1
		1 m ≤ depth < 1.5 m	2
		1.5 m ≤ depth < 2 m	3
		2 m ≤ depth < 3 m	4
		3 m ≤ depth	5
Sewer type	0.8	lateral sewer	1
		branch sewer	2
		main sewer	3
Distance from river (m)	1	400 m ≤ dist.	1
		300 m ≤ dist. < 400 m	2
		200 m ≤ dist. < 300 m	3
		100 m ≤ dist. < 200 m	4
		dist. < 100 m	5
Land use	1	bare land, green & open space	1
		urban facilities & public used land	2
		manufactural district	2
		commercial district	2
		residential district ect.	2
		river & lake, transportation space	3
Number of road	1	line < 3	1
		3 ≤ line < 7	2
		7 ≤ line	3
Ground condition	0.8	etc.	1
		stable soils	2
		unstable soils	3

여기서, P_i=하수관로 i, n=해당 관로에 대해 확보된 영향인자의 수, W_j=영향인자 j의 가중치, S_{ij}=하수관로 i의 영향인자 j에 대한 영향인자 점수이다.

2.2 파손가능성(PoF) 산정 방법

2.2.1 파손가능성 계산식 결정

하수관로는 시간이 지남에 따라 물리적인 상태의 노후가 진행되는 동시에 파손이 발생할 가능성이 점차 증가하게 된다. 따라서 아래 Eq. (2)와 같이 하수관로의 내용연수 대비 경과된 사용연수의 비율로 나타낸다. 이는, 이상적인 상황에서 사용연수가 경과할수록 관로의 노후로 인해 파손가능성이 계속해서 증가하게 되고 결국

파손가능성이 100%에 이르게 되는 현상을 설명할 수 있다(WERF, 2009).

$$PoF(P_i) = \frac{Used\ year(P_i)}{Expected\ useful\ life(P_i)} \quad (2)$$

여기서, P_i =하수관로 i, $Used\ year(P_i)$ =하수관로 i의 사용연수, $Useful\ life(P_i)$ =하수관로 i의 내용연수이다. 하수관로의 내용연수는 CCTV 조사가 과거에 수행되어 상태등급 자료가 확보되어 있는 경우에는 상태등급과 노후도 모델을 사용하여 하수관로의 예상 내용연수를 예측하거나 파손가능성을 확률적으로 산정할 수 있다(WERF, 2009). 예를 들어, 미국의 PACP (Pipeline Assessment and Certification Program) 매뉴얼은 하수관로 상태등급 5등급에 해당하는 관로는 5년 내로 관로의 붕괴가 발생할 가능성이 있으며 즉각적인 보수가 필요한 대상으로 분류하고 있다(NASSCO, 2013). 국내에서도 마찬가지로, 단순히 매설년도를 기준으로 노후도를 판단하기보다는 정밀조사 수행 결과인 상태등급을 기준으로 물리적인 노후 정도를 판정하도록 제안하고 있다(MOE, 2011; MOE, 2015a).

하지만 CCTV 조사 단계에서는 과거에 측정된 상태등급 자료가 없는 대상이 대부분이기 때문에 노후도 모델을 활용하여 파손가능성을 산정하는 것이 불가능하다. 따라서 대안적으로 관련 연구 자료나 문헌을 토대로 하수관로의 예상 내용연수를 결정하고 사용연수와 함께 파손가능성을 산정한다(US-EPA, 2015).

2.2.2 내용연수 결정

파손가능성을 결정하기 위해 하수관로의 사용연수 데이터를 확보하고 하수관로의 내용연수를 결정한다. 사용연수는 서울시 하수관로 GIS DB에 포함된 매설년도를 통해 매설시점부터 현재까지의 경과된 년도를 산정하여 결정하였다. 또한 내용연수는 국내외 회계기준 및 유지관리 매뉴얼, 하수관로 자산관리 보고서 등을 참고하여 결정하였다.

아래 Table 4에서 국내외 하수관로의 내용연수를 비교한 결과,

최소 20년에서 최대 125년까지 내용연수가 상당한 분포를 보였다. 국내 하수관로는 공공하수도시설 관리업무 대행지침과 지방공기업법 시행규칙에서 흙관은 20년, 대형 박스관로는 30년으로 내용연수를 규정하고 있으며, 공공하수도 유지관리 실무지침서에서는 하수관로 시설의 내용연수를 50년으로 제시하고 있다(MOE, 2005; MOE, 2015b). 미연방정부 재무회계기준에 따르면 콘크리트 하수관로는 50년, 빗물 배수관은 40~45년으로 제시하고 있으며, 매사추세츠 수자원 사무국 보고서에서는 50년을 기준으로 규정하고 있었다(FASAB, 2009; MWRA, 2009). 또한, 미국 국제청의 Publication 946에서는 일반상각법을 적용하는 경우 20년, 대체상각법을 적용하는 경우 50년으로 규정하고 있다(IRS, 2015). 반면에, 영국의 WRc 매뉴얼과 뉴질랜드 인버카길 시의 보고서에서는 각각 80~125년과 100년을 제시하고 있어 국내와 미국의 기준과 큰 차이를 보이고 있었다(WRc, 2001; ICC, 2011).

이처럼 내용연수에서 큰 차이를 보이는 이유는 제조 품질이나 시공 환경이 서로 다르고 시설 개보수에 따라 지속적으로 성능을 유지하면서 사용이 가능하기 때문이다. 또한 내용연수를 규정하는 방법에서도 회계적 내용연수와 관리적 내용연수의 관점으로 구분되는 것을 이유로 들 수도 있다. 하수관로의 노후로 인한 파손가능성을 설명하기 위해서는 회계장부상의 내용연수가 아닌, 실제 하수관로가 기능적으로 발휘할 수 있는 한계까지의 기간인 관리적 내용연수를 활용해야 할 것이다(NFEC, 2014).

하지만 일반적으로 내용연수가 반세기에 이르는 하수관로를 오랜 기간에 걸쳐 관리적 내용연수를 예측하고 결정하는 것은 쉽지 않다(US-EPA, 2002). 또한, 서울시 GIS 데이터상의 하수관로의 평균 사용연수는 24.9년이기 때문에 예상 내용연수를 100년 이상으로 설정하는 것은 하수관로의 성능이 충분히 검증되지 않았기 때문에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 파손가능성을 산정하기 위한 변수인 내용연수를 국내외 미국 문헌에서 제시하고 있는 50년으로 설정하여 활용하였다.

2.3 파손결과 및 파손가능성 등급 결정 방법

앞서 계산한 파손결과와 파손가능성 값은 0부터 1까지의 연속적

Table 4. Sewer Pipe Useful Life in Various Countries

Pipe material		Korea		USA				UK	New Zealand
		MOE (2015b)	MOE (2005)	FASAB (2009)	IRS (2015)	NASSCO (2013)	MWRA (2009)	WRc (2001)	ICC (2011)
Concrete	RC ¹⁾	20	50	50	50	-	50	80-125	100
	Box	30	-	50	50	-	50	80-125	100
Plastic	HDPE ²⁾	-	-	25	-	50	-	40	100
	PVC ³⁾	-	-	25	-	50	-	40	85

¹⁾RC : reinforced concrete, ²⁾HDPE : high-density polyethylene, ³⁾PVC : polyvinyl chloride

인 숫자로 도출되기 때문에, 위험도 매트릭스(risk matrix)산정을 위해서는 다섯 개의 등급으로 분할해야 한다. 다수의 선행연구에서 연속적인 숫자변수를 5등급으로 구분하기 위해서 네츄럴 브레이크 방법(Jenks natural breaks classification method)을 사용하고 있다(Salman and Salem, 2012; Baah et al., 2015). 네츄럴 브레이크 방법은 GIS DB에서 등급구분을 위해 가장 보편적으로 활용되고 있는 방법으로, 데이터 값의 배열을 자연스러운 등급(natural classes)으로 최적화하여 묶는 방법이다. 네츄럴 브레이크를 적용하면 같은 등급 내 전체 값들의 평균을 기준으로 편차는 최소화되고 각 등급 간의 분산은 극대화 할 수 있다(Jenks, 1977).

3. 조사 우선순위 산정 결과

3.1 검토 대상지역 선정

서울시 영등포구는 산업발전과 동시에 서울에서 도시개발이 가장 먼저 진행된 지역으로, 기반시설의 노후화가 상당히 진행되어 있다. 특히 영등포구 서쪽에 위치한 문래 배수분구는 공업단지가 위치하고 있으며, 대부분의 하수관로가 노후화된 합류식 하수관로로 구성되어 있어 관로의 조사와 보수가 우선적으로 필요하다. 또한 하수관로 매설년도 및 파손결과 영향인자들로 구성된 GIS DB의 구성이 양호하여 조사 우선순위를 검토하기에 충분하다. 문래 배수분구의 하수관로는 전체 관로 연장 약 89.3 km이며, 하수관로 GIS 데이터는 전체 3,339개, 이 중 매설년도가 있어

사용연수를 계산할 수 있는 데이터는 2,811개 데이터(전체의 84%)로 구성되어 있다.

3.2 파손결과 및 파손가능성 산정 결과

앞서 설명한 산정 방법에 따라, 문래 배수분구 내의 하수관로에 대한 파손결과와 파손가능성 점수를 산정하였다. 또한 네츄럴 브레이크 방법을 활용하여 산정된 점수를 다섯 등급으로 구분하고 해당지역의 GIS 지도상에 표현하였다.

Table 5에서 나타난 바와 같이, 파손에 대한 결과가 막대한 것으로 예상되는 4~5등급 관로는 전체의 15.9%를 차지하고 있다. 반면, 파손가능성이 5등급에 해당하는 0.72점(사용연수 36년경과) 이상인 대상은 전체 하수관로의 55%를 차지하여 해당 배수분구의 파손가능성은 대체적으로 매우 높았다.

또한 GIS 지도상에 표현된 위치 분포를 살펴보면, Fig. 1(a)에서 하천 인근에 매설된 차집관로가 가장 높은 파손결과 등급을 나타내고, 시가지 블록의 주도로에 위치하는 대부분의 간선관로가 4등급에 해당한다. 마찬가지로 Fig. 1(b)에서 대부분 주 간선도로에 매설된 하수관로가 파손가능성 4~5등급에 해당한다.

3.3 위험도 등급 산정 결과

최종적으로, 앞에서 1~5등급으로 구분한 파손결과와 파손가능성을 동시에 고려하여 위험도 기반의 조사 우선순위를 설정한다. 조사 우선순위는 위험도 매트릭스로 표현하며, 파손결과와 파손가

Table 5. Cutoff Values for Consequence of Failure and Probability of Failure Grade

Grade		Consequence of failure		Probability of failure	
		Cutoff values (score)	Ratio (%)	Cutoff values (score)	Ratio (%)
1	Very low	0.000 - 0.390	28.4%	0.00 - 0.24	6.5%
2	Low	0.390 - 0.465	31.5%	0.24 - 0.42	14.7%
3	Moderate	0.465 - 0.540	24.3%	0.42 - 0.56	13.9%
4	High	0.540 - 0.723	15.4%	0.56 - 0.72	10.0%
5	Very high	0.723 - 1.000	0.5%	0.72 - 1.00	55.0%

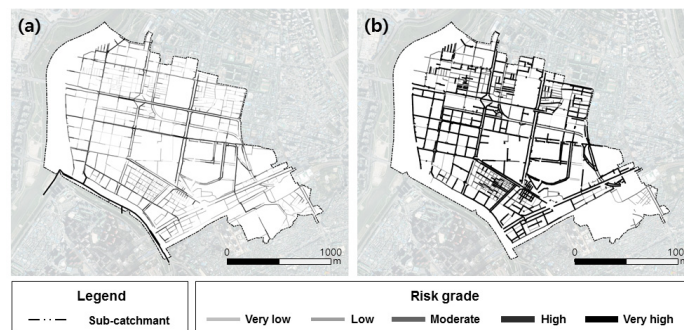


Fig. 1. Sewer Pipe Map in Mullae Sub-catchment: (a) Classified by Consequence of Failure Grade; (b) Classified by Probability of Failure Grade

능성이 동시에 높은 항목부터 차례대로 색을 구분하여 다섯 등급의 위험도로 구분한다. 위험도 등급 구분은 CCTV 하수관로 조사 예산에 적합하도록 유동적으로 설정하는 것이 원칙이나, 기본적으로 공공하수도 기술진단 업무처리 규정에서는 합류식 관로인 경우 전체연장 대비 20% 이상 내부조사를 권고하고 있으며, 하수관로정비 임대형민자사업(BTL) 시행지침에서는 대상지역의 10~30% 범위 내에서 조사하도록 권고하고 있다. 따라서 문래 배수분구 전체를 조사 사업 대상으로 선정한다고 가정하였을 때, 전체 조사대상의 20% 이상 30% 미만의 대상이 선정될 수 있도록 위험도 등급을 조정하였다.

위험도 매트릭스와 위험도 등급을 산정한 결과는 Table 6와 같다. 앞에서 파손결과와 파손가능성의 다섯 개 등급으로 구분한 대상을 위험도 매트릭스에 배치하고 위험도 등급에 따라 다섯 가지 색으로 구분하였다. 그 결과, 위험도 등급은 1등급에서 5등급까지 차례로 6.8%, 33.3%, 33.2%, 17.2%, 9.5%로 나타났으며, 위험도 4~5등급은 전체 하수관로의 26.7% 비율을 차지하고 있어 조사사업 표본대상 비율에 적합한 결과가 도출되었다. Fig. 2는 해당 등급을 GIS 지도상에 출력한 결과이다. 시가지 블록의 주도로에 위치하는 간선관로 대부분이 위험도 4~5등급에 해당하였으며, 간선관로임에도 불구하고 몇몇의 관로는 3등급인 관로도 혼재되어 등급 구분의 중요성을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 서울시 하수관로 GIS DB를 기초로 하여 위험도 기반의 하수관로 조사 우선순위를 결정하기 위한 방법을 제안하였다. 국내의 위험도 기반의 조사 우선순위 도출 방법을 검토하여 파손결과와 파손가능성, 그리고 위험도 산정방법을 도출하고 소규모 배수분구 지역을 대상으로 조사 우선순위의 산정방법의 적용 타당성을 검토하였다.

- (1) 가중치 환산법에 기초한 파손결과 산정방법을 토대로, 주어진 DB에 적합한 영향인자, 가중치, 구분기준을 결정하고 파손결과 값을 도출하는 식을 제시하였다.

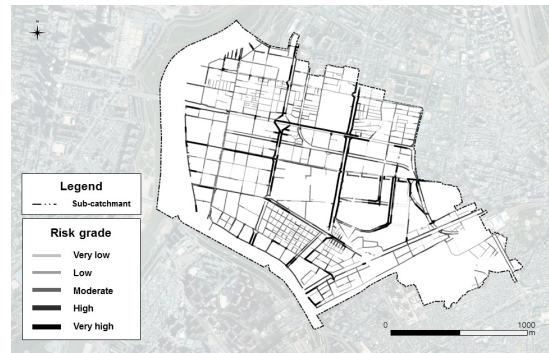


Fig. 2. Sewer Pipe Risk Grade Map in Mullae Sub-catchment

- (2) 하수관로 사용연수를 기반으로 정량적인 파손가능성 산정방법을 제시하였다.
- (3) 실제 배수분구를 대상으로 앞에서 도출한 파손결과와 파손가능성 산정방법을 적용하고, 최종적으로 위험도 기반의 조사 우선순위를 도출하여 해당 산정방법의 적용 타당성을 확보하였다.

결론적으로, 하수관로 조사 우선순위를 설정하기 위해 파손결과와 파손 가능성 모두를 고려한 합리적인 위험도 등급을 산정 방안을 제안할 수 있었다. 본 논문에서는 약 27%에 해당하는 관로를 4~5등급으로 배정하였으나, 추후 배정된 조사 예산에 따라, 동일한 방법을 적용하고 위험도 매트릭스의 등급 구분을 조정하여 조사의 우선순위를 재배정할 수 있을 것이다. 실제 조사가 이루어진 이후에는 우선순위를 설정하는 기본적인 틀로서 활용하여 기존의 GIS DB를 갱신하고 파손 결과와 파손 가능성을 정교하게 재산정할 수 있다. 또한 본 연구에서 제시하는 개별 하수관로에 대한 위험도 산정 방법을 토대로 지역별 위험도 지표를 추가적으로 개발하여 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “환경정책기반공공기술개발사업(과제번호 2016000200012)”으로 지원받은 과제입니다. 이에 감사드립니다.

Table 6. Sewer Inspection Prioritization Matrix Based on Risk Assessment (Classified in Five Color)

Risk matrix (%)		Probability of failure				
		Very low	Low	Moderate	High	Very high
Consequence of failure	Very high	0.04%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%
	High	2.10%	2.99%	0.50%	0.82%	9.46%
	Moderate	1.85%	2.99%	2.70%	2.38%	13.52%
	Low	1.46%	4.30%	4.62%	4.73%	15.15%
	Very low	1.03%	4.34%	6.08%	2.06%	16.83%

References

- Baah, K., Dubey, B., Harvey, R. and McBean, E. (2015). "A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management." *Science of The Total Environment*, Vol. 505, pp. 1011-1017.
- Federal Accounting Standards Advisory Board (FASAB) (2009). *Statement of federal financial accounting concepts and standards*.
- Hahn, M. A., Palmer, R. N., Merrill, M. S. and Lukas, A. B. (2002). "Expert system for prioritizing the inspection of sewers : Knowledge base formulation and evaluation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, No. 2, pp. 121-129.
- Halfawy, M. R., Dridi, L. and Baker, S. (2008). "Integrated decision support system for optimal renewal planning of sewer networks." *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 360-372.
- Harvey, R. R. and McBean, E. A. (2014). "Predicting the structural condition of individual sanitary sewer pipes with random forests." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 41, No. 4, pp. 294-303.
- Internal Revenue Service (IRS) (2015). *Publication 946*, pp.105-113.
- Invercargill City Council (ICC) (2011). *Sewerage Asset Management Plan*.
- Jenks, G. F. (1977). *Optimal data classification for choropleth maps*, Occasional paper No. 2. Lawrence, Kansas: Univ. of Kansas, Dept. of Geography.
- Kleiner, Y., Sadiq, R. and Rajani, B. (2004). "Modeling failure risk in buried pipes using fuzzy Markov deterioration process." *In ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction*, pp.1-12.
- Kley, G. and Caradot, N. (2013). *DI. 2. Review of sewer deterioration models; project acronym : SEMA*, Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- Korea Institute of Public Finance (KIPF) (2012). *Depreciation and useful life analysis of major countries*, pp. 40-45 (in Korean).
- Lukas, A. and Merrill, M. S. (2006). Scraps: "An expert system for prioritizing sewer inspections." *North American Society for Trenchless Technology (NASTT)*.
- Massachusetts Water Resources Authority (MWRA) (2009). *Capital Improvement Program (CIP)*, <http://www.mwra.state.ma.us/finance/cip.htm>
- McDonald, S. E. and Zhao, J. Q. (2001). "Condition assessment and rehabilitation of large sewers." *In Proceedings of the International Conference on Underground Infrastructure Research*, pp. 361-369. University of Waterloo.
- Ministry of Environment (MOE) (2005). *Public sewer maintenance practical guide* (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2011). *Sewerage facility standard* (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2013). *Guidance of sewer system maintenance in major management* (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2015a). *Conducting precise surveys on aged sewage pipes to cope with subsidence*; Press Releases (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2015b). *Guidelines for public sewerage facility management* (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2015c). *National sewerage master plan (2016~2025)*.
- National Association of Sewer Service Companies (NASSCO) (2013). *Infrastructure condition assessment and certification programs (PACP/MACP/LACP)*, National Association of Sewer Service Companies, USA, 2012 and 2013 Trainer of the Year.
- National Research Facility & Equipment Center (NFEC) (2014). *Accounting Life and Management Life of Research Equipment* (in Korean)
- Salman, B. and Salem, O. (2012). "Risk assessment of wastewater collection lines using failure models and criticality ratings." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol. 3, No. 3, pp. 68-76.
- Seoul Metropolitan Government. (2015). *Korea geologic information consortium : sewer management computer system maintenance · improvement of function and DB accuracy improvement business* (in Korea).
- Syachrani, S., Jeong, H. D. and Chung, C. S. (2013). "Advanced criticality assessment method for sewer pipeline assets." *Water Science and Technology*, Vol. 67, No. 6, pp. 1302-1309.
- Syachrani, S., Jeong, H. S. and Chung, C. S. (2011). "Dynamic deterioration models for sewer pipe network." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol. 2, No. 4, pp. 123-131.
- Toy, L. P. (2014). *Risk-based asset inspection prioritisation programme*.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (2002). *SSO fact sheet-asset management for sewer collection systems*.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (2005). *Advanced asset management training*.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (2009). *Condition assessment of wastewater collection systems*, EPA/600/R-09/049.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (2015). *Condition assessment of underground pipes with excerpts from : condition assessment of wastewater collection systems*, EPA/600/R-09/049.
- Ward, B. and Savić, D. A. (2012). "A multi-objective optimisation model for sewer rehabilitation considering critical risk of failure." *Water Science and Technology*, Vol. 66, No. 11, pp. 2410-2417.
- Water Environment Research Foundation (WERF) (2007). *Condition assessment strategies and protocols for water and wastewater utility assets*.
- Water Environment Research Foundation (WERF) (2009). *Remaining asset life : A state of the art review*.
- Water Research centre (WRc) (2001). *Sewerage rehabilitation manual* (4th ed.).