

마르코프 연쇄 모델을 이용한 하수관로의 구조적 노후도 추정

강병준* · 유순유** · 장전리*** · 박규홍****

Kang, Byong Jun*, Yoo, Soon Yu**, Zhang, Chuanli***, Park, Kyoo Hong****

Estimation of Structural Deterioration of Sewer using Markov Chain Model

ABSTRACT

Sewer deterioration models can offer important information on prediction of future condition of the asset to decision makers in their implementing sewer pipe networks management program. In this study, Markov chain model was used to estimate sewer deterioration trend based on the historical structural condition assessment data obtained by CCTV inspection. The data used in this study were limited to Hume pipe with diameter of 450 mm and 600 mm in three sub-catchment areas in city A, which were collected by CCTV inspection projects performed in 1998-1999 and 2010-2011. As a result, it was found that sewers in sub-catchment area EM have deteriorated faster than those in other two sub-catchments. Various main defects were to generate in 29% of 450 mm sewers and 38% of 600 mm in 35 years after the installation, while serious failure in 62% of 450 mm sewers and 74% of 600 mm in 100 years after the installation in sub-catchment area EM. In sub-catchment area SN, main defects were to generate in 26% of 450 mm sewers and 35% of 600 mm in 35 years after the installation, while in sub-catchment area HK main defects were to generate in 27% of 450 mm sewers and 37% of 600 mm in 35 years after the installation. Larger sewer pipes of 600 mm were found to deteriorate faster than smaller sewer pipes of 450 mm by about 12 years. Assuming that the percentage of main defects generation could be set as 40% to estimate the life expectancy of the sewers, it was estimated as 60 years in sub-catchment area SN, 42 years in sub-catchment area EM, 59 years in sub-catchment area HK for 450 mm sewer pipes, respectively. For 600 mm sewer pipes, on the other hand, it was estimated as 43 years, 34 years, 39 years in sub-catchment areas SN, EM, and HK, respectively.

Keywords : Sewer deterioration, Markov Chain Model, CCTV inspection, Condition assessment

초 록

하수관로 열화모델은 하수관망을 관리하는 의사결정자에게 자산의 미래 상태 예측에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 CCTV 조사를 통해서 확보한 구조적 상태평가 이력자료를 기반으로 마르코프 연쇄 모델을 이용하여 하수관로의 노후도를 추정하였다. A시의 3개 배수 분구에서 1998-1999년과 2010-2011년에 CCTV 조사에 의해 수집된 관경 450 mm와 600 mm의 흠관 자료를 이용하여 분석하였다. EM 배수 분구의 450 mm 관로와 600 mm 관로에서 주요 결함 발생이 다른 두 배수분구보다 빠르게 발생하는 것으로 나타났다. 관로 설치 이후 35년이 지난 시점에는 450 mm 관로의 약 29%, 600 mm 관로의 약 38%가 주요 결함이 발생했으며, 100년 후에는 각각 62%와 74%의 관로가 주요 결함으로 관로 기능을 상실하는 수준으로 나타났다. 관로설치 35년 후, SN 배수분구는 450 mm 관로의 약 26%, 600 mm 관로에서 약 35%, HK 배수분구에서는 450 mm 관로의 약 27%, 600 mm 관로에서 약 37%의 주요 결함이 발생한 것으로 예측되었다. 또한 600 mm 관로가 450 mm

* 정회원 · (주)엔솔파트너스 스마트상하수도사업팀 차장, 공학박사 (Environment Solution Partners · igligl@daum.net)

** 한국공학대학교 부교수, 이학박사 (Tech University of Korea · ysyoo00@naver.com)

*** 중앙대학교 토목공학과 박사과정 (Chung-Ang University · zcl_5208@naver.com)

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

Received July 6, 2020/ revised June 16, 2022/ accepted May 17, 2023

관로보다 평균 12년 정도 빨리 기능 저하가 일어나는 것으로 나타났다. 한편, 관로의 주요 결함등급 비율을 40%로 설정하여 관로의 유효사용수명으로 적용할 경우, 450 mm 관로는 SN배수분구에서 60년, EM배수분구에서 42년, HK배수분구 59년이며, 600 mm 관로에서는 각각 43년, 34년 39년으로 나타났다.

검색어 : 하수관로 열화, 마르코프 연쇄 모델, CCTV 조사, 상태평가

1. 서론

하수관로는 현대 사회에서 매우 중요한 공공시설물로서, 오수와 우수를 수집하고 운반하는 매우 중요한 구성 요소이며, 가장 자본집약적인 시설 중 하나이다. 이러한 시설은 장시간사용으로 인한 노후화, 주변 환경의 영향, 유지관리 미흡 등으로 인해 열화(劣化)되며, 도심침수 및 관 붕괴와 같은 부작용이 발생한다. 대부분의 시설이 지하에 매설되어 육안으로 확인이 어렵기 때문에 문제가 발생될 때까지 관심을 갖지 않다가 하수관로의 문제가 발생한 후 대처하려면 경제적 부담이 크며, 증가하는 하수량 수요와 강화되는 수질 규제에 적절하게 대응하지 못하는 경향이 있다.

과거 국내 하수관로 정책은 서비스 지역의 확대를 위해 질적인 성장보다는 양적인 성장을 목표로 발전해 왔다. 하수관로 시설이 점점 노후화되면서 침수, 관 막힘, 관 붕괴 등의 심각한 문제가 발생한 곳을 중심으로 보강·보수를 실시하는 사후 대응형 관리가 주를 이루고 있었다. Baur and Herz(2002)는 사후 대응형 관리는 불충분한 조사와 계획으로 인하여, 비효율적인 유지보수 전략과 경제적 애로사항을 일으킬 수 있음을 지적하기도 하였다. 따라서 지자체 또는 국가의 예산을 절약하고 사업의 효과를 극대화하기 위한 하수관로 관리체계가 요구되고 있다. 문제가 발생하기 전에 미리 문제를 처리하는 방식인 사전 예방 관리가 관심을 얻고 있으며, 이러한 목적을 달성하기 위해 여러 기반시설에 대해 자산관리 체계의 필요성이 제기되어왔다(Ariaratnam, 1994; Vanier, 2001).

자산관리 체계의 중요한 요소 중 하나는 기반시설의 미래 거동을 예측하는 능력을 갖추는 것이다(Lemer, 1999; Mehle et al., 2001). 이러한 작업을 수행하기 위해서는 시설의 현재 상태에서부터 시간의 흐름에 따라 어떻게 열화되는지 예측하는 것이 필요하다. 열화모델은 수학적인 설명, 필요데이터 양과 항목 그리고 보정에 있어 약간의 차이를 나타내고 있지만, 실제 데이터들을 필요한 형태로 가공하여 미래 상태를 예측한다. 노후도 추정 기법을 통해 대부분 지하에 매설되어 직접적으로 상태를 파악하기 어려운 하수관로 시설에 대하여 미래 상태를 예측하고 적절한 관리에 큰 도움을 줄 수 있다. 사회기반시설 자산관리 분야의 선진국들은 다양한 열화모델을 이용하여 하수관로 수명을 예측(IIMM, 2000; WRc, 1994; City of Victoria, 2005; USACE, 1984; NAASCO, 2004; ACPA,

1991; NCPI, 2004)하고 있다. 또한, 하수관로의 기능 저하 방지, 효율적 예산 분배, 최적의 유지 보수 및 정비 전략 구체화, 관로 사용연한 연장 등과 같은 이점을 얻고 있는 것으로 알려져 있다(IIMM, 2000). 그러나 하수관로의 열화는 광범위한 요소들에 의해 복잡한 영향을 받기 때문에 관로의 문제 발생을 예측하는 것은 매우 어렵고 힘든 일이다.

Rostum et al.(1999)은 Herz 분포(Herz, 1998)를 이용하여 cohort 모델을 개발하였다. CCTV(Closed-Circuit Television Camera)를 이용한 하수관로 상태평가 자료가 연구에 이용되었으며, 노르웨이의 표준 하수관로 상태 5등급 분류 체계(NORVAR 1998)를 열화모델 개발에 사용하였다. Ariaratnam et al.(2001)은 데이터가 불충분한 상태에서 특정 하수관로에서의 열화 가능성을 예측하기 위해 logistic 회귀모델을 이용하였다. Logistic 회귀모델에서 결과변수는 이진(binary)과 베르누이분포를 가정하기 때문에 관로 결함상태에 대한 영향 여부만을 예측할 수 있다. 따라서 이 모델은 하수관로의 상태 변화 예측에 적용할 수 없다. Wirahadikusumah et al.(2001)은 대형 합류식 하수관로에 대한 마르코프 연쇄(Markov Chain) 기반 열화 모델을 개발하였다. 이 모델은 전이확률은 상태 자료와 마르코프 모델에서 얻은 기댓값의 절대 거리를 최소화하여 비선형 최적화기법을 이용하여 계산되며, 하수관로 상태 예측에 사용연한만을 고려하므로 관로의 유사한 열화거동을 범주별로 분류해야 한다. 하수관로 특성에 따라 16개의 범주로 분류하였으나, 분석 신뢰성과 자료의 충분성을 고려하여 4개만을 이용하여 모델링을 실시하였다. 이와 유사하게 Micevski et al.(2002)은 Metropolis-Hastings 알고리즘을 이용하여 하수관로 상태와 사용연한으로 전이확률을 추정하였으며, 관로는 관경, 관의 재질, 도양 유형 및 여러 요소들을 기반으로 관의 여러 특성과 열화 특성을 고려하여 분류하였다. 전이확률 추정방법에 따라, 상기 마르코프 연쇄 모델은 관로나 관망의 범주별로 상태 예측에 더 적합하다. 최근 Baik et al.(2006)은 하수관로 사용 연수와 상태 자료뿐만 아니라 관로의 물리적 특성(여러 공변량)을 토대로 ordered probit 모델을 이용하여 전이확률을 예측하였다. Le Gat(2008) 또한 Gompertz 분포를 이용하여 유도된 전이확률을 마르코프 연쇄 모델에 적용하였다. 이 두 모델은 관로의 특정 공변량을 고려하기 때문에 Wirahadikusumah et al.(2001)과 같이 관로의 특성별로 범주화를 할 필요가 없이 직접 각 관의 열화를 예측할

수 있었다. 또한, Le Gat(2008)이 제안한 모델은 교차 타당성 분석을 통해 관망에서 가장 열화된 관로를 찾을 수 있는 장점이 있다.

국내에서 Ryeo et al.(2004)은 추계학적 최적화 모형인 마르코프 연쇄 모델을 이용하여 불명수 발생량의 불확실성을 고려한 하수관로 정비 연구를 수행하였으나, 전이 확률을 추정하는 과정에서 자료 부족으로 많은 가정을 함으로써 현실적인 분석에 한계를 보였다. Seoul(2013a)에서는 하수관로 종합정비사업 성과 분석 및 품질보증향상방안 연구에서 관로의 노후도 평가를 위해 마르코프 연쇄 모델을 이용하였다. 그러나 이들 연구는 사용 연수만을 이용한 전이확률 추정 기능성만을 제시하였다. 하수관로 열화예측을 위해 하수관로의 상태변화를 고려함으로써 더욱 과학적인 하수관로 열화에 대한 정의와 이를 바탕으로 한 적절한 잔존수명 추정 필요성이 있다.

본 연구에서는 하수관로의 내부 조사를 통한 구조적 상태평가 이력 자료들을 이용한 확률 기반의 분석을 통해, 국내 하수관로의 상태변화에 따른 노후도 추정 방안을 도출하고자 하였다. 이를 위해서 A시의 SN, EM, HK의 세 배수분구의 하수관로 GIS(Geographic Information System) 데이터베이스(Seoul, 2013b)를 활용하여 해당 시점의 관로상태 데이터를 수집하여 마르코프 연쇄 모델 분석에 이용하였다. 수집된 데이터를 중심으로 미래 하수관로 상태 변화를 예측하였고, 예측결과와 관측결과를 비교하여 오차범위를 제시하였다. 또한 하수관로 상태 변화추이 예측 결과를 바탕으로 사전 예방관리를 위한 적절한 정비 시점과 관로의 잔존 수명 예측 방법을 제시하였다. 여러 관로의 속성 중에서 설치 지역, 직경, 재질, 사용연한을 그룹화하여 관로 상태평가 시점 별로 분류하였으며, 서로 다른 시점의 관로 결함 등급 비율을 통한 전이 확률 추정은 비선형 최적화 방법을 이용하였다.

2. 마르코프 연쇄 모델

마르코프 연쇄 모델은 1906년 Andrei Andreyevich Markov에 의해 개발된 마르코프 성질을 지닌 이산 확률 과정(Discrete-time Stochastic Process)으로 시간 경과에 따라 상태가 확률적으로 변화하는 과정과 그 결과에 대하여 파악하는 기법이다(Osaki, 1992). 시스템의 변화는 여러 인자들에 의해서 시간에 따라 그 상태가 확률적으로 변화하는데 이러한 확률과정의 대표적인 모형 중 하나이다.

시스템에서 과거와 현재 상태가 주어졌을 때 미래 상태의 조건부 확률분포가 과거 상태와는 독립적으로 현재 상태에 의해서만 결정되는 특징을 마르코프 특징이라고 한다. 시스템(하수관)의 현재시점(t) 상태는 시스템의 미래 상태를 결정하는데 중요한 요소로

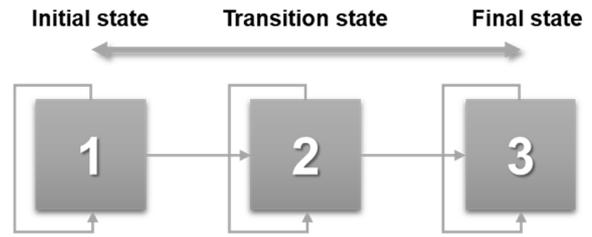


Fig. 1. Schematization of Markov Chain Model for Sewer System

작용한다. Fig. 1과 같이 시스템의 미래시점(t_n)에서 현재 상태 또는 노후화된 상태에 머물러 있다는 것을 의미하며, 다른 상태로 변화되는 것을 전이라고 한다.

식 (1)과 같이 이산 상태 공간에서 마르코프 특성을 갖는, 즉 현재 상태가 미래와 과거의 상태와는 독립적인 일련의 임의의 변수 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_t$ 로 표현될 수 있다:

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t) = p_{ij} \quad (1)$$

여기서, i_t = 시간 t 에서 과정의 상태

P = 주어진 현재와 과거 상태에서 미래의 상태 확률

상태 i 의 하수관로가 열화되는 과정에 마르코프 연쇄 모델을 적용하면 하수관로는 현재 상태 i 에서 미래 상태 j 로 변하는 고정 확률이 존재할 수 있다. 이 확률은 식 (2)에서 보는 것과 같이 전이 확률이라고 부르며 P_{ij} 라고 표시한다.

$$P(X_{t+1} = j | X_t = i) = P_{ij} \quad (2)$$

전이확률은 보통 전이확률 행렬(P)로 불리는 순서 행렬 ($m \times m$)에 의해 대표되며, 여기서 m 은 가능한 있는 구조상태이다. 행렬에서 각 요소(P_{ij})는 확률을 나타내고 시스템의 상태는 일정기간동안 상태 i 에서 상태 j 로 이동된다. 전이행렬의 일반적인 형식은 식 (3)과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\sum_{j=1}^m P_{ij} = 1, \text{ for } i = 1, 2, 3, m$

상태 1이 상태 2로 전이되는 확률은 n 번의 전이 과정후 n -단계 전이확률로 정의되며, $P_{ij}^{(n)}$ 과 Chapman-Kolmogorov식을 이용한 전이확률행렬 $P^{(n)}$ 은 식 (4)와 같이 한 단계 전이확률 P 의 n 제곱에 의해 얻을 수 있다.

$$P^n = \underbrace{P \times P \times \dots \times P}_{n\text{-times}} \quad (4)$$

3. 연구방법

3.1 데이터의 취득

연구대상지역으로 선정된 A시의 하수관로는 대부분 합류식으로 구성되어 있지만 새로운 택지개발사업지역에서는 분류식 하수관로를 설치하고 있어 합류식과 분류식이 혼재되어 있다. 자료 수집은 A시의 하수관로 GIS에 저장된 자료와 하수관로정비보고서(Seoul, 2013b)를 활용하였다. 수집된 자료에서 관로 식별 번호, 관경, 관종, 관로 상태 결함 및 등급, 관로 연장, 조사 연장, 조사 연도, 하수배제방식(합류식 관로, 우수관로, 오수관로) 등과 같은 본 연구에 필요한 자료만을 추출하여 정리하였다. 과거 수행한 관로 조사에서 약 10년간의 시간차이를 갖는 관로 내부 CCTV 조사를 기반으로 한 이력 자료가 남아 있는 SN, EM, HK 세 배수분구의 자료를 분석 대상으로 연구범위를 축소하였다. 그러나 1984년 이전에 신설된 관로에서는 설치연도를 기록해두지 않아서, 관로 설치연도가 불확실한 관로는 분석대상에서 제외하였다. 연구대상지역은 국가경제개발계획이 이행되면서 1980년부터 급속한 지역 성장과 함께 하수관로 설치가 본격화된 지역이다.

Table 1은 분석대상 배수분구에 설치된 하수관로 연장 및 CCTV 조사 연장이다. 과거(1998~1999년) 자료 37,801.46 m 중 조사된 29,847.42 m 자료와 최근(2010~2011년) 자료 68,369.1 m 중 조사된 58,177.85 m CCTV 조사 관독 자료를 활용하였다.

3.2 분석방법

통계적 방법을 이용한 데이터 분석에서 중요한 것은 관로의

Table 1. Sewer Lengths in each Sub-Catchment Area (The Values in Parentheses Mean Sewer Lengths Inspected by CCTV)

Unit : m				
Sub-catchment area	1998	1999	2010	2011
SN	-	3,299.1 (2,498.42)	17,800.28 (14,833.60)	-
EM	845.16 (617.1)			37,986.47 (33,167.43)
HK	33,657.2 (26,731.9)			12,582.35 (10,176.82)

Table 2. Condition State Evaluated by Grade Based on Defect Rate

Condition state	Grade by defect rate		
	a	b	c
1	0%	0%	< 60%
2	< 20%	< 40%	> 60%
3	> 20%	> 40%	-

상태를 정의하는 방법이다. CCTV 조사 자료로부터 과거 결함의 평가는 하수관로의 구조적 상태에 따라 관로 상태를 CS1(좋음)에서 CS3(불량)까지 세 등급으로 정의한 A시의 하수관로 CCTV 결함 판독 기준(Table 2)을 이용하였다. CS 등급 결정은 불량항목의 총 비율로 결정되며, CS1 등급은 불량항목 중 a와 b를 판정받은 항목이 없지만 c등급 비율이 60% 미만인 경우에 해당한다. 정비 대상 선정은 불량발생율의 등급 비율에 의하여 관로 상태등급(구간 전체 등급)이 결정된다.

수집된 자료를 지역별(SN, EM, HK)로 분류하고, 관종, 관경, 하수 배제 방식(합류식)으로 분류하였다. 또한 관로 신설시 상태등급은 CS1로 가정하였고, 관로 구조적 상태 등급(Condition state: CS)은 해당 지역에서 1998~1999년과 2010~2011년에 수행된 두 번의 CCTV조사결과를 사용하였다(Seoul, 2013b). 수집된 자료는 해당지역의 모든 관로를 대상으로 조사한 자료가 아니며, 표본조사를 통해 얻은 결과이다. 통상 하수관로 CCTV조사 예산의 제약으로 일부 구간이 조사된 후 추가 예산이 확보되면 그 전에 조사되지 않은 구간을 조사하게 된다. 이에 동일한 관로에 대한 조사결과가 매우 희귀하여 본 연구의 모델 분석에 활용할 수 없으므로, 동일한 배수분구의 경우에는 다른 관로이더라도 동일한 시공사가 유사한 시공 품질로 건설했을 것이라는 가정을 하였다. 또한 본 연구에서는 자료 분석의 단순화를 위해 동일 배수분구의 하수관로 CCTV조사 두 사업 간의 시간 간격 약 10년 동안 관로의 보수·정비·교체 등으로 인한 관로의 상태 변화는 없는 것으로 가정하였다. 1990년에 EM지역에서 845 m, 1999년에 SN지역에서 3,299 m의 조사자료가 다른 지역이나 다른 시간의 조사자료보다 상대적으로 적다고 하여 마르코프 연쇄 모델의 전이확률이 미치는 영향은 없을 것으로 사료된다. 왜냐하면 전이확률 산정 시 관로 조사 연장과는 무관하게 매설 후 경과년수와 CS 등급의 결과를 이용하였고, 두 조사시점의 자료 유형이 연속성을 갖는 자료가 아니라 별도의 이산자료의 형태이기 때문이다. 전이확률을 추정하기 위해 Mathematica 프로그램을 이용하여 비선형 최적화 분석을 수행하였다.

3.3 관경 및 관종 선택

모델 적용을 위한 변수 설정을 위해 3개의 배수분구에서 가장

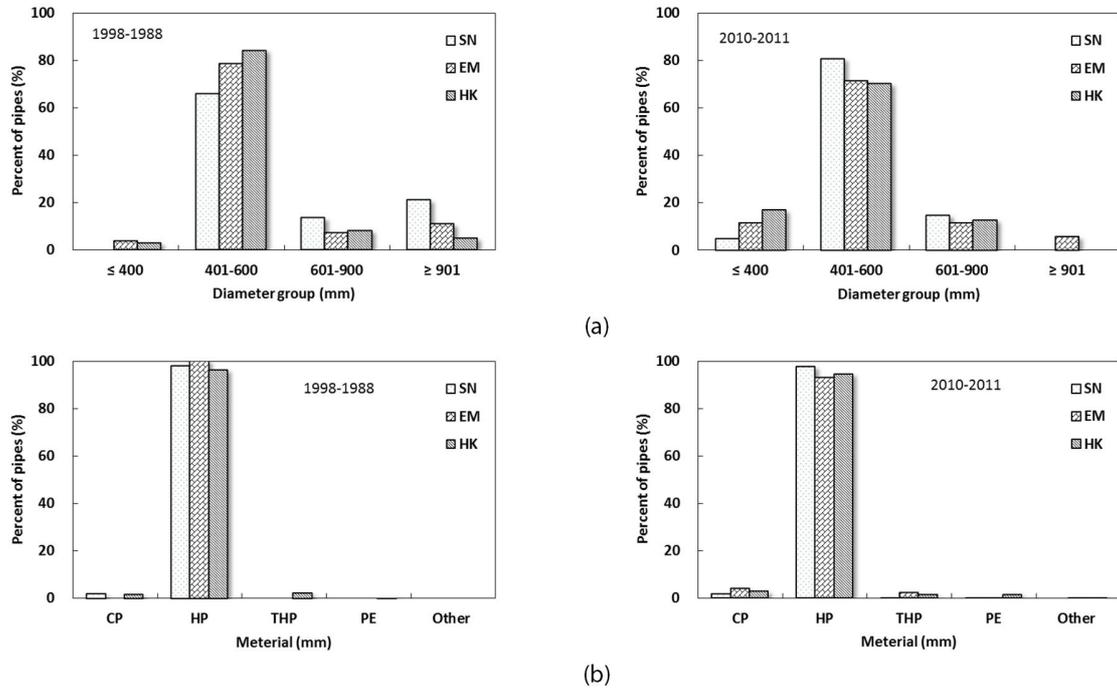


Fig. 2. Distribution of CCTV Inspected Sewer Pipes According to the Pipe Diameter and Material: (a) Diameter Distribution, (b) Material Distribution

많이 사용되고 있는 관경과 관종으로 선택하기 위하여 데이터의 사전 분석을 실시하였다. 우선 관경별로 4개의 그룹(400 mm 이하, 401~600 mm, 601~900 mm, 901 mm 이상)으로 구분하여 분석한 결과 401~600 mm 그룹이 65.7~84.2%로 가장 높은 분포를 나타내고 있으며, 이 중에서도 450 mm, 600 mm 관경이 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다.

관종은 재질에 따라 콘크리트관(CP), 흙관(HP), 주름관(THP), 폴리에틸렌관(PE), 기타(경질염화비닐관, PVC, 고강성 PVC이중벽관, PVCDC, 강관, SP, 파형강관, CSP 등)로 구분하여 분석한

결과 SN, EM, HK 지역 모두 HP 관로가 95% 이상으로 가장 많이 사용되는 것으로 나타났다. 따라서, 모델에 적용할 자료의 범위는 3개의 배수분구에서 가장 많이 사용되고 있는 450 mm, 600 mm의 HP관으로 한정하였다.

3개의 배수분구에서 수집한 모든 관경과 관종의 자료를 모델에 적용할 수 있겠지만 가장 많이 분포하는 관종과 관경 외의 자료 수는 극히 일부여서 모델 결과의 신뢰성에 영향을 줄 수 있어 제외하였다.

Table 3. The Temporal Fraction of each Condition State of Sewers with Diameter 450 mm and 600 mm in each Area

Sub-catchment area	Year of CCTV inspection	450mm			600mm		
		CS1	CS2	CS3	CS1	CS2	CS3
SN	1984	0.99	0.01	0.00	0.99	0.01	0.00
	1999	0.706	0.294	0.000	0.654	0.346	0.00
	2010	0.852	0.122	0.026	0.797	0.183	0.020
EM	1984	0.99	0.01	0.00	0.99	0.01	0.00
	1998	0.667	0.333	0.00	0.429	0.143	0.429
	2011	0.768	0.158	0.074	0.754	0.138	0.108
HK	1984	0.99	0.01	0.00	0.99	0.01	0.00
	1998	0.715	0.166	0.119	0.693	0.191	0.116
	2011	0.805	0.165	0.03	0.711	0.264	0.025

CS : Condition State

Table 4. Estimation of Transition Probability according to Condition State of Sewers with Diameter 450 mm and 600 mm in each Area

Sub-catchment area	Condition state		Future state					
			450mm			600mm		
			CS1	CS2	CS3	CS1	CS2	CS3
SN	Current State	CS1	0.9916	0.0084	0	0.9881	0.0119	0
		CS2	0	0.9700	0.0300	0	0.9776	0.0224
		CS3	0	0	1	0	0	1
EM	Current State	CS1	0.9881	0.0119	0	0.9850	0.0150	0
		CS2	0	0.9659	0.0341	0	0.9661	0.0339
		CS3	0	0	1	0	0	1
HK	Current State	CS1	0.9915	0.0085	0	0.9871	0.0129	0
		CS2	0	0.9916	0.0084	0	0.9963	0.0037
		CS3	0	0	1	0	0	1

4. 결과 및 고찰

4.1 전이확률 추정

전이 확률을 산정하기 위해 하수관로 신설 시점의 등급분포는 CS1 99.0%, CS2 1.0%, CS3 0.0%로 가정하였으며, 실제 CCTV 조사가 이루어진 다른 두 시점은 분석대상 지역의 하수관로 GIS 상의 결합등급 정보를 이용하였다(Seoul, 2013b). 이와 같은 자료를 이용하여 시간의 흐름에 따른 하수관로 결합 등급 비율을 산출하였다(Table 3).

Table 3과 같은 전제로 식 (3)을 이용하여 비선형최적화를 수행할 경우 Table 4와 같이 전이확률을 구할 수 있다.

4.2 하수관로 미래 상태 변화 예측

Table 4의 전이확률을 이용하여 분석지역의 미래 하수관로 상태 변화, 즉 결합의 등급 비율 변화를 예측하였다. 이때 10년 이상의 시간차이 때문에 발생할 수 있는 오차를 최소화하는 방법으로

관로 설치시(1984년)부터 100년(2084년)까지 1년 간격으로 관로 상태변화를 예측하여 Fig. 3~Fig. 5에 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 바와 같이, SN, EM 지역에서 CS2의 분포가 30년부터 완만하게 증가 후 약 60년 이후 약간 감소 추세를 보이며, CS3 분포는 지속적으로 증가하는 것으로 분석되었다. CS1의 감소와 CS2와 CS3의 증가는 시간의 흐름에 따라 반대되는 경향을 보였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, HK 지역의 경우 다른 두 지역보다는 CS3이 증가 추세가 급하지는 않으나 지속적으로 완만하게 증가함을 볼 수 있다. HK지역의 CS2의 추세도 EM과 SN 지역과는 다르게 시간 변화에 따라 꾸준히 증가하고 있으며, CS1은 급격한 변화 없이 일정한 비율로 감소하는 추세를 보였다.

4.3 관로 상태등급 실측 및 모의 비율 비교

관경, 관중 그리고 배수분구 구분은 수집된 자료의 그룹화를 위한 범주였으며, 분석에 직접적인 변수로 사용한 요인은 서로 다른 시점에서의 관로 상태 등급 비율이었다. 이를 이용하여 도출된

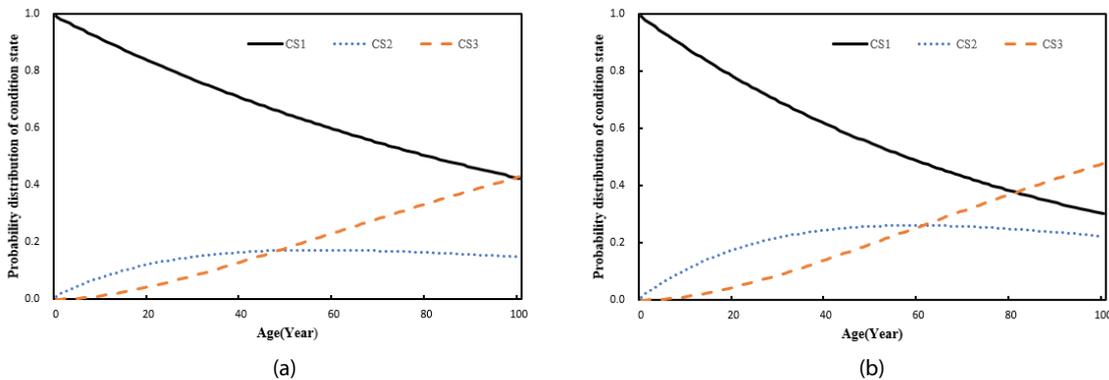


Fig. 3. Probabilities Distribution of Condition State for 450 mm and 600 mm Sewer Pipes in the SN Area: (a) HP, 450 mm, (b) HP, 600 mm

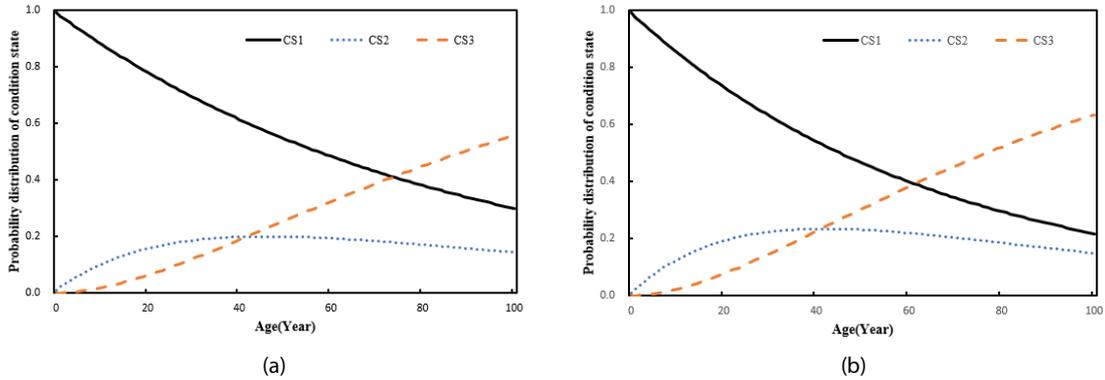


Fig. 4. Probabilities Distribution of Condition State for 450 mm and 600 mm Sewer Pipes in the EM Area: (a) HP, 450 mm, (b) HP, 600 mm

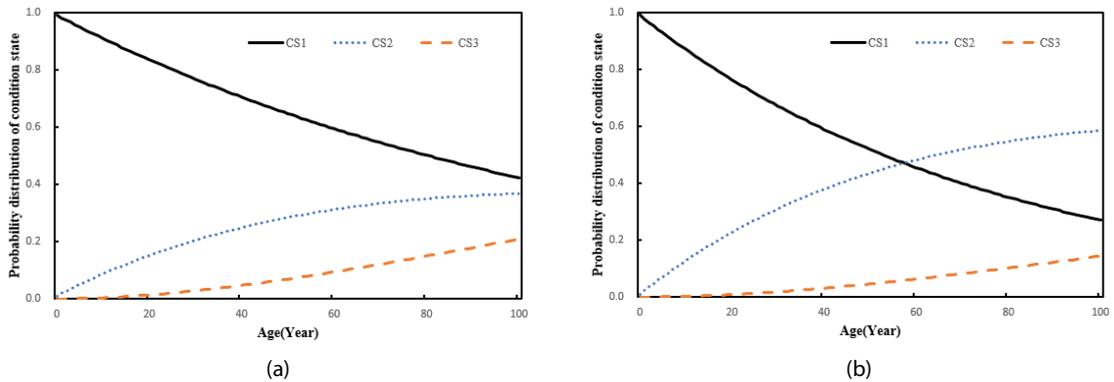


Fig. 5. Probabilities Distribution of Condition State for 450 mm and 600 mm Sewer Pipes in the HK Area: (a) HP, 450 mm, (b) HP, 600 mm

전이확률을 토대로 미래 관로 상태 변화를 예측할 수 있다. 1998년 ~1999년과 2010년~2011년의 관로 CCTV조사 결과를 바탕으로 전이확률을 하수관로의 노후도 평가에 적용 가능성이 있는지

Table 5와 Table 6에서 비교하여 보았다.

Table 5에서와 같이 1998년에서 1999년에 450 mm 관로에 대해 관측된 관로 상태 등급 비율과 모의된 관로 상태 등급 비율이

Table 5. Comparison of the Observed Value with the Simulated Value of each Condition State for Sewers with Diameter 450 mm

Area	Year	Observed/ Simulated	CS1	CS2	CS3
SN	1999	Observed	0.706	0.294	0
		Simulated	0.872	0.102	0.026
	2010	Observed	0.852	0.122	0.026
		Simulated	0.794	0.140	0.066
EM	1998	Observed	0.667	0.333	0
		Simulated	0.837	0.128	0.034
	2011	Observed	0.768	0.158	0.074
		Simulated	0.717	0.180	0.103
HK	1998	Observed	0.715	0.166	0.119
		Simulated	0.879	0.114	0.007
	2011	Observed	0.805	0.165	0.030
		Simulated	0.787	0.190	0.023

Table 6. Comparison of the Observed Value with the Simulated Value of each Condition State for Sewers with Diameter 600 mm

Area	Year	Observed/ Simulated	CS1	CS2	CS3
SN	1999	Observed	0.654	0.346	0
		Simulated	0.828	0.145	0.027
	2010	Observed	0.797	0.183	0.020
		Simulated	0.726	0.204	0.070
EM	1998	Observed	0.429	0.142	0.429
		Simulated	0.801	0.158	0.042
	2011	Observed	0.754	0.138	0.108
		Simulated	0.657	0.217	0.125
HK	1998	Observed	0.693	0.191	0.116
		Simulated	0.826	0.170	0.005
	2011	Observed	0.711	0.264	0.025
		Simulated	0.697	0.287	0.016

큰 차이를 나타내고 있는 반면, 2010년에서 2011년에 관측된 비율과 모의된 결과의 차이가 다소 감소한 것으로 나타났다. Table 6의 600 mm 관로에 대해서도 2010~2011년의 관측결과와 모의 결과 값의 평균 차이가 1998~1999년의 차이보다 다소 감소된 것을 확인할 수 있다.

측정값과 모의값의 큰 차이의 원인을 분석하였다. 먼저, HK 배수분구가 다른 두 배수분구보다 관측값과 모의값의 오차가 작은 것은 이 곳이 전략적 개발이 시행된 곳이기 때문에 하수관로 매설시 양질의 시공 품질을 확보하였을 가능성이 있다. 그러나 SN, EM 배수분구는 1980년 이후 대상지역의 행정 구역 확장과 경제 개발 계획으로 급격한 성장을 보이면서 공공 위생을 위해 하수관로 설치가 시급하게 이루어져 관로 시공 품질의 저하가 있을 수 있다. 두 번째 이유로는 하수관로 정보관리 시스템에서 관리되고 있는 관로 매설연도는 시스템 정보 입력과정에서 오류, 매설시점을 추정하여 나중에 기입하는 등으로 정보의 부정확성을 배제할 수 없다. 그리고 상태 등급 중 CS3의 관측값과 모의값 차가 큰 또 다른 이유로 관로의 시급한 문제(침수사고, 하수역류, 지반침하 등)가 있는 부분에 대한 교체 등과 같은 비상시 보수작업의 영향이 있을 수 있는데 이에 대한 정확한 자료 취득이 어려워 없는 것으로 가정하여 오차가 발생할 수 있는 상황이다. 이에 대해 하수도분야가 아닌 도시계획분야의 퇴직실무자와의 면담이 가능하도록 체계적이고 조직적인 협력 방안을 구축하는 것이 필요하다. 이를 통해 더 정확하게 노후도 및 잔존수명을 예측하도록 하여 자산관리의 성과를 제고할 수 있을 것이다. 세 번째 이유로는 관측된 시점의 시간적 차이가 크다는 것이다. 첫 번째 관측 시점보다 두 배 정도 짧은 약 10년 정도 차이를 나타내는 두 번째 관측값과 모의값의 차이가 첫 번째 관측값과 모의값보다 오차율의 폭이 작은 것을 확인할 수 있다. 관로 매설 연도에서 첫 번째 관측이 이루어진 1998~1999년까지 약 20년간의 매년 전이확률은 정확성이 상대적으로 부족하다는 것을 의미하며, 이후 2010~2011년까지의 약 10년간의 매년 전이확률은 정확성이 향상된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 미래 상태가 과거보다는 현재 상태 영향을 받는 마르코프 연쇄 모델 특성상 모의된 전이확률의 오차를 감소시키기 위해서는 최소한의 관측기간 간격을 설정하여 지속적인 관측이 이루어져야 한다는 것이다. 네 번째 이유는 CCTV 관측 결과의 오류를 들 수 있다. 초기(1998~1999년)의 카메라의 화질과 10년후의 카메라 화질이 매우 차이는 상황이다. 이에 따라 초기의 화질에서 관측이 이루어진 등급의 불확실성의 범위가 더 커서 생기는 오차일 수 있다. 앞서 지적한 CS3의 관측값과 모의값의 차이가 정확한 관로 매설정보 부족일 수 있지만, 이 원인이 관측 결과의 오류로부터 기인할 수 있다는 것이다. 관로 조사는 시간적 차이를 가지고 있기 때문에 매년 동일한 관측자가 수행한다는 것은 불가능하다. 하수관

로 CCTV 조사 및 관측 기준을 바탕으로 조사된 영상을 사람이 육안 평가를 하기 때문에 동일한 관측자라도 주관적인 판단 오류를 가질 수 있으며, 또 동일한 배수구역이라 하더라도 조사자와 관측자가 여럿이어서 발생하는 조사와 관측의 오차가 있을 수도 있다. 최근에 발달되고 있는 CCTV 조사기술 및 전개영상해석기술, 카메라 해상도의 발전을 고려하고, 동일지역에 2022년 이후에 추가적인 CCTV 조사자료가 수행되어 자료를 확보할 경우에 모델 예측값의 검증 및 보정 작업이 이루어질 수 있을 것이다. 이때 상기의 데이터 취득, 기록, 해석상 불확실성을 유발하는 문제점에 유의하면 관로의 노후도 추정이 더 정확하게 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

4.4 관로 노후도 변화 및 경제적인 잔존수명 예측

하수관로 사용수명 설정은 이론상 관로의 기능을 모두 상실하게 되는 햇수를 의미한다. 그러나 관로의 기능이 모두 상실될 때까지 기다리는 것은 공공위생, 도시침수, 도로 함몰, 수변공간 오염 등의 많은 문제를 야기하게 된다. 따라서 하수관로 사용수명은 관로의 기능이 모두 상실되는 시점이 아닌, 문제가 발생할 수 있는 중요 결함 등급으로 설정해야 한다. A시의 관로 등급 판정 기준에 의하면 CS3의 경우 매우 불량한 관로로 긴급 정비 대상이며, CS2는 보통 상태를 나타내지만 40% 이상이면 문제를 일으킬 수 있어 정비가 필요하다고 규정하고 있다. CS1은 결함이 없는 상태는 아니지만 A시의 하수도 정비 판단 기준에 따르면 경미한 결함이 전체 60% 이상일 경우 정비 대상관로로 판단한다.

Fig. 5에 CS1을 제외하고 CS2와 CS3를 주요 관로 결함 발생 등급으로 설정하고 이들의 총합의 이용한 변화를 나타냈다. 먼저 관로 결함등급 변화에 따른 노후도 변화를 살펴보면, 관로 설치 후 중요 결함이 10% 발생하는 시점은 450 mm 관로의 경우 SN에서 12년, EM에서 8년, HK에서 12년, 600 mm 관로의 경우 SN에서 8년, EM에서 7년, HK에서 8년으로 나타났다. 대략 10년 전후로 하수관로에 중요 결함 문제가 발생하기 시작하는 것으로 분석되었다. EM 배수분구의 450 mm 관로와 600 mm 관로에서 주요 결함 발생이 다른 두 배수분구보다 빠르게 발생하는 것으로 나타났다. 관로 설치 이후 35년이 지난 시점에는 450 mm 관로의 약 29%, 600 mm 관로의 약 38%가 주요 결함이 발생했으며, 100년 후인 2084년에는 각각 62%와 74%의 관로가 주요 결함으로 관로 기능을 상실하는 수준으로 나타났다. 관로설치 35년 후, SN 배수분구는 450 mm 관로의 약 26%, 600 mm 관로에서 약 35%, HK 배수분구에서는 450 mm 관로의 약 27%, 600 mm 관로에서 약 37%의 주요 결함이 발생한 것으로 예측되었다. 또한 600 mm 관로가 450 mm 관로보다 평균 12년 정도 빨리 기능 저하가 일어나는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 하수관경이 작을수록 외부 요인으로부터 매설된 관로까지 작용하는 힘의 영향을 덜 받는

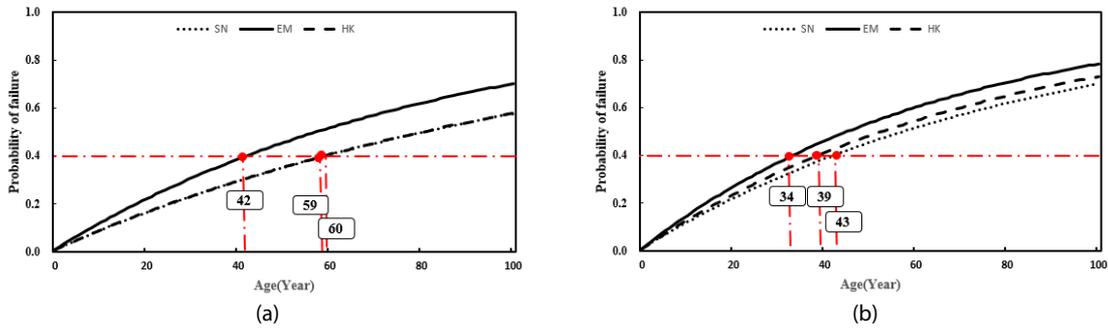


Fig. 6. Prediction of Deterioration by Condition State 2 and 3 of Sewer Pipe: (a) 450 mm, (b) 600 mm

반면 관경이 커질수록 외부의 힘을 많이 받는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 관경은 관로 결함 원인의 주요 인자로 판단할 수 있다.

앞서 서술한 바와 같이, 관로의 주요결함 등급 비율을 임의로 설정하여 특정 데이터그룹인 관로군의 사용수명을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 관로의 주요 결함등급 비율을 40%로 설정하여 제시하고자 하였다. 이 비율은 CS2 정비 등급 비율로 CS3과 같은 긴급 정비 비율도 어느 정도 발생하여 문제를 일으킬 수 있다는 가정을 한 것이다. 이와 같은 기준을 적용할 경우 450 mm 관로는 SN은 60년, EM은 42년, HK는 59년이며, 600 mm 관로에서는 각각 43년, 34년, 39년으로 나타났다. 하수관로 기능이 60% 정도 잔류된 상태에서 이와 같은 결과는 지방공기업법시행규칙 별표2에서 규정하고 있는 내용연수 20년보다 훨씬 상회하는 수준이다. 현재 국내에서는 하수관로 내용연수를 경제적 가치 평가 방식을 적용하고 있어 자산 취득 비용을 내용연수동안 매년 일정 비율로 감가상각하고 있다. 현재 국내에서 적용하고 있는 하수관로 잔존 가치평가는 과학적인 분석을 통해서 재산정할 필요가 있으며, 관로 설치 지역, 관중, 관경 등의 변수를 고려하여 지역 특성에 맞는 적절한 내용 연수를 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4.5 고찰

마르코프 연쇄 모델을 기반으로 한 하수관로 열화 모델은 전이확률의 정확한 추정이 핵심요소이다. 연구 결과에서 제시한 전이확률 추정은 국내에서 많이 사용하고 있는 CCTV조사 및 관독 결과와 과거 자료 등을 이용하여 계산할 수 있는 접근성이 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 본 연구와 같이 수십 년간 여러 횟수에 걸쳐 수집한 원자료를 확보해야 하며, 관로 매설년도, 시공 품질과 같은 관로 정보가 누락될 경우 가정과 추정 값을 이용해야 하는 한계를 내포하고 있다. 이러한 한계는 관리기관의 예산 분배의 비효율과 의사결정 체계의 장애로 연결될 수 있다. 하나의 작은 정보들이 모여서 미래 가치를 창출할 수 있도록 정보 수집 및 유지 관리의

중요성을 인지할 필요가 있다.

또한 열화 모델을 개발하기 위해서는 하수관로 상태평가 자료가 매우 중요하다. CCTV를 이용한 효과적인 조사에도 불구하고 개보 수사업을 위한 일회성 조사에만 활용되고 지속적으로 관리되지 못하고 있다. Yoon(2014)에 의하면 CCTV 조사자료는 단일 사업에만 주도적으로 사용되며, 사업후 지자체, 시공사, 조사 업체들이 분할하여 관리하고 있다가 담당자 변경, 저장장치 오류 등으로 관리되지 못하거나 손실된다고 한다. 따라서 본 연구에서처럼 10여년 간격의 시간 흐름에 따른 CCTV 조사자료를 3회(신설관로의 상태평가 포함) 이상 축적하고 있어야 분석의 신뢰성을 제고할 수 있음을 명심하여 이런 요구조건에 맞는 자료 취득에 노력을 기울여야 한다.

또한 관로의 조사 및 관독의 품질에도 오류와 불확실성이 존재하고 있다. Dirksen et al.(2007)은 네덜란드에 있는 도시 4곳을 중복 조사한 결과 첫 번째 조사에서 관찰된 결함이 30% 정도였는데, 두 번째 조사에서는 발견되지 않았다. Chae et al.(2003)와 Muller and Fischer(2007)는 이러한 불확실성의 원인으로 CCTV조사 및 관독의 결과는 운전자의 능력, 경험, 집중력에 크게 의존하기 때문에 인간적인 오류가 존재할 수 있으며, CCTV 카메라와 조명의 성능이 결함을 식별하는데 영향을 미칠 수 있다고 지적하였다. 기존 하수관로 CCTV 데이터는 하수관로 정비 대상 판단을 위해 사용하고 폐기되는 일회성 자료에 불과하다는 인식이 매우 깊었다. 그러나 본 연구결과를 바탕으로 잘 관리된 데이터에서 소중한 정보를 얻을 수 있다는 중요한 사실을 확인할 수 있었다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 관로별 연속성을 지니는 조사 결과 자료가 아님에도 유사 특성을 고려한 개별 데이터를 그룹화하여 하수관로 노후도 분포 예측이 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다. EM 배수분구의 450 mm 관로와 600 mm 관로에서 주요 결함 발생이 다른 두

배수분구보다 다소 빠른 것으로 나타났다. 관로 설치 이후 35년이 지난 시점에는 450 mm 관로의 약 29%, 600 mm 관로의 약 38%가 주요 결함이 발생했으며, 100년 후인 2084년에는 각각 62%와 74%의 관로가 주요 결함으로 관로 기능을 상실하는 수준으로 나타났다. 관로설치 35년 후, SN 배수분구는 450 mm 관로의 약 26%, 600 mm 관로에서 약 35%, HK 배수분구에서는 450 mm 관로의 약 27%, 600 mm 관로에서 약 37%의 주요 결함이 발생한 것으로 예측되었다. 또한 600 mm 관로가 450 mm 관로보다 평균 12년 정도 빨리 기능 저하가 일어나는 것으로 나타났다. 한편, 관로의 주요 결함등급 비율을 40%로 설정하여 관로의 유효사용수명으로 적용할 경우, 450 mm 관로는 SN 배수분구에서 60년, EM 배수분구에서 42년, HK 배수분구 59년이며, 600 mm 관로에서는 각각 43년, 34년 39년으로 나타났다.

하수관로의 열화 모델은 미래 하수관로의 상태를 예측하는데 도움이 될 뿐만 아니라, 최적의 정비 및 교체 정책과 그것들의 적용 시점 최적화에 있어 중요한 역할을 담당한다. 한정된 예산과 정비 효율성을 감안하면, 하수관로 상태를 예측할 수 있는 방법론을 개발하여 유지관리 계획이나 정비계획을 의사결정권자에게 제공하는 것이 오히려 정비가 예상되는 지역의 무작위 검사를 통한 정비 대상을 판별하는 현재 관행보다는 더 효과적일 수 있다. 본 연구에서 활용한 예측 모델은 유지관리 비용과 같은 경제성 평가를 진행할 수 있으며, 향후 하수관로 유지·보수·정비 시점에 대한 의사결정뿐만 아니라 포괄적 자산관리 시스템 구현에 도움이 될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-과학기술인문사회 융합연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017M3C1B6070095).

References

American Concrete Pipe Association (ACPA) (1991). *Buried Facts: Bibliography Pipe Material Durability*, <www.concrete-pipe.org/buried_facts/bib_pipe_mat.pdf> (Accessed: March 10, 2004).

Ariaratnam, S. T. (1994). *The investigation of methods to assist decision-makers regarding bridge maintenance, repair and restoration activities*, Ph.D. Dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois.

Ariaratnam, S. T., El-Assaly, A. and Yang, Y. (2001). "Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models." *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, Vol. 7, No. 4, pp. 160-165, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2001\)7:4\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:4(160)).

Baik, H. S., Jeong, H. S. and Abraham, D. M. (2006). "Estimating transition probabilities in markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 132, No. 1, pp. 15-24, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:1(15)).

Baur, R. and Herz, R. (2002). "Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types." *Water Science and Technology*, IWA, Vol. 46, Nos. 6-7, pp. 389-396, <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0704>.

Chae, M. J., Iseley, T. and Abraham, D. M. (2003). "Computerized sewer pipe condition assessment." *Proceedings of Pipeline Engineering and Construction International Conference*, Baltimore, USA, [https://doi.org/10.1061/40690\(2003\)12](https://doi.org/10.1061/40690(2003)12).

City of Victoria (2005). *Water & Environment Water Works Operations* <www.city.victoria.bc.ca/cityhall/departments_engwateroperations.shtml> (Accessed: March 21, 2005).

Dirksen, J., Goldina, A., ten Veldhuis, J. A. E. and Clemens, F. H. L. R. (2007). "The role of uncertainty in urban drainage decisions: Uncertainty in inspection data and their impact on rehabilitation decisions." *Proceedings of IWA 2nd Leading-Edge Conference in Asset Management*, Lisbon, Portugal, pp. 273-285.

Herz, R. K. (1998). "Exploring rehabilitation needs for drinking water distribution networks." *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, IWA, Vol. 47, No. 6, pp. 275-283, <https://doi.org/10.2166/aqua.1998.33>.

International Infrastructure Management Manual(IIMM) (2000). *New Zealand National Asset Management Steering Group and the Institute of Public Works Engineering of Australia*.

Le Gat, Y. (2008). "Modelling the deterioration process of drainage pipelines." *Urban Water*, Taylor & Francis, Vol. 5, No. 2, pp. 97-106, <https://doi.org/10.1080/15730620801939398>.

Lemer, A. (1999). "Building public works infrastructure management systems for achieving high returns on public assets." *Public Works Management & Policy*, SAGE, Vol. 3, No. 3, pp. 255-272, <https://doi.org/10.1177/1087724X9933007>.

Mehle, J. J., O'Keefe, S. M. and Wrase, P. E. (2001). *An examination of methods for condition rating of sewer pipelines*, Center for Development of Technical Leadership, University of Minnesota.

Micevski, T., Kuczera, G., and Coombes, P. (2002). "Markov model for storm water pipe deterioration." *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 82, No. 2, pp. 49-56, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2002\)8:2\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2002)8:2(49)).

Muller, K. and Fischer, B. (2007). "Objective condition assessment of sewer systems." *Proceedings of IWA 2nd Leading-Edge Conference in Asset Management*, Lisbon, Portugal.

NASSCO (2004). *National Association for Sewer Service Companies* <<http://www.nassco.org>> (Accessed: October 15, 2004).

National Clay Pipe Institute(NCPI) (2004). Tech Notes: *Vitrified Clay and Polyvinyl Chloride Pipe*, <www.ncpi.org/pdf/TN-6-7.pdf> (Accessed: October 15, 2004).

- Osaki, S. (1992). *Applied stochastic system modeling*, Springer Science & Business Media.
- Rostum, J., Baur, R., Saegrov, S., Horold, S. and Schilling, W. (1999). "Predictive service-life models for urban water infrastructure management." *Proceedings of 8th International Conference on Urban Storm Drainage*, Sydney, Australia, Vol. 2, pp. 594-601.
- Ryeo, M. K., Kin, S. K., Kim, J. H. and Kim, J. H. (2004). "A stochastic optimization model for sewer rehabilitation policy : considering uncertainty in inflow/infiltration flow." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 24, No. 3B, pp. 267-272 (in Korean).
- Seoul (2013a). *A Study on Performance Analysis and Quality Improvement for Comprehensive maintenance business of Sewer Pipes* (in Korean).
- Seoul (2013b). *Seoul Sewerage Management System Database* (in Korean).
- United States Army Corps of Engineers(USACE) (1984). *Sanitary and Industrial Wastewater Collection Engineering and Design Manual*, EM-1110-3-174, U.S. Army Corps of Engineers <www.usace.army.mil/inet/usace-docs/engmanuals/em1110-3-174/entire.pdf> (Accessed: March 21, 2005).
- Vanier, D. J. (2001). "Why industry needs asset management tools." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 1, pp. 35-43, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2001\)15:1\(35\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:1(35)).
- Water Research Centre(WRc) (1994). *Sewerage Rehabilitation Manual*, 3rd Edition, Water Research Center Plc, Wiltshire, U.K.
- Wirahadikusumah, R., Abraham, D. and Iseley, T. (2001). "Challenging issues in modeling deterioration of combined sewers." *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, Vol. 7, No. 2, pp. 77-84, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2001\)7:2\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:2(77)).
- Yoon, S. S. (2014). *Sewer piepe maintenance association* (in Korean).