하수관거 최적개량 모형 개발(I)

- 불확실성 분석에 의한 관별 불명수량 산정 -

이정호[1) · 김형수[2) · 김응석[3) · 김중훈[4)

1. 서 론

관거의 노후화에 따라서 발생하는 요인중 불명수의 발생은 하수처리장 처리효율, 관거의 유하능력, 유지관리 측면에서 중요하다. 외국의 경우 관별 결함, 불명수 및 유량 자료들이 과거로부터 구축되어 이러한 자료들을 바탕으로 하수관망에 대한 체계적인 관리가 이루어지고 있다. 그러나, 국내의 경우 근래에 들어서야 CCTV를 이용한 관거내부 조사가 이루어지고 있으며 지속적인 관측이 필요한 불명수, 유량 및 수질에 관한 조사는 표본지역에 대해서만 실시하는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 관거별 결함의 종류 및 정도에 따라서 중요지점에서의 관측 불명수량을 관거별로 배분하는 불명수 산정 모형을 개발하였다. 이때, 관거별 결함상태에 따라 항목별 가중치를 고려하여 불명수를 분배하였으며 이 과정에서 발생하는 오차에 대하여 Monte Carlo 모의기법을 이용하여 불확실성 분석을 통해 불명수를 재산정하였다.

2. 기존 불명수 산정방법

불명수(I/I)란 「유입원인이 불명확한 침입수」로 사업구역내에서 선정된 각 조사 지점별로 구역내에서 발생하는 생활하수 이외의 하수관거로의 불명수 유입원을 조사하여 현장조사 및 실적자료, 기타 관련자료를 통해 불명수량을 추정하며, 추정된 유입원별 불명수량은 관거정비 우선순위 결정시 활용된다.

그런데, 현행 실시되고 있는 불명수(I/I)의 조사는 표본조사결과를 과업대상 전지역에 확대 적용하여 사업우선순위 선정을 위한 기초자료로 활용하고 있으며 이것은 관거 및 유역이 미조사된 지역에 대해서 그 특성을 고려하지 못하며 따라서 사업시행방안 수립 자체가 부정확한 결과를 낳게 된다. 이에 대하여 본 연구에서는 관거별 특성을 고려하여 확률적 접근을 통해 관거 각각의 불명수를 산정하는 불명수 산정 모형을 개발하므로써 표본결과의 확대적용이라는 현행 사업 시행의 문제점을 해결하고자 하였다.

3. 모형의 이론 및 구성

불명수 산정 모형은 기조사된 관거별 결함 상태에 따라 결함별 가중치를 고려한 확률적 접근에 의하여 불명수를 산정한다. 여기서, 관거별 불명수의 배분을 위하여 고려된 결함별 가중치는 전문가들을 대상으로 실시된 설문결과를 통하여 산정되었다. 따라서, 이 과정에서 발생하는 주관적 평가에의한 불확실성은 Monte carlo 모의기법을 이용한 불확실성 분석(uncertainty analysis)을 통하여 수정하였다.

3.1 불확실성 분석

불확실성은 인간과 자연의 관계, 즉 문제를 풀고 결론을 내리는 방법과 확률변수들에 포함된 모든 종류의 오차라는 것이다. 매개변수의 불확실성(parameter uncertainty)은 현장에서 수집한 자료와 판단으로부터 추론

---

1) 고려대학교 부설 방재과학기술연구센터 연구원
2) 인하대학교 토목공학과 조교수
3) 고려대학교 부설 방재과학기술연구센터 선임연구원 (E-mail : hydrokes@empal.com)
4) 고려대학교 토목공학과 교수

된 매개변수의 정확성과 관련되고, 매개변수 불확실성의 주요 원인은 자료의 불확실성에 기인한다. 또한, 모형의 불확실성(model uncertainty)은 대리 변수(surrogate variables)의 사용과 모형에서 배제된 변수, 그리고 자연 현상을 나타내기 위한 수학적인 표현의 부정확성 등에 기인한다.

본 연구에서는 불명수량 산정 기법의 개발에 있어서 매개변수의 불확실성, 자료의 불확실성 및 모형의 불확실성에 대하여 분석이 이루어졌으며 오차의 발생에 있어서 Monte Carlo 모의 기법이 활용되었다.

Monte Carlo 모의 기법은 어떤 특정한 통계분포 특성을 가지는 무작위 변수를 발생시키는 방법이다. 무작위 변수의 경험적인 발생방법에는 몇 가지가 있으나 가장 널리 사용되는 방법은 혼합조화법(mixed congruential method)이고, M개의 난수를 발생시키기 위해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_i = \{aX_{i-1} + C\} \text{ (modulo m)} \quad i = 1, 2, \cdots, M \tag{1}$$

여기서, X_i는 $\{aX_{i-1}+C\}$를 정수 m으로 나누고 남는 정수이며 a, c, X_{i-1}은 0에서 (m-1) 사이에 있는 정수이고, m은 일반적으로 대단히 큰 값의 정수를 택하도록 되어있다. 또한, a, c, m 및 초기값 $X_{i-1} = X_0$가 주어지면 연속적으로 X_i를 계산할 수 있고, 다음 식에 의해 0과 1사이의 난수를 발생할 수 있다.

$$U_i = \frac{X_i}{m} \tag{2}$$

3.2 관거별 불명수량 산정 기법

본 연구에서는 배수분구내 표본조사지역의 중요 지점에서 조사된 불명수량을 배수분구내 각각의 모든 관거로 관거별 결합상태에 따라 확률적으로 불명수량을 분배하는 새로운 불명수량 산정기법을 개발하였다.

(1) 불명수량 산정기법 적용 절차

한 개의 중요지점에서 관측된 불명수량은 그 지점이 포함하고 있는 각각의 모든 관거로 분배된다.

다음의 그림 1은 불명수 산정 기법의 적용 절차를 나타내고 있다.

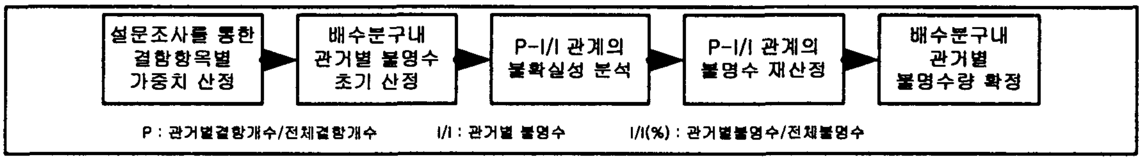


그림 1. 불명수 산정기법 적용 절차

(2) 불명수량 산정식

본 연구에서는 불명수의 발생이 관거에 존재하는 결함을 통해 발생하며 결함의 종류 및 양상에 따라 불명수의 발생량이 달라진다는 가정하에 결함항목별 가중치를 고려하여 관거별 불명수를 산정하였다. 여기서, 관거별 불명수는 배수분구내 전체 관거에 존재하는 결함에 따른 가중치의 총합에 대하여 각각의 관거가 가지고 있는 결함의 가중치의 비율에 따라서 분배된다.

관거별 가중치의 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x'_n = \frac{\sum_{j=1}^{m}(c_{nj} \times k_j)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(c_{ij} \times k_j)} \tag{3}$$

x'_n : n번째 관거 가중치확률, c_{ij} : 관거별 결함항목별 결함갯수
k_j : 결함항목별 가중치, i, j : 관거번호 및 결함항목

산정된 x'_n에 대하여 관거별 전체 가중치 x_n은 식(4)와 같으며 관거별 불명수량은 식(5)와 같이 산정된다.

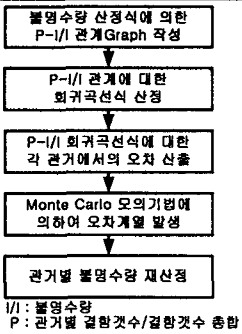
$$x_n = a_n x'_n \qquad (a_n : n\text{번째 관거의 가중치계수}) \tag{4}$$

$$y_n = P_n \times y \times x_n \tag{5}$$

여기서, P_n은 n번째 관거의 결함갯수 확률로써 전체관거의 결함갯수의 총합에 대한 관거별 결함갯수의 합으로 나타내어지며, y_n은 n번째 관거의 불명수량, y는 해당구역내 전체 불명수량을 나타낸다.

(3) 불확실성 분석에 의한 불명수량 재산정

결상상태에 따른 관거별 불명수의 산정에 있어서 결함별 가중치의 산정은 불확실성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 관거별 불명수의 산정에 있어서 결함항목별 가중치라는 매개변수가 갖는 불확실성에 대하여 분석을 실시하여 관거별 불명수를 재산정하며 이러한 분석을 수행하기위한 절차는 그림 2와 같다.



① 불명수량 산정식에 의한 관별 I/I 산정 및 P-I/I 관계곡선 작성

② 불명수량 산정식에 의한 P-I/I 관계에 대한 회귀곡선식 산정

③ 각 관거에서 발생하는 오차를 산정하여 평균값($\bar{x}$)으로 가정

④ Monte Carlo 모의기법에 의해 난수(z)를 발생하여 오차 자료계열에 대하여 모의($x_T = \bar{x} + \sigma z$)

⑤ 모의된 오차계열의 평균값에 의하여 관거별 불명수량 재산정

그림 2. 불확실성 분석 수행 절차

4. 적용 및 결과

4.1 결함항목별 가중치를 고려한 관거별 불명수의 1차 산정

본 연구에서의 대상지역은 서울시 3개 배수분구로 구성되었으며 관거별 불명수량은 17개 결함항목별 가중치를 고려하여 식(3)~(5)에 따라서 배수분구별로 관측된 전체 불명수량을 배분함으로써 산정된다. 결함항목별 가중치는 표 1에 제시된 결함항목별 점수배점에 기준하였다.

표 1. 결함항목별 점수 배점(2차)

결 합 항 목	결 합 등 급			결 합 항 목	결 합 등 급			결 합 항 목	결 합 등 급		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
맨홀뚜껑파손	12	10	-	유 출 수	18.7	-	-	타 관	24.7	12.9	6.4
맨홀연결파손	22.2	16.7	8.9	부 식	15	10	5	폐 유	10.3	7.8	4.1
돌 출 관	15	5	1	관파손/크랙	-	20	15	모 르 타 르	10.3	7.8	4.1
접 합 부	14.7	6.1	3.7	곡 관 리	15	10	5	토 사	10	5	3
이 음 부	26.9	20.2	6.7	관 침 하	24.7	16.5	8.2	기 타	15	10	-
침 입 수	23.5	-	-	관 구 배	10.4	10	5				

1차 산정된 관거별 불명수량에 대하여 결함확률(P)과 불명수(I/I)에 관한 관계 Graph를 작성하였다.

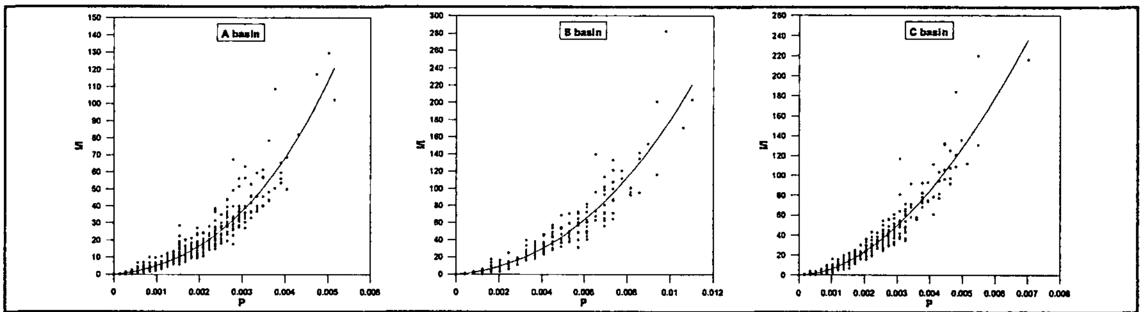


그림 3. 관거별 결함갯수에 따른 불명수량 관계(1차 산정)

이상의 그림에서 보여지듯이 관거별 결함의 종류 및 정도에 따라서 각기 다른 가중치가 부여됨으로써 동일한 결함갯수를 갖는 관거일지라도 불명수량이 차등 분배되었음을 알 수 있다.

4.2 불확실성을 고려한 관거별 불명수의 재산정

1차로 산정된 관거별 불명수량에 의하여 작성된 P-I/I 관계Graph를 통하여 불확실성 분석을 실시한후 관거별 불명수량을 재산정 하였다. 여기서 1차 산정된 P-I/I 관계곡선에서의 회귀식은 다음과 같다.

표 2. P-I/I 관계에 대한 회귀곡선식(1차 산정)

배수분구	A	B	C
회귀곡선식	$Y = -0.06 + 2633.72X + 2097103.46X^2 + 382067969.21X^3$	$Y = -0.09 + 1.78X + 0.16X^2 + 0.03X^3$	$Y = -0.09 + 2144.949X + 1140904.99X^2 + 44502533.03X^3$

1차 회귀곡선식에 대하여 P-I/I 관계에 의해 발생되는 관거별 불명수량의 오차에 대하여 Monte Carlo 모의기법에 의하여 발생시킨 20,000개의 난수를 적용하여 관거별 불명수량을 재산정하였다. 이때, 1차 회귀곡선에 의하여 발생한 오차를 평균($\bar{x}$)으로 하였으며 P별 표준편차(σ)를 산출하여 오차계열을 발생시켰다.

다음의 표 3은 재산정된 불명수량(I/I)에 따른 2차 회귀곡선식을 나타내고 있다.

표 3. P-I/I 관계에 대한 회귀곡선식(재산정)

배수분구	A	B	C
회귀곡선식	$Y = -0.08 + 3380.48X + 760302.41X^2 + 605977785.93X^3$	$Y = -0.16 + 2132.14X + 725410.07X^2 + 79725521.09X^3$	$Y = 0.05 + 204.925X + 4998183.28X^2 - 55866518.02X^3$

5. 결 론

본 연구에서는 현재 배수구역내 표본지역의 중요지점에서만 관측되는 불명수에 대하여 관거별 결함 양상에 따라 불명수를 배분하는 불명수 산정 모형을 개발하였다. 이때, 관거별 불명수의 산정은 관거내부에 발생하는 결함상태에 따른 가중치를 고려하는 한편 불확실성 분석을 통해 산정하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론이 도출되었다.

(1) 관거내부의 결함상태에 따른 가중치의 고려에 있어서 불확실성 분석을 수행하므로써 불명수 산정을 위한 확률적 접근을 좀더 명확히 하였다.

(2) 관거의 결함 상태 즉, 노후도에 따라 발생하는 불명수량에 대하여 정량화가 이루어졌다.

(3) 관거내부 결함특성을 고려하였으므로 관거개량의 세부적인 계획에 대한 지침을 마련할 수 있다.

그러나, 본 연구에서의 결과는 단기적인 하수관거 개량에 대한 활용도 측면에서는 매우 유용하나 장기적인 정비계획 수립을 위해서는 지속적인 관거자료 구축을 통한 하수관망의 장기 개량 모형을 개발되는 한편 하수관거의 노후도에 관한 장기 예측 및 노후도에 따른 불명수 발생율에 대한 연구가 필요하다.

6. 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 지원(과제번호:R01-2001-000-00474-0)으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

7. 참고문헌

환경부, 1997, 도심 하수관 정비기법 연구

Jack R. Benjamin(1982) Risk and decision analyses applied to dams and levees, Structural Safety, Vol. 1, Issue 4, pp. 257-268.

Wilfred D. Iwan and Huang Ching-Tung(1996) On the dynamic response of non-linear systems with parameter uncertainties, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 31, Issue 5, pp. 631-645

Chris and Stephen(2000) Estimation and evaluation of uncertainty: a minimalist first pass approach. International Journal of Project Management, Vol. 18, Issue 6, pp. 369-383.