韓國水資源學會論文集
第37卷 第2號 · 2004年 3月
pp. 195~206

최적 도시유출시스템의 개발 : Ⅰ. 도시유출시스템에서의 AHP를 고려한 불명수량 산정에 대한 연구

Development of Optimal Urban Runoff System : Ⅰ. Study of Inflow/Infiltration Estimation Considering AHP in Urban Runoff System

이 정 호* / 김 중 훈** / 김 형 수*** / 김 응 석**** / 조 덕 준*****
Lee, Jung Ho / Kim, Joong Hoon / Kim, Hung Soo / Kim, Eung Seok / Jo, Deok Jun

Abstract

One of the main factors which reduces the efficiency of a sewage treatment plant is the Inflow/Infiltration(I/I) in the sewer. First we must calculate the quantity of I/I via the investigation of each sewer to establish the reduction plan of I/I. However, in Korea, we apply the results of a surveyed sample to the entire study area to establish the reduction plan of I/I. This methodology just considers the total I/I for the entire study area but it does not consider the quantity of I/I for the individual sewer systems. Therefore, we may need the model to consider the I/I in the individual sewer systems and we develop the model to calculate the I/I that happen in urban sewer systems. We estimate the I/I of individual systems by the developed model and the estimated I/I are utilized as the basic data for the establishment of I/I reduction plan. The observed I/I for the entire study area is distributed into the individual sewer systems according to their defect states. Here, the weights of defect elements are calculated using AHP(Analytic Hierarchy Process) and we perform the uncertainty analysis for considering the errors using MCS(Monte Carlo Simulation).

Keywords : Sewer, I/I, AHP, MCS, Defect Element

요 지

도시유역 하수처리장의 효율을 저감시키는 가장 큰 요인은 하수관내에 발생하는 불명수(Inflow /Infiltration, I/I)이다. 불명수 저감방안 수립을 위해서는 관로 개개 시설에 대한 조사를 통해 불명수 유입량을 산정해야 한다. 그러나, 국내의 경우 재정적, 시간적 한계로 인해 표본조사 결과를 과업대상 전지역에 확대 적용하여 불명수 저감방안을 수

* 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
Ph.D. Student, Dept. of Civil and Envir. Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea
(E-mail : jungho_lee@lycos.co.kr)
** 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수
Prof., Dept. of Civil and Envir. Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea
*** 인하대학교 환경토목공학부 조교수
Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Inha Univ. Incheon 402-751, Korea
**** 선문대학교 토목공학과 전임강사
Instructor., Dept. of Civil Eng., Sunmoon Univ. Asan 336-708, Korea
***** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
Ph.D. Student, Dept. of Civil and Envir. Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

립하고 있다. 이러한 국내의 불명수 산정 방법은 사업대상 전지역의 불명수 총량에 따른 고려만 이루어질 뿐, 관로 개개 시설에 대한 불명수 발생량의 고려가 이루어지지 않는 문제점을 나타낸다. 본 연구에서는 도시유역의 유출시스템에서의 불명수량 산정모형을 개발하여 관로 개개 시설에서의 불명수 발생량을 추정하여 불명수 저감방안 수립을 위한 기초자료로 활용하고자 한다. 전체 대상지역에 대한 관측 불명수량은 CCTV 및 육안조사를 통해 조사된 관거별 결함 상태에 따라 관거별로 분배된다. 이때, 결함 항목별 가중치는 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법을 통해 산정하였으며, 발생 오차를 고려하기 위하여 MCS(Monte Carlo Simulation) 방법을 사용하여 불확실성 분석을 수행하였다.

핵심용어 : 하수관, 불명수, AHP, MCS, 결함항목

1. 서 론

하수도는 공공수역의 수질보전 뿐만 아니라 시가지 또는 농어촌의 우수를 신속히 배제함으로써 침수에 의한 재해를 방재하는 기능도 갖고 있다. 우리나라의 경우 근래에 들어 지속적인 인구증가와 더불어 도시의 외형적인 규모는 커지고 발전하는 반면 도시환경 및 기반시설인 하수도 시설은 양적 팽창에도 불구하고 질적으로 낙후되어 개선의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 특히, 관거의 노후화로 인해 생길 수 있는 문제점 중 불명수의 발생은 하수처리장 처리효율, 관거의 유하능력, 유지관리 측면에서 중요하다.

외국의 경우 관거별 결함, 불명수 및 유량 자료 등이 과거로부터 구축되어 이러한 자료들을 바탕으로 하수관망에 대한 체계적인 관리가 이루어지고 있다. 그러나, 국내의 경우 근래에 들어서야 CCTV를 이용한 하수관거에 대한 조사가 이루어지고 있으며, 지속적인 관측이 필요한 불명수, 유량 및 수질에 관한 조사는 예산상의 제약으로 표본지역에 대해서만 실시하는 한계를 가지고 있고, 이것 역시 해당지역에 대한 하수관거 정비사업이 실시될 경우에만 한해서 이루어지고 있다.

본 연구에서는 실무 관계자들을 대상으로 설문조사를 실시하여 관거에 발생하는 결함의 종류에 따른 가중치를 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법으로 산정하여(Vargas L.G., 1990; Thomas L.S., 1994), 관거별 결함의 종류 및 결함 발생 정도에 따라 중요지점의 관측 불명수량을 관거 각각으로 배분하는 불명수 산정기법을 개발하였다. 이때, 결함항목별 가중치의 산정과정에서 발생하는 오차의 정도를 고려하기 위하여 불확실성 분석에 의해 불명수를 재산정하였다.

국내의 경우 전국적으로 관거의 신설보다는 기존에 매설되어 있는 관거의 노후에 따른 개량에 대한 관심이 증대되고 있으나 그에 따른 연구는 미비한 실정이다. 국외의 경우 deMonsabert(1997)에 의하여 하수관망 개량에 관한 정수계획법의 적용 예가 있으며, 국내의 경우 정철권 등(2001)이 유전자 알고리즘을 이용하여 개량 시기를 결정하는 연구 예가 있다. 또한, 하수관망 불명수 예측 및 개량에 관하여 Belhadj 등(1995)은 도심외곽 지역과 도심지역을 대상으로 분류식 관망내의 불명수와 강우를 측정하여 소규모 배수구역에서의 강우별, 시간별 관망내 불명수를 예측하는 모형을 개발하였다. 그러나, 이러한 연구에 있어서 개량 시기를 결정하는 요소들이 매우 단순하여 관거의 노후에 따른 복합적인 의사결정은 이루어지지 않고 있다.

불확실성의 분류 및 불확실성을 고려한 구조물의 설계에 있어서 수문학적 불확실성은 고유의 불확실성, 매개변수 추정의 불확실성, 모형 구성의 불확실성 등으로 분류된다. 김문모(1995)는 신뢰도 분석기법을 이용해 우수관거의 위험도를 산정하고 신뢰도에 기초한 최적설계 방안을 제시하였으며, 이홍래 등(1998)은 하도에서 홍수해석 모형의 불확실성을 고려하기 위해 Monte Carlo 모의 기법을 이용하여 제방 월류에 대한 위험도 분석을 실시하였다.

2. 기존의 불명수 산정방법

불명수(Inflow/Infiltration, I/I)란 「유입원인이 불명확한 침입수」로 사업구역내에서 선정된 각 조사 지점별로 구역내에서 발생하는 생활하수 이외의 불명수 유입원(계곡수, 지하철 역사배수, 하천복류수, 공사중 배수량등)을 조사하여 유입원별로 현장조사 및 실적자료, 기타 관련자료를 통해 불명수량을 추정하고, 추정된 유입원별 불명수량 자료를 토대로 관거정비 우선순위를 결정한다.

불명수 저감방안을 수립하기 위해서는 우선 불명수 유입량을 산정하기 위한 대상지역을 선정해야한다. 대상지역의 선정방안으로는 관로의 개개 시설을 고려하는 경우와 집합적으로 고려하는 경우가 있다. 그런데, 관로의 개개시설마다 불명수를 파악하기 위해서는 상당한 기간과 재정적 투자가 요구되며, 특정 개소로부터 유입하는 대량의 침입수와 같은 특수한 현상을 제외하면 불

명수 유입의 대부분은 전지역에서 소량씩 유입된다. 따라서, 국내에서 현행 실시되고 있는 불명수 산정을 위한 조사과정은 사업구역내 현장답사를 통하여 우선적으로 배수분구 전체를 대표할 수 있는 지점을 선정한다. 그리고, 조사된 표본조사 결과를 과업대상 전지역에 확대 적용하여 사업 우선순위 선정을 위한 기초자료로 사용하고 있다.

2.1 불명수 산정방법

조사지점별로 계절별 수질 및 유량조사 결과를 이용하여 아래와 같이 하수관거의 조사·평가와 정비(2000)에서 제시되는 대표적 3가지 방법을 통해 불명수량을 산정하였다.

(1) 제1방법

불명수량 = 실측하수량 - 기지하수량

기지하수량 = 상수도 사용조정량 + 공장지하수사용량 + 대형건물, 지하철 역사 및 공사장 배출 지하수량

(2) 제2방법

일평균 유량 및 일최저유량시의 하수수질간의 부하량 관계를 고려하여 산정

① 불명수가 포함되지 않은 수질

$$B_{pure} = \frac{Q_{ave}B_{ave} - Q_{min}B_{min}}{Q_{ave} - Q_{min}} \quad (1)$$

여기서, Q_{ave}는 일평균 유량(m^3/일), Q_{min}는 일최저 유량(m^3/일), B_{ave}는 일평균 BOD(mg/l), B_{min}는 일최저 BOD(mg/l)를 나타낸다

② 일최저 유량시 불명수가 포함되어 있지 않은 하수량

$$Q_{min} - Q_U = \frac{Q_{min}B_{min}}{B_{pure}} \quad (2)$$

여기서, B_{pure}는 불명수가 포함되지 않은 수질상태의 BOD(mg/l)를 나타낸다

③ 불명수량

$$Q_u = Q_{min} - \frac{Q_{min}B_{min}}{B_{pure}} \quad (3)$$

(3) 제3방법

시간별 유량측정 자료중 최저값을 불명수량으로 가정한다.

2.2 표본조사결과의 확대적용

현행 실시되고 있는 불명수(I/I)의 조사는 조사기간, 조사비용 및 사업의 시급성 등의 이유로 전지역을 대상으로 조사를 시행하는 것은 불가능한 현실이다. 따라서 표본조사결과를 과업대상 전지역에 확대 적용하여 사업 우선순위 선정을 위한 기초자료로 활용하고 있다.

다음의 그림 1은 표본조사지역에서 상정된 불명수(I/I)를 미조사지역을 포함한 전체 사업지역으로 확대 적용하는 모식도이다.

표본지역에 대한 현장조사결과를 미조사 지역에 확대적용하는 방안 및 절차는 다음의 그림 2와 같이 수행된다.

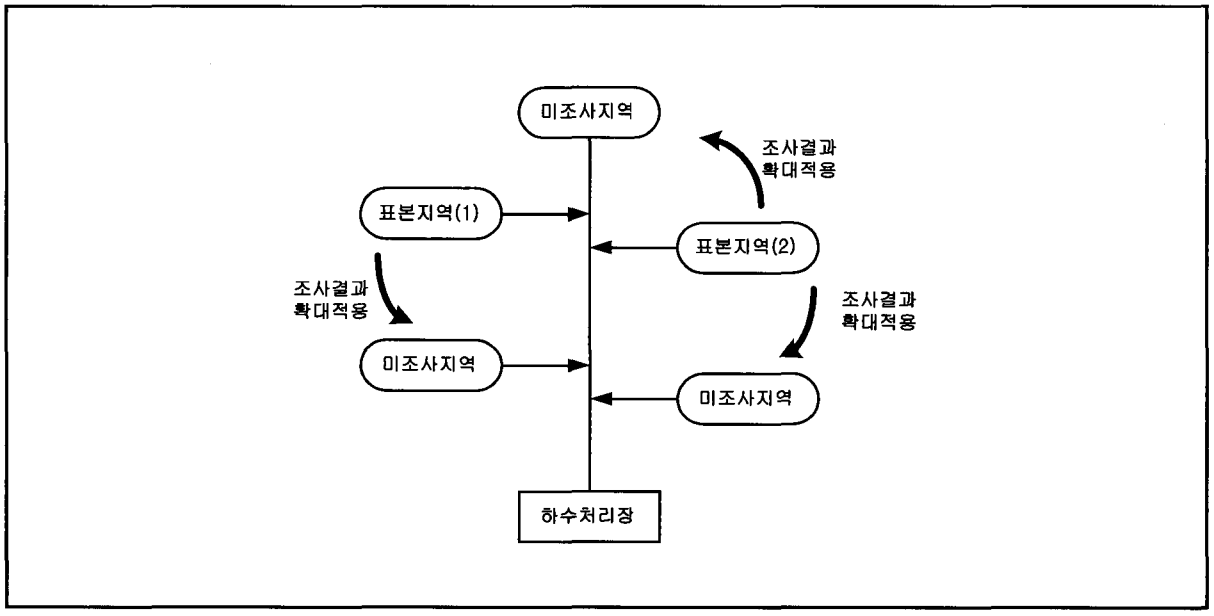

그림 1. 확대적용 개념도

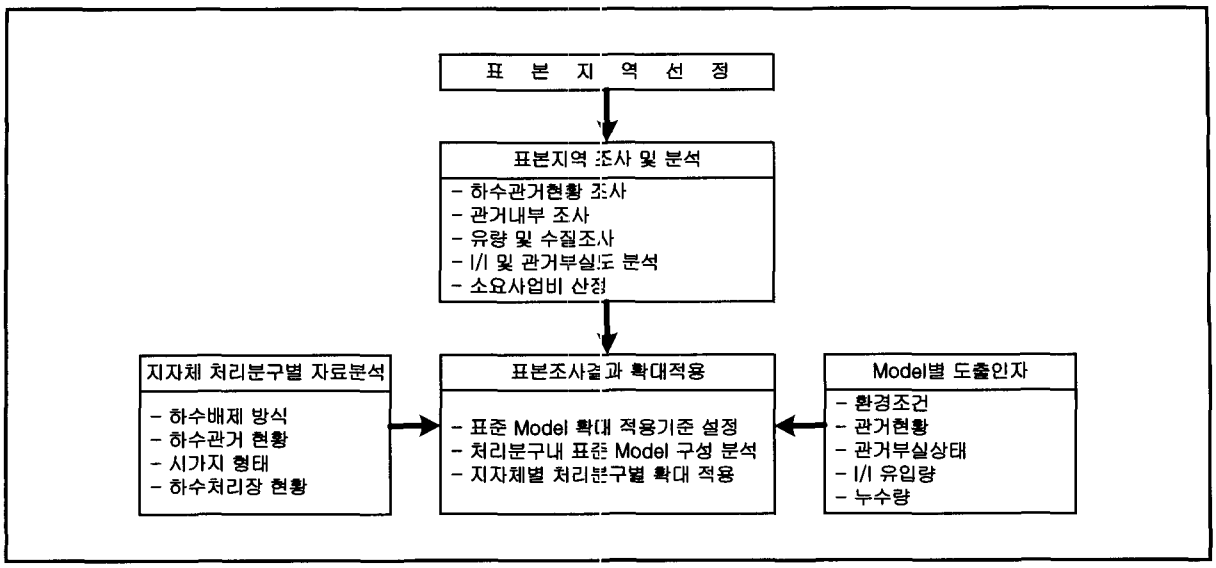

그림 2. 표본조사결과 확대적용 절차

이와 같이 기존 사업 시행에 있어서 확대적용은 관거 및 유역 개황 등에 의하여 적용 지역 전체를 표본지역과 동일하게 간주하는 것이다. 이것은 관거 및 유역이 미조사된 지역에 대해서 그 특성을 고려하지 못하는 한계를 가지며, 따라서 사업 시행 방안 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 결함의 상태에 따라 결함별 가중치를 고려한 확률적 접근에 의하여 불명수를 산정한다. 여기서, 관거별 불명수의 배분을 위해 고려된 결함별 가중치는 전문가들을 대상으로 실시한 설문결과를 통하여 AHP 기법에 의해 산정하였다. 따라서, 이 과정에서 발생하는 주관적 평가에의한 불확실성은 Monte Carlo 모의기법을 이용한 불확실성 분석(uncertainty analysis)을 통하여 수정하였다.

3.1 AHP(Analytic hierarchy Process) 기법

AHP 기법은 의사결정 문제를 계층화한 후 각 평가기준의 관점에서 대안들의 상대적 중요도와 평가 기준들간의 상대적 중요도를 쌍대비교(pairwise comparison)하므로써 측정한다. AHP를 이용한 여러 속성들간의 체계적인 가중치 부여는 다음과 같이 4단계의 과정을 통하여 이루어진다

(1) 계층구조의 형성

계층구조의 형성에서는 대상의 목표를 선정하고 그 목표에 영향을 미치는 관련 속성들을 계층적으로 세분화하여 의사결정구조를 설정한다

(2) 쌍대비교 행렬의 작성

요소들의 중요도에 대한 의사 결정자의 선호도를 평가하는 단계로서, 중요도의 척도에 따라 쌍대비교를 통해 행렬 식 (1)이 구성되는데, 이는 주 대각선의 원소들이 모두 1이 되는 역수행렬이다.

$$A_{ij} = w_i / w_j \tag{4}$$

여기서, w_i와 w_j는 i번째 속성과 j번째의 속성의 가중치이며, $i, j = 1, 2, 3, \cdots, n$ 이다.

(3) 가중치 계산

가중치 계산에는 쌍대비교 행렬의 고유값(eigenvalue) 중에서 최대치에 대응하는 고유 벡터를 요소의 중요도로 이용하는 고유벡터(eigenvector) 방법이 사용되며 가중치 계산을 위한 식은 다음과 같다.

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \tag{5}$$

여기서, a는 행렬의 구성값, n은 비교항목의 개수를 나타낸다.

(4) 일관성 검증(consistency test)

일관성 검증에서는 대상들에 대한 비교에 있어서 일

관성 지수(Consistency Index, CI)와 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)을 구함으로써 일관성을 판단하며, CR값이 0.20 이하일 경우에는 일관성을 인정하는 정도이다.

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n-1) \quad (6)$$

$$CR = CI / RI \quad (7)$$

여기서, λ_{max}는 행렬의 최대 고유치, RI는 무작위 일관성 지수(Random consistency Index)를 나타낸다. 다음의 표 1은 대상들에 대한 쌍대비교의 가치 판단 기준을 나타내고 있으며, 이것은 비교항목간의 중요도에 따른 점수책정의 기준이 된다. 표 2는 1에서 9까지의 정수들을 무작위 추출하여 역수 행렬을 작성한 후, 이로부터 일관성 지수를 구하여 500개 표본에 대해 평균값을 작성한 것이다.

표 1. 쌍대비교 척도

Semantic Scale	수 치
A와 B가 동등	1
A가 B보다 약간 중요	3
A가 B보다 상당히 중요	5
A가 B보다매우 중요	7
A가 B보다 절대적으로 중요	9

표 2. 무작위 일관성 지수(RI)

행렬의 크기(n)	R I	행렬의 크기(n)	R I
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

3.2 Monte Carlo 기법에 의한 불확실성 분석

매개변수의 불확실성(parameter uncertainty)은 현장에서 수집한 자료와 판단, 기술적인 보고서로부터 추론된 매개변수의 정확성과 관련이 있다. 자료의 불확실성은 매개변수 불확실성의 주요 원인으로 측정오차, 일관성이 없는 자료에 의한 오차, 자료의 조작오차 및 시간, 공간, 재정적 한계에 의한 대표성이 없는 표본으로 인한 불확실성 등이 여기에 포함된다. 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 모형의 개발에 있어서 매개변수의 불확실성, 자료의 불확실성 및 모형의 불확실성에 대하여 분석이 이루어졌다. 즉, AHP 기법의 쌍대비교를 행하는 과정에서 발생하는 주관적 가치판단에 따른 매개변수의 불확실성 및 자료계열의 회귀분석을 통해 발생하는 오차의 불확실성을 MCS(Monte Carlo Simulation) 방법을 사용하여 분석하였다.

Monte Carlo 모의 기법은 어떤 특정한 통계분포 특성을 가지는 무작위 변수를 발생시키는 방법이다. 무작위 변수 계열을 발생시키는 가장 일반적인 방법은 반복적인 계산의 형태를 도입하는 것이다. 이러한 반복계산 방식은 선형 변환된 정수의 나머지를 계산하는 것에 바탕을 두고 있다.

무작위 변수 계열을 발생시키는 과정은 확정론적이다. 그러나 발생된 난수 계열은 균등하게 분포되고 서로 독립적이다.

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(Lehmer, 1951).

$$X_i = \{aX_{i-1} + C\} \text{ (modulo m)} \quad i = 1, 2, \cdots, M \quad (8)$$

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.

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.

$$U_i = \frac{X_i}{m} \quad (9)$$

모의발생을 위한 알고리즘에는 역누가분포함수 방법(CDF inverse method), AR방법(acceptance-rejection method), 변수변화 방법 등이 있다. 역누가분포함수 방법은 무작위 변수 X의 누가분포함수 $F_x(X)$가 X에 대해 0과 1 사이의 범위에서 증가한다는 사실에 기초한

다. 수자원공학 분야에 적용되는 대다수의 연속적인 확률분포에 있어서 $F_x(X)$는 X에 비례한다. $U=F_x(X)$라 하고, U가 0에서 1 사이의 표준정규 난수라고 하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$X = F_x^{-1}(U) \tag{10}$$

3.3 관거별 불명수량 산정 기법

(1) 불명수량 산정기법 적용 절차

본 연구에서는 한 개의 중요지점에서 관측된 유량 및 수질자료에 의하여 산정된 불명수량을 그 지점이 포함하고 있는 각각의 모든 관거로 분배함으로써 관거별 불명수 발생량을 예측한다. 여기서 중요지점에서 산정된 불명수량을 분배함에 있어서는 관거 각각에서 조사된 결함의 종류 및 결함 정도에 따라서 차등 분배하게 된다.

다음의 그림 3은 불명수 산정 기법의 적용 절차를 나타내고 있다.

(2) 불명수량 산정식

본 연구에서는 불명수의 발생이 관거에 존재하는 결함을 통해 이루어지며 결함의 종류 및 양상에 따라 불명수의 발생량이 달라진다는 가정하에 결함항목별 가중치를 산정하여 관거 각각에 대한 불명수를 산정하였다.

AHP 기법을 통해 산정된 결함항목별 가중치를 적용하여 중요 지점에서 산정된 불명수량을 관거별로 분배하게 된다. 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.

$$x_n' = \frac{\sum_{j=1}^{m}(c_{nj}\times k_j)}{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{m}(c_{ij}\times k_j)} \tag{11}$$

여기서, x_n'은 n번째 관거의 가중치 확률, c_{ij}는 관거별 결함항목별 결함갯수, k_j는 결함항목별 가중치, i와 j는 각각 관거번호 및 결함항목, r과 m은 각각 관거의 총갯수와 결함항목의 총갯수이다.

여기서 산정된 x_n'에 대하여 n번째 관거의 전체 가중치 x_n은 다음과 같다.

$$x_n = a_n x_n' \tag{12}$$

여기서, a_n는 n번째 관거의 가중치계수이다. 그런데 가중치확율은 전체가중치와 비례한다는 가정하에 a_n은 모든 관거에서 동일한 계수 a로 나타낼 수 있다.

즉, n번째 관거의 불명수량은 다음식에 의하여 산정된다.

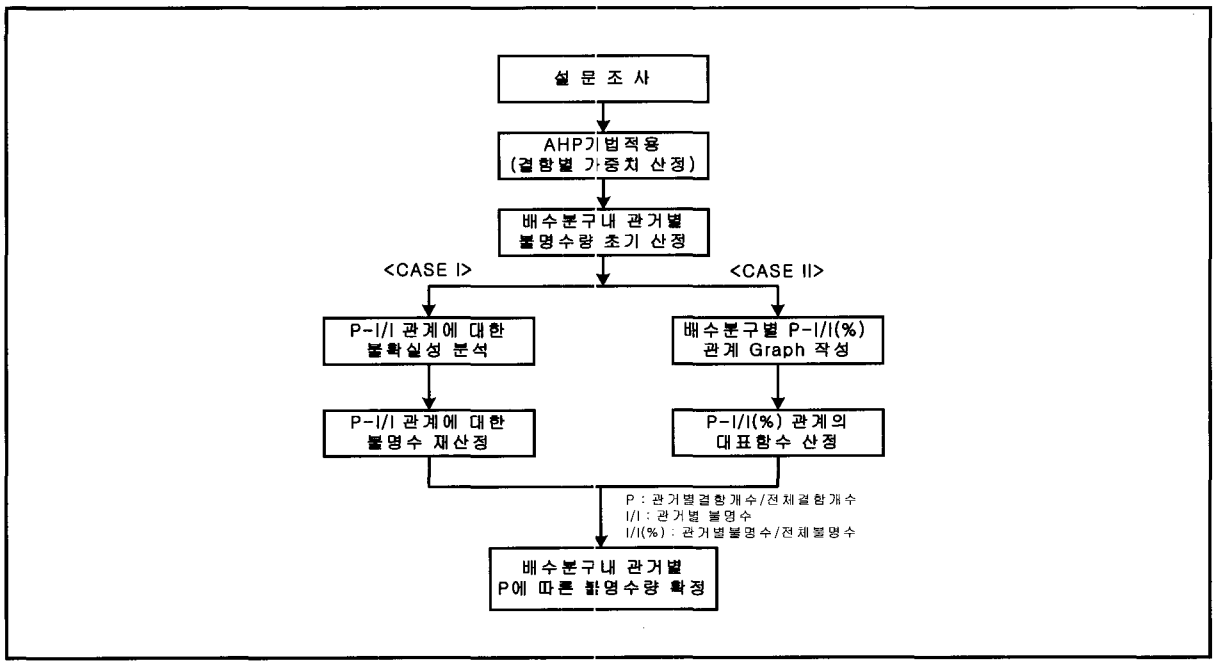

그림 3. 불명수 산정기법 적용 절차

$$y_n = P_n \times Y \times x_n \quad (13)$$

여기서, P_n은 n번째 관거의 결함개수 확률로써 전체 관거의 결함개수의 총합에 대한 관거별 결함개수의 합으로 나타내어지며, y_n은 n번째 관거의 불명수량, Y는 해당구역내 전체 불명수량이다.

또한, 관거의 가중치계수 a는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$y_1 + y_2 + \cdots + y_n = P_1 \times y \times ax_1' + P_2 \times y \times ax_2' + \cdots + P_n \times y \times ax_n' = Y \quad (14)$$

이상의 식에서 a값이 계산되어지면 식 (14)에 의하여 관거별 불명수량이 산정될 수 있다.

(3) 불확실성 분석에 의한 불명수량 재산정

불명수량 산정식에 의하여 배수분구내 관거별 불명수량을 산정하여 배수분구내의 모든 관거에 대한 P-I/I 관계를 그래프로 나타내면 다음의 그림 4와 같은 형태가 된다. 여기서, P는 관거별 결함갯수의 총합에 대한 각 관거별 결함갯수의 비율을 나타내며 I/I는 불명수량 산정식으로 산정된 관거별 불명수량이다. 그림 4에서 각 점들은 각 관거별 P에 따른 I/I를 나타내고 있으며 같은 P의 값을 갖는 관거일지라도 다른 I/I값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 관거별 결함의 갯수가 같더라도 관거내에 존재하는 결함의 종류 및 결함 정도에 따라서 다른 가중치점수가 산정되어 불명수가 차등 분배되었다.

그런데, P에 따른 관거별 I/I의 산정과정에서 가장 중요한 요소인 결함에 따른 가중치의 산정은 불확실성을 내포하고 있다. 즉, 결함항목별 중요도에 대하여 설문조사를 거쳐 AHP기법에 의해 결함항목별 가중치를 정량화하는 과정에서 설문 응답자들의 주관적 판단에 의해 발생되는 불확실성이 포함된다. 따라서, 가중치의 산정에 따른 P-I/I 관계에 있어서 불확실성 분석이 요구된다.

본 연구에서는 배수분구내 관거별 불명수의 산정에 있어서 결함항목별 가중치라는 매개변수가 갖는 불확실성에 대하여 분석을 실시하여 P에 따른 I/I를 재산정 하며 이러한 분석을 수행하기위한 절차는 다음과 같다. 이때, P는 관거별 결함갯수의 총합에 대한 각 관거별 결함개수의 비율을 나타내며 I/I는 불명수량 산정식으로 산정된 관거별 불명수량이다.

① 불명수량 산정식에 의한 P-I/I 관계에 대한 회귀곡선식을 산정한다.

② 회귀곡선식에서 각 관거에 대하여 P-I/I 관계에서의 결과값이 갖는 오차 및 P별 오차들의 표준편차(σ)를 산출한다.

③ 각 관거에서 발생하는 오차를 평균값($\bar{x}$)으로 가정한다.

④ 각 관거별로 Monte Carlo 모의기법에 의하여 난수(z)를 발생하여 오차 자료계열에 대하여 모의한다. ($x_T = \bar{x} + \sigma z$)

⑤ 모의된 오차계열의 평균값에 의하여 각 관거별 불명수량을 재산정한다.

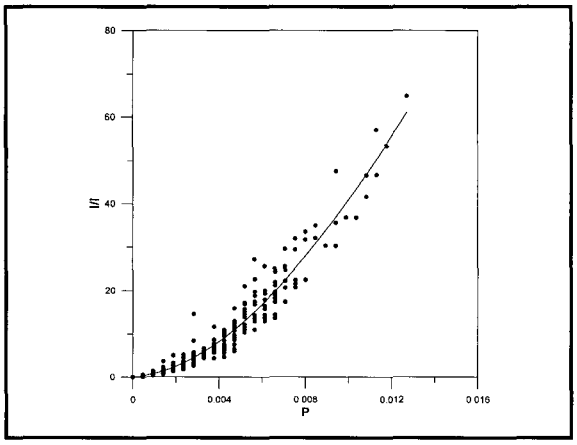

그림 4. 결함확률(P)-불명수(I/I) 관계

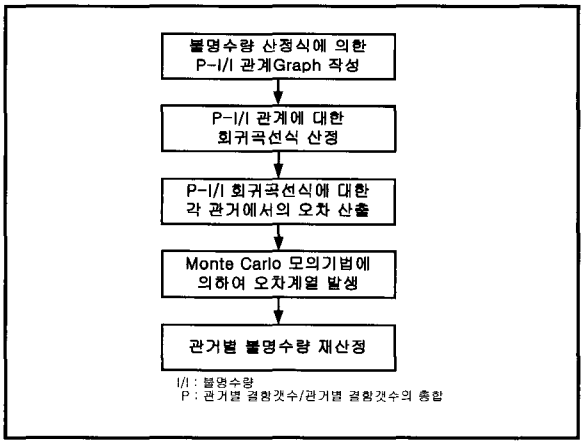

그림 5. 불확실성 분석 수행 절차

4. 적용 및 결과

4.1 대상지역 자료조사 및 분석

서울시의 배수구역 분할은 하수관망 조사결과와 하수도 정비 기본계획(1998)에서 기존 하수관망의 보완을 위해 조사된 각 구청별 증·신설 관거현황, 대단위 택지

개발지구 및 재개발지구 관거시설 현황을 토대로, 한강에 직접 유입되는 지천 및 주요 토구별로 구분하여 4개 처리구역에 16개의 배수구역으로 분할하였다. 본 연구의 대상지역은 난지처리구역의 불광배수구역내 16개 배수분구중 갈현, 불광(1), 불광(2), 대조 등 4개 배수분구 22개 토구로 구성되어있다. 다음의 표 3은 하수도 정비기본계획(1998)에서 기조사된 4개 배수분구별 유역 현황 및 발생 불명수 총량을 나타내고 있다. 여기서, 불명수의 산정은 앞서 제시된 불명수 산정방법상의 제2방법에 의해 계절별 1회, 총 4회 관측유량에 대하여 분석되었다.

또한, 현행 실무에서 관거 결함 판단기준상의 17개 결함항목에 대하여 4개 실무업체 25명의 전문가들을 대상으로 항목별 중요도에 관한 설문조사를 실시하여 AHP 기법에 의해 결함항목별 가중치를 산정하였으며, 이것을 바탕으로 점수배점표를 작성한 결과는 다음 표 4와 같다.

표 3. 배수분구별 면적분포 현황

배수분구	총 면 적(ha)	시가화면적(ha)	녹지면적(ha)	불명수 발생량(cmd)
갈 현	158.60	120.80	37.80	9,082
불 광(1)	239.20	117.90	121.30	12,997
불 광(2)	114.50	81.30	33.20	2,639
대 조	70.10	70.10	-	9,475

표 4. 결함항목별 점수 배점

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

표 5. 배수분구별 결함 수준

갈현 배수분구	결함항목	맨홀뚜껑파손	맨홀연결파손	돌출관	접합부	이음부	침입수	유출수	부식	관파손
	결함갯수	0	5	1893	1837	2705	7	0	1	118
	결함항목	곡관리	관침하	관구배	타관통과	폐유	모르타르	토사	기타	결함총수
	결함갯수	10	3	2	132	0	8	263	196	7180
불광(1) 배수분구	결함항목	맨홀뚜껑파손	맨홀연결파손	돌출관	접합부	이음부	침입수	유출수	부식	관파손
	결함갯수	0	1	2320	919	2137	1	0	0	49
	결함항목	곡관리	관침하	관구배	타관통과	폐유	모르타르	토사	기타	결함총수
	결함갯수	4	1	0	51	0	2	160	194	5839
불광(2) 배수분구	결함항목	맨홀뚜껑파손	맨홀연결파손	돌출관	접합부	이음부	침입수	유출수	부식	관파손
	결함갯수	0	1	526	422	945	2	0	0	27
	결함항목	곡관리	관침하	관구배	타관통과	폐유	모르타르	토사	기타	결함총수
	결함갯수	4	1	0	44	0	0	89	64	2125
대조 배수분구	결함항목	맨홀뚜껑파손	맨홀연결파손	돌출관	접합부	이음부	침입수	유출수	부식	관파손
	결함갯수	0	0	602	278	305	2	0	0	69
	결함항목	곡관리	관침하	관구배	타관통과	폐유	모르타르	토사	기타	결함총수
	결함갯수	5	1	2	27	0	2	147	107	1547

배수분구별로 관측된 전체 불명수량은 표 4에 나타나있는 결함항목별 점수배점에 근거하여 식(12)~식(15)를 통해 관거별 불명수량으로 배분된다.

다음의 표 5는 4개 배수분구내 관거 내부 조사 결과 17개 결함항목에 대한 집계표이다.

4.2 모형의 적용 결과

본 연구에서는 관거별 불명수량을 산정하기 위하여 관거별 결함항목 및 결함등급에 관한 정보가 획득된 경우(Case Ⅰ)와 예산상의 제약에 의하여 관거별 총 결함갯수에 관한 정보만 획득된 경우(CaseⅡ)에 대하여 모형을 적용하였다.

4.2.1 결함항목 및 결함등급 정보에 의한 적용 (Case Ⅰ)

관거별 불명수량은 AHP기법을 통해 산출한 17개 결함항목별 가중치를 고려하여 배수분구별로 관측된 전체 불명수량을 통해 배분함으로써 산정된다.

(1) 결함항목별 가중치를 고려한 관거별 불명수의 1차 산정

결함항목별 가중치를 고려하여 관거 각각에 대한 결함항목 및 결함등급에 따른 결함 갯수를 산출하여 관거별 불명수를 배분하였으며, 1차 산정된 관거별 불명수량에 대하여 결함확률(P)과 불명수(I/I)에 관한 관계 그래프를 작성하였다(그림 6).

계절별 1회씩 관측한 유량 및 수질자료를 통해 산출된 배수분구별 불명수량은 갈현 배수분구 9,082(m^3/일), 불광(1) 배수분구 12,997(m^3/일), 불광(2) 배수분구 2,639(m^3/일), 그리고 대조 배수분구는 9,475(m^3/일)이다.

이상의 그림에서 알 수 있듯이 관거별 결함갯수가 동일한 관거일지라도 불명수량은 서로 다름을 알 수 있다. 즉, 관거별 결함의 종류 및 정도에 따라서 각기 다른 가중치가 부여됨으로써 동일한 결함갯수를 갖는 관거일지라도 불명수량이 차등 분배되었음을 알 수 있다.

(2) 불확실성을 고려한 관거별 불명수의 재산정

관거별 결함의 종류 및 정도에 따라 차등 분배된 1차 불명수량이 산정되었다. 그러나, 여기서 부여된 결함 종류 및 정도에 따른 가중치는 AHP기법에 의하여 정량화되었다 할지라도 설문조사를 통한 자료를 바탕으로 하였으므로 설문 응답자의 주관적 판단에 의한 불확실성을 내포하고 있다. 따라서, 1차로 산정된 관거별 불명수량에 의하여 작성된 P-I/I 관계Graph를 통하여 불확실성 분석을 실시한후 관거별 불명수량을 재산정 하였다.

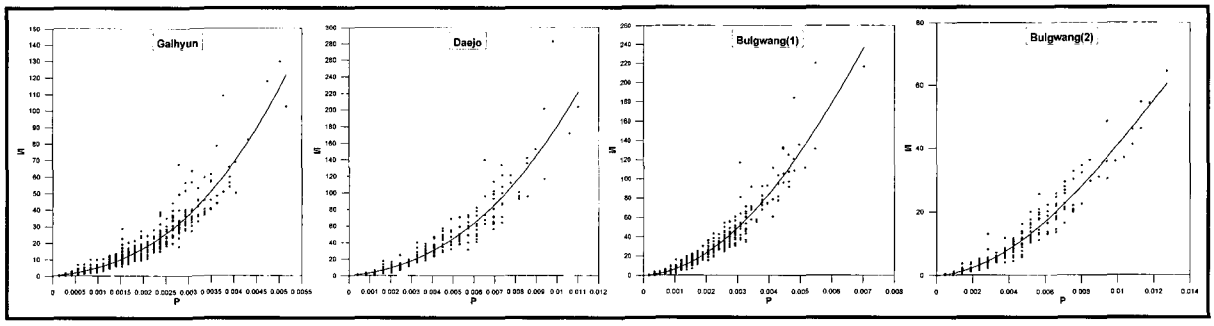

그림 6. 관거별 결함확률에 따른 불명수량 관계(1차 산정)

표 6. P-I/I 관계에 대한 회귀곡선식(1차 산정)

배수분구	회귀곡선식
갈 현	$Y = -0.06271444561 + 2633.719353X + 2097103.456X^2 + 382067969.2X^3$ (Average X = 0.000903364, Average Y = 8.20325, R-squared = 0.926654)
불광(1)	$Y = -0.08941843459 + 2144.940434X + 1140904.988X^2 + 44502533.03X^3$ (Average X = 0.000796197, Average Y = 10.3479, R-squared = 0.945737)
불광(2)	$Y = -0.005243257729 + 227.6169624X + 504780.075X^2 - 11711121.42X^3$ (Average X = 0.00160258, Average Y = 4.22917, R-squared = 0.964044)
대 조	$Y = -0.08537079485 + 1.78242696X + 0.1599294572X^2 + 0.02981804027X^3$ (Average X = 0.00155761, Average Y = 14.7586, R-squared = 0.926215)

가. P-I/I 관계에 대한 1차 회귀곡선식 작성

관거별 결함의 종류 및 정도에 따라 차등분배된 1차 불명수량에 따른 배수분구별 P-I/I 관계에 대한 회귀곡선식은 다음 표 6과 같다.

나. 불확실성 분석에 의한 불명수 재산정

P-I/I 관계에 대하여 1차 산정한 회귀곡선식에서 발생하는 관거별 불명수량의 오차에 대하여 불확실성 분석을 수행하였다. 즉, 1차 회귀곡선식에 대하여 3,629개의 관거별 불명수량 값이 갖는 오차($\bar{x}$) 및 표준편차(σ)와 Monte Carlo 모의기법에 의하여 발생시킨 20,000개의 난수(z)를 적용해 관거별 불명수량(x_T)을 산정하였으며($x_T=\bar{x}+\sigma z$), 난수별 산정값의 평균치를 관거별 불확실성을 고려한 불명수 대표값으로 채택하였다.

다음의 표 7은 재산정된 불명수량(I/I)에 따른 2차 회귀곡선식을 나타내고 있다.

4.2.2 총 결함갯수 정보에 의한 적용(Case II)

예산제약 등의 이유로 대상지역에 대한 관거별 총 결함개수에 관한 정보만이 획득되었을뿐 결함의 종류 및 결함 정도에 관한 정보의 획득이 불가능할 때에는 Case I 에서 산정된 관거별 P-I/I 관계에 대한 회귀곡선에 의하여 결함개수에 따른 불명수량을 추정할 수 있다. 즉, 향후 몇 년 후에 본 연구에서 선정된 대상지역에 대하여 정비사업을 실시할 때 관거별 결함개수에 관한 정보만 획득되었다면, 본 연구에서 산출된 회귀곡선식에 의하여 관거별 불명수량을 추정할 수 있다.

다음의 그림 7은 불광배수구역내 15개 배수분구에 대한 결함확률, P에 대한 불명수량 비율, I/I(%) 관계에 따른 회귀곡선을 보여주고 있다. 여기서, 결함확률, P는 전체 결함개수에 대한 관거별 결함 비율을 나타내며, 불명수량 비율, I/I(%)는 전체 불명수량에 대한 관거별 불명수량 비율을 나타내고 있다.

표 7. P-I/I 관계에 대한 회귀곡선식(2차 산정)

배수분구	회귀곡선식
갈 현	$Y= -0.08481022253+3380.478307X+760302.4121X^2+605977785.9X^3$ (Average X = 0.000903364, Average Y = 7.38341, R-squared = 0.923954)
불광(1)	$Y= 0.04622892462+204.9210265X+4998183.281X^2-55866518.02X^3$ (Average X = 0.000796197, Average Y = 9.14206, R-squared = 0.940726)
불광(2)	$Y= -0.007782779613+374.6899238X+380242.3034X^2-2698687.5X^3$ (Average X = 0.00160258, Average Y = 3.89895, R-squared = 0.968736)
대 조	$Y= -0.162567206+2132.143115X+725410.0731X^2+79725521.09X^3$ (Average X = 0.00155761, Average Y = 13.057, R-squared = 0.913622)

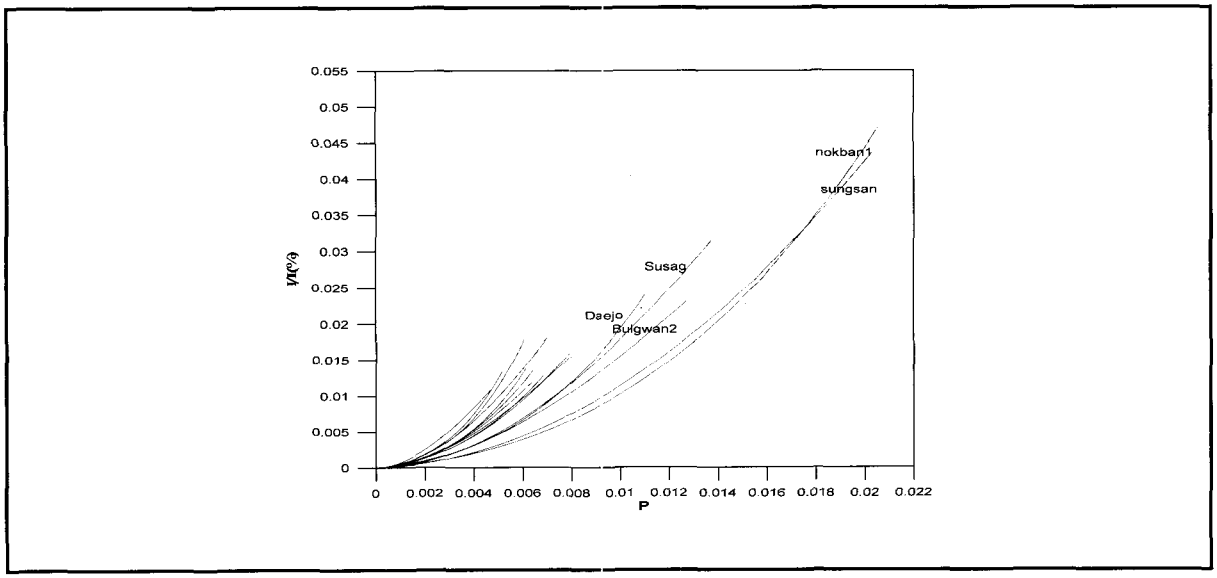

그림 7. 불광배수구역 15개 배수분구별 P-I/I(%)

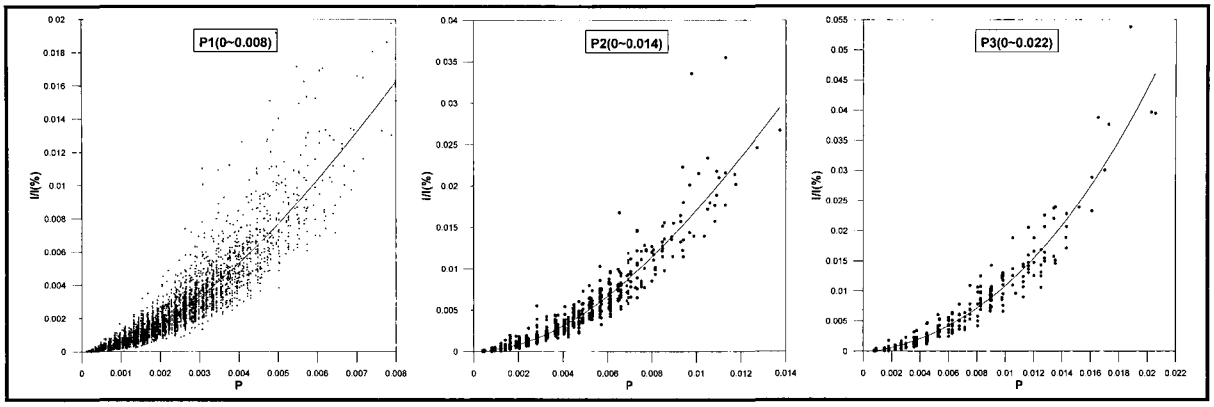

그림 8. 결함확률(P)의 분포범위별 P-I/I(%)

표 8. 결함확율(P)의 분포에 따른 P-I/I(%) 회귀곡선식

결함확율(P) 분포범위	회 귀 곡 선 식
0 ~ 0.008	$Y=-7.125389871E-005+0.3284213599\ X+296.1284323\ X^2-10274.52318\ X^3$ (Average X = 0.00167772, Average Y = 0.00167422, R-squared = 0.873085)
0 ~ 0.014	$Y=0.0001193835838-0.04942710117\ X+216.040962\ X^2-4136.263917\ X^3$ (Average X = 0.00361882, Average Y = 0.00361882, R-squared = 0.915097)
0 ~ 0.022	$Y=-0.0002787499796+0.2916012929\ X+69.52223971\ X^2+1265.781252\ X^3$ (Average X = 0.0060423, Average Y = 0.0060423, R-squared = 0.932452)

이상의 그림에서 알 수 있듯이 관거별 결함확률, P의 분포 범위에 따라서 매우 유사한 형태의 회귀곡선들이 보여지고 있다. 즉, P의 분포 범위가 0~0.008까지의 좁은 범위내에 고루 분포하는 경우와 0~0.014까지 좀더 분포 범위가 넓어진 경우, 그리고 0~0.022까지 넓은 범위로 분포된 경우로 구분되어지고 있다.

P의 범위에 따라 세 개의 군(group)으로 나누어 각각 독립된 회귀곡선을 작성하면 다음의 그림 8과 같이 나타난다.

결함확률, P의 분포 범위에 따른 세가지 분포형에 따라 구분되어지는 회귀곡선식을 작성하면 표 8과 같다.

5. 결 론

우리나라의 경우 최근에 건설된 일부 신시가지를 제외하고는 대부분이 합류식 하수관거가 설치되어 있으며, 침수방지 목적으로 건설되었기 때문에 인구 증가 및 산업발달에 따른 오염원 증가시 오수배제 및 처리기능의 미비로 도시위생 환경 여건의 악화 및 각종 용수원의 수질오염 문제 등을 야기하고 있다. 근래에 들어 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 하수관거 정비사업이 활발히 이루어지고 있으나, 하수관거 시설물에 대한 과거 자료의 구축이 전무한 실정이며 체계적인 사업 시행이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는, 현재 배수구역내 표본지역의 중요지점에서만 관측되는 불명수에 대하여 관거별 결함 양상에 따라 불명수를 배분하는 불명수 산정 모형을 개발하였다. 불명수 산정 모형은 하수관거에 발생하는 결함의 종류 및 결함 정도에 따라 관거별 불명수를 차등배분하여 불확실성 분석을 통해 관거별 불명수량을 산정한다. 이때 결함에 따른 불명수 차등배분을 위해서는 환경부의 「도심하수관 정비기법 연구(1997)」에 수록된 결함항목별 점수배분에 근거하는 한편 실무자들을 대상으로 한 설문조사를 거쳐 AHP기법을 적용하여 결함항목별 가중치를 산정하였다. 또한, 관거별 결함정보가 획득된 경우(Case Ⅰ)와 획득되지 못한 경우(Case Ⅱ)로 나누어 적용하였다.

본 연구에서 개발된 불명수 산정 모형에 의하여 관거의 결함 상태 즉, 노후도에 따라 발생하는 불명수량에 대하여 정량화가 이루어졌다(Case Ⅰ). 또한, 결함 상태에 따른 불명수 발생량을 대표적 회귀곡선식으로 산정함(Case Ⅱ)에 따라 향후 동일 지역에서 발생하는 동일 결함 상태의 관거에 대해서는 불명수량 추정이 가능하므로 관거 조사에 소요되는 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과를 토대로한 관거의 결함정보에 따른 노후도의 진행과 이에 따른 불명수 발

생량의 예측은 도심 하수관망의 정비 및 유지관리 시스템 구축을 위한 유용한 자료 제공을 가능하게 한다.

추후 연구 과제로는 지속적인 관거자료 구축을 통해 하수관망의 장기 개량 모형이 개발되는 한편 하수관거의 노후도에 관한 장기 예측 및 노후도에 따른 불명수 발생율에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

김문모, 조원철, 허준행, (1995). "우수관거의 불확실성과 위험도-안전율 곡선에 관한 연구." **대한토목학회지,** 대한토목학회, Vol. 15, No. 5, pp. 1323-1332.

김상호, 한건연, 이홍래 (1998). "하천 홍수범람 모의를 위한 DWOPER-LEV 모형." **대한토목학회지,** 대한토목학회, Vol. 18, No. 2, pp, 211-214.

정철권, 박규홍, 정연규 (2001). "유전자알고리즘에 의한 소규모 배수유역 하수관거 정비의 최적화" **대한토목학회지,** 대한토목학회, Vol. 21, No. 2, pp, 295-304.

서울특별시 (1998). **하수도정비기본계획 보고서,** pp. 181-229.

한국비굴착기술연구회 (2000). **하수관거의 조사·평가와 정비,** pp. 33-66.

Belhadj, N., Joannis, C., and Raimbault, G. (1995) "Modelling of Rainfall Induced Infiltration into Separate Sewerage" *Water Science and Technoloy*, Pergamon, Vol. 32, No. 1, pp. 161-168.

deMonsabert (1997). "A Benders decomposition model for sewer rehabilitation planning for infiltration and inflow planning" *Water Environment Research*, The Federation, Vol. 69, 1997, pp. 162-167.

Thomas L. Saaty (1994) "Highlights and critical points in the theory and application of the analytical hierarchy process." *European Journal of Operational Research*, North-Holland Pub. Co, Vol. 74, pp. 426-447.

Vargas L.G. (1990) "An overview of the analytic hierarchy process & its applications." *European Journal of Operational Research*, North-Holland Pub. Co, Vol. 48, pp. 2-8.

(논문번호:03-65/접수:2003.08.16/심사완료:2004.02.18)