

# 하수관거시스템 개량 우선순위 결정 모형

## Rehabilitation Priority Decision Model for Sewer Systems

이정호\* · 박무종\*\* · 김종훈\*\*\*

Lee, Jung Ho · Park, Moo Jong · Kim, Joong Hoon

### Abstract

The main objective of sewer rehabilitation is to improve its function while eliminating inflow/infiltration (I/I). If we can identify the amount of I/I for an individual pipe, it is possible to estimate the I/Is of sub-areas clearly. However, in real, the amount of I/I for an individual pipe is almost impossible to be obtained due to the limitation of cost and time. In this study, I/I occurrence of each sewer pipe is estimated using AHP (Analytic Hierarch Process) and RPDM (Rehabilitation Priority Decision Model for sewer system) was developed using the estimated I/I of each pipe to perform the efficient sewer rehabilitation. Based on the determined amount of I/I for an individual pipe, the RPDM determines the optimal rehabilitation priority (ORP) using a genetic algorithm for sub-areas in term of minimizing the amount of I/I occurring while the rehabilitation process is performed. The benefit obtained by implementing the ORP for rehabilitation of sub-areas is estimated by the only waste water treatment cost (WWTC) of I/I which occurs during the sewer rehabilitation period. The results of the ORP were compared with those of a numerical weighting method (NWM) which is the decision method for the rehabilitation priority in the general sewer rehabilitation practices and the worst order which are other methods to determine the rehabilitation order of sub-areas in field. The ORP reduced the WWTC by 22% compared to the NWM and by 40% compared to the worst order.

**Key words** : Inflow/Infiltration, Sewer rehabilitation, Rehabilitation priority

### 요 지

하수관거시스템 개량의 주된 목적은 불명수(Inflow/Infiltration, I/I)를 제거함으로써 그 성능을 향상시키는데 있다. 이때 전체 하수관거시스템 내에서 개개 관거별 I/I 발생량을 정량화할 수 있다면, 전체 하수관거시스템 내에서 소유역별 해당 정보의 추출이 보다 명확해질 수 있다. 그러나 실제 현장에서는 예산 및 시간의 제약 때문에 개개 관거의 I/I 발생 정보의 획득은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 하수 관거별 I/I 발생량을 AHP(Analytic Hierarch Process)를 이용하여 정량화하였으며, 산정된 관거별 I/I 발생량을 이용하여 효율적인 하수관거 개량 사업 시행을 위한 개량 우선순위 결정 모형(Rehabilitation Priority Decision Model for sewer system, RPDM)을 개발하였다. 개개 관거별 I/I 발생량 산정 결과에 기반하여 RPDM은 개량이 시행되는 기간 동안 발생하는 I/I 발생량을 최소화하는 소유역별 최적 개량 우선순위(Optimal Rehabilitation Priority, ORP)를 유전자 알고리즘을 이용하여 결정한다. 이때 최적 개량 우선순위에 따른 소유역별 개량 시행 시 발생하는 이익은 개량 기간 동안 하수처리장으로 들어가는 I/I의 하수처리비용(Waste Water Treatment Cost, WWTC)에 대한 절감을 의미한다. 본 연구에서는 개발된 RPDM에 의한 최적 개량 우선순위의 결과는 일반적인 하수관거 개량사업의 우선순위 결정 방법인 점수가중평가법(Numerical Weighting Method, NWM)과 최악의 개량순서에 따른 결과들과 비교되었으며, 개량 기간 동안의 I/I 처리비용이 점수가중평가법에 비하여 22%, 최악의 개량순서에 비하여 40% 감소하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 불명수, 하수관거 개량, 개량 우선순위

### 1. 서 론

하수관거시스템 개량의 목적은 불명수(Inflow/Infiltration, I/I)를 저감시키고 및 통수능 부족 관거를 개량하는데 있다. 통수능 부족 관거는 도시유역 내 내수침수 발생의 주요 원인중 하나이며, I/I의 발생은 하수처리장으로 유입되는 유입수의 농

도를 저감시킴으로써 하수처리 효율의 감소를 야기한다. 따라서 하수관거시스템의 개량은 관거 시스템 자체의 효율과 함께 하수처리장의 효율 증대를 위하여 반드시 필요한 사항이다. 그런데, 하수관거 개량에 있어서 개개 관거별 I/I 발생량을 정량화 할 수 있다면 보다 효율적인 관거 개량사업의 시행을 위한 소유역 단위의 세밀한 유역 구분이 가능할 것이며,

\*정회원 · 고려대학교 방재과학기술연구원 연구교수(E-mail: jungho\_lee@korea.ac.kr)

\*\*정회원 · 한서대학교 토목공학과 교수

\*\*\*정회원 · 고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 교수(교신저자)

이것을 통한 보다 효율적인 사업의 시행이 가능할 것이다. 그러나 실제 사업 현장에서는 시간 및 예산의 제약으로 인하여 개개 관거별 I/I 발생 자료를 획득하는 것은 불가능하며, 몇 개의 주요 지점에서 관측된 유량 및 수질 자료를 통하여 I/I를 샘플링하는 현실이다. 따라서 사업 시행을 위한 우선순위의 결정은 I/I가 관측된 몇 개의 지점에 해당하는 소유역들만을 대상으로 하게 되며, 보다 효율적인 사업 우선순위의 결정을 위하여 보다 세분화된 영역의 분할은 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 보다 세분화된 소유역을 대상으로 사업 우선순위를 결정하기 위하여 하수관거시스템의 개량 우선순위 결정 모형(Rehabilitation Priority Decision Model for sewer system, RPDM)을 개발하였다.

RPDM은 관거별 결함의 종류 및 수량을 이용하여 개개 관거별 I/I 발생량을 정량화하게 된다. 이때 관거 내의 결함은 그 종류 및 양상에 따라서 각기 다른 특성을 가지고 있으며 이것은 I/I의 발생에도 각기 다른 영향을 미치게 된다. RPDM에서 개별 관거의 결함상태에 따른 I/I 발생량을 정량화하기 위해서는 관거의 결함 항목 및 양상별 I/I 발생에 미치는 영향 정도에 대한 평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 다기준 의사결정 기법 중 하나인 계층분석기법(Alytic Hierarchy Process, AHP)을 이용하여 I/I 발생에 대한 결함 항목별 가중치를 산정하였으며, 이것을 바탕으로 관거별 I/I 발생량을 정량화하였다.

또한 RPDM은 관거별 I/I 발생량 산정 값을 토대로 세분화된 소유역별 최적의 개량 우선순위를 결정하게 된다. 이때 개량 우선순위는 개량사업이 시행되는 동안에 발생하는 유역 전체의 I/I 발생량을 최소화함으로써 하수처리장에서의 I/I 처리비용을 최소화하기 위하여 결정된다. 즉, 전체 유역 내 개량사업 시 소모되는 관거의 개량, 교체 등의 비용은 소유역별 사업 순위에 따라서 달라지는 것이 아니므로 RPDM은 사업 순서에 따라서 달라질 수 있는 공사기간동안의 I/I 발생량을 최소화하는 것을 목적함수로 채택하였다. 예를 들어 하나의 유역 내에 두 개의 소유역이 존재하며 각 소유역에서 발생하는 I/I를 포함한 하수는 하나의 하수처리장으로 유입된다고 가정해보자. 소유역 A는 10 개의 관거 내 결함을 가지고 있으며 10 m<sup>3</sup>/day의 I/I를 발생시킨다. 또한 소유역 B는 20개의 결함을 가지고 15 m<sup>3</sup>/day의 I/I를 발생시킨다. 이때 소유역 A 및 B에 대한 관거 개량사업에 소요되는 공사 기간은 각각 10일 및 20일이다. 만약 소유역 B가 개량 우선순위를 가지며 먼저 사업 시행이 이루어진다면 소유역 B의 개량 사업이 시행되는 동안에 소유역 A에서는 총 200 m<sup>3</sup>(10 m<sup>3</sup>/day × 20일)의 I/I가 하수처리장으로 유입될 것이다. 이때 소유역 B에서는 공사가 시행되면 더이상 I/I의 발생은 없는 것으로 가정할 수 있다. 반면, 소유역 A가 우선 개량된다면 해당 공사기간 10일 동안 소유역 B에서는 총 150 m<sup>3</sup>(15 m<sup>3</sup>/day × 10일)의 I/I가 발생되어 하수처리장으로 유입될 것이다. 따라서 이러한 경우 소유역 B를 우선 시행할 경우보다 공사기간 중 발생하는 I/I량이 50 m<sup>3</sup> 저감될 것이며, 이것은 하수처리장의 처리 비용 절감으로 이어질 것이다. 그러므로 하수관거시스템의 개량 사업은 사업 시행의 순서에 따른 비용 절감의

문제를 고려하여 이루어져야 한다.

하수관거 개량에 대한 기존의 많은 연구들 중에서 Belhadj (1995)는 강우강도 및 강우 지속시간에 따른 도시유역에서의 I/I를 예측하는 모형을 개발하였다. 그러나 이 모형은 단지 유역 내 전체 I/I 발생량만을 산정할 수 있으며 각 관거별 I/I는 추정하지 못한다. 하수관거의 상태를 평가하는 연구들에 있어서는 Wirahadikusumah(1998)의 관거 상태를 평가하는 모형 개발에 관한 연구와 Fenner(1999)의 관거의 형상, 관경, 매설깊이 및 관중 등에 대한 데이터에 따라서 관거의 위험도를 예측하는 연구가 있었다. 관거 개량의 결정에 대한 기법 연구는 deMonsabert(1997, 1999)의 연구가 대표적이다. 이 모형에서는 I/I 제거에 따른 비용 편익을 분석하여 주어진 예산 내에 최적화된 개량 순위를 결정한다. 그러나 이 모형들은 오직 관측된 I/I를 바탕으로 실행 가능하므로 개발 관거에 대한 세부적인 효율 분석이 불가능하며 I/I 관측 지점이 포괄하는 전체 지역별 순위만 결정될 수 있는 한계를 가지고 있다. 또한 현재 국내에서 실시되고 있는 하수관거시스템의 개량사업에 있어서는 소유역 단위의 샘플링된 I/I를 바탕으로 몇 개 소유역별 개량 우선순위를 선정함에 있어서 단순히 관거 내 결함의 개수, 공사비용, I/I 발생량 등을 점수합산한 점수가중평가법에 의하여 사업 순위를 결정하는 한계를 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 최적의 개량 우선순위를 결정할 수 있는 RPDM을 개발하였으며, 이것을 통하여 하수관거 정비 사업에 있어서 비용 절감 효과를 최대화하는 효율적인 개량 의사 결정을 가능하게 한다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 Inflow/Infiltration (I/I)

수원으로부터 하수관거에 유입되는 침입수나 침투수량이 과도할 경우에는 하수관거의 통수용량 감소, 하수처리장의 효율 감소 등 심각한 문제를 야기할 수 있다. 또한 이렇게 과도한 침입수나 침투수 때문에 처리되지 않고 방류되는 하수가 수자원의 보호 및 관거에 미치는 영향은 매우 크다. 이러한 문제들은 현재의 하수량과 미래의 도시성장을 고려할 때 하수관거 조기 건설의 필요성, 도로 및 개인 주택지 하수와 강우량의 과부하, 하수의 우회처리, 전력비의 상승, 유량의 누수, 처리 효율의 저하, 미처리된 하수의 방류로 인한 하천의 수질 악화 등을 야기한다.

침입수는 고의적으로 또는 편의상 하수관거에 외부수원이 직접 연결되어 발생한다. 이러한 연결은 원치 않는 우수나 임의의 배수관을 통하여 배수된 오수를 유입시키며 낮은 지역 혹은 침수지역의 물이 의도적이든, 우연적이든 간에 맨홀 덮개를 통하여 하수관거로 유입되게 된다. 또한, 침투수는 결함이 있는 연결 부위, 깨진 곳, 균열이 있는 파이프, 부적절한 연결, 맨홀 벽, 그 외 다른 곳들을 통하여 토양에서 하수관거로 들어가는 지하수량을 말한다. 침입수와 침투수는 하수구로 유입되는 하수량에 영향을 끼치는 발생원이 다르지만 이송과 처리 용량의 증가를 일으키는 면에서는 결과적으로

동일하다.

이러한 I/I의 산정에 있어서 국내에서는 침입수 산정에 유량해 방법, 유량-수질해 방법, 물사용 평가법 등을 이용하며 유입수는 건기 시 강우전의 기저유량과 실제 강우 시 강우유량의 차감량을 통하여 산정하고 있다.

## 2.2 계층분석기법(Alytic Hierarchy Process, AHP)

계층분석기법(Alytic Hierarchy Process, AHP)는 다기준 의사결정 기법중 하나로서 다양한 의사결정자들간의 선호도를 통하여 대안들에 대한 우선순위를 결정하는데 유용하게 이용되어온 기법이다. AHP는 의사결정 문제를 계층화한 후 대안들 및 평가 기준들 간의 상대적 중요도를 쌍대비교에 의하여 측정한다. 따라서 AHP는 정량적인 요소뿐만 아니라 정성적인 요소에 대해서도 쌍대비교를 통하여 상대적 중요도를 정량화함으로써 현실에 실제로 적용하기가 용이하다(Vargas, 1990). 또한, AHP는 Saaty(1990)의 여러 적용 예들을 통하여 실제 현장에의 적용상 그 타당성이 검증된 기법이라 할 수 있다.

AHP는 계층구조의 형성, 의사결정 요소들의 쌍대 비교, 가중치 계산, 일관성 검증 등의 분석 과정을 거치도록 구성되어 있다. 계층구조의 형성에서는 대상의 목표를 선정하고 그 목표에 영향을 미치는 관련 속성들을 계층적으로 세분화하여 의사결정구조를 설정한다. 의사결정 요소들의 쌍대 비교에서는 특정 계층에 있는 요소들의 중요도에 대한 의사 결정자의 선호도를 쌍대 비교를 통하여 평가하여 요소들 간의 상대적 중요도를 평가하며 쌍대 비교 행렬을 작성한다. 이렇게 작성된 쌍대 비교 행렬을 통하여 요소들 간의 상대적 중요도에 대한 가중치가 정량적으로 산정되게 되며, 마지막으로 일관성 검증을 통하여 의사 결정자들의 평가 설문지들에 대한 일관성 여부를 판단하여 평가 요소들에 대한 재조사 여부를 결정하게 된다.

$n$ 개의 항목들에 대한 상대적 중요도에 대한 비교를 가정해 보자. 이때 그림 1과 같은  $n$ 차원의 쌍대비교행렬이 구성되어 있다. 여기서  $a_{ij}$ 는 항목과  $j$  항목 간의 상대적 중요도를 나타내며, 그 상대적 중요도는 표 1의 비교 척도를 이용하여 평가될 수 있다.

$a_{ij}$ 는 다음의 식에 의하여 산정되어진다.

$$a_{ij} = w_i / w_j \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

여기서,  $w$ 는 비교 대상 항목  $A$ 에 대한 가중치를 의미한다.

	$A_1$	$A_2$	...	$A_n$
$A_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1n}$
$A_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$A_n$	$a_{n1}$	$a_{n2}$	...	$a_{nn}$

그림 1. 쌍대비교행렬

표 1. 쌍대 비교 척도

Semantic scale	Index
A is equally important with B	1
A is weakly more important than B	3
A is strongly more important than B	5
A is very strongly more important than B	7
A is absolutely more important than B	9

또한 평가 항목별 가중치는 다음의 식에 의하여 산정된다.

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

평가 요소들 간의 쌍대 비교 행렬은 실제 적용 분야의 전문가들을 대상으로 작성되며, 요소들 간의 상대적 중요도는 행렬  $A$ 로부터 유도된 고유벡터(Eigenvector, EV) 방법으로부터 산정될 수 있다. 여기서, EV 방법의 특징 중 하나는 일관성 지수(Consistency Index, CI)를 획득할 수 있다는 것이며 이것은 주어진 쌍대 비교 행렬들 간의 일관성을 향상시키기 위한 기준이 된다. 작성된 쌍대비교 행렬에 대한 의 값이 상대적으로 크다면 그 행렬은 일관성이 없다고 보고 다시 설문을 해야 하거나 중요도 산정에서 제외시켜야 한다. CI값은 식 (3)을 이용하여 산정되어진다.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

$$CR = CI / RI \quad (4)$$

여기서,  $\lambda_{\max}$ 는 행렬  $A$ 의 최대 고유치를 의미하며, 쌍대 비교 행렬의 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)이 0.1보다 크다면 해당 행렬의 조사 결과는 AHP 과정에서 제외되어야 한다. 또한,  $RI$ 는 무작위 일관성 지수(Random consistency index)로서 다음의 표 2에 의하여 선택되어지며 여기서  $n$ 은 평가 요소의 개수를 나타낸다(Saaty, 1990).

본 연구에서 AHP는 실무 전문가들을 대상으로 I/I의 발생에 영향을 미치는 결합항목별 가중치 산정을 위하여 이용되었으며, 결합항목별 가중치는 유역 전체의 I/I 발생량을 각 관거별로 분배하기 위한 기준이 된다.

## 2.3 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm, GA)

최적화 방법 중 발견적(heuristic) 방법으로는 SA (Simulated Annealing), TA(Taboo Search), 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 등이 폭넓게 사용되고 있다. 다윈의 적자생존의 원리에 기반한 유전자 알고리즘은 Holland(1975)에 의하여 개발되었으며 Goldberg (1989) 등에 의하여 다양한 최적화 문제들에 적용되어왔다.

본 연구에서 최적화 문제의 해결을 위하여 채택된 유전자 알고리즘은 자연계에 있는 생물의 진화과정에 있어서 개체군(population) 중에서 환경에 대한 적합도(fitness)가 높은 개체가 높은 확률로 살아남아 재생(reproduction)할 수 있게 된다.

표 2. 무작위 일관성 지수

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

이때 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)로써 다음 세대의 개체군을 형성하는 알고리즘을 인공적으로 모델링한 것이다. 그리고 본 연구에서 유전자 알고리즘은 하수관거 개량 사업의 결정에 있어서 최적 개량 우선순위를 결정하기위하여 이용되었다.

### 3. 개량 우선순위 결정 모형

본 모형에서 개발된 하수관거시스템의 개량 우선순위 결정 모형(Rehabilitation Priority Decision Model for sewer system, RPDM)은 관거별 I/I 발생량을 정량화하는 'I/I 분석 과정'과 전체 관거 시스템에 대하여 소유역별 최적의 개량 순서를 결정하는 '개량 우선순위 분석 과정'으로 구분되어진다. 'I/I 분석 과정'에서는 AHP를 이용하여 I/I에 대한 관거 내 결합 항목들의 영향도를 전문가들의 의사를 고려함으로써 결합항목별 가중치를 산정하게 된다. 이렇게 산정된 결합항목별 상대적 가중치를 통하여 현재 관거의 결합 상태에 따른 관거별 I/I 발생량을 추정하여 산정하게 된다. 그리고 '개량 우선순위 분석 과정'에서는 I/I에 대한 하수처리 비용을 계산하여 전체 배수분구 내 소유역별 순차적 개량 순위에 따라서 달라지는 개량기간동안의 I/I 발생량을 최소화하기 위한 최적 개량 우선순위를 결정하게 된다. 다음의 그림 2는 최적 개량 우선순위 결정을 위한 RPDM의 구성 체계를 나타낸다.

I/I에 영향을 미치는 관거의 결합 항목들에 대한 쌍대비교 행렬은 항목별 가중치를 산정하기 위하여 작성되어지며, 관거의 결합 상태에 대한 정보를 이용하여 관거별 I/I 발생량이 산정되어진다. 이러한 관거별 I/I 정보는 전체 하수관거시스템 유역에 대하여 소유역별 개량 우선순위를 산정하기 위한 입력 자료로서 제공되며, 최적의 개량 우선순위는 소유역별 개량 순서에 대한 개체(S)의 생성과 GA를 이용한 진화의 과정을 거쳐서 최적의 해를 탐색하게 된다.

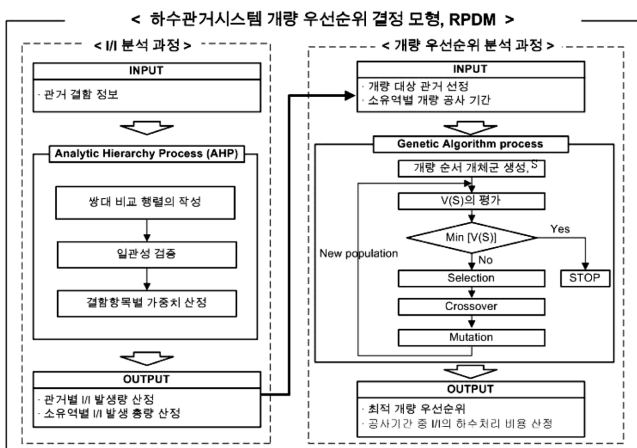


그림 2. RPDM 구성 체계

### 3.1 I/I 분석 과정

I/I는 수질 및 유량의 관측 자료로부터 산정되어지며, 현재 국내에서는 시간 및 예산의 제약에 의하여 일부 지점에서의 샘플링된 자료로부터 전체 배수분구에서 발생하는 I/I 총량이 산정되어진다. 따라서 이렇게 산정된 I/I는 관측 지점으로부터 상류 유역에 대해서만 I/I 발생 총량을 가늠할 수 있는 반면, 관측 자료가 수집되지 않는 상류 유역에 대한 세부적인 I/I 발생량의 추정은 불가능하다. 본 연구에서는 RPDM의 'I/I 분석 과정'을 통하여 샘플링 지점에서 관측된 유역의 전체 I/I 총량을 관거의 결합 상태에 따라서 관거별로 I/I를 분배할 수 있으며, 샘플링된 관측 지점 상류 유역에 대한 세부적인 유역의 구분 및 사업의 순차적인 시행을 가능하게 한다. I/I에 영향을 미치는 관거의 결합항목으로는 개량사업 시행 시 CCTV에 의하여 조사되어지는 맨홀연결부, 이음부불량, 침입수, 유출수, 타관통과, 접합부불량, 돌출관 및 관침하 등 8개 항목으로 각 결합항목은 AHP에 의하여 개별적인 가중치를 갖는다.

결합항목에 대한 쌍대비교 설문은 하수관거 개량사업에 대한 현장 전문가 43명을 대상으로 실시되었으며, 각 전문가들은 I/I 발생에 미치는 영향에 대하여 결합항목들 간의 상대적 중요도를 표 1을 통하여 결정하게 된다. 이렇게 수집된 자료들은 식 (1)을 이용한 쌍대비교 행렬로 작성되며, 결합 항목별 가중치는 식 (2)를 통하여 산정되어진다. 또한 관거별 I/I 발생량은 관측된 유역 전체의 I/I 총량을 다음 식 (3)의 관거의 결합 가중치 비율을 바탕으로 관거별로 분배되어진다.

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^m (D_{ij} \times w_j)}{\sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^m (D_{lj} \times w_j)} \quad (3)$$

여기서,  $x_i$ 는 전체 관거에 대한  $i$ 번째 관거의 가중치 비율을 나타내며,  $n$  및  $m$ 은 각각 관거 개수 및 결합 항목 개수를 나타낸다. 또한  $D_{ij}$ 는  $i$ 번째 관거의  $j$  항목의 결합 개수를 나타낸다.

$i$ 번째 관거의 I/I 발생량을 의미하는  $y_i$ 는 다음 식에 의하여 산정되어진다. 여기서  $y$ 는 배수분구의 샘플링 관측 지점에서 산정된 유역 전체의 I/I 총량을 의미한다.

$$y_i = y \cdot x_i \quad (4)$$

그러므로, 'I/I 분석 과정'에서는 위의 식들을 이용하여 각 관거별 I/I 발생량을 산정함으로써 세분화된 소유역별 I/I 발생량 산정을 가능하게 하며, 이러한 산정 결과들을 바탕으로 소유역별 최적 개량 우선순위를 산정하게 된다.

### 3.2 개량 우선순위 분석 과정

‘개량 우선순위 분석 과정’에서는 관거 시스템에 대하여 최적 개량 우선순위를 결정하며 결정된 우선순위는 사업 시행 시 그 기간 동안 발생하는 I/I를 최소화하며, 최적화를 위한 목적함수는 다음의 식과 같다.

$$MinVS = TI - EI = \sum_{i=1}^n TI_i - \sum_{i=1}^n EI_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 소유역 개수이며  $V(S)[m^3]$ 는 각 소유역이 최적화된 개량 순위( $S$ )에 따라서 순차적으로 개량될 때 전체 사업 기간동안 전체 유역에서 발생하는 I/I이다. 또한,  $S$ 는  $i$ 번째 개량 순서의 소유역을 나타내는  $s_i$ 들로 구성된 개량 순서의 집합이다. 그리고  $TI[m^3]$ 는 전체 사업기간동안 개량사업이 실시되지 않았을 경우 발생하는 I/I 총량이며  $EI[m^3]$ 는  $S$ 에 따라서 개량이 실시될 경우 사업기간동안 전체 유역에서 감소되어지는 I/I이다. 이때 개량사업이 어떤 한 소유역에서 실시되는 동안 개량이 미처 실시되지 않은 다른 소유역들에서는 I/I가 지속적으로 발생되므로  $V(S)$ 는  $S$ 에 따라서 달라지게 된다.

개량 순서상  $i$ 번째 소유역( $s_i$ )에서 개량이 실시되지 않았다면  $i$ 번째 소유역에서 소요되는 개량 기간( $T_{S_i}$ )동안 전체 유역에서 발생하는  $I/I(TI_i)$ 는 다음의 식에 의하여 계산되어진다.

$$TI_i = T_{S_i} \cdot \sum_{j=1}^n I_{S_j} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

여기서,  $T_{S_j}[m^3/day]$ 는  $j$ 번째 개량 순서의 소유역에서 발생하는 단위 I/I량이다. 또한,  $i$ 번째 순서의 개량이 시행되는 동안  $i-1$ 번째 개량까지 소요된 기간을 고려하여 해당 소유역에서 제거되어진 I/I 총량인  $EI_i$ 는 다음 식에 의하여 계산되어진다.

$$EI_i = T_{S_i} \cdot \sum_{j=1}^n I_{S_j} \quad (m = i) \quad (7)$$

따라서 개량사업이  $S$ 의 우선순위에 따라서 시행되는 동안에 하수처리장으로 유입되는 I/I인  $V(S)$ 는  $TI$ 로부터  $EI$ 를 빼줌으로써 계산되어진다. 또한 이에 따른 공사기간 중 발생하는 I/I의 하수처리비용(Waste Water Treatment Cost, WWTC)은  $V(S)$ 에 하수처리비용 단가( $C_{ut}$ )를 곱해줌으로써 계산되어진다.

$$WWTC = V(S) \cdot C_{ut} \quad (8)$$

### 4. 적용 및 결과

본 연구에서 개발된 모형은 서울의 불광 배수구역에 적용되었다. 대상 유역의 면적은 585 ha이며 이 유역에는 총 연장 96,703 m인 관거 2,987개가 매설되어있다. 또한 유역 출구에서 관측된 총 I/I 발생량은 약 24,234  $m^3/day$ 로서 ‘하수 관거조사 및 정비 기본설계보고서(서울특별시, 1998)’의 자료를 인용하였다. 또한, 해당 배수구역은 전체 16개 배수분구로 구성되어있으며 이중 본 연구에서는 3개의 배수분구를 선택하여 21개의 소유역으로 구분하였으며 소유역별로 모형의 적용 결과를 도출하였다. 본 연구에서 적용된 대상 유역은 관거 개량 사업의 타당성 조사를 위하여 1998년 서울시에서 조사된 3개 배수분구별 I/I 총량에 대한 산정 결과를 인용하였다. 또한, 기존의 일반적인 사업 시행에 있어서는 I/I 조사 결과를 토대로 3개 배수분구별 사업 순위의 책정만이 가능한 반면 본 연구에서는 RPDM을 통한 보다 세분화된 소유역별 사업순위의 책정이 가능하다는 특징을 가지고 있다.

#### 4.1 결함 가중치 및 I/I 산정

각 관거별 I/I 발생 확률은 각 관거의 결함 상태에 따라서 결정되어지며, 개량 우선순위를 산정하기 위한 결정변수으로써 이용되어진다. 이때, 결함 항목별 가중치는 I/I 발생에 미치는 상대적 영향도를 의미하며 이것은 각 결함 항목별 상대적 중요도는 43명의 관련 전문가들을 상대로 조사된 쌍대비교 행렬을 이용하여 식 (2)에 의하여 산정되어진다. 이때 43명의 대상자를 상대로 조사된 쌍대비교 행렬은 다음의 표 4와 같으며, 각 결함항목별로 산정되어진 결함 가중치는 다음의 표 5와 같다.

각 결함항목은 I/I 발생에 대하여 개별적인 가중치를 갖게 된다. 그러나 어떤 관거내에 같은 항목의 결함이 존재한다 하더라도 각 관거의 I/I 발생은 결함의 양상에 따라서 달라질 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 동일 항목의 결함에 대하여 결함 양상에 따른 결함 가중치를 구분하기 위하여 ‘도심 하수관 정비기법 연구(환경부, 1997)’에 수록된 ‘결함 항목에 대한 평가 기준’을 고려하였다. 이 기준에서는 결함 항목별 결함 정도를 세 가지 등급으로 분류하고 있으며 등급별 결함 항목에 대한 점수 배점을 다음의 표 6과 같이 제시하였다.

여기서, 표 5의 결함 가중치를 각 결함의 등급별 가중치의 평균이라고 가정한다면, 각 결함 등급별 가중치는 표 6의 각 등급별 점수 배점간의 비율을 이용하여 산정되어질 수 있다. 예를 들어 이음부 불량( $D_2$ )이 0.161의 결함 가중치( $w_2$ )를 갖으며, 이것이 다음의 식 (9)와 같이 해당 결함의 등급별 가중치의 평균이라고 가정한다면 이음부 불량( $D_2$ )의 결함등급 A에 대한 가중치  $w_{2A}$ 는 다음의 식 (10) 및 식 (11)에 의하

표 3. 유역 현황

배수분구	면적 (ha)	평균하수 발생량 ( $m^3/day$ )	I/I 발생총량 ( $m^3/day$ )	관거 개수	소유역 개수
A	114.5	43,924	9,890	624	5
B	224.6	54,397	7,015	1,107	4
C	245.9	62,468	7,329	1,256	12
Sum	585.0	160,789	24,234	2,987	21

표 4. 결함항목 간 상대비교 행렬

	맨홀 연결파손 (A)	이음부 불량 (B)	침입수 (C)	유출수 (D)	타관통과 (E)	접합부 불량 (F)	돌출관 (G)	관침하 (H)
(A)	1.000	0.714	0.929	1.075	0.726	2.027	2.114	0.863
(B)	1.401	1.000	1.269	1.170	0.797	2.482	2.429	0.854
(C)	1.076	0.788	1.000	1.377	0.973	2.206	1.543	1.082
(D)	0.930	0.855	0.726	1.000	0.789	1.981	1.115	0.587
(E)	1.377	1.255	1.028	1.268	1.000	2.190	1.775	1.050
(F)	0.493	0.403	0.453	0.505	0.457	1.000	0.679	0.427
(G)	0.473	0.412	0.648	0.897	0.564	1.473	1.000	0.817
(H)	1.158	1.171	0.924	1.704	0.953	2.340	1.225	1.000

표 5. 결함 가중치

결함항목	맨홀 연결파손	이음부 불량	침입수	유출수	타관통과	접합부 불량	돌출관	관침하
가중치 (w)	0.133	0.161	0.141	0.112	0.154	0.062	0.088	0.148

표 6. 결함 등급별 점수 배점

결함등급	맨홀 연결파손 (D <sub>1</sub> )	이음부 불량 (D <sub>2</sub> )	침입수 (D <sub>3</sub> )	유출수 (D <sub>4</sub> )	타관통과 (D <sub>5</sub> )	접합부 불량 (D <sub>6</sub> )	돌출관 (D <sub>7</sub> )	관침하 (D <sub>8</sub> )
A	20	20	20	20	20	12	15	15
B	15	15	15	15	10	5	5	10
C	8	5	5	5	5	3	1	5

여 산정되어진다. 여기서  $p_{2A}$ 는 표 6에서 제시된 D<sub>2</sub>의 결함 항목의 A 결함 등급의 점수 20을 나타낸다.

$$w_2 = (w_{2A} + w_{2B} + w_{2C})/3 \quad (9)$$

$$\frac{w_{2A}}{w_{2A} + w_{2B} + w_{2C}} = \frac{p_{2A}}{p_{2A} + p_{2B} + p_{2C}} \quad (10)$$

$$w_{2A} = 3w_2 \cdot \frac{p_{2A}}{p_{2A} + p_{2B} + p_{2C}} \quad (11)$$

그러므로 각 결함항목별 결함 등급에 따른 결함 가중치는 다음의 표 7과 같이 재산정되었다.

표 7과 같이 각 결함 항목별 등급에 따른 결함 가중치를 이용하여 각 관거별 결함 상태에 따른 I/I 발생량을 산정하였다. 그런데, 관거 내 I/I의 발생은 결함에 따라서 결정되어지는데, 결함의 개수가 동일한 관거라 할지라도 결함 가중치가 다른 양상을 나타낼 수 있으므로 동일한 I/I가 발생되지는 않는다. 이러한 현상은 다음의 그림 3을 통하여 알 수 있다. 여기서 D는 각 관거의 결함 개수를 나타내며 각 점들은 각 관거의 결함 개수 대비 I/I 발생량을 나타내고 있다.

또한 각 관거별로 산정된 I/I를 이용하여 적용 구역의 3개 배수분구에 대한 각 소유역별 I/I 발생량을 계산한 결과는 다음의 표 8에서 보여지는 바와 같다.

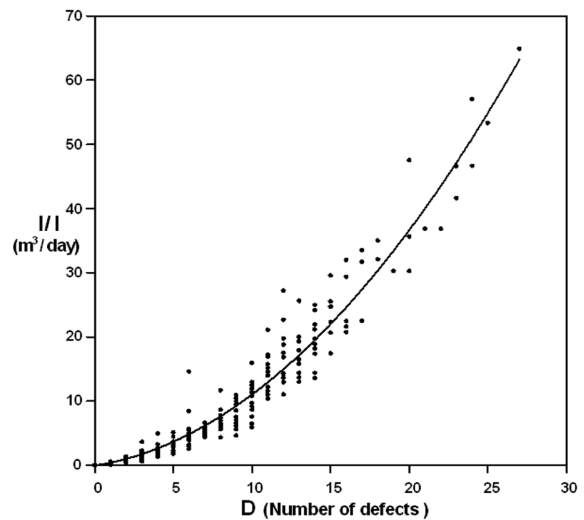


그림 3. 결함-I/I 도표

#### 4.2 최적 개량 우선순위

본 연구에서 개발된 개량 우선순위 결정 모형은 RPDM은 사업 시행기간 중 발생하는 I/I를 최소화하기 위해 최적화된 개량 순위를 결정한다. 그러나 개량 우선순위에 대하여 국내에서는 일반적으로 몇 가지 개량 결정 요소들에 대한 점수평가에 의하여 결정되어지는데 ‘한강수계 하수관거정비 시범사업 타당성조사보고서(구리시, 2002)’ 및 ‘구리시 하수도정비 기본계획보고서(구리시, 2001)’ 등에서 나타내는 결정 요소들은 관거의 단위 길이당 결함 개수, 단위 길이당 통수용량

표 7. 결함 등급별 결함 가중치

결함등급	맨홀 연결파손 (D <sub>1</sub> )	이음부 불량 (D <sub>2</sub> )	침입수 (D <sub>3</sub> )	유출수 (D <sub>4</sub> )	타관통과 (D <sub>5</sub> )	접합부 불량 (D <sub>6</sub> )	돌출관 (D <sub>7</sub> )	관침하 (D <sub>8</sub> )
A	0.186	0.242	0.212	0.168	0.264	0.112	0.189	0.222
B	0.139	0.181	0.159	0.126	0.132	0.047	0.063	0.148
C	0.074	0.060	0.053	0.042	0.066	0.028	0.013	0.074

표 8. 소유역별 I/I 발생량

소유역	I/I (m <sup>3</sup> /day)	소유역	I/I (m <sup>3</sup> /day)	소유역	I/I (m <sup>3</sup> /day)
a	1,417.6	h	385.6	o	32.8
b	137.6	i	1,198.4	p	469.6
c	3,193.6	j	1,661.6	q	7,407.2
d	2,266.4	k	325.6	r	851.2
e	43.5	l	383.2	s	154.4
f	42.4	m	1,320.0	t	352.8
g	562.4	n	904.0	u	1,124.8

부족 관거의 길이 및 단위 길이당 I/I 발생량 등이다. 또한, 통수용량이 부족한 관거에 대하여 우선적으로 시행하고 그다음 결정 요소들에 대한 점수평가를 통하여 개량 순위를 결정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 대상 유역에서의 통수용량 부족 관거에 대한 교체 시행이 완료되었다는 가정 하에 소유역별 개량 순위를 책정하였다. 그리고 본 연구에서 개발된 모형에 의한 결과를 현행 국내 사업시행에 따른 결과와 비교하기 위하여 위에서 언급한 국내에서 일반적으로 사용되어지는 점수평가법(Numerical Weighting Method, NWM)에 의한 결과를 ‘하수관거조사 및 정비 기본설계 보고서(서울시, 1998)’를 인용하여 추가적으로 도출하였다. 또한 사업 시행에 대한 의사 결정자의 판단이 최악의 결과를 나타낼 수도 있다는 가정하에 GA를 이용한 최악의 개량 우선순위(worst order)에 대한 결과들과도 비교하였다. ‘하수관거조사 및 정비 기본설계 보고서(서울시, 1998)’에서 제시된 2,965 ha의 불광배수구역 전체에 대한 사업 기간은 13년으로 본 모형 적용을

위한 전체 사업 기간은 개량 대상인 관거연장 약 5 km에 대하여 3년(48 m/day)으로 가정하였다. 또한 I/I 저감에 따른 저감비용 산정을 위한 하수처리비용은 해당 지역 난지하수처리장의 2007년 현재 처리비용인 80원/ton을 적용하였다. 다음의 표 9는 개량 대상이 되는 결합 관거의 총 연장에 따른 공사 소요 기간을 나타내고 있다.

다음의 표 10은 RPM에 의하여 결정된 21개 소유역에 대한 최적 개량 순위와 국내의 점수평가법에 의한 개량 순위의 산정 결과를 비교하고 있으며, 표 11은 개량 순위에 따른 개량 사업 시행기간 중 발생하는 I/I(V(S)) 및 하수처리비용 산정 결과를 나타낸다.

이상의 결과에서 RPDM에 의하여 최적화된 개량 순서는 S={p, k, g, l, i, h, n, e, m, j, o, r, u, q, t, c, a, d, f, s, b}이며, 국내에서 일반적으로 사용되는 점수가중평가법(NWM)에 의하여 개량사업 시행 시보다 공사기간 중 발생하는 I/I의 하수처리비용이(WWTC) 약 22% 감소되는 것으로 나타났다. 또한 만일의 경우 의사 결정자의 판단에 의하여 최악의 공사 순서에 의하여 개량 사업이 시행된다고 가정할 경우에 발생하는 I/I 하수처리 비용은 3년의 공사기간 중 약 11.4억원 발생하며, 이것은 RPDM에 의한 최적의 공사 시행에 비하여 약 40%의 비용 증가를 나타낸다.

#### 4. 결 론

도시 하수관거의 개량 사업의 시행에 있어서 점수가중평가

표 9. 소유역별 결합 관거 및 공사 소요 기간

소유역	결합관거연장 (m)	공사기간 (day)	소유역	결합관거연장 (m)	공사기간 (day)	소유역	결합관거연장 (m)	공사기간 (day)
a	4,251	89	h	448	9	o	41	1
b	667	14	i	1,252	26	p	357	7
c	8,995	188	j	2,641	55	q	16,527	345
d	7,408	155	k	304	6	r	1,507	31
e	45	1	l	370	8	s	668	14
f	168	4	m	1,999	42	t	937	20
g	586	12	n	1,082	23	u	2,188	46

표 10. 산정 방법별 개량 우선순위

소유역	개량 순위			소유역	개량 순위		
	NWM	Optimum by RPDM	Worst by GA		NWM	Optimum by RPDM	Worst by GA
a	10	17	2	l	13	4	16
b	18	21	3	m	15	9	18
c	17	16	5	n	12	7	20
d	5	18	1	o	19	11	15
e	21	8	17	p	1	1	14
f	20	19	7	q	6	14	6
g	11	3	10	r	3	12	8
h	4	6	12	s	16	20	4
i	2	5	19	t	9	15	21
j	14	10	13	u	7	13	11
k	8	2	9				

표 11. 개량 우선순위 산정 방법별 I/I 하수처리 비용

개량 우선순위 산정 방법	TI (m <sup>3</sup> )	EI (m <sup>3</sup> )	V(S) (m <sup>3</sup> )	I/I의 하수처리비용 (WWTC)
Optimum (by RPDM)	26,536,997	17,970,085	8,566,912	68,535만원
NWM	26,536,997	15,596,558	10,940,439	87,523만원
Worst order (by GA)	26,536,997	12,190,102	14,346,895	114,775만원

법(NWM)과 같은 기존의 방법들은 효율적인 사업의 시행을 보장할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이것은 기존의 방법들에 있어서 개량 순서의 결정이 뚜렷한 비용의 절감 효과를 토대로 이루어지지 않고 있기 때문이다. 그러나 본 연구에서 개발된 하수관거시스템의 개량 우선순위 결정 모형(Rehabilitation Priority Decision Model, RPDM)은 관거별 I/I 산정을 토대로 세분화된 유역별 개량 우선순위의 산정을 가능하게 하며, 또한 소유역별 개량 순서에 따른 공사기간 중 발생하는 I/I 총량을 최소화함으로써 이에 따른 I/I 하수처리 비용을 절감하도록 최적의 개량 우선순위를 결정하게 된다. 따라서 RPDM에 의한 개량 우선순위의 산정은 가장 효율적인 개량 사업 시행을 보장하게 된다. 따라서 본 연구에서 개발된 RPDM은 실제 하수관거 개량 사업 현장에서 의사결정자로 하여금 효율적인 사업 시행의 판단 척도로서 이용될 수 있다. 그러나 본 연구의 성과는 단기간의 개량 사업에 국한되어 있으므로, 향후 관거 시스템의 유지관리와 연계되어 장기적인 개량 계획 수립을 위한 모형 개발이 계속되어야 할 것이다.

### 참고문헌

구리시 (2001) 구리시 하수도정비 기본계획보고서. 구리시.  
 구리시 (2002) 한강수계 하수관거정비 시범사업 타당성조사보고서. 구리시.  
 서울특별시 (1998) 하수관거조사 및 정비 기본설계보고서. 서울특별시.  
 환경부 (1997) 도심 하수관 정비기법 연구. 환경부.

Belhadj, N., Joannis, C. and Raimbault, G. (1995) Modelling of Rainfall Induced Infiltration into Separate Sewerage. *Water Science and Technology*, Vol. 32, No. 1. pp. 161-168.  
 deMonsabert, S. and Thornton, P. (1997) A benders decomposition model for sewer rehabilitation planning for infiltration and inflow planning. *Water Environment Research*, Vol. 69, No. 2, pp. 162-167.  
 deMonsabert, S., Ong, C. and Thornton, P. (1999) An integer programming for optimizing sanitary sewer rehabilitation over a planning horizon. *Water Environment Research*, Vol. 74, No. 7, pp. 1292-1297.  
 Fenner, R.A. and Sweeting, L. (1999) A Decision Support Model for the Rehabilitation of Non-Critical Sewer. *Water Science Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 193-200.  
 Goldberg, D.E. (1990) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA.  
 Holland, J.H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Univ. MI Press.  
 Saaty, T.L. (1990) How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 9-16.  
 Vargas, L.G (1990) An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 2-8.  
 Wirahadikusumah, R., Abraham, D.M., Iseley, T. and Prasanth, R.K. (1998) Assessment Technologies for Sewer System Rehabilitation. *Automation in Construction*, Vol. 7, No. 4, pp. 259-270.

© 논문접수일 : 08년 09월 22일  
 © 심사의뢰일 : 08년 09월 23일  
 © 심사완료일 : 08년 10월 17일