

효율적인 하수관거 개량을 위한 의사결정모형의 개발

Development of a Decision Making Model for Efficient Rehabilitation of Sewer System

이 정 호* / 전 환 돈** / 주 진 곶*** / 김 중 훈****

Lee, Jung Ho / Jun, Hwan Don / Joo, Jin Gul / Kim, Joong Hoon

Abstract

The objective of sewer rehabilitation is to improve its function while eliminating inflow/infiltration (I/I) and insufficient carrying capacity (ICC). Such rehabilitation efforts, however, have not been particularly successful due to a lack of sewer data and unsystematic field practices. The present study aimed to solve these problems by developing a decision making model consisting of two models: the rehabilitation weighting model (RWM) and the rehabilitation priority model (RPM). In RWM, the I/I of each pipe in a drainage district is estimated according to various defects, with each defect given an individual weighting factor using an analytic hierarchy process (AHP). RPM determines the optimal rehabilitation priority (ORP) using a genetic algorithm (GA). The developed models can be used to overcome the problems associated with unsystematic practices and, in practice, as a decision making tool for urban sewer system rehabilitation.

keywords : rehabilitation priority, decision making, optimal rehabilitation

요 지

하수관거 개량사업의 주된 목적은 Inflow/Infiltration (I/I)를 제거 및 통수능력 확보이다. 최근 노후 하수관거의 개·보수 및 신설 사업이 활발히 이루어지고 있으나 현재의 사업들은 관거 데이터의 부족, 유량 및 수질 자료의 장기적인 측정 미비 등으로 인하여 효율적인 사업을 진행시키기에 무리가 있다. 본 연구에서는 하수관거 개량사업을 보다 효율적으로 진행시키기 위하여 Rehabilitation Weighting Model (RWM)과 Rehabilitation Priority Model (RPM)로 구성된 의사결정모형을 개발하였다. RWM은 시간 및 예산상의 제약으로 인하여 주요 지점에서만 관측되는 I/I를 상류의 각 관거별로 I/I를 산정하며, 관거별 I/I는 Analytic Hierarchy Process (AHP)를 통하여 산정된 8개 결합항목별 가중치에 따라서 결정된다. RPM은 Genetic Algorithm (GA)를 이용하여 소유역별 최적개량우선순위를 산정한다. 이것은 공사 기간 중 발생하는 I/I를 최소화시키기 위한 소유역별 공사 순서를 설정함으로써 하수처리장의 처리비용을 절감시킴으로써 하수관거 개량사업의 효율적인 시행을 위한 판단 기준을 제시해준다.

핵심용어 : 개량우선순위, 의사결정, 최적개량

- * 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Seoul, Korea.
(e-mail: jungho_lee@korea.ac.kr)
- ** 한밭대학교 토목공학과 조교수
Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University, Deajeon, Korea.
- *** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Seoul, Korea.
- **** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 교수
Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Seoul, Korea.
(e-mail: jaykim@korea.ac.kr)

1. 서론

하수관거 개량사업의 목적은 Inflow/Infiltration (I/I) 및 통수능 부족으로 인한 문제점들을 해결함으로써 관거 시스템의 기능을 향상시키는데 있다. 관거의 통수능 부족은 도시구역에서의 내수침수의 주요 원인중 하나이며, I/I는 하수처리장으로 유입되는 유입수의 농도를 희석시킴으로써 처리장의 처리 효율을 저감시킨다. 그러므로 관거 시스템의 기능 향상 및 하수처리장의 효율 향상을 위해서는 하수관거 개량사업이 필요하다. 그러나, 현행 하수관거 개량사업들은 대부분 매설 관거의 상태에 대한 데이터의 부족과 비합리적인 현장 상황들에 의하여 비효율적으로 시행되고 있다. 일반적으로 배수분구내 I/I의 조사는 예산 및 시간의 부족으로 인하여 일부 지점에서 샘플링된 유량 및 수질 자료를 분구 전체로 확대 적용하고 있으며, 해당 배수분구에서는 오직 전체 I/I 발생량만 산정되고 각 관거별 I/I의 산정은 불가능한 실정이다. 그리고 하나의 배수분구에 대한 관거 개량 사업은 분구내 각 소유역별로 산정된 우선순위에 따라서 순차적으로 시행되며 우선순위 결정은 일반적으로 점수평가법에 의하여 이루어진다. 그러나, 기존의 이러한 우선순위 산정은 관거 개량에 따른 효율을 고려하지 않고 단순한 평가항목별 점수 배분에 의하여 이루어지고 있다. 따라서, 하수관거 개량사업의 효율을 최대화하기 위해서는 개량 시행에 따른 효율을 고려함으로써 개량 우선순위를 결정하는 새로운 방법이 필요하다.

하수관거 개량에 대한 많은 연구들이 있었으며 Reyna (1994), Abraham (1999), Hoffman (2000) 등은 하수관거 개량에 대한 새로운 기법들을 개발하고 개량 기법에 따른 개량 효율을 분석하였다. 또한, Brousseau (1997)는 하수관거 시스템의 개량 기법들에 대한 조사를 바탕으로 I/I를 정의하였으며, Belhadj(1995)는 강우 강도 및 강우 지속시간에 따른 도시구역에서의 I/I를 예측하는 모형을 개발하였다. 그러나 이 모형들은 단지 구역내 전체 I/I 발생량만을 산정할 수 있으며 각 관거별 I/I는 추정하지 못한다. 최근 이정호 등(2004)은 관거별 I/I 발생량을 추정하기 위하여 AHP (Analytic Hierarchy Process)를 이용하여 관거 내 결합항목별 I/I 발생에 미치는 영향에 따른 항목별 가중치를 산정하였다. 하수관거의 상태를 평가하는 연구들에 있어서는 Wirahadikusumah (1998)의 관거 상태를 평가하는 모형 개발에 관한 연구와 Fenner (1999)의 관거의 형상, 관경, 매설깊이 및 관종 등에 대한 데이터에 따라서 관거의 위험도를 예측하는 연구가 있었다. 또한, Moselhi

(2000)는 신경망을 이용하여 관거의 파손, 접합부 이상 및 유사 등을 어느정도 예측하는 모형을 개발하였으며 Chae (2001)는 뉴로-퍼지를 이용하여 관거의 현재 상태를 예측하는 모형을 개발하였다. 관거 개량의 결정에 대한 기법 연구는 deMonsabert (1997, 1999)의 연구가 대표적이다. 이 모형에서는 I/I 제거에 따른 비용 편익을 분석하여 주어진 예산내에 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 이정호 등(2004)은 관거별 I/I 발생량을 이용하여 배수분구 내 소유역별 개량 우선순위를 결정하는 모형을 개발한바 있으나 이 모형은 개량 우선순위에 따른 효과를 정량화하지 못하였으며 개량사업 기간 중 발생하는 효과를 고려하지 못하였다.

본 연구에서는 하수관거 시스템의 효율적인 개량 사업을 위하여 의사결정모형을 개발하였으며 개발된 모형은 Rehabilitation Weighting Model (RWM)과 Rehabilitation Priority Model (RPM)로 구성된다. RWM은 각 관거의 결합상태에 따라서 관거내 발생 가능한 I/I 발생량을 추정하며 RPM은 개량에 따른 효율을 분석하여 전체 배수분구내 소유역별 개량 우선순위를 결정함으로써 관거 개량 사업의 계획 및 시행에 있어서 판단 기준을 제시해준다. 여기서, RWM은 이정호 등(2004)의 연구내용을 바탕으로 8개의 결합항목별 I/I 발생에 대한 영향도를 기준으로 산정된 결합항목별 가중치에 따른 각 관거별 상태를 판단한다. 또한 이를 바탕으로 전체 배수분구에 대하여 관측된 전체 I/I 발생량을 상류지역의 각 관거로 배분함으로써 각 관거별로 발생 가능한 I/I를 추정하게 된다. 이렇게 산정된 관거별 I/I 발생 가능량을 바탕으로 RPM은 배수분구내 소유역별 최적 개량 우선순위를 산정하게 되는데 최적화기법으로는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하였으며 개량사업 시행 기간 중 발생하는 I/I를 최소화함으로써 사업 기간중 하수처리장에서의 I/I에 따른 추가적인 처리 비용을 최소화하는 것을 목적함수로 한다.

2. 배경 이론

RWM은 각 관거의 결합상태에 따른 I/I 발생 가능성을 정량화하기 위하여 개발되었으며, 각 관거의 결합상태는 I/I 발생에 미치는 영향에 따라서 개별적인 가중치를 가지고 있으며 이것은 계층분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)에 의하여 산정되었다. 또한,

RPM에서 결정되는 개량 비용 및 개량 우선순위의 최적화에는 유전자 알고리즘이 이용되었다.

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 하수관과 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 결합이 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 (AHP)

계층분석기법(AHP)은 다요소 의사결정(Multi-Attribute Decision Making, MADM) 기법들 중 가장 널리 응용되고 있는 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 Thomas (1990, 1994) 및 Lin (1996)의 AHP에 대한 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 의사결정자의 선호도를 쌍대비교를 통하여 평가하여 요소들 간의 상대적 중요도를 평가하며 쌍대 비교 행렬을 작성한다. 이렇게 작성된 쌍대비교 행렬을 통하여 요소들 간의 상대적 중요도에 대한 가중치가 정량적으로 산정되게 되며, 마지막으로 일관성 검증을 통하여 의사결정자들의 평가 설문지들에 대한 일관성 여부를 판단하여 평가 요소들에 대한 재조사 여부를 결정하게 된다. 이때 쌍대 비교 행렬은 다음의 Eq. (1)에 의하여 작성되며 평가 요소별 가중치는 Eq. (2)에 의하여 산정된다.

$$A_{ij} = w_i/w_j \quad (1)$$

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

여기서, A 는 쌍대 비교 행렬, w 는 각 요소들의 가중치, i 및 j 는 각각 쌍대 비교 행렬의 행과 열을 나타낸다. 또한, n 은 평가 요소의 개수, a 는 평가 요소를 나타낸다.

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 CI 의 값이 상대적으로 크다면 그 행렬은 일관성이 없다고 보고 다시 설문을 해야 하거나 중요도 산정에서 제외시켜야 한다. CI 값은 Eq. (3)을 이용하여 산정되어진다.

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

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

여기서, λ_{\max} 는 행렬 A 의 최대 고유치를 의미하며, 쌍대 비교 행렬의 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)이

Table 1. Random Consistency Index (RI)

<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

Table 2. Pair-wise Comparison Index

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

0.1보다 크다면 해당 행렬의 조사 결과는 AHP 과정에서 제외되어야 한다. 또한, *RI*는 무작위 일관성 지수(Random consistency index)로서 다음의 Table 1에 의하여 선택되어지며 여기서 *n*은 평가 요소의 개수를 나타낸다(Thomas, 1990).

Table 2는 쌍대 비교 행렬에서 평가 요소들 간의 상대적 중요도 선택의 척도를 나타낸다(Thomas, 1990).

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

2.3 유전자 알고리즘 (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. 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 의사결정모형의 RPM에 대한 최적 개량 우선순위(optimal rehabilitation priority)를 결정하기 위하여 이용되었다.

3. 모형의 구성

본 연구에서 개발된 하수관거 개량에 대한 의사결정

모형은 RWM 및 RPM으로 구성되며 이것은 하수관거 시스템의 효율적인 개량 시행을 위하여 개발되었다. 여기서, RWM은 AHP를 이용하여 I/I에 대한 각 결함항목의 영향도를 고려하여 결함항목별 가중치를 산정하고 관거별 결함상태에 따라서 각 관거별 I/I를 추정하게 된다. 또한, RPM은 I/I에 대한 하수처리 비용을 계산하여 전체 배수분구 내 소유역별 순차적 개량 순위에 따라서 달라지는 개량기간동안의 I/I 발생량을 최소화하기 위한 최적 개량 우선순위를 결정한다.

다음의 Fig. 1은 본 연구에서 개발된 의사결정모형의 구성 체계를 나타낸다.

Fig. 1에서 관거의 결함 상태에 대한 정보는 RWM으로 입력되며 결함항목들에 대한 쌍대비교행렬은 항목별 가중치를 산정하기 위하여 작성되어진다. 또한, RWM에서 산정된 각 관거별 I/I는 RPM의 입력 자료로서 제공되고 이것을 이용하여 최적개량 우선순위가 결정되어진다.

3.1 Rehabilitation Weighting Model (RWM)

배수분구에 대한 I/I 조사는 일반적으로 시간 및 예산의 제약에 의하여 일부 지점에서의 샘플링된 유량 및 수질 자료로부터 전체 배수분구에서 발생하는 I/I의 총량이 산정되어진다. 본 연구에서 개발된 RWM은 이정호 등(2004)의 연구내용을 바탕으로 대상 유역에 대하여 산정된 전체 I/I 발생 총량을 이용하여 관거의 결함 상태에 따라서 각 관거별로 I/I를 분배하도록 구성되어 있다. 이때, I/I에 영향을 미치는 관거의 결함항목으로는 개량사업 시행 시 CCTV에 의하여 조사 되어지는 맨홀 연결과손, 이음부불량, 침입수, 유출수, 타관통과, 점합부불량, 돌출관 및 관침하 등 8개 항목으로 각 결함항목은 AHP에 의하여 개별적인 가중치를 갖는다. 또한, 결함항목에 대한 쌍대 비교 설문은 하수관거 개량사업에 대한 현장 전문가 43명을 대상으로 실시되었다.

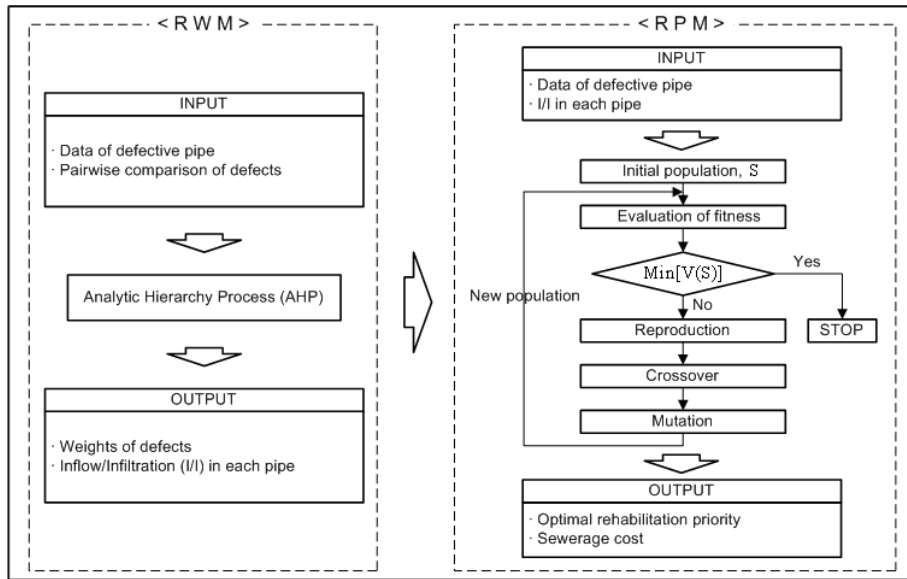


Fig. 1. Structure of the Decision Making Model

결합항목들에 대한 쌍대 비교 행렬은 Eq. (1)에 의하여 작성되며 항목별 가중치는 Eq. (2)에 의하여 산정되어진다. 또한, 대상구역의 I/I 총량은 전체 관거의 가중치 총합에 대한 각 관거의 결합 가중치 비율에 따라서 상류 모든 관거로 분배되며, 각 관거의 결합 가중치 비율은 다음의 Eq. (5)와 같이 계산된다(이정호 등, 2004).

$$x'_n = \frac{\sum_{j=1}^m (D_{nj} \times w_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (D_{ij} \times w_j)} \quad (5)$$

여기서, x'_n 은 n 번째 관거에 대한 가중치 비율이며, m 은 결합항목의 개수, D_{ij} 는 i 번째 관거의 j 번째 결합항목의 개수이다.

n 번째 관거의 가중치인 x_n 은 x'_n 과 가중치계수 C 를 이용하여 산정되어진다.

$$x_n = C \cdot x'_n \quad (6)$$

따라서, n 번째 관거의 I/I y_n 은 다음의 Eq. (7)에 의하여 산정되어진다.

$$y_n = P_n \cdot y \cdot x_n \quad (7)$$

여기서, y 는 배수분구의 전체 I/I 발생량이며, P_n 은 전체 관거의 결합 총 개수에 대한 n 번째 관거의 결합 개수 비율을 나타낸다. 또한, 가중치 계수 C 는 다음의

Eq. (8)로부터 계산되어진다.

$$y_1 + y_2 + \dots + y_n = P_1 \cdot y \cdot C \cdot x'_1 + P_2 \cdot y \cdot C \cdot x'_2 + \dots + P_n \cdot y \cdot C \cdot x'_n \quad (8)$$

3.2 Rehabilitation Priority Model (RPM)

RPM은 관거 시스템에 대하여 최적 개량 우선순위를 결정하며 결정된 우선순위는 사업 시행 시 그 기간 동안 발생하는 I/I를 최소화하며, 최적화를 위한 목적함수는 다음의 Eq. (9)와 같다.

$$\text{Min}[V(S)] = TI - EI = \sum_{i=1}^n TI_i - \sum_{i=1}^n EI_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

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 구역에서 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 구역에서 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 Eq. (10)에 의하여 계산되어진다.

$$TI_i = T_{S_i} \cdot \sum_{j=1}^n I_{S_j} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

여기서, I_{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 Eq. (11)에 의하여 계산되어진다.

$$EI_i = T_{S_i} \cdot \sum_{j=1}^m I_{S_j} \quad (m = i) \quad (11)$$

다음의 Fig. 2는 개량 우선순위의 집합 S 에 따라서 개량사업이 실시될 때의 TI , EI 및 $V(S)$ 의 관계를 나타내고 있다. 또한 EI 및 $V(S)$ 의 값은 S 에 따라서 달라지므로 RPM에서는 이에 관한 최적화 문제를 해결하도록 구성되어있다.

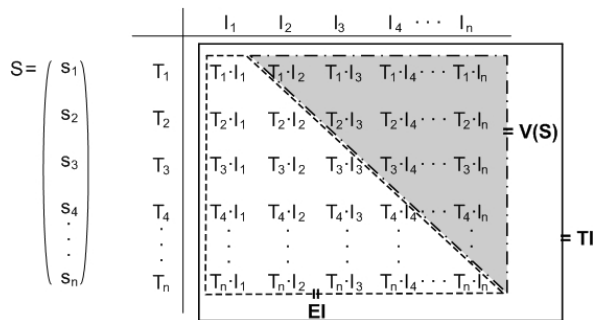


Fig. 2. Matrix of TI Corresponding to S

4. 적용 및 결과

본 연구에서 개발된 모형은 서울의 한 배수구역에

적용되었다. 대상 유역의 면적은 582.4 km^2 이며 이 유역에는 총 연장 109,703 m인 관거 3,629개가 매설되어 있다. 또한 유역 출구에서 관측된 총 I/I 발생량은 약 26,000 m^3/day 이다. 또한, 해당 배수구역은 전체 16개 배수분구로 구성되어있으며 이중 본 연구에서는 4개의 배수분구를 선택하여 22개의 소유역으로 구분하였으며 소유역별로 모형의 적용 결과를 도출하였다. 본 연구에서 적용된 대상 유역은 관거 개량 사업의 타당성 조사를 위하여 1998년 서울시에서 조사된 4개 배수분구별 I/I 총량에 대한 산정 결과를 인용하였다. 또한, 기존의 일반적인 사업 시행에 있어서는 I/I 조사결과를 토대로 4개 배수분구별 사업 순위의 책정만이 가능한 반면 본 연구에서는 RWM을 통한 보다 세분화된 소유역별 사업순위의 책정이 가능하다는 특징을 가지고 있다.

다음의 Fig. 3은 적용 유역에 대한 개략적인 유역도이며 Table 3은 유역 현황을 나타낸다.

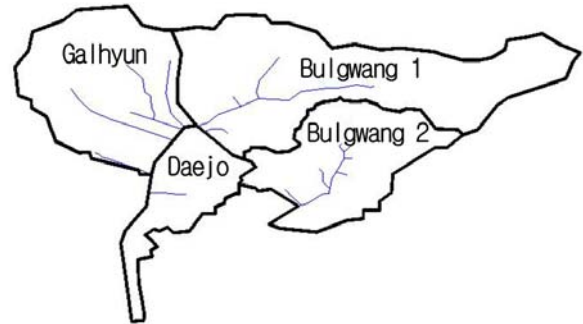


Fig. 3. Map of Applied Drainage Area

4.1 결함 가중치 및 I/I 산정

각 관거별 I/I의 발생 확률은 관거의 결함 상태에 따라서 산정되어지며 개량 우선순위의 산정을 위한 결정 변수로서 이용되어진다. 결함 가중치는 I/I 발생에 대한 각 결함항목의 상대적 영향도에 따라서 산정되어진다. 쌍대 비교 행렬은 결함항목별 상대적 중요도에 대한 43명의 전문가들로부터의 설문 조사를 통하여 작성되어 Eq. (2)를 이용하여 개별적 가중치가 산정되어진다. 결함

Table 3. Summary of Applied Drainage Area

Division	Area (ha)	Observed I/I (m^3/day)	Number of pipes	Number of sub-areas
Galhyun	158.6	7,015	1,107	4
Bulgwang1	239.2	7,329	1,256	12
Bulgwang2	114.5	9,890	624	5
Daejo	70.1	2,028	642	1
Sum	582.4	26,262	3,629	22

* 하수관거조사 및 정비 기본설계보고서(불광배수구역), 서울시, 1998.

Table 4. Pair-wise Comparison Matrix of Relative Evaluation among Each Defect

Defect	Manhole connection's breakage (A)	Connection part's badness (B)	Inflow (C)	Outflow (D)	Other pipe through a pipe (E)	Joining part's badness (F)	Projective pipe (G)	Sewer sinking (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

Table 5. Defect Weights

Defect	Manhole connection's breakage	Connection part's badness	Inflow	Outflow	Other pipe through a pipe	Joining part's badness	Projective pipe	Sewer sinking
Weight (w)	0.133	0.161	0.141	0.112	0.154	0.062	0.088	0.148

Table 6. I/I Distributed to Each Sub-Area

Sub-area	I/I (m ³ /day)	Sub-area	I/I (m ³ /day)	Sub-area	I/I (m ³ /day)	Sub-area	I/I (m ³ /day)
a	1,417.6	g	562.4	m	1,320.0	s	154.4
b	137.6	h	385.6	n	904.0	t	352.8
c	3,193.6	i	1,198.4	o	32.8	u	1,124.8
d	2,266.4	j	1,661.6	p	469.6	v	2,028.0
e	43.5	k	325.6	q	7,407.2		
f	42.4	l	383.2	r	851.2		

항목들에 대한 43명이 설문조사를 바탕으로 작성된 쌍대 비교 행렬은 Table 4와 같으며 각 결함항목별 산정된 가중치는 Table 5에 나타내었다. 이때, 각 결함항목별 가중치의 총합은 1이다.

Table 5에서 I/I 발생에 대한 결함항목별 가중치가 다르게 산정되었다는 것은 동일한 결함 개수를 갖는 관거라 할지라도 분배된 I/I 발생량은 다름을 의미한다. 따라서, RWM은 각 관거별 결함 가중치에 따라서 전체 유역의 I/I를 각 관거별로 분배함으로써 추정되는 소유역별 I/I 발생량의 계산이 가능하며, 적용 유역에 대한 산정 결과는 Table 6에 제시되었다.

4.2 최적개량 우선순위

RPM을 이용하여 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 결정

되어지는데 ‘한강수계 하수관거정비 시범사업 타당성조사보고서(구리시, 2002)’ 및 ‘구리시 하수도정비 기본계획보고서(구리시, 2001)’ 등에서 결정 요소들로는 관거의 단위 길이당 결함 개수, 단위 길이당 통수용량 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 교체를 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. ‘하수관거조사 및 정비 기본설계 보고서(서울시, 1998)’에서 제시된

Table 7. Rehabilitation Priority

Sub-area	Rehabilitation priorities		Sub-area	Rehabilitation priorities		Sub-area	Rehabilitation priorities	
	RPM	NWM		RPM	NWM		RPM	NWM
a	17	10	I	5	2	q	14	6
b	22	19	j	10	15	r	12	3
c	16	18	k	2	8	s	20	17
d	18	5	l	4	14	t	15	9
e	8	22	m	9	16	u	13	7
f	19	21	n	7	13	v	21	12
g	3	11	o	11	20			
h	6	4	p	1	1			

Table 8. I/I and Sewerage Cost by RPM and NWM

Method	TI (m ³)	EI (m ³)	V(S) (m ³)	하수처리비용
RPM	28,862,707	19,544,988	9,317,719	74,542만원
NWM	28,862,707	16,963,445	11,899,262	95,194만원

2,965ha의 불광배수구역 전체에 대한 사업 기간은 13년으로 본 모형 적용을 위한 전체 사업 기간은 개량 대상인 관거연장 약 6km에 대하여 3년(56m/day)으로 가정하였다. 또한 I/I 저감에 따른 저감비용 산정을 위한 하수처리비용은 해당 지역 난지하수처리장의 2007년 현재 처리비용인 80원/ton을 적용하였다.

다음의 Table 7은 RPM에 의하여 결정된 22개 소유역에 대한 최적 개량 순위와 국내의 점수평가법에 의한 개량 순위의 산정 결과를 비교하고 있다.

Table 8은 개량 순위에 따른 개량 사업 시행기간 중 발생하는 I/I(V(S)) 및 하수처리비용 산정 결과를 나타낸다.

이상의 결과에서 RPM에 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, v, b}이며, 국내에서 일반적으로 사용되는 점수평가법에 의하여 개량 사업이 시행될 때보다 I/I 및 하수처리비용이 약 22% 감소되는 것으로 나타났다.

5. 결 론

점수평가법과 같은 현행의 일반적인 개량 우선순위 결정 방법들은 하수관거 시스템의 효율적인 개량 시행에 대한 정량화된 근거가 부족한 실정이다. 그러나 본 연구에서 개발된 하수관거 개량 사업에 대한 의사결정 모형은 I/I라는 정량화된 근거를 기준으로 최적화된 개량 우선순위를 설정함으로써 공사기간 중 하수처리비용 절감에 따른 효율적인 개량 시행을 가능하게 한다. 실제 사업 대상유역에 대하여 본 모형을 적용한 결과 기존의 점수평가법에 따른 사업 시행과는 확연히 다른 개량 순서가 결정되어지며 그 결과 하수처리비용의 절감

효과가 분명한 것으로 나타났다. 또한 불광배수구역은 전체 16개 배수분구로 구성되며 난지하수처리장에서 오수가 처리되어진다. 본 연구에서 적용된 유역은 이중 4개 배수분구로 본 모형을 16개 전체 배수분구에 확대 적용한다면 보다 더 큰 하수처리비용의 절감 효과를 얻을 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서 개발된 모형은 의사결정자로 하여금 전체 사업을 시행함에 있어서 효율성을 고려한 시행 계획을 수립하는데 도움을 줄 수 있다.

아울러 본 연구와 관련하여 지속적인 관거자료 구축을 통한 관거 노후화에 대한 장기 예측에 관한 연구가 필요하며 또한 관거 시스템의 유지관리 및 장기적인 개량 모형에 대하여 추후 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문 또는 저서는 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00885)

참 고 문 헌

구리시 (2001). 구리시 하수도정비 기본계획보고서.
 구리시 (2002). 한강수계 하수관거정비 시범사업 타당성조사보고서.
 서울특별시 (1998). 하수관거조사 및 정비 기본설 계보고서(불광배수구역).
 이정호, 김중훈, 김형수, 김응석, 조덕준 (2004). “최 적 도시유출시스템의 개발 : I. 도시유출시스템 에서의 AHP를 고려한 불명수량 산정에 대한 연

- 구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 37권, 제3호, pp. 195-206.
- 이정호, 김중훈, 김형수, 조덕준, 김응석 (2004). “최적 도시유출시스템의 개발 : II. 도시구역의 최적 유출시스템 제어를 위한 의사결정모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제3호, pp. 207-217.
- Abraham, D.M., Gillani, S.A. (1999). “Innovations in Material for Sewer System Rehabilitation.” *Trenchless Technology Research*, Vol 14, No. 1, pp. 43-56.
- Brousseau, E (1997). “Trenchless Sewer Rehabilitation vs. Reconstruction. DM Robichaud Associates” Ltd. <http://www.dnrobichaud.com/rehabchoices.htm>.
- 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.
- Chae, M.J. and Abraham, D.M. (2001) “Neuro-Fuzzy Approaches for Sanitary Sewer Pipeline Condition Assessment.” *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 4-14.
- 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
- Hoffman, M. (2000). “New Developments in Pipeline Rehabilitation Technology.” *Environmental and Pipeline Engineering 2000*, pp. 348-357.
- Lin, Z.C. and Yang, C.B. (1996). “Evaluation of machine selection by the AHP method.” *Journal of materials Processing Technology*, Vol. 57, No. 3, pp. 253-258.
- Moselhi, O. and Tariq, S.E. (2000). “Classification of Defects in Sewer Pipes using Neural Networks.” *Journal of Infrastructure System*, Vol. 6, No. 3, pp. 97-104.
- Reyna, S.M., Vanegas, J.A. and Khan, A.H. (1994). “Construction Technologies for Sewer Rehabilitation.” *Journal of Construction Engineering and management*, Vol. 120, No. 3, pp. 467-487.
- Thomas, L.S. (1990). “How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process.” *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 9-16.
- Thomas, L.S. (1994). “Highlights and critical points in the theory and application of the analytical hierarchy process.” *European Journal of Operational Research*, Vol. 74, No. 3, pp. 426-447.
- 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.

(논문번호:07-112/접수:2007.10.22/심사완료:2007.12.28)