

PROMETHEE를 이용한 도시 하수관거시스템 침수위험순위 평가

Evaluation of Inundation Risk Ranking for Urban Sewer Systems using PROMETHEE

송양호, 이정호
국립한밭대학교 건설환경공학과

Yang-Ho Song(s6460@nate.com), Jung-Ho Lee(leejh@hanbat.ac.kr)

요약

본 연구에서는 도시 하수관거시스템의 침수위험순위 평가를 위하여 엔트로피(Entropy) 기법 및 다기준 의사결정기법의 하나인 프로메티(Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations, PROMETHEE)를 적용하였다. 엔트로피와 프로메티를 이용한 침수위험순위 산정에 있어서 평가 대상이 되는 항목들은 두 가지의 접근방식으로 선정되었다. 먼저 침수발생 및 피해 규모에 영향을 미치는 인자로 지형·환경적 요인으로써 지역의 평균고도, 평균경사, 유역폭, 인구수 및 관밀도를 선정하였다. 또한 각 시스템별 침수가 가장 크게 발생하는 초과강우사상을 선정 및 적용하여 시스템내 월류발생량 및 발생지점 두 가지를 이용한 치수안전성 지수를 추가적으로 고려하였다. 본 논문에서 적용된 엔트로피기법과 프로메티에 의한 도시 하수관거시스템 침수위험순위 평가는 추후 하수관거 정비사업의 계획 및 추진에 있어서 각 시스템별 위험도에 따른 개량우선순위 결정 및 평가지표로서 활용될 수 있을 것이다.

■ 중심어 : | 하수관거시스템 | 침수위험순위 | 프로메티 | 엔트로피 |

Abstract

In this study, Entropy method and PROMETHEE(Preference Ranking organization METHod for Enrichment Evaluations) which is one of the multi criteria decision making methods are applied to estimate the relative inundation risk ranking of the urban sewer systems. Then, the evaluation factors were selected considering two main items to estimate the inundation risk using Entropy and PROMETHEE. In the first item considering topographical and environmental factor, average elevation, average slope, width of area, population, density of conduit were selected as the detailed factors of first item which have influence of the overflow occurrence and damage scale in urban sewer system. And, the relative reliability of sewer network was considered as the second item which can quantify the inundation appearance. Then, the reliability is estimated considering the number of overflow nodes and overflow volume simultaneously. Therefore, the suggested inundation risk evaluation method can be used as the evaluation index for sewer networks and contribute to decision making for the sewer rehabilitation policy.

■ keyword : | Sewer System | Inundation Risk Ranking | PROMETHEE | Entropy |

* "이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20100026519)."

접수번호 : #120627-003

심사완료일 : 2012년 08월 20일

접수일자 : 2012년 06월 27일

교신저자 : 이정호, e-mail : leejh@hanbat.ac.kr

I. 서론

최근 기후변화로 인하여 도시유역의 극지성 집중호우가 빈번히 발생하고 있다. 또한 집중호우 발생시 도시화에 따른 불투수면적의 증가 및 도달시간의 감소 등으로 인하여 내수침수의 빈번한 발생과 이로 인한 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 따라서 이러한 피해를 저감하고 적절한 대책을 세우기 위해서는 명확한 기준에 따른 지역별 침수위험도의 산정이 필요하다[1].

자연유역과 달리 인구나 시설물이 밀집해 있는 도시 지역은 특성상 침수 발생시 많은 피해를 입을 수 있는 잠재력을 내포하고 있다. 따라서 도시지역에서 침수발생은 단일 침수유발인자에 의한 발생보다는 다양한 인자가 복합적으로 상호 작용하여 발생된다고 볼 수 있으며, 차원이 서로 다른 인자를 비교 및 분석하여 침수위험성 평가방법이 필요하다[2]. 이정호 등(2011)[1]은 이러한 여러 인자들의 복합적인 고려를 통해 하나의 정량화된 침수위험도를 산정하기 위하여 퍼지 클러스터 알고리즘의 하나인 Fuzzy C-Means(FCM) 알고리즘을 이용하여 하나의 정량화된 지표로 침수위험도를 산정하였다.

국내의 경우 수자원분야에서 엔트로피 기법과 프로메티와 같은 다기준의사결정기법을 이용한 도시 하수관거시스템의 침수위험평가와 관련된 연구가 활발히 이루어져왔다. 먼저 최순철(2003)[3]은 도시지역의 침수원인 및 경향분석에 관한 연구를 실시하였으며, 이때 주된 침수발생의 원인을 저지대, 지반이 평탄하거나 우수의 신속한 배수가 곤란한 지역으로 규정하였다. 황유정(2006)[4]은 DEM을 기초로 유역의 고도와 경사경도와 같은 지형정보와 홍수흔적조사를 통한 홍수에 의한 침수지역예측을 실시하였으며, 추태호와 이승관(2006)[5]은 엔트로피 기법을 이용하여 효과적인 유량 측정 및 분석방법을 제시하고, 실측자료를 이용하여 신뢰성과 적용성을 검증하였다. 또한 박무종 등(2008)[6]은 유사발생량과 침수위험도 간의 관계 분석 및 GIS를 이용한 침수위험도 관계 분석을 통해 유사지도 제시에 따른 실제 침수피해 발생지역과 비교하였으며, 박무종과 최성욱(2008)[7]이 침수발생에 영향을 미치는 5가지

의 인자를 평가항목으로 선정하고 다기준 의사결정 기법인 프로메티를 적용하여 산정된 소유역간 상대적 침수위험도를 과거 실제 침수실적 결과와 유사발생에 따른 상대적 침수위험도와 비교 분석하였다. 또한 송양호와 이정호(2012)[8]는 소유역별 내수침수 위험에 기인하는 자연적요인과 사회적으로인을 평가항목으로 선정하고 다기준의사결정기법을 이용하여 소유역별 침수 위험등급 평가를 실시하였다.

국외의 경우 도심지의 침수위험과 관련된 연구들은 GIS를 기반으로 활발히 이루어져왔다.

먼저 Jian 등(2009)[14]은 강우강도와 강우지속기간, 토양 조건, 토양의 최소습윤 상태 및 하수관망시스템의 배수능력을 가지고 GIS기반의 도시 홍수범람모형에 관한 연구를 실시하였으며, Huaixiang 등(2011)[15]은 도시의 DEM 파일을 토대로 홍수발생에 따른 도심지의 침수공간 분석을 실시하였으며, 홍수에 따른 침수 범위에 대한 경제적 손실을 추정하는 모델을 개발하였다. 또한 Jochen과 Brett(2012)[16]은 홍수와 비슷한 조건의 불안정한 다차원적 흐름을 실제 도시유역에 적용함으로써 홍수의 확산범위, 홍수의 흐름방향 및 특성을 분석함으로써 불규칙적인 홍수의 양상을 예측하였다.

하지만 먼저 나열한 송양호와 이정호(2012)[8]를 비롯한 기존의 국내 연구들은 침수에 영향을 미치는 주요 인자들만을 고려했을뿐, 실제 침수현상에 따른 수리·수문학적 월류발생현상(규모)을 고려한 연구는 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 하수관거시스템의 침수위험순위의 평가를 위한 항목을 두 가지의 접근방식으로 선정하였다. 먼저 하나는 침수발생에 직접적인 영향을 미치는 인자로 지형·환경적 요인에 크게 지배되는 유역의 평균고도, 평균경사, 유역폭, 인구수 및 관밀도를 선정하였다. 다른 하나는 초과강우사상의 적용에 따른 시스템 내 월류발생량과 월류발생지점의 개수를 고려한 치수안전성 지수이다.

치수안전성과 관련하여 일반적인 현재까지의 연구들은 대부분 하수관거시스템에 있어서 산정식의 선정, 매개변수의 선정, 변동성 분석 방법 등과 같이 불확실성 분석에 기반하여 시스템의 파괴 확률만 고려할 뿐 파괴에 따른 현상에 대해서는 고려하지 않았다[9]. 이때, 파

피라 함은 하수관망의 근본적인 기능을 수행하지 못하는 상황을 의미하며, 하수관거시스템의 파괴는 결국 월류의 발생을 의미한다. 하수관거시스템에서 월류의 발생은 두 가지 측면에서 고려되어야 한다. 이 두 가지 고려되어야 할 사항이 먼저 제시한 시스템 내 월류발생량과 월류발생지점의 개수가 되는 것이다. 즉 도시 하수관거시스템에서의 월류 발생시 발생량 또한 중요하지만 어느 지점에서 얼마만큼의 월류가 발생하였는가 역시 중요하기 때문이다. 하지만 이들 인자들은 정량적 가치 척도가 다르기 때문에 복합적인 고려가 어렵다는 문제점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 이들 각 인자들의 복합적 고려를 통해 하나의 정량화된 치수안전성 지수를 산정하기 위하여 거리척도방법(Distance Measure Method, DMM)을 이용하였다. 본 연구에서의 DMM은 파괴현상이 일어나지 않는 하수관망 설계시의 치수안전성 지수와 초과강우사상의 적용에 따른 시스템 내 월류발생으로 인한 치수안전성 지수간의 처리 차로써 이를 통한 하수관거시스템의 침수위험순위 결정에 있어 무차원적 정량화된 평가항목으로 적용이 가능하다.

본 연구에서는 도시 하수관망시스템의 침수위험 평가에 따른 위험순위 결정 및 지표를 마련하고자 엔트로피 기법 및 프로메티의 적용을 통한 방법론 및 절차를 수립하였다. 하수관망시스템의 침수위험을 평가하기 위한 항목별 가중치 산정은 엔트로피(Entropy) 기법을 적용함으로써 산정 과정에서 평가자의 주관이 개입될 여지를 배제하였으며, 가중치 적용에 따른 침수위험 평가를 위한 방법으로는 다기준의사결정 기법의 하나인 프로메티(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations, PROMETHEE)를 적용함으로써 도시 하수관망시스템의 침수위험 평가기법을 제시하였다. 또한 본 논문에서는 제안한 도시 하수관망시스템 위험순위 평가기법의 타당성 검증에 위해 서울시의 239개의 배수분구중 과거 집중호우에 따른 침수이력을 갖는 유역에 해당하는 가락, 공릉1, 성내 및 하계 배수분구 4곳을 대표적으로 선정 및 적용하였으며, 적용한 전체 4개 배수분구에 대한 각각의 가중치와 침수위험순위를 산정하였다. 다음의 [그림 1]은 본 연구에서

의 도시 하수관망시스템 위험순위 평가 절차를 나타내고 있다.

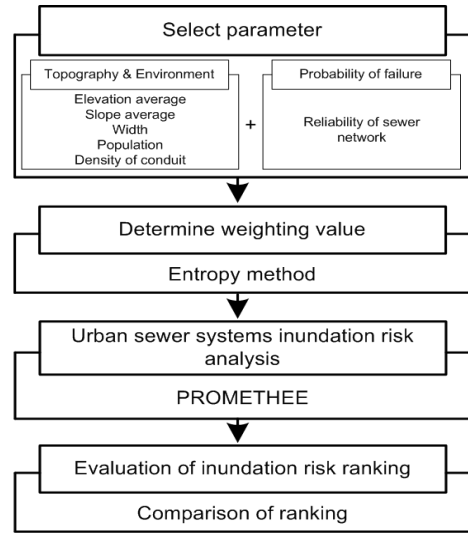


그림 1. 침수위험순위 평가절차

II. 연구 방법

1. 엔트로피 기법의 정의

엔트로피 방법은 수, 신호 또는 기호들로 구성된 통신신호를 분석하는 정보이론(information theory)에서 출처를 살펴볼 수 있다. 일반적으로 엔트로피는 무질서 또는 불확실성의 척도라 알려져 있으나, 정보이론에서는 엔트로피를 특정신호가 가지고 있는 정보용량으로 정의하고 있으며, 통계적인 해석이 가능한 모든 무작위 변량에 대해 엔트로피를 계산할 수 있고 어떤 정보에 대해 객관적으로 평가할 수 있는 기준으로 활용이 가능하다고 알려져 있다[17]. 즉, 신호가 보내짐으로써 정보 교환이 이루어지고, 신호자체가 가지고 있는 정보의 양이 많아서, 그 자체가 가지고 있는 불확실성을 감소시킬 정도로 많아지면 불확실성의 감소 정도에 따른 간접적인 정보의 양을 측정할 수 있다. 즉, 엔트로피는 어떠한 체계 내에서 그 신호에 대한 정보를 수치로 나타내는 것이다. 따라서 엔트로피가 크다는 것은 그 지점에

서의 불확실성의 감소정도가 크다는 말이고, 같은 구역 내에서 받아지는 동일 신호에 대해 정보의 양이 많았다는 것을 뜻한다.

엔트로피 기법은 의사결정자의 주관적 판단에 의존하지 않고 구성된 의사결정문제의 데이터에 의해서만 가중치를 계산할 수 있는 객관성이 검증되었으므로, 본 연구에서는 도시 하수관망시스템의 침수위험순위 평가에 해당하는 각각의 항목별 가중치 산정에 있어 엔트로피 기법을 적용하였다.

엔트로피방법은 대안-속성 행렬로부터 가중치 벡터를 추정해내는데, 이 행렬은 엔트로피 관점에서 기준들 간의 가중치 추정의 정보를 담고 있다. 즉 대안들 간의 차이가 큰 기준은 중요한 기준이고 대안들 간의 차이가 적은 기준은 덜 중요한 기준이다. 여기서 의사결정 문제는 식 (1)과 같이 D라는 행렬로 나타낼 수 있으며, 모든 속성에 대해서 정규화 한 결과를 p_{ij} 라고 하면, p_{ij} 는 식 (2)와 같이 표시된다. 또한 각 속성의 엔트로피를 E_j 라고 하면, 엔트로피는 식 (3)으로 산정할 수 있다.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \log p_{ij} \quad (\text{Here, } k = \frac{1}{\log m}; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

속성의 가중치를 구하기 위하여 다양성정도 d_j 를 사용하는데, 다양성 정도는 $d_j = 1 - E_j$ 와 같이 계산되며, 이 값들은 각 속성에 대하여 정규화한 것이 그 속성의 가중치(w_j)가 된다.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

2. PROMETHEE의 정의

프로메티는 평가기준별 선호함수와 선호유출량 및 유입량을 이용하여 대안들의 순위선호를 도출하는 방법으로 Brans와 Vincke(1985)[18]에 의해 구체화 되었다. 프로메티의 적용과정은 다음의 [그림 2]와 같다. 다음의 식 (5)의 선호지수($\pi(a, b)$)를 계산하기 위해서는 평가기준별 가중치를 결정해야 하며, 결정시 주관적 경향이 크게 작용할 수 있으므로 합리적인 방법의 가중치 결정과정이 필요하다. 선호지수($\pi(a, b)$)는 평가기준별 선호함수($p_h(a, b)$)의 합을 평균한 값으로 나타낸다. 여기서 $p_h(a, b)$ 는 평가기준 H의 선호함수 값을 의미한다. 평가기준 H에서 평가기준의 값의 차이를 x_h 라 할 때, 선호함수는 식 6과 같이 표현 할 수 있다.

$$\pi(a, b) = \frac{1}{k} \sum_{h=1}^k p_h(a, b) \quad (5)$$

$$H = \begin{cases} P(a, b), & x \geq 0 \\ P(b, a), & x \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

식 6에서 평가기준 H하에서 대안 a와 b의 평가기준 값의 차가 0보다 클 경우, 대안 a는 대안 b보다 선호된다고 나타낸다. 평가기준 H하에서 대안 a와 b의 평가기준 값의 차가 0보다 작을 경우 대안 b는 대안 a보다 선호된다고 나타낸다. PROMETHEE에서 일반적으로 적용되고 있는 선호함수와 선호임계치는 6가지로 구분되며 [표 1]과 같다.

프로메티는 순위선호체계를 기반으로 대안들의 부분적인 우선순위를 결정하고, 식 (7)에 의하여 계산된 순흐름량(net flow, $\phi(a)$)를 이용하여 전체의 우선순위(total preorder)를 구한다.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(b) \quad (7)$$

표 1. 선호함수와 선호임계치[10]

Types	Preference functions	Range of the parameter
Types-I (1 usual)	$H(x_j)=\begin{cases} 0, & x_j \leq 0 \\ 1, & x_j \geq 0 \end{cases}$	N / A
Types-II (U-shape)	$H(x_j)=\begin{cases} 0, & x_j \leq l \\ 1, & x_j \geq l \end{cases}$	$l > 0$
Types-III (V-shape)	$H(x_j)=\begin{cases} x/m, & x_j \leq m \\ 1, & x_j \geq m \end{cases}$	$m > 0$
Types-IV (Discrete)	$H(x_j)=\begin{cases} 0, & x_j \leq s \\ 1/2, & q < x_j \leq q+p \\ 1, & x_j > q+p \end{cases}$	$q > 0, p > 0$
Types-V (Linear)	$H(x_j)=\begin{cases} 0, & x_j \leq s \\ (x-s)/r, & s < x_j \leq s+r \\ 1, & x_j > s+r \end{cases}$	$s > 0, r > 0$
Types-VI (Gaussian)	$H(x_j)=\begin{cases} 0, & x_j \leq 0 \\ 1 - e^{-x_j^2/2\sigma^2}, & x_j \geq 0 \end{cases}$	$\sigma > 0$

프로메타에 의한 평가는 선호의 유입·유출량에 따른 순흐름량을 계산을 통해 순위의 선호관계를 결정하게 된다. 여기서 선호유출량($\emptyset^+(a)$)은 다른 대안들을 선호 혹은 지배하는 정도를 나타내는 수치로 정의되며, $\emptyset^+(a)$ 가 클수록 대안 a가 나머지 비교대안들 보다 선호된다는 것을 의미한다. 선호유입량 ($\emptyset^-(a)$)은 선호유출량과 상반되고, $\emptyset^-(a)$ 가 클수록 대안 a가 나머지 비교대안들보다 선호되지 않는 것을 의미한다.

3. 치수안전성 지수 산정을 위한 거리척도방법 (DMM)의 정의

본 연구에서는 도시 하수관거시스템의 치수안전성 지수를 산정하기 위한 두 가지 평가요소로서 월류발생량 및 발생지점의 개수를 선택하였다. 또한 각기 차원이 다른 이 두 가지 요소에 대한 종합적인 평가를 위하여 MCDM(Multi Criteria Decision Making) 방법들 중 하나인 거리척도방법을 이용하였다. 다음의 [그림 2]는 DMM을 이용한 치수안전성 지수의 산정 개념을 나타내고 있다.

이때, 본 연구에서의 시스템을 평가하기 위하여 고려해야할 기준이 Z_1, Z_2 두 가지이며 두 기준 모두 최대로 만족시켰을 때의 값이 각각 1이라고 하면 점 A는 두 기

준을 모두 최대로 만족시키므로 먼저 언급한 파괴현상이 발생하지 않는 이상점(utopian point)이 되며, 점 B는 시스템에서 파괴가 일어난 현 상태를 나타내는 현재 점이 된다. 본 연구에서 이 개념을 도입한 DMM에서는 위의 [그림 2]에 나타나 있는 거리인 a, b, c 그리고 d를 이용하여 서로 다른 기준인 Z_1 과 Z_2 에 대하여 시스템의 현재 상태에 대한 지수를 산정하게 된다. 거리척도는 각각의 기준이 특정한 상황에 있을 때를 나타내는 점과 모든 조건을 만족시키는 점과의 거리를 의미하며, 일반적으로 많이 쓰이는 거리척도로는 다음과 같은 세 가지가 있다.

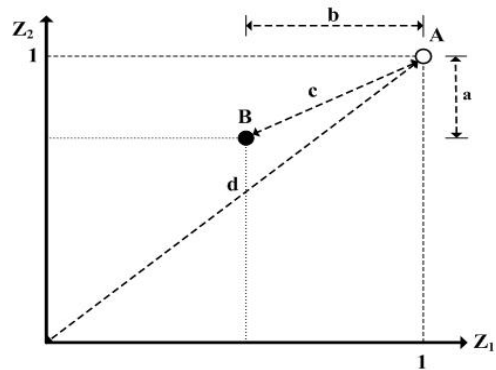


그림 2. Distance measure method

Eclidean distance : $c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$ (8)

City distance(rectangle distance) : $a + b$ (9)

Tchebycheff distance : $Max(a, b)$ (10)

본 연구에서는 거치척도방법을 이용함에 있어서 euclidean distance에 의하여 하수관거시스템 평가 분석에 따른 치수안전성 지수를 산정하였다.

III. 침수위험순위 평가

1. 적용대상 선정

본 연구에서는 프로메티를 이용한 도시 하수관거시스템 침수위험순위를 평가하기 위해 서울시의 기존 처리구역 및 배수구역 현황을 조사하여 전체 16개 배수구역의 239개의 배수분구 중 과거 집중호우에 따른 침수이력을 갖는 유역에 해당하는 2개 배수구역의 가락, 공릉1, 성내 및 하계배수분구 4곳을 대표적으로 선정하였다. 적용면적은 전체 323.13 ha이며, 인구수는 2011년 발표된 통계청 자료를 바탕으로 하였다. 적용한 배수분구의 현황은 국가통계포털(www.kosis.kr/)[11]과 서울시 하수도정비기본계획(변경)보고서[12]을 참고하였으며 다음의 [표 2]와 같다.

2. 평가기준별 가중치 산정

이정호 등(2011)[1]은 도시유역내 소유역간의 침수위험도를 산정하고자 5가지 단일인자(지표고, 경사, 관밀도, 인구밀도, 단위면적당 유사발생량)들을 고려하였으며, 이때 고려한 5가지 인자들의 정량적 가치가 서로 다르기 때문에 복합적인 고려를 위해 Fuzzy C-means (FCM)을 적용함으로써 유역별 침수위험도에 의한 평가의 타당성을 주장하였다. 그러나 클러스터링 기법의 경우 초기에 연구자의 주관에 따른 클러스터의 개수와 소속 함수를 결정함에 따라 각각의 인자별 요소의 특성을 나타내는 소속값이 달라지는 문제점을 지니고 있다. 이와 더불어 평가기준별 가중치를 결정함에 있어 대표적인 기법인 계층분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP) 역시 평가기준에 대한 조사 집단의 구성이 달라짐에 따라 상이한 결과가 도출될 수 있으며, 이 과정에서 평가자의 주관에 개입될 여지가 있다. 이처럼 주관성 개입에 따른 문제점을 최대한 배제하고 도시 하수관거시스템의 자체 조사자료 기반의 가중치 산정을 위해서는 보다 객관성이 검증된 엔트로피 기법이 적합하다고 판단되었다.

본 연구에서는 도시 하수관거시스템의 침수위험순위 평가를 위한 항목을 두 가지의 접근방식으로 선정하였다. 먼저 하나는 침수발생에 직접적인 영향을 미치는 인자로 지형·환경적 요인에 크게 지배되는 유역의 평균 고도, 평균경사, 유역폭, 인구수 및 관밀도를 선정하였다.

표 2. 적용 배수분구 현황[11][12]

배수분구명	전체면적 (ha)	적용면적 (ha)	대상 행정구역		인구합계 (∑ 인구)	적용인구 (면적비)	비 고
			(동)	(인구)			
가락	539.44	22.67	가락 분동	30,012	81,726	3,435	
			가락 1동	15,442			
			가락 2동	36,272			
공릉1	163.56	44.02	공릉 1,3동	40,813	40,813	10,984	
성내	95.34	95.34	성내 1동	20,624	47,965	78,965	단일수계
			성내 2동	27,341			
하계	505.08	161.1	하계 1,2동	30,960	99,610	31,772	
			중계 2동	26,054			
			중계 3동	42,596			
합계	1303.42	323.13			270,114	94,155	

이때, 평균고도는 고도의 높낮이에 따라 침수의 위험로부터 상대적으로 안전하다 볼 수 있으며, 평균경사는 수문학적 대표적인 요인으로써 하류쪽의 저지대의 유출변화에 큰 영향을 끼침과 동시에 경사의 차이에 따라 배수능력이 달라진다고 판단된다. 또한 유역폭의 경우에는 좁은 도심지역의 특성상 집중시간과 직접적으로 연관되며 유역의 지체효과를 결정하는 주요인자가 된다. 관거의 밀도는 유로연장을 포함한 소유역 대비 관거의 비율로써 관거의 밀도가 밀집된 지역은 우수의 배제가 원활하게 이루어지므로 배수계통에 있어 중요한 인자로 판단된다. 인구수의 경우 일반적으로 시설물이 밀집된 지역은 유동인구가 많으며, 사람이 밀집되어 있어 이러한 특성을 반영해 유역에 침수가 발생한다면 인구수가 적은 지역에 대해 상대적으로 많은 피해가 발생되어 침수위험순위 평가에 있어 중요한 인자로 작용한다고 판단된다.

본 연구에서의 침수위험순위 평가를 위한 다른 하나는 초과강우사상의 적용에 따른 시스템 내 월류발생량과 월류발생지점의 개수를 고려한 치수안전성 지수이다. 이는 강우의 예를 들어 도시지역의 경우 유역면적을 소유역 단위로 산정하기 때문에 공간분포에 따른 강우의 고려가 불분명하다고 볼 수 있다. 또한 강우를 적용시 빈도와 지속기간의 임계점을 얼마만큼 고려할 것인가와 같은 범위가 사실상 주된 문제점이라 할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 도시 하수관거시스템에 초과강우사상을 적용시 발생하는 월류의 문제는 당연히 직면하는 문제로 판단하고, 이정호 등(2012)[9]이 제안한 치수안전성 지수를 산정하여 이를 평가항목으로 선정하였다. 치수안전성 지수는 하수관거시스템의 파괴 현상에 대한 모의를 통하여 그 현상에 대한 평가를 정량적으로 나타낼 수 있는 새로운 산정방법으로써 이때 고려 대상은 초과강우사상 발생 시 해당 시스템에서의 월류발생량과 월류발생지점의 개수라 할 수 있다. 이는 도시 하수관거시스템에서의 월류 발생시 발생량 또한 중요하지만 어느 지점에서 얼마만큼의 월류가 발생하였는가 역시 중요하기 때문이다. 이때 고려 대상이 되는 월류발생량 및 월류발생지점의 개수가 서로 다른 척도를 갖는 인자이므로 이에 대한 종합적인 고려를 위해

다기준의사결정 기법 중 하나인 DMM을 이용한 것이다. 본 연구에서 고려한 치수안전성 지수의 산정 절차는 [표 3]과 같다.

본 연구에서는 적용하고자 하는 4개 배수분구의 시스템 파괴 현상을 일으키는 초과강우를 선정하기 위하여 서울시 과거 강우자료를 통한 Huff 4분위, 지속기간 60, 90, 120, 150, 180 및 360분을 적용하여 각각의 시스템별 임계지속기간을 선정하였으며, 이에 따라 산정된 치수안전성 지수는 다음의 [표 4]에 나타내었다. 이때 월류 발생 현상의 모의는 대표적 도시유출 해석 모형인 SWMM(Storm Water Management Model)을 이용하였다. 이상의 치수안전성 지수를 비롯한 전체 6개 평가기준 항목의 시스템별 특성에 따른 가중치 산정결과 관 밀도가 차지하는 비율이 가장 크게 산정되었으며, 나머지 5가지 항목들을 포함하여 하나의 값에 편중되지 않는 결과가 나타났다. 배수분구별 평가항목의 특성 및 가중치 산정 결과는 다음의 [표 5]와 같다.

표 3. 치수안전성 지수 산정 절차[8]

적용 단계	산정 절차
step_1	30~100년 사이의 다수의 초과 빈도 산정 및 적용
step_2	초과빈도별 월류발생량 및 월류발생지점 개수 산정
step_3	빈도별 월류발생량 비율(V_i) 및 월류발생지점 비율(N_i) 산정 $V_i = \left(\frac{V_o}{V_T}\right) \left(\frac{R_{max}}{R}\right) \quad N_i = \left(\frac{N_o}{N_T}\right) \left(\frac{R_{max}}{R}\right)$ <p>여기서, 월류발생량 비율은 적용된 강우량당 유역의 전체 유출량 대비 월류발생량을 나타낸다. 또한 월류발생지점의 비율은 적용된 강우량당 해당 관망의 전체 지점 수 대비 월류발생지점 개수를 나타낸다. 또한 R은 재현기간 별 강우량, R_{max}는 적용 강우빈도 중 최대 강우량 값을 나타낸다.</p>
step_4	중심점(central point) 산정
step_5	중심점(central point)에 대하여 DMM을 이용한 치수안전성 지수 산정 Reliability of Sewer Networks $= 1 - \frac{\sqrt{(1 - N_i)^2 + (1 - V_i)^2}}{\sqrt{2}}$

표 4. 배수분구별 치수안전성 지수

배수분구명	강우 지속 기간	재현 기간	강우량 (mm)	Overflow Node (N _o) (개)	Overflow Volume (V _o) (m ³)	Total Node Number (N _T) (개)	Total Volume (V _T) (m ³)	N _i	V _i	Central point		Reliability of Sewer Network
										N _i	V _i	
가락	90분	30년	116.57	53	1,844c	140	24,024c	0.4605	0.0934	0.5205	0.1363	0.3014
		50년	127.29	65	2,937c		25,479c	0.5164	0.1282			
		70년	134.28	74	3,637c		26,361c	0.5576	0.1455			
		80년	137.03	73	3,937c		26,694c	0.5392	0.1525			
		100년	141.66	74	4,405c		27,247c	0.5286	0.1617			
공릉1	180분	30년	156.81	87	8,776c	181	55,658c	0.5847	0.1918	0.5870	0.2386	0.3875
		50년	170.99	92	12,043c		58,789c	0.5654	0.2279			
		70년	180.23	100	14,302c		60,677c	0.5828	0.2486			
		80년	183.85	106	15,225c		61,377c	0.6056	0.2565			
		100년	190.04	108	16,784c		62,568c	0.5967	0.2683			
성내	90분	30년	116.57	9	24,934c	26	76,924c	0.4211	0.3943	0.3671	0.4255	0.3956
		50년	127.29	9	30,365c		81,116c	0.3850	0.4164			
		70년	134.28	9	34,408c		83,711c	0.3651	0.4336			
		80년	137.03	8	35,982c		84,731c	0.3182	0.4392			
		100년	141.66	9	38,387c		86,402c	0.3462	0.4443			
하계	360분	30년	201.31	122	65,968c	167	191,848c	0.8887	0.4183	0.8440	0.4735	0.6117
		50년	219.42	128	84,041c		202,139c	0.8526	0.4625			
		70년	231.22	134	95,785c		208,218c	0.8464	0.4853			
		80년	235.85	134	100,662c		210,589c	0.8298	0.4943			
		100년	243.80	134	108,814c		214,542c	0.8024	0.5072			

표 5. 배수분구별 선정항목의 특성 및 가중치 산정 결과

배수분구	평균고도 (m)	평균경사 (%)	유역폭 (m)	인구수 (명)	관밀도 (m ² /m ²)	치수안전성 지수	합계
가락	20.357	0.006	38.062	3435	0.02988	0.3014	
공릉1	21.050	0.008	43.156	10984	0.14590	0.3875	
성내	14.380	0.015	147.308	47965	0.03779	0.3956	
하계	26.786	0.002	107.036	31772	0.01151	0.6117	
가중치 산정결과	0.1467	0.1597	0.1564	0.1685	0.2211	0.1476	1

3. 프로메티 적용에 따른 침수위험순위 평가

도시 하수관거시스템의 침수위험순위를 평가하기 위하여 선정된 6개의 평가항목들은 각각의 선호함수로부터 프로메티의 분석과정을 거쳐 각 배수분구별 상대적 위험순위를 결정하게 된다. 본 연구에서는 프로메티의 선호도의 증감을 용이하게 판별하기 위한 이분형(usual criterion), U형(u-shape criterion), V형(v-shape criterion), 계단형(level criterion), 선형((v-shape with indifference criterion), 가우스형(gaussian criterion)의 6가지 선호함수들 중에서 침수현상을 모의하기에 적합한 V자 형태의 선호함수를 채택하였다. 이것은 침수가 능성이 평가지표가 어느 정도 값 이상으로 커진다고 하

여도 계속적으로 높아지지 않는 특성을 보이기 때문이며 V형 선호함수가 이러한 특성을 가장 잘 나타낸다고 판단되었기 때문이다[7].

V형의 파라미터 설정은 앞서 제시한 식 (6)과 같이 각 평가지표의 최대값과 최소값의 차를 사용함으로써 평가지표 범위내에서 설정되므로, 본 논문에서 선정한 항목의 가중치는 평균고도가 낮을수록, 평균경사가 클수록, 유역폭이 클수록, 인구수가 많을수록, 관밀도는 작을수록, 그리고 치수안전성 지수가 크게 산정될수록 침수위험순위가 높게 산정되었다.

다음의 [표 6]은 평가항목별 가중치를 고려하여 프로메티를 이용한 배수분구별 선호유출량, 선호유입량 및

순흐름량에 따른 결과를 나타를 나타낸다. 산정된 결과를 살펴보면 도시 하수관거시스템의 침수위험순위는 성내, 하계, 가락 그리고 공릉1 배수분구의 순으로 나타나고 있으며, 특히 3, 4순위에 비해 순흐름량이 상대적으로 위험순위가 높게 산정된 강동구의 성내배수분구와 노원구의 하계배수분구의 경우 WAMIS에서 제공하는 행정구역별 침수실적조사에서 다음의 [그림 3]과 같이 침수 이력이 있는 것으로 조사되었다. 특히, 침수위험순위가 가장 높은 성내배수분구의 경우 우수관망 시스템의 취약성에 의해 발생했던 것으로 파악되었다. 또한 다음 순위에 해당하는 하계배수분구의 경우 일부구역이 지형학적 취약성에 의해 인근 배수분구에서의 월류량이 확산되어 침수피해가 발생했던 것으로 추정된다. 반면, 상대적 안전성이 높게 나타난 가락 및 공릉1 배수분구의 경우 본 연구에서 적용지역에 해당하는 배수분구의 침수 이력이 존재하지 않으므로 이상의 조사 내역을 바탕으로 본 연구에서 제안된 도시 하수관거시스템 침수위험순위 평가의 적정성이 검증되었다고 판단된다.

표 6. 프로메티 적용에 따른 순흐름량 산정

배수분구 명	순호 유출량	순호 유입량	순 흐름량	위험 순위
가락	0.056	0.173	-0.116	3
공릉1	0.040	0.222	-0.182	4
성내	0.269	0.027	0.242	1
하계	0.171	0.115	0.056	2

다음의 [그림 4][그림 5]는 [그림 3]과 같이 현재 국가 수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)/[13]에서 제공하는 성내배수분구와 하계배수분구의 과거 실

제 침수 이력 지역을 바탕으로 초과강우사상에 대한 SWMM 모의를 통하여 분석된 주요 월류 발생 지역을 빗금으로 나타내었다.

따라서 본 연구에서 제안한 도시 하수관거시스템 침수위험순위 평가는 다기준의사결정 기법에 의해 산정된 상대적 침수위험순위를 통해 관거의 정비 및 방재정책 수립에 이바지 하고자 한다. 즉, 내수침수 발생에 영향을 미치는 다양한 평가항목을 고려함으로써 배수분구별 상대적 위험도를 평가할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 이는 관련 분야의 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 도시 하수관거시스템의 침수위험순위를 평가하기 위하여 가중치 결정을 위한 엔트로피 기법 및 DMM과 다기준의사결정 기법인 프로메티를 이용한 침수위험순위 평가방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 침수위험순위는 침수발생 및 피해 규모에 직접적으로 영향을 미치는 지형·환경적 인자들과 동시에 초과강우에 따른 우수관망에서의 침수발생 현상 및 상대적 안전성을 고려함으로써 복합적인 인자들을 통한 배수분구별 침수위험도를 정량화하였다. 이때, 인자들의 경우 수집된 자료들을 기반으로 가중치를 산정함으로써 산정과정에서의 객관성을 확보하였다. 또한 침수위험순위 평가에 있어 프로메티의 적용에 따른 각 배수분구별 침수위험순위 평가를 통해 위험의 순위가 크게 산정된 지역에 해당하는 행정구역의 과거 침수실적 및 흔적 조사와 비교함으로써 그 신뢰성이 검증되었다.

한강권역 서울특별시 노원구 침수실적조사

조사	위치	관련하천	발생년도	발생월일	종료월일	호우종류	토지이용
서울특별시 노원구 하계동		-	1998	07월31일	08월18일	-	-

한강권역 서울특별시 강동구 침수실적조사

조사	위치	관련하천	발생년도	발생월일	종료월일	호우종류	토지이용
서울특별시 강동구 풍납동,성내동		한강	1984	09월02일	09월04일	태풍 June	주택지
서울특별시 강동구 성내1동		-	1990	09월09일	09월12일	-	-

그림 3. 행정구역별 침수조사 [13]

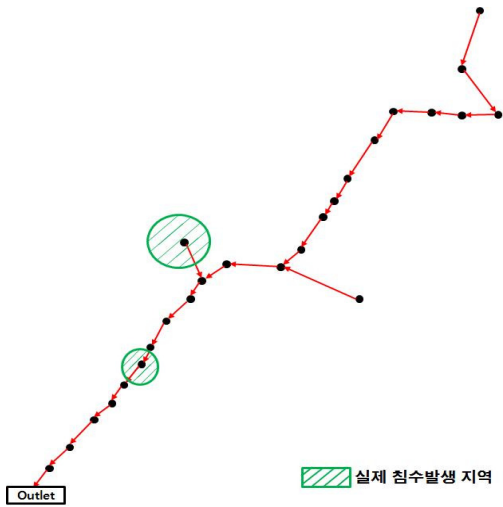


그림 4. 성배내수분구 과거 침수 이력 지역

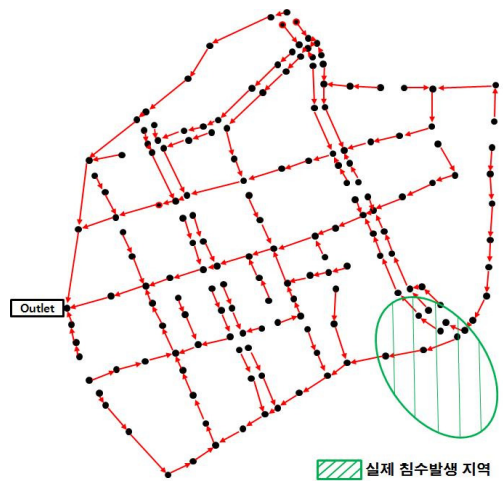


그림 5. 하계배수분구 과거 침수 이력 지역

본 연구에서 제안된 도시 하수관거시스템 침수위험 순위 평가는 빈번히 발생하는 국지성 집중호우에 따른 침수위험도에 대한 다양한 방재관련 대책 수립 및 정비 사업 계획 수립에 도움이 될 것으로 기대된다. 다만 본 연구에서 적용한 6개의 인자 외에도 수리학적 인자 등과 같은 중요인자들을 추가적으로 고려할 경우 배수분구별 대책 수립에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단되므로 추후 침수 발생에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 이정호, 이원우, 김중훈, 전환돈, “Fuzzy C-Means (FCM)를 이용한 도시유역 침수위험도 산정”, 한국방재학회논문집, 제11권, 제4호, pp.229-235, 2011
- [2] 최성욱, *다기준 의사결정 방법을 이용한 침수위험성 분석 기법*, 한서대학교, 대학원, 2009.
- [3] 최순철, *도시지역의 침수원인 및 경향분석*, 서울시립대학교, 대학원, 2003.
- [4] 황유정, “홍수에 의한 침수 취약지역 예측에 관한 연구”, 한국지역지리학회지, 제12권, 제1호, pp.172-178, 2006.
- [5] 추태호, 이승관, “엔트로피 개념에 의한 유량측정 기법”, 한국콘텐츠학회 춘계종합학술대회 논문집, Vol.4, No.1, pp.342-347, 2006.
- [6] 박무종, 전환돈, 신민철, “GIS를 이용한 도시유역의 유사량 산정 및 유사발생과 침수위험도 관계 분석”, 대한토목학회논문집, 제27권, 제3B호, pp.277-287, 2007.
- [7] 박무종, 최성욱, “다기준 의사결정기법을 기반으로 하는 침수위험 평가기법의 개발”, 한국수자원학회논문집, 제41권, 제4호, pp.365-377, 2008.
- [8] 송양호, 이정호, “다기준의사결정기법을 이용한 도시 내수침수 위험도 평가기법”, 한국방재학회 논문집, 제12권, 제2호, pp.209-214, 2012.
- [9] 이정호, 송양호, 류승현, “우수관망 신뢰도 산정 방법의 개발”, 한국수자원학회 학술발표회논문집, p.263, 2012.
- [10] 국립방재연구소, *산지 돌발홍수예측시스템 고도화 및 의사결정지원 시스템 개발*, 제1권, pp.15-37, 2010.
- [11] <http://www.kosis.kr/>
- [12] 서울특별시, *서울특별시 하수도정비기본계획(변경)보고서*, Vol.1, 2009.
- [13] <http://www.wamis.go.kr/>
- [14] Jian Chen, Arleen A. Hill, and D. Lensyl, “A GIS-based model for urban flood inundation,”

Journal of Hydrology Vol.373, pp.184-192, 2009.

- [15] H. X. Liu, Y. J. Lu, and Z. Y. Wang, "Gis Approach Of Inundation Analysis In The Dongjiang(East River) Drainage Area," *Procedia Environmental Sciences*, Vol.12, pp.1063-1070, 2011.
- [16] J. E. Schubert and B. F. Sanders, "Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency," *Advances in Water Resources* Vol.41, pp.49-64, 2012.
- [17] C. E. Shannon and W. Weaver, *The mathematical theory of communication*, The University of Illinois Press, Urbana, Illinois, USA, 1949.
- [18] J. P. Brans and Ph. Vincke, "A preference ranking organization method," *Management Science*, Vol.31, No.6, pp.647-656, 1985.

이 정 호(Jung-Ho Lee)

정회원



- 2001년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과(공학사)
- 2003년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과(공학석사)
- 2008년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과(공학박사)

▪ 2009년 9월 ~ 현재 : 국립한밭대학교 건설환경공학과 조교수

<관심분야> : 수공학, 상하수도공학

저 자 소 개

송 양 호(Yang-Ho Song)

준회원



- 2011년 2월 : 국립한밭대학교 건설환경공학과(공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 국립한밭대학교 건설환경공학과 석사과정

<관심분야> : 수공학, 상하수도공학