

다기준 의사결정기법을 기반으로 하는 침수위험 평가기법의 개발

Development of an Inundation Risk Evaluation Method Based on a Multi Criteria Decision Making

박무종* / 최성욱**

Park, Moo Jong / Choi, Sung Wook

Abstract

In this study, PROMETHEE(Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) which is one of the multi criteria decision making methods is applied to estimate the relative inundation risk of the urban subcatchment. For this purpose, several factors which have an effect on the inundation risk are selected and used to perform PROMETHEE. Those are elevation average, slope average, density of conduit, population and sediment yields per unit area of each subcatchment. Based on them, PROMETHEE is performed and the relative inundation risk for each subcatchment is estimated. For the validation of the suggested method, the results from the suggested method are compared with the historical inundation records occurred on 1998 and the relative inundation risk estimated by the method considering sediment yields per unit area only. From the comparison, it is found that the suggested method may generate better results to estimate the relative inundation risk of each subcatchment than the method considering sediment yields per unit area only. Also, it can be applied to establish a rehabilitation order of subcatchments for mitigating the inundation risk.

keywords : decision making, inundation risk, PROMETHEE, urban subcatchment, GIS

요 지

본 논문에서는 다기준 의사결정 방법의 하나인 PROMETHEE(Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations)를 적용하여 도시유역내 소유역간의 상대적 침수위험도를 산정하였다. 이를 위해 도시유역의 침수에 영향을 미치는 인자를 선정하여 이를 PROMETHEE 적용을 위한 평가기준으로 활용하였다. 침수발생에 영향을 미치는 인자로는 유역의 평균고도, 평균경사, 관밀도, 인구수, 단위면적당 유사발생량으로 선정하였다. 선정된 인자를 바탕으로 PROMETHEE를 적용하여 산정된 소유역간 상대적 침수위험도를 '98년 침수실적 결과와 유사발생에 따른 상대적 침수위험도와 비교 분석하였다. 유사발생량만을 근거로 한 침수위험도에 비해 다양한 인자를 고려하여 산정된 소유역간 침수위험도가 '98년 침수실적 결과와 더 일치하는 것으로 나타났다. 본 논문에서 적용된 PROMETHEE에 의한 평가방법은 침수 예상지역의 사전 예방을 위한 정비 사업 계획 추진에 있어서 우선순위에 대한 방향을 결정하는데 있어서 기초자료가 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 의사결정, 침수위험도, PROMETHEE, 도시유역, 지형정보시스템

* 한서대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Hanseo Univ., Chungnam 356-870. Korea
(e-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)

** 한서대학교 토목공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hanseo Univ., Chungnam 356-870. Korea
(e-mail: eternity0722@naver.com)

1. 서론

전세계적으로 이상기후에 따른 집중호우 및 게릴라성 호우와 같은 기상변화가 자주 발생하고 있다. 또한 집중호우 발생시 급속한 도시개발로 인한 불투수면적 증가와 도달시간 감소 등으로 인해서 도시유역내의 침수가 발생하고 있으며 이러한 도시지역의 침수는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 예를 들어 도시지역 내 침수가 발생하는 지역은 일반적으로 지형적으로 평탄하거나 우수의 신속한 배수가 곤란한 지역, 지반고가 계획홍수위보다 상대적으로 낮은지역이라 할 수 있다(황유정, 2006). 이러한 지형적인 요인 외에도 도시유역 내 홍수에 의한 우수의 배출에 중요한 역할을 하는 하수관거에서 관거 내 유사퇴적은 내배수 시스템의 기능을 저감하고 내수침수를 유발하는 중요한 요인 중의 하나이다(김중훈 등, 2004). 도시지역에서 발생하는 유사는 관내로 유입되어 관거의 통수능을 감소시켜 홍수발생시 내수침수의 가능성을 높인다. 박무중 등(2007)은 이러한 유사에 의한 침수위험증가의 정도를 평가하기 위하여 지형정보시스템(GIS)을 이용, 소유역별 유사량을 산정하고 유사발생량과 침수지역이 직접적인 상관관계가 있음을 확인하였다. 또한, 유사발생 규모가 실측치와 오차가 발생하더라도, 각 소유역별 유사발생 순위는 거의 유사하게 발생함을 주장하였다.

도시지역 침수에 대한 저감대책을 수립하기 위해서는 상습 침수지역의 침수가능성을 낮추기 위한 개량사업의 우선순위에 소유역의 위험도를 평가하기 위한 지역별 지형적, 인문적, 수문특성이 함께 고려될 수 있는 방안이 필요하다. 위험도(risk)는 사전적 의미로 위험이 생기거나 사고가 날 염려가 큰 정도를 의미한다. 위험도와 안전도(safety)는 서로 연관되어 있어, 안전도를 증가시키기 위해서는 위험도를 감소시켜야 한다. 도시유역 내 침수위험도는 수문특성(토지이용특성), 지형특성(유역경사, 유역고도, 관거특성), 인문특성(인구수, 지역의 중요성) 등을 종합하여야 평가가 가능하다. 따라서 도시유역의 침수위험도 평가를 위해서는 다양한 요소의 영향을 평가해야 하며 적용기준이 일정치 않은 요소들 간의 관계를 정량화하기 위해서는 다기준 의사결정기법의 도입이 필수적이다. 본 논문에서는 다기준 의사결정기법중의 하나인 PROMETHEE를 이용하여 다양한 인자가 기여하는 소유역별 침수위험도를 산정하기 위한 방법을 제시하고자 한다. PROMETHEE를 활용한 토목분야는 특정 시설의 부지선정(Mlaineo *et al.*, 1987, Chou *et al.*, 2007)이나 도로건설을 위한 노선결정(Mladineo *et al.*, 1992)등과 같은 분야에 주로 적용되어

왔다. 그러나 본 연구에서는 PROMETHEE의 새로운 활용방안으로 소유역별 상대적 침수위험도 산정에 이를 적용하였다. 이를 위하여 이론적인 PROMETHEE의 적용과정에 필요한 자료를 수집하고, Excel을 이용하여 단계별로 계산을 실시하였다. PROMETHEE 적용을 위한 평가기준을 유역내의 평균고도, 평균경사, 관밀도, 소유역별 인구수, 단위면적당 유사발생량을 선정하였고, GIS를 이용한 공간분석을 통하여 평가기준별 데이터를 추출하였다. 위 내용을 기반으로 도시소유역별로 상대적 침수위험도를 산정하는 방법을 개발하였다. 제안된 방법을 군자배수분구에 적용하여 해당 유역내 소유역간의 상대적 침수위험도를 산정하고 이를 '98년 침수실적과 유사발생에 의한 도시소유역간의 상대적 침수위험도와 비교 분석하였다.

2. 다기준 의사 결정 방법

2.1 다기준 의사 결정방법의 종류

다기준 의사결정 (Multi-Criteria Decision Making, MCDM)기법은 현실 문제에 대해 여러 기준에 입각해서 대안들에 대한 선호의 순서를 결정하거나 하나의 최적 대안을 선택하는 방법론이다. 다요소 의사결정 분석 (Multi-Attribute Decision Analysis, MADA)은 정성적인 방식으로 공공정책의 수립, 공모 과제의 선정, 협력업체의 선정, 댐 입지의 선정, 유한개의 후보해가 존재하는 댐 운영 문제 등 대안의 수가 적고 다소 불확실성이 큰 문제에 적용되며, MAUT(Keeney and Raiffa, 1976), AHP/ANP(Saaty, 1980; Saaty, 1996), PROMETHEE(Brans and Vincke, 1985), ELECTRE(Roy, 1991)등이 있다. 다목적 계획법(Multiple Objective Programming, MOP)은 열등하지 않은 해 즉, 파레토 최적해(Pareto-Optimal Solution, POS)의 도출을 목적으로 생산 일정 계획, 댐 방류량 결정 문제 등 가능해가 무수히 많으면서 비교적 논란의 여지가 작은 문제에 주로 적용되고 있다(Steuer, 1986). 이러한 다기준 의사결정방법간의 특징을 비교하면 Table 1(경기개발연구원, 2006)과 같다. 이중 PROMETHEE는 적용과정과 이론의 이해가 상대적으로 쉽고 또한, 대안간의 순위선호도를 이용하여 도시유역의 상대적 침수위험도 산정에 적합하여 최종적으로 선정되었다. 수자원분야의 대표적인 PROMETHEE 적용사례로 이재응과 남동성(2007)의 안동다목적댐의 수문학적 안정성 증대방안의 결정에 대한 연구와 홍성준 등(2006)에 의한 상수도관망의 위험요소 평가가 있으나, 침수위험도 평가에 대해서는 적용된 사례가 없다.

Table 1. Comparison of the Multi-Criteria Decision Making

	MAUT	AHP	ELECTRE	PROMETHEE
기본가정	- 추이성, 비교가성, 완전 합리성	- 추이성, 비교가성, 완전 합리성	- 비추이성, 비교불가능성, 제한적 합리성	- 비추이성, 비교불가능성, 제한적 합리성
선호함수 형태	- 수학적 함수형태	- 평가자의 주관적 판단에 의존	- 수학적 함수형태	- 수학적 함수형태
가중치 결정	- 사전연구 및 의견수렴을 통하여 가중치 결정	- 의견수렴을 통한 이원비교 행렬에 기초하여 아이겐벨류 방법을 이용하여 도출	- 사전연구 및 의견수렴을 통하여 가중치 결정	- 사전연구 및 의견수렴을 통하여 가중치 결정
장점	- 수학적으로 정교한 이론 정립 - 간결한 구조 및 명확한 논리 - 정성적 평가항목의 계량화	- 개념적으로 쉽고 적용편리 - 가중치 산정방법의 이론적 기초	- 제한적 합리성을 통한 현실적 접근가능 - 선호 특성치를 의사결정모형에 포함 (Fuzzy 기능) - 기준의 다양한 특성 고려 - 객관적 사실에 근거한 기준값 산출	- 제한적 합리성을 통한 현실적 접근가능 - 선호 특성치를 의사결정모형에 포함 (Fuzzy 기능) - 기준의 다양한 특성 고려 - 객관적 사실에 근거한 기준값 산출 - 개념적으로 쉽고 적용 편리
단점	- 완벽한 합리성에 의한 현실과의 괴리 - 선호의 모호성을 고려하지 않고 이원적 선호관계 가정 - 효용함수 도출의 복잡 (평가항목이 많아질 경우 더욱 복잡) - 효용함수값에 대한 일관성 검증의 어려움	- 부적절한 계층구조 형성 가능 - 고려가능한 대안의 수와 수준의 상세정도가 제한적 - 비교대상(n)의 수가 증가함에 따라 평가횟수(n(n-1)/2) 급증하며 대안 등의 추가 또는 삭제 시 반복 작업 필요	- 가중치 및 선호관계 산정의 주관성 - 최적대안 도출과정이 복잡함	- 가중치 및 선호기준 선정의 주관성

2.2 PROMETHEE의 정의

PROMETHEE는 평가기준별 선호함수와 선호유출량 및 유입량을 이용하여 대안들의 순위선호를 도출하는 방법으로 Brans와 Vincke(1985)에 의해 구체화 되었다. PROMETHEE의 적용과정은 Fig. 1과 같다.

Eq. (1)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 나타난다. 여기서 $p_h(a,b)$ 는 평가기준 h의 선호함수 값을 의미한다.

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

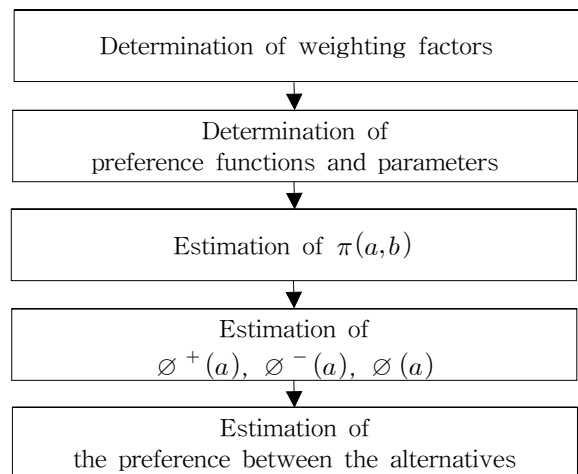


Fig. 1. Procedure to apply PROMETHEE

대안 a, b의 평가기준 값의 차에 대해 의사결정자의 선호 선향을 나타내는 선호함수($p_h(a,b)$)는 Fig. 2와 같이 6개로 정의되며 평가기준 h에서 평가기준 값의 차이

를 x_h 라 할 때, 선호함수는 Eq. (2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$H(x) = \begin{cases} P(a,b), & x \geq 0 \\ P(b,a), & x \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 평가기준 h 하에서 대안 a 와 b 의 평가 기준 값의 차가 0보다 클 경우, 대안 a 는 대안 b 보다 선호된다고 나타낸다. 평가기준 h 하에서 대안 a 와 b 의 평가 기준 값의 차가 0보다 작을 경우 대안 b 는 대안 a 보다 선호된다고 나타낸다. PROMETHEE의 선호함수는 이원비교에 기초하고 있다는 점에서 평가자의 위험 성향을 반영하는 MAUT의 효용함수와 차이가 있다.

PROMETHEE에서는 평가자가 평가기준별 선호함수와 경계치를 결정하게 되면 내부 알고리즘에 의하여 대안들 간의 쌍대비교가 자동적으로 수행되므로 평가자가 직접 이원비교를 수행해야 하는 번거로움이 없어진다. PROMETHEE에 일반적으로 적용되는 선호함수와 선호함계치는 Fig. 2와 Table 2와 같다.

Eq. (3)과 같이 선호유출량($\phi^+(a)$)은 다른 대안들을 선호 혹은 지배하는 정도를 나타내는 수치이며, $\phi^+(a)$ 가 클수록 대안 a 가 나머지 비교대안들 보다 선호된다는 것을 의미한다. Eq. (4)와 같이 선호유입량($\phi^-(a)$)은 선호유출량과 상반되고, $\phi^-(a)$ 이 클수록 대안 a 가

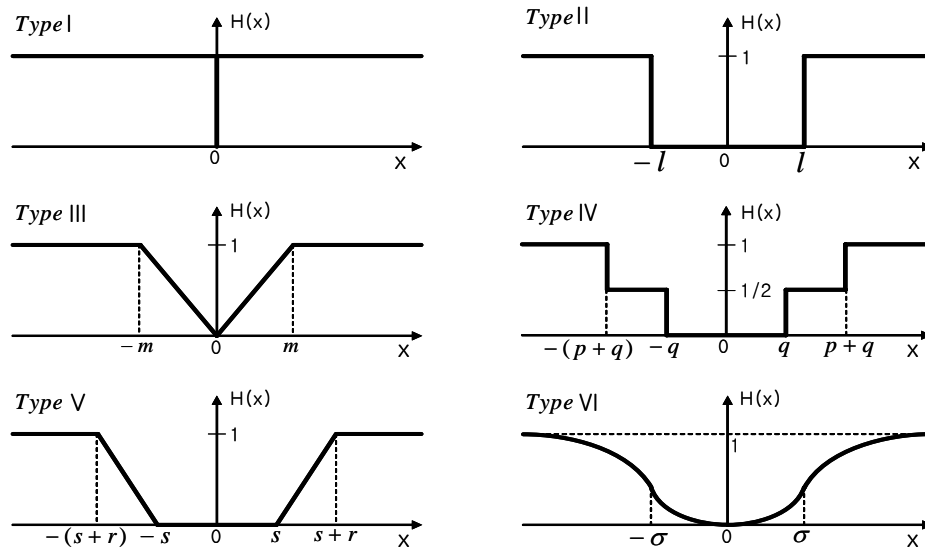


Fig. 2. Six Possible Shapes of Preference Functions

Table 2. Preference Functions and the Range of the Parameters

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

Table 3. Conditions of the Partial Preorder

Type	Condition	Interpretation
aPb	$\phi^+(a) > \phi^+(b)$ and $\phi^-(a) < \phi^-(b)$ $\phi^+(a) > \phi^+(b)$ and $\phi^-(a) = \phi^-(b)$ $\phi^+(a) = \phi^+(b)$ and $\phi^-(a) < \phi^-(b)$	At least, one of the conditions is satisfied, a outranks b
aIb	$\phi^+(a) = \phi^+(b)$ and $\phi^-(a) = \phi^-(b)$	a is indifferent to b
aRb	Neither aPb or aIb	a and b are incomparable

나머지 비교대안들보다 선호되지 않는 것을 의미한다. PROMETHEE에서는 이와 같은 개념을 이용하여 대안들간의 순위선호관계를 나타낸다.

$$\phi^+(a) = \sum_{x \in k} \pi(a, x) \tag{3}$$

$$\phi^-(a) = \sum_{x \in k} \pi(x, a) \tag{4}$$

Eqs. (5a)~(5d)는 선호유출량($\phi^+(a)$)과 선호유입량($\phi^-(a)$)에 의해 표현되는 선호관계 유형이며, Table 3은 선호관계를 기준으로 한 대안 a와 b의 순위선호체계이다.

$$aP^+b \text{ iff } \phi^+(a) > \phi^+(b) \tag{5a}$$

$$aP^-b \text{ iff } \phi^-(a) < \phi^-(b) \tag{5b}$$

$$aI^+b \text{ iff } \phi^+(a) = \phi^+(b) \tag{5c}$$

$$aI^-b \text{ iff } \phi^-(a) = \phi^-(b) \tag{5d}$$

선호의 추이성과 비교대안의 완전한 구분가능성을 가정하지 않아 발생하는 비교 불가능한 관계는 무차별한 관계와는 다른 개념으로써 대안 a의 유출량과 유입량이 각각 0.7과 0.3이고, 대안 b의 유출량과 유입량이 0.5와 0.1인 경우, 유출량 관점에서는 대안 a가 우월하나 유입량 관점에서는 대안 b가 우월하여, 대안 a와 b는 우열을 가리기 힘든 상황에 있음을 말한다. 이러한 비교 불가능성이 의사결정 적용 과정에서 발생하는 원인은 다음과 같이 세 가지로 정리할 수 있다(Roy and Vanderpooten, 1996). 첫째, 의사결정문제에 대한 정보의 부족 및 불확실성으로 인하여 평가자의 판단력이 흐려지기 때문이다. 둘째, 적합한 선호함수가 존재하지 않는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 셋째, 의사결정자의 선호에 대한 인식결여 또는 선호표현의 부정확성 등으로 비교가 불가능할 수 있다.

PROMETHEE I은 순위선호체계를 기반으로 대안

들의 부분적인 우선순위를 결정하고, PROMETHEE II는 Eq. (6)에 의해 계산된 순흐름량(net flow, $\phi(a)$)를 이용하여 전체의 우선순위(total preorder)를 구한다. 본 연구에서는 PROMETHEE II를 적용하였으며 이때, 순흐름량($\phi(a)$)은 대안 a와 대안 b가 비교 불가능한 관계에 놓여졌을 경우를 배제하여 우선순위를 나타낼 수 있다.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \tag{6}$$

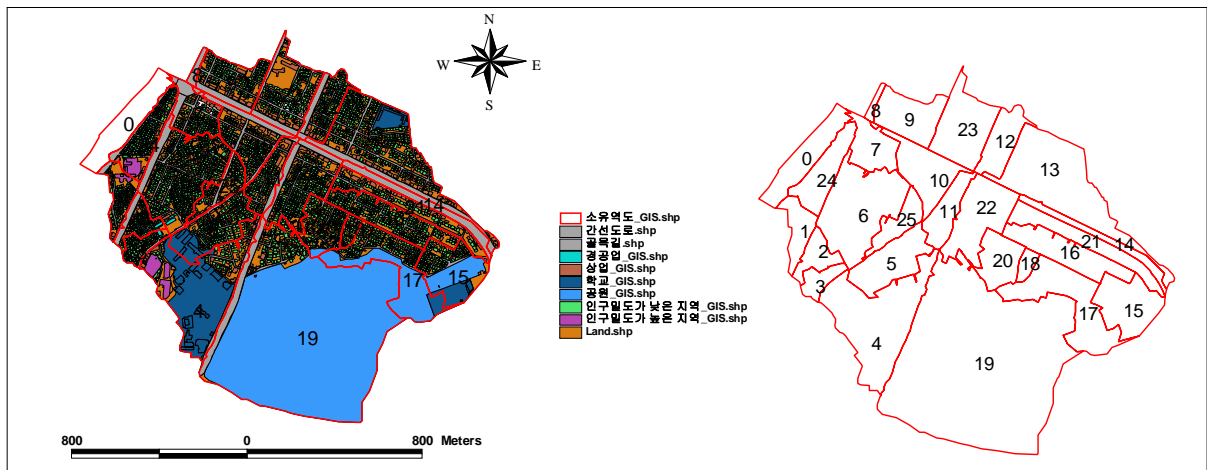
3. 적용대상 유역 및 PROMETHEE 평가를 위한 평가지표 추출

3.1 적용대상 유역

제안된 PROMETHEE를 이용한 침수위험 평가기법을 실제 유역에 적용하기 위해 중랑천 유역중에서 침수가 빈번하게 발생하는 군자배수구역을 선정하였다. 군자배수분구의 유역면적은 193.62ha이며, 소유역 분할은 도시유역의 특성을 고려하여 하수관거와 맨홀의 위치를 고려하여 25개로 구분하였다(Fig. 3 참조).

3.2 PROMETHEE 평가를 위한 평가지표 선정

소유역별 침수위험도의 상대적 평가를 위한 인자로서 수문특성(토지이용특성, 지형특성(유역경사, 유역고도, 관거특성), 인문특성(인구수, 지역의 중요성) 등을 선정하였다. 수문특성중 대표적인 경우는 도시지역의 경우 유역면적이 작아서 강우의 공간분포를 고려할 필요가 없기 때문에 제외하였고 토지이용 특성에 따른 유사발생량을 대표적인 수문특성으로 선정하였다. 토지이용특성은 인구밀도 높은지역, 인구밀도 낮은지역, 학교, 상업지역, 경공업지역, 공원, 간선도로, 골목길 등 총 8개로 토지이용특성으로 구분할 수 있다. 침수의 가능성은 유역내 배수의 원활함 정도에 따라 달라질 것으로 예상되어 지역특성으로 유역의 평균경사와 고도를 선정하였다. 유역의 평균경사가 급하면 배수가 원활할 수 있으며, 유역고도가 높으면 침수로부터 상대적으로 안전할 수 있을 것이다. 추가적인 지형적 특성으로 관거의 밀도



(a) Land use

(b) Subcatchment delineation

Fig. 3. Watershed characteristics

를 선정하였다. 관거의 밀도가 밀집된 지역은 우수의 배제가 원활할 것으로 예상되어 침수와 깊은 연관성이 있을 것으로 사료되기 때문이다. 인문특성은 유역별 인구수와 중요 시설을 통해 반영될 수 있다. 즉, 동사무소와 경찰서, 소방서등의 공공기관과 지역별 인구수는 침수에 대한 대책을 수립하는데 중요한 인자로 적용될 수 있다. 침수특성은 과거의 침수지역을 침수위험도와 함

께 평가함으로써 적정성을 평가할 수 있다.

3.3 PROMETHEE 평가를 위한 평가지표 추출과정

평가지표의 추출방법은 GIS를 이용한 도시유역의 유수량 산정결과(박무종 등, 2007)와 공간분석을 통하여 Fig. 4와 같은 방법으로 추출하였고, 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Preference Indexes for Subcatchment

sub catchment	elevation average (EL.m)	slope average (°)	density of conduit (m ² /m ²)	Population (capita)	sediment yields per unit area (kg/yr/m ²)
1	16.00	7.80	0.018	979	0.47
2	18.08	4.34	0.016	677	2.55
3	19.00	4.92	0.020	488	0.02
4	18.76	3.61	0.008	3,987	0.40
5	18.15	2.84	0.019	1,651	0.02
6	17.75	2.71	0.020	3,317	0.90
7	16.62	2.67	0.018	1,140	2.16
8	14.50	5.99	0.030	158	10.01
9	16.25	0.89	0.017	1,708	1.34
10	18.89	3.03	0.026	1,597	1.97
11	18.13	1.52	0.021	955	1.59
12	20.00	2.62	0.024	1,706	2.05
13	25.86	2.97	0.016	6,403	1.34
14	27.35	2.63	0.023	488	9.99
15	32.57	4.12	0.019	810	0.02
16	22.00	2.04	0.011	792	0.01
17	30.50	4.41	0.008	1,187	0.02
18	23.00	5.52	0.015	122	0.02
19	33.25	6.17	0.002	50	0.40
20	28.42	6.38	0.014	527	0.02
21	25.05	2.87	0.015	650	0.02
22	21.93	2.59	0.019	1,000	1.79
23	21.00	2.61	0.017	2,329	0.82
24	16.33	5.62	0.019	1,599	0.30
25	18.64	2.63	0.032	783	0.02

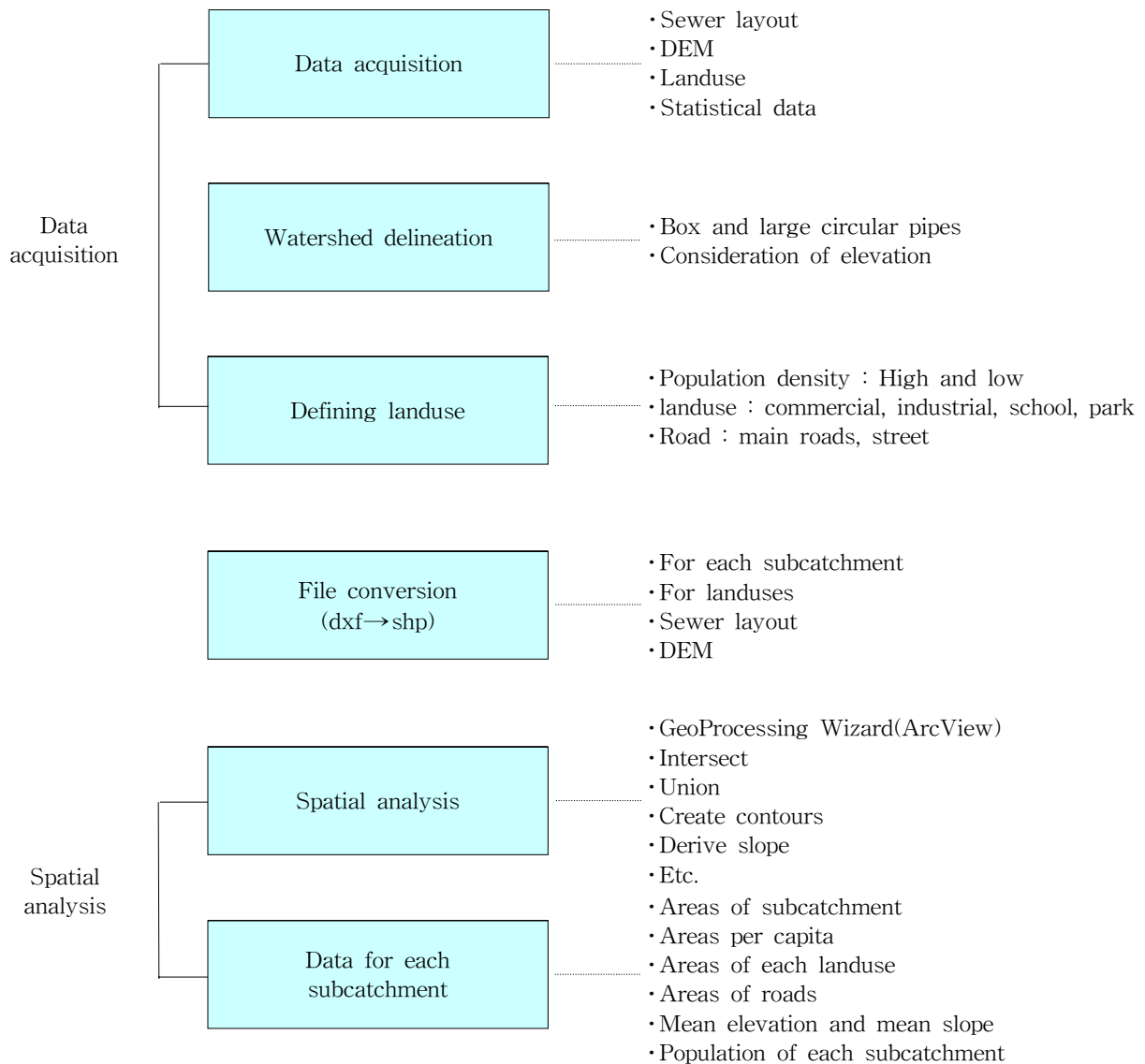


Fig. 4. Data Acquisition Procedure using GIS

4. PROMETHEE 적용 과정

4.1 평가기준에 대한 가중치 설정

지역특성에 따른 대상 지역의 소유역에 대한 상대적 침수위험도를 평가하기 위해 평가지표의 대한 가중치 설정은 필수적이다. 가중치 설정 방법은 의사결정자가 평가기준에 대해 중요한 순서대로 배열을 한 후 배열 순서에 대해 역을 취하여 가중치를 계산하는 카드배열 방법을 적용하였다(Simos, 1990). 본 논문에서는 대상 지역의 수자원분야의 전문가(교수 4명, 수자원분야 박사학위자 3, 대학원생 3)를 대상으로 설문조사를 실시한 결과, Table 5와 같이 나타났으며, 가중치 합 1에 대해 정량화된 값을 가중치로 적용하였다. 그러나 설문조사 대상의 수가 상대적으로 적어서 가중치 산정의 신뢰

성이 낮을 수 있다. 따라서 신뢰도 높은 가중치 산정을 위하여 방재분야의 전문가를 포함한 전국적인 설문조사를 실시하여 PROMETHEE 적용에 필요한 인자별 가중치를 산정하는 것이 필요하다.

4.2 선호함수 및 파라미터 설정

본 논문에서는 PROMETHEE에 선호함수의 6가지 유형 중 침수가능성의 특성을 고려하여 Eq. (7)과 같이 V형 선호함수로 선정하였다. 이것은 침수가능성이 평가지표가 어느 정도 값 이상으로 커진다고 하여도 계속적으로 높아지지 않는 특성을 보이기 때문이며 V형 선호함수가 이러한 특성을 가장 잘 나타낸다고 판단되었기 때문이다. 6개의 선호함수 중 적용 가능한 것으로 type III, type V, type VI가 있으나 type VI의 경우 평균치

Table 5. The Weights Obtained from Survey

survey	elevation average (EL.m)	slope average (°)	density of conduit (m ² /m ²)	Population (capita)	sediment yields per unit area (kg/yr/m ²)	sum
1	2	1	4	3	5	15
2	3	1	5	4	2	15
3	5	4	3	2	1	15
4	2	5	4	1	3	15
5	5	4	1	3	2	15
6	1	5	4	2	3	15
7	4	2	3	1	5	15
8	4	3	1	2	5	15
9	2	4	3	1	5	15
10	5	2	1	3	4	15
sum	33.00	31.00	29.00	22.00	35.00	150
weight	0.220	0.207	0.193	0.147	0.233	1

Table 6. Parameters for the Preference Function of V-Shape

	elevation average EL.(m)	slope average (°)	density of conduit (m ² /m ²)	Population (capita)	sediment yields per unit area (kg/yr/m ²)
MAX	33.25	7.80	0.032	6403	10.01
MIN	14.50	0.89	0.002	50	0.01
Parameters	18.75	6.91	0.030	6353	10.00

산정이 어렵고(즉 홍수에 미치는 인자의 영향의 평균), type V의 경우 홍수에 영향을 미치는 정도가 어느 정도에서 시작된다고 판단하기 어려워 type III을 선정하였다. V형의 파라미터 설정은 Table 6과 같이 각 평가 지표의 최대값과 최소값의 차를 사용함으로써 평가지표 범위 내에서 설정하였다.

$$H(x_h) = \begin{cases} x_h/m, & x_h \leq m \\ 1, & x_h \geq m \end{cases} \quad (7)$$

4.3 선호지수 계산

선호지수 $\pi(a,b)$ 는 대안 a 와 b 사이의 가중치를 고려하여 Eq. (8)을 이용하여 계산할 수 있으며, 대안 a , b의 평가기준의 차에 대해 의사결정자의 선호 선향을 나타내는 선호함수 $p_h(a,b)$ 와 평가기준별 가중치 w_h 의 곱의 합을 평균하여 나타내었다. Eq. (8)을 적용하여 선호지수 계산결과는 Table 7과 같다.

$$\pi(a,b) = \frac{1}{k} \sum_{h=1}^k p_h(a,b) \cdot w_h \quad (8)$$

예를 들어, Table 7의 $\pi(1,2)$ 는 2번 소유역에 대한 1번 소유역의 선호지수를 나타내며, 선호지수 값은 0.006이다. 이에 대한 계산과정을 설명하면 다음과 같다. Table 8의 평가기준 평균고도의 $x_h=16.00-18.08=2.08$ (절대값)이며, V형 선호함수 조건의 평균고도 파라미터 18.75 보다 작으므로 선호함수는 $2.08/18.75=0.111$ 이 된다. 평가기준별 가중치 0.220을 곱하면 2번 소유역에 대한 1번 소유역의 평가기준인 평균고도에 선호지수 0.02가 산출된다. 여기서 평균고도는 'MIN'으로 설정되어 평균고도가 낮을수록 침수위험발생에 높은 영향을 미치게 된다는 것을 의미하며, 평균고도에 의한 침수위험발생에 대하여 1번 소유역이 2번 소유역보다 선호되고 있다. 즉 평가기준의 값이 작을수록 침수위험발생에 높은 영향을 미칠 경우 x_i 의 값이 음(-)의 값을 나타낼 때 값을 취하여 사용하며, 양(+)의 값을 나타낼 경우 0을 취한다(민재형과 송영민, 2003).

또한, 2번 소유역에 대한 1번 소유역의 평가기준별 선호지수는 평균고도 : 0.02, 평균경사 : 0.00, 관필도 : 0.00, 소유역별 인구수: 0.01, 단위면적당 유사발생량 : 0.00의 합을 평균이 $\pi(1,2)=0.006$ 이 된다.

Table 7. Estimation of the Preference Indexes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	$\phi^+(a)$
1		0.006	0.014	0.008	0.008	0.007	0.001	0.019	0.001	0.017	0.009	0.017	0.023	0.035	0.043	0.017	0.036	0.022	0.045	0.033	0.025	0.015	0.012	0.003	0.027	0.446
2	0.033		0.023	0.013	0.016	0.013	0.004	0.030	0.007	0.018	0.011	0.017	0.024	0.032	0.050	0.021	0.041	0.033	0.059	0.049	0.028	0.016	0.016	0.022	0.034	0.612
3	0.017	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.008	0.001	0.008	0.016	0.023	0.032	0.007	0.027	0.015	0.043	0.031	0.014	0.007	0.005	0.004	0.015	0.294
4	0.052	0.030	0.040		0.025	0.019	0.026	0.060	0.022	0.035	0.031	0.034	0.027	0.056	0.064	0.026	0.045	0.048	0.068	0.063	0.039	0.035	0.025	0.037	0.046	0.954
5	0.033	0.013	0.021	0.006		0.001	0.002	0.040	0.000	0.012	0.006	0.011	0.019	0.032	0.045	0.013	0.041	0.034	0.063	0.050	0.021	0.012	0.007	0.017	0.022	0.521
6	0.043	0.023	0.033	0.012	0.014		0.010	0.047	0.007	0.020	0.013	0.018	0.021	0.039	0.059	0.026	0.054	0.048	0.075	0.064	0.035	0.021	0.013	0.028	0.033	0.755
7	0.039	0.016	0.035	0.021	0.016	0.011		0.040	0.004	0.019	0.011	0.016	0.027	0.035	0.059	0.024	0.053	0.047	0.073	0.063	0.033	0.016	0.017	0.028	0.034	0.736
8	0.059	0.043	0.057	0.057	0.055	0.050	0.042		0.045	0.048	0.048	0.050	0.067	0.030	0.089	0.064	0.084	0.067	0.090	0.082	0.071	0.056	0.058	0.050	0.059	1.420
9	0.050	0.030	0.046	0.028	0.025	0.020	0.015	0.054		0.031	0.017	0.028	0.035	0.050	0.070	0.031	0.063	0.057	0.084	0.073	0.044	0.029	0.024	0.036	0.046	0.987
10	0.038	0.012	0.026	0.012	0.009	0.005	0.002	0.030	0.003		0.005	0.003	0.019	0.025	0.051	0.020	0.047	0.040	0.067	0.056	0.028	0.011	0.010	0.023	0.021	0.564
11	0.043	0.018	0.032	0.021	0.015	0.010	0.007	0.042	0.001	0.017		0.015	0.028	0.033	0.057	0.020	0.054	0.047	0.073	0.063	0.033	0.015	0.017	0.031	0.030	0.722
12	0.042	0.015	0.029	0.015	0.011	0.006	0.003	0.035	0.003	0.006	0.006		0.019	0.023	0.052	0.018	0.047	0.041	0.068	0.057	0.028	0.009	0.008	0.027	0.024	0.592
13	0.061	0.035	0.050	0.021	0.032	0.021	0.027	0.065	0.023	0.035	0.032	0.032		0.040	0.058	0.032	0.050	0.050	0.070	0.060	0.033	0.029	0.023	0.047	0.053	0.978
14	0.075	0.045	0.060	0.052	0.048	0.043	0.037	0.031	0.040	0.044	0.039	0.038	0.042		0.068	0.047	0.065	0.066	0.082	0.071	0.048	0.038	0.043	0.063	0.058	1.243
15	0.022	0.002	0.008	0.000	0.000	0.001	0.000	0.028	0.000	0.009	0.003	0.006	0.000	0.007		0.000	0.002	0.012	0.017	0.015	0.001	0.000	0.000	0.009	0.017	0.158
16	0.044	0.021	0.030	0.009	0.015	0.016	0.013	0.051	0.008	0.025	0.013	0.020	0.021	0.033	0.048		0.034	0.031	0.055	0.046	0.018	0.014	0.011	0.032	0.031	0.638
17	0.034	0.013	0.022	0.000	0.014	0.015	0.013	0.043	0.012	0.023	0.018	0.021	0.010	0.023	0.021	0.006		0.021	0.022	0.023	0.012	0.015	0.012	0.021	0.033	0.444
18	0.018	0.001	0.006	0.000	0.005	0.006	0.004	0.022	0.003	0.014	0.008	0.012	0.008	0.021	0.028	0.000	0.018		0.028	0.018	0.005	0.005	0.003	0.006	0.022	0.259
19	0.030	0.018	0.025	0.009	0.024	0.023	0.021	0.036	0.019	0.031	0.024	0.028	0.018	0.027	0.024	0.013	0.010	0.019		0.019	0.019	0.022	0.019	0.022	0.040	0.541
20	0.014	0.003	0.008	0.000	0.006	0.008	0.005	0.022	0.004	0.015	0.009	0.013	0.003	0.012	0.016	0.000	0.005	0.003	0.014		0.001	0.006	0.004	0.006	0.023	0.200
21	0.033	0.010	0.020	0.004	0.005	0.006	0.004	0.040	0.003	0.015	0.008	0.012	0.004	0.016	0.030	0.000	0.022	0.018	0.042	0.030		0.005	0.003	0.022	0.022	0.374
22	0.037	0.012	0.026	0.014	0.010	0.006	0.000	0.038	0.002	0.012	0.004	0.007	0.014	0.020	0.043	0.009	0.039	0.032	0.059	0.048	0.019		0.005	0.025	0.026	0.509
23	0.040	0.018	0.030	0.010	0.011	0.004	0.007	0.047	0.003	0.017	0.011	0.012	0.014	0.031	0.049	0.013	0.042	0.036	0.063	0.052	0.023	0.011		0.026	0.030	0.601
24	0.016	0.008	0.014	0.007	0.006	0.005	0.003	0.023	0.000	0.015	0.010	0.015	0.022	0.036	0.043	0.018	0.036	0.024	0.050	0.039	0.026	0.016	0.011		0.027	0.471
25	0.031	0.011	0.016	0.006	0.001	0.000	0.000	0.023	0.000	0.003	0.000	0.003	0.019	0.022	0.042	0.008	0.038	0.031	0.059	0.047	0.017	0.008	0.006	0.018		0.408
$\phi^-(a)$	0.904	0.402	0.672	0.327	0.371	0.298	0.247	0.889	0.209	0.490	0.335	0.435	0.500	0.701	1.142	0.436	0.953	0.842	1.367	1.151	0.619	0.412	0.348	0.603	0.774	

Table 8. Example of Computation of the Preference Indexes

	elevation average (EL.m)	slope average (°)	density of conduit (m ² /m ²)	Population (capita)	sediment yields per unit area (kg/yr/m ²)
subcatchment	max-min				
	MIN	MIN	MIN	MAX	MAX
	weights				
	0.220	0.207	0.193	0.147	0.233
1	16.00	7.80	0.018	979	0.47
2	18.08	4.34	0.016	677	2.55

4.4 선호유출량-유입량, 순흐름량 계산

선호유출량($\phi^+(a)$)은 다른 대안들을 선호 혹은 지배

하는 정도를 나타내는 수치이고, 선호유입량($\phi^-(a)$)은 선호유출량의 반대 개념으로 다른 대안으로부터 선호, 지배되는 정도를 나타내는 수치이다. 본 논문에서 사용

Table 9. Estimation of the Outgoing and Incoming Flow, Net-Flow, and the Preference Order

Subcatchment	outgoing flow	incoming flow	net-flow	Ranking order of risk	Subcatchment	outgoing flow	incoming flow	net-flow	Ranking order of risk
1	0.446	0.904	-0.458	20	14	1.243	0.701	0.542	3
2	0.612	0.402	0.209	10	15	0.158	1.142	-0.984	25
3	0.294	0.672	-0.378	19	16	0.638	0.436	0.202	11
4	0.954	0.327	0.627	2	17	0.444	0.953	-0.509	21
5	0.521	0.371	0.150	13	18	0.259	0.842	-0.583	22
6	0.755	0.298	0.457	7	19	0.541	1.367	-0.826	23
7	0.736	0.247	0.490	5	20	0.200	1.151	-0.951	24
8	1.420	0.889	0.531	4	21	0.374	0.619	-0.245	17
9	0.987	0.209	0.778	1	22	0.509	0.412	0.097	14
10	0.564	0.490	0.074	15	23	0.601	0.348	0.253	9
11	0.722	0.335	0.387	8	24	0.471	0.603	-0.132	16
12	0.592	0.435	0.157	12	25	0.408	0.774	-0.366	18
13	0.978	0.500	0.477	6	-	-	-	-	-

하는 순흐름량($\phi(a)$)은 대안 a와 대안 b가 비교불가능한 관계에 놓여졌을 경우를 배제하여 순흐름량($\phi(a)$)을 정의하여 대상 유역의 침수위험발생에 대한 상대적 우선순위를 나타낼 수 있다. 선호유출량($\phi^+(a)$) 계산은 Table 9의 행의 합으로, 선호유입량($\phi^-(a)$)은 열의 합으로 나타나며, 순흐름량은 선호유출량($\phi^+(a)$)과 선호유입량($\phi^-(a)$)의 차로 계산된다. 이러한 계산 결과는 Table 9와 같다.

5. PROMETHEE 적용에 의한 유역별 상대적 침수위험도 산정 결과

본 논문에서 제안된 방법을 이용한 소유역간 상대적 침수위험도를 유역 내에서 발생하는 유사량을 바탕으로 산정된 소유역간 상대적 침수위험도와 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 '98년 침수 실적 결과조서를 GIS를 이용하여 침수위험

도를 작성한 결과를 비교하여 제안된 방법의 적용성을 검증하였다. 비교결과를 Fig. 5와 Table 10에 나타내었다. '98년 실제 침수가 발생한 지역은 25개 소유역중 15개의 소유역에서 침수가 발생하였다. 유사 발생에 따른 침수위험순위는 상위 15개의 소유역중 11개 소유역이 '98년 침수 실적과 일치하였고, PROMETHEE에 따른 침수위험순위는 상위 15개의 소유역중 13개의 소유역이 '98년 침수 실적과 일치하였다. 본 대상유역의 경우 다양한 인자를 고려한 PROMETHEE에 의한 방법이 단일 인자를 바탕으로 한 침수위험도 평가모델보다 좀 더 나은 결과가 도출되었다. 또한 제안된 방법에 의해 산정된 침수위험순위 상위 10개 소유역중 7번 소유역을 제외하고 9개 소유역에서 '98년도에 침수가 발생한 것으로 나타나 제안된 방법에 의한 상대적 침수위험도가 타당함을 알 수 있었다. 유사발생량을 기준으로 한 상대적 침수위험도 산정에서 상위 10개 소유역중 8개가 '98년도에 침수가 발생하였다. 따라서 본 논문에서

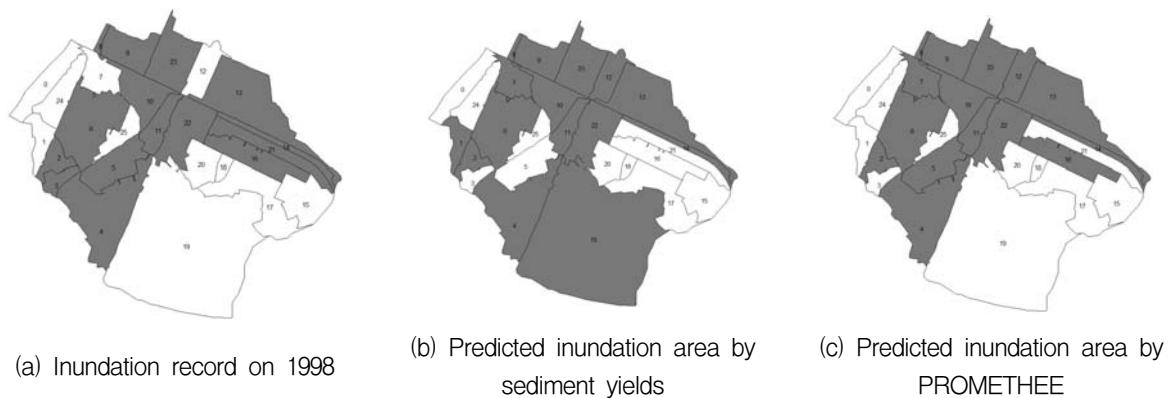


Fig. 5. Comparison of the Actual and Predicted Inundation Area in the Guja Basin

Table 10. Comparison of the Actual and Predicted Inundation Area Obtained from the Methods

subcatchment	Inundation record on 1998	Predicted inundation area by sediment yields		Predicted inundation area by PROMETHEE	
	Inundation (occurrence:O)	ranking order of inundation	agreement between actual and predicted	ranking order of inundation	agreement between actual and predicted
1		13		20	
2	O	3	O	10	O
3	O	21		19	
4	O	14	O	2	O
5	O	24		13	O
6	O	11	O	7	O
7		4		5	
8	O	1	O	4	O
9	O	10	O	1	O
10	O	6	O	15	O
11	O	8	O	8	O
12		5		12	
13	O	9	O	6	O
14	O	2	O	3	O
15		18		25	
16	O	25		11	O
17		20		21	
18		23		22	
19		15	O	23	
20		22		24	
21	O	19		17	
22	O	7	O	14	O
23	O	12	O	9	O
24		16		16	
25		17		18	

제안된 방법의 결과가 이 경우에도 좀 더 나은 결과를 보였으나 예측 상 큰 차이는 없다고 판단된다. 그러나 침수위험도 증가에 기여하는 다양한 인자들 뿐만 아니라 침수에 의한 피해도 함께 고려할 수 있는 방법을 이용하여 침수예방 대책수립에 이용하는 것이 단일인자에 의한 방법보다 합리적이라고 사료된다. '98년 침수 실적에 포함되지 않는 PROMETHEE 및 유사발생에 따른 침수위험도 평가 방법에서 모두 선정된 7, 12번 소유역은 침수위험도가 상대적으로 크게 평가된 유역의 주변부에 위치하고 있고 PROMETHEE의 침수 위험순위에서 각 5, 12위에 놓여 있으며. 이것은 평가 기준의 값이 침수에 대한 상대적인 위험도를 크게 만들고 있음을 나타낸다. 따라서 7, 12번 소유역에 침수 기록이 없다 하더라도 상대적 위험도가 크게 평가되었으므로 추가적인 침수방재에 대한 대책 수립이 필요한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 대상유역내의 소유역간 상대적인 침수위험도를 평가하기 위하여 다기준 의사결정 시스템의 하나인 PROMETHEE를 이용하였고, 침수 발생에 기여하는 평가기준 수문특성, 지형특성, 인문특성으로 구분하여 소유역간 침수위험도를 평가하였다. 본 논문에서 얻어진 주된 연구 성과는 다음과 같다.

- 1) 도시유역의 침수에 기여하는 다양한 인자간의 영향과 침수피해를 함께 고려할 수 있는 방안으로 다기준 의사결정 기법중의 하나인 PROMETHEE를 도입한 결과 실제 침수실적과 부합되는 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 25개 소유역중 침수가 발생한 15개 소유역을 기준으로 할 때 PROMETHEE에 의한 상대적 침수위험도가 높은 13개 소유역이 일치하여 선정된 상대적 침수위험

도에 의한 평가의 타당성을 검증하였다.

- 2) 유사발생량만을 고려하여 침수예상지역을 제한한 기존의 연구 성과를 발전시켜서 보다 합리적인 방법으로 도시소유역간의 상대적인 침수위험도 산정이 가능할 수 있는 방법을 제안하였다. 이는 단일 인자에 의한 도시소유역간 상대적 침수위험도 산정을 보완하여 수문특성, 지형특성, 인문특성으로 구분된 5개의 인자를 이용할 수 있는 방안을 제시하였다.
- 3) PROMETHEE 적용을 위한 다양한 인자들을 효율적으로 산정할 수 있는 GIS 기반의 방법을 제시하여 추후 다른 지역에 적용할 경우 적용의 효율을 높일 수 있는 방안을 제시하였다.
- 4) 수자원 이외의 분야에서 널리 활용되고 있는 PROMETHEE를 다양한 인자간의 복잡한 상호작용에 의한 침수예측에 적용하여 PROMETHEE의 활용범위를 넓힐 수 있었고 수자원 분야의 다른 문제에도 적용이 가능함을 보였다.

본 논문에서 제안된 방법을 침수저감 대책의 수립에 적용할 경우 효율적인 피해저감 방안의 수립이 가능할 것이다. 즉, PROMETHEE 기법을 이용하여 대상 유역 내의 소유역별 상대적 침수위험도를 평가할 수 있어 침수발생이 예상되는 소유역별로 우선적인 침수저감대책의 수립과 시행을 위한 근거를 제시할 수 있다. 침수위험요소의 선택적 제거와 침수위험도가 상대적으로 높은 소유역의 집중관리를 통해서 유역전반에 걸친 상대적인 침수 위험을 감소시킬 수 있다. 또한 기존의 전국을 대상으로 한 획일화된 하나의 평가방법보다 현실적으로 합리적인 대안이 될 수 있으며, 대상유역의 특성을 고려하여 다양한 평가기준을 이용한 PROMETHEE에 의한 평가방법이 대상유역을 포괄적으로 평가 할 수 있으며 신뢰도가 뒷받침되는 대안이 될 수 있다. 그러나 PROMETHEE의 평가기준 결정과 가중치결정에 있어서 전문가들의 의견을 수렴하여 객관성을 확보하지만 이 또한 전문가들의 주관적 성향이 반영이 되는 문제점이 발생한다. 따라서 합리적이고 객관적인 평가기준의 선정방법과 가중치의 결정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구(보고서)는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연CO3-01)에 의한 도시홍수재해

관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 경기개발연구원 (2006). **다기준의사결정모형(MCDM)을 이용한 경기도 주택정책의 효율적 운영방안 연구**. 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr/)
- 김중훈, 이재수, 박무중, 이상렬 (2004). **도시 내배수시설의 운영 및 유지관리 기술**. 도시홍수재해관리기술연구사업단, FFC-04-15.
- 민재형, 송영민 (2003). "PROMETHEE를 이용한 다기준의사결정." **서강경영논총**, 서강대학교 경영학연구원, 제14권, 제2호, pp. 109-127.
- 박무중, 전환돈, 신민철 (2007). "GIS를 이용한 도시유역의 유사량 산정 및 유사발생과 침수위험도 관계 분석." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 277-287.
- 이재웅, 남동성 (2007). "다기준의사결정기법을 이용한 안동다목적댐의 수문학적 안정성 증대방안 결정." **국토연구**, 국토연구원, Vol. 53, pp. 93-109.
- 홍성준, 이용대, 김승권, 김중훈 (2006). "PROMETHEE와 ANP기법을 활용한 상수도관망의 위험요소평가." **산업공학**, 대한산업공학회, Vol. 19, No. 2, pp. 106-116.
- 황유정 (2006). "홍수에 의한 침수 취약지역 예측에 관한 연구." **한국지역지리학회지**, 한국지역지리학회, Vol. 12, No. 1, pp. 172-178.
- Brans, J.P. and Vincke, Ph. (1985). "A preference ranking organisation method." *Management Science*, Vol. 31, No. 6, pp. 647-656.
- Chou, W.C., Lin, W.T. and Lin, C.Y. (2007). "Application of fuzzy theory and PROMETHEE technique to evaluate suitable ecotechnology method: A case study in Shihmen Reservoir Watershed, Taiwan." *Ecological Engineering*, Vol. 31, pp. 269-280.
- Keeney, R. L. and Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objective: Preferences and Value Tradeoff*. John Wiley & Sons, New York.
- Mladineo, N., Lozi, I., Stoi, S. Mlinari, D. and Radica, T. (1992). "An evaluation of multicriteria

- analysis for DSS in public policy decision." *European Journal of Operational Research*, Vol. 61, pp. 219-229.
- Mladineo, N., Margeta, J., Brans, J.P., and Mareschal, B. (1987). "Multicriteria ranking of alternative locations for small scale hydro plants." *European Journal of Operational Research*, Vol. 31, pp. 215-222.
- Roy, B. (1991). "The Outranking approach and the foundations of ELECTRE methods" *Theory and Decision*, Vol. 31, pp. 49-73.
- Roy, B. and Vanderpooten, D. (1996). "The European School of MCDA : Emergence, Basic Features and Current Works." *Jurnal of Mutil-criteria Decision Analysis*, Vol 5, pp.22-38.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning Setting Priorities, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L. (1996). *Decision Making with Dependence and Feedback: the Analytic Network Process*. RWS publisher, Pittsburgh.
- Simos, J. (1990). *L'evaluation environnementale : un proces sur cognitif negocié*, These de doctorat, DGR-EPFL, Lausanne, p. 216.
- Steuer, R.E. (1986). *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. John Wiley & Sons

(논문번호:07-155/접수:2007.12.26/심사완료:2008.02.14)