도시홍수 취약성 평가에 대한 연구

A Study on Urban Flood Vulnerability Assessment

박무종* · 송영석** · 주진걸*** · 박민규****

Park, Moojong · Song, Youngseok · Joo, Jingul · Park, Minkyu

Abstract

Urban flood inundation by poor interior drainage systems causes annually the significant loss of life and properties in Korea. The inundation vulnerability assessment is important for policy establishment and priority decision of disaster management policy. In this study, an assessment model was developed for urban vulnerable areas. An assessment model was applied to arithmetic Urban flood vulnerability assessment and Urban flood vulnerability assessment using Promethee(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation). Assessment factors that directly affect urban flood were selected to lowland area, length of poor drainage sewer, and curve number. The results of assessment, inundation records are in concordance with arithmetic urban flood vulnerability assessment method about 75% and urban flood vulnerability assessment using Promethee about 58.3%. In this study, arithmetic urban flood vulnerability assessment method using assessment factors that directly affect urban flood was confirmed by accuracy.

Key words : Flood vulnerability, Promethee, Inundation record, Urban flood, Lowland area

요 지

내수배제 불량으로 인한 도시침수는 매년 심각한 인적, 물적 피해를 발생시키고 있다. 내수침수 피해 저감을 위한 방재정책을 수립하고, 방재대책의 우선순위를 결정하기 위해서는 대상지역의 취약성을 적절하게 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 도시지역의 침수피해 취약지역을 평가할 수 있는 모형을 개발하였다. 평가 모형은 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법과 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가 방법을 적용하였다. 평가인자로는 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 저지대 지역, 통수능력 부족관거 그리고 유출곡선 지수를 선정하였다. 평가 결과 과거 침수기록과 비교하였을 때 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법은 약 75%의 일치율을 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가방법은 58.3%의 일치율이 분석되었다. 본 연구에서는 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 인자를 활용한 산술적인 도시홍수 취약성 평가방법의 정확성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 홍수취약성, Promethee, 침수피해자료, 도시침수, 저지대

1. 서 론

전세계적으로 기후변화에 따른 이상기후의 발생은 홍수, 태풍, 강풍 등 여러 자연재해를 유발하고 있다. 특히, 우리나라의 경우 여름철에 집중되어 발생하는 갑작스런 호우사상으로 매년 침수피해가 반복되고 있으며 침수피해에 의한 피해액은 매년 증가되고 있어 인구나 주요시설이 밀집되어 있는 도시지역에 대한 방재대책수립이 시급하다. 그러나 도시지역에서 침수피해가 발생하는 지역은 일반적으로 지형이 평탄하거나,

우수의 신속한 배수가 곤란한 지역, 지반고가 홍수위보다 낮은 지역의 지형적인 원인 뿐 아니라 하수관거 내 유사퇴적으로 인한 내수배제 불량과 설계빈도를 충족하지 못하는 통수능력부족관거에서 발생하는 내수침수원인들이 있다(Hwang, 2006; Hong *et al.*, 2006b). 이렇게 도시지역에서 발생하는 침수피해의 원인은 다양하고 방재대책에 의한 예산은 한정적이기 때문에 도시지역에서 홍수에 취약한 지역을 선정하는 연구가 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 국외의 경우 Raiu *et al.* (2000), Maragoudaki and Tsakiris (2005), Hermans

*정회원. 한서대학교 토목공학과 교수(E-mail: mjpark@gmail.com)
Member: Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

**정회원. 한서대학교 토목공학과 박사과정
Member: Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Hanseo University

***정회원. 전북과학대학교 건축토목조경과 교수
Member: Professor, Division of Architecture, Civil & Landscape, Jeonbuk Science College

****교신저자. 정회원. 중원대학교 방재안전공학과 교수(Tel: +82-43-830-8683, Fax: +82-43-830-8683, E-mail: mkhoin@gmail.com)
Corresponding Author: Member: Professor, Department of Disaster Mitigation and Safety Science, Jungwon University

et al. (2007)은 스페인의 경제, 환경, 사회적요인을 평가, 최적홍수경감계획수립, 하천관리대안 결정방법에 Promethee (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)를 사용하여 분석 하였다. Keon (2002)은 홍수 위험도를 위험성, 노출성, 그리고 취약성의 3가지 요소로 표현하였으며 Liu et al. (2011)은 도시지역에서 발생하는 홍수 발생 침수공간분석에 Gis를 적용하였다. 국내의 연구로는 Min and Song (2003)은 MAUT(Multi-Attribute Utility Theory), AHP(Analytic Hierarchy Peocess), Promethee의 선호함수형태, 가중치 결정방법, 비교대안의 평가방법, 평가순위 부여방법, 의사결정문제의 계층구조화 측면에서 다기준의 사결정기법이 갖는 장단점을 비교하였으며 Hong et al. (2006a, 2006b)는 Promethee와 ANP기법을 활용하여 용수공급의 효율적 관리를 위한 상수도관망의 위험요소 평가에 사용하였다. Choi et al. (2008), Park and Choi (2008)은 침수저감 대책수립의 우선순위를 도출하기 위해 수문특성, 지형 특성, 인문특성등을 선정하여 Promethee를 적용하였으며 Lee et al. (2008), Song and Lee (2012)은 지역별 돌발홍수위험도와 하수관망시스템의 침수위험 평가기법으로 Entropy기법과 Promethee를 사용하여 유역의 평균고도, 평균경사, 유역 폭, 인구수 및 관밀도를 선정하여 위험도를 평가하였다. Kim et al. (2012)에서는 비교대안의 수가 많거나 새로운 대안의 추가 및 삭제의 여지가 있는 경우 Promethee기법이 ANP기법보다 효율적이라고 하였다. Park et al. (2006), Jeong et al. (2008)은 기후변화를 고려한 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)의 문제점을 개선하고 홍수피해발생 잠재위험도가 설계빈도와의 연계성을 가지는 방법론을 제시하고자 하였다.

기존의 선행 연구된 취약성 평가 방법으로는 Promethee, ANP등이 사용되었으나 인자 선정 및 가중치 적용등에 대한 문제점이 항상 대두되어 왔다. 또한 위험도 또는 취약성 등의 평가인자 선정시 피해의 주요원인 인자뿐만 아니라 저감성이나 노출성등의 직간접적인 다양한 인자를 선정하여 평가방법에 적용하였다. 따라서 본 연구에서는 도시홍수를 유발시키는 직접적인 인자를 선정하여 산술적인 도시홍수 취약성평가 방법과 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가 방법에 대하여 연구하고자 하며 과거의 28년동안 발생한 침수기록을 통해 두 평가방법의 적용성을 검증하고자 한다.

2. 도시홍수 취약성 평가 방법

2.1 개별인자의 순위를 고려한 평가기법(산술적인 평가 방법)

Song et al. (2012)에서는 수해취약성인자에 대하여 등가중치를 주어 종합위험도를 평가할 수 있다고 하였다. 본 연구에서 제시하고자 하는 산술적인 도시홍수 취약성평가 방법은 Song et al. (2012)에 의한 종합위험도의 평가방법의 정의와는 다르나 그 평가방법을 이용하여 다음과 같이 정의하고자 한다. 식 (1)에서 제시하고 있는 도시홍수 취약성을 저지대 지역, 통수능력 부족관거, 유출곡선지수로 도시홍수 피해에 직접적인 영향을 주는 인자의 순위평균을 의미한다.

$$\text{도시홍수 취약성} = \frac{\sum_{i=1}^P N_i}{P} \text{에 따른순위} \quad (1)$$

여기서, P = 인자의수, N = 개별인자의 순위

2.2 Promethee를 적용한 평가 방법

Promethee기법은 선호유입량과 선호유출량을 이용하여 대안들의 순위순위를 분석하는 기법으로 Bran과 Vincke(1985)에 의해 구체화 되었다. 여기서, 순위번호란 대안 a 가 대안 b 보다 미흡하지 않는 대안이라고 판단될 때 두 대안의 a 와 b 의 수학적 지배관계가 존재하지 않더라도 대안 a 를 선택하려는 의사결정자의 주관적인 선호성향을 의미한다(Roy, 1991; Pirlot, 1997). 식 (2)의 선호지수((a, b))를 계산하기 위해서는 평가기준별 가중치를 결정해야 하며, 결정시 주관적경향이 크게 작용할 수 있으므로 합리적인 방법의 가중치 결정과정이 필요하다. 선호지수((a, b))는 평가기준별 선호함수($P_h(a, b)$)의 합을 평균한 값으로 나타난다. 여기서 $P_h(a, b)$ 는 평가기준 H 의 선호함수 값을 의미한다. 평가기준 H 에서 평가기준의 값의 차이를 X_h 라 할 때, 선호함수는 식 (3)와 같이 표현할 수 있다.

$$\pi(a, b) = \frac{1}{k} \sum_{h=1}^k p_h(a, b) \quad (2)$$

$$H(x) = \begin{cases} p(a, b), x \geq 0 \\ p(a, b), x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

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

$$\phi^- = \sum_{x \in k} \pi(x, a) \quad (5)$$

Promethee에서는 선호도의 증감을 용이하게 판별하기 위한 방법으로 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 선호함수와 그때의 관계식과 선호임계치를 각각 정의하고 있다. 식 (4)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. 식 (5)와 같이 선호유입량($\phi^-(a)$)은 선호유출량과 상반되고, ($\phi^-(a)$)이 클수록 대안 a 가 나머지 비교대안들 보다 선호되지 않는 것을 의미한다. Promethee에서는 이와 같은 개념을 이용하여 대안들의 순위선호관계를 나타낸다. 식 (6a)부터 식 (6d)까지는 선호유출량($\phi^+(a)$)과 선호유입량($\phi^-(a)$)에 의해 표현되는 선호관계유형이다.

$$aP^+ + b \text{ iff } \phi^+(a) > \phi^+(b) \quad (6a)$$

$$aP^- + b \text{ iff } \phi^-(a) < \phi^-(b) \quad (6b)$$

$$aI^+ + b \text{ iff } \phi^+(a) = \phi^+(b) \quad (6c)$$

$$aI^- + b \text{ iff } \phi^-(a) = \phi^-(b) \quad (6d)$$

Fig. 1. Study Area

선호의 추이성과 비교대안의 완전한 구분 가능성을 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 대안 b는 우열을 가리기 힘든 상황에 있음을 말한다. 이러한 비교 불가능성이 의사결정 적용과정에서 발생하는 원인은 다음과 같이 세가지로 정리할 수 있다 (Roy and Vanderpooten, 1996). 첫째, 의사결정 문제에 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 순위 선호체계를 기반으로 대안들의 부분적인 우선순위를 결정하고 Promethee II는 식 (7)에 의해 계산된 순흐름량(net flow, $\phi(a)$)을 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.

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

3. 도시홍수 취약성 평가의 적용

3.1 대상유역

본 연구에서는 도시홍수 취약성을 평가하기 위해 서울특별시 관내의 중랑천 수계를 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 중랑천의 유역면적은 113.4 km², 총 36개의 배수분구로 나누어져 있으며 유역에 포함된 하천은 총 7개로 중랑천, 면목천, 목동천, 당현천, 도봉천, 방학천 그리고 우이천으로 총 연장은 58.0 km에 달한다. 중랑천은 전체유역의 약 75%이상이 고밀도 도심지 및 인구밀집지역으로 각 배수분구별 하수관거

의 총 연장은 1,839.1 km에 달하며 1984년부터 2011년까지의 침수피해 중 총 8회의 침수피해가 발생한 지역이다(Table 1).

3.2 평가지표 선정

도시지역의 일반적인 침수피해 지역은 지형이 평탄하거나 우수의 신속한 배수가 곤란한 지역, 지반고가 계획홍수위보다 상대적으로 낮은지역이 침수에 취약하다. 또한 불투수층의 비율과 관거의 통수능에 따라서도 침수의 가능성이 변하게 된다. 서울시에서 발생한 침수피해의 주요원인으로 저지대 33%, 통수능력 부족 32%, 펌프장 14%, 설계기준초과 11%, 기타빗물받이 8%, 관거토사 및 퇴적 3%으로 Fig. 2와 같이 조사되었다. 그 외에도 도시에서 발생하는 침수피해는 여러가지의 원인이 복합적으로 작용하여 발생하지만 각각의 지표를 평가에 모두 반영하기에는 자료구축이나 데이터수집의 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 자료수집이 용이하며 침수피해의 주요원인으로 조사된 저지대 지역, 통수능력 부족관거 그리고 유출곡선지수를 선정하였다(Fig. 3). 저지대

Fig. 2. Main Causes of Flood Damages in Seoul(Song, 2012)

Table 1. Basin Parameters

Sub basin	Watershed area	Sewer length	Inundation record (1984-2111)								Accumulated inundation	
	(ha)	(km)	1984	1987	1990	1998	2001	2003	2010	2011	Area(ha)	Count
Sub01	163.56	52.93									45.16	3
Sub02	474.15	14.7									0.02	1
Sub03	199.8	47.53									164.83	6
Sub04	862.06	31.45									12.18	2
Sub05	203.74	42.05									19.5	4
Sub06	301.44	119.64									389.61	6
Sub07	193.04	54.24									12.06	5
Sub08	151.67	26.94									16.92	5
Sub09	175.19	41.37									92.46	5
Sub10	215.26	63.6									18.11	4
Sub11	584.86	115.27									116.33	3
Sub12	459.86	18									16.15	3
Sub13	283.08	72.37									106.28	4
Sub14	215.69	25.8									17.93	3
Sub15	407.51	25.17									8.63	3
Sub16	258.95	58.27									1.35	2
Sub17	639.05	151.33									12.46	2
Sub18	352.74	23.62									0.43	3
Sub19	309.35	50.74									31.41	3
Sub20	329.04	0.77									0.2	1
Sub21	122.53	29.61									1.92	1
Sub22	208.56	35.86									95.21	4
Sub23	372.33	1.47									0	0
Sub24	374.84	29.87									0.76	2
Sub25	153.15	20.85									2.7	2
Sub26	231.13	34.97									33.46	3
Sub27	491.67	125.84									260.14	5
Sub28	424.12	81.81									127.68	6
Sub29	289.14	104.11									275.54	4
Sub30	166.73	15.09									0.02	1
Sub31	238.41	32.42									13.36	3
Sub32	296.36	58.94									127.58	4
Sub33	405.61	78.56									78.44	3
Sub34	165.84	49.3									16.78	2
Sub35	505.07	69.35									120.92	4
Sub36	112.42	35.17									115.82	7

(a) Lowland Area

(b) Deficiency Sewer length

(c) Curve Number

Fig. 3. Selected Parameters

지역은 지반고가 계획홍수위보다 낮은 지역인 홍수위이하지역이며, 통수능력 부족관거는 하수관거 설계기준인 간선 30년, 지선 10년 빈도를 충족하지 못하는 관거, 유출곡선지수는 토지유형과 정밀도양도를 활용하여 수문학적 특성을 AMC-II로 적용하였다.

3.3 산술적인 도시홍수 취약성평가 방법

산술적인 도시홍수 취약성평가는 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 저지대 지역, 통수능력 부족 관거, 유출곡선지수의 인자를 선정하여 종합적인 취약성 평가를 진행하고자 한

다. 평가를 진행하기 전에 선정된 3개 인자의 단위는 ha, km, CN으로 각 인자에 대한 상하관계의 구분에 어려움이 있어 각 인자를 값의 크기의 순위로 정량화 하여 종합적인 평가를 진행하였다. 저지대 지역, 통수능력 부족관거, 유출곡선지수는 배수분구별 값이 큰 곳이 도시홍수에 더 취약한 지역으로 순위를 부여하였으며 식 (1)을 통해 분석된 산술적인 도시홍수 취약성 평가의 결과는 Table 2와 같다. 평가결과 Sub28, Sub06, Sub13, Sub36, Sub27 배수분구는 침수피해에 취약한 지역으로 Sub15, Sub31, Sub08, Sub23, Sub20은 안전한 지역으로 분석되었다.

Table 2. Result of Urban Flood Vulnerability

Sub basin	Lowland area		Deficiency sewer length		Curve number		Urban flood vulnerability
	(ha)	Ranking ⁽¹⁾	(km)	Ranking ⁽²⁾	CN	Ranking ⁽³⁾	Ranking ⁽⁴⁾
Sub01	0.93	22	2.11	20	83.38	5	17
Sub02	0.62	23	1.40	27	66.07	33	30
Sub03	16.33	12	3.29	15	74.48	18	15
Sub04	30.37	9	2.18	18	65.57	34	22
Sub05	0.03	32	1.19	29	72.19	23	31
Sub06	176.80	2	5.61	9	90.27	2	2
Sub07	0.12	28	1.47	26	71.30	24	25
Sub08	0.02	33	0.40	34	67.48	29	34
Sub09	38.03	6	1.22	28	79.79	8	12
Sub10	0.05	30	5.57	10	76.39	12	20
Sub11	28.76	10	10.05	3	68.65	26	9
Sub12	0.02	34	1.00	30	74.63	17	28
Sub13	47.12	5	9.08	4	88.23	4	3
Sub14	0.18	25	1.59	25	66.56	31	29
Sub15	0.34	24	0.87	32	67.72	28	32
Sub16	26.35	11	4.98	12	72.71	22	16
Sub17	36.55	7	10.08	2	70.49	25	8
Sub18	1.35	20	1.69	23	65.24	36	27
Sub19	0.17	26	2.13	19	72.76	21	23
Sub20	0.01	35	0.00	36	66.23	32	36
Sub21	7.29	14	2.07	21	75.81	13	18
Sub22	2.98	18	6.18	8	82.11	6	6
Sub23	0.00	36	0.30	35	67.27	30	35
Sub24	8.94	13	3.00	16	73.05	20	19
Sub25	1.28	21	1.78	22	65.51	35	26
Sub26	0.15	27	7.24	6	80.63	7	10
Sub27	54.50	4	8.16	5	77.19	11	5
Sub28	322.31	1	12.64	1	92.38	1	1
Sub29	6.37	15	4.46	13	75.71	14	13
Sub30	0.05	29	0.67	33	75.30	15	24
Sub31	0.05	31	0.93	31	68.07	27	33
Sub32	31.13	8	1.68	24	79.54	9	11
Sub33	5.59	16	6.94	7	77.90	10	7
Sub34	1.79	19	2.47	17	73.51	19	21
Sub35	4.83	17	5.22	11	75.13	16	14
Sub36	72.60	3	3.51	14	88.80	3	4

주) (4) = Ranking of [(1)+(2)+(3)]/3

3.4 Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가

Promethee를 적용한 취약성 평가에서 가장 중요한 부분은 각 인자에 대한 가중치 산정이라고 할 수 있다. 기존의 선행된 많은 연구에서도 선정인자의 가중치 산정을 위해서 많은 방법을 적용하였다. 가중치 산정을 위해 적용된 방법은 전문가 선호도 조사, Entropy 그리고 AHP기법등이 있다(Lee *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2012; Park and Choi, 2008). 본 연구에서는 선정된 평가인자 중 저지대 지역, 통수능력 부족 관거은 Fig. 2에서 제시한 서울시의 침수피해 원인에서 각각 32%로 조사되었다. 또한, Sogn *et al.* (2012)에서는 강우발생시 토지이용에 따른 유출특성도 침수피해에 직접적인 영향을 미친다고 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 각 평가인자들이 도시홍수에 직접적인 영향을 미친다고 판단되어 각 인자에 대해 동일한 가중치를 Table 3과 같이 적용하였다.

도시지역에서 발생하는 홍수취약성을 평가하기 위하여 선정된 항목들은 각각의 선호함수로부터 Promethee의 분석과정을 거쳐 각 배수분구별 상대적 위험순위를 결정하게 된다. 본 연구에서는 Promethee의 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 침수피해는 적합한 V자 형태의 선호함수를 선정하였다. 침수피해는 계속 증가하다

가 어느 이상의 침수피해가 발생하면 더 이상 증가하지 않는 특성을 보이기 때문에 V형의 선호함수가 이러한 침수피해에 취약한 지역을 평가하는데 적합하다고 판단되었다(Park, 2008). V형의 파라미터 설정은 앞서 제시한 식 (2)와 같이 각 평가지표 범위내에서 선정하였다. Table 4는 3가지 취약성 인자를 적용한 Promethee의 배수분구별 선호유출량, 선호유입량 및 순흐름량에 따른 결과를 나타낸다. 각 평가인자는 값이 클수록 위험한 배수분구로 분류되며 Promethee의 결과도 순흐름량이 클수록 위험한 지역으로 평가된다. 평가결과 Sub28, Sub06, Sub13, Sub36, Sub27 은 도시홍수에 취약한 지역으로 Sub15, Sub31, Sub08, Sub23, Sub20은 안전한 지역으로 평가되었다.

4. 과거 침수기록을 적용한 도시홍수 취약성 정확도 비교

본 연구는 중랑천 유역을 대상으로 도시홍수를 유발하는 직접적 인자 3가지를 선정하여 산술적인 도시홍수 취약성 평가와 promethee를 적용한 도시홍수 취약성 실시하고자 한다. 평가 결과는 과거 대상유역에서 발생한 1984년부터 2011년까지의 침수기록을 통해 제안한 평가방법의 적용성을 검토하고자 한다. 과거의 침수기록은 총 28년동안 발생한 침수기록을 사용했으며 위험순위는 전체피해 면적을 침수횟수로 나누어 1회 발생한 침수면적에 대한 순위로 검토하였다. 또한 도시홍수에 대한 취약성 평가는 전체 36개의 배수분구 중 도시홍수에 취약한 상위 30%인 12개의 배수분구에 대하여 비교하였다. 과거 침수기록, 산술적인 도시홍수 취약성 평가 그리고 Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가의 배수분구별 상위 30%인 1위부터 12위까지의 결과는 Fig. 4와 같다.

Table 3. Weight of Vulnerability Index

	Lowland area	Deficiency sewer length	Curve number
Weight	0.3333	0.3333	0.3334

Table 4. Result of Promethee

Sub basin	Outgoing flow (a)	Incoming flow (b)	Net-flow (a-b)	Ranking order of risk	Sub basin	Outgoing flow (a)	Incoming flow (b)	Net-flow (a-b)	Ranking order of risk
Sub01	8.768	5.621	3.146	12	Sub19	0.429	7.678	-7.249	22
Sub02	0.063	15.369	-15.305	32	Sub20	0.010	18.148	-18.138	36
Sub03	0.872	2.696	-1.824	18	Sub21	1.649	5.458	-3.810	19
Sub04	0.721	12.433	-11.712	27	Sub22	12.833	2.202	10.632	7
Sub05	0.291	10.107	-9.815	25	Sub23	0.037	16.536	-16.498	35
Sub06	32.018	0.283	31.735	2	Sub24	0.655	5.083	-4.429	20
Sub07	0.267	10.346	-10.078	26	Sub25	0.099	15.099	-15.000	31
Sub08	0.045	16.125	-16.080	34	Sub26	13.552	2.394	11.158	6
Sub09	6.432	5.596	0.836	17	Sub27	14.717	0.513	14.204	5
Sub10	6.175	2.665	3.510	11	Sub28	60.556	0.000	60.556	1
Sub11	13.904	6.186	7.718	10	Sub29	3.355	2.326	1.029	14
Sub12	0.448	8.259	-7.811	23	Sub30	1.014	8.868	-7.854	24
Sub13	26.564	0.227	26.336	3	Sub31	0.082	14.476	-14.393	28
Sub14	0.088	14.561	-14.474	29	Sub32	5.682	4.704	0.978	15
Sub15	0.068	14.899	-14.831	30	Sub33	10.409	2.086	8.322	9
Sub16	3.516	2.678	0.838	16	Sub34	0.543	6.224	-5.681	21
Sub17	14.657	4.451	10.207	8	Sub35	4.326	2.398	1.928	13
Sub18	0.088	15.528	-15.440	33	Sub36	18.220	0.933	17.287	4

4.1 도시홍수 취약성 인자 검토

도시홍수 취약성인자는 도시지역에서 발생하는 침수피해에 직접적인 피해를 유발시키는 인자로서 저지대 지역, 통수능력 부족관거, 유출곡선지수를 선정하였다. 본 절에서는 취약성 인자 3개에 적용한 도시홍수 취약성 평가에 앞서 과거의 침수 기록의 1위부터 12위 까지의 배수분구에 대한 각 인자의 순위를 비교하고자 한다. 과거 침수기록의 배수분구별 순위에 대한 취약성 인자의 순위의 관계는 Fig. 5와 같다.

또한, 배수분구별 각 순위에 대한 특성을 검토하기 위해 과거 침수기록의 순위를 평균으로 각 인자에 대하여 표준편차와 표준오차를 식 (8)과 식 (9)에 대하여 적용하였다. 표준편차와 표준오차는 두 인자에 대한 상관관계를 제시하기위한 통계기법으로 0에 근접하면 각 인자의 상관관계가 높은 것이다. 배수분구별 과거 침수기록의 순위와 각 인자의 순위의 표준편차 및 표준오차는 저지대 지역이 7.34와 2.12, 통수능력 부족관거가 9.26과 2.67, 유출곡선지수가 9.59와 2.77로 분석 되었다. 각 인자의 평가 결과 과거 침수피해와의 상관관계는 저지대 지역이 통수능력 부족관거나 유출곡선지수보다 상관성이 크게 분석되었다.

$$\text{표준편차} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\text{표준오차} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

여기서, x_i : 인자의 순위, m : 배수분구 별 과거 침수면적 순위, n : 자료수

4.2 도시홍수 취약성 평가 결과

본 연구에서는 도시홍수 취약성 평가방법으로 산술적인 평가 방법과 Promethee를 이용한 평가 방법에 대하여 분석을 진행하였다. Fig. 6는 과거 침수기록 1위부터 12위까지의 배수분구를 기준으로 산술적인 도시홍수 취약성 평가와 Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가의 배수분구별 순위를 비교한 그래프이다. 또한 배수분구별 각 순위에 대한 특성을 검토하기 위해 산술적인 도시홍수 취약성 평가와 Promethee를 적용한 평가의 배수분구별 순위에 대하여 표준편차와 표준오차를 식 (8)과 식 (9)에 대하여 적용하였다. 과

(a) Inundation Record
(1984~2011)

(b) Arithmetic Urban flood
vulnerability assessment

(c) Urban flood vulnerability
assessment using Promethee

Fig. 4. Compared with Inundation Record and Urban Flood Vulnerability Assessment

(a) Lowland Area

(b) Deficiency Sewer length

(c) Curve Number

Fig. 5. Compared with Inundation Record and Urban Flood Vulnerability Index

(a) Arithmetic Urban flood vulnerability assessment

(b) Urban flood vulnerability assessment using Promethee

Fig. 6. Compared with Inundation Record and Urban Flood Vulnerability

거 침수기록에 대한 표준편차와 표준오차는 산술적인 도시홍수 취약성 평가가 6.34와 1.83, Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가가 7.29와 2.10로 분석되었다. 각 평가 방법에 과거 침수피해와의 상관관계는 Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가보다 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법의 정확도가 더 높게 분석되었다.

4.3 고찰

본 연구에서는 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 인자인 저지대 지역, 통수능력 부족관거 그리고 유출곡선 지수를 선정하여 산술적인 방법과 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가 방법을 제시하였다. 과거 28년동안 중랑천 유역에서 발생한 누가 침수면적을 침수횟수로 나누어 1회 발생한 평균 침수면적의 1위부터 12위까지의 순위로 산술적인 방법과 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가와 비교하였다. 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법은 각각의 취약성 인자보다 과거 침수기록과의 표준편차와 표준평균이 낮게 분석되었다. 이는 도시홍수 취약성 평가를 위해서는 도시홍수의 직접적 원인인 인자의 개별적인 적용보다는 복합적인 인자를 고려한 평가방법이 정밀도가 높다고 판단된다. 또한 과거 침수기록의 1위부터 12위까지의 배수분구중 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법은 9개의 배수분구가 일치하였으며 Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가 방법은 7개의 배수분구가 일치하였다. 따라서, 도시홍수의 유발하는 직접적인 인자만으로 조합된 평가방법시에는 다기준 의사결정방법의 하나인 Promethee를 이용한 분석보다는 각 인자의 순위의 산술적 평균의 순위를 적용한 평가방법이 더 정확하다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 인자를 선정하여 산술적인 방법과 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가 방법을 과거 중랑천 유역에서 발생한 1984년부터 2011년까지의 침수기록과 비교하여 평가방법에 대한 적용성을 검토하고자 한다. 선정된 인자로는 도시홍수에 직접적인

영향을 미치는 저지대 지역, 통수능력 부족관거 유출곡선지수이며 각 인자의 값의 순위의 평균을 순위로 산정하여 산술적인 도시홍수 취약성평가와 등가중치를 적용한 Promethee의 도시홍수 취약성 평가를 분석하였다. 과거의 침수기록은 중랑천 유역에서 총 28년동안 발생한 침수기록을 사용했으며 위험순위는 전체피해 면적을 침수횟수로 나누어 1회 발생한 침수면적에 대한 순위로 검토하였다. 또한 도시지역의 취약성 평가의 목적은 침수피해에 취약한 지역을 선정하기 위한 방법으로 대상지역을 전부 검토하는 것 보다는 상위 33%인 12개의 취약지역에 대하여 검토하였다. 과거 침수기록의 1위부터 12위까지의 배수분구중 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법은 9개의 배수분구가 일치하여 약 75.0%의 일치율이 분석되었으며 Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가 방법은 7개의 배수분구가 일치하여 약 58.3%의 일치율이 분석되었다.

본 연구에서는 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 인자만을 선정하여 취약성 평가를 진행하였으며 각 인자의 순위의 평균을 사용한 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법이 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가 방법보다 과거 침수기록과의 일치율이 높게 분석되었다. 따라서, 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 인자를 선정하여 취약성 평가시에는 Promethee를 이용한 평가보다는 순위의 평균에 대한 산술적인 도시홍수 취약성 평가 방법이 적절하다고 판단된다. 그러나 본 연구의 결과는 각 배수분구에 대한 순위의 일치성 보다는 취약한 범위를 선별하기에 적합한 방법으로 각 대상유역에 대한 정확한 분석을 위해서는 추가적인 인자선정이나 평가방법을 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 한서대학교 교내연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

Brans, J.P. and Vincke, P. (1985) The A Preference Ranking Organ-

- isation Method : The Promethee Method for MCDM. *Management Science*, Vol. 31, No. 6, pp. 647-656.
- Choi, S.W., Jun, H.D. and Park, M.J. (2008) Study on the Inundation Risk Evaluation by the Relationship Analysis, *The 2008 Korea Society of Hazard Mitigation Annual Conference*, pp. 115-118.
- Hermans, C., Erickson, J., Noordewier, T., Sheldon, A. and Kline, M. (2007) Collaborative Environmental Planning in River Management: An Application of Multicriteria Decision Analysis in the White River Watershed in Vermont, *Journal of Environmental Management*, Vol. 84, No. 4, pp. 534-546.
- Hong, S.J., Lee, Y.D., Kim, S.K. and Kim, J.H. (2006a) Evaluation of Risk Factors in Water Supply Networks using PROMETHEE and ANP, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 106-116.
- Hong, S.J., Lee, Y.D., Kim, S.K. and Kim, J.H. (2006b) Evaluation of Risk Factors to Detect Anomaly in Water Supply Networks-Based on the PROMETHEE and ANP-, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 1, pp. 35-46.
- Hwang, Y.J. (2006) Application of Geographic Database for Prediction of Flood Vulnerable Area, *Journal of Korea Association of Regional Geographers*, Vol. 12, No. 1, pp. 172-178.
- Jeong, D.L., Stedinger, J.R., Sung, J.H. and Kim, Y.O. (2006) Flood Risk Assessment with Climate Change, *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 1B, pp. 55-64.
- Kim, K.H., Sun, S.P., Yeo, K.D. and Kim, H.S. (2012) Determination of Investment Priority For River Improvement Project at Downstream of Dams Using PROMETHEE, *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 1B, pp. 41-51.
- Kron, W. (2002) Flood Risk = Hazard $\times$ Exposure $\times$ Vulnerability, Flood Defence.
- Lee, J.H., Jun, H.D., Park, M.J. and Jung, J.H. (2011) Flash Flood Risk Assessment using PROMETHEE and Entropy Method, *Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 3, pp. 151-156.
- Liu, H.X., Lu, Y.J. and Wang, Z.Y. (2011) Gis Approach of Inundation Analysis In The Dongjiang(East River) Drainage Area, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 12, pp. 1063-1070.
- Maragoudaki, R. and Tsakiris, G. (2005) Flood Mitigation Planning Using Promethee, *European Water 2005*, EWRA, PP.51-58.
- Min, J.H. and Song, Y.M. (2003) A Comparison of MAUT, AHP and Promethee for Multicriteria Decisions, *The 2003 Korean Management Science Review Annual Conferences*, pp. 229-232.
- Park, M.J. and Choi, S.W. (2008) Development of an Inundation Risk Evaluation Method Based on a Multi Criteria Decision Making, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 4, pp. 365-377.
- Park, M.K., Song, Y.S., Kim, S.D. and Park, M.J. (2012) A Study on the Assessment Method for High-risk Urban Inundation Area Using Flood Vulnerability Index, *Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 245-253.
- Park, S.G., Lee, K.H., Kyung, M.S. and Kim, H.S. (2006) Risk of Flood Damage Potential and Design Frequency, *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5B, pp. 489-499.
- Pirlot, M. (1997) A Common Framework for Describing Some Outranking Methods, *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, Vol. 6, pp. 86-92.
- Raju, K.S., Ducjstein, L. and Arondel, C. (2000) Multicriterion Analysis for Sustainable Water Resources Planning: A Case Study in Spain, *Water Resources Management*, Vol. 14, No. 6, pp. 435-456.
- 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 Feature and Current Works, *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, Vol. 5, pp. 22-38.
- Song, Y.H. and Lee, J.H. (2012) Evaluation of Inundation Risk Ranking for Urban Sewer Systems using PROMETHEE, *The Korea Contents Association*, Vol. 12, No. 8, pp. 388-398.
- Song, Y.S. (2012) Quantitative Relationship between Flood Vulnerability and Urban Inundation Characteristics, M.S, University of Hanseo, Korea

© Received August 12, 2013

© Revised August 16, 2013

© Accepted October 17, 2013