

도시침수 고위험지역 선정을 위한 AHP-PROMETHEE 연계*

Selection of Flood Risk Hotspots in Urban Areas : Based on the AHP-PROMETHEE Method

이상은 Lee Sangeun**, 이종소 Lee Jongso***, 김슬예 Kim Seulyea****

Abstract

Risk assessment methods are becoming important in making decisions on disaster prevention measures in urban areas. With a focus on urban flood, this study examines how risk hotspots are determined at the viewpoint of urban planning in municipalities. To this end, this study proposes the hybrid method of AHP and PROMETHEE. AHP, a pair comparison, is used in effectively designing a complex decision-making problem and selecting and weighting evaluation criteria, whereas PROMETHEE, a priority approach, is used in finding grid alternatives at higher risk. After analyzing the Gwangju case, the proposed method indicates that flood risk hotspots lies in two areas. The first is located in some grids near a bend of the Mokhyun river. Because this area can be inundated with the high depth, its development needs to be regulated strictly. The second is located in a joint of the Mokhyun river and the Gyungan river. Because this area is currently used with a residential purpose and highly populated, it needs various disaster prevention measures with designation of a special district. This study concludes that the proposed method has a sufficient possibility as a tool for planning flood disaster prevention, in particular selecting flood risk hotspots objectively.

Keywords: Multi-Criteria Decision Making, Urban Flood, Risk Hotspot, Disaster Prevention

I. 서론

2015년에 합의된 UNISDR의 센다이 강령에서는 도시의 방재역량을 높이도록 과학적인 위험도 평가 기술의 중요성을 더욱 강조하고 있다(UNISDR 2015). 각국 정부의 첫 번째 우선이행과제로 재난위험을 이해

하도록 하였으며, 이를 위해 전문가 집단에게 재해특성(Hazard), 노출특성(Exposure), 취약성(Vulnerability) 등 위험도를 평가하기 위한 요소기술을 개발하고 사전 재해저감대책을 마련하기 위한 의사결정이 체계적으로 이루어지도록 당부하고 있다.

그동안의 국제적 재난관리 협약과 국가 방재정책

* 본 논문은 2017년도 국토연구원 일반사업인 '도시 침수지역 및 영향권 분석을 통한 재난안전 자원시스템 구현(II)'의 연구 결과를 활용하여 작성되었음.

** 국토연구원 책임연구원(제1저자) | Associate Research Fellow, Korea Research Institute for Human Settlements | Primary Author | selee@krihs.re.kr

*** 국토연구원 책임연구원 | Associate Research Fellow, Korea Research Institute for Human Settlements | jslee@krihs.re.kr

**** 국토연구원 연구원 | Assistant Research Fellow, Korea Research Institute for Human Settlements | seulyea@krihs.re.kr

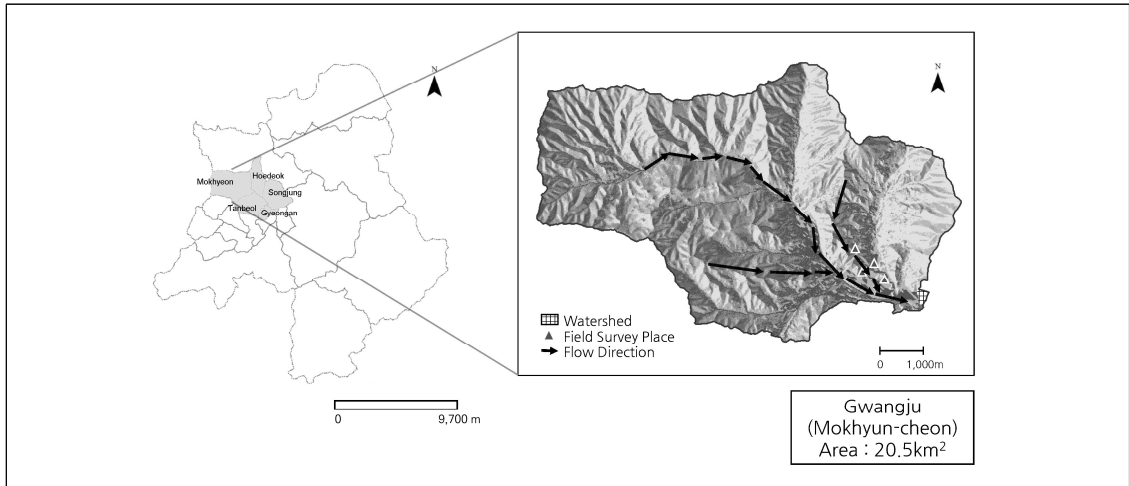
을 통해 사전에 재해 위험도를 낮추려면 대규모 투자나 규제가 필요하다는 점은 인식하고 있지만, 현장에서는 특정 공간이 위험도가 높다는 객관적인 근거를 확보하는 데 어려움을 겪고 있다(UNISDR 2011). 이는 Donoso, Di Baldassarre, Bøgh and Browning et al.(2012)에서 지적한 바와 같이, 그동안의 위험도 평가기술이 위험도의 물리적 측면인 재해특성을 정밀하게 분석하는 데에만 집중되어 있을 뿐만 아니라, 위험도의 사회적 측면인 노출특성과 취약성을 종합해 고위험지역의 위치와 적절한 저감대책 방향을 찾는 과학적인 의사결정 방법이 충분히 확보되지 않았기 때문이라 할 수 있다. 사실 방재대책을 수립하기 위해서는 가장 우선적으로 대상지 내의 고위험지역(Risk Hotspot)이 어디인지를 정확하게 파악해야 하지만, 공간단위로 위험을 판단하는 것은 학술적으로 매우 힘든 결정이다. 이는 공간에 부속된 위험요인이 다양할 뿐만 아니라 위험요인의 단위계가 저마다 달라 직관적으로 비교하기도 어렵고 각 위험요인의 중요성에 대해서도 이해관계자마다 다른 가치판단을 갖고 있기 때문이다(Fernandez, Mourato and Moreira 2016, 1367-1389; Kubal, Haase, Meyer and Scheuer 2009, 1881-1895; Brio and Evers 2016, 1019-1033). 최근에는 다양한 위험요인과 이들의 가치판단을 합리적으로 조율해 방재대책 의사결정의 품질을 높일 수 있는 다기준의사결정기법(MCDM)이 중요한 방법론으로 대두되고 있다. 하지만 Kandilioti and Makropoulos (2012), Brio and Evers(2016) 등에서는 MCDM의 필요성과 가능성에 비해, 여전히 실무차원에서의 적용 사례는 충분하지 않으며 도시침수와 관련해서는 적용 사례가 거의 없다고 지적하고 있다.

이러한 배경하에 본 논문은 도시침수 재해에 초점을 두고 지자체가 얻을 수 있는 다양한 위험정보를 토대로 고위험지역 위치를 결정하는 데 유용한

MCDM 방법론을 검토하고자 하였다. 방법론의 조사와 검증에 사용된 연구질문은 다음과 같다. 첫째, 도시침수의 고위험지역을 평가하는 복잡한 의사결정 문제를 어떻게 구조화할 수 있을 것인가? 둘째, 고위험지역의 평가기준과 이들의 상대적인 중요도를 어떻게 결정할 것인가? 셋째, 평가기준 간의 보상(Trade-off)이 크게 발생하는 상황에서, 각 공간별로 고위험지역으로서의 선호도를 어떻게 판단할 것인가? 실증 대상지의 경우 시군구 단위로 피해액과 피해빈도를 기준으로 상대적으로 도시침수가 크게 우려되는 경기도 광주시를 1차적으로 선정하였으며, 피해력 조사, 현장 관계자 의견 청취, 지형분석 등을 통해 <Figure 1>과 같이 광주시 내 목현천 유역을 공간범위로 설정하였다. 위험정보는 지자체의 재해예방형 도시계획의 기술지원을 위해 국토연구원 도시방재·수자원연구센터에서 구축 중인 도시침수 예방대책 지원시스템(이상은, 김창현, 박태선, 김미은 외 2016)을 통해 수집하였다. 해당 시스템은 각 지자체의 도시계획 단계에서 공간을 중심으로 토지이용, 건축물, 방재시설, 지구지정 등의 종합대책을 마련할 수 있도록 도시침수와 관련된 다양한 종류의 상세 주제도를 제공하고 있다. 광주시 목현천 유역의 경우 해당 시스템에서도 중점관리대상지로 선정하고 있어 관련 주제도를 쉽게 구할 수 있다.

본 논문은 방법론의 이론적인 발전보다는, MCDM의 장점을 이용해 각종 공간정보를 종합함으로써 정책·실무현장에서 더 합리적인 판단을 하도록 지원하는 실용적인 측면에서의 기여도가 클 것으로 판단된다. 특히, 도시침수 예방대책 지원시스템을 통해 지자체별로 도시침수의 고위험지역 위치정보를 서비스할 예정인데, 여기서 고위험지역은 주민피해가 크게 우려되며 위험을 구성하는 재해특성, 노출특성, 취약성 등의 범주에 포함된 다양한 영향요인으로 결정하기로

Figure 1 _ Study Area



하였다. 고위험지역은 지자체 담당자가 도시계획의 사전단계에서 방재대책 또는 개발규제를 우선적으로 고려해야 할 위치를 이해하는 데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

II. 방법론

1. 전체 방법론의 구성

관리과학 분야에서는 1970년대 이후 복잡한 문제에서 최선의 의사결정을 위해 MCDM의 다양한 기법을 개발한 바 있는데, 다속성 효용가치 함수법, 쌍대비교법, 우선순위 산정법, 이상치 거리 분석법 등이 대표적이다. 어떤 방법도 모든 문제에 적용할 수 있을 만큼 완벽하지 않기 때문에 최근 들어서는 해당 문제의 특성에 맞춰 각 방법의 단점을 서로 보완할 수 있도록 방법론 간의 연계가 강조되고 있다. 본 논문에서는 도시침수에 대한 다양한 위험정보를 토대로 개별 공간의 위험을 평가해 고위험지역을 결정하는 데 쌍대비교법인 AHP와 우선순위 산정법인 PROMETHEE를 서로 연계하는 방법을 취하기로 하였다. 이는 AHP와

PROMETHEE는 각각의 장점이 서로의 단점을 보완하는 특징이 있기 때문이다(Bilsel, Buyukozkan and Ruan 2006, 1181-1197; Wang and Yang 2007, 3691-3700; Behzadian, Kazemzadeh, Albadvi, and Aghdasi 2009, 198-215; Macharis, Springael, Brucker and Verbeke 2004, 307-317; Samant, Deshpande and Jadhao 2015, 7175-7178). Saaty(1980; 1986)가 심리학과 수학의 이론을 접목해 제안한 개발한 AHP의 경우 대안을 선정하는 문제를 유연하게 정의하고 평가기준 간의 중요도를 체계적으로 계량화하는 방법을 제공한다는 장점이 있다. 이에 반해, Brans(1982), Brans and Vincke(1985), Brans and Mareschal(1994) 등이 개발한 PROMETHEE의 경우 대안의 성과 차이를 선호도로 치환함으로써 축척이 다른 평가기준 간의 보상(Trade-off) 문제에 대한 이론적이고 안정적인 의사결정 규칙을 제공하는 장점을 지니고 있어 AHP가 지닌 결정규칙의 이론상의, 그리고 안정성의 한계(Guitouni and Martel 1998, 501-521; Ishizaka and Labib 2009, 201-220)를 해결하는 데 유용한 것으로 알려져 있다.

본 논문에서 두 기법을 연계해 고위험지역 위치를 선정하기 위해 먼저 AHP를 통해 의사결정 문제를

구조화하고 평가기준별 가중치를 얻기로 하였으며, 도시침수 예방대책 지원시스템에서 제공하는 위험정보와 AHP를 통해 도출한 평가기준별 가중치를 PROMETHEE에 적용해 각 공간 대안별로 고위험지역으로서의 비교우위를 검토하기로 하였다. 이는 다음과 같이 5가지 단계로 구분할 수 있다.

(1단계) 도시침수 고위험지역 위치결정 문제의 계층 구조화: 의사결정 문제의 목적, 대안 및 평가기준의 정의

(2단계) 평가기준의 가중치 도출: 전문가 그룹에게 쌍대비교 설문지를 발송해 평가기준의 상대적인 중요도에 대한 응답을 받고 가중치 정량화

(3단계) 각 대안의 평가기준별 성과표 작성: 도시침수 예방대책 지원시스템에서 제공하는 대상지에 대한 위험도 상세 주제도 이용

(4단계) 각 대안의 고위험지역으로서의 선호도 산정: 특정 대안과 타 대안 간의 평가기준에 대한 성과 차이를 선호도 값으로 변환

(5단계) 각 대안의 고위험지역으로서의 우선순위 분석: 선호도 흐름량을 분석한 뒤 우선순위 높은 대안을 조사하고 대안의 특징을 확인

2. 문제의 계층 구조화

계층구조에서 의사결정 문제의 목적은 다양하게 정할 수 있는데, 고위험지역 위치결정에 대한 본 논문의 문제는 '선택의 문제에 해당된다. 즉 도시침수의 위험을 야기하는 다양한 원인, 다양한 평가기준을 종합해 대상지 내 위험이 높은 공간을 선택하는 문제라 할 수 있다. 선택의 문제에서 대안이란 최종 목적 달성을 위해 선택해야 할 대상을 의미하는 것으로, 위험지역을 선정하는 문제와 관련해서는 장소를 구분하는 구체적

인 공간의 위치가 대안이 된다(Meyer, Haase and Scheuer 2007). 본 논문에서는 고위험지역 결정 이후 지구단위계획 수립 등에서의 활용목적을 고려해 100m×100m 크기의 격자단위로 대안을 구분하기로 하였다. 또한 도시침수 예방대책 지원시스템에서 확인할 수 있는 대상지의 침수해석 결과를 토대로 도시침수에 영향을 받지 않는 격자는 사전에 제외해 분석량을 줄이고자 하였다. 광주시 대상지의 경우 시스템에서 제공하는 영향권 지도를 바탕으로 <Figure 2>와 같이 총 95개의 격자를 대안으로 선정하였다.

평가기준은 대안 선정 시 고려해야 할 핵심적인 속성(Attributes)에 해당된다. 최근 들어 재해 위험도의 발생원인에 대해 개념구조의 틀이 UNISDR(2009)을 중심으로 마련됨에 따라 본 논문은 이를 참고하여 재해특성, 노출특성, 취약성으로 평가기준을 개략적으로 구분한 뒤 각각에 대해 세부평가기준을 선정하였다. 아울러 토목, 도시계획, 방재 등의 분야 전문가로 구성된 자문회의를 개최하여 평가기준 선정의 적정성을 검토하고 수정·보완하였다.

최종적으로 평가기준은 <Table 1>과 같이 3단계의 계층으로 정의되었다. 재해특성의 경우 '방어능력을 초과하는 강우조건에서 내외수에 의해 특정 공간이 위협받는 정도로 정의하였으며, 각 공간에 발생한 내수에 의한 최대 침수위(30년 빈도 기준)와 외수에 의한 최대 침수위(100년 빈도 기준)의 두 가지 세부평가기준으로 평가하기로 하였다. 노출특성의 경우 '해당 강우조건에서 특정 공간이 침수에 노출된 정도로 정의하였으며, 각 공간 내 도시침수 영향권에 포함된 인구수와 토지면적의 두 가지 세부평가기준을 고려하였다. 이 중에 토지노출의 경우, 동일한 면적이 노출되었다고 해도, 주거, 상업·업무, 공업, 녹지 등 토지 용도에 따라 위험정도가 크게 다르기 때문에 토지이용방식별로 노출면적을 추가로 구분하기로 하였다.

Figure 2_Definition of Alternatives in the Hierarchical Structure

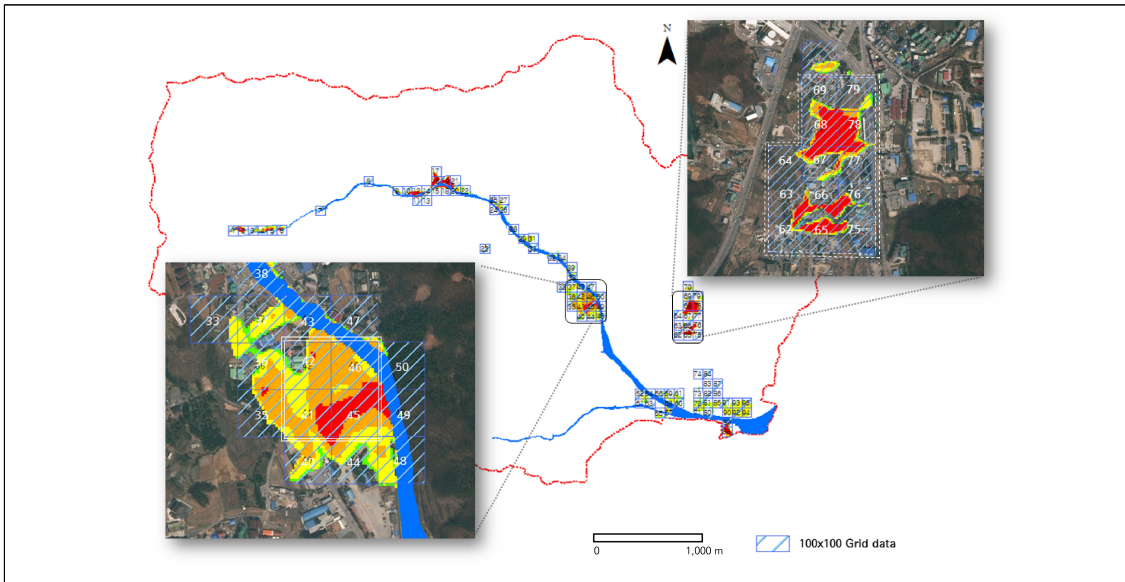


Table 1_Evaluation Criteria Used to Select Flood Risk Hotspots

Criteria	Unit	Description
Hazard	-	The Degree to Which a Certain Area is Threatened by Flood in Rainfall Conditions Exceeding Defensive Capacity
• Maximum Inundation Depth from River Flood	cm	Maximum Inundation Depth from River Flood at 100-year Return Period
• Maximum Inundation Depth From Drainage Failure	cm	Maximum Inundation Depth from Drainage Failure at 30-year Return Period
Exposure	-	The Degree to Which a Certain Area is Exposed to Flood in Rainfall Conditions Exceeding Defensive Capacity
• Affected Population	per.	Total Number of Population Living in the Flood Inundation Area
• Affected Land	-	Total Area of Land Included in the Flood Inundation Area
- Residential Land	m ²	Total Area of Residential Land Included in the Flood Inundation Area
- Commercial & Business Land	m ²	Total Area of Commercial and Business Land Included in the Flood Inundation Area
- Industrial Land	m ²	Total Area of Industrial Land Included in the Flood Inundation Area
- Natural & Green Land	m ²	Total Area of Natural and Green Included in the Flood Inundation Area
Vulnerability	-	The Degree to Which a Certain Area is Inherently Sensitive to Flood, Irrespectively of Occurrences of Hazards
• Dist. of Vulnerable Building	#	Total Number of Old(Aged over 30 Years) or Underground Buildings in the Area
• Dist. of Critical Facility	#	Total Number of Urban Facilities to be Protected Importantly from Flood, Including Lifeline Facilities(Water, Electricity, and Gas Supply), Waste Disposal Facilities, Water Pollution Control Facilities, Public Offices, and Medical Facilities
• Dist. of Road	m	Total Length of Road

취약성의 경우 '기상·수문 현상과 무관하게, 피해민감성에 영향을 주는 해당 공간 고유의 특징'으로 정의하였으며, 주민 고층이나 경제적 피해를 가중하는 요인에 초점을 두고 노후·지하 건축물, 보호대상시설, 그리고 도로 등의 분포를 고려하기로 하였다.

3. 평가기준의 가중치 도출

평가기준 간의 중요도 비교를 위해 관련 전문가들이 9점 척도(1점: 동등하게 중요; 9점: 절대적으로 중요)에 따라 평가기준 간의 상대적 중요도를 판단할 수 있도록 쌍대비교 설문조사서를 작성하였다. 이어서 토목, 도시계획, 방재 등의 전문가 30인을 선정한 뒤 개인별로 연락을 취해 연구취지, 평가문제의 구조, 설문지 응답방법 등을 설명하고, 이메일을 통해 설문지를 발송하였으며, 이 중에서 총 28개의 설문지가 회수되었다. 설문조사에서 평가기준 간의 중요도를 비교한 결과를 토대로 비교행렬을 작성한 뒤 다음의 고유벡터법(Eigenvalue method)을 통해 10가지 평가기준의 가중치 벡터 \vec{p} 를 <식 1>과 같이 도출하였으며, A는 <식 2>와 같다.

여기서, a_j 는 j번째 평가기준($j=1..10$)을, A는 비교행렬을, $P(a_i, a_j)$ 는 a_i 에 비한 a_j 의 상대적 중요도이며 p_i/p_j 을 의미하는 것으로 가정한다.

$$A \times \vec{p} = 10\vec{p}; \vec{p} = [p_1, p_2, \dots, p_{10}] \quad \text{<식 1>}$$

	a_1	...	a_i	...	a_N
a_1	1	...	$P(a_1, a_i)$...	$P(a_1, a_N)$
\vdots	\vdots	1
a_i	$P(a_i, a_1)$	\vdots	1	...	$P(a_i, a_N)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	1	...
a_N	$P(a_N, a_1)$	\vdots	$P(a_N, a_i)$	\vdots	1

	a_1	...	a_i	...	a_N
a_1	p_1/p_1	...	p_1/p_i	...	p_1/p_N
\vdots	\vdots	1
a_i	p_i/p_1	\vdots	p_i/p_i	...	p_i/p_N
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	1	...
a_N	p_N/p_1	\vdots	p_N/p_i	\vdots	p_N/p_N

<식 2>

이러한 방법은 응답의 일관성이 부족해 비교행렬을 통해 얻은 가중치가 신뢰할 만한지 판단할 수 있는 판단기준을 필요로 한다. 따라서 Saaty(1977)가 제시한 일관성 지수(Consistency Index: CI), 일관성 비율(Consistency Ratio: CR)을 순차적으로 계산하여 일관성 조건 충족 여부를 <식 3>과 같이 확인하기로 하였으며, 문제의 계층이 비교적 복잡하고 쌍대비교를 해야 할 항목이 많은 점을 고려해 CR이 0.2보다 큰 응답의 경우 일관성이 낮다고 판단하여 가중치 산정에서 제외하기로 하였다. 비교행렬의 일관성에 문제가 없는 응답자의 가중치를 기하평균(Geometric Mean)하여 집단 가중치값(Local Weights)을 각 계층별로 산정하고, 이어서 전체 계층구조를 고려해 전체 가중치(Global Weights)를 산정하였다.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RCI} \quad \text{<식 3>}$$

여기서, λ_{max} 는 최대 고유값, n 은 행렬의 차원, RCI는 난수지수를 각각 의미한다.

4. 대안의 성과표 작성

도시침수 예방대책 지원시스템에서 제공하는 대상지의 위험정보를 이용해 j번째 평가기준($j=1..10$)에 대

Table 2_Performance Table for Alternatives

Evaluation Criteria j \ Alternatives k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	353	0	7	0	0	0	1,715	0	0	137
2	353	0	18	0	0	0	3,897	0	0	116
3	128	0	68	0	0	0	1,604	0	0	129
4	164	0	7	0	0	0	3,278	0	0	131
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
93	50	0	190	5,121	0	0	0	3	0	275
94	50	0	372	8,038	0	0	0	3	0	224
95	50	0	147	5,237	0	0	535	0	0	237

Note: Evaluation Criterion is Respectively Maximum Inundation Depth from River Flood(j = 1), Maximum Inundation Depth from Inland Flood(j = 2), Affected Population(j = 3), Affected Residential Land(j = 4), Affected Commercial & Business Land(j = 5), Affected Industrial Land(j = 6), Affected Natural & Green Land(j = 7), Dist. of Vulnerable Buildings(j = 8), Dist. of Critical Facilities (j = 9), and Dist. of Road(j = 10)

한 k번째 격자 대안(k=1...95)의 성과 $f_j(x_k)$ 를 산정한 뒤 <Table 2>와 같이 성과표를 작성하였다.

5. 대안의 선호도 산정

PROMETHEE는 선호도라는 개념에 근거해 대안 간의 비교우위를 결정하는 방법으로, 우선 각 평가기준에서 대안 간의 성과 차이를 다음 <식 4>와 같이 단일기준 선호도 $Pr_j(x_s, x_t)$ 로 변환한다.

$$Pr_j(x_s, x_t) = G_j\{f_j(x_s) - f_j(x_t)\} \quad \text{<식 4>}$$

여기서, x_s 와 x_t 는 임의의 두 대안($s = 1 \dots 95$, $t = 1 \dots 95$)을, $f_j(x_s)$ 와 $f_j(x_t)$ 는 j번째 평가기준에서 s번째와 t번째 대안의 성과를 의미한다. $Pr_j(x_s, x_t)$ 는 단일기준 선호도로서 0에서 1사이의 값을 갖는데, 1일 경우 대안 x_s 를 절대적으로 선호함을, 0일 경우에는 x_s 를 전혀 선호하지 않는 것으로 정의된다. $G_j\{\}$ 는 j번째 평가기준에서 두 대안의 성과 차이를 0~1의 범위의 선호도 값으로 변환하는 선

호도 함수인데, 대안의 성과차이와 선호도 간의 관계를 고려해 적당한 형태를 지닌 함수를 선택한다. Brans, Vincke and Mareschal(1986)은 선호도 함수로서 Uniform, U-shape, V-shape, Level, Gaussian 등의 6가지 형태를 제시한 바 있다. 이 가운데 본 논문에서는 함수의 형상계수에 대한 가정을 최소화하고 선호도의 불연속성을 고려할 특별한 이유가 없어 다음 <식 5>와 같이 V-shape 함수를 적용하기로 하였고, 이 함수의 유일한 역치인 기준값 q_j 는 대안별 성과 차이의 최댓값을 적용하였다.

$$Pr_j(x_s, x_t) = G_j\{d_j(x_s, x_t)\} = \begin{cases} 0 & d_j(x_s, x_t) \leq 0 \\ d_j(x_s, x_t)/q_j & d_j(x_s, x_t) > 0 \end{cases}$$

$$d_j(x_s, x_t) = f_j(x_s) - f_j(x_t) \quad \text{<식 5>}$$

단일기준 선호도를 구한 뒤에는 미리 구한 가중치 값 \vec{p} 를 고려해 전체 평가기준을 종합하는 선호도 지수를 <식 6>과 같이 대안별로 산정하였다.

$$\pi(x_s, x_t) = \sum_{j=1}^N [p_j \times Pr_j(x_s, x_t)]$$

$$\vec{p} = [p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_{10}] \text{ <식 6>}$$

여기서 $\pi(x_s, x_t)$ 는 두 대안 x_s 와 x_t 간의 종합 선호도 지수이며, 이 지수가 1일 경우에는 모든 평가 기준을 종합할 때 대안 x_s 를 절대적으로 선호함을, 0일 경우에는 x_s 를 전혀 선호하지 않음을 의미한다.

6. 고위험지역 우선순위 분석

PROMETHEE 방법으로 대안 간의 비교우위를 판별할 때 두 가지 결정규칙이 있다. 첫 번째는 한 대안이 타 대안을 지배하는 정도와 지배받는 정도를 별도로 판단하는 PROMETHEE 1인데 <식 7>과 같이 선호도 유입량과 선호도 유출량을 사용한다.

$$\varphi^+(x_s) = \frac{1}{M-1} \sum_{t=1}^M \pi(x_s, x_t)$$

$$\varphi^-(x_s) = \frac{1}{M-1} \sum_{t=1}^M \pi(x_t, x_s) \quad \text{<식 7>}$$

여기서, $\varphi^+(x_s)$ 는 선호도 유입량으로서 대안 x_s 가 M-1개의 나머지 대안을 평균적으로 지배하는 정도를 나타낸다. $\varphi^-(x_s)$ 는 선호도 유출량으로서 대안 x_s 가 M-1개의 나머지 대안에게 평균적으로 지배받는 정도를 나타낸다. PROMETHEE 1에서는 임의의 두 대안의 관계는 선호, 무차별, 비교불가의 세 가지 종류의 결정이 가능한데, 이를 통해 고위험지역으로서 명백히 선호도 유입량이 높고 선호도 유출량이 낮은 곳이 있는지를 확인하였다.

두 번째 결정규칙은 한 대안이 타 대안에 대한 상대적인 비교우위를 판단하는 PROMETHEE 2인데 선

호도 유입량과 선호도 유출량의 차이, 즉, 선호도의 순흐름량을 기초로 한다. 단일한 선호도 순흐름량을 이용하기 때문에 PROMETHEE 1에서 비교불가인 경우에 각 대안의 비교우위를 강제적으로 판별하는 데 사용된다. 본 논문에서는 PROMETHEE 2를 이용해 전체 대안 95개 격자 가운데 상위 10%에 해당되는 고위험지역 10개소를 분석하기로 하였다.

III. 결과 및 토의

AHP를 통해 도출한 평가기준별 가중치 산정 결과와 PROMETHEE를 통해 분석된 대상지 내 고위험지역은 각각 다음과 같다.

1. 평가기준의 가중치 산정 결과

가중치 산정 결과를 요약한 <Table 3>을 보면, 설문 에 참가한 전문가들은 전반적으로 도시침수의 위험에 있어서 재해특성(36.4%), 노출특성(27.3%), 취약성(36.3%)에 비슷한 중요도를 부여하였다. 순수한 자연 환경적인 요인인 재해특성이 위험을 구성하는 데 필요조건임에도 불구하고, 재해 영향권에 대한 인구나 개발의 근접성을 의미하는 노출특성, 도시의 개발방식과 관련된 취약성에도 비슷한 수준의 중요도가 부여된 점은 인상적인 결과라 할 수 있다. 이는 재해 그 자체를 방어하기보다는 위험을 악화시키는 사회·경제적 요인에 집중하는 최근 방재정책의 방향과도 잘 부합하는 결과라 할 수 있다.

재해특성 가운데에서는 외수에 의한 침수위(16.5%)에 비해 내수에 의한 침수위(19.9%)가 조금 더 중요시되었다. 도시침수는 인명 손실을 크게 유발하기보다는 경제적 피해나 주민생활의 불편과 직결되므로 주로 밀집지역에서 관거용량 부족이나 노면수 적체에

Table 3_Weights of Evaluation Criteria

Criteria	Unit	Local Weight(%)	Global Weight(%)
Disaster Characteristics	-	36.4	36.4
• River Max Inundation Depth	cm	45.4	16.5
• Inland Max Inundation Depth	cm	54.6	19.9
Exposure Characteristics	-	27.3	27.3
• Residential Area	per.	53.7	2.4
• Land Exposure	-	16.4	4.5
- Residential Area	m ²	53.7	2.4
- Commercial Business Area	m ²	27.7	1.2
- Industry Area	m ²	14.2	0.6
- Natural Green Area	m ²	4.4	0.2
Vulnerability	-	36.3	36.3
• Vulnerable Building	#	46.5	16.9
• Protective Facility	#	42.2	15.3
• Road Length	m	11.4	4.1

의해 발생하는 내수에 더 큰 중요도를 부여한 것으로 해석된다.

전문가들은 노출특성에 대해서는 인구노출(22.8%)이 토지의 노출(4.5%)보다 크게 중요시하였다. 즉, 도시침수의 위험을 판단할 때 단순히 얼마나 방대한 토지가 영향을 받는지보다는 얼마나 많은 사람이 영향을 받는지를 고려하는 것이 더욱 중요하다는 의미로 해석된다. 토지노출 중에서는 주거(2.4%), 상업·업무(1.2%), 공업(0.6%), 녹지(0.2%)의 순서로 중요도를 부여하였는데, 단순히 도시침수로 인한 경제적 피해의 크기 외에도 주민생활의 불편함을 크게 고려한 것으로 이해된다.

취약성에 대해서는 공간 내 노후·지하 건축물(16.9%)과 특정한 보호대상시설(15.3%)의 분포가 비슷한 수준으로 중요하지만, 도로 분포(4.1%)의 경우 상대적으로 낮은 중요도가 부여되었다. 최근 도시침수의 사례를 보면 노후 또는 지하 건축물에 거주한 주민들은 노면수 유입 또는 하수역류로 인해 재산상

의 피해도 크게 발생하였고 일상의 생활로 환원하는 데에도 오랜 시간이 소요되었으므로 전문가들도 이 점을 잘 인식한 것으로 보인다. 전기공급시설, 가스 공급설비, 공공청사, 종합의료시설, 수질오염방지시설, 폐기물처리시설 등의 보호대상시설의 분포에 대해서도 이러한 취약 건축물만큼이나 중요하게 판단한 점은 인상적인 결과라 할 수 있다. 이는 침수된 지점에서 당장에 발생하는 1차 피해뿐만 아니라 라이프 라인, 지역의 구호 및 상황통제, 환경상의 위해 발생 등 도시의 기능 마비로 인한 피해 확산 또한 중요시하고 있다는 것을 뜻한다. 하지만 도로 분포의 경우 도로 그 자체가 피해가 크게 발생하는 대상은 아니지만 도로가 침수될 경우 대피, 구호, 수송 등에 차질을 줄 수 있고, 통행, 이동 등의 불편으로 인해 도시생활에 큰 영향을 줄 수 있다는 점을 감안할 때 그 중요도가 과소평가되었을 가능성이 있다. 하지만 도로는 도시공간에 비해 배수기능을 잘 갖추고 있어 침수 지속시간이 상대적으로 짧기 때문에 그 영향이

상대적으로 크지 않다고 전문가들이 판단하였을 가능성도 존재한다.

3단계에 걸쳐 마련한 평가기준 중에서는 거주인구 노출, 내수에 의한 최대 침수위, 취약 건축물 분포, 외수에 의한 최대 침수위, 보호대상시설 분포의 순서대로 중요도가 부여되었다. 10가지 평가기준 중 위 5가지 기준만으로 가중치 합이 90%를 넘어 도시 침수 위험을 판단하는 데 핵심 요인이라 할 수 있을 것이다.

2. 고위험지역 분석 결과

<Table 4>는 PROMETHEE의 방법으로 광주시 대상지의 각 격자 대안별로 선호도 지수 값을 이용해 선호도 흐름량을 산정한 결과를 예시로 나타내고 있다. PROMETHEE 1을 적용했을 때, 즉, 선호도 유입량과 선호도 유출량을 개별적으로 분석하였을 때 95개 격자 대안 중에서 고위험지역으로서 선호도 유입량이 가장 높고, 선호도 유출량이 가장 낮은 곳은 발견되지 않았다.

PROMETHEE 2의 결정 규칙에 해당하는 순흐름량

$\varphi(x_s)$ 을 구한 뒤 고위험지역으로서의 상대적인 비교우위를 조사한 결과, <Figure 3>, <Table 5>와 같이 10가지 격자를 선정할 수 있었다. 전반적으로 목현동에 위치한 목현천 만곡부 연접지역(격자번호 8, 20, 21, 이상 유형 1)과 송정동에 위치한 경안천 합류부 연접지역(격자번호 59, 61, 72, 80, 81, 93, 94, 이상 유형 2)의 두 곳으로 구분됨을 알 수 있었다. 이 중에서 군집 1인 목현동 고위험지역은 지형특성상 100년 재현기간 조건에서 외수에 의해 3m 이상 침수될 수 있으며 취약한 노후·지하 건축물이 다수 포함되어 있음을 알 수 있었다. 현재 자연녹지 지역으로 지정되어 있음을 고려할 때 향후에도 이곳은 개발규제가 우선시되어야 할 지역이라 할 수 있다. 군집 2인 송정동의 고위험지역은 동일 조건에서 외수에 의해 침수는 50cm 수준에 불과하지만 인구가 매우 밀집된 주거 지역이라는 특징이 발견되었다. 이 지역을 아우르도록 방재지구를 지정해 도시정비 차원에서 단지, 대지, 건축물의 침수 방지와 설비 대책을 먼저 강구하고, 추가로 위험이 가중되지 않도록 신규 건축물의 경우 용도나 규모를 제한하고 의무적으로 내수화하도록 할 필요가 있을 것

Table 4_ Example of Calculation of Preference Flows

	$\pi(x_s, x_t)$							$\varphi^+(x_s)$
	(x_1)	(x_2)	(x_3)	...	(x_{93})	(x_{94})	(x_{95})	
(x_1)	0.00	0.00	0.11	...	0.14	0.00	0.14	0.18
(x_2)	0.14	0.00	0.11	...	0.14	0.00	0.14	0.21
(x_3)	0.20	0.17	0.00	...	0.10	0.00	0.10	0.19
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
(x_{93})	0.42	0.41	0.35	⋮	0.00	0.00	0.22	0.35
(x_{94})	0.43	0.42	0.39	⋮	0.12	0.00	0.31	0.37
(x_{95})	0.25	0.24	0.16	⋮	0.00	0.00	0.00	0.22
$\varphi^-(x_s)$	0.20	0.18	0.22	⋮	0.12	0.03	0.18	

Figure 3 _ Selection of Flood Risk Hotspot

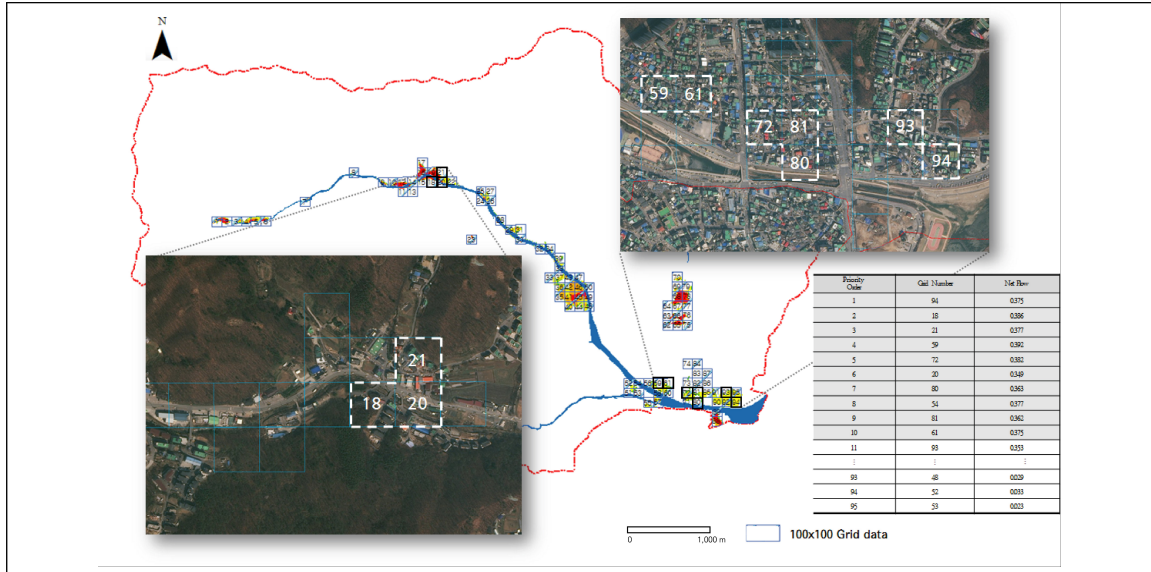


Table 5 _ Characteristics of Flood Risk Hotspots

Priority Order	Grid Number	Hazard		Population	Exposure				Vulnerability		
		from River Flood	from Drainage Failure		Land				Buildings	Critical Facilities	Road
		m	m	Residential	Comm. & Business	Industrial	Natural & Green	#			
1	94	0.50	0.00	372	8,037.7	0.0	0.0	0.0	3	0	224
2	18	5.02	0.00	63	0.0	0.0	0.0	1,635.7	3	0	58
3	21	3.14	0.00	118	0.0	0.0	0.0	1,398.0	3	0	13
4	59	0.50	0.00	256	3,124.5	0.0	0.0	0.0	15	0	342
5	72	0.50	0.00	207	5,506.8	0.0	0.0	0.0	22	0	180
6	20	3.14	0.00	49	0.0	0.0	0.0	4,265.4	2	0	159
7	80	0.65	0.00	192	1,317.1	0.0	0.0	0.0	4	0	283
8	54	0.50	0.00	698	34.3	0.0	0.0	708.8	2	0	221
9	81	0.50	0.00	178	4,053.6	0.0	0.0	0.0	5	0	295
10	93	0.50	0.00	167	8,261.4	0.0	0.0	0.0	0	0	316

Note: group 1; group 2

으로 판단되었다. 당장에 주민 주거지를 하천으로부터 이격시킬 수 없지만 중장기 계획 수립 시에는 점진적으로 침수 위험 감소를 유도해야 할 것이다. 즉, 도시

계획에는 용도나 시설 배치, 입지 제어, 토지매수 등도 이루어질 수 있도록 내용적 반영이 필요하다고 판단되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 지자체가 얻을 수 있는 도시침수에 대한 위험정보를 토대로 하여, 재해 예방형 도시계획 수립 시 고위험지역 위치를 결정하는 방법론을 검토하였다. 다양한 MCDM 방법론 가운데 AHP와 PROMETHEE의 연계방법은 대상지 내 고위험지역의 위치를 결정하는 좋은 수단을 제공한다는 점을 확인할 수 있었다. 즉, AHP는 도시침수의 고위험지역을 평가하는 복잡한 의사결정 문제를 유연하게 구조화하고, 다양한 위험 유발요인을 고려해 평가기준을 체계적으로 마련하는 데 유용한 측면이 있었다. 또한 전문가 그룹의 다양한 의견을 종합해 평가기준의 중요도를 정량화할 수 있었으며 그 결과 또한 최근 방재정책 방향과도 잘 부합함을 알 수 있었다. 게다가 고위험지역을 선정하는 데 포괄적으로 10가지의 평가기준을 적용하였음에도 불구하고 PROMETHEE 기법은 각 격자대안이 갖는 성과의 차이를 선호도로 변환한 뒤 평가기준 간의 보상을 적절히 조율하므로 최선의 결정을 할 수 있도록 돕는다는 것을 알 수 있었다. 종합하면, 제안한 MCDM 방법론은 도시침수에 대한 도시계획적 대책을 강구하는 목적하에서 고위험지역을 선정하는 데에 상당한 가능성이 있음을 경기도 광주시 사례연구 결과를 통해 실증하였다.

본 논문의 성과에도 불구하고 많은 추후 연구과제가 남아 있으며, 특히, 추가적인 사후 해석방법에 대한 연구가 필요한 것이 사실이다. 예를 들어, 평가기준 간의 가중치가 전문가의 주관적인 판단에 의해 결정되기 때문에 결정의 민감성은 중요한 분석대상이라 할 수 있다. 민감성 분석 외에도 엔트로피 방법이나 요인분석과 같은 분석방법을 적용해 평가기준의 가중치를 분석한 뒤 그 결과를 비교하는 것은 좋은 해결책이 될 수 있을 것이다. 또한 최종적으로 한 공간 대안

이 고위험지역으로 선정되었을 경우 어떤 평가기준으로 인한 것인지에 대한 주요인 분석 결과는 방재대책의 방향을 보다 객관적으로 판단하는 데 유용한 정보를 제공할 수 있다. 이는 본 논문의 한계라 할 수 있으며, 실무적용을 앞두고 별도의 추후 연구가 반드시 이루어져야 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. 이상은, 김창현, 박태선, 김미은, 김슬예. 2016. 도시 침수지역 및 영향권 분석을 통한 재난안전 정책지원 시스템 구현(I). 안양: 국토연구원.
Lee Sangeun, Kim Changhyun, Park Taesun, Kim Mieun and Kim Seulyea. 2016. *Development of the Urban Flooding Risk Prevention System(I)*. Anyang: Korea Research Institute for Human Settlements.
2. Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A. and Aghdasi, M. 2009. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* 200: 198-215.
3. Bilsel, R. U., Buyukozkan, G. and Ruan, D. 2006. A fuzzy preference-ranking model for a quality evaluation of hospital web sites. *International Journal of Intelligent Systems* 21, no.11: 1181-1197.
4. Brans, J. P. 1982. L'ingenierie de la decision. Elaboration d'instruments d'aide a la decisio. In *L'aide a la Decision: Nature, instruments et perspectives d'aveni*. eds. Nadeau, R., Landry, M., 183-214. Quebec: Presses de l'Universite Laval.
5. Brans, J. P. and Vincke, Ph. 1985. A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for Multiple Criteria Decision-Making. *Management Science* 31, no.6: 647-656.
6. Brans, J. P., Vincke, Ph. and Mareschal, B. 1986. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research* 24, no.2: 228-238.
7. Brans, J. P. and Mareschal, B. 1994. The PROMCALC and GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems* 12, no.4: 297-310.
8. Brito, M. M. and Evers, M. 2016. Multi-criteria decision-

- making for flood risk management: a survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16, no.4: 1019-1033.
9. Donoso, M., Di Baldassarre, G., Bøgh, E., Browning, A., Oki, T., Tindimugaya, C. and Vairavamoorthy, K. et al. 2012. *International Hydrological Programme (IHP) Eighth Phase: Water security: responses to local, regional and global challenges, strategic plan, IHP-VIII (2014-2021)*. Paris: UNESCO.
 10. Fernandez, P., Mourato, S. and Moreira, M., 2016. Social vulnerability assessment of flood risk using GIS-based multicriteria decision analysis. A case study of Vila Nova de Gaia (Portugal). *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7, no.4: 1367-1389.
 11. Guitouni, A. and Martel, J. M. 1998. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research* 109, no.2: 501-521.
 12. Ishizaka, A. and Labib, A. 2009. Analytic hierarchy process and expert choice: benefits and limitations. *OR Insight* 22, no.4: 201-220.
 13. Kandiloti, G. and Makropoulos, C. 2012. Preliminary flood risk assessment: the case of Athens. *Natural Hazards* 61, no.2: 441-468.
 14. Kubal, C., Haase, D., Meyer, V. and Scheuer, S. 2009. Integrated urban flood risk assessment - adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1881-1895.
 15. Macharis, C., Springael, J., Brucker, K. and Verbeke, A. 2004. PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operational Research* 153, no.2: 307-317.
 16. Meyer, V., Haase, D. and Scheuer, S. 2007. *GIS-based Multicriteria Analysis as Decision Support in Flood Risk Management*. Oxfordshire: HR Wallingford.
 17. Saaty, T. L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15: 234-281.
 18. _____. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill.
 19. _____. 1986. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. *Management Science* 32, no.7: 841-855.
 20. Samant, R., Deshpande, S. and Jadhao, A. 2015. Survey on multi criteria decision making methods. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4, no.8: 7175-7178.
 21. UNISDR. 2009. *2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva: UNISDR.
 22. _____. 2011. *HFA Progress in Asia-Pacific: Regional Synthesis Report 2009-2011*. Geneva: UNISDR.
 23. _____. 2015. *Global Assessment Report 2015 on Disaster Risk Reduction*. Geneva: UNISDR.
 24. Wang, J. J. and Yang, D. L. 2007. Using a hybrid multi-criteria decision aid method for information systems outsourcing. *Computers and Operation Research* 34, no.12: 3691-3700.
-
- 논문 접수일: 2017. 7. 25.
 - 심사 시작일: 2017. 8. 14.
 - 심사 완료일: 2017. 9. 4.

요약

주제어: 다기준의사결정기법, 도시침수, 고위험지역, 재해예방

도시의 사전 재해저감대책 의사결정을 위해 위험도 평가 기술의 중요성이 강조되는 상황에서, 본 논문은 도시침수에 초점을 두고 지자체의 재해 예방형 도시계획 수립 차원에서 고위험지역 위치를 결정하는 방법론을 검토하였다. 도시침수에 대한 고위험지역을 결정하는 데에 다양한 위험정보를 토대로 쌍대비교법인 AHP와 우선순위 산정방법인 PROMETHEE를 서로 연계하여 각 격자대안의 비교우위를 검토하였다. 분석 결과, 경기도 광주시의 경우 전반적으로 목현동에 위치한 목현천 만곡부 연접지역과 송정동에 위치한 경안천 합류부 연접지역의 두 지역이 고위험

지역으로 구분됨을 알 수 있었다. 목현천 만곡부의 경우 지형특성상 하천 범람 시 높은 침수심이 예상되어 고위험지역으로 분류되었는데, 향후 개발규제가 우선되어야 할 지역으로 판단되었다. 송정동의 경우에는 인구가 매우 밀집된 주거지역으로서 방재지구 지정과 함께 다양한 도시계획적 대책이 집중되어야 할 지역으로 판단되었다. 본 논문에서 제안한 방법론은 도시침수에 대한 예방대책을 위한 도구, 특히 고위험지역을 선정하는 객관적인 방법을 제공할 가능성이 확인되었다.