

# 도시침수 사전관리를 위한 고위험지역 선정 : 제주시 사례 연구\*

## Evaluation of Risk Hotspots to Urban Flood for a Spatial Disaster Risk Management: A Case Study of Jeju City

이종소 Lee Jongso\*\*, 송창근 Song Changgeun\*\*\*, 이상은 Lee Sangeun\*\*\*\*

### Abstract

For a practical tool for disaster risk reduction, this study examines how urban planners can evaluation of risk hotspots which are required to prevent urban areas from flood. This study attempts to analyze flood inundation area and depth in Jeju city. It then develops 10 GIS-based risk maps after flood inundation area is overlapped with various GIS maps officially produced by MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport). The 10 risk maps are applied to AHP and PROMETHEE, leading to the selection of risk hotspots. The proposed methods finally identifies 33 grids with size of 100m×100m successfully as flood risk hotspots. With all results together, this study concludes that if it is used in disaster prevention for urban plan, it will be useful for realistic disaster prevention and mitigation measures and contribute to comprehensive spatial planning.

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

### I. 서론

우리나라의 경우 전 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있고 연중 강수량이 여름철에 집중되어 있는 특징으로 인해 인구와 기반시설이 밀집된 하류 도시지역은 높은 범람 가능성과 우수배제의 어려움을 겪고 있다. 이에 도시침수를 방어하기 위해서는 도시주변의 하천정비가 필수적이거나 하천정비를 통한 도시침

수 방어에는 한계가 존재하고 더 이상 사후복구에 의존할 수 없기 때문에 위험을 근본적으로 낮출 수 있도록 도시공간을 이용한 사전적 위험관리의 필요성이 강조되고 있다(김종원, 김창현, 심우배 2006). 사전적 위험관리를 위해서는 도시공간을 대상으로 규제와 사업을 포함한 방재대책이 필요한 실정이나 이를 위해 방재대책을 집중시킬 고위험지역을 객관적으로 파악하는 데에는 많은 어려움이 존재한다. 사실상 공

\* 본 논문은 '이상은 외. 2018. 2018 도시 침수지역 및 영향권 분석을 통한 재난안전 지원시스템 구현(III). 국토연구원.'의 중간연심회 연구결과를 활용하여 작성되었음.

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

\*\*\* 인천대학교 안전공학과 부교수 | Associate Prof., Dept. of Safety Engineering, Incheon National Univ. | baybreeze119@inu.ac.kr

\*\*\*\* 국토연구원 책임연구원(교신저자) | Associate Research Fellow, Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements | Corresponding Author | selee@krihs.re.kr

간단위로 위험을 판단하는 것은 다양한 위험요인의 존재, 위험요인에 대한 중요성 및 가치관 등의 차이로 인해 매우 어려운 결정이라 할 수 있다(Fernandez, Mourato and Moreira 2016; Kubal, Haase, Meyer and Scheuer 2009). 다양한 분야의 과학적 기법의 연계, 특히, 물리적인 침수해석과 위험요인의 인식에 대한 사회·과학적인 가치판단을 결합해 의사결정의 품질을 높이는 것이 중요하지만, 이 역시 실무차원과 도시침수와 관련한 적용사례는 많지 않다(de Brio and Evers 2016).

이러한 배경으로, 본 논문에서는 제주시 시가화 지역을 대상으로 사전적 위험관리와 방재대책 수립방향을 제시하기 위해 상세위험정보를 개발하고 고위험지역 선정 및 위험원인 분석방법론을 제시하고자 하였다. 도시침수 해석을 위해 미국육군공병단(U.S Army Corp of Engineers)의 HEC-RAS(Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)와 미국환경보호청(U.S Environmental Protection Agency)의 SWMM(Storm Water Management Model) 등의 모형연계를 통해 침수해석을 실시하였으며, 각종 공간정보를 수집·구축·가공하여 하나의 단위공간으로 상세위험정보를 구축하고자 하였다. 또한, 두 가지 다기준 의사결정기법인 AHP(Analytic Hierarchy Process)와 PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)의 연계 및 현장검증을 통해 고위험지역을 최대한 객관적이고 합리적으로 선정하고자 하였다.

본 논문에서는 주요 원인 분석결과와 현장검증 등을 통해 실질적인 방재대책의 방향을 보다 객관적으로 제시하고 공간범위를 현실화하여 기존 연구의 한계를 보완하였다. 본 논문에서 제시하고 있는 일련의 절차와 방법론 그리고 연구결과는 도시침수의 사전관리, 특히 재해예방형 도시계획이 강조되고 있는 상황에서 정책·실무현장에서 고위험지역을 선정하고 건

축물, 토지이용, 방재시설, 개발행위허가 등을 포함한 종합적인 공간계획을 수립하는 데에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다.

## II. 방법론

### 1. 전체 방법론의 구성

본 논문의 최종 결과물인 고위험지역 선정 및 위험원인 분석방법론을 제시하기 위해서는 크게 3가지 단계로 구분할 수 있다.

첫 번째 단계로 대상지역의 강우조건에서의 침수 피해를 모의하기 위해 하천변 외수위 상승으로 인한 범람과 관망 밀집지역의 내수침수 영향을 분석해야 한다. 내수침수 해석의 결과는 지점에서의 월류량으로 산출되는데 이는 2차원 지표수 흐름해석 모형(Song, Ku, Kim and Park 2016)을 통해 시간대별 침수위 결과를 얻을 수 있다. 두 번째 단계로 상세 위험주제도를 작성할 수 있다. 각각의 공간정보와 도시침수 간소화 해석 결과를 토대로 재해특성 주제도, 노출특성 주제도, 취약성 주제도를 작성할 수 있으며, 상세 위험주제도를 종합하여 격자 단위의 상세위험정보를 구축할 수 있다. 마지막으로 격자 단위의 상세위험정보 결과를 바탕으로 고위험지역의 위치를 결정한다. 하나의 격자마다 10가지의 상세위험정보를 담고 있는데, 이 격자정보를 AHP-PROMETHEE 기법에 적용하여 고위험지역 위치를 결정한 뒤 현장 조사 검증 및 공간 연속성 보안을 통해 최종적으로 고위험지역 위치를 선정하게 된다. 선정된 고위험지역은 필지 단위로 공간정보를 현실화할 수 있으며, GAIA(Geometrical Analysis for Interactive Aid) 평면해석을 통해 주요 위험원인을 해석할 수 있다.

본 논문은 위와 같은 일련의 절차와 방법론을 통해

도시침수에 대한 고위험지역을 최대한 객관적이고 합리적으로 선정하고자 한다.

## 2. 도시침수 간소화 해석

우리나라 도시침수 해석을 효과적으로 해석하기 위해서 조완희, 한건연, 김현식, 김진수(2015)는 고급기능을 갖추거나 값비싼 모형보다는 범용적으로 사용되는 모형 간 연계가 더욱 효과적임을 강조하였다. 본 논문에서는 도시계획적 대책을 마련하는 데 필요한 넓은 공간을 포괄하기 위해 범용적으로 사용되는 모형을 연계하여 입력자료 요구수준을 낮추고자 하였으며, 정밀한 해석이 필요한 밀집지역 노면해석에 대해서만 2차원 흐름해석을 적용하고자 하였다.

대상지역의 강우조건은 설계홍수량 산정요령(국토해양부 2012) 및 확률강우량도 개선 및 보완 연구(국토해양부 2011)를 토대로 산정하였다. 단지, 외수 해석 시에는 일반적인 중소하천의 용량을 상회하는 재현기간 100년을 기준으로 하였으며 내수해석 시에는 일반적인 하수도시설 용량을 상회하는 재현기간 30년을 기준으로 하여 90.3mm/hr와 75.6mm/hr의 값을 각각 적용하였다.

위의 강우조건에서 하천변 외수위 상승으로 인한 침수는 이종소, 이상은(2018)에서 사용된 하도버퍼링 기법을 적용하였다. 하도버퍼링 기법은 HEC-RAS 모형을 이용해 잠재적인 홍수위를 먼저 계산한 뒤 GIS 틀을 통해 제내지까지 연장한 하천측선에 홍수위 값을 입력하고, 지형자료와 홍수위의 차이를 통해 개략적인 침수영역과 침

수위를 산정하는 기법이며, 본 논문에서는 5m×5m의 DEM을 사용하였다.

대상지역 가운데 하루 시가화된 관망밀집지역에 한정하여 내수침수 해석을 실시하였다. 하수관망 시스템분석을 위해 EPA-SWMM 모형을 이용하였으며 실제 침수발생 상황과 비교를 통해 검·보정을 실시한 후에 강우 시나리오를 적용하여 월류지점과 월류량을 산정하였다. EPA-SWMM에서 산정된 월류량 결과를 침수위와 침수영역으로 분석하기 위해 2차원 지표수 흐름해석 모형을 적용하였으며, 절점에서의 월류된 노면수의 시간대별 침수심을 산정할 수 있다.

이어서 내·외수로 구분된 침수해석 결과를 통합하고 그 결과를 쉽게 파악하기 위해 이상은, 이종소, 이병재, 김슬예(2017)에서 제안한 기준을 적용하여 영향권을 구분하였다. 해당 연구에서는 EU 회원국가의 공간구획화 개념(EC 2010)을 토대로 <Table 1>과 같이 4가지 단계의 영향권으로 공간을 구획화할 것을 제안한 바 있으며, 침수위에 따라 Red, Orange, Yellow, Green의 단계로 설정하였다.

Table 1\_ Selection of Criteria on Risk-based Zoning

| Classification of Zones | Accountability of Prevention Measures | Operational Definition                                       | -Criterion (Inland Flood) at 1/30yr Condition<br>-Criterion (River Flood) at 1/100yr Condition |
|-------------------------|---------------------------------------|--|--|
| Red Zone                | Compulsory                            | Places where heavy rainfall may cause very serious impacts   | Over 100cm   |
| Orange Zone             | Strongly Encouraged                   | Places where heavy rainfall may cause substantial impacts    | 50cm to 100cm  |
| Yellow Zone             | Encouraged                            | Places where heavy rainfall may cause noticeable impacts     | 10cm to 50cm   |
| Green Zone              | Not Considered                        | Places where heavy rainfall may not cause noticeable impacts | Below 10cm   |

Source: Lee, Lee, Lee and Kim 2017.

### 3. 상세 위험주제도 작성

본 논문에서는 2009년 UN ISDR(International Strategy for Disaster Reduction)에서 제시한 자연재해의 위험도에 대한 용어상의 개념에 근거해 상세 위험주제도를 작성하였다. UN ISDR(2009)에서 위험도는 특정한 공간과 시간 동안 재해에 의해 초래될 수 있는 잠재적 피해규모로 정의하였으며, 이 위험도는 재해특성, 노출특성, 취약성의 3가지 차원의 요소에 의해 결정된다고 명시하고 있다. 본 논문에서는 위험도 요소 각각에 대해 <Table 2>와 같이 조차적으로 정의하였다. 재해특성은 극단적 현상이 발생함으로써 인해 촉발된 위협을 의미하며 강우조건에서 발생하는 외수침수 또는 내수침수로 인한 침수위(cm)로 정의하였다. 노출특성은 발생된 재해로 인해 사회시스템이 공간적으로 밀접하게 영향을 받는 것을 의미하며, 영향권 내의 거주인구(명)와 토지이용으로 구분하기로 하였다. 또한, 토지이용은 주거, 상업, 공업, 기타 용도 토지(m<sup>2</sup>)로 구분하였다. 취약성은 피해민감성을 결정하는 사회, 경제, 환경, 문화 등 해당 공간에 부속된 속성을 의미하는데, 본 논문에서는 30년 이상의 건축물과 지하층수를 보유한 건축물을 취약건축물(개)로, 유통공급시설, 공공문화체육시설, 보건위생시설, 환경기초시설을 보호대상시설(개)로 그리고 도로연장(m)을 도로 취약성으로 정의하였다.

재해특성, 노출특성, 취약성에 대한 각 위험주제도는 도시침수 해석 결과와 국토지리정보원의 격자 인구조제도, 국토교통부의 건축물통합정보 등의 공간정보를 활용하여 작성하였다. 이어서 구축한 위험정보들을 국토지리정보원에서 제공하는 100m×100m 격자체계와 공간적 중첩을 통하여 총 6,800개의 격자에 대해 모든 정보를 통합하였다(<http://www.nsd.go.kr>; <http://www.ngii.go.kr>).

Table 2\_ Definition of Risk Information

| 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 <sup>2</sup> | Total Area of Residential Land Included in the Flood Inundation Area   |
| Commercial & Business Land                     | m <sup>2</sup> | Total Area of Commercial and Business Land Included in the Flood Inundation Area   |
| Industrial Land                                | m <sup>2</sup> | Total Area of Industrial Land Included in the Flood Inundation Area  |
| Natural & Green Land                           | m <sup>2</sup> | 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   |

Source: Lee, Lee and Kim 2017.

#### 4. 고위험지역 위치 결정

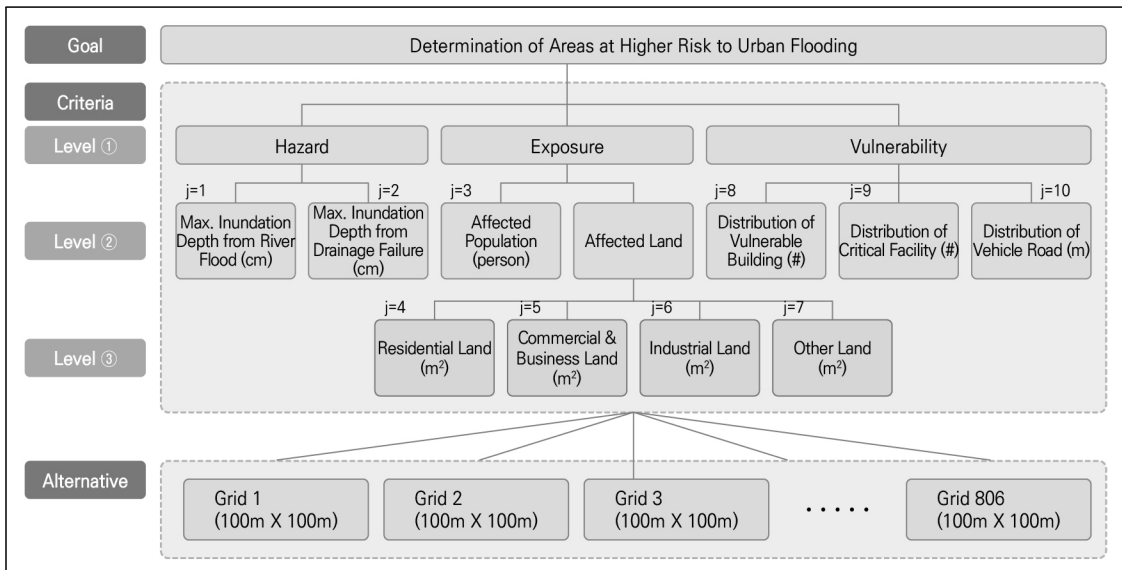
대상지의 도시침수 위험에 대한 상세주제도를 바탕으로 방재대책을 수립하기 위해서는 ‘어느 지역에 어떤 방향의 대책이 필요할지’에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 고위험지역 결정을 객관적으로 선별하는 데 유용한 이상은, 이병재, 이종소, 김슬예(2017)에서 제안한 방법을 적용하였다. 즉, 앞서 구한 상세주제도를 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법과 PROMETHEE(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) 기법을 적용해 고위험지역 위치를 격자별로 판단한 후에 선정된 격자에 대해서는 PROMETHEE의 사후해석인 GALA 위상 해석으로 주요 위험 원인을 분석하였다. 추가적으로 현장검증을 통해 고위험지역 분석결과를 다시 한 번 조정하고 위험지역의 공간범위를 격자에서 필지 단위로 현실화하였다.

#### 1) AHP-PROMETHEE 연계

먼저, 도시침수 고위험지역 위치를 결정하는 데에 AHP 기법을 적용하기 위해 상세주제도의 격자별 정보를 활용할 수 있도록 다기준 의사결정 문제를 <Figure 1>과 같이 구조화하였다. 대안의 경우 대상지에 포함된 총 6,800개의 격자정보 가운데 향후 분석량을 줄이기 위해 도시침수 영향권에 포함되지 않는 격자는 사전에 제외하여 총 806개의 격자 대안을 정의하였다. 평가기준은 대안 선정 시 고려해야 할 핵심적인 속성으로서 재해 위험도의 개념구조와 상세 위험주제도를 고려해 선정하였다.

각 평가기준의 가중치는 이상은, 이종소, 김슬예(2017)의 연구결과를 적용하였다. 해당 연구에서는 토목, 도시계획, 방재 등의 분야 28인 전문가를 대상으로 실시한 설문조사 결과인 9점 척도(1점: 동등하게 중요, 9점: 절대적으로 중요)로 평가기준 간의 상대적 중요도를 판단하게 한 뒤 고유벡터법(Eigenvalue Method)을 통해 i번째 전문가가 판단한 10가지 평가

Figure 1 \_ Result of Hierarchical Structure for Urban Flood Evaluation



기준의 가중치 벡터  $\vec{p}_i$ 를 도출하였다. 비교행렬의 일관성에 문제가 없는 응답자의 가중치만을 기하평균하여 전체 전문가 그룹의 가중치  $\vec{p}$ 를 <식 1>과 같이 도출하였다.

$$\vec{p} = [p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_{10}]$$

$$= [0.165, 0.199, 0.228, 0.024, 0.012, 0.006, 0.002, 0.169, 0.153, 0.004]$$

<식 1>

다음으로는, PROMETHEE 적용을 위해 각 대안의 평가기준별 성과표를 작성하였다. 즉, 상세주제도를 이용해 j번째 평가기준(j=1, ..., 10)에 대한 s번째 격자 대안(s=1, ..., 806)의 성과값  $f_j(x_s)$ 을 산정할 수 있다. PROMETHEE는 선호도 개념에 의거해 대안 간의 비교우위를 결정하는 방법이다(Brans and Vincke 1985). 따라서 특정 대안  $x_s$ 과 타 대안  $x_t$  간의 평가기준에 대한 성과값 차이를 다음과 같이 단일기준 선호도 값  $Pr_j(x_s, x_t)$ 으로 변환하고, 가중치 값을 고려해 전체 평가기준에 걸친 선호도 지수  $\pi(x_s, x_t)$ 를 산정할 수 있다.

$$Pr_j(x_s, x_t) = G_j\{f_j(x_s) - f_j(x_t)\} \quad \text{<식 2>}$$

여기서,  $f_j(x_s)$ 는 평가기준 j에서 s번째 대안이 갖는 성과,  $G_j\{\}$ 는 평가기준 j에서 대안의 성과 차이를 0~1의 범위의 선호도 값으로 변환하는 선호도 함수이다.

$$\pi(x_s, x_t) = \sum_{j=1}^N [p_j \times Pr_j(x_s, x_t)], N = 10$$

<식 3>

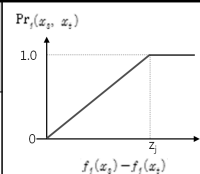
여기서  $\pi(x_s, x_t)$ 는 두 대안  $x_s$ 와  $x_t$  간의 종합 선호도 지수이며 N은 10개의 평가기준이다.

<식 2>와 <식 3>에서,  $Pr_j(x_s, x_t)$ 와  $\pi(x_s, x_t)$ 은 각각 단일기준 또는 전체기준에 대한 선호도로써 0에서 1 사이의 값을 갖는데, 그 값이 1일 경우 대안  $x_s$ 를 절대적으로 선호하고, 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 선호도 함수이다. 함수의 형상계수에 대한 가정을 최소화하고 선호도의 불연속성을 고려할 특별한 이유가 없으므로 Brans, Vincke and Mareschal(1986)에서 제안된 6가지 선호도 함수 가운데 V-shape 형태를 적용하고 형상계수 값  $z_j$ 은 대안 간의 성과 차이의 기댓값과 표준편차를 토대로 <Table 3>과 같이 정의하였다.

마지막으로 선호도 흐름량을 분석하여 각 대안의 고위험지역으로서 우선순위가 높은 대안을 조사하였다. 본 논문에서는 PROMETHEE 2 방법, 즉 한 대안이 타 대안에 대한 선호도 순흐름량(Net Flow)을 다음 <식 3>과 같이 산정하였고, 순흐름량  $\phi(x_s)$ 이 가장 높은 20개 격자(100m×100m×20개=총 0.2km<sup>2</sup> 사업 면적)를 우선 선정하였다.

**Table 3** \_ Shape Factor of Unicriterion Preference Degree

| Shape Factor j         | 1     | 2   | 3     | 4       | 5       | 6   | 7       | 8    | 9   | 10    |
|------------------------|-------|-----|-------|---------|---------|-----|---------|------|-----|-------|
| Evaluation Criteria zj | 562.9 | 6.1 | 151.2 | 7,398.9 | 3,669.5 | n/a | 8,445.4 | 22.9 | 0.6 | 195.4 |



## 2) 주요 원인 해석

선정된 고위험지역에 적절한 방재대책을 수립하기 위해 격자로 구분된 각 공간이 어떤 평가기준과 밀접하게 관련되어 있는지를 객관적으로 설명하는 위험원인에 대한 정보를 필요로 하며, 이를 위해 Mareschal and Brans(1988)가 제안한 GAIA 위상해석을 실시하였다. GAIA 위상해석은 주성분 분석을 응용한 것으로 다수의 평가기준을 소수의 성분을 가진 축으로 정의한 뒤 각 대안의 위상을 시각화하여 비교우위가 높은 대안의 특징을 확인하는 데 도움이 된다. 본 논문에서는 GAIA 위상해석을 2단계로 실시하였다. 우선 1단계에서는 고위험지역 전반에 대한 위험원인 특성을 분석하였다. 이를 위해 10가지 평가기준의 벡터를 통합한 두 개의 U축과 V축에서 모든 806개 격자대안의 위치를 투영시킨 뒤에 고위험지역으로 선정된 격자와 나머지 격자 간의 특성을 파악하였다. 2단계에서는 고위험지역으로 선정된 격자만을 대상으로 GAIA 위상해석을 실시함으로써 고위험지역 내부에 위험 원인의 차이가 큰지 여부를 판단하였다.

## 3) 현장검증 및 공간범위 재조정

2가지 문제를 해결하기 위해 분석결과에 대한 현장검증을 실시하였다. 첫째, 고위험지역을 결정할 때 노출특성, 취약성 등의 다양한 사회적 요소를 고려하였지만 실제 피해양상을 결정하는 지엽적인 요소들을 완벽히 반영할 수 없다. 둘째, 고위험지역을 결정할 때 분석이 편리하도록 실체가 없는 격자로 구분한 뒤 비교우위를 이원화하여 판단하였다. 이러한 점을 고려해 대상지역을 방문하여 나리태

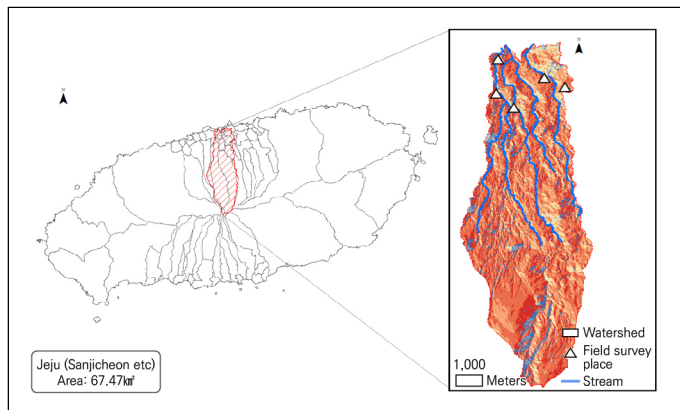
풍 등에서 주민들의 침수피해 경험을 확인한 후에 일부 격자지점은 고위험지역에서 제외하였고, 동시에 대책수립 시 노면수 흐름, 토지이용 등의 공간적 연속성을 고려할 수 있도록 일부 격자지점을 추가하였다. 또한, 국가공간정보포털에서 제공하는 연속지적도상의 필지자료를 활용하여 고위험지역의 공간범위를 필지단위로 현실화하였다.

## III. 적용 및 연구결과

### 1. 대상지역 선정 및 강우조건

제주시 안에 대상지역을 선정하기 위해 과거 피해액, 피해빈도, 침수유형을 확인하고 침수흔적도, 풍수해저감종합계획 보고서, 하천기본계획 보고서 등을 종합하여 과거 도시침수 피해발생 위치와 피해원인을 파악하였다. 또한, 피해이력 조사의 검증과 추가 조사가 필요한 지점을 파악하기 위해 지자체 공무원과 현장·면담 조사를 실시하였으며, 최종적으로 지형분석을 통해 주요 지점을 포괄하도록 산지천, 병문천, 한천, 독사천의 4개 하천에 대한 집수구역 범위를 <Figure 2>와 같이 선정하였다.

Figure 2\_ Study Area



## 2. 모형연계를 통한 침수해석

대상지역의 잠재적 하천범람은 HEC-RAS 모형(5.0.1)과 ArcGIS(10.4)를 이용한 하도버퍼링 기법을 적용하여 분석하였으며, 도심지 관망밀집지역의 내수침수 해석은 EPA-SWMM(5.1) 모형과 2차원 지표수 흐름 해석모형을 적용하여 침수영역과 침수위를 분석하였다. 지반공사로 인한 저고도 지역, 하천구역 제거 등의 보정을 통해 분석된 침수해석 결과와 실제 대상지역의 침수흔적도의 비교결과는 <Figure 3>과 같다. 비교결과 대상지역 전체에 걸쳐 일정 부분 일치하는 것으로 나타났으며, 하천변에서는 침수흔적도가 침수해석 결과에 비해 비교적 넓게 분포하고, 하류의 도심지 구간에서는 침수흔적도보다 침수해석 결과가 비교적 넓게 분포해 있는 것으로 분석되었다. 이는 침수흔적도 기록 시 조사방법의 불안정성, 하상이 불안정한 제주시 하천의 특수성 등도 원인일 수 있다. 이보다 외수해석 시에는 단순히 잠재 홍수위와 지형의 표고를 비교해 침수지역을 분석하지만, 실제 현장은 복개 하천구간의 존재로 인해 홍수 범람 시 복잡하게 인공화된 도로를 거쳐 최종적으로 적체되는 위치가 일부

달라지는 게 원인으로 파악되었다. 침수해석 단계에서 정확도를 더욱 개선하기보다는 향후 고위험지역을 선정하는 단계에서 현장조사를 통해 실제 경험을 반영키로 하였다.

## 3. 상세위험정보 개발

방재대책의 근거를 제공할 수 있도록 상세위험정보는 재해특성 주제도, 노출특성 주제도, 취약성 주제도로 구분하여 개발하였으며, 도시침수 해석결과인 각각의 주제도는 <Figure 4>와 같다. 또한 상세위험정보를 토대로 방재대책 수립방향을 객관적으로 제시하기 위해 하나의 단위공간으로 중첩할 필요가 있는데, 이를 위해 국토지리정보원에서 제공하는 100m×100m 격자체계를 이용하여 상세위험정보를 포함하도록 하였다. 그 결과, 대상지역 전체에 포함된 격자는 약 6,800개로 나타났으며, 이 중 도시침수 영향권에 포함되는 격자는 총 806개로 분석되었다.

영향권 내에 상세위험정보 가운데 노출특성 결과를 보면 인구 2만 9,821명이 영향권 내에 거주하고 있는 것으로 분석되었으며, 주거지역 면적은 약 1.68km<sup>2</sup>,

상업·업무지역 면적은 약 0.44km<sup>2</sup>, 자연·녹지 등의 면적은 약 5.86km<sup>2</sup>가 분포되어 있고 공업지역은 존재하지 않는 것으로 나타났다. 상류 부근에는 자연·녹지 등으로 토지가 이용되고 있어 영향권에 노출되는 인구는 많지 않았으며, 주거지역, 상업·업무지역으로 토지가 이용되는 하류 부근에는 많은 인구 영향권에 노

Figure 3 \_ Comparison of Flood Analysis and Inundation Trace Map

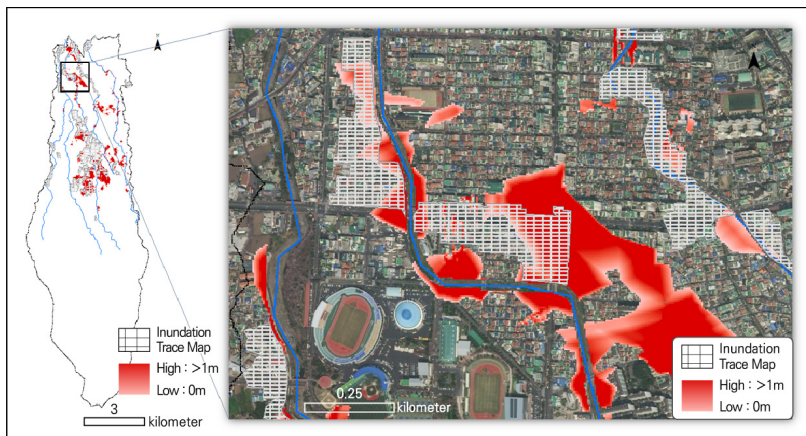
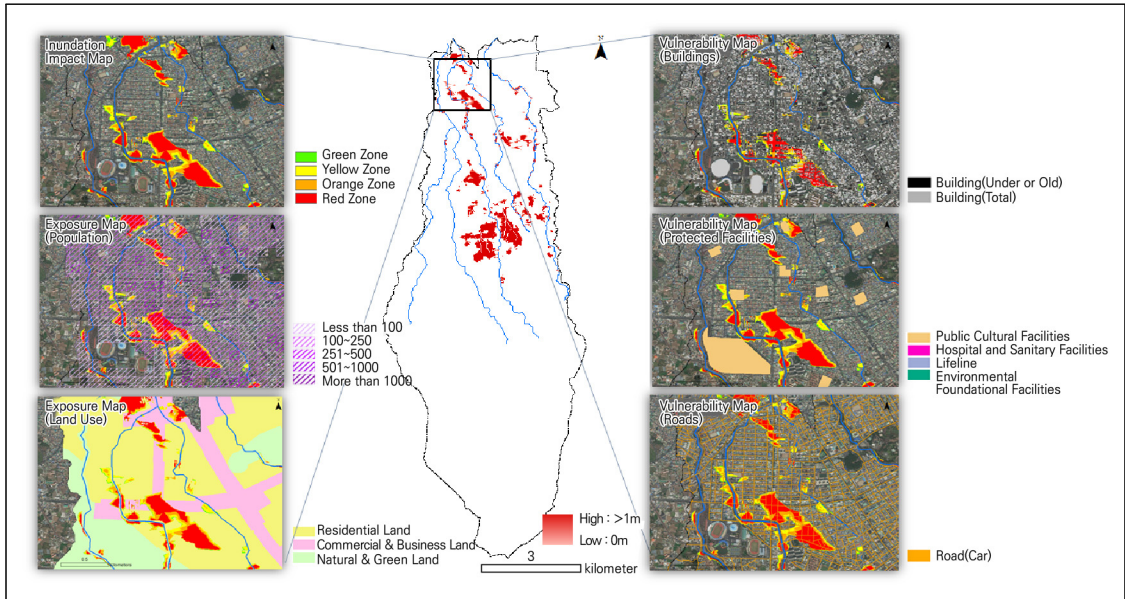


Figure 4\_ Results of Risk Information



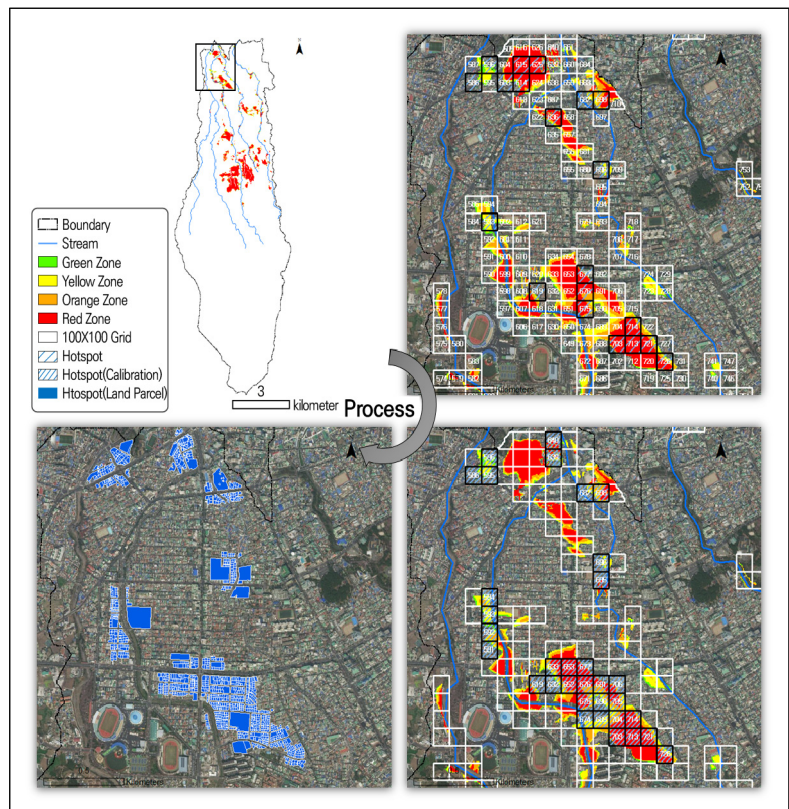
출되는 것으로 분석되었다. 또한, 취약성 결과를 보면 노후 건축물은 2,334개, 지하건축물은 1,298개, 보호대상시설은 22개, 도로연장 64.26km가 영향권에 존재하고 있으며 대부분 도심지역에 해당하는 하루 부근에 집중되어 있는 것으로 분석되었다.

#### 4. 방재대책 수립방향 제시

방재대책을 추진하기 위한 규제 또는 사업대상지로서 고위험지역을 다음 <Figure 5>와 같이 단계적으로 선정하였다.

먼저, 10가지 상세위험정보를 AHP-PROMETHEE 연계를

Figure 5\_ Procedures for Selecting Risk Hotspots



법에 적용해 선정된 20개소의 격자를 선정하였다. 비록 침수 영향권은 전체 대상지의 중·하류에 걸쳐 나타나므로 침수위험의 물리적인 요소인 재해특성은 넓게 분포되어 있다. 하지만 실제 도시개발은 대상지 하류에 집중되어 있으므로 침수위험의 사회적 요소인 노출특성과 취약성 또한 하류에 집중되어 있다. 따라서 고위험지역은 위험요소를 종합적으로 고려할 때 다음과 같이 20개소가 선정되었으며, 크게 5가지 그룹으로 구분되었다.

- 그룹 I: 제주시청 주위인 이도2동 일대에 9개소
- 그룹 II: 제주중앙여자중학교에서 제주남초등학교까지의 독사천 복개구간에 3개소
- 그룹 III: 병문천 복개구간인 용담4거리에서 서문공설시장 인근에 5개소
- 그룹 IV: 한천 하류의 복개구간 2개소
- 그룹 V: 용담1동에 1개소

당초 선정된 20개 격자 가운데 현장조사를 통해 그룹 III에 속한 5개 격자는 고위험지역에서 제외할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 이곳은 병문천 외수영향을 받고, 인구밀도가 높으며, 취약건축물이 다수 존재하지만, 구배나 도로의 특성으로 노면유출이 빠르

게 통과하고 건축물 축조 시 이미 지반을 승고하였기 때문에 큰 피해를 입지 않는다는 점을 현장에서 확인하였다. 실제로는 노면유출량이 이곳을 통과한 뒤 도로를 따라 서문공설시장에서 서문사거리 뒤쪽으로 집중되므로 격자 639와 640을 추가하기로 하였다. 아울러 방재대책을 원활하게 추진하기 위해 이원화된 격자의 공간적 연속성을 보완할 필요가 있으므로 총 16개 격자를 추가하였다. 따라서 최종적으로 고위험지역의 격자수는 <Table 4>와 같이 33개소(=20-5+2+16)로 조정되었다.

1단계의 GAIA 위상해석을 통해 보았을 때 고위험지역은 나머지 지역과 비교해 외수나 내수에 의한 침수위, 인구노출, 취약건축물수가 높다는 점을 확인할 수 있었다. 2단계의 위상해석(<Figure 6>의 예시 참조)을 통해 고위험지역으로 포함된 격자 간의 차이도 있음을 확인할 수 있었는데, 전반적으로 외수 침수위나 취약건축물수는 공통적으로 높아 큰 변별력이 없었다. 하지만 내수 침수위, 노출인구, 주거나 상업지역 면적, 보호대상시설 포함 여부, 도로연장 등에 따라 그룹별로 위험원인의 차이가 있음을 <Table 5>와 같이 알게 되었고 이는 방재대책 수립 시 이러한 차이를 반영해야 함을 시사한다.

최종적으로 <Figure 6>의 마지막 단계는 조정된

Table 4\_ Recalibration of Risk Hotspots by Field Survey

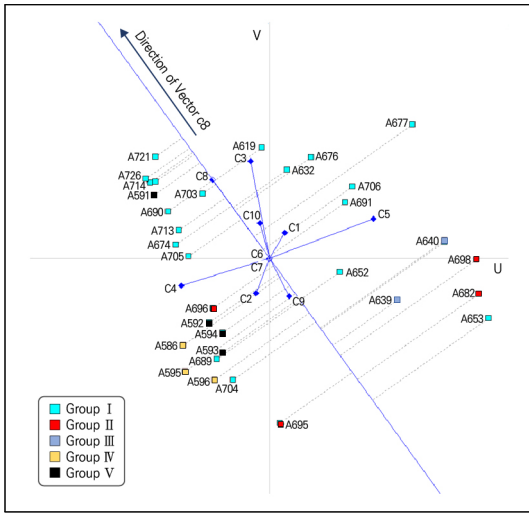
(unit: grid number)

| Variable                            | Groups  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |          |     |     |     |     |     |     |                   |
|-------------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------|
|                                     | I   |     |     |     |     |     |     |     |     | II  |     |     | III      |     |     |     |     | IV  |     | V                 |
| [1] Results of Risk Hotspots        | 619   | 675 | 676 | 677 | 703 | 713 | 714 | 721 | 726 | 682 | 696 | 698 | 603      | 614 | 615 | 625 | 636 | 586 | 596 | 593               |
| [2] Results of Field Survey(Except) |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ✓        | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |     |     |                   |
| [3] Add and Supplement              | 632, 633, 652, 653, 674, 689, 690, 691<br>704, 705, 706 |     |     |     |     |     |     |     |     | 695 |     |     | 639, 640 |     |     |     |     | 595 |     | 591<br>592<br>594 |

Table 5 \_ Summary of Risk Causes

| Groups      | I   | II   | III   | IV   | V  |
|-------------|---|--|---|--|--|
| Risk Causes | River Inundation Depth<br>Population<br>Residential Land<br>Commercial Land<br>Vulnerable Buildings<br>Road | River Inundation Depth<br>Population<br>Commercial Land<br>Vulnerable Buildings<br>Critical Facilities<br>Road | River Inundation Depth<br>Commercial Land<br>Vulnerable Buildings | Inland Inundation<br>Depth<br>Residential Land<br>Vulnerable Buildings | River Inundation Depth<br>Population<br>Residential Land<br>Vulnerable Buildings<br>Road |

Figure 6 \_ GAIA Analysis Result(Phase 2)  
: For Vulnerable Buildings



고위험지역 격자와 필지정보를 공간 중첩한 결과를 나타낸 것이다. 즉, 고위험지역으로 약 0.32km<sup>2</sup> 면적의 총 1,249개의 필지를 도출하였고, 공간범위를 현실성 있게 설정하였으며 세부적인 지번까지 명확하게 파악할 수 있었다.

#### IV. 결론

본 논문은 도시침수에 대한 사전적 위험관리와 방재 대책 수립방향을 제시하기 위해 상세위험정보를 개발하고, 고위험지역 선정 및 위험원인 분석방법론을 제시하였다. 하천정비를 통한 도시침수 방어의 한계로

도시공간의 사전위험관리 중요성이 강조되고 있으며, 사전위험을 관리하기 위해서는 규제와 사업을 포함한 방재대책이 필요하다. 이에 본 논문은 방재대책 수립 시 여러 비과학적인 갈등과 논쟁을 줄이기 위해 제주도 시가화 지역을 대상으로 하여 고위험지역 선정 및 원인결과 분석에 대한 방법론을 제시하였으며 결론을 요약하면 다음과 같다.

- ① 도시침수가 우려되는 제주시 중점관리 대상지역을 선정하여 외수로 인한 침수가능성과 내수로 인한 침수가능성을 고려하였다. 침수해석 결과가 실제 침수흔적도와 일정 부분 일치하는 것으로 분석되었으나 침수흔적도 기록 시 작성방법 등의 문제점과 외수해석 시 정확성 등의 문제점으로 인해 다소 차이가 나는 것으로 분석되었다. 본 단계에서는 정확도를 더욱 개선하기보다는 향후 고위험지역 선정 단계에서의 현장조사를 통해 정확도를 높이고자 하였다.
- ② 방재대책의 근거를 객관적으로 제공할 수 있도록 상세위험정보를 재해특성, 노출특성, 취약성으로 구분하여 개발하였으며, 100m×100m로 제공되는 국가 그리드 코드를 이용하여 상세위험정보를 하나의 단위공간으로 중첩하였다. 그 결과, 도시침수 영향권에 포함되는 격자는 총 806개로 분석되었으며, 2만 9,821명의 거주인구, 8km<sup>2</sup>의 토지, 2,334개의 노후건축물, 1,298개의 지하건축물, 22

개의 보호대상 시설 그리고 64.26km의 도로연장이 도시침수의 영향을 받을 것으로 분석되었다.

- ③ 구축된 806개 격자의 10가지 상세위험정보를 AHP-PROMETHEE 연계기법에 적용하였다. 그 결과 20개소의 격자가 선정되었으며, 현장조사 검증 및 공간 연속성 보완을 실시하여 고위험지역을 재조정하였다. 재조정된 고위험지역은 5개 그룹의 33개 격자로 조정되었으며, GAIA 위상해석을 통해 그룹별 위험원인의 차이를 알 수 있었다. 최종적으로 선정된 33개의 격자정보와 필지 단위 공간정보를 활용하여 약 0.32km<sup>2</sup>의 면적, 총 1,249개의 필지로 고위험지역의 공간범위를 현실화하였다.

사전 위험관리를 위한 방재대책 수립 시 공간범위인 고위험지역을 파악하는 것은 매우 중요한 요소라 할 수 있으며, 본 논문에서 제시한 상세위험정보, 고위험지역 선정 그리고 주요 원인분석 등의 방법론들과 결과는 보다 객관적이고 현실적인 고위험지역 선정에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 본 논문의 최종결과물인 방재대책 우선지역 결정방법을 사전 위험관리 측면과 도시계획적 방재대책 수립 측면에서 활용한다면 지역특성에 맞는 현실적인 방재대책 및 저감대책 방안 수립과 종합적 공간계획 수립에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌 •••••

1. 국토교통부 국가공간정보포털. <http://www.nsdi.go.kr> (2018년 1월 23일 검색).  
MOLIT National Spatial Data Infrastructure Portal. <http://www.nsdi.go.kr> (accessed January 23, 2018).

2. 국토교통부 국토지리정보원. <http://www.ngii.go.kr> (2018년 1월 22일 검색).

MOLIT National Geographic Information Institute. <http://www.ngii.go.kr> (accessed January 22, 2018).

3. 국토해양부. 2011. 확률강우량도 개선 및 보완 연구. 서울: 국토해양부.  
MOLIT. 2011. *A Study on Improvement and Complement of Probability Rainfall*. Seoul: MOLIT.

4. \_\_\_\_\_. 2012. 설계홍수량 산정요령. 서울: 국토해양부.  
MOLIT. 2012. *Estimation of Design Flood*. Seoul: MOLIT.

5. 김종원, 김창현, 심우배. 2006. 최근 홍수피해의 실태와 수해 최소화를 위한 정책방향. 국토정책Brief 100호. 세종: 국토연구원.  
Kim Chongwon, Kim Changhyun and Sim Oubae. 2006. Actual situation of flood damage and policy direction to minimize flood damage. *KRIHS Policy Brief* no.100. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.

6. 이상은, 이병재, 이종소, 김슬예. 2017. 도시 침수지역 및 영향권 분석을 통한 재난안전 정책지원 시스템 구현(II). 세종: 국토연구원.  
Lee Sangeun, Lee Byungjae, Lee Jongso and Kim Seulyea. 2017. *Development of the Urban Flooding Risk Prevention System (II)*. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.

7. 이상은, 이종소, 김슬예. 2017. 도시침수 고위험지역 선정을 위한 AHP-PROMETHEE 연계. 국토연구 94권: 68-75.  
Lee Sangeun, Lee Jongso and Kim Seulyea. 2017. Selection of flood risk hotspots in urban areas: Based on the AHP-PROMETHEE method. *The Korea Spatial Planning Review* 94: 68-75.

8. 이종소, 이상은. 2018. 재해예방형 도시계획 지원을 위한 도시침수 위험도 공간정보 개발. 대한토목학회 38권, 2호: 203-213.  
Lee Jongso and Lee Sangeun. 2018. Development of urban flood risk maps for strengthening urban planning toward disaster prevention. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 38, no.2: 203-213.

9. 조완희, 한건연, 김현식, 김진수. 2015. 내수 및 외수영향을 고려한 침수해석에 관한 연구. 한국지리정보학회지 18권, 1호: 74-89.  
Cho Wanhee, Han Kunyeun, Kim Hyeonsik and Kim Jinsoo. 2015. A study on inundation analysis considering inland and river flood. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18, no.1: 74-89.

10. Brans, J. P. and Vincke, Ph. 1985. A preference ranking

- organization method: The PROMETHEE method for MCDM. *Management Science* 31, no.6: 647-656.
11. 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.
  12. de Brito, 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: 1019-1033.
  13. European Commission(EC). 2010. Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. *EU Commission Staff Working Paper* 1626. Brussels: EC.
  14. 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.
  15. Kubal, C., Haase, D., Meyer, V. and Scheuer, S. 2009. Integrated urban flood risk assessment - adapting a multi criteria approach to a city. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1881-1895.
  16. Mareschal, B. and Brans, J. P. 1988. Geometrical representations for MCDA: The GAIA module. *European Journal of Operational Research* 34, no.1: 69-77.
  17. Song Changgeun, Ku Younghun, Kim Youngdo and Park Yongsung. 2016. Stability analysis of riverfront facility on inundated floodplain based on flow characteristic. *Journal of Flood Risk Management* 11, no.1: 1-13.
  18. United Nations Office for Disaster Risk Reduction(UNISDR). 2009. *2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva: UNISDR.

- 
- 논문 접수일: 2018. 6. 20.
  - 심사 시작일: 2018. 8. 8.
  - 심사 완료일: 2018. 9. 17.

---

## 요약

주제어: 도시침수, 방재대책, 다기준 의사결정기법, 위험정보, 고위험지역

본 논문은 도시침수의 사전적 위험관리와 방재대책 수립방향을 제시하기 위해 고위험지역 선정 및 주요 위험 원인 분석에 대한 방법론을 제시하고자 한다. 제주도 시가지 지역을 대상으로 침수해석을 실시하여 침수영역과 침수심을 분석하였으며, 각종 공간정보를 수집하여 10개의 상세위험도를 개발하였다. 구축한 공간정보와 침수해석 결과를 하나의 단위공간으로 중첩하여 100m×100m 격자 단위의 상세위험정보

에 다기준 의사결정기법인 AHP와 PROMETHEE를 적용하여 고위험지역을 선정하였다. 그 결과, 33개 격자의 고위험지역을 객관적으로 선정할 수 있었다. 본 논문의 결과를 사전 위험관리 측면과 도시계획적 방재대책수립 측면에서 활용한다면 지역특성에 맞는 현실적인 방재대책 및 저감대책 방안 수립에 많은 도움이 될 수 있을 것이며, 종합적인 공간계획 수립에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다.