

SWMM을 이용한 청계천 유역의 도시홍수 위험도 지수 개발

양정석* · 김일환**

Yang, Jeong-Seok*, Kim, Il-Hwan**

Development of Urban Flood Risk Index for the Cheonggyecheon Watershed Using SWMM

ABSTRACT

In this study, we analyzed the Cheonggyecheon watershed for urban flood risk index. SWMM model configuration based on each watershed data. And it was set as the final index calculated indicators related to the humanities, social and environmental. Each indicator was standardized and weighted using the Delphi method. Finally, select the danger area through urban flood risk index. Determined 12 indices according to the hazard and vulnerability. Vulnerability is selected the index divided by three factors. 21 watersheds were analyzed through urban flood risk index. The top of three areas of index is Jeongneung 1, Majang, Pil-dong, each index is 0.533, 0.494, 0.381. The lowest index is Soongin 0.216. Urban flood risk index developed in this study can be applied to other regions in Korea for establishing national water resources management plan.

Key words : SWMM, Flood risk index, Delphi method, Cheonggyecheon, Jeongreungcheon

초록

본 연구에서는 도시홍수 위험도 지수 산정을 위하여 청계천 및 정릉천 유역을 분석하였다. 각 유역 배수구역별 자료를 토대로 SWMM 모델링을 구축하고 인문, 사회 환경과 관련하여 최종 지수 산정을 위한 지표를 선정하였다. 수집된 자료는 요소에 따라 정의하였다. 각 요소별 가중치는 Delphi 기법을 이용하였으며, 각 지표에 대한 표준화를 실시하고 최종적으로 위험도에 따른 위험 유역을 선정 했다. 유해성 및 취약성에 따라 12개의 지표를 결정하였다. 그중 취약성의 경우 세분화하여 3가지 요소로 나누어 지표를 선정했다. 총 21개의 배수구역별 지수를 산정하였으며 정릉1이 0.533, 마장 0.494, 필동 0.381, 순으로 나타났으며, 가장 적은 지수는 송인 0.216으로 나타났다. 도시홍수 위험도 지수를 통해 우리나라 전 지역에 적용하게 되면 향후 수자원 정책 수립에 있어서 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

검색어 : SWMM, 홍수 위험도 분석, Delphi 기법, 청계천, 정릉천

1. 서론

우리나라를 비롯한 아시아 지역에 홍수피해가 증가하고 있다는 것은 사회의 복지를 저해하는 중요한 이슈다. 세계은행에 따르면 지난 30년간 전 세계 홍수의 40%가량이 아시아 지역에서 발생했다. 수해 인구의 90%가량이 아시아에 집중됐다(World Bank, 2013). 아시아개발은행은 2025년엔 아시아 도시 인구 4억1000여만 명이 홍수 피해에 노출될 것이라고 경고했다. 아시아의 도시화율은 2000년 35.5%에서 2020년 62.9%에 달할 전망이다. 이는 전 세계 도시화율 67.2%에 근접한 수치이다. UN은 2025년에 인구 1000만 명 이상의 Megacity가 37곳이 될 것으로 내다보는데, 이 중 21곳이 아시아에 속한다(ADB, 2013). 우리나라의 서울의 경우 1029만

* 중신회원 · 교신저자 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Kookmin University · jyang@kookmin.ac.kr)

** 국민대학교 건설시스템공학부 박사과정, 공학사 (Kookmin University · igablessed@nate.com)

Received January 12, 2016/ revised February 18, 2016/ accepted April 12, 2016

7천명(Seoul Statistics, 2014)으로 천만 이상의 인구가 사는 Megacity로 분류될 수 있다. 도시홍수가 발생하게 되면 피해에 크게 노출 될 것이라는 것을 알 수 있다. 특히 우리나라는 도시지역에 인구의 91.58%가 거주하고 있음에 따라 도시집중현상이 나타나고 있다는 것을 확인할 수 있다(MOLIT, 2014). 최근 기후변화로 인한 극한강우현상의 강도가 증가함에 따라 도시홍수의 위험성은 날로 커져가고 있다(Yoon, 2012; Choi et al., 2008; Kim et al., 2013). 짧은 시간에 강우가 집중되거나 집중호우 일수가 증가하고 국지성, 돌발성 강우가 증가하며 도시지역에 많은 피해가 발생하고 있다. 일반적으로 강우량과 도시화율의 증가를 원인으로 보고 있지만, 도시화 외에 피해경험유무, 피해복구사업의 정도, 인문 사회적 특성 등 지역별 특성이나 방재시설존재 여부에 따라 피해에 영향을 미칠 수 있다(Kim et al., 2011). 이에 따라 도시홍수 위험도 분석에 많은 연구가 집중되고 있고, 본 논문을 통해 도시홍수의 위험지수 산정에 따른 위험도 분석을 진행하였다.

최근 홍수 위험도에 대한 연구들을 살펴보면 위험도를 유해성 및 취약성으로 나누어 한강의 전체 유역을 대상으로 위험도 분석을 하였고(Yoon et al., 2014), 2000년 중후반부터 시작된 연구들은 중규모 이상의 유역단위, 시군구 단위에서 홍수취약성을 평가한 바 있다(Kim et al., 2013). 그러나 이러한 공간단위는 강우의 국지성을 고려할 때 집중호우에 의한 도시 내 홍수재해의 분석을 공간적 범위로는 너무 넓어 제공되는 정보에 한계가 있다(Kubal et al., 2009; Kim et al., 2013). 세밀하게 분할된 연구지역을 통한 분석이 필요하며, 또한 피해를 일으키는 외력과 피해를 가중시키는 내적인 요소인 불투수를 증가, 인구 및 산업 집중화, 지하 공간 활용 증대, 방재시설 용량 부족에 대한 연구 및 접근이 필요하다고 볼 수 있다(Kim et al., 2011). 또한 SWMM (Storm Water Management Modeling)을 통한 홍수 저감효과를 분석하거나(Jang et al., 2013) 도시홍수의 취약성을 통한 지수산정을 하는 선행연구들이 진행 되었다(Kim et al., 2013)

이에 본 논문에서는 SWMM을 이용하여 한강의 지류 중 정릉천과 청계천을 대상으로 소유역으로 나누어 그에 따른 유해성을 분석하고 각각의 소유역의 인문 및 사회지표를 통합하여 새로운 위험도 지수 산정을 진행하였다. 도심지역의 모델링을 통한 도시 유출 해석을 하고 각 인문 사회 지표들을 선정해서 과거 자료를 통한 각 배수분구별 직접적인 위험도 지수 산정을 실시하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 도시홍수 위험도 분석을 위하여 청계천 및 정릉천 유역을 분석하였다. 각 유역 배수구역별 자료를 토대로 SWMM 모델링을 구축하고 인문, 사회와 관련하여 최종 지수 산정을 위한



Fig. 1. Study Area (Cheonggyecheon Watershed)

지표를 선정하였다. 수집된 자료는 요소에 따라 정의하였다. 각 요소별 가중치는 Delphi 기법을 이용하였으며, 각 지표에 대한 표준화를 실시하고 최종적으로 위험도에 따른 위험 유역을 선정하였다.

2.1 연구지역

청계천은 중랑천의 제 1지류인 지방하천이고 서울의 도심인 중구와 종로구를 관통하는 하천이다. 청계천 유역은 유역면적 50.96km², 유로연장은 10.92km이며, 정릉천의 유역면적은 19.32km², 유로연장은 10.85km이다. 유역의 하상경사는 상류부와 중류부는 1/100 - 1/250 정도의 비교적 급한 경사를 이루고 있는 산지 하천의 형태를 이루고 있으며, 하류부에서는 1/1300 정도의 완만한 경사를 이루고 있는 도시하천이다. 복원 공사로 인해 많은 부분이 직선형 수로로 이루어져 있으며 이로 인해 인근지역 침수에 대비하는 200년 빈도 홍수량으로 설계되었다. 정릉천은 강우의 영향을 많이 받는 하천으로 알려져 있다. 평시에는 전천화가 되어 있지만 강우에 따라 유출변화가 크다. 2010년 광화문 침수를 시작으로 꾸준히 증가한 강우강도로 인하여 최근 2013년까지 상습적인 집중호우가 발생한 지역이다. 따라서 도시홍수 위험도 분석에 적합한 지역으로 판단하여 다음지역을 선정했다.

2.2 SWMM 모형

수문순환과정의 해석을 위한 기본 자료로서 소유역 폭, 면적, 하도길이, 경사 등의 지형학적 요소들은 필수적이며, 특히 도시 지역에서도 같이 강우와 유출의 관계가 토지이용현황과 복잡하게 연관되어지는 수문현상의 해석을 위해서 보다 정밀한 지형요소의 추출이 필수적이다(Jang et al., 2013). SWMM 모형은 강우 주상도, 기상자료, 유역 자료, 하수관거 자료를 입력하여 유역의 유출유량을 예측할 수 있는 모델이다(Lee, 2010). 따라서 본 연구는 도심지역 유출해석에 적합한 모형인 SWMM 5.0을 이용하여 모델

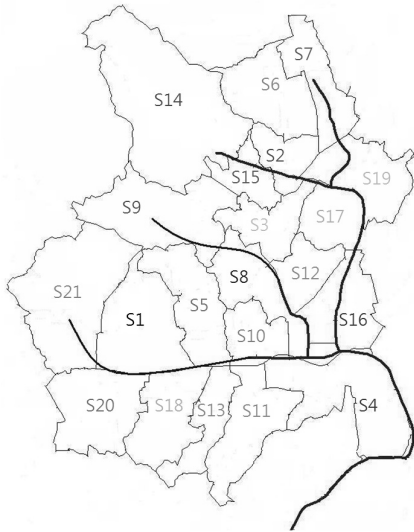


Fig. 2. SWMM Subcatchment Area

Table 1. SWMM Subcatchment Area Name

Name	No.	Name	No.	Name	No.
Gahoe	S1	Bomun	S8	Jeongneung2	S15
Gireum	S2	Seongbuk	S9	Jegi	S16
Dongseon	S3	Sungin	S10	Jongam	S17
Majang	S4	Sindang	S11	Pil-dong	S18
Myeongnyun	S5	Anam	S12	Hawolgok	S19
Mia1	S6	Jangchung	S13	Hoehyeon	S20
Mia2	S7	Jeongneung1	S14	Hyoja	S21

링을 실시하였다. 청계천과 정릉천에 해당하는 대상유역은 도시유역의 배수구역 내 하수관거를 중심으로 설계하였다. SWMM 모델링은 각 소 배수 유역별 자료를 바탕으로 구동하였으며 각 관거를 중심으로 Fig. 2 and Table 1과 같이 총 21개의 소 유역으로 구분하였다. SWMM 모델링을 통해 선정된 지표 중 총 유출량, 최고 유출량, 총 침투량을 산정하였다. 배수 관거를 통해 설계된 소유역을 중심으로 자료를 취합 했으며, 소유역에 위치에 따라 각 지표들을 통계청에서 얻은 동 및 구별 자료들을 배분하여 구성하였다. 해당 배수분구의 측정 위치와 해당 지표자료를 수집한 지자체의 위치에 따라 분구별 값을 지정하였다. 지자체의 위치는 각 동 및 구로 나누어져 있으며 해당 자료는 서울시 통계청을 통해 입수하였다(Seoul Statistics, 2014).

Fig. 3은 SWMM 모델링 결과 계산 값과 관측 값의 결과를 나타낸 그래프이다. 모형에 입력된 강우자료는 서울시 통계청에서 입수한 각 구별로 종로구, 강북구, 성북구, 중구, 성동구, 동대문구의 자료를 사용하였다. 보정에 사용된 유량자료는 청계천 유역의 출구 점인 제 2 마장교 수위 관측소의 2011년 7월 3일의 관측 자료를

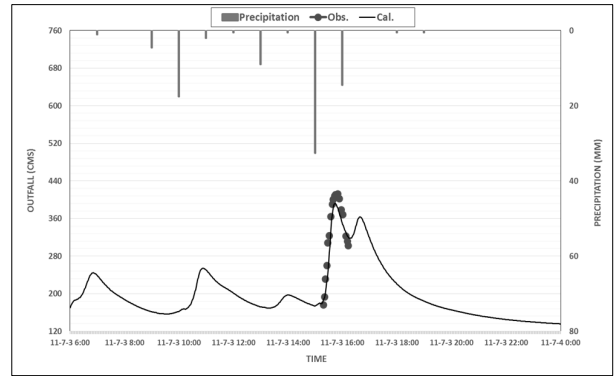


Fig. 3. Cheonggyecheon Outfall Calculation vs. Observed (2011-7-3)

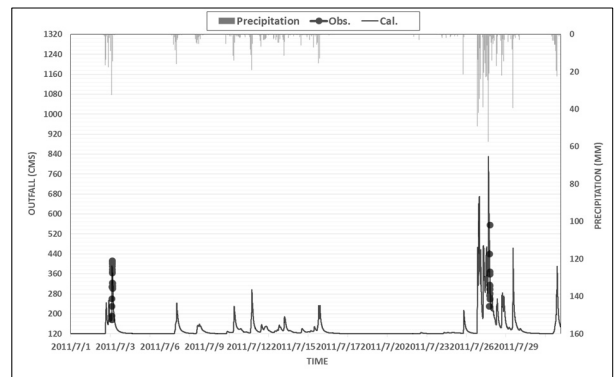


Fig. 4. Cheonggyecheon Outfall Calculation vs. Observed (2011-7)

사용하였다. 보정에 사용된 매개변수는 투수면적과 불투수면적의 조도계수, 침투 매개변수를 사용하였고, 모델링 분석 결과 상관관계는 95%로 나왔으며 RMSE (Root Mean Square Error)는 23.21cms로 나타났다.

Fig. 4는 보정된 매개변수를 통해 2011년 7월을 대상으로 장기도의 유출을 진행한 결과이다. 상관계수는 95%로 나왔으며 RMSE는 28.91cms로 나타났다. 이를 통해 도시 홍수 위험도를 산정하는데 신뢰성 있는 분석 자료를 산출하였다고 판단된다.

2.3 표준화 방법

위험도 분석을 위해 선정된 각 지표들은 지표별 기준과 단위가 다르기 때문에 우선순위 또는 가중치를 적용하기 위한 표준화가 필요하다. 표준화 방법에는 편차를 이용한 Z-Score 방법과 평균을 이용한 Re-Scale 방법, 우선순위를 통한 방법으로 나눌 수 있다. 우선순위의 경우 가장 단순하고 간단한 방법이라 할 수 있지만 가중치를 부여하는 경우에는 적합하지 못 하다. Z-Score 방법의 경우 표준화 방법으로 가장 많이 사용되는 방법이지만 각 유역별 지표에 대한 자료가 정규분포인 경우에만 신뢰도가 높은 방법이기 때문에 부적합하다고 판단하였다(Yu and Kim, 2008). 본 연구에

서는 유역 별로 편차가 발생하기 때문에 Re-Scale 방법을 통해 표준화를 실시하였다.

$$a_j^i = \frac{x_j^i - \min_j(x)}{\max_j(x) - \min_j(x)} \quad (1)$$

여기에서 i 는 소유역을 나타내고, j 는 평가항목을 나타낸다.

2.4 Delphi 방법

본 연구의 홍수 위험 및 취약성의 평가는 지구 재해 시스템의 이론을 기반으로 하였다. 위험도의 정의는 다음의 수식으로 표현될 수 있다(Maskrey, 1989):

$$Risk = Hazard + Vulnerability \quad (2)$$

유해성(Hazard)을 전제로 하고, 취약성(Vulnerability)을 포함하여, 그에 따른 위험도(Risk)를 판단하게 된다(IPCC, 2007). 유해성은 기후나 인간에 의한 실제 사건을 통해 미치는 영향을 의미한다. 취약성은 상해에 대한 적응능력과 잠재적인 위험 가능성을 파악할 수 있는 민감 정도를 지표로 선정했다. 또한 장소나 사람, 환경 기능 등 현재 직접 노출되어진 인자에 대한 지표를 통해 서로의 인과관계에 주목하여 의사결정자들에게 도움이 될 뿐만 아니라 대중들이 환경 및 관련 요소들과 서로 연결되어 있음을 알 수 있게 해준다(Yoon, 2014). 위험도 분석은 직접적인 피해와 원인이 중요하기 때문에 실제 일어난 자료를 바탕으로 취합하였다. 실측이 없는 자료 중 가장 최근 한 해 동안에 이벤트를 다루기 위해 2012년도 자료를 사용했다(Seoul Metropolitan Government, 2013; KMA, 2009).

Delphi를 이용한 전문가들의 설문을 통해 가중치를 산정하였다. 이 기법은 전문가들의 의견을 설문의 방식을 통해 교환한다. 반복적인 설문을 통해 각자의 의견을 수렴하여 전문가들의 생각을 종합하고 이를 바탕으로 새로운 방안을 제시하는 방법이다. 다단계 연구를 진행하는데 막대한 시간이 필요하며 극단적 의견을 처리하는데 어려움이 있지만 문제를 냉정하고 객관적으로 검토할 수 있다는 장점이 있다(Lee, 2001). 설문은 총 3번 진행하였고 수문학 전문가 22명을 선정하여 진행하였다. 설문 그룹은 수문학 및 도시홍수 전문 연구원 9명과 도시 행정관련 공무원 집행원 6명, 대학교의 교수와 박사 이상 전문가 7명으로 구성되었다. 첫 번째 설문을 통해 여러 가지 지표들 중 위험도 분석에 적합한 지표를 선정했다. 개방형 질문을 통해 도시홍수 위험도 분석을 위해 고려되어야 하는 지표, 혹은 영향을 미치지 않을 지표들을 선정하고 그에 합당한 근거를 산출하였다. 해당 부문에 따른 업무를 처리할 인원을 파악할

지역별 담당 공무원에 대한 자료의 경우 업무의 대한 파악이나 자세한 진행업무를 알지 못하기에 지표에서 제외하였다. 토지 현황의 경우 시가화 면적이나 녹지현황으로 편입하여 재구성 하였으며, 자연 재해 위험지구 역시 자연재난 발생현황으로 많은 의견이 증첩되어 지표를 선정하게 되었다. 각 동별 재정 자립도에 대한의견은 각 분구별 적용범위의 해석과 일치 하지 못하는 부분이 많은 이유로 지표에 선정되지 못하였다. 선정된 지표를 바탕으로 서울특별시 통계청에서 자료를 수집하여 설문지와 함께 배포하였다. 두 번째, 세 번째 설문에서는 선정된 지표의 가중치를 부여하고 객관적인 결론을 만드는 과정을 진행했다. 이를 최종적인 지수로 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$Index(a_i) = \alpha_h \sum_{j=1}^m \beta_j a_j^i + \alpha_v (E \sum_{j=m+1}^e \beta_j a_j^i + S \sum_{j=e+1}^s \beta_j a_j^i - A \sum_{j=s+1}^a \beta_j a_j^i) \quad (3)$$

여기에서 i 는 소유역을 나타내고, j 는 평가항목을 나타낸다. α_h 는 유해성의 가중치를 나타내고 α_v 는 취약성의 가중치를 나타낸다 ($\alpha_h + \alpha_v = 1$). 또한 E 는 노출에 대한 가중치, S 는 상태에 대한 가중치, A 는 적응에 대한 가중치를 나타낸다($E + S + A = 1$). β 에서 1 - m까지는 위험도에 대한 항목들의 가중치이고 ($\sum_{j=1}^m \beta_j = 1$), m+1-a까지는 취약성에 대한 항목들의 가중치이다 ($\sum_{j=m+1}^a \beta_j = 1$).

3. 연구 결과

3.1 지표선정

결정된 지표에서 SWMM 모델링에 따른 결과 및 수문자료, 인문, 사회 지표를 유해성(Hazard)과 취약성(Vulnerability)으로 나누어 선정했다. SWMM 모델링에 따른 결과는 총 유출량, 최대 유출량, 총 침투량 이다. 수문자료는 1일 최대 강우량, 연속3일 최대강우량, 80mm이상 강우일수이며 인문 및 사회는 인구, 행정구역, 녹지 현황, 시가지 면적, 자연재해 발생현황, 하수도 및 부대시설 현황으로 각각 지표가 선정 되었다.

선정된 지역을 대상으로 Delphi 방법을 이용해 최종적으로 유해성 및 취약성 12개의 지표를 결정하였다. 그중 취약성의 경우 세분화 하여 3가지 요소로 나누어 지표를 선정했다. 우선 유해성에 미치는 지표는 총 유출량과 최대 유출량이 있다. 총 유출량 및 최대 유출량은 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 요소라고 판단 된다. 취약성의 3가지 요소는 직접적인 영향을 미치는 노출, 민감

정도, 적응성으로 분류하였다. 노출에는 1일 최대 강우량, 연속3일 최대강우량, 80mm이상 강우일수가 있다. 본 지표들은 기후변화를 고려한 홍수취약성 지표 개발에서 언급되기도 하였다(Son et al., 2011). 민감 요소에는 인구, 행정구역 면적, 시가지 면적, 자연재해 발생현황이 있다. 이중 인구는 많이 상주하고 있는 지역이 도시홍수에 민감하게 작용하고, 이와 유사하게 인구밀도가 지표에 포함되어 있었으나 행정구역 면적이 포함되어 이를 포함하는 복합적인 지표로 작용하였다. 행정구역 면적은 강우량이 직접적으로 내리는 면적을 포함하게 된다. 시가지 면적은 불투수면적으로 인해 직접적으로 유출되는 강우의 절대적인 양에 영향을 미치는 인자로 도시홍수에 민감하게 작용한다는 의견이었다. 또한 자연재해 발생현황의 건수가 많을수록 지역주민의 도시홍수에 대한 피해의 민감도가 크게 작용한다. 적응 정도에는 총 침투량, 녹지 현황, 하수도 및 부대시설 현황이 있다. 적응의 지표는 도시홍수에 대처하기 위한 시설물들이

고 이와 같은 시설물이 많은 지역의 도시홍수에 대한 피해는 다른 지역에 비해 상대적으로 줄어들 것이다. 본 지표들은 홍수 취약성 범주별 대표변수를 연구할 목적으로 사용된 지표를 토대로 사용되기도 하였다(Kim et al., 2013). 첫 번째 설문을 통해 선정된 아래의 지표들은 델파이 차트를 통해 각 지표의 가중치에 대한 중앙 값, 상위 25% 값, 상한 값, 하한 값을 이해하기 쉽게 표기하여 2, 3차 설문 시 전체의 의견을 설문지를 통해 교환할 수 있도록 진행하였다. 또한 현재 벌어지고 도시홍수의 심각성을 언급하며 설문에 참여를 유도하였다.

3.2 가중치 산정 결과

각 인사들에 대한 가중치는 Delphi 기법을 통해 수문학 및 수리학 관련 전문가들의 설문을 실시하고 결과 값을 정리하여 재 설문을 통해 가중치를 결정하였다. 총 3번의 설문과 2번의

Table 2. Description of Indicators

Group	Factors	Indicators	Description
Hazard		TR	Total Runoff
		PR	Peak Runoff
Vulnerability	Exposure	MR1	Maximum Rainfall in 1 day
		MR3	Maximum Rainfall in 3 days
		80R	More than 80mm Rainy days
	Sensitivity	P	Population
		A	Area
		UA	Urbanization Area
		OF	Occurrence of Flood
	Adaptation	TI	Total Infiltration
		GA	Green Area
		SFC	Sewerage system and Facilities Construction

Table 3. Weights of Indicators

Group	Weights	Factors	Weights	Indicators	Weights		
Hazard	0.42			TR	0.36		
				PR	0.64		
Vulnerability	0.58	Exposure	0.45	MR1	0.31		
				MR3	0.51		
				80R	0.18		
		Sensitivity	0.29			P	0.2
						A	0.29
						UA	0.36
						OF	0.15
		Adaptation	0.26			TI	0.23
						GA	0.27
						SFC	0.5

피드백을 거쳐 조사된 가중치의 중앙값을 사용하였다.

Table 3의 분석 결과 취약성과 취약성에 대해서는 취약성이 0.16 더 크게 나타났으며 취약성은 노출, 민감도, 적응도 순으로 결정되었다. 취약성 지표 중 직접적인 노출에 영향을 주는 지표가 0.45로 위험도에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 그 중 연속3일 최대강우량이 전체 중 0.51을 차지하며 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 그 뒤를 이어 1일 최대강우량이 0.31, 80mm 이상 강우일수가 0.18의 비중을 차지하였다.

3.3 지표의 표준화

Re-Scale 방법을 통해 표준화한 지표들을 결정된 가중치에 적용하여 각 유역별 최종적인 위험도 분석을 실시하였다.

Fig. 5는 유해성에 관련된 지표를 표준화하였다. 총 유출량은 S17이 0.360으로 가장 많은 양이 유출됨을 알 수 있었고 뒤를 이어 S6가 0.350로 나타났다. 하지만 최대 유출량은 0.640으로 S14 분구가 나타났으며 총 유출량이 크다고 최대유출량이 커지지 않는다는 것을 수치상으로 확인할 수 있다. 최종 유해성 지수는 S14이고, 산정된 지수 가운데 최대 유출량이 83%를 차지하며 높은 수치를 나타냈다.

Fig. 6은 취약성 요소 중 직접적인 노출과 관련된 지표를 표준화하였다. 강우강도와 밀접한 관련을 갖고 있는 지표가 많아 청계천 및 정릉천 유역에 많은 양의 강우가 내린 지역을 알 수 있다. 가장 많은 강우가 내린 지역은 0.94가 산정된 S16 유역이라는 것을 알 수 있다. 특히 S16은 산정된 최종 노출 지수에서 연속3일 최대강우량이 54%를 받았다. 뒤를 이어 S14 유역이 0.699으로

나타났다. 연속3일 최대강우량이 많은 유역이 최종적으로 높은 수치를 나타냈다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 취약성 요소 중 민감 유역 관련 지표를 표준화하였다. S2 유역이 가장 높은 0.772를 받았다. 총 지수중 시가지 면적 0.36으로 산정되며 많은 부분을 차지하였다. 두 번째 많은 지수가 산정된 S4 유역의 경우 최종 지수를 통해 각 인자별 차지하는 비율을 비교하였다. 인구 26%, 행정구역 31%, 시가지 면적비율 19%, 재난 발생 현황 23%로 분포하며 네 가지 지표가 비등한

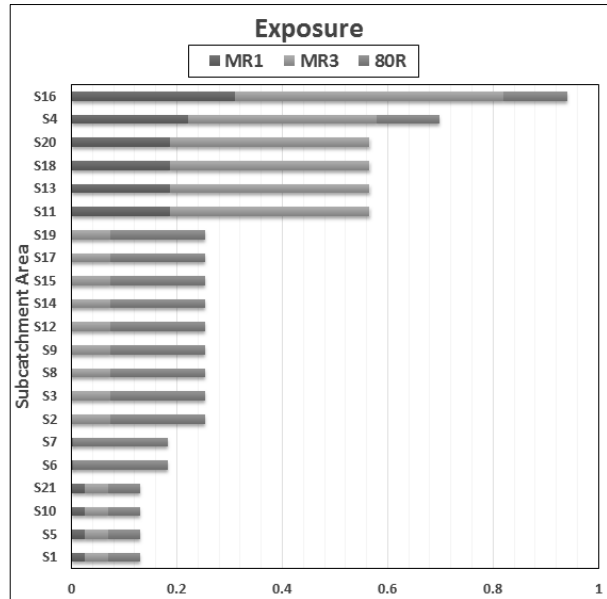


Fig. 6. Weighted Data of Vulnerability Factor (Exposure)

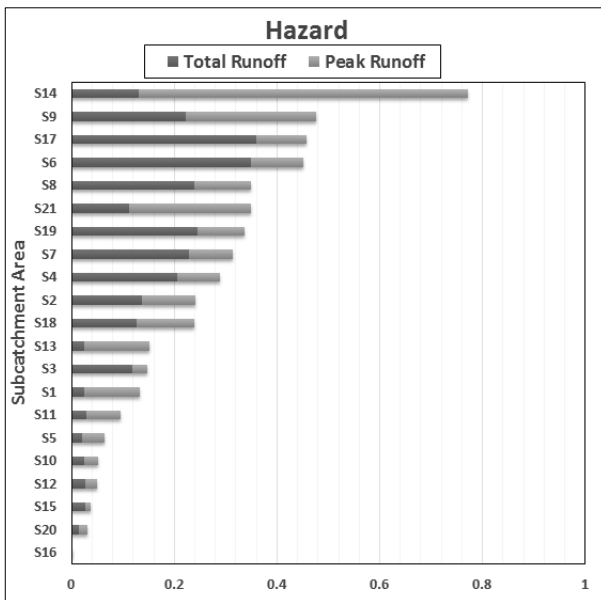


Fig. 5. Weighted Data of Hazard Indicators

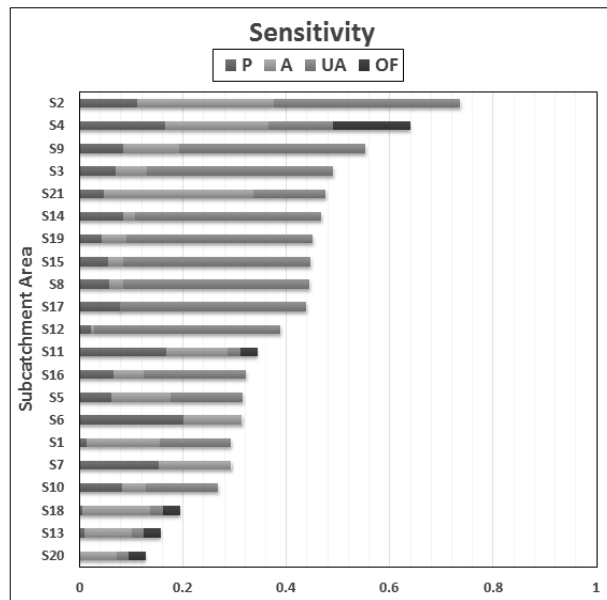


Fig. 7. Weighted Data of Vulnerability Factor (Sensitivity)

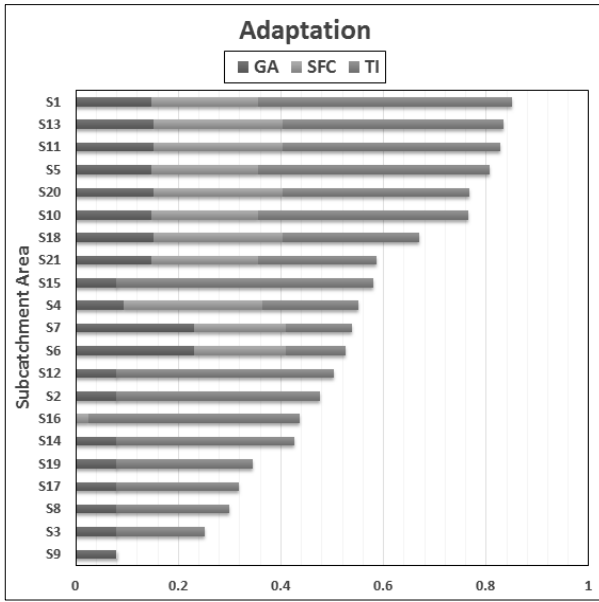


Fig. 8. Weighted Data of Vulnerability Factor (Adaptation)

비율로 분포하였으며, 최종지수는 0.628로 산정되었다. 시가지 면적비율이 높은 영역이 큰 지수로 산정 되었다는 점을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 취약성 요소 중 적응 요소 관련 지표를 표준화 하였다. 지수가 적을수록 총 침투 량, 녹지화 비율, 하수도 및 부대시설이 많다는 것을 의미한다. S1 영역은 최종지수에서 0.85가 산정되었으며, 최종지수 중 각 지표별 차지하는 비율에 따르면 58%로 총 침투 량이 가장 많은 부분을 차지하였다. S9의 경우 녹지 현황을 제외하고는 총 침투 량이나 하수도 및 부대시설이 다른 영역에 비해 많은 것으로 산정 되었다.

3.4 가중치를 적용한 홍수 위험도 지수 산정

Table 4 and Fig. 9는 가중치를 부여한 각 요소 및 지표별 점수를 종합하여 도출해낸 도시홍수 위험도 지수이다.

최종지수 산정 결과 S14 영역 가장 위험한 것으로 판단되었으며 0.533으로 산정되었다. S14 영역은 취약성보다는 유해성에서 많은 점수를 받으며 종합적인 지수에서 높은 위험도를 받았다. 유해성 지수 산정에서 최대 유출량이 전체 지수에 83%를 차지하며 집중적으로 많은 양의 물이 배출되는 양상으로 인해 위험도 지수가 높게 산정 되었다. 뒤를 이어 S4 영역이 0.494 로 나타났다. S4 영역의 경우 가장 높은 지수가 산정된 S14와는 반대로 유해성보다는 취약성이 76%를 차지하며 많은 수치를 받았다. S4 영역은 전체 취약성 지수에서 49%를 직접적인 노출 지표를 통해 받았으며, 높은 강우강도의 영향을 받는 지역으로 판단된다. S16유역은 취약성으로 산정된 지수로 0.368을 받았다. S16 유역의 경우 S4 유역과 유사한

Table 4. Urban Flood Risk Index

No.	Hazard	Vulnerability	Final Index
S1	0.056	0.211	0.267
S2	0.101	0.262	0.363
S3	0.062	0.186	0.248
S4	0.121	0.373	0.494
S5	0.027	0.208	0.235
S6	0.190	0.180	0.369
S7	0.132	0.178	0.310
S8	0.146	0.186	0.332
S9	0.200	0.171	0.371
S10	0.022	0.194	0.216
S11	0.040	0.330	0.370
S12	0.021	0.207	0.228
S13	0.064	0.300	0.363
S14	0.324	0.209	0.533
S15	0.015	0.228	0.244
S16	0.000	0.365	0.365
S17	0.192	0.188	0.380
S18	0.100	0.281	0.381
S19	0.142	0.194	0.336
S20	0.013	0.285	0.298
S21	0.146	0.202	0.348

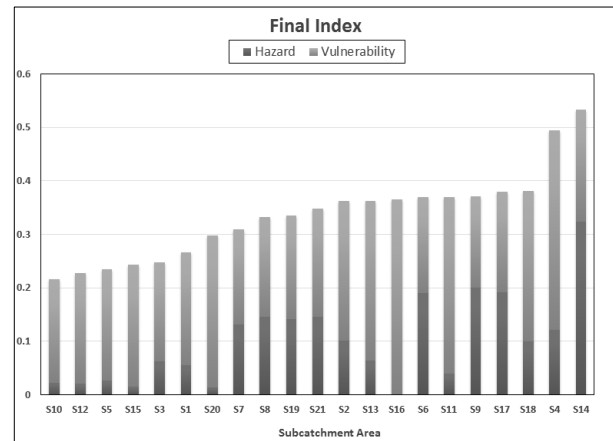


Fig. 9. Urban Flood Risk Index

양상을 보이며, 전체 취약성 지수에서 67% 직접적인 노출 지표를 통해 산정되며, 높은 강우강도의 영향을 받았다.

위의 지수는 각 지표들의 정량화 및 표준화를 거쳐 만들어진 수치들이다. S14분구가 가장 위험도가 높은 지역으로 산정 되었지만 기후변화로 인한 강우강도가 높아지는 현 상황에서는 취약성이 유해성에 비해 비교적 높은 S4, S16, S20 지역이 위험한 것으로

판단된다. S4, S16, S20의 경우 인구밀도가 크고, 높은 강우강도를 가진 강우가 많이 발생한다.

4. 결론

본 연구에서는 도시홍수 위험도 분석을 위하여 청계천 및 정릉천 유역을 분석하였다. 각 유역 배수구역별 자료를 토대로 SWMM 모델링을 구축하고 인문, 사회와 관련하여 최종 지수 산정을 위한 지표를 선정하였다. 수집된 자료는 요소에 따라 정의하였다. 각 요소별 가중치는 Delphi 기법을 이용하였으며, 각 지표에 대한 표준화를 실시하고 최종적으로 위험도에 따른 위험 유역을 선정하였다. 분석 결과 유해성과 취약성에 대해서는 취약성이 0.16 더 크게 나타났으며 취약성은 강우에 따른 직접적인 노출, 인문지표에 따른 민감 정도, 유역 상황에 따른 적응 능력 순으로 결정되었다. 취약성 지표 중 직접적인 노출에 영향을 주는 지표가 0.45로 위험도에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 그 중 연속3일 최대강우량이 전체 중 0.51을 차지하며 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 그 뒤를 이어 1일 최대강우량이 0.31, 80mm 이상 강우일수가 0.18의 수치로 나타났다.

최종적으로 유해성 및 취약성 12개의 지표를 결정하였다. 그중 취약성의 경우 세분화하여 3가지 요소로 나누어 지표를 선정했다. 가회, 길음, 동선, 마장, 명륜, 미아1, 미아2, 보문, 성북, 송인, 신당, 안암, 장충, 정릉1, 정릉2, 제기, 종암, 필동, 하월곡, 회현, 효자 총 21개 각 소 배수 유역 구분별 자료를 SWMM 모델링으로 구성하였다. 모델링 자료와 인문, 사회 지표를 토대로 도시홍수 위험 유역을 지수화하여 산정하였다. 수치화된 자료를 이용해 순위를 매긴 결과 정릉-1이 0.533, 마장 0.494, 필동 0.381, 종암 0.380 순으로 나타났으며, 가장 적은 지수는 송인 0.216으로 나타났다. 정릉1분구가 가장 위험도가 높은 지역으로 선정 되었지만 기후변화로 인한 강우강도가 높아지는 현 상황에서는 취약성이 높은 마장, 제기, 회현 지역이 위험한 것으로 판단된다. 마장, 제기, 회현의 경우 인구밀도가 크고, 높은 강우강도를 가진 강우가 많이 발생한다. 그렇기 때문에 도시화 비율을 최대한 낮추며, 좀 더 많은 하수도 및 부대시설과 녹지 시설 확충이 필요하다고 판단된다. 도시화 비율을 낮추는 방안으로는 최근 대두되고 있는 저영향개발(LID)을 이용한 옥상녹화 기법이나 인공습지를 조성하는 방법 등을 이용해 도시화된 지역에 녹지 시설을 늘리는 효과와 도시화의 가속화를 멈출 수 있을 것이라 판단된다. 최종지수에서 높은 수치를 받고 가장 유해성이 큰 정릉1 역시 최대 유출량과 총 유출량이 많기 때문에 지수산정에 큰 영향을 받았다. 지대가 높고 산지가 많은 것이 장점으로 판단되지만 현재 보유한 녹지 자원을 최대한 보존하고 활용하는 방안을 마련해야 할 것이다.

본 연구는 SWMM을 이용한 모델링 분석과 인문, 사회 지표를 사용하여 도시홍수의 위험도를 분석하였다. 또한 도심지역 행정 구역별 위험도를 통해 지수를 산정한 것은 도심지역의 위험도 평가를 통한 도시홍수 예방에 큰 도움이 될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 모델링을 통한 자료구축과 인문 및 사회 지표의 통합으로 만든 정량적 지수산정을 통해 직접적인 위험지역을 판단하는 것이다. 또한 세분화된 지역에 따른 위험 지수를 통해 각 지역별 사회적 특성 및 위치적 구조를 통한 분석을 실시하였으며, 각 지표별 결과를 토대로 지역 특성에 따른 취약 부분을 판단 할 수 있다. 이에 따라 홍수 예방 대책 수립에 앞서 각 지역에 대한 경제적인 판단을 할 수 있는 바탕을 마련해 준다. 또한 각 지표의 변화와 취약요소, 원인 및 전망 등을 통해 취약한 지점에 대한 적응대책을 사업의 우선순위를 두고 진행한다면 보다 효율적인 사업을 진행할 것으로 사료된다. 본 연구에 선정된 여러 지표들이 다른 도심지역에도 적용이 가능하며, 각 도시에 자료 수집을 기반으로 또 다른 도심지의 위험지수 산정에 도움이 될 것으로 판단된다. 하지만 도시홍수의 위험도를 산정하는데 있어서 다양한 사회경제적 인자의 경우 인구 및 면적 등을 제외하고는 소유역 별로 분할하여 자료를 수집하는데 많은 어려움이 있었다. 각 소유역별 지역 내부가치 생산액, 유동인구 등에 대해서 세분화하여 각 행정구역에서 조사를 실시하여 자료를 제공하면 더욱 다양한 분야에 대해서 고려할 수 있는 완성도 있는 도시홍수 위험도 지수 산정을 실시할 수 있을 것으로 판단된다.

현재의 서울지역은 많은 곳이 도시화가 진행되고 인구밀도가 아주 높은 도시이다. 강우강도가 높아짐에 따라 서울 같은 인구밀도가 높은 지역은 도심으로 갈수록 피해가 커질 전망이다. 위험도 분석을 통해 각 유역 및 지역별로 적합한 계획을 세워야한다. 기후변화의 특성을 파악하고 각 구, 동별 특성에 맞는 계획을 세우는 도시홍수 대책방안을 마련함에 있어서 본 연구 결과가 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물 관리 연구사업 연구지원비(13AWMP-B066761-03)를 지원받아 수행된 연구입니다.

References

Asian Development Bank (ADB) (2013). *Development Effectiveness Report 2013: Private Sector Operations*, Available at: <http://www.adb.org/> (Accessed: July 10, 2014).
Choi, G. Y., Kwon, W. T., Boo, K. O. and Cha, Y. M. (2008). "Recent spatial and temporal changes in means and extreme events

- of temperature and precipitation across the republic of Korea.” *The Korean Geographical Society*, Vol. 43, No. 5, pp. 681-700 (in Korean).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge, United Kingdom.
- Jang, Y. S., Mun, S. H. and Yang, S. L. (2013). “An analysis of flood mitigation effect applying to LID in mokgamcheon watershed using SWMM model.” *Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 75-83 (in Korean).
- Kim, B. K., Jang, D. W., Zhang, N. and Yang, D. M. (2011). “The deduction of urban flood risk factor considering climate change.” *Journal of safety and crisis management*, Vol. 7, No. 1, pp. 125-142 (in Korean).
- Yang, J. S. and Kim, I. H. (2013). “Analysis of promising country for seawater desalination plant using delphi method.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2351-2357 (in Korean).
- Kim, J. S., Sung, H. H. and Choi, G. Y. (2013). “Spatial patterns of urban flood vulnerability in Seoul.” *The Korean Geographical Society*, Vol. 19, No. 4, pp. 615-626 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2009). *Korea Meteorological Administration all rights reserved*, Available at: http://www.kma.go.kr/weather/observation/aws_table_popup.jsp (Accessed: April 10, 2014) (in Korean).
- 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*, Vol. 9, pp. 1881-1895.
- Lee, J. M., Hyun, K. H. and Yuh, O. K. (2010). “An analysis on the hydrologic cycle effect of roadway permeable pavement in residential site.” *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 26, No. 4, pp. 691-699 (in Korean).
- Lee, J. S. (2001). *Method of Delphi*, Publisher of Education and Science (in Korean).
- Maskrey, A. (1989). *Disaster mitigation: A community based approach*, Development Guidelines, Oxford, London.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014). *Ministry of Land, Infrastructure and Transport All Rights reserved*, Available at: http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/1st.jsp (Accessed: July 21, 2014) (in Korean).
- Seoul Metropolitan Government (2013). *Seoul Metropolitan Government all rights reserved*, Available at: <http://stat.seoul.go.kr/index.jsp> (Accessed: April 10, 2014) (in Korean).
- Seoul Statistics (2014). *Copyright Seoul Metropolitan Government All rights reserved*, Available at: <http://stat.seoul.go.kr/jsp3/index.jsp> (Accessed: April 7, 2016) (in Korean).
- Son, M. W., Sung, J. Y., Chung, E. S. and Jun, K. S. (2011). “Development of flood vulnerability index considering climate change.” *JKWRA*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248 (in Korean).
- World Bank (WB) (2013). *World Development Report 2014 : Risk and Opportunity—Managing Risk for Development*, Washington, DC. © World Bank. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16092> (Accessed: January 10, 2013).
- Yoon, S. K. (2012). “Flood risk and vulnerability analysis in an urban stream by climate change.” University of Seoul, Graduate Doctoral Dissertation (in Korean).
- Yoon, S. K., Kim, J. S. and Moon, Y. I. (2014). “Integrated flood risk analysis in a changing climate: A Case Study from the Korean Han River Basin.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 1563-1571 (in Korean).
- Yu, G. Y. and Yu, I. A. (2008). “Introduction method development and vulnerability assessment index of climate change.” Korea Environment Institute (in Korean).