

# 확률론적 모의 기법을 활용한 기후변화에 따른 수원시 침수 발생가능성 지도 구축\*

## Forecasting Possibility of Flood Occurrence in Suwon under Climate Change Applying Stochastic Simulation

김지연\*\* · 성선용\*\*\*  
Kim, Ji-Yeon · Sung, Sun-Yong

### Abstract

A natural risk common in urban areas, flooding caused by localized heavy rain has shown an increase under climate change. Thus, It is needed to consider future rainfall event derived from climate change scenario for establishing flood possibility maps. In this study, The stochastic approach was used to quantify the uncertainty in precipitation of future. Monte Carlo simulation was conducted to calculate precipitation distribution in 2030. The future flood possibility of Suwon was estimated by using Maximum Entropy (MaxEnt) applied the results of Monte Carlo simulation. Pyeong-dong in Gwonseon-gu would currently include the highest flood possibility, however, Top-dong would be the most risky areas in 2030. The uncertainty of flood possibility would be higher in Homaesil and Gwanggyo Newtown, whereas Paldal-gu and Northern Suwon have lower uncertainty. As the flood possibility in Seodun-dong would increase as much as 0.32 compared to current one, an adaptation strategy would be necessary for flood prevention. The flood possibility maps resulted from this study can be used to support decision-making for planning safer city.

키 워 드 ▪ 도시 침수, 기후변화 영향, 불확실성, 몬테카를로 시뮬레이션, MaxEnt  
Keywords ▪ Urban Flooding, Climate Change Impact, Uncertainty, Monte Carlo Simulation, MaxEnt

### I. 서 론

최근 더욱 심각해진 기후변화 영향은 폭우, 폭염, 산사태 등의 대규모 자연 재해로 이어지고 있다. 특히 인구와 기반시설이 집중되어 있는 도시 지역은 기후변화에 따른 재해 피해가 대형화되고

있으며 그 빈도 및 강도가 점점 증가할 것으로 예상된다(Huong and Pathirana, 2013). 실제로 광화문 광장, 강남역 등 서울뿐만 아니라 수원시 등 수도권 지역의 시가지가 최근 들어 상승적으로 침수되고 있다. 이는 과거의 강우 사상보다 더욱 집중적이고 반복적인 강우가 발생한 것이 1차적인 원인

\* 본 연구는 2015년도 BK21플러스 사업의 지원을 받아 수행되었으며(서울대학교 협동과정조경학 그린인프라 창조 인재 양성팀), 수원시정연구원 수문학연구센터가 주최한 <2015 수원연구논문 공모전>에 수상작으로 선정된 논문을 수정 보완한 것 입니다.

\*\* Urban & Environmental Research Group, Suwon Research Institute (jiyeon0424@suwon.re.kr)

\*\*\* Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University (Corresponding author: white109@snu.ac.kr)

으로 뽑히고 있다(환경부, 2011).

미래 이상기후에 안전한 도시를 만들기 위해서 미래의 기후변화 현상을 정량적으로 파악하는 것이 선행되어야 한다. 집중호우에 의한 도시 침수에 대응하기 위해서는 강수량의 변화 양상을 분석하고 이해하는 것이 필요하다. 현재의 양상과 달라지는 미래 강우 패턴과 발생 확률에 대한 이해는 기후변화에 따른 침수 재해를 대비함에 있어서 필수적이다. 이는 객관적으로 미래 환경 변화를 해석함으로써 기후변화에 따른 재해를 논의하는데 핵심적으로 다루어져야 할 사항이다.

국내에서 기후변화 영향에 대한 연구는 비교적 최근에 진행되었으며, 특히 기후변화를 고려한 침수 평가 연구는 주로 관련 지표를 선정하고 정규화 하는 취약성 평가이다(배덕효·이문환, 2010; 한우석 외 2012; 경남발전연구원, 2013). 일부 추세모형을 이용하여 홍수량을 정량적으로 산정한 연구가 이루어졌으나(정대일 외, 2008) 미비한 실정이다. 국외에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)가 제시한 SRES 시나리오(Special Report on Emissions Scenarios), RCP 시나리오(Representative Concentration Pathway) 등의 기후변화 시나리오를 이용하여 홍수의 피해 규모 및 빈도를 도출하는 연구가 진행되고 있으나(Arnell and Lloyd-Hughes, 2014; Hinkela et al., 2014; Alfieri et al., 2015) 국내에서 침수 발생가능성을 정량화하여 예측한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

침수 발생가능성을 정량화할 때 신뢰할 만한 결과를 얻기 위해서는 불확실성을 고려해야 한다. 불확실성은 인간 행동의 변화, 사회적 변화, 자연적 변화에서 기인하는데(Walker et al., 2003), 기후변화는 이 모든 변화를 내포할 뿐만 아니라 기후변화를 가정하는 일련의 과정 속에서 불확실성이 더욱 커질 수 있다(New and Hulme, 2000). 따라서 미래 기후변화 영향에 따른 재해를 판단할 때 발생할

수 있는 불확실성을 이해하고 이를 고려한 재해 평가가 진행되어야 한다. 이는 기후변화에 따른 재해에 대응하기 위한 공간 계획을 지원할 수 있는 좋은 의사결정 도구를 제공할 것이다.

본 연구에서는 수원시를 대상으로 미래 강우사상의 불확실성을 고려한 2030년의 침수 가능성을 산출하고자 한다. 기후변화에 따른 강우의 불확실성은 확률론적 모의기법을 이용하여 반영하였다. 과거에 침수가 발생한 지역의 물리적 특성 및 영향 정도를 통계적 기법을 통해 파악함으로써 강수량 변화에 따른 침수 가능성을 공간적으로 나타내었다. 결과적으로 수원시 도시기본계획과 연계하여 기후변화 영향에 의한 침수 재해에 적용할 수 있는 보다 안전한 공간 계획에 활용 가능한 침수 발생가능성 지도를 도출하고자 한다.

## II. 연구의 범위

### 1. 공간적 범위

본 연구의 대상지는 상습적으로 침수되는 지역과 자연재해위험지구를 포함하고 있는 수원시로 선정하였다(그림 1). 수원시는 2005년부터 2009년 5년간 집중 호우에 따른 주택지, 농경지와 도로 교량에서 상습적인 피해가 발생함으로써 해당 지역에 적절한 대응 전략 수립이 필요한 실정이다(강상준·정주철, 2012). 특히 권선구 평동 지역은 지속적으로 침수 피해가 발생하고 있는 것으로 나타나 수원시 자연재해위험개선지구로 지정되어 있다. 이러한 침수 피해는 수원시 내 일부 지역이 저지대라는 지형학적 요인과 국지적 폭우에 의한 주변 하천의 수위 상승 등 기상이변 및 물리적인 요인이 근본적으로 작용하는 것으로 나타났다(수원시, 2014). 향후 기후변화에 따라 집중 호우가 심화될 것으로 예상

되므로 수원시가 미래 침수 발생가능성 지도를 구축해야 하는 대상지로서 타당하다고 판단하였다.

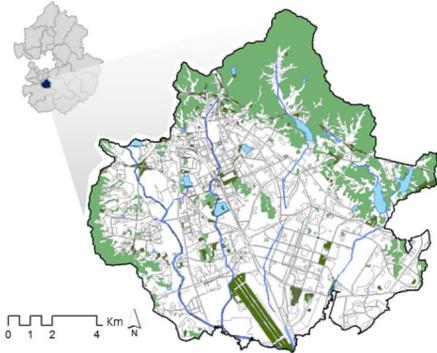


그림 1. 연구의 대상지 (수원시)  
Fig. 1. Study site (Suwon)

## 2. 내용적 범위

기후변화에 따른 강수량 변화를 분석하기 위하여 RCP 시나리오를 사용하였다. 본 연구에서는 4개의 RCP 시나리오 중 저감 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 배출하는 경우를 가정한 RCP 8.5를 이용하였다. 이를 통해 가장 비관적으로 예측된 기후 변화 현상으로부터 발생할 수 있는 영향을 분석하고자 하였다.

RCP 시나리오에 따른 미래 강수량은 지역기후 모델링을 통해 도출되는데 HadGEM3-RA로부터 도출된 1km 해상도의 강수량(1km×1km)을 사용하여 일 강수량을 추출하였다. 단기간의 강수량을 나타내는 강우강도(mm/hr)는 미래를 예측하기에 불확실성이 매우 커 배제하였다.

침수 발생가능성 지도를 구축할 목표연도는 2030년으로 설정하였다. 일반적으로 토지이용계획은 계획수립시점부터 20년을 기준으로 이루어지며 5년마다 그 타당성을 전면적으로 재검토한다(국토

교통부, 2013). 수원시의 경우 2010년을 기준 연도로 하여 20년 후인 2030년의 도시기본계획을 수립하기 때문에 2030년의 침수 발생가능성을 예측하고자 하였다.

## III. 연구의 방법

본 연구는 크게 세 단계로 나뉘어있다. 먼저 침수 발생가능성에 영향을 끼치는 변수를 설정하기 위하여 침수가 발생한 지역의 지형·물리학적 변수와 강우량 자료를 구축하였다. 두 번째는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 강우량의 확률분포를 도출하는 과정이며, 최종적으로 환경 변수와 강우 확률분포를 MaxEnt 모형에 반영하여 현재와 침수 발생가능성 지도를 도출하는 것이다.

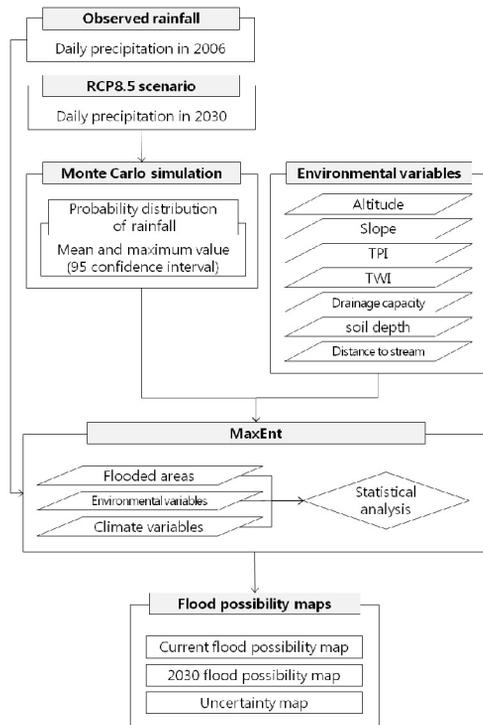


그림 2. 연구 흐름도  
Fig. 2. Research flow

1) 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 강우 확률분포 도출

확률론적 모형(Stochastic model)을 이용한 예측 모형은 불확실성을 고려할 수 있는 진보된 도구이다(Tebaldi and Knutti, 2007). 이는 최적의 값을 찾아내는 결정론적 모형(Deterministic model)과 달리 작은 확률이라도 발생할 가능성이 있는 사건에 대해 정보를 제공함으로써 더 나은 의사결정을 지원할 수 있다(Leutbecher and Palmer, 2008). 확률론적 모형에서는 미래의 기온 및 강수량을 확률분포로 나타냄으로써 가장 발생 확률이 높은 기후 사상을 제시하고 발생 확률이 낮은 극한 사상에 대해서도 해석할 기회를 준다.

본 연구에서는 확률론적 모형 중 기후변화의 불확실성을 처리하는데 많이 사용되고 있는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 강우사상의 확률분포를 도출하였다(그림 3). 이를 통해 강우 패턴의 변화를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 강우 확률분포를 적용하여 침수 평가 모형을 구동할 경우 어떤 지역이 얼마나 위험한지를 정량적으로 파악할 수 있다. 확률분포를 반영한 평가는 평균적인 강우 사상에 의한 침수 발생가능성을 나타낸다. 더욱이 극심한 강우 사상, 즉 기후변화에 의해 발생하는 집중 호우에 의한 침수 발생가능성까지도 확률적으로 도출

할 수 있다.

몬테카를로 시뮬레이션은 미래(2030년)의 강우 확률분포를 도출하는데 사용되었다. 몬테카를로 시뮬레이션을 위한 프로그래밍은 Excel의 VBA(Visual Basic for Application)를 이용하였으며 강우량을 추출하는 알고리즘은 2만 번의 무작위(Random) 반복 시행을 하도록 설정하였다. 도출된 미래의 강우 확률분포로부터 95% 신뢰구간에서의 최댓값과 표준편차를 추출하였다.

현재의 강우 확률분포는 수원시에서 가장 많은 침수 피해가 발생했던 2006년의 일강우량 자료를 이용하여 도출하였다. 강우 확률분포를 공간화 하여 지도 위에 표현하기 위하여 수원시 주변의 Automatic Weather Station(자동기상관측장비, AWS)로부터 구득한 일강우량을 Inverse Distance Weighting (IDW) 공간보간법(역거리가중치법)을 이용하여 수원시에 내삽 하였다(식 1).

$$IDW에\ 의한\ u(x) = \frac{\sum_{k=0}^N W_k(x)u_k}{\sum_{k=0}^N W_k(x)} \quad (식\ 1)$$

u(x)=주어진 점 x에 대하여 보간된 값, 추정치  
 N=이미 알고 있는 값의 수  
 k=영향 범위 내에 해당하는 샘플 포인트  
 W=거리의 역에 대한 가중치

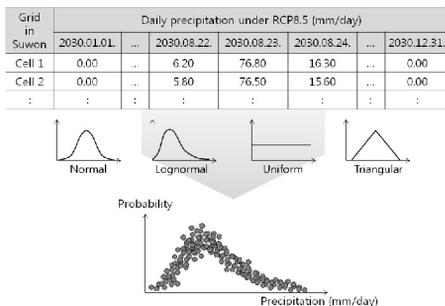


그림 3. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 미래 강우 확률분포 선정 방법  
 Fig. 3. Rainfall distribution calculation of future by using Monte Carlo simulation

IDW는 AWS 지점이 비교적 균일하게 분포하고 있는 지역에서 일정 수준 이상의 정확도를 보이기 때문에 강우량을 내삽 하는데 많이 쓰이는 보간 기법 중 하나이다(황연상 외, 2010). 미래의 강우 확률분포는 RCP8.5 시나리오가 나타내는 2030년 일강우량을 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 도출

하였다. RCP8.5의 강우량 자료의 해상도에 맞추어 미래 강우 확률분포를 1km×1km의 그리드로 공간화 하여 미래 강우량 지도를 도출하였다.

### 2) 침수 발생가능성 평가 변수 구축

문헌연구를 바탕으로 침수 발생에 영향을 끼칠 것으로 판단되는 환경 변수들을 추출하였다(표 1). 일강우량 뿐만 아니라 물이 고이는데 영향을 끼치는 지형 조건, 물이 빠지지 못하고 유출되는데 영향을 끼치는 토양 조건, 마지막으로 범람에 의해 주변 지역이 잠기는데 영향을 끼치는 하천 조건 등을 수원시 침수 발생가능성의 변수로 선정하였다. 이러한 변수는 ArcGIS 10.1을 이용하여 지도화 하였다.

표 1. 침수 발생가능성 영향 변수  
Table 1. Variables for Flood Possibility

Category	Environmental Variables	Properties
Rainfall characteristic	Daily precipitation (mm/day)	Continuous
	Altitude	Continuous
Topographic Indices	Slope	Continuous
	Topographic Position Index (TPI)	Continuous
	Topographic Wetness Index (TWI)	Continuous
Soil	Drainage capacity	Categorical
	Effective soil depth	Categorical
Stream	Distance from nearest stream	Continuous

지형 변수 중에서 고도와 경사는 물의 고임과 흐름에 밀접한 관련이 있는 변수로서 지형을 나타내는 가장 대표적인 변수이다. TPI는 주변 지역의 오목 볼록한 정도를 나타내는 지형위치지수로서 주변 지역보다 고도가 낮으면 음수, 높으면 양수의 값을 갖는다. TWI는 물이 흐르는 경향과 경사를 이용하여 그 값이 클수록 물이 많이 고이는 특성을

지닌다. 토양 관련 변수 중 토양 배수능은 지형 및 토성의 투수성, 지하수위 등을 고려하여 매우 양호/양호/약간 양호/약간 불량/불량/매우 불량 등 6개 등급으로 나뉘어 배수가 불량할수록 침수 발생에 영향을 끼친다. 유효토심은 깊을수록 수분 함유가 가능한 토양의 체적이 증가한다. 마지막으로 하천과의 거리는 침수심(침수 깊이)에 영향을 끼친다 (Galasso and Senarath, 2014).

### 3) MaxEnt를 이용한 침수 발생가능성 지도 도출

MaxEnt는 본래 종의 출현 지역으로부터 물리적 특성을 파악하여 그와 유사한 특성을 갖는 지역을 추출함으로써 생물 종 분포를 예측하는 로지스틱 회귀분석 기반의 공간 확률 모형이다(Young et al., 2011). 종의 출현정보만을 가지고 서식 적합지역을 확률적으로 나타낸다는 점에서 최근에는 재해 발생 지역을 이용하여 재해 발생 가능지역을 예측하는데 사용되기도 한다(Vorpahl et al., 2012; 김호걸 외, 2013; 김효민 외, 2013).

본 연구에서는 2006년에 침수가 발생한 수원시 내 53개의 지역을 대상으로 MaxEnt를 구동하였으며, 이 때 전체 침수 발생 지역의 25%에 해당하는 13개 지역을 무작위로 추출하여 결과를 검증하였다. 침수 발생 지역의 물리적 특성을 설명하는 변수는 앞서 구축한 침수 발생가능성 영향 변수를 사용하였다. 또한 변수 간 다중공선성 문제를 파악하기 위해 SPSS를 이용하여 변수들의 상관관계를 파악하였다.

파일럿 테스트를 통해 모델에 대한 변수의 기여도와 변수 별 반응 곡선을 해석하여 결과의 설명력을 떨어뜨리는 변수를 제거해가며 MaxEnt를 여러 번 구동 후 최종적으로 믿음직한 결과를 도출하였다. 또한 모델 자체 내에서 15번의 반복 시행을 통해 평균적인 침수 발생가능성 지도를 도출하였다.

모형의 설명력은 어떤 검사의 판단 결과를 보여주는 Receiver Operating Characteristic (ROC) 곡선의 아래 면적을 나타내는 Area Under the Curve (AUC) 값을 이용하여 판단하였다. AUC는 출현 정보와 비출현 정보가 모델에서 정확히 구분되어 나타났는가를 보여주는 확률로서, 그 값이 1에 가까울수록 테스트 결과의 정확성이 높다고 해석할 수 있다(Subtil and Rabilloud, 2015).

### III. 연구의 결과 및 고찰

#### 1. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 미래 강우 확률분포

RCP8.5 시나리오 상의 2030년 강우 확률분포를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 도출한 결과, 95%의 신뢰구간에서 최대 일강우량은 93.32mm로 나타났다(그림 4). 10mm 이하의 강우가 올 확률(무강우 일 포함)이 0.77로 가장 크고 70mm 까지 강우 확률은 점점 감소하는 양상을 보였다. 극한강우량에 가까워질수록 강우 확률이 감소하는 것은 일반적인 강우 패턴이다. 그러나 모의된 미래 강우 확률분포

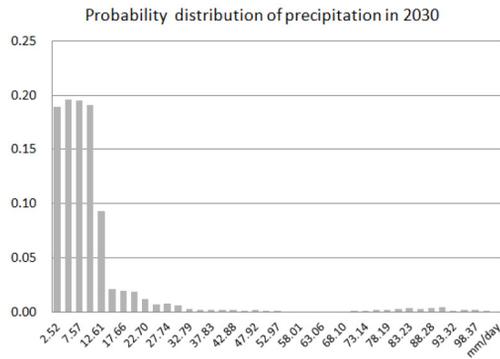


그림 4. 2만 번 반복시행을 통해 도출한 2030년 일강우량 확률분포  
Fig. 4. Probability distribution of daily precipitation in 2030 by 20,000 iteration

는 70mm 이상부터 신뢰구간 내 최대 강우량에 도달할 때까지 강우 확률이 다시 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 기후변화에 따른 강우 패턴의 변화라고 할 수 있다.

#### 2. 수원시 현재 침수 발생 가능성 지도

현재의 강우특성과 지형-물리학적 영향 변수를 이용하여 MaxEnt 모형의 파일럿 테스트를 시행한 결과, 경사, TWI, 토양 배수능 그리고 유효토심은 침수 발생가능성에 끼치는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 침수 발생가능성에 영향력이 큰 변수는 고도, 일강우량, TPI 순으로 나타났다. 변수 별 반응곡선을 살펴보면 고도가 낮을수록, 일강우량이 증가할수록, 하천과의 거리가 가까울수록, TPI가 작을수록 침수 발생가능성이 큰 것으로 분석되었다.(그림 5).

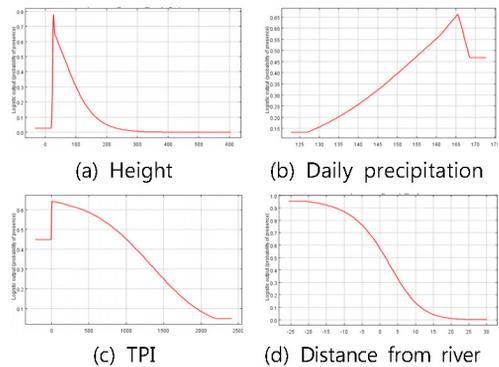


그림 5. 침수 발생가능성 영향 변수별 반응곡선  
Fig. 5. Response curve for significant variables

MaxEnt 모형의 AUC는 0.80이며 검증용 데이터를 이용한 모형의 AUC는 0.75로 나타나 본 모형의 결과인 침수 발생가능성 지도는 신뢰할 만한 것으로 판단된다. 수원시에서 가장 높은 침수 발생가능성은 0.83이며 이 지역은 상습적으로 침수되어 자

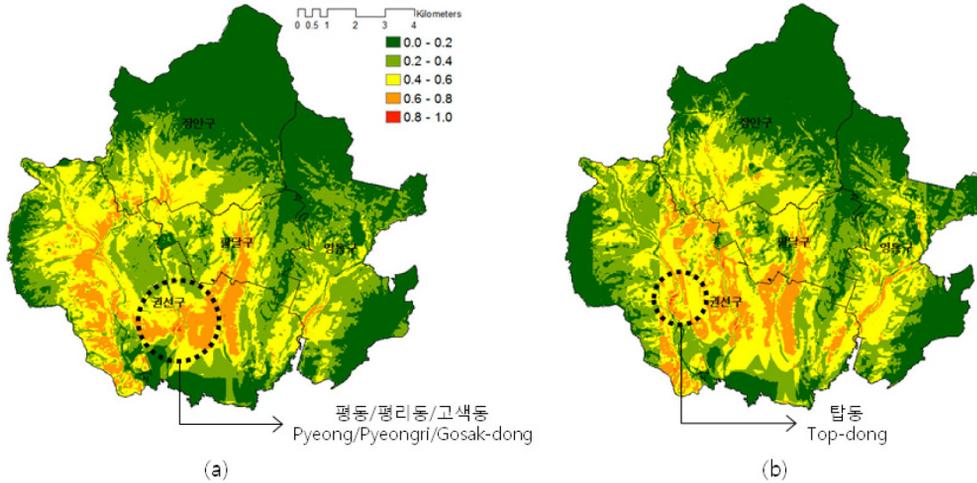


그림 6. 수원시 침수 발생가능성 지도 ((a): 현재, (b): 2030년)  
 Fig. 6. Flood possibility maps in Suwon ((a): current map, (b): 2030 map)

연재해위험지구로 지정되어 있는 평동과 그와 인접한 평리동, 고색동으로 나타났다. 권선구는 다른 구보다 침수 발생가능성이 높은 지역을 포함하고 있는데, 이는 국지적 호우와 황구지천, 수원천 등 하천의 영향인 것으로 추정된다. 반면, 백운산과 광교산이 위치하고 있는 북수원 지역과 영통구를 포함하는 동수원 지역은 침수 발생가능성이 0.2 이하로 매우 낮아 상대적으로 침수에 안전한 것으로 분석되었다(그림 6(a)).

### 3. 수원시 2030년 침수 발생가능성 지도 및 현재와의 비교 고찰

2030년의 일강우량을 대입하여 MaxEnt를 구동한 결과, 2030년에 평동 지역은 여전히 0.80 이상의 높은 침수 발생가능성을 갖는 지역을 포함하지만 그 면적은 현재의 42%로 줄어든다. 가장 높은 침수 발생가능성은 0.83이며 이 지역은 황구지천을 끼고 있는 권선구 탑동에 위치한다(그림 6(b)).

2030년과 현재의 수원시 침수 발생가능성 변화를 나타낸 결과, 서수원 지역은 침수 발생가능성이 감소하여 현재에 비해 상대적으로 안전한 지역이 되는 것으로 나타났다. 이는 RCP 8.5의 가정 하에서 집중호우에 따른 극한 강우량이 해당 지역에서 오히려 감소하는 것으로 예측되었기 때문이다.

반면 권선구 서둔동 일대는 2030년의 침수 발생가능성이 현재보다 최대 0.32만큼 증가하는 지역이 생겨 이 지역에 대한 적절한 대응 전략이 필요할 것으로 생각된다. 팔달구는 총 면적의 83.47%가 현재와 비교했을 때 침수 발생가능성이 높아지는 것으로 나타났으나 수원천 주변을 제외하면 침수 발생가능성 자체는 낮은 것으로 분석되었다(그림 7(a)).

몬테카를로 시뮬레이션 결과로부터 표준편차를 추출하여 침수 발생가능성 지도의 불확실성을 분석한 결과, 권선구 호매실 공공주택지구와 영통구 광교신도시의 침수 발생가능성의 불확실성이 높게 나타났다. 호매실 지역은 침수 발생가능성이 현재에 비해 최대 0.30만큼 감소하지만 광교신도시는 최대

0.25만큼 증가하기 때문에 이 지역의 침수 대응 계획 필요 여부에 대해 논의가 필요하다. 광고신도시의 경우 불확실성이 크기 때문에, 즉 침수를 일으키는 극한 강우량의 발생 확률이 0.005로 매우 낮기 때문에 침수 대응 계획을 세워야 할 당위성은 부족하다고 볼 수 있다. 반면, 복수원의 광고산, 백운산 일대와 팔달구의 우만1동, 지동, 인계동 일대는 불확실성이 낮게 나타났다(그림 7(b)).

동시에 낮은 불확실성을 갖는 지역이다. 향후 수원시는 한정된 예산으로 침수 대응 대책을 적용해야 하는 지역의 우선순위를 결정하는데 있어서 본 연구의 결과를 활용할 수 있다. 이에 따라 수원시의 침수 대책 우선 지역은 현재와 2030년 모두 가장 높은 침수 발생가능성을 포함하고 불확실성이 가장 낮은 지역을 포함하는 권선구 평동 및 탑동으로 선정할 수 있다.

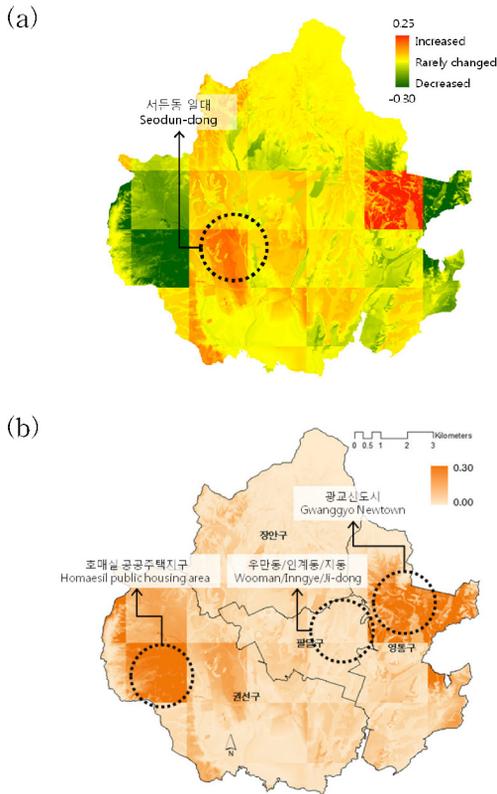


그림 7. 침수 발생가능성 변화(a)와 2030년 침수 발생가능성의 불확실성(b)  
 Fig. 7. Changes in Flood Possibility(a) and uncertainties of Flood Possibility(b)

결과적으로 침수에 대한 대응대책이 우선적으로 마련되어야 하는 지역은 침수 발생가능성이 높으며

#### IV. 결론

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션과 통계 기반 모형을 활용하여 미래 강우의 불확실성을 고려한 2030년 수원시 침수 발생가능성을 산정하였다. 현재와 미래의 침수 발생가능성을 비교함으로써 기후변화에 따라 침수 위험이 오히려 낮아지는 지역과 증가하는 지역을 나타내었다. 이를 통해 향후 추가적인 침수 대응 계획이 필요한 지역을 찾아낼 수 있었다. 또한 미래 강우 확률분포가 반영된 표준편차 지도는 침수 발생 가능성의 불확실성을 나타내어 그 값이 작을수록 해당 지역에 적합한 대응 계획을 수립하는데 유리함을 시사한다.

다만 본 연구에서 제시한 침수 발생가능성 지도는 침수에 영향을 끼치는 기후환경 및 지형·물리학적 측면만을 고려한 것으로 기술 발달에 따른 배수 능력의 변화, 토지이용의 변화에 대한 부분은 고려하지 않았다. 따라서 사회경제적인 변화 및 인간의 개입에 따라서 바뀔 수 있는 요소에 대해서는 추가적인 검토가 필요할 것이다. 또한 강우에 의해 토양 수분흡수능력의 변화가 예상되나 이를 정량화하기에 어려움이 있으므로 본 연구의 범위에서 제외하였다. 향후 토양의 역할에 대한 검토가 가능하면 모형을 정교화 하는데 도움이 될 것이다. 마지막으로 기상청에서 제공하는 상세 기후자료의 단위

가 1km×1km로 다른 환경 변수와 비교하였을 때 다소 해상도가 떨어져 미래 예측 지도의 해상도를 높이는데 한계가 있었다.

그러나 본 연구의 결과는 토지이용계획, 도시 계획 및 정책결정자로 하여금 기후변화 영향에 대응할 수 있는 수원을 만들어나가는 데 합리적인 의사결정을 지원하는 기초 자료로서 활용될 수 있다는 점에서 그 의미가 크다. 기후변화 시대를 살아가는 현대인들에게 있어 도시 계획의 새로운 패러다임은 기후변화 영향을 줄이고 적응할 수 있도록 재해 위험 평가가 선행되어야 하는 것이라고 할 수 있다. 침수 발생가능성 지도는 다양한 분야에서 활용이 가능한데, 침수 발생가능성이 높은 지역에 대해서는 녹지를 조성하거나 방제시설을 설계하는 등의 조치를 취할 수 있기 때문이다. 향후 본 연구에 사용된 방법론을 활용하여 기후변화에 따른 침수 발생가능성 뿐만 아니라 다른 영향까지 통합적으로 평가함으로써 보다 안전한 수원을 위한 공간 계획을 수립할 수 있을 것으로 기대한다.

### 인용문헌

### References

1. 강상준·정주철, 2012. “수해지 분포 특성에 관한 연구: 경기도 사례를 중심으로”, 『대한토목학회논문집』, 32(5D): 507-517.  
Kang, S-J and Jung, J-C, 2012. “Study on the Distribution Characteristics of Storm Damage Area : The Case of Gyeonggi-do”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(5D): 507-517.
2. 경남발전연구원, 2013. 「기후변화시대에 부응한 경남 도시홍수재해 저감 방안」, 경남. Gyeongnam Development Institute, 2013. *A study on urban flood disaster mitigation in Gyeongsang-namdo to Meet the era of climate change*, Gyeongnam.
3. 국립환경과학원, 2012. 「2050 기후친화적 안전사회 모형 개발을 위한 기초연구」, 서울. National Institute of Environmental Studies, 2012. *A Basic Research on the 2050 Climate Friendly and Safe Society Model Development*. Seoul.
4. 국토교통부, 2011. 「2013. 도시기본계획수립지침 개정안」, 경기. Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2011. *2013 Decree of Urban Planning Guideline*, Gyeonggi.
5. 김호걸·이동근·모용원·김승호·박찬·이수재, 2013. “MaxEnt 모형을 이용한 기후변화에 따른 산사태 발생가능성 예측”, 『환경영향평가』, 22(1): 39-50. Kim, H-G, Lee, D-K, Mo, Y-W, Kil, S-H, Park, C, Lee, S-J, 2013, “Prediction of Landslides Occurrence Probability under Climate Change using MaxEnt Model”, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(1): 39-50.
6. 김효민·이동근·박찬, 2013. “MaxEnt를 이용한 서울시 도시홍수 적응능력 취약지역 선정에 관한 연구”, 『국토계획』, 48(4): 205-217. Kim, H-M, Lee, D-K, Park, C, 2013. “A Study on Selection for Vulnerable Area of Urban Flooding Adaptable Capacity Using MaxEnt in Seoul”, *Journal of the Korea Planning Association*, 48(4): 205-217.
7. 배덕효·이문환, 2010. “기후변화에 따른 홍수취약성 평가와 사례 분석”, 『국토』, 6: 20-31. Bae, D-H, Lee, M-H, 2010. “Flooding vulnerability assessment and case review due to climate change”, *Planning and policy*, 6: 20-31.
8. 수원시청, 2014. 「수원시 풍수해저감종합계획 보고서」, 수원. Suwon-si, 2014. *Synthesis report on Natural Hazard Management*, Suwon.
9. 정대일·제리 스테던저·성장현·김영오, 2008. “기후변화를 고려한 홍수 위험도 평가”, 『대한토목학회논문집 B』, 28(1B): 55-64. Jeong, D-I, Jerry, R., Sung, J-H, Kim, Y-O,

- 2008, "Flood risk assessment with climate change", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 28(1B): 55-64.
10. 한우석·심우배·이병재·유재환, 2012. "기후변화에 따른 홍수에 대한 지자체 기반시설 취약성 평가 방법 제시", 『한국기후변화학회지』, 3(1), 25-37.  
Han, W-S, Sim, O-B, Lee, B-J, Yoo, J-H, 2012. "The proposal of evaluation method for local government infrastructure vulnerability relating to climate change driven flood", *Journal of Climate Change Research*, 3(1):25-37
  11. 환경부, 2011. 「침수대응 하수도 시뮬레이션 가이드라인 마련 연구」, 서울.  
Ministry of Environment, 2011. *Development Sewage System Simulation Guideline to Respond Inundation*, Seoul.
  12. 황연상·정영훈·임광섭·허준행, 2010. "강우-유출 모형 적용을 위한 강우 내삽법 비교 및 2단계 일 강우 내삽법의 개발", 『한국수자원학회』, 43(12): 1083-1091.  
Hwang, Y-S, Jung, Y-H, Lim, K-S, Heo, J-H, 2010. "Comparison of Daily Rainfall Interpolation Techniques and Development of Two Step Technique for Rainfall-Runoff Modeling", *Journal of Korea Water Resources Association*, 43(12): 1083-1091.
  13. Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F., Bianchi, A., 2015. "Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios", *Global Environmental Change*, 35:199-212
  14. Arnell, N., W., Lloyd-Hughes, B., 2014. "The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios", *Climatic change*, 122(1):127-140
  15. Galasso C., Senarath S., 2014. "A Statistical Model for Flood Depth Estimation in Southeast Europe, Vulnerability, Uncertainty, and Risk", *ASCE*, 2014: 1415-1424.
  16. Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A., Perrette, M., Nicholls, J. R., Tol, S. J. R., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C., Levermann, A., 2014. "Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise", *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 111(9):3292-3297
  17. Huong H.T.L. and Pathirana A., 2012. "Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17: 379-394.
  18. IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
  19. Leutbecher M., and Palmer T.N., 2008. "Ensemble forecasting", *Journal of computational physics*, 227: 3515-3539.
  20. New, M., Hulme, M., 2000. Representing uncertainty in climate change scenarios: a Monte-Carlo approach. *Integrated Assessment* 1(3): 203-213.
  21. Storch H., Downes N., Katzschner L., Think N., 2011. "Building resilience to climate change through adaptive land use planning in Ho Chi Minh city, Vietnam", *Local sustainability*, 1: 349-363.
  22. Subtil F., Rabilloud M., 2015. "An enhancement of ROC curves made them clinically relevant for diagnostic-test comparison and optimal-threshold determination", *Journal of Clinical Epidemiology* (in Press)
  23. Tebaldi C., Knutti R., 2007. "The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections determination", *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365: 2053-2075.
  24. Vorpahl P., Helmut E., Michael M. and Boris S., 2012. "How can statistical models help to determine driving factors of landslides?",

- Ecological Modelling*, 239: 27-39.
25. Walker W.E., Harremoes P., Rotmans J., Sluijs J.P., Asselt M.B.A., Janssen P., Kraye von Krauss M.P., 2003. "Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support", *Integrated Assessment*, 4(1): 5-17.
26. Young N., Carter L., Evangelista P. A., 2011. A MaxEnt Model v3.3.3e Tutorial (ArcGIS v10), Colorado, USA: Natural Resource Ecology Laboratory at Colorado State University and the National Institute of Invasive Species Science.

Date Received 2016-01-29

Date Reviewed 2016-03-17

Date Accepted 2016-03-17

Date Revised 2016-03-24

Final Received 2016-03-24