



A review on urban inundation modeling research in South Korea: 2001-2022

Lee, Seungsoo^a · Kim, Bomi^b · Choi, Hyeonjin^c · Noh, Seong Jin^{d*}

^aResearch Fellow, Water and Land Research Group, Sejong, Korea

^bPh.D. Course Student, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

^cPh.D. Course Student, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

^dAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

Paper number: 22-072

Received: 6 September 2022; Revised: 26 September 2022; Accepted: 4 October 2022

Abstract

In this study, a state-of-the-art review on urban inundation simulation technology was presented summarizing major achievements and limitations, and future research recommendations and challenges. More than 160 papers published in major domestic academic journals since the 2000s were analyzed. After analyzing the core themes and contents of the papers, the status of technological development was reviewed according to simulation methodologies such as physically-based and data-driven approaches. In addition, research trends for application purposes and advances in overseas and related fields were analyzed. Since more than 60% of urban inundation research used Storm Water Management Model (SWMM), developing new modeling techniques for detailed physical processes of dual drainage was encouraged. Data-based approaches have become a new status quo in urban inundation modeling. However, given that hydrological extreme data is rare, balanced research development of data and physically-based approaches was recommended. Urban inundation analysis technology, actively combined with new technologies in other fields such as artificial intelligence, IoT, and metaverse, would require continuous support from society and holistic approaches to solve challenges from climate risk and reduce disaster damage.

Keywords: Urban inundation, Review, Modeling technique, Analysis by modeling objectives, Challenges

도시침수 모의 기술 국내 연구동향 리뷰: 2001-2022

이승수^a · 김보미^b · 최현진^c · 노성진^{d*}

^a한국환경연구원 물국토연구본부 부연구위원, ^b금오공과대학교 토목공학과 석박사 통합과정, ^c금오공과대학교 토목공학과 석박사 통합과정,

^d금오공과대학교 토목공학과 조교수

요 지

본 총설연구에서는 도시침수 모의 기술의 체계와 발전 과정을 정리하고, 주요 성과와 한계점을 파악하여 향후 연구 방향과 도전 과제를 제시하였다. 이를 위해 2000년대 이후 국내 주요 학술논문집에 수록된 도시침수 모의 관련 논문 160여편을 분석하여 연구의 핵심 주제와 내용을 살펴본 후, 물리 및 데이터 기반 모형의 침수모의 세부 방법론별로 기술의 발전 현황에 대해 정리하였다. 또한, 국내 도시침수 모의 기술의 활용목적별 동향, 국외 및 연관 분야 연구동향에 대해서도 분석하였다. 국내 도시침수 모의 연구에서 Storm Water Management Model (SWMM) 모형을 활용하는 비율이 60%를 넘는 것으로 조사되었으며, 이중 배제(dual drainage)의 도시침수 물리 과정을 상세히 해석하는 국내 기술에 대한 연구가 필요한 것으로 판단되었다. 한편, 딥러닝(deep learning) 등 데이터 기반 모의 기술은 도시침수 해석의 새로운 분야로 자리매김하였다. 다만, 모형 훈련을 위한 극한기상조건에 대한 침수자료는 관측만으로 확보할 수 없으므로, 고정확도 물리 모형과 데이터 기반 모형 연구는 상호보완적으로 진행되어야 할 필요가 있다. 도시침수 모의 기술은 인공지능이나 IoT, 메타버스 등 타 분야 신기술과의 접목이 활발히 이루어지고 있으며, 기후 위기 적응과 재해 피해 저감을 위해 지속적인 사회적 투자와 융합 연구가 필요한 분야로 판단된다.

핵심용어: 도시침수, 연구동향, 모의기술, 활용목적별 분석, 도전 과제

*Corresponding Author. Tel: +82-54-478-7621

E-mail: seongjin.noh@kumoh.ac.kr (Noh, Seong Jin)

1. 서론

기후변화로 인해 집중호우나 침수 등 수재해의 발생 빈도와 피해규모가 가파르게 증가하고 있다. 특히, 많은 인명 및 재산 피해가 동반되는 도시침수는 태풍, 집중호우, 산사태, 가뭄 등 여러가지 자연재해 중에서도 신속한 대응이 필요한 중대한 재해 중 하나이다. 최근 들어, 재해의 시공간적 규모보다 사회경제적 영향에 중점을 두어 평가하고 회복력을 향상시키는 대응 방식이 주목받고 있으나(Hammond *et al.*, 2015), 상대적으로 복잡한 구조의 도시공간 내에서 급속하게 발생하는 도시 침수는 많은 기술 발전에도 불구하고 예측 불확실성이 높은 재해 현상으로 남아 있다.

도시침수의 발생 원인은 도시하천이 넘쳐서 발생하는 외수범람(fluvial flooding)과 우수관거나 저류시설 등 우수배제 시설의 통수능 부족으로 인한 내수침수(pluvial flooding) 두 가지로 구분할 수 있다(Fig. 1). 외수범람과 내수침수의 발생기작은 다르지만, 서로 연관될 수 있으며, 중첩될 경우 도시침수로 인한 피해의 크기와 범위가 확대될 수 있다. 예를 들어, 하천 수위 상승으로 인해 도시유역 유출수의 배제가 원활하게 이루어지지 않아 내수침수가 발생할 수 있으며, 반대로 도시화로 인한 유출량 증가로 인해 외수범람의 위험성이 상승할 수도 있다. 또한, 해수면의 상승과 폭풍 해일의 영향으로 외수범람과 내수침수의 위험이 동반 상승할 수도 있다. 이처럼 도시침수는 도시의 지형적, 수문기상학적, 수리학적, 사회경제학적 요소가 결합되어 발생하는 복합재난의 하나라 할 수 있다.

도시침수의 발생과 그로 인한 피해를 예방하기 위해서는 원인분석을 바탕으로 한 대책 수립이 선행되어야 하며 그 대표적 수단으로는 현장 계측, 축소모형실험, 수치 모의 등이 있다. 현장 계측은 해당 지역에서 발생하는 도시침수를 빠르고

정확하게 파악할 수 있다는 장점이 있으나, 광범위한 영역에서 발생하는 도시침수의 복합적인 원인을 모두 계측하는 것은 현실적으로 불가능하다는 제약이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 실제 현상을 수리학적 사상 법칙을 적용해 축소된 모형에서 실험하는 방법이 있다. 그러나 모형실험 역시 많은 비용과 인력이 소요되므로 적용이 제한적이다. 전산 수치 모의는 이러한 비용과 시간 그리고 공간적 제약을 극복할 수 있는 방법으로 알려져 있으며, 수치 모의를 통한 도시유역 침수 원인 분석과 피해 저감을 위한 대책 수립하는 기술은 전세계적으로 최근 2~30년간 급속한 속도로 발전해왔다.

전통적 수리, 수리학 분야에 비해 상대적으로 근래에 발전된 도시침수 관련 연구의 초기에는 전통적인 수리수문학적 방법론을 도시지역에 단순화하여 적용하는 방식이 주로 적용되었다. 이후, 지표면 유출과 우수관로를 통한 배수를 함께 고려한 이중 배수(dual drainage) 개념이 도입된 후 독립적인 연구 분야와 방법론으로 주목받기 시작했다. 이중 배수 개념을 최초로 제안한 연구를 특정하기는 어려우나 Ellis *et al.* (1982)의 연구를 선구자적 시도 중 하나로 볼 수 있다. Ellis *et al.* (1982)이 Storm Water Management Model (SWMM) 모의에서 과대 산정되는 오염물 부하량 문제를 해결하기 위해 이중 배수 개념을 제안한 이후, 이는 도시침수를 이해하는 핵심적인 개념으로 인식되었다. 컴퓨터의 연산 능력 향상에 힘입어 지리정보 시스템(Geographic Information System, GIS)을 이용한 2D (Two Dimensional) 지표면 유출 해석 모형과 1D (One Dimensional) 우수관망 해석 모형을 결합한 방법론(Djordjević *et al.*, 1999)이 제안된 이후, 많은 연구자들에 의해 물리 모형 기반 도시 홍수 해석 연구의 진전이 이루어졌다(Chen *et al.*, 2007, 2015; Fraga *et al.*, 2017; Hsu *et al.*, 2002; Leandro *et al.*, 2009; Leandro and Martins, 2016; Nasello and Tucciarelli, 2005). 또한, 국외에서는 도시침수와 관련된 실험(Mignot *et al.*, 2019)과 모의 기법(Bulti and Abebe, 2020; Nkwunonwo *et al.*, 2020; Qi *et al.*, 2021) 그리고 영향평가(Hammond *et al.*, 2015)에 관한 리뷰논문이 발간되어 그간 관련 연구의 흐름을 짚어 보고 앞으로 나아갈 방향에 대한 활발한 논의가 이어지고 있다.

한편, 국내에서도 2000년대 이후 도시침수 모의 연구가 활발히 진행되어 왔다. 도시지역의 우수지 규모 결정을 위한 배수펌프 용량 결정에 관한 연구(Ahn *et al.*, 2003)와 도시화에 따른 도시유역 유출변화 특성에 관한 연구(Heo, 2003) 등을 21세기 초반 연구 사례로 들 수 있다. 이후 GIS를 이용하여 도시지역의 건물 영향을 고려한 도시침수해석 모형에 관한 연구(Lee and Han, 2007a)와 지하공간과 건물의 영향을 고려한 도

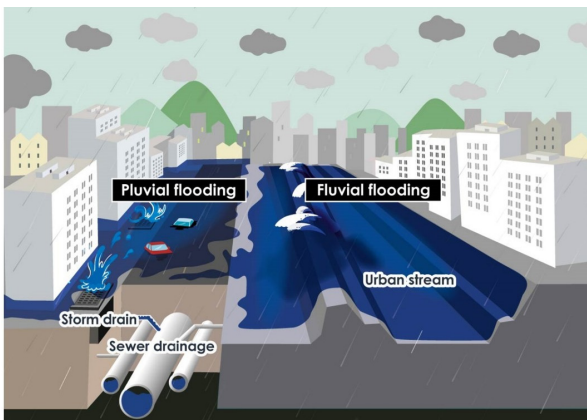


Fig. 1. Schematic diagram of urban inundation processes

시침수 해석에 관한 연구가 진행되었다(Lee and Han, 2007b). 2008년에는 홍수예경보(Yoon *et al.*, 2008)와 침수위험평가를 위한 연구(Park and Choi, 2008)가 소개되었으며, 2010년에는 지점 강우 이외에 격자 기반의 레이더 강수 자료를 도시 침수 예측에 이용한 연구(Yoon and Bae, 2010)가 소개되었다. 2010년 이후에는 기후변화의 영향을 고려한 확률강우량 변화와 도시지역 배수시스템 능력 평가에 관한 연구들이 다양하게 소개되었으며(Son *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2015; Ahn *et al.*, 2014), 최근에는 도시지역 저영향 개발에 관한 연구(Song and Chung, 2019)와 인공지능 학습법을 적용한 연구(Kim *et al.*, 2020b)가 수행된 바 있다.

그동안 발표된 국내 도시침수 모의 기술 연구에 대해 분야별로 흐름을 분석하고 그간의 성과를 알아보는 것은 향후 관련 연구가 나아갈 방향의 중요한 이정표가 될 수 있을 것이다. 따라서 본 총설연구에서는 국내에서 수행된 도시침수 모의에 관한 연구의 주요 성과와 한계점에 대해 알아보고 향후 발전 방향과 도전 과제에 대해 검토하고자 한다. 이를 위해 국내 주요 학술논문집에 수록된 도시침수 모의 관련 논문 160여편을 분석하여 연구의 핵심 주제와 내용을 살펴본 후, 모의 방법론에 따라 물리 기반 모형과 데이터 기반 모형으로 구분해 세부 주제별로 연구의 발전 현황과 도전 과제에 대해 정리했다. 자

료분석 범위는 2001년부터 2022년 8월까지 국내논문집에 게재된 연구논문으로, 도시침수 모의 관련 연구 논문은 161편이었고(Fig. 2(a)), 연도별 논문 수의 추이는 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 2011년 이후로 연간 7~20여편의 논문이 발표되고 있으며, 2018년에는 분석 기간 중 가장 많은 22건의 논문이 발표되었다. 논문집별로는 한국방재학회논문집과 한국수자원학회논문집에 실린논문이 각각 61, 57편으로 가장 많았으며, 대한토목학회논문집 27편, 그 외 10여개 논문집에 실린 연구가 16편 순이었다(Fig. 3). 본 총설연구에서 분석한 국내 도시침수 연구 논문의 전체 리스트는 서지정보 소프트웨어인 Zotero의 클라우드 데이터베이스(<https://www.zotero.org/groups/4576657/urban-flood-2022-review/library>)에서 확인할 수 있다.

2. 도시침수 모의 기법에 따른 연구 동향

Nkwunonwo *et al.* (2020)은 도시침수 모형을 공간적 범위, 차원, 수학적 복잡성에 따라 3가지로 분류한 바 있으며, Qi *et al.* (2021)는 이를 좀 더 세분화해 모의 방법론, 계산 알고리즘, 차원, 수학적 복잡성, 공간적 범위 등 5가지로 구분한 바 있다. Fig. 4는 Qi *et al.* (2021)의 분류를 바탕으로 모의 방법론으로서 물리 및 데이터 기반 모형의 세부 기술을 상세화한 도시침수 모의 기법 분류이다. 물리 기반 모형은 운동파, 확산파, 동력학과 모형 등 전통적인 수리학적 방법론을 도시침수에 확장 적용한 기술이라 할 수 있으며, Neal *et al.* (2012) 이 제시한 단순 관성향 모형(simple inertial wave models)은 고해상도 침수 모의를 위해 기존 수치 기법을 최적화한 사례이다. 데이터 기반 모형은 물리 거동을 설명하는 방정식을 사용하는 대신 여러가지 종류의 인공지능 및 통계 기법을 이용하여 자료를 재현하는 방법으로 이후 절에서 연구 동향을 검토한다. 계산 알고리즘의 모의 상태량의 종류에 따라 소유역 단위 침투, 유

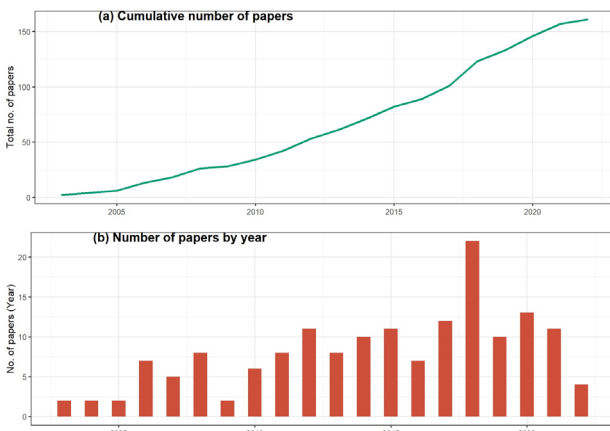


Fig. 2. Cumulative and yearly urban flood papers

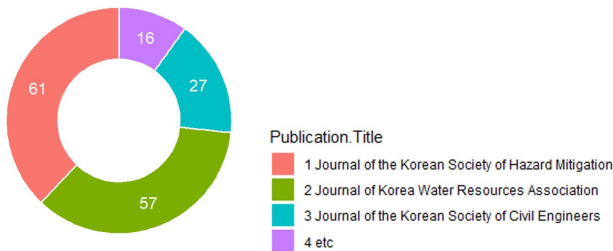


Fig. 3. Number of urban inundation papers by academic journals

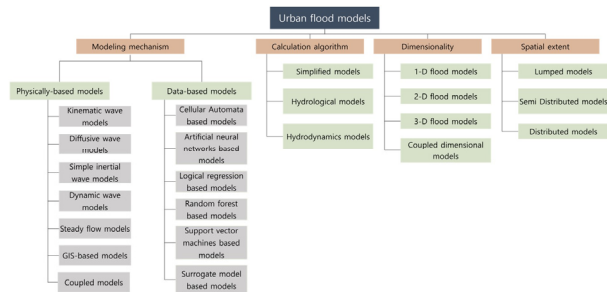


Fig. 4. Classification of urban flood models (adapted from Qi *et al.* (2021))

출 등 도시 수문 순환을 추정하는 수문학적 모형과 침수심, 유속 등이 주요 모의 관심사인 수리학적 모형, 이 두가지 보다 간단한 모형구조를 사용하여 시간변화보다 최대 홍수량 등을 산정하는 단순화 모형으로도 구분할 수 있다. 공간 차원 및 범위에 따른 분류도 가능하며, 유역단위 평균값을 추정하는 집중형 모형(lumped models)과 격자단위의 공간분포형 모형(distributed models), 수문반응단위(Hydrological Response Unit, HRU) 등 관심해석단위 중심의 준 분포형 모형(Semi Distributed models)이 있다.

대상 연구논문 분석 결과, 2000년 이후 국내 도시침수 모의 관련 연구의 60% 이상은 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 SWMM 모형을 이용한 연구였으며, 그 외 상용모형이나 자체적으로 모형을 개발한 사례는 상대적으로 적은 것으로 조사되었다. 이에 본 총설 연구에서는 물리 기반 모형과 데이터 기반 모형으로 분류해 연구동향을 파악하고자 했다. 이후 물리 기반 모형은 다시 모형 개발(SWMM 연계 포함)에 관한 연구와 SWMM을 활용한 연구로 구분하였으며 데이터 기반 모형은 통계적 기법을 기반으로 한 연구와 기계학습을 포함하는 인공지능 기반의 연구로 세부주제를 분류하여 연구동향을 파악하였다.

2.1 물리 기반 모형 연구동향

2.1.1 모형 개발에 관한 연구

도시침수 모형에 관한 국내 연구 사례로는 Kim *et al.* (2006)가 1D 우수관로 해석 모형인 ILLUDAS 모의 결과를 이용해 2D 침수해석을 할 수 있는 1D-2D 연계 모형을 개발했으며 Lee *et al.* (2006)은 SWMM 모형을 이용해 계산된 월류량을 GIS에 연동하여 시간별 침수위 및 침수범위를 계산할 수 있는 도시침수 해석 모형을 개발한 바 있다. 이후 Lee and Han (2007b)이 이중 배수 모형을 이용해 지하공간 유입량을 계산 후 비정형 격자에 link-node 기법을 적용해 지하철역 침수해석을 수행한 것이 순수 국내 기술로 수행된 도시침수 해석 모형의 시초라 할 수 있다. 이후 Kim *et al.* (2007)이 수문학적 개념을 기반으로 격자간 흐름을 비선형 저류방정식으로 해석하고 관로 유입을 오리피스 공식으로 처리해 도시유역 지표면 유출을 계산하는 모형을 개발하였다. Ryu *et al.* (2010)은 강우유출 모형과 ILLUDAS 관망해석 모형을 연계하여 도시유역 유출 해석을 실시 한 바 있으나 당시까지는 대부분 1D 관로 해석 모형인 ILLUDAS와 SWMM 해석 결과를 2D 침수확산 모형의 입력 자료로 이용하는 1D-2D 연계 모형을 개발했다. Fig. 5는 SWMM 모형의 1D 해석 결과를 2D 모형 입력 자료로 사용한 연구의 모의 흐름도 예시이다(Keum *et al.*, 2018).

이후 보다 안정적으로 홍수파의 전파 특성을 분석할 수 있

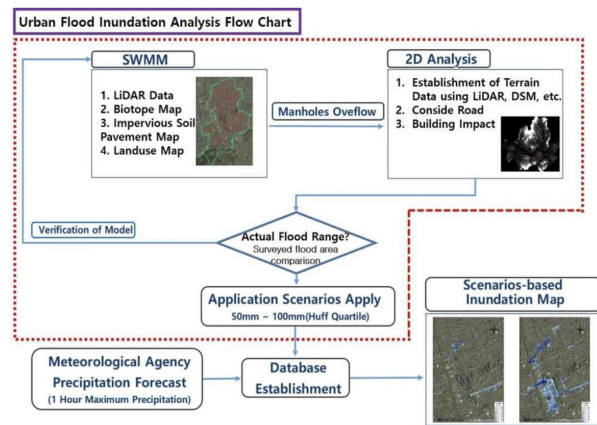


Fig. 5. Case of flow chart of the study (Keum *et al.*, 2018)

는 유한체적기법(Finite Volume Method, FVM) 기반의 2D 침수해석 모형이 개발되었으며(Jeong *et al.*, 2009; Jeong and Kim, 2011), An and Yu (2011)는 복잡한 지형에 각기 다른 크기의 격자를 적용하여 효율적으로 지형을 표현할 수 있는 적응적 메쉬 세분화 기법(adaptive mesh refinement method)과 복잡한 형상의 경계를 효과적으로 표현할 수 있는 분할격자기법(cut cell method)이 함께 적용된 FVM기반 2D 홍수파 해석 모형을 개발하여 복잡한 지형을 가진 도시지역에서 발생하는 홍수파를 효율적으로 계산할 수 있음을 보여주었다. Kwak and Lee (2012a)와 Kwak and Lee (2012b)는 그간 도시침수 해석 모형에서 고려하지 않았던 지표하 침투에 의한 유출을 고려할 수 있는 모형을 개발하여 기존의 집중형 모형인 FFC2Q(Flood Free City model for Stormwater Runoff and Quality)와 분포형 모형인 VflowTM과의 모의 결과를 비교하는 연구를 수행해 그간 크게 주목받지 못했던 도시지역 물순환 해석의 중요성을 강조했다. 이후 물리 기반 도시침수 해석 모형의 개발에 관한 연구는 계산시간을 단축하기 위한 연구와 실제 도시침수 발생 과정을 세밀하게 묘사하기 위한 연구가 진행되었다. Son *et al.* (2015)는 모의 시간 단축을 위해 전체 도시지역에서 도로 망만을 추출해 침수모의를 하는 경우 계산시간 절감과 더불어 전체를 모의하는 것 대비 85%의 침수적합도를 유지할 수 있음을 보고하였으며, Lee and Yoon (2017)은 고해상도 침수 모의를 목적으로 SWMM과 연계한 이중 배수 모형을 개발한 바 있다. Lee *et al.* (2017)은 그간 이중 배수 개념 기반의 모형이 1D 관망 해석 이후 관망의 배수 용량을 초과하는 유량을 역류량으로 산정해 2D 침수해석의 입력자료로 사용하는 것은 실제 도시지역에서 발생하는 침수양상과 다름을 지적하고 1D 관망해석 모형과 2D 침수해석 모형을 완전히 연동한 1D-2D 완전 연동(fully coupled)모형을 개발해 적용성을 검증한 바 있다. An *et al.* (2018)는 An and Yu (2011)가 개발한 모형을 더욱

고도화시켜 시간 및 공간에 대해 2차 정확도를 가지고 홍수해석을 할 수 있는 K-Flood를 개발하여 검증하였고, Lee et al. (2019d)는 이중 배수 개념을 기반으로 개발된 COBRA (COmposite Basin Runoff Analysis), XP-SWMM, UFAM (Urban Flood Analysis Model)간 성능을 비교 분석하는 연구를 수행한 바 있다.

2.1.2 SWMM을 활용한 연구

SWMM은 1971년 미국 플로리다 대학에서 합류식 우수관로의 역류(Combined Sewer Overflows, CSOs)를 모의하기 위해 최초로 개발되었다(Singh and Frevert, 2010). 1975년에 SWMM II 버전으로 개발되어 가장 널리 사용되게 되었으며, 1981년에는 동역학 흐름해석과, 침투, 용설 등의 해석이 가능한 SWMM 3 버전이 개발되어 배포되었다. 이후 1983년에 미국 EPA에서 최초의 PC 버전인 SWMM 3.3을 개발하여 배포하였으며, 1988년 SWMM 4 버전과 2005년에 SWMM 5 버전이 배포되어 홍수유출 해석, 유역유출 연속모의, 수질모의 분야에서 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 모형이라 할 수 있다. Fig. 6은 SWMM모형을 이용하여 연구지역에 대하여 토지이용도와 유역의 흐름경로를 구축한 사례이다(Koo and Seo, 2017).

앞서 언급한 바와 같이 국내의 물리 기반 침수 해석 연구는 SWMM모형을 이용한 연구가 주를 이루고 있다. SWMM 모형을 이용한 연구 중 2D 침수확산 모형과 연동하는 모형 개발에 관한 연구를 제외하면 1) 매개변수 추정 및 모형의 적용성 평가, 2) 침수지도 작성, 3) 침수재현을 통한 영향분석, 4) 침수 예측에 관한 연구로 구분할 수 있다. 매개변수 추정 및 모형의 적용성 평가에 관한 연구는 SWMM을 이용한 모의 수행시 매개변수를 최적화하는 방식에 관한 연구가 주를 이루었으며, 침수지도 작성에 관한 연구는 침수피해 저감대책 수립 및 다양한 강우 시나리오에 따라 침수범람지도를 작성해 침수예보를 위한 기초자료 구축을 주요 목적으로 하였다. 침수재현에 관한 연구는 침수재현을 통해 침수원인을 파악하거나 침수재현시 도로나 건물이 침수해석에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구가 주를 이루었으며, 침수예측에 관한 연구는 다양한 강우시나리오를 기반으로 침수 발생 데이터베이스를 구축해 강우예측자료 획득 시 가장 근접한 시나리오를 도출해 침수를 예측하는 방식과 예측강우 자료를 이용해 빠른 시간 안에 침수예측결과를 도출하거나 예측강우를 활용한 침수예측의 정확도를 평가하는 연구 등이 수행되었다.

이와 관련해보다 세부적인 내용을 살펴보면, Kang et al. (2012)은 SWMM에 집합체 혼합진화(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona, SCE-UA) 알고리즘을 결합하여 매개변

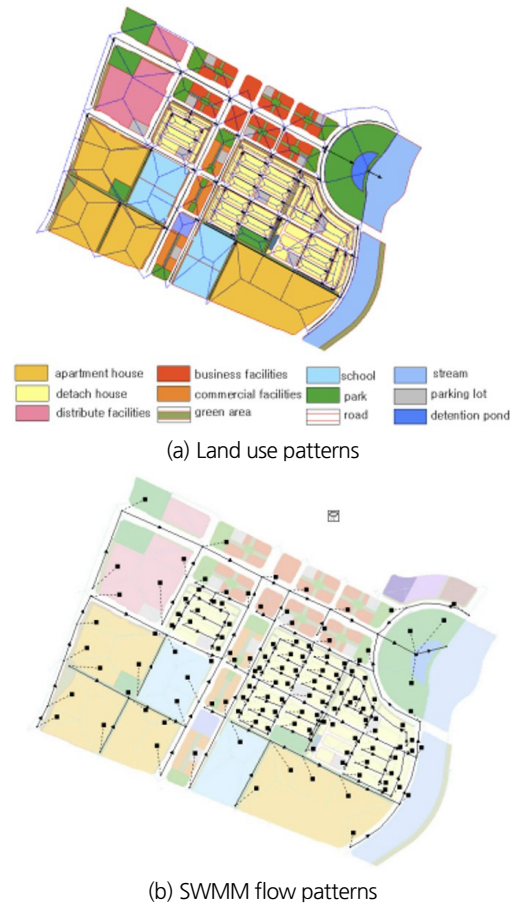


Fig. 6. Land use patterns (a) and construction of the SWMM (b) of the study area (Koo and Seo, 2017)

수를 자동 보정하는 모듈을 개발하는 연구를 수행하였고, Ha et al. (2018)은 주요 매개변수별 민감도 분석을 수행한 후 자동보정 기법인 PEST (Parameter ESTimation)를 SWMM과 연계 해석하여 매개변수를 보정하는 연구를 수행하였다.

침수지도 제작 관한 연구로는 SWMM모형과 GIS 기법을 이용하여 도시지역인 사당동 지역의 국지성 돌발홍수 발생 사례에 대해서 강우단계에 따른 내수침수상황을 모의하여 침수예상지역을 분석하고 그에 따른 대피강우기준을 개발한 후 침수예상지도를 작성한 연구(Shin et al., 2005)와 2010년 9월 21일 광화문 일대에 발생한 침수피해를 재현하여 XP-SWMM 2010 모형 검증 후 확률강우량을 Huff 4분위법 사용하여 침수예상도를 산정한 연구(Ahn et al., 2012)를 비롯하여 2D 침수 모의를 수행하고 BIM (Building Information Modeling) 기반 3D 지형공간 상에 구축한 도시정보모형에 그 결과를 표출한 연구(Jeong, 2020), 1D-2D 이중 배수 모의결과를 실제 침수 면적과 비교 분석하여 침수지도를 구축하기에 더 적절한 모형을 선정해 침수 지도를 구축한 연구(Park et al., 2020) 등이 있다.

SWMM을 이용한 침수재현 및 분석에 관한 연구는 꾸준히 수행되었다. Lee and Yeon (2008)은 XP-SWMM모형을 이용해 배수시설의 부족과 외수위 상승에 의한 침수해석을 수행하였으며, 이때 건물지역은 해석영역에서 제외하는 방식으로 건물의 영향이 고려된 시간대별 침수심, 침수면적을 산정하는 연구를 수행했다. Lee *et al.* (2008)은 SWMM5를 이용해 빈도별 홍수량을 산정하고, UNET 모형과 연계하여 홍수위를 산정한 후 이를 3D 지형공간에 중첩시켜 침수지역의 범위와 정도를 평가한 바 있다. Cho *et al.* (2011)은 2009년 집중호우로 침수가 발생한 부산시 BEXCO 및 센텀시티 주변의 침수 사례를 대상으로 건물 및 도로가 2D 침수해석에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 도로 및 건물의 영향을 고려한 침수해석이 고려하지 않은 경우보다 19% 이상 침수적합도가 높은 결과를 도출할 수 있음을 보인 바 있다. Tak *et al.* (2016b)은 SWMM의 관망해석기능과 범람해석 모형인 FLUMEN (FLUvial Modeling ENgine)을 활용하여 관거에서 월류된 우수의 흐름과, 월류수 저감을 위한 저류지 설치 및 관거 확대 시나리오를 적용하여 도시구역의 침수 발생시 내수배제 불량에 의한 영향 예측 적용성을 검토하였다. Choi and Jun (2018)은 XP-SWMM을 이용하여 해수면 상승과 하천의 홍수위 상승, 내수 배수체계의 유출을 복합적으로 고려한 연안도시 지역(제주 산지천)의 침수 해석을 기반으로 인명과 건물에 대한 침수 피해 평가를 수행한 바 있다.

Yoon *et al.* (2014)은 레이더 예측강우로 예측된 침수모의 결과와 지상관측강우를 이용해 예측된 침수심과 침수범위를 비교해 예측강우를 통해 사전 침수 예측이 가능하다면 사전통제나 대피발령과 같은 대책을 통해 도시지역의 침수피해 저감이 가능할 수 있음을 보였다. Kim and Han (2019)은 빈도분석 기반의 다양한 강우 시나리오를 SWMM 모형에 적용하고 유전자 알고리즘을 통해 최적화한 후 2D 침수확산 모형과 연계해 각 강우량에 따른 침수 발생 유무를 로지스틱 회귀 곡선을 통해 침수 발생 한계 강우량을 산정해 침수예측에 대한 적용성을 평가한 바 있다. Jang *et al.* (2020)은 SWMM major/minor 시스템의 1D-2D모형 모의결과를 이용하여 1D-1D모형 검증 및 SWMM5 DLL을 이용한 결과 분석을 기반으로 SWMM 1D-1D 모형의 실시간 침수예측에 대한 적용 가능성을 확인하였다.

이 외에도 효과적인 도시지역의 강우-유출 해석을 위해 필요한 지표면 유역분할과 우수관망 정밀도 수준을 분석한 연구(Ha and Lee, 2006), 적정수준의 정확도를 확보할 수 있는 우수관망 단순화 기법 개발에 관한 연구(Lee *et al.*, 2018a, 2019c) 등이 있으며, Kang and Yoo (2018)은 shot noise process 기법을 기반으로 소유역별 침투유량, 지체시간, 감쇄상수 등의 매개변수를 산정해 도시구역의 유출량을 산정하는 기법을 개발

하였으며 이를 통해 매우 빠른 시간에 홍수 유무를 판단할 수 있음을 보였다. 이는 비록 shot noise process 기법이 전통적인 수리수문학적 개념에 기반한 기법이 아님에도 도시침수 예측에 다양한 기법이 적용될 수 있음을 보여줬다는 측면에서 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

2.2 데이터 기반 모형 연구동향

데이터 기반 모의(data-driven modeling) 기술은 물리 기반 모의(physically-based modeling) 기술과 더불어, 도시침수 모의의 중요한 도구이며, 본 절에서는 비교적 간단한 통계적 기법을 활용하는 연구와 머신러닝 기반 모의 연구로 구분하여 연구동향을 분석하였다.

2.2.1 통계기반 모형

통계적 기법을 기반으로 도시침수 예측을 수행한 연구는 다른 분야에 비해 상대적으로 많은 연구가 수행되지는 않았으나 머신러닝 기반 모형의 근간을 이루는 연구가 수행되었다. Jeong and Lee (2010)는 대전광역시 도심구역 하천을 대상으로 강우, 수위 관측자료를 이용해 회귀모형을 구축하여 2시간 후까지의 수위자료 예측에 좋은 성능을 보여줌으로써 데이터 기반 시계열 자료 예측의 기초를 제공했다고 할 수 있다. Bae *et al.* (2012)는 실시간 침수 예측에서 물리 기반 모형의 가장 큰 한계로 여겨지던 계산시간의 한계를 극복할 수 있는 방안으로 강우강도와 지속시간을 이용해 홍수 발생 유무를 판단할 수 있는 flood monograph를 개발해 적용성을 평가하고 실시간 침수예측에 활용 가능할 수 있음을 보였다. 이는 충분한 시나리오를 기반으로 모의결과를 도출한 후 침수 유무를 판단할 수 있는 데이터베이스를 구축한다면 기상예측자료 획득 후 flood monograph를 활용해 침수 유무를 판단할 수 있음을 의미한다(Jo, 2014).

2.2.2 머신러닝 기반 모형

머신러닝(machine learning)은 컴퓨터 통계학에서 파생된 알고리즘의 한 계열로, 관찰된 샘플을 기반으로 목표값을 예측 또는 구분하도록 수학적 모형을 훈련시키는 방식을 사용한다. 데이터로부터 학습하고 일반화하는 능력과 높은 계산 효율성으로 인해 머신러닝은 점점 더 다양한 분야에서 관심을 받는 기술이 되어 가고 있다(Greydanus *et al.*, 2019). 특히, 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)을 기반으로 한 머신러닝의 하위 집합인 딥러닝(deep learning)은 기존의 전통적인 물리 기반 모의 방법의 적용이 적합하지 않았던 문제를 해결할 수 있는 장점이 주목받으며 알고리즘의 개발 및 적용 측면에서 비약적인 성장이 이루어지고 있다. Fig. 7은 인공

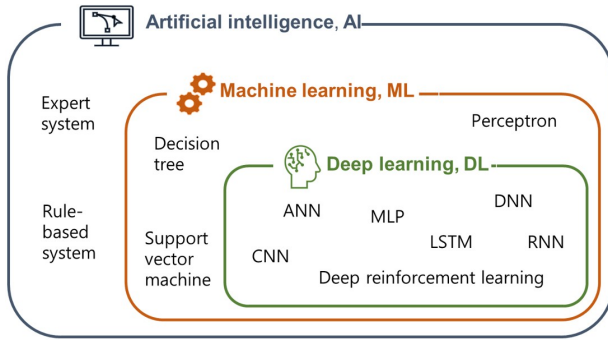


Fig. 7. Relationship of artificial intelligence, machine learning, and deep learning

지능과 기계학습 그리고 딥러닝의 분류와 관계 그리고 대표기법을 도시하였다.

국내의 머신러닝 기반의 도시침수 해석 연구는 다른 기술에 비해 연구기간이 길지는 않지만 비교적 최근 여러 연구에서 적용가능성이 증명됨에 따라 추후에는 보다 다양한 인공지능 기법을 활용한 연구들이 수행될 것으로 기대된다.

국내의 머신러닝 기반 침수 해석 연구는 인공지능망의 새로운 출발점을 맞이하게 해준 다층 퍼셉트론(Multi-Layer Perceptron, MLP) 기법의 오류 역전파 알고리즘을 활용하여 2015년 서울특별시 전 지역에 대한 침수 발생가능성을 분석한 연구(Kang and Lee, 2015)를 시작으로 꾸준히 연구되어오고 있다. 이후 Tran and Song (2017)은 RNN (Recurrent Neural Network), RNN-BPTT (Backpropagation Through Time), LSTM (Long Short-Term Memory)을 사용하여 수위 관측 데이터를 학습하고 30분과 60분 후의 침수 가능성을 비교함으로써 시계열 침수 예측에 있어서 LSTM 신경망의 우수성을 검증하였다. 이외에도 SWMM의 결과값을 학습 목표값 자료로 연계 해석한 연구로 IDNN (Input Delay Neural Network), TDNN (Time Delay Neural Network), NARX 인공지능망을 이용한 도시홍수량 예측(Kim *et al.*, 2018b), 비지도학습 군집화를 수행하는 SOM (Self-Organizing Map)을 이용한 침수 지도 예측(Kim *et al.*, 2018c), 심층신경망(Deep Neural Network, DNN)을 이용한 월류량 예측(Kim *et al.*, 2020c) 연구가 수행되었다. 모형 구축과정의 간소화, 학습 소요시간의 단축과 동시에 높은 예측력을 확보할 수 있는 방안을 마련하고자 SWMM모형과 2D 침수해석 모형 FLO-2D를 활용하여 1D-2D 침수분석 및 LSTM을 이용한 월류량 예측 및 랜덤 포레스트 회귀 모형으로 침수범위를 예측한 연구가 Fig. 8과 같이 수행되었다(Kim *et al.*, 2020b; Kim *et al.*, 2021a). 이외에도 일반화 능력이 뛰어난 머신러닝 알고리즘의 하나인 SVM (Support Vector Machine)을 이용해 지속시간별 한계강우량을 산정하고 교차검증을 수행

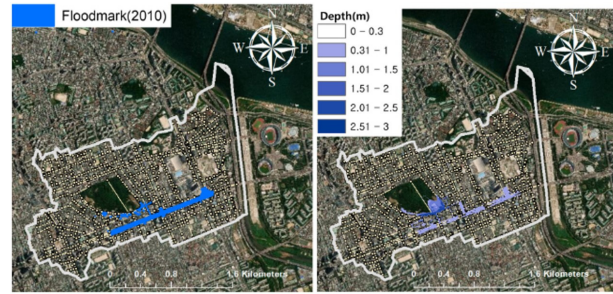


Fig. 8. Floodmark compared with simulation by LSTM (Kim *et al.*, 2020a)

한 연구를 통해 침수 위험기준 추정에서 SVM의 활용가능성을 검증(Lee *et al.*, 2019b)한 연구가 이루어졌다. 이외에도 ANN을 이용하여 침수 위험을 예측하고 학습자료의 확장 기법 적용을 통해 모형 성능 향상을 검증한 연구(Kang *et al.*, 2021), 비정형 데이터를 이용하여 침수 발생 여부를 판단하는 CNN (Convolutional Neural Network) 기반 이진분류 모형을 개발하여 재해 및 재난관리 분야에서 AI 및 딥러닝 모형의 적용성을 확인한 연구(Lee *et al.*, 2021a)가 수행되었다. 이처럼 머신러닝 기법은 비교적 최근부터 도시침수 분야에 적용되었음에도 불구하고 침수심, 침수범위, 침수 위험기준 추정 및 예측 등 전 분야에서 다양한 기법들이 적용되어 뛰어난 성능을 보여주고 있다. 따라서 향후 침수 예경보를 위한 예측 분야의 활용성이 매우 높을 것으로 기대되고 있으나, 기계학습 분야의 구조적인 한계로 인해 침수원인 분석 분야의 적용에 한계가 있으며 안정적인 학습데이터 확보는 향후 극복해야 할 문제로 판단된다.

3. 활용목적별 연구 고찰

본 연구에서는 앞서 도시침수 모의 기술과 관련된 연구를 물리 기반 모형과 데이터 기반 모형으로 구분하였다. 이후 물리 기반 모형은 도시침수 해석 모형의 개발과 SWMM을 활용한 연구로 구분 지었으며 데이터 기반 모형은 통계 기반 연구와 기계학습 기반의 연구로 다시 분류하여 연구 분야별 흐름에 대해 파악해보았다. 본 절에서는 도시침수 모의 기술을 활용목적별로 재 분류하여 흐름을 파악하고자 한다.

선행연구 사례를 연구목적별로 조사, 검토한 결과 연구목적은 ① 고정확도 침수예측 모형 개발, ② 침수피해 저감을 위한 사전대응에 관한 연구, ③ 피해저감을 위한 대책 수립에 관한 연구, ④ 침수 모의시 결과에 영향을 주는 다양한 입력자료와 매개변수의 불확실성 평가에 관한 연구 그리고 ⑤ 유출특성과 모형의 적용성 평가를 위한 연구로 구분했다.

3.1 고정확도 침수예측모형 개발

연구목적별 연구동향을 살펴보면 도시침수 예측 모형 개발에 관한 연구는 SWMM이나 ILLUDAS와 같은 1D 관망 해석 모의 후 월류량을 2D 침수해석 모형의 입력자료로 이용하는 방식으로 시작되었다(Kim *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006). 즉, 이중 배수 개념을 기반으로 1D 우수관망 모형의 해석결과를 2D 침수 확산 모형의 입력자료로 활용하는 모형간 연계를 통해 도시지역 침수를 모의하는 방식으로 시작되었다. 이후 도로, 건물 등과 같은 인공구조물이 다수 분포하고 있는 도시지역의 지형적 특성을 보다 실제와 유사하게 해석하기 위해 불규칙 격자망 기반의 FVM 기반의 고정확도의 2D 해석 모형의 개발을 통해 도시지역의 홍수파 해석에 대한 적용성 평가에 관한 연구가 수행되었으며(Jeong *et al.*, 2009; Jeong and Kim, 2011), 적응적 메시세분화기법과 분할격자기법(Fig. 9)을 이용해 도시지역 건물의 효과적인 경계처리가 가능한 도시지역 홍수파 해석 모형 개발에 관한 연구(An *et al.*, 2018; An and Yu, 2011)가 수행되었다. 그러나 맨홀을 소유역의 출구로 가정하고 해당 소유역에서 발생한 지표면의 유출수가 모두 맨홀로 유입된다는 가정과 우수관로의 용량을 초과한 유출수가 해당 맨홀의 위치에서 역류한다는 가정은 실제 도시유역에서 일어나는 동시다발적인 지표면과 우수관망 사이의 유입과 역류 현상을 시간적, 공간적 측면에서 왜곡해 실제와 상이한 결과를 도출할 수 있다는 문제가 제기 되었으며, 이를 극복하기 위한 방식으로 Lee *et al.* (2017)은 지표면 유출수와 우수관망 사이의 유입과 역류현상이 발생하는 지점을 맨홀이 아닌 집수구로 변경하고 매 계산 시간 간격(Δt)마다 오리피스와 위어 공식을 적용해 유입-역류 유량을 계산하는 1D-2D 완전 연동방식의 모형을 개발해 서울 상당유역에 적용해 그 적용성을 평가한 바 있다. 이처럼 1D-2D 완전 연동 모형에 대한 개발이 진행되고 있다는 점은 괄목할 만한 성과라 할 수 있으나 상대적으로 1D 관망해석 모형 개발에 관한 연구가 미진한 점은 향후 더 많은 연구가 이루어져야 할 주제로 판단된다.

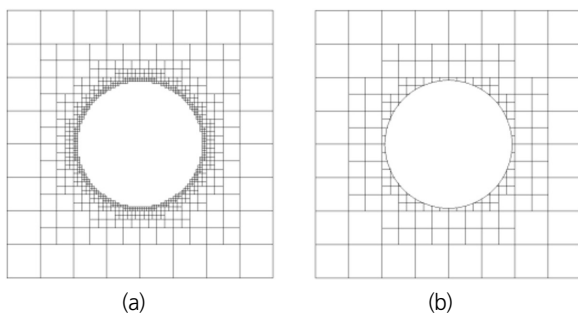


Fig. 9. Examples of adaptive mesh approaches: (a) adaptive mesh refinement, (b) cut cell method (An *et al.*, 2018)

도시침수 해석 모형의 개발에 관한 연구는 수치해석 기법 자체의 발전과 함께 도시지역의 건물 등과 같은 인공구조물이 침수해석에 미치는 영향을 고려하고 이를 효과적으로 반영하는 방식으로 진행되었다. 도시침수 해석 시 건물의 영향을 고려하는 방식은 크게 1) 모든 건물의 형상과 높이를 고려하는 방법, 2) 건물을 모의 영역에서 배제해 불투수지역으로 처리하는 방법(An and Yu, 2011; Jeong *et al.*, 2009; Jeong and Kim, 2011; Lee and Yoon, 2017; Lee and Yeon, 2008), 3) 건물 밀집지역의 지반고를 임의로 높여 지표면 유출수가 해당지역으로 유입되지 않게 하는 방법(Lee *et al.*, 2017, 2018b), 4) 도로망만을 고려해 침수해석을 실시하는 경우 방법(Son *et al.*, 2015) 등 크게 네 가지로 구분할 수 있다. 첫번째 방식은 실제와 가장 유사한 침수해석을 실시할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 도시지역의 모든 건물을 고려하기 위해 필요한 자료 확보와 세밀한 건물 형태를 고려하기 위해 매우 많은 격자가 필요하다는 수치해석상의 제약으로 인해 국내에서는 실제 유역에 적용된 사례는 없는 것으로 조사되었다. 두번째 방식은 건물 형태를 반영함에 따라 지표면 유출수의 흐름이 건물의 형태를 반영할 수 있다는 장점과 함께 건물 면적만큼 계산 격자가 제외되므로 계산상의 이득을 얻을 수 있다는 장점이 있으나 건물의 형상이 모의 영역에서 제외됨에 따라 해당 영역에 내린 강우를 반영할 수 없어 침수심이 과소 추정될 수 있다는 단점이 있다. 세번째 방식은 두번째 방식의 단점을 고려할 수 있으나 개별 건물을 고려하기 위해서는 매우 세밀한 격자가 필요함에 따라 적정 수준의 단순화가 필수적이라 할 수 있다. 네번째 방식은 두번째 방식보다 계산 영역을 극단적으로 줄여 계산용량을 저감할 수 있다는 장점이 있으나 침수심이 높아 도로를 벗어나는 확산 현상은 고려할 수 없다는 단점을 가진다.

3.2 침수피해 저감을 위한 사전대응

도시침수로 인한 피해를 저감하기 위해 가장 선행되어야 할 것은 현재의 상태를 진단하고 침수에 취약한 부분을 보완하기 위한 노력이다. 이러한 측면에서 도시침수에 대한 리스크를 평가하고 침수위험지도를 작성해 미래에 발생 가능한 침수에 대비하기 위한 연구는 침수피해를 저감하는데 가장 우선시되어야 하는 연구 중 하나이다. Shon *et al.* (2010)은 부산시 온천천 유역을 대상으로 빈도별 확률강우량(10년 - 100년)에 대해서 침수모의를 수행한 후 1 - 4단계로 위험도 취약성을 구분 제시한 바 있으며 Ahn *et al.* (2013)은 시간별 강우발생 빈도만을 이용해 관로 침투유출량에 따라 침수의 수준을 분석하는 것에 대한 한계를 지적하고 침수특성을 6가지(침투유출량, 침수면적, 침수총량, 평균침수심, 최대침수심, 침수지속시간)로 새롭게 구분해 확률개념을 배제한 강우강도-지속시

간 조합을 이용해 ‘발생가능강우별 침수특성 등치선도’를 개발한 바 있다. Tak *et al.* (2017)은 토지이용도와 인구에 따른 다차원 침수피해 산정 방법을 제시한 바 있으며, Hwang *et al.* (2018)은 기후모형 자료에 상세화 기법을 적용해 2017 - 2100년까지의 확률강우량과 도시구역의 최대침투홍수량을 산정해 기후변화로 인한 영향을 평가하고 미계측 도시구역의 수공 구조물 설계기준의 불확실성을 검토했다. Lee and Lee (2018)은 재해예방형 도시계획 수립 지원을 위해 RCP 8.5 시나리오를 이용해 기후변화 시나리오에 따른 내외수 침수해석을 실시하고 재해특성, 노출특성, 취약성 등에 대한 격자단위 위험지도를 생산할 수 있는 기술을 개발하였다. Park *et al.* (2020)은 기후변화에 따른 해수면 상승을 고려해 연안지역 침수위험도를 평가하고 방재성능목표를 제시하는 연구를 수행한 바 있다.

침수피해를 저감하기 위해서는 현재의 상황 진단을 기반으로 대책을 수립해 이행하는 것과 함께 침수 피해가 예상되는 경우 빠른 예경보를 통해 위험지역에 위치하고 있는 시민의 대피를 유도하는 것도 매우 중요하며 이를 위해서는 실시간 예경보시스템 구축을 위한 연구가 필요하다. 실시간 예경보를 위해서는 예측강우를 기반으로 도시침수 예측모의를 수행하고 이를 기반으로 생산된 침수예상도에 기반해 예경보를 발령하는 1) 물리 모형 기반 예경보 시스템과 사전에 다양한 강우시나리오에 따라 침수예상도 데이터베이스를 구축하고 강우 발생시 또는 강우 발생이 예상되는 경우 가장 유사한 강우시나리오 데이터베이스에 따라 예경보를 발령하는 2) 데이터베이스 기반 예경보로 구분할 수 있다.

물리 모형 기반 실시간 예경보시스템 구축에 관한 연구로는 Yoon *et al.* (2008)이 중랑천 유역에 대해 SWMM을 이용한 수문 유출량을 1D 하천수리해석 모형인 HEC-RAS의 입력자료로 연계해 외수범람으로 인한 도시지역 홍수 예경보 적용성을 알아본 바 있으며, 이후 삼성배수분구 지역을 대상으로 지상강우자료와 레이더 예측강우자료를 이용한 침수모의 결과를 비교해 레이더 예측강우자료를 이용한 침수예측 가능성을 평가하는 연구를 수행한 바 있다(Yoon *et al.*, 2014).

Lee *et al.* (2018a)은 물리 기반 예경보시스템에서 예경보 발령을 위해 가장 중요한 모형의 계산시간 저감을 위해 적정수준의 정확도를 유지하면서 우수관로를 가장 단순화할 수 있는 기법에 대해 연구한 바 있다. 또한 Jang *et al.* (2020)은 1D-2D 해석결과를 이용해 1D-1D(SWMM) 모형의 성능을 검증하고 예측강우를 이용한 1D-1D 모형의 실시간 도시침수예측 가능성을 검토한 바 있다.

데이터베이스 기반 실시간 도시침수 예경보 시스템 구축에 관한 연구로 Shin *et al.* (2005)은 서울 상당역 유역에 대해

서 강우강도 시나리오를 기반으로 침수예상지역을 분석해 대피강우기준을 제시하는 연구를 수행한 바 있으며, Choi *et al.* (2018)은 ‘강우강도 - 지속시간’에 따른 연안도시지역 홍수 예경보 기준표를 작성하고 지점 변경에 따라 예경보 기준이 달라지는 점을 지적하고 고해상도 지형자료를 이용한 해석의 필요성에 대해 강조한 바 있다. Kim and Han (2019)은 강우시나리오를 기반으로 유전자알고리즘 최적화 기법을 이용해 침수발생 판단을 위한 로지스틱 회귀식을 산정해 침수 예경보 판단에 활용 가능함을 보인 바 있다.

3.3 피해저감을 위한 대책 수립

침수로 인한 피해 저감을 목적으로 수행된 연구로 Ahn *et al.* (2012)은 광화문 유역에 대해서 관로 침투유출량이 도시구역의 침수특성을 합리적으로 반영하지 못함을 지적하고 침수특성치(관로침투유출량, 평균침수심, 최대침수심, 침수면적, 침수총량, 침수지속시간 등)를 이용해 치수계획규모 결정을 위한 연구를 수행한 바 있다. Kim (2020)은 부산 에코델타 시티에 대해서 침수저감대책별(연구저류지, 식생수로 설치, 투수성 포장, 배수펌프장 및 배수문 증설 등) 효과를 분석한 결과 배수펌프장 증설이 침수 예방에 가장 효과적인 것을 보인 바 있으며, Kwon *et al.* (2021)은 목감천 유역에 대해서 비구조적 대책인 내배수펌프장 운영 최적화를 통해 침수피해 저감 기술을 개발해 그 효과를 정량적으로 제시한 바 있다. 이는 비구조적 대책을 통한 침수피해 저감효과를 정량화한 연구라는 측면에서 큰 의미가 있다고 할 수 있다. Lee *et al.* (2021b)은 여수 도원지구에 대해서 기존 배수시설과 연계한 간선저류지의 침수 저감 효과를 분석한 연구를 수행한 바 있으며 Kim *et al.* (2021b)은 부산 동천 배수분구에 대해서 방재성능 목표강우량 검토 후 조위에 의한 침수영향을 고려해 침수방어벽을 개선하고 그 효과를 분석하는 연구를 수행한 바 있다.

3.4 매개변수와 입력자료의 불확실성 평가

Choi *et al.* (2018)에 의해 지적된 바와 같이 도시침수 모의 결과는 입력자료의 불확실성이 결과에 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문에 자료의 불확실성과 매개변수의 민감도를 파악하는 것이 중요하다. Lee *et al.* (2015)은 과부하 연결 맨홀의 손실계수가 침수모의에 미치는 영향에 대해 분석한 바 있으며 이후 Kim *et al.* (2018a)은 침수모의시 과부하 연결맨홀과 합류맨홀(90° 연결, 3개, 4개 연결)이 침수모의의 결과에 미치는 영향을 분석하고 인버트 사용시 손실계수가 작아짐에 따라 침수저감효과가 큰 것을 보인 바 있다. Tak *et al.* (2016a)은 해상도가 다른 지형정보(10 m dem, 1 m LiDAR, 1:1000 등고선)

를 활용하여 침수모의 결과를 비교 분석해 지형자료 해상도에 따라 월류량이 달라지는 것을 정량적으로 비교 분석하는 연구를 수행한 바 있다. Lee *et al.* (2019c)은 관망 단순화가 침수 모의에 미치는 영향을 평가한 바 있으며, Kim *et al.* (2020a)은 기존 우수관망 신뢰도 산정기법에 복원탄력성 개념을 추가해 신뢰도를 재산정한 후 기후변화로 인해 침수와 관련해 우수관망 시스템의 개선된 치수기능을 수치화해 제시한 바 있다.

모형의 입력자료로 활용되는 지표면 지형자료 및 우수관망과 달리 강수자료는 침수모의 결과에 직접적으로 영향을 미치는 주요 자료로 시공간적으로 강수자료가 침수모의 결과에 미치는 영향에 대한 분석은 매우 중요하다. 이를 위해 Choi *et al.* (2015)은 강남역 중심 5개 배수분구에 대해서 방재기상 관측자료(Automatic Weather Station, AWS)와 광덕산 레이더자료(격자형)를 이용해 생산된 고해상도 정량적 강수추정자료(Quantitative Precipitation Estimate, QPE)를 이용해 도시침수 모의결과를 비교한 후 강수자료의 공간적 분포가 침수 예측에 미치는 영향을 평가한 결과 침투유량 변동폭이 최대 6배까지 증가하는 것을 보인 바 있다. Ahn and Jeong (2018)은 청계천 유역을 대상으로 SK 텔레콤 기지국에 설치된 고밀도 기상관측망 자료인 SK techx와 AWS자료를 이용해 침수모의를 수행한 결과 SK techx자료를 이용한 결과가 실측자료와 유사함을 보인 바 있으며, Hyun *et al.* (2019)은 용담빗물펌프장 유역을 대상으로 방재기상관측자료(AWS)와 기상청 종관기상관측자료(Automated Synoptic Observing System, ASOS)를 이용한 침수모의 수행 후 조밀한 강우자료의 중요성과 강우의 공간분포가 침수모의에 미치는 영향을 확인한 바 있다.

3.5 유출특성과 모형의 적용성 평가

도시지역의 유출 특성을 파악하고 다양한 모형의 적용성을 판단하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. Kang *et al.* (2012)은 구로빗물펌프장 유역을 대상으로 집합체 혼합진화 알고리즘(SCE-UA)을 적용해 매개변수 자동보정 모듈을 개발했으며, 이를 기반으로 단일목적 함수와 다중목적 함수를 이용해 매개변수를 보정한 결과 다중목적 함수를 이용한 매개변수 모정이 더 우수한 결과를 도출함을 보인 바 있다. Kang and Lee (2012)는 도시지역(구로1 빗물배수펌프장 유역)과 밀양댐 배수유역에 대한 유출모의 결과를 비교한 후 전원유역 유출분석의 경우 지하수 유출 고려가 매우 중요함을 보인 바 있다. 이는 도시유역의 경우 불투수층으로 인해 지하수 유출이 매우 적음을 반증하는 결과로 해석할 수 있다. Sun *et al.* (2021)은 XP-SWMM을 이용해 부산 마린시티 유역을 대상으로 연안지역의 도시침수 모의를 위한 매개변수 민감도를 분석하고 이를 보정하는 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다.

4. 국외 및 연관 분야 연구동향

본 절에서는 국외 총설연구에서 논의된 도시침수 모의 연구의 한계 및 방향에 대해 검토하고, 본 고에서 중점적으로 다루지 않았지만 기후변화, 강수 추정 및 예측 등 도시침수 모의와 연관이 깊은 주제들에 대한 연구동향을 간략히 정리한다.

Guo *et al.* (2021)의 총설연구에서는 물리 기반 도시홍수 모의의 한계점에 대해, 우수관거와 지표수 교환 과정이 경험식이나 단순화된 수식에 의존하기 때문에 정확성에 한계가 있으며, 교환과정을 정교하게 해석할 수 있는 모의의 공간적 범위가 한정적이고, 도시 유역의 공간적 불균질성, 지표면에서의 극히 얇은 침수심 등은 수치 불안정성을 심화시킬 수 있으며, 병렬컴퓨팅으로 계산 효율 향상되고 있지만 실시간 예측에는 한계가 있다고 지적하였다. 예를 들어, 도시침수의 물리적 과정을 $10^0 - 10^1$ m의 공간해상도 격자로 모의하기 위해서 1 km^2 내에 $10^4 - 10^6$ 개의 계산격자가 필요하기 때문에 도시 전체 혹은 지역 단위로 $10^3 - 10^4 \text{ km}^2$ 정도의 공간 범위를 고해상도로 모의하는 것은 사실상 불가능한 과제로 남아 있다고 하였다. Ivanov *et al.* (2021)는 도시침수 고해상도 해석의 차원문제를 해결하기 위해 surrogate model 기법을 통해서 격자의 수는 감소시키면서 모의 정확도는 유지시키는 방법론을 제안하였다. 한편, Noh *et al.* (2018, 2019)의 연구에서는 하이브리드 방식 등의 병렬컴퓨팅을 기술을 도입하여 도시 전체 규모의 공간범위에 대해 1D-2D 고해상도 도시침수 해석이 가능함을 보고하였다. Piadeh *et al.* (2022)는 실시간 도시홍수 예측 기술에 대한 총설연구에서, 예측모형을 경험적, 개념형, 물리 기반으로 구분하며, 각 모형의 장단점에 대해 정리하였다.

21세기 기후변화 가속화로 인해, 극한 강우의 빈도 및 강도가 증가하고 있으며, 기후변화의 도시침수에 대한 영향을 정량화하고 적응대책을 수립하는 것이 도시수문학 분야의 주요한 주제로 등장하였다. 기후변화 영향의 정량화 및 적응은 기후모형, 비정상성 강우분석, 공간상세화 등 다양한 세부주제와 연관되기 때문에 별도의 논의가 필요하지만, 도시침수 모의 기술은 기후변화 해법 제시를 위한 핵심 요소이다. 도시침수 모의 기술을 활용한 기후변화 관련 연구를 일부 소개하면 다음과 같다.

Hwang *et al.* (2018)은 RCP 4.5 기후시나리오에 대한 확률 강우량과 침투홍수량의 변화를 HadGEM3-RA (RCM)모형과 도시유출모형을 이용하여 분석하였다. 또한, Kim and Sung (2016)은 수원지역 2030년의 침수 가능성을 산출하고, Kim *et al.* (2020d)은 도시확장강도지수를 활용하여 이와 연관된 도시홍수 발생 가능성에 대해 연구하였다. 이외에도 기후변화와 도시홍수 모의에 대한 다수의 연구가 수행되었다(Kim *et al.*, 2018d; Lee *et al.*, 2019a; Park *et al.*, 2020). 불투수면적

증가와 기후변화로 인한 도시홍수의 적응전략으로 주목받는 저영향개발기법(Low Impact Development, LID), GI (Green Infrastructure) 기술 또한, 도시침수 모의 기술과 밀접한 관계에 있다. 국내에서 LID, GI와 관련한 많은 연구가 진행되었으나, 관련 저작이 방대하고 실험과 모의, 설계가 연관된 연구가 많아 별도의 총설연구가 필요한 분야이다.

최근 디지털트윈(digital twin), CPS (Cyber-Physical System), 메타버스(metaverse) 등 정보통신분야 신기술과 도시침수 모의 기술의 연계 및 활용 가능성이 높아지고 있다(Kim et al., 2022). 디지털트윈은 컴퓨터 속 가상공간에 현실 세계의 쌍둥이를 만들고, 현실에서 발생할 수 있는 상황을 컴퓨터로 모의하여 예측하는 기술로, 도시홍수의 고해상도 가시화 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다. CPS는 디지털트윈의 가상 현실 외에 현장의 IoT (internet of things) 센서 등을 통한 관측 정보와의 실시간 융합을 중시하며, 도시침수 분야에 적용될 경우, 모의와 관측의 실시간 연동을 통한 예측 향상이 기대된다. 한편, 메타버스 기술은 디지털트윈을 확장하여 다양한 미래 상황에 대한 멀티버스를 제시하고, CPS의 IoT 센싱 이외에 사용자 참여를 통한 능동적 자료 획득 및 시스템 활용을 중시한다. 일례로, Haynes et al. (2018)는 증강현실을 이용하여 모바일 장치에서 도시지역 홍수를 가시화하는 기술을 개발하고, 도시 침수 모델링 및 정보통신 융합기술이 위기관리에 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

5. 결론

본 총설연구에서는 2001년 이후 발표된 160여편의 국내 도시침수 모의 기술 연구에 대해 물리 기반 및 데이터 기반 모형의 분야별로 흐름을 분석하여 성과와 한계점, 향후 발전방향과 도전과제에 대해 검토하였으며, 그 주요 결과는 다음과 같다.

물리 기반 모형의 활용에 대한 연구는 꾸준히 진행되고 있으나, 2019년 이후 국내 도시침수 해석 모형 개발에 대한 연구가 이루어지지 않고 있는 것으로 파악되었다. 이는 최근의 연구 흐름이 물리 기반 모형 연구에서 머신러닝 기반의 인공지능 분야로 전환된 것이 가장 큰 이유로 판단된다. 그러나 머신러닝 모형 훈련을 위한 극한기상조건에 대한 침수자료는 관측만으로 확보할 수 없기 때문에 고정확도의 물리 모의 기술은 머신러닝 기반 연구의 정확도 향상을 위해 필수적인 부분이라 할 수 있다. 따라서 국내의 침수 특성을 고려한 고정확도 물리 모형 개발에 관한 연구가 데이터 기반 모형 연구와 함께 상호 보완적으로 진행되어야 할 필요가 있다. 또한, 국내 도시침수

모의 연구에서 SWMM모형을 활용하는 비율이 60%를 넘는 것으로 조사되었다. 이는 SWMM모형의 적용성과 활용성이 검증되었기 때문이라고 해석할 수 있으나 SWMM모형은 지표면에서 발생한 유출은 맨홀을 통해 전량 우수관거로 유입된 후 관거의 통수능을 초과하는 유량이 맨홀에서 역류된다는 가정을 기반으로 하고 있기 때문에 지표면 경사가 큰 도시지역의 경우 실제 침수 과정을 왜곡할 수 있다는 한계점을 가진다. 따라서 도시지역의 수리, 수문 과정을 적절하게 반영할 수 있는 관망해석 기술의 개발 역시 필요한 것으로 판단된다.

머신러닝을 활용한 도시침수 모의는 특정지점의 시계열 자료를 예측하거나 데이터 분류에 인공지능 기법을 적용하는 연구가 주를 이루고 있으며, 침수의 공간적 분포를 예측하는 기술 개발은 상대적으로 미진한 것으로 조사되었다. 따라서, CNN, attention, transformer 등의 딥러닝 기법을 활용한 도시 침수 시공간 예측 기술 개발이 진행되어, 계산시간 등 기존 물리 기반 기술의 약점이 보완되기를 기대한다.

활용목적 별 측면에서는 복잡한 도시 구조물의 영향을 실제와 유사하게 반영할 수 있는 고해상도 모의 기술에 관한 연구가 미진한 것으로 판단된다. 1 m급 이하의 초고해상도 도시침수 모의를 위해서는 이중 병렬 컴퓨팅 기술(CPU 기반 MPI (Message Passing Interface)와 OpenMP (Open Multi Processing), GPU (Graphics Processing Unit), TPU (Tensor Processing Unit) 등의 복합 활용)의 적용이 필요하다. 또한 지표면-우수관망 사이의 유입 및 역류량, 토지피복과 우수관거 관련 매개변수의 불확실성이 도시침수 모의에 미치는 영향을 정량화 하기 위한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 도시침수 모의의 궁극적인 목적인 침수 피해 예방을 위해 침수 발생시 최적 피난 경로 탐색 및 피난경로 안내와 같은 효과적인 비구조적 대책 수립에 관한 연구도 필요하다. 지속적인 사회적 관심과 투자, 융합 연구를 통해 기후 위기 적응과 재해 피해 저감을 위해 필수적인 도시침수 예측 기술의 발전이 꾸준히 진행되기를 기대한다.

감사의 글

이 성과는 한국환경연구원의 2022년도 기본과제 ‘기후위기 대응을 위한 도시침수 관리 정책 개선방안 연구(RE2022-15)’와 한국수자원공사(K-water)의 개방형 혁신 R&D (21-BC-001) 사업 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2022R1A4A5028840)의 지원을 받아 수행된 연구임.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ahn, J.-H., and Jeong, C.-S. (2018). "Numerical simulation of the flood event induced temporally and spatially concentrated rainfall on August 17, 2017, the flood event of Cheonggyecheon." *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 11, No. 2, pp. 45-52.
- Ahn, J.-H., Cho, W.-C., and Jung, J.-H. (2014). "Flood simulation for basin-shaped urban watershed considering surface flow." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 3, pp. 841-847.
- Ahn, J.-H., Cho, W.-C., and Kim, H.-S. (2012). "A study on flooding characteristic value for the decision method of an urban basin design magnitude." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 10, pp. 1035-1041.
- Ahn, J.-H., Kim, K.-W., and Cho, W.-C. (2013). "Flooding risk assessment using flooding characteristic values." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 957-964.
- Ahn, T.-J., Park, J.-Y., Lyu, H.-J., and Kim, J.-H. (2003). "A study on determination of capacity for pump and detention pond in small basins for flood control." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 3, pp. 385-398.
- An, H., and Yu, S. (2011). "Numerical simulation of urban flash flood experiments using adaptive mesh refinement and cut cell method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 7, pp. 511-522.
- An, H.-U., Jeong, A.-C., Kim, Y.-S., and Noh, J.-W. (2018). "Development of 2D inundation model based on adaptive cut cell mesh (K-Flood)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 10, pp. 853-862.
- Bae, D.-H., Shim, J.B., and Yoon, S.-S. (2012). "Development and assessment of flow nomograph for the real-time flood forecasting in Cheonggye Stream." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1107-1119.
- Bulti, D.T., and Abebe, B.G. (2020). "A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application." *Modeling Earth Systems and Environment*, Vol. 6, No. 3, pp. 1293-1302.
- Chen, A.S., Djordjevic, S., Leandro, J., and Savic, D. (2007). *The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks*. Sixth International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, Lyon, France.
- Chen, Y., Zhou, H., Zhang, H., Du, G., and Zhou, J. (2015). "Urban flood risk warning under rapid urbanization." *Environmental Research*, Vol. 139, pp. 3-10.
- Cho, W.-H., Han, K.-Y., Hwang, T.-J., and Son, A.-L. (2011). "2-D Inundation analysis in urban area considering building and road." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 5, pp. 159-168.
- Choi, J.-W., and Jun, H.-D. (2018). "Inundation damage assessment for coastal urban area considering complex causes of inundation." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 6, pp. 283-290.
- Choi, J.-W., Park, K.-J., Choi, S.-H., and Jun, H.-D. (2018). "A forecasting and alarm system for reducing damage from inland inundation in coastal urban areas: A case study of Yeosu City." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 475-484.
- Choi, S.-M., Yoon, S.-S., Lee, B.-J., and Choi, Y.-J. (2015). "Evaluation of high-resolution QPE data for urban runoff analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 9, pp. 719-728.
- Djordjević, S., Prodanović, D., and Maksimović, Č. (1999). "An approach to simulation of dual drainage." *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 95-103.
- Ellis, J.H., McBean, E.A., and Mulamootil, G. (1982). "Design of dual drainage systems using SWMM." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 108, No. 10, pp. 1222-1227.
- Fraga, I., Cea, L., and Puertas, J. (2017). "Validation of a 1D-2D dual drainage model under unsteady part-full and surcharged sewer conditions." *Urban Water Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 74-84.
- Greydanus, S., Dzamba, M., and Yosinski, J. (2019). *Hamiltonian neural networks*. Advances in Neural Information Processing Systems, Curran Associates, Inc., NY, U.S.
- Guo, K., Guan, M., and Yu, D. (2021). "Urban surface water flood modelling - a comprehensive review of current models and future challenges." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 25, No. 5, pp. 2843-2860.
- Ha, S.-R., and Lee, K.-W. (2006). "Effect of a hydrologic similarity unit and storm sewer resolution on the SWMM model performance." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 9, No. 2, pp. 79-90.
- Hammond, M.J., Chen, A.S., Djordjević, S., Butler, D., and Mark, O. (2015). "Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review." *Urban Water Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 14-29.
- Haynes, P., Hehl-Lange, S., and Lange, E. (2018). "Mobile augmented reality for flood visualisation." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 109, pp. 380-389.
- Heo, C.-H. (2003). "Characteristics of runoff variation due to watershed urbanization." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 725-740.
- Hsu, M., Chen, S., and Chang, T. (2002). "Dynamic inundation simulation of storm water interaction between sewer system and overland flows." *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 25, No. 2, pp. 171-177.
- Hwang, J.-Y., Ahn, J.-H., Jeong, C.-S., and Heo, J.-H. (2018). "A

- study on the variation of design flood due to climate change in the ungauged urban catchment.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 5, pp. 395-404.
- Hyun, J.-H., Park, H.-S., and Chung, G.-H. (2019). “Effects of the difference between ASOS and AWS data on runoff characteristics.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 7, pp. 443-449.
- Ivanov, V.Y., Xu, D., Dwelle, M.C., Sargsyan, K., Wright, D.B., Katopodes, N., Kim, J., Tran, V.N., Warnock, A., Fatichi, S., Burlando, P., Caporali, E., Restrepo, P., Sanders, B.F., Chaney, M.M., Nunes, A.M.B., Nardi, F., Vivoni, E.R., Istanbuluoglu, E., Bisht, G., and Bras, R.L. (2021). “Breaking down the computational barriers to real-time urban flood forecasting.” *Geophysical Research Letters*, Vol. 48, No. 20, p. e2021GL093585.
- Jang, J.-K., Park, M.-K., Lee, N.-E., Lee, J.-M., and Yang, D.-M. (2020). “Real-time prediction of urban inundation based on SWMM 1D-1D model.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 1, pp. 401-411.
- Jeong, C.-S. (2020). “Development of a flood disaster evacuation map using two-dimensional flood analysis and BIM technology.” *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 13, No. 2, pp. 53-63.
- Jeong, D.-K., and Lee, B.-H. (2010). “Development of urban flood water level forecasting model using regression method.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 221-231.
- Jeong, W.-C., Cho, Y.-S., and Lee, J.-W. (2009). “A Numerical study on characteristics of flood wave passing through urban areas (1): Development and verification of a numerical model.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 6, pp. 89-97.
- Jeong, W.-C., and Kim, K.-H. (2011). “A study on inundation simulation in coastal urban areas using a two-dimensional numerical model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 601-617.
- Jo, D.-J. (2014). “Application of the urban flooding forecasting by the flood nomograph.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 6, pp. 421-425.
- Kang, H., Cho, J., Lee, H., Hwang, J., and Moon, H. (2021). “Development of an ANN-Based urban flood alert criteria prediction model and the impact of training data augmentation.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 6, pp. 257-264.
- Kang, J.-E., and Lee, M.-J. (2015). “Analysis of urban infrastructure risk areas to flooding using neural network in Seoul.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 4, pp. 997-1006.
- Kang, M.-S., and Yoo, C.-S. (2018). “Development of a shot noise process based rainfall-runoff model for urban flood warning system.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 1, pp. 19-33.
- Kang, T.-U., and Lee, S.-H. (2012). “A study for a reasonable application of the SWMM to watershed runoff event simulation.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 6, pp. 247-258.
- Kang, T.-U., Lee, S.-H., Kang, S.-U., and Park, J.-P. (2012). “A study for an automatic calibration of urban runoff model by the SCE-UA.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 15-27.
- Keum, H.-J., Kim, H.-I., and Yeun, H.-K. (2018). “Real-time forecast of rainfall impact on urban inundation.” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 21, No. 3, pp. 76-92.
- Kim, C.-R., Kim, J.-S., and Yoon, S.-E. (2018a). “Applicability analysis of head loss coefficients at surcharge manholes for inundation analysis in urban area.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 3, pp. 395-406.
- Kim, D.H., Park, H.J., Yoo, H.J., and Lee, S.O. (2022). “The applicability of metaverse for urban inundation response.” *Journal of Korean Society of Disaster & Security*, Vol. 15, No. 2, pp. 13-25.
- Kim, D.-J., Song, Y.-H., and Lee, J.-H. (2020a). “A study on the improvement of reliability estimation method for sewer network considering resilience.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 5, pp. 309-317.
- Kim, H.-I., and Han, K.-Y. (2019). “Computation of criterion rainfall for urban flood by logistic regression.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 6, pp. 713-723.
- Kim, H.-I., Han, K.-Y., and Lee, J.-Y. (2020b). “Prediction of urban flood extent by LSTM Model and logistic regression.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 40, No. 3, pp. 273-283.
- Kim, H.-I., Keum, H.-J., and Han, K.-Y. (2018b). “Application and comparison of dynamic artificial neural networks for urban inundation analysis.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 5, pp. 671-683.
- Kim, H.-I., Keum, H.-J., and Han, K.-Y. (2018c). “Estimation of Inundation Area by Linking of Rainfall-Duration-Flooding Quantity Relationship Curve with Self-Organizing Map.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 6, pp. 839-850.
- Kim, H.-I., Lee, J.-Y., Han, K.-Y., and Cho, J.-W. (2020c). “Applying observed rainfall and deep neural network for urban flood analysis.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 1, pp. 339-350.
- Kim, H.I., Lee, Y., and Kim, B. (2021a). “Real-time flood prediction applying random forest regression model in urban areas.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, pp. 1119-1130.
- Kim, H.-S., Hwang, J.-Y., Ahn, J.-H., and Jeong, C.-S. (2018d). “Analysis of rate of discharge change on urban catchment considering climate change.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 5, pp. 645-654.
- Kim, J.-H., Ha, S.-M., Kim, T.-W., Park, Y.-J., Lee, G.-W., and Song, S.-H. (2021b). “Study of inundation response plan by inundation analysis in coastal urban area.” *Journal of Korea Academia-*

- Industrial cooperation Society*, Vol. 22, No. 12, pp. 845-852.
- Kim, J.-S., Han, K.-Y., and Lee, C.-H. (2006). "Development and verification of inundation modeling with urban flooding caused by the surcharge of storm sewers." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 12, pp. 1013-1022.
- Kim, J.-Y., and Sung, S.-Y. (2016). "Forecasting possibility of flood occurrence in suwon under climate change applying stochastic simulation." *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 51, No. 2, pp. 255-265.
- Kim, M.-M., Lee, J.-W., and Yi, J.-E. (2007). "Development and application of grid-based urban surface runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 1, pp. 25-38.
- Kim, S.-Y., Lee, B.-J., and Lee, A.-J. (2020d). "Flooding risk under climate change of fast growing cities in Vietnam." *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 13, No. 2, pp. 1-9.
- Kim, Y. (2020). "A study on the flood reduction in Eco-delta city in Busan using observation rainfall and flood modelling." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 187-193.
- Koo, Y.-M., and Seo, D.-G. (2017). "Parameter estimations to improve urban planning area runoff prediction accuracy using Storm-water Management Model (SWMM)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 5, pp. 303-313.
- Kwak, C.-J., and Lee, J.-J. (2012a). "A development of method for surface and subsurface runoff analysis in urban composite watershed (I) -Theory and development of module-." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 39-52.
- Kwak, C.-J., and Lee, J.-J. (2012b). "A development of method for surface and subsurface runoff analysis in urban composite watershed (II) -Analysis and application-." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 53-64.
- Kwon, S.H., Jung, H.W., Hwang, Y.K., Hoon, L.E., and Kim, J.H. (2021). "Combined Inland-River operation technique for reducing inundation in urban area: The case of Mokgam drainage watershed." *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 22, No. 1, pp. 257-266.
- Leandro, J., and Martins, R. (2016). "A methodology for linking 2D overland flow models with the sewer network model SWMM 5.1 based on dynamic link libraries." *Water Science and Technology*, Vol. 73, No. 12, pp. 3017-3026.
- Leandro, J., Chen, A.S., Djordjević, S., and Savić, D.A. (2009). "Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (Sewer/Surface) hydraulic models for urban flood simulation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 6, pp. 495-504.
- Lee, B.-J., and Yoon, S.-S. (2017). "Development of Grid based Inundation Analysis Model (GIAM)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 3, pp. 181-190.
- Lee, B.-R., Jeong, D.-M., and Choi, S.-Y. (2019a). "Analysis of urban runoff discharge characteristics affected by climate change and urbanization: Case on Bokdae-dong basin." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 3, pp. 41-46.
- Lee, C.-H., and Han, K.-Y. (2007a). "GIS-based urban flood inundation analysis model considering building effect." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 3, pp. 223-236.
- Lee, C.H., and Han, K.Y. (2007b). "Integration model for urban flood inundation linked with underground space flood analysis model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 4, pp. 313-324.
- Lee, C.-H., Han, J.-Y., and Kim, J.-S. (2006). "Urban inundation analysis by applying with GIS." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 9, No. 2, pp. 115-125.
- Lee, H., Kim, H.S., Kim, S., Kim, D., and Kim, J. (2021a). "Development of a method for urban flooding detection using unstructured data and deep learning." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 12, pp. 1233-1242.
- Lee, H.-S., Cho, J.-W., Kang, H.-S., and Hwang, J.-G. (2019b). "Applicability study on urban flooding risk criteria estimation algorithm using cross-validation and SVM." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 12, pp. 963-973.
- Lee, J.-H., and Yeon, K.-S. (2008). "Flood inundation analysis using XP-SWMM model in urban area." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 08, No. 05, pp. 155-161.
- Lee, J.-H., Kang, S.-G., Yuk, G.-M., and Moon, Y.-I. (2019c). "Accuracy evaluation of 2D inundation analysis results of simplified SWMM according to sewer network scale." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 8, pp. 531-543.
- Lee, J.-H., Kim, M.-S., Moon, Y.-G., and Moon, Y.-I. (2018a). "A study on simplification of SWMM for prime time of urban flood forecasting - A case study of Daerim basin -." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 1, pp. 81-88.
- Lee, J.-J., Kwak, C.-J., and Lee, S.-H. (2019d). "Application of dual drainage system model for inundation analysis of complex watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 4, pp. 301-312.
- Lee, J.-M., Lee, S.-H., and Kang, T.-U. (2008). "Inundation analysis on the region of lower elevation of a new port by using SWMM5 and UNET model - Yongwon-dong, Jinhae-si." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 24, No. 4, pp. 442-451.
- Lee, J.-S., and Lee, S.-E. (2018). "Development of urban flood risk maps for strengthening urban planning toward disaster prevention." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 2, pp. 203-214.
- Lee, S.H., Kim, J.S., and Kim, S.J. (2021b). "Analysis of applicability of the detention in trunk sewer for reducing urban inundation." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 8, No. 1, pp. 44-53.
- Lee, S.-S., Noh, S.J., Jang, C.-H., and Rhee, D.-S. (2017). "Simulation and analysis of urban inundation using the integrated 1D-2D urban flood model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 4, pp. 263-275.
- Lee, S.-S., Pakdimanivong, M., Jung, K.-S., and Kim, Y.-S. (2018b). "Study on the influence of sewer network simplification on urban inundation modelling results." *Journal of Korea Water*

- Resources Association*, Vol. 51, No. 4, pp. 347-354.
- Lee, W., Kim, J.-S., and Yoon, S.-E. (2015). "Inundation analysis in urban area considering of head loss coefficients at surcharged manholes." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 2, pp. 127-136.
- Mignot, E., Li, X., and Dewals, B. (2019). "Experimental modelling of urban flooding: A review." *Journal of Hydrology*, Vol. 568, pp. 334-342.
- Nasello, C., and Tucciarelli, T. (2005). "Dual multilevel urban drainage model." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 748-754.
- Neal, J., Villanueva, I., Wright, N., Willis, T., Fewtrell, T., and Bates, P. (2012). "How much physical complexity is needed to model flood inundation?" *Hydrological Processes*, Vol. 26, No. 15, pp. 2264-2282.
- Nkwunonwo, U.C., Whitworth, M., and Baily, B. (2020). "A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries." *Scientific African*, Vol. 7, e00269.
- Noh, S.J., Lee, J.-H., Lee, S., and Seo, D.-J. (2019). "Retrospective dynamic inundation mapping of hurricane harvey flooding in the Houston Metropolitan area using high-resolution modeling and high-performance computing." *Water*, Vol. 11, No. 3, 597.
- Noh, S.J., Lee, J.-H., Lee, S., Kawaike, K., and Seo, D.-J. (2018). "Hyper-resolution 1D-2D urban flood modelling using LiDAR data and hybrid parallelization." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 103, pp. 131-145.
- Park, M.-J., and Choi, S.-W. (2008). "Development of an inundation risk evaluation method based on a multi criteria decision making." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 4, pp. 365-377.
- Park, Y., Jung, B., and Kim, R.-H. (2020). "Flood risk assessment for coastal cities considering sea level rise due to climate change." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 6, pp. 323-332.
- Piadeh, F., Behzadian, K., and Alani, A.M. (2022). "A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems." *Journal of Hydrology*, Vol. 607, 127476. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127476.
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., and Han, H. (2021). "A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies." *Natural Hazards*, Vol. 108, No. 1, pp. 31-62.
- Ryu, H.-S., Kim, M.-M., Kim, Y.-S., and An, W.-S. (2010). "Distributed rainfall-runoff analysis of urban basin with GIS technique and Network Analysis." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 143-148.
- Shin, S.-Y., Yeo, C.-G., Baek, C.-H., and Kim, Y.-J. (2005). "Mapping inundation areas by flash flood and developing rainfall standards for evacuation in urban settings." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 8, No. 4, pp. 71-80.
- Shon, T.-S., Kang, D.-H., Jang, J.-K., and Shin, H.-S. (2010). "A study of assessment for internal inundation vulnerability in urban area using SWMM." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 105-117.
- Singh, V.P., and Frevert, D.K. (2010). *Watershed models*, CRC Press, FL, U.S.
- Son, A.-L., Bae, S.-H., Han, K.-Y., and Cho, W.-H. (2013). "Prospect of design rainfall in urban area considering climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 6, pp. 683-696.
- Son, A.-L., Kim, B.-H., and Han, K.-Y. (2015). "A study on prediction of inundation area considering road network in urban area." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 307-318.
- Song, Y.-H., and Chung, E.-S. (2019). "Spatial prioritization of permeable pavement considering multiple general circulation models: Mokgamcheon watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 2, pp. 1011-1023.
- Sun, D., Kang, T., and Lee, S. (2021). "Sensitivity analysis and coverage review of the parameters for inundation simulations of coastal areas using XP-SWMM." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 5, pp. 59-68.
- Tak, Y.-H., Kim, J.-D., Kim, Y.-D., and Kang, B.-S. (2016b). "A study on urban inundation prediction using urban runoff model and flood inundation model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 3, pp. 395-406.
- Tak, Y.-H., Kim, Y.-D., Kang, B.-S., and Park, M.-H. (2016a). "Sewer overflow simulation evaluation of urban runoff model according to detailed terrain scale." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 6, pp. 519-528.
- Tak, Y.-H., Kim, Y.-D., Kang, B.-S., and Park, M.-H. (2017). "Application of multi-dimensional flood damage analysis in urban are." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 6, pp. 397-405.
- Tran, Q.-K., and Song, S. (2017). "Water level forecasting based on deep learning: A use case of trinity River-Texas-The United States." *Journal of Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, Vol. 44, No. 6, pp. 607-612.
- Yoon, S.-S., and Bae, D.-H. (2010). "The applicability assesment of the short-term rainfall forecasting using translation model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 8, pp. 695-707.
- Yoon, S.-S., Bae, D.-H., and Choi, Y.-J. (2014). "Urban inundation forecasting using predicted radar rainfall: Case study." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 3, pp. 117-126.
- Yoon, S.-S., Choi, C.-G., and Bae, D.-H. (2008). "Connection of hydrologic and hydraulic models for flood forecasting in a large urban watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 929-941.