



Development and application of cellular automata-based urban inundation and water cycle model CAW

Lee, Songhee^a · Choi, Hyeonjin^b · Woo, Hyuna^a · Kim, Minyoung^c · Lee, Eunhyung^d · Kim, Sanghyun^e · Noh, Seong Jin^{f*}

^aMaster's Course Student, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

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

^cUndergraduate Student, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

^dEnvironmental Researcher, Geum-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Okcheon, Korea

^eProfessor, Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

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

Paper number: 24-003

Received: 16 January 2024; Revised: 16 February 2024; Accepted: 23 February 2024

Abstract

It is crucial to have a comprehensive understanding of inundation and water cycle in urban areas for mitigating flood risks and sustainable water resources management. In this study, we developed a Cellular Automata-based integrated Water cycle model (CAW). A comparative analysis with physics-based and conventional cellular automata-based models was performed in an urban watershed in Portland, USA, to evaluate the adequacy of spatiotemporal inundation simulation in the context of a high-resolution setup. A high similarity was found in the maximum inundation maps by CAW and Weighted Cellular Automata 2 Dimension (WCA2D) model presumably due to the same diffuse wave assumption, showing an average Root-Mean-Square-Error (RMSE) value of 1.3 cm and high scores of binary pattern indices (HR 0.91, FAR 0.02, CSI 0.90). Furthermore, through multiple simulation experiments estimating the effects of land cover and soil conditions on inundation and infiltration, as the impermeability rate increased by 41%, the infiltration decreased by 54% (4.16 mm/m²) while the maximum inundation depth increased by 10% (2.19 mm/m²). It was expected that high-resolution integrated inundation and water cycle analysis considering various land cover and soil conditions in urban areas would be feasible using CAW.

Keywords: Cellular Automata, Urban Inundation, Water Cycle, Artificial Intelligence

셀룰러 오토마타 기반 도시침수 및 물순환 해석 모형 CAW의 개발 및 적용

이송희^a · 최현진^b · 우현아^a · 김민영^c · 이은형^d · 김상현^e · 노성진^{f*}

^a금오공과대학교 토목공학과 석사과정, ^b금오공과대학교 토목공학과 박사과정, ^c금오공과대학교 토목공학과 학사과정,

^d국립환경과학원 금강물환경연구소 환경연수사, ^e부산대학교 환경공학과 교수, ^f금오공과대학교 토목공학과 조교수

요 지

도시 지역의 홍수 위험을 완화하고 지속 가능한 수자원을 관리하기 위해서는 도시 홍수와 물순환의 연계 해석이 필수적이다. 본 연구는 간단한 전환 규칙을 통해 침수의 시공간적 변화를 모의하는 셀룰러 오토마타 기법을 이용하여 고해상도 도시침수 및 물순환 해석 모형 CAW (Cellular Automata-based integrated Water cycle model)를 개발하고, 그 적용성을 평가하였다. 개발된 모형을 미국 포틀랜드 도심지 유역에 적용하고, 물리 기반 모형 및 기존 셀룰러 오토마타 기반 모형의 침수 해석 결과와 비교하여 도시침수 재현의 적절성을 평가하였다. 연구 결과, 침수 검증 대상 지점에 대한 CAW 모형의 최대 침수심 분포는 확산파 방정식을 모사하는 WCA2D (Weighted Cellular Automata 2 Dimension) 모형과 평균 오차 값이 1.3 cm로 유사하게 모의되었고, 이진 패턴 유사도 검증에서 HR 0.91, FAR 0.02, CSI 0.90으로 비교적 높은 유사성을 나타내며 모형의 침수 해석 적용성을 검증하였다. 또한, 토지피복 및 토양 조건이 침수, 침투에 미치는 영향을 시험 평가한 결과, 불투수율이 41% 더 높은 지역에서의 침투와 최대 침수심이 각각 54% (4.16 mm/m²) 감소 및 10% (2.19 mm/m²) 증가하였다. CAW 모형을 이용하여 도시 유역의 다양한 토지피복 및 토양 특성을 고려한 고해상도 물순환 및 도시침수 연계 모의 해석이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어: 셀룰러 오토마타, 도시 홍수, 물순환, 인공지능

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

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

1. 서론

기후변화와 도시화로 인한 불투수 면적의 증가는 침투 및 총 유출 증가, 침투 및 증발산 감소 등의 문제를 발생시켜 도시에서의 물순환 체계를 왜곡시킨다. 도시 지역의 물순환 분포 상태가 침수 모의의 초기조건이 된다는 점에서, 지속 가능한 도시 환경을 구축하기 위해서는 두 요소 간의 연계 해석이 필수적이다. 또한, 도시의 인위적인 개발로 인한 물순환계 요소의 변화가 도시침수 및 물순환에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 지난 수십 년 동안 국내외 도시 지역의 장단기 물순환 변화 특성을 파악하기 위해 다양한 물순환 해석 모형이 개발 및 적용되었다. 예를 들어, 증발산, 침투, 유출 등의 수문요소를 격자단위로 해석하는 물리 기반의 공간 분포형 모형 WEP (Water and Energy transfer Process)과 침투, 증발, 지하수 흐름 해석이 가능한 CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool) 모형은 그 중 대표적인 사례이다(Kim *et al.*, 2012; Noh *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2005). 이 외에도, 중소 규모 지역에서 물순환 특성을 해석하기 위한 DWAT (Dynamic Water resources Assessment Tool) 모형과 대규모의 복잡한 지역에서 효율적인 장기 모의가 가능한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형이 적용된 바 있다(Jang *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2016a). 이처럼 도시 영역에서의 물순환 해석 관련 연구가 활발히 수행되고 있으나, 기존 연구에서는 도시침수와 물순환이 별도의 연구 영역으로 간주되어 각각의 요소에 특화된 모형들이 개발되었다. 그 결과, 도시침수 모형은 수리학적 계산에 집중되어 물순환 요소에 대한 고려가 부족하고, 반대로 도시 물순환 모형은 유출량 해석은 가능하지만 침수 해석이 연동되지 않는 한계가 존재한다. 또한, 도시 지역의 복잡한 토지 이용 특성을 반영하여 침수와 물순환의 시공간적 변화를 정확하게 해석하기 위해서는 고해상도의 지형자료가 필수적으로 요구되지만, 천수 방정식(shallow water equation)을 수치적으로 해석하는 물리 기반 모형을 통한 해석은 많은 컴퓨터 자원과 계산시간이 소요되는 한계가 있다.

한편, 셀룰러 오토마타(cellular automata)는 전환 규칙을 기반으로 격자 상태를 모의하는 접근 방식으로, 계산 과정을 단순화하여 모의에 사용되는 계산 규칙이 간단하고 모의 전처리 시간이 물리 기반 모형보다 훨씬 짧기 때문에 복잡한 물리적 시스템을 비교적 빠른 시간 내에 모의할 수 있다. 개별적인 시공간 단계에 의해 모의되기 때문에 각종 재해(Brasiel and Lima, 2023; Yoon and Koh, 2012) 및 토지이용도 변화 예측(Lee *et al.*, 2016b)에 이용되었다. 또한, 셀룰러 오토마타 기법의 알고리즘을 침수 및 물순환 해석에 이용된 연구 사례들도

보고되고 있으며(Furnari *et al.*, 2023; Ghimire *et al.*, 2013; Guidolin *et al.*, 2012; Jamali *et al.*, 2019; Kassogué *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2015; Wijaya and Yang, 2021), 다양한 연구에서 그 성과가 입증되었다. 국내에서도 셀룰러 오토마타 기반 2차원 침수 해석 모형 WCA2D (Weighted Cellular Automata 2 Dimension)를 이용해 부산 온천천 유역에 적용하고, 복잡한 도시 유역에 대해 비용 효율적인 침수 모의가 가능함을 확인하였다(Choi *et al.*, 2023). 셀룰러 오토마타 기법은 시공간적인 측면에서 도시의 복잡한 동역학적 현상을 효과적으로 예측하지만, 토지피복에 따른 침수, 침투, 토양수분, 증발 등과 같은 물순환 요소 간의 상호연관성에 대한 고려가 부족하다. 또한, 셀룰러 오토마타 기법의 도시침수 및 물순환을 연계 모의하여 적용한 사례가 미흡한 상황이다.

본 연구에서는 셀룰러 오토마타 기반 고해상도 도시침수 및 물순환 해석 모형 CAW (Cellular Automata-based integrated Water cycle model)를 개발하고, 그 적용성을 평가한다. CAW 모형은 토양수분, 침투, 중간유출, 지표면 흐름 해석 모듈로 구성되며, 도시침수 및 물순환을 연계하여 해석한다. 고해상도 도시침수 재현의 적절성을 평가하기 위해 물리 기반 도시홍수 해석 모형과 기존 셀룰러 오토마타 기반 모형의 침수 해석 결과를 CAW 모형의 결과와 정량적으로 비교한다. 또한, 개발된 모형을 미국 포트랜드 도심지 유역에 적용하여 토지피복 및 토양 조건이 침수, 침투, 등의 물순환 요소에 미치는 영향을 평가한다. 논문의 구성은 2장에서 모형의 구조 및 알고리즘 등 CAW 모형의 이론적 배경에 대해 기술하고, 3장에서는 침수 재현성 평가 및 강우사상과 토지피복별 물순환 해석 평가를 수행한다. 마지막 4장에서는 결론에 대해 논의한다.

2. 연구방법

2.1 CAW

본 절에서는 셀룰러 오토마타 기반 고해상도 도시침수 및 물순환 해석 모형인 CAW의 침수, 침투, 토양수분 등의 흐름 해석 모듈에 대해 설명한다(Lee, 2024). Fig. 1은 CAW 모형의 개념도를 나타낸다. CAW는 Shao *et al.* (2015)가 제안한 RunCA 모형의 침수 알고리즘을 기반으로 개발되었으며, RunCA 모형은 격자들의 평균높이를 이용하여 다양한 규모에 대한 정량적인 지표면 유출 과정 모사가 가능한 모형이다. 복잡한 도시침수의 물리적 특성을 반영하면서 셀룰러 오토마타 기법을 통한 간단한 연산 규칙을 적용하기 때문에 효율적인 계산이 가능하지만, 각 시간 단계 사이의 수위 진동 문제가

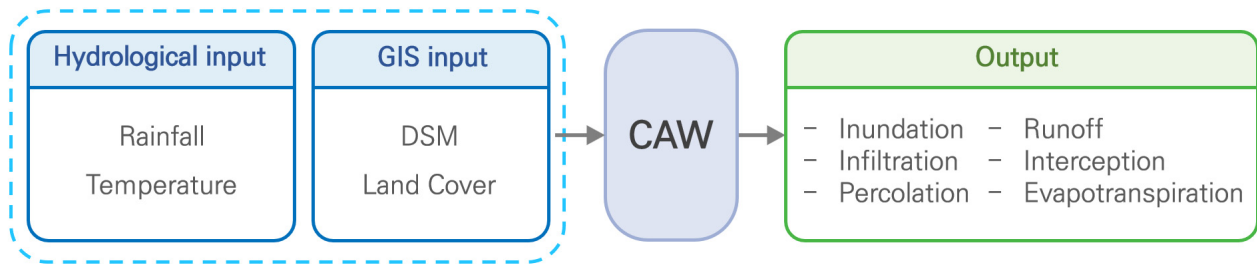


Fig. 1. Conceptual diagram of CAW model

발생하는 한계가 존재한다. CAW 모형은 기존 셀룰러 오토마타 기반 침수 해석 알고리즘의 불확실성을 Guidolin *et al.* (2016)이 개발한 WCA2D 모형의 가중치 기반 시스템을 통해 개선하고, 복원 메커니즘으로 인한 수위진동 문제를 해결하였다. 또한, 토지피복에 따른 투수 조건을 반영하여 투수 면적 비율이 다양한 도시 유역에 대한 침투, 증발 등의 복잡한 물순환 과정을 간단하게 구현할 수 있어 효율적인 물순환 정보 생산이 가능하다. 지표면 및 지표하 흐름 해석 모듈에 대한 자세한 과정은 아래의 내용과 같다.

2.1.1 지표면 흐름 해석 모듈

CAW 모형의 지표면 흐름 해석 모듈은 시간 단계마다 각 격자간 물의 흐름방향 및 재분배되는 물의 양을 추정한다. 기본적으로 모든 격자에 대해 다음과 같은 세 가지 전환규칙이 적용된다. (1) 물이 흘러갈 하류의 이웃 격자 식별, (2) 이웃 격자로 흐를 수 있는 잠재적 물의 양 추정, (3) 실제로 중앙 격자에서 이웃 격자로 흘러갈 물의 양을 가중치에 따라 계산(Fig. 2). 이웃영역은 Moore-neighborhood를 기반으로 하여 모든 이웃을 고려한 8개의 인접한 격자로 구성되지만, 본 연구에서는 4가지의 기본 흐름 방향만 구현하였다.

첫 번째 규칙으로, 중앙 격자에서 물이 흘러갈 이웃 격자들을 식별한다. 매시간 단계마다 각 격자의 수심 및 높이를 결정하고, 이웃영역의 평균 격자 높이가 결정되면 격자의 높이와 비교하여 높이 값이 더 큰 이웃 격자를 제거한다. 추가 제거를 위해 나머지 이웃 격자들과 중앙 격자 간의 새로운 평균높이를 재산정하며, 더이상 제거할 이웃 격자가 없을 때까지 이 과정을 반복한다. 재산정되는 평균 높이는 다음 Eq. (1)과 같다.

$$AVE = \frac{\sum_{i=1}^{n'} H_i - H_0}{n' + 1} \quad (1)$$

여기서, H_i (mm)는 이웃 격자의 높이, H_0 (mm)는 중앙 격자의 높이, n' 은 제거 후 남은 이웃 격자의 수, AVE (mm)는 나머지

이웃 격자들과 중앙 격자 사이의 평균 높이이다.

다음으로, 선별된 이웃 격자들의 각각의 높이와 평균 높이의 차이에 의해 중앙 격자에서 전달될 수 있는 물의 양 즉, 잠재유출량 f_p (mm)이 결정된다. 이 때, 모든 흐름에 대한 이동 시간을 계산하여 잠재유출량이 고려되며, 중앙 격자에서 각 흐름 이웃으로의 유출속도 V_{man} (m/s)를 결정하기 위해 Manning 방정식이 사용된다. 만약 모의 시간 간격 Δt (s)가 계산된 이동시간 T (s)보다 작다면, 흘러갈 이웃 격자의 높이와 평균 높이 차이에 $\Delta t / T_i$ (s) 시간만큼 곱해주어 유출량 f_i (mm)를 결정하고, 각 흐름의 유출량이 결정되면 중앙 격자로부터의 총 유출량 f_0 (mm)는 f_i (mm)의 합으로 이루어진다.

$$V_{man} = \frac{1}{n} h_o^{2/3} \left(\frac{H_0 + H_i}{D_i} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$T = \left(\frac{D_i}{V_{man}} \right) \quad (3)$$

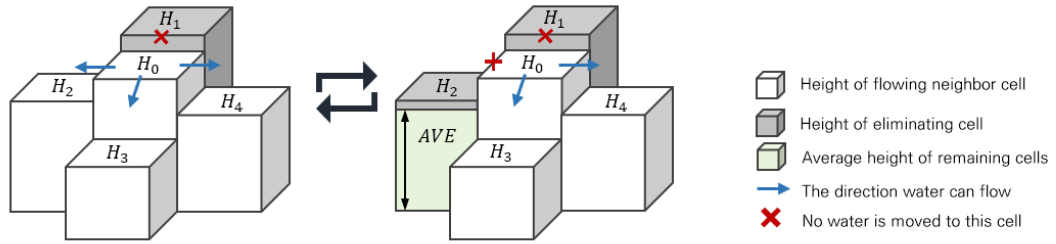
$$f_i = \begin{cases} f_p, & \Delta t \geq T \\ f_p \frac{\Delta t}{T}, & \Delta t < T \end{cases} \quad (4)$$

$$f_0 = \sum_{i=1}^{n'} f_i \quad (5)$$

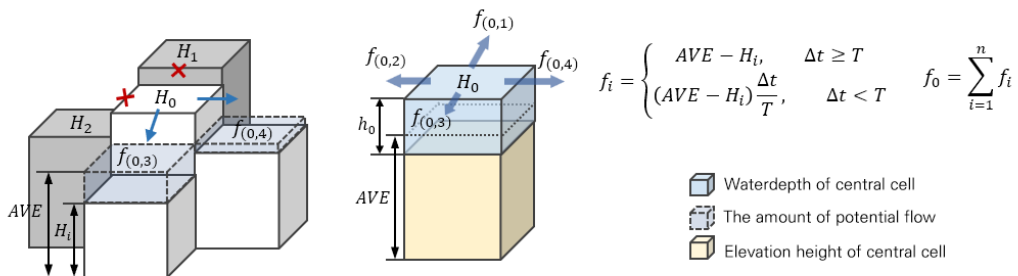
여기서, n 은 Manning 방정식의 조도계수, h_o (mm)는 중앙 격자 수심, D_i (mm)는 중앙 격자에서 흐름 이웃 격자로의 이동 거리이며, V_{man} (m/s)은 Manning식으로 산정한 단면의 평균 유속, T (s)는 중앙 격자에서 흐름 이웃 격자로의 흐름 이동 시간을 의미한다. 또한, f_p (mm)는 잠재유출량, f_i (mm)는 흐름 이동 시간을 고려한 유출량, f_0 (mm)는 총 유출량이다.

마지막으로, 총 유출량이 중앙 격자의 수심보다 크면 하류에 위치한 각 이웃 격자에 가중치를 반영한 실제유출량 f_i

(a) Rule 1 : Determine the flow direction to which neighbor cells the water in each central cell will flow



(b) Rule 2 : Estimate the amount of potential water that can flow to neighboring cells



(c) Rule 3 : Calculate the actual amount of water to flow from the center cell to the neighboring cell according to the weight

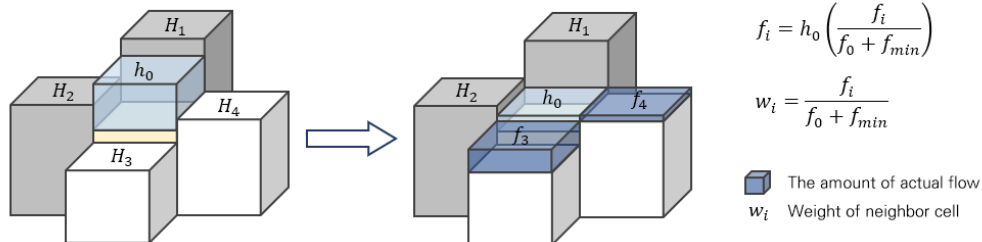


Fig. 2. Flow transition algorithm of CAW model by calculation step

(mm)가 계산되어 이웃 격자로 물이 흘러가게 되고, 최종적으로 각 격자의 수심이 결정된다.

$$f_{min} = H_0 - \max(H_i) \tag{6}$$

$$f_i = \begin{cases} f_i, & h_0 \geq f_0 \\ h_0 \frac{f_i}{f_0 + f_{min}}, & h_0 < f_0 \end{cases} \tag{7}$$

여기서, f_{min} (mm)은 중앙격자에서 최소한으로 나갈 수 있는 물의 양이다.

CAW는 Guidolin *et al.* (2016)이 제안한 가중치 기반 알고

리즘을 사용하여 모형의 불안정성을 초래할 수 있는 시간 간격 사이의 수위 진동을 극복하였다. 격자 간의 물이 이동할 때 가중치를 주어 물을 넘겨받은 이웃 격자가 중앙 격자보다 더 높아지지 않도록 알고리즘을 추가하였으며, 중앙격자가 전달된 전체 간의 물 부피의 일부를 유지하게 되어 실제 침수량 상과 유사한 모의가 가능해진다. 시간 단계마다 중앙 격자로 유입된 물은 가중치에 따라 이웃 격자로 보낼 물의 양을 추정하게 되고, 더 이상 흘러갈 물이 없을 때까지 각 격자에 대한 계산이 반복적으로 수행된다.

2.1.2 토양수분 및 침투 모듈

CAW 모형에서 각 시간 단계에서의 유출량은 현재 시간 단계의 유효강우량과 마지막 시간 단계에서의 유입 및 유출량에

기초하여 결정된다. 일반적으로 물순환 요소에는 차단, 증발, 침투 등이 있고, CAW 모형에서는 차단, 침투, 중간유출, 지표 유출의 물순환 요소가 고려된다. 또한, 중간유출과 침투에 기여하는 토양수분 모듈은 각 격자의 토양 특성에 따라 토양층의 포화 및 불포화 조건을 모두 모의할 수 있다. 유효강우가 지표면과 토양층 사이의 상호작용을 통해 토양수분량으로 재산정되며, Fig. 3은 토양층의 구조 및 CAW 모형의 다중 추적 알고리즘을 나타낸 그림이다. 토양층의 중간유출량은 공극률과 가용토양수분량의 함수로 계산되며, CAW 모형의 토양수분 및 침투 모듈에 관한 세부적인 내용은 다음과 같다.

첫 번째로, 토지피복 및 토양수분의 조건에 따라 유효강우량 일부는 토양층으로 유입되고, 침투되지 못하는 양은 지표 유출량으로 산정되어 지표면 흐름 해석에 기여한다. 지표면에 내린 강우량은 식생에 의한 차단 과정을 거치게 되고, CAW 모형에서 차단은 식생에서 수집, 저장된 입력 강우를 의미한다. 대부분 불투수 면적으로 이루어진 식생이 없는 지역에서는 차단량이 무시될 수 있지만, 식생의 면적이 크고, 강우량이 적은 지역의 경우에는 상대적으로 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 Von Hoyningen-Huene (1983)이 개발한 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)에 따른 차단 저류량 추정 방정식을 사용하여 비가 오는 동안 누적된 차단량(Aston, 1979)을 계산한다(Eq. (9)).

$$P_{max} = 0.935 + 0.498LAI + 0.00575LAI^2 \quad (8)$$

$$P_{cum} = P_{max} \left[1 - \exp \left(-0.046LAI \frac{R_{cum}}{P_{max}} \right) \right] \quad (9)$$

여기서, P_{max} (mm)는 최대 차단 저류량, LAI는 엽면적지수, P_{cum} (mm)은 누적 차단, R_{cum} (mm)은 누적 강우량이다.

지표면과 토양층에서 침투되는 물의 양을 모두 고려하기 위해 Horton 침투 방정식을 사용하여 모형을 구축하였다. 유효강우는 토지피복에 따른 불투수율을 고려하여 지표면에서 침투된 후 토양층으로 유입된다. 토양층으로 유입된 후에는 초기 토양수분량과 함께 토양수분량이 재산정되며 이때, 토양 깊이와 공극률을 추가적으로 고려하여 토양에 채워질 수 있는 체적함수율이 계산된다.

$$R_e = R_t - P_t \quad (10)$$

$$R_{sur} = R_e * I_r \quad (11)$$

$$I_{sub} = I_f + (I_0 - I_f) e^{-kt} \quad (12)$$

$$R_{sub} = R_e - R_{sur} - I_{sub} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{R_{sub}}{H_s} \times 100 \quad (14)$$

$$K(\theta) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \times 100 \quad (15)$$

여기서, R_e (mm)는 유효강우량, R_t (mm)는 초기강우, P_t (mm)는 차단량을 나타낸다. R_{sur} (mm)는 지표유출에 기여하는 유효강우량, I_r 은 불투수율, I_{sub} (mm/hr)은 토양층 밖으로 침투

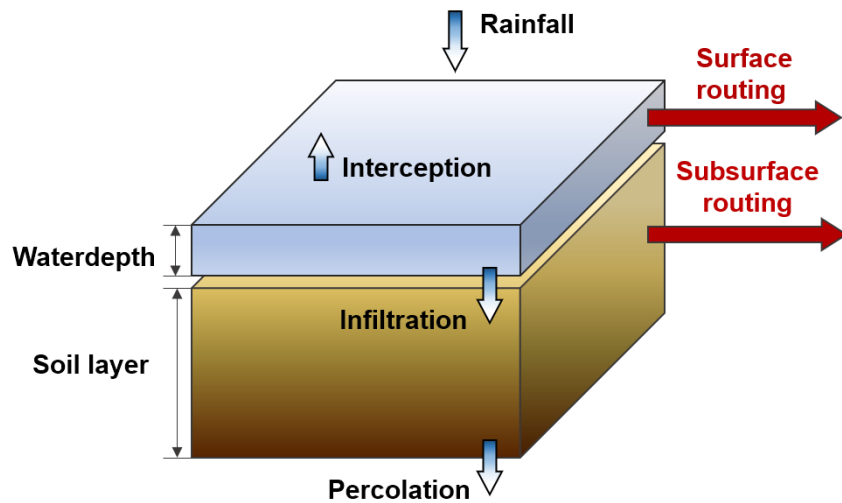


Fig. 3. Soil layer structure that simulate the water cycle and major flow in the CAW model

되는 양이며, I_0 (mm/hr)는 초기 침투능, I_f (mm/hr)는 종기 침투능, e 는 감소상수이다. R_{sub} (mm)은 재산정되는 토양수분량, H_s (mm)는 토양층 깊이, θ 는 토양층 대비 토양수분함수율, θ_r 은 최소 토양수분 함수율, θ_s 는 공극률(포화 토양수분 함수율), $K(\theta)$ 는 체적함수율이다.

토양에 차 있는 물이 공극률보다 많은 비율을 차지할 경우, 토양이 포화되어 전체 토양 깊이에서 공극률이 차지하는 비율만큼 제외된 물이 지표면 밖으로 유출되고, 가용 저장 공간 대비 채워질 수 있는 물의 비율이 토양층에 전부 포화되지 않아도 일부는 중간유출에 기여한다.

$$f_s = \begin{cases} H_s \frac{\theta - \theta_r}{100}, & \text{if } \theta > \theta_s \\ K_s \times R_{sub} & \text{if } K(\theta) > K(\theta') \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$R_s = R_{sub} - f_s \quad (17)$$

여기서, f_s (mm)는 토양층에서의 유출량을 의미하고, $K(\theta')$ 는 기준 포화 함수율, K_s 는 포화수압 전도도, R_s (mm)는 최종적으로 토양에 남겨지는 토양수분량이다.

또한, 도시 내에서 증발에 대한 충분한 데이터를 확보하고, 증발 패턴을 일반화하는 과정이 어렵기 때문에 CAW 모형에서 증발 과정은 고려되기 어려운 측면이 있었다. 따라서, 온도, 습도, 일사량과 같은 기상 데이터를 기반으로 한 도시 내 증발산 추정 모듈 및 하수관거 흐름 모듈을 개발하여 확장된 물순환에 대한 추가 분석이 요구된다.

2.2 물리 기반 도시침수 모형 H12

CAW 모형의 지표면 침수 모의 성능 평가를 위해 물리 기반 도시침수 모형 H12 (Hybrid-1D-2D)를 사용하였다. H12 모형은 1차원 우수관거 흐름과 2차원 지표면 흐름을 연동하여 해석하는 도시침수 모형이다. 지표 흐름은 Kawaike (2002)가 제안한 2차원 동역학파(dynamic wave) 수치해석 기법을 기반으로 모의한다. 모형 초기 개발 과정에서는 실제 물리적 모의 실험이 수행되었으며, 실측 실험값 및 현장 관측값과 비교하여 최대 침수심 깊이와 수위 상승 과정이 유사하게 모의됨을 확인하였다(Lee *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2017; Noh *et al.*, 2016). 국외 다양한 지역에 적용되어 모형의 정확도와 신뢰성이 입증되었으며(Noh *et al.*, 2018; Noh *et al.*, 2019), 국내의 경우, 대전 A 아파트 단지과 서울 사당천

유역에서 발생한 과거 도시침수 사상을 재현하고 침수 원인을 분석하여 모형의 적용성을 검증하였다(Kim *et al.*, 2022). 본 연구에서는 H12 모형의 1차원 우수관망 흐름 해석 모듈을 제외하고 2차원 지표면 흐름 해석만 실시하였다.

2.3 셀룰러 오토마타 기반 도시침수 모형 WCA2D

CAW 모형의 지표면 침수 모의 성능 평가를 위해 기존 셀룰러 오토마타 기반의 2차원 도시침수 모형 WCA2D를 추가적으로 사용하였다. WCA2D는 계산 비용이 많이 소요되는 복잡한 물리방정식 대신에 가중치 기반 전환규칙에 따라 물의 움직임을 개념적으로 설명하기 때문에 효율적이다. 또한 관성항과 운동량 보존을 고려하지 않는 2차원 확산파(diffusive wave) 모형이다. WCA2D는 효율적인 고해상도 계산 홍수 모델링을 위한 도구인 CADDIES-2D프레임워크의 일부로 Center for Water Systems (<http://cws.exeter.ac.uk>)의 오픈 소스 라이선스를 사용하여 구현이 가능하다. 제안된 접근 방식은 2차원 확산파 침수 모형 UIM (Urban Inundation Model), LISFLOOD-FP와 함께 테스트 되었으며, 다양한 테스트 유역에서 본 모형의 계산 효율성 및 침수 해석 결과의 정확도가 확인되었다(Ghimire *et al.*, 2013; Guidolin *et al.*, 2016). 또한, 부산 온천천 유역의 과거 도시침수 사상을 침수 흔적도와 유사하게 재현하며, 국내 도시 유역에 대해서도 적용성이 검증된 바 있다(Choi *et al.*, 2023).

2.4 적용지역 및 입력자료

본 연구에서는 미국 오리건주 북서부 지역에 위치한 포틀랜드의 도심을 적용 지역으로 선정하였다. 포틀랜드는 여름에 강수량이 적고 겨울은 상대적으로 습한 계절적 특징을 가지며, 연평균 강수량은 1981년에서 2010년 기준 약 930 mm로 11월과 4월 사이에 연간 강수량의 66%가 집중된다(Cooley and Chang, 2017). Figs. 4(a) and 4(b)는 각각 포틀랜드의 토지피복도와 4 m 공간해상도 DSM (Digital Surface Model)을 나타내며, 토지피복 유형에는 수역, 불투수지역, 잔디, 숲 등이 포함되고, 토지피복 유형에 따라 CAW 모형에서 격자별로 서로 다른 불투수계수가 적용되었다. Fig. 4(c)는 포틀랜드 도심지의 연구 유역 및 침수 시계열 비교를 위해 선정된 6곳의 검증 지점들을 나타내며, 각 지점들은 지형 및 시공간적 침수 변화 양상이 다른 특징이 있다.

침수 및 물순환 모의를 위해 세 가지의 강우사상이 사용되었다. 첫 번째로, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 NOAA Atlas 2 Precipitation Frequency Estimates 자료를 기반으로 포틀랜드의 100년 빈

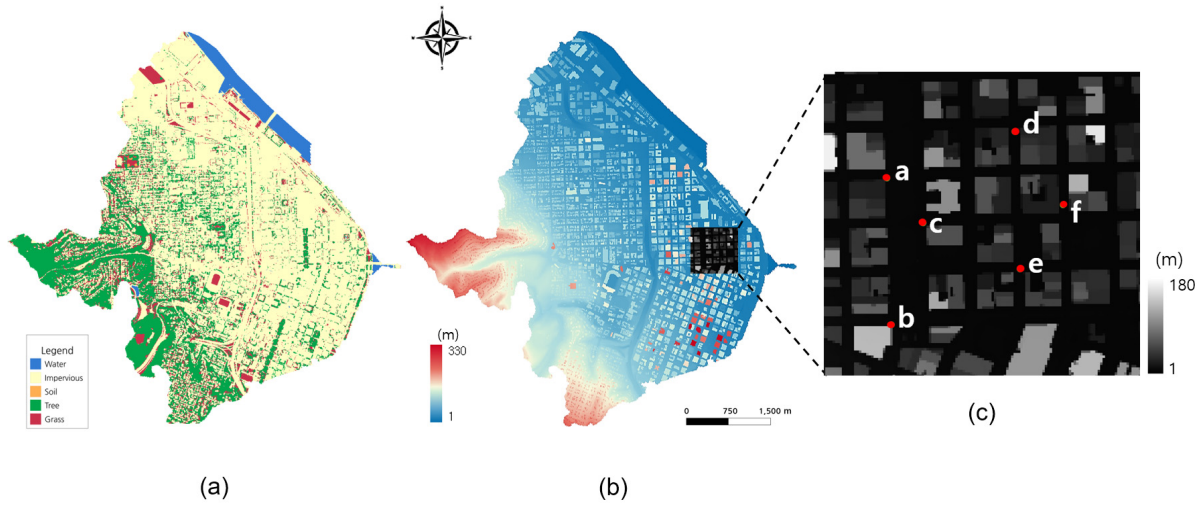


Fig. 4. Image of input data and target points of study area. (a) Land cover (4 m resolution), (b) Digital surface model (4 m resolution), (c) Study area and target points

도 6시간 강우량(52.32 mm/hr)을 1시간으로 환산 후, 무강우 2시간을 포함한 3시간 지속시간의 강우를 사용하였다. 두번째로, 강우사상에 따른 도시에서의 침수 및 침투 변화를 분석하기 위해 무강우 1시간을 포함한 2시간 지속시간의 25 mm/hr 가상강우를 사용하였다. 마지막으로, 실제 과거 2015년 12월 7일 7시부터 13시까지 6시간에 대한 실제 관측 강우의 시간분포를 고려한 가상 시계열 강우(총 강우량 44.5 mm/hr)가 물순환 해석 평가에 사용되었다.

2.5 침수 모의 성능 평가 기준

2.5.1 이진 패턴 측정

CAW 모형의 침수 면적에 대한 모의 성능을 평가하기 위해 이진 패턴 지표를 평가지표로 사용하였다. 세부적으로 적중률(Hit Rate, HR), 오경보율(False Alarm Ratio, FAR), 성공지수(Critical Success Index, CSI)를 사용하였고, 평가지표들은 0~1 사이의 값을 가진다(Wing *et al.*, 2017).

$$HR = \frac{M_1B_1}{M_1B_1 + M_0B_1} \quad (18a)$$

$$FAR = \frac{M_1B_0}{M_1B_0 + M_1B_1} \quad (18b)$$

$$CSI = \frac{M_1B_1}{M_1B_1 + M_0B_1 + M_1B_0} \quad (18c)$$

여기서, 기준 모형은 H12와 WCA2D 모형으로 두고, 각 모형

Table 1. Table of possible cell descriptors in a binary classification

	Inundated area by CAW	Non-inundated area by CAW
Inundated area by base model	M_1B_1	M_1B_0
Non-inundated area by base model	M_0B_1	M_0B_0

과 CAW 모형 간의 침수 면적을 비교하였다. 또한, 건물 밀집도가 높고, 도로가 좁은 도시 구역에서의 침수 여부를 판단하기 위한 임계값은 15 cm로 설정하였다(Jasour *et al.*, 2022; Wing *et al.*, 2017). M_1 은 기준이 되는 두 모형이 15 cm 이상 침수된 격자의 개수, B_1 은 CAW 모형이 15 cm 이상 침수된 격자의 개수를 의미하며, M_0B_0 는 모든 모형에서 침수되지 않은 격자의 개수들을 의미한다(Table 1).

2.5.2 RMSE

H12 및 WCA2D 모형과 CAW 모형 간의 침수 깊이 해석 정확도를 평가하기 위한 정량적 비교 지표로 RMSE (Root-Mean-Square Error)를 사용하였으며, 다음 Eq. (19)로 산정된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2} \quad (19)$$

여기서, N 은 전체 격자수이며, X_i 는 H12와 WCA2D 모형으로 모의된 최대 침수심, \hat{X}_i 는 CAW 모형으로 모의한 최대 침

수심이다. RMSE가 낮을수록 모형 간의 유사도가 높아짐을 의미한다.

3. 결과 및 분석

3.1 CAW 침수 모의 결과

3.1.1 최대 침수심 및 침수 범위도 비교

CAW 모형으로 52.32 mm/hr의 3시간 지속강우에 대해 모의한 2차원 최대 수심 예측 결과는 Fig. 5와 같다. 동일한 강우 사상에 대해 Fig. 5(b)는 H12 모형으로, Fig. 5(c)는 WCA2D 모형으로 모의한 결과이며, 각 모형과 CAW 모형 간의 최대 침수심 차이를 나타낸 결과가 Figs. 5(d) and 5(e)와 같다. 최대 침수심 모의 결과는 전체 시간 단계에 대해 모의 시간 간격마다 각 격자에서 모의된 수심이 가장 최대일 때의 침수심을 표시하였으며, 전반적으로 도로나 건물 주변에서 세 모형의 침수 영역이 유사하게 모의되는 것으로 확인되었다. 특히, CAW 모형과 WCA2D 모형 간의 침수 양상 및 최대 침수심의 범위가 유사했으며, 이는 CAW 모형이 WCA2D 모형처럼 확산파에 의한 2차원 지표면 흐름을 적절하게 모사하였기 때문으로 판단된다. 한편, H12 모형으로 모의한 결과의 좌측 도로

영역의 침수 분포가 적게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 H12 모형이 운동파 이론에 근거해 지표면 흐름을 해석하기 때문에 침수 영역이 Fig. 5(d) 만큼 적게 분포된 것으로 분석된다. 또한, H12 모형의 경우 이웃 격자로 흘러갈 물의 양을 계산할 때 중앙 격자에서 물을 남겨두지 않고 모두 계산하여 이동하지만, CAW와 WCA2D 모형의 경우 수치적 안정성을 위해 가중치 규칙을 주어 이동 가능한 물 부피의 일부를 유지하기 때문에 침수된 영역이 상대적으로 더 넓게 분포된 것이라 평가되었다. 세부 지점에 대한 침수 시계열 결과는 3.1.2절에서 분석한다.

H12 및 WCA2D 모형과의 최대 침수 범위도에 대한 유사도 검증을 HR, FAR, CSI로 평가하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 Table 2와 같다. 이는, 침수 발생 기준 임계값 15 cm에 대해 CAW 모형의 침수 발생 예측 및 침수 미발생 예측에 대한 유사도 검증 지수를 각 모형과 비교한 결과를 나타낸다. CAW 모형과 H12 및 WCA2D의 HR은 각각 0.77, 0.91로 높은 비율로 일치했다. FAR은 각각 0.04, 0.02의 값을 가지며, 0에 가까운 오경보 비율을 나타냈다. CSI 역시 HR과 마찬가지로 각각 0.74, 0.90의 값을 나타내는 것으로 보아, 전반적으로 같은 확산파 방정식으로 흐름을 해석하는 셀룰러 오토마타 기반 모형

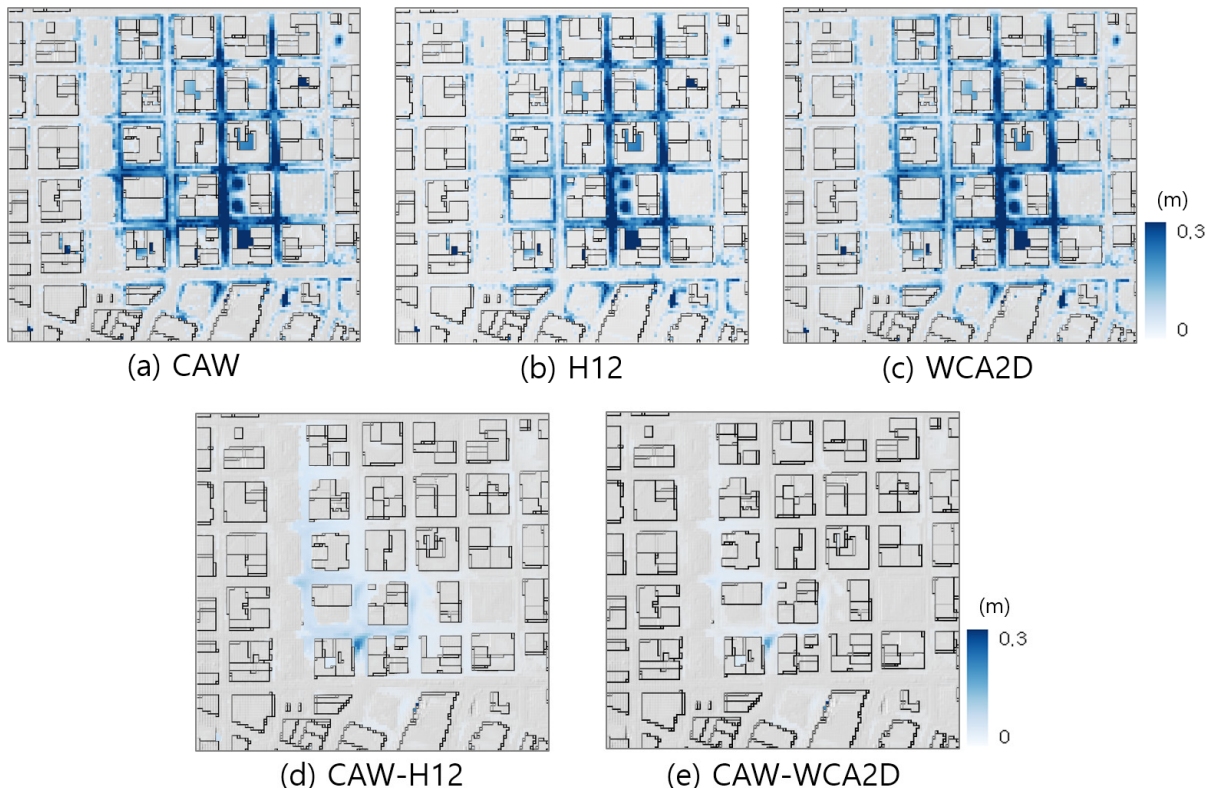


Fig. 5. Comparison of maximum inundation depth results of CAW, H12, and WCA2D ((d), (e): difference between CAW model and H12, WCA2D model)

인 CAW와 WCA2D가 공간적으로 가장 유사한 침수 예측 성능을 보이는 것으로 확인되었다. 반면, H12 모형을 기준(base model)으로 비교 시 CAW에서 상대적으로 많은 오경보가 발생했지만, WCA2D 모형을 기준으로 비교했을 때 HR 및 CSI 지수가 0.7 이상의 비교적 높은 유사도를 나타냈다.

3.1.2 침수 시계열 비교

Fig. 7은 검증 지점들에 대한 각 모형의 시간대별 수심을 비교한 결과이다. 모의 시간 간격은 물리모형인 H12의 경우 Courant-Friedrichs-Lewy 조건을 만족하는 0.1초, 물리적 조건의 영향을 상대적으로 덜 받는 CAW와 WCA2D 모형은 0.5 초로 설정하였다. 사전 시험 모의시, CAW와 WCA2D는 모의 시간 간격 1초 이하에서 계산결과에 차이가 거의 없었다. 각 지점들에 대한 최대 침수심과 CAW 모형 및 H12, WCA2D

모형 간의 RMSE 값은 다음 Table 3과 같다. Fig. 7의 결과를 보았을 때, (a)와 (c) 지점에서 세 모형 간의 침수 시계열 결과가 가장 유사한 것으로 나타났으며, 전체 모의 시간에 대해 H12 모형과 비교한 RMSE값은 각각 1.16 cm, 1.26 cm, WCA2D 모형과 비교한 결과는 1.13 cm, 2.42 cm로 나타났다. 반면, (b), (d), (e), (f) 지점은 CAW 모형과 H12 모형 간의 RMSE 값과 WCA2D 모형 간의 RMSE 값이 상이한 결과를 나타냈다. H12의 경우, 6.70 cm, 3.25 cm, 7.93 cm, 6.03 cm 로 크게 나타났으며, WCA2D의 경우 2.14 cm, 2.48 cm, 1.00 cm, 1.35 cm 로 오차가 비교적 적게 나타났다. 이는 앞서 살펴본 지표면 침수 면적에 대한 모의 결과와 마찬가지로 지배방정식에 의한 차이 또는 각 모형의 계산 시간 간격의 차이에 대한 영향에서 기인한 오차로 분석된다.

Table 3에서는 각 지점의 침수 시계열에 대한 RMSE 값과

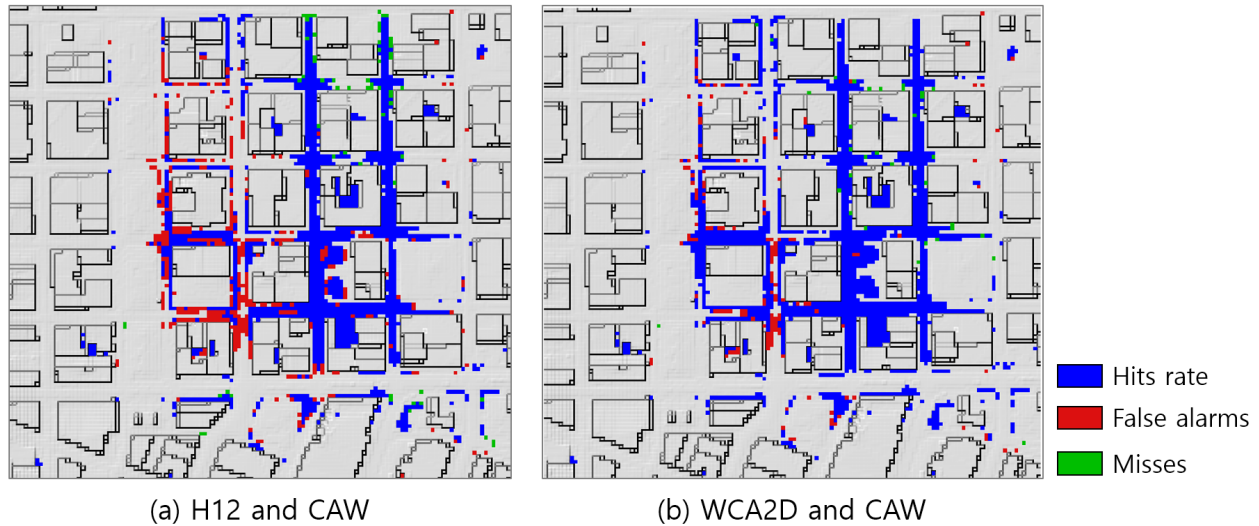


Fig. 6. Comparison of the accuracy of the simulated maximum inundation map (Hit: M_1B_1 , False alarm: M_1B_0 , Miss: M_0B_1)

Table 2. Indices error of the CAW, H12 and WCA2D

	HR	FAR	CSI
H12 and CAW	0.77	0.04	0.74
WCA2D and CAW	0.91	0.02	0.90

Table 3. Maximum inundation depth and RMSE of the CAW, H12, and WCA2D

Points	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
CAW (cm)	16.8	22.7	18.0	25.6	43.3	42.8
H12 (cm)	15.4	13.3	18.7	26.2	38.6	41.6
WCA2D (cm)	15.5	18.2	18.9	25.7	42.3	43.0
RMSE (H12 and CAW) (cm)	1.16	6.70	1.26	3.25	7.93	6.03
RMSE (WCA2D and CAW) (cm)	1.13	2.14	2.42	2.48	1.00	1.35

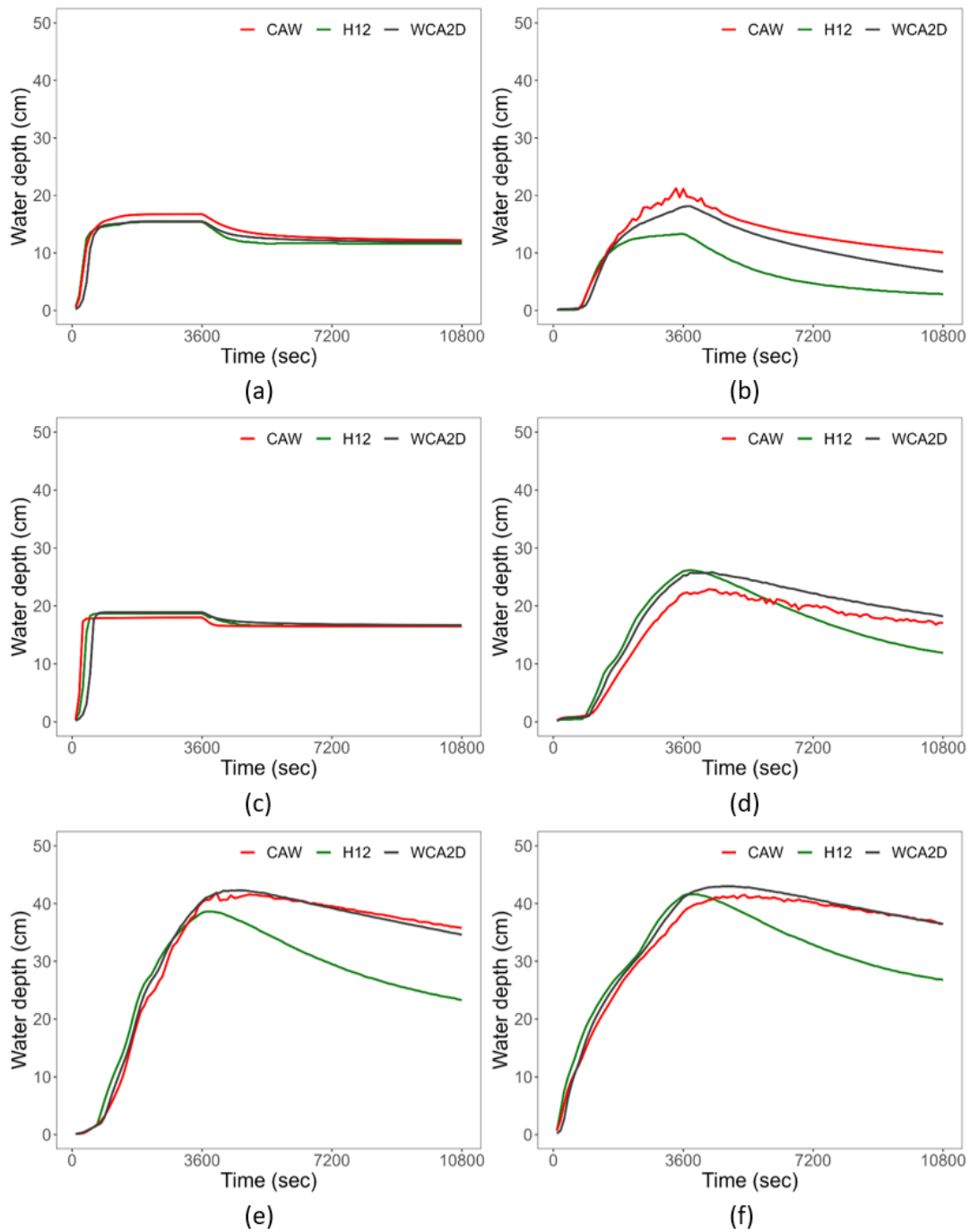


Fig. 7. Comparison of inundation time series for CAW, H12, and WCA2D

각 모형별 최대 침수심 값의 차이가 다른 경향을 나타냈다. (f) 지점에서의 H12로 모의한 최대 침수심 결과와 CAW로 모의한 결과의 차이는 1.2 cm로 다른 지점에 비해 비교적 적은 차이가 나타나지만 침수 시계열에 대한 RMSE가 6.03 cm로 나타났다. 마찬가지로, (c) 지점에서의 WCA2D 모형과 CAW 모형의 최대 침수심 차이는 0.1 cm로 그 차이가 아주 적었지만, 오차는

2.42 cm로 비교적 높게 산정되었다. Table 3에 표시된 최대 침수심 값들은 전체 모의 시간 중 각 모형이 최대의 침수심을 나타내는 시간대의 수심을 표기한 것으로, 동일한 시간대에 대한 값을 나타내지 않을 수 있다. 반면, RMSE는 모든 시간대에 대한 값들을 전부 고려하여 측정된 값이기 때문에 RMSE 값과 각 모형의 최대 침수심 값의 차이가 다른 경향을 나타내

는 것을 확인할 수 있다.

최대 침수 범위에 대한 정량적 비교와 더불어 지점별 침수 시계열 비교를 통해 본 모형이 복잡한 수리방정식을 해결하지 않고도 간단한 전환규칙을 통해 물리적인 침수 기작을 잘 묘사할 수 있음을 확인하였다. 그러나 일부 지점에 대해 침수 해석 방식에 의한 미세한 진동 문제가 발생했으며, 이는 후속 연구를 통한 개선이 필요한 부분이다. 예를 들어, 물리기반 모형의 sub-grid scale 기법(Yu and Lane, 2006; 2011)에서 주로 사용되는 격자별 침수부피 재산정 및 오차 보정 방식 등의 도입을 통해 CA 알고리즘 연산의 안정성을 추가적으로 향상할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 CAW 물순환 모의 결과

3.2.1 강우 특성에 따른 침수 및 침투 모의 결과

Fig. 8은 CAW 모형으로 모의한 최대 침수심 및 누적 침투량을 모의한 결과이다. 계산 효율을 위해 모의의 시간 간격은 1초로 두고 모의를 진행하였다. Figs. 8(b) and 8(c)의 강우는 52.32 mm/hr이며, Figs. 8(e) and 8(f)는 50% 적은 25 mm/hr로 모의한 결과이다. 상대적으로 강우가 더 많았던 Figs. 8(b) and 8(c)의 경우 Figs. 8(e) and 8(f)에 비해 누적 침투량과 최대 침수심 모두 높게 나타남에 따라, CAW 모형이 토지피복 특성에 따른 침수 및 침투 모듈이 잘 반영된 것을 확인할 수 있다.

Table 4는 강우가 감소함에 따라 달라지는 부피 차이를 정량적으로 나타낸 결과이다. 최대 침수심의 부피는 174.77 m³

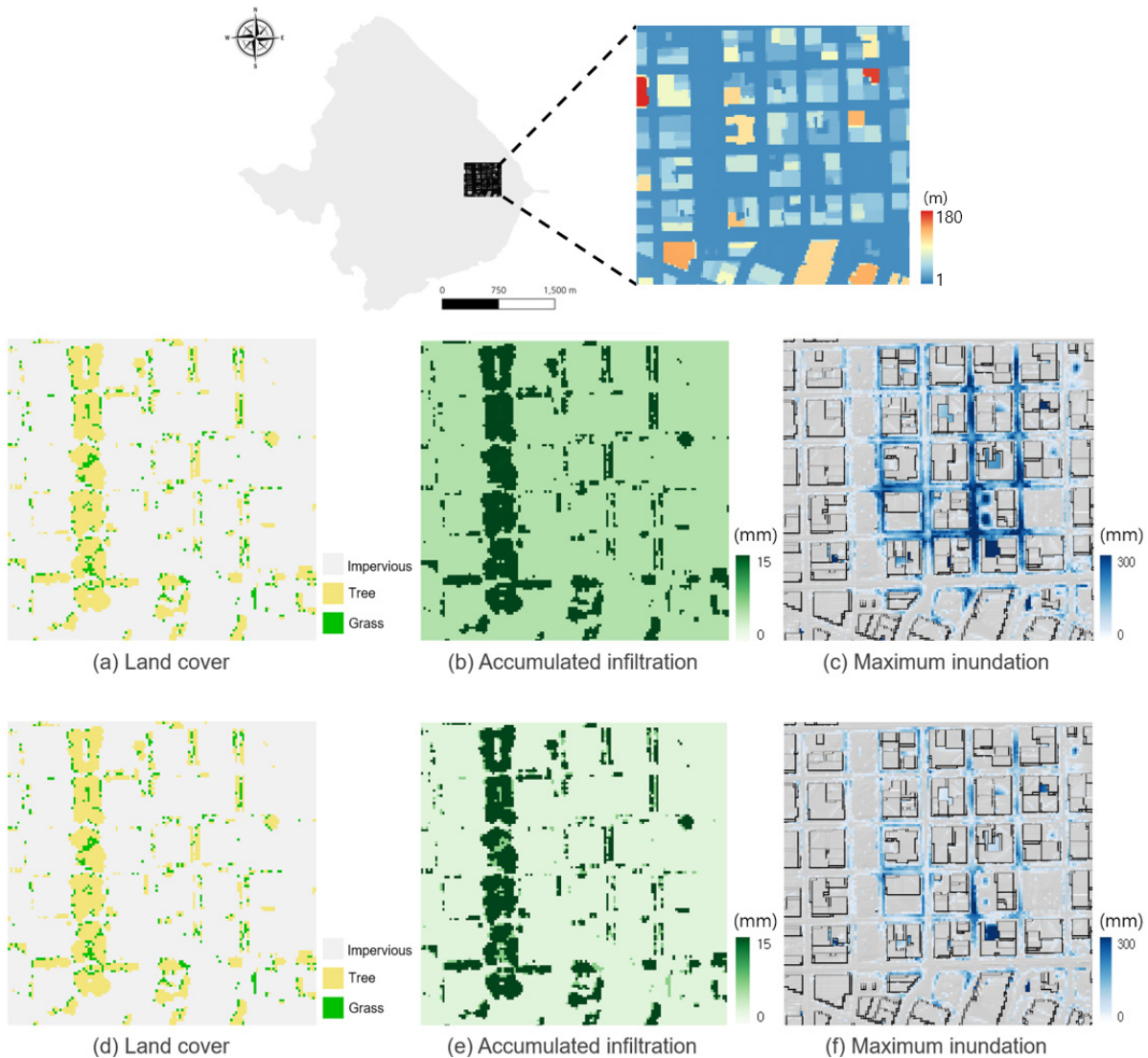


Fig. 8. Results of simulation of water cycle of CAW model according to rainfall ((a)~(c) rainfall: 52.32 mm/hr and (d)~(f) rainfall: 25 mm/hr)

에서 88.44 m³로 86.33 m³ 줄어들었고, 누적 침투 부피는 21.12 m³ 만큼 줄어들었다. 즉, 강우사상에 따른 최대 침수심 및 누적 침투 부피 감소 변화가 강우가 줄어든 양과 비례했다. 이를 통해, 본 모형이 침수 및 침투 연계 해석이 가능한 모형임을 확인하였다.

을 확인하였다.

3.2.2 지표 특성에 따른 침수 및 침투 결과

본 절에서는 산지와 도심지 유역에 44.5 mm/hr의 가상 시계열 강우로 모의한 최대 침수 및 누적 침투 결과와 토지피복의 투수 및 불투수 비율에 따른 단위 면적당 누적 침투량과 최대 침수심 값에 대한 결과를 나타낸다(Fig. 9, Table 5). Fig. 9(A), (B)는 포틀랜드 유역 중 산지와 도심지의 특성을 가장 잘 나타내는 지역이다. Figs. 9(b) and 9(c)는 산지 유역에서의 최대 침수심 및 누적 침투량을 나타내고, Figs. 9(e) and 9(f)는

Table 4. Volume of the CAW water cycle results

Rainfall	Maximum inundation	Accumulated infiltration
52.32 mm/hr	174.77 m ³	39.07 m ³
25 mm/hr	88.44 m ³	17.95 m ³

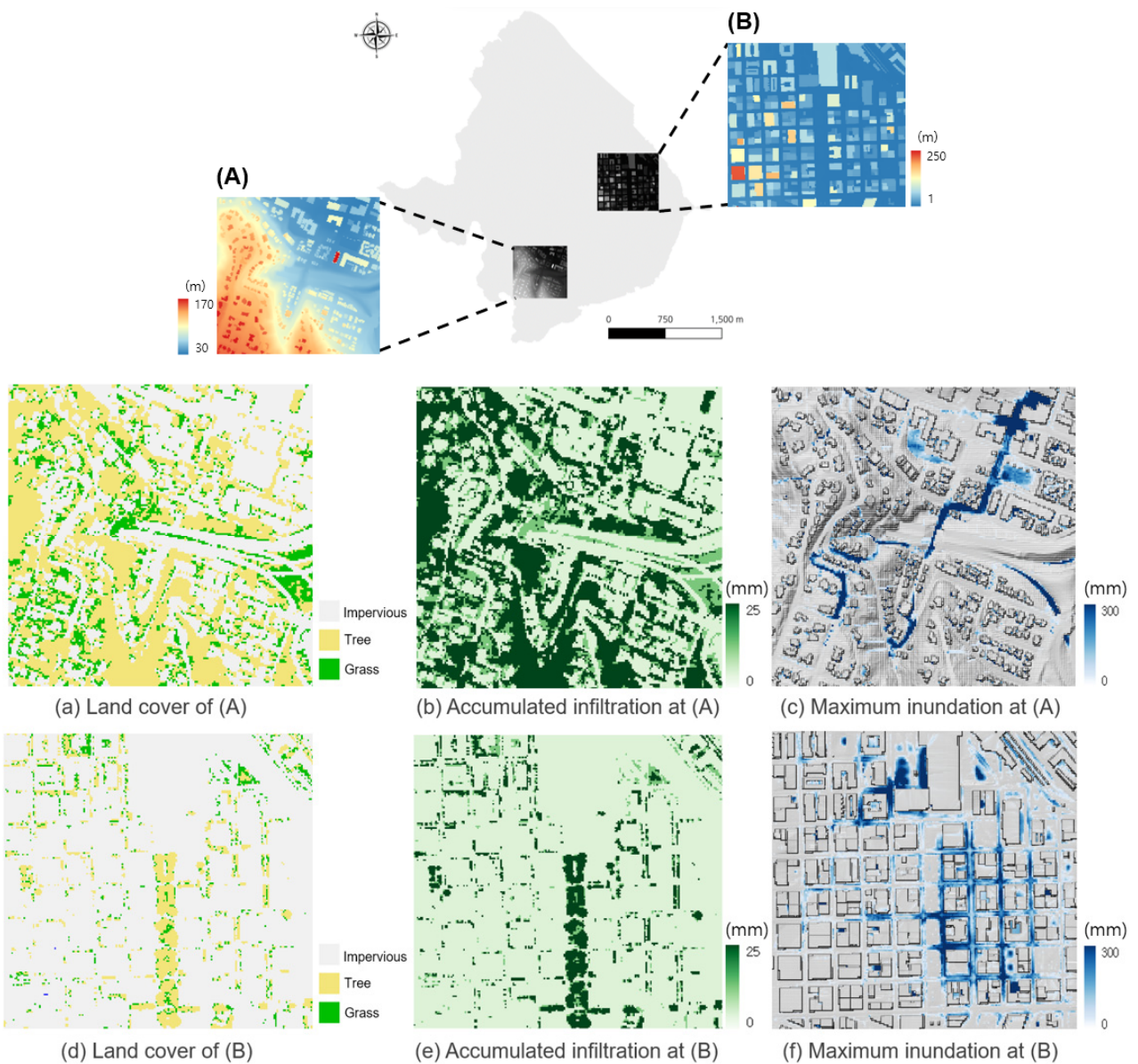


Fig. 9. Results of simulation of water cycle of CAW model according to land cover about (A) and (B) (Rainfall: 44.5 mm/hr)

Table 5. Accumulated infiltration and maximum inundation depth per unit area by land cover rate

		Location (A)	Location (B)
Area (m ²)		47,861	60,115
Land cover rate	Impervious surface	49%	87%
	Tree and grass	51%	13%
Accumulated infiltration per unit area (mm/m ²)		9.11	4.16
Maximum inundation depth per unit area (mm/m ²)		21.05	23.24

도심지 구역에서의 최대 침수심 및 누적 침투량을 나타낸다. 토지피복 특성에 따른 투수의 영향만을 고려하기 위해 토양의 종류는 모래, 미사, 점토 입자가 균형있게 혼합된 사질 양토 (sandy loam)로 가정하였다.

모의 지역으로 선정한 산지(47,861 m²)의 불투수 면적은 49%였으며, 도심지(60,115 m²)는 87%가 불투수 면적으로 분석되었다. 모의 결과 도시 지역이 산지에 비해 불투수 면적이 많기 때문에 단위 면적당 침수되는 부피가 더 크고, 그 범위가 더 넓었다. 또한, 산지의 경우 대부분 나무, 잔디와 같은 식생으로 이루어져 있어 불투수율이 많은 도심지 보다 상대적으로 고도가 낮은 도로와 건물 주변으로 물이 집중되는 양상을 확인할 수 있었다(Fig. 9). 또한, 토지피복 비율의 차이를 고려하여 산지 구역과 도시 구역 간 침투 효율의 차이를 평가해본 결과, 불투수 면적의 비율이 높을수록 단위면적당 침수되는 양이 4.16 mm/m²으로 적었으며, 최대 침수심의 경우 도심에서 2.19 mm/m² 만큼 더 깊은 것으로 나타났다.

CAW 모형이 지표 특성에 따라 침수 및 침투의 물리적 기작이 잘 반영할 수 있음을 확인하였지만, 실제 물순환을 모의하기 위해서는 추가적으로 증발 및 증발산량, 기저유출량 등을 추가적으로 고려한 물수지 분석과 물순환 요소에 미치는 영향에 대한 민감도 분석 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 셀룰러 오토마타 기법을 기반으로 고해상도 도시침수 및 물순환 연계 해석 모형인 CAW 모형을 개발하고, 기존 물리 기반 침수 해석 모형 H12 및 셀룰러 오토마타 기반 2차원 침수해석 모형 WCA2D의 결과와 비교하여 적용성을 검증하였다. 또한, 다양한 강우 및 지표 특성에 따라 침수 및 물순환 모의가 가능함을 확인하였다. 본 연구의 주요 성과를 요약하면 다음과 같다.

고해상도 도시침수 및 물순환 해석 모형인 CAW는 가중치 기반 알고리즘을 통해 각 시간 단계에서 발생하는 수치적 불

안정성을 완화했으며, 기존의 모형과 최대 침수심 및 범위를 비교한 결과, 확산파 가정 기반 셀룰러 오토마타 기반 2차원 침수해석 모형인 WCA2D와 침수 해석 결과의 유사도가 높고, 운동파를 모사하는 물리 기반 모형 H12와는 국소적인 차이가 있음을 확인하였다.

모형 간의 지점별 침수심 시계열 변화를 비교한 결과, H12, WCA2D에 대한 CAW의 평균 RMSE는 각각 4.4 cm, 1.3 cm였으며, 최대 침수 범위도의 경우 모형별로 다른 흐름 지배방정식으로 인해 침수심, 침수 면적에 대한 차이가 있었지만, WCA2D와 CAW 모형의 유사도가 HR 0.91, FAR 0.02, CSI 0.90로 가장 근접했다

다양한 강우조건 및 토지피복에 따른 CAW 모형의 침수 및 침투 결과를 정량적으로 분석한 결과, 불투수율이 41% 더 높은 지역에서의 침투 및 최대 침수심이 각각 54%(4.16 mm/m²) 감소 및 10%(2.19 mm/m²) 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해, 토지피복과 토양 조건에 따라 침수와 물순환 요소 간의 연계 해석이 가능한 모형임을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 CAW 모형은 복잡한 물리적 과정을 셀룰러 오토마타 기반의 단순한 전환규칙을 통해 모의할 수 있어 고해상도 정보를 이용한 효율적인 침수 해석이 가능하다. 복잡한 물리적 과정의 침수 범위 및 침수심 시계열 변화를 잘 모사하는 것으로 분석되었다. 다만, 운동파 영향이 지배적인 구간에서는 다른 확산파 기반 모형과 마찬가지로 침수 범위도의 차이가 발생하여 주의가 필요하며, 이는 시공간적 조건에 따른 격자 크기 및 계산 시간 간격의 범위를 유연하게 설정하여 모형의 효율성을 향상시키는 후속 연구가 필요한 부분이다. 또한, 물순환 요소 간의 연계 해석을 통해 침수뿐만 아니라 토양수분량, 기저유출량 등을 해석할 수 있어 지속 가능한 도시 계획 수립을 위한 도구로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 후속 연구에서는 온도, 습도, 일사량 등과 같은 기상 데이터를 기반으로 도시 내 증발산 추정 모듈과 하수관거 흐름 모듈의 개발을 통해 보다 확장된 물순환 분석이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (202103770001).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Aston, A.R. (1979). "Rainfall interception by eight small trees." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 42, No. 3, pp. 383-396.
- Brasiel, H.C., and Lima, D.A. (2023). "Exploring the influence of wind, vegetation and water sources on the spread of forest fires in the Brazilian Cerrado biome using cellular automata." *Proceedings of the 14th Workshop of Applied Computing for the Management of the Environment and Natural Resources (WCAMA)*, SBC, Porto Alegre, RS, Brasil, pp. 61-70.
- Choi, H., Lee, S., Woo, H., and Noh, S.J. (2023). "High-resolution urban flood modeling using cellular automata-based WCA2D in the Oncheon-cheon catchment in Busan, South Korea." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 43, No. 5, pp. 587-599.
- Cooley, A., and Chang, H. (2017). "Precipitation intensity trend detection using hourly and daily observations in Portland, Oregon" *Climate*, MDPI, Vol. 5, No. 1, 10.
- Furnari, L., De Rango, A., Senatore, A., and Mendicino, G. (2024). "HydroCAL: A novel integrated surface-subsurface hydrological model based on the cellular automata paradigm." *Advances in Water Resources*, Vol. 185, 104623.
- Ghimire, B., Chen, A.S., Guidolin, M., Keedwell, E.C., Djordjević, S., and Savić, D.A. (2013). "Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach." *Journal of Hydroinformatics*, IWA, Vol. 15, No. 3, pp. 676-686.
- Guidolin, M., Chen, A.S., Ghimire, B., Keedwell, E.C., Djordjević, S., and Savić, D.A. (2016). "A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis." *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, Vol. 84, pp. 378-394.
- Guidolin, M., Duncan, A., Ghimire, B., Gibson, M., Keedwell, E., Chen, A.S., Djordjević, S., and Savić, D. (2012). "CADDIES: A new framework for rapid development of parallel cellular automata algorithms for flood simulation." *Proceedings the 10th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2012)*, Hamburg, Germany.
- Jamali, B., Bach, P.M., Cunningham, L., and Deletic, A. (2019). "A cellular automata fast flood evaluation (CA-ffé) model." *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 6, pp. 4936-4953.
- Jang, C.H., Kim, D.H., and Kim, H.J. (2019). "Development of Dynamic Water resources Assessment Tool (DWAT)." *Proceedings KSCE 2019 Convention*, p. 297.
- Jasour, Z.Y., Reilly, A.C., Tonn, G.L., and Ferreira, C.M. (2022). "Roadway flooding as a bellwether for household retreat in rural, coastal regions vulnerable to sea-level rise." *Climate Risk Management*, Elsevier, Vol. 36, 100425.
- Kassogué, H., Bernoussi, A.S., Amharref, M., and Ouardouz, M. (2017). "Cellular automata approach for modelling climate change impact on water resources." *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 21-36.
- Kawaike, K. (2002). *Study on flood analysis method in urban area and its application to water resistance evaluation*. Ph. D. dissertation, University of Kyoto, Kyoto, Japanese.
- Kim, B., Noh, S.J., and Lee, S. (2022). "Retrospective analysis of the urban inundation and the impact assessment of the flood barrier using H12 model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 55, No. 5, pp. 345-356.
- Kim, H.J., Jang, C.H., and Noh, S.J. (2012). "Development and application of the catchment hydrologic cycle assessment tool considering urbanization (I) - Model development -." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 2, pp. 203-215.
- Lee, S. (2024). *Development of cellular automata-based urban inundation and water cycle analysis model*. Master Thesis, Kumoh National Institute of Technology.
- Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H. (2012). "Study on Inlet Discharge coefficient through the different shapes of storm drains for urban inundation analysis." *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, JSCE, Vol. 68, No. 4, pp. 31-36.
- Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H. (2013). "Experimental validation of interaction model at storm drain for development of integrated urban inundation model." *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, JSCE, Vol. 69, No. 4, pp. 109-114.
- Lee, S., Noh, S.J., Jang, C., 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*, KWRA, Vol. 50, No. 4, pp. 263-275.
- Lee, S.J., Kim, Y.O., Lee, S.H., and Lee K.S. (2005). "Water cycle simulation for the Dorimcheon Catchment Using WEP model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 6, pp. 449-460.
- Lee, W.H., Lee, J.H., Park, J.H., and Choi, H.S. (2016a). "The relationship between parameters of the SWAT model and the geomorphological characteristics of a watershed." *Ecology and Resilient Infrastructure*, KSEIE, Vol. 3, No. 1, pp. 35-45.
- Lee, Y.G., Cho, Y.H., and Kim, S.J. (2016b). "Prediction of land-use change based on urban growth scenario in South Korea using CLUE-s model" *Journal of the Korean Association of Geo-*

- graphic Information Studies*, KAGIS, Vol. 19, No. 3, pp. 75-88.
- Liu, L., Liu, Y., Wang, X., Yu, D., Liu, K., Huang, H., and Hu, G. (2015). "Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 3, pp. 381-391.
- Noh, S.J., Kim, H.J., Jang, C.H., and Lee, Y.J. (2009). "Development of hydrologic components of CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 159-163.
- 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.
- Noh, S.J., Lee, S., An, H., Kawaike, K., and Nakagawa, H. (2016). "Ensemble urban flood simulation in comparison with laboratory-scale experiments: Impact of interaction models for manhole, sewer pipe, and surface flow." *Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 97, pp. 25-37.
- Shao, Q., Weatherley, D., Huang, L., and Baumgartl, T. (2015). "RunCA: A cellular automata model for simulating surface runoff at different scales" *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 529, No. 3, pp. 816-829.
- Von Hoyningen-Huene, J. (1983). *Die Interzeption des Niederschlages in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen*. Report 57, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Hamburg, Berlin, pp. 1-66.
- Wijaya, O.T., and Yang, T.H. (2021). "A novel hybrid approach based on cellular automata and a digital elevation model for rapid flood assessment." *Water*, MDPI, Vol. 13, No. 9, 1311.
- Wing, O.E., Bates, P.D., Sampson, C.C., Smith, A.M., Johnson, K.A., and Erickson, T.A. (2017). "Validation of a 30 m resolution flood hazard model of the conterminous United States." *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 9, pp. 7968-7986.
- Yoon, D., and Koh, J.H. (2012). "A study on analysis of landslide disaster area using cellular Automata: An application to Umyeonsan, Seocho-Gu, Seoul, Korea." *Spatial Information Research*, KSIS, Vol. 20, No. 1, pp. 9-18.
- Yu, D., and Lane, S.N. (2006). "Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 2: development of a sub-grid-scale treatment." *Hydrological Processes*, Vol. 20, No. 7, pp. 1567-1583.
- Yu, D., and Lane, S.N. (2011). "Interactions between subgrid-scale resolution, feature representation and grid-scale resolution in flood inundation modelling." *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 1, pp. 36-53.