

유전 알고리즘 연계 격자기반 홍수모형 개발*

이승민¹·유문무²·김형수³·김수준^{4**}

Development of a Grid based Flood Simulation Model with Coupling Genetic Algorithm*

Lee, Seungmin¹·Yoo, Munmu²·Kim, Hung Soo³·Kim, Soojun^{4**}

요 약

국내에서는 홍수 대응에 있어 일반적으로 홍수량 산정지점을 선정하여 지점별 설계홍수량을 기준으로 홍수에 대응하고 있다. 이러한 방법은 강우유출 모형의 결과에만 의존하며, 유역에서 실제로 발생한 홍수피해에 따른 검·보정을 수행하지 않아 적절한 대응이 이뤄지지 않은 사례가 많은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수치표고모형, 강우량, 토지피복도, 정밀토양도를 활용하여 격자단위 홍수량 산정 모형을 개발하고, 이를 전역 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘과 통합하여 실제 수위관측소의 관측치를 기반으로 매개변수를 보정하였다. 격자단위 홍수량 산정에는 모든 격자별로 운동파(kinematic wave) 공식, Gree-Ampt 방법이 포함된다. 유전 알고리즘의 적합도로는 분석 대상 유역 내에 위치한 수위관측소의 관측치와 해당 위치에서 모의된 홍수량 간 RMSE를 산정하여 그 값이 적을수록 적합도가 높게 산정되도록 구성하였다. 이 모형은 유역의 특성을 실제 발생한 하천 유량 바탕으로 강우유출 모형의 매개변수를 보정하여 기존 실무에서 사용되는 방법에 비해 정확하게 격자단위 홍수량을 모의할 수 있다. 이러한 결과는 설계 홍수량 산정 이후에 수행되어야 하는 위험도 평가나 예측을 정밀하게 할 수 있는 기반이 되어 재난 대응 담당자들의 의사결정에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 강우유출모형, 격자단위 모의, 유전 알고리즘, 홍수

2024년 12월 10일 접수 Received on December 10, 2024 / 2024년 12월 17일 수정 Revised on December 17, 2024 / 2024년 12월 19일 심사완료 Accepted on December 19, 2024

* 본 연구는 자연재난 정책연계형 기술개발사업의 연구비지원(기후변화 대응 재해예방사업 표준화 기술개발)(과제번호: 2021-MOIS35-004)에 의해 수행되었습니다.

1 인하대학교 스마트시티공학과 석사과정 / Master's Course, Program in Smart City Engineering, Inha University

2 한국스마트워터그리드학회 부회장, 공학박사 / Ph. D, Vice President, The Society of Korean Smart Water Grid

3 인하대학교 사회인프라공학과 교수, 공학박사 / Ph. D, Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

4 교신저자·인하대학교 사회인프라공학과 교수, 공학박사 / Ph. D, Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

** Corresponding Author E-mail: sk325@inha.ac.kr

ABSTRACT

In South Korea, flood response strategies typically rely on determining specific estimation points for flood discharge and responding based on the design flood discharge at each point. However, this approach solely depends on rainfall-runoff models and often lacks calibration or validation against actual flood damage within the watershed, leading to cases of inadequate responses. To address this issue, this study develops a grid-based flood discharge estimation model using digital elevation models (DEMs), rainfall data, land cover maps, and soil type maps. The model is integrated with a global optimization algorithm, specifically the genetic algorithm, to calibrate parameters based on observed values from actual water level stations. The grid-based flood estimation incorporates the Kinematic wave equation, and the Green-Ampt method for each grid. The fitness function of the genetic algorithm was designed to minimize the RMSE between the observed water discharge at stations within the study watershed and the simulated flood levels at corresponding locations, with a lower RMSE indicating higher fitness. By calibrating rainfall-runoff model parameters based on actual river water discharges, this model achieves a more accurate simulation of grid-based flood discharge compared to conventional methods used in practice. These results provide a foundation for conducting more precise risk assessments and forecasts following design flood estimation, which could support improved decision-making for disaster response authorities.

KEYWORDS : Rainfall-runoff model, Grid-based Simulation, Genetic Algorithm, Flood

서론

최근 기후변화에 따라 태풍 및 집중호우 등 재난의 발생빈도와 강도가 증가하고 있다. 또한, 도시화 등으로 인해 시가지 형성에 따른 불투수 면적이 증가하면서 침수로 인한 인명·재산피해 또한 증가하고 있다(AON, 2021; Kim, 2022; Shin et al., 2014). 국내에서는 홍수에 대한 대응을 위하여 여러 설계와 계획을 수립하고 있다. 대부분의 홍수 대응 시스템은 각 유역을 대표하는 홍수량 산정 지점을 선별하여 지점단위 홍수량을 계산하고, 이를 바탕으로 하천의 계획 홍수위를 산정하거나 우수관거의 내수배제 능력을 고려하여 침수범위 및 깊이를 모의한다. 분석을 수행할 때에는 「홍수량 산정 표준지침(환경부, 2019)」 등과 같이 기수립된 지침이나 오래전에 개발되어 일반화되어 있는 계수들을 그대로 적용하거나 전문가의 경험적인 판단으로

조정되는 매개변수들을 적용한다(ME, 2019). 이에 따라 현재의 유출 특성을 올바르게 정의하지 못해 정확도가 떨어지는 사례가 증가하고 있다. 또한 홍수 대응 과정은 강우유출 모형의 결과에 의존하며, 유역에서 실제로 발생한 홍수피해 또는 실제 수위관측치에 따른 검·보정이 이루어지지 않아 적절한 대응을 하지 못한 사례가 발생하고 있다. 따라서, 지역별 유출특성을 올바르게 정의하여 매개변수를 탐색하고, 최적의 강우유출모형을 개발할 필요성이 있다.

지역별 유출특성을 고려한 매개변수 최적화 및 격자단위 홍수 분석에 대한 연구를 진행하기 위하여 선행연구를 조사하였다. Choi et al. (2008)은 격자 형태로 제공되는 지형 및 수문 자료를 효과적으로 활용하여 단기간의 강우-유출 과정을 모의하기 위한 물리적 모형 기반의 분포형 모형인 GRM (Grid based Rainfall-runoff Model)을 개발하였다. 이를 통해 기존 모형들이 지형 및 수문 자료의 격자 형태 처리

를 충분히 반영하지 못하는 문제를 해결하고자 하였다. GRM은 지표면 흐름과 하도 흐름을 모의하기 위해 운동과 방정식을 사용하고, 침투 과정을 모의하기 위해 Green-Ampt 모형을 적용하였다. 지배 방정식은 유한체적법으로 이산화하였으며, 선형 방정식의 해를 구하기 위해 TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm)를, 비선형 항의 해를 구하기 위해 Newton-Raphson 방법을 적용하였다. 개발된 모형을 가상의 단순화된 유역에 적용하여 VfloTM 모형의 결과와 비교하여 검증한 결과 합리적인 모의 결과를 도출하였음을 확인하였다. 또한, 위천 유역에 적용하여 실측 유량과 비교한 결과, 모의된 수문곡선이 관측된 수문곡선과 잘 일치함을 확인하였다 (Choi et al., 2008).

Lee et al. (2011)은 국내 다목적 댐을 대상으로 과거와 강우-유출 모형을 활용한 홍수량 산정 방식을 유역 면적 규모별로 비교 분석하였다. 특히 강우량, 시간분포, 유효우량 산정방법, 매개변수 추정 및 기저유량 등 다양한 인자가 홍수량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 최종적으로 향후 댐 설계시 홍수량 산정 방안으로 Huff 방법 및 Clark 단위도 등은 기준에 따라 동일하게 적용하고, 관측치 신뢰성이 높은 호우사상에 대하여 집중시간과 저류상수만을 최적화 대상으로 설정하는 방안을 제시하였다. 그러나 해당 연구는 다양한 인자에 따른 영향을 분석하였으나, 실제 홍수 피해자료를 활용한 검증이 부족하여 실무 적용에 한계가 있을 수 있음을 언급하였다(Lee et al., 2011).

Choi et al. (2015)에서는 기존의 설계홍수량 산정 방법인 설계강우법과 강우량을 이용하여 유출을 모의하고 최대유출량을 빈도해석하는 방법을 비교 분석하였다. 대상 유역은 남강댐, 소양강댐 등 7개 유역으로, 실측 유출량 빈도해석 자료를 참값으로 가정하여 분석하였다. 그 결과 일부 유역에서는 강우-유출해석 후 연최대 침투홍수량 빈도해석 방법이, 다른 유역에서는 설계강우법이 실측 유출량 빈도해석 값에 더 가까운 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 유역 특성에 따라 적절한 방법을 선

택해야 함을 시사한다(Choi et al., 2015).

또한 홍수 등 재난의 대응을 위한 연구로 기존 물리모형의 보완 및 개선, 위험도 평가 방법론의 개발, 예·경보 발령 기준 수립, AI 기반 예측 등의 다양한 연구가 진행되고 있다(Choi, 2019; Choi et al., 2018, 2019; Jung et al., 2021; Kim et al., 2022; Lee et al., 2023). 선행연구 조사에 따르면 재난에 대응하기 위한 홍수 모의는 각 유역 또는 지역의 특성을 올바르게 반영하여 정확한 모의를 수행하기 위한 방법의 개발이 필요하며, 적절한 매개변수 추정이나 실무에 적용이 가능한 시스템의 개발이 필요한 것으로 확인되었다.

따라서, 본 연구에서는 기존 물리모형의 모의 결과에만 의존하여 유역의 실제 유출특성을 올바르게 반영하지 못하거나 지점별 홍수량만을 고려하여 유역의 전체적인 침수 양상을 정확하게 모의하기 어려운 현 시스템의 문제점을 해결하고자 하였다. 입력자료로는 지형자료로 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM), 토지피복도(Land Cover map, LC), 정밀토양도(soil type map)를, 시계열 자료로는 강우량 관측치와 수위 관측치를 활용하였다. 각 지형자료는 격자화하여 50m×50m 크기로 구축하고, 강우량은 Thiessen 다각형법을 활용하여 대상 지역 내 면적평균강우량(Mean Average Precipitation, MAP)을 산정하여 시계열로 구축하여 적용하였다. DEM을 통해 흐름 방향(flow direction)을 격자단위로 구축하여 입력자료로 추가 적용하고, 흐름 방향을 기준으로 격자를 연결하여 물의 흐름을 모든 격자별로 각각 모의하는 시스템을 구축하였다. 격자별 흐름 모의에는 Green-Ampt 방법을 활용한 손실 계산과 운동파(kinematic wave) 공식을 활용한 지표흐름 계산이 포함된다. 각 격자별 모의 프로세스를 구축한 후 매개변수 추정을 위하여 전역 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘을 통합하였다. 구축한 격자단위 홍수모의 시스템은 유전 알고리즘의 적합도 함수식에 포함되어 격자별로 강우량에 따른 유량을 모의하고, 분석 대상 유역에 위치한 모든 수위관측소의 유량과 비교한

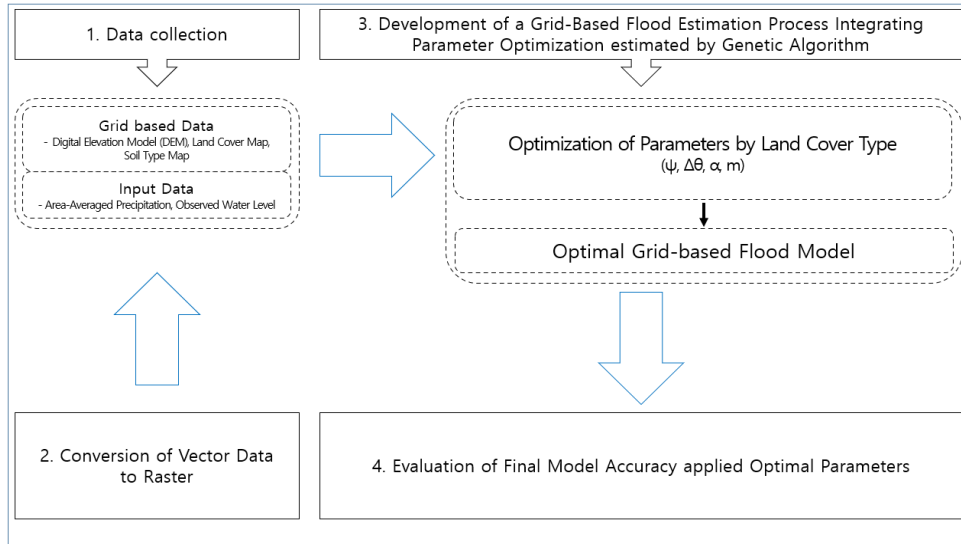


FIGURE 1. Flow chart of this study

RMSE를 기준으로 적합도를 평가한다. 최종적으로 본 연구에서는 격자단위 입력자료 및 시계열 구축 이후 유역의 유량을 격자단위로 모의하고 유전 알고리즘을 통해 최적의 매개변수를 탐색하는 알고리즘을 통합하여 유전 알고리즘 연계 격자기반 홍수모형을 개발하였으며, 연구의 분석 과정을 그림 1과 같이 나타내었다.

연구방법

1. 연구 대상지역 선정 및 입력자료 구축

연구 대상지역으로는 경안천 상류 유역으로 선정하였다. 본 연구에서는 대상지역에 대한 MAP 산정 및 시계열 구축을 위하여 기상청의

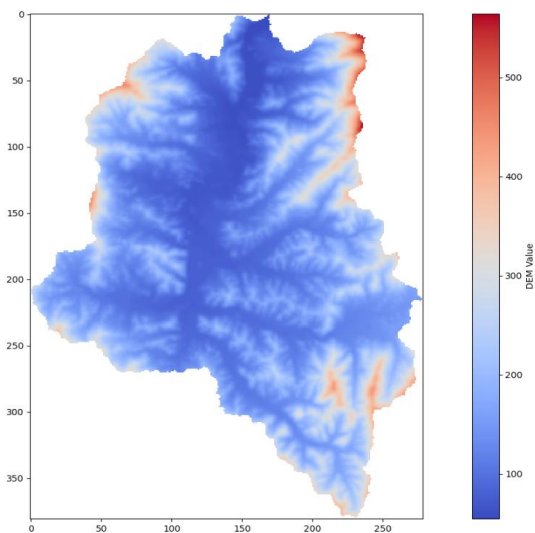


FIGURE 2. Generated DEM data

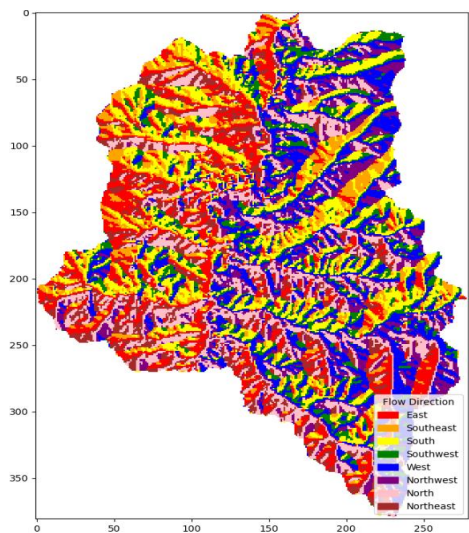


FIGURE 3. Generated flow direction data

ASOS와 AWS 관측소 관측자료를 모두 조사하여 티센망을 구축한 결과 대상유역에는 티센망이 AWS 관측소 하나로 이루어져 해당 관측소의 자료를 MAP로 적용하였다.

격자단위 홍수분석을 위하여 국토지리정보원에서 운영하는 국토정보플랫폼을 통해 수치지형도 자료를 수집하였다. 수집한 수치지형도에서 등고선과 각 지점별 고도값을 포함하는 객체들을 추출하였다. 이를 활용하여 DEM을 ASCII 형식으로 변환하여 격자기반 홍수모형의 입력자료로 활용하였다. 생성된 DEM을 기반으로 각 격자별 흐름 방향을 산정하였다. 본 연구에서는 흐름의 방향을 8방향으로 표현하였다. 최종적으로 생성된 DEM을 그림 2, 격자단위 흐름 방향을 그림 3과 같이 나타내었다.

토지피복도와 정밀토양도는 지표면의 다양한 피복 유형, 토양형을 분류한 지도로, 수문학적 모형의 매개변수 산정에 필수적인 자료이다. 토지피복에서 분류하는 피복 유형으로는 대분류 기준으로 시가지, 습지, 수역 등 총 7개의 항목으로, 정밀토양도에서 분류하는 수문학적 토양형은 토양수분 보유능과 침투 속도, 수리전도도 등에 따라 4개의 항목으로 분류한다(Jung et al., 2007). 이를 통해 각 격자별 토지피복 및 토양형 유형에 따른 매개변수를 설정하여 모형의 정

확성 및 적용성을 높이고자 하였다. 수집한 토지 피복도와 정밀토양도는 7개의 토지피복 유형을 각각 100단위 코드로 부여하여 100부터 700까지, 토양형을 1부터 4까지 각 격자별로 할당하였다. 이는 토지피복 및 토양형 유형에 고유한 코드를 부여함으로써 모형 내에서 피복, 토양형 유형 식별을 용이하게 하기 위함이다.

토양침식인자(k)는 수집한 토양자료를 바탕으로 Wischmeier and Smith (1978)에서 제시하는 공식을 적용하였다(Wischmeier and Smith, 1978). 해당 값은 토양 입자의 크기, 토양의 유형 등에 따라 산정되며, 각 유형별로 토양침식인자 산정에 필요한 매개변수를 각 토양형별로 적용하여 공간자료로 구축하였다. 이후 연구 대상지역을 일정한 크기의 격자로 분할한 후 각 격자에 해당하는 토지피복 코드와 토양형을 할당하여 격자화된 자료를 생성하였다. 정밀 토양도에서 제시하는 각 격자별 수문학적 토양형과 토양형별로 산정한 토양침식인자 자료를 격자단위로 구성하여 홍수 모의를 위한 매개변수로 활용하였다(그림 4; 5; 6).

격자화된 토지피복 및 토양형 정보를 기반으로 수문학적 매개변수를 설정하였다. 설정된 매개변수는 다음과 같다.

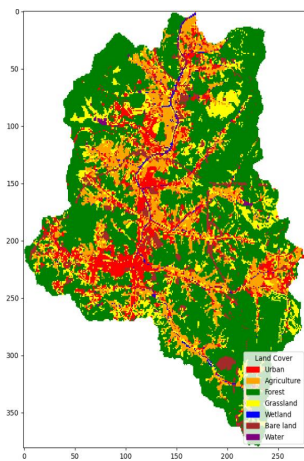


FIGURE 4. Generated land cover

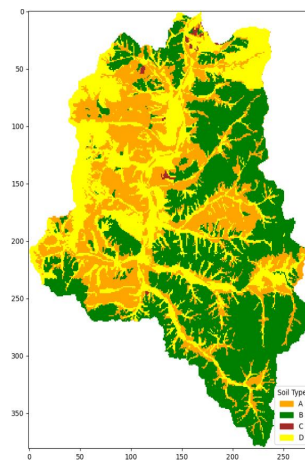


FIGURE 5. Generated soil type

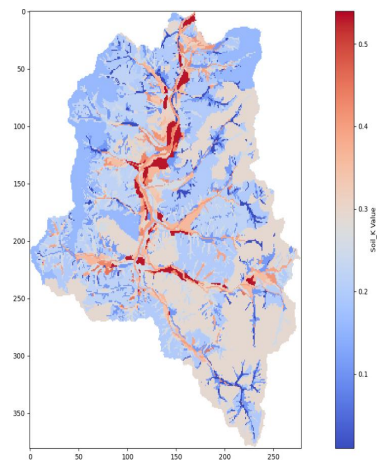


FIGURE 6. Generated soil K

(1) 침투장력 (ψ): 토양 입자 간 공극에 따라 물이 침투할 때 필요한 흡인력을 의미하며, 토양형에 따라 다른 값을 적용

(2) 가능 함수 변화량 ($\Delta\theta$): 포화 함수량과 초기 함수량의 차이로 토양 공극에 유효한 물 저장 가능량을 나타내며, 토양형에 따라 다른 값을 적용

(3) a : 지표유출 모의시 유속을 결정할 때 활용하는 상수로, 토지피복 유형에 따라 다른 값을 적용

(3) m : 유속과 수심의 관계에서 수심에 대한 민감도를 결정하는 지수로써 모의된 수심 (h)에 따라 흐름 속도를 결정하며, 토지피복 유형에 따라 다른 값을 적용

홍수분석을 위한 격자기반 홍수모형의 매개변수는 7개의 토지피복 유형에 대하여 각 2개씩, 4개의 토양형에 대하여 각 2개 설정되어 총 22개의 매개변수를 토양의 특성에 따라 설정하였다. 해당 매개변수들은 유전 알고리즘의 최적화 대상이 된다.

격자기반 홍수모형의 검증에 위해 국내 홍수 통제소에서 제공하는 수위관측소 자료를 활용하였다. 수집된 수위자료는 유역 내 위치한 수위 관측소의 관측 시계열로, 모형의 매개변수 보정 및 검증에 활용되었다. 홍수통제소는 수위 자료의 정확도와 신뢰성을 확보하기 위해 국가수문 자료품질관리시스템을 운영한다. 해당 시스템은 실시간으로 수집되는 수문자료의 이상치 및 결측치를 자동으로 점검하고, 수동으로 수정·보완할 수 있는 기능을 제공하여 자료의 신뢰도를 높이는 데 기여하고 있다(Kim et al., 2008).

수집한 수위 관측 자료는 격자기반 홍수모형의 매개변수 보정 및 검증에 활용되었으며, 모형의 정확도 향상에 기여하였다. 특히 유전 알고리즘의 적합도 함수로 수위관측소의 관측치와 모의된 홍수위 간의 RMSE (Root Mean Squared Error)를 산정 및 적용하여 매개변수를 최적화하였다. 이를 통해 유역의 특성을 실제 발생한 하천 유량을 바탕으로 반영하여 기존

방법에 비해 정확한 격자단위 홍수량 모의가 가능하였다. 분석 대상유역 내에 위치한 수위관측소는 총 1개로 확인되었다. 수위관측지점의 좌표를 격자형태로 구축하여 각 관측소별로 검증할 대상 격자를 ASCII 형식으로 입력자료화 하였으며, 구축된 수위관측지점 위치 정보 입력자료의 형태는 그림 7과 같다.

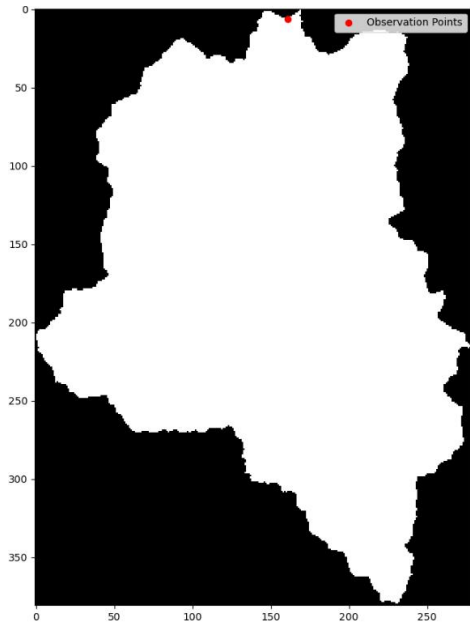


FIGURE 7. Water level observation's location data

2. 격자기반 홍수모형 개발을 위한 방법론

전통적으로 유속을 산정할 때는 Manning 공식을 활용한다. 그러나 본 연구의 분석에는 유역 내에 분포된 모든 격자가 대상으로 적용되므로, Manning 공식에서 요구하는 수리반경이나 조도계수 등을 적절하게 각 격자별로 반영하는 데에는 어려움이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 격자단위 홍수모형의 개발을 위하여 운동파(kinematic wave) 접근법을 적용하였다. 운동파 모형은 단순화된 1차원 비정상류 해석 기법으로서, 수심과 흐름특성 간 비선형적 관계를 통해 흐름을 모의하는 방법이다(Woolhiser and

Liggett, 1967; Singh, 1996). 격자기반 홍수 모형에서는 수심에 따른 유속을 다음과 같이 산정한다.

$$v = \alpha h^m \quad (1)$$

여기서 v 는 격자별 유속(m/s), α 는 경험상수, m 은 수심에 대한 유속의 민감도를 나타내는 지수이다. α 와 m 은 토지피복 유형별로 각각 적용되는 매개변수로서 유전 알고리즘의 최적화 대상 매개변수로 정의된다. 이러한 방법은 Manning 공식에서 요구되는 하상의 조도계수나 수리반경 등의 반영이 어려운 추가 변수 없이 격자단위 수심 및 경사를 반영한 흐름의 해석이 가능하다(Lighthill and Whitham, 1955; Akan and Yen, 1981). 경사는 DEM을 기반으로 인접 격자 간 고도차와 격자 크기를 바탕으로 산정하며, 유량은 격자의 폭과 수심을 고려한 단면적과 위의 식을 활용하여 유입량과 유출량을 산정한다.

침투량 계산에는 Green-Ampt 모형을 적용하였다. Gree-Ampt 모형은 토양의 포화전도도와 침투장력, 가능 함수 변화량 등을 활용하여 침투속도를 산정하는 물리 기반 모형으로써 다양한 강우-유출 모형에서 널리 사용되고 있다(Green and Ampt, 1911; Mein and Larson, 1973; Chu, 1978). 본 연구에서는 격자별 토양 유형 및 포화전도도 정보를 바탕으로 Green-Ampt 모형을 적용하며, 각 단위시간별로 유역의 전 영역에 대하여 다음과 같은 수식을 통해 침투량을 계산한다.

$$f = \min\left(P, K\left(1 + \frac{\psi \Delta\theta}{F}\right)\right) \quad (2)$$

여기서 f 는 침투율(m/s), P 는 단위면적당 유효 강우강도(m/s), K 는 토양의 포화전도도, ψ 는 침투장력, $\Delta\theta$ 는 가능 함수 변화량, F 는 누적침투량을 의미한다. Green-Ampt 모형에서 사용되는 매개변수 중 포화전도도는 토양도

에서 제시되는 값을 격자단위로 구축하여 활용하고, 침투장력과 가능 함수 변화량은 토양형별로 각각 적용되어 유전 알고리즘에서 최적화 대상 매개변수로 포함된다.

대다수의 하천에서는 비가 오지 않은 상태에서도 기본적으로 흐르는 기저유량이 존재한다. 격자기반 홍수모형에서는 이러한 기저유량을 추정하기 위하여 분석 대상 강우사상의 시작 전 24시간동안 관측된 수위와, 해당 수위에 수위-유량 관계곡선(rating curve)을 적용하여 추정된 유량을 활용하여 기저유량을 적용하였다. 해당 값들은 하천구역에서만 적용되며, 하천구역의 고도 분포를 바탕으로 10개의 구간으로 분류하여 각각 다른 기저유량을 적용한다. 초기에는 분석 대상 강우사상 이전의 수위관측치를 기준으로 도출한 기저유량을 모든 구간에 대하여 동일하게 적용하고, 이를 유전 알고리즘에서 최적화 대상 매개변수로 적용하여 하천의 10개 구간별로 물리적으로 타당한 기저유량 값을 탐색하였다. 기존에 격자단위 홍수분석을 위한 모형으로는 ModClark 모형이 있다(Lee et al., 2013). 본 연구에서 개발한 모형은 기본적으로 과거 ModClark 모형과 유사하나, Python 언어를 기반으로 구축하여 토지피복 유형 및 토양형, 고도별 세부 매개변수를 설정하고 전역 최적화 알고리즘과의 통합 여부에서 큰 차이를 가진다.

3. 유전 알고리즘을 활용한 격자기반 홍수모형의 최적화 방법론

본 연구에서는 격자기반 홍수모형의 매개변수를 최적화하기 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 활용하였다. 유전 알고리즘은 자연 선택과 유전의 원리를 모방한 전역 최적화 기법으로, 복잡한 문제의 최적해를 탐색하는데 효과적이다(Kwak, 2008; Lee et al., 2023, 2024; Wang, 2023). 이를 통해 각 격자의 토지피복 특성에 따른 매개변수를 효율적으로 산정하였으며, 유전 알고리즘의 분석 과정을 그림 8과 같이 나타내었다.

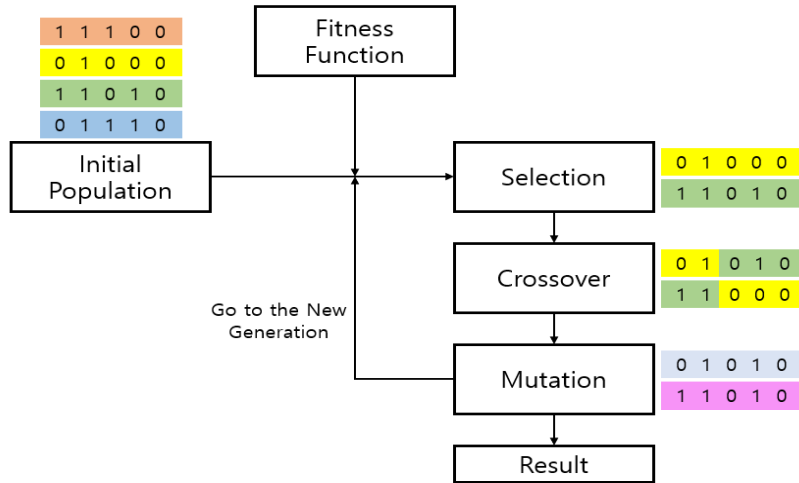


FIGURE 8. Analytic process of genetic algorithms (Kwak, 2008)

1) 초기 개체군 생성

유전 알고리즘은 초기 개체군(initial population)의 생성으로 시작한다. 해당 과정에서는 유전자로 활용할 초기 변수를 정의한다. 초기 개체군은 각 격자의 토지피복 유형에 따라 매개변수 집합을 구성하여 생성하였다. 생성된 초기 개체군은 유전 알고리즘의 최초 변수로 활용되며, 세대의 진행에 따라 개선된다. 각 개체는 토지피복 유형에 대응하는 매개변수인 α 와 m , 토양형에 대응하는 매개변수인 ψ 와 θ , 고도에 따라 분류된 하천구간별 기저유량을 포함하며, 초기값은 수문·수리학적 기준에 의거한 값으로 설정하였다(Chow, 1959).

2) 적합도 평가

적합도 평가(fitness evaluation) 과정에서는 각 개체군의 성능을 평가한다. 각 개체군의 적합도는 모형이 계산한 격자단위 유량과 실제 수위 관측치에 따른 유량 값 간의 RMSE (Root Mean Square Error)를 기반으로 평가한다. 적합도 계산을 위해 각 개체의 매개변수를 사용하여 홍수를 모의하고, 그 결과를 관측치와 비교하였다. 이를 통해 모형의 적합도를 정량적으로 평가하였다.

3) 재생산

재생산(reproduction) 과정에서는 이전 세대에서 적용된 개체군 값을 바탕으로 다음 세대의 개체군 값을 설정하는 과정이다. 해당 과정은 선택(selection)과 교배(crossover), 그리고 돌연변이(mutation)와 엘리트(elite) 등의 세부 단계로 구성된다.

- (1) 선택: 적합도의 크기를 확률로 적용하여 적합도 값이 높은 개체를 선별. 높은 적합도를 가진 개체군은 다음 세대에 전이될 확률 증가
- (2) 교배: 두 개체의 유전자를 교배한 후 다음 세대에 적용될 개체를 생성. 교배에는 두 대상 유전자 값을 2진수로 변환한 다음 합성하는 과정을 통해 새로운 값을 생성
- (3) 돌연변이: 유전자에 무작위적 변화 확률을 부여하여 유전자의 다양성을 유지. 돌연변이의 발생 확률을 설정하여 무작위의 유전자 값을 생성하여 적용
- (4) 엘리트: 상위 10%의 개체를 다음 세대로 전달하여 개체의 우수성을 유지

4) 평가

평가(evaluation) 과정은 생성된 세대의 적합도를 평가한 후 종료 조건 만족 여부를 검토한다. 설정한 종료 조건을 만족하지 못할 경우, 다음 세대로 넘어가면서 선행 과정을 반복한다.

적용 및 결과

1. 홍수모의를 위한 격자기반 홍수모형 개발

1) 분석 대상 호우사상 및 결과 평가를 위한 수위관측소 선별

본 연구에서 개발한 격자기반 홍수모형은 모든 격자들이 개별적으로 다른 매개변수들을 적용하고, 연산에 필요한 변수들을 격자별로 계산하여 각 격자별 유량을 모의한다. 이러한 까닭으로 필요한 연산자원이 많이 들기 때문에 특정 시군에 대한 격자단위 홍수모의를 할 때 고해상도의 격자로 모의하거나, 최적화를 위해 여러개의 호우사상을 적용하는데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 경안천 상류유역을 대상으로 50m × 50m의 크기를 가지는 격자자료를 구축한 후 '20.07.28 ~ '20.08.11에 발생한 집중호우 기간

중 유역에서 강수량이 크게 발생한 시간을 대상으로 격자기반 홍수모형의 매개변수를 최적화하였다. 해당 기간의 호우사상은 실제로 인근 지역에 큰 공공시설 및 사유시설 피해를 발생시킨 사상이다. 입력자료 구축을 제외한 모든 모형의 연산 과정은 Python으로 구축하였다.

격자기반 홍수모형은 공간자료로 DEM, 흐름방향, 토지피복 유형을 격자단위로 구축 후 활용하며, 시계열 자료로 경안천 상류유역에 대한 MAP 시계열과 검증에 활용할 수위관측소의 수위 시계열을 활용한다. 수위관측소의 제원에는 지점에 대한 주소와 좌표가 포함된다. 수위관측소의 선별은 홍수통제소에서 제공하는 수위관측소 제원에서 위경도 좌표를 기준으로 기준으로 선별하였다. 최종적으로 수위관측소는 환경부 관할의 용인시(월촌교) 관측소가 선별되었다. 연구 진행 과정에서 검증에 적용된 수위관측소의 제원은 표 1과 같다.

2) 격자기반 홍수모형 개발

수치표고모형(DEM), 강우량 자료, 토지피복도, 정밀토양도 등을 활용하여 격자기반 홍수모

TABLE 1. Information about applied water level station

Obs. Code	Latitude	Longitude	Grid X	Grid Y	Administor
1016607	37-19-57	127-14-22	161	6	Ministry of Environment

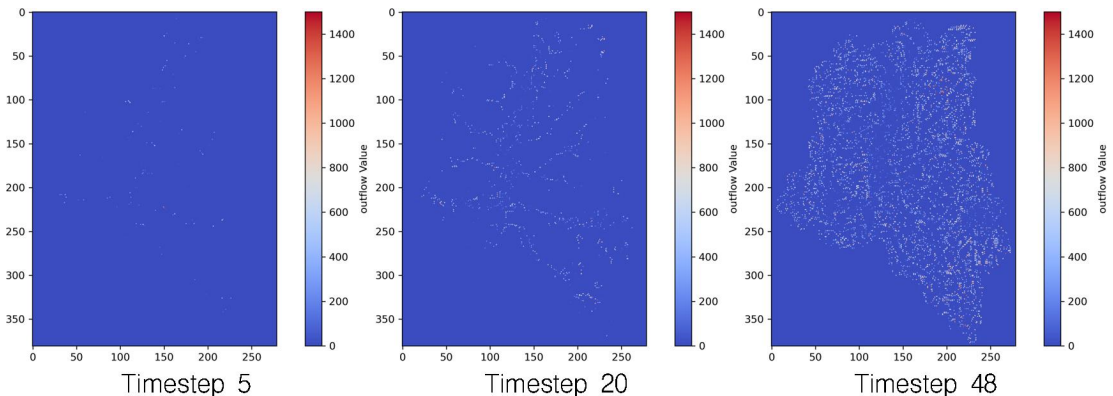


FIGURE 9. Analysis results from Grid based Flood Simulation Model

형을 개발하였다. 모형의 구조는 데이터 전처리와 격자단위 홍수 모의로 구성된다.

대상지역의 DEM, 토지피복도, 정밀토양도, 흐름 방향 등의 레스터 파일을 생성하여 격자단위로 적용하였다. DEM은 대상지역의 지형정보를 제공하며, 토지피복도는 각 격자별 토지 이용 특성을 나타낸다. 흐름 방향 자료는 각 격자에서 물이 흐르는 방향을 정의한다.

홍수 모의는 강우-유출 과정을 격자단위 모의하는 것으로, 각 격자에서 유량을 시간에 따라 계산한다. 이를 위해 Gree-Ampt 방법, 운동과 공식을 활용한 방법이 순차적으로 적용된다. 이러한 방법론들을 모두 통합하여 시간단위별로 각 격자의 유량 변화를 계산하였으며, 이를 통해 시·공간적 홍수의 양상을 상세하게 파악할 수 있다. 개발된 격자기반 홍수모형에서

나오는 최적화 매개변수를 적용한 결과를 그림 9과 같이 나타내었다.

2. 격자기반 홍수모형의 매개변수 최적화

모형의 매개변수인 ψ , $\Delta\theta$, α , m 값을 최적화하기 위하여 유전 알고리즘을 적용하였다. 초기 개체군은 관련 기준에 의거하여 토지피복 유형 및 토양형별로 할당되어 있는 기본값에 작은 변이를 적용하여 생성하였다. 또한, 물의 흐름에 있어 물리적 한계 내에서 매개변수를 생성하기 위하여 세대의 갱신에 따라 생성되는 각 매개변수들의 최대값과 최소값을 적절하게 설정하였다. 매개변수 생성에 적용된 최대값과 최소값의 범위는 표 2와 같다.

유전 알고리즘에서는 각 개체(매개변수)에 대해 홍수 모의를 수행하고, 수위관측소에서 기저

TABLE 2. Applied minimum and maximum values of parameters

Classification	Min	Max
ψ	0.05	0.35
$\Delta\theta$	0.01	0.3
α	0.1	10.0
m	0.3	1.5

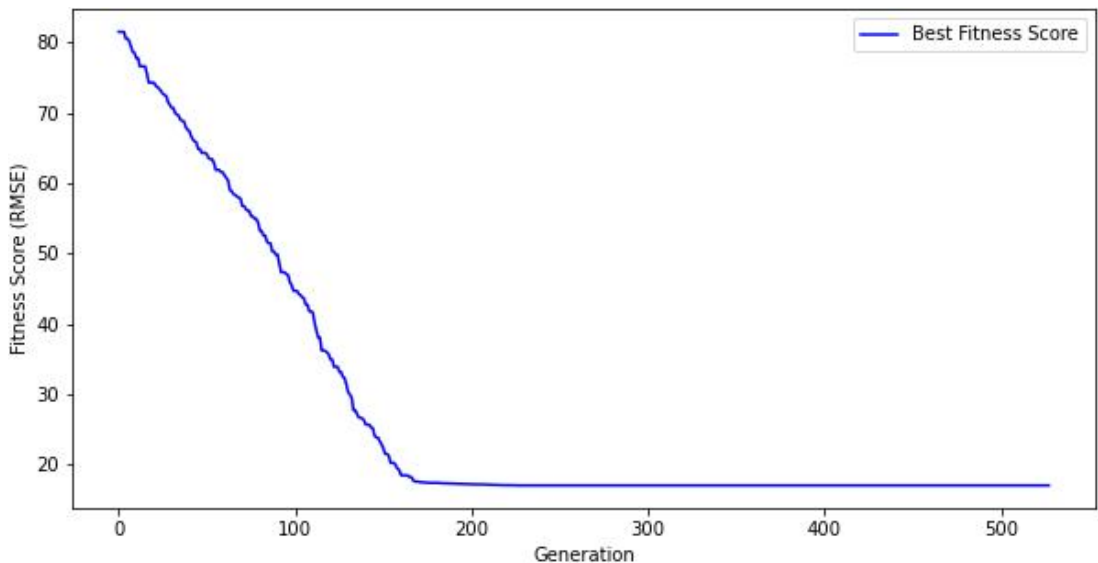


FIGURE 10. Fitness evaluation progress

유량을 뺀 관측 유량과 모의 유량 간 RMSE를 계산하여 적합도를 평가한다. 격자기반 홍수모형은 모든 격자별로 유량을 모의한다. 본 연구에서는 연산 부하를 줄이기 위하여 50m × 50m 단위의 격자를 통해 분석을 수행하였으나, 그림에도 분석 대상 격자는 381 × 279로 총 106,299개의 개수를 가진다. 필요한 연산 자원이 방대함에 따라 유전 알고리즘의 규모를 축소시켰다. 최적화를 위한 유전 알고리즘은 527세대 동안 25개의 개체군에 대하여 진행되었다. 유전 알고리즘 구동 중 세대를 거듭할수록 전체 개체군의 적합도가 향상되었으며, RMSE가 점진적으로 감소하는 것을 확인하였다(그림 10).

또한, 수위관측소가 위치한 격자에 대하여 초기 매개변수를 적용한 모의 결과와 최적화 매개변수를 적용한 모의 결과를 비교하였다. 시계열과 산포도를 비교한 결과, 실제 수위에서 계산되는 유량을 초기 매개변수에 비해 최적화 매개

변수가 실제 유량을 정확하게 표현할 수 있음을 확인하였다(그림 11).

각 세대별로는 적용 매개변수의 조합별로 25회로, 527개 세대에서 총 13,175회의 모의가 수행된다. 25회의 모의 기준으로 세대별로 약 2분의 시간이 소요되었으며, 매개변수 최적화에 총 13시간이 소요되었다. 이러한 모의시간은 할당된 연산자원에 따라 상이할 수 있으며, 실시간으로 매개변수를 최적화하는 데에는 어려움이 있다는 것을 의미한다. 실제 적용에는 모형에서 매개변수 최적화를 한달 또는 1주일정도의 시간 간격을 설정하여 주기적으로 최적화 후 모형을 적용해야 한다는 것을 의미한다. 또한 본 연구에서 제시되는 모형은 1개의 표준유역에 하나의 호우사상을 대상으로 매개변수를 최적화 하였으므로, 확장적용을 위해서는 더 넓은 유역과 여러 호우사상을 대상으로 최적화를 수행하여 모델의 적용성을 확보해야 한다.

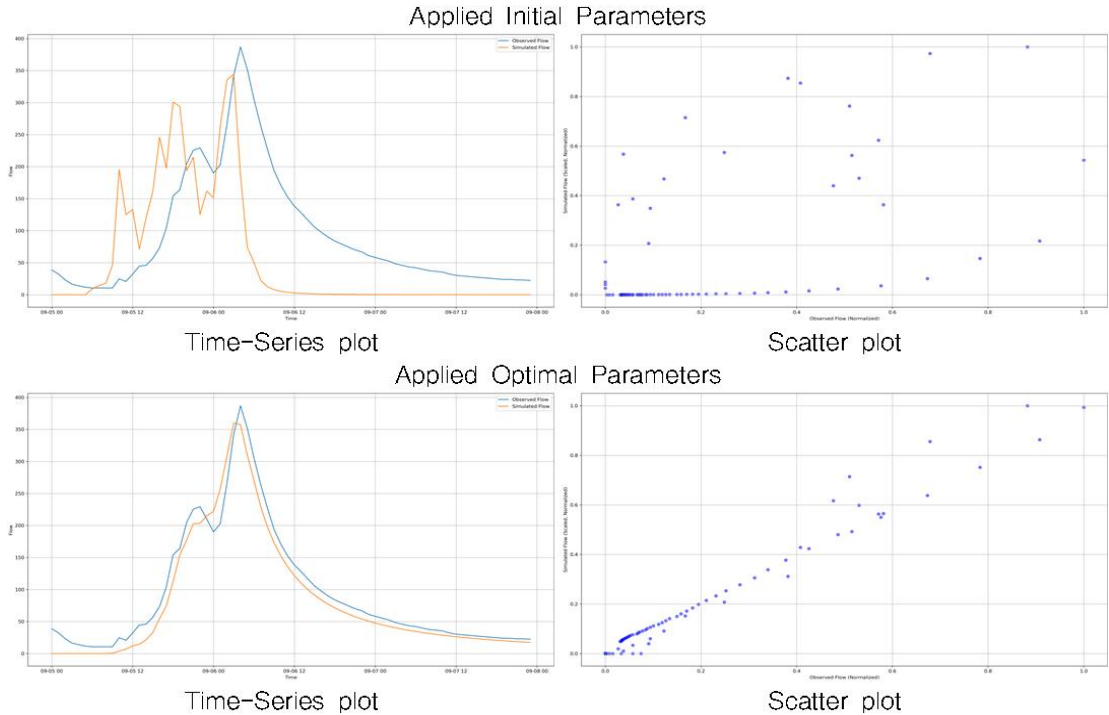


FIGURE 11. Comparison of initial and optimized parameters for a Grid based Flood Simulation Model

TABLE 3. Compare the evaluation index of the initial and optimal models

Classification	Initial Model	Optimal Model
RMSE	81.48	16.99
R ²	0.23	0.97

3. 최적화된 매개변수를 적용한 격자기반 홍수 모형의 결과 분석

최적화된 매개변수를 적용하여 홍수 모의를 수행한 결과 관측유량과 모의 유량 간 RMSE가 초기 값에 비해 감소한 것을 확인하였다. 표 3은 격자기반 홍수모형의 초기 모형과 최적화된 모형의 결과에 따른 평가지표를 비교한 결과이다.

분석 결과를 살펴보면 모델에서 나온 결과들을 살펴보면 초기 매개변수를 적용한 모형과 최적의 매개변수를 적용한 모형의 결과에서 개선된 R² 값을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 초기 매개변수와 최적화된 매개변수를 비교하였을 때 실제 유량과 모의 유량 간의 RMSE가 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시하는 방법론이 유의미함을 증명한다.

결 론

본 연구에서는 격자단위 홍수모의를 위한 유전 알고리즘 연계 격자기반 홍수모형을 개발하고, 실제 수위관측소의 관측 자료를 활용하여 매개변수를 최적화하는 알고리즘을 적용하였다. 개발된 모형은 DEM, 흐름 방향, 토지피복도, 정밀토양도 등 다양한 지형 및 토지 특성 자료를 활용하여 격자별 홍수량과 수위를 시간적으로 모의하였다. 본 연구의 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 격자기반 홍수모형을 통해 기존의 지점별 홍수량 산정 방법에 비해 격자단위로 유량의 분포를 상세히 파악할 수 있었다. 이를 활용하면 유역 내 홍수 위험지역을 정확하게 식별하고, 지역별 홍수 대응 전략 수립에 기여할 수 있다.

2) 유전 알고리즘을 적용하여 모형의 매개변

수를 실제 관측유량을 바탕으로 최적화함으로써 모의 결과의 신뢰성과 정확성을 향상시켰다. 특히, RMSE가 초기 값에 비해 크게 감소하고, 결정계수가 크게 증가하여 모의 유량이 관측 유량을 잘 표현하는 것을 확인하였다.

3) 운동과 접근법, Green-Ampt 방법 등 여러 방법을 통합하여 강우-유출 및 흐름 과정을 현실적으로 모의하였다. 이는 복잡한 유역의 수문학적 특성을 반영하여 보다 정확한 모의를 가능하게 하였다.

본 연구의 결과는 실시간 홍수 예측, 홍수 위험 지도 작성, 재난 대응 계획 수립 등에 실질적으로 활용될 수 있다. 특히, 격자단위의 상세한 홍수 정보를 제공함으로써 재난 대응 기관이 신속하고 정확한 의사결정을 내릴 수 있도록 지원할 수 있다. 또한, 기후 변화로 인한 극한 강우 이벤트에 대비하여 유역의 홍수 위험성을 사전에 평가하고 관리하는 데에도 기여할 것으로 기대한다. **KAGIS**

감사의 글

본 연구는 자연재난 정책연계형 기술개발사업의 연구비지원(기후변화 대응 재해예방사업 표준화 기술개발) (2021-MOIS35-004)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Akan, A.O. and B.C. Yen. 1981. Mathematical model of shallow water flow over porous media. Journal of the hydraulics division 107(4):479-494.
- AON. 2021. 2018 Annual Report. Weather, climate & catastrophe insight, London,

- United Kingdom.
- Choi, C.H. 2019. Development of combined heavy rain damage prediction models using machine learning and effectiveness of disaster prevention projects. Ph. D. Dissertation, Inha University pp. 1-12 (최창현. 2019. 머신러닝과 재해예방사업 효과를 이용한 결합형 호우피해 예측모형 개발. 공학박사학위 청구논문, 인하대학 1-12쪽).
- Choi, C.H., J.H. Kim, J.S. Kim, D.H. Kim, Y.H. Bae and H.S. Kim. 2018. Development of heavy rain damage prediction model using machine learning based on big data. *Advances in meteorology* 2018.
- Choi, C.H., J.W. Kim, H.C. Han, D. Han and H.S. Kim. 2019. Development of water level prediction models using machine learning in wetlands: A case study of Upo wetland in South Korea. *Water* 12(1):93-110.
- Chow, V.T. 1959. *Open channel hydraulics*. International student edition, University of Illinois, United States.
- Choi, J.I., J.W. Ji and J.U. Yi. 2015. A Study on Rainfall-Runoff Frequency Analysis for Estimating Design Flood. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(8):605-612 (최종인, 지정원, 이재웅. 2015. 설계홍수량 산정을 위한 강우-유출 빈도해석에 관한 연구. 한국수자원학회논문집 48(8):605-612).
- Choi, Y.S., K.T. Kim and J.H. Yi. 2008. Development of Grid Based Distributed Rainfall-Runoff Model with Finite Volume Method. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(9):895-905 (최윤석, 김경탁, 이진희. 2008. 유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발. 한국수자원학회논문집 41(9):895-905).
- Chu, S.T. 1978. Infiltration during an unsteady rain. *Water resources research* 14,(3):461-466.
- Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science* 4(1):1-24.
- Jung, J.W., H.C. Han, K.H. Kim and H.S. Kim. 2021. Machine learning- based small hydropower potential prediction under climate change. *Energies* 14(12): 3643-3653.
- Jung, K.H., S.J. Jung, Y.K. Sonn and S.Y. Hong. 2007. Classification of hydrologic soil group of Korean soils. National Institute of Agricultural Science and Technology. 141-169 (정강호, 정석재, 손연규, 홍석영. 2007. 유출곡선 지수법의 활용을 위한 수문학적 토양군 분류. 농업과학기술원 141-169).
- Kwak, J.W. 2008. A study on the parameter calibration of flood forecasting models. Master Thesis, Inha University, pp. 1-114 (곽재원. 2008. 홍수에보모형 매개변수의 최적화에 관한 연구. 공학석사학위 청구논문. 인하대학 1-114쪽).
- Kim, C.S., H.S. Kim, H.S. Cho and H.R. Kim. 2008. Establishment of National Quality Control System for the Hydrologic Data. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference* pp. 1823-1827 (김충수, 김형섭, 조효섭, 김휘린. 2008. 국가수문자료 품질관리시스템 구축. 한국수자원학회 학술발표회 1823-1827쪽).
- Kim, D.H. 2022. Development of flood water level forecasting and flood damage risk assessment method for river basin

- using AI-based hybrid model. Ph. D. Dissertation, Inha University, pp. 1-173 (김동현. 2022. AI 기반 Hybrid Model을 이용한 하천유역의 홍수위 예측 및 홍수피해 위험도 평가 기법 개발. 공학박사학위 청구논문. 인하대학 1-173쪽).
- Kim, D.H., Lee, K.S. Lee, J.G. Hwang-Bo, H.S. Kim and S.J. Kim. 2022. Development of the method for flood water level forecasting and flood damage warning using an AI-based model. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 22(4):145-156 (김동현, 이기성, 황보종구, 김형수, 김수전. 2022. AI 기반 모형을 이용한 홍수위 예측 및 홍수피해 예·경보 기법 개발. 한국방재학회논문집 22(4):145-156).
- Lee, D.H., J.I. Choi, S.H. Shin and J.U. Lee. 2013. A Study on Proper Number of Subbasin Division for Runoff Analysis Using Clark and ModClark Methods in Midsize Basins. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 33(1):157-170 (이동훈, 최종인, 신수훈, 이재웅. 2013. 중규모 유역에서 Clark 방법과 ModClark 방법을 이용한 유출해석 시적정 소유역 분할 개수에 대한 연구. 대한토목학회논문집 33(1):157-170).
- Lee, J.H., J.K. Lee, T.W. Kim and J.Y. Kang. 2011. Comparative Study on Calculation Method for Design Flood Discharge of Dam. Journal of Korea Water Resources Association 44(12): 941-954 (이재홍, 이정규, 김태웅, 강지예. 2011. 댐 설계홍수량 산정방법에 관한 비교연구. 한국수자원학회논문집 44(12):941-954).
- Lee, S.M., S.U. Baek, J.H. Lee, K.T. Kim, S.J. Kim and H.S. Kim. 2023. Development of disaster severity classification model using machine learning technique. Journal of Korea Water Resources Association 56(4):261-272 (이승민, 백선욱, 이준학, 김경탁, 김수전, 김형수. 2023. 머신러닝 기법을 이용한 재해강도 분류모형 개발. 한국수자원학회논문집 56(4):261-272).
- Lee, S.M., W.J. Wang, D.H. Kim, H.C. Han, S.J. Kim and H.S. Kim. 2023. Establishing meteorological drought severity considering the level of emergency water supply. Journal of Korea Water Resources Association 56(10):619-629 (이승민, 왕원준, 김동현, 한희찬, 김수전, 김형수. 2023. 비상급수의 규모를 고려한 기상학적 가뭄 강도 수립. 한국수자원학회논문집 56(10):619-629).
- Lee, S.M., Y.J. Kang, J.W. Song, J.H. Kim, H.S. Kim and S.J. Kim. 2024. Study on water quality prediction in water treatment plants using AI techniques. Journal of Korea Water Resources Association 57(3):151-164 (이승민, 강유진, 송진우, 김주환, 김형수, 김수전. 2024. AI 기법을 활용한 정수장 수질예측에 관한 연구. 한국수자원학회논문집 57(3):151-164).
- Lighthill, M.J. and G.B. Whitham. 1955. On kinematic waves I Flood movement in long rivers. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 229(1178):281-316.
- Mein, R.G. and C.L. Larson. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. Water resources research 9(2):384-394.
- Ministry of Environment (ME), 2019. Standard guidelines for calculating flood volume. Republic of Korea (환경부. 2019. 홍수량 산정 표준지침. 대한민국)
- Shin, J.Y., S.M. Lim, J.H. Kim and T.W. Kim. 2014. Analysis of urban flood

- damage characteristics using inland flood scenarios and flood damage curve. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 14(1):291–302 (신지예, 임성민, 김중훈, 김태웅. 2014. 내수침수시나리오와 침수피해곡선을 활용한 도시지역 내수침수피해특성 분석. *한국방재학회논문집* 14(1): 291–302).
- Singh, V.P. 1996. *Kinematic wave modeling in water resources: surface water hydrology*. John Wiley & Sons, New York.
- Wang, W.J. 2023. *Development and Application of Grid-Based Flood Risk Assessment Methodology*. Ph. D. Dissertation, Inha University, pp. 1–279 (왕원준. 2023. 격자 기반 홍수위험도 평가 방법론 개발 및 적용. *공학박사학위 청구논문*. 인하대학 1–279쪽).
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses*. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Woolhiser, D.A. and J.A. Liggett. 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane—The rising hydrograph. *Water Resources Research* 3(3):753–771. **KAGIS**