

ENGINEERING

Flood analysis for agriculture area using SWMM model: case study on Sindae drainage basin

Inhyeok Song¹, Hyunuk An¹, Mikyoung Choi¹, Heesung Lim^{2*}

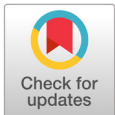
¹Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 15634, Korea

*Corresponding author: hslim1@ekr.or.kr

Abstract

Globally, abnormal climate phenomena have led to an increase in rainfall intensity, consequently causing a rise in flooding-related damages. Agricultural areas, in particular, experience significant annual losses every year due to a lack of research on flooding in these regions. This study presents a comprehensive analysis of the flood event that occurred on July 16, 2017, in the agricultural area situated in Sindaedong, Heungdeok-gu, Cheongju-si. To achieve this, the EPA (United States Environmental Protection Agency) Storm Water Management Model (SWMM) was employed to generate runoff data by rainfall information. The produced runoff data facilitated the identification of flood occurrence points, and the analysis results exhibited a strong correlation with inundation trace maps provided by the Ministry of the Interior and Safety (MOIS). The detailed output of the SWMM model enabled the extraction of time-specific runoff information at each inundation point, allowing for a detailed understanding of the inundation status in the agricultural area over different time frames. This research underscores the significance of utilizing the SWMM model to simulate inundation in agricultural areas, thereby validating the efficacy of flood alerts and risk management plans. In particular, the integration of rainfall data and the SWMM model in flood prediction methodologies is expected to enhance the formulation of preventative measures and response strategies against flood damages in agricultural areas.



OPEN ACCESS

Citation: Song I, An H, Choi M, Lim H. Flood analysis for agriculture area using SWMM model: case study on Sindae drainage basin. Korean Journal of Agricultural Science 50:799-808. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500417>

Received: October 16, 2023

Revised: November 02, 2023

Accepted: November 08, 2023

Copyright: © 2023 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Keywords: agriculture area, internal flooding, inundation, SWMM (Storm Water Management Model)

Introduction

최근, 전 세계적으로 이상기후 현상이 심화되고 있으며, 한 해에 홍수와 가뭄이 동시에 발생하는 이례적인 극한기후 현상이 나타나고 있다. Kim 등(2021)과 Yeo 등(2022)의 연구 결과에 따르면, 대한민국의 연 강우량은 지난 40년 동안 유의한 변동을 보이지 않았지만, 강우 일수의 감소와 강우 강도의 증가가 확인되었다. 이러한 기후 변화는 홍수 및 가뭄 등 수재해의

발생 빈도와 강도에 큰 영향을 미치고 있다(An et al., 2018). 기상청의 2020 이상기후 보고서에 따르면(KMA, 2020)에 따르면, 1시간당 최대 30 mm 이상이며, 24시간 동안의 강수량이 80 mm 이상인 집중호우 발생 일수는 1981 - 1990년 기간 동안의 평균 26.0일에서 2010 - 2020년 기간 동안의 평균 30.6일로 상승하였다. 이러한 강우 패턴의 변화는 도시의 침수 피해 면적에도 영향을 미쳤으며, 2010년에 기록된 5,560 ha에서 2020년에는 7,793 ha로, 지난 10년 동안 도시 침수 면적이 약 1.4배의 증가한 것으로 나타났다.

이와 관련하여, 도시 침수는 주로 내수침수와 외수침수로 구분되며, 각각의 원인과 특성이 다르다. 내수침수는 배수로, 하수도, 펌프장 등의 수방시설물의 배수 능력이 강우 강도에 비해 과소설계되어 적시·적량의 강우가 하천으로 배출되지 못해 발생한다. 이와 대조적으로, 외수침수는 하천의 범람 혹은 제방의 구조적 결함으로 인한 제체 붕괴 등의 원인에 기인한다. 과거 우리나라 도시 지역의 침수피해는 주로 외수침수가 주된 원인이었으나, 하천정비사업을 기점으로 외수침수에 대한 대비능력은 충분히 보강된 바 있다. 그러나 2000년대 초반부터 도시화가 가속화됨에 따라 증가된 물 사용량에 비해 배수시설의 배수능력이 상대적으로 부족하게 되어 내수침수가 도시침수의 주요한 원인으로 부상하고 있다(Joo and Kim, 2022).

인구 밀집도가 높고 중요 시설물이 다수 위치한 도시 지역은 구조적으로 인명 및 재산 피해에 취약하며, 이러한 피해를 저감하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. Lee 등(2022)은 기후위기 대응을 중심으로 도시침수 관리 전략의 개선 방안을 연구하였으며, Choi와 Choi (2015)는 SWMM (Storm Water Management Model)을 활용하여 도시 지역의 침수예상지도를 작성하였다. 또한, Choi 등(2021)은 침수흔적도를 활용하여 도시침수 모형과 홍수추적모형 간의 침수 패턴을 비교 분석하였고, Lim (2023)은 강우 예측 자료를 기반으로 기계학습 알고리즘을 활용한 도시 침수 규모를 예측한 바 있다.

농경지에서의 침수 현상도 도시 지역의 침수와 유사한 패턴을 보이며, 도시 지역과 동일하게 내수 침수가 주요 원인으로 작용한다. Jang (2009)의 연구에 따르면, 충남 지역의 농경지에서 발생한 침수 사례를 분석한 결과, 크게 내수침수와 외수침수로 구분할 경우 내수침수가 전체의 67%를 차지하였다. 도시 지역의 하수관망은 지하에 매설된 시설물이고 농업 용·배수의 수로조직은 지면에 설치된 시설이라는 점에서 차이가 있으나 기본적으로 수로조직을 중심으로 하기 때문에 농업용수의 용·배수관망에 대한 수리해석은 도시 지역의 하수관망의 수리해석과 동일하게 적용할 수 있다(An et al., 2022). 이러한 결과는 농경지의 침수 원인이 도시 지역과 본질적으로 크게 다르지 않음을 시사한다.

하지만 방재시설 설치와 침수대책 수립을 위한 재정 지원과 연구는 도시지역을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 농경지에 대한 침수 분석은 기초적인 연구만 이루어진 실정이다. 또한, 농경지의 연구 우선순위가 도심지에 비해 후순위로 밀려나는 경향으로 인해 농경지에 대한 침수 연구는 도시 지역에 비해 상대적으로 주목받지 못하고 있다(Moon, 2006). 이러한 경향으로 인해, 농경지에 대한 침수 모니터링 및 계획 활동이 부족하여 도시지역 침수 예측을 위해 개발된 모형을 농경지에 적용함에 있어 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 농경지 침수 분석에 SWMM 모형을 활용하고 그 적용성을 검토해 보고자 하였다. SWMM 모형은 도시지역의 침수 해석에 널리 사용되는 모형으로, 그 신뢰성과 정확성이 검증되어 있으며, 국내외적으로 널리 활용되고 있는 도시 구역의 홍수 해석을 위한 모델이다(Lim, 2023). 도시 구역뿐만 아니라 인위적 배수계통을 갖는 소유역에도 적용할 수 있으며, 단일/연속 강우에 의한 계산이 가능하다는 특징으로 인해 농경지 구역에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 농경지에 SWMM 모형의 적용 가능성을 검증하고, 그 결과를 바탕으로 농경지 홍수피해 예방 및 대응전략 구축에 기여하고자 하였다.

Methods and Materials

연구 대상지 및 호우사상

2017년 7월 16일 7시 10분 호우경보가 발효되었으며, 호우경보 발령기간 청주시는 임의시간 최고 91.8 mm의 폭우가 발생하였다(Cheongju City, 2017). 이는 200년 빈도에 달하는 집중호우로 인명 피해와 수리구조물, 교량, 도로 등이 붕괴되고 침수되었으며 농경지 침수 피해도 발생하였다. 본 연구는 행정안전부 생활안전정보에서 제공하는 침수흔적도(MOIS, 2021)에서 침수영역을 확인할 수 있는 청주시 미호천과 석남천 합류지점에 위치한 신대배수장 인근 농경지를 대상으로, 집중호우가 발생한 2017년 7월 16일 0시부터 23시 호우사상을 이용하여 SWMM모의를 수행하였다.

대상지의 총 면적은 619 ha로, 2017년 항공사진과 농림축산식품부 팜맵(MAFRA, 2023)에 따르면 주로 논으로 구성되어 있으며 밭과 비닐하우스가 일부 분포하고 있다. 금년 현장조사에서 농경지의 배수로는 대부분 콘크리트로 구성되어 있었으며, 대부분의 콘크리트 배수로는 무너짐 없이 관리 상태가 양호하였고, 배수로 내 식생 활착이나 이물질은 확인되지 않았다.

연구 대상지의 용배수는 신대배수장으로 모두 유입되며, 고가도로로 둘러싸여 있기 때문에 미호천과 석남천으로부터 범람 가능성은 배제하였다. 본 연구에서는 대상지의 외부로부터의 유입되는 유량은 없으며, 배수 펌프를 통해 물이 충분히 배출되는 것을 가정하여 모의하였다. 드론을 활용하여 얻은 1 m 격자 크기의 digital elevation model (DEM)을 이용하여 대상지의 고도와 배수관망 체계를 QGIS프로그램(version 3.28, <https://www.qgis.org/>)을 통하여 구축하였으며(Fig. 1), 강우 데이터는 기상청의 자료개방포털에서 대상지와 가장 근접한 ASOS (automated synoptic observing system) 청주 기상관측소의 강수량 데이터(KMA, 2017)를 활용하였다(Fig. 2).

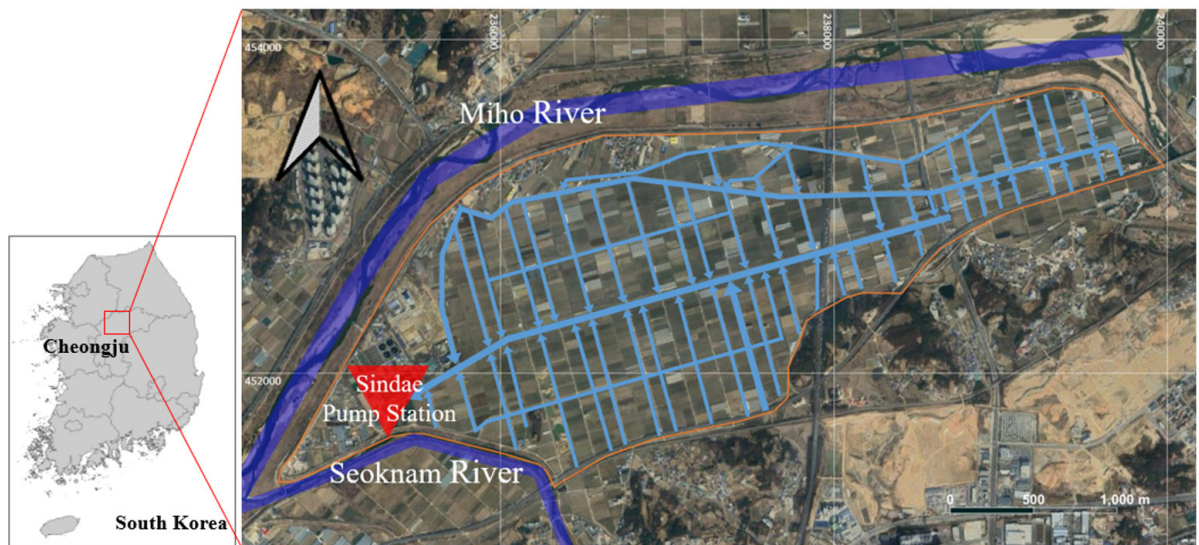


Fig. 1. Target area and drainage channels.

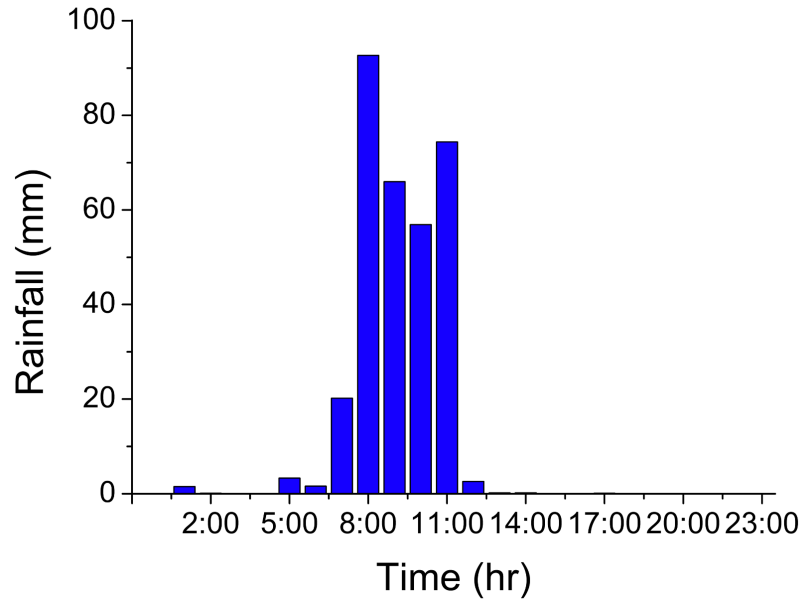


Fig. 2. Precipitation by the minute on July 16, 2017.

SWMM 자료 구축

SWMM 모형의 개요

SWMM 모형의 구성은 Runoff, Transport, Extran, Storage, Executive 5개의 주요 실행블럭과 Statistic, Graph, Combine, Rain, Temp 5개의 보조블럭들로 구성되어 있다. Fig. 3은 SWMM 모형의 블럭들을 개념적으로 도시하였다.

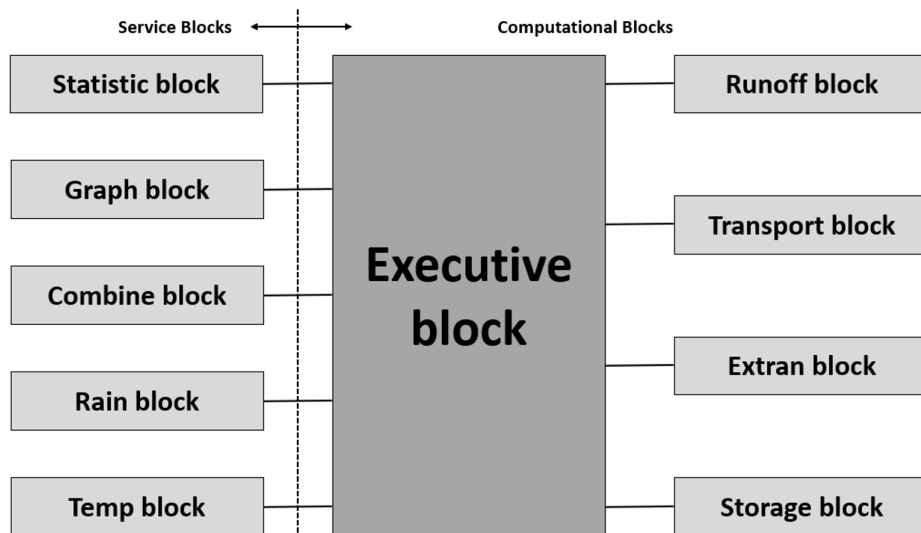


Fig. 3. Structure of the SWMM (Storm Water Management Model).

Runoff 블록은 SWMM 모형의 초기 연산을 수행하며, 강우 발생 시 유역에서의 유출 현상을 모의한다. 임의의 강우 우량도, 선행 강우 조건, 지형도, 토지 이용도 등의 자료를 활용하여 지표면 및 지표하 유출을 추적한다. Runoff 블록에서의 관로 유출은 비선형 저류방정식으로 계산된다. 이러한 복잡한 방정식의 안정된 해를 얻기 위해서 Newton-Rapson 방법을 사용한다. 관로 유출에서 사용되는 연속방정식과 Manning 식은 식(1), 식(2)와 같다.

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_I + Q_W + Q_{GW} - Q \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} A \quad (2)$$

여기서 V 는 저류량, Q 는 유출량, Q_I 는 유입량, Q_W 는 측방 유입량, Q_{GW} 는 지하수 유입량이다.

Transport 블록은 Runoff 블록에서 연산된 결과를 통해 건기 및 우기시 하수관거시스템에서의 유량과 오염물질을 추적 모의한다. Extran 블록은 분류 및 합류 시스템을 가진 도시 배수 유역에서 적용되며, 배수관망 시스템 내에서 유량과 수질을 계산한다. 이는 관수로 등에서 동수역학 방정식을 사용하여 흐름을 추적한다. Storage 블록은 유량과 수질에 대한 조절 및 처리장치의 영향을 평가한다. 각 단계에서의 비용 연산이 가능하며, 저류지의 운영 조작 기준은 수위와 유량이다.

Statistic 블록은 유역의 강우사상에 대한 유출체적, 평균유량, 침투유량, 지속기간, 오염물질 등과 같은 다양한 파라미터에 대한 분석을 수행한다. Graph 블록은 수문곡선과 오염도 곡선을 시각적으로 표현하여 출력장치에 전달한다. Combine 블록은 선행 결과와 연속적인 다른 블록에서의 결과를 통합하여, 확장된 배수 유역에서 적용하기 위한 interface 파일을 관리한다. 이 파일 내에서는 수문 및 오염도 곡선의 통합과 SWMM 모형의 메모리 관리가 이루어진다. Rain 블록은 최대 10개의 강우자료군을 동시에 고려하며, 서로 다른 시간간격의 강우량 데이터 처리와 강우의 시간 및 공간적 분포를 고려한다. Temp 블록은 기온 데이터베이스로 Runoff 블록에서 용설량 계산에 중요한 요소이며, 증발산량 계산의 기본데이터로 활용된다.

SWMM 모형의 입력 변수 중 subcatchment는 지형 및 배수 시스템 요소가 지표면 유출을 단일 배수지점으로 유도하는 토지 수문단위를 의미한다. 이는 소유역의 면적, 불투수율, 폭, 경사 등의 입력데이터를 필요로 한다. Junction은 SWMM에서 link가 교차하는 배수 시스템 노드로, 해당 노드의 고도와 연결된 수로의 최대 깊이와 같은 입력 데이터가 필요하다. Conduit는 junction 간을 연결하는 link로 파이프나 수로를 나타내며, 단면 형상, Manning 계수, 수로의 길이 등의 입력 데이터가 필요하다.

SWMM 입력자료 구축

SWMM 모형의 공간 분석 단위인 subcatchment는 통상적으로 하나의 건물 집수면적을 의미한다. 그러나 본 연구에서는 농경지를 대상으로 하였으므로 subcatchment를 하나의 논 면적으로 가정하였다. 대상지는 총 266개의 subcatchment로 구성되었으며, 이에 대응하는 junction은 총 199개로 설정하였다. Fig. 4는 대상지의 DEM과 SWMM에서 구축된 유역을 나타내었다.

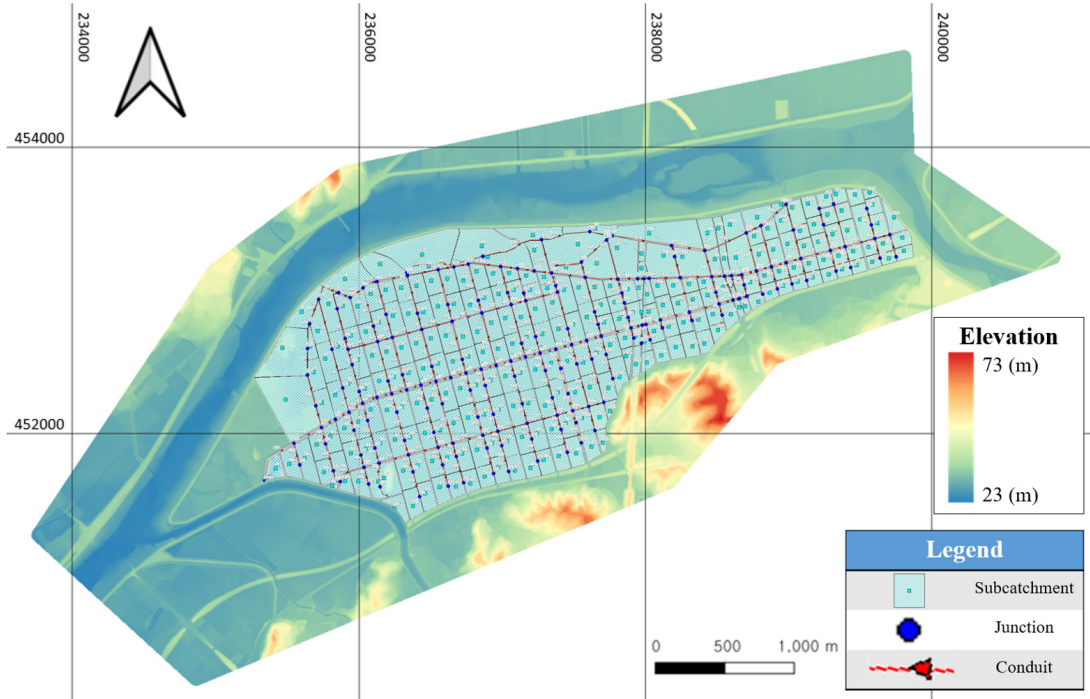


Fig. 4. DEM (digital elevation model) of target area and watershed construction in EPA SWMM (United States Environmental Protection Agency Storm Water Management Model).

대상지의 용배수는 모두 신대배수장으로 유입되며, 대상지가 주변의 고가도로로 둘러싸여 있기에 미호천과 석남천으로부터의 범람가능성을 배제하였다. 또한 본 연구에서는 강우로 발생하는 농경지에서의 내수침수에 초점을 맞추었기 때문에 강우 이외에 대상지 외부로부터의 유량의 유입은 고려하지 않았다.

대상지의 하류에 펌프장이 위치해 있으며, 총 6대의 압축사류 펌프가 운영 중이다. 이 펌프장은 최대 $21 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량을 배출할 수 있는 용량을 가지고 있다. 본 연구에서 SWMM을 활용한 모의에서 펌프장의 용량 내에서 대상지의 배수량이 배수될 수 있도록 모델링을 하였다.

각 subcatchment의 불투수율은 대상지의 대부분의 면적이 논으로 구성되어 있기에 논 특성을 일괄적으로 반영하였다. 각 junction에는 고도와 연결된 수로의 깊이 값을 할당하였다. 대상지의 배수로는 지상에 노출되어 있는 명거 배수로로 구성되어 있으며, 배수로의 구배차를 이용하여 자연배수를 하고 있다. 대상지의 배수관망은 대상지의 상류부터 하류까지 지나가는 3,300m의 배수간선과 대상지의 외곽까지 연결된 배수지선으로 구성되어 있다. 배수지선은 대부분 콘크리트로 구성되어 있지만, 일부 흙으로 구성된 수로들이 존재하였다. 흙수로 들은 접근하기 어려운 장소에 위치하고 있었으며, 일부는 농민들이 임의로 막아 두기도 하여 흙수로에 대한 조사는 충분하게 이루어지지 못하였다. 현장조사를 통해 배수간선과 배수지선의 형태, 폭, 깊이 등에 대한 측량 자료를 확보하였고, 현장조사를 통해 구축된 배수로의 자료를 반영하여 배수로의 형태, 폭, 깊이에 대한 정보로 conduit를 설정하였다. 또한, 고도차에 따라 고도가 높은 곳에 낮은 곳으로 흘러가는 것을 반영하여 유량의 방향을 설정하였다. 하지만 폭이 0.5 m의 좁은 흙수로들은 정보의 부족으로 인해 SWMM에 반영하지 못하였다. 본 연구에선 용수와 배수로의 마찰력을 고려하기 위해 Chow (1959)의 연구내용을 참고하여, 연구지역의 배수로 재질과 배수로 내 식생을 고려하여 Manning계수를 $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ 으로 산정하였다.

Results and Discussion

본 연구에서는 EPA (United States Environmental Protection Agency) SWMM을 활용하여 청주 미호천 인근 농경지를 대상으로 실제 호우사상 기반 범람 모의를 수행하였다. SWMM을 활용한 모의 결과, 총 199개의 junction에서 범람이 관측되었다. Fig. 5는 이러한 범람 지점 199개의 강우 사상 동안의 최대 유출량과 실제 침수지도를 중첩하여 나타낸 그림이다. 모의결과로 식별된 106개의 범람 지점 중, 94개의 지점이 실제 침수가 발생한 지역과 일치하였고, 대부분의 지점에서 실제 침수지역과의 연관성을 확인할 수 있었다. 특히 침수가 가장 크게 일어나는 대상지의 하류 지역에서는 실제 침수지역과 모의 결과가 거의 일치하는 것을 확인하였다.

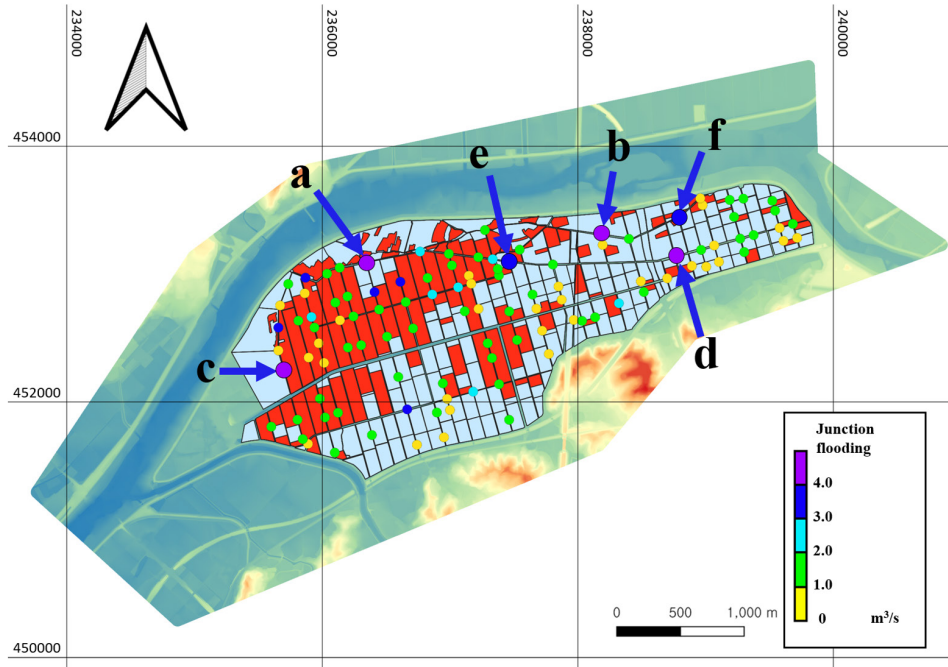


Fig. 5. Actual inundated area depicted in red and flood occurrence points at each junction based on SWMM (Storm Water Management Model) simulation. The a - f points indicate the junctions where flooding occurred most significantly in the watershed.

행정안전부에서 제공하는 침수흔적도(MOIS, 2017)는 침수심의 공간적인 분포만을 보여주며, 시간 경과에 따른 침수면적과 침수심의 변화에 대한 구체적인 정보 제공이 부족하다. 하지만 SWMM을 활용한 모의는 단순히 범람 지점의 위치만을 예측하는 것에 그치지 않고, 각 범람 지점에서의 특정 시점의 수위, 유출량의 결과값을 제시한다. Fig. 5에서는 junction flooding이 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상 발생한 여섯 개의 junction을 표시하고 해당 지점에서의 시간 당 유출량은 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 그래프에서 최대 강우시점인 7시 40분에 여섯 지점 모두 최대 유출량이 발생한 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6의 여섯 지점 외에도 다양한 시간대별 각 범람 지점의 유출량 정보를 상세히 확인할 수 있다. 본 연구의 모의 결과는 SWMM 모형이 농경지의 침수경보 및 관련 위험 관리계획 수립에 있어서 근거 자료로 활용될 수 있음을 시사하였다.

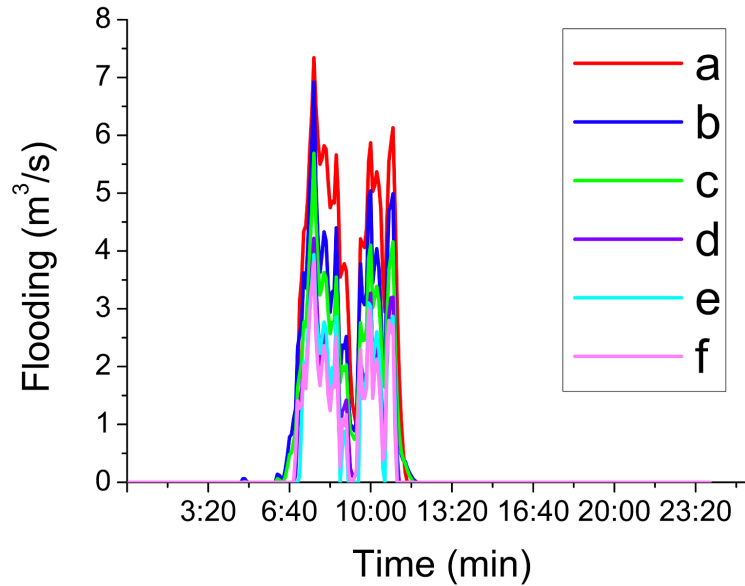


Fig. 6. Amount of flooding at 6 flooding points. The a - f points indicate the junctions where flooding occurred most significantly in the watershed.

SWMM의 모의는 대부분의 지점에서 높은 일치성을 보였지만 유역의 주변부에 위치한 12개의 지점에서는 실제 침수지역과의 연관성이 확인되지 않았다. 특히 대상지의 상류 지역에서 실제 침수가 발생하지 않았음에도 불구하고, SWMM을 활용한 모의에서는 침수가 발생한 것으로 확인되었다. 현장조사를 통한 SWMM상에서의 배수 관망을 모델링하는 과정에서 대상지의 상류지역에는 대부분이 흠수로로 구성되어 있기에 상류 지역의 배수계통을 충분히 반영하지 못하여 이러한 차이가 발생한 것으로 판단되었다. 또한 모의를 진행할 당시의 유역 내 필지의 상세정보가 부족한 상태에서 모의를 진행하였기 때문에, 일괄적으로 모든 필지에 논 특성만을 반영하여 모의를 수행하였다. 이러한 접근은 필지 간의 불투수율의 다양성을 간과하게 되며, 이는 유량의 분포와 흐름에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 실제 유역에서는 필지의 불투수 특성에 따라 유량의 분포와 방향이 달라질 수 있으며, 이를 모의에서 정확히 반영하지 못한 것으로 해석된다.

본 연구의 SWMM을 활용한 농경지 침수 모의에서는 침수의 위치와 해당 위치에서의 유출량만을 계산할 수 있었기에 침수심에 대한 정보는 확인할 수 없었다. 농립수산식품부에 따르면 기존의 논에서는 30 cm의 침수를 허용하였지만, 밭이나 비닐하우스의 경우 이보다 적은 침수만으로도 농작물에 큰 피해가 발생할 수 있다. 그러나 밭이나 비닐하우스의 허용 침수심에 대한 정확한 기준은 아직 확립되지 않았다. 특히, 논에서 원예작물 재배면적이 확대되는 추세에서 침수지역 예측 및 침수심 정보의 중요성은 더욱 커지고 있다. 따라서 후속 연구에서 SWMM의 유출량을 기반으로 한 지표수의 추적을 통해 침수심을 정확히 파악하는 방법론 개발이 필요할 것으로 사료된다. 이는 농경지 침수 관리 및 대응 전략의 효율성을 높이는데 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

Conclusion

본 연구에서는 SWMM을 활용하여 2017년 7월 16일 집중호우가 발생한 청주시 신대배수장 인근 농경지의 범람 모의를 실시하고, 행정안전부에서 제공하는 침수흔적도와 비교·검증하였다. SWMM 모형 모의 결과 106개의 범람 지점 중 94개의 지점이 실제 침수가 발생한 지역과 일치하는 것으로 확인되었다. 이는 SWMM 모의가 농경지에

서 발생하는 침수 예측에 있어서 높은 정확성을 보이며, 침수 깊이와 규모 외에도 배수로의 시간적 변화에 따른 유량 및 수심에 대한 정보를 제공함으로써 농경지 침수 예방 및 대응 전략에 있어서 중요한 참고자료로 활용할 수 있음을 확인하였다.

해당 연구를 통해 SWMM 모형의 실제 현장 적용가능성을 높이고, 농경지의 침수 예방 및 대응 전략을 보다 체계적으로 수립하는 데 기여할 것으로 기대된다. 그러나, 농경지에 특화된 SWMM 모형의 적용 사례는 아직 제한적이며, 모형의 적용에 있어서 한정적인 변수와 초기 조건에 크게 의존하는 한계가 존재하였다. 다양한 환경 조건과 변수를 포함한 모의 결과를 도출하기 위하여 토지 이용 형태, 배수시설의 상태 등을 포함한 다양한 시나리오에 대한 추가 연구와 검증이 필요하다.

본 연구의 초점은 SWMM을 활용한 배수로에서 발생할 수 있는 홍수량을 모의하고 재현성을 검토함에 있었으며, 발생한 지표류의 추적에 대해서는 고려하지 않았다. 향후 연구에서는 지표류의 추적에 대한 분석을 포함하여 더욱 정확하고 실용적인 침수예측을 수행하고자 한다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 연구는 2023년도 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (322082-3, 농업용수 이용량 절감을 위한 스마트 농업용수 계측 모니터링 및 자동 관개 기술 개발).

Authors Information

Inhyeok Song, <https://orcid.org/0009-0006-0703-7756>

Hyunuk An, <https://orcid.org/0000-0002-4566-5159>

Mikyong Choi, <https://orcid.org/0000-0003-3199-1794>

Heesung Lim, <https://orcid.org/0000-0002-1922-3680>

References

- An H, Jeong A, Kim Y, Noh J. 2018. Development of 2D inundation model based on adaptive cut cell mesh (K-Flood). *Journal of Korea Water Resources Association* 51:853-862. [in Korean]
- An SS, Bang NK, Lee JS, Bang SS, Nam WH, Kim HJ. 2022. Simplified analysis of agricultural water network model using SWMM: A case study of Mandae Reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 64:27-37. [in Korean]
- Cheongju City. 2017. Flood damage white paper. Cheongju City, Cheongju, Korea.
- Choi DG, Choi J. 2015. Mapping inundation areas using SWMM. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 33:335-342. [in Korean]
- Choi J, Jeon J, Kim T, Kim B. 2021. Comparison of inundation patterns of urban inundation model and flood tracking model based on inundation traces. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54:71-80. [in Korean]

- Chow VT. 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Jang HI. 2009. A study on the causes and types of inland waterlogging in agricultural lands of Chungnam. Master's thesis, Kongju National Univ., Kongju, Korea. [in Korean]
- Joo JH, Kim HB. 2022. Rainfall frequency and urban flood damage: Focused on capacity level of districts in Seoul, Korea. *Journal of the Korean Regional Development Association* 34:121-138. [in Korean]
- Kim H, Lee JH, Park HJ, Heo JH. 2021. Assessment of temporal probability for rainfall-induced landslides based on nonstationary extreme value analysis. *Engineering Geology* 294:106372.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2017. ASOS Cheongju Weather Observation Station precipitation data. Accessed in <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36> on 5 July 2023. [in Korean]
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2020. Climate anomaly report. KMA, Daejeon, Korea. [in Korean]
- Lee SS, Yang IJ, Lee MH, Noh SJ. 2022. Improving policies for urban inundation management to cope with the climate crisis. Korea Environment Institute, Sejong, Korea. [in Korean]
- Lim HS. 2023. Development of real-time forecasting model for urban flooding based on machine learning. Ph.D. dissertation, Chungnam National Univ., Daejeon, Korea. [in Korean]
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2023. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs' farm map service. Accessed in <https://agis.epis.or.kr/ASD/main/intro.do> on 5 July 2023. [in Korean]
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). 2017. Flood trace map. Accessed in <https://www.bigdata-map.kr/search/55903992> on 5 July 2023. [in Korean]
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). 2021. Flood trace map. Accessed in <https://safemap.go.kr/opna/data/dataView.do?objtId=212> on 5 July 2023. [in Korean]
- Moon C. 2006. Operational status of disaster preventing city plan in Korea. *The Korea Spatial Planning Review* 51:151-168. [in Korean]
- Yeo MH, Nguyen VTV, Kim YS, Kpodonu TA. 2022. An integrated extreme rainfall modeling tool (SDExtreme) for climate change impacts and adaptation. *Water Resources Management* 36:3153-3179.