복합유역 홍수량 산정 및 개발지역 하류 통수능 평가

Estimation of Flood Discharge in Complex Basins and Assessment of Downstream Conveyance in Development Areas

금호준* · 김학수** · 고택조***

Keum, Hojun*, Kim, Haksoo**, and Ko, Taekjo***

Abstract

The rainfall-runoff characteristics of urban and rural areas differ. Hence, major domestic design standards recommend using the rural basin rainfall-runoff models (the unit hydrograph method) for rural areas and the urban rainfall-runoff models (time-area method) for urban areas when estimating the amount of floods. Further, the guidelines for consultations on disaster impact assessment in Korea describe the selection of rainfall-runoff models according to basin types such as urban and rural areas. However, in complex watersheds where rural and urban basins coexist, the type of rainfall-runoff model is selected based on the modeler's (or business operator's) experiences rather than model selection guidelines. This study aims to analyze the impacts of uncertain design standards on disaster impact assessment in Korea. To this end, the parameters for each model (the unit hydrograph method, time-area method) were optimized using the measured datasets. The accuracy of the models was evaluated, as well as the appropriateness of flood reduction measures based on whether there was an assessment of downstream conveyance in development areas. The results of this study are expected to contribute to improving the reliability of the evaluation of flood reduction measures by assessing the accuracy of results in hydrological modeling and supplementing the uncertain flood estimation guidelines.

Key words : Rural Basin Rainfall-runoff Model, Urban Basin Rainfall-runoff Model, Complex Watershed, Guideline for Flood Estimation

요 지

도시유역과 자연유역의 유출특성은 서로 상이하다. 이로 인해, 국내 주요 설계기준에서는 홍수량 산정 시 자연유역에는 자연유역 유출모형(단위도법)을 도시유역에는 도시유역 유출모형(시간-면적 방법)을 사용하도록 권고하고 있다. 재해영향평가 등의 협의 실무지침에서도 유역을 구분하여 모형을 선택하도록 기술하고 있다. 그러나 자연유역과 도시유역이 공존하는 복합유역의 경우 개발 전후에 대해 동일 모형 사용만을 제시하고 있어 사업자의 임의적 판단에 따라 홍수량 산정모형이 선택되어 활용되고 있다. 본 연구에서는 설계 기준상 불확실한 기준이 재해영향평가에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해서 실측자료를 활용하여 모형별(단위도법, 시간-면적 방법) 매개변수를 최적화하고, 정확성을 평가한 다음 하류부의 통수능 검토 유무에 따라 호우재해저감대책 평가 결과를 비교하였다. 본 연구를 통해 유출해석모형에 대한 수문학적 해석결과의 정확성을 평가하고 불명확한 홍수량 산정기준을 보완함으로써 호우재해저감대책 평가의 신뢰성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 자연유역 유출모형, 도시유역 유출모형, 복합유역, 홍수량 산정기준

*정회원, 국립재난안전연구원 방재연구실 선임연구원(E-mail: hojunkeum@korea.com)

Member, Senior Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

**국립재난안전연구원 방재연구실 시설연구관(E-mail: hskim73@korea.com)

Senior Research Officer, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

***교신저자, 정회원, 국립재난안전연구원 방재연구실 책임연구원(Tel: +82-52-928-8261, Fax: +82-52-928-8299, E-mail: kotjo0329@korea.com)

Corresponding Author, Member, Principal Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

1. 서 론

강수량과 강수일수의 증가에 따른 홍수로 인한 침수피해가 빈번히 발생하고 있다. 집중호우란 50 mm/hr 이상 혹은 80 mm/day 이상의 강우가 내리거나, 연강수량의 10%에 달하는 강우가 하루에 내리는 경우를 말하는데 2011년 기상청에 따르면 집중호우는 1970년 대비 2000년대에 들어서 두배 가까이 증가하였다(KMA, 2011). 또한 최근 10년간 집중호우로 인한 인명피해는 207명으로 전체 자연재난으로 발생한 인명피해의 76.7%에 달하고, 재산피해는 약 3조 6천억 원으로 전체 자연재난 피해의 약 58.4%를 차지하고 있다(NDMI, 2018). 이러한 집중호우로 인한 침수피해와 급경사지 붕괴 등의 근본적 원인으로 급격한 도시화에 따른 홍수량 증가가 주목받고 있다.

국내에서는 도시화와 같은 인위적 개발에 따른 풍수해 피해를 저감시키기 위해 개발에 따르는 재해영향요인을 개발사업 시행 이전에 예측·분석하고 적절한 저감대책안을 수립·시행하도록 하고 있다(Kang et al., 2014). 이를 위한 재해영향평가 등의 협의 실무지침(MOIS, 2019a)에서는 개발 전·후 단계의 홍수량 산정을 위해 자연유역과 도시유역에 각각 단위도법과 시간·면적 방법을 적용하도록 하고 있으며 자연과 도시유역이 혼재되어 있는 복합유역에 대해서는 모형의 상의성에 대한 오류를 제어하기 위해 사업자가 하나의 모형을 선정하여 홍수량을 산정하도록 제안하고 있다.

기존 협의가 완료된 재해영향평가 보고서를 검토 결과, 복합유역에 대해서는 홍수량 산정모형의 선택기준이 명확하지 않아 사업자의 임의적 판단에 따라 선택되고 있으며, 자연 혹은 도시유역모형 중 어떤 유형의 모형을 적용하여 홍수량을 산정하느냐에 따라 개발 후 홍수유출 저감대책의 적절성 여부가 다르게 판단되는 사례도 발생하고 있다.

이러한 홍수량 산정모형 선택방법의 불확실성은 재해영향평가 등의 업무 실무지침뿐만 아니라 국내 주요 설계기준(ME, 2017; MOLIT, 2018; MOIS, 2019b)에서도 찾아볼 수 있으며, 홍수량 산정모형 선택 방법의 기준을 제시하기 위해서는 실측자료를 활용하여 복합유역에서 자연 및 도시유역 모형의 정확성을 정량적으로 평가하고 모형의 정확성이 재해영향평가 결과와 홍수유출 저감대책 수립에 미치는 영향을 검토해 볼 필요가 있다.

이와 더불어 재해영향평가 시, 기존 배수체계 상류지역(자연유역)을 개발할 경우에 사업지구 말단부에 접합되는 배수 시설물(우수관거)에 대한 통수능 영향분석이 필요하나, 현재 단순 권고사항으로 사업자가 임의적으로 하류부 통수능 검토 여부를 선택하고 있다. 이와 같은 단순 권고로 인해 개발 후 단계에서 산정된 상류 배수량이 하류 기존 배수체계와 연계한 재해영향평가를 생략되는 사례가 빈번히 발생하는 등 하류지역에서 발생할 수 있는 피해에 대한 정확한 분석이 이루어지지 않고 있다. 또한, 상류지역에서 하류지역

으로 연결되는 배수관거의 통수능 검토 유무에 따라 호우재해 저감대책 결과가 서로 상이하게 나타날 수 있어 재해저감 대책 평가의 일관성을 유지하기 위한 보완이 필요하다.

홍수량 산정모형의 유형별 정확성을 비교한 연구사례를 살펴보면, Cho et al. (2007)은 자연하천유역인 위천과 평창강 유역을 대상으로 SWMM 모형과 Clark 단위도법의 정확성을 평가하였고, 유출량 관점에서 두 모형의 정확성이 유사한 것으로 평가하였다. Kwon and Moon (2005)은 운동파 방정식(Kinematic Wave Equation)과 동역학과 방정식(Dynamic Wave Equation)을 이용한 유출량 산정 결과와 HEC-1 (단위도법) 모형을 이용한 유출량 산정 결과를 비교하여 모형의 적용성을 비교하였다. 국외의 경우 Souza et al. (2012)은 Samambaia 하천을 대상으로 SWMM 모형과 HEC-HMS (단위도법) 모형의 유출량을 비교하였고, HEC-HMS 모형의 유출량 예측값이 더 정확하다는 결론을 도출하였다. Trommer et al. (1996)은 자연하천을 대상으로 유출량 산정에 많이 이용되는 5가지의 유출모형(합리식, USGS 지역회귀식, NRCS TR-20 모델, HEC-1 모델, SWMM 모형)을 대상으로 모의 유출량과 실측 유출량을 비교하였고, 각 모형을 미계측 유역에 적용하여 미계측 유역에서 적용성을 평가하였다. 그러나, 복합유역을 대상으로 실측자료를 활용하여 강우유출모형의 유형별 정확성을 평가한 사례는 드물며, 대부분의 기존 연구는 자연하천유역에 국한되어 자연 및 도시유역모형을 비교 분석하였다(Kim et al., 2005; Choe et al., 2009; Kwak and Lee, 2012).

본 연구에서는 재해영향평가 등의 협의 실무지침에서 제도적 개선이 필요한 부분을 도출하였으며 실제 유역을 대상으로 검증하고 보완하고자 한다. 이를 위해 자연유역과 도시유역이 공존하는 복합유역을 대상으로 모니터링 사이트를 구축하였으며, 실측자료(강우, 유출량)를 활용하여 홍수량 산정모형(Clark 단위도법, 시간·면적 방법)의 정확성을 정량적으로 평가하고자 한다. 또한, 개발지구 말단부에 접합되는 우수관거의 통수능 영향검토 유무가 재해영향평가 시 호우재해 저감대책 평가결과(적합, 부적합)에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구방법 및 적용모형

복합유역에 대한 홍수량 산정모형의 정확성을 평가하기 위해 도시 수문 모니터링 시범유역(159,937 m²)을 구축하였고, 시범유역 내 기상관측지점 1개소와 우수유출 관측지점 1개소(유역출구)를 설치하였다. 홍수량 산정모형의 선정은 재해영향평가 등의 협의 실무지침을 준용하여 자연유역의 경우 Clark 단위도법을 도시유역의 경우 시간·면적 방법을 적용하기 위해 범용모형인 미 환경보존국(Environmental Protection Agency, EPA)의 지원으로 개발된 최신의 Storm Water Management Model (SWMM) 모형을 적용하였다.

모니터링 지점에서 실측된 강우-유출량 데이터를 이용하여 모형별 매개변수를 검 · 보정한 후 모형평가지표로 모형의 정확성을 평가하였다. 또한, 보정된 모형을 이용하여 배수구역 하류부에 접합되는 우수관거의 통수능 영향을 검토하였다. 배수구역 하류부 통수능을 검토함에 있어 상류지역에서 가상 개발 시나리오를 적용하였으며, 개발에 따른 호우저감 대책을 반영하여 개발 전 · 후에 대한 침투홍수량을 모형별로 산정하고, 하류부 우수관거 통수능 영향검토 유무가 호우재해 저감대책 평가 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

2.2 모형의 정확성 평가 방법

매개변수 보정은 관측값과 모의값 사이의 오차를 최소화 하며 최적의 매개변수를 추정해 나가는 과정이다. 최적화의 양적인 정도는 목적함수의 값으로 대표될 수 있고, 목적함수의 값은 모의값과 관측값 사이의 편차의 정도로 정량화된다. 모형 매개변수의 자동보정(Auto-calibration)에서 정확성과 효율성을 좌우하는 가장 중요한 요소는 최적화에 사용된 탐색 알고리즘이다(Yoon et al., 2009). 모형 매개변수 최적화를 위해 Clark 단위도법에서는 단일변량증감법(Univariate-Gradient Method) 사용하였다. 단일변량증감법은 최적화를 위해 선택된 매개변수 중 하나를 제외한 모든 매개변수를 고정시킨 상태에서 하나의 매개변수를 변화시키는 방법으로 발산율이 적은 장점이 있다. SWMM 모형은 집합체 혼합진화법(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona, SCE-UA; Duan et al., 1992)을 이용하여 매개변수를 보정하였다. SCE-UA는 매개변수 공간(Parameter Space)에서 전역적 최적값(Global Optimum)을 선별해 낼 수 있는 방법으로 강우유출모형 최적화에 널리 활용되고 있는 전역 탐색기법이다(Sorooshian et al., 1993). 평균제곱오차의 제곱근(Root Mean Square Error; RMSE)을 최적화를 위한 목적함수로 사용하였다(Eq. (1)).

$$\text{Minimize } \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,cal})^2}{N}} \quad (1)$$

여기서 $q_{t,obs}$ 와 $q_{t,cal}$ 는 관측 및 모의유량값이고, N 은 자료의 개수를 의미한다. 또한, NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency),

관측자료의 표준편차에 대한 평균제곱오차 제곱근의 비율 (RSR), 평균편차의 비율(Percent BIAS; PBIAS)을 모형의 성능평가를 위한 참고지표로 활용하였다(Moriasi et al., 2007). 모형성능을 평가하기 위한 참고지표는 Table 1에 정리하였다.

2.3 유역 하류부 접합지점 통수능 평가

유역 상류 개발 시, 유역 하류부에 접합되는 우수관거의 통수능 영향검토 유무가 호우재해 저감대책 평가결과에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 재해영향평가 등의 협의 실무지침에서 제시하는 홍수량 산정 모형별(Clark 단위도법, SWMM 모형) 매개변수 최적화를 실시한 다음, 최적화된 모형을 이용하여 개발 전 · 후(우수유출저감대책 포함)에 대한 홍수량을 산정하였다. 30년 빈도 확률강우량을 사용하였고, 하류부 우수관거의 통수능은 하수도 설계기준(ME, 2017) 내 관로시설 설계기준을 참고하여 Manning공식을 적용하여 통수능을 산정하였고, 이를 기준으로 홍수저감대책에 따른 모형별 홍수량과 비교하여 우수관거 통수능에 대한 호우재해 저감대책 적절성을 검토하였다.

3. 대상유역 및 모형구축

울산 태화강 삼호동 일부 지역을 대상유역으로 선정하였다. 울산 태화강 유역은 전체 유역면적의 약 52%가 불투수면적으로 구성되어 있다. 시범유역으로 선정된 삼호동 지역은 도시화에 따른 유역 불투수면적비의 증가로 유역의 건전성이 악화되어 도시침수 및 홍수, 하천 건천화, 수질악화 등과 같은 현상이 발생하고 있다(ME, 2013). 대상유역을 포함하는 삼호동 지구(Fig. 1(a))는 태화강 하류에 위치하고 있으며, 유역면적은 약 627,000 m²이다. 삼호동 지구는 주택, 공원, 학교, 주차장 등으로 구성된 인구 밀집지역과 유역 상류의 배후산지로 구분된다(Fig. 1). 대상유역(Fig. 1(b))으로 선정된 삼호동 일부 지역의 유역면적은 159,937 m²로 삼호동 배수구역의 중간에 위치한다. 대상유역 내 공간정보를 분석을 위해 국립지리정보원에서 제공하는 1:1,000 수치지형도를 사용하였고, 지형정보시스템(GIS) 소프트웨어를 활용하여 수치표고모델(DEM)을 작성하고 유역경사정보를 추출

Table 1. Model Performance Statistics for Model Assessment

Statistics	Equations	Optimal Value
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)	$1 - \left(\frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,cal})^2}{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - \bar{q}_{obs})^2} \right)$	1
Percent Bias (PBIAS)	$\left(\frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,cal})}{\sum_{t=1}^N q_{t,obs}} \right) \times 100 (\%)$	0
RMSE-Observations Standard Deviation Ratio (RSR)	$\left(\frac{\sqrt{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,cal})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - \bar{q}_{obs})^2}} \right)$	0

(a) Sam-ho Drainage Basin (area: 627,000 m²)

(b) Study site (area: 159,937 m²)

Fig. 1. Study Site in the Sam-Ho Drainage Basin

(a) Soil Map

(b) Landuse Map

Fig. 2. Geology and Landuse in the Study Site

하였다.

대상유역 토지이용현황을 구분하기 위해 농촌진흥청 국립농업과학원과 국립지리정보원에서 제공하는 정밀토양도와 토지이용도를 사용하였다. 국립농업과학원에서 1:25,000 수치지도를 이용하여 제작된 정밀토양도를 이용하여 대상 지역에서 토양통(토양상, 수문학적토양군)을 분류하였다. 분석결과, 대상지역의 토양은 Hk (황룡, A타입), Se (석계, D타입), HHB (화동-반천, D타입), BIC (반호, B타입), MTE2 (무등-태화-대구, D타입), TME4 (태화-봉계-무등, A타입) 등으로 구성되어 있고, 수문학적 토양군의 분류에 따른 면적 비는 A 타입(8%), B 타입(33.6%), D 타입(58.4%)로 나타났다(Fig. 2(a)). 또한, 대상유역 토지이용현황은 주거지, 상업

지, 공공시설지역이 42.7%, 도로 18.5%, 배후산지 23.4%, 기타 15.4%로 구성되어 있다(Fig. 2(b)).

울산시 남구청 건설과에서 제공받은 하수관망도를 이용하여 SWMM 모형 입력자료들을 구축하였다. 대상유역의 공간적 특성을 반영하여 32개의 소유역, 35개의 하수관거, 36개의 맨홀로 구성하였고(Fig. 3(a)), 침투량 산정에는 Horton 방식을 적용하였다. 대상유역 내 설치되어 있는 강우 관측소 자료를 사용하였고, 유출 모니터링 지점은 유역경계와 배수계통도를 고려하여 복합유역의 특성이 잘 드러나는 최종 출구 지점을 선정하여 유량계를 설치하고 유출량 자료를 취득하였다(Fig. 3(b)).

(a) Sewer Network

(b) Rainfall and Runoff Gauging Stations

Fig. 3. Sewer Network and Gauging Stations Rainfall, Runoff of the Study Site

4. 연구결과

4.1 모형 정확성 평가

매개변수 추정과정에서 발생할 수 있는 주관적 요소를 제거하고, 정확한 모형 평가를 위해 자동보정기법으로 Clark 단위도법과 SWMM 모형의 매개변수를 보정하였다. 2019년 10월 2일 00시부터 24시까지 1분 단위 관측 강우 및 유출량 자료를 이용하였다. 보정을 위해 선택된 강우유출사상의 총 누적강우량은 206.9 mm이고, 누적유출량 및 첨두유출량은 각각 230.28 m³/s와 1.35 m³/s이다. 모형평가지표(NSE, PBIAS (%), RSR)로 모형의 정확성을 평가하였다. Clark 단위도법과 SWMM 모형의 모형보정 결과는 Fig. 4에 도시하였고, 평가지표는 Table 2에 정리하였다.

Clark 단위도법에서 계산된 누적유출량은 223.71 m³/s, 첨두유출량은 1.5 m³/s로 실측치에 비해 누적유출량은 3% (실측값 230.28 m³/s) 작은 반면, 첨두유출량은 약 11% (실측값 1.35 m³/s) 크게 평가되었다. SWMM 모형에서 모의된 누적유출량은 227.06 m³/s (실측값 230.28 m³/s)이고 첨두유출량은 1.46 m³/s이었으며 실측치에 비해 누적유출량은 1% 작았으며 첨두유출량은 약 8% (실측값 1.35 m³/s) 크게 평가되었다. 모형평가지표에서는 Clark 단위도법과 SWMM 모형 모두에서 전반적으로 양호한 모형 성능값을 보였다(Table 2).

4개의 강우유출사상을 활용하여 보정된 모형을 검증하였다. 선별된 강우사상은 2020년 6월부터 7월까지 강우량으로 써 최대 122.5 mm에서 최소 75.3 mm이며, 강우의 지속기간은 24시간으로 첨두유출이 명확히 구분되는 강우사상을 선택하였다(Table 3). 총 유출량은 최대 217.49 m³/s에서 최소 72.81 m³/s로 예측되었으며, 시간당 최대강우량은 29.5 mm에서 15.8 mm로 관측되었다.

Fig. 4. Hydrographs Derived from Calibrated Parameters of the Watershed Runoff Simulation Model (Clark Unit Hydrograph, SWMM)

Table 2. Calibration Results for the Watershed Runoff Simulation Models

Model	NSE	PBIAS (%)	RSR
Clark Unit Hydrograph	0.85	2.55	0.38
SWMM	0.97	2.71	0.18

강우사상별 Clark 단위도법과 SWMM 모형의 검증 결과를 첨두유출량 관점에서 비교하였다(Table 4). 백분율 오차로 비교하였을 때, 강우사상별 예측된 첨두유출량에 비해 Clark 단위도법은 20.9% (0.60 m³/s), 61.2% (0.27 m³/s), 32.0% (0.68 m³/s), 50.4% (0.28 m³/s)인 반면, SWMM 모형은 7.0% (0.71 m³/s), -4.4% (0.72 m³/s), 11.7% (0.89 m³/s),

Table 3. Rainfall-Rainfall Events for Model Verification

Event No	Rainfall Period	Total Rainfall (mm)	Total Runoff (m ³ /s)	Maximum Rainfall (mm/hr)
Rainfall 1	2020.6.29. (0 h~24 h)	105.2	117.81	29.5
Rainfall 2	2020.7.22. (0 h~24 h)	75.3	75.94	25.6
Rainfall 3	2020.7.23. (0 h~24 h)	122.5	217.49	33.6
Rainfall 4	2020.7.27. (0 h~24 h)	79.0	72.81	15.8

Table 4. Comparison of Peak Flows According to Rainfall Events

Event No	Observed Peak Flow (m ³ /s)	Clark Unit Hydrograph (m ³ /s)	SWMM Model (m ³ /s)
Rainfall 1	0.76	0.60	0.71
Rainfall 2	0.69	0.27	0.72
Rainfall 3	1.01	0.68	0.89
Rainfall 4	0.57	0.28	0.49

Fig. 5. Verification of the Watershed Runoff Simulation Model (Clark Unit Hydrograph, SWMM)

14.3% (0.49 m³/s)로 SWMM 모형에서 계산된 첨두유출량이 실측된 첨두유출량과 유사한 값을 보였다. Clark 단위도법과 SWMM 모형의 모형별 검증결과는 Fig. 5에 도시하였다. 실측 유출량과 계산된 유출량을 모형성능지표를 활용하

여 정량적으로 정확성을 비교하였다(Table 5). SWMM 모형에서 계산된 유출량이 실측 유출량보다 다소 크게 산정되거나, 유사한 수문곡선 형태를 가지는 것으로 분석되었으며, 복합유역을 대상으로 SWMM 모형을 적용하여 유출량을

Table 5. Verification Results for the Watershed Runoff Simulation Models

Rainfall	Model	NSE	PBIAS (%)	RSR
Rainfall 1	Clark Unit Hydrograph	0.85	35.94	0.39
	SWMM	0.90	9.97	0.32
Rainfall 2	Clark Unit Hydrograph	0.54	47.16	0.68
	SWMM	0.89	5.25	0.33
Rainfall 3	Clark Unit Hydrograph	0.55	56.31	0.67
	SWMM	0.66	45.02	0.58
Rainfall 4	Clark Unit Hydrograph	0.70	39.72	0.55
	SWMM	0.91	-4.02	0.30

Fig. 6. Development Scenario Upstream of the Study Site

산정하였을 때 침투홍수량에 대한 유출수문 특성을 적절히 반영되는 것으로 평가되었다. 강우사상 3 (2020년 7월 23일)의 경우, 강우종료 후 하류 하수관거로 배수 지연으로 실측 수문곡선 저류부가 급격히 감소하지 않았고(Fig. 5(c)), 이는 각 해석모형이 물수지 측면(Table 5, PBIAS (%))에서 다소 과소 평가되는 원인이 되었다.

4.2 유역 하류부 접합지점 통수능 평가

재해영향평가 등의 협의 실무지침에서는 재해영향저감 대책 수립 및 저감방안을 반영하도록 명시하고 있다. 그러나 저감된 침투홍수량과 기존 배수 관거와의 연계에 대한 검토 부분이 권고사항으로 제시되고 있다. 본 연구에서는 기존 배수체계 상류지역 개발 시, 기존 배수관거를 연계한 재해영향평가를 검토하였다. 침투홍수량 산정을 위해서 매개변수를 검 · 보정한 Clark 단위도법과 SWMM 모형을 적용하였다. 개발시나리오 구성은 유역의 상류부인 자연유역의 면적 55,621.5 m²중 68.2%에 해당하는 37,894.1 m²에 아파트 단지

가 조성된다고 가정하였다(Fig. 6). 아파트 단지 면적을 제외한 17,727.4 m²는 산지로 구성하였다. 개발에 의한 침투홍수량을 저감하기 위해 아파트 단지 내에는 공원 2개소를 조성하였으며, 총 공원 면적은 4,328.9 m²로 조성하였다. 이는 아파트 단지면적의 약 11.4% (37,894.1 m²)에 해당한다. 개발 전 · 후 시나리오를 반영하여 모형 입력자료를 구성하였다.

개발시나리오를 적용하고 개발 전 · 후에 따른 침투홍수량을 산정하기 위해서는 먼저 확률강우량을 산정하였다. 확률강우량의 경우 기존 보고서를 참고하여 적용하였으며(NDMI, 2019), 30년 빈도의 확률강우량 75.9 mm/hr의 경우 울산광역시 울주군에서 공고한 지역별 방재성능목표(75.0 mm/hr)와 비교하여 방재성능목표에 부합하는 값을 확인하였다.

상류에 위치한 자연유역이 개발시나리오에 따라 변화하는 침투홍수량을 모형별로 산정하였다. 개발 후 침투홍수량은 개발 전의 침투홍수량에 비해 각각 0.39 m³/s (Clark 단위도법), 1.00 m³/s (SWMM 모형) 증가하였다(Table 6). 저감대책 수립한 후 침투홍수량을 살펴보면, Clark 단위도법

Table 6. Peak Flows for Each Rainfall-Runoff Model

Model	Development Plan	Peak Flows (m ³ /s)
Clark Unit Hydrograph	Before Development	1.49
	After Development [†]	1.88
	Flood Reduction Measures ^{††}	1.44
SWMM	Before Development	3.13
	After Development [†]	4.13
	Flood Reduction Measures ^{††}	3.13

[†] After Development without Flood Reduction Measures

^{††} After Development with Flood Reduction Measures

에서는 1.49 m³/s에서 1.44 m³/s로 0.05 m³/s 감소하였고, SWMM 모형에서는 3.13 m³/s에서 3.13 m³/s로 개발 전·후 침투홍수량의 변동이 없는 것으로 모의되었다. 이는 재해영향평가 등의 협의 지침에서 제시하는 저감대책의 기준에 적합한 것을 알 수 있다(Table 6).

본 연구지역은 상류지역의 홍수량이 하류부 하수관거로 바로 접합되기 때문에 통수능에 대한 검토를 실시하여 하류부 영향 검토 유무에 대한 결과를 비교하였다. 하수관거 직경(1,200 mm), 하수관거 평균경사(0.0087), 관거면적(1.13 m²), 조도계수(0.013), 유속(3.22 m/s)을 이용하여 Manning 공식으로 하수관거 관로유량을 산정하였고, 여유율 80%를 고려하였을 때, 2.91 m³/s를 최대 통수능으로 설정하였다. 하수관거의 최대 통수능 2.91 m³/s를 기준으로 모형별 침투홍수량을 비교했을 때, Clark 단위도법에서 산정된 30년 빈도의 침투홍수량 1.44 m³/s는 이론상 전량 배수 가능하나, SWMM 모형에 의해 산정된 침투홍수량 3.13 m³/s는 관로유량을 초과하여 통수능이 부족한 것으로 분석되었다. 이처럼, 홍수량 산정 모형에 따라 재해영향평가 결과가 상이하게 나올 수 있으므로 이를 보완하기 위해서는 재해영향평가 시 개발 지역 하류부의 통수능 영향분석을 의무적으로 시행하는 것을 검토해 볼 필요성이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합유역에 대한 홍수량 산정모형 선택기준을 보완하고 홍수유출 저감대책 평가 절차의 신뢰성을 개선하고자 하였다. 이를 위해서 실측자료 기반 홍수량 산정모형의 정확성을 평가하였고, 재해영향평가 시 하류부 통수능 검토 유무가 호우재해 저감대책 평가 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실측자료를 활용하여 홍수량 산정모형 매개변수에 대한 자동보정을 수행하였다. 모형 보정결과, Clark 단위도법에서 계산된 누적유출량은 223.71 m³/s, 침투유출량은 1.5 m³/s로 실측치에 비해 누적유출량은 3% (230.28 m³/s)로 작았으며 침투유출량은 11% (1.35 m³/s)

로 크게 산정되었다. SWMM 모형에서 계산된 누적유출량은 227.06 m³/s, 침투유출량은 1.46 m³/s로 실측치에 비해 누적유출량은 1% (230.28 m³/s)로 작았으며 침투유출량은 8% (1.35 m³/s)로 증가하였다. 모형평가 지표를 활용하여 정량적으로 비교하였을 때, 두 모형 모두에서 양호한 모형성능을 보였다.

- (2) 모형의 검증을 위해 2020년 호우기 때 관측된 4개의 강우유출사상을 사용하였다. 모형평가지표를 활용하여 정량적으로 정확성을 비교하였을 때, 복합유역에서 Clark 단위도법보다 SWMM 모형이 우수하게 평가되었다. 홍수량 산정모형의 검·보정 결과를 통해 SWMM 모형이 복합유역에 적합함을 입증하였다. SWMM 모형과 달리 Clark 단위도법에서는 홍수량 산정을 위한 매개변수인 도달시간과 저류상수 이외에 유출곡선지수(CN)값이 침투홍수량 산정 시 크게 영향을 받는 것으로 보인다.
- (3) 확률강우량에 따른 유역의 침투홍수량을 산정하였고, 침투시설을 이용하여 저감대책을 수립하였다(가상 개발시나리오). 저감된 침투홍수량이 하류부의 하수관거로 접합될 때 통수능에 대한 검토를 실시해 본 결과, Clark 단위도법에서는 재해영향평가에서 적합한 결과를 얻었으나 SWMM 모형에서 산정된 침투홍수량은 하수관거의 계획유출량을 초과하여 통수능을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 자연유역 상류부에 도시지역을 개발하고자 할 때 고려하여야 할 사항으로는 개발 후 저감시설로 인하여 침투홍수량이 감소하더라도 하류부 하수관거의 통수능에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서 제안된 기술적 개선방안을 적용할 경우, 미계측 신규 개발지역에 대하여 홍수량 예측의 정확성과 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 침투홍수량 저감대책과 통수능 분석을 통하여 상류지역의 개발로 인한 하류지역의 수재해 방어 능력 개선에 도움이 될 것으로 여겨진다. 아울러 본 연구의 결과는 관련 제도 보완을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Cho, M.O., Yoon, J.Y., Jang, S.H., and Yoon, Y.N. (2007). An analysis of flood runoff variations due to watershed development using SWMM. *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 2B, pp. 125-132.
- Choe, C.G., Ham, G.U., Jang, D.J., Yoon, S.M., Park, J.H., and Kim, K.P. (2009). Runoff analysis of the distributed model and the lumped model. *2009 conference of Korea Society of Civil Engineers*, Korea Society of Civil Engineers, pp. 3248-3251.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031.
- Kang, S.J., Jung, J.C., and Lee, D.B. (2014). Improvement of preliminary disaster inspection and consultation system. *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 5, pp. 395-406.
- Kim, J.S., Ahn, J.H., Moon, Y.I., and Oh, T.S. (2005). Runoff analysis of urban watershed using MIKE SWMM model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 11, pp. 907-916.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2011). *Abnormal Climate Report*.
- Kwak, C.J., and Lee, J.J. (2012). A development of method for surface and runoff analysis in urban composite watershed(Ⅱ). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 53-64.
- Kwon, H.H., and Moon, Y.I. (2005). An analysis of the rainfall-runoff of natural watershed using the hydraulic routing method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 7, pp. 555-564.
- Ministry of Environment (ME). (2013). *Nationwide impervious area survey and improvement plan*.
- Ministry of Environment (ME). (2017). *Design Standard of Drainage System*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2018). *River Design Standard*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2019a). *Guide for disaster impact assessment consultation*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2019b). *The Design Criteria for Small Stream*.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- National Disaster Management Research Institute (NDMI). (2018). *Development of the technology for flood damage reduction in urban areas using a rainfall simulator*.
- National Disaster Management Research Institute (NDMI). (2019). *Development of the technology for flood damage reduction in urban areas using a rainfall simulator(Ⅱ)*.
- Sorooshian, S., Duan, Q., and Gupta, V.K. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the sacramento soil moisture accounting model. *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 1185-1194.
- Souza, R.M., Crispim, D.C., and Formiga, K.T.M. (2012). Comparative study between the models SWMM and HEC-HMS to simulation the storm flow. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, Vol. 5, No. 2, pp. 1-11.
- Trommer, J.T., Loper, J.E., Hammett, K.M., and Bowman, G. (1996). *Comarison of estimated and observed stormwater runoff for fifteen watersheds in west-central florida using five common design technique*. Open-File Report 96-129, U.S. Geological Survey, Tallahassee, Florida.
- Yoon, G.H., Park, M.K., Choi, B.M., and Kim, Y.J. (2009). Study on parameter optimization in daegok & sayun dam basins using HEC-HMS. *2009 Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 1103-1107.

Received	May 4, 2021
Revised	May 4, 2021
Accepted	June 17, 2021