

# 도시홍수예보를 위한 SWMM과 HEC-RAS의 연계 검토

## The Study on the Connection of SWMM and HEC-RAS for Urban Flood Forecasting

윤성심\* , 배덕효\*\*  
Seong-Sim Yoon, Deg-Hyo Bae

### 요 지

최근의 급속한 도시화로 인한 불투수면적의 증가는 침투유량의 증가, 홍수도달시간의 단축을 야기해 도시 지역의 홍수 피해를 증가시키고 있다. 특히 하천 홍수위 상승에 의한 외수피해와 순간적인 집중호우에 의해 도로 노면수의 배수불량에서 기인하는 내수피해가 겹치는 경우 도시지역의 홍수피해는 더욱 가중된다. 이러한 도시홍수의 피해를 방지하기 위해서는 구조적 또는 비구조적인 대책수립이 필요하다. 구조적 대책의 경우 효과적이나 예산과 공기 등의 문제가 있으며, 중추적인 해결책이 되지 않으므로 도시홍수예보 시스템의 개발이 필요하다. 일반적으로 홍수예보에는 유출해석모형이 활용되고 있다. 유출해석모형 중 SWMM 모형은 맨홀 및 우수관망의 고려가 가능하여 하천과 우수관로가 연계된 도시 유출특성의 모의가 가능하여 도시홍수예보에 적합한 모형이다. 그러나 SWMM은 소배수구역의 분할 및 계산시간의 제약으로 대체적으로 유역면적이 100km<sup>2</sup> 내에 적용되는 한계를 가지고 있다. 따라서 분류 및 지류하천과 우수관로가 연계되는 100km<sup>2</sup> 이상인 도시지역의 홍수예보를 위해서는 우수관망 해석 및 하천흐름해석의 연계가 필요하다. 본 연구에서는 중규모 지역의 도시홍수예보를 위해 SWMM과 HEC-RAS 모형을 연계하는 방안을 제시하였다. 중랑천 유역을 대상으로 SWMM 모형을 이용하여 소유역의 지표 및 관망유출과 지류하천의 유출 분석을 수행하였고, 중랑천 본류구간에 대해서는 HEC-RAS 모형을 구축하여 하천의 부정류 해석을 수행하였다. 또한, SWMM으로 계산된 배수구역별 유출해석 결과를 HEC-RAS의 지류유입량으로 활용하여 본류의 지류유입 영향을 고려하도록 하였으며, 원활한 연계를 위해 SWMM과 HEC-RAS를 연계한 시스템을 구축하였다. 결과적으로 SWMM과 HEC-RAS를 연계시스템 통한 모의유량이 관측유량과 유사한 결과를 보였으며, 도시홍수예보를 위한 SWMM과 HEC-RAS의 연계는 복잡한 도시지역의 홍수관리에 활용성이 클 것으로 판단된다.

**핵심용어 : 도시홍수예보, SWMM, HEC-RAS**

### 1. 서론

최근의 급속한 도시화로 인한 불투수면적의 증가는 침투유량의 증가, 홍수도달시간의 단축을 야기해 도시 지역의 홍수 피해를 증가시키고 있다. 도시지역의 홍수피해 원인으로는 하천 홍수위 상승에 의한 외수피해와 순간적인 집중호우로 인한 도로 노면수의 배수불량에서 기인하는 내수피해가 있는데, 두 원인이 동시에 발생할 경우 심각한 피해가 발생할 수 있다. 이러한 도시지역의 홍수피해를 방지하기 위해서는 구조적 또는 비구조적인 대책수립이 필요하다. 구조적 대책은 효과적이지만 중규모 이상 도시지역의 경우 하천 주변이 대부분 도로나 주택지로 이용되고 있으므로 구조물 건설에는 한계가 있다. 따라서 홍수발생을 사전에 예측하여 피해를 최소화할 수 있는 비구조적 대책이 필요하다. 대표적인 비구조적 방법으로 홍수예보가 있다. 일반적으로 홍수예보시스템에서는 레이다 예측강우 및 실시간 관측강우를 유출모형에 입력하여 홍수량을 예측하고 있다. 지금까지 도시지역에서의 홍수예보를 위한 연구는 100km<sup>2</sup> 이하의 소규모 유역을 대상으로 수행되어 왔으나, 최근의 지속적인 개발로 인한 도시의 확장으로 중규모 이상의 도시지역에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 이와 같은 측면에서 중규모 이상 대규모 도시지역의 홍수예보를 위하여 SWMM과 HEC-RAS 모

\* 정회원.세종대학교 토목환경공학과 박사과정-E-mail : [lapisis@hanmail.net](mailto:lapisis@hanmail.net)

\*\* 정회원.세종대학교 토목환경공학과 교수.물자원연구소-E-mail : [dhbae@sejong.ac.kr](mailto:dhbae@sejong.ac.kr)

형을 연계하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 방법론

### 2.1 연구절차

도시유역의 홍수예보를 위해 본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 바와 같은 방법론을 제시하였다. 우선 선정된 대상유역에 대한 수문자료와 지형자료를 수집하고, 이를 바탕으로 SWMM과 HEC-RAS 모형에 대한 입력자료를 구축한다. 그 다음, SWMM을 이용하여 배수구역별 지류유입량을 계산하고 이를 경계조건으로 유역의 본류구간 모의는 HEC-RAS 부정류 모형을 이용하여 계산하게 된다. 본 연구에서는 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 정확도 평가를 위해 실제 호우사상을 대상으로 유출분석을 수행하였다.

### 2.2 분석유역 및 자료수집

#### 2.2.1 중랑천 유역의 개황

중랑천 유역은 한강의 제1지류로서 대표적인 도시유역이다. 1998년과 2001년을 비롯해 집중호우 때마다 노원구 공릉동과 월계동, 상계동 노원마을과 중랑구 목동과 상봉동, 동대문구 이문동 등 중랑천 주변지역은 침수 피해가 발생하였다. 이러한 피해는 도시유역의 특성인 하천의 복개 및 교량으로 인한 통수단면의 축소로 인한 하천수위의 증가, 배수관과 하천수위의 차로 인한 배수로나 하수도를 통한 역류로 초래된다. 중랑천 유역은 하천 양안의 제방 위에 간선도로가 건설되어 있어 집중호우시 빗물이 아래로 스며들 수도 없고, 인근 저지대엔 주택가가 들어서 있어 제방을 확장할 수도 없으며, 강변의 공원화로 인해 저수호안의 침수로 인한 인명피해의 우려가 존재하므로 정확한 홍수예보시스템의 구축을 통한 홍수방제가 요구되는 유역이다.

중랑천유역은 서울특별시와 의정부시가 3/4 이상을 접하는 고밀도의 도시지역으로 농경지는 주로 중·상류부의 제1, 제2지류 연안에 다소 분포하고 있으며, 유역의 평균고도는 107.2m이다. 하폭은 하구부에서 330.0m, 서울시 경계부근에서 110.0m 정도이고, 평균상상경사는 1/1,150이다. 유역의 상류부 북측에 의정부시와 양주군계를 이루는 천보산맥이 위치하고 유역의 동측에 용암산(EL.476.9m), 수락산(EL.637.7m), 불암산(EL.508m) 등이 왕숙천과 분수령을 이루고 있으며 유역의 서측으로는 도봉산(EL.730.5m), 북한산(EL.799.5m) 등이 곡릉천, 창릉천과 분수령을 이루고 있다. 중랑천 유역은 행정구역상 경기도와 서울시지역으로 구분되며, 경기도는 의정부시, 양주군 주내면, 그리고 서울시지역은 도봉구, 노원구, 강북구, 성북구, 중랑구, 광진구, 성동구, 종로구, 중구 등을 포함하고 있다(서울시, 2002).

#### 2.2.2 수문 및 지형자료 구축

현재 중랑천 유역은 도시홍수재해관리기술연구사업단에서 2004년부터 자체적으로 강우·수위 관측을 수행하면서 서울시 데이터베이스와의 연계를 통해 수문자료를 수집·관리하는 도시시험유역이 운영되고 있다(배덕효 등, 2007). 또한, 홍수기 전후에 하천단면 측량을 수행하여 중랑천 하천단면의 지형자료를 구축하고 있다. 본 연구에서 사용된 수문자료 및 지형자료는 중랑천 시험유역 운영을 통해 구축된 자료를 사용한 것으로 SWMM 모형의 강우입력 자료로는 서울시와 기상청 관할의 강우 관측소 19개 지점자료를 활용하였다. 또한, 6개 지점의 수위 관측소 자료를 이용하여 모형의 검정을 수행하였다. 2000년부터 2007년의 시강우 및 시수위 자료를 수집하여 7개의 호우사상을 선정하고 모형의 보정 및 검정에 활용하였다.

SWMM과 HEC-RAS 모형의 구축을 위해서 DEM, 토지이용도, 토양도, 토지피복도, 하수관망 및 하도 단면자료와 같은 지형자료를 구축하였다. 구축된 지형자료를 이용한 SWMM의 입력자료 계산에는 상용소프트웨어인 ArcGIS 8.0과 AutoCAD를 사용하였다.

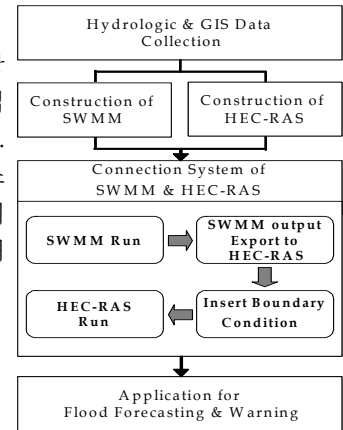


Fig. 1. Flowchart of the Study

### 3. 적용 및 결과 분석

#### 3.1 유역구분 및 모형 구축

본 연구에서는 중랑천 유역의 강우자료와 유역특성자료를 입력하여 SWMM을 구축하였다. SWMM을 구축하기 위해 중랑천 유역을 Fig. 2(a)와 같이 하천을 간략화한 후 지류하천 및 본류의 영향을 고려하여 25개 배수구역(Fig. 2(b))으로 분할하여 구축하였다. SWMM에서 25개 배수구역별로 계산된 유출량 결과는 본류에 사각형과 원으로 표시된 유입지점(Fig. 2(b))을 통해 HEC-RAS 모형에 지류유입으로 입력된다. 여기서 사각형은 지류하천을 통한 유입, 원은 중랑천 본류에 직접 위치한 토출구를 통한 유입을 총 55개 유입지점으로 간략화 한 것이다. 배수구역의 지표유출은 SWMM의 RUNOFF 블록으로 계산하고, 계산 결과를 EXTRAN 블록의 기본자료로 사용하여 배수구역별 관망 유출 및 지류하천 유출 해석을 수행하였다.

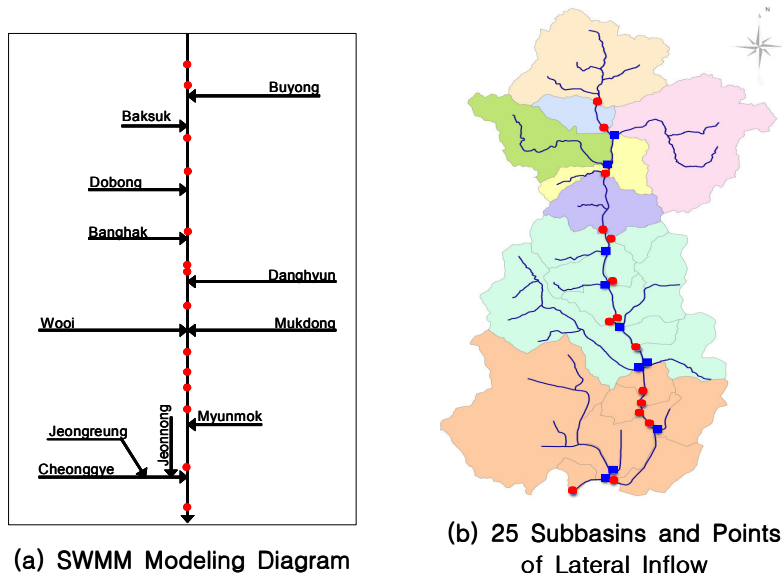


Fig. 2. Status of SWMM Construction

중랑천의 HEC-RAS를 구축하기 위해 하도를 형성하고, 실제 측량된 하천단면 자료를 이용하여 총 301개의 하천 횡단면 및 6개의 수공구조물에 대한 입력자료를 구성하였다. HEC-RAS에서는 지류유입을 고려한 부정류 계산을 위해 SWMM을 통해 계산된 배수구역의 유출량을 55개 지점에서 측방유입으로 받도록 구축하였다. 상류단 경계조건으로는 신곡교의 유량자료를 사용하였으며, 하류단 경계조건으로 성동교의 수위자료를 사용하도록 설정하였다.

본 연구에서 구축된 SWMM과 HEC-RAS를 홍수예보에 활용하기 위해서는 계산시간의 단축이 요구된다. 본 연구에서는 이를 위해 각 배수구역별 강우입력 및 SWMM 모형의 실행, SWMM 결과의 HEC-RAS 입력, 그리고 HEC-RAS를 이용한 부정류 해석이 일괄적으로 처리될 수 있는 시스템을 구축하였다(Fig. 3). 이 시스템은 Visual Basic을 이용하여 GUI 구성 및 SWMM과 HEC-RAS의 연계 과정을 처리하였고, Fortran을 이용하여 강우자료의 자동 입력을 처리하였다. 또한, 배치파일을 사용하여 25개의 소유역이 연속되어 모의되도록 구성하였다.

#### 3.2 홍수유출 분석

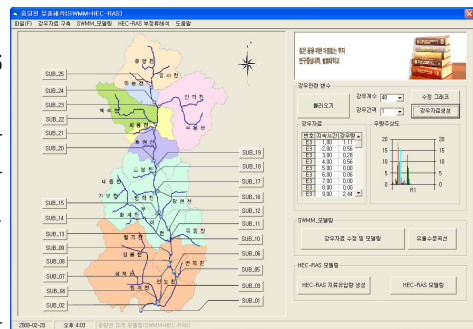


Fig. 3. Connection System of SWMM and HEC-RAS

본 연구에서는 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 정확도 평가를 위해 실제 호우사상을 대상으로 홍수 유출분석을 수행하였다. 선정된 6개 호우사상에 대해 보정 및 검정을 수행한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5, Table 1과 Table 2에 제시하였다. 각 호우사상에 대한 모의홍수량의 검정을 위해 월계1교와 중랑교의 관측유량을 활용하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 정리된 그래프에서 실선은 관측유량을 나타내고, 점선은 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 모의홍수량을 나타낸다. 대체로 첨두홍수량 및 도달시간이 유사하였으나, 특히 하류에 위치한 중랑교 지점의 모의홍수량이 대체로 과소추정되어 관측치와의 편차 및 정확도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 원인으로서는 하류 경계조건인 성동교 수위관측소의 밀물시 한강으로 유입되는 유량의 영향으로 인한 자료 관측의 부정확성이 부정류 계산시 불안정성을 증가시켜 중랑교 지점에서 모의홍수량의 정확도가 떨어지게 되는 것으로 사료된다. Table 1과 Table 2는 통계적 분석결과를 제시한 것이다. 중랑천 중류에 위치한 월계1교 지점의 경우 상관계수가 0.78~0.95, 모형 효율성계수가 0.49~0.89, 유출용적오차가 1.27~24.26%의 범위를 보였으며, 중랑교 지점의 경우 상관계수가 0.76~0.98, 모형효율성계수가 0.53~0.92, 유출용적오차가 13.69~31.16%를 나타내었다. 도식적 및 통계적 분석 결과 호우사상에 따라 다소 차이는 있으나 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템은 중랑천 유역의 홍수유출 사상을 관측치에 비교적 적합하게 모의하는 것으로 나타났다.

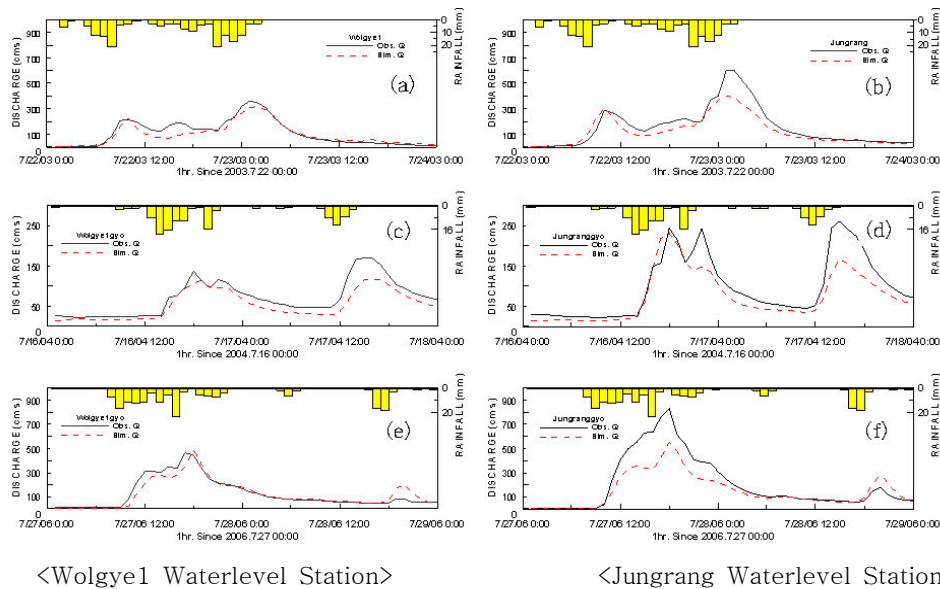


Fig. 4. Observed and Simulated Discharges for Calibration Events

Table 1. Statistical Results of Calibration Events

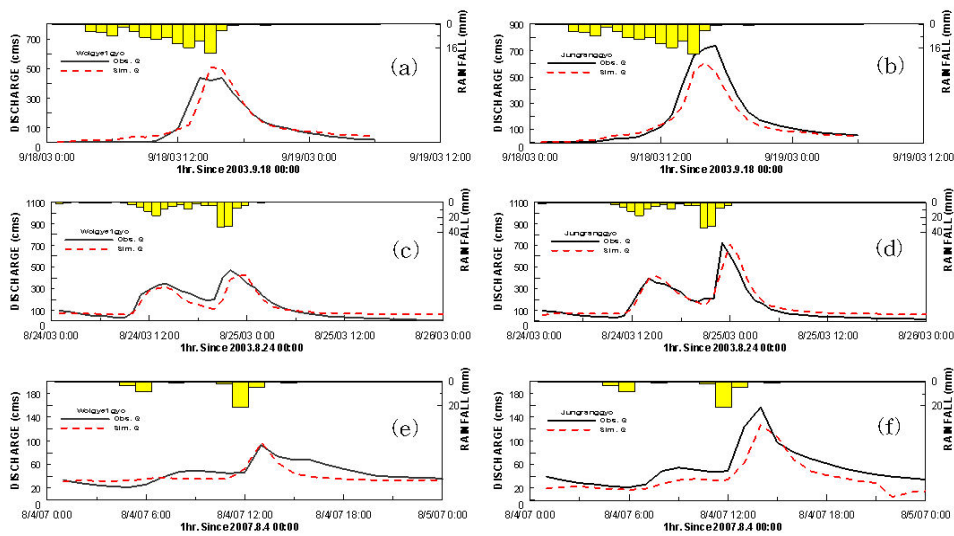
Item	CORR-C	RMSE	ME	VE	
2003.7.22-23	Wolgye1	0.9537	0.66	0.88	-11.48
	Jungrang	0.9644	1.26	0.82	-21.71
2004.7.16-17	Wolgye1	0.9495	0.44	0.73	-24.26
	Jungrang	0.9303	0.72	0.76	-23.90
2006.7.27-28	Wolgye1	0.9404	0.80	0.88	-2.39
	Jungrang	0.9565	2.18	0.74	-25.94

(주) 유출용적오차(VE) =  $100 \times (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i$ , 여기서 O는 관측유량, S는 계산유량.

평균제곱근오차(RMSE) =  $\sqrt{\sum (O_i - S_i)^2 / n}$ , 여기서 n은 자료수.

모형 효율성계수(ME) =  $[\sum (O_i - \bar{O})^2 - \sum (O_i - S_i)^2] / \sum (O_i - \bar{O})^2$ , 여기서  $\bar{O}$ 는 관측유량의 평균

상관계수(CORR-C) =  $SS_{OS} / \sqrt{SS_O \times SS_S}$ , 여기서  $SS_{OS} = \sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})$ ,  $SS_O = \sum (O_i - \bar{O})^2$ ,  $SS_S = \sum (S_i - \bar{S})^2$



<Wolgye1 Waterlevel Station>

<Jungrang Waterlevel Station>

Fig. 5. Observed and Simulated Discharges for Verification Events

Table 2. Statistical Results of Verification Events

Item		C-CORR	RMSE	ME	VE
2003.9.18	Wolgye1	0.9443	0.88	0.89	5.14
	Jungrang	0.9839	1.16	0.92	-13.69
2003.8.24-25	Wolgye1	0.9343	0.98	0.85	-1.27
	Jungrang	0.9462	1.08	0.88	15.53
2007.8.4	Wolgye1	0.8250	0.23	0.60	-12.22
	Jungrang	0.9208	0.40	0.60	-31.16

## 5. 결론

본 연구는 도시유역의 홍수예보를 위한 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 활용을 제안하고 이의 적용성을 분석하였다. SWMM과 HEC-RAS 연계시스템은 도시유역의 유출특성을 고려하면서 짧은 계산 시간으로 신뢰성 있는 하천 홍수량의 계산이 가능한 것으로 나타났다. 또한, 이 시스템은 기존의 수작업을 최소화할 수 있도록 SWMM의 강우 입력 및 실행, SWMM 유출자료의 HEC-RAS 입력으로의 변환을 일괄 처리되도록 개발되었다. SWMM과 HEC-RAS 연계시스템을 중랑천 유역에 구축하고 실제 호우사상에 적용하여 평가한 결과, 관측유량에 적합한 결과를 나타내었다. 본 연구를 통해 도시유역의 특성을 고려한 홍수예보를 위해 SWMM과 HEC-RAS를 연계하는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구(보고서)는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다.

## 참고 문헌

배덕효, 김형섭, 이종태, 김이현 (2007). 중랑천 시험유역 수문자료집 2006, 도시홍수재해관리기술연구사업단 FFC05-05.  
서울특별시 (2002). 01' 수해백서.