韓國水資源學會論文集
第41卷 第9號 · 2008年 9月
pp. 929~941

DOI: 10.3741/JKWRA.2008.41.9.929

대규모 도시유역의 홍수예보를 위한 수리·수문 모형의 연계

Connection of Hydrologic and Hydraulic Models for Flood Forecasting in a Large Urban Watershed

윤 성 심* / 최 철 관** / 배 덕 효***

Yoon, Seong Sim / Choi, Chul Kwan / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objectives of this study are to propose a system for combined use of a hydrologic and a hydraulic model for urban flood forecast model and to evaluate the system on the 300 km^2 Jungrang urban watershed area, which is relatively large area as an urban watershed and consequently composed of very complex drainage pipes and streams with different land uses. In this study, SWMM for hydrologic model and HEC-RAS for hydraulic model are used and the study area is divided into 25 subbasins. The SWMM model is used for sewer drainage analysis within each subbasin, while HEC-RAS for unsteady flow analysis in the channel streams. Also, this study develops a GUI system composed of mean areal precipitation input component, hydrologic runoff analysis component, stream channel routing component, and graphical representation of model output. The proposed system was calibrated for the model parameters and verified for the model applicability by using the observation data. The correlation coefficients between simulated and observed flows at the 2 important locations were ranged on 0.83-0.98, while the coefficients of model efficiency on 0.60-0.92 for the verification periods. This study also provided the possibilities of manhole overflows and channel bank inundation through the calculated water profile of longitudinal and channel sections, respectively. It can be concluded that the proposed system can be used as a surface runoff and channel routing models for urban flood forecast over the large watershed area.

keywords : urban flood, flood forecasting, SWMM, HEC-RAS

요 지

본 연구의 목적은 다양한 하수관망과 하천을 포함하는 복잡한 토지이용으로 구성된 도시유역으로서는 비교적 유역면적이 큰 유역의 홍수예보모형으로 수문모형과 수리모형을 연계하는 방법을 제안하고, 이를 유역면적이 약 300 km^2에 해당하는 중랑천 유역에 적용하여 적용 가능성을 평가하고자 한다. 본 연구에서 수문모형으로는 SWMM과 수리모형으로서는 HEC-RAS 모형을 선정하였으며, 적용대상유역인 중랑천 유역은 25개의 소유역으로 구분되었다. SWMM모형은 각 소배수구역의 지표흐름 및 하수관망 흐름 해석을 수행하며, HEC-RAS 모형은 하천에서의 부정류 흐름 해석을 수행하였다. 또한, 이들 각 모형의 입출력과 모형의 원활한 연계운영 및 효과적인 결과 표출을 위하여

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정
Ph.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: lome970303@paran.com)
** (주)방재안전기술원 과장
Chief, Disaster Prevention Safety Institute Co., Ltd, Gyeonggi-Do 463-741, Korea
*** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수
Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

GUI 시스템을 구축하였다. 구축된 시스템은 적용대상지역의 실측자료를 이용하여 모형 매개변수를 추정하였으며, 또한 모형의 적용성을 검증하였다. 적용대상지역의 주요 두 지점에 대해 모형의 적용성을 검토한 결과, 상관계수는 0.82-0.98, 모형 효율성 계수는 0.60-0.92의 범위를 나타내었다. 또한 본 연구에서는 맨홀의 초과유출과 하천 종·횡단면의 수면곡선으로 맨홀 월류로 인한 내수침수 및 하천저수호안의 예측 가능성을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 시스템은 중규모 이상 대규모 도시유역의 홍수예보 수문모형으로 활용 가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 도시홍수, 홍수예보, SWMM, HEC-RAS

1. 서 론

최근의 급속한 도시화로 인한 불투수면적의 증가는 첨두유량의 증가, 홍수도달시간의 단축을 야기해 도시유역의 홍수 피해를 증가시키고 있다. 또한, 최근에는 이상기후로 인한 국지성 집중호우로 인해 설계강우를 상회하는 강우가 발생하여 도시유역에서의 홍수 발생이 증가하고 있다. 도시유역의 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 도시유역의 홍수피해를 방지하기 위해서는 구조적 또는 비구조적인 대책수립이 필요하다. 구조적 대책으로는 고규격 제방 건설, 하도 정비, 방수로 건설, 저류지 설치 등이 있다. 이 방법은 효과적이지만 중규모 이상 대규모 도시유역의 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 홍수예경보가 있다.

최근 국외에서는 도시홍수예경보의 활용성을 높이기 위해 복잡한 도시유역의 홍수특성을 반영하도록 수리·수문모형을 연계하여 유출모형을 개선하는 연구가 진행되고 있다. Refsgaard *et al.*(1988)은 인도와 방글라데시에서의 홍수조절 및 예측을 위해 집중형 강우유출 모형을 사용하였고, Liong *et al.*(1995)은 도시국가인 싱가폴에서 SWMM을 적용하였고, Smemoe *et al.*(2004)은 HEC-RAS를 이용한 홍수위험분석에 관한 연구를 수행하였다. Andrysiak and Maidment(2000)는 HEC-HMS, ArcView/GIS 모형을 함께 이용하여 홍수터의 3차원 분석을 시도하였고, Knebl et al.(2005)는 HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용하여 도시유역을 대상으로 홍수를 모의할 수 있는 체계를 개발하였다. 국내에서도 신현석 등(2007)이 부산 온천천유역을 대상으로 SWMM과 HEC-RAS를 이용하여 지속시간별 한계유출량과 홍수발생 강우량을 산정하고 이를 기준으로 해안도시지역에서의 홍수예경보 체계를 구축하는 방안을 검토한 사례가 있다.

일반적으로 홍수예보 시스템은 레이더 강우예측과 같은 강우예보 모델, 실황 및 선행강우를 활용하여 유역의 홍수유출특성을 분석하는 유출모형, 홍수예측결과를 전파하는 홍수예경보 발령시스템으로 구성되어 있으며, 예측결과의 정확도는 선행강우의 정확도와 이를 활용한 홍수해석의 정확도에 의존한다. 지금까지 도시유역에서의 홍수예보를 위한 연구는 100 km^2 이하의 중소규모 유역을 대상으로 수행되어 왔으나, 최근의 지속적인 개발로 인한 도시의 확장으로 중규모 이상 대규모 도시유역에 대한 연구가 필요하다. 또한, 친수성을 강조한 도시하천의 관리계획으로 위락시설 및 수변공원으로 하천 주변이 조성되어 있으므로 저수호안의 침수로 인한 인명피해를 최소화할 수 있도록 저수호안의 침수예측이 가능한 시스템의 구축이 요구된다.

본 연구에서는 이와 같은 측면에서 유출모형을 통한 홍수유출분석 개선에 중점을 두고 중규모 이상 대규모 도시유역의 홍수예보를 위하여 SWMM과 HEC-RAS 모형을 연계하는 방법을 제안하고 활용성을 평가하고자 한다. SWMM 모형은 맨홀 및 우수관망의 고려가 가능하여 배수관망이 복잡하게 구성된 도시 유출특성을 모의할 수 있어 도시홍수예보에 적합한 모형이다. 그러나 SWMM은 소배수유역의 분할 및 계산시간의 제약으로 대체적으로 유역면적이 100 km^2 내에 적용되는 한계를 가지고 있다. 따라서, 본류 및 지류 하천과 우수관로가 연계되는 100 km^2 이상인 도시유역의 홍수예보를 위해서는 우수관망의 해석 및 하천흐름 해석을 SWMM과 HEC-RAS를 연계하여 수행하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 적용 대상유역으로 대표적인 대규모 도시유역인 중랑천 유역을 선정하고 SWMM과 HEC-RAS 연계 시스템의 활용성을 평가하였다. SWMM 모형으로 배수구역의 지표 및 관망 유출과 지류 하천의 유출 분석을 수행하였고, 계산된 배수 구역별 유출 해석 결과를 HEC-RAS의 지류 유입량으로 활용하여 본류의 부정류 해석을 수행하였으며, 원활한 연계를 위해 SWMM과

HEC-RAS를 연계한 GUI 시스템을 구축하였다. 또한, 실측수문자료를 이용한 검정을 통해 연계시스템의 도시홍수예보에 대한 적용성 및 활용성을 분석하였다.

2. 방법론

2.1 연구절차

본 연구의 목적은 수리 및 수문학적 모형을 연계하여 중규모 이상 대규모 도시유역에서의 홍수유출해석을 수행할 수 있는 방법을 제시하고 적용성 및 활용성을 평가하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 바와 같은 절차를 따라 연구를 수행하였다. 우선 선정된 대상유역에 대한 수문자료와 지형자료를 수집하고, 이를 바탕으로 SWMM과 HEC-RAS 모형에 대한 입력자료를 구축하였다. 그 다음, Batch 파일의 실행으로 SWMM을 통한 배수구역별 유출량을 일괄계산하고, 각 배수구역별 EXTRAN 블록의 최종유출관망 유량을 지류유입 경계조건으로 HEC-RAS에 삽입하는 과정을 Visual Basic으로 GUI 구성하여 처리하였다. 본 연계시스템을 통해 HEC-RAS의 입력파일들이 구성되면 HEC-RAS 부정류 모형을 이용하여 유역의 본류구간 모의를 수행할 수 있다. 이에 본 연구에서는 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 정확도 및 가능성을 평가하기 위해 실제 호우사상에 대해 홍수유출 분석과 저수호안의 침수 및 내수침수 분석을 수행하였다.

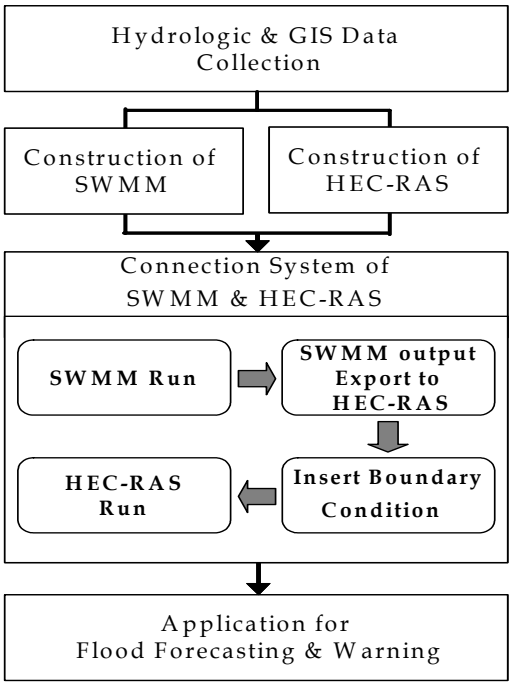


Fig. 1. Flowchart of the Study

2.2 분석유역 및 자료수집

2.2.1 중랑천 유역의 개황

중랑천 유역은 한강의 제1지류로서 대표적인 도시유역이다. 1998년과 2001년을 비롯해 집중호우 때마다 노원구의 공릉동, 월계동, 상계동과 중랑구의 묵동, 상봉동, 그리고 동대문구 이문동 등 중랑천 주변지역은 침수 피해가 발생하였다. 이러한 피해는 도시유역의 특성인 하천의 복개 및 교량으로 인한 통수단면의 축소로 인해 하천수위가 증가하고, 배수관과 하천수위의 차로 인한 배수로나 하수도를 통한 역류가 발생되어 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 홍수방재가 요구되는 유역이다.

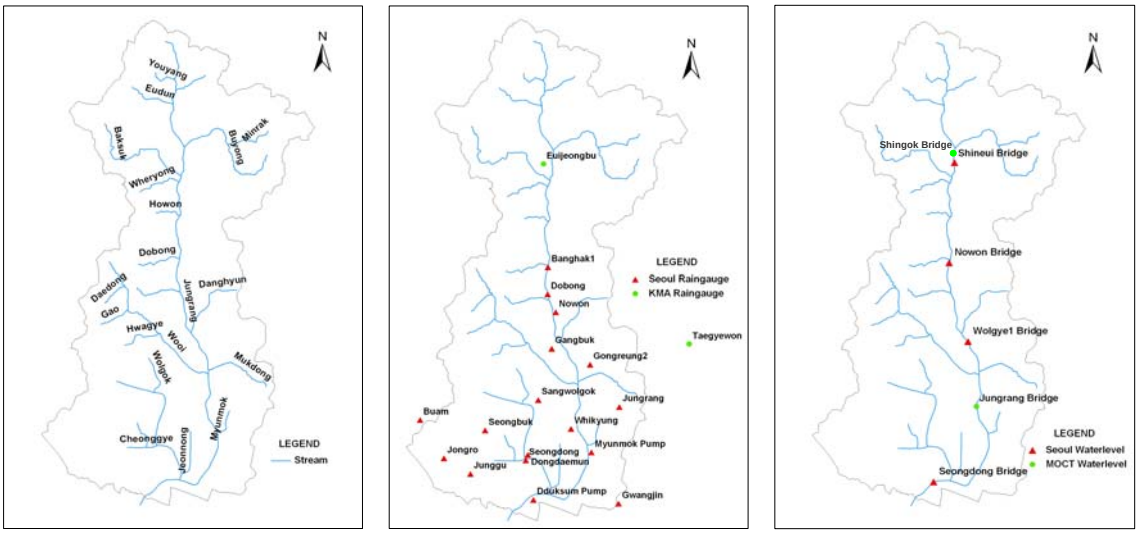
중랑천유역은 서울특별시와 의정부시가 3/4 이상을 점하는 고밀도의 도시지역이다. 농경지는 주로 중·상류부의 제1, 제2지류 연안에 다소 분포하고 있으며, 유역의 평균고도는 107.2 m이다. 하폭은 하구부에서 330.0 m, 서울시 경계부근에서 110.0 m 정도이고, 평균하상경사는 1/1,150이다. 유역의 상류부 북측에 의정부시와 양주군계를 이루는 천보산맥이 위치하고 유역의 동측에 용암산(EL. 476.9 m), 수락산(EL. 637.7 m), 불암산(EL. 508.0 m) 등이 왕숙천과 분수령을 이루고 있으며 유역의 서측으로는 도봉산(EL. 730.5 m), 북한산(EL. 799.5 m) 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(서울특별시, 2002). Table 1은 중랑천유역의 지형학적 특성을 나타낸 것이고, Fig. 2는 중랑천 유역의 경계 및 하천 현황과 수문관측 현황을 나타낸 것이다.

2.2.2 수문 및 지형자료 구축

현재 중랑천 유역에는 도시홍수재해관리기술연구단이 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, 구축

Table 1. Characteristics of the Jungrang Watershed

Watershed	Area (km^2)	Length (km)	Width (m)	Average Elevation (EL.m)	Average Slope (%)
Jungrang	299.6	37.17	8.06	107.2	16.94



(a) Stream Network (b) Raingauge Stations (c) Waterlevel Stations

Fig. 2. Hydrologic Observation System over the Study Area

Table 2. Application Events

	Calibration	Verification
Events	2003.7.22-23	2003.9.18
	2004.7.16-17	2003.8.24-25
	2006.7.27-28	2007.8.4
	2006.8.25-26	

Table 3. Areal Distribution of Soil Type

Soil Type	Area(km^2)	
	Area(km^2)	Ratio(%)
A	113.94	38.03
B	88.02	29.38
C	60.64	20.24
D	37.00	12.35
Sum	299.60	100.00

된 중랑천 유역의 수문자료와 지형자료는 Fig. 2(b), Fig. 2(c), Fig. 3과 같다. SWMM 모형의 강우입력 자료로는 Fig. 2(b)의 서울시와 기상청 관할의 강우 관측소 19개 지점자료를 활용하였다. 또한, Fig. 2(c)의 6개 지점의 수위 관측소 자료를 이용하여 모형의 검정을 수행하였다. 2000년부터 2007년의 시강우 및 시수위 자료를 수집하여 Table 2에 제시된 바와 같이 7개의 호우사상을 선정하고 모형의 보정 및 검정에 활용하였다. 선정된 호우사상 중 2003년 9월 18~19일은 호우로 인해 중랑천의 월계1교와 군자교 사이에 하천 범람이 발생된 기간으로 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 하천 저수호안 침수 해석의 적합성 평가에 활용하였다.

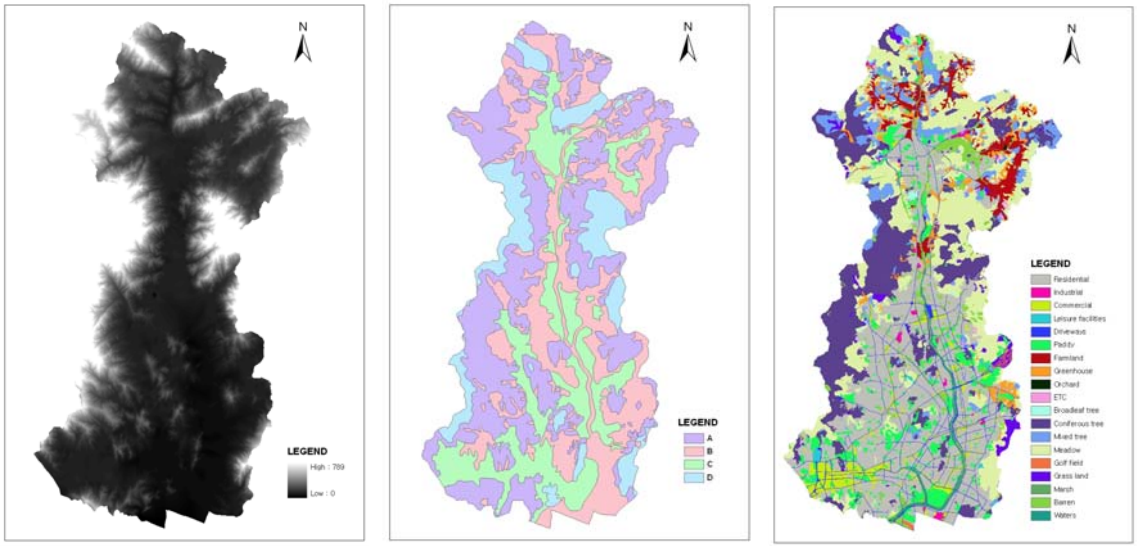
SWMM과 HEC-RAS 모형의 구축을 위해서는 DEM, 토지이용도, 토양도, 토지피복도, 하수관망 및 하도 단면자료와 같은 지형자료가 필요하다. 구축된 지형자료를 이용한 SWMM의 입력자료 계산에는 상용소프트웨어인 ArcGIS 8.0과 AutoCAD를 사용하였다.

Table 3과 Table 4는 중랑천 유역의 토양형과 토지이용 현황을 정리한 것이다.

2.3 도시홍수예보 적용 모형

2.3.1 SWMM 모형

도시유역의 유출해석을 위하여 국내에서 널리 적용되는 모형으로는 합리식, ILLUDAS, SWMM, STORM 및 MOUSE 모형 등이 있다. 이 중에서 유출 모의뿐만 아니라 수질 모의까지 가능한 SWMM(Storm Water Management Model) 모형이 가장 많이 사용되고 있다.



(a) DEM (b) Soil Type (c) Land use

Fig. 3. Various GIS Data of Jungrang Watershed

Table 4. Areal Distribution of Landuse

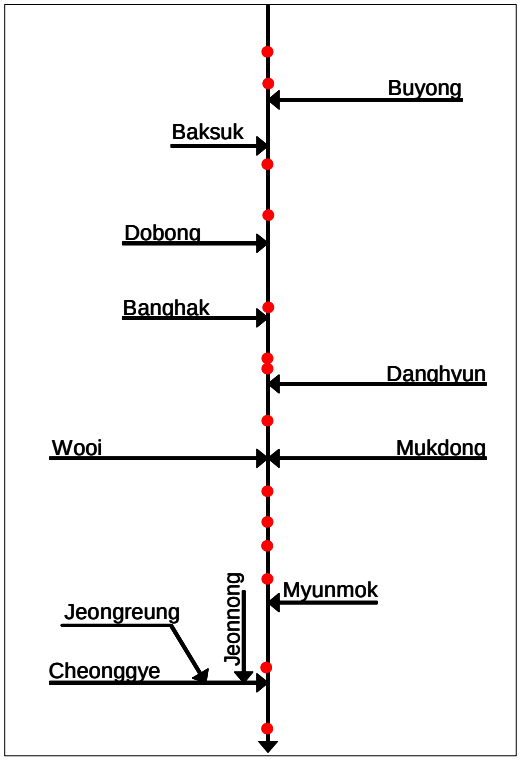
Stream	Land use	Residential Area	Industrial Area	Commercial Area	Scenic Zone	Green Zone	Farmland	ETC	Sum
Jung rang	Area (km^2)	92.85	4.19	12.93	7.74	163.89	13.47	4.53	299.60
	Ratio (%)	31.0	1.4	4.3	2.6	54.7	4.5	1.5	100.0

주) 중랑천 하천정비 기본계획(안)(서울특별시, 2000), 지적통계연보(행정자치부, 2000)

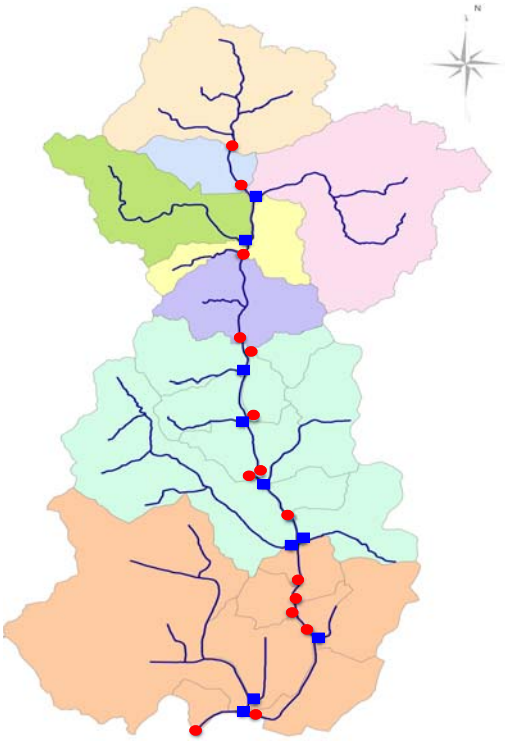
SWMM은 도시유역에서의 강우에 따른 유출량을 계산하기 위하여 1971년 미국 EPA(Environment Protection Agency)의 지원 아래 Metcalf & Eddy사가 개발해 낸 모형으로서, Florida 대학 및 WRE(Water Resources Engineers)의 공동연구에 의하여 도시유역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 구성되어 있다(Huber and Dickinson, 1988). 1981년에는 SWMM 모형내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하여 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 EXTRAN 블록을 개발하여 모형에 추가하였다. SWMM 모형은 도시유역내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질에 대한 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있다(김충수, 2001).

2.3.2 HEC-RAS 모형

본 연구에서 하천 수리분석을 위해 사용한 HEC-RAS(River Analysis System) 모형은 미육군공병단이 개발한 하천 해석 모형으로 수면곡선을 분석하는 HEC-2 모형의 확장된 버전이다. HEC-2 모형이 자연하천이나 인공하천에서의 정상류 상태의 점변류 수면곡선을 계산하기 위해 개발되었다면, HEC-RAS 모형은 정상류뿐만 아니라 부정류, 유사현상 해석 기능까지 포함하는 종합적인 하천 해석 시스템으로 발전하였다. HEC-RAS 모형은 사용자의 편리기능과 자료 입·출력 도구, 모의결과의 도시 등을 통한 작업시간의 최소화를 목적으로 설계된 GUI를 활용한다. 입력 및 출력 자료의 쉽고 다양한 화상 처리 기능, 자동 오류 검색기능, 그리고 다양한 on-line 도움말 등이 그 대표적 예이다. 따라서 사용자는 흐름과 흐름의 상태를 더욱 자세히 확인할 수 있게 되었고, 하천형상에 대한 3차원 도시도 가능하게 되었으며, 상류 및 사류 모의가 가능하고, 교량, 수문, 암거 등에 대한 부등류 및 부정류해석도 처리할 수 있게 되었다. 특히, HEC-RAS는 자료관리, 결과도시, 애니메이션 기능 등이 편리하게 구성되어 있어 하나의 과제에 대한 입력 자료들을 일괄적으로 처리할 수 있다(한건연 등, 2006).



(a) SWMM Modeling Diagram



(b) 25 Subbasins and Lateral Inflow Locations

Fig. 4. Schematic of SWMM Configuration

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. 4(a)와 같이 하천을 간략화한 후 지류하천 및 본류의 영향을 고려하여 25개 배수구역(Fig. 4(b))으로 분할하여 구축하였다. SWMM에서 25개 배수구역별로 계산된 유출량 결과는 본류에 사각형과 원으로 표시된 유입지점(Fig. 4(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.

중랑천의 HEC-RAS를 구축하기 위해 Fig. 5에서 제시한 바와 같이 하도를 형성하고, 실제 측량된 하천단면 자료를 이용하여 총 301개의 하천 횡단면(Fig. 6) 및 6개의 수공구조물(Fig. 7)에 대한 입력자료를 구성하였다. HEC-RAS에서는 지류유입을 고려한 부정류 계산을 위해 SWMM을 통해 계산된 배수구역의 유출량을 55개 지점에서 측방유입으로 고려할 수 있도록 구축하였다. 상류단 경계조건으로는 신곡교(Fig. 2(c))의 유량자료를 사용하였으며, 하류단 경계조건으로 성동교(Fig. 2(c))의 수위자료를 사용하도록 설정하였다.

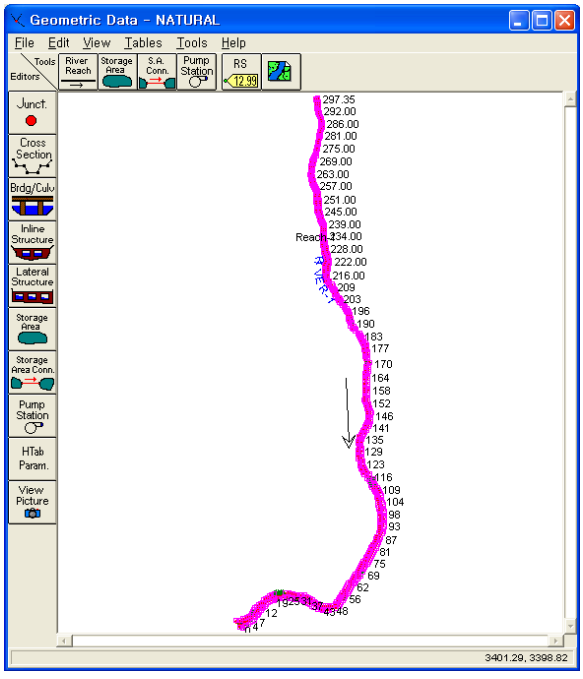


Fig. 5. Overview of Jungrang Stream

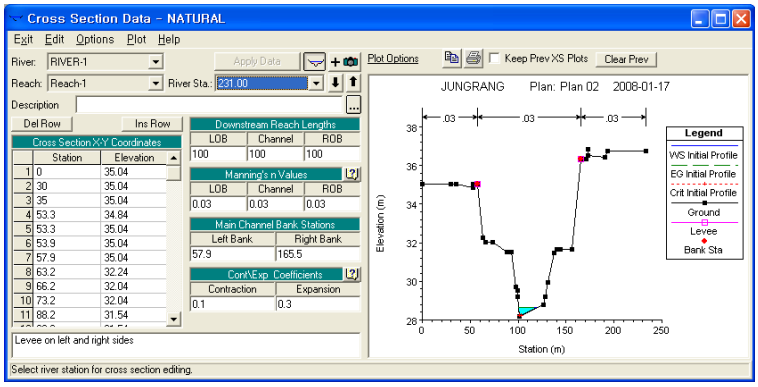


Fig. 6. An example of Cross Section Data

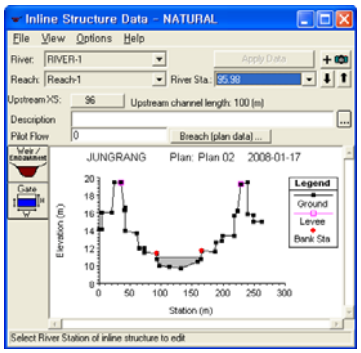


Fig. 7. An example of Inline Structure Data

본 연구에서 구축된 SWMM과 HEC-RAS를 홍수예보에 활용하기 위해서는 계산시간의 단축이 필요하다. 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. 8). 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

구축된 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템을 이용하여 수리 및 수문학적 해석을 수행하였다. 선정된 7개 호우사상에 대해 보정 및 검정을 수행한 결과를 Fig. 9와 Fig. 10, Table 5와 Table 6에 제시하였다. 각 호우사상에 대한 모의홍수량의 검정을 위해 월계1교와 중랑교의 관측유량을 활용하였다. Fig. 9와 Fig. 10에 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 원인으로는 하류 경계조건인 성동교 수위관측소의 밀물시 한강에서 유입되는 유량의 영향으로 인한 자료 관측의 부정확성과 중랑교와 성동교 사이에 지류유입으로 영향을 미치는 중랑천 전

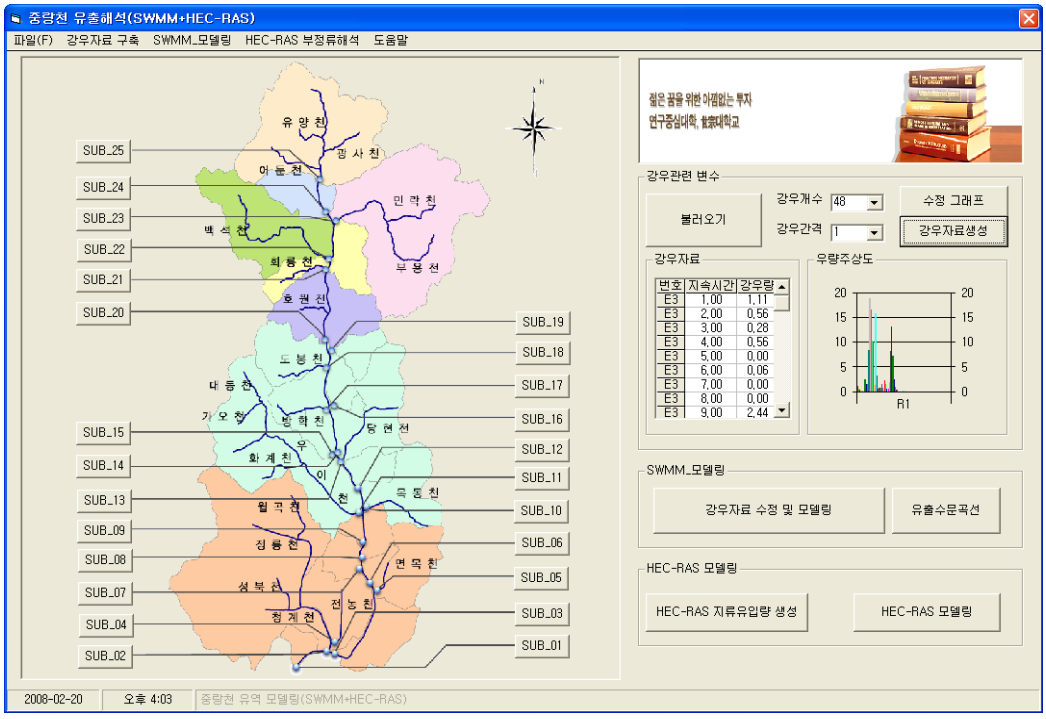
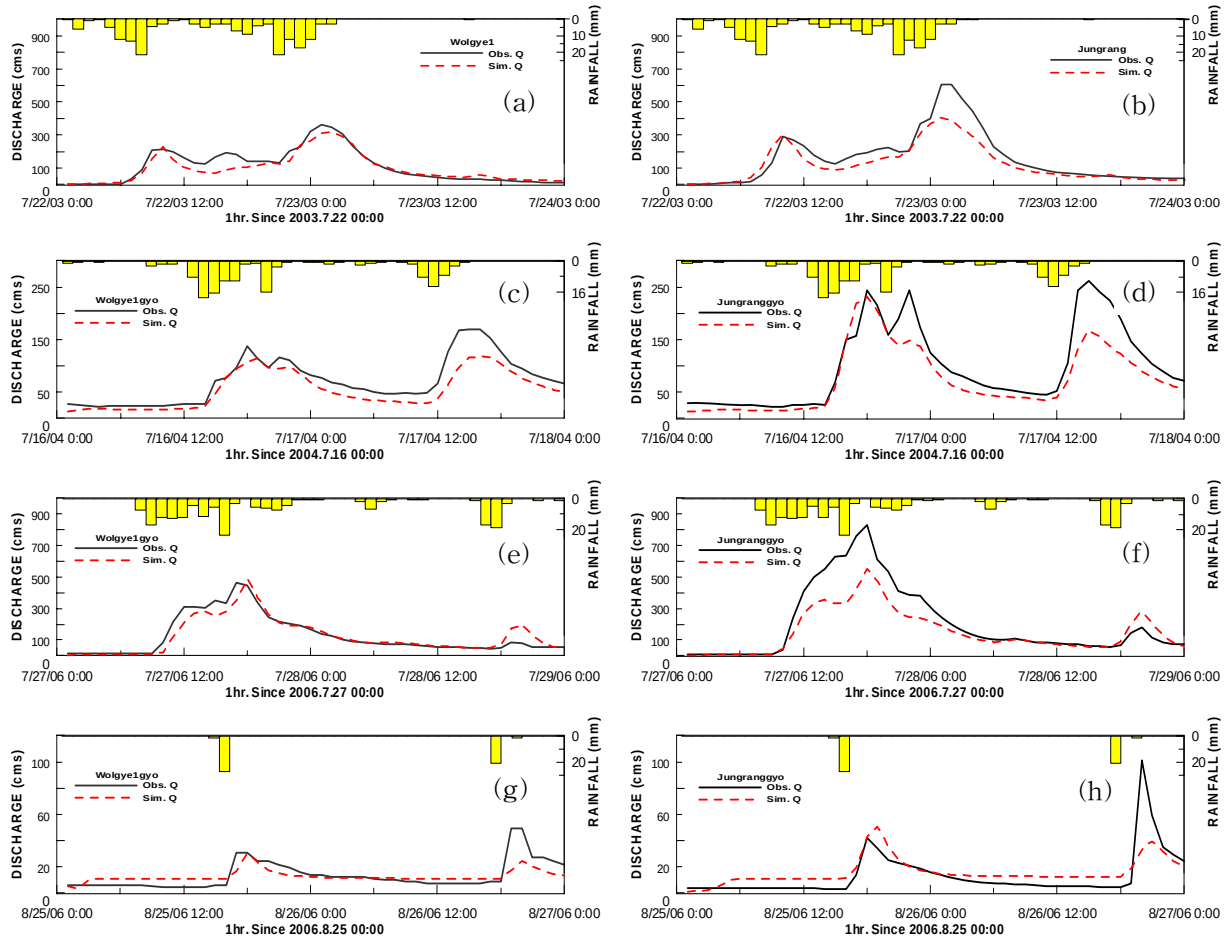
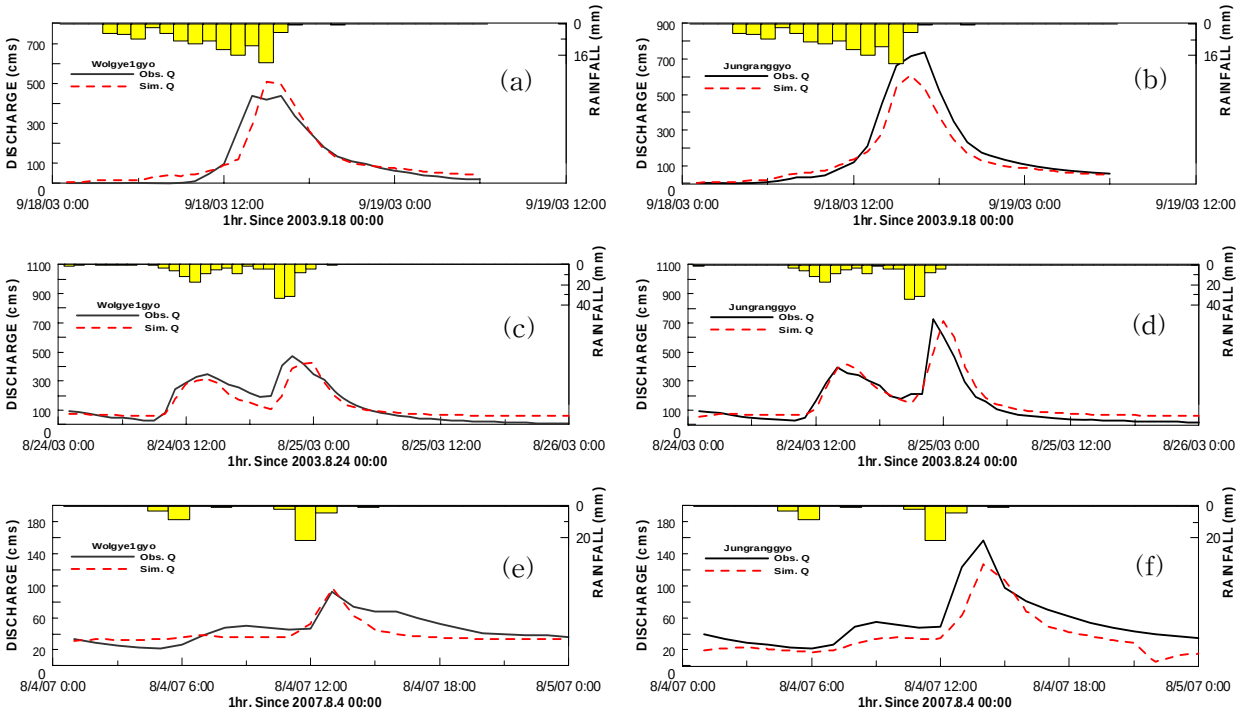


Fig. 8. Connection System of SWMM and HEC-RAS



<Wolgye1 Waterlevel Station> <Jungrang Waterlevel Station>

Fig. 9. Observed and Simulated Discharges for Calibration Events



<Wolgye1 Waterlevel Station> <Jungrang Waterlevel Station>

Fig. 10. Observed and Simulated Discharges for Verification Events

Table 5. Statistical Results of Calibration Events

Item		CORR-C	RMSE	ME	VE
2003.7.22-23	Wolgye1	0.95	0.66	0.88	-11.48
	Jungrang	0.96	1.26	0.82	-21.71
2004.7.16-17	Wolgye1	0.95	0.44	0.73	-24.26
	Jungrang	0.93	0.72	0.76	-23.90
2006.7.27-28	Wolgye1	0.94	0.80	0.88	-2.39
	Jungrang	0.96	2.18	0.74	-25.94
2006.8.25-26	Wolgye1	0.78	0.15	0.49	-3.41
	Jungrang	0.77	0.23	0.53	21.75

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) = $[\sum(O_i-\overline{O})^2-\sum(O_i-S_i)^2]/\sum(O_i-\overline{O})^2$, 여기서 $\overline{O}$는 관측유량의 평균
상관계수(CORR-C) = $SS_{OS}/\sqrt{SS_O\times SS_S}$, 여기서 $SS_{OS}=\sum(O_i-\overline{O})(S_i-\overline{S})$, $SS_O=\sum(O_i-\overline{O})^2$, $SS_s=\sum(S_i-\overline{S})^2$

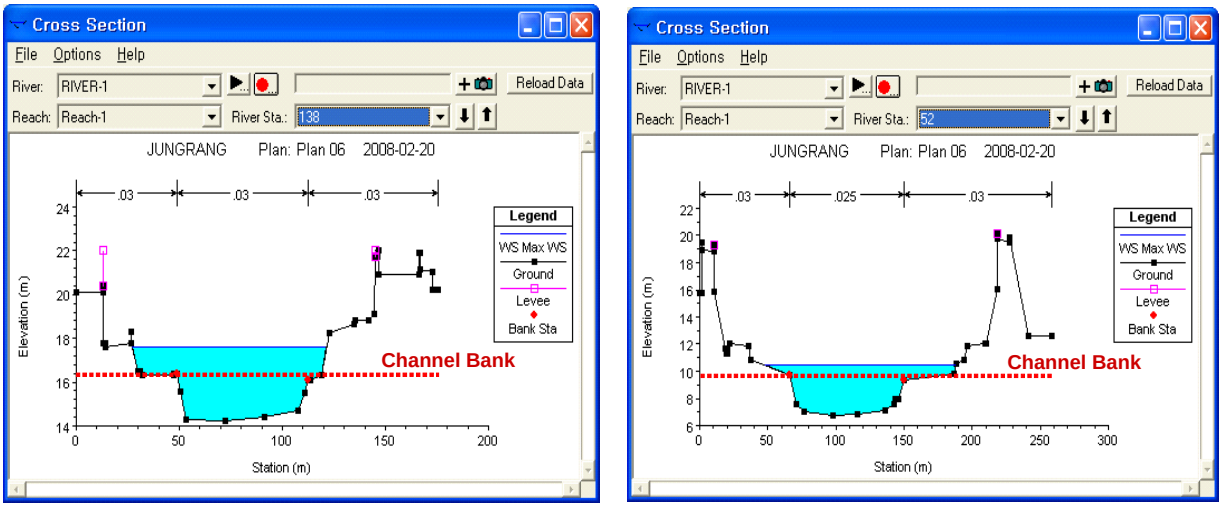
Table 6. Statistical Results of Verification Events

Item		C-CORR	RMSE	ME	VE
2003.9.18	Wolgye1	0.94	0.88	0.89	5.14
	Jungrang	0.98	1.16	0.92	-13.69
2003.8.24-25	Wolgye1	0.93	0.98	0.85	-1.27
	Jungrang	0.95	1.08	0.88	15.53
2007.8.4	Wolgye1	0.83	0.23	0.60	-12.22
	Jungrang	0.92	0.40	0.60	-31.16

체 유역의 1/5 이상을 차지하는 청계천과 면목천의 유량이 급격한 유량의 변화를 일으켜 부정류 계산시 불안정성이 증가하게 되어 중랑교 지점에서의 모의홍수량의 정확도가 떨어지게 되는 것으로 사료된다. Table 5와 Table 6은 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.

3.3 하천 저수호안 침수 및 내수침수 분석

본 연구에 사용된 7개 호우 사상 중 실제 중랑천에 저수호안 침수가 발생한 2003년 9월 18~19일의 호우를 이용하여 개발된 연계시스템의 하천 저수호안 침수 분석 및 내수침수 분석 가능성을 검토하였다. Fig. 11은 2003년 9월 18~19일 호우시 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템을 적용한 모의 결과로서 군자교와 월계1교의 수면곡선을 포함한 하도 단면을 나타낸 것이다. Fig. 12는 저수호안 침수발생시 월계1교의 실제 관측수위 및 모의수위와 통제수위(저수호안 침수 시작시 통행제한 기준), 침수수위(저수호안의 완전침수 기준)를 함께 도시한 것이며, 저수호안의 침수발생여부는 통제수위로 확인할 수 있다. 이에 Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이, 화살표로 표시된 9월 18일 12시와 18시 사이에 월계1교 부근에 실제 저수호안 침수가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 저수호안 침수의 발생을 연계시스템이 잘 모의하는 것을 볼 수 있다. Fig. 13은 하도의 중심을 따라 하류방향으로의 수면곡선과 좌우제방고 및 하천호안고를 나타낸 것으로 적용된 호우로 인한 군자교와 월계1교 구간의 저수호안 침수발생여부 및 침수범위를 확인할 수 있다. 또한, HEC-RAS를 통해 Fig. 14의 X-Y-Z 3차원 출력되는 단면을 따라 하류부로 이동하면서 상대적인 기울기의 변화와 제내지 범람 및 침수의 상대적 범위를 알아볼 수 있었다. 도시에서의 내수침수 분석은 2003년 9월 18~19일의 호우사상에 대한 SWMM의 EXTRAN 블록의 계산결과를 활용하여 다음 Fig. 16과 같이 수행하였다. Fig. 15와 같이 침수분석



(a) Wolgye1 Bridge (b) Gunja Bridge

Fig. 11. Selected Cross Section Views of Water Surface Obtained from Model Application

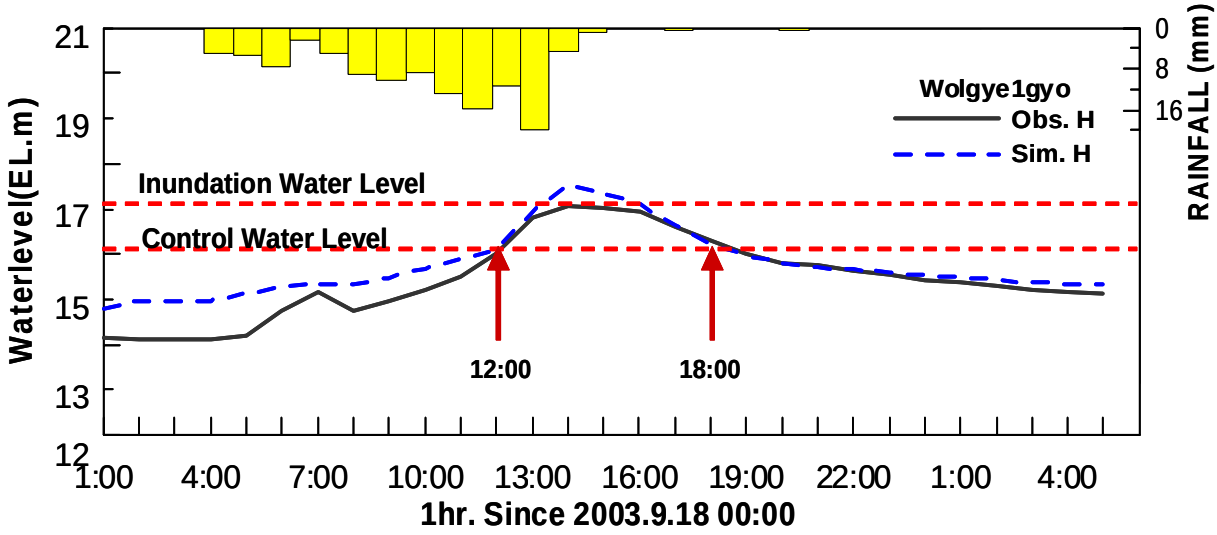
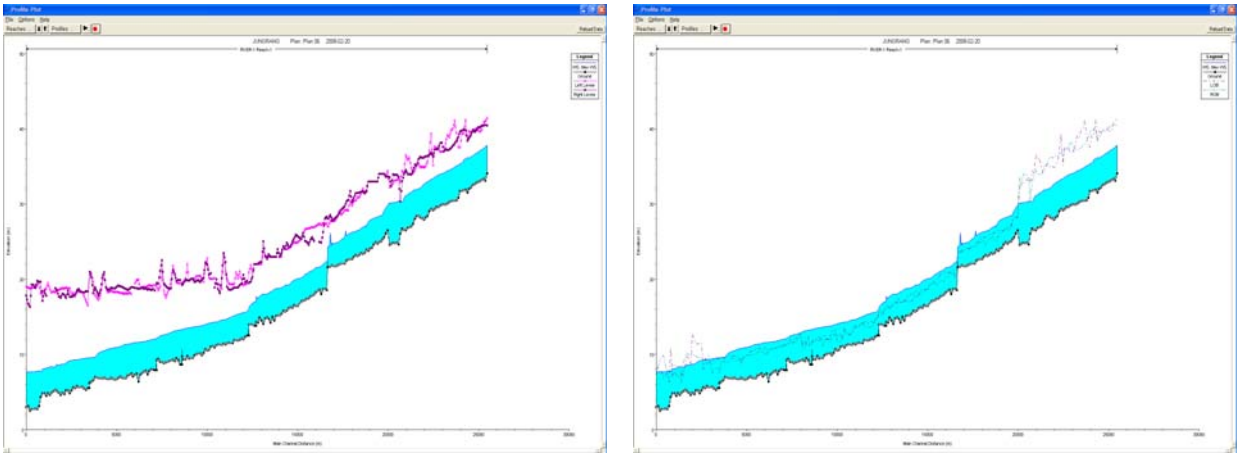


Fig. 12. Observed and Simulated Waterlevel for Channel Bank Inundation Verification



(a) Water Surface with Levee Elevation (b) Water Surface with Channel Bank Elevation

Fig. 13. Overview of Computed Water Surface Profile

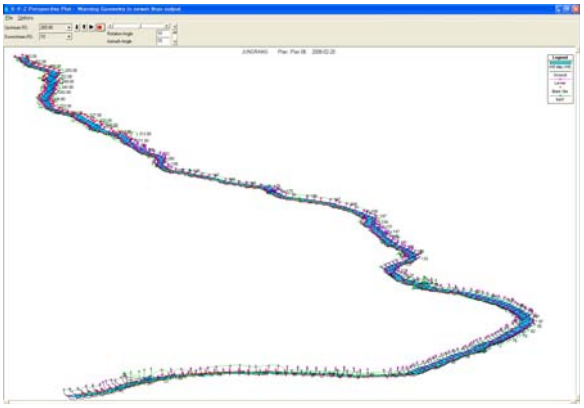
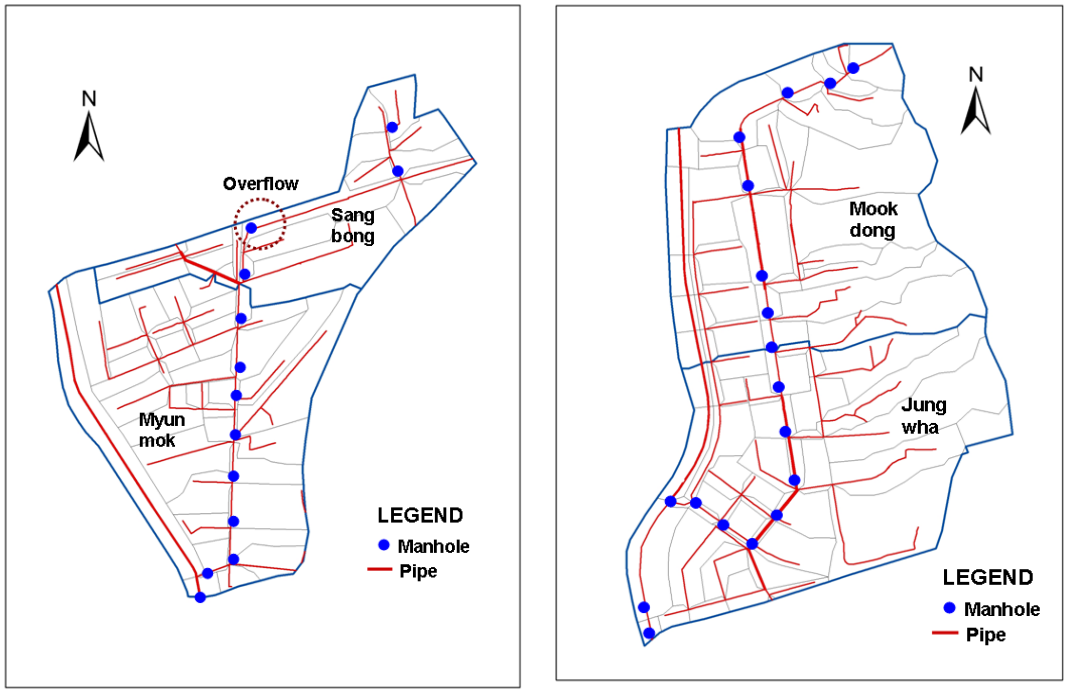


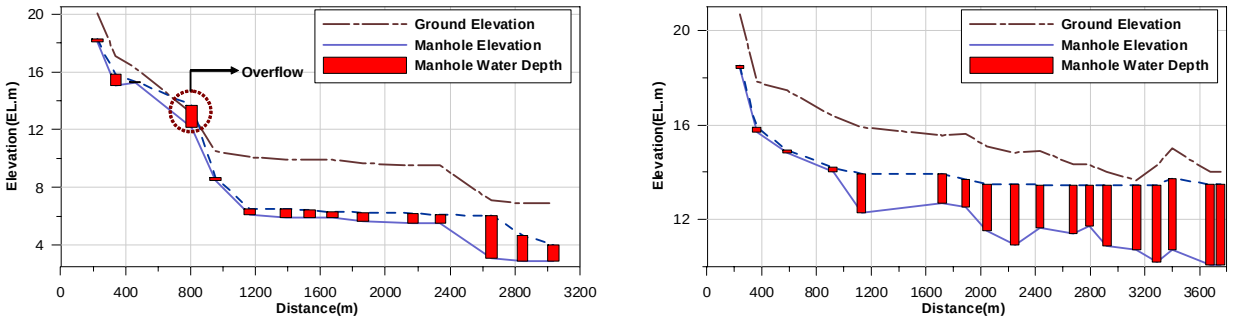
Fig. 14. X-Y-Z Perspective Plots

은 25개 배수구역 중 2개의 배수구역을 선정하였으며, 6번 배수구역은 중랑구 묵동과 중화동 지역, 8번 배수구역은 중랑구 상봉동과 면목동에 해당된다. Fig. 15는 각 배수구역에 존재하는 맨홀과 관망을 SWMM 모형의 적용을 위해 간략화한 것이고, Fig. 16은 2003년 9월 18일 16시의 상류에서 하류로의 맨홀고 및 지반고와 계산된 맨홀의 수심을 종단면으로 나타낸 것이다. 일반적으로 맨홀의 수심이 지반고를 상회하게 되면 월류로 인한 내수침수를 의미한다. 선택된 2003년 9월 18~19일 호우사상의 경우 Fig. 16에서와 같이 수치모의에서는 침수가 발생하는 것으로 나타났으나, 실측자료를 확보할 수 없어 침수모의 정확도 검정은 불가능하였다. 이에 대해서는 본 연구대상지역에 추후 침수사례가 발생한다면 침수실적자료를 수집하여 검토하여야 할 것으로 판단된다.



(a) Subbasin 6 (b) Subbasin 8

Fig. 15. Configuration of Manholes and Pipes for the Selected Subbasins



(a) Subbasin 6 (b) Subbasin 8

Fig. 16. Longitudinal Views of Main Line in Subbasins

4. 도시홍수예보의 활용성 분석

전술한 바와 같이 일반적으로 홍수예보시스템의 예보 정확도는 선행강우 예측의 정확도와 이를 활용하여 특정지점의 홍수량을 예측하는 유출모형의 정확도에 의존한다. 본 연구에서는 유출모형의 개선을 통한 홍수예보 적용성 확장에 그 연구범위를 제한하였다. 즉, 복잡한 하수관망과 도시하천, 다양한 토지용도로 구성된 중규모 이상 대규모 도시유역의 홍수해석을 위해 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 활용성을 평가하였다. 이들 연계 시스템으로 분석을 수행할 경우 SWMM 모형이 가지고 있는 적용유역 범위에 대한 문제를 극복하면서 내수침수 및 맨홀 그리고 관망흐름해석 등을 수행할 수 있다. 또한, 배수관과 하천이 복잡하게 연결되어 있는 대규모 도시유역의 특성을 HEC-RAS 모형의 측방류 유입을 고려한 부정류 계산을 통해 분석할 수 있고, HEC-RAS를 통해 계산되는 결과들은 저수호안의 침수 예측에도 활용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템을 중랑천유역에 적용하여 실제 사상에 대해 홍수유출 분석과 하천 저수호안 침수 및 내수침수 분석을 수행하였다. 홍수유출 분석 결과에서 일부 홍수사상을 제외하고는 관측치에 적합한 모의가 가능한 것으로 분석되었으며, 저수호안의 침수 분석에서도 2003년 9월의 저수호안 침수현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 특히, HEC-RAS를 통해 계산 가능한 수면곡선 및 홍수량은 하천 횡단면 및 종단면의 표출을 통해 홍수예보의 기준으로 제시될 수 있으며, SWMM에서 계산 가능한 관망 및 맨홀의 초과유출 결과는 내수침수가 발생할 수 있는 맨홀의 월류지점을 산정할 수 있고, 향후 GIS 도구와의 연계를 통해 범람 및 침수가능지역의 도시가 가능할 것으로 판단되었다. 또한, 도시홍수예보를 위해서는 선행시간의 확보가 중요하므로 이를 위한 계산시간의 단축이 요구되는데, 본 연구에서 구축한 연계시스템(Fig. 8)은 기존에 수작업을 통해 이루어지는 강우자료의 입력, 모형의 실행, SWMM 결과의 전환 및 HEC-RAS의 실행을 일괄 처리할 수 있도록 하여 총 계산시간을 5~10분으로 단축하였다. 중랑천 유역의 경우 홍수도달시간을 명확히 제시한 연구는 없으므로, 본 연구에서 활용한 7개 호우사상의 10분간격의 실측강우 및 유량자료를 이용하여 강우중심(peak)에서 첨두유량 발생시간까지의 홍수도달시간을 검토한 결과, 월계 1교는 1~4시간, 중랑교는 2~4시간으로 분석되어 실제 관측강우를 본 시스템에 적용하면 계산시간이 10분 이내로 소요되어 첨두홍수량 예측의 선행시간이 확보 될 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 추후 실시간 관측강우나 예측강우가 본 연계시스템에 적용된다면 중랑천 유역과 같은 대규모 도시유역의 홍수예보에 활용성이 클 것으로 분석된다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구는 중규모 이상 대규모 도시유역의 홍수예보를 위해 SWMM과 HEC-RAS 연계시스템의 적용성 및 활용성을 평가하였다. 본 연구의 연계시스템은 대규모 도시유역의 유출특성을 고려하면서 짧은 계산시간으로 신뢰성 있는 하천 홍수량의 계산이 가능한 것으로 나타났다. 또한, 이 시스템은 기존의 수작업을 최소화 할 수 있도록 SWMM의 강우 입력 및 실행, SWMM 유출자료의 HEC-RAS 입력으로의 변환을 일괄 처리되도록 하였다. SWMM과 HEC-RAS 연계시스템을 중랑천 유역에 구축하고 실제 7개 호우사상에 적용하여 평가한 결과, 관측유량에 적합한 결과를 나타내었다. 본 연구를 통해 중규모 이상 대규모 도시유역의 홍수특성 반영과 홍수예보를 위한 기준의 제공에 있어 SWMM과 HEC-RAS를 연계하는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

다만, 내수침수 발생모의 결과는 실제 내수침수 발생 실측자료와의 비교를 수행할 수 없어 본 연계시스템의 내수침수 모의의 정확도 검정은 평가하지 못하였다. 향후 실제 내수침수 사례에 적용하여 정확도를 검정하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 홍수예보의 선행시간 확보를 위해서는 본 연구를 통해 개발된 시스템에 레이더 예측강우 및 실시간 수문관측자료와의 연계에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

김충수 (2001). **도시유출 모의모형의 매개변수 추정**, 석사학위논문, 서울대학교.

배덕효, 김형섭, 이종태, 김이현 (2007). **중랑천 시험유역 수문자료집 2006**, 도시홍수재해관리기술연구단 FFC05-05.

신현석, 박용운, 홍일표 (2007). “미계측 해안 도시 유역의 홍수예경보 시스템 구축 방법 검토 - 부산시

온천천 유역 대상 -." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제6호, pp. 447-458.

서울특별시 (2000). **중랑천 하천정비 기본계획(안)**.

서울특별시 (2002). **01′ 수해백서**.

한건연, 안기홍, 김병현, 김극수, 박홍성, 백진규, 이용신 (2006). "Advanced HEC-RAS." **제15회 수공학 웍샵 교재**, 한국수자원학회, pp. 3-151.

행정자치부 (2000). **지적통계 연보**.

Andrysiak P.B., and Maidment D.R. (2000). *Visual Floodplain Modeling with Geographic Information Systems(GIS)*. Center for Research in Water Resources, InterSys, River-Tools Visual 2.0 Manual.

Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Stormwater management model, Version 4: User's manual Ver. 2.1*. U.S. Army Corps of Engineers, Computer Program 723-S8-L7520.

Knebl M.R., Yang Z.L., Hutchison K., and Maidment D.R. (2005). "Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event." *Journal of Environmental Management*, Vol. 75, pp. 325-336.

Liong S.Y., Chan W.T., and Ram J.S. (1995). "Peak-flow forecasting with genetic and SWMM." *Journal of Hydraulic Engineering*, Volume 121, Issue 8, pp. 613-617.

Maitland, D., Phillips, B.C., Goyen, A.G., and Thompson, G.R. (1999). "Integrated modelling of urban drainage systems using XP-SWMM32." *The Eighth International Conference on Urban Storm Drainage,* p. 1.

Refsgaard J.C., Havnø K., Ammentorp H.C., and Verwey A. (2003). "Application of hydrological models for flood forecasting and flood control in India and Bangladesh." *Advances in Water Resources*, Vol. 11, Issue 2, pp. 101-105.

Smemoe C., Nelson. J., and Zundel A. (2004). "Risk analysis using spatial data in flood damage reduction studies." *World Water Congress 2004*, p.1

(논문번호:08-27/접수:2008.02.28/심사완료:2008.07.09)