

SWMM을 이용한 조만강 유역 강우-오염물 유출모델링시스템 구축

이용진 · 윤영삼* · 이남주**

(주)이산 수자원부, *국립환경과학원 낙동강물환경연구소, **경성대학교 건설환경공학부
(2009년 5월 6일 접수; 2009년 6월 22일 수정; 2009년 8월 5일 채택)

Establishment of Rainfall and Contaminants Runoff Modeling System for the Joman River Watershed Using SWMM

Yong-Chin Lee, Young-Sam Yoon* and Nam-Joo Lee**

Department of Water-Resources, Isan Corporation, Gyeonggi 431-060, Korea

**Nakdong River Water Environment Research Center, National Institute of
Environmental Research, Gyeongbuk 717-873, Korea*

***Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungsoong University, Busan 608-736, Korea*

(Manuscript received 6 May, 2009; revised 22 June, 2009; accepted 5 August, 2009)

Abstract

The purpose of the present study is to analyze pollutant runoff characteristics from non-point sources in Joman River basin. The present study contains analyzed results of rainfall and SS, BOD, COD, TN, TP runoff from Joman River basin. This study contains a sensitivity analysis of parameters that affect the simulation results of rainfall and pollutants runoff. Result of the sensitivity analysis shows that proportion of watershed and impervious areas is the most sensitive to peak discharge and total flowrate for rainfall runoff and that WASHPO is the most sensitive parameter for pollutants runoff. For parameter estimation and verification, flow-rate and water quality is measured at the Kangdong Bridge in Haeban stream. A single rainfall event is use to perform parameter estimation and verification. Results of the present study show that total pollutant loads of Joman River basin is 11,600 ton of SS, 452 ton of BOD, 1,084 ton of COD, 515 ton of TN, and 49 ton of TP, respectively. In addition, it is found that contribution ratio of non point source and total source is 89% of SS, 63% of BOD, 61% of COD, 21% of TN, and 32% of TP, respectively.

Key Words : SWMM, Sensitivity analysis, Pollutant buildup procedure, Washoff

1. 서 론

1.1. 연구의 배경 및 목적

도시화와 산업화에 따라 생활하수, 산업폐수 등의

점오염원(point pollutant source)이 꾸준히 증가하였다. 그렇지만 관련법규 제정 및 하수처리장과 하수 관거정비 등과 같은 환경기초시설 건설로 대부분의 오염물이 처리과정을 거쳐 하천으로 방류되므로, 하천의 수질은 지속적으로 개선되고 있는 상황이다.

이와 같은 노력에도 불구하고, 하천환경에 대한 국민의 기대수준이 높아짐에 따라 더욱더 깨끗하고 건전한 하천 생태계를 만들기 위한 점오염원 및 비

Corresponding Author : Nam-Joo Lee, Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungsoong University, Busan 608-736, Korea
Phone: +82-51-663-4755
E-mail: njlee@ks.ac.kr

점오염원 관리가 중요한 문제로 되고 있다. 특히, 비점오염원은 강우시 초기유출 농도가 매우 높기 때문에 영양염류의 과다 유입으로 부영양화나 저산소증으로 인한 어류의 집단 폐사 등과 같은 여러 가지 문제를 유발할 수 있다.

조만강 유역의 상류는 산지이며, 중류는 도시지역이 위치해 있고, 하류부에 김해평야를 포함하고 있다. 축산업과 비닐하우스에 의한 사계절 농업이 많은 지역이라 비점오염에 의한 영향이 큰 지역이다. 조만강의 본류인 서낙동강은 상류에 위치한 대저수문과 하구에 위치한 녹산수문으로 인해 정체수역이 형성되는 전형적인 호소형 하천(또는 하천형 저수지)이다. 수체가 정체되는 호소형 하천의 주요 특징은 느린 유속, 다량의 부유물질 퇴적, 자정능력 감소 등이다. 조만강 등 여러 지천에서 유입된 오염물로 인해 서낙동강의 현재 수질은 하천 생활환경기준으로 BOD가 III~V 등급인 상황이다. TN과 TP의 경우는 하천 생활환경기준에 제시되고 있지 않으며, 호소 생활환경기준과 비교한 결과 TN은 전 지역에서 VI등급, TP는 전 지역에서 IV등급 이하의 수질을 보이고 있다. 또한 유입된 오염물이 바다에 가라앉아 조만강 하구 부근에는 두꺼운 퇴적층이 형성되어 있다.

이 연구는 조만강 유역에 물과 오염물 유출을 예측하는 모형인 SWMM 모형을 적용하여, 우수와 오염물 유출을 정확히 예측할 수 있는 유역유출모델링시스템을 구축하고 오염부하량을 산정할 목적으로 수행하였다. 또한 예측시스템의 정확도 향상을 위해 SWMM 모형에서 사용하는 매개변수에 대한 민감도 분석과 검보정을 수행하였다.

1.2. SWMM 모형 연구동향

SWMM(Storm Water Management Model) 모형을 활용하여 유역에서 유출되는 우수와 오염물의 양을 예측하는 연구는 국내외에서 다양하게 수행되고 있다. 전¹⁾은 화옹간척지구에 SWMM과 회귀분석방법을 이용하여 비점오염원 부하량을 비교분석하였으며, SWMM을 이용한 비점오염원 부하량 산정 방법이 신뢰성이 높은 것으로 판단하였다. 유²⁾는 안양천 수계의 비점오염원 유출특성을 SWMM 모형을 적용하여 분석한 결과, 비점오염원이 전체 수질오염의 50% 이상을 차지하고 있음을 밝히고, 오염총량 관

리에 있어 비점오염원 관리의 중요성을 입증하였다.

김³⁾은 보령 담수호 유역에 SWMM을 적용하여 매개변수에 대한 민감도분석을 수행하였고, 유출량과 오염부하량을 산정하여 토지이용별 부하량 기여도와 연평균 오염부하량을 추정하였다. 박⁴⁾은 용담천과 죽당천 유역을 대상으로 하여 SWMM을 적용하여 토지이용별 및 강우사상별 비점오염 부하량을 산정하였으며, 토지이용과 강우량에 따른 비점오염 관계식을 도출하였다.

조⁵⁾는 황구지천 유역에 대하여 월별 및 연평균 비점오염부하량을 산정하기 위하여 SWMM을 적용하였다. 환경관리공단⁶⁾은 서울시와 경기도 일대 도심지의 합류식 하수관거 월류수 및 분류식 우수관거의 우수 유출에 대한 오염부하량을 평가하기 위하여 SWMM을 적용하였으며, 단일강우 및 연속강우에 대한 발생 특성과 관리대안에 대하여 검토하였다. 장 등⁷⁾은 부산시 온천천 유역에 대하여 SWMM의 흐름분할기능을 적용하여 합류식 하수관거 월류수의 영향으로 인한 도시하천의 수질오염현상을 평가하였다.

Temprano 등⁸⁾은 스페인의 Santander 지역의 하수관망 시스템의 유출량 및 오염부하량을 SWMM 모형을 이용하여 추정하였다. 유량 관련 매개변수 11개와 수질 관련 매개변수 5개에 대하여 보정 및 검증은 통하여 대상지역의 적절한 매개변수 값을 제안하였다. 또한, 강우량과 오염부하량의 상관관계를 분석하여 초기 30%의 강우량에 총오염부하량의 약 60%가 발생되는 것을 밝혀 초기오염 관리의 중요성을 입증하였다.

2. SWMM 모형의 기본이론

2.1. SWMM 모형의 구조

SWMM 모형은 블록의 형태로 구성된다. Fig. 1과 같이 실행블록, 4개의 계산 블록, 그리고 5개의 보조블록으로 구성되어 있으며, 각각의 블록은 특정 기능을 수행한다. 일반적으로 Executive 블록과 하나 혹은 두 개 이상의 계산 블록이 함께 실행된다. 이 각각의Runoff 블록을 이용하여 강우 및 오염물 유출을 모의하였다.

Runoff 블록은 강우사상에 대해 배수유역에서의 유출현상과 수질변화를 모의하며, Transport 블록은

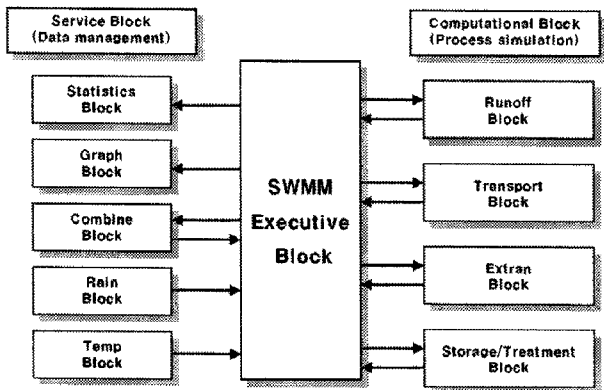


Fig. 1. Diagram of SWMM model (Huber and Dickson⁹⁾).

하수시스템 내에서 유량과 오염물질을 추적한다. Extran 블록은 배수관망시스템 내의 유출현상을 해석하며, 배수현상 등을 고려할 수 있다.

Storage/Treatment 블록은 유량과 수질에 대한 조절과 처리시설의 영향을 평가할 수 있다. 보조블록은 실행블록에 대한 보조적인 기능을 수행하고 있으며, 통계처리, 모의결과 합성, 수문곡선 및 오염도 곡선 출력, 강우량 및 증발산량 관리 등의 기능을 수행한다.

2.2. Runoff 블록의 유출 해석

지표면 유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 운동과 근사법인 비선형 저류방정식이 사용된다. Runoff 블록은 각 소유역의 수심과 유량을 결정하기 위해 연속방정식과 Manning 방정식을 사용한다. Fig. 2와 같이 각 계산시간 Δt 마다 두개의 미지수(유량 Q^{n+1} 와 수심 d^{n+1} , 위첨자 n 과 $n+1$ 은 각각 계산시간 t^n 과 $t^{n+1} = t^n + \Delta t$ 에서의 값, Δt 는 계산시간간격을 의미함)가 존재하며, 미지수를 구하기 위해서는 두개의 방정식이 필요하다. 소유역에 대한 연속방정식은 다음과 같이

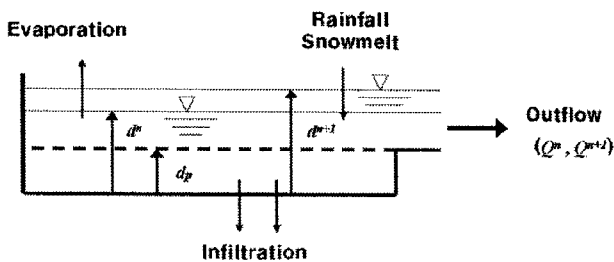


Fig. 2. Surface outflow of runoff block.

나타낼 수 있다.

$$\frac{dV_b}{dt} = A_s \frac{dd}{dt} = A_s i_e - Q \quad (1)$$

여기서, V_b 는 지표면 위의 물의 체적($=A_s \cdot d$), d 는 지표면 유출 수심(m), t 는 시간(sec), A_s 는 지표면의 면적(m^2), i_e 는 초과강우강도(m/s), Q 는 유출유량(m^3/s)이다. 초과강우강도는 강우강도(i , m/s)와 침투로 인한 손실(f_p , m/s)의 차로 표현된다. Runoff 블록에서 지표면 유출은 폭이 넓은 개수로 흐름으로 가정(수리반경이 수심과 같다고 가정)하고, 아래의 Manning 방정식을 사용하여 계산한다.

$$Q = W \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2)$$

여기서, W 는 유역의 폭(m), n 은 Manning의 조도 계수, d_p 는 지면 저류깊이(m), S 는 소유역의 경사(m/m)이다.

Runoff 블록에서 관로 유출은 비선형 저류방정식으로 계산하며, 이 방정식의 해는 Newton-Raphson 방법으로 구한다. 각 적분 연산구간에서 Manning 식을 사용하며, 유출현상의 동역학적 거동은 준정상 상태로 근사하여 처리한다. 이 방법은 수심 d 와 단면적 A 가 시간에 따라 급하게 변화하지 않는 경우에 적용성이 우수하다. 관로유출에서 사용되는 연속방정식과 Manning 식은 각각 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$\Delta V_d = \Delta t (Q_I + Q_W + Q_{GW} - Q) \quad (3)$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

여기서, V_d 는 관로 내부의 물의 체적, Q_I 는 관로 구간 상류의 유입유량, Q_W 는 측방 유입유량, Q_{GW} 는 지하수 유입유량이다. Q 는 d^n 과 d^{n+1} 의 평균값을 이용하여 Manning 공식으로 구한다. 관로에서도 표면유출에서와 같이 비선형방정식인 식 (3)과 (4)의 해를 구하기 위해 Newton-Raphson 반복법을 사용한다. 관로유출 계산을 위한 Newton-Raphson 합수는 다음과 같다.

$$F_d = \Delta V_d + \Delta t (Q - Q_I - Q_W - Q_{GW}) \quad (5)$$

식 (5)에서 Q 는 유출유량이다. ΔV_d 와 Q 는 d^n 과

d^{n+1} 로 나타낼 수 있으며, 식 (5)로부터 Δd 에 대한 도함수를 구한다.

2.3. Runoff 블록의 오염부하량 해석

유역에서의 오염물 배출과정은 강우가 시작되기 이전의 오염물 축적과정과 강우의 개시에 따른 오염물 쓸림과정으로 크게 구분하여 설명할 수 있으며, 이 현상은 SWMM의 유출과정에서 계산할 수 있다.

유역에서의 오염물 축적 과정은 선행건기일수, 토지의 이용정도, 강우조건, 바람, 도로의 청소상태 등과 같이 자연적인 조건 및 인위적인 조건들에 의하여 영향을 받는다. 그렇지만, 이런 현상을 정확히 반영할 수 있는 수학적 모형으로 구성하기는 쉽지 않다. 따라서 대부분의 연구는 물리적, 화학적 기초를 무시한 경험적 공식을 제시하고 있다. SWMM에서 오염물의 축적 과정은 Table 1과 같이 3가지 형태의 식을 선택적으로 사용하여 계산할 수 있다. Table 1에서 *PSHED*는 오염물의 축적량(kg), *QFACT*(1)은 오염물 축적 한계량(kg/km-curb 또는 kg/ha), *QFACT*(2)는 오염물 축적지수, *QFACT*(3)는 오염물 축적계수, 그리고 t_a 는 선행건기일수(day), t_r 은 강우시작 이후 시간, *POFF*(t_r)는 시간 t_r 에서의 오염물 누적 쓸림량(kg), *WASHPO*는 오염물 쓸림지수, *RCOEF*는 오염물 쓸림계수, *WFLOW*는 지표면 유출유량(m^3/s)이다.

3. 현황 분석 및 모형 구축

3.1. 조만강 유역 현황 분석

조만강 유역은 행정구역상 김해시의 장유면, 주촌면, 북부동, 내외동, 회현동 그리고 칠산서부동과

부산시 강서구 일대를 포함하고 있다. 조만강은 낙동강 하구로부터 약 2 km 상류지점에서 낙동강의 파천인 서낙동강으로 유입되는 준용하천으로 유역면적은 140 km^2 , 유로연장은 21.0 km인 지방2급 하천이다(Fig. 3 참조). 유역의 토양특성은 강우로 인한 유출과정에 직접적인 영향을 미친다. 토양의 성질에 따라 침투능이 상이하므로 총우량 중 직접유출로 유하하는 유효우량의 크기도 다를 수밖에 없다.

토양의 성질을 정량적으로 나타내기에는 어려움이 있으므로, SCS는 토양의 침투능을 기준으로 4개의 토양군으로 분류하고 있다. 조만강 유역 내의 토양분포는 1:25,000 정밀토양도를 GIS로 분석한 후 SCS 기준의 유출발생능력에 따라 분류하였다. 조만강 유역의 SCS 토양 분류 결과는 Fig. 4와 같으며, D형의 토양이 약 절반 정도 차지함을 알 수 있다.

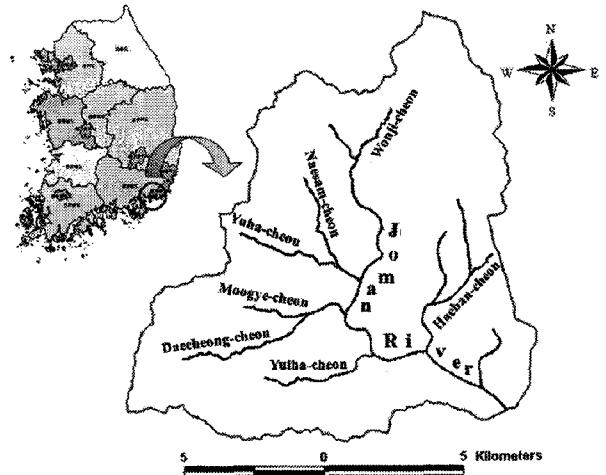


Fig. 3. The illustration of Joman river watershed.

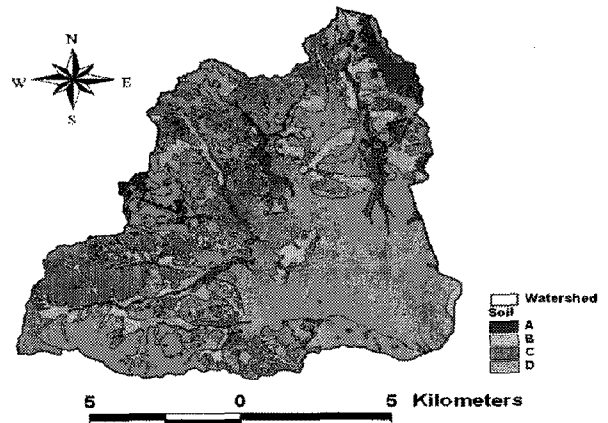


Fig. 4. Soil map for Joman river watershed.

Table 1. Equations of pollutant buildup and washoff

Items	Equation
Build-up	$PSHED = QFACT(3) \times t_a^{QFACT(2)}$
	$PSHED \leq QFACT(1)$
	$PSHED = QFACT(1) \times (1 - e^{-QFACT(2) \cdot t_a})$
	$PSHED = \frac{QFACT(1) \times t_a}{QFACT(3) + t_a}$
Wash-off	$-POFF(t_r) = -RCOEF \tau^{WASHPO} PSHED$
	$POFF(t_r) = RCOEF WFLOW^{WASHPO}$

토지이용 현황은 국립지리원의 1:25,000 토지이용도를 이용하여 국토해양부의 토지이용 분류법에 따라 GIS를 사용하여 분석하였다. Fig. 5는 유역의 토지이용 현황을 나타내고 있으며, 유역면적 137.80 km² 중 농경지가 44.28 km²(32.13%), 임야면적이 62.08 km²(45.05%), 도시 및 주거지는 25.81 km²(18.73%), 수계는 5.64 km²(4.09%)를 각각 점하고 있다.

국립지리원의 1:25,000 수치지도를 이용하여 GIS 분석을 통하여 TIN(Triangular Irregular Network, 불규칙 삼각망) 파일을 생성하고 30 m 격자(grid)의 DEM(Digital Elevation Model, 수치 표고 모형)을 생성하여 고도 및 경사 분석을 수행하였다. 조만강 유역의 평균고도는 EL. 111.02 m 이고, 평균경사는 11.4%이다.

3.2. SWMM 모형의 구축

SWMM 5.0을 이용하여 모형을 구축하였으며, 민감도분석은 CHI사의 PCSWMM Sensitivity Wizard를 이용하여 수행하였다. 유역을 토지이용 및 수치지도를 이용하여 24개의 소유역으로 나누고 각 소유역에 대한 유역면적, 유역폭, 불투수면적, 하천경사, 하천길이 등을 GIS를 이용하여 분석하고 산출하였다. 모형 내에 강우자료, 하천망, 소유역을 구성하고 각각의 소유역과 하천망을 연결하여 모형을 구축하였다.

조만강 유역의 소유역 특성자료는 수치지도, 토지이용도 그리고 토양도를 이용하여 ArcView GIS 프로그램으로 분석하여 자료를 구축하였다. 전체 유역을 총 24개의 소유역으로 분할하였으며, 각 유

역의 유역면적, 유역폭, 불투수 면적, 지면 경사, 조도계수, 지표면 저류, 침투관련 계수를 구축하였다.

조만강의 하도자료를 구성하기 위해 조만강 및 각 소유역으로 연결된 지류를 총 20개의 하도구간으로 구성하였다. 유역내 모든 하도는 자연하도로 불규칙한 형상을 지닌다. 따라서 대부분의 하도구간형상은 불규칙 단면으로 설정하여 횡단자료를 직접 입력하였다. 그러나 C2와 C3은 횡단자료가 없어 자연하도와 가장 유사한 포물형 단면으로 설정하였다. 하도의 길이는 GIS 분석을 통하여 산정하였으며, 관로경사, 횡단면 그리고 조도계수는 경상남도(1991), 한국토지공사(1994) 그리고 김해시(1995)에서 발행한 하천정비 기본계획 보고서를 이용하여 구축하였다.

SWMM 5.0 모형에서 소유역과 하천 그리고 노드를 생성하고, 수집되고 분석된 소유역 자료와 하도 자료를 입력하였다. 유역면적 및 불투수율 등은 유역에 따라 많은 차이를 보였으며, 조도계수는 일괄적으로 적용하였다. 하도구간의 길이는 237~5,420 m 범위를 보이고 있으며, 하도의 경사는 최대가 2.5%로 매우 완만하다. 조도계수는 하천정비 기본계획을 참고하여 설정하였다. 소유역과 하도구간을 연결하여 Fig. 6과 같이 SWMM 모형의 배수계통도를 구성하였으며, 강우 및 오염물의 유출에 대한 수치모의를 실시하였다.

조만강 유역에 김해기상관측소가 있으나, 2008년부터 운영을 시작하여 자료를 사용할 수 없는 상황이다. 따라서 2007년 강우자료의 경우 단일모의는

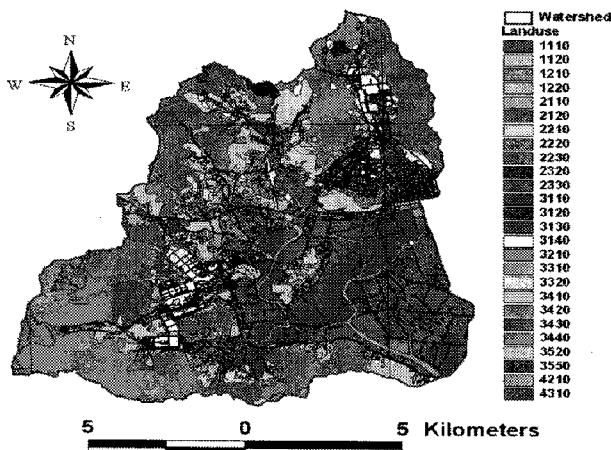


Fig. 5. Land use map for Joman river watershed.

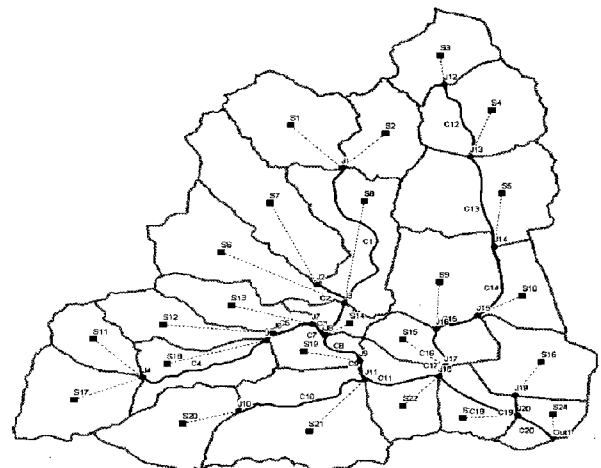


Fig. 6. Drainage system for Joman river watershed.

진해 AWS(Automatic Weather Station)의 15분 강우 자료를 사용하였으며, 연속모의는 김해공항기상대의 시강우 자료를 이용하였다. 2008년 강우자료는 김해관측소의 15분 강우자료를 이용하여 Rain 블록을 구축하였다. 모형에서 사용된 단일강우사상은 Table 2와 같다. 증발량은 Table 3의 부산기상청의 2007년 월별 소형증발접시 증발량 자료를 이용하여 입력자료를 구축하였다.

오염부하량을 수취모의 하기위해 수질오염의 척도를 나타내는 5가지 주요 항목(SS, BOD, COD, TN, TP)을 설정하였다. 오염물의 축적한계량은 실제 계측이나 실험을 통해서 설정하는 것이 가장 이상적인 방법이다. 그러나 시간적, 경제적 문제로 실험을 하기란 쉽지 않으므로 축적식은 선형을 가정한 Power-linear 식을 적용하였다.

오염물의 쓸림은 일반적으로 선형-지수 식을 사용한다. 이 식은 WASHPO의 값을 적절히 선택하여 초기 쓸림 현상을 잘 모사할 수 있다.

연속적으로 강우가 발생하는 홍수시에는 유량과 비슷한 경향을 보여 Rating Curve 식의 적용성이 더 높다. 이 연구에서는 홍수시의 강우사상을 이용하지 않기 때문에 선형-지수 식을 적용하였다.

Table 2. Data of single rainfall event

Observatory	Date	Duration time (hr)	Rainfall (mm)	Dry periods (day)
Jinhae AWS	2007/08/28	16.3	70.0	0
	2007/09/15	18.5	85.0	0
KimhaeObservatory	2008/06/28	24.0	63.0	6
	2008/08/22	11.8	26.0	5

Table 3. Monthly evaporation in Pusan meteorological administration(2007)

Monthly evaporation(mm/day)					
Jan.	Feb.	Mar.	April	May	June
2.4	2.6	2.9	4.3	5.1	4.0
July	Aug.	Sep.	Oct.	Nob.	Dem.
3.5	4.5	3.0	3.2	3.2	2.3

4. 민감도 분석

PCSWMM에서 제공하는 민감도분석도구를 이용하여 유량 및 수질에 영향을 끼치는 매개변수에 대하여 민감도분석을 실시하였다. PCSWMM에서 제공하는 민감도분석 도구는 손쉽게 사용할 수 있으며, 빠른 분석 결과를 도출하여 시간 절약과 사용자의 편의를 증가시키는 유용한 프로그램이다. PCSWMM은 SWMM 4.4h를 원시 프로그램으로 사용하고 있어서 SWMM 5.0과 약간의 차이가 날 수도 있으나, 민감도 분석을 수행하는데 있어서 큰 영향은 없을 것으로 판단되어 PCSWMM을 민감도 분석 도구로써 사용하였다. 민감도 분석도구를 이용하여 침투유량과 총 유출체적에 대하여 매개변수의 민감도를 비선형 민감도도표로 분석하였다. 민감도 분석결과는 이후 보정 및 검증을 수행할 경우 매개변수의 변동범위를 정하는 중요한 정보이다.

4.1. 강우 유출에 대한 민감도 분석

Table 4의 매개변수에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 각각의 매개변수를 초기값을 기준으로 -50%에서 +50%까지 25%씩 변화시켜 침투유량과 총 유출체적의 변화를 알아보았으며, 그 결과는 Fig. 7~8과 같다. 각각의 매개변수들이 골고루 영향을 주고 있으며, 유역 면적, 불투수 면적, 침투계수, 중기침투능, 유역폭의 순서로 민감한 것으로 나타났다.

Table 4. Parameters for rainfall-runoff sensitivity analysis

Parameter	Explanation	Parameter	Explanation
GLEN	channel length	WSLOPE	watershed slope
G3	channel slope	WW6	roughness of pervious area
G6	channel roughness	WW8	storage of pervious area
WW1	watershed width	WW9	initial infiltration rate (Horton's)
WAREA	watershed area	WW10	infiltration capacity (Horton's)
WW3	ratio of impervious area	WW11	infiltration coefficient (Horton's)

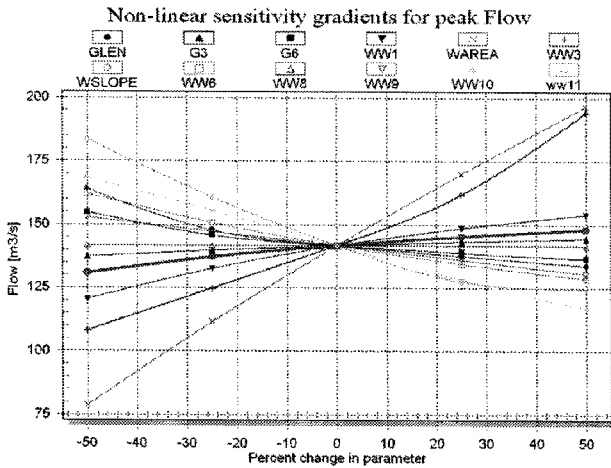


Fig. 7. Sensitivity analysis for peak flow.

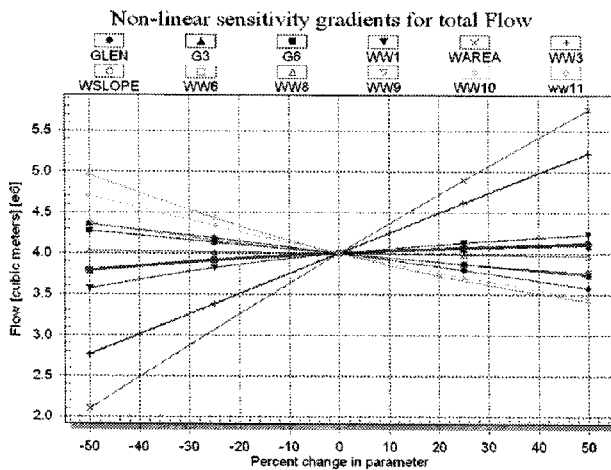


Fig. 8. Sensitivity analysis for total runoff volume.

4.2. 오염물 유출에 대한 민감도 분석

SWMM 모형에서 수질항목에 영향을 미치는 매개변수는 Table 5와 같으며, 이 표에 있는 매개변수들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 수질관련 매개변수는 전체유역에 공통으로 적용되므로 BOD에 관해 1회 실시하였다.

Table 5. Parameters for pollutant-runoff sensitivity analysis

Parameter	Explanation	Parameter	Explanation
DRYDAY	Dry Periods	QFACT3	Buildup Coeff.
QFACT1	Pollutant Buildup	WASHPO	Washoff Exp.
QFACT2	Buildup Exp.	RCOEF	washoff Coeff.

Fig. 9와 같이 침투 농도에 대해서는 쓸림지수와 쓸림계수가 가장 민감한 반응을 보였으며, 다른 매개변수는 큰 영향을 주지 않음을 보여준다. 쓸림지수의 경우 -50%까지 줄였을 경우 침투 농도는 오히려 상승하는 결과를 보여주고 있으며, +50%일 때는 초기농도가 7배 정도까지 상승하는 것을 볼 수 있다.

이는 쓸림지수의 작은 변화에도 침투 농도가 매우 민감하게 반응하는 것을 보여준다. Fig. 10에서 총 부하량에 대해서는 모든 매개변수가 값이 커질수록 부하량은 증가하는 비례관계를 보여주고 있으며, 쓸림지수와 축적지수가 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 이러한 수질 매개변수는 어떤 값을 사용하느냐에 따라 완전히 다른 경향을 보여주므로 유역의 수질경향을 잘 모의하기 위해서는 주의해서 매개변수 값을 선택할 필요가 있다.

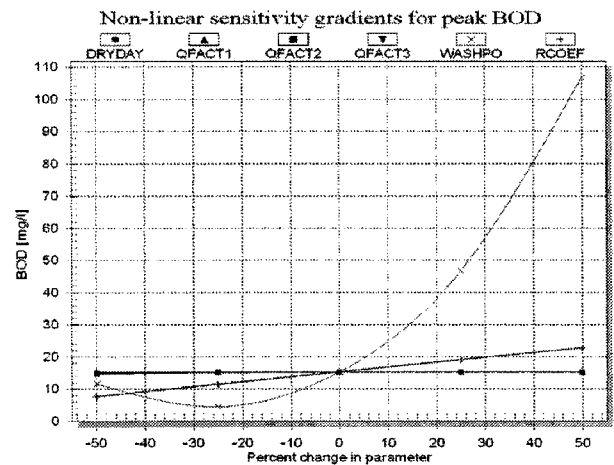


Fig. 9. Sensitivity analysis for peak flow (BOD).

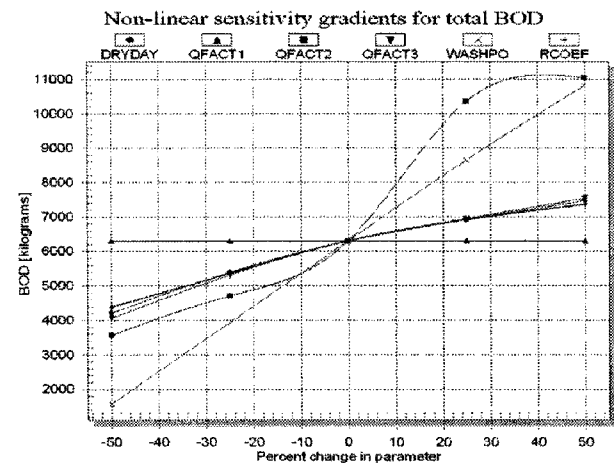


Fig. 10. Sensitivity analysis for total runoff volume (BOD).

5. SWMM 모형의 보정 및 검증

강동교 지점의 강우시 측정자료를 이용하여 조만강 유역의 보정 및 검증을 수행하였다. Table 6과 같이 보정은 2007년 2회 측정된 자료를 이용하였으며, 검증은 2008년 2회 측정된 자료를 이용하였다.

5.1. 강우 유출에 대한 보정 및 검증

민감도 분석결과를 바탕으로 강동교 지점에서 측정된 실측값과 이에 대응하는 모의값을 비교하여 보정 및 검증을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 11과 같다. 2007년 8월 28일의 경우 첨두유량을 측정하지는 못하였으나 관측값과 모의값은 거의 비슷하게 나왔다. 2007년 9월 15일의 경우 첨두유량은 값을 측정하였으며, 관측값과 모의값이 거의 비슷하게 나왔으나, 지체시간이 1시간 15분 차이가 난다. 이는 초기 강우강도가 매우 클 경우 보와 같은 저류구조물의 영향을 고려할 수 없기 때문인 것으로 판

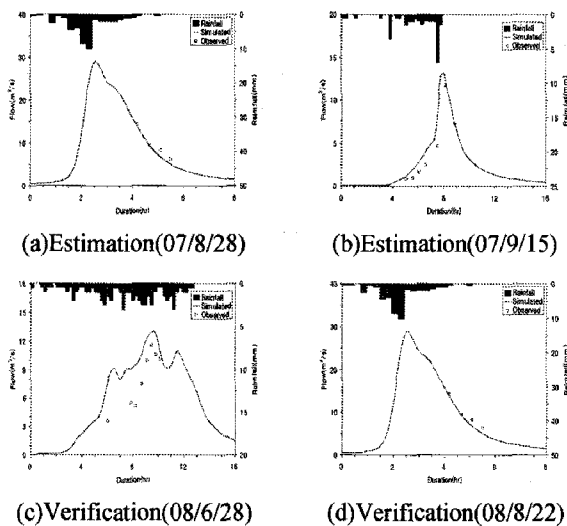


Fig. 11. Estimation and verification for rainfall-runoff.

Table 6. Rainfall data for model estimation and verification

	Data	Duration Time (hr)	Rainfall (mm)	Dry Period (day)
Estimation	07/08/28	16.3	70.0	0
	07/09/15	18.5	85.0	0
Verification	08/06/28	24.0	63.0	6
	08/08/22	11.8	26.0	5

단된다. 그러나 검증의 경우, 2008년 6월 28일 강우사상과 2008년 8월 22일 강우사상의 경우에는 지체시간은 같거나 거의 비슷하게 모의되었으며, 첨두유량은 1.4 m³/s 정도 작게 모의되었다.

Table 7은 각각의 강우사상에 대하여 관측값과 모의값의 첨두유량 상대오차와 상관계수를 나타내고 있다. 상관계수는 1.0에 가까울수록 관측값의 경향을 잘 반영한다. 보정과 검증 모두 0.9이상의 높은 결과를 보였다.

5.2. 오염물 유출에 대한 보정 및 검증

수질은 물리적, 화학적 작용 등의 영향으로 변동이 심하여 예측하는 것이 어렵다. 이 연구에서는 하천의 수질을 대표할 수 있는 수질항목(SS, BOD, COD, TN, TP)에 대하여 수질에 대한 보정 및 검증을 수행하였다(Fig. 12 참조).

BOD는 초기수세현상(first flush effect)이 가장 활발히 일어나는 수질 항목으로, 강우로 인한 유출 초기에 가장 높은 농도를 보이는 특징을 가진다. SS는 유량의 변화와 가장 비슷한 경향을 보이며, COD, TN, TP는 BOD와 SS의 중간 정도의 경향을 보인다.

Table 7. Peak flow error and correlation constant

Items	Estimation				Verification			
	07.8.28		07.9.15		08.6.28		08.8.22	
	Peak (m ³ /s)	Delay (hr)	Peak (m ³ /s)	Delay (hr)	Peak (m ³ /s)	Delay (hr)	Peak (m ³ /s)	Delay (hr)
Real	-	-	30.89	2.00	11.53	9.50	11.73	8.17
Simu.	-	-	30.92	0.75	12.92	9.50	13.13	8.00
Err. (%)	-	-	0.1	62.5	12.0	0.0	11.9	2.1
Corre. Const.	0.99		0.99		0.92		0.95	

Table 8. Correlation constants for pollutants runoff

Items	Estimation	Verification
	2007. 9. 15.	2008. 6. 28.
SS	0.87	0.87
BOD	0.79	0.94
COD	0.99	0.40
TN	0.94	0.68
TP	0.93	0.75

Table 8은 오염물 유출에 대한 검보정 결과를 정리한 것이다. 2007년 9월 15일 강우사상으로 보정을 실시하였으며, 상관계수는 0.79 이상의 결과를 보였다. COD가 0.99로 가장 높았으며, BOD가 0.79로 가장 낮은 결과를 보였다. 2008년 6월 28일 사상에 대

하여 검증을 실시하였다. 상관계수가 SS는 0.87, BOD는 0.94, TN은 0.68, TP는 0.75로 비교적 안정적인 결과를 보였다.

6. 결론

유역유출모형인 SWMM 모형을 이용하여 조만강 유역의 강우와 오염물 유출을 예측할 수 있는 유역 유출 모델링 시스템을 구축하였으며, 예측 시스템의 정확도 향상을 위해 민감도 분석과 검보정을 수행하였다. 이 연구를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) SWMM 모형을 수행하기 위해, 자료수집과 GIS 분석을 하여 각각의 소유역 및 하도구간에 대한 입력 자료를 구축하였다. 그 결과 토지이용에 의한 불투수 면적 산출은 실제보다 크게 나왔으며, 더 많은 유출이 발생하였다. 그렇지만 나머지 지형자료의 GIS 분석결과는 유역의 특성을 잘 반영하고 있다. 따라서 앞으로 GIS와 SWMM을 연계하여 수행한다면 훨씬 효율적인 모형을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 강우 유출에 대한 민감도 분석 결과, 유역면적과 불투수 면적 비율이 가장 민감하게 나타났으며, 다음으로 Horton의 침투 관련 매개변수와 유역폭이 민감한 결과를 나타내었다. 하도 관련 매개 변수는 조도계수가 가장 민감한 결과를 나타내었다. 오염물 유출에 대한 민감도 분석 결과, 침투농도에 대해서는 쓸림 매개변수인 쓸림지수와 쓸림계수가 매우 민감한 결과를 보여주고 있다. 특히 쓸림지수의 경우 +50%까지 변화시켰을 경우 초기 침투농도가 약 7배 이상 증가함을 보여주고 있다. 총부하량에 대해서는 쓸림지수와 축적지수의 영향에 따라 거의 선형적으로 변하고 있다. 쓸림지수의 경우는 매우 민감하게 반응하기 때문에 매개변수의 선정에 있어 주의를 요한다.

3) 강우 유출에 대한 보정 결과 상관계수가 0.99 이상이고, 검증 결과 상관계수가 0.92 이상으로, 보정과 검증이 적절히 이루어졌다. 오염물 유출 보정 결과 상관계수가 0.79 이상이고, 검증 결과는 COD를 제외하고는 안정적인 결과를 보였다.

4) 향후 유량 및 수질 관측 자료들을 보완하여 보다 정확한 모델링 시스템을 구축하는 것이 필요하다

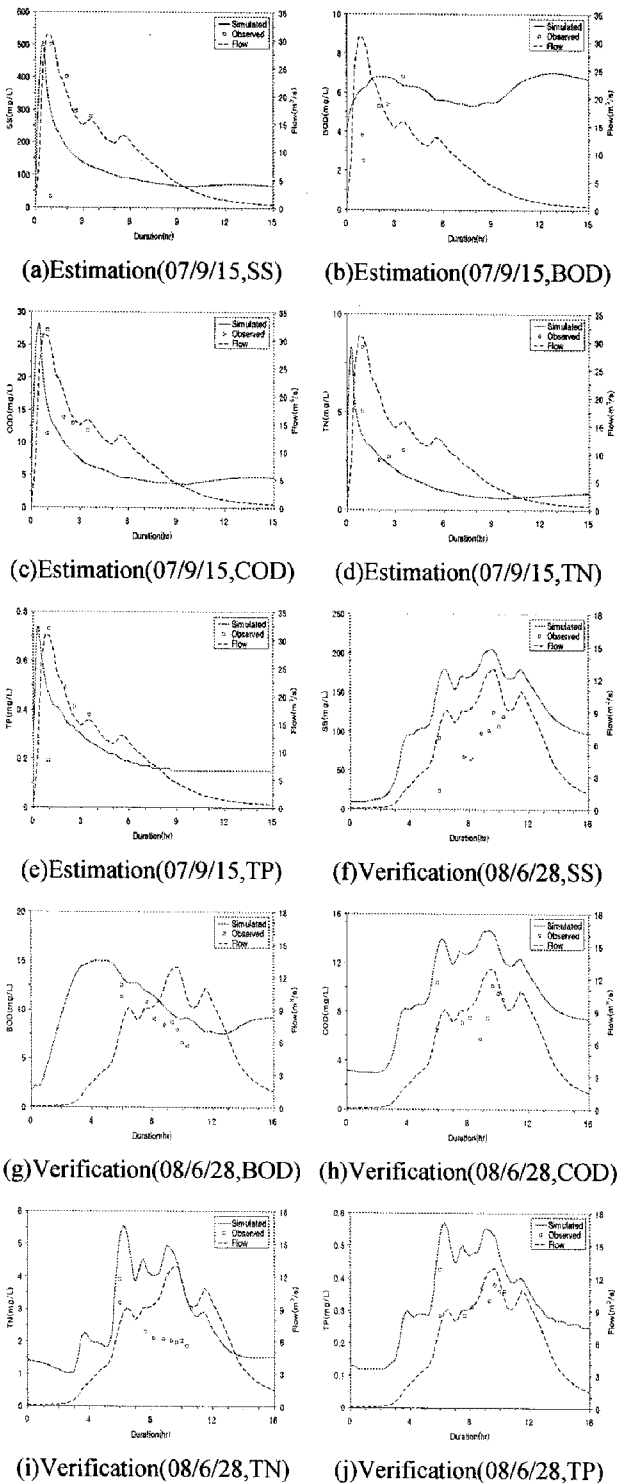


Fig. 12. Estimation and verification for pollutant-runoff.

다. 도시지역의 관로 시스템을 구축하여 도시지역으로부터 나오는 오염물과 논, 밭 등의 경작지에서 나오는 오염물을 분리하여 각 지역의 주요 오염원에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) 전지홍, 2000, SWMM과 회귀법을 이용한 유역에서의 비점오염원 부하량 산정 비교 연구, 석사학위논문, 농공학과, 건국대학교, 서울.
- 2) 유세진, 2001, 강우시 비점오염원 유출특성파악 및 총량관리를 위한 SWMM 모형의 적용, 석사학위논문, 토목공학과, 단국대학교, 서울.
- 3) 김창환, 2002, SWMM을 이용한 보령담수호 유역의 비점원오염 추정, 석사학위논문, 농공학과, 건국대학교, 서울.
- 4) 박연희, 2003, 강우사상에 따른 토지이용별 비점오염원 부하량 산정 함수 연구, 석사학위논문, 환경공학과, 이화여자대학교, 서울.
- 5) 조남홍, 2004, SWMM을 이용한 황구지천유역의 비점오염부하량평가, 석사학위논문, 환경학과, 관동대학교, 강릉.
- 6) 환경관리공단, 2004, 도심지 합류식 하수관거 월류수 및 분류식 우수관거 우수유출 오염부하 기초조사 연구 요약 보고서.
- 7) 장주형, 박해식, 박청길, 2006, GIS 기반의 SWMM 모형을 이용한 하수도시스템 선정에 따른 도시하천 수질개선효과의 정량적 분석, 한국물환경학회지, 22(6), 982-990.
- 8) Temprano, J., Ó. Arango, J. Cagiano, J. Suárez and Tejero, 2006, Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain, Water SA, 32(1), 55-63.
- 9) Huber W. C. and R. E. Dickinson, 1988, Storm Water Management Model Ver. 4 User's Manual, Environmental Protection Agency.