

도시 지역의 유출량 변화 예측을 위한 유역 모델 연구

A study on Watershed Model for Predicting the Runoff Characteristics of Urban Area

이혜원
Hye Won Lee

이화여자대학교 환경공학과
Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

(2009년 7월 31일 접수, 2009년 11월 12일 채택)

ABSTRACT : The SWMM (Storm Water Management Model) was applied to Princeton University campus, USA to predict the change of the runoff characteristics. Topography and infra structure of urban area are used in detail and watershed is made as form of regular square to improve the efficiency of data. Princeton campus was divided into 131 sub-basins and model input parameters were obtained from DEM (Digital Elevation Model), land use type, and campus management map, etc.. The model was validated based on the measured meteorological data. The validated model was used to analyze the change of the runoff characteristics according to urbanization, which are two different scenarios: 50% and 100% increase of impervious area. The increase of impervious area causes the increase of runoff, especially in the first-flush.

Key words : SWMM, Urbanization, Imperiousness, Runoff, Sewer system

요약 : 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 도시지역의 유출량 증가에 미치는 영향을 SWMM (Storm Water Management Model) 모델을 미국 프린스턴 대학 캠퍼스에 적용하여 분석하였다. 도시지역의 하수관거망을 고려하여 정밀한 지형 및 인프라 자료를 구축하기 위하여 모형의 유역을 격자 형식으로 제시하고, GIS를 활용하여 지형인자를 추출하였다. 모형의 격자망은 구축 자료의 사용 용이성 및 활용도를 높이기 위하여 200×200 ft (60.96×60.96 m)의 정사각형 형태의 131개의 소유역으로 구성하였다. 적용성이 검토된 도시지역의 SWMM 모델을 이용하여 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 지표면 유출에 미치는 영향을 예측하기 위하여 불투수면적이 50% 및 100%로 증가했을 경우의 유출량 증가를 검토하였다. 도시화에 따른 불투수 면적의 증가로 인하여 초기 강우시 유출량의 증가율 평균이 가장 높게 나타났으며 최대 강우 강도시에 최대 증가율을 보였다.

주제어 : SWMM, 도시화, 불투수층, 유출, 하수관망

1. 서론

우리나라는 1970년 이후 급속한 도시화와 산업화로 인하여 농지, 산림, 하천부지 등의 투수면적은 감소하는 반면 건물, 아스팔트 도로, 주차장 등의 불투수 면적은 증가하는 등의 토지 이용 패턴이 변화하고 있다. 또한 도시 오수 및 우수를 처리하기 위한 복잡한 하수관로의 구축은 강우의 토양 침투량을 감소시키고, 표면 유출을 증가시킨다. 불투수율의 증가에 따른 유출 침투의 증가 및 강우도달시간의 감소는 저지대의 하수관거 병목지점에서 우수가 배제되지 못하게 하며, 집중 호우시 재해를 발생시킬 수 있다. 뿐만 아니라 표면 침투량이 감소로 인한 지하수 수위의 저하는 하천의 건천화 현상과 토양의 자연정화 능력의 감소 문제를 발생시킨다.^{1~5)}

도시지역 면적의 증가에 따른 유출량의 변화에 관한 연구

는 유역 모델을 중심으로 지속적으로 진행되고 있다. 일반적으로 유역 모델의 사용은 유역에서 유출되는 수량과 비점오염 부하량 예측을 목적으로 하며, 이를 통하여 유역 내 지표나 하천에서의 오염 물질 유출과 그 이동과정을 시간적 및 공간적으로 분석한다. 현재 다양한 유역 모델이 도시, 비도시 및 농업 지역 등의 특성을 고려하여 개발되고 있으며, SWMM (Storm Water Management Model)은 도시 지역의 유출 유량과 수질을 예측하기에 적당한 모델로 개발 및 사용되고 있다.^{6,7)}

최근 들어, 유역 모델을 적용하여 도시화에 따른 유출량의 변화 연구가 다양하게 진행되고 있다. 특히 도시지역 면적의 증가에 따른 삼림 면적 감소 등으로 인한 유출량 변화를 중심으로 연구가 진행되었다.^{8,9)} 또한 도시지역에 SWMM 모형을 적용하여 도시의 강우-유출 현상을 효과적으로 모의할

† Corresponding author : E-mail : hwon@ewha.ac.kr Tel : 02-3277-2901 Fax : 02-3277-3275

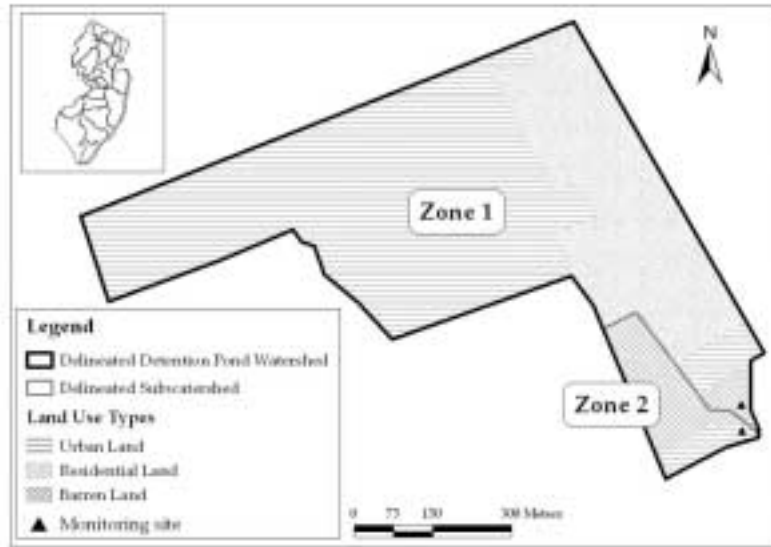


Fig. 1. Delineated Detention Pond Watershed in the Princeton University.

때 요구되는 도수우수 관거망 공간정보 정밀도의 수준을 파악하는 연구를 진행하였다.¹⁰⁾ SWMM을 이용하여 최근 농촌에서 도시로 토지 이용이 변화된 지역에 대해 개발 전후의 유출특성을 평가하였다.¹¹⁾ SWAT 모형을 이용하여 도시지역 면적의 증가에 따른 농경지 면적의 감소로 인한 유출량 변화에 대한 연구를 수행한 바 있다.¹²⁾

최근 GIS는 지형특성, 토지이용, 토양 등과 관련된 방대한 공간자료를 보다 쉽게 추출하고 활용할 수 있는 유용한 도구로 이용되고 있으며, 이러한 GIS의 지원으로 방대한 입력자료의 처리와 계산과정의 어려움이 해결되어 유역의 공간적 다양성을 반영할 수 있는 분산형 모델이 많이 사용되고 있다.^{13~16)} 특히, 강우-유출모의에서 모형의 입력 매개변수로 사용되는 수문학적 지형인자의 산정은 모의과정에서 매우 중요한 일이며 이는 DEM(Digital Elevation Model)으로부터 GIS 기법을 이용한다면 효과적으로 추출될 수 있다.⁴⁾

따라서 본 연구에서는 SWMM 모형을 적용하여 도시 지역의 하수관거망을 고려하여 도시화 유역의 유출을 분석하였다. 연구의 효율성을 높이며 보다 정밀한 입력 자료를 구축하기 위하여 모형의 유역을 격자 형식으로 제시하고, GIS를 활용하여 지형인자를 추출하였다. 또한 구축된 모형을 기반으

로 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 유출 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상현황

본 연구는 미국 뉴저지 주 프린스턴 대학 약 0.455 km²의 일부 지역을 대상으로 실시하였다. 토지 이용도는 거주지, 학교 건물 및 운동용지로 구성되어있으며, 전체 면적 중 도로, 건물 등의 불투수 지역이 약 31.7%를 차지한다(Table 1). 연구 대상지는 학교 건물과 상업 지구 등을 포함한 Zone1과 운동장이 있는 Zone2 구분 할 수 있으며, 이 두 지역에서의 강우 유출수는 하수관거를 통하여 이루어지며 유출은 말단부의 우수지 내부의 암거와 유출구를 통하여 이루어진다(Fig. 1). 우수지에 저류된 후 근처 카네기호 (Carnegie Lake)에 최종 유입된다. 평수기에는 우수지 상류의 유역에서의 모든 유출수가 유입되는 반면 홍수기에는 우수지의 용량을 초과하는 강우가 발생하면, 우수지 유입 이전에 flow divider를 이용하여 용량을 초과하는 유출수는 우수지를 통하지 않고 바로 카네기호로 흘러가도록 설계되어 있다.

2.2. 모델 적용

2.2.1. 모델 구성

SWMM (Storm Water Management Model)은 U. S. EPA에서 1971년에 완성한 도시 유역의 하천유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발된 모델로 강우 사상에 의해 발생하는

Table 1. Physical characteristics of the discretised subcatchments

Characteristics	Zone 1	Zone 2
Total area (km ²)	0.418	0.037
Average slope (%)	2.20	1.92
Imperviousness (%)	38.4	6.2
Land use types	Urban, Residential and Barren	Urban and Barren

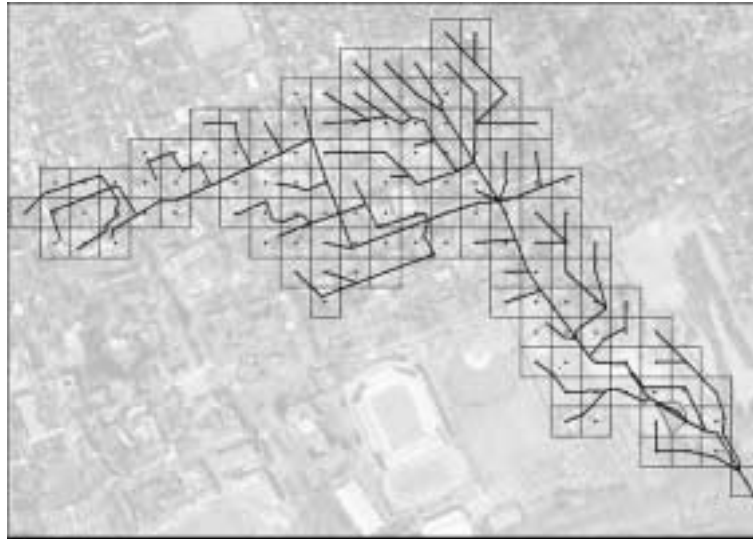


Fig. 2. Layout of study area and spatial distribution of sewer.

유출수량과 배수관망에서의 유출량 추정, 저류량 산정, 오염 물질의 처리 등을 모의할 수 있다. 단일 및 연속 강우현상 모의가 가능한 장점을 가지고 있으며, 최소의 보정으로 비교적 정확한 유출량을 산정할 수 있고 다양한 오염물질 모의 방법들을 적용할 수 있어 세계적으로 널리 사용되고 있는 유역 모델이다. SWMM은 4개의 실행블록과 5개의 보조블록을 가지고 있으며, 실행블록은 유출과 관련된 RUNOFF Block, 하도 내 수질을 모의하는 TRANSPORT Block, 하도의 수리 수문 기작을 정밀하게 표현할 수 있는 EXTENDED TRANSPORT (EXTRAN) Block, 처리시설 기작을 반영할 수 있는 STORAGE와 TREATMENT Block으로 구성되어 있다.¹⁷⁾

대상 유역의 DEM 자료를 바탕으로 ArcGIS 8.0을 이용하여 자연 지형을 고려한 기본 유역 경계를 구분하였다. 또한 30인치 이상, 12~30인치, 10인치 이하로 크기에 따라 3가지 형태로 구성되어 있는 대학 내 하수관거망 자료를 기반으로 도심 지역의 인위적인 유출 흐름을 변경을 고려하여 연구 대상지를 선정하였다.

모델의 격자망은 DEM 자료의 활용도를 높이고 자료의 정확도를 높이기 위하여 200×200 ft (60.96×60.96 m)의 정사각형 형태의 131개의 소유역을 구성하였다. ArcGIS 8.0을 이용하여 DEM 자료에서 고도 자료, 소유역의 흐름 방향, 경사를 추출하였고, 지형도와 토지이용도 자료에서 투수 및 불투수 지역을 추출하여 소유역별 비율을 산정하였다. 또한 토양도 자료를 통하여 토양의 특성 및 기타매개 변수를 추출하였다. 소유역별로 방대하게 구축된 자료를 바탕으로 SWMM의 입력 자료를 구성하기 위하여 C

언어를 활용하였으며, 소유역간의 연결고리는 대학 내 하수 관거 자료를 바탕으로 실제 연결 거리를 고려하였다. 연구 대상지역 내에 존재하는 기상관측소가 없어서 약 16 km 떨어진 곳에 위치한 Trenton-Mercer 공항의 기상자료를 활용하였다.

2.2.2. 모델 적용

2006년 4월 15일부터 21일까지 발생한 단일 강우사상을 대상으로 해당유역의 유출수 유량을 모의하였으며, 동일한 시기에 실측한 자료를 이용하여 보정과 검증을 실시하였다. 강우발생 기간 동안 측정된 유량값에 강우 발생 전에 측정된 기저유량을 고려하여 하수관거의 유량으로 보정하였다(Fig. 2). 모델 입력 계수들은 문헌값에 기초하여 보정하였다(Table

Table 2. Parameter used for the calibration of the model

Parameters	Value	Range
Subcatchment Manning's n ¹⁸⁾		
- Impervious area	0.012	0.012 (Smooth concrete)
- Pervious area	0.20	0.15-0.41 (Grass)
Conduit Manning's n ¹⁹⁾		
- Closed conduits	0.015	0.012-0.017 (Concrete)
- Open conduits		
• Zone 1	0.035	0.030-0.100 (Natural)
• Zone 2	0.100	
Depression storage (mm) ²⁰⁾		
- Impervious area	1.78	1.27-2.54
- Pervious area	5.08	2.54-7.62
Infiltration (Green-Ampt Method) ²¹⁾		
- Soil capillary suction head (mm)	220.5	47.3-308.7
- Soil saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	4.9	0.245-116.13

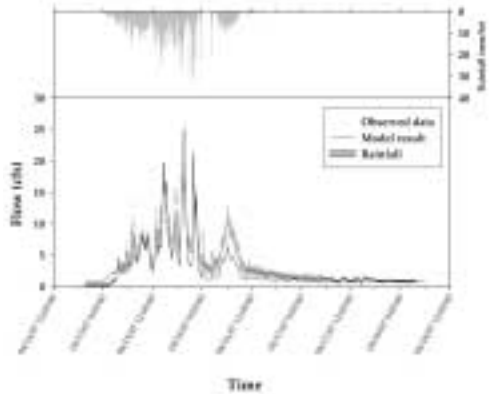


Fig. 3. Calibration results of flow data.

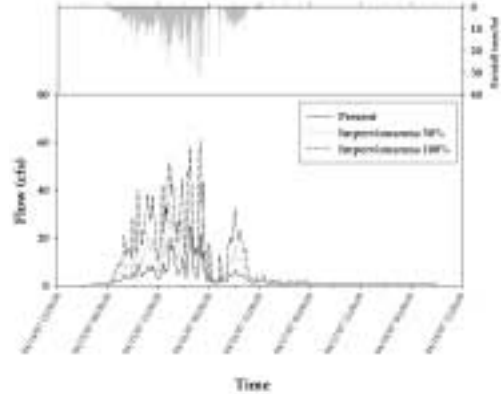


Fig. 4. Runoff change results of SWMM model.

2).^{18~21)} 모델 보정 계수는 각 소유역과 하수관거의 Manning's 계수를 참고문헌을 참고하여 특성별 반응계수를 산정하였고, 침투함수는 Green-Ampt Method를 적용하였다. 지면의 Manning 계수와 지면 저류량(Depression Storage), 침투감소계수, 유역 폭 등이 유출수량 보정에 사용되었다.

다음의 Fig. 3은 SWMM을 이용하여 유출수량을 모의한 결과와 실측자료를 비교한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 실측치와 모형에 의한 모의치가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 적용 모델의 타당성

도시지역의 지형 및 하수관거 자료와 GIS를 활용하여 SWMM 모형을 구축하여, 강우 유출량을 재현하였다. 기존의 DEM 기반의 유역 분할 방식 대신 자료의 활용도를 높이고 향후 도시화에 따른 토지이용 변화를 보다 효과적으로 모의하기 위하여 격자망 형태의 유역으로 분할하였다. 도시 개발로 인한 불투수 면적의 증가는 그 비율만큼이나 어느 지역이 개발되었는지, 즉 개발 지역의 위치 또한 유출량의 변화에 영향을 준다. 분산형 비점오염원 모델에서 단위유역 크기에 따른

Table 3. Relationship between peak rainfall and peak discharge

Rainfall		Discharge		
Time of peak	Peak rainfall (mm/hr)	Time of peak	Peak discharge (cfs)	Lag time (min)
04/15 06:56	16.15	04/15 07:17	12.39	0:21
04/15 14:01	25.51	04/15 14:44	20.65	0:43
04/15 19:21	25.23	04/15 19:37	24.67	0:16
04/15 21:47	33.40	04/15 21:53	19.58	0:06
04/16 05:56	10.16	04/16 06:19	10.07	0:23

민감도 분석 연구가 진행된 바 있으나, 연구 대상에 따라서 모델 구축시 적절한 단위유역 크기를 산정하는 것은 어려움이 있다.¹³⁾ 또한 인위적인 구조물이 많고, 표면 경사의 변화가 크지 않은 도시지역에서 DEM을 기반으로 유역을 분할하는 것은 자료의 신뢰도를 떨어뜨린다. 따라서 본 연구에서는 GIS 기반의 자료를 래스터 형식으로 변환하여 자료를 추출하여 보다 과학적이며 도시지역을 잘 반영할 수 있는 SWMM 모형을 구축하였다. 또한 도시지역에서 구축한 하수관거 자료의 속성을 모형에서 반영하여 실제 하수 관거의 크기, 매설 깊이 등을 모두 고려하였다.

모델의 적용성을 검토하기 위하여 2006년 4월 15일부터 21일까지 6일간의 강우 기간 동안에 대하여 모형을 적용하였다. 이 기간 동안 총 5회의 강우 peak가 나타났으며, 각 peak 별 시간대, 강우강도 및 지체시간은 Table 3과 같다. peak 강우에 따른 침투 유량은 불투수 면적의 비율, 강우 강도, 이전 강우와의 함수 등에 따라 변화하는 것을 알 수 있다.

3.2. 시나리오 분석

적용성이 검토된 도시지역의 SWMM 모델을 이용하여 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 지표면 유출에 미치는 영향을 예측하였다. 본 연구지역 중 Zone1은 불투수면적이 38.4%이며, 적용한 시나리오는 불투수면적이 50% 및 100%로 증가했을 경우이다. 시나리오 결과는 Fig. 4에 제시하였다.

불투수면적이 약 12% 증가하여, 전체 50%를 점유할 경우에 유출량은 평균 48.8% 증가하였으며, 최대 256% 증가율을 나타냈다. 초기 강우시 유출량의 증가율 평균이 가장 높게 나타났다. 최대 강우 강도시에 최대 증가율을 보였다. 초기 강우 이후 후기 강우시 증가율이 점점 낮아지는 것을 알 수 있다. 전체 연구지역이 도시화가 진행되어 불투수면적이 100%

를 점유할 경우에 유출량은 평균 124% 증가하였으며, 최대 571% 증가율을 나타냈다.

4. 결론

본 연구는 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 도시지역의 유출량 증가에 미치는 영향을 SWMM 모델을 적용하여 분석하였다. 도시지역의 하수관거망을 고려하여 정밀한 지형 및 인프라 자료를 구축하기 위하여 모형의 유역을 격자 형식으로 제시하고, GIS를 활용하여 지형인자를 추출하였다. 또한 구축된 모형을 기반으로 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 유출 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

대상 유역의 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 바탕으로 자연 지형을 고려한 기본 유역 경계를 구분하였으며, 연구 대상지역의 하수관거망 자료를 기반으로 도심 지역의 인위적인 유출 흐름을 변경을 고려하여 연구 대상지를 선정하였다. 모형의 격자망은 구축 자료의 사용 용이성 및 활용도를 높이기 위하여 200×200 ft (60.96×60.96 m)의 정사각형 형태의 131개의 소유역으로 구성하였다.

적용성이 검토된 도시지역의 SWMM 모델을 이용하여 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 지표면 유출에 미치는 영향을 예측하기 위하여 불투수면적이 50% 및 100%로 증가했을 경우의 유출량 증가를 검토하였다. 도시화에 따른 불투수 면적의 증가로 인하여 초기 강우시 유출량의 증가율 평균이 가장 높게 나타났으며 최대 강우 강도시에 최대 증가율을 보였다.

본 연구를 통하여 GIS 기반의 자료를 래스터 형식으로 변환하여 자료를 추출하여 보다 과학적이며 도시지역을 잘 반영할 수 있는 SWMM 모형을 구축하여 그 적용성을 검토하였으며, 본 모형을 적용하여 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 유출량에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

KSEE

사 사

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국연구재단(구, 한국학술진흥재단)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(KRF-2006-352-D00121) 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, J. G., and Heaney, J. P., "Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems," *J. WATER RES. PL.-ASCE.*, September/October, 419~426(2003).
2. Pappas, E. A., Smith, D. R., Huang, C., Shuster, W. D., and Bonta, J. V., "Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation," *Catena*, **72**, 146~152(2007).
3. Farahmand, T., Sean, W. F., and Quilty, E. J., "Detection and visualization of storm hydrograph changes under urbanization: An impulse response approach," *J. Environ. Manage.*, **85**, 93~100(2007).
4. 이범희, "유전자알고리즘을 이용한 도시화 유역에서의 유출 관리 방안 연구," 한국지수물리학회지, **9**(4), 321~331(2006).
5. 박정규, 박영기, "도시화의 영향에 따른 유출변화특성에 관한 연구," 환경관리학회지, **14**(1), 9~16(2008).
6. Rahmat, S. N., Yusop, Z., and Abustan, I., "Modeling of stormwater quality from residential catchment using storm water management model(SWMM)," *National Conference-Water for sustainable developed towards a developed nation by 2020, Malaysia*, 1~8(2006).
7. Jang, S., Cho, M., Yoon, J., Yoon, Y., Kim, S., Kim, G., Kim, L., and Aksoy, H., "Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment," *Desalination*, **212**, 344~356(2007).
8. 박민지, 권형중, 김성준, "HSPF 모형을 이용한 토지피복변화에 따른 유출 변화 분석," 한국수자원학회 논문집, **38**(6), 495~504(2005).
9. 이승종, 김영오, 이상호, 이길성, "WEP 모형을 이용한 도림천 유역 물순환 모의," 한국수자원학회 논문집, **38**(6), 449~460(2005).
10. Park, S. Y., Lee, K. W., Park, I. H., and Ha, S. R., "Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation," *Desalination*, **226**, 328~337(2008).
11. 박준호, 유용구, 박영근, 윤희택, 김종건, 박윤식, 전지홍, 임경재, "SWMM을 이용한 춘천 거두 1지구의 LID 개념 적용으로 인한 유출 감소 특성 분석," 수질보전 한국물환경학회지, **24**(6), 806~816(2008).
12. 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환, "SWAT 모델을 이용한 갑천유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가," 한국수자원학회 논문집, **39**(10), 881~901(2006).
13. 배인희, 박정은, 박석순, "분산형 비점오염원 모델에서 단위 유역 크기의 민감도 분석," 대한환경공학회지, **27**(9),

- 952~957(2005).
14. Leon, L. F., Soulis, E. D., Kowen, N., and Farquhar, G. J., "Nonpoint source pollution: a distributed water quality modeling approach," *Water Res.*, **35**(4), 997~1007(2001).
 15. 유금환, 오경미, 박희경, "확률론적 방법을 이용한 분포형 비점오염원 모델의 격자크기에 따른 매개변수 민감도 분석," 대한환경공학회 99추계학술연구발표회 논문집(I), 대한환경공학회, 광주, pp. 363~364(1999).
 16. 양인태, 김연준, "수문해석을 위한 DEM에 의한 지형의 경사도분석에서 격자크기의 영향," 한국측지학회지, **15**(2), 221~230(1997).
 17. Rossman, L. A., *Storm Water Management Model, Ver. 5.0, User's Manual*, U. S. EPA(2004).
 18. McCuen, R. H., Johnson, P. A., and Ragan, R. M., "Highway Hydrology," U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Hydraulic Design Series, (1996).
 19. ASCE, *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction*, ASCE Manual of Practice No. 60, New York, NY. (1982).
 20. ASCE, *Design & construction of UrbanStormwater Management Systems*, New York, NY. (1992).
 21. Jenkin, E. D., "Ground-Water Management in Western Kansas," *J HYDRAUL ENG-ASCE*, **109**, 1314~1322(1983).