

SWAT-SWMM 결합모형의 개발**(I) 모형의 개발****Development of Coupled SWAT-SWMM Model****(I) Model Development**

김 남 원* / 원 유 승**

Kim, Nam Won / Won, Yoo Seung

Abstract

From the continuous long-term rainfall-runoff standpoint, the urbanization within a watershed causes land use change due to the increase in impervious areas, the addition of manmade structures, and the changes in river environment. Therefore, rainfall-runoff characteristics changes drastically after the urbanization. Due to these reasons, there exists the demand for rainfall-runoff simulation model that can quantitatively evaluate the components of hydrologic cycle including surface runoff, river flow, and groundwater by considering urban watershed characteristics as well as natural runoff characteristics.

In this study, continuous long-term rainfall-runoff simulation model SWAT-SWMM is developed by coupling semi-distributed continuous long-term rainfall-runoff simulation model SWAT with RUNOFF block of SWMM, which is frequently used in the runoff analysis of urban areas in order to consider urban watershed as well as natural watershed. The coupling of SWAT and SWMM is described with emphasis on the coupling scheme, model limitations, and the schematics of coupled model.

Keywords : urban hydrology, SWAT, SWMM, SWAT-SWMM, long-term runoff

요 지

장기적 유출 측면에서 유역의 도시화는 불투수면적의 확대에 의한 토지이용변화, 인위적 구조물의 설치여부, 하천 환경의 변화를 유발하며 따라서 도시화되기 이전과 매우 다른 형태의 유출거동 특성을 가진다. 따라서 자연적인 유출 성분변화 특성은 물론 도시화 유역 특성변화요소를 적절히 반영함으로써 지표수, 하천수, 지하수 등의 수문순환 요소를 장기적인 측면에서 정량적으로 평가할 수 있는 유출모형이 필요하다.

본 연구에서는 준 분포형 장기 유출모형인 SWAT 모형과 도시지역의 유출해석에 주로 이용되는 SWMM 모형의 RUNOFF 블록을 결합함으로써 자연유역은 물론 도시유역의 제반 유역특성을 충분히 고려할 수 있는 장기유출모형인 SWAT-SWMM 모형을 개발하였다. SWAT-SWMM 결합모형의 구성방법 및 모형의 한계 그리고 결합모형의 모식을 중심으로 두 모형의 결합상황을 기술하였다.

핵심용어 : 도시수문학, SWAT, SWMM, SWAT-SWMM, 장기유출

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(E-mail : nwkim@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-721, Korea

1. 서론

유역의 도시화로 인한 수문학적 영향평가는 주로 단기 홍수사상에 대하여 토지이용 변화가 침투유량 변화에 미치는 영향의 분석에 집중되어 왔다(Bhaduri 등, 2001). 그러나, 도시화 전·후의 토지이용변화로 인하여 지표면, 하천, 지하수 유출 및 증발산 등과 같은 수문순환의 전반적인 요소들은 도시화의 시·공간적 확장 및 변화특성에 의해 크게 변화한다(Dunne과 Leopold, 1978; Welsh, 1989). 또한 유역내 서로 다른 토지이용은 수문학적으로 서로 다른 수준의 영향을 주기 때문에, 토지이용변화로 인한 수문순환요소의 정량적인 평가를 위해서 이용되는 강우-유출 모형은 다양한 토지이용에 대한 고려가 이루어져야 하고, 각각의 토지이용 특성을 물리적으로 반영할 수 있어야 한다. 특히 도시지역의 경우, 불규칙적으로 확대되는 불투수지역에 대한 적절한 모식은 개개 수문순환요소의 변화양상 및 영향을 파악하는데 중요하고, 이들로부터 도시의 개발 또는 도시의 확장에 따른 수문순환요소의 영향을 최소로 할 수 있는 방안을 도출할 수 있을 것이다(Bhaduri 등, 1997, 2001).

세계적으로 도시지역의 장·단기 유출모형으로 가장 널리 이용되는 모형은 SWMM 모형(Storm Water Management Model, Huber와 Dickinson, 1988)이다. SWMM 모형은 도시지역에 대한 수량 및 수질 모의와 도시 우수시설 유출과정의 거의 모든 분야에서 이용가능한 장점이 있다. 반면 이 모형은 많은 입력자료가 요구되고, 특히 국내의 경우, 장기적인 자료의 구축이 어려워, 주로 작은 도시 소유역에 적용되었고, 도시지역 이외의 토지이용에 대한 영향을 적절히 고려할 수 없어 도시지역이라는 부분적인 토지이용에 제한되어 이용되어 왔다. 그러나, 우리나라 대부분의 유역은 도시지역, 농업지역, 산림지역 등 다양한 토지이용이 이루어지고 있으며, 이러한 복잡한 토지이용을 적절히 고려할 수 있는 모형이 필수적이다.

현재 유역의 토지이용변화로 인한 장기적인 유출특성을 규명하기 위해 비교적 손쉽게 이용할 수 있는 모형으로 SWAT 모형(Soil and Water Assessment Tool, Arnold 등, 1993, 1995)이 대표적이며, 이 모형은 부족한 가용자료로 과거·현재·미래의 장기유출 거동특성을 규명하고, 다양한 토지이용에 대해 유역규모의 장기적인 수문순환요소의 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 더욱이 미계측 유역의 경우 유역과 여러 개의 소유역에서 유출상황을 재현할 수 있는 준분포형 유출모형으로 국내의 경우 적용성이 뛰어나다(장철희 등,

2003; Kim 등, 2003). 또한 미국의 경우, 이 모형은 미 농무성은 물론 환경청에서도 아주 유용한 모형으로 받아들여지고 있고, 현재 한국건설기술연구원에서 연구모형으로 이용되고 있으며, 그 신뢰성이 검토되고 있다(과학기술부, 2004). 그러나, 이 모형은 토지이용의 한 부분인 도시지역 대한 전체적인 모식에 부분적인 문제점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 토지이용에 대하여 유역규모의 장기적인 모의가 가능하나, 도시라는 토지이용의 해석에 부분적인 결함을 가지고 있는 SWAT 모형의 일부분을 도시지역이라는 특정의 토지이용 부분에 강점을 가지고 있는 SWMM 모형으로 개선하기 위하여 SWAT과 SWMM 모형의 결합을 시도하였다. 이를 위해서 먼저 도시지역의 장기 유출모형을 좀 더 세밀히 검토하여 SWAT과 SWMM 모형의 강점을 토의하고, SWAT과 SWMM 모형의 직접적인 비교를 통하여 수문성분간의 유사성을 검토한 후, 모형의 분해 및 결합 과정을 수행하였다.

2. 도시지역 장기 유출모형

장기 유출모형은 인위적이거나 자연적인 유역내 다양한 토지이용과 변화를 고려하여 개개 수문성분량을 해석할 수 있어야 하며, 모의의 최소단위에 대한 물리적 특성을 모형에 고려할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서 장기 유출모형은 집중형 모형보다 분포형 또는 준분포형 모형이 적절할 것으로 판단된다. 분포형 모형의 경우 모의 최소단위가 격자이며, 대표적인 모형으로 MIKE-SHE(MIKE System Hydrologique Europeen), AnnAGNPS(ANNualized AGricultural Non-Point Source Pollution Modeling System), ANSWER2000(Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Simulation 2000) 모형 등이 있다. MIKE-SHE 모형은 토양층을 중심으로 수문성분을 모의하는 물리적 기반의 이상적인 모형이지만, 입력자료의 구축이 용이하지 않아 적용이 어렵고, 고가인 단점이 있으며, AnnAGNPS와 ANSWER2000 모형은 최근에 개발되어 적용사례가 많지 않다. 준분포형 모형은 토양도, 토지이용도 등을 이용하여 소유역내 동일한 수문학적 응답단위군을 모의의 최소단위로 이용하며, 이들로부터 개개 수문성분의 특성을 해석한다. 대표적 모형으로 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran), PRMS(Precipitation-Runoff Modeling System), SWAT(Soil and Water Assessment Tool), SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 모형 등이 있는데,

PRMS와 SWAT 모형에서는 모의의 최소단위를 HRU(Hydrological Response Unit)라 하고, SLURP에서는 ASA(Aggregated Simulation Area)라 한다. HSPF 모형의 경우 소유역보다 세밀한 모의 최소단위의 구분이 어려우며, SLURP 모형은 많은 적용사례가 있지만, 매개변수의 결정에 제한점이 있고, 비교적 대유역에 대한 적용에 유리하다. PRMS 모형은 미국 지질조사국의 대표적인 유역유출모형으로 USGS의 조사사업 및 연방정부나 주정부의 주요 수문관련 프로젝트에 이용되고 있다. Steuer와 Hunt(2001)는 USGS의 사업으로 수행된 도시화에 의한 수문학적 영향을 평가하기 위해 PRMS 모형을 적용하였고, 국내의 경우 유역조사사업의 일환으로 한강유역에 적용되고 있다(과학기술부, 2004). 그러나 이 모형은 소유역이나 HRU의 개수가 유출에 영향을 거의 주지 않아 준분포형 모형이라기보다는 집중형 모형에 가까운 단점이 있다(과학기술부, 2004). 미국 농무성 산하 농업연구소(ARS, Agricultural Research Service)에서 개발한 SWAT 모형은 오염총량 평가에 활용되고, 미 환경청(EPA, U.S. Environmental Protection Agency)에서 수행하는 연구사업에 적용되고 있으며, 미국외의 지역에서도 활발히 이용되고 있다. 국내의 경우, 김남원과 원유승(2003)은 경안천 유역을 대상으로 도시화에 따른 수문학적 영향을 평가하였다.

도시지역이라는 특정 토지이용에 대한 장기 유출모형으로 STORM, ILLUDAS(ILLinois Urban Drainage Area Simulator), SWMM(Storm Water Management Model) 모형 등이 있는데, ILLUDAS와 SWMM 모형은 개발 당시 단기의 사상성 모형이었으나, 장기 유출모형으로 확장되었다. 미 공병단(USACE, U.S. Army Corps of Engineers)에 의해 개발된 STORM 모형은 삼각형 무차원 단위도를 이용하여 유출량을 산정하고, 기본 수질인자의 침전과 퇴적을 계산하나, 우수관거가 고려하지 못한다는 단점이 있다. ILLUDAS 모형은 불투수지역에 대하여 선형 시간-면적법을 이용하고, 투수지역에 대해서는 Horton 방정식을 이용하여 지표면 유출량을 산정하나, 지하수 유출과 수질관련 모의를 할 수 없다는 단점이 있다. 미 환경청의 지원으로 개발된 SWMM 모형은 현재까지 수정·보완되고 있으며, 강우, 용해, 지표수, 지하수, 수로/관의 추적, 수질 등의 성분을 모의할 수 있어 도시지역 유출과정의 거의 모든 부분을 모의할 수 있는 모형이다. STORM, ILLUDAS, SWMM 모형은 외국의 경우 많은 연구자들에 의한 장기 강우유출 특성을 규명하거나, 모형간의 모의결과를 비교하는 연구가 수행되었다(Han과 Delleur, 1979; Bric, 1978, Abbott, 1978). 국내의 경우 단기사상에 대

한 연구에 이들 모형을 이용한 경우는 있으나, 장기적인 유출거동의 특성을 규명하기 위한 연구는 전무한 실정이다.

3. 장기 유출모형의 비교

장기와 단기 유출모형의 차이는 증발산의 고려와 지하수 유출의 계산여부이다. 단기 유출모형에서는 증발산의 경우 모의기간이 짧고, 우기에는 증발산이 거의 일어나지 않는다는 이유와 지하수 유출량 역시 단기 유출모형이 짧은 기간만을 모의하므로 상대적으로 흐름속도가 느린 지하수 유출 또는 기저 유출량을 고려하지 않는다. 그러나, 장기 유출모형은 증발산량 및 지하수 유출에 대한 고려가 필수적이고, 다양한 토지이용에 따른 물리적 특성과 유역내 토지이용의 월, 계절 또는 연별 변화특성을 고려할 수 있어야 한다.

본 고에서는 다양한 토지이용, 토지이용의 변화와 월, 계절, 연별 변화 특성을 고려할 수 있는 SWAT 모형과 도시지역의 유출해석시 가장 널리 이용되고, 배수특성과 수질 등 도시지역에 대한 거의 모든 수문성분을 모의할 수 있는 SWMM 모형을 선택하여 각 모형에서 모의하는 수문성분의 특성을 표 1에 비교하였고, 각 수문성분의 자세한 특성은 후술한다.

3.1 도시지역과 장기유출 모형

도시라는 형태의 토지이용 특징은 크게 지표면특성, 배수특성, 상류의 토지이용 특성으로 대변될 수 있다. 도시지역에서 지표면 특성은 불투수지역과 투수지역의 크기와 형태, 위치 등으로 표현될 수 있고, 배수특성은 다른 형태의 토지이용과 다르게 배수관망을 통하여 임의의 지점으로 유출되는 것이다. 또한, 도시지역의 상류는 저밀도의 주거지역, 농업지역, 산림지역 등 다양한 형태의 토지이용이 이루어지고 있다.

이러한 관점에서 SWAT 모형은 지표면 특성과 도시지역 상류의 토지이용에 대한 특징은 고려되나, 배수특성을 적절히 고려하지 못하는 단점이 있다. 또한, 도시지역의 토지이용 특징을 고려하기 위해 불투수지역과 투수지역의 비율을 이용하여 지표면 유출량을 산정하나, 증발산량 산정시 불투수지역의 특징을 고려하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 반면, SWMM 모형은 지표면특성과 배수특성을 고려할 수 있는 큰 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 도시지역의 유출 거동특성을 파악하기 위해 개발되었기 때문에 도시지역 상류의 토지이용에 따른 유출거동의 특성을 고려하기 힘들다는 단점이 있다.

3.2 SWAT과 SWMM 모형의 장기유출 성분별 구조 비교

SWAT과 SWMM 모형의 결합을 위해 두 모형이 포함하고 있는 수문성분을 차단저류, 지표면 유출과 침투, 토양 구조, 지하수 유출, 증발산량의 산정과 하도 및 수로/관의 추적적으로 분류한 후, 각 성분에 대하여 두 모형에서 이용하고 있는 모식에 대한 비교를 시도하였다(표 1 참조).

먼저, SWAT과 SWMM 모형에서 차단저류는 각각 기공저류(canopy storage)와 지면저류(depression storage)를 이용하여 강우로부터 제일 먼저 제외되고, 증발로 제거된다. 따라서 기공저류와 지면저류는 식물의 피복특성과 지표면의 요면 저류특성에 의해 강우 초기에 저장된다. 따라서 기공저류와 지면저류는 식물의 피복특성과 지표면의 요면 저류특성에 의해 강우 초기에 저장된다. 따라서 기공저류와 지면저류는 식물의 피복특성과 지표면의 요면 저류특성에 의해 강우 초기에 저장된다. 따라서 기공저류와 지면저류는 식물의 피복특성과 지표면의 요면 저류특성에 의해 강우 초기에 저장된다.

지표면 유출량과 침투량의 모식은 두 모형에서 사용하는 방정식만 다를 뿐 큰 차이가 없는데, SWAT 모형에서는 SCS의 CN 방법과 Green & Ampt 방정식, SWMM 모형에서는 Horton 방정식과 Green & Ampt 방정식을 이용할 수 있다. 다만, 각각의 방법이나 방정식이 지표면 유출량을 산정하는지 또는 침투량을 산정하는지에 따라 초과 침투량의 처리방식이 약간 다르다. 토양의 침투용량을 초과하는 침투량에 대해 지표면 유출량을 기준으로 지표면 유출량과 침투량을 분리하는 SCS의 CN 방법은 토양속으로 초과침투량을 보내고, 침투량을 기준으로 분리하는 Horton 식은 지표면으로 초과침투량을 돌려보낸다.

토양구조의 경우, SWAT 모형은 크게 4개(토양통, 비포화지대, 포화지대(얇은 대수층, 깊은 대수층)), SWMM 모형은 크게 3개(비포화 대수층, 포화 대수층, 깊은 대수층)로 구분한다. SWAT 모형의 경우, 비포화지대 위에 지표로부터 0~2m 깊이의 토양통을 고려하여 지표하 유출량을 산정하고, 토양통의 맨 하단층을 침투한 수분이 침투하여 지하수위를 함양한다. 반면에 SWMM 모형의 비포화 대수층에서는 지하수위에 직접 기여하는 침투량만을 산정하고, 지표하 유출량은 산정하지 않는다. 두 모형의 토양구조를 비교하여 보면 SWAT 모형의 토양통과 비포화지대가 SWMM 모형의 비포화 대수층과 유사함을 알 수 있는데, SWAT 모형의 경우, 토양통에 대한 수분의 이동은 세세히 취급한 반면 비포화지대로 침투한 수분은 단순히 지체되어 지하수위를 함양시킨다. 즉, 비포화지대의 수분함량과 토양특성을 지질층 전역에 대한 지체시간만의 함수로 고려하며, 이 값은 사용자에 의한 입력값이다. 또한, 비포화지대에서의 수분함량을 계산하지 않기 때문에 비포화지대의 증발산량을 산정할 수 없다. 이러한 문제는 SWAT 모형에서 토양통의 하단에 있는 3개의 대수층

에 대해 대수층의 크기를 알 수 있는 입력자료가 없기 때문에 발생하며, SWAT 모형에서 출력되는 대수층의 수분함량은 초기에 대수층에 있었던 수분량으로부터 상대적으로 변한 양이다. 대수층의 두께가 이용되지 않음으로써 발생하는 또 다른 문제는 지하수위의 산정에서 발생하는데, 지하수위가 비포화층의 어느 정도를 포화시켰는지 또는 토양통까지 포화시켰는지에 대한 정보를 알 수 없다는 것이다. 다만 대수층에 남아있는 수분량만 알 수 있을 뿐으로 SWAT 모형의 토양구조 중 비포화층의 모식은 불분명하고, 포화지대의 모식 역시 지하수위에 대한 정보를 명확히 알 수 없는 단점이 있다.

지하수 유출의 경우, SWAT 모형은 사용자가 입력한 한계치에 따라 지하수 유출의 발생여부가 결정되나, SWMM 모형은 수로/관의 수위에 따라 지하수 유출량을 산정할 수 있고, 이를 임의의 소유역으로 유출시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 두 모형 모두 하도 또는 수로/관에서 지하수위를 함양하는 양은 고려하지 못한다.

증발산의 경우, SWAT 모형은 기공저류, 토양통, 얇은 대수층, 하도에서 발생하는데, 토양통에서는 토양증발과 식물의 증산량을 산정하고, 얇은 대수층에서는 토양통으로 또는 식물의 증산량을 산정한다. SWAT 모형에서 일어나는 대부분의 증발산량은 토양통에서 발생하는데 이는 기온, 최대 토양증발량 및 최대 식물증산량, 토양통의 수분함량, 식생의 종류 및 상태에 따라 다르고, 얇은 대수층에서의 증발산량은 특별한 구분없이 얇은 대수층의 깊이가 사용자가 입력한 한계치 이상이면 발생한다. SWMM 모형은 지면저류, 비포화지대에서 토양증발 및 식물증산, 포화지대에서 식물의 증산, 수로/관에서 증발이 발생한다. 비포화지대에서 산정하는 토양증발 및 식물증산은 SWAT 모형에서처럼 구분하여 계산하지 않고, 비포화지대의 수분함량에 의해 한꺼번에 계산된다. 또한, SWAT 모형은 침투와 증발산이 HRU의 전면적에서 발생한다고 가정하는 반면, SWMM 모형은 투수 지역에서만 발생한다고 가정한다. 이로부터 실제 증발산량을 산정하기 위해 SWAT 모형은 상당히 복잡한 모식을 이용하면 반면, SWMM은 간단히 계산한다는 것을 알 수 있으며, SWAT 모형의 경우 도시 HRU 전체에서 증발산이 발생하는 문제점을 가지고 있다.

하도 및 수로/관의 경우, SWAT 모형은 한 개의 소유역에 한 개의 주 하도가 존재하며, 소유역내 모든 HRU의 지표면, 지표하, 지하수 유출량의 합이 소유역의 주 수로에 유입되어 추적된다. SWMM 모형은 수로/관의 형태 및 종류를 다양하게 입력할 수 있고, 소유역의 출구에 지표면 유출량이 유입되며, 지하수 유출량은 사용자가 지정한 소유역 출구로 유입되어 시간간격별로 추적된다.

표 1. SWAT과 SWMM 모형의 도시지역 물 순환모식 비교

| 구분 | SWMM의 도시지역 | SWMM | |
|-----------|---|--|--|
| 소유역 | 소유역의 세분 | · 다수의 HRU로 구성되고 도시지역 HRU는 다시 3개의 세분됨. · 3개(용설이 모의되면 4개)로 세분됨. | |
| | 초기 차단저류 | · 기공저류 · 저면저류 | |
| | 지표면 유출과 침투 | · SCS CN 방법과 Green & Ampt 방정식 이용함. · SCS CN 방법을 이용할 경우 도시 HRU의 지표면 유출량은 합성 CN을 이용함. · HRU의 지표면 유출량을 지체시켜 소유역내 주 수로에 유입시킴. · CN 값이 일별로 갱신됨. · HRU 면적에 대해 균일하게 침투함. | · Horton 방정식과 Green & Ampt 방정식을 이용함. · RUNOFF 블록의 경우, kinematic wave의 근사법인 비선형 저류방정식을 이용함. · 소유역에 대해 3개 또는 4개로 세분하며, 각각의 지표면 유출량을 합산하여 소유역 출구로 유출시킴. · 침투능 회복방정식에 의해 침투능이 회복됨. · 투수면적에서만 침투하고 소유역에 대해 균등하게 분포시킴. |
| | 토양 구조 | · 토양통, 비포화 대수층, 포화대수층(얇은 대수층, 깊은 대수층)으로 구분 · 비포화 대수층과 포화대수층으로 구분 | |
| | 지표하 유출 | · 토양통에 의한 측방흐름 및 토관흐름 고려하여 지표하 유출량을 산정함. · HRU의 지표하 유출량을 지체시켜 소유역내 주 수로에 유입시킴. · 산정하지 않음. | |
| 소유역 | 지하수 유출 | · 토양통 최하단의 침투량이 비포화 대수층을 침투 및 지체하여 얇은 대수층과 깊은 대수층을 함양함. · 깊은 대수층의 수분함량과 깊은 대수층으로의 침투량은 유역외로 사라지는 손실량임. · 사용자 입력치와 얇은 대수층의 수분함량에 따라 지하수 유출량 산정 · HRU가 위치한 소유역의 주 수로에 유입됨. · 침투량이 비포화 대수층을 거치면서 침투하고 포화대수층 함양시킴. · 유역의 손실량인 깊은 침투량 산정 · 하천수위와 지하수위를 고려하여 지하수 유출량 산정 · 사용자가 지정한 소유역으로 유출됨 | |
| | 증발산 | · 잠재 증발산량 산정 · 실제 증발산량은 식물피복에 의한 증발 및 증산량과 눈에 승화 및 토양으로부터의 증발량으로 산정됨. · 식물에 의한 증산량은 LAI, 식물성장, 토양층의 가용수분 등의 함수임. · 토양증발량은 토양통으로부터만 발생함. · 눈으로부터의 승화 고려 · HRU의 전 면적에 대해 증발산이 발생함. · 최대 증발산량 입력 · 저면저류량의 증발량, 비포화 지대의 증발산량, 포화지대의 증산량 산정 · 특별히 고려되지 않음. · 비포화지대에서 최대증발산량과 수분량을 간단히 고려하여 산정함. · 고려하지 못함. · 소유역의 투수지역에서만 발생함. | |
| 하도 및 수로/관 | · 소유역내 주수로에 대해 변동저류추적법과 Muskingum 방법으로 하도추적 · 수로형태는 1:2의 사다리꼴로 가정하고, 사다리꼴의 상부 폭을 5배 확장하여 홍수터릴 가정함. · 소유역 수와 하도 수가 같음. | · RUNOFF 블록의 경우, 수로/관에 대하여 비선형 저류방정식 이용하여 수로 또는 관의 수위 및 유출량을 추적함. · 수로 또는 관의 형태를 다양하게 입력할 수 있음. · 다름. | |
| 입력자료의 구축 | · 비교적 용이함 | · 어려움 | |

3.3 SWAT과 SWMM 모형의 상호보완성

SWAT 모형에서 유역(watershed)은 여러개의 소유역(subbasin)으로 세분되어 있고, 소유역은 토양도와 토지이용도를 이용하여 같은 속성을 분류한 다수의 HRU가 존재하며, 도시지역 HRU의 경우 투수지역과 불투수지역으로 구분하여 지표면 유출량을 산정한다. SWMM 모형에서 유역(catchment)은 여러 개의 소유역(subcatchment)으로 이루어지며, 각각의 소유역은 투수지역과 불투수지역으로 세분되어 각각의 수문성분을 산정한다.

이로부터 SWAT 모형의 HRU와 SWMM 모형의 소유역(subcatchment)의 특성이 유사하므로 두 모형의 연계 가능성이 있다. 도시지역에 대해 SWAT 모형은 토양통의 고려에 따른 증발산, 지표하 유출의 산정에 장점이 있고, SWMM 모형은 수로/관의 수위를 고려한 지하수 유출과 수로/관을 다양하게 고려하여 하도 추적을 한다는 점에 장점을 가지고 있다. 그러나, SWAT 모형의 토양구조 중 토양통은 큰 장점으로 부각될 수 있으나, 토양통 아래에 있는 비포화지대와 포화지대의 모식에는 전술할 바와 같이 개선해야 할 사항이 다수 포함되어 있다.

4. SWAT-SWMM 결합모형

SWAT과 SWMM 모형을 결합하기 위해 SWAT과 SWMM 모형을 각각 소유역 추적부분과 하도 추적부분으

로 분해한 다음 두 모형의 결합을 시도하였고, 두 모형의 분해 및 결합시 발생하는 변수교환에 대하여 기술하였다. SWAT-SWMM 결합모형에서는 SWMM 모형의 RUNOFF 블록을 이용하였고, 여기에서 SWAT-SWMM 모형이라 함은 SWAT 모형과 SWMM 모형의 RUNOFF 블록만을 고려한 것이다.

4.1 SWAT과 SWMM 모형의 분해

SWAT 모형에 SWMM 모형을 포함시키기 위해 SWAT 모형과 SWMM 모형을 그림 1과 같이 '읽는 부분', '계산하는 부분', '출력하는 부분'의 3개 부분으로 구분하였다. 이를 위해 SWAT 모형의 경우 'simulate 서브루틴'을 기준으로 초기화하고 읽는 부분, 계산하는 부분, 출력하는 부분(그림 1(a)에서 "S-1", "S-2", "S-3")으로 구분하였으며, SWMM 모형의 경우는 RUNOFF 블록의 'HYDRO 서브루틴'을 기준으로 초기화하고 읽는 부분, 계산하는 부분, 출력하는 부분(그림 1(b)에서, "W-1", "W-2", "W-3")으로 구분하였다.

SWMM 모형의 'HYDRO 서브루틴'(그림 1(b)의 "W-2")은 그림 2(a)와 같이 구성되어 있으며, 이를 그림 2(b)와 같이 수정하였다. 그림 2(b)에서 "W-2-1" 부분은 소유역 유출계산관련 부분이고, "W-2-2"는 수로/관 추적관련 부분이고, "W-2-3"은 출력에 관련된 부분이다. 그림 2(a)와 그림 2(b)를 비교하면 단위기간 루프 내에 소유역 관련부분과 수로/관 추적 관련부분이 포함되어 있는 것은 동일하나, 타임 루프에 대하여 소유역

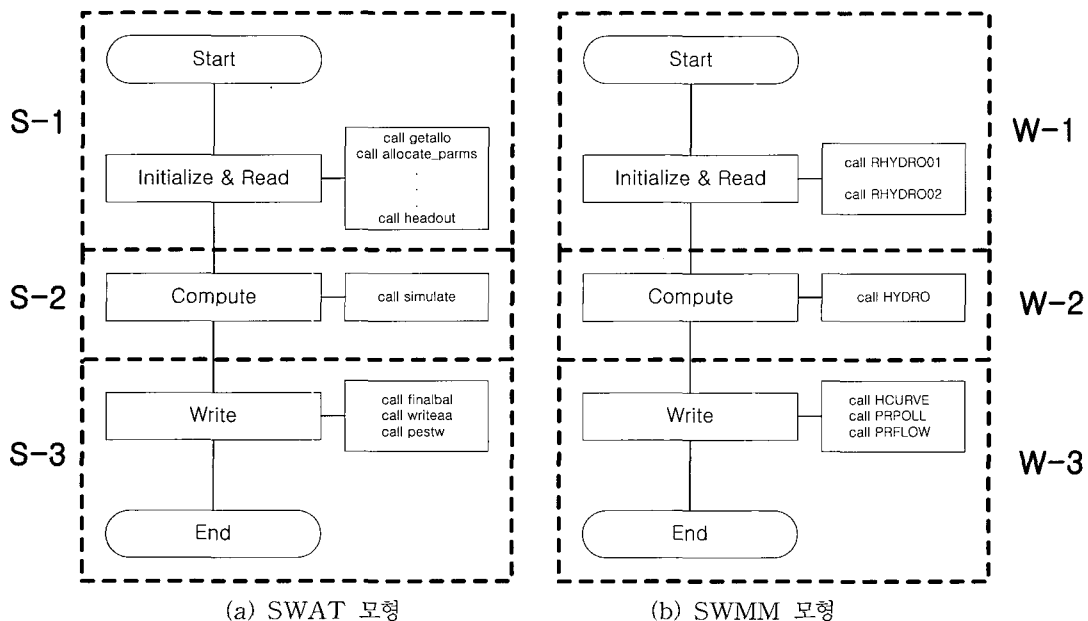


그림 1. SWAT과 SWMM 모형의 구분

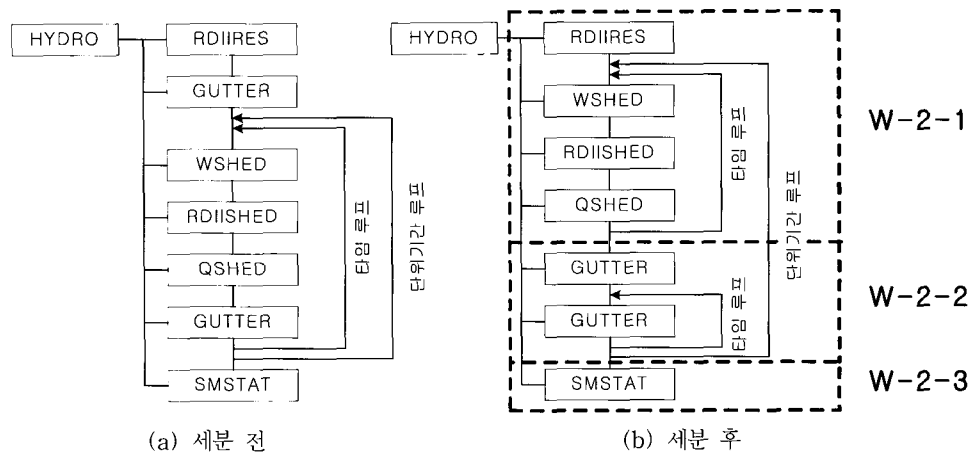


그림 2. SWMM 모형의 세분

관련부분과 수로/관 추적 관련부분이 분리되었다는 점이다. 또한, 그림 2(a)의 "HYDRO 서브루틴"의 초반에 소유역과 수로/관에 대한 초기화 부분이 있는데 이를 "W-2-1" 부분과 "W-2-2" 부분에 분리하여 실행되도록 수정하였다. 예로서 "W-2-2" 부분에서 타임루프가 시작하기 전에 "GUTTER 서브루틴"이 불러지는데 이 부분이 수로/관에 관련된 변수를 초기화하는 부분이다. "W-2-1" 부분과 "W-2-2" 부분을 분리한 이유는 SWAT의 단위기간과 유출량 추적체계를 따르기 위한 것으로 일반적으로 SWAT 모형에서는 "일 단위"의 단위시간을 이용하여 소유역 추적을 수행한 다음 상류부터 하류로 하도추적을 수행한다. 그러나, SWMM 모형이 SWAT 모형과 같은 "일"의 단위시간에 대해 분석된다 하더라도 물수지의 균형을 맞추기 위해서 단위기간은 좀 더 세분되어 실행되어야 한다. 따라서 단위기간 내에 소유역 관련 타임루프가 완전히 수행된 후, 그 결과를 수로/관 관련부분에서 반환받아 수로/관 관련부분 수행되어야 하므로 소유역 관련부분과 수로/관 관련부분이 분리되었다.

4.2 SWAT과 SWMM 모형의 결합

그림 1과 그림 2와 같이 분해되고 세분된 두 모형을 결합시키기 위한 SWAT-SWMM 결합모형의 주 프로그램은 SWAT 모형의 주 프로그램을 개선하여 그림 3과 같이 구성하였다. 그림 3은 SWAT 모형의 HRU가 SWMM 모형의 소유역, SWAT 모형의 소유역이 SWMM 모형의 유역으로 가정하여 연결한 모식이며, SWAT-SWMM 결합모형은 먼저 SWAT 모형의 "S-1" 부분을 실행하여 SWAT 모형이 실행되는데 필요한 변수 초기화 및 입력자료를 읽고, SWMM 모형으로 도시지역을 모식할 소유역이 있는지에 대한 정보를

읽은 다음, SWMM 모형으로 도시 소유역을 모의한다면 "W-1" 부분을 실행하여 모형의 실행에 필요한 변수 초기화 및 입력자료를 읽게 된다.

SWAT 모형에서 단위기간별 HRU, 소유역, 하도추적 등의 주 연산은 그림 3의 "S-2" 부분인 'simulate 서브루틴'에서 실행되며, 소유역 추적은 'subbasin 서브루틴', 하도 추적은 'route 서브루틴'에서 각각 수행된다. 만약 SWMM 모형을 이용하여 소유역 추적이 수행된다면 'subbasin 서브루틴' 대신 SWMM 모형의 "W-2-1" 부분이 실행되고, 도시 소유역내 하도추적에 대해서는 "W-2-2"를 실행한다. 이때, SWMM 모형의 소유역 추적에 관련된 부분에서 산정된 소유역 유출량은 수로/관을 추적을 할 때 서로 교환되어야 하고, SWMM 모형으로 추적된 소유역 관련 추적결과와 수로/관의 유출량은 SWAT 모형으로 반환되어야 한다.

4.3 SWAT-SWMM 결합모형의 변수 교환

그림 3과 같이 구축한 SWAT-SWMM 결합모형의 경우, SWAT 모형에서 SWMM 모형으로 반환시켜야 하는 변수는 도시지역 상류에 소유역이 있다면 상류 소유역으로부터의 유출량이며, SWAT의 입력자료 중 활용할 수 있는 자료는 도시소유역에 대한 강수량 및 기상자료와 하도관련 자료들이다. 반면에 SWMM 모형에서 SWAT 모형으로 반환시켜야 하는 자료는 SWAT 모형의 소유역과 하도에 관련된 출력변수들로 SWAT 모형은 이들 결과 값을 이용하여 출력파일에 기록한다. 또한 SWMM 모형의 "W-2-1"과 "W-2-2" 부분에서도 변수교환이 있어야 하는데 이때 관련된 주요 교환변수는 시간에 관련된 변수들이다.

4.3.1 SWAT과 SWMM 모형의 변수 교환

SWAT-SWMM 결합모형내에서 SWMM 모형이 실

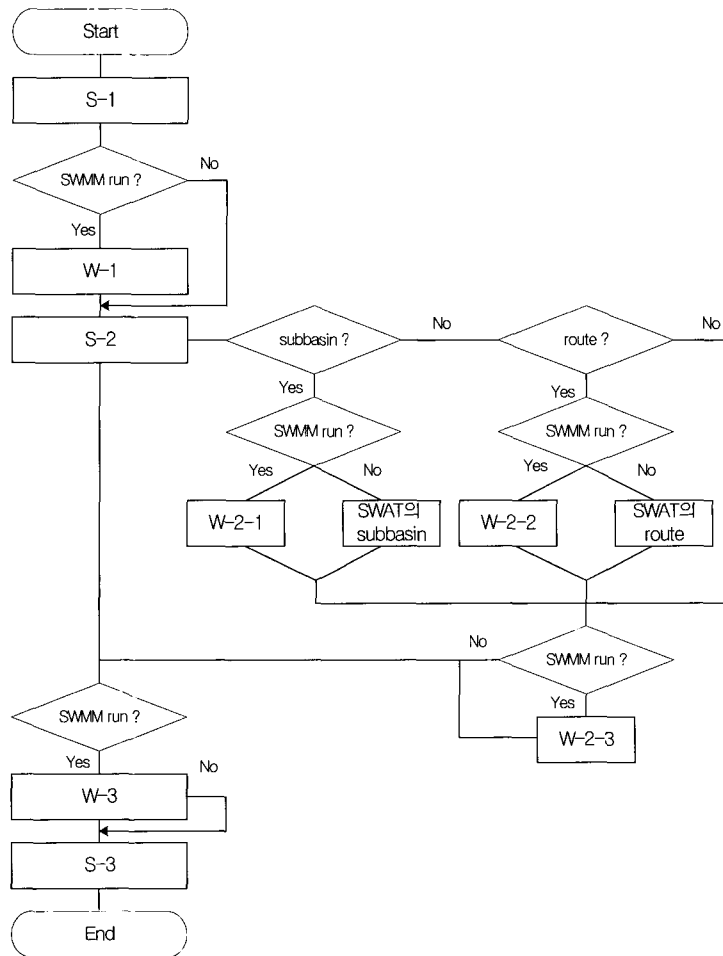


그림 3. SWAT-SWMM 결합모형의 모식

행될 소유역이 사용자에게 의해 지정되면, 소유역 추적과 수로/관은 추적은 SWMM 모형으로 수행된다. 이러한 경우, SWMM 모형을 이용하여 소유역 및 수로/관이 추적된 후, SWAT 모형의 출력변수와 일치하는 변수들의 교환이 이루어져야 한다.

소유역과 관련하여 SWAT 모형에서 출력하는 변수는 지표면 유출량과 침투량, 토양구조에 관련된 유출량, 증발산량 등이다. 이들 중 지표면 유출과 관련된 주요 변수는 지표면 유출량과 지체되어 소유역에 남아 있는 양, 용해량, 침투량 등이며, 토양으로부터의 유출에 관련된 변수는 지표면 유출량, 지하수 유출량, 포화대수층의 함양량, 깊은 대수층으로의 함양량, 지하수위 등이고, 증발산과 관련된 주요 변수는 저면저류량, 비포화대수층에서의 증발산량, 포화대수층으로부터의 증산량 등이다. 하도와 관련하여 SWAT 모형에서 출력하는 변수는 소유역 유출·입량, 흐름 단면적, 수심, 하도에서의 증발량, 하도에 저장된 유량 등이다.

소유역과 하도에 관련된 변수들은 타임 루프가 단위 기간 루프와 일치할 때까지 합산되거나 최종 타임 루프

에서의 값이다. 하도와 관련하여 SWAT 모형에서 SWMM 모형으로 반환되는 변수는 SWMM 모형이 모의하는 도시 소유역 상류에 소유역이 있는 경우로 상류 소유역에 연결된 SWMM 모형의 수로/관에 상류 소유역의 유출량이 유입되어야 한다. 이때 SWMM 모형의 수로/관에 유입되는 유입량은 타임 루프의 시간간격 동안 일정하게 유입되는 것으로 가정하였다.

4.3.2 SWMM 모형내 "W-2-1"과 "W-2-2" 부분의 변수교환

SWMM 모형의 주요한 특징 가운데 하나는 WET, WETDRY, DRY 상태에 따라 시간간격을 조정함으로써 계산시간을 단축할 수 있다는 점이다. 그러나, SWAT-SWMM 결합모형에서는 WET 시간간격만을 이용한다. 그 이유는 SWMM 모형이 모의되는 유역이 SWAT 모형에서는 소유역에 해당하므로 WET과 DRY 상태를 명확히 구분하기가 어렵고, 시간간격마다 소유역 추적과 하도 추적이 이루어지는 SWMM 모형의 모식을 단위기간 동안 소유역 추적이 이루어진 다음 하도 추적이 단위기간 동안 수행되도록 "W-2-1"과 "W-2-2"

를 구분했기 때문이다.

'HYDRO 서브루틴'의 "W-2-1"과 "W-2-2"의 구분의 목적은 소유역 추적과 하도 추적에 관한 시간간격 즉 타임 루프의 구분을 제거하여 SWAT 모형의 단위 시간 루프와 연결하기 위함이다. 따라서 "W-2-1"과 "W-2-2"는 같은 타임 루프에서 실행되어야 하며, 이때 교환되어야 할 변수는 계산이 이루어지는 시간에 관한 정보들이다. 따라서 'HYDRO 서브루틴'을 분리했을 때와 안했을 때 같은 결과를 얻을 수 있도록 정확한 변수 교환이 이루어져야 한다.

5. SWAT-SWMM 결합모형의 개선

SWAT-SWMM 결합모형은 대부분의 소유역에서는 SWAT 모형을 이용하고, 특별히 지정된 도시지역에 한하여 SWMM 모형이 이용되는 모형이다. 즉, SWAT 모형에 SWMM 모형이 포함된 형태이고, 사용자의 의해 SWMM 모형의 사용여부가 결정된다. 또한 SWAT과 SWMM 모형은 모두 대상유역의 수문순환요소를 산정할 수 있도록 구성된 모형으로써, SWAT 모형은 토양도와 토지이용도를 이용하여 거의 모든 토지이용상태에 대한 모의가 가능하고, SWMM 모형은 도시유역을 대상으로 개발된 특수모형이다. 두 모형간의 수문순환요소의 모의특성은 전 절에서 상세히 논의되었으며, 본 절에서는 두 모형이 서로 장·단점을 보완할 수 있도록 SWAT-SWMM 결합모형의 개선사항을 수문순환요소별로 기술한다. 단, 도시지역의 경우 지표면 유출과 침투에 관련된 사항은 SWMM 모형의 모식을 이용한다.

5.1 소유역

SWAT-SWMM 결합모형은 SWAT과 SWMM 모형에서 모식하는 용해에 관련된 사항을 사용자가 선택적으로 사용할 수 있도록 개선하였다. 어느 모형에 포함된 용해 관련 모식을 사용할지 여부는 SWMM 모형의 'isnow' 옵션으로 구분되며, SWMM 모형에서 'isnow'가 "0"이면 용해를 계산하지 않고, "1"이면 단기사상의 용해 계산, "2"이면 장기유출의 용해를 계산한다. SWAT-SWMM 결합모형의 경우 'isnow'가 "0"인 경우 SWAT 모형의 용해에 관련 모식을 이용하고, 그 외의 경우는 SWMM 모형의 용해 관련 모식을 이용한다.

SWAT 모형에서 잠재증발산량은 Penman-Monteith, Priestly-Taylor, Hargreaves 방법에 의해 산정되거나, 사용자의 의해 입력될 수 있고, SWMM 모형에서는 'ivap 옵션'에 따라 최대증발산량 자료 읽거나, 기본 값('ivap=0')을 이용한다. SWAT-SWMM 결합모형에서는

'ivap'이 "0"일 경우 SWAT 모형에서 잠재증발산량을 산정하는 서브루틴을 불러 잠재증발산량을 산정한 후 이를 이용하고, 나머지 옵션은 SWMM 모형의 방식을 따르도록 개선하였다.

SWMM 모형에서 지하수에 관련된 계산은 지하수 관련자료가 입력되었을 때만 수행되므로, 지하수 관련자료가 입력되었을 때와 입력되지 않았을 때를 구분하는 변수 'igorund'를 SWAT-SWMM 결합모형에 추가하였다. SWAT-SWMM 결합모형에서는 'iground'가 "1"이면 SWMM 모형의 입력자료에 지하수 관련자료가 입력된 경우이고, 입력되지 않았으면 'igorund'가 "0"으로 설정되어 SWAT 모형의 지하수와 증발산 관련 서브루틴을 수행한다.

5.2 하도 또는 수로/관

SWAT 모형은 각 HRU에서 산정된 지표면, 지표하, 지하수 유출량이 지체되어 소유역의 주수로에 유입된다고 가정하며, 상류에 소유역이 있으면 상류 유출량과 소유역 유출량을 합한 후, 하도추적을 수행한다. SWMM 모형의 경우, 지표면 유출량은 수로/관을 통해 유출되나, 지하수 유출은 소유역의 출구로 유출되는 것이 아니라, 사용자가 지정한 임의의 수로/관에 지하수를 유출시킬 수 있다. SWAT-SWMM 결합모형에서는 SWAT 모형과 SWMM 모형의 침투와 지하수 관련 부분을 모두 이용할 수 있으므로 'iground'가 "0"인 경우는 SWAT 모형처럼 소유역의 주수로에 지하수를 유출시키고, 'iground'가 "1"인 경우 SWMM 모형의 입력자료에 의거하여 지정된 소유역에 지하수를 유출시킨다.

SWMM 모형이 도시유역을 대상으로 구성되었음에도 불구하고, SWAT-SWMM 결합모형에서는 SWAT 모형의 한 소유역에 대해 모의하게 되므로 상류 소유역으로부터의 유출량을 주수로에 유입시켜야 한다. 또한 도시가 위치한 소유역의 수로/관의 추적은 SWMM모형을 이용해야 한다. 이와 관련하여 이용되는 변수는 SWAT 모형의 'icode'와 'inum1' 변수이다. SWAT 모형에서 'icode'가 "1"인 경우 소유역 추적이고, "2"인 경우 하도추적이다. 'icode'가 "2"이면서 'inum1'이 사용자의 의해 입력된 소유역 또는 하도 번호와 같으면 SWMM 모형이 수로/관에서의 유출량을 추적한다.

6. 요약 및 결론

유역규모의 장기 유출모형인 SWAT 모형은 도시라는 특정 토지이용의 모식에 부분적인 결합을 내포하고 있다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 도시지역의

유출해석에 주로 이용되는 SWMM 모형을 결합시켰으며, 그 과정을 기술하였다. 두 모형을 결합하기 위해서 장기 유출 특성을 수문성분별로 비교하고, 결합의 일관성과 간편성을 위하여 모형의 분해와 결합과정을 반복하였다. 이러한 반복적인 분해와 결합으로 SWAT-SWMM 결합모형을 완성할 수 있었으며, SWAT-SWMM 결합모형의 특징 및 한계는 다음과 같다.

- 1) SWAT-SWMM 결합모형은 Arcview interface SWAT 2000과, SWMM 4.31을 이용하여 개발되었다.
- 2) SWAT-SWMM 결합모형은 SWAT 모형에 SWMM 모형을 포함시킨 형태로 구성되었으며, SWMM 모형의 RUNOFF 블록만이 결합되었다.
- 3) SWAT-SWMM 결합모형내 SWMM 모형이 이용되는 타임루프의 시간간격은 WET 시간간격이다.
- 4) SWAT-SWMM 결합모형에서 유역내 소유역 중 SWMM 모형으로 모의되는 도시 소유역은 1개이다.

SWAT-SWMM 결합모형은 유역내 도시지역의 장기 유출거동 특성과 도시화로 인한 수문성분의 변화양상을 파악하는데 기초 자료를 제공할 것으로 판단되며, 도시라는 토지이용의 특성을 파악하기 위해 개개 수문성분의 해석이 가능한 SWAT과 SWMM 모형을 병렬로 연결한 최초의 시도이다. 이러한 연구결과는 새로운 모형의 개발이나 모형간의 결합에 유용하게 이용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-1)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 과학기술부(2004). **수자원의 지속적 확보기술개발사업 -지표수 수문성분 해석기술 개발 보고서**, 한국건설기술연구원.
- 김남원, 원유승(2003). “유역의 도시화에 따른 수문학적 영향 평가”, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2269-2274.
- 장철희, 김현준, 김남원(2003). “용담댐 유역의 장기-유출 분석을 위한 AVSWAT 2000 모형의 적용”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 46-49.
- C. G. Kim, H. J. Kim, C. H. Jang, N. W. Kim(2003). “Runoff estimation from two mid-size watersheds using SWAT model”, *Water Engineering Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 193-202.
- Abbott, J.(1978). “Testing of Several Runoff Models on an Urban Watershed”, *ASCE Urban Water Resources Research Program*, Technical Memorandum, New York., No. 34.
- Arnold, J. G., P. M. Allen, and G. Bernhardt (1993). “A Comprehensive Surface-Groundwater Flow Model”, *Journal of Hydrology*, Vol. 142. pp. 47-69.
- Arnold, J. G., J. R. Williams, and D. R., Maidment (1995). “Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basin”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121. No. 2, pp. 171-183.
- Bhaduri, B., M. Grove, C. Lowry and Harbor, J.(1997). “Assessing the Long-Term Hydrologic Effects of Land Use Change”, *Journal of AWWA*, 89(11), pp. 94-106.
- Bhaduri, B., M. Minner, S. Tatalovich, and Harbor, J.(2001). “Long-Term Hydrologic Impact of Urbanization: A Tale of Two Models”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, No 1, pp 13-19.
- Bric, C.(1978). *Application of STORM to Assess the Impact of an Urbanizing Area*, US EPA report EPA-600/2-76-175a (NTIS PB-259597), Cincinnati, Ohio.
- Dunne, T., and Leopold, L. B.(1978). *Water in environmental planning*, Freeman, New York.
- Han, J., J. W. Delleur(1979). *Development of an Extension of ILLUDAS Model for Continuous Simulation of Urban Runoff Quantity and Discrete Simulation of Runoff Quality*, Prude University, Water Resources Center, West Lafayette, Indiana.
- Huber, W. C. and R .E. Dickinson(1988). *Storm Water Management Model, Ver. 4, Part A : User’s Manual*, EPA-600/3-88/001a, U.S. EPA.
- Steuer, J. J., R. J. Hunt(2001). *Use of a Watershed Modeling Approach to Assess the Hydrologic Effects of Urbanization*, North Fork Pheasant Branch Basin near Middleton, Wisconsin: U. S. Geological Water-Resources Investigation Report 01-4113.
- Walesh, S. G.(1989) *Urban Surface Water Management*. New York, John Wiley and Sons.
- (논문번호:04-50/접수:2004.05.04/심사완료:2004.06.30)