SWAT-SWMM 결합모형의 구축

Development for Combination Model of SWAT and SWMM

김남원*, 원유승**

Nam Won Kim, Yoo Seung Won

요 지

장기적인 측면에서 유역의 도시화는 토지이용(불투수면적의 확대), 인위적인 구조물, 하천환경의 변화로 도시화되기 이전과 매우 다른 유출거동 특성을 가진다. 이러한 유역특성변화 요소를 모형에 적절히 반영함으로써 지표수, 하천수, 지하수 등의 수문순환요소를 정량화하고 이를 수문학적으로 평가할 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 장기유출모형인 SWAT과 도시지역 유출해석에 주로 이용되는 SWMM의 RUNOFF 블록의 결합모형을 구성하였고, SWAT-SWMM 결합모형의 구성방법 및 모형의 한계, 결합모형의 모식 등을 기술하였다.

핵심용어 : 도시지역의 특징, SWAT 모형, SWMM 모형, SWAT-SWMM 결합모형, 장기유출

1. 서론

유역의 도시화로 인한 수문학적 영향평가는 주로 단기 홍수사상에 대하여 토지이용 변화가 첨두유량 변화에 미치는 영향의 분석에 집중되었다. 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 변화할 것이다. 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 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.

세계적으로 도시지역의 장·단기 유출모형으로 가장 널리 이용되는 모형은 SWMM 모형이다. 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 어려우며, 주로 작은 도시 소유역에 적용되었고, 도시지역 이외의 토지이용에 대한 영향을 적절히 고려할 수 없어 도시지역이라는 토지이용에 제한되어 이용되어 왔다. 그러나, 우리나라 대부분의 유역은 도시지역, 농업지역, 삼림지역 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 모형이 대표적이며, 이 모형은 부족한 가용자료로 과거·현재·미래의 장기유출 거동특성을 규명하고, 다양한 토지이용에 대해 유역규모의 장기적인 수문순환요소의 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 이 모형은 토지이용의 한 부분인 도시지역 대한 전체적인 모식에 상당한 문제점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 토지이용에 대하여 유역규모의 장기적인 모의가 가능하나, 도시라는 토지이용의 해석에 결함을 가지고 있는 SWAT 모형의 일부분을 도시지역이라는 특정의 토지이용 부분에 강점을

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원·E-mail : nwkim@kict.re.kr
** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원·E-mail : yswon@kict.re.kr

가지고 있는 SWMM 모형으로 개선하기 위하여 SWAT과 SWMM 모형의 결합을 시도하였다. 이를 위해 SWAT 모형과 SWMM 모형에서 모식하는 개개의 수문순환요소를 면밀히 비교·검토하였으며, 두 모형의 장점을 서로 이용하고, 단점을 서로 보완할 수 있는 SWAT-SWMM 결합모형을 개발하였다.

2. SWAT과 SWMM 모형

2.1 수문순환요소별 SWAT과 SWMM 모형의 비교

수문순환 요소를 산정하기 위하여 SWAT과 SWMM 모형에서 이용하고 있는 방법을 차단저류, 지표면 유출과 침투, 토양구조, 지하수 유출, 증발산량의 산정과 하도 및 수로/관의 추적으로 분류한 후, 각 항목에 대하여 두 모형에서 이용하고 있는 모식에 대하여 간단히 기술하고 비교하였다.

먼저, SWAT과 SWMM 모형에서 차단저류는 각각 기공저류와 지면저류를 이용하여 강우로부터 제일 먼저 제외되고, 제일 먼저 증발로 제거된다. 따라서 기공저류와 저면저류는 식물의 피복특성과 지표면의 요면저류특성에 의해 강우 초기에 저장된다는 점을 제외하고 그 외의 특성은 유사함을 알 수 있다.

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 초과침투량의 처리방식이 약간 다르다. 토양의 침투용량을 초과하는 침투량에 대해 지표면 유출량을 기준으로 지표면 유출량과 침투량을 분리하는 SCS의 CN 방법은 토양속으로 초과 침투량을 보내고, 침투량을 기준으로 분리하는 Horton 식은 지표면으로 초과침투량을 돌려보낸다.

토양구조의 경우, SWAT 모형은 크게 4개(토양통, 비포화지대, 포화지대(얕은 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 침루한 수분이 침루하여 지하수위를 함양한다. 반면에 SWMM 모형의 비포화 대수층에서는 지하수위에 직접 기여하는 침루량만을 산정하고, 지표하 유출량은 산정하지 않는다. 두 모형의 토양구조를 비교하면 SWAT 모형의 토양통과 비포화지대가 SWMM 모형의 비포화 대수층과 유사함을 알 수 있는데, SWAT 모형의 경우, 토양통에 대한 수분의 이동은 세세히 취급한 반면 비포화지대로 침루한 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 대수층에 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 발생되는 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 임의 소유역으로 유출시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 두 모형 모두 하도 또는 수로/관에서 지하수위를 함양하는 양은 산정하지 못한다.

증발산의 경우, SWAT 모형은 기공저류, 토양통, 얕은 대수층, 하도에서 발생하는데, 토양통에서는 토양증발과 식물의 증산량을 산정하고, 얕은 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, 얕은 대수층에서의 증발산량은 특별한 구분없이 얕은 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 SWMM은 투수지역에서만 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 모형의 경우, 수로/관의 형태 및 종류를 다양하게 입력할 수 있고, 소유역의 출구에 지표면 유출량이 유입되며, 지하수 유출량은 사용자가 지정한 소유역 출구로 유입된다.

2.2 SWAT과 SWMM 모형의 상호보완성

SWAT 모형의 HRU와 SWMM 모형의 소유역(subcatchment)의 특성이 유사하여 서로 연계 가능성이 있으며, 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.

3. SWAT-SWMM 결합모형

SWAT-SWMM 결합모형은 대부분의 소유역에서는 SWAT 모형을 이용하고, 특별히 지정된 도시지역에 한하여 SWMM 모형이 이용되는 모형이다. 즉, SWAT 모형에 SWMM 모형이 포함된 모형이고, 사용자에 의해 SWMM 모형의 사용여부가 결정된다. SWAT 모형에 SWMM 모형을 포함시키기 위해 이용된 SWMM 모형의 블록은 RUNOFF이며, 특별한 언급이 없는 한 본 고에서는 SWMM 모형의 RUNOFF 블록을 중심으로 기술한다.

3.1 SWAT과 SWMM 모형의 분해

SWAT 모형에 SWMM 모형을 포함시키기 위해 SWAT 모형과 SWMM 모형의 입력자료를 '읽는 부분', '계산하는 부분', '출력하는 부분'의 3개 부분으로 구분하였다(그림 1 참조). 이를 위해 SWAT 모형의 경우 'simulate 서브루틴'을 기준으로 초기화하고 읽는 부분, 계산하는 부분, 출력하는 부분(그림 2(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.

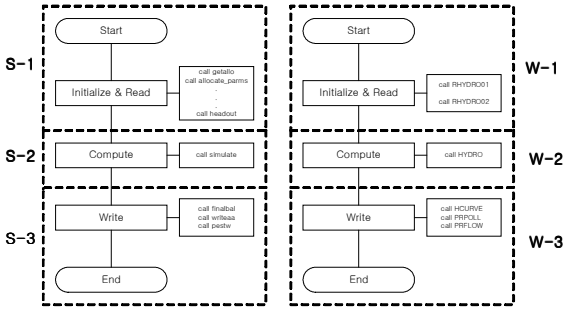
SWMM 모형의 'HYDRO 서브루틴'(그림 1(b)의 "W-2")은 그림 2(a)와 같이 구성되어 있으며, 이를 그림 3(b)와 같이 수정하였다. 그림 3(b)에서 "W-2-1" 부분은 소유역 유출계산관련 부분이고, "W-2-2"는 수로/관 추적관련 부분이고, "W-2-3"은 출력에 관련된 부분이다. 그림 2(a)와 그림 2(b)를 비교하면 단위기간 루프내에 소유역 관련부분과 수로/관 추적 관련부분이 포함되어 있는 것은 동일하나, 타임 루프에 대하여 소유역 관련부분과 수로/관 추적 관련부분이 분리되었다는 점이다. 또한, 그림 2(a)의 "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 불려지는데 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 단위기간에 대해 분석된다 하더라도 물수지의 균형을 맞추기 위해서 단위기간은 좀 더 세분되어 실행되어야 한다. 따라서 단위기간내에 소유역 관련 타임루프가 완전히 수행된 후, 그 결과를 수로/관 관련부분에서 반환받아 수로/관 관련부분 수행되어야 하므로 소유역 관련부분과 수로/관 관련부분이 분리되었다.

3.2 SWAT과 SWMM 모형의 결합

SWAT과 SWMM 모형을 결합시키기 위해 SWAT 모형을 읽는 부분("S-1"), 계산하는 부분("S-2"), 출력하는 부분("S-3")으로 구분하였고, SWMM 모형을 읽는 부분("W-1"), 계산하는 부분("W-2"), 출력하는 부분("W-3")으로 구분한 후, 계산하는 부분("W-2")을 소유역 관련 부분("W-2-1"), 수로/관 부분("W-2-2"), 출력하는 부분("W-2-3")으로 세분하였다. SWAT-SWMM 결합모형의 주 프로그램은 SWAT 모형의 주 프로그램을 개선하여 그림 3과 같이 구성하였다. 그림 3에서 SWAT 모형의 HRU는 SWMM 모형의 소유역, SWAT 모형의 소유역은 SWMM 모형의 유역으로 가정하여 연결한 모식이며, SWAT-SWMM 결합모형은 먼저 SWAT 모형의 "S-1" 부분을 실행하여 SWAT 모형이 실행되는데 필요한 변수 초기화 및 입력자료를

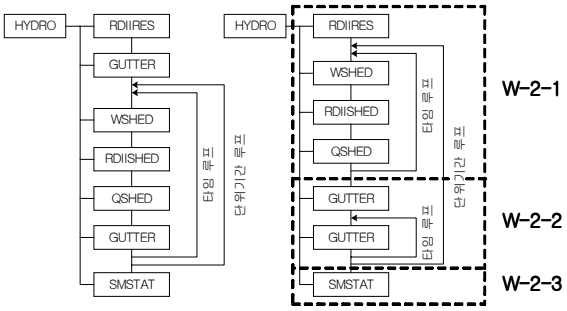
읽고, SWMM 모형으로 도시지역을 모식할 소유역이 있는에 대한 정보를 읽은 다음, SWMM 모형으로 도시 소유역을 모의한다면 "W-1" 부분을 실행하여 모형의 실행에 필요한 변수 초기화 및 입력자료를 읽게 된다.

SWAT 모형에서 단위기간별 HRU, 소유역, 하도추적 등의 주 연산은 'simulate 서브루틴'에서 실행되며, 소유역 추적은 'subbasin 서브루틴', 하도 추적은 'route 서브루틴'에서 각각 수행한다. 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.



(a) SWAT 모형 (b) SWMM 모형

그림 1. SWAT과 SWMM 모형의 구분



(a) 세분 전 (b) 세분 후

그림 2. SWMM 모형의 세분

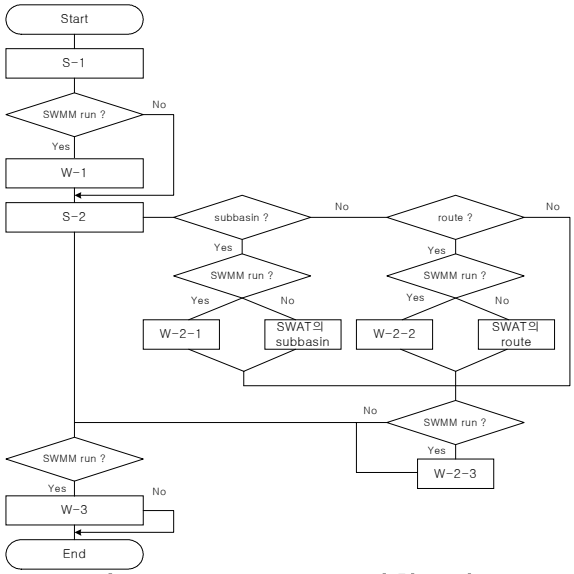


그림 3. SWAT-SWMM 결합모형

3.3 SWAT-SWMM 결합모형의 변수 교환

SWAT-SWMM 결합 모형내의 SWAT 모형에서 SWMM 모형으로 반환시켜야 하는 변수는 도시지역 상류에 소유역이 있는 경우, 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 결과값을 이용하여 출력파일에 기록한다. 또한 SWMM 모형의 "W-2-1"과 "W-2-2" 부분에서도 변수교환이 있어야 하는데 이때 관련된 주요 교환변수는 시간에 관련된 변수들이다.

3.3.1 SWAT과 SWMM 모형의 변수교환

SWAT-SWMM 결합모형내에서 SWMM 모형이 실행될 소유역이 사용자에 의해 지정되면, 소유역 추적

과 수로/관은 추적은 SWMM 모형으로 수행된다. 이러한 경우, SWMM 모형으로 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 주요한 변수는 지표면 유출량과 지체되어 소유역에 남아 있는 양, 융해량, 침투량 등이며, 토양으로부터의 유출에 관련된 변수는 지표하 유출량, 지하수 유출량, 포화대수층의 함양량, 깊은 대수층으로의 함양량, 지하수위 등이며, 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 단위기간 루프와 일치할 때까지 합산되거나 최종 타임 루프에서의 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.

3.3.2 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 모형에서는 WET 시간간격만을 이용하다. 그 이유는 SWMM 모형이 모의되는 유역이 SWAT 모형에서는 소유역에 해당하므로 WET과 DRY 상태를 명확히 구분하기가 어렵고, 시간간격마다 소유역추적과 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 단위기간 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 변수교환이 이루어져야 한다.

4. SWAT-SWMM 결합모형의 특징 및 한계

유역규모의 장기 유출모형인 SWAT은 도시라는 특정 토지이용의 모식에 많은 결함을 내포하고 있다. 이를 개선하기 위하여 도시지역의 유출해석에 주로 이용되는 SWMM 모형을 결합시켰으며, SWAT-SWMM 결합모형의 특징 및 한계는 다음과 같다.

1) SWAT-SWMM 결합모형에서 SWAT 모형의 버전은 2000이고 SWMM 모형의 버전은 4.31을 이용하여 구축되었다.
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.

감사의 글

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

참고문헌

1. 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.
2. Neitsch, S. L., Arnold, J. R., Kiniry, J. R., Williams J. R.(2001). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Ver. 2000,