

강우-유출관계에 의한 도시지역의 장기유출 특성 비교

Comparison of Long-Term Runoff in Urban Area by Rainfall-Runoff Relationship

김남원*, 원유승**

Nam Won Kim, Yoo Seung Won

요 지

장기 유역 유출모형인 SWAT에 도시지역의 영향을 적절히 고려할 수 있도록 SWMM 모형을 포함시킨 SWAT-SWMM 결합모형을 테스트하기 위해 시험유역에 적용하였다. 이로부터 SWAT 모형과 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 수문순환요소(지표수, 지하수, 하천유출, 증발산 등)를 비교·분석하였다. 또한 각 모형이 수문순환요소를 모식하는 방법을 비교·분석하여 SWAT-SWMM 결합모형을 개선하였다.

핵심용어 : 강우-유출관계, SWAT-SWMM 결합모형, 도시지역, 수문순환요소

1. 서론

우리나라의 도시는 일반적으로 하천을 중심으로 발달하며, 하천의 하류에 위치해 있고, 인구의 도시집중으로 점점 확대되는 경향이 있다. 이러한 도시지역의 특징을 강우-유출 모형에 적절히 반영하기 위한 방법으로 지표면 특성은 불투수지역과 투수지역의 크기와 속성으로 대변되며, 배수는 자연유역과 다르게 배수관망을 통해 타 지역으로 유출되는 특성이 있다. 또한, 도시지역의 상류에는 저밀도의 도시 또는 주거지역, 농업지역, 산림지역 등 다양한 토지이용이 이루어지고 있다.

SWAT 모형(Neitsch et al. 2001)은 지표면 특징과 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. SWMM 모형(Huber와 Dickinson, 1988)은 지표면 특성과 배수특성을 고려할 수 있는 큰 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 도시지역의 유출 거동특성을 파악하기 위해 개발되었기 때문에 도시지역 상류의 토지이용에 따른 유출거동의 특징을 고려하기 힘들다는 단점이 있다.

김남원과 원유승(2004)은 SWAT 모형과 SWMM 모형의 도시지역에 대한 모식의 장·단점을 상호보완하기 위해 SWAT-SWMM 결합모형을 개발하였다. SWAT-SWMM 결합모형은 지표면 특성, 배수특성, 도시지역 상류의 토지이용 등의 특징을 모두 고려할 수 있으며, 도시지역의 경우 SWMM 모형을 이용하고, 도시지역 외의 토지이용은 SWAT 모형을 이용한다.

본 고에서는 SWAT-SWMM 결합모형에서 도시지역을 모의하는 SWMM 모형의 용해, 잠재증발산, 토양으로부터의 유출(지표하유출+지하수유출) 등의 산정에 대하여 SWAT 모형의 용해, 잠재증발산, 토양으로부터의 유출 모식을 이용할 수 있도록 SWAT-SWMM 결합모형을 개선하였으며, 경안천 유역내 오산천 유역에 대하여 SWAT-SWMM 결합모형을 테스트하였다. 결합모형의 테스트 결과를 SWAT 모형에 의한 모의 결과와 비교하였으며, 비교 대상 수문성분량은 증발산량, 지표면, 지표하, 지하수 유출량과 유역출구에서의 유출량의 변화 특성이다. 또한 두 모형에 의해 모의되는 결과를 서로 비교하기 위해서 SWAT 모형에서 이용되는 가용한 모든 자료를 이용하여 SWAT-SWMM 결합모형의 입력자료를 비슷하게 구축하였다.

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : nwkim@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : ywon@kict.re.kr

2. SWAT-SWMM 결합모형의 개선

SWAT과 SWMM 모형은 모두 대상유역의 수문순환요소를 산정할 수 있도록 구성된 모델로써, SWAT 모형은 토양도와 토지이용도를 이용하여 거의 모든 토지이용상태에 대한 모의가 가능하고, SWMM 모형은 도시유역을 대상으로 개발된 특수모형이다. 두 모형간의 수문순환요소의 모의특성은 김남원과 원유승(2004)에서 논의되었으며, 본 절에서는 두 모형이 서로 장·단점을 보완할 수 있도록 SWAT-SWMM 결합모형의 개선사항을 수문순환요소별로 기술하였다. 단, 도시지역의 경우 지표면 유출과 침투에 관련된 사항은 SWMM 모형의 모식을 이용한다.

2.1 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 옵션'으로 구분되며, SWMM 모형에서 'isnow'가 "0"이면 용해를 계산하지 않고, "1"이면 단기사상의 용해계산, "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, Priestlye-Taylor, Hargreaves 방법에 의해 산정되거나, 사용자에 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 모형에 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.

2.2 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 경우는 소유역 추적이고, "2"인 경우는 하도추적이다. 'icode'가 "2"이면서 'inum1'이 사용자에 의해 입력된 소유역 또는 하도 번호와 같으면 SWMM 모형이 수로/관에서의 유출량을 추적한다.

3. SWAT-SWMM 결합모형의 입력자료

SWAT 모형이나 SWMM 모형을 개별적으로 이용할 때는 두 모형의 입력자료를 개별적으로 구축하여야 하나, SWAT-SWMM 결합모형에서는 입력자료가 중복되거나, 편리하게 구축할 수 있는 경우가 있으며, 추가적으로 구축해야 할 입력자료가 있다. 입력자료가 중복되는 경우는 강우량 및 기상자료이고, 편리하게 구축되는 자료는 SWAT 모형의 소유역내 하도에 대한 사항이다. SWAT 모형에서 하도는 사다리꼴로 가정하며, 사다리꼴 하도의 측벽경사는 1:2이고, 하도 상부 폭의 5배만큼 확장하여 홍수터를 가정한다. SWAT에서 출력되는 하도제원은 입력자료가 없거나 입력자료의 구축이 용이하지 않을 때 이용될 수 있다.

SWAT-SWMM 결합모형은 SWAT 모형을 모체로 하여 SWMM 모형이 추가된 형태로 구축되었으므로 SWMM 모형으로 모의될 도시 소유역에 대한 토양도와 토지이용도의 전처리 과정이 필요하다. 이러한 전처리과정은 Arcview interface SWAT 모형을 이용하여 비교적 쉽게 처리될 수 있는데, Arcview interface SWAT 모형을 이용하면 사용자 임의로 소유역 구분과 출구 등을 지정할 수 있다. 소유역 구분과 출구지점이 지정되면 Arcview interface SWAT 모형은 소유역을 분할하고, 소유역내 HRU의 특성치를 추출한다. 만약 어느 한 도시 소유역이 SWMM 모형으로 실행된다면, 이 소유역의 HRU는 SWMM 모형의 소유역처럼 구분되어야 한다. 즉, SWAT 모형에서 분석한 HRU수와 SWMM 모형으로 구축될 소유역수가 같아야 하고, 면적의 크기도 같아야 SWAT-SWMM 결합모형의 모식을 자유롭게 이용할 수 있다.

이를 위해서 Arcview interface SWAT 모형을 실행시킨 후, 전체 유역에 대해 소유역을 분할하고, 분할된 소유역 중 SWMM 모형이 실행될 한 개의 도시 소유역 내부를 세분화하여야 한다. 이때 세분된 소유역은 SWAT-SWMM 결합모형의 SWAT 모형에서는 HRU로 인식하게 되고, SWMM 모형에서는 소유역으로 인식하게 된다. 도시 소유역을 세분한 후, HRUs distribution의 Dominant Land Use and Soil 옵션을 이용해 한 개의 소유역에 한 개의 대표적인 토양도 및 토지이용도를 가지도록 분류할 수 있다. 이 작업까지 수행하면 Arcview interface SWAT의 project 디렉토리에 [scenarios]와 [watershed]라는 두 디렉토리가 생성된다. 이 중 [scenarios] 디렉토리에는 SWAT 모형이 실행되는데 필요한 입력자료와 출력자료 등이 있으며, [watershed] 디렉토리에는 [grids], [shapes], [tables], [text]라는 디렉토리가 생성된다. [watershed] 디렉토리내 [grids] 디렉토리에 생성된 [water1], [lusgr1], [solgr1]의 Arcview grid 파일을 서로 중첩시킨 후, 도시 소유역내 소유역에 한 개의 토양도와 토지이용도를 할당하여 새로운 토양도와 토지이용도를 생성시킬 수 있다.

4. SWAT-SWMM 결합모형의 적용

4.1 대상유역의 선정 및 입력자료의 구축

SWAT-SWMM 결합모형을 도시지역에 적용하기 위해 최근 빠르게 도시지역이 확장되고 있는 경안천 유역을 선정하였고, SWAT-SWMM 결합모형이 실제 적용된 유역은 경안천 유역내 오산천 유역이다. Arcview interface SWAT 모형을 이용하여 전 절의 전처리 과정을 거치면 SWMM 모형에서 이용되는 소유역과 수로/관에 대한 많은 양의 입력정보를 추출할 수 있다. 소유역과 관련하여 이용할 수 있는 자료는 면적, 평균표고, 소유역내 지류의 최장길이, 수문학적 토양그룹 등이며, 수로/관에서 이용할 수 있는 자료는 폭, 길이, 경사, 만수심 등이다.

DEM과 전 절에서 전처리과정을 거친 토지이용도 및 토양도를 이용하여 Arcview interace SWAT 모형을 구동시켜 그림 1과 같이 소유역을 분할하였고, 대상유역에 SWAT-SWMM 결합모형을 적용하기 위해 그림 1에 제시된 3개의 소유역 중 1, 2번 소유역은 SWAT 모형, 3번 소유역은 SWMM 모형에 의해 모의된다고 가정하였다. 그림 1의 3번 소유역을 SWMM 모형으로 모의하기 위해서는 3번 소유역에 대한 SWAT 모형의 HRU와 SWMM 모형의 소유역을 일치시킬 필요가 있으므로 그림 2와 같이 3번 소유역을 다시 17개의 소유역으로 세분하였다. 그림 3에서 세분된 소유역의 번호는 SWAT 모형에 의해 할당된 HRU 번호이고, 하도번호는 임의로 할당된 값이다. 각 소유역에 대한 정보는 표 1에 제시된 바와 같이 전처리 전·후의 SWAT 모형의 입력자료를 이용하고, SWMM 모형의 수로/관, 지하수 등의 입력자료 역시 SWAT 모형의 입력자료를 참고하여 두 모형에서 이용되는 재 변수들이 비슷하도록 구축하였다.

4.2 모형의 적용결과

SWAT 모형과 SWAT-SWMM 결합모형의 결과를 수문성분별로 비교하기 위해 유역, 소유역, SWAT 모형의 HRU와 SWMM 모형의 소유역을 일치시켰고, 도시소유역에 대한 입력자료가 유사하도록 SWAT 모형의 입력자료를 최대한 이용하였다. 두 모형에 의해 모의된 기간은 1984~1987년까지 4개년이고, 이중 분석에 실제로 이용된 자료는 1985~1987까지 3개년이다. 모의결과를 비교하기 위해 수문성분을 증발산량과 지표면, 지표하, 지하수 유출량으로 구분하였으나, 이들 수문성분 중 지표하 유출과 지하수 유출량의 구분은 SWAT 모형에서는 가능하나, SWMM 모형에서는 두 개의 성분이 합쳐져 지하수 유출량으로 출력됨에 유의해야 한다. 그림 3은 도시소유역에 대한 수문성분별 유출량을 비교한 것으로 소유역 전체 유출량은 SWAT-SWMM 결합모형의 결과가 1985년은 3 mm 정도 작고, 1986과 1987년은 약 27 mm 정도 크게 분석되었는데, 이는 소유역내 잔류수량인 토양수분과 지하수량 및 깊은 대수층으로의 손실량이 서로 다르기 때문이다. 개개의 수문성분 중 지표면 유출량의 경우는 SWAT 모형에 의한 모의결과가 65~240 mm 정도 크게

분석된 반면, 증발산량과 지하수 유출량은 각각 32~63 mm, 20~233 mm 정도 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 결과가 크게 분석되었다. 그림 3으로부터 증발산량과 지하수 유출량은 SWAT-SWMM 결합모형, 지표면 유출량은 SWAT 모형이 크게 분석됨을 알 수 있고, 그림 4에는 이들 수문성분의 양을 상대적으로 평가하기 위해 연도별 소유역 총 유출량에 대한 각 수문성분의 비율을 나타내었다. 두 모형에 의해 산정된 수문 성분별 기여율은 증발산량과 지하수 유출량은 SWAT-SWMM 결합모형의 산정결과가 약간 크고, 지표면 유출량은 SWAT 모형에 의해 산정된 결과가 크게 분석되었는데, 1985년과 1986년의 증발산량, 지표면, 지하수 유출량에 대한 기여율에 비해 1987년은 상당히 상이한 결과를 보임을 알 수 있다. 1987년의 경우, 지하수+지표면 유출량의 기여율은 유사한데, 그 구성비는 SWAT 모형의 경우 지표면 유출량, SWAT-SWMM 결합모형의 경우 지하수 유출량이 상당히 크다. 그림 5와 6은 다른 소유역(1, 2번 소유역)은 SWAT 모형으로 모의되고, 도시소유역(3번 소유역)만이 SWAT 모형과 SWAT-SWMM 모형으로 모의된 경우 하천 출구에서의 유출량의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 SWAT 모형의 모의 결과보다 SWAT-SWMM 모형에 의한 모의결과가 유출체적은 0~5% 정도 작게 분석된 반면, 침투유출량은 30~50 % 정도 크게 증가하였고, 기저유출에 의해 하천유량이 결정되는 건기는 SWAT모형의 유출량이 큼을 알 수 있다.

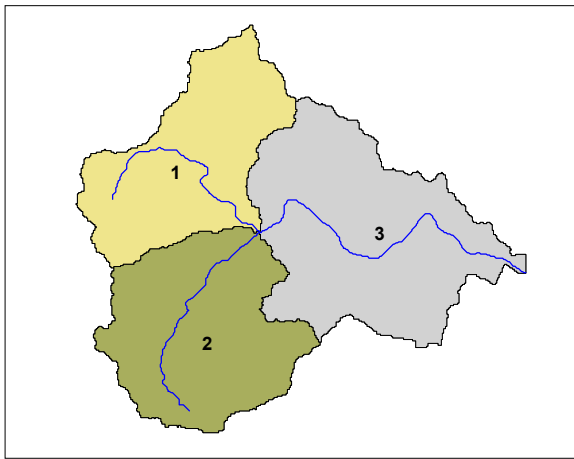


그림 1. 소유역의 분할

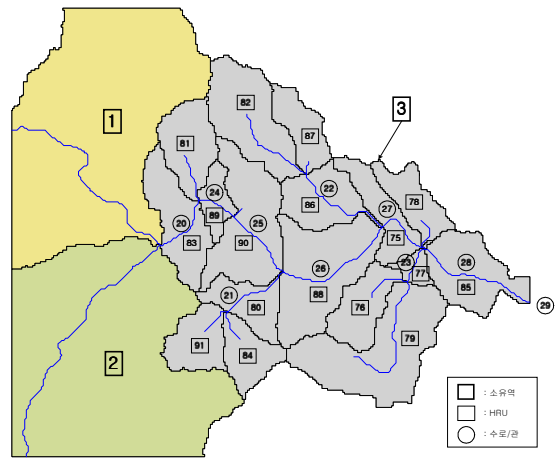


그림 2. 도시 소유역의 소유역과 수로/관

표 1. 대상유역의 소유역 정보

소유역 번호	HRU 번호	평균표고 (m)	평균경사 (m/m)	지류길이 (km)	수문학적 토양그룹	LandUse/Soil	면적 (ha)
1	1-25	170.37	0.227	7.008	B	25개의 HRU	1345.32
2	26-74	210.00	0.244	6.677	B	49개의 HRU	1501.56
3	75	70.00	0.132	2.280	B	URHD/JIGOG	85.68
	76	90.39	0.189	1.914	B	URHD/NOEGOG	92.97
	77	67.31	0.110	0.817	B	URHD/OSAN	22.77
	78	70.00	0.116	1.858	B	UCOM/JIGOG	75.42
	79	98.55	0.203	4.027	B	UCOM/OSAN	252.27
	80	94.35	0.216	1.821	B	UINS/JIGOG	78.93
	81	179.29	0.310	1.891	B	URLD/JIGOG	104.76
	82	204.90	0.326	2.626	C	URLD/JISAN	169.02
	83	94.29	0.190	1.994	B	URLD/MAEGOG	128.52
	84	224.52	0.309	1.614	B	URLD/OSAN	74.97
	85	60.00	0.131	2.379	B	UTRN/OSAN	137.88
	86	107.55	0.163	2.161	B	URMD/JIGOG	105.21
	87	130.00	0.284	1.747	C	URMD/JISAN	73.08
	88	70.00	0.168	2.970	B	URMD/OSAN	224.10
	89	85.58	0.180	1.110	B	URML/JIGOG	44.55
90	80.00	0.209	2.746	B	URML/MAEGOG	195.03	
91	115.06	0.265	1.479	B	URML/OSAN	83.25	

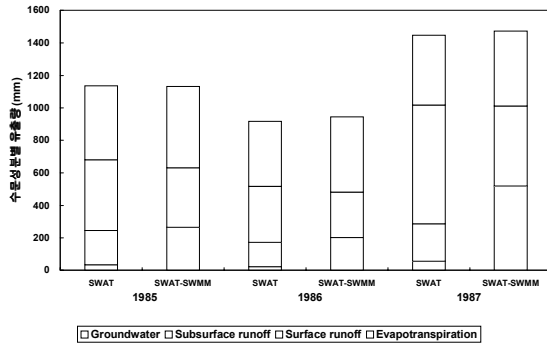


그림 3. 수문성분별 유출량 비교

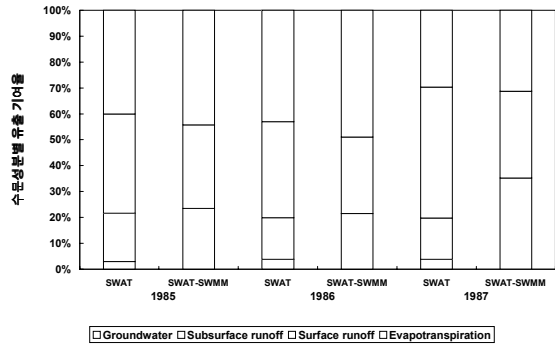


그림 4. 수문성분별 유출 기여율

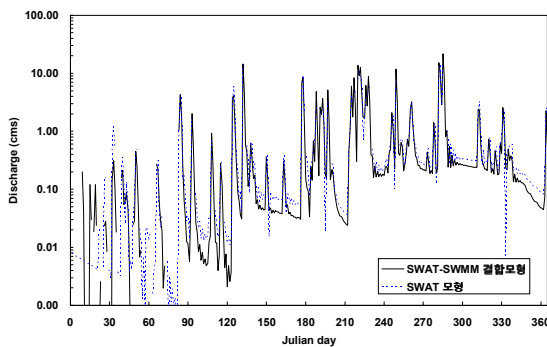


그림 4. 1985년 하천유출량 비교

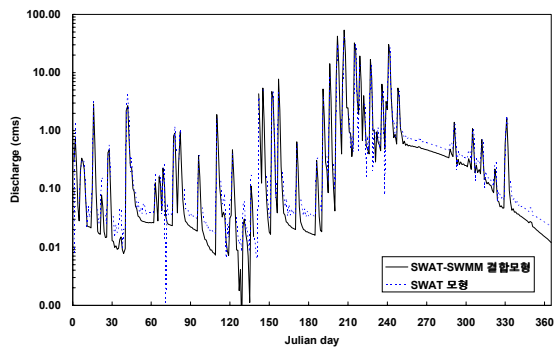


그림 5. 1987년 하천유출량 비교

5. 요약 및 결론

SWAT과 SWAT-SWMM 결합모형을 이용하여 도시지역의 장기유출 특성을 수문성분별로 비교하였다. 이 비교는 관측유출량에 의해 매개변수가 보정된 상태가 아니며, 단지 두 모형의 입력자료를 유사하게 했을 때, 두 모형으로부터 얻어지는 수문성분량을 비교한 것이다.

- 1) 지표수 유출량은 SWAT 모형, 증발산량과 토양으로부터의 유출량(지표하+지하수 유출량)은 SWAT-SWMM 결합모형의 결과가 양적으로 크며, 총 도시소유역 유출량에 대한 상대적인 비율 역시 유사하다. 그러나 연 강우량이 큰 1987년의 경우, 지표수 유출량은 SWAT 모형, 토양으로부터의 유출량은 SWAT-SWMM 결합모형으로 산정된 결과가 월등히 크게 분석되었다.
- 2) 하천출구에서의 유출량을 수문성분별로 살펴보면, 유출체적은 SWAT 모형에 의한 산정결과가 0~5%, 침투유출량은 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 결과가 30~50% 정도 크게 산정되었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김남원, 원유승(2004). SWAT-SWMM 결합모형의 구축, 2004년 한국수자원학회 학술발표회 논문집.
2. 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.
3. Neitsch, S. L., Arnold, J. R., Kiniry, J. R., Williams J. R.(2001). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Ver. 2000,