

SWAT-SWMM 결합모형의 개발

(II) 모형의 특징 및 평가

The Development of Coupled SWAT-SWMM Model (II) Model Characteristics and Evaluation

김 남 원* / 원 유 승**

Kim, Nam Won / Won, Yoo Seung

Abstract

The continuous long-term rainfall-runoff simulation model SWAT has the advantage of being able to account for various land use, however, SWAT lacks the capability of simulating the drainage characteristics of urban area. On the other hand, SWMM, which is the most popular model for runoff analysis of urban watershed, has the advantage of being capable of considering surface and drainage characteristics in urban area, but SWMM cannot easily account for land use other than urban area within a watershed.

In this study, SWAT-SWMM model, which builds on the strengths of SWAT and SWMM, has been applied to the Osan River Watershed which is a tributary watershed to the Gyung-Ahn River. From the application, the results from coupled SWAT-SWMM model has been compared to the ones from SWAT for each hydrologic component such as evapotranspiration, surface runoff, groundwater flow, and watershed and channel discharge, and the runoff characteristics of two models for each hydrologic component has been discussed.

Keywords : rainfall-runoff relation, SWAT, SWMM, SWAT-SWMM, urban area, hydrological component

요 지

유역규모의 장기 유출모형인 SWAT은 다양한 토지이용을 고려할 수 있는 장점이 있는 반면, 도시지역에 대한 배수특성을 충분히 고려할 수 없는 단점을 가지고 있다. 반면, 세계적으로 도시지역의 유출현상 규명에 널리 이용되는 SWMM 모형은 도시지역의 지표면 특성과 배수특성을 모두 고려할 수 있는 장점이 있는 반면 유역내 도시지역 이외의 토지이용에 대한 고려가 힘들다는 단점이 있다.

본 연구에서는 두 모형의 장점을 살리고, 단점을 보완한 SWAT-SWMM 결합모형을 경안천내 오산천 유역에 적용하였다. 이로부터 SWAT-SWMM 결합모형에 대한 모식결과와 SWAT 모형에 의한 모의결과를 증발산, 지표면 유출량, 토양으로부터의 유출량, 유역 및 하도 유출량 등 수문성분별로 비교·평가하였고, 두 모형의 수문성분별 유출모식의 특징에 대하여 논의하였다.

핵심용어 : 강우-유출관계, SWAT, SWMM, SWAT-SWMM, 도시지역, 수문성분

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

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

1. 서 론

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(Dunne과 Leopold, 1978; Welsh, 1989; Habor, 1994). 또한, 도시지역의 상류에는 저밀도의 도시 또는 주거지역, 농업지역, 산림지역 등 다양한 토지이용이 이루어지고 있다.

김남원과 원유승(2004)은 SWAT 모형(Soil and Water Assessment Tool, Arnold 등, 1993, 1995)과 SWMM 모형(Storm Water Management Model, Huber와 Dickinson, 1988)의 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.

SWAT-SWMM 결합모형과 같이 수분성분의 해석에서 모형의 취약한 한 부분을 보완하기 위해 타 모형을 결합시킨 모형은 1990년대 이후 미국을 중심으로 몇몇 예가 있다. 대표적으로 SWATMOD(Sophocleous 등, 1997)와 ISGW(Integrated Surface and GroundWater model, SDI, 1997)가 있는데 이들 모형은 장기 유출모형인 SWAT 또는 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran) 모형의 지하수 부분을 강화하기 위해 MODFLOW를 결합시켰다. 국내에서도 김남원 등(2004a, b)은 SWATMOD와 유사하게 SWAT과 MODFLOW 모형을 결합시킨 SWAT-MODFLOW 모형을 개발하였다. SWATMOD, ISGW, SWAT-MODFLOW 모형은 지표수와 지하수 부분을 각각 다른 모형을 이용하여 연계한 모형인데 반해, 하도와 지하수를 연계한 MODBARNCH(Swain과 Wexler, 1996)와 MODNET(Walton 등, 1999) 등도 있다. 이들 두 모형 역시 1차원 하도추적 모형인 BRANCH 또는 UNET 모형에 MODFLOW 모형을 결합한 예인데, 지표수 유출, 침투와 침투 등에 관련된 지표면 유출량을 산정하는 부분이 포함되지 않은 단점이 있다.

상기의 결합모형들이 지표수 또는 하천과 지하수 유출량을 산정하기 위해 두 모형을 직렬로 연결한 것과 달리 SWAT-SWMM 결합모형은 SWAT 모형의 단점인 도시지역이라는 토지이용 부분을 강화하기 위해

SWMM 모형을 결합한 모형으로 두 모형에 포함된 수문 성분 산정 모식을 모두 이용할 수 있는 강점이 있다(김남원과 원유승, 2004). 즉 SWAT-SWMM 결합모형은 SWAT 모형에서 모의하는 어느 한 수문성분만을 대상으로 결합된 모형이 아니라 도시지역이라는 토지이용 부분에 대하여 두 모형을 병렬로 결합시킨 모형이다.

본 고에서는 기 개발된 SWAT-SWMM 결합모형을 경안천 유역내 오산천 유역에 적용하였고, 적용결과를 SWAT 모형에 의한 모의결과와 비교·평가하였다. 비교 대상 수문성분량은 증발산량, 지표면, 지표하, 지하수 유출량과 유역출구에서의 유출량의 변화 특성이고, 두 모형에 의해 모의되는 결과를 서로 비교하기 위해서 SWAT 모형에서 이용되는 가용한 모든 자료를 이용하여 SWAT-SWMM 결합모형의 입력자료를 비슷하게 구축하였다.

2. SWAT-SWMM 결합모형의 입력자료

SWAT 모형이나 SWMM 모형을 개별적으로 이용할 때는 두 모형의 입력자료를 개별적으로 구축하여야 하나(Neitsch 등 2001a, b; Huber와 Dickinson, 1988), SWAT-SWMM 결합모형에서는 입력자료가 중복되거나, 편리하게 구축할 수 있는 경우가 있으며, 추가적으로 구축해야 할 입력자료가 있다. 입력자료가 중복되는 경우는 강수량 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(Av SWAT) 모형을 이용하여 비교적 쉽게 처리될 수 있는데, Av SWAT 모형을 이용하면 사용자 임의로 소유역 구분과 출구 등을 지정할 수 있다. 소유역 구분과 출구지점이 지정되면 Av SWAT 모형은 소유역을 분할하고, 소유역내 HRU의 특성치를 추출한다(Di Luzio 등, 2001). 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, 먼

적의 크기도 같아야 SWAT-SWMM 결합모형의 모식을 자유롭게 이용할 수 있다.

이를 위해서 Av SWAT 모형을 실행시킨 후, 전체 유역에 대해 소유역을 분할하고, 분할된 소유역 중 SWMM 모형이 실행될 한 개의 도시 소유역 내부를 세분하여야 한다. 이때 세분된 소유역은 SWAT-SWMM 결합모형의 SWAT 모형에서는 HRU로 인식하게 되고, SWMM 모형에서는 소유역으로 인식하게 된다. 도시 소유역을 세분한 후, "HRUs distribution"의 "Dominant Land Use and Soil" 옵션을 이용해 한 개의 소유역에 한 개의 대표적인 토양도 및 토지이용도를 가지도록 분류할 수 있다. 이 작업까지 수행하면 Av 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 소유역도(water1), 토지이용도(lusgr1), 토양도(solgr1)의 Arcview grid 파일을 서로 중첩시킨 후, 도시 소유역내 소유역에 한 개의 토양도와 토지이용도를 할당하여 새로운 토양도와 토지이용도를 생성시킬 수 있다.

3. SWAT-SWMM 결합모형의 적용

3.1 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. Av 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 Av 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 모형 입력자료를 이용하였고, 도시 소유역의 수로/관의 입력자료는 전처리 전의 SWAT 모형 입력자료를 이용하여 표 2와 같이 구성하였다. 지하수에 관련된 입력자료 역시 SWAT 모형의 입력자료를 참고하여 두 모

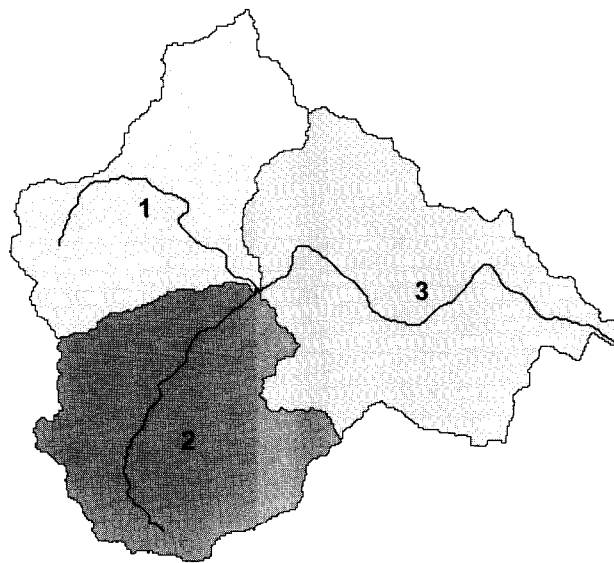


그림 1. 소유역의 분할

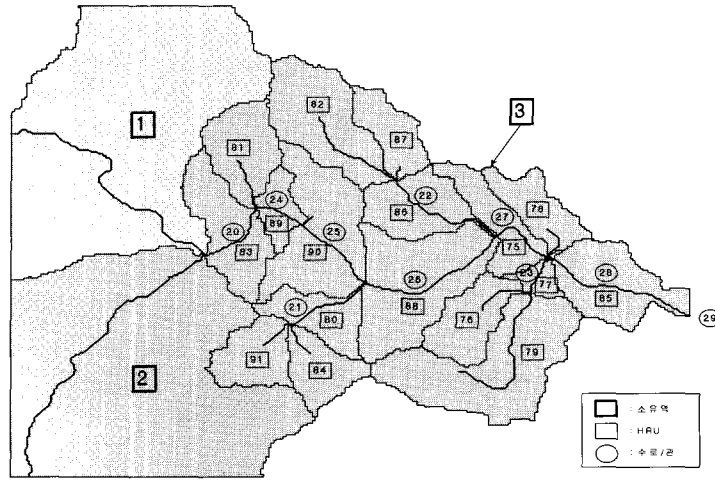


그림 2. 도시 소유역의 소유역과 수로/관

표 1. 대상유역의 소유역 정보

소유역 번호	HRU 번호	평균표고 (m)	평균경사 (m/m)	지류길이 (km)	수문학적 토양그룹	LandUse/Soil	면적 (km ²)
1	1-25	170.37	0.227	7.008	B	25개의 HRU	13.453
2	26-74	210.00	0.244	6.677	B	49개의 HRU	15.016
3	75	70.00	0.132	2.280	B	URHD/JIGOG	0.857
	76	90.39	0.189	1.914	B	URHD/NOEGOG	0.930
	77	67.31	0.110	0.817	B	URHD/OSAN	0.228
	78	70.00	0.116	1.858	B	UCOM/JIGOG	0.754
	79	98.55	0.203	4.027	B	UCOM/OSAN	2.523
	80	94.35	0.216	1.821	B	UINS/JIGOG	0.789
	81	179.29	0.310	1.891	B	URLD/JIGOG	1.048
	82	204.90	0.326	2.626	C	URLD/JISAN	1.690
	83	94.29	0.190	1.994	B	URLD/MAEGOG	1.285
	84	224.52	0.309	1.614	B	URLD/OSAN	0.750
	85	60.00	0.131	2.379	B	UTRN/OSAN	1.379
	86	107.55	0.163	2.161	B	URMD/JIGOG	1.052
	87	130.00	0.284	1.747	C	URMD/JISAN	0.731
	88	70.00	0.168	2.970	B	URMD/OSAN	2.241
	89	85.58	0.180	1.110	B	URML/JIGIG	0.446
	90	80.00	0.209	2.746	B	URML/MAEGOG	1.950
91	115.06	0.265	1.479	B	URML/OSAN	0.833	

표 2. 도시소유역의 수로 정보

수로 번호	유입구 번호	사다리꼴 수로의 제원				
		바닥 폭 (m)	길이 (m)	경사 (m/m)	측면 경사 (m/m)	만수심 (m)
20	24	15.72	1104.0	0.009	2.0	2.53
21	26	2.86	1179.0	0.014	2.0	0.92
22	27	3.76	1703.0	0.012	2.0	1.08
23	28	3.9	669.0	0.015	2.0	1.10
24	25	16.23	652.0	0.001	2.0	2.58
25	26	16.88	1467.0	0.007	2.0	2.64
26	27	18.38	2065.0	0.004	2.0	2.78
27	28	19.95	1009.0	0.010	2.0	2.93
28	29	21.44	2073.0	0.001	2.0	3.06
29	-	-	-	-	-	-

형에서 이용되는 재 변수들이 비슷하도록 구축하였고, 포화 투수계수, 영구위조점, 포장용수량 등의 자료는 Saxton 등 (1986)에 의해 제안되어지고, 프로그램화된 SPAT(Soil-Plant-Air-Water Field & Pond Hydrology) Version 6.1.51 또는 Soil Water Characteristics Version 6.1.51을 이용하여 SWAT 모형에 입력된 각 토양층의 층별로 추정된 다음, 층별 깊이를 가중한 평균값을 이용하였다.

3.2 모형의 적용결과

전 절의 입력자료를 이용하여 경안천유역내 오산천 유역에 대하여 SWAT 모형과 SWAT-SWMM 결합모형을 적용하였다. 전술한 바와 같이 오산천 유역을 3개의 소유역으로 분할하였고, 3번 소유역을 도시소유역이라 가정하여 토양도와 토지이용도를 수정하였다. 이 수정된 토양도와 토지이용도를 이용하여 3개의 소유역에 대해 SWAT 모형으로 모의한 경우와, 상류 두 개의 소유역은 SWAT, 하류의 도시소유역(그림 1의 3번 소유역)은 SWMM 모형으로 모의한 경우(SWAT-SWMM 결합모형)로 나누어 적용하였다. 총 모의기간은 1984~1987년까지 4개년이고, 이 중 분석에 실제로 이용한 자료는 1985~1987년까지 3개년이다. 두 모형에 의한 모의결과를 비교하기 위해 수문성분을 증발산량과 지표수, 지표하, 지하수 유출량으로 구분하였으나, 이들 수문성분 중 지표하 유출과 지하수 유출량의 구분은 SWAT 모형에서는 가능하나, SWMM 모형에서는 두 개의 성분을 합해 지하수 유출량으로 표현됨에 유의하여야 한다. 따라서 두 모형으로부터 모의된 결과를 서로 비교하기 위해서는 지하수, 지표하, 지하수+지표하 유출량의 표현을 서로 구분할 필요가 있다. 본 연구에서는 SWAT 모형의 지하수 유출량과 지표하 유출량의 합을 "토양으로부터의 유출량" 또는 "토양유출량"이라 표현하였고, 이로부터 SWMM 모형의 경우 지하수 유출량과 토양으로부터의 유출량은 같은 의미를 알 수 있다.

3.2.1 증발산량

그림 3은 SWAT과 SWAT-SWMM 결합모형에 의해 산정된 도시 소유역의 증발산량을 1985년에 대하여 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SWAT 모형과 SWAT-SWMM 결합모형으로 산정된 증발산량은 상당히 다른 분포를 보이는데, SWAT 모형의 경우 증발산량이 서서히 증가하다가 6~8월 사이에 크게 증가하고, 이후 서서히 감소하는 분포를 보이며, 일별로 진동이 심하다. 반면 SWAT-SWMM 결합모형에 의해 산정된 도시지역의 증발산량은 강우가 발생한 특정일에

크게 증가하였다가, 무강우시 거의 일정한 형태의 증발산량 분포를 보인다. 본 연구의 경우 SWAT-SWMM 결합모형을 적용할 때 용해를 고려하지 않아 1~3월, 11~12월 사이에 SWAT 모형에 의해 산정된 증발산량보다 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 증발산량이 큰 것이 당연할지라도 SWAT-SWMM 결합모형의 경우 0.8 mm 정도의 증발산량이 일별로 거의 일정하게 유지하는 아주 특이한 현상이 나타난다.

이로부터 SWAT 모형과 SWMM 모형이 도시지역에 대한 증발산량 산정방식이 상당히 차이를 유추할 수 있으며, SWAT 모형의 경우 증발산량은 차단지류(canopy storage), 식물에 의한 증산, 승화와 토양으로부터 증발이 발생한다고 가정하여 이들 개개 성분의 증발산량을 산정한 다음 합산하여 총 증발산량을 계산한다. 반면 SWMM 모형의 경우는 지면저류(depression storage), 비포화대(상부지대) 증발량인 토양증발량과 포화지대(하부지대)의 증발량인 식물증산량을 합하여 총 증발산량을 산정한다. 두 모형에서 증발산량의 개개 구성요소를 파악하기 위해서 눈으로부터의 승화량을 제외(SWAT-SWMM 모형에서는 용해를 고려하지 않아 승화량을 비교할 수 없음)하고 나머지 세 성분에 의해 발생하는 증발산량을 각각 비교하여 보았다. 그림 4는 SWAT 모형에 의해 산정된 차단지류, 토양증발, 식물증산의 변화를 나타낸 것이고, 그림 5는 SWMM 모형에 의해 산정된 지면저류, 상부지대 증발, 하부지대 증산을 비교한 것이다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 SWAT 모형에 의한 차단지류는 거의 없고, 토양증발은 4월까지 증가하는 경향을 보이다가 4월~7월 사이에서 감소하며, 8월에 크게 증가하였다가 서서히 감소하는 경향을 보이고, 식물증발은 4월부터 7월 사이에 상당히 크게 발생함을 알 수 있다. 그림 5는 SWMM 모형의 경우로 사용자 입력에 의존하는 지면저류가 강우시마다 발생하며, 토양증발과 식물증산은 거의 일정한 형태를 보인다. 이로부터 그림 3에 제시된 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 증발산량이 일별로 0.8 mm 이상 유지하는 이유는 SWMM 모형의 토양증발과 식물증산량이 거의 일정하게 연중 발생하기 때문임을 알 수 있다.

SWAT 모형의 증발산량 산정 모식은 식생의 종류, 토양수분, 온도 등의 영향 등을 복합적으로 고려하여 상당히 복잡하게 산정된다. 먼저 사용자의 선택된 방법으로 잠재증발산량을 산정하고, 차단지류를 제외한 잠재증발산량으로부터 최대토양증발량, 증기압과 엽면적지수(LAI) 등으로부터 최대식물증산량을 산정한다. 각각 산정된 최대토양증발량과 최대식물증산량의 합과 잠재증발산량을 비교하여 최종적으로 최대토양증발량과

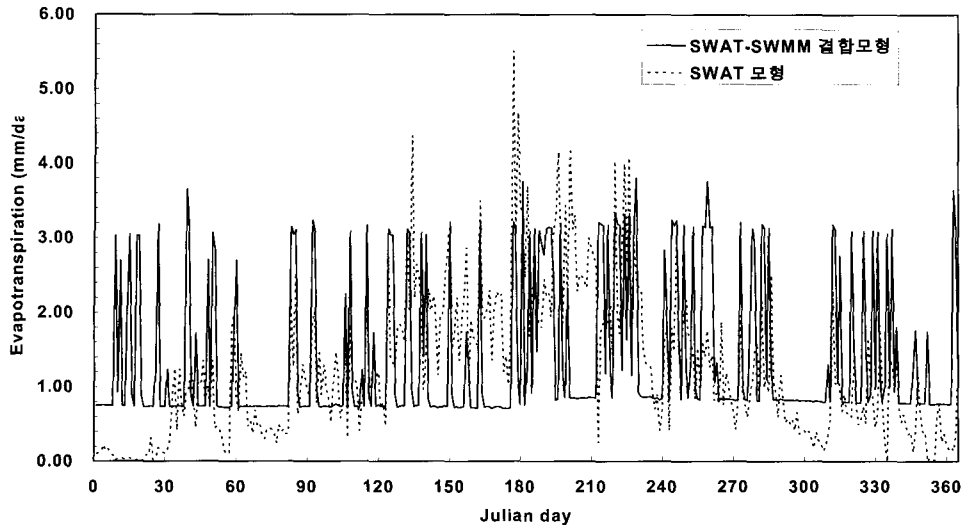


그림 3. 증발산의 변화

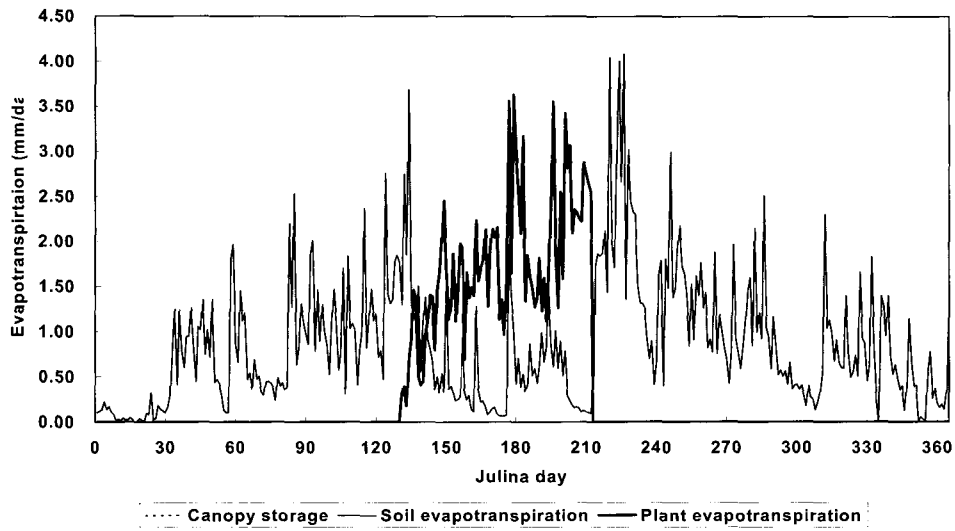


그림 4. SWAT 모형에 의한 증발산량

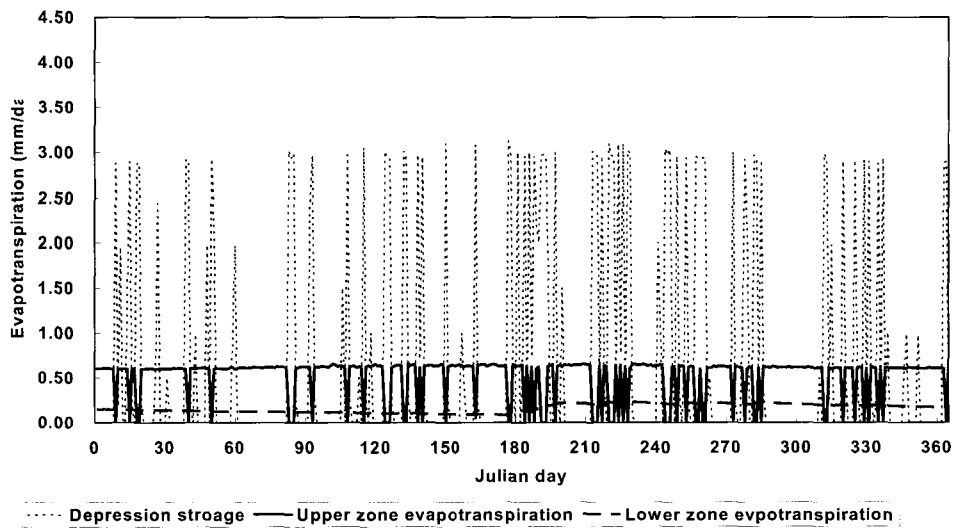


그림 5. SWMM 모형에 의한 증발산량

최대식물증산량을 조정한다. 이로부터 실제 토양증발량은 최대토양증발량과 토양수분, 토양깊이에 의해 결정되고, 실제 식물증산량은 식물의 뿌리깊이, 잠재수분흡수량, 토양수분에 의해 결정된다. 반면 SWMM 모형에 있는 증발산량의 산정은 비교적 간단한데, 먼저 최대증발산량은 사용자에 의해 입력(SWAT-SWMM 결합모형은 SWAT 모형의 잠재증발산량 산정식을 이용하여 산정함)된다. 입력된 최대증발산량은 사용자가 입력한 상부지대 최대증발량의 비율에 의해 상부와 하부지대의 최대증발산량으로 분할되고, 상부지대의 토양수분 또는 하부지대의 지하수위에 따라 실제증발산량이 산정된다. 상기의 절차에 의해 증발산량의 구성요소별 실제 증발산량이 산정되며(그림 4와 그림 5 참조), SWAT 모형과는 달리 SWMM 모형의 경우 비포화대와 포화대에서 증발산량이 일정하게 나오는 이유는 최대 증발산량으로부터 실제 증발산량산정시 토양깊이, 뿌리대 깊이, 토양수분 등의 저항요소를 고려하지 않았기 때문이다.

도시지역의 지표면 특징은 도시의 발달정도에 따라 다르지만 어느 정도의 불투수지역이 존재한다는 것이다. SWMM 모형의 경우, 이 불투수지역의 특징을 모형에 고려하기 위해 불투수지역을 지면저류가 존재하는 불투수지역과 지면저류가 존재하지 않는 불투수지역으로 구분한다. 지면저류가 존재하는 불투수지역은 강우 발생시 맨 먼저 지면에 저류되고 나머지는 지표면 유출되며, 지면저류가 존재하지 않는 불투수지역은 지표면 유출을 통해 수로/관에 바로 유입되므로 침투나 증발산이 발생하지 않는다. 반면, 불투수면적을 제외한 투수지역에서는 지면저류, 지표면 유출, 침투, 증발산 등의 모든 수문현상이 발생하는 것으로 가정한다. SWAT 모형 역시 SWMM 모형과 유사하게 도시지역의 지표면의 특징을 투수지역과 불투수지역으로 구분하며, 불투수지역은 배수관에 직접연결된 불투수지역과 연결되지 않은 불투수지역으로 다시 세분하며, 지표면 유출 산정시 이들 요소들이 고려된다. 이로부터 SWAT 모형에 의한 실제 증발산량이 SWMM 모형의 실제 증발산량에 비해 상당히 복잡한 절차를 거쳐 정교하게 산정되는 것처럼 보이나, 도시지역의 경우에 대하여 한가지 문제점을 가지고 있다. 그것은 토양으로부터의 증발산량 산정시 불투수지역에 대한 영향이 전혀 고려되지 않고, HRU 전면적에서 균등하게 일어나는 것으로 가정하므로 증발산량이 과대평가될 수 있다는 점이다.

3.2.2 지표면 유출량

그림 6은 SWAT 모형과 SWAT-SWMM 결합모형에 의해 산정된 지표면 유출량을 1985년에 대하여 비교

한 것이다. SWAT 모형에 입력된 도시지역 특성인 표 1을 이용하여 SWAT 모형과 SWMM 모형의 입력자료가 유사하도록 구축했을 경우임에도 불구하고, 지표면의 침투유출량은 SWAT 모형으로 모의되었을 때가 약 1.5배정도 크다. 이러한 차이는 입력자료의 차이뿐만 아니라, 지표면과 침투량을 분리하는 방법의 차이에도 있을 수 있다. 본 연구에서는 SWAT 모형의 경우 SCS CN 방법, SWAT 모형의 경우 Horton의 침투방정식을 이용하였는데, SCS CN 방법을 이용한 SWAT 모형의 경우는 지표면 유출량을 산정한 후 그 나머지를 침투시키고, Horton의 침투방정식을 이용한 SWMM 모형의 경우는 침투량이 결정된 다음, 그 나머지가 지표면으로 유출된다. 지표면 유출량과 침투량 분리방법과 더불어 지표면 유출량과 침투량에 영향을 주는 인자는 일별 CN의 변화 또는 Horton의 침투능 회복방정식이며, 이들은 모두 토양수분과 밀접한 관계가 있다. 이러한 복합적인 요인의 영향으로 지표면 유출량에 많은 차이가 있었음을 유추할 수 있다.

3.2.3 토양으로부터의 유출량

그림 7은 1985년대에 대하여 모형별 토양유출을 비교한 것이다. 여기서 토양유출은 SWAT 모형의 경우, 지표하+지하수 유출량, SWMM 모형의 경우, 지하수 유출량을 의미하며, 지표하, 지하수 유출량에 대한 개개 수문성분을 직접 비교하지 못한 이유는 SWMM 모형의 경우 지표하 유출이란 개념이 없기 때문이다. 토양으로부터의 유출량은 전반적으로 SWMM 모형에 의한 모의 결과가 SWAT 모형의 모의결과보다 크게 산정되었으며, 침투의 경우 최대 3~4배정도의 차이를 보였다. 전 절에서 논의한 지표면 유출의 경우 SWAT 모형에 의한 지표면 유출량이 SWMM 모형에 의한 지표면 유출보다 상대적으로 크다는 사실로부터 침투는 SWAT 모형에 의한 모의결과보다는 SWMM 모형에 의한 모의결과가 클 것이라는 것을 예상할 수 있고, 이로부터 지하수 유출량도 SWMM 모형에 의한 모의결과가 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 지표면 유출의 침투는 SWAT 모형에 의한 결과가 1.5배정도 크고, 토양 유출량의 침투는 SWMM 모형에 의한 모의 결과가 3~4배정도 크게 분석되었고, 이를 양적으로 보면 유사하다는 것을 알 수 있다.

또한 강우량이 상대적으로 많은 6~10월에는 SWMM 모형, 강우가 적은 1~5월, 11~12월에는 SWAT 모형에 의한 토양유출이 크게 분석되었다. 그 이유는 SWAT 모형은 침투한 물이 비교적 짧은 시간 내에 토양통을 거치면서 지표하 유출을 발생시키는 반

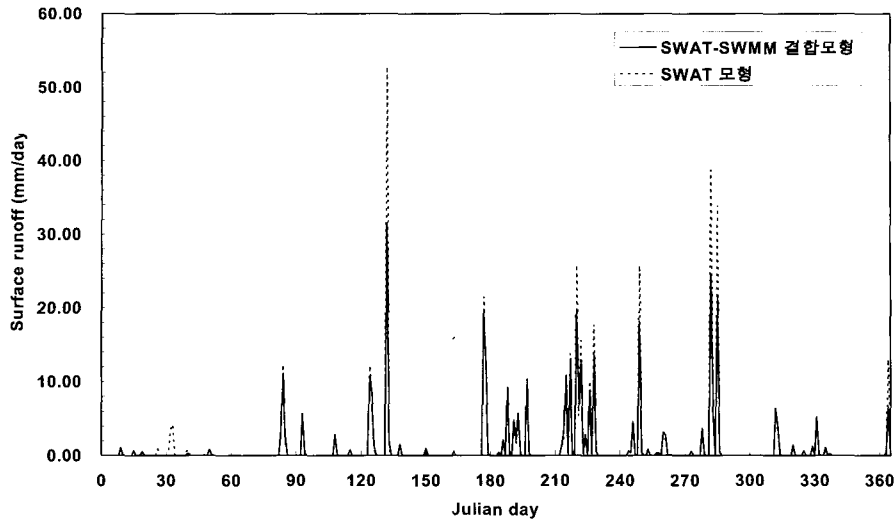


그림 6. 지표면 유출량

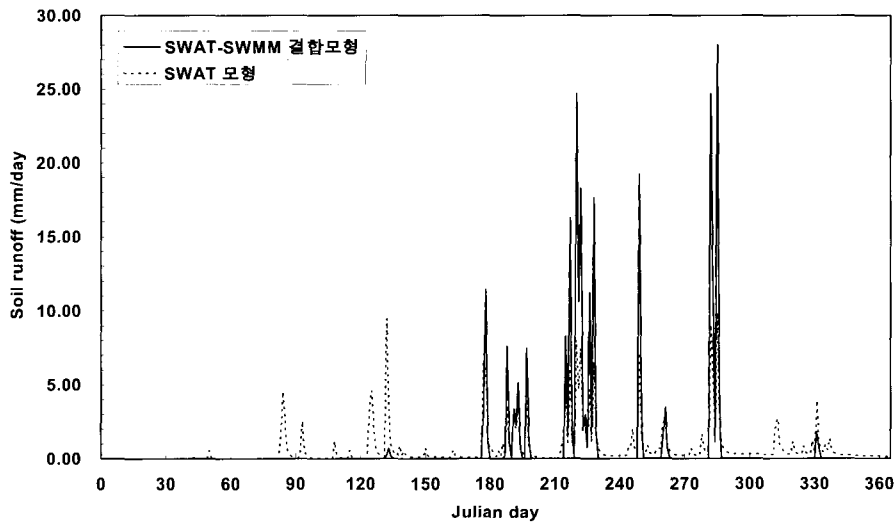


그림 7. 토양유출

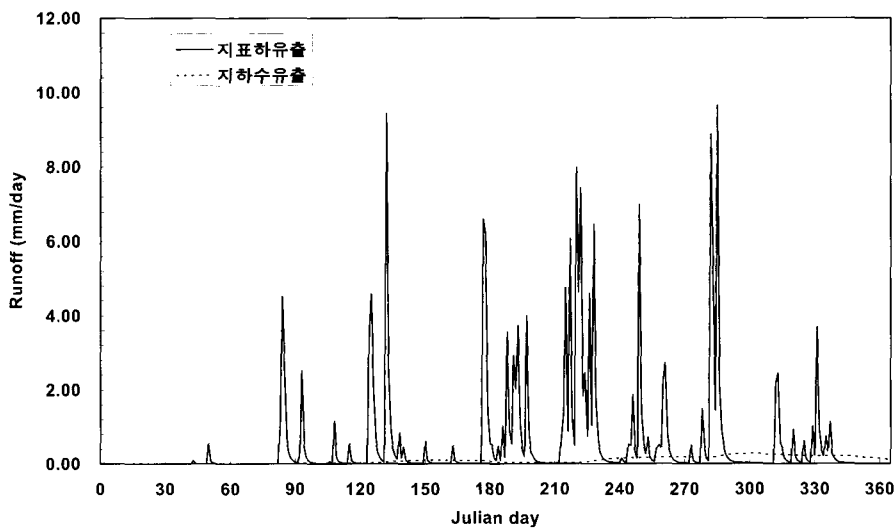


그림 8. SWAT 모형에 의한 지표하, 지하수 유출

면, SWMM 모형은 침투한 물이 침투하여 지하수위를 함양시키고, 지하수위가 하천 수위 또는 하천의 평균수위보다 높을 때만 지하수유출이 발생하기 때문이다. 또 다른 이유는 SWMM 모형의 경우 토양증발과 식생증산이 일별로 거의 일정하게 발생하기 때문에 강우가 충분히 크지 않는 한 지하수위를 상승시킬 수 없어, 지하수 유출이 발생할 수 없기 때문이다.

이러한 사실은 그림 8을 참고하면 명백히 알 수 있는데, 그림 8은 SWAT 모형에 의해 산정된 토양유출(그림 7 참조)을 지표하 유출과 지하수 유출을 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SWAT 모형에서 토양유출의 대부분은 전술한 바와 같이 지표하 유출이며, 지하수 유출량은 미미하다. 이로부터 SWAT 모형의 경우, 건기(1~5월, 11~12월)의 토양유출량은 지표하 유출량임이 명백하고, SWMM 모형의 경우는 지하수 함양으로부터 지하수위가 상승한 다음에 유출이 발생하고, 지하수위가 지하수유출량을 발생키는 조건에 미달하거나 약간 초과하는 경우는 증발산에 의해 모두 대기중으로 사라져 토양유출이 발생하지 않는다. SWMM 모형에서 최대 증발산량은 저항요소에 의해 제어하지 못하기 때문에 나타나는 또 다른 특징은 SWAT 모형의 경우, 연중 꾸준한 지하수 유출량이 있는 반면, SWMM 모형에 의한 토양유출은 강우 발생을 중심으로 나타나고 그 외의 기간에 대해서는 토양유출량이 거의 없다는 점이다.

3.2.4 소유역 유출량

소유역 유출량은 지표면, 지표하, 지하수 유출량의 합으로 이루어지며, 증발산량은 총 유입인 강우량으로부터 대기중으로 손실되는 양의 하나이다. 소유역의 하도나 수로/관에 유출되지 않는 또 다른 손실로는 깊은 침투량이 있으며, 깊은 침투량은 SWAT 모형이나, SWMM 모형 모두 유역외로 나가는 손실량으로 취급된다. SWAT 모형의 경우, 대수층 침투계수와 지하수 함양량으로부터 깊은 대수층으로 이동하는 최대 수분량이 결정되며, 포화대수층의 수분량이 사용자 입력치 이상이면 깊은 침투량이 발생하고, SWMM 모형의 경우, 감소계수와 지하수의 정수압에 의해 결정된다. 그림 9는 이러한 손실량을 제외한 도시소유역(그림 2 참조)의 하도 또는 수로/관으로의 순유출량을 1985년에 대하여 비교한 것이다. 그림 9로부터 우기의 경우, 지표면 유출량은 SWAT 모형, 토양유출은 SWMM 모형으로 산정된 결과가 상대적으로 컸음에도 불구하고 두 개의 수문성분이 합쳐져 하도 또는 수로/관으로 유출되는 소유역 유출량의 합은 거의 유사한 경향을 보임을 알 수 있고,

전술한 토양유출의 특성으로 건기에는 SWAT 모형에 의한 소유역 유출량이 상대적으로 큼을 알 수 있다.

표 3에는 증발산, 지표면 유출, 토양유출(지표하, 지하수 유출) 등의 수문성분을 모형별, 연도별로 비교였다. 표 3에 제시된 바와 같이 소유역내 증발산과 유출량의 총량은 SWAT-SWMM 결합모형의 모의결과가 1985년은 3.1 mm 정도 작고, 1986과 1987년은 각각 27.7, 27.1 mm 정도 크게 분석되었는데, 이는 소유역내 잔류량인 토양수분과 지하수량 및 깊은 대수층으로의 손실량이 서로 다르기 때문이며, SWMM 모형의 경우 토양구조내의 물수지의 불균형으로 인한 에러 항이 포함되어 있다. 이러한 손실량은 1985년의 경우, SWAT 모형과 SWAT-SWMM 모형 모두 총 강우량의 38.4~41.5 mm 정도가 유출되지 않았고, 1986년과 1987년 경우, SWAT 모형은 총 강우량의 대부분이 손실되지 않고 유출되었으며, SWAT-SWMM 모형의 경우, 각각 31.8, 24.5 mm 정도가 연강우량에 비해 초과유출되었다.

소유역내 증발산과 유출량을 수문성분별로 살펴보면, 증발산량의 경우는 31.7~61.7 mm 정도 SWAT-SWMM 결합모형의 모의결과가 크고, 연도별 소유역 유출량은 4.6~49.3 mm 정도 SWAT 모형에 의한 모의결과가 큼을 알 수 있다. 소유역 유출량을 다시 지표면 유출과 토양유출로 세분하여 각 수문성분별 유출량을 비교하면, 지표면 유출의 경우, 64.5~237.6 mm 정도 SWAT 모형의 모의결과가 크게 산정된 반면, 토양유출의 경우는 20.9~233 mm 정도 SWAT-SWMM 결합모형의 모의결과가 크다. 그러나, 두 모형에 의해 모의된 결과 중 지표면 유출과 토양유출의 차이가 상당히 큼에도 불구하고 소유역 유출량은 대략 50 mm 이내의 차이를 보임을 알 수 있는데, 이로부터 두 모형에서 지표면 유출과 토양유출을 산정하는 과정 및 절차가 서로 달라 개개 수문성분의 차이는 크나, 이들 수문성분의 합인 소유역 유출량은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

표 3으로부터 증발산량과 토양유출량은 SWAT-SWMM 결합모형, 지표면 유출량은 SWAT 모형에 의한 모의결과가 크게 분석됨을 알 수 있고, 그림 10은 표 3의 소유역내 증발산량과 유출량을 연도별로 나타낸 것이고, 그림 11은 이들 개개 수문성분의 양을 상대적으로 평가하기 위해 연도별 소유역 증발산과 유출량에 대한 각 수문성분의 비율을 나타낸 것이다. 그림 10과 그림 11에 제시된 바와 같이 두 모형에 의해 산정된 수문성분별 소유역 증발산량과 유출량 및 각 수문성분의 기여율은 전술한 바와 같이 증발산량과 지하수 유출량은 SWAT-SWMM 결합모형, 지표면 유출량은 SWAT 모형에

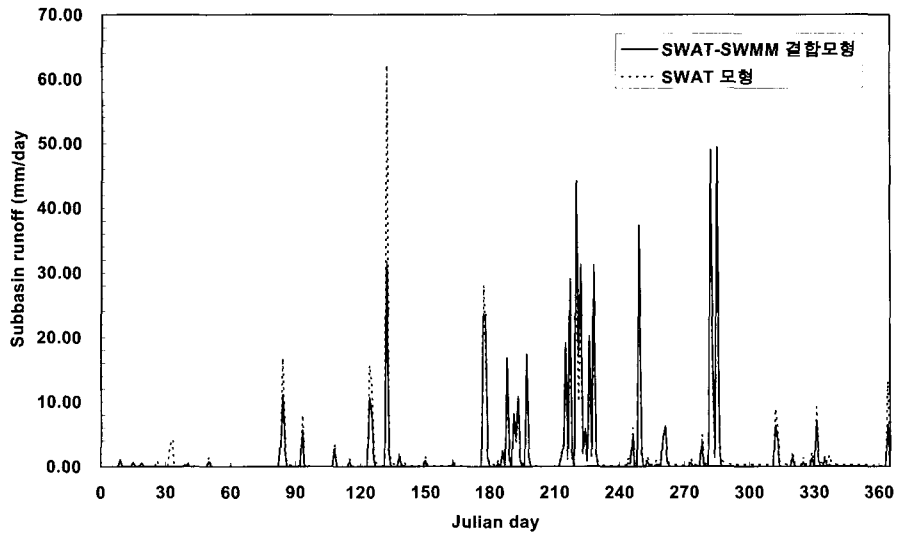


그림 9. 소유역 유출량

표 3. 수문성분별 도시소유역 유출량

(단위 : mm)

구분	연도	강우량	소유역 물수지						손실량
			계	증발산	소유역 유출량				
					소계	지표면	지표하	지하수	
SWAT 모형	1985	1178.3	1135.4	455.5	680.0	434.9	210.9	34.2	38.4
	1986	912.0	916.1	399.4	516.7	343.7	149.5	23.5	-4.1
	1987	1449.0	1446.4	429.0	1017.4	731.6	230.2	55.6	2.6
SWAT-SWMM 결합모형	1985	1178.3	1132.8	501.6	630.6	364.7	-	266.0	41.5
	1986	912.0	943.8	462.1	481.7	279.2	-	202.6	-31.8
	1987	1449.0	1473.5	460.7	1012.8	494.0	-	518.8	-24.5

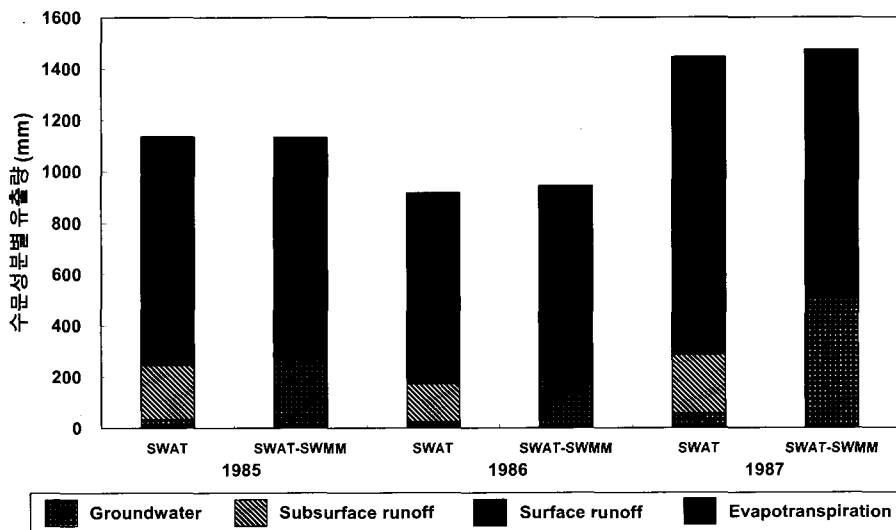


그림 10. 연도별 수문성분별 유출량 비교

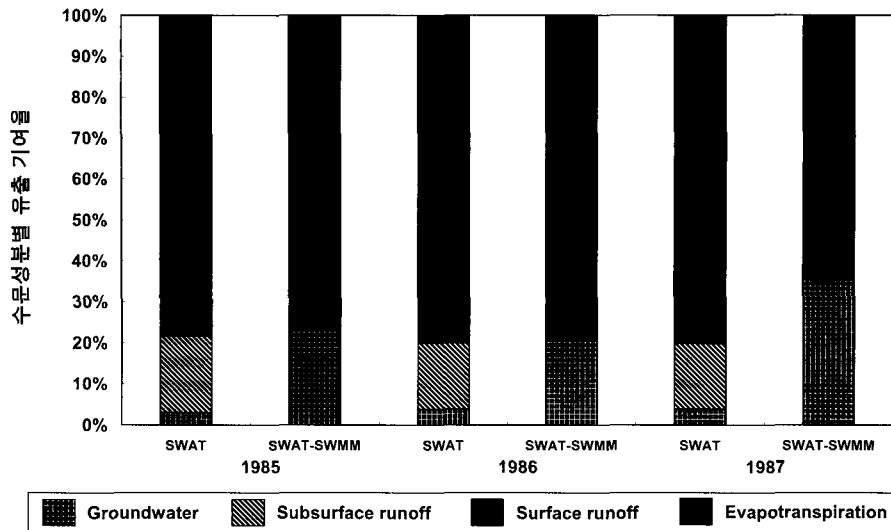


그림 11. 연도별 수문성분별 기여율(%) 비교

의해 산정된 결과가 크게 분석되었다. 그러나, 연도별 유출량과 기여율을 살펴보면, 1985년과 1986년의 증발산량, 지표면, 토양유출량 및 이에 대한 기여율에 비해 1987년은 상당히 상이한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 1985년과 1986년에 비해 상대적으로 연 강수량이 큰 1987년의 경우, 두 모형에 의한 소유역 유출량은 거의 같은 반면, 그 구성비를 살펴보면 SWAT 모형의 경우 지표면 유출량이 지배적이고, SWAT-SWMM 결합 모형의 경우 지표면 유출량보다 토양으로부터의 유출량이 크다. 이러한 결과는 지표면 유출과 침투량의 분리 방식 및 증발산, 토양수분, 지하수 유출 등의 모식의 차이에 의해 발생한 결과로 추정된다.

3.2.5 하도 유출량

그림 12는 그림 1에 제시된 소유역 분할도에서 세 개의 소유역 모두 SWAT 모형으로 모의된 경우와 1, 2번 소유역은 SWAT 모형으로 모의되고, 3번 소유역을 도시 소유역이라 가정하여 그림 2와 같이 도시 소유역을 세분한 후, SWMM 모형으로 모의된 경우(SWAT-SWMM 결합모형)에 대하여 대상유역의 출구에서 1985년의 유출량을 서로 비교한 것이다. 이 경우에 1, 2번 소유역은 모두 SWAT 모형으로 모의되므로 두 모형 모두 동일한 결과가 이용됨을 알 수 있고, 3번 소유역에 대하여 SWAT 모형 또는 SWMM 모형이 적용되었다는 차이가 있다. 또한 SWAT 모형의 경우는 1, 2번 소유역으로부터 하도추적된 유출량과 3번 소유역의 소유역 유출량을 합한 후, 이 합이 3번 소유역의 주 수로에 유입된다고 가정하여 SWAT 모형에 포함된 변동저류추적법 또는 Muskingum 방법에 의해 하도추적이 이루어지나, SWAT-SWMM 결합모형에서는 1, 2번 소유

역 유출량이 그림 2의 20번 수로에 유입되고, 각각의 도시 소유역에서 추적된 소유역 유출량은 각각의 수로/관에 유입되어 비선형 저류방정식과 Manning 식에 의해 하도추적이 이루어진다. 즉, 대상유역의 출구에서 유출량은 3번의 도시 소유역에 대하여 두 모형에 의해 모의된 소유역 유출량과 하도 또는 수로/관에 대한 하도추적방법이 서로 다름을 알 수 있다.

그림 12에서 알 수 있는 바와 같이 SWAT 모형에 의한 모의결과가 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 모의결과 보다 건기의 하천유량(기저유량)이 더 큰 것으로 분석되었는데, 이는 토양유출 부분에서 설명한 바와 같이 SWAT 모형의 경우 지하수 유출량이 연중 꾸준히 유출되기 때문이다. 표 4는 SWAT 모형과 SWAT-SWMM 결합모형에 대하여 유역출구에서의 유출량 특성을 나타낸 것이다. 표 4에 제시된 바와 같이 유출체적은 SWAT 모형에 의한 모의결과가 약간 큰 것으로 분석되었으며, 유출률은 SWAT 모형의 경우 50.1~69.0%, SWAT-SWMM 결합모형은 48.2~68.5% 정도였다. 두 모형에 의해 산정된 유출체적과 유출률은 SWAT-SWMM 결합모형에 의해 모의된 결과보다 SWAT 모형에 의해 모의된 결과가 약 0.7~4.3% 정도 큰 반면, 침투유출량은 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 모의결과가 SWAT 모형에 의한 모의결과보다 32.6~52.6% 정도 크게 산정되었다. 이는 두 모형에서 이용되는 하도 또는 수로/관의 추적방법이 다르고, 도시 소유역의 경우, SWAT 모형보다 SWAT-SWMM 모형의 적용시 더 많은 수로/관이 고려된 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

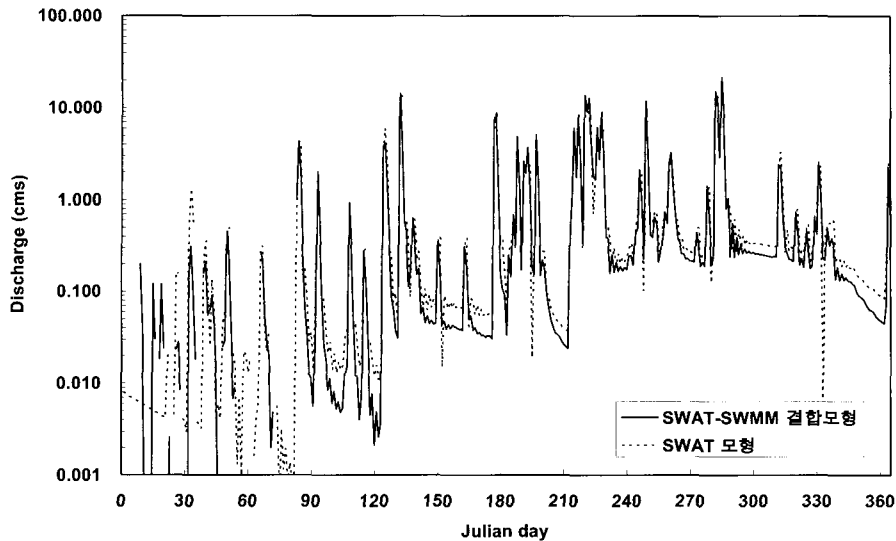


그림 12. 하도 유출량

표 4. 연도별 하도유출량의 비교

구 분		1985	1986	1987
면적 (km ²)		47.95		
평균강우량 (mm)		1056.5	777.3	1267.0
강우체적(10 ⁶ ×m ³)		50.67	37.3	60.8
SWAT 모형	유출체적(10 ⁶ ×m ³)	27.6	18.7	42.0
	유출률(%)	54.5	50.1	69.0
	침투유출(m ³ /s)	14.9	17.1	40.6
SWAT-SWMM 결합모형	유출체적(10 ⁶ ×m ³)	26.5	18.0	41.6
	유출률(%)	52.2	48.2	68.5
	침투유출(m ³ /s)	21.5	26.1	53.8

4. 요약 및 결론

장기 유역유출 모형인 SWAT에 도시지역의 영향을 적절히 고려할 수 있도록 SWMM 모형을 포함시킨 SWAT-SWMM 결합모형을 테스트하기 위해 경안천유역내 오산천유역에 적용하였다. 이로부터 SWAT 모형과 SWAT-SWMM 결합모형에 의한 수문성분(지표수, 지하수, 하천유출, 증발산 등)을 비교·분석하였고, 각 모형이 수문순환요소를 모식하는 방법을 상세히 검토하였다. SWAT-SWMM 결합모형의 적용결과는 다음과 같으며, 이 결과는 관측 유출량에 의해 매개변수가 보정된 상태가 아니라, 두 모형의 입력자료를 유사하게 했을 때 얻어지는 개개 수문성분량의 특성을 비교·평가한 것이다.

1) 증발산량은 SWMM 모형으로 모의된 경우, 일별

로 0.8 mm 정도 일정하게 유지하는 경향이 있었는데 이는 최대 증발산량을 비포화지대의 최대 토양증발량과 포화지대의 최대 식물증산을 구분하는 방식과, 증발산량의 산정시 식생, 토양수분, 온도 등의 저항요소가 고려되지 않았기 때문이다. SWAT 모형의 경우, 상당히 복잡하고 정교한 방식으로 증발산량을 모식함에도 불구하고 도시지역의 불투수지역에 대한 고려가 되지 않는 문제점이 있다.

2) 지표면 유출량은 SWAT 모형에 의해 모의된 결과가 크게 산정되었고, 지표면 유출량의 침투는 SWAT-SWMM 결합모형에 의해 모의된 결과보다 1.5배정도 크게 산정되었다. 이러한 차이는 입력자료의 차이와 지표면 유출량과 침투량을 분리하는 방식 및 침투능 회복방법, 토양수분 등의 영

향인 것으로 판단된다.

- 3) 토양유출량은 SWAT-SWMM 결합모형에 의해 모의된 결과가 크게 산정되었고, 침투유출량은 SWAT 모형에 의해 모의된 결과보다 3~4배정도 크게 나타났다. 그 이유는 지표면 유출량과 침투량의 분리방법의 차이에 있고, 토양으로부터의 침투유출량의 차이와 지표면으로부터의 침투유출량의 차이는 양적으로 유사하다. 또한 강우가 비교적 적은 건기에 SWAT 모형에 의한 모의결과는 지표면 유출량의 영향으로 유출이 발생하고, 작지만 연중 지하수 유출이 이루어진다. 반면 SWMM 모형은 건기의 강우에 대하여 지하수 유출이 이루어지지 않으며, 연중 발생하는 지하수 유출 역시 거의 발생하지 않았다.
- 4) 소유역 유출량은 지표면 유출량과 토양유출량의 합이며, 두 모형에 의한 소유역 유출량은 거의 유사한 경향을 보였다. 다만 건기의 경우는 토양유출의 특성으로 SWAT 모형에 의한 유출량이 상대적으로 컸다.
- 5) 하도유출량의 차이는 도시 소유역의 유출량과 하도추적 방식에 의존하며, 유출체적 및 유출률은 두 모형의 모의결과가 유사하나, SWAT 모형에 의해 모의된 결과가 약간 컸다. 반면 침투유출량은 SWAT-SWMM 모형에 의한 모의결과가 상당히 크게 산정되었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- 김남원, 원유승(2004). "SWAT-SWMM 결합모형의 개발 - (I) 모형의 개발", **한국수자원학회 논문집**, Vol. 37, No. 7, pp. 589-598.
- 김남원, 정일문, 원유승(2004a). "완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 - (I) 모형의 개발", **한국수자원학회 논문집**, Vol. 37, No. 6, pp. 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승(2004b). "완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 - (II) 모형의 평가", **한국수자원학회 논문집**, Vol. 37, No. 6, pp. 509-515.
- 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.
- Di Luzio, M., R. Srinivasan, J. G. Arnold(2001). *ArcView Interface for SWAT2000 User's Guide*.
- Dunne, T., and Leopold, L. B.(1978). *Water in environmental planning*, Freeman, New York.
- Habor, J. M.(1994). "A Practical Method for Estimating the Impact of Land-Use Change on Surface Runoff, Groundwater Recharge and Wetland Hydrology", *Journal of American Planning Association*, Vol. 60, No. 1, pp. 95-108.
- 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.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams(2001a). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Document Version 2000*.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams(2001b). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000*.
- Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger and R. I. Papendick(1986). "Estimating Generalized Soil-Water Characteristics from Texture", *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 50(4), pp. 1031-1036.
- Sophocleous, M. S., S. P. Perkins, N. G. Stadnyk, and R. S. Kaushal. (1997). *Lower Republican Stream-Aquifer Project*, Final Report; Kansas Geological Survey Open File Report 97-8, 1930 Constant Avenue, University of Kansas, Lawrence, KS 66047-3726.
- SDI Environmental Service, Inc. (1997). *Water Resource Evaluation and Integrated Hydrologic Model of the Central Northern Tampa Bay Region*, Final Report ISGW/CNTB Model SDE Project No. WCF-690, Prepared for West Coast Regional Water Supply Authority, Clearwater Florida.
- Swain, E. D. and E. J. Wexler. (1996). *A Coupled Surface-water and Ground-water Flow Model (MODBRANCH) for Simulation of Stream-Aquifer Interaction*, U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A6, pp. 125.

Walesh, S. G.(1989). *Urban Surface Water Management*. New York, John Wiley and Sons.

Walton, R., E. J. Wexler and R. S. Chapman. (1999). *MODNET: An Integrated Groundwater/Open-*

Channel Flow Model, prepared by WEST Consultants, Inc.

(논문번호:04-51/접수:2004.05.04/심사완료:2004.06.30)