

SWAT 모형의 유출성분 계산 모듈의 개선 및 효과분석

Enhancement of runoff estimation module in SWAT

김남원*, 이정우**

Nam Won Kim, Jeongwoo Lee

요 지

SWAT 모형에서는 토양수량을 고려하여 유출곡선지수법에 따라 지표유출량과 침투량을 계산하고, 계산된 침투량이 토양수대가 받을 수 있는 최대용량인 토양수 최대보수용량(soil water capacity)을 초과할 경우에는 그 초과분을 강제적으로 토양수량에 더해지도록 처리하고 있다. 즉, 초과침투량이 연직 아래로만 유입되는 것으로 간주하고 있다. 이러한 방식은 경사가 매우 완만한 경우에는 적합하다고 할 수 있으나, 국내 유역에서와 같이 비교적 유역 경사가 급한 경우에는 지표유출량이 작게 계산될 수 있으며 특히 집중호우시 강우에 대한 유출 응답이 둔감하게 모의되어 홍수기 큰 강우로 인해 급격하게 증가하는 유출량을 잘 모사하지 못하게 되는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 홍수기 큰 강우에 대해서 유출량이 민감하게 반응할 수 있도록 초과침투량 재분배 모듈(Redistributing EXcessive INFiltration module, 이하 SWAT-REXINF)을 개발하였다. 이 모듈은 토양층의 보수능을 초과하는 침투량 처리 방식을 개선한 것으로 지표유출의 집중시간과 토양수의 침투 유하시간의 상대적인 크기에 따라 초과침투량을 분배하여 지표유출량과 침투량에 할당하는 방식을 취하고 있다. 개발 모듈 SWAT-REXINF을 기 개발한 시간가중평균 유출곡선지수법에 의한 지표유출계산법과 집합-분리 방식의 토양층 구조화 기법 등의 유출계산 개선 기법과 접목하여 그 효과를 충주댐 유역에 대해 분석하였다. 시간가중평균 유출곡선지수법에 의한 지표유출계산법과 집합-분리 방식의 토양층 구조화 기법 등 다른 유출 개선 기법과 혼용하여 적용할 경우에는 지표유출량이 약 2배 증가, 침투유량은 20~50% 증가하는 등 개선 효과가 매우 크게 나타났다. 모형 개선으로 인해서 강우량에 대한 유출량의 응답 민감도를 증가시켜 유출수문곡선의 증감을 보다 용이하게 모의할 수 있고 정확도 또한 높일 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : SWAT 모형, 유출 응답, 초과침투량, SWAT-REXINF

1. 서 론

SWAT 모형에서는 중간유출, 침투, 토양 증발, 식물에 의한 증산 등의 수문과정을 모사하기 위해서 토양수대를 토양의 물리적 특성에 따라 몇 개의 층으로 구분하고 각 층별로 순차적으로 수문성분량을 계산하고 있다. 토양수대로 유입되는 모의 침투량이 토양수대가 받을 수 있는 최대용량(soil water capacity)를 초과할 경우에는 그 초과분 즉, 초과침투량(excessive infiltration)을 토양수량에 더해지도록 처리하고 있다. 그러나 이러한 초과침투량 처리 방식은 침투량은 크게, 상대적으로 지표유출량은 작게 계산되게 하기 때문에 홍수기 큰 강우로 인해 급격하게 증가하는 유출량을 모사하는데 한계가 있다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위해서 본 연구에서는 초과침투량 재분배 모듈(Redistributing EXcessive INFiltration module, 이하 SWAT-REXINF)을 새롭게 개발하여 SWAT에 추가하고 이의 충주댐 유역을 대상으로 개선 효과를 검토하였다.

* 한국건설기술연구원 연구위원 E-mail : nwkim@kict.re.kr

** 한국건설기술연구원 수석연구원 E-mail : ljjw2961@kict.re.kr

2. 지표유출 집중시간과 침투 유하시간을 고려한 초과침투량 분배 기법 개발

SWAT 모형에서는 지면위에 내린 강우량을 지표유출량과 침투량으로 분리하기 위해서 토양수량의 함수에 따라 일별로 변하는 수정 SCS 유출곡선지수법을 사용하고 있으며, SWAT의 한국형 모형인 SWAT-K에서는 침투유출량의 정확도를 높이고 금일 발생한 강우량의 영향을 반영할 수 있도록 이를 개선한 시간가중평균 유출곡선지수법(Kim and Lee, 2008)을 따르고 있다. SWAT 및 SWAT-K에서는 강우량에 대해서 토양수량에 따라 결정된 유출곡선지수에 따라 지표유출량과 침투량을 계산하며, 이때 계산된 침투량이 토양수대의 최대보수용량을 초과하여 초과침투량이 발생할 경우에는 이 초과침투량이 연직 아래로만 유입되는 것으로 가정하여 그 전량을 토양수량에 더해지도록 처리하고 있다. 그러나 이 경우는 계산 시간 간격동안 지표유출량의 횡적 이동을 무시한 것으로 경사가 매우 완만한 경우에는 이 방법이 적합하다고 할 수 있으나 국내 유역에서와 같이 유역 경사가 다소 급한 경우에는 침투량은 크게 지표유출량은 상대적으로 작게 계산될 가능성이 있다. 한편, 도시유출해석 모형으로 잘 알려져 있고 현재는 장기유출해석을 위해 점차 이용이 증가하고 있는 SWMM에서는 초과침투량 전량을 지표유출량에 더해지도록 처리하고 있다. 즉 SWAT 보다 SWMM 방식이 지표유출량을 더 크게 계산되는 계산 구조를 가지고 있다. SWMM의 방식을 SWAT에 도입하면 지표유출량을 보다 크게 계산되도록 할 수 있다. 그러나 SWMM 방식은 계산 시간간격 동안 연직 이동을 고려하지 못한 것으로 침투량이 작아 지하수 함양량이 작게 계산될 수 있다. 초과침투량의 연직 이동을 제한하였기에 도시유역과 같이 토양층의 투수성과 보수능력이 매우 작으며 유역 경사가 매우 급한 유역에 최적화된 방법이다. 따라서 본 연구에서는 상기 두 방식을 접목하여 보다 일반적 조건에 적용 가능하도록 지표유출량의 집중시간(time of concentration)과 침투량의 유하시간(travel time)의 상대적인 크기에 따라 초과침투량을 나누어 갖도록 모형을 수정하였다.

모형에서 유출의 집중시간은 식 (1)과 같이 지표면 유출에 대한 집중시간(overland flow time of concentration)과 하도 유출에 대한 집중시간(channel flow time of concentration)의 합으로 결정된다.

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (1)$$

여기서, t_{conc} 는 소유역 또는 HRU에 대한 집중시간 (hr), t_{ov} 는 지표면 유출에 대한 집중시간 (hr), t_{ch} 는 하도유출에 대한 집중시간 (hr)이다. 각각의 집중시간은 SWAT에서 식 (2)와 식 (3)과 같이 계산된다.

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}} \quad (2)$$

여기서, L_{slp} 은 소유역 경사길이 (m), n 은 지표면 대한 Manning의 조도계수, slp 는 유역경사 (m/m)이다.

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad (3)$$

여기서, L 은 가장 먼 지점으로부터 소유역 출구까지의 하도길이 (km), n 은 하도에 대한 Manning의 조도계수, $Area$ 는 소유역 면적 (km²), slp_{ch} 는 하도경사 (m/m)이다. 식 (2)와 식 (3)을 개발하는데 사용된 몇몇 가정들이 명확하지는 않지만 수리학적 고려사항들을 기준으로 했기 때문에 순수한 경험식들에 비해 좀 더 신뢰성이 있다고 평가되고 있다(Neitsch 등, 2005). 소유역에서와 마찬가지로 HRU 단위에서도 상기와 동일한 방식을 따르고 있으며, SWAT의 서브루틴 hydroinit.f에서 계산된다.

모형에서 침투는 각 토양층에 대해서 계산된다. 토양수분함량이 층에서 포장용수량을 초과하게 되면 침투가 일어나며, 침투 유하시간은 각 토양층에 대해 다음 식 (4)와 같이 계산된다.

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (4)$$

여기서, TT_{perc} : 침투 유하시간(hrs), SAT_{ly} : 완전포화시 토양층에서의 수분량(mm), FC_{ly} : 포장용수량(mm), K_{sat} : 토양층에 대한 포화 수리전도도(mm/h)이다. 침투 유하시간은 SWAT의 서브루틴 soil_phys.f에서 계산된다.

본 연구에서 개발한 지표유출-침투량 분배 기법(Redistributing EXcessive INFiltration module, 이하 SWAT-REXINF)에서는 유출곡선지수법에 의해 산정된 침투량이 토양의 허용보수능력을 초과하여 초과침투량이 발생하였을 경우, 지표유출량의 집중시간은 식 (2)와 식(3)의 합으로 침투량의 유하시간은 식 (4)로부터 계산하고, 각 시간에 반비례하여 초과침투량을 분배하여 지표유출량과 침투량에 가감한다.

3. 모형의 개선 효과

개발 모듈 SWAT-REXINF를 기 개발된 Kim과 Lee (2008)의 시간가중평균 유출곡선지수법(temporally weighted average CN method, 이하 TWA-CN법)에 의한 지표유출계산법과 김남원과 이정우(2009)의 접합-분리 방식의 토양층 구조화 기법 등의 유출계산 개선 기법과 접목하여 그 효과를 분석하였다. 분석 대상구역은 남한강 상류인 충주댐 유역으로 선정하였고 모형의 구축에 대한 자세한 사항은 과학기술부 (2004) 보고서에 제시되어 있어 여기서는 생략하였다. 상대비교를 위해서 유출계산과 관련된 매개변수값은 모형에서 제공하는 디폴트 값을 모든 경우에 대해서 동일하게 사용하였다. 그림 1은 충주댐 유역에 대하여 계산된 지표유출량(Surface), 중간유출량(Lateral), 지하수유출량(Groundwater), 증발산량(Evapotranspiration), 총유출량(Total Yield) 등의 수문성분 발생량을 유출계산 구조개선 방법별로 비교하여 도시한 것이고, 그림에서와 같이 유출계산 구조 개선으로 인해 지표, 중간, 지하수 유출은 모형 개선 전(SWAT)에 비해 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 지표유출량의 경우 TWA-CN법에 의한 지표유출계산법, 지표유출 집중시간과 침투 유하시간을 고려한 초과침투량 분배 기법(present), 접합-분리 방식의 토양층 구조화 기법(adjustment of top soil layer) 등의 순으로 증가 효과가 컸다. 중간유출량과 지하수 유출량의 경우는 접합-분리 방식의 토양층 구조화 기법의 영향이 가장 컸다. 지표유출량의 증가는 주로 홍수기에 발생한 것으로 유출수문곡선의 침투부를 급격히 증가하는 양상을 잘 묘사할 수 있다. 주목할 점은 각 기법을 모두 적용하였을 경우 지표유출량은 거의 2배 증가하였고 중간유출량은 반으로 줄어드는 등 개별 효과에 비해 그 변화의 폭이 크게 발생하였다. 즉, 강우량에 대한 유출량의 응답 민감도를 증가시켜 유출수문곡선의 증감을 보다 용이하게 구현할 수 있음을 의미한다. 한편, 증발산량과 총유출량은 개선 전, 후에 크게 변하지 않았다. 모형 개선으로 인해 홍수기에 포장용수량 이상에 대해서는 토양수량의 변화폭이 크지만 포장용수량과 위조점 사이에서는 상대적으로 그 변화폭이 작기 때문에 포장용수량 이상의 토양수량에 대해서 발생하도록 모형화되어 있는 중간유출과 침투는 크게 변하지만 반면에 위조점 이상의 토양수량에 대해서 발생하도록 모형화되어 있는 증발산량은 모형 개선에 따른 영향이 작게 나타났다. 연간 총유출량은 증발산량의 변화가 크지 않고 지표, 중간, 지하수 유출의 가감에 따라 개선 전, 후에 거의 비슷하게 발생하였다. 연간 총유출량은 거의 변하지 않았더라도 유출구조 개선으로 인해 홍수기에는 크게 비홍수기에는 다소 작게 총유출량이 계산된다. 개선된 SWAT-K 모형은 연간 증발산량과 총유출량은 크게 변하지 않으면서 나머지 수문성분을 유연하게 배분할 수 있다.

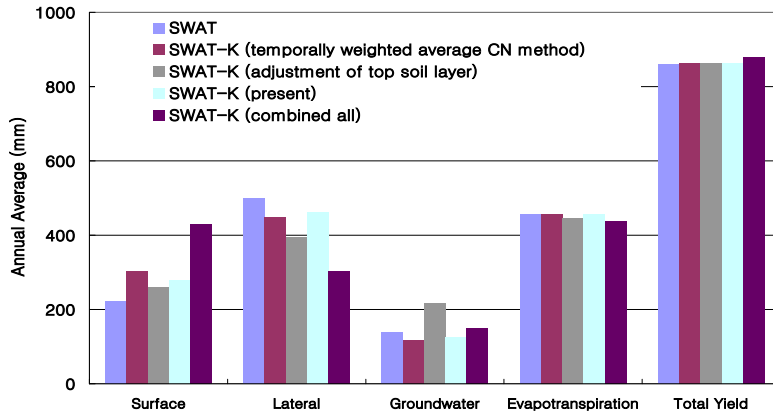


그림 1. 유출계산 구조개선에 따른 수문성분량 변화

그림 2 ~ 그림 4는 2002년부터 2003년까지의 모의 유출수문곡선을 관측치와 비교한 것으로 연한 실선은 관측치, 진한 실선은 SWAT-K 모의치, 진한 점선은 SWAT 모의치를 나타낸 것이다. 그림 2는 TWA-CN법에 의해 개선된 지표유출 계산모듈을 탑재한 SWAT-K에 의한 결과와 개선 전 SWAT 모형의 결과를 비교한 것으로 SWAT-K가 침투유량을 더 크게 모의하고 있다. 예를 들어 2002년 8, 9월에 발생한 두 번의 큰 침투치는 개선 전에 비해 약 14 ~ 15 % 만큼 증가하였다. 검토정을 실시하지 않았음에도 불구하고 SWAT-K 모의치가 관측치에 비교적 잘 적합하고 있으며 침투유량도 개선 전에 비해 더 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 지표유출 집중시간과 침투 유하시간을 고려한 초과침투량 분배 기법을 다른 개선 기법들과 함께 적용할 경우에는 그림 3과 같이 침투부 증가 효과가 매우 크게 나타났다. 2002년 8, 9월에 발생한 두 번의 큰 침투치는 개선 전에 비해 약 23 ~ 48 % 만큼 증가하였다. 모형의 개선으로 인해서 강우량에 대한 유출량의 응답 민감도를 증가시켜 유출수문곡선의 증감을 보다 용이하게 모의할 수 있으며, 국내 유역에서와 같이 비교적 경사가 급한 산지 유역에 적용할 경우 상당한 개선 효과를 기대할 수 있다.

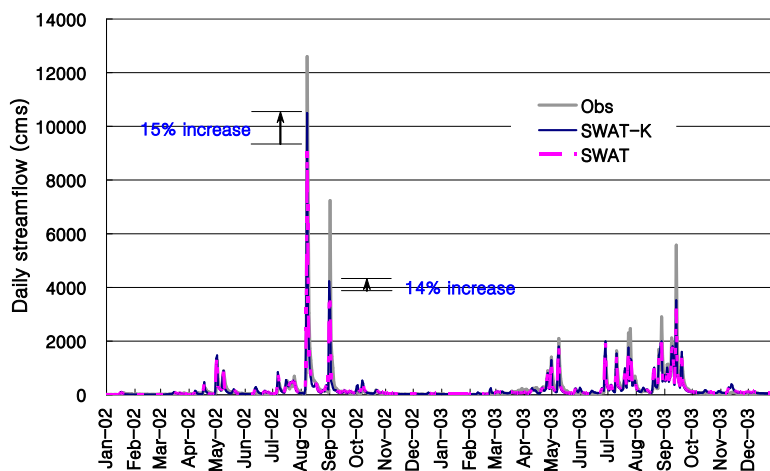


그림 2. 유출계산 구조개선 효과 (TWA-CN method)

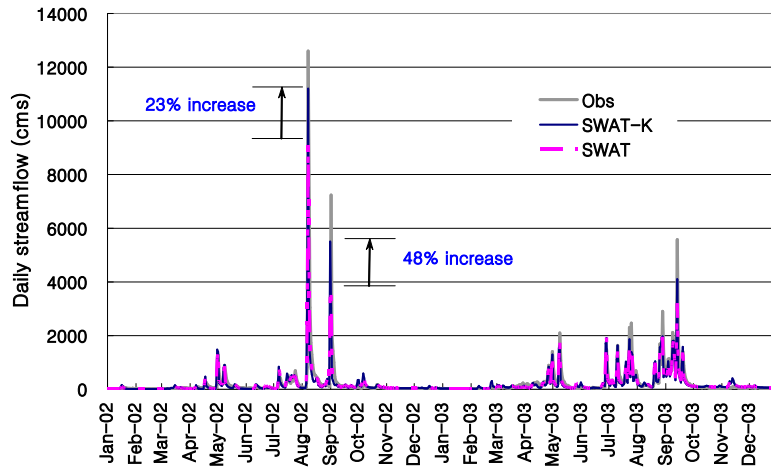


그림 3. 유출계산 구조개선 효과 (Combined all)

4. 결론

유출성분의 재현성을 보다 유연하게 하기 위해서 지표유출과 토양수 침투의 유하시간을 고려한 지표유출량과 침투량 계산 모듈을 개발하였고, 기 개발한 각종 유출 계산 개선 기법들과 접목하여 그 효과를 분석하였다. 지표유출과 토양수 침투의 유하시간을 고려한 지표유출량과 침투량 계산 모듈을 단독으로 SWAT-K에 적용한 경우에는 일 유출량 변화가 크지 않았으나, 시간가중평균 유출곡선지수법에 의한 지표유출계산법과 접합-분리 방식의 토양층 구조화 기법 등 다른 개선 기법과 함께 적용할 경우에는 침투부 증가 효과가 매우 크게 나타났다. 모형의 개선으로 인해서 강우량에 대한 유출량의 응답 민감도를 증가시켜 유출수문곡선의 증감을 보다 용이하게 모의할 수 있으며, 국내 유역에서와 같이 비교적 경사가 급한 산지 유역에 적용할 경우 상당한 개선 효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 과학기술부 (2007). 지표수 수문성분 해석기술 개발, 한국건설기술연구원.
2. 김남원, 이정우 (2008). "Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation." Hydrological Processes, Vol. 22, pp. 4936-4948.
3. 김남원, 이정우 (2009). "SWAT의 지표하 유출 계산 모듈의 개선." 한국수자원학회 학술발표회 논문집. pp. 1346-1350.