한국환경과학회지 제20권(제10호), 1347~1355, 2011 http://dx.doi.org/10.5322/JES.2011.20.10.1347
Journal of the Environmental Sciences

제주도 유출분석을 위한 한계유출 모의기법 개발

정일문* · 이정우 · 김지태 · 나한나 · 김남원
한국건설기술연구원 수자원연구실
(2011년 9월 22일 접수; 2011년 10월 18일 수정; 2011년 10월 21일 채택)

Development of Threshold Runoff Simulation Method for Runoff Analysis of Jeju Island

Il-Moon Chung*, Jeongwoo Lee, Ji-Tae Kim, Hanna Na, Nam-Won Kim
Department of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do 411-712, Korea
(Manuscript received 22 September, 2011; revised 18 October, 2011; accepted 21 October, 2011)

Abstract

In Jeju island, runoff has frequently happened when the rainfall depth is over a threshold value. To simulated this characteristic rainfall-runoff model structure has to be modified. In this study, the TRSM (Threshold Runoff Simulation Method) was developed to overcome the limitations of SWAT in applying to the hydrologic characteristics of Jeju island. When the precipitation and soil water are less than threshold value, we revised the SWAT routine not to make surface/lateral or groundwater discharge. For Hancheon watershed, the threshold value was set as 80% of soil water through the analysis of rainfall-runoff relationship. Through the simulation of test watershed, it was proven that TRSM performed much better in simulating pulse type stream flow for the Hancheon watershed.

Key Words : SWAT-K, Hancheon watershed, TRSM (Threshold Runoff Simulation Method)

1. 서 론

제주도의 연평균 강우량은 1,975 mm로서 우리나라 최대의 다우지역 중 한 곳인 반면, 급한 경사와 짧은 유로 연장 등의 하천 특성과 높은 투수성의 지질학적 특성으로 인해 집중호우시 짧은 기간 동안 유출이 발생하고 평상시 도내 대부분의 하천은 건천의 상태로 유지되고 있다. 제주도와 한국수자원공사(2003)에서는 제주 지역의 수자원평가를 위해 제주도수문지질 및 지하수자원 종합조사를 실시한 바 있으며, 이에 의하면 제주지역의 유출률은 강수대비 21%로 내륙에 비해 매우 낮은 특성을 보이며 지하수 함양량은 강수대비 54%로서 역시 내륙과는 상이하게 높은 지하수 함양률을 나타내고 있다. 이와 같이 제주 지역 수자원은 강수로부터 하천으로 유출되기 보다는 지하공극을 통해 대수층으로 유입되는 양이 커서 전체 수자원관리에 있어서 지하수의 중요성이 매우 크다.

제주형 수문해석 모형을 개발하기 위해서는 제주도 수문성분의 특성에 대한 정확한 분석과 현재 모형으로 어느 정도까지 모의할 수 있는지 그 제한성과 가능성에 대한 분석이 필요하다. 이러한 문제점 분석을 통해 모형을 개선하고 필요한 자료를 구축함으로써 제주도의 특수한 수문성분을 분석할 수 있는 모형을

*Corresponding author : Il-Moon Chung, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do 411-712, Korea
Phone: +82-31-910-0334
E-mail: imchung@kict.re.kr

개발할 수 있다.

이와 같은 특성을 갖는 제주지역의 유출해석을 수행하는데 있어 기존의 모형으로는 한계가 있다. 제주지역의 경우 일정한 강수량 또는 토양 수분 함수량에 도달하기 전까지는 지표 및 중간유출이 발생하지 않으므로 이를 분석하는데 기존 유출모의 패러다임으로는 설명이 불가하기 때문이다.

즉, 선행강우가 없거나 적은 경우, 다시 말해서 토양조건이 습하지 않는 경우에는 유출발생이 이뤄지지 않으며 강수량이 적더라도 선행토양습윤상태가 매우 습한 경우는 지표 유출이 발생할 수 있다. 제주는 하천과 대수층이 완전 분리되어 있으므로 지하수 유출은 거의 발생하지 않는 것으로 볼 수 있다. 다만 토양수분의 조건 및 강수량 조건에 따라 지표 또는 중간유출은 발생 가능하다. 실례로 40 mm의 강우조건에서도 지표유출이 발생한 경우도 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 SWAT 모형(Arnold 등, 1993)을 개선한 SWAT-K 모형(Kim 등, 2009)을 기반으로 수문분석을 수행한 후 기존 모형으로 구현할 수 없는 부분에 대해서는 한계 유출기법을 이용, SWAT-K 모형을 개선함으로써 향후 제주의 유출분석에 활용토록 제안하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. SWAT-K 모형의 개요

장기 강우-유출의 모형은 수자원계획과 효율적 물관리를 위하여 중요하다. 수문성분 해석기술의 상당부분이 선진국에서 오래된 연구를 통해서 개발되었고 개선되고 있기 때문에 기존의 모형들 중에서 활발하게 이용되고 있는 모형을 비교 · 평가하고, 적정모형을 선정하여 유역에 대한 적용성을 해석하였다. 이를 위해 장기 강우-유출 모형 중 SWAT-K 모형을 적용하여 유역물수지 분석을 수행하였다. 우리나라의 대부분이 산지로 이루어져 있으며 소하천을 가진 유역이 많은 것을 감안했을 때 이 모형을 통한 유역물수지 분석과 그 적용가능성의 평가는 중요할 것이다. 본 연구에서 활용하고자 하는 SWAT-K(Korea)모형은 미국농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Arnold 등(1993)에 의해 개발된 준분포형 장기 유역 수문모형 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 우리나라 특성에 맞도록 인위적, 자연적인 물순환 구조변화와 지표수-지하수 연계 해석 등을 개선하여, 강우·증발산·토양수분·지표수·지하수의 시공간적 분포를 정량적으로 산정하는 장기유출해석 모형이다. 특히 국내 토양통 DB를 자체적으로 구축하고 유출 구조를 개선한 한국형 모형이라고 할 수 있다(김 등, 2008).

2.2. SWAT-K 모형의 구조

SWAT에서 모의되는 수문순환은 다음과 같은 물수지 방정식에 근거하여 일별로 모의 된다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t와 SW_o는 각각 주어진 날의 최종 및 초기 토양 수분량(mm H_2O), t는 시간(일), R_{day}는 강수량(mm H_2O), Q_{surf}는 지표유출량(mm H_2O), E_a는 증발산량(mm H_2O), W_{seep}는 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm H2O), Q_{gw}는 회귀수량(mm H_2O)이다. SWAT 모형에서는 지표유출량 산정을 위해 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 제공하고 있으며, 증발산량 산정을 위해서는 Penman-Monteith 방법, Priestley- Taylor 방법, Hargreaves 방법의 세가지 방법이 제시되고 있다(Neitsch 등, 2001). 본 연구에서는 이 중에서 SCS 유출곡선법과 Penman-Monteith 방법을 이용해서 각각의 지표유출량과 증발산량을 계산하였다. 이외에도 SWAT 모형에는 토지 피복/식물 성장, 침식, 영양물질 및 살충제의 거동, 영농관리의 영향, 주 하천 및 하도, 저수지 추적 등이 포함되어 있다.

SWAT모형에서 모의되는 수문성분들은 물이 이동하는 경로에 따른 요소이다. 강수가 내리면, 식생에 의해 차단되고 부착되거나 지표면에 떨어진다. 지표면의 물은 토양층으로 침투되거나 지표면을 따라 흘러 상대적으로 빠르게 하도를 따라 유동한다. 침투된 물은 토양내에서 머물면서 증발산에 의해 이동하거나 지하 매질을 통해 하천으로 천천히 움직인다. 이러한 각각의 수문성분들은 차단저류, 침투, 재배분,

증발산, 잠재증발산, 측방지표하흐름, 지표유출, 침루, 지하수 함양 등으로 나눌 수 있다. SWAT 모형은 토지이용상태, 토양상태, 경사, 방향에 따라 수문학적 반응단위를 가지는 동질 유역으로 정의되는 HRU (Hydrological Response Unit)라는 분할개념을 이용하고 있다(Leavesley 등, 1983). 이와 같은 단위로 유역이 구분되면 여러 종류의 작물과 토양에 의한 다양한 증발산, 토양수분, 지하수 함양 등을 반영할 수 있다. 이러한 특징이 준 분포형 모형의 장점으로 각 HRU에서 수문성분의 발생량이 계산되고 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 소유역별 하도로 유입된다

2.3. 모델 입력 자료 구축

SWAT모형은 유역의 형상을 나타내는 수치표고모델(Digital Elevation Model; 이하 DEM), 유역내 토지이용상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필요로 한다. 본 연구에 구축한 DEM, 토지이용도, 토양도는 다음과 같다.

- 수치표고모델(DEM)

DEM은 일반적으로 격자형태로 만들어져 있으며 각 격자에는 표고값이 입력되어 있다. DEM은 수치지도를 이용하여 구축할 수 있으며, 현대에 들어와서 인공위성영상의 활용도가 높아지면서 위성영상을 활용하여 구축할 수도 있다. 본 연구에서는 모형의 계산시간, 모형결과의 정확도 등을 판단하여 30 m 공간해상도를 가지는 DEM을 100 m 공간해상도로가공하여 사용하였으며, 대상유역에 대한 DEM은 Fig. 1과 같다.

- 토지이용도

환경부에서는 대분류(1:50,000), 중분류(1:25,000), 세분류(1:5,000)의 해상도에 해당하는 토지이용도를 제공하고 있으며, 본 연구는 이 중 모의 시 다양한 토지이용상태를 반영할 수 있도록 중분류 토지이용도를 사용하였다. Fig. 2는 유역의 토지이용도를 DEM의 공간해상도인 100m로 가공한 것이다. 토지이용항목에 대한 면적은 Table 1과 같다.

- 토양도

토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다. Fig.3은 한천 유역에 대한 정밀토양도를 앞서 토지이용도와 같이 DEM과 동일한 공간해상도로 가공한 것으로서, 토양통의 종류는 43개이며 각 토양통에 대한 면적은 Table 2에 나타냈다.

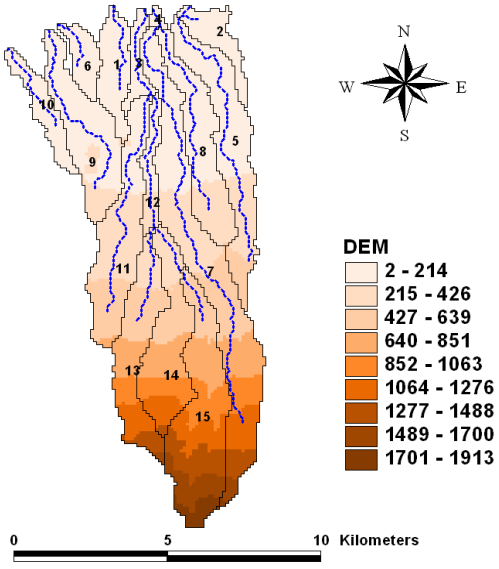

Fig. 1. Digital elevation map of Hancheon watershed.

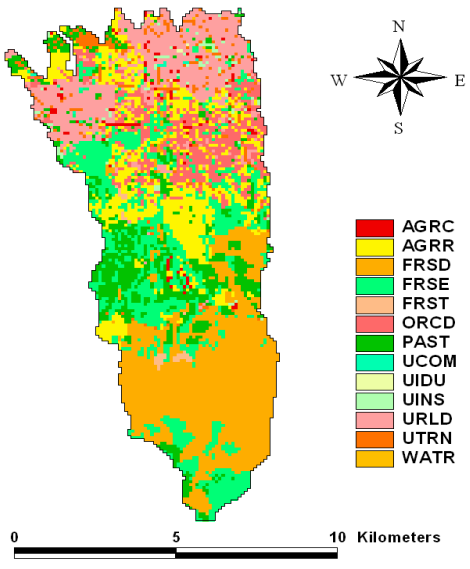

Fig. 2. Land use map of Hancheon watershed.

Table 1. Land use types and areas of Hancheon watershed

Items	Types	Area(Km^2)	Ratio(%)
PAST	Pasture	10.14	11.77
WATR	Water	0.06	0.07
UCOM	Commercial	0.13	0.15
UINS	Institutional	0.87	1.01
FRSD	Forest-Deciduous	22.73	26.36
FRSE	Forest-Evergreen	15.68	18.19
FRST	Forest-Mixed	0.43	0.5
AGRC	Agricultural Land-Close-grown	1.09	1.27
URLD	Residential-Low Density	11.85	13.75
UIDU	Industrial	0.04	0.05
UTRN	Transportation	2.75	3.19
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	12.64	14.66
ORCD	Orchard	7.79	9.03

Table 2. Hydrologic soil groups in Hancheon watershed

Name	Area(Km^2)	Ratio(%)	Name	Area(Km^2)	Ratio(%)
UDO	0.03	0.03	JUNGEOM	0.34	0.40
NAMWEON	0.10	0.12	IDO	4.38	5.08
PYEONGDAE	4.49	5.21	YEONGRAG	0.02	0.02
BYEONGAG	0.06	0.07	YONGDANG	0.17	0.20
SONGAG	1.72	2.00	DONGGUI	16.85	19.55
DAEHEUL	0.16	0.19	RB	4.12	4.78
JIGOG	0.08	0.09	AEWEOL	0.05	0.06
GUEOM	1.85	2.14	HANGYEONG	0.08	0.09
GEUMAG	0.69	0.80	Rock outcrop	0.17	0.20
GIMYEONG	0.08	0.09	WEOLPYEONG	0.07	0.08
NORO	0.03	0.03	HANRIM	0.25	0.29
MINAG	0.01	0.01	MUREUNG	0.61	0.71
ARA	0.13	0.15	JUNGMUN	2.91	3.38
SARA	0.92	1.07	ORA	8.81	10.22
TOSAN	1.58	1.83	JOCHEON	0.44	0.51
JEOGAG	0.07	0.08	GANGJEONG	0.44	0.51
JEJU	8.14	9.44	HEUGAG	13.85	16.06
NONGO	0.05	0.06	BRB	0.01	0.01
Water	0.03	0.03	GYORAE	0.99	1.14
YONGHEUNG	1.21	1.41	DONGHONG	3.91	4.54
GUNSAN	5.18	6.01	GUJWA	0.82	0.95
GAMSAN	0.29	0.34			

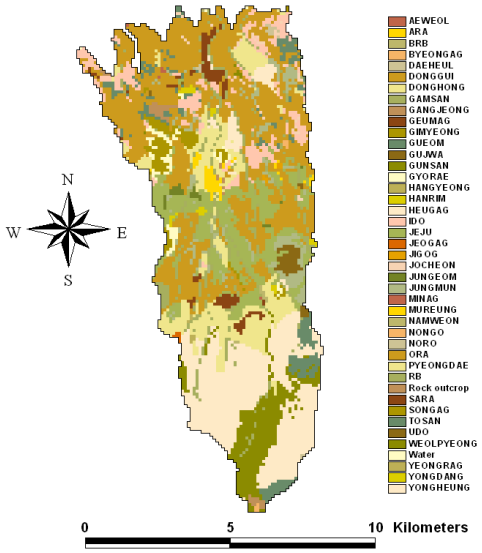

Fig. 3. Precise soil association map.

2.4. 한계유출 모의기법 개발

본 연구에서는 국내 최초로 제주 유출특성에 부합하는 유출 해석모델링을 수행하기 위해 한계유출 모의기법(Threshold Runoff Simulation Method - TRSM)을 제안하고자 한다. 제주는 하천과 대수층이 완전 분리되어 있으므로 지하수 유출은 거의 발생하지 않는 것으로 볼 수 있다. 다만 토양수분의 조건 및 강수량 조건에 따라 지표 또는 중간유출은 발생 가능하다. 이에 본 연구에서는 한계강수량과 한계토양수분량 이내인 경우 전량 침투되어 지표면 유출이 발생하지 않게 제어할 수 있도록 SWAT-K 모형을 수정하였고, 지표면유출이 발생하지 않으면(빠른흐름이 발생하지 않으면) 상대적으로 느린 흐름인 중간, 지하수 유출도 발생하지 않도록 모형을 개선하였다. 통상 선행강수량만을 이용해서 유출을 제어하는 경우를 상정할 수 있으나 SWAT-K모형의 장점이 토양수분모의가 가능한 것이기에 선행 토양수분조건을 검토할 때 선행강수량 대신 토양수분량을 직접 사용하였다. 또한 이와 같은 개선 사항을 한천유역을 기반으로 시험 적용하여 적용 전후결과의 타당성을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기존 모형에 의한 분석

제주지역의 경우 SWAT-K의 매개변수가 통상적인 값으로는 유출 결과를 모의할 수 없으며, 특히 토양 침투를 조절하는 CN2변수와 깊은 대수층으로의 침루를 조절하는 RCHRG_DP변수를 조절해야만 목적하는 유출량을 산정해 낼 수 있다. 예를 들어 한천유역에 대해서는 CN2의 변수범위를 제안범위인 8%증감을 훨씬 뛰어넘는 -30%에서 가장 적절한 유출량을 산정해 내는 것을 알 수 있었으며, 깊은 대수층으로의 침루 변수는 0.7일 때 적정한 유출량이 도출됨을 알 수 있었다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 개선된 토양자료와 면적강우 자료를 적용한 결과 모의 유출수문곡선이 관측 수문곡선과 상당히 일치하는 것을 볼 수 있다. 연도별로 살펴보아도 상당히 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 5~Fig. 7). 그러나 여전히 비강우시 건천이 되는 특성을 모의하고 있지 못하며 소규모 강우시 유출이 발생하지 않는 특성을 반영하지 못하고 있다.

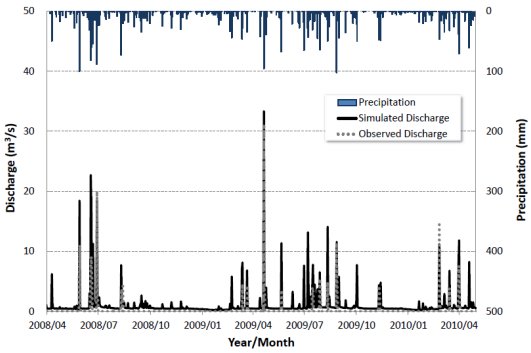

Fig. 4. Result of calibration by SWAT-K (2008-2010).

Table 3. Calibrated parameters (Hancheon wathershed)

Parameter	Definition	Median	Range	Calibrated value
CN2	SCS curve number	Default	±8%	-30%
RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0.05	None	0.7

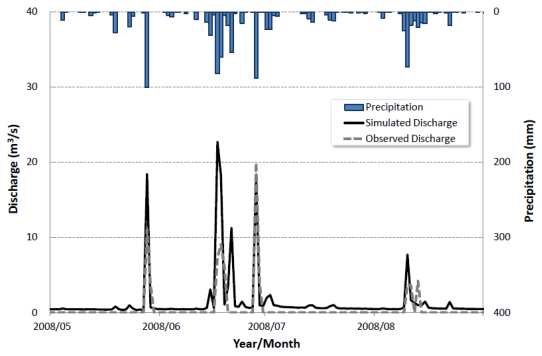

Fig. 5. Result of calibration by SWAT-K (2008).

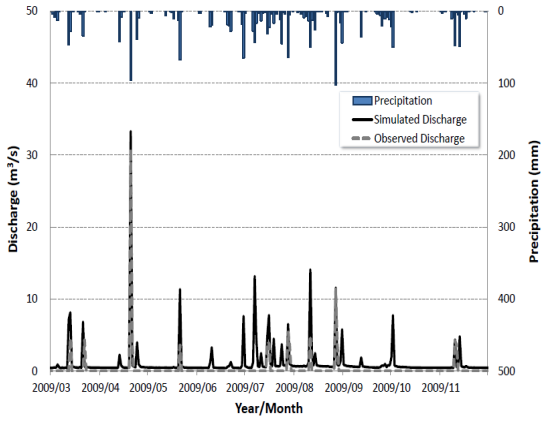

Fig. 6. Result of calibration by SWAT-K (2009).

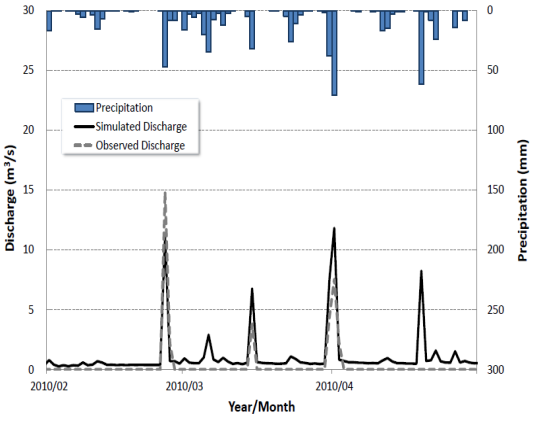

Fig. 7. Result of calibration by SWAT-K (2010).

모의 결과의 통계적 분석을 실시한 결과 결정계수 R^2는 0.64, 모형의 효율성 지수(ME:Model Efficiency)는 0.30으로 나타났다(Fig. 8).

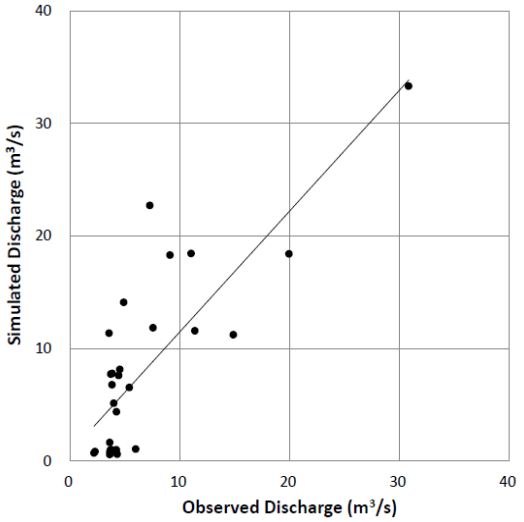

Fig. 8. Statistical result of calibration (R^2=0.64, ME=0.30).

3.2. 한계유출 모의기법 개발 및 적용

한계유출 모의기법을 한천 유역에 적용하여 분석하였다. 먼저 관측강우와 유출량과의 관계를 분석하였다(Fig. 9).

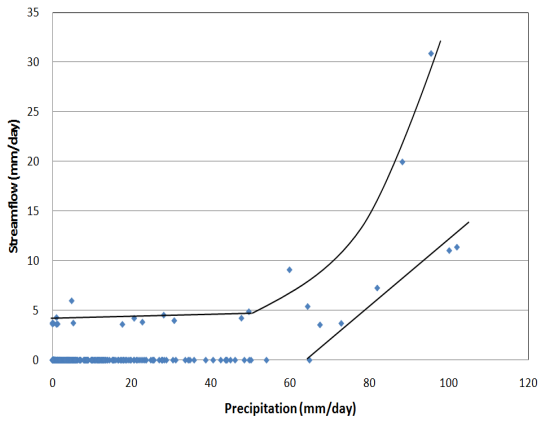

Fig. 9. Rainfall-runoff relationship in Hancheon watershed.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 강수와 유출량은 다음과 같은 두 가지 양상으로 요약할 수 있다. 첫째, 65 mm까지 유출이 없다가 65 mm 초과 후 선형 증가하는 양상, 둘째, 50 mm 이내에서 약 5 mm 로 발생하다가 50 mm 초과 후 지수형으로 증가하는 양상으로 대별된다.

자료 분석을 통해 살펴보면 첫 번째 경우는 선행강수가 없거나 매우 작을 때 발생하며, 두 번째 경우는 장마철 등 선행강수가 상당량 존재하는 경우에 발생하였다. 즉, 평상시(건기포함)는 65 mm 까지는 유출이 전혀 발생하지 않지만, 우기 장마철 (융설기 포함) 등 선행강수가 발생한 경우는 유출이 발생하는 것으로 검토됐다. 따라서 위의 두 가지 한계값으로 제약조건을 설정하여 SWAT-K를 수정하였다. 즉, 강수량이 한계강수량보다 작고, 전날토양수분량이 포화토양수분량의 특정 비율이하이면 지표면유출, 중간유출, 지하수유출이 발생하지 않도록 하였다 (Fig. 10의 Case 1). 한계강수량은 유역평균은 65 mm이나 관측값을 참고로 하여 소유역별로 다르게 부여할 수 있을 것이다.

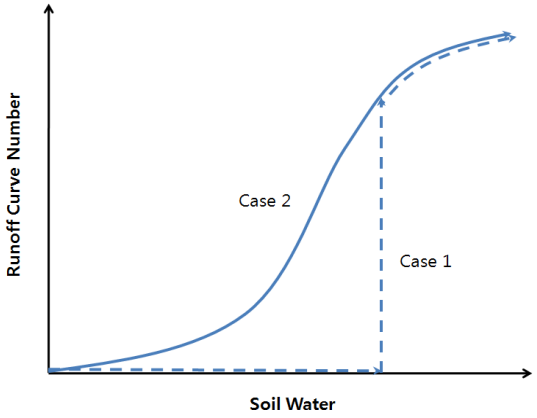

Fig. 10. Soil water-runoff curve number relationship.

다음 Fig. 11은 한계유출 기법을 적용하여 선행토양수분비율이 80%일 때 관측치와 모의치를 비교한 결과로서 모의 유출수문곡선이 관측 수문곡선과 상당히 일치하는 것을 보여줌으로써 모형의 수정이 유출량 모의개선에 크게 기여했음을 볼 수 있다. 연도별 수문곡선 비교에서도 양호한 결과를 확인할 수 있다 (Fig. 12 - Fig. 14)

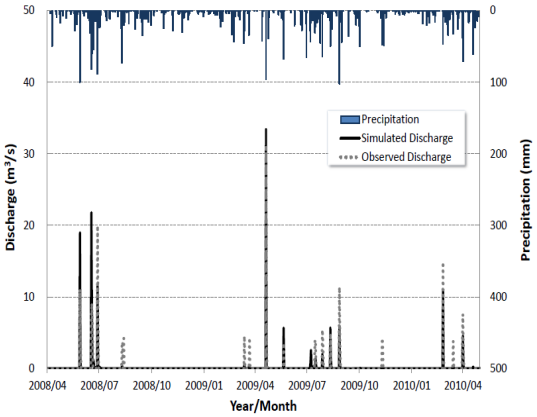

Fig. 11. Result of calibration by modified SWAT-K (2008-2010).

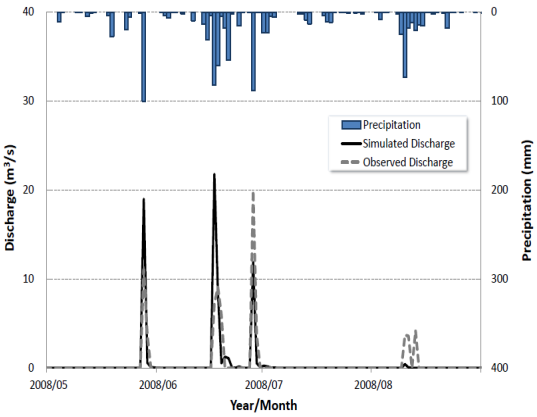

Fig. 12. Result of calibration by modified SWAT-K (2008).

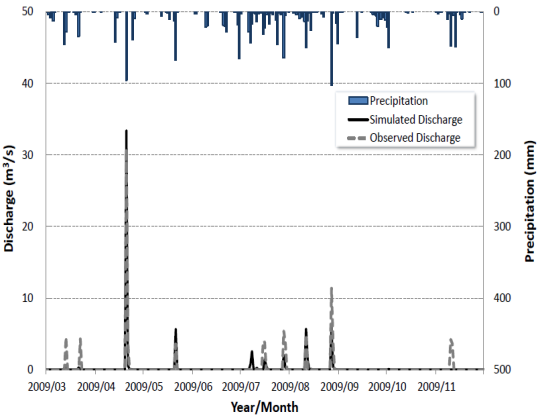

Fig. 13. Result of calibration by modified SWAT-K (2009).

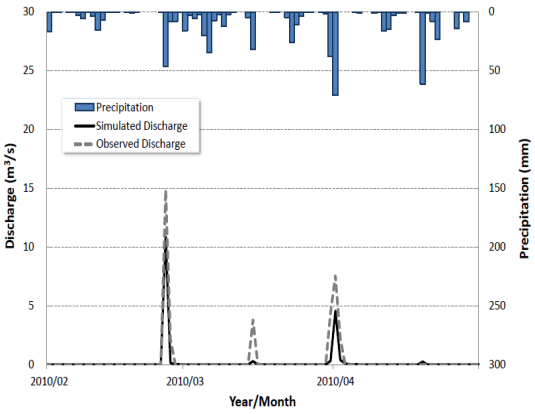

Fig. 14. Result of calibration by modified SWAT-K (2010).

한계유출 모의기법 적용결과에 대해 관측값에 대한 모의값의 통계분석을 실시한 결과 결정계수 0.74, 모형효율 ME는 0.71로 모의결과가 상당히 개선되었음을 알 수 있었다(Fig. 15).

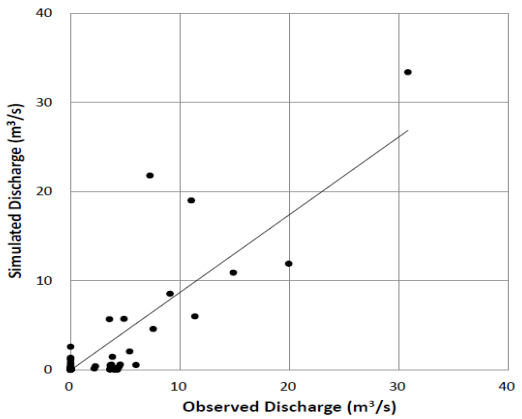

Fig. 15. Statistical result of calibration (R^2=0.74, ME=0.71).

한계유출 모의기법을 적용하여 분석한 수문성분 해석 결과를 Table 4에 제시하였다. 이와 같이 본 연구에서 개발된 한계유출 모의기법은 한천 유역을 대상으로 매우 성공적으로 적용된 바, 향후 관측치 수집여부에 따라 보다 정교한 분석이 가능해 질 수 있고 타 유역으로도 확장 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

유역별로 일정규모 이상의 강우 발생시에만 간헐적으로 유출이 발생하는 제주도 하천의 특성을 모의하기 위해서는 보다 근원적인 모형의 구조개선이 필요하며 이를 위해 제주형 한계유출 모의기법(TRSM)을 새롭게 제시하였다. 이러한 제주형 한계유출 모의기법을 개발하여 한계강수량과 한계토양수분량 이내인 경우 전량 침투되어 지표면 유출이 발생하지 않게 제어할 수 있도록 모형 구조를 개선하였고, 지표면유출이 발생하지 않으면 상대적으로 느린 흐름인 중간, 지하수 유출도 발생하지 않도록 모형을 개선하였다. TRSM 기법을 SWAT모형에 반영하고 개선된 검보정 방법을 복합 적용하여 한천유역에 적용한 결과 소규모 강우시의 유출현상을 잘 모의할 수 있는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통평가원의 지역개발혁신연구사업인 '제주형 물순환 해석 및 수자원 관리기반 구축' 연구단의 제2세부과제의 연구결과로서 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김남원, 이지은, 정일문, 김동필, 2008. SWAT-K 모형을 이용한 설마천 유역의 수문성분 해석, 한국환경공학회지 17(12), 1363-1372.

제주도/한국수자원공사, 2003. 제주도수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ.

Table 4. Hydrologic components by SWAT-K (TRSM)

Rainfall (mm)	Surface runoff (mm)	Evapotranspira-tion (mm)	Lateral flow (mm)	Recharge (mm)
2502.6 (100%)	537.06 (21.5%)	829.6 (33.1%)	39.68 (1.6%)	1130.54 (45.2%)

Arnold, J. G., Allen, P. M., Bernhardt, G., 1993, A comprehensive surface-groundwater flow model, Journal of Hydrology, 142, 47-69.

Kim, N. W., Chung, I. M., Kim, C., Lee, J., Lee, J. E., 2009, Development and applications of SWAT-K (Korea), in: Arnold, J. et al.(eds.), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications, Special Publication No. 4, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, Thailand.

Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., Saindon, L. G., 1983, Precipitation- runoff modeling system: user's manual. US Geological Survey, Water- Resources Investigations Report 83-4238, 207.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Willams, J. R., 2001, Soil and Water Assessment Tool: the theorical doccumentation (version 2000), U.S. Agicultural Reasearch Service.