

SWAT을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가**An Evaluation of Snowmelt Effects Using SWAT in Chungju Dam Basin**

김남원* / 이병주** / 이정은***

Kim, Nam Won / Lee, Byong Ju / Lee, Jeong Eun

Abstract

The objective of this study is to evaluate the snowmelt effects on the hydrological components, especially on the runoff, by using the soil water assessment tool(SWAT) which is a continuous semi-distributed long term rainfall-runoff model. The model was applied to the basin located in the upstream of the Chungju Dam. Some parameters in the snowmelt algorithm were estimated for the Chungju basin in order to reflect the snowmelt effects. The snowmelt effects were assessed by comparing the simulated runoff with the observed runoff data at the outlet of the basin. It was found out that the simulated runoff with considering the snowmelt component matches more satisfactorily to the observed one than without considering snowmelt effect. The simulation results revealed that the snowmelt effects were noticeable on March and April. Similar results were obtained at other two upstream gauging points. The effect of the elevation bands which distribute temperature and precipitation with elevation was analyzed. This study also showed that the snowmelt effect significantly affects the temporal distribution as well as quantity of the hydrological components. The simulated runoff was very sensitive to the change of temperature near the threshold temperature which the snowmelt can occur. However, the reason was not accounted for this paper. Therefore, further analyses related to this feature are needed.

keywords : SWAT, snowmelt, Chungju Dam Basin

요 지

본 연구는 준 분포형 장기유출모형인 SWAT 모형을 이용하여 용설모의에 따른 유출 및 수문성분의 영향을 분석하고자 하는데 그 목적이 있다. 대상유역으로는 충주댐 유역을 선정하였으며 용설 매개변수를 산정하였다. 충주댐 지점에서의 관측유량과 용설모의 전후의 모의유량을 비교한 결과 용설모의를 수행한 유출거동이 관측치와 유사하게 모의되었으며, 특히 3, 4월에 용설 영향이 큰 것으로 나타났다. 상류유역 2개 지점에 대해서도 유사한 결과를 보였다. 또한, 용설 모의시 표고밴드 설정에 따른 영향을 분석하였으며, 용설 고려에 따른 각 수문성분들이 시간적, 양적으로 다른 거동을 보이는 것을 제시하였다. 다만, 용설 모의시 용설 발생 임계온도 전후의 온도변화에 따라 유출량이 민감하게 반응하는 문제가 도출되었으며, 이는 향후 연구를 통해 개선되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : SWAT, 용설, 충주댐유역.

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

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

1. 서 론

수자원계획 및 평가에서 장기유출모의 해석은 시·공간적으로 미계측 유역의 유량을 파악하는 물론 이·치수, 그리고 오염 해석 등의 기본자료를 제공하는 역할을 한다. 이를 위해 여러 유출모형이 개발 및 적용되고 있으나, 국내의 경우 대체로 탱크모형과 같은 집중형 유출모형이 이용되고 있는 실정이다. 이러한 집중형 모형은 주어진 지점에서 사실상 시간적인 미계측 형태를 잘 모의할 수 있으나 공간적으로 변화하거나, 인위적인 토지이용 등의 해석에는 충분한 모의를 할 수 없는 구조적 한계점이 있다. 특히 우리나라의 경우 사계절이 뚜렷하여 갈수기에 해당하는 1~5월에 용설의 효과가 유출모의 및 수문성분해석에 상당히 영향을 미치고 있음에도 불구하고 이에 대한 해석도 충분치 않은 실정이다.

국내 수자원 계획에서 이용되고 있는 용설에 대한 해석은 강우-유출의 절대적인 총량이 불변하기 때문에 크게 영향을 미치지 않을 것이라는 지배적인 견해이다. 이것은 수문관측의 부정확으로 인하여(김남원, 1998) 용설 효과가 수자원실무에 큰 영향을 못 미친다고 보았기 때문이다. 그러나 하천유지유량, 우수점용기준, 기준유량설정 등에 절대적인 영향을 미치는 갈수량은 사실상 용설 효과에 의해 크게 좌우될 수 있다. 단지, 우리수문관측으로 이러한 영향을 충분히 파악하고 있지 못하고 있기 때문에 그 정도가 알려지지 않고 있을 뿐이다.

더욱이, 용설을 고려한 장기유출모의에 대한 연구는 미비한 실정이다. 배덕효와 오재호(1998)는 미국 국립기상청의 온도지수 용설모형을 소양강 제1지류인 내린천 유역에 적용하였으나 정성적인 분석에 그쳤으며, 이상호 등(2003)은 소양강댐과 충주댐 유역에 탱크모형을 적용하여 집중형 모형에서 유출모의 가능성을 비추어 해석하였다.

본 연구에서는 용설 영향에 대한 구체적인 평가를 위해 준 분포형 장기유출 모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 충주댐 유역에 적용하였으며, 용설 효과를 고려할 경우 강우-유출 관계를 좀 더 세밀히 모사할 수 있음을 제시하는 한편, 강우-유출 모형에서 용설을 고려할 경우의 중요한 매개변수에 대해서 고찰하고자 하였다.

2. 기본이론

2.1 수문학적 모형

실측 자료에 근거한 것이 아닌 형태로서 용설 효과를 좀 더 구체화하기 위한 방법은 어떤 목적과 어떤 형

태로 유출 현상을 파악하느냐에 따라 결정된다. 본 연구에서는 인위적인 토지이용상태나 수문환경변화에 따라 유출과 유사는 물론 영양물질의 거동까지 복합적인 수자원관리를 할 수 있는 SWAT모형을 선정하여, 용설 효과의 구체성을 검토하고자 하였다. SWAT모형은 미국 농무성(ARS)에서 개발되었고 국내의 적용성은 김남원 등(2004a, 2004b)에 의해서 충분히 입증된 바 있다.

유출거동이 강우의 변화는 물론 지형, 지질적인 형태에 크게 영향을 받고 있기 때문에 장기간의 수문학적 모의를 위해서는 기상, 토양형태, 토지이용, 토지피복, 지형 및 지질자료 등에 대한 정보가 필요하며, 이에 따라서 시간적인 해석은 물론 공간적인 수문성분의 모의가 이루어진다. 이러한 성분별 모의를 위해 전체 유역을 소유역으로 구분하고, 각 소유역에 대해 동일한 토양형과 토지피복을 갖는 면적별로 구분하여 동일한 유출현상을 갖는 단위로 구분하는데, 이를 수문학적 반응 단위(Hydrologic Response Unit; 이하 HRU)라 한다. 따라서 SWAT 모형은 모든 수문성분에 대해서 각 HRU별로 모의를 하며 이는 해당 소유역의 주하도 유입량이 된다. 이렇게 각 소유역에 대해서 계산단위시간(Δt)동안 해당 HRU들로부터 들어온 유입량은 소유역 주하도의 하도추적을 통해 각 소유역 유출량이 된다. SWAT 이론에 대한 자세한 내용은 Neitsch et al.(2001), 과학기술부(2004)에 언급되어 있다.

SWAT 모형의 수문학적 모의 절차는 다음의 5가지 과정, (1) 강수차단, (2) 지표수, (3) 토양과 뿌리대의 침투, (4) 증발산과 토양과 눈의 증발, (5) 지하수에 의해 구동되며, 토양수분 변화량에 따른 기본적인 물수지 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\Delta SW = P - Q - ET - DP - QR \quad (1)$$

여기서, P는 강수량, Q는 유출량, ET는 증발산량, DP는 침투량, QR은 하천으로의 회귀수를 나타낸다.

지표수 유출량은 토양수분량이 고려된 SCS 유출곡선지수(Curve Number; 이하 CN) 방법이 이용된다. 기존에 이 방법은 토양형, 토지이용 및 관리, 유출량의 관계로부터 산정되나 SWAT 모형에서는 이러한 관계에 토양수분 변화량을 고려하여 계산단위에 대한 CN값을 산정하게 된다.

식물, 토양, 눈의 증발은 잠재증발산량로부터 각각 산정되고, 식물의 증산은 가용토양수분, 엽면적지수, 잠재증발산량에 관한 함수로부터 산정된다. 잠재증발산은 Penman Monteith, Priestley Taylor, Hargreaves의 3가지 방법으로 산정할 수 있으며 통상 Penman Monteith

방법이 가장 많이 이용된다. 이 방법은 일사량, 기온, 상대습도, 풍속 등의 자료가 필요하며, 이러한 자료들은 기상청으로부터 제공받을 수 있다.

얕은 대수층으로부터의 지하수 거동은 지표면 위로의 증발산, 하천으로의 지하수 유출, 그리고 지하수 시스템의 마지막 단계인 깊은 대수층으로의 침투로 이루어진다. 여기서 증발산과 깊은 대수층으로의 침투는 얕은 대수층의 저류량 정도와 지하수 유출에 관련된 매개변수로부터 조절된다(Fontaine et al., 2002).

2.2 용설 모형

SWAT 모형은 물, 유사, 농업화학물질에 대한 모의를 종합적으로 수행할 수 있는 모형으로 유출모의에 관점에서 보면 Fig. 1의 왼쪽과 같이 기상자료, 유역추적, 하도추적, 저수지추적의 과정을 통해 수문모의를 수행한다. 이때, 용설모의는 유역추적 과정에서 수행되며 용설 관련 매개변수에 따라 HRU에 대한 강우량 및 수문성분이 변하기 때문에 지표수, 토양수, 증발산, 지하수 모의보다 선행된다.

SWAT의 용설모형은 Fig. 1의 오른쪽과 같이 표고에 따른 강수, 온도에 따른 변화율을 고려하기 위해 표

고밴드(elevation band)를 설정하게 되며 각 표고밴드의 표고값과 밴드 내 소유역 면적비 설정에 따라 밴드 면적가중에 따른 HRU별로 용설량을 산정하게 된다.

2.2.1 누적 적설량 산정

눈을 강우량과 같은 형태로 나타내기 위해서 눈에 대한 물당량(Snow Water Equivalent; 이하 SWE)이라는 용어를 사용하게 되는데 이는 눈과 동일한 열용량을 가진 물의 질량으로, 눈의 열용량을 물의 비열로 나눈 값이다. 따라서 비열 차이로 인해 눈을 물로 환산한 양으로 대략 그 양의 10%에 해당하는 물과 같다(이상호 등, 2003). SWAT에서는 이러한 SWE를 이용하여 누적되는 적설량을 계산한다.

적설량 방정식은 초기 적설량과 강설량, 용설량, 승화량으로부터 Eq. (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$SWE_2 = SWE_1 + P_{SB} - M - E_S \quad (2)$$

여기서, SWE_2 는 현재의 눈의 물당량(mm), SWE_1 은 초기 눈의 물당량(mm), P_{SB} 는 강설량(mm)으로 표고 밴드의 온도(T_B)가 강수에서 강설로 변하는 임계온도

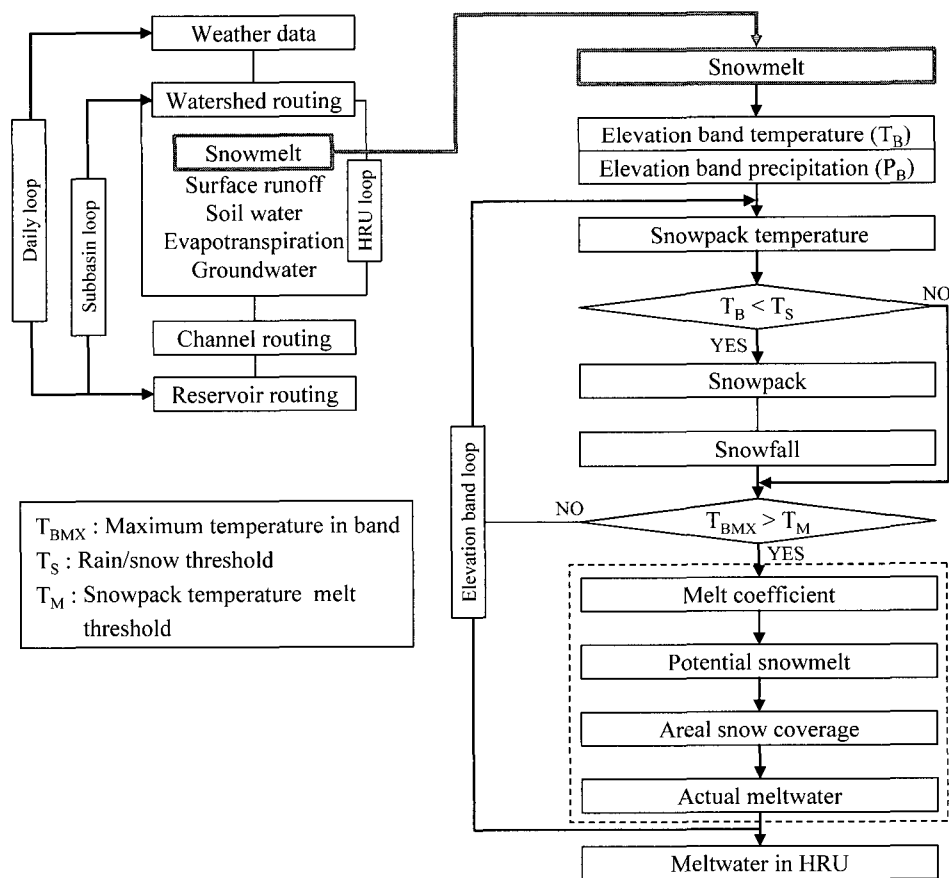


Fig. 1. Flow diagram of the SWAT snowmelt model

(T_S)보다 낮을 경우 발생하는 강수량을 말한다. M 은 용설량(mm)으로 적설온도(T_{SN})가 용설이 시작되는 임계온도(T_M)보다 높을 경우 발생하며, E_S 는 승화량(mm)이다.

2.2.2 적설온도 산정

강설로 인한 온도가 용설이 시작되는 임계온도(T_M)인 0°C에 도달하기 전까지는 용설이 발생하지 않는다. 적설온도(T_{SN})는 대기온도, 적설밀도, 적설깊이, 노출 정도에 영향을 받으며 SWAT 모형에서는 적설온도와 일 평균 기온 사이의 지체계수를 이용하여 Eq. (3)과 같이 적설온도를 산정한다(Anderson, 1973).

$$T_{SN2} = T_{SN1}(1.0 - \beta) + T_B \cdot \beta \quad (3)$$

여기서, T_{SN2} 는 현재의 적설온도(°C), T_{SN1} 는 초기 적설온도(°C), β 는 적설온도와 기온에 관계된 지체계수를 나타낸다. β 의 범위는 당일의 적설온도가 전날의 적설온도와 기온 중 영향을 받는 정도에 따라 0~1의 값을 가진다.

2.2.3 잠재 용설량 산정

지표면에 쌓여 있는 적설은 태양복사열의 증가로 인해 그 에너지가 증가하게 된다. 이러한 에너지는 적설 온도를 0°C로 만드는데 소모되며, 0°C 도달 이후의 추가 에너지는 고체 상태의 적설을 자유수(free water)로 만들어 용설을 발생시키는데 사용된다. 따라서 이러한 태양복사강도는 용해율의 중요한 인자가 된다.

용해율은 용설이 발생하는 임계온도(T_M) 이상의 온도에 대해 발생하는 용설량의 비로 나타낼 수 있다. 용해율은 Central Sierra Snow Laboratory(Anderson, 1973)에서 계절적 변동성을 고려해 sine 함수를 이용하여 Eq. (4)와 같이 제시하였다. 이 방법은 6월 21일과 12월 21일에 발생한 최대(α_{MX}), 최소(α_{MN}) 용해율로부터 정의되며 1년을 주기로 다양한 용해율을 나타내게 된다. 일반적으로 농업지역의 용해율은 1.4~6.9 mm/day/°C(Huber and Dickinson, 1988)이며 도심지역은 3.0~8.0mm/day/°C(Bengston, 1981; Westerstrom, 1981) 범위를 가진다.

$$\alpha = \frac{(\alpha_{MX} + \alpha_{MN})}{2} + \frac{(\alpha_{MX} - \alpha_{MN})}{2} \cdot \sin\left((d_n - 81) \cdot \frac{2\pi}{365}\right) \quad (4)$$

여기서, α 는 모의일 용해율(mm/day/°C), α_{MX} 는 6월 21일 용해율(mm/day/°C), α_{MN} 은 12월 21일 용해율(mm/day/°C), d_n 은 연중 모의일(julian day)이다.

따라서, 용설이 발생하는 임계온도(T_M) 이상의 적설 온도에 대한 잠재용설량(M)은 용해율(α), 적설온도(T_{SN}), 일 최대 기온(T_{BMX})으로부터 Eq. (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$M = \alpha(((T_{SN} + T_{BMX})/2) - T_M) \quad (5)$$

2.2.4 눈 피복면적 산정

용설기간 동안 발생한 실제 용설량은 잠재용설량(Eq. (5))과 적설면적(areal snow coverage)으로 산정된다(Shook and Gray, 1997). 용설은 상대적으로 기온이 높은 저지대부터 발생하므로 설선(snowline)은 용설이 발생됨에 따라 표고가 높은 곳으로 이동하게 되고 적설면적은 감소하게 된다. 이러한 적설의 면적감소곡선(areal depletion curve)은 그 지역의 방위, 식생, 기상패턴에 따라 달라지므로 곡선의 형태는 각 지역마다 다르다(Hartman et al., 1999).

면적감소곡선으로부터 산정되는 적설면적비는 100% 적설면적일 경우의 잠재용설량을 실제 용설량으로 변환하기 위해 사용되는 값이다. Fig. 2는 SWE 감소에 따른 면적감소비를 나타낸 그림으로, X축은 전체 면적에 대한 현재의 적설면적비, Y축은 100% 적설면적의 SWE에 대한 현재의 SWE의 비(Eq. (6))를 나타낸다. 면적감소곡선(Eq. (7))은 적설면적비가 0.5일때의 yy 값과 고정점 (0.95, 0.95)의 두 점을 이용하여 곡선형상계수 COV_1 , COV_2 를 결정함으로써 산정할 수 있다. 면적비가 0.5일때 yy 가 각각 0.1, 0.3, 0.5, 0.7에 대한 COV_1 , COV_2 산정결과는 Table 1과 같다.

$$yy = SWE/COV_{100} \quad (6)$$

$$COV = yy/(yy + \exp(COV_1 - COV_2(yy))) \quad (7)$$

Table 1. Shape coefficients of the curve

COV ₅₀ / COV ₁₀₀	COV ₁	COV ₂
0.1	0.8155	-2.2210
0.3	2.7566	-0.3770
0.5	5.1169	1.8653
0.7	10.5562	7.0327

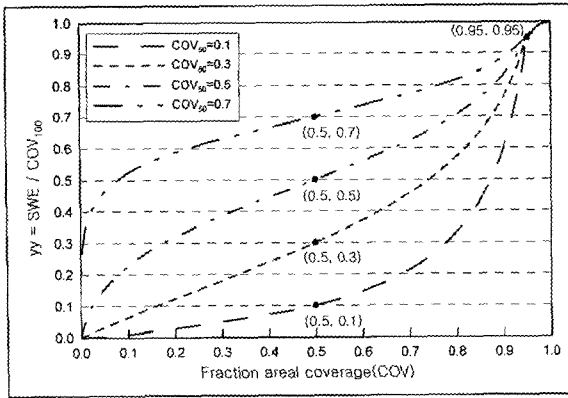


Fig. 2. Areal depletion curve

2.2.5 실제 용설량 산정

눈이 덮힌 면적에 대한 실제 용설량은 100% 적설면적에 대한 잠재용설량(M)과 현재 SWE에 대한 적설면적비(COV)를 곱해줌으로써 Eq. (8)과 같이 산정할 수 있다.

$$M_A = M \cdot COV \quad (8)$$

따라서, 적설온도(T_{SN}), 일 최대 기온(T_{BMX}), 용설 발생 임계온도(T_M)와 용해율(α)로부터 산정된 HRU에 대한 잠재용설량(M)과 면적감소곡선에 의해 현재 HRU의 SWE에 대한 적설면적을 산정함으로써 각 HRU에 대한 실제 용설량을 산정할 수 있게 된다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역

본 연구에서는 남한강의 대표적인 댐 지점인 충주댐 상류유역을 대상유역으로 선정하였다. 이것은 대 유역 면적이고 작은 유역면적에서의 흐름형태도 함께 고찰할 수 있을 뿐만 아니라 댐 지점에서 신뢰성 있는 유출자료가 있을 것으로 판단되었기 때문이다. 충주댐의 유역 개황을 파악하여 보면 300m×300m DEM으로부터 추출한 유역면적은 6,632km²(국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>) : 6,648km²)이며 표고는 EL. 124~1560m, 평균표고는 EL. 607m인 전형적인 산지지역이다. 소유역 구분은 수자원단위지도(건설교통부, 2002)에서 제시한 단위유역을 토대로 7개로 구분하였으며 전체 유역에 대한 HRU는 토지이용항목과 토양통에 각각 임계면적비 5%를 적용하여 140개로 결정하였다.

모의에 필요한 기상자료(강우, 풍속, 기온, 일사량, 상대습도)는 기상청 기상대의 자료를 사용하였다. 사용된 관측소는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 대관령(100), 강릉

(105), 동해(106), 원주(114), 영월(121), 충주(127), 홍천(212), 태백(216), 제천(221), 봉화(271), 영주(272), 문경(273)의 12개 관측소이다.

대상유역의 겨울철 적설 정도를 파악하기 위해 기상청으로부터 12개 관측소에 대한 10년(1995~2004년) 동안의 일 적설량 자료를 수집하였다. 연평균 적설량 산정 결과 대관령 관측소가 2,242mm로 적설량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 충주관측소가 268mm로 가장 적게 나타났다. 12개 관측소의 연평균 적설량은 615mm이며, 이 중 10%를 물로 가정할 경우 겨울철 약 61.5mm의 강수가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 충주댐 상류유역은 용설모의에 적합한 대상지역이라 판단된다.

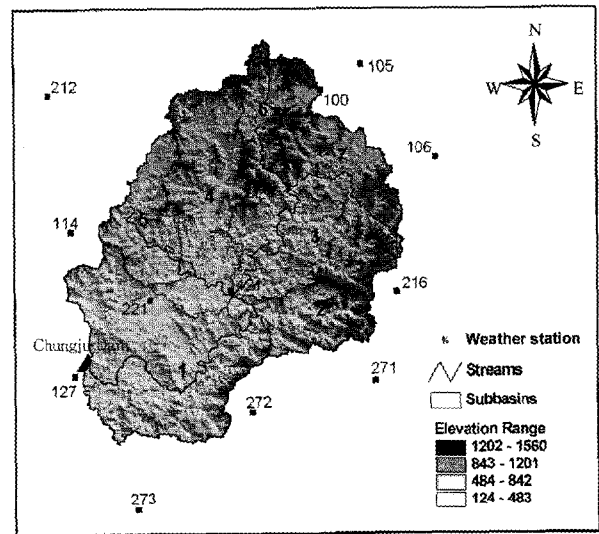


Fig. 3. Digital elevation model of the Chungju Dam Basin

3.2 매개변수 산정

3.2.1 표고밴드(elevation bands)

대부분의 용설모형은 표고에 따른 시공간적 변동성을 고려하기 위해 표고밴드 등을 설정한다. SWAT 모형에서도 표고밴드를 이용하여 온도와 강수를 보정하게 되며 밴드의 중심표고 및 각 밴드 내 소유역 면적비가 필요하다. 따라서 충주댐 유역을 전체 7개 소유역에 대해서 4개의 밴드로 설정하였으며 각 밴드별 소유역 면적비는 Table 2와 같다. 1번 소유역은 평균 표고가 EL. 417m로 약 70%가 EL. 500m 미만에 분포하는 것으로 나타났으며, 이외의 지역들은 약 70% 이상이 EL. 500m 이상인 지역에 분포하는 것으로 나타났다. 대상유역에서 표고에 따른 온도나 강수의 변화가 있다면, 이러한 표고별 소유역 면적을 고려할 때 기상관측소의 자료를 그대로 적용하면 공간적으로 변하는 기온과 강수의 영

Table 2. Fraction of subbasin area within each elevation band

Subbasin	Elevation (EL. m)	Mean El. (EL. m)	Elevation band(EL. m)			
			124~483	484~842	843~1201	1202~1560
1	124~1408	417	0.6864	0.2630	0.0419	0.0087
2	170~1534	707	0.2103	0.4869	0.2833	0.0195
3	183~1497	651	0.2614	0.5412	0.1815	0.0159
4	185~1515	600	0.3566	0.4789	0.1601	0.0044
5	215~1321	575	0.2864	0.6198	0.0938	0.0000
6	340~1560	835	0.0236	0.5304	0.4006	0.0454
7	340~1422	808	0.0365	0.5579	0.3912	0.0144

향을 고려하지 못하게 된다. 특히 응설모의는 응설 시작 임계온도(T_M)와 강우에서 강설로 바뀌는 임계온도(T_S) 등에 따라 민감하게 반응하므로 이러한 표고밴드 설정이 중요한 입력변수가 된다.

3.2.2 온도보정(temperature lapse rate)

대류권 내 기온은 표고가 증가할수록 감소한다. 따라서 소유역 내 표고에 따른 정확한 온도 산정을 위해 표고에 따른 온도변화율(dT/dZ) 산정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 12개 기상관측소 위치표고와 10년(1995~2004년) 동안의 연평균 기온 자료를 구축하였으며, Fig 4는 이를 도시한 것으로서 표고에 따라 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 표고에 따른 온도변화율의 정량적인 값을 산정하기 위한 회귀식 산정결과는 Eq. (9)와 같다. 여기서, T 는 연평균 기온($^{\circ}C$), Z 는 관측소 표고(EL. m)를 나타낸다. 이는 표고에 따른 온도변화율은 유역 전반에 걸친 관측소를 이용하여 도출한 회귀식이므로 본 연구에서도 전체 소유역에 대해 $-6^{\circ}C/1000m$ 를 적용하였다.

$$T = -0.00623Z + 12.46459 \quad (9)$$

SWAT 모형에서 표고밴드 내 소유역에 위치한 각각

의 HRU의 온도는 해당 밴드의 온도와 같다고 가정한다. 따라서 밴드의 중심표고(Z_B)와 관측소 표고(Z_S) 차에 대한 온도변화율을 적용함으로써 Eq. (10)과 같이 각 밴드의 온도(T_B)를 산정할 수 있다. 여기서, T_{ST} 는 관측소 온도이다.

$$T_B = T_{ST} + (Z_B - Z_S) dT/dZ \quad (10)$$

3.2.3 강수보정(precipitation lapse rate)

SWAT 모형은 강수량을 포함한 기상자료 구축시 티센망도 등을 이용한 면적평균 값을 사용하는 것이 아니라 각 소유역의 중심에서 가장 가까운 관측소 하나만을 선택하여 그 값을 사용하게 된다. 따라서 대상지역의 강수량이 공간적으로 이질적인 성향을 보이는 경우 이를 보정해야 한다.

강수보정은 온도보정과 동일한 방법으로 수행하였으며 표고에 따른 강수량을 그래프에 도시한 결과는 Fig. 5와 같다. 이 중 대관령 관측소는 연평균 강수량이 1,823mm로 이는 우리나라 연평균 강수량 1,245mm(건설교통부, 2006)보다 약 43%가 많은 양이다. 대관령 관측소를 포함한 추세선은 그림에서 점선으로 Eq. (11), 포함하지 않은 경우는 실선과 같이 나타난다. Eq. (11)에서 P 는 강수량(mm), Z 는 관측소 표고(EL. m)이다.

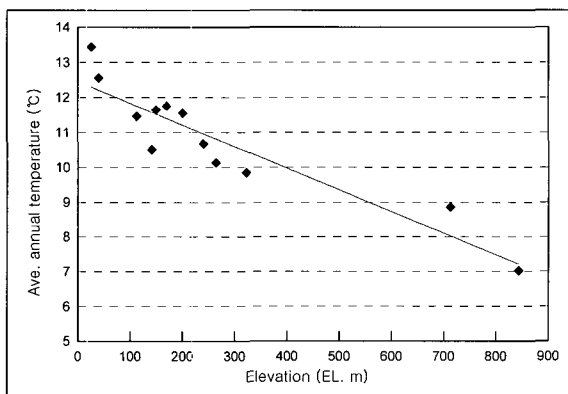


Fig. 4. Ave. annual temperature vs. elevation

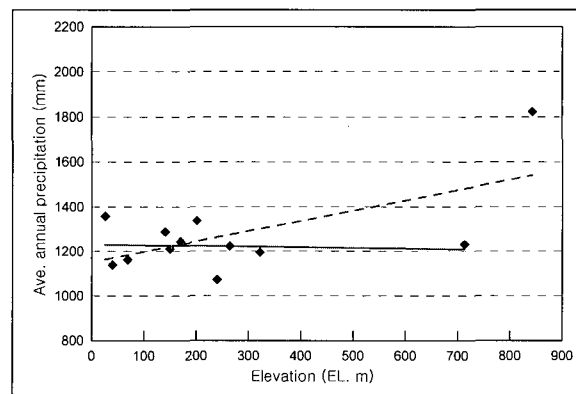


Fig. 5. Ave. annual precipitation vs. elevation

Table 3. Input parameters used for final simulation

Input parameter	Value
Rain/snow threshold (T_S)	0.0℃
Snowpack temperature melt threshold (T_M)	0.0℃
Maximum melt coefficient (α_{MX})	6.0mm/day/℃
Minimum melt coefficient (α_{MN})	2.0mm/day/℃
Snowpack temperature lag factor (β)	0.5
Areal snow coverage threshold (COV_{50}/COV_{100})	0.5
Areal snow coverage threshold ($MNCOV_{100}$)	50.0mm

대관령 관측소를 포함한 경우는 표고에 따른 연 강수량이 461mm/1000m 증가하는 것으로 나타났으나 대관령 관측소 이외의 관측소들은 표고에 따른 강수의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 전체 유역에 대해서 강수변화율을 고려하지 않을 경우 대관령 관측소에 영향을 받는 6, 7번 소유역은 표고가 낮은 지형에서도 관측소 값을 그대로 적용하므로 보정이 필요하다.

$$P = 0.46148Z + 1151.25149 \quad (11)$$

본 연구의 계산단위는 일단위(daily)이므로 연 강수량을 일 증가량으로 환산해야 한다. 10년(1995~2004년) 동안의 대관령 관측소의 연평균 강수일 산정결과 약 130일로 나타났으며, 이를 연 강수량 증가량 461mm에 나눈 결과 강수일 당 3.55mm/1000m가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 6, 7번 소유역은 이 값을 적용하였고, 이외의 소유역은 소유역들은 표고에 따른 강수변화가 없는 것으로 가정하였다.

3.2.4 기타 매개변수

SWAT 용설모형은 앞서 기술한 매개변수 이외에도 강우/강설 임계온도(T_S), 용설 발생 임계온도(T_M), 잠재 용설량 산정을 위한 연중 최대, 최소 용해율(α_{MX} , α_{MN}), 적설온도 지체계수(β), 적설면적 감소곡선 산정을 위한 100% 적설피복 물당량에 대한 50% 적설피복 물당량 비(COV_{50}/COV_{100}), 100% 적설피복 최소 물당량($MNCOV_{100}$)이 필요하다.

본 연구에서는 각 매개변수 변화에 따른 유출량과 관측치와의 비교결과를 토대로 Table 3과 같이 입력 매개변수를 설정하였다.

4. 적용결과 및 분석

4.1 유출량 분석

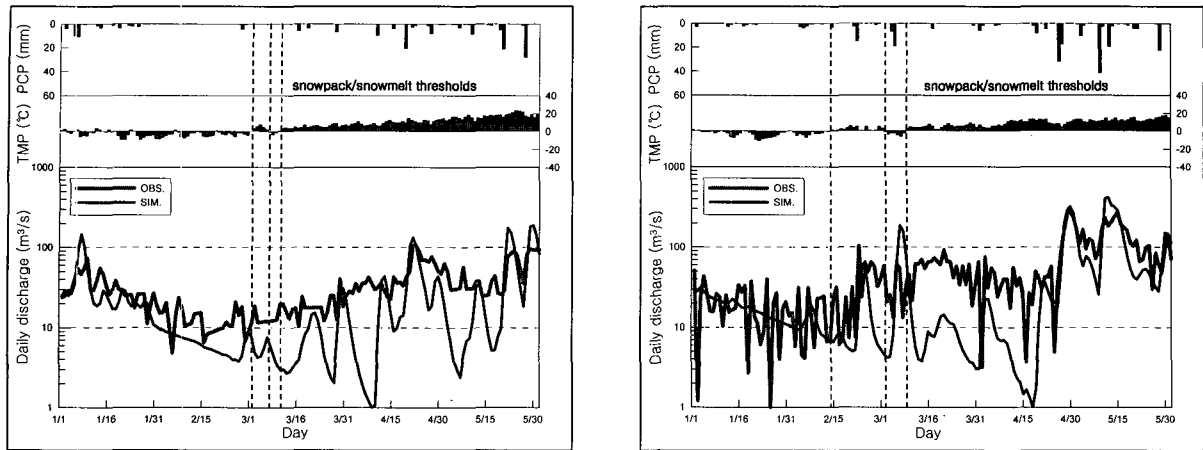
일반적인 장기유출모형은 보정기간(calibration

period)에서 추정된 매개변수를 검증기간(verification period) 동안 적용하여 모형의 정확도를 평가한다. 그러나 SWAT 모형은 물수지 방정식으로부터 각 성분별 거동성향을 물리적으로 유역 전체 HRU에 일관되게 적용하고 있기 때문에 실제적으로 모형의 검·보정이 필요하지 않으나, 각 매개변수의 물리적인 성질을 달리 할 필요가 있다.

본 연구에서는 모의기간을 2000~2004년, 모의 초기 매개변수 안정화를 위한 warming up 기간을 1999년의 1년 동안으로 하여 모의를 수행하였다. 용설 영향을 평가하는 것이 본 연구의 목적이므로 용설에 관계된 매개변수 이외의 매개변수들은 용설고려 전후에 대해 동일하게 적용하였다.

4.1.1 용설 미 고려

우리나라에서 일반적으로 강우-유출모형을 적용할 때, 모형의 한계 및 우리나라의 관행으로 대체적으로 용설을 고려하지 않게 된다. 실측된 용설 효과에 대한 자료가 없는 상황에서 용설효과를 좀 더 구체화하기 위해서 먼저 기존 관행대로 용설을 고려하지 않는 상황을 살펴볼 필요가 있다. 따라서 용설을 고려하지 않을 경우에 대해 2000~2004년 동안 모의를 수행하였으며, 이를 위해 기온이 0℃ 이하일 때 내리는 강수를 모두 강우로 가정하였다. Fig. 6은 모의기간 중 관측치와 가장 큰 편차를 보이는 2000년, 2004년의 1~5월에 대한 모의결과를 실측치와 비교하여 나타낸 것이다. 겨울철의 실측유량은 강우에 따른 급격한 변화를 보이지 않는 반면 모의 결과는 유량에 따라서 그 반응이 대단히 빠르다는 것을 알 수 있다. 더욱이 용설이 시작되는 기간에는 전반적으로 관측유량에 비해 모의유량이 적게 모의되는 것을 알 수 있다. 이것은 어떠한 장기유출모형에서도 용설을 고려하지 않을 경우 나타나는 현상을 대표한다고 할 수 있다. 자세히 보면 용설이 발생하는 3~4월 기간에 모의유량이 1~10m³/s 이하로 급격히 낮아지는 결과가 초래되었다. 이는 Table 4에 제시된 월별 유



a) 2000year
b) 2004year
Fig. 6. Daily simulated discharges without considering snowmelt effect

Table 4. Monthly mean observed and simulated discharges without considering snowmelt effect

Month	2000year			2004year		
	OBS.	SIM.	RE	OBS.	SIM.	RE
Jan.	32.64	31.80	-2.58	20.35	18.87	-7.28
Feb.	12.51	6.44	-48.49	26.64	13.67	-48.68
Mar.	17.21	7.83	-54.51	50.31	22.62	-55.03
Apr.	47.68	29.17	-38.81	62.82	47.09	-25.04
May	50.81	47.47	-6.57	128.32	120.87	-5.80

Note: OBS, SIM - Measured and simulated monthly discharge[m³/s], RE - Relative error[%]

출량을 통해서도 알 수 있다. 1~5월 월 유출량이 관측치에 비해 모두 낮게 산정되었으며, 특히 2, 3, 4월의 경우 관측치에 대한 모의치의 상대오차가 약 20~60%로 적게 모의된 것을 알 수 있다.

4.1.2 용설 고려

충주댐 유역의 용설 영향을 고려하기 위해 앞서 산정된 매개변수를 이용하여 모의를 수행하였다. Fig. 7은 용설을 고려하지 않은 결과와 상대적인 비교를 위해 2000년, 2004년 결과를 제시한 그림이다. Fig. 6의 결과와 비교할 때 2~4월 사이에 유출량이 급격히 떨어지는 현상이 상대적으로 감소하였으며, 월 유출의 거동도 용설 고려전과 비교해 관측치에 더 가까운 값을 제시하는 것으로 나타났다. 이것은 충주댐의 유량이 이미 용설의 영향을 받아 거동하고 있으며 따라서 장기 유출모의 모형에서도 용설의 효과가 매우 중요하게 고려되어야 함을 의미한다.

좀 더 구체적으로 살펴보면 2000년의 경우 용설이 발생하지 않는 1, 2월 유출량은 관측치에 비해 낮게 산정되었으며 이외의 월 유출량은 관측치와 유사하거나 다소 높게 산정되었다. Table 5에서 2000년 3월 유출량

이 관측치에 비해 과다산정된 것을 알 수 있는데 이는 겨울철 누적된 적설량이 3월초 용설 발생 임계온도 (T_M) 이상의 급격한 온도상승으로 인해 많은 양의 용설이 발생했기 때문으로 판단된다. 그러나 기온이 0°C 이상인 용설 기간 동안에는 모의치가 실측자료의 거동과 거의 일치함을 알 수 있다. 다만, 적설과 용설이 전환되는 시점을 전후해 상대적으로 큰 오차가 발생하는 것으로 나타나는데, 이러한 결과는 용해율과 관련된 매개변수의 영향으로 보이며, 용해율을 현재보다 더 낮출 경우 잠재 용설량 감소로 인해 관측치와 유사하게 모의할 수 있으나 실제로 전환시점 이후부터 대략 5월까지의 유출량이 관측치보다 크게 모의되는 단점이 있다. 또한 월 평균 기온이 0°C 이하인 경우 토양수도 거동을 하지 않으므로 0°C를 전후해 급격한 유출량 변화가 발생하게 된다. 그러나 현재 나타난 결과로만 파악할 때 실제로 용해율의 문제인지, 기상관측소의 영향문제인지, 또는 자료의 불확실성에 기인한 것인지 분명히 밝힐 수 없었다. 따라서 이러한 문제는 향후 모형보완을 통해 개선해야 할 것으로 판단된다.

이상과 같이 용설 고려 전후에 대한 결과(Figs. 6

and 7, Tables 4 and 5)를 비교하여 볼 때, 충주댐 유역의 경우 용설 효과가 존재하고 특히 3, 4월에 그 영향이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 연속적인 장기유출모의를 위해서는 갈수기에 많은 영향을 주는 용설모의가 필수적이며, 특히, 저유하량 해석을 위한 모의시에는 용설모의가 매우 중요함을 알 수 있다.

4.2 공간적 분석

분포형 모형의 장점은 집중형 모형과는 달리 유역 전반에 걸친 수문성분 발생량으로부터 각 소유역별 유출량 또는, 전체 유역의 유출량을 산정하므로 공간적인 분석이 가능하다는 것이다. 상류 소유역의 용설영향을 분석하기 위해 3, 4번 소유역 출구점의 상류에 각각 위치한 영월2, 영월1 수위관측소 자료와 소유역의 용설모의 전후의 유출량을 비교하였다. 관측유량은 한강홍수통제소로부터 수집한 수위-유량 관계곡선식으로부터 산정되었다. Fig. 8은 신뢰성 여부와 관계없이 실측치로 추정되는 유량과 용설을 고려시 및 미 고려시의 모의 유량을 통합하여 나타낸 것이다. 용설을 고려하지 않을 경우 유출량은 강우량에 의한 반응이 매우 빠르며 유출 거동이 급격하게 이루어져, 유출량이 급격하게 낮아지

는 현상을 보이며 반면 용설을 고려할 경우의 모의결과는 용설의 영향을 받는 관측치와 그 거동이 유사하게 됨을 알 수 있다. 이것은 하류의 충주댐의 분석결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

그러나 충주댐의 경우인 Fig. 7에서는 적설기간에는 실측 유출량이 점차로 감소하며 모의결과도 그 양은 다르지만 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 Fig. 8에서는 적설기간의 실측치는 오히려 상승하고 있으며 특별한 강우 없이도 갑자기 유량이 저하되는 경우가 발생하고 있다. 다시 말해서 적설기간의 실측 유출거동을 모의유출거동에 비추어 볼 때 현재 유량자료는 물론 수위 자료를 신뢰하기 힘들다는 것이다. 따라서 관측 자료에 근거하여 갈수해석은 물론 하천유지유량 결정이 이루어지는 현실에 비추어 보면 현재 우리나라 저유량 자료에 상당한 문제가 있고, 그 결과에 상당한 오차가 발생할 수 있음을 유추할 수 있다.

이상의 용설모의의 공간해석의 결과로부터 전체 유역 출구점에 해당하는 충주댐의 유출량을 정확하게 모의함으로써 상류 소유역들에 대한 공간적인 해석이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

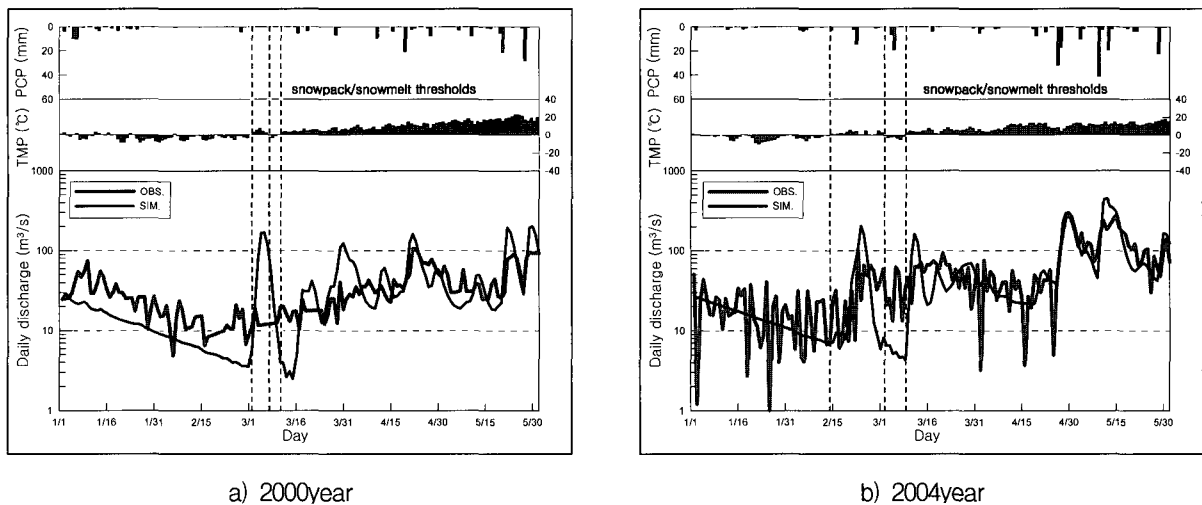
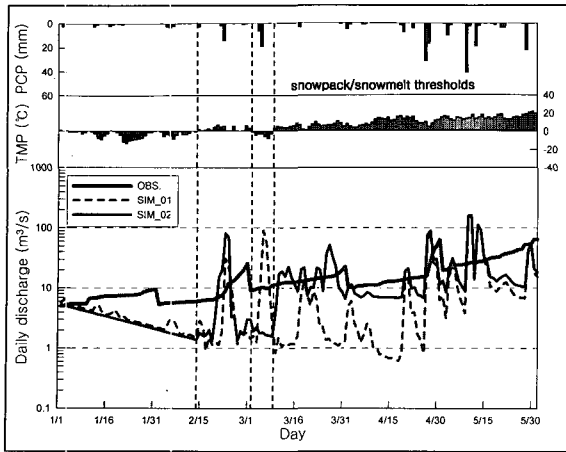


Fig. 7. Daily simulated discharges considering snowmelt effect

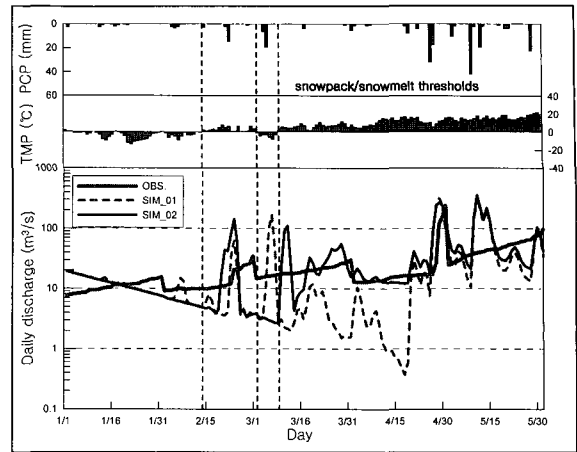
Table 5. Monthly mean observed and simulated discharges considering snowmelt effect

Month	2000year			2004year		
	OBS.	SIM.	RE	OBS.	SIM.	RE
Jan.	32.64	16.55	-49.31	20.35	17.46	-14.19
Feb.	12.51	5.86	-53.18	26.64	30.44	14.25
Mar.	17.21	44.32	157.55	50.31	42.66	-15.19
Apr.	47.68	53.34	11.89	62.82	65.77	4.69
May	50.81	61.79	21.61	128.32	141.09	9.95

Note: OBS, SIM - Measured and simulated monthly discharge[m³/s], RE - Relative error[%]



a) Subbasin No. 3



b) Subbasin No. 4

Fig. 8. Daily simulated discharges for subbasins

4.3 표고밴드 영향 분석

표고밴드는 모형에서 표고에 따른 온도와 강수의 변화를 고려할 수 있도록 하는 인자이다. 따라서 표고에 따라 보정된 온도와 강수는 융설 모의 뿐만 아니라 이들에 영향을 받는 수문성분들에 모두 적용되므로 표고밴드의 설정은 중요하다. 이러한 표고밴드 설정에 따른 영향을 분석하기 위해 Fig. 9와 같이 2004년에 대해서 표고밴드 설정 전후(SIM_01, SIM_02)의 유출량을 비교하였다.

표고에 따른 온도 및 강수 변화를 자연현상과 유사하게 나타내기 위해서는 표고밴드의 간격을 세밀하게 설정하는 것이 이론적으로 타당하나, 관측 자료의 불확실성, 관측소 개수의 한계 등을 고려할 때 표고밴드의 간격을 적절하게 설정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 표고밴드를 설정하지 않았을 경우(SIM_01)와 기존의 4개의 표고밴드로 설정한 결과(SIM_02)에 대해 Fig. 9와 같이 2004년에 대해서 유출량을 비교하였다.

적설과 융설이 교차되는 시점에서는 상기 4.1.2의 융설 고려시의 유출량 분석에서 집중논의된 것과 같은 이유로 인해 오히려 표고밴드를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 실측유출량을 충분히 모사하고 있지 못하는 현상이 나타났다. 물론 융설 기간에는 표고밴드를 설정한 유출량이 관측치에 더 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 따라서 융설 모의시 표고에 따른 온도 및 강수보정이 이루어질 경우 유출성분을 더욱 잘 모사할 수 있음을 알 수 있었다.

4.4 수문성분 분석

융설 고려에 따른 유출량 변화는 지표수, 토양수, 지

하수, 증발산 등의 수문성분 변화를 의미한다. 장기유출에서 수문성분의 양을 파악하는 것은 수자원의 평가, 운영 그리고 계획 수립 시 중요한 요소가 된다. 실제로 지하수함양량의 변화로 지하수 거동이 달라지며 또한 토지이용에 따라 유사이동 및 기타 영양염류 이동 등의 거동 변화에 크게 영향을 미친다.

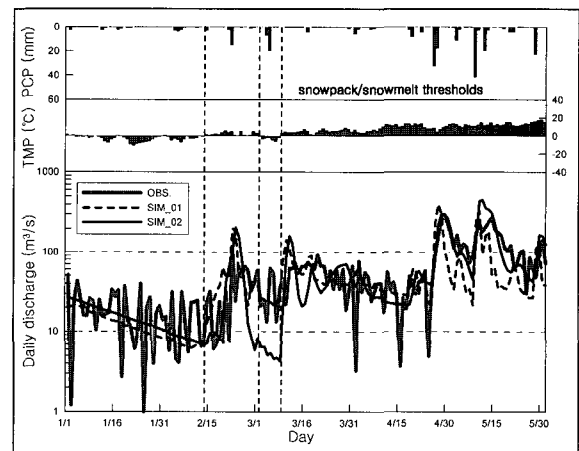
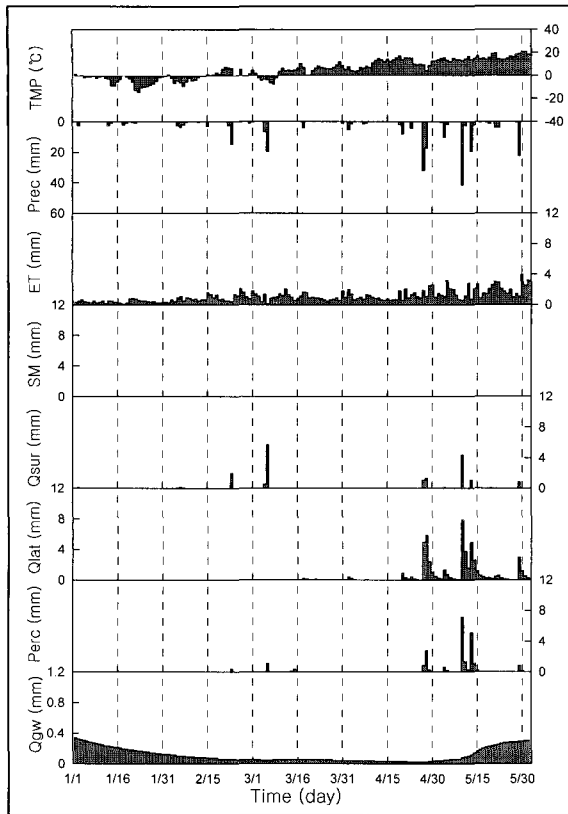


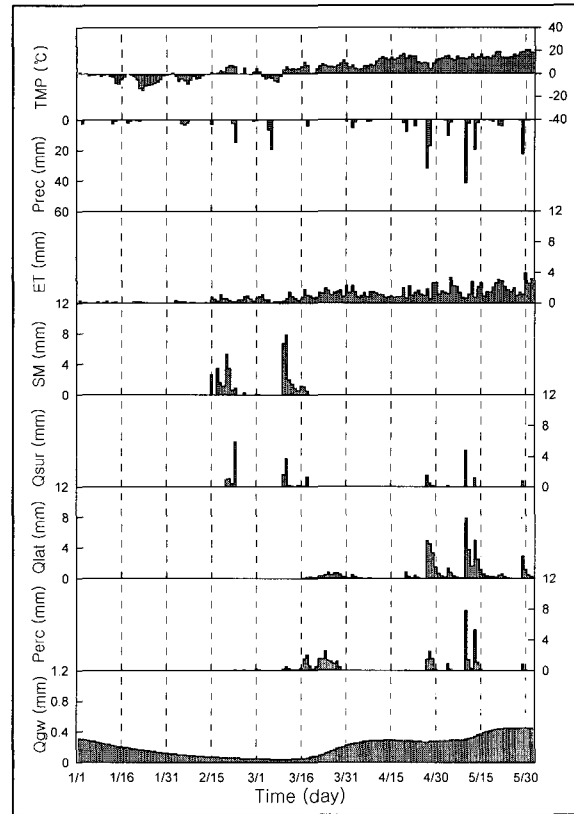
Fig. 9. Comparison of daily simulated discharges considering elevation band

실례로 Fig. 10은 2004년 1~5월에 대해 융설 고려에 따른 증발산 전체 유역의 각 수문성분별 발생량을 분석한 것으로 인위적인 토지이용을 고려하지 않은 자연적인 수문성분을 중심으로 고찰한 것이다.

융설(SM)은 Fig. 10의 최상단 기온변화에 비추어 보면 융설 발생 임계온도(T_M) 이상의 기온이 되는 2월 15일~3월 15일 사이에 발생하는 것을 알 수 있다. 물론, 융설 고려의 경우 무강우 기간에도 지표수(Q_{sur}), 토양수(Q_{lat}), 지하수함양(Perc), 지하수유출(Q_{gw})이 발생



a) Without considering snowmelt effect



b) considering snowmelt effect

Fig. 10. Comparison of daily simulated hydrologic components for snowmelt effect

또는 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 지하수유출(Qgw)의 경우 용설 고려전에는 거의 발생하지 않는 것에 비해 용설 고려시인 3월 중순 이후 상대적으로 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 용설 고려시 증발산량(ET)이 감소한 것은 토양층 위의 적설로 인한 태양반사율의 증가로 인하여 토양수 증발이 감소하기 때문이다.

이상과 같은 용설 모의 전후 수문성분 거동의 차이를 고려할 때 장기유출모의를 통한 정확한 수문성분 해석을 위해서는 용설 모의가 필히 수행되어야 하며, 이를 통해 각종 수문현상이 파악되어야 할 것이다.

5. 결론

국내에서 장기 유출모의의 결과는 대체로 유향을 파악하거나, 부존량의 평가 그리고 갈수량의 해석 등에 사용되고 있으나 실제로 이러한 저유하량에 영향을 미치는 용설의 효과를 충분히 검토한 바 없으며, 또한 국가 수자원계획 및 평가 그리고 설계에서는 이를 고려하고 있지 못하는 것이 현실이다.

본 연구에서는 유출성분 모의시에 용설효과를 좀 더 구체적으로 나타내고자 하였다. 이를 위해서 준 분포형 장기 유출모형인 SWAT에서 이용하고 있는 용설 모의

절차를 고찰하였고, 충주댐 유역을 대상으로 매개변수를 추정하였다. 용설효과를 좀 더 구체화하기 위하여 표고에 따른 온도 및 강수변화율을 고려하였다. 4개의 표고밴드를 구성하여 12개 관측소에 대한 10년(1995~2004년) 동안의 기상관측자료를 토대로 표고에 따른 온도 및 강수변화율을 산정하여 모형에 적용하였다.

충주댐에서의 관측유량과 용설 모의 전후의 유출량을 비교한 결과 용설모의를 수행한 유출거동이 관측치와 유사하게 모의되는 것으로 나타났으며, 월별 유출량의 상대오차 또한 용설 모의전의 경우에 비해 상당히 개선되었음을 알 수 있었다. 용설 미 고려 시에는 사실상 관측치와 모의치의 거동특성과 주어진 값의 의미가 완전히 다를 수 있었다. 따라서 유출 모의시 반드시 용설의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다. 한편, 공간적인 분석을 통하여 상류 소유역에 대해서도 같은 매개변수와 거동특성을 이용하여 분석한 결과, 관측 유출량과의 거동은 상이하나 용설모의를 수행한 결과가 관측치와 어느 정도 유사한 경향을 갖는 것을 알 수 있었으며, 이를 통하여 상류 수위관측소의 관측치가 상당한 문제점을 가지고 있고, 관측자료를 실무에 적용하기 위해서는 무엇보다도 정확도가 개선되어야 할 것으로

유추 해석할 수 있다.

용설도의에 있어 표고밴드를 설정하는 것이 대상유역에 대해 보다 정확한 강수량 및 기온의 특성을 반영할 수 있기 때문에, 이를 반영하는 것이 관측유량과 일치하는 것처럼 보였으나 그 특성을 구체적으로 밝혀내지는 못했다. 물론, 수문성분 분석에서도 용설모의 전후에 따라 각 수문성분들이 시간적, 양적으로 다른 거동을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 용설 모의시 용설 발생 임계온도(T_M) 전후의 온도변화에 따라 유출량이 민감하게 반응하는 문제가 발생하였으며, 이는 향후 연구를 통해 개선되어야 할 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 용설 효과가 3, 4월 유출량에 많은 영향을 미치고, 분포형 또는 총괄형 장기유출모의시에 반드시 용설영향이 고려되어야 함을 알 수 있었으며, 이러한 결과가 우리나라 수자원 부존량 평가, 갈수량해석, 유지유량 및 각종 기준유량 해석에 중요하게 적용될 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

건설교통부 (2002). 수자원단위지도 구축.
건설교통부 (2006). 수자원장기종합계획(2006~2020), pp. 8.
과학기술부 (2004). 수자원의 지속적 확보기술개발사업-지표수 수문성분 해석기술 개발 보고서, 한국건설기술연구원.
김남원 (1998). "수문관측현황과 개선방향-수위, 우량 관측을 중심으로." *건설기술정보지*, 한국건설기술연구원, 7월호, pp. 9-15.
김남원, 원유승 (2004a). "SWAT-SWMM 결합모형의 개발-(II) 모형의 특징 및 평가." *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제37권, 제7호, pp. 599-612.
김남원, 정일문, 원유승 (2004b). "SWAT-MODFLOW 결합모형-(II) 모형의 평가." *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-507.
배덕효, 오재호 (1998). "장기 유출해석에서의 용설영향에 관한 기초연구." *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 883-844.

이상호, 안태진, 윤병만, 심명필 (2003). "적설 및 용설 모의를 포함한 탱크모형의 소양강댐 및 충주댐에 대한 적용." *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 851-861.

Anderson, E.A., (1973). "National Weather Service River Forecast System - Snow Accumulation and Ablation Model." NOAA Technical Memorandum NWS Hydro, Vol. 17, US Department of Commerce, Washington, DC pp. 217.

Bengston, L., (1981). Snowmelt-generated runoff in urban areas, pp. 444-451. In B.C. Yen (ed.) Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981. Water Resources Publications, Littleton, CO.

Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G., Hotchkiss, R.H. (2002). "Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool(SWAT)." *Journal of Hydrology*, vol. 262, pp. 209-223.

Hartman, M.D., Baron, J.S., Lammers, R.B., Cline, D.W., Band, L.E., Liston, G.E., Tague, C., (1999). "simulations of snow distribution and hydrology in a mountain basin." *Water Resources Research*, 35(5), pp. 1587-1603.

Huber, W.C., Dickinson, R.E., (1988). Storm water management model, version 4: user's manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., (2001). Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation.

Shook, K., Gray, D.M., (1997). "Synthesizing shallow seasonal snow cover." *Water Resources Research*, 33(3), pp. 419-426.

Westerstrom, G., (1981). Snowmelt runoff from urban plot, pp. 452-459. In B.C. Yen (ed.) Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981. Water Resources Publications, Littleton, CO.

(논문번호:06-60/접수:2006.05.25/심사완료:2006.09.01)