

용설을 고려한 물수지 모형을 이용한 소양강 댐 상류 유역의 월 유출량 산정

김 병 식* / 장 대 원** / 서 병 하*** / 김 형 수****

Simulation of Monthly Streamflow for the Soyang Basin Using Water And Snow balance MODELing System

Kim, Byung Sik* / Jang, Dae Won** / Seoh, Byung Ha*** / Kim, Hung Soo****

요약 : 본 연구에서는 용설을 고려할 수 있는 물수지 모형인 WASMOD(Water And Snow MODELing system)에 대하여 기술하였으며, 소양강댐 상류유역에 적용하여 장기 월 유출량을 산정하였다. WASMOD의 장점은 입력자료의 구축이 간단하며 사용자가 쉽게 운영할 수 있다는 점이다. 모형의 매개변수를 최적화하기 위해 자동추적법인 VA05A를 이용하였으며, 관측 월 유출 수문곡선과 모의 월 수문곡선을 비교하였다. 관측 유출량과 계산 유출량간의 상관계수가 0.89이상으로, 이를 통해 WASMOD의 국내 유역에 적용가능성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 용설, 물수지, WASMOD, 월 유출량

Abstract : This study describes the WASMOD, water balance model which can consider the snowmelting. The pilot study basin is the Soyang River basin with outlet at Soyang Dam Site and compute long-term monthly streamflow. The advantage of the WASMOD is that the input data is simple and the user can operate easily. To optimize for the parameters of the model, the WASMOD used VA05A of automatic fitting technique. The observed and simulated monthly streamflow hydrographs were compared. The model performance on correlation coefficient between the observed and the simulated streamflow for the verification periods was above 0.89. It was shown that the WASMOD reproduces the observed monthly streamflow hydrographs very well. This evidence suggests that the WASMOD might be appropriate for the simulation of monthly streamflow

Keywords : snowmelt, water balance, WASMOD, monthly streamflow

1. 서 론

월 유출량은 물 수지 분석을 위한 장기 유출정보로서 저수지와 댐의 용량결정, 가뭄대책 수립, 하천유지용량 결정 등의 이수계획과 용수공급을 위한 댐 및 저수지의 물 관리, 수리권의 허가 및 조정, 용수분쟁 조정 등의 하천 물 관리 실무에서

필수적인 요소라고 할 수 있다. 우리나라와 같이 겨울철에 눈이 내리는 사계절의 변화가 뚜렷한 지역에서 하천 유량을 장기간에 걸쳐 연속적으로 모의하기 위해서는 강수, 증발산, 침투, 토양수분의 변화 등 하천 유량에 영향을 미칠 수 있는 수문순환의 각 성분과정이 강우-유출모형에 포함되어야 할 뿐만이 아니라 용설의 현상을 모의할 수

+ Corresponding author : hydrokbs@kict.re.kr

* 한국건설기술연구원 수자원 연구부선임연구원

** 인하대학교 토목공학과 박사수료

*** 정회원.인하대학교 토목공학과 교수

**** 정회원.인하대학교 토목공학과 부교수

있는 모형의 요소도 포함되어야 할 것이다. 강우-유출모형에서 입력자료가 되는 강수량의 형태가 강우(rainfall)와 강설(snowfall) 중에서 어떠한 형태로 발생하는가에 따라 유출량 산정에 많은 영향을 미칠 것이다. 강우는 지표면에 도달하자마자 일부는 지하로 침투하여 지하수를 형성하고, 나머지는 지표유출을 하여 하천의 유출량에 바로 영향을 미치지만, 강설은 지표면에 쌓여 있다가 대기의 온도가 영상으로 상승함에 따라 서서히 녹아 하천 유출량에 영향을 미치기 때문이다. 특히 강설이 많은 지역에서 유출모의를 하고자 할 때에는 적설 및 용설을 고려한 모의가 필요 하다(배덕효 등, 1998). 아직 국내에서는 용설에 대한 고려하여야 한다는 필요성은 인식하면서도 용설에 관한 자료의 부족, 등 여러 가지의 이유로 연구가 미미한 실정이다. 국내의 용설에 관한 연구로는 배덕효와 오재호(1998)가 미국 국립기상청의 온도지수 용설모형을 도입하여 내린천 유역에 적용검토한 바가 있다. 또한, 최근 김남원 등(2006)에 의해 SWAT 모형을 이용하여 용설을 고려한 유출모의를 한 바 있다.

본 연구에서는 용설을 고려할 수 있는 WASMOD(Water And Snow MODELing system)(Xu, 1996)을 이용하여 소양강댐 상류유역의 월 유출량을 산정하였으며 이를 통해 국내 유역의 적용성 여부를 판단하고자 하였다.

2. Water And Snow MODELing system의 이론 및 구조

2.1 모형의 개념

강수에 의한 유출현상은 강수의 시공간적 변화성, 불균일한 지표조건, 토양깊이에 따른 수리학적 특성 차이 등으로 인해 매우 복잡한 수문현상을 나타낸다. 이 모든 자연현상을 수학적으로 정확히 표현한다는 것은 불가능한 일이므로 대부분의 수문모형에서와 같이 WASMOD도 유출현상을 개념적으로 단순화하였다. WASMOD는

Vandewiele 등(1992)이 제시한 온도지수함수를 이용하여 강수(precipitation)를 강우(rainfall)과 강설(snowfall)로 구분하여 그 양을 산정하며 강설량은 적설량(snowpack)에 합쳐지고 적설량 중 일부는 녹아 토양수분저류량(soil moisture storage)에 기여하게 된다. 강수량 중 일부는 증발산으로 손실되고 나머지 양을 실제 강우량(active rainfall)으로 정의하며 이 실제 강우량이 토양수분저류량에 기여한다(Xu, 1996). 그림 1은 WASMOD의 개념도를 나타낸 것이다.

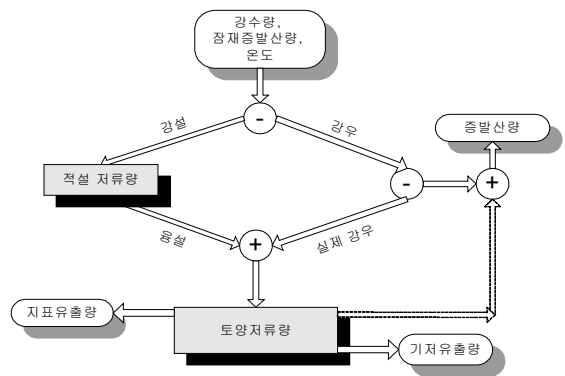


그림 1. WASMOD의 개념도(Xu, 1996)

2.2 적설량과 용설량의 산정

WASMOD는 Vandewiele 등(1992)이 제시한 온도 지수법에 의해 적설량과 용설량을 산정하며 수식으로 표현하면 식 (1)과 (2)와 같다.

$$s_t = P_t \{1 - e^{[(c_t - a_1)/(a_1 - a_2)]^+}\} \quad (1)$$

여기서, P_t : 강수량, c_t : 평균온도

a_1, a_2 : 매개변수($a_1 > a_2$)

$$x^+ = \max(x, 0)$$

$$m_t = sp_{t-1} \{1 - e^{-[(c_t - a_2)/(a_1 - a_2)]^+}\} \quad (2)$$

식 (1)에서 산정한 강설량으로부터 식 (3)을 이

용하여 적설량을 산정한다.

$$sp_t = sp_{t-1} + s_t - m_t \quad (3)$$

여기서, sp_{t-1} : 전달의 적설량

m_t : 용설량

$$r_t = P_t - s_t \quad (4)$$

강우량은 강수량 중에서 강설량을 제외한 양으로 식 (4)와 같으며 그림 2는 지금까지 언급한 변수들 간의 관계를 나타낸 것이다.

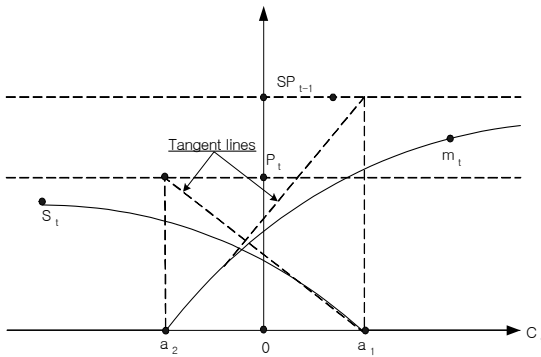


그림 2. s_t , sp_{t-1} , m_t , P_t 의 관계

2.3 실제 증발산량 산정

잠재증발산량과 가용수량을 이용하여 실제 증발산량을 산정하며 가용수량과 잠재증발산량은 강우량과 토양수분 저류량으로 부터 산정한다. 이러한 관계는 식 (5)~(8)과 같다.

$$w_t = r_t + sm_{t-1}^+ \quad (5)$$

여기서, sm_{t-1}^+ : $\max(sm_{t-1}, 0)$

$$ep_t = [1 + a_3(c_t - \overline{c_m})] \overline{ep_m} \quad (6)$$

여기서, a_3 : 매개변수

c_m : 장기 월평균온도

ep_m : 월평균 잠재증발산량

ep_t : 잠재증발산량

$$e_t = \min \{ ep_t [1 - a_4^{w_t / ep_t}], w_t, \dots, \} \quad (7)$$

$(0 \leq a_4 \leq 1)$

$$e_t = \min \{ w_t (1 - e^{-a_4 ep_t}), ep_t \} \quad (a_4 \leq 0) \quad (8)$$

여기서, a_4 : 매개변수

e_t : 실제 증발산량

2.4 기저 및 지표유출량의 산정

기저 유출량은 유역의 수분 저류량과 밀접한 관계가 있으며 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$s_t = a_5 (sm_{t-1}^+)^{b_1} \quad (9)$$

여기서 a_5, b_1 : 매개변수

실제 강우량은 식 (10)에 의해 산정되며 지표 유출량은 식 (11)에 의해 산정 된다.

$$n_t = r_t - ep_t [1 - e^{-r_t / ep_t}] \quad (10)$$

$$f_t = a_6 (sm_{t-1}^+)^{b_2} (m_t + n_t) \quad (11)$$

여기서 a_6, b_2 : 모형의 매개변수

b_1, b_2 : 지역 상수(반 건조지역; 0.5,

그 외의 지역; 1, 2)

3. 모형의 적용

3.1 적용 대상지역 및 기본자료

본 논문에서는 소양강댐 상류유역을 대상유역으로 선정하여 WASMOD를 적용하였다(그림 3참

조). 모형의 입력자료는 1990년 1월부터 1999년 12월 간의 월 강수량, 월 잠재 증발산량, 월 평균 온도, 월 유출량자료를 이용하였으며 우량관측소와 기상 관측소는 서화, 원통, 현리, 창촌, 인제, 추양, 용대, 군량, 상남, 신평 귀둔, 방동 우량관측소, 춘천 측후소를 이용하였다. 유출량 자료는 소양강댐의 유입량 자료를 이용하였다.

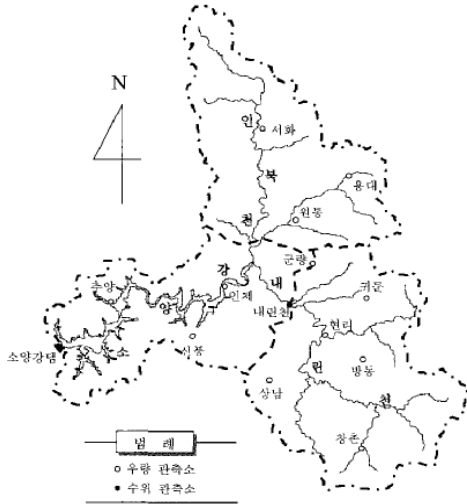


그림 3. 소양강댐 유역도

표 2. WASMOD 보정결과의 통계 특성치

항목	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation
Observed Runoff(m ³ /s)	87.539	119.353	1.363
Calculated Runoff(m ³ /s)	82.315	107.435	1.305
Fast Runoff(m ³ /s)	69.609	106.854	1.535
Slow Runoff(m ³ /s)	12.706	1.322	0.104

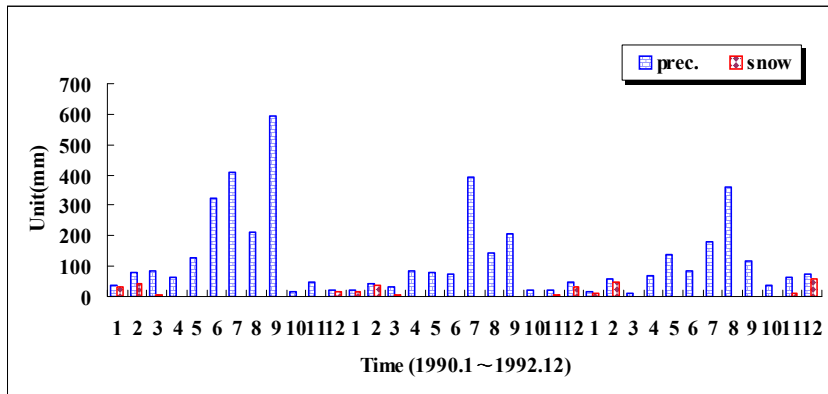


그림 4. 강설량 모의결과(1990.1~1992.12)

3.2 매개변수의 보정 및 검증

본 논문에서는 1990년 1월 부터 1992년 12월 기간을 대상으로 자동추적법인 VA05A(Hopper, 1976)을 이용하여 모형의 매개변수를 보정하였다. 추정된 매개변수 값은 표 1과 같으며 관측 유출량과 모의 유출량의 통계 특성치는 표 2에 수록하였다. WASMOD로부터 산정된 물수지 성분들을 그림 4~8에 도시하였으며 그림 4~8과 표 2에서 알 수 있듯이 일부 유출량값을 과소평가되는 경향이 있지만 전반적으로 유출량을 잘 모의할 수 있

표 1. WASMOD의 매개변수 보정결과

parameter	추정치	HWCI
a_1	0.716778	0.280
a_2	0.054989	0.241
a_3	0.627491	0.335
a_4	-0.0058432	0.091
a_5	0.194144	0.607
a_6	0.351719	0.490

주) HWCI : half width of a 95% confidence interval

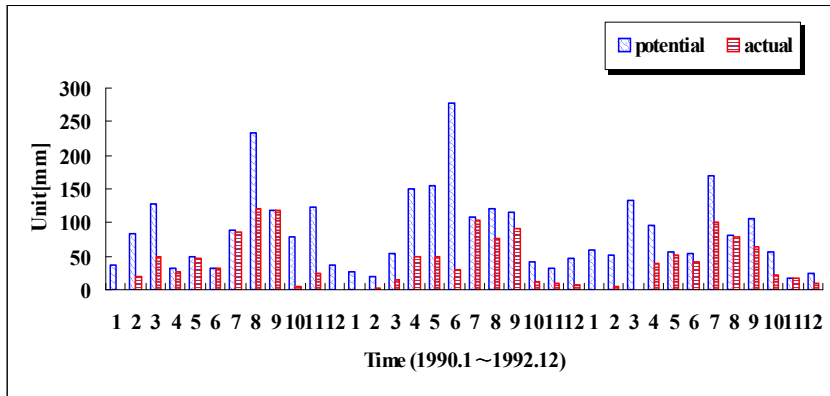


그림 5. 증발산량 모의결과(1990.1~1992.12)

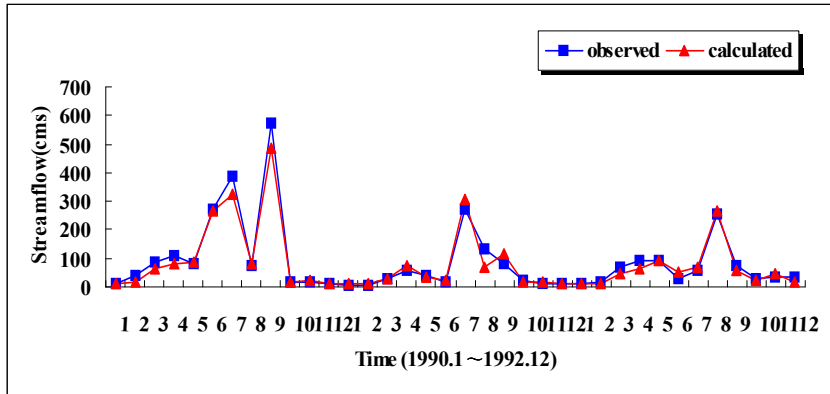


그림 6. 월 유출 수문곡선의 비교

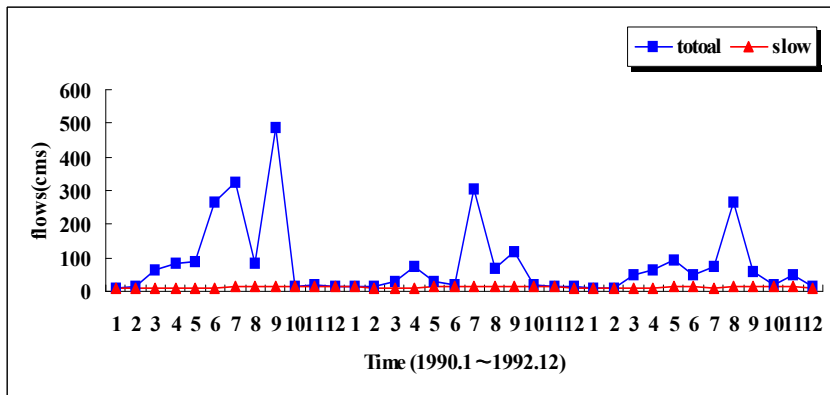


그림 7. 기저유출량 모의결과

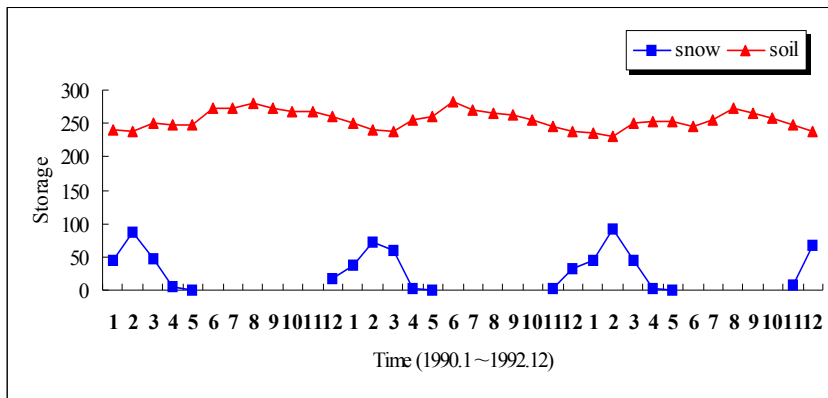


그림 8. 적설 저류량과 토양수분 저류량 산정결과

표 3. 월 유출량 보정결과 (1990.1~1992.12)

항목	1990년		1991년		1992년	
	관측(m ³ /s)	계산(m ³ /s)	관측(m ³ /s)	계산(m ³ /s)	관측(m ³ /s)	계산(m ³ /s)
1월	8.80	11.78	5.90	13.13	10.40	11.06
2월	40.90	16.96	5.90	12.64	18.00	11.99
3월	88.30	64.88	30.40	31.69	71.20	47.79
4월	109.70	82.64	59.40	75.72	93.10	65.49
5월	83.30	88.14	37.90	31.92	92.40	92.15
6월	269.30	266.93	17.70	21.75	27.30	50.11
7월	385.10	324.05	270.60	303.99	55.80	72.10
8월	75.90	83.11	133.10	70.66	252.10	265.09
9월	574.70	485.62	78.30	117.4	74.80	58.64
10월	17.10	16.00	21.30	17.87	28.30	22.11
11월	16.90	21.68	9.90	16.89	32.10	47.61
12월	11.40	14.21	13.10	13.72	32.00	15.85
수문 모형 평가 지수	RMSE	24.689				
	ME	0.953				
	IOA	0.987				
	Nash	0.915				
	R ²	0.954				

음을 확인하였다.

앞에서 추정된 매개변수를 이용하여 모형을 검증하기 위하여 1993년 1월부터 1999년 12월간의 강수량, 잠재증발산량, 평균온도 자료를 이용

하여 유출 모의를 실시하였으며 이를 통해 관측유출량을 잘 재현함을 확인하였다. 표 4와 표 5 그리고 그림 9~13의 모형의 검증 결과를 나타낸 것이다.

표. 4 WASMOD 검증결과 통계치 분석

항목	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation
Observed Runoff(m ³ /s)	70.983	116.392	1.640
Calculated Runoff(m ³ /s)	72.729	103.524	1.423
Fast Runoff(m ³ /s)	59.169	103.216	1.744
Slow Runoff(m ³ /s)	13.560	2.220	0.164

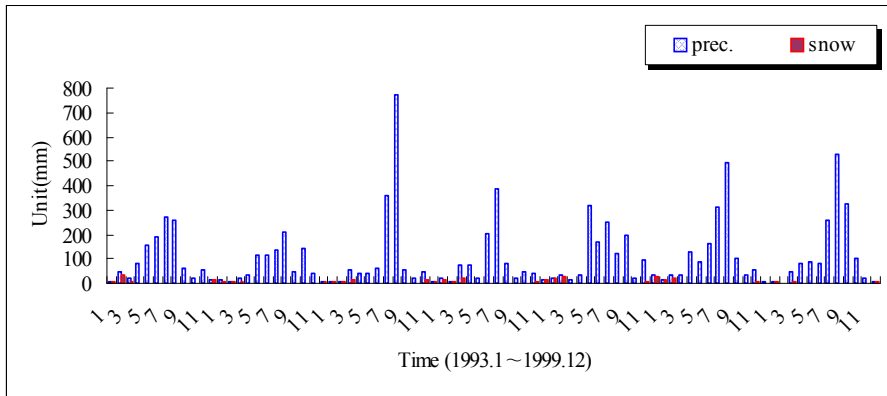


그림 9. 강설량 모의결과

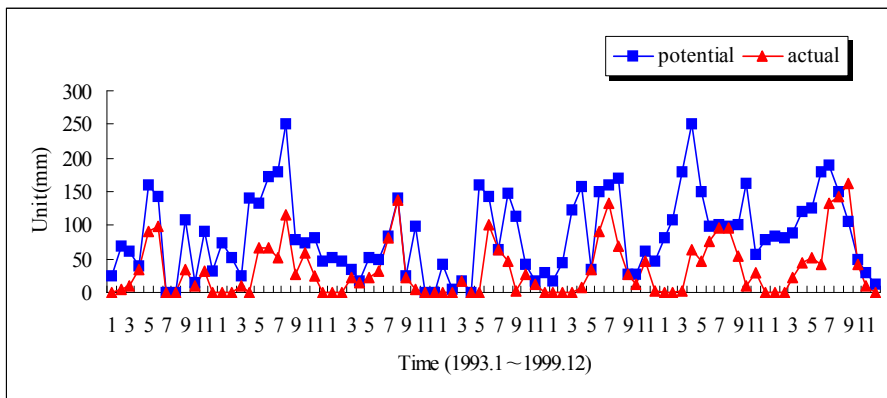


그림 10. 증발산량 모의결과

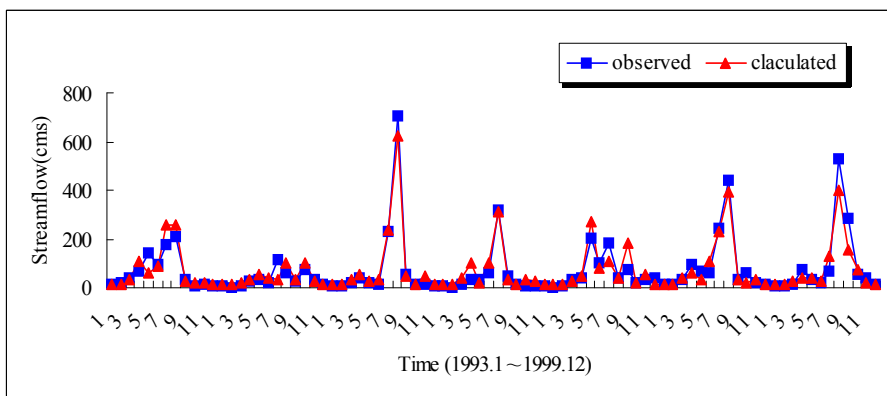


그림 11. 월 유출수문곡선의 비교

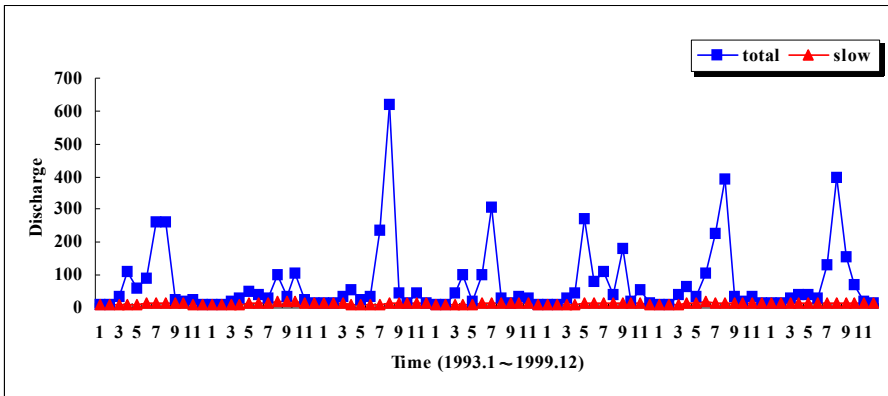


그림 12. 기저유출량 산정결과

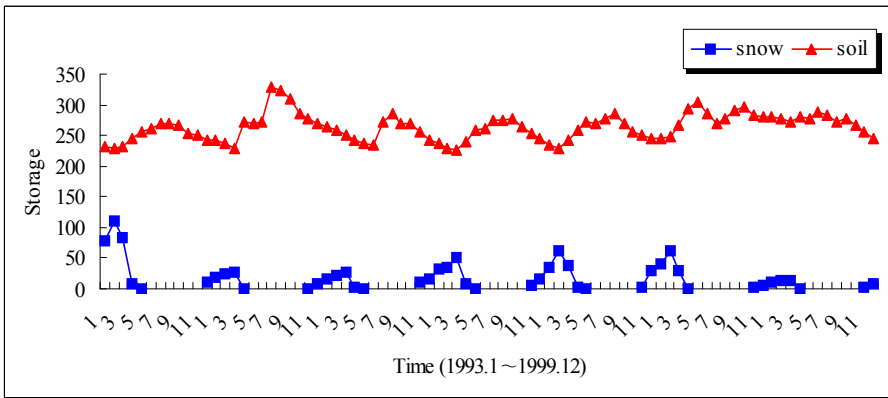


그림 13. 적설저류량과 토양수분저류량 모의결과

4. 결 론

본 연구에서는 용설을 고려할 수 있는 물수지 모형인 WASMOD를 이용하여 소양강댐 유역의 월 유출량을 산정하였다. WASMOD는 모형의 입력 자료와 구조가 비교적 간단하며 또한, 사용자가 각 지역의 특성에 따라 쉽게 수정이 가능하기 때문에 토양수분의 변화를 모의할 수 있는 장기 유출모형이다. 그러므로 우리나라와 같이 수자원 계획시 월 유출량 추정이 필요한 실무자들에게 손쉽게 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 1990년 1월 - 1992년 12월 기간 동안의

수문자료를 이용하여 모형의 매개변수를 검증한 결과 수문모형평가지수가 0.9이상의 값을 얻을 수 있었으며 관측 유출량을 잘 재현함을 알 수 있음을 확인 할 수 있었다.

2) 보정된 매개변수를 이용하여 모형을 검증하기 위하여 1993년 1월 - 1999년 12월의 유출모의를 실시해 본 결과, WASMOD의 수문모형평가 지수 값이 0.8이상을 나타내었으며 이를 통해 WASMOD를 이용하여 장기 월 유출량을 산정하는데 무리가 없음을 확인할 수 있었다.

3) WASMOD의 온도지수법을 이용하여 적설량과 용설량을 고려하여 모의해 본 결과 소양

표. 5 월 유출량 검증결과

	1993년		1994년		1995년		1996년		1997년		1998년		1999년	
	관측 (m ³ /s)	계산 (m ³ /s)	관측 (m ³ /s)	계산 (m ³ /s)	관측 (m ³ /s)	계산 (m ³ /s)	관측 (m ³ /s)	계산 (m ³ /s)	관측 (m ³ /s)	계산 (m ³ /s)	관측 (m ³ /s)	계산 (m ³ /s)	관측 (m ³ /s)	계산 (m ³ /s)
1월	14.60	11.08	5.30	11.46	7.10	14.20	4.90	11.52	3.20	11.59	13.20	11.62	7.60	15.26
2월	22.80	11.45	3.30	11.36	5.60	13.60	3.30	11.02	3.70	11.00	16.80	12.30	6.10	15.12
3월	39.20	37.18	5.10	17.72	18.20	34.77	15.70	43.56	30.90	30.11	35.60	42.66	13.50	28.79
4월	70.10	111.36	25.90	32.48	39.80	54.47	32.40	100.10	38.00	45.17	91.60	63.85	74.70	40.91
5월	140.70	61.53	37.10	51.38	19.00	24.07	30.70	19.63	204.30	274.03	69.80	33.69	36.90	39.96
6월	96.90	89.93	20.00	42.69	14.10	33.57	57.70	100.99	103.30	78.42	59.00	108.63	19.50	28.02
7월	176.60	259.97	113.00	31.41	233.80	238.47	320.70	308.66	186.40	110.29	244.20	228.11	64.80	132.18
8월	211.80	260.35	61.30	98.96	703.10	621.21	44.30	32.39	41.30	42.78	439.00	395.30	528.50	397.48
9월	31.20	26.31	26.90	33.65	55.60	45.52	14.10	16.50	74.70	181.85	34.60	32.84	287.60	156.14
10월	9.90	20.69	73.30	104.98	15.00	16.06	7.50	33.08	18.50	20.92	58.20	20.17	55.00	72.02
11월	13.70	23.22	33.40	25.75	15.00	47.61	8.40	30.11	31.50	55.57	23.50	36.08	42.20	17.67
12월	7.00	12.28	16.00	15.07	6.40	12.98	5.80	12.43	43.10	12.80	13.70	15.54	14.80	12.67
평가 지 수	RMSE	37.356												
	ME	0.894												
	IOA	0.969												
	Nash	0.894												
	R ²	0.895												

강댐 상류 유역은 용설에 의한 영향이 있음을 알 수 있었다(그림 4).

참고 문헌

김남원, 이병주, 이정은 (2005). "SWAT 모형을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가." 한국수자원학회논문집, 제39권, 10호, pp. 833-844

배덕효, 오재호 (1998). "장기유출해석에서의 용설영향에 관한 기초연구." 한국수자원학회논문집, 제31권, 6호, pp. 833-844

Hopper, M.J. (1978). "A Catalogue of

Subroutines", Harwell Subroutine Library, UK Atomic Energy Authority, Harwell

Vandewiele, G.L., Xu, C.-Y. and Ni-Lar-Win. (1992). "Methodology and Comparative Study on Monthly Water Balance Models in Belgium, China and Burma." *Journal of Hydrology*, Vol. 134, pp. 315-347.

Xu, C-Y, J. Seibert and S. Halldin, (1996). "Regional water balance modelling in the NOPEX area: development and application of monthly water balance models." *Journal of Hydrology*, Vol. 180, pp. 211-236.