

SWAT 모형의 토양수분지수를 이용한 가뭄감시

The Drought Monitoring by Soil Moisture Index of SWAT Model

황태하* / 장대원** / 서병하*** / 김형수****

Tae Ha Hwang, Dae Woon Jang, Byung Ha, SeoHung Soo Kim

요 지

가뭄은 홍수와는 달리 장기적이고 지속적인 피해를 유발하고, 지역의 경제에 타격을 주며, 생태계 및 환경을 파괴하는 자연재해로서 인간에게 오랫동안 고통을 준다. 이와 같은 가뭄에 대비하고 가뭄을 관리하기 위해 가뭄의 정도를 정량화하고자 하는 연구가 꾸준히 이루어져 왔다. 그 결과 다양한 가뭄지수들이 개발되었으며 이들을 이용해 가뭄감시를 수행하고 있다. 그중 Palmer의 가뭄심도(PDSI)가 가뭄감시와 관리를 위하여 가장 널리 사용되고 있음에도 불구하고, 물순환의 고려없이 기후적인 조건만을 이용하는 단점과 한계성이 여러 학자들에 의해 지적되어 오고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 토양, 토지이용, 기후자료를 입력자료로 하는 분포형 장기유출모형인 SWAT모형을 이용하였다. 즉, SWAT 모형을 이용해 토양수(soil water, SW)를 추정하고, 이로부터 계산된 토양수분결핍을 근거로 토양수분지수(soil moisture index, SMI)를 산정하였다. 본 연구에서 제안한 토양수분결핍에 기초한 토양수분지수는 가뭄감시와 관리에 그 적용성 및 활용이 가능하리라 판단된다.

핵심용어 : 가뭄, PDSI, SWAT, 토양수분, 토양수분지수

1. 서 론

가뭄은 인간이 극복하기 힘든 자연재해로서 가뭄지역의 경제를 어렵게 할 뿐 아니라 자연이 생태계까지 파괴하기 때문에 전 세계적으로 가장 두려워하는 주요 관심 재해 중 하나이며 인구증가, 도시화 및 산업화 등으로 인하여 용수수요가 증가할수록 더욱 극복하기 어려운 문제이다. 이와 같은 가뭄을 관리하기 위해 가뭄의 정도를 정량화하는 다양한 가뭄지수가 개발되어 왔으며, 각각의 관심분야에 따라 각기 다른 변수들을 이용해 가뭄의 심도와 기간을 분석하고 있다. 이들은 가뭄관리의 기본 자료로 이용될 뿐 아니라 가뭄감시에 매우 유용하게 이용하고 있다. 그중 PDSI는 가뭄을 정량적으로 분석하는 방법으로 국내외에 넓게 사용됨에도 불구하고 물수지 방정식에 사용되고 있는 두 개의 토양층은 상부와 하부로 단순화하였고, 그 위치에 대하여 적절히 표현되지 못할 수 있는 점과, 잠재 증발산량 산정시 개략적 방법인 Thornthwaite 방법을 사용하고 있으며, 또한 유역전체에 대해 동일한 토양-토지이용의 단순한 집중형(lumped) 물수지 모형이라는 점등 그 단점과 한계성이 여러 학자들에 의해서 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 GIS와 컴퓨터의 발달로 향상된 계산능력, 그리고 장기간에 걸친 다양한 식생분포, 토지이용상태, 토양의 성질 및 기상상태를 이용하여 복잡한 유역의 유출량을 예측할 수 있는 분포형 장기 유출모형(Soil and Water Assessment Tool, SWAT)을 이용, 기존의 PDSI의 단점과 한계성을 극복하는 토양수분에 기초한 토양수분지수를 산정, 가뭄분석을 실시하고자 한다.

* (주)삼호텍엔지니어링 (E-mail; arron_hwang77@hotmail.com)
** 인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail; badajdw@hotmail.com)
*** 인하대학교 토목공학과 교수 (E-mail; seohydro@inha.ac.kr)
**** 인하대학교 토목공학과 교수 (E-mail; sookim@inha.ac.kr)

2. 연구방법

SWAT 모형을 이용해 장기 일 토양수를 추정하기 위해 소양강댐 지점의 일 유입량 자료를 이용하여 SWAT 모형의 보정과 검증에 하고, 일 토양수(soil water, SW)를 추정하였으며, 추정된 토양수를 이용하여 토양수분결핍에 기초한 토양수분지수(soil moisture index, SMI)를 산정, 가뭄분석을 실시하고자 한다. 본 연구의 과정은 그림1 과 같다.

3. SWAT 모형

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold(1990)에 의해 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지 이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법과 영향을 예측하기 위하여 개발된 모형이다.

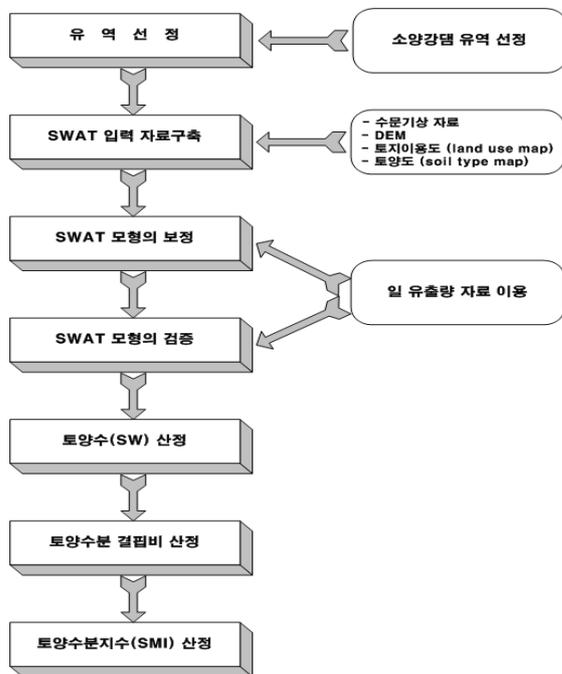


그림 1. 가뭄분석 모식도

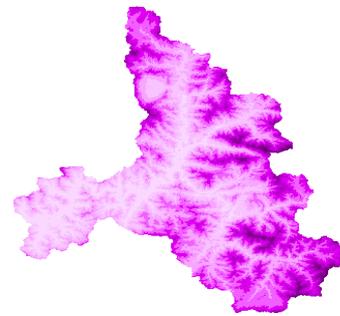


그림 2. 소양강댐 유역의 DEM

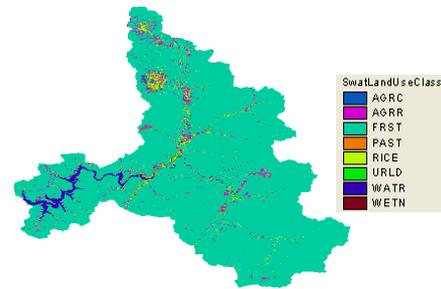


그림 3. 소양강댐 유역의 토지피복상태

3.1 자료수집 및 입력자료 구축

본 연구에서는 유역을 선정하는 과정에서 모형의 입력 자료를 충분히 만족시켜줄 수 있는 소양강댐 유역으로 결정하였다. 기상관측소는 춘천, 인제 두 곳과 강우량 자료는 유역내의 여러 우량관측소 중 비교적 자료가 정확한 12개 우량관측소의 1990~1999년 자료를 이용하였다. 일 유출량 분석은 소양강댐 지점의 관측 유입량을 사용하였다. 대상유역에 대한 수치고도자료(DEM)는 자료 구축과정을 거쳐 SWAT의 입력 자료로 그림2와 같은 소양강댐 유역의 DEM을 생성시켰다. 토지이용도(Land-use map)는 한국수자원공사의 한강 유역조사에서 위성영상을 가지고 수치지형도와 혼합하여 구축된 토지이용도를 이용하였다. 표1은 소양강댐 유역의 토지피복상태를 정리한 것이다. 토양도(Soil-type map)는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 정밀토양도와 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 이용하면 입력자료로의 구축이 가능하다. 그림4에서 미지정된 토양도 부분은 휴전선 이북으로 측정 자료가 없기 때문이며 이는 모형에서

각 토양도의 분포에 따른 균등 배분으로 모형내에서 고려되도록 하였다.

표 1. 소양강댐 유역의 토지피복상태

구 분	초지(PAST)	물(WATR)	습지(WETN)	산림(FRST)	나지(AGRC)	밭(AGRR)	논(RICE)	도시화(URLD)	계
면적(km ²)	14.17	43.59	1.87	2460.4	9.09	73.01	54.29	17.65	2674.4
비 율(%)	0.53	1.63	0.07	92	0.34	2.73	2.03	0.66	100

3.2 일유출량 산정

SWAT 모형을 이용한 일유출량 모의에 있어서 먼저 실제 하천과 유사하게 계산된 하천을 모의하는 것이 필요하다. 이를 위해 최적 Threshold area(출구점 면적)를 사용자가 선정하여야 하며 이를 이용해 소유역을 분할할 수 있다. 본 연구에서는 출구점 면적을 2000ha로 결정하였다. 본 연구에서는 실제 하천의 형상파일(shape file)을 이용하여 실제 하천과 유사하게 하천을 모의하였으며, 모의하천을 실제 하천망과 비교하여 하천이 없는 부분의 출구점을 지워가는 방식으로 29개의 소유역을 형성시켰다.

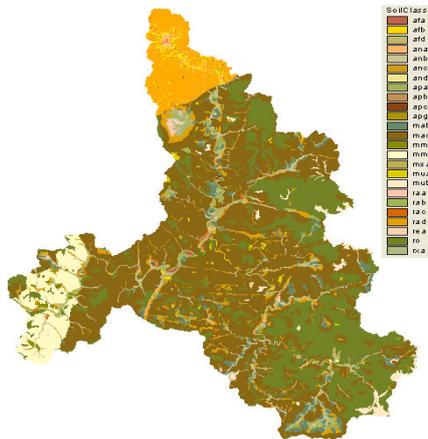


그림 4. 소양강댐 유역의 토양 분포상태

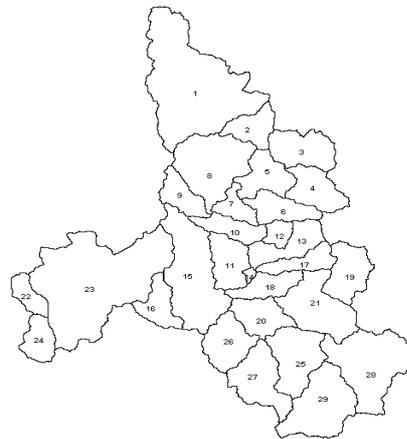


그림 5. 소양강댐 유역의 소유역 분할

모형의 검정을 실시하는 과정에서는 유역을 가장 잘 반영하고 있다고 판단되는 1996년 수문기상자료를 가지고 매개변수를 추정하였고, 검정과정에서 사용되지 않은 다른 기간에 대하여 모형의 검정을 실시하였다. 보정된 매개변수 값은 표2 와 같다. SWAT 모형의 적용 및 검정 결과는 각각 표3 및 4 와 같다.

표 2. 매개변수의 기준값 및 보정값

입력파일	매개변수	하한치	상한치	보정값
*.mgt	CN ₂	35	98	▽8
*.gw	GWREVP	0.02	0.2	0.02
	REVAPMN	0	500	1
*.sol	SOL_AWC	0	1	▽0.05
*.hru	EPCO	0	1	1
	ESCO	0	1	0.8

표 3. 대상기간에 대한 SWAT 모형의 적용 결과

구 분	RMSE	ME	R ²	모의유출량 (mm)	관측유출량 (mm)	강 우 (mm)
1990	12.13	0.319	0.328	1327.416	1647.860	2017.7
1991	4.693	0.442	0.463	461.032	678.769	1163.7
1992	3.270	0.313	0.414	650.904	780.309	1206.6
1993	3.206	0.434	0.481	713.371	826.812	1178.1
1994	1.768	0.247	0.529	454.911	417.440	892.2
1995	7.794	0.565	0.567	1053.720	1129.933	1466.3
1996	4.150	0.568	0.569	600.180	542.503	967.3
1997	2.805	0.495	0.570	869.508	774.8	1309.3
1998	2.842	0.779	0.780	1024.499	1092.752	1462.1
1999	8.972	0.511	0.513	1090.464	1138.893	1544.1
1990-1999	6.063	0.467	0.447	8246.01	9027.154	13207.4

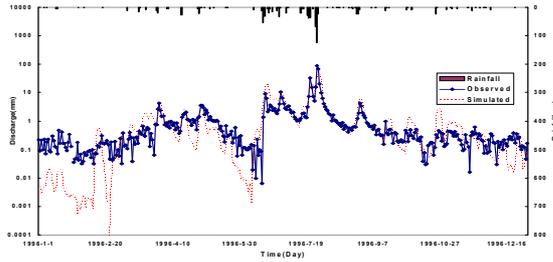


그림 6. 소양강댐 지점의 1996년 일 유출 수문곡선

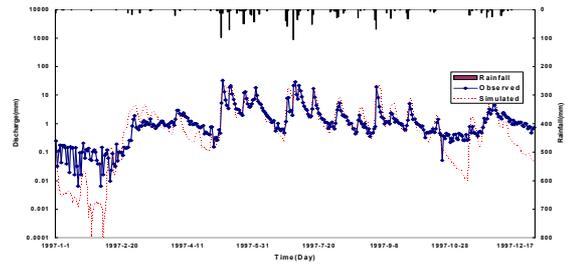


그림 7. 소양강댐 지점의 1997년 일 유출 수문곡선

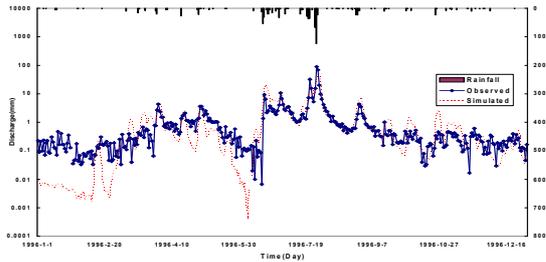


그림 8. 소양강댐 지점의 1996년 일 유출 수문곡선(보정)

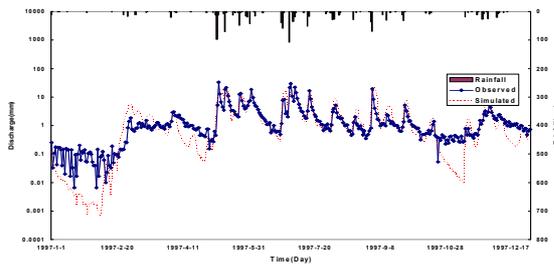


그림 9. 소양강댐 지점의 1997년 일 유출 수문곡선(검정)

표 4. 대상기간에 대한 SWAT 모형의 검정 결과

구분	RMSE	ME	R ²	모의유출량 (mm)	관측유출량 (mm)	강우 (mm)
1990	12.141	0.319	0.327	1312.17	1647.860	2017.7
1991	4.695	0.442	0.462	463.134	678.769	1163.7
1992	3.193	0.346	0.429	650.210	780.309	1206.6
1993	3.196	0.437	0.480	696.803	826.812	1178.1
1994	1.756	0.257	0.532	458.729	417.440	892.2
1995	7.834	0.561	0.565	1062.809	1129.933	1466.3
1996	4.138	0.571	0.571	594.558	542.503	967.3
1997	2.755	0.512	0.574	861.569	774.8	1309.3
1998	2.825	0.782	0.784	996.504	1092.752	1462.1
1999	8.974	0.511	0.513	1085.871	1138.893	1544.1
1990-1999	6.061	0.467	0.487	8182.357	9027.154	13207.4

표3 과 4 에서 볼 수 있는 것처럼 모형의 검정 결과 모형의 효율성 계수는 10년 전체 경우 0.467 값을 보였고, 결정계수의 경우 평균 0.524 로 보정전보다 좋은 결과를 나타내었다. 전반적으로 매개변수 보정 전과 보정후의 차이는 아주 크게 나타나지는 않았다. 그러나 매개변수 보정전과는 다르게 동절기의 갈수 유량이 관측치와 비교적 잘 맞음을 알 수 있다.

3.3. 토양수분지수 산정

소양강댐유역의 일유출 자료를 이용하여 SWAT 모형의 보정과 검증을 한 뒤 구해진 각 소유역의 매 달의 마지막 일 토양수분을 그 달의 실제 유효 토양수(acutal available soil water)로 사용하여 각 달의 장기간토양수분의 평균(mean), 최대값(maximum), 최소값(minimum)을 결정한다. 이렇게 결정된 토양수분의 평균, 최대값과 최소값을 사용하여 토양수분 결핍비(soil moisture deficit ratio)를 계산하였으며 식 (1)과 같다.

$$SMD_i = \frac{SM_i - SM_i^{mean}}{SM_i^{max} - SM_i^{min}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, SMD_i : 토양 수분 결핍비 (soil moisture deficit ratio)

SM_i^{mean} : 장기간 평균 유효토양수 (long-term monthly mean available soil water)

SM_i^{max} : 장기간 최대 유효토양수 (long-term monthly maximum available soil water)

SM_i^{min} : 장기간 최소 유효토양수 (long-term monthly maximum available soil water)

SM_i : 실제 유효 토양수 (actual available soil water) ($i=1,..12$)

이렇게 구해진 각 달의 토양수분 결핍비(SMD_i)는 장기간에 걸쳐 구해진 유효토양수의 평균, 최대, 최소값을 이용하여 건조의 정도를 나타내게 된다. 가장 최악의 가뭄(토양수분 결핍의 최대비)을 결정하기 위해 모든 소유역의 지속기간별(1~24개월) 최대 토양수분 결핍비($\sum_{i=1}^n SMD_i$, cumulative soil moisture deficit ratio)를 이용하여 토양수분지수 산정공식을 유도한다. 표 5 은 지속기간별 최대 토양수분결핍비를 나타낸 것이고, 표 5 에서 구한 지속기간별 최대 토양수분결핍비를 그림 10과 같이 도시하여 회귀직선을 구하였으며 이때의 가뭄을 극한 가뭄으로 정의하며 토양수분지수는 $X=-4.0$ 이다. 또한, 극한 가뭄과 지속기간별 최대 토양수분결핍비가 0인 구간을 3개로 세분하여 심한 가뭄($X=-3.0$), 보통가뭄($X=-2.0$), 약한 가뭄($X=-1.0$)으로 정의하였다. 이는 PDSI를 구하는 방법과 매우 유사하다.

표 5. 소양강댐 유역의 최대 가뭄기간별 $\sum SMD_i$

가뭄지속기간(월)	$\sum SMD_i$	가뭄지속기간(월)	$\sum SMD_i$
1	-73.8731	13	-647.783
2	-199.17	14	-670.017
3	-199.17	15	-692.119
4	-237.928	16	-752.102
5	-289.304	17	-800.413
6	-350.347	18	-825.822
7	-383.544	19	-861.609
8	-438.003	20	-906.581
9	-488.215	21	-946.497
10	-520.013	22	-958.741
11	-562.21	23	-958.096
12	-622.68	24	-939.123

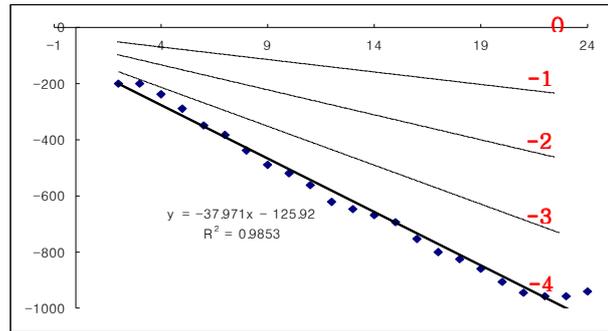


그림 10. 소양강댐 유역의 최대 가뭄기간별 $\sum SMD_i$

그림10 에서 보는 바와 같이 실선으로 표시된 $X=-4$ 에서 $t=1$ 개월일 때 $\sum SMD_i = -163.891$ 이고 $t=24$ 개월일 때 $\sum SMD_i = -1037.224$ 을 이용하여 i 번째 월의 가뭄심도 X_i 를 구하는 공식은 식 (2)와 같이 유도된다. 식 (2)를 가뭄지수 산정공식으로 변형시키면 식 (3)과 같이 유도된다.

$$X_i = \frac{\sum_{i=1}^i SMD_i}{31.48 + 9.493t} \quad (2)$$

$$X_i = X_{i-1} + \frac{SMD_i}{40.973} - 0.232X_{i-1} \quad (3)$$

여기서, X_i : i 달의 토양수분지수, X_{i-1} : $i-1$ 달의 토양수분지수, SMD_i : i 달의 토양수분 결핍비

식(3) 을 이용하여 소양강댐 유역의 월 토양수분지수를 산정하였다. 그림11 과 표6 은 소양강댐의 1996년 6월의 토양수분지수이다.

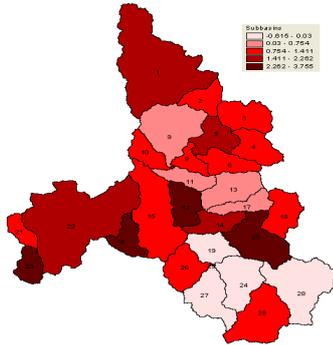


그림11.유역의토양수분지수(96년 6월)

표 6. 소양강댐 유역의 토양수분지수(1996년 6월)

소유역	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6월	2.24	2.01	1.27	0.92	3.02	0.88	0.84	2.01	2.02	2.08
소유역	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6월	0.86	0.83	0.90	1.44	1.31	1.00	0.88	0.64	2.84	0.61
소유역	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
6월	0.97	1.30	0.83	2.53	2.87	3.03	2.89	2.31	2.81	

각 소유역별로 계산된 토양수분지수를 면적평균법으로 소양강댐 유역의 평균 토양수분지수를 도출하였으며, 그 결과는 표7 과 그림12 와 같다.

표 7. 소양강댐 유역의 평균 토양수분지수

년 \ 월	1	2	3	4	5	6
1990	2.14	2.29	2.86	3.14	3.44	4.02
1991	1.51	1.21	0.84	0.23	0.02	1.66
1992	-3.58	-3.26	-3.54	-3.44	-3.21	-3.36
1993	0.44	1.10	1.02	1.41	1.28	1.28
1994	-0.50	-1.18	-1.75	-2.32	-2.25	-1.86
1995	-1.83	-2.09	-1.69	-1.90	-2.39	-2.80
1996	0.87	0.91	1.67	2.28	1.44	1.74
1997	0.43	1.26	1.01	0.35	1.62	1.95
1998	1.45	1.47	1.22	1.94	1.61	1.79
1999	-0.73	-1.56	-1.53	-1.60	-1.50	-1.79
년 \ 월	7	8	9	10	11	12
1990	4.05	3.81	3.36	2.55	1.88	1.51
1991	1.39	-0.34	-1.29	-2.01	-2.89	-3.26
1992	-3.79	-3.29	-2.79	-2.35	-2.12	-0.68
1993	1.53	1.38	0.94	0.48	0.14	-0.24
1994	-2.75	-2.51	-2.88	-2.11	-1.66	-1.68
1995	-2.48	-0.87	-0.23	0.29	0.74	0.67
1996	2.30	1.86	0.63	0.33	0.21	0.36
1997	1.33	0.71	1.09	0.61	1.23	1.47
1998	1.83	1.60	1.94	1.45	1.24	0.22
1999	-1.39	-0.80	0.40	1.65	1.92	2.18

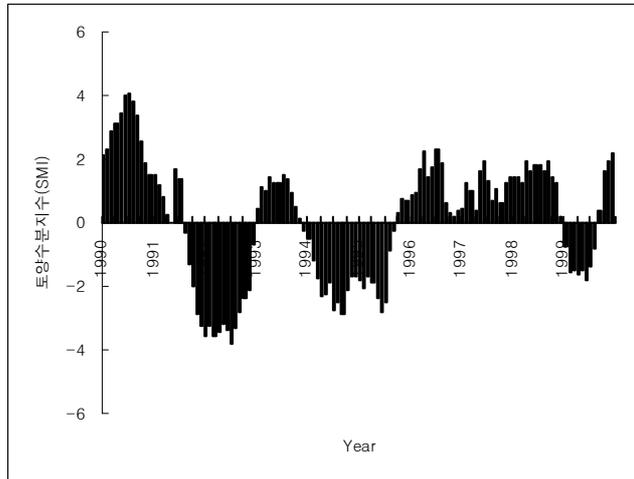


그림 12. 소양강댐 유역의 평균 토양수분지수

4. 결론

Palmer 의 가뭄심도(PDSI)는 가뭄감시와 관리를 위해 세계적으로 많이 사용됨에도 불구하고 물순환의 고려 없이 기후적인 조건만을 이용하는 단점과 한계성이 여러 학자들에 의해 지적된바 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 토양, 토지이용, 기후자료를 입력자료로 하는 분포형 장기유출모형인 SWAT 모형을 이용하였다. 즉, SWAT 모형을 이용해 토양수(soil water)를 추정하여 토양수분결핍에 기초한 토양수분지수(SMI)를 산정하였다. 소양강댐 유역에 이를 적용하였으며 장기 일 토양수를 추정하기 위해 소양강댐 지점의 일유입량 자료를 이용하여 SWAT모형의 보정과 검정을 하였으며, SWAT모형을 통해 모의된 토양수를 이용해 토양수분지수를 산정, 가뭄분석을 실시하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 PDSI에서 잠재 증발산량 산정시 Thornthwaite 방법은 지표면의 성질이나 조건을 전혀 고려하지 않았다. 본 연구에서는 토지이용도, 토양도를 고려한 SWAT 모형을 이용해 이들 조건을 고려하였다.
- (2) PDSI의 물수지방정식에 사용되고 있는 두 개의 토양층은 상부와 하부로 단순화되어 있는데, 이는 그 위치를 대하여 적절히 표현할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 최대 10개의 토양층으로 구분할 수 있는 SWAT 모형을 통해 보완하였다.

- (3) 이상의 결과들로부터 기존의 물순환 고려없이 기후적인 조건만을 이용하는 PDSI의 단점과 한계성을 SWAT모형을 통해 보완하였으며, GIS를 통해 보다 높은 해상도에서 가뭄감시를 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김상민 (1999). 우리나라 주요지점에 대한 가뭄지수 산정과 비교, 석사학위논문, 서울대학교.
2. 류재희 (2000). 가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교연구, 석사학위논문, 고려대학교.
3. 장대원 (2004). GIS 기반의 SWAT 모형을 이용한 하천 유출량 모의, 석사학위논문, 인하대학교.
4. Nathaniel, B. Guttman, A sensitivity analysis of the palmer hydrologic drought index, Water Resources Bulletin, Vol. 27, No. 5, pp. 797-807
5. Narasimhan, B. and R. Srinivasan (2002), Development of a soil moisture index for agricultural drought monitoring using a hydrologic model (SWAT), GIS and remote sensing, 2002 Texas Water Monitoring Congress Plenary Session.