

토양수분과 지리정보시스템을 활용한 전국 단위 가뭄 평가와 활용



최진용 >>

서울대학교 농업생명과학대학
지역시스템공학전공
iamchoi@snu.ac.kr



김옥경 >>

서울대학교 대학원 생태조경
지역시스템공학부

1. 서론

강우가 시기별로 편중되면 가뭄이 발생하고 지역별 불균형에 의하여 공간적인 가뭄이 발생하는데, 이와 같이 강우가 필요량 보다 적어 발생하는 가뭄은 홍수와 대비되는 자연 재해이다. 홍수가 급진적이며 돌발적이고, 파괴적이면서 그 피해 범위가 하천 주변 및 저지대 일대인 반면에, 가뭄은 점진적이고, 예측 가능하며 발생시에 그 피해 범위가 광범위하다. 홍수는 일시에 생활기반과 사회기반 그리고 생산기반을 파괴하는 반면에 가뭄은 점차적으로 피해 범위가 확대되고 시간이 경과함에 따라 가뭄의 강도가 강해져 식수 공급을 제한하여 생활을 어렵게 하거나, 가뭄 발생 이 후로 그 피해가 오랫동안 지속되거나 일정 시간 후에 그 결과가 나타난다는 특징이 있다.

가뭄도 자연재해 중 하나이므로 이를 예보하고 대처할 수 있다면 충분히 그 피해를 줄일 수 있다. 특히 홍수에 비해 가뭄은 그 제 현상들이 점진적으로 이루어 지므로 예측과 대비로서 인재를 줄일 수 있고 생활의 불편함과 산업에 대한 영향을 감소시킬 수 있다. 이를 위하여

가뭄을 평가하고 예측하기 위한 여러 기법들이 연구 되어 왔다.

학자들은 가뭄을 기상학적가뭄, 수문학적 가뭄, 농업가뭄 등으로 분류하고 가뭄의 정도를 표현하기 위하여 가뭄지수 (Drought Index)를 개발하여 사용하여 왔으며, 대상과 평가방법에 따라 가뭄을 표현하는 특성이 다르다. 가뭄지수 중에서 대표적인 것이 기상학적 가뭄을 표현하는 Palmer (1965)가 제시한 PDSI(Palmer Drought Severity Index) 이다. 이는 가뭄정도를 평가하기 위해 물수지를 기본으로 어느 지역의 실제 강우량과 필요수량의 차를 이용하였다. 가뭄은 수자원 개발인해 지역과 산업에 따라 미치는 영향이 다르다. 수문학적 가뭄지수중 하나인 SWSI(Surface Water Supply Index) 는 비록 강우가 적어 기상학적으로나 농업적으로는 가뭄이 왔다고 하더라도 저수지와 같은 수원에 물이 많으면 가뭄이라고 표현하지 않게 된다.

이와 같이 가뭄지수는 어떤 가뭄에 관심이 있는가에 따라 선택적으로 사용할 수 있으며 목적에 맞는 가뭄지수의 선택 또한 중요한 사항이라고 할 수 있다. 또한 여러개의 가뭄지수를 계산하여 서로 보완하는 역할을 할 수 있도록 할 수 있다. 즉 기상학적인 가뭄지수가 가뭄을 나타내면 비록 수문학적으로는 가뭄이 아니더라도 미리 수자원 관리에 주의를 기울이도록 하는 것이다.

토양수분에 의한 가뭄 평가와 지수 산정은 주로 농업에서 관개계획을 수립하거나 작물의 생육조건을 파악하기 위하여 이루어져 왔다. 하지만 토양수분의 감소에 의한 가뭄은 산발발생, 소하천 수량의 감소 등 생태계와 중요한 관계가 있고, 수자원활용과 이용에 관련된 수문학적 가뭄에 선행하여 나타나는 특성이 있어 외국에서는 가뭄 평가에 많이 사용되고 있다.

따라서 본 고에서는 김옥경 등(2006) 등에 의해 발표된 논문을 참고하여 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)를 소개하고 산정하기 위한 기본 이론과 이를 정보기술 중 하나인 지리정보시스템을 이용하여 활용하는 방법에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 토양수분 가뭄 평가

2.1 토양수분 물수지모형

토양수분모형을 이용한 가뭄을 분석하기 위하여 유역별 토양수분함량을 추정할 수 있는 토양수분 물수지모형을 구성할 수 있다. 토양수분 물수지모형은 기상자료, 토양의 물리적 특성 자료를 사용하여 각 토양별 토양수분을 추정할 수 있다. 토양 내에서의 일정 기간의 물의 유입 및 유출량을 나타내는 물수지 방정식은 포장의 지형적 조건이나 토양인자, 작물 등에 의해 좌우되며, 아래의 식과 같이 표현할 수 있다. 토양수분물수지 모식도는 그림 1과 같다.

$$\Delta SMC = (RF + IR + UP + HI) - (DR + DP + ET + HO) \quad (1)$$

여기서, ΔSMC 는 토양 내에서의 토양수분 변화량 (mm), RF 는 강우량(mm), IR 은 관개량(mm), UP 는 모관력에 의한 수분상승량(mm), HI 는 횡방향 수분 유입량(mm), DR 은 지표배수량(mm), DP 는 유효토층 하부에서의 지하배수량(mm), ET 는 증발산량 (mm), HO 는 횡방향 수분유출량(mm)이다.

식 (1)에서 수평방향의 유출입량, 모세관력에 의한 수분상승량을 무시하고 무관개라고 가정하면 식 (2)와 같이 단순화 할 수 있다.

$$\Delta SMC = (RF) - (DR + DP + ET) \quad (2)$$

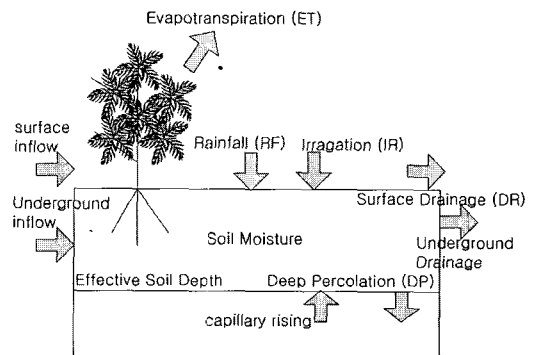


그림 1. Schematic diagram of soil water balance.

2.2 Runs 이론

토양수분을 이용한 가뭄의 특성을 분석하는 방법으로써 가장 유용하게 이용되는 Runs 이다. 이 이론의 적용하여 가뭄을 분석하며, 토양수분에 의한 가뭄의 시작은 유효수분백분율이 50% 이하로 내려가는 시점으로 정의하고 가뭄의 종료는 강우에 의해 충분한 수분이 공급되어 유효수분백분율이 50% 이상이 될 때로 정의할 수 있다. Runs 이론은 가뭄이 가지는 다양한 특성을 세 가지의 특성치로 구분하여 이를 각각 분석하며, 가뭄의 세 가지 특성치는 기본수준(truncation level)에 대한 음의 부분 즉, 부족분에 대한 지속기간(duration ; D), 크기(magnitude ; M), 강도(severity ; S)로 분류할 수 있다. 가뭄강도는 유효수분백분율 50% 이하일 경우의 기간과 유효수분백분율 50%에서 현재의 토양수분함량을 뺀 값의 곱으로 정의할 수 있으며, 무게 단위의 토양수분과 기간의 곱(% $Wt \times day$), 부피 단위의 토양수분과 기간의 곱(% $Vol. \times day$), 토양수분량과 기간의 곱($mm \times day$), 유효수분백분율과 기간의 곱(% $\times day$)과 같은 방법으로 표시할 수 있다. 본 연구에서는 가뭄의 실제적인 크기를 나타낼 수 있는 유효수분백분율과 기간의 곱에 의한 가뭄강도를 선택한다. 가뭄크기는 가뭄강도에서 가뭄기간을 나눈 값으로 정의된다. 이상과 같이 정의한 가뭄특성치를 식 (3), (4), 그리고 (5)에 나타내었다.

$$D(day) = \text{end day of AW50\%} - \text{start day of AW50\%} \quad (3)$$

$$S(\% \times day) = \sum_{i=\text{start}}^{\text{end}} SMD_i \quad (4)$$

$$M(\%) = S/D \quad (5)$$

여기서, AW 50%(Available Water 50%)는 유효수분백분율 50%이하를 나타내며, SMD(Soil Moisture Deficit, %)는 유효수분백분율 50%에서

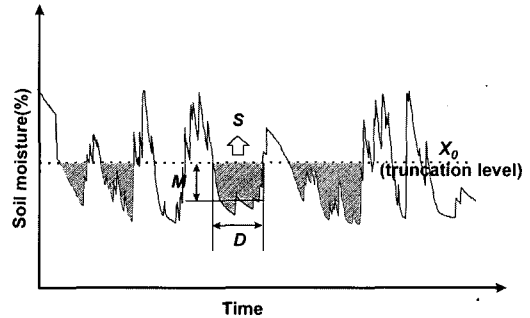


그림 2. Fundamental parameters of the drought events. 현재의 유효수분백분율을 뺀 값으로 정의한다. 위의 D, S, M 을 표현하면 그림 2와 같다.

2.3 빈도분석

가뭄 특성치를 분석하기 위하여 각각에 대해 빈도분석을 실시하였으며 빈도 분석시 사용된 방법은 빈도계수법이며 비초과확률(non-exceedance probability)은 년 초과치 계열의 해석에 적합성이 인정된 California 공식을 사용할 수 있다. 또한 재현기간을 살펴보기 위하여 빈도계수법을 사용할 수 있으며, 이는 식 (6)와 같고, 특정 재현기간을 가지는 특성치를 결정하는데 사용한다. 선택된 분포형에 따라 $K_T \sim T$ 관계가 수립되며 이는 공식, 표 혹은 관계곡선의 형태를 가진다.

$$x_T = \bar{x} + sK_T \quad (6)$$

여기서, x_T 는 재현기간별 특성값, s 는 표준편차, 빈도계수 K_T 는 기간 T 와 확률분포형의 함수를 나타낸다.

3. 전국단위 가뭄 분석

3.1 유역 단위의 선정

수자원 정보시스템 기반을 구축하고, 국가 차원의

수자원 개발 계획 및 관리를 보다 효율적으로 추진하기 위하여 국가지리정보 시스템(NGIS)을 활용하여 개발된 수자원단위지도(1999)를 이용하여 우리나라 전 지역을 대상으로 가뭄을 평가할 수 있다. 이때 가뭄상황에 따른 효과적인 물관리를 위하여 수문 단위 중권역을 기본 대상구역으로 선정하고, 수문 단위 중권역은 총 117개의 구역으로 구분된다.

3.2 자료의 수집

토양의 물리적 특성자료인 유효토심(ED), 포장용수량(FC), 위조점(WP) 및 수문학적 토양균을 알기 위하여 1:50,000 개략토양도(농촌진흥청, 1971)와 토양종류에 따른 특성자료 제시 분류표(Israelsen and Hansen, 1962)를 이용할 수 있으며, CN값을 계산하기 위하여 개략토양도의 토양 종류에 따른 NRCS 수문학적 토양군으로 분류표와 토지피복도를 이용하고 이를 이용하여 우리나라 전 지역에 대한 토양자료를 구축하여 사용할 수 있다. 기상자료는 강우량과 잠재증발산량을 산정하기 위한 평균기온, 평균 풍속, 상대습도, 일조시간 등이며, 이를 측후소별로 수집하고, 이를 바탕으로 Thiessen의 면적가중법을 사용하여 수문 단위 중권역 구역별 강우량과 증발산량을 산정할 수 있다.

3.3 SMI 산정

김옥경 등(2006)은 위에서 살펴본 방법에 따라 확률분포형을 이용하여 SMI를 산정하였다. SMI지수는 총 5단계로 구분되며 PDSI나 SPI, MSWSI와는 달

리 유효수분 백분율 50% 이상인 경우에 대해서는 고려하지 않으므로 정상상태나 강수가 많은 상태는 지수로 표현되지 않는다.

3.4 SMI 적용

개발된 SMI를 이용하여 큰 가뭄이 있었던 1994, 1995, 2000, 2001 연도의 구역별 SMI 분포를 살펴보면 1994년 4월의 경우 전체 구역 중 약 70%가 약한 가뭄 상태로 나타났고, 강원도 북부 지역만 매우 심한 가뭄 상태를 나타내었다.

반면 1995년 7월은 SMI 각 단계별로 비슷한 비율을 나타내며, 중부지방과 남부지역의 일부 해안 지방이 매우 심한 가뭄 상태를 보이고 있다. 2000년 4월은 한 구역을 제외한 모든 구역이 가뭄상태를 나타내며 약 50%가 심한 가뭄 상태 이상이 나타내며, 한반도의 동남쪽이 심한 가뭄상태를 나타내었다. 2001년 6월은 구역의 약 90%가 심한 또는 매우 심한 가뭄 상태를 나타내며 전 구역이 극심한 가뭄 상태를 나타내었다.

이 중 계절적으로 비슷한 시기를 보인 1994년과 2000년을 비교해 보면, 2000년이 전반적으로 1994년 보다 더 심한 가뭄을 나타내었다. Table 2는 SMI 분석결과 나타낸 SMI값에 따른 구역 개수를 나타낸 표이고 그림 3은 4개년의 SMI를 공간분포로 나타낸 것이다.

그림 4는 극심한 봄 가뭄이 있었던 2001년 4월부터 7월의 중순경의 SMI를 공간분포로 나타낸 것이다. 4월부터 심한 가뭄 상태를 보이는 지역이 점점 넓어져 6월에는 매우 심한 가뭄 상태가 한반도 전역에

표 1. SMI classification

Severity(X)	probability	SMI	Drought stage
$X < 543$	0.96 ~ 1.00	-1	mild Drought
$543 \leq X < 1106$	0.68 ~ 0.96	-2	moderate Drought
$1106 \leq X < 2338$	0.32 ~ 0.68	-3	severe Drought
$2338 \leq X < 5734$	0.04 ~ 0.32	-4	very severe Drought
$5734 \leq X$	0 ~ 0.04	-5	extreme Drought

표 2. Analysis result using SMI

SMI \ year/month/day	1994/4/11	1995/7/7	2000/4/18	2001/6/17
-4	6	21	9	66
-3	7	29	48	37
-2	15	22	31	7
-1	67	15	27	5
normal	21	29	1	1

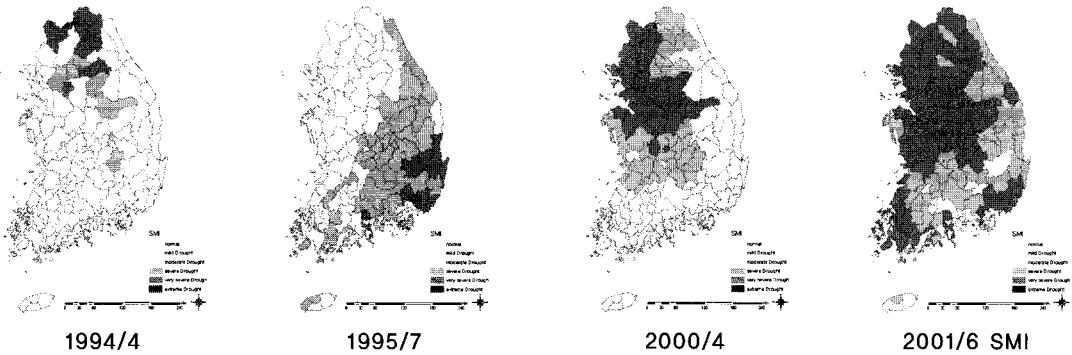


그림 3. Result of SMI(1994/4, 1995/7, 2000/4, 2001/6)

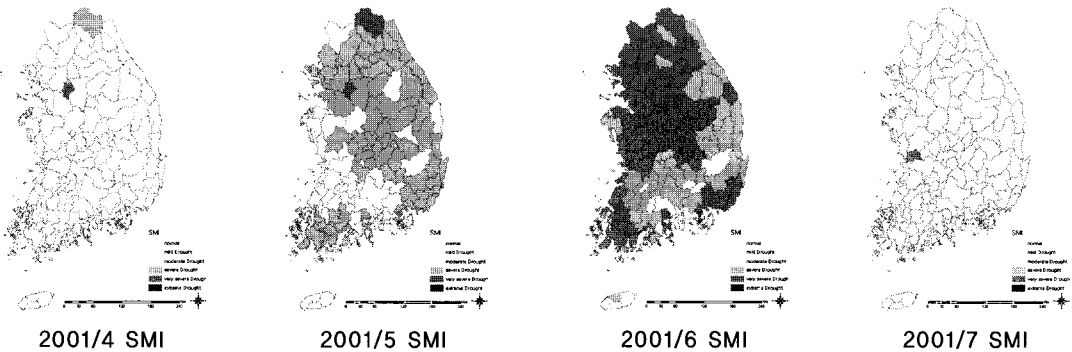


그림 4. Result of Monthly SMI (2001/4~2001/7)

걸쳐 나타나지만 7월 강우로 인하여 가뭄이 해소되는 양상을 알 수 있었다.

SMI지수는 다른 가뭄지수들과 비교하여 보면 PDSI나 SPI는 월별 혹은 주별 모의가 가능한 반면 SMI는 일별모의가 가능하며 단기 가뭄이나 선형적인 가뭄을 나타낼 수 있다는 특징을 가진다. 그러나 SMI가 토양수분과 관련된 가뭄지수인 것을 생각해 보면 비 식생지역에서 느끼는 가뭄과 SMI에서 제시하는 가뭄은 차이가 있을 수 있다. 그리고 SMI 결과를 통해 알 수 있듯이, 충분한 강우에 의하여 나타나는 가뭄상태에서 습윤상태로의 전환을 효과적으로 반

영할 수 있으며, 토양수분부족에 의한 가뭄이나 강우에 의한 가뭄의 해소에 잘 반응하는 것으로 나타나 단기 가뭄 평가에 효과적으로 사용할 수 있다. SMI는 토양수분에 의한 가뭄을 나타내므로 사람이 느끼는 가뭄보다 식생이나 작물이 느끼는 가뭄에 더 민감하게 반응하므로 농업적 가뭄의 평가에 효과적인 지표로 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

3.5 SMI와 PDSI의 비교

2006년 가을에 우리나라는 심각한 가뭄을 겪게 되

었다. ‘이번 가을 가뭄은 10년 만에 최악의 가뭄으로 모든 유역에서 가뭄을 겪었으며, 특히 농업적 가뭄이 심각하게 대두되었다.’는 대중매체의 보도가 이어졌다(SBS, 한겨레, 연합뉴스, 2006). 이번 가뭄은 7~8월의 여름 호우 뒤에 이어진 가을 가뭄으로, 기상청에서 가뭄을 보도하는데 사용되는 PDSI가 이번 가을 가뭄을 제대로 나타내지 못하게 되어 가뭄 보도를 위해 사용되던 기존의 가뭄지수의 신뢰성에 대한 문제가 발생하기도 하였다. 이는 PDSI의 경우 장기간의 평균 기상자료를 사용하므로 8월까지 내린 많은 양의 강우로 인하여 9월 말부터 10월에 걸쳐 나타난 가뭄을 표현하지 못하였다. 이러한 이유로 이번 가을가뭄에 대하여 SMI와 PDSI 자료를 비교해보았다. 그림 5는 가을가뭄이 극심했던 2006년 10월 14일과 20일에 대해 PDSI와 SMI를 이용해 공간분포로 나타낸 것이다. PDSI자료는 수자원공사에서 제공하는 자료로써, 대부분의 지역이 습윤 상태로 나타나고 있으며 한강지역과 금강지역 일부분만 약한 가뭄의 상태를 보이고 있다. 가뭄이 심해지고 있음에도 불구하고 20일의 PDSI는 심해지는 가뭄을 효과적으로 표현하지 못하였다. 반면에 SMI의 경우 영산강 일부지역을 제외한 모든 지역이 가뭄상태를 보이고 있으며, 한강과 금강지역은 보통가뭄 ~ 매우 심한 가뭄의 상태를 나타내고 있어, 언론에서 보도된 가뭄 상황을 비교적 잘 반영하고 있다. 또한 20일의 SMI의 경우 14일에 비하여 가뭄상태 표시 단계가 더 심해진 유역이 10여 개 정도로 나타나 심해지고 있는 가뭄상황을 PDSI보

다 좀 더 효과적으로 반영하였다. 결론적으로 두 가뭄지수를 비교해 보았을 때, PDSI는 2006년도 있었던 한반도 전역 가을 가뭄을 신속히 표현하지 못하고 있으나 SMI는 가을 가뭄을 보다 신속하고 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 고에서는 한반도 전역의 토양수분에 의한 가뭄 분석을 위해 지리정보시스템과 토양수분모형, 그리고 Runs 이론을 이용하여 SMI(토양수분지수)를 개발하고 수문단위도 증권역 유역을 대상으로 가뭄을 평가하였다.

확률분포와 빈도분석한 결과를 바탕으로 5단계로 구분된 토양수분지수(SMI)를 개발하였으며 이를 이용해 가뭄이 발생하였던 4개 연도(1994년, 1995년, 2000년, 2001년)에 적용해 본 결과, 1994년은 4월에는 경기, 강원북부 지역을 중심으로 심한 가뭄을 보였으나 전반적으로는 약한 가뭄상태이며, 1995년은 7월에 중부내륙 지방을 중심으로 심한가뭄을 나타내었다. 2000년은 4월에 동남부 지역을 중심으로 심한가뭄을 보이고 2001년 6월은 한반도 전체지역이 극심한 가뭄을 보이고 있다. 또한 2001년의 월별 SMI를 살펴보면, 4월~6월에 가뭄상태가 극심하며, 이를 통해 2001년이 봄 가뭄이었음을 알 수 있었다. 그리고 2006년 가을의 가뭄상황에 대하여 PDSI와

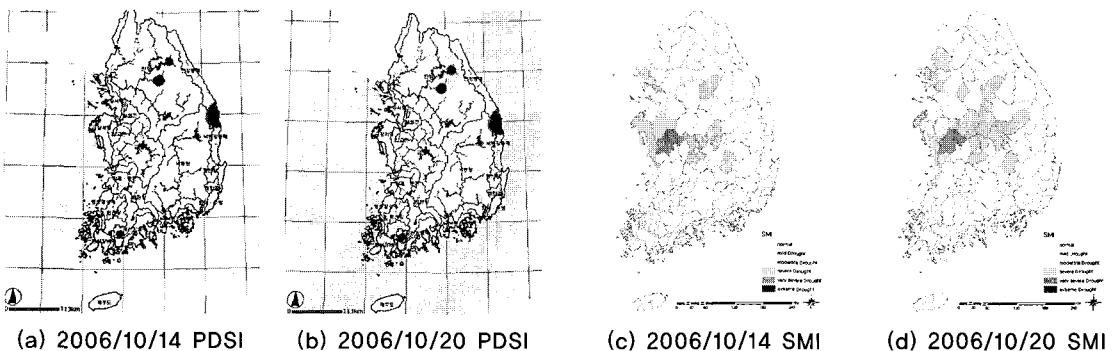


그림 5. Compare SMI and PDSI (2006/10/14, 2006/10/20)
PDSI 출처 (<http://basin.kowaco.or.kr/drought>)

SMI를 이용하여 살펴본 결과, PDSI의 경우 여름의 홍우 등으로 인하여 가을 가뭄상태를 효과적으로 나타내지 못한 반면, SMI는 일별 자료를 사용하여 가뭄상태 나타내어 이번 가을 가뭄상태를 효과적으로 나타내었다.

다른 가뭄지수는 월별 혹은 주별 모의가 가능한 반면 SMI는 일별모의가 가능하고, 충분한 강우에 의한 습윤상태로의 전환을 효과적으로 반영할 수 있으므로 단기 가뭄 평가에 효과적으로 사용할 수 있다. SMI는 토양수분에 의한 가뭄을 나타내므로 사람이 느끼는 가뭄보다 식생이나 작물이 느끼는 가뭄에 더 민감하게 반응하므로 수문가뭄의 선행지수산정이나 생태 및 농업가뭄의 평가에 효과적인 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같이 SMI와 지리정보시스템을 활용하면 전국단위 가뭄평가를 할 수 있으며 이를 활용하여 가뭄의 예측도 가능하여 가뭄 대비를 통한 재해 방지에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Bae, S. J., H. W. Chung and J.-Y. Choi, 1999, Drought Analysis using Soil Water Balance Model and Geographic Information System, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 41(6), pp. 33-43 (in Korean)
- Israelsen, O.W. and V.E. Hansen, 1962. *Irrigation principles and practices*. John Wiley and Sons, Inc. NY, NY.
- Palmer, W. C., 1965, *Meteorological drought*, Research Paper No. 45. U.S. Weather Bureau.
- 개략토양도, 1971, 농촌진흥청, 식물환경연구소
- 김옥경, 최진용, 유승환, 장민원, 이주현, 노재경, 2006, 토양수분지수를 이용한 유역단위 가뭄평가, *한국농공학회논문집*, 제48권, 제6호, pp.3-13
- 수자원단위지도, 1999, 건설교통부, 한국수자원공사