

관 계 배 수

토양수분지수를 이용한 유역단위 가뭄 평가

Watershed Scale Drought Assessment using Soil Moisture Index

김옥경* · 최진용**† · 장민원*** · 유승환* · 남원호* · 이주현**** · 노재경*****

Kim, Ok-kyoung · Choi, Jin-yong · Jang, Min-won · Yoo, Seung-hwan
Nam, Won-ho · Lee, Joo-heon · Noh, Jae-kyoung

Abstract

Although the drought impacts are comparably not catastrophic, the results from the drought are fatal in various social and economical aspects. Different from other natural hazards including floods, drought advances slowly and spreads widely, so that the preparedness is quite important and effective to mitigate the impacts from drought. Soil moisture depletion directly resulted from rainfall shortage is highly related with drought, especially for crops and vegetations, therefore a drought can be evaluated using soil moisture conditions. In this study, SMI (Soil Moisture Index) was developed to measure a drought condition using soil moisture model and frequency analysis for return periods. Runs theory was applied to quantify the soil moisture depletions for the drought condition in terms of severity, magnitude and duration. In 1994, 1995, 2000, and 2001, Korea had experienced several severe droughts, so the SMI developed was applied to evaluate applicability in the mid-range hydrologic unit watershed scale. From the results, SMI demonstrated the drought conditions with a quite sensitive manner and can be used as an indicator to measure a drought condition.

Keywords : Drought Assesment, Soil Moisture Index, Runs Theory, Water Balance Method

I. 서 론

가뭄은 강우의 시기, 지역별 불균형에 의해 발생하며, 특히 강우가 적어 발생하는 것으로서 홍수와 대비되는 자연 재해이다. 가뭄은 홍수 등 기타 자연재해와는 달리 진행속도가 느려 시간적으로 대처할 여유가 많기 때문에 비록 진행 중인 상태라 하더라도 그 진행상황을 초기에 감지한다면 피해를 최소화할 수 있다. 즉, 가뭄의 진행상황을 모니터링 하여 물 관리 담당자 및 일반 국민에게 알려줄 수

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원
** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 조교수
*** 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원
**** 중부대학교 사회기반시스템공학과 부교수
***** 충남대학교 지역환경토목전공 교수
† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4583
Fax: +82-2-873-2087
E-mail address: iamchoi@snu.ac.kr

있다면 신속한 대처와 피해경감효과를 기대할 수 있다. 이를 위하여 가뭄을 평가하고 예측하기 위한 여러 기법들이 연구되어 왔다.

학자들은 가뭄을 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농업적 가뭄 등으로 분류하고 가뭄의 정도를 표현하기 위하여 가뭄지수(Drought Index)를 개발하여 사용하여 왔는데, 대상과 평가방법에 따라 가뭄을 표현하는 특성이 다르다. 가뭄지수 중에서 대표적인 것이 기상학적 가뭄을 표현하는 PDSI(Palmer Drought Severity Index)이다(Palmer, 1965). 이는 가뭄정도를 평가하기 위해 물수지를 사용하여 실제 강우량과 필요수량의 차를 이용하였다. SWSI(Surface Water Supply Index)는 수문학적 가뭄을 나타내는 가뭄지수이며 이는 지표 수자원의 물 공급 가능량을 나타내는 지수로서 강우량보다는 현재 공급가능한 지표 수자원의 수량에 영향을 받는다(Ryu et al., 2002). 이와 같이 현재까지 개발된 가뭄지수는 주로 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄을 표현하는 지수이다. 이러한 지수로는 농업적 가뭄, 즉 식생이 받는 수분 스트레스를 잘 나타낼 수 없는 한계가 있다. 즉 기상학적인 가뭄지수나 수문학적 가뭄지수로 가뭄이 아니더라도 농업적 가뭄 상태라면 사전에 용수관리에 주의를 기울이도록 해야 산림이나 식생, 작물의 생육에 영향을 끼치지 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 여러 개의 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.

토양수분은 농업과 식생에 중요한 연관관계가 있는 수문인자이며, 기상학적 가뭄이 지속되면 토양수분의 결핍을 발생시키고 식생의 수분 스트레스를 증가시킨다. 이러한 토양수분에 대한 연구와 가뭄을 평가하는 기법에 대한 연구가 진행되어 왔다.

토양 수분에 관련된 연구를 살펴보면 Yevjevich (1967)은 토양수분 모형과 Runs 이론을 이용하여 처음으로 가뭄의 정량적인 평가를 하였으며, 가뭄을 나타내는 방법에 있어서 Hershfield 등(1972)은 dry-day를 사용하였다. Zhongbo su 등 (2003)은 중국 북부지방을 대상으로 상대적인 토양수분을 이용해 가뭄을 모니터링 하였고, 미국 NWS(National Weather Service Climate Prediction Center)에서는 과거 17년간 관측된 토양수분 자료를 이용하여 가뭄 상태를 모니터링 하고 있다.

토양수분을 직접적으로 가뭄평가에 적용한 사례로, Bae 등(1999)은 우리나라 발적지역에서의 가뭄을 분석하기 위해 지리정보시스템과 통합 운영이 가능한 토양수분 물수지모형과 가뭄의 특성치를 분석할 수 있는 가뭄분석모형을 결합하여 가뭄을 평가하였으며, Chun (1995)은 기상관측소를 중심으로 일정 지역의 가뭄정도를 토양수분지수를 도입하여 평가하였다. 그리고 Park (2003)은 GIS를 이용하여 8개 주요 토양 특성 추출하고, 함수력, 점토비율, 토양깊이, 사면경사, 지하수위까지의 깊이, 배수특성, 토성, 투수도등 토양 특성이 가뭄에 미치는 영향을 캔자스 중서부 지역을 대상으로 분석하였다. 그러나 이러한 토양수분을 이용한 가뭄 분석에 대한 연구는 어느 특정 지역을 대상으로 연구되어 한반도 전역에 대한 가뭄감시에 적용되는 않았으며, 위성영상을 모니터링한 지표의 수분 상태를 토양수분 상태로 간주하는 등 정확한 가뭄감시가 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 한반도 남한 지역의 토양수분에 의한 가뭄분석을 위하여 수문단위 중권역 유역별을 대상으로 토양수분 모형을 적용하였으며, 토양수분지수(SMI, Soil Moisture Index)를 개발하여 토양수분에 의한 가뭄을 평가하였다.

II. 이론적 배경

1. 토양수분모형

가. 토양수분 물수지모형

토양수분모형을 이용한 가뭄을 분석하기 위하여 유역별 토양수분함량을 추정할 수 있는 토양수분 물수지모형을 구성하였다. 토양수분 물수지모형은 기상자료, 토양의 물리적 특성 자료를 사용하여 각 토양별 토양수분을 추정할 수 있도록 하였다. 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 Fig. 1과 같다.

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

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 수분유입량 (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.

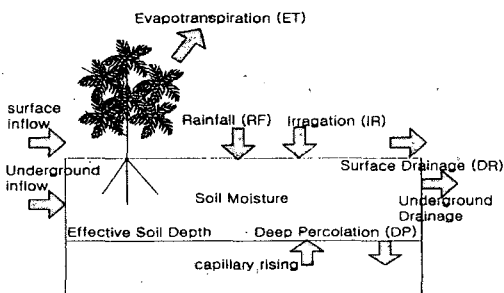


Fig. 1 Schematic diagram of soil water balance.

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

나. 증발산량

본 연구에는 1998년에 국제식량농업기구에서 추천한 Penman-Monteith 공식을 이용하여 증발산량을 산정하였다. 이 공식은 1965년에 제안된 Penman 공식의 공기동역학 조건에 작물형에 따른 기공저항을 포함하여 수정한 방법으로 공식은 식 (3)과 같다.

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, PET 는 잠재증발산량 (mm/day), Δ 는 증기압 곡선의 기울기 (kpa/°C), R_n 은 지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 에너지(순일사량) (MJ/m²day), G 는 토양 열 유속 밀도 (MJ/m²day), γ 는 건습계 상수 (kpa/°C), T 는 2 m 높이에서 일평균기온 (°C), u_2 는 2 m 높이에서 풍속 (m/s), e_s 는 포화증기압 (kPa), e_a 는 실제증기압 (kPa)이다.

작물증발산량 ET 는 잠재증발산량으로부터 식 (4)에 의해 구하여지며 작물계수 K_c 는 식 (5)에 의해 구하여진다. 이때 유역 단위의 증발산량을 계산하기 위하여 토지이용상태를 혼합된 상태로 간주하여 작물계수를 사용하였다. K_c 는 토양의 유효수분량에 따라 증발산량이 변화하는 것을 고려하는 계수로서 Jensen 등(1971)이 제시한 식 (6)을 사용하였다. 식 (6)을 이용하게 되면 토양수분이 포장용수량 상태면 K_c 는 1이 되며 위조점상태일 경우 0이 된다. 또한, 본 연구에서는 포장용수량 이상의 토양수분량은 모두 지하배수량으로 산정하였으므로 증력수에 의해 발생하는 K_s 는 제외되었다.

$$ET = K_c \times PET \dots\dots\dots (4)$$

$$K_c = K_{co} \times K_a + K_s \dots \dots \dots (5)$$

$$K_a = \ln(A_w + 1) / \ln(101) \dots \dots \dots (6)$$

여기서, K_{co} 는 피복에 따른 작물별 작물계수, K_a 는 토양수분함량에 따른 계수, K_s 는 강우 또는 관개 후에 지표면에서의 토양증발량을 보정하는 계수이며, A_w 는 유효수분백분율(%)이다.

다. 지표배수량

지표배수량은 강우량 중에서 토양 속으로 침투한 우량을 제외하고 지표와 토양층을 통해 경지를 벗어나는 유출량을 말한다. 본 연구에서는 직접유출량을 산정하기 위하여 NRCS (Natural Resources Conservation Service, USDA) CN (Curve Number) 방법을 이용하였으며 유출량을 계산하는 방법은 식 (7)와 같다. 그리고 강우량이 매우 적은 경우는 실제로 토양수분에 거의 영향을 미치지 못하므로 1일 강우량 5 mm를 최대 무효우량으로 결정하였다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \text{ 단, } P \leq 0.2S \text{ 일 때 } Q = 0.$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 (\text{mm}) \dots \dots \dots (7)$$

여기서, Q 는 유효강우량에 해당되는 직접유출량(mm)이며, P 는 총강우량(mm), S 는 최대저류량으로 토지피복도와 수문학적 토양군에 따라 결정되는 상수이다.

라. 지하배수량

지하배수량은 유효토층 하부에서 토양수분 중 증력수가 아래로 이동되는 양을 말하며, 강우가 왔을 때 토양수분이 포장용수량 보다 커질 경우 포장용수량 이상의 토양수분은 모두 지하배수 되는 것으로 간주한다.

2. Runs 이론

토양수분을 이용한 가뭄의 특성을 분석하는 방법으로서 가장 유용하게 이용되는 Runs 이론을 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 정의한다. 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.×day), 부피 단위의 토양수분과 기간의 곱(% Vol.×day), 토양수분량과 기간의 곱(mm×day), 유효수분백분율과 기간의 곱(%×day)과 같은 방법으로 표시할 수 있다. 본 연구에서는 가뭄의 실제적인 크기를 나타낼 수 있는 유효수분백분율과 기간의 곱에 의한 가뭄강도를 선택하였다. 가뭄크기는 가뭄강도에서 가뭄기간을 나눈 값으로 정의된다. 이상과 같이 정의한 가뭄특성치를 식 (8), (9), (10)에 나타내었다.

$$D(\text{day}) = \text{end day of AW50\%} - \text{start day of AW50\%} \dots \dots \dots (8)$$

$$S(\text{mm} \times \text{day}) = \sum_{i=\text{start}}^{\text{end}} SMD_i \dots \dots \dots (9)$$

$$M(\%) = S/D \dots \dots \dots (10)$$

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

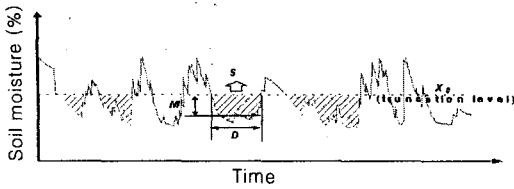


Fig. 2 Fundamental parameters of the drought events.

현재의 유효수분백분율을 \bar{x} 값으로 정의한다. 위의 D, S, M 을 표현하면 Fig. 2와 같다.

라. 빈도분석

가뭄 특성치를 분석하기 위하여 각각에 대해 빈도 분석을 실시하였으며 빈도 분석시 사용된 방법은 빈도계수법이며 비초과확률(non-exceedance probability)은 년 초과치 계열의 해석에 적합성이 인정된 California 공식을 사용하였다. 비초과확률을 결정하는 California 공식은 식 (11)과 같다.

$$P(X \leq x) = 1 - \frac{m}{n}, \quad P(X > x) = \frac{m}{n} \dots\dots\dots(11)$$

여기서, $P(X \leq x)$ 는 비초과확률 혹은 누가생기확률을 뜻하며, n 과 m 은 자료치 계열을 구성하고 있는 자료의 총수와 전 자료를 제일 큰 것부터 제일 작은 것까지의 순으로 나열했을 때의 순위를 말한다.

빈도계수법은 식 (12)와 같으며, 특정 재현기간을 가지는 특성치를 결정하는데 사용한다. 선택된 분포형에 따라 $K_T \sim T$ 관계가 수립되며 이는 공식, 표 혹은 관계곡선의 형태를 가진다.

$$x_T = \bar{x} + sK_T \dots\dots\dots(12)$$

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

III. 재료 및 방법

1. 대상구역의 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 평가하였다. 이때 가뭄상황에 따른 효과적인 물관리를 위하여 수문 단위 중권역을 기본 대상구역으로 선정하였으며, 수문 단위 중권역은 총 117개이다.

2. 자료의 수집

가. 토양 특성 자료

토양의 물리적 특성자료인 유효토심(ED), 포장용수량(FC), 위조점(WP) 및 수문학적 토양군을 알기 위하여 1:50,000 개략토양도(농촌진흥청, 1971)와 토양종류에 따른 특성자료 제시 분류표(Israelsen and Hansen, 1962)를 이용하였고, CN값을 계산하기 위하여 개략토양도의 토양 종류에 따른 NRCS 수문학적 토양군으로 분류표와 토지피복도를 이용하였고 이를 이용하여 우리나라 전 지역에 대한 토양자료를 구축하였다.

나. 기상자료의 수집

기상자료는 강우량과 잠재증발산량을 산정하기 위한 평균기온, 평균풍속, 상대습도, 일조시간 등이며, 이를 측후소별로 수집하고, 이를 바탕으로 Thiessen의 면적가중법을 사용하여 수문 단위 중권역 구역별 강우량과 증발산량을 산정하였다.

3. 토양수분모형의 입출력 자료

가. 모형의 구성

토지피복도와 토양도로부터 GIS를 이용하여 수

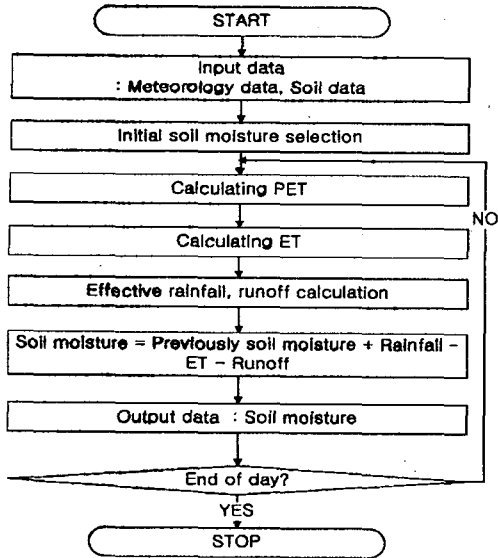


Fig. 3 Flow chart of soil water balance model

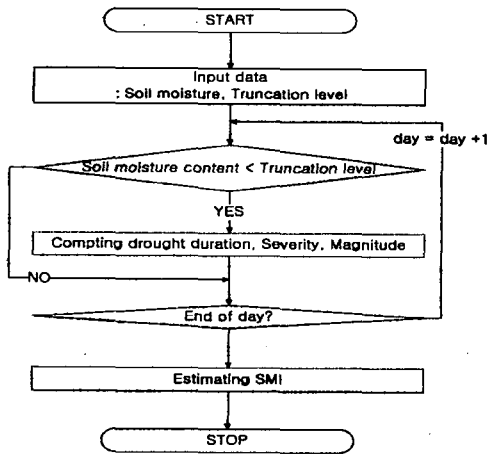


Fig. 4 Flow chart of drought analysis model

문단위 중권역 유역별 토양특성자료를 입력받아 일별 토양수분량을 구한다. Fig. 3은 토양수분 물수지 모형의 흐름도를 나타낸 것이다.

나. 모형의 입출력자료

모형은 기상인자와 토양 특성 자료를 입력자료로 사용하며, 기상 인자는 수문단위 중권역 유역별 강우량, 증발산량이며, 토양 특성 자료는 유효토심

(ED), 포장용수량(FC), 위조점(WP), CN값이다. 그리고 출력자료는 일별 증발산량(ET, mm) 및 토양수분함량(SM, mm)으로 이는 가뭄분석모형의 입력 자료로 사용된다.

4. 가뭄 모형

가. 모형의 개요

본 연구에서는 우리나라 가뭄을 분석하기 위하여 수문단위 중권역 유역별 토양수분함량을 추정하고, 이를 이용하여 가뭄특성치를 산정하여 가뭄강도에 대한 빈도분석을 실시하였다. 그리고 가뭄 강도에 대한 확률분포형을 선정하여 토양수분가뭄지수(SMI)를 개발하였다.

나. 모형의 구성

토양수분 물수지 모형에 의해 계산된 수문단위 중권역 유역별 토양수분 함량을 가뭄분석 모형에 입력하여 토양수분 함량이 기본수준 이하일 경우에 한해 가뭄으로 처리하여 각 사상별로 기간, 크기, 강도를 계산하고, 이 중 초과치 계열을 선정하고 이의 평균, 분산, 표준편차, 왜곡도 계수 등의 통계치를 계산하며, 계산된 통계치와 초과치 계열을 이용하여 적정확률분포형을 선택하게 되며, 선택된 적정확률분포형에 의해 빈도분석을 실시함으로써 재현기간별 가뭄특성치를 산정하였다. Fig. 4는 가뭄분석모형의 흐름도를 나타낸 것이다.

다. 모형의 입출력 자료

토양수분가뭄모형의 입력자료는 토양수분모형의 결과 데이터인 토양수분함량 자료이며, 출력 자료는 가뭄의 세 특성치이며, 가뭄기간(duration, D), 가뭄강도(severity, S), 가뭄크기(magnitude, M)이다.

IV. 결과 및 고찰

1. 토양수분 산정 결과

가. 토양수분 모의치의 검증

토양수분모형 검증을 위하여 주천 지역(전북 진안군 주천면 주양리 산 17-9번지)의 토양수분실측치와 모의치를 비교하였다. 토양수분을 측정된 주천지역의 토양은 식양질이며 토양특성 값은 포장용수량이 39.5(% Vol), 위조점이 18.0(% Vol)이며, 유효토층이 1,000 mm, CN 55, 수문학적 토양군은 B, 토지이용상태는 초지, 산림등이 섞여있는 혼합토지이용 지역이며 기상자료는 금산측후소의 자료를 사용하였다. 비교한 결과는 Fig. 5와 같으며 모의치와 실측치의 유사성을 판단하기 위해 $R, R^2, RMSE$ 값을 사용하였으며, R 값은 0.78, R^2 값은 0.62, $RMSE$ 은 0.86(% Vol)으로 산정되어 본 연구에서 제시한 토양수분모형이 적용 가능한 것으로 나타났다.

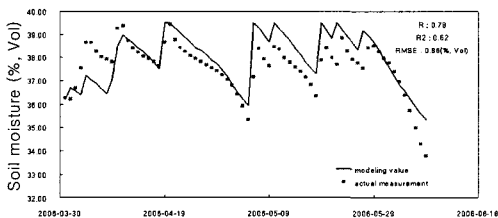


Fig. 5 Comparison of soil moisture content in model verification

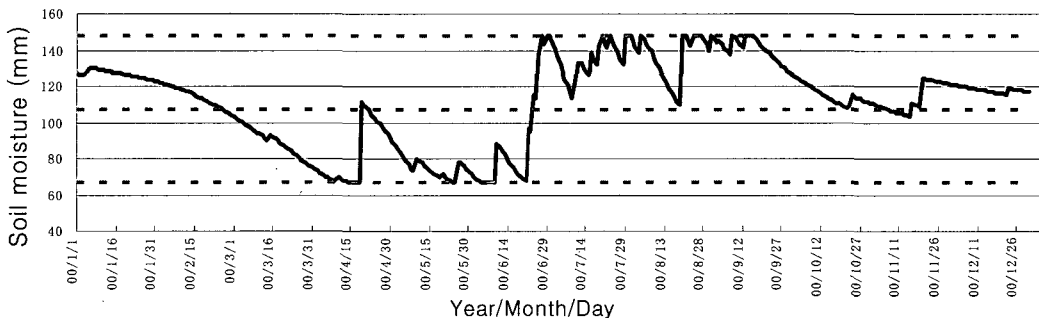


Fig. 6 Soil moisture modeling result (2000 year, No. 3008 watershed)

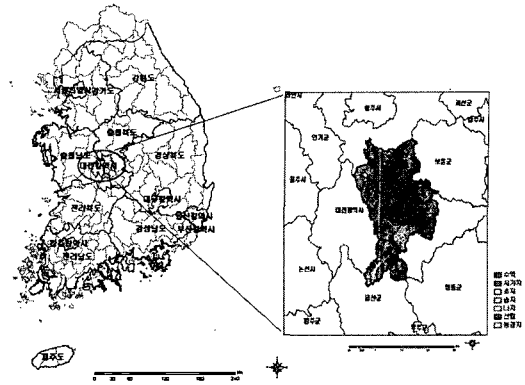


Fig. 7 Location and landuse of No. 3008 mid-range hydrologic unit watershed

나. 토양수분 산정

수문단위 중권역 117개 전 유역을 대상으로 1975~2004년까지의 토양수분모형을 분석하였다. Fig. 6은 전체 유역 중 대표 유역으로 선정되었던 유역 중 하나인 수문단위 중권역 3008 유역(금강 유역, 포장용수량이 25.8(% Vol), 위조점이 11.6(% Vol)이며, 유효토층이 573.9 mm, CN 54, 혼합토지이용지역)의 가뭄이 발생했던 2000년의 토양수분함량 산정 결과를 나타낸 것이다. 이 결과를 살펴보면 토양수분함량은 포장용수량과 위조점 사이에서 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 수문단위 중권역 3008번 유역의 위치를 나타낸 것이다.

2. 가뭄분석 결과

가. 빈도분석

본 연구에서는 모든 수문단위 증권역별에 대한 가뭄 분석 결과 중 포장용수량과 위조점, 유효토층을 고려하여 평균값을 가지는 10개의 대표유역을 선정하여 선정된 10개 유역의 자료를 이용하여 빈도 분석을 실시하였다. 이 결과 대표유역으로 1018, 2006, 2020, 2301, 2302, 3008, 3009, 4004, 4102, 4104 유역이 선정되었다.

대표유역 10개 지역에 대해 초과치계열로 30개의 가뭄강도 자료를 이용하여 가뭄확률 분포형을 선정하였고, California 공식을 이용하여 초과확률(P)을 계산하고 이를 이용하여 빈도분석을 실시하였다. 확률분포형 산정을 위해 여러 가지 분포형에 대해 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정을 실시하였으며, 이중 Log Gaussian (Log Normal)은 0.11, Log Pearson type III (Log Gamma)는 0.112, Gaussian (Normal)은 0.161의 값을 나타내었다. 이에 따라 Log Gaussian을 분포형으로 선정하였으며 이는 K-S 적합도 검정에서 1% 유의 수준에서 적합성이 인정되었고, 유의성을 알아보기 위해 R² 값을 산정한 결과 0.996으로 높은 유의성을 나타내었다. 또한, 빈도분석 결과를 바탕으로 재현기간에 따른 가뭄강도 값을 계산한 결과는 2년 빈도의 경우 1,609(mm×day), 5년 빈도의 경우 2,741(mm×day), 10년 빈도의 경우 4238(mm×day), 20년 빈도의 경우 5,370(mm×day)으로 산정되었다.

나. SMI 산정

위에서 산정된 확률분포형을 이용하여 SMI를 산정하였다. SMI지수는 총 5단계로 구분되며 PDSI나 SPI, MSWSI와는 달리 유효수분 백분율 50% 이상인 경우에 대해서는 고려하지 않으므로 정상상태나 강수가 많은 상태는 지수로 표현되지 않는다. SMI 심도 산정 시 5단계의 기준은 표준정규분포에

Table 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

서 표준편차 값이 -2, -1, 1, 2 되는 지점으로 선정하였다. SMI 구분 단계는 Table 1에 나타내었다. SMI -5 상태는 극심한 가뭄을 나타내는 상태로써 30년 동안 발생했던 가뭄 중 4%에 속하는 가뭄이다. SMI -4 상태는 매우 심한 가뭄을 나타내는 상태로써 32%에 속하며 SMI -3 상태는 심한가뭄을 나타내고 68%에 해당된다. SMI -2 상태는 보통가뭄 상태이며 약간의 작물피해가 발생하는 상태로 이전 가뭄발생 상황의 96% 상태에 해당된다. 나머지 상태는 SMI -1로써 약한 가뭄 상태이며 작물생육이 지연되는 상태이다. SMI구분은 미국 NDMC에서 작성한 가뭄분류표를 참고하였다 (<http://drought.unl.edu>). NDMC에서 작성된 토양수분을 이용한 가뭄감시는 토양수분의 30% 상태부터 가뭄으로 간주하였으나 본 연구에서는 50% 상태부터 가뭄으로 간주하여 가뭄상태표시에 차이 가 존재한다.

다. SMI 적용

개발된 SMI를 이용하여 큰 가뭄이 있었던 1994, 1995, 2000, 2001 연도의 유역별 SMI 분포를 살펴보면 1994년 4월의 경우 전체 유역 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, 중부지방이 매우 심한 가뭄 상태를 보이고 있다. 2000년 4월은 한 유역을 제외한 모든 유역이 가뭄상태를 나타내며 약 50%가 심한 가뭄 상태 이상이 나타내며, 한반도의 동남쪽이 심한 가뭄상

Table 2 Analysis result using SMI

year/month/day SMI	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

태를 나타내었다. 2001년 6월은 유역의 약 90%가 심한 또는 매우 심한 가뭄 상태를 나타내며 전 유역이 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 분석

결과 나타낸 SMI값에 따른 유역 개수를 나타낸 표이고 Fig. 8은 4개년의 SMI를 공간분포로 나타낸 것이다.

Fig. 9은 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 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 선행적인 가뭄을 나타낼 수 있다는 특징을 가진다. 그러나 SMI가 토양수분과 관련된 가뭄지수인 것을 생각해 보면 비 식생지역에서 느끼는 가뭄과 SMI

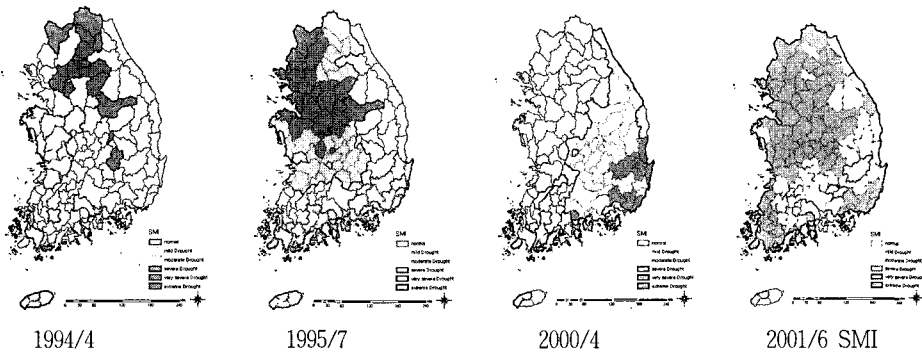


Fig. 8 Result of SMI (1994/4, 1995/7, 2000/4, 2001/6)

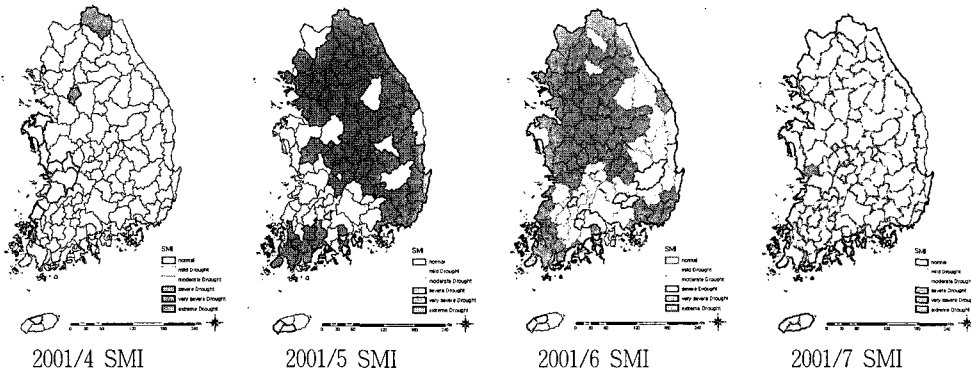


Fig. 9 Result of Monthly SMI (2001/4~2001/7)

에서 제시하는 가뭄은 차이가 있을 수 있다. 그리고 SMI 결과를 통해 알 수 있듯이, 충분한 강우에 의하여 나타나는 가뭄상태에서 습윤상태로의 전환을 효과적으로 반영할 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.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도 전역의 토양수분에 의한 가뭄분석을 위해 수문단위 중권역 유역을 대상으로 Runs 이론을 이용한 토양수분모형을 검증하고 적용하였으며, 토양수분 지수를 개발하여 가뭄을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 토양수분 물수지 모형을 수문단위 중권역 전 유역에 대해 모의하고 이를 검증하기 위하여 주천 지역의 토양수분실측치와 모의치를 비교해 본 결과 R 값은 0.78, R^2 값은 0.62, $RMSE$ 값은 0.86 (% Vol)으로 나타나 토양수분의 예측에 적합한 것으로 판단되었다.
2. 토양 수분 가뭄 모형을 수문단위 중권역 전 유역에 대해 모의한 결과 각 유역단위별로 가뭄강도, 가뭄크기, 가뭄기간을 산정하였으며 이 중 평균적인 토양특성치를 가지는 10개의 단위유역에 대해 30년(1975년~2004년) 동안의 가뭄강도 값의 초과치계열을 이용하여 Log Gaussian을 확률분포형으로 선정하였고 그 결과를 바탕으로 빈도분석을 한 결과 가뭄강도(mm×day) 값은 2년 빈도 1,609, 5년 빈도 2,741, 10년 빈도 4,238, 20년 빈도 5,370 으로 나타났다.
3. 확률분포와 빈도분석한 결과를 바탕으로 5년

계로 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 가뭄 상태이며, 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.

4. 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. 그리고 SMI는 토양수분에 의한 가뭄을 나타내므로 사람이 느끼는 가뭄보다 식생이나 작물이 느끼는 가뭄에 더 민감하게 반응하므로 농업적 가뭄의 평가에 효과적인 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. 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)
2. Chun, K. E., 1995, The Drought based on the Assessment of Soil Moisture in Korea, Journal of Korean Environment Sciences Society, 4(1), pp. 1-12. (in Korean)
3. Israelsen, O. W. and V. E. Hansen. 1962. Irrigation principles and practices. John Wiley and Sons, Inc. NY, NY.
4. Jensen, M. E., J. L. Wright and B. J. Pratt, 1971, Estimation soil moisture depletion

- from climate, crop and soil data, *Trans. of the ASAE*, 14:954-959
5. Kim, C. H. and C. K. Koh, 1977, A Study on the Development of a Simulation Model for Predicting Soil Moisture Content and Scheduling Irrigation (I), *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 19(1), pp. 1-17. (in Korean)
 6. Kim, C. H. and C. K. Koh, 1977, A Study on the Development of a Simulation Model for Predicting Soil Moisture Content and Scheduling Irrigation (II), *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 19(2), pp. 25-34. (in Korean)
 7. Palmer, W. C., 1965, Meteorological drought. Research Paper No. 45. U.S. Weather Bureau.
 8. Park, S. Y., 2003, Influences of Physical Soil Properties on Drought Severity in the Central Great Plains Based on Satellite Data and a Digital Soil Database, *Journal of Korean Geographical Society*, 38(6), pp. 935-948. (in Korean)
 9. Ryu, J. H., D. R. Lee, J. H. Ahn and Y. N. Yoon, 2002, A Comparative Study on the Drought Indices for Drought Evaluation, *Journal of Korea Water Resources Association*, 35(4), pp. 397-410. (in Korean)
 10. Yevjevich, V. M. 1967, An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought. Colorado State University Hydrology Paper No. 23, Ft. Collins, Co.
 11. Su Z., Yacob A., Wen J., Roerink G., He Y., Gao B., Boogaard H., van Diepen C., 2003, Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation, and application to drought monitoring over the North China Plain, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 28, pp. 89-101.