지표수문해석모형을 활용한 국내 가뭄해석 적용성 평가

Drought Analysis and Assessment by Using Land Surface Model on South Korea

손 경 환* / 배 덕 효** / 정 준 석***

Son, Kyung Hwan / Bae, Deg Hyo / Chung, Jun Seok

Abstract

The objective of this study is to evaluate the applicability of a Land Surface Model (LSM) for drought analysis in Korea. For evaluating the applicability of the model, the model was calibrated on several upper dam site watersheds and the hydrological components (runoff and soil moisture) were simulated over the whole South Korea at grid basis. After converting daily series of runoff and soil moisture data to accumulated time series (3, 6, 12 months), drought indices such as SRI and SSI are calculated through frequency analysis and standardization of accumulated probability. For evaluating the drought indices, past drought events are investigated and drought indices including SPI and PDSI are used for comparative analysis. Temporal and spatial analysis of the drought indices in addition to hydrologic component analysis are performed to evaluate the reproducibility of drought severity as well as relieving of drought. It can be concluded that the proposed indices obtained from the LSM model show good performance to reflect the historical drought events for both spatially and temporally. From this point of view, the LSM can be useful for drought management. It leads to the conclusion that these indices are applicable to domestic drought and water management.

Keywords : Land surface model, Drought indices, SRI, SSI

요 지

본 연구의 목적은 전지구 수문해석도구인 지표수문해석모형을 활용하여 국내 가뭄해석에 적용성을 평가하는데 있다. 이에 댐 상류 유역의 관측유입량 자료를 대상으로 모형의 모의능력을 평가하고 남한 전역에 대한 수문성분(유출, 토양수분)을 생산하였다. 격자별 일 단위 유출 및 토양수분자료를 해당기간별 누가 시계열(3, 6, 12개월)로 변환하여 가뭄지수를 생산하였고, 빈도해석에 따른 누가확률값 산정 및 표준화를 통해 SRI 및 SSI를 산정하였다. 산정된 지수의 평가를 위해 국내 과거 가뭄기록사례를 조사하고 기존 가뭄지수인 SPI 및 PDSI를 활용하였다. 본 연구 결과의 평가는 시계열별, 지역별 분석 및 유역별 물수지 분석을 통해 수행되었으며, 주로 가뭄기간동안의 가뭄심도와 가뭄 발생 및 해갈의 재현여부를 평가하였다. 분석결과 SRI 및 SSI 모두 시·공간적으로 과거 기록된 피해기간 및 지역 상황을 잘 반영한 것으로 나타났으며, 가뭄기간 동안의 정량적인 수문정보 생산이 가능하다는 점에서 유역단위 가뭄관리에 유용하게 활용될 것이라는 결론을 얻었다.

핵심용어 : 지표수문해석모형, 가뭄지수, SRI, SSI

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: skhdr@paran.com)

Ph.D. Candidate, Course student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

** 교신저자, 세종대학교 물자원연구소 토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Corresponding Author, Prof. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

*** 기상청 기후예측과 기후예측과장 (e-mail: woobo008@gmail.com)

Director, Climate Prediction Division, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

1. 서론

가뭄은 미국 해양기상청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)이 선정한 20세기 최대의 자연재해 중 상위 5위 안에 랭크될 정도로 그 피해와 영향력은 막대하다 (한국수자원공사, 2005). 국내의 경우 가뭄에 대한 여러 구조적 및 비구조적 대책을 마련하고 있으나 홍수와 달리 피해규모가 광범위하고 점진적으로 발생하는 가뭄의 특징으로 인해 전망은 고사하고 감시마저 제대로 이루어지지 못하는 실정이다. 더욱이 현재 전 지구적으로 발생하는 기후변화에 따른 지구온난화는 강우발생일수 감소, 증발산 증가에 따른 하천유량의 감소를 유발시킴에 따라 앞으로 가뭄피해가 증가할 것이라는 견해가 나오고 있어 이에 대한 대책마련이 시급한 실정이다 (Trenberth et al., 2004).

통상 가뭄은 물 수지의 불균형에 따른 물 부족 현상으로 인식되며, 수문순환 거동을 총체적으로 다뤄야 할 만큼 해석범위가 광범위 하다. 그렇다 보니 해석하는 관점을 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농업가뭄 등으로 구분하고 있으며, 해석 도구인 가뭄지수를 활용하여 각 분야별 목적에 따라 가뭄에 대한 현상을 정량적으로 규명하고 있는 추세이다. 그동안 국내에서는 이러한 가뭄지수에 대해 다양한 연구 및 개발을 수행해 왔는데, 류재희 등 (2002)은 기상학적 가뭄지수인 SPI (Standard Precipitation Index) 및 PDSI (Palmer Drought Severity Index)와 수문학적 가뭄지수인 SWSI (Surface Water Supply Index)를 국내에 적용하고 각 지수에 대한 비교 연구를 수행한 바 있으며, 권현중 등 (2006)은 SWSI의 지수를 보완한 MSWSI (Modified Surface Water Supply Index) 지수를 개발하여 국내 적용성을 검증한 바 있다. 또한 이주헌 등 (2006)은 가뭄감시시스템 구축을 위한 가뭄지수의 적용성을 평가한 바 있다. 국외의 경우 McKee et al. (1995)은 개발한 SPI를 토대로 미국 콜로라도 지방을 대상으로 다양한 시간간격에 대해 가뭄의 시·공간적인 변화를 고찰하여 재현여부를 평가하였으며, Herbst et al. (1996)은 강우량 자료로부터 가뭄을 평가하는 방법을 제시 및 평가한 바 있다.

이처럼 국내외에서 가뭄지수와 관련하여 다양한 연구가 진행된 것을 알 수 있다. 그러나 산정된 지수들 대부분이 각 관측소 지점별 기상 및 수문정보를 기반으로 모의되어 시·공간적으로 이를 표현하고 있을 뿐, 가뭄의 본질적인 요인은 제대로 반영되지 않는 실정이다. 즉, 가뭄을 본질적으로 다루기 위해서는 대기와 지표 사이에 발생하는 수문성분에 대한 모의를 수행하여 가뭄해석에 필요한 정보를 생산하는 것이 바람직하며, 해석범위도 단순히 지역 또는 유역단위가 아닌 국가 또는 인접국가와의 연계가 가

능할 정도로 광범위해야 할 것이다. 따라서 Mesoscale 기반의 지표수문해석모형 (Land Surface Model, LSM)이 활용되어야 할 것이며, 여기서 지표수문해석모형이란 전 지구를 대상으로 수문해석이 가능한 물리적 기반의 분포형 모형을 뜻한다. 현재 국외에서는 지표수문해석모형을 기반으로 가뭄해석에 다양한 방식으로 접근하고 있는데, Fan et al. (2004)는 지표수문해석모형을 활용하여 미국전역에 1/2° 격자 간격의 수문성분을 산정한 후 가뭄감시에 활용하고 있으며, Jaranilla-Sanchez et al. (2011)은 필리핀 Panpanga 유역에 대해 지표수문해석모형에서의 수문성분을 활용하여 가뭄평가에 적용성을 검증한 바 있다. 국내의 경우 손경환 등 (2010)은 지표수문해석모형을 구축하여 국내 적용성을 평가한 바 있으나 가뭄해석 및 평가에 대한 사항은 여전히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 국내를 대상으로 지표수문해석모형을 구축하고 가뭄해석을 위한 가뭄정보를 산출하여 가뭄해석 및 활용가능 여부를 평가하고자 한다.

2. 연구수행방법

본 연구의 목적은 물리적 기반의 지표수문해석모형을 활용한 국내 가뭄에 대한 적용성 평가를 수행하고자 함이며, 이를 위한 연구수행절차 및 방법은 Fig. 1에 제시된바와 같다. 우선 수문정보 생산을 위해 남한 전역에 대한 기상 및 지형 정보를 구축하고 지표수문해석모형에 적용하

Fig. 1. Methodology for Drought Analysis Using Land Surface Model

여 격자별 수문성분을 생산한 후 관측유량과의 비교를 통한 모형의 모의 능력을 평가한다. 생산된 수문정보를 지수로 전환하는 과정이 필요하며, 본 연구에서는 빈도해석 기법을 적용하여 가뭄지수를 생산한다. 마지막으로 산출된 가뭄정보에 대한 평가를 위해 시계열 분석, 지역별 분석 및 유역별 물수지 분석을 통해 지수의 재현정도 및 적절성을 평가한다.

2.1 VIC Model

전술한 바와 같이 가뭄은 물수지 불균형에 따른 물 부족 현상으로 특성상 점진적이고 피해 규모가 광범위 하여 기상정보와 더불어 수문해석이 연계된 권역 및 국가단위의 가뭄해석이 요구된다. 본 연구에서는 남한 전역에 대한 수문성분을 산정하기 위해 중규모 이상(mesoscale)의 수문해석에 있어 그 적용성이 검증된 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모델(Liang et al., 1994)을 채택하였다. 현재 국내외에서는 VIC 모델을 활용하여 대유역 또는 전 세계에 대한 수자원 부족량 및 가뭄해석을 수행하고 있는데, Andreadis et al. (2005)는 VIC 모델을 이용하여 미국 대륙에 대한 가뭄평가를 수행하였으며 Sheffield et al. (2008)은 전세계를 대상으로 VIC 모델을 적용하여 과거 50년(1950~2000년) 간의 가뭄의 경향을 분석한 바 있다. 모형의 특징은 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 Water 및 Energy Flux를 모의하는 분포형 모형으로써 크게 Water Balance, Channel Routing, Energy Balance 등으로 구성되어 있으며, 각 모듈은 독립적으로 수행된다. 모형에서 적용 가능한 격자의 범위는 $1/8^{\circ}$ ~ 2° 정도로 다양한 공간분해능이 가능하며, 기상모형(General Climate Model, GCM; Regional Climate Model, RCM)과의 직접적인 연계에 용이하다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 모형은 크게 차단층(Canopy)과 3개의 토양층(Soil Layer)으로 구분되며, 한 격자내에서도 다양한 지형조건과 토양의 물리적 특성을 고려함으로써 mesoscale에 적합한 장주기 수문해석을 수행한다. 차단층에서는 동일 피복종류별 면적비를 고려하여 각 피복특성이 반영된 차단 및 증발(E_c)을 모의하며, 보통 식생지대(N) 및 나대지(B)로 구분된다. 토양층의 경우 깊이에 따라 최상부토층(Top thin layer), 상부토층(Upper layer), 하부토층(Lower layer)으로 구분된다. 이 중 최상부토층은 침투(i)에 직접적인 영향을 받는 지역이며, 토양수분의 변화에 가장 민감하다. 또한 중력식 배수를 통해 상부토층으로 침투량(Q_{sep1})을 모의하며, 식생 및 나대지 지역의 여부에 따라 증산(E_t) 및 증발(E)모의가 결정된다. 상부토층에서는 최상부 토층과 더불어 강우시작 후 토양층의 포화여부에 따라 지표유출(Q_d)이 모의되며, 증산

Fig. 2. Schematic of the VIC Model for Water Balance Analysis (손경환 등, 2010)

및 하부토층에 대한 침투량(Q_{sep2})이 계산된다. 하부토층에서는 상부토층에서 유입된 침투량으로부터 증산과 기저유출(Q_b)이 모의된다(손경환 등, 2010).

2.2 가뭄지수 산정

Mckee et al. (1993)은 가뭄을 물 수요에 비해 상대적으로 물의 부족을 유발시키는 요인이 강수량의 감소에 의해 시작된다는 것에 착안하여 SPI를 개발하였다. 이는 강수 부족에 대한 확률적 특성을 적용한 것으로 과거기간의 강수량자료에 대한 해당 확률밀도함수의 누가확률분포함수를 통해서 실제 강수량의 누가확률을 계산한 후 실 강수의 누가확률을 정규분포함수를 이용하여 지수를 계산하는 방식이다. SPI는 현재 국내에서 가뭄대책 수립을 위한 도구로 주로 활용되고 있으며, 통계분석상 30년 이상의 자료가 요구된다는 단점을 가지고 있으나 그 해석에 있어 공간적으로 일관성이 있고 다양한 지속기간 구분(1, 3, 6, 9, 12월 등)을 토대로 가뭄평가가 가능하다. 특히, 지속기간 구분은 장기 및 단기간 발생하는 가뭄사상을 감지함에 있어 유용하다고 볼 수 있는데, 통상 국내에서는 단기가뭄의 경우 지속기간 3~6개월의 SPI가, 장기가뭄은 9~12개월 정도의 SPI가 평가에 적절하다고 볼 수 있다(류재희 등, 2002). 본 연구에서는 생산된 유출, 토양수분 정보를 SPI의 산정 방법을 기반으로 가뭄지수로의 전환을 수행하였으며, 산정절차는 Fig. 3에 제시한 바와 같이 해당 기간별 누가 시계열에 따른 수문성분 산정, 적정 확률분포형 선정, 누가확률산정 및 표준지수로의 전환 순으로 이루어진다.

우선 해당기간별 누가 시계열을 작성하기 위해 격자별 일단위 유출 및 토양수분값을 월단위로 환산 후 연도별 과거 누적기간을 3개월, 6개월 및 12개월로 구분하여 유

Fig. 3. Methodology of the Drought Index Estimation

출 및 토양수분값을 산정하였다. 여기서, 누적기간 선정의 경우 전술한 바와 같이 3개월 및 6개월은 단기간의 가뭄, 12개월은 장기간의 가뭄을 보기 위함이다. 누가확률값 산정을 위해 빈도해석을 수행하였으며, 본 연구에 활용된 분포형은 Log Normal (2변수), Log Normal (3변수), Gamma (2변수), Pearson type-3, Log-Pearson type-3, Gumbel, GEV (3변수), Wakeby (5변수)로 총 8개 이다. 확률분포형의 매개변수 결정은 기존 국내에서 갈수유량자료에 대한 빈도해석시 활용된 L-moment 법 (Hosking and Wallis, 1993)을 적용하였으며, 적합도 검정을 거쳐 적정 확률분포형을 선정하였다 (윤용남과 박무중, 1997). 따라서 각 월의 확률분포함수를 결정할 수 있으며, 결정된 확률분포함수에서 누가확률값을 산정할 수 있게 된다. 마지막으로 평가기간에 대한 누가확률값을 산정하고 이를 표준정규분포의 누가확률값이 같은 값을 찾아 표준정규분포상의 변수 (Z)값을 읽으면 그것이 가뭄지수가 되는 것이다. 본 연구에서는 누가확률값에 대한 표준화를 위해 Abramowitz and Abramowitz and Stegun (1964)이 제시한 방법을 활용하였으며, 산정공식은 다음과 같다.

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}, \quad 0.0 < H(x) \leq 0.5 \quad (1)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)}, \quad 0.5 < H(x) \leq 1.5 \quad (2)$$

$$Z = -\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right), \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (3)$$

$$Z = +\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right), \quad 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad (4)$$

여기서, $H(x)$ 는 확률분포함수에서 누가확률값, c_0 는 2.515517, c_1 은 0.802853, c_2 는 0.010328, d_1 은 1.432788, d_2 는 0.189267, d_3 는 0.001308이다.

본 연구에서는 이상의 유출정보로부터 산정된 지수를 표준유출지수 (Standard Runoff Index, SRI) (Shukla and Wood, 2008), 토양수분의 경우 표준토양수분지수 (Standard Soil moisture Index, SSI)라 하였으며 각 지수에 대한 가뭄의 심도 구분은 기존 SPI와 동일하게 구분하였다 (Table 1).

2.3 가뭄평가

통상 가뭄지수에 대한 평가는 과거 피해사례와의 비교를 통해 해당 가뭄지수의 재현정도를 분석함에 따라 결정된다 (이주현 등, 2006). 그러나 가뭄피해의 경우 그 특성상 시작과 끝을 알기가 힘들뿐 아니라 피해지역을 정량적으로 제시하기가 어려워 평가에 많은 불확실성이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 국내 가뭄피해사례와 더불어 기존 국내에서 주로 활용되고 있는 가뭄지수를 평가에 활용하였으며, 채택된 가뭄지수는 SPI 및 PDSI (Palmer, 1965)이다. 여기서, SPI 및 PDSI의 경우 “산업기상지수 산출기술개발” (기상청, 2007)에서 산정된 결과를 인용하였으며, Table 1은 SPI 및 PDSI에 대한 지수범위별 가뭄심도를 나타낸 것이다.

과거 피해사례 수집은 1990년부터 2009년까지 신문 또는 메스컴 자료와 “가뭄기록조사 보고서” (건설교통부, 1995),

Table 1. Classification of Drought Severity for the Range of Indices Values

SPI, SRI, SSI		PDSI	
Values	Drought Category	Values	Drought Category
$2.00 \leq Z$	Extremely wet	$4.00 \leq Z$	Extremely wet
$1.99 \sim 1.50$	Very wet	$3.99 \sim 3.00$	Very wet
$1.49 \sim 1.00$	Moderately wet	$2.99 \sim 2.00$	Moderately wet
		$1.99 \sim 1.00$	Slightly wet
		$0.99 \sim 0.50$	Incipient wet spell
$0.99 \sim 0.00$	Near normal	$0.49 \sim -0.50$	Near Normal
		$-0.51 \sim -1.00$	Incipient Drought
$0.00 \sim -0.99$	Mild Drought	$-1.01 \sim -2.00$	Mild Drought
$-1.00 \sim -1.49$	Moderate Drought	$-2.01 \sim -3.00$	Moderate Drought
$-1.50 \sim -1.99$	Severe Drought	$-3.01 \sim -4.00$	Severe Drought
$-2.00 \geq Z$	Extremely Drought	$-4.00 \geq Z$	Extremely Drought

Table 2. Drought Impact Period and Province (1990~2009)

Year	Month	Damaged Province	Remarks
1992	06	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
	07	Entire region	
	08	-	×
1994	07	Entire region	○
1995	05	-	×
1995	07	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam, Chungbook, Chungnam	○
	08	Jeonbook, Chungbook, Chungnam, Kyunggi	
	09	-	×
1996	11	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
1997	03	-	×
1997	10	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
	12	-	×
2000	02	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
	06	-	×
2001	04	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
	05	Kyunggi, Chungbook, Chungnam, Gangwon	
	06	Entire region	
	06	-	×
2001	09	Kyunggi, Chungbook, Chungnam, Gangwon	○
	12	-	×
2006	11	Entire region	○
2007	01	-	×
2008	09	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam, Gangwon	○
2009	04	-	×

※ (○) : Drought Occurrence, (×) Drought End

“2001 가뭄기록 조사 보고서”(건설교통부, 2002) 자료를 토대로 조사하였으며, Table 2에서 제시한 바와 같이 연

도별 피해기간, 피해지역, 가뭄발생 및 해갈에 대해 각각 구분하여 나타내었다. 가뭄 사례를 수집하는 과정에서 문

헌 및 신문기사에서 가뭄을 표현하는 방법 대부분이 행정 구역별로 피해지역을 나타냄에 따라 본 연구에서도 기록과 유사한 행정구역 단위로 가뭄피해지역을 구분하여 사용하였다. 수집된 가뭄기록들을 살펴보면 국내의 경우 평균 2년에 한번 주기로 지역별 또는 전국적으로 크고 작은 가뭄을 겪고 있는 것으로 나타났으며, 그 중에서 대표적인 가뭄사상으로는 1990년대의 경우 1994, 1995년, 2000년대에는 2001, 2008, 2009년으로 확인되었다.

산출된 가뭄지수에 대한 평가방법은 크게 시계열 분석, 지역별 분석 및 수문성분 분석으로 구분하여 분석하였다. 시계열 분석에서는 기존 가뭄지수 및 과거 피해사례를 기반으로 가뭄의 시작과 해갈에 대한 연도별 및 월별 거동을 비교 분석하고자 하며, 지역별 분석에서는 Barnes 객관분석 기법 (Barnes, 1964)을 토대로 공간적으로 분포시켜 과거 가뭄피해지역과의 일치 여부 및 기존 지수와의 차이점을 명확히 구분하고자 한다. 마지막 물수지 분석에서는 과거 극심한 가뭄사상이 발생한 연도를 토대로 강수, 유출 및 토양수분의 거동을 평가하며, 각 기간별 수문성분의 부족량을 정량적으로 제시하여 최종 가용여부를 판단하고자 한다.

3. VIC Model 적용 및 평가

3.1 입력자료 구축

본 연구에서는 VIC 모델이 국내 가뭄해석 적용성을 평가하기 위해 남한 전역에 대한 VIC 모델을 구축하였으며, 모형 구축에 필요한 입력자료인 지형정보와 기상정보를 수집하였다. 우선 지형정보는 국토해양부에서 제공하는 100 m 간격의 DEM (Digital Elevation Model)과 환경부

에서 제공하는 100 m 간격의 토지피복도를 이용하였으며, 농업과학기술원으로부터 정밀토양도 (1:25000)와 토양속성자료를 제공받아 토양특성인자를 산정하였다. 기상정보 (최대 및 최저기온, 평균풍속, 강수)는 기상청 관할 76개소, 국토부 관할 강수관측소 521개소로 총 1976~2009년 동안의 자료를 수집하였다. VIC 모델은 분포형 모델로써 격자별 입력정보 구축이 필요하다. 따라서 수집된 자료는 모델에서 요구하는 적정해상도인 1/8° (약 12.5 km)로 전환해야하므로 (Liang et al., 2004) 본 연구에서는 남한전체를 1/8° 해상도로 구분하여 총 586개 격자에 대한 기상 및 지형정보를 격자에 맞게 재구성 하였다 (손경환, 2010).

3.2 모의능력 평가

가뭄해석에 필요한 수문성분을 활용하기 위해서는 관측치와의 비교 및 검증을 통해 결과의 적절성에 대한 평가가 이루어져야 하며, 대상 지역에 대한 적정 매개변수를 산정이 필요하다. 손경환 등 (2010)은 8개 댐유역 (소양, 충주, 괴산, 임하, 안동, 합천, 대청, 섬진강댐)에 대한 관측유량정보로부터 매개변수 추정 후 남한 전역을 대표할 수 있는 대표매개변수를 산정하여 그 적용성을 검증한 바 있다. 이에 본 연구에서는 이상의 연구성과에서 산정된 매개변수를 적용하였으며, 모의기간인 1976~2009년 동안 격자별 유출 및 토양수분정보를 생산하였다. 생산된 정보에 대한 평가를 위해 일단위 유출결과와 8개 댐 관측유량과의 도시적 및 통계적 평가를 수행하였으며, Table 3은 각 댐별 모의기간 동안의 통계치를 나타낸 것이다. 상관관계수 (CORR_C)의 경우 모든 유역에서 0.83으로 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 모형효율성계수

Table. 3. Statistical Analysis on Simulated Runoff for Each Dam Site

No.	Dam Site	Period (year)	CORR_C (-)	RMSE (mm/d)	ME (-)	VE (%)
D1	Soyang	1986~2009	0.89	3.38	0.80	-5.97
D2	Chungju	1986~2009	0.87	3.50	0.75	-9.87
D3	Guesan	1986~2009	0.86	3.33	0.72	-2.98
D4	Imha	1993~2009	0.84	3.26	0.70	-5.53
D5	Andong	1986~2009	0.87	2.78	0.75	0.98
D6	Habcheon	1989~2009	0.88	2.80	0.76	9.47
D7	Daecheong	1982~2009	0.86	2.60	0.75	7.45
D8	Seomjin	1986~2009	0.83	3.74	0.70	2.41

Percent error in Volume (VE) = $100 \times (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i$,

Root mean square error (RMSE) = $\sqrt{\sum (O_i - S_i)^2 / n}$, where n is a number of data

Nash-Sutcliffe efficiency (ME) = $[\sum (O_i - \bar{O})^2 - \sum (O_i - S_i)^2] / \sum (O_i - \bar{O})^2$

Correlation coefficient (CORR-C) = $SS_{os} / \sqrt{SS_o \times SS_s}$, $SS_{os} = \sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})$, $SS_o = \sum (O_i - \bar{O})^2$, $SS_s = \sum (S_i - \bar{S})^2$

Where, O is observed flow and S is simulated flow.

Fig. 4. Observed and Simulated Runoff for 3 Dam sites

(ME)는 0.70 이상, 평균제곱오차 (RMSE) 2.60~3.74, 유출율적오차 (VE)도 전체유역에서 10% 이내로 관측치에 대해 높은 적합도를 보인 것으로 나타났다. 또한 유출결과에 대한 도식적 평가를 위해 소양, 충주 및 대청댐 유역을 대상으로 전체 모의기간 중 2005년 이후에 대한 관측 및 모의 유출수문곡선을 비교하였다. Fig. 4는 불확실성이 높은 저수유량에 대한 관측치와 모의치의 일치성을 명확히 구분하고자 Hogue et al. (2000)이 제시한 변환유량 산정방법을 이용하여 변환된 값을 나타낸 것이다. 분석결과 소양강 댐의 경우 2008년 봄철 저수부에서 모의 유량이 다소 크게 모의되고 여름철 고수부에서 과소산정된 것으로 나타났으나 전반적으로 기간에 따라 모의치가 관측치와 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있었으며, 나머지 2개 유역도 이와 유사한 것으로 확인되었다. 이상의 통계적, 도식적 평가로부터 활용된 매개변수의 적용성은 높은 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 산정된 매개변수를 토대로 가뭄평가를 위해 남한 전역에 대한 수문정보를 생산하였다.

4. 가뭄지수 산정 및 평가

4.1 가뭄지수 산정

본 연구에서는 VIC 모델을 활용한 가뭄해석을 수행하고자 총 586개의 격자별 모의된 유출 및 토양수분정보를 가뭄지수로 변환하고자 한다. 일 단위 정보를 월단위로 환산한 후 연도별 (1976~2009년) 매월 누적기간별 평균값으로 전환하였으며, 적정분포형 선정을 위한 적합도 검정을 수행하였다. 통상 갈수 및 가뭄해석에 적합한 분포형 선정의 경우 극치값 (smallest)을 잘 반영하는 곡선을 찾는 것이 중요한데, 기존 McKee et al. (1993)은 Gamma 분포를 적정 분포형으로 제시한 바 있다. 최근에는 Log Pearson type-3과 Log Normal (3변수), GEV 분포가 추천된 바 있으며 (Ames, 2006; Kroll and Voge, 2002; Onoz and Bayazit, 1999), 국내의 경우 윤용남과 박무종 (1997)은 Wakeby (5변수)을 적용한바 있다.

적합도 검정을 위해 본 연구에서는 K-S 및 Chi-square 검정을 수행하였으며, Fig. 5는 격자별 유출 및 토양수분

Fig. 5. Results of Chi-square and K-S Test

별 적용된 8개 분포형 곡선에 대한 유의수준 5%에 해당하는 Chi-square 및 K-S 검정 결과를 그 예로 도시하였다. 그림에서의 x축은 각월을 뜻하며, y축은 유의수준을 만족한 격자의 개수를 의미한다. 적합도 검정 결과 대부분의 격자에서 유출의 경우 Log Pearson type-3 분포형이, 토양수분에서는 Wakeby (5변수)가 적절한 것으로 나타났다으며, 금회 결과가 기존 연구에 활용된 분포형 범주에 해당하는 것으로 확인되었다.

적용된 분포형 곡선에 대한 누가확률값을 산정하였으며, 각 확률값에 대한 표준화를 통해 586개 격자별 SRI 및 SSI를 산정하였으며, Fig. 6은 3월을 기준으로 과거 3개월 (1, 2, 3월) 누적평균값에 대한 누가확률 및 SRI 값을 예로써 나타낸 것이다. 이상의 곡선은 평가하고자 하는 기간의 과거치로부터 산정된 것이며, 해당 그래프로 부터 현재의 값이 위치하는 x축 값을 최종 가뭄지수로 선정하였다. 본 연구에서는 이와 같은 방법을 토대로 1990~2009년까지 SRI 및 SSI값을 매월 순차적으로 산정하였다.

4.2 시계열 분석

가뭄에 대한 평가를 위해서는 생성된 지수를 중심으로 시계열에 따라 기록된 가뭄사상을 적절히 반영하는가에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 남한 전역에 산정한 SRI (3, 6, 12) 및 SSI (3, 6, 12) 값을 평균하여 1991~2009년까지 나열한 후, Table 2에 제시한 과거 가뭄사상

Fig. 6. SRI (Standard Runoff Index) Results on 586 Grids

과 비교검토 하였다. 또한 현 기상청에서 산정되는 가뭄지수인 SPI (3, 6, 12)와 PDSI를 이용하여 금회 결과와 비교하였다. Fig. 7은 지속시간별 가뭄지수를 구분하여 결과를 시계열에 따라 도시한 것이며, ○와 ×는 가뭄발생 및 해갈을 의미한다. 여기서 PDSI의 경우 장기간 지속되는 가뭄기간동안의 평가에 유리한 특성으로 (류재희 등, 2002) SRI (12) 및 SSI (12)와 비교를 수행하였다.

우선 지속시간 3개월 및 6개월에 대한 SRI 및 SSI의 평

Fig. 7. Temporal Analysis of SRI, SSI (1991~2009year) with SPI and PDSI

가결과 SRI 및 SSI 모두 가뭄이 발생한 시기에 가뭄을 잘 재현하는 것을 볼 수 있다. 이중 3개월의 경우 2001년 가뭄을 포함하여 여러 단기간에 발생한 가뭄에 대한 해석에서도 이를 적절히 반영한 것으로 나타났으나, 장기 가뭄인 1994~1995년 사상에서는 가뭄기간 중간에 가뭄이 해결되는 것으로 나타나 장기간 발생한 가뭄 평가에는 신뢰성이 다소 떨어지는 것으로 확인되었다. 반면, SRI (12) 및 SSI (12)의 경우 단기간에 발생한 가뭄에 대한 평가는 미흡하나, 장기 가뭄에 대한 표현의 경우 적절한 것으로 나타났다. 기존 가뭄지수와와의 비교 및 분석에서는 SPI와 비교할 경우 값에 약간의 차이가 있겠으나 전반적으로 유사한 거동을 보인 것으로 나타났다. 이는 강수의 거동 및 영향을 지배적으로 받는 장기유출모형의 특성 때문인 것

으로 판단되며, 지역별 분석을 통해 명확한 차이를 규명하고자 한다. 마지막 PDSI와의 비교에서는 단기 가뭄에 대한 반영은 미흡하였으며, 대체로 SRI (12) 및 SSI (12)와 거동이 유사한 것으로 확인되었다.

Table 4는 국내 극심했던 주요 가뭄 사상 (1994, 1995, 2001, 2008 및 2009년)에 대해 전체 산정 지점별 가뭄심도의 값을 평균하여 지속기간별로 나타낸 것이다. 우선 1994~1995년 가뭄은 94년 7월을 시작으로 95년 4월에 해결되었으나 다시 7~8월에 발생하여 9월에 완전히 종료된 사상으로, SPI, SRI 및 SSI 모두 가뭄 기준인 -1.0 이하로 지속기간별 가뭄의 상황을 적절히 나타내는 것을 알 수 있다. 다만, SPI (12), SRI (12), SSI (12) 및 PDSI의 경우 4, 5월에 대한 가뭄의 해결은 반영하지 못하였으며, SSI

Table 4. Drought Indices for Each Drought Year

Drought Period		SPI			SRI			SSI			PDSI
Year	Month	03	06	12	03	06	12	03	06	12	
1994	07	-1.21	-1.59	-0.83	-1.36	-1.57	-0.74	-1.15	-1.00	-0.40	-2.20
	08	-1.41	-1.40	-1.56	-1.60	-1.72	-1.87	-1.54	-1.25	-0.87	-2.27
	09	-1.65	-1.59	-1.56	-1.81	-1.89	-1.77	-1.81	-1.48	-1.02	-3.35
	10	-0.24	-1.01	-1.14	-0.66	-1.37	-1.35	-0.85	-1.27	-0.85	-2.49
	11	-0.15	-1.27	-1.31	-0.22	-1.42	-1.45	-0.59	-1.26	-0.92	-2.38
	12	1.09	-1.20	-1.33	0.96	-1.42	-1.52	0.19	-1.13	-1.00	-2.21
1995	01	-0.59	-0.40	-1.36	-0.44	-0.84	-1.51	-0.43	-0.77	-1.06	-1.72
	02	-0.69	-0.45	-1.39	-0.68	-0.48	-1.56	-0.55	-0.65	-1.11	-1.62
	03	-0.40	0.60	-1.34	-0.58	0.52	-1.55	-0.56	-0.16	-1.11	-1.45
	04	-0.47	-0.74	-1.27	-0.62	-0.75	-1.47	-0.58	-0.55	-1.09	-1.51
	05	-0.43	-0.80	-1.51	-0.81	-1.00	-1.59	-0.83	-0.72	-1.22	-1.64
	06	-1.28	-1.33	-1.74	-1.36	-1.41	-1.71	-0.97	-0.97	-1.29	-2.24
	07	-1.01	-1.11	-1.11	-1.44	-1.49	-1.66	-1.36	-1.29	-1.28	-2.08
	08	0.03	-0.12	-0.36	-0.14	-0.28	-0.53	-1.03	-1.18	-1.07	0.24
	09	0.07	-0.43	-0.25	0.00	-0.38	-0.25	-0.58	-1.15	-0.88	-0.82
2001	03	0.22	-0.30	0.19	0.86	0.01	0.41	1.05	0.44	-0.27	1.25
	04	-1.23	-0.79	0.16	-1.10	-0.28	0.39	-0.35	0.00	-0.28	0.58
	05	-2.40	-1.48	0.07	-1.25	-0.75	0.36	-1.78	-0.61	-0.38	-0.17
	06	-0.36	-0.27	0.36	-0.58	-0.15	0.57	-1.69	-0.87	-0.29	0.45
	07	-0.01	-0.41	0.43	-0.25	-0.39	0.68	-1.21	-0.89	-0.12	0.64
2008	09	-0.79	-0.70	-0.83	-1.11	-1.18	-1.29	-1.06	-0.80	-0.55	-1.24
	10	-0.85	-0.65	-0.92	-1.22	-1.15	-1.37	-1.20	-0.96	-0.84	-1.58
	11	-1.21	-0.79	-0.90	-1.89	-1.18	-1.37	-1.56	-1.09	-1.04	-1.64
	12	-1.00	-1.06	-0.95	-1.75	-1.36	-1.38	-1.67	-1.40	-1.20	-1.55
2009	01	-1.25	-1.19	-1.08	-1.91	-1.54	-1.45	-1.81	-1.61	-1.47	-1.22
	02	-0.32	-1.32	-0.98	-1.53	-2.15	-1.46	-1.83	-1.79	-1.54	-1.18
	03	-0.12	-0.93	-0.99	-1.01	-1.83	-1.44	-1.99	-1.76	-1.54	-1.16
	04	-0.34	-0.90	-0.99	-0.67	-1.02	-1.39	-1.60	-1.78	-1.61	-1.34

(6) 및 PDSI는 가뭄이 해갈된 9월에도 가뭄이 지속되는 것으로 나타내었다. 2001년의 경우 가뭄 4월에 시작하여 6월 중순에 해갈된 사상으로 단기간 발생한 가뭄에 속한다. 이에 SPI (3)은 4월 -1.23을 시작으로 5월 -2.40, 6월 -0.36으로 가뭄이 종료한 것으로 나타났으며, SPI (6)도 이와 유사한 값을 나타내었다. 마찬가지로 SRI (3)과 SSI (3)은 해당가뭄기간에 대한 가뭄을 적절히 표현하였는데, 6개월에서는 -1.0 이하의 값이 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 SRI 및 SSI의 경우 단기가뭄에 대한 감시를 위해서는 지속기간 3개월의 활용성이 높다고 판단된다. PDSI는 앞서 언급한바와 같이 단기가뭄인 2001년 사상에 대한 재현은 미흡한 것으로 확인되었다. 마지막 2008년 가뭄사상의 경우 피해기간은 2008년 9월을 시작으로 2009년 4월 초에 해갈된 사상으로, SRI 및 SSI 모두 해당

기간에 대한 가뭄상황을 적절히 반영하는 것으로 확인되었으며, SRI (12) 및 SSI (3,6,12)의 경우 가뭄이 해갈된 이후에도 가뭄이 지속된 것으로 나타내었다. SPI는 가뭄시작이 11월에서 2월 해갈된 것으로 표현하였으며, 가뭄의 시작 및 종료를 적절히 해석하지 못한 것을 알 수 있다. PDSI는 대부분의 값이 -0.5 이하로 가뭄임을 나타내었으나, 가뭄이 해갈된 이후에도 가뭄이 지속되어 기록된 사항을 반영하지 못한 것으로 확인되었다.

이상의 결과는 남한 전역에 대한 평균값으로써 극심하였던 가뭄기간에서의 평가는 적절하나, 지역별 심도의 특성 및 구체적인 범위에 대해서는 미흡하다고 볼 수 있다. 이에 지역별 분석에서 금회 산정된 결과의 적절성을 평가하고자 한다.

4.3 지역별 분석

가뭄지수의 적용성 평가를 위한 방법 중 하나는 각 지점별로 산정된 가뭄지수를 공간적으로 분포시켜 실제 가

뭄이 발생한 지역과의 일치여부를 평가하는 방법이 있으며, 이는 가뭄시작과 종료 및 피해지역에 대한 조사 결과와 평가하는 간접적인 방법이라 할 수 있겠다. 본 연구에서는 Barnes 객관분석 기법을 이용하여 SRI (3), SSI (3)

Fig. 8. Spatial Analysis of Drought Index for 2008~2009 year

에 대한 가뭄도를 작성한 후 과거 극심했던 가뭄사상을 토대로 지역별 가뭄해석의 적절성을 평가하였다. 평가 기간은 최근 발생한 2008~2009년 가뭄사상을 선정하였으며, 마찬가지로 SPI (3) 및 PDSI에 대한 가뭄도를 작성하여 비교 및 평가에 활용하였다.

2008년 가뭄은 피해기간이 2008년 9월부터 시작하여 2009년 3월까지로 4월 10일 강수로 인해 가뭄이 해갈된 것으로 2009년까지 이어진 대가뭄으로 볼 수 있다. 피해 지역은 강원 및 중부 내륙지방과 남부지방 전역에 심각하게 발생하였으며, 특히 태백시는 87일 동안 제한급수가 실시되는 등 피해가 가장 극심한 지역인 것으로 조사되었다.

Fig. 8은 2008년 9월에서 2009년 5월까지 2개월 단위로 SRI, SSI, SPI 및 PDSI에 대한 가뭄도를 나타낸 것이며, 가뭄해갈 반영의 적절성 평가를 위해 4월에 대한 결과도 도시하였다. 우선 SRI의 결과를 살펴보면 9월에 강원지역과 남부지방을 중심으로 가뭄이 발달하여 11월~1월에는 극심한 가뭄이 서울 및 경기일부를 제외한 남한 전역에 확장된 것으로 표현되었다. 2009년 3월 이후에는 남부 및 중부 일부지역에서 가뭄이 점차 해갈되고 있는 것으로 나타났다. 기록된 사항(4월 가뭄해갈)과 다르나 3월에 비해 점차 그 심도가 약해지는 양상을 보여 가뭄 상황을 적절히 표현한 것으로 판단된다. 반면 공간적인 분포는 SSI의 경우 11월까지 SRI와 유사한 거동을 보이고 있으나, 가뭄회복 속도가 느린 토양수분의 특성상 가뭄이 종료된 5월에서도 강원도, 경상도 및 전라도 일부 지역에서 그 심도가 지속되고 있는 것으로 나타났다. SPI는 9월에 강원 내륙 및 남부지방을 중심으로 가뭄이 발달하여 2008년 11월에도 지속되는 것으로 나타났으며, SRI 및 SSI와는 강원 내륙지역과 심도에서 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 기록된 사항과 다르게 2009년 1월에 강원지역에 심도가 경미한 수준으로 나타났으며, 3월에는 경상도 일부를 제외한 거의 모든 지역에서 가뭄이 해갈된 것으로 표현된 결과의 신뢰성이 낮다고 판단된다. PDSI의 경우 9월에 강원 및 경기 북부를 제외한 모든 지역에서 가뭄이 발생하였으며, 특히 강원 및 남부지역을 가장 극심한 가뭄으로 표현한 것으로 나타났다. 그러나 3월, 5월에도 이전과 차이가 미비하여 기록된 사항과 다르다고 볼 수 있다. 동일한 방식으로 나머지 대 가뭄 기간인 1994년, 1995년, 2001년에 대한 평가를 수행하였으며, SRI 및 SSI 모두 가뭄상황을 적절히 반영한 것으로 확인되었다.

4.4 유역별 수문성분 분석

본 연구에서는 산정된 유출 및 토양수분정보를 이용하여 유역별 가뭄해석의 적용성을 평가하였다. 대상유역은 각 수계별로 충주, 안동, 대청 및 섬진강 댐을 대표로 선정

하였으며, 대상기간은 과거 단기 및 장기간 가뭄으로 기록된 2001년 및 2008년을 선정하였다. Fig. 9는 모델에서 산정된 1976~2009년까지의 일 단위 유출 및 토양수분 값을 연도로 구분하여 각각 나열한 후 대상기간별 강우, 유출 및 토양수분의 거동을 도시한 것이다. 여기서 강수 및 유출정보는 1년 동안 누적된 값을 뜻하며, 그림에서 열은 회색은 최대~75% 및 25%~최소값, 진한 회색은 75~25% 사이를 의미한다. 우선 충주댐의 유역별 누적강우 및 유출정보를 살펴보면 전체 범위에서 2008년도에 최소값에 근접하게 거동하는 것으로 확인되었으며, 토양수분도 역시 6월 이후부터 34개 연도 중에서 2008년이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 2008년도 극심했던 강원지역의 가뭄 상황을 잘 반영한 것으로 판단된다. 안동, 대청 및 섬진강 댐 유역은 가뭄기간동안의 누적강수 및 유출정보가 25%~최소 범위에 위치한 것으로 나타났으며, 토양수분의 경우 01년 가뭄기간인 4~6월 동안에 가장 낮다가 6월부터 평균치 이상 상승한 것을 알 수 있다. 또한 2008년에는 9월 이후부터 약 25%의 범위에 범주한 것으로 나타나 전반적으로 유역별 산정된 수문성분들이 국내 가뭄에 대한 상황을 적절히 반영하는 것으로 확인되었다. 이상의 결과는 남한 전역에 대한 유역별 갈수 및 가뭄관리에 있어 정량적인 정보의 제공이 가능하다는 점에서 유용하게 활용될 것이라 사료된다.

5. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 권역 또는 국가별 수문해석에 용이한 VIC 모델을 활용하여 국내에 대한 유출해석을 수행하였으며, 산정된 수문성분을 가뭄지수로 전환하여 국내 가뭄 해석 및 활용에 대한 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 분석된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 가뭄평가를 위한 기초자료로써 과거 (1991~2009년) 국내에서 발생한 가뭄피해사례를 가뭄 시작과 해갈 및 피해지역을 중심으로 수집하였다. 국내에서는 크고 작은 가뭄피해가 평균적으로 2년에 한번 발생하는 것을 확인하였으며, 주요 극심한 가뭄사상이 1994~1995년, 2001년, 2008~2009년인 것으로 조사되었다.
- 2) 가뭄해석을 위한 수문성분 모의를 위해 남한 전역을 대상으로 지형 및 기상자료를 활용하여 1/8° (약 12.5 km) 격자 기반의 유출모의를 수행하였다. 관측유량이 존재하는 8개 댐 상류유역에 대한 모의결과의 정확도를 평가한 결과 상관계수 및 모형효율성 계수는 0.83, 0.70 이상, 평균제곱근오차는 2.60~3.74 (mm/d) 및 유출용적오차는 10% 이내로 관측치에 대해 높은

Fig. 9. Hydrological Component Analysis on 4 Dam Basin

정확도를 보인 것으로 나타났다.

- 3) 수문성분정보에 대한 가뭄지수를 산정하고자 격자별 일 단위 유출 및 토양수분정보를 월단위로 환산한 후 연도별 누적기간별 평균값으로 전환하였으며, 누적기간의 경우 단기간 및 장기간의 가뭄에 대한 평가를 고려하기 위해 3개월 및 12개월로 구분하였다. 적정 분포형 선정의 경우 적합도 검정을 통해 유출은 Log Pearson type-3, 토양수분은 Wakeby (5변수)으로 나타났으며, 각 곡선에 대한 누가확률값을 산정하고 각 확률값에 대한 표준화를 통해 격자별 SRI 및 SSI를 산정하였다.
- 4) 국내 가뭄해석에 대한 적용성을 평가하기 위해 과거 가뭄기록사례와 기존 가뭄지수 (SPI 및 PDSI)를 토대로 SRI 및 SSI에 대한 시계열 분석, 지역별 분석 및 유역별 수문성분 분석을 수행하였다. 시계열 분석은 1991~2009년 동안 남한 전역에 산정된 SRI 및

SSI값을 평균하여 기간별로 가뭄발생 및 해갈에 대해 평가한 것으로, SRI (3) 및 SSI (3)는 단기간에 발생한 가뭄에, SRI (12) 및 SSI (12)는 장기간 발생한 가뭄평가에 적절한 것으로 나타났다. 지역별 분석에서는 2008년 가뭄사상을 토대로 산정된 지수에 대한 가뭄도를 작성하여 공간적인 거동을 평가하였으며, 피해기간 및 지역에서 다른 가뭄지수에 비해 SRI 및 SSI 모두 해당기간의 기록된 가뭄상황을 잘 반영한 것으로 나타났다. 마지막 유역별 수문성분 분석에서는 충주, 안동, 대청 및 섬진강 댐을 토대로 과거 대비 가뭄기간 (2001년, 2008년)에서의 유출 및 토양수분의 거동을 분석하였으며, 전 유역에서 기록된 피해시기와 유사하게 나타나 수자원 관리 측면에서도 충분히 활용 가능한 것으로 확인되었다.

본 연구에서 산출된 지수인 SRI와 SSI는 수문학적 가뭄 및 농업적 가뭄평가에 활용이 가능하다는 측면에서 가

치가 있다고 하겠다. 또한 남한전역에 대한 장주기 수문 해석이 가능하다는 점은 가뭄의 광역적이고 점진적인 특성을 반영함에 있어 용이하며, 향후 동아시아 지역과 연계한 가뭄감시 및 전망과 물 관리에 있어 효율적으로 활용될 것이라 판단된다. 다만, 평가에 있어 남아있는 몇몇 불확실성은 배제할 수 없는 상황이며 추후 보다 많은 가뭄사례를 수집하고 평가와 검증을 통해 두 지수에 대한 수정 및 보완이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(RACS_2010-4601)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부 (1995). **가뭄기록조사 보고서**
- 건설교통부 (2002). **2001년 가뭄기록조사 보고서**
- 권현중, 박혁진, 홍대의, 김성준 (2006). "SWSI 가뭄지수를 보완한 준분포형 수문학적 가뭄평가 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 645-658.
- 기상청 (2007). **산업기상지수 산출기술 개발**
- 류재희, 이동률, 안재현, 윤용남 (2002). "가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제4호, pp. 397-410.
- 손경환 (2010). 동아시아 지역에 대한 전구수문모형의 적용성 평가. 석사학위논문, 세종대학교, pp. 16-21.
- 손경환, 이종대, 배덕효 (2010). "전지구 수문해석 모형의 국내 적용성 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제12호, pp. 1063-1074.
- 윤용남, 박무중 (1997). "L-moment법을 이용한 월강우량 자료의 지역가뭄빈도 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제1호, pp. 55-62.
- 이주현, 정상만, 김성준, 이명호 (2006). "가뭄모니터링 시스템 구축: I. 정량적 가뭄모니터링을 위한 가뭄지수의 적용성 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제9호, pp. 787-800.
- 한국수자원공사 (2005). **2005년 가뭄관리모니터링 체계 수립 보고서**.
- Abramowitz, M., and Stegun, I.A. (1964). Handbook of Mathematical function, *U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series*, No. 55.
- Ames, D.P. (2006). "Estimating 7Q10 Confidence Limits from Data: A Bootstrap Approach." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 132, No. 3, pp. 204-208.
- Andreadis, K.M., Clark, E.A., Wood, A.W., Hamlet, A.F., and Lettenmaier, D.P. (2005). "Twentieth-Century Drought in the Conterminous United States." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 6, Issue 6, pp. 985-1001.
- Barnes, S. (1964). "A technique for maximizing details in numerical map analysis." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 3, No. 4, pp. 395-409.
- Fan, Y., and Van den Dool, H. (2004). "The CPC global monthly soil moisture data set at $\frac{1}{2}$ degree resolution for 1948-present." *Journal of Geophysical Research*, 109:D10102, doi:10.29/2003JD004345
- Herbst, P.H., Bredenkamp, D.B., and Barker, H.M.G. (1966). "A technique for the evaluation of drought from rainfall data." *Journal of Hydrology*, Vol. 4, pp. 264-272.
- Hogue, T.S., Sorooshian, S., Gupta, V.K., Holz, A., and Braatz, D. (2000). "A Multistep Automatic Calibration Scheme for River Forecasting Models." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 1, pp. 524-542.
- Hosking, J.R.M., and Wallis, J.R. (1993). "Some Statistics Useful in Regional Frequency Analysis." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 6.
- Jaranilla-Sanchez, P.A., Wang, L., and Koike, T. (2011). "Modeling the hydrologic responses of the Panpanga River basin, Philippines: A quantitative approach for identifying droughts", *Water Resources Research*, Vol. 47, W03514, doi:10.1029/2010WR 009702.
- Kroll, C.N., and Vogel, R.M. (2002). "Probability Distribution of Low Streamflow Series in the United States." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 132-146.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., and Burges, S.J. (1994). "A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. 7, pp. 14415-14428.
- Liang, X., Jianzhong, G., and Ruby Leung, L. (2004). "Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, Issues. 1-4, pp. 287-310.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The

- Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales.” *8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, California.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). “Drought Monitoring with Multiple Time Scales Preprints.” *9th Conference on Applied Climatology*, 15-20 January, Dallas, TX, pp.223-236.
- Onoz, B., and Bayazit, M. (1999). “GEV-PWM Model for Distribution of Minimum flows.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 289-293.
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought, Research paper. No. 45, U.S. Weather Bureau.
- Sheffield, J., and Wood, E.F. (2008). “Global Trends and Variability in Soil Moisture and Drought Characteristics, 1950 - 2000, from Observation-Driven Simulations of the Terrestrial Hydrologic Cycle.” *Journal of Climate*, Vol. 21, No. 3, pp. 432-458.
- Shukla, S., and Wood, A.W. (2008). “Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought.” *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2007GL032487.
- Trenberth, K.E., Overpeck, J.T., and Solomon S. (2004), “Exploring drought and its implications for the future.” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 85, No. 3, pp. 27-27.

논문번호: 11-045	접수: 2011.04.22
수정일자: 2011.06.15/07.13	심사완료: 2011.07.13