

수문기상 정보에 따른 국내 가뭄판단기준 제시 및 평가 Derivation & Evaluation of Drought Threshold Level Considering Hydro-meteorological Data on South Korea

배 덕 효* / 손 경 환** / 김 현 애***

Bae, Deg Hyo / Son, Kyung Hwan / Kim, Heon Ae

Abstract

The objective of this study is to derive and evaluate the drought threshold level based on hydro-meteorological data using historical drought events. After collecting the drought events during 1991 to 2009 year, the observed meteorological data and estimated hydrological component from LSM are used as input for the percentile analysis that is drought analysis data. The drought threshold level that precipitation and runoff of 3 month duration are less than 35%, soil moisture of 2 month duration is less than 35% and evapotranspiration of 3 month duration is more than 65% is derived using ROC analysis that are objective test method. ROC analysis with SPI (3) is performed to evaluate the applicability of threshold level in the domestic. As a result, it can be concluded that the derived drought threshold level show better performance to reflect the historical drought events than SPI (3) and it reasonably explain the spatial drought situation through the spatial analysis.

Keywords : threshold level, Hydro-meteorological data, Historical drought events, ROC analysis

요 지

본 연구의 목적은 기록된 관측가뭄자료를 이용하여 수문기상 기반의 국내 가뭄판단기준을 제시하는데 있다. 과거 1991년에서 2009년까지 기록된 가뭄사례를 수집한 후, 관측기상정보와 LSM (Land Surface Model)으로부터 생산된 수문정보를 이용하여 백분위 해석을 수행하였다. 기간별 가뭄판단기준을 도출하기 위해 객관적 가뭄평가 기법인 ROC (Relative Operating Characteristics) 분석을 이용하였다. 국내 가뭄기준은 대표적으로 강수 및 유출이 지속기간 3개월에 평년대비 35% 이하, 토양수분이 지속기간 2개월의 35% 이하 그리고 증발산량이 지속기간 3개월에 65% 이상으로 나타났다. 가뭄판단기준의 적용성 평가를 위해 SPI (3)와의 ROC 분석을 수행한 결과 SPI (3)에 비해 적용성이 높은 것으로 나타났다. 또한 가뭄판단기준에 대한 지역별 분석을 수행한 결과 공간적으로 가뭄상황을 적절히 반영하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 가뭄판단기준, 수문기상정보, 과거가뭄기록사례, ROC 분석

* 세종대학교 물자원연구소 · 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

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

** 교신저자, 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: skhdr@paran.com, Tel: 02-3408-3337)

Corresponding Author, Ph.D. Course Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

*** 기상청, 기후예측과 주무관 (e-mail: hakim@kma.go.kr)

Action Officer, Climate Prediction Division, Korea Meteorological Administration, Seoul 1565-720, Korea

1. 서론

가뭄은 홍수와 달리 수개월에서 수년간 지속되며 광역적으로 발생하는 특성이 있다. 이로 인해 가뭄을 감지하더라도 구체적인 발생시점, 범위, 원인을 규명하는 것은 매우 어려우며 가뭄이 해갈된 이후에도 그 영향이 장기간 지속된다. 국내에서 가뭄은 짧게는 2~3년, 길게는 5~7년 주기로 아주 빈번하게 발생한다고 알려져 있다(KMA, 2012). 실제로 국내 가뭄피해사례를 살펴보면 전국규모로는 1994년, 1996년, 2001년에 발생하였으며 2002년에 영남 지역, 2005년에 제주도, 2006년에 강원도 및 전남, 2008~2009년에 강원도 태백시와 남부지방, 2012년에 경기도, 충청도, 전라도 지역에서 극심한 가뭄피해를 겪은바 있다.

가뭄은 발생원인과 해석관점에 따라 분류할 수 있다. 발생원인에 따라 자연적, 인위적 원인으로 구분할 수 있으며 인위적인 요인으로 발생한 가뭄이라 할지라도 그 발생원인 자체는 강수량 부족으로 인한 물 순환의 불균형이므로 통상 가뭄은 자연재해로 인식되는 것이 일반적이다. 또한 해석관점에 따라 기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제적 가뭄으로 분류할 수 있으며 유관기관은 그 목적에 맞게 가뭄해석을 수행하고 있다(K-water, 2005; KMA, 2007; EKR, 2006). 다만 현재까지 가뭄을 정량적으로 판단할 수 있는 기준이 마련되지 않아 가뭄현상 규명 및 감지에 어려움이 있는 실정이다.

지금까지 자연조건에서 정량적 가뭄판단기준을 제시하기 위한 연구는 많이 이루어져왔다. Cole (1993)은 기록된 가뭄기간동안 무강수일수를 계산하여 무강수일수가 15일 이상인 경우, Van Bavel (1953)은 20일 평균토양수분량이 평년대비 20% 지속될 때, Tallaksen et al. (1997)은 하천 유량모의를 통해 유량에 대한 지속기간별 초과확률을 이용하여 가뭄을 정의한 바 있다. 한편 Yevjevich (1967)은 평년의 상태에 따라 유동적으로 가뭄을 정의할 수 있는 기법(Truncated Level Method)을 개발하였고, 최근에는 이와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다(Dracup et al., 1980; Hisdal and Tallaksen 2003; Fleig et al., 2006).

이처럼 국외에서는 기록된 가뭄사례를 이용하여 다양한 실험과 이론해석을 통해 각 분야별로 가뭄판단기준을 제시해 온 것을 알 수 있다. 국내의 경우 Lee and Kim (1979)은 10일 이상 연속하여 일 강수량이 5mm 이하일 경우, Byun and Han (1994)는 15일 동안 무강수 일수가 지속될 경우, 기상청에서는 15일 동안 5mm 이하의 강수가 지속될 경우를 가뭄이라 제시한바 있으며, 이를 근거로 기상청에서는 가뭄판단지수(Drought Decision Index,

DDI)를 개발하여 가뭄정보를 매일 웹상으로 제공하고 있다(KMA, 2007). 그러나 상당수가 기상에 관한 것으로 그 외 분야에서의 가뭄기준 제시가 미흡하다. 또한, 이러한 기준들도 객관적으로 검증되지 않아 실효성이 낮은 실정이다. 이는 가뭄의 정량적인 관측이 어려워 기록을 소홀히 했다는 점과, 우리나라 전역에 대해 Mesoscale 기반의 수문정보를 생산할 수 있는 지표수문해석모형(Land Surface Model, LSM)을 다룰 수 있는 기술력이 부족한 것이 주요 원인이라 판단된다. 그러나 최근에는 인터넷, 기사, 방송매체 및 여러 문헌들로 부터 기록된 가뭄피해에 대한 사례를 쉽게 접할 수 있으며, 수문해석의 경우 국내에서 LSM에 대한 적용성이 검증된 사례가 있어(Son et al., 2011), 물 순환 해석을 통한 국내 가뭄판단기준 제시가 가능해 졌다.

본 연구에서는 우리나라를 대상으로 기록된 가뭄자료를 이용하여 기상 및 수문정보 기반의 국내 가뭄판단기준 제시 및 적용성을 평가하고자 한다.

2. 연구수행방법

본 연구의 목적은 기록된 가뭄피해사례와 수문기상 정보를 활용하여 국내 가뭄의 판단기준을 제시하고자 함이며, 이를 위한 연구수행절차와 방법은 Fig. 1과 같다.

우선 남한전역을 대상으로 지형 및 기상(강수, 기온, 평균풍속 등) 정보를 수집한다. 수문해석모형인 지표수문해석모형(Land Surface Model, LSM)을 구축하여 격자별 수문성분(유출, 토양수분 및 증발산량)을 생산한다. 기상 및 수문정보를 가뭄정보로 전환하는 과정이 필요하며, 본 연구에서는 백분위(percentile) 기법을 적용하여 가뭄정보를 생산한다. 가뭄정보 생산을 위해 지속기간별 백분위 해석을 수행한다. 이를 위해 일 단위로 구성된 관측기상 정보 및 수문해석정보를 기간별로(1, 2, 3~12개월) 다양하게 구분하고, 백분위 해석을 통해 기간별 수문기상 백분위값을 생산하고자 한다. 통상 가뭄해석에 있어 가장 어려운 부분은 지속기간 결정이다. 과거 Palmer (1965), Yevjevich (1967)은 가뭄지속기간을 최소 1개월 이상으로 구분할 것을 제시한바 있으며, 국내에서도 기간을 1개월 또는 3개월로 구분해 왔다. 그러나 아직 지속기간 결정과 관련하여 제대로 검증된 사례가 없어 재검토가 필요하다. 가뭄판단기준 도출을 위해 그동안 국내에서 1991~2009년에 발생한 가뭄피해사례를 수집하고 그 중 1991~2000년을 가뭄판단기준 선정기간으로, 나머지 2001~2009년을 검증기간으로 구분한다. 생산된 수문기상백분위 결과에 대해 가뭄해석정보의 객관적 평가에 용이한 ROC

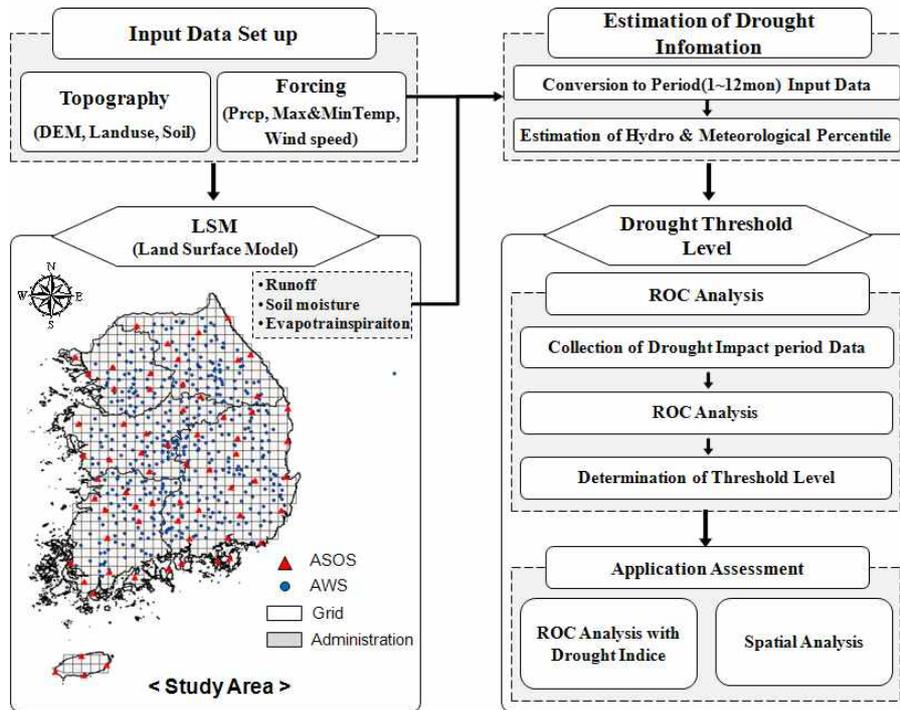


Fig. 1. Methodology for Estimation and Assessment of Drought Threshold Level

(Relative Operating Characteristic) 분석을 이용하여 가뭄판단기준을 도출하고자 한다. 마지막으로 검증기간에서 기존 가뭄지수와의 ROC 분석 및 지역별 분석을 수행하여 가뭄판단기준에 대한 적용성을 평가하고자 한다.

2.1 지표수문해석모형

본 연구에서는 수문해석기반의 가뭄정보를 생산하고자 중규모 이상(mesoscale)의 수문해석에 있어 전 세계적으로 활용성이 높은 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모형(Liang, 1994)을 채택하였다. VIC 모형은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발되었으며, 이미 국내에서도 그 적용성이 검증된바 있다(Son et al., 2010). 현재 국외에서는 VIC 모형을 활용하여 대륙 또는 전지구 규모의 수자원 부족량 및 가뭄해석을 수행하고 있다. Nijssen et al., (1997)은 유역 면적이 795,000 km²인 Mekong river를 대상으로 0.5° 해상도를 적용하여 유출해석을 수행한바 있으며, Sheffield et al., (2008)은 VIC 모형을 이용하여 전 세계 토양수분을 산정하고 평가한 바 있다. 모형의 특징은 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지의 유동(Water & Energy flux)을 모의하는 분포형 모형으로써 크게 물수지(Water balance), 하도추적(Channel routing), 에너지수지(Energy balance) 등으로 구성되

어 있으며, 각 모듈은 독립적으로 수행된다. 모형에서 적용 가능한 격자의 범위는 1/8~2° 정도로 다양한 공간분해능이 가능하며, 기상모델(Global Climate Model, GCM; Regional Climate Model, RCM)과의 직접적인 연계에 용이하다.

2.2 수문기상 백분위

기간별 가뭄정보를 생산하기 위해서는 다양한 시간간격에 대해 가뭄정보를 계산할 수 있는 방법이 고려되어야 한다. 가뭄정보는 장기간의 축적된 입력정보를 이용하여 정상년 대비 현재의 상태를 가늠함으로써 결정된다. 그중, 다양한 시간간격을 고려한 가뭄해석 방법으로는 정상강수백분위(Percent of Normal precipitation, PN)과 표준강수지수(Standard Precipitation Index, SPI)가 있다. 여기서, PN은 해당월의 강수를 정상강우로 나누고 100을 곱하여 계산되며(KMA, 2007), SPI는 평년기간에서의 확률밀도함수를 결정하고 해당기간의 강수량이 위치하는 확률값 선정 및 표준화를 통해 지수를 계산한다(Mckee et al., 1993). 그러나 PN은 지역별 강수의 부족을 비교하기가 어려우며, 수문정보에 대해서 아직 그 적용성이 검증된 사례가 없는 실정이다. 또한, SPI 방법의 경우 기존 Son et al., (2011)이 수문해석정보로부터 대표 확률분포형을 결정하여 국내 적용성을 검증한바 있으나, 적정 확

률분포형 결정에 있어 여전히 불확실성이 문제되고 있다.

한편, Tang et al. (2009)은 미국 서부지역에 백분위 해석기법을 적용하여 가뭄의 현상을 규명한다. CPC (Climate Prediction Center), PU (Princeton University) 및 UW (University of Washington)에서는 지표수문해석 모형으로부터 산출된 유량 및 토양수분값을 백분위로 환산하고 웹기반으로 실시간 유관기관 및 대 국민에게 가뭄에 대한 현황을 제공하고 있다. 백분위 해석이란 해당기간에서의 기간별 수문기상값과 정상년에서의 값을 비교하여 해당기간 값에 대한 등수를 평가함으로써 가뭄정보를 얻게 되며, 값의 정상상태인 50%를 기준으로 값이 낮을수록 가뭄임을 뜻한다. 수문정보 백분위 산정공식은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$\text{Percentile}(\%) = \frac{\{\text{count}(Q \geq Q_i)\} \times 100}{T_p} \quad (1)$$

여기서, T_p 는 해당기간에서의 정상년 자료의 개수, Q 는 해당기간의 수문기상 값, Q_i 는 정상년 기간 동안의 수문기상값을 뜻한다.

본 연구에서는 일단위 관측기상(강수 및 평균기온)과 LSM으로부터 해석된 수문성분(유출, 토양수분 및 증발산)정보를 기간별(1, 2, 3개월~12개월)로 구분하고 Eq. (1)의 백분위 해석 방법을 이용하여 가뭄판단기준 결정에 활용하고자 한다.

2.3 국내 가뭄피해사례

과거 피해사례 수집은 1990년부터 2009년까지 신문 또는 매스컴 자료와 MOCT (1995), MOCT (2002), KMA (2011) 및 Kim and Lee (2011)에서의 자료를 참고하였다. 여러 문헌 및 기사에서 가뭄을 표현하는 방법 대부분이 행정구역별로 피해지역을 나타냄에 따라 본 연구에서도 기록과 유사한 행정구역 단위(경기도, 강원도, 충청도, 전라도 및 경상도)로 가뭄피해지역을 구분하여 사용하였다. 수집된 가뭄기록들을 살펴보면 국내의 경우 평균 3년에 한번

지역별 또는 전국적으로 크고 작은 가뭄을 겪고 있는 것으로 나타났으며, 그 중에서 대표적인 가뭄사상으로는 1990년대의 경우 94, 95년, 2000년대에는 01, 08, 09년으로 확인되었다. 가뭄 발생 원인의 대부분이 강수부족에 따른 물수지의 불균형에 의한 것으로 조사되었다.

Fig. 2는 1991년부터 2009년까지 조사된 피해사례를 이용하여 20년 동안 각 월별 가뭄발생 일수에 대한 백분율을 나타낸 것이다. 대체로 11월, 12월과 1~4월에 가뭄발생 일수의 백분율 값의 범위가 30.1~43.4%로 나타났으며, 그중 3월달이 가장 높은 것으로 분석되었다. 7~9월에는 10.7~15.7% 정도로 가뭄발생 일수가 낮은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 6월부터 9월에 장마, 집중호우 및 태풍 등으로 인해 봄철과 겨울철 가뭄이 해소되기 때문이며, 주로 기후학적 특성에 큰 영향을 받는다고 볼 수 있다. 따라서 기간별로 기상 및 수문성분의 특성을 고려하여 가뭄판단기준을 제시할 필요가 있다.

2.4 ROC Analysis

가뭄은 홍수와 달리 정량화된 관측값이 없는 실정이다. 이로 인해 가뭄지수는 과거 가뭄사례를 위주로 시계열 및 지역별 분석을 거쳐 평가되지만(Lee et al., 2006; Son et al., 2011), 평가방법이 객관적이지 못한 단점이 있다. Kim and Lee (2011)은 실제 가뭄사례와 가뭄지수와와의 정량적인 평가를 위해 통계적 기법인 ROC 분석을 제시 및 검증한다. 본 연구에서는 이 ROC 분석을 이용하여 가뭄판단기준을 제시하고 그 적용성을 평가하고자 한다.

ROC 분석은 특정한 수치를 X좌표와 Y좌표로 나타내고 이를 확률적 근거를 통해 가장 높은 확률을 가지는 분류를 찾아내는 방법으로, 주로 기상분야에서 확률예보의 정성적 검증에 활용되는 기법이다(Mason, 1982; KMA, 2010). ROC 분석은 Fig. 3과 같이 기본적으로 “관측된 결과(Observed value)”와 “예보 결과(Prediction value)”로 나누어지며, “진실(Yes)”과 “거짓(No)”에 의해서 각각 2가지씩 분류된다. 실제 어떠한 사건이 발생한다고 관측될 경

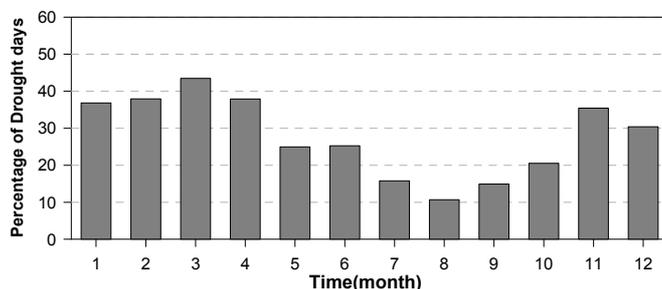


Fig. 2. Analysis of the Number of Drought Days (1991–2009 year)

		Observed Value	
		Yes	No
Prediction Value	Yes	Hit (H)	False (F)
	No	Missing (M)	Negative hit (N)

Fig. 3. ROC Table

우 예보 결과에서도 사건이 발생한다면 “성공(Hit, H)”, 그렇지 않다면 “잘못된 경고(Missing, M)”로 나타낸다. 반면에, 실제 사건이 발생하지 않을 경우 예보 결과에서 사건이 발생한다면 “실패(False, F)”, 그렇지 않다면 “음의성공(Negative hit, N)”으로 나타낸다. 이 중 Hit와 Negative hit의 경우는 각각 “Yes”와 “No”로만 이루어진 참의 값으로 판단하고, False와 Missing은 거짓의 값으로 받아들인다 (Fig. 3).

확률적 분포로 분류된 4가지의 요소를 이용하여 Eq. (2)의 적중률(Hit rate, HR)과 Eq. (3)의 비적중률(False Alarm Rate, FAR)을 산정할 수 있으며, Fig. 4와 같이 ROC 좌표계(space) 내에 하나의 점으로 표현함으로써 ROC 곡선(curve)을 구성할 수 있다. 값의 범위는 0에서 1 사이의 값을 가지며, 완벽한 예보일 때 HR=1, FAR=0 (M=0 & F=0)이다.

$$HR = H / (H + M) \quad (2)$$

$$FAR = F / (F + N) \quad (3)$$

ROC 곡선(Fig. 4)은 적중률을 표현하는 HR과 비적중률을 나타내는 FAR와의 분포도를 구해서 한 그래프 곡선에 나타낸다. HR=1이고 FAR=0일 때가 가장 완벽한 예보이므로 ROC 곡선이 좌측상단으로 가까이 위치할수록 예보의 수행능력이 좋다고 할 수 있다. 그러나 ROC의 적중률과 비적중률은 지역 또는 기간구분에 따라 그 차이를 명확히 제시하지 못하는 경우가 있다. 즉, ROC 분석 결과를 다른 개체와 비교하는데 있어서는 어떤 개체의 정확도가 높은지를 판단하기가 어렵다. Wilk (2006)은 적중률과 비적중률의 결과를 대표하는 값을 산정하기 위해 Eq. (4)와 같이 ROC 곡선의 면적 값인 ROC score를 산정한다.

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} (HR_i + 0.0) (FAR_i - 0.0) + \\ & \frac{1}{2} (HR_{i+1} + HR_i) (FAR_{i+1} - FAR_i) + \dots, \\ & + \frac{1}{2} (1 + HR_{i+n}) (1 - FAR_{i+n}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

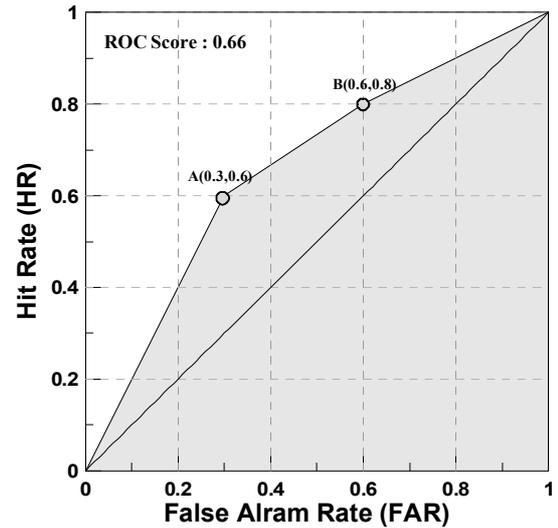


Fig. 4. ROC Curve

그림에서의 대각선은 예보의 적절성을 결정하는 경계선으로 면적은 0.5이고, 적중률과 비적중률의 확률이 서로 같은 구간이다. 따라서 완벽한 예보인 경우에는 ROC score가 1.0이고, 예보의 기술이 없을 경우에는 0.5이다.

3. 가뭄판단기준 도출

3.1 수문기상 백분위 산정

가뭄해석을 위해서는 장기간 관측된 기상정보와 수문해석을 통해 산정된 수문성분정보가 요구된다. 본 연구에서는 과거 30년 이상 강우 및 기온자료를 보유한 기상청 67개 ASOS 정보를, 수문정보는 지표수문해석모형을 통해 생산된 격자별 유출, 토양수분 및 증발산량을 활용하였다. 여기서, 지표수문해석모형의 결과는 기존 Son et al., (2010)의 결과를 그대로 인용하였으며, 구축된 자료기간은 1971~2009년까지이나, 수집된 가뭄사례의 기간을 고려하여 수문기상 백분위 해석기간을 1991~2009년까지만으로 구분하였다. 가뭄피해 사례가 행정구역 위주로 기록됨에 따라 티센 기법을 이용하여 지점 및 격자별 수문기상정보를 도단위로 변환하였다. 입력자료 기간은 최소 1개월에서 최대 12개월까지 자료기간을 월별로 구분하고, 계

산간적은 일단위로 지정하였다.

Fig. 5는 전라도 지역을 대상으로 산정된 수문기상 백분위 값들 중 강수, 토양수분, 기온 및 증발산량을 도시한 것이다. 그림에서 검은선은 3개월, 회색선은 12개월 단위를 뜻하고 ○와 ×는 전라도 지역에서 실제 기록된 가뭄 발생 및 해갈을 의미한다. 3개월 및 12개월을 도시한 이유는 단기 및 장기 가뭄을 표현하는데 대표적으로 활용되기 때문이다(Ryu et al., 2002). 3개월 지속기간의 백분위 값의 변화가 12개월에 비해 큰 것을 알 수 있다. 강수 및 토양수분의 경우 값에 차이는 있었으나 전반적으로 거동이 유사한 반면, 기온 및 증발산량은 강수와 거동이 반대로 나타나는 것을 알 수 있다.

아직 가뭄판단기준이 도출되지 않은 관계로 강수, 유출 및 토양수분은 평년(50%) 이하일 경우, 기온 및 증발산량은 평년이상일 경우를 가뭄이라 보고 기록된 가뭄 기간과 백분위 값의 거동을 검토하였다. 지속기간 3개월의 강수 및 토양수분은 실제 기록사상에서 평년보다 낮게, 증발산은 평년보다 높게 산정된 것을 볼 수 있다. 그러나 기온의 경우 1992년, 1996년, 2006년 등 가뭄기간에 평년보다 낮게 산정되었으며, 1998년 및 1999년 등을 포함하여 일부 가뭄기간이 아닌 구간에서 평년보다 높게 산정되어 실 가뭄사례를 적절히 반영하지 못한 것으로 분석되었다. 다만 이 결과는 평년을 기준으로 가뭄을 주관적으로 평가한 것으로 신뢰 수준이 매우 낮다. 본 연구에서는 ROC 분석을 이용하여 가뭄판단기준인 평년이하의 적정 수준을 결정하고, 객관적으로 가뭄을 평가하고자 한다.

3.2 ROC 분석을 통한 가뭄판단기준의 적정범위 검토

본 연구에서는 ROC 분석을 이용하여 가뭄해석의 적정 범위를 결정하고자 한다. 분석기간은 1991~2000년으로 지정하고 평년대비 수문기상 백분위 값의 범위를 전체 10~90%에서 기준치(threshold level)를 5% 단위로 증가시켜 가며 각 기간별-행정구역별 ROC 정보를 생산하였다(Fig. 6). 그림에서 만약 X축의 FAR가 0에 근접할 경우 실제 가뭄이 아닌 경우에 가뭄이 아니라 해석된 것이고, Y축의 HR이 1에 근접하다는 것은 실제 가뭄인데 가뭄이라고 해석한 경우이다. 따라서 완벽한 ROC는 X축 값이 0에, Y축 값이 1에 근접할 경우 성립된다. 다만, 해석된 결과가 실제 가뭄현상을 완벽히 재현하는 경우는 드물기 때문에 적정 유의수준을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 다소 주관적이지만 유의수준을 HR을 0.7 이상, FAR를 0.3 이하로 지정하였으며, 그림의 빨간색 선으로 도시하였다. 각 수문기상의 기간별 기준값에 대한 적용성을 평가한 결과 지속기간은 최대 3개월 이내의 구분이 적절한 것으로 나타났다. 강수(○), 유출(□), 토양수분(+)은 threshold level 25~40% 이하에서, 증발산량(△)은 평년대비 60~75% 이상이 적절한 것으로 확인되었다. 기온(◇)의 경우 어느 기준에 상관없이 유의수준을 만족시키지 못한 것으로 나타났다. 이는 국내의 가뭄발생은 주로 기온보다 강수의 영향이 더 크기 때문이라 판단되며, 본 연구에서는 국내 가뭄판단기준 제시에 있어 이를 제외하고자 한다.

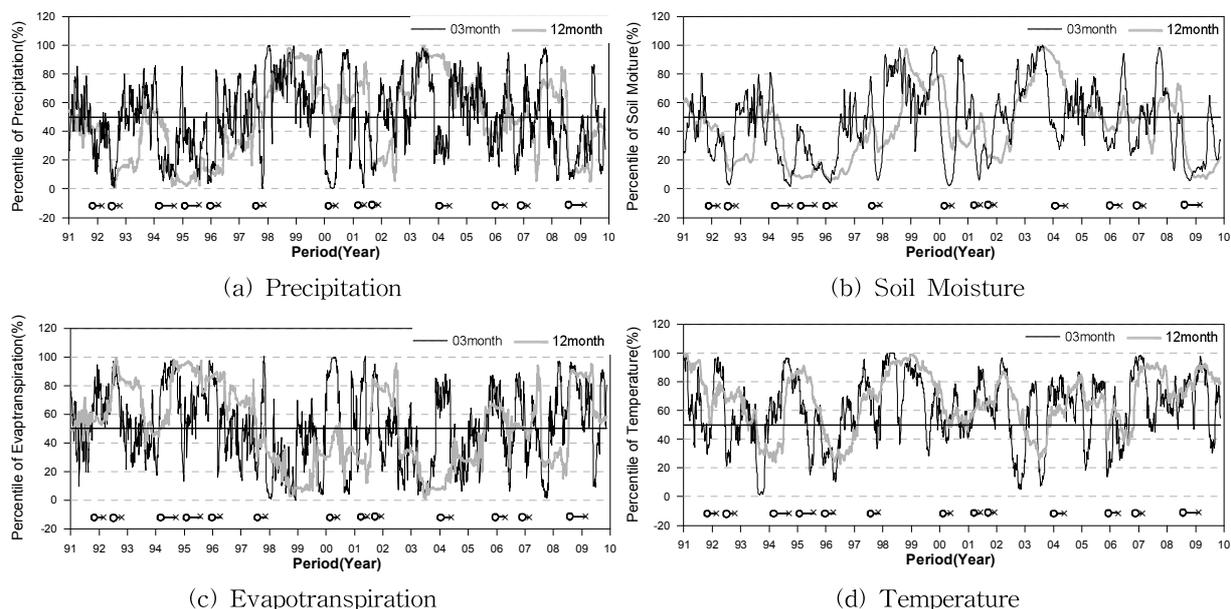


Fig. 5. Results of Hydro & Meteorological Percentile

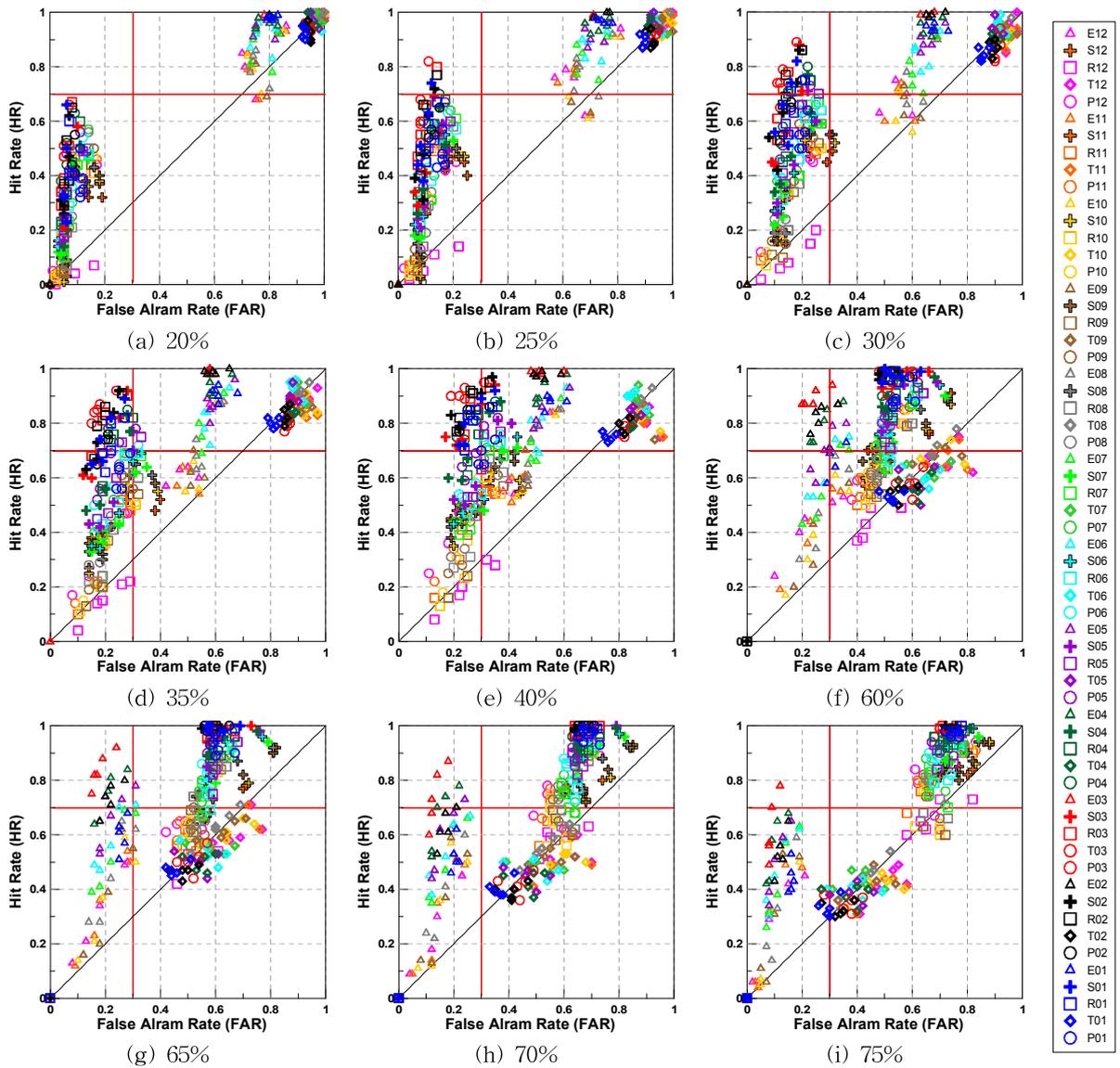


Fig. 6. Review of Drought Threshold Level Range Using ROC Analysis

3.3 기간별 가뭄판단기준 도출

앞서 ROC 분석결과 가뭄해석을 위한 수문기상정보의 기간구분은 1~3개월, 가뭄기준은 강수, 유출, 토양수분이 25~40%, 증발산량은 60~75%가 적절한 것으로 알 수 있었다. 다만, 이 ROC 에서의 HR과 FAR 만으로는 그 차이를 명확히 구별하기 어려우며, 월 또는 계절에 대해서도 고려되지 않았다. 따라서 가뭄판단 기준을 도출하는데 많은 한계가 있다. 본 연구에서는 언급한 Eq. (4)의 ROC score를 이용하여 전체기간, 계절 및 월별에 대한 가뭄판단 기준을 결정하였다. Fig. 7은 전체기간에서의 가뭄판단 기준 결정을 위해 지속기간별(1, 2, 3개월) 산정된 ROC

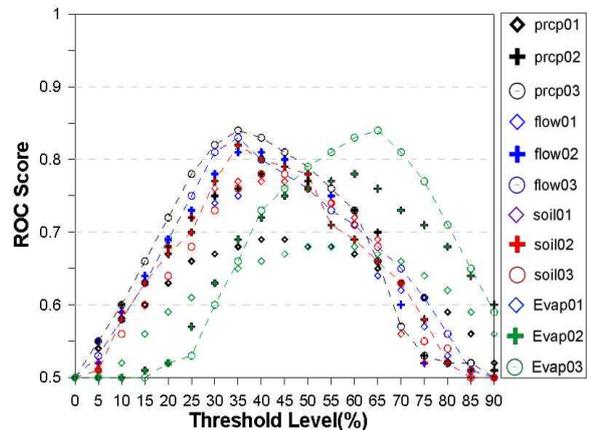


Fig. 7. Drought Threshold Level on Total Period

Score를 각 성분별로 도시한 것이다. 본 연구에서는 가장 높은 score에 위치한 기준과 지속기간을 가뭄판단기준으로 채택하였다. Fig. 7에서 강수(prcp)와 유출(runoff)의 경우 지속기간 3개월의 35% 이하, 토양수분(soil)은 지속기간 2개월의 35% 이하, 증발산량(evap)은 지속기간 3개월에 65% 이상에서의 ROC Score가 다른 지속기간 및 백분위에 비해 제일 높는데, 이 값이 전체기간에서의 가뭄판단기준이 된다.

여기서, 가뭄에 대한 판단은 수문기상정보의 백분위 값이 기준값을 동시에 만족할 경우가 아닌, 각 성분들을 개별적으로 보았을 때 이다. 예를들어 강수량 정보만을 활용한다면 지속기간 3개월의 강수량이 평년대비 35% 이하일 경우에 가뭄이라 판단하는 것이며, 증발산량은 지속기간 3개월 평년대비 65% 이상일 경우를 가뭄이라 판단하는 것이다.

그 외 계절별 및 월별에 대한 가뭄판단기준도 이와 동일한 방식으로 채택하였으며, 그 결과는 Table 1에 제시하였다. 각 성분별로 채택된 가뭄판단기준은 강수(Prcp), 유출(Runoff) 및 토양수분(Soil)이 25~35% 이하로, 증발산량(Evapo)이 65~75% 이상으로 나타났으며, 지속기간은 2~3개월의 범위를 가진다.

Table 2는 전체기간에 대해 지속기간 1~6개월에서의 ROC Score를 정량적인 값으로 제시한 것이다. 표에서 굵은색으로 표시한 값은 금회 채택된 가뭄판단기준을 의미

한다. 여기서 지속기간 6개월까지의 ROC Score를 제시한 것은 앞서 지정한 유의수준의 적절성을 평가하기 위함이다. 여러 지속기간 및 기준값들 중 금회 채택된 기준에서의 ROC Score가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 지속기간이 4개월 이상부터는 Score가 점차 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 앞서 3.2절에 주관적인 판단으로 지정된 ROC 유의수준이 가뭄판단기준의 활용에 있어 큰 무리가 없다고 볼 수 있다. 그 외 계절별 및 월별에 대해서도 이와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 가뭄판단기준의 적용성 평가

4.1 기존 가뭄지수와의 비교분석

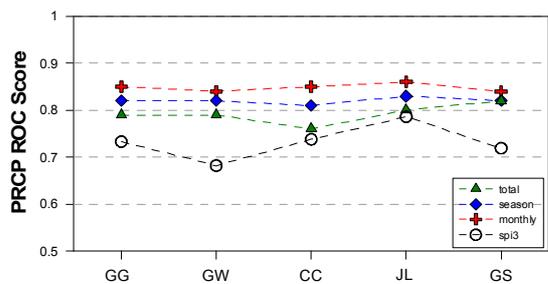
본 연구에서는 가뭄판단기준의 적용성을 평가하기 위해 SPI (3) 지수와 수문기상 백분위값에 대한 ROC score를 산정하고 결과를 비교하였다. SPI (3)는 국내 가뭄해석에 가장 많이 활용되는 지수로써(KMA, 2007; Lee et al., 2006), 가뭄기준은 지수가 -1.0 이하일 경우이다. 따라서 검증기간인 2001~2009년 동안에 SPI (3) 지수와 기간별(전체, 계절 및 월별) 수문기상백분위에 대한 ROC score를 산정하였다. Fig. 8과 Table 3은 기간별 수문기상 가뭄판단기준과 SPI (3)에 대한 ROC score를 지역별로 구분하여 그림 및 값으로 나타낸 것으로 그림의 X축은 경기도(GG), 강원도(GW), 충청도(CC), 전라도(JL) 및 경상도(GS)를

Table 1. Drought Threshold Level for Seasonal and Monthly

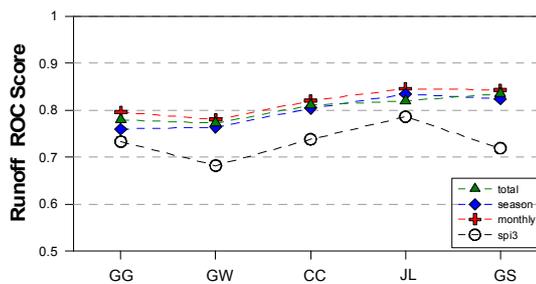
		Seasonal				Monthly											
		Spring	Summer	Fall	Winter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Prcp	Threshold Level (%)	35	30	30	35	35	35	35	35	30	30	25	25	30	30	30	30
	Period (month)	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3
Runoff	Threshold Level (%)	35	30	30	35	35	35	35	35	30	30	25	25	30	30	30	30
	Period (month)	3	2	2	3	3	3	3	2	3	2	2	2	2	2	3	3
Soil	Threshold Level (%)	35	30	30	35	35	35	35	35	30	30	25	30	30	30	30	30
	Period (month)	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
Evap	Threshold Level (%)	65	70	70	65	65	65	65	70	70	70	75	75	70	70	70	70
	Period (month)	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3	3	3

Table 2. Results of Estimated ROC Score each Hydrological Components

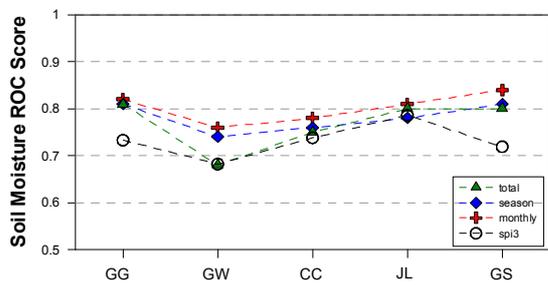
Thre shold (%)	Precipitation						Thre shold (%)	Runoff					
	1mon	2mon	3mon	4mon	5mon	6mon		1mon	2mon	3mon	4mon	5mon	6mon
5	0.54	0.55	0.55	0.52	0.53	0.51	5	0.55	0.52	0.53	0.52	0.51	0.52
10	0.58	0.60	0.60	0.59	0.58	0.57	10	0.59	0.59	0.58	0.56	0.55	0.55
15	0.60	0.64	0.66	0.65	0.63	0.62	15	0.63	0.64	0.63	0.61	0.59	0.58
20	0.63	0.68	0.72	0.70	0.67	0.66	20	0.67	0.69	0.69	0.65	0.63	0.62
25	0.66	0.72	0.78	0.74	0.70	0.68	25	0.72	0.73	0.75	0.69	0.66	0.64
30	0.67	0.75	0.82	0.76	0.72	0.69	30	0.74	0.78	0.78	0.73	0.68	0.65
35	0.68	0.76	0.84	0.77	0.71	0.68	35	0.75	0.80	0.81	0.73	0.68	0.65
40	0.69	0.78	0.83	0.77	0.71	0.67	40	0.77	0.77	0.79	0.73	0.67	0.65
45	0.69	0.79	0.81	0.75	0.70	0.66	45	0.77	0.76	0.78	0.72	0.67	0.64
Thre shold (%)	Soil Moisture						Thre shold (%)	Evapotranspiration					
	1mon	2mon	3mon	4mon	5mon	6mon		1mon	2mon	3mon	4mon	5mon	6mon
5	0.52	0.53	0.51	0.51	0.51	0.50	50	0.68	0.76	0.79	0.73	0.69	0.65
10	0.59	0.60	0.56	0.55	0.54	0.54	55	0.68	0.77	0.81	0.75	0.7	0.66
15	0.63	0.63	0.60	0.57	0.57	0.57	60	0.68	0.78	0.83	0.76	0.71	0.67
20	0.68	0.68	0.64	0.61	0.60	0.60	65	0.67	0.76	0.84	0.77	0.71	0.68
25	0.72	0.71	0.68	0.65	0.63	0.62	70	0.66	0.73	0.81	0.75	0.71	0.68
30	0.76	0.77	0.73	0.68	0.65	0.63	75	0.64	0.71	0.77	0.73	0.69	0.67
35	0.77	0.81	0.76	0.71	0.67	0.63	80	0.62	0.68	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.77	0.89	0.78	0.72	0.67	0.64	85	0.59	0.64	0.65	0.64	0.62	0.62
45	0.77	0.78	0.78	0.72	0.67	0.65	90	0.56	0.6	0.59	0.59	0.57	0.56



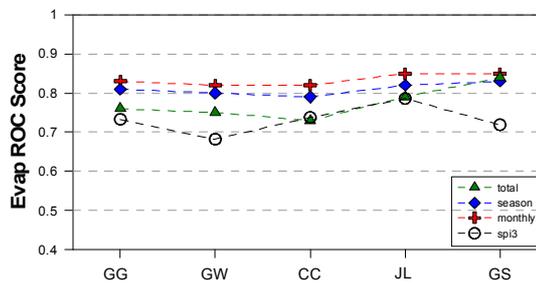
(a) Precipitation Roc Score



(b) Runoff Roc Score



(c) Soil Moisture ROC Score



(d) Evapotranspiration ROC Score

Fig. 8. Application Assessment of Drought Threshold Level with SPI3 (2001~2009 year)

Table 3. Roc score of Drought Threshold Level with SPI(3) (2001~2009 year)

-	Precipitation			Runoff			Soil moisture			Evapotranspiration			SPI
	Total	Seasonal	Monthly	Total	Seasonal	Monthly	Total	Seasonal	Monthly	Total	Seasonal	Monthly	
GG	0.85	0.82	0.79	0.80	0.76	0.78	0.82	0.81	0.81	0.83	0.81	0.76	0.73
GW	0.84	0.82	0.79	0.78	0.76	0.77	0.76	0.74	0.68	0.82	0.8	0.75	0.68
CC	0.85	0.81	0.76	0.82	0.80	0.81	0.78	0.76	0.75	0.82	0.79	0.73	0.74
JL	0.86	0.83	0.8	0.85	0.83	0.82	0.81	0.78	0.80	0.85	0.82	0.79	0.79
GS	0.84	0.82	0.82	0.84	0.82	0.84	0.84	0.81	0.80	0.85	0.83	0.84	0.72

의미한다. 가뭄판단기준 및 SPI(3)과의 비교분석 결과 모든 지역에서 ROC score가 0.5 이상으로 나타났으며, 월별, 계절별, 전체기간 및 SPI(3) 순으로 월별 가뭄판단기준이 가장 높은 것으로 분석되었다.

4.2 지역별 분석

지역별 분석은 가뭄을 평가하는 방법 중에 하나로 각 지점별로 산정된 가뭄지수를 공간적으로 분포시켜 실제 가뭄이 발생한 지역과의 일치여부를 평가하는 방법이다. ROC 분석과 달리 기록된 피해사례를 객관적으로 평가하는데 한계가 있으나, 지역별 가뭄상황의 반영 유무를 판단하는데 있어 유용하다. 본 연구에서는 과거 2001년 가뭄사상을 대상으로 Barnes 객관분석 기법(Barnes, 1964)과 NCL (NCAR Command Language) 프로그램을 이용하여 가뭄도를 작성한 후 과거 극심했던 가뭄사상을 토대로 지역별로 가뭄판단기준의 적절성을 평가하였다.

2001년 가뭄은 약 50~100년 빈도에 해당할 정도로 극심한 가뭄으로 알려져 있다(MOCT, 2002). 가뭄의 진행 과정은 2001년 4월부터 6월까지 경기북부를 비롯해 중부 및 전국으로 확산되었으며, 6월말에 남부지방을 중심으로 점차 해갈된 것으로 조사되었다. Fig. 9는 2001년 3월부터 7월까지 지속기간 1개월의 강수(Prcp), 유출(Runoff), 토양수분(Soil) 및 증발산량(Evap)에 대해 백분위 결과를 도시한 것이다. 가뭄기준은 Table 1에서의 전체기간(Total)에 대한 기준으로 범례를 설정하였다. 3개의 수문기상백분위(강수, 유출 및 토양수분) 모두 4월부터 전국적으로 평년(50%)대비 35% 이하, 증발산량은 65% 이상의 수준을 보였으며, 5월에 극심하였다가 6월부터 남부지방을 중심으로 점차 해갈되는 것으로 나타났다. 다만 토양수분의 경우 그 거동의 특성상 가뭄회복 속도가 느려 가뭄이 종료된 6월에도 가뭄이 지속되는 것으로 나타났다. 그 외에도 대 가뭄인 2008~2009년 가뭄사상에 대한 평가를 수행하였으며, 모두 가뭄상황을 적절히 반영하는 것을 확

인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 기록된 가뭄정보를 이용하여 국내 기상 및 수문정보 기반의 가뭄평가기준을 제시하였으며, 기존 가뭄지수와와의 평가를 통해 적용성을 검증하였다. 본 연구에서 분석된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 가뭄 시작과 해갈 및 피해지역을 중심으로 과거 1991~2009년까지 국내에서 발생한 가뭄피해사례를 수집하였다. 또한, 자연조건에서의 가뭄현상에 근거한 가뭄판단기준을 도출하기 위해 피해사례에서 인위적으로 발생한 가뭄사례는 사례조사에서 제외하였다. 국내에서는 평균 3년에 한번 지역별 또는 전국적으로 크고 작은 가뭄을 겪는 것으로 나타났다. 대표적인 가뭄사상은 1994년, 1995년, 2001년, 2008~2009년으로 확인되었다.
- 2) 백분위 해석기법을 이용하여 기상 및 수문성분에 대한 가뭄정보를 산정하였으며, ROC Score를 산정하여 가뭄판단기준을 도출하였다. 국내 가뭄판단기준은 강수는 지속기간 3개월, 평년대비 35% 이하로, 유출은 지속기간 3개월, 평년대비 35% 이하로, 토양수분은 지속기간 2개월, 평년대비 35% 이하 그리고 증발산량은 지속기간 3개월, 평년대비 65% 이상일 경우로 나타났다. 그 외 월별 및 계절별로도 가뭄판단기준을 제시하였으며, 지속기간이 2~3개월로, 기준값이 강수, 유출 및 토양수분은 25~35% 이하로, 증발산량은 65~75% 이상의 범위로 나타났다.
- 3) 가뭄판단기준의 적용성을 평가하기 위해 기존 국내에서 가장 활용성이 높은 가뭄지수인 SPI(3)와의 비교분석과 지역별 분석을 수행하였다. 월별, 계절별, 전체기간의 백분위 및 SPI(3) 순으로 월별 가뭄판단기준에 따른 백분위의 적용성이 가장 높은 것으

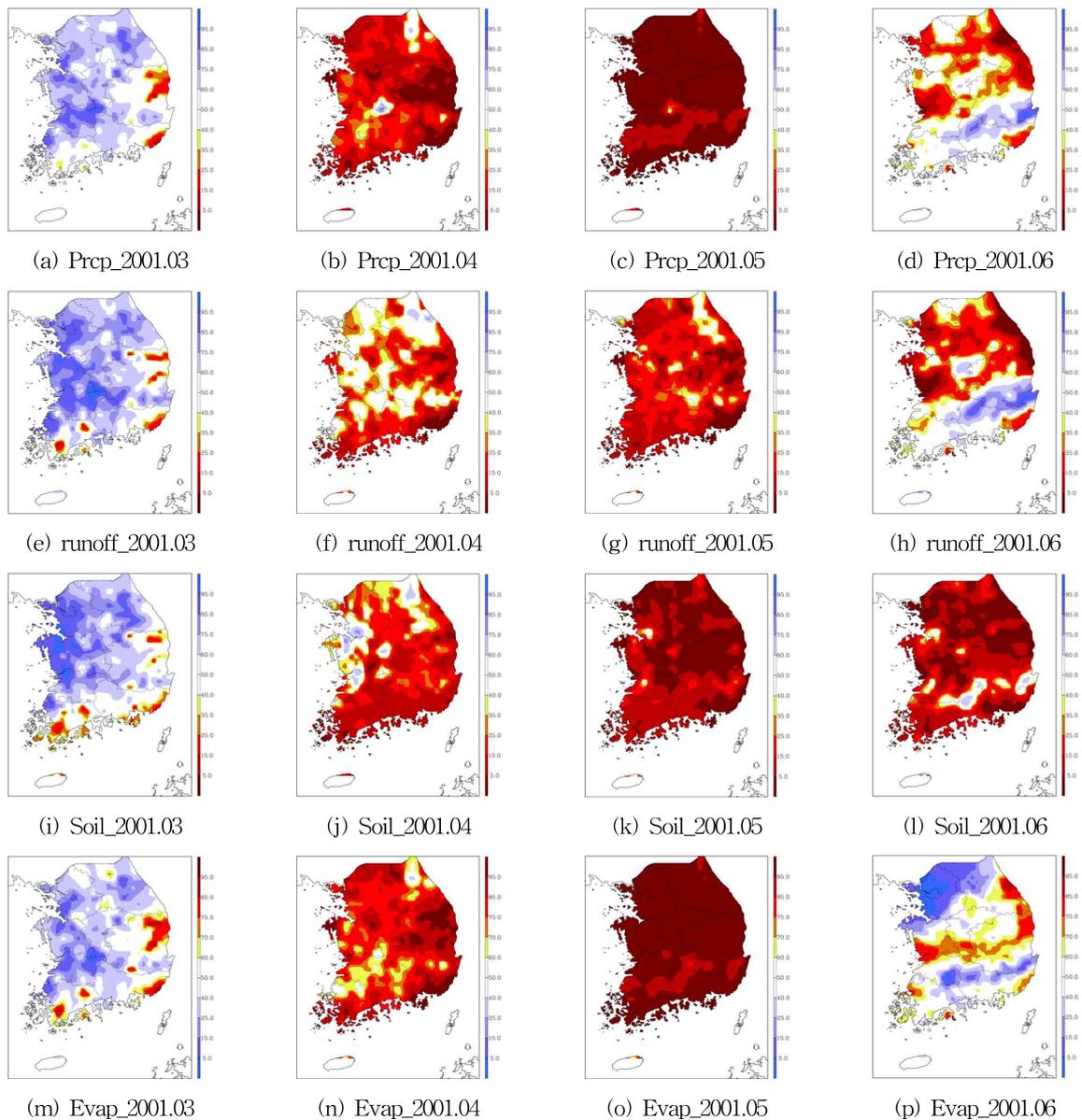


Fig. 9. Spatial Analysis of Hydro-meteorological Percentile (2001 year)

로 나타났다. 또한, 가뭄판단기준이 지역별 가뭄의 상황을 적절히 재현한 것으로 나타나, 도출된 가뭄판단기준의 국내 적용성이 높은 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출한 가뭄판단기준은 기상, 수문 및 농업적 가뭄해석에 활용이 가능하다는 측면에서 그 가치가 높다고 볼 수 있다. 다만, 본 연구에서의 가뭄판단기준은 각 수문기상 성분별로 도출된 것으로, 추후 여러 가뭄판단기준들을 조합한 통합가뭄판단기준 제시에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한, 활용된 수문정보가 LSM으로부터 모의된 결과여서 지속적인 관측수문정보 확보를 통해 가뭄판단기준을 보정할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012~3100)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Barnes, S. (1964). "A technique for maximizing details in numerical map analysis." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 3, pp. 395-409.
- Byun, H.R., and Han Y.H. (1994). "On the Existence of

- the Seasonal Drought in the Korean Peninsula.” *Asia Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Korea Meteorological Society, Vol. 30, No. 3, pp.457-467.
- Cole, H.S. (1933). “Drought in Arkansas.” *Monthly Weather Review*, Edited by Humphreys, W.J., Vol. 61, No. 5, pp. 129-140.
- Dracup, J.A., Lee, L.S., and Paulson, E.G.Jr. (1980). “On the definition of drought.” *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 297-302.
- Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H., and Demuth, S. (2006). “A global evaluation of streamflow drought characteristics.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 535-552.
- Hisdal, H., and Tallaksen, L.M. (2003). “Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark.” *Journal of Hydrology*, Vol. 281, pp. 230-247.
- Korea Meteorological Administration. (2007). Development of calculation technology of industrial meteorology index.
- Korea Meteorological Administration. (2010). Research of precise long-term forecast techniques Based on UM Atmospheric model.
- Korea Rural Community Corporation. (2008). Practical support technology development of Agricultural Drought Information System.
- Korea Water Resources Corporation. (2005). Establishment of drought management monitoring system.
- Kim, G.S., and Lee, J.W. (2011). “Evaluation of Drought Indices using the Drought Records.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 44, No. 8, pp. 639-652.
- Lee, B.H., Kim, I.G. (1979). “Meteorological disasters in Korea: Analysis of regional distribution and geography.” *Kyungpook National University*, No. 5, pp. 51-67.
- Lee, J.H., Chung, S.M., Kim, S.J., and Lee, M.H. (2006). “Development of Drought Monitoring System: I. Applicability of Drought Indices for Quantitative Drought Monitoring.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 39, No. 9, pp. 787-800.
- 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. 1415-1428.
- Mason, I.B. (1982). “A model for assessment of weather forecasts.” *Australian Meteorological Magazine*, Vol. 30, pp. 291-303.
- 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.
- Ministry of Construction & Transportation. (1995). Survey Report of drought history.
- Ministry of Construction & Transportation. (2002). Survey Report of drought history.
- Nijssen, B., Lettenmaier, D.P., Liang, X., Suzanne, W., Wetzel, F.W. (1997). “Streamflow simulation for continental-scale river basins.” *Water Resource Research*, Vol. 33, Issue 4, pp. 711-724.
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought, Research paper. No. 45, U.S. Weather Bureau.
- Ryu, J.H., Lee, D.R., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2002). “A Comparative Study on the Drought Indices for Drought Evaluation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol.35, No.4, pp.397-410.
- 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.
- Son, K.H., Lee, J.D., and Bae, D.H. (2010). “The Application Assessment of Global Hydrologic Analysis Models on South Korea.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 43, No. 12, pp. 1063-1074.
- Son, K.H., Bae, D.H., and Chung, J.S. (2011). “Drought Analysis and Assessment Using Land Surface Model on South Korea.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 44, No. 8, pp. 667-681.
- Tallaksen, L.M., Hisdal, H., and Clausen, B. (1997). “On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume.” *Hydrological Sciences*

Journal, Vol. 42, No. 1, pp. 15-33.

Tang, Q., Wood, A.W., and Lettenmaier, D.P. (2009). "Real-Time Precipitation Estimation Based on Index Station Percentile." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 10, No. 2, pp. 266-277.

Van Bavel, C.H.M. (1953). "A drought criterion and its application in evaluating drought incidence and hazard." *Agronomy Journal*, Vol. 45, pp. 167-172.

Wilk, D.S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric*

Sciences, Academic Press, pp. 293-298.

Yevjevich, V. (1967). *An Objective Approach to Definition and Investigations of Continental Hydrologic Drought*. Hydrology paper 23, Colorado State University, Fort Collins, USA.

논문번호: 12-108	접수: 2012.09.24
수정일자: 2012.10.24/11.09/11.21	심사완료: 2012.11.21