



Estimation and assessment of natural drought index using principal component analysis

Kim, Seon-Ho^a · Lee, Moon-Hwan^a · Bae, Deg-Hyo^{a*}

^aDepartment of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Paper number: 16-022

Received: 22 February 2016; Revised: 6 April 2016 / 18 April 2016; Accepted: 18 April 2016

Abstract

The objective of this study is to propose a method for computing the Natural Drought Index (NDI) that does not consider man-made drought facilities. Principal Component Analysis (PCA) was used to estimate the NDI. Three monthly moving cumulative runoff, soil moisture and precipitation were selected as input data of the NDI during 1977~2012. Observed precipitation data was collected from KMA ASOS (Korea Meteorological Association Automatic Synoptic Observation System), while model-driven runoff and soil moisture from Variable Infiltration Capacity Model (VIC Model) were used. Time series analysis, drought characteristic analysis and spatial analysis were used to assess the utilization of NDI and compare with existing SPI, SRI and SSI. The NDI precisely reflected onset and termination of past drought events with mean absolute error of 0.85 in time series analysis. It explained well duration and inter-arrival time with 1.3 and 1.0 respectively in drought characteristic analysis. Also, the NDI reflected regional drought condition well in spatial analysis. The accuracy rank of drought onset, termination, duration and inter-arrival time was calculated by using NDI, SPI, SRI and SSI. The result showed that NDI is more precise than the others. The NDI overcomes the limitation of univariate drought indices and can be useful for drought analysis as representative measure of different types of drought such as meteorological, hydrological and agricultural droughts.

Keywords: Natural Drought Index, Principal Component Analysis, SPI, SRI, SSI

주성분 분석을 활용한 자연가뭄지수 산정 및 평가

김선호^a · 이문환^a · 배덕효^{a*}

^a세종대학교 건설환경공학과

요 지

본 연구에서는 인위적 수공시설물을 고려하지 않는 자연상태의 가뭄해석을 위해 자연가뭄지수(NDI)를 산정하고 활용성을 평가하였다. 자연가뭄지수는 주성분 분석을 이용하여 산정하였으며, 입력자료는 3개월 누적강수량, 자연유량, 토양수분량 자료이다. 강수량은 ASOS 59개 지점 자료이고, 자연유량 및 토양수분량은 지표수문해석모형의 결과를 이용하였다. 가뭄지수의 평가기간은 1977~2012년이며, 활용성 평가를 위해 시계열 분석, 지역별 분석 및 가뭄특성인자 분석을 수행하였다. 시계열 분석결과, 자연가뭄지수는 가뭄의 시작과 끝에 대한 평균절대오차는 0.85로 가장 정확하게 나타났다. 과거 가뭄사례와 가뭄특성인자를 분석한 결과, 자연가뭄지수의 지속기간과 발생간격의 평균절대오차는 각각 1.3, 1.0으로 가뭄의 지속기간 및 발생간격을 적절히 반영하는 것을 확인하였다. 지역별 분석결과, 자연가뭄지수는 단일변량 가뭄지수의 지역별 가뭄상황을 적절히 반영하여 활용성이 높은 것으로 나타났다. 또한, 가뭄의 시작, 끝, 지속기간, 발생간격에 대한 자연가뭄지수, 표준강수지수, 표준유출지수, 표준토양수분지수의 순위를 분석한 결과 자연가뭄지수가 가장 높은 순위로 산정되었다. 자연가뭄지수는 기존 단일변량 가뭄지수의 상이한 가뭄상황을 종합적으로 반영하며, 가뭄의 특성을 정량적으로 제시한다는 점에서 활용성이 높다고 판단된다.

핵심용어: 자연가뭄지수, 주성분 분석, 표준강수지수, 표준유출지수, 표준토양수분지수

*Corresponding Author. Tel: +82-2-3408-3814
E-mail: dhbae@sejong.ac.kr (D. -H. Bae)

1. 서론

최근 전 세계적으로 이상기후가 발생하고 있으며, 국내에서도 과거에 경험하지 못했던 자연재해가 빈번하게 발생하고 있는 추세이다. 가뭄은 홍수와 더불어 그 피해가 가장 큰 자연재해 중 하나이며, 장주기적이고 광역적으로 발생함에 따라 구체적인 발생시기, 장소, 원인을 파악하는 것이 어렵다(Bae et al., 2013). 그동안 국내에서는 가뭄 극복을 위해 관개용수 확보, 비상관정 개발 등의 구조적인 대책과 가뭄정보 제공 등의 비구조적인 대책을 마련해 왔음에도 불구하고 가뭄피해는 지속적으로 증가하고 있다. 실례로 2014~2015 가뭄으로 소양강 댐은 역대 최저수위를 기록하였으며, 일부 지역에서는 제한급수, 농업용수 부족 피해가 발생한 바 있다. 이처럼 가뭄으로 인한 피해는 기후변화의 영향으로 더욱 빈번할 것이라는 보고가 있어 가뭄대응을 위한 지속적인 노력이 필요하다(NEMA, 2013).

가뭄은 강수량의 부족으로 발생하는 일시적인 물순환의 불균형 현상으로 자연현상이다. 가뭄은 물부족과 다르며, 물의 이용 측면에서 볼 때 몇 가지로 구분할 수 있다. 지난 3개월의 강수량이 예년의 30~40% 이하로 내리는 상황을 기상학적 가뭄이라 하며(Bae et al., 2013), 이는 산간계곡수 부족, 미급수 지역의 물부족을 야기한다. 또한, 자연상태의 토양수분량 부족에 따른 농업적 가뭄, 자연유량의 부족에 따른 수문학적 가뭄에 영향을 미친다. 그러나 지난 몇 달의 강수량이 부족할지라도 영농이 가능하도록 농업용 저수지에서 물이 공급 가능하면 농업적 물부족은 없을 것이고, 생활용수나 공업용수를 공급할 수 있도록 전국 다목적댐에 충분한 수량을 보유하고 있다면 수문학적 물부족은 없을 것이다. 따라서, 물부족을 평가하기 위해서는 자연적 영향을 나타내는 가뭄에 대한 평가가 선행되어야 하며, 이를 기반으로 인위적 영향을 고려하는 것이 타당하다.

이처럼 가뭄은 자연적 요인(강수, 자연유출, 토양수분 등)에 따라 기상학적, 수문학적, 농업적 가뭄으로 분류할 수 있으며, 해석도구인 가뭄지수를 활용하여 각 분야별 목적에 맞게 가뭄의 정도를 정량적 지표로 활용해 왔다. 국내 가뭄해석에 주로 활용되는 가뭄지수로는 Palmer (1965)의 PDSI (Palmer Drought Severity Index), Mckee et al. (1993)의 SPI (Standardized Precipitation Index), Shukla and Wood (2008)의 SRI (Standardized Runoff Index), Son et al. (2011)의 SSI (Standardized Soil moisture

Index) 등이 있으며, 이 지수들은 가뭄의 분류에 따라 단일 관점의 가뭄상황을 해석해 왔다. 기존 가뭄지수는 종합적인 가뭄해석에 한계가 있으며, 다변량을 고려한 자연상태의 물순환을 반영할 수 있는 지수개발이 요구된다.

그동안 국내외적으로 다변량을 이용한 가뭄해석 연구가 수행되어 왔다. NDMC (National Drought Mitigation Center)는 강수량, 토양수분량, 유출량, 지하수위, 저수지수위, 위성식생, 가뭄지수의 가중치를 고려하여 미국 가뭄감시정보(U.S. Drought Monitor)를 생산 및 제공하고 있다(NDMC, 2002). Keyantash and Dracup (2004)은 주성분 분석을 이용하여 강수량, 저수지수위, 토양수분량을 통합한 ADI (Aggregate Drought Index)를 산정한 바 있으며, Hao and Aghakouchak (2013)은 결합분포함수를 이용하여 강수량, 토양수분량을 고려하는 MSDI (Multivariate Standardized Drought Index)를 개발하였다. 또한, Sepulcre et al. (2012)는 강수량, 토양수분량, 위성자료를 결합하여 CDI (Combined Drought Indicator)를 개발한 바 있다. 국내의 경우 Bae et al. (2011)은 SPI, DDI, PDSI, SRI 및 SSI를 이용하여 활용성을 평가하였으며, 지속시간 3개월의 SPI, SRI, SSI의 활용성이 높음을 제시한 바 있다. Kwon and Kim (2006)은 적설량, 강수량, 유출량, 저수지저류량, 증발산량을 고려한 MSWSI (Modified Surface Water Supply Index)의 국내 적용성을 검증한 바 있으며, So et al. (2014)는 강수량과 토양수분량을 이용한 BDI (Bivariate Joint Drought Index)를 산정하여 국내에 적용한 바 있다. 이처럼 기존 연구에서는 다양한 변수를 활용하여 가뭄을 평가하였지만, 입력변수에 인위적 영향을 반영하거나 기상학적, 수문학적, 농업적 변수를 모두 포함하여 자연상태의 가뭄을 종합적으로 고려하지 못한 한계가 있다.

본 연구에서는 자연상태의 기상학적, 수문학적, 농업적 가뭄상황을 반영할 수 있는 강수량, 자연유량, 토양수분량을 결합하여 자연가뭄지수(Natural Drought Index, NDI)를 산정할 수 있는 방법을 제시하고, 산정된 자연가뭄지수의 국내 적용성을 평가하고자 한다.

2. 자연가뭄지수 산정 및 평가방법

본 연구에서는 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)을 이용하여 NDI를 산정 및 평가하고자

하며, 주요 산정절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 기상 및 수문자료를 수집하여 NDI의 입력자료인 3개월 누적 강수량, 자연유량, 토양수분량을 구축한다. 이때 강수량은 관측자료를 사용하고, 자연유량 및 토양수분은 모형기반의 자료를 활용한다. 구축된 입력자료의 차원을 하나로 축소하기 위해 주성분 산정, 주성분 점수 산정, 비계절화 등의 주성분 분석을 수행한다. 월별로 산정된 주성분 점수의 경험적누가확률값을 표준화하여 NDI를 산정한다. 산정된 NDI값의 시계열 분석, 지역별 분석, 가뭄특성인자를 분석하여 가뭄지수의 활용성을 평가한다.

2.1 주성분 분석

주성분 분석은 원래의 변수들의 선형조합을 통해 새로운 변수들을 생산하는 방법으로 원래의 변수들과 새로운 변수들의 총 분산은 동일하다. 이때, 일부 변수만으로 대부분의 분산을 설명할 수 있다면 고차원의 자료를 저차원의 자료로 축소 가능하다(Jeon, 2012). 따라서 복잡한 고차원의 자료를 해석하기 위한 주성분 분석은 가뭄연구에서 다양하게 활용된바 있다(Keyantash and Dracup, 2004; Yoo et al., 2009; Rajsekhar et al., 2015). 주성분 분석의 기본과정은 자료를 설명하기 위해 자료를 투영시켰을 때 분산이 최대가 되는 방향벡터들을 찾은 후 필요에 따라 방향벡터로 투영된 성분들을 새로운 자료로 이용하는 것이다. 여기서, 방향벡터는 주성분, 방향벡터로 투영된 성분은 주성분 점수라 한다. 주성분 분석은 자료의 공분산을 이용한 방법과 상관계수를 이용한 방법이 있으며, 입력변수 간의 분산이 크게 다른 경우 상관계수를 이용한 주성분 분석을 이용한다. 본 연구에서는 상관계수

를 이용한 주성분 분석을 수행하였으며, 산정과정은 다음과 같다.

입력변수간 값의 범위가 다를 경우 자료의 변동이 큰 변수 위주로 주성분이 결정된다. 따라서 Eq. (1)과 같이 강수량, 자연유량, 토양수분량의 표준화를 수행한 후 표준화된 강수량, 자연유량, 토양수분량으로 구성된 입력변수 행렬 X 를 Eq. (2)와 같이 구축한다. 이때, X 는 월별로 1월부터 12월까지 총 12개 구축할 수 있다. 변수간의 선형적인 관계를 나타내는 상관계수 행렬 R 은 Eq. (3)을 통해 산정한다. 또한, 고유벡터 ν_k 와 고유값 λ_k 는 Eq. (4)를 통해 산정하며, 고유벡터는 입력변수의 주성분, 고유값은 주성분이 나타낼 수 있는 분산의 양을 의미한다. 주성분은 X 의 입력변수의 개수만큼 산정되며, 이중 가장 큰 고유값을 갖는 주성분을 제 1주성분이라 한다. 주성분 산정 시 다음 조건을 갖는다. 1) 주성분 분석에서 각각의 주성분간의 관계는 독립이며, 0의 공분산을 갖는다. 2) 주성분 점수의 분산은 주성분의 크기에 따라 변동되기 때문에 주성분의 자승합은 1이 되도록 한다.

$$x_{m,n} = \frac{o_{m,n} - \bar{o}_m}{\sigma_m} \tag{1}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{p,1} & \dots & x_{p,n} \\ x_{r,1} & \dots & x_{r,n} \\ x_{s,1} & \dots & x_{s,n} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$R = \frac{1}{n-1} X X^T \tag{3}$$

$$R \nu_k = \lambda_k \nu_k \tag{4}$$

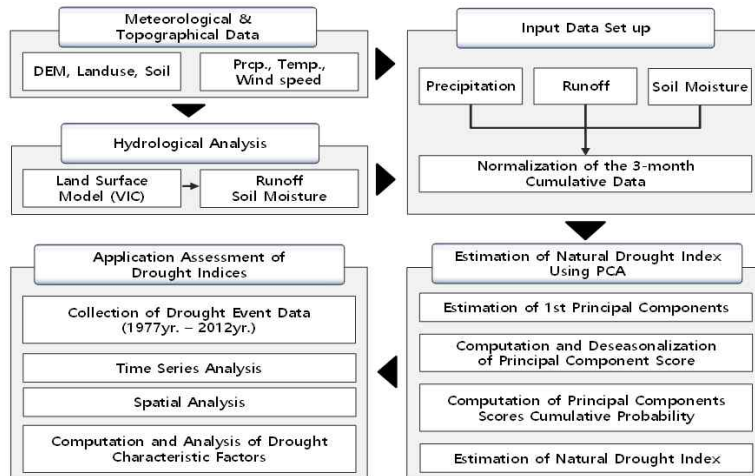


Fig. 1. Flow chart of this study

주성분 점수는 제 1주성분을 이용하며, Eq. (5)와 같이 산정한다. 여기서 ν_1 은 제 1주성분으로 강수량, 자연유량 및 토양수분량의 가중치이다. 따라서 주성분 점수(PC')는 강수량, 자연유량 및 토양수분량이 결합된 값이다. 12개의 월별 X 를 Eqs. (1)~(5)의 과정을 반복하여 월별 PC' 를 산정한다. 산정된 PC' 는 서로 다른 주성분을 사용함에 따라 표준편차의 차이가 발생하며, Eq. (6)과 같이 비계절화를 수행한 후 최종 PC 를 가뭄지수 산정에 이용한다. 본 연구에서 산정한 PC 는 초기 입력자료를 이용한 값이며, 새로운 기간의 입력자료를 이용한 PC'_{NEW} 와 PC_{NEW} 는 Eq. (7), (8)로부터 산정한다.

$$PC' = \nu_1^T X \quad (5)$$

$$PC = \frac{PC'}{\sigma_{PC}} \quad (6)$$

$$PC'_{NEW} = \nu_1^T X_{NEW} \quad (7)$$

$$PC_{NEW} = \frac{PC'_{NEW}}{\sigma_{PC}} \quad (8)$$

여기서, PC' 는 주성분 점수 행렬, ν_1 은 제 1주성분, PC 는 비계절화된 주성분 점수 행렬, σ_{PC} 는 PC' 의 표준편차, X_{NEW} 는 새로운 기간의 입력변수 행렬, PC'_{NEW} 은 새로운 기간의 주성분 점수 행렬, PC_{NEW} 는 비계절화된 새로운 기간의 주성분 점수 행렬을 뜻한다.

2.2 가뭄지수 산정

본 연구에서는 PC 의 누가확률값을 산정하기 위해 커널확률밀도 추정방법을 이용하였다. 커널확률밀도 추정 방법은 확률분포형에 대한 가정없이 비모수적인 확률분포를 추정하기 때문에 자료에 가장 가까운 확률분포를 찾을 수 있다. 추정한 확률분포형을 이용하여 PC 의 누가확률(P)을 산정하였으며, 가뭄지수로의 변환은 Mckee et al. (1993)가 제시한 표준화 방법을 적용하였다. 이 방법을 통해 자연가뭄지수(NDI)는 누가확률값(P)과 표준정규분포상의 동일한 누가확률값의 X축 변수를 산정하여 얻게 되며, 주성분 점수의 경험적 누가확률값(P)를 Abromowitz and Stegun (1964)이 제시한 Eqs. (9)~(12)에 대입하여 지수를 산정하였다. NDI 는 Table 1과 같이 SPI 와 동일하게 가뭄을 구분하여 가뭄해석에 활용하였다.

$$NDI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), \quad 0.0 < P \leq 0.5 \quad (9)$$

$$NDI = \left(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), \quad 0.5 < P \leq 1.0 \quad (10)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{P^2}\right)}, \quad 0.0 < P \leq 0.5 \quad (11)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-P)^2}\right)}, \quad 0.5 < P \leq 1.0 \quad (12)$$

여기서, P 는 PC 의 누가확률값이며, c_0 는 2.515517, c_1 는 0.802853, c_2 는 0.010328, d_1 는 1.432788, d_2 는 0.189267, d_3 는 0.001308이다.

Table 1. Classification of NDI value

Values	Drought category
$2.00 \leq NDI$	Extremely Wet
$1.99 \sim 1.50$	Very Wet
$1.49 \sim 1.00$	Moderately Wet
$0.99 \sim -0.99$	Near Normal
$-1.00 \sim -1.49$	Moderate Drought
$-1.50 \sim -1.99$	Severe Drought
$-2.00 \geq NDI$	Extremely Drought

2.3 적용성 평가

가뭄특성의 비교평가를 위해 1977~2012년 동안의 과거 가뭄피해사례를 활용하였다. 국내에 과거 가뭄 피해지역, 시작, 끝, 지속기간 등을 정량적으로 추정하는 기준이 없기 때문에 가뭄피해가 기록된 보고서 및 논문을 수집하였다(MOCT, 1995; MOCT, 2002; Kim and Lee, 2011; KMA, 2012). MOCT와 KMA는 과거 극심한 가뭄사상에 대한 집계 가능한 가뭄피해(제한급수, 농업용수 부족 등)을 정리한 보고서이며, Kim and Lee (2011)은 보고서를 기반으로 보다 객관적인 피해사태 결정을 위해 신문 기사를 이용하여 가뭄피해사태를 결정하였다. 수집한 피해사태는 다양한 연구에 활용된 바 있으나(Son et al., 2011; Bae et al., 2013), 해석관점에 따라 구분되어 있지 않다는 한계점을 가지고 있다.

본 연구에서는 시계열 분석, 가뭄특성인자 분석, 지역별 분석을 수행하여 가뭄지수의 활용성을 평가하였다. 시계열 분석을 통해 가뭄지수 시계열과 과거가뭄사태를 비교하여 가뭄의 시작과 끝의 재현성을 비교하였으며, 가뭄특성인자를 산정하여 지속기간 및 발생간격의 적절성을 평가하였다. 또한, 가뭄지수를 공간적으로 분포시켜 과거가

물기간 및 피해지역과의 일치여부를 평가하였다. 가뭄사례가 행정구역별로 제시됨에 따라 본 연구에서는 해당 행정구역 내의 지점별 가뭄지수의 평균값을 활용하였다.

가뭄특성인자는 Yevjevich (1967)가 제시한 연속이론(run theory)을 이용하여 산정하였다. 연속이론이란 수문·기상학적 변수의 시계열에 대한 통계적 속성이며, 가뭄현상을 표현하는 요소로써 비교적 명확하게 정립되어 있다. Fig. 2와 같이 가뭄은 가뭄지수가 절단수준(X_0) 이하로 떨어지는 기간으로 정의할 수 있다. 절단수준 이하로 내려간 시간을 지속기간(D_i), 지속기간 동안 절단수준 이하로 내려간 양을 가뭄심도(S_i)로 정의하며, 가뭄사상 간 발생시점 사이의 시간을 발생간격(L_i)이라 한다. 본 연구에서는 수문·기상학적 변수로 산정된 자연가뭄지수 NDI를 이용하였으며, 절단수준은 NDI의 가뭄분류에 따라 보통 가뭄(moderate drought)을 나타내는 -1 로 정의하였다. 주성분 분석을 통해 산정된 표준화된 주성분 점수(PC)는 NDI 산정에 활용됨에 따라 가뭄심도는 주성분 점수와 연관성이 있다. 본 연구에서는 NDI의 시계열 값을 산정하여 과거 가뭄사상에 대한 지속기간 및 발생간격을 분석하였다.

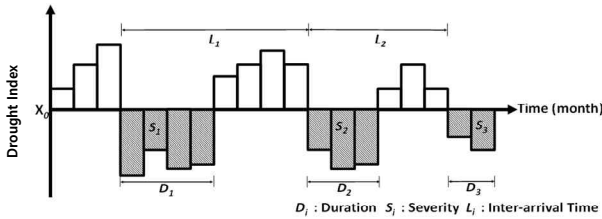


Fig. 2. Drought characteristic factors (Yevjevich, 1967)

가뭄지수의 시작, 끝, 지속기간 및 발생간격을 정량적으로 평가하기 위해 평균오차(Mean Error, ME) 및 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE) 활용하였다. 평균오차는 시작, 끝, 지속기간 및 발생간격에 대한 과거 가뭄사례와 가뭄지수간의 평균적인 차이를 의미한다. 평균절대오차는 특성인자에 대한 가뭄지수의 정확도를 나타내며, 0에 가까울수록 정확도가 높음을 뜻한다.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - y_i) \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - y_i| \quad (14)$$

여기서, ME 및 MAE 는 평균오차와 평균절대오차이며, N 은 과거가뭄사례의 수, f_i 는 가뭄지수의 특성인자(시작, 끝, 지속기간, 발생간격), y_i 는 과거 가뭄사례의 특성인자이다. 본 연구에서는 5개 행정구역에 대한 특성인자별 평균오차 및 평균절대오차를 산정하였다.

3. 입력변수 수집

본 연구에서는 1977~2012년의 기상청 ASOS(Automatic Synoptic Observation System) 59개소의 강수량자료와 지표수문해석모형으로부터 산정한 자연유량 및 토양수분량 자료를 이용하였다. 지표수문해석모형은 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모형을 활용하였으며(Liang et al., 1994), 이 모형은 대기, 식생, 토양의 상호작용과 같은 수문과정을 기반으로 물과 에너지의 유동(water & energy flux)을 모의하는 분포형 모형으로써 크게 물수지(water balance), 하도추적(channel routing), 에너지수지(energy balance) 등으로 구성되어 있다. 모형을 통해 산정된 토양수분량은 이미 국·내외적으로 가뭄해석에 있어 그 활용성이 검증된 바 있다(Sheffield and Wood, 2008; Son et al., 2011; Rajsekhar et al., 2015)

4. NDI 산정 및 평가

NDI 산정을 위해 3개월 누적강수량, 자연유량, 토양수분량의 제 1 주성분을 산정하였다. 월별 제 1 주성분의 지점평균 설명력은 9월, 10월에 0.91, 0.90으로 가장 높았으며, 1월과 2월에 0.78로 가장 낮은 것으로 나타났다. 전반적으로 이수기(11~4월)의 설명력이 치수기(5~10월)에 비해 낮게 나타났다. 이는 치수기의 강수량, 자연유량, 토양수분량은 서로 높은 선형성을 갖지만 이수기의 강수량, 자연유량은 높은 선형성을 보이나 토양수분량은 상대적으로 낮은 선형성을 갖기 때문으로 판단된다. ASOS 59개 지점에 대한 월별 제 1 주성분의 평균 설명력은 0.85로 자료의 변동을 적절하게 반영하는 것으로 판단되며, 이를 활용하여 가뭄지수를 산정하였다. Fig. 3은 서울지점의 월별 표준화된 입력변수와 주성분을 예로써 나타낸 것이며, X축은 강수, Y축은 유출, Z축은 토양수분, 빨간색 실선은 강수량, 자연유량, 토양수분량의 제 1 주성분을 의미한다.

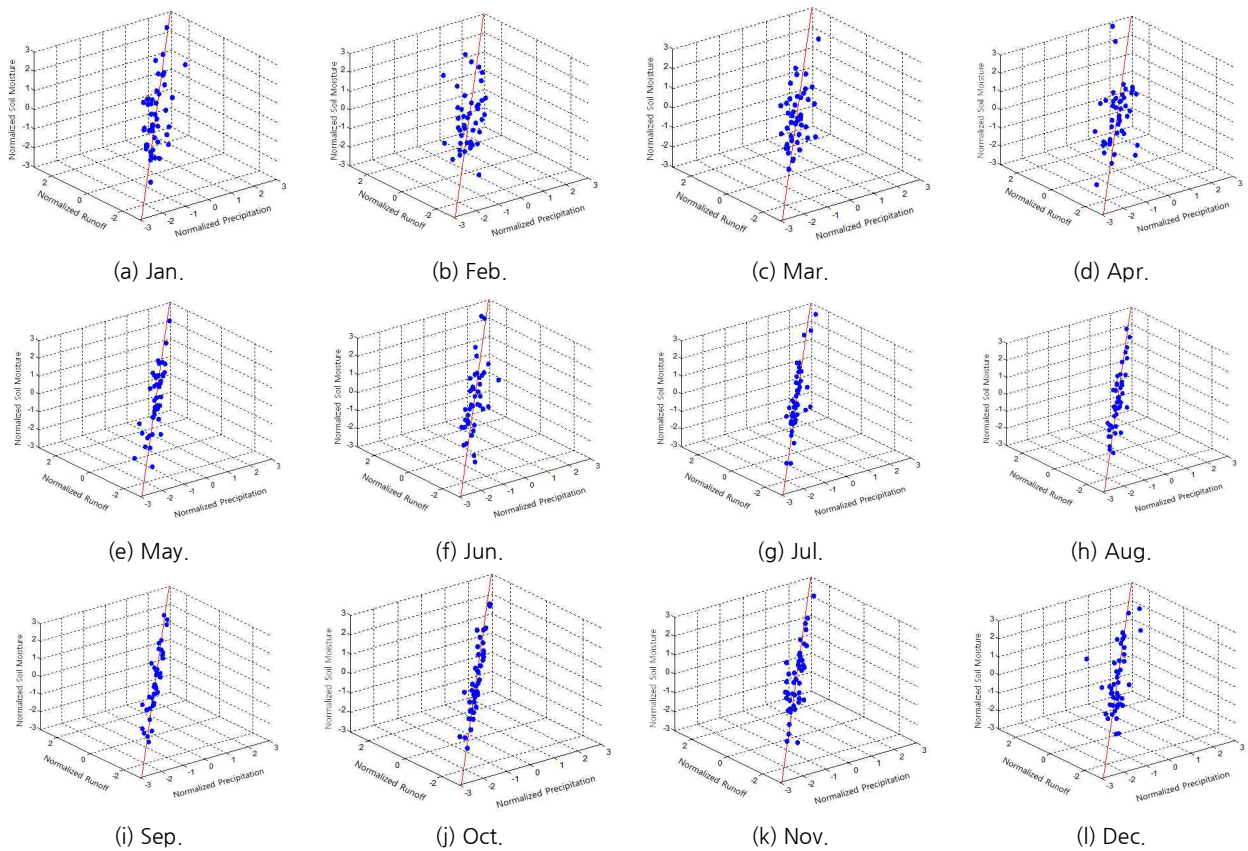


Fig. 3. Monthly first principal component of Input data (Seoul)

4.1 시계열 분석

기존 가뭄지수와 NDI의 거동특성을 검토하기 위해 남한 59개 지점 가뭄지수를 평균하여 1977~2012년까지 나열한 후, 과거 가뭄사례와 비교하였다. Fig. 4는 SPI, SRI, SSI 및 NDI의 시계열을 도시한 것이며 ○, △는 과거 가뭄사례의 시작 및 끝을 나타낸다. 기존 가뭄지수 및 NDI는 대부분의 가뭄사상에 대하여 -1.0 이하로 나타나 과거가뭄사례를 적절하게 재현하였다. SPI는 가뭄의 시작이 빨랐으며, 장기간 지속된 가뭄사상에서는 가뭄기간 도중 초기 해갈되는 것으로 나타났다. SSI는 가뭄의 끝이 다소 늦으며, 지속시간이 짧은 가뭄사상에 대한 재현성은 낮은 것으로 확인되었다. 반면, SRI 및 NDI의 거동특성은 유사하였으며, 가뭄의 시작은 SPI 보다 늦고 끝은 SSI 보다 빠른 것으로 나타났다.

Fig. 5는 2000년, 2008~2009년 가뭄사상에 대한 경상도 및 전라도 지역의 가뭄지수(가뭄심도) 시계열을 예로써 도시한 것이다. 2000년 가뭄사상에 대한 경상도 및 전라도의 시계열을 살펴보면, SPI는 SRI, SSI 보다 가뭄을

먼저 감지하나 가뭄기간 도중 해갈되는 것으로 나타났으며, SRI, SSI는 SPI에 비해 가뭄이 지속되는 것으로 나타나 가뭄의 끝을 적절히 반영하였다. 반면, NDI는 가뭄의 시작은 SPI, 가뭄의 끝은 SRI, SSI와 유사하게 나타났다. 이는 가뭄의 영향에 따른 발생순서를 반영한 것으로 NDI는 자연상태의 기상학적, 수문학적 및 농업적 가뭄상황을 종합적으로 반영한다고 볼 수 있다.

장기가뭄에 속하는 2008~2009년 가뭄사상에 대한 경상도 및 전라도의 가뭄지수별 시계열이 상이함을 볼 수 있다. 경상도의 경우, SPI는 가뭄의 시작을 반영하나 SRI, SSI는 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 가뭄의 끝은 SRI, SSI만 반영하고 SPI는 가뭄기간 도중 초기 해갈되는 것으로 나타났다. 전라도의 경우, 가뭄의 시작은 기존 가뭄지수 모두 반영하나 가뭄의 끝은 SSI만 반영하는 것으로 나타났다. 반면, NDI는 두 지역의 가뭄사례를 적절히 재현하는 것으로 확인되었으며, 가뭄의 시작과 끝이 상이한 기존 가뭄지수의 결과를 적절히 반영하는 것으로 나타났다.

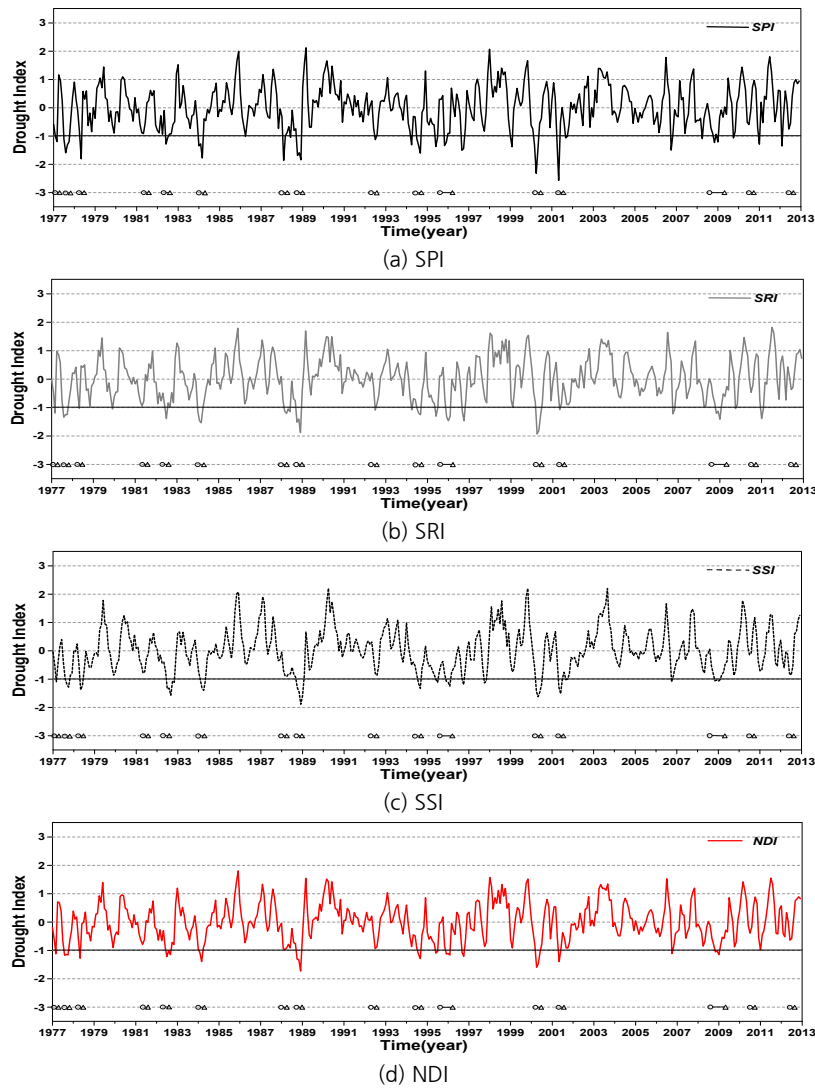


Fig. 4. Time series of drought indices for 1977~2012 years

가뭄지수(SPI, SRI, SSI, NDI)의 시작과 끝의 재현성을 정량적으로 평가하기 위해 과거가뭄사례와 비교하였다. 예를 들어 기록된 가뭄파해기간이 6~10월까지일 때, 지수의 가뭄기간은 7~9개월이면 시작 및 끝의 차이는 각각 +1개월, -1개월이다. 이처럼 과거가뭄사례에 대한 가뭄지수별 시작 및 끝의 차이를 계산하고 평균오차 및 평균절대오차를 산정하였으며, Table 2 및 3은 전라도와 경상도 지역의 결과를 나타낸다. 경상도의 경우, 가뭄의 시작에 대한 평균오차는 SPI(-0.1개월), SRI(0.4개월), NDI(0.7개월), SSI(0.8개월) 순으로 과거가뭄사례에 비해 SPI는 빠르게, SRI, NDI, SSI는 늦게 나타났다. 가뭄의 끝은 SPI(-0.5개월), NDI(0.1개월), SRI(0.1개월), SSI(0.9개월) 순으로 SPI는 빠르게, SRI, NDI, SSI는 늦게 나타났다. 가뭄의

시작에 대한 평균절대오차는 NDI(0.8), SRI(0.9), SPI(0.9), SSI(1.0), 끝은 NDI(0.8), SRI(0.8), SSI(1.1), SPI(1.2) 순으로 정확한 것으로 나타났다. 전라도의 경우, 가뭄의 시작에 대한 평균오차는 SPI(0.0개월), NDI(0.3개월), SRI(0.4개월), SSI(1.0개월), 끝은 SPI(-0.9개월), NDI(0.1개월), SRI(0.1개월), SSI(1.5개월) 순으로 경상도의 결과와 유사하게 나타났다. 가뭄의 시작에 대한 평균절대오차는 SPI(0.8), NDI(0.9), SRI(0.9), SSI(1.2), 끝은 NDI(0.9), SPI(1.1), SRI(1.3), SSI(1.5)으로 정확도가 높은 것으로 나타났다. 나머지 행정구역(경기도, 충청도, 강원도)의 결과는 경상도, 전라도 지역과 유사한 것으로 확인되었다.

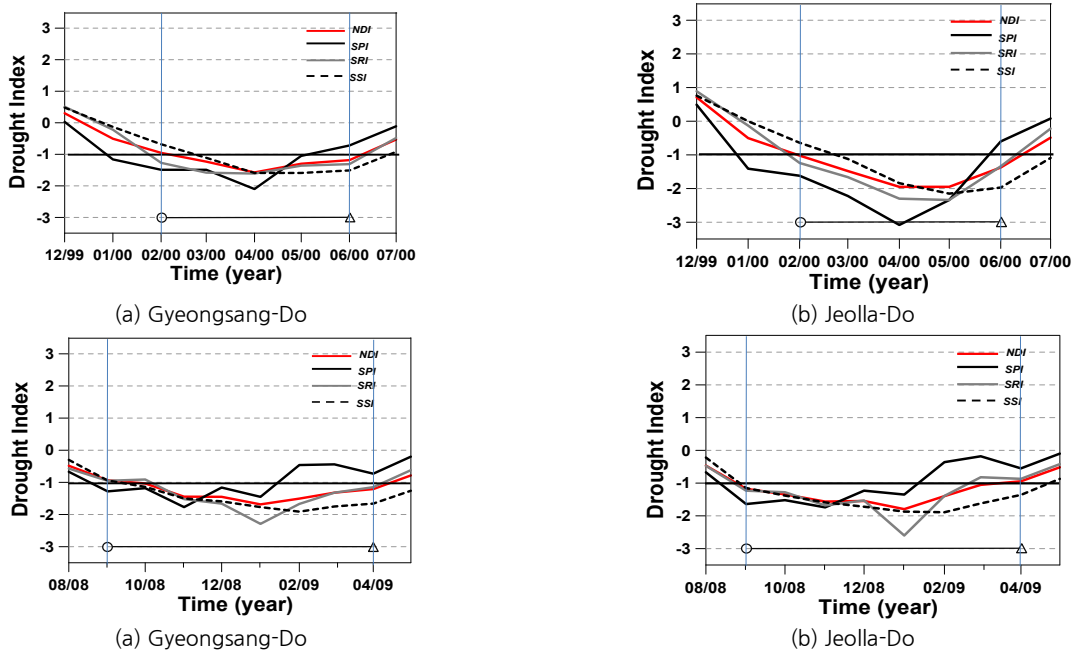


Fig. 5. Time series of drought indices for 1977~2012 years

Table 2. Drought onset and termination comparison on past drought events with drought indices (Gyeongsang-Do)

Drought period	Onset				Termination			
	NDI	SPI	SRI	SSI	NDI	SPI	SRI	SSI
1977. 06~1977. 08	1	1	1	2	2	2	2	2
1978. 02~1978. 06	3	2	3	3	-1	-1	-1	0
1981. 05~1981. 06	0	-1	-1	0	0	-1	0	0
1982. 06~1982. 07	0	0	0	0	0	0	0	2
1984. 01~1984. 04	0	0	0	1	0	-1	0	1
1988. 10~1988. 12	0	0	0	1	0	0	0	1
1992. 06~1992. 08	1	0	1	1	0	0	0	0
1994. 05~1994. 07	2	2	2	2	3	2	3	4
1995. 07~1996. 03	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	0
2000. 03~2000. 06	0	-2	-1	0	0	-1	0	0
2001. 04~2001. 07	1	0	1	1	-2	-2	-2	-1
2008. 11~2009. 04	-1	-2	0	-1	0	-3	0	2
ME	0.6	-0.1	0.4	0.8	0.1	-0.5	0.1	0.9
MAE	0.8	0.9	0.9	1.0	0.8	1.2	0.8	1.1

Table 3. Drought onset and termination comparison on past drought events with drought indices (Jeolla-Do)

Drought period	Onset				Termination			
	NDI	SPI	SRI	SSI	NDI	SPI	SRI	SSI
1977. 01~1977. 03	2	1	2	2	0	0	0	0
1977. 06~1977. 08	2	1	2	2	4	2	5	6
1978. 02~1978. 06	2	2	2	2	-1	-1	-1	0
1982. 06~1982. 07	0	0	0	1	0	-1	0	2
1984. 01~1984. 04	1	0	1	2	-1	-1	-1	1
1988. 10~1988. 12	-2	-2	-2	-1	0	0	0	2
1992. 06~1992. 08	0	0	1	1	0	0	0	0
1994. 05~1994. 07	-1	1	-1	2	2	-2	2	4
1995. 07~1996. 03	0	-1	0	0	-1	-3	-1	2
2000. 02~2000. 06	0	-1	0	1	0	-1	0	1
2001. 05~2001. 06	0	-1	0	0	-1	-1	-1	0
2008. 09~2009. 04	0	0	0	0	-1	-3	-2	0
ME	0.3	0.0	0.4	1.0	0.1	-0.9	0.1	1.5
MAE	0.9	0.8	0.9	1.2	0.9	1.3	1.1	1.5

Table 4. Drought characteristics factors comparison on past drought events with drought indices (Gyeongsang-Do)

Drought period	Duration				Inter-arrival time			
	NDI	SPI	SRI	SSI	NDI	SPI	SRI	SSI
1977. 06~1977. 08 (3 mon.)	1	1	1	0	-	-	-	-
1978. 02~1978. 06 (5 mon.)	-4	-3	-4	-3	2	1	2	1
1981. 05~1981. 06 (2 mon.)	0	0	1	0	-3	-3	-4	-3
1982. 06~1982. 07 (2 mon.)	0	0	0	2	0	1	1	0
1984. 01~1984. 04 (4 mon.)	0	-1	0	0	0	0	0	1
1988. 10~1988. 12 (3 mon.)	0	0	0	0	0	0	0	0
1992. 06~1992. 08 (3 mon.)	-1	0	-1	-1	1	0	1	0
1994. 05~1994. 07 (3 mon.)	1	0	1	2	1	2	1	1
1995. 07~1996. 03 (9 mon.)	-4	-3	-3	-2	-2	-3	-3	-2
2000. 03~2000. 06 (5 mon.)	0	1	1	0	0	-1	0	0
2001. 04~2001. 07 (4 mon.)	-3	-2	-3	-2	1	2	2	1
2008. 11~2009. 04 (6 mon.)	1	-1	0	3	-2	-2	-1	-2
ME	-0.8	-0.7	-0.6	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	-0.3
MAE	1.3	1.0	1.3	1.3	1.1	1.4	1.4	1.0

Table 5. Drought characteristics factors comparison on past drought events with drought indices (Jeolla-Do)

Drought period	Duration				Inter-arrival time			
	NDI	SPI	SRI	SSI	NDI	SPI	SRI	SSI
1977. 01~1977. 03 (3 mon.)	-2	-1	-2	-2	-	-	-	-
1977. 06~1977. 08 (3 mon.)	2	1	4	4	0	0	0	0
1978. 02~1978. 06 (5 mon.)	-3	-3	-3	-2	0	1	0	0
1982. 06~1982. 07 (2 mon.)	0	-1	0	1	-2	-2	-2	-1
1984. 01~1984. 04 (4 mon.)	-2	-1	-2	-1	1	0	1	1
1988. 10~1988. 12 (3 mon.)	2	2	2	3	-3	-2	-3	-3
1992. 06~1992. 08 (3 mon.)	0	0	-1	-1	2	2	3	2
1994. 05~1994. 07 (3 mon.)	1	1	3	2	1	1	-2	1
1995. 07~1996. 03 (9 mon.)	-3	-4	-3	2	-1	-2	1	-2
2000. 02~2000. 06 (5 mon.)	0	0	0	0	0	0	0	1
2001. 05~2001. 06 (2 mon.)	-1	0	-1	0	0	0	0	-1
2008. 09~2009. 04 (8 mon.)	-1	-3	-2	0	0	1	0	0
ME	-0.6	-0.8	-0.4	0.5	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2
MAE	1.5	1.4	1.9	1.5	1.0	1.0	1.1	1.1

4.2 가뭄특성인자 분석

Table 4 및 5는 경상도, 전라도 지역의 과거가뭄사례와 가뭄지수로부터 산정한 가뭄 지속기간 및 발생간격의 평균오차, 평균절대오차를 나타낸다. 경상도에 대한 지속기간 평균오차는 NDI(-0.8개월), SPI(-0.7개월), SRI(-0.6개월), SSI(-0.1개월), 발생간격은 SPI(-0.3개월), SSI(-0.3개월), NDI(-0.2개월), SRI(-0.1개월) 순으로 짧은 것으로 나타났다. 지속기간 평균절대오차는 SPI(1.0), NDI(1.3), SRI(1.3), SSI(1.3), 발생간격은 NDI(1.0), SSI(1.0), SPI(1.4), SRI(1.4) 순으로 정확도가 높은 것으로 나타났다. 전라도의 지속기간 평균오차는 SPI(-0.8개월), NDI(-0.6개월), SRI(-0.4개월), SSI(0.5개월), 발생간격은 NDI(-0.2개월), SRI(-0.2개월), SSI(-0.2개월), SPI(-0.1개월) 순으로 나타났다. 지속기간 평균절대오차는 SPI(1.4), NDI(1.5), SSI(1.5), SRI(1.8), 발생간격은 NDI(1.0), SPI(1.0), SRI(1.1), SSI(1.1) 순으로 나타났다.

Table 6은 가뭄지수의 객관적인 평가를 위해 5개 행정구역

에 대한 시작, 끝, 지속기간 및 발생간격의 평균절대오차에 따른 순위를 부여한 것이다. 가뭄의 시작은 SPI, NDI, SRI, SSI, 끝은 NDI, SRI, SPI, SSI, 지속기간은 NDI, SPI, SRI, SSI, 발생간격은 NDI, SPI, SRI, SSI 순으로 순위가 높았다. 각 항목별 평균 순위를 계산한 결과 NDI 1.4순위, SPI 2.1순위, SRI 2.9순위, SSI 3.6순위로 국내 가뭄해석에 있어 NDI의 활용성이 우수한 것으로 나타났다.

Table 6. Rank of drought indices

Drought indices	Onset	Termination	Duration	Inter-arrival time	Rank
NDI	2 (0.9)	1 (0.8)	1 (1.3)	1.5 (1.0)	1.4
SPI	1 (0.8)	3 (1.0)	3 (1.4)	1.5 (1.0)	2.1
SRI	3 (1.0)	2 (0.9)	3 (1.4)	3.5 (1.3)	2.9
SSI	4 (1.1)	4 (1.1)	3 (1.4)	3.5 (1.3)	3.6

4.3 지역별 분석

본 연구에서는 Barnes 객관분석 기법(Barnes, 1964)을 이용하여 SPI, SRI, SSI 및 NDI에 대한 가뭄분포도를

작성하였으며, 과거가뭄사례의 피해지역과 일치여부를 평가하였다. 평가기간은 2000년 2월~2000년 6월과 2008년 9월~2009년 4월의 가뭄사례를 선정하였다.

2000년 가뭄은 2월을 시작으로 7월에 해갈된 사례로 2월 경상도, 전라도 지역을 시작으로 4~5월에 전 지역으로 확장된 후 7월 전국적으로 해갈되었다. Fig. 6은 2000년 2월~2000년 6월까지의 가뭄분포도로 SPI는 2월에 경상도, 전라도 지역에 비교적 심한 가뭄으로 나타났으며, 4월 전국적으로 확장된 후 6월에 대부분 지역의 가뭄이 해갈된 것으로 나타났다. SRI는 2월에 경상도, 전라도

지역을 시작으로 4~5월에 전 지역으로 확장되었으며, 6월 경기도, 강원도 지역의 가뭄상황을 재현하였다. SSI는 3월에 경상도, 전라도 지역을 중심으로 가뭄이 늦게 시작되었으며, 4~6월에 전 지역으로 확장된 후 7월까지 경기 및 강원도 지역에 가뭄이 지속되었다. NDI는 2월에 SPI, SRI와 동일하게 경상도 및 전라도 지역의 가뭄상황을 재현하였으며, 4월 전 지역으로 확장된 후 6월에 SRI, SSI와 동일하게 경기도, 강원도, 경상도, 전라도 지역의 가뭄상황을 반영하였다.

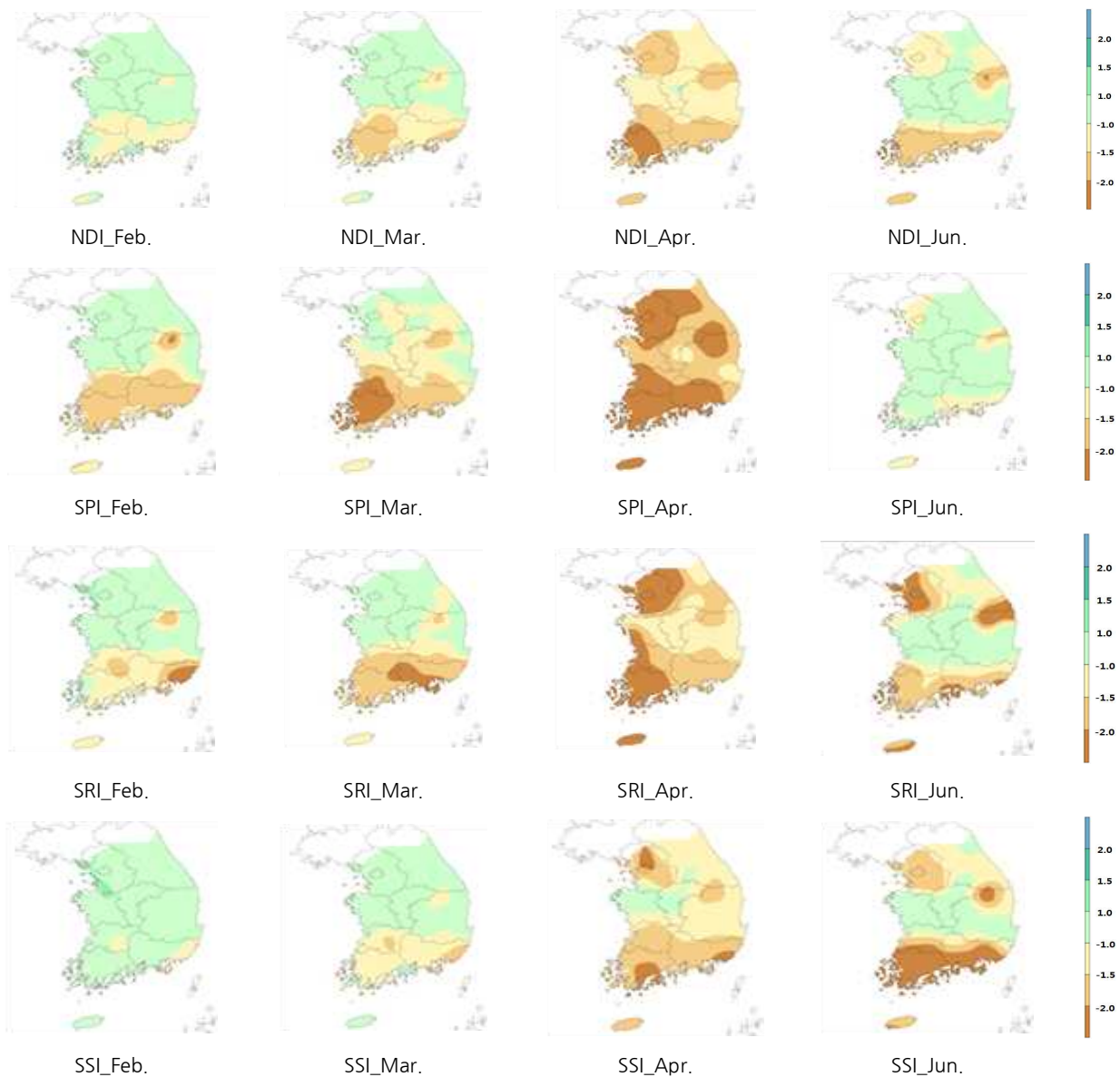


Fig. 6. Spatial analysis of SPI, SRI, SSI and NDI (2000.02~2000.06)

2008년 가뭄은 피해기간이 2008년 9월부터 시작하여 2009년 4월까지 이어진 대가뭄으로 볼 수 있다. 피해지역은 강원 및 중부 내륙지방과 남부지방 전역에 심각하게 발생하였으며, 특히 태백시는 90일간의 제한급수가 실시되는 등 피해가 극심한 지역인 것으로 조사되었다. Fig. 7은 2008년 9월부터 2009년 4월까지의 가뭄분포도이다. SPI는 9월에 경상도, 전라도 지역을 시작으로 11월에는 경기도 지역을 제외한 전 지역에 가뭄을 나타냈으며, 3월에 가뭄기간 도중 모든 지역의 가뭄이 해갈되었다. SRI는 경상도, 전라도 지역을 중심으로 가뭄이 시작되었으며,

11월에 경기도 지역을 제외한 전 지역으로 확장되었고 1월에 경상도, 전라도 지역에 극심한 가뭄을 나타내어 3월까지 충청도, 경상도, 전라도 지역에 가뭄이 이어졌다. SSI는 전라도 지역을 중심으로 가뭄이 시작하여 1월까지 경상도, 전라도 지역을 중심으로 심한 가뭄을 보였으며, 경상도, 전라도 지역의 가뭄은 3월에도 강하게 지속되는 것으로 나타났다. NDI는 9월에 경상도, 전라도 지역을 중심으로 가뭄을 나타내었으며, 1월에 충청도, 경상도, 전라도 지역의 가뭄을 재현하였다. 3월에는 SRI, SSI와 동일하게 경상도, 전라도 지역에 가뭄상황을 재현하였다.

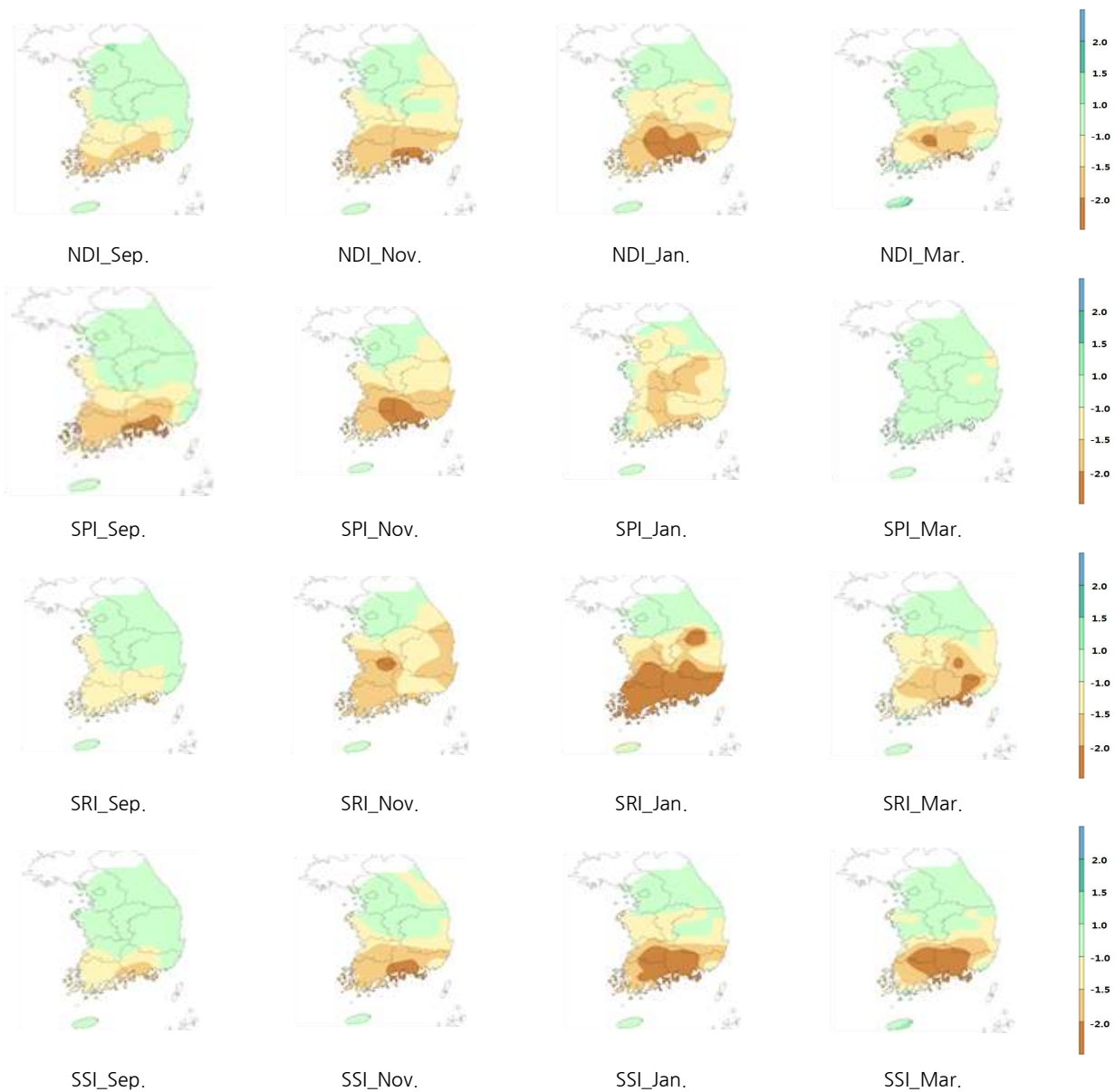


Fig. 7. Spatial analysis of SPI, SRI, SSI and NDI (2008.09~2009.04)

5. 결론

본 연구에서는 주성분 분석을 이용하여 기상학적 가뭄지수 SPI, 농업적 가뭄지수 SSI, 수문학적 가뭄지수 SRI를 동시에 고려할 수 있는 자연가뭄지수 NDI를 산정하는 기법을 제안하고 국내 가뭄해석의 적용성을 평가하였으며, 주요 연구 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) NDI 산정을 위해 다변량 통계기법인 주성분 분석을 이용하였으며, 입력변수는 강수량, 자연유량 및 토양수분량을 선정하였다. 우리나라 ASOS 59개 지점에 대해 NDI를 산정하고 SPI, SRI 및 SSI와 함께 시계열 분석을 수행하였다. 1977~2012년까지의 과거가뭄사례와 비교분석 결과 NDI는 행정구역별 가뭄사례를 적절히 재현하였다. 가뭄지수의 시작 및 끝의 정확도를 정량적으로 평가하기 위해 평균절대오차를 산정하였으며, NDI의 정확도는 기존 가뭄지수에 비해 대체로 높은 것으로 나타났다.

2) 과거가뭄사례와 가뭄지수들의 가뭄특성인자를 연속이론에 근거하여 산정·분석하였다. 5개 행정구역에 대한 지속기간 평균오차의 경우, NDI, SPI, SRI는 과거가뭄사례에 비해 짧고 SSI는 긴 것으로 나타났다. 발생간격 평균오차는 4개 지수 모두 과거가뭄사례에 비해 짧은 것으로 나타났다. 지속기간 및 발생간격의 평균절대오차는 NDI, SPI, SSI, SRI 순으로 정확한 것으로 나타났다.

3) 가뭄지수의 객관적인 평가를 위해 5개 행정구역에 대한 시작, 끝, 지속기간 및 발생간격의 평균절대오차에 따른 순위를 부여하였다. 4개의 항목에 대한 평균 순위를 산정한 결과 NDI 1.4순위, SPI 2.1순위, SRI 2.9순위, SSI 3.6순위로 국내 가뭄해석에 NDI의 활용성이 우수한 것으로 나타났다.

4) 과거 가뭄기간 동안에 SPI, SRI, SSI 및 NDI에 대한 분포도를 작성하여 지역별 가뭄해석의 활용성을 평가하였다. 2000년 2월~6월 사례의 경우 NDI는 2월에 경상도, 전라도 지역에 심한 가뭄을 나타내는 SPI, SRI와 가뭄이 아닌 SSI를 반영하여 경상도, 전라도 지역에 보통 가뭄상황으로 재현하였다. 6월 대부분 해갈된 SPI와 달리 지역적 가뭄상황이 지속되는 SRI, SSI를 반영하여 보통 가뭄상황으로 재현하였다. 2008년 9월부터 2009년 4월 사례의 경우 NDI는 9월에 기존 가뭄지수들과 동일하게 경상도, 전라도 지역의 가뭄상황을 재현하였으며, 3월 경상도 및 전라도 지역의 가뭄상황을 적절히 재현하였다.

본 연구에서 제안하는 NDI는 가뭄의 시작과 끝을 정확하게 재현하여 가뭄감시 및 대응에 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 가뭄의 발생간격 및 지속기간을 적절하게 재현하여 가뭄대응을 위한 장기적인 대책수립에 활용성이 높을 것으로 판단된다. 또한 기상학적, 수문학적, 농업적 가뭄에 대한 종합적 가뭄평가를 통해 가뭄에 대한 일관적인 정보를 제공할 수 있으므로 향후 가뭄해석에 있어 그 활용성이 높다고 판단된다. 추후, 자연적 가뭄지수를 기반으로 농업용 저수지, 댐 저수지, 지하수 등의 인위적인 요인을 고려한 가뭄지수의 개발 및 평가에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(KMIPA 2015-2070)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abramowitz, M., and Stegun, I.A.E. (1964). *Handbook of Mathematical Functions*, National Bureau of Standards.
- Bae, D.H., Son, K.H., Ahn, J.B., Hong, J.Y., Kim, G.S., Chung, J.S., Jung, U.S., and Kim, J.H. (2011). "Development of real-time drought monitoring and prediction system on Korea & East Asia region.", *Atmosphere*. KOMES, Vol. 22, No. 2, pp. 267-277.
- Bae, D.H., Son, K.H., and Kim, H.E. (2013). "Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 3, pp. 287-299.
- Barnes, S. (1964). "A technique for maximizing details in numerical map analysis", *Journal of Applied Meteorology*, AMS, Vol. 3, No. 4, pp. 395-409.
- Hao, Z., and AghaKouchak, A. (2013). "Multivariate standardized drought Index: A parametric multi-index model", *Advances in Water Resources*, Vol. 57, pp. 12-18.
- Jeon, C.H. (2012). *Data Mining Techniques and Application*, Hannarae Publishing Co.
- Keyantash, J.A., and Dracup, J.A. (2004). "An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage.", *Water Resources Research*, AGU, Vol. 40, No. 9, W09304.

- Kim, G.S., and Lee, J.W. (2011). "Evaluation of Drought Indices using the Drought Records." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No.8, pp. 639-652.
- Korea Meteorological Administration (2012). *Development of Hydro-meteorological Early Warning System for Response to Climate Change*, Korea Meteorological Administration.
- Kwon, H.J., and Kim, S.J. (2006) "Evaluation of Semi-Distributed Hydrological Drought using SWSI (Surface Water Supply Index)" *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 48, No. 2, pp. 37-43.
- Liang, X., Lettenmainer, 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*, AGU, Vol. 99, pp.14415-14428.
- 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*, No. 17-2.
- Ministry of Construction & Transportation. (1995). *Survey Report of drought history*, Ministry of Construction & Transportation.
- Ministry of Construction & Transportation. (2002). *Survey Report of drought history*. Ministry of Construction & Transportation.
- National Drought Mitigation Center (NDMC) (2002). *Three Years and Counting: What's New with the Drought Monitor*, National Drought Mitigation Center.
- National Emergency Management Agency (NEMA) (2013). *Establishment of National Drought Disaster Information System*, National Emergency Management Agency.
- Palmer, W.C. (1965) "Meteorologic drought. U.S. Department of Commerce", *Weather Bureau, Research Paper*, pp. 45-58.
- Rajekhar, D., Singh, V.P., and Mishra, A.K., (2015) "Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment" *Journal of Hydrology*, Vol. 526, pp. 164-182.
- Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, A., Carrao, H., and Vogt J. (2012) "Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe" *Natural Hazards and Earth System Sciences*, EGU, Vol. 12, pp. 3519-3531.
- 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", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 35, No. L2045, doi:10.1029/2007GL032487.
- So, J.M., Son, K.H., and Bae, D.H. (2014), "Estimation and Assessment of Bivariate joint Drought Index based on Copula Functions" *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 2, pp. 171-182.
- 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*, KWRA, Vol. 44, No. 8, pp. 667-681.
- Yevjevich, V. (1967). "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts", *Hydrology Paper*, No. 23, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Yoo, J.Y., Choi, M.H., and Kim, T.W. (2009) "Regional Characterization Analysis of Drought in Korea using Multivariate Analyses" *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, pp. 1462-1466.