

# EOF 해석 및 다변량시계열 모형을 이용한 농업가뭄 대비능력의 평가

## Evaluation of Agricultural Drought Prevention Ability Based on EOF Analysis and Multi-variate Time Series Model

유철상\* / 김대하\*\* / 김상단\*\*\*

Yoo, Chulsang / Kim, Dae Ha / Kim, Sangdan

### Abstract

In this study 3-month SPI data from 59 stations over the Korean peninsula are analyzed by deriving and spatially characterizing the EOFs. Also, the coefficient time series of EOF are applied to the multi-variate time series model to generate the time series of 10,000 years, to average them to estimate the areal average, and to decide the maximum drought severity for given return periods. Finally, the drought prevention ability is evaluated by considering the effective storage of dam within the basin and the size of agricultural area. Especially for the return period of 30 years, only the Han river basin has the potential to overcome the drought. Other river basins like the Youngsan river basin, which has a large portion of agricultural area but less water storage, are found to be very vulnerable to the rainfall-sensitive agricultural drought.

**keywords** : EOF analysis, multivariate time series model, drought severity, return period

### 요 지

본 연구에서는 전국 59개 지점의 3개월 SPI 자료를 가지고 EOF를 유도하고 아울러 그 공간적 특성을 분석하였다. 또한 EOF 해석에 의해 나타난 Coefficient Time Series를 다변량 시계열 모형에 적용하여 SPI 시계열을 자료기간 10,000년으로 확장하였고 전국적인 가뭄심도를 판단하기 위해 전국 평균 지수를 이용하여 재현기간별 최대심도를 결정하였다. 마지막으로 각 대권역의 댐 유효저수량과 농경지 면적을 이용하여 농업가뭄 대비능력을 판단하였는데 재현기간 30년 가뭄에 적절히 대비할 수 있는 이수능력을 갖춘 유역은 한강유역이 유일한 것으로 파악되었다. 특히 영산강 유역은 큰 농경지 면적에 비해 저수량이 크게 부족한 것으로 파악되었고 강우량의 크기에 민감한 농업가뭄에 가장 취약할 것으로 나타났다.

**핵심용어** : EOF 해석, 다변량 시계열모형, 가뭄심도, 재현기간

### 1. 서 론

가뭄은 과거와 현재에 걸쳐서 홍수와 함께 국가의  
홍명성쇠를 좌우할 정도의 큰 재해로 여겨지고 있다.

미 해양대기청(NOAA)이 발표한 20세기 최대의 자연  
재해 중 상위 5위 안에 4개의 가뭄이 포함되어 있을 정  
도로 가뭄은 막대한 피해를 입히는 재해라 할 수 있다.  
이 발표에 따르면 1907년에 발생한 중국의 가뭄이 1위

\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 · 공학박사 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

\*\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (e-mail: violt007@korea.ac.kr)

\*\*\* 부경대학교 환경시스템공학부 전임강사 · 공학박사 (e-mail: skim@pknu.ac.kr)

를 기록하였으며, 2위는 1922년에 구소련의 가뭄, 4위는 1967년 인도, 5위는 1975년 아프리카 사헬지방에서 발생한 가뭄으로 각각 5백만 명, 150만 명, 60만 명의 사망자가 발생하였다고 한다. 또한 유엔은 2000년 한 해 동안 아시아 지역은 가뭄으로 인하여 약 1억 명의 기민이 발생했음을 발표한 바 있으며, 이는 한반도뿐 아니라 전 세계적으로 과거에서 최근까지도 가뭄이 지구촌에 막대한 피해를 발생시키고 있음을 보여주는 예라 할 수 있다(경기개발연구원, 2004).

가뭄은 다른 재해와 비교했을 때 몇 가지 다른 특징이 있다. 먼저 가뭄은 아주 서서히 찾아오는 재해로 그 시작과 끝을 인식하기 매우 어렵다. 아울러 그 진행속도도 굉장히 느리며 장기간에 걸쳐 지속되는 특징을 가진다. 또한 그 진원지나 경로를 파악하기 어려우며 시공간적으로 전파된다(Wilhite and Glantz, 1985). 이러한 특징은 가뭄에 대한 예측을 어렵게 하며 따라서 이에 대한 대책 역시 마련하기 쉽지 않다. 이와 더불어 가뭄은 그 정의 자체가 공학적으로 확실하지 않기 때문에 이에 대한 혼돈으로 그 해석방법이 난무한 상황이다.

가뭄의 해석은 일반적으로 기상학적 가뭄은 강수량을 이용하여 수행되어 왔고 수문학적 가뭄은 하천유량을 이용하여 수행되어 왔다(Dracup et al., 1980; Karl, 1983; Clausen and Pearson, 1995; Henriques and Santos, 1999; Shin and Salas, 2000). 또한 최근에는 몇몇 연구에서 가뭄과 기후학적 신호와의 관계에 관한 연구 또한 찾아볼 수 있다(Piechota and Dracup, 1996; Chiew et al., 1998). 이와 더불어 가뭄지수를 이용한 가뭄해석은 주로 PDSI(Palmer Drought Severity Index; Palmer, 1965)와 같은 가뭄지수를 RUN의 개념(Yevjevich, 1967)에 적용하여 수행되어져 왔는데 이는 주어진 절단수준에 대하여 가뭄의 지속기간, 심도, 발생간격 등을 정의한 후 이를 시계열 분석하여 그 특성을 찾는 방법이다(Chang, 1991; Wang and Salas, 1989). 아울러 최근에는 마코프 연쇄(Markov chain)가 가뭄해석에 많이 이용되어 왔고(Chang, 1991; Chang and Kleopa, 1991; Wang and Salas, 1989; Chung and Salas, 2000) 몇몇 다른 연구에서는 Bernoulli 시행과 DARMA 모형이 이용되기도 하였다(Fernandez and Salas, 1999a, 1999b; Salas et al.; 2001). 이외에도 포아송과정을 이용한 가뭄해석(유철상 등, 2004), 구형펄스모형을 이용한 가뭄심도-지속기간-재현기간 분석(유철상과 김대하, 2006), 신경망 모형을 이용한 가뭄의 공간해석(신현석과 박무중, 1999) 등 많은 방법 등 국내외에 제시된 가뭄해석에 관한 연구는 쉽게 찾아볼 수 있다.

일반적으로 위에서 언급된 방법들은 상대적으로 긴

자료가 가용한 경우에 한한다. 자료가 긴 경우에는 관측자료 만으로도 가뭄의 특성을 파악하는 것이 가능하므로 이를 모형의 결과와도 쉽게 비교할 수 있다. 그러나 우리나라에서 대부분의 경우 가뭄을 특성화할 수 있을 정도로 충분한 길이의 강수기록은 존재하지 않는다고 할 수 있다. 가뭄은 홍수에 비해 훨씬 장기적인 시간 규모에서 발생하는 현상이므로 그 해석에 더 큰 제약이 있을 수밖에 없다. 홍수의 경우 최소 30-40년 정도의 기록으로도 빈도해석을 수행할 수 있으나 가뭄의 경우 수 년 동안 발생할 수도 있고 수십 년 동안 발생하지 않을 수도 있어 훨씬 긴 관측기록이 해석에 필요하게 된다(유철상 등, 2004).

본 연구에서는 자료기간이 짧은 국내 59개 지점의 3개월 표준강수지수(Standard Precipitation Index; SPI; McKee et al., 1993) 시계열을 경험적 직교 함수(Empirical Orthogonal Function) 해석으로 가뭄의 공간분포를 분석하였다. 또한 EOF 해석에서 나타난 시계열을 다변량 시계열모형(Multivariate Time Series Model)에 적용하여 자료의 시간적 확장을 시도하였다. 자료의 시간적 확장이 무한하게 가능해지면 빈도해석 방법을 사용하지 않아도 재현기간에 대한 가뭄심도를 결정할 수 있게 된다. 아울러 각 재현기간에 대한 가뭄심도의 공간 분포 양상을 파악하였다. 이와 더불어 일정 재현기간에 대한 가뭄지수를 강수부족량으로 환산하여 유역별 농업가뭄 대비능력을 판단하고자 하였다.

## 2. 표준강수지수 (Standardized Precipitation Index)

McKee et al.(1993)은 가뭄이 강수량의 감소로부터 시작된다는 것에 착안하여 표준강수지수(Standardized Precipitation Index; SPI)를 개발하였다. 즉, 지하수량, 적설량, 저수지 저류량, 토양수분, 하천 유출량 등은 그 변화 형태는 다르지만 근본적으로 강수량의 부족에 의해 감소한다는 것이다. 표준강수지수는 특정 계산 시간 단위를 3, 6, 9, 12개월 등과 같이 설정하고 시간 단위별로 강수부족량을 산정하여 개개의 용수공급원이 가뭄에 미치는 영향을 산정하는 것이다. 이렇게 산정된 표준강수지수는 그 시간단위에 따라 각기 다른 분야에 사용될 수 있다. 예를 들어 단기기간의 시간축척은 짧은 기간 동안의 강수량에 대한 지수이므로 농업적 관심에 사용될 수 있으며 비교적 긴 기간의 시간축척은 수자원 공급관리 측면에 사용될 수 있다.

SPI를 산정하기 위해서는 우선 시간 단위별 누가강수 시계열을 구성해야 하며 이는 이동 누가에 의한 방법으로 월 강수량을 시간단위에 따라 연속적으로 중첩

하여 구한다. 즉, 각 월을 기준으로 하여 시간 단위에 해당하는 누가강수 시계열을 산정하고 이를 누가 된 월 수로 나누어 고려해준 월에 따른 이동 평균 강수량 시계열을 만들어 낸다. 지속기간별 이동 평균 강수량 시계열이 구성되면 이 시계열을 월별로 분석하여 적정 확률분포형을 결정한다. Guttman(1999)에 의하면 SPI를 산정하기 위한 누가강수시계열의 적정 확률분포형은 Pearson Type-III 분포이며 유원희 등(2000)에 의하면 기타 다른 확률분포형을 가정하더라도 Pearson Type-III 분포와 크게 차이하지 않는 것으로 알려져 있다. 이렇게 결정된 적정 확률분포형을 이용하여 개개 변량의 누가확률, 즉, 비초과확률을 산정하여 정규분포에 적용하면 표준강수지수를 얻을 수 있다. 적정확률분포형에 해당하는 비초과확률을  $P_1$ 이라고 하면  $P_1$ 에 해당하는 표준정규분포의  $z$ 값이 바로 표준강수지수가 된다. 표준강수지수는 표준정규분포를 사용하기 때문에 이론적으로 한계값이 존재하지 않으며 값 자체에 확률 개념이 포함하고 있으므로 발생 빈도를 내포하고 있다.

본 연구에서는 전국 59개 지점에 대한 3개월 SPI 자료를 사용한 분석을 수행하였으며 앞에서 언급한 대로 짧은 지속시간에 해당하는 가뭄지수이므로 농업가뭄에 대한 해석이라 할 수 있다.

### 3. 경험적 직교함수 해석(Empirical Orthogonal Function Analysis)

자연현상의 공간적 변동성은 주로 점형태로 구성된 관측망으로부터 얻어진 공간자료를 통하여 파악될 수 있다. 강수량 또한 이러한 점구조로 된 관측망의 네트워크를 통하여 공간적인 패턴을 분석해 볼 수 있다. 이때, 어떤 관심있는 자연현상의 공간적인 변동성의 주된 특징은 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF)라 불리는 기법에 의해 압축적으로 설명될 수 있다. 이러한 EOF분석은 학문분야에 따라 주성분분석(Principal Component Analysis; PCA) 또는 Karhunen-Loeve Basis Function이라 불리며 넓은 의미에서 통계기법 중의 하나로 분류될 수 있다. EOF 해석은 관측망 네트워크로부터 오랜 기간 동안의 관측을 통해 얻은 시공간 정보를 분석하여 몇몇의 핵심적인 공간정보로 압축하는 기법이라 할 수 있다(Yoo and Kim, 2004).

EOF를 이용한 통계기법은 수학적으로 간단히 표현하면  $N$ 차원의 크기를 갖는 자료를  $N$ 보다 작은  $K$ 차원으로 자료를 압축적으로 표현하는 기법을 의미한다. 예를 들면, 1999년 연강우량의 공간 패턴과 2000년 연강

우량의 공간 패턴은 서로 비슷하기는 하지만 공간적으로는 약간 다른 경향을 보일 것이다. 이러한 수많은 시공간 자료로부터 핵심적인 공간패턴을 추출하여 그것이 어떻게 구성되는지 혹은 그것이 시간적으로 어떻게 변동하는지를 파악하면 자연현상의 시공간적인 구조를 간단하게 알아볼 수 있는 장점이 있다(경기개발연구원, 2004). EOF 해석은 최근 기상학, 지리학, 지질학과 같은 여러 과학 분야에서 많이 사용되고 있는 추세이다(Kutzbach, 1967; Wallace and Dickinson, 1972; Singh and Kripalani, 1986; Wagner et al., 1990; Kim and North, 1993; Kim, 1996; Yoo and Kim, 2004).

EOF는 자료의 선형변환을 통해 비상관분포된 자료들을 구성하며 이로부터 원자료 대부분을 설명할 수 있으면서 더 작은 수의 변수들을 얻는 통계적 기법이다. 이는 Eq. (1)에 나타난 행렬의 비정칙 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 통해 수행될 수 있다.

$$A = U \times S \times V^T \quad (1)$$

여기서 행렬  $U$ 의 열들을  $A$ 의 EOF라 하고 행렬  $S$ 의 대각요소들을 고유값이라고 한다. 행렬  $S$ 의 고유값들은 EOF가 설명하는 원자료의 분산값이며 모든 EOF의 고유값을 더하면 원자료의 분산이 된다. 행렬  $V$ 의 각 열은 시계열 계수로서 각 EOF의 시간적 전개를 나타낸다.

본 연구에서는 전국 59개 지점의 3SPI 시계열을 행렬  $A$ 로 만든 후 EOF 해석을 수행하였다. 자료기간은 1973년 4월부터 2001년 12월까지로 모든 지점에 대해 동일하다. 3SPI 첫 번째부터 세 번째 EOF의 공간 분포는 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

첫 번째 EOF의 경우 남한의 중부내륙에서 해안지역의 방향으로 가뭄심도가 변화하는 공간적 특성을 보이고 있다. 그리고 두 번째 EOF는 남한지역의 남부지역에서부터 북부지역으로 비슷한 거리에 따라 비슷한 변화폭을 보여주고 있으며 세 번째 EOF는 경도에 따라 서해에서 동해쪽으로 변화하고 있다. 세 번째 EOF는 서해보다 동해지역이 거리에 따른 변화율이 2배 정도 크게 나타난다. 각 EOF의 분산 공헌도는 Fig. 2와 같으며 누가분산 70%에 해당하는 EOF는 21번째로 나타난다. 통상적으로 누가분산 70%에 해당하는 EOF 들을 원자료에 설명력을 가지는 인자로 본다(경기개발연구원, 2004).

또한 각 EOF의 시계열은 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 이 시계열은 EOF 시계열에 분산공헌도가 곱해진 값들

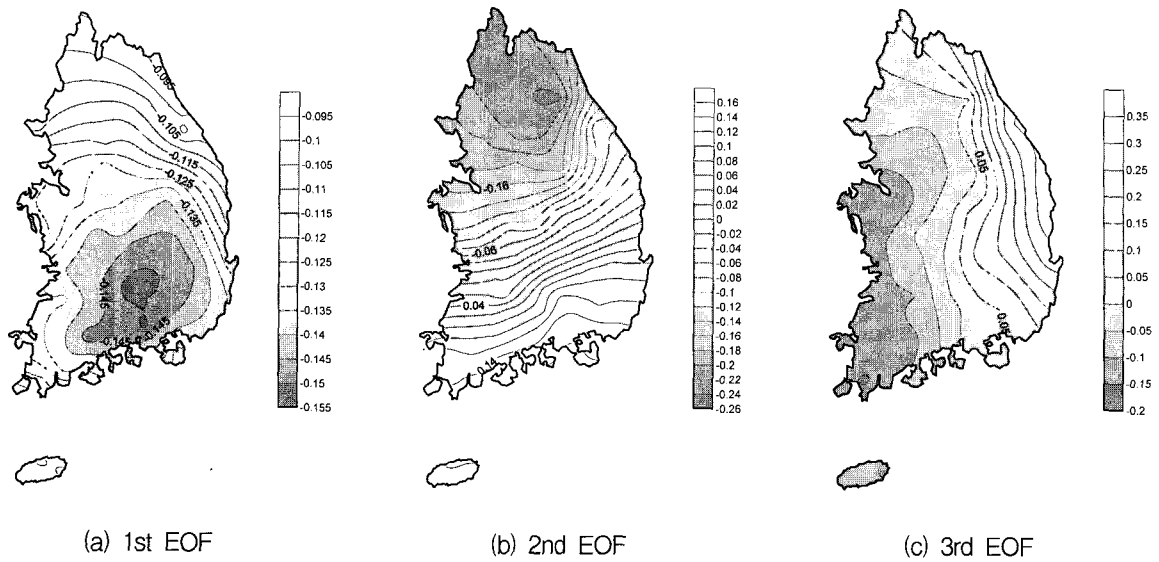


Fig. 1. Spatial distribution of 1st, 2nd, and 3rd EOF

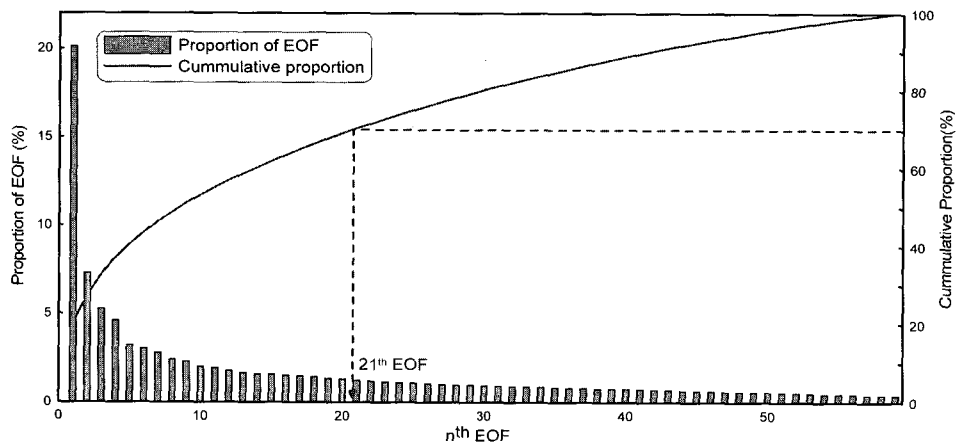


Fig. 2. Proportion of EOFs

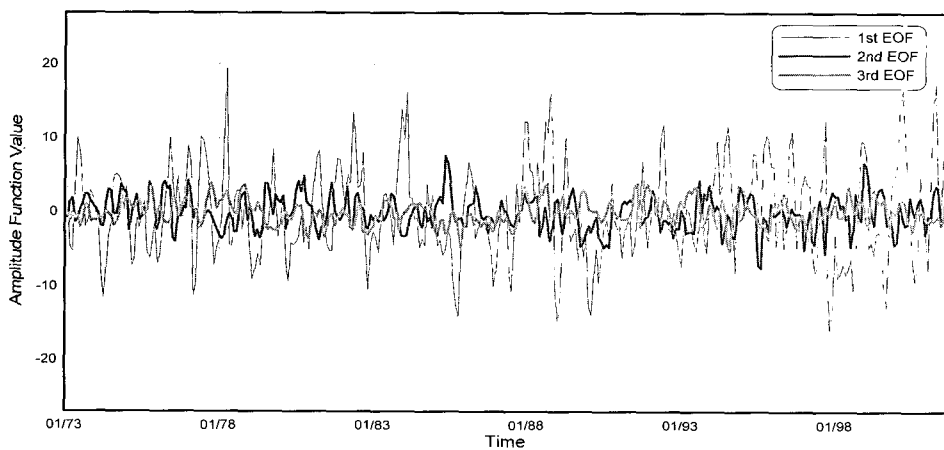


Fig. 3. EOF Coefficient Time Series

이며 공헌도가 가장 큰 첫 번째 EOF가 가장 뚜렷하게 진동하고 있음을 알 수 있다. 첫 번째 EOF의 양수 값들은 가뭄심도가 깊었던 시기를 나타내며 실제로 가뭄

이 극심했던 기간이었던 77-78년, 88년, 94-95년, 00-01년 등(건설교통부, 2002)의 기간에 나타나는 것으로 보아 실제 가뭄사상과 잘 맞는 결과를 할 수 있다.

#### 4. 다변량 시계열 모형 (Multivariate Time Series Model)

행렬 S와 행렬 V를 곱한 시계열은 EOF의 분산공헌도가 고려된 시계열로 Coefficient Time Series라 불린다. 첫 번째부터 세 번째 EOF의 Coefficient Time Series는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 본 연구에서는 각 EOF의 Coefficient Time Series를 다변량 시계열 모형을 이용하여 시간적 확장을 시도하였다. 각 Coefficient Time Series 들은 서로 독립적으로 나타난다고 보기 힘들며 각각의 시계열이 다른 시계열과 어느 정도의 갖는다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각각을 독립적으로 보는 단변량 시계열 분석이 아닌 다변량 시계열 분석을 시도하였으며, 가능한 모형중의 하나인 VARMA(Vector Autoregressive Moving Average) 모형을 이용하여 시간적 자료 확장에 적용하였다.

다변량 시계열 모형의 식별은 단변량 시계열과는 달리 상당히 까다로운 작업이라 할 수 있으며 Tiao and Box(1981)에 의하면 표본의 Cross Correlation 행렬과 Partial Cross Correlation 행렬을 이용하여 행렬의 모든 원소가 유의수준보다 낮아지는 Lag 차수를 모형의 차수로 판단한다. 하지만 본 연구에서는 30번째 EOF Coefficient Time Series 까지를 고려했기 때문에 모형에 적용되는 변량의 수가 30개가 되며 이에 따라 자료의 통계특성을 이용하여 차수를 판단하기가 굉장히 어

렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 Minimum Information Criteria(MIC) 기법을 이용하여 모형을 식별하였다. MIC 기법은 모형과 실자료에서 나타난 오차들의 분산과 모형의 매개변수 개수의 합이 가장 작은 값을 주는 모형을 식별하는 기법이라 할 수 있다(Chatfield, 2004). MIC을 이용한 모형의 식별은 Table 1에 나타나 있으며 사용된 MIC는 SBC(Schwartz's Bayesian criterion)이다. Table 1의 결과에서 VARMA(1,0), 즉, VAR(1)과정이 가장 작은 Information Criteria임을 알 수 있다.

VAR(1) 과정은 Eq. (2)와 같은 식으로 표현할 수 있다.

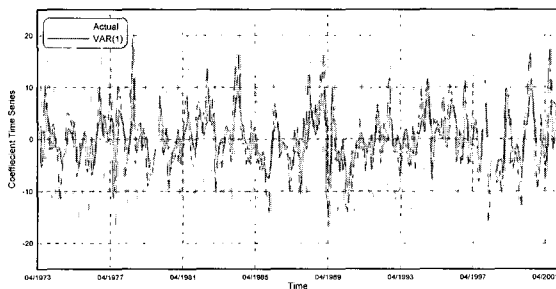
$$y_t = \delta + \Phi_1 y_{t-1} + \epsilon_t \quad (2)$$

여기서  $\delta$ 는 상수행렬 이고  $\Phi_1$ 은 AR1 매개변수 행렬,  $\epsilon_t$ 는 공분산 행렬이  $\Sigma$ 인 백색잡음과정 행렬이다. 모형으로 생성된 자료와 실자료는 Fig. 4에 나타나 있으며 음영은 95% 신뢰구간을 나타낸다.

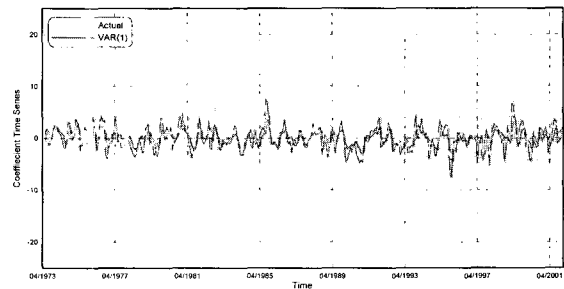
시계열을 모형에 적용하기 위해서는 시계열이 정상성(stationarity)을 갖추고 있어야 한다. 정상성을 만족하기 위해서는 시간에 따라 시계열의 확률밀도함수(probability density function; pdf)가 변하지 않아야 하지만 이를 만족시키기는 매우 어려우며 따라서 약정상

Table 1. Determinating the order of VARMA Model

Lag	MA 0	MA 1	MA 2	MA 3	MA 4	MA 5
AR 0	-30.606	-30.598	-27.451	-22.349	-15.663	-6.384
<b>AR 1</b>	<b>-41.889</b>	-37.665	-33.194	-26.322	-17.057	-3.508
AR 2	-39.719	-34.163	-27.475	-17.993	-4.436	16.142
AR 3	-35.143	-27.746	-18.161	-4.082	16.773	53.005
AR 4	-27.999	-18.018	-4.141	16.748	53.612	125.636
AR 5	-18.410	-4.214	16.913	53.013	125.467	316.542

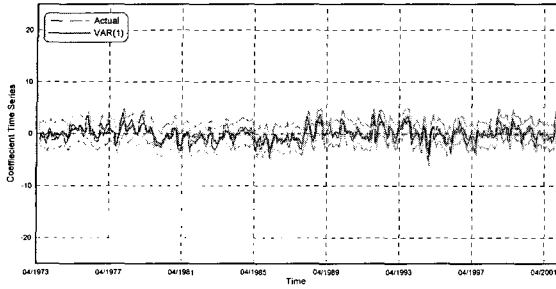


(a) 1st EOF Coefficient Time Series

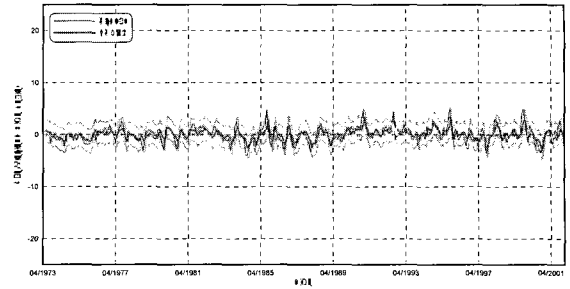


(b) 2nd EOF Coefficient Time Series

Fig. 4. Actual and generated EOF Coefficient Time Series(1st-4th EOF)(continued)



(c) 3rd EOF Coefficient Time Series



(d) 4th EOF Coefficient Time Series

Fig. 4. Actual and generated EOF Coefficient Time Series(1st-4th EOF)

성(weak stationarity 또는 covariance stationarity)을 기준으로 주로 판단한다. 약정상성의 기준은 시간에 따라 평균과 분산이 변하지 않으며 아울러 자기상관함수가 지체시간(lag time)의 함수로 나타나야 한다는 것이다. 이를 위해서는 적용되는 시계열 모형의 차분방정식의 해가 모두 단위원 바깥에 위치해야 하며, 본 연구의 경우에서도 각 EOF 시계열이은 모두 이 조건을 만족하는 것으로 파악되었다. 따라서 시계열 모형에 적용된 시계열은 시간적으로 확장될 수 있다.

### 5. SPI의 생성 및 재현기간별 가뭄심도의 결정

VAR(1) 모형에서 추정된 AR(1) 과정의 매개변수 행렬  $\Phi_1$ 과 백색잡음의 공분산 행렬  $\Sigma$ 를 이용하면 VAR(1) 과정의 Coefficient Time Series를 임의적으로 생성할 수 있다. 또한 생성된 시계열에 원자료의 EOF 행렬 U를 곱하면 각 지점의 3개월 SPI자료 역시 생성할 수 있다. 본 연구에서는 EOF Coefficient Time Series를 VAR(1)과정의 120,000개월 기간으로 생성하였으며 이는 10,000년 자료에 해당한다. 또한 생성된 시계열에 EOF를 곱하여 29년의 3SPI 자료를 10,000년으로 확장하였다. Fig. 5는 속초지점의 생성된 3SPI 자료를 나타낸다.

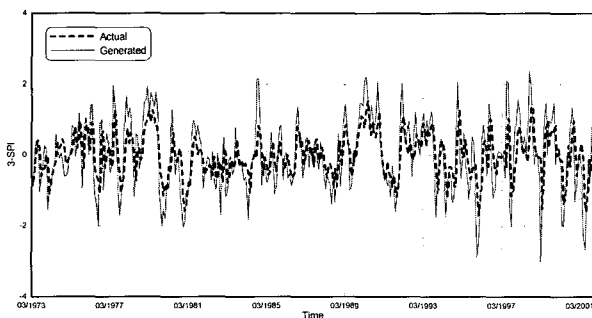


Fig. 5. Generated 3SPI Time Series (Sokcho station)

아울러 생성된 120,000개월 자료를 이용하여 재현 기간에 해당하는 전국 평균 최대치 자료계열을 구성하였다. 10,000년 자료는 빈도해석 방법을 사용하지 않고 실제 재현기간 동안 최대 심도가 어느 정도 되는지 구해내는데 어려움이 없을 정도로 긴 기간의 자료라 할 수 있다. 전국 평균적인 가뭄심도를 구하기 위해 59개 지점의 자료를 평균하여 전국 평균 시계열을 이용하였다.

먼저, 재현기간이 2년일 경우 120,000개월의 자료계열을 24개월(2년) 단위로 끊어서 최대치를 산정할 경우 5,000개의 자료계열이 생성되게 된다. 마찬가지로 재현기간이 5년일 경우 이에 대한 최대치 자료계열은 2,000개의 자료가 생기며 이러한 방법으로 재현기간을 증가시키면서 각 재현기간에 대한 최대치 자료계열을 구성하였다. 이들 자료계열의 히스토그램은 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 살펴볼 수 있는 것처럼 재현기간이 증가함에 따라 작은 값들이 점점 사라지고, 따라서 히스토그램은 점점 더 작은(가뭄심도가 큰) 쪽으로 이동하게 된다. 결국 재현기간에 대한 가뭄심도는 점점 더 작은 평균을 갖게 되며 이들 평균치는 각 재현기간에 대한 평균적인 최대심도라 할 수 있다. 하지만 각 재현기간에 대한 자료계열은 정규분포보다는 대수정규분포 형태로 나타나는 것으로 판단되어 그 평균의 추정에 대수정규분포를 고려하였다. 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에 나타난 평균심도는 전국 평균심도 이므로 가뭄심도의 공간적인 분포는 파악할 수 없다. 따라서 재현기간에 해당하는 최대심도와 유사한 크기의 사상들을 추출하여 공간분포를 파악하였다. 이는 Figs. 7-9와 같고 등치선의 공간적 자료의 보간은 Kriging기법을 사용하였다. 그 결과로 각 재현기간에 대한 가뭄 심도는 중부 내륙지방과 남부지방이 크게 나타나는 뚜렷한 특징을 파악할 수 있다.

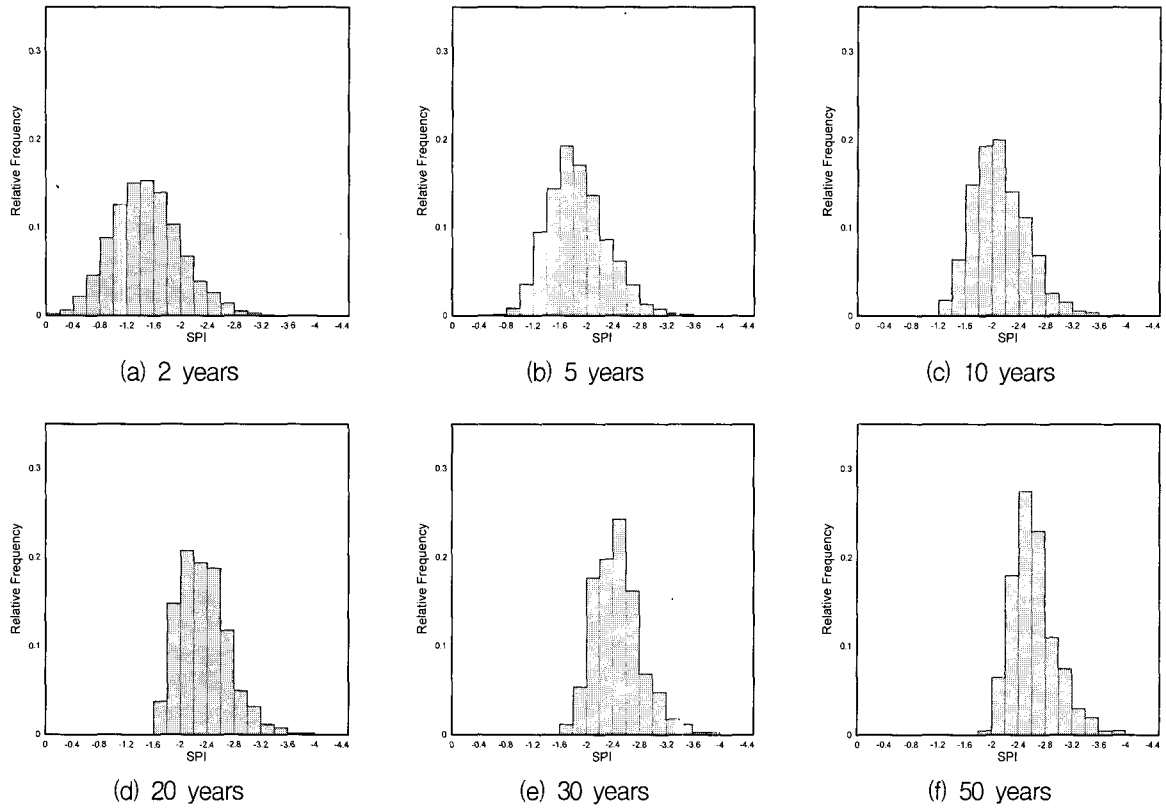


Fig. 6. Histogram of generated maximum drought severity data for each return period

Table 2. Drought severity for each return period

Return Period (years)	2	5	10	20	30	50	100	200	300	500
Drought Severity	-1.400	-1.813	-2.076	-2.313	-2.445	-2.602	-2.803	-2.994	-3.123	-3.266

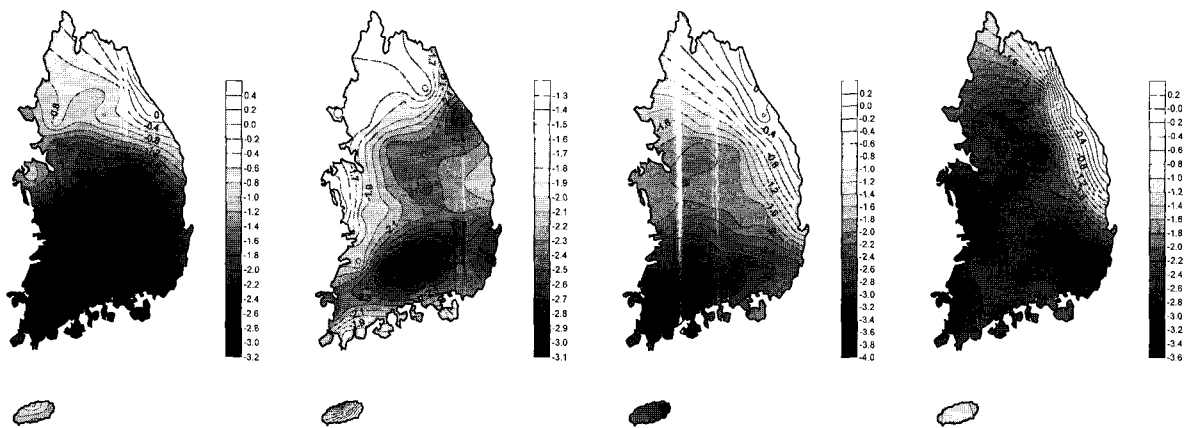


Fig. 7. Spatial distribution of 10-year drought severity

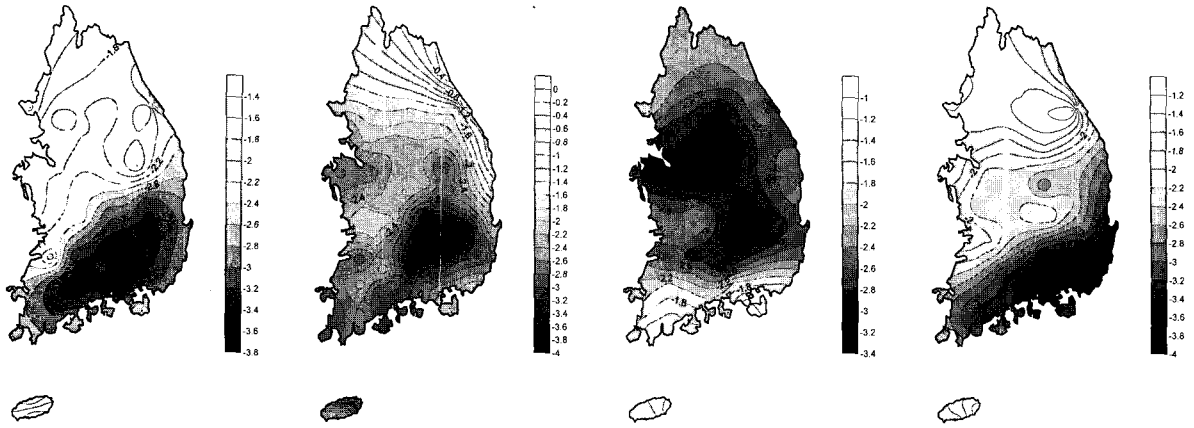


Fig. 8. Spatial distribution of 30-year drought severity

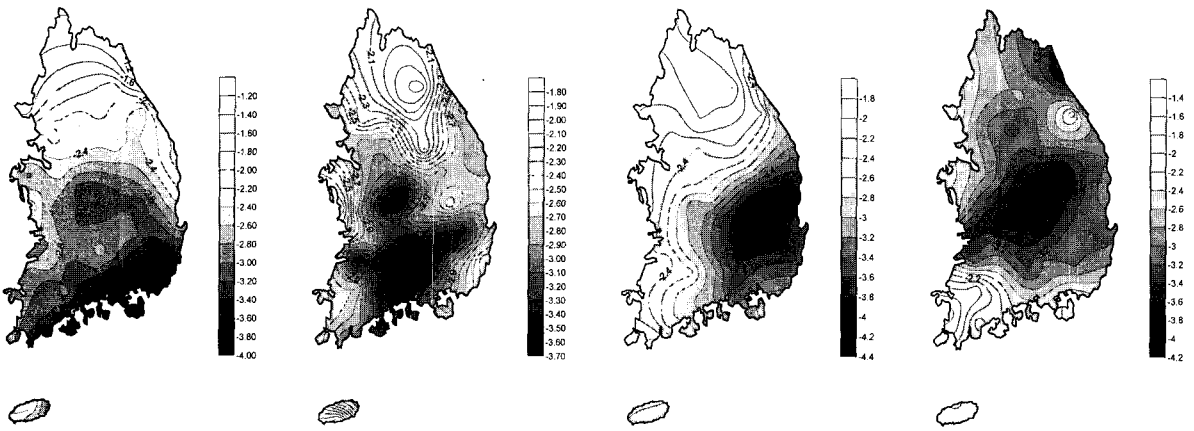


Fig. 9. Spatial distribution of 100-year drought severity

## 6. 가뭄심도에 대한 강수부족량 산정과 유역별 농업가뭄 대비능력 평가

SPI는 강수량 자료를 기초로 산출되므로 SPI 가뭄지수를 이용한 심도는 강수부족량으로 환산될 수 있다. 3, 4, 5, 6월이 농업가뭄이 발생하는 주요한 달이라고 판단하였을 경우 전국 평균 3, 4, 5월 이동평균 강수량은 대수정규분포를 사용하였을 때 79.83mm, 4, 5, 6월의 경우 119.08mm이다(이 결과는 분석에 사용된 59개 지점의 평균 월강수량 자료로부터 산정되었다). 30년 빈도가뭄이 발생하였을 경우 3SPI의 전국평균심도는 -2.445 정도라 할 수 있는데 SPI는 표준정규분포를 따르므로 이에 대한 표준정규분포의 누가확률은 0.007243이다. 아울러 누가확률 0.007243에 대한 3, 4, 5월 및 4, 5, 6월 59개 지점의 전국평균 이동평균강수량은 31.32mm, 61.64mm 이다. 따라서 3, 4, 5월, 4, 5, 6월 1개월 평균 강수부족량은 각각 48.43mm, 57.43mm라 할 수 있다. 참고로 이 값은 전국 평균에 근거한 값이므로 유역별로

다소 차이가 있을 수 있다.

한편, 우리나라의 유역별 주요 댐 유효저수량 및 유역면적, 농경지 면적은 Table 3과 같다. 이에 댐 유효저수량을 농경지 면적으로 나누면 생활용수, 공업용수 등 농업용수를 제외한 용수사용을 모두 배제하였을 때 농경지에 공급할 수 있는 최대 공급수량 깊이의 의미를 갖는다고 할 수 있다.

3, 4, 5월 및 4, 5, 6월 1개월 전국평균 강수부족량은 각각 48.43mm 및 57.43mm 이므로 Table 3에 의하면 30년 빈도의 가뭄이 발생하였을 경우 한강, 낙동강, 섬진강 유역은 어느 정도 대비할 수 있으나 금강, 영산강의 경우는 물 부족이 발생할 수 있다. 또한 같은 심도가 2개월 지속되었을 경우 대비할 수 있는 유역은 한강유역이 유일하며 한강 나머지 유역은 적절한 추가의 이수 대책이 필요해 짐을 알 수 있다. 특히 영산강 유역의 경우 유역의 30% 정도가 농경지로 이루어져 있는데 반해 농업용수를 공급할 수 있는 저수용량이 상당히 부족함을 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 실제 저수율(50-60%)



Table 3. Major river basins and their basin area, effective storage of dams within the basin, and beneficial area for agriculture

River Basin	Basin Area (km <sup>2</sup> )	Effective Storage of Dams (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Beneficial Area for Agriculture(ha)	Max. Depth of Water Supply (mm)
Han	23,292.83	2819.69	243,740	115.68
Nakdong	23,702.02	2648.32	388,148	68.23
Geum	9,914.01	1010.10	204,565	49.38
Sumjin	4,914.32	607.30	83,510	72.72
Youngsan	3,469.58	171.00	107,115	15.96

을 고려한다면 2개월 지속되는 30년 가뭄에 저항할 수 있는 유역은 없을 것으로 판단된다.

### 7. 결 론

본 연구에서는 전국 59개 지점의 3개월 SPI 자료를 EOF 해석 및 다변량 시계열 모형에 적용하여 재현기간 별 최대가뭄심도를 결정하였다. 먼저 EOF 해석에 의한 결과를 요약하면 각 EOF 별로 다른 공간적 분포특성을 보이며 첫 번째의 경우 남한의 중부내륙에서 해안지역의 방향으로 그리고 두 번째 EOF는 남한지역의 남부지역에서부터 북부지역으로 비슷한 거리에 따라 비슷한 변화폭을 보이는 것으로 나타났다. 또한 세 번째 EOF는 경도에 따라 서해에서 동해쪽으로 변화하고 동해지역으로 갈수록 거리에 따른 변화율이 더 커짐을 알 수 있었다.

아울러 EOF 해석에 의해 나타난 Coefficient Time Series를 다변량 시계열 모형에 적용하여 SPI 시계열의 시간적 확장을 수행하였다. 시계열 모형을 이용하여 자료기간을 10000년으로 확장하였고 전국적인 가뭄심도를 판단하기 위해 전국 평균 지수를 이용하여 재현기간 별 최대심도를 결정할 수 있었다. 또한 재현기간에 대한 가뭄 사상의 공간적 분포를 파악하였으며 해석 결과 가뭄 심도의 분포는 중부내륙지방과 남부지방이 크게 나타남을 파악할 수 있었다. 이와 더불어 각 대권역의 댐 유효저수량과 농경지 면적을 이용하여 농업가뭄 대비능력을 판단하였는데 재현기간 30년 가뭄에 적절히 대비할 수 있는 이수능력을 갖춘 유역은 한강유역이 유일한 것으로 나타났다. 특히 영산강 유역은 큰 농경지 면적에 비해 저수량이 크게 부족한 것으로 파악되었고 강우량의 크기에 민감한 농업가뭄에 가장 취약할 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 국제수문개발계획(IHP) 6단계 3차년도 (2005)의 연구지원으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- 건설교통부 (2002). 2001년 가뭄기록조사 보고서.
- 경기개발연구원 (2004). 경기북부 농업가뭄현황 감시기법 연구.
- 신현석, 박무종 (1999). “신경망을 이용한 우리나라의 시공간적 가뭄의 해석.” 한국수자원학회논문집, 제 32권, 제1호, pp. 15-29.
- 유원희 (2000). 유출량 계열을 이용한 가뭄지수 산정, 석사학위논문, 인하대학교.
- 유철상, 김대하 (2006). “구형필스모형을 이용한 가뭄사상의 평가.” 한국수자원학회논문집, 제39권, 제4호, pp. 373-382.
- 유철상, 안재현, 류소라 (2004). “포아송과정을 이용한 가뭄의 공간분포 분석.” 한국수자원학회논문집, 제 37권, 제10호, pp. 813-822
- Chang, T. J. (1991). “Investigation of precipitation droughts by use of Kriging method.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 6, pp. 935-943.
- Chang, T. J. and Kleopa, X. A. (1991). “A proposed method for drought monitoring.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 27, No. 2, pp. 275-281.
- Chatfield, C. (2004). *The analysis of time series: An introduction*. 6th Edition. Chapter 13. Chapman & Hall/CRC
- Chiew, F.H.S., Piechota, T. C., Dracup, J. A., and McMahon, T. A. (1998). “El Nino/Southern oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought: Links and potential for forecasting.” *Journal of Hydrology*, Vol. 204, pp. 138-149.
- Chung, C. and Salas, H. D. (2000). “Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrologic processes.” *Journal of Hydrologic Engineering* ASCE, Vol. 5, No. 3, pp. 259-268.
- Clausen, B. and Pearson, C. P. (1995). “Regional frequency analysis of annual maximum streamflow

- drought." *Journal of Hydrology*, Vol. 173, pp. 111-130.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., and Paulson Jr., E. G. (1980). "On the definition of droughts." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 297-302.
- Fernandez, B. and Salas, J. D. (1999a). "Return period and risk of hydrologic events. I. Mathematical formulation." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 4, No. 4, pp. 297-307.
- Fernandez, B. and Salas, J. D. (1999b). "Return period and risk of hydrologic events. II. Applications." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 4, No. 4, pp. 308-316.
- Guttman, N. B. (1999). "Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 2, pp. 311-322.
- Henriques, A. G. and Santos, M. J. J. (1999). "Regional drought distribution model." *Physical, Chemical & Earth Sciences (B)*, Vol. 24, No. 1-2, pp. 19-22.
- Karl, T. R. (1983). "Some spatial characteristics of drought duration in the United States." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 22, pp. 1356-1366.
- Kim, K. Y. (1996). "Sensitivity of a linear detection procedure to the accuracy of empirical orthogonal functions." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. D18, pp. 23423-23432.
- Kim, K. Y. and North, G. R. (1993). "EOF analysis of surface temperature field in a stochastic climate model." *Journal of Climate*, Vol. 6, No. 9, pp. 1681-1690.
- Kutzbach, J. (1967) "Empirical Eigenvectors of Sea Level Pressure, Surface Temperature and Precipitation Complexes over North America." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, pp. 791-802.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." Preprints, *8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA, 179-184.
- Palmer, W. C. (1965) *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, U.S. Weather Bureau, Washington, D.C.
- Piechota, T. C. and Dracup, J. A. (1996) "Drought and regional hydrologic variation in the United States: Association with the El Nino-Southern Oscillation." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 5, pp. 1359-1373.
- Salas, J. D., Chung, C. and Fernandez, B. (2001) "Relating autocorrelations and crossing rates of continuous- and discrete-valued hydrologic processes." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 2, pp. 109-118.
- Shin, H. S. and Salas, J. D. (2000) "Regional drought analysis based on neural networks." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 2, pp. 145-155.
- Singh, S. V. and Kripalani, R. H. (1986). "Application of extended empirical orthogonal function analysis to interrelationships and sequential evolution of monsoon fields, *Monthly Weather Review*, Vol. 114, pp. 1603-1610.
- Tiao, G. C. and Box, G. E. P. (1981) "Modeling Multiple Time Series with Applications." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 76, No. 376, pp. 802-816.
- Wagner, D., Ruppecht, E., and Simmer, C. A. (1990). "A combination of microwave observations from satellites and an EOF analysis to retrieve vertical humidity profiles over the ocean." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 29, pp. 1142-1157.
- Wallace, J. M. and Dickinson, R. (1972). "Empirical Orthogonal Representation of Time Series in the Frequency Domain, Part I: Theoretical Consideration." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 11, pp. 887-892.
- Wang, D.-C. and Salas, J. D. (1989) "Stochastic modeling and generation of droughts." *Hydrologic Engineering 89 Proceedings*, ASCE.
- Whilite, D. A. and Glantz, M. H. (1985). "Understanding the drought phenomenon: The Role of definition." *Water International*, Vol. 10, pp. 111-120.
- Yevjevich, V. (1967) "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts." *Hydrology Papers No. 23*, Colorado State University, Fort Collins, USA.
- Yoo, C. and Kim, S. (2004). "EOF analysis of surface soil moisture field variability." *Advanced in Water Resources*, Vol. 27, pp. 831-842.

(논문번호:06-48/접수:2006.04.22/심사완료:2006.06.21)