

# 가뭄심도-지속기간-빈도해석을 통한 우리나라 가뭄의 공간분포 분석

## Analysis of Spatial Distribution of Droughts in Korea through Drought Severity-Duration-Frequency Analysis

김 대 하\* / 유 철 상\*\*

Kim, Dae Ha / Yoo, Chulsang

### Abstract

This study adopted the Rectangular Pulses Poisson Process Model for the drought severity-duration-frequency analysis to characterize the spatial pattern of drought over the Korean peninsula using the rainfall data of the 59 rain gauge stations. First of all, the drought severity in the southern part of the Korean peninsula was found to be generally high for any return period. This result is consistent for both cases with and without considering the overlap probability of rectangular pulses, which is also valid for longer durations. Comparison with those of observed drought frequency and maximum severity also showed that the result in this study has enough reliability.

**keywords** : Rectangular pulses Poisson process model, drought analysis, return period

### 요 지

본 연구에서는 구형펄스모형을 이용한 가뭄심도-지속기간-생기빈도 해석 방법을 적용하여 전국 59개 지점에 대한 분석을 수행하고, 이를 통해 남한전체 가뭄심도의 공간분포를 특성화하였다. 먼저 일정재현기간에 대해 가뭄심도는 대체적으로 남부지방에서 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 구형펄스의 중첩을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 모두에 대해 이러한 경향은 일관되게 나타났으며 지속기간이 증가하더라도 남부지방의 가뭄 심도는 타 지역에 비해 여전히 큰 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 관측된 가뭄의 발생횟수 및 최대심도와 비교되었는데, 이를 통해 본 연구에서의 해석결과가 어느 정도의 신뢰도를 가짐을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 구형펄스모형, 가뭄해석, 재현기간

### 1. 서 론

가뭄은 역사적으로 국가의 흥망성쇠를 좌우할 정도의 큰 재해로 여겨지고 있다. 미국의 해양대기청(NOAA)이 발표한 20세기 최대의 자연재해 10개 중에서도 가뭄재해 4개가 상위 5위 안에 포함되어 있을 정

도로 가뭄은 피해는 막대하다(경기개발연구원, 2004). 특히, 가뭄으로 인한 지속적인 하천유량의 감소는 수원을 강으로 하는 지역이나 강물을 수력발전에 이용하는 지역의 경우 인간의 생활 영위 자체에 큰 문제를 일으키며, 또한 하수의 하류가 되는 강의 경우 오염물질의 농도를 크게 증가시켜 동물의 서식지를 파괴하고 생태계

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

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

를 위협하기도 한다.

국내에도 최근 극심한 가뭄이 빈발하고 있으나 이에 대한 국가 차원의 대책 마련은 상당히 미흡하다고 할 수 있다. 가뭄은 불가피성과 반복성을 가진 자연현상인 것이 사실이지만 발생 전의 사전 대비계획과 발생 시 실효성 있는 가뭄 관리체계가 제대로 구축되지 못해 피해를 최소화시키지 못하는 재해이기도 하다. 따라서 가뭄 발생에 대한 대비를 위해 수자원의 공급 및 수요관리는 아주 중요한 일이라 할 수 있으나 우리나라의 경우 이에 대한 관리가 상당히 부족한 실정이다(한국수자원공사, 2002). 수자원은 한정된 자원이고 언제든지 공급 확대가 가능한 자원이 아님에도 불구하고 이에 대한 소홀한 관리는 잠재적으로 큰 경제적 피해를 일으키는 요인이라 할 수 있다.

가뭄의 대비를 위해 적절한 수자원의 공급 및 배분 관리에는 기본적으로 공간적인 가뭄심도의 파악이 매우 중요한 부분이 된다. 가뭄이 발생했을 때 공간적인 물 부족량의 분포가 어느 정도인지 모른다면 수자원 배분 자체가 불가능하기 때문이다. 가뭄심도의 공간적인 분석은 지역적인 물부족량의 파악에 큰 도움을 줄 수 있으며 따라서 이에 대한 연구는 국내외에서 오래전부터 이루어져 왔고 현재에도 많은 연구가 진행 중이다.

수자원 분야에서 공간분포에 가장 많이 사용되는 방법은 지점해석을 기본으로 한 공간적인 내삽방법이며 가뭄의 공간해석에도 많은 연구에 사용되었다. 내삽방법으로는 역거리법(inverse distance method), multi-quadratic polynomial, Kriging 방법 등이 대표적이며 이러한 방법들은 가뭄의 공간분석에 많이 사용되어져 왔다. 이들 중 Tase(1976)는 강수량 자료의 지역화를 위해 ploynomial 방법을 사용하였고 Chang(1991)은 월강수량을 이용한 가뭄해석을 위해 Kriging 방법을 사용한 바 있다. 또한 최근에는 신경망(neural network)을 이용한 비매개변수 공간분석 모형이 개발되어 가뭄의 공간 분석에 사용되기도 하였다(Shin and Salas, 2000; 신현석과 박무중, 1999).

이외에도 가뭄의 지역화를 위해 유역의 유출량자료를 이용하여 지역빈도해석을 수행한 경우(Clausen and Pearson, 1995)를 찾아볼 수 있으며 EOF 해석 및 Kriging 기법을 이용해 가뭄심도-면적-지속기간 곡선을 유도한 방법(경기개발연구원, 2004; 김보경 등, 2006)도 제시된 바 있다. 뿐만 아니라 포아송과정(Poisson Process)을 이용한 지점분석을 공간화한 가뭄공간분석(유철상 등, 2004), 확률분포를 이용한 통계적 가뭄해석(김경덕과 허준행, 2000) 등 가뭄의 공간적 분석에 사용된 다양한 방법들을 찾아볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 연구의 연장으로 유철상과 김대하(2006)가 제시한 구형펄스모형을 이용한 가뭄사상의 정량화 과정을 우리나라 59개 지점에 적용하여 남한 지역 가뭄심도의 공간적인 분포특성을 분석하였다. 특히, 구형펄스모형을 이용하는 방법은 다른 방법과는 달리 주어진 지속기간에 대한 평균 심도보다는 가뭄사상 전체를 평가할 수 있게 해 주는 특성이 있다. 가뭄의 정량화를 위해서는 가뭄지수의 하나인 SPI(Standardized Precipitation Index; McKee et al., 1993)를 이용하였다.

## 2. 구형펄스모형을 이용한 가뭄 심도-지속기간-빈도해석

수문분야에서 흔히 구형펄스모형이라고 불리는 모형은 Eagleson(1972), Rodriguez-Iturbe(1984) 등의 연구에서 그 출처를 살펴볼 수 있다. 이 모형은 이후 군집특성을 추가로 고려하는 여러 모형들(Entekhabi et al., 1989; Islam et al., 1990)로 발전되어 왔다. 이 모형은 그 구조가 간단하고 매개변수가 적어서 여러 관련 연구에 많이 이용되고 있기도 하다(Raines and Valdes, 1993). 이 모형의 구조 및 특성을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

구형펄스모형은 먼저 개개 사상  $\xi(t)$ 의 발생을 나타내는 과정  $N(t)$ 가 매개변수  $\lambda$ 인 포아송 과정을 따르는 것으로 가정한다. 사상의 발생시간  $T_n$ 과 더불어 강도  $i_r^{(n)}$ 와 지속기간  $t_r^{(n)}$ 이 한 쌍으로  $U_n = (i_r^{(n)}, t_r^{(n)})$ 으로 정의된다. 따라서  $U_n$ 은 시간  $T_n$ 에 발생한 사상의 기본 특성이 된다. 각 사상의 특성인  $U_n$ 은 서로 독립이며 동일하게 분포되어 있고(independent and identically distributed) 발생시간  $T_n$ 과도 역시 독립이다. 일반적으로 각 사상의 강도와 지속기간은 서로 독립인 무작위 변수로서 각각 Eqs. (1) and (2)와 같은 지수확률밀도함수를 따른다고 가정한다.

$$f(i_r) = \mu e^{-\mu i_r}, \mu > 0 \quad (1)$$

$$f(t_r) = \eta e^{-\eta t_r}, \eta > 0 \quad (2)$$

따라서, 펄스의 전체크기는 Eq. (3)과 같게 된다.

$$f(U) = f(i_r, t_r) = \mu\eta e^{-\mu i_r - \eta t_r} \quad (3)$$

이 때  $E[i_r] = 1/\mu$ 와  $E[t_r] = 1/\eta$ 는 각각 사상의 평균지속기간과 평균심도를 나타낸다. 이러한 모형

의 확률적 특성과 펄스의 집성시간을 고려하게 되면 Eqs. (4)~(6)과 같이 모형의 통계특성치를 유도할 수 있다.

$$E[Y] = T\lambda/\mu\eta \quad (4)$$

$$Var[Y] = \frac{4\lambda}{\eta^3\mu^2}(\eta T - 1 + e^{-\eta T}) \quad (5)$$

$$Cov[Y_1, Y_k] = \frac{2\lambda}{\eta^3\mu^2}(1 - e^{-\eta T})^2 e^{-\eta(k-2)T}, k \geq 2 \quad (6)$$

구형펄스모형의 매개변수  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\eta$ 의 추정치는 이렇게 이론적으로 유도된 모형의 통계치를 관측자료를 통해 얻은 통계치와 일치시킴으로써 수행될 수 있다.

유철상 등(2001)은 모형의 수학적 구조를 이용한 빈도해석을 수행하는 방법을 제시하였는데 펄스의 중첩을 고려하지 않는 경우와 고려하는 경우에 대해 각각 다음과 같은 결과 식을 유도하였다. 먼저 중첩이 고려되지 않는 경우, 재현기간이  $R$ 인 가뭄심도는 관측 사상의 평균지속기간( $1/\eta$ )이 분석대상 지속기간  $D$ 보다 작은 경우( $D > E[D_\lambda]$ )에 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \cdot \left[ \frac{F(d \leq E[D_\lambda])}{F(d \leq D)} \right] \quad (7)$$

여기서  $E[I_D]$ 는 지속기간  $D$ 를 고려한 가뭄 심도를,  $E[I_\lambda]$ 는 모형에 의해 구현되는 개개 사상의 심도의 기대치를 나타낸다. 아울러  $E[X]_R$ 은 재현기간  $R$ 에 해당하는, 즉  $prob[x \leq X] = 1 - 1/(R+1)$ 인  $X$ 의 기대값을 나타낸다. 만일  $D < E[D_\lambda]$ 인 경우에는 위 식의 우변 대괄호 안이 1이 되므로 Eq. (8)과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \quad (8)$$

다음으로 중첩이 고려되는 경우, 재현기간  $R$ , 지속기간  $D$ 에 해당하는 심도는  $D > E[D_\lambda]$ 인 경우에 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \cdot \left[ \frac{F(d \leq E[D_\lambda])}{F(d \leq D)} \right] \cdot [\alpha \cdot p_O \cdot R + 1] \quad (9)$$

반면에  $D < E[D_\lambda]$ 인 경우는 Eq. (10)과 같이 간단히 나타나게 된다.

$$E[I_D]_R = E[I_\lambda]_R \cdot D \cdot [p_O \cdot R + 1] \quad (10)$$

Eq. (10)에서 중첩확률  $p_O$ 는 구형펄스모형의 경우에 Eq. (11)과 같이 계산될 수 있다.

$$p_O = \int_{1/\lambda}^{\infty} f(t_r) dt_r = e^{-\frac{\eta}{\lambda}} \quad (11)$$

주어진 재현기간이  $R$ 인 경우 중첩이 될 수 있는 개별 사상의 기대값은  $p_O R$ 이 된다. 중첩이 발생하는 경우에 심도는 증가하나 그 정도  $\alpha$ 는 개별 사상의 평균 지속기간  $E[D_\lambda]$ 와 고려되는 지속기간  $D$ 에 영향을 받는다. 따라서  $\alpha$ 는  $D > E[D_\lambda]$ 의 경우에 Eq. (12)와 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha = \frac{F(d \leq E[D_\lambda])}{F(d \leq D)} \quad (12)$$

아울러  $D > E[D_\lambda]$ 인 경우  $\alpha$ 값은 1이 된다.

### 3. 자료 및 가뭄 심도-지속기간-빈도해석

#### 3.1 자료

유철상과 김대하(2006)가 제시한 방법으로 서울과 수원 지점을 포함한 전국 59개 지점에 대한 3개월 표준강수지수(Standard Precipitation Index; SPI)를 이용하여 가뭄심도-지속기간-생기빈도 해석을 실시하였다. 이들 지점의 위치는 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 각 지점의 자료기간은 서울지점의 경우 1908년 1월부터 2001년 12월까지 94년이고 수원지점의 경우 1965년 1월부터 2001년 12월의 37년이며 그 외 지점의 경우 1973년 4월부터 2001년 12월로 28년 9개월이다.

#### 3.2 가뭄 심도-지속기간-생기빈도 해석

먼저 모형 매개변수의 추정에 사용된 서울 및 수원 지점의 기본 통계특성은 Table 1과 같다. Eqs. (4)~(6)과 자료의 통계특성을 이용하여 추정된 서울 및 수원지점의 모형 매개변수는 Table 2와 같으며, 이를 토대로 2장에서 설명한 방법으로 수행한 가뭄 심도-지속기간-빈도해석 결과는 Table 3과 같다. 매개변수는 Table 3

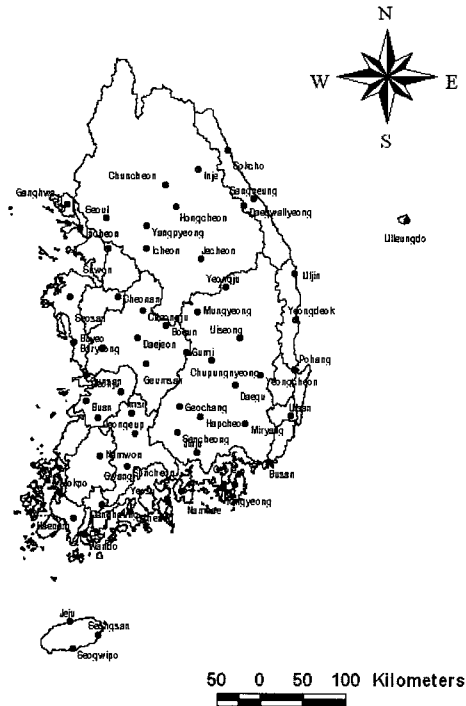


Fig. 1. Location of stations

에 나타난 가뭄 심도-지속기간-빈도해석 결과는 중첩을 고려하지 않은 결과와 고려한 결과를 비교할 수 있도록 하였다. 절단수준(Threshold)은 -1.0을 적용하였으며 이는 보통 가뭄의 기준이다(경기개발연구원, 2002). 절단수준이 적용된 시계열은 간헐성을 가지게 되며 따라서 구형펄스모형에 적용할 수 있게 된다(유철상과 김대하, 2006). 구형펄스모형의 심도는 지수분포를 사용하므로 심도는 양수로 표현되어야 하며 이에 따라 절대값을 사용하였다. 가뭄심도-지속시간-생기빈도 해석은 2장에서 설명한 재현기간에 따른 심도와 모형의 매개변수의 관계를 이용하여 수행하였다.

지속시간이 짧은 경우 아울러 재현기간이 긴 경우에 중첩의 효과가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 서울지점과 수원지점의 비교에서는 특히 재현기간 500년에 대해 확인한 중첩효과의 차이를 확인할 수 있는데, 이는 어느 정도 추정된 매개변수의 불확실성에 기인한다고 할 수 있을 것이다. 그러나 재현기간 100년 이내에서의 값에서는 두 경우 모두 무난한 정도로 받아들일 수 있는 수준으로 파악된다. 서울지점의 경우 지속시간 2개월과 3개월의 가뭄심도가 크게 차이 나지 않은 것을 확

Table 1. Basic statistics of 3 month-SPI at Seoul and Suwon (threshold=-1.0; from top, Seoul and Suwon)

Duration Statistics	1 month	2 months	3 months	4 months
Mean	0.082527	0.115538	0.142661	0.112760
Variance	0.068602	0.168867	0.326814	0.227971
Lag-1 Cov.	0.029073	0.048392	0.014787	0.017835
Lag-2 Cov.	0.010348	-0.000470	0.016046	0.016269

Duration Statistics	1 month	2 months	3 months	4 months
Mean	0.081847	0.110090	0.124189	0.086577
Variance	0.070940	0.153894	0.224189	0.158776
Lag-1 Cov.	0.019566	0.015442	-0.012264	-0.006821
Lag-2 Cov.	0.004106	-0.011587	0.002931	0.023967

Table 2. Parameters estimated for Seoul (top) and Suwon (bottom)

Duration Parameters	1 month	2 months	3 months	4 months
$\lambda$	0.189020	0.096665	0.046296	0.028747
$\mu$	1.558921	1.442060	1.510788	2.430239
$\eta$	1.469225	1.160360	0.644403	0.419618

Duration Parameters	1 month	2 months	3 months	4 months
$\lambda$	0.235216	0.131127	0.061579	0.024741
$\mu$	1.190856	1.600042	4.664311	12.699075
$\eta$	2.413265	2.977278	0.957020	0.295380

Table 3. Results of drought severity-duration-frequency analysis for Seoul (top) and Suwon (bottom)

Duration Return Period	1 month	2 months	3 months	4 months
2 years	-1.58(-1.58)	-1.53(-1.53)	-1.54(-1.54)	-1.35(-1.35)
5 years	-1.94(-1.96)	-1.87(-1.87)	-1.88(-1.88)	-1.57(-1.57)
10 years	-2.26(-2.32)	-2.17(-2.17)	-2.17(-2.17)	-1.77(-1.77)
20 years	-2.60(-2.74)	-2.48(-2.48)	-2.49(-2.49)	-1.97(-1.97)
30 years	-2.81(-3.03)	-2.67(-2.67)	-2.68(-2.68)	-2.10(-2.10)
50 years	-3.07(-3.50)	-2.91(-2.92)	-2.92(-2.92)	-2.26(-2.26)
80 years	-3.31(-4.08)	-3.14(-3.14)	-3.15(-3.15)	-2.41(-2.41)
100 years	-3.43(-4.44)	-3.24(-3.25)	-3.26(-3.26)	-2.48(-2.48)
200 years	-3.79(-6.11)	-3.58(-3.60)	-3.59(-3.60)	-2.70(-2.70)
300 years	-4.01(-7.74)	-3.77(-3.82)	-3.79(-3.80)	-2.82(-2.82)
500 years	-4.27(-11.06)	-4.02(-4.10)	-4.04(-4.05)	-2.99(-2.99)

( ) : cases of considering overlap probability

Duration Return Period	1 month	2 months	3 months	4 months
2 years	-1.64(-1.64)	-1.44(-1.44)	-1.16(-1.16)	-1.06(-1.06)
5 years	-2.04(-2.05)	-1.71(-1.71)	-1.26(-1.26)	-1.09(-1.09)
10 years	-2.40(-2.40)	-1.95(-1.95)	-1.34(-1.34)	-1.12(-1.12)
20 years	-2.77(-2.79)	-2.21(-2.21)	-1.44(-1.44)	-1.15(-1.15)
30 years	-3.00(-3.02)	-2.36(-2.36)	-1.49(-1.49)	-1.17(-1.17)
50 years	-3.29(-3.33)	-2.56(-2.56)	-1.56(-1.56)	-1.20(-1.20)
80 years	-3.56(-3.62)	-2.74(-2.74)	-1.63(-1.63)	-1.22(-1.22)
100 years	-3.69(-3.77)	-2.83(-2.83)	-1.66(-1.66)	-1.23(-1.23)
200 years	-4.09(-4.27)	-3.10(-3.10)	-1.76(-1.76)	-1.27(-1.27)
300 years	-4.33(-4.62)	-3.26(-3.26)	-1.82(-1.82)	-1.29(-1.29)
500 years	-4.62(-5.15)	-3.46(-3.46)	-1.89(-1.89)	-1.31(-1.31)

( ) : cases of considering overlap probability

인할 수 있는데 이 역시 추정된 매개변수의 불확실성에서 기인하는 것으로 판단된다. 실제로 지속기간이 증가할 경우 모형에서 발생확률( $\lambda$ )과 평균심도( $1/\mu$ )는 감소하고 평균지속시간( $1/\eta$ )는 증가해야 한다. 하지만 Table 2에서 볼 수 있듯이 서울지점의 경우 평균심도가 지속기간에 따라 일정하게 감소하지 않음을 알 수 있고 이에 따라 Table 3의 2개월과 3개월의 재현기간에 따른 심도의 변화가 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이는 지속시간에 따라 매개변수가 달라지는 모형의 단점과 추정되는 매개변수의 불확실성에서 기인한다고 할 수 있으며 지속시간에 상관없는 매개변수를 위해서는 군집효과가 고려된 좀 더 복잡한 모형을 사용해야 한다. 하지만 이러한 모형에 대한 빈도해석 방법이 정립된 상태가 아니므로 적용을 위해서는 또다른 연구가 필요하다.

#### 4. 가뭄의 공간분포

위와 같은 분석 결과를 바탕으로 남한지역의 재현기간에 따른 가뭄지수의 등치선(contour)을 작성하였다. 본 연구에서의 등치선은 크리깅(Kriging)기법을 이용하여 지점과 지점사이의 자료를 보간하여 나타낸 것이다.

크리깅기법은 통계학에 기반을 둔 공간 변량을 추정하는 방법으로 세 가지 주요 구성요소가 있다. 첫 번째 요소는 온도가 북서쪽 방향으로 갈수록 감소하는 것처럼 방향에 따라 변량이 증가하고 감소하는 공간적인 성향이다. 두 번째 요소는 국소지역에 대한 공간 자기상관, 즉, 인접한 지점은 비슷한 값을 가지는 경향을 의미한다. 세 번째는 임의적이고 추계학적인 변동성이다. 이 세 가지 요소가 수학적인 모형에서 결합하여 하나의 추정함수(estimation function)를 만들어낸다. 이 함수가

관측치들에 적용되어 관측지점 사이의 값들을 추정할 수 있게 해 준다. 자연과학 분야에서는 강수량, 기온, 일광량 등의 기후 자료에서부터 관정의 수위정보를 이용한 지하수위의 내삽, 수문학적 인자들의 추정 등 다양한 분야에서 응용되어 쓰여 지고 있다. 관련 연구로서 김형수 등(2000), 윤용남 등(2002), 이재형과 서승운(2003), 윤강훈과 서봉철(2004) 등을 참고할 수 있다.

대상지역의  $n$ 개의 관측값을 바탕으로 각 격자에서 미지값을 추정하기 위한 크리깅 이론의 식은 Eq. (13) 과 같다.

$$\begin{aligned} W_1\gamma(d_{1,1}) + W_2\gamma(d_{1,2}) + \dots + W_n\gamma(d_{1,n}) &= \gamma(d_{1,p}) \\ W_1\gamma(d_{2,1}) + W_2\gamma(d_{2,2}) + \dots + W_n\gamma(d_{2,n}) &= \gamma(d_{2,p}) \\ &\vdots \\ W_1\gamma(d_{n,1}) + W_2\gamma(d_{n,2}) + \dots + W_n\gamma(d_{n,n}) &= \gamma(d_{n,p}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $W_i$ 는 미지점  $p$ 를 구하기 위한 기지점에서의 가중치이고  $\gamma(d_{i,j})$ 는 기지점  $i, j$  사이의 거리  $d$ 에 관련된 등방성 반분산(semivariance)이며  $\gamma(d_{i,p})$ 는 기지점  $i$ 에서 구하고자하는 미지점  $p$ 까지의 거리에 대한 등방성 반분산이다. 해의 편의(bias)를 방지하기 위해 다음 Eq. (14)가 제약조건으로 사용된다.

$$W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1 \quad (14)$$

Eq. (13)와 Eq. (14)를 행렬로 나타내면 Eq. (15)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \gamma(d_{1,1}) & \gamma(d_{1,2}) & \dots & \gamma(d_{1,n}) & 1 \\ \gamma(d_{2,1}) & \gamma(d_{2,2}) & \dots & \gamma(d_{2,n}) & 1 \\ & & \vdots & & \\ \gamma(d_{n,1}) & \gamma(d_{n,2}) & \dots & \gamma(d_{n,n}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(d_{1,p}) \\ \gamma(d_{2,p}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{n,p}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Eq. (15)는  $AW = B$  형태의 연립방정식이므로  $W = A^{-1}B$ 로 가중치를 간단히 계산할 수 있고 따라서 미지값  $\hat{V}_p$ 의 추정은 Eq. (16)과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{V}_p = W_1 V_1 + W_2 V_2 + \dots + W_n V_n \quad (16)$$

여기서  $V_i$ 는 기지점  $i$ 에서의 관측값이다(경기개발연구원, 2004).

위에서 설명한 크리깅 기법을 이용하여 남한지역의 재현기간별 가뭄심도의 등치선도를 작성하였다. 등치선

도는 중첩을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 두 가지 모두에 대해 작성하여 비교하였다. 지속기간 1개월, 2개월, 3개월에 대해 작성된 등치선도는 Figs. 2 ~ 4와 같다.

지속기간 1개월에 대한 등치선의 경우 중첩확률이 가장 큰 지속기간이므로 중첩에 따른 가뭄심도의 공간 분포 차이가 가장 심한 것을 알 수 있다. 대체적으로 한 반도 남부 지역에서 심도가 큰 것으로 나타나며 재현기간 30년 이상일 경우 중첩을 고려하는 경우에는 남동부 지역보다 남서부지역의 가뭄심도가 더 커지는 현상을 보이고 있다. 하지만 남부지역의 가뭄이 중부지역보다 더 큰 것은 어느 빈도에서나 나타나는 특징이다. 재현기간 50년 이상, 중첩을 고려하는 경우부터 가뭄지수가 -5.8 이하인 경우가 나타나기 시작하는데 SPI는 정규분포를 따르게 되므로 이 정도로 작은 지수는 1개월 동안 비가 거의 오지 않았음을 의미하고 이보다 더 작은 수는 숫자적인 차이일 뿐 실제 현실적으로는 한 두 방울의 빗방울 차이밖에 되지 않는다고 할 수 있다.

지속기간 2개월의 경우 역시 남부지역에서의 가뭄심도가 크다고 할 수 있다. 하지만 2개월부터는 서울, 경기지역에서도 상당히 큰 가뭄심도가 나타난다. 이는 서울지점의 자료기간이 다른 지점에 비해 월등히 길어서 나타나는 현상이라 볼 수 있다. 지속기간 2개월부터는 펄스가 더해져서 평균이 되기 때문에 절단수준(-1.0) 이하로 나타나는 경우가 1개월보다 떨어지게 된다. 따라서 가뭄사상 자체가 줄어들게 되며 자료기간이 짧을수록 이런 현상은 더 커지게 된다. 그러므로 상대적으로 자료기간이 긴 서울지점의 경우에는 SDF 해석 결과가 다른 지점에 비해 크게 나타날 수 있는 것이다. 하지만 이러한 경향에도 불구하고 남부지역에 가뭄심도가 더 큰 것은 지속기간 1개월과 마찬가지로이다. 하지만 지속기간 1개월보다 중첩확률은 더 작아지게 되므로 중첩에 따른 결과의 차이는 1개월보다 더 작아진 것을 알 수 있다.

지속기간 3개월부터는 중첩의 고려 유무에 대한 결과의 차이가 현저히 감소하기 시작하며 이 차이는 재현기간 50년 이하에서는 거의 찾아볼 수 없다. 3개월의 결과 역시 남부지역의 가뭄심도가 큰 것을 알 수 있다. 지속기간 4개월은 3개월보다 더 중첩의 효과를 보기 힘들게 되며 가뭄심도의 공간적 편차가 상당히 줄어들 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 마찬가지로 4개월간 구형펄스의 평균이 절단수준을 넘는 경우가 거의 사라져 사상의 발생확률이 떨어져 나타나는 현상이라 할 수 있다.

하지만 이 등치선은 각 지점의 개개의 사상들이 독립

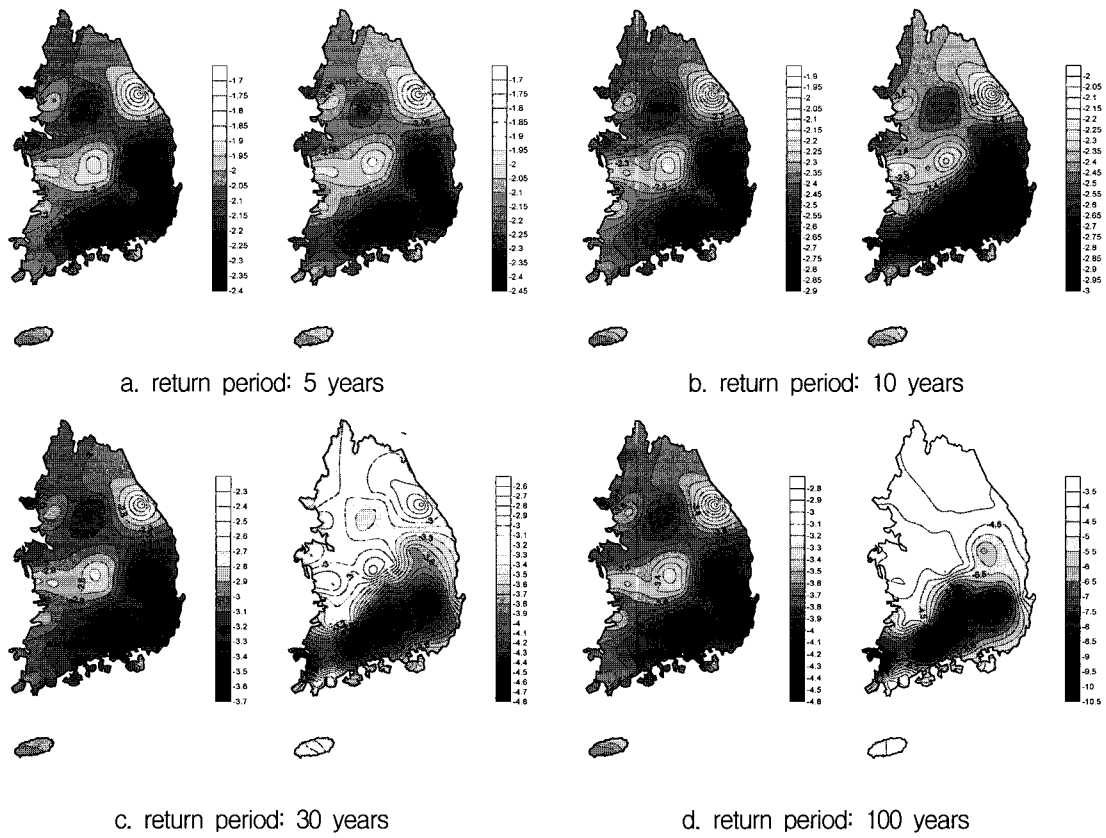


Fig. 2. Isopleth map of drought with one month duration for various return periods (left and right panels are those without and with considering the overlap probability, respectively)

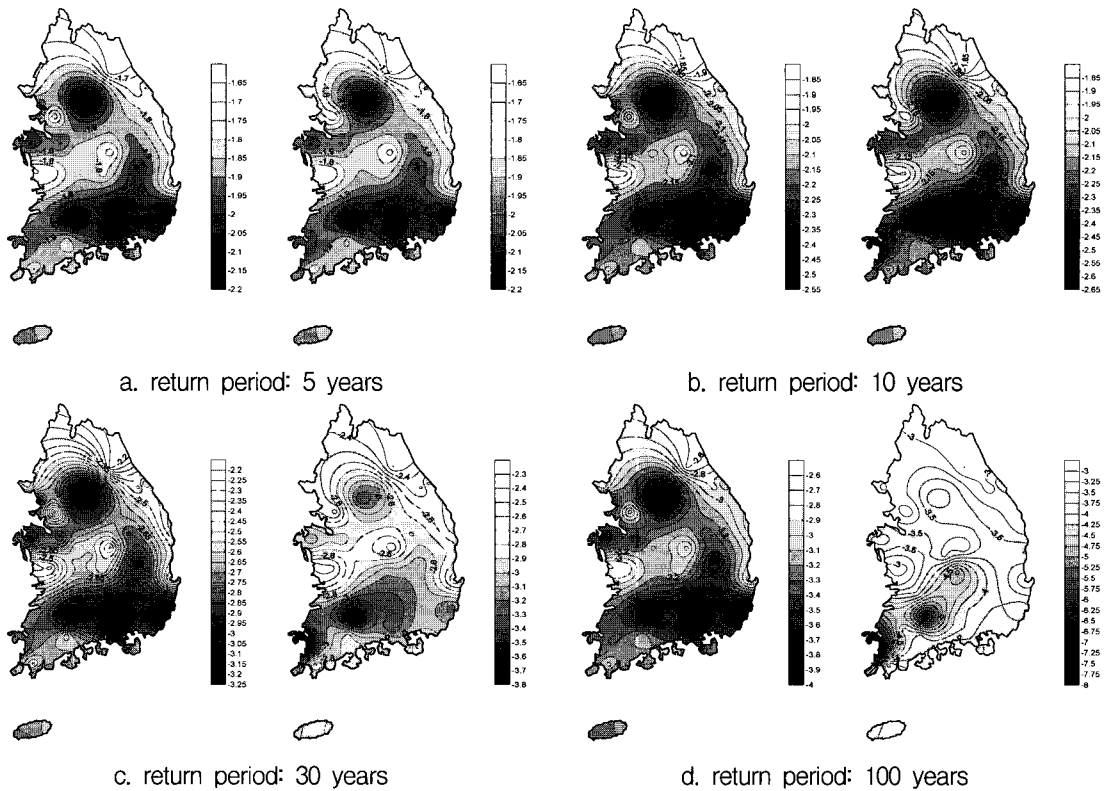


Fig. 3. Isopleth map of drought with two month duration for various return periods (left and right panels are those without and with considering the overlap probability, respectively)

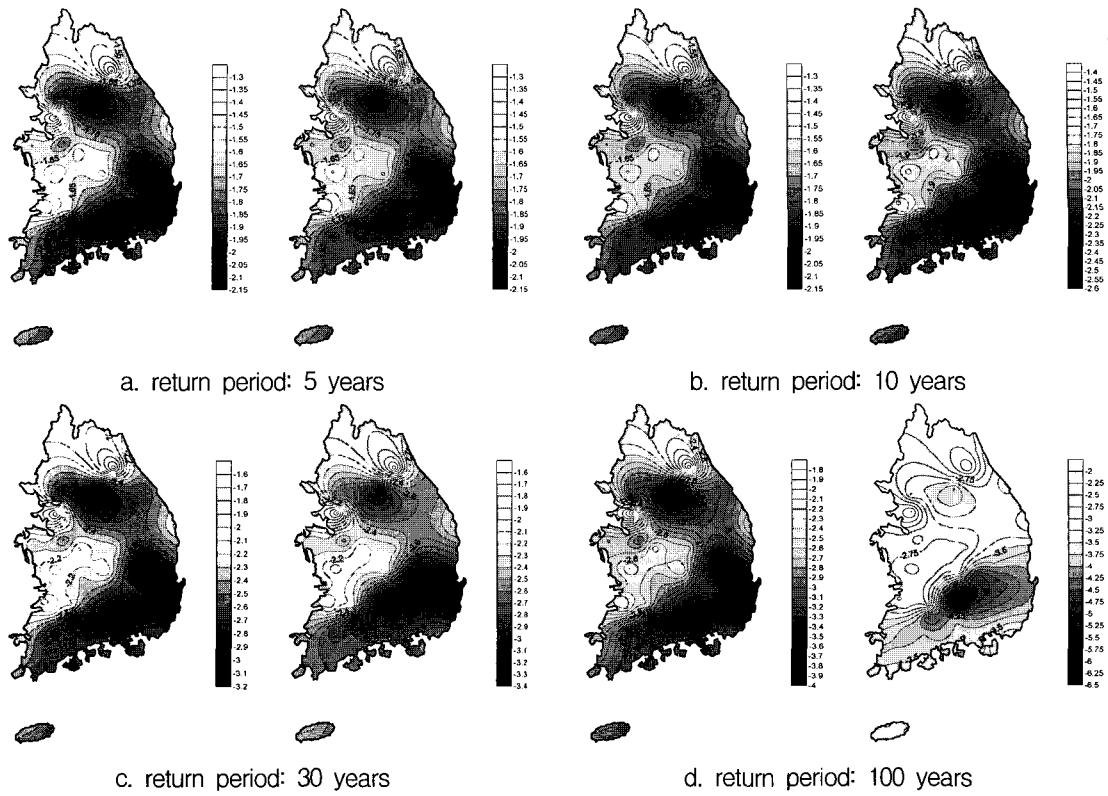


Fig. 4. Isoleth map of drought with three month duration for various return periods (left and right panels are those without and with considering the overlap probability, respectively)

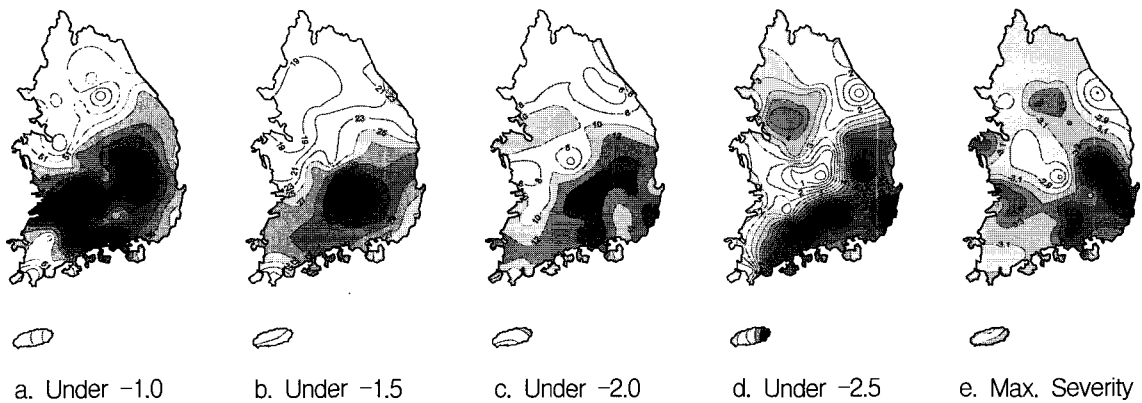


Fig. 5. Frequency of drought occurrences and maximum drought severity of SPI over the Korean Peninsula

적으로 발생하는 것을 가정하고 그린 것이므로 시간적인 패턴은 파악할 수 없다. 각 지점에서 이러한 극한 사상이 동시에 발생할 확률은 거의 0에 가깝다. 또한 해석에서 지속기간이 길어지면 사상의 발생이 점점 사라지게 되므로 매개변수를 추정할 수 없게 되는 것은 해석의 또 하나의 약점이 될 수 있다.

Table 4는 여러 절단수준에 대해 절단수준 이하의 경우가 나타난 횟수와 최대심도를 지점별로 나타낸 것이다. 이를 등치선으로 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5

에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 전체적으로 남부지방에서의 가뭄발생 횟수가 많고 최대심도가 큰 것은 해석결과가 실제 자료와 어느 정도의 일관성을 가지고 있음을 나타내는 결과로 이해할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 유철상과 김대하(2006)가 제시한 구형 펄스모형을 이용한 가뭄심도-지속기간-생기빈도 해석 방법을 적용하여 전국 59개 지점에 대한 분석을 수행하



Table 4. Frequency of drought occurrences and maximum drought severity of SPI at 59 stations over the Korean Peninsula

Station Number	Station Name	Frequency				Max. Severity	Station Number	Station Name	Frequency				Max. Severity
		Under -1.0	Under -1.5	Under -2.0	Under -2.5				Under -1.0	Under -1.5	Under -2.0	Under -2.5	
90	Sokcho	47	21	10	3	-3.009	211	Inje	50	21	5	2	-2.966
100	Daegwallyeong	54	19	4	0	-2.247	212	Hongcheon	43	19	7	4	-3.507
101	Chuncheon	52	18	8	2	-3.058	221	Jecheon	53	24	10	2	-3.316
105	Gangneung	52	26	9	1	-2.638	226	Boeun	56	22	5	2	-2.945
108	Seoul	46	18	8	4	-2.831	232	Cheonan	45	18	10	3	-2.733
112	Incheon	52	17	8	2	-2.901	235	Boryeong	55	20	6	2	-2.985
115	Ulleungdo	53	24	4	0	-2.463	236	Buyeo	55	20	6	2	-2.985
119	Suwon	48	18	11	5	-2.971	238	Geumsan	65	28	12	1	-3.039
129	Seosan	51	20	12	2	-3.647	243	Buan	65	28	12	1	-3.039
130	Uljin	53	21	9	5	-2.890	244	Imsil	60	28	12	2	-3.437
131	Cheongju	56	24	8	4	-2.841	245	Jeongeup	61	27	8	3	-3.545
133	Daejeon	53	28	10	1	-2.830	247	Namwon	61	30	13	6	-3.138
135	Chungnyeong	55	36	13	0	-2.426	256	Suncheon	61	30	13	6	-3.138
138	Pohang	55	28	10	5	-3.651	260	Jangheung	53	26	12	6	-2.901
140	Gunsan	55	23	10	2	-3.872	261	Haenam	45	21	9	1	-3.080
143	Daegu	61	34	12	5	-3.222	262	Goheung	48	28	12	5	-3.176
146	Jeonju	60	27	8	3	-3.649	265	Seongsan	49	20	8	1	-3.223
152	Ulsan	52	25	16	7	-3.767	272	Yeongju	58	27	13	5	-3.293
156	Gwangju	50	29	11	4	-3.197	273	Mungyeong	60	25	10	1	-3.121
159	Busan	54	26	13	5	-3.354	277	Yeongdeok	52	31	14	4	-3.017
162	Tongyeong	57	27	13	4	-3.626	278	Uiseong	63	29	15	7	-4.436
165	Mokpo	53	27	14	2	-3.058	279	Gumi	62	33	16	3	-3.373
168	Yeosu	57	29	11	5	-3.093	281	Yeongcheon	60	30	15	5	-4.080
170	Wando	48	20	9	3	-3.237	284	Geochang	62	36	18	6	-3.495
184	Jeju	45	23	8	3	-2.759	285	Hapcheon	53	34	15	8	-3.893
189	Seogwipo	45	20	5	3	-3.253	288	Miryang	58	31	10	5	-3.576
192	Jinju	65	30	18	5	-3.809	289	Sancheong	55	31	12	7	-3.212
201	Ganghwa	47	20	6	3	-3.051	294	Geoje	52	23	8	3	-2.946
202	Yangpyeong	50	19	10	4	-3.553	295	Namhae	58	29	11	4	-3.228
203	Icheon	49	22	12	5	-3.013							

고, 이를 통해 남한전체 가뭄심도의 공간분포를 해석하였다. 먼저, 일정재현기간에 대해 가뭄심도는 대체적으로 남부지방에서 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 구형펄스의 중첩을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 모두에 대해 이러한 경향은 일관되게 나타났으며 지속기간이 증가하더라도 남부지방의 가뭄 심도는 타지역에 비해 여전히 큰 것으로 나타났다. 중첩을 고려하는 경우와 고려하지 않은 경우의 차이는 지속기간이 짧을수록 큰데 이는 지속기간의 증가보다 사상의 발생확률의 감소가 훨씬 커서 중첩확률이 지속기간이 증가할수록 감소하기 때문으로 파악되었다.

재현기간 50년에 중첩을 고려할 경우 심도의 크기가 -5.8 이하인 경우가 발생하기 시작하는데 이정도 크기의 심도는 SPI가 정규분포를 따른다는 것을 고려했을 때 1개월 동안 비가 거의 오지 않았음을 의미한다. 이보다 더 작은 지수의 경우 빗방울 한 두 방울의 차이 정도일 뿐 물리적으로는 거의 같은 의미의 지수라 할 수 있다. 마지막으로 해석결과의 신뢰도를 파악하기 위

해 절단수준에 대한 가뭄의 발생횟수를 각 지점별로 살펴보고자 하며 발생횟수의 분포 역시 대체적으로 남부지방에서 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 본 연구에서의 해석결과가 어느 정도의 신뢰도를 가짐을 나타낸다.

본 연구에서 수행한 가뭄심도 공간분포 해석은 시간적인 패턴을 전혀 고려하지 않았으므로 각 재현기간에 대한 가뭄이 전국적으로 동시에 발생할 확률은 거의 없다. 하지만 본 연구에서의 분석결과는 가뭄이 발생했을 시 각 지점별로 어느 정도 크기를 갖게 되는지를 파악하는데 이용될 수 있으며, 가뭄지수는 강수부족량으로 곧바로 연결될 수 있으므로 어느 정도의 물이 부족할 것인지 예측하는데 도움이 될 수 있다. 본 연구에서 사용된 3개월 SPI의 경우 짧은 지속기간의 SPI이며 농업가뭄을 대표할 수 있다. 농업가뭄의 경우 강수량 부족에 가장 민감한 가뭄이라 할 수 있으며 따라서 해석결과와 직접적인 상관성을 가질 수 있을 것으로 보인다. 가뭄대책의 마련을 위해서는 용수수요량 등 다른 변수

를 고려해야 하므로 적절한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

- 경기개발연구원 (2002). **경기도지역을 중심으로한 가 물의 재현 및 지속특성 분석.**
- 경기개발연구원 (2004). **경기북부 농업가뭄현황 감시 기법 연구.**
- 김경덕, 허준행 (2000). “크기 및 기간 차원에 의한 한 강유역의 가뭄해석.” **대한토목학회논문집**, 제20권, 제6-B호, pp. 774-781.
- 김보경, 김상단, 이재수, 김형수 (2006). “가뭄의 시공간 적 분포 특성 연구: 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기 간 곡선의 작성.” **대한토목학회논문집**, 제26권, 제 1B호, pp. 69-78.
- 김형수, 문장원, 김재형, 김중훈 (2000). “한강유역의 가 뭄경향에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 제33 권, 제4호, pp. 437-446.
- 신현석, 박무중 (1999). “신경망을 이용한 우리나라의 시공간적 가뭄의 해석.” **한국수자원학회논문집**, 제 32권, 제1호, pp. 15-29.
- 이재형, 서승운 (2003). “섬진강댐 유역의 강우관측망 개량에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제2호, pp. 143-152.
- 유철상, 김남원, 정광식 (2001). “점 강우모형과 강우강 도-지속기간-생기빈도 해석.” **한국수자원학회논문 집**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 577-586.
- 유철상, 김대하 (2006). “구형펄스모형을 이용한 가뭄사 상의 평가.” **한국수자원학회논문집**, 제39권, 제4호, pp. 373-382.
- 유철상, 안재현, 류소라 (2004). “포아송과정을 이용한 가뭄의 공간분포 분석.” **한국수자원학회논문집**, 제 37권, 제10호, pp. 813-822.
- 윤강훈, 서봉철 (2004). “크리강기법을 이용한 낙동강 유역의 홍수강우의 공간해석 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 제37권, 제3호, pp. 233-240.
- 윤용남, 김중훈, 유철상, 김상단 (2002). “공간 분포된 강우를 사용한 유출 매개변수 추정 및 강우오차가 유출계산에 미치는 영향분석.” **한국수자원학회논문 집**, 제35권, 제1호, pp. 1-12.

- 한국수자원공사 (2002). **가뭄관리 종합대책 수립연구.**
- Chang, T.J. (1991). “Investigation of precipitation drought by use of Kriging method.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 117, No. 6, pp. 132-343.
- Clausen, B. and Pearson, C.P. (1995). “Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought.” *Journal of Hydrology*, Vol. 173, pp. 111-130.
- Eagleson, P.S. (1972). “Dynamics of flood frequency.” *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 878-898.
- Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., and Eagleson, P.S. (1989). “Probabilistic representation of the temporal rainfall by a modified Neymann-Scott rectangular pulses model: Parameter estimation and validation.” *Water Resources Research*, Vol.25, No.2, pp. 295-302.
- Islam, S., Entekhabi, D., and Bras, R.L. (1990). “Parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses model of rainfall.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. D3, pp. 2093-2100.
- 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.
- Raines, T.H., and Valdes, J.B. (1993). “Estimation of flood frequencies for ungaged catchments.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1138-1154.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V.K., Waymire, E. (1984). “Scale Considerations in the Modeling of Temporal Rainfall.” *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, pp. 1611-1619.
- 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.
- Tase, N. (1976). *Area-deficit-intensity characteristics of drought*. Ph.D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.

(논문번호:06-47/접수:2006.04.22/심사완료:2006.08.03)