

# 기후변동을 고려한 조건부 GEV 분포를 이용한 비정상성 빈도분석

김 병 식\*<sup>+</sup> / 이 정 기\*\* / 김 형 수\*\*\* / 이 진 원\*\*\*\*

## Non-stationary Frequency Analysis with Climate Variability using Conditional Generalized Extreme Value Distribution

Byung Sik, Kim\*<sup>+</sup> / Jung Ki, Lee\*\* / Hung Soo, Kim\*\*\* / Jin Won, Lee\*\*\*\*

**요약** : 전통적 수문빈도분석의 기본가정은 기후와 수문사상이 정상성이라는 것으로 즉, 분포형의 매개변수들이 시간에 따라 불변이라는 것이다. 댐, 제방, 운하, 교량 등 수공 관련 기간시설물을 계획하고 설계할 때는 과거 상황을 이해하고 미래에도 그 상황이 유지될 것이라는 것을 근거로 한다. 그러나 현실은 기본가정과는 달리 수문자료들은 비정상성을 지니고 있으며 수자원관리자들에 의해 항상 기간시설물을 계획하고 설계 할 때 비정상성을 다루고자 끊임없이 노력해 왔다. 본 논문에서는 비정상성 수문빈도분석기법을 소개하고, 조건부 Generalized Extreme Value(GEV) 분포를 이용하여 비정상성 빈도분석을 실시하였다. 본 논문에서는 6개 기상관측소지점의 24시간 연최고치 강우량을 대상으로 비정상성 빈도분석을 실시하였으며 최우도법(Maximum Likelihood)을 사용하여 GEV 분포형의 매개변수를 추정하였다. 그 결과 비정상성 GEV 분포가 확률 강우량을 산정하는데 있어 적합함을 확인 할 수 있었다. 또한 ENSO(EI Nino Southern Oscillation)를 나타내는 지수인 SOI(Southern Oscillation Index)를 이용하여 기후변동 고려한 비정상성 빈도분석을 실시하였다.

**핵심용어** : 비정상성, 빈도분석, GEV 분포, 기후변화 및 변동, ENSO

**Abstract** : An underlying assumption of traditional hydrologic frequency analysis is that climate, and hence the frequency of hydrologic events, is stationary, or unchanging over time. Under stationary conditions, the distribution of the variable of interest is invariant to temporal translation. Water resources infrastructure planning and design, such as dams, levees, canals, bridges, and culverts, relies on an understanding of past conditions and projection of future conditions. But, Water managers have always known our world is inherently non-stationary, and they routinely deal with this in management and planning. The aim of this paper is to give a brief introduction to non-stationary extreme value analysis methods. In this paper, a non-stationary hydrologic frequency analysis approach is introduced in order to determine probability rainfall consider changing climate. The non-stationary statistical approach is based on the conditional Generalized Extreme Value(GEV) distribution and Maximum Likelihood parameter estimation. This method are applied to the annual maximum 24 hours-rainfall. The results show that the non-stationary GEV approach is suitable for determining probability rainfall for changing climate, such a trend, Moreover, Non-stationary frequency analyzed using SOI(Southern Oscillation Index) of ENSO(EI Nino Southern Oscillation).

**Keywords** : non-stationary frequency analysis, GEV distribution, changing climate, ENSO

+ Corresponding author : hydrokbs@kangwon.ac.kr

\* 정희원 · 교신저자 · 강원대학교 도시환경방재전공 · 조교수 · 공학박사 · E-mail : hydrokbs@kangwon.ac.kr

\*\* 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 · 박사과정 · 공학석사 · E-mail : jungki5425@hanmail.net

\*\*\* 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 · 교수 · 공학박사 · E-mail : sookim@inha.ac.kr

\*\*\*\* 비희원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 하천해안항만연구실 · 연구위원 · 공학박사 · E-mail : jwlee@kict.re.kr

## 1. 서 론

기후변화와 변동으로 인해 기온, 강수, 증발산 등의 수문순환 요소들이 과거와는 다르게 빠른 속도로 변하고 있다. 이에 따라 기후변화가 수문학적 극한사상에 미치는 잠재적 영향은 지난 수십년간 수자원공학 관련 분야에 많은 관심을 이끌어 왔으며 많은 선행 연구들은 극한 수문사상의 규모 및 빈도가 증가한다는 결과를 보여 주었다(Kite, 1993; Boorman and Sefton, 1997; Panagoulia and Dimou, 1997; Gellens and Roulin, 1998; Mirza et al., 1998). 또한 최근 들어서 설계규모를 넘어서는 극한강우사상의 발생은 다양한 수공구조물들과 물 관련 방재체계를 파괴하는 원인이 되고 있기 때문에 극한강우사상에 대한 현재의 시공간적 특성을 파악하는 것과 미래의 기후변화 하에서 극한사상이 어떻게 변화하고 수공구조물의 수명기간동안 수문변수의 분포형이 어떻게 변화할지를 이해하기 위한 연구가 진행되어져 왔다(Fowler and Kilsby, 2003; Wang and Yang, 2005; Griffis and Stedinger, 2007).

전통적인 수문통계분석에서는 정상성(Stationarity)이라는 가정 하에 극한강우정보를 이용하여 수공시설물의 빈도별 설계규모를 추정하였으나 기후변화로 인해 극한강우의 특성이 변화하고 있기 때문에 극한강우의 변화를 파악하고 정상성의 가정을 벗어난 수문학적 통계분석의 적용이 매우 중요하게 되었다. 특히, 극한강우의 수문학적 빈도분석을 통한 극한사상의 통계학적 확률 추정은 재해위험관리, 국토계획, 수공구조물의 설계 등 여러 분야에서 반드시 필요하며 홍수 등과 같은 방재정책의 장기적 계획에 있어서도 매우 중요한 항목이다.

기존의 수문학적 빈도분석기법은 극치수문자료가 IID(independent and identically-distributed) 조건을 갖는 독립사상이라고 가정하고 최적 확률 분포형을 이용하여 재현기간에 대응하는 확률수문량을 산정하게 되는데 이를 극한치 이론(Extreme Value Theory, EVT)이라고 한다. 지금까지 극한

치 이론은 극한강우의 확률분포를 추정하는데 있어 완벽한 도구이며 빈도별 설계규모를 결정하기 위해 널리 이용되어 왔다(Hershfield, 1973; Coles, 2001; Katz 등, 2002). 그러나 전통적 극한치 이론은 정상성(Stationarity)이라는 기본 가정을 전제로 하고 있기 때문에 기후변화 및 변동에 의한 외부변화 요인을 반영하기에는 한계가 있음이 지적되어져 왔다. 통계학적 의미에서 정상성이란 평균과 분산과 같은 매개변수가 시간 불변이라는 것이며 극한사상을 표현하는 확률분포형의 매개변수들이 시간의 변화에 상관없는 상수로 표현된다는 것을 의미한다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 실제 강우사상은 기후변화로 인해 점차적으로 확률분포형의 매개변수나 그 분포 자체가 시간에 따라 변화하기 때문에 기존의 정상성 가정에 근거한 빈도분석과는 다른 비정상성(Non-Stationarity)을 고려할 수 있는 새로운 빈도분석 방법이 요구된다.

국내외의 비정상성 빈도분석과 관련된 연구동향을 보면 Stedinger와 Crainiceanu (2001)은 비정상성을 고려한 연 최대 홍수량의 추정을 위해 평균의 선형추세와 혼합된 이변수 대수정규분포모형과 대수정규 ARMA모형을 제안하였다. Strupczewski 등 (2001)은 확률밀도함수의 매개변수를 시간의 변수로 해석하도록 제안하였으며 Cunderlik와 Burn(2003)은 지역 홍수빈도해석을 위하여 2차 비정상성 접근법을 제안하였다. He 등 (2006)은 일정 기간을 이동하면서 산정한 매개변수에 비선형 회귀식을 적용하였지만, 이는 과거 자료에 비해 최근 자료의 증가가 클 경우 비정상적으로 큰 확률강우량의 변화를 예측하게 된다는 단점을 가지고 있다. 권영문 등(2009)에서는 He 등 (2006)에서 제안한 방법의 문제점을 해결하기 위하여 빈도분석의 경우 전 자료기간에 매년 강우 자료가 추가 되면서 확률강우량 값이 변하게 된다는 점을 밝히고, 강우자료의 초기 20년을 기준으로 1년씩 자료를 추가 하면서 변화하는 자료의 평균과 매개변수 간 관계를 이용하여 목표연도 확률강우량을 추정하였다. 권영문 등(2009)은 기

상청 산하 56개 강우관측소의 강우자료를 분석하여 증가 경향성을 가지는 관측지점에 대하여 그 경향성을 반영함으로써 설계목표년도의 확률강우량을 산정하는 방법을 제안하였다. 권현한과 김병식(2009)은 Markov Chain 모형의 매개변수인 천이확률과 확률분포형의 매개변수 등을 연결함수(link function)를 통해 외부인자와 연동하도록 하였으며 정준상관분석을 통해 매개변수를 추정하였다. 이창환 등(2010)은 Gumbel 분포의 평균에 경향성을 반영하여 확률강우량을 평가하였으며 이정주 등(2010)은 POT자료를 GEV 분포를 이용하여 비정상빈도분석을 한 바 있다. 최근에서는 극한사상의 경향성, 주기성을 고려할 수 있는 비정상성 극한치 이론(Non-Stationary Extreme Value theory; NSEV)에 대한 연구가 진행되어져 오고 있다(Smith 1989; Karl and Knight, 1998; Groisman 등 1999).

본 논문에서는 장기간의 자료를 보유하고 있는 강릉, 서울, 대구, 부산, 광주, 인천 관측소의 24시간 연 극한치 강우자료를 대상으로 시간에 따른 경향성과 외부상관기상변수로서 ENSO(El Nino Southern Oscillation)을 이용하여 비정상성 빈도분석을 실시하였다.

## 2. 기후변화와 극한사상

기후변화라는 요소는 과거에 발생하지 않았던

기간에 강우가 발생하고 집중되거나 지속시간이 길어지는 기상이변 현상 즉, 비정상적인 기후로 설명되는 극한기상사상의 출현을 유발하기도 한다. 극한기상사상은 기간과 양적인 측면에서 해석할 수 있다. IPCC는 4차 보고서(AR4)에서 극한기상사상이란 특정 기간을 벗어나 발생한 사상들의 평균이라 하였으며 이 자체를 극한이라고 표현하여 기간적인 측면으로 설명하였다. Ganguly 등(2007)은 통계적 특성 분포를 고려할 때 거의 발생하지 않았던(rare) 사상으로 보통 10th이나 90th 퍼센타일 또는 그보다 더 발생하지 않는 경우로 정의한다고 하여 양적인 측면으로 표현한 바 있다. 여러 가지 기후 변수들로 인하여 현재와 미래의 기상현상은 변화하게 되고 이는 곧 현재와는 대별되는 극한 사상의 크기와 발생이 두드러지는 것으로 설명할 수 있다. 또한 이를 가시화하기 위하여 Figure. 1과 같이 현재와 미래의 확률분포형으로 도시하였을 때 현재와는 일치하지 않고 과거 극한강우와 같은 특정 사상의 크기와 위치는 변화하게 된다(Klein Tank, A.M.G.와 Konneb, G. P., 2003; Griffith, G.M. 등, 2005). 예를 들어 1990년대에 10이라는 크기를 갖는 극한강우가 5회만큼 발생하였다면 미래에는 10이라는 크기의 강우는 20회 이상으로 빈번하게 발생하여 극한강우로 표현하기 어렵게 된다. 이는 곧 미래 극한강우는 1990년대 정의하였던 10이라는 크기를 넘는 20 이상의 크기가 될 수 있음을 의미한다.

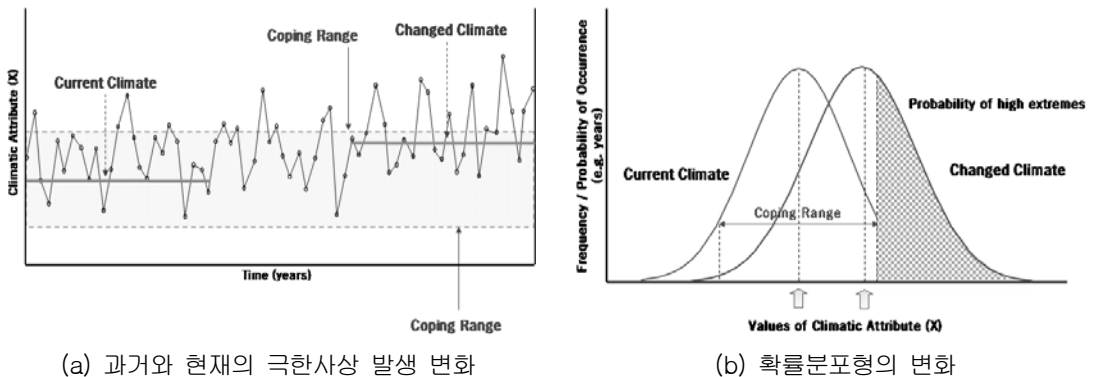


Figure 1. 과거와 현재의 극한사상 발생 및 확률분포형의 변화

### 3. 정상성과 비정상성 빈도분석

일반적으로 극한사상을 분석하기 위해서는 두 종류의 시계열자료를 이용하는데 첫 번째 기법은 지속시간별 연최고치(Series of Annual Maximum, SAM)를 이용하는 것이며 두 번째 기법은 특정 임계치 이상의 값을 이용하는 POT(Peak Over Threshold)방법이다. POT 방법은 많은 관심을 가지고 있으나 임계치 설정의 어려움과 자료들 간의 자기상관성 때문에 널리 이용되고 있지 않다. 연최고치 계열을 이용하는 정상성 빈도분석 기법은 현재까지 가장 보편적으로 이용되는 기법으로 일반적으로 GEV 확률분포를 통해 극한강우를 통계적으로 표현한다(Coles, 2001). GEV 확률분포의 누가밀도함수는 식 (1)과 같으며 재현기간(T)에 대한 극한강우는 식 (2)와 같이 추정할 수 있다(Coles, 2001).

$$F(z) = \exp\left\{-\left[1+\xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{[1-F(z)]} \quad (2)$$

여기서,  $\mu$ ,  $\sigma$  그리고  $\xi$ 는 위치매개변수(location parameter), 규모매개변수(scale parameter), 형상매개변수(shape parameter)를 의미한다.

재현기간은 z보다 클 가능성이 있는 연최고치 값의 평균시간으로서 정상성(stationarity) 기반에서는 재현기간이 시간에 독립적이라는 것을 의미하며 이 개념은 전통적으로 특정 수공시설물의 사용수준(service level)을 평가하기 위해 이용된다. 가령, 100년 빈도 재현기간으로 되어 있다는 것은 평균적으로 100년에 한번 발생할 수 있는 사상에 견딜 수 있도록 구조물이 설계되어 있다는 것을 의미하는 것이다. 그러나 비정상성 기반에서는 극한강우의 발생빈도가 변한다는 뜻으로 더 이상 재현기간이 상수가 아니라 시간에 따라 변한다는 것을 의미한다. 기후변화는 과거에 발생했던

극한사상의 경향을 현격히 벗어나 연 최고치(Series of Annual Maximum, SAM)가 더 이상 정상성이라는 가정을 만족하지 못하게 할 것이다. 비정상성은 확률분포의 1차 모멘트, 2차 모멘트 등이 모두 시간에 따라 변하는 경우로 단순화하여 표현할 수 있다.

본 논문에서는 조건부 GEV 확률분포를 이용하여 비정상성 빈도분석을 실시하였으며 식 (3)과 같은 형태로 표현된다.

$$F(z,t) = \exp\left\{-\left[1+\xi(t)\left(\frac{z-\mu(t)}{\sigma(t)}\right)\right]^{-1/\xi(t)}\right\} \quad (3)$$

여기서, z는 독립변수(자료),  $\mu(t)$ 는 시간에 종속된 위치매개변수,  $\sigma(t)$ 는 시간에 종속된 규모변수,  $\xi(t)$ 는 시간에 종속된 형상매개변수

GEV 확률분포형의 시간 종속된 매개변수들은 비매개변수적 기법 또는 매개변수적 기법을 통해 추정된다. 그러나 시간의 함수로서 재현수준(Return Level)을 추정하는데 있어서는 비매개변수적 방법으로는 모형의 변수들을 외삽 추정을 할 수 없기 때문에 매개변수적 기법을 이용하여 조건부 GEV 확률분포형의 변수를 추정한다. 시간 종속된 매개변수들을 추정하기 위해서는 여러 모형들이 이용될 수 있으나 외삽의 어려움과 복잡함을 피하기 위해 비교적 간단한 선형 및 지수모형을 이용할 것을 권하고 있다(Coles, 2001; Mudersbach 등, 2010). 본 논문에서는 위치매개변수와 규모매개변수 각각에 대하여 선형모형을 이용하여 외부설명 변수와 경향성을 반영하였다. 시간에 종속된 위치매개변수  $\mu(t)$ 와 시간에 종속된 규모변수  $\sigma(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 경향성을 고려한 경우

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (4)$$

$$\log \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \quad (5)$$

$$\xi(t) = \xi \quad (6)$$

여기서, 시간모형의 매개변수  $\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1$  그리고  $\xi$ 는 관측 자료로부터 추정된다.

- 외부설명변수를 고려한 경우

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 x(t) \tag{7}$$

$$\log\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 x(t) \tag{8}$$

$$\xi(t) = \xi \tag{9}$$

여기서,  $x(t)$ 는 Southern Oscillation Index

## 4. 적용

### 4.1 대상관측소 및 자료

본 논문에서는 비교적 장기간(40년 이상)의 자료를 보유하고 있는 강릉, 서울, 대구, 부산, 광주, 인천 관측소의 24시간 연최고치 강우자료를 대상으로 강우의 경향성 분석을 통해 비정상성 여부를 검토하였으며 조건부 GEV 확률분포를 이용하여 비정상성 빈도분석을 실시하여 기존의 전통적 방

법에 따른 빈도분석 결과 비교·분석하였다. Table. 1과 Figure. 2은 관측소의 위치와 현황을 나타낸 것이며 Station Code는 기상청 관측소 코드를 의미한다.

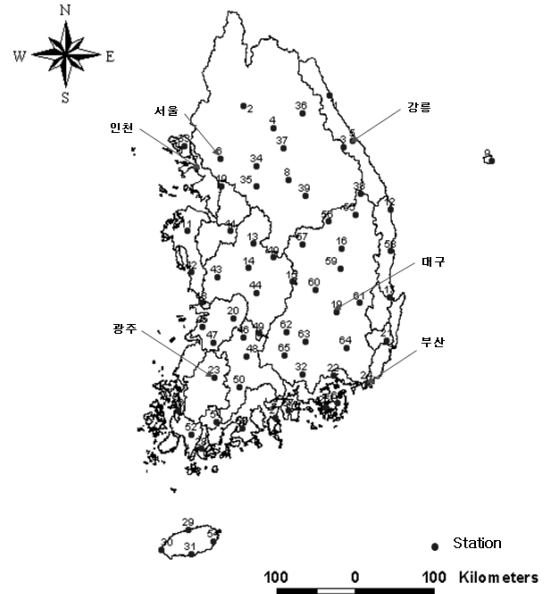


Figure 2. 강우관측소의 위치

Table 1. 관측소 위치

Station Code	Station Name	Location(degree)	
		Latitude	Longitude
105	강릉	37.75	128.88
108	서울	37.57	126.95
112	인천	37.48	126.62
143	대구	35.88	128.62
156	광주	35.17	126.88
159	부산	35.10	129.03

### 4.2 극치강우시계열 자료의 빈도분석

본 논문에서의 연최고치 강수량계열은 시단위 강수량자료를 이용하여 24시간 지속시간에 대한 이 동합계를 통해 연중 가장 큰 24시간지속 강수량 계열을 추출하였다. 선형 경향성 분석 결과 부산

을 제외한 모든 관측소에서 증가경향을 보이는 것으로 나타났으며 특히, 강릉과 인천 지점의 경향성이 가장 큰 것으로 분석되었다. Figure. 3은 각 관측소별 연최고치 강수량의 시계열과 경향성을 나타낸 것이다.

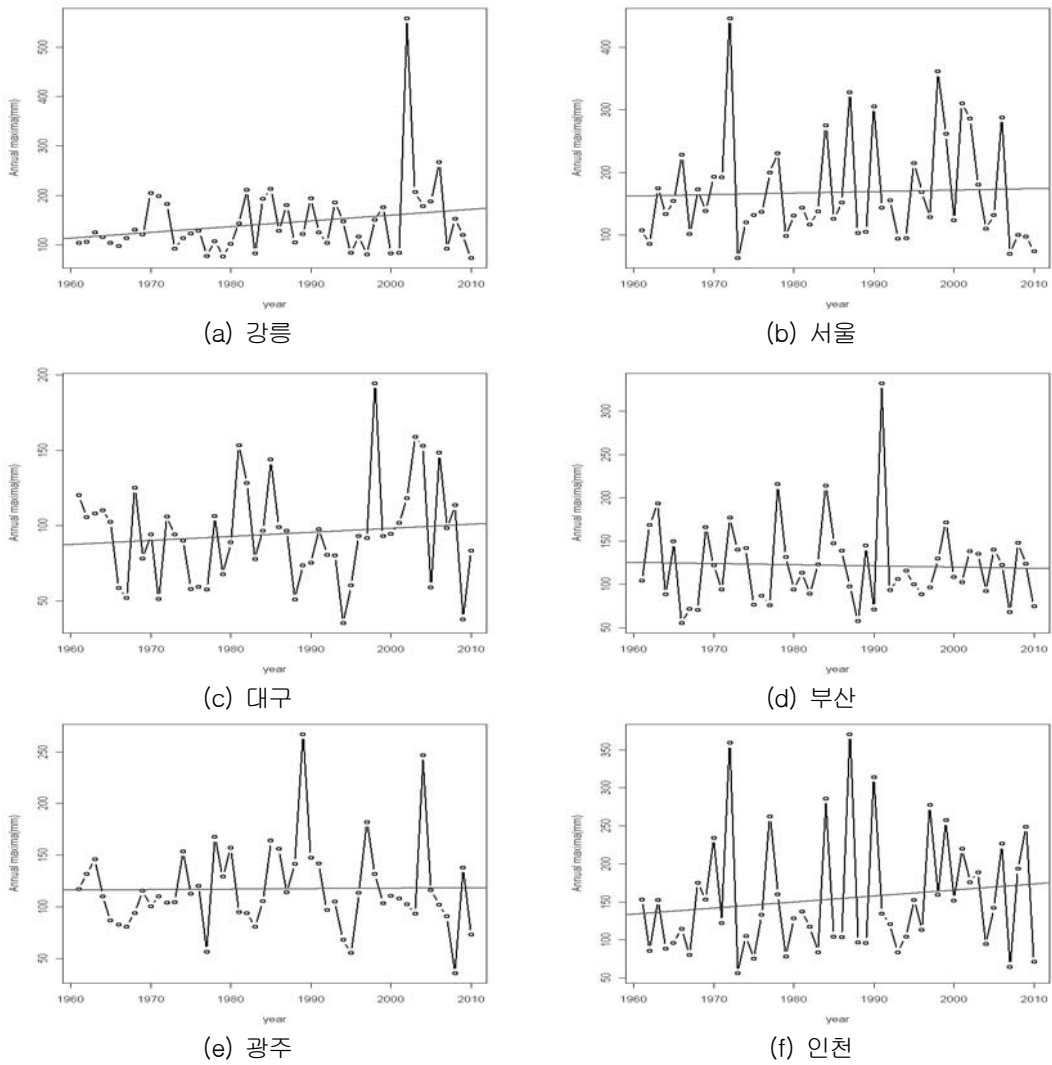


Figure 3. 관측소별 연최고치 강수량의 시계열과 경향성

Table 2. Mann-Kendall 경향성 분석 결과

Station code	Station Name	Mann Kendall test	
		Kendall's tau statistic	p-value
105	강릉	0.0899	0.3618
108	서울	0.0262	0.7953
112	인천	0.115	0.2451
143	대구	0.0351	0.7253
156	광주	-0.0441	0.6575
159	부산	-0.0106	0.92004

본 논문에서는 연최고치 강우자료 경향성을 판단하기 위해 비매개변수적 경향성 분석 기법인 Mann-Kendall 경향성 기법(Kendall, 1995)을 이용하였다(Table. 2).

(1) 정상성 빈도분석

먼저, 각 지점별 극한강우자료가 GEV(Generalized Extreme Value) 확률분포형을 따른다고 가정하고 각 관측소별 연최고치 강우량계열에 대하여 정상성 빈도 분석을 실시하였다. 아직까지 실무에서는 Gumbel 확률분포형을 사용하고 있으나 최근의 극한강우사상을 표현하는 데 있어서는 두꺼운 꼬리(heavy tail)를 가지고 있는 GEV 확률분포형이 널리 이용되고 있기 때문에 본 논문에서 이용하였다. GEV 확률분포가 각 관측소별 극치 강수량을 표현

(fitting)하기에 적합한지를 평가하기 위해서 시각적인 검토를 우선적으로 실시하였으며 GEV 분포형의 매개변수는 최우도법(Maximum Likelihood, ML)을 이용하여 추정하였다. Figure. 4는 각 관측소별 경험적 히스토그램과 GEV 확률밀도함수를 나타낸 것이며 Figure. 5는 경험적 분포와 모형분포의 확률의 Q-Q plot을 도시한 것이다. Figure.4와 5를 통해 알 수 있듯이 경험적인 확률밀도함수와 GEV 확률분포형의 밀도함수가 유사한 거동을 하고 있으며 GEV 확률분포의 경우 좌·우측꼬리 부분의 거동을 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 GEV 확률분포가 24시간 지속기간의 연최고치 강수량의 분포특성을 표현하는데 무리가 없을 것으로 판단된다. Table. 3은 각 관측소별 GEV 확률분포형의 매개변수를 추정한 결과이다.

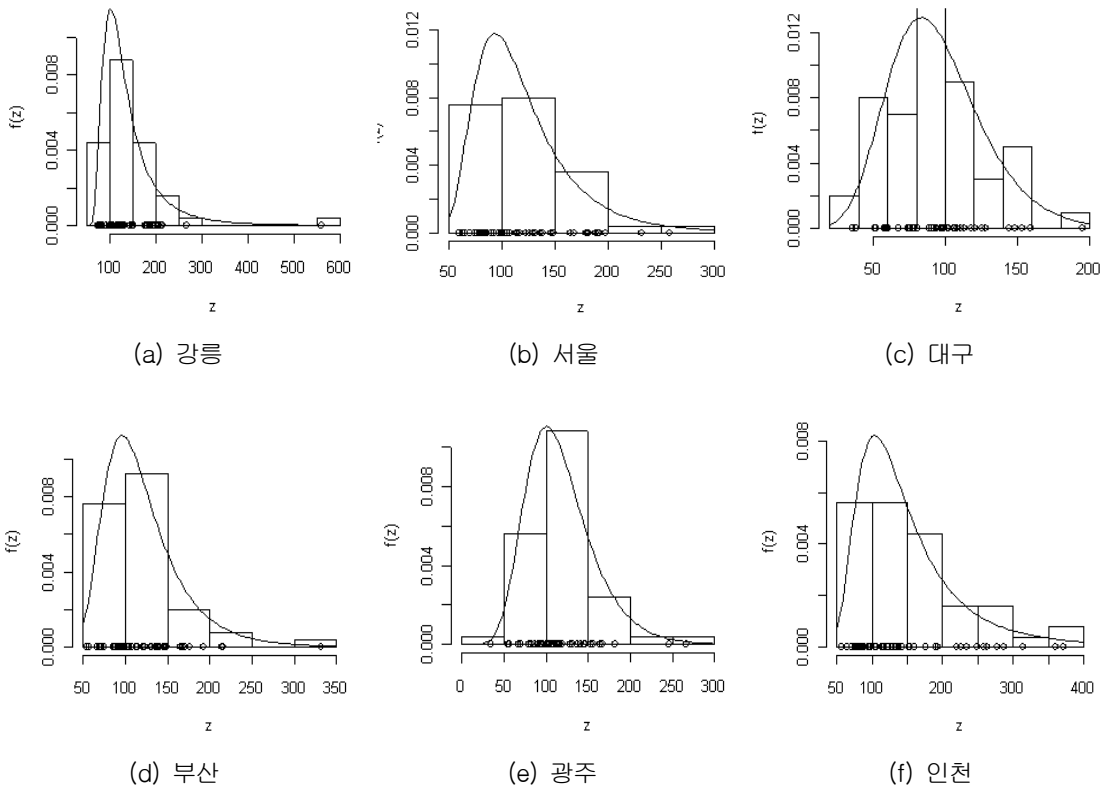


Figure 4. 각 관측소별 확률밀도함수의 비교

Table 3. 각 관측소별 GEV 확률분포형의 매개변수

관측소 명	$\mu$	$\sigma$	$\xi$
강릉	110.67	33.36	0.32
서울	98.10	31.64	0.16
대구	80.25	28.63	-0.0098
부산	99.66	32.85	0.098
광주	99.73	33.29	-0.040
인천	113.79	46.26	0.26

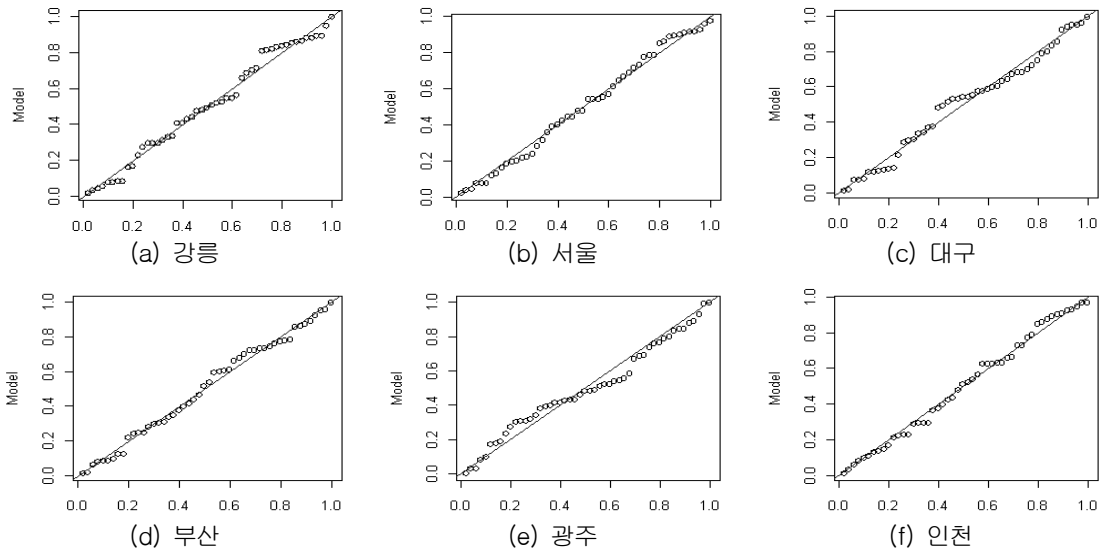


Figure 5. 각 관측소별 Probability plot 비교

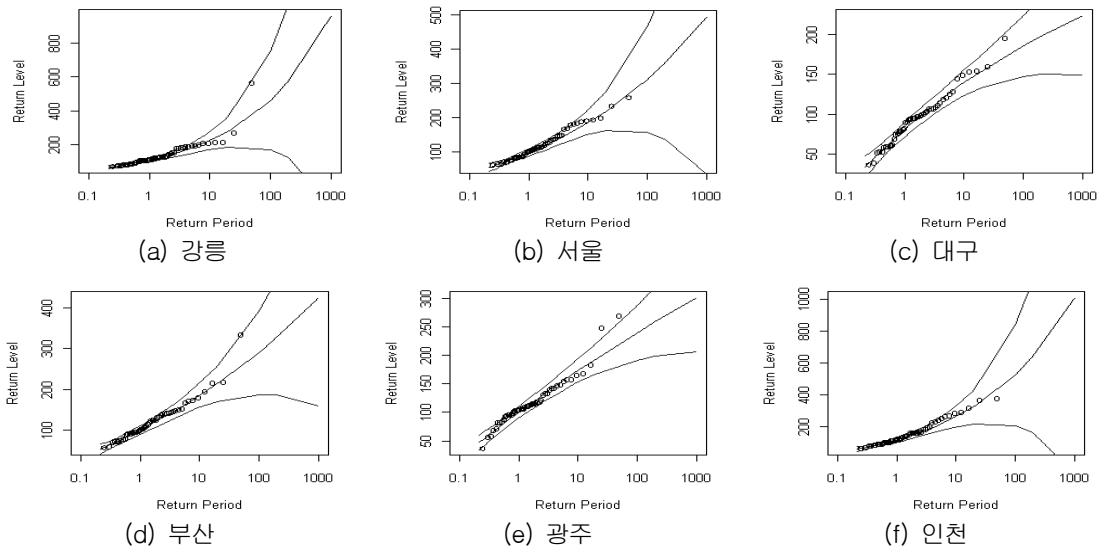


Figure 6. 각 관측소별 Return Level 비교



Figure. 6은 각 관측소의 재현기간별 재현수준(Return Level)을 나타낸 것으로 각 그림의 점은 추정치를 나타낸 것이다. 검정실선은 빈도별 재현수준의 추세선이며 상하의 파란색 실선은 Delta 방법(Rao, 1973)에 의해 추정된 신뢰구간 95%의

상하 경계치(boundary)를 나타낸 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 강릉지점의 재현수준이 다른 지점에 비해 가장 높으며 대구지점과 광주지점이 가장 낮은 것으로 분석되었다.

Table 4. 각 관측소별 정상성 빈도분석 결과

관측소 명	재현기간		
	10년	30년	100년
강릉	219	305	433
서울	273	379	528
대구	138	163	186
부산	182	231	289
광주	170	198	223
인천	252	349	481

(2) 경향성을 고려한 빈도분석

본 논문에서는 극치수문자료의 분포특성을 고려할 수 있는 경향성 분석 방법과 이를 빈도분석과 연계시켜 해석할 수 있는 비정상성 빈도분석 모형을 개발하였다. 식 (3)의 조건부 GEV 분포형과 식 (4)~(6)의 시간을 고려한 매개변수 모형을

구성하였으며 이를 해석하기 위한 매개변수 추정 방법으로 최우도법을 이용하였다. Table. 5는 관측소별 조건부 GEV 확률분포형의 매개변수를 추정한 것이다. 각 지점별 조건부 GEV 확률분포의  $\mu_0$ 는 강릉과 인천이 가장 컸으며  $\mu_1$ 은 강릉지점이 가장 큰 것으로 추정되었다.

Table 5. 각 관측소별 비정상성 GEV 분포의 매개변수

관측소 명	$\mu_0$	$\mu_1$	$\sigma$	$\xi$
강릉	116.99	0.30	31.74	0.38
서울	94.16	0.14	31.82	0.16
대구	79.46	0.05	28.77	-0.11
부산	94.68	0.19	32.38	0.11
광주	109.80	-0.42	31.82	-0.000214
인천	110.43	0.15	46.53	0.24

Figure. 7은 경향성을 고려하여 추정된 10년, 30년, 100년 빈도강수량을 비교한 것으로 기존의 정상성 기반의 빈도분석의 결과는 빈도수준이 상수로서 일정한 반면 비정상성 기반의 빈도분석의 빈도강수량은 시간에 따라 증가 또는 감소함을 알 수 있다. Figure. 7에서 파란실선은 연도별 연최고치

강우량을 나타낸 것이며 검정점선은 아래에서부터 각각 10년, 30년, 100년의 정상성 기반의 재현수준, 빨강점선은 비정상성 10년 재현수준, 녹색점선은 비정상성 기반의 30년 재현수준, 파랑점선은 비정상성 100년 재현수준을 나타낸 것이다.

강릉지점(Figure. 7 (a))의 경우 정상성 기반으

로 추정된 빈도별 강수량이 비정상성에 기반을 둔 빈도별 강수량에 비해 과소 추정되었으며 점차적으로 빈도별 강수량이 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 점차적으로 현재 시점의 빈도별 강수량이 미래 특정 시점에서는 건설 당시의 설계빈도 이하로 낮아지고 있음을 의미하는 것이다. 서울지점(Figure. 7 (b))의 경우 1980년을 전후로 하여 현재의 빈도 강수량이 낮아지고 있음을 확인할 수 있다. 대구지점(Figure. 7 (c))은 현재 시점의 빈도별 강수량에 비해 큰 차이가 없으나 부산지점(Figure.

7 (d))은 서울지점과 마찬가지로 1980년대 이후 빈도별 강수량이 점차적으로 증가되고 있다. 다른 지점과 같이 광주 지점(Figure. 7 (e))의 경우 1980년대 이후 빈도별 강수량이 점차적으로 증가하고 있으며 인천 지점(Figure. 7 (f)) 또한 빈도별 강수량이 점차적으로 증가되고 있다 Figure. 7을 요약해 보면 전반적으로 대부분의 관측소의 비정상성빈도분석의 빈도강수량이 정상성 빈도강수량 보다 크며 시간에 따라 증가함을 알 수 있다.

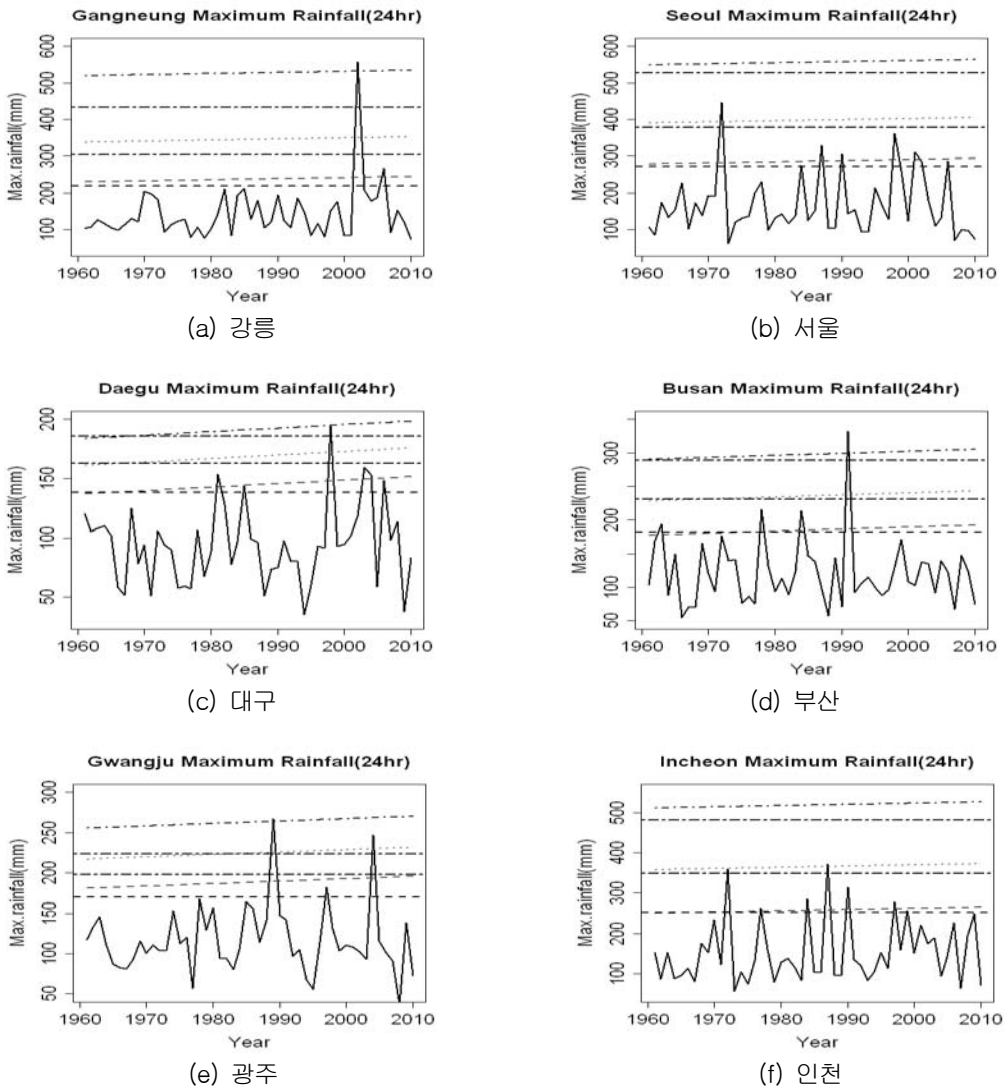


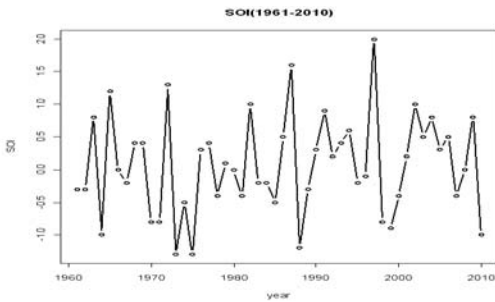
Figure 7. 경향성을 고려한 비정상성의 빈도별(10, 30년, 100년) 강우량 비교

(3) 기후변동을 고려한 비정상성 빈도분석

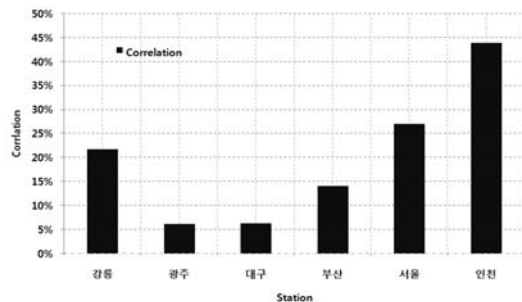
최근 전 지구적으로 발생하고 있는 기후변화(Climate Change)와 함께 많은 연구자들에 의해서 주요하게 다루어지고 있는 이슈 중 하나는 바로 기후의 변동성(Climate Variability)이다. 기상 변동성이 어떠한 방식으로 극치수문사상의 빈도를 변화시키는지 입증하는 여러 연구들이 선행되어 왔다(Franks와 Kuczera, 2002; Jain과 Lall, 2000; , 2001; Milly 등, 2002; Pizaro와 Lall, 2002; Sankarasubramanian과 Lall, 2003). 특히, Porparto와 Ridolfi(1998)는 최근 비정상성시계열(non-stationary time series)에서 뚜렷한 변동성이 재현될 수 있음을 설명하였다. 기후변화가 장기간에 걸쳐 지속적으로 서서히 변화하는 특성을 가지는 반면에 기후변동은 그 보다는 단기적으로 일종의 주기를 가지며 반복적으로 발생하는 특성이 있다. 그 대표적인 사례는 바로 El Nino와 La

Nina로 대표되는 ENSO(El Nino Southern Oscillation)를 들 수가 있으며 El Nino와 La Nina 현상의 발생 증가는 우리나라를 포함하여 전 세계적으로 가뭄과 홍수를 유발하고 있음을 많은 연구사례에서 확인할 수 있다(Halpert와 Ropelewski, 1992; Piechota와 Dracup, 1996; Ropelewski와 Halpert, 1996; Ropelewski 등, 1987).

본 논문에서는 기후변동을 고려한 비정상성 기반의 빈도분석을 위해 ENSO를 나타내는 지수인 SOI를 이용하였다. 본 논문에서는 조건부 GEV 확률분포형의 각 매개변수와 SOI를 외부설명기상 변수로 구성하였다. Figure. 8은 SOI 시계열과 각 관측소별 상관관계를 나타낸 것으로 인천, 강릉, 서울, 부산 등이 상관관계가 다소 있는 것으로 나타났다.



(a) Southern Oscillation Index(SOI) 시계열



(b) 극한강우와 SOI의 상관관계

Figure 8. Southern Oscillation Index 시계열과 각 관측소별 상관관계

Table 6. 각 관측소별 ENSO 고려한 비정상성 GEV 분포의 매개변수

관측소 명	$\mu_0$	$\mu_1$	$\sigma$	$\xi$
강릉	110.79	1.85	33.40	0.315
서울	97.81	14.81	29.30	0.19
대구	80.41	3.14	28.66	-0.102
부산	99.04	7.86	31.67	0.13
광주	99.72	2.39	33.24	-0.042
인천	113.16	18.77	40.32	0.35

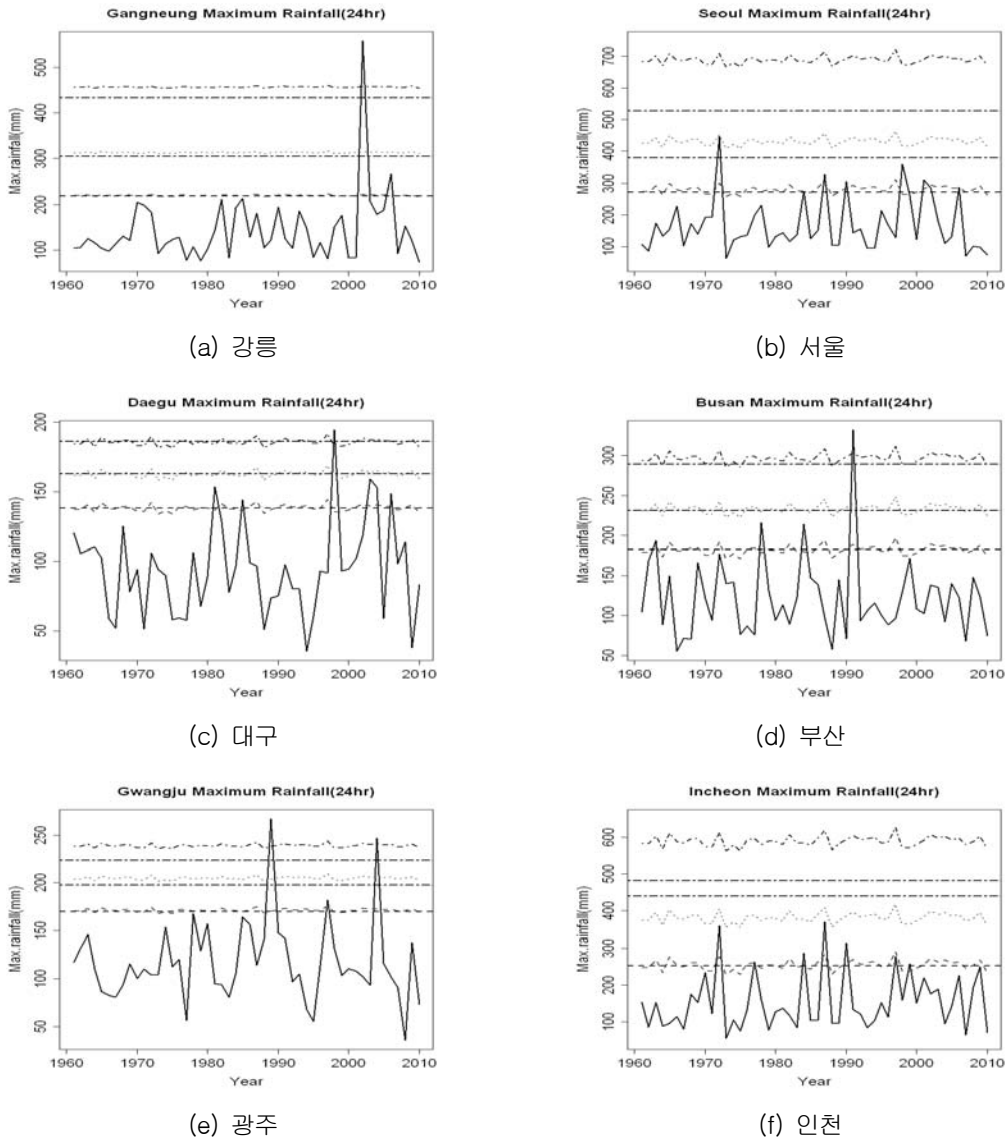


Figure 9. ENSO 고려한 비정상성의 빈도별(10, 30년, 100년) 강우량 비교

Figure. 9는 각 관측소별 ENSO를 고려한 비정상성 빈도분석 결과를 나타낸 것이다. Figure. 9를 통해 알 수 있듯이 강릉지점의 경우는 비정상성 기반의 빈도분석 결과와 정상성 기반의 빈도분석 결과가 큰 차이가 없었으나 서울, 부산, 인천지점의 경우 기존의 정상성 기반의 빈도분석 결과를 중심으로 재현수준이 진동하고 있음을 확인하였다. 특히, 인천, 서울의 경우 기존의 재현기간이

높아질수록 정상성 기반의 재현수준이 기후변동을 고려한 경우보다 과소 추정되고 있음을 보였다.

## 5. 요약 및 결론

전통적 빈도분석은 정상성이라는 기본 가정을 전제로 하고 있기 때문에 기후변화 및 변동에 의한 외부변화 요인을 반영하기에는 한계가 있음이

지적되어져 왔다. 통계학적 의미에서 정상성이란 평균과 분산과 같은 매개변수가 시간 불변이라는 것으로 시간의 변화에 상관없는 상수로서 표현된다는 것을 의미한다. 그러나 실제 강우사상은 기후변화로 인해 점차적으로 확률분포형의 매개변수나 그 분포 자체가 시간에 따라 변화하기 때문에 기존의 정상성 가정에 근거한 빈도분석과는 다른 비정상성을 고려할 수 있는 새로운 빈도분석 방법이 요구된다. 본 논문에서는 비교적 장기간(40년 이상)의 자료를 보유하고 있는 강릉, 서울, 대구, 부산, 광주, 인천 관측소의 24시간 연최고치 강우 자료를 대상으로 강우의 경향성 분석을 통해 비정상성 여부를 검토하였으며 조건부 GEV 확률분포를 이용하여 비정상성 빈도분석을 실시하여 정상성 빈도분석 결과와 비교하였다. 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서는 각 지점별 극한강우자료가 GEV 확률분포형을 따른다고 가정하고 각 관측소별 연최고치 강우량계열에 대하여 정상성빈도 분석을 실시하였으며 매개변수는 최우도법을 이용하여 추정하였다. GEV 분포형에 적합 시킨 결과 경험적인 밀도함수와 GEV 확률분포형의 밀도함수가 유사한 거동을 하고 있으며 GEV 분포의 경우 좌·우측꼬리 부분의 거동을 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있다.
- (2) 본 논문에서는 극치수문자료의 분포특성을 고려할 수 있는 경향성 분석 방법과 이를 빈도분석과 연계시켜 분석할 수 있는 비정상성 빈도분석 모형을 개발하였으며 전반적으로 대부분의 관측소의 비정상성 빈도분석의 빈도강수량이 정상성 기반의 빈도강수량보다 크며 시간에 따라 증가함을 알 수 있다.
- (3) 본 논문에서는 기후변동 고려한 비정상성 기반의 빈도분석을 위해 ENSO를 나타내는 지수인 SOI를 이용하여 비정상성 빈도분석 모형을 개발하였다. 분석결과 강릉지점의

경우는 비정상성 기반의 빈도분석 결과와 정상성 기반의 빈도분석 결과가 큰 차이가 없었으나 서울, 부산, 인천 지점의 경우 기존의 정상성 기반의 빈도분석 결과를 중심으로 재현수준이 진동하고 있음을 확인하였다. 특히, 인천, 서울의 경우 기존의 재현기간이 높아질수록 정상성 기반의 재현수준이 기후변동을 고려한 경우보다 과소 추정되고 있음을 보였다.

## 참 고 문 헌

- 권영문, 박진원, 김태웅 (2009). “강우의 증가 경향성을 고려한 목표연도 확률강우량 산정.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제29권, 제2B호, pp. 131-139.
- 권현한, 김병식 (2009). “비정상성 Markov Chain Model을 이용한 통계학적 Downscaling 기법 개발.” 한국수자원학회논문집, 제42권, 제3호, pp. 213-225.
- 이정주, 권현한, 황규남 (2010), “극치수문자료의 계절성 분석 개념 및 비정상성 빈도해석을 이용한 확률강수량 해석”, 한국수자원학회논문집, Vol. 43(8), pp. 733-745
- 이창환, 안재현, 김태웅 (2010), “비정상 강우빈도 해석법에 의한 확률강우량의 평가”, 한국수자원학회논문집, Vol. 43(2), pp. 187-199
- Boorman, D.B. and Sefton, C.E.M. (1997). “Recognizing the uncertainty in the quantification of the effect of climate on hydrological response.” *Climate Change*, Vol. 35, pp. 415-434.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modelling of extreme values*, Springer, London.
- Cunderlik, J.M. and Burn, D.H. (2003). “Non-stationary pooled flood frequency analysis.” *Journal of Hydrology*, Vol. 276, pp. 210-223

- Flower, H.J., and Kilsby, C.G. (2003). "A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000." *International Journal of Climatology*, Vol. 23, pp. 1313-1334.
- Franks, S.W., and Kuczera, G. (2002), "Flood frequency analysis: Evidence and implications of secular climate variability", *New South Wales. Water Resources Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 432-439.
- Ganguly, A.R.(2007) *Climate Extremes Hydro-Meteorological Extremes and Impacts*, Fall Creek Falls 2007 Workshop(www.ccs.ornl.gov)
- Gellens, D., and Roulin, E. (1998). "Streamflow response of Belgian catchment to IPCC climate change scenario." *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 242-258
- Griffis, V.W., and Stedinger, J.R. (2007). "Incorporating climate change and variability into Bulletin 17B LP3 Model." *World Environmental and Water Resource Congress 2007*, ASCE, Tampa, FL, USA.
- Griffith, G.M., Chambers, L.E., Haylock, M.R., Mamtom, M.J., Nicholls, N., Baek, H.J., Choi, Y., Della-Marta, P.M., Gosal, A., Iga, N., Lata, R., Laurent, V., Maitrepierre, L., Nakamigawa, H., Ouprasitwong, N., Solofa, D, Tahani, L., Thuy, T., Tibig, L., Trewin, B., VEDIAPAN, K., and Zhai, P.(2005) "Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific Region", *International Journal of Climatology*, Vol. 25, pp. 1301-1330
- Groisman PY, Karl TR, Easterling DR, Knight RW, Jamason PB, Hennessy JK, Suppiah R, Page ChM, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev VN, Douglas A, Forland E, Zhai PM. 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic changes. *Climatic Change* Vol. 42(1): 243-283.
- Halpert, M. S., and C. F. Ropelewski (1992), "Surface-temperature patterns associated with the Southern Oscillation", *J. Clim.*, Vol. 5, pp. 577-593.
- He, Y., Bardossy, A. and Brommundtm, J. (2006). "Non-stationary flood frequency analysis in southern Germany." *The 7th International Conference on HydroScience and Engineering*, Philadelphia, USA
- Hershfield DM. (1973). "On the probability of extreme rainfall events.", *Bulletin of the American Meteorological Society* 54: 1013-018. Reiss R-D, Thomas M. 1997. *Statistical Analysis of Extreme Values*. Birkh"auser: Basel, Boston, MA, Berlin.
- Jain, S., and U. Lall (2000), "Magnitude and timing of annual maximum floods: Trends and large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork River", *Utah, Water Resour. Res.*, 36(12), 3641-3651,
- Jain, S., and U. Lall (2001), "Floods in a changing climate: Does the past represent the future?", *Water Resour. Res.*, Vol. 37(12), pp. 3193-3205
- Karl T, Knight RW. (1998). "Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States.", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79(2), pp. 231 - 241.
- Katz RW (2002). "Stochastic modeling of hurricane damage.", *J Appl Meteorol.*, Vol. 41, pp. 754-62
- Katz RW, Parlange MB, Naveau P. (2002). "Statistics of extremes in hydrology.", *Advances in Water Resources*, Vol. 25(8 - 12), pp. 1287-1304.

- Kendall, C., Sklash, M.G. and Bullen, T.D. (1995), "Isotope Tracers of Water and Solute Sources in Catchments.", In Trudgill, S.T. (ed). *Solute Modelling in Catchment Systems*, pp. 261-303. Wiley, London.
- Kite, G.W. (1993). "Application of a land class hydrological model to climate change." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, pp. 2377-2384.
- Klein Tank, A.M.G. and Konneb, G. P.(2003), "Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946-1999", *Journal of Climate*, Vol. 16, pp. 3665-3680
- Milly, P. C. D., R. T. Wetherald, K. A. Dunne, and T. L. Delworth (2002), "Increasing risk of great floods in a changing climate", *Nature*, Vol. 415(6871), pp. 514-517
- Mirza. M.Q., Warrick, R.A., Ericksen, N.J., and Kenny, K.J. (1998). "Trend and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputa and Meghna basin in the south Asia." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 439(6), pp. 845-858.
- Mudersbach, C. and Jensen, J. (2010) "Nonstationary extreme value analysis of annual maximum water levels for designing coastal structures on the German North Sea Coastline.", *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 3, pp. 52-62
- Panagoulia, D., and Dimou, G. (1997). "Sensitivity of flood events to global climate change." *Journal of Hydrology*, Vol. 191, pp. 208-222.
- Piechota, T. C., and J. A. Dracup (1996), "Drought and regional hydrologic variation in the United States: Associations with the El Nino Southern Oscillation", *Water Resour. Res.*, Vol. 32(5), pp. 1359-1373
- Pizaro, G., and U. Lall (2002), "El Nino and Floods in the US West: What can we expect?", *Eos Trans. AGU*, Vol. 83(32), pp. 349-352
- Porparto, A., and L. Ridolfi (1998), "Influence of weak trends on exceedance probability", *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, Vol. 12(1), pp. 1-15
- Rao,C.R. (1973), "Linear Statistical Inference and Its Applications(2<sup>nd</sup> ed.)", Wiley, New York
- Ropelewski, C. F., and M. S. Halpert (1987), "Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Nino/Southern Oscillation", *Mon. Weather Rev.*, Vol. 115, pp. 1606-1626
- Sankarasubramanian, A. and Upmanu Lall (2003), "Flood quantiles in a changing climate: Seasonal forecasts and causal relations", *Water Resources Research*, Vol. 39(5), pp. 1134,
- Smith RL. (1989), "Extreme value analysis of environmental time series: an application to trend detection in ground-level ozone.", *Statistical Science* Vol. 4, pp. 367-393.
- Stedinger, J.R., and Crainiceanu, C.M. (2001). "Climate variability and flood-risk management, risk-based decision making in water resources." IX Proceedings of the Ninth Conference, United Engineering Foundation, ASCE, Santa Barbara, CA USA, pp. 77-86.
- Strupczewski, W.G., Singh, V.P., and Flench, W. (2001). "Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling I. Maximum likelihood estimation." *Journal of Hydrology*, Vol. 248, pp. 123-142.
- Wang, J., and Yang, P. (2005). "A compound

reconstructed prediction model for nonstationary climate processes.” Journal of Climatology, Vol 25, pp. 1265-1277.

- 논문접수일 : 2011년 08월 23일
- 심사의뢰일 : 2011년 08월 26일
- 심사완료일 : 2011년 11월 15일