비정상성 GEV 모형을 이용한 행정구역별 미래 확률강우량 산정

Estimation of Future Design Rainfalls in Administrative Districts Using Nonstationary GEV Model

신지예* · 박예준** · 김태웅***

Shin, Ji Yae · Park, Yei Jun · Kim, Tae-Woong

Abstract

In South Korea, stationary frequency analysis methods are generally used for estimating design rainfalls in practice. However, due to climate change and/or variability, recent rainfall observations have significantly different patterns from the past so that the recent trends need to be considered to estimate extreme rainfall quantiles for hydrologic design. This study focused on estimating extreme rainfall quantiles in administrative districts across South Korea, after building nonstationary GEV model using annual maximum rainfall (AMR) datasets for 228 administrative districts from point rainfall measures from 1973 to 2012. A moving average method with 25-year window was used for investigating time-dependent statistics of AMR, such as mean, variance and skewness, and parameters of GEV distribution. From the analyses of relationships between statistics and distribution parameters, this study derived nonlinear regression equations for distribution parameters, which provide the estimates of distribution parameters at any future time. The overall results achieved in this study illustrate that the nonlinear regression equations can be easily incorporated into the hydrologic frequency analysis and provide appropriate estimates of design rainfalls in the near future.

Key words : Design rainfall, Administrative district, Nonstationary GEV model

요 지

국내에서는 설계강우량을 산정하기 위해서 정상성 강우빈도해석법이 일반적으로 적용되고 있다. 그러나, 기후변화 또는 기후 변동으로 인한 극치사상의 증가 등으로 최근의 강우패턴은 과거와는 다른 양상을 보여주고 있으며, 이러한 경향은 수문학적 설계를 위한 확률강우량 산정에 고려될 필요가 있다. 본 연구에서는 행정구역별 비정상성 강우빈도해석을 수행하였다. 이를 위하여 1973년부터 2012년까지 관측된 지점강우량을 이용하여 행정구역별 연최대강우량 자료를 구축하였다. 25년 이동평균방법으로 관측자료의 통계량과 GEV 분포함수의 모수 사이의 상관성을 검토한 후, 미래 특정 시점에 대한 분포함수의 모수를 추정할 수 있는 비선형 회귀식을 유도하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 관측된 연최대강우량에 대하여 검증을 하였으며, 강우패턴의 변화를 정상성 강우빈도해석법에 비해 보다 적절히 반영하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 행정구역별 비정상성 강우빈도해석법은 가까운 미래의 확률강우량 산정과 최근에 도입된 행정구역별 방재성능 목표강우량 산정에 유용할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 설계강우량, 행정구역, 비정상성 GEV 모형

1. 서 론

산업화가 시작되어 인간들의 인위적인 탄소배출이 발생된 이후로, 지속적인 이산화탄소의 증가는 지구온난화를 가속시켰으며, 최근 세계적으로 극한기후 및 이상홍수와 같은 이상기후가 잦은 빈도로 발생하고 있다. IPCC 4차 보고서(IPCC, 2007)에 의하면 전 세계적으로 기후변화는 명백히 일어나고

있다. 또한, 기상청(http://web.kma.go.kr/4rivers/sub_02_01.jsp)에 의하면, 최근 100년간(1912~2008) 우리나라는 온도와 연평균 강우량이 증가하는 경향성을 보이고 있다. 최근 연구에 의하면, 평균 강우량 뿐만 아니라 여름기간 동안의 강우 발생빈도 및 극치강우의 발생은 증가하는 경향을 보이고 있다(Jung et al., 2011; Park et al., 2011). 또한, 2009년 수도권 지역에 침수피해를 일으킨 강우사상의 경우 일부지역에서

*정회원. 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정(E-mail: starzee@hanyang.ac.kr)
Member, Graduate Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정
Graduate Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***교신저자, 정회원, 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 부교수(Tel: +82-31-400-5184, Fax: +82-31-436-8170, E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

는 10년 빈도(75 mm/hr)로 설계된 우수관거의 용량을 초과하는 강우가 발생하였다(예를 들어, 종로구 98 mm/hr, 용산구 80 mm/hr). 이와 같이, 최근 설계빈도를 초과하는 강우에 의한 침수피해가 빈번히 발생하고 있다. 소방방재청에서는 “지역별 방재성능목표 설정 기준”을 지자체별로 설정하고 방재성능목표 강우량에 대한 지역적 방재성능을 평가하도록 하고 있다. 이에 본 연구에서는 최근 증가하는 강우패턴을 고려하고 행정구역별로 강우빈도해석을 적용하기 위하여 행정구역별 비정상성 강우빈도해석법을 제안하고자 한다.

최근 비정상성 수문빈도해석에 대한 많은 연구 결과가 발표되고 있다. 국외 연구의 경우, El Adlouni et al.(2007)은 Martins and Stedinger(2000)가 제안한 GML(Generalized Maximum Likelihood) 방법을 이용하여 GEV 분포함수의 모수를 추정하였으며, 비정상성 빈도해석을 위하여 위치모수(location parameter)를 선형함수와 이차함수로, 규모모수(scale parameter)를 지수함수로 나타내어 GML 방법의 효율성을 검증하였다. Cannon(2011)은 GEV 분포의 위치모수를 시간에 따른 선형함수로 나타내고 규모모수를 지수함수로 나타내면서 동시에 CDN(Conditional Density Network) 이론을 적용하여 비정상성 빈도해석을 위한 GEV-CDN 모형을 제안하였다. Hundecha et al.(2008)은 Gulf 지방에 발생하는 풍속자료에 대하여 연초과값과 연최대값을 추출하여 Gumbel 분포 모형의 위치 모수를 다항식으로 규모 모수는 로그함수로 나타내어 비정상성 빈도해석을 수행하였다. Katz(2013)는 극치강우의 비정상성 빈도해석방법으로 GEV 분포를 이용하여 위치모수를 선형함수로, 규모모수를 로그함수로, 형상모수(shape parameter)를 일정한 상수로 추정하여 비정상성 빈도해석을 수행할 것을 제안하였다.

국내에서는 Kwon et al.(2009)은 연최대강우량을 누적한 자료에서 연최대 평균강우량과 Gumbel 분포의 위치 및 규모모수 사이에서 선형회귀식 추정하여 확률강우량을 산정하였으며, Lee et al.(2010)은 Kwon et al.(2009)의 방법을 초기누적연도와 모수 추정방법을 변화시키면서 적용성에 관한 분석을 하였다. Kwon et al.(2011)은 Gumbel 분포를 이용한 비정상성 빈도해석을 위한 자료 구축방법으로 누적평균방법과 이동평균방법을 적용한 뒤, 선형 회귀직선을 활용하여 모수를 추정한 뒤 미래의 확률강우량을 산정하였다. Kim et al.(2011)은 매개변수를 선형회귀식 및 로그함수식을 이용하여 시간에 대한 함수로 나타낸 뒤, ENSO 지수와 결합하여 비정상성 빈도해석을 수행하였다. 또한, Goo(2012)는 GEV 분포의 위치모수를 시간에 따른 선형함수로, 규모모수를 시간에 따른 지수함수로 나타낸 뒤, Newton-Raphson 방법을 기반으로 한 최우도법을 이용하여 비정상성 GEV 모수 추정방식을 제안하였다. 위의 연구들은 확률분포함수의 모수를 시간에 따른 선형 및 비선형 함수로 추정하고 있지만, 확률분포함수의 모수는 자료의 통계량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 비정상성 강우빈도해석을 위하여 GEV 분포의 모수를 관측자료의 다양한 기초 통계량(평균, 분산, 왜곡도)과의 선형 및 비선형적 관계를 고려하여 산정하였다. 연구대상 자료는 기상청 산하의 57개 지점자료를 행정구역별 면적강우

량으로 환산한 228개 행정구역별 연최대강우량이다.

2. 연구대상 및 연구방법

2.1 연구대상 자료

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 57개 지점의 일강우량(1973~2012년) 자료를 수집하였다. 행정구역별 자료분석을 위하여 티센다각형법을 이용한 면적비로 시, 군, 구 단위의 228개 행정구역에 대하여 일강우량을 산정하였다. 행정구역별 일강우량 자료에서 초기연도 1973년부터 매년 최대값을 추출하여 행정구역별 연최대강우량(AAMR: Administrative Annual Maximum Rainfall) 자료를 구축하였다.

2.2 경향성 검정

2.2.1 Mann-Kendall Test

본 연구에서는 행정구역별 연최대강우량(AAMR) 자료의 경향성 검정을 위하여 비모수적 통계기법 중의 하나인 Mann-Kendall Test를 수행하였다. Mann-Kendall Test는 자료의 선형 혹은 비선형에 관계없이 경향성 여부만을 판단할 수 있어 자료의 경향성 판단에 쉽게 사용할 수 있다(Oh et al., 2006; Seo et al., 2010).

$x_1, x_2, \dots, x_n$ 의 n 개의 변수 x 의 j 번째 자료가 존재할 때, Mann-Kendall (MK) 통계량(S)은 식 (1)과 같이 정의한다.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (1)$$

여기서, x_k 와 x_j 는 각각 AAMR의 k 번째와 j 번째 값이다. $\text{sign}(x_j - x_k)$ 은 x_j 와 x_k 의 비교를 통해서 식 (2)와 같이 산정한다.

$$x_j - x_k > 0 : \text{sign}(x_j - x_k) = 1 \quad (2a)$$

$$x_j - x_k = 0 : \text{sign}(x_j - x_k) = 0 \quad (2b)$$

$$x_j - x_k < 0 : \text{sign}(x_j - x_k) = -1 \quad (2c)$$

식 (1)에 의해 정의된 MK 통계량(S)은 식 (3)과 같은 분산을 가지며, 정규분포를 따른다.

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3)$$

여기서, n 은 자료의 수, g 는 동일한 값을 가지는 동점그룹 수, t_p 는 p 번째 동점그룹의 자료수이다. 정규분포에 대한 표준정규변량 Z 는 식 (4)과 같다.

$$S > 0 : Z = \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} \quad (4a)$$

$$S = 0 : Z = 0 \quad (4b)$$

$$S < 0 : Z = \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} \quad (4c)$$

여기서, 표준정규변량 Z 가 95%의 신뢰도를 가진다고 할 때, 음의 신뢰도 한계값 보다 적게 나오면($Z < -u_{1-\alpha/2}$) 음의 경향성을 가지고 있으며, 양의 신뢰도 한계값 보다 큰 값을 가지면($Z > u_{1-\alpha/2}$) 양의 경향성을 가지고 있다고 판단한다.

2.2.2 Regression Test

모수적 검정방법인 Regression Test은 변수 x, y 에 대한 선형회귀 직선식의 잔차가 평균이 0인 정규분포라고 가정하여 변수들의 선형 경향여부를 판단한다. 검정 통계량 S 는 식 (5)와 같으며, 자유도가 $n - 2$ 인 Student- t 분포를 따른다.

$$S = \frac{b}{\sigma} \quad (5a)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2}{n(n-2)(n^2-1)}} \quad (5b)$$

여기서, n 은 자료의 수, a 와 b 는 선형회귀 직선식의 y 절편과 기울기이다.

2.3. 이동평균 방법

이동평균 방법은 일정 기간에 대한 기준기간을 설정한 뒤, 기준기간을 유지한 채로 일정 기간씩 이동시키면서 자료를 구축하는 방법이다. 본 연구에서는 25년 이동평균 방법을 이용하여 자료를 재구축하여 기초 통계량과 확률분포함수 모수의 변화양상을 파악하였다. 25년 이동평균 방법의 기준기간은 25년으로 일반적인 수문자료의 해석을 위한 자료기간인 30년 보다 짧은 기간이지만, 총 16개의 이동기간 자료를 생성하여 상관성 분석을 수행하기 위한 자료수(16개)를 제공한다. 초기연도는 1973~1997년이며, 해당기간의 행정구역에 대한 연최대강우량(AAMR) 자료를 이용하여 첫 번째 기간에 대하여 GEV 분포함수의 모수와 평균, 분산, 왜곡도를 계산

하였다. 이어서 1년씩 자료를 이동시키면서 마지막 구간인 1988년에서 2012년까지의 AAMR 자료를 재구축하여 총 16개의 이동평균 구간에 대한 GEV 분포함수의 모수와 기초 통계량을 계산하였다(Table 1 참고). 이동평균 방법은 과거 자료를 버리고 새로운 자료로 대체하여 통계량을 계산하기 때문에 자료의 변동성을 효과적으로 파악할 수 있다는 장점이 있다. Kwon et al.(2011)은 이동평균 방법과 누적평균 방법을 이용하여 자료의 경향성을 반영한 비정상성 빈도해석을 수행하였으며, 그 결과 이동평균 방법이 최근의 경향성을 보다 신뢰성있게 분석하는 것으로 판단되었다. 특히, 최근에 들어서 자료의 증가 경향성이 뚜렷이 나타나고 있으며 증가양상이 커지고 있는 국내 극치강우량의 분석에는 이동평균 방법이 적합할 것으로 판단된다.

2.4 비정상성 GEV 모형

본 연구에서는 최근 극한사상의 표현에 널리 사용되는 GEV(Generalized Extreme Value) 분포함수를 이용하여 비정상성 강우빈도해석을 수행하였다. 자료의 정상성(stationarity)을 가정한 빈도해석에 적용되는 GEV 분포의 확률밀도함수와 누적밀도함수는 각각 Eqs. (6) and (7)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{k} \left[1 - \sigma \left(\frac{x - \mu}{k} \right) \right]^{\frac{1}{\sigma} - 1} \exp \left[- \left[1 - \sigma \left(\frac{x - \mu}{k} \right) \right]^{\frac{1}{\sigma}} \right] \quad (6)$$

$$F(x) = \exp \left[- \left[1 - \sigma \left(\frac{x - \mu}{k} \right) \right]^{\frac{1}{\sigma}} \right] \quad (7)$$

여기서, k 는 형상모수(shape parameter), σ 는 규모모수(scale parameter), μ 는 위치모수(location parameter)로 모두 일정한 상수이다. 정상성 빈도해석은 대상지역에 대하여 확률분포모형이 변화하지 않는다는 가정 아래 산정되므로 과거의 확률 분포모형의 모수와 현재의 확률분포모형의 모수는 변화가 없

Table 1. Basic statistics and GEV parameters of moving average method with 25-year window (Gangwondo Cheorwongun)

No.	Duration	Mean	Variance	Skewness	Shape Parameter	Scale Parameter	Location Parameter
1	1973~1997	130.6	3841.5	1.315	-0.167	39.7	99.9
2	1974~1998	134.0	3583.9	1.378	-0.181	37.4	104.4
3	1975~1999	138.7	3997.7	1.129	-0.157	41.8	106.9
4	1976~2000	139.1	3977.1	1.118	-0.146	42.3	107.6
5	1977~2001	140.9	4108.3	1.011	-0.131	44.4	108.7
6	1978~2002	141.5	4056.3	1.012	-0.130	44.1	109.7
7	1979~2003	141.5	4056.3	1.012	-0.130	44.1	109.7
8	1980~2004	143.1	3997.4	0.970	-0.099	45.5	111.9
9	1981~2005	144.3	3895.3	0.973	-0.098	44.8	113.7
10	1982~2006	145.8	3944.5	0.890	-0.076	46.8	115.0
11	1983~2007	146.9	3791.7	0.952	-0.107	44.0	116.4
12	1984~2008	150.8	3849.3	0.785	-0.040	48.4	120.8
13	1985~2009	148.4	3449.2	0.802	-0.001	47.5	120.9
14	1986~2010	152.9	3334.9	0.690	0.046	48.8	126.8
15	1987~2011	160.6	3494.8	0.628	0.020	49.2	133.2
16	1988~2012	158.9	3658.3	0.613	0.026	50.7	130.9

Fig. 1. The Timeseries of AAMR (Gangwondo Cheorwongun)

Fig. 2. The Change of PDFs according to time periods with 25-year window (Gangwondo Cheorwongun)

이 같다. 하지만 최근에 관측되는 극치강우량은 시간에 따라 통계량을 변화시키며(Fig. 1 참고), 확률분포함수의 모수 또한 시간에 따라 변화시킨다(Fig. 2 참고).

비정상성(non-stationarity)이란 시공간이 변화함에 따라 자료의 기초 통계량인 평균과 분산이 변화하고 시계열 자료가 경향성, 도약성, 주기성을 가지게 되는 것을 의미한다. 본 연구에서 적용하는 비정상성을 고려한 빈도해석 방법은 시간이 변화함에 따라 관측 강우량의 기초 통계량이 변화하며 확률 분포모형의 특성을 나타내는 모수가 시간에 따라 변화한다는 것으로 GEV 분포함수의 모수 k , σ , μ 가 일정한 상수가 아닌 시간에 따른 함수로 나타난다. 비정상성 GEV 분포함수의 확률밀도함수와 누적밀도함수는 각각 Eqs. (8) and (9)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{k(t)} \left[1 - \sigma(t) \left(\frac{x - \mu(t)}{k(t)} \right) \right]^{\frac{1}{\sigma(t)} - 1} \exp \left[-1 - \sigma(t) \left(\frac{x - \mu(t)}{k(t)} \right) \right]^{\frac{1}{\sigma(t)}} \quad (8)$$

$$F(x) = \exp \left[- \left[1 - \sigma(t) \left(\frac{x - \mu(t)}{k(t)} \right) \right]^{\frac{1}{\sigma(t)}} \right] \quad (9)$$

2.5 선형 및 비선형 회귀식을 이용한 GEV 모수의 추정

비정상성 강우빈도해석을 위한 비선형 GEV 모수 추정식을

개발하기에 앞서, 228개 행정구역 연최대강우량 자료 중에서 경향성 검증(Mann-Kendall Test와 Regression Test)을 수행한 결과 통계적으로 유의하다고 판단된 지역에 대하여 이동평균 방법을 적용하여 자료를 재구축하였다. 이동평균 방법의 기준기간은 25년으로 채택하였으며, 최초 연도를 포함한 25년간의 연최대강우량 자료의 기초 통계량인 평균, 분산, 왜곡도와 GEV 분포모형의 형상(k), 규모(σ), 위치(μ) 모수를 산정하였다. 이후 1년씩 이동시키면서 마지막 연도인 2012년도의 자료를 포함하여 총 16개의 이동기간의 자료(Table 1 참고)를 구축한 뒤, GEV 분포모형의 변화하는 모습을 시각적으로 확인하였다(Fig. 2 참고). Table 1을 통하여 평균의 증가와 왜곡도의 감소를 파악할 수 있으며, 동시에 GEV 분포의 형상, 규모, 위치 모수가 전체적으로 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있다.

기존의 연구(Kwon et al., 2009; Lee et al., 2010; Kwon et al., 2011)는 비정상성 빈도해석을 위한 모수추정을 위하여 평균과 확률분포의 모수를 선형 회귀식을 이용하여 모수를 추정하였으나, 본 연구에서는 상관계수를 고려하여 확률분포의 모수별로 상관성이 가장 높은 기초 통계량(예를 들어, 형상모수는 왜곡도, 규모모수는 왜곡도, 위치모수는 평균과의 관계)를 이용하여 모수 추정식을 구축하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 경향성 검증

본 연구에서는 우리나라 228개 행정구역에 대하여 1973년부터 2012년까지의 연최대강우량 자료를 대상으로 Mann-Kendall Test와 Regression Test를 이용하여 자료의 증가 혹은 감소하는 경향을 가지고 있는 지역을 파악하였다. 95% 유의수준에 대하여 Mann-Kendall Test는 95개 행정구역에서, Regression Test에는 78개 행정구역에서 경향성이 유의하게 나타났다. 총 228개 행정구역 중 76개 행정구역이 동시에 통계적으로 유의한 경향성을 가지는 것으로 확인되었다(Fig. 3 참고).

Fig. 3. The administrative districts that have a significant trend

경향성을 가지고 있다고 통계적으로 판단된 지역은 모두 증가 경향성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한, 서울과 경기도 대부분의 지역에서는 양의 경향성을 가지는 것으로 나타났는데, 이는 2009년부터 지속적으로 관측된 집중호우의 영향으로 서울 및 근교 지역의 연최대강우량이 뚜렷한 증가 경향성을 나타냈기 때문으로 판단된다.

3.2 GEV 모수 추정

모수 추정식을 산정하기에 앞서 이동평균 방법을 이용하여 재구축한 자료(Table 1 참고)의 기초 통계량과 각각의 GEV 모수의 상관계수를 Eq. (10)을 사용하여 산정하였으며, 각각의 모수에 대하여 행정구역별로 평균, 분산, 왜곡도와와의 관계에서 상관계수가 가장 큰 행정구역의 수를 세어 Table 2에 정리하였다. 형상 및 규모모수는 왜곡도와 상관성을 가지고 있는 지역이, 위치모수는 평균과 상관성이 높은 지역이 많이 존재함을 확인할 수 있다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

이동평균 방법으로 재구축한 행정구역별 평균, 분산, 왜곡도와 GEV 모수 자료를 이용하여 비정상성 GEV 모형의 모수 추정을 위한 다양한 선형 및 비선형 함수식(Eq. (11))을 적용하였다.

$$M(t) = a_0 t + a_1 \quad (11a)$$

$$S(t) = b_0 \cdot e^{b_1 t} \quad (11b)$$

$$S(t) = b_0 \cdot e^{b_1 M(t)} \quad (11c)$$

$$k(t) = p_0 + p_1 S(t) + p_2 S(t)^2 \quad (11d)$$

$$\beta(t) = q_0 \cdot e^{q_1 M(t)} \quad (11e)$$

$$\beta(t) = q_0 \cdot e^{q_1 S(t)} \quad (11f)$$

$$\alpha(t) = r_0 \cdot e^{r_1 M(t)} \quad (11g)$$

여기서, a_0 , a_1 , b_0 , b_1 , p_0 , p_1 , q_0 , q_1 , r_0 , r_1 은 회귀모형의 계수로 행정구역별로 추정하였다. $M(t)$ 는 평균, $S(t)$ 는 왜곡도, $k(t)$ 는 형상모수, $\beta(t)$ 는 규모모수, $\alpha(t)$ 는 위치모수를 위한 추정식이다.

Table 2를 통해서 모수와 높은 상관성을 가지고 있는 기초 통계량이 평균과 왜곡도에 해당되는 것을 확인하였으므로, 평

Table 2. The number of administrative districts which has the highest correlation coefficient

	Shape parameter	Scale parameter	Location parameter
Mean	4	20	76
Variance	3	6	0
Skewness	69	50	0

균과 왜곡도를 산정하는 식을 먼저 추정한 후, 이를 이용하여 비정상성 GEV 모형의 모수를 추정하도록 하였다(Fig. 4 참고). $M(t)$ 는 시간 t 를 이용하여(본 연구에서는 이동평균 방법의 고정된 25년에서 마지막으로 포함되는 연도를 대상연도의 시간이라 가정) 1차 함수를 이용하여 추정하였다. 연최대강우량의 이동평균값인 $M(t)$ 는 시간의 흐름에 따른 영향을 받는 인자이면서, 지수함수를 사용할 경우에는 시간이 지남에 따라 $M(t)$ 는 과다추정이, 로그함수를 사용하면 $M(t)$ 가 일정한 값으로 수렴된다. 또한 이차 함수식을 사용하여 $M(t)$ 를 추정할 경우, 함수의 꼭지점을 지나게 되면 증가하던 값이 감소하거나 감소하던 값이 증가하는 양상을 보이므로 산정된 값의 신뢰성이 낮아지므로 선형 1차 함수식을 활용하여 그 값을 추정하였다. $S(t)$ 는 시간에 대한 함수 혹은 $M(t)$ 와의 상관성을 고려하여 지수함수를 이용하여 추정하였다. 연최대강우량 자료에서는 일반적으로 음의 왜곡도가 나타나지 않으므로 왜곡도는 지수함수를 이용하여 양의 결과가 나오도록 하였다.

모수 추정식의 경우, $k(t)$ 는 왜곡도에 대한 결정계수가 가장 크므로 $S(t)$ 를 활용하여 추정식을 산정한다. 이동평균방법을 사용하여 추정한 왜곡도는 0~2.0 사이의 값이며, $S(t)$ 는 지수함수를 사용하여 양의 값을 나타내며 그 변화가 크지 않기 때문에 $k(t)$ 를 추정하기 위하여 여러 가지 함수 중에서 상관계수가 높게 추정되는 이차함수를 사용하였다. $\beta(t)$ 는 평균이 가장 큰 결정계수를 가지는 지역이 20개, 왜곡도는 50개로 왜곡도의 영향을 받는 지역이 많으나, 평균의 영향이 큰 지역을 무시할 수 없으므로, $M(t)$ 와 $S(t)$ 에 대한 두 가지 변수를 활용하여 지수함수를 활용한 추정식을 산정하였으며, 지역별로 높은 상관성을 가지는 추정식을 사용하도록 한다. $\alpha(t)$ 는 평균과의 결정계수가 가장 크므로 $M(t)$ 를 활용하여 위치 모수와의 높은 상관계수를 유도하는 지수함수식을 이용하였다.

기존의 연구에서는 모수 추정식을 산정하여 비정상성 빈도 해석을 수행한 경우, 모든 지점에 대하여 동일한 식을 적용하였다(Kwon et al., 2010; Kim et al., 2011; Lee et al., 2010). 그러나 최근 우리나라에서는 집중호우가 빈번히 발생하는 지역과 태풍으로 인한 강우의 영향이 많은 지역이 서로 일치하지 않으므로, 행정구역별 강우의 변화양상도 다를 것이다. 따라서 본 연구에서는 행정구역별로 4가지의 종류의 모수 추정식을 적용하여 행정구역별 최적의 함수식을 도출하였다(Table 3 참고).

3.3 적용성 검토

본 연구에서 제안하는 비선형적 GEV 모수추정식의 검증을 위하여 현재 시점을 2007년이라고 가정한 후, 비정상성 GEV 모형을 이용하여 추정한 2012년 미래의 재현기간별 확률강우량값과 2012년까지 관측된 강우량을 이용하여 산정한 2012년의 재현기간에 대한 확률강우량과의 비교분석을 수행하였다. 총 76개 대상지역 중에서 70개의 지역에서 정상성 빈도해석모형 보다 비정상성 GEV 모형이 관측값과 좀 더 유사한 값을 산정하였다. 또한, 54개의 지역에서 비선형적 모수 추정식을 이용한 비정상성 GEV 모형이 선형적 모수 추정식을 이용한 비정상성 GEV 모형 보다 좀 더 관측값에 유사한

Fig. 4. Example of regression equations for estimating GEV parameters

Table 3. The equations for estimating GEV parameters

Equation ID	$M(t)$	$S(t)$	$k(t)$	$\beta(t)$	$\alpha(t)$
1	$M(t) = a_1 t + a_1$	$S(t) = b_0 \cdot e^{b_1 t}$	$k(t) = p_0 + p_1 S(t) + p_2 S(t)^2$	$\beta(t) = q_0 \cdot e^{q_1 M(t)}$	$\alpha(t) = r_0 \cdot e^{r_1 M(t)}$
2	$M(t) = a_1 t + a_1$	$S(t) = b_0 \cdot e^{b_1 t}$	$k(t) = p_0 + p_1 S(t) + p_2 S(t)^2$	$\beta(t) = q_0 \cdot e^{q_1 S(t)}$	$\alpha(t) = r_0 \cdot e^{r_1 M(t)}$
3	$M(t) = a_1 t + a_1$	$S(t) = b_0 \cdot e^{b_1 M(t)}$	$k(t) = p_0 + p_1 S(t) + p_2 S(t)^2$	$\beta(t) = q_0 \cdot e^{q_1 M(t)}$	$\alpha(t) = r_0 \cdot e^{r_1 M(t)}$
4	$M(t) = a_1 t + a_1$	$S(t) = b_0 \cdot e^{b_1 M(t)}$	$k(t) = p_0 + p_1 S(t) + p_2 S(t)^2$	$\beta(t) = q_0 \cdot e^{q_1 S(t)}$	$\alpha(t) = r_0 \cdot e^{r_1 M(t)}$

Table 4. The RMSEs of frequency curves estimated from various methods

Frequency analysis method	RMSE	
	Gangwondo Cheorwongun	Gyeonggido Yonginsi
Non stationary method of nonlinear regression	17.32	5.54
Non stationary method of linear regression	35.87	12.78
Stationary method	90.83	23.11

(a) Gangwondo Cheorwongun

(b) Gyeonggido Yonginsi

Fig. 5. The comparison of frequency curves estimated from various methods

Table 5. The parameter equations for administrative districts

No.	District	Equation ID	No.	District	Equation ID
1	강원도 양구군	1	39	경상북도 성주군	Kwon²⁾
2	강원도 영월군	Sta¹⁾	40	경상북도 예천군	Sta¹⁾
3	강원도 원주시	1	41	경상북도 칠곡군	1
4	강원도 철원군	4	42	서울특별시 강남구	4
5	강원도 춘천시	4	43	서울특별시 강동구	4
6	강원도 홍천군	1	44	서울특별시 강북구	4
7	강원도 화천군	1	45	서울특별시 관악구	4
8	강원도 횡성군	1	46	서울특별시 광진구	4
9	경기도 가평군	Sta¹⁾	47	서울특별시 구로구	4
10	경기도 고양시	4	48	서울특별시 금천구	4
11	경기도 과천시	1	49	서울특별시 노원구	4
12	경기도 광명시	4	50	서울특별시 도봉구	4
13	경기도 광주시	1	51	서울특별시 동대문구	4
14	경기도 구리시	4	52	서울특별시 동작구	4
15	경기도 군포시	Kwon²⁾	53	서울특별시 마포구	4
16	경기도 남양주시	1	54	서울특별시 서대문구	4
17	경기도 동두천시	4	55	서울특별시 강서구	4
18	경기도 성남시	1	56	서울특별시 중구	4
19	경기도 수원시	Kwon²⁾	57	서울특별시 서초구	4
20	경기도 안산시	4	58	서울특별시 성동구	4
21	경기도 안성시	Kwon²⁾	59	서울특별시 성북구	4
22	경기도 안양시	Kwon²⁾	60	서울특별시 송파구	4
23	경기도 양주시	4	61	서울특별시 양천구	4
24	경기도 양평군	1	62	서울특별시 영등포구	4
25	경기도 여주군	1	63	서울특별시 용산구	4
26	경기도 연천군	4	64	서울특별시 은평구	4
27	경기도 오산시	Kwon²⁾	65	서울특별시 종로구	4
28	경기도 용인시	1	66	서울특별시 중랑구	4
29	경기도 의왕시	Kwon²⁾	67	전라북도 고창군	4
30	경기도 의정부시	4	68	전라북도 정읍시	Kwon²⁾
31	경기도 이천시	Kwon²⁾	69	충청남도 당진군	2
32	경기도 평택시	4	70	충청남도 서산시	Kwon²⁾
33	경기도 포천시	4	71	충청남도 예산군	Kwon²⁾
34	경기도 하남시	4	72	충청남도 태안군	Kwon²⁾
35	경기도 화성시	Kwon²⁾	73	충청북도 단양군	Sta¹⁾
36	경상북도 구미시	Kwon²⁾	74	충청북도 음성군	2
37	경상북도 문경시	Sta¹⁾	75	충청북도 제천시	Kwon²⁾
38	경상북도 봉화군	Sta¹⁾	76	충청북도 진천군	Kwon²⁾

¹⁾“Sta”는 정상성 강우빈도해석을 적용

²⁾“Kwon”은 Kwon et al.(2009)에 적용된 선형함수모형을 적용

결과를 나타냄을 확인하였다(Fig. 5와 Table 4 참고). 또한 Table 3에서 제시한 4가지 모수 추정식을 적용한 결과 행정 구역별로 선정된 최적의 모수식과 그에 대한 결과는 Table 5를 통하여 확인할 수 있다.

3.4 미래 확률강우량

경향성을 가지고 있는 지역(Fig. 3 참고)에 대하여 본 연구에서 제안한 비선형적 모수 추정식을 이용한 비정상성 GEV 모형을 이용하여 20년 후인 2032년의 재현기간 20년, 50년, 100년, 200년의 확률강우량을 작성하였다(Fig. 6 참고). Kwon et al.(2011)에 의하면 경향성이 없는 지역에 대해서 비정상성과 정상성 빈도해석 수행한 결과 미래 목표연도의 확률강우량이 유사하게 추정되는 것으로 나타났기에 확률강

우량은 현재 경향성을 가지고 있다고 판단된 지역에 대하여만 비정상성 GEV 모형을 적용하였다. 비정상성 GEV 모형의 경우, 현재의 경향성이 반영되는 가까운 미래의 확률강우량은 타당하게 산정하는 반면, 먼 미래(예를 들어, 50년 후인 2062년)의 확률강우량은 과다 산정되는 한계를 가지는 것으로 나타났다(Table 6 참고).

Table 6은 서울시의 2022, 2032, 2042, 2052, 2062년의 재현기간별 확률강우량을 비정상성 빈도해석방법을 적용한 결과이며, Table 7은 서울시의 2062년의 확률강우량을 비정상성, 정상성 빈도해석 결과와 기후변화 시나리오 RCP(Representative Concentration Pathway) 8.5를 활용한 빈도해석 결과와 비교를 한 것이다. 정상성 강우빈도해석은 현재의 자료(1973~2012년)를 활용하였으며, 기후변화 시나리오 자료를

Fig. 6. The maps for 30-year rainfall in the future

Table 6. The future design rainfall according to return period in Seoul (mm)

Return period Year	20 year	50 year	100 year	200 year
2022	365.0	439.8	498.5	559.4
2032	437.8	551.0	646.9	752.9
2042	507.2	661.1	799.0	959.2
2052	569.8	761.4	940.4	1156.0
2062	624.7	848.3	1063.4	1328.9

Table 7. Comparing design rainfall of 2062 in Seoul (mm)

Return Period	20 year	50 year	100 year	200 year
Stationary	306.1	383.7	450.0	524.0
Non-Stationary	624.7	848.3	1063.4	1328.9
RCP 8.5 (2000~2063)	342.9	489.5	637.2	827.1

활용한 빈도해석은 RCP 8.5의 행정구역별 일강우량 자료에서 서울지역의 2000년부터 2063년까지에서 연최대강우량을 추출하여 강우빈도해석을 수행하였다. Table 7을 통하여 비정상성 빈도해석을 수행한 확률강우량은 정상성 빈도해석의 확률강우량보다 약 2배 정도 큰 값이 산정되며, 기후변화 시나리오 자료를 활용하여 산정한 확률강우량 보다 300 mm 정도 크게 산정된다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 모수 추정식을 활용한 비정상성 빈도해석 시, 2063년에는 재현기간 30년의 확률강우량이 경상북도 구미시에서는 11,346 mm, 충청도 예산군에서는 15,620 mm와 같이 비정상적으로 과도하게 산정되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 행정구역별로 재구축한 연최대강우량에 대한 GEV 분포함수의 모수를 비선형적 모수 추정식을 이용하여 산정하는 비정상성 GEV 모형에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구를 통해서 도출된 결론은 다음과 같다.

경향성을 가지고 있는 지역에 대하여 비정상성 강우빈도해석을 수행하기 위한 방법으로 GEV 분포의 모수 추정식을 통계적 모멘트를 활용하여 제안하였다. 본 연구에서는 종속변수인 GEV 분포의 세 가지 모수를 독립변수인 평균과 왜곡도가 시간에 따라 변화하는 양상과 모수와의 관계성을 고려하여 다양한 모수 추정식을 도출한 후, 검증을 통하여 행정구역별로 모수 추정식을 산정하였다. 현재시점을 2007년이라 가정하여 2012년의 확률강우량을 추정한 결과 총 4가지 모수 추정방법에 대하여 지역별로 실제값과 유사하게 도출되는 모수 추정식이 다르게 도출되었다. 이는 강우가 증가하는 경향성을 가지고 있더라도 기상학적 및 지형학적 특성 등으로 지역별로 강우의 경향성에 대한 차이가 존재하며, 이로 인해 행정구역별 비정상성 빈도해석이 필요함을 확인할 수 있다.

또한, GEV 분포함수의 비선형 모수 추정식에 대한 검증을 수행한 결과, 경향성을 가지고 있는 76개 행정구역 중 55개 지역에서 선형적 모수 추정식을 활용한 비정상성 빈도해석 및 정상성 빈도해석 결과보다 관측값과 가까운 값으로 도출되었다. 25년 이동평균기간을 이용하여 16개 구간이 도출되어 자료수의 부족으로 5년 후에 대한 검정이 이루어졌으나, 다수의 지역에서 선형적 모수 추정식보다 관측값에 가까운 확률강우량을 확인하여 비선형적 모수 추정식을 사용하는 것이 보다 정확한 확률강우량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 현재의 짧은 기간의 자료로는 비정상성 빈도해석을 수행시에는 먼 미래의 확률강우량을 추정하는 것보다 20년 이내의 가까운 미래의 확률강우량을 추정해야 함을 확

인할 수 있었다. 50년 후인, 2062년의 확률강우량을 산정하여 정상성, 비정상성 빈도해석 결과와 RCP 8.5 자료를 활용한 빈도해석 결과를 비교한 결과 비정상성 빈도해석을 수행한 확률강우량이 과다 추정됨을 확인할 수 있었다. 이는 현재 비정상성 빈도해석 분석 시, 40년의 단기 자료를 활용하여 빈도해석을 수행하였으므로 먼 미래의 확률강우량 산정시에 활용되는 모수 추정식의 정확도가 낮아지기 때문으로 판단되며 미래의 강우패턴 파악을 위하여 장기적인 기후변동성을 고려하여 보다 신뢰성 있는 확률강우량 산정에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부 한국연구재단의 지원(No.2011-0028564)과 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원(NEMA-자연-2011-42)을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- Cannon, A.J. (2010) A flexible nonlinear modeling framework for nonstationary generalized extreme value analysis in hydroclimatology, *Hydrol. Process* Vol. 24, Issue 6, pp. 673-685.
- El Adlouni, S., Ouarda, T.B.M.J., Zhang, X., Roy R. and Bobée, B. (2007) Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model, *Water Resources Research*, Vol. 43, W03410, doi:10.1029/2005WR004545.
- Goo, Y.J. (2011) Parameter Estimation of GEV Distribution Considering the Non-stationarity, MS Thesis, Yonsei University.
- Hundechea, Y., St-Hilaire, A., Ouarda, T.B.M.J., El Adlouni, S. and Gachon, P. (2008) A nonstationary extreme value analysis for the assessment of changes in extreme annual wind speed over the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 47, No. 11, pp. 2745-2759.
- IPCC (2007) *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis*. Contributions of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.
- Jung, I.W., Bae, D.H. and Kim, G. (2011) Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea, *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 359-370.
- Katz, R.W. (2013) Statistical methods for nonstationary extremes. In *Extremes in a Changing Climate*, pp. 15-37. Springer Netherlands.
- Kim, B.S., Lee, J.K., Kim, H.S. and Lee, J.W. (2011) Non-stationary frequency analysis with climate variability using conditional generalized extreme value distribution, *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 499-514.
- Kwon, H.H., So, B.J., Yoon, P.Y., Kim, T.W. and Hwang, S.H.

- (2011) A comparison of nonstationary frequency analysis using successive average and moving average method, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 6, pp. 269-280.
- Kwon, Y.M., Park, J.W. and Kim, T.W. (2009) Estimation of design rainfalls considering an increasing trend in rainfall data, *Journal of the Korean Society of Civil Engineer*, Vol. 29, No. 2B, pp. 131-139.
- Lee, C.J., Ahn, J.H. and Kim, T.W. (2010) Evaluation of probability rainfalls estimated from non-stationary rainfall frequency analysis, *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 187-199.
- Martins, E.S. and Stedinger, J.R. (2000) Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 737-744.
- Oh, J.S., Kim, H.S. and Seo, B.H. (2006) Trend and shift analysis for hydrologic and climate series, *Journal of the Korean Society of Civil Engineer*, Vol. 26, No. 4B, pp. 355-362.
- Park, J.S., Kang, H.S., Lee, A.Y. and Kim, M.K. (2011) Changes in the extreme daily rainfall in South Korea, *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 2290-2299.
- Seo, L., Choi, M. and Kim, T.W. (2010) Outlook for temporal variation of trend embedded in extreme rainfall time series, *Journal of Wetlands Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 13-23.

© Received March 12, 2013

© Revised March 13, 2013

© Accepted May 21, 2013