



# 기후변화에 따른 주요 도시의 하수도 침수 재현기간 예측

## Prediction of Return Periods of Sewer Flooding Due to Climate Change in Major Cities

박규홍<sup>1\*</sup>·유순유<sup>1</sup>·밤바도지 엘베자르갈<sup>2</sup>  
KyooHong Park<sup>1\*</sup>·Soonyu Yu<sup>1</sup>·Elbegjargal Byambadorj<sup>2</sup>

<sup>1</sup>중앙대학교 사회기반시스템공학부, <sup>2</sup>울란바타르 상하수도국  
<sup>1</sup>Dept. of Civil Engineering at Chung-Ang University, <sup>2</sup>Water supply and sewerage authority in Ulanbataar City

### ABSTRACT

In this study, rainfall characteristics with stationary and non-stationary perspectives were analyzed using generalized extreme value (GEV) distribution and Gumbel distribution models with rainfall data collected in major cities of Korea to reevaluate the return period of sewer flooding in those cities. As a result, the probable rainfall for GEV and Gumbel distribution in non-stationary state both increased with time(t), compared to the stationary probable rainfall. Considering the reliability of  $\xi_1$ , a variable reflecting the increase of storm events due to climate change, the reliability of the rainfall duration for Seoul, Daegu, and Gwangju in the GEV distribution was over 90%, indicating that the probability of rainfall increase was high. As for the Gumbel distribution, Wonju, Daegu, and Gwangju showed the higher reliability while Daejeon showed the lower reliability than the other cities. In addition, application of the maximum annual rainfall change rate ( $\xi_1 \cdot t$ ) to the location parameter made possible the prediction of return period by time, therefore leading to the evaluation of design recurrence interval.

**Key words:** Generalized extreme value (GEV) distribution, Gumbel distribution, climate change, return period, sewer flooding

**주제어:** 일반극치분포(GEV분포), 검분포, 기후변화, 재현기간, 하수도 침수

## 1. 서 론

최근 세계적으로 지리적 위치 또는 과거 발생 시기를 벗어나는 가뭄, 홍수를 비롯한 이상 기상현상이 빈번하게 관측되고 있다. 이러한 기후변화의 영향으로 특정지역에서 극한강우로 인한 하천유황이 변화하고, 도심침수 등의 횡수가 증가하게 되었으며, 이는 수문순환과정에서 일어나는 사상들의 강도가 커지게 됨을 의미한다.

과거 15년 동안에 홍수와 관련된 피해 기록들을 조

사해 보면, 1999년의 집중호우, 2002년 태풍 ‘루사’, 2003년 태풍 ‘매미’, 2006년 집중호우 및 2007년 태풍 ‘나리’ 등의 피해와 더불어 2009년에 9월 발생한 부산 지역의 집중호우와 2010년 9월 서울에 발생한 시간당 100mm 이상의 집중호우로 인한 피해를 겪은 바 있고, 2011년에는 여름철 국지성 집중호우로 인해 많은 도심지역에서 재산과 인명피해를 입었다. 서울시에는 2012년 7월 26일부터 28일 동안 내린 총 강우량이 620mm로 1907년 서울에서 처음으로 강우를 관측하기 시작한 이후 가장 많은 강우량을 기록했다. 또한 관악구에서는 시간당 111mm라는 최고치를 기록하는 등

Received 23 November 2015, revised 14 January 2016, accepted 18 January 2016  
\*Corresponding author: KyooHong Park (E-mail: kpark@cau.ac.kr)

pp. 001-008
pp. 009-017
pp. 019-031
pp. 033-040
pp. 041-049
pp. 051-058
pp. 059-067
pp. 069-075
pp. 077-085
pp. 087-097
pp. 099-104
pp. 105-111

피해 규모 역시 증가하고 있는 추세이다. 2014년 8월 말에도 부산시에 시간당 130mm의 폭우가 쏟아지는 등 창원과 경남지역에 수해를 입었다. 최근 50년 동안 전국적으로 강수일수는 감소하고 일강수량 80mm 이상인 호우발생 빈도는 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 이는 홍수 및 집중호우와 같은 극치사상의 발생빈도와 강도가 동시에 증가될 가능성과 더불어 대한민국 유역환경이 기후변화에 대한 취약성이 높다는 것을 시사하고 있다.

이와 같은 강우사상의 변동을 예측하고 대처하기 위해서는 과거의 강우자료를 바탕으로 한 정량적 분석이 매우 중요하다 할 수 있으며 본 연구에서는 이와 같은 극치사상의 발생빈도의 증감을 정량적으로 분석하기 위해 비정상 계열의 극치분포(Non-Stationary Extreme Value Distribution) 모델을 사용하여 국내 주요도시별 극한 강우의 특성 및 향후 극한 강우량 변동을 예측하였고 이를 하수관로의 계획 확률년수 관점에서 검토하였다.

## 2. 확률강우량 산정이론

연간 최대 시간당 강우량과 같이 자료의 최대치 혹은 최소치의 자료의 열은 일반 극치 분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 따라야 한다. 이러한 이유로 GEV 분포는 수문자료 중 홍수량 혹은 갈수량 자료계열의 분석에 널리 사용되고 있으며 최근 기후변화 예측을 위한 확률강우량을 산정하는 연구에 많이 활용되고 있다. 극치분포의 한 형태인 Gumbel분포는 “1999년도 수자원관리기법개발 연구조사 보고서-한국확률강우량도 작성(건설교통부, 2000)”에서 대한민국 지형에 대한 최적의 확률분포형으로 채택했으며, 국립방재연구소의 FARD(2011)를 활용하여 강우자료를 분석한 결과 추천 분포형으로 선정되었다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 GEV모델과 이의 한 형태인 Gumbel 분포를 사용하여 우리나라 대도시의 극한 강우량을 분석하였다.

### 2.1 GEV(Generalized Extreme Value)분포와 Gumbel 분포

서로 독립이고 동일한 분포를 따르는 확률변수의 열  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 이 있을 때 이 값의 최댓값  $M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 의 분포는 다음 식 (1) 같은 극치 분포(Extreme value distribution)를 따른다.

$$F_{GEV}(x) = \exp\left[-\left(1 - \frac{\beta(x-\xi)}{\alpha}\right)^{1/\beta}\right] \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 축척매개변수(scale parameter),  $\beta$ 는 형상매개변수(shape parameter),  $\xi$ 는 위치매개변수(location parameter)라 불리며, 변량  $x$ 값의 범위는 매개변수  $\beta$ 의 부호에 따라 결정된다.  $\beta < 0$ 이면 Type-II 극치분포(Extreme Value Type-II, EV2)가 되고  $\xi + \alpha/\beta < x < \infty$ 의 값을 가지게 되어 홍수 빈도해석에 적절한 분포가 된다.  $\beta > 0$ 이면 Type-III 극치분포(Extreme Value Type-III, EV3)가 되고  $-\infty < x < \xi + \alpha/\beta$ 의 값을 가지게 되어 상한계가 존재한다는 충분한 증거가 있기 전에는 홍수빈도해석에 적용되기에는 문제가 있다. 한편  $\beta=0$ 이면 Type-I 극치분포(Extreme Value Type-I, EV1)가 되고  $-\infty < x < \infty$ 의 값을 가진다.

Type-I 극치분포는 극치자료의 빈도해석에 많이 사용되는 분포로서 GEV 분포에서 매개변수  $\beta=0$ 이며, Gumbel 분포 혹은 Fisher-Tippett Type-I 분포로 알려져 있다. 상한 값을 갖고 있지 않은 연 최대 강우량 등과 같은 수문자료는 빈도 분석에 Gumbel 분포가 많이 사용된다. Gumbel 분포의 누적분포함수  $F_I(x)$ 는 식 (1)로부터 다음 식 (2)로 유도된다.

$$\begin{aligned} F_I(x) &= \lim_{\beta \rightarrow 0} \exp\left[-\left(1 - \frac{\beta(x-\xi)}{\alpha}\right)^{1/\beta}\right] \\ &= \exp\left[-\left(\lim_{\epsilon \rightarrow 0} (1+\epsilon)^{1/\epsilon}\right)^{-(x-\xi)/\alpha}\right], \quad \epsilon = -\beta(x-\xi)/\alpha \\ &= \exp\left[-\exp\left(-\frac{(x-\xi)}{\alpha}\right)\right] \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2 기후변화를 고려한 Model 설정

기후변화 등에 의한 강우량의 시간적 변동은 모델 매개변수들을 시간의 함수로 가정함으로써 모사할 수 있다. 관측 자료의 통계적 성질이 시간에 불변이라 가정한 것을 정상계열(stationary sequence)이라 하고 시간에 따라 변한다고 가정한 것을 비정상 계열(non-stationary sequence)이라 한다. 비정상 계열 분석에 있어 앞서 언급된 세 개의 매개변수 모두를 시간의 함수로 볼 수 있으나 가능한 최소의 매개변수의 수로 관측 자료를 잘 설명할 수 있는 것이 최선의 방법이므로 매개변수 중 함수의 최댓값의 위치를 나타내고 있어 강우량 증감에 가장 민감하게 반응하는  $\xi$ 만을 다음과 같이 시간의 1차 함수로 가정하여 분석을 하였다.



$$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 t \quad (3)$$

$\xi$ 를 포함한 나머지 두 매개변수들을 시간의 함수로 보는 경우 또는 각 매개변수들을 시간의 2차 이상의 시간 함수로 묘사하는 경우도 가능하나 그 결과가 식 (3)과 같이  $\xi$ 만을 시간의 1차 함수로 묘사하는 경우의 결과와 거의 차이가 없음을 밝혀둔다.

### 2.3 Model Parameter 산정 방법

$n$ 개의 관측 자료의 열  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 이 서로 독립이고 각 관측 자료들이 매개변수가  $k$ 개인 동일한 확률 밀도 함수  $f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \equiv f(x; \theta)$ 를 따르는 경우 관측자료의 열이 나올 확률은 다음과 같은 결합 확률 밀도 함수에 비례한다.

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) \equiv P(\mathbf{x}; \theta) = f(x_1; \theta) f(x_2; \theta) \dots f(x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (4)$$

여기서 굵은 문자는 각각  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ,  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ 와 같은 확률변수와 매개변수의 열을 벡터로 나타낸 것이다. 본 분석의 경우와 같이 모델을 결정한다는 것은 관측 자료  $x_i$ 로부터  $\theta_i$ 들을 결정하는 것이므로  $x_i$ 가 상수이고  $\theta_i$ 가 변수인 다음 식과 같은 형태의 함수  $L$ 의 극값을 구하는 문제로 귀결되는데 이와 같은 함수를 우도 함수(likelihood function)라 한다.

$$L(\theta | \mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n g(\mathbf{x} | \theta) \quad (5)$$

이와 같은 우도 함수를 이용하여 다음 식(5)와 같은  $k$ 개의 연립방정식을 통해  $\theta_i$ 들을 구하는 것은 MLE (Maximum Likelihood Estimation) 라 한다.

$$\frac{\partial L(\theta | \mathbf{x})}{\partial \theta_i} = 0, (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (6)$$

통상적으로 편의상  $L$ 보다는 이의 로그인  $\ell = \ln L$ 를 이용하여 해를 구한다.

### 2.4 재현주기에 따른 확률 강우량 산정 방법

식 (1)~(2)  $F(x)$ 는 누적분포함수를 의미하므로 확률변수  $x$ 가 강우량인 경우  $F(x)$ 는 주어진 기간에 최대 강우량이  $x$ 이하일 확률을 의미한다. 따라서 주어

진 기간 동안  $x$ 이상의 강우가 올 확률은  $1 - F(x)$ 이고, 따라서  $x$ 이상의 강우량의 재현주기는 이의 역수인  $T = 1/(1 - F)$ 가 되어 특정 재현주기  $T$ 에 해당하는 확률강우량  $x_T$ 는 다음과 같다.

$$x_T = F^{-1}(1 - 1/T) \quad (7)$$

이를 앞서 언급한 극치분포함수에 적용하면 다음과 같다.

$$x_T = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{\beta} \left[ 1 - \left\{ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right\}^\beta \right] & \text{for } GEV \\ \xi - \alpha \ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right] & \text{for } Gumbel \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)에서  $\xi$ 는 식 (3)으로 표현되며 정상계열 분석이면  $\xi_1 = 0$ , 비정상계열 분석이면  $\xi_1 \neq 0$ 이다.

## 3. 연구결과

### 3.1 대상관측소 및 자료수집

본 연구에서는 대한민국 주요도시(서울, 강릉, 인천, 원주, 대전, 대구, 울산, 광주, 부산)의 40년(1972~2011) 강우자료(hourly rainfall data)를 대상으로 지속 시간별 강우량을 분석을 통해 비정상성 여부를 검토하였다. Table 1은 관측소의 위치를 나타낸 것이며 Station Code는 기상청 관측소 코드를 의미한다.

Table 1. Location of Rain Gauge Stations

Station Code	Station Name	Location	
		Latitude	Longitude
105	Gangneung	37° 75'	128° 88'
108	Seoul	37° 57'	126° 95'
112	Incheon	37° 48'	126° 62'
114	Wonju	37° 20'	127° 56'
133	Daejeon	36° 59'	127° 22'
143	Daegu	35° 53'	128° 37'
152	Ulsan	35° 33'	129° 19'
156	Gwangju	35° 10'	126° 53'
159	Busan	35° 06'	129° 01'

### 3.2 기후변화를 고려한 GEV 분포와 Gumbel 분포의 매개변수 산정

우리나라 대도시의 40년간의 강우자료에 대해 (1)의 GEV 분포 또는 식 (2)의 Gumbel 분포를 적용하여

pp. 001-008  
pp. 009-017  
pp. 019-031  
pp. 033-040  
pp. 041-049  
pp. 051-058  
pp. 059-067  
pp. 069-075  
pp. 077-085  
pp. 087-097  
pp. 099-104  
pp. 105-111

**Table 2.** Model Parameters Estimated from Annual Maximum Hourly Rainfall

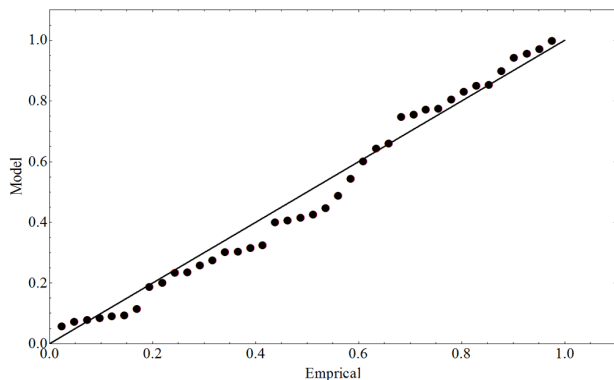
City	GEV distribution				Gumbel distribution		
	Location		Scale ( $\alpha$ )	Shape ( $\beta$ )	Location		Scale ( $\alpha$ )
	$\xi_0$	$\xi_1$			$\xi_0$	$\xi_1$	
Seoul	34.569	0.418	12.985	-0.116	34.407	0.386	12.658
Gangneung	22.0154	0.176	8.279	0.302	22.919	0.205	9.787
Incheon	29.008	0.2432	10.139	0.129	29.325	0.263	10.767
Wonju	27.218	0.264	7.934	0.326	29.42	0.231	9.502
Deajeun	34.949	0.087	10.796	-0.2687	35.03	0.012	9.911
Daegu	21.5467	0.27	7.3951	0.0828	22.733	0.228	7.684
Ulsan	24.713	0.129	8.778	0.087	25.529	0.11	9.102
Gwangju	28.474	0.344	10.612	0.129	28.782	0.294	10.108
Busan	34.878	0.135	12.598	0.14	35.326	0.161	13.455

식 (6)의 MLE 방법을 통해 모델 매개변수를 구할 수 있었으며 이를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서  $\xi_0$ 는 극한 강우량의 평균값을 의미하고  $\xi_1$ 는 시간에 따른  $\xi$ 의 증감을 나타내는데 GEV와 Gumbel model 공히  $\xi_1$  값이 양수 값을 보임에 따라 우리나라의 모든 대도시에서 지난 40년간 극한 강우량의 강도가 증가했음을 의미한다. 이러한 추세는 180~720분 누적 강우량에 대해서도 동일하게 성립됨을 확인할 수 있었다(Byambadorj (2013) 참고).

### 3.3 비정상계열의 매개변수에 대한 적합도 분석

$n$  개의 측정자료(연 특정시간당 강우량)를 발생시점과 무관하게 크기순으로 나열한 경우  $k$  번 째 값을  $x_{(k)}$  라 한다면 누적분포함수  $F(x_{(k)})$ 는  $x_{(k)}$  이하가 나올 확률이므로  $x_{(k)}$ 는 근사적으로  $k/(n+1)$ 과 같아야 한다.



**Fig. 1.** Residual Probability Plot in linear trend Gumbel model of Gangneung annual maximum non-stationary hourly rainfall series.

단, 비정상계열 분석의 경우 시간에 대한 변화량이 개입되어 있어 각 자료를 표준화한 후 비교해야 한다. Fig. 1은 강릉의 1시간 강우량에 대한 비정상 계열분석에 대한 잔류 확률도(Residual Probability Plot)이다. 대체적으로 선형성을 유지하고 있음을 알 수 있으며 여타 도시에 대한 결과도 유사함을 확인할 수 있었다(Byambadorj (2013) 참고).

### 3.3 비정상계열의 GEV 분포와 Gumbel 분포 확률강우량 산정

Table 3은 Gumbel 분포에 따른 비정상계열과 정상계열의 확률강우량을 추정된 값이다. 체류시간이 짧은 하수관거의 특성과 하수관거의 설계기준을 고려하여 5년, 10년, 30년의 재현기간과 지속시간 60분, 120분, 180분을 중심으로 검토하였다. (GEV분포에 따른 비정상계열의 확률강우량 값을 나타낸 표는 본 논문에 수록하지 않음. Byambadorj (2013) 참고)

Table 3에 의하면 비정상계열의 Gumbel 분포에 의해 추정된 확률강우량이 정상계열의 경우보다 대부분 증가한 것으로 나타났다. 편차의 크기는 대전이 가장 적은 곳으로 광주가 가장 큰 곳으로 나타났는데 이는 광주의 강우강도의 시간에 따른 변화가 가장 큰 곳임을 암시한다. 비정상계열의 값이 정상계열의 값보다 크게 나타나는 이유는 모델의 특성상 정상계열의 경우 시작 시점(40년 전)에서 현재까지 동일한 확률분포를 띤다고 가정한 반면 비정상계열의 경우 강우량의 확률분포가 이동한다고 가정했기 때문으로 비유하자면 동일한 자료를 0차함수와 1차함수로 fitting한 결과의 차이와 유사하다고 할 수 있다. 만약 기울기에 해당하는  $\xi_1$ 가 음수였다면 반대의 상황이 도출



**Table 3.** Comparison between Stationary and Non-stationary Probable Rainfall by Gumbel Distribution

Return period(yr)	Duration (min)	60			120			180		
		Stationary	Non-stationary	Increment	Stationary	Non-stationary	Increment	Stationary	Non-stationary	Increment
Seoul	5	66.2	70.1	+3.9	91.4	94.8	+3.4	114.8	119.4	+4.6
	10	77.8	81.4	+3.6	107.9	111.2	+3.3	136.3	140.9	+4.6
	30	95.4	98.4	+3	133	136.1	+3.1	168.8	173.3	+4.5
	50	103.4	106.2	+2.8	144.4	147.5	+3.1	183.7	188.1	+4.4
Gangneung	5	42.2	45.79	+3.59	63.7	69.04	+5.34	82.1	88.34	+6.24
	10	49.8	53.14	+3.34	75.7	80.82	+5.12	98.2	104.19	+5.99
	30	61.4	64.24	+2.84	94	98.61	+4.61	122.6	128.13	+5.53
Incheon	5	66.6	69.30	+2.7	102.3	106.74	+4.44	133.7	139.1	+5.365
	5	51.3	55.99	+4.69	81.7	86.07	+4.37	100.8	107.21	+6.41
	10	59.7	64.07	+4.37	96.2	100.5	+4.3	119.5	125.67	+6.17
	30	72.4	76.28	+3.88	118.2	122.32	+4.12	147.7	153.56	+5.86
Wonju	50	78.2	81.86	+3.66	128.2	132.28	+4.08	160.6	166.29	+5.69
	5	49.2	52.91	+3.71	70.2	76.23	+6.03	86.2	93.99	+7.79
	10	56.8	60.04	+3.24	80.7	86.27	+5.57	99.7	106.92	+7.22
	30	68.2	70.82	+2.62	96.7	101.45	+4.75	120.2	126.47	+6.27
Daejeon	50	73.5	75.74	+2.24	104	108.37	+4.37	129.6	135.39	+5.79
	5	50.1	50.37	+0.27	75.2	77.71	+2.51	88.6	91.15	+2.55
	10	57.6	57.81	+0.21	87	89.42	+2.42	102.5	105.05	+2.55
	30	68.8	69.05	+0.25	104.7	107.11	+2.41	123.5	118.39	-5.11
Daegu	50	73.9	74.18	+0.28	112.9	115.19	+2.29	133.1	135.66	+2.56
	5	39.8	43.38	+3.58	58.4	64.23	+5.83	68.5	74.15	+5.65
	10	46.1	49.14	+3.04	67.2	72.50	+5.3	79.1	84.42	+5.32
	30	55.5	57.86	+2.36	80.6	85	+4.4	95.2	99.94	+4.74
Ulsan	50	59.8	61.84	+2.04	86.7	90.71	+4.01	102.5	107.03	+4.53
	5	41.7	43.58	+1.88	65.1	67.53	+2.43	81.1	85.8	+4.7
	10	48.6	50.41	+1.81	76.5	78.76	+2.26	95.3	99.66	+4.36
	30	59.1	60.73	+1.63	93.6	95.72	+2.12	116.8	120.61	+3.81
Gwangju	50	63.9	65.44	+1.54	101.4	103.46	+2.06	126.6	130.18	+3.58
	5	50.2	55.70	+5.5	75.2	83.23	+8.03	91.2	100.94	+9.74
	10	58.1	63.29	+5.19	87.1	94.47	+7.37	106.5	115.54	+9.04
	30	70	74.75	+4.75	98.5	111.45	+12.95	129.7	137.61	+7.91
Busan	50	75.5	79.98	+4.48	105	119.21	+14.21	140.3	147.68	+7.38
	5	58.9	61.95	+3.05	86.1	92.81	+6.71	105.7	112.83	+7.13
	10	69	72.04	+3.04	102.4	108.75	+6.35	126.1	132.82	+6.72
	30	84.4	87.3	+2.9	127	132.85	+5.85	157	163.04	+6.04
50	91.4	94.27	+2.87	138.2	143.84	+5.64	171	176.84	+5.84	

되었을 것이므로 이 결과는  $\xi_1$ 가 양수로 예측되었기 때문이라고 할 수도 있을 것이다.

### 3.4 시간에 따른 강우강도 증가의 신뢰도 분석

앞서 Table 2에서 알아본 바와 같이  $\xi_1$  값이 양수란 의미는 우리나라의 모든 대도시의 극한 강우의 강도가

시간에 따라 더 심화됨을 의미한다. 하지만  $\xi_1$ 이 양수라 해서 앞으로 극한 강우의 강도가 증가할 확률이 100%란 의미는 아니므로 본 절에서는 이와 같이  $\xi$ 가 증가할 확률, 즉  $\xi_1$ 이 양수일 확률에 대한 분석을 해 보기로 한다.

각 매개변수의 분산 또는 표준편차는 다음과 같이 우도함수의 2차 미분으로 이루어진 정보행렬을  $I_0$  통

pp. 001-008  
pp. 009-017  
pp. 019-031  
pp. 033-040  
pp. 041-049  
pp. 051-058  
pp. 059-067  
pp. 069-075  
pp. 077-085  
pp. 087-097  
pp. 099-104  
pp. 105-111

**Table 4.** Uncertainty and Reliability of  $\xi_1$  in GEV and Gumbel Distribution Functions With Variation of Rainfall Duration

City	Duration (min)	GEV Distribution			Gumbel Distribution		
		Mean	Standard Deviation	Reliability	Mean	Standard Deviation	Reliability
Seoul	60	0.418	0.096	99.99%	0.386	0.183	98.25%
	120	0.462	0.112	99.99%	0.385	0.2616	92.95%
	180	0.428	0.119	99.98%	0.437	0.387	87.06%
Gang-neung	60	0.176	0.138	89.89%	0.205	0.172	88.33%
	120	0.173	0.217	78.73%	0.293	0.207	92.15%
	180	0.255	0.175	92.75%	0.336	0.114	99.84%
Incheon	60	0.243	0.175	91.75%	0.263	0.149	96.12%
	120	0.227	0.139	94.89%	0.232	0.263	81.11%
	180	0.327	0.116	99.76%	0.337	0.319	85.46%
Wonju	60	0.264	0.186	92.21%	0.231	0.127	96.55%
	120	0.362	0.158	98.90%	0.349	0.195	96.33%
	180	0.429	0.146	99.86%	0.447	0.251	96.25%
Daejeon	60	0.087	0.115	77.53%	0.012	0.019	73.62%
	120	0.121	0.171	76.04%	0.131	0.199	74.48%
	180	0.09	0.147	50.00%	0.128	0.239	70.39%
Daegu	60	0.269	0.105	99.48%	0.228	0.0116	99.99%
	120	0.354	0.144	99.30%	0.349	0.172	97.88%
	180	0.314	0.132	99.13%	0.312	0.207	93.41%
Ulsan	60	0.129	0.134	83.21%	0.11	0.131	79.95%
	120	0.173	0.06	99.80%	0.134	0.214	73.44%
	180	0.371	0.188	97.58%	0.279	0.267	85.20%
Gwangju	60	0.344	0.1279	99.64%	0.294	0.149	97.58%
	120	0.459	0.1731	99.60%	0.449	0.208	98.46%
	180	0.522	0.1647	99.92%	0.546	0.143	99.99%
Busan	60	0.135	0.179	77.46%	0.161	0.205	78.39%
	120	0.349	0.161	98.49%	0.366	0.301	88.80%
	180	0.407	0.14	99.81%	0.4	0.369	86.08%

해 구할 수 있다.

$$I_0 = \begin{pmatrix} -\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \ell(\theta) & -\frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \xi_0} \ell(\theta) & -\frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \xi_1} \ell(\theta) \\ & -\frac{\partial^2}{\partial \xi_0^2} \ell(\theta) & -\frac{\partial^2}{\partial \xi_0 \partial \xi_1} \ell(\theta) \\ \text{대칭} & & -\frac{\partial^2}{\partial \xi_1^2} \ell(\theta) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$\ell(\theta)$ 는 식 (5)의 log우도함수를 의미하고 이로부터 변수들의 covariance  $\sigma_{ij}$ 가 다음 식 (11)과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{ij} = (I_0^{-1})_{ij} \quad (10)$$

각 변수의 분산은 행렬  $\sigma$ 의 대각성분이고 이 값에 의거  $\xi_1$ 에 대한 평균과 표준편차를 지속시간(60분, 120분, 180분)별로 Table 4에 나타내었으며  $\xi_1$ 이 양수

일 확률이 극한 강우의 강도가 증가한다는 주장의 신뢰성을 나타낸다는 의미에서  $\xi_1 > 0$ 인 확률을 신뢰도 (Reliability)라 정의하였다.

GEV 분포에서 서울, 대구, 광주, 광주의 경우에는 모든 지속시간에 90% 이상의 신뢰도를 나타내어 강우량 증가 확률이 높게 나타났으며 대전의 경우가 50~70%대의 값을 보임을 알 수 있다. 대전이 상대적으로 신뢰도가 낮게 나온 이유는 변화율인  $\xi_1$ 의 값 자체가 상대적으로 적은 반면 표준편차는 여타 도시와 크게 차이가 없기 때문으로 이는 경계선 근처에 값이 분포하면 경계선을 넘을 확률이 커지는 것과 같은 당연한 결과이며 다른 관점으로 분석하자면 타 도시에 비해 강우 강도의 변동이 상대적으로 미미하여 향후 강우 강도의 증감 여부가 불투명한 것으로 이해할 수 있다.

이חק표 등(2012)에서 과거 50년간의 강우자료를 이용해 분석했을 때 서울시 강우지속시간 60분 동안의 신뢰도



는 87.9%, 120분 동안의 신뢰도는 74.2%, 180분 동안의 신뢰도는 75.5%를 나타내지만, 본 연구에서와 같이 과거 40년만의 자료를 분석한 결과를 보면 서울시 강우지속시간 60분 동안의 신뢰도는 95%, 120분 동안의 신뢰도는 96%, 180분 동안의 신뢰도는 95.6%로 향상되어 제시되고 있음을 보여주고 있다. 이는 강우강도의 증가추세가 비교적 최근에 발생하고 있음을 나타낸다.

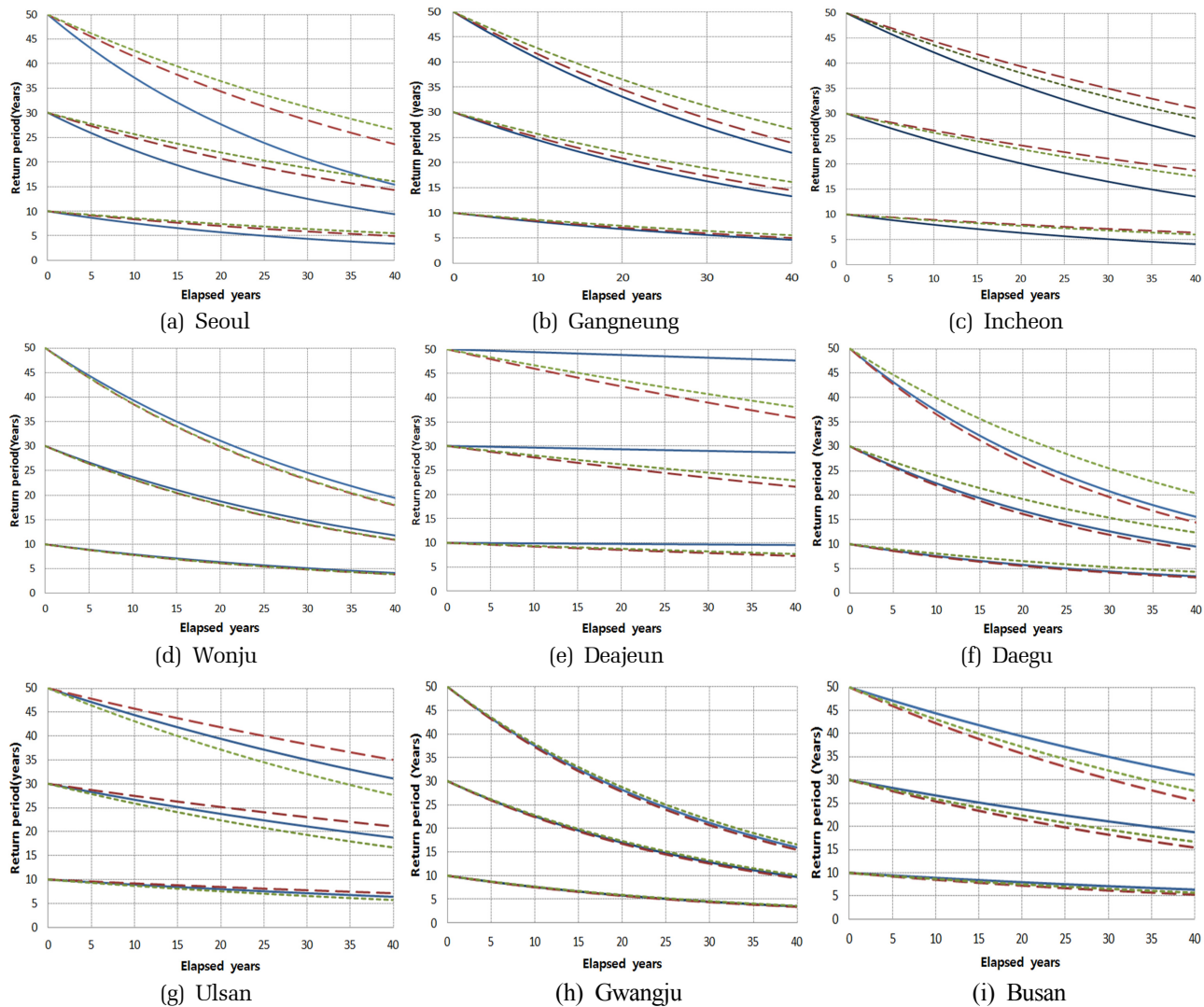
### 3.5 시간의 변화에 따른 재현기간의 변화와 하수관거 시스템의 설계기준 평가

Mailhot 등(2010)은 시간의 변화에 따른 초과확률의 변화를 표현하기 위하여 비정상계열의 GEV의 누적함

수식에 변위치  $x$ 를 시간  $t_0$ 에서의 누적함수  $F_0$ 로 표현하여 다음과 같이 나타내었다.

$$F_t = \begin{cases} \exp\left[-\left\{(-\ln F_0)^\beta + \frac{\beta}{\alpha}\xi_1(t)\right\}^{1/\beta}\right] & \text{for GEV 분포} \\ \exp\left[\exp\left\{\frac{\xi_1(t)}{\alpha}\right\}\ln F_0\right] & \text{for Gumbel 분포} \end{cases} \quad (11)$$

식 (11)의 Gumbel 분포에 대해 현재의 특정 재현 주기(10년, 30년 그리고 50년)에 해당하는 강우강도의 시간에 따른 재현주기의 변화를 지속시간별로 Fig. 4에 나타내었다(GEV분포에 관한 결과는 지면제약으로 본 논문에 수록하지 않음; Byambadorj (2013) 참조). Fig. 4에서 실선, 파선 그리고 점선은 각각 60분, 120



**Fig. 4.** Variation of Return Periods with Change of Time When Non-stationary Gumbel Distribution is applied. (Straight line: Duration 60min.; Dashed line: Duration 120min.; Dotted line: Duration 180min.)

pp. 001-008  
pp. 009-017  
pp. 019-031  
pp. 033-040  
pp. 041-049  
pp. 051-058  
pp. 059-067  
pp. 069-075  
pp. 077-085  
pp. 087-097  
pp. 099-104  
pp. 105-111



분 그리고 180분 지속 강우량의 재현주기를 나타내며 현재(0년)의 재현주기 10년, 30년, 50년에 해당하는 강우강도의 변화를 한 그림에 나타내었다. 서울, 강릉 그리고 인천의 경우 현재 10년, 30년 그리고 50년 빈도의 강우강도 모두 60분 지속시간(실선)의 감소 폭이 120분이나 180분 지속시간(파선과 점선)에 비해 크게 나타난 반면 원주, 대구 그리고 대전의 경우 120분의 변화율이, 울산은 180분의 변화율이 가장 큰 것으로 나타났으며 광주와 대구의 경우는 지속시간에 따른 차이가 거의 없었다. 이와 같은 결과는 미래의 강우량의 변화를 대응함에 있어서 각 대도시의 강우 특성에 따른 서로 다른 접근 전략이 이루어져야함을 의미한다. 예를 들어 서울의 경우 지속시간이 짧을수록 변화율이 크다는 것은 짧은 시간동안 집중강우가 발생할 확률이 타 도시에 비해 더 크다는 것으로 해석되고 이는 강우의 절대량에 대한 대처보다는 집중 강우에 대한 대처가 더 중요한 문제로 제기되어야 함을 의미한다.

한편 지속시간 60분의 재현주기 30년의 강우강도를 기준으로 분석을 해 보면 현재의 30년 빈도의 60분 지속 강우량이 40년이 경과한 후, 서울은 9년, 강릉과 인천은 13년, 원주는 12년, 대전은 29년, 대구는 9년, 울산과 부산은 18년, 광주는 10년 강우 강도에 불과한 것으로 나타났다. 예를 들면 서울에서 하수관의 용량을 재현기간 30년의 강우사상에 대처하도록 설계하고 기대수명을 40년이라 한다면 기대수명의 마지막 시점부가 됐을 때 9년 빈도의 강우량을 대처할 수 있는 용량에 불과하여 심각한 용량 부족이 발생할 수 있음을 나타낸다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 단순히 기대수명 마지막 시점부를 기준으로 하수관 설계를 한다면 대부분의 사용시간 동안 과도한 용량의 설계임이 당연할 것이므로 기후변화를 고려한 적절한 용량 산정을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기후변화를 고려하여 시간에 따라 강우 사상의 분포가 이동하는 비정상계열(Non-stationary) 극치분포 모델을 이용하여 서울을 포함한 우리나라 8개 주요도시의 강우강도의 변화를 예측하고 이를 하수관 설계기준 관점에서 분석하였다. 앞서 알아본 바와 같이 모든 주요 대도시에서 재현주기에 따른 강우량이 정상계

열의 결과 보다 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났으며 70~99%의 신뢰도로 향후 강우강도가 증가할 것으로 예측되었고 이는 현재 하수관 설계에 기준이 되는 확률 강우량을 재정의 해야 할 필요성을 나타낸다. 또한 각 도시에 따라 강우의 지속시간 별, 또는 재현 주기별로 서로 상이한 변화율을 보이는 것으로 나타났고 이는 각 도시의 강우 특성에 맞는 하수관의 설계기준을 적용하여야 할 필요성을 나타낸다.

이와 같은 정성적인 경향을 실제 하수관 설계에 적용하기 위해서는 기후변화를 고려한 적절한 하수관 용량 산정 등과 같은 정량적인 값을 산출할 수 있는 추가적인 연구가 필요하며 더불어 현재 빈번히 발생하는 국지성 집중호우를 대처하기 위해서는 기초 지자체와 같은 소규모 지역 별 분석이 이루어져야 할 것이라 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부 차세대 에코이노베이션 기술개발 사업인 한국환경산업기술원 EI 사업(과제번호 : 414-111-001)의 지원을 받아 하수관거관리기술연구단 주관으로 진행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### References

Byambadorj, E. (2013). *Evaluation of sewer flooding and drought by estimating design rainfalls of cities in Korea and Mongolia due to climate change*, Mater's Thesis. Chung-Ang University.

Bell, V. A., Kaya, A.L., Jonesb, R.G., Moorea, R.J., and Reynard, N.S. (2009). Use of soil data in a grid-based hydrological model to estimate spatial variation in changing flood risk across the UK. *Journal of Hydrology*, 377(3~4), 335-350.

Choi, D. (2010), *Analysis of Impact of Future Climate Change and Evaluation on Its Effect on Water Resources in Watershed*. Master's thesis, Pukyong University.

Coles, G.S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer.

Fowler, H.J. and Kilsby, C.G. (2003). A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *International Journal of Climatology*, 23, 1313-1334.

Grum M, Jorgensen A.T, Johansen R.M, and Linde J.J. (2006).





- The effect of climate change on urban drainage: an evaluation based on regional climate model simulation.*
- He, Y., Bárdossy, A., and Brommundt, J. (2006). Non-stationary flood frequency in southern Germany. *The 7th International Conference on Hydrosience and Engineering.*
- Mailhot, A. and Duchesne, S. (2010). Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 201-208.
- Ministry of Construction and Transportation, (2000) *Study on Development of 1999 Water Resources Management Methodology - Map of Probable Rainfall in Korea.*
- Na, Y. (2009). *A Study on the Design Rainfall and Variation of Floods Due to Climate Change.* Master's thesis, Sejong Univ.
- Kim, B., Kim, B., Kyung, M., and Kim, H. (2008). Evaluation of the effect of climate change on the extreme rainfall and IDF analysis, *Korean Water Resources Association*, 41(4), 379-394.
- Kim, E., Lee, D., and Yoo, C., (2004). Analysis on effect of runoff in Dam Daecheong watershed due to climate change, *Korean Water Resources Association*, 37, 305-314.
- Korean Association of Water and Wastewater (2011). *Standard on Sewerage Facilities.* 31-33.
- Korean Meteorological Administration (2011). *White Paper on Monsoon Seasons.*
- Kwon, Y., Park, J., and Kim, T. (2009). Estimation of design probable rainfall considering increasing trend of rainfall depth, *Korean Society of Civil Engineers*, 29(2), 131-139.
- Kwon, J. (2009). *Detailing of GCM Climate Change Simulation Scale Using Climate Change Trend Analysis and Random Cascade Model.* Master's thesis, Dankook Univ.
- Lim, H., Kwon, H., Bae, D., and Kim, S. (2006). Hydrologic Analysis on Watershed of Dam Soyan Due to Climate Change Using CA-Markov technique, *Korean Water Resources Association*, 39(5), 241-245.
- Lee, H. (2012) *Analysis of Generalized Extreme Distribution on Design Rainfall Standard Due to Climate Change,* Master's thesis, Chung-Ang University.
- Lee, H., Ryu, J., Yoo, S., and Park, K. (2012) Analysis of generalized extreme value distribution to estimate stormwater capacity of sewer system under climate change, *Korean Society of Water and Wastewater*, 26(2), 321-329.
- Lee, S. (2010). *Regional Variation of Probable Rainfall Due to Climate Change,* Master's thesis, Dankook University.
- Oh, S. (2004). *Change of Flood Runoff in Rivershed Due to Climate Change.* Master's thesis, Korea University.
- Ouarda, T.B.M.J. and Adlouni, S.E. (2008). Bayesian inference of non-stationary flood frequency models, *World Environmental and Water Resources Congress 2008.*
- Park, K. (2012) *Annual Report on Development of Analysis System on Level of Sewer Service and Investigation on Planning and Evaluation System on the Integrated Sewer Asset Management System.* Research Center of Urban Sewer and Drainage System.
- Ryu, J., Lee, H., Yoo, S., and Park, K. (2014). Statistical evaluation on storm sewer design criteria under climate change in Seoul, South Korea, *Urban Water Journal*, 11(5), 370-378.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., and Gustafsson, L.G. (2008). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden : Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, 350(1-2), 100-113.
- Seo, L. (2011). *Development of Method to Estimate the Probable Rainfall Considering Climate Change,* Master's thesis, Hanyang University.
- The Seoul Institute (2011). *Forum on Flood Prevention Policy in Seoul Due to Climate Change.*

pp. 001-008

pp. 009-017

pp. 019-031

pp. 033-040

pp. 041-049

pp. 051-058

pp. 059-067

pp. 069-075

pp. 077-085

pp. 087-097

pp. 099-104

pp. 105-111