



## Development of spatial dependence formula of FORGEX method using rainfall data in Korea

Kim, Sunghun<sup>a</sup> · Ahn, Hyunjun<sup>a</sup> · Shin, Hongjoon<sup>a</sup> · Heo, Jun-Haeng<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

Paper number: 16-040

Received: 15 April 2016; Revised: 11 November 2016 / 15 November 2016; Accepted: 15 November 2016

### Abstract

The FORGEX (Focused Rainfall Growth Extension) method was developed to estimate rainfall quantiles in the United Kingdom. This method does not need any regional grouping and can estimate rainfall quantiles with relatively long return period. The spatial dependence formula ( $\ln N_e$ ) was derived to consider the distance from growth curve of proper population to the distributed network maximum (netmax) data using the UK rainfall data. For this reason, there is an inaccurate problem in rainfall quantiles when this formula is applied in Korea. In this study, the new formula was derived in order to improve such shortcomings using rainfall data of 64 sites from the Korea Meteorological Administration (KMA). A 42-year period (1973~2014) was taken as the reference period from rainfall data, then the formula was derived using three parameters such as rainfall duration, number of site, area of network. Then the new formula was applied to the FORGEX method for regional rainfall frequency analysis. In addition, rainfall quantiles were compared with those from the UK formula. As a result, the new formula shows more accurate results than the UK formula, in which the FORGEX method by the UK formula underestimates rainfall quantiles. Finally, the new improved formula may estimate accurate rainfall quantiles for long return period.

**Keywords:** FORGEX, Regional Frequency Analysis, Netmax, Spatial Dependence, Rainfall Quantile

## 우리나라 강우 자료를 이용한 FORGEX 기법의 공간상관식 개발

김성훈<sup>a</sup> · 안현준<sup>a</sup> · 신흥준<sup>a</sup> · 허준행<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>연세대학교 토목환경공학과

### 요 지

영국에서는 지역구분이 필요없고 상대적으로 긴 재현기간에 대해서도 안정적인 확률강우량 추정이 가능한 FORGEX (Focused Rainfall Growth Extension) 기법을 개발하여 강우자료의 지역빈도해석을 수행하고 있으며, 지역빈도해석에 적합한 모집단 성장곡선으로부터 네트워크 최대값(network maximum, netmax) 자료의 분포위치를 고려하기 위하여 영국 강우자료를 이용한 공간상관식( $\ln N_e$ )을 유도하였다. 이런 이유로 영국에서 개발된 공간상관식을 우리나라에 적용할 경우 부정확한 확률강우량을 산정하는 문제점이 발생한다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 우리나라 기상청 산하 유인관측소 지점 중 30년 이상의 긴 강우자료를 보유한 64개 지점의 강우자료를 이용하여 공간상관식을 유도하였다. 지점 간의 합리적인 비교를 위해 1973년부터 2014까지를 기준기간(reference period)으로 정하였고, 강우지속시간, 지점 수, 네트워크 면적 등 3가지 변수를 고려하여 공간상관식을 유도하였다. 유도된 공간상관식을 FORGEX 기법에 적용하여 지역빈도해석을 수행하였고, 기존의 영국식을 이용하여 산정한 확률강우량 값과 비교 분석하였다. 그 결과 우리나라 강우자료를 이용하여 새롭게 유도한 공간상관식은 기존의 영국식 보다 정확한 것으로 나타났고, 이를 FORGEX 기법에 적용한 결과 영국 공간상관식은 새롭게 개발한 공간상관식보다 확률강우량을 과소 추정하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 기존 FORGEX 기법에서 내포하고 있는 부정확성을 보완할 수 있고, 긴 재현기간에 대한 확률강우량을 보다 정확하게 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어:** FORGEX, 지역빈도해석, Netmax, 공간상관식, 확률강우량

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-2123-2805  
E-mail: jhheo@yonsei.ac.kr (J.-H. Heo)

## 1. 서론

전 지구적으로 나타나는 기후변화에 따른 강우사상과 강우강도의 변화로 인해 현재의 자연재해 대응 정책과 수공구조물의 설계기준에 대한 재검토가 요구되고 있다. 기존 수공구조물의 설계기준은 빈도해석을 통한 확률강우량을 산정하여 수행되지만, 실제 발생하고 있는 호우는 지점자료의 관측기간에 비하여 구하고자 하는 재현기간이 상대적으로 크기 때문에 지역빈도해석을 통하여 보다 신뢰할 수 있는 설계수문량을 재산정하는 것이 필요하다고 알려져 있다(Kim, 2004). 영국에서 발간한 Flood Estimation Handbook (Institute of Hydrology, 1999)에 의하면 지점빈도해석은 구하려는 재현기간이 짧고, 해당 지점자료가 충분히 길고 신뢰할 수 있을 때 사용할 것을 권장하고 있다. 지점자료의 기간이 구하려는 재현기간 T보다 작은 경우 지점빈도해석은 적절하지 않으며, 지점자료 기간이 T에서 2T일 때는 지점빈도해석과 지역빈도해석을 동시에 수행하는 것을 추천하고 있다. 지점자료의 기간이 2T 이상이면 지점빈도해석을 수행하는데 자료가 충분하며, 비교대상으로 지역빈도해석의 결과를 사용할 수 있다. 우리나라 강우관측소의 자료기간은 대체로 짧기 때문에 지점빈도해석 수행 시 재현기간 50년이 넘는 확률강우량은 불확실성을 내포하고 있다. 지점빈도해석 시 자료의 기간이 짧은 경우 산정된 확률강우량의 정확도가 낮아지는 단점을 극복하기 위하여 지역빈도해석 방법이 개발되었고, 다양한 연구가 수행되어 왔다(Darlymple, 1960; Hosking and Wallis, 1997; Burn, 1990; Lee and Heo, 2001; Heo et al., 2007; Lee et al., 2007; Nam et al., 2008; Oh et al., 2008; Kim et al., 2014).

영국에서는 Flood Studies Report (NERC, 1975)가 출간된 이후 지역빈도해석에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. Flood Studies Report에서 제안한 방법을 보완한 Flood Estimation Handbook (Institute of Hydrology, 1999)에서는 확률강우량 산정시 본 연구에서 적용한 경험적이고 도시적인 FORGEX (Focused Rainfall Growth Extension) 기법을 이용한 지역빈도해석을 제시하고 있으며, 국내에서도 관련 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. Kim (2004)은 자료관측기간보다 긴 재현기간의 확률강우량을 안정적으로 산정하기 위하여 한 강우역의 네트워크 최대치(netmax) 자료를 구축하여 지역빈도해석을 수행하였고, 기존 지점빈도해석의 단점을 보완하기 위하여 지수홍수법과 netmax법을 이용한 지역빈도해석을 비교·분석하였다. Nam et al. (2004)은 FORGEX 기법에 의한 지역빈도해석에서 국내 수문자료의 적용성을 검토하여 우리나라의 특성을 고려한 공간상관식 개발의 필요성을 제기

하였다. Kim et al. (2008)은 FORGEX 기법을 우리나라에 적용하기 위한 연구를 수행하여 1:2 비율의 타원형 네트워크로 구성된 FORGEX 기법이 한국의 지역빈도해석에 적합하다는 결론에 도달하였다. 하지만, 기존 FORGEX 기법에 사용된 공간상관식은 영국 강우자료의 특성을 반영하여 유도된 영국식으로 우리나라에 적용할 경우 부정확한 오류를 포함한 확률강우량을 산정하는 문제가 발생한다. 또한, 우리나라의 강우자료의 특성을 고려하여 공간상관식을 보완한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구에서는 우리나라 강우 및 지형조건을 고려한 새로운 공간상관식을 유도하였고, 이를 FORGEX 기법에 적용하여 지역빈도해석을 수행하여 확률강우량을 산정하였다. 우리나라 기상청 관측소 중 30년 이상의 자료를 보유하고 있는 64개 지점을 대상으로 확률강우량을 산정하였고, 기존의 영국식과 새롭게 유도된 공간상관식을 이용하여 산정한 결과는 네 개의 재현기간(100, 200, 500, 1000년)으로 구분하여 비교·분석을 실시하였다.

## 2. FORGEX 기법

### 2.1 FORGEX 기법을 이용한 지역빈도해석

FORGEX 기법의 지역빈도해석은 연 최대강우자료를 이용하여 대상지점을 중심으로 네트워크를 구성하고 이를 확장해 나가며 확률강우량을 산정하는 방법으로 FEH (Institute of Hydrology, 1999)에서 제안하고 있다. FORGEX 기법은 1989년 영국에서 개발된 FORGE (Focused Rainfall Growth Estimation) 방법(Reed and Stewart, 1989; 1994)을 향상시킨 기법으로, 대상지점과 네트워크에 구성된 지점들 간의 성장곡선(growth curve)을 유도하여 확률강우량을 추정하기 위해 개발되었다(Stewart et al., 1999; Reed et al., 1999). Fig. 1은 FORGEX 기법의 절차를 나타낸 것이다. FORGEX 기법의 가장 큰 특징 중 하나는 기존의 지역빈도해석에서 수행하는 지역구분의 절차를 구하고자 하는 대상지점을 중심으로 단계적인 네트워크를 구성하는 것으로 대신한다. 대상지점이 포함된 유역 내 강우 관측소들을 단계적인 네트워크를 통해 지역화한다. 이는 기존 지역빈도해석에서 지역 경계에 위치한 지점에서 나타나는 단점(지리적으로 인접해 있지만 서로 다른 지역으로 구분되어 상이한 확률강우량을 산정)을 극복할 수 있다는 장점이 있다. 각 네트워크 내에서 중앙값으로 표준화된 강우자료는 y-slice 방법을 이용하여 Gumbel 확률지에 도시하고, 공간적인 상관성을 고려한 netmax 값은  $\ln N_s$

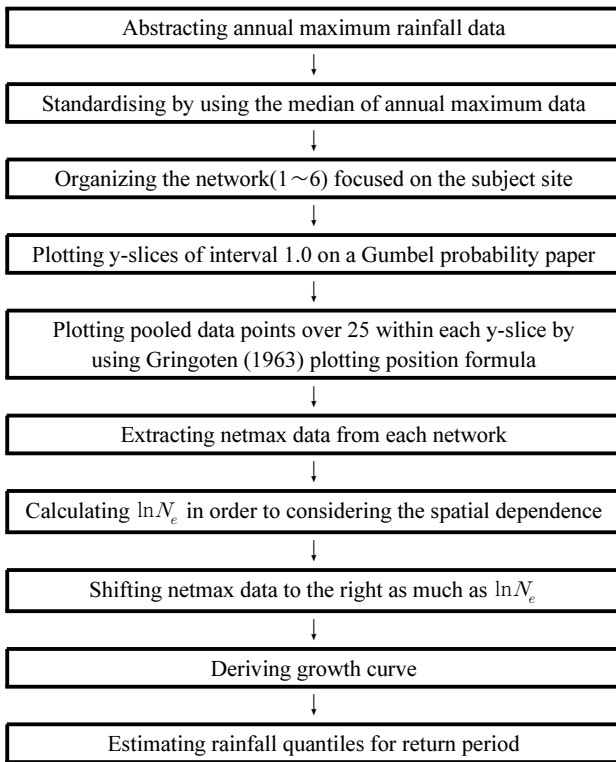


Fig. 1. Procedure of FORGEX method

만큼 오른쪽으로 이동하여 성장곡선을 유도함으로써 재현기간에 대한 확률강우량을 추정하게 된다. 짧은 재현기간은 작은 네트워크 자료를 필요로 하지만 긴 재현기간에 대해서는 큰 네트워크에서 수집한 자료를 바탕으로 성장곡선을 유도하게 된다.

## 2.2 자료의 표준화

FORGEX 기법에서는 자료의 표준화를 위하여 사용되는 지수(index)로 중앙값(median)을 사용한다. 중앙값을 지수로 사용하면 극치사상의 영향을 제거할 수 있는 장점이 있으며, Eq. (1)을 이용하여 자료의 표준화를 수행한다.

$$X_{ij} = \frac{R_{ij}}{R\ MED_j} \quad (1)$$

여기서,  $X_{ij}$ 는  $i$ 번째 해, 지점  $j$ 에 해당하는 강우자료의 표준화된 값,  $R_{ij}$ 는  $i$ 번째 해, 지점  $j$ 에 해당하는 연 최대 강우량,  $R\ MED_j$ 는 지점  $j$ 의 중앙값이다.

## 2.3 Gumbel reduced variate의 계산

자료의 표준화 후 자료를 오름차순으로 정리하고 Gringorten

(1963)이 제안한 Eq. (2)의 도시위치공식을 이용하여 Gumbel 확률지 상에 pooled points와 netmax 자료를 도시한다.

$$F_i = \frac{i - 0.44}{N + 0.12} \quad (2)$$

여기서,  $F_i$ 는 비초과확률,  $i$ 는 오름차순 순서,  $N$ 은 자료의 개수를 나타낸다. 도시위치공식으로부터  $F_i$ 를 산정한 후 Gumbel 확률지에 도시하기 위하여, 좌표 상의  $x$ 축 값을 Eq. (3)의 Gumbel reduced variate  $y$ 로 환산한다.

$$y = -\ln(-\ln F_i) \quad (3)$$

## 2.4 네트워크의 구성

네트워크의 확장은 대상지점을 중심으로 인접지점에 대한 표준화된 강우자료를 추가함으로써 이루어진다. 네트워크 확장 시 표준화된 연 최대 자료를 적절하게 지역화하여 도시하기 위해 NERC (1975)에서 제안한  $y$ -절편법( $y$ -slice method)을 사용한다.  $y$ -절편법은 Gumbel reduced variate의 구간을 정해 그 구간 내에 포함되는 표준화된 연 최대 강우 자료들을 하나의 집단으로 구성하는 방법으로, 이 방법에 의해 Gumbel 확률지 상에 도시된 점들을 pooled points라고 한다. FORGEX 기법에서는 긴 재현기간에 대한 확률수문량을 산정하기 위하여 추가적인 자료를 Gumbel 확률지에 도시하여 사용한다. 이 자료는 각 네트워크에 포함된 지점들의 표준화된 연 최대 자료에서 각 해의 최대값으로 network maximum (netmax) 자료라 한다. 성장곡선을 안정적으로 추정하기 위해 Gumbel 확률지 상에서 간격이 1인  $y$ -절편 내에 관측자료가 균등하게 분포되도록 각 절편 내의 관측자료 수가 최소 20개가 되도록 권장하고 있다(Reed et al., 1999). 본 연구에서는 최소 25개가 되도록 하였다. 따라서 관측지점 수가 적은 지역의 네트워크 반경은 상대적으로 증가하고, 반대로 관측지점이 많은 지역의 네트워크 반경은 상대적으로 감소한다.

## 3. 공간상관식( $\ln N_e$ )의 유도

### 3.1 공간상관식( $\ln N_e$ )의 산정 절차

독립적이고 동일한 GEV 분포를 나타내는  $N$ 개의 지점들로부터 추출된 netmax 자료의 분포는 모집단 성장곡선으로부터  $\ln N$ 만큼 왼쪽에 위치하는 것으로 나타났다(Dales and Reed, 1989). 이러한 특성은 GEV 분포 이외의 다른 확률분포

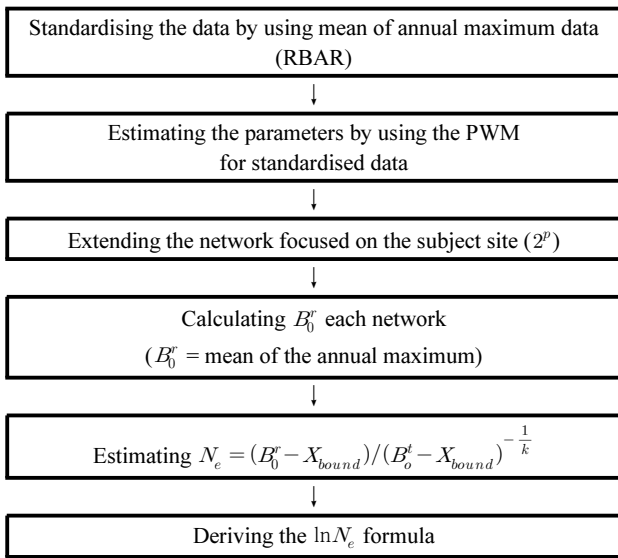


Fig. 2. Procedure to determine  $\ln N_e$  formula

에서도 동일하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Reed and Stewart, 1994). 따라서 지점자료들 간의 공간 종속성을 나타내기 위해, 또한 얼마나 독립적인지를 판단하기 위해  $\ln N_e$ 에 대한 식이 개발되었으며, Fig. 2는  $\ln N_e$  식 산정 절차를 나타낸다.  $\ln N_e$  식은 표준화된 각 지점의 강우자료를 확률가중모멘트법(PWM, Probability Weighted Moments)을 이용하여 매개변수를 추정하고, 거리에 따라 구성된 네트워크의  $N_e$  값과 강우지속시간, 지점 수, 네트워크 면적 등을 산정하여 이를 하나의 대표식으로 유도한 것이다.

3.2 자료의 표준화와 매개변수의 산정

$\ln N_e$  식을 산정하기 위하여 지점자료들의 표준화 작업을 최우선으로 진행해야 하는데(Dales and Reed, 1989), 이를 위해 강우자료의 평균(RBAR, Mean of annual maxima)을 이용하여 표준화 작업을 진행한다. 표준화된 자료를 바탕으로 PWM 기법을 이용하여 매개변수를 지점별로 구한다. Eq. (4)~(6)은 GEV의 분포에 대한 확률가중모멘트의 매개변수를 나타낸 것이다.

$$u = u_t + a_t(1 - N^{-k_t})/k_t \tag{4}$$

$$a = a_t N^{-k_t} \tag{5}$$

$$k = k_t \tag{6}$$

여기서,  $u$ 는 위치 매개변수,  $a$ 는 규모 매개변수,  $k$ 는 형상 매개변수를 나타내며  $t$ 는 대상지점을 나타낸다.

3.3  $N_e$  값 산정을 위한 네트워크 구성

각 지점별 매개변수를 산정한 후 대상지점을 중심으로  $2^p$  ( $p = 1 \sim 6$ )개의 지점이 포함되도록 네트워크를 확장해 나간다. 각 네트워크별  $B_0^r$ 은 포함된 지점들의 표준화된 연 최대 자료에서 각 해당연도의 최대값을 산술평균한 값이다. 매개변수와  $B_0^r, B_0^t$ 를 이용하여 GEV 분포에서 유추된  $N_e$ 는 Eqs. (7)~(8)과 같다.

$$N_e = [(B_0^r - x_{bound}) / (B_0^t - x_{bound})]^{-1/k} \tag{7}$$

$$x_{bound} = u_t + a_t/k \tag{8}$$

여기서,  $B_0^r$ 은 표준화된 자료에서 네트워크의 평균값이고,  $B_0^t$ 는 전체자료의 평균값을 나타낸다. Eq. (8)에서  $x_{bound}$ 는 전체자료의 위치 매개변수( $u_t$ ), 규모 매개변수( $a_t$ ), 형상 매개변수( $k$ )의 함수이다. Table 1은 서울지점에서 지속시간별로 네트워크를 확장하며 산정한  $N_e$  값이다. Table 1에서 지속시간이 커짐에 따라  $N_e$  값이 작아지는 것으로 나타났는데, 이는 강우의 지속시간이 길수록 지점 간 독립성이 작아지는 것을 의미한다.

$\ln N_e$  식을 산정하기 위하여  $N_e$ , 지점개수( $N$ ), 지속시간( $D$ )에 대한 값 이외에 네트워크 면적( $AREA$ )에 대한 값을 산정해야 하는데, 네트워크 면적은 Eq. (9)로 산정할 수 있다. 사각형 또는 육각형 형태로 분포된 지점간의 거리를 고려하여 면적을 계산하기 위한 계수는 2.5로 정하였고, 실제 자료에 적용하여 유의미한 결과를 확인하였다(Dales and Reed, 1989).

$$AREA = 2.5d^2 \tag{9}$$

Table 1.  $N_e$  Values at seoul station

Number of Sites	Seoul			
	$N_e$ (1day)	$N_e$ (2day)	$N_e$ (4day)	$N_e$ (8day)
2( $2^1$ )	1.484	1.436	1.414	1.376
4( $2^2$ )	2.356	2.195	2.176	2.047
8( $2^3$ )	3.659	3.208	3.035	2.806
16( $2^4$ )	6.108	4.957	4.836	4.315
32( $2^5$ )	12.257	9.427	9.224	8.393
64( $2^6$ )	23.102	19.093	17.999	15.917

여기서,  $d$ 는 네트워크에 포함된 지점들 간 거리의 평균값으로 Eq. (10)를 이용하여 구한다.

$$d = \frac{1}{N(N-1)} \sum_i \sum_j \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (10)$$

여기서,  $N$ 은 네트워크에 포함된 지점수를 나타내고  $i, j$ 는 각 지점들을 나타낸다.  $X$ 와  $Y$ 는 각 지점의 위·경도상의 위치변수를 나타낸다.

#### 4. 우리나라 강우특성을 고려한 공간상관식의 유도

우리나라 강우자료를 바탕으로 새로운  $\ln N_e$  식을 산정하기 위하여 기상청 산하 유인관측소 78개소의 강우자료 및 지점자료를 사용하였다. 각 지점별 강우자료는 기준기간(reference period)인 1973년부터 2014년까지의 지속기간 24, 48, 96, 192시간에 대한 연 최대 강우자료를 추출하여 표준화 작업을 진행하였고, 30년 이상의 강우자료를 보유하고 있는 64개소를 대상지점으로 선정하여 네트워크를  $2^p$  ( $p=1 \sim 6$ )으로 확장해 나갔다. 각 지점을 GEV 분포로 가정하고 PWM 기법을 적용하여 매개변수를 산정하였다. 네트워크 별로 표준화된 강우자료를 바탕으로 각 해마다 최대값을 추출한 후 산술평균에 의해 지역화된 모멘트 값인  $B_e^*$ 을 산정한다. Eq. (7)에 의해  $N_e$  값을 산정하고 Eqs. (9)~(10)을 이용하여 각 네트워크의 면적을 산정한다.  $N_e$  값을 산정한 후 Eqs. (11)~(12)와 같은 2-변수, 3-변수 회귀식을 이용하여 FORGEX 기법에 이용할 새로운 공간상관식을 산정한다.

$$\ln N_e = \ln N(a + b \ln AREA + c \ln N) \quad (11)$$

$$\ln N_e = \ln N(a + b \ln AREA + c \ln N + d \ln D) \quad (12)$$

여기서,  $a, b, c, d$ 는 공간상관식의 계수이다. 회귀식 Eqs. (11)~(12)를 이용하여 우리나라 강우자료에 맞는 새로운  $\ln N_e$  식은 Eqs. (13)~(14)와 같다.

$$\ln N_e = \ln N(0.228 + 0.049 \ln AREA + 0.008 \ln N) \quad (13)$$

$$\ln N_e = \ln N(0.302 + 0.049 \ln AREA + 0.008 \ln N - 0.065 \ln D) \quad (14)$$

여기서,  $N_e$ 는 독립된 관측소의 유효 개수,  $N$ 은 관측소 개수,

Table 2. Comparison of the  $N_e$  in UK and Korea

Statistics	Spatial Dependence Formula			
	2-variables		3-variables	
	$\ln N_e$ (UK)	$\ln N_e$ (Korea)	$\ln N_e$ (UK)	$\ln N_e$ (Korea)
RMSE	0.208	0.178	0.200	0.143
Relative Error (%)	12.38	11.78	11.59	10.02
R-square	0.953	0.966	0.957	0.978

$AREA$ 는 네트워크의 면적,  $D$ 는 지속기간(일)을 나타낸다.

FEH (Institute of Hydrology, 1999)에서는 2-변수( $N, AREA$ )와 3-변수( $N, AREA, D$ )의 영향을 고려한 공간상관식(spatial dependence formula)을 소개하고 있다. 대상지점 자료로부터 산출한  $N_e$  값, 기존 영국 공간상관식의  $N_e$  값과 본 연구에서 유도한 공간상관식의  $N_e$  값을 비교한 결과는 Table 2에 정리하였다. 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)와 상대오차(Relative Error)를 살펴보면 2-변수보다 3-변수일 때 오차가 작게 나타나고, 영국식보다 우리나라 식의 RMSE 값이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. R-square 값도 2-변수보다 3-변수에서 더 좋은 결과를 보여주었고, 우리나라 3-변수의 공간상관식이 가장 좋은 결과를 나타냈다. 기존의 영국식보다 우리나라 공식을 사용하는 것이 우리나라 강우자료의 특성을 보다 정확하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 새롭게 제안된 공간상관식을 적용한 FORGEX 기법은 기존의 지점빈도해석 및 지역빈도해석의 단점을 보완하고, 수공구조물의 확률강우량을 산정하는데 도움이 될 것으로 보인다.

#### 5. 적용성 검토

본 연구에서는 우리나라 기상청 산하 유인관측소 64개소의 강우자료를 이용하여 새로운 공간상관식을 유도하였고, 앞서 언급한 64개의 강우관측지점을 대상으로 1961년부터 2014년까지의 강우자료를 사용하여 FORGEX 기법의 지역빈도해석을 수행하였다.

##### 5.1 FORGEX 기법을 이용한 지역빈도해석 수행

FORGEX 기법을 이용하여 우리나라 기상청 64개 지점을 대상으로 지속시간 1, 2, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 48시간에 대한 100, 200, 500, 1000년의 재현기간별 확률강우량을 산정하였다. 또한, 영국수문자료에 의해 만들어진 기존의 2-변수, 3-변수의  $\ln N_e$  식과 우리나라 수문자료에 의해 만들어진 새로운

2-변수, 3-변수의  $\ln N_e$  식을 FORGEX 기법에 적용하여 산정된 확률강우량 값을 비교하였다. FORGEX 방법은 구성된 네트워크에서의 pooled points와 netmax 값을 회귀하여 성장곡선을 유도한다. 우리나라는 자료의 보유년수가 크게 차이가 나지 않기 때문에 Gringorten (1963)이 제안한 도시위치공식에서의  $F_i$ 의 값이 지점별로 큰 차이 없이 산출되고 있다. 이에 Gumbel 확률지 상에서 간격이 1.0인 y 절편 사이에서 pooled points와 netmax의 값이 고르게 분포되지 못하는 경향이 발생한다. 이러한 문제점은 절편 1.0구간마다 수행한 선형 회귀식이 아닌 Gumbel 확률지 상에 도시된 pooled points와 netmax를 한 번에 연결한 회귀식 Eq. (15)를 이용하여 확률강우량을 산정할 경우 보완할 수 있다.

$$Y = AX^2 + BX + C \quad (15)$$

Fig. 3에서 x축과 y축은 Gumbel Reduced Variate와 표준화된 강우량(Standardised rainfall)을 의미하며, 이를 이용하여 성장곡선을 유도할 수 있다. 서울지점의 지속시간 24시간, 48시간 강우량을 사용하여 pooled points와 netmax의 값을 Gumbel 확률지 상에 도시하고, 이를 회귀하여 나타낸 성장곡선은 Fig. 3과 같으며, 본 연구에서는 기존 영국의 2-변수, 3-변수 공간상관식( $\ln N_e$ )과 우리나라 2-변수, 3-변수  $\ln N_e$  식을 적용하여 성장곡선을 유도하였다. 성장곡선을 이용하여 해당하는 재현기간에 대한 Standardised rainfall 값을 구할 수 있으며, 이를 지점의 해당 지속시간의 중앙값(RMED)을 곱

하여 확률강우량을 산정할 수 있다. 2-변수보다 3-변수의 성장곡선이 아래에 위치함으로써 확률강우량을 작게 추정하는 것으로 나타났고, 지속시간을 고려한 3-변수가 2-변수보다 작게 나타나는 영국과 비슷한 경향을 보였다. 또한, 우리나라의 공간상관식은 기존의 영국식보다 성장곡선이 위쪽에 위치함으로써 영국식을 FORGEX 기법에 적용할 경우 확률강우량을 과소 추정할 것으로 판단된다.

Gumbel 확률지 상에 pooled point와 netmax 값을 이용하여 Eq. (15)의 형태를 갖는 성장곡선을 유도하고, 각 지속시간의 중앙값을 곱함으로써 확률강우량을 산정할 수 있다. 앞서 언급한 우리나라 기상청 64개 강우관측지점을 대상으로 FORGEX 기법을 이용하여 확률강우량을 산정하였고, RMSE 값이 가장 작게 나타난 KOR3 식에 대한 UK2, UK3, KOR2 식의 상대적인 차이를 구하고 이를 평균한 값을 Table 3에 정리하였다. 재현기간 100년 일 때, UK2 식은 -1.99% (-7.34 ~ 3.06%), UK3 식은 -4.00% (-7.64 ~ -0.50%) 과소 추정하였고, KOR2 식은 5.82% (1.38 ~ 9.53%) 과대 추정하였다. 재현기간 200년에 대하여 각각 -2.47% (UK2), -4.73% (UK3), 6.72% (KOR2)의 차이를 보였으며, 재현기간이 커짐에 따라 영국식과 우리나라 공간상관식의 차이도 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 기존의 영국 공간상관식을 FORGEX 기법에 적용할 경우 확률강우량이 과소 추정될 수 있고, 우리나라 강우자료를 이용한 공간상관식은 기존 영국 공간상관식에서 내포하고 있는 부정확성을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

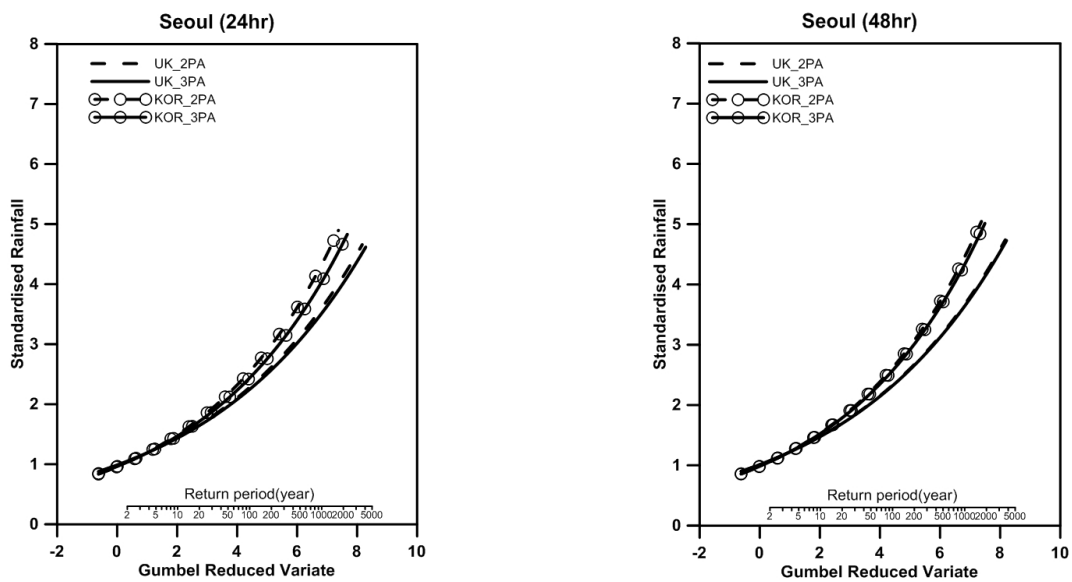


Fig. 3. Growth curve from new regression method (seoul)

**Table 3.** Average of relative difference to KOR3 (64 sites) (unit:%)

Return Period (yr)	1 hour			2 hour		
	UK2	UK3	KOR2	UK2	UK3	KOR2
100	3.06	-0.50	9.53	1.77	-1.45	8.88
200	3.23	-0.75	10.98	1.78	-1.83	10.21
500	3.44	-1.09	12.97	1.78	-2.35	11.96
1000	3.58	-1.38	14.50	1.77	-2.74	13.30

Return Period (yr)	3 hour			6 hour		
	UK2	UK3	KOR2	UK2	UK3	KOR2
100	0.80	-2.21	8.30	-0.85	-3.20	6.92
200	0.70	-2.65	9.51	-1.18	-3.81	7.96
500	0.56	-3.24	11.10	-1.62	-4.63	9.35
1000	0.45	-3.69	12.30	-1.96	-5.25	10.41

Return Period (yr)	9 hour			12 hour		
	UK2	UK3	KOR2	UK2	UK3	KOR2
100	-2.05	-4.02	5.93	-2.86	-4.60	5.16
200	-2.49	-4.69	6.81	-3.41	-5.37	5.96
500	-3.08	-5.58	7.99	-4.14	-6.37	7.04
1000	-3.53	-6.26	8.89	-4.70	-7.12	7.87

Return Period (yr)	15 hour			18 hour		
	UK2	UK3	KOR2	UK2	UK3	KOR2
100	-3.52	-5.09	4.62	-4.03	-5.36	4.11
200	-4.20	-5.97	5.42	-4.80	-6.32	4.85
500	-5.10	-7.13	6.51	-5.83	-7.58	5.85
1000	-5.80	-8.01	7.34	-6.61	-8.55	6.62

Return Period (yr)	24 hour			48 hour		
	UK2	UK3	KOR2	UK2	UK3	KOR2
100	-4.94	-5.96	3.33	-7.34	-7.64	1.38
200	-5.80	-6.97	3.90	-8.54	-8.91	1.62
500	-6.94	-8.29	4.66	-10.09	-10.56	1.93
1000	-7.79	-9.29	5.24	-11.24	-11.77	2.16

## 6. 결론

본 연구에서는 FORGEX 기법의 지역빈도해석을 수행하여 100, 200, 500, 1000년의 긴 재현기간에 대한 확률강우량을 산정하였다. 기존 영국의 수문자료로부터 유도된 공간상관식을 우리나라에 적용할 경우 발생할 수 있는 부정확성 문제를 보완하기 위해 우리나라 기상청 산하 64개소의 유인관측소 수문자료를 이용하여 공간상관식을 새롭게 유도하였

다. FORGEX 기법에서 Gumbel 확률지 상에서 도시하는 pooled points와 netmax를 y-slice 방법에서 구간별로 성장곡선을 유도하는 단점을 보완하고자 새로운 회귀식을 사용하여 확률강우량을 산정하였고, 이를 기존 영국식을 이용한 결과와 비교·분석을 실시하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) FORGEX 기법 적용 시 가장 중요한  $\ln N_c$  식은 netmax 자료를 Gumbel 확률지 상에 도시할 때 사용하는데, 이는 영국의 수문자료로부터 유도된 공간상관식으로 우리나라의 강우자료 특성이 반영되지 않는다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 우리나라 강우자료의 특성을 고려한 공간상관식을 유도하였다. 기존의 영국식과 비교한 결과 본 연구에서 유도한 공간상관식이 보다 정확한 것으로 나타났으며, 2-변수 보다는 3-변수의  $\ln N_c$  식이 가장 좋은 결과를 보였다.
- 2) 지수홍수법과 같은 대부분의 지역빈도해석에서 지역구분의 번거로운 과정을 거쳐야 하지만 FORGEX 기법은 비매개변수적 방법으로 지역구분 없이 대상지점을 중심으로 네트워크를 확장하면서 확률강우량을 산정하기 때문에 다른 지역빈도해석보다 지역경계조건에서 편리함을 갖고 있다. 또한, FORGEX 기법은 거리에 따른 네트워크를 구성함으로써 기존의 고정된 지역구분방법보다는 유연하게 지역을 구분하여 지역 경계에서 나타나는 문제점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 기상청 산하 64개 지점을 대상으로 FORGEX 기법을 통하여 확률강우량을 산정한 결과, 기존 영국의 공간상관식은 우리나라의 공간상관식의 결과보다 과소추정 하는 것으로 나타났고, 재현기간이 커질수록 부정확한 결과의 차이도 커지는 경향이 나타났다. 우리나라 강우자료의 특성을 고려하여 새롭게 유도한 공간상관식을 FORGEX 기법에 적용함으로써 기존의 영국 공간상관식에서 발생하는 부정확한 결과를 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 연구로서 FORGEX 기법과 다른 방법들과의 결과를 정량적으로 검토하고, 추계학적 모의 자료를 이용하여 불확실성에 대한 신뢰구간을 추정할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 한국

연구재단에서 부여한 과제번호: 2014R1A2A2A01006671).

## References

- Burn, D. H. (1990). "Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2257-2265.
- Dales, M. Y., and Reed, D. W. (1989). *Regional flood and storm hazard assessment*. Report No. 102, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Darlymple, T. (1960). *Flood frequency analyses*. Water Supply Paper 1543-A, US Geological Survey, Reston, Virginia, USA.
- Gringorten, I. I. (1963). "A plotting rule for extreme probability paper." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 3, pp. 813-814.
- Heo, J.-H., Lee, Y. S., Shin, H. J., and Kim, K.-D. (2007). "Application of regional rainfall frequency analysis in South Korea(I): rainfall quantile estimation." *Journal of KSCE*, KSCE, Vol. 27, No. 2B, pp. 101-111.
- Hosking, J. R. M., and Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis – an approach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Institute of Hydrology (1999). *Flood estimation handbook*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Kim, J. H. (2004). *Comparative study on regional frequency analysis : using index flood method and netmax method*. M. S. dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Kim, J. W., Nam, W. S., Shin, J.-Y., and Heo, J.-H. (2008). "Regional frequency analysis of South Korean rainfall data using FORGEX method." *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 41, No. 4, pp. 405-412.
- Kim, J.-Y., Kwon, H.-H., and Lim, J.-Y. (2014). "Development of hierarchical Bayesian spatial regional frequency analysis model considering geographical characteristics." *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 47, No. 5, pp. 469-482.
- Lee, D.-J., and Heo, J.-H. (2001). "Frequency analysis of daily rainfall in Han River basin based on regional L-moments algorithm." *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 34, No. 2, pp. 119-130.
- Lee, Y. S., Heo, J.-H., Nam, W. S., and Kim, K.-D. (2007). "Application of regional rainfall frequency analysis in South Korea(II): Monte Carlo simulation and determination of appropriate method." *Journal of KSCE*, KSCE, Vol. 27, No. 2B, pp. 113-123.
- Nam, W. S., Kim, K.-D., and Heo, J.-H. (2004). "Regional frequency analysis based on FORGEX Model." *Proc. of the KWRA Conference*, KWRA, pp. 323-327.
- Nam, W. S., Kim, T. S., Shin, J.-Y., and Heo, J.-H. (2008). "Regional rainfall frequency analysis by multivariate techniques." *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 41, No. 5, pp. 517-525.
- NERC (1975). *Flood studies report*. Natural Environment Research Council, London, UK.
- Oh, T. S., Moon, Y.-I., and Oh, K.-T. (2008). "Estimation of probability precipitation by regional frequency analysis using cluster analysis and variable Kernel Density Function." *Journal of KSCE*, KSCE, Vol. 28, No. 2B, pp. 225-236.
- Reed, D. W., and Stewart, E. J. (1989). "Focus on rainfall growth estimation." *Proc. 2nd National Hydrology Symposium*, Sheffield, UK, pp. 3.37-3.65.
- Reed, D. W., and Stewart, E. J. (1994). "Inter-site and inter duration dependence in rainfall extremes." *Statistics for the environment 2: water related issues*, Edited by V. Barnett and K.F. Turkman, Wiley Chichester, UK, pp. 125-143.
- Reed, D. W., Faulkner, D. S., and Stewart, E. J. (1999). "The FORGEX method of rainfall frequency estimation II : description." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 3, No. 2, pp. 197-203.
- Stewart, E. J., Reed, D. W., Faulkner, D. S., and Reynard, N. S. (1999). "The FORGEX Method of rainfall frequency estimation I : requirement." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-195.