

## 제주도 지하수위 관측지점별 적정 확률분포형의 결정

정일문<sup>1\*</sup> · 남우성<sup>2</sup> · 김민규<sup>1</sup> · 최지안<sup>1</sup> · 김기표<sup>3</sup> · 박윤석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구소

<sup>2</sup>K-Water 국가가뭄정보분석센터

<sup>3</sup>제주특별자치도

## Determination of Proper Probability Distribution for Groundwater Monitoring Stations in Jeju Island

Il-Moon Chung<sup>1\*</sup> · Woosung Nam<sup>2</sup> · Min Gyu Kim<sup>1</sup> · Gian Choi<sup>1</sup> · Gee-Pyo Kim<sup>3</sup> · Yun-Seok Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>National Drought Information Analysis Center, K-Water

<sup>3</sup>Jeju Special Self-Governing Province

### ABSTRACT

Comprehensive statistical analysis for the 127 groundwater monitoring stations in Jeju Island during 2005~2015 was carried out for the re-establishment of management groundwater level. Three probability distribution functions such as normal distribution, GEV (General Extreme Value) distribution, and Gumbel distribution were applied and the maximum likelihood method was used for parameter estimation of each distribution. AIC (Akaike information criterion) was calculated based on the estimated parameters to determine the proper probability distribution for all 127 stations. The results showed that normal distribution and Gumbel distribution were found in 11 stations. Whereas GEV distribution were found in 105 stations, which covered most of groundwater monitoring stations. Therefore, confidence levels should be established in accord with the proper probability distribution when groundwater level management is determined.

**Key words :** Jeju Island, Management groundwater level, Probability distribution

### 1. 서 론

고투수성 화산암으로 구성된 제주지역은 연평균 강수량이 2,000 mm를 상회하는 다우지역이나 높은 지하수 함양률에 의해 대부분의 수자원은 지하수로 유입된다. 이에 따라 음용수를 비롯한 모든 용수를 지하수에 의존하는 특수한 지역으로 1991년부터 지하수 개발 및 이용 허가제를 운영하는 등 엄격한 지하수 관리가 이루어지고 있다. 이를 위해 제주 수자원 종합계획을 통해 10년단위로 지하수 함양량을 재산정하고 개발가능량 범위내에서 지하수 이용을 체계적으로 관리해 오고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2013). 특히 제주지역에 극단적인 가뭄이 발생할 경우, 농업용 지하수 뿐 아니라, 생활용수

이용량도 증가하게 되며, 지하수 함양량 감소가 이어지는 상황에서 지하수를 더 많이 취수·이용하게 되면, 지하수 위 하강과 해수침투 등 지하수 장애가 발생할 가능성이 높다. 이를 위해 제주지역 농업용 지하수의 양수 특성에 관한 분석도 수행된 바 있다(Park et al., 2004). 한편, 제주특별자치도에서는 국내 최초로 수역별 지하수 관리수위를 설정, 단계별로 조치를 취할 수 있는 법적 근거를 마련, 2004년 9월 고시한 바 있다. 당시 지하수위 관측자료를 대상으로 99% 신뢰구간내 수위자료 중 하한값을 기준수위로 정하고 이 기준수위의 75%, 50%, 25%를 각 단계별 관리수위로 설정하였다(Kim et al., 2005). 지하수의 시계열 변동 유형 분석은 기후변화 따른 수문환경에 대비하는 지속적인 조사 및 관측자료를 통해서만 가능하

\*Corresponding author : imchung@kict.re.kr

Received : 2017. 10. 30 Reviewed : 2017. 11. 13 Accepted : 2018. 1. 29

Discussion until : 2018. 4. 30

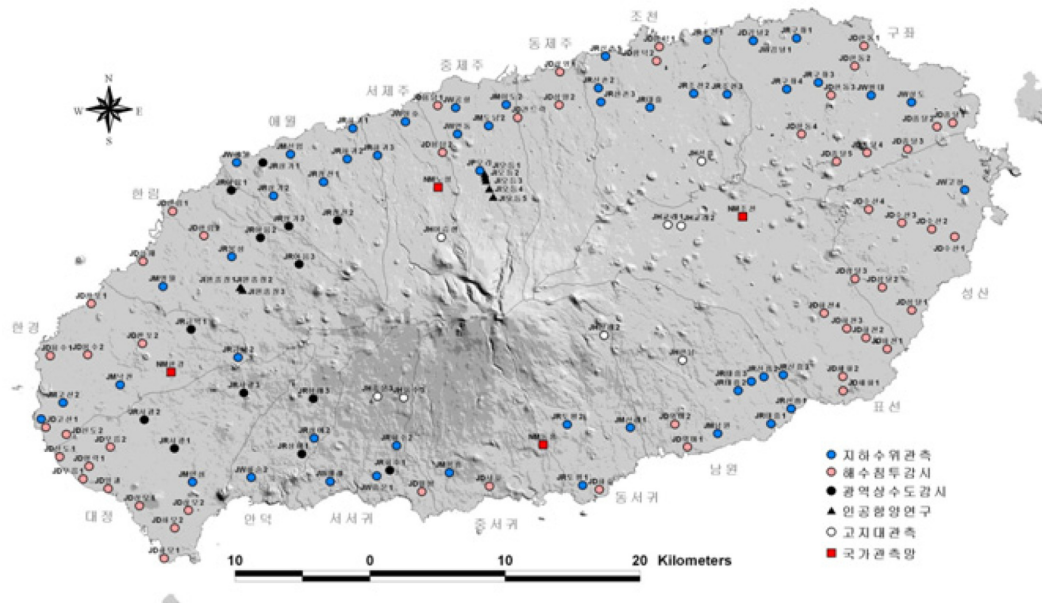


Fig. 1. Groundwater monitoring stations in Jeju Island.

다(Kim et al., 2013).

본 연구에서는 제주도 지하수 관리수위의 재설정을 위한 지하수위 관측 자료 통계 분석을 수행하고자 한다. 2004년 관리수위가 설정된 후 2005년부터 2015년까지 확충된 자료를 기반으로 지하수 자료의 통계적 특성을 파악하는 과정은 제주도 내의 지하수위 관측 지점 143개소 (Fig. 1) 중 분석 가능한 127개소 자료를 선별하여 수행되었다.

## 2. 분석 방법

### 2.1. 통계분석 개요

제주도 지하수 관리수위 설정을 위한 지하수위 관측 자료 통계 분석 방법은 Fig. 2와 같다. 순서에 따라 제주도 내의 지하수위 관측 지점 중 분석 가능한 자료를 수집하고, 기본통계량인 평균, 표준편차, 왜곡도 계수를 산정하였다. 대상 자료에 정규(normal), Gumbel, GEV(general extreme value) 분포의 확률분포함수(Probability distribution function, PDF)를 적용하고, 최우도법을 이용하여 매개변수를 추정하였다. 추정된 매개변수를 바탕으로 각 분포의 AIC(Akaike Information Criteria)를 계산하여 대상 자료에 적합한 분포형을 선정하였다. 최종적으로 선정된 적정 분포형의 누적분포함수를 이용하여 신뢰수준 99%에 대한 신뢰구간을 산정하였다.

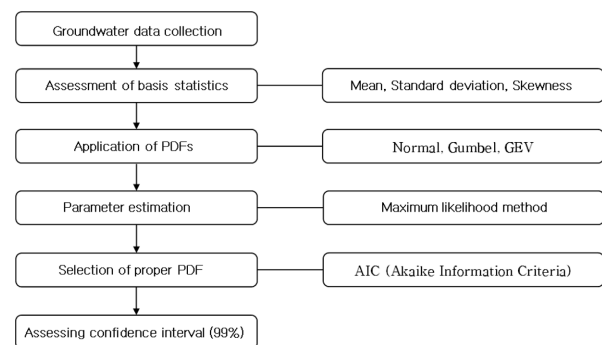


Fig. 2. Flow chart of statistical analysis.

### 2.2. 확률분포형의 특성

본 연구에서는 지하수위 관리수위 설정을 위해 정규(normal), Gumbel, GEV(general extreme value) 분포를 적용하였다. 적용된 확률분포형에 대해 기술하면 다음과 같다.

먼저 정규분포의 확률밀도함수는 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

여기서  $\mu$ 는 위치 매개변수로 평균을 의미하며  $\sigma$ 는 규모 매개변수로 표준편차이다. Eq. (1)을 도시하면 종 모양(bell shape)으로서  $x$ 가  $-\infty$ 로 감소하거나  $\infty$ 로 증가하게 되면  $f(x)$ 는 0으로 점근하게 된다(Fig. 3). 정규분포에서

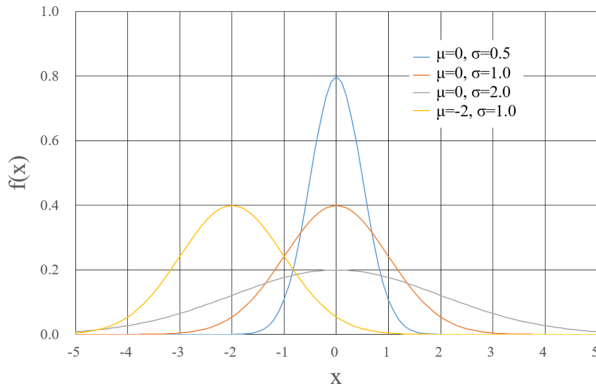


Fig. 3. Probability distribution function for normal distribution.

왜곡도 계수는 0, 첨예도 계수는 3으로 나타난다.

다음으로 GEV(Generalized Extreme Value) 분포는 홍수나 가뭄 같은 수문사상의 빈도해석에 가장 널리 사용되는 분포함수로서 형상 매개변수  $\beta$ 에 따라 3가지 형태로 구분될 수 있다. GEV 분포의 누가분포함수(Cumulative distribution function)는 Eq. (2a), 확률밀도함수(Probability distribution function)는 Eq. (2b)와 같이 나타난다.

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}\right)^{(1/\beta)}\right] \quad (2a)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}\right]^{(1/\beta)-1} \cdot F(x) \quad (2b)$$

여기서  $\alpha$ 는 규모 매개변수,  $\beta$ 는 형상 매개변수,  $x_0$ 는 위치 매개변수이다.  $\beta$ 가 음수이면 하한경계치를 갖는 GEV-2 분포이고(Frechet 분포 또는 log-Gumbel 분포),  $\beta$ 가 양수이면 상한경계치를 갖는 GEV-3 분포(Weibull 분포)이며,  $\beta$ 가 0이면 GEV-1(Gumbel 분포) 분포가 된다. GEV 분포의 확률밀도함수는 Fig. 4와 같다.

마지막으로 Gumbel 분포는 generalized extreme value 분포의 특수한 경우이며 Fisher-Tippett 분포, log-Weibull 분포, double exponential 분포라고도 한다. GEV-1 분포로도 알려져 있는 Gumbel 분포의 누가분포함수와 확률밀도함수는 Eq. (3)과 같다.

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right\} \quad (3a)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)}{\alpha} - \exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right\} \quad -\infty < x < \infty \quad (3b)$$

여기서  $\alpha$ 는 규모 매개변수,  $x_0$ 는 위치 매개변수이다. Gumbel 분포의 왜곡도 계수(coefficient of skewness)는

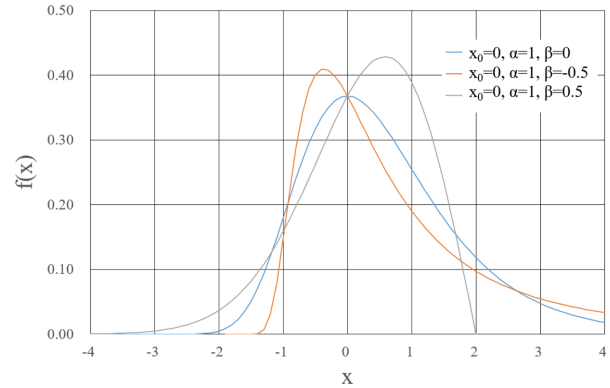


Fig. 4. Probability distribution function for GEV distribution.

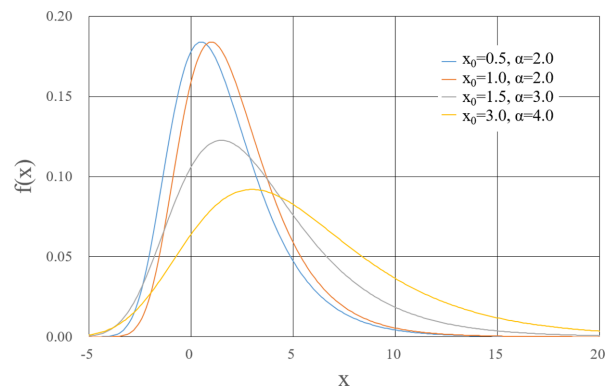


Fig. 5. PDF for Gumbel distribution.

1.1396으로 고정된 값을 갖는다. Gumbel 분포의 확률밀도함수는 Fig. 5와 같다.

확률분포형의 매개변수를 추정하는 방법으로 모멘트법, 최우도법, 확률기중 모멘트법, L-모멘트법 등 다양한 방법이 있지만, 분석 대상 자료의 개수가 많을 경우 최우도법이 가장 정확한 매개변수를 추정하는 방법으로 알려져 있다.

최우도법은 추출된 표본자료가 나올 수 있는 확률이 최대가 되도록 매개변수를 추정하는 방법이다. 일반적으로 우도함수(likelihood function)보다는 유도상의 편리성 때문에 대수 우도함수(log-likelihood function)를 많이 사용하며 다음 Eq. (4)와 같이 대수 우도함수를 매개변수별( $\theta$ )로 미분한 뒤 0으로 놓고 매개변수를 추정한다.

$$\frac{\partial \ln L(\theta_i)}{\partial \theta_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

여기서  $\ln L(\theta_i)$ 는 대수 우도함수이고,  $\theta$ 는 선정된 확률분포형의 매개변수이며,  $k$ 는 선정된 확률분포함수의 매개변수 수이다. 일반적으로 최우도법은 가장 효율적인 추정치를 얻을 수 있으며 표본자료의 크기가 충분히 클 때 다

른 매개변수 추정방법에 대하여 추정치의 효율성을 비교하는데 기준으로 사용된다(Mood et al., 1974). 많은 경우에 Eq. (4)가 비선형 방정식으로 표현되므로, 해를 얻기 위하여 Newton-Raphson 법 같은 수치기법이 필요하다. 최우도를 발생시키는 매개변수를 추정하기 위해서 최적화 방법 중 하나인 Newton-Raphson 방법은 목적함수의 1차 도함수와 2차 도함수를 이용하는 방법이다. Newton-Raphson 방법을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 위해서는 1차 도함수와 2차 도함수를 유도하여야 한다. 몇몇 목적함수의 경우 1차 도함수와 2차 도함수를 유도하는 것이 용이하지 않는 경우가 많다. 이런 최적화 문제를 해결하고자 다양한 최적화 방법이 제안되었다. 매개변수 추정을 위한 대표적인 최적화 방법으로 Nelder-Mead 방법, Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS) 방법 등이 널리 쓰이고 있다. 위 두 가지 최적화 방법은 1차 및 2차 도함수의 유도 없이 최적화 문제를 해결하는 방법으로 unconstrained 비선형최적화 문제에 대하여 널리 사용되고 있다. 위 최적화 방법을 사용할 경우 1차 및 2차 도함수의 유도 없이 확률분포형들의 매개변수를 추정할 수 있다(Coles, 2001; Gilleland et al., 2013). Nelder-Mead 방법(downhill simplex 방법 또는 아메바 방법)은 휴리스틱(heuristic) 방법으로, 매개변수 공간(parameter space)에서 목적함수의 대략적인 형태를 유추하여 최적해를 찾기 때문에 1차와 2차 도함수 유도 및 다른 정보가 필요 없다는 장점이 있다. BFGS 방법은 quasi-Newton 방법으로 식을 유도하지 않고, 근사값을 넣어 근사 도함수 값을 사용하는 것이 Newton-Raphson 방법과의 차이점이다. Nelder-Mead 방법과 BFGS 방법은 일반적인 최적화 방법 즉, Newton-Raphson 방법보다 부정확할 수는 있으나, 1차 및 2차 도함수 유도 없이 목적함수만으로 최적해를 보다 빠르게 찾을 수 있는 장점을 가지고 있다(Gilleland et al., 2013).

### 2.3. 적합도 검정

#### 2.3.1. 정규분포에 대한 적합도 검정

자료의 정규성(normality)을 검정하는 방법은 다양하나 본 분석에서는  $\chi^2$ 검정을 적용하였다.  $\chi^2$ 검정은 가장 널리 사용하는 적합도 검정방법 중의 하나로, Pearson에 의해 제안되어 광범위하게 사용되어 왔다. 이 방법은 대상 자료에 대해 적합하다고 가정한 확률밀도함수와 군집화된 자료를 이용한 빈도해석을 통하여 구해지는 경험적 확률밀도함수를 비교하는 검정방법으로, 자료를 크기에 의해  $m$ 개의 계급구간으로 나누고 이론값과 자료값의 절대도수

를 비교하는 방법이며,  $\chi^2$ 검정의 통계량  $\chi^2$ 는 다음 Eq. (5)와 같이 나타낸다.

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(n_j - np_j)^2}{np_j} \quad (5)$$

여기서  $n_j$ 는 관측자료의  $j$ 번째 구간의 표본 관측도수,  $m$ 은 계급구간의 수,  $p_j$ 는 구간 내 특정 기각치를 만족하는 모의변수확률이다. 한편, Eq. (5)로 표시되는 변량  $\chi^2$ 은  $n \rightarrow \infty$ 에 따라 자유도(degree of freedom)  $\nu = m - 1$ 를 가지는  $\chi^2$  분포에 접근한다. 그러나 이론분포의 매개변수가 미지수여서 자료로부터 추정되어야 할 경우에는 확률 분포에 포함되어 있는 변수의 수  $k$ 만큼 자유도를 감소시켜 주어야 한다. 또한 어떤 통계자료 계열에 특정확률분포를 적용할 수 있다는 가설(hypothesis)이 기각될 확률을 확률분포형의 적합도 검정의 유의수준(significance level)이라 하며, 일반적으로 수문자료의 빈도분석에서는 대체로 유의수준 5%를 많이 채택하고 있다.  $\chi^2$ 검정에서는 Eq. (5)로 계산된 검정통계량  $\chi^2$ 이 Eq. (6)의 관계를 만족시키면 가정한 확률분포는 유의수준  $\alpha$ 에서 적합성이 인정되며 그렇지 못하면 기각된다.

$$\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha, \nu} \quad (6)$$

여기서  $\chi^2_{1-\alpha, \nu}$ 는 자유도  $\nu$ 일 때 유의수준  $\alpha$ 로 가정한 분포의 적합성을 인정하는  $\chi^2$ 의 한계값이다.

#### 2.3.2. AIC 기반 적정 분포형 선정

분석 대상 자료에 적합한 확률분포형을 선정하기 위해 AIC(Akaike's information criteria)를 산정하였다. AIC는 Akaike(1973)가 개발한 최적 모형 선정방법으로 두 모형 간의 차이를 나타내는 Kullback-Leibler information (Kullback and Leibler, 1951)과 매개변수의 추정에 사용되는 대수우도함수(log-likelihood function)의 관계를 이용하여 Eq. (7)과 같이 표현된다

$$AIC = -2\log(ML) + 2k \quad (7)$$

여기서  $ML$ 은 최대화된 우도함수값(maximum likelihood),  $k$ 는 모형의 매개변수 개수이다. 분석 자료에 적용된 다양한 모형들의 AIC값을 비교하여 가장 작은 값을 갖는 모형을 최적 분포형으로 선택할 수 있다.

#### 2.3.3. 분위수(quantile) 산정

분위수는 특정 초과확률(exceedance probability) 또는 비초과확률(nonexceedance probability)에 해당하는 값으로

**Table 1.** Inverse function of probability distribution

Type	Inverse function
Normal	$x_T = \mu + \sigma \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1} \left[ 2 \left( 1 - \frac{1}{T} \right) - 1 \right]$
Gumbel	$x_T = x_0 - \alpha \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]$
GEV	$x_T = x_0 + \frac{\alpha}{\beta} \left[ 1 - \left\{ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right\}^{\beta} \right]$

보통 누가분포함수의 역함수를 사용하여 산정한다. 확률 분포형의 누가분포함수는 확률변수  $X$ 와 매개변수  $\theta$ 의 함수로 주어진다.

$$F(x) = fct(x, \theta) \quad (8)$$

여기서 누가분포함수  $F(x)$ 를 0에서 1사이의 값을 가지는 비초과확률  $q$ 로 나타내고 Eq. (8)을 확률변수  $X$ 의 역함수로 나타내면 다음과 같다.

$$x = fct^{-1}(q, \theta) \quad (9)$$

여기서,  $\theta$ 는 추정된 매개변수의 값이나, 확률분포형의 특성에 따라 Eq. (9)가 양해적으로 표현되지 않는 경우도 있으므로, 이런 경우에는 수치계산을 이용하여 확률강우량을 산정해야 한다. 지하수위 자료 분석에 사용된 확률 분포형들의 역함수는 Table 1과 같다.

### 3. 결과분석

#### 3.1. 최적 분포형의 결정

제주 지하수위 관측 지점 중 127개 지점에 대해 전술한 3개 확률분포형을 적용하고, 최우도법을 활용하여 각 확률분포형의 매개변수를 추정하였다. 추정된 매개변수를 바탕으로 AIC를 계산하여 가장 작은 AIC 값을 갖는 분포형을 대상 자료에 대한 적정 분포형으로 선정하였다. 각 지점 자료에 적용한 확률분포형의 AIC값과 선정 분포형은 Table 2와 같다. Table 2에서 정규분포와 Gumbel 분포는 각각 11개 지점에서, GEV 분포는 105개 지점에서 적정 분포형으로 선정됐음을 확인할 수 있다.

**Table 2.** AIC value and determined PDF

Station	Normal	Gumbel	GEV	Determined PDF
Gandrak	12128.97	11040.66	10488.32	GEV
Gimnyung2	-393.04	-801.50	-800.22	Gumbel
Gosan1	3957.77	4026.34	3903.06	GEV
Hacheon1	-446.20	-638.50	-721.90	GEV
Hacheon2	4549.18	2696.57	2400.23	GEV
Hacheon3	10363.37	8949.01	8779.13	GEV
Hacheon4	14027.05	12031.93	11482.82	GEV
Handong1	1065.72	-293.65	-297.15	GEV
Hamduk1	9465.86	6674.60	6234.55	GEV
Handong2	2924.30	777.83	614.15	GEV
Hamduk2	14269.38	11168.42	10246.05	GEV
Handong3	8277.65	6277.22	6214.97	GEV
Handong4	17285.50	14531.46	13098.51	GEV
Hahyo	4156.60	3908.58	3910.49	Gumbel
Hyupjae	6382.20	6202.13	6200.82	GEV
Hanrim1	3067.05	1055.79	893.56	GEV
Hanrim2	15552.40	15401.05	15368.02	GEV
Hamo1	-872.51	-680.95	-842.71	Normal
Hamo2	1010.39	736.11	708.84	GEV
Ilgwa	5332.06	5335.55	5223.29	GEV
Jongdal1	-1133.69	-2290.69	-2292.16	GEV
Jongdal2	176.40	-1224.80	-1253.40	GEV
Jongdal3	5543.99	3305.11	3175.68	GEV
Jongdal4	6683.29	4198.09	4010.23	GEV
Jongdal5	9681.00	7558.40	7199.50	GEV

Table 2. continued

Station	Normal	Gumbel	GEV	Determined PDF
Mureung1	11434.70	11965.00	11287.80	GEV
Mureung2	16527.37	18340.85	68576.51	Normal
Panpo1	5459.34	5754.64	5459.32	GEV
Panpo2	4941.28	4974.95	4918.65	GEV
Samdal1	-477.91	-713.00	-742.68	GEV
Sindo1	5229.90	5031.80	4999.40	GEV
Samdal2	5473.20	3591.50	3247.30	GEV
Sindo2	1391.18	1461.19	1388.78	GEV
Samdal3	12894.15	10037.26	8529.13	GEV
Seoho	6535.91	6410.98	6391.23	GEV
Sehwa1	-1262.90	-791.50	-1058.30	Normal
Sehwa2	322.21	76.65	71.87	GEV
Sangmo1	7240.15	6657.99	6659.99	Gumbel
Sangmo2	12265.18	14153.00	39880.84	Normal
Susan1	-1481.84	-2361.37	-2360.02	Gumbel
Susan2	2993.75	1061.77	779.02	GEV
Susan3	5952.84	4423.69	4092.67	GEV
Susan4	9404.95	7436.68	6940.48	GEV
Samyang1	10121.82	8196.25	7364.52	GEV
Samyang2	20887.92	19162.25	18388.30	GEV
Wimi1	949.84	640.18	627.73	GEV
Wimi2	16680.82	16248.76	16232.37	GEV
Wolpyung	6155.60	6024.55	6026.54	Gumbel
Yongdam1	12000.10	10628.49	10249.87	GEV
Yongdam2	19773.97	18932.73	18920.88	GEV
Youngrak1	1984.26	2081.12	1984.41	Normal
Yongsu1	10425.27	12185.32	10348.98	GEV
Yongsu2	17496.38	17420.12	17336.99	GEV
Gyora1	21402.55	21798.89	20918.32	GEV
Gyora2	16576.66	16283.15	16284.58	Gumbel
Hoesu3	9599.30	10022.80	9413.50	GEV
Jungmun3	16115.17	15769.36	15760.52	GEV
Sinrye2	8785.29	8733.04	8675.07	GEV
Odeung1	6947.62	7008.97	6930.97	GEV
Odeung2	5427.51	5389.76	5371.55	GEV
Odeung3	2165.69	1210.97	610.30	GEV
Odeung4	10377.89	10401.75	10319.69	GEV
Odeung5	2158.07	2266.20	2130.99	GEV
Wonjongjang1	32131.60	32908.50	30790.30	GEV
Wonjongjang2	16852.97	15496.77	15046.67	GEV
Wonjongjang3	4485.76	4540.69	4396.40	GEV
Anseong	19148.57	19938.38	19151.68	Normal
Chuja1	-552.60	-345.80	-589.00	GEV
Donam2	31867.20	30323.80	29979.20	GEV
Gosan2	17439.75	18199.65	17443.65	Normal
Ido2	27480.90	26356.40	26206.00	GEV
Nakcheon	19952.51	20684.17	19941.04	GEV
Namwon	3368.00	2860.70	2839.00	GEV
Sinrye1	25834.61	25517.04	25460.42	GEV
Sinum	22741.35	22052.07	22049.25	GEV
Yongheung	25348.39	24834.38	24829.78	GEV

Table 2. continued

Station	Normal	Gumbel	GEV	Determined PDF
Myungwol	19582.80	19200.80	19176.30	GEV
Ora	21177.15	20163.58	19917.81	GEV
Bongseong	22140.20	21685.90	21681.50	GEV
Dahul	19864.86	18168.40	17927.04	GEV
Eoum1	7958.44	7581.96	7581.78	GEV
Eoum3	3622.70	3451.40	3449.80	GEV
Gumak1	9696.49	9890.73	9620.45	GEV
Gumak2	28464.63	31082.52	83181.96	Normal
Gujwa1	98.20	-1067.08	-1068.52	GEV
Gujwa3	4718.40	2063.20	1579.80	GEV
Gujwa4	10940.50	8682.49	8326.89	GEV
Hagui1	17403.08	16951.78	16953.14	Gumbel
Hagui2	22137.82	21475.33	21430.36	GEV
Hagui3	29247.50	28466.00	28442.80	GEV
Hoesu1	10559.98	10004.30	9955.12	GEV
Hoesu2	29871.33	29541.49	29543.49	Gumbel
Jocheon1	1786.59	106.86	62.24	GEV
Jocheon2	13405.12	10802.09	9924.26	GEV
Jocheon3	16878.29	13684.68	12403.26	GEV
Jangjeon1	20957.70	20395.01	20392.61	GEV
Sangga1	7979.88	7728.09	7707.70	GEV
Sangga2	19199.12	18715.10	18716.99	Gumbel
Sangga3	12515.60	12336.80	12327.60	GEV
Shinchon1	4384.96	2009.22	1935.56	GEV
Shinchon2	12963.70	11874.87	11404.91	GEV
Shinchon3	19324.25	17147.27	16250.22	GEV
Seogwang1	13876.32	13773.44	13736.91	GEV
Seogwang2	11820.35	11831.56	11748.79	GEV
Seogwang3	9435.20	9203.99	9196.69	GEV
Shinhung1	283.76	1925.35	662.63	Normal
Shinhung2	12565.40	11031.10	10878.60	GEV
Shinhung3	8680.80	7697.20	7660.20	GEV
Sangye1	8904.44	9681.22	8763.86	GEV
Sangye3	3770.69	3889.20	3730.85	GEV
Taehung1	-2191.80	-2298.48	-2396.70	GEV
Taehung2	20717.29	19937.22	19935.12	GEV
Taehung3	16951.90	15281.40	14730.90	GEV
Topyung1	22425.27	20838.68	20043.59	GEV
Topyung2	16117.90	15927.50	15853.20	GEV
Aewol	861.74	761.66	627.69	GEV
Gonghang	19883.28	18195.02	17427.29	GEV
Gimnyung1	1388.89	667.34	643.98	GEV
Gosung	-420.70	-1285.20	-1283.50	Gumbel
Hanjangdong	567.73	654.37	535.03	GEV
Hwasun2	6802.86	5110.20	3842.04	GEV
Iho	23566.33	24835.03	88549.91	Normal
Jungmun1	29201.53	31606.93	85640.50	Normal
Pyungdae	4608.90	2690.50	2617.40	GEV
Sangdo	1895.43	938.24	939.66	Gumbel
Yeondong	13897.80	13937.90	13827.60	GEV
Yerae	-211.78	102.91	-296.80	GEV

### 3.2. 신뢰구간의 결정

선정 분포형을 바탕으로 Table 1의 누가분포함수를 활용하여 신뢰구간을 산정하였다. 각 지점 자료에 대한 기

본통계량(최소값, 최대값, 평균, 표준편차, 왜곡도 계수)과 신뢰구간은 Table 3과 같다.

**Table 3.** Basis statistics and confidence interval for each station (unit: EL. m)

Station	Min	Max	Mean	STD	Skewness	99%		95%	
						Lower	Upper	Lower	Upper
Gandrak	14.96	35.78	19.64	4.11	1.74	15.26	54.94	15.62	34.10
Gimnyung2	0.59	2.82	1.09	0.22	1.66	0.70	1.90	0.77	1.62
Gosan1	-0.86	2.89	0.25	0.52	0.55	-0.86	1.85	-0.65	1.42
Hacheon1	0.11	2.20	0.65	0.23	0.84	0.19	1.41	0.27	1.19
Hacheon2	0.58	4.11	1.23	0.44	2.25	0.66	3.37	0.73	2.38
Hacheon3	1.23	8.03	2.50	0.93	1.72	1.20	7.00	1.36	5.01
Hacheon4	3.55	15.52	5.14	1.41	2.17	3.49	14.36	3.65	9.49
Handong1	-0.09	2.90	0.89	0.27	2.24	0.43	1.82	0.50	1.51
Hamduk1	0.77	8.80	1.83	0.84	3.43	0.87	5.19	0.99	3.67
Handong2	0.51	3.96	1.11	0.34	2.66	0.64	2.44	0.71	1.90
Hamduk2	1.12	14.09	2.60	1.43	3.36	1.17	10.57	1.31	6.30
Handong3	1.58	7.06	2.67	0.59	2.27	1.80	4.84	1.93	4.02
Handong4	4.37	14.91	6.19	1.90	2.18	4.36	22.24	4.50	12.50
Hahyo	1.06	7.14	2.35	0.80	0.92	0.93	5.33	1.16	4.31
Hyupjae	3.94	8.92	5.76	1.07	0.50	3.73	9.49	4.08	8.30
Hanrim1	0.43	5.27	1.02	0.39	3.71	0.52	2.48	0.58	1.88
Hanrim2	5.64	16.72	9.79	2.71	0.40	4.27	18.10	5.29	15.78
Hamo1	-0.23	1.77	0.51	0.20	0.39	-0.02	1.03	0.11	0.91
Hamo2	0.30	3.89	1.15	0.57	2.04	0.38	3.56	0.48	2.54
Ilgwa	1.95	6.58	3.78	0.69	0.58	2.33	5.87	2.61	5.31
Jongdal1	0.42	3.05	0.91	0.21	1.90	0.57	1.68	0.62	1.41
Jongdal2	0.70	3.38	1.12	0.25	2.12	0.73	2.06	0.79	1.71
Jongdal3	0.70	5.85	1.57	0.50	3.04	0.90	3.36	1.00	2.66
Jongdal4	0.62	7.28	1.63	0.59	3.97	0.89	3.73	0.99	2.88
Jongdal5	1.11	8.26	2.47	0.79	2.47	1.47	6.16	1.60	4.48
Mureung1	-2.37	2.58	0.08	1.00	-0.18	-2.57	2.21	-1.94	1.87
Mureung2	-1.25	15.26	8.85	2.41	-1.02	2.64	15.06	4.12	13.57
Panpo1	1.52	5.47	3.33	0.69	0.14	1.69	5.15	2.04	4.76
Panpo2	13.34	24.09	17.95	2.56	0.26	12.17	24.79	13.35	23.21
Samdal1	0.85	2.70	1.41	0.22	0.83	0.98	2.16	1.06	1.93
Sindo1	-1.71	2.53	-0.29	0.62	0.71	-1.51	1.74	-1.29	1.14
Samdal2	1.35	6.78	2.05	0.55	2.93	1.39	4.84	1.47	3.49
Sindo2	-0.96	3.52	1.02	0.62	0.53	-0.35	2.88	-0.08	2.41
Samdal3	1.76	17.74	3.28	1.89	3.52	1.77	18.69	1.87	8.92
Seoho	35.76	50.61	41.08	2.37	0.93	36.49	48.91	37.30	46.57
Sehwa1	-0.32	1.39	0.25	0.18	-0.20	-0.21	0.71	-0.09	0.69
Sehwa2	0.70	2.70	1.24	0.27	1.12	0.75	2.16	0.83	1.86
Sangmo1	1.57	6.13	2.82	0.69	1.06	1.61	5.36	1.80	4.48
Sangmo2	1.67	10.01	6.67	1.27	-1.15	3.39	9.96	4.18	9.17
Susan1	0.44	2.40	0.88	0.20	1.45	0.53	1.61	0.59	1.36
Susan2	0.59	4.01	1.11	0.35	2.30	0.65	2.77	0.71	2.01
Susan3	1.07	6.58	1.89	0.62	2.17	1.12	5.35	1.21	3.64



Table 3. continued

Station	Min	Max	Mean	STD	Skewness	99%		95%	
						Lower	Upper	Lower	Upper
Susan4	1.72	7.21	2.66	0.79	1.97	1.71	7.23	1.81	4.92
Samyang1	0.75	5.88	1.83	0.98	1.91	0.78	9.75	0.87	5.17
Samyang2	3.65	25.83	8.23	4.31	1.75	3.52	48.61	3.90	24.55
Wimi1	1.18	3.35	1.74	0.28	0.70	1.21	2.69	1.30	2.39
Wimi2	10.78	23.73	15.17	3.27	0.63	9.76	30.54	10.52	24.35
Wolpyung	11.41	29.32	18.70	4.51	0.67	10.62	35.62	11.92	29.80
Yongdam1	1.05	9.36	2.70	1.24	1.52	1.13	11.06	1.29	6.73
Yongdam2	37.06	61.01	42.46	3.83	1.29	36.17	57.59	37.12	51.99
Youngrak1	-2.34	2.86	0.38	0.97	0.07	-2.12	2.88	-1.52	2.28
Yongsu1	-2.67	4.46	1.88	1.01	-0.91	-0.95	4.07	-0.27	3.73
Yongsu2	8.62	22.00	13.56	2.72	0.37	7.82	21.50	8.92	19.42
Gyora1	160.70	211.83	188.67	14.66	-0.35	138.40	211.04	153.27	209.37
Gyora2	162.76	187.07	171.97	5.91	0.56	161.34	194.17	163.04	186.53
Hoesu3	349.78	386.87	373.19	8.31	-0.66	346.33	386.81	353.92	385.58
Jungmun3	343.81	399.16	360.67	9.16	1.38	343.85	392.40	346.73	382.29
Sinrye2	290.10	299.90	293.87	1.91	0.58	289.93	299.74	290.66	298.13
Odeung1	95.89	112.72	102.12	3.43	0.19	94.27	111.24	95.89	109.17
Odeung2	116.74	124.49	119.67	2.04	0.33	115.37	125.60	116.19	124.04
Odeung3	223.39	229.46	223.89	0.52	3.26	223.43	228.79	223.46	225.69
Odeung4	116.99	136.30	124.95	4.13	0.24	115.61	135.64	117.54	133.23
Odeung5	166.39	168.81	167.41	0.45	0.11	166.35	168.56	166.58	168.32
Wonjongjang1	9.06	79.17	49.87	22.25	-0.58	-36.11	78.65	-7.94	77.33
Wonjongjang2	108.03	141.95	119.37	8.18	1.66	109.90	159.68	110.95	139.95
Wonjongjang3	68.79	71.45	70.16	0.64	0.08	68.51	71.51	68.90	71.29
Anseong	8.70	21.16	15.45	2.16	-0.05	9.90	21.01	11.22	19.68
Chuja1	0.22	1.62	0.82	0.22	0.15	0.31	1.40	0.42	1.27
Donam2	8.00	34.71	15.08	5.40	1.18	7.72	48.84	8.55	32.23
Gosan2	-0.97	9.38	4.63	1.66	0.09	0.36	8.90	1.38	7.88
Ido2	7.32	29.27	13.79	4.64	1.00	6.92	38.84	7.78	27.57
Nakcheon	13.28	28.14	21.86	2.11	0.06	16.70	27.07	17.83	26.03
Namwon	0.42	2.83	1.16	0.33	0.69	0.52	2.28	0.63	1.93
Sinrye1	35.75	52.40	43.39	3.32	0.52	36.81	53.93	38.00	50.86
Sinum	4.36	16.91	8.63	2.79	0.76	3.79	19.74	4.54	15.72
Yongheung	27.08	51.87	35.54	5.08	0.76	26.20	53.37	27.77	47.58
Myungwol	7.70	17.48	11.30	2.15	0.63	7.17	18.43	7.89	16.25
Ora	87.91	102.40	91.78	3.00	0.95	87.64	113.38	88.08	102.32
Bongseong	4.89	17.52	9.69	3.08	0.64	3.96	20.49	4.92	17.00
Dahul	3.83	17.70	6.47	2.08	1.64	3.61	17.14	3.96	12.27
Eoum1	2.33	7.46	4.00	1.16	0.80	1.99	8.59	2.31	6.94
Eoum3	210.33	227.15	216.29	3.59	1.14	210.46	230.37	211.34	225.13
Gumak1	15.42	20.56	17.97	1.31	0.06	14.65	20.90	15.41	20.38
Gumak2	50.80	80.10	70.40	5.16	-1.46	57.11	83.69	60.29	80.51
Gujwa1	0.41	3.35	0.95	0.24	2.14	0.54	1.84	0.61	1.53
Gujwa3	0.68	6.50	1.26	0.47	4.25	0.75	3.40	0.81	2.37
Gujwa4	1.62	8.61	2.67	0.75	2.31	1.69	6.48	1.81	4.70

Table 3. continued

Station	Min	Max	Mean	STD	Skewness	99%		95%	
						Lower	Upper	Lower	Upper
Hagui1	4.29	13.03	7.43	2.02	0.60	3.78	15.10	4.36	12.46
Hagui2	8.49	29.32	15.36	4.98	0.80	7.46	39.71	8.53	29.53
Hagui3	10.65	34.27	18.53	5.45	0.76	9.48	42.16	10.80	33.02
Hoesu1	32.38	39.30	34.69	1.67	0.86	32.10	43.09	32.44	39.49
Hoesu2	63.11	117.48	83.56	13.93	0.46	58.19	136.54	62.27	118.32
Jocheon1	0.49	3.38	1.05	0.29	1.98	0.60	2.17	0.67	1.75
Jocheon2	1.78	16.55	3.43	1.72	3.31	1.76	14.62	1.91	8.30
Jocheon3	1.45	14.00	2.97	1.50	2.76	1.49	13.04	1.62	7.33
Jangjeon1	5.79	20.69	10.61	3.46	0.73	4.62	24.49	5.55	19.44
Sangga1	1.61	8.14	4.23	1.18	0.85	1.98	8.16	2.38	6.96
Sangga2	5.31	18.48	9.51	2.95	0.70	4.23	20.56	5.08	16.76
Sangga3	4.38	17.80	9.38	3.06	0.52	3.44	19.55	4.48	16.46
Shinchon1	0.13	5.25	0.88	0.38	3.08	0.34	2.25	0.42	1.74
Shinchon2	2.56	19.42	6.09	3.43	1.63	2.27	39.36	2.58	19.51
Shinchon3	4.84	24.90	8.17	3.34	2.28	4.74	36.50	5.02	19.71
Seogwang1	22.68	37.80	29.00	3.82	0.43	21.15	40.59	22.61	37.40
Seogwang2	20.01	33.31	25.74	3.60	0.20	17.46	34.80	19.20	32.83
Seogwang3	96.31	106.61	100.23	2.21	0.74	96.07	107.76	96.78	105.40
Shinhung1	-0.38	1.58	0.50	0.25	-0.51	-0.14	1.14	0.01	0.99
Shinhung2	1.19	6.44	2.50	0.87	1.38	1.22	6.57	1.39	4.84
Shinhung3	1.15	5.35	2.20	0.66	1.14	1.13	5.03	1.29	3.92
Sangye1	51.75	58.49	55.80	1.37	-0.53	51.80	58.44	52.83	58.10
Sangye3	218.46	221.32	219.84	0.59	0.23	218.48	221.37	218.77	221.04
Taehung1	-0.10	1.45	0.41	0.19	0.54	0.03	1.00	0.10	0.83
Taehung2	8.55	18.58	11.70	1.92	0.82	8.38	19.21	8.90	16.51
Taehung3	1.50	9.95	3.55	1.59	1.29	1.54	14.05	1.75	8.62
Topyung1	1.48	14.73	4.37	2.62	1.24	1.37	41.20	1.58	17.62
Topyung2	175.04	182.21	177.71	1.45	0.49	174.76	182.17	175.31	180.93
Aewol	0.23	3.40	0.94	0.27	1.18	0.40	1.87	0.49	1.59
Gonghang	5.13	17.79	7.67	2.29	1.36	5.03	32.34	5.24	17.39
Gimnyung1	0.41	3.28	1.16	0.28	1.49	0.65	2.14	0.73	1.83
Gosung	0.48	2.49	0.94	0.23	1.22	0.54	1.79	0.60	1.50
Hanjangdong	-0.74	0.75	-0.07	0.35	-0.18	-1.02	0.66	-0.79	0.55
Hwasun2	38.33	49.46	39.63	1.66	3.05	38.41	50.09	38.49	43.54
Iho	4.82	24.14	13.33	3.35	-0.35	4.71	21.95	6.77	19.89
Jungmun1	55.32	81.04	73.86	5.87	-1.56	58.73	88.98	62.35	85.36
Pyungdae	0.33	5.09	1.58	0.41	2.30	0.97	3.06	1.06	2.50
Sangdo	0.69	3.63	1.23	0.30	1.44	0.72	2.31	0.80	1.94
Yeondong	31.65	48.01	38.61	4.18	0.15	28.78	48.85	30.88	46.72
Yerae	24.30	25.47	24.82	0.24	0.08	24.24	25.37	24.37	25.27

분석지점 중 13개 선별 지점에 대한 히스토그램과 적정 분포형에 대한 확률밀도함수를 도시하면 Fig. 6과 같다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 2005년부터 2015년까지 제주도 내의 지

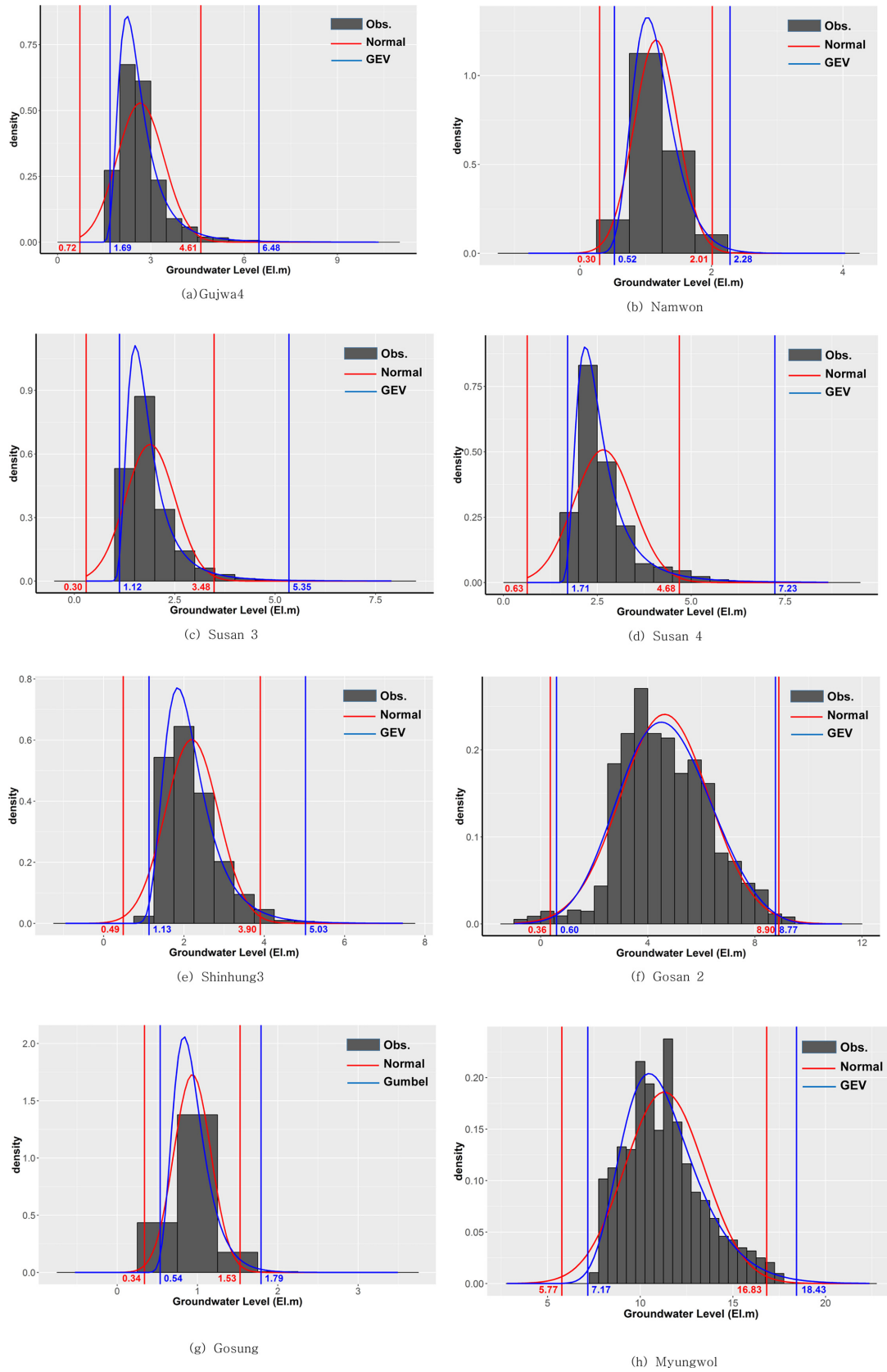


Fig. 6. Estimated PDFs and 99% confidence interval.

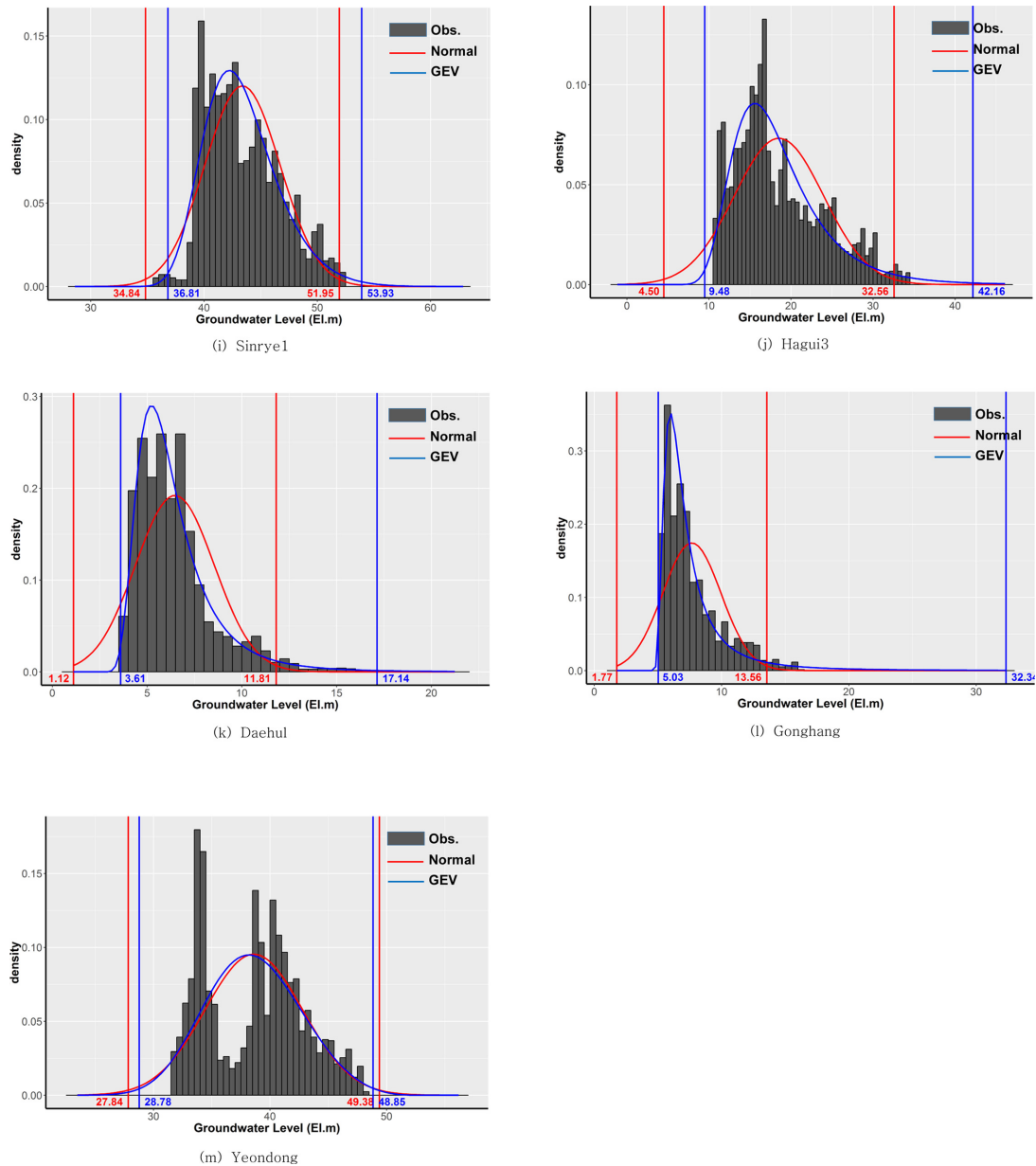


Fig. 6. continued

하수위 관측 지점 127개소 자료를 대상으로 제주도 지하수 관리수위의 재설정을 위한 지하수위 관측 자료 통계 분석을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 확률밀도함수는 정규분포, GEV분포, Gumbel분포형의 3개 확률분포형을 적용하였고, 최우도법을 활용하여 각 확률분포형의 매개변수를 추정하였다.

2. 추정된 매개변수를 바탕으로 AIC를 계산하여 가장 작은 AIC 값을 갖는 분포형을 대상 자료에 대한 적정 분포형으로 선정한 바, 정규분포와 Gumbel 분포는 각각

11개 지점에서, GEV 분포는 105개 지점에서 적정 분포형으로 선정되어 대다수의 지하수위자료가 GEV분포를 나타냄을 알 수 있었다.

3. 정규분포가 아닌 본 연구에서 적용된 다른 분포들에 지하수위 자료들이 적합하다는 것은 자료가 평균을 중심으로 대칭을 이루는 형태가 아닌 양으로 또는 음으로 왜곡(skewed)된 형태를 보인다는 의미로서, 지하수위 자료는 위치, 지질특성 등에 따라 동일한 강수에 대해서도 다른 응답을 보일 것으로 예상되어 지하수위 관측지점에 따

라 상이한 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

4. 제주지역의 기준수위를 정함에 있어서는 장기적인 지하수위 관측자료의 확률분포형에 맞는 통계분석을 통해 구해진 신뢰구간의 하한치를 활용하는 것이 바람직하며 최종 기준수위는 지자체의 정책적 결정사항이므로 과거 가뭄 기록과 지하수위 시계열자료를 대비하여 안전율을 고려한 수위로 결정되도록 추진해야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 제주특별자치도의 지원과 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 제주권 건설교통기술 지역거점센터의 “해수침투 취약성 평가기술 및 담-염수 경계예측기술 개발(과제번호 : 18RDRP-B076272-05)”에 의해 수행되었습니다.

## References

- Akaike, H., 1973, Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, in Petrov, B.N.; Csáki, F., *2nd International Symposium on Information Theory*, Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 267-281.
- Gilleland, E., Ribatet, M., and Stephenson, A.G., 2013, A software review for extreme value analysis, *Extremes*, **16**(1), 103-119.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2013, Comprehensive planning of water resources in Jeju Special Self-Governing Province, p.366.
- Kim, G.-B., Cha, E.-J., Jeong, H.-G., and Shin, K.-H., 2013, Comparison of time series of alluvial groundwater levels before and after barrage construction on the lower Nakdong River, *J. of Eng. Geol.*, **23**(2), 105-115.
- Kim, J.-W., Koh, G.-W., Won, J.-H., and Han, C., 2005, A study on the determination of management of groundwater level on Jeju Island, *J. Soil Groundw. Environ.*, **10**(2), 12-19.
- Kullback, S. and Leibler, R.A., 1951, On information and sufficiency, *Ann. Math. Stat.* **22**(1), 79-86.
- Mood, A.M., Graybill, F.A., and Boes, D.C., 1974, *Introduction to the Theory of Statistics*, 3rd Ed., McGraw-Hill, U.S.A.
- Park, W.-B., Koh, G.-W., Kim, B.-S., Moon, D.-C., and Yang, S.-K., 2004, Estimation of agricultural groundwater withdrawal and characteristics of groundwater use in Jeju Island, *Proceedings of KoSSGE 2004 Spring Conference*, 110-113.