

한국 연안 심해 설계파고의 극치분포 특성 Characteristics on the Extreme Value Distributions of Deepwater Design Wave Heights off the Korean Coast

정신탈* · 김정대* · 조홍연**

Shin Taek Jeong*, Jeong Dae Kim* and Hong Yeon Cho**

요 지 : 연안 및 항만구조물의 설계에서 심해 설계파는 매우 중요한 환경인자이다. 특히, 심해설계파고의 분포 정보는 최근 부각되고 있는 신뢰성 설계에 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 한국해양연구원(2003)에서 제시한 1979년부터 1998년까지의 한국연안 67개 지점의 16방향별 최대 유의파 산출자료를 이용하여 극치분포 분석을 수행하였다. 특성분석에 사용된 극치분포함수는 Weibull, Gumbel, Log-Pearson Type-III, Lognormal 분포이며, 각 분포함수의 매개변수는 모멘트법, 최우도법 그리고 확률가중모멘트법으로 추정하였다. 또한, 극치분포함수의 적합성은 95% 신뢰도 수준으로 χ^2 및 K-S 검정을 실시하였다. 그 결과, 한국연안의 심해 설계파고는 Gumbel 분포형이 가장 적합한 모형으로 파악되었으며, 최적 추정된 매개변수 및 재현기간 50년에 대한 심해 설계파고 정보를 제시하였다.

핵심용어 : 신뢰성 설계, 추산자료, 극치분포, 설계파고, 매개변수, Gumbel 분포, 50년 빈도 심해 설계파고

Abstract : For a coastal or harbor structure design, one of the most important environmental factors is the appropriate design wave condition. Especially, the information of deepwater wave height distribution is essential for reliability design. In this paper, a set of deep water wave data obtained from KORDI(2003) were analyzed for extreme wave heights. These wave data at 67 stations off the Korean coast from 1979 to 1998 were arranged in the 16 directions. The probability distributions considered in this research were the Weibull, the Gumbel, the Log-Pearson Type-III, and Lognormal distribution. For each of these distributions, three parameter estimation methods, i.e. the method of moments, maximum likelihood and probability weighted moments, were applied. Chi-square and Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit tests were performed, and the assumed distribution was accepted at the confidence level 95%. Gumbel distribution which best fits to the 67 station was selected as the most probable parent distribution, and optimally estimated parameters and 50 year design wave heights were presented.

Keywords : reliability design, hindcasting, extreme value distribution, design wave height, parameter, Gumbel distribution, 50 year design wave heights

1. 서 론

연안 및 항만구조물의 설계에서 가장 중요한 인자는 구조물의 기대 내구연한, 즉 재현기간에 대한 설계파 정보이다. 해양수산부(2000)에 의하면 심해설계파 산정기준으로 10년 이상의 파랑 실측자료를 이용하거나, 30년 이상의 기상자료를 이용하여 추산치를 구하고 관측치와 보정

하여 사용하는 것을 권장하고 있다.

극치분포 해석에 많이 쓰이는 확률 분포의 종류에는 Lognormal, Gumbel 또는 Fisher-Tippett I(FT-I), Fisher-Tippett II(FT-II)와 Weibull 분포 등이 있다. 이들 분포형은 2개 또는 3개의 매개변수를 포함하고 있으며, 관측 자료를 이용하여 최적 매개변수를 추정하여야 한다. Goda(1988)는 Weibull 분포에 맞추기 위해 형상매개변수

*원광대학교 토목환경도시공학부(Corresponding author: Shin Taek Jeong, School of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University, 344-2, Shinyong-Dong, Iksan, 570-749, Korea. stjeong@wonkwang.ac.kr)

**한국해양연구원 연안 · 항만공학연구본부(Coastal & Harbour Engineering Research Division, Korea Ocean R & D Institute)

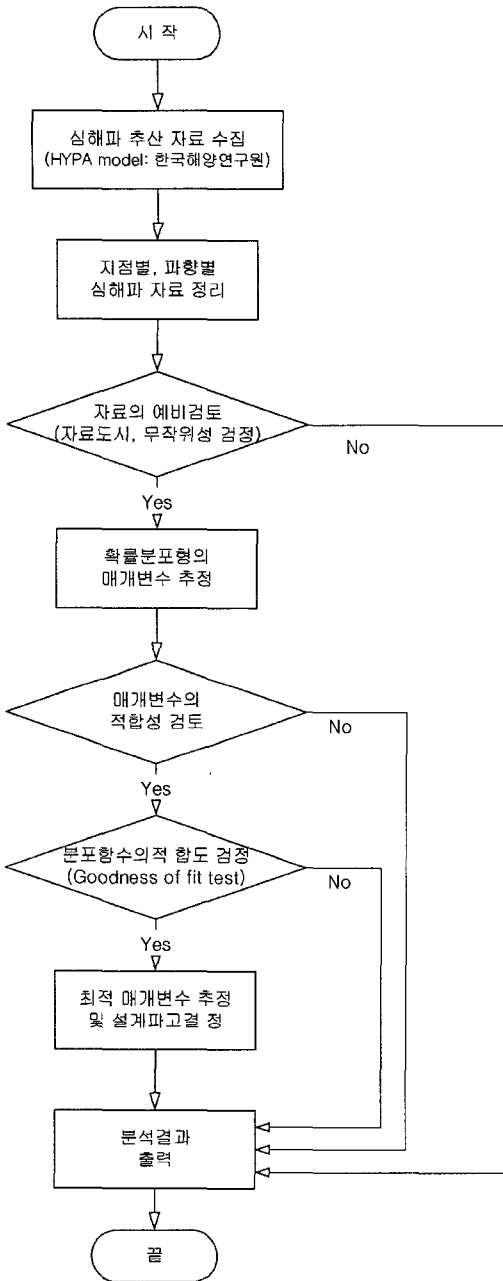


Fig. 1. Flowchart of the extreme wave height analysis.

를 4가지로 가정하여 관측 자료에 맞도록 시도하였으며, 이러한 분포들을 이용한 응용 예는 Isaacson and MacKenzie(1981), Muir and El-Shaarawi(1986), Ochi(1982), 그리고 Vledder et al.(1993)을 들 수 있다. 한편, Goda and Kobune(1990)는 일본 해안에 대한 파랑자료를 분석하여 크게 4개의 Weibull 극치분포형을 제안하였다. Goda et al.(2000)은

차후 관측된 자료를 추가한 후 분석을 실시하여 해역별로 2개의 Weibull 극치분포형과 1개의 FT-I 분포형을 제안하였다.

본 연구에서는 해안 및 항만공학자에게 중요한 사안으로 대두되는 심해 설계파고 추정과정에 대하여 체계적인 검토를 수행하였다(Fig. 1참조). 우선, 기존의 심해 설계파고 추정방법에 대한 문제점 및 한계를 검토하였다. 또한, 한정된 Hindcasting 자료, 즉 한국해양연구원에서 제시한 1979년~1998년(20년) 동안의 지점별, 방향별 연최대파고 자료를 이용하여 극치분포해석을 수행하였으며, 지점별·방향별로 적합한 극치분포 형태 및 추정된 매개변수를 제안하고, 재현기간별 심해 설계파고를 체계적으로 추정·제시하였다. 심해 설계파고 추정에 사용된 극치분포 함수에 대해서는 선행 연구에서 생략되어 있는 95% 신뢰수준에 대한 적합성 검증도 수행하였다.

2. 심해 설계파 추산자료

심해 설계파 추정을 위한 자료는 한국해양연구원 파랑정보시스템(wave.kordi.re.kr)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 파랑정보시스템에서는 우리나라 연안 67개 지점, 16 방향에 대하여 HYPA 모형으로 추산된 파랑장(Wave field) 자료 정보를 제공하고 있다. 물론, 이전 연구에서 사용된 심해설계파 추정자료(수산청, 1988; 해운항만청, 1988)도 있으나, 일정한 간격의 추산자료가 아닌 특정 태풍에 대하여 추산된 자료로 특정기간에 국한되어 있기 때문에 체계적인 극치분포 해석에는 적합하지 않아 제외하였다. 한편, 한국해양연구원에서 제공하는 심해 설계파 추정 지점은 Fig. 2에 도시하였다. 각 지점의 코드번호, 경·위도 등에 관한 정보는 한국해양연구원(2000, 2003), 김정대(2003)에 수록되어 있다.

3. 극치분포함수의 매개변수 추정 및 적합도 검증 방법

극치분포 해석에 사용되는 극치분포함수는 연구영역(홍수량, 강우량, 풍속 분석 등)에 따라 매우 다양하게 제안되어 있으며, 분석하고자 하는 극값의 성격 또는 지역적 특성에 따라 범용적으로 사용되는 극치분포 함수가 다른 양상을 보이고 있다. 그러나, 어떤 극치분포 함수를 사용한다 할지라도 원하는 신뢰도를 확보한다면, 기본적으로 분석과정상의 문제는 발생하지 않는다. 따라서, 본 연구

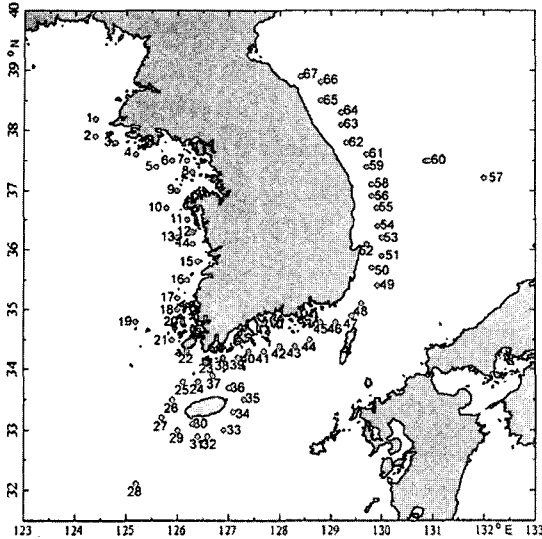


Fig. 2. Location numbers of the estimated wave heights off the Korean coast.

에서는 일반적으로 극치분포 해석에 널리 이용되는 Weibull, Log-Normal, Log-Pearson Type-III 그리고 Gumbel 분포함수를 선정하여 극치분포 해석을 수행하였다. 각 분포에 대한 확률밀도함수, 기중밀도함수, 그리고 매개변수 추정 방법 등은 Kite(1988), 국립방재연구소(1998), Rao and Hamed (2000), 김정대(2003) 등의 자료를 이용하였다.

3.1 매개변수 추정방법

본 연구에서는 매개변수를 추정하는 방법으로 모멘트법(Method of Moments), 최우도법(Method of Maximum Likelihood), 그리고 확률가중모멘트법(Method of Probability Weighted Moments)을 사용하였다. 통계적인 관점에서 보면, 최우도법은 표본크기가 충분히 클 때 가장 효율적인 방법으로 평가되지만 수렴성에 있어 문제가 발생할 수 있으며, 표본의 크기가 작을 때 일반적으로 잘 일치하지 않는 결과를 얻게 된다. Gumbel 분포의 경우에는 모멘트법으로도 충분히 정확하고 불편의된(un-biased) 추정치를 구할 수 있으므로 가장 편리한 방법이라 할 수 있다. 그러나 모멘트법은 매우 왜곡된(skewed) 분포형의 경우 불안정한 추정치를 얻게 되며, 고차 모멘트로 갈수록 부정확해지는 단점이 있다. 또한 표본자료중에 이상치가 포함되면 모멘트법에 의한 방법은 만족스럽지 못한 결과를 준다. 최근에는 모멘트법의 단점을 보완한 확률가중모멘트법(Greenwood et al., 1979)과 L-모멘트법(Hosking, 1989)이

제안되었다. 확률가중모멘트법은 자료에 가중치를 부여하여 매개변수를 추정하는 방법으로 표본크기가 작거나 왜곡된 자료일 때 비교적 안정적인 결과를 얻을 수 있다. L-모멘트법은 확률가중모멘트의 함수를 선형조합하여 매개변수를 추정하는 방법이나, 본 연구에서는 검토대상에서 제외하였다.

3.2 적합도 검정 방법

적합도 검정방법은 선정된 극치분포함수의 매개변수 추정이 완료되면, 원하는 신뢰도에 대하여 수행하게 된다. 전통적인 적합도 검정방법은 자료를 전체적인 관점 또는 pdf 비교를 통하여 분석하는 방법, 즉 χ^2 검정과 자료 하나하나의 편차 또는 CDF 비교를 통하여 분석하는 K-S (Kolmogrov-Smirnov) 검정 방법으로 대별될 수 있다.

χ^2 검정의 경우 자료의 수가 20개 밖에 되지 않아 각 계급구간에 적어도 5개의 수치를 포함시키는 것이 바람직하다는 기준(Ang and Tang, 1975)을 만족하지 못하지만 적합도 검정에 가장 일반적으로 쓰이는 방법이고, 추정된 자료의 한계를 현 시점에서는 극복할 수 없기 때문에 불가피한 상황으로 간주하였다. 결과적으로, χ^2 검정은 K-S 검정보다 적합도 정도가 떨어졌다. 따라서, 본 연구에서는 K-S 검정 결과를 기준으로 모형의 적합도를 판단하였다.

4. 극치분포함수의 매개변수 추정 및 적합도 검정 결과

본 연구에서는 일정기간(1년)을 단위로 삼아 1979년부터 1998년까지 추정된 파고자료 중 연 최대 유의파고 1개를 추출, 총 20개의 자료를 이용하여 극치분포해석을 수행하였다. 즉, 매년의 자료중 가장 큰 파고만을 선정하는 년 최고치 방법(Annual maxima method)을 채택하였다. 특정치 초과방법(Peaks-Over-Threshold method)을 사용하면 극치분포 해석에 포함되는 자료의 개수를 더 늘릴 수 있는 이점이 있으나, 기존의 시계열 추정자료에서 별도로 자료를 분리하는 것이 곤란하여 채택하지 않았다.

편의상 확률밀도함수 약어 및 적합도 검정 방법별 약어는 Table 1과 같이 정의하였으며, Table 2에는 추정된 매개변수를 이용한 분포함수에 대하여 95% 수준의 신뢰도에 대한 K-S 적합도 검정을 만족하는 지점수와 백분율을 정리하였다.

한국 연안의 최적 확률분포형은 Fig. 3과 같이 Weibull 분포보다 Gumbel 분포가 보다 더 적합한 것으로 파악되

Table 1. Acronyms of probability density function, goodness-of-fit test, and parameter estimation

약어	확률분포함수	약어	적합도 검정 및 매개변수 추정방법
WBU3	3변수 Weibull 분포	CHI2	χ^2 검정
WBU2	2변수 Weibull 분포	KS	Kolmogorov-Smirnov
GUM	Gumbel 분포	MM	모멘트법
LP3	Log-Pearson Type-III 분포	MML	최우도법
LN3	Lognormal 분포	MPWM	확률가중모멘트법

Table 2. Results of Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test

매개변수 추정방법	구분					
	MM-CHI2	MM-KS	MML-CHI2	MML-KS	MPWM-CHI2	MPWM-KS
WBU3	648(60.45)	868(80.97)	179(16.70)	241(22.48)	610(56.90)	778(72.57)
WBU2	795(74.16)	1001(93.38)	744(69.40)	1016(94.78)	821(76.59)	981(91.51)
GUM	908(84.70)	1070(99.81)	909(84.79)	1030(96.08)	899(83.86)	1071(99.91)
LP3	391(36.47)	461(43.00)	204(19.03)	234(21.83)	789(73.60)	880(82.09)
LN3	761(70.99)	1055(98.41)	684(63.81)	895(83.49)	689(64.27)	885(82.56)

참고: 결과 수치는 총 자료 세트 1,072개에서 95% 유의수준의 K-S검정을 통과한 자료세트의 수이며, ()는 백분율이다.

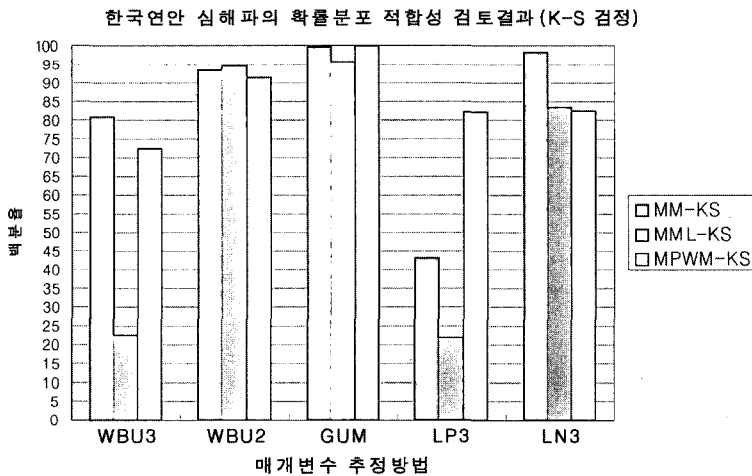


Fig. 3. Plots of Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test result.

었다. 확률가중모멘트법으로 Gumbel 분포의 매개변수를 추정한 결과, 적합도 검정을 만족하지 않는 자료는 단 하나(St. 15, SSE 방향)이었으나, St. 15(SSE 방향)의 자료에 대해서도 최우도법으로는 적합도 검정을 만족하는 확률매개변수를 구할 수 있다.

연안 심해 설계파에 대한 체계적인 극치분포 해석을 수행한 결과를 종합하여 확률분포함수를 Table 3에 제시하였다. 그리고, 대부분의 자료가 적합도 검정을 통과하는 Gumbel 분포함수의 위치 및 규모 매개변수를 각각 Table 4, Table 5에 정리하여 제시하였다.

5. Gumbel 분포함수를 이용한 심해설계파 추정

전술한 과정에 따라 적정 확률분포형이 결정되면, 여러 가지 목적에 따라 재현기간별 설계파고를 산정하게 된다. 확률파고를 구하는 방법에는 빈도계수법과 각 확률분포형의 누가분포함수의 역함수를 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 재현기간 T에 대한 설계파고를 누가분포함수의 역함수를 사용하여 구하였다. Gumbel 확률분포형의 역함수는 다음 식 (1)과 같다.

Table 3. Results of the estimated parameters on the extreme wave height distributions

지점	적합확률분포형	매개변수추정방법	비고	지점	적합확률분포형	매개변수추정방법	비고
St.01	GUM	MM, MML, MPWM		St.37	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.02	GUM	MM, MML, MPWM		St.38	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.03	GUM	MPWM		St.39	GUM	MM, MML, MPWM	
St.04	GUM	MPWM			LN3	MM, MPWM	
St.05	GUM	MM, MML, MPWM		St.40	GUM	MM, MML, MPWM	
St.06	GUM	MM, MML, MPWM			LN3	MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM		St.41	GUM	MPWM	
St.07	GUM	MPWM			LN3	MPWM	
St.08	GUM	MPWM		St.42	GUM	MM, MML, MPWM	
St.09	GUM	MM, MML, MPWM			LN3	MPWM	
	St.10	GUM	MM, MML, MPWM		St.43	GUM	MM, MML, MPWM
WBU2		MM, MML, MPWM		LN3		MPWM	
St.11	GUM	MPWM		St.44	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			LN3	MPWM	
St.12	GUM	MPWM		St.45	GUM	MM, MML, MPWM	
St.13	GUM	MM, MML, MPWM			LN3	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.14	GUM	MPWM		St.46	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.15	GUM	MPWM	SSE(MML)	St.47	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.16	GUM	MPWM		St.48	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.17	GUM	MM, MML, MPWM		St.49	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.18	GUM	MM, MML, MPWM		St.50	GUM	MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			LN3	MPWM	
St.19	GUM	MM, MML, MPWM		St.51	GUM	MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			LN3	MPWM	
St.20	GUM	MPWM		St.52	GUM	MPWM	
	LN3	MPWM			LN3	MPWM	
St.21	GUM	MM, MML, MPWM		St.53	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.22	GUM	MPWM, MML		St.54	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM, MML			LN3	MPWM	
St.23	GUM	MM, MML, MPWM		St.55	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			LN3	MPWM	
St.24	GUM	MM, MML, MPWM		St.56	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			LN3	MPWM	
St.25	GUM	MM, MML, MPWM		St.57	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.26	GUM	MM, MML, MPWM		St.58	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MML, MPWM			LN3	MPWM	
St.27	GUM	MM, MML, MPWM		St.59	GUM	MPWM, MML	
	LN3	MPWM			LN3	MPWM	
St.28	GUM	MM, MML, MPWM		St.60	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	

Table 3. Continued

지점	적합확률분포형	매개변수추정방법	비고	지점	적합확률분포형	매개변수추정방법	비고
St.29	GUM	MM, MML, MPWM		St.61	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			LN3	MPWM	
St.30	GUM	MM, MML, MPWM		St.62	GUM	MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			LN3	MPWM	
St.31	GUM	MM, MML, MPWM		St.63	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.32	GUM	MM, MML, MPWM		St.64	GUM	MM, MML, MPWM	
	LN3	MPWM			WBU2	MM, MML, MPWM	
St.33	GUM	MM, MML, MPWM		St.65	GUM	MM, MML, MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			WBU2	MPWM, MML	
St.34	GUM	MM, MML, MPWM		St.66	GUM	MPWM	
	LN3	MPWM			LN3	MPWM	
St.35	GUM	MM, MML, MPWM		St.67	GUM	MPWM	
	WBU2	MM, MML, MPWM			LN3	MPWM	
St.36	GUM	MM, MML, MPWM					
	WBU2	MM, MML, MPWM					

$$X_T = x_0 - \alpha \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \quad (1)$$

여기서, x_0 는 위치 매개변수, α 는 규모 매개변수를 의미한다.

본 논문에서는 적정 확률분포형으로 Gumbel 분포를 채택하여 설계파고를 산정하였다. 매개변수 추정법(확률가중모멘트법)을 이용하여 구한 위치 매개변수 x_0 와 규모 매개변수 α (Table 4 및 5참조)를 전술한 식 (1)에 대입하여, Table 6에 50년 빈도(재현기간 50년; $T=50$) 설계파고를 제시하였다. 제시된 50년 빈도 설계파고는 연안에서 시행되는 각종 개발사업의 천해 설계파(50년 빈도) 추정을 위한 파랑전파모형의 입력자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결론 및 차후 연구과제

6.1 결론

한국해양연구원의 파랑모델(HYPA Model) 추산결과를 이용하여 한국 연안의 심해파에 대한 극치분석을 체계적으로 실시하였다. 67개 지점 자료를 16방향별로 구분하여 총 1,072개의 자료를 수집·정리하였다. 사용한 극치분포형은 Weibull, Gumbel, Log-Pearson type-III, 그리고 Lognormal 분포 4종류이며, Weibull 분포형은 2변수와 3변수 분포로 구분하여 분석을 실시하였다. 각 분포형에 대한 매개변수 추정은 모멘트법, 최우도법, 그리고 확률가중모멘트법을 이용하고, χ^2 검정과 K-S 검정을 이용하여 추정된 확률분포

형의 적합도를 검정하였다. 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 확률가중모멘트법으로 Gumbel 확률분포형의 매개변수를 추정한 결과, 전체 자료군 1072개 중 1071개(99.91%)가 K-S 검정(유의수준 5%)을 통과하였고, 2변수 Weibull 분포(91.51%), Lognormal 분포(82.56%), Log-Pearson type-III 분포(82.09%), 그리고 3변수 Weibull 분포(72.57%) 순으로 K-S 검정(유의수준 5%)을 통과하였다. 그러나 최우도법으로 매개변수를 추정한 결과는 Gumbel 분포(96.08%), 2변수 Weibull 분포(94.78%), Lognormal 분포(83.49%) 순으로 K-S 검정(유의수준 5%)을 통과하였다. 한편, 모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정한 결과는 Gumbel 분포(99.81%), Lognormal 분포(98.41%), 2변수 Weibull 분포(93.38%) 순이다. 즉, 매개변수 추정방법에 관계없이 Gumbel 분포가 심해파 추산자료의 극치분포로 가장 적합한 것으로 파악되었다.

2) 다른 매개변수 적합도 검정법인 χ^2 검정 결과는 K-S 검정 결과보다 기간되는 자료 세트가 더 많았다. 이는 χ^2 검정으로 적합도를 검토하기에는 자료 수가 20개로 너무 부족하기 때문으로 사료된다.

3) 대부분의 자료(99.91%)가 K-S 검정(유의수준 95%)을 통과하는 Gumbel 분포에 대하여 확률가중모멘트법으로 추정한 Gumbel 분포의 위치 및 규모 매개변수는 Table 4 및 5에 지점 및 방향별로 정리하여 차후 신뢰성 설계시 활용토록 하였다. 단, St.15의 SSE방향은 적합도 검정결과를 고려하여 최우도법으로 매개변수를 추정하였다. 또

Table 4. Results of the estimated location parameters for Gumbel PDF

GUM-MPWM-LOCATION- PARAMETER															단위: m	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
St.01	2.606	1.699	1.292	1.032	1.106	1.209	1.226	2.075	2.964	3.005	2.396	2.025	2.461	2.818	3.156	3.455
St.02	1.819	1.202	1.214	1.127	1.182	1.776	1.965	2.379	3.223	3.103	2.529	2.038	2.517	3.083	3.509	3.557
St.03	0.975	0.758	0.725	0.816	1.272	1.758	1.846	2.236	3.167	3.004	2.678	2.124	2.542	3.172	3.694	3.518
St.04	0.850	0.707	0.668	1.076	1.557	1.705	1.695	1.888	2.781	2.829	2.594	2.101	2.523	3.624	2.231	1.610
St.05	1.237	1.026	0.968	1.427	1.429	1.487	1.461	1.545	2.489	2.831	2.532	2.185	2.462	3.565	1.939	1.539
St.06	1.040	0.919	0.943	1.216	1.211	1.317	1.237	1.218	2.154	2.760	2.460	2.045	1.706	1.574	1.539	1.383
St.07	0.641	0.518	0.547	0.793	0.969	0.985	0.997	0.967	1.950	2.443	2.582	1.983	1.526	1.548	1.380	1.125
St.08	1.649	1.227	0.836	1.023	0.939	0.963	1.326	2.373	2.077	2.092	2.431	2.240	2.381	2.223	1.803	1.397
St.09	1.455	1.027	1.151	1.224	0.655	0.760	0.726	0.850	2.221	2.732	2.436	2.362	2.634	3.545	2.634	1.994
St.10	1.761	1.323	1.244	1.130	1.060	1.139	1.522	1.672	2.621	2.978	2.571	2.488	2.783	4.027	4.110	2.700
St.11	0.685	0.636	0.620	0.720	0.892	0.921	1.064	1.134	1.740	2.456	2.558	2.430	2.764	3.857	3.263	2.218
St.12	1.068	0.931	0.841	0.875	0.900	0.931	1.076	1.114	1.592	2.393	2.524	2.388	2.604	3.803	3.164	1.750
St.13	1.391	1.180	1.176	1.236	1.168	1.205	1.535	1.759	2.308	2.807	2.473	2.518	2.625	4.078	4.442	3.112
St.14	1.056	0.921	0.855	0.880	0.827	0.914	1.025	1.084	1.336	2.228	2.566	2.376	2.768	3.932	3.283	1.878
St.15	1.141	0.949	0.824	0.755	0.569	0.596	0.633	0.658	1.078	2.168	2.502	2.283	2.894	3.941	3.550	2.035
St.16	1.569	1.171	1.024	0.881	0.627	0.705	0.716	0.786	1.614	2.446	2.525	2.408	2.807	4.190	4.190	2.744
St.17	2.047	1.496	1.221	1.011	0.977	1.232	1.374	2.187	2.410	2.935	2.549	2.616	2.756	4.278	5.095	4.051
St.18	1.649	1.227	1.143	1.023	1.028	1.190	1.326	2.373	2.558	2.910	2.619	2.549	2.865	4.339	5.059	3.906
St.19	3.438	2.155	1.894	1.591	1.570	2.019	2.922	3.059	3.299	3.201	2.399	2.649	2.943	4.151	5.398	5.538
St.20	1.578	1.256	1.045	1.004	0.816	0.904	2.840	3.000	2.717	3.022	2.478	2.555	2.762	4.345	5.025	3.944
St.21	2.317	1.796	1.464	1.355	1.527	2.706	3.180	2.565	2.921	3.031	2.394	2.566	3.050	4.309	5.377	4.672
St.22	1.293	1.148	1.064	1.320	2.073	2.736	2.974	2.251	2.148	2.638	2.790	2.543	2.962	4.430	5.059	3.836
St.23	1.598	1.452	1.464	1.738	2.499	2.822	3.499	2.532	1.968	2.100	2.148	2.397	3.205	4.715	3.452	2.067
St.24	2.125	1.991	1.999	2.479	2.419	1.781	1.461	1.431	1.437	1.732	1.940	1.997	2.945	4.392	5.021	3.152
St.25	2.229	1.941	2.019	2.585	2.410	1.718	1.578	1.559	2.278	3.019	2.852	2.542	3.198	4.276	5.568	4.320
St.26	2.822	2.288	2.405	2.822	1.317	1.386	2.246	2.492	3.199	3.229	2.552	2.516	3.018	4.325	5.820	5.440
St.27	3.744	2.723	1.840	1.686	1.754	3.073	4.185	4.110	3.730	3.349	2.508	2.497	3.146	0.904	5.799	5.686
St.28	4.984	3.277	3.177	3.033	3.243	4.492	4.699	3.729	3.596	3.475	2.409	2.568	3.107	3.970	5.718	6.065
St.29	1.451	1.310	1.253	1.521	2.543	3.568	4.289	4.016	3.636	3.522	2.675	2.554	3.167	4.407	5.892	5.331
St.30	1.171	1.008	1.064	1.698	2.569	3.288	4.438	4.347	3.700	3.564	2.897	2.549	1.675	2.156	1.762	1.302
St.31	1.910	1.868	2.093	2.567	3.093	3.309	4.629	4.143	3.596	3.519	2.875	2.617	3.242	5.149	3.450	2.239
St.32	1.905	1.734	2.025	2.539	2.942	3.252	4.628	4.377	3.654	3.609	2.872	2.792	2.288	2.294	2.149	2.026
St.33	2.023	2.882	3.999	3.670	2.856	3.344	4.613	4.331	3.652	3.584	2.824	2.874	2.289	2.212	2.132	2.049
St.34	2.624	2.634	3.799	3.598	2.589	3.013	4.088	4.259	3.654	3.501	2.700	2.669	1.173	1.345	1.560	1.953
St.35	2.707	2.568	3.414	3.498	2.680	2.694	3.742	4.180	3.794	3.617	2.444	2.022	2.035	4.391	4.135	3.194
St.36	2.268	2.020	2.641	3.132	2.905	2.479	3.746	4.169	2.397	1.362	1.487	1.442	2.953	4.779	3.552	2.794
St.37	2.244	1.940	2.033	2.572	2.715	2.877	3.151	2.388	1.527	1.595	1.647	1.853	3.327	4.834	3.549	2.591
St.38	1.460	1.328	1.354	1.742	2.348	2.248	3.673	3.377	2.023	1.979	2.119	2.455	2.884	2.569	1.807	1.700
St.39	1.385	1.333	1.592	2.256	2.475	2.170	3.414	3.947	2.632	2.180	2.168	2.493	2.594	2.000	1.984	1.586
St.40	1.238	1.283	1.509	2.100	2.467	2.143	2.509	3.743	3.361	2.432	2.125	2.441	2.223	1.831	1.791	1.455
St.41	1.257	1.347	1.633	2.187	2.460	2.106	2.351	3.676	3.639	2.848	2.250	2.522	2.117	1.795	1.801	1.406
St.42	1.240	1.371	1.834	2.342	2.536	2.157	2.399	3.559	3.876	3.001	2.191	2.546	2.052	1.742	1.704	1.331
St.43	1.179	1.439	1.912	2.393	2.541	2.009	2.215	3.164	3.842	3.194	2.281	2.384	1.738	1.614	1.415	1.249
St.44	1.304	2.230	2.680	2.983	2.368	2.029	1.985	2.829	3.716	3.551	2.550	2.402	1.674	1.633	1.466	1.349
St.45	1.095	1.433	2.050	2.512	2.460	1.913	2.072	2.199	3.256	3.479	2.617	2.105	1.079	1.002	0.918	0.808
St.46	1.377	1.716	2.882	2.579	2.364	2.111	2.030	2.487	3.159	3.638	2.868	1.882	1.566	1.574	1.442	1.152
St.47	1.621	2.776	4.244	2.982	2.202	1.798	1.995	2.283	3.008	3.627	2.958	2.016	1.672	1.536	1.560	1.434
St.48	2.107	3.298	4.281	3.357	1.970	1.821	1.908	2.388	2.854	3.449	2.930	2.079	1.261	1.144	1.190	1.226

Table 4. Continued

GUM-MPWM-LOCATION- PARAMETER															단위: m	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
St.49	2.050	3.198	4.358	3.368	2.178	1.866	1.983	2.525	2.907	3.348	2.602	1.655	1.467	1.460	1.593	1.558
St.50	1.878	3.343	4.170	3.570	2.168	1.935	1.922	2.412	2.408	2.465	1.370	1.349	1.058	1.003	0.914	0.919
St.51	2.601	3.691	4.200	3.591	2.102	1.818	2.063	2.427	2.337	2.458	1.819	1.528	1.515	1.592	1.669	1.757
St.52	1.617	3.414	4.091	3.577	2.388	1.712	1.789	2.039	1.849	0.766	0.769	0.806	0.883	0.898	0.836	0.651
St.53	2.455	3.714	4.106	3.555	2.290	1.763	2.076	2.471	2.455	3.714	4.106	3.555	2.290	1.763	2.076	2.471
St.54	2.559	3.704	4.150	3.590	2.505	1.926	2.175	2.461	2.339	2.265	1.387	1.326	1.480	1.639	1.736	1.589
St.55	2.579	3.552	4.059	3.500	2.546	1.940	2.207	2.171	2.109	1.408	1.312	1.341	1.541	1.779	1.798	1.630
St.56	2.580	3.502	4.002	3.340	2.722	2.034	2.073	2.105	2.028	1.284	1.295	1.365	1.597	1.828	1.835	1.666
St.57	4.919	4.436	4.063	3.413	2.632	2.127	2.108	2.351	2.703	3.701	3.773	3.400	4.084	4.859	4.590	4.910
St.58	2.645	3.545	3.953	3.225	2.700	2.226	2.130	2.124	2.057	1.308	1.348	1.411	1.669	1.865	1.879	1.817
St.59	2.496	3.418	3.797	3.296	2.617	2.202	2.052	1.973	1.424	1.243	1.279	1.457	1.717	1.932	1.913	1.774
St.60	4.357	4.465	3.815	3.278	2.758	2.363	2.286	2.637	3.106	3.136	2.448	2.635	3.227	4.093	4.187	4.010
St.61	2.689	3.458	3.803	3.286	2.654	2.332	2.109	1.881	1.351	1.182	1.281	1.524	1.864	2.094	2.401	2.225
St.62	1.824	2.685	3.638	3.168	2.651	2.295	1.934	1.513	0.860	0.657	0.715	0.948	1.582	1.680	1.732	1.449
St.63	1.640	2.860	3.593	3.193	2.593	2.362	1.934	1.384	1.022	0.974	1.133	1.302	1.716	1.828	1.794	1.507
St.64	1.664	2.726	3.429	3.217	2.619	2.342	2.037	1.412	1.010	1.015	1.244	1.441	1.733	1.947	2.040	1.788
St.65	1.226	1.783	3.160	3.251	2.629	2.255	1.742	1.046	0.541	0.528	0.650	0.869	1.411	1.533	1.514	1.132
St.66	1.108	1.534	2.938	3.283	2.693	2.228	1.719	1.030	0.848	0.917	1.057	1.300	1.543	1.716	1.791	1.171
St.67	0.743	1.008	2.233	3.025	2.687	2.323	1.585	0.915	0.502	0.495	0.638	0.847	1.284	1.448	1.251	0.884

비고) St.15의 SSE방향은 최우도법으로 매개변수를 추정하였음

Table 5. Results of the estimated scale parameters for Gumbel PDF

GUM-MPWM-SCALE- PARAMETER															단위: m	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
St.01	0.337	0.412	0.324	0.337	0.246	0.285	0.301	0.609	0.825	0.598	0.501	0.312	0.518	0.394	0.363	0.328
St.02	0.313	0.386	0.262	0.273	0.308	0.734	0.616	0.495	0.775	0.705	0.453	0.298	0.498	0.420	0.349	0.360
St.03	0.173	0.108	0.156	0.250	0.308	0.644	0.597	0.674	0.836	0.651	0.453	0.409	0.524	0.473	0.358	0.298
St.04	0.182	0.101	0.168	0.396	0.464	0.521	0.408	0.376	0.674	0.720	0.486	0.396	0.523	0.374	0.172	0.130
St.05	0.187	0.259	0.359	0.335	0.357	0.379	0.302	0.320	0.556	0.691	0.465	0.432	0.481	0.467	0.227	0.132
St.06	0.156	0.218	0.358	0.336	0.301	0.317	0.239	0.229	0.347	0.581	0.459	0.424	0.198	0.158	0.149	0.098
St.07	0.137	0.116	0.230	0.212	0.183	0.224	0.179	0.162	0.243	0.384	0.430	0.385	0.249	0.167	0.096	0.096
St.08	0.410	0.317	0.327	0.273	0.192	0.186	0.241	0.558	0.517	0.490	0.535	0.460	0.319	0.211	0.150	0.161
St.09	0.235	0.299	0.492	0.322	0.165	0.121	0.120	0.233	0.423	0.689	0.406	0.455	0.451	0.580	0.245	0.158
St.10	0.345	0.497	0.366	0.287	0.225	0.306	0.308	0.214	0.552	0.757	0.414	0.636	0.540	0.664	0.451	0.225
St.11	0.131	0.136	0.191	0.207	0.239	0.207	0.218	0.174	0.364	0.449	0.549	0.580	0.462	0.552	0.488	0.280
St.12	0.167	0.276	0.275	0.286	0.329	0.207	0.206	0.174	0.247	0.402	0.548	0.593	0.452	0.550	0.469	0.216
St.13	0.197	0.381	0.405	0.362	0.445	0.363	0.303	0.219	0.316	0.707	0.385	0.584	0.563	0.645	0.542	0.439
St.14	0.181	0.250	0.259	0.269	0.299	0.210	0.190	0.166	0.189	0.263	0.535	0.630	0.532	0.559	0.497	0.272
St.15	0.188	0.235	0.210	0.243	0.140	0.111	0.116	0.087	0.186	0.280	0.525	0.671	0.530	0.475	0.520	0.338
St.16	0.236	0.319	0.227	0.189	0.161	0.139	0.154	0.128	0.253	0.493	0.468	0.810	0.611	0.580	0.528	0.548
St.17	0.404	0.500	0.353	0.258	0.257	0.334	0.270	0.447	0.338	0.519	0.556	0.804	0.734	0.688	0.536	0.648
St.18	0.410	0.317	0.315	0.273	0.220	0.276	0.241	0.558	0.368	0.382	0.487	0.798	0.780	0.730	0.607	0.579
St.19	0.618	0.702	0.617	0.500	0.382	0.478	0.638	0.600	0.807	0.709	0.399	0.625	0.732	0.787	0.515	0.394
St.20	0.328	0.265	0.269	0.314	0.196	0.216	0.740	0.743	0.413	0.412	0.567	0.736	0.715	0.684	0.640	0.730
St.21	0.525	0.483	0.314	0.303	0.282	0.699	0.641	0.736	0.475	0.553	0.409	0.691	0.763	0.764	0.611	0.784
St.22	0.376	0.368	0.296	0.346	0.515	0.768	0.555	0.370	0.429	0.325	0.615	0.749	0.612	0.771	0.625	0.726
St.23	0.324	0.274	0.340	0.437	0.583	0.888	0.651	0.697	0.342	0.303	0.333	0.594	0.728	0.623	0.403	0.335
St.24	0.328	0.345	0.401	0.513	0.538	0.380	0.268	0.319	0.265	0.188	0.208	0.447	0.701	0.897	0.535	0.361

Table 5. Continued

GUM-MPWM-SCALE- PARAMETER															단위: m	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
St.25	0.331	0.311	0.323	0.486	0.485	0.385	0.341	0.366	0.463	0.383	0.446	0.810	0.826	0.874	0.549	0.770
St.26	0.559	0.375	0.633	0.500	0.300	0.432	0.614	0.724	0.687	0.582	0.516	0.448	0.766	0.753	0.493	0.770
St.27	0.825	0.576	0.442	0.336	0.608	0.809	1.257	1.178	0.797	0.634	0.523	0.576	0.743	0.216	0.574	0.665
St.28	0.773	0.498	0.838	0.671	1.130	1.261	1.716	1.241	0.631	0.590	0.669	0.732	0.637	1.161	0.662	0.632
St.29	0.363	0.276	0.273	0.613	0.827	0.748	1.197	1.220	0.883	0.524	0.753	0.721	0.672	0.751	0.525	0.760
St.30	0.222	0.151	0.184	0.618	0.825	0.748	0.895	1.113	0.954	0.608	0.838	0.495	0.563	0.466	0.378	0.169
St.31	0.338	0.342	0.263	0.439	0.921	0.876	0.894	1.329	1.099	0.765	0.893	0.533	0.672	0.661	0.650	0.288
St.32	0.347	0.358	0.355	0.582	0.914	0.820	0.775	1.218	1.024	0.696	0.777	0.689	0.342	0.331	0.271	0.197
St.33	0.446	0.880	0.685	0.650	0.934	0.790	0.956	1.237	1.027	0.824	0.643	0.617	0.261	0.273	0.170	0.226
St.34	0.608	0.712	0.712	0.653	0.686	0.800	0.861	1.223	1.085	0.735	0.538	0.530	0.289	0.242	0.181	0.332
St.35	0.543	0.575	0.678	0.757	0.623	0.739	0.846	1.074	1.257	0.829	0.435	0.490	0.521	0.465	0.521	0.348
St.36	0.541	0.589	0.578	0.706	0.667	0.643	0.864	0.973	0.923	0.455	0.395	0.810	0.731	0.729	0.308	0.452
St.37	0.418	0.502	0.367	0.689	0.650	0.846	0.735	0.792	0.421	0.312	0.213	0.446	0.776	0.626	0.392	0.423
St.38	0.251	0.332	0.374	0.516	0.670	0.533	0.696	0.725	0.410	0.434	0.434	0.633	0.462	0.306	0.256	0.321
St.39	0.242	0.368	0.361	0.535	0.815	0.555	0.713	0.811	0.846	0.467	0.402	0.767	0.564	0.199	0.210	0.285
St.40	0.203	0.359	0.340	0.450	0.715	0.601	0.842	0.940	1.003	0.525	0.451	0.682	0.574	0.189	0.188	0.173
St.41	0.195	0.368	0.411	0.438	0.737	0.699	0.691	0.872	1.093	0.584	0.251	0.786	0.439	0.181	0.145	0.172
St.42	0.287	0.319	0.279	0.516	0.621	0.742	0.677	0.677	1.115	0.535	0.353	0.709	0.377	0.161	0.140	0.172
St.43	0.228	0.392	0.325	0.419	0.527	0.643	0.606	0.573	1.097	0.651	0.500	0.678	0.289	0.175	0.112	0.132
St.44	0.331	0.675	0.503	0.489	0.592	0.643	0.510	0.521	0.692	1.037	0.693	0.568	0.297	0.220	0.180	0.209
St.45	0.304	0.384	0.191	0.447	0.606	0.678	0.593	0.669	0.657	0.893	0.586	0.580	0.227	0.230	0.160	0.176
St.46	0.325	0.267	0.473	0.607	0.539	0.631	0.519	0.542	0.444	0.896	0.489	0.439	0.241	0.210	0.360	0.352
St.47	0.388	0.406	0.737	0.716	0.473	0.602	0.510	0.549	0.462	0.915	0.593	0.371	0.282	0.205	0.295	0.349
St.48	0.586	0.523	0.735	0.663	0.546	0.518	0.437	0.533	0.486	0.808	0.597	0.330	0.207	0.340	0.295	0.379
St.49	0.537	0.506	0.730	0.592	0.557	0.562	0.574	0.520	0.448	0.688	0.473	0.312	0.291	0.199	0.368	0.359
St.50	0.731	0.463	0.589	0.572	0.472	0.494	0.525	0.551	0.480	0.434	0.268	0.271	0.247	0.359	0.304	0.435
St.51	0.882	0.535	0.744	0.666	0.481	0.567	0.480	0.680	0.560	0.453	0.304	0.325	0.372	0.118	0.270	0.343
St.52	0.498	0.547	0.579	0.603	0.541	0.490	0.565	0.583	0.574	0.154	0.140	0.085	0.142	0.125	0.172	0.172
St.53	0.571	0.557	0.683	0.675	0.564	0.540	0.535	0.639	0.571	0.557	0.683	0.675	0.564	0.540	0.535	0.639
St.54	0.711	0.573	0.632	0.642	0.606	0.561	0.537	0.623	0.505	0.494	0.266	0.232	0.200	0.133	0.345	0.271
St.55	0.928	0.603	0.512	0.658	0.517	0.486	0.559	0.623	0.452	0.203	0.222	0.259	0.241	0.193	0.246	0.268
St.56	0.909	0.681	0.542	0.693	0.447	0.504	0.618	0.632	0.462	0.253	0.147	0.304	0.221	0.211	0.225	0.301
St.57	1.128	0.535	0.541	0.470	0.404	0.498	0.498	0.656	0.593	0.578	0.497	0.459	0.625	0.443	0.615	1.117
St.58	0.710	0.867	0.532	0.728	0.391	0.536	0.546	0.617	0.550	0.237	0.186	0.362	0.201	0.181	0.244	0.379
St.59	0.934	1.009	0.577	0.804	0.439	0.491	0.551	0.593	0.236	0.264	0.148	0.291	0.266	0.257	0.237	0.400
St.60	1.262	0.736	0.546	0.688	0.523	0.601	0.553	0.663	0.656	0.571	0.332	0.346	0.421	0.367	0.378	0.633
St.61	1.298	1.162	0.687	0.874	0.459	0.597	0.594	0.717	0.302	0.265	0.153	0.331	0.366	0.210	0.311	0.441
St.62	0.739	0.710	0.679	0.696	0.579	0.432	0.530	0.489	0.330	0.092	0.078	0.133	0.291	0.233	0.316	0.323
St.63	0.562	0.892	0.679	0.671	0.481	0.568	0.462	0.435	0.179	0.184	0.159	0.335	0.311	0.256	0.262	0.508
St.64	0.600	0.907	0.720	0.525	0.608	0.517	0.448	0.412	0.243	0.155	0.157	0.354	0.281	0.274	0.216	0.410
St.65	0.491	0.775	0.650	0.535	0.444	0.494	0.396	0.259	0.111	0.090	0.121	0.175	0.319	0.228	0.218	0.361
St.66	0.540	0.919	0.688	0.583	0.489	0.454	0.461	0.252	0.263	0.188	0.221	0.390	0.358	0.310	0.284	0.371
St.67	0.470	0.784	0.705	0.510	0.482	0.384	0.347	0.286	0.257	0.104	0.159	0.291	0.340	0.307	0.215	0.253

비고) St.15의 SSE방향은 최우도법으로 매개변수를 추정하였음

한 이들 자료를 근거로 한국 연안 심해파의 50년 빈도 설계파를 지점 및 방향별로 Table 6에 제시하여 결정론적인 설계시 활용토록 하였다.

4) 20년 자료를 활용하여 매개변수를 추정한 결과 2개의 매개변수를 가진 Gumbel 분포나 2변수 Weibull 분포가 3개의 매개변수를 가진 3변수 Weibull 분포, Log-Pearson

Table 6. Estimated 50-year design wave heights off the Korean coast

단위 : m

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
St.01	3.921	3.307	2.556	2.347	2.066	2.321	2.400	4.451	6.183	5.338	4.351	3.242	4.482	4.355	4.572	4.735
St.02	3.040	2.708	2.236	2.192	2.384	4.640	4.369	4.310	6.247	5.854	4.297	3.201	4.460	4.722	4.871	4.962
St.03	1.650	1.179	1.334	1.791	2.474	4.271	4.175	4.866	6.429	5.544	4.446	3.720	4.587	5.018	5.091	4.681
St.04	1.560	1.101	1.324	2.621	3.367	3.738	3.287	3.355	5.411	5.638	4.490	3.646	4.564	5.083	2.902	2.117
St.05	1.967	2.037	2.369	2.734	2.822	2.966	2.639	2.794	4.658	5.527	4.346	3.871	4.339	5.387	2.825	2.054
St.06	1.649	1.770	2.340	2.527	2.385	2.554	2.170	2.112	3.508	5.027	4.251	3.699	2.479	2.191	2.120	1.765
St.07	1.176	0.971	1.444	1.620	1.683	1.859	1.695	1.599	2.898	3.941	4.260	3.485	2.498	2.200	1.755	1.500
St.08	3.249	2.464	2.112	2.088	1.688	1.689	2.266	4.550	4.094	4.004	4.519	4.035	3.626	3.046	2.388	2.025
St.09	2.372	2.194	3.071	2.480	1.299	1.232	1.194	1.759	3.872	5.420	4.020	4.137	4.394	5.808	3.590	2.611
St.10	3.107	3.262	2.672	2.250	1.938	2.333	2.724	2.507	4.775	5.932	4.186	4.970	4.890	6.618	5.870	3.578
St.11	1.196	1.167	1.365	1.528	1.825	1.729	1.915	1.813	3.160	4.208	4.700	4.693	4.567	6.011	5.167	3.311
St.12	1.720	2.008	1.914	1.991	2.184	1.739	1.880	1.793	2.556	3.962	4.662	4.702	4.368	5.949	4.994	2.593
St.13	2.160	2.667	2.756	2.649	2.904	2.621	2.717	2.614	3.541	5.566	3.975	4.797	4.822	6.595	6.557	4.825
St.14	1.762	1.896	1.866	1.930	1.994	1.733	1.766	1.732	2.073	3.254	4.654	4.834	4.844	6.113	5.222	2.939
St.15	1.875	1.866	1.643	1.703	1.115	1.029	1.086	0.997	1.804	3.261	4.551	4.901	4.962	5.794	5.579	3.354
St.16	2.490	2.416	1.910	1.618	1.255	1.247	1.317	1.285	2.601	4.370	4.351	5.569	5.191	6.453	6.250	4.882
St.17	3.623	3.447	2.598	2.018	1.980	2.535	2.428	3.931	3.729	4.960	4.718	5.753	5.620	6.963	7.186	6.579
St.18	3.249	2.464	2.372	2.088	1.886	2.267	2.266	4.550	3.994	4.401	4.519	5.663	5.909	7.187	7.427	6.165
St.19	5.849	4.894	4.301	3.542	3.061	3.884	5.411	5.400	6.448	5.967	3.956	5.088	5.799	7.222	7.407	7.075
St.20	2.858	2.290	2.095	2.229	1.581	1.747	5.727	5.899	4.329	4.630	4.690	5.427	5.552	7.014	7.522	6.792
St.21	4.366	3.681	2.689	2.537	2.627	5.433	5.681	5.437	4.774	5.189	3.990	5.262	6.027	7.290	7.761	7.731
St.22	2.760	2.584	2.219	2.670	4.082	5.733	5.140	3.695	3.822	3.906	5.190	5.466	5.350	7.438	7.498	6.669
St.23	2.862	2.521	2.791	3.443	4.774	6.287	6.039	5.252	3.302	3.282	3.447	4.715	6.046	7.146	5.024	3.374
St.24	3.405	3.337	3.564	4.481	4.518	3.264	2.507	2.676	2.471	2.466	2.752	3.741	5.680	7.892	7.109	4.561
St.25	3.521	3.155	3.279	4.481	4.302	3.220	2.909	2.987	4.085	4.513	4.592	5.703	6.421	7.686	7.710	7.324
St.26	5.003	3.751	4.875	4.773	2.488	3.072	4.642	5.317	5.880	5.500	4.565	4.264	6.007	7.263	7.744	8.444
St.27	6.963	4.971	3.565	2.997	4.126	6.230	9.090	8.706	6.840	5.823	4.549	4.745	6.045	1.747	8.039	8.281
St.28	8.000	5.220	6.447	5.651	7.652	9.412	11.395	8.571	6.058	5.777	5.019	5.424	5.593	8.500	8.301	8.531
St.29	2.867	2.387	2.318	3.913	5.770	6.487	8.960	8.776	7.081	5.567	5.613	5.367	5.789	7.337	7.941	8.296
St.30	2.037	1.597	1.782	4.109	5.788	6.207	7.930	8.690	7.422	5.936	6.167	4.480	3.872	3.974	3.237	1.961
St.31	3.229	3.202	3.119	4.280	6.687	6.727	8.117	9.329	7.884	6.504	6.359	4.697	5.864	7.728	5.986	3.363
St.32	3.259	3.131	3.410	4.810	6.508	6.452	7.652	9.130	7.650	6.325	5.904	5.480	3.622	3.586	3.206	2.795
St.33	3.763	6.316	6.672	6.206	6.500	6.427	8.343	9.158	7.659	6.799	5.333	5.281	3.307	3.277	2.795	2.931
St.34	4.996	5.412	6.577	6.146	5.266	6.135	7.448	9.031	7.888	6.369	4.799	4.737	2.301	2.289	2.266	3.248
St.35	4.826	4.812	6.060	6.452	5.111	5.578	7.043	8.371	8.699	6.852	4.141	3.934	4.068	6.205	6.168	4.552
St.36	4.379	4.318	4.896	5.887	5.508	4.988	7.117	7.966	5.998	3.137	3.028	4.603	5.805	7.624	4.754	4.558
St.37	3.875	3.899	3.465	5.260	5.251	6.178	6.019	5.478	3.170	2.812	2.478	3.593	6.355	7.277	5.079	4.242
St.38	2.439	2.623	2.813	3.755	4.962	4.328	6.389	6.206	3.623	3.672	3.812	4.925	4.687	3.763	2.806	2.953
St.39	2.329	2.769	3.001	4.344	5.655	4.336	6.196	7.111	5.933	4.002	3.737	5.486	4.795	2.776	2.803	2.698
St.40	2.030	2.684	2.836	3.856	5.257	4.488	5.794	7.411	7.275	4.481	3.885	5.102	4.463	2.568	2.525	2.130
St.41	2.018	2.783	3.237	3.896	5.336	4.833	5.047	7.078	7.904	5.127	3.229	5.589	3.830	2.501	2.367	2.077
St.42	2.360	2.616	2.923	4.355	4.959	5.052	5.041	6.201	8.227	5.089	3.568	5.312	3.523	2.370	2.250	2.002
St.43	2.069	2.969	3.180	4.028	4.597	4.518	4.580	5.400	8.122	5.734	4.232	5.030	2.866	2.297	1.852	1.764
St.44	2.596	4.864	4.643	4.891	4.678	4.538	3.975	4.862	6.416	7.597	5.254	4.618	2.833	2.491	2.168	2.165
St.45	2.281	2.931	2.795	4.256	4.825	4.559	4.386	4.809	5.820	6.963	4.904	4.368	1.965	1.899	1.542	1.495
St.46	2.645	2.758	4.728	4.947	4.467	4.573	4.055	4.602	4.891	7.134	4.776	3.595	2.506	2.393	2.847	2.525
St.47	3.135	4.360	7.120	5.776	4.048	4.147	3.985	4.425	4.811	7.197	5.272	3.464	2.772	2.336	2.711	2.796
St.48	4.394	5.339	7.149	5.944	4.100	3.842	3.613	4.468	4.750	6.602	5.259	3.367	2.069	2.471	2.341	2.705
St.49	4.145	5.172	7.206	5.678	4.351	4.059	4.223	4.554	4.655	6.033	4.448	2.872	2.602	2.236	3.029	2.959
St.50	4.730	5.150	6.468	5.802	4.010	3.863	3.971	4.562	4.281	4.158	2.416	2.406	2.022	2.404	2.100	2.616

Table 6. Continued

단위 : m

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
St.51	6.043	5.779	7.103	6.190	3.979	4.030	3.936	5.080	4.522	4.226	3.005	2.796	2.967	2.052	2.723	3.095
St.52	3.560	5.548	6.350	5.930	4.499	3.624	3.994	4.314	4.089	1.367	1.315	1.138	1.437	1.386	1.507	1.322
St.53	4.683	5.887	6.771	6.189	4.491	3.870	4.164	4.964	4.683	5.887	6.771	6.189	4.491	3.870	4.164	4.964
St.54	5.333	5.940	6.616	6.095	4.870	4.115	4.270	4.892	4.309	4.193	2.425	2.231	2.260	2.158	3.082	2.646
St.55	6.200	5.905	6.057	6.067	4.563	3.836	4.388	4.602	3.873	2.200	2.178	2.352	2.481	2.532	2.758	2.676
St.56	6.127	6.159	6.117	6.044	4.466	4.001	4.484	4.571	3.831	2.271	1.869	2.551	2.459	2.651	2.713	2.840
St.57	9.320	6.524	6.174	5.247	4.208	4.070	4.051	4.911	5.017	5.956	5.712	5.191	6.523	6.588	6.990	9.268
St.58	5.415	6.928	6.029	6.066	4.226	4.317	4.260	4.531	4.203	2.233	2.074	2.824	2.453	2.571	2.831	3.296
St.59	6.140	7.355	6.048	6.433	4.330	4.118	4.202	4.287	2.345	2.273	1.856	2.592	2.755	2.935	2.838	3.335
St.60	9.281	7.337	5.945	5.963	4.799	4.708	4.444	5.224	5.666	5.364	3.743	3.985	4.870	5.525	5.662	6.480
St.61	7.754	7.992	6.484	6.696	4.445	4.661	4.427	4.679	2.529	2.216	1.878	2.816	3.292	2.913	3.615	3.946
St.62	4.708	5.455	6.287	5.884	4.910	3.981	4.002	3.421	2.148	1.016	1.019	1.467	2.717	2.589	2.965	2.709
St.63	3.833	6.341	6.242	5.811	4.470	4.578	3.737	3.081	1.720	1.692	1.753	2.609	2.930	2.827	2.816	3.489
St.64	4.005	6.265	6.238	5.266	4.991	4.359	3.785	3.020	1.958	1.620	1.857	2.822	2.829	3.016	2.883	3.388
St.65	3.142	4.807	5.696	5.339	4.361	4.183	3.287	2.057	0.974	0.879	1.122	1.552	2.656	2.423	2.365	2.541
St.66	3.215	5.120	5.623	5.558	4.601	3.999	3.518	2.013	1.874	1.651	1.919	2.822	2.940	2.926	2.899	2.619
St.67	2.577	4.067	4.984	5.015	4.568	3.821	2.939	2.031	1.505	0.901	1.258	1.982	2.611	2.646	2.090	1.871

type-III 분포, 그리고 Lognormal 분포보다 적합도 검정에서 기각되는 자료군이 적음을 알 수 있다. 이러한 이유 때문에 Goda and Kobune(1990)는 3개의 매개변수로 구성된 FT-II 분포와 Weibull 분포의 형상매개변수를 고정하여, 2개의 매개변수를 가진 확률분포로 가정하여 분석을 실시하였다. 더 나아가 Goda(2000)는 100이하의 표본 크기에서는 주어진 표본 자료에서 모분포함수를 올바르게 식별하는 것이 어렵다는 것을 Monte Carlo 방법으로 설명한 바 있다.

5) Gumbel 분포와 2변수 Weibull 분포의 설계파고를 비교해 보면 전체적으로 Gumbel 분포의 확률파고가 큰 값을 가진다. 이것은 Hogg and Swail(2002)이 41년간의 자료군(Swail and Cox, 2000)으로 분석한 결과에서도 언급한 바 있다.

6.2 차후 연구과제

추산된 20년간의 년 최대파고 자료를 이용하여 극치분포해석을 실시한 결과 다음과 같은 문제점이 발견되었다.

극치 파랑 분석에 사용하는 자료는 크게 실측자료와 추산자료로 나눌 수 있다. 기기 고장 없이 장기간에 걸쳐 축적된 파랑 자료가 존재하는 경우에는 실측 자료를 활용하는 것이 최선이나, 이러한 자료가 없는 현 상황에서는 최신의 기법으로 추산된 파랑 자료를 활용하여야 한다. 그러나 이러한 경우에도 추산된 파랑자료는 몇 종류의 폭풍파를 대상으로 수치모형의 검증을 철저히 하여야 한다. 본 연구에서 사용한 심해파 추산자료를 향상시키기 위해서는

파랑 추산 수치모형(HYPA Model), 바람자료 재현, 그리고 모형 격자 크기 등에 세심한 연구가 추가적으로 필요하며, 추산기간도 확장하여야 할 것으로 사료된다. 또한 양질의 현장 자료를 얻기 위해서는 관측 시스템의 개선 및 보완이 필요하다.

표본 수가 한정된 경우에는, 1년 자료에서 1개의 자료만을 채택하는 년 최고치 방법(Annual maxima method) 대신 시계열 자료에서 특정 기준치를 초과한 파고들을 선정하는 방법인 특정치 초과 방법(Peaks-Over-Threshold method: POT)을 채택하여 표본 수를 늘리는 방법에 대한 연구도 고려할 만하다.

또한 극치확률 분포형에 대한 매개변수 추정방법인 최소자승법, 모멘트법, 최우도법 그리고 확률가중모멘트법 외에 최근에 제안된 L-moment 방법(Hosking, 1986)과 비매개변수적 방법인 핵밀도함수(Kernal density function)를 도입하여 빈도분석을 실시하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 것이다.

참고문헌

- 국립방재연구소 (1998). 강우분석 프로그램의 개발.
김정대 (2003). 한국연안 심해파의 극치분포 특성. 석사학

- 위논문, 원광대학교.
- 수산청 (1988). 해역별(동해·남해) 심해파 추정 보고서.
- 한국해양연구원 (2000). 해상파랑관측 및 조사.
- 한국해양연구원 (2003). 파랑모델 산출자료(<http://wave.kordi.re.kr>).
- 해양수산부 (1997). 장기파랑(심해·천해) 자료 통계산출 시스템 매뉴얼.
- 해양수산부 (2000). 항만 및 어항 설계기준.
- 해운항만청 (1988). 전국 항만 설계파 추산보고서.
- Ang, A. H-S and Tang, W.H. (1975). Probability concepts in engineering planning and design. I, John Wiley and Sons, Inc. 274.
- Goda, Y. (1988). On the methodology of selecting design wave height. Proc. 21st Int. Conf. Coastal Engineering, 899-913.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientific.
- Goda, Y. and Kobune, K. (1990). Distribution function fitting for storm wave data. Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Engineering, 18-31.
- Goda, Y., Konogaya, O., Takeshita, N., Hitomi, H. and Nagai, T. (2000). Population distribution of extreme wave heights estimated through regional analysis. Proc. Coastal Engrg., 1078-1091.
- Greenwood, J.A., Landwehr, J.M., Matalas, N.C. and Wallis, J.R. (1979). Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form. Water Resources Research, 15(5), 1049-1054.
- Hogg, W.D. and Swail, V.R. (2002). Effects of Distribution and Fitting Techniques on Extreme Value Analysis of Modelled Wave Height. 7th International workshop on Wave Hindcasting and Forecasting Preprints, Banff, Alberta, Canada.
- Hosking, J.R.M. (1989). The Theory of Probability Weighted Moments. Research Report RC12210, IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Height, New York.
- Isaacson, M. and MacKenzie, N.G. (1981). Long-term Distributions of Ocean Waves. Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, 107(2), ASCE, 93-109.
- Kite, G.W. (1988). Frequency and Risk Analyses in Hydrology. Water resources publications.
- Muir, L.R. and El-Shaarawi, A.H. (1986). On the Calculation of Extreme Wave Heights. A Review, Ocean Eng., 13, 93-118.
- Ochi, M.K. (1982). Stochastic analysis and probabilistic prediction of random seas. Adv. Hydrosci., 13, 218-375.
- Rao, A.R. and Hamed, K.H. (2000). Flood Frequency Analysis. CRC Press LLC.
- Swail V.R. and A.T. Cox (2000). On the use of NCEP-NCAR reanalysis surface marine wind fields for a long-term North Atlantic wave hindcast. J. Atmospheric Oceanic Technology, 17, 532-545.
- Vledder, G. van, Goda, Y., Hawkes, P., Mansard, E., Martin, M.H., Mathiesen, M., Peltier, E. and Thompson, E. (1993). Case studies of extreme wave analysis: a comparative analysis. Proc. 2nd Int. Symp. Ocean Wave Measurement and Analysis, ASCE, 978-992.

Received April 6, 2004

Accepted July 14, 2004