

한국 연안 심해 설계파의 매개변수 추정 및 분석 Parameter Estimation and Analysis of Deepwater Design Wave in Marginal Seas around Korea

김정대* · 정신태* · 조홍연** · 오남선***

Jeong Dae Kim*, Shin Taek Jeong*, Hong Yeon Cho**, and Nam-Sun Oh***

요 지 : 장기간의 극치 및 평상시 파고는 연안 및 항만구조물의 계획 및 설계에서 매우 중요한 환경인자이다. 그러나, 한국 연안 심해파의 관측 자료가 한정되어 있기 때문에, 심해설계파의 정보는 기상정보로부터 사후추정한 장기간의 파랑자료를 이용하고 있다. 본 연구에서는 한국해양연구원(2003)에서 제시한 1979년부터 1998년까지의 한국연안 67개 지점의 16방향별 최대 유의파 산출자료를 이용하여 극치분포 분석을 수행하였다. 특성분석에 사용된 극치분포함수는 FT-I와 Weibull 분포이며, 각 분포함수의 매개변수는 Goda(2004)의 방법을 이용하여 추정하였다. 또한 Goda and Gobune(1990)가 제안한 MIR 값을 산정하여 가장 적합한 확률분포형을 결정하였다. 분석 결과 FT-I 분포가 886개 지점, Weibull($k=0.75$) 분포가 81개 지점 및 Weibull($k=1.00$) 분포가 105개 지점의 확률분포형으로 적합한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 사후추산, 심해파랑자료, 극치분포, FT-I 분포, Weibull 분포, MIR

Abstract : Long term wave climate of both extreme and operational wave height is essential for planning and designing coastal structures. Since the availability of the field wave data for the waters around Korean peninsula is limited to provide a reliable wave statistics, the wave climate information has been generated by means of long-term wave hindcasting using available meteorological data. 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 FT-I and Weibull distribution. For each of these distributions, the method proposed by Goda(2004) was applied to estimate the parameters. For judgment of best fitting, MIR criterion proposed by Goda and Gobune(1990) was used. FT-I distribution which best fits to the 886 data, while Weibull($k=0.75$) 81 data, Weibull($k=1.00$) 105 data.

Keywords : hindcasting, deep water wave data, extreme wave heights, FT-I distribution, Weibull distribution, MIR

1. 서 론

해안 및 해양 공학자의 중요 관심사 중 한 가지는 장래의 사상을 예측하여 연안구조물을 설계하는 것이다. 현행 설계에서는 결정론적 해석법이 적용되고 있으나 여기에는 많은 불확실성 요소가 내재되어 있다. 입력변수의 불확실

성 존재는 가치가 없는 것이지만 통계적 방법으로 최적의 매개변수를 도출하는 것은 불확실성 제거 측면에서 의미가 있다. 본 연구에서는 연안구조물의 설계에 있어서 첫 번째 과제인 설계파 산정을 위해 파고를 극치분석하여 최적의 설계파와 매개변수 추정에 목적이 있다.

설계파 산정에 이용되는 자료는 장기간의 실측에 의한 자

*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 연안개발연구본부(Coastal & Harbour Engineering Research Division, Korea Ocean R & D Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea, hcho@kordi.re.kr)

***목포해양대학교 해양토목공학과(Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea. sun@mmu.ac.kr)

료와 기상자료를 이용하여 사후 추산한 자료 두 가지 형태로 존재한다. 첫 번째 실측자료의 경우 10년 이상 축적된 자료 확보가 바람직하나, 제기관측의 역사가 짧아서 전 세계적으로 10년 이상 자료가 축적되어 있는 지점은 많지 않다. 우리나라에서는 1986년에 8개소의 파랑관측소와 보조 관측소를 구축하였으나 현실적으로 운영 및 관리상 어려움이 많은 실정이다(해양수산부, 2003). 두 번째 자료의 경우 제1세대(DSA-5) 모델, 제2세대(HYPA) 모델이 주로 사용되어왔으며, 최근 제3세대 모델인 WAM 4, Wave Watch III 등이 개발되어 사용할 수 있게 되었다. 한편, 해양수산부에서는 2001년부터 매년 『해상파랑관측 및 조사』 사업을 수행하여 파랑관측 및 산출과업을 시행하고 있으며(해양수산부, 2003). 이 자료는 항만구조물의 설계파를 구하기 위한 심해 설계파는 한국해양연구원(2005)이 제시한 결과를 참고할 수 있게 되었다.

심해 설계파 자료의 통계분석은 연안구조물에 대한 설계파 산정에 있어서 중요한 과제이다. 관측기기로 실측한 자료가 설계파 산정시 가장 좋은 자료라는 것은 자명하지만 국내의 경우 장기간에 걸쳐 축적된 자료 확보가 불가능하기 때문에 장기간의 파랑산출 자료를 확보하여 극치분석을 실시하여야 한다.

국내 연구에서는 김(2003)과 정 등(2004)은 한국해양연구원(2000)에서 추산한 20년간의 자료를 이용하여 Gumbel 분포가 한국 연안에 적합하다는 결론을 내린 바 있다. 국외에서는 Isaacson and Mackenzie(1981), Muir and El-Shaarawi(1986), Ochi(1982), 그리고 Vledder *et al.*(1993) 등이 다양한 방법으로 시도하였다. 한편, 일본토목학회(2000)에서는 일본의 태평양 북동해안에 위치한 11개 지점에 대한 극치 통계분석을 통하여 형상계수, $k=1.0$ 의 Weibull 분포가 각 관측 지점의 설계파로 선택될 가능성이 높다는 것을 보여주고 있다.

현재 국내에서는 파랑의 극치통계자료를 이용하여 FT-I (Gumbel) 분포, Weibull 분포 등의 방법으로 발생확률을 추정하고 재현기간에 상응하는 설계파고를 결정한다(해양수산부, 2005). 한편 정 등(2004)은 Gumbel, Lognormal, Log-Pearson Type-III 그리고 Weibull 분포형을 이용하여 한국 연안 심해파를 분석한 결과 Gumbel 분포와 Weibull 분포형의 결과가 KS 검정과 χ^2 검정에서 가장 적합하다는 결론을 얻은 바 있다. 본 연구에서는 Goda(2000)가 제안하여 일본에서 파랑의 극치 통계분석에 지배적으로 이용되고 있는 FT-I 분포와 4개의 Weibull 분포를 후보로 하여 매개변수를 추정한 뒤 재현기간별 파고를 산정하였다. 극치분포의 적합성 검정 및 선정은 기존의 방법을 이용하지 않고 극치자

료의 특성에 맞추어 Goda(2000)의 MIR(MInimum Ratio of residual correlation coefficient)을 기준으로 판단하였다. 일반적으로 통계분석에서는 적합성 검정은 단지 x_m 과 y_m 사이의 상관계수 r 이 1에 가까운 값을 택하는 경우가 많다. χ^2 검정이나 Kolmogorov-Smirnov(KS) 검정 등을 사용하기도 하나, 확률변량이 적은 극치분석에서는 이러한 검정이 반드시 적절하지는 않다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 Goda(2000)가 제안한 MIR을 지표로 정했다.

현재까지의 국내의 연구결과에서 강조하는 중요한 두 가지 사항이 있다. 첫째는 신뢰성 있는 입력자료이다. 그리고 두 번째는 결정론적인 극치분포형의 선정보다는 확률론적으로 각 지역에 서로 다른 극치분포형 선정이 필요하다는 것이다. 또한 Goda(2004)는 Spread 매개변수를 제안하여 분포형의 꼬리부분의 민감성 문제를 지적하고 있다.

2. 심해 설계파 추산 자료

심해파의 극치분석에 있어서 가장 중요한 것은 이용 가능한 자료의 축적 및 확보이다. 본 연구에 사용한 파랑자료는 HYPA 모델로 추산된 1979년부터 1998년까지 20년간의 연도별 최대 자료이다. 이 자료는 태풍시에 크게 저평가되는 경향이 있지만(한국해양연구원, 2005), 본 연구의 목적은 심해파의 극치분석의 방법론에 역점을 두어 가능한 불확실성 제거하는데 있으며, 현재까지 확보된 자료 중에서 한국연안의 심해파의 극치분포 특성을 파악하기에는 가

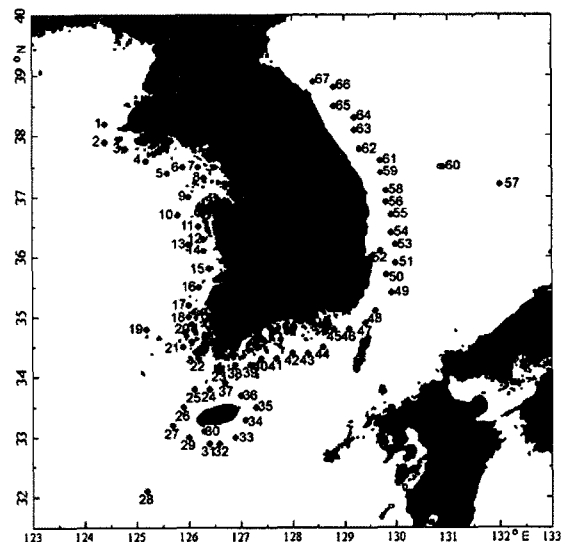


Fig. 1. Location number of the estimated wave heights off the Korean coast.

장 적합하다고 판단된다. 현재 제3세대 모델인 WAM 4와 Wave Watch III 등이 개발되어 사용할 수 있게 되었으며 한국해양연구원에서는 『해상파랑 관측 및 조사』 사업을 진행 중에 있으며, 2005년에는 개정된 심해 설계파를 발표하였지만 기초자료는 공개되지 않고 있다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 한국연안 67개 지점을 도시한 것이다. 각 지점의 경위도 등에 관한 정보는 한국해양연구원(2000)과 김(2003)에 수록되어 있다.

3. 후보 분포함수의 종류

확률파고 추정방법을 이용하여 임의 재현기간에 대한 파고를 추정하기 위한 통계 자료의 특성, 후보 분포함수의 선정, 자료와의 관계식 도출, 분포함수의 적합성을 측정하는 통계지표 등에 대한 참고 자료로서는 Goda(2000) 또는 ACES Technical Reference(1992) 등이 있고, 여기에는 관련사항이 잘 기술되어 있으며 프로그램도 이용 가능하다(해양수산부, 2005).

본 논문에서 채택한 극치분석을 위한 후보 분포함수를 아래에 정리하였다.

1. Fisher-Tippett type I(FT-I) 분포:

$$F(x) = \exp[-\exp\{-(x-B)/A\}]: -\infty < x < \infty \quad (1)$$

$$y_R = -\ln[-\ln\{1 - 1/(\lambda R)\}] \quad (2)$$

2. Weibull distribution:

$$F(x) = 1 - \exp[-\{(x-B)/A\}^k]: B < x < \infty \quad (3)$$

with $k = 0.75, 1.0, 1.4$ 그리고 2.0

$$y_R = \{\ln(\lambda R)\}^{1/k} \quad (4)$$

여기서, x 는 극치확률변량(extreme variate, 즉 파고), y_R 은 기준화변량(reduced variate), R 은 재현기간(Return Period)이며, k, A 그리고 B 는 각각 형상(shape), 규모(scale) 그리고 위치(location) 매개변수이다. λ 는 평균발생율(mean rate)이다. 식 (1)과 식 (3)에 나타난 극치분포 함수는 2 매개변수와 3 매개변수 분포형이다. 주어진 표본에 가장 잘 맞는 분포를 찾아내는 목적으로 3 매개변수 분포를 사용하는 것이 유리하다. 단, 3 매개변수 분포는 표본의 값이 약간 변한 것만으로 매개변수의 추정치가 크게 변하는 일이 있고, 매개변수 추정이 불안정하게 되기 쉽다(Goda, 2000). FT-I 분포는 Fisher와 Tippett(1928)이 유

도한 극치 1형분포이며 이중지수분포 또는 Gumbel 분포라고도 한다. 김(2003)과 정 등(2004)의 연구에 의하면 2 매개변수(Gumbel, 2변수 Weibull)분포가 3 매개변수(3변수 Weibull, Log-Pearson Type-III, Lognormal) 분포보다 안정적임이 증명되었다.

극치분석은 표본이 속하는 모집단의 특성을 추정하는데 목적이 있기 때문에 매개변수의 추정치가 가능한 안정적인 것이 바람직하다. 이 때문에 Weibull 분포는 형상매개변수를 미리 고정하여 각각 형상이 다른 2 매개변수형 분포함수로서 취급되어지고 있다.

4. 매개변수 추정 및 적합도 검정 방법

4.1 매개변수 추정

확률분포형의 매개변수를 추정하는 방법은 일반적으로 모멘트법(Method of Moments), 최우도법(Method of Maximum likelihood), 확률가중모멘트법(Method of Probability Weighted Moments), L-Moment법 그리고 핵밀도함수(Kernal density function) 등이 있다. 표본의 크기가 작을 때는 일반적으로 잘 일치하지 않는 결과를 얻게 된다. 따라서 충분한 기간의 자료의 확보가 절실히 요구된다. 본 연구에서는 모멘트법에 의한 Goda(2004)의 방법에 의해 추정하였다.

극치자료의 표본은 주로 평균(x_{mean})과 표준편차(σ)로 묘사되어진다. 이를 이용하여 식 (5)로 규모매개변수와 위치 매개변수를 추정할 수 있다(Goda, 2004). 식 (5)에 사용된 계수들은 Table 1에 정리하였다.

$$\hat{A} = \sigma/\alpha k, \hat{B} = x_{mean} - \beta\sigma/\alpha k \quad (5)$$

4.2 재현기간별 확률파고 산정

재현기간은 상정한 값을 상회하는 파랑이 나타난 평균적인 연수이다. 예를 들면, 6 m 이상의 파고의 파가 평균하여 M년에 1회 비율로 나타난다면 이 파랑의 재현기간은 M년이다(해양수산부, 2005).

Table 1. Value of Coefficients (α, β , and k)

Distribution	α	β	k
FT-I	0.5772	1.2826	0.975
Weibull($k=0.75$)	1.1906	1.6108	0.923
Weibull($k=1.00$)	1.0000	1.0000	0.958
Weibull($k=1.40$)	0.9114	0.6597	0.977
Weibull($k=2.00$)	0.8862	0.4633	0.986

from (Goda,2000; Goda, 2004)

후보 극치분포의 기준화변량 y_R 이 식 (2)와 (4)에 의해 정해지고, 식 (5)에 의해 매개변수가 정해지면 재현기간 R 에 대한 확률과고 H_R 을 다음 식 (6)에 의해 산출할 수 있다.

$$H_R = \hat{A}y_R + \hat{B} \quad (6)$$

4.3 표본에 적합한 극치분포형의 선정

한국연안의 20년간(1979년~1998년)의 심해파 자료는 여러 개의 확률분포함수에 적용가능하다. 확률분포함수의 선택에 따라 재현기간별 심해파는 다른 값이 얻어진다. 적합성 검정에 의해서 일부 확률분포함수를 기각하는 것이 가능하다. 하지만 하나의 확률분포함수로 선택하는 것은 바람직하지 않다. 일반적으로 극치확률변량(과고)와 y_R 사이의 관계는 상관계수가 1에 가장 가까운 값으로 취하는 경우가 많다. 극치자료의 경우는 상관계수를 적합도의 지표로 사용하는 것은 바람직하지 않기 때문에 Goda(2000)는 Monte carlo법으로 추출한 표본 각 10,000조를 계산하여 상관계수의 잔차 평균치 Δr_{mean} 를 식으로 소개하였다. Fig. 2는 완전적합의 경우인 값 1에 대한 상관계수의 잔차 $\Delta r = 1-r$ 에 대하여 분석한 것이다. 20개의 표본에 대한 상관계수의 잔차는 모두 0.05이하이며 후보분포형들의 잔차는 각각 0.042675(FT-I), 0.035898(Weibull, $k=0.75$), 0.029499(Weibull, $=1.00$), 0.024363(Weibull, $k=1.40$) 그리고 0.021429(Weibull, $k=2.00$)이다. Weibull($k=2.0$) 분포형의 잔차가 최소이며 FT-I 분포형의 잔차가 최대이다. 이는 무작위 표본에 대한 상관계수의 잔차의 결과이며 Weibull($k=2.0$) 분포형의 잔차가 최소라고 해서 모든 지역의 표본(과고 등)에 가장 적합한 분포형이라고는 판단할 수 없다. 또한 표본의 크기가

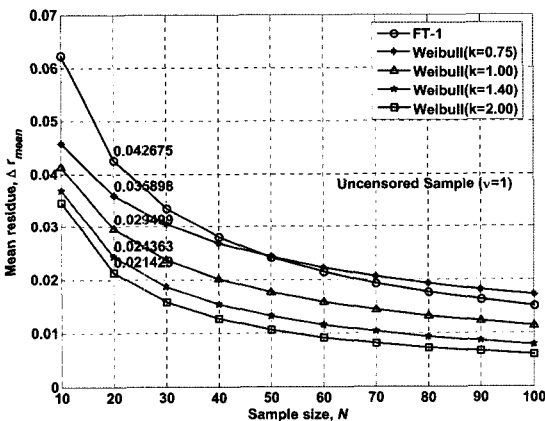


Fig. 2. Mean residue Δr_{mean} of candidate distributions.

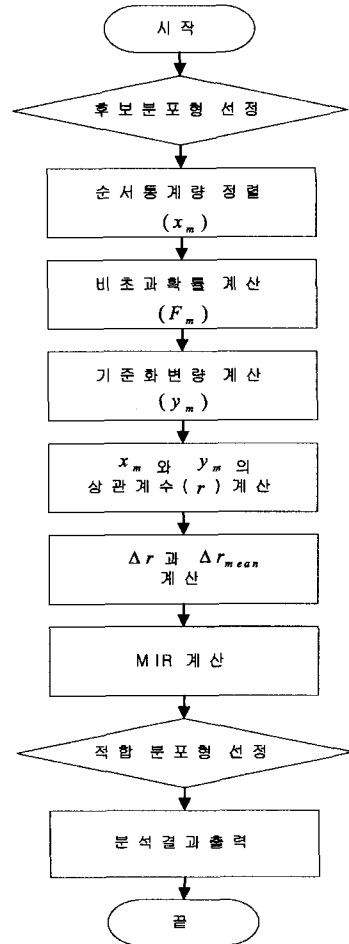


Fig. 3. Flowchart of the selection of most probable parent distribution.

클수록 상관계수의 잔차는 작아진다. 바꿔 말하면 장기간의 심해파의 자료가 축적된다면 통계분석의 신뢰성을 높일 수 있다.

상관계수의 잔차가 작다는 것은 후보확률분포함수에 대한 표본의 적합도가 높은 것을 의미하며 표본마다의 상관계수의 잔차를 분포함수의 평균치에 대한 비율로 나타내면 확률분포함수 사이의 차가 감소한다. 따라서 $MIR(\Delta r/\Delta r_{mean})$ 로서 표준화하여 각 표본에 대한 적합성을 검정할 수 있다. 이 판단의 기준을 Goda(2000)는 MIR(MInimum Ratio of residual correlation coefficient)로 명하였다. 즉 MIR 값이 가장 작은 후보 확률분포형이 가장 적합하다고 판단할 수 있다.

적합 극치분포형의 선정은 다음의 수순으로 행하였으며, Fig. 3에 순서도를 도시하였다.

- ① 후보 분포형 선정

- ② 순서통계량 x_m 정렬(주어진 표본의 자료를 크기 순으로).
- ③ x_m 에 대한 비초과확률 F_m 을 계산(Goda, 2004).
- ④ x_m 에 대한 기준화변량 y_m 을 계산.
- ⑤ x_m 과 y_m 사이의 상관계수 r 을 계산.
- ⑥ 완전적합인 값인 1에 대한 상관계수의 잔차 $\Delta r = 1 - r$ 을 계산.
- ⑦ Monte carlo법의 추출한 표본 각 10,000조에 대한 계산 결과인 상관계수의 잔차의 평균치 Δr_{mean} 을 계산(Goda, 2000).
- ⑧ Goda(2000)가 제안한 MIR을 계산(식 (7)참조).
- ⑨ 후보 분포형의 MIR을 비교하여 가장 작은 값에 해당하는 분포형을 채택.

$$MIR = \frac{\Delta r}{\Delta r_{mean}} \quad (7)$$

5. 결과 및 토의

한국연안 67개소의 16방향 총 1072개 지점의 20년간 심해파 자료 MIR의 누적분포를 Fig. 4에 도시하였다. MIR 값은 1에서 5까지 범위에 속해 있으며 특히 FT-I 분포형의 값이 가장 작은 값의 누적분포를 보이고 있다.

각 표본에 대한 후보확률분포의 MIR 값을 비교하여 순위를 정한 결과는 Table 2에 정리하였다. FT-I 분포가 886개 지점, Weibull($k=0.75$) 분포가 81개 지점 및 Weibull($k=1.00$) 분포가 105개 지점이다. 특히하게 Weibull($k=2.0$) 분포가 780개 지점에서 2순위로 채택되었는데 그 이유는 FT-I 분포형 다음으로 MIR 값이 작게 나온 것(Fig. 4참조)과

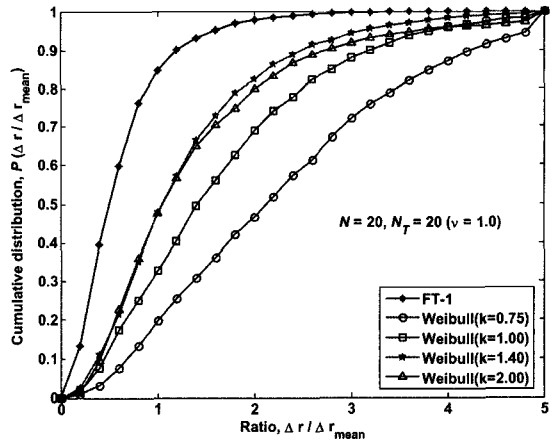


Fig. 4. Cumulative distributions of the ratio $\Delta r/\Delta r_{mean}$.

20개의 표본에서 상관계수의 잔차가 0.021429로 후보 분포형 중에서 가장 작은 것과 연관된다(Fig. 2참조). 결과적으로 한국 연안 심해파의 경우 상관계수만으로 표본의 적합성을 판단할 수 없으며 표준화된 MIR 값이 판단기준으로 더 적절한 것으로 사료된다. 참고로 정 등(2004)의 분석결과를 이번 연구와 비교하기 위하여 Table 4에 한국연안 심해파의 확률분포 적합성 검정 검토결과를 정리하였으며, Table 3는 확률분포형별 약어 및 적합도 검정 방법별 약어이다.

이러한 결과는 한국연안 심해파의 극치분포형을 반드시 FT-I 분포형이라는 것을 의미하기 보다는 표본에 따라 적정 분포형을 선택하여야 한다는 것을 보여준다.

Table 2. The number of the smallest MIR among candidate distributions

	1 순위	2 순위	3 순위	4 순위	5 순위	합 계
FT-I	886	85	68	10	23	1072
Weibull($k=0.75$)	81	46	185	240	520	1072
Weibull($k=1.00$)	105	60	155	630	122	1072
Weibull($k=1.40$)	0	101	664	192	115	1072
Weibull($k=2.00$)	0	780	0	0	292	1072
합 계	1072	1072	1072	1072	1072	

Table 3. 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-Smirov
GUM	Gumbel 분포	MM	모멘트법
LP3	Log-Pearson Type III 분포	MML	최우도법
LN	Lognormal 분포	MPWM	확률가중모멘트법

Table 4. 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	868	179	241	610	778
		(60.45)	(80.97)	(16.70)	(22.48)	(56.90)	(72.57)
WBU2		795	1001	744	1016	821	981
		(74.16)	(93.38)	(69.40)	(94.78)	(76.59)	(91.51)
GUM		908	1070	909	1030	899	1071
		(84.70)	(99.81)	(84.79)	(96.08)	(83.86)	(99.91)
LP3		391	461	204	234	789	880
		(36.47)	(43.00)	(19.03)	(21.83)	(73.60)	(82.09)
LN		761	1055	684	895	689	885
		(70.99)	(98.41)	(63.81)	(83.49)	(64.27)	(82.56)

참고: ()는 백분율

6. 결론 및 제언

한국연안의 67지점 16방위의 1072지점의 극치분석 결과 하나의 분포형에 집중하는 것은 곤란하며 각 표본에 따라 적정 분포형을 선정하여 설계파를 산출함으로써 설계 입력 자료의 불확실성을 최소화해야 할 것이다. FT-I(Gumbel) 분포가 적합성이 가장 우수한 것은 김(2003)과 정(2004)에서 Gumbel 분포형이 가장 우수한 결과와 일치하지만 지점별, 방향별 극치파랑의 자료의 특성을 반영하여 복수의 분포형을 적용하는 것이 필요하다. 후보분포형의 지역적인 특성은 현재의 자료로는 분석되지는 않았다. 파랑 관측 자료가 계속 축적되고 파랑 산출 모델도 급속히 발전하고 있어 파랑자료는 수정보완하는 것이 요구된다. 항만구조물의 설계파를 구하기 위한 설계 심해파를 한국해양연구원(2005)에서 개정하였으며, 1979년에서 2003년까지의 설계파를 산출하였다. 이러한 자료는 설계파랑의 통계분석에 가장 좋은 자료가 될 것이며 계속해서 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

또한 설계파의 통계분석에 있어서 가장 민감한 것은 분포형의 꼬리부분에 해당한다. 충분하지 않은 표본과 이상치 자료는 재현기간에 대한 설계파고 산출시 큰 영향을 미친다. 이러한 연구는 Spread Parameter(Goda, 2004)를 제안하여 연구되어 지고 있다. 신뢰성설계의 주요한 입력 자료인 정확한 설계파의 산출을 위해 시간적, 공간적 그리고 기술적 문제의 해결이 절실히 요구되는 실정이며, 안정적인 경제적인 설계를 위해 자료의 축적과 분석이 요구되어지고 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 및 한국해양수산기술진흥원의 “항만구조물 신뢰성 설계법 개발” 사업의 연구비지원에 의하여 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

- 김정대(2003). 한국연안 심해파의 극치분포 특성, 석사학위논문, 원광대학교.
- 일본토목학회(2000). 해안시설설계편람.
- 정신택, 김정대, 조홍연(2004). 한국 연안 심해 설계파고의 극치분포 특성, 한국해양해양공학회지.
- 한국해양연구원(2005). 전해역 심해설계파 추정 보고서 II.
- 해양수산부(2000). 해상파랑관측 및 조사.
- 해양수산부(2003). 해상파랑관측 및 조사.
- 해양수산부(2005). 항만 및 어항 설계기준(상권).
- 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.
- Goda, Y., (2000). Random seas and design of maritime structures, World Scientific.
- Goda, Y. (2004). Spread Parameter of Extreme Height Distribution for Performance-Based Design of Maritime Structure. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 130, No 1, 29-38.
- Goda, Y. and Kobune, K(1990). Distribution function fitting for storm wave data, Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Engrg. 18-31.

- Gumbel, E. J., (1958). *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, New York.
- 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.
- Isaacson, M and MacKenzie, N.G, (1981). *Long-term Distributions of Ocean Waves*, J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE, 93-109.
- 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. Hydrosoci., 13, 218-375.
- Rao, A.R. and Hamed, K.H., (2000). *Flood Frequency Analysis*, CRC Press LLC.
- Shimosako, K., and Takahashi, S., (1999). *Application of reliability design method for coastal structures-expected sliding distance method of composite breakwaters*. Proc., Coastal Structures, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 363-371.
- 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 December 29, 2006

Accepted June 29, 2007