

Original Article

조류발전시스템 설계를 위한 장죽수도 해역의 극치파랑조건 분석

고동휘¹ · 정원무² · 이진학^{3,†}

¹한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 선임연구원

²한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임연구원

³한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 책임연구원

Analysis of Extreme Wave Condition for Design of Tidal Energy Converter in the Jang-Juk Waterway

Dong-Hui Ko¹, Weon-Mu Jeong², and Jin-Hak Yi^{3,†}

¹Senior Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

²Principal Research Scientist, Marine ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

³Principal Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

요 약

본 연구에서는 조류발전시스템의 설계근거(design basis) 작성을 위해 2003년부터 2019년까지 장죽수도 인근해역의 장기 파랑 후측 자료를 이용하여 극치파랑조건을 분석하였다. 장기파랑자료의 극치모델로는 Weibull-3 분포형을 사용하였으며, 매개변수 추정법으로는 확률가중모멘트법과 최소자승법을 사용하였다. 또한 극치분포함수의 적합도 검정을 위해 95%의 신뢰수준으로 K-S 검정법(Kolmogorov-Smirnov test)을 사용하였으며, POT(Peaks-Over-Threshold) 기법을 이용하여 재현기간별 설계파고를 산정하였다. 그 결과, 파랑 후측 자료는 Weibull-3 분포형에 잘 접합하는 것으로 나타났으며, 확률가중모멘트법을 이용하여 추정한 극치파고가 최소자승법으로 추정한 극치파고보다 높게 산정되었다. 또한 재현주기별 극치파고에 상응하는 파주기를 산정하기 위해 파고와 파주기에 대한 관계식을 추정하였다.

Abstract – In this paper, the extreme wave condition was analyzed using long term hindcast simulation wave data from 2003 to 2019 in the Jang-Juk waterway to make the design basis for the development of tidal energy converter. The Weibull-3 distribution was used as the extreme distribution, and three parameters were estimated using the probability weighted moments method and the least square method. Furthermore, the K-S test (Kolmogorov-Smirnov test) was used at the 95% confidence level to test the goodness-of-fit. Meanwhile, the design wave height for each return period was calculated using the POT method. As a result, hindcast simulation wave data was found to be well fitted to the Weibull-3 distribution, and the extreme wave height by the probability weighted moments method was higher than by the least square method. Besides, the relationship between the wave height and the wave period was estimated to calculate the wave period corresponding to extreme wave height with the return period.

Keywords: Extreme wave condition(극치파랑조건), Jang-Juk waterway(장죽수도), Weibull-3 distribution(Weibull-3 분포), Probability weighted moments method(확률가중모멘트법), Least square method(최소자승법)

1. 서 론

1.1 조류발전 개요

최근 지구온난화로 인한 환경문제에 대처하기 위해 신·재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 재생에너지원 중 해양에너지는

미래 청정에너지원으로 유럽을 중심으로 상용화를 위한 기술 개발이 진행 중에 있다. 조류발전은 조류의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 발전방식으로 풍력발전에 비해 에너지밀도가 높으며, 달과 태양의 기조력에 의해 발생하기 때문에 규칙적이고 에너지 출력 예측이 가능한 장점이 있다(Ko et al.[2018]; Ko et al.[2019]; Park et al.[2019]). 조류발전시스템(tidal current energy converter)은 Fig. 1과

†Corresponding author: yjih@kiost.ac.kr

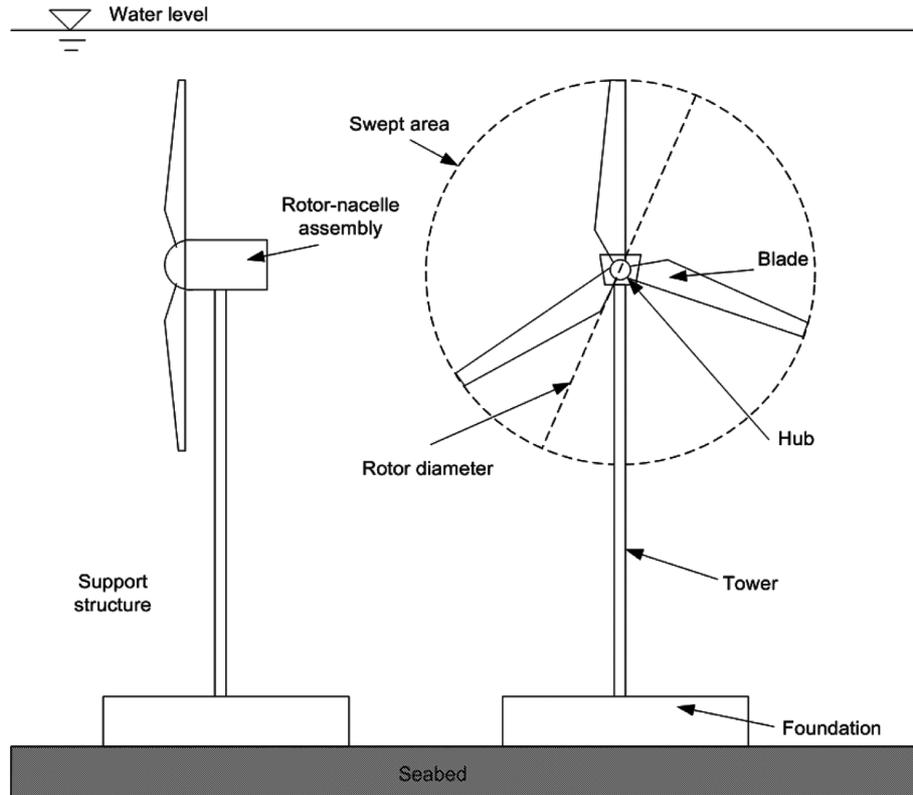


Fig. 1. Parts of a tidal turbine.

같이 조류로부터 전력을 생산하는 상부의 조류발전기(tidal turbine)와 조류발전기에서 발생하는 하중과 환경외력에 대해 구조적으로 안정성을 확보하기 위한 지지구조물(support structure)로 구성되어 있다. 또한 조류발전기는 고정부인 나셀(nacelle)과 회전부인 로터(rotor)로 구성되며 지지구조물은 타워(tower)와 기초(foundation)로 구성된다. 조류발전기와 지지구조물은 하중 특성에 맞춰 설계되어야 하며, 해상 및 지반 조건에 따라 부유식, 중력식, 모노파일, 자켓식 등 지지구조물 형식을 결정하게 된다.

1.2 IEC TS 62600-2 설계 규격

조류발전시스템의 안정성을 확보하기 위해서는 설계 외력에 대한 충분한 저항력이 확보되어야 하며, 설계수명 기간 동안의 파괴 모드에 대한 안정성이 검토되어야 한다. 특히 극치파고(EWH, Extreme Wave Height)는 조류발전시스템의 파괴를 야기하는 중요한 설계인자로 작용하기 때문에 설계 단계에서부터 이에 대한 평가가 충분히 이뤄져야 한다.

이러한 극치해상조건을 규정하기 위해 DNV[2007]에서는 해양 에너지 및 해상풍력 개발을 위한 설계 조건을 규정하고, 파랑에 대한 통계적 처리 방법들을 제시하고 있다. 국내에서는 Jeong *et al.*[2004]이 국내 연안 67개 지점의 최대 유의파 산출자료를 이용하여 극치분석을 수행한 바 있으며, 이를 통해 국내 연안 지점의 최적 매개변수 및 50년에 대한 심해 설계파 정보를 제시하였다. 또한,

Jeong *et al.*[2008; 2009]은 한국 연안의 조위자료를 활용해 극치분포 분석을 수행하여 각 분포에 대한 매개변수를 추정한 바 있으며, 한국 연안 극치 파고 분포의 확산모수(spread parameter) 특성을 검토한 바 있다. 이처럼 극치모델은 파랑, 조위, 해상풍 등과 같은 설계외력의 극치값 산정에 활용될 수 있으며, 이를 위해서는 장기 자료를 잘 모사할 수 있는 적합한 분포함수 추정이 매우 중요하다 (Jeong *et al.*[2014]; Ko *et al.*[2014]).

한편 세계 각국에서는 해양에너지 설계 경험을 바탕으로 자국의 환경조건에 적합한 설계 기술 규격을 마련하고 있는 실정이다. 해양에너지시스템의 설계를 다룬 국외 문서로는 API[2007], DNV [2007], GL[2005], ABS[2011; 2015], ISO[2005] 등이 있으며, 국내에서는 항만 및 어항 설계 기준(MOF[2014]) 등이 준용될 수 있다. 대표적인 국제 기술 규격서(TS, Technical Specification)는 국제전기기술위원회(IEC, International Electrotechnical Committee) 산하 해양에너지 기술 분과인 IEC/TC114에서 발간하고 있으며, 해양에너지 지지구조물 및 터빈에 대한 설계 요구사항은 IEC TS 62600-2: Design requirements for marine energy systems 문서에서 다루고 있다(IEC[2009; 2016; 2019]); Yi *et al.*[2019]; Ko[2019]).

IEC TS 62600-2 기술 규격서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 2014년에 초안이 발간되었고, 2016년에 1차 발행본이 발간되었다. 1차 발행본의 경우, IEC/TC 88에서 다루고 있는 풍력발전 국제표준을 근거로 작성되었으며, 2019년에 해양에너지시스템에 필요한 내용을

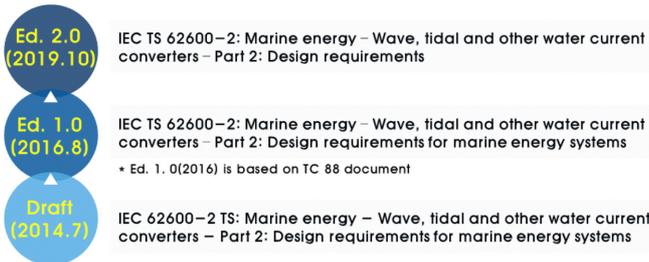


Fig. 2. History of IEC TS 62600-2.

보완하여 2차 발행본을 발간하였다. 2차 발행본에는 조류발전시스템의 파괴를 유발하는 모든 위험요소로부터 신뢰성과 안정성을 확보하기 위해 조류발전시스템 개발에 필요한 최소 설계 요구사항을 규정하고 있다(IEC[2019]).

이 기술규격서의 목적은 1) 조류발전 지지구조물 및 터빈의 설계/건설을 위한 기술적 근거 제시, 2) 조류발전시스템 구조, 기계, 전기 및 제어 시스템에 영향을 미치는 위험요소로부터 적절한 안전 수준 확보, 3) 조류발전시스템(프로토타입과 상용설치)의 기본 설계 및 설계 적합성 인증 자료로 활용하기 위함이다. 본 문서에서 제시하는 안전수준은 목표 파괴확률 10^{-4} (신뢰도지수 3.71에 해당) 이나 조류발전시스템이 극한 하중조건 하에서 인명사건을 유발할 수 있거나 혹은 환경 또는 경제에 큰 영향을 미칠 경우 목표 파괴확률은 10^{-5} (신뢰도 지수 4.26에 해당)으로 낮춰 설계할 수 있다. 또한 이 규격서는 지지구조물에 하중으로 작용하는 설계 외부환경조건을 주요 환경조건과 보조 환경조건으로 구분하여 규정하고 있다. 주요 환경조건은 파랑, 해류 및 수위 등 구조물에 악영향을 미칠 수 있는 해상조건을 포함하고 있으며, 보조 환경조건은 쇄파, 쇄파류, 해상풍, 부착생물, 지진, 세굴 등을 포함하고 있다. 주요 환경조건에 해당하는 파랑조건은 해양구조물의 안정성을 저해하는 주요 외력 중 하나로서 이에 대한 적절한 평가가 이뤄져야 한다. 특히 구조물에 외력으로 작용하는 극치 파랑은 장기 파랑 자료로부터 통계학적 방법을 이용해 산정되어야 하며 IEC TS 62600-2 기술 규격서는 대상해역의 고유 데이터를 사용하여 극치파고(EWH, Extreme Wave Height) 값을 제시하도록 권고하고 있다(IEC[2019]).

따라서 본 연구에서는 1 MW급 조류발전시스템 설계를 위해 설치 대상 해역인 장죽수도 인근해역의 매 1시간 후속 파랑 산출 자료를 수집하였으며, POT(Peaks-Over-Threshold) 기법을 이용해 극치설계파랑을 산정하였다. 또한 극치파랑의 분포함수로는 Weibull-3 분포형을 채택하였으며, 확률가중모멘트법과 최소자승법을 사용하여 매개변수를 추정하고 이에 대한 결과를 상호 비교하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 후속 파랑 자료

최근 국내에서는 조류발전 실험역 시험장 구축, 1 MW급 조류발전 상용화 시스템 개발 등 조류발전 상용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 조류발전 최적 후보지로 평가받고 있는 장죽수도 해역에 실증시험을 추진 중에 있다. 조류발전시스템의 설계 및 실증 시험을 위해서는 대상 해역의 관측자료 또는 모델링자료를 분석하여 해상조건을 분석해야 하며, 이 결과를 기반으로 설계 근거 (design basis)가 작성되어야 한다. 그러나 현장 관측 자료를 확보하는 작업은 많은 비용과 시간을 요구하며, 해상공간에서 장기간 축적된 파랑 자료를 확보하기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 극치파랑조건을 분석하기 위해 국내 연안 심해 설계과 산출에 활용된 과거(2003.01~2019.12) 매 1시간 후속 파랑 산출 자료를 활용하였다. 본 자료는 최근 해양환경 변화에 따른 기존 심해 설계과를 재산정하기 위해 산출된 자료로서 바람과 파랑 시뮬레이션을 통해 수치모의된 자료이다. 바람장 생성 모델은 WRF 기상모델과 3D WRF 기상모델이 사용되었으며, 파랑 생성 모델로는 SWAN 모델이 사용되었다. 수치모델을 통해 산출된 매 1시간 파랑 자료는 현장 관측치와의 비교 평가를 통해 검증되었다(MOF[2019]). Table 1과 Fig. 3는 파랑 산출 지점 위치에 대한 좌표 정보와 위치도이다.

2.2 Weibull-3 극치 분포

극치파고, H_{EWH} 는 1년, 5년, 50년 혹은 100년 재현주기 동안의 가장 큰 파고로 정의할 수 있으며, 극치파랑 추정을 위한 자료 선

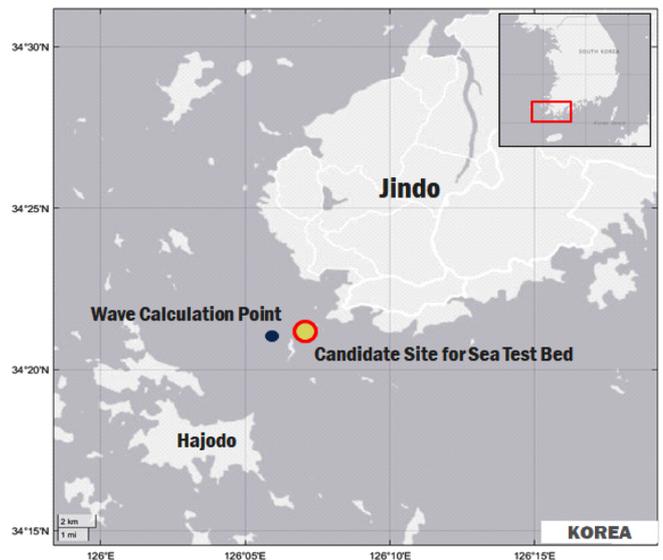


Fig. 3. A location map of wave calculation point.

Table 1. Wave calculation point coordinate

Point	WGS84 UTM 52N		WGS84 longitude and latitude	
	X (m)	Y (m)	Long. (°)	Lat (°)
Wave calculation point	233,252.96	3,804,775.36	126.10E	34.35N

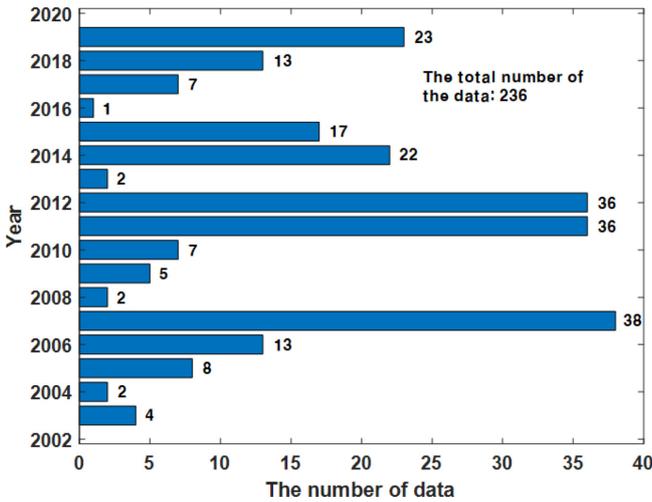


Fig. 4. The number of significant wave heights ($H_s \geq 3.18$ m).

정 방법에는 분석기간 동안의 전체 자료를 활용하는 방법(whole data method), 연 최댓값을 활용하는 방법(annual maxima method). 그리고 특정값 이상의 값을 산정하는 방법(POT) 등이 있다. 그러나 극치통계에 사용될 자료는 독립성(independency)과 균질성(homogeneity)이 만족되어야 하므로 전체 자료를 사용하는 방법은 일반적으로 사용되지 않으며, 전체 자료를 사용할 경우는 약 10% 이상의 과대 추정이 발생하는 것으로 발표된 바 있다(DNV[2007]; Goda[2000]).

본 연구에서 사용한 파랑자료는 총 17년 자료로서 연 최댓값을 뽑아내어 사용할 경우 자료 개수가 충분하지 않아 결과값이 왜곡될 수 있기 때문에 특정값 이상의 정보를 추출하여 극치해석에 사용하는 POT 기법을 이용하였다. 매년 최대파랑 정보를 포함하기 위해 3.18 m 이상의 파랑 정보를 추출하였고, 이에 해당하는 표본 자료의 수는 236개로 나타났다(Fig. 4 참조).

표본 파랑자료의 극치 분포형으로는 GEV(Generalized Extreme Value), Gumbel, Weibull 분포형이 많이 사용된다. Weibull 분포는 재료의 안정성과 수명시험을 모형화하기 위해 제안되었으며 지역 홍수빈도해석과 같은 극치해석에 많이 사용된다(Weibull[1939]; Weibull[1951]). 3개의 매개변수를 갖는 Weibull-3 분포의 누적분포함수(CDF, Cumulative Distribution Function)와 확률밀도함수(PDF, Probabiltiy Density Function)는 다음 식 (1)-(2)와 같이 나타낼 수 있다(Rao and Hamed[2000]; Haldar and Mahaevan[2000]; Weibull[1951]).

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^k\right\}; x_0 \leq x < \infty \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{k}{a} \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^k\right\} \quad (2)$$

여기서, a 는 규모 매개변수(scale parameter), k 은 형상 매개변수(shape parameter), x_0 는 위치 매개변수(location parameter)이다.

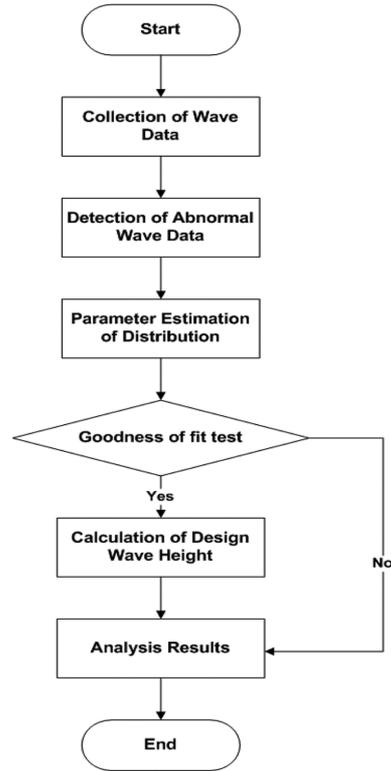


Fig. 5. Process of extreme wave height calculation.

한편 극치설계파랑 산출을 위한 극치분포해석 과정을 정리하면 Fig. 5와 같다.

2.3 확률가중모멘트법을 이용한 매개변수 추정

확률분포형의 매개변수를 추정하는 방법으로는 모멘트법(MOM, Method of Moments), 최우도법(MLM, Maximum Likelihood method), 확률가중모멘트법(PWM, Probability Weighted Moments method). 그리고 최소자승법(LSM, Least Square Method)이 있다. 최우도법은 매개변수의 추정치가 다른 방법에 비해 비교적 작은 분산을 보이기 때문에 효율적인 방법으로 평가된다. 이에 반해 모멘트법은 상대적으로 매개변수 추정방법이 간단하지만 작은 표본에서 편중될 가능성이 높아 고차 모멘트(3개 이상의 매개변수를 갖는) 분포형에 대해서는 부정확해지는 경향이 있다. 확률가중모멘트법은 자료의 크기에 따라 가중치를 부여하는 방법으로 계산절차가 복잡하지 않고 작은 표본치에서도 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있어 매개변수 추정법으로 흔히 사용된다(Rao and Hamed[2000]; Greenwood *et al.*[1979]). 이에 본 연구에서는 Weibull-3 분포형의 매개변수를 추정하기 위해 확률가중모멘트법을 사용하였다(Greenwood *et al.*[1979]; Rao and Hamed[2000]; Hosking[1986; 1990]).

2.4 적합도 검정

추정된 분포함수의 적합도 검정을 위해 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정 방법을 사용하였다. K-S 검정은 관측 자료의 누적확률곡

선과 본 연구에서 추정된 Weibull-3 분포형의 누적확률곡선을 비교하여 각 구간에서의 두 값의 최대차, D_n 를 다음 식 (3)을 이용해 산정한다.

$$D_n = \text{Max}[F_X(x) - S_n(x)] \quad (3)$$

여기서, $F_X(x)$ 는 이론적인 확률분포의 누적확률분포이며, $S_n(x)$ 는 n 개의 관측 자료를 크기순으로 배치하여 나타낸 누적확률분포이다. 식 (3)으로부터 구한 최대차가 자료의 총 수(n)와 유의수준 $\alpha(=5\%)$ 에 따라 다음 식 (4)로 구해진 한계값보다 작으면 이 자료는 유의수준 $\alpha(=5\%)$ 에서 검정하는 확률분포를 따른다고 할 수 있다(Ang and Tang[2007]).

$$D_n^\alpha = 1.36\sqrt{n} \quad n > 50 \quad (4)$$

2.5 POT 기법을 활용한 설계파랑 산정

재현기간, T 는 어떤 특정값 이상의 극한사건이 발생하는 평균기간으로 정의할 수 있으며 재현값은 주어진 재현기간 동안의 최대값으로 정의할 수 있다. 한편 K 년 동안에 일어나는 사건의 횟수 N_T 에 의해 다음 식 (5)와 같이 극한 사건의 평균 발생률(mean rate), v 을 산정할 수 있다.

$$v = \frac{N_T}{K} \quad (5)$$

연 최대치를 활용하는 방법의 경우 매년 최대값을 사용하기 때문에 $v = 1$ 이며, POT 방법의 경우 극한 사건의 경계치인 임계치(threshold value)의 크기에 따라 평균 발생률(mean rate)이 결정된다.

POT 방법에 따른 재현기간과 재현값은 다음 식 (6)과 (7)로 산정할 수 있다(Goda[2000]).

$$T = \frac{1}{v[1 - F(x_n)]} \quad (6)$$

$$X_T = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{vT}\right) \quad (7)$$

여기서, $1 - F(x_n)$ 는 임의의 극치값 x 가 일 년 동안 특정 값 x_n 를 초과하는 확률로서 정의할 수 있다.

3. 극치설계파랑 산정 결과

3.1 Weibull-3 매개변수 추정 및 설계파고 산정

극치분석을 위해 2003년~2019년 기간의 파랑 산출 자료 중 3.18 m 이상의 파고에 해당하는 236개의 파랑 표본자료를 추출하였으며, 이 자료를 Weibull-3 분포에 적합(fitting)하였다. 매개변수 추정법으로는 확률가중모멘트법을 사용하였고, 이 결과를 최소자승법 결과와 비교하였다. 확률가중모멘트법에 따라 매개변수를 산정한 결과, 규모 매개변수 a 는 0.50, 형상 매개변수 k 는 1.42, 위치 매개변수 x_0 는 3.11로 산정되었으며, Fig. 6에 파랑자료와 Weibull-3 분포에 대한 확률밀도함수를 도시하였다.

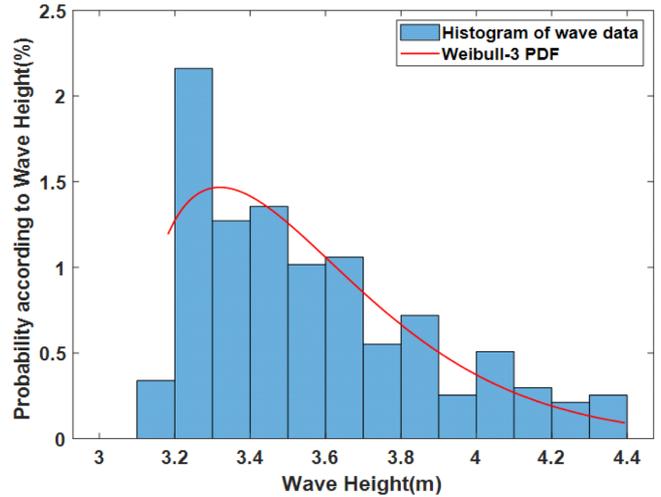


Fig. 6. Histogram and fitted Weibull-3 distribution model.

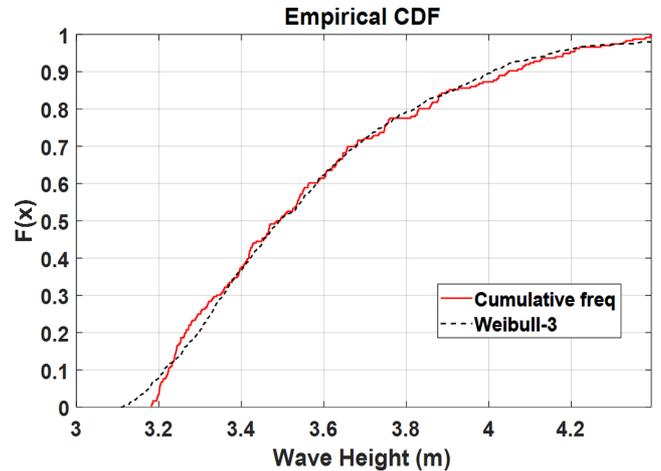


Fig. 7. A comparison of empirical CDF and theoretical CDF for the K-S test.

Fig. 7은 표본파랑자료의 누적확률밀도와 Weibull-3 분포형의 누적확률밀도를 도시한 것으로 표본치와 이론치는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 식 (3)에 의한 D_n 값은 0.064로 식 (4)에 의해 계산된 한계치 0.089보다 작은 것으로 산정되어 5% 유의수준에서 Weibull-3 확률분포에 적합한 것으로 나타났다. 또한 p-value 값도 0.71로서 유의수준 0.05(95% 신뢰수준)보다 크게 산정되어 두 자료의 확률 분포가 일치한다는 귀무가설을 기각할 수 없는 것으로 나타났다.

한편 본 연구에서는 최소자승법을 이용하여 매개변수를 추정하였고, 그 결과를 확률가중모멘트법의 결과와 비교하였다. 표본파랑 자료에 대한 축소변량(reduced variate)과 매개변수는 다음과 식 (8)과 (9)와 같이 산정할 수 있다.

$$y_i = [-\ln(1 - F_i)]^{1/k} \quad (8)$$

$$x_i = x_0 + ay_i \quad (9)$$

Fig. 8은 최소자승법을 이용한 Weibull-3 분포와 표본파랑자료의

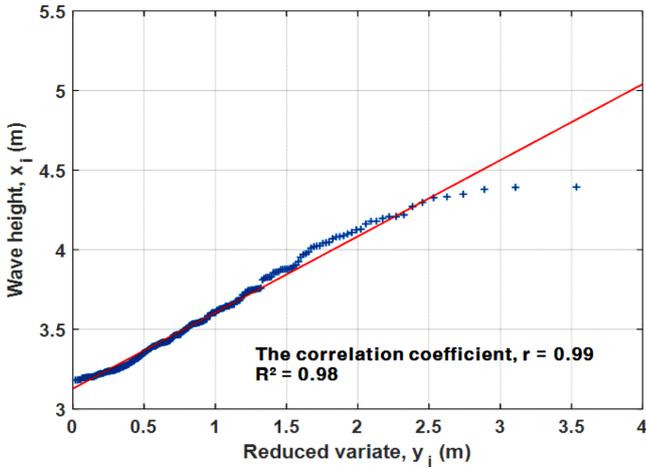


Fig. 8. Fitting of the wave data to the Weibull distribution with $k = 1.42$.

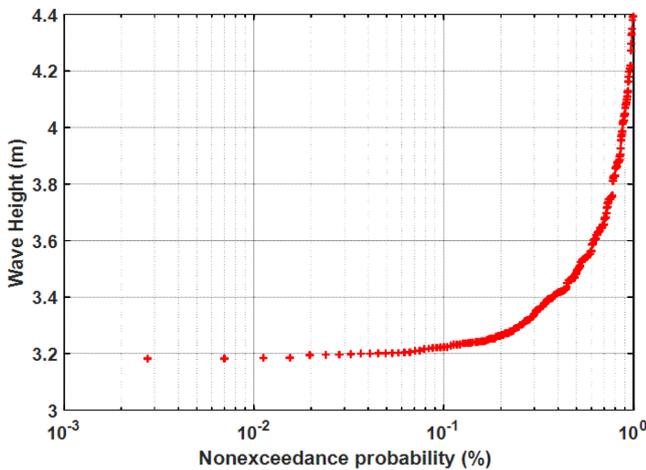


Fig. 9. Nonexceedance probability plot according to wave height.

적합도를 도시한 것으로 두 자료가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 최소자승법에 의한 매개변수 추정 결과, 규모 매개변수 a 는 0.48, 위치 매개변수 x_0 는 3.13으로 산정되었으며 축소변량과 표본 파랑자료와의 상관계수, r 은 0.99로 산정되었다(Table 2 참조).

Fig. 9는 Weibull-3 분포에 따른 특정 파고의 초과 확률을 도시한 것이다.

재현기간별 극치설계파고를 산정한 결과, 확률가중모멘트법에 따라 산정한 1, 2, 10, 50, 100년 재현주기의 설계파고는 4.05 m, 4.23 m, 4.61 m, 4.95 m, 5.09 m로 각각 산정되었으며 최소자승법에 의한 설계파고는 4.03 m, 4.20 m, 4.56 m, 4.89 m, 5.02 m로 확률가중모멘트법에 의한 값보다 작게 산정되었다.

Table 2. Estimated parameters of Weibull-3 distribution

Distribution	Parameters		
	shape, k	scale, a	location, x_0
Weibull-3	Probability wighted moments	1.42	3.11
	Least squares	1.42	3.13

3.2 극치설계파 주기 산정

해양에너지 시스템에 영향을 미치는 파랑 하중은 주로 주기에 종속적인 성격을 갖는 파고에 의해 결정된다. 하지만 수심과 지형 등 해역 특성에 따라 파랑 특성이 변하기 때문에 파고와 주기의 일반적인 관계식은 성립하지 않으며 장기 자료로부터 관계식을 추정한 후 특정 파고에 따른 주기를 산정해야 한다. 본 연구에서는 후측 파랑자료를 이용하여 유의파고와 유의파 주기의 관계식을 식 (10)의 형태로 추정하였다(Kamphuis[2000]).

$$T_{1/3} = \zeta H_{1/3}^{\nu} \tag{10}$$

Fig. 10은 파고와 주기의 관계를 보여주는 산포도(scatter diagram)이며, 매개변수를 추정한 결과, ζ 는 5.09, ν 는 0.34, 결정계수(R^2)는 0.44로 산정되었다. Table 3은 매개변수 추정방법에 따른 재현주기별 설계파고와 주기를 정리한 표이며, Fig. 11은 재현주기에 따른 극치설계파고를 나타낸 것이다.

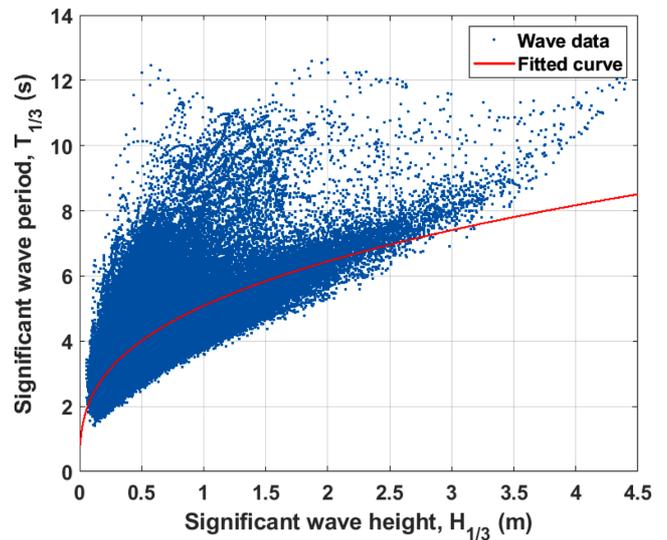


Fig. 10. Plotting of relation between wave height and wave period.

Table 3. Result of extreme wave height and period calculation

Return period (year)	PWM method		Least squares method	
	$H(m)$	$T(s)$	$H(m)$	$T(s)$
1	4.05	8.21	4.03	8.19
2	4.23	8.33	4.20	8.31
5	4.46	8.48	4.41	8.45
10	4.61	8.58	4.56	8.55
20	4.76	8.68	4.71	8.64
50	4.95	8.79	4.89	8.75
100	5.09	8.88	5.02	8.83

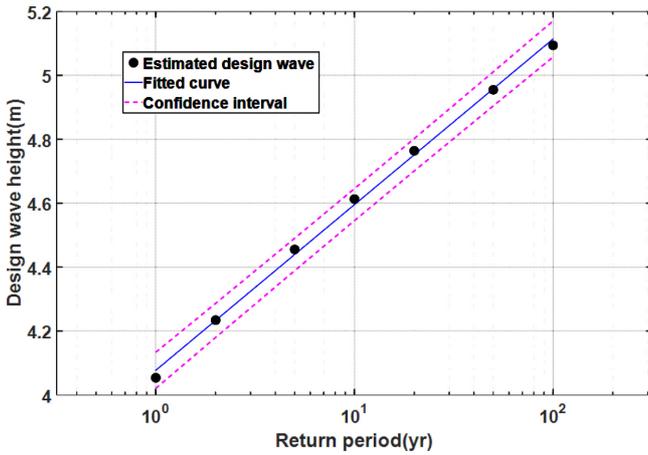


Fig. 11. Design wave height according to return period and confidence interval.

4. 결 론

본 연구에서는 조류발전시스템 설계를 위해 조류발전 단지 후보지인 장주기도 인근 해역의 극치파랑조건을 분석하였다. 2003년부터 2019년까지의 17년 장기 후측 파랑산출자료를 이용하여 Weibull-3 분포형의 매개변수를 추정하였으며, POT 기법을 이용하여 1년, 5년, 50년, 100년의 재현주기를 갖는 설계파고를 산정하였다. 이러한 일련의 과정을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 통계적 기법을 통한 설계파고 산정을 위해서는 장기간 파랑 자료가 요구된다. 그러나 열악한 해상상태에서 장기 파랑 관측 자료의 확보는 쉽지 않으며, 최근 한반도 주변 파랑 관측시스템의 설치가 증가하고 있으나 장기 파랑 정보가 누적되기 위해서는 더 많은 시간이 지나야 한다. 이에 따라 장기 파랑 관측 자료를 대신하여 파랑모델을 통한 장기 추산 자료의 활용이 불가피하며 이를 활용한 대상해역의 불규칙 파랑 특성 분석이 이뤄져야 한다.

(2) 본 연구에서는 Weibull-3 분포형의 매개변수 추정을 위해 확률가중모멘트법과 최소자승법을 사용하였다. 그 결과 확률가중모멘트법에 의한 규모 매개변수, 형상 매개변수, 그리고 위치 매개변수는 0.50, 1.42, 3.11로 각각 산정되었고, 최소자승법의 경우, 규모 매개변수는 0.48, 위치 매개변수는 3.13으로 산정되어 유사한 결과를 도출하였다. 또한 K-S 검정을 통한 매개변수의 적합도 검정을 실시하였으며, D_n 은 0.064로 한계치인 0.089보다 작아 5% 유의수준에서 Weibull-3 확률분포에 적합한 것으로 나타났다.

(3) 특정 분포에 따른 재현기간의 비초과 누적확률분포는 $F(X_T) = 1 - 1/T$ 로 나타낼 수 있으나, 이 경우 1년 재현주기 산정이 불가능하다. 그러나 POT 기법을 이용할 경우 1년 재현주기를 갖는 파고 추정이 가능하며 확률가중모멘트법을 이용하여 산정한 설계파고 값이 최소자승법보다 큰 값을 제시하는 것으로 나타났다.

(4) 매 1시간 후측 파랑자료를 이용하여 장주기도 인근 해역의 유의파고와 유의파 주기의 관계식을 $T_{1/3} = 5.09H_{1/3}^{0.34}$ 로 추정하였다.

그러나 높은 파고에서는 추정된 관계식이 잘 일치하지 않는 것으로 나타나 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

(5) 본 연구에서는 해양에너지 시스템 설계를 위해 요구되는 극치설계파랑 조건을 분석하였으며, 이 결과는 해양에너지시스템 설계초안 및 한계상태 설계법에 의한 구조물 설계에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 조류발전 청정재생에너지시스템 개발사업인 “1MW급 조류발전 상용화 시스템 개발(과제번호: 20190499)” 과제와 해양청정에너지기술개발사업인 “조류발전 실험장 구축(과제번호: 20170333)” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

- [1] American Bureau of Shipping(ABS), 2011, Design Standards for Offshore Wind Farms, final report, ABS, Texas, USA.
- [2] American Bureau of Shipping(ABS), 2015, Guide for Building and Classing Bottom-Founded Offshore Wind turbine Installations, ABS, Texas, USA.
- [3] American Petroleum Institute(API), 2007, API RP 2A-WSD: Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore structures – Working Stress Design, API, Washington, USA.
- [4] Ang, A.H-S and Tang, W.H., 2007, Probability concepts in engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering, second ed., John Wiley & Sons, INC., Hoboken.
- [5] Det Norske Veritas(DNV), 2007, OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures, DNV, Høvik, Norway.
- [6] Germanischer Lloyd(GL), 2005, Guideline for the certification of offshore wind turbines, GL, Uetersen, Germany.
- [7] Goda, Y., 2000, Random seas and design of maritime structures, World Scientific, Singapore.
- [8] 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.
- [9] Haldar, A. and Mahadevan, S., 2000, Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley & Sons, INC., New York.
- [10] Hosking, J.R.M., 1986, The Theory of Probability Weighted Moments, Res. Rep. RC 12210, IBM Research Division, Yorktown Heights, New York.
- [11] Hosking, J.R.M., 1990, L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions using Linear Combinations of Order Statistics, J. Royal Stat. Soc B, 52(1), 105-124.
- [12] International Electrotechnical Commission(IEC), 2009, IEC

- 61400-3: Wind Turbines - Part 3: Design Requirements for Off-shore Wind Turbines, IEC, Geneva, Switzerland.
- [13] International Electrotechnical Commission(IEC), 2016, IEC 62600-2: Marine Energy – Wave, Tidal and Other Water Current Converters- Part 2: Design Requirements for Marine Energy Systems, Ed. 1.0, IEC, Geneva, Switzerland.
- [14] International Electrotechnical Commission(IEC), 2019, IEC 62600-2: Marine Energy – Wave, Tidal and Other Water Current Converters- Part 2: Marine Energy Systems-Design Requirements, Ed. 2.0, IEC, Geneva, Switzerland.
- [15] International Organization for Standardization(ISO), 2005, ISO 19901-1: Petroleum and Natural Gas Industries – Specific Requirements for Offshore Structures- Part 1: Metocean Design and Operating Considerations, ISO, Geneva, Switzerland.
- [16] Jeong, S.T., Kim, J.D. and Cho, H.Y., 2004, Characteristics on the Extreme Value Distributions of Deepwater Design Wave Heights off the Korean Coast, *J Korean Soc Coast Ocean Eng*, 16(3), 130-141.
- [17] Jeong, S.T., Kim, J.D., Ko, D.H. and Yoon, G.L., 2008, Parameter Estimation and Analysis of Extreme Highest Tide Level in Marginal Seas around Korea, *J Korean Soc Coast Ocean Eng*, 20(5), 482-490.
- [18] Jeong, S.T., Kim, J.D., Ko, D.H. and Kim, T.H., 2009, Characteristics of Spread Parameter of the Extreme Wave Height Distribution around Korean Marginal Seas, *J Korean Soc Coast Ocean Eng*, 21(6), 480-494.
- [19] Jeong, S.T., Cho, H.Y., Ko, D.H. and Hwang, J.D., 2014, Estimation on the Distribution Function for Coastal Air Temperature Data in Korean Coasts, *J Korean Soc Coast Ocean Eng*, 26(5), 278-284.
- [20] Kamphuis, J.W., 2000, Introduction to Coastal Engineering and management, World Scientific, Toh Tuck Link, Singapore.
- [21] Ko, D.H., Jeong, S.T., Cho, H. and Kang, K.S., 2014, Extreme Offshore Wind Estimation using Typhoon Simulation, *J Korean Soc Coast Ocean Eng*, 26(1), 16-24.
- [22] Ko, D.H., Park, J.S. and Lee, K.S., 2018, Assessment of Tidal Current Energy Potential at Uldolmok in the Southwestern Coast of Korea, *J Coast Res*, 85, 1301-1305.
- [23] Ko, D.H., Chung, J., Lee, K.S., Park, J.S. and Yi, J.H., 2019, Current Policy and Technology for Tidal Current Energy in Korea, *energies*, 12, 1807.
- [24] Ko, D.H., 2019, Introduction to IEC TS 6260-2: Design requirements for marine energy systems : Focused on marine and meteorological external conditions, in proc. of KOSMEE Fall Meeting, Busan, Korea, 50.
- [25] Park, J.S., Lee, C.Y., Park, J.S., Choi, H.W., Ko, D.H. and Lee, J.L., 2019, Assessment of Tidal Stream Energy Resources Using a Numerical Model in Southwestern Sea of Korea, *Ocean Sci J*, 54(4), 529-541.
- [26] Rao, A.R. and Hamed, K.H., 2000, Flood Frequency Analysis, CRC Press LLC, New York.
- [27] Ministry of Oceans and Fisheries(MOF), 2019, The Final Report of estimation for Deep-Sea Design Wave in Korean Seas, Sejong.
- [28] Ministry of Oceans and Fisheries(MOF), 2014, Harbor and Fishery Design Criteria, Sejong.
- [29] Weibull, W., 1939, A Statistical Theory of the Strength of Material, *Ingeniörs Vetenskaps Akademiens Handigar*, No. 151, Stockholm, Sweden.
- [30] Weibull, W., 1951, Statistical Distribution Function of Wide Application, *Jour. Appl. Mech.*, ASME, 293-297.
- [31] Yi, J.H., Choi, J.S. and Ko, D.H., 2019, Recent Trend and Domestic Activities on Technical Standardization on Ocean Energy Systems, in proc. of KAOSTS, Jeju, Korea, 10.

Received 27 May 2020

Revised 4 August 2020

Accepted 10 August 2020