

극치파고분포의 모수 불확실성에 따른 설계파고의 불확실성 및 피복재의 파괴확률 해석

Analysis of Failure Probability of Armor Units and Uncertainties of Design Wave Heights due to Uncertainties of Parameters in Extreme Wave Height Distributions

이 철 응*
Cheol-Eung Lee*

요 지 : 재현기간에 따른 설계파고 산정시 Gumbel 극치분포함수의 축척모수와 위치모수를 확률변수로 고려할 수 있는 Monte-Carlo 모의법을 제안하였다. 축척모수의 불확실성의 정도에 따라 설계파고의 불확실성의 정도가 결정되며 그 분포형태는 Gumbel 분포함수를 따른다. 또한 내용년수에 해당하는 최대 유의파고 분포특성을 이용하여 재현기간에 따른 설계파고를 산정하는 경우에 더 많은 불확실성이 포함된다. 한편 피복재의 파괴모드에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 설계파고의 불확실성에 대한 영향을 검토하였다. 설계파고의 불확실성을 고려하는 방법에 따라 재현기간 50년 동안 5% 피해수준에 해당하는 파괴확률을 산정하여 비교하였다. 설계파고의 불확실성이 년 최대 유의파고자료의 불확실성과 같다고 가정하면 파괴확률이 넓은 범위에 걸쳐서 산정된다.

핵심용어 : 재현기간, 설계파고, 불확실성, Monte-Carlo 모의법, 파괴확률

Abstract : A Monte-Carlo simulation method is proposed which can take uncertainties of scale and location parameters of Gumbel distribution into account straightforwardly in evaluating significant design wave heights with respect to return periods. The uncertainties of design wave heights may directly depend on the amounts of uncertainties of scale parameter and those distributions may be followed by Gumbel distribution. In case of that the expected values of maximum significant wave height during lifetime of structures are considered to be the design wave heights, more uncertainties are happened than in those evaluated according to return periods with encounter probability concepts. In addition, reliability analyses on the armor units are carried out to investigate into the effects of the uncertainties of design wave heights on the probability of failure. The failure probabilities of armor units to 5% damage level for 50 return periods are evaluated and compared according to the methods of taking uncertainties of design wave heights into account. It is found that the probabilities of failure may be distributed into wide ranges of bounds when the uncertainties of design wave heights are assumed to be same as those of annual maximum significant wave heights.

Keywords : return period, design wave height, uncertainty, monte-carlo simulation, probability of failure

1. 서 론

장기적인 파고자료를 이용하여 설계파고를 정확히 예측하는 문제는 항만 구조물 설계에서 매우 중요하다. 재현기간에 따른 유의 설계파고를 예측하기 위해서는 크게 다음과 같은 두 가지 단계가 수행된다. 처음 단계가 극치자료의 확보에서부터 분포함수의 선택, 모수의 추정 등 기본적으로 극치자료를 해석하는 것이다. 다음 단계가 어떤 모형을 적용하여 설계파고를 정량적으로 산정하는 것이다. 첫 번째 단계는 다시 다음과 같은 세 가지 세부과정을 거치게 된다. 먼저 해석에

사용될 양질의 극치자료들을 많이 확보하는 것이다. 일반적으로 년 최대유의파고 자료나 POT(Peak-Over-Threshold) 법에 의하여 얻어진 자료를 이용하는데, 일정 기간에 많은 자료를 확보하는데 용이한 방법이 POT 법이다(Goda, 1988; Burcharth, 1989; Soares and Scotto, 2001). 다음은 어떤 분포함수로 확보된 극치자료를 확률적으로 잘 나타내느냐 하는 문제이다. 현재까지 일반적으로 사용되는 극치분포함수로는 Fisher-Tippett I, II, III (FT-I, II, III)와 대수정규분포들이 있다. Gumbel 분포함수나 Weibull 분포함수가 각각 FT-I과 FT-III에 해당하며, 대수정규분포는 제한적인 경우에만 적용되고

*강원대학교 공과대학 토목공학과, 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja2-Dong, Chuncheon 200-701, Korea. celee@kangwon.ac.kr)

일반적으로는 잘 사용하지 않는다. 마지막으로 중요한 과정이 극치자료와 선택된 분포함수의 축척모수나 형태모수, 그리고 위치모수와 같은 모수를 산정하는 것이다. 일반적으로 모멘트법이나 최소자승법 그리고 최우도법들이 사용된다. 한편 이상의 첫 단계가 완료되면 어떤 모형을 적용하여 재현기간에 따른 설계과고를 정량적으로 산정하게 된다. 이 때 사용되는 모형으로는 구조물의 내용년수 동안에 일정 수준의 허용 조우확률을 부여하여 재현기간에 따른 설계과고를 산정하는 방법과 내용년수에 해당하는 최대과고들의 평균을 산정하는 방법이 있다. 전자의 방법이 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법으로 내용년수와 재현기간을 동일하게 가정하면 허용 조우확률은 약 0.63이 된다. 후자의 방법은 신뢰성 설계법에서 많이 적용되는 방법으로 현재 LFRD(Load Resistance Factor Design)법에 적용되어 사용되고 있다(Ravindra et al., 1978). Gumbel 분포함수에서 내용년수 동안의 최대과고의 평균은 내용년수의 1.8배에 해당하는 재현기간에 대한 설계과고와 같다는 개념이다.

이상에서의 재현기간에 따른 설계과고를 산정하는 단계에는 극치자료의 확보에서부터 산정모형의 적용까지 많은 과정을 거치게 된다. 이와 같은 과정을 거치면서 재현기간에 따른 설계과고가 각기 다르게 산정될 수 있다(Naress and Clause, 2001; Scotto and Soares, 2007). 재현기간에 따른 설계과고가 각기 다르게 산정되는 주 원인은 극치자료의 변동성에 의한 것이다. 재현기간에 따른 설계과고를 산정하기 위하여 어느 산정모형을 사용하든지 간에 적합도 검증 과정, 즉, 동일한 극치자료를 사용하더라도 잘 일치하는 분포함수의 선정에서부터 축척모수와 같은 모수들을 추정하는 과정에 극치자료의 변동성이 각기 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 따라서 PIANC(1992) 등은 모수를 확률변수로 고려할 수 있는 방법을 제안하였으며, Burcharth(1992)와 Goda(2000) 등은 재현기간에 따른 설계과고의 불확실성을 나타낼 수 있는 변동계수를 경험적으로 산정하기도 하였다.

본 연구에서는 극치분포함수의 모수를 확률변수로 고려할 수 있는 Monte-Carlo Simulation(MCS) 기법을 제안하여 재현기간에 따른 설계과고의 통계적·확률적 거동특성을 해석하였다. 또한 PIANC(1992)에서 제안한 자료로부터 얻어진 해석 결과를 Burcharth(1992)의 재현기간에 따른 설계과고의 불확실성 정도와 비교하였다. 특히 재현기간에 따른 설계과고의 불확실성이 신뢰성 해석에 어떠한 영향을 미치는지를 정량적으로 확인하기 위하여 피복재에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 즉, 본 연구에서는 극치분포함수의 모수를 확률변수로 고려하였을 때 피복재의 파괴확률이 어떠한 통계적·확률적 거동특성을 갖는지 해석하였다.

제2절에 재현기간에 따른 설계과고의 개념적 정의와 수학적 산정 모형을 수립하였으며, 제3절에는 PIANC(1992)에서 제안한 자료를 가지고 극치분포함수의 모수를 확률변수로 고려할 수 있는 MCS 기법을 사용하여 재현기간에 따른 설계

과고의 통계적·확률적 거동특성이 해석되었다. 또한 제4절에서는 피복재의 파괴모드에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 파괴확률에 미치는 재현기간에 따른 설계과고의 불확실성의 영향을 정량적으로 확인하였다. 마지막으로 제5절에 해석 결과를 언급하였다.

2. 설계과고 산정 모형

일정기간에 걸쳐 관측된 극치자료가 독립성(independency)과 균일성(homogeneity)을 만족한다는 가정하에 적합도 검증을 수행하는데 현재 일반적으로 적용될 수 있는 가장 대표적인 극치분포함수가 다음 식 (1)의 Gumbel 분포함수이다.

$$F(x) = \exp\{-e^{-\alpha(x-\beta)}\} \quad (1)$$

여기서 x 는 확률변수이며, α 와 β 를 각각 축척모수(scale parameter)와 위치모수(location parameter)라 한다. 극치자료에 모멘트법이나 최소자승법 그리고 최우도법을 적용하여 분포함수의 모수들을 산정할 수 있다(Ang and Tang, 2007; Goda, 2000). Weibull 분포함수 등 여러 분포함수를 대상으로 해석을 수행하였으나 정 등(2004)이 한국연안에 가장 적합한 모형으로 Gumbel 분포함수를 제시하였기 때문에 본 연구에서는 이에 대한 결과만 제시하였다.

식 (1)과 같은 극치분포함수를 이용하여 재현기간에 따른 설계과고를 산정하는 방법은 전 절에서 설명한 바와 같이 구조물의 내용년수 동안에 일정 수준의 허용 조우확률을 부여하여 재현기간에 따른 설계과고를 산정하는 방법과 내용년수 동안의 최대과고의 평균을 산정하는 방법이 있다.

먼저 내용년수와 재현기간이 동일하다는 가정하에 재현기간에 따른 유의설계과고, H_s^R 은 식 (1)에 의하여 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$H_s^R = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ -\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda R} \right) \right\} \quad (2)$$

여기서 $\lambda = N/T$ 로 단위 년에 해당하는 극치자료의 수이며, N 은 POT 법에 의하여 T 년 동안 관측된 전체 극치자료의 수이다. R 은 년으로 표시되는 재현기간이다.

한편 신뢰성 설계법에서는 내용년수에 해당하는 최대과고의 평균을 설계과고로 사용하는 방법이 일반적으로 적용된다. 즉 단위 년이 아닌 내용년수 동안 발생 가능한 최대과고들의 자료를 이용하여 분포함수를 추정하고, 그 평균을 설계과고로 사용하는 방법이다. 따라서 식 (1)을 이용하여 단위 년에 해당하는 최대과고 분포함수를 산정하면, 내용년수 L 년에 해당하는 최대과고 분포함수, $\Phi(x_L)$ 는 다음 식 (3)과 같이 정의할 수 있다(Goda, 2000).

$$\Phi(x_L) = [F^r(x_L)]^L \quad (3)$$

따라서 식 (1)을 식 (3)에 대입하여 정리하면 내용년수에 해

당하는 최대 유의파고의 평균은 다음 식 (4)와 같이 쉽게 산정된다.

$$\bar{H}_s^L = \beta + \frac{1}{\alpha} \{ \ln(\lambda L) + \gamma \} \quad (4)$$

여기서 $\gamma = 0.57722$ 는 Euler 상수이다. 또한 식 (2)의 재현기간 R 과 내용년수 L 사이에는 $R=1.8L$ 의 관계가 성립한다. 특히 식 (4)에 의하여 산정된 결과를 설계파고로 이용한다는 개념은 년 최대 유의파고자료의 불확실성을 그대로 사용하면서 분포함수를 내용년수에 따라 평행 이동시킨다는 의미이다. 이상에 재현기간에 따른 설계파고를 산정하는 방법을 수립하였다. 식 (1)~식 (4)에서 쉽게 알 수 있듯이 어느 방법을 사용하던지 분포함수의 모수에 따라 직접적으로 설계파고가 달라질 수 있다. 또한 모수는 사용된 극치자료에 따라 달라진다. 따라서 모수를 확률변수로 고려하여 발생 가능한 전 범위에 해당하는 재현기간에 따른 설계파고의 거동 특성을 정확히 해석해야 한다.

3. 설계파고의 불확실성 해석

PIANC(1992)에서 제안한 극치분포함수의 모수를 확률변수로 고려하여 MCS 기법을 사용하여 재현기간에 따른 설계파고의 통계적·확률적 거동특성을 해석하였다. PIANC(1992)에서는 POT 법에 의하여 수집된 관측 자료를 최우도법으로 해석하여 식 (1)의 극치분포함수에 대한 축척모수, α 와 위치모수, β 의 분포함수를 다음 식 (5)와 같이 제시하였다.

$$\alpha \sim N\left(\hat{\alpha}, \hat{\alpha} \sqrt{\frac{0.608}{N}}\right) \quad (5a)$$

$$\beta \sim N\left(\hat{\beta}, \frac{1}{\hat{\alpha}} \sqrt{\frac{1.109}{N}}\right) \quad (5b)$$

여기서 $N(\mu, \sigma)$ 는 평균, μ 와 표준편차, σ 를 갖는 정규분포를 의미하며, $\hat{\alpha}$ 과 $\hat{\beta}$ 은 각각 POT 자료를 최우도법으로 추정된 추정치이다. PIANC(1992)에는 Bilbao, Sines 등 유럽의 여러 지역에서 수집한 POT 자료를 해석하여 여러 분포함수에 대한 모수들을 제시하였다. 이 중 본 연구에서는 $N=50$, $\lambda=4.17$, $\hat{\alpha}=1.95$, 그리고 $\hat{\beta}=5.55$ 를 갖는 Gumbel 분포함수에 대한 Bilbao 자료를 이용하였다.

먼저 모수의 표본평균을 식 (2)와 식 (4)에 대입하여 재현기간에 따른 설계파고를 산정하였다. 식 (2)의 재현기간, R 과 식 (4)의 내용년수, L 을 변화시키면서 산정된 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 $R=1.8L$ 의 관계가 잘 만족되고 있다. 예로 내용년수 50년에 대한 설계파고는 재현기간 90년에 해당하는 설계파고와 같다. 따라서 내용년수 동안의 최대 유의파고의 평균을 산정하는 식 (4)에 의한 결과가 약간씩 크게 나타나고 있다.

Fig. 1에 제시된 결과는 모수의 불확실성을 고려하지 않고

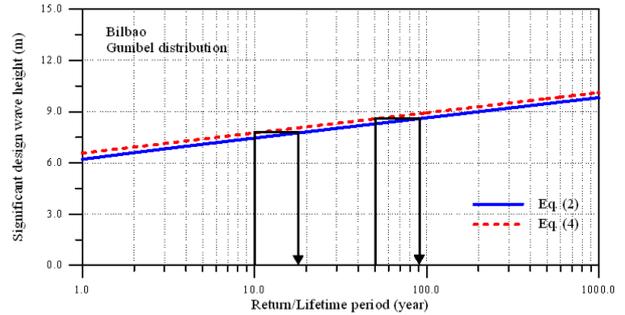


Fig. 1. Significant design wave heights with respect to return/lifetime periods.

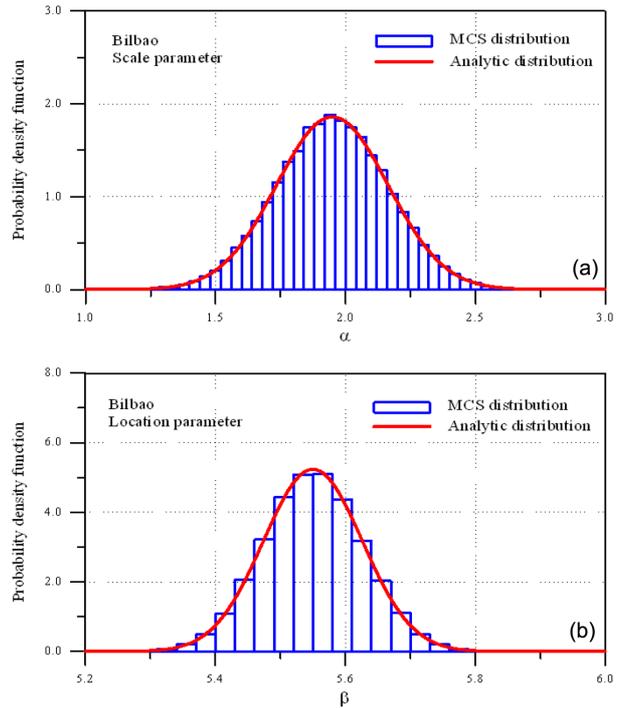


Fig. 2. (a) Comparison of distributions for scale parameter of Gumbel distribution, (b) Comparison of distributions for location parameter of Gumbel distribution.

산정된 현재까지 일반적으로 적용되고 있는 재현기간에 따른 설계파고이다. 따라서 본 연구에서는 모수의 불확실성이 고려되었을 때 재현기간에 따른 설계파고가 어떻게 달라지는지 그 거동특성을 해석하였다. MCS 기법을 사용하여 먼저 식 (5)에 제시된 축척모수와 위치모수를 각각 50,000개씩 생성하여 Fig. 2에 그 결과를 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 생성된 자료가 정규분포를 따르는 등 식 (5)를 만족스럽게 재현하고 있다. 따라서 생성된 모수의 자료를 먼저 식 (2)에 대입하여 재현기간 50년에 대한 설계파고를 산정하였다. Fig. 3(a)는 위치모수를 고정시켜 놓고 축척모수의 불확실성만을 고려한 결과이고, Fig. 3(b)는 반대로 위치모수의 불확실성만을 고려한 결과이다. 마지막으로 두 모수의 불확실성을 모두 고려한 결과가 Fig. 3(c)이다. Fig. 1의 결정론적 방법으로 산정한 재현기간 50년에 대한 설계파고는 8.287 m이다. 그러나 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 모수의 불확실성을 고

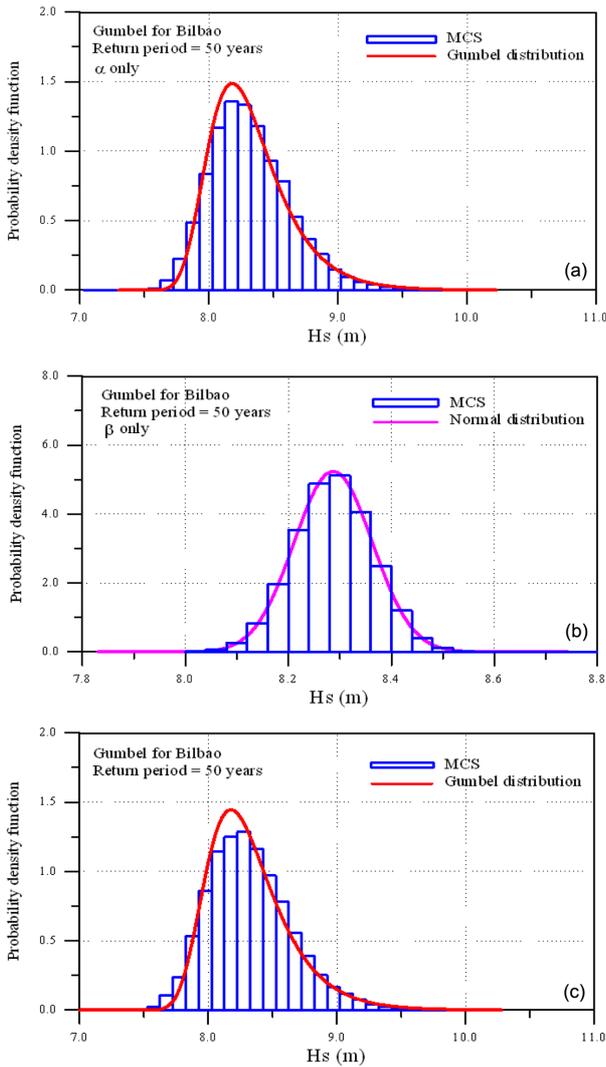


Fig. 3. (a) Distribution of significant design wave height with respect to variation of scale parameter of Gumbel distribution, (b) Distribution of significant design wave height with respect to variation of location parameter of Gumbel distribution, (c) Distribution of significant design wave height with respect to variations of scale and location parameters of Gumbel distribution.

려하여 산정한 결과에서는 설계과고가 일정 범위에 걸쳐서 특정한 분포특성을 가지고 나타난다. Fig. 3(a)의 평균은 8.323 m로 결정론적 방법에 의하여 산정된 설계과고와 약간 다르며, 변동계수는 약 3.809%이다. 또한 설계과고의 분포형태는 Gumbel 분포함수를 따르는 것으로 판단된다. 특히 신뢰성 해석에서 중요한 우측 꼬리 부분이 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 Fig. 3(b)의 평균은 8.287 m이고 변동계수는 약 0.917%이다. 설계과고의 분포형태는 정규분포와 잘 일치한다. 이는 Fig. 3(a)와 다르게 평균은 결정론적 방법에 의하여 산정된 설계과고와 동일하며, 비교적 작은 변동계수를 갖는다. 따라서 위치모수의 불확실성이 설계과고에 미치는 영향은 축척모수보다 매우 작다. 마지막으로 Fig. 3(c)의 평균은 8.323 m으로 Fig. 3(a)와 동일하나 변동계수는 3.929%로 Fig. 3(a)보다 약간

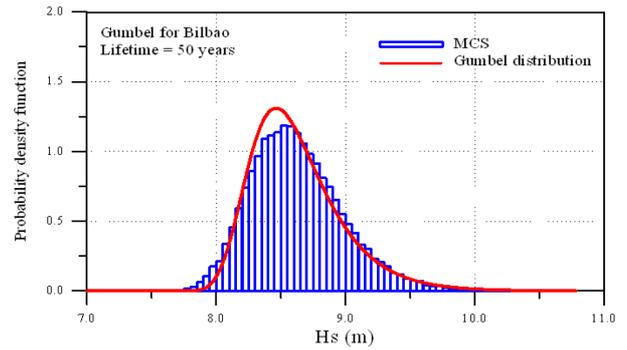


Fig. 4. Distribution of expected significant wave height of maximum wave height during lifetime with respect to variations of scale and location parameters of Gumbel distribution.

증가하였다. 전체적인 분포형태도 Gumbel 분포함수와 잘 일치한다. 따라서 Gumbel 분포함수로 재현기간에 따른 설계과고를 산정하는 경우, 축척모수의 불확실성의 정도에 따라 설계과고의 불확실성의 정도가 결정되며 그 분포형태는 Gumbel 분포함수를 따른다. 본 연구에서는 축척모수의 변동계수가 11.03%, 위치모수의 변동계수가 1.37%일 때 50년 재현기간의 설계과고의 변동계수는 약 4%로 산정되었다.

동일한 방법으로 식 (4)의 축척모수와 위치모수의 불확실성을 모두 고려하여 내용년수에 해당하는 최대 유의과고들의 평균을 산정하였다. 산정된 내용년수에 따른 설계과고의 거동특성을 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 1에 제시한 결정론적 방법으로 산정한 내용년수 50년에 해당하는 최대 유의과고들의 평균이 8.584 m이다. 그에 비해 모수의 불확실성을 고려한 Fig. 4의 결과에서는 내용년수 50년에 해당하는 최대 유의과고들의 평균의 평균(ensemble average)이 8.624 m로 약간 크게 산정되었다. 또한 변동계수는 약 4.174%로 Fig. 3의 결과보다는 불확실성이 약간 증가한 결과이다. 따라서 식 (4)와 같이 내용년수에 해당하는 최대 유의과고들의 분포특성을 이용하여 설계과고를 산정하게 되면 식 (2)와 같이 재현기간에 따른 설계과고를 산정할 때 보다 더 많은 불확실성이 포함된다.

한편 본 연구에서는 Fig. 3과 Fig. 4에서 제시한 재현기간에 따른 설계과고의 불확실성을 정량적으로 검증하였다. 비교 검증을 위해 Burcharth(1992)가 경험적으로 제시한 다음 식 (6)을 이용하였다.

$$\sigma_{H_s^R}^2 = \frac{1}{N\alpha^2} (1.109 + 0.514c + 0.604c^2) \quad (6a)$$

$$c = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda R}\right)\right) \quad (6b)$$

식 (6)은 최우도법을 이용하여 경험적으로 제안된 식이다. Bilbao 자료를 가지고 식 (6)과 식 (2)에 의하여 산정된 50년 재현기간에 해당하는 설계과고의 변동계수는 약 4.017%이다. 따라서 Fig. 3(c)의 3.929%와 Fig. 4의 4.174%와 잘 일치한다. 이는 재현기간에 따른 설계과고의 불확실성이 본 연구에서 제

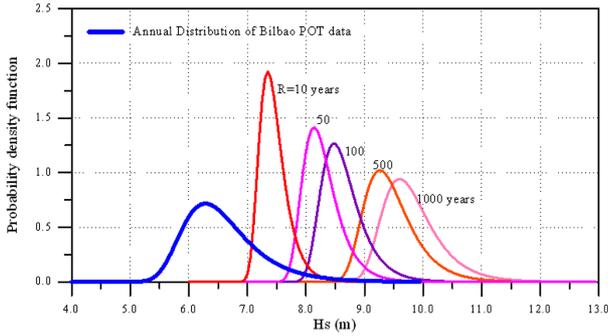


Fig. 5. Distributions of significant design wave heights according to return periods.

시한 MCS 기법에 의하여 올바르게 해석되었다는 것을 의미한다. 따라서 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성을 고려할 수 있는 분포함수를 재현기간에 따라 Fig. 5에 제시하였다. 또한 Table 1에 재현기간에 따른 설계파고의 평균과 변동계수 그리고 Gumbel 분포함수의 축척모수와 위치모수를 제시하였다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 재현기간이 증가함에 따라 불확실성을 나타내는 변동계수가 약 3.3%에서 약 5.1%로 증가하고 있다. 이는 극치자료의 제약성에 기인한 것으로 재현기간에 따른 설계파고 산정에서 일반적으로 나타나는 현상이다 (Goda, 2000).

이상과 같이 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성을 나타낼 수 있는 통계적 특성 및 분포함수를 얻을 수 있었다. 따라서 이하에 이와 같은 설계파고의 불확실성이 신뢰성 해석을 어떻게 영향을 미치는지 검토하였다.

4. 피복재의 파괴확률 해석

극치분포함수에 포함된 모수의 불확실성에 의하여 나타나는 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성이 MCS 기법에 의하여 만족스럽게 산정되었다. 따라서 본 절에서는 이와 같은 불확실성의 영향들이 피복재 파괴모드에 대한 신뢰성 해석에서 어떻게 나타나는지를 분석하였다. 먼저 다음 식 (7)과 같이 Hudson 공식을 이용하여 피복재의 파괴모드에 대한 신뢰함수를 수립하였다(이, 2007).

$$Z = A_H \Delta D_n (K_D \cot \alpha)^{1/3} - (H_s^R + FH_s) \tag{7}$$

여기서 A_H 는 경험식의 불확실성을 나타내는 계수이고,

Table 2. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (7).

#	X_i	μ_{X_i}	$\Omega_{X_i}(\%)$	Distribution
1	A_H	1.00	18.0	Normal
2	Δ	1.60	3.8	Normal
3	$D_n(\text{m})$	2.59	6.7	Normal
4	$\cot \alpha$	2.00	5.0	Normal
5	$FH_s(\text{m})$	0.00	-	Normal

$\Delta = \gamma_s / \gamma_w - 1$, γ_s 와 γ_w 는 각각 피복재 및 해수의 단위중량, D_n 은 피복재의 대표입경, $\cot \alpha$ 는 체체의 경사이다. 또한 K_D 는 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파, 피복층의 두께, 거치 방법 등에 의하여 결정되는 안정상수로 본 연구에서는 5% 피해수준에 해당하는 4.0을 사용하였다. H_s^R 은 재현기간 R 년에 해당하는 유의설계파고이다. 설계파고를 제외한 신뢰성 해석에 사용된 사석 경사체의 통계적 특성 및 분포함수를 Table 2에 제시하였다.

먼저 Table 2에 제시된 각 확률변수의 평균과 Fig. 1에 제시한 재현기간 50년에 해당하는 설계파고 8.287 m를 사용하여 결정론적 설계법으로 사석 피복재의 대표입경을 결정하였다. 다음으로 식 (3)에 제시된 개념, 년 최대 유의파고들의 불확실성을 그대로 유지하면서 50년에 해당하는 분포함수를 이용하여 MCS 기법으로 파괴확률을 산정하였다. 즉, Fig. 2에 제시된 극치분포함수의 축척모수와 위치모수를 변화시키면서 50년에 해당하는 최대 유의파고의 분포함수를 산정하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 재현기간 50년 동안 5% 피해수준에 해당하는 파괴확률을 Fig. 6에 제시하였다. 그림에서 알

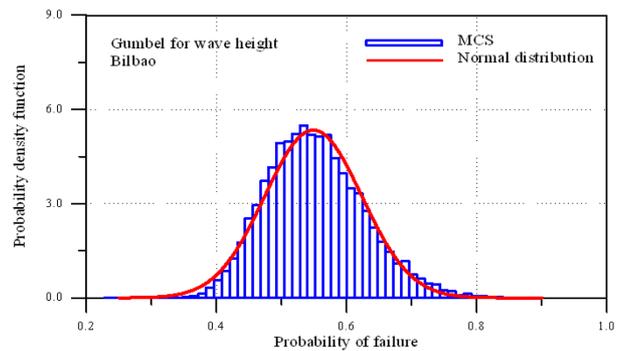


Fig. 6. Distribution of probability of failure of armor units with variations of uncertainties of significant design wave heights according to return periods.

Table 1. Statistical properties of significant design wave heights and its scale and location parameters of Gumbel distribution according to return periods

R(years)	$\mu_{H_s^R}(\text{m})$	$\text{COV}_{H_s^R}(\%)$	$\alpha_R(1/\text{m})$	$\beta_R(\text{m})$
10	7.457	3.286	5.232	7.347
50	8.287	4.017	3.843	8.137
100	8.643	4.304	3.446	8.476
200	8.999	4.567	3.123	8.814
500	9.469	4.879	2.777	9.261
1000	9.825	5.099	2.562	9.599

수 있듯이 특정한 분포형태에 따라 약 32%에서 80%까지의 범위에 걸쳐 파괴확률이 나타나고 있다. 본 연구에서는 실선으로 표시한 정규분포와 비교하였다. Fig. 6의 50년 동안 5% 정도의 피해수준이 발생할 파괴확률의 평균이 약 54.9%이고 변동계수가 13.6%이다. 한편 전절에서 재현기간 50년에 해당하는 설계파고의 불확실성을 Fig. 3(c)와 Fig. 4에 제시하였다. 따라서 이들 분포함수를 이용하여 동일한 조건에서 산정된 파괴확률은 각각 약 49.5%와 56.5%이다. 따라서 단위년에 대한 분포함수로부터 50년에 해당하는 최대파고 분포함수를 유도하여 신뢰성 해석을 수행한 결과와 설계파고의 불확실성에 대한 분포함수를 직접 산정하여 수행한 신뢰성 해석의 결과에 약간의 차이를 보이지만 거의 동일한 수준이라 판단된다. 따라서 년 최대 유의파고자료의 불확실성을 그대로 사용하면서 분포함수를 내용년수에 따라 평행 이동시키는 방법으로 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성을 고려하는 경우는 년 최대 파고의 분포함수와 관련된 축척모수나 위치모수의 크기에 따라 파괴확률이 상당히 다르게 산정된다.

5. 결 론

극치분포함수의 축척모수와 위치모수를 확률변수로 고려할 수 있는 MCS 기법을 제안하여, 재현기간에 따른 설계파고의 통계적 확률적 거동특성을 해석하였다. 구조물의 내용년수 동안에 일정 수준의 허용 조우확률을 부여하여 재현기간에 따른 설계파고를 산정하는 방법과 내용년수에 해당하는 최대 유의파고들의 평균을 설계파고로 정의하는 방법에 본 연구에서 제안된 MCS 모형이 적용되었다. 한국 연안에 가장 적합한 극치분포함수인 Gumbel 분포함수와 PIANC(1992)에서 제안한 POT 자료를 이용하여 해석되었다. 본 연구에서 얻어진 해석 결과를 Burcharth(1992)가 제안한 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성 정도와 비교하여 만족스럽게 검증하였다. 특히 Gumbel 분포함수로 재현기간에 따른 설계파고를 산정하는 경우, 축척모수의 불확실성의 정도에 따라 설계파고의 불확실성의 정도가 결정되며 그 분포형태는 Gumbel 분포함수를 따른다. 또한 신뢰성 해석에 사용될 수 있는 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성의 분포함수를 다양한 재현기간에 대하여 제시하였다.

마지막으로 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성이 신뢰성 해석에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 확인하였다. Hudson 공식을 이용하여 사석 피복재의 파괴모드에 대한 신뢰함수를 수립하고, 대표적인 자료를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 세 가지 방법으로 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성이 고려되었다. 년 최대 유의파고들의 불확실성을 그대로 유지하면서 50년에 해당하는 극치자료의 분포함수를 이용하는 방법과 식 (2) 및 식 (4)를 이용하는 방법이다. 각 방법으로 산정된 재현기간 50년 동안 5% 피해수준에 해당하는 파괴확률을 비교한 결과 거의 동일한 수준이었다. 그러나 년

최대 유의파고 자료의 불확실성을 그대로 사용하면서 분포함수를 내용년수에 따라 평행 이동시키는 방법으로 설계파고의 불확실성을 고려하는 경우는 파괴확률이 넓은 범위에 걸쳐 산정되었다. 이는 년 최대 유의파고의 분포함수와 관련된 축척모수나 위치모수 산정에 상당한 주의해야 한다는 것을 의미한다.

따라서 본 연구에서 제안한 MCS 기법을 사용하면 재현기간에 따른 설계파고의 불확실성에 대한 정보를 정확히 파악할 수 있으며, 그 결과는 신뢰성 해석에 유용하게 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국해양수산진흥원 지원과제인 “항만구조물 신뢰성 설계 개발” 과제의 일부임을 밝히며, 국토해양부 및 한국해양수산진흥원의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이철웅 (2007). 피복재의 부분안전계수 산정, 한국해양-해양공학회지, 제19권, 제4호, pp.336-344.
- 정신태, 김정대, 조홍연 (2004). 한국 연안 심해 설계파고의 극치 분포 특성, 한국해양-해양공학회지, 제16권, 제3호, pp.130-141.
- Ang, A.H-S., and Tang, W.H. (2007). *Probability concepts in engineering*, John Wiley & Sons, Inc.
- Burcharth, H.F. (1989). Uncertainties related to environmental data and estimated extreme events, *Report of Subgroup_B, PIANC PTC II Working Group 12 on Rubble Mound Breakwater*.
- Burcharth, H.F. (1992). Reliability evaluation of a structure at sea, *Proc. of Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures at the 23rd. ICCE, Venice*, pp.597-644.
- Goda, Y. (1988). On the methodology of selecting design wave height, *Proc. 21st. ICCE, Malaga, Spain*, pp.899-913.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*, World Scientific.
- Naess, A., and Clausen, P.H. (2001). Combination of the peak-over-threshold and bootstrapping methods for extreme value prediction, *Struc Safety*, Vol. 23. pp.315-330.
- PIANC (1992). Analysis of rubble mound breakwaters, *Report of Working Group no. 12 of PTC II*.
- Ravindra, M.K., Cornell, C.A., and Galmbos, T.V. (1978). Wind and snow load factors for use in LRFD, *J. Struc. Div., ASCE*, Vol.104, No.ST9, pp.1443-1457.
- Soares, C.G and Scotto, M. (2001). Modeling uncertainty in long-term predictions of significant wave height, *Ocean Eng.*, Vol.28, pp.329-342.
- Scotto, M., and Soares, C.G. (2007). Bayesian inference for long-term prediction of significant wave height, *Coast. Eng.*, Vol.54, pp.393-400.

원고접수일: 2010년 3월 5일

수정본채택: 2010년 3월 30일

게재확정일: 2010년 4월 8일