혼성제 직립벽에 작용하는 파력의 불확실성 해석 Uncertainty Analysis of Wave Forces on Upright Sections of Composite Breakwaters

이철웅*
Cheol Eung Lee*

요 지 : 혼성제 케이슨에 작용하는 파력의 불확실성을 확률론적으로 해석할 수 있는 MCS 기법을 제시하였다. 수평파력과 양력에 대한 확률론적 산정모형을 파력 산정에 사용되는 최대파고의 확률적 특성의 함수로 수립하였다. 파력이 극치분포를 따른다는 가정하에 Goda 식으로부터 산정된 수평파력과 양력에 대한 상대파력의 개념으로 파력의 거동특성을 해석하였다. 이중절단형 정규분포를 이용하는 MCS 기법을 이용하여 축척모수와 형상모수의 불확실성을 고려하였다. 최대설계파고의 초과확률에 따라 상대파력의 평균과 분산을 정량적으로 산정하였다. 해석 결과에 의하면 초과확률이 커짐에 따라 수평파력 및 양력에 대한 상대파력의 평균은 일정하게 감소된다. 특히 양력에 대한 상대파력은 그 평균값이 수평파력의 평균보다 크고 변동계수는 작게 산정되었다. 이는 동일조건의 초과수준에서 양력에 대한 불확실성이 상대적으로 수평파력의 불확실성보다 작다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구의 결과는 파력의 불확실성에 대한 통계적 거동특성을 요구하는 신뢰성 설계 등에서 유용하게 이용될 수 있다.

핵심용어 : 혼성제, 파력산정모형, 극치분포, 불확실성, MCS 기법

Abstract : A MCS technique is represented to stochastically analyze the uncertainties of wave forces exerted on the upright sections of composite breakwaters. A stochastic models for horizontal and uplift wave forces can be straightforwardly formulated as a function of the probabilistic characteristics of maximum wave height. Under the assumption of wave forces followed by extreme distribution, the behaviors of relative wave forces to Goda's wave forces are studied by the MCS technique. Double-truncated normal distribution is applied to take the effects of uncertainties of scale and shape parameters of extreme distribution into account properly. Averages and variances of relative wave forces are quantitatively calculated with respect to the exceedance probabilities of maximum design wave height. It is found that the averages of relative wave forces may be decreased consistently with the increases of the exceedance probabilities. In particular, the averages on uplift wave force are evaluated slightly larger than those on horizontal wave force, but the variations of coefficient of the former are adversely smaller than those of the latter. It means that the uncertainties of uplift wave forces are smaller than those of horizontal wave forces in the same condition of the exceedance probabilities. Therefore, the present results could be useful to the reliability based-design method that require the statistical properties about the uncertainties of wave forces.

Keywords : composite breakwaters, stochastic wave force model, extreme distribution, uncertainty, MCS technique

1. 서 론

혼성제는 해저 사석 마운드로부터 해수면 위까지 거치된 대형 직립 케이슨의 자중으로 파력에 저항하는 항만 외곽 방파 시설물 중 하나이다. 또한 혼성제는 연성체인 경사제와는 달리 강성 구조체이기 때문에 한번 피해가 발생하면 그 피해 규모가 상대적으로 크다. 따라서 혼성제의 최적 단면을 설계하기 위해서는 파력을 정확하게 산정하는 것이 중요하다.

파력 산정을 위하여 많은 연구들이 수행되었는데, 먼저 Hiroi(1919), Sainflou(1928), Minikin(1950) 등은 유의파고를

사용하여 혼성제 설치위치의 수심조건에 따라 중복파와 쇄파로 구분하여 각기 다른 식으로 파력을 산정하였다. Goda(1974)는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 중복파와 쇄파 구분 없이 적용할 수 있는 방법을 제안하였다. 이때 파력산정을 위한 설계파고로 이전과 같은 유의파고가 아닌 최대파고 개념을 사용하였다. Tanimoto et al.(1976, 1981)이 많은 실험적 연구를 수행하여 Goda 파압 산정식의 적용성을 확인하였으며, Takahashi et al.(1994)은 충격쇄파에 대한 영향을 고려할 수 있는 방법을 제시하였다. 최근까지도 Goda의 파압 산정식은 혼성제 케이슨에 작용하는 파력을 산정하는데 가장 일반적으로

*강원대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon, 200-701, Korea, celee@kangwon.ac.kr)

사용되고 있다. 한편 Bruining(1994), Franco et al.(1996) 은 다양한 파랑조건에서 실험을 실시하여 혼성제의 신뢰성 설계에 중요한 자료로 이용될 수 있는 Goda 파압 산정식이 갖는 불확실성과 에너지 집중 및 입사파향에 따른 3차원적인 영향들에 대한 기초적 연구를 수행하였다. CEM(2006)에서는 파력의 불확실성을 입사파고의 불확실성을 이용하여 간접적으로 고려하고 있다. 설계파고로 최대파고를 사용하는 Goda 파압 산정식을 이용함에도 불구하고 유의파고의 불확실성을 사용한다는 모순점이 있다. 한편 일본 항만 구조물 기준서(2009)에서는 CEM(2006)과 다르게 파력의 불확실성을 직접적으로 고려하고는 있으나, 수평파력과 양력이 동일한 불확실성을 갖는다고 가정하였다. 이와 같이 파력에 대한 불확실성이 각기 서로 다른 방법, 다른 값으로 사용되고 있는 이유는 다음과 같이 두 가지로 생각할 수 있다. 먼저 Goda 파압 산정식을 이용하여 파력을 산정하기 위해서는 심해 유의입사파고에 임의의 파랑변형모형을 적용하여 방파제 설치 위치에서의 설계파고인 최대파고를 산정하여야 한다. 비선형 천수 및 쇄파모형을 이용하는 Goda(2000)의 파랑변형모형에 의하면 최대파고는 방파제 설치 위치에서 산정된 유의파고의 1.8배나 방파제로부터 유의파고의 5배 떨어진 심해에서의 파고 중 작은 값으로 정의된다. 따라서 파력을 정확하게 산정하기 위해서는 우선 설계파고인 최대파고를 정확히 산정하는 것이 필요하다. Goda(2000)에 의하면 최대파고를 유의파고의 1.8배로 정의한 것은 단지 제안일 뿐 1.6배나 다른 배율을 사용할 수 있다고 언급하고 있다. 따라서 설계파고인 최대파고 산정과정에 임의로 포함되는 불확실성이 결국은 파력의 불확실성으로 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 또 다른 하나는 Goda 파압 산정식이 현장 및 실험에 의하여 얻어진 많은 경험적 자료와 파동이론을 조합하여 제안된 것이기 때문에 식 자체가 갖는 불확실성이 있을 것으로 판단된다. 이는 다양한 조건에서 수행한 모형실험 결과와의 비교에서 확인할 수 있다(Bruining, 1994; Van der Meer et al., 1995; Franco et al., 1996).

따라서 본 연구에서는 이상의 두 가지 원인에 의하여 발생하는 혼성제 케이슨에 작용하는 파력의 불확실성을 해석하고자 한다. 파고와 파력을 임의의 확률분포함수를 따르는 확률변수로 고려하여 설계파고와 파력의 관계를 직접 해석할 수 있는 파력산정모형을 수립하였다. 또한 파력이 극치분포를 따른다는 가정하에 수평파력과 양력에 대한 상대파력의 개념이 도입되었다. 이는 Goda의 파압 산정식에 의하여 계산된 파력과의 상대적인 비교가 가능하도록 하기 위함이다. 마지막으로 변수들의 불확실성을 올바르게 고려하기 위하여 개발된 MCS(Monte-Carlo simulation) 기법을 이용하여 상대파력과 그 불확실성을 확률론적으로 해석하였다.

2. 파력산정을 위한 최대파고 분석

혼성제 직립 케이슨에 작용하는 파력을 산정하기 위해서는

먼저 설계파고인 최대파고를 산정하여야 한다. Goda(2000)는 비쇄파조건에서 파력 산정을 위한 설계파고로 유의파고가 아닌 다음 식 (1)과 같이 정의되는 최대파고를 제안하였다.

$$H_{max} \equiv H_{1/250} \quad (1)$$

여기서 $H_{1/250}$ 은 유의파고, H_s 의 정의와 동일하게 상위 0.4% 파고들의 평균파고를 의미한다. 이는 파고가 다음 식 (2)와 같이 정의되는 Rayleigh 분포를 따른다고 가정한 것이다.

$$f(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp\left[-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2\right], \quad H \geq 0 \quad (2)$$

여기서 H_{rms} 는 제곱평균제곱근파고(root-mean-square wave height)를 의미한다. 따라서 식 (2)를 이용하면 다음 식 (3)을 얻을 수 있다(Sarpkaya and Isaacson, 1981).

$$\frac{H_{1/n}}{H_{rms}} = \sqrt{\ln(n)} + \frac{n}{2} \sqrt{\pi} [1 - \operatorname{erf}\{\sqrt{\ln(n)}\}] \quad (3a)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3b)$$

식 (3)에 의하면 $H_s = H_{1/3} = 1.416H_{rms}$ 이고, $H_{1/250} = 1.8H_s$ 임을 알 수 있다. 이는 파력을 산정하기 위하여 Goda가 제안한 최대파고, $H_{max} = 1.8H_s$ 와 일치하는 것이다. 또한 식 (2)와 식 (3)을 함께 이용하면 파고변화에 따른 초과확률을 산정할 수 있다. Fig. 1에 제시된 결과에 의하면 유의파고를 초과할 확률은 약 13.5%이고, 최대파고를 초과할 확률은 0.1%이다. 이는 파력을 산정할 때 사용하는 설계최대파고가 실제 발생하는 파고 중 최대파고가 아니라 아주 작지만 0.1%의 초과확률을 갖는다는 의미이다. 따라서 이와 같은 영향이 파력 산정 결과에도 그대로 전달된다고 볼 수 있다.

한편 $H_{max} = H_{1/250} = 1.8H_s$ 는 순수하게 심해 파고가 Rayleigh 분포를 따를 때 성립하는 이론적 관계이다. 따라서 임의의 수심을 갖는 지점에 설치될 방파제에 작용하는 파력을 산정하기 위해서는 하상경사나 파형경사 등 심해파고가 전달되면서 발생하는 천수효과 등에 의한 에너지 변화를 고려하여 최대파

Fig. 1. Exceedance probability with respect to the relative wave height.

고를 산정하여야 한다. 이에 따른 영향을 살펴보기 위하여 비선형 천수 및 쇄파효과를 고려한 Goda(2000)의 파랑변형모형을 이용하여 여러 파형경사에 대하여 최대파고를 산정하였다. 유의파고에 대한 최대파고의 비로 정의된 상대설계파고 결과를 Fig. 2에 제시하였는데, Fig. 2(a)는 일정 하상경사 조건에서 수심변화에 따른 결과이고, Fig. 2(b)는 일정 수심조건에서 하상경사에 따른 결과이다. 전반적으로 수심이 증가함에 따라 상대설계파고가 증가하다가 1.8로 일정하게 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 하상경사 변화에 따른 결과에서는 다르게 나타나고 있다. 중요한 것은 파형경사가 크면 일정 수심이하에서 그리고 하상경사에 따라 상대설계파고가 1.8보다 작으면서 각기 다르게 산정된다는 것이다.

이상의 결과를 Fig. 1의 결과와 함께 해석하면 실제 파력 산정시 사용하는 설계최대파고는 입사파랑의 특성과 방파제 설치 위치의 지형학적 조건에 따라 0.1% 보다 큰 초과확률을 가질 수 있다. 예로 $H_{max}/H_s = 1.7$ 인 경우는 0.3%의 초과확률을 갖게 된다. 이와 같이 파형경사 및 하상경사 그리고 수심에 따라 다르게 산정되는 설계최대파고의 초과확률에 대한 자료는 궁극적으로 방파제의 안전성을 해석하는데 유용할 수 있다. 이를 위해 파력 산정시 대표적으로 사용될 수 있는 범위에 해당하는 상대최대파고와 그 초과확률 그리고 식 (3)으로부터 산정된 동일 크기에 해당하는 파고 $H_{1/n}$ 을 함께 Table 1에 제시하였다.

초과확률은 Fig. 1로부터 쉽게 산정할 수 있으며, Goda(2000)가 제시한 개념과 일치시키기 위하여 유의파고에 대한 상대설계파고로 최대파고를 제시하였다. 만약 파력 산정시 $H_{max} =$

Table 1. Relative design wave heights, exceedance probabilities and

H_{max}/H_s	Exceedance probability (%)	$H_{1/n}$
1.5	1.0	$H_{1/35}$
1.6	0.6	$H_{1/65}$
1.7	0.3	$H_{1/125}$
1.8	0.1	$H_{1/250}$

$1.6H_s$ 를 사용하였다면, 이는 실제 상위 1.5% 파고들의 평균 파고, $H_{1/65}$ 를 설계파고로 사용한 것이고 그 초과확률은 0.6%가 된다.

3. 파력산정모형의 수립

파형경사 및 하상경사 그리고 혼성제 케이스 설치 위치에서의 수심에 따라 설계최대파고가 각기 다르게 산정된다는 것을 알 수 있었다. 또한 설계최대파고의 초과확률에 대해서도 확인할 수 있었다. 따라서 본 절에서는 설계최대파고의 초과확률을 이용하여 파력을 산정할 수 있는 모형을 수립하고자 한다. 이는 설계최대파고의 영향이 그대로 파력산정에 전달되기 때문이다.

혼성제 케이스에 작용하는 파력, X 에 대한 많은 실험 자료를 확률적으로 해석하기 위하여 Franco et al.(1996)은 다음 식 (4)와 같은 정의되는 2변수 Weibull 분포를 사용하였다.

$$f(X) = \frac{b}{a} \left(\frac{X}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{X}{a}\right)^b\right] \quad (4)$$

여기서 a 와 b 는 각각 축척모수와 형상모수이다. 식 (4)를 이용하면 초과확률, $P(X)$ 에 따른 파력 X_p 를 산정할 수 있는 다음 식 (5)를 유도할 수 있다.

$$X_p = a \{-\ln[P(X)]\}^{1/b} \quad (5)$$

여기서 X_p 는 초과확률 $P\%$ 에 해당하는 파력을 의미한다. 축척모수, a 와 형상모수, b 는 모형이나 현장 관측자료를 이용하여 추정해야 한다. Franco et al.(1996)은 3차원 모형실험을 실시하여 축척모수와 형상모수를 추정하였는데 파력의 실험 자료 중 상위 0.4%에 해당하는 파력의 평균을 사용하였다. 이는 Goda 파압 산정식에서 상위 0.4%에 해당하는 파고들의 평균을 파력산정을 위한 설계최대파고로 사용하는 것과 동일한 개념으로 초과확률 0.1%에 해당하는 파력이 된다.

이와 같은 개념을 식 (5)에 적용하면 축척모수, $a = X_{0.1}/(6.908)^{1/b}$ 이 되고, 초과확률 0.1%에 해당하는 관측파력 $X_{0.1}$ 를 Goda 파압 산정식으로부터 산정된 파력, X_G 와 연결시킬 수 있는 변수 $r = X_{0.1}/X_G$ 을 도입하면 다음 식 (6)을 쉽게 얻을 수 있다.

$$X_p = r \left\{ -\frac{\ln[P(X)]}{6.908} \right\}^{1/b} X_G = \xi_p X_G \quad (6)$$

Fig. 2(a). Variation of the relative design wave height with respect to water depth.

Fig. 2(b). Variation of the relative design wave height with respect to bottom slope.

여기서 초과확률 0.1%를 갖는 최대파고를 이용하여 산정된 파력 X_G 의 초과확률도 0.1%라고 가정한 것이다. 따라서 실험에서 관측한 파력 $X_{0.1}$ 도 0.1%의 초과확률을 갖기 때문에 이론적으로는 $r = 1.0$ 이 되어야 한다는 개념이다. 그러나 Goda 파압 산정식은 이미 앞에서 언급된 바와 같이 반 경험적으로 제시된 식이기 때문에 필연적으로 일정 크기의 불확실성을 내포할 수 밖에 없다. 예로 $X_{0.1} = 1.1X_G$ 는 실제 파력이 $H_{max} = 1.8H_s$ 를 이용하여 Goda 파압 산정식으로 부터 산정된 파력, X_G 보다 10% 크다는 의미이다. 그러나 $\xi_{0.1} = 1.1$ 을 산정하는데 관련된 변수 r 과 b 가 상수가 아니라 확률변수라면 $\xi_{0.1}$ 도 임의의 분포함수를 갖는 확률변수가 된다. 동일하게 $X_{0.6} = 1.1X_G$ 도 실제 파력이 $H_{max} = 1.6H_s$ 를 이용하여 Goda 파압 산정식으로 부터 산정된 파력, X_G 보다 10% 크다는 의미이다. $X_{0.1} = 1.1X_G$ 와 $X_{0.6} = 1.1X_G$ 의 차이는 그 파력을 초과확률이 각각 0.1%와 0.6%로 다를 뿐이다. 따라서 ξ_p 의 거동특성을 알게 되면 Goda 파압 산정식을 그대로 이용하면서 현재까지 고려하지 못한 초과확률에 따른 파력과 그 불확실성을 각각 산정할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 식 (6)과 관련된 변수들의 불확실성을 이용하여 초과확률에 따른 수평파력, F_H 와 양력 F_U , 그리고 그 불확실성을 MCS 기법으로 해석하였다.

4. MCS 기법을 이용한 불확실성 해석

초과확률에 따른 수평파력과 양력의 불확실성을 MCS 기법으로 산정하기 위해서는 먼저 식 (6)에 포함된 관련 변수들의 통계적 특성을 알아야 한다. Franco et al.(1996)은 장봉파 및 단봉파 조건에 대하여 3차원 모형실험을 실시하여 Table 2의 자료를 제시한 바 있다. 그 외 다른 자료들을 얻을 수 없어 본 연구에서는 이들 자료만을 이용하였다.

먼저 식 (6)과 Table 2의 자료를 함께 비교하면 초과확률 0.1%를 갖는 수평파력, F_H 에 대한 $\xi_{0.1}$ 의 평균은 0.99, 변동계수는 0.14이고 양력, F_U 에 대한 $\xi_{0.1}$ 의 평균은 0.99, 변동계수는 0.10이다. 따라서 초과확률 0.1%에 대한 Goda 파압 산정식의 파력 산정 정도와 그 불확실성을 알 수 있다. 그러나 그 외의 초과수준에 대해서는 이와 같은 사실들을 쉽게 알 수 없다. 이는 식 (6)의 ξ_p 가 두 변수 r 과 b 로 이루어진 비선형 함수로 수학적으로 해석하는 것이 불가능하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 MCS 기법을 사용하였다.

먼저 ξ_p 의 독립변수인 r 과 b 의 통계적 특성을 Table 2에

Table 2. Statistical properties of the related parameters to Eq. (6)

	r		b	
	μ	σ	μ	σ
F_H	0.99	0.14	1.95	0.67
F_U	0.99	0.10	2.30	0.70

제시하였으나 그 분포함수는 모르기 때문에 본 연구에서는 이들 변수들이 모두 다음 식 (7)의 제약조건을 만족하는 정규분포를 따른다고 가정하였다.

$$\mu_X = \frac{1}{2}(X_l + X_u) \quad (7a)$$

$$COV_X = \frac{1}{k} \left(\frac{X_u - X_l}{X_u + X_l} \right) \quad (7b)$$

여기서 X_l 과 X_u 는 각각 확률변수의 하한치와 상한치를 의미하고, k 는 상한치와 하한치 사이에 자료가 얼마나 집중되어 있는지를 나타내는 계수이다. 식 (7)의 제약조건을 둔 이유는 자료 생성시 형상모수, b 의 값이 음수가 되는 등 물리적으로 의미가 없으면서 해석 결과를 왜곡할 수 있는 자료들을 배제하기 위함이다. Table 2에 제시된 각 확률변수의 통계적 특성과 식 (7)을 이용하면 각 확률변수의 하한치와 상한치를 Table 3과 같이 산정할 수 있다.

이와 같은 개념으로 수평파력과 양력 모두에 대해 확률변수 r 과 b 의 자료를 각각 생성할 수 있다. 파력에 대한 Table 3의 자료를 식 (7)에 대입하면 각 파력의 평균과 변동계수를 구할 수 있고, 이를 난수와 결합하여 정규분포에 대응시키면 된다. 본 연구에서는 각각의 확률변수에 대하여 모두 50,000개의 자료를 생성하였다. 이 중 수평파력에 대한 결과만을 Fig. 3에 제시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 MCS 기법에 의하여 생성된 r 과 b 가 모두 정규분포를 잘 따르고 있다. 따라서 Fig. 3의 자료와 식 (6)을 이용하면 초과확률에 따른 수평파력과 그 불확실성을 해석할 수 있다. 먼저 초과확률 0.1%에서 5.0%까지의 해석 결과를 Table 4에 제시하였다.

변수 r 과 b 의 평균만을 이용하여 결정론적으로 산정한 초과확률에 따른 상대파력을 비교 목적으로 함께 제시하였는데 r 과 b 를 정규분포를 따르는 확률변수로 고려했을 때 산정된 상대파력의 결과와 비교하면 초과확률이 커짐에 따라 일정하게 감소하는 등 전반적으로 유사한 거동 특성을 나타내고 있다. 그러나 상수로 고려했을 때의 결과가 약간 크다. 이는 형상계수, b 의 불확실성에 기인된 것으로 판단된다.

Table 3(a). Lower limit and upper limit of factor, r in Eq. (6)

	k	r	
		r_l	r_r
F_H	3	0.57	1.41
F_U	4	0.59	1.39

Table 3(b). Lower limit and upper limit of shape parameter, b in Eq. (6)

	k	r	
		r_l	r_r
F_H	2	0.61	3.29
F_U	3	0.20	4.40

Fig. 3(a). Simulated result of factor, r for horizontal wave force, F_H .

Fig. 3(b). Simulated result of shape parameter, b for horizontal wave force, F_H .

Table 4. Statistical properties of ξ_p with respect to exceedance probability for horizontal wave force, F_H

Exceedance probability, (%)	ξ_p		
	$r = 0.99$ $b = 1.95$	$r \sim N(0.99, 0.14), b \sim N(1.95, 0.67)$	
		μ	σ
0.1	0.990	0.990	0.139
0.2	0.938	0.932	0.132
0.4	0.883	0.872	0.129
0.8	0.824	0.809	0.129
1.0	0.804	0.787	0.129
2.0	0.740	0.720	0.131
5.0	0.645	0.622	0.134

한편 초과확률에 따른 상대수평파력의 거동특성과 그 불확실성을 해석하여 Fig. 4에 제시하였다. 이때 ξ_p 도 확률변수 r 과 b 와 동일하게 정규분포로 가정하였는데, 이는 ξ_p 에 미치는 형상모수 b 의 영향이 상대적으로 r 보다 작기 때문이다.

Table 1에 제시된 상대설계파고와 그 초과확률을 이상의 결과와 함께 해석하면 다음과 같다. 임의의 파랑변형모형을 이용하여 방파제 설치 위치에서 산정된 상대설계파고, $H_{max}/H_s = 1.8$ 이 아니라 1.5라면 초과확률 0.1%에 대한 파력과 그 불확실성을 사용하는 것이 아니라 1.0%에 해당하는 파력과 그 불확실성을 이용하여야 한다. 따라서 Table 4와 Fig. 4에 제시된 결과를 파력 산정시 사용한 설계최대파고의 초과확률과 연계하면 수평파력의 크기와 그 불확실성을 쉽게 산정할

Fig. 4. Relative horizontal wave forces and its uncertainties with respect to exceedance probability.

Table 5. Statistical properties of ξ_p with respect to exceedance probability for uplift wave force, F_U

Exceedance probability, (%)	ξ_p		
	$r = 0.99$ $b = 2.30$	$r \sim N(0.99, 0.10), b \sim N(2.30, 0.70)$	
		μ	σ
0.1	0.990	0.990	0.100
0.2	0.946	0.942	0.095
0.4	0.898	0.891	0.094
0.8	0.847	0.837	0.095
1.0	0.830	0.819	0.095
2.0	0.773	0.759	0.098
5.0	0.688	0.672	0.104

Fig. 5. Relative uplift wave forces and its uncertainties with respect to exceedance probability.

수 있다.

수평파력에서 수행된 해석 과정을 동일하게 양력에 대하여도 적용하면 초과확률에 따른 양력의 크기와 그 불확실성을 산정할 수 있다. 초과확률에 따라 산정된 결과를 Table 5와 Fig. 5에 제시하였다.

Table 4와 Table 5 그리고 Fig. 4와 Fig. 5를 직접 비교하면 0.1%를 제외한 나머지 동일 초과확률에서 양력에 대한 ξ_p 의 평균은 수평파력보다 더 크고 표준편차가 작다는 것을 쉽게 알 수 있다. 이는 Goda 파압 산정식은 수평파력 보다 상대적으로 양력에 대한 산정 정도가 높다는 의미이다.

마지막으로 이상의 해석 결과들을 검증하기 위하여 신뢰성

Table 6. Comparison of present result with Japan standard(2009) for statistical properties of ξ_p of horizontal wave force, F_H

Japan standard (2009)			Present	
μ	Ω^*	Exceedance probability, $P(X)$ (%)	μ	Ω
0.740	0.239	2.0	0.720	0.182
0.825	0.251	0.8	0.809	0.160

* : coefficient of variation

Table 7. Comparison of present result with Japan standard(2009) for statistical properties of ξ_p of uplift wave force, F_U

Japan standard (2009)			Present	
μ	Ω	Exceedance probability, $P(X)$ (%)	μ	Ω
0.740	0.239	3.0	0.722	0.140
0.825	0.251	1.0	0.819	0.119

해석에서 사용되었던 파력의 불확실성에 대한 자료들과 비교하였다. 동일조건에서 일본 항만 구조물 기준서(2009) 자료와의 비교 결과를 Table 6과 Table 7에 제시하였다.

비록 일본 항만 구조물 기준서의 자료에는 초과확률의 개념이 포함되어 있지 않지만 형식적으로는 식 (6)에 정의된 ξ_p 를 나타내는 것이다. 이는 r 과 b 를 결정론적 상수로 취급하여 산정한 ξ_p 가 일본 항만 구조물 기준서 자료의 편위와 일치해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 Table 4와 Table 5에서 그에 해당하는 초과확률을 산정하고 r 과 b 를 확률변수로 고려하여 산정된 ξ_p 의 통계적 특성을 직접 비교하였다.

먼저 수평파력에 대한 ξ_p 의 통계적 특성을 살펴보면, 평균의 경우는 최대 3.0%의 차이를 보여 일본 항만 구조물 기준서의 자료와 본 연구의 결과가 비교적 잘 일치한다. 그러나 변동계수에서는 본 연구의 결과가 일본 항만 구조물 기준서의 자료보다 24.0%에서 36.0%까지 작다. 또한 양력의 경우는 평균이 최대 2% 차이를 보여 수평파력 보다 더 잘 일치하나, 변동계수의 경우는 최대 53.0%까지 차이가 난다. 이와 같이 차이를 보이는 이유에 대하여는 추가적인 자료를 가지고 앞으로 더 연구해야 한다. 한편 Fig. 4와 Fig. 5를 보면 초과확률이 작을수록 ξ_p 의 평균은 커진다. 이를 분포함수 개념으로 보면 파력이 큰 쪽에서 발생하는 불확실성을 고려할 수 있다는 의미이다.

5. 결 론

혼성제 케이슨에 작용하는 파력의 불확실성을 확률론적으로 해석할 수 있는 MCS 기법을 제시하였다. 동일한 유의 설계과 조건에서도 파형경사 및 해상조건에 따라설계최대파고가 각기 다르게 산정된다는 사실에 주목하여 수평파력 및 양력에 대한 확률론적 산정모형을 수립하였다. 즉, 최대파고의 확률적

특성의 함수로 파력산정모형을 수립하였다. 파력이 극치분포를 따른다는 가정하에 수평파력과 양력에 대한 상대파력의 개념이 도입되었는데, 이는 Goda의 파압 산정식에 의하여 계산된 파력과의 상대적인 비교가 가능하도록 하기 위함이다. 파력산정모형은 극치분포의 축척모수와 형상모수로 이루어진 비선형 함수로 수학적 해석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 이중절단형 정규분포를 이용하여 축척모수와 형상모수의 불확실성을 고려하였다.

모형실험에서 제안된 장봉파 및 단봉파에 대한 통계자료를 이용하여 초과확률에 따른 수평파력과 양력에 대한 상대파력의 거동특성을 해석하였다. 축척모수와 형상모수가 상수인 경우와 확률변수인 경우로 구분하여 해석하였다. 먼저 축척모수와 형상모수를 상수로 취급한 경우에 대하여 초과확률에 따른 상대파력을 정량적으로 산정하였다. 초과확률이 커짐에 따라 수평파력과 양력의 상대파력의 크기는 모두 일정하게 감소하였다. 그러나 동일 초과수준에서 수평파력의 감소 정도가 양력의 그것보다 크게 나타났다. 이는 초과수준이 커짐에 따라 Goda의 파력에서 수평파력의 감소 정도가 양력의 그것보다 크게 발생한다는 의미이다. 한편 축척모수와 형상모수를 확률변수로 고려한 해석이 수행되었는데, 이는 모수를 상수로 취급할 경우 나타나지 않는 상대파력에 대한 불확실성을 해석하기 위함이다. 동일하게 최대설계파고의 초과확률에 따라 상대파력의 평균과 분산을 정량적으로 산정하였다. 먼저 평균을 보면 그 거동특성은 모수를 상수로 취급했을 때와 유사한 경향을 보였다. 그러나 그 크기는 확률변수로 고려한 결과가 상수로 취급한 경우보다 작게 나타났다. 이는 축척모수와 형상모수의 불확실성에 따른 영향으로 판단된다. 또한 상대파력의 불확실성의 정도를 살펴보기 위하여 산정한 분산의 크기도 초과수준에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 상대적으로 보면 양력에 대한 평균값이 수평파력의 평균값보다 크고 변동계수는 작게 산정되었다. 이는 동일조건에서의 초과수준에서 양력에 대한 불확실성이 상대적으로 수평파력의 불확실성보다 작다는 것을 의미한다. 마지막으로 본 연구의 불확실성에 대한 결과를 일본 항만 구조물 기준서의 자료와 비교하였다. 따라서 이상의 결과는 최대설계파고에 따른 파력의 불확실성에 대한 통계적 거동특성을 요구하는 신뢰성 설계 등에서 유용하게 이용될 수 있다. 확률론적으로 파력을 산정하고 그 불확실성을 해석할 수 있는 방법을 제시하였지만 분포함수 등 매우 제한적인 조건 및 자료를 이용하여 해석하였다. 따라서 파력산정모형에 포함된 확률변수들의 다양한 자료를 확보하여 추가적인 해석이 수행될 필요가 있다.

감사의 글

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

참고문헌

- Bruining, J. W. (1994). Wave forces on vertical breakwaters, Reliability of design formula. MSc. Thesis, Delft Univ. of Technology.
- Coastal Engineering Research Center. (2006). CEM(Coastal Engineering Manual), US Army Corps Engineers, Washington D.C., USA.
- Franco, C., Van der Meer, J. W. and Franco, L. (1996). Multidirectional wave loads on vertical breakwaters. Proc. 25th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 2008-2021.
- Goda, Y. (1974). New wave pressure formula for composite breakwaters. Proc. 14th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1702-1720.
- Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures. Univ. of Tokyo Press, Tokyo.
- Hiroi, I. (1919). On a method of estimating the force of waves. Memoirs of Engrg. Faculty, Imperial Univ., X(1), 19.
- Minikin, R. R. (1950). Wind, waves and maritime structures. Charles Griffin and Co., Ltd., London, U.K.
- Sainflou, G. (1928). Essai sur les diques maritimes verticales. Annales des Ponts et Chausees, 98(4).
- Sarpkaya, T. and Isaacson, M. (1981). Mechanics of wave forces on offshore structures. Van Nostrand Reinhold Co., NewYork.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K. (1994). A proposal of impulsive pressure coefficient for the design of composite breakwaters. Proc. Int. Conf. Hydro- Technical Engrg. for Port and Harbor Constr. (Hydro-Port '94) Yokosuka, 489-504.
- Tanimoto, K., Moto, K., Ishizuka, S. and Goda, Y. (1976). An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters, Proc. 23rd Japanese Conf. Coastal Engrg., 11-16.
- Tanimoto, K., Takahashi, S. and Kitatani, T. (1981). Experimental study of impact breaking wave forces on a vertical-wall caisson of composite breakwaters. Rept. Port and Harbor Res. Inst., 20(2), 3-39.
- The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. (2009). Technical Standard and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructures, Transport and Tourism(MLIT), Japan.

원고접수일: 2011년 2월 19일

수정본채택: 2011년 4월 8일(1차)

2011년 6월 10일(2차)

게재확정일: 2011년 6월 13일