

혼성제 기초 마운드의 피복재 안정성에 대한 신뢰성 해석 Reliability Analysis on Stability of Armor Units for Foundation Mound of Composite Breakwaters

이철웅*
Cheol-Eung Lee*

요 지 : 혼성제 사석 기초 마운드 상에 거치되는 피복재의 소요중량을 산정하기 위한 결정론적 해석과 더불어 신뢰성 해석을 수행하였다. 사석 기초 마운드 경사, 피해를 그리고 입사파수를 고려할 수 있도록 안정수 산정을 위한 기존의 경험식을 수정하였다. 수정된 안정식은 기존 경험식을 개발하는 과정에 사용했던 것과 동일 조건에서 수학적으로 일치한다. 먼저 결정론적 설계법으로 임의의 대표단면에 대하여 여러 가지 조건을 변화시키면서 사석 기초 마운드 보호에 필요한 피복재의 소요중량을 산정하였다. 사석 기초 마운드 경사가 급할수록, 입사파수가 증가할수록 기존의 경험식으로 부터 산정된 피복재의 소요 중량보다 더 큰 피복재의 소요중량이 필요함을 확인하였다. 그러나 허용 피해를 크게 부여하면 반대 경향이 나타난다. 한편, 본 연구에서 처음으로 사석 기초 마운드 피복재에 대한 신뢰성 해석이 수행되었는데, 이는 결정론적 설계법으로 산정된 피복재가 얼마나 안정한지를 정량적으로 확인하고, 파괴에 미치는 각 확률변수들의 불확실성에 따른 영향의 정도를 살펴보기 위함이다. 신뢰성 해석 결과에 의하면 기존 경험식이 만족하는 조건에서 산정된 피복재의 소요중량은 재현기간 50년 설계파 조건에서 단위 년에 1%의 피해가 발생할 확률 1.2%를 갖는다. 또한 영향계수 산정 결과에 의하면 입사각에 따라 약간 다르지만 전반적으로 안정계수, 파고 그리고 사석 기초 마운드상의 수심 순으로 파괴에 미치는 영향이 큼을 확인할 수 있었다. 마지막으로 안정수 산정식에 음함수적으로 포함되어 그 영향이 쉽게 확인되지 않는 확률변수의 변화에 따른 민감도 분석이 수행되었다. 해석 결과에 의하면 사석 기초 마운드의 수심이 깊어 질수록 파괴확률이 급격하게 감소하였다. 그러나 반대로 사석 기초 마운드의 폭이 커질수록, 입사 파랑의 주기가 짧을수록 파괴확률은 커지는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 혼성제, 기초 마운드 피복재, 안정수, 신뢰성 해석, 파괴확률

Abstract : Probabilistic and deterministic analyses are implemented for the armor units of rubble foundation mound of composite breakwaters which is needed to protect the upright section against the scour of foundation mounds. By a little modification and incorporation of the previous empirical formulas that has commonly been applied to design the armor units of foundation mound, a new type formula of stability number has been suggested which is capable of taking into account slopes of foundation mounds, damage ratios of armor units, and incident wave numbers. The new proposed formula becomes mathematically identical with the previous empirical formula under the same conditions used in the developing process. Deterministic design have first been carried out to evaluate the minimum weights of armor units for several conditions associated with a typical section of composite breakwater. When the slopes of foundation mound become steepening and the incident wave numbers are increasing, the bigger armor units more than those from the previous empirical formula should be required. The opposite trends however are shown if the damage ratios is much more allowed. Meanwhile, the reliability analysis, which is one of probabilistic models, has been performed in order to quantitatively verify how the armor unit resulted from the deterministic design is stable. It has been confirmed that 1.2% of annual encounter probability of failure has been evaluated under the condition of 1% damage ratio of armor units for the design wave of 50 years return period. By additionally calculating the influence factors of the related random variables on the failure probability due to those uncertainties, it has been found that Hudson's stability coefficient, significant wave height, and water depth above foundation mound have sequentially been given the impacts on failure regardless of the incident wave angles. Finally, sensitivity analysis has been interpreted with respect to the variations of random variables which are implicitly involved in the formula of stability number for armor units of foundation mound. Then, the probability of failure have been rapidly decreased as the water depth above foundation mound are deepening. However, it has been shown that the probability of failure have been increased according as the berm width of foundation mound are widening and wave periods become shortening.

Keywords : composite breakwaters, armor units of foundation mound, stability number, reliability analysis, failure probability

*강원대학교 건축·토목·환경공학부 교수(Professor, Department of Architectural, Civil, and Environmental Engineering, Kangwon National University, 1 Gangwondaehakgil, Chuncheon, Gangwon 24341, Korea. Tel: 033-250-6238, Fax: 033-256-6235, celee@kangwon.ac.kr)

1. 서 론

기후변화에 따른 해수면 상승으로 해양환경이 점점 악화되고 있는 가운데 혼성제 형식의 방파제를 건설해야 하는 경우가 자주 발생하고 있다. 혼성제는 사석 마운드 기초 위에 케이슨을 거치하는 형식으로 설계된다. 케이슨 자체에 대한 안정성은 Goda(2010)의 파압 이론이 정립된 이후로 비교적 잘 해석되고 있다. 안전율에 대한 검토를 넘어서 활동량에 대한 결정론적 해석(Shimosako and Takahashi, 1994) 뿐만 아니라 다중 파괴모드에 대한 확률론적 해석(Lee et al., 2018)도 최근에 많이 수행되고 있다. 그러나 사석 기초 마운드 위에 거치되는 피복재에 대한 연구는 상대적으로 덜 수행되었다. 사석 기초 마운드를 보호하기 위한 피복재는 사석 기초 마운드의 세굴에 따른 상부 케이슨 안정성을 확보하는데 필수적이다. 피복재의 소요중량은 입사 파랑의 체원이나 설치수심, 사석부의 두께, 마운드 전면 어깨 폭, 경사 등의 사석 마운드 형상, 피복재의 종류나 거치방법 그리고 제간부나 제두부 등에 따라 다르다.

먼저 Tanimoto et al.(1982), Wu and Jensen(1983)이 사석 기초 마운드 경사가 일정하다는 가정하에 제간부에 대하여 직각으로 입사하는 비쇄파 불규칙 파랑에 대한 수리모형 실험을 수행하여 사석재 및 콘크리트 블록에 대한 안정수(stability number)를 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다. 이는 Brebner and Donnelly(1962)의 사석재에 대한 규칙파 실험을 확장시킨 것으로, 물리적으로 케이슨 전면 사석 기초 마운드 위에서 가장 취약한 지점의 피복재에 작용하는 항력, 양력 그리고 중량에 대한 힘의 정적 평형방정식을 근간으로 한다. 특히 항력 및 양력은 미소진폭파 이론에서 얻어지는 수 입자의 유속을 이용하여 산정하였다. 그 후 Kimura et al.(1994)이 사석재에 대한 Tanimoto et al.(1982)의 경험식을 임의의 입사각을 가지고 입사하는 파랑에 대하여도 적용 가능하도록 확장하였다. 또한 수치적, 실험적 연구를 동시에 수행하여 제간부 뿐만 아니라 제두부에도 적용 가능한 경험식을 제안하였다. 그러나 Kimura et al.(1994)의 연구는 단순히 사석재에 국한된 경험식으로 사석 기초 마운드의 경사 변화에 따른 영향을 고려할 수 없다는 문제점을 내포하고 있다. 또한 케이슨의 마루높이를 입사파고의 0.6배로 일정하게 하여 상당한 율파가 발생하는 조건에서 입사파수(wave number) 500파에 대하여 피해를 1%를 기준으로 수리모형실험을 한 결과이다. 이에 대한 문제점을 해결하기 위하여 Kimura et al.(1995)이 변형을 허용하는 안정수 산정식을 제시하였다. 또한 CEM(2006)이나 RM(Rock Manual)(2007)에는 이들 경험식 뿐만 아니라 상대적으로 적용이 간단한 Madrigal and Valdes(1995)의 경험식도 함께 제시하고 있다. 직각으로 입사하는 불규칙 파랑과 사석재에 국한된 간편한 경험식이지만 피해를 변화에 따른 적용이 가능한 식이다. 한편 소요중량의 사석재를 확보하기가 어려운 경우에는 콘크리트 블록을 사용해야 한다.

Fujiike et al.(1999)은 추가적인 수리모형실험을 수행하여 Tanimoto et al.(1982)의 콘크리트 블록에 대한 결과를 보완하고, 소파블록 피복재(horizontally-composite breakwaters)에도 적용이 가능하도록 확장하였다.

현재 우리나라 항만 설계기준서에서는 Tanimoto et al.(1982)가 제시하고 Kimura et al.(1994)와 Sudo et al.(1995)이 수정한 변형을 허용하는 경험식을 이용하여 케이슨 전면 사석 기초 마운드 위에 거치되는 제간부와 제두부의 피복재 소요중량을 산정하도록 하고 있다. 앞에서 언급되었듯이 경험식의 제약성으로 인해 적용시 상당한 주의가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 제약성을 해결하기 위하여 기존의 경험식을 하나의 식으로 통합하여 제시하고, 이 식을 이용하여 결정론적 해석과 더불어 확률론적 신뢰성 해석을 수행하였다. 각 확률변수의 파괴에 미치는 영향의 정도와 중요 확률변수의 변화에 따른 파괴확률의 거동 등 민감도 분석을 수행하였다. 한편 CEM(2006)이나 RM(2007)에서 제시된 Madrigal and Valdes(1995)의 경험식에 대한 적용성을 살펴보기 위하여 결정론적 해석을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 2절에 케이슨 전면 사석 기초 마운드 상에 거치되는 피복재의 소요중량을 산정할 수 있는 경험식을 수립하는 과정을 제시하였고, 제 3절에서는 FORM(First-Order Reliability Method) 신뢰성 해석을 수행하기 위한 신뢰함수의 수립과정과 각 확률변수의 불확실성을 제시하였다. 또한 제 4절에서는 Kimura et al.(1994)이 적용한 임의의 대표 단면에 대하여 신뢰성 해석과 민감도 분석을 수행하였다. 마지막으로 제 5절에 결론을 제시하였다.

2. 기초 마운드 피복재의 소요중량 산정식

불규칙 파랑에 의해 혼성제 케이슨 저면 부근에 바닥 흐름이 유발되어 사석 기초 마운드에 세굴이 발생할 수 있다. 이는 상부 케이슨의 안정성에 영향을 줄 수 있어 사석 기초 마운드를 보호하기 위한 피복재를 반드시 설치하여야 한다. 피복재의 소요 중량을 올바르게 산정하기 위해서는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 여러 가지 변수를 고려하여야 한다. 입사 파랑의 체원인 유의파고, H_s 와 유의주기, T_s , 피복재 설치 수심, h' , 케이슨 전면 기초 마운드 폭, B_M 그리고 기초 마운드 경사, $\cot\alpha$ 등의 사석 마운드 형상과 피복재의 종류나 거치 방법이다. 또한 피복재의 설치 위치가 제간부나 제두부에 따라 소요 중량이 달라질 수 있다.

일반적으로 피복재에 대한 최소 소요중량은 Hudson(1959)이 처음으로 제안하고, Brebner and Donelly(1962)에 의하여 수정된 다음 식(1)을 이용하여 산정된다.

$$W = \frac{\gamma_r H_s^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (1)$$

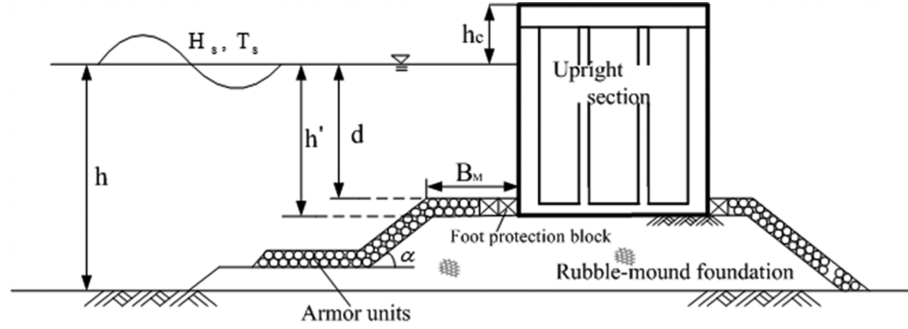


Fig. 1. Definition of cross section of composite breakwaters.

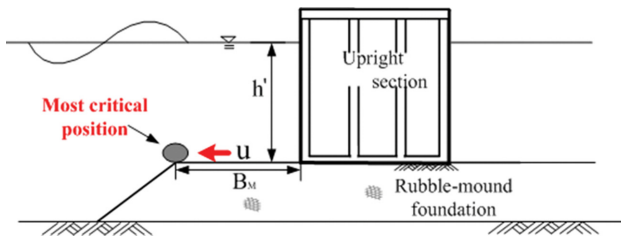


Fig. 2. Conceptual definition for formulation of mathematical model.

여기서 γ_r 은 피복재의 단위중량, $N_s = H_s/(\Delta D_n)$ 으로 정의되는 안정수, $\Delta = (S_r - 1)$, D_n 은 피복재의 대표입경, $S_r = \gamma_r/\gamma_w$, γ_w 는 해수의 단위중량이다. 따라서 식(1)을 혼성제 사석 기초 마운드 피복재에 적용하기 위해서는 안정수 N_s 를 올바르게 산정해야 한다.

이를 위해 Tanimoto et al.(1982), Kimura et al.(1994)은 Fig. 2와 같이 수심 h' 인 케이슨 전면 기초 마운드 위에서 가장 취약한 지점, 즉, 케이슨 전면 사석 기초 마운드의 끝단과 마운드 경사부가 만나는 지점에 설치된 피복재가 가장 위험하다고 가정하였다.

또한 피복재에 작용하는 파랑에 의한 항력, 양력, 그리고 부력 및 피복재 중량에 대한 힘의 정적 평형방정식과 미소진폭과 이론 그리고 불규칙 파랑을 이용한 수리모형실험 결과를 활용하여 $h'/H_s \geq 0.5$ 일 때 제간부에 대한 피복재의 안정수, N_s 를 산정할 수 있는 다음 식(2)를 제안하였다.

$$N_s = A \frac{(1 - \kappa) h'}{\kappa^m H_s} + N_{so} \exp \left[-B \frac{(1 - \kappa)^2 h'}{\kappa^m H_s} \right] \quad (2)$$

여기서 A , B 그리고 m 은 수리모형실험의 결과를 이용하여 결정되는 상수들이고, $N_{so} = (K_D \cot \alpha)^{1/3}$, K_D 는 Hudson 공식의 안정계수(stability coefficient)로 피복재의 종류와 피복 방법 그리고 허용 피해율에 따라 다른 값을 갖는다. 또한 κ 는 무차원 흐름 속도계수(non-dimensional flow velocity coefficient)로 혼성제의 법선과 이루는 입사파랑의 입사각 β 를 고려하여 미소진폭과 이론을 적용하면 다음 식(3)과 같이 정의된다.

$$\kappa = \kappa_1 \kappa_2 \quad (3a)$$

$$\kappa_1 = \frac{4\pi h'/L'}{\sinh(4\pi h'/L')} \quad (3b)$$

$$\kappa_2 = \max \left[\begin{array}{l} \alpha_s \sin^2 \beta \cos^2 \left(\frac{2\pi B_M}{L'} \cos \beta \right) \\ \cos^2 \beta \sin^2 \left(\frac{2\pi B_M}{L'} \cos \beta \right) \end{array} \right] \quad (3c)$$

여기서 α_s 는 경사인자(slope factor)로 0.45이다. Tanimoto et al.(1982)는 기초 마운드 위에 2층으로 피복된 사석재에 대한 수리모형실험 결과를 이용하여 $A = 1.3$, $B = 1.5$ 그리고 $m = 1/3$ 로 제안하였다. 특히 $N_{so} = 1.8$ 로 제안하였는데 이는 $K_D = 2.9$ 과 $\cot \alpha = 2.0$ 에 대한 값이다. 즉, 사석 기초 마운드 경사, $\cot \alpha = 2.0$, 마루높이, $h_c = 0.6H_s$ 로 고정시킨 단면에 대하여 입사파수 500과 조건의 수리모형실험에서 관측된 피복재의 피해율 1%에 대한 결과를 근간으로 한다. 즉, 임의의 다양한 중량의 사석재를 대상으로 유의파고, H_s 와 유의주기, T_s 그리고 피복재 설치 수심, h' , 케이슨 전면 기초 마운드 폭, B_M 을 변화시키면서 수리모형실험을 실시하여 피복재의 피해율을 관측하였다. 피해율 1%에 해당하는 조건에서 식(2)의 안정수 산정식과 실험 결과들을 비교하여 계수, A , B 그리고 m 을 결정하였다.

식(2)를 자세히 살펴보면 Hudson 공식을 근간으로 하고 있다. 이는 $h' = 0.0$ 인 조건에서 쉽게 확인된다. 즉, $h' = 0.0$ 이면 해저면의 마운드가 해상으로 올라오는 경사체의 피복재에 대한 것이 되고, $N_s = N_{so} = (K_D \cot \alpha)^{1/3}$ 가 되어 정확히 Hudson 공식과 일치한다. 그러나 제안된 식(2)에서 $N_{so} = 1.8$ 로 항상 일정해야 한다. 이는 사석 기초 마운드의 경사, $\cot \alpha = 2.0$, 피해율 1% 그리고 입사파수가 500인 조건에서만 적용이 가능하다는 의미이다. 그러나 Van der Meer(1988)에 의하면 경사제 피복재에 대한 안정수는 피해율 또는 피해수준, 입사파수, 경사 등에도 상당히 의존한다. 실제 설계에서는 기초 마운드 경사를 실험조건보다 완만하거나 급하게 설계할 수 있다. 또한 피해율을 1%가 아닌 5%로 허용할 수 있으며, 입사파수도 500파가 아닌 1000파 이상을 사용하기도 한다. 이를 반영하기 위하여 본 연구에서는 Sudo et al.(1995)의 수리모형 실험결과와 변형을 허용하는 개념 그리고 식(2)를 수정하

여 다음 식(4)를 수립할 수 있었다.

$$N_s^* = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \left[\frac{D_N}{\exp \left\{ 0.3 \left(1 - \frac{500}{N_w} \right) \right\}} \right]^{0.25} \times \left[0.722 \frac{(1-\kappa) h'}{\kappa^{1/3} H_s} + \exp \left\{ -1.5 \frac{(1-\kappa)^2 h'}{\kappa^{1/3} H_s} \right\} \right] \quad (4)$$

여기서 D_N 은 % 피해율이고, N_w 는 입사파수이다. 식(4)는 앞에서 언급한 식(2)가 만족하여야 하는 조건, $K_D = 2.9$, $\cot \alpha = 2.0$, $D_N = 1\%$ 그리고 $N_w = 500$ 을 대입하면 정확히 식(2)와 일치한다.

따라서 식(4)를 이용하면 이론적으로 피복재의 종류에 따라 K_D 를 변화시킬 수 있으며, 사석 기초 마운드 경사에 따른 영향도 고려할 수 있다. 또한 피해율과 입사파수도 올바르게 고려할 수 있다. 다만 식(4)를 적용할 때 피복재의 종류에 따라 다르게 결정되는 K_D 를 어떻게 결정하느냐가 문제이다. Tanimoto et al.(1982)의 수리모형실험에서는 사석재를 기준으로 5% 피해율에 대한 $K_D = 4.0$ 을 27.5% 작게 하여 $K_D = 0.725 \times 4.0 = 2.9$ 를 적용하였으며, 이를 피해율 1%에 해당하는 것으로 해석하였다. 그러나 동일한 개념을 TTP와 같은 이형 콘크리트 피복재에 적용할 수 없다. 왜냐하면 이형 콘크리트 피복재의 K_D 는 무한 경사면에서 각 블록 간의 맞물림(interlocking)이 크게 발생하는 조건에서 산정된 결과이기 때문이다(Burcharth, 1993). 그러나 케이슨을 거치하는 사석 기초 마운드는 일정 거리가 평면이고 그 후에 경사면과 만난다. 즉, 사석 기초 마운드 상에 거치되는 피복재는 맞물림의 효과보다 중량에 의하여 그 안정성이 더 많은 영향을 받게 된다. 따라서 이형 콘크리트 피복재에 대한 수리모형실험 결과가 올바르게 제시되기 전까지는 $K_D = 2.9$ 를 사용하는 것이 바람직하다. Brorsen et al.(1974)이 사석재와 Dolos 등 이형 콘크리트 피복재에 대한 수리모형실험을 실시하여 경사에 따른 K_D 의 거동을 해석하였다. 동일한 허용 피해율에 대하여 사석재와 이형 콘크리트 피복재 모두에서 경사가 완만해질수록 K_D 가 작아지는 것을 확인하였다. 이는 경사가 완만해질수록 맞물림의 효과가 작아지기 때문이다. 또한 맞물림의 효과가 매우 작아지면 자중이 중요하기 때문에 사석재나 이형 콘크리트 피복재의 K_D 간에 별 차이가 없게 된다. Burcharth(1993)의 연구에서도 이와 같은 특성을 확인할 수 있다. 그러나 식(4)의 적용범위를 명확히 설정하기 위해서는 추가적인 수리모형실험이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 식(4)와 기존의 경험식 식(2)의 차이를 비교하기 위하여 사석 기초 마운드의 경사와 피해율 그리고 입사파수 변화에 따른 차이를 살펴보았다. 먼저 사석 기초 마운드 경사를 $\cot \alpha = 2.0$ 에서 $\cot \alpha = 3.0$ 으로 완만하게 설계하는 경우는 $N_s^* = 1.14N_s$, 반대로 $\cot \alpha = 1.5$ 로 급하게 설계하

는 경우는 $N_s^* = 0.91N_s$ 이 된다. 따라서 식(1)에 의하면 전자는 중량을 약 32% 감소시킬 수 있으며, 후자는 반대로 약 33% 할증해야 한다. 동일하게 $D_N = 1\%$, $N_w = 1000$ 인 조건에서 $N_s^* = 0.96N_s$ 로 식(2)로 산정된 안정수보다 작게 된다. 이 결과를 식(1)에 대입하면 $N_w = 500$ 기준으로 식(2)를 이용하여 산정된 중량보다 14% 할증된 소요중량이 필요함을 알 수 있다. Van der Meer(1988)에 의하면 평형상태에 도달하는데 필요한 $N_w = 6000$ 까지는 피복재의 피해가 증가하는 경향을 나타낸다. 즉, 입사파수가 커지면 피해가 증가하는데 이를 1% 수준의 피해율로 고정시키기 위해서는 더 큰 소요중량이 필요하다는 것을 의미한다. 또한 $D_N = 5\%$, $N_w = 500$ 인 조건에서는 $N_s^* = 1.50N_s$ 이 되고, $D_N = 5\%$, $N_w = 1000$ 인 경우는 $N_s^* = 1.44N_s$ 가 된다. 즉 동일한 입사파수에서 피해율을 1%보다 많이 허용하면 식(1)에 의하여 피복재의 중량을 감소시킬 수 있고, 반대로 입사파수가 커지면 피복재의 중량을 할증해야 된다. 따라서 본 연구에서 기존의 경험식들을 통합하여 제안한 식(4)를 이용하면 사석 기초 마운드의 경사, 허용 피해율 그리고 입사파수의 영향을 모두 고려하여 안정수를 산정할 수 있다.

한편 서론에서 언급하였듯이 CEM(2006)이나 RM(2007)에서는 앞에서 설명한 식(2)-(4)와 함께 불규칙 파랑에 의한 수리모형실험 결과를 근간으로 Madrigal and Valdes(1995)가 제안한 다음 식(5)와 같은 경험식도 함께 제시하고 있다.

$$N_s = \left(5.8 \frac{h'}{h} - 0.6 \right) N_{od}^{0.19} \quad (5)$$

사석 기초 마운드 상에 2층으로 사석재를 피복하는 경우에 각각으로 입사하는 파랑에 적용 가능한 경험식이다. 적용 한계는 $0.5 < h'/h < 0.8$, $0.3 < B_M/h < 0.55$ 이다. 즉, 사석 기초 마운드 수심, h' 과 케이슨 전면 마운드 폭, B_M 이 혼성제 전면 수심의 함수로 결정되는 경험식이다. 또한 N_{od} 는 피해율과 유사한 의미를 가지는 계수로, $N_{od} = 0.5$ 를 초기피해로 정의하며 이는 $D_N = 1\%$ 피해율에 해당한다. $N_{od} = 2.0$ 은 허용피해를 의미하며 $D_N = 5\%$ 피해율에 해당한다. 식(5)는 수심의 함수로만 제시되어 적용이 간편하지만 식(4)에 비하여 주거나 입사파수의 영향을 직접 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Kimura et al.(1994)이 해석한 대표 단면에 대하여 식(4)와 식(5)를 이용하여 결정론적으로 사석 기초 마운드 보호에 필요한 피복재의 소요중량을 각각 산정하여 비교하였다. 또한 안정성을 정량적으로 산정하기 위하여 식(4)를 이용하여 확률론적 개념에 근거한 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석에서는 각 확률변수들의 불확실성에 따른 영향과 중요 변수의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다.

3. 신뢰함수의 수립

신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 먼저 신뢰함수를 수립해

야 한다. 본 연구에서는 식(4)를 이용하였다. 식(4)는 다양한 종류의 피복재와 사석 기초 마운드의 경사, 허용 피해를 그리고 입사파수의 영향을 모두 고려하기 위하여 기존의 경험식들을 통합하여 본 연구에서 수립된 식이다.

신뢰함수는 저항과 하중의 차로 정의되는 안전여유(safety margin)로 정의되기 때문에 식(4)를 저항과 관련된 변수들과 하중과 관련된 변수들로 분리하면 다음 식(6)의 신뢰함수를 얻을 수 있다.

$$Z = R - S \quad (6a)$$

$$R = A_H \Delta D_n (K_D \cot \alpha)^{1/3} \left[\frac{D_N}{\exp \left(0.3 \left(1 - \frac{500}{N_s} \right) \right)} \right]^{0.25} \times \left[0.722 \frac{(1 - \kappa) h'}{\kappa^{1/3} H_s} + \exp \left\{ -1.5 \frac{(1 - \kappa)^2 h'}{\kappa^{1/3} H_s} \right\} \right] \quad (6b)$$

$$S = H_s \quad (6c)$$

여기서 A_H 는 Hudson의 안정수 K_D 의 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 확률변수이다. 따라서 관련 변수 중 D_N 을 제외한 8개의 변수를 확률변수로 고려하였다. 이는 식(4)가 실험 결과를 이용하여 제시된 경험식이기 때문에 가능하면 많은 불확실성을 고려하기 위함이다. 각각의 확률변수에 대한 불확실성과 분포함수를 Table 1에 제시하였다. 파고 등 표에 제시된 각각의 확률변수에 대한 변동계수, V_{X_i} 는 Goda(2010), Van der Meer(1988) 등 여러 연구자들이 제시한 결과이다. 다만 사석 기초 마운드와 관련된 무차원 흐름 속도계수, κ 와 사석 기초 마운드 위의 수심, h/H_s 에 대한 변동계수는 Tanimoto et al.(1982)이 제시한 실험결과를 이용하여 임의로 설정하였다. 특히 κ 와 h/H_s 는 식(2)에서 언급하였듯이 수리모형실험 결과를 경험식으로 보간하는 과정에 내포되는 불확실성이다. 또한 각각의 확률변수에 대한 평균, μ_{X_i} 는 결정론적 해석에서 사용하는 값이다. 한편 정규분포를 사용하는 다른 확률변수와 달리 파고에 대한 분포함수는 극치분포 중의 하나인 다음 식(7)과 같이 정의되는 Gumbel 분포를 이용하였다. 이는 설계파의 산정과정에 내포되는 불확실성을 올바르게 고려하기 위함이다. 일반적으로 설계파는 극치자료를 이용하여 극치분포에 대한 적합도 분석을 통해 빈도해석으로 산정되기 때문이다.

Table 1. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (6)

#	X_i	μ_{X_i}	V_{X_i} (%)	Distribution
1	A_H	1.0	18.0	Normal
2	Δ	various	3.8	Normal
3	D_n (m)	various	6.7	Normal
4	$\cot \alpha$	various	5.0	Normal
5	κ	various	10.0	Normal
6	h/H_s	various	10.0	Normal
7	H_s (m)	various	16.0	Gumbel
8	N_w	various	50.0	Normal

$$F_{H_s}(x) = \exp[-\exp\{-\zeta(x - \lambda)\}] \quad (7a)$$

$$\mu_{H_s} = \lambda + 0.5772/\zeta \quad (7b)$$

$$V_{H_s} = \frac{\pi}{\sqrt{6}\mu_{H_s}\zeta} \quad (7c)$$

여기서 ζ 와 λ 는 각각 축척모수(scale parameter)와 위치모수(location parameter)로 최우도법이나 모멘트법을 이용하여 추정할 수 있다.

사석 기초 마운드를 보호하기 위하여 설치되는 피복재의 소요량과 관련된 신뢰함수 식(6)을 보면 수학적으로 비선형성이 상당히 강하다. 따라서 본 연구에서는 Level II FORM 기법(Lee et al., 2018)을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 식(6)과 같이 신뢰함수를 구성하는 다차원 공간의 원점에서 파괴면까지의 최단거리인 신뢰지수(reliability index), β_R 를 산정하는 반복 계산법이다. 또한 신뢰함수에 정규분포가 아닌 임의의 분포함수를 따르는 확률변수가 존재해도 Rosenblatt 변환(Rosenblatt transformation)을 사용하면 신뢰지수를 올바르게 산정할 수 있는 방법이다. 신뢰성 이론에 따라 파괴확률, P_f 는 표준정규분포의 누적분포함수, $\Phi(x)$ 를 이용하여 다음 식(8)로 부터 산정할 수 있다(Thoft-Christensen and Baker, 1982).

$$P_f = 1 - \Phi(\beta_R) \quad (8)$$

4. 신뢰성 해석 및 민감도 분석

Kimura et al.(1994)이 식(2)를 이용하여 결정론적으로 해석한 동일 단면에 대하여 신뢰성 해석이 수행되었다. 이는 사석 기초 마운드 피복재에 대한 결정론적 해석과 확률론적 신뢰성 해석을 직접 비교하기 위함이다. 즉, 결정론적으로 산정된 피복재의 안정성을 신뢰성 해석을 통하여 정량적으로 평가하였다.

Fig. 1에 정의된 기호에 따라 혼성제 전면 및 사석 기초 마운드 상의 수심, $h = 13.0$ m, $h' = 9.0$ m이고 혼성제 전면 마운드 폭, $B_M = 8.0$ m, 마운드 경사, $\cot \alpha = 3.0$ 이다. 입사파랑으로 $H_s = 5.0$ m, $T_s = 13.0$ sec이며, 입사각, $\beta = 0^\circ$ 와 $\beta = 60^\circ$ 인 두 가지 경우이다. 제간부를 대상으로 피복재는 $\gamma_r = 2.65$ tf/m³인 사석재이다.

신뢰성 해석을 수행하기 전에 식(4)를 구성하는 변수들간의 거동 특성을 해석하였다. 먼저 Fig. 3에 무차원 흐름 속도계수, κ 와 입사각, β 의 관계를 제시하였다. 식(3)으로 부터 산정된 결과로서 그림에서 볼 수 있듯이 입사각이 커질수록 무차원 흐름 속도계수가 매우 다르게 거동하는 것을 알 수 있다. 직각으로 입사하는 경우, 입사파장에 대한 케이슨 전면 마운드 폭의 비, $B_M/L' \leq 0.15$ 인 구간에서는 증가하다가 그 이후 영역에는 감소하는 경향을 보인다. 그러나 $\beta = 60^\circ$ 인 경우는 전 구간에서 감소하고 있다.

한편 식(4)를 이용하여 산정된 안정수, N_s 와 무차원 흐름 속

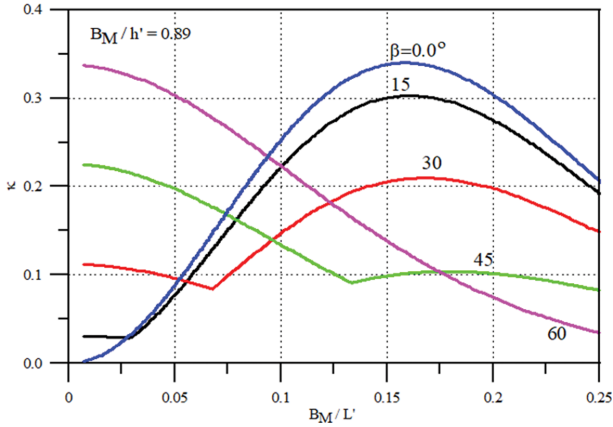


Fig. 3. Variation of κ with respect to incident wave angle, β and relative width of foundation mound to wave length, B_M/L' .

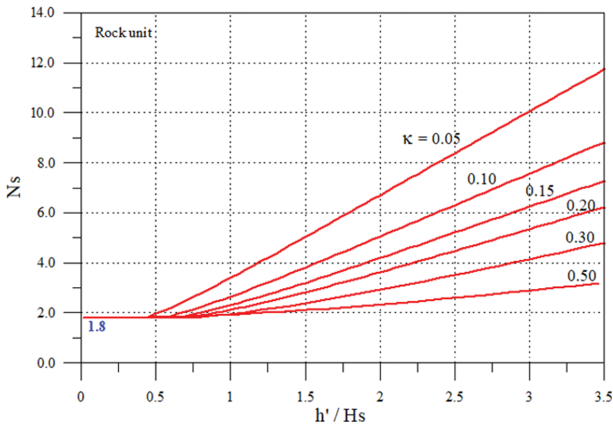


Fig. 4. Variation of N_s with respect to κ and h'/H_s .

도계수, κ 그리고 유의파고에 대한 사석 기초 마운드 상의 상대수심, h'/H_s 의 관계를 나타낸 것이 Fig. 4이다. Tanimoto et al.(1982)에서 제시한 조건 $K_D = 2.9$, $\cot\alpha = 2.0$ 에 대하여 피해율, $D_N = 1.0\%$ 과 입사파수 $N_w = 500$ 에 대한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 동일한 h'/H_s 에서 κ 가 커지면 안정수, N_s 가 작아짐을 알 수 있다. 안정수가 작아지면 식(1)에 의하여 요구되는 피복재의 중량은 커진다. 그러나 동일한 κ 에서 $h'/H_s > 0.5$ 일 때 h'/H_s 가 커지면, 즉, 피복재가 거치되는 기초 마운드의 수심이 깊어지면 안정수는 거의 선형적으로 증가하는 것을 쉽게 알 수 있다.

이상의 결과에 따라 식(1)~(4)를 이용하여 먼저 결정론적으로 산정된 사석재의 중량을 Table 2에 제시하였다. 식(3)에 의한 무차원 흐름속도 계수, κ 뿐만 아니라 식(4)에 의한 안정수, N_s 도 함께 제시하였다. 즉, $B_M/L' = 0.07$, $h'/H_s = 1.8$ 에 해당하기 때문에 Fig. 3과 Fig. 4에서 각각 κ 와 N_s 를 구한 후 식(1)에 대입하면 사석 기초 마운드 상에 거치되는 사석재의 중량을 쉽게 구할 수 있다.

표에서 쉽게 알 수 있듯이 $\beta = 60^\circ$ 로 입사하는 경우가 직각으로 입사하는 경우보다 2.5배 더 큰 중량을 요구한다. 이는 표에서 쉽게 알 수 있듯이 입사각에 따라 영향을 받는 식

Table 2. Minimum weight of armor required for protecting rubble mound foundation

$\beta (^\circ)$	0	60
κ_1	0.863	0.863
κ_2	0.171	0.322
κ	0.148	0.278
N_s	3.790	2.800
W (tf)	1.560	3.880
D_n (m)	0.838	1.136

(3)의 κ_2 에 의한 것이다.

이상의 결정론적 해석 결과를 $K_D = 2.9$, $\cot\alpha = 2.0$, $D_N = 1.0\%$ 그리고 과 함께 Table 1에 대입하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 각각의 확률변수에 대한 영향계수와 파괴확률을 산정하였다. 먼저 파괴확률을 보면 $\beta = 0^\circ$ 인 경우, $P_f = 45.6\%$ 로 $\beta = 60^\circ$ 인 경우의 $P_f = 46.4\%$ 보다 약간 작게 산정되었지만 거의 동일한 파괴확률을 갖는다고 할 수 있다. 즉, 식(4)를 이용하여 $K_D = 2.9$, $\cot\alpha = 2.0$, $D_N = 1.0\%$ 그리고 $N_w = 500$ 인 조건에서 결정론적으로 산정된 피복재의 소요중량은 대략 파괴확률이 46% 정도가 된다는 것을 알 수 있다. 이를 물리적으로 해석하기 위하여 본 연구에서는 하중의 크기를 나타내는 재현기간(return period), 하중의 발생 가능성을 의미하는 조우확률(encounter probability) 그리고 구조물의 내구년수(structure lifetime)를 함께 고려하여 설명하였다. 먼저 식(8)로부터 산정된 파괴확률은 다음 식(9)와 같이 단위 년에 발생할 파괴확률, P_a 와 재현기간 T_R 에 의존한다.

$$P_f = 1 - (1 - P_a)^{T_R} \quad (9)$$

따라서 재현기간 50년 설계파에 대하여 피해율, $D_N = 1.0\%$ 가 발생할 확률 46%를 단위 년에 발생할 확률로 환산하면 1.2%가 된다. 또한 파괴확률 46%는 재현기간 50년에 해당하는 하중 사상이 실제로 발생한다는 조건에서 얻은 결과이다. 따라서 하중 사상의 실제 발생 가능성을 고려하여야 한다. 이를 위하여 다음 식(10)과 같이 정의되는 조우확률을 사용하였다.

$$P_E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^{N_L} \quad (10)$$

여기서 N_L 은 구조물의 내구년수이다. 따라서 내구년수에 따른 파괴확률(lifetime probability of failure)은 다음 식(11)과 같이 정의될 수 있다.

$$P_L = P_E \times P_f \quad (11)$$

따라서 식(11)을 이용하면 내구년수에 따라 피해율, $D_N = 1.0\%$ 가 발생할 확률을 얻을 수 있다. Fig. 5에 식(10)과 식(11)을 이용하여 산정된 결과를 제시하였다. 조우확률도 함께 제시하였는데 그림에서 볼 수 있듯이 피해율, $D_N = 1.0\%$ 가 실제 발생할 확률, P_L 은 내구년수 10년에서 8.4%, 20년에서

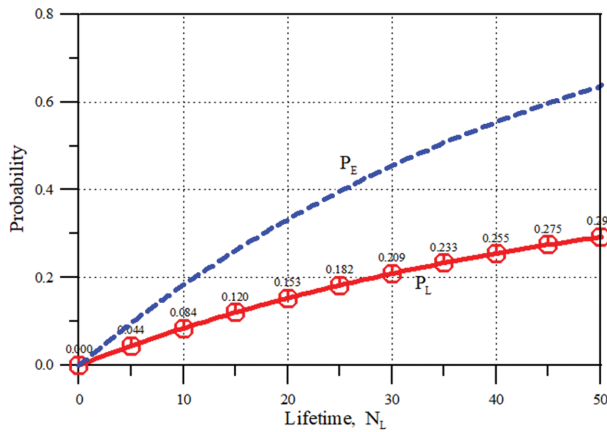


Fig. 5. Encounter probability and lifetime probability of failure.

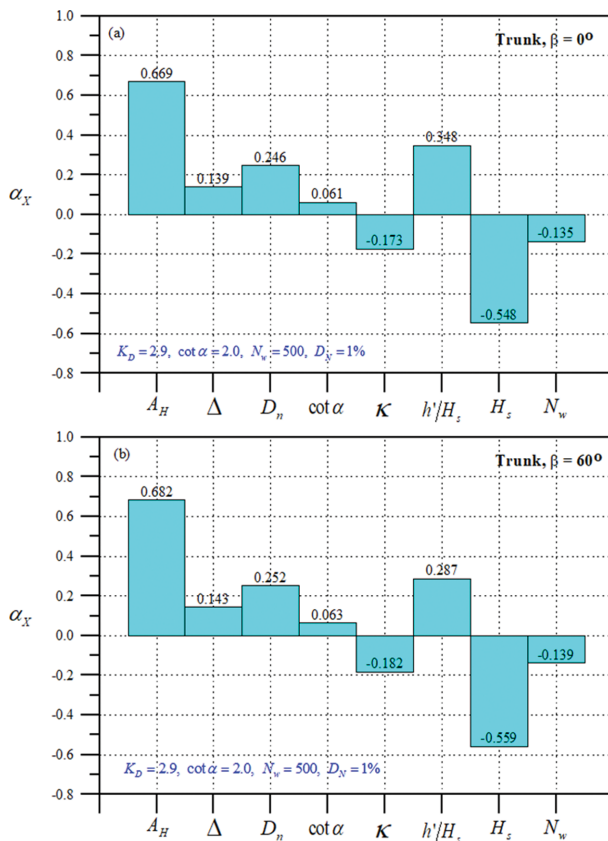


Fig. 6. Value of influence factors of each random variable.

15.3%, 30년에서 20.9%, 40년에서 25.5% 그리고 50년이 되면 29.2%로 완만히 증가한다.

또한 두 조건에 대하여 영향계수(influence factors)를 산정하여 Fig. 6에 제시하였다. 영향계수는 파괴에 미치는 각 확률변수의 영향의 정도를 의미하는 것으로 수학적으로는 임의 벡터의 방향여현(direction cosine)에 해당한다. 따라서 모든 영향계수의 제곱의 합은 1.0을 만족하여야 한다. 그림에서 양수는 저항과 관련된 확률변수를 의미하고, 음수에 해당하는 확률변수가 하중과 관련된 확률변수이다. 신뢰함수에서 하중항에 포함된 유의파고, H_s 뿐만 아니라 저항항에 포함된 무

Table 3. Failure probabilities with respect to the foundation mound slopes

$\cot \alpha$	2.0		3.0	
β (°)	0.0	60.0	0.0	60.0
P_f (%)	45.6	46.4	27.6	27.9

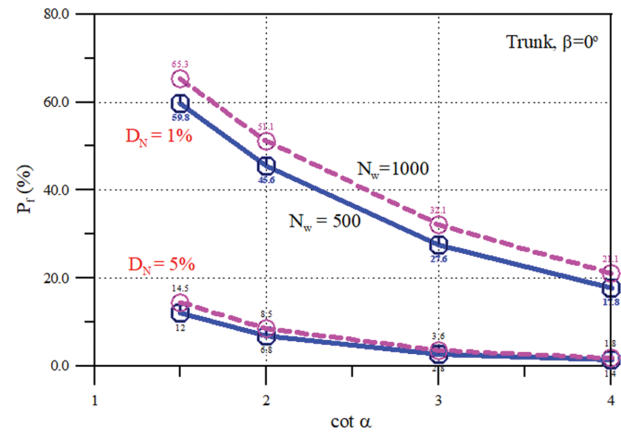


Fig. 7. Variation of failure probability with respect to $\cot \alpha$, D_N and N_w .

차원 흐름 속도계수, κ 와 입사파수, N_w 가 이에 해당한다. 두 조건에서 전반적으로 영향계수의 크기는 유사하나, 특히 입사각이 큰 $\beta = 60^\circ$ 인 경우에 h'/H_s 의 영향이 직각으로 입사하는 경우보다 작게 나타났다. 이는 입사각이 커지면 직각으로 입사하는 경우보다 파괴에 미치는 h'/H_s 의 영향이 상대적으로 작아진다는 것을 의미한다.

한편 Table 2에 제시된 피복재의 소요중량은 앞에서 언급하였듯이 $K_D = 2.9$, $\cot \alpha = 2.0$, $D_N = 1.0\%$ 그리고 $N_w = 500$ 이라는 가정하에 산정된 결과이다. 따라서 중량 산정 조건과 동일하게 설계하여야 하나 실제로 기초 마운드 경사를 $\cot \alpha = 3.0$ 으로 더 완만하게 설계하였다. 따라서 훨씬 더 안정할 것으로 판단된다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 실제 설계 단면, 에 대한 파괴확률을 산정하여 Table 3에 비교하였다.

예상한 대로 $\cot \alpha = 2.0$ 인 조건에서 산정한 피복재를 $\cot \alpha = 3.0$ 인 단면으로 설치하면 파괴확률이 약 40% 감소된다. 앞에서 해석한 조우확률 개념에 의하면 재현기간 50년 설계파에 대하여 단위 년에 피해율, $D_N = 1.0\%$ 가 발생할 확률이 0.65%가 된다.

파괴확률의 거동을 더 확인하기 위하여 제간부에 대하여 직각으로 입사하는 경우에 대하여 기초 사석마운드 경사와 피해율, 입사파수 변화에 따른 파괴확률의 변화를 Fig. 7에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 기초 사석 마운드 경사를 $\cot \alpha = 2.0$ 보다 완만하게 할수록, 피해율을 $D_N = 1\%$ 에서 $D_N = 5\%$ 로 크게 고려할수록 파괴확률은 작아진다. 반대로 기초 사석 마운드 경사를 $\cot \alpha = 2.0$ 보다 급하게 할수록, 입사파수가 커질수록 파괴확률은 급격하게 증가하는 경향을 나타낸다. 이를 앞에서 언급한 대로 식(4)가 피해율 1%에 대하여

평균적으로 46%의 파괴확률을 갖는다는 기준에 맞추면, 사석 기초 마운드 경사를 완만하게 하면 피복재의 중량을 줄일 수 있다는 의미이고 반대로 급하게 설계하면 중량을 오히려 늘려야 한다는 의미이다. 비용 등 여러 가지 문제로 인해 피복재 중량 산정 조건과 다르게 사석 기초 마운드를 더 급하게 설계하는 경우는 이에 대한 상당한 주의가 필요하다.

이상의 결과를 가지고 사석 기초 마운드 피복재의 최소 소요중량 산정에 중요한 영향을 미치는 변수들을 변화시키면서 민감도 분석을 실시하였다. 설계시 결정하여야 할 중요한 변수가 기초 마운드의 수심과 폭이다. 또한 입사파의 유의주기는 식(3)에 의하여 음함수적으로 고려되고 있다. 따라서 이에 대한 영향도 정량적으로 확인하고자 한다.

먼저 파랑이 직각으로 입사하는 $\beta=0^\circ$ 인 경우에 앞에서 언급한 기준 조건과 동일할 때 사석 기초 마운드 상의 수심, h' 만을 변화시키면서 해석하였다. Table 4에 결정론적 설계법으로 결정된 피복재의 최소 소요 대표입경을 제시하였다. 이 결과는 식(4)에 근본적으로 내포된 $K_D=2.9$, $\cot\alpha=2.0$, $D_N=1\%$ 그리고 $N_w=500$ 을 기준으로 산정된 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 사석 기초 마운드 상의 수심, h' 이 작아짐에 따라, 즉, 사석 기초 마운드가 수면에 가까워 질수록 피복재의 대표입경이 크게 요구되는 것을 쉽게 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하면 앞에서 언급한 결과와 동일하게 모든 경우에서 파괴확률이 약 46%로 일정하다. 즉, 식

(4)는 피해를 1%에 대하여 평균적으로 46%의 파괴확률을 갖는다는 것이 확인되었다.

한편 다른 관점에서 $h'=9.0$ m에 대하여 산정된 피복재 $D_n=0.838$ m을 다른 h' 에 적용할 때 나타나는 파괴확률의 변화를 계산하여 Fig. 8에 제시하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 사석 기초 마운드 상의 수심이 피복재 중량 산정시 설정된 조건과 다르게 되면 파괴확률이 매우 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 h' 이 작아지는 경우를 주의해야 한다.

동일한 방법으로 케이슨 전면에 설치되는 사석 기초 마운드의 폭 변화에 따른 피복재의 최소 소요 대표입경과 파괴확률을 산정하였다. 먼저 Table 5에 결정론적 설계법에 의하여 산정된 결과를 제시하였다. 앞에서 제시한 사석 기초 마운드 상의 수심 변화에 따른 결과와는 정반대로 사석 기초 마운드의 폭이 커지면 요구되는 최소 대표입경도 커지는 것을 알 수 있다. 이는 미소진폭과 이론으로부터 유도한 식(3)의 무차원 흐름 속도계수에 의한 영향으로 판단된다.

특히 Table 5에는 CEM(2006)과 RM(2007)에서 사용하는 식 (5)의 결과도 함께 제시하였는데, 이는 앞의 경우와 달리 사석 기초 마운드 폭을 변화시키면 식(5)의 적용 범위, $3.90 \leq B_M \leq 7.15$ 가 만족하기 때문이다. 표에 의하면 식(5)가 식(4)보다 약 1.9배에서 1.4배 까지 더 큰 피복재를 산정한다. 중

Table 4. Minimum nominal diameters of armor with respect to water depth above the rubble mound foundation

h' (m)	κ	N_s	D_n (m)	h'/H_s
6	0.221	2.301	1.382	1.2
7	0.190	2.722	1.168	1.4
8	0.166	3.232	0.983	1.6
9	0.148	3.790	0.838	1.8
10	0.132	4.438	0.716	2.0
11	0.120	5.105	0.623	2.2
12	0.109	5.806	0.547	2.4

Table 5. Minimum nominal diameters of armor with respect to width of the rubble mound foundation

B_M (m)	κ	N_s		D_n (m)	
		Eq. (4)	Eq. (5)	Eq. (4)	Eq. (5)
5	0.060	5.616		0.566	
6	0.085	4.863	2.993	0.654	1.062
7	0.115	4.278		0.743	
8	0.148	3.790		0.838	
9	0.184	3.428		0.927	
10	0.223	3.116		1.020	
11	0.264	2.862		1.111	

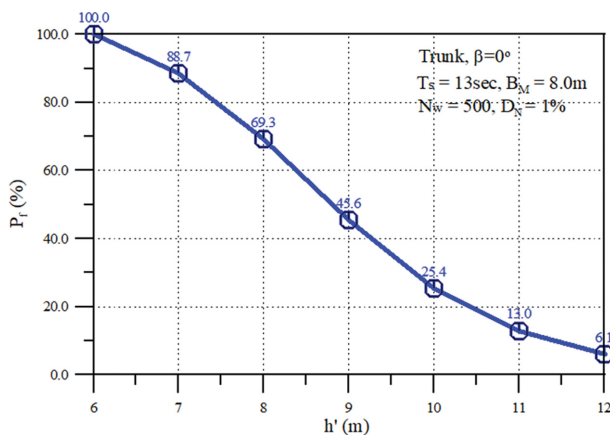


Fig. 8. Variation of failure probability with respect to water depth above the rubble mound foundation.

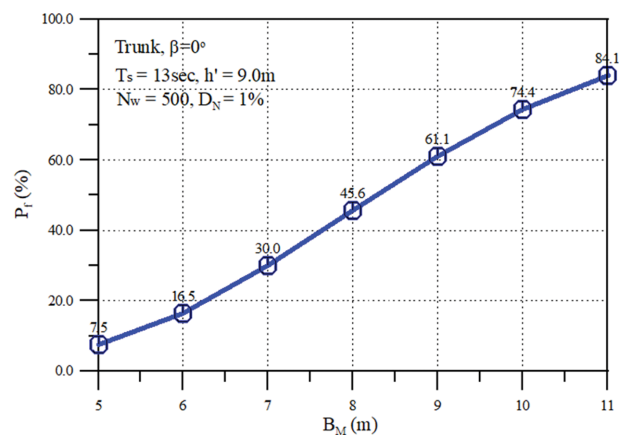


Fig. 9. Variation of failure probability with respect to width of the rubble mound foundation.

량으로 환산하면 6.6배에서 2.9배에 해당하는 차이이다. 또한 신뢰성 해석에 의하여 산정된 파괴확률을 Fig. 9에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 B_M 의 변화에 따라서도 파괴확률이 매우 민감하게 변화하고 있다. 따라서 B_M 을 인위적으로 크게 하는 경우를 주의해야 한다.

마지막으로 입사파랑의 유의주기, T_s 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 먼저 Table 6에 결정론적 설계법에 의하여 산정된 결과를 제시하였다. 주기가 짧아 질수록 피복재의 최소 대표입경이 커지는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 사석 기초 마운드의 폭, B_M 의 변화에 따른 해석에서 언급하였듯이 미소 진폭과 이론으로부터 유도한 식(3)의 무차원 흐름 속도계수는 주기가 짧아질수록 커지고 안정수, N_s 는 작아진다. 결과적으로 식(1)에 의하여 피복재의 소요중량은 커지게 된다. 또한 신뢰성 해석에 의하여 산정된 파괴확률의 거동을 Fig. 10에 제시하였는데 그림에서 볼 수 있듯이 T_s 의 변화에 따라서도 파괴확률이 다르게 나타나고 있다. 거의 선형적으로 거동하면서 앞의 두 결과보다는 상대적으로 변화폭이 크지 않지만 사석 기초 마운드의 피복재 소요중량 산정시 주기에 대한 영향도 무시할 수 없다.

이상과 같이 사석 기초 마운드 상에 거치되는 피복재의 안정성을 정량적으로 산정하기 위하여 본 연구에서 처음으로 확률론적 개념에 근거한 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석 결과에 의하면 기존 경험식이 만족하는 조건에서 산정된 피복재의 소요중량은 피해율 $D_N = 1\%$ 에 대하여 약 46%의

파괴확률을 갖는다. 또한 Hudson의 안정계수, 파고 그리고 사석 기초 마운드상의 수심 순으로 파괴에 미치는 영향의 정도가 높았다. 마지막으로 피복재의 소요중량 산정에 양함수적으로 고려되는 사석 기초 마운드 경사, 허용 피해율 그리고 입사파수와 음함수적으로 고려되는 사석 기초 마운드의 수심과 폭 그리고 주기에 대한 민감도 분석이 수행되었다.

5. 결 론

혼성제 사석 기초 마운드 상에 거치되는 피복재의 중량 산정에 대한 결정론적 해석과 더불어 신뢰성 해석을 수행하였다. Tanimoto et al.(1982)이 제시하고 Kimura et al.(1994)와 Sudo et al.(1995)이 수정한 경험식을 이용하였다. 피복재에 작용하는 파랑에 의한 항력, 양력 그리고 부력 및 피복재 중량에 대한 힘의 정적 평형방정식과 미소진폭과 이론 그리고 불규칙 파랑을 이용한 수리모형실험 결과를 근간으로 제시된 경험식으로 우리나라 항만설계 기준서에서도 활용되고 있다. 그러나 사석 마운드 경사, $\cot\alpha = 2.0$, 피해율, $D_N = 1.0\%$ 그리고 입사파수, $N_w = 500$ 인 조건에서만 적용이 가능하다는 문제점을 내포하고 있다. 실제 설계에서는 사석 기초 마운드 경사를 실험조건보다 완만하거나 급하게 설계할 수도 있으며, 피해율도 다르게 허용할 수도 있다. 특히 입사파수의 경우는 실험조건과 다르게 실제 태풍이 내습할 때의 조건을 고려할 수 있어야 한다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존의 경험식을 수정하고 통합하여 사석 기초 마운드 경사와 피해율 그리고 입사파수를 동시에 고려할 수 있는 새로운 형식을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 식은 앞에서 언급된 수리모형실험 조건에서 정확하게 수학적으로 기존의 경험식을 만족한다. 따라서 본 연구에서 제시한 식과 기존의 경험식의 차이를 비교하기 위하여 사석 기초 마운드의 경사와 피해율 그리고 입사파수 변화에 따른 안정수를 변화를 살펴보았다. 사석 기초 마운드 경사가 급할수록, 입사파수가 증가할수록 기존의 경험식으로부터 산정된 피복재의 소요 중량보다 더 큰 피복재의 소요중량이 필요함을 정량적으로 확인하였다. 그러나 허용 피해율을 크게 부여하면 반대 경향이 나타난다.

이와 같은 기초 해석을 기반으로 본 연구에서 제시된 식을 대표단면에 적용하였다. 먼저 결정론적으로 사석 기초 마운드 보호에 필요한 피복재의 소요중량을 여러 가지 조건을 변화시키면서 산정하였다. Madrigal and Valdes(1995)의 경험식이 적용 가능한 조건에서는 두 결과를 비교하였는데, 비교 결과에 의하면 Madrigal and Valdes(1995)의 경험식이 Tanimoto et al.(1982)의 경험식보다 더 큰 피복재의 소요중량을 산정한다.

한편 사석 기초 마운드 상에 거치되는 피복재의 안정성을 정량적으로 산정하기 위하여 본 연구에서 처음으로 확률론적 개념에 근거한 신뢰성 해석을 수행하였다. 이는 사석 기초 마

Table 6. Minimum nominal diameters of armor with respect to significant period of incident wave

T_s (sec)	κ	N_s	D_n (m)
10	0.224	3.106	1.023
11	0.194	3.337	0.953
12	0.169	3.573	0.890
13	0.148	3.810	0.838
14	0.130	4.044	0.786
15	0.115	4.274	0.744

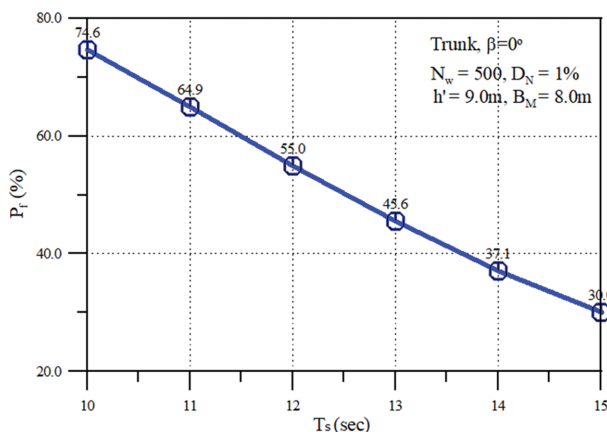


Fig. 10. Variation of failure probability with respect to significant period of incident wave.

운드에 대한 결정론적 해석과 확률론적 신뢰성 해석을 직접 비교하기 위함이다. 즉, 결정론적으로 산정된 피복재가 얼마나 안전한지를 파괴확률 개념에 근거하여 정량적으로 확인하고, 이에 미치는 각 확률변수들의 불확실성에 따른 영향의 정도를 살펴보았다. 신뢰성 해석 결과에 의하면 기존 경험식이 만족하는 조건에서 산정된 피복재의 소요중량은 피해율 $D_N = 1\%$ 에 대하여 약 46%의 파괴확률을 갖는다. 조우확률 개념으로 재현기간 50년 설계파에 대하여 단위 년에 발생할 확률로 환산하면 약 1.2%가 된다. 즉, 단위 년에 사석 기초 마운드 상에 거치된 피복재에 1%의 피해가 발생할 확률이 1.2%라는 의미이다. 또한 파괴에 미치는 각 확률변수의 영향의 정도를 확인하기 위하여 영향계수를 산정하였다. 산정 결과에 의하면 입사각에 따라 약간의 다른 영향을 받으나 전반적으로 Hudson의 안정계수, 파괴 그리고 사석 기초 마운드 상의 수심 순으로 영향의 정도가 높음을 확인할 수 있었다.

또한 신뢰성 해석을 이용하여 사석 기초 마운드에 거치되는 피복재의 소요중량 산정에 중요한 영향을 미치는 변수에 대한 민감도 분석을 자세히 실시하였다. 먼저 신뢰함수에 양함수적으로 고려되는 사석 기초 마운드 경사, 허용 피해율 그리고 입사파수 변화에 대하여 해석하였다. 경사가 급할수록, 허용 피해율이 작을수록, 그리고 입사파수가 클수록 파괴확률이 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로는 신뢰함수에 음함수적으로 고려되어 결정론적 해석법에서는 파악하기 어렵지만 설계시 중요하게 결정되어야 하는 변수인, 사석 기초 마운드의 수심과 폭 그리고 주기에 대한 영향에 대하여도 민감도 분석이 수행되었다. 해석 결과에 의하면 사석 기초 마운드의 수심이 깊어 질수록 파괴확률이 급격하게 감소하였다. 그러나 사석 기초 마운드의 폭이 커질수록, 입사 파랑의 주기가 작을수록 파괴확률이 커지는 것도 확인할 수 있었다. 따라서 혼성제 사석 기초 마운드 상에 거치되는 피복재의 소요중량을 산정할 때 음함수적으로 고려되는 변수들의 거동에 주의해야 한다.

본 연구에서는 $K_D = 2.9$ 를 적용하여 사석재를 대상으로 해석하였으나 TTP와 같은 이형 콘크리트 피복재에 대한 해석도 향후 필요하다. 따라서 불규칙 파랑을 이용한 수리모형실험을 실시하여 사석 기초 마운드 상에 거치되는 해당 이형 콘크리트 피복재의 K_D 를 결정할 수 있는 연구가 추가적으로 수행되어야 한다.

References

- Brebner, A. and Donnelley, D. (1962). Laboratory study of rubble foundation for vertical breakwater, Proc. of 8th Coastal Eng. Conf., ASCE, New Mexico City, USA, 408-429.
- Brorsen, M., Burcharth, H.F. and Larsen, T. (1974). Stability of Dolos slopes, Proc. of 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, Copenhagen, Denmark, 1691-1701.
- Burcharth, H.F. (1993). The design of breakwaters, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.
- CEM (Coastal Engineering Manual), (2006). Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Fujiike, T., Kimura, K., Hayashi, T. and Doi, Y. (1999). Armor block stability of rubble mound foundation for horizontally composite breakwaters. Proc. of Coastal Eng., JSCE, 46, 881-885 (in Japanese).
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures, World Scientific Publishing Co., Singapore.
- Hudson, R.Y. (1959). Laboratory investigation of rubble mound breakwaters. Proc. of ASCE, 85(WW3), 93-121.
- Kimura, K., Takahashi, S. and Tanimoto, K. (1994). Stability of rubble mound foundations of composite breakwaters under oblique wave attack. Proc. of 24th Coastal Eng. Conf., ASCE, Kobe, Japan, 408-429.
- Lee, C.-E., Kim, S.U. and Park, D.-H. (2018). Determination of cross section of composite breakwaters with multiple failure modes and system reliability analysis. J. Korea Water Resour. Assoc. 51(9), 827-837 (in Korean).
- Madrigal, B.G. and Valdes, J.M. (1995). Study of rubble mound foundation stability. Proc. of the Final Workshop, MAst II. MCS-Project.
- Rock Manual (2007). The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), CIRIA C683, London.
- Shimosako, K. and Takahashi, S. (1994). Calculation of expected sliding distance of composite breakwaters. Proc. of Coastal Eng., JSCE, 41, 756-760 (in Japanese).
- Sudo, H., Kimura, K., Sasajima, K., Mizuno, O. and Takeda, B. (1995). Formula for evaluating the required weight of armor units of foundation mound of composite breakwater with allowable damage. Proc. of Coastal Eng., JSCE, 42, 896-900 (in Japanese).
- Tanimoto, K., Yagyu, T. and Goda, Y. (1982). Irregular wave tests for composite breakwater foundations. Proc. of 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, Cape Town, Republic of South Africa, 408-429.
- Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J. (1982). Structural reliability theory and its applications. Springer-Verlag, Berlin.
- van der Meer, J.W. (1988). Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers. J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., 114(1), 66-80.
- Wu, G. and Jensen, O.J. (1983). Stability of rubble foundation for composite breakwaters. Proc. of Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries, 831-841.

Received 21 March, 2023

Revised 12 April, 2023

Accepted 12 April, 2023