韓國海岸·海洋工學會誌
第 13 券 第 1 號, pp. 9~17, 2001年 3月

안전계수에 따른 경사제 피복재의 파괴확률
Probability of Failure of Armor Units on Rubble-mound Breakwater with Safety Factor

이철응* · 안성모**
Cheol-Eung Lee* and Sung-Mo Ahn**

要 旨 : 신뢰성 해석을 위한 직접계산법을 이용하여 경사제 피복재의 파괴확률이 안전계수의 함수로 산정되었다. 신뢰함수를 수립하기 위하여 현재 설계에서 가장 많이 적용되고 있는 Hudson 공식을 사용하였다. 제체의 경사, 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파 그리고 각 확률변수의 상관성에 따른 안전계수와 파괴확률의 관계가 제시되었다. 또한 신뢰함수에 포함된 각 확률변수의 변동계수에 따른 영향이 민감도 분석을 통하여 정량적으로 해석되었다.

핵심용어 : 신뢰성 해석, 직접계산법, 안전계수, Hudson 공식, 파괴확률

Abstract □ A probability of failure of armor units on rubble-mound breakwater are evaluated by using the direct method for reliability analysis, which is represented as a function of safety factor that has been extensively used in practical design. The reliability function is formulated based on Hudson formula suggested for designing the stable size of armor units on rubble-mound breakwater. Several kinds of stability coefficient are applied separately to calculate the probability of failure with respect to the type of armor units, breaking/nonbreaking and the correlation coefficients between random variables. In addition, the sensitivity analyses are carried out to investigate quantitatively into the effects of each random variable in the reliability function on the probability of failure.

Keywords : reliability analysis, direct method, safety factor, Hudson formula, probability of failure

1. 서 론

방파제와 같은 해안 구조물을 설계하는데 현재까지는 결정론적 해석법이 일반적으로 적용되어 왔다. 모형실험이나 현장 관측자료를 근거로 제시된 경험식을 사용할 때 관련 변수들을 결정론적 상수로 취급하여, 임의의 기법으로 추정된 관련 변수들이 일정하다는 가정하에 설계에 필요한 자료를 산정하는 해석법이다. 따라서 결정론적 해석법을 적용하는 과정에는 많은 불확실성들이 내포되게 된다. 이와 같은 불확실성을 크게 두 가지로 구분하면 다음과 같다. 하나는 사용하고자 하는 임의의 경험식이 내포하고 있는 불확실성이다. 일반적으로 경험식은 관측자료를 근거로 차원해석과 보간법을 이용하여 유도되는데, 이때 사용된 관측자료와 제시된 경험식간에 완전한 일치가 존재할 수 없기 때문이다. 다른 하나는 경험식을 적용하기 위해 관련 변수를 추정하는 과정에 가미되는 불확실성이다. 예로 경사제 피복재의 중량을 결정하기 위해서는 먼저 빈도별 설계파고가 결정되어야 한다. 장기간의 현장 관측자료를 근거로 빈도별 설계파고가 결정된다면 그에 따른 불확실성을 상당히 완화시킬 수 있지만, 현실적으로 이와 같은 자료를 확보하는 것이 어렵다. 따라서 제한된 자료를 가지고 극치분포와 같은 확률적 개념을 이용하여 설계파고를 추정하게 된다. 관측자료의 범위를 벗어난 빈도에 해당하는 설계파고를

*강원대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea)
**삼성물산주식회사 토목사업본부(Civil Engineering Division, Engineering Construction Group, Samsung Corporation, Seoul 135-080, Korea)

추정할 때 많은 불확실성들이 가미될 수 밖에 없다. 불확실성을 고려하기 위해 결정론적 해석법에서 현재 일반적으로 이용되고 있는 방법이 안전계수(safety factor)를 도입하는 것이다. 그러나 안전계수 개념을 사용하게 되면 정확한 기준없이 과도설계가 될 가능성이 크고, 안정성과 관련된 상대적 결과만을 얻을 수 있다. 즉, 설계조건 보다 큰 외력이 작용하는 경우에는 구조물이 파괴될 것이고, 그렇지 않은 경우에는 상대적으로 안전하다는 개념이다. 따라서 최적 설계 뿐만 아니라 기존 구조물의 유지 보수에 필요한, 임의의 외력조건에서 발생되는 구조물의 안정성과 관련된 특성, 즉, 파괴확률 그리고 각 변수들의 영향이 해석될 수가 없다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서는 구조물의 안정성과 관련된 각 변수들을 결정론적 상수가 아닌 확률변수로 고려하여 해석하는 신뢰성 이론을 도입하여야 한다.

경사제와 같은 임의의 해안 구조물에 대한 신뢰성 해석을 올바로 수행하기 위해서는 구조물의 파괴를 유발하거나 그 기능 수행능력을 저해시키는 파괴모드에 대한 정의가 먼저 정확하게 수립되어야 한다. 또한 파괴모드가 어떠한 확률변수들로 구성되었으며, 각 확률변수들이 어떠한 통계적 특성에 의존하는지에 대한 이해도 함께 병행되어야 한다. 이(1999, 2000a, 2000b), Takayama and Ikeda(1994), Burcharth *et al.*(1994), Burcharth (1992), PIANC(1992), CIRIA/CUR(1991), Van der Mee(1988) 등의 연구자가 해안 구조물에 대한 안정성을 신뢰성 해석으로 연구한 바 있다. 이들은 모두 단일 파괴모드라는 가정하에 구조물의 저항력을 나타내는 저항함수와 외력의 크기를 나타내는 하중함수의 관계를 수학적으로 정의하는 신뢰함수(reliability function)를 수립하기 위하여 기존에 제시된 경험식을 이용하였다. 예로, 경사제인 경우에는 파랑과 직접적으로 만나는 피복층의 피복재에 의하여 단면의 안정성이 확보된다는 가정하에, 피복재의 적정 중량을 산정하기 위하여 제시된 Hudson의 경험식(SPM, 1984)이나 Van der Meer(1987)의 경험식으로부터 수립된 신뢰함수를 이용하여 피복재의 파괴확률에 대한 제반 특성들이 신뢰성 해석으로 수행되었다. 그러나 이들의 연구는 결정론적인 해석법에 대한 대안으로 신뢰성 해석에 대한 방법론적인 문제와 적용가능성 그리고 각 확률변수들의 영향 정도만을 해석한 것이다. 따라서 적용의 간편성으로 인해 현재 일반적으로 사용되고 있는 안전계수와 신뢰성 해석에 의하여 얻을 수 있는 파괴확률의 관계를 정량적으로 제시하지 못하였다. 즉, 불확실성을 고려하기 위하여 설계자의 경험을 바탕으로 결정된 임의의 안전계수가 얼마의 파괴확률을 갖게될 것인지에 대한 신뢰성 해석을 수행하지 않았다. 결정론적 해석법에서 주로 사용되는 안전계수와 신뢰성 해석에서 얻어지는 파괴확률의 관계를 올바르게 수립하는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 왜냐하면 설계자의 경험과 더불어 신뢰성 해석에서 얻어진 정량적인 파괴확률을 가지고 안전계수를 결정할 수 있는 이론적인 근거를 제공할 수 있기 때문이다. 또한 설계 단계에서부터 다양한 조건에 대한 비교 검토가 비교적 간편하면서도 정확하게 수행될 수 있기 때문에, 경제적이면서 안정적인 방파제 설계가 가능할 수 있다.

이와 같은 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 이(2000a)에 의하여 개발된 신뢰성 해석을 위한 직접계산법을 이용하여 경사제 피복재의 파괴확률이 안전계수의 함수로 산정되었다. 신뢰함수를 수립하기 위하여 현재 설계에서 가장 많이 적용되고 있는 Hudson 공식을 이용하였다. 피복재의 종류와 입사파의 특성 그리고 신뢰함수를 구성하는 각 확률변수들의 상관성에 따른 파괴확률이 신뢰성 해석을 통하여 안전계수의 함수로 제시되었다. 또한 신뢰함수에 포함된 각 확률변수의 변동계수에 따른 영향이 민감도 분석을 통하여 정량적으로 해석되었다.

2. 피복재의 안정성에 대한 신뢰함수의 수립

신뢰성 해석을 올바로 수행하기 위해서는 신뢰함수가 정확하게 수립되어야 하며, 관련된 확률변수들의 통계적 특성들이 올바르게 고려되어야 한다. 일반적으로 신뢰함수는 저항함수와 하중함수의 차로 정의되는데 이를 안전여유(safety margin) 라 하기도 한다. 안전여유는 안전계수와 함께 최적화 이론에서 자주 사용되는 개념이다. 저항함수는 외력에 대하여 저항할 수 있는 관련 확률변수들로 구성되는 반면, 하중함수는 반대로 구조물의 안정성을 약화시키는 외력과 관련된 확률변수들로 구성된다. 경사제의 안정성과 관련하여 하중함수는 파랑과 관련된 변수들로 구성될 것이며, 제체의 경사 및 피복재의 물리적 특성과 관련된 변수들은 저항함수에 포함될 것이다. 경사제는 우리 나라에서 가장 많이 적용되고 있는 방파제 형식으로, 파랑과 직접적으로 만나는 경사제 피복층의 피복재에 의하여 단면의 안정성이 확보된다는 가정하에 Hudson 공식을 이용하여 신뢰함수가 수립되

었다. 경사제의 피복층에 거치될 안정한 피복재의 소요 중량을 산정하기 위하여 제시된 식이기 때문에, 수립된 신뢰함수는 피복재의 안정성과 관련된 단일 파괴모드에 해당한다. 신뢰함수를 수립할 때 주의할 점은, 어떤 확률변수가 저항함수에 포함될 것인지 아니면 하중함수에 포함될 것인지에 대한 판단이다. 본 연구에서는 임의의 확률변수의 값이 커짐에 따라 신뢰함수가 안전영역으로 이동하는 경향을 보이면 해당 변수는 저항함수에 대한 확률변수가 되고, 그 반대의 경우는 하중함수의 확률변수가 된다는 개념을 적용하여 신뢰함수를 유도하였다.

먼저, 경사제 피복재의 안정적인 중량을 산정하기 위하여 현재 가장 일반적으로 이용되고 있는 Hudson 공식은 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$D_{n50} = \frac{H_s}{K_D^{1/3}\Delta(\cos\alpha)^{1/3}} \tag{1}$$

여기서 D_{n50}은 피복재의 대표크기(nominal diameter), H_s는 유의 설계파고, K_D는 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파, 피복층의 두께, 거치 방법 등에 의하여 결정되는 안정상수, $\Delta = \gamma_s/\gamma_w - 1$, γ_s와 γ_w는 각각 피복재 및 해수의 단위중량, cotα는 제체의 경사이다. 따라서 식 (1)의 우변에 있는 모든 변수들이 일정하다고 가정하게 되면, 결정론적인 해석법으로 피복재의 중량을 산정할 수 있다. 앞에서 언급되었듯이 이와 같은 결정론적 해석법으로 피복재의 중량을 산정하게 되면 많은 불확실성이 포함되게 된다. 따라서 이와 같은 불확실성을 고려하기 위하여 현재 일반적으로 적용되고 있는 방법이 다음 식 (2)와 같이 정의되는 안전계수를 도입하는 것이다.

$$S_F = \frac{D_n}{D_{n50}} \tag{2}$$

여기서 D_n은 설계에 적용되는 피복재의 크기를 의미한다. 즉, 식 (2)는 실제 설계에서 적용될 피복재의 크기와 결정론적 해석법으로 산정된 피복재의 크기를 상대적인 비로 나타낸 것이다. 식 (2)의 안전계수는 건설될 경사제의 중요 정도 등에 따라 설계자의 경험을 바탕으로 결정된다. 비록 이와 같은 결정론적 해석법이 적용에 있어서는 매우 간편하나 여러 가지 하중조건과 저항조건에서 경사제의 안정성과 관련된 파괴확률 등을 정량적으로 해석할 수가 없다. 따라서 식 (1)에 포함된 변수들을 임의의 방법으로 추정된 결정론적 상수가 아닌 확률변수로 고려하는 신뢰성 해석기법이 필요하게 된다.

언급된 바와 같이 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 먼저 신뢰함수가 정확하게 정의되어야 한다. 따라서 신뢰함수 수립에 필요한 개념들을 식 (1)에 적용하게 되면 다음 식 (3)과 같이 경사제 피복재의 단일 파괴모드에 대한 신뢰함수를 얻을 수 있다.

$$R = \lambda\Delta D_n K_D^{1/3}(\cot\alpha)^{1/3} - (H_s + F_{H_s}) \tag{3}$$

여기서 λ는 경험식 자체에 내포된 불확실성을 정의하기 위하여 도입된 확률변수이며, 동일하게 F_{H_s}도 유의 설계파고 추정시 내포되는 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 확률변수이다. 식 (3)은 경사제 피복층에 거치된 피복재의 안정성과 관련된 단일 파괴모드로 우변의 첫 항이 저항력을 나타내는 저항함수이고, 두 번째 항이 외력을 나타내는 하중함수이다. 따라서 저항력이 외력보다 작게 되면 $R < 0$되고, 이는 파괴를 의미하게 된다. 반대로 저항력이 외력보다 크게 되는 안정영역에서는 $R > 0$되며, 한계상태에서는 $R = 0$이 된다. 따라서 식 (3)에 포함된 모든 변수를 임의의 통계적 특성을 갖는 확률변수로 고려하게 되면 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 다만 기존의 연구자들에 의하여 수행된 바와 같이 관측자료를 근거로 제시된 안정상수와 같은 변수는 결정론적 상수로 고려할 수 있다. 특히 본 연구의 목적이 식 (1)과 (2)를 이용하여 결정된 피복재의 크기가 실제 얼마의 파괴확률을 갖는지를 정량적으로 규명하는 것이기 때문에 피복재의 크기, D_n도 안정상수와 마찬가지로 결정론적 상수로 취급하였다. 즉, 피복재의 크기를 안전계수의 함수로 변화시키면서 파괴확률을 산정하였다. 제체의 경사, 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파, 거치 방법, 피복층의 두께 등에 따라 SPM(1984)에 각기 다르게 정의된 안정상수를 도입하여, 여러 조건에 대한 파괴확률이 안전계수의 함수로 계산되었다. 각각의 수치실험에서 신뢰함수를 구성하는 확률변수들의 상관성에 따른 영향도 함께 계산되었다. 또한 신뢰함수에 포함된 각 확률변수의 변동계수 변화에 따른 파괴확률의 민감도 분석도 수행되었다.

3. 신뢰성 해석을 위한 직접 계산법

일반적으로 신뢰성 해석에서 임의의 기간 동안에 구조물이 파괴될 확률은 신뢰지수(reliability index)라는 변수를 통하여 계산된다. 신뢰지수는 여러 확률변수들에 의하여 형성되는 다차원 공간상에서 파괴영역과 안전영역

의 경계를 이루는 한계면(limit state surface)으로부터 원점까지의 최단거리를 정의하는 변수이다. 현재 신뢰지수를 구하기 위하여 FORM(First Order Reliability Method)에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 해석법이 AFDA (Approximate Full Distribution Approach)이다. 이(1999, 2000a)가 언급한 바와 같이 AFDA에서는 확률변수들을 정규화하는 과정이 필요하게 되며, 특히 관련 확률변수들이 서로 독립이 아닌 경우에는 고유치와 고유벡터를 반복적으로 구해야 하기 때문에 계산과정이 복잡해진다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 과정을 하나도 거치지 않으면서 신뢰지수와 파괴확률을 직접적으로 계산할 수 있는 방법을 사용하였다. 신뢰함수로부터 신뢰지수와 파괴확률을 구하는 해석절차가 이(2000a)에 자세히 언급되어 있기 때문에 본 논문에서는 직접 계산법에 대한 개념만 설명하겠다.

확률변수들 사이에 임의의 상관성을 갖는 다차원 공간상에서 파괴영역과 안전영역의 한계면을 나타내는 신뢰함수를 다음 식 (4)와 같이 일반적으로 정의할 수 있다.

$$R(X) = 0 \tag{4}$$

여기서 $X = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$는 신뢰함수를 구성하고 있는 확률변수이다. 확률변수, X는 평균, $\mu_X = [\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \cdots, \mu_{x_n}]^T$과 표준편차, $\sigma_X = [\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \cdots, \sigma_{x_n}]^T$를 가지며, 임의의 두 확률변수, x_i와 x_j 사이에는 공분산 $\sigma_{x_ix_j}$가 존재한다. 따라서 모든 변수들 사이의 상관성은 공분산 행렬, V_X에 의하여 정의될 수 있다.

앞에서 언급되었듯이 신뢰지수는 여러 확률변수들에 의하여 형성되는 다차원 공간상에서 파괴영역과 안전영역의 경계를 이루는 식 (4)의 한계면으로 부터 원점까지의 최단거리를 정의하는 변수이다. 따라서 식 (4)를 Taylor 전개하여 1차까지 취한 다음, 다차원 공간상에 형성되는 한계면의 연직벡터 개념을 사용하게 되면 신뢰지수를 직접적으로 구할 수 있는 다음 식 (5)를 얻을 수 있다(이, 2000a).

$$\beta = \left|(X_o - \mu_X)^T (\nabla R)_o [(\nabla R)_o^T V_X (\nabla R)_o]^{-1/2}\right| \tag{5}$$

여기서 $(\nabla R)_o = [\partial R/\partial x_1, \partial R/\partial x_2, \cdots, \partial R/\partial x_n]_o^T$ 으로 한계면에 있는 설계점, X_o에서 계산된 미분계수이다. 따라서 신뢰지수를 계산하기 위해서는 한계면상에 존재하는 설계점, X_o의 값을 알아야 한다. 설계점, X_o는 허용된 오차 범위내에서 임의로 가정된 초기치 X_o'과 다음 식 (6)을 이용하여 반복적으로 쉽게 구할 수 있다.

$$X_o'' = \mu_X + V_X (\nabla R)_o' \frac{(X_o' - \mu_X)^T (\nabla R)_o'}{(\nabla R)_o'^T V_X (\nabla R)_o'} \tag{6}$$

따라서 이와 같이 결정된 설계점, X_o를 식 (5)에 대입하면 신뢰지수를 구할 수 있으며, 그에 따른 파괴확률도 다음과 같은 과정을 이용하여 구할 수 있다.

신뢰성 해석에서 주어진 신뢰함수를 따르는 단일 파괴모드에 대한 파괴확률은 다음 식 (7)과 같이 정의된다.

$$P_f = \int_{R(X)\le 0} f_X(X)\,dX \tag{7}$$

식 (7)에서 적분구간, $R(X)\le 0$는 물리적으로 저항력이 외력보다 작게 형성되는 구간을 의미한다. 따라서 식 (7)을 풀기 위해서는 신뢰함수에 대한 확률밀도함수를 알아야 한다. 현재, 신뢰성 해석에서 사용되고 있는 가장 중요한 가정은 신뢰함수가 정규분포를 따른다는 것이다. 이와 같은 가정을 도입하게 되면, 파괴확률을 정의하는 식 (7)은 신뢰지수의 함수로 다음 식 (8)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \tag{8}$$

여기서 Φ는 표준정규분포의 누가확률밀도함수이다. 따라서 신뢰지수를 구하게 되면 파괴확률은 식 (8)로 부터 쉽게 구할 수 있다.

한편, 이상의 과정은 신뢰함수에 포함된 모든 확률변수들이 정규분포를 따른다는 가정하에 유도된 것들이다. 따라서 어떤 확률변수가 정규분포가 아닌 다른 임의의 확률분포를 갖게 되는 경우에는 적용이 불가능하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 Rosenblatt의 확률분포 변환기법을 사용하는 등가정규분포(equivalent normal distribution) 개념을 도입하였다. 즉, 한계면상에 있는 임의의 점, X_o에서 정규분포를 따르지 않는 분포함수의 확률밀도크기와 누가확률밀도가 등가정규분포의 그것들과 일치한다는 개념으로, 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다(Ang and Tang, 1984).

$$\Phi\left(\frac{X_o - \mu_X^N}{\sigma_X^N}\right) = F_X(X_o) \tag{9}$$

여기서 μ_X^N과 σ_X^N는 각각 확률변수 X_o에 대한 등가정규분포의 평균과 표준편차이고, $F_X(X_o)$는 X_o에서 계산된 누가확률밀도이다. 따라서 임의의 확률분포함수와 한계면상에 있는 X_o의 값을 가지고 등가정규분포의 평균과 표

준편차를 구할 수 있다. 먼저, 식 (9)를 변환시키면 등가정규분포의 평균은 다음 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\mu_X^N = X_o - \sigma_X^N \Phi^{-1}[F_X(X_o)] \tag{10}$$

또한 식 (9)를 양변 미분한 다음, 식 (10)을 대입하게 되면 등가정규분포의 표준편차를 구할 수 있으며, 이는 다음 식 (11)과 같이 정의된다.

$$\sigma_X^N = \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F_X(X_o)\}]}{f_X(X_o)} \tag{11}$$

여기서 $\phi(x) = (1/\sqrt{2\pi})e^{-x^2/2}$로, 표준정규분포의 확률밀도함수이고, $f_X(X_o)$는 임의의 확률밀도함수이다. 따라서 임의의 확률분포함수를 따르는 확률변수는 식 (10)과 (11)에 의하여 계산된 평균과 표준편차를 가지고 정규분포를 따르게 된다. 그러므로 정규분포를 따르지 않는 변수가 존재할 경우에는 신뢰지수를 계산하기 위해서 반드시 등가정규분포의 평균과 표준편차가 먼저 산정되어야 한다.

이상의 신뢰성 해석을 위한 직접계산법의 해석과정에서 알 수 있듯이 임의의 구조물에 대한 신뢰성 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 먼저 외력과 저항력의 관계를 잘 나타낼 수 있는 신뢰함수를 정확하게 정의하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위한 신뢰함수가 이미 제 2절에서 수립되었기 때문에, 이하에서는 식 (3)을 직접계산법에 적용하기 위하여 정의되어야 하는 각 확률변수들의 통계적인 특성, 평균과 표준편차 그리고 분포함수의 결정과정 및 적용 결과에 대하여 언급하겠다.

4. 안전계수에 따른 파괴확률의 거동특성

식 (3)에서 수립된 신뢰함수를 직접계산법에 적용하기 위해서는 먼저 관련된 모든 확률변수들에 대한 평균과 표준편차 그리고 분포함수가 정의되어야 한다. Van der Meer(1988), PIANC(1992), Burcharth(1992) 등의 연구자들에 의하여 이에 대한 연구가 수행된 바 있다. 기존 관련 연구들을 종합적으로 분석하여 식 (3)에 포함된 각 변수들에 대한 통계적 특성들이 정의되었다. 본 연구에서 사용된 각 확률변수들의 통계적 특성들이 Table 1에 제시되어 있다. 표에서 볼 수 있듯이 유의 설계파고를 제외한 다른 확률변수들은 정규분포를 따른다고 가정하였다. 파고에 대한 분포는 극치분포 Type I에 해당하는 Gumbel 분포를 따른다고 가정하였다. 결정론적 해석법에서도 유의 설계파고를 추정하기 위하여 Weibull이나 Gumbel과 같은 극치분포를 이용하고 있기 때문이다. 따라서 이상 정의된 확률변수들의 통계적 특성을 이용하면 쉽게 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 이때 식 (9)에 언급되었듯이 먼저 정규분포를 따르지 않는 확률변수에 대한 분포함수가 수학적으로 정의되어야 한다. 유의 설계파고에 대한 Gumbel 분포함수는 다음 식 (12)와 같이 정의된다.

$$f_y(y) = Ae^{[-e^{A(y-B)}]}e^{-A(y-B)} \tag{12}$$

여기서 A와 B는 분포특성을 나타내는 변수로 극치분포에 대한 확률 이론을 적용하게 되면 다음 식 (13)과 같은 간단한 수학적 정의에 의해 쉽게 구할 수 있다.

$$A = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma_y} \tag{13a}$$

$$B = \mu_y - \frac{\gamma}{A} \tag{13b}$$

여기서 γ는 Euler 상수로 0.57722이다. 그러므로 안정상수와 Table 1에 주어진 확률변수들의 통계적 특성을 가지고 안전계수를 변화시키면서 신뢰성 해석을 수행하게 되면 임의의 안전계수에 따른 경사제 피복재의 파괴확률을 구할 수 있다. 동일한 조건에서 경사제 피복재의 파괴확률 예측에 대한 검증이 이미 이(2000a, 2000b)에 의하여 수행되었기 때문에, 본 연구에서는 피복재의 종류와 제체의 경사를 변화시키면서 계산된 안전계수와 파괴확률의 관계에 대하여 설명하겠다. SPM (1984)에 제시된 자료를 근거로 피복재의 종류와 제체의 경사에 따른 안정상수가 선택되었다. 쇄파 및 비쇄파 그리고 피복재의 종류에 따른 Hudson 공식의 거동특성을 해석하고자 여러 가지의 안정상수가 선택되었는데, Table 2에 본 연구의 수치실험에서 사용된 조건을 제시하였다.

경사제 제체의 경사, $\cot\alpha = 1.5$인 경우에 안전계수와

Table 1. Statistical properties of random variables in reliability function of Eq. (3)

#	X_i	μ_{X_i}	σ_{X_i}	Distribution
1	λ	1.0	0.18	Normal
2	Δ	1.6	0.06	Normal
3	$\cot\alpha$	1.5, 2.0	0.10	Normal
4	F_{Hs} (m)	0.0	0.25	Normal
5	H_s (m)	4.4	0.70	Gumbel

Table 2. Structure slope, cotα and stability coefficient, K_D used in the present numerical tests

No-damage criteria and minor overtopping					
cotα	Armor Units	Layer	Placement	K_D	
				Breaking	Nonbreaking
1.5, 2.0	Quarrystone with Rough angular	2	Random	2.0	4.0
	Tetrapod	2	Random	7.0	8.0

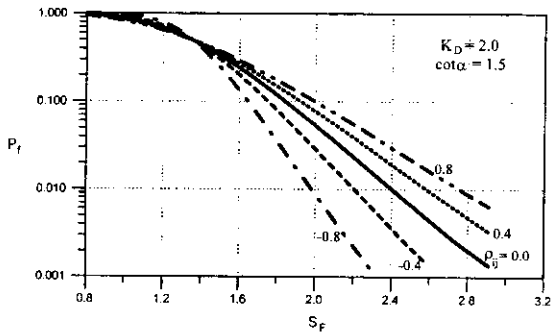

Fig. 1. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for K_D= 2.0 and cotα = 1.5.

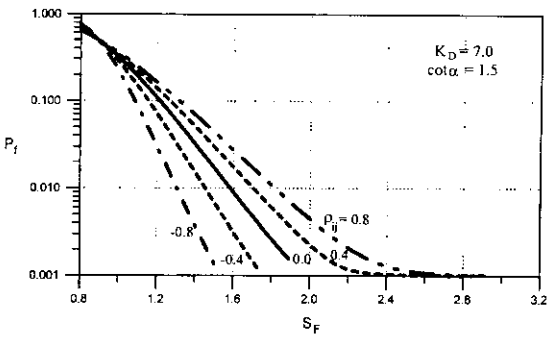

Fig. 2. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for K_D= 7.0 and cotα = 1.5.

파괴확률에 대한 각각의 계산 결과가 Fig. 1~4에 제시되었다. 여기서 Fig. 1과 2는 쇄파조건에 대한 결과이며, Fig. 3과 4는 비쇄파 조건에 대한 결과이다. 또한 각각의 결과에는 신뢰함수, 식 (3)에 포함된 각 확률변수들의 상관계수에 따른 영향 정도가 같이 제시되었다. 먼저, K_D= 2.0, 쇄파조건에서 사석재에 대한 파괴확률을 나타낸 Fig. 1을 살펴보자. 비록 제한적인 해석결과이긴 하나 Fig. 1로부터 중요한 사실들을 확인할 수 있다. 하나는 사석재를 경사제의 피복재로 사용하는 경우에 쇄파조건에서 Hudson 공식은 피복재의 중량을 과

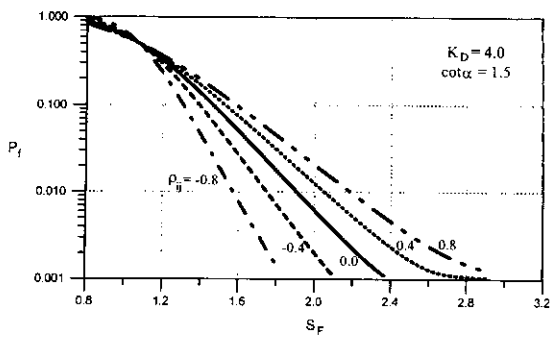

Fig. 3. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for K_D= 4.0 and cotα = 1.5.

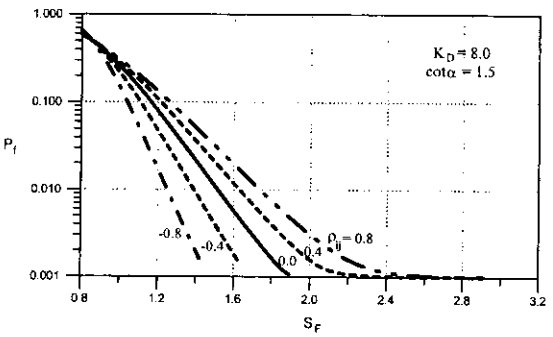

Fig. 4. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for K_D= 8.0 and cotα = 1.5.

소 산정한다는 것이다. 안전계수, S_F= 1.0인 경우에 확률변수들의 상관성에 관계없이 피복재의 파괴확률이 90% 정도가 되기 때문이다. 비록 경사제의 파괴가 교량이나 건축물과 같이 직접적인 인명의 손실과 이어지지는 않으나 파괴확률이 90%가 된다는 것은 많은 경제적 손실을 가져오기 때문이다. 따라서 쇄파조건에서 사석재를 경사제의 피복재로 사용할 때, 파괴확률이 30% 내외의 범위를 만족시키기 위해서는 결정론적 해석법으로 산정된 피복재의 크기보다 1.6배 이상 되게끔 설계하여야 한다. 즉, 안전계수가 1.6 이상이 되어야 한다. 또 다른 사실은 안전계수가 2.0보다 크게 되면 파괴확률이 10% 미만이 되어 과도설계가 될 위험성이 있다는 것이다. 이때 각 확률변수간의 상관성에 따라 파괴확률의 차이가 크게 나타나고 있으나 파괴확률이 10% 미만인 경우이기 때문에 상관성에 따른 영향은 큰 의미를 갖기 않는다고 할 수 있다. 왜냐하면 일반적으로 방파제 설계에서 적용되는 파괴확률의 범위가 30%~40% 정도이기 때문이다(PIANC, 1992). 경사제의 설치 위치 및 목적에 따라 부여되는 파괴확률의 정도가 다르겠지만 일반적인

설계를 기준으로 해석한다면, 쇄파조건에서 사석재로 피복된 경사제를 건설할 경우에는 약 1.6정도의 안전계수를 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다. Fig. 1의 결과가 자연 사석재에 대한 결과인데 반해, Fig. 2는 인공 피복재의 한 종류인 TTP에 대한 결과이다. 자연 사석재에 대한 결과와는 다르게 인공 피복재인 경우에는 Hudson의 공식에 의하여 산정된 피복재의 크기가 일반적인 파괴확률의 범위를 만족시킨다고 할 수 있다. 신뢰함수에 포함된 각 확률변수들의 상관성에 따라 약간 다르게 나타나고는 있으나 안전계수가 1.0인 경우의 파괴확률이 약 33%정도이기 때문이다. 따라서 쇄파조건의 인공 피복재인 경우에는 안전계수를 1.1~1.2 정도로 설계하게 되면 30% 미만의 파괴확률을 유지할 수 있다고 판단된다. 이상의 Fig. 1과 2에 대한 결과는 쇄파조건에 대한 결과이다. 앞에서 언급되었듯이 동일한 피복재 형태에 대한 비쇄파조건에서의 결과가 각각 Fig. 3과 4에 제시되었다. Fig. 3은 자연 사석재에 대한 결과이고, Fig. 4는 인공 피복재에 대한 결과이다. 각각의 그림에서 알 수 있듯이 안전계수 1.0에서 자연 사석재의 파괴확률은 약 58%, 인공 피복재의 파괴확률은 약 26% 정도로 나타나고 있다. 쇄파조건인 경우의 결과보다는 파괴확률이 작게 나타나고 있으나, 여전히 자연 사석재인 경우의 파괴확률이 약간 크게 나타나고 있다. 그러나 상관성에 따른 영향은 Fig. 1과 2의 결과와 동일하게 안전계수가 상대적으로 큰 범위에서만 나타나고 있다. 따라서 쇄파조건에 상관없이 자연 사석재를 경사제 피복재로 사용하는 경우에 Hudson 공식에 의하여 산정된 사석재의 중량은 과소 평가될 가능성이 크다고 하겠다. 그러나 인공 피복재인 경우에는 적정한 파괴확률 범위에서 산정되는 것으로 판단된다. 이상의 결과와 해석 방법을 이용하게 되면 설계자는 경사제의 설치 위치 및 목적에 부응하는 파괴확률을 가지고 안전계수를 결정할 수 있는 이론적인 근거를 확보할 수 있다.

한편, SPM(1984)에 제시된 Hudson 공식의 적용 범위내에서 경사제 제체의 경사를 변화시키면서 안전계수와 피복재의 파괴확률을 계산하였는데, $\cot\alpha = 2.0$에 대한 결과들이 Fig. 5~8에 제시되었다. 제체의 경사가 완만해짐에 따라 파괴확률이 감소하는 것을 제외하고는 전반적인 거동특성들이 앞의 Fig. 1~4에서 알 수 있었던 거동특성들과 정성적으로는 유사하게 나타나고 있다. 그러나 앞의 결과들에서 나타나지 않았던 사실이 인공 피복재의 결과, Fig. 6과 8에서 나타나고 있다. 앞의 결과들, Fig. 2와 4에서는 각 확률변수들의 상관성에 따른 영향이 안전계수가 1.0보다 상대적으로 큰 범위에서만 나타났으나, Fig. 6과 8의 결과에서는 안전계수가 1.0인 경우에도 크게 나타나고 있다. 특히 안전계수가 1.0보다 작은 0.8인 경우에도 인공 피복재의 파괴확률이 약 50% 내외로 예측되고 있다. 비록 제한적인 해석 결과이긴 하나, 제체의 경사가 완만해질수록 Hudson 공식

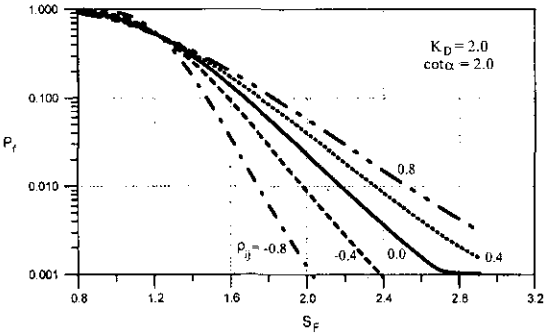

Fig. 5. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for $K_D = 2.0$ and $\cot\alpha = 2.0$.

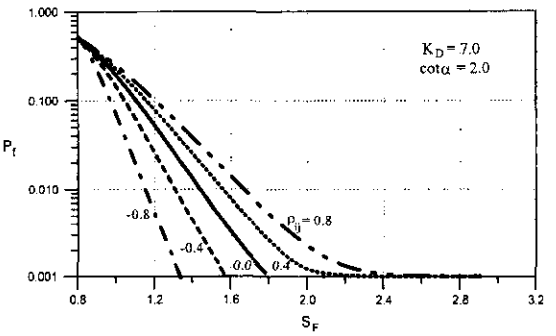

Fig. 6. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for $K_D = 7.0$ and $\cot\alpha = 2.0$.

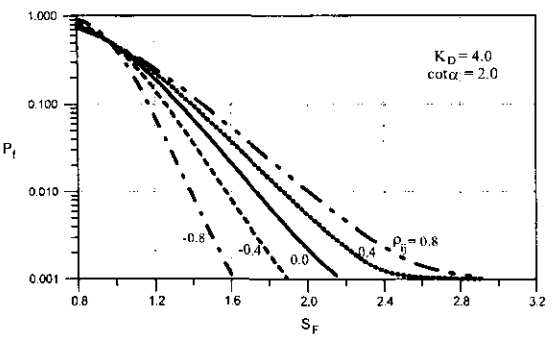

Fig. 7. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for $K_D = 4.0$ and $\cot\alpha = 2.0$.

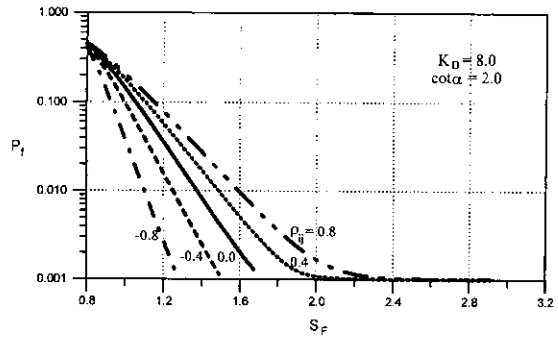

Fig. 8. Probability of failure with respect to ρ_{ij} as function of safety factor for $K_D = 8.0$ and $\cot\alpha = 2.0$.

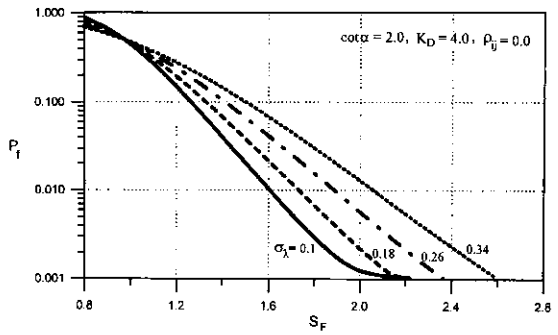

Fig. 9. Probability of failure with respect to σ_λ as function of safety factor.

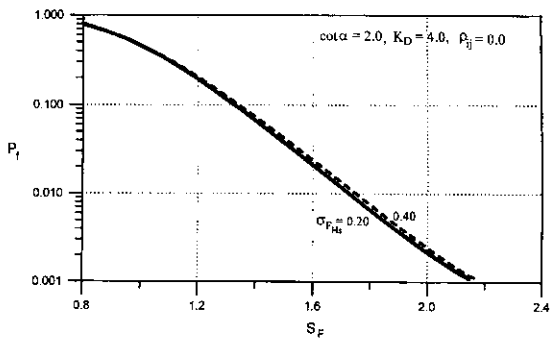

Fig. 10. Probability of failure with respect to $\sigma_{F_{HS}}$ as function of safety factor.

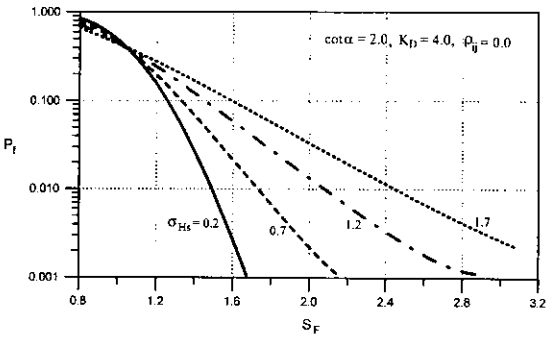

Fig. 11. Probability of failure with respect to σ_{HS} as function of safety factor.

은 피복재의 중량을 과대평가할 수 있음을 의미하는 것이다.

마지막으로 식 (3)의 신뢰함수에 포함된 각 확률변수들의 표준편차에 따른 영향들이 해석되었다. 앞의 결과들과 마찬가지로 각 확률변수의 표준편차를 변화시키면서 경사제 피복재의 파괴확률이 안전계수의 함수로 산정되었다. 먼저 Hudson 공식 자체가 내포하고 있는 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 확률변수의 표준편차, σ_λ를 변화시키면서 계산된 결과가 Fig. 9에 제시되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 안전계수가 큰 범위에서 σ_λ가 커짐에 따라 파괴확률이 일정한 크기로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 안전계수가 1.2 보다 작은 범위에서는 파괴확률의 변화 폭이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이는 안전계수를 크게 할수록 Hudson의 공식에는 많은 불확실성이 내포된다는 것을 의미하는 것이다. 또한 유의 설계파고 추정시 내포될 수 있는 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 확률변수의 표준편차, $\sigma_{F_{Hs}}$의 변화에 따른 파괴확률이 Fig. 10에 제시되었다. 앞의 결과와는 다르게 $\sigma_{F_{Hs}}$의 변화에 따른 파괴확률의 변화가 거의 나타나지 않고 있어 F_{H_s}는 결정론적 상수로 고려할 수 있다. 즉, Table 1에서 볼 수 있듯이 $\mu_{F_{H_s}}$=0.0이기 때문에 신뢰함수에 포함시키지 않아도 된다는 의미이다. 민감도 분석의 마지막으로 유의 설계파고의 표준편차의 변화에 따른 파괴확률의 거동특성이 해석되었다. Fig. 11에 제시된 결과를 보면 그 영향 정도가 다른 확률변수들보다 상당히 크게 나타나고 있다. 특히 안전계수가 1.2보다 큰 범위에서의 변화가 두드러지게 나타나고 있다. 따라서 안전계수 결정시 이와 같은 사실들이 반드시 고려되어야 한다.

5. 결 론

신뢰성 해석을 위한 직접계산법을 이용하여 경사제 피복재의 단일 파괴모드에 대한 파괴확률이 안전계수의 함수로 산정되었다. 신뢰함수를 수립하기 위하여 현재 설계에서 가장 많이 적용되고 있는 Hudson 공식을 이용하였다. 결정론적 해석법으로부터 얻을 수 있는 피복재 중량의 산정 결과와 신뢰성 해석에서 얻어지는 파괴확

률을 직접적으로 연결시키기 위해 SPM(1984)에 제시된 안정상수를 수치실험에 사용하였다. 자연 사석재와 인공 피복재 그리고 쇄파 및 비쇄파 조건에 따라 경사제 피복재의 파괴확률이 안전계수의 함수로 계산되었다. 비록 제한적이긴 하지만 신뢰함수를 구성하고 있는 확률변수들의 상관성에 따른 영향도 함께 해석되었다. 마지막으로 신뢰함수에 포함된 각 확률변수의 변동계수에 따른 영향이 민감도 분석을 통하여 정량적으로 해석되었다. 앞으로 여러 피복재 중량 산정식에 대한 유사한 연구가 더 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

이철응, 1999. 경사제 피복재의 안정성에 대한 신뢰성 해석, 한국해안 해양공학회지, **11**(3), pp. 165-172.

이철응, 2000a. 경사제 피복재의 신뢰성 해석을 위한 직접 계산법의 개발, 대한토목학회논문집, **20**(3-B), pp. 389-397.

이철응, 2000b. 직접 계산법에 의한 경사제 피복재의 신뢰성 해석, 대한토목학회논문집, **20**(3-B), pp. 399-409.

Ang, A.H-S. and Tang, W.H., 1984. *Probability concepts in engineering planning and design*, John Wiley & Sons, New York, NY.

Burcharth, H.F., 1992. Reliability evaluation of a structure at sea, *Proc. of Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures*, pp. 470-517.

Burcharth, H.F., Sorensen, D, and Christiani, E., 1994. On the evaluation of failure probability of monolithic vertical walt breakwaters, *Rep. of Port and Harbor Res. Inst.*, pp. 458-468.

CIRIA/CUR, 1991. Manual on the use of rock in coastal and shore engineering, *Center for Civil Engrg. Research. and Codes Rep. 154*, Special Publication 83, Construction Industry Research and Information Association, UK.

PIANC, 1992. Analysis of rubble mound breakwaters, Rep. of *Working Groups No. 12 of PTC II*, Belgium.

SPM(*Shore Protection Manual*), 1984. 4th Ed., U.S. Army Corps of Engrs., Coast. Engrg. Res. Ctr., Washington, D.C.

Takayama, T. and Ikeda, N., 1994. Estimation of encounter probability of sliding for probabilistic design of breakwater. Rep. of Port and Harbor Res. Inst., pp. 438-455.

Van der Meer, J.W., 1987. Stability of breakwater armour layers - Design formulae, *Coast. Engrg.*, **11**, pp. 219-239.

Van der Meer, J.W., 1988. Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers, *J. Wtrway., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, **114**(1), pp. 66-80.