

콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석 Reliability Analysis for Fracture of Concrete Armour Units

이철응*
Cheol-Eung Lee*

요 旨 : 방파제의 경사면에 거치된 콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰함수는 피복재의 흔들림 또는 동요의 크기를 정량적으로 나타내는 회전각의 함수로 유도되었다. 방파제 단면에 거치된 피복재의 재질적 성질 및 기하학적 형상과 관련된 확률변수들의 단면파괴에 미치는 영향 정도가 자세히 해석되었다. 또한 파고의 함수로 피복재 개개의 단면파괴에 대한 파괴확률이 산정되었다. 마지막으로 Bernoulli 과정과 허용파손율의 개념을 동시에 고려하여 피복재의 단면파괴가 어떻게 방파제 체체의 파괴확률로 이어지는가가 해석되었다. 허용파손율 개념은 본 연구에서 도입된 것으로, 허용파손율을 어떻게 정의하느냐에 따라 피복재의 단면파괴에 의하여 유발되는 방파제 체체의 파괴확률이 다르게 거동되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 상대적으로 수심이 깊은 곳에 중량이 큰 콘크리트 피복재를 사용하여 방파제를 설계할 때는 수리학적 안전성 뿐만 아니라 구조적 안전성도 중요하게 고려되어야 한다.

핵심용어 : 피복재의 단면파괴, 신뢰성 해석, 허용파손율, 구조적 안전성, 신뢰함수

Abstract □ A fracture or breakage of the concrete armor units in the primary cover layer of breakwaters is studied by using the reliability analysis which may be defined as the structural stability. The reliability function can be derived as a function of the angle of rotation that represents the rocking of armor units quantitatively. The relative influences of all of random variables related to the material and geometric properties on the fracture of armor units is analyzed in detail. In addition, the probability of failure for the fracture of individual armor unit can be evaluated as a function of the incident wave height. Finally, Bernoulli random process and the allowable fracture ratio may be introduced together in this paper, by which the probability of failure of a breakwater due to the fracture of armor units can be obtained straightforwardly. It is found that the probability of failure of a breakwater due to the fracture of armor units may be varied with the several allowable fracture ratios. Therefore, it should be necessary to consider the structural stability as well as the hydraulic stability for the design of breakwaters with multi-leg slender concrete armor units of large size under wave action in deep water.

Keywords : fracture of armor units, reliability analysis, allowable fracture ratio, structural stability, reliability function

1. 서 론

경사제 체체의 안전성과 관련하여 현재까지는 주로 피복층에 거치된 피복재의 수리학적 안전성에 대한 연구가 주 관심의 대상이었다. 최근 방파제의 설치 위치가 심해로 확장되면서 수리학적 안전성이 아닌 다른 원인에 의하여 체체의 안전성이 위협받는 경우가 종종 발생되고 있

다. 대표적인 예로 포르투갈의 Sines, 미국의 Crescent City, 남아프리카의 Richards Bay의 경사제에 대한 파괴 원인을 조사해 본 바에 의하면, 경사제 피복층에 거치된 피복재의 단면파괴(fracture/breakage of armor unit)가 그 원인의 한 부분이다 라는 분석들이 제기되었다(PIANC, 1992). 최근 우리나라에서도 2000년 8월 31일 제 12호 태풍(Prapiroon)에 의하여 소흑산도항 방파제의 두부와 제

*강원대학교 토목공학과, 부교수(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja 2-Dong, Chunchon, Kangwondo 200-701, Korea. celee@kangwon.ac.kr)

간부가 약 500 m 정도 피해를 입은 예가 있다. 이는 피복재가 수리학적인 안전성을 만족하지만 구조적인 안전성이 만족되지 않았기 때문이다. 즉, 대부분의 파괴된 방파제의 피복재에 현행의 설계기준인 허용피해율의 개념을 적용하게 되면, 수리학적인 안전성을 만족함에도 불구하고 대규모 피해가 발생될 수 있다는 것이다. 이는 구조적 불안전성이 즉각 수리학적 불안전성으로 이어져 방파제 제체의 파괴가 발생된다는 것을 의미하는 것이다.

경사제 피복재의 중량은 여러 가지 경험식을 이용하여 설계파고를 만족하도록 산정된다. 이와 같이 산정된 피복재를 가지고 수리모형실험을 수행하여 피복재의 맞물림 효과가 포함된 제체의 안전성을 검토하게 된다. 방파제 제체의 안전성에 피복재의 맞물림 효과는 대단히 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 콘크리트로 만들어진 많은 인공 피복재들은 맞물림 효과를 증대시키기 위하여 다가지리를 가지면서 홀쭉한 형태(multi-leg slender type)를 갖도록 고안되고 있다. 따라서 피복재의 단면 형태에 따라 구조적으로 취약한 부분이 존재하게 된다. 또한 현행의 설계법에서는 수리학적 안전성을 검토할 때 피복재들의 피해를 일정 범위내에서 약간 허용하고 있다. 즉, 파랑이 내습할 때 경사면에 거치된 피복재들에 약간의 움직임은 허용한다는 의미이다. 그러나 현행의 설계에서는 피복재의 구조적인 안전성에 대하여는 고려하고 있지 않다. 따라서 수리학적인 안전성이 만족되어도 피복재 각각의 구조적 안전성이 만족되지 않을 가능성이 충분히 내재되어 있다. 특히 구조적 불안전성, 즉, 콘크리트 피복재의 단면파괴는 항상 수리학적 불안전성이 발생되기 전에 나타나기 때문에 일단 발생되게 되면 급속도로 수리학적인 불안전성이 유발되고, 이는 즉각 방파제 제체의 불안전성으로 이어질 수 있다. 이와 같은 현상은 특히 수심이 깊은 곳에 설치되는 경사제에서 주의되어야 한다. 왜냐하면 수심이 깊은 곳에서는 그 설계파고가 커지게 되고, 그에 따라 피복재의 중량도 증가하게 된다. 일반적으로 피복재의 중량이 커지게 되면 그 형태가 일정할지라도 피복재의 외력에 대한 구조적인 강도는 감소하기 때문이다. 피복재의 구조적 강도와 설계파고 그리고 피복재의 크기에 따른 관계를 해석하면 다음과 같다. 설계파고가 작아 약 20 ton 미만의 피복재를 사용한 경우에는 방파제 제체의 안전성이 수리학적인 현상에 의하여 지배된다. 따라서 설계파고에 해당되는 적절한 피복재의 중량이 사용되면 일반적으로 방파제 제체의 수리학적인 안전성이 만족될 수 있다. 이는 실험에 의하여도 잘 파악될 수 있으며, 방파제 제체의 안전

성이 만족된다는 것을 의미하는 것이다. 그러나 설계파고가 커지면 피복재의 중량도 상대적으로 증가하게 된다. 이 단계에서 피복층에 거치된 피복재의 안전성은 수리학적 안전성 보다는 구조적 안전성이 지배하게 된다. 동일한 재질로 만들어진 경우, 피복재의 크기가 증가함에 따라 동일한 외력이라도 저항력과 관련된 구조적 강도가 급격히 감소하는데 비해 받게 되는 강도는 크기에 따라 증가하기 때문이다. 그러나 이와 같은 현상들은 일반적으로 수행되는 규모나 방법의 수리모형실험을 통해서서는 확인되지 않는다. 왜냐하면 수리학적 현상에 대한 상사성은 잘 만족 되지만, 구조적 안전성에 대한 상사성은 원형에 가까운 대규모 실험을 통하지 않는 한 잘 만족되지 않기 때문이다.

이와 같은 분야에 대한 중요성이 인식되면서 이에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 설계에 올바르게 반영할 수 있는 경험식이나 해석방법들이 아직까지 제시되지 못하고 있다. 먼저 피복재의 중량이 증가됨에 따라 구조적인 안전성에 문제가 있다는 사실이 Burcharth (1981)에 의하여 언급되었다. 이와 같은 문제를 수리학적 안전성과 구조적 안전성의 불일치에 의하여 발생된다고 규정하였다. 이에 대한 문제를 해석하기 위하여 먼저 상사성에 대한 적용 원리를 자세히 제시하였다. 특히 맞물림의 효과가 좋아 현재 외국에서 많이 사용되고 있는 Dolos를 사용하여 낙하실험과 충격실험을 통하여 현상에 대한 이해를 도모하였다. 수리학적 안전성에서 일반적으로 허락되는 흔들림이나 이동(Rocking and Displacement)이 피복재의 단면파괴에 직접적인 영향을 미친다는 사실을 규명하기 위함이다. 낙하높이 및 충격거리에 따른 회전각의 크기, 균열의 크기 및 발생 등을 파괴역학에서 정의되는 개념을 이용하여 해석하였다. 궁극적으로 피복재의 단면파괴를 유발하는 피복재 내부에서 발생하는 최대 인장강도의 크기를 산정할 수 있는 관계식이 피복재의 재질과 낙하높이 그리고 충격거리의 함수로 제시되었다. 그러나 그의 실험에서는 파랑과 관련된 인자들이 피복재의 단면파괴에 어떻게 영향을 주는지에 대한 해석이 수행되지 못하였다. 예로 어떤 파고의 파랑이 내습할 때 경사면에 거치된 임의 중량의 피복재가 몇 개 동요될 것이고, 그 동요의 크기는 얼마인가? 또한 동요에 의하여 피복재의 취약 단면에 유발되는 최대 인장강도는 얼마인가에 대한 관계식이 수립되지 못하였다. Lin *et al.*(1986)도 Burcharth (1981)가 제안한 방법을 이용하여 Dolos를 이용하여 동일한 실험을 수행하였다. 이들은 측면 충돌실험을 추가로 실

시하여 한 방파제 단면에서 삼차원적으로 피복재의 단면 파괴에 대한 해석을 수행한 것이다. 그러나 이들도 피복재가 받게 되는 최대 인장강도를 임의의 낙하높이와 충격거리의 함수로 산정하였을 뿐 파랑과의 관계가 해석되지 못하였다. 그 외 Baird *et al.*(1986), Burcharth and Brejnegard-Nielsen(1986), Scott *et al.*(1986), Howell(1988), McDougal *et al.*(1988), Zwamborn *et al.*(1988), Burcharth *et al.*(1991) 등이 Dolos를 이용하여 피복재의 단면파괴에 대한 연구를 수행하였다. 특히 Burcharth *et al.*(1991)은 수리학적 안전성과 구조적 안전성을 동시에 만족시킬 수 있는 피복재의 중량 결정 방법을 목표로 제시하였다. 이와 같은 도표를 제시하기 위하여 기존의 실험 자료들을 다양한 방법으로 해석하였다. 개념적인 관점으로 보면 이와 같은 도표를 이용하게 되면 설계 과정에 수리학적 안전성과 구조적 안전성을 동시에 만족시키는 피복재의 중량을 결정할 수 있다. 그러나 결과에 대한 적용성은 아직 더 연구되어야 한다. 지금까지의 연구들은 모두 Dolos 피복재 단면파괴에 대한 연구들이다. 그러나 우리나라에서는 Dolos 보다 TTP 피복재가 방파제에 더 많이 사용되고 있는 실정이다. Nishigori *et al.*(1986)은 TTP를 이용하여 피복재의 단면파괴에 대한 수리모형실험을 수행하였다. 이들은 파랑 작용시 피복재가 받게 되는 최대 인장강도를 산정하기 위하여 피복재의 겉면에 변위계를 설치하여 변위를 측정하는 방법을 사용하였다. 다양한 파랑조건에서 실험이 수행되었다. 특히 이들은 피복재의 흔들림이나 동요가 발생하는 형태를 세 가지로 구분하여 해석하였다. 그러나 이들은 파괴 기구에 대한 체계적인 해석을 수행하지 못하였다. 최근 Burcharth *et al.*(2000)은 기존의 실험결과 및 파괴가 발생한 방파제의 현장 관측자료를 이용하여 피복재의 파괴에 영향을 주는 여러 변수들을 분석하여, 단면파괴에 가장 큰 영향을 주는 변수들의 함수로 단면파괴의 발생 가능성을 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다. 경험식은 Dolos 및 TTP 로 구분하여 제시되었다. 관련된 변수들은 크게 피복재의 저항력과 관련된 재질적인 요소와 피복재에 하중을 가하는 파랑과 관련된 요소 등이다. 이와 같이 제시된 경험식을 이용하게 되면 방파제에 거치된 피복재가 단면파괴에 의하여 파괴될 가능성을 설계 단계에서 검토하는 것이 가능하다. 비록 현장 관측자료와의 제한적인 비교로 효용성에 대한 언급이 있었으나, 아직까지 제안된 경험식의 적용성 여부는 더 검토하여야 할 문제라고 판단된다. 왜냐하면 피복재의 단면파괴 현상이 너무 복잡하기 때문이다. 또한 현

상에 대한 물리적인 이해가 가능하더라도 관련된 변수들에 대한 연구가 미약하기 때문이다. 이는 경험식 속에는 확인되지 않은 너무나 많은 불확실성들이 내포되어 있기 때문이다.

이와 같은 문제를 해결하는 가장 좋은 방법이 신뢰성 해석을 통하여 피복재의 단면파괴 과정과 각 변수들의 영향정도를 정확히 파악하는 것이다. 또한 신뢰성 해석에서는 물리적인 현상에 대한 이해를 바탕으로 문제에 대한 신뢰함수가 올바르게 수립되어야 하기 때문에 수학적 관계식들이 비교적 올바르게 유도될 수 있다. CIAD(1985)를 제외하고 현재까지 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 TTP 피복재를 대상으로 Burcharth(1981)가 제시한 경사제 피복재의 단면파괴에 대한 개념을 도입하여 수학적 모형을 구성하고, CIAD(1985)의 자료를 이용하여 단면파괴와 관련된 여러 가지 현상들을 규명하고자 한다.

2. 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰함수의 수립

경사제 사면상에 거치된 피복재가 임의의 파고를 갖는 파랑에 노출되면 비록 피복재간의 맞물림 효과가 우수하더라도, 일정량의 흔들림이나 동요가 발생된다. 앞에서 언급되었듯이 수리학적 안전성 검토에서는 이와 같은 내부의 미세한 동요를 중요하게 생각하지 않는다. 다만 거치된 위치를 이탈하는 피해율의 크기가 허용을 이하가 되도록 제어한다. 그러나 피복재의 중량이 증가하게 되면 피복재 내부에서 발생하는 약간의 흔들림이나 동요도 피복재의 구조적 안전성에 미치는 영향은 지대할 수도 있다. 예로 Timco(1983)는 Sines 방파제의 파괴원인을 다음과 같이 구체적으로 분석하였다. 파괴 당시 내습된 파랑에 의하여 경사면상에 거치된 피복재가 경사면으로부터 약 2~4° 정도로 회전되었으며, 그 흔들림에 의하여 유발되는 회전력이 피복재의 허용 인장강도를 초과하는 최대 인장강도가 발생하여, 피복재의 단면파괴가 발생한 것으로 해석되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Burcharth(1981), Timco(1983)에 의하여 제시된 피복재의 흔들림이나 동요가 구조적 안전성과 관련된 가장 중요한 변수라고 가정하였다. 개념적으로 보면 일정 파랑의 파고가 작용할 때 경사면상에 있는 피복재에 약간의 흔들림이 발생하게 될 것이고, 파랑의 작용이 없어지게 되면 피복재는 원래의 경사면상으로 재 위치할 것이다. 이는 파랑이 작용하여 피복재의 위치에너지가 증가하게 되고, 원래의 위치로 되돌아

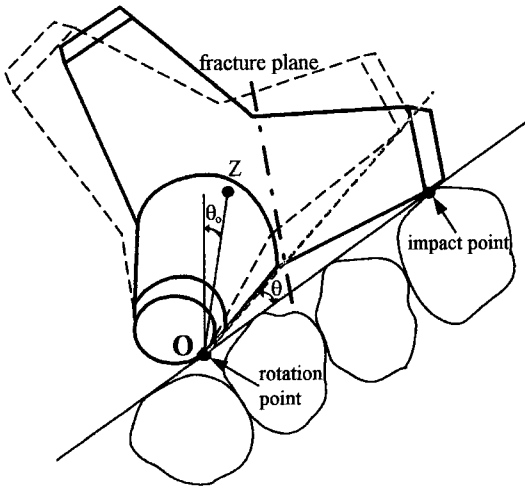


Fig. 1. Definition sketch for the rocking motion of concrete armor, TTP.

오는 과정에 증가된 위치에너지는 운동에너지로 변환하게 된다는 개념이다. 피복재의 크기가 커지게 되면 작은 흔들림일지라도 상대적으로 큰 충격력이 발생하게 된다. 따라서 피복재의 인장 저항력이 가장 취약한 부분에서 단면파괴가 발생할 가능성이 중량이 작은 피복재보다 상대적으로 높아지게 된다.

피복재의 흔들림에 의하여 발생하는 단면파괴의 수학적 모형을 수립하기 위한 개념적 모식도를 Fig. 1에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 피복재의 흔들림은 지지점, O를 기준으로 발생된다고 가정하였다. 또한 피복재는 강성체(rigid body)이며, 회전하는 동안 지지점은 이동되지 않는다고 가정하였다. 이와 같은 현상은 경사면상으로 파랑이 내습하는 과정을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 즉, 파랑의 치오름이 발생한 다음 연속적으로 처내림이 발생될 때의 상황을 생각하면 된다. Fig. 1로부터 쉽게 알 수 있듯이 본 연구에서는 피복재의 흔들림의 크기를 회전각, θ 로 정의하였다. 이때 회전각은 위치에너지와 운동에너지의 관계로부터 회전각속도의 개념을 도입하여 정의된다. 따라서 위치에너지와 운동에너지를 산정하기 위해서는 먼저 다음 식 (1)과 같이 TTP 피복재의 질량과 지지점, O를 기준으로 한 단면 2차 모멘트를 정의하여야 한다(CIAD, 1985).

$$m=0.28\rho H^3 \quad (1a)$$

$$J_\alpha=0.354mH^2 \quad (1b)$$

여기서, ρ 와 H 는 각각 피복재의 밀도와 크기를 나타

낸다. 또한 Fig. 1에서 알 수 있듯이 피복재의 흔들림이나 동요에 의하여 증가되는 위치에너지 및 운동에너지는 다음 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$E_p=mg\Delta h \quad (2a)$$

$$E_k=\frac{1}{2}J_o\omega^2 \quad (2b)$$

여기서, g 는 중력가속도, ω 는 회전각속도, 그리고 Δh 는 피복재 무게중심의 연직 이동거리이다. Fig. 1에 의하면 회전각이 작은 경우, 피복재가 회전하는 동안 무게중심의 연직 이동거리는 다음 식 (3)과 같이 정의될 수 있다(CIAD, 1985).

$$\Delta h=\theta_o\theta R-\frac{1}{2}\theta^2 R \quad (3)$$

여기서, θ_o 는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 경사면상에 거치된 정지중인 피복재의 무게중심, Z와 지지점, O의 선분과 연직선이 이루는 각이다. 따라서 제체의 경사와 연관된 변수로, 제체의 경사가 완만할수록 큰 값을 갖게 된다. 일반적으로 사용되는 제체의 경사 1:1.33에서는 약 0.255rad를 갖는 것으로 알려져 있다(CIAD, 1985). 본 연구에서는 $\theta_o=0.255\text{rad}$ 으로 일정하다고 가정하였다. 또한 R 은 지지점 O에서 피복재의 무게중심까지의 거리이다. 따라서 식 (2a)와 식 (2b)를 같다고 정의하면 피복재의 흔들림에 따른 회전각속도를 다음 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$\omega=\sqrt{\frac{2mg\Delta h}{J_o}} \quad (4)$$

식 (4)의 관계는 흔들림에 따른 피복재의 위치에너지 증가량이 원래의 위치로 복귀하는 과정에 운동에너지로 전환된다는 관계식을 의미하는 것이다. 실제에서도 이와 같은 관계가 발생하는지에 대한 연구는 앞으로 더 연구되어야 할 것으로 판단된다. 특히, 식 (4)는 피복재가 원래의 위치로 돌아오는 과정동안에 발생하는 회전각속도를 나타낸 것이다. 따라서 피복층과 피복재 사이에 충격이 발생되기 전의 회전각속도이다. 왜냐하면 충격이 발생되고 나면 다음 식 (5)의 운동량방정식이 적용되어야 하기 때문이다.

$$J_o\omega=\psi Ft_i \quad (5)$$

여기서, ψ 는 충격보정계수이고, F 는 최대 충격력, t 은

지지점과 충격점 사이의 거리, 그리고 t_i 는 충격시간이다. 특히 충격보정계수는 충격 시 충격에너지의 얼마가 피복재의 인장력으로 발생되는지를 묘사하기 위하여 도입된 확률변수이다. 따라서, 식 (5)로부터 계산된 흔들림에 의하여 발생하는 최대 충격력의 회전모멘트, $M=0.477H \times F$ 를 이용하게 되면 피복재가 받게 되는 최대 인장응력은 다음 식 (6)으로부터 쉽게 구할 수 있다. 여기서 $0.477H$ 는 단면과피가 발생할 것으로 예상되는 파괴면에서 TTP 끝단까지 거리이다(SPM, 1984).

$$\sigma_T = \frac{M}{Z_w} \quad (6)$$

여기서, Z_w 는 단면계수로서 $(0.477H)^3 \pi 32$ 이다. 따라서 흔들림에 의하여 발생된 최대 인장응력이 콘크리트 피복재의 허용 인장응력보다 크게 되면 피복재의 인장 저항력이 가장 취약한 면에서 단면과피가 발생하게 된다. 따라서 신뢰함수는 다음 식 (7)과 같이 매우 간단하게 정의될 수 있다.

$$f = \sigma_A - \sigma_T \quad (7)$$

여기서, σ_A 는 피복재의 재질에 따른 허용 인장응력이다. 따라서, 본 연구의 신뢰함수인 식 (7)과 관련된 모든 확률변수들의 통계적 특성 및 분포함수를 알게 되면, 흔들림에 의해 피복재가 임의의 단면에서 파괴될 확률을 회전각의 함수로 구할 수 있다.

마지막으로, 흔들림의 발생 가능성 및 흔들림에 따른 회전각의 크기가 입사파랑의 함수로 어떻게 정의되는가를 규명하면, 피복재의 단면과피를 입사파랑의 함수로 비교적 쉽게 해석할 수 있다. 이하에서는 식 (7)의 신뢰함수를 이용하여 파고의 함수로 변환하는 피복재의 단면과피에 대한 신뢰성 해석과정을 설명하겠다. 이미 전 절의 말미에서 언급되었듯이 본 연구에서 사용된 대부분의 자료들은 CIAD(1985)의 자료에 그 근간을 두고 있다. 이는 본 연구가 신뢰성 해석기법을 이용하여 피복재 단면과피에 대한 기초적인 개념과 주요 변수들을 해석하는데 주 목적이 있음을 의미하는 것이다. 따라서 결과의 적용성에 대하여는 보다 많은 자료를 확보한 다음에 추후 더 연구되어야 한다.

3. 피복재의 단면과피에 대한 신뢰성 해석

경사면상에 거치된 피복재가 임의의 파고를 갖는 파랑에 의하여 흔들리거나 동요될 때 발생할 수 있는 피복재

Table 1. Statistical properties and distributions of random variables in Eq. (7)

Random variable	Mean	Coefficient of Variation	Distribution
σ_A (N/mm ²)	2	0.125	Normal
ρ (kg/m ³)	2400	0.030	Normal
θ (rad)	Various	1.000	Weibull
H (m)	4.15	0.020	Normal
ψ	0.5	0.200	Normal
t_i (sec)	0.03	0.333	Normal

의 단면과피를 해석할 수 있는 신뢰함수가 수립되었다. 흔들림에 의하여 피복재에 발생되는 증가된 위치에너지가 운동에너지로 전환되어 낙하한다는 가정하에 정의된 신뢰함수에 의하면, 파괴상태는 피복재가 피복층과 충격될 때 발생하는 피복재 내부의 최대 인장응력이 허용 인장응력을 초과하는 상태로 정의하였다. 특히, 신뢰함수는 흔들림의 크기를 정량적으로 산정할 수 있는 회전각의 함수로 정의되었다. 따라서 관련된 각 확률변수들의 통계적 특성과 확률분포를 알게 되면 피복재의 단면과피 확률을 회전각의 함수로 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 현재의 연구에서 구하고자하는 결과는 피복재의 단면과피에 대한 파괴확률이 입사파고의 함수로 정의되는 것이다. 따라서 이에 대한 과정을 아래에서 자세히 해석하였다.

먼저 식 (7)을 이용한 신뢰성 해석은 Level II의 AFDA (Approximate Full Distribution Approach)를 이용하여 해석하였다. 신뢰성 해석기법의 하나인 AFDA는 FORM(First Order Reliability Method)에서 가장 정도가 높은 해석기법으로 알려져 있다(Theft-Christensen and Baker, 1982; Haldar and Mahadevan, 2000). 자세한 해석과정은 이미 잘 알려져 있기 때문에, 본 연구에서는 생략하고 사용된 확률변수의 특성과 그 자료를 이용하여 구해진 신뢰성 해석 결과만을 제시하였다. 먼저 식 (7)과 관련된 확률변수들의 통계적 특성과 확률분포를 Table 1에 제시하였다. Table 1의 자료 중 피복재의 재료적인 성질 및 기하학적인 특성과 관련된, 허용 인장응력, 밀도, 그리고 피복재의 크기와 관련된 변수들의 통계적 특성과 확률변수들은 비교적 잘 정의된 확률변수들이다. 그러나 회전각, 충격보정계수, 그리고 충격시간 등의 확률변수들은 이에 대한 자료의 부족으로 매우 큰 불확실성이 내포된 확률변수들이다. 따라서 본 연구에서는 CIAD(1985)의 자료를 사용하였다. 그러나 Table 1에 제시된 자료들은 임의로 선택된 것이 아니다. 비록 제한적이긴 하지만 현장에서 관

Table 2. Reliability results as a function of angle of rotation

μ_θ (rad)	Reliability Index	Probability of Failure
0.001	1.946	0.0258
0.002	1.506	0.0660
0.003	1.219	0.1114
0.004	1.009	0.1565
0.005	0.843	0.1996
0.006	0.707	0.2398
0.007	0.593	0.2766
0.010	0.330	0.3707
0.015	0.039	0.4845

측된 자료와 이론적 근거를 가지고 정의된 것이다. 예로 충격시간은 피복재의 체적탄성계수를 이용하여, 피복층과의 충격시 피복재 내부에서 발생하는 충격파의 전파속도(speed of longitudinal shock wave in the concrete)를 근간으로 대략 그 적용범위를 산정할 수 있다. 또한 충격 보정계수는 충격시의 에너지가 모두 피복재 내부에서 최대 인장응력을 발생시키는데 기여하느냐에 대한 영향을 보정하기 위하여 도입된 확률변수이다. 한편 다른 확률변수와는 다르게 회전각의 분포함수를 Weibull 분포함수를 사용한 이유는 회전각의 크기가 직접적으로 입사하는 파괴의 크기와 관련이 있다고 판단하였기 때문이다. 또한 회전각의 불확실성을 다른 확률변수보다는 크게 설정하였다. 이는 이와 관련된 자료가 매우 부족하기 때문이고, 해석을 안전측으로 수행하기 위함이다. 신뢰성 해석에서 하중과 관련된 확률변수의 불확실성이 증가하면 파괴확률도 크게 산정되는 특성을 이용한 것이다. 이에 대한 연구는 추후 관련 자료가 확보 되는대로 Bayesian 기법과 같은 해석법을 이용하면 쉽게 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

이상에 제시한 Table 1의 자료를 이용하여 계산된 신뢰성 해석 결과를 회전각의 함수로 Table 2에 제시하였다. Fig. 2는 이를 그림으로 제시한 것이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 회전각의 값이 커짐에 따라 피복재의 단면파괴가 발생할 확률이 크게 나타나고 있다. 또한 Table 3의 자료는 신뢰성 해석으로부터 얻을 수 있는 영향계수를 제시한 것이다. 신뢰성 해석에서 영향계수란 파괴확률에 미치는 각 확률변수의 영향 정도를 나타낸 것으로, 그 값이 크다는 것은 당연히 영향의 정도가 크다는 것을 의미한다. 이는 해석에서 어떤 확률변수를 중심으로 연구가 진행되어야 하는가를 제시하는 지표라 할 수 있다. 결과에서 쉽게 알 수 있듯이 본 연구에서 정의된 신뢰함수에

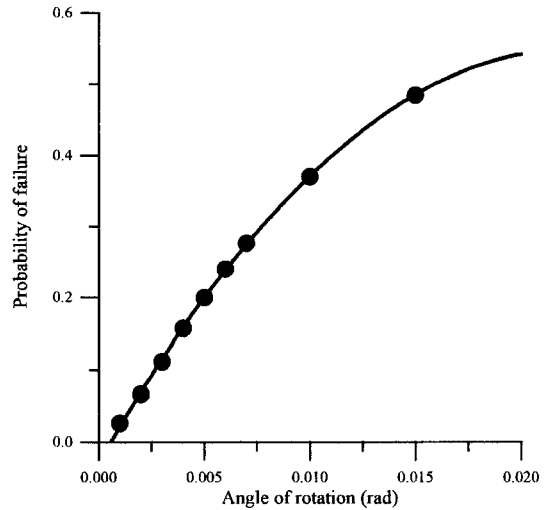


Fig. 2. Probability of failure as a function of the angle of rotation.

Table 3. Influence coefficients of random variables related to Eq. (7)

Random Variable	Influence Coefficient	
	$\mu_\theta=0.05$ rad	$\mu_\theta=0.010$ rad
σ_A	0.037	0.035
ρ	0.002	0.002
θ	0.491	0.592
H	0.002	0.002
ψ	0.102	0.092
t_i	0.366	0.277

서는 임의의 파괴를 갖는 파랑이 내습할 때 발생하는 피복재의 회전각과 충격시간에 대한 확률변수가 결과에 지대한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 각 확률변수의 변동계수를 변화시키면서 수행되었다. 대표적으로 충격시간에 대한 민감도 분석 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 충격시간의 변동계수에 따라 피복재의 단면 파괴확률이 크게 변화하고 있다. 이는 충격시간의 통계적 특성에 대한 정확한 자료가 요구된다는 것을 의미한다. 즉, 피복재의 단면 파괴확률을 정확히 산정하고, 그 결과에 올바른 의미를 부여하기 위해서는 충격시간과 관련된 자료의 정확한 산정이 필요하다. 비록 본 연구에서는 제시하지 않았지만 다른 확률변수들의 통계적 특성 변화에 따른 영향이 거의 없게 나타났다. 특히 회전각의 변동계수에 따른 영향이 거의 나타나지 않는다는 사실은 입사파괴에 따른 회전각의 크기

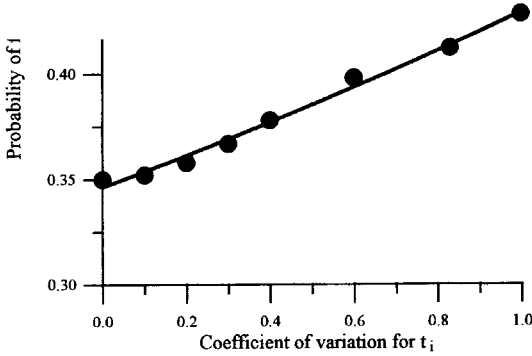


Fig. 3. Variation of probability of failure with respect to coefficient of variation for t_i .

를 어떤 관계식에 의하여 산정할 수 있다면, 신뢰성 해석의 결과는 큰 의미를 갖게 된다. 즉, 회전각의 불확실성에 따른 영향이 매우 작기 때문에 분포함수와 평균만을 알아도 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 비록 본 연구에서는 수행되지 않았지만 분포함수에 따른 차이가 작다면 많은 자료들의 통계적 특성에 대한 해석 없이 비교적 쉽게 정확한 결과를 얻을 수 있다.

이상에서는 신뢰성 해석을 통하여 입사파고와 관계없이 콘크리트 피복재의 흔들림이나 동요에 의하여 발생하는 피복재의 단면파괴에 대한 결과들을 제시하였다. 따라서 이하에서는 이들 신뢰성 해석 자료를 이용하여 입사파고와의 관계를 수립하는 방법에 대하여 설명하였다. 먼저 회전각에 따른 피복재의 단면 파괴확률을 파고의 함수로 나타낼 수 있어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 CIAD(1985)의 개념을 도입하여 다음 식 (8)을 이용하였다.

$$P_f(F_r|H_s) = P(R_c|H_s) P_f(F_r|\theta H_s) \quad (8)$$

여기서 $P(R_c|H_s)$ 는 임의의 파고 H_s 에 의하여 경사제에 거치된 피복재가 흔들리거나 동요될 확률을 의미하며, $P_f(F_r|\theta H_s)$ 는 임의의 파고에 의하여 발생한 흔들림이나 동요의 크기, 즉, 회전각의 함수로 산정된 피복재의 단면 파괴확률을 의미한다. 본 연구에서는 이미 앞에서 언급된 이유에 의하여 CIAD(1985)에 제시된 다음 식 (9)를 이용하여 입사파고의 함수로 피복재가 흔들리거나 동요될 확률을 산정하였다.

Table 4. Wave induced probability of failure of armor units

μ_θ (rad)	$P_f(F_r H_s)$	
	$P(R_c H_s=4.5m)$	$P(R_c H_s=9.0m)$
0.001	0.0006	0.0093
0.003	0.0025	0.0401
0.005	0.0045	0.0719
0.010	0.0083	0.1335
0.015	0.0109	0.1454

$$P(R_c|H_s) = (H_s - 3.0)^2 / 100 \quad (9)$$

식 (9)는 실험 및 현장 관측자료를 이용하여 CIAD(1985)에 제시된 경험식이지만, 제한적인 자료를 가지고 제시된 식이기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 현재 많이 수행되고 있는 수리학적 안전성 실험을 통하여 비교적 간단히 정립할 수 있다고 판단된다. 그러므로 앞의 신뢰성 해석 결과와 식 (9)를 가지고 식 (8)을 이용하면 임의의 입사파고에 대한 파괴확률을 산정할 수 있다. 이렇게 산정된 파고와 회전각 그리고 파괴확률의 관계를 Table 4에 제시하였다. Table 4의 결과는 식 (9)가 적용되는 범위 ($4.5m \leq H_s \leq 9.0m$)에서만 의미를 갖게 된다는데 주의해야 하며, 또한 아직 어떤 파고가 얼마의 회전각을 유발하는지에 대한 정보가 없는 상태에서의 결과이다. 따라서 파고와 회전각에 대한 관계가 설정되어야 한다. 현재까지 이에 대한 연구가 매우 부족한 실정이기 때문에, 본 연구에서는 CIAD(1985)에서 사용한 방법에 따라 파고에 따른 피복재의 단면 파괴확률을 산정하였다. 즉, 본 계산에 사용된 여러 제반 조건하에서 $H_s=4.5m$ 의 입사파고는 평균적으로 회전각 0.005 rad을 발생시키고, $H_s=9.0m$ 의 입사파고는 평균적으로 0.010 rad의 회전각을 유발한다고 제시하였다. 또한 적용 범위내의 파고에 대하여는 선형 보간법을 이용하여 해석하였다. 이와 같은 조건을 사용하여 파고의 함수로 계산된 피복재의 단면 파괴확률 Fig. 4에 제시하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 파고가 증가함에 따라 단면이 파괴될 확률은 급격하게 증가하고 있다. 이미 앞에서 언급되었듯이 Fig. 4의 결과를 얻는 과정에 많은 가정, 즉, 충격시간의 정의, 파고의 함수로 정의된 피복재의 흔들림 확률, 그리고 파고의 함수로 정의된 회전각의 크기들이 파괴역학의 관점에서 또는 현장 관측 자료와 비교로부터 단순화되었다. 따라서 이와 같은 가정이 충족되지 못하게 되면 결과의 적용성에

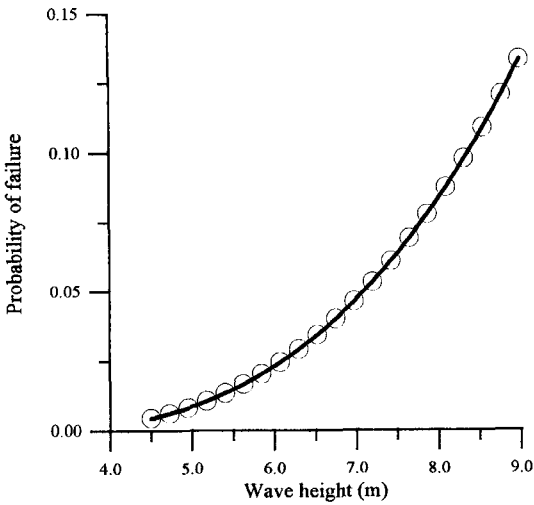


Fig. 4. Probability of failure with respect to wave height.

많은 문제점들이 발생할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 Burcharth *et al.*(2000)이 제시한 경험식과 본 연구의 결과를 비교하였다. Burcharth *et al.*(2000)이 제시한 경험식은 그 동안 이루어진 피복재의 단면파괴와 관련하여 연구되고 관측된 자료들을 종합적으로 분석하여 제시된 식이다. 비록 적용성에 대한 문제는 아직 연구 중이지만, 현재로서는 피복재의 단면파괴와 관련하여 가장 많은 자료를 내포하는 경험식이라고 판단된다. Burcharth *et al.*(2000)은 다음 식 (10)과 같은 경험식을 제시하였는데, 이는 TTP에만 적용 가능한 경험식이다.

$$B=0.00393M^{-0.79}S^{-2.73}H_s^{3.84} \quad (10)$$

여기서 B 는 피복재의 단면파괴확률이고, M 은 피복재의 질량(ton), S 는 콘크리트의 허용 인장강도(MPa), 그리고 H_s 는 입사파랑의 유의파고(m)이다. 본 연구의 결과와 Burcharth *et al.*(2000)의 결과가 Table 5에 비교되었다. 비록 약간의 차이는 있지만 Table 5에 의하면 본 연구

Table 5. Comparison of the present results with Burcharth *et al.* (2000)'s result for the probability of failure of concrete armour units

H_s (m)	Present Result	Burcharth <i>et al.</i> (2000)'s Result
4.5	0.0045	0.0089
5.0	0.0088	0.0134
6.0	0.0236	0.0271
7.0	0.0477	0.0489
8.0	0.0834	0.0817
9.0	0.1332	0.1284

의 결과와 Burcharth *et al.*(2000)의 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 앞에서 단순화되었던 여러 관계식들의 적용성이 확인되었다.

4. 피복재의 단면파괴와 제체의 안전성 해석

전 절에서 자세히 언급되었듯이 여러 단계의 해석과정을 거쳐서 콘크리트 피복재의 단면이 파괴될 확률을 파고의 함수로 산정하였다. 이상의 결과는 단일 피복재에 대한 결과이다. 즉, 피복층에 거치된 피복재 하나가 파괴될 확률을 의미하는 것이다. 물론 지금까지의 연구 결과를 살펴보면 거치 위치에 따른 파괴확률의 차이는 큰 것으로 생각된다. 그러나 본 연구에서 제시된 결과는 가장 위험한 부분, 즉, 평균해수면을 기준으로 상하로 피복재의 크기에 해당하는 영역에서 피복재의 단면 파괴가 가장 크게 발생된다는 가정하에 평균적인 의미로 해석하는 것이다. 일반적으로 경사제 제체의 파괴수준은 피복층에 거치된 피복재가 이탈되고, 그 후 연속적으로 내부 피복층의 피복재 및 사석재들이 이동되는 파괴수준을 따른다. 따라서 현재까지는 순수하게 수리학적 안전성, 즉, 피복재의 피해율과 관련된 현상을 주로 해석하였다. 이와 같은 과정에 본 연구에서 수행된 바와 같이 구조적 불안정성을 생각하는 경우에는 파괴수준이 다르게 나타날 수 있다. 만약 피복재가 구조적 안전성을 만족시키지 못할 경우는 우선적으로 구조적 안전성이 파괴된다. 대부분의 방파제에서는 수리학적 불안정성이 발생하기 전에 반드시 구조적 불안정성이 나타나게 된다. 즉, 콘크리트 피복재가 단면파괴에 의하여 그 소요 중량을 유지하지 못하게 되면 자연적으로 수리학적 불안정성이 나타나게 된다는 것이다.

본 절에서는 이와 같은 피복재의 단면파괴가 경사제 제체의 전반적인 파괴에 어떻게 적용되는지를 설명하고자 한다. 이는 근본적으로 단위 폭 당 총 거치된 피복재 중 과연 몇 개가 단면파괴에 의하여 파손되느냐 하는 문제와 동일하다. CIAD(1985)에서는 대략 10% 이상의 피복재가 단면파괴될 때 경사제 제체의 전반적인 안전성에 문제가 발생한다고 제시하였다. 본 연구에서도 이와 같은 개념을 도입하여 허용파손율 5%, 10%, 15%, 그리고 20%에 대하여 다각적인 해석을 수행하였다. 이를 수행하기 위해서는 먼저 거치된 피복재가 5%, 10%, 15%, 그리고 20% 파손될 확률을 구해야한다. 이를 위해 본 연구에서는 피복층에 거치된 피복재가 단면파괴에 의하여 파손되는 과정이 Bernoulli 과정을 따른다고 가정하였다. 즉, 피복재

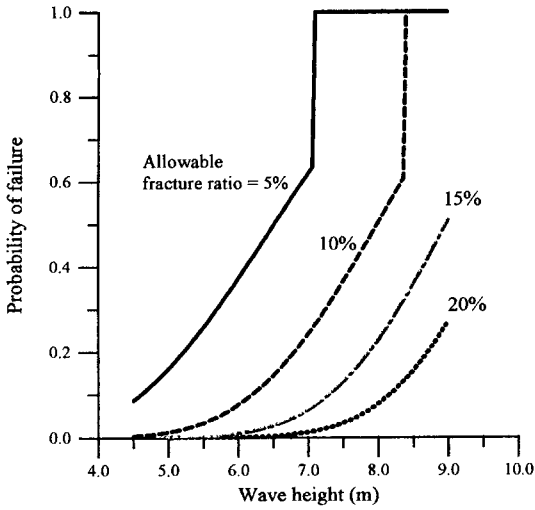


Fig. 5. Probability of failure of a breakwater with respect to wave height.

들은 서로 독립적으로 단면파괴에 의하여 파손된다는 것이다. 따라서 다음 식 (11)과 같은 Binomial 분포를 적용할 수 있다.

$$P(k|H_s) = \binom{n}{k} \{P_f(F_r|H_s)\}^k \{1 - P_f(F_r|H_s)\}^{n-k} \quad (11)$$

여기서 n 은 경사제 단위 폭에 거치된 피복제의 총 개수이며, k 는 단면파괴에 의하여 파손된 피복제의 개수이다. 따라서 식 (11)을 이용하면 임의의 파고에 의하여 방파제 체체가 파괴될 확률, $P_f(B_r|H_s)$ 를 구할 수 있다. $n=20$ 에 대하여 계산된 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 허용파손율이 클수록 방파제 체체가 파괴될 확률은 상당히 감소하고 있다. 이는 수리학적 안전성 해석에서 허용피해율의 개념과 동일하다고 생각하면 이해가 쉬울 것이다. 그림 중에서 갑작스럽게 파괴확률이 증가하는 이유는 해당 파고가 내습하면 이미 허용파손율을 넘는 파괴가 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 수리학적 안전성과 함께 구조적 안전성을 동시에 고려할 경우, Fig. 5와 같은 결과는 설계에 매우 유익한 정보를 제공할 수 있다고 판단된다. 왜냐하면 구조적 불안전성에 의하여 방파제 체체가 파괴될 확률을 파고의 함수로 간단히 제시하기 때문이다.

이상에서는 파고의 함수로 구조적 불안전성, 즉, 피복제의 단면파괴에 의하여 발생하는 방파제 체체의 파괴확률을 Bernoulli 과정을 이용하여 구하였다. 마지막으로 이와 같은 파괴가 단위년 동안에 발생할 확률을 구하게 되

Table 6. Probability of failure of a breakwater per year

Allowable fracture ratio	P_f
5%	0.1408
10%	0.0315
15%	0.0079
20%	0.0022

면 내용년수에 따른 방파제 체체의 파괴확률을 구할 수 있다. 단위년 동안에 발생할 파괴확률은 다음 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$P_f = \int P_f(B_r|H_s) f_{H_s}(H_s) dH_s \quad (12)$$

여기서 $f_{H_s}(H_s)$ 는 단위년 동안에 발생한 파고의 극치분포함수이다. 따라서 식 (12)는 구조적 불안전성에 의하여 발생하는 평균적인 방파제 체체의 파괴확률을 구한다는 것을 의미하게 된다. 앞의 자료들을 이용하여 구한 단위년 동안의 파괴확률을 Table 6에 제시하였다. Table 6의 결과를 얻기 위한 파고분포로 형태변수, 위치변수, 그리고 축척변수가 각각 1.00, 3.95, 그리고 0.90의 Weibull 분포를 사용하였다(CIAD, 1985). 앞의 Fig. 5로부터 이미 예상할 수 있었듯이 허용파손율이 작아짐에 따라 방파제 체체의 파괴확률은 상당히 크게 나타날 수 있다. 마지막으로 내용년수에 따른 방파제의 파괴확률을 허용파손율에 따라 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 6의 결과는 누적파괴확률이 아니라, 유지보수가 매년 수행된다는 개념 하에 계산된 결과이다. 그림에서 볼 수

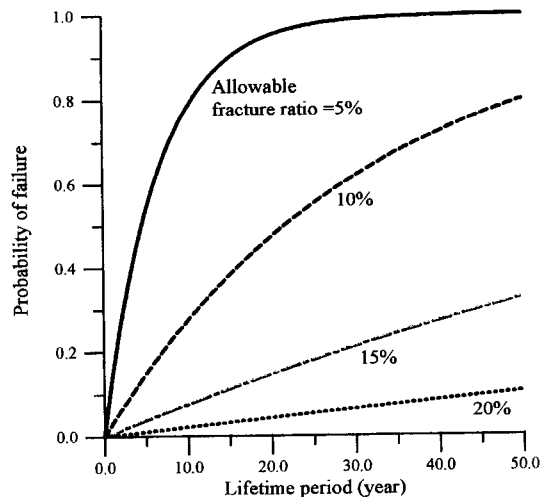


Fig. 6. Probability of failure of a breakwater with respect to lifetime periods.

있듯이 내용년수에 따른 파괴확률도 허용파손율에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 수리학적 안전성과 함께 구조적 안전성도 고려하여 방파제를 설계할 때는 허용피해를 뿐만 아니라 허용파손율의 개념이 반드시 함께 고려되어야 한다. 허용파손율의 범위를 정하는 문제는 피해 자료를 수집, 분석한다면 올바르게 설정될 수 있으리라 판단된다. 본 연구에의 결과를 근거로 유추해보면 대략 10% 정도가 허용파손율로 적절하다 판단된다.

이상의 결과를 보면 다가지를 가지면서 중량이 큰 콘크리트 피복재를 사용한 방파제의 안전성을 검토하는데 현재까지는 수리학적 안전성만을 고려하고 있는데, 구조적 안전성에 대한 고려도 반드시 필요하다고 판단된다. 특히 우리나라와 같이 30 ton 이상의 TTP가 아주 많이 사용되는 상황에서는 구조적 안전성에 대한 검토는 수리학적 안전성 못지않게 중요하다고 판단된다.

5. 결 론

수리학적 안전성을 만족함에도 불구하고 경사제의 피복층에 거치된 피복재가 대규모 피해를 입은 사례가 많다. 이는 구조적 안전성이 만족되지 못하기 때문이다. 즉, 피복재의 단면파괴에 의하여 중량이 감소되면 피복재는 쉽게 거치된 위치를 이탈하여 수리학적 불안전성으로 이어지기 때문이다. 현재까지는 상사성의 제한에 의하여 이와 같은 문제들이 수리모형실험에서 잘 파악되지 못하였다. 특히 상대적으로 수심이 깊은 영역에서 수리학적 안전성을 향상시키기 위한 방법, 즉, 맞물림의 효과를 증대시키기 위하여 다가지를 가지면서 단면이 훌쭉한 중량이 큰 Dolos나 TTP와 같은 콘크리트 피복재에서는 구조적 안전성에 대한 해석이 매우 중요한 검토사항으로 취급되어야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 현상을 신뢰성 해석기법을 이용하여 해석하였다. 신뢰성 해석기법을 적용하기 위하여 유도된 신뢰함수는 피복재의 흔들림 또는 동요의 크기를 정량적으로 나타내는 회전각의 함수로 유도되었다. 입사파랑에 의하여 증가된 피복재의 위치에너지가 피복층 또는 피복재간의 충격력으로 전환된다는 물리적인 개념을 적용한 것이다. FORM의 Level II의 기법을 이용하여 신뢰함수와 관련된 변수, 즉, 주어진 방파제 단면에 거치된 피복재의 재질적 성질 및 기하학적 형상과 관련된 확률변수들이 단면파괴에 미치는 영향 정도가 자세히 해석되었다. 피복재의 흔들림을 정량적으로 나타내는 회전각의 함

수로 피복재의 단면파괴에 대한 확률이 먼저 산정되었다. 또한 회전각의 크기를 입사파랑의 파고와 연관시킬 수 있는 기법이 제시되었다. 이때 입사파고에 따라 피복재가 흔들릴 확률과 회전각의 크기 관계가 CIAD(1985)의 자료를 근간으로 동시에 고려되었다. 따라서 파고의 함수로 피복재 개개의 단면파괴에 대한 파괴확률이 산정되었다. 이와 같은 자료를 가지고 Bernoulli 과정과 허용파손율의 개념을 동시에 고려하여 피복재의 단면파괴가 어떻게 방파제 체체의 파괴확률로 이어지는지가 해석되었다. 해석에 의하면 본 연구에서 도입된 허용파손율을 어떻게 정의하느냐에 따라 피복재의 단면파괴에 의하여 유발되는 방파제 체체의 파괴확률이 다르게 거동되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 중량이 큰 콘크리트 피복재를 사용하여 방파제를 설계할 때는 수리학적 안전성 뿐만 아니라 구조적 안전성도 중요하게 고려되어야 한다.

이상의 결과를 보면 다가지를 갖는 콘크리트 피복재를 사용한 경사제의 안전성을 검토하는데 현재까지는 수리학적 안전성만을 고려하고 있는데, 구조적 안전성에 대한 고려도 반드시 필요하다고 판단된다. 특히 우리나라와 같이 30 ton 이상의 TTP가 아주 많이 사용되는 상황에서, 구조적 안전성에 대한 올바른 검토는 수리학적 안전성의 검토 못지않게 중요하다고 판단된다. 따라서 수리모형실험을 수행할 때는 두 가지 측면의 안전성이 함께 고려되어야 한다.

참고문헌

- Baird, W.F., Readshaw, J.S., Scott, R.D., and Turcke, D.J., 1986. A procedure for the analysis and design of concrete armor units, *Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1739-1753.
- Burcharth, H.F., 1981. Full-scale dynamic testing of Dollosses to destruction, *Coast. Engrg.*, **4**, pp. 229-251.
- Burcharth, H.F. and Brejnegaad-Nielsen, T., 1986. The influence of waist thickness of Dolosse on the hydraulic stability of Dolosse armour, *Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1783-1796.
- Burcharth, H.F., Howell, G.L., and Liu, Z., 1991. On the determination of concrete armour unit stresses including specific results related to Dolosse, *Coast. Engrg.*, **15**, pp. 107-165.
- Burcharth, H.F., d'Angremond, K., Van der Meer, J.W., and Liu, Z., 2000. Empirical formula for breakage of Dollosse and Tetrapods, *Coast. Engrg.*, **40**, pp. 183-206.
- CIAD, 1985. *Computer aided evaluation of the reliability of a*

- breakwater design*, Zoetermeer, Netherlands, pp. 105-121.
- Haldar, A. and Mahadevan, S., 2000. *Probability, reliability and statistical methods in engineering design*, John Wiley & Sons, New-York.
- Howell, G.L., 1988. Measurements of forces on Dolos armor units at prototype scale, *Proc. 21st. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2355-2369.
- Lin, W.M., Rau, C., and Su, R.L., The structural responses of Dolos armor units under the dynamic loading, 1986. *Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2065-2078.
- McDougal, W.G., Melby, J.A., and Tedesco, J.W., 1988. Wave forces on concrete armor units, *J. of Waterway, Port, Coast. and Ocn. Engrg.*, ASCE, **114**(5), pp. 582-598.
- Nishigori, W., Endo, T., and Shimada, A., On stress in Tetrapods under wave action, 1986. *Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2119-2132.
- PIANC, 1992. *Analysis of rubble mound breakwaters*, Permanent Int. Assoc. of Navig. Cong., Belgium.
- Scott, R.D., Turcke, D.J., and Baird, W.F., 1986. A unique installation scheme for measuring loads in model Dolos units, *Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2212-2223.
- SPM, 1984. Coastal Engineering Research Center, US Army Corps Engineers, Washington, DC.
- Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J., 1982. *Structural reliability theory and its applications*, Springer-Verlag, New-York.
- Timco, G.W., 1983. On the structural integrity of Dolos units under dynamic loading conditions, *Coast. Engrg.*, **7**, pp. 91-101.
- Zwamborn, J.A., Scholtz, D.J.P., and Claassens, H. 1988. Stability and structural behaviour of strength improved Dolosse, *Proc. 21st. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2075-2089.

Received February 7, 2003

Accepted April 15, 2003