

소단형 방파제의 안정성에 대한 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Stability of Berm Breakwaters

이철응*
Cheol-Eung Lee*

요 지 : 수리학적 파괴모드인 소단의 후퇴거리와 구조적 파괴모드인 사석재의 파손에 대한 발생 가능성을 확률적으로 해석할 수 있는 신뢰성 해석 모형이 개발되었다. 본 연구에서 수립된 신뢰함수를 이용하여 관련 변수들의 불확실성을 고려할 수 있는 AFDA(Approximate Full Distribution Approach)법과 Monte-Carlo 모의법이 개발되었다. 다른 연구 결과들과 상호 비교하여 신뢰성 해석 모형이 올바르게 수립되었음을 확인할 수 있었다. 또한 기존의 연구자들이 수행하지 못한 각 파괴모드와 관련된 확률변수들의 영향이 해석되었다. 마지막으로 동일한 입사파랑 조건에서 발생하는 두 파괴모드의 의존성을 산정하기 위해 다중파괴모드에 대한 해석도 수행하였다. 다중 파괴모드 해석 결과에 의하면 허용 후퇴거리 일정 이상의 범위에서는 구조적 파괴모드가 소단형 방파제의 주 파괴모드가 됨을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 소단형 방파제, 소단 후퇴거리, 파손, 다중파괴모드, 신뢰성 해석

Abstract : Two reliability models, AFDA(Approximate Full Distribution Approach) and Monte-Carlo simulation method, are directly developed to study on both hydraulic failure mode of berm recession and structural failure mode of armour breakage of berm breakwaters. By comparing the present results with the results of other researcher, it may be confirmed that two reliability models can be straightforwardly applicable to berm breakwaters. Relative influence of each random variable on hydraulic and structural failure probabilities could be properly analyzed. The upper bound and the lower bound of failure probability can be evaluated by using bi-modal bounds of the multiple failure mode analysis, from which it may be possible to investigate some kinds of dependence into between two failure modes. Finally, it may also be found that the structural failure mode of armour breakage could become a main failure mode of berm breakwaters in the condition of more than any allowable berm recession.

Keywords : Berm breakwaters, berm recession, breakage, multiple failure mode, reliability analysis

1. 서 론

소단형 방파제(berm breakwater)는 경사제(rubble-mound breakwaters)와 유사한 단면 형태를 가지나 전면에 일정 크기의 소단을 설치하여, 소단이 방파제 체체의 전반적인 안정성과 기능을 유지하도록 고안된 방파제이다. 입사파랑의 에너지가 소단에 의하여 차단되기 때문에 경사제에서 요구되는 피복재의 중량보다 작은 중량으로 안정성을 유지할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 기존의 경사

제 보다 경제적으로 방파제를 건설할 수 있다. 특히 경사제에서는 근본적으로 피복층에 거치된 피복재의 이탈이동이 거의 허락되지 않는다. 그러나 소단형 방파제에서는 소단상에 거치된 피복재의 이동이 상대적으로 허락된다. 즉, 일정 크기/체원의 소단을 설치하여 파랑과의 상호작용에 의하여 소단 스스로 평형상태를 찾아가, 방파제 체체의 안정성과 기능성 그리고 경제성이 만족되도록 한다. 소단형 방파제의 안정성 및 기능적 관점 뿐만 아니라 경제적인 관점에서의 성공적인 건설 사례들을 유럽의 여러 나라에서

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

볼 수 있다(Sigurdarson et al., 2000; PLANC MarCom WG 40, 2003).

현재까지 경사제를 대체하기 위하여 고안된 소단형 방파제의 형태는 크게 세 가지로 구분된다(Torum et al., 2003). 하나가 정적으로 안정한 형태(static non-reshaping profile)이다. 이와 같은 형태는 경사제와 유사한 피복재의 중량을 사용하여 소단으로 보강한 단면이 항구적으로 유지된다는 개념이다. 따라서 소단과 체체를 잘 조합하여 설계하면 기존 콘크리트 피복재로 피복된 경사제의 대체 수단으로도 활용될 수 있다. 다른 하나는 체체의 안정성이 크게 위협받지 않는 범위내에서 경사제 보다 더 유연하게 체체 전면에 설치된 소단의 변형을 허락하는 정적으로 변형된 안정한 형태(static reshaped-stable profile)이다. 마지막으로 경사제의 적정 중량보다 작은 중량의 다양한 피복재들을 체체 전면의 소단상에 거치하여, 피복재 스스로가 파랑작용에 의하여 피복층을 따라 이동하면서 점차 안정상태를 찾아가도록 하는 동적으로 안정한 형태(dynamic stable profile)이다. 따라서 가장 경제적인 형태인 동적으로 안정한 소단형 방파제를 올바르게 설계하기 위해서는 먼저 소단의 궁극적인 변형이 올바르게 예측되어야 한다. 이와 같은 소단의 변형은 근본적으로 피복재의 중량과 입사파랑의 조건에 따라 매우 불규칙하게 나타날 것이다. 이와 같은 문제를 해석하기 위하여 본 연구에서는 동적으로 안정한 소단형 방파제에 대한 안정성을 신뢰성 해석 개념으로 연구하였다. 지난 여러 해 동안 소단형 방파제에 대한 연구들이 Sigurdarson et al.(2000), Hall and Kao(1991) 그리고 Juhl and Sloth(1998) 등의 연구자들에 의하여 이루어 졌다. 특히 Torum(1998)은 처음으로 소단의 후퇴거리(berm recession)를 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다. 수리모형실험을 통해 여러 파랑조건으로부터 얻어진 결과를 가지고 입사파랑의 파고, 주기 그리고 피복재의 크기 및 밀도의 함수로 구성된 2차 다항식을 제안하였다. 그 후 Torum et al.(2000)은 기존 경험식을 보완하기 위하여 3차 다항식을 제안하였다. 한편 Torum et al.(2000)은 실험자료를 통계적으로 해석하여 소단의 후퇴거리에 따른 확률적인 해석도 수행하였다. 즉, 소단의 후퇴거리에 따른 발생 파괴확률을 산정하였다. 그러나 이들의 해석은 소단의 후퇴거리만을 단지 하나의 확률변수로 고려하여, 그것이 정규분포를 따른다는 단순한 가정을 사용하였다. 따라서 실제로 중요한 파고, 주기 그리고 피복재와 관련된 여러 확률변수들의 각 특성들이 올바르게 고려되지 않았으며, 또한 소단의 후퇴에 미치는 각 확률변수들의 영향을 해석하

지 못했다.

이미 전 절에서 언급 되었듯이 동적으로 안정한 소단형 방파제에서는 입사 파랑조건에 따라 소단상의 피복재가 움직이면서 안정 평형 상태를 찾아간다. 어떤 특정한 파고까지는 정적으로 안정한 형태를 유지하다가 그 파고보다 큰 파고가 내습하게 되면 동적으로 변형되는 특성을 나타내게 된다. 동적 변형의 크기는 소단의 후퇴거리로 측정할 수 있지만 피복재가 이동되면서 다른 현상이 복합적으로 발생되게 된다. 즉, 피복재가 이동하면서 다른 피복재와 충돌하게 되는데, 이 과정에서 원래의 피복재들이 마모되거나 절단/파손되어 처음 거치된 중량보다 작은 중량의 피복재로 왜곡된다. 이는 바로 동일한 파고에서도 경험식에 의하여 예측되는 것보다 더 큰 소단의 후퇴로 이어질 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 문제를 해석하기 위하여 Torum et al.(2002)은 사석재의 파손에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. 실험 자료를 근거로 충격력과 저항력을 극치분포를 따르는 하나의 확률변수로 고려하여 사석재의 중량에 따른 파괴확률을 산정하였다. 먼저 무차원 변수인 안정계수(stability parameter)의 함수로 사석재의 이동속도를 해석하였다. 이들은 사석재의 이동속도가 안정계수와 상관성이 없다고 가정하였다. 이 가정을 근거로 충격력의 분포함수를 결정하고, 낙하실험에 의하여 얻어진 저항력의 분포함수와 결합하여 파괴확률을 근사적으로 산정하였다. 따라서 사석재의 이동속도에 미치는 입사파랑의 영향이 얼마인지에 대한 해석을 하지 못하였다. 또한 저항력의 분포함수에 미치는 각 확률변수들의 영향이 얼마인지에 대한 해석도 수행하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 앞에서 언급한 두 파괴모드, 즉, 수리학적 파괴모드(hydraulic failure mode)인 소단의 후퇴거리와 사석재의 파손에 대한 구조적 파괴모드(structural failure mode)에 대해 단일파괴모드(single failure mode) 개념으로 각각 신뢰성 해석을 수행하였다. 이때 기존의 연구자들이 수행하지 못한 각 확률변수들의 파괴확률에 미치는 영향을 해석하기 위하여 파괴모드와 관련된 모든 변수들을 확률변수로 고려하였다. 먼저 본 연구에서 개발한 AFDA(Approximate Full Distribution Approach)법과 Monte-Carlo 모의법을 함께 적용하여 Torum et al.(2000, 2002)의 결과와 비교하였다. 또한 각각의 확률변수들이 파괴확률에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여도 자세히 해석하였다. 마지막으로 두 파괴모드를 복합적으로 해석할 수 있는 다중파괴모드(multiple failure mode)에 대한 해석을 수행하였다. 이는 앞에서 언급된 것처럼 두 파괴모드가 동일

한 입사파랑 조건에서 독립적이기 보다는 상호 의존적이기 때문이다.

2. 수리학적 파괴모드에 대한 신뢰성 해석

Fig. 1에 나타난 소단형 방파제에 설치된 소단의 후퇴거리에 대한 수리학적 파괴모드를 신뢰성으로 해석하기 위하여는 파괴상태에 대한 정의와 신뢰함수의 올바른 수립이 우선적으로 필요하다. 본 연구에서는 Torum et al.(2000)이 제안한 3차 다항식을 이용하여 신뢰함수가 수립되었다. 이때 예측된 소단의 후퇴거리가 설계시 허용된 소단의 후퇴거리보다 크게 발생하는 상태를 파괴상태라 정의하였다. 따라서 Torum et al.(2000)의 3차 다항식에 파괴상태에 대한 정의를 도입하고 변수변환을 이용하면 다음 식 (1)과 같은 수리학적 파괴모드에 대한 신뢰함수를 쉽게 수립할 수 있다.

$$Z_H = (Res)_{allow} \Delta^3 D_n^{3.5} - (c_1 g^{3/2} H_s^3 T_z^3 + c_2 g H_s^2 T_z^2 \Delta D_n^{1.5} + c_3 g^{1/2} H_s T_z \Delta^2 D_n^3 - c_4 \Delta^3 D_n^{4.5}) \quad (1)$$

여기서 $(Res)_{allow}$ 는 허용된 소단의 후퇴거리, $\Delta = \rho_s / \rho_w - 1$, ρ_s 와 ρ_w 는 각각 피복재와 물의 밀도이고, c_1, c_2, c_3, c_4 는 경험상수이다. D_n 은 피복재의 대표길이, g 는 중력가속도, H_s 는 유의 입사파고, T_z 는 입사파랑의 침투주기이다. 따라서 우변의 첫 항이 저항력이 되고 두 번째 항이 하중이 된다. 따라서 하중이 저항력보다 크게 되면 파괴가 발생된다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 수리학적 파괴모드는 입사파랑 및 피복재의 특성을 나타내는 네 개의 변수에 의존하게 된다. 따라서 이들 네 개의 변수를 확률변수로 고려하여야 한다. 한편 경험상수도 확률변수로 고려할 수도 있지만 본 연구는 경험식의 예측능력을 산정하는 것이 아니라 수리학적 파괴모드에 미치는 입사파랑 및 피복재의 특성을 확률적으로 해석하는 것이기 때문에 본 연구에서는 이들을 상수로 취급하였다. 해석에 사용된 입력자료를 Table 1에 제시하였다(Burcharth,

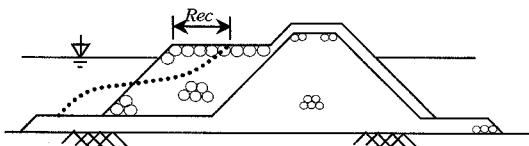


Fig. 1. Recession of berm breakwaters.

Table 1. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (1) for hydraulic failure mode.

Random variable	Mean	COV	Distribution
Δ	1.62	0.038	Normal
D_n (m)	1.95	0.067	Normal
T_z (sec)	10.40	0.100	Normal
H_s (m)	Various	0.160	Gumbel
c_1	0.0000027	0.000	-
c_2	0.000009	0.000	-
c_3	0.11	0.000	-
c_4	0.8	0.000	-

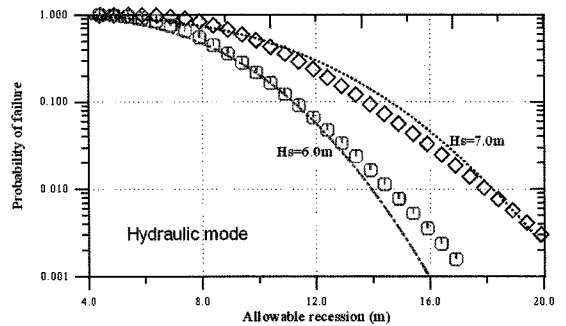


Fig. 2. Comparison of the present results(—, —) with those of Torum et al.(2000)'s results(\diamond , \square) for hydraulic failure mode.

2000; Van der Meer, 1995).

먼저 식 (1)의 신뢰함수와 Table 1의 입력자료를 이용하여 해석된 결과를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2는 AFDA법의 결과와 Torum et al.(2000)의 결과를 비교한 것이다. 전반적으로 경향은 잘 일치하고 있다. 그러나 허용 후퇴거리가 일정치 이상인 영역에서는 입사파랑의 조건에 따라 결과에 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 확률변수를 고려하는 해석 방법의 차이에 의한 것으로 판단된다. 즉, Torum et al.(2000)의 결과는 단지 후퇴거리를 정규분포라 가정하여 해석한데 반해 본 연구의 AFDA법은 관련변수들을 모두 확률변수로 취급하여 해석하였다. 또한 AFDA법의 결과와 Monte-Carlo 모의법의 결과를 비교한 그림이 Fig. 3과 Fig. 4이다. Fig. 3은 주어진 허용 후퇴거리에 대한 신뢰함수의 확률밀도함수를 비교한 것이고, Fig. 4는 허용 후퇴거리에 대한 파괴확률을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 수립된 수리학적 파괴모드에 대한 AFDA법은 올바르게 수립되었다고 판단된다. 한편 각 확률변수들의 파

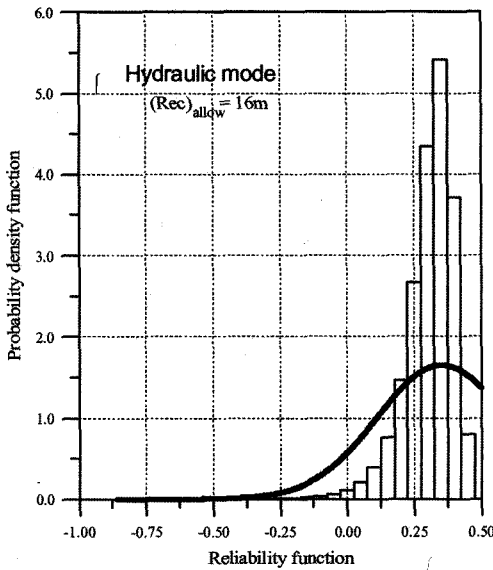


Fig. 3. Comparison of probability density function of AFDA (—) with that of Monte-Carlo simulation(---) for hydraulic failure mode.

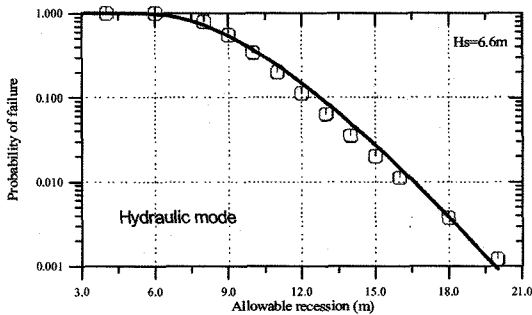


Fig. 4. Comparison of AFDA results(—) with those of Monte-Carlo simulation(□) for hydraulic failure mode.

Table 2. Relative importance of random variables to hydraulic failure probability.

Random variable	(Rec) _{allow} (m)	α_i	α_i^2
Δ	15	-0.300	0.090
	16	-0.310	0.096
	18	-0.327	0.107
D_n	15	-0.536	0.287
	16	-0.564	0.318
	18	-0.612	0.375
T_z	15	0.273	0.075
	16	0.246	0.061
	18	0.203	0.041
H_s	15	0.741	0.549
	16	0.725	0.526
	18	0.691	0.477

파괴물에 미치는 영향의 정도를 살펴보기 위하여 AFDA 법으로부터 산정된 여러 조건에 따른 영향계수, α_i 를 Table 2에 제시하였다. 표에서 알 수 있듯이 피복재와 관련된 확률변수는 저항력에 기여하고 입사파랑과 관련된 확률변수는 하중에 기여하고 있다. 특히 파괴확률에 미치는 영향의 정도는 파고, 피복재의 크기 그리고 상대밀도 순으로 나타나고 있다. 그러나 주기에 대한 영향은 상대적으로 작게 나타나고 있다.

3. 구조적 파괴모드에 대한 신뢰성 해석

피복재가 파랑작용에 의하여 소단을 따라 움직이게 되면 인접한 피복재들 사이에 충돌이 일어나게 된다. 이 과정에 각각의 피복재에 충격력이 가해지게 된다. 따라서 피복재가 충격력에 저항할 수 있는 구조적 저항력을 갖지 못하면 피복재는 파손된다. 이와 같은 현상을 본 연구에서 구조적 파괴모드라 정의하였다.

구조적 파괴모드를 신뢰성 이론으로 해석하기 위해서는 먼저 충격력과 저항력에 대한 통계치와 분포함수에 대한 자료가 필요하다. Torum et al.(2002)은 이를 위하여 수리 모형실험과 낙하 충격 실험을 수행하였다. 먼저 충격력에 대한 특성을 얻기 위하여 입사파랑 및 피복재의 특성에 따른 피복재의 이동속도를 수리모형실험에서 관측하였다. 이는 충격력이 피복재의 이동속도에 의존하기 때문이다. 한편 낙하 충격 실험에서는 피복재가 내재하고 있는 충격에 대한 피복재의 구조적 저항력을 산정하였다. 현재까지 이에 대한 연구들이 거의 이루어지지 않았기 때문에 비록 제한적이긴 하지만 본 연구에서도 이들의 자료를 사용하였다. 다음 식 (2)는 피복재가 이동하면서 인접한 피복재와의 충돌할 때 발생하는 충격력 중에서 피복재의 파손에 기여하게 되는, 순수하게 피복재 내부로 전달되는 충격력 성분을 유효 충격에너지, E 로 나타낸 것이다.

$$E = \frac{1}{2}mK_s g H_s \Phi_v \quad (2)$$

여기서 m 은 피복재의 질량, $\Phi_v = V_s^2/gH_s$, V_s 는 피복재의 이동속도, 그리고 K_s 는 충격계수이다. 한편 피복재가 충격에 저항할 수 있는 저항에너지, P 는 다음 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{P}{P_{50}} = e^{-(0.5 - F_p)/\beta_0} \quad (3)$$

여기서 P_{50} 은 임의의 피복재를 50% 파손시키는데 필요

한 에너지이고, F_p 는 파손율을 의미하고, β_o 는 실험으로부터 결정되는 경험상수이다. Torum et al.(2002)은 $P_{50}=kV^\alpha$ 의 관계식을 제안하였다. 여기서 k , α 는 경험상수이고, V 는 피복재의 부피이다. 따라서 식 (2)와 식 (3)을 이용하면 구조적 파괴모드에 대한 신뢰함수를 다음 식 (4)와 같이 수립할 수 있다.

$$Z_s = kV^\alpha e^{-(0.5-F_p)/\beta_o} - \frac{1}{2}mgH_sK_i\Phi_v \quad (4)$$

식 (4)의 우변 첫 항이 저항에너지를, 두 번째 항이 충격에너지 나타낸다. 식 (4)에 수립된 구조적 파괴모드의 신뢰함수에는 많은 변수들이 음함수적으로 포함되어 있다. 이 중 본 연구에서는 수리학적 파괴모드 해석에서 접근한 방법에 따라 가장 중요하다고 생각되는 5개의 변수를 확률변수로 고려하였다. AFDA법과 Monte-Carlo 모의법으로 소단형 방파제의 소단상에 거치된 피복재의 파손율 신뢰성 해석하는데 사용한 입력 자료들을 Table 3에 제시하였다. 제시된 바와 같이 파고와 충격력의 확률변수들은 극치분포로 가정하였고, 변동 폭이 그리 크지 않을 것으로 예상되는 확률변수들은 정규분포로 가정하였다.

식 (4)의 신뢰함수와 Table 3의 입력 자료를 이용하여 산정된 구조적 파괴모드에 대한 신뢰성 해석 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 파손율에 대한 함수로 파괴확률을 산정하여, Torum et al.(2002)의 결과, AFDA법의 결과 그리고 Monte-Carlo 모의법의 결과를 비교하였다. 그림에 의하면 AFDA법의 결과와 Monte-Carlo 모의법의 결과는 매우 잘 일치하고 있다. 그러나 Torum et al.(2002)의 결과는 파손율에 상관없이 파괴확률이 항상 일정하게 나타나고 있다. 이는 파손율에 상관없이 저항에너지와 하중에너지를 각각 하나의 확률변수로 고려하였기 때문이다. 따라서 Torum et al.(2002)의 방법으로 산정된 파괴확률은 파손율이 대략 40%에 해당하는 결과이다. 이는 소단형 방파제의 피복재 파손에 대한 확률론적 해석을 수행하기 위하여 제안된

Table 3. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (4) for structural failure mode.

Random variable	Mean	COV	Distribution
k	98,306.0	0.20	Normal
β_o	0.504	0.10	Normal
K_i	1.4	0.15	Normal
H_s (m)	6.6	0.16	Gumbel
Φ_v	0.285	0.16	Weibull

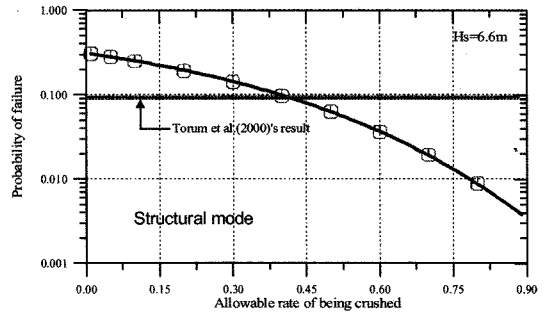


Fig. 5. Comparison of AFDA results(—) with those of Monte-Carlo simulation(□) for structural failure mode.

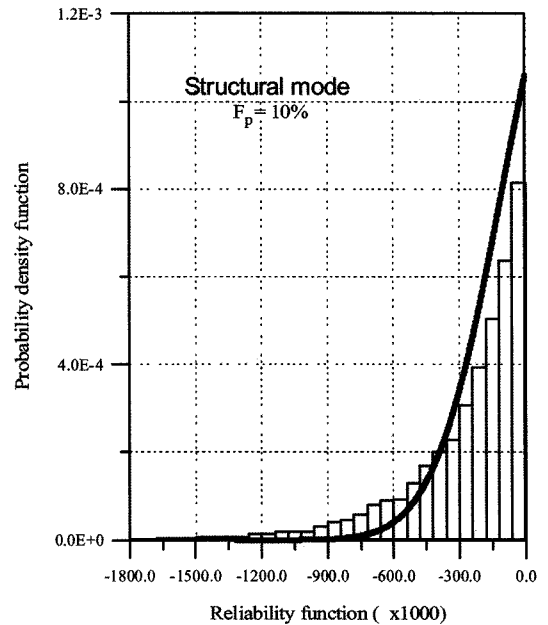


Fig. 6. Comparison of probability density function of AFDA (—) with that of Monte-Carlo simulation(□) for structural failure mode.

Torum et al.(2002)의 방법은 그 적용성에 제약을 갖게 된다는 의미와 동일하다. 한편 Fig. 6에 AFDA법과 Monte-Carlo 모의법에 의하여 산정된 에 해당하는 신뢰함수의 확률밀도함수를 제시하였다. 신뢰성 이론의 개념에서 보면 두 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다. 이는 Fig. 5에 제시된 결과로부터 확인할 수 있다. 즉, Fig. 5의 결과는 Fig. 6에 제시된 확률밀도함수의 면적에 해당하기 때문이다.

마지막으로 구조적 파괴모드에 영향을 미치는 확률변수들의 파괴확률에 대한 영향 정도를 해석하였다. 각 확률변수들의 영향계수를 Table 4에 제시하였다. 표에서 볼 수 있

Table 4. Relative importance of random variables to structural failure probability.

Random variable	F_p (%)	α_i	α_i^2
k	1	-0.182	0.033
	5	-0.186	0.035
	10	-0.192	0.037
β_o	1	-0.088	0.008
	5	-0.083	0.006
	10	-0.076	0.006
K_i	1	0.060	0.004
	5	0.053	0.003
	10	0.044	0.002
H_s	1	0.060	0.004
	5	0.052	0.003
	10	0.043	0.002
Φ_v	1	0.976	0.953
	5	0.976	0.953
	10	0.976	0.953

듯이 무차원 형태로 표시된 피복재의 이동속도가 구조적 파괴모드를 거의 지배하고 있음을 알 수 있다. 이는 피복재의 파손에 대한 정확한 연구를 위해서는 먼저 피복재의 이동속도에 대한 많은 연구가 선행되어야 한다는 것을 의미한다. 즉, 다양한 조건에서의 수리모형실험이나 현장관측 자료를 이용하여 입사파랑 조건과 피복재 증량에 따라 피복재의 이동속도를 예측할 수 있는 경험식과 그와 관련된 여러 통계적 특성들이 해석되어야 한다.

4. 다중파괴모드에 대한 신뢰성 해석

소단형 방파제에서 중요하게 고려되는 두개의 파괴모드, 즉, 수리학적 파괴모드와 구조적 파괴모드에 대한 단일 신뢰성 해석 모형이 올바르게 수립되고 해석되었다. 이미 서론에서 언급된 바와 같이 이들 두 파괴모드는 독립적으로 발생하는 것이 아니라 각 파괴모드의 발생에 서로 영향을 주게 된다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 별개의 단일 파괴모드보다는 두개의 모드를 동시에 복합적으로 고려할 수 있는 다중파괴모드로 해석되어야 한다는 것을 의미한다.

현재까지 제시된 대부분의 다중파괴모드 해석법은 파괴 확률이 발생할 수 있는 상한치(upper bound)와 하한치(lower bound)를 계산하는 것이다(Ang and Tang, 1984). 즉, 다중파괴모드의 해석에서는 어떻게 하면 상·하한치의 간격을 최대한 줄일 수 있느냐 하는 것이 연구의 핵심이 된다. 따라서 본 연구에서는 보다 정확한 해석을 위하여 일차법(uni-modal bounds)이 아닌 아래에 설명된 이차법(bi-

modal bounds)을 이용하였다.

임의의 시스템에 N 개의 파괴모드가 존재할 경우, 파괴 확률의 상한치와 하한치는 다음 식 (5)에 의하여 산정될 수 있다.

$$p_{F_1} + \text{Max} \left[\sum_{i=2}^N \left\{ p_{F_i} - \sum_{j=1}^{i-1} P(E_i E_j)_L \right\}, 0 \right] \leq p_F \leq \sum_{i=1}^N p_{F_i} - \sum_{i=2, j < i}^N \text{Max} [P(E_i E_j)_U] \quad (5)$$

여기서 $p_{F_i} = P(E_i)$ 는 단일파괴모드로부터 산정된 i 번째 파괴모드의 파괴확률이고, $E_i = [Z_i(\vec{X}) < 0]$ 이다. $P(E_i E_j)$ 는 i 번째 파괴모드와 j 번째 파괴모드가 동시에 발생할 확률이다. 따라서 식 (5)를 이용하여 다중파괴모드의 상한치와 하한치를 계산하기 위해서는 먼저 각 파괴모드에 대한 파괴확률과 $P(E_i E_j)$ 를 계산해야만 한다. 이는 다중파괴모드를 해석하기 위해서는 단일파괴모드에서 산정된 해석결과, 즉, 파괴확률과 각 확률변수의 영향계수들이 필요하다.

먼저 식 (5)의 상·하한치에 존재하는 i 번째 파괴모드와 j 번째 파괴모드가 동시에 발생할 파괴확률, $P(E_i E_j)$ 은 각각 다음 식 (6a)와 식 (6b)를 사용하여 산정될 수 있다.

$$P(E_i E_j)_L = P(A) + P(B) \quad (6a)$$

$$P(E_i E_j)_U = \text{Max} \{P(A), P(B)\} \quad (6b)$$

또한, 식 (6)의 $P(A)$ 와 $P(B)$ 는 다음 식 (7)과 같이 파괴모드간의 상관성이 고려될 수 있도록 정의된다.

$$P(A) = \Phi(-\beta_i) \Phi \left(\frac{\beta_j - \rho_{ij} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (7a)$$

$$P(B) = \Phi(-\beta_j) \Phi \left(\frac{\beta_i - \rho_{ij} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (7b)$$

여기서 ρ_{ij} 는 i 파괴모드와 j 파괴모드 간의 상관계수로서, 파괴점에서 접선면의 방향여현(direction cosine)을 사용하면 쉽게 구할 수 있다. 또한 β_i 는 단일 파괴모드 개념으로 해석된 i 파괴모드의 신뢰성 지수(reliability index)로 다음 식 (8)과 같은 관계를 갖는다.

$$P(E_i) = \Phi(-\beta_i) \quad (8)$$

비록 소단형 방파제에도 기초 지반의 부등침하로 인한 체체의 전반적인 파괴 등 여러 가지 파괴모드가 존재할 수는 있으나 본 연구에서는 소단형 방파제의 주요 파괴모드

Table 5. Correlation coefficient between hydraulic failure mode and structural failure mode evaluated in the present study.

$(Rec)_{allow}$ (m)	$F_p(\%)$	ρ_{ij}
10	1	4.710×10^{-2}
	5	4.082×10^{-2}
	10	3.376×10^{-2}
12	1	4.668×10^{-2}
	5	4.046×10^{-2}
	10	3.345×10^{-2}
16	1	4.350×10^{-2}
	5	3.770×10^{-2}
	10	3.118×10^{-2}

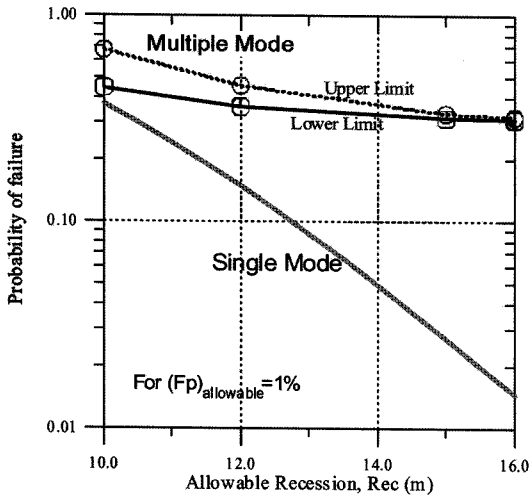


Fig. 7. Comparison of results of single failure mode with those of multiple failure mode for $F_p = 1\%$.

로 앞에서 해석한 수리학적 파괴모드와 구조적 파괴모드만을 고려하였다. 먼저 Table 5에 허용파손을 5%에 대한 수리학적 파괴모드와 구조적 파괴모드 간의 상관계수를 산정하여 제시하였다. 표에서 볼 수 있듯이 전반적으로 상관계수의 값은 작게 나타나고 있다.

한편 여러 가지 허용치에 대한 다중파괴모드의 결과들을 Fig. 7~11에 제시하였다. 먼저 Fig. 7은 파손율 1%에 대하여 허용 소단 후퇴거리의 함수로 나타난 파괴확률이다. 비교의 목적으로 단일파괴모드에 대한 결과도 함께 제시하였다. 그림에서 보면 허용 소단 후퇴거리가 10 m 이상이 되면 다중파괴모드로 해석했을 때의 결과가 단일파괴모드로 계산했을 때 보다 파괴확률이 크게 산정되고 있다. Fig. 8과 Fig. 9에 제시한 파손율 5%와 10%에 대한 결과에서도 이와 동일한 경향을 나타내고 있다. Table 5에

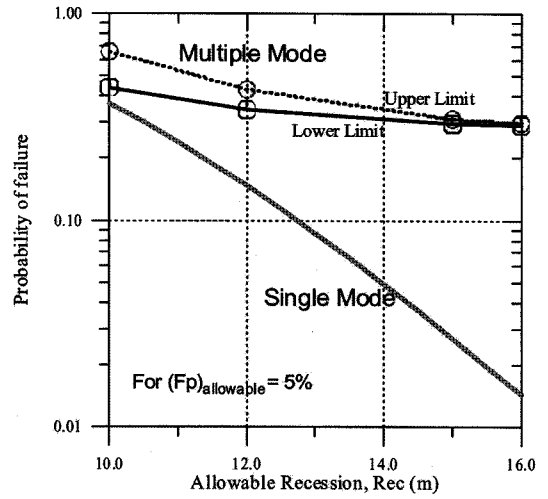


Fig. 8. Comparison of results of single failure mode with those of multiple failure mode for $F_p = 5\%$.

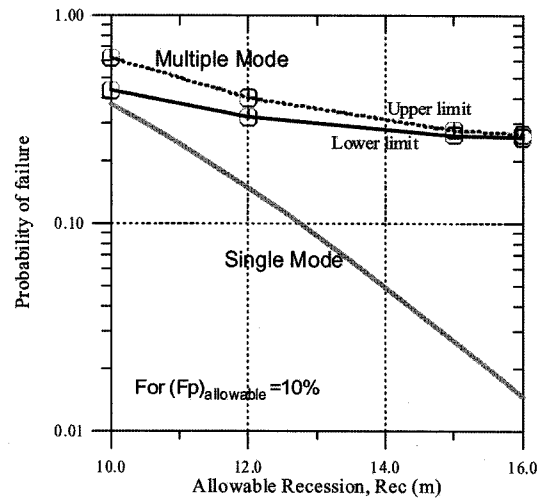


Fig. 9. Comparison of results of single failure mode with those of multiple failure mode for $F_p = 10\%$.

제시한 수리학적 파괴모드와 구조적 파괴모드 간의 상관계수가 작게 산정되어 단일파괴모드와 다중파괴모드간의 결과 차이가 없을 것으로 예상할 수 있으나 Fig. 7~9의 결과는 그와 다르게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다. 즉, 다중파괴모드 해석에서는 상관성이 조금이라도 있으면 파괴확률이 큰 파괴모드가 해당 시스템의 주 파괴모드가 되어 파괴확률이 작은 파괴모드의 영향은 거의 없어지게 된다는 의미이다(Thoft-Christensen and Baker, 1982). 따라서 지금과 같은 경우를 수리학적 파괴모드만을 이용하여 단일 파괴모드로 해석하게 되면 파

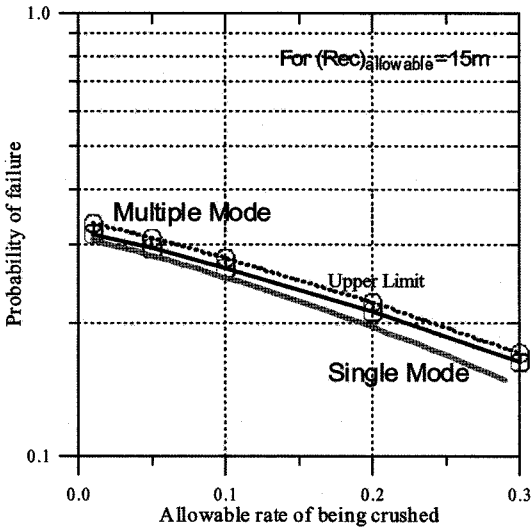


Fig. 10. Comparison of results of single failure mode with those of multiple failure mode for $(Rec)_{allowable} = 15\text{ m}$.

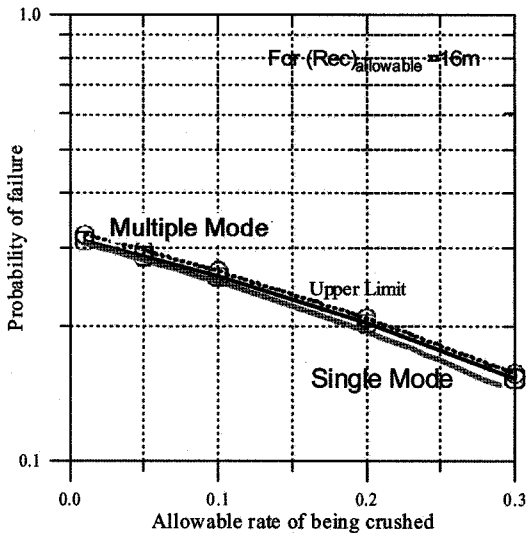


Fig. 11. Comparison of results of single failure mode with those of multiple failure mode for $(Rec)_{allowable} = 16\text{ m}$.

파괴율이 과소평가될 수 있게 된다. 이는 결국 구조물의 안정성이 과대평가되었다는 것을 의미한다. 따라서 상관계수가 작은 경우라도 다중파괴모드에 대한 해석이 반드시 수행되어야 한다. 다만 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 단일 파괴모드의 수와 상관성에 따른 영향이 좀더 해석되어야 할 것으로 판단된다. 또한 Fig. 10과 Fig. 11에는 소단 후퇴거리가 15m와 16m로 각각 허용되었을 때 파손율의 함수로 산정된 파괴확률의 결과를 제시하였다. 앞의

결과들과는 다르게 파손율의 함수로 산정된 결과는 다중 파괴모드와 단일파괴모드간의 결과가 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 이에 대한 것도 앞에서 설명한 개념에 의하면 쉽게 이해 될 수 있다. 따라서 본 경우에는 단일파괴모드로 해석하여도 구조물의 안정성이 올바르게 평가될 수 있다.

이상의 결과에서 볼 수 있듯이 단지 두 개의 파괴모드만을 고려하여 해석한 본 연구의 결과에서도 다중파괴모드에 대한 해석 결과가 단일파괴모드로 해석한 결과와 다른 경향을 나타내고 있다. 따라서 이에 대한 자세한 연구가 더 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

소단형 방파제의 안정성에 대한 신뢰성 해석이 AFDA 법과 Monte-Carlo 모의법으로 수행되었다. 이는 제체의 안정성과 기능성에 영향을 주는 각 확률변수들의 불확실성을 고려하기 위함이다. 본 연구에서는 소단형 방파제의 안정성과 직접적으로 연관되는 두 개의 파괴모드를 해석하였다. 하나가 소단의 후퇴거리를 나타내는 수리학적 파괴모드이고, 다른 하나가 사석재의 파손과 관련된 구조적 파괴모드이다. 기존의 연구자들이 수행하지 못한 각 확률변수들의 파괴확률에 미치는 영향을 해석하기 위하여 파괴모드와 관련된 모든 변수들을 확률변수로 고려하였다.

먼저 본 연구에서 개발된 AFDA 법과 Monte-Carlo 모의법을 수리학적 파괴모드와 구조적 파괴모드에 적용하였다. 또한 적용 결과들을 Torum et al.(2000, 2002)의 결과들과 비교하여 모형이 올바르게 수립되었음을 확인할 수 있었다. 한편 각각의 확률변수들이 파괴확률에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 민감도 분석도 자세히 해석하였다. 마지막으로 두 파괴모드를 복합적으로 해석할 수 있는 다중 파괴모드에 대한 해석을 수행하였다. 이는 앞에서 언급된 것처럼 두 파괴모드가 동일한 입사파랑 조건에서 독립적이기 보다는 상호 의존적이기 때문이다. 먼저 각각의 파괴모드에 대한 신뢰성 해석에서 구해진 영향계수를 이용하여 두 파괴모드간의 상관계수를 산정하였다. 비록 수리학적 파괴모드와 구조적 파괴모드 간의 상관계수가 작게 산정되어 단일파괴모드와 다중파괴모드간의 차이가 크지 않을 것으로 예상하였으나 결과는 그와 다르게 나타났다. 즉, 본 연구에서 해석된 결과에 의하면 단일파괴모드 개념으로부터 산정된 파괴확률은 다중파괴모드 개념으로 산정된 파괴확률보다 작게 나타나고 있다. 이는 단일파괴모드 개념으로 해석하게 되면 방파제의 안정성이 실제 보다 높게

평가될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 동적으로 안정한 소단형 방파제를 합리적으로 설계하기 위해서는 반드시 다중파괴모드에 대한 해석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2006년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였기에, 이에 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- Ang, A.H-S., and Tang, W.H. (1984). Probability concepts in engineering planning and design, John-Wiley & Sons, New York.
- Burcharth, H.F. (2000). Reliability based design of coastal structures. Chapter 6 in Coastal Engineering Manual, Part VI(CEM). Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mis. U.S.
- Frigaard, P., Jansen, M.S., and Hald, T. (1996). Stability of reshaping breakwaters with special referance to stone durability, Proc. 25th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, New York, pp.1640-1651.
- Hall, K., and Kao, S. (1991). A study of the stability of dynamically stable breakwaters, Canadian Journal of Civil Engineering, 18, pp.916-925.
- Juhl, J., and Sloth, P. (1998) Berm breakwaters - Influence of stone gradation, permeability and armouring, Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, New York, pp.1394-1406.
- PIANC MarCom WG 40 (2003). State-of-the-art of the design and construction of berm breakwaters, PIANC.
- Sigurdarson, S., Viggoson, G., Benediktsson, S., Einarsson, S., and Smarason, B. (1998). Berm breakwaters - fifteen years experience, Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, New York, pp.1407-1420.
- Sigurdarson, S., Smarason, O.B., and Viggoson, G. (2000). Design considerations of berm breakwaters, Proc. 27th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, New York, pp.1610-1621.
- Thoft-Christensen, P., and Baker, M.J. (1982). Structural reliability theory and its application, Springer-Verlag, New York.
- Torum, A. (1998). On the stability of berm breakwaters in shallow and deep water, Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, New York, pp.1435-1448.
- Torum, A., Krogh, S.R., Bjordal, S., Fjeld, S., Archetti, R., and Jakobsen, A. (2000). Design criteria and design procedures for berm breakwaters, Coast. Structures '99, Losada(ed.) pp.331-341.
- Torum, A., Krogh, S.R., and Fjeld, S. (2002). Berm breakwaters: Stone breaking strength, J. of Waterway, Port, Coast., and Ocn. Engrg., ASCE, 128(4), pp.163-172.
- Torum, A., Kuhnen, F., and Menze, A. (2003). On berm breakwaters. Stability, scour, overtopping, Coast. Engrg., 49, pp.209-238.
- Van der Meer, J.W. (1995). Conceptual design of rubble mound breakwaters, Advances in Coastal and Ocean Engineering, Vol. 1, World Scientific, Singapore.

Received June 8, 2007

Accepted August 16, 2007