

해수면 상승에 따른 경사식 해안 구조물의 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Sloped-Coastal Structures with Sea-Level Rise

이철웅*
Cheol-Eung Lee*

요지 : 신뢰성 해석을 이용하여 해수면 상승에 따른 경사식 해안 구조물의 안정성 및 기능성을 정량적으로 평가할 수 있는 위험도 평가 시스템을 개발하였다. 안정성 평가를 위한 피복재의 해석에서는 피복재의 대표입경과 제체의 경사, 기능성 평가를 위한 처오름의 해석에서는 제체의 경사와 마루높이를 변화시키면서 해수면 상승 전·후의 파괴확률이 정량적으로 산정되었다. 위험도 평가 시스템을 임의의 단면에 적용하여 해수면 상승에 따라 안정성과 기능성이 얼마나 감소하는지를 정확히 판정할 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과는 해수면 상승 후에도 전과 동일한 안정성 및 기능성을 회복하기 위해서 어떤 변수들을 보수·보강해야 하는지, 또한 새로운 구조물 설계시 설계변수들을 얼마나 강화해야 하는지의 기초 지표로 이용될 수 있다.

핵심용어 : 경사식 해안 구조물, 해수면 상승, 피복재, 처오름, 신뢰성 해석

Abstract : A system of risk assessment is developed by using the reliability analysis which evaluate quantitatively both stability and performance of sloped-coastal structures according to several scenarios of sea-level rise. By using reliability functions on armor unit and run-up, the probabilities of failure can be straightforwardly calculated with respect to several design parameters such as nominal diameter of armor unit, slope of coastal structure, and freeboard height. By comparing the results before and after sea-level rise, it may be possible to exactly assess some ranges of decrease of stability and performance of sloped-coastal structure with respect to sea-level rise. Therefore, it can also be possible to make a decision which parameters should be repaired or strengthened in order to maintain the original stability and performance of sloped-coastal structures. Finally, The present results may be useful for designing some kinds of new sloped-coastal structures including the effect of sea-level rise.

Keywords : sloped-coastal structures, sea-level rise, armor unit, run-up, reliability analysis

1. 서 론

지구 온난화에 따른 중요한 영향중의 하나가 해수면 상승(Sea-Level Rise:SLR)이다. 이와 같은 해수면 상승은 기존 해안 구조물의 안정성 및 기능성을 약화시킬 수 있다. 따라서 해수면 상승에 따라 안정성 및 기능성이 얼마나 약화되었는지를 평가할 수 있어야 하며, 또한 그 결과를 이용하여 보수·보강대책이 수립되어야 한다. 한편 새로운 해안 구조물을 설계할 때에도 해수면 상승효과가 올바르게 고려되어야 한다. 그럼에도 불구하고 해수면 상승과 해안 구조물의 상호작용에 대한 연구가 아직 활발하게 진행되지 못

하고 있다. 현재 해안 구조물 설계에서 지구 온난화에 따른 해수면 상승효과를 고려하는 방법은 약간의 수위를 증가시켜 파랑변형모형을 수행하고 그로부터 설계파를 산정하는 것이다. 이와 같은 접근방법으로는 해수면 상승이 해안 구조물에 미치는 영향을 정확하게 고려하지 못한다. 일반적으로 설계과 조건은 수심과 비선형적인 관계를 가지고 상호 작용하는 파고, 주기 그리고 해수면의 높이에 의존한다. 따라서 이중 하나의 변수가 변하면 다른 변수들도 함께 비선형적인 관계에 따라서 변할 수밖에 없다. 이와 같은 과정은 심해보다 천해영역에서 두드러질 것이다. 왜냐하면 심해영역에서는 수심의 영향이 크지 않은데 반해 천

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

해양역에서는 수심의 영향이 상당히 중요하기 때문이다. 즉, 해수면이 상승되면 쇄파형태 및 쇄파대의 위치가 달라질 것이고, 다른 형태의 세굴이 발생되어 쇄파대 영역에서의 파랑이 다른 형태로 변형될 수 있다. 따라서 쇄파대 부근에 대부분 건설되는 해안 구조물 설계시 해수면 상승에 따른 영향을 올바르게 고려하기 위하여는 먼저 쇄파대 부근에서 해수면 상승에 따라 어느 정도의 파고 상승이 발생하는지를 먼저 정확히 산정하여야 한다.

해수면 상승과 해안 구조물의 상호작용에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 다만 Townend와 Burgess (2004)가 해수면 상승에 따른 쇄파대에서의 파고 변화를 해석하였는데, 해수면 상승 전·후의 수심에 따른 파고변화를 파형경사의 함수로 산정하였다. 또한 해수면 상승에 따른 처오름과 월파량의 변화도 산정하였다. 그러나 이들은 해수면 상승에 따른 파고, 처오름 그리고 월파량의 변화량만 산정하였지, 각 변화량이 미치는 경사식 해안 구조물의 안정성과 기능성에 대한 정량적인 평가는 하지 못하였다.

본 연구에서는 신뢰성 해석을 이용하여 해수면 상승에 따른 경사식 해안 구조물의 안정성 및 기능성을 정량적으로 평가할 수 있는 위험도 평가 시스템을 개발하였다. 안정성에 대하여는 해수면 상승 전·후의 피복층에 거치된 피복재의 파괴확률을 산정하여 비교·평가하였다. 동일하게 기능성에 대하여는 해수면 상승 전·후의 월파량과 직접적으로 관련된 처오름의 파괴확률을 산정하여 비교·평가하였다. 마지막으로 해수면 상승 전·후 파괴확률들의 평가 결과를 이용하여 해수면 상승에 따른 기존 해안 구조물의 보수·보강 방법에 대하여 언급하였다. 또한 새로운 경사식 해안 구조물 설계시 해수면 상승에 따른 효과를 어떻게 고려해야 하는지에 대하여도 언급하였다.

2. 파괴모드와 신뢰함수의 수립

신뢰성 해석을 이용하여 해수면 상승에 따른 해안 구조물의 안정성 및 기능성을 평가할 수 있는 위험도 평가 모형을 개발하고자 한다. 적용대상은 피복재로 거치된 경사식 해안 구조물이며, 해수면 상승 시나리오에 따라 안정성 및 기능성의 파괴확률이 산정되었다. 경사식 해안 구조물의 특성에 따라 안정성에 대한 해석은 피복층에 거치된 피복재의 파괴확률을 산정하는 것으로 하였다. 또한 해수면 상승 시나리오에 따른 기능성 해석을 수행하기 위하여 처오름에 대한 파괴확률을 산정하였다.

2.1 안정성 평가를 위한 피복재의 신뢰함수

현재 피복재의 안정성 해석에 가장 일반적으로 적용되고 있는 공식이 Hudson의 공식이다. 경사제의 피복층에 거치될 안정한 피복재의 소요증량을 산정하기 위하여 제시된 식이다. 신뢰함수 수립에 필요한 개념, 임의의 확률변수 값이 커짐에 따라 신뢰함수가 안전영역으로 이동하는 경향을 보이면 해당 변수는 저항함수에 대한 확률변수가 되고, 그 반대의 경우는 허중함수의 확률변수가 된다는 개념을 적용하여, 다음 식 (1)과 같이 경사제 피복재의 단일 파괴모드에 대한 신뢰함수를 얻을 수 있다(이철용, 2004, 2003b, 2001, 2000a, 2000b, 1999).

$$Z_H = A_H \Delta D_n K_D^{1/3} (\cot \alpha)^{1/3} - (H_s + F_{H_s}) \quad (1)$$

여기서 A_H 는 경험식 자체에 내포된 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 확률변수이며, 동일하게 F_{H_s} 도 유의 설계 파고 추정시 내포되는 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 확률변수이다. D_n 은 피복재의 대표크기(nominal diameter), H_s 는 유의 설계파고, K_D 는 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파, 피복층의 두께, 거치 방법 등에 의하여 결정되는 안정상수, $\Delta = \gamma_s \gamma_w - 1$, γ_s 와 γ_w 는 각각 피복재 및 해수의 단위중량, $\cot \alpha$ 는 제체의 경사이다. 식 (1)은 경사제 피복층에 거치된 피복재의 안정성과 관련된 단일 파괴모드로 우변의 첫 항이 저항력을 나타내는 저항함수이고, 두 번째 항이 외력을 나타내는 허중함수이다. 따라서 저항력이 외력보다 작게 되면 $Z_H < 0$ 되고, 이는 파괴를 의미하게 된다. 반대로 저항력이 외력보다 크게 되는 안정영역에서는 $Z_H > 0$ 되며, 한계상태에서는 $Z_H = 0$ 이 된다. 따라서 식 (1)에 포함된 모든 변수를 임의의 통계적 특성을 갖는 확률변수로 고려하여 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 다만 기존의 연구자들에 의하여 수행된 바와 같이 관측자료를 근거로 제시된 안정상수와 같은 변수는 결정론적 상수로 고려할 수 있다.

2.2 기능성 평가를 위한 처오름의 신뢰함수

본 연구에서는 처오름의 개념을 가지고 해수면 상승에 따른 해안 구조물의 기능성 평가를 신뢰성 해석으로 수행하였다. 신뢰성 해석에 필요한 신뢰함수를 수립하기 위해서는 먼저 파괴모드에 대한 정확한 정의가 필요하다. 본 연구에서는 해수면을 기준으로 정의된 처오름의 크기가 제체의 마루높이, F_c 보다 클 때를 파괴모드로 정의하였다. 따라서 피복재의 신뢰함수를 수립할 때 적용된 동일한 개념을

사용하면 초오염에 대한 신뢰함수도 올바르게 수립할 수 있다. 본 연구에서는 해수면을 기준으로 경사식 해안 구조물의 초오염 크기, R_u 를 산정할 수 있는 경험식(Losada, 1990)을 이용하여 다음 식 (2)와 같은 신뢰함수를 수립하였다(이철웅, 2005, 2003a, 2003c; Lee, 2004).

$$Z_R = (h_c - h) - H_s A_u \left(1 - e^{-B_u \tan \alpha / \sqrt{s_{om}}} \right) \quad (2)$$

여기서 A_u , B_u 는 피복재의 종류 등 초오염과 관련되나, 경험식에 포함되지 않은 변수들의 영향을 고려하기 위하여 정의된 경험계수이다. h_c 는 해저면을 기준으로 산정한 제체의 높이, h 는 구조물 전면의 수심, 그리고 파형경사, $s_{om} = H/L_{om}$, L_{om} 은 심해파의 파장이다. 식 (2)에서 구조물 전면의 수심을 하나의 확률변수로 고려한 이유는 앞에서 언급되었듯이 여러 가지 원인에 의하여 발생될 수 있는 수면의 불확실성에 따른 영향을 고려하기 위함이다. 비록 허용 월과량의 개념에 의하면 마루높이 보다 큰 초오염이 반드시 경사식 해안 구조물의 제체 안전성을 위협하지는 않지만, 그에 대한 영향은 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 순수하게 초오염의 크기와 제체의 마루높이만을 비교하여, 초오염의 크기가 제체의 마루높이 보다 클 때 파괴가 발생한다고 가정하였다. 이는 가능성 평가가 안정성이 만족되는 범위에서 해안 구조물의 그 본래 의도된 기능이 올바르게 수행되고 있는지를 평가하는 것이기 때문이다.

3. 해수면 상승 시나리오

IPCC(2001a, 2001b)는 지난 수십 년 동안 관측된 대기 이산화탄소나 메탄, 이산화질소, 오존 등의 온실가스 측정

결과를 기준으로 인간활동이 온난화 등 지구의 기후변화에 영향을 준다고 결론을 내렸다. 따라서 21세기에도 인간활동은 계속하여 대기조성에 영향을 줄 것이기 때문에 이에 대하여 IPCC(2001a)는 SRES(Special Report on Emission Scenario)를 작성하여 발표하였다. 35개의 SRES 시나리오로 추정된 지구 온난화와 해수면 상승에 대한 예측 결과를 보면 그 범위가 너무 넓다. 따라서 앞으로 기후변화 추정 모델의 정확도를 높이려면 기후변화의 진행을 면밀하게 이해하는 것은 물론, 기후변화 모델에 빠져있는 증발산, 바다 얼음의 동태, 바다의 열류(heat flux)가 포함되어야 할 것이다. 또한 이 모델을 뒷받침하는 적도 동태평양의 해수 온도가 상승하여 태평양의 강수대를 동쪽으로 이동하게 하는 엘니뇨(ENSO) 현상, 몬순, 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation) 등에 대한 모델을 개발하여야 한다고 주장하고 있다.

한편 해수면 상승은 극지방의 얼음과 눈이 녹아 바다로 흘러드는 경우와 바닷물의 온도가 올라감에 따라 발생하는 열팽창이 그 원인이다. 이들 원인을 종합하여 IPCC(2001a)에서 예측한 SRES의 해수면 상승 시나리오를 Table 1과 Fig. 1에 제시하였다. Table 1에 모두 6개의 시나리오에 대한 결과를 제시하였는데, 세계인구의 증가 및 경제성장, 화석 연료의 사용 증가 그리고 대체 연료의 개발 등에 따라 구분된 시나리오들이다. Fig. 1에 의하면 정량적인 차이는 있으나 모든 시나리오의 예측결과가 동일한 거동특성을 나타내고 있다. 이는 시간이 갈수록 지구 온난화가 가속되어 해수면이 상승될 가능성이 높다는 것을 말해주는 것이다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 SRES의 해수면 상승 예측 결과를 가지고 경사식 해안 구조물의 안정성과 가능성을 신뢰성 해석으로 평가하고자 한다. 해석 순서는

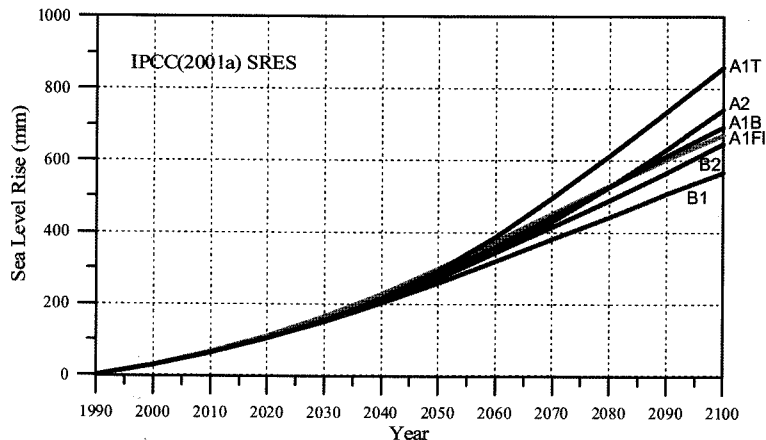


Fig. 1. Global maximum sea-level rise 1990 to 2100 for SRES scenarios.

Table 1. (a) Total sea level rise change - model average (IPCC, 2001a)
(unit: mm)

Year	A1B	A1T	A1FI	A2	B1	B2
1990	0	0	0	0	0	0
2000	17	17	17	17	17	17
2010	37	39	37	38	38	38
2020	61	66	61	61	62	64
2030	91	97	90	88	89	94
2040	127	134	126	120	118	126
2050	167	175	172	157	150	160
2060	210	217	228	201	183	197
2070	256	258	290	250	216	235
2080	301	298	356	304	249	275
2090	345	334	424	362	281	316
2100	387	367	491	424	310	358

(b) Total sea level rise change - model minimum (IPCC, 2001a)

Year	A1B	A1T	A1FI	A2	B1	B2
1990	0	0	0	0	0	0
2000	6	6	6	6	6	6
2010	13	13	13	13	13	13
2020	22	22	24	21	22	23
2030	34	33	36	31	32	34
2040	48	47	49	44	42	45
2050	63	66	64	58	52	56
2060	78	89	77	75	63	68
2070	93	113	89	93	72	79
2080	107	137	99	113	80	91
2090	119	160	106	133	87	103
2100	129	182	111	155	92	114

(c) Total sea level rise change - model maximum (IPCC, 2001a)

Year	A1B	A1T	A1FI	A2	B1	B2
1990	0	0	0	0	0	0
2000	29	29	29	29	29	29
2010	63	63	65	64	64	65
2020	103	104	110	104	105	109
2030	153	153	164	149	151	159
2040	214	214	228	204	203	216
2050	284	291	299	269	259	277
2060	360	386	375	343	319	344
2070	442	494	453	430	381	414
2080	527	612	529	526	444	488
2090	611	735	602	631	507	566
2100	694	859	671	743	567	646

다음과 같다. 먼저 주어진 파랑 및 수심조건에 시나리오에 따른 해수면 상승을 고려한다. 이때 IPCC(2001a)에 제시된 해수면 상승에 따른 빈도별 해일높이도 함께 고려한다. 다음, Townend와 Burgess(2004)의 접근방법으로 수심의 변화

에 따른 설계파고 변화를 계산한다. 마지막으로 파고의 변화에 따른 안정성 및 기능성에 대한 영향을 신뢰성 해석으로 수행한다.

4. 신뢰성 해석 결과

해수면 상승에 따른 해안 구조물의 안정성 및 기능성에 대한 위험도 평가 모형을 개발하고 정량적 평가를 수행하기 위하여 신뢰성 해석 기법 중 하나인 AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 모형을 이용하였다. 안정성에 대하여는 해수면 상승 전·후의 피복층에 거치된 피복재의 파괴확률을 산정하여 비교·평가하였다. 동일하게 기능성에 대하여도 해수면 상승 전·후 초오름의 파괴확률을 산정하여 비교·평가하였다. 마지막으로 해수면 상승 전·후 파괴확률들의 평가 결과를 이용하여 해수면 상승에 따른 기존 해안 구조물의 보수·보강 방법에 대하여 언급하였다. 또한 새로운 경사식 해안 구조물 설계시 해수면 상승에 따른 효과를 어떻게 고려해야 하는지에 대하여도 언급하였다.

4.1 피복재에 대한 해석 결과

경사식 해안 구조물의 특성에 따라 안정성에 대한 해석은 피복층에 거치된 피복재의 파괴확률을 산정하는 것으로 하였다. 먼저 피복재의 신뢰함수인 식 (1)을 구성하는 확률 변수들의 통계적 특성 및 분포함수를 Table 2에 제시하였다. 또한 Table 1과 Fig. 1에 제시된 SRES에 의한 해수면 상승에 따른 수심 및 파고 증가 그리고 그에 따른 Gumbel 매개변수들의 특성이 산정되어 Table 3에 제시되었다. Table 3에 제시된 결과들은 Table 1c에 있는 최대 해수면 상승시 나리오를 근거로 50년 빈도의 폭풍해일 상승고까지 고려된 것으로, IPCC(2001a), Townend와 Burgess(2004)가 제시한 개념을 이용하여 본 연구에서 산정된 것이다. 해수면 상승 전의 파고, $H_s=4.4$ m, 경사식 해안 구조물 전면의 수심, $h=15.0$ m를 생각할 때, 해수면 상승에 따라 약 10% 내외

Table 2. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (1) for armor failure mode.

#	X_i	μ_{X_i}	COV_{X_i}	Distribution
1	A_H	1.0	0.18	Normal
2	Δ	1.6	0.038	Normal
3	D_n (m)	1.5	0.067	Normal
4	$\cot \alpha$	1.5	0.05	Normal
5	F_{H_s} (m)	0	0.25	Normal
6	H_s (m)	4.4	0.16	Gumbel

Table 3. Variations of water depth, wave height and Gumbel parameters according to SRES

Scenario	$h'(m)$	$H'_s(m)$	Gumbel parameters	
			Scale	Location
			$k(1/m)$	$\lambda(m)$
A1B	16.395	4.809	1.668	4.463
A1T	16.560	4.858	1.651	4.508
A1FI	16.365	4.800	1.670	4.454
A2	16.440	4.822	1.661	4.474
B1	16.260	4.770	1.681	4.427
B2	16.350	4.796	1.672	4.451

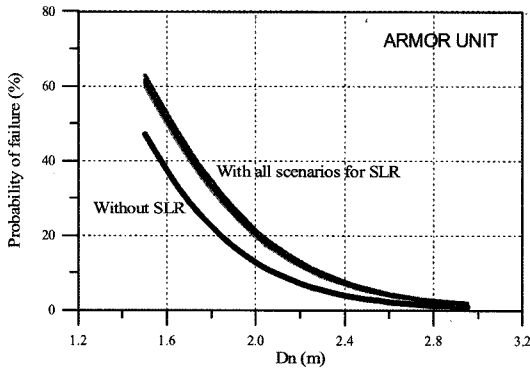


Fig. 2. Variation of probability of failure with respect to nominal diameter for armor unit.

의 수심 및 파고 상승효과가 발생되고 있다. 따라서 Table 2와 Table 3의 자료를 가지고 식 (1)의 신뢰함수를 이용하여 AFDA 방법에 의한 신뢰성 해석을 수행하면, 해수면 상승 전·후의 피복재에 대한 파괴확률을 산정할 수 있다. 그와 같은 과정에 의하여 산정된 시나리오에 따른 해석 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 제시하였다. 먼저 Fig. 2는 피복재의 대표입경 변화에 따른 파괴확률이고, Fig. 3은 경사식 해안 구조물의 경사 변화에 따른 파괴확률이다. 각각의 그림에는 해수면 상승 전·후의 결과가 함께 제시되었다. 먼저 Fig. 2를 보면 해수면 상승 전·후 모두에서 피복재의 대표입경이 커짐에 따라 파괴확률은 급격하게 감소한다. 그러나 동일한 입경에서는 해수면이 상승됨에 따라 파괴확률이 커지는 것을 쉽게 볼 수 있다. 특히 피복재의 대표입경이 작은 영역에서 해수면 상승에 따른 파괴확률의 증가가 두드러지게 나타나고 있다. 이는 해수면 상승에 따라 피복재의 안정성이 감소할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 기존의 경사식 해안 구조물인 경우에, 해수면 상승 후에도 상승 전과 동일한 안정성을 확보하기 위해서는 Fig. 2에 나타난 파괴확률의 차이만큼 그에 따른 보수·보강이 필요할 것이다.

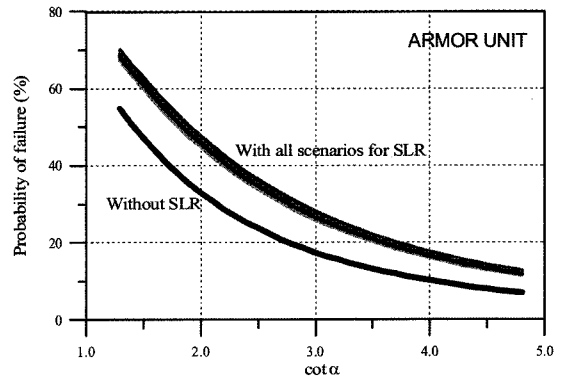


Fig. 3. Variation of probability of failure with respect to slope of coastal structure for armor unit.

또한 새로운 경사식 해안 구조물을 설계할 경우에는 처음부터 해수면 상승효과를 고려하여 산정된 파괴확률을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 예로, 목표파괴확률을 20%로 가정할 때 해수면 상승전의 대표입경은 약 1.84 m 인데 해수면 상승효과가 고려되면 대표입경의 크기는 2.0 m 로 커진다. 즉, 해수면 상승에 따라 대표입경이 약 9% 증가되어야 동일한 안정성을 만족할 수 있다.

한편 해안 구조물 경사 변화에 따른 해석 결과, Fig. 3을 보면 경사가 완만하게 건설될수록 피복재의 파괴확률이 작아짐을 알 수 있다. 또한 동일한 경사에서는 해수면 상승 전보다 해수면 상승 후의 파괴확률이 크게 나타나고 있다. 전반적으로 피복재 대표입경 변화를 나타낸 Fig. 2와 유사한 거동특성을 나타내고 있다. 따라서 앞에서 설명한 동일한 개념을 가지고 기존 해안 구조물을 보수·보강하고 새로운 경사식 해안 구조물을 설계를 할 수 있다고 판단된다. 지금까지는 피복재의 대표입경, 경사의 변화를 별개로 취급하였다. 그러나 실제 적용에서는 현장에 맞는 경제성 분석을 이용하여 두 변수를 적절히 조합하는 것이 필요하다고 판단된다. 이에 대한 연구는 추후 진행되어야 할 것으로 판단된다.

4.2 처오름에 대한 해석 결과

경사식 해안 구조물의 특성에 따라 기능성 해석은 경사면을 따라 발생하는 처오름에 대한 파괴확률을 산정하는 것으로 하였다. 먼저 식 (2)의 신뢰함수를 구성하는 확률변수들의 통계적 특성 및 분포함수를 Table 4에 제시하였다. Table 3의 자료를 함께 사용하여 AFDA 법에 의하여 산정된 파괴확률 산정 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다. 피복재의 안정성 해석과는 달리 처오름의 기능성 해석에서는

Table 4. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (2) for run-up failure mode

#	X_i	μ_{X_i}	COV_{X_i}	Distribution
1	A_H	1.05	0.20	Normal
2	B_u	0.67	0.20	Normal
3	$\tan \alpha$	1/1.5	0.05	Normal
4	s_{om}	0.032	0.25	Normal
5	H_s (m)	4.4	0.16	Gumbel
6	h (m)	15.0	0.07	Normal

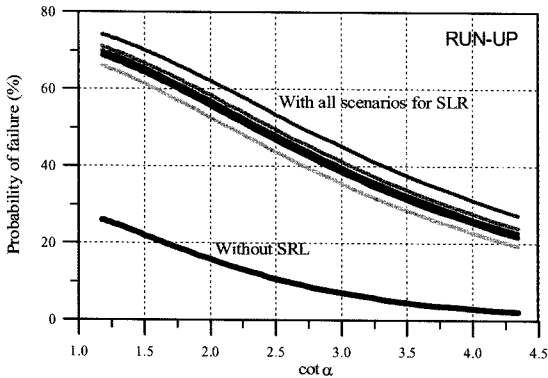


Fig. 4. Variation of probability of failure with respect to slope of coastal structure for run-up.

경사와 마루높이를 변화시키면서 신뢰성 해석을 수행하였다. 이는 신뢰함수로부터 쉽게 알 수 있듯이 경사와 해안 구조물의 마루높이가 처오름에서 제일 중요한 변수들이기 때문이다. Fig. 4가 경사 변화에 따른 파괴확률의 해석 결과이고, Fig. 5가 마루높이에 따른 파괴확률이다. 각각의 그림에는 해수면 상승 전·후의 결과가 함께 제시되었다. 먼저 경사가 완만해 질수록 처오름의 파괴확률이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 동일한 경사에서는 해수면 상승 전과 후의 파괴확률이 큰 차이를 보이고 있다. 이는 해수면 상승에 따라 기능성이 크게 약화된다는 것을 의미한다. 특히 해수면 상승에 따른 기능성 약화를 보강하기 위해서 해안 구조물의 경사만을 조정하여 완만하게 하는 방법은 그 적용에 제약성이 따른다. 즉, Fig. 4에 의하면 목표파괴확률을 20%로 가정한 때 해수면 상승에 따른 처오름의 어느 해석 결과도 이를 만족하지 못한다.

한편 처오름에서 또 하나의 중요한 변수인 마루높이의 변화에 따른 파괴확률 산정 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 해수면 상승 전·후 모두에서 마루높이가 증가함에 따라 파괴확률이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 앞의 결과들과 마찬가지로 동일한 마루높이에서는 해수면 상승

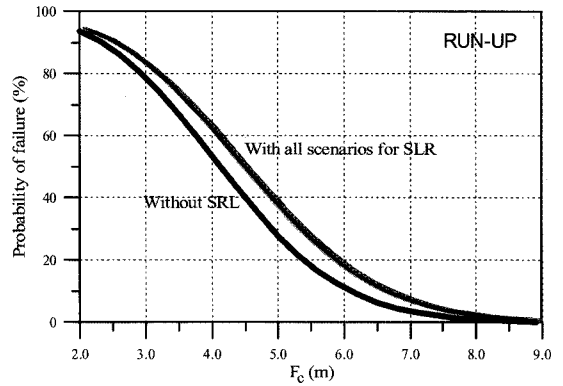


Fig. 5. Variation of probability of failure with respect to free-board for run-up.

에 따라 파괴확률이 증가하고 있다. $F_c = 5$ m를 기준으로 보면 해수면 상승 전에는 파괴확률이 약 28%이던 것이 해수면 상승 후에는 약 38%로 증가하고 있다.

이상의 결과를 조합하면 해수면 상승에 따라 파괴확률이 증가한 만큼 경사식 해안 구조물의 기능성이 약화된 것으로 판단된다. 따라서 해수면 상승 전의 기능성을 회복하기 위해서는 경사를 완만하게 하거나 마루높이를 증가시켜야 할 것으로 판단된다. 특히 처오름에 의한 기능성 평가에서는 경사만을 조정하여 기능성을 회복시키는데 한계성이 있다. 따라서 실제 적용에서는 현장에 맞는 경제성 분석을 이용하여 두 변수를 적절히 조합하는 것이 필요하다고 판단된다. 동일한 형식의 새로운 해안 구조물을 설계할 때도 해수면 상승에 따른 영향이 고려된 신뢰성 해석 결과를 이용해야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

신뢰성 해석기법을 이용하여 지구온난화에 의한 해수면 상승에 따른 해안 구조물의 안정성 및 기능성을 정량적으로 평가할 수 있는 위험도 평가 시스템을 개발하였다. 경사식 해안 구조물이 갖는 특성에 따라 안정성을 평가하기 위하여 해수면 상승 전·후의 피복층에 거치된 피복재의 파괴확률을 산정하여 비교하였다. 동일하게 기능성을 평가하기 위하여 해수면 상승 전·후 처오름의 파괴확률을 산정하여 비교하였다.

SRES에 의한 해수면 상승에 따른 수심 및 파고 증가 그리고 그에 따른 Gumbel 매개변수들의 특성이 IPCC(2001a), Townsend와 Burgess(2004)가 제시한 개념을 이용하여 본 연구에서 산정되었다. 안정성 평가를 위한 피복재의 신뢰성

해석에서는 피복재의 대표입경과 제체의 경사를 변화시키면서 해수면 상승 전·후의 파괴확률이 정량적으로 산정되었다. 동일하게 기능성 평가를 위한 처오름의 신뢰성 해석에서도 제체의 경사와 마루높이를 변화시키면서 해수면 상승 전·후의 파괴확률이 산정되었다. 선택된 변수들은 해당 파괴모드에서 저항력을 지배하는 중요한 변수들이다. 따라서 각 변수의 값이 커짐에 따라 전반적으로 파괴확률은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 중요한 것은 각각의 동일한 변수 값에서는 해수면 상승 후에 파괴확률이 증가한다는 점이다. 이는 해수면 상승에 따라 파괴확률이 증가한 만큼 안정성 및 기능성이 감소할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 해수면 상승 전의 안정성 및 기능성을 회복하기 위해서는 각각의 파괴모드에서 중요한 변수들을 적절히 조합하여 저항력을 증가시키는 방법에 대하여는 추후 많은 연구가 수행되어야 한다. 특히 실제 적용에서는 현장에 맞게 변수들을 적절히 조합하여 경제성 분석을 병행하는 것이 가장 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 첨단항만기술개발 연구과제중 “항만구조물 신뢰성 설계 개발” 및 강원발전연구원 공모과제 “해수면 상승에 따른 동해안 해안 구조물의 위험도 평가” 과제의 일부임을 밝히며, 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이철웅 (2005). 처오름의 신뢰성 해석에 대한 파고-주기결합분포의 영향, 한국해양해양공학회지, 제 17권, 제 3호, pp.178-187.
- 이철웅 (2004). 구조적 안정성을 고려한 콘크리트 피복재의 신뢰성 설계, 한국해양해양공학회지, 제 16권, 제 3호, pp.142-151.
- 이철웅 (2003a). 경사식 해안 구조물에 대한 처오름의 신뢰성 해석, 대한토목학회논문집, 제 23권, 제 6-B호, pp.567-574.
- 이철웅 (2003b). 콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석 한국해양해양공학회지, 제 15권, 제 2호, pp.89-96.
- 이철웅 (2003c). 월파에 대한 경사식 해안구조물의 신뢰성 해석, 한국해양해양공학회지, 제 15권, 제 4호, pp.214-223.
- 이철웅 (2001). 안전계수에 따른 경사제 피복재의 파괴확률, 한국해양해양공학회지, 제 13권, 제 1호, pp.9-17.
- 이철웅 (2000a). 경사제 피복재의 신뢰성 해석을 위한 직접 계산법의 개발, 대한토목학회논문집, 제 20권, 제 3-B호, pp.387-397.
- 이철웅 (2000b). 직접계산법에 의한 경사제 피복재의 신뢰성 해석, 대한토목학회논문집, 제 20권, 제 3-B호, pp.399-409.
- 이철웅 (1999). 경사제 피복재의 안정성에 대한 신뢰성 해석, 한국해양해양공학회지, 제 11권, 제 3호, pp.165-172.
- Goda, Y. (1985) *Random seas and design of maritime structures*, Univ. of Tokyo Press, Tokyo.
- IPCC (2001a). *Climate Change 2001: The scientific basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2001b). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptations and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lee, C.-E. (2004). Evaluation of crest freeboard of rubble-mound breakwaters by reliability analysis of wave run-up, *J. of Ocean Science and Technology*, Vol 1, No. 2, KAOIST, pp. 111-118.
- Losada, M.A. (1990). Recent developments in the design of mound breakwaters, *Handbook of Coast. and Ocean Engrg.*, ed. Herbich, Gulf Publishing, pp. 939-1050.
- Townend, I. and Burgess, K. (2004). Methodology for assessing the impact of climate change upon coastal defence structures, *Proc. 29th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 3953-3965.

Received September 5, 2007

Accepted January 28, 2008