

무역항 및 연안항 피복재의 파괴확률과 부분안전계수 해석

Analysis of Probabilities of Failure and Partial Safety Factors of Armor Units on Trading and Coastal Harbors

이 철 응* 박 동 현**
Lee, Cheol-Eung Park, Dong-Heon

Abstract

Level II AFDA and Level III MCS reliability models are applied to analyze the stability of armor units on trading and coastal harbors in Korea. Hudson's formula and Van der Meer's formula are used in this reliability analysis. Also, probability density functions of reliability index and probability of failure are derived by the additional analysis. In addition, the partial safety factors of all harbors related to armor units can be straightforwardly evaluated by the inverse-reliability method. The upper and lower limits and average level of partial safety factors can be statistically investigated with the results of all cases applied in this paper. Therefore, it may be possible to design armor units of new breakwaters including the uncertainty of random variable and target level by using the present results.

키워드 : 무역항, 연안항, 신뢰성 해석, 부분안전계수

Keywords : trading harbor, coastal harbor, reliability analysis, partial safety factor

1. 서론

무역항과 연안항의 방파제 형식은 대부분이 경사제이며, 경사제는 그 안전성이 제체 전면에 피복된 피복재에 의존하게 된다. 우리나라 방파제의 피복재는 피복석보다 취득이 용이한 인공블록을 주로 사용하고 있다. 피복블록의 종류는 Tetrapod, Cube, Dolos 등 여러 가지가 있지만 국내에서는 Tetrapod 사용을 주로 사용하고 있다. 본 연구에서는 신뢰성 해석모형을 이용하여 기존에 건설된 무역항 및 연안항 피복재에 대한 안정성을 정량적으로 평가하였다. 또한 피복재의 부분안전계수를 산정하여 그 거동특성을 해석하였다.

기존 구조물은 모든 변수를 상수로 취급하는 결정론적 설계법으로 설계되었다. 그러나 실제 하중 및 저항은 임의의 상수가 아니라 확률변수이다. 확률변수로 해석한다는 것은 결정론적 설계시 고려할 수 없었던 불확실성을 고려할 수 있다는 의미이다. 신뢰성 해석법은 이런 변수의 불확실성을 고려하여 파괴정도를 정량적으로 평가할 수 있는 해석법이다. 국내에서는 이철응[1]이 우리나라 무역항 및 연안항에 대한 신뢰성 해석을 수행한 바 있다. 국외에서는 PIANC[2]가 각 국가별 항만에 대한 신뢰성 해석을 적용한 바 있다. 본 연구에서는 과거부터 사용되었던 해운항만청[3], 수산청[4], 해양연구원[5] 등에 제시된 과거 설계파들을 조사하여 신뢰성 해석에 유용하다고 판단되는 심해 자료를 사용하였다. 이는 해양환경 변화에 대한 영향을 최대한 고려하기 위함이다. 해수면 상승 등의 원인에 의하여 동일한 지점에서 최근의 심해 설계파 재원이 과거의 심해 설계파 재원보다 크게 선정되

* 강원대학교 토목공학과 교수, 교신저자

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

는 경향이 있다. 따라서 천해 설계과의 크기도 커질 수 밖에 없다.

신뢰성 해석은 본 연구에서 개발된 AFDA(Level II Approximate Full Distribution Approach) 방법과 MCS(Level III Monte-Carlo Simulation) 방법이다. 또한 부분안전계수도 본 연구에서 개발된 역해석법을 이용하였다.

2. 신뢰함수의 수립

먼저 Tetrapod의 안정수(Stability number)를 산정하는 식은 크게 Hudson식과 Van der Meer식으로 구분할 수 있으며, Hudson(SPM[6])식에 의한 안정수 산정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = (K_a \cot \alpha)^{1/3} \quad (1)$$

여기서, N_s 는 안정수, D_n 은 블록의 공칭 직경, $\Delta = \gamma/\gamma_w - 1$, γ_s 와 γ_w 는 각각 피복재 및 해수의 단위중량, α 는 피복층의 경사각, K_a 는 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파, 피복층의 두께, 지지 방법 등에 의하여 결정되는 안정상수, H_s 는 유의설계파고이다.

콘크리트 블록의 안정수 산정 공식은 파해정도 N_{od} , 작용파수 N_w , 파형경사 s_{om} 등의 함수로 표현되며, 다음 식 (2)는 Tetrapod에 대한 경험식이다.

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = (3.75N_{od}^{0.5}/N_w^{0.25} + 0.85)s_{om}^{-0.2} \quad (2)$$

정의된 파괴모드 개념 하에 Tetrapod의 중량 산정식에 포함된 모든 변수를 확률변수로 고려하여 신뢰성 해석을 수행하고자 한다. 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 신뢰함수의 비선형성의 정도가 먼저 파악되어야 올바른 해석방법을 선택할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)을 이용하여 신뢰함수와 불확실성의 개념으로 저항력과 하중을 분리하면 다음 식 (3)과 같은 Tetrapod에 대한 Hudson 공식의 신뢰함수를 쉽게 얻을 수 있다.

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

여기서 A_H 는 Hudson 공식의 불확실성을 나타내는 계수이다. 한편 Van der Meer[7]는 Hudson 공식에서 고려할 수 없는 파형경사와 입사파의 수를 고려하기 위하여 입사파랑의 이력에 따른 영향을 고려할 수 있는 식을 제시하였다.

Tetrapod에 대한 Van der Meer 공식인 식 (2)는 다음 식 (4)와 같이 된다.

$$Z_{V_T} = A_{V_T} (3.75N_{od}^{0.5}/N_w^{0.25} + 0.85) \Delta D_n - s_{om}^{0.2} H_s \quad (4)$$

여기서 A_{V_T} 는 Van der Meer 공식의 불확실성을 나타내기 위한 계수이다.

3. 무역항 및 연안항의 설계변수

먼저 표 1에 해석 대상이 되는 무역항의 주요 방파제 제원을 나타내었다.

표 1 주요 무역항의 경사제 피복재 설계 관련 변수

#	항	cot α	W ton	Dn m	설계파 제원		
					파향	파고 m	주기 sec
1	속초	2.0	20	2.1	NE	7.6	12
2	옥계	1.3	32	2.4	NE	8.0	13
3	목호	2.0	50	2.8	NE	8.2	13
4	동해	2.0	40	2.6	NE	8.2	13
5	삼척	2.0	40	2.6	NE	8.2	13
6	포항	1.3	13	1.8	NNE	7.1	11
7	울산	1.3	25	2.2	S	9.0	13
8	온산	1.3	25	2.2	S	5.9	10
9	삼천포	1.5	32	2.4	S	9.6	13
10	장승포	3.0	8	1.5	SSE	5.2	9
11	옥포	1.5	8	1.5	SSE	5.2	9
12	부산	1.5	32	2.4	SSW	10.	14
13	제주	1.5	20	2.1	NNW	7.0	11
14	서귀포	1.5	64	3.0	S	11.	15

또한 표 2에 해석 대상이 되는 여러 연안항 방파제의 주요 제원을 나타내었다.

표 2 주요 연안항의 경사제 피복재 설계 관련 변수

#	항	cot α	W ton	Dn m	설계파 제원		
					파향	파고 m	주기 sec
1	후포	1.5	40	2.6	NE	7.7	12
2	구룡포	1.5	25	2.2	NNE	7.1	11
3	울릉	1.5	40	2.6	NNE	8.6	13
4	홍도	1.5	40	2.6	SSE	8.9	13
5	부산남	1.5	16	1.9	SSW	10.	14
6	애월	1.5	25	2.2	NNW	7.0	11
7	화순	1.5	64	3.0	S	9.1	13

4. 신뢰성 해석 결과 분석

4.1 무역항에 대한 결과 분석

현재 우리나라에 무역항으로 지정된 항만은 총 28개이다. 본 연구에서는 인천항 등 서해안에 위치한 항을 제외한 나머지 동해안과 남해안의 모든 무역항을 대상으로 안정성을 평가하기 위하여 신뢰성 해석을 실시하였다. 다만 신뢰성 해석을 수행하는데 필요한 최소한의 자료를 확보할 수 없는 항들은 해석에서 제외하였다. 신뢰성 평가를 위하여 Hudson과 Van der Meer의 공식으로부터 유도된 각각의 식 (3)와 식 (4)의 신뢰함수를 사용하였다. 파괴분포함수는 Gumbel 극치분포를 사용하였다. Gumbel 극치분포함수의 축척계수 및 위치계수는 수산청에 제시된 빈도별 심해 설계파를 기준으로 산정되었다.

각 항에 Level II의 AFDA 해석법을 적용하여 얻어진 신뢰지수와 파괴확률 및 Level III의 MCS 해석법을 적용하여 얻어진 결과를 아래와 같이 각각 표 3과 표 4에 그림 1과 그림2 및 그림 3과 그림 4에 제시하였다.

표 3 전국 주요 무역항의 경사제 피복재의 신뢰지수와 파괴확률 (Hudson)

무역항	Level II, AFDA		Level III, MCS (%)
	β	P_f (%)	
속초	1.089	13.812	15.855
옥계	1.122	13.097	14.790
목호	1.883	2.986	3.500
동해	1.701	4.449	5.045
삼척	1.701	4.449	5.045
포항	0.763	22.279	23.770
울산	0.575	28.271	30.490
온산	1.708	4.383	5.185
삼천포	0.137	44.559	48.175
장승포	1.825	3.401	3.990
옥포	1.246	10.641	11.740
부산	0.730	23.275	24.915
제주	0.627	26.539	29.595
서귀포	0.581	28.068	30.995
평균	1.121	16.444	18.078
표준편차	0.568	12.662	13.620

표 3에 의하면 Level III의 파괴확률과 Level II의 AFDA 해석법의 결과가 잘 일치한다. 무역항에 대한 파괴확률의 평균은 각각 18.078와 16.444, 표준편차는 13.620, 12.662이다.

표 4 전국 주요 무역항의 경사제 피복재의 신뢰지수와 파괴확률 (Van der Meer)

무역항	Level II, AFDA		Level III, MCS (%)
	β	P_f (%)	
속초	0.563	28.678	29.900
옥계	1.154	12.429	12.915
목호	1.591	5.582	5.835
동해	1.388	8.259	8.440
삼척	1.388	8.259	8.440
포항	0.615	26.934	27.560
울산	0.463	32.175	33.060
온산	1.680	4.649	5.000
삼천포	-0.349	63.652	65.030
장승포	0.990	16.113	16.630
옥포	0.990	16.113	16.630
부산	0.546	29.260	30.055
제주	0.231	40.873	42.805
서귀포	0.360	35.949	37.480
평균	0.829	23.495	24.270
표준편차	0.581	16.615	17.076

표 4에 의하면 Level III의 파괴확률과 Level II의 AFDA 해석법의 결과가 잘 일치한다. 무역항에 대한 파괴확률의 평균은 각각 24.270와 23.495, 표준편차는 17.076, 16.615이다.

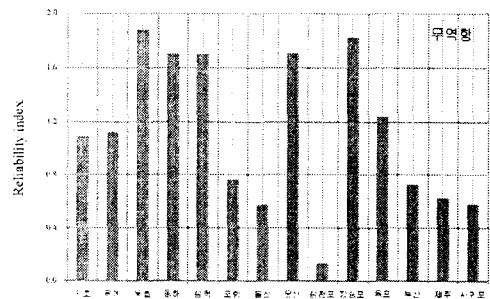


그림 1 전국 주요 무역항의 경사제 피복재의 신뢰지수 (Hudson)

그림 3과 그림 4에서 볼 수 있듯이 동해안 보다는 남해 및 제주 지역의 파괴확률이 높게 나타나고 있다. 전국적으로 파괴확률이 제일 높게 나타나는 무역항은 삼천포항의 경사제로 확인되었다.

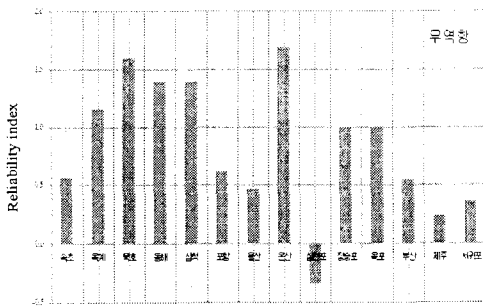


그림 2 전국 주요 무역항의 경사제 피복재의 신뢰 지수 (Van der Meer)

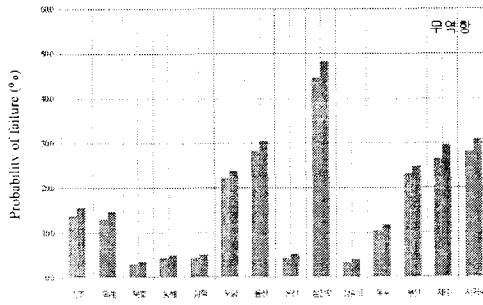


그림 3 전국 주요 무역항의 경사제 피복재의 파괴 확률 (Hudson)

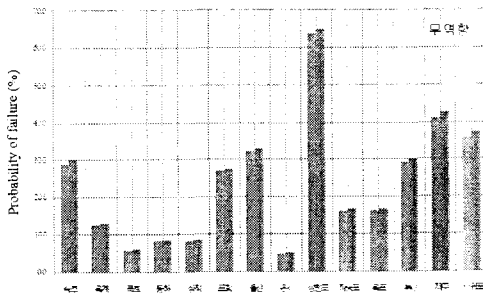


그림 4 전국 주요 무역항의 경사제 피복재의 파괴 확률 (Van der Meer)

또한 이상에 제시된 각 항의 결과들을 이용하여 무역항의 전국적인 특성을 살펴보기 위하여 다음 그림 5에서 그림 8에 제시하였다. 즉, 평균과 표준편차를 산정하여 정규분포함수와 비교하였다. 자료의 제약성으로 인해 만족스럽지 못하지만 어느 정도는 정규분포로 비교할 수 있다. 이상의 결과로부터

더 알 수 있는 사실은 과거 결정론적 설계법에 의하여 건설된 항만 구조물의 안정성이 평균화되어 있지 않았다는 것이다. 이는 어느 항은 과대 설계 되었으며 어느 항은 과소 설계되어 위험에 직면할 수 있다는 사실이다. 그러나 신뢰성 설계를 수행하면 이와 같은 구조물의 평균화를 도모할 수 있으며, 이는 바로 균형있고 경제적인 설계, 즉, 전국적인 관점에서의 최적 설계가 가능하다는 것을 의미한다.

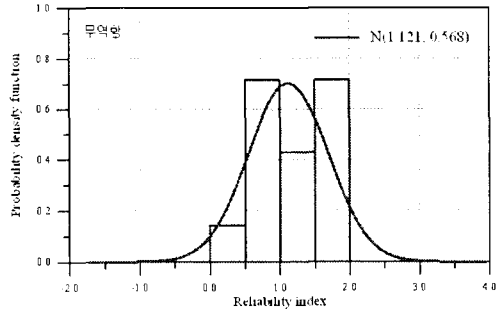


그림 5 무역항 경사제 피복재의 신뢰지수의 확률 밀도함수 (Hudson)

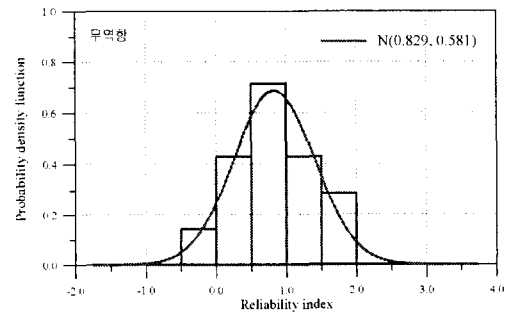


그림 6 무역항 경사제 피복재의 신뢰지수의 확률 밀도함수 (Van der Meer)

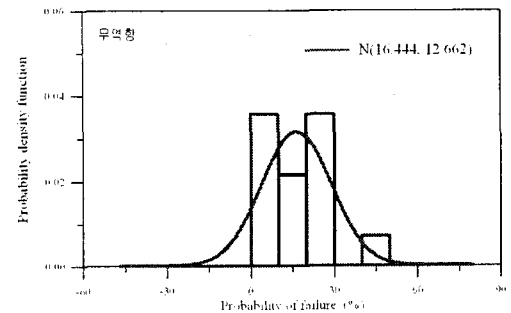


그림 7 무역항 경사제 피복재의 파괴확률의 확률 밀도함수 (Hudson)

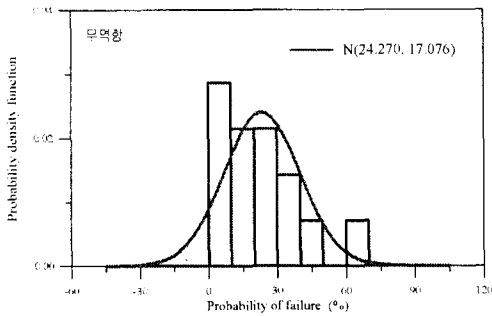


그림 8 무역항 경사제 피복재의 파괴확률의 확률 밀도함수 (Van der Meer)

한편 이상의 무역항에 대한 신뢰성 해석으로부터 얻어진 영향계수를 이용하면 각 항의 부분안전계수를 산정할 수 있다. 각각 Hudson과 Van der Meer에 대해 아래 그림 9에서 그림 16에 저항력 및 파고 그리고 신뢰함수에 대한 부분안전계수를 목표파괴수준의 함수로 제시하였다.

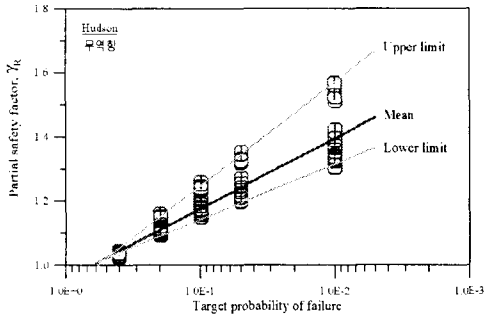


그림 9 무역항의 저항력에 대한 부분안전계수 (Hudson)

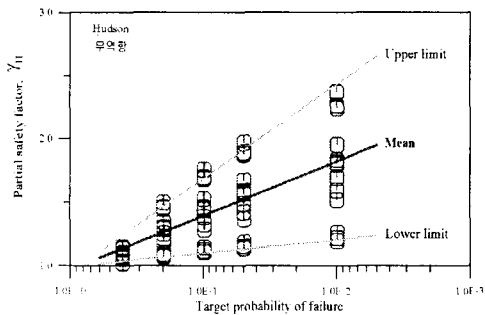


그림 10 무역항의 파고에 대한 부분안전계수 (Hudson)

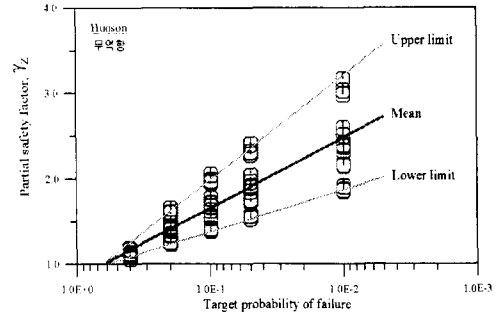


그림 11 무역항의 신뢰함수에 대한 부분안전계수 (Hudson)

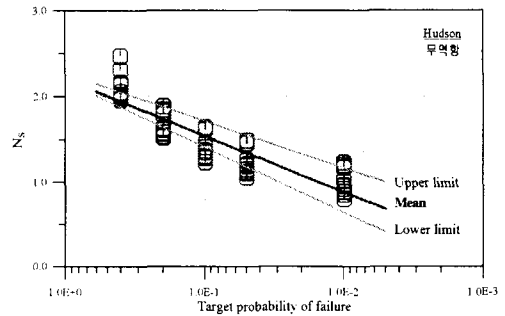


그림 12 무역항의 목표수준에 따른 안정수 (Hudson)

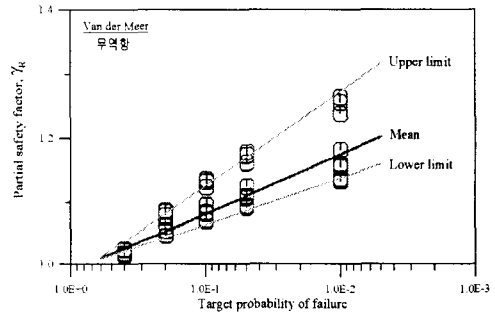


그림 13 무역항의 저항력에 대한 부분안전계수 (Van der Meer)

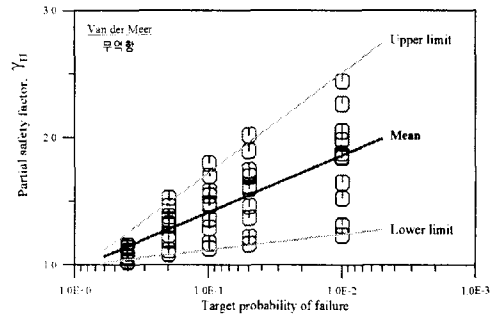


그림 14 무역항의 파고에 대한 부분안전계수 (Van der Meer)

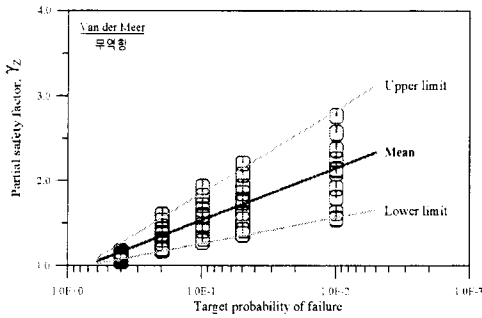


그림 15 무역항의 신뢰함수에 대한 부분안전계수 (Van der Meer)

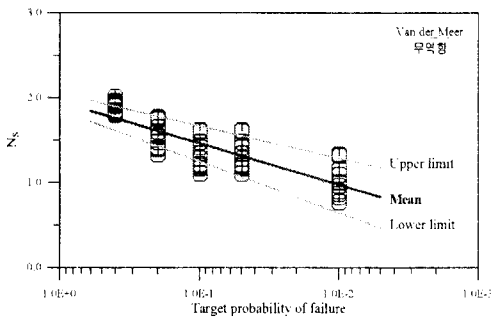


그림 16 무역항의 목표수준에 따른 안정수 (Van der Meer)

예상할 수 있었듯이 실제로 적용된 조건의 차이에 의하여 저항력 및 파괴에 대한 부분안전계수의 변동성이 크게 나타나고 있다. 특히 파괴에 대한 변동 폭이 상대적으로 크게 나타나고 있다.

한편 파괴를 포함한 전체적인 영향을 살펴보기 위하여 그림 12와 그림 16에 각각의 목표수준에 따른 안정수(stability number), $N_s = H_s / \Delta D_n$ 를 제시하였다. 앞의 그림에 제시된 바와 같이 부분안전계수의 상한치와 하한치 그리고 평균 수준에 맞는 부분안전계수를 목표수준에 따라 산정할 수 있다. 이는 새로운 신뢰성 설계법으로 설계를 하던 현재의 수준에 맞는, 또는 현재의 수준보다 안정한 설계를 선택적으로 할 수 있다는 의미이다.

4.2 연안항에 대한 결과 분석

무역항의 신뢰성 평가에 적용된 동일한 방법으로 동해안과 남해안의 연안항에 대하여 해석하였다. 현재 우리나라 연안항은 모두 23개이다. 이 중 서해안에 위치한 연안항 및 자료가 부족한 연안항을 제외한 표 2에 제시된 7개소의 연안항에 건설된 경사제 피복재에 대하여 신뢰성 평가를 실시하였다.

동일하게 연안항에 대한 신뢰성 해석에서 산정

된 각 항의 신뢰지수와 파괴확률을 각각 표 5와 표 6에 그림 17과 그림 18 및 그림 19와 그림 20에 제시하였다.

표 5 전국 주요 연안항의 경사제 피복재의 신뢰지수와 파괴확률 (Hudson)

연안항	Level II, AFDA		Level III, MCS (%)
	β	P_f (%)	
후포	1.661	4.837	5.330
구룡포	1.441	7.482	8.205
울릉	0.978	16.408	18.890
홍도	0.569	28.474	31.595
부산남	0.127	44.954	47.030
애월	0.912	18.093	20.945
화순	1.059	14.484	16.985
평균	0.964	19.247	21.283
표준편차	0.513	13.688	14.254

표 5에 대한 파괴확률의 평균은 각각 21.283와 19.247, 표준편차는 14.254, 13.688이며, 동일한 조건에서 산정된 MCS 해석법의 결과가 AFDA 해석법의 결과 보다 약간 크게 산정되었다. 그러나 두 결과는 비교적 잘 일치한다고 판단된다.

표 6 전국 주요 연안항의 경사제 피복재의 신뢰지수와 파괴확률 (Van der Meer)

연안항	Level II, AFDA		Level III, MCS (%)
	β	P_f (%)	
후포	1.550	6.059	6.240
구룡포	1.252	10.532	10.790
울릉	0.800	21.191	22.555
홍도	0.240	40.523	42.600
부산남	-0.111	54.426	54.830
애월	0.606	27.232	29.110
화순	0.880	18.948	20.685
평균	0.745	25.559	26.687
표준편차	0.568	16.975	17.200

표 6에 대한 파괴확률의 평균은 각각 26.687와 25.559, 표준편차는 17.200, 16.975이며, 동일한 조건에서 산정된 MCS 해석법의 결과가 AFDA 해석법의 결과 보다 약간 크게 산정되었다. 그러나 두 결과는 비교적 잘 일치한다고 판단된다.

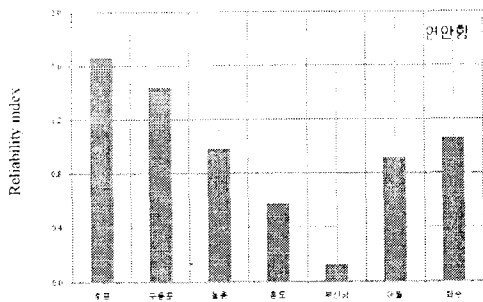


그림 17 전국 주요 연안항의 경사제 피복재의 신뢰지수 (Hudson)

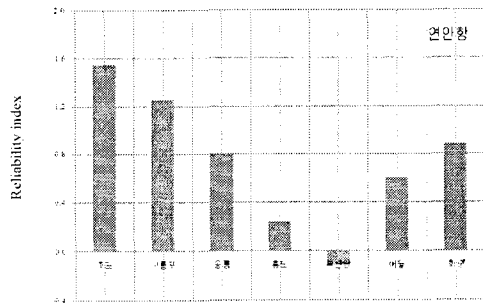


그림 18 전국 주요 연안항의 경사제 피복재의 신뢰지수 (Van der Meer)

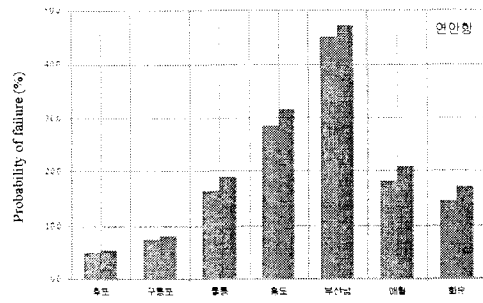


그림 19 전국 주요 연안항의 경사제 피복재의 파괴확률 (Hudson)

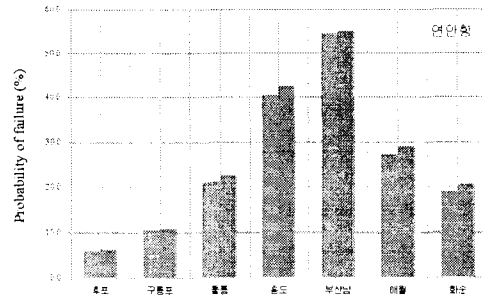


그림 20 전국 주요 연안항의 경사제 피복재의 파괴확률 (Van der Meer)

또한 각 연안항의 결과들을 이용하여 산정된 전국적인 특성용 다음 그림 21에서 그림 24에 제시하였다.

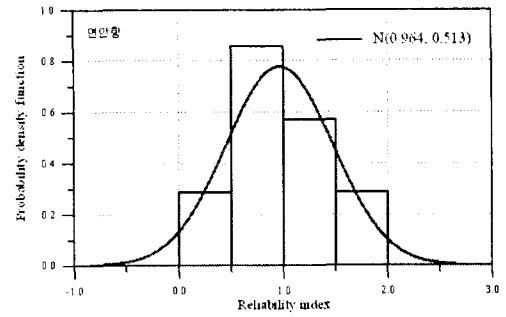


그림 21 연안항 경사제 피복재의 신뢰지수의 확률 밀도함수 (Hudson)

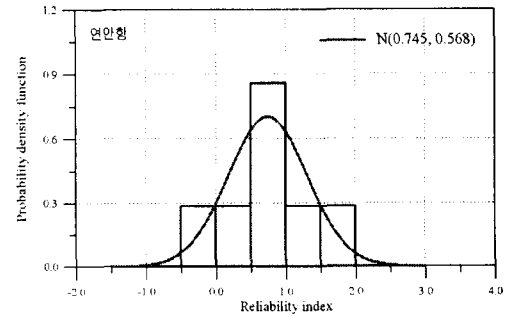


그림 22 연안항 경사제 피복재의 신뢰지수의 확률 밀도함수 (Van der Meer)

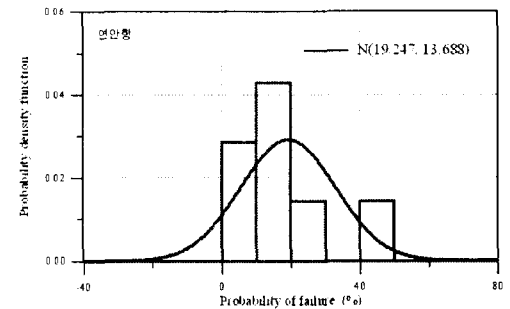


그림 23 연안항 경사제 피복재의 파괴확률의 확률 밀도함수 (Hudson)

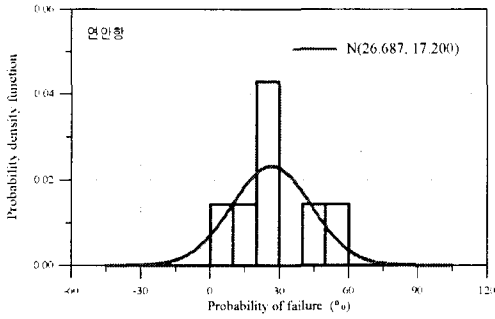


그림 24 연안항 경사제 피복재의 파괴확률의 확률 밀도함수 (Van der Meer)

비록 자료의 제약성으로 의미가 약하지만 전국적으로 비교하면 무역항이 연안항의 피복재보다 안정적으로 설계되었음을 쉽게 알 수 있다.

한편 무역항과 동일하게 신뢰성 해석으로부터 얻어진 영향계수를 이용하여 각 항의 부분안전계수를 산정하였다. 아래 그림 25에서 그림 32에 저항력 및 파괴 그리고 신뢰함수에 대한 부분안전계수를 목표파괴수준의 함수로 제시하였다. 또한 각각의 Hudson과 Van der Meer 식을 그림 28과 그림 32에 목표수준에 따른 안정수를 제시하였다.

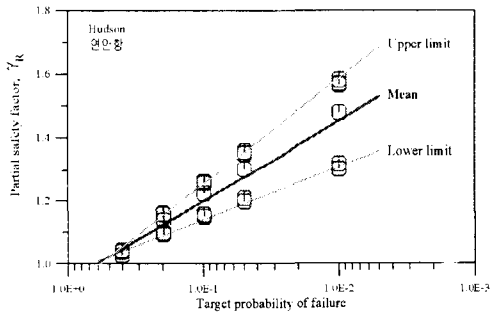


그림 25 연안항의 저항력에 대한 부분안전계수 (Hudson)

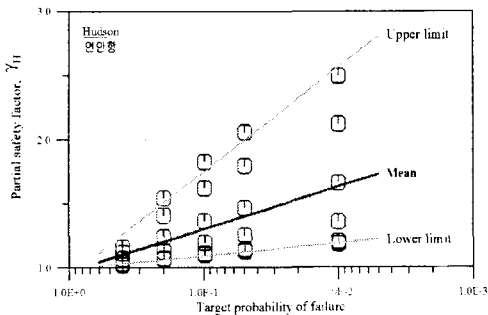


그림 26 연안항의 파고에 대한 부분안전계수 (Hudson)

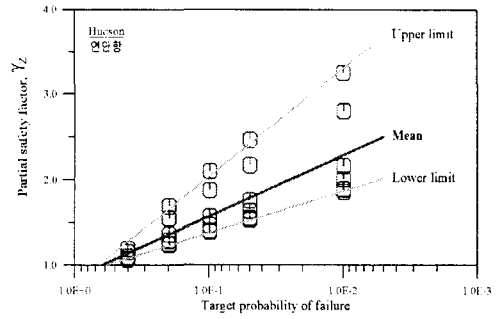


그림 27 연안항의 신뢰함수에 대한 부분안전계수 (Hudson)

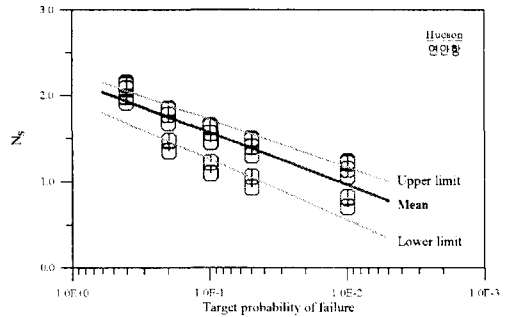


그림 28 연안항의 목표수준에 따른 안정수 (Hudson)

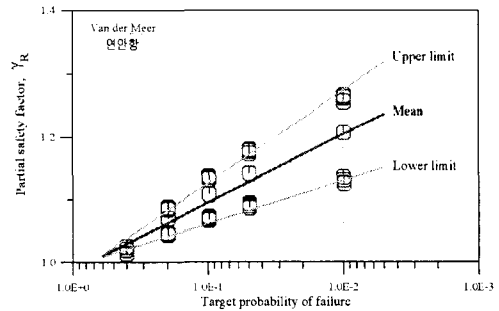


그림 29 연안항의 저항력에 대한 부분안전계수 (Van der Meer)

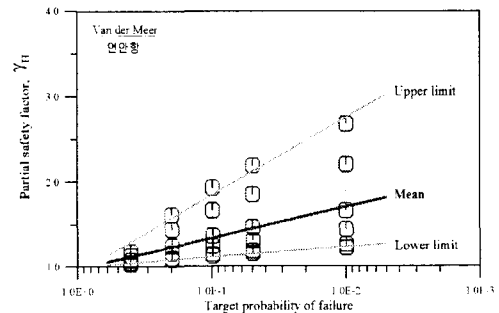


그림 30 연안항의 파고에 대한 부분안전계수 (Van der Meer)

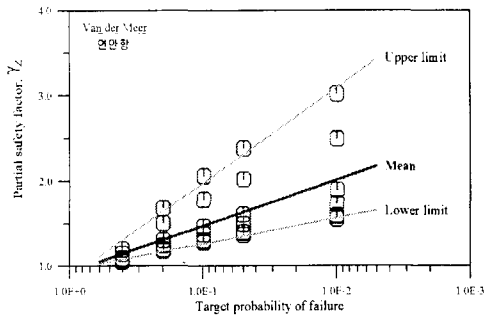


그림 31 연안항의 신뢰함수에 대한 부분안전계수 (Van der Meer)

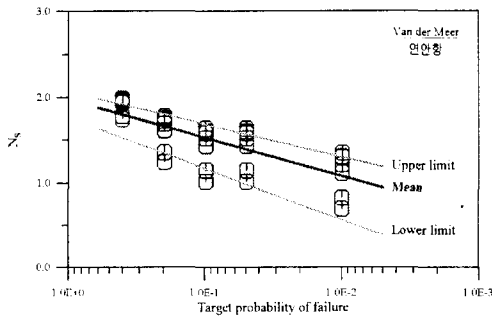


그림 32 연안항의 목표수준에 따른 안정수 (Van der Meer)

정량적으로 약간의 차이를 보이지만 무역항의 결과와 거의 동일한 거동특성을 나타내고 있다. 따라서 무역항 및 연안항의 결과를 동시에 해석하면 전국적인 수준의 부분안전계수를 목표수준에 따라 산정할 수 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 개발된 해석법을 우리나라에 건설된 무역항과 연안항의 경사제 피복재에 대한 안정성을 평가하기 위하여 적용하였다. 동해안과 남해안에 위치한 14개 무역항의 경사제와 7개 연안항의 경사제 피복재를 대상으로 평가하였다. 평가 결과를 통계적으로 처리하여 무역항 및 연안항에 대한 평균 수준의 안정성을 확인할 수 있었다. 한편 신뢰성 해석 결과에서 얻어지는 영향계수를 이용하여 각 항의 저항력 및 파고 그리고 신뢰함수에 대한 부분안전계수를 산정하여 상한치 및 하한치 그리고 평균치를 제시하였다.

따라서 이들 결과를 이용하면 현행 수준에 맞는 부분안전계수를 결정할 수 있다. 이는 신뢰성 설계

법을 이용하면 전국적으로 평균화된 경사제 피복재의 중량을 목표수준에 따라 합리적으로 설계할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 이철웅, 피복재의 신뢰성 해석과 부분안전계수 산정, 제2회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop, pp.145-183, 2008.
- [2] PIANC, *Development of a partial safety factors system for the design of rubble mound breakwaters*, Working Group 12, 1991.
- [3] 해운항만청, 전국 항만구조물 도집, 제 1편 무역항, 1992.
- [4] 수산청, 해역별(동해, 남해) 심해파 추정 보고서, 1988.
- [5] 한국해양연구원, 전해역 심해설계파 추정 보고서 II, 2005.
- [6] SPM(Shore Protection Manual), Coastal Engineering Research Center, US Army Corps Engineers, Washington, DC., 1984.
- [7] Van der Meer, J.W., Stability of breakwater armour layers-Design formulae, *Coastal Engineering*, Vol. 11, pp.219-239, 1987.