

추계학적 호안구조물 설계기법 A Study on the Stochastic Design of Coastal Defense System

조용준¹ · 이재일² · 권혁주³ · 유하상²
 Yong Jun Cho¹, Jae Il Lee², Hyuck Ju Kwon³, and Ha Sang Ryu²

1. 서 론

현재 우리나라 방파제 설계의 주류를 이루는 방법은 Hudson(SPM,1984)공식과 같은 경험식을 이용하는 결정론적 방법이다. 이 결정론적 방법은 사용하기에 간편한 장점이 있으나, 그 유도과정을 살펴보면 적용에 한계가 있음을 알 수 있다. 즉, 임의로 선택된 설계파로부터 구조물의 안정여부에 대한 평가만 가능하다.

이러한 결정론적 해석의 한계를 체계적으로 해결할 수 있는 대안이 추계학적 해석방법이다. 추계학적 방법은 방파제 강도와 파력의 영향인자에 내재한 불확실성을 통계적으로 기술함으로써 적절한 안전율을 체계적으로 산정할 수 있다. 또한 적절한 파괴 확률을 수용함으로써 결정론적 설계기법에서 불필요하게 보수적으로 운영될 수 있는 부분들을 찾아낼 수 있으며 이로 인해 비용절감효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 기존의 결정론적 기법으로 설계된 방파제에 대해 추계학적 설계법을 적용하여 피복재 증량을 산정하고 결과를 비교하고자 한다.

본 연구에서 사용한 설계기법은 추계학적 방법으로 Level I의 부분안전계수법과, Level II의 FMA, AFDA방법이다. 또한 Hudson 공식에 의해 설계된 동해(울산항), 남해(나로도항), 서해(계마항)를 연구대상지역으로 선정하여 방파제의 피복재 증량을 산정하고 그 결과를 비교하였다.

2. 기본방정식

본 연구에서는 Tompson과 Shuttler(1975)의 초기 작업을 기초로 Delft Hydraulics(1988)에서 일련의 수리모형실험을 수행한 van der Meer(1998)의 식을 사용하였다.

- Level I 방법 (부분안전계수법) -

Van der Meer의 부분안전계수식
 (T.T.P, cot α = 1.5) (PIANC PTC II, 1992)

$$\frac{1}{\gamma_c} \left(3.75 \cdot \frac{N_{out}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85 \right) S_{om}^{-0.2} \Delta D_n \geq \gamma_H \cdot H_S^T$$

$$\gamma_z = 1 - k_a \cdot \ln(P_f) \quad : \text{강도감소계수}$$

$$\gamma_H = \frac{H_s^T}{H_s^T} + \sigma_{F_{Hs}} \left(1 - \left(\frac{H_s^T}{H_s} - 1 \right)^{k_r} \right) + \frac{k_s}{\sqrt{P_f N}} \quad : \text{하중증가계수}$$

T : 설계내용 년수 (년)

P_f : 내용기간 중의 목표 파괴확률

F_{Hs} : H_s의 단기오차 및 변동성에 기인하는 불확실 모델

σ_{F_{Hs}} : F_{Hs}의 정규화 분산계수(PIANC Bulletin No. 78/79 Table 4.1)

H_s^T : 내용년수 T년의 조우확률에 의한 유의파고

H_s^{3T} : 내용년수 T년의 3배 기간의 조우확률에 의

1 서울시립대학교 토목공학과 부교수

2 서울시립대학교 박사과정

3 (주) 유신 코퍼레이션

한 유의과고

- $H_s^{T_p}$: 재현기간 T_p 에 상응하는 유의과고
- T_{Pf} : 목표 파괴확률 P_f 에서의 재현기간
- N : 극치분포의 모수추정에 사용된 자료의 수 (Hudson식과의 비교 위해 $N=50$ 을 적용)
- k_α, k_β, k_s : 각각의 파괴확률로부터 최적화된 계수

- Level II 방법 -

Van der Meer 식(T.T.P, cot $\alpha = 1.5$) (PIANC PTC II, 1992)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = (3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85) S_{om}^{-0.2}$$

$$Z = (3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85) \Delta D_{n50} - H_s S_{om}^{-0.2} = R - S$$

신뢰성 함수에 적용할 정규분포를 가지는 확률변수로서 Van der Meer(1988)와 PIANC(1992)의 제안치를 참조하여 평균값과 표준편차 등을 선정하였다.

구조물의 저항R와 하중S는 상호 독립적인 추계과정으로 보이며 이 사실에 기초하면 $f_{R,S}(R,S)$ 는 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$f_{R,S}(R,S) = f_R(R) f_S(S)$$

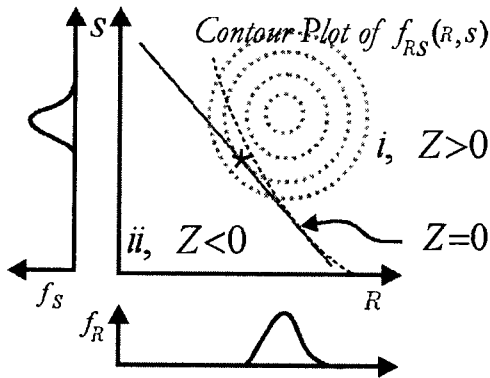


Fig. 1. 결합확률밀도함수의 등고선도와 침식영역.

엄밀히 말해 신뢰함수는 Van der Meer 식에 준거하면 $N_{od}, N_z, \Delta, D_{n50}, H_s, S_{om}$ 라는 상호 독립적인 6개의 무작위 과정에 종속하나 편의상 저항R와 하중S 종속하는 것으로 가정하면 R와 S로 구성되는 표본공간에서 신뢰함수의 거동은 그림1과 같이 도식화 할 수 있다

피복석이 파괴될 확률은 신뢰함수의 확률밀도함

수 $f_z(z)$ 의 영역 ii에 대한 적분으로 정의되며 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(Z < 0) &= \int_{Z < 0} f_z(z) dz \\ &= \iint_{Z < 0} f_R(R) f_S(S) dR dS \\ &= \iiint \dots \int_{Z < 0} f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2) \dots f_{X_n}(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \end{aligned}$$

Fig. 1에서 f_R 은 저항(강도)의 확률분포곡선을, f_S 는 하중(외력)의 확률분포곡선을 의미한다. 결합확률분포함수의 곡면상을 지나서 직선(곡선)은 한계상태의 경계면으로서 직선의 경우 선형화된 신뢰성함수를 의미하며 곡선의 경우는 원래의 신뢰성함수를 의미한다.

3. 추계학적 호안구조물 설계

- Level I 방법(부분안전계수법) -

최종적으로 구조물이 확보해야 할 안전도를 목표 신뢰도 지수로 삼아 기존의 안전계수 개념과 유사하게 부분안전계수들을 계산하여 이용하는 의사확률해석법이다.

Van der Meer 식(PIANC PTC II, 1992)에서 제시한 부분 안전계수를 적용한 설계방정식을 이용하고, 적정 허용피해율($N_{od} = 0.2$)에 대한 파괴확률을 고려하여 피복재의 중량을 산정한다.

- Level II 방법 -

각 확률변수의 평균과 분산 그리고 분포형태만을 이용하여 파괴확률의 간접 지표인 신뢰도지수를 근사적으로 산정하는 방법으로 모멘트법이라고도 하며 변수들의 확률밀도함수를 직접적으로 사용하지 않고도 각 변수들의 불확실성을 고려할 수 있는 방법이다.

FMA(First order Mean value Approach)

신뢰성 함수 Z (한계상태식)가 정규분포 확률변수의 비선형식으로 주어졌을 경우 각 확률변수의 기대평균치 주변에서 Taylor Series로 전개하여 선형한계상태식으로 근사시켜 1차항만을 고려하는 방법이다. 확률변수의 상호독립과 정규분포를 가정하며, 확률변수의 선형근사식에서 신뢰성 지수 β 를 구한다. 이때, β 는 신뢰성 함수(Z)의 평균에서 한계상태($Z=0$)까지의 상대적 거리를 의미한다.

AFDA(Approximate Full Distribution Approach)

정규분포를 따르지 않는 변수들 사이의 상관관계를 고려하여 신뢰성을 해석할 수 있는 방법이다. 그러나 이 방법에서도 각각의 확률변수들 사이의 상관관계가 가정되든지 아니면 관련 자료로부터 미리 구하여 입력자료로 주어져야만 한다.

즉, 상관계수와 관련된 고유치와 고유벡터를 구하여 그에 따른 영향들을 해석하는 방법이다. (Ang and Tang, 1990)

FMA와 유사하나 신뢰성 함수의 선형화를 기대 평균치가 아닌 MPFP(Most Probable Failure Point or Design Point)의 주변에서 전개하는 것이 차이점이다.

4. 추계학적 설계기법의 적용

- 적용대상 -



Fig. 2. 적용해역.

동해(울산항), 남해(나로도항), 서해(계마항)에서 결정론적방법인 Hudson 공식에 의해 설계된 방파제의 피복석 중량에 대해 추계학적 방법을 적용하여 재산정하고 그 결과를 비교·검토해 보았다. Fig. 2는 설계대상해역의 위치도이다.

설계대상해역의 세부사항은 Table 1과 같다.

Table 1. 설계대상해역

해역 구분	동해	남해	서해
항명	울산항	나로도항	계마항
관할청	지정항만(해수부)	국가어항(해수부)	국가어항(해수부)
행정위치	울산시 남구 용연동	전남 고흥군 봉래면	전남 영광군 홍농읍
검토보고서	울산신항 방파제 1단계(1공구) 실시설계보고서 (1999.10)	나로도항 서방파제 축조 실시설계 보고서 (1998.12)	계마항 매물저감 방지대책보고서 (2002.10)
적용구조물	중앙방파제	서방파제	신설 서방파제

- Level I 방법(부분안전계수법) -

설계입력자료

PIANC PTC II(1992)의 자료를 이용하여 부분안전계수법을 위한 입력 자료를 Table 2에 결정하였다.

Table 2. 각 해역별 설계입력자료

구분	동해 (울산항)	남해 (나로도항)	서해 (계마항)
단위중량 (Precast Plain Concrete)	2.35 ton/m ³		
내용년수	50년		
파고(50년 재현기간)	6 m	4.06 m	4.29 m
주기(50년 재현기간)	15 sec	10 sec	9 sec
제체경사(cot α)	1.5		
전면수심	21.0 m	9.7 m	8.2 m
적용식	Van der Meer 식		

Burcharth 와 Sorensen(1999)은 van der Meer식의 파괴확률에 따른 부분 안전계수를 Table 3과 같이 제안하고 있다.

Table 3. 파괴확률에 따른 부분 안전계수 (PIANC,1999)

P _f	σ _{F_m} = 0.05	
	γ _H	γ _Z
0.01	1.7	1.02
0.05	1.4	1.06
0.10	1.3	1.04
0.20	1.2	1.02
0.40	1.0	1.08

Hudson 식에 의해 계산된 피복재의 중량과 이로부터 채택한 부분안전계수법 적용중량이 표4에 도시되어 있다.

Table 3의 파괴확률 별 부분안전계수와 Table 4의 T.T.P 중량에 대해 부분 안전계수법을 사용하여 추계학적 설계를 수행하였다.

Table 4. Hudson식에 의한 중량과 부분안전계수법 적용중량

구분	동해 (울산항)	남해 (나로도항)	서해 (계마항)
Hudson식에 의한 피복석중량	25t	8t	12.5t
부분안전계수법 적용중량	20t, 25t, 32t, 40t	8t, 10t, 12.5t, 16t,	10t, 12.5t, 16t, 20t

계산결과

허용피해율 Nod 에 따른 파괴확률을 도시하면 그림3과 같다. Fig. 3은 울산항을 대상영역으로 32ton T.T.P를 사용할 경우 내용년수 1년, 20년, 50년, 그리고 100년에 대해 허용피해율 Nod 에 따른 파괴확률 P_f 를 도시한 것이다.

Hudson 식에서 허용피해율 5%수준은 Van der Meer 공식의 Nod=0.2에 해당한다. 부분안전계수법에 의한 피복석 안정성 검토 결과 동해(울산항)의 경우 Fig. 4에서 Nod=0.2의 아래에 해당하는 피복재 중량을 설계시에 채택할 수 있다.

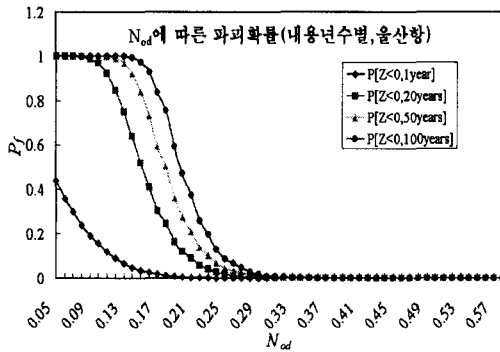


Fig. 3. Nod에 따른 파괴확률(내용년수별, 울산항).

즉, 파괴확률 0.2의 경우 40ton TTP를 채택할 수 있으며, 파괴확률을 0.3으로 채택할 경우의 피복재 중량은 32ton이고 파괴확률 0.4를 채택할 경우는 25ton T.T.P (Hudson식에 의한 중량)를 적용할 수 있음을 알 수 있다.

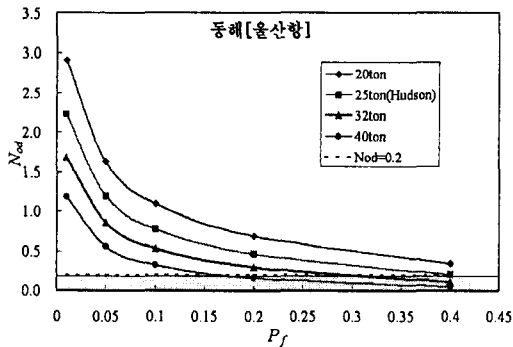


Fig. 4. 부분안전계수법에 의한 평가(울산항).

또한, 남해(나로도항)는 파괴확률 0.2의 경우 16ton TTP를 0.3일 경우 12.5ton을 그리고 0.4일 경우 10ton을 사용할 수 있음을 알 수 있다. 그리고, Hudson 식에 의해 산정된 중량 8ton은 파괴확률이 0.5가 됨을 알 수 있다(Fig. 5).

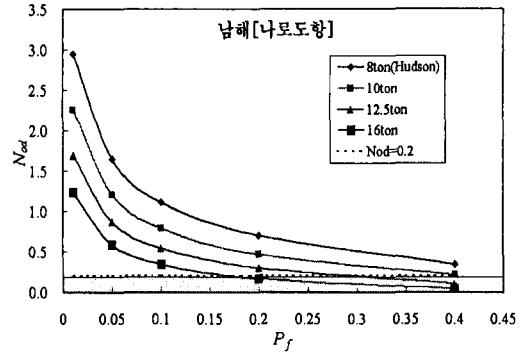


Fig. 5. 부분안전계수법에 의한 평가(나로도항).

마찬가지로 서해(계마항)의 경우 파괴확률 0.2에서 20ton TTP를, 파괴확률 0.3일 경우 16ton을 그리고 0.4에서는 12.5ton을 사용할 수 있음을 알 수 있다. 또한, Hudson 식에 의해 결정된적 방법으로 산정된 중량 12.5ton은 파괴확률이 0.35 임을 알 수 있다(Fig. 6).

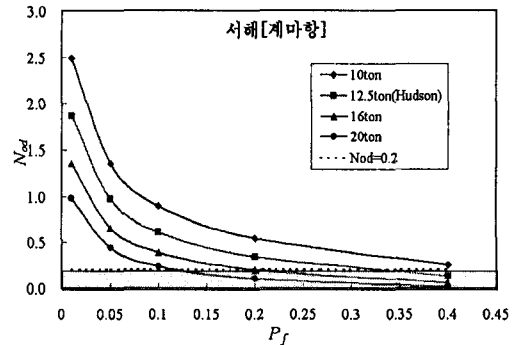


Fig. 6. 부분안전계수법에 의한 평가(계마항).

- Level II 방법 -

신뢰성 함수에 적용할 정규분포를 가지는 확률 변수로서 van der Meer(1988)와 PIANC(1992)의 제안치를 참조하여 평균값과 표준편차 등을 선정하였다(Table 5).

Table 5. 각 항별 확률변수의 입력치

구분	동해(울산항)		남해(나로도항)		서해(계마항)	
	평균	분산	평균	분산	평균	분산
파고	6.0	0.25	4.06	0.25	4.29	0.25
파형경사 S_{om}	0.027	0.0016	0.042	0.0038	0.053	0.005
내습파랑수 N_Z	1000	0	1000	0	1000	0
상대밀도 Δ	1.28	0.03	1.28	0.03	1.28	0.03
특성지름 $D_{\#60}$	2.30	0.04	1.83	0.06	1.99	0.05
N_{od}	0.2	0.05	0.2	0.05	0.2	0.05
주 기	15.0	0.27	10.0	0.275	9.0	0.275

FMA

신뢰성 함수(파괴기준함수)가 n 개의 설계확률 변수 x_i 로 이루어진다면 다음과 같이 정의된다.

$$Z = Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

각 확률변수들의 평균을 전개점으로 잡고, 전개점에서 Taylor Series로 전개(비선형 항을 무시)하여 신뢰성 함수 선형화 한다.

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_n) = Z(\mu_{x1}, \mu_{x2}, \dots, \mu_{xn}) + \sum_{i=1}^n ((x_i - \mu_{xi}) \frac{\partial}{\partial x_i} [Z(\mu_{xi})])$$

선형화된 신뢰성 함수의 평균과 분산은 정규분포를 따르므로 다음과 같다.

$$\mu_z = Z(\mu_{x1}, \dots, \mu_{xn})$$

$$\sigma_z = (\sum (\frac{\partial Z}{\partial x_i})^2 \sigma_{xi}^2)^{0.5}$$

위의 선형화 과정을 토대로 FMA방법을 이용하여 신뢰성을 평가하면 Table 6과 같다.

Table 6. FMA방법에 의한 신뢰성 평가(울산항)

Variable x_i	Mean μ_{xi}	Standard Deviation σ_{xi}	Partial Derivative	Influence Factor α_{xi}^2	Relative Contribution
N_{od}	0.2	0.05	$\partial Z / \partial N_{od}$ 2.202	0.0121	32%
N_Z	1000	0	$\partial Z / \partial N_Z$ 0.000	0	0%
Δ	1.282	0.03	$\partial Z / \partial \Delta$ 2.646	0.0063	17%
$D_{\#60}$	2.30	0.0396	$\partial Z / \partial D_{\#60}$ 1.472	0.0034	9%
S_{om}	0.0267	0.0016	$\partial Z / \partial S_{om}$ -21.769	0.0012	3%
F_{HS}	0	0.25	$\partial Z / \partial F_{HS}$ -0.485	0.0147	39%
H_S	6.00	0.00	$\partial Z / \partial H_S$ -0.485	0	0%
Σ 0.0377					100%
R	3.391			σ_z 0.194366	
S	2.907				
μ_z	0.484	β	2.49	$P[Z < 0]$ 0.64%	per 1 year

계산결과 울산의 경우 μ_z 는 0.484, σ_z 는 0.194로

신뢰도 지표는 $\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{0.484}{0.194} = 2.49$ 로서 표준 정규분포표에서 누적확률분포의 값이 약 0.64%로 이 값이 1년에 해당하는 위험률, 즉 파괴 확률수준이다.

1년 평균 파괴확률이 0.0064 이므로 50년 내륙년수 동안에 최소 1번 이상 조우할 확률은 다음과 같이 27.44%이다.

$$P_f [Z < 0, 50year] = 1 - (1 - P_f [Z < 0, 1year])^{50}$$

같은 방법으로 계산한 각 항별 신뢰도 지표와 파괴확률을 Table 7에 도시하였다.

Table 7. 각 항별 FMA 방법에 의한 신뢰도 및 파괴확률

평가 방법		신뢰도 지표 β	위험도(파괴확률) $P[Z < 0]$	년수
Level II FMA	동해 (울산항)	2.49	0.64 %	1년
		0.60	27.44 %	50년
	남해 (나로도항)	2.77	0.26 %	1년
		1.20	12.20 %	50년
	서해 (계마항)	2.65	0.40 %	1년
		0.90	18.16 %	50년

AFDA

확률변수들을 파괴표현상의 점에서 정규화한다 음 원점에서의 거리가 가장 가까운 직선거리에 위치한 한계상태식 상의 점(MPPF; Most Probable Failure Point)을 추적한다. 그 직선거리를 신뢰도 지수로 취하여 파괴확률을 계산한다(Ang 등, 1990).

각 재현기간별 수치계산의 결과를 Table 8에 도시하였다.

Table 8. AFDA방법에 의한 수치계산 결과(계마항)

Variable	Assumed Design Point x_i^*	Standard Deviation σ	$\frac{\partial Z}{\partial x_i}$	α_{xi}^*	Reliability Index β	Adjusted Design Point x_i^*
N_{od}	0.2	0.05	0.095	0.49513	2.751	0.131895
N_Z	1000	0	0.000	0.00000		1000.0
Δ	1.28	0.03	0.068	0.35744		1.250501
$D_{\#60}$	1.99	0.04	0.059	0.30721		1.951909
S_{om}	0.053	0.0016	-0.014	-0.07522		0.053331
F_{HS}	0.0	0.25	-0.139	-0.72599		0.499297
H	4.29	0.00	0.000	0.00000		4.290000
$\Sigma ((\partial Z / \partial x_i)^2)$			0.037	R 2.66		S 2.66

Table 9. AFDA방법에 의한 신뢰성 평가(계마항)

확률변수	평균	표준편차	Most Probable Failure Point
N_{od}	0.2	0.05	0.132
N_s	1000	0	1000
Δ	1.28	0.03	1.251
D_{n50}	1.99	0.04	1.952
S_{om}	0.053	0.0016	0.0533
F_{HS}	0.0	0.25	0.499
H_s	4.29	0.0	4.29

계산결과(Table 9)에서 계마항의 경우 신뢰도지표 $\beta = 2.751$ 로서 표준 정규분포표에서 누적확률분포의 값이 약 0.3%로 이 값이 1년에 해당하는 위험률, 즉 파괴확률수준이다.

1년 평균 파괴확률이 0.003 이므로 50년 내용년수 동안에 최소 1번 이상 조우할 확률은 다음과 같이 14%이다.

5. 추계학적 설계 결과 분석

울산항의 경우 Hudson식으로 구한 피복재의 중량은 25ton이며, 이때 구해진 중량에 대해 부분안전계수법 결과를 이용하여 파괴확률을 구하면 40%가 되는 것을 알 수 있으며, 따라서 결정론적인 방법에 의한 피복재 중량산정은 과소평가 될 수 있음을 보여준다(Table 10, Fig. 7).

Table 10. 울산항설계기준에 따른 피해확률의 비교

항 목	Hudson	추계학적 설계		
		부분안전계수법	FMA	AFDA
피복재중량 (ton)	25	32	32	32
피해율	5%	Nod = 0.2		
신뢰도지표 β	N/A	0.52	0.6	0.47
파괴확률 $P[Z < 0, 50 \text{ years}]$	40%	30%	27%	33%

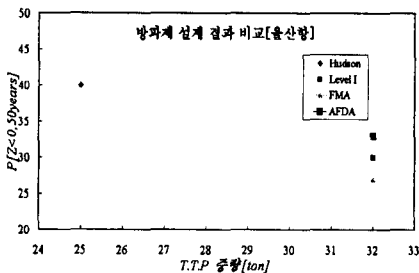


Fig. 7. 울산항 50년 내용년수의 파괴확률.

나로도, 계마항의 경우에도 이와 유사한 결과를 보였다(Table 11, Table 12, Fig. 8, Fig. 9).

Table 11. 나로도항설계기준에 따른 피해확률의 비교

항 목	Hudson	추계학적 설계		
		부분안전계수법	FMA	AFDA
피복재중량 (ton)	8	16	16	16
피해율	5%	Nod = 0.2		
신뢰도지표 β	N/A	0.9	1.2	1.35
파괴확률 $P[Z < 0, 50 \text{ years}]$	50%	18%	12%	9%

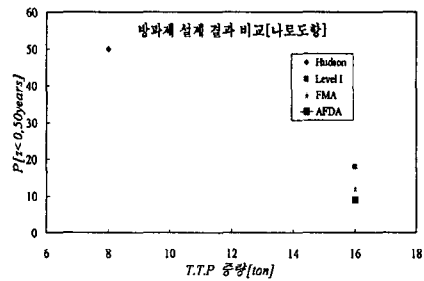


Fig. 8. 나로도항 50년 내용년수의 파괴확률.

Table 12. 계마항 설계기준에 따른 피해확률의 비교

항 목	Hudson	추계학적 설계		
		부분안전계수법	FMA	AFDA
피복재중량 (ton)	12.5	20	20	20
피해율	5%	Nod = 0.2		
신뢰도지표 β	N/A	1.2	0.9	1.05
파괴확률 $P[Z < 0, 50 \text{ years}]$	35%	12%	18%	15%

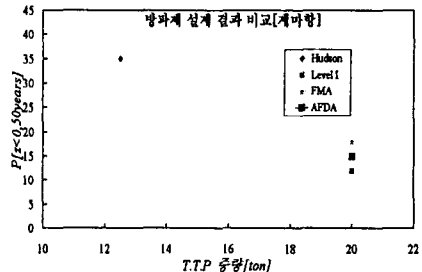


Fig. 9. 계마항 50년 내용년수의 파괴확률.

6. 결 론

추계학적 설계기법으로 방파제 피복석 중량을 산정해본 결과 기존의 Hudson 공식에 의한 결정

론적 설계기법에서 산정한 피복석 중량이 과소 산정된 것으로 나타났다.

참고 문헌

- 계마항 매물저감 대책수립 보고서, 2002. 10, 해양수산부
- 나로도항 서방파제 축조 실시설계 보고서, 1998. 12, 여수지방 해양수산청
- 울산신항 방파제 1단계(1공구) 실시설계 보고서, 1999 10, 해양수산부
- Ang, Alfredo H-S and Wilson H. Tang, 1990, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol 2, p. 361.
- Burcharth, H. F. and Sorensen, J. D., 1999. The PIANC safety factor system for breakwaters. Proc. Int. Conf. Coastal Structures '99, A. A. Balkema, Spain, pp.1125-1144.
- Delft Hydraulics, 1988. Rock slopes, static stability of rock slopes under waves attack, Report M1983, Part 1.
- Van der Meer, 1988. Deterministic and probabilistic design of break water armour layers, Proc. Am. Soc. Civ. Eng. Jnl Waterways Ports, Coastal and Ocean Eng., Div., 114, NO.1.
- PIANC PTC II, 1992, Analysis of Rubble Mound Breakwater, Supplement to Bulletin No. 78/79.
- SPM, 1984. Shore Protection Manual, 4th edition, US Army Corps of Eng., Coastal Eng. Res. Center, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Thompson, D. M. and Shuttler, R. M., 1975. Riprap design for wind-wave attack-a laboratory study in random waves, Report EX 707 Hydraulics Research, Wallingford.