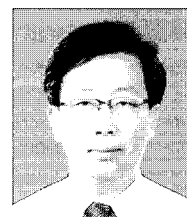
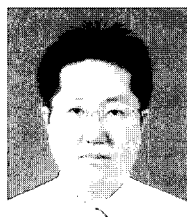
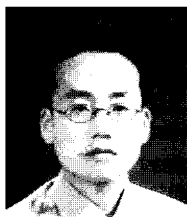


신뢰성 기법에 의한 태풍 내습시 해안구조물 안정성 평가

Stability examination through reliability technique
about Coastal structure which attacks of typhoon



홍수영 | 해인이엔씨 부설기술연구소 연구원 이기재 | 해인이엔씨 부설기술연구소 연구원 고진석 | 해인이엔씨 부사장

1. 서론

최근 우리나라에 태풍 매미, 루사, 송다, 나비 등과 같은 초대형 태풍이 한반도를 내습하면서 해안에 인접한 지역에서는 수많은 인명피해와 경제적 손실이 발생하였다. 따라서, 태풍에 의한 고파랑 내습시 해안으로 전파되는 파랑을 차단하는 방파제, 호안 등과 같은 외곽 시설에 대한 안정성 검토의 필요성이 증대되고 있다. 그러나, 아직까지 구조물 설계시 안정계수 등을 결정하여 안정성 유무를 판단하는 결정론적 방법을 설계에 적용하고 있어, 기상이변에 따른 이상파랑에 대한 구조물의 안정성 평가는 미흡한 실정이다. 최근 화순항 동방파제 설계시 신뢰성 기법을 적용하여 안정성 평가를 수행한 사례와 우리나라 남해지역에 큰 영향을 미친 태풍 루사와 매미에 의한 파랑제원을 산정하여 신뢰성 해석을 수행하여 초대형 태풍 내습시 구조물에 대한 안정성 평가를 수행하였다.

신뢰성 검토를 수행하기에 앞서 각각의 태풍에 대

해 태풍 이동경로에 따른 수치모형을 수행하여 대상 해역에 가장 큰 영향을 미치는 시간대의 파랑제원을 산정한 후, 이를 천해역에 적용하여 구조물 설계파를 산정하여 이를 기초자료로 활용하였다.

해파 특성을 파악하기 위한 기초이론은 19세기에 완성되었지만 실제 현장에 적용된 것은 제2차 세계대전 중의 일이며, 해파추정은 바람이 비교적 일정한 해역에서의 풍속과 파고의 경험적인 관계를 사용하여 산정하였다(Sverdrup 등, 1947). Gelci 등(1957)은 스펙트럼내의 에너지 평형 개념을 적용하여 해파를 추산하는 해파 모형인 각 스펙트럼 해파모형(DSA-5)을 개발하였다. 이 에너지 평형 방정식에 기초한 스펙트럼 에너지 해파 모형은 여러 유형으로 구분되어 꾸준한 개발을 통해 세계 주요 해양국이 현장에 적용하고 있다. 이 중에서 제 3세대 해파 모형인 WAM모형(WAMDIG, 1988)은 가장 잘 검증된 모형으로서 세계의 40여 연구진들이 예보에 적용하고 있다.

신뢰성 설계 기법은 1970년대 이후 결정론적 설계의

단점을 극복하기 위해 구조물 설계에 대한 확률적 방법으로 방파제에 대한 신뢰성 설계 기법의 연구는 1980년대 중반부터 시작되었다. 사석 방파제에 대해서는 van der meer(1987, 1988)가 확률적인 접근방법을 제안하였으며, Burcharth(1991)가 부분안전계수를 도입한 신뢰성 설계 기법을 제시하였다. Burcharth 등(2000)은 PIANC(Permanent International Association of Navigation Congress)working group의 결과를 요약하여 사석 방파제에 대한 부분안전계수 시스템을 확립하였다. 우리나라에서는 이철웅(1999)이 경사제 파복재의 안정성에 대한 신뢰성 해석을 수행하였으며, 신뢰함수에 대한 확률밀도함수를 수학적으로 유도하고, 유도된 함수의 적용성을 검증하기 위하여 Monte-Carlo 해석방법, 모멘트법인 FMA(First order Mean value Approach), AFDA(Approximate Full Distribution Approach)등을 사용하였다.

2. 모형 개요

2.1 WAM cycle 4

이상파 추정은 WAM cycle 4 모형(WAMDIG, 1988)을 사용하였으며, 2차원 파랑 스펙트럼의 변화를 파랑에너지 보존방정식으로 적분하여 계산하는 제 3세대 모형이다. 기본방정식은 식(1)과 같다(Gunther et al., 1992).

$$\frac{dF}{dt} + \frac{\partial}{\partial \Phi}(\Phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda}(\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\theta F) = S \quad (1)$$

여기서, F : $(\lambda, \theta, \Phi, \lambda)$ 에 관련한 스펙트럼 밀도함수

S : 원천함수

f : 주파수

θ : 방향

Φ : 경도

λ : 위도

원천함수 S 는 바람에 의한 에너지 유입 S_{in} , 에너지 소산 S_{ds} , 비선형 전파항 S_{nl} 의 합으로 식(2)과 같다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

2.2 TDMSE

화순항 인근해역의 천해역에서의 전파과정을 재현하기 위해서 시간의존 완경사 방정식(Time Dependent Mild Slope Equation)을 이용한 TDMSE모형으로 수치실험을 수행하였다. TDMSE모형은 천수, 굴절, 회절, 반사, 쇄파 등을 고려한 Nishmura 등(1983)과 Watanabe 등(1986)식을 사용하였다.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_D Q_x = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_D Q_y = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial}{\partial x}(nQ_x) + \frac{\partial}{\partial y}(nQ_y) \right] = 0 \quad (5)$$

여기서, C : 파속

f_D : 쇄파의 에너지 감쇠계수

n : 군속도와 파속 비(= C_g/C)

Q_x, Q_y : x, y 방향의 선류량

x, y : 수평직각좌표계

t : 시간

η : 수면변위

2.3 신뢰성해석

화순항 동방파제의 안정성을 검토하기 위해 신뢰성해석 방법 중의 하나의 Level 2에서 가장 정확도가 높은 AFDA(Approximate Full Distribution Approach)을 사용하였다. 본 연구에서와 같은 항만

구조물의 신뢰성 해석에서는 Level 2의 해석법에 의하여 산정된 결과가 여러 과정을 거쳐 올바르게 수행된 Monte-Carlo 해석법의 결과와 잘 일치한다는 여러 연구 결과에 따라, 항만 구조물의 신뢰성 해석에서는 실제 적용이 어렵고 변수 결정이 난해한 Level 3의 Monte-Carlo 해석법보다 Level 2를 사용하는 것이 더 정확하다.

2.3.1 Level 2에 의한 계산방법

방과제 등과 같은 임의의 해안 구조물의 저항을 R , 그리고 하중의 크기를 S 라고 정의하면, 현재 구조물의 설계에 일반적으로 사용되고 있는 결정론적 설계법의 중요한 개념중의 하나인 안전계수, F_s 가 다음식(6)과 같이 정의된다.

$$F_s = R/S \quad (6)$$

식(6)의 정의에 따르면 결정론적 설계법에서는 안전계수 $F_s \leq 1$ 이면 해당구조물이 파괴된다고 가정하는데 반해, 신뢰성 해석에서는 $F_s > 1$ 면 안정하다고 판정한다. 최적화 이론에서 일반적으로 이용되고 있는 개념을 도입하여 안전여유(safety margin), M 은 식(7)과 같다.

$$M = R - S \quad (7)$$

$M = 0$ 인 상태를 한계상태(critical/limit state)라고 정의하고 파괴상태와 안전상태를 구분하는 한계식으로 사용한다. 또한, 구조물의 저항을 나타내는 R 은 저항에 영향을 주는 또 다른 확률변수들에 의한 함수가 될 수 있기 때문에 저항함수(resistance function)로 정의되며, 동일하게 S 는 하중함수(loading function)로 정의된다. $M = 0$ 인 한계식은 저항함수와 하중함수로 구성되며, 이 함수를 신뢰함수(reliability function) 또는 파괴함수(failure function)라 한다.

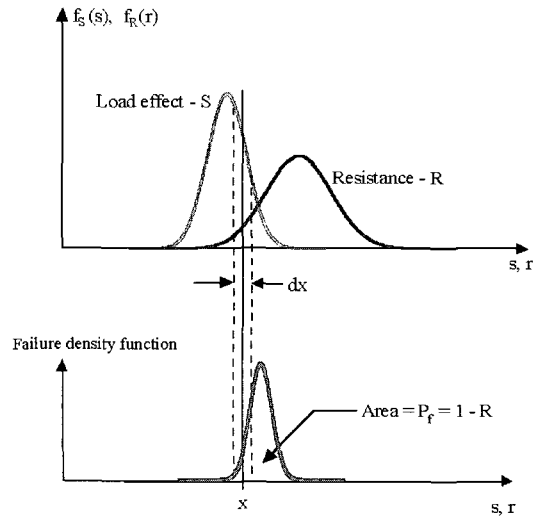


그림 1. 신뢰성 해석에서 정의된 파괴확률

저항함수와 하중함수 모두 임의의 분포함수를 따르는 확률변수라면 신뢰성 이론에서 일반적으로 정의되는 파괴확률/신뢰성은 그림 1에 제시된 바와 같이 식(8)과 같이 정의된다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(\chi) f_S(\chi) d\chi \quad (8a)$$

$$R = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} F_R(\chi) f_S(\chi) d\chi \quad (8b)$$

여기서, f_s 는 하중함수의 확률밀도함수이다. 식(8a)에 정의된 파괴확률은 하중이 임의의 χ 와 $\chi + d\chi$ 사이에서 발생될 확률과 저항이 χ 보다 작거나 같게 될 확률의 곱의 합이다. 반대로 적용하게 되면 동일하게 파괴확률/신뢰성에 대한 또 다른 형태의 정의가 다음 식(9)과 같다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - F_S(\chi)) f_R(\chi) d\chi \quad (9a)$$

$$R = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \{1 - F_S(\chi)\} f_R(\chi) d\chi \quad (9b)$$

식(8)과 식(9)을 이용하여 해당 파괴모드에 대한 파

파괴확률을 정량적으로 산정하기 위해서는 저항함수와 하중함수에 대한 각각의 분포함수를 알아야 한다. 일반적으로는 저항함수와 하중함수가 또 다른 여러 분포함수를 갖는 확률변수들의 함수가 되기 때문에 이와 같은 분포함수를 정의하기가 불가능하다. 그러나, 단순한 경우에는 해석해가 존재할 수 있다. 저항함수 R 과 하중함수 S 가 서로 독립적이고, 각각 $N(\mu_R, \sigma_R)$ 과 $N(\mu_S, \sigma_S)$ 의 확률변수라고 가정하면, 기존에 정의된 선형의 신뢰함수는 중심극한정리(Central limit theorem)에 의하여 식(10)의 평균과 분산을 갖는 정규분포를 따르게 된다.

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \tag{10a}$$

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \tag{10b}$$

따라서, 표준정규분포로부터 해당 파괴모드에 대한 파괴확률/신뢰성은 식(11)과 같다.

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi(-\beta) \tag{11a}$$

$$R = 1 - \Phi(-\beta) \tag{11b}$$

여기서, $\beta = \mu_M/\sigma_M$ 으로 신뢰지수(reliability index)로 정의하며, 이는 파괴점으로부터 평균치가 어느 정도 떨어져 있는가를 나타내는 척도로 파괴확률과 같은 개념으로 중요하게 사용되는 변수이다(그림 2).

저항함수와 하중함수가 서로 독립적이면서 평균이 각각 μ_R 과 μ_S 로, 분산이 각각 σ_R^2 과 σ_S^2 을 갖는 대수정규분포를 따르는 확률변수라고 가정하면, 식(11)의 산정 과정과 동일하게 적용하여 식(12)의 파괴확률을 얻을 수 있다.

$$P_f = \Phi\left\{\frac{\ln\left(\frac{\mu_S}{\mu_R} \sqrt{V_R^2 + 1}\right)}{\sqrt{\ln[(V_R^2 + 1)(V_S^2 + 1)]}}\right\} \tag{12}$$

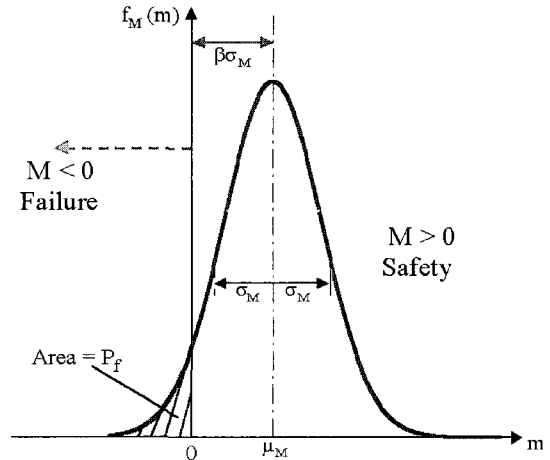


그림 2. 파괴확률과 신뢰지수의 관계

여기서, V_R 과 V_S 는 각각 저항함수와 하중함수의 변동계수이다. 따라서, 신뢰함수가 저항함수와 하중함수에 의하여 선형적으로 구성되고, 각 함수의 분포가 정규분포 또는 대수정규분포를 따른다면 파괴확률은 식(11)과 식(12)에 의하여 각 함수의 통계적 특성만을 가지고 쉽게 구할 수 있다. 일반적으로 저항함수는 구조물을 구성하는 재료의 성질, 구조물의 크기 등을 나타내는 확률변수에 의하여 정의되고, 하중함수는 파고나 바람 등과 같은 확률변수들에 의하여 구성된다. 이들 구조물의 기능수행능력에 영향을 주는 n 개의 확률변수(basic variable), $\vec{X} = X_1, X_2, \dots, X_n$ 가 존재한다면, 저항함수와 하중함수에 의하여 정의되는 신뢰함수는 식(13)과 같이 임의의 함수로 n 개의 상관성이 있는 확률변수들에 의하여 정의될 수 있다.

$$M = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \tag{13}$$

그러므로, 임의의 파괴모드에 대한 파괴확률/신뢰성은 식(14)과 같이 정의된다.

$$P_f = \int \int \dots \int_{f(\vec{X}) \leq 0} f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1, \dots, dx_n \tag{14a}$$

$$P_f = 1 - \int \dots \int_{f(\vec{X}) > 0} f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1, \dots, dx_n \quad (14b)$$

2.3.2 ADFA의 적용

식(10)과 식(11)의 개념으로 신뢰지수/파괴확률을 산정하게 되면, 동일한 문제임에도 불구하고 신뢰함수가 다르게 구성되면 그 해석 결과가 다르게 산정된다는 문제점이 발생되게 된다. 따라서 신뢰함수의 형태와 관계없이 동일한 결과(신뢰지수의 불변성)를 나타내기 위해 신뢰함수를 구성하는 각각의 확률변수를 해당 확률변수의 평균과 분산으로 정규화 한다. 만약, 신뢰함수를 구성하는 확률변수를 식(13)에서와 같이 \vec{X} 로 정의하고 서로 독립이며 정규분포를 따른다고 가정하면, 식(15)와 같이 각 확률변수의 평균과 분산을 이용하여 정규화하게 되면 $\mu_{z_i} = 0, \sigma_{z_i} = 1$ 을 만족하는 새로운 확률변수 \vec{Z} 를 정의할 수 있다.

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

따라서 식(13)의 신뢰함수도 정규화 된 확률변수로 구성된 새로운 신뢰함수가 되어야한다. 식(7)에 식(15)의 개념을 $R' = (R - \mu_R)/\sigma_R$ 과 $S' = (S - \mu_S)/\sigma_S$ 에 적용하면 그림 3에 정의된 바와 같이 다음 식(16)의 정규화된 확률변수로 구성된 신뢰함수와 같다.

$$\sigma_R R' - \sigma_S S' + (\mu_R - \mu_S) = 0 \quad (16)$$

식(16)은 정규화된 좌표계에서 신뢰지수 β 는 원점으로부터 파괴면까지 최단거리므로, 신뢰지수는 원점으로부터 가장 가까운 파괴면상의 점으로 이를 설계점(Design point)이라 한다. 따라서, 신뢰지수는 다음 식(17)과 같다.

$$\beta = \min \left[\sum_{i=1}^n Z_i^2 \right]^{1/2} \quad \vec{Z} \in \partial\omega \quad (17)$$

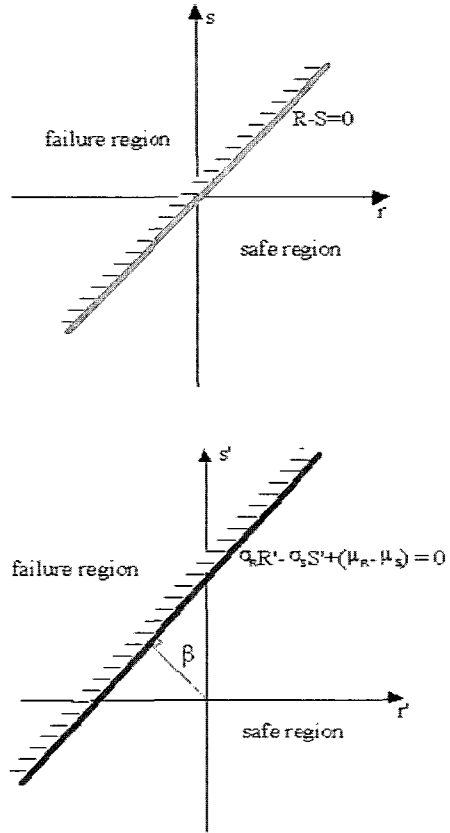


그림 3. 정규화된 좌표계에서의 신뢰지수

여기서, $\partial\omega$ 는 정규화된 신뢰함수의 파괴면을 나타낸다. 따라서, 파괴면상의 설계점을 구하게 되면 신뢰지수는 식(17)에 의하여 산정되며, 또한 파괴확률/신뢰성은 식(11a)와 식(12b)에서 산정되고, 파괴확률은 식(11)에 대입하면 산정한다.

3. 해안구조물 안정성 평가

3.1 대상구조물 개요

해안구조물 중 내습파랑을 차단하는 기능을 하는 방파제에 대한 안정성 평가를 수행하였으며, 최근 신뢰성 기법을 적용하여 설계된 화순항 동방파제 연장

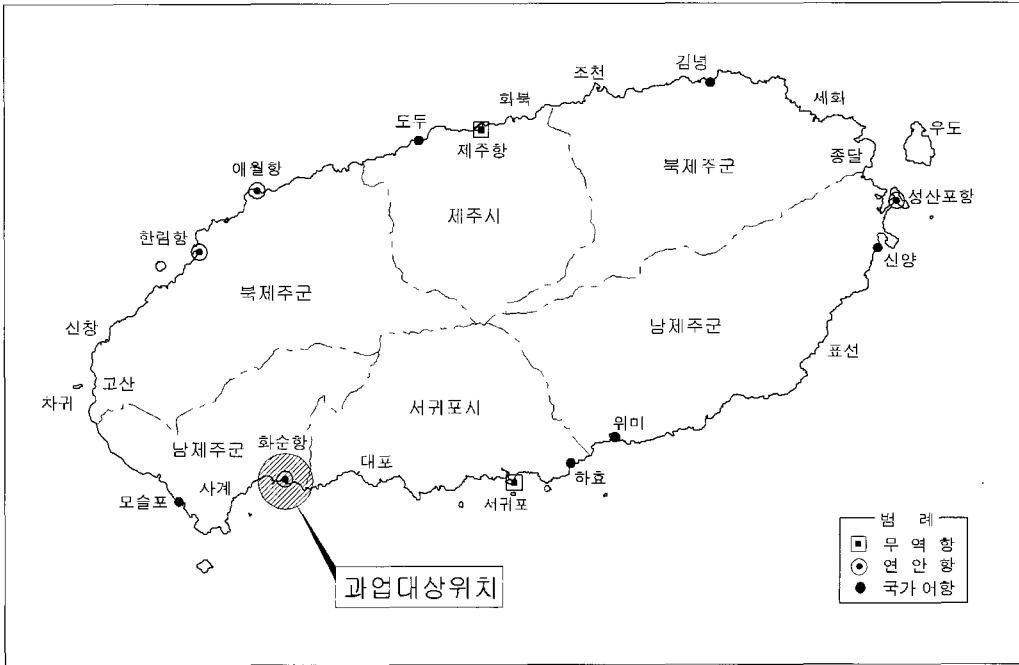


그림 4. 제주 화순항 위치도

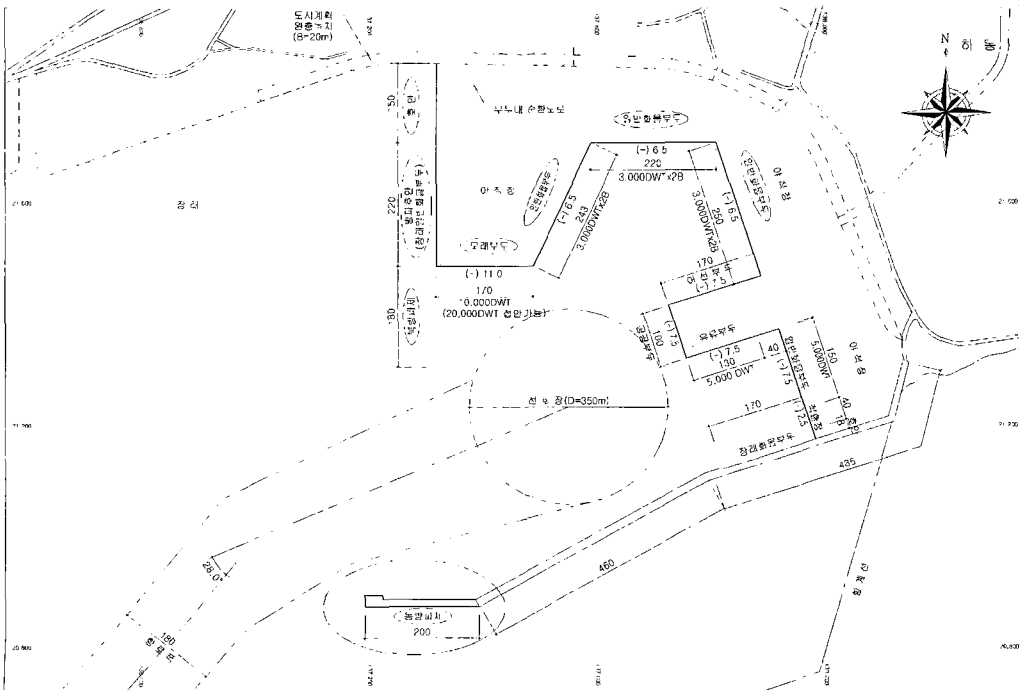


그림 5. 대상구조물(동방파제 연장부)

부를 대상구조물로 선정하였다. 제주 화순항은 제주도 남제주군 안덕면에 위치한 제주도내 4대 연안항 중 하나로써 1994년도에 신규항만으로 지정되어, 1999년 이후 본격적인 항만개발이 이루어졌다. 그러나, 화물량 조정에 따른 기본계획 일부 수정으로 화순항 2단계 사업시 항내 정온 및 안정성을 확보하기 위해 기존 동방파제를 20m 연장하였다.

3.2 설계파 산정

구조물 안정성 평가시 중요한 입력자료인 구조물 설계파의 선정은 기수행된 「화순항 2단계 방파제 축조 및 기타공사 기본·실시설계 용역」시 동방파제 연장부에 대한 재현빈도 50년 구조물 설계파는 파고 10.0m, 주기 15.0sec와 최근 우리나라 남해안에 영향을 주었던 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미를 선정하여 각각의 경우에 대한 구조물 설계파를 산정하였다.

금회 태풍 매미와 루사 내습시 구조물 설계파를

산정하기 위해 태풍에 의한 해파를 WAM모형을 사용하여 재현하였다. 격자간격은 5' 간격으로 계산하였으며, 태풍이 발생되어 우리나라에 영향을 미치는 기간동안의 이동경로를 따라 수치실험을 수행하여 천해역에서의 입사파제원을 산정하였다. 입사파 제원은 태풍 루사 내습시 8월 30일 23시에 화순항 전면해역에서 파고 9.3m, 주기 16.4sec, 태풍 매미 내습시 9월 12일 15시에 파고 8.2m, 주기 14.9sec을 나타냈다.

천해역에서의 자연현상과 유사한 파랑전파 과정을 재현하기 위해 시간의존 완경사 방정식(Time Dependent Mild Slope Equation)을 이용한 TDMSE 모형을 사용하였다. 격자간격은 수치실험의 정확성을 확보하기 위해 20m 격자로 실험을 수행하였다. 동방파제 연장부에서의 구조물 설계파는 태풍 루사 내습시 파고 9.3m, 태풍 매미 내습시 9.7m로 산정되었다. 이 결과는 기존 구조물 설계파 10.0m보다 작게 산정되었다. 이는, 화순항이 태풍 이동경로의 위험반경인 오른쪽이 아닌 왼쪽에 위치하여 그 영향이 적었

표 1. 태풍 개요

발생년도	태풍명	순간최대풍속	중심 최저기압	최대강우량	기간	피해액
2002년	루사	39.7m/s	970hPa	870.5mm	8.23~9.1	5조 4696억원
2003년	매미	60.0m/s	950hPa	450.0mm	9.6~9.14	4조 7810억원

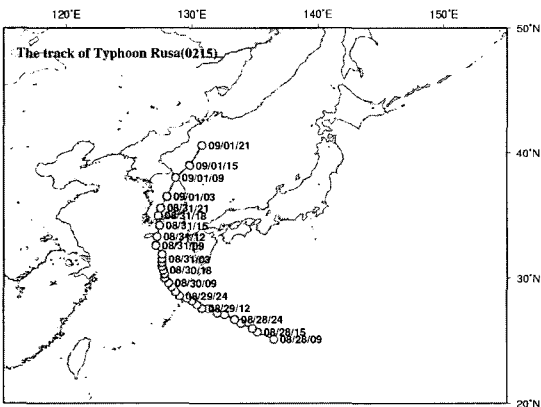


그림 6. 태풍 루사의 이동 경로

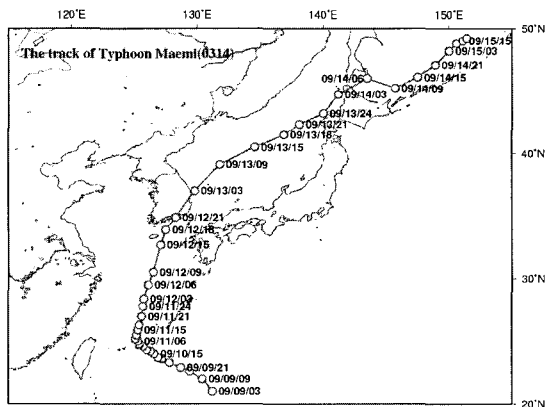


그림 7. 태풍 매미의 이동 경로

고, 태풍이 제주 남부 외해에 위치했을 시에는 파향이 S계열이었으나, 제주 인근해역을 통과할 때 파향이

N계열로 변화하여 화순항에 큰 영향을 미치지 않았다.

표 2. 구조물 설계파

제원	구분	기본·실시설계 용역(2005년)	태풍 루사 내습시	태풍 매미 내습시
	입사파 제 원	파 향	S	S55° E
파 고		10.9m	9.3m	8.2m
주 기		15.0sec	16.4sec	14.9sec
구조물 설계파	파 고	10.0m	9.3m	9.7m
	주 기	15.0sec	16.4sec	14.9sec

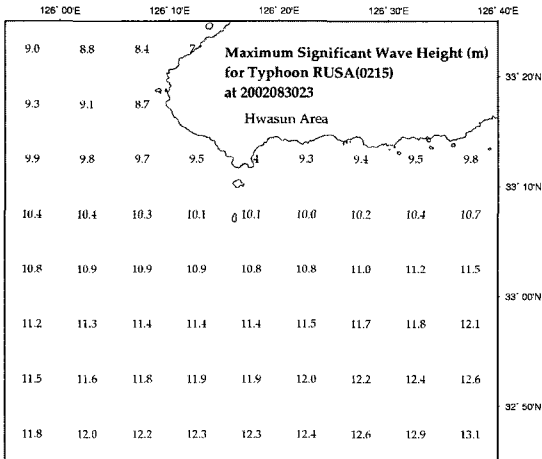


그림 8. 파고분포도(태풍 루사 내습시, 해파)

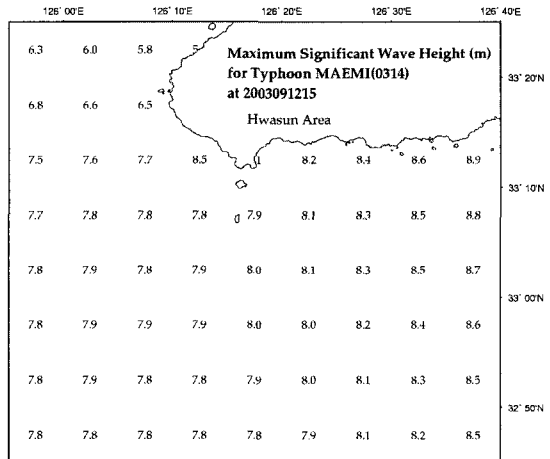


그림 9. 파고분포도(태풍 매미 내습시, 해파)

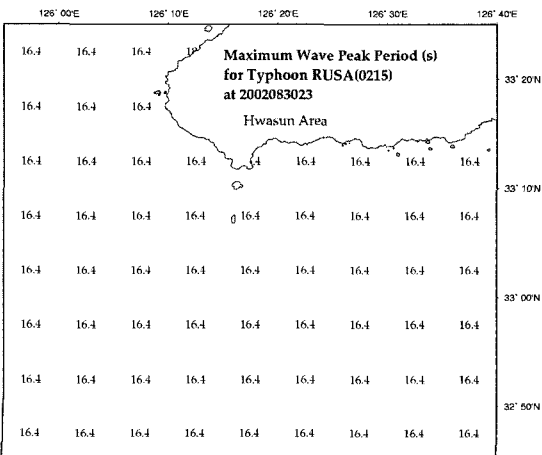


그림 10. 주기분포도(태풍 루사 내습시, 해파)

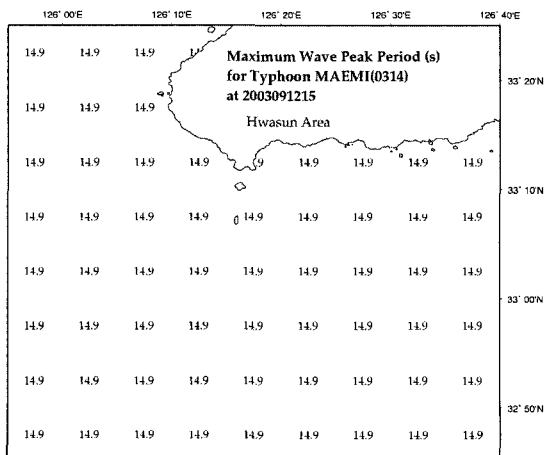


그림 11. 주기분포도(태풍 매미 내습시, 해파)

학술분야

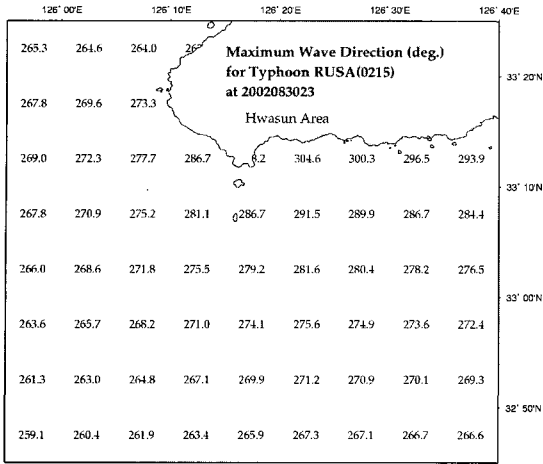


그림 12. 파향분포도(태풍 루사 내습시, 해파)

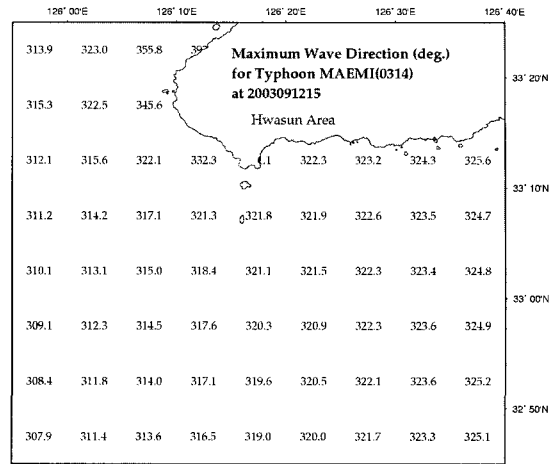


그림 13. 파향분포도(태풍 매미 내습시, 해파)

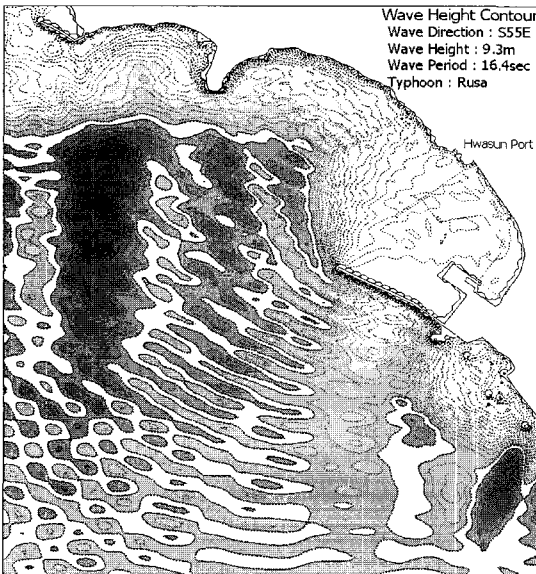


그림 14. 등파고선도(태풍 루사 내습시, 천해양역)

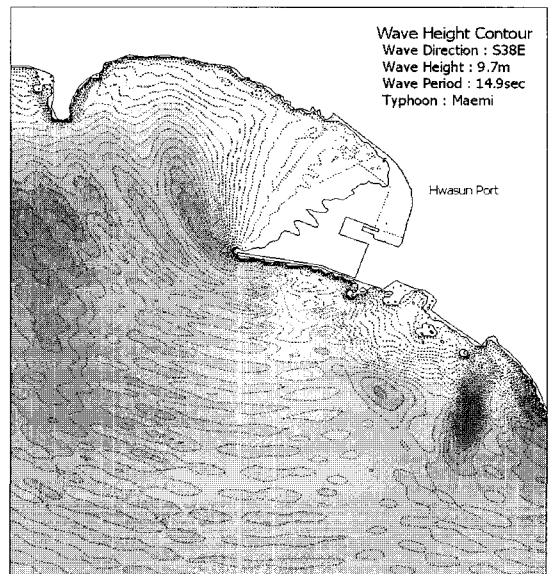


그림 15. 등파고선도(태풍 매미 내습시, 천해양역)

3.3 신뢰성 해석

그림 16은 대상구조물인 화순항 동방파제 연장부 단면으로써 외측은 100ton Sealock, 내측은 25ton T.T.P로 이루어진 경사식 단면이다.

기 수행된 『화순항 2단계 방파제 축조 및 기타공사 기본 및 실시설계』에서 방파제 피복재 결정시 신뢰성

해석을 통해 설계과 제원에 의한 소요중량 산정결과에 따라 100ton Sealock과 T.T.P 인 경우 최대 제작가능한 80ton에 대한 사용년수별 파괴확률을 산정하여 적정피복재 중량을 산정하였다.

본 연구에서는 외해측 피복재인 100톤 Sealock에 대해 각 설계과 제원별 신뢰성 검토를 수행하였다. 그림 19~21은 구조물의 내용연수별, 하중별 파괴확

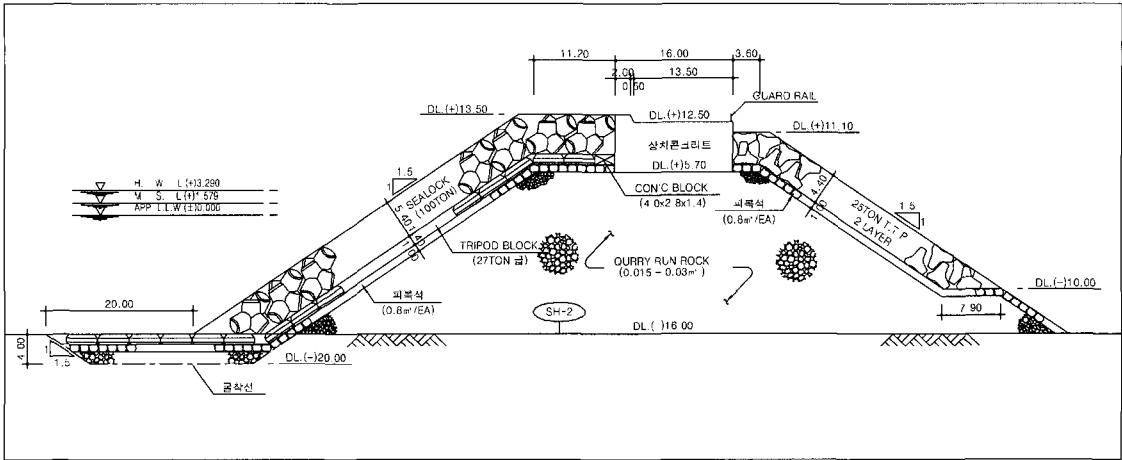


그림 16. 동방파제 연장부 단면도

표 3. 피복재 파괴확률

피복재	재현빈도 50년 파괴확률(%)		목표 파괴확률기준(PIANC)	
	No Damage	Damage	Moderate Damage	Severe Damage
Sealock 100ton	34.3	1.63	OK	OK
T.T.P 80ton	98.5	91.6	N.G	N.G

※ Moderate Damage : 50~60%, Severe Damage : 10~20%

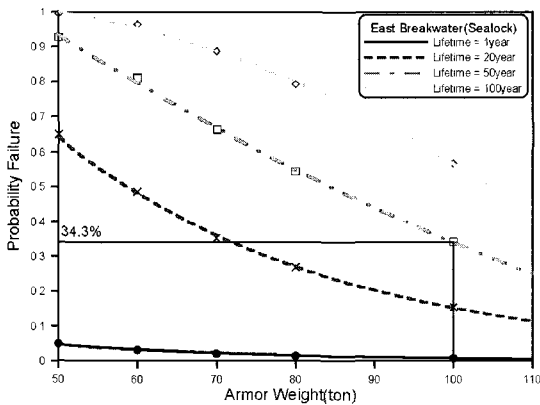


그림 17. 동방파제 피복재(Sealock)의 중량별 사용연수에 따른 파괴확률(No Damage)

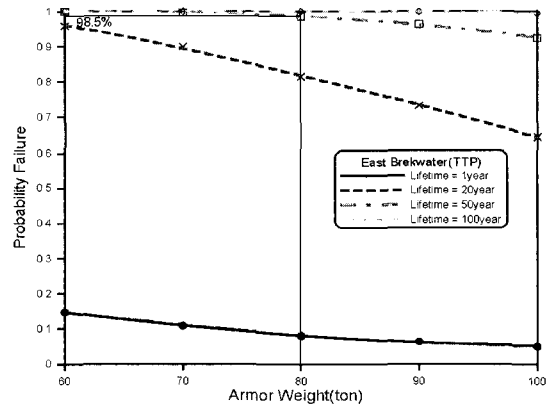


그림 18. 동방파제 피복재(T.T.P)의 중량별 사용연수에 따른 파괴확률(No Damage)

물을 나타내고 있다. 이 결과에서 구조물의 파괴확률은 제체의 하중이 클수록 낮은 파괴확률을 나타내며, 이는 구조물이 수리학적으로 안정함을 의미한다. 또한, 재현기간 1년~100년까지의 파괴확률을 비교하였으며, 구조물의 내용연수가 클수록 파괴확률이 크게

산정됨을 알 수 있다. 그리고, 이번 연구에서 적용한 태풍 매미와 루사의 구조물 설계파가 더 작게 산정되어 전반적으로 태풍 매미와 루사에 의한 구조물의 파괴확률이 작게 산정되었으며 구조물의 안정성에는 문제가 되는 않음을 알 수 있다.

표 4. 신뢰성 검토 결과

구분	기존결과	태풍 매미 내습시	태풍 루사 내습시
설계파	10.0m	9.70m	9.30m
파괴확률 (재현빈도 50년)	1.63%	1.23%	0.84%

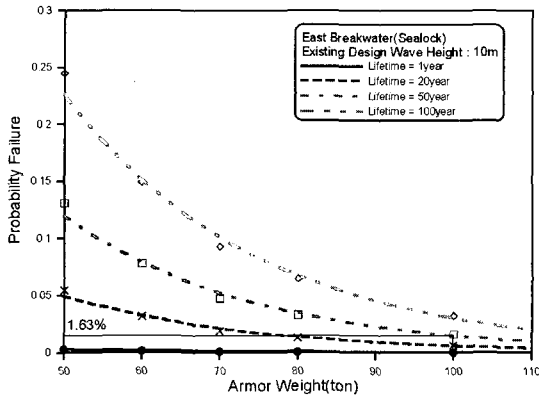


그림 19. 파괴확률(기존 설계파)

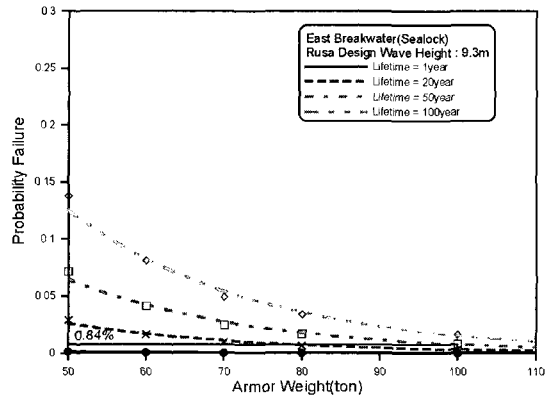


그림 20. 파괴확률(태풍 루사 내습시)

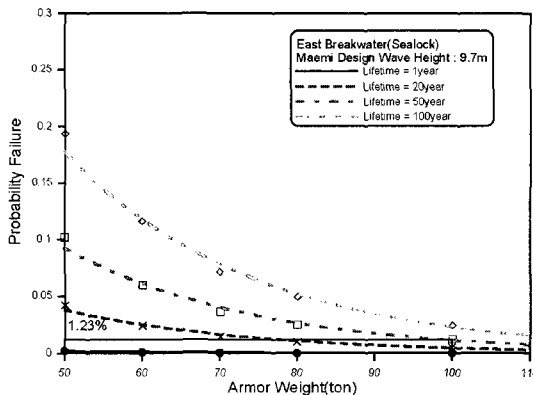


그림 21. 파괴확률(태풍 매미 내습기존 설계파)

4. 결론

태풍 루사와 매미 내습시 대상 구조물인 화순항 동방파제 설계파가 기존의 50년 빈도 설계파보다 작게 산정되었다. 이는 화순항의 위치가 태풍의 위험반경을 벗어난 왼쪽에 위치하였고, 제주 인근해역이 태풍의 세력권에 들었을 때에는 파향이 N계열로 변하여 그 영향이 감소함에 기인한다고 판단된다. 따라서,

신뢰성 해석을 수행한 결과 구조물의 내용연수 50년의 파괴확률이 태풍 매미와 루사의 경우 각각 1.23%와 0.84%로 산정되어 기존결과 1.63%보다 더욱 안정한 결과로 나타났으나, 기존의 결정론적 기법의 설계방법으로는 이벤트성 초대형 태풍 내습시에 대한 안정성 확보 여부가 불명확하므로 확률론적 접근에 의한 신뢰성 기법을 통해 피복재 규모 검토는 물론 사용연수, 파괴확률 등을 산정하여 경제적이고 방재

공학적으로 안정한 구조물이 될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- 김승우, 서경덕, 오영민 (2005) 동해항 방파제를 대상으로 한 신뢰성 설계법의 비교 연구. 1. 피복 블록의 안정성. 한국해안·해양공학회지, 제17권, 제3호. pp. 188~201.
- 이철웅 (1999) 경사제 피복재의 안정성에 대한 신뢰성 해석. 한국해안해양공학회지, 제11권, 제3호, pp. 165~172.
- 제주지방해양수산청 (2005) 화순항 2단계 방파제 축조 및 기타공사 기본·실시설계, 용역 보고서.
- Akira Watanabe, Kohki Maruyama (1986) Numerical Modeling of Nearshore Wave Field under Combined Refraction, Diffraction and Breaking. Coastal Engineering in Japan, Vol. 29, pp. 19~39.
- Berkhoff, J.C.W (1972) Computation of Combined Refraction-Diffraction. Proc. 13th Coastal Engineering conf., ASCE, pp.471-490.
- Burcharth, H.F and Sorenson, J.D. (2000) The PIANC Safety Factor System for Breakwaters. Proc. Coastal Structures '99, Spain, pp. 1125~1144.
- Gelci, R., Cazale, H., Vassal, J. (1957) Prevision de la houle. La methode des densites spectroangulaires. Bull. Inform. Comite Central Oceanogr. Etude Cotes, Vol. 9, 416p.
- Gunther, H., Hasselmann, S. and Janssen, P. A. E. M. (1992) The WAM Model Cycle 4. Report No. 4, Hamburg.
- Lee, C.H., Suh, K.D..(1998) Internal Generation of Waves for Time Dependent Mild Slope Equations. Coastal Engineering, Vol. 34, pp. 35~57.
- Nishimura, H., K. Maruyama, H. Hiraguchi (1983) Wave Analysis by Direct Numerical Integration. Proc. 30th Japanese Conf. on Coastal Eng., pp. 123~127.
- Sverdrup, H. U. and W. H. Munk (1947) Wind, Sea and Swell: Theory of relations for forecasting. Publication 601, Hydrographic Office, U.S. Navy, 50p.
- van der Meer, J.W. (1987) Stability of Breakwater Armor Layers Design Formular. Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219~239.
- van der Meer, J.W.(1988). Deterministic and Probabilistic Design of Breakwater Armor Layer. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp. 66-80.
- WAMDI group : S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing (1988) The WAM model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. J. Phys. Oceanography, Vol. 18, pp. 1775~1810.