

## 장기 파랑측정자료를 이용한 평상파 산정 방법론 A Methodology of Estimating Design Waves for the Operable Harbor Condition Using Long-term Wave Data

안경모\* · 천제호\*\*

Kyungmo Ahn\* and Je Ho Chun\*\*

**요 지** : 본 논문에서는 장기간 측정된 파랑자료를 이용하여 신뢰성 있는 항만설계를 하기 위한 평상파 산정에 대한 방법론을 제시하였다. 제안된 방법론을 부산항 내 해경부두 설계에 적용하여, 부산항 입구 조도 전면해상에서 장기간 측정된 파랑자료를 이용하여 97.5% 평상파를 산정하였다. 1993년 2월부터 2002년 12월까지 측정된 파랑자료를 파향별로 유의파고와 유의파주기의 결합분포를 구한 후, 포물선형 완경사 방정식 파랑모델을 이용하여 해경부두에서의 평상파 조건을 산정하였다. 해경부두 위치에서의 항만설계를 위한 97.5% 평상파의 파고는 1.06 m 이며, 이는 부산항 항외에서 입사되는 파향 E, 유의파고 1.75 m, 유의파주기 7 sec에 의해 생성되는 것으로 분석되었다. 부산항 내 풍파에 의한 평상파에의 영향을 검토하였으나, 항내 풍파는 평상파 산정에 영향이 없으며 항외에서 항내로 진입하는 너울성 파고의 영향이 지배적임이 밝혀졌다. 따라서 항내의 풍파의 영향만을 고려하여 평상파를 추정하였을 경우 심각한 오류가 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 설계파, 평상파, 유의파고, 유의파주기, 결합확률분포

**Abstract** : For designing a reliable harbor, a methodology for estimating design waves of 97.5% operable harbor condition is suggested using long-term wave data. For a practical application of the methodology, a marine police harbor was selected as a site. Wave data used were collected from February 1993 to December 2003 at Jodo wave gage station in front of Pusan harbor. Joint distributions of significant wave height and significant wave period for specified wave directions were obtained and used to feed as input waves for parabolic mild-slope wave model. Results showed that input waves with significant wave height of 1.75 m, significant wave period of 7 sec and wave direction E yield design waves height of 1.06 m at the site of interests, which is a 97.5% operable harbor condition. Wind waves generated inside harbor showed to be no effect on the design wave condition. Swells propagated from deep water into harbor are shown to be dominant effects on the design waves of operable harbor condition.

**Keywords** : design waves, operable harbor condition, significant wave height, significant wave period, joint distribution

### 1. 서 론

성공적인 항만설계를 위한 중요한 요소 중의 하나는 신뢰성 있는 설계파의 추정에 있다. 설계파 추정은 이상파와 평상파의 추정으로 나뉘어 진다. 이상파는 재현주기 동안에 출현할 수 있는 극치파랑을 의미하며, 평상파는 항만가동률을 확보하기 위한 파랑조건을 의미한다. 항만 및

어항 설계 기준(해양수산부, 2000)에 의하면 평상파는 '대상부두(berth)에서 하역한계를 넘는 항내 파고의 출현율을 100%에서 제외한 값이다'라고 정의되어 있다. 현재는 항만설계를 위해 97.5%의 항만가동률을 확보할 수 있는 97.5% 평상파 조건을 만족하는 항만을 설계하도록 요구하고 있다.

항만 및 해안 구조물이 태풍이나 폭풍 시에 발생할 수

\*한동대학교 공간시스템공학부(Corresponding author, School of Spatial Environment System Engineering, Handong Global University, 3 Namsong-ri, Hunghae, Pohang City, 791-708, Korea. kmahn@handong.edu)

\*\*한동대학교 건설환경연구소 (Institute of Construction & Environmental Research, Handong Global University)

있는 이상파랑에 견딜 수 있으며 또한 연중 항만 가동률을 충분히 확보할 수 있도록 설계하기 위해서 신뢰성 있는 설계파의 추정이 중요함은 새삼 강조할 필요가 없을 것이다. 설계파를 산정하기 위해서는 10년 이상의 파랑 측정자료가 바람직하나 실측자료가 없는 경우에는 30년 이상의 기상자료를 이용하여 파랑을 추산하여 설계파를 구하고 이를 실측치와 보정하여 사용하도록 권고하고 있다. (항만 및 어항 설계기준 67쪽).

현재 우리나라에서 항만 및 해안구조물의 설계를 위한 심해 설계파 제원은 기상자료를 이용한 풍파 추정모델의 결과에 의존하고 있다. (1988, 해운항만청, 1988, 수산청) 설계파 추정에 사용되는 풍파 스펙트럼 모델은 과거 40년 동안 꾸준히 발전되어 왔다. 파랑성분 간의 비선형 상호작용 항을 취급하는 방법의 차이에 의해 DP(decoupled propagation) 모델, CH(coupled hybrid) 모델, 그리고 CD(coupled discrete) 모델로 분류되는 풍파 스펙트럼 모델은 컴퓨터 연산속도의 팽목할 만한 증가와 더불어 개선되어 왔다. 그러나 풍파의 추정은 폐쇄해역이 아닌 개방된 해역에서 태풍과 같이 풍향이 수시로 변화는 경우 과거에 생성된 너울(swell)의 영향을 고려하여 정확히 수치모의 하는 기법상의 어려움을 극복하지 못하고 있다. 현재 우리나라에서 설계파 추정에 사용되는 풍파수치모의는 첫째, 설계파 추정에 가장 중요한 태풍의 영향을 적절히 고려하지 못하고 있으며 둘째, 풍파수치모델과 조석모델에 의한 조위변화를 실시간 연동하여 수치모의 하지 않음으로 인해 조차가 큰 남해안과 서해안에서의 설계파 추정의 신뢰성이 떨어진다. 또한 파랑모델의 입력조건이 되는 기상도에 의한 바람장의 추산 등의 정확도에도 많은 문제점이 내재해 있다.

정확도에 있어 많은 문제점이 있음에도 불구하고 풍파 스펙트럼 모델의 결과를 이용하여 설계파를 추정해 온 이유는 신뢰성 있는 설계파를 추정하기 위한 다른 대안이 없었기 때문이다. 현재로서 신뢰성 있는 설계파 추정을 위한 대안은 인근 해역에 장기 파랑측정 자료가 있는 경우 실측 파랑자료를 이용하여 설계파 추정의 신뢰성을 보완하는 것이다.

1986년부터 당시 해운항만청에 의해 파랑관측업무의 개선방안이 수립되어 점차적으로 우리나라 연안에서의 파랑 관측망을 개선 발전시켜왔다. 현재까지 해양수산부에서 지속적으로 우리나라 연안해역의 대표지점에서 부이형 파고계 및 수압식 파고계를 설치하여 파랑을 관측해온 자료들이 누적되어 있다. 해역에 따라 측정기간의 차이가 있

지만 약 10년간의 파랑측정자료가 누적됨으로 인해 이제는 파랑측정자료를 이용하여 보다 신뢰성 있는 설계파를 산정할 수 있으리라 생각된다.

본 논문에서는 그 동안 장기간 동안 측정된 파랑자료를 이용하여 항만설계를 위한 평상파를 산정하는 방법을 제시하였다. 부산항 내의 해경부두 설계를 위한 평상파 산정을 위해 조도 방파제 전면 해상에서 1993년 2월 5일부터 2002년 12월 31까지 해양수산부 주관 하에 부이형 파고계에 의해 측정된 파랑자료를 이용하였다.

해경부두는 부산항 내에 위치하고 있으나 조도와 오류도 방파제 사이의 개구부에 대해 열려 있음으로 인해 항내 풍파의 영향만을 고려하여 평상파를 산정하였을 경우 심각한 오류가 발생할 수 있다. 해경부두 위치에서는 외해에서 항 내로 전파되어 들어오는 파랑을 반드시 고려해야 한다.

부산항 내 해경부두 설치위치에서의 평상파를 산정하기 위해 조도방파제 전면해상에서 측정된 파랑을 파향별로 분석하여 유의파고와 유의파 주기의 결합분포를 구하였다. 항 외에서 파향별로 전파되어 항 내로 진입하는 파랑의 파고와 주기의 결합을 항내 입사파 조건으로 하여 환경사 불규칙 파랑 수치모의를 통해 해경부두 설치위치에서 97.5% 평상파를 산정하였다.

본 연구에서 추정된 97.5% 평상파의 신뢰도는 상당히 높다고 판단된다. 부산항 내의 풍파만을 고려하여 추정된 평상파 조건과 비교함으로써 항 외에서 항 내로 진입되는 너울성 파랑의 영향을 고려하지 않았을 경우 심각한 오류가 발생함을 알 수 있었다.

## 2. 평상파 추정을 위한 파랑측정 자료의 분석

### 2.1 평상파 추정 해역 및 파랑측정 위치

Fig. 1은 부산항 내 해경부두 설치위치를 나타내며 사업대상구역으로 표시되어 있다. Fig. 2는 본 평상파 산정을 위해 해양수산부에서 장기적으로 파랑을 측정하고 있는 조도 파랑측정 위치를 나타낸다. 본 연구를 위해 사용된 파랑은 1993년부터 2002년까지 매 3시간 간격으로 부이형 파고계에 의해 측정된 파랑으로서 총 22,628개의 유의파고와 유의파 주기이다. Fig. 3는 유의파고와 유의파 주기의 시계열 자료이다. 이 기간 중에 측정된 최대 유의파고는 2000년 9월 16일 오전 7시에 측정된 유의파고 8.9 m로서 태풍 SAOMAI가 남해안을 통과하면서 생성된

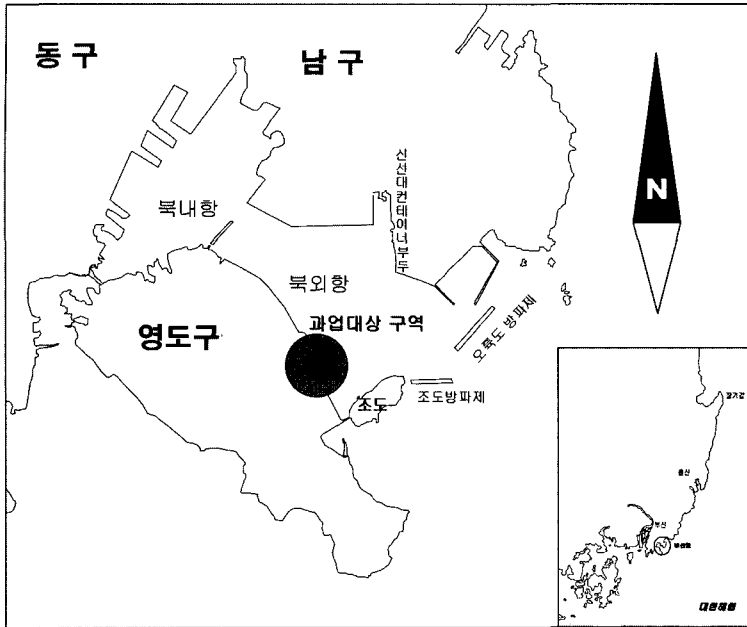


Fig. 1. Location of the site for the estimation of operable harbor condition.

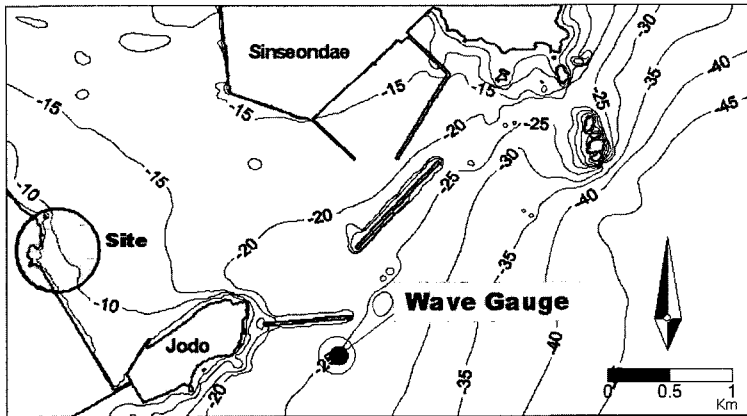


Fig. 2. Location of wave gage deployed near Jodo breakwater.

파고이다. 이 당시의 침두주기는 14초, 유의파주기 11.86 초이고 파향은 129.4°이다.

부산항 인근 해역에서 항만설계에 사용되는 50년 빈도 심해 설계파 제원이 파향 SE인 경우 유의파고 5.6 m 이고 유의파주기 10 sec(부산지방해양수산청, 2002)이다. 이는 조도 파랑측정 자료의 최대 파고 8.9 m와 유의파주기 11.9 sec와 비교할 때 반사파의 영향을 고려하더라도 파 소평가되어 있는 것을 알 수 있다.

측정된 파랑의 파향별 출현율은 Table 1에 표시하였다. 표에서 볼 수 있듯이 44.6%의 파랑이 E 파향이며, ENE

파향의 출현율은 18.4%, ESE 파향의 출현율은 8.7%이다. ENE, E, ESE 파향의 파랑 출현율의 합계는 71.7%이다. 이는 부산항 전면 해역의 수심 변화에 의한 것으로 심해의 파랑이 굴절에 의해 부산항 입구에 ENE, E, ESE 파향으로 파랑이 집중됨을 알 수 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 조도 전면 해상에서 측정된 파랑 중에 조도와 오륙도 방파제 사이의 개해부를 직접 통과할 수 있는 파랑의 파향은 ENE, E, ESE 방향임을 알 수 있다. 이 이외의 파향은 조도 방파제와 오륙도 방파제에 의해 차단이 되어 회절파에 의한 영향을 제외하고는 거의 항 내로 진입되

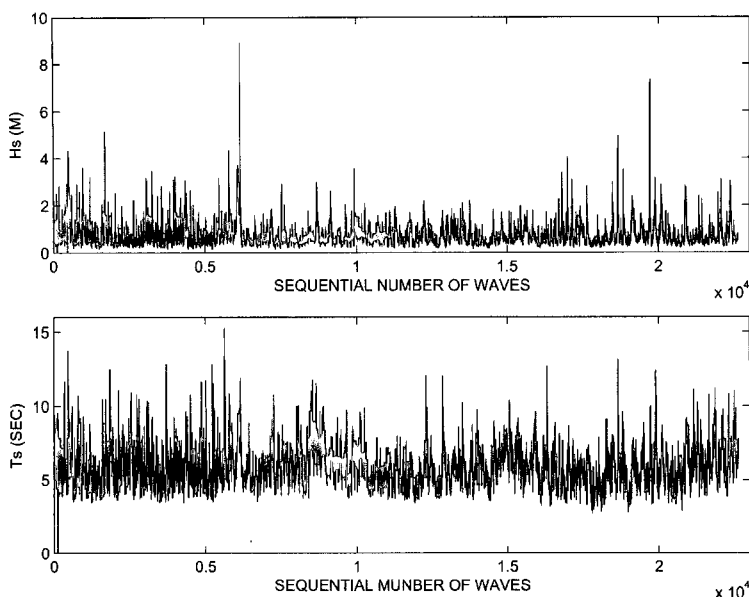


Fig. 3. Time series of significant wave height and significant wave period measured at Jodo wave gage station from February 1993 to December 2002.

Table 1. Distribution of wave direction measured at Jodo wave gage station

파향	파향각	출현율(%)	파향	파향각	출현율(%)
N	348.75<θ, θ≤11.25	1.3	S	168.75<θ≤191.25	9.6
NNE	11.25<θ≤33.75	1.8	SSW	191.25<θ≤213.75	0
NE	33.75<θ≤56.25	3.8	SW	213.75<θ≤236.25	0
ENE	56.25<θ≤78.75	18.4	WSW	236.25<θ≤258.75	1.1
E	78.75<θ≤101.25	44.6	W	258.75<θ≤281.25	0.6
ESE	101.25<θ≤123.75	8.7	WNW	281.25<θ≤303.75	0.4
SE	123.75<θ≤146.25	4.1	NW	303.75<θ≤326.25	0.5
SSE	146.25<θ≤168.75	4.5	NNW	326.25<θ≤348.75	0.6

지 못하며 본 평상파 산정에 영향을 미치지 못함을 파랑 수치모의를 통해 알 수 있었다.

### 2.2 유의파고와 유의파 주기의 분포함수

Fig. 4는 측정된 유의파고로부터 구한 매개 변수를 이용하여 확률밀도함수를 구하고 막대그래프와 함께 표시하였다. 사용된 확률밀도함수는 Generalized Gamma 확률밀도함수(Ochi, 1998)이며, 유의파고  $H_s$ 를 나타내는 Generalized Gamma 확률밀도함수  $f(H_s)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$f(H_s) = \frac{c}{\Gamma(m)} \lambda^{cm} H_s^{cm-1} \exp\{-\lambda(H_s)^c\}, \quad 0 < H_s < \infty$$

여기서  $\Gamma(m)$ 는 Gamma 함수이고 매개변수  $m, c$ 는 아래 두 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{\{\Gamma(m)\}^{1/2} \Gamma(m+3/c)}{\{\Gamma(m+2/c)\}^{3/2}} = \frac{E[H_s^3]}{\{E[H_s^2]\}^{3/2}}$$

$$\frac{\Gamma(m)\Gamma(m+4/c)}{\{\Gamma(m+2/c)\}^2} = \frac{E[H_s^4]}{\{E[H_s^2]\}^2}$$

그리고  $\lambda$ 는  $E[x^2] = \frac{1}{\lambda^2} \frac{\Gamma(m+2/c)}{\Gamma(m)}$ 로부터 구할 수 있다.  $E[\cdot]$  평균을 나타낸다.

Ahn et al.(2000)는 경북 포항시 영일만 입구 장기에서 9년간 부이형 파고계에 의해 장기간 측정된 파랑의 유의파고를 Generalized Gamma 확률 분포함수와 비교하여 잘 일치함을 보였다. 그러나 Fig. 4에서 Generalized Gamma 확률밀도 함수가 유의파고가 작은 부분에서 막대그래프와 잘 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 조도 파랑 측정위

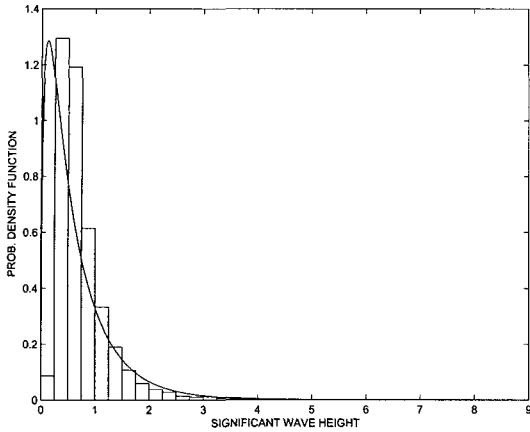


Fig. 4. Comparison between the generalized Gamma distribution and the histogram of significant wave data measured at Jodo wave gage.

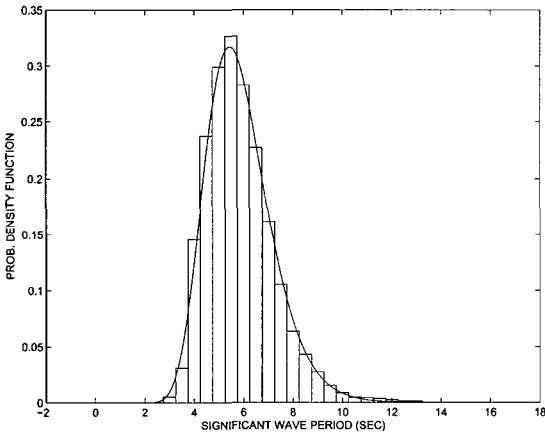


Fig. 5. Comparison between the log-normal distribution and the histogram of significant wave period measured at Jodo wave gage.

치가 조도 방파제와 약 500 m 이내의 거리이고 조도와는 약 1 km 이내의 거리이기 때문에 반사파에 의해 유의파고의 분포가 영향을 받았을 가능성이 있어 보인다. 조도 파랑 측정위치가 반사파의 영향을 받는지의 여부는 좀 더 연구가 필요하며, 만약 반사파의 영향을 심하게 받는다면 현재의 측정위치를 변경해야 할 필요가 있다고 판단된다. 현재로서 본 연구를 위해선 일단 반사파의 영향이 미미하다고 가정하고 해경부두에서의 정상파를 추정하였다.

Fig. 5는 유의파 주기의 막대그래프와 Log-Normal 확률밀도함수를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 장기간 실측된 유의파 주기는 Log-Normal 확률밀도함수와 잘 일치함을 알 수 있다. 유의파 주기  $T_s$ 의 Log-Normal 확률밀도함수  $f(T_s)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$f(T_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma T_s} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln T_s - \mu}{\sigma}\right)^2\right\}, 0 \leq T_s < \infty$$

여기서 매개변수  $\mu$ 와  $\sigma$ 는 유의파 주기  $T_s$ 의 Log를 취한 값의 평균과 표준편차를 나타낸다.

부산항 내 해경부두 위치에서의 정상파를 추정하기 위해 해선 항 입구에서 측정된 파랑을 파향별로 나누어 유의파고와 유의파 주기의 결합확률을 구한 후, 파향별로 파고와 주기의 결합에 의해 해경부두 위치에서의 파고 분포를 추정해야 한다.

Table 2, Table 3, Table 4는 각각 ESE, E, ENE 파향별 유의파고와 유의파주기의 결합분포를 나타낸다.

### 2.3 파랑수치모의에 의한 항내 정상파 산정

부산항 내 해경부두 설치 위치가 조도 방파제와 오락도 방파제 사이의 개구부를 통해 침입해 들어오는 외해의 파랑에 노출되어 있기 때문에 해경부두 위치에서의 파랑조건을 알기 위해선 부산항 입구에서의 파랑조건을 입사파 조건으로 파랑 수치모의를 해야 한다. 파랑 수치모의를 위해 광각 포물선형 환경사 방정식 파랑모델인 MIKE21-PMS를 사용하였다. 본 논문에서 해경부두 위치에서의 설계를 위한 정상파 조건이라 함은 해경부두 방파제 설치위치에 상위 97.5%의 파고를 발생시키는 외해에서의 파랑 조건을 구하는 것이므로, 해경부두가 접한 육지에서의 파랑의 반사를 고려하지 않았다.

광각 포물선형 환경사 파랑모델의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left( C C_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\sigma_2}{\omega C_g} \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \left( C C_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \left[ i(k_0 - \beta_1 k) + \frac{1}{2C_g} \frac{\partial C_g}{\partial x} + \frac{W}{2C_g} \right] A = 0$$

여기서  $A(x, y)$ 는 평면좌표  $x, y$ 에 따른 진폭함수,  $C$ 는 파랑전파속도,  $C_g$ 는 군속도,  $k$ 는 파수,  $k_0$ 는  $y$ 방향으로의 평균 파수,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 는 포물선형 근사 계수,  $\omega$ 는 각주 파수,  $W$ 는 바닥마찰 및 쇄파현상에 의한 에너지 감쇠 계수이다.

Fig. 6은 파랑수치모의를 위한 세부해역의 수심 음영도이다. Fig. 7와 Fig. 8은 해경부두 위치에서의 정상파를 산정하기 위해 사용한 포물선형 환경사방정식 파랑 모델에 의한 수치모의 결과 중 하나로서 입사파고 4 m, 주기 9 sec, 이고 파향 ESE인 경우의 파랑의 등파고도와 파수

**Table 2.** Joint distribution of significant wave height, Hs, and significant wave period, Ts, with wave direction ESE at Jodo wave gage station (C.S: Cumulative Sum, C.P: Cumulative percentage/100)

Hs \ Ts	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	Sum	C.S	C.P	
0.25	0	0	0	0	1	6	16	13	7	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	1974	1.000
0.50	0	0	0	0	2	13	87	200	194	154	109	59	28	9	10	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	868	1924	0.975
0.75	0	0	0	0	0	23	82	123	89	75	55	18	17	9	4	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	500	1056	0.535	
1.00	0	0	0	0	0	7	23	35	52	49	19	17	7	2	1	0	0	2	0	0	1	2	1	0	0	0	0	1	1	220	556	0.282	
1.25	0	0	0	0	0	0	4	18	21	36	21	13	7	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	126	336	0.170	
1.50	0	0	0	0	0	0	0	5	15	21	19	8	2	1	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	76	210	0.106	
1.75	0	0	0	0	0	0	1	0	5	4	7	6	4	4	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	134	0.068	
2.00	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	9	5	4	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	100	0.051	
2.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	1	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	73	0.037	
2.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	2	0	1	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	13	60	0.030	
2.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	8	47	0.024	
3.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	39	0.020	
3.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	0	1	4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	14	31	0.016	
3.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	17	0.009	
3.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	12	0.006		
4.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0.006		
4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	11	0.006	
4.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	0.005	
4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0.005		
5.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	0.005		
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	0.004		
5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.004		
5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.004		
6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.004		
6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	0.004		
6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.003		
6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.003		
7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0.002		
7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0.001		
Sum	0	0	0	2	14	123	326	388	344	305	195	108	60	41	16	8	9	16	3	2	3	2	3	2	1	0	1	1	1	1974			

벡터도를 각각 나타낸다. 부산항 내의 대상해역에서의 97.5% 평상파를 산정하기 위해서는 부산항 외해에서 측정된 파랑자료를 입사파로 하는 파랑수치모의를 통해 대상 해역에서의 파랑조건을 추정해야 한다.

Table 5 부터 Table 7까지는 포물선형 완경사 방정식 파랑모델에 의해 수치모의된 결과로서 해경부두 위치에서의 파고를 나타낸다. Table 5는 항외에서 E계열 파랑이 조도와 오륙도 방파제 사이를 통과해서 항 내로 진입했을 때 해경부두 위치에서의 추정된 파고를 나타낸다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 조도와 오륙도 방파제가 파향 E계열 파랑에 대해 열려 있어서 평상파 추정에 가장 큰 영향을 끼치는 파랑이 E계열 파랑임을 예측할 수 있다. 예를 들면 입사파의 파고가 1.75 m이고 주기가 7 sec 일 때 해경부두 위치에서의 파고는 1.06 m 임을 Table 5에서 알 수 있다. 조도 방파제에서 측정된 총 유의파고의 개수가 22628개 이므로 97.5% 평상파를 추정하기 위해선 상위

번제의 파랑에 대해 고려하면 97.5% 평상파 조건을 알 수 있다. Table 3에 의하면 유의파고가 2 m 이상인 파랑의 개수가 500개 임을 알 수 있다. 따라서 평상파 조건은 입사파의 유의파고가 1.75 m임을 알 수 있다. 입사파의 유의파고가 1.75 m일 때 주기가 작아질수록 대상 해역에서의 파고가 커지는 것을 알 수 있으며, 입사파의 유의파고가 1.75 m이고 주기가 7 sec의 경우, 유의파고가 2 m 이고 주기가 12 sec인 경우보다 대상해역에서의 파고가 더 큰 것을 알 수 있다. 이로부터 상위 566번째 입사파랑 조건은 유의파고 1.75 m와 주기 7 sec일 때 해경부두 위치에서의 97.5% 평상파 조건이 됨을 알 수 있다. 여기서 입사파랑의 유의파고 1.75 m는 Fig. 7의 상세역 파랑수치모의 영역에서의 입사파 조건이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 조도 파랑관측 위치의 수심이 25 m이고 입사파의 내부조파선 위치의 수심은 약 50 m 정도이다. 유의파고 1.75 m와 주기 7초의 입사파가 상세역 입사파 내부조파

**Table 3.** Joint distribution of significant wave height, Hs, and significant wave period, Hs, with wave direction E at Jodo wave gage station (C.S: Cumulative Sum, C.P: Cumulative percentage/100)

Hs	Ts																				Sum	C.S	C.P											
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0				10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5		
0.25	0	0	0	0	0	1	5	17	35	39	16	18	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	10080	1.000
0.50	0	0	0	0	0	2	25	129	380	556	562	451	374	241	136	63	26	13	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2966	9942	0.986
0.75	0	0	0	0	0	6	47	203	429	524	492	344	332	260	170	119	69	25	18	4	3	3	2	0	0	1	0	0	0	0	0	3051	6976	0.692
1.00	0	0	0	0	0	1	7	49	147	264	318	260	153	117	80	75	77	44	14	7	11	8	2	0	0	0	0	0	0	0	1634	3925	0.389	
1.25	0	0	0	0	0	0	0	4	42	141	192	200	124	65	34	26	26	20	9	10	4	4	4	0	1	0	0	1	907	2291	0.227			
1.50	0	0	0	0	0	0	0	0	5	45	102	137	111	83	34	17	7	6	8	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	562	1384	0.137		
1.75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	38	83	74	55	34	14	4	2	2	1	1	0	3	1	1	0	0	0	0	322	822	0.082		
2.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	34	38	43	29	8	5	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	170	500	0.050			
2.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	21	33	18	18	7	2	1	0	1	2	1	0	0	0	0	0	111	330	0.033			
2.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	18	23	17	13	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	85	219	0.022			
2.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	8	15	4	8	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	47	134	0.013			
3.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2	4	3	8	2	2	0	0	1	1	0	0	0	0	27	87	0.009			
3.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	6	5	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0.006			
3.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	12	40	0.004				
3.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	15	28	0.003				
4.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	13	0.001				
4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0.001				
4.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	10	0.001				
4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0.001				
5.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	0.001				
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	0.001				
5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.000				
5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.000				
6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.000				
6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0.000				
6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.000					
6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.000					
7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.000					
7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0.000				
7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.000				
7.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.000				
Sum	0	0	0	0	0	3	37	200	671	1219	1565	1619	144	1111	824	507	337	254	123	72	31	24	19	14	2	2	1	0	1	1008	0	0.000		

위치에서 파랑측정위치 지점까지 전파될 때 유의파고의 변화가 거의 없기 때문에 파랑측정위치에서의 파랑조건을 입사파 조건으로 사용해도 97.5% 평상파 산정에 미치는 영향은 미미하다.

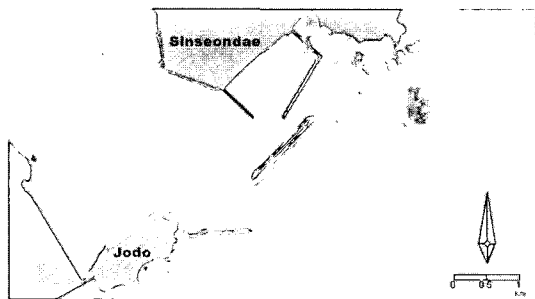
입사파향 ESE와 ENE인 경우를 검토해 보면 다음과 같다. Table 6에서 볼 수 있듯이 조도와 오륙도 방파제 사이의 개구부를 통과하는 ESE 계열 파향의 입사파 파고 4.0 m와 주기 10 sec 일 때 평상파 추정해역에서의 파고가 0.77 m로서 가장 큰 것을 알 수 있다. 이는 E계열 파랑에 의한 평상파 조건인 1.06 m보다 상당히 작다. 입사파의 파고가 4 m 일 때 주기가 10 sec보다 커지거나 작아지더라도 해경부두 위치에서의 파고는 주기 10 sec 일 때 보다 작아 지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 조도와 오륙도 방파제 사이를 통과해서 항 내로 입사할 때 방파제에 의해 회절되고 수심에 의해 굴절되는 파랑이 주기에

따라 다르기 때문이며, 이와 같은 이유로 인해 외해에서의 파고와 주기의 결합분포함수를 파향에 따라 고려해야 함을 알 수 있다. Table 2에 의하면 조도 파랑관측 지점에서 파고가 4 m 이상인 파랑의 개수는 11개이며 이는 전체 측정 파랑의 개수 22628개의 0.044%에 불과하다. 따라서 ESE 파향의 파랑은 평상파 추정에 전혀 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

Table 7에 의하면 조도와 오륙도 방파제 사이의 개구부를 통과하는 ENE 계열의 파향의 입사파의 파고 4 m와 주기 12 sec 일 때 평상파 추정해역에서의 유의파고가 0.86 m로서 파향 E계열 평상파 조건 1.06 m보다 작음을 알 수 있다. Table 4에 의하면 ENE파향의 파고 중에서 유의파고가 4 m 이상인 파랑의 개수는 5개이며 이는 전체 측정 파랑의 개수 22628개의 0.022%에 불과함을 알 수 있다. 따라서 ENE 계열의 파랑도 평상파 추정에 영

**Table 4.** Joint distribution of significant wave height, Hs, and significant wave period, Ts, with wave direction ENE at Jodo wave gage station (C.S: Cumulative Sum, C.P: Cumulative percentage/100)

Hs	Ts																									Sum	C.S	C.P	
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5				
0.25	0	0	0	0	0	0	1	7	16	7	12	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	4167	1.000	
0.50	0	0	0	0	0	1	10	68	139	214	257	242	191	89	64	28	11	4	3	0	2	0	0	0	0	1323	4115	0.988	
0.75	0	0	0	0	0	0	2	22	62	140	222	254	235	208	164	81	46	20	5	5	2	2	1	1	1	1473	2792	0.670	
1.00	0	0	0	0	0	0	0	1	19	50	73	90	99	80	47	62	35	31	17	9	3	1	5	1	2	625	1319	0.317	
1.25	0	0	0	0	0	0	1	0	0	13	37	71	56	40	29	16	17	13	8	3	1	3	2	1	0	313	694	0.167	
1.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	16	28	37	31	21	16	8	4	7	2	2	1	1	1	0	177	381	0.091	
1.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	18	17	17	12	8	8	2	1	3	2	0	1	0	1	94	204	0.049	
2.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	5	14	5	2	5	0	0	0	0	0	0	1	40	110	0.026	
2.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	3	4	2	3	2	3	0	0	1	1	0	0	24	70	0.017	
2.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3	7	2	2	0	0	0	0	1	0	20	46	0.011
2.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6	26	0.006	
3.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	20	0.005
3.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	17	0.004	
3.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	16	0.004
3.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	13	0.003
4.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	5	10	0.002	
4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	5	0.001	
4.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.001
4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.001
5.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3	0.001	
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.000
5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.000
5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.000
6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.000
6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.000
6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.000
6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.000
7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	2	0.000	
Sum	0	0	0	0	0	1	14	98	236	426	624	713	646	476	361	224	142	87	48	25	12	9	11	6	6	4167			



**Fig. 6.** Bottom bathymetry of the study area.

향이 없음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 조도 전면 해상에서 측정된 파랑 중 E 계열 파랑 만이 97.5% 평상파 산정에 영향을 끼침을 알 수 있으며, 해경부두 위치에서 97.5% 평상파가 되는 조건은 입사파의 파고가 1.75 m이고 주기가 약 7 sec 라고 결론 지을 수 있다.

### 2.4 항내 풍파에 의한 영향

2.3절에서 97.5% 평상파 추정을 위해 항 외에서 측정된 파랑자료를 이용하였다. 유의파고 상위 97.5% 조건은 해경부두 위치에서 유의파고가 약 1 m 정도됨을 알 수 있었다. 본 절에서는 부산항 내에서 풍파에 의한 파랑 조건을 검토하였다.

본 풍파수치모의를 위해서 미 육군 공병단의 Shore Protection Manual(1984)에 제시되어 있는 천해파 SMB (Svendrup, Munk, and Bretshneider)모델을 사용하였다. SMB모델은 미국 플로리다의 오키초비 호수(Lake Ocheechobee)에서 측정된 자료에 근거하여 만들어진 경험식이다. 따라서 파업대상 지역이 외해에 대해 폐쇄되어 있다고 가정했을 때 장기간의 풍파를 모의하기에 검증되고 신뢰할 수 있는 경제적인 풍파추정모델이다.

부산항 내 해경부두에서의 풍파는 취송거리에 의해 제한(Fetch limited)을 받는다. 주어진 풍향자료와 이로부터



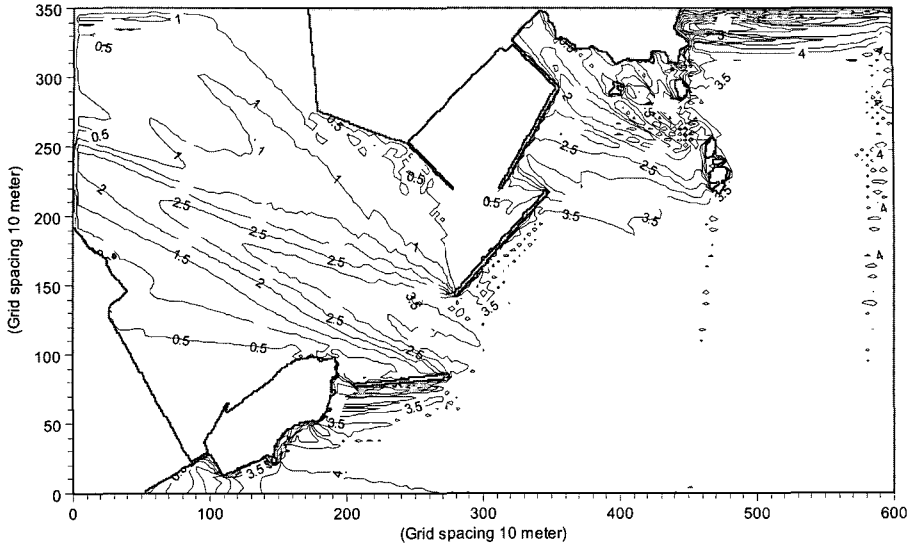


Fig. 7. Wave height contours simulated by Mike21 PMS model with the incident wave height 4 m, wave period 9sec, wave direction ESE.

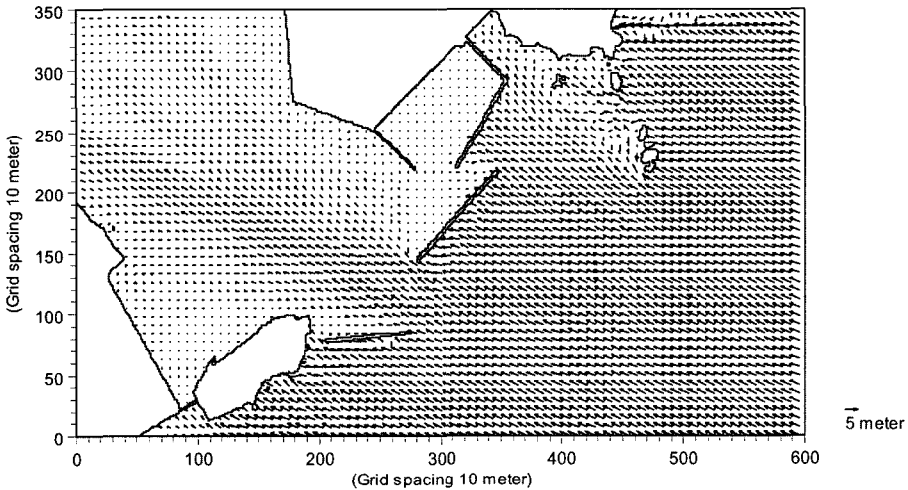


Fig. 8. Wave number vector plot simulated by Mike21 PMS model with the incident wave height 4 m, wave period 9sec, wave direction ESE.

계산된 취송거리, 풍속, 수심 자료로부터 유의파고와 유의파주기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{gH_s}{U_A^2} = 0.283 \tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]$$

$$\tanh \left[ \frac{0.00565 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right]$$

$$\frac{gT_s}{U_A^2} = 7.54 \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]$$

$$\tanh \left[ \frac{0.0379 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right]$$

$$\frac{gt}{U_A} = 5.37 \times 10^2 \left( \frac{gT_s}{U_A} \right)^{7/3}$$

**Table 5.** Wave height at the site of interest obtained through simulation of Mike21 PMS model with incident wave Hs, Ts, and wave direction of E

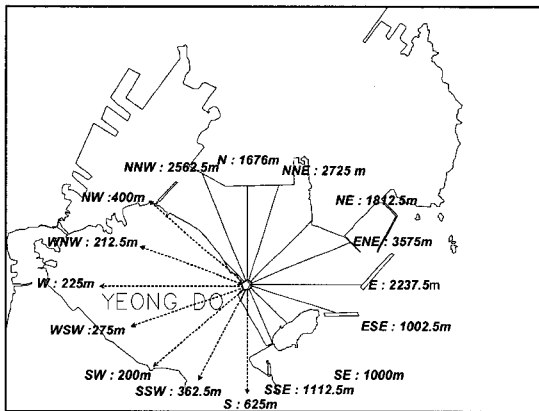
Hs (m) \ Ts (sec)	7	8	8.5	9	10	11	12
1.25	0.78	0.75	0.75	0.74	0.72	0.71	0.69
1.50	0.92	0.89	0.88	0.86	0.74	0.83	0.82
1.75	1.06	1.02	1.00	0.98	0.96	0.94	0.93
2.00	1.20	1.14	1.13	1.10	1.05	1.05	1.04

**Table 6.** Wave height at the site of interest obtained through simulation of Mike21 PMS model with incident wave Hs, Ts, and wave direction of ESE

Hs (m) \ Ts (sec)	7	8	8.5	9	10	11	12
2.50	0.42	0.48	0.49	0.51	0.52	0.50	0.46
3.00	0.50	0.56	0.58	0.59	0.61	0.58	0.55
3.50	0.55	0.65	0.66	0.68	0.69	0.65	0.62
4.00	0.65	0.73	0.74	0.76	0.77	0.73	0.69

**Table 7.** Wave height at the site of interest obtained through simulation of Mike21 PMS model with incident wave Hs, Ts, and wave direction of ENE

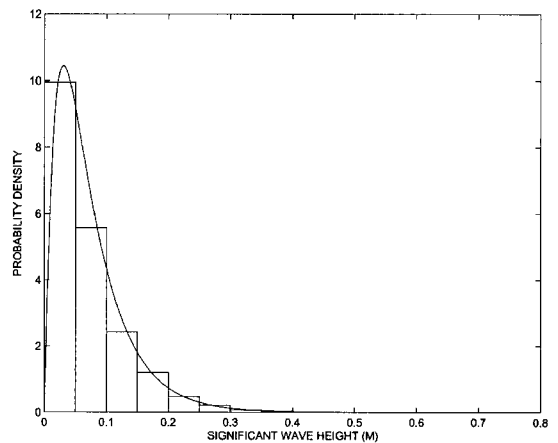
Hs (m) \ Ts (sec)	7	8	8.5	9	10	11	12
2.50	0.23	0.13	0.30	0.32	0.39	0.51	0.59
4.00	0.45	0.26	0.46	0.49	0.63	0.77	0.86



**Fig. 9.** Fetch according to wind direction.

여기서  $g$ 는 중력가속도( $m/sec^2$ ),  $H_s$ 는 유의파고( $m$ ),  $T_s$ 는 유의파 주기( $sec$ ),  $F$ 는 취송거리( $m$ ), 그리고  $t_s$ 는 취송시간을 나타낸다.  $U_A = 0.71U^{1.23}$ 는 보정된 풍속으로  $U = R_f U(10)$ 이고  $U(10)$ 는 평균해수면에서 10 m 위에서 측정된 평균풍속( $m/sec$ )이고  $R_f = 1.1$ 이다.

위의 식에서 수심  $d$ 는 취송거리 상의 평균수심이다. 그러나 부산항 같이 취송거리가 짧고 수심이 비교적 일정한 항내에서는 풍파를 구하고자 하는 지점의 국지수심을 사용하여도 무관하다(Ahn, 1990).



**Fig. 10.** The generalized Gamma probability density function and the histogram of significant wave heights obtained from shallow water SMB model.

해경부두에서의 풍향별 취송거리는 Fig. 9와 같다. 본 풍파모의를 위해 1971년 1월 1일부터 2003년 7월 7일까지의 32년간의 측정된 바람자료를 입력자료로 하여 천해 SMB 모델의 수치모의로 구한 1시간 간격의 풍파의 유의파고의 개수는 총 285,072개이다.

Fig. 10은 천해와 SMB 모델에 의해 추정된 유의파고

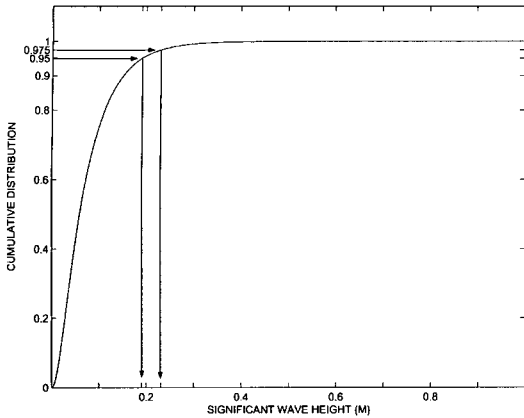


Fig. 11. The cumulative distribution function of the significant wave heights obtained from shallow water SMB model.

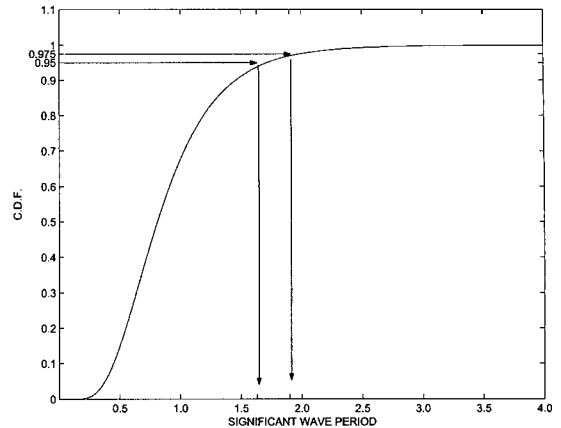


Fig. 13. The cumulative distribution function of the significant wave periods obtained from shallow water SMB model.

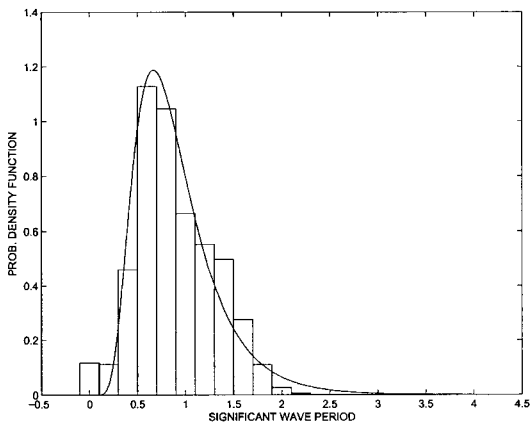


Fig. 12. The Log-Normal probability density function and the histogram of significant wave periods obtained from shallow water SMB model.

의 막대그래프와 Generalized Gamma 확률밀도함수이고, Fig. 11은 유의파고의 비초과 누적확률밀도함수를 나타낸다. 여기서 풍파만을 고려했을 때의 97.5% 평상파의 유의파고는 0.23 m 임을 알 수 있다. Fig. 12는 유의파 주기의 막대그래프와 Log-Normal 확률밀도함수이고, Fig. 13은 유의파 주기의 비초과 누적확률밀도함수를 나타낸다. 이로부터 항내 풍파만을 고려했을 때의 97.5% 비초과 유의파 주기는 1.9 sec 임을 알 수 있다.

위의 결과는 부산항이 폐쇄해역이라는 가정하에 산정된 평상파 산정이므로 다소 평가된 비현실 적인 값이다. 2.3 절에서 항 외에서 측정된 파랑으로부터 추정된 97.5% 평상파 조건은 유의파고 1.06 m이고 유의파주기 7 sec 이므로 항 내 풍파만을 고려하여 평상파를 추정하였을 경우 심각한 오류가 있음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

부산항 내 해경부두 설계를 위한 97.5% 평상파를 장기간 측정된 파랑자료를 이용하여 산정하는 방법론을 제시하였다. 1993년 2월부터 2002년 12월까지 부산항 입구 조도방파제 앞 해역에서 측정된 파랑자료를 파향별로 유의파고와 유의파주기의 결합분포함수를 구한 후, 포물선형 환경사 방정식 파랑모델을 이용하여 해경부두에서의 평상파 조건을 산정하였다. 해경부두 위치에서의 항만설계를 위한 97.5% 평상파의 파고는 1.06 m이며, 이는 부산항 항외에서 입사되는 파향 E, 유의파고 1.75 m, 유의파주기 7 sec에 의해 생성되는 것으로 분석되었다.

부산항 내 풍파에 의한 평상파에의 영향을 검토하였으나, 항 내 풍파는 평상파 추정에 영향이 없으며 항 외에서 항 내로 진입하는 너울성 파고의 영향이 지배적임을 알 수 있었다. 따라서 항 내의 풍파의 영향만을 고려하여 평상파를 추정하였을 경우 심각한 오류가 있음을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

부산지방해양수산청 (2003). 부산항 국제여객 · 해경부두 축조 기본설계용역 보고서.  
 수산청 (1988). 해역별(동해, 남해) 심해파 추산보고서.  
 해양수산부 (1988). 전국 항만 설계파 추산 보고서.  
 해양수산부, 한국항만협회 (2000). 항만 및 어항 설계기준.  
 Ahn, K. (1990). Hindcasting of wind wave and estimation of bottom shear stresses in Lake Okeechobee. MS Thesis, Coastal & Oceanographic Eng. Department, University of

Florida, Gainesville, U.S.A.

- Ahn, K., Chun J.H., Park, K.S. and Kim, S.I. (2000). Joint distribution of significant wave height and average period of long-term wave climate. Proc. Korea-China Conference on Port and Coastal Engineering, Seoul, Korea, 159-164.
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center (1984). Shore

Protection Manual. U.S. Government Printing Office.

- Ochi, M.K. (1998). Ocean waves. The Stochastic Approach, Cambridge University Press.

---

Received July 28, 2004

Accepted September 3, 2004