

工學碩士 學位論文

소형 어항에 대한 다양한 파랑모델의
실질적 적용

A Practical Application of Multiple Wave Models to the
Small Fishery Harbor Entrance

指導教授 李 重 雨

2008年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

鄭 在 賢

A Practical Application of Multiple Wave Models to the Small Fishery Harbor Entrance

Jae-Hyun Jung

*Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime University*

Abstract

Samchunpo(Sinhyang) Harbor is located at the Sachun bay, on the central south coast of Korean peninsula. The harbor and coastal boundaries are being protected by natural coastal islands and shoals. Currently, The Sinhyang harbor needs maintenance and renovation to the weather deterioration and typhoon damages on the sheltered structures. Consequently, the calculation of accurate design wave through the typhoon wave attack is necessary. In this study, calculation of incident wave condition simulated by steady state spectrum energy wave model (wide area wave model) from 50 years return wave condition. And this simulation results in wide offshore area were used for the input of the extended mild-slope wave model at the narrow coastal area. Finally, the calculation of design wave at Sinhyang harbor entrance was induced by Boussinesq wave model (detail area wave model) simulation. The numerical model system was able to simulate wave transformations from generation-scale to shoreline or harbor impact. We hope to contribute from this study that coastal engineers are able to assist in the placement, design, orientation, and evaluation of a wide range of potential solutions.

목차

<i>ABSTRACT</i>	i
<i>LIST OF TABLES</i>	iv
<i>LIST OF FIGURES</i>	iv
<i>NOMENCLATURE</i>	viii
제1장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 내용 및 범위	4
제2장 파랑 해석의 기본 이론	5
2.1 심해역 파랑해석	5
2.1.1 기본 방정식	5
2.1.2 회절	8
2.1.3 쇄파 및 바람	9
2.2 중간역 파랑해석	11
2.2.1 기본방정식	11
2.2.2 경계조건	15
2.2.3 운동학적 파라메타	18
2.3 해안 및 항만내 파랑해석	22
2.3.1 기본방정식	22
2.3.2 쇄파	24
2.3.3 해저 마찰	26
제3장 수치모델의 구성 및 검증	27
3.1 대상영역의 특성	27
3.1.1 지리적 특성	27
3.1.2 기상 특성	29
3.1.3 파랑 특성	30
3.2 심해역 파랑해석	32
3.3 중간역 파랑해석	39

3.4 해안 및 항만역 파랑해석	41
3.4.1 모델의 검증	41
3.4.2 해안 및 항만내 모델의 구성	46
제4장 실험 결과 및 분석	50
4.1 심해역 파랑해석	50
4.2 중간역 파랑해석	57
4.3 해안 및 항만역 파랑해석	62
제5장 결론	84
참고문헌	87

LIST OF TABLES

Table 2.1 Breaker type	25
Table 3.1 Characteristic of winds at Tongyoung	29
Table 3.2 Stations for long term wave predictions(after KORDI, 2006)	30
Table 3.3 Appearance frequency of wave heights and periods	31
Table 3.4 Annual maximum value of significant wave height in terms of direction	31
Table 3.5 Assumption of shallow water wave height summary	33
Table 3.6 Incident wave condition of extended mild-slope wave model	39
Table 3.7 Applied reflection coefficient	40
Table 3.8 Incident wave condition of Boussinesq wave model	47
Table 4.1 Result of wave height calculation by spectral energy wave model	52
Table 4.2 Result for the input of nearshore model by steady state spectrum energy wave model	56
Table 4.3 The result of simulation by extended mild-slope wave model	58
Table 4.4 Observation data for pressure and wind speed at Sorido, Yeosu	76
Table 4.5 Observation wave height at Sorido, Yeosu	77

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Definition of wave and current vector	6
Fig. 2.2 Definition sketch of model domain	17
Fig. 2.3 Slope of $\tan\varphi$ and pointing in the opposite direction of the wave propagation	25
Fig. 3.1 Study area	28
Fig. 3.2 Plan of Samchunpo harbor	28
Fig. 3.3 Location of Sinhyang Harbor, Sachun Bay, Korea and limit of open boundaries for model input	33
Fig. 3.4 Water depth of Steady state spectral energy wave model	34
Fig. 3.5 Schematic of deep water area grid	36

Fig. 3.6	Input spectrum energy vs. frequency and direction of model	37
Fig. 3.7	Grid of steady state spectral energy wave model	38
Fig. 3.8	Water depth of extended mild-slope wave model area	40
Fig. 3.9	Model domain and selected cross sections for comparison	41
Fig. 3.10	Calculated significant wave height in a model domain.	42
Fig. 3.11	Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(A-A')	44
Fig. 3.12	Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(B-B')	44
Fig. 3.13	Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(X-X')	45
Fig. 3.14	Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(Y-Y')	45
Fig. 3.15	Water depth and comparison point of Boussinesq wave model area	48
Fig. 3.16	Grid of Boussinesq wave model area	48
Fig. 3.17	Energy vs. frequency and energy vs. direction of model	49
Fig. 4.1	Comparison point of steady state spectral energy wave model	50
Fig. 4.2	Wave height of steady state spectral energy wave model (S direction)	53
Fig. 4.3	Wave height of steady state spectral energy wave model (SSE direction)	53
Fig. 4.4	Wave height of steady state spectral energy wave model (S + Wind SSW)	54
Fig. 4.5	Wave height of steady state spectral energy wave model (SSE + Wind SSW)	54
Fig. 4.6	Comparison point of wave height at steady state spectral energy wave model area (A1~A11)	55
Fig. 4.7	Incident wave height point of wave height for extended mild-slope wave model area (B1~B5)	55
Fig. 4.8	FE mesh and comparison point of extended mild-slope wave model area	59
Fig. 4.9	Wave height of direction S12°E (Linear wave)	60
Fig. 4.10	Wave height of direction S15°E (Linear wave)	60
Fig. 4.11	Comparison point of wave height at extended mild-slope wave model area (C1~C9)	61
Fig. 4.12	Incident wave height point of wave height for Boussinesq wave model area (B1~B5)	61

Fig. 4.13 Significant wave height of model wave direction S12°E	63
Fig. 4.14 Significant wave height of model wave direction S15°E	63
Fig. 4.15 Max. wave height of model wave direction S12°E	64
Fig. 4.16 Max. wave height of model wave direction S15°E	64
Fig. 4.17 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C1	66
Fig. 4.18 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C2	66
Fig. 4.19 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C3	66
Fig. 4.20 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C4	67
Fig. 4.21 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C5	67
Fig. 4.22 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C6	67
Fig. 4.23 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C7	68
Fig. 4.24 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C8	68
Fig. 4.25 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C9	68
Fig. 4.26 Surface elevation of model wave S12°E	69
Fig. 4.27 Surface elevation of model wave S15°E	69
Fig. 4.28 Wave disturbance S12°E	71
Fig. 4.29 Wave disturbance coefficient S12°E	71
Fig. 4.30 Wave disturbance S15°E	72
Fig. 4.31 Wave disturbance coefficient S15°E	72
Fig. 4.32 Wave disturbance Plot S12°E	73
Fig. 4.33 Wave disturbance Plot S15°E	73
Fig. 4.34 Wave disturbance coefficient Plot S12°E	74
Fig. 4.35 Wave disturbance coefficient Plot S15°E	74
Fig. 4.36 Significant wave height Typhoon YANNI at Sorido, Yeo-Su	75
Fig. 4.37 Observation data (2002, 1 year)	78
Fig. 4.38 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C1	79
Fig. 4.39 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C2	79
Fig. 4.40 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C3	80
Fig. 4.41 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C4	80
Fig. 4.42 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C5	81
Fig. 4.43 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C6	81

Fig. 4.44 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C7	82
Fig. 4.45 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C8	82
Fig. 4.46 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C9	83

NOMENCLATURE

C_m	Mean wave celerity
$\overline{C_g}$	Average group celerity of the spectrum
D	Derivative
E	Wave energy density divided by ($\rho_w g$), where ρ_w is density of water
E_{tot}	Total energy in the spectrum divided by ($\rho_w g$)
g	Gravitational acceleration
h	Water depth
H_{mo}	Zero-moment wave height
k	Wave number
Γ_E	Energy flux
k_p	Wave number associated with the peak of the spectrum
n	Coordinate normal to the wave orthogonal
R	Coordinate in the direction of the wave ray
S	Energy source and sink terms
Δt	Equivalent travel time
u_*	Friction velocity
U, V	Depth-averaged velocities in the x, y directions
α	Wave orthogonal direction(normal to the wave crest)
α_m	Mean wave direction, relative to the grid
σ	Factor equal to 0.9 for wind seas
δ	Direction of the current relative to a reference frame (the x-axis)

ϵ	Coefficient equal to 30
λ	Partitioning coefficient
μ	Direction of wave ray
ρ_a	Density of air
ρ_w	Density of water
ω	Angular frequency
$C(x,y)$	Phase velocity = σ/k
$C_g(x,y)$	Group velocity = $\partial\sigma/\partial k = nC$ with $n = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right)$
$k(x,y)$	Wave number (= $2\pi/L$), related to the local depth $d(x,y)$ through the linear dispersion relation: $gk \tanh(kd)$
K_r	Reflection coefficient
f	Friction factor
γ	Wave breaking parameter
$\hat{\eta}(x,y)$	Complex surface elevation function, from which the wave height can be estimated
$H_n(kr)$	Hankel functions of the first kind
Ψ_x, Ψ_y	Dispersive Boussinesq type terms
τ_x, τ_y	Dispersive terms due to bottom friction
(c_x, c_y)	Wave/roller celerities
ζ	Surf similarity parameter
H_b	Wave height at the break point
L_0	Deepwater wavelength
f_m	Friction factor
δ	Roller thickness
φ	Breaker angle

제1장 서론

1.1 연구의 배경

어항은 어선이 안전하게 출입·정박하고 어획물의 양륙, 선수품의 공급 및 기상 악화시 어선이 안전하게 대피할 수 있는 어업활동의 근거지의 역할을 하고 있다. 우리나라 어항의 수는 소규모 항·포구를 포함하여 약 2,300여개로 도서, 벽지를 불문하고 전국 연안에 분포되어 있다. 어항은 역사적으로 자연지형을 이용하여 지역주민의 생활과 밀착한 형태로 발전해왔으며, 어촌정주어항이나 소규모항 등이 도서·벽지에 위치하는 경우가 많아 다소 교통이 불편한 곳이 있지만, 어촌지역사회의 핵으로서 개발이 진행되고 있다. 어항의 접안시설은 이용어선의 독특한 형상, 이용형태, 양륙방법을 고려하여 시설되어 있고, 또한 조위차가 큰 해역에서는 해수면의 변동에 대해서도 항상 이용하기 쉽고 안전하도록 설치되어 있다.

어항의 중요한 기능 중 하나는 태풍의 내습 등 기상악화 시에 어선을 안전하게 보호하는데 있다. 어선들은 대부분 소형 선박이므로 대형선박과는 달리 기상악화 시에 항내 접안시설 등에 2중 3중으로 계류하거나 육상으로 끌어올리는 경우가 많다. 우리나라의 어항은 어항법에 의해 해양수산부 장관이 지정·관리하는 국가 어항 105개, 시·도지사가 지정·관리하는 지방 어항이 316개로 총421개의 지정어항이 있으며, 법정어항이 아닌 소규모 항·포구가 1,851개로 이는 시·군에서 관리하고 있다.

복잡한 해안선을 가진 지형의 파랑 예측은 해안공학 분야의 설계에서 매우 중요한 연구이다. 복잡한 해안선과 구조물의 형상을 해석하는데 있어서 다양한 파랑모델이 사용되지만 각각의 모델의 적용은 대상영역의 크기와 특성에 따라 상이할 것이다. 파랑 수치실험은 적용되는 파랑모형에서 고려하는 물리

현상을 광역, 중간역, 세부역 등 상이한 영역에 대해서 적절히 적용해야 한다.

파랑에 관한 연구는 초기단계의 경우 실측파랑자료의 부족으로 불가피하게 해상풍으로부터 파랑을 간접적으로 도출하여 내는 파랑추산법 (Wave Hindcast method)에 의하여 수행되었다. 그러나 이와같은 파랑추산법에 의한 풍파의 해석은 7, 80년대에 들어와 컴퓨터의 발달과 함께 비약적인 발전을 했으며 대부분의 공업항, 어항 및 무역항의 설계 및 유지 관리를 위한 파랑분석에 적용되어왔다.

파랑 추산법은 SMB법, PNJ법과 수치모델에 의한 파랑 추산법으로 나눌 수 있다.

SMB법은 1940년대에 제안된 파랑 추산법으로서 불규칙하게 변동하는 해양의 파랑을 정량적으로 기술하기 위한 통계적 평균량으로써의 “유의파”라는 개념을 도입하였고, 풍파의 발생, 발달, 전파 및 감쇄로 일컬어지는 연속적 현상의 전체상을 파악할 수 있는 일련의 시스템을 제안하였으며, 종래에 단편적으로 얻어졌던 관측자료들을 통일되게 정리되어진 유의파($H_{1/3}$)나 주기($T_{1/3}$)를 도입하여, 파랑을 일으키는 외적조건 (풍속, 취송시간, 취송거리, 수심 등)과의 상관관계를 구체적으로 표시하였다.

1950년대에 들어서서 불규칙한 성질의 해양파를 기술하기 위해서 통계적인 이론들이 급속도로 정리되어졌다. 해양파의 실측 결과를 해양파의 스펙트럼형으로 결정하는 방법을 제시하였고 이러한 기초적 연구성과에 의하여 파랑 스펙트럼을 바탕으로 한 파랑추산법이 Pierson과 Neumann 그리고 James에 의하여 PNJ법으로 제안되었다.

SMB법이나 PNJ법은 해양파랑의 표현에 유의파를 이용하는 것과 파랑 스펙트럼을 이용하는 것에 있어서 그 차이는 있으나, 모두 다 일정한 방향의 바람이 계속해서 동일 강도로 불어오는 정상상태의 파랑이나 풍향을 기초로 하고 있다. 그러나 바람의 영역이 시간, 공간적으로 변화하는 경우는 적용이 곤란하

다. 이에 SMB법의 개량이나 PNJ법의 적용이 유행한 1950년대 후반에 간략화되어진 에너지 평형방정식을 이용한 파랑추산을 시도한 바 있으며 1960년대부터 1970년대 초까지는 파랑의 비선형항을 직접적으로 고려하지 않은 제1세대 파랑모형이 사용되었고, 1980년대 초까지 개발된 파랑스펙트럼의 유사성을 이용하여 스펙트럼의 매개변수를 계산한 제2세대 파랑모형으로 발전하였으며 비선형 효과를 고려하여 보다 정확한 파랑추산을 할 수 있는 제3세대 모델로 발전하였다.

최근에는 제3세대 파랑모형뿐 아니라 환경사 방정식을 사용한 모델과 Boussinesq 방정식을 사용한 모델 등이 보다 정확한 물리적 현상을 재현할 수 있도록 개발되어 설계과 산정에 적용되고 있다.

강 등(2005)은 태풍 MAEMI 내습으로 막대한 피해를 입은 마산·진해만의 설계파랑을 태풍자료수집, 태풍파라메타 산정, 해상풍 산출, 심해파랑 모델링, 연안국지 설계파랑제원 산출 순으로 모의 산정하였다.

시간의존 방법을 사용하는 Boussinesq 파랑방정식 모델은 소형어항의 파랑형상을 예측하는데 있어서 매우 적절한 모형이다. Boussinesq 파랑 방정식 모형은 천수변형, 굴절, 회절 및 복잡한 지형에서 불규칙 단파 및 장파의 유한진폭파랑의 전달 등의 해안공학 및 항만공학에서 주요 관심 현상을 재현할 수 있다. 본 연구는 삼천포 신항항의 파랑작용에 대한 수치모델의 적용에 대한 연구이다.

삼천포항에 인근한 소형 어항인 신항항은 사천만에 인접해 있으며, 항만역에서 피난항의 역할을 겸한 소형어항이다. 또한 외곽시설 미비 등으로 기상악화시 소형어선 침몰 및 파손으로 주민의 재산 피해 등 대피항으로서의 기능유지가 불가함에 따라 접안시설 및 외곽시설 확충을 위한 정비계획이 실시될 전망이다. 따라서 해안선 및 수심의 변화로 파랑형상이 변화하므로 항내의 파랑변화를 재고찰 할 필요성이 있다.

1.2 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 심해 설계파 제원을 이용해서 심해역, 중간역, 천해역에 각각 적용할 수 있는 모델을 선정하여 시뮬레이션을 실시하고자한다. 심해역은 굴절 및 회절과 천수효과 및 쇄파에 의한 감소 등을 효과적으로 고려할 수 있는 파랑모형을 사용해야하기 때문에 정상상태 스펙트럼 에너지 파랑모형을 적용해 수치실험을 실시하며, 중간역 및 천해역 실험에는 확장 환경사 방정식 파랑모형 및 Boussinesq 파랑모형을 도입하기로 한다.

기존의 Boussinesq 방정식은 $h_{\max}/L_{0,\min} < 0.22$ 에서만 계산이 가능하지만 본 실험에서 사용하는 개량된 Boussinesq 방정식 모델은 심해 조건을 고려하여 $h_{\max}/L_{0,\min} = 0.5$ 에서도 계산이 가능하다.

최근에는 기존의 천해역에서만 사용이 국한되었던 환경사 방정식 모델이나 Boussinesq 방정식 모델과 같은 경우에도 방정식의 확장을 통해서 광역에 적용할 수 있는 상황이지만 막대한 계산시간 때문에 그 사용은 미비한 실정이다.

많은 경우 하나의 설계파랑이 사용되어 파랑 구조물의 선택 및 설계를 위해 최소한의 시뮬레이션이 수행된다. 본 연구에서는 해안 공학 분야의 문제에서 다양한 파랑모델의 영역별로 적절한 적용을 제시하고자 하였으며 신항항의 설계파랑의 예측을 위해서 3종류의 파랑모델을 사용하여 바람을 고려할 수 있는 50년 빈도 심해파랑을 심해역에 입사하여 수치실험을 실시하고자 한다. 관측 자료는 2002년 해상파랑관측 및 조사에 관측위치 52번, 067126 격자번호, 34.67 128.00 위치의 2002년 역추산된 파랑 관측 자료를 이용하여 비교 및 분석한다. 확장 환경사 방정식 모델 역시 세역에 사용할 수 있는 모형이기 때문에 Boussinesq 파랑모형의 결과와 비교하기로 한다.

제2장 파랑해석의 기본 이론

2.1 심해역 파랑해석

심해에서 천해역으로의 파랑해석 실험을 위해서는 굴절, 회절, 천수 및 쇄파를 적절하게 고려해주는 모델을 사용해야한다. 정상상태 에너지 스펙트럼 파랑모델은 심해를 포함하는 광역에 적합한 모델이다.

2.1.1 기본 방정식

파랑스펙트럼의 정상상태 보존에 대한 지배방정식은 다음과 같다 (Jonsson(1990)).

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(\omega, \alpha)}{w_r} = \Sigma \frac{S}{w_r} \quad (2.1)$$

여기서, $E = \frac{\text{파랑에너지밀도스펙트럼}}{\rho_w g}$ (ρ_w 는 물의 밀도)

S = 에너지 소스와 싱크 항(쇄파, 바람 및 간섭 항)

ω = 각 주파수

g = 중력 가속도

k = 파수

α = 파향선 방향(파봉선에 직교, Fig. 2.1 참조)

μ = 파의 에너지 전달 방향

파의 분산관계는 다음의 식으로 나타낸다.

$$\omega_r^2 = gk \tanh kh \quad (2.2)$$

여기서, h = 수심

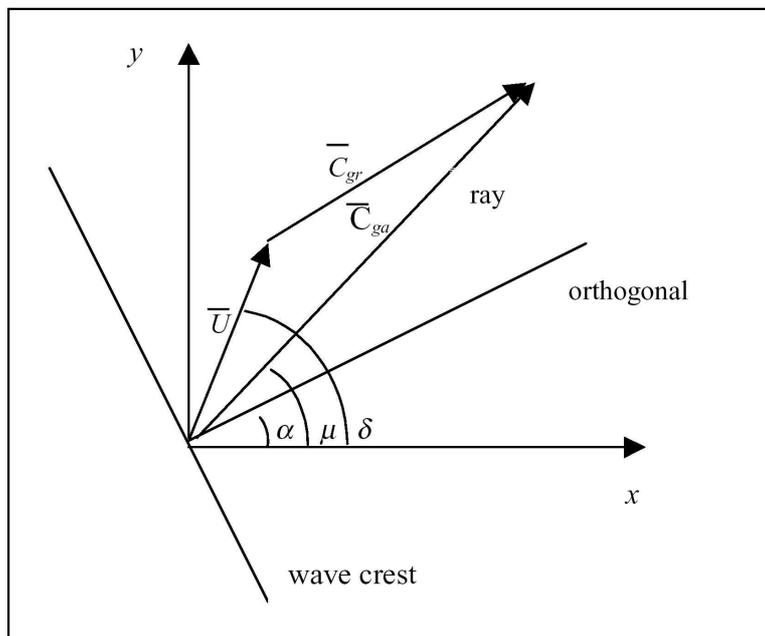


Fig. 2.1 Definition of wave and current vector

절대 기준좌표계에서 각주파수는 다음과 같다.

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha) \quad (2.3)$$

여기서, U = 흐름 속도

δ = 기준좌표(여기에서는 x축)에 대한 상대 흐름의 방향

파수는 식(2.3)에 식(2.2)을 대입하여 k 에 대하여 반복 계산하면 구할 수 있다. 파수와 파장($L=2B/k$)은 두 가지의 구조관계에서 동일하다.

굴절과 천수변형항을 계산하기 위해서는 파속 C 와 군속도 C_g 의 관계식이 필요하다. 흐름에 대한 상대적인 관계에서는

$$C_r = \frac{\omega_r}{k} \quad (2.4)$$

$$C_{gr} = C_r \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (2.5)$$

상대속도와 상대군속도의 방향은 파향선 방향인 α 이다. 절대 기준좌표계에서 상대속도와 상대군속도는 다음과 같다.

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad (2.6)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad (2.7)$$

여기서 첨자 i 는 x 와 y 구성요소에 대한 텐서 표기법이다. 절대 유속의 방향 또한 파봉선 진행과 직교 방향이다. 절대 군속도는 파의 에너지 전달 방향으로 정의한다. 그래서 Fig. 2.1에서 파의 에너지 전달 방향 μ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right) \quad (2.8)$$

파향선과 파의 에너지 전달 방향 사이의 차이는 파와 흐름의 상호작용을 설명하는데 아주 중요하다. 흐름이 없다면 파향선과 파의 에너지 전달 방향은 같다. 그러나, 흐름이 있으면 파의 에너지 전달 방향으로 움직이지만 파향은 여전히 파봉선에 직교하는 방향으로 정의한다.

Mei(1989)와 Jonsson(1990)에 의하면 정상상태 조건에 대한 파향선은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn} \quad (2.9)$$

여기서, D : 도함수 연산자

R : 파의 에너지 전달 방향의 좌표축

n : 파향선에 대한 직교 좌표축

2.1.2 회절

회절은 파 에너지의 평할화 과정을 거쳐 간단한 방법으로 스펙트럼 파랑 모델에 적용된다. 다음 식을 이용하여 주어진 주파수와 파향 에너지를 매끄럽게 할 수 있다.

$$E_j(\omega_a, \theta) = 0.55 E_j(\omega_a, \theta) + 0.225 (E_{j+1}(\omega_a, \theta) + E_{j-1}(\omega_a, \theta)) \quad (2.10)$$

여기서, E 는 주파수와 방향의 에너지 밀도이고 아래첨자 j 는 격자 행의 번호를 가리킨다.

2.1.3 쇄파 및 바람

1) 쇄파

쇄파의 기준은 수심에 대한 파고 비율의 함수로 나타낸다. 여기서 H_{mo} 는 쇄파시 에너지에 기초한 최대파고이다.

$$\frac{H_{mo_{max}}}{d} = 0.64 \quad (2.11)$$

해안 입구에서 파는 파와 흐름의 상호작용에 의해 파형경사가 커지게 되고, 쇄파는 경사의 증가로 인해 커지게 된다. Smith et al.(1997)은 간조흐름에서 불규칙한 쇄파의 측정을 실험실에서 수행하였으며, 간단하고 확고하고 정확한 Miche 기준(1951)의 공식으로 쇄파 관계를 찾았다.

$$H_{mo_{max}} = 0.1L \tanh kd \quad (2.12)$$

또한 이것은 Battjes(1982), Battjes and Janssen(1978)에서도 알 수 있다. 식(2.12)는 모멘트가 0이되는 파고에서 최대 한계로서 적용한다. 스펙트럼 에너지는 주파수 폭과 파향 폭에서 쇄파 전의 에너지의 양에 대한 비로 주파수와 파향이 각각 감소한다. 고주파에 대한 에너지의 비선형 이송이 발생하는 동안의 쇄파는 이 모델에서 나타내지 않는다. 식(2.12)에 의해 한정된 파고에서 모델 격자 셀은 활동적인 쇄파 셀로 약해진다.

2) 바람

파는 바람장으로부터 운동량의 이송을 통하여 파랑장으로 성장하게 된다. 파랑장에서의 에너지 플럭스 S_{in} 은 Resio(1988)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$S_{in} = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_w} 0.85 C_m \frac{u_*^2}{g} \quad (2.13)$$

여기서, λ = 파랑장으로 대기가 직접 물에 전달하는 운동량의 총량을 나타내는 분할계수(0.75)

ρ_a = 공기의 밀도, ρ_w = 물의 밀도

C_m = 평균 파속

u_* = 마찰 속도(풍속 U 의 결과와 같고, 항력 계수인

$C_D = 0.0012 + 0.000025U$ 의 평방근)

2.2 중간역 파랑해석

2.2.1 기본방정식

완경사방정식(Mild Slope Equation)은 일반 선형파 이론의 한 분야로 Berkhoff(1972)에 의해 개발된 이후 Chen과 Mei(1974, 1975)에 의해 유한요소법(Finite Element Method)과 복합요소법(Hybrid Element Method)으로 방법이 제안되어 많은 학자들에 의해 개량되어 왔다. 이 식 자체로 천수효과(Shoaling), 회절 및 굴절과 반사 등의 물리현상을 포함하므로 수치해석에 빈번하게 사용되고 있으나 해저마찰, 경계면흡수, 반사파의 산란(Scattering) 등을 고려한 경우는 최근에 와서이다.

그러나, Chen(1986)의 경우 경계면에서 흡수에 대한 기술은 예로 든 항만경계면에 동일한 반사계수를 설정하여 작은 축적의 항에만 적용할 수 있었고 또한 Lee(1989)의 연구에 의하면 마찰계수에 대한 것은 실제 항만과 같은 대규모 항의 분석에는 부적합한 것으로 나타났다. 한편 항만이나 해안특정지역에 대한 시뮬레이션에 수반되는 문제는 방파제나 수로 등에서 연구영역을 한정할 때 경계면에 대한 처리로 수치해석의 결과에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있어 이에 대한 처리 방법이 아쉬운 실정 이었다.

본 연구에서는 이러한 점을 보완하고 수치해석의 정도를 높이기 위하여 2차원 타원형 환경사 파랑 방정식을 사용하기로 한다. 그 방정식은 식 (2.17)와 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (2.17)$$

여기서, $\hat{\eta}(x, y)$ = 복소해면 변동함수

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} ; \text{각주파수 (radians/sec)}$$

$$C(x, y) = \sigma/k ; \text{위상속도(phase velocity)}$$

$$C_g(x, y) = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = nC ; \text{군속도 (group velocity)}$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right)$$

$\mathcal{K}(x, y)$ = 수심 $d(x, y)$ 에서 선형분산관계식 $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$ 를 만족하는 파수 ($= 2\pi/L$)를 가리킨다.

식 (2.17)는 임의의 모양의 해안영역에서의 파랑의 굴절과 회절 그리고 반사가 고려된 방정식이다. 그러나, 해안영역에서는 이 외에도 해저면의 마찰, 쇄파 등의 다른 인자들도 파랑의 거동에 영향을 미치게 되며, 이를 고려하면 환경사 방정식은 다음과 같이 확장이 가능하다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma f + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad (2.18)$$

여기서, f = 마찰항

γ = 쇄파파라메타

본 연구에서는 Dalrymple et al.(1984)에 따라 아래와 같은 진폭 감쇠계수를 사용하여 마찰항을 나타낸다.

$$w = \left(\frac{2\pi\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \quad (2.19)$$

여기서, $a = H/2$; 파랑의 진폭

f_r = 마찰계수

마찰계수는 레이놀즈수와 저면조도에 좌우되며, Madsen(1976)과 Dalrymple et al.(1984)를 참조하였다. 일반적으로, 계수 f_r 의 크기는 Manning의 소산계수 또는 조도계수 n 과 비슷한 범위의 값을 가지며, 공간 (x, y) 의 함수로서 f_r 을 지정할 때 항내 진입에 따른 손실요소를 위해 항만입구에 더 큰 값을 부여한다. 쇄파파라메타인 γ 에는, 다음의 식을 사용한다(Dally et al., 1985; Demirbilek, 1994).

$$\gamma = \frac{0.15}{d} \left(1 - \frac{0.4^2 d^2}{4d^2} \right) \quad (2.20)$$

위의 관계식 외에도, 비선형파의 시뮬레이션은 환경사방정식을 이용하여 실험할 수 있다. 이것은 이러한 시뮬레이션에 중요하다고 알려진 진폭을 고려한 파랑분산관계를 사용할 수 있다.

식 (2.17) 및 (2.18)에 있는 선형분산관계식을 비선형 산란관계식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma^2 = gk[1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 ka] \tanh\{ka + kaF_2\} \quad (2.21)$$

여기서, $F_1 = \frac{\cosh(4ka) - 2\tanh^2(ka)}{8\sinh^4(ka)}$, $F_2 = \left(\frac{ka}{\sinh(ka)}\right)^4$

2.2.2 경계조건

엄밀히 말해 불투과성 직립벽에 직교하는 흐름은 벽을 통과할 수 없으므로 $\partial n / \partial n = 0$ 이 되어야한다. 그러나, 해안선이나 투과성 구조물에 대해서는 다음과 같은 부분반사경계조건이 적용된다.

$$\frac{\partial n}{\partial n} = \alpha \hat{n} \quad (2.22)$$

α 는 복소계수로 식 (2.23)과 같이 사용한다.

$$\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (2.23)$$

여기서, $K_r =$ 반사계수

개방경계를 따라 유출되는 파량은 무한대로 전파되어 결국 소멸되는데 이를 위해서는 Sommerfeld의 방사조건(Radiation condition)을 아래와 같이 적용한다.

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{n}_s \rightarrow 0 \quad (2.24)$$

여기서, $\hat{\eta}_s$ = 산란파의 포텐셜

r = 중심 축에서부터 임의의 점까지의 거리

$\hat{\eta}_s$ 는 Mei(1983)가 제시하였는데, 의도하는 산란파의 포텐셜 $\hat{\eta}_s$ 는 환경사 방정식의 해이고, 식 (2.24)의 방사조건식을 만족한다. 이는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\hat{\eta}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (\alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (2.25)$$

여기서, $H_n(kr)$ = 제1종 Hankel함수

제2종 Hankel함수는 무한대에서 Sommerfeld 방사조건을 만족하지 않으므로 식 (2.25)에서 제외되었다.

그러나 $\hat{\eta}_s$ 는 일정수심의 외부 영역을 필요로 한다. Fig. 2.2와 같은 항만 문제에서도, 식 (2.25)에서 나타낸 산란파의 포텐셜은 개방경계와 관련된 단면 A_1 및 A_2 에서 직선상의 완전반사 해안선을 필요로 한다. 이 문제를 극복하기 위하여, Xu et al.(1996)은 개방경계조건에서 대안을 개발하였다. 즉, 개방경계를 따라 다음의 포물선형근사를 포함시켰다.

$$\frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial r} + p \hat{\eta}_s + q \frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial \theta^2} = 0 \quad (2.26)$$

여기서,
$$p = \frac{k^2 r^2 + k_0^2 r^2 + ik_0 r + \frac{1}{4}}{2ik_0 r^2}$$

$$q = \frac{1}{2ik_0 r^2}$$

이때 k_0 는 개방경계 Γ 를 따라 평균수심에 상응하는 파수를 채용하였다. 모텔영역 Ω 내에서, 확장완경사방정식이 적용한다. 반원형호 Γ 를 따라서 개방경계조건으로 위와 같이 포물선형 근사를 사용한다.

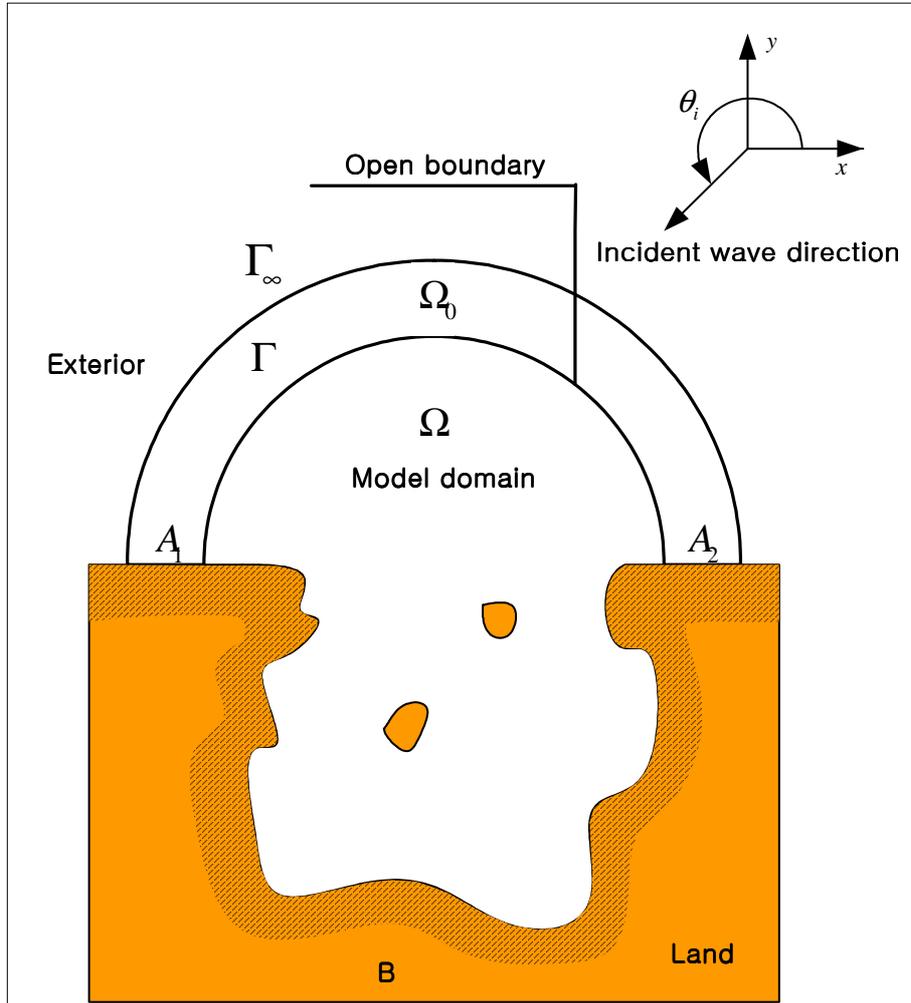


Fig. 2.2 Definition sketch of model domain

2.2.3 운동학적 파라메타

\hat{n} 의 해를 구할 때, 최고파속과 최고파압, 파랑의 위상각 그리고 파랑의 진폭은 \hat{n} 의 값에서 구한다.

파랑표면의 미소 수립자의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi(x, y, z, t) = [\Phi_1 \cos \omega t + \Phi_2 \sin \omega t] Z(z) \quad (2.27)$$

여기서, $Z(z) = \frac{-\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)}$

\hat{n} 의 항에서 포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{g}{\omega} \hat{n} \quad (2.28)$$

식 (2.27)에서 이 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} K \left[\hat{n}(x, y) e^{-\left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right)} \right] Z(z) \quad (2.29)$$

$$\hat{n} = \hat{n}_1 + i\hat{n}_2 \quad (2.30)$$

이 식을 실수부와 \hat{n}_1 , 허수부 \hat{n}_2 를 분리하고 $-\pi/2 - \omega t$ 를 α 로 대체한다.

$$\Phi = \frac{g}{\omega} [n_1 \cos \alpha + n_2 \sin \alpha] Z \quad (2.31)$$

수립자의 속도에 관한 식은 식(2.31)의 Φ 에 대해 방향별 도함수 식을 평가하여 구한다.

$$v_x = \frac{g}{\omega} \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right) \sin \alpha \right] Z \quad (2.32)$$

$$v_y = \frac{g}{\omega} \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right) \sin \alpha \right] Z \quad (2.33)$$

이 식은 속도의 수평성분을 포함한다. 간단히 하기 위해, Z는 국지상수이다. 앞 식의 v_x 와 v_y 를 아래와 같이 대체함으로 속도의 수평성분의 크기를 구할 수 있다.

$$|v|^2 = (v_x)^2 + (v_y)^2 \quad (2.34)$$

$$|v|^2 = \left(\frac{g}{\omega} \right)^2 Z^2 \left\{ \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] \cos^2 \alpha + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right] \sin^2 \alpha - \left[\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right] \sin(2\alpha) \right\} \quad (2.35)$$

최고수평속도는 α 에 대응하는 $|v|^2$ 의 도함수가 0일 때 나타나며 다음과 같다.

$$\left\{ - \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \sin(2\alpha) - 2 \left[\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right] \cos(2\alpha) = 0 \quad (2.36)$$

식 (2.36)을 이항하여 정리하면 식(2.37)과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2 \left[\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right]}{- \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right]} \right] \quad (2.37)$$

속도의 수평성분의 값은 α 에서 최대값 그리고 $\alpha + \pi/2$ 에서 최소값을 가지게 된다. $|z|$ 의 값은 이 두 각에서 계산된다.

그 중 큰 값은 전체 과정에서 가장 큰 속도가 되며, 압력은 베르누이식의 선형식으로부터 얻어진다.

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = \text{constant} \quad (2.38)$$

속도에 의한 압력, 즉 운동 수두는 이와 같은 선형식에서 무시하였다. 식 (2.29)의 Φ 의 식은 이 식에서 대체 되었고, 식들을 다시 풀면 식 (2.39)으로 나타낼 수 있다.

$$P = -\rho gz + \rho gK(\widehat{n}e^{-i\omega t})Z + C \quad (2.39)$$

파의 주기에서 가장 큰 압력은 $(\widehat{n}e^{-i\omega t})$ 의 실수부가 $H/2$ 일 때 발생한다. 상수 C 는 $Z=0$ 일 때 0으로 하여 구함.

$$P_{\max} = -\rho gz + \rho g\frac{H}{2}Z \quad (2.40)$$

파랑의 위상각 β 는 다음의 식에서 구해진다.

$$\beta = \arctan \frac{\widehat{n}_2}{\widehat{n}_1} \quad (2.41)$$

$\cos\beta$ 는 -1에서 1까지 변화하고, 출력 값으로 사용되며, 파랑의 진폭A는 다음 식에서 구해진다.

$$A = \sqrt{\widehat{n}_1 + \widehat{n}_2} \quad (2.42)$$

시간 0에서 순간 해수면 높이는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\eta = K[\widehat{n}e^{-i\omega t}] = [\widehat{n}_1 \cos \omega t + \widehat{n}_2 \sin \omega t] \quad (2.43)$$

2.3 해안 및 항만내 파랑해석

2.3.1 기본방정식

본 연구에서 사용된 Boussinesq 방정식은 해양의 수심자료, 개방경계의 경계 조건, 흡수경계의 해면층(sponge layer) 배열, 유공구조물의 배치 등을 입력자료로 하여 계산영역 내의 파랑에 대한 시간영역 해를 제공한다.

본 모델에서 사용하고 있는 수치해석 기법은 시간에 대해서 중심차분을 이용한 음해법을 사용하며, 공간에서는 등간격 사각격자계상에 정의된 종속변수를 사용하여 차분화한다. 이 방법은 ADI(Alternating Direction Implicit) 기법에 기초하며, 형성된 유한 차분식은 three-diagonal system으로 얻어지고 double sweep 알고리즘을 이용하여 계산될 수 있다.

Boussinesq 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (2.44)$$

x-momentum

$$-\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{d} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + qd \frac{\partial \eta}{\partial x} + \Psi_x + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (2.45)$$

y-momentum

$$-\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{d} \right) + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + qd \frac{\partial \eta}{\partial y} + \Psi_y + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (2.46)$$

위의 식에서 d 는 총 수심이며 분산 Boussinesq 항인 Ψ_x 과 Ψ_y 는 $h(x)$ 이상의 결과를 무시한 완경사 가설과 Taylor 확장을 사용하는 대신 Pade 확장 기법을 채택하여 향상된 주파수 분산 특성을 제공한다. 이 방정식은 Madsen과 Sørensen(1992)에 의해 정리되었다.

$$\begin{aligned}
\Psi_x = & - \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) - Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \\
& - h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \\
& - h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right)
\end{aligned} \tag{2.47}$$

$$\begin{aligned}
\Psi_y = & - \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} \right) - Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y \partial x^2} \right) \\
& - h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \\
& - h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right)
\end{aligned} \tag{2.48}$$

여기서, x , y 와 t 는 공간과 시간 간격을 고려한 차이이며 B 는 1/15로 주어진다.

Boussinesq 방정식의 적용성은 천해로 한정되어있었으나 심해로 확장하려는 노력은 1990년대에 활발히 진행되었다. Boussinesq 방정식의 분산항에 조율계수를 잘 조정하여 선형의 분산관계의 정확성을 향상시켰다. 그러나 Boussinesq 방정식의 확장에서 조율계수 값이 전 수심에 동일하게 적용되어 천해에서는 파랑의 분산성이 적기 때문에 어떤 조율계수 값을 사용하여도 파랑변형을 예측하는데 오차가 작지만 중간 수심해에서는 고정된 조율계수 값을 사용함으로 인하여 파랑의 분산성을 정확히 예측할 수 없게 되고 수심이 깊어지면 깊어질수록 그 오차가 커지는 문제점이 있다.

2.3.2 쇄파

방정식의 전개는 쇄파특성이 포함된 surface roller의 개념이 기초가 된 쇄파

효과를 포함하도록 확장되었다. Surface roller 개념은 쇄파효과가 파속 c 와 함께 이동하는 전면에 쇄파가 되는 시점으로부터 물의 체적을 추가하는 것에 의해 모델링할 수 있도록 가정한다.

R_{xx} , R_{yy} and R_{xy} 는 다음과 같다.

$$(R_{xx}, R_{yy}, R_{xy}) = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(\left(c_x - \frac{B}{d} \right)^2, \left(c_x - \frac{B}{d} \right) \cdot \left(c_y - \frac{B}{d} \right), \left(c_y - \frac{B}{d} \right)^2 \right) \quad (2.49)$$

여기서 δ 는 roller thickness이며 (c_x, c_y) 는 wave/roller 속도이다.

이 모델에서 쇄파는 t_B 에서 국부적인 파형경사의 최초 쇄파각 φ_B 일 때 발생한다. 한계 기울기 $\tan\varphi$ 최초의 쇄파 다음은 최종의 값인 $\tan\varphi_0$ 에 이를 때까지 점차 감소할 것이다. 이 감소는 시뮬레이션에 의해 쇄파대내의 쇄파의 점진적인 변형을 포함한다. 감소 방정식은 다음과 같다.

$$\tan\varphi(t) = \tan\varphi_0 + (\tan\varphi_B - \tan\varphi_0) \cdot \exp\left(-\ln 2 \frac{t - t_B}{t_{1/2}}\right) \quad (2.50)$$

여기서 $t_{1/2}$ 는 φ_B 에서 φ_0 까지 변형하는데 걸리는 시간의 반이다.

자연적인 쇄파는 Table 2.1의 Plunging, spilling, surging과 collapsing 4개의 상황으로 나눌 수 있다.

$$\zeta = \tan\beta \sqrt{\frac{L_0}{H_b}} \quad (2.51)$$

여기서 β 는 사면 경사, L_0 는 심해 파장이며 H_b 는 쇄파지점에서의 파고이다. Nielsen이 정리한 쇄파 타입은 다음과 같다.

Table 2.1 Breaker type

Surf similarity parameter	Breaker type
$4 < \zeta$	Little or no breaking (Reflection)
$2 < \zeta < 4$	Collapsing or surging breaker
$0.4 < \zeta < 2$	Plunging Breaker
$\zeta < 0.4$	Spilling Breaker

4개의 각각의 쇄파 타입은 다른 에너지 분산특성을 가지고 있다.

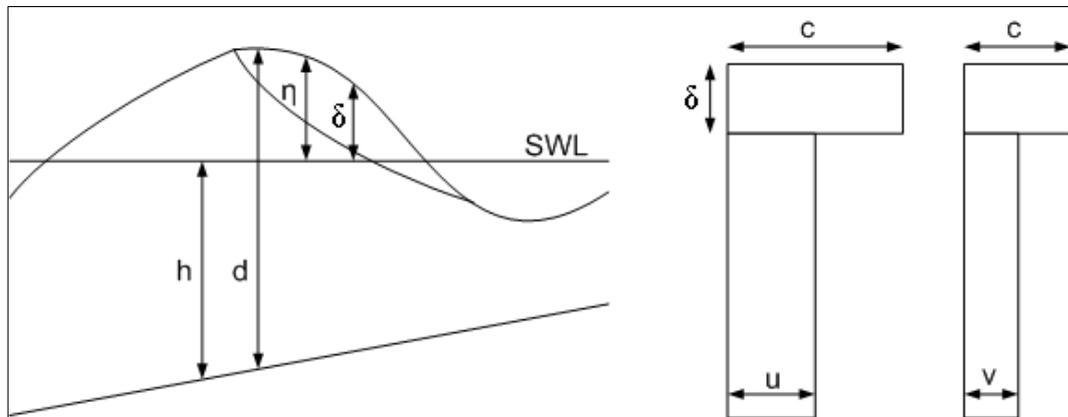


Fig. 2.3 Slope of $\tan\varphi$ and pointing in the opposite direction of the wave propagation

2.3.3 해저 마찰

마지막으로 해저마찰에 대한 분산항은 다음과 같다.

$$(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{2} \cdot f_m \cdot \rho \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{d^2} (P, Q) \quad (2.52)$$

여기서

$(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{2} \cdot \frac{2g}{C^2} \cdot \rho \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{d^2} (P, Q)$, f_m 은 마찰항, P 와 Q 는 수심
 적분 속도이며 d 는 $h + \eta$ 이다. 본 모델에서는 해저 마찰항을 Chezy number
 $C = \sqrt{\frac{2g}{f_m}}$ 를 사용하였다.

제3장 수치모델의 구성 및 검증

3.1 대상영역의 특성

3.1.1 지리적 특성

본 연구의 대상영역은 창선도, 신수도, 상도 하도 등의 섬들로 인해 지형이 매우 복잡하며 북쪽의 육지와 창선도, 신수도, 상도, 하도, 수우도 등으로 둘러싸여 있어 동계의 북서 계절풍에 의한 영향은 매우 적으며, 하절기 태풍에 의해 발생된 심해파랑이 창선도와 상도 사이를 지나 삼천포 수도를 따라 진행하면서 삼천포 항에 영향을 미치고 있다. 2002년 태풍 MAEMI의 내습 이후 심해파 제원이 대부분의 지역에서 상향 조정되었다. 심해파제원으로부터 천해파랑을 추정하기 위해서는 굴절 및 회절과 천수효과 및 쇄파에 의한 감소 등을 효과적으로 고려할 수 있는 모형이 필요하다.

본 연구의 대상영역인 삼천포항 및 신항항은 Fig. 3.1에서 보이는 것과 같이 사천만과 한려해상국립공원에 인접해있다. Fig. 3.2는 삼천포항의 계획평면도로서 신항항은 삼천포항 우측에 위치해있는 것을 알 수 있다. 외곽시설 미비 등으로 기상악화시 소형어선 침몰 및 파손으로 주민의 재산 피해 등 대피항으로서의 기능 유지가 불가함에 따라 접안시설 및 외곽시설 확충을 위한 정비계획이 수립되고 있는 상황이다.

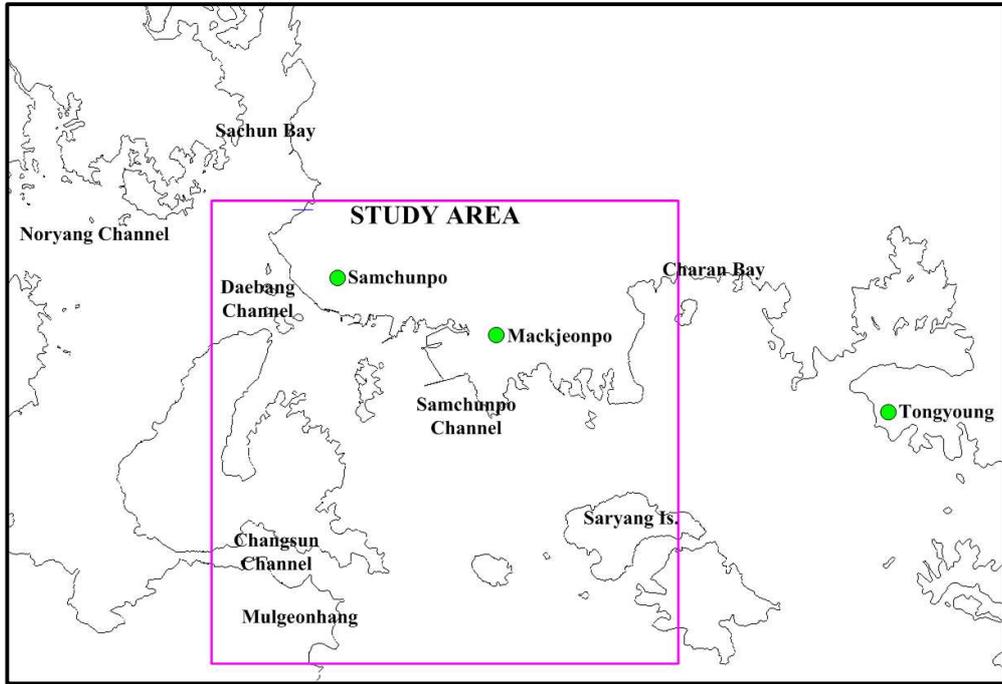


Fig. 3.4 Study area



Fig. 3.5 Plan of Samchunpo harbor

3.1.2 기상 특성

남부해안지방에 위치하여 온대성 기후에 속하고 대한난류와 북적해류의 영향을 받는 해양성 기후로서 대체로 춘하추동 사계절의 구분과 변화가 뚜렷하고 하계에는 고온 다습하여 강우량이 많다.

사천시 측후소의 부재로 통영 측우소에서 관측된 22년간의 기상기록 통계치(1979~2000년)에 의하면 살펴보면 강풍방향은 남풍계로 계절별로는 추계에 심하며 월별 최대풍속은 30m/sec(풍향은 SSW)이며 월별 순간최대풍속은 46.6m/sec(풍향은 SE)를 나타내고 있다.

Table 3.2 Characteristic of winds at Tongyoung

구분 / 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	전년
최대풍속 (m/sec)	18.3	21	20.7	30	20	19	26.7	23.7	18.3	22.3	19.2	22	30
	SW	S	S	SSW	SSE	SSW	SSW	S	WSW	SSE	WNW	SW	S
평균풍속 (m/sec)	2.6	2.7	2.7	2.8	2.5	2.2	2.8	2.5	2.2	2.1	2.3	2.4	2.5

(1979 ~ 2000년) : 통영 [기상연보]

3.1.3 파랑 특성

삼천포 신항 및 신항항은 북쪽의 육지와 창선도, 신수도, 상도, 하도, 수우도 등으로 둘러싸여 있어서 동계의 북서계절풍에 의한 영향은 매우 적으며, 하절기 태풍에 의해 형성된 심해파랑이 창선도와 상도 사이를 지나 삼천포 수도를 따라 진행하여 삼천포 신항과 신항항에 영향을 미친다. 과업 대상지역에 적용할 수 있는 심해설계파랑을 추정하기 위해 인근해역에서 수행된 기존의 과업과 “해역별(동해, 남해) 심해파 추정보고서에 수록된 추정치들과 “장기파랑 산출 자료집에 수록된 자료를 이용할 수 있다. 장기파랑 산출 자료집과 해상파랑 관측 및 조사 보고서에서는 Table 3.2와 같이 우리나라 해역일대를 격자화하여 파랑을 추산하였으며, 본 연구의 심해파 위치와 일치하는 43번 격자에서의 파랑추산자료를 정리하였다.

Table 3.3은 주기, 파고 계급별 발생빈도를 나타내었으며 Table 3.4는 년별 방향별 최대유의파를 나타내었다. 본 연구의 대상영역에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 S계열 및 SSE의 파랑 중에서 S방향의 파가 현저히 큰 값을 나타내고 있다.

심해설계파랑은 최근의 태풍 MAEMI의 내습으로 인한 설계파랑의 증가를 고려하여 S파향, 파고 9.38m, 주기는 14.43초, SSE파향, 파고 13.44m, 주기는 16.79초로 결정하였다.

Table 3.3 Stations for long term wave predictions(after KORDI, 2006)

번호	Station#	위도, 경도	번호	Station#	위도, 경도
40	3038	34.3, 127.4	45	3537	34.8, 128.8
41	3138	34.3, 127.7	46	3637	34.8, 129.1
42	3238	34.4, 128.0	47	3737	34.9, 129.4
43	3338	34.4, 128.3	48	3836	35.1, 129.6
44	3438	34.5, 128.6	49	3935	35.4, 129.9

Table 3.3 Appearance frequency of wave heights and periods.

H(m) \ T(s)	~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~	Total	(%)
0.0-0.5	2869	96	285	201	98	116	51	11	3	1	3731	25.8
0.5-1.0	6038	282	242	325	149	220	77	7	1	3	7344	50.9
1.0-1.5	647	1291	95	141	143	155	134	9	5	4	2624	18.2
1.5-2.0	10	143	171	42	47	64	54	11	1	0	543	3.8
2.0-2.5	0	4	16	59	22	26	9	8	1	0	145	1
2.5-3.0	0	0	0	15	19	2	5	0	0	2	43	0.3
3.0-3.5	0	0	0	0	3	2	0	0	0	2	7	0
3.5-4.0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	3	0
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	9564	1816	809	783	481	587	330	46	11	13	14440	
Prop.(%)	66.2	12.6	5.6	5.4	3.3	4.1	2.3	0.3	0.1	0.1		

Table 3.4 Annual maximum value of significant wave height in terms of direction

Year	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Max
1979	1	2.3	1.7	2.5	2.3	1.8	2.6	3.7	6.6	3.2	2.6	4.7	2.5	1.4	1.4	1.2	6.6
1980	1.8	1.9	2.4	2	2	1.5	1.6	3.5	3.8	3.3	2.4	2.4	2.1	2.1	1.7	1.7	3.8
1981	1.2	1	1.6	2	2.5	2.1	2.4	5.1	5.3	6	2.4	1.9	1.7	1.9	1.5	1.3	6
1982	1.3	1.5	2.5	2.2	2.7	1.7	2.9	3.7	3.5	2.9	2.2	3	2.1	1.5	1.3	1.3	3.7
1983	1.7	1.6	1.7	3.1	3.1	2.1	2.2	2.8	4.1	2.8	2.5	2.1	1.8	2.1	1.4	1.2	4.1
1984	1.3	1.4	1.8	2.3	3.9	3.9	1.6	3.1	3.9	3.2	1.9	1.7	1.6	2	1.4	1.3	3.9
1985	1.2	2.5	2.3	2.6	2.5	2.8	3.2	4.4	3	2.9	2.3	1.9	1.7	1.8	1.5	1.2	4.4
1986	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	2.5	3.4	4.4	3	2.9	2.3	1.9	1.7	1.8	1.5	1.2	4.4
1987	1.1	1.8	2.5	3	3.6	3.2	3.9	2.7	5.1	5.5	4.8	3.2	2	1.6	1.7	1.4	5.5
1988	1.1	1.5	2.3	2.8	3	2.4	2.6	3	3.5	2.5	3.2	2.3	2.1	1.8	1.5	1.3	3.5
1989	1.2	1.8	1.9	2.4	3.9	1.8	2	2.7	4.4	3.2	2.2	2.3	1.6	1.4	1.4	1.3	4.4
1990	1.7	2.1	2.2	2.9	2.7	2.3	2.8	3.2	4.2	3.4	2.3	2.7	2.1	1.8	1.4	1.6	4.2
1991	1.3	1.8	2.4	2.7	2.6	4.5	2.1	2.7	4.4	3.4	2.2	2.6	1.3	1.7	1.6	1.6	4.5
1992	1.7	2.2	2.1	2.7	2.6	1.8	1.3	3.4	5.6	3.4	1.9	2.7	2.1	1.8	1.4	1.2	5.6
1993	1	1.4	2.2	3.3	2.3	1.6	1.8	3.5	2.4	3.5	3.4	4.6	2.7	1.7	1.4	1.3	4.6
1994	1.4	2.5	2.4	3.2	3.5	2.7	3.1	4.2	4	3	2.1	3.6	1.7	1.6	1.5	1.3	4.2
1995	0.9	1.2	2.3	2.6	2.3	1.5	3.1	3	3.8	3.7	3.3	2.3	2.2	1.7	1.5	1	3.8
1996	1	1.3	1.6	2.3	2.7	1.8	2.3	4	3.1	3.1	2.7	2.8	2.1	1.8	1.6	1.4	4
1997	1.6	1.1	2.9	3.1	3.3	2.4	2.7	3.8	4.7	3.5	2.6	2.3	1.7	1.6	1.3	1.2	4.7
1998	1.5	1.1	1.8	3.5	3.7	3.2	3.7	2.8	4.9	4.1	2.6	2.3	1.6	1.4	1.3	1.2	4.9
Max	1.8	2.5	2.9	3.5	3.9	4.5	3.9	5.1	9.2	6	4.8	4.7	2.7	2.1	1.8	1.7	9.2

3.2 심해역 파랑해석

광역에 사용되는 모델의 기본 방정식인 정상상태 에너지 스펙트럼 방정식은 성분파의 에너지 스펙트럼이 시·공간적으로 보존된다고 가정하고 수심변화에 따른 천수변형, 굴절, 쇄파 등의 현상을 고려하여 심해로부터 천해로의 파고변화를 계산하는 방법이다. 본 연구에 사용된 광역, 중간역, 세부역모델의 계산영역은 Fig. 3.3과 같으며 심해역의 수심은 Fig. 3.4와 같고 격자망은 Fig. 3.5와 같다. 파랑 전파가 용이하도록 격자간격은 20m 등간격으로 구성하였으며 총격자수는 940×1,000로 940,000개의 셀로 구성되었다. 기준해면은 약 최고고조위 Approx. H.H.W.(DL+3.296m)로 보정하였다.

광역모형의 계산영역은 대상해역에서 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 S방향 과 SSE방향의 심해파랑을 고려하여 구성하였으며, 심해에서 발달된 파랑을 효과적으로 모의 할 수 있도록 모형의 범위는 18.8km×20km의 넓은 해역으로 산정하였다. 또한 월별 최고 풍속인 SSW방향의 30m/sec의 바람을 고려하여 Table 3.5에 나타나 있는 것과 같이 총 4개의 Case를 선정하여 수치모의를 하였다. 외해수심은 심해조건은 만족하지 못하지만, 수심의 영향으로 인한 파고의 변화에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. Fig. 3.6은 모델에 적용한 입력파랑 스펙트럼이다.

Table 3.6 Assumption of shallow water wave height summary

항목	내용				
적용수치모형	steady-state spectrum wave model (regular wave)				
격자망 수립	계산 영역 : 18.8 km×20.0 km 격자 간격 : 20m 등방격자 격자 수 : 940×1,000 = 940,000				
입사파	파고(m)	주기(sec)	파향	비고	
Case1	9.38	14.43	S	-	
Case2	13.44	16.79	SSE	-	
Case3	9.38	14.43	S	wind speed=30m/sec	
Case4	13.44	16.79	SSE	wind speed=30m/sec	

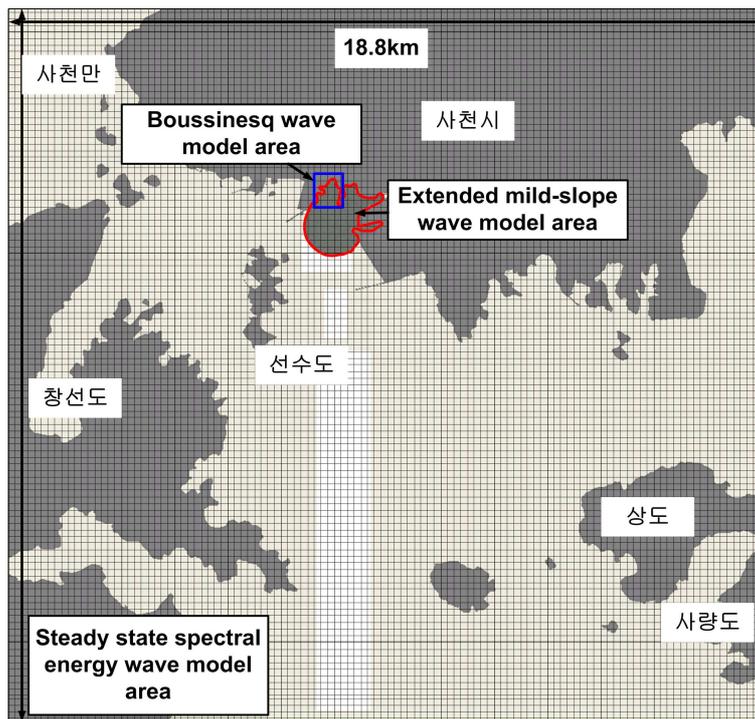


Fig. 3.6 Location of Sinhyang Harbor, Sachun Bay, Korea and limit of open boundaries for model input

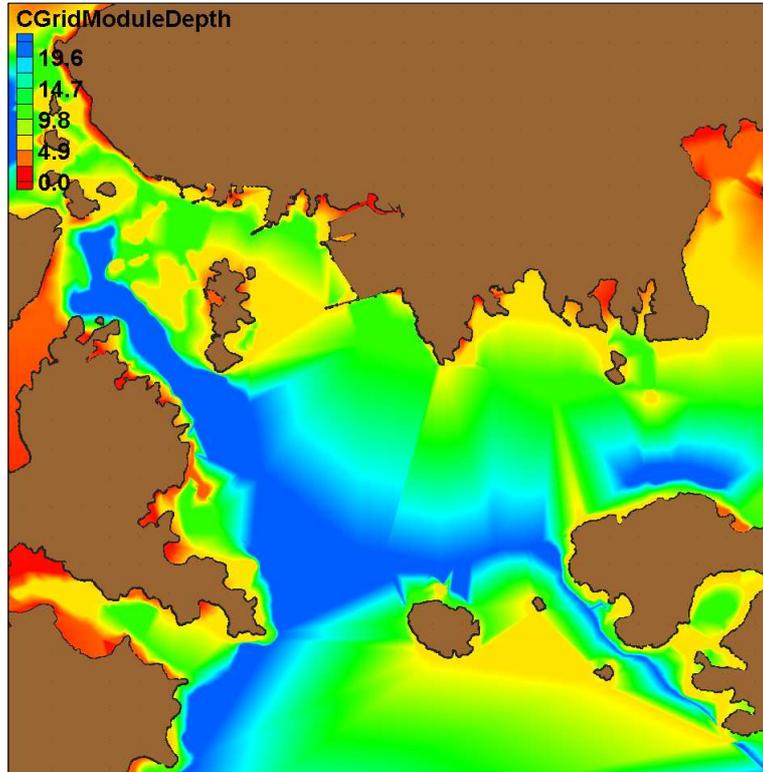


Fig. 3.7 Water depth of steady state spectral energy wave model

심해에서, 스펙트럼 파랑모델에서는 Hasselmann et al.(1973)이 제안한 총 에너지 성장률을 적용한다. 스펙트럼에 대한 에너지 증가는 격자 셀을 가로질러 이동하는 파에 대한 등적 시간에 의해 증가하는 에너지 플럭스로 계산한다.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\sigma C_g \cos \theta_m} \quad (3.1)$$

여기서, Δt = 등가 이동 시간

Δx = 격자 간격

σ = 풍파에 대해 0.9와 동일한 계수

$\overline{C_g}$ = 스펙트럼의 평균 군속도

α_m = 격자에 대한 평균 파향

스펙트럼 파랑모델은 반평면 모델이기 때문에, 해안을 향해(+x방향) 부는 바람만 포함한다. 바다로 부는 바람과 바다로 이동하는 파의 성장에 의한 파의 감소는 무시한다.

에너지는 바람으로부터 파로 공급된다. 그것은 비선형파의 상호 간섭에 의해 재분배된다. 스펙트럼 파랑 모델에서는, 스펙트럼 최고점의 주파수는 취송 거리나 등가의 에너지 전달시간과 함께 증가한다. 다음은 f_p 의 변화하는 비율에 대한 식이다.

$$(f_p)_{i+1} = \left[(f_p)_i^{7/3} \frac{-9}{5} \zeta \left(\frac{u_*}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right]^{-3/7} \quad (3.2)$$

여기서, 아래첨자 i 와 $i+1$ 은 모델의 격자 열 색인이고 ζ 는 무차원 상수이다(Resio and Perrie, 1989). 스펙트럼의 단일 상사 형상을 유지한다는 의미의 스펙트럼(최고 주파수 보다 작은 주파수) 전면에서 주파수가 스펙트럼에 의해 얻어진 에너지를 설명한다.

활발히 발달되는 파랑장에서 가장 현저한 파랑에너지는 고주파수에서 에너지 이동과 쇄파(백파)와 난류/점성 효과에 의해 소산된다. 이것은 바람 입력 때문에 파랑장에 유입되는 에너지와 고주파수에서 비선형 플럭스 때문에 파랑장에 잔여 에너지 사이의 동적 평형을 나타낸다(Resio, 1987, 1988). 스펙트럼 파랑모델에서는 다음과 같이 고주파에서 에너지 플럭스를 나타낸다.

$$\Gamma_E = \frac{\varepsilon g^{1/2} E^3 k_p^{9/2}}{\tanh^{3/4}(k_p d)} \quad (3.3)$$

여기서, Γ_E = 에너지 플럭스

ε = 수정 계수 (=30)

E_{tot} = 스펙트럼 총 에너지

k_p = 최고 스펙트럼에서의 파수

스펙트럼의 풍파 부분 0.9와 너울 부분 1.0으로 되는 β 와 함께 식(3.1)에서 정의한 파랑의 격자 셀을 통과할 때의 등가시간(Δt)에 의한 에너지 플럭스의 증가로 스펙트럼 에너지 손실을 계산하며 바람의 영향을 포함할 때 적용한다.

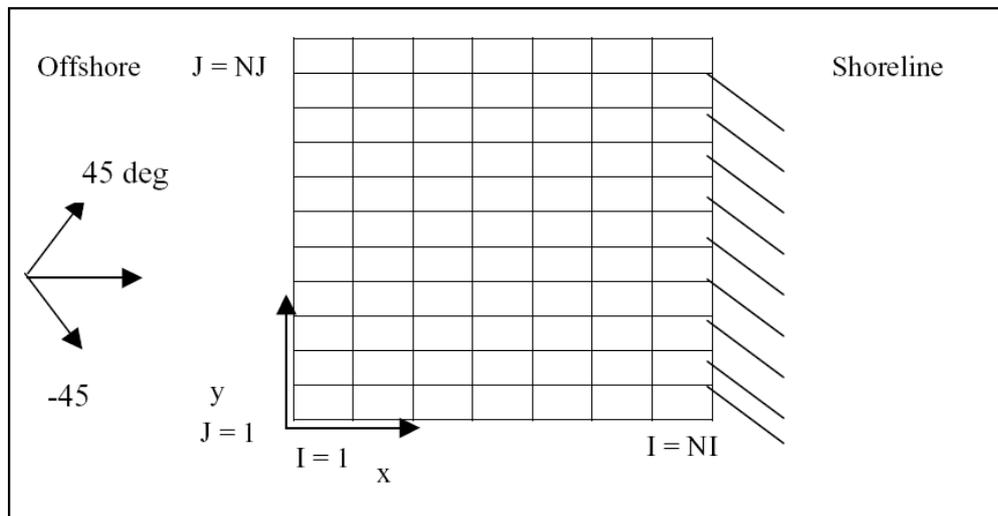


Fig. 3.8 Schematic of deep water area grid

본 모델은 직교 격자를 사용하는 유한차분모델이며 격자 셀은 사각형이다($\Delta x = \Delta y$). 가변격자 분석은 nesting 모델의 실행으로 구한다. 이것은 조잡한 분석과 근해에서의 스펙트럼의 저장으로 모델의 실행에 의해 성취된다. 이 근해의 스펙트럼은 입자분석의 다른 격자의 경계조건에 사용될 수 있다. 구성된 격자는 Fig. 3.5와 같다. 본 모델은 x축이 해안에 직교하고 y축이 해안선과 나란한 국지 좌표계에서 사용된다. x축의 방위는 (± 87.5 deg) 모델에서 나와 있는 바와 같이 half plan이다. y축은 대체로 바닥 등심선과 한 줄이 된다. 파랑의 각도는 x 축으로부터 반시계방향에 맞는 수학적 감각으로 정의된다. 모델의 바깥쪽의 경계는 양수(+, 바다)이나 음수(-, 육지)와 같이 바다 격자와 육지 격자를 정의할 수 있다. 바다 대신 육지를 정의한다면 다른 결과를 가져올 수 있다는 것을 명심해야할 것이다. 육지 경계는 육지 방향으로부터 전파하는 것을 막기 때문에 파랑의 성장을 감소시킨다. 만약 경계가 바다로 정의되었다면 경계의 zero-gradient type은 허용된 에너지, 이웃된 셀과의 연속성, 바깥쪽의 경계를 따라 영역 밖이나 안으로 전파하는 것을 적용한다.

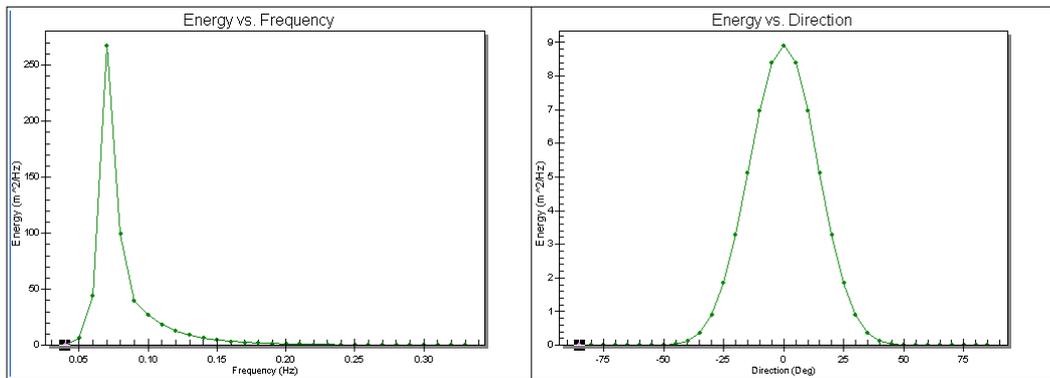


Fig. 3.9 Input spectrum energy vs. frequency and energy vs. direction of model

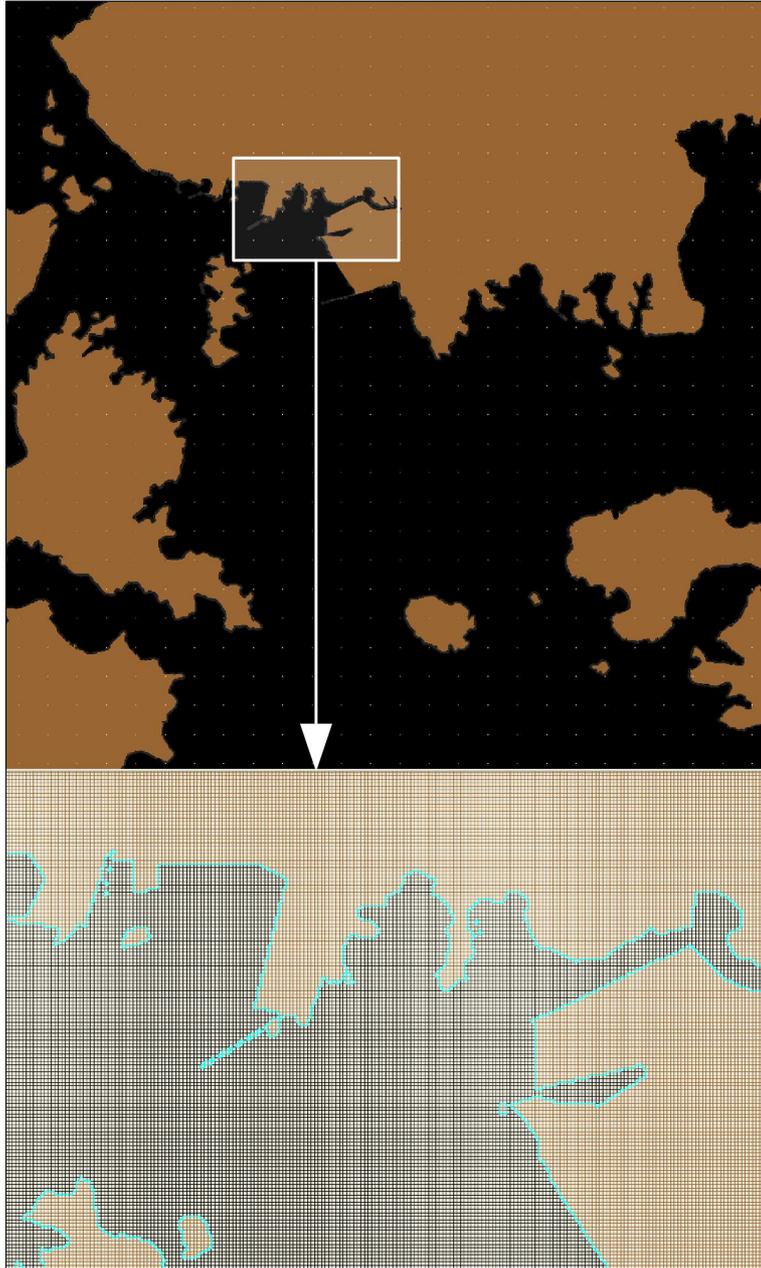


Fig. 3.10 Grid of steady state spectral energy wave model

3.3 중간역 파랑 해석

천수효과(Shoaling), 회절 및 굴절과 반사 등의 물리현상을 비롯해 해저마찰, 경계면흡수, 반사파의 산란(Scattering) 등을 고려하는 확장 완경사 방정식 파랑모형을 사용하여 세역 입사조건을 산출하고 중간역 파랑변형에 대해 수치시뮬레이션을 실시했다. 중간역으로 시뮬레이션을 하지만 반사, 굴절, 회절, 해저마찰 등 세역에도 적용할 수 있는 모델로서 Boussinesq 파랑모델의 결과와 비교 분석하여 모델의 적합성을 비교하고자 한다.

먼저 확장완경사 파랑모델의 영역은 신수도 상부 지역으로부터 신항항이 포함된 지역으로 Table 3.6에 정리한 바와 같이 3.3km × 2.0km의 영역으로 설정하였으며, 5m~10m의 가변요소로 29,967개의 절점과 총 58,484개의 요소로 구성하였다. 입사조건은 정상상태 에너지 스펙트럼 파랑 모델에서 바람을 고려한 실험의 결과값을 사용하였다. Fig. 3.8은 대상 영역의 수심도이다.

Table 3.7 Incident wave condition of extended mild-slope wave model

Menu	contents
Calculation model	extended mild-slope wave model (irregular wave)
Element	Calculation area : 3.3 km×2.0 km element interval : 5m ~ 10m node number : 29,967 element number : 58,484
Incident wave condition	H=2.698m, T=14.43sec, wave direction=S12°E
	H=3.898m, T=16.79sec, wave direction=S15°E

반사율의 적용은 Table 3.7로 정리된 항만설계기준 및 Goda 이론에 입각하여 직립구조물 0.95, 일반해안 0.20, TTP나 사석은 0.50으로 적용하였다.

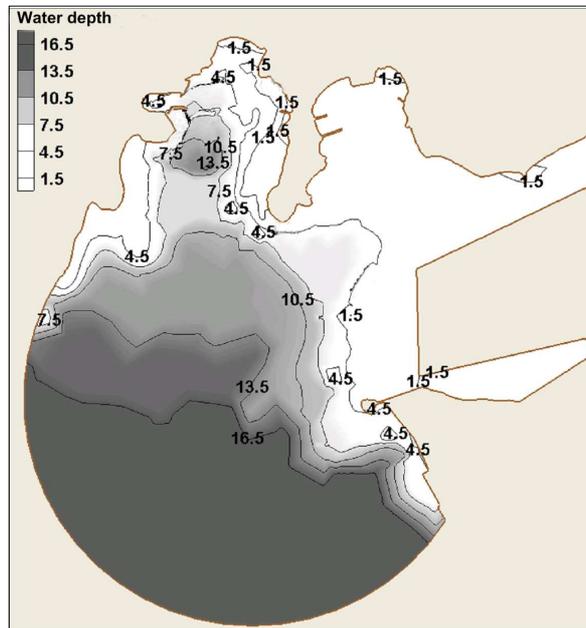


Fig. 3.11 Water depth of Extended mild-slope wave model area

Table 3.8 Applied reflection coefficient

formation	Reflection coefficient
Wall(Crest on SWL)	0.7 ~ 1.0
Wall(Crest under SWL)	0.5 ~ 0.7
Rubble(1:2~3 slope)	0.3 ~ 0.6
heteromorphy bloke	0.3 ~ 0.5
Natural coastal	0.05 ~ 0.2

3.4 해안 및 항만역 파랑해석

3.4.1 모델의 검증

경계적분 방정식(BIE)을 이용하여 입사주기 $T=9.97s$, 항내 수심 7m, 입사각 90° 의 조건에서 완전 반사를 갖는 항내에서 항내 파고분포 조사를 한 김 등 (2007)의 연구와의 비교 검토를 통해 본 연구에 사용된 모델의 신뢰성을 확인하고자 한다. 齋藤 등(1993)은 Fig. 3.9에서 보는바와 같이 폭 24m, 길이 33m, 깊이 1.5m의 평면 수조에서 수리모형 실험을 하였다. 수조의 한 변에는 폭 $50cm \times 48$ 개의 피스톤 타입 비연속형 Serpent형 조파장치가 설치되어 있고, 다른 3면은 소파재로 덮여져 있다. 수치모형실험은 일정수심의 계산조건을 근거로 실시하였다. 항만 모형의 조사선 A-A', B-B', X-X', Y-Y' 상에서의 실험 결과를 Fig. 3.11~Fig. 3.14에 정리하였다. 실험치와 경계적분방정식을 사용한 수치실험 및 본 연구에서 사용하는 Boussinesq 파랑모형을 사용한 수치 실험 결과를 비교하였다.

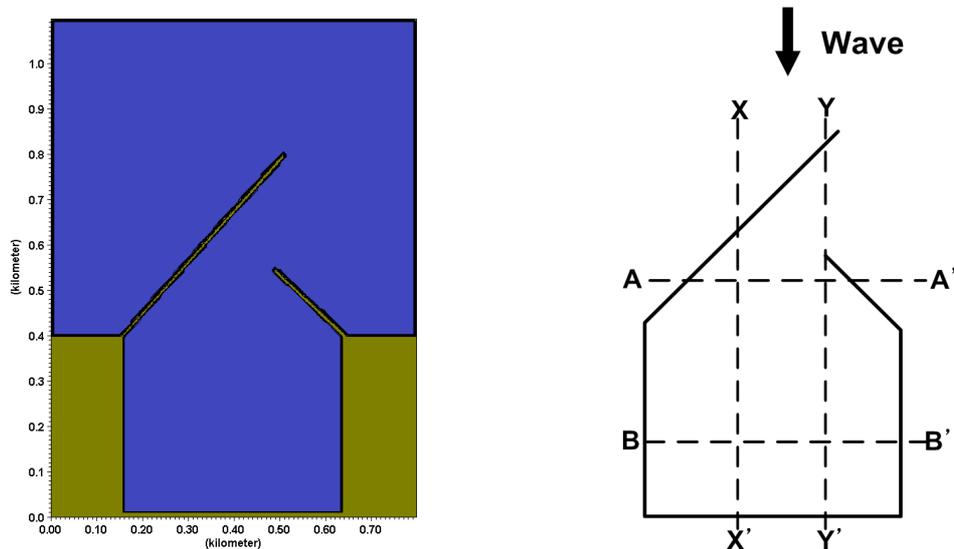


Fig. 3.12 Model domain and selected cross sections for comparison

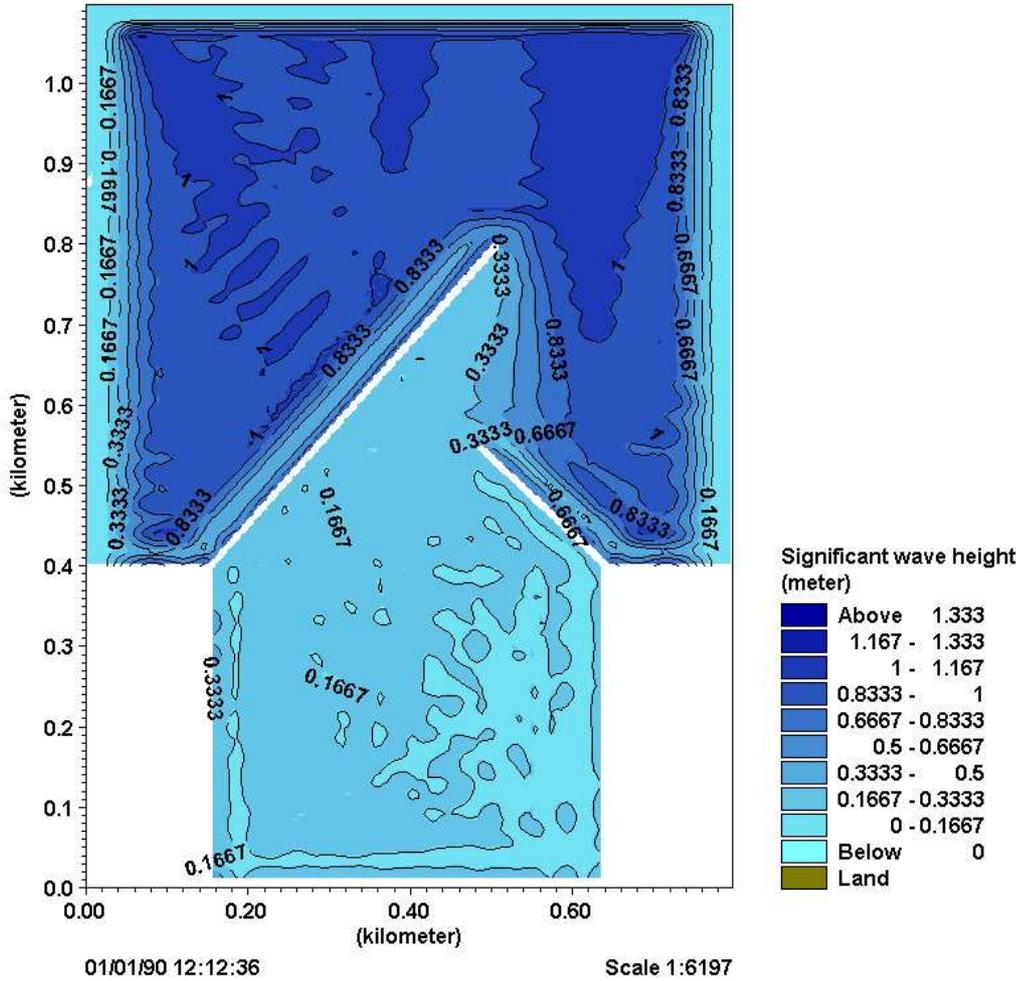


Fig. 3.13 Calculated significant wave height in a model domain.

입사파고 2m, 주기 9.97sec, 입사파향 90°로 Boussinesq 파랑모형 실험을 수행했다. 실험결과 유의파고도는 Fig. 3.10과 같으며 齊藤 등의 실험치 및 김 등의 수치모형 실험 결과와 비교하였다.

실험 결과 A-A' 단면의 결과를 제외한 영역에서 대체적으로 김 등이 수행한 경계적분 방정식을 이용한 수치실험에 비해 실험치와 비슷한 형상을 나타

내었다. A-A' 단면은 좌·우측 경계에서 Boussinesq 파랑모델의 결과가 낮고 중간 부분에서는 비슷한 결과를 나타내었고, B-B' 단면에서는 실험치에 비해서 약간 낮지만 경계적분 방정식에 비해 실험치에 경계적분 방정식 모델에 비해 비교적 정확한 파고분포를 보였다. 종단을 가로지르는 X-X' 단면에서는 경계적분 방정식이 상당히 높은 값을 가진 반면 Boussinesq 파랑모형의 결과는 대체적으로 실험치와 일치하는 것으로 보인다. 마지막으로 Y-Y' 단면은 Boussinesq 파랑모형의 결과가 실험치와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

실험의 결과 Boussinesq 파랑모형의 회절 및 파랑전파가 실험치와 매우 흡사하게 나타난 것으로 나타났다. 세부영역에 적절한 Boussinesq 파랑모형은 본 실험에서 적용한 영역과 같은 기본적인 항만의 형상 뿐 아니라 복잡한 해안선을 가진 부분에서도 적용할 수 있도록 만들어져있으며 소규모의 어항과 같은 영역에 적용하기에 적절한 파랑 모델인 것으로 판단된다.

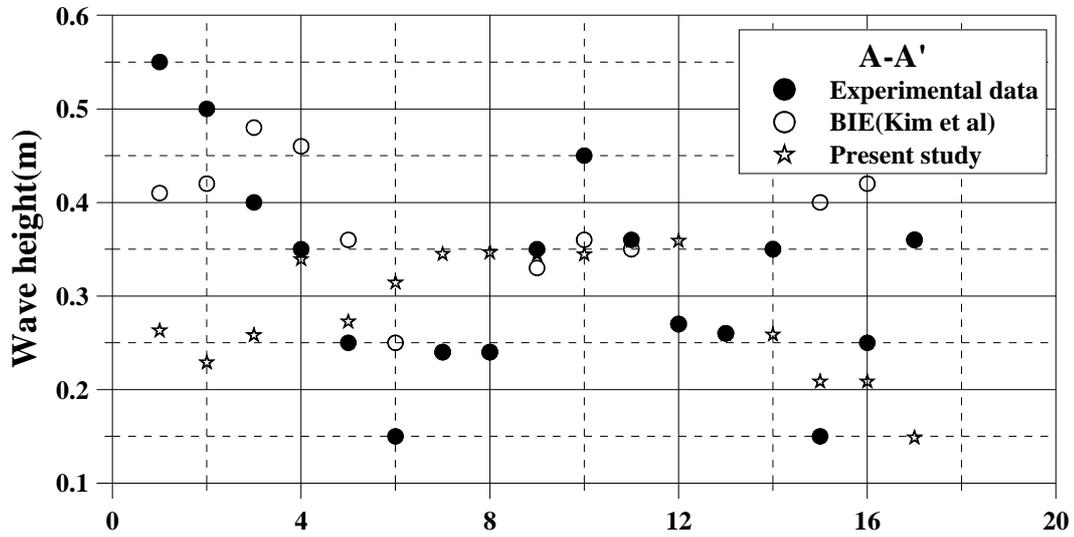


Fig. 3.14 Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(A-A')

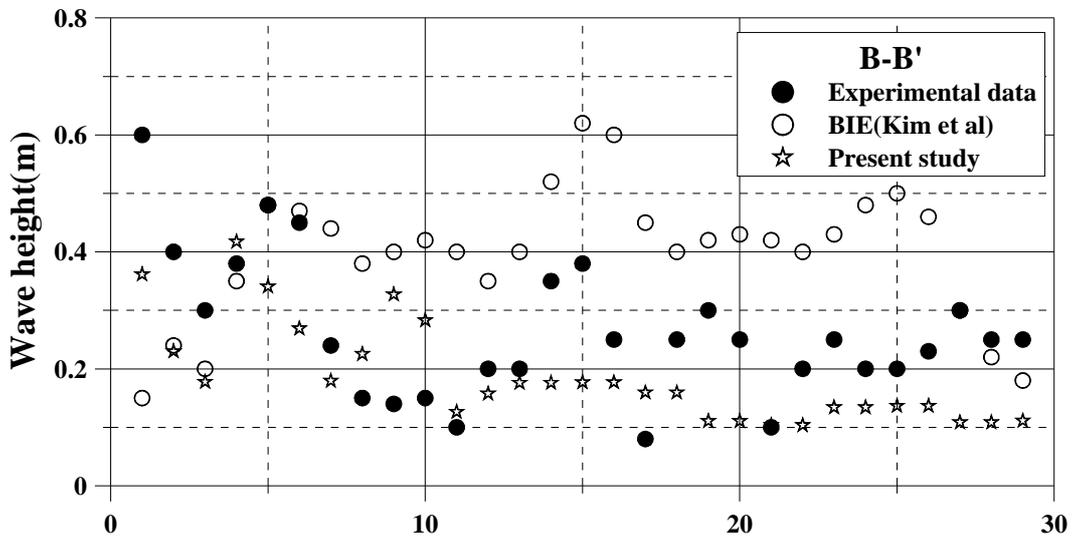


Fig. 3.15 Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(B-B')

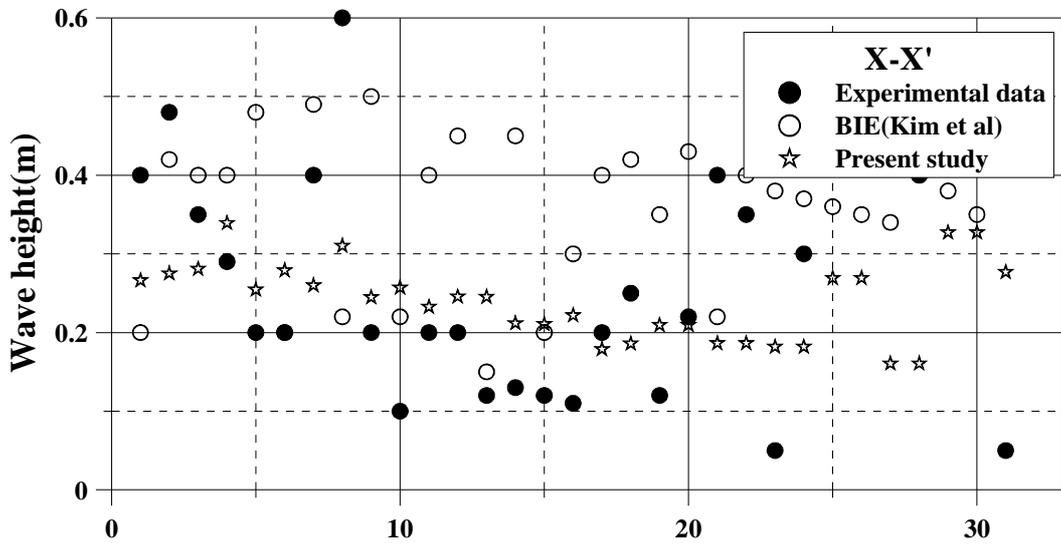


Fig. 3.16 Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(X-X')

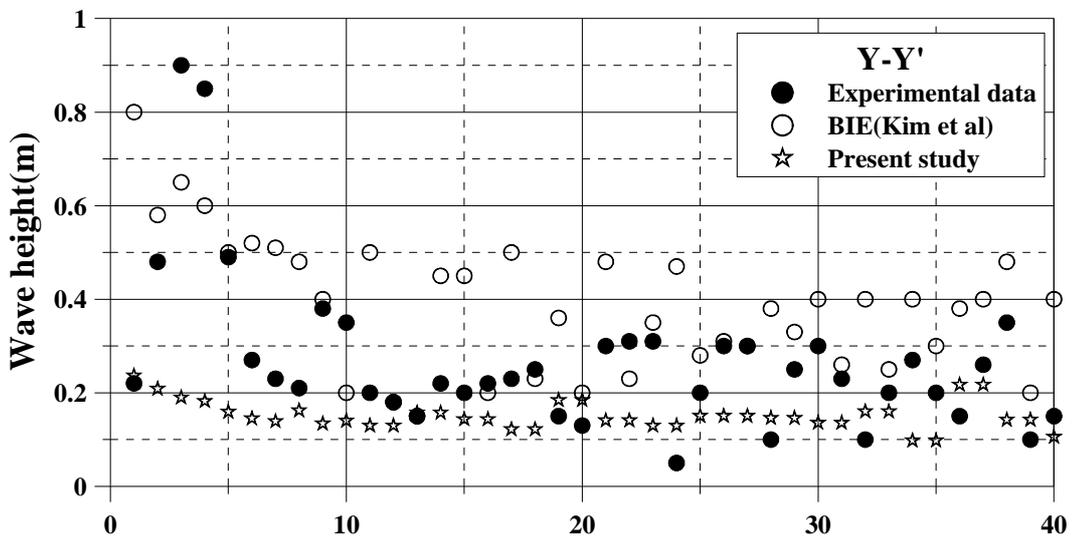


Fig. 3.17 Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary(Y-Y')

3.4.2 해안 및 항만내 모델의 구성

Boussinesq 방정식은 해양의 수심자료, 개방경계의 경계조건, 흡수경계의 해면층(sponge layer) 배열, 유공구조물의 배치 등을 입력자료로 하여 계산영역 내의 파랑에 대한 시간영역 해를 제공한다. 비선형항과 주파수 분산(frequency dispersion)을 포함하고 있다. 기본적으로 주파수 분산은 압력 분포에서의 수직가속(vertical acceleration)효과를 고려할 수 있는 흐름함수(flow equation)에서 도입된 것이다. 전형적인 Boussinesq 방정식의 적용은 수심에 따른 한계성이 있다. 파랑모델은 이런 수심의 한계성을 극복하기 위해 분산특성을 개선하여 심해(심해 파장에 따른 최대수심 비 $d/L_0 \approx 0.5$)에서 천해로 파랑이 전파되는 것을 재현할 수 있도록 보완되었다. 또한 본 모형은 연안 및 항만구조물이 설치된 지역에서 발생하는 파랑변형에 따른 대부분의 현상(복잡한 지형에서의 유한진폭파의 전파, 천수, 굴절, 회절 및 불규칙 부분반사)을 고려할 수 있다.

항내의 정온도는 선박의 정박, 화물의 선적 및 하역작업에 매우 중요하다. 또한 이러한 교란(disturbance)은 항만설계 및 구조물 위치 선정에 있어서 매우 중요한 사항이다. 따라서 본 모형은 외해에서 입사되는 파랑이 방파제 등에 의해 전달 및 변형되는 과정(천수, 굴절, 회절, 반사)을 포함하고 있으므로 항내 정온도 분석에 적합한 모델이다.

Boussinesq 파랑모형을 통해서 최종적으로 어항 내부 및 어항 전면부 및 외곽시설 등의 파랑변형을 수치모의하였다. 신항항 전면 및 내부의 파랑변형을 계산하기 위해서 Fig. 3.3에서 가장 작은 영역인 신항항이 포함된 1.0km × 1.0 km 크기의 계산영역을 설정하였고 중간역 수치시물레이션을 통해서 계산된 입사 제원을 사용하였다. 입사조건의 전체적인 정리는 Table 3.8로 나타내었다. S15°E 파향의 입사파는 파고 2.25m, 주기 16.79초를 사용하였으며, S12°E 파향의 입사파는 파고 1.67m, 주기 14.43초를 사용하여 실험하였다. 쉘

파를 적용하기 위해서는 격자간격을 2m 이내로 구성해야하기 때문에 격자 간격은 2m × 2m로 설정하였으며, 총 격자수는 500 × 500으로 250,000개의 격자로 구성되었다. Boussinesq 파랑모형의 수심도는 Fig. 3.15와 같으며 확장 환경사 방정식 파랑모형과의 비교를 위해서 같은 비교지점을 선정하였다. Fig. 3.16은 격자망을 나타내었다.

반사계수 적용은 앞서 확장 환경사 방정식 모델과 동일하게 적용하였으며 해저 마찰계수는 Chezy number를 적용하여 계산하였으며 입사파의 Spectrum은 JONSWAP Spectrum을 사용하였고 Fig. 3.17과 같다.

Table 3.9 Incident wave condition of Boussinesq wave model

menu	contents		
Calculation model	steady-state spectrum wave model (irregular wave)		
Grid	Calculation area : 1.0 km×1.0 km Grid interval : 2m×2m, Grid number : 500×500 = 250,000		
Incident wave	Wave height(m)	Wave period(sec)	Wave direction
	2.25	16.79	S15°E
	1.67	14.43	S12°E

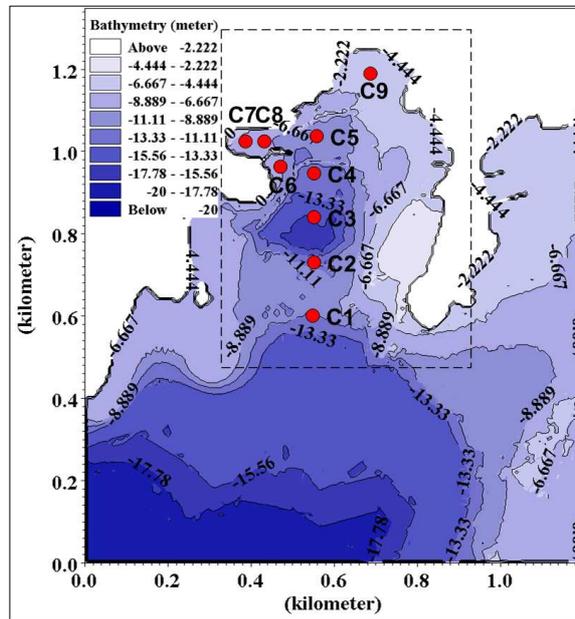


Fig. 3.18 Water depth and comparison point of Boussinesq wave model area

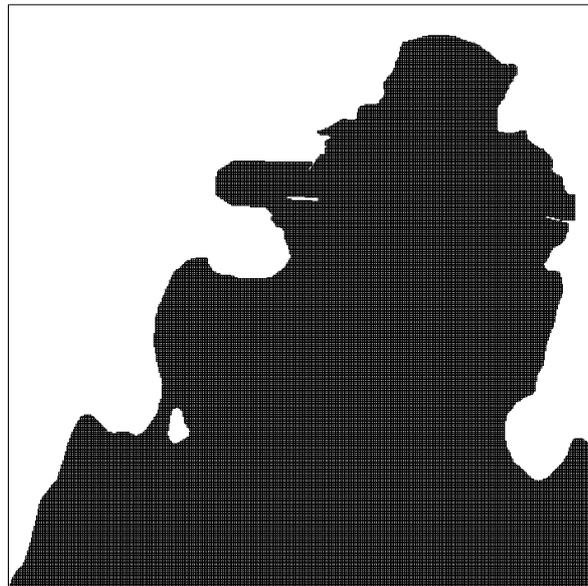


Fig. 3.19 Grid of Boussinesq wave model area

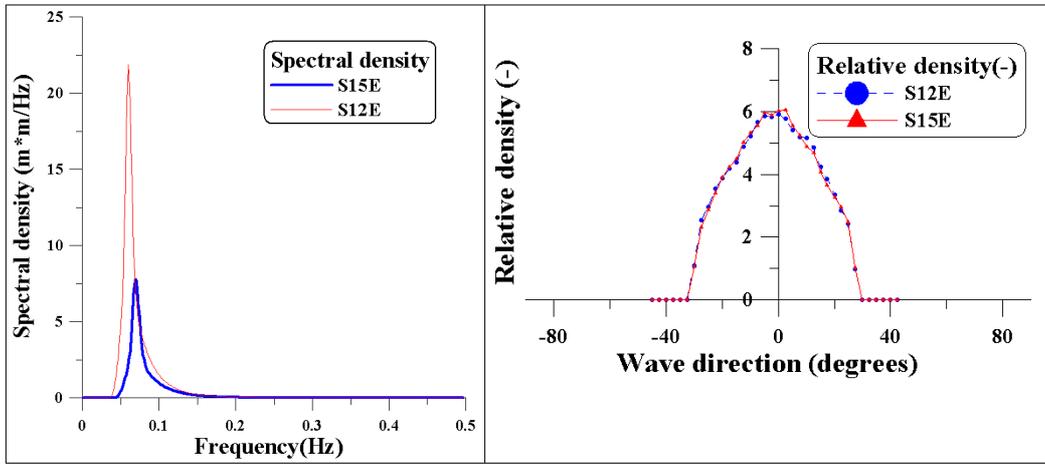


Fig. 3.20 Energy vs. frequency and direction of model

제4장 실험 결과 및 분석

4.1 심해역 파랑해석

정상상태 스펙트럼 파랑모형에 의한 심해역 파랑변형 실험 결과를 적절히 비교를 위하여 Fig. 4.1에서 도시한바와 같이 파랑의 진행방향과 일치하도록 A1~A11 지점을 선정하였고 B1~B5는 중간역 파랑실험을 위해서 선정하였다.

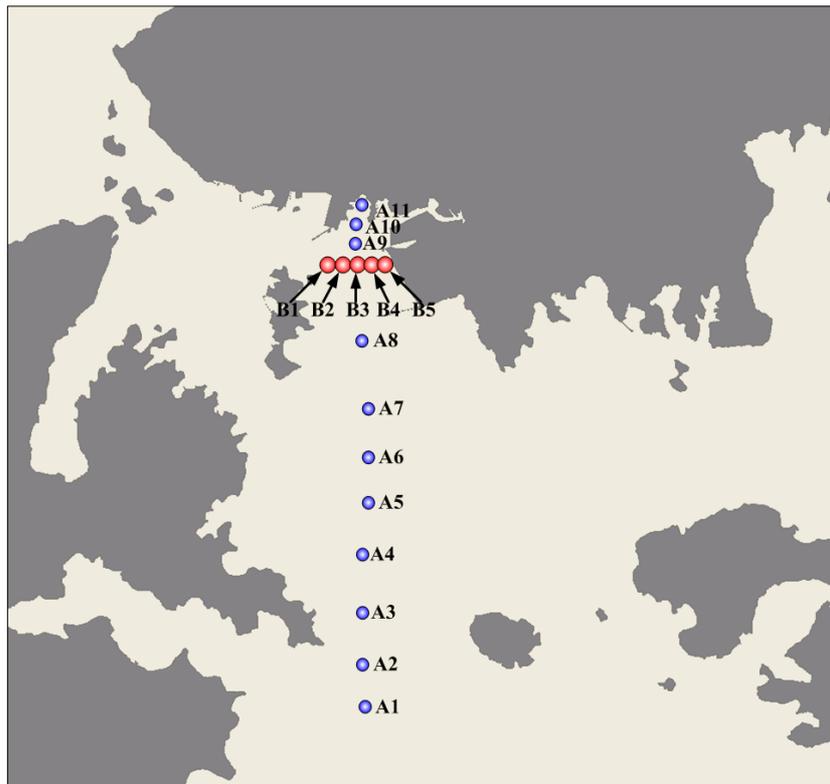


Fig. 4.22 Comparison point of steady state spectral energy wave model

파랑변형 실험 결과 파고비도와 파고벡터도를 Fig. 4.2~Fig. 4.5에 도시하였으며 Fig. 4.6~Fig. 4.7과 Table 4.1에서 각 비교지점의 결과를 그래프로 나타내었다. 4개의 Case를 살펴보면 전체적으로 수우도를 지나면서 수심이 급격히 증가함에 따라 파고의 감소가 눈에 띄게 나타나는 것을 볼 수 있으며 S파향에 비해서 SSE 파향의 파랑 전파가 더욱 두드러지는 것을 볼 수 있으며 A9 지점에서는 천수 효과에 의해서 파고가 증가하는 경향을 보이고 있다.

A1~A3에서는 S파향의 파고 결과가 SSE파향의 파고 결과에 비해 높아졌다가 A4지점 이후로 SSE파향의 파랑이 역전하는 현상을 볼 수 있는데 그 이유는 S파향의 파랑은 수우도의 영향으로 신항항으로 들어가는 파랑전달이 상당부분 감소하고 SSE 파향의 파랑은 수우도 오른편으로 들어가는 파랑이 신항항까지 전달되는데 장애물이 없기 때문인 것으로 사료된다.

중간역 파랑 모델의 입사조건을 산출하기 위한 B1~B5의 결과는 Table 4.2에서 보는 바와 같이 S파향의 결과는 파고 2.176m, 주기 14.43sec, 파향 S11°E, SSE파향의 결과는 파고 2.484m, 주기 16.79sec 파향 S16°E, 바람을 고려한 S파향의 결과는 파고 2.698m, 파향 S12°E이며 바람을 고려한 SSE파향의 결과는 파고 3.898m, 주기 16.79sec, 파향 S15°E로 산출되었다.

바람의 영향을 고려함에 따라 Case3 및 Case4의 결과값이 바람을 고려하지 않은 Case에 비해 파고가 전체적으로 1m 이상 높은 것을 볼 수 있다. 이는 사용된 파랑 모형이 천수변형 및 바람에 대한 실험에 적절하다는 것을 보여준다. 또한 파고 벡터도를 보면 파랑의 굴절 및 회절을 적절히 잘 나타내어주는 것을 볼 수 있으며 신항항 내에서는 S파향 A10에서 1.66m, A11에서 1.32m, SSE파향 A10에서 1.69m, A11에서 1.38m이며 바람을 고려한 S파향은 A10에서 2.48m, A11에서 2.07m, 바람을 고려한 SSE파향 A10에서 3.32m, A11에서 2.66m이다.

파고 벡터도에서 나타나는 특성으로는 창선도 및 상도 부근에서 파랑의 회

절이 매끄럽지 못하고 제대로 전달되지 못하는 점이 발견되었다. 정상상태 스펙트럼 에너지 방정식이 세역에서 적용되지 못하는 이유는 다음과 같은 특성을 완벽하게 재현할 수 없다는 점이다. 수심에 따른 물리현상과 짧은 계산시간은 엔지니어들에게 보다 매력적으로 생각될 수 있지만 약한 회절의 재현 등으로 인해서 세역에서의 적용이 쉽지 않기 때문에 광역을 대상으로 하는 분석에 적절하다는 것을 보여준다.

Table 4.10 Result of wave height calculation by spectral energy wave model

	S(m)	SSE(m)	windS(m)	windSSE(m)
A1	7.07	6.48	8.53	8.3
A2	6.94	6.1	8.33	7.91
A3	5.72	5.54	7.34	7.39
A4	4.12	4.76	5.83	6.68
A5	3.43	4.24	5.12	6.15
A6	3.02	3.89	4.69	5.75
A7	2.75	3.67	4.39	5.47
A8	2.48	3.27	3.01	4.73
A9	2.02	2.16	2.7	3.83
A10	1.66	1.69	2.48	3.32
A11	1.32	1.38	2.07	2.66
B1	1.39	1.36	2.23	2.84
B2	2.11	2.23	2.77	3.94
B3	2.43	2.77	2.88	4.27
B4	2.51	3.01	2.85	4.28
B5	2.44	3.05	2.76	4.16
B1 ~ B5 Average	2.176	2.484	2.698	3.898

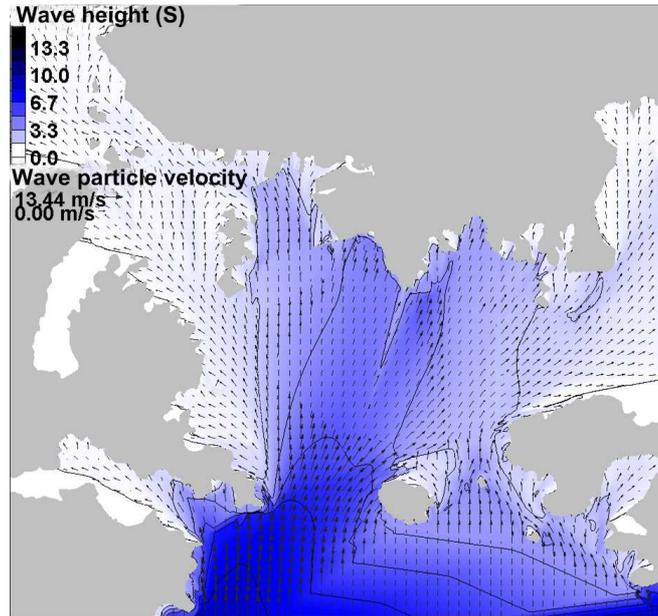


Fig. 4.23 Wave height of steady state spectral energy wave model(S direction)

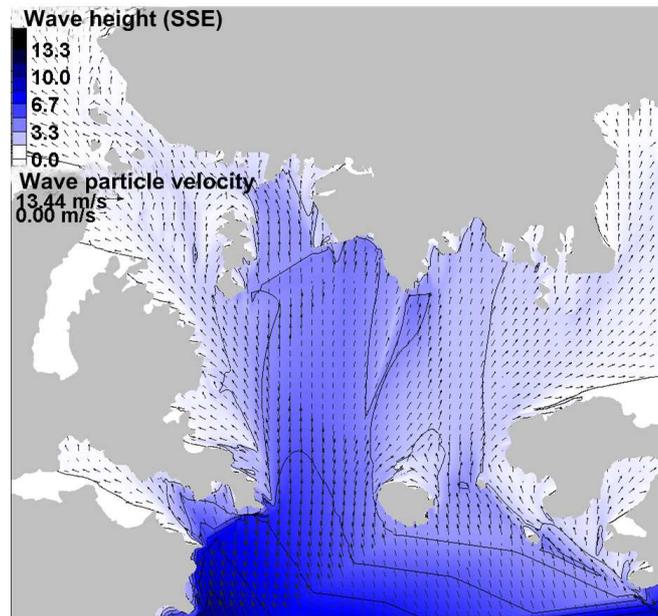


Fig. 4.24 Wave height of steady state spectral energy wave model(SSE direction)

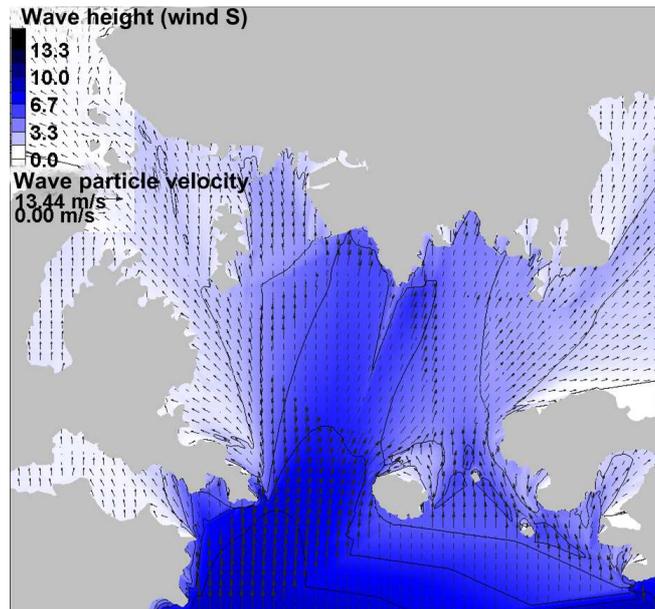


Fig. 4.25 Wave height of steady state spectral energy wave model (S + Wind SSW)

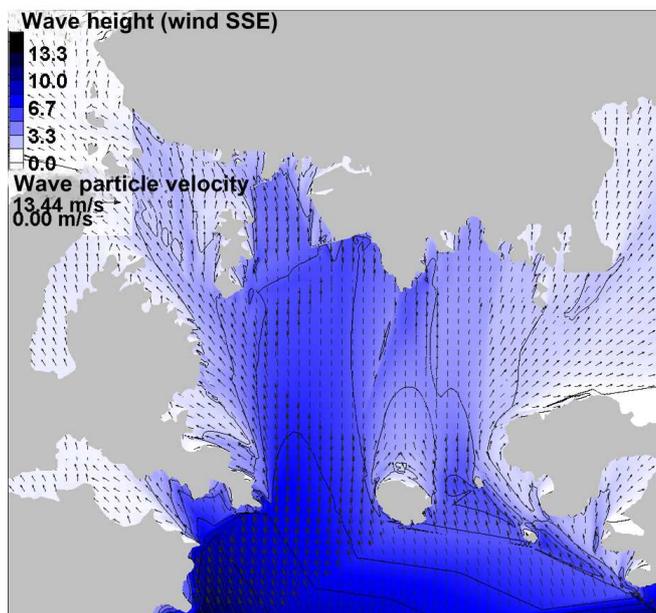


Fig. 4.26 Wave height of steady state spectral energy wave model (SSE + Wind SSW)

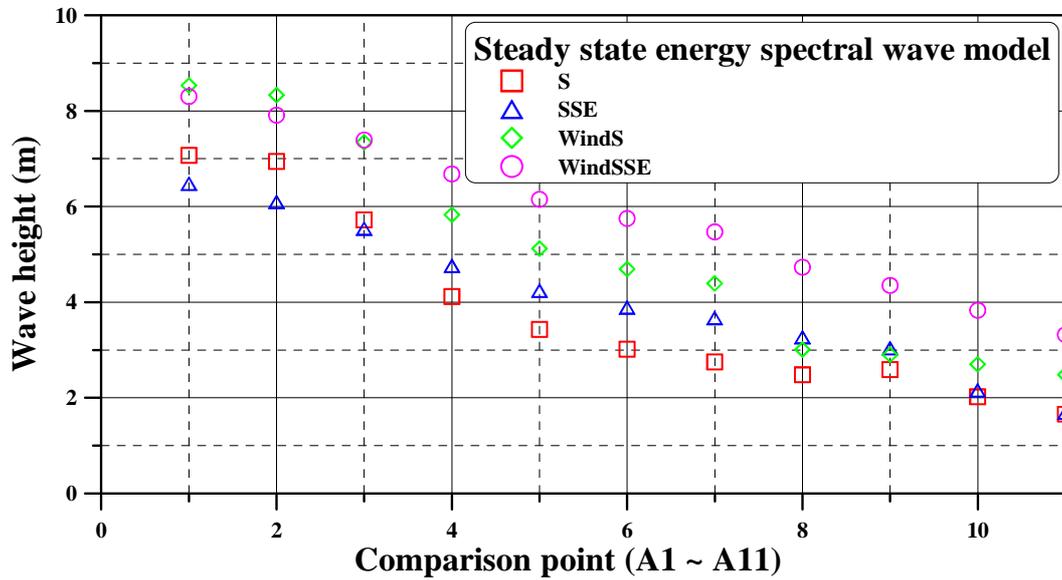


Fig. 4.27 Comparison point of wave height at steady state spectral energy wave model area (A1 ~ A11)

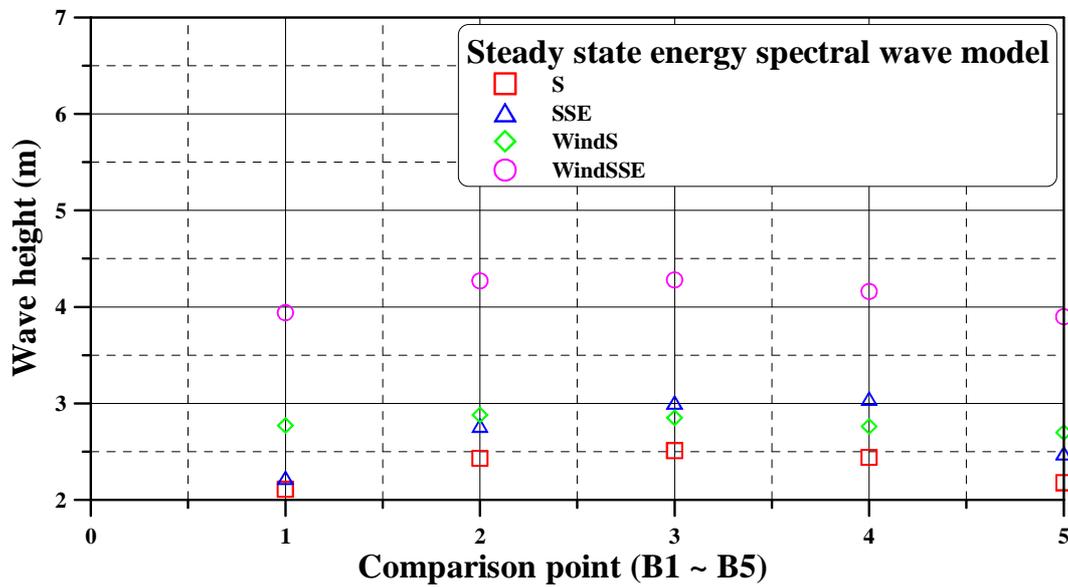


Fig. 4.28 Incident wave height point of wave height for extended mild-slope wave model area (B1 ~ B5)

Table 4.11 Result for the input of nearshore model by steady state spectrum energy wave model

Wave direction	Simulation result (Steady state spectrum energy wave model)		
	Wave height (m)	Wave period (sec)	Wave direction (°)
S	2.176	14.43	S11°E
SSE	2.484	16.79	S16°E
S+Wind(채택)	2.698	14.43	S12°E
SSE+Wind(채택)	3.898	16.79	S15°E

4.2 중간역 파랑 해석

심해역 수치실험의 결과 중 바람을 고려한 실험의 결과를 채택하여 중간역 모델의 수치실험을 수행하였다.

Fig. 4.8에 도시되어 있는 C1~C9은 파랑의 전달방향과 일치시켜 파랑의 변형 특성을 비교하였으며 D1~D6의 결과를 통해 세역 파랑모델인 Boussinesq 파랑모형의 입사조건을 산출하였다. 파고, 유속 및 방향을 나타내는 결과는 Fig. 4.9와 Fig. 4.10이며, 비교지점의 파고는 Fig. 4.11과 Fig. 4.12의 그래프로 정리하였다.

C1~C9 지점의 결과를 살펴보면 S15°E파향의 실험결과는 C1지점에서 1.36m의 파고를 나타냈고 파랑이 진행하면서 신항항 전면 해역에서 1.45m, 남방파제 전면에서는 1.07m의 파고를 나타내었다. 신항항 내 지점인 C7은 0.24m, C8은 0.5m의 파고를 나타내었다. S12°E파향의 실험결과는 C1지점에서 파고 1.04m를 나타내었고, 파랑이 진행하면서 신항항 전면 해역에서 0.64m, 남방파제 전면에서는 0.9m의 파고를 나타내었다. 신항항 내 지점인 C7은 0.19m, C8은 0.41m의 파고를 나타내었다. C6지점에서의 파랑이 C4보다 큰 이유는 남방파제 전면에서의 반사파에 의한 파고의 상승이 이루어진 것으로 사료된다. S12°E파향에서 항내 지점인 C7은 0.19m와 C8지점은 0.41m이며 S15°E파향의 결과는 C7지점에서 0.24m, C8지점에서 0.5m의 파고가 시뮬레이션 결과로 나타났다. C7지점에서는 각각 0.19m와 0.24m로 하역한계파고를 밑돌지만 C8지점에서는 0.41m와 0.5m로 하역한계파고를 크게 초과한 것으로 나타났다.

확장 환경사 파랑모형을 사용한 중간역 파랑모델은 광역 모델인 파랑모형에 비해서 지형에 대한 회절 및 물리현상을 좀 더 세밀하게 재현해준다는 것을 볼 수 있다.

복잡한 해안선을 가진 대한민국 남해안의 해안선에 파랑모형을 적용하기 위

해서는 선형파랑을 사용해서 분석하는 방법보다는 비선형적이고 불규칙적인 파랑을 적용하는 것이 보다 정확하고 만족할 만한 결과를 얻는데 도움이 될 것이다.

Table 4.12 The result of simulation by extended mild-slope wave model

	S15°E(m)	S12°E(m)
C1	1.36	1.04
C2	1.31	0.96
C3	1.35	0.85
C4	1.22	0.61
C5	1.45	0.64
C6	1.07	0.9
C7	0.24	0.19
C8	0.52	0.41
C9	0.77	0.53
Calculated model input for inner domain		
D1	3.38	2.68
D2	2.79	1.94
D3	2.43	1.79
D4	1.97	1.54
D5	1.65	1.24
D6	1.26	0.82
D1 ~ D6 Average	2.24	1.66

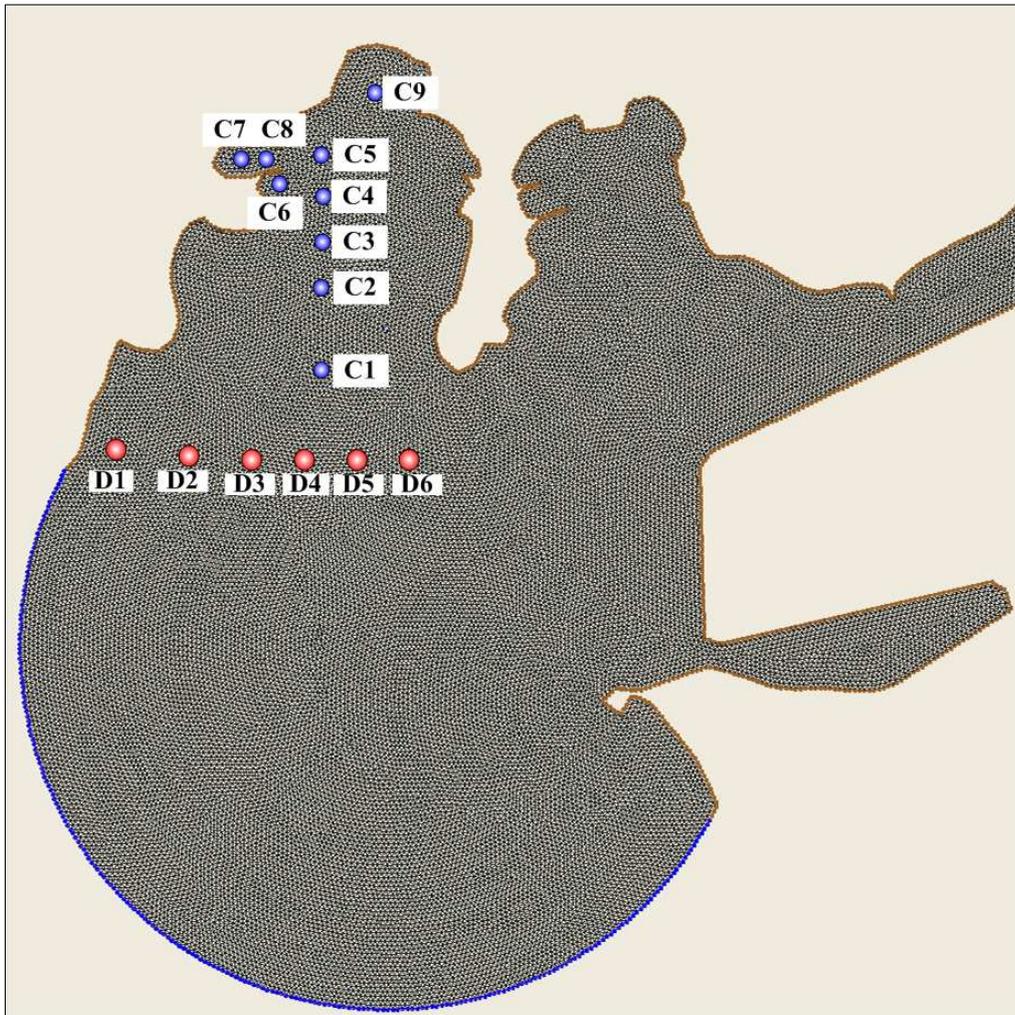


Fig. 4.29 FE mesh and comparison point of extended mild-slope wave model area

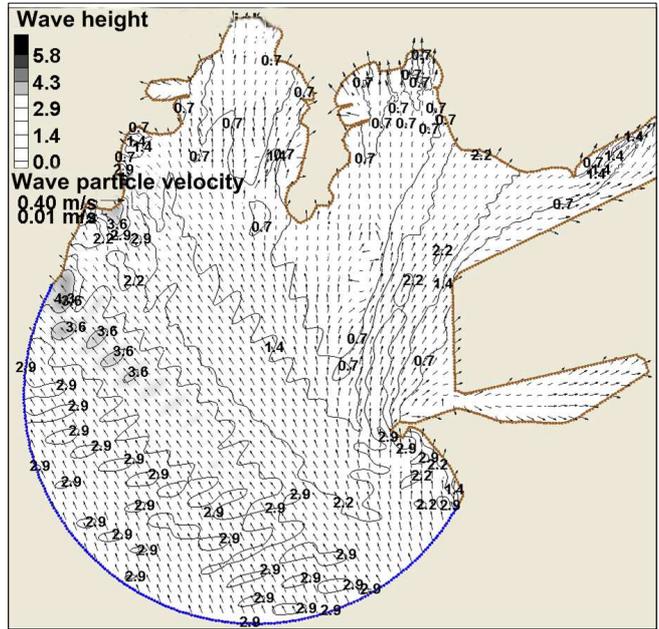


Fig. 4.30 Wave height of direction S12°E
(Linear wave)

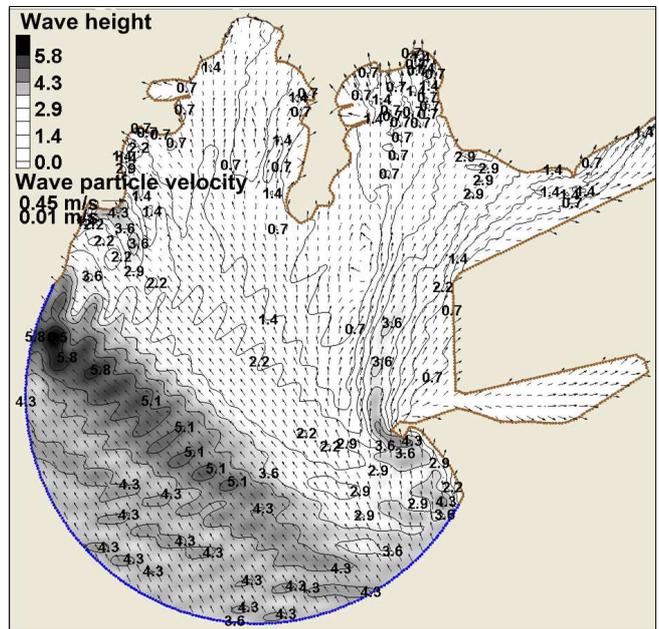


Fig. 4.31 Wave height of direction S15°E
(Linear wave)

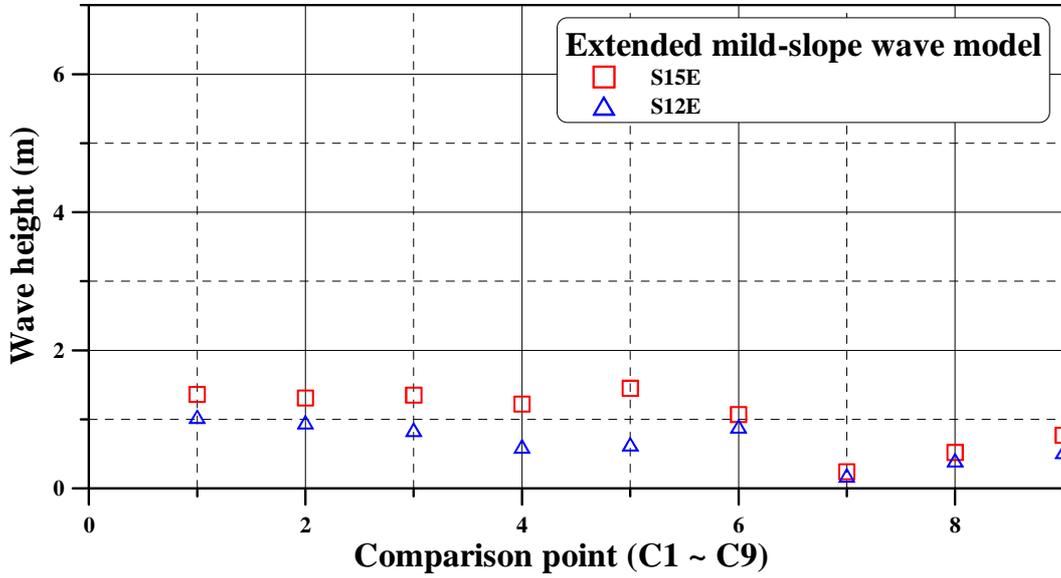


Fig. 4.32 Comparison point of wave height at extended mild-slope wave model area (C1 ~ C9)

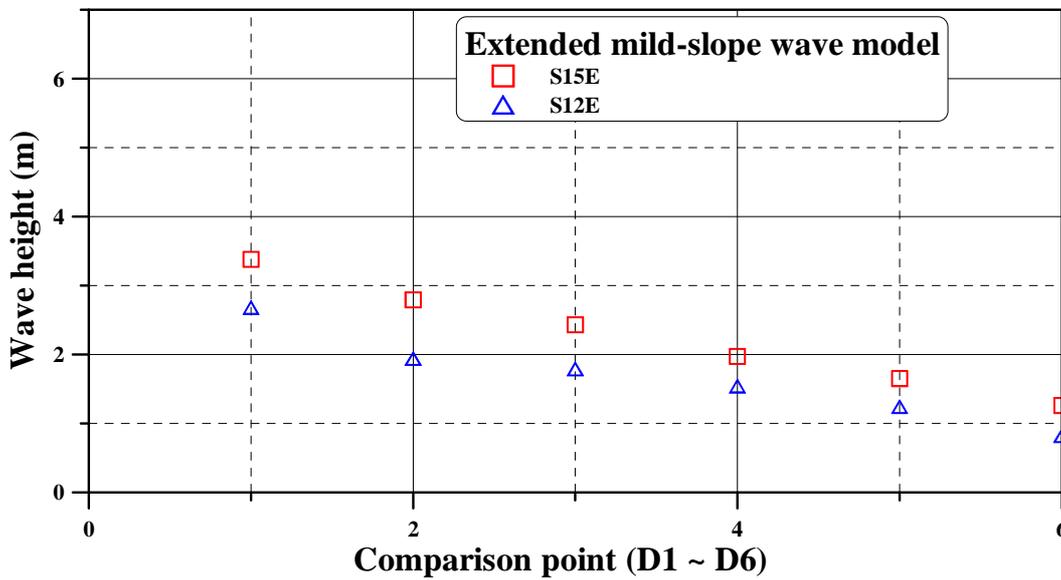


Fig. 4.33 Incident wave height point of wave height for Boussinesq wave model area (B1 ~ B5)

4.3 해안 및 항만역 파랑해석

Boussinesq 파랑모형의 수치시뮬레이션을 실시하였다. Surface elevation, 유의파고 및 최대파고의 결과를 얻어낼 수 있었으며 태풍 YANNI 내습시 관측 데이터와 비교하였다.

먼저 Fig. 4.13과 Fig. 4.14는 S12°E와 S15°E파향의 유의파고도이다. 입사조건을 파고 1.67m, 주기 14.43sec를 사용한 S12°E의 유의파고도를 보면 신항항내에서는 0.4m~0.8의 파고, 신항항 전면에서 1.5m가량의 파고를 나타냈으며 신항항 입구부분에서는 1.0m 가량의 파고분포를 보였다. 입사조건을 파고 2.25m, 주기 16.79sec를 사용한 S15°E의 유의파고도를 보면 신항항내에서는 0.5m~1.5m의 파고, 신항항 전면에서 1.6~2.5m의 파고를 나타냈으며 신항항 입구부분에서는 2m 가량의 파고분포를 보였다. 대체적으로 S15°E의 실험에서 계산된 파고가 S12°E에 비해서 높은 결과를 얻었다.

Fig. 4.15와 Fig. 4.16은 S12°E와 S15°E파향의 최대파고도이다. S12°E의 최대파고도를 보면 신항항내에서는 0.75m의 파고, 신항항 전면에서 2.2~2.6m의 파고를 나타냈으며 신항항 입구부분에서는 1.2m 가량의 파고분포를 보였다. S15°E의 최대파고도를 보면 신항항내에서는 1.5m의 파고, 신항항 전면에서 2.6~3.2m의 파고를 나타냈으며 신항항 입구부분에서는 2.7m 가량의 파고분포를 보였다. 대체적으로 S15°E의 실험에서 계산된 파고가 S12°E에 비해서 높은 결과를 얻었다.

전체적인 파고분포도는 앞서 계산한 확장 완경사방정식 파랑모형에 비해서 대체적으로 큰 값이 나왔다.

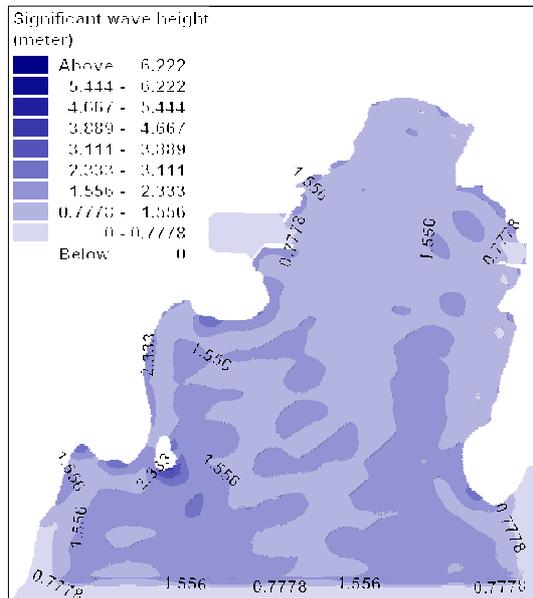


Fig. 4.34 Significant wave height of model wave direction S12°E

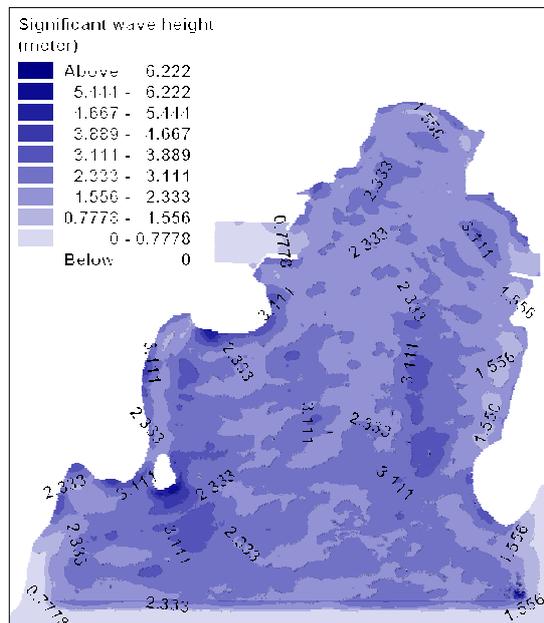


Fig. 4.35 Significant wave height of model wave direction S15°E

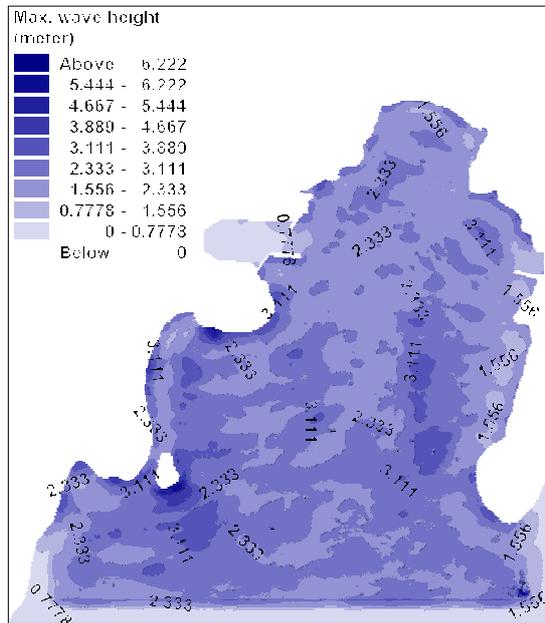


Fig. 4.36 Max. wave height of model wave direction S12°E

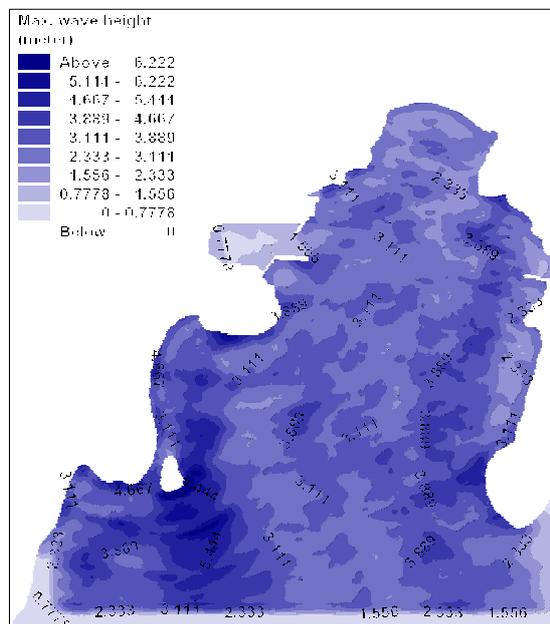


Fig. 4.37 Max. wave height of model wave direction S15°E

Boussinesq 파랑모형실험에서 각각의 선정된 지점의 파고변화를 산출하였다. S12°E와 S15°E파향의 결과를 비교하여 Fig. 4.17~Fig. 4.25까지 C1지점에서 C9지점까지의 파고변화를 나타낸다.

S12°E의 파고변화를 보면 C1지점에서 2m, C2지점에서 2m, C3지점에서 2m, C4지점에서 1.5m, C5지점에서 0.5m~1m, C6지점에서 1m, C7지점에서 0.4m, C8지점에서 0.8m, C9지점에서 1.5m의 파고를 나타내었다.

S15°E의 파고변화를 보면 C1지점에서 2m, C2지점에서는 2.5m, C3지점에서는 2~3m로 S12°E보다 높은 파고가 나타났다. C4지점에서 2.5m, C5지점에서 3m, C6지점에서 2m, C7지점에서 0.6m, C8지점에서 1.5m로 S12°E에 비해서 상당히 높은 결과이며, C9지점에서 2m~3m로서 S12°E에 비해 상당히 높은 파고를 나타내었다. 해수면 상승고는 S12°E와 S15°E의 입사조건이 틀린 부분을 감안한다면 대체적으로 비슷한 결과를 나타냈다.

그러나 신향항 내의 지점인 C7과 C8의 경우에서 S15°E에서 S12°E에 비해 높은 해수면 상승고가 계산 되었다. 높은 주기와 높은 파랑을 입사파로 선택한 이유도 있겠지만 파향이 신향항으로 입사되는 파랑에 많은 영향을 줄 가능성이 더욱 큰 것으로 생각된다.

Fig. 4.26과 Fig. 4.27는 S27°E파향과 S15°E파향의 수면변동을 3차원으로 나타낸 그림이다.

Boussinesq 파랑모형의 결과에서 비선형 불규칙 파랑의 재현과 벡터도에서 보이듯이 세밀한 회절, 굴절, 쇄파, 해저마찰 등의 적용을 볼 수 있다.

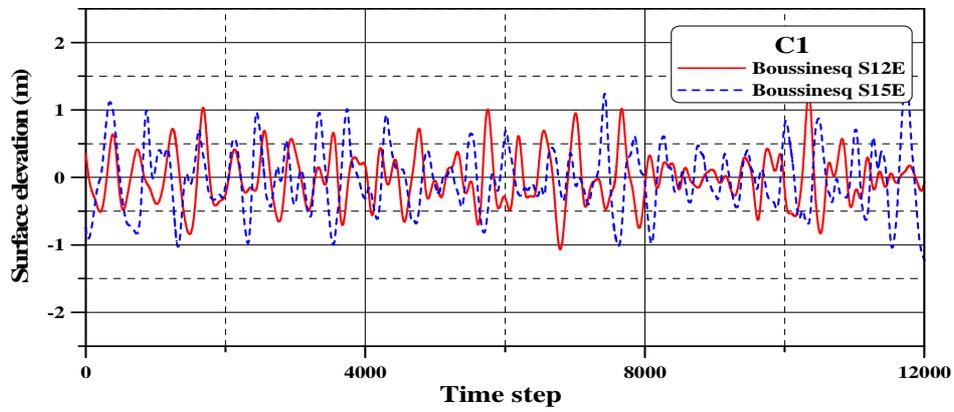


Fig. 4.38 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C1

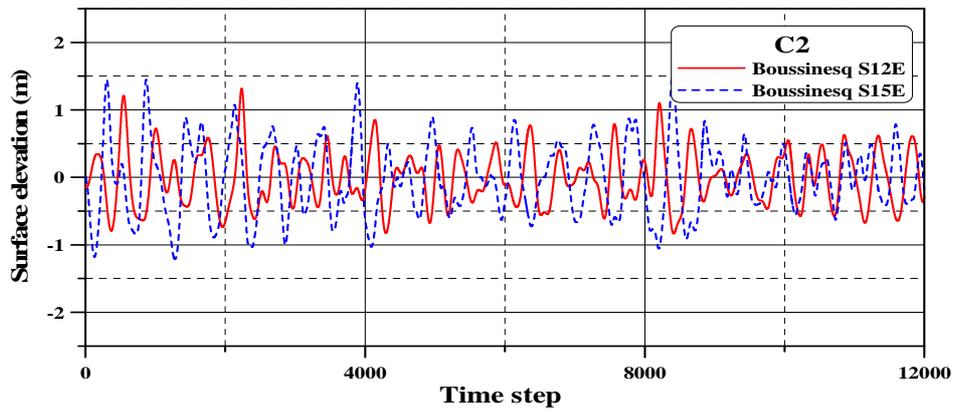


Fig. 4.39 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C2

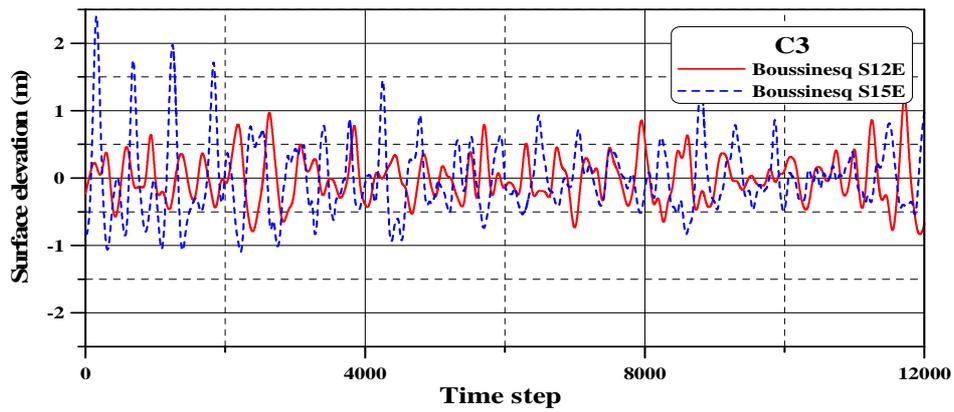


Fig. 4.40 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C3

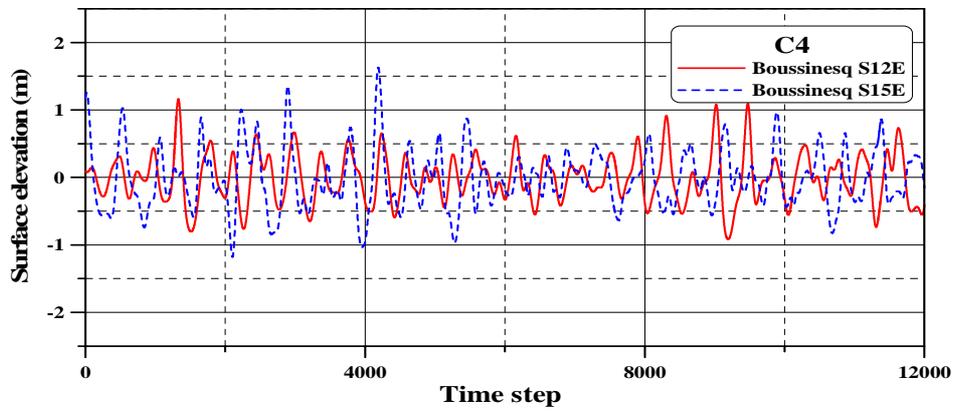


Fig. 4.41 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C4

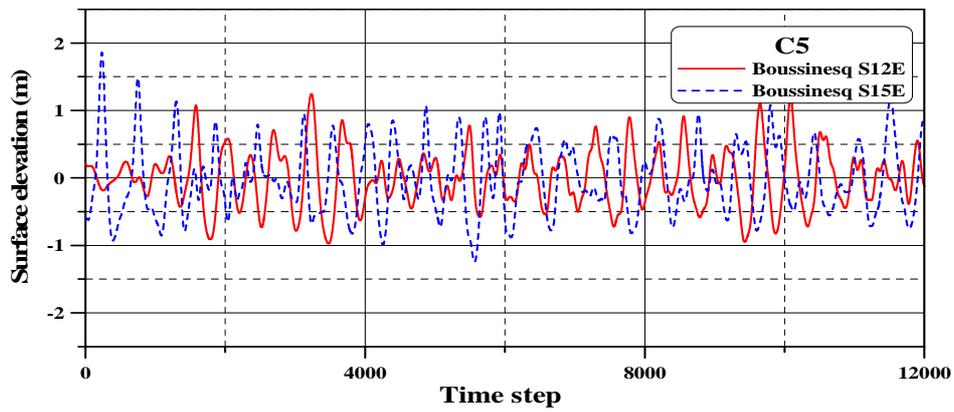


Fig. 4.42 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C5

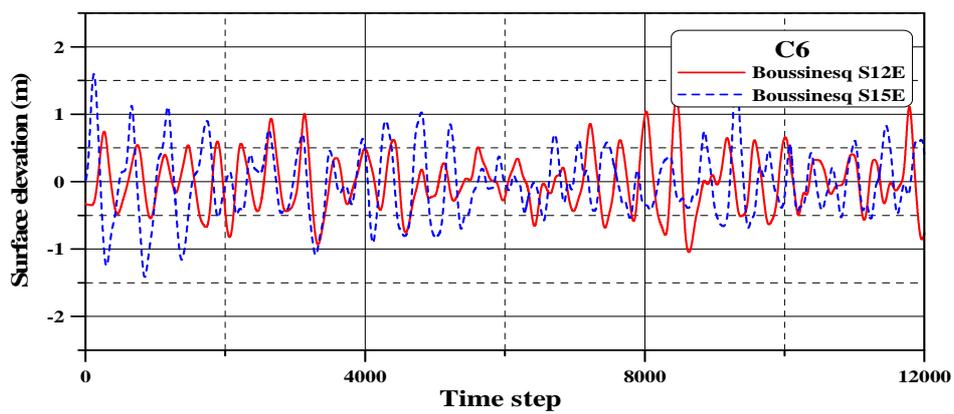


Fig. 4.43 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C6

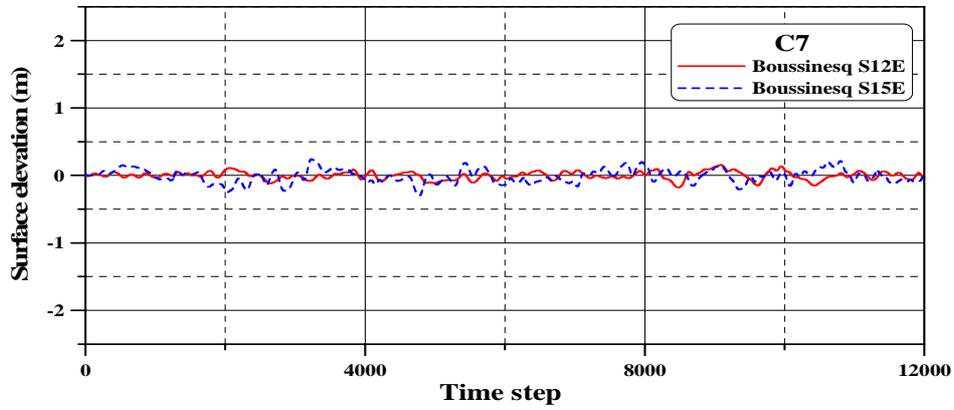


Fig. 4.44 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C7

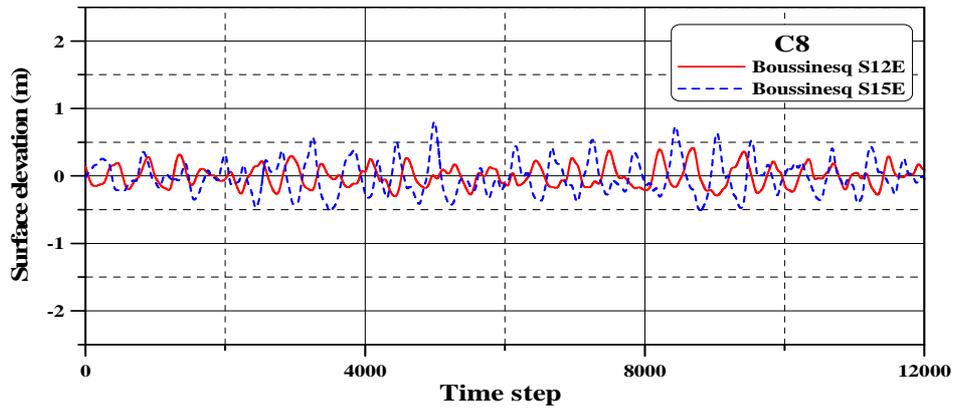


Fig. 4.45 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C8

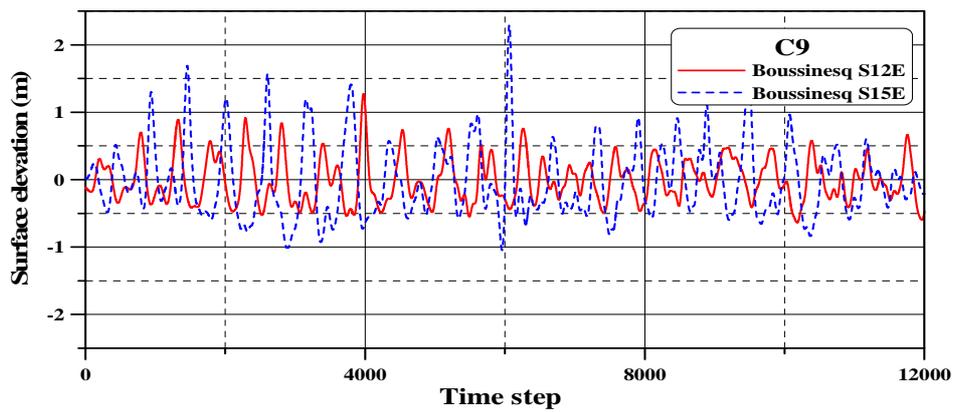


Fig. 4.46 Surface elevation of model wave S15°E and S12°E at C9

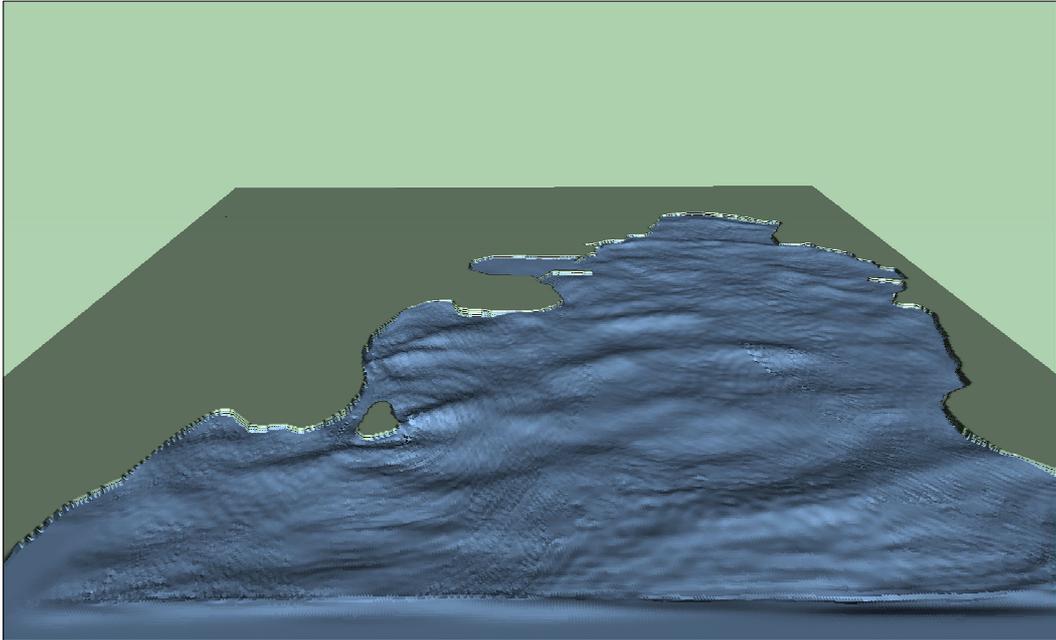


Fig. 4.47 Surface elevation of model wave S12°E

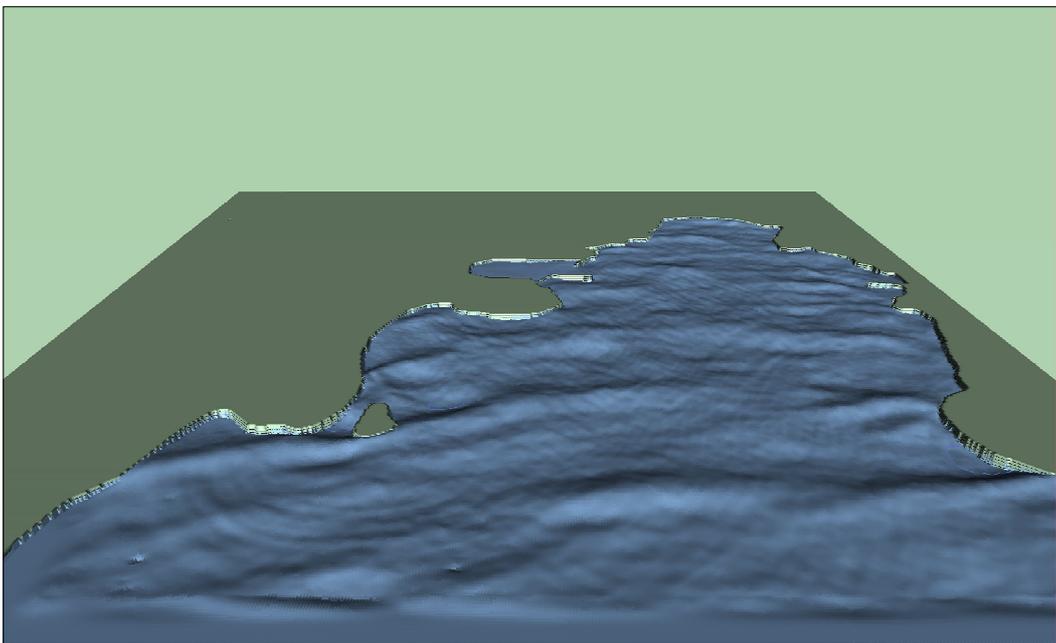


Fig. 4.48 Surface elevation of model wave S15°E

Fig. 4.28과 Fig. 4.29는 S12°E파향 실험의 파랑분산도와 파랑분산률을 나타낸 그림이며, Fig. 4.30와 Fig. 4.31은 S15°E파향 실험의 파랑분산도와 파랑분산률을 나타낸 그림이다. 전체적인 분포는 유의 파고 및 최대 파고도와 비슷한 형상이다.

S12°E의 결과를 보면 신항항 내에서는 0.3m~0.5m로서 파랑분산률은 0.2~0.36정도이고, 신항항 입구 및 전면에서는 1.33m~1.6m가량의 파랑분산분포를 보이며 파랑분산률은 0.9~1.08정도이다.

S12°E의 결과를 보면 신항항 내에서는 0.1m~0.5m로서 파랑분산률은 0.1~0.3정도로 S12°E의 결과에 비해 낮고, 신항항 입구 및 전면에서는 1.6m~2.2m가량의 파랑분산분포를 보이며 파랑분산률은 0.7~0.98정도로 S12°E에 비해서 파랑분산은 높지만 파랑분산률은 낮은 결과를 보인다.

자세한 결과는 Time step별로 정리해놓은 Fig. 4.32~4.35의 그래프를 보면 좀 더 쉽게 알 수 있다. 항내의 지점인 C7 및 C8을 제외하고 거의 대부분의 지점에서 입사파에 비해서 약간 낮은 분포로 파랑 분산률이 분포하는 것을 볼 수 있다.

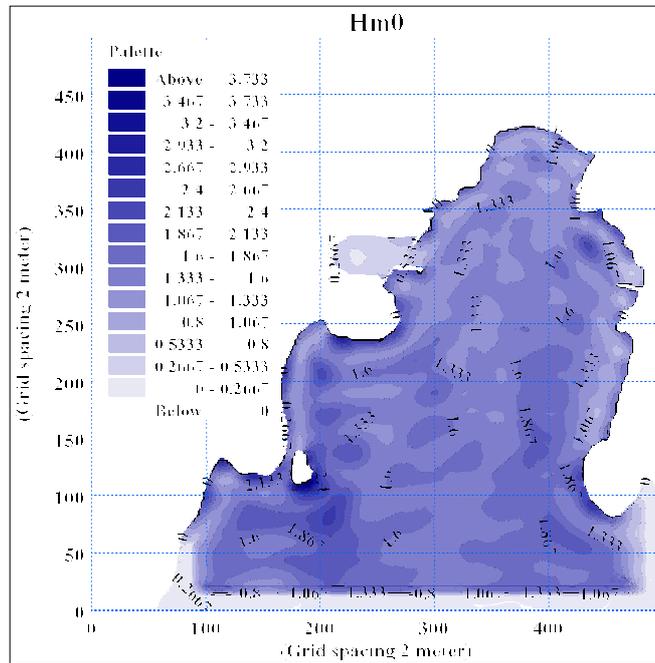


Fig. 4.49 Wave disturbance S12°E

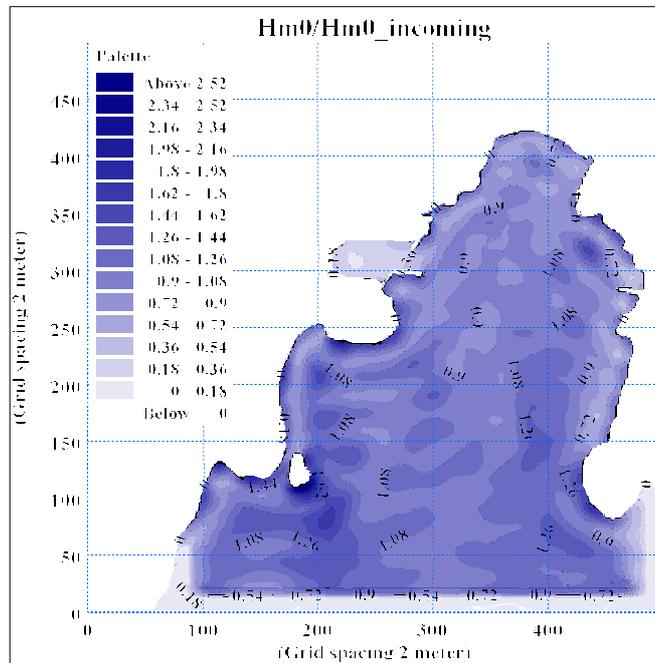


Fig. 4.50 Wave disturbance coefficient S12°E

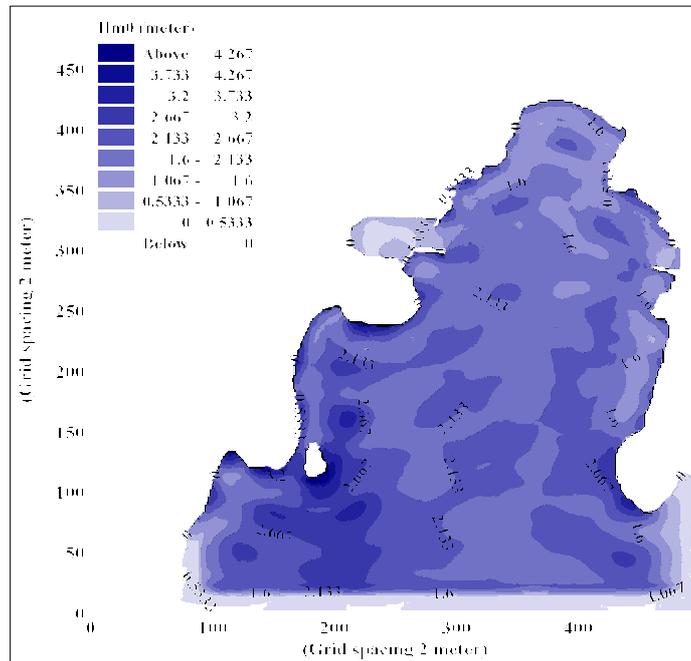


Fig. 4.51 Wave disturbance S15°E

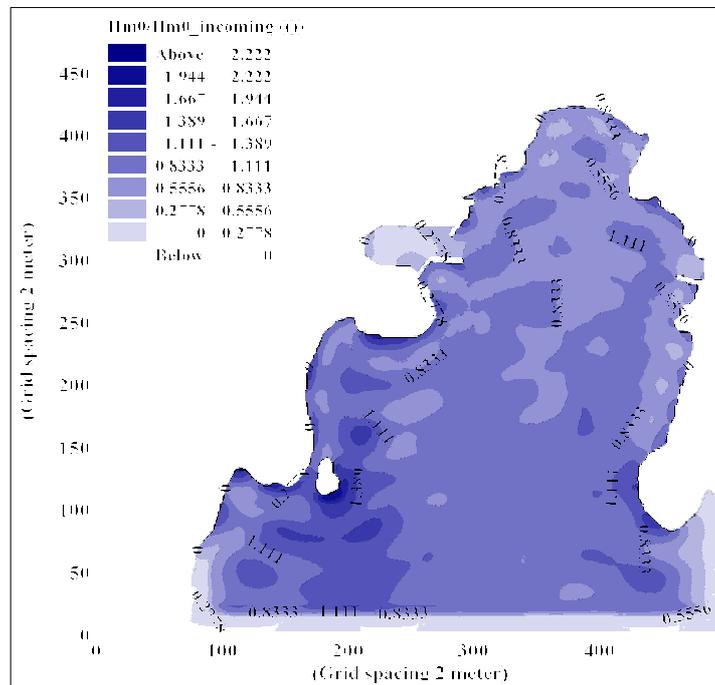


Fig. 4.52 Wave disturbance coefficient S15°E

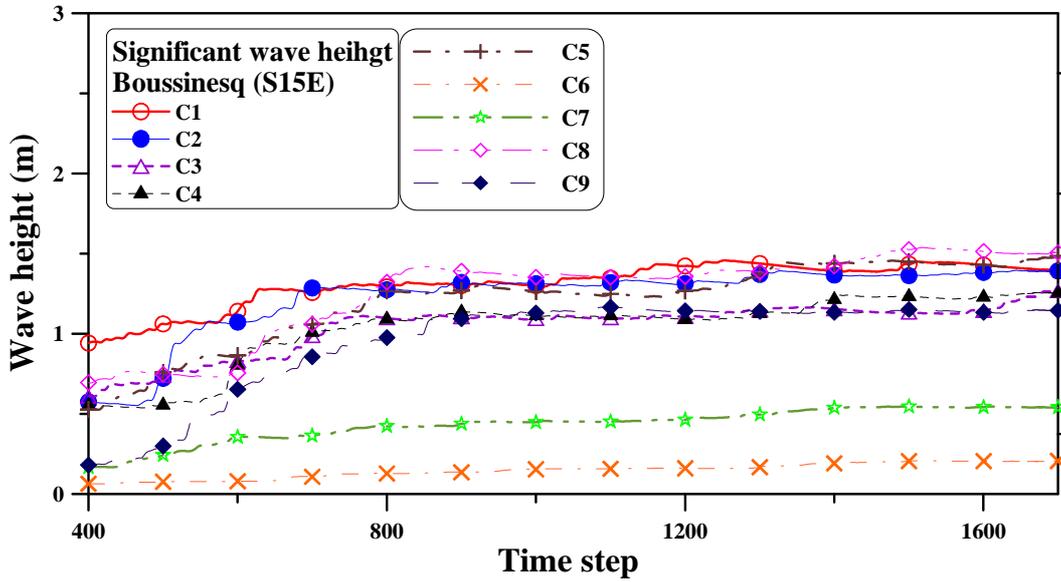


Fig. 4.53 Wave disturbance Plot S12°E

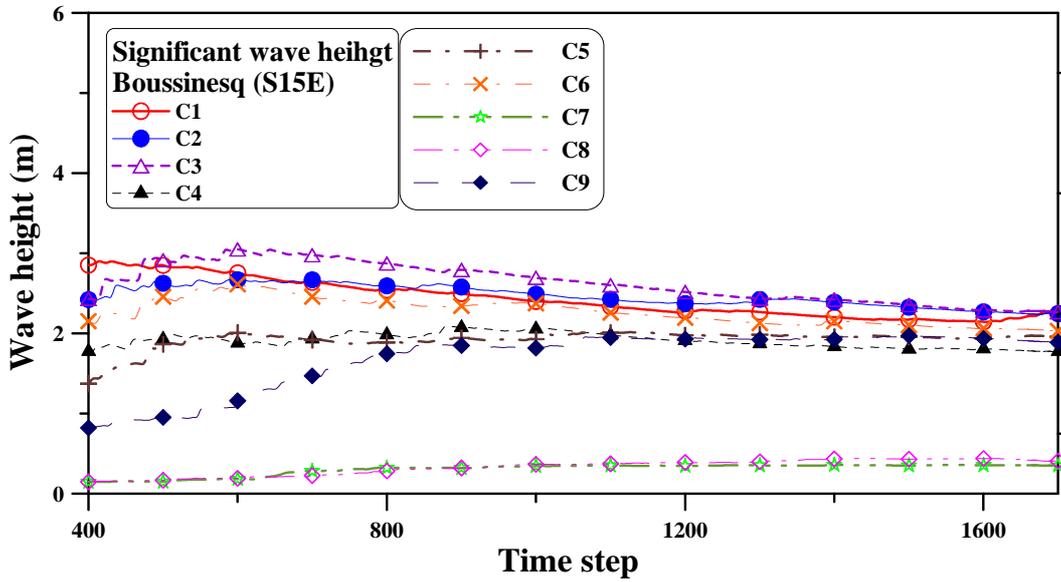


Fig. 4.54 Wave disturbance Plot S15°E

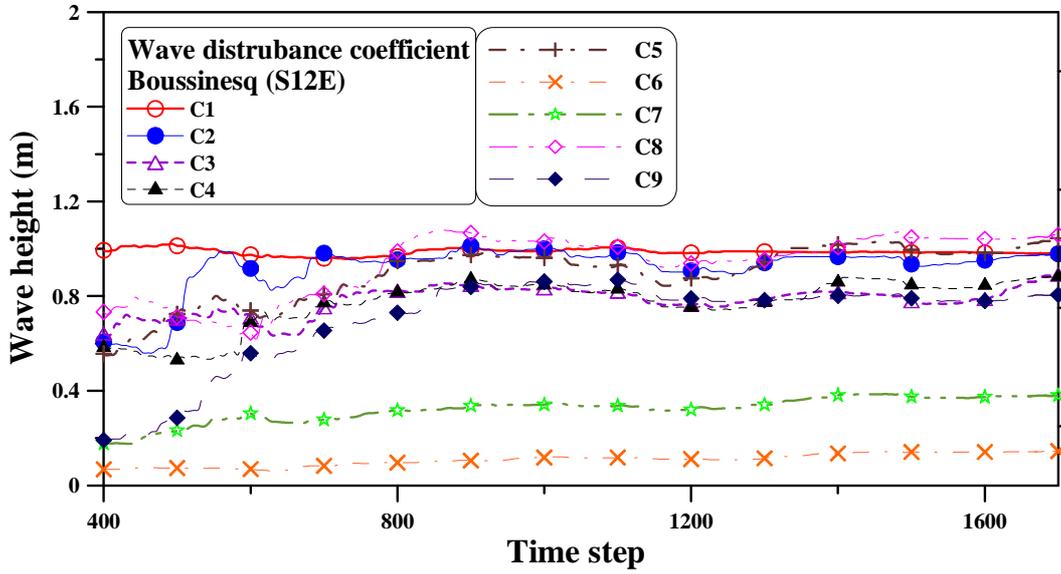


Fig. 4.55 Wave disturbance coefficient Plot S12°E

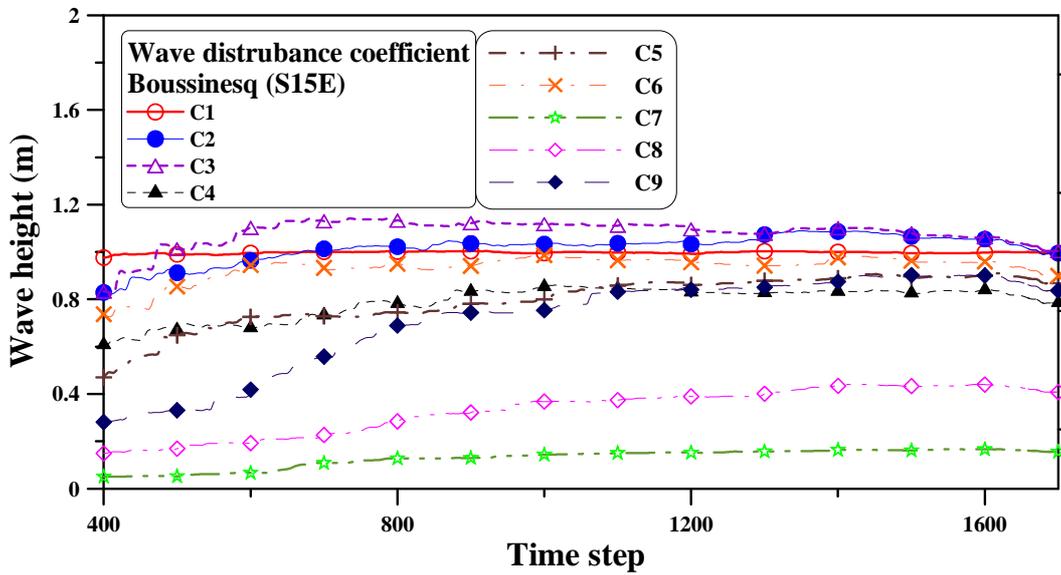


Fig. 4.56 Wave disturbance coefficient Plot S15°E

Boussinesq 파랑모형, 확장 완경사 방정식 파랑모형 및 정상상태 에너지 스펙트럼 파랑모형의 결과를 각 지점에서 비교하였다. 시간의존 파랑모형인 Boussinesq 파랑모형은 Time step별로 데이터의 추출이 가능하지만 확장 완경사 방정식 파랑모형과 정상상태 에너지 스펙트럼 파랑모형은 유의파고가 하나의 값으로 정의된다. 비교한 그래프는 Fig. 4.38~Fig. 4.46으로 정리하였으며 모델의 검증에 위해 삼천포 해역은 아니지만 가장 가까운 지역의 파랑관측소로 생각되는 여수의 보조파랑관측소인 소리도에서 1998년 9월 30일 00시부터 10월 2일 00시까지 48시간 동안에 태풍 YANNI의 내습시 관측된 자료를 비교하였다.(해상파랑관측 및 조사, 1998 해양수산부) 태풍 YANNI의 파고는 9월 30일 00시에서 10시까지 2m가량이었으나 13시에 최대 파고를 기록하고 점차 낮아져 10월 1일 00시에는 1.5m를 나타냈고 그 이후 계속 낮아져 10월 2일에는 0.34m까지 떨어진 것을 볼 수 있다. 이에 파랑 모형실험을 통해 산출된 값과 비교해 보았다. 태풍 YANNI의 압력 변화 및 풍속 등의 제원은 Table 4.4 및 Table 4.5를 통해서 파랑관측 결과를 정리하였다.

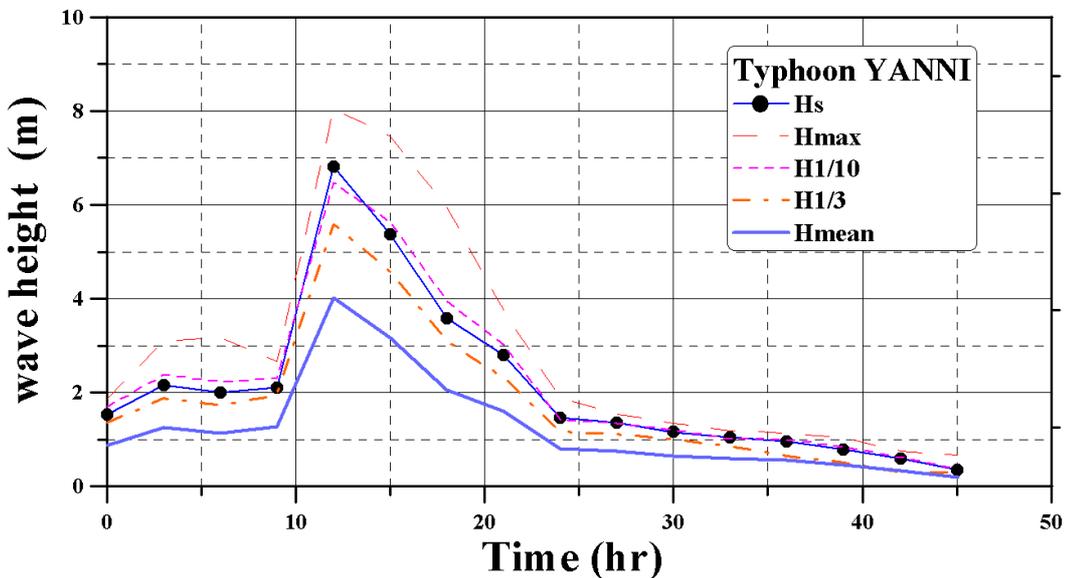


Fig. 4.57 Significant wave height Typhoon YANNI at Sorido, Yeo-Su

Table 4.13 Observation data for pressure and wind speed at Sorido, Yeosu

best track of YANNI (9809)					
TIME (UTC)	GRADE	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Pressure(hPa)	Wind (kt)
1998-09-26-12	2	204	1261	1002	0
1998-09-26-18	2	204	1260	1002	0
1998-09-27-00	2	208	1251	1002	0
1998-09-27-06	2	206	1229	1002	0
1998-09-27-12	2	216	1234	1002	0
1998-09-27-18	2	225	1222	1000	0
1998-09-28-00	3	230	1222	998	35
1998-09-28-03	3	234	1222	996	35
1998-09-28-06	3	238	1221	992	40
1998-09-28-09	3	241	1223	990	40
1998-09-28-12	3	244	1224	985	45
1998-09-28-15	3	248	1226	985	45
1998-09-28-18	4	252	1228	980	50
1998-09-28-21	4	255	1230	980	50
1998-09-29-00	4	259	1233	975	50
1998-09-29-03	4	265	1239	975	55
1998-09-29-06	4	271	1243	970	60
1998-09-29-09	4	279	1249	970	60
1998-09-29-12	5	287	1256	965	65
1998-09-29-18	4	309	1267	970	60
1998-09-30-00	4	330	1272	975	55
1998-09-30-03	4	342	1272	975	55
1998-09-30-06	4	346	1270	980	50
1998-09-30-09	6	346	1271	990	0
1998-09-30-12	6	346	1272	994	0
1998-09-30-18	6	346	1274	996	0
1998-10-01-00	6	339	1278	998	0
1998-10-01-06	6	334	1284	1000	0

Table 4.14 Observation wave height at Sorido, Yeosu

best track of YANNI (9809)					
TIME (UTC)	Hs	Hmax	H1/10	H1/3	Hmean
1998093000	1.53	1.87	1.69	1.36	0.88
1998093003	2.16	3.09	2.38	1.88	1.26
1998093006	2	3.17	2.23	1.73	1.13
1998093009	2.1	2.66	2.3	1.94	1.27
1998093012	6.82	8.05	6.47	5.59	4.02
1998093015	5.37	7.46	5.63	4.58	3.16
1998093018	3.59	5.94	3.95	3.09	2.05
1998093021	2.81	3.74	3.02	2.33	1.61
1998100100	1.47	1.88	1.42	1.17	0.81
1998100103	1.36	1.54	1.34	1.11	0.76
1998100106	1.16	1.35	1.2	1	0.64
1998100109	1.05	1.19	1.01	0.86	0.6
1998100112	0.96	1.13	1	0.65	0.56
1998100115	0.79	1.04	0.84	0.51	0.45
1998100118	0.6	0.75	0.62	0.3	0.33
1998100121	0.36	0.67	0.38	0.3	0.2

Fig. 4.37의 관측자료는 2002년 해상파랑관측 및 조사에 관측위치 52번, 067126 격자번호, 34.67 128.00 위치의 2002년 역추산된 파랑 관측 자료이다. 전체적인 파고분포를 보면 정상상태 스펙트럼 에너지 파랑모형과 Boussinesq 방정식을 사용한 모델에서 높은 파고값이 나타났다. 그러나 파랑의 전달면에서 신항항 내 지점인 C7과 C8지점을 보면 확장 완경사 방정식 파랑 모형에 비해서 Boussinesq 파랑모형이 상당히 큰 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 신항항내에서 확장 완경사 방정식 파랑모형의 결과는 0.5m~0.9m이며 Boussinesq 파랑모형의 결과는 0.5m~1.5m까지로 나타났다. YANNI는 최대파고6.8m와 관측자료의 최대 유의파고 6.7m내외의 파고를 결과와 비교하면 최대파고는 Boussinesq 파랑모형의 경우 3m~4m 가량의 높은 파고를 나타내는 곳이 있었고 신항항 전면에서는 대체적으로 2m 내외의 파랑분포를 보였으며 확장 완경사 방정식 파랑모형의 경우 1m~1.5m 내외의 파랑 분포를 나타내었다. 파랑의 높고 낮음이 모델의 적합성과 연결되지는 않지만 실측 데이터가 부족한 본 연구에서 천수변형, 굴절, 회절, 반사, 쇄파, 해저마찰 등의 주요 물리현상을 재현할 수 있는 세역 모델에 적합한 두 모델의 결과는 충분히 두 모델의 차이점을 설명해줄 수 있는 잣대가 될 수 있을 것으로 사료된다.

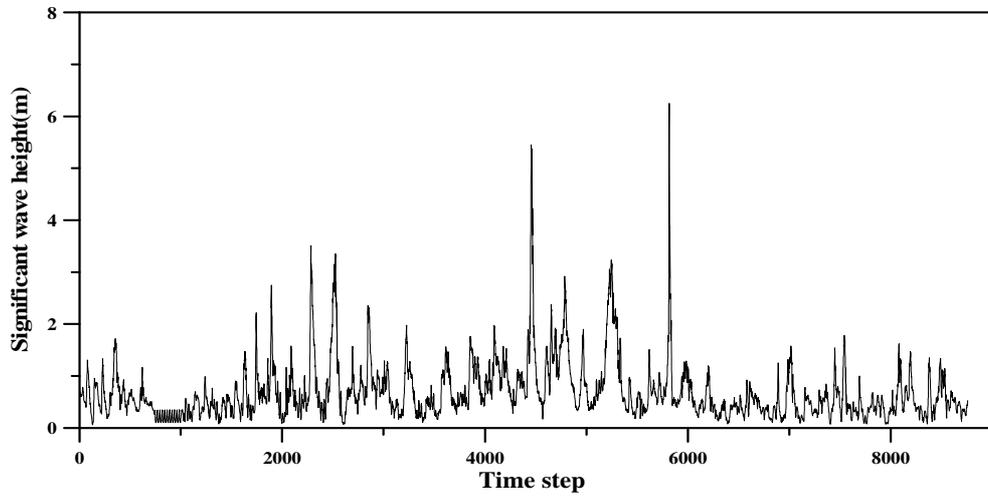


Fig. 4.58 Observation data (2002, 1 year)

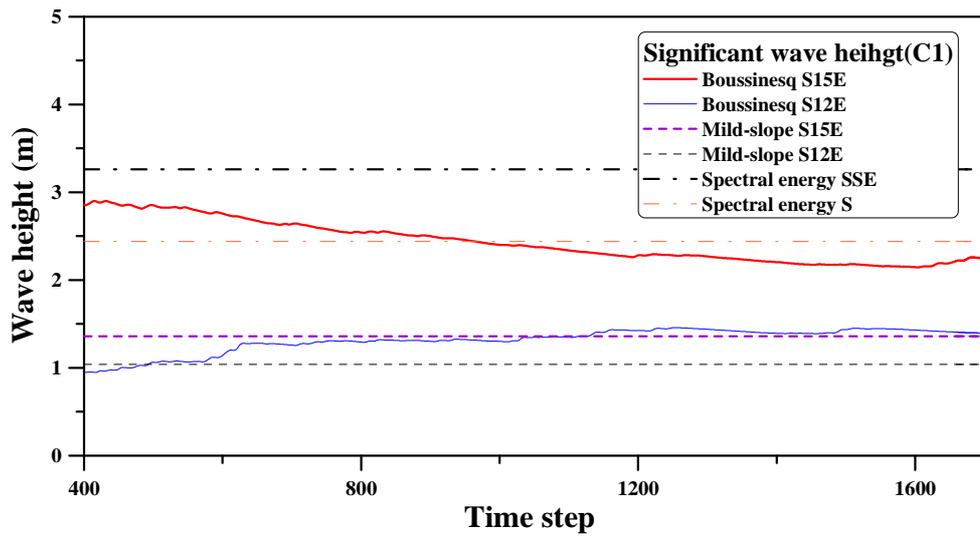


Fig. 4.59 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C1

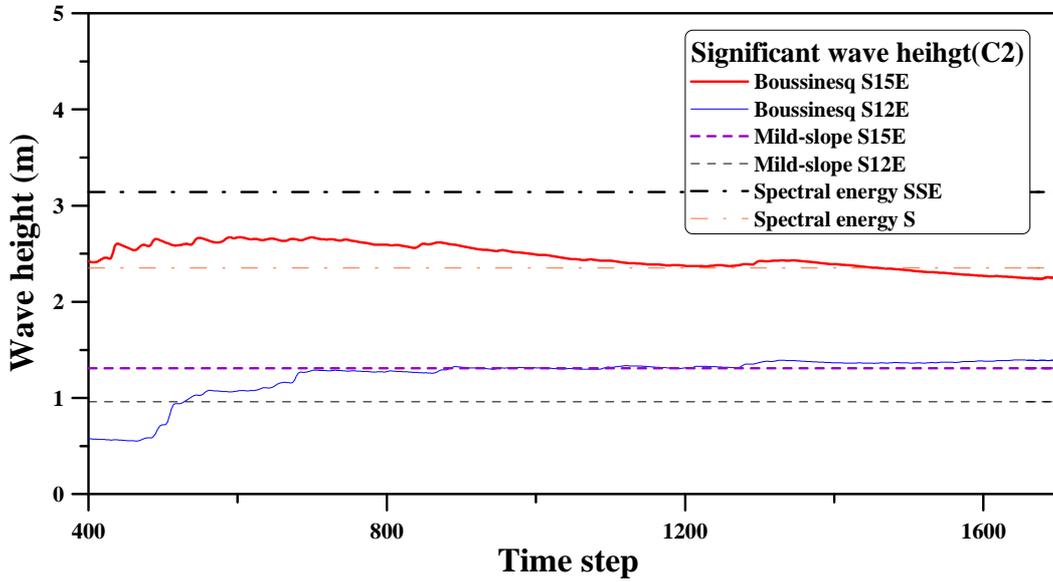


Fig. 4.60 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C2

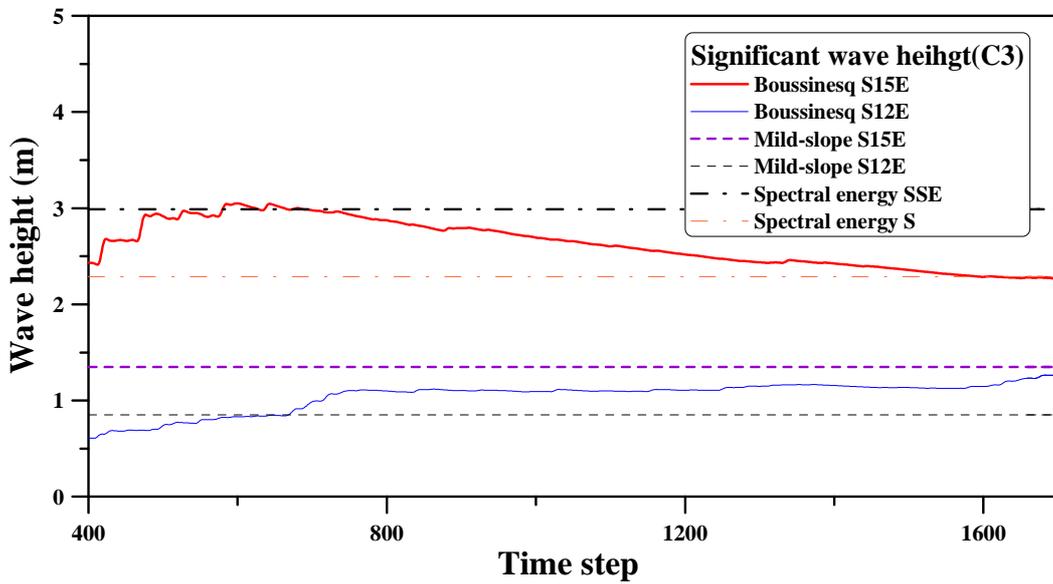


Fig. 4.61 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C3

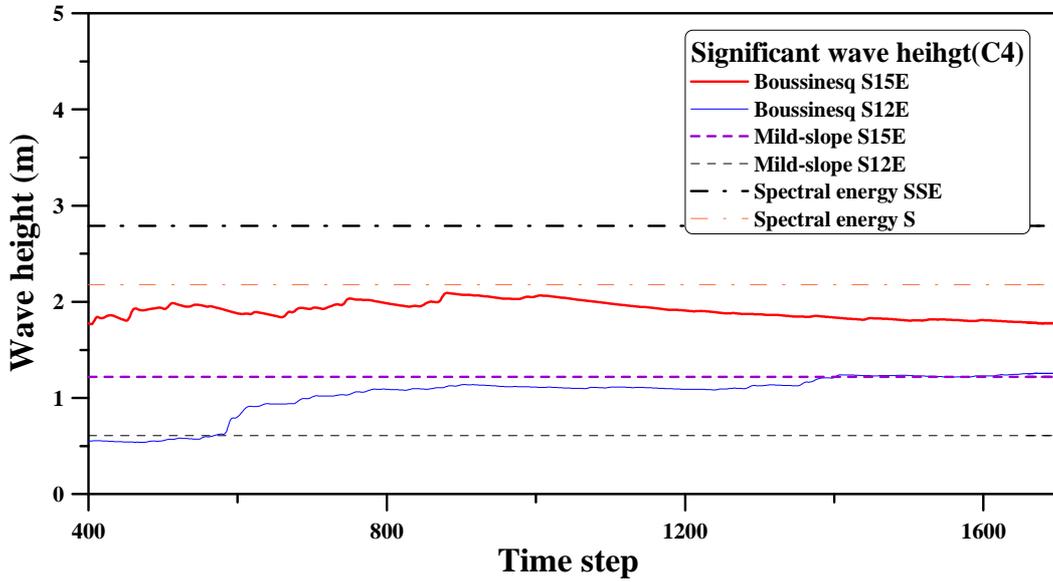


Fig. 4.62 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C4

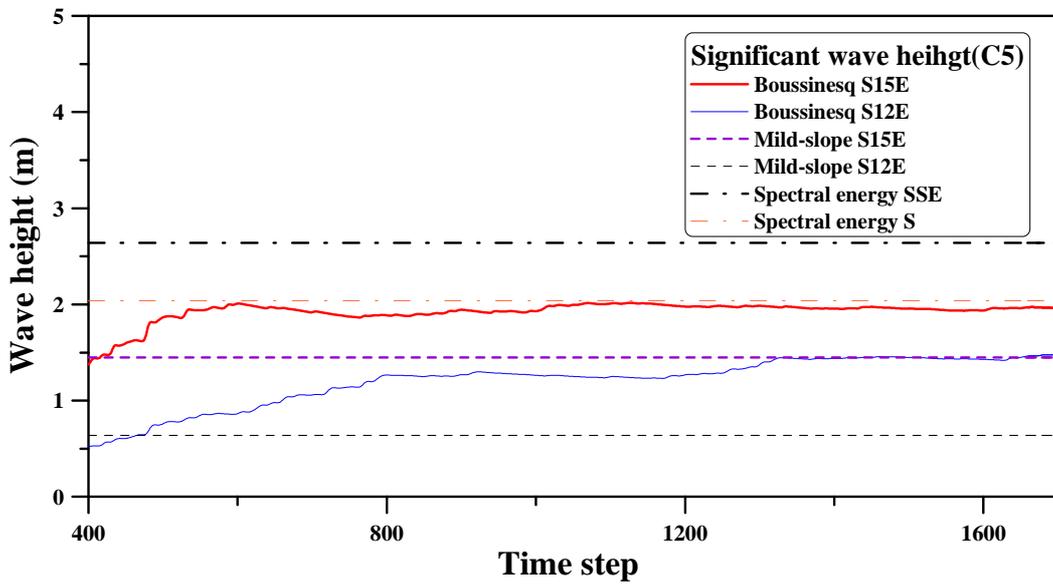


Fig. 4.63 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C5

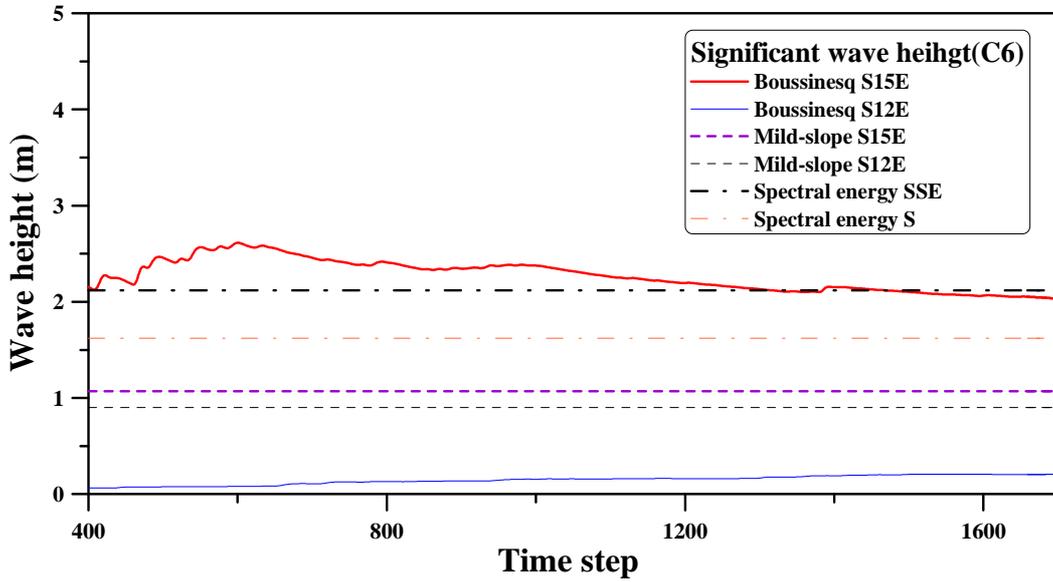


Fig. 4.64 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C6

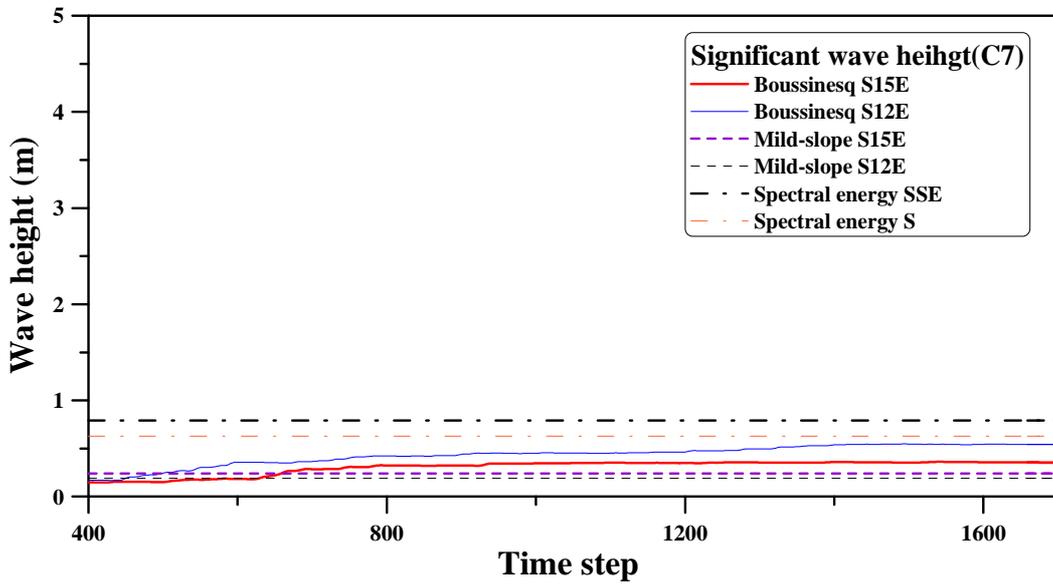


Fig. 4.65 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C7

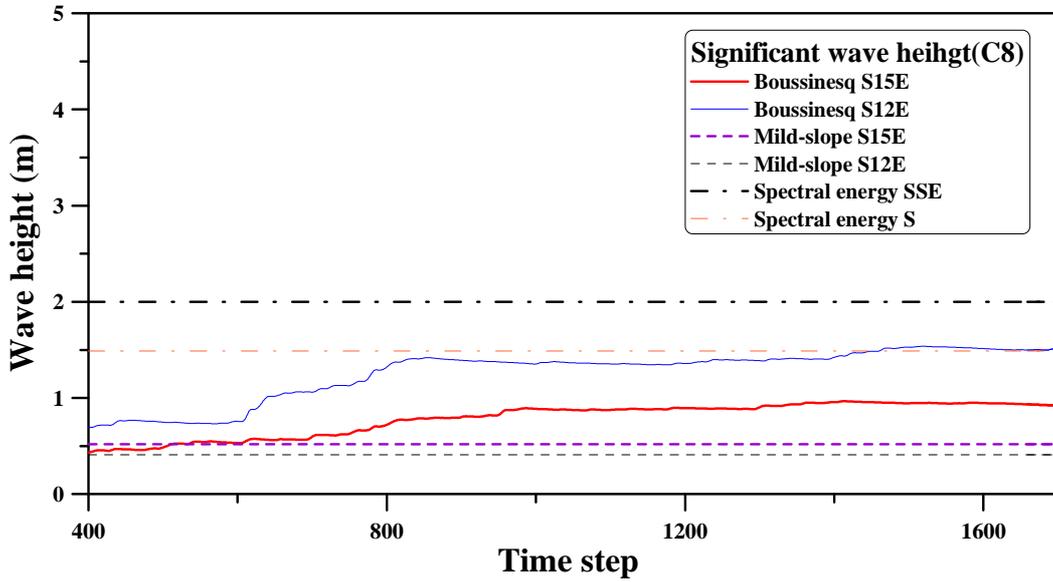


Fig. 4.66 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C8

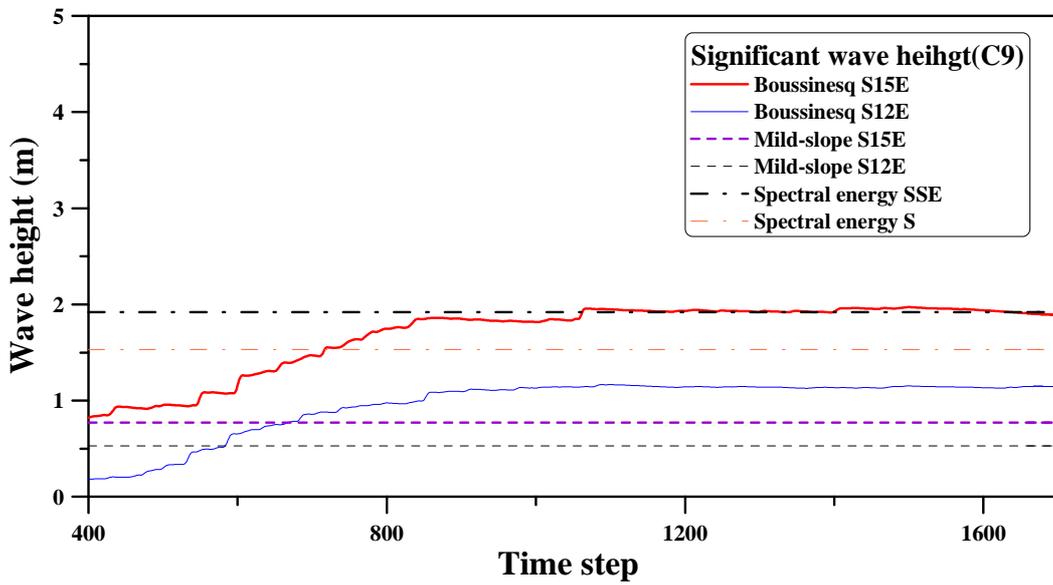


Fig. 4.67 Compare Boussinesq, mild-slope, spectral energy equation model for significant wave height Plot at C9

제5장 결론

신항항은 매우 복잡한 해안선 및 지형을 가지고 있는 소형 어항이다. 현재 신항항은 외곽시설 및 계류시설의 확장이 예정되어있고 그에 대한 적합한 대안을 찾고 있는 실정이다. 파랑 특성 파악 및 예측은 항내에 정박하는 선박의 하역작업 및 접안, 이안시의 거동과 입출항시 항 입구에서의 항해 문제 등에 관련되는 중요한 문제로서 실제 관측 데이터와 수치실험 데이터를 비교하여 모델을 검증한 후 분석하였다.

본 연구에서는 신항항을 대상영역으로 하여 소형어항에서 파랑모형의 적절한 적용을 위한 수치시뮬레이션을 실시하였다. 3개의 각각 다른 수치모델을 사용하여 각각 다른 해안 환경에서 적용시켰다.

먼저 1차적으로 광역 파랑 실험에 적합한 정상상태 스펙트럼 에너지 파랑모델은 성분파의 에너지 스펙트럼이 시·공간적으로 보존된다고 가정하고 수심 변화에 따른 천수변형, 굴절, 쇄파 등의 현상을 고려하여 심해로부터 천해로의 파고변화를 계산하는 방법으로 신항항에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 50년 빈도의 S(H=9.63m, T=14.43sec) 및 SSE(H=13.44m, T=16.79sec) 파향을 선정하여 실험하였다. 실험결과로 중간역을 대상으로 수치실험한 확장완경사 방정식 파랑모델의 입사조건으로 사용하였다.

천수효과, 회절 및 굴절과 반사 등의 물리현상을 비롯해 해저마찰, 경계면흡수, 반사파의 산란 등을 고려하는 확장완경사 방정식 파랑모형을 사용하여 중간역의 파랑 분석을 실시하였다. 광역 모델에서 산출한 입사조건인 파고 2.698m, 주기 14.43sec, 파향 S12°E와 파고 3.898m, 주기 16.79sec, 파향 S15°E를 적용하였으며 유한요소법으로 격자를 구성하였다. 반사조건은 항만설계기준에 제시된 값을 사용하였다.

마지막으로 연안 및 항만구조물이 설치된 지역에서 발생하는 파랑변형에 따

른 대부분의 현상(복잡한 지형에서의 유한진폭파의 전파, 천수, 굴절, 회절 및 불규칙 부분반사)을 고려할 수 있는 Boussinesq 파랑모형을 통해서 최종적으로 어항 내부 및 어항 전면부 및 외곽시설 등의 파랑변형을 수치실험 하였다. 반사계수 적용은 앞서 확장 환경사 방정식 파랑모델과 동일하게 적용하였으며 해저 마찰계수는 Chezy number를 적용하여 계산하였으며 입사파의 스펙트럼은 JONSWAP Spectrum을 사용하였다.

해상파랑관측 및 조사(해양수산부 1998)에서 여수의 소리도에서 관측된 태풍 YANNI의 관측 파고데이터 및 2002년 해상파랑관측 및 조사에 관측위치 52번, 067126 격자번호, 34.67 128.00 위치의 2002년 역추산된 파랑 관측 자료를 이용하여 Boussinesq 파랑모형, 확장 환경사 방정식 파랑모델 및 정상상태 스펙트럼 파랑모델의 실험결과와 비교 분석하였으며 신항항 내에서 확장 환경사 방정식 파랑모형의 경우 0.5m~0.9m, Boussinesq 파랑모형의 경우 0.5m~1.5m가 계산되었다. 신항항 내의 경우 정상상태 에너지 스펙트럼 방정식은 파고 2m이상 나오는 결과가 나왔다.

1. 정상상태 스펙트럼 에너지 파랑모형의 파고 벡터도에서 나타나는 특성으로는 창선도 및 상도 부근에서 파랑의 회절이 매끄럽지 못하고 제대로 전달되지 못하는 점이 발견되었다. 정상상태 스펙트럼 에너지 방정식이 세역에서 적용되지 못하는 이유는 다음과 같은 특성을 완벽하게 재현할 수 없다는 점이다. 수심에 따른 물리현상과 짧은 계산시간은 엔지니어들에게 보다 매력적으로 생각될 수 있지만 세역에서의 적용이 쉽지 않기 때문에 광역을 대상으로 하는 분석에 적절하다는 것을 보여준다. 신항항 내에 과도하게 높은 파고가 나타나는 것은 바람을 고려하여 상대적으로 높아지는 이유도 있지만 해저 마찰을 고려하지 않았고 세밀하지 않은 회절의 적용 등이 영향을 미친 것이다.

2. 확장 환경사 방정식 파랑모형을 사용한 중간역 파랑모델은 광역 모델인 파랑모형에 비해서 지형에 대한 회절 및 물리현상을 좀 더 세밀하게 재현해준다는 것을 볼 수 있다. 복잡한 해안선을 가진 대한민국 남해안의 해안선에 파랑모형을 적용하기 위해서는 선형파랑을 사용해서 분석하는 방법보다는 비선형적이고 불규칙적인 파랑을 적용하는 것이 보다 정확하고 만족할 만한 결과를 얻는데 도움이 될 것이다.

3. Boussinesq 방정식을 사용하는 파랑모형은 불규칙파랑을 적용했을 때 파랑에너지의 분산이 확장 환경사 파랑모형과 정상상태 스펙트럼 에너지 파랑모형에 비해서 굴절, 회절, 천수변형 및 해저마찰 등의 적용이 타 모델에 비해 세밀한 시뮬레이션이 가능하다. 또한 시간에 따른 결과를 나타내어주기 때문에 결과 및 설계파랑의 산정시에 더욱 정밀한 분석이 가능하다.

4. 여러 가지의 모델링 방법의 채택의 근본적인 목적은 좀 더 정형화된 방안의 수치실험을 수행하여 광범위하게 유효한 평가를 적용하는 것이다. 본 연구를 통해서 해안 및 항만의 설계자들이 파랑모형을 사용하고 분석하는데 있어서 도움이 되길 바라며 향후 많은 관측자료와의 비교를 통해서 모델의 검증을 보완해야 할 것이다.

참고문헌

- 강시환, 전기천 (2005), “태풍시 연안내해에서의 설계파랑 모의산정” 한국 해양과학기술협의회 공동학술대회, p.587.
- 김성덕, 이홍식 (2007), “Pit에 의한 부분반사율을 갖는 항내에서의 파랑 회절에 관한 연구” 한국해안·해양공학회지, 제 19권 제5호, pp. 502~510.
- 최한규 (1992) “설계파산정기법” 어항기술교실, p.54.
- 해양수산부 (2000), “삼천포항 실시설계 보고서”.
- 한국해양연구원 (2006), “장기파랑 산출자료집”.
- 해양수산부 (2007), “심해파 추정보고서”.
- 해양수산부 (2007), “항만 설계 기준”.
- 해양수산부 (1998), “해상파랑관측 및 조사”.
- 해양수산부 (2002), “해상파랑관측 및 조사”.
- Battjes, J. A. (1982), "A case study of wave height variations due to currents in a tidal entrance," *Coast. Engrg.* 6, 47-57.
- Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M. (1978), "Energy loss and set-up due to breaking of random waves." *Proc. 16th Coast. Engrg. Conf., ASCE*, 569-587.
- Berkhoff, J. C. W. (1972), "Computation of Combined Refraction - Diffraction," *Proc. 13th International Coastal Engineering Conference*, 741-790.

Chen, H. S. (1986), "Effects of Bottom Friction & Boundary Absorption on Water Wave Scattering, Applied" Ocean Research, 8, 99-104.

Dally, W. R., Dean R. G., and Dalrymple R. A. (1985), "Wave Height Variation across beaches of arbitrary profile", J. Geophys. Research, 90, 1917-1927.

Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A. (1984), "Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 110, 67-79.

Demirbilek, Z. (1994), "Comparison Between REFDIFS and CERC Shoal Laboratory Study", Unpublished Report, Waterways Exp. Station, Vicksburg, MS, p.53.

Jonsson, I. G. (1990), "Wave-current interactions." The sea. Vol. 9, Part A, B. LeMehaute and D. M. Hanes, ed., John Wiley & Sons, Inc., New York. References 65.

Madsen, O.S. (1976), "Wave Climate of the Continental Margin: Elements of its Mathematical Description, Marine Sediment Transport and Environmental Management" (eds. D. Stanley and D.J.P. Swift), John Wiley, New York, 65-87.

Madsen, P.A. and Sørensen, O.R., (1992), "A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics", Part 2: A Slowly-varying Bathymetry. Coastal Eng., 18. 183-204.

Mei, C. C. (1983), "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves", John Wiley, New York.

Mei, C. C. (1989), "The applied dynamics of ocean surface waves." World Scientific Publishing, Singapore.

Miche, M. (1951), "Le pouvoir reflechissant des ouvrages maritimes exposes a l' action de la houle." *Annals des Ponts et Chaussess*, 121e Annee, 285-319 (translated by Lincoln and Chevron, University of California, Berkeley, Wave Research Laboratory, Series 3, Issue 363, June 1954).

Resio, D. T. (1987), "Shallow-water waves. I: Theory," *J. Waterway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 113(3), 264-281.

Resio, D. T. (1988a), "Shallow-water waves. II: Data comparisons," *J. Waterway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 114(1), 50-65.

Resio, D. T. (1988b), "A steady-state wave model for coastal applications" *Proc. 21st Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 929-940.

Resio, D. T. and Perrie, W. (1989), "Implications of an f-4 equilibrium range for wind-generated waves," *J. Phys. Oceanography* 19, 193-204.

Sørensen, O.R., Schäffer, H.A, and Sørensen, L.S. (2004), "Boussinesq-type modeling using an unstructured finite element technique", *Coastal Eng.*, 50, 181-198.