

工學碩士 學位請求論文

군산-장항항 해역에서 파랑 예측 수치
모형의 분석

Analysis of Numerical Model Wave Predictions for Coastal
Waters at Gunsan-Janghang Harbor Entrance

指導教授 李重雨

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

李 勳

Analysis of Numerical Model Wave Predictions for Coastal Waters at Gunsan–Janghang Harbor Entrance

Hoon Lee

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

Abstract

Gunsan–Janghang Harbor is located at the mouth of Gum River, on the central west coast of Korea. The harbor and coastal boundaries are protected from the effects of the open ocean by natural coastal islands and shoals due to depositions from the river, and two breakwaters. The navigation channel commences at the gap formed by the outer breakwater and extends through a bay via a long channel formed by an isolated jetty. For better understanding and analysis of wave transformation process where a wide coastline changes appear due to on-going reclamation works, we applied the spectral wave model including wind effect to the related site, together with the energy balance models. This paper summarizes comparisons of coastal responses predicted by several numerical wave predictions obtained at the coastal waters near Gunsan–Janghang Harbor. Field and numerical model investigations were initially conducted for the

original navigation channel management *project*. We hope to contribute from this study that coastal engineers are able to use safely the numerical models in the area of *port* and navigational channel design.

목 차

ABSTRACT	i
LIST OF TABLES	v
LIST OF FIGURES	v
NOMENCLATURE	xv
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향 및 방법	3
제2장 수치모형의 기초이론	5
2.1 파랑장 이론	5
2.1.1 에너지 평형방정식을 기초로 하는 모형	5
1) 제3세대 파랑모형	5
2) 정상상태 스펙트럼 파랑모형	12
2.1.2 질량 및 운동량 평형방정식을 기초로 하는 모형	20
1) 정상상태 완경사방정식 파랑 모형	20
2) 비정상상태 완경사방정식 파랑 모형	25
2.2 유동장 이론	30
2.2.1 지배방정식	30
2.2.2 경계조건	34
제 3 장 수치실험 및 분석	37
3.1 대상영역의 특성	37

3.2 모델의 구성 및 입력조건	39
3.2.1 모델의 구성	39
3.2.2 입력 조건	49
3.3 결과 및 분석	51
3.3.1 파랑장 수치모형의 결과	51
1) 에너지 평형 모형방정식에 기초한 모형에 의한 결과	51
(1) 제3세대 파랑모형	51
(2) 정상상태 스펙트럼 파랑모형	59
2) 질량 및 운동량 평형방정식에 기초한 모형에 의한 결과	66
(1) 정상상태 환경사방정식 파랑모형에 의한 결과	66
(2) 비정상상태 환경사방정식 파랑모형에 의한 결과	71
3.3.2 흐름 및 바람의 영향을 고려한 수치모형 결과	78
(1) 흐름장 결과	78
(2) 흐름과 파랑을 고려한 경우의 결과	90
(3) 흐름과 파랑과 바람을 고려한 경우의 결과	92
제 4 장 결론	115
참 고 문 헌	119

LIST OF TABLES

Table 3.1 Numerical model characteristics	40
Table 3.2 Incident wave condition for design wave	49
Table 3.3 Characteristics of wind	49
Table 3.4 Simulation conditions of wave	50

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Transform of Coordinates considering the incident wave direction.	10
Fig. 2.2 Definition of wave and current vector	13
Fig. 2.3 Definition sketch of model domain	24
Fig. 2.4 Coordinate system for wave propagation	25
Fig. 2.5 Definition of calculation domain in the numerical model	25
Fig. 3.1 Location map for numerical simulation	38
Fig. 3.2 Water depth at the model site	40
Fig. 3.3 Orientation of transect lines for the comparison of numerical simulation results	41
Fig. 3.4 The field measured significant wave heights in winter	41
Fig. 3.5 The field measured significant wave heights in summer	42
Fig. 3.6 Comparison with field measurement at the stations	42
Fig. 3.7 Study area and depth for model simulation before reclamation in Gunsan-Janghang Harbor	43
Fig. 3.8 Generated finite element mesh for F.E.M. before reclamation in Gunsan-Janghang Harbor	43

Fig. 3.9 Study area and depth for model simulation after reclamation in Gunsan-Janghang Harbor	44
Fig. 3.10 Generated finite element mesh for F.E.M after reclamation in Gunsan-Janghang Harbor	44
Fig. 3.11 Detailed mesh for F.E.M. at study area(Janghang Coastline for shore protection work)	45
Fig. 3.12 Detailed mesh for F.D.M. at study area(Janghang Coastline for shore protection work)	46
Fig. 3.13 Detailed mesh for F.E.M. at study area(Gunsan Waterway)	47
Fig. 3.14 Detailed mesh for F.D.M. at study area(Gunsan Waterway)	48
Fig. 3.15 Wave vector from the 3rd generation wave model for the present configuration with wave(W)	53
Fig. 3.16 Wave vector from the 3rd generation wave model for the present configuration with wave(W) and Wind(W)	53
Fig. 3.17 Wave vector from the 3rd generation wave model for the present configuration with wave(WNW)	54
Fig. 3.18 Wave vector from the 3rd generation wave model for the present configuration with wave(WNW) and wind(WNW)	54
Fig. 3.19 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal reclamation plan with wave(W)	55
Fig. 3.20 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal reclamation plan with wave(W) and wind(W)	55
Fig. 3.21 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW)	56
Fig. 3.22 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal	

reclamation plan with wave(WNW) and wind(WNW)	56
Fig. 3.23 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route A(wave direction W)	57
Fig. 3.24 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route B(wave direction W)	57
Fig. 3.25 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route A(wave direction WNW)	58
Fig. 3.26 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route B(wave direction WNW)	58
Fig. 3.27 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(W)	60
Fig. 3.28 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(WNW)	60
Fig. 3.29 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(W) and wind(W)	61
Fig. 3.30 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(WNW) and wind(WNW)	61
Fig. 3.31 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(W)	62
Fig. 3.32 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW)	62
Fig. 3.33 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(W) and wind(W)	63
Fig. 3.34 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW) and wind(WNW)	63

Fig. 3.35	Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route A(wave direction W)	64
Fig. 3.36	Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route B (wave direction W)	64
Fig. 3.37	Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route A (wave direction WNW) ...	65
Fig. 3.38	Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route B (wave direction WNW) ...	65
Fig. 3.39	Wave height predictions from the steady-state mild slope eq. wave model for the present configuration with wave direction of W ...	67
Fig. 3.40	Wave height predictions from the steady-state mild slope eq. wave model after coastal reclamation plan with wave direction of W ...	67
Fig. 3.41	Wave height predictions from the steady-state mild slope eq. wave model for the present configuration with wave direction of W ...	68
Fig. 3.42	Wave height predictions from the steady-state mild slope eq. wave model after coastal reclamation plan with wave direction of W ...	68
Fig. 3.43	Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction W) ..	69
Fig. 3.44	Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route B(wave direction W) ..	69
Fig. 3.45	Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction WNW) ..	70
Fig. 3.46	Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route B(wave direction WNW) ..	70
Fig. 3.47	Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model	

	for the <i>present</i> configuration with wave(W)	72
Fig. 3.48	Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model for the <i>present</i> configuration with wave(WNW)	72
Fig. 3.49	Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model after coastal reclamation <i>plan</i> with wave(W)	73
Fig. 3.50	Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model after coastal reclamation <i>plan</i> with wave(WNW)	73
Fig. 3.51	Comparison of wave amplification factors from the non steady-state mild slope Eq. wave model along route A(wave direction W)	74
Fig. 3.52	Comparison of wave amplification factors from the non steady-state mild slope Eq. wave model along the route B(wave direction W)	74
Fig. 3.53	Comparison of wave amplification factors from the non steady-state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction WNW)	75
Fig. 3.54	Comparison of wave amplification factors from the non steady-state mild slope Eq. wave model along the route B(wave direction WNW)	75
Fig. 3.55	Comparison of wave amplification factors along the route A (wave direction W)	76
Fig. 3.56	Comparison of wave amplification factors along the route B (wave direction W)	76
Fig. 3.57	Comparison of wave amplification factors along the route A (wave direction WNW)	77
Fig. 3.58	Comparison of wave amplification factors along the route B (wave direction WNW)	77
Fig. 3.59	Selected station for Point for the <i>present</i> configuration	80
Fig. 3.60	Comparison of observed and calculated tides for the selected station	

.....	80
Fig. 3.61 Comparison of observed and calculated velocities for the selected station	81
Fig. 3.62 Computed tidal current(maximum flood current) point for the present configuration	82
Fig. 3.63 Computed tidal current(maximum ebb current) point for the present configuration	82
Fig. 3.64 Selected station point after coastal reclamation plan	83
Fig. 3.65 Computed tidal current(maximum flood current) point after coastal reclamation plan	83
Fig. 3.66 Computed tidal current(maximum ebb current) point after coastal reclamation plan	84
Fig. 3.67 Comparison of observed and calculated wave velocity for the selected station	84
Fig. 3.68 Stick diagram of tidal current computed in for the present configuration ..	85
Fig. 3.69 Stick diagram of tidal current computed in after coastal reclamation plan	86
Fig. 3.70 Velocity distribution of residual current for the present configuration (Janghang Coastline)	87
Fig. 3.71 Velocity distribution of residual current after coastal reclamation plan (Janghang Coastline)	88
Fig. 3.72 Velocity distribution of residual current for the present configuration (Gunsan Waterway)	89
Fig. 3.73 Velocity distribution of residual current after coastal reclamation plan (Gunsan Waterway)	89

Fig. 3.74	route lines for the comparison of numerical model results	94
Fig. 3.75	Wave vector distributions with wave(W) and tide(H.W.L) for the present configuration	94
Fig. 3.76	Wave vector distributions with wave(W) and tide(L.W.L) for the present configuration	95
Fig. 3.77	Wave vector distributions with wave(W) and current(M.F.C) for the present configuration	95
Fig. 3.78	Wave vector distributions with wave(W) and current(M.E.C) for the present configuration	96
Fig. 3.79	Wave vector distributions with wave(W) and tide(H.W.L) after coastal reclamation plan	96
Fig. 3.80	Wave vector distributions with wave(W) and tide(L.W.L) after coastal reclamation plan	97
Fig. 3.81	Wave vector distributions with wave(W) and current(M.F.C) after coastal reclamation plan	97
Fig. 3.82	Wave vector distributions with wave(W) and current(M.E.C) after coastal reclamation plan	98
Fig. 3.83	Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(H.W.L) for the present configuration	98
Fig. 3.84	Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(L.W.L) for the present configuration	99
Fig. 3.85	Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.F.C) for the present configuration	99
Fig. 3.86	Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.E.C) for the present configuration	100

Fig. 3.87	Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(H.W.L) after coastal reclamation plan (Janghang Coastline)	100
Fig. 3.88	Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(L.W.L) after coastal reclamation plan (Janghang Coastline)	101
Fig. 3.89	Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.F.C) after coastal reclamation plan	101
Fig. 3.90	Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.E.C) after coastal reclamation plan	102
Fig. 3.91	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(H.W.L) for the present configuration	102
Fig. 3.92	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(L.W.L) for the present configuration	103
Fig. 3.93	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and Current(M.F.C) for the present configuration	103
Fig. 3.94	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and Current(M.E.C) for the present configuration	104
Fig. 3.95	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(H.W.L) after coastal reclamation plan	104
Fig. 3.96	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(L.W.L) after coastal reclamation plan	105
Fig. 3.97	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and Current(M.F.C) after coastal reclamation plan	105
Fig. 3.98	Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and Current (M.E.C) after coastal reclamation plan	106
Fig. 3.99	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide	

	(H.W.L) for the <i>present</i> configuration	106
Fig. 3.100	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide (L.W.L) for the <i>present</i> configuration	107
Fig. 3.101	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current (M.F.C) for the <i>present</i> configuration	107
Fig. 3.102	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current (M.E.C) for the <i>present</i> configuration	108
Fig. 3.103	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide (H.W.L) after coastal reclamation <i>plan</i>	108
Fig. 3.104	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide (L.W.L) after coastal reclamation <i>plan</i>	109
Fig. 3.105	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current (M.F.C) after coastal reclamation <i>plan</i>	109
Fig. 3.106	Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current (M.E.C) after coastal reclamation <i>plan</i>	110
Fig. 3.107	Comparison of wave amplification factors along the route A for the <i>present</i> configuration(wave W and wind W)	110
Fig. 3.108	Comparison of wave amplification factors along the route B for the <i>present</i> configuration(wave W and wind W)	111
Fig. 3.109	Comparison of wave amplification factors along the route A for the <i>present</i> configuration(wave WNW and wind WNW)	111
Fig. 3.110	Comparison of wave amplification factors along the route B for the <i>present</i> configuration(wave WNW and wind WNW)	112
Fig. 3.111	Comparison of wave amplification factors along the route A after coastal reclamation <i>plan</i> (wave W and wind W)	112

Fig. 3.112 Comparison of wave amplification factors along the route B after coastal reclamation plan(wave W and wind W) 113

Fig. 3.113 Comparison of wave amplification factors along the route A after coastal reclamation plan(wave WNW and wind WNW) 113

Fig. 3.114 Comparison of wave amplification factors along the route B after coastal reclamation plan(wave WNW and wind WNW) 114

NOMENCLATURE

A	Elemental area
C_m	Mean wave celerity
$\overline{C_g}$	Average group celerity of the spectrum
C_g	Group velocity
C_D	Drag coefficient
C_{bottom}	Bottom friction coefficient
$C(x,y)$	Phase velocity = σ/k
$C_g(x,y)$	Group velocity = $\partial\sigma/\partial k = nC$ with $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$
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 $(\rho_w g)$
f_r	Friction coefficient
g	Gravitational acceleration
G	A gradient of air pressure
h	Water depth
H_{m0}	An estimated significant wave height
i	Water level
k	Wave number
k_p	Wave number associated with the peak of the spectrum

K_r	Reflection coefficient
K_t	Wave energy transmission coefficient
m_o	Spectrum moment
n :	Coordinate normal to the wave orthogonal
N	Wave action density
Q_p	Spectral peak parameter
r	Radius of the semicircle
R	Coordinate in the direction of the wave ray
S	Energy source and sink terms
S	Wave energy density
$S(f)$	Spectrum density function
S_{in}	Wind input(source term)
$S_{ds}(\sigma, \theta)$	Dissipation of wave energy (whitecapping)
$S_{ds.b}(\sigma, \theta)$	Dissipation of wave energy (bottom friction)
$S_{ds.br}(\sigma, \theta)$	Dissipation of wave energy (wave-breaking)
Δt	Equivalent travel time
T_p	Spectrum peak frequency
T	Spectrum average frequency
u_*	Friction velocity
U	Current speed
U_x	Speed of friction by wind
$\overline{U_{10}}$	Wind speed of 10m height on the sea surface
U_v	Wind speed of the sea side
U_{gr}	Wind speed by an air pressure gradient

w	Friction factor
Δx	Grid spacing
α, β	A coefficient of structure shape
α	($= \alpha_1 + i\alpha_2$) Complex coefficient
α	Wave orthogonal direction(normal to the wave crest)
α_m	Mean wave direction, relative to the grid
β	Wave phase angle
β	Factor equal to 0.9 for wind seas
γ	Wave breaking parameter
γ	A radius of an isobaric line
δ	Direction of the current relative to a reference frame (the x-axis)
ϵ	Coefficient equal to 30
ϵ_i	Spectral width parameter
θ	Wave direction
λ	Partitioning coefficient
μ	Direction of wave ray
ρ	Air density
ρ_a	Density of air
ρ_w	Density of water
$\hat{\eta}_s$	Scattering wave potential
$\{\hat{\eta}^I\}$	Subset of $\{\hat{\eta}\}$ for nodes situated on boundary I
$\hat{\eta}(x, y)$	Complex surface elevation function, from which the wave height can be estimated

σ	Wave frequency under consideration (in radians/second)
σ	Relative frequency
ω	Angular velocity
Φ	Latitude in the observation <i>point</i>

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

외해에서부터 매우 복잡한 해안선을 가진 연안까지의 영역에서 바람 성장과 파랑변형을 고려한 파랑 예측은 항로의 계획과 연안 구조물의 설계와 보수, 특히 연안 입구 또는 해변 등 해안공학분야의 대부분에서 중요한 부분이다. 일반적으로 이러한 분야에서는 연구 대상영역의 파랑장에 대한 전문적 지식이 요구된다. 파랑의 발달은 복잡한 수심, 조위, 바람과 조류에 의한 영향을 받므로 우리가 원하는 영역의 파랑 정보를 얻기란 쉬운 일이 아니다. 그러나 이러한 정보는 보통 대상영역에서 다소 떨어진 지역의 부이 관측자료 또는 지점 관측자료를 이용할 수 있다. 해안공학 기술자들은 이러한 불충분한 자료를 기초로 하여 여러 상황 속에서의 파랑 조건을 추정하는 능력을 길러야 한다.

수치모형해석은 지금까지 예측의 수단들 중 가장 효율적이며 비용이 저렴하고, 합리적인 방법이다. 최근까지 대부분의 파랑 예측은 에너지평형 방정식을 기초로 하는 모형과 질량 및 운동량 평형 방정식을 기초로 하는 모형의 두 가지 주요 이론 내에서 대상 영역에 맞추어 사용되어 왔다. 그러나 에너지평형 방정식에 기초한 수치모형은 수심 변화와 구조물의 형태에 따른 회절이나 반사의 영향을 반영하지 못하고 질량 및 운동량평형 방정식에 기초한 수치모형은 바람 발달에 의한 효과와 파랑 상호작용의 결과에 의해 발생하는 영향을 기술할 수 없는 단점이 있다. 또한 Vogel et al.(1988)의 연구에서는 이러한 관점에서 몇 가지 중요한 요점을 지적한 바 있다.

과거에 많은 연구자들이 굴절, 회절, 천수, 쇄파, 해저마찰과 반사 등과 같은 복잡한 요소를 포함하는 수치모형을 개발해 왔다. 그러나 최근의 연구에서는 바람이 급격하게 변화하는 경우에 이들 모형에 신뢰성이 없다는 것을 밝혀냈

고, 이후 파랑의 비선형 상호작용과 바람의 변화를 명확하게 고려할 수 있는 제3세대 파랑모형을 개발하기에 이르렀다. 제3세대 파랑모형은 스펙트럼과 파랑의 발달에 기본이 되는 원천(source)의 형태에 가정을 도입하지 않고 스펙트럼 에너지 평형 방정식을 사용하여 스펙트럼의 발달을 재현하는 모형을 지칭한다. 또한 비선형 효과를 고려함에 있어서 매개변수화하거나 또는 스펙트럼의 자기 상사구조를 이용하지 않고 비선형 상호작용에 관한 식을 근사적으로 직접 적분하여 계산한다.

많은 수치해석법의 발전이 있어왔지만, 특정 해안의 프로젝트를 담당하면서 각각의 수치모형에 근거를 둔 물리적인 기본 메카니즘의 이해함 없이 여러 가지 복잡한 현상이 고려된 계산 결과를 사전에 파악하지 않고 무분별하게 사용되어 지고 있다.

현재까지 이 모든 물리적 현상들을 단 하나의 모델에 전부 포함시키는 것은 불가능하다. 다행히 현재 개발되어져 있는 모형은 과거에 다룰 수 없었던 제반 인자들을 나름대로 포함시켜서 개발하였으므로 이용하기 편리하고 그 결과의 제시 방법을 다양한 그래픽 기능으로 나타낼 수 있다. 그러나 그 결과가 화려하게 보인다고 해서 무분별하게 적용할 때 큰 과오를 범할 우려가 있으므로 현장적용 시에는 신중을 기할 필요가 있다. 따라서 각각의 개발된 모형의 배경을 조사·이해하고 모형 적용 결과를 해석할 때 이를 반영하도록 하는 시도가 필요하다고 하겠다.

최근 충청권 행정도시 건설, 수도권 산업단지의 포화와 국가의 균형발전 등의 목적으로 군산-장항 국가산업단지 개발방안이 국가균형발전위원회의 활성화 방안 진행 추이와 산업용지 수요 등 제반 여건에 박자를 맞춰 단계별로 수립돼 시행될 전망이다. 계획에 따라 1990년에 제 3진입로만 완공된 상태지만 주 진입로인 호안도로공사 착공 시 산업단지 조성사업은 탄력을 받을 것으로

본다. 이번에 착공될 산업단지 호안도로 축조공사는 충남 서천군 장항읍~마서면 해변부 6.023km의 호안공사와 호안 위 도로 5.9km의 도로를 건설하는 것이다. 이러한 호안공사시 가장 기본적이며 설계에 큰 영향을 미치는 인자 중에 하나가 파랑이다. 특히, 파랑은 지형과 수심이 복잡한 연안 해역에서 조석 및 바람에 의한 파의 성장 및 감쇠 등으로 인한 에너지의 재 분포 과정을 거쳐 변화하게 된다. 본 논문에서는 군산-장항항의 복잡한 수심의 변화와 계절풍의 영향 그리고 현재 진행 중인 대규모 해안 매립공사에 의한 파랑의 변화가 수로에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 다루어 보기로 하였다. 연구 대상역에 대해 만족할 수 있는 결과를 얻기 위해 현재 널리 사용되어지고 있는 제 3세대 파랑모형, 정상상태 스펙트럼 파랑모형, 정상상태 환경사방정식 파랑 모형, 비정상상태 환경사방정식 파랑모형을 적용하여 매립 및 호안도로 공사로 인한 파랑의 변화를 관찰하고, 바람 성장에 의한 파랑 발달과 흐름까지 고려한 파랑의 변화를 살펴봄으로써 여러 인자들을 적용하여 수행한 수치실험 결과의 값들을 비교할 것이다. 이들의 결과는 모형 각각이 가진 배경과 가정을 근거로 하여 분석하고 추후 수치모형의 활용에 중요한 판단의 기준을 제시할 수 있을 것으로 본다.

1.2 연구 동향 및 방법

파랑 모형은 경험적인 모형과 에너지 평형방정식에 기초한 모형으로 분류한다.

경험적인 모형은 Sverdrup & Munk(1947)가 2차 세계대전 중 풍파를 예측하기 위해 수행한 연구로서 불규칙한 파랑을 정량적으로 기술하기 위해 유의파라는 통계량을 도입하였고, 그 이후 Brestschneider(1952)와 Wilson(1965)이 많은 관측 자료를 보완하여 SMB법으로 명명하였다. SMB법이 파의 불규칙성

을 제대로 반영하지 못하는 단점을 보완하기 위해 파랑 스펙트럼의 개념을 도입하여 파의 발생, 발달, 너울의 전파, 해안에서의 파랑 변형 등을 계산하는 기법이 Pierson et al.(1955)에 의해서 개발되어 PNJ법으로 불렸다. 이 두 방법은 이론적인 근거는 가지고 있지만, 관측 자료에 크게 의존하므로, 사용 시 각별한 주의를 기울여야 한다.

에너지 평형방정식에 기초한 모형은 Gelci et al.(1957)에 의해 처음 개발되었지만, 파랑발달과 소산과정에 대한 충분한 이해가 부족했다. 이 후에 파랑생성이론을 Phillips(1957)와 Miles(1957)가 발표하고, Hasselmann(1962)이 비선형 상호작용에 의한 에너지 평형에 대한 연구를 발표함으로써 파랑모형에 대한 이론적인 틀이 확립되었다. 에너지 평형방정식에 의한 수치모형은 파랑의 발생, 소산 및 비선형 상호작용의 고려여부와 평가방법에 따라 제1세대, 제2세대, 제3세대 모형으로 분류된다. 제3세대 모형의 대표 격인 SWAN모형(Booij et al., 1999)은 WAM모형이 연안역에서 중요한 수심변화에 의해 발생하는 쇄파, 3파 비선형 상호작용 등을 포함할 수 없음을 해결하기 위해 음해법을 이용하여 파랑의 전파를 계산하고, 수심변화에 의해 발생하는 쇄파 및 3파 비선형 상호작용을 고려할 수 있도록 개발되었다. 그리고 Holthuijsen et al.(2003)은 회절현상을 고려하지 못하는 스펙트럼 모형의 단점을 극복하기 위해서 환경사방정식과 스펙트럼 모형을 결합시켜 회절현상을 재현하였다.

따라서 본 연구에서는 파랑의 재현을 위하여 바람장의 유무에 따른 수로 및 항내에서 파랑의 전파과정을 살펴보고, 반사와 회절의 적용 유무에 따른 파랑의 변화를 살펴볼 것이다. 또한, 유동장 수치실험을 수행하여 대상역의 중요 위치에 대한 유속과 흐름의 변화를 살펴보고, 흐름과 파랑, 바람의 영향을 모두 고려한 수치실험도 수행하여 파랑 변화를 분석할 것이다.

제2장 수치모형의 기초이론

2.1 파랑장 이론

2.1.1 에너지 평형방정식을 기초로 하는 모형

1) 제3세대 파랑모형

Delft 대학에서 개발된 제3세대 풍파모형으로서 심해 풍파모형인 WAM, WAVEWATCH와 더불어 세계적으로 가장 널리 쓰이고 있는 파랑모형 중 하나이다. 심해입사파, 바람, 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구의 파랑을 계산한다(WAMDI group, 1988). 이 모형의 기본방정식은 Cartesian 좌표계에 대해 파랑작용 평형방정식(wave action balance equation)으로 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.1)$$

파랑 작용 평형방정식의 좌변 제1항은 파랑 작용의 시간변화량, 제2항과 제3항은 지리적 공간에서의 파랑 작용의 전파, 제4항은 σ 상에서 수심과 해류의 변화로 인한 상대 주파수의 이동, 제5항은 공간 θ 상의 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다.

여기서, c_i 는 각 공간상의 전파속도, σ 는 상대 주파수, θ 는 파향, $S(=S(\sigma, \theta))$ 는 에너지의 생성, 소산, 전달을 표현하는 에너지 소스항, N 은 작용 밀도 스펙트럼(action density spectrum)을 나타낸다.

파랑 작용 밀도 스펙트럼($=N(\sigma, \theta)$)과 파랑 에너지 밀도 스펙트럼($=E(\sigma, \theta)$)의 관계

식은 다음과 같다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (2.2)$$

정상상태로 가정할 경우 파랑 평형방정식에서 독립변수인 시간 즉, 첫 번째 항은 방정식으로부터 제거되고 각각의 평형방정식의 각 항은 다음과 같이 유한차분법으로 수치기법으로 근사화 된다.

지형적인 공간에서 전파항

$$\frac{\partial c_x N(\sigma, \theta)}{\partial x} \simeq \frac{[c_x N]_{i_x} - [c_x N]_{i_x-1}}{\Delta x} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial c_y N(\sigma, \theta)}{\partial y} \simeq \frac{[c_y N]_{i_y} - [c_y N]_{i_y-1}}{\Delta y} \quad (2.4)$$

스펙트럼 공간에서 전파항

$$\frac{\partial c_\sigma N(\sigma, \theta)}{\partial \sigma} \simeq \frac{(1-\nu)[c_\sigma M]_{i_\sigma+1}}{2\Delta\sigma} + \frac{2\nu[c_\sigma M]_{i_\sigma} - (1+\nu)[c_\sigma M]_{i_\sigma-1}}{2\Delta\sigma} \quad (2.5)$$

방향 공간에서 전파항

$$\frac{\partial c_\theta N(\sigma, \theta)}{\partial \theta} \simeq \frac{(1-\eta)[c_\theta M]_{i_\theta+1}}{2\Delta\theta} + \frac{2\eta[c_\theta M]_{i_\theta} - (1+\eta)[c_\theta M]_{i_\theta-1}}{2\Delta\theta} \quad (2.6)$$

여기서, i_x, i_y, i_θ, i_0 는 각 공간상의 격자수(grid counter)이며, ν, η 는 스펙트럼 공간상의 풍상차분(upwind difference)이나 중앙차분(central difference)의 정도를 결정하는 계수로, 주기와 방향공간에서 수치적 확산(numerical diffusion)을 조절한다.

평형방정식의 우변은 에너지 유입항과 에너지 소산항의 합을 나타내며 이는 다음 식과 같이 파랑의 생성, 소산 및 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달이 포함된다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.7)$$

여기서, S_{in} 은 바람에 의한 에너지 유입, S_{ds} 는 에너지 소산, S_{nl} 는 4파 비선형 상호작용이다.

바람 에너지가 파로 전이되는 것은 공진 메카니즘(resonance mechanism)과 전단 메카니즘(feed-back mechanism)으로 나타나는데, 이에 대응되는 각 항은 선형적인 발달과 지수적인 발달의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2.8)$$

여기서, A(선형적 발달)는 Cavaleri & Malanotte- Rizzoli(1981)의 식을 사용하였다. B(지수적 발달)는 Snyder et al.(1981)식과 Janssen(1989, 1991)식 중에서 선택하여 사용한다.

파랑 에너지의 소산항은 다음과 같은 세 개의 항의 합으로 나타내어진다.

백파에 의한 에너지 소산은 Komen et al.(1984)식과 Janssen(1991)식을 선택적으로 사용한다.

Komen et al.(1984)의 바람 입력식을 사용한 경우 백파 소산 $S_{ds,br}$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{\bar{k}} E(\sigma, \theta) \quad (2.9)$$

여기서, Γ 는 경사 종속계수, k 는 파수, $\bar{\sigma}$ 는 평균주파수, \bar{k} 는 평균 파수를 나타낸다.

Janssen(1991)의 바람 입력에 대응하는 백파 소산 모형은 다음과 같다.

$$\Gamma = C_{ds} \left[(1 - \delta) + \delta \frac{k}{\bar{k}} \right] \left(\frac{\bar{s}}{s_{PM}} \right)^p \quad (2.10)$$

여기서, C_{ds} , δ , p 는 수치상수로 Komen et al.(1984)와 Janssen(1992)에 의한 값을 사용하며, \bar{s} 는 파형경사, s_{PM} 은 PM스펙트럼(Pierson & Moskowitz, 1964)의 \bar{s} 의 값 ($s_{PM} = 3.02 \times 10^{-3}$)^{1/2}이다.

저면에 의한 에너지 소산은 저면 마찰, 저면 운동, 투수 및 불규칙 저면의 산란 등에 의하여 발생한다. SWAN 모형에서는 Weber(1991)의 식을 사용하여 저면마찰 소산 $S_{ds,b}$ 을 계산하였다.

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (2.11)$$

여기서, C_{bottom} 은 저면마찰계수이다.

파랑장에서 수심에 의해 발생하는 쇄파에 의한 파랑 에너지 소산의 계산에는 단파 모형이 적용된다(Battjes & Janssen, 1978). Eldeberky & Battjes(1995)는 파랑 스펙트럼에 비례하는 쇄파 소산 공식을 도출하였으며, 이 공식을 쇄파에 의한 에너지 소산식으로 사용하였다.

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = - \frac{\alpha_{BJ} Q_b \bar{\sigma} H_m^2}{8\pi} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (2.12)$$

여기서, α_{BJ} 는 수치상수, Q_b 는 쇄파율, H_m 는 최대파고로 $H_m = \gamma d$ 로 계산된다. γ 는 Nelson(1987)식을 사용하여 계산하였다.

$$\gamma = 0.55 + 0.88e^{-0.012cot\beta} \quad \text{for} \quad 0 < \beta < 0.1 \quad (2.13)$$

여기서, β 는 해저면의 경사, α_{BJ} 는 쇄파 발달의 관측으로부터 추정될 수 있으며, 모형에서는 1.0을 적용하였다.

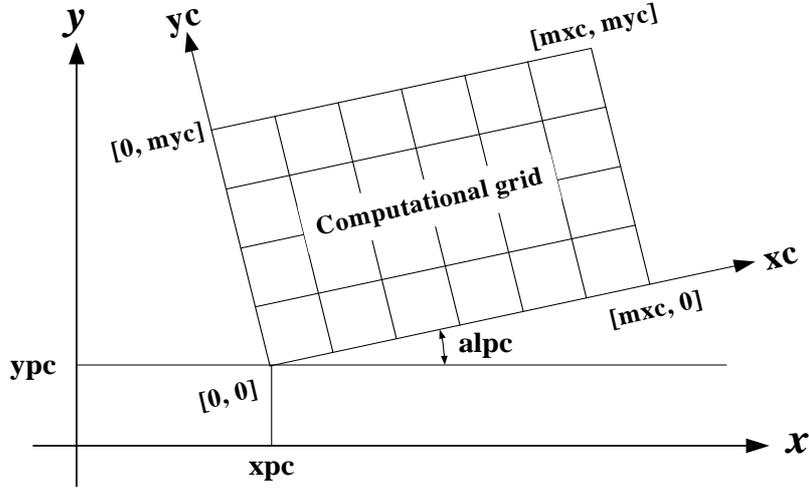


Fig. 2.1 Transform of Coordinates considering the incident wave direction.

본 모형에서 격자는 3가지 방법으로 사용할 수 있다.

즉, Δ_x 와 Δ_y 가 일정한 고정격자, Δ_x 와 Δ_y 가 다른 가변격자, 곡선격자이다.

지형공간에서 일차풍상차분법, 스펙트럼공간에서 여러 변수들을 풍상차분법과 중앙차분법을 같이 사용하는 음해법으로 해석한다.

3파 비선형작용을 계산하기 위해 Eldeberky(1996)가 사용한 *LTA*(Lumped Triad Approximation)근사법을 선택하였다. 4파 비선형상호작용은 Hasselmann et al.(1985)에 의해 제안된 *DIA*(Discrete Interaction Approximation)근사법을 사용하여 해석하였다. 모형에서 사용된 JONSWAP 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4} - \frac{1}{2}\frac{(f-f_m)^2}{\sigma^2 f_m^2}} \gamma^e \quad (2.14)$$

여기서, α 는 Phillips 상수, f_m 는 첨두주파수, γ 은 첨두향상계수이다.

σ 는 스펙트럼의 폭을 결정하는 파라미터로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_a & \text{for } f &\leq f_m \\ \sigma &= \sigma_b & \text{for } f &> f_m \end{aligned}$$

Hasselmann et al.(1973)이 북해에서 관측한 심해 파랑자료의 분석결과에 의하면 α 와 f_m 은 취송거리와 풍속의 함수로 결정되며, γ , σ_a , σ_b 의 평균값은 각각 3.3, 0.07, 0.09로 나타난다. 특히, γ 의 분포범위는 1.0 ~ 6.0이다.

유의파고 H_s 와 파향 $\bar{\theta}$ 은 다음 두 식과 같이 정의된다.

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (2.15)$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\int \sin\theta E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos\theta E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right\} \quad (2.16)$$

지형공간과 스펙트럼 공간에서의 경계조건은 해안선을 통과하거나 계산영역을 지날 경우에는 완전히 흡수되는 것으로 한다. 개방경계에 해안지역이 포함되어 있을 경우에는 입사되는 에너지를 허용하지 않으며, 심해 개방경계에서만 에너지가 입사될 수 있다.

2) 정상상태 스펙트럼 파랑모형

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

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(\omega_a, \alpha)}{w_r} = \Sigma \frac{S}{w_r} \quad (2.17)$$

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

$S =$ 에너지 소스와 싱크 항(쇄파, 바람 및 간섭 항)

$\omega =$ 각 주파

$g =$ 중력 가속도

$k =$ 파수

$\alpha =$ 파향선 방향(파봉선에 직교, Fig. 2.1 참조)

$\mu =$ 파의 에너지 전달 방향

파와 흐름의 상호작용은 흐름과 함께 움직이는 이동기준좌표계에서 생각한다. 이 기준좌표계에서 파의 파라메타들은 흐름에 상대적인 의미인 첨자 r 로 표시하고 고정 기준좌표계에서의 파라메타들은 절대적인 의미인 첨자 a 로 표시하였다. 파의 분산관계는 다음의 식으로 나타낸다.

$$\omega_r^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.18)$$

여기서, $h =$ 수심

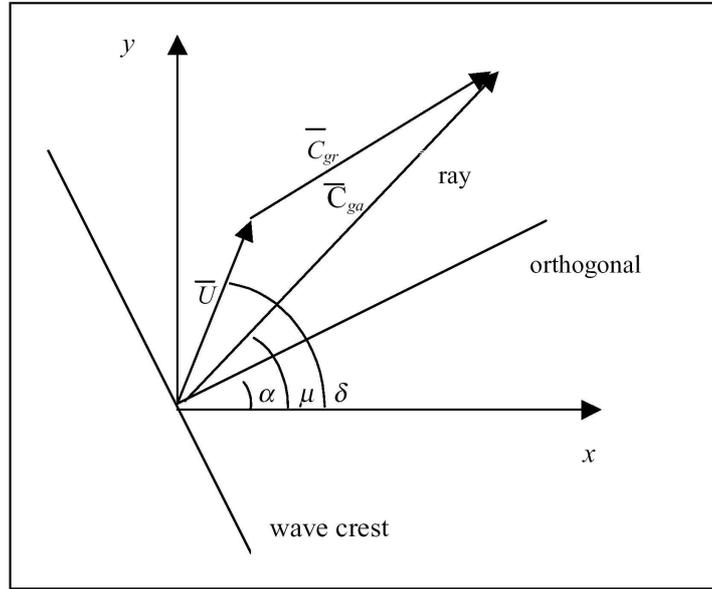


Fig. 2.2 Definition of wave and current vector

절대 기준좌표계에서 각주파수는 다음과 같다.

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha) \quad (2.19)$$

여기서, U = 흐름 속도

δ = 기준좌표(여기에서는 x축)에 대한 상대 흐름의 방향

파수는 식(2.19)에 식(2.18)을 대입하여 k 에 대하여 반복 계산하면 구할 수 있다. 파수와 파장($L = 2B/k$)은 두 가지의 구조관계에서 동일하다.

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

$$C_r = \frac{\omega_r}{k} \quad (2.20)$$

$$C_{gr} = C_r \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (2.21)$$

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

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad (2.22)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad (2.23)$$

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. 2.2에서 파의 에너지 전달 방향 μ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right) \quad (2.24)$$

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.

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn} \quad (2.25)$$

여기서, D = 도함수 연산자

R = 파의 에너지 전달 방향의 좌표축

n = 파향선에 대한 직교 좌표축

본 모형에서 굴절과 천수효과는 파의 에너지 전달 방향의 반대 방향으로 역 추적하여 파랑작용 보존을 적용하여 스펙트럼 파랑모형에서 반영된다. 파의 에너지 전달 방향은 다음 열에서 하나의 격자 열로 가는 미세 구간별로 추적한다. 2차원 파랑 스펙트럼은 첫 번째 격자 열(외해 경계)을 따라 입력하여 설정한다. 두 번째 격자 열의 점(point)에 대해 스펙트럼은 스펙트럼의 주파수와 방향 요소 각각에 대한 파의 에너지 전달 방향을 다시 추적하여 계산한다. 파의 에너지 전달 방향 μ 는 식(2.24)에서 정의했다. 본 모형은 해안 쪽으로 전파하는 방향만($-87.5^\circ \sim +87.5^\circ$) 고려한다. 외해로 향하는 에너지 전달은 무시한다.

파향선은 이전 격자 열에서 후방으로 추적한다. 계속해서 이전 열(column)에서 파수, 파속, 군속, 그리고 파향각을 계산한다. 2열에서 파랑에너지의 굴절과 천수효과는 파의 에너지 전달을 따라 파랑작용 보존은 식(2.23)으로 계산한다.

회절은 파 에너지의 평할화 과정을 거쳐 간단한 방법으로 스펙트럼 파랑 모형에 적용된다. 다음 식을 이용하여 주어진 주파수와 파향의 에너지를 평할화한다.

$$E_j(\omega_a, \theta) = 0.55E_j(\omega_a, \theta) + 0.225(E_{j+1}(\omega_a, \theta) + E_{j-1}(\omega_a, \theta)) \quad (2.26)$$

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

킨다. 위의 식은 차폐된 지역에서 발생하는 파고 기울기의 보간을 나타내지만 파의 회전은 나타내지 않는다.

쇄파의 기준은 수심에 대한 파고 비율의 함수로 나타낸다. 여기서 H_{m0} 는 쇄파 시 에너지에 기초한 최대파고이다.

$$\frac{H_{m0_{\max}}}{d} = 0.64 \quad (2.27)$$

해안 입구에서 파는 파와 흐름의 상호작용에 의해 가파르게 되고, 쇄파는 경사의 증가로 인해 강화된다. 간단하고 정확한 Miche 기준(1951)의 공식으로 쇄파 관계를 찾았다.

$$H_{m0_{\max}} = 0.1L \tanh kd \quad (2.28)$$

식 (2.28)은 제로모멘트 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 나타내지 않는다. 식 (2.28)에 의해 한정된 파고에서 모형 격자 셀은 활동적인 쇄파 셀로 약해진다.

파랑은 파랑장에서 바람장으로부터 운동량의 이송을 통하여 성장한다. 파랑장에서의 에너지 플럭스 S_{in} 은 Resio(1988)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$S_{in} = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_w} 0.85 C_m \frac{u_*^2}{g} \quad (2.29)$$

여기서, λ = 파랑장으로 대기가 직접 물에 전달하는 운동량의 총량을 나타

내는 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)

심해에서, 스펙트럼 파랑모형은 Hasselmann et al.(1973)으로 일관되는 총 에너지 성장률을 제공한다. 스펙트럼에 대한 에너지 증가는 격자 셀을 가로질러 이동하는 파에 대한 등적 시간에 의해 증가하는 에너지 플럭스로 계산한다.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\beta \overline{C}_g \cos \theta_m} \quad (2.30)$$

여기서, Δt = 등가 이동 시간

Δx = 격자 간격

β = 풍파에 대해 0.9와 동일한 계수

\overline{C}_g = 스펙트럼의 평균 군속도

α_m = 격자에 대한 평균 파향

스펙트럼 파랑모형은 반평면 모형이기 때문에, 해안을 향해(+ x 방향) 부는 바람만 포함한다. 바다로 부는 바람과 바다로 이동하는 파의 성장에 의한 파의 감소는 무시한다.

에너지는 바람으로부터 파로 공급된다. 그것은 비선형파의 상호 간섭에 의해 재분배된다. 에너지는 최대주파수가 감소하거나 최대주기가 증가하는 저주파수와 산란된 고주파수 스펙트럼의 최고점으로부터 이동한다.

스펙트럼 파랑 모형에서는, 스펙트럼 최고점의 주파수는 취송거리나 등가의 에너지 전달시간과 함께 증가한다. 다음은 f_p 의 변화하는 비율에 대한 식이다.

$$(f_p)_{i+1} = \left[(f_p)_i^{7/3} \frac{-9}{5} \zeta \left(\frac{u_*}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right]^{-3/7} \quad (2.31)$$

여기서, 아래 첨자 i 와 $i+1$ 은 모형의 격자 열 색인에 관하여 설명하는 것이고 ζ 는 무차원 상수이다(Resio & Perrie, 1989). 스펙트럼의 단일 상사 형상을 유지한다는 의미의 스펙트럼(최고 주파수 보다 작은 주파수) 전면에서 주파수가 스펙트럼에 의해 얻어진 에너지를 설명한다.

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

$$\Gamma_E = \frac{\epsilon g^{1/2} E^3 k_p^{9/2}}{\tanh^{3/4}(k_p d)} \quad (2.32)$$

여기서, Γ_E = 에너지 플럭스

ϵ = 수정 계수(=30)

E_{tot} = 스펙트럼 총 에너지

k_p = 최고 스펙트럼에서의 파수

스펙트럼의 바다 부분 0.9와 너울 부분 1.0으로 되는 β 와 함께 식 (2.30)에서 격자 셀을 통과하는 파에 대한 등가시간(Δt)에 의한 에너지 플러스의 증가가 스펙트럼 에너지 손실을 계산하며 바람의 영향을 포함할 때 적용한다.

2.1.2 질량 및 운동량 평형방정식을 기초로 하는 모형

1) 정상상태 환경사방정식 파랑 모형

연안의 표면파랑 모형을 구축하기 위하여 2차원 타원형 환경사 파랑 방정식을 다음과 같이 사용하기로 한다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (2.33)$$

여기서, $\hat{\eta}(x, y)$ = 복소해면변동함수

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

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

$$C_g(x, y) = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = nC \quad ; \quad \text{군속도 (group velocity), } n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

$k(x, y)$ = 수심 $d(x, y)$ 에서 선형분산관계식 $\sigma^2 = kg \tanh(kd)$ 을 만족하는 파수 ($=2\pi/L$)를 가리킨다.

식 (2.33)은 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.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad (2.34)$$

여기서, w = 마찰항

γ = 쇄파파라메타

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

$$w = \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd)\sinh kd} \right] \quad (2.35)$$

여기서, $a = H/2$; 파랑의 진폭

f_r = 마찰계수

마찰계수는 레이놀즈수와 저면조도에 좌우되며, 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.

$$\gamma = \frac{0.15}{d} \left(1 - \frac{0.4^2 d^2}{4a^2} \right) \quad (2.36)$$

위의 관계식 외에도, 비선형파의 시뮬레이션을 본 모형에서 재현할 수 있다. 이것은 이러한 시뮬레이션에 중요하다고 알려진 진폭을 고려한 파랑분산관계를 사용할 수 있다. 식 (2.33) 및 (2.34)에 있는 선형분산관계식을 비선형 분산관계식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma^2 = gk \left[1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd \right] \tanh \{ kd + kaF_2 \} \quad (2.37)$$

$$\text{여기서, } F_1 = \frac{\cosh(4kd) - 2\tanh^2(kd)}{8\sinh^4(kd)}$$

$$F_2 = \left(\frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^4$$

본 모형에서 적용하는 경계조건으로 해안선이나 투과성 구조물에 대해서는 다음과 같은 부분반사경계조건이 적용된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial n} = \alpha \hat{\eta} \quad (2.38)$$

α 는 복소계수로 다음 식과 같이 사용한다.

$$\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (2.39)$$

여기서, K_r = 반사계수

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

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{\eta}_s \rightarrow 0 \quad (2.40)$$

여기서, $\hat{\eta}_s$ = 산란파의 포텐셜

r = 중심 축에서부터 임의의 점까지의 거리

의도하는 산란파의 포텐셜 $\hat{\eta}_s$ 는 완경사방정식의 해이고, 식 (2.40)의 방사조건식을 만족한다. 이는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\hat{\eta}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (\alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (2.41)$$

여기서, $H_n(kr)$ = 제1종 Hankel 함수

제2종 Hankel함수는 무한대에서 Sommerfeld 방사조건을 만족하지 않으므로 식 (2.41)에서 제외되었다.

그러나 $\hat{\eta}_s$ 는 일정수심의 외부 영역을 필요로 한다. Fig. 2.3과 같은 항만 문제에서도, 식 (2.41)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.

$$\frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial r} + p \hat{\eta}_s + q \frac{\partial \hat{\eta}_s^2}{\partial \theta^2} = 0 \quad (2.42)$$

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. 모형영역 Ω 내에서, 확장 환경사방정식이 적용된다. 반원형호 Γ 를 따라서 개방경계조건으로 위와 같이 포물선형 근사를 사용한다.

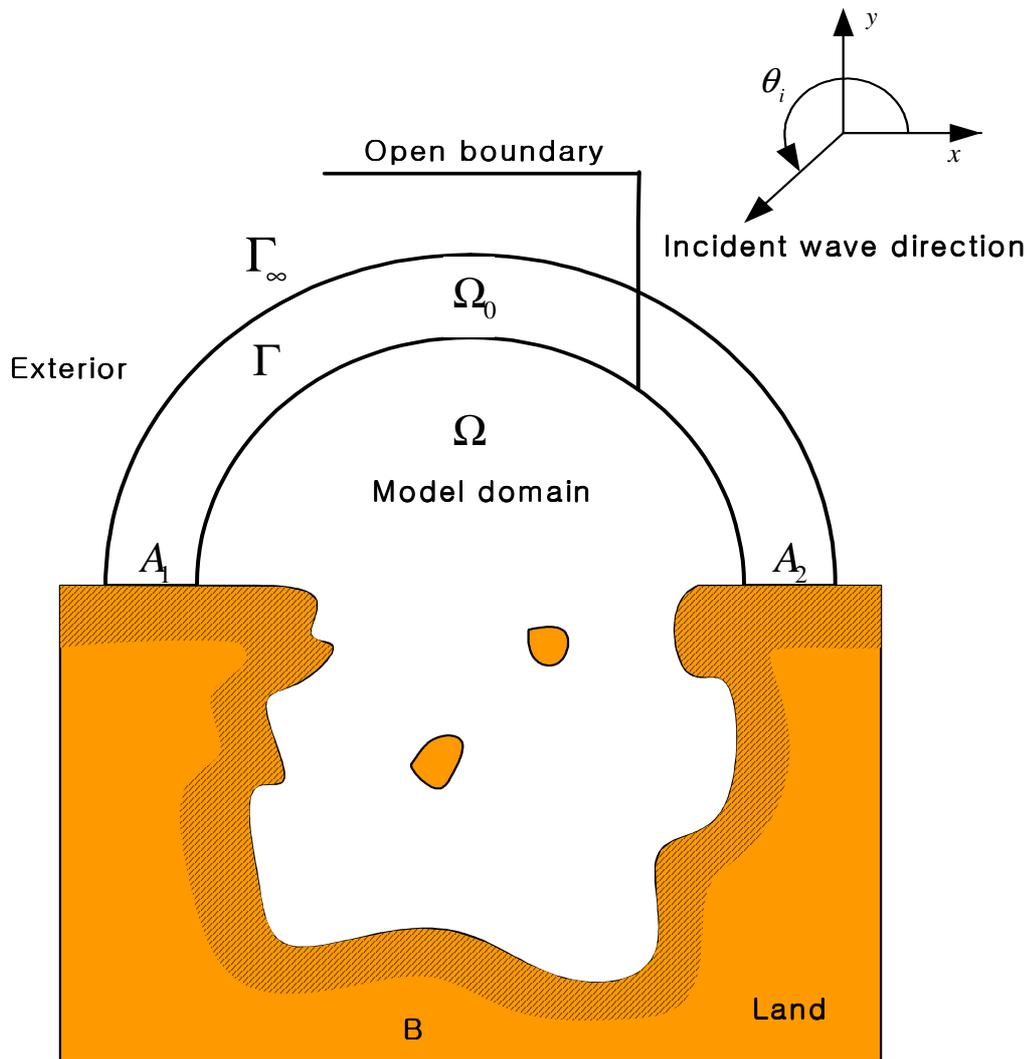


Fig. 2.3 Definition sketch of model domain

2) 비정상상태 환경사 방정식 파랑모형

본 모형은 광역 파랑변형 실험에 사용한 것으로 파랑의 천수, 굴절, 회절, 쇄파 변형 및 파랑 흐름간의 간섭효과를 동시에 고려할 수 있도록 비정상 상태의 환경사 방정식을 정상상태로 가정하여, 유도한 타원형 편미분방정식이다.

파랑의 굴절, 회절 및 흐름과의 간섭효과에 의해, 변형되는 현상을 해석하기 위해 비정상 상태에서의 환경사라는 가정 하에서 다음 식을 이용하여 기본방정식을 유도한다.

$$\begin{aligned} \frac{D^2\Phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot \vec{U}) \frac{D\Phi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) \\ + (\sigma^2 - k^2 CC_g)\Phi + (\sigma^2 - \omega^2)\Phi = 0 \end{aligned} \quad (2.43)$$

여기서, $\Phi = \phi e^{-i\omega t}$, $\phi = a \cdot e^{ks}$ 이다.

$$\frac{D^2}{Dt^2} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \right) \quad (2.44)$$

위 식은 파고분포에 따른 파랑의 비선형 효과를 포함한 것이므로 shoal 뒤에서와 같은 파향 집중지역에서 파고의 분포를 계산하기에 적합하다. 상기의 두 식을 정리하여 정상상태에서의 환경사방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + [k^2 CC_g - 2(\sigma^2 - \omega^2) \\ + i\omega(\nabla \cdot \vec{U})]\phi + (1 - 2i\omega)(\vec{U} \cdot \nabla \phi) = 0 \end{aligned} \quad (2.45)$$

여기서, $hi = a \cdot e^{is}$ 를 대입하여 미분한 후, 유속이 파속 보다 매우 크다고 가정하여 정리하면 다음 식과 같아진다.

$$\frac{1}{H} \left(\nabla^2 H + \frac{1}{CC_g} \nabla CC_g \cdot \nabla H \right) - |\nabla S| + k^2 - \frac{2(\sigma^2 - \omega^2)}{CC_g} = 0 \quad (2.46)$$

$$\nabla \cdot (H^2 CC_g \nabla S) + \nabla \cdot (\omega \vec{UH}^2) - \vec{UH}^2 \cdot \nabla S = 0 \quad (2.47)$$

위 식 중에서 식 (2.46)은 회절효과가 고려된 파수 $|\nabla S|$ 에 관한 식이며, 식 (2.47)은 파의 에너지 보존식을 나타낸다. 위의 두 식을 다시 정리하고, 파수의 비회전성에 관한 식과 $|\nabla S|$ 에 대한 식을 각각 $\nabla \times (\nabla S) = 0$ 와 $\nabla S = |\nabla S| \cos \theta + |\nabla S| \sin \theta$ 로 정의하여 다시 정리하면 Fig. 2.4와 같은 좌표계에서 정상상태 하에서의 파고 변화에 의한 회절효과와 파랑과 흐름간의 간섭효과를 고려한 파랑 변형에 관한 다음과 같은 기본 방정식이 된다.

$$|\nabla S|^2 = k^2 + \frac{1}{H} \left(\nabla^2 H + \frac{1}{CC_g} \nabla CC_g \cdot \nabla H \right) - \frac{2(\sigma^2 - \omega^2)}{CC_g} \quad (2.48)$$

$$\nabla \cdot (H^2 CC_g \nabla S) + \nabla \cdot (\omega \vec{UH}^2) - \vec{UH}^2 \cdot \nabla S = 0 \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (|\nabla S| \sin \theta) - \frac{\partial}{\partial y} (|\nabla S| \cos \theta) = 0 \quad (2.50)$$

여기서, $|\nabla S|$: 회절 효과를 고려한 파수 , H : 파고

C : 파속 , k : 파수($=2\pi/L$)

σ : 상대 각주파수($\sigma^2 = gk \tanh(kh)$) , h : 수심

C_g : 파랑의 군속도 , ω : 절대 각주파수($=\sigma + \vec{k} \cdot \vec{U}$)

\vec{k} : 파수 벡터 , \vec{U} : 평면에서의 유속 벡터

θ : 파향

기본 방정식 중 식 (2.48)는 회절 효과를 고려한 파수 보존식이고, 식 (2.49)은 파의 에너지 보존을 나타내는 식으로 이 두 식으로부터 파고가 계산된다. 마지막 식 (2.50)은 파수의 비회전성으로부터 유도한 파랑의 진행방향 계산식이다.

본 모형에서는 해가 빠르게 수렴하도록 Fig. 2.5와 같은 각 격자점에서 파고와 파향의 초기치를 개략적으로 산정한 후, 이를 이용하여 정밀 계산을 하게 된다. 먼저, 수심과 입사파 제원 및 파의 분산관계식 ($\sigma^2 = gk \tanh(kh)$)을 이용하여 파수 k 를 구하고, 이로부터 파속 C 와 군속도 C_g 를 각 격자점에서 구한다. 다음에 Snell 법칙에 의하여 초기 파향을 구하고, 천수계수와 굴절계수를 계산한 후 초기 파고를 계산한다.

초기치를 이용하여 기본 방정식을 유한차분 양해법으로 푸는데, 먼저 $|\nabla S|$ 를 구하고 다음에 파향 θ 를 계산한 후 파고 H 를 계산한다. 파의 진행방향으로는 전진 차분법을 적용하고 진행 방향의 직각 방향으로는 중앙 차분법을 적용하여, 외해 입사 경계역부터 모형 영역 내부로 계산을 수행하여 가는데 각 격자점에서 다음과 같은 수렴 조건을 동시에 만족할 때까지 계산을 반복한다.

$$\left| \frac{|\nabla S|_{old} - |\nabla S|_{new}}{|\nabla S|_{new}} \right| < 10^{-3} \quad (2.51)$$

$$\left| \frac{H_{old} - H_{new}}{H_{new}} \right| < 10^{-3} \quad (2.52)$$

한편, 각 격자점에서 계산된 파고를 쇄파고와 비교하여 파고가 쇄파고보다 크지 않도록 조정하였다. 쇄파조건은 심해파 주기와 해저경사를 고려한 Weggel의 식을 사용하였다

$$H_b = \frac{bh_b}{1 + \frac{h_b a}{gT^2}} \quad (2.53)$$

여기서, H_b : 쇄파 파고

h_b : 쇄파 수심

T : 파랑 주기

$a = 43.75\{1 - \exp(-19m)\}$

$b = 1.56/\{1 + \exp(-19.5m)\}$

m : 해저 경사

모형의 경계는 크게 입사 경계와 투과 경계로 구분된다. 외해의 입사 경계에서는 입사파의 파고, 주기 및 파향이 주어지며, 측면 및 육지 경계에서는 파가 투과하도록 하는 투과 경계조건을 준다.

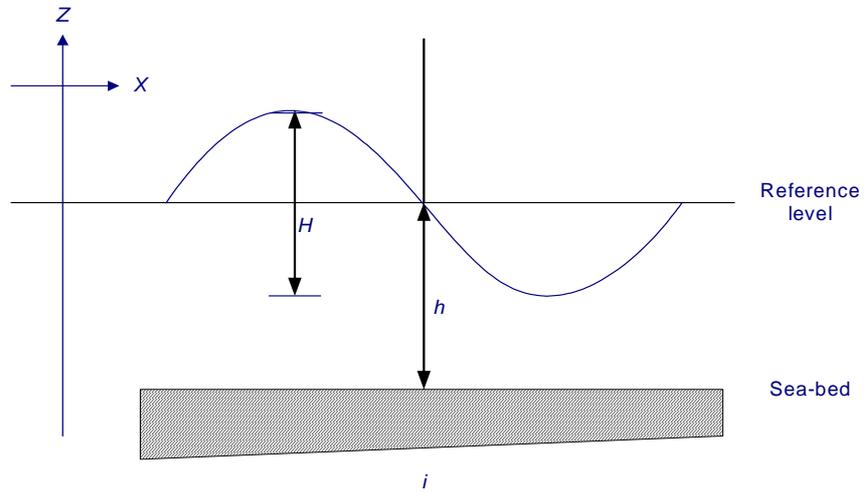


Fig. 2.4 Coordinate system for wave propagation

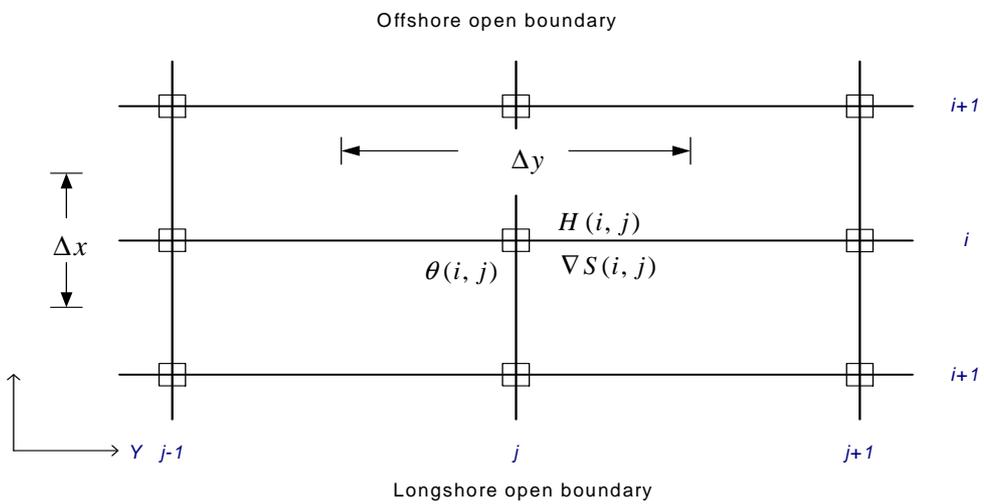


Fig. 2.5 Definition of calculation domain in the numerical model

2.2 유동장 이론

2.2.1 지배방정식

파랑과 흐름의 상호작용을 다루기 위해 장주기 흐름을 야기하는 수면변동에 대해서 수심 적분된 연속 방정식 및 운동 방정식을 지배방정식으로 도입한다. 가상적인 수면진동 대신에 일반화시킨 연속방정식과 운동방정식을 유한요소의 Galerkin 가중잔차법을 적용하여 해석하기로 한다.

연직적분 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(UH) + \frac{\partial}{\partial y}(VH) = 0 \quad (2.54)$$

여기서, $U, V = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u, v \, dz = x, y$ 방향의 수심 적분된 유속

$u, v = x, y$ 방향의 연직적으로 변화하는 유속

$H = \zeta + h =$ 총 물이 차지하는 열의 두께

$h =$ 수심

$\zeta =$ 평균해면(평균지오이드)으로부터의 자유 수면까지의 연직거리

수치적 변환을 용이하도록 하기 위해 식(2.55)를 시간 미분 $\partial/\partial t$ 를 취하고 그 결과를 식(2.55)에 수치 가중 파라메타 τ_0 를 곱한 것에 더한 후 수심은 시간의 변화에 따라서는 변하지 않는다고 가정하여 ($\partial H/\partial t = \partial \zeta/\partial t$), 미분의 연쇄 법칙(chain rule)을 적용하여 재정리하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{J}_y}{\partial y} - Q_x \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - Q_y \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \quad (2.55)$$

여기서,

$$\tilde{J}_x = \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \tau_0 Q_x = H \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tau_0 Q_x \quad (2.56)$$

$$\tilde{J}_y = \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \tau_0 Q_y = H \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tau_0 Q_y \quad (2.57)$$

여기서, $Q_x = UH$; x 방향의 단위폭당 유량(x 방향의 선유량)

$Q_y = VH$; y 방향의 단위폭당 유량(y 방향의 선유량)

연직 적분된 운동방정식은 식(2.54)의 연속방정식에서 얻는다. 일반화시킨 파랑 연속방정식은 새로운 자유수면 높이를 결정하기 위해 계산한다. 수심적분 유속을 결정하기 위해 연직 적분된 운동방정식을 계산한다. 연직 적분된 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV \\ & = -g \frac{\partial [\zeta + P_s / g\rho_0 - \alpha\eta]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{H\rho_0} + \frac{M_x}{H} - \frac{D_x}{H} - \frac{B_x}{H} \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU \\
& = -g \frac{\partial [\zeta + P_s / g\rho_0 - \alpha\eta]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{H\rho_0} + \frac{M_y}{H} - \frac{D_y}{H} - \frac{B_y}{H}
\end{aligned} \tag{2.59}$$

여기서,

$$M_x \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(E_h \frac{\partial Q_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_h \frac{\partial Q_x}{\partial y} \right) ; x \text{ 방향의 연직적분된 측면응력 기울기}$$

$$M_y \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(E_h \frac{\partial Q_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_h \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) ; y \text{ 방향의 연직적분된 측면응력 기울기}$$

$$D_x \equiv \frac{\partial D_{uu}}{\partial x} + \frac{\partial D_{uv}}{\partial y} ; x \text{ 방향의 운동량 소산}$$

$$D_y \equiv \frac{\partial D_{uv}}{\partial x} + \frac{\partial D_{vv}}{\partial y} ; y \text{ 방향의 운동량 소산}$$

$$D_{uu} \equiv \int_{-h}^{\zeta} (u-U)(u-U)dz$$

$$D_{uv} \equiv \int_{-h}^{\zeta} (u-U)(v-V)dz$$

$$D_{vv} \equiv \int_{-h}^{\zeta} (v-V)(v-V)dz$$

$$B_x \equiv \int_{-h}^{\zeta} b_x dz ; x \text{ 방향의 연직적분된 기압 경도력}$$

$$B_y \equiv \int_{-h}^{\zeta} b_y dz ; y \text{ 방향의 연직적분된 기압 경도력}$$

$$b_x \equiv g \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\zeta} \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} dz ; x \text{ 방향의 기압 경도력}$$

$$b_y \equiv g \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\zeta \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} dz ; y \text{ 방향의 기압 경도력}$$

ρ = 염도와 수온변화에 의한 물의 시간과 공간적으로 변하는 밀도

ρ_0 = 물의 기준 밀도

τ_{sx}, τ_{sy} = x, y 방향의 수면에서의 응력

τ_{bx}, τ_{by} = x, y 방향의 해저에서의 응력

P_s = 수면에서의 대기압

η = 뉴턴 평형 조석 포텐셜

E_h = 연직방향으로 적분된 측면 응력 계수

운동량 소산항의 값을 구하기 위해서는 수평유속의 연직 측면의 정보가 필요하다. 따라서 2차원 운동량 소산항은 무시한다고 가정하고 운동방정식과 일반화시킨 파랑 연속방정식에서 생략한다.

저면 응력 항에 대해서는 일반화된 슬립(slip) 공식을 활용한다.

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_0} = \frac{K_{slip} Q_x}{H}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho_0} = K_{slip} V = \frac{K_{slip} Q_y}{H} \quad (2.60)$$

여기서, K_{slip} 은 다음과 같이 나타내고 모형 내에서 값이 일정한 선형 슬립 경계조건을 기본값으로 하여 계산한다.

K_{slip} = 일정 ; 선형 슬립 경계조건, (K_{slip} = 선형 항력 계수)

$K_{slip} = C_d \sqrt{U^2 + V^2}$; 2차 슬립 경계조건, (C_d = 2차 항력 계수)

2.2.2 경계조건

경계조건에서 산술 된 높이는 일반화시킨 파랑 연속 방정식에서 각 경계조건 높이에 일치하는 열에 대해 대각 항을 모두 0으로 하고 일반화시킨 파랑 연속 방정식 행렬에서 모든 다른 대각 항의 평균 제곱근 값의 열을 같게 되도록 설정하여 충족한다. 경계 절점에서 산술 된 각 높이에 대해 대응하는 오른쪽의 벡터는 전술한 평균 제곱근을 곱한 높이를 같게 한다.

플럭스 경계조건은 단위 폭당 연직 유량으로 이루어진 경계조건을 고려한다. 연직 유량은 자연경계조건(Natural B.C)을 따라 자유 슬립을 가정하여 계산되거나 0으로 설정한 경계들을 따라 접선 속도를 상술한다. 자연경계조건을 따르는 연직유량의 자세한 내용은 아래와 같다. 수평면의 어떤 절점에서 운동 방정식은 다음과 같은 구조로 계산된다.

$$\begin{bmatrix} AU_{V_1} - AU_{V_2} \\ AU_{V_2} \quad AU_{V_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

여기서, $AU_{V_1}, AU_{V_2} =$ 유한 요소 집합 과정으로부터 계산된 행렬 성분

$$F_x, F_y = \text{작용 벡터}$$

연직과 접선 유속 U_N, U_T 는 유속 벡터의 스칼라 곱과 연직과 접선 단위 벡터로 정의된다.

$$UT_x + VT_y = U_T \quad (2.62)$$

$$UN_x + VN_y = U_N$$

연직 유량 경계 절점 y 방향의 운동방정식에서 연직 속도에 대한 표현에 의해 치환되고 x 방향 운동방정식은 \mathcal{T}_y 를 곱한 y 방향 운동방정식을 더하고 \mathcal{T}_x 를 곱한 x 방향 운동방정식에 의한 접선 운동방정식에 의해 치환된다. 이상의 결과는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} AUV_1N_y - AUV_2N_x & -AUV_2N_y - AUV_1N_x \\ N_x & N_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_xN_y - F_yN_x \\ U_N \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

식(2.63)에서 왼쪽 항은 원 식인 식(2.62)과 같이 대칭을 이루지 않는다. AUV_1 으로 나누고 AUV_2 를 곱하고 접선 운동방정식을 더하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} N_y - N_x \\ N_x & N_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_xN_y - F_yN_x + AUV_2U_N}{AUV_1} \\ U_N \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

연직 방향 속도 기울기가 없다는 경계조건은 연직 속도 기울기가 없는 조건을 가진 방정식과 경계 절점에서 운동방정식 치환에 의해 충족된다. 계산된 유속장은 경계를 가로지르는 연직 유량 결정에 사용되고 이 연직 유량은 시간의존의 일반화시킨 파랑 연속방정식에서 경계 유량 적분에 사용된다.

연직 방향 속도 기울기가 없다는 것은 두 가지의 다른 접근을 이용한다. 첫 번째 접근은 각 경계 절점에 대해 내부 영역의 가상 절점을 정의하고 두 번째 접근 방법은 경계 절점에서 조건을 주어 결정한다.

높이에 대한 잉여 경계조건은 연직 유량과 그 경계를 따라 높이장(elevation field) 사이에 관계를 명시함으로 충족된다. 경계조건 형태 중에서 가장 공통의

경계조건은 Sommerfield 방사 조건이다. 일반화시킨 파랑 연속 방정식으로 주어진 경계조건이 어떠한 형태로도 적용이 어려운 것은 이것이 비대칭적인 형태를 만들기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 고려하지 않는다.

제 3 장 수치실험 및 분석

본 장에서는 여러 수치 파랑모형을 군장국가산업단지 호안도로공사 해역에 적용하여 항로에서의 파랑변화와 흐름의 변화를 호안건설 및 해안 매립의 전·후에 대하여 수로의 파고분포와 유속의 변화를 비교 분석하였다.

3.1 대상영역의 특성

본 연구의 대상영역인 군산-장항 연안은 충청남도 서천군 장항읍 마서면에 위치하는 해역으로서 유부도, 대죽도, 소죽도 등 크고 작은 섬들이 산재해 있다. 서쪽으로는 개야도를 통하여 개야 수로와 연결되며, 남쪽으로는 도류제가 설치된 군산항로가 있으며, 동쪽으로는 금강하구가 위치하고 있다.

서해안에 위치한 대상 해역은 조석간만의 차가 심한 편(최고 약 6.0m)으로 간조 시에는 폭이 약 3~4km 정도의 조간대가 발달되어 있으며 곳곳에서 노출암도 존재하고 있다. 항의 입구부에 금강이 위치하고 있어 항내로 유입되는 많은 양의 토사에 의해 형성된 사구로 자연적으로 외해의 영향으로부터 보호 받고 있다.

산업단지 총 면적은 14.748km²으로 산업시설구역이 9.614km², 지원시설구역 1.253km², 공공시설구역 2.228km², 녹지구역 1.653km²로 조성될 계획이며, 호안도로가 축조될 구간은 약 6.03km 정도이며, 일부 중앙부 수로 구간을 제외하고 대부분 조간대에 위치하고 있다. 이 지역은 국토의 중부 서해안 지역의 거점 생산기지 역할을 담당함으로서 서해안시대 관문으로 향후, 대륙교역과 동남아시아, 태평양으로의 진출을 위한 중심지로 발돋움할 예정일뿐만 아니라 중국과 접해 있는 지역으로 국내·국제적인 산업단지로서 전략적으로 중요한 위치에 있다.

Fig. 3.1은 본 연구에서 수치 실험할 대상지역을 나타낸다.



Fig. 3.1 Location map for numerical simulation

3.2 모델의 구성 및 입력조건

3.2.1 모델의 구성

본 연구의 대상영역은 군장 내·외항과 장항항을 포함하고 있으며, 모형은 유한 요소 격자망으로 삼각형 가변요소와 유한차분격자망을 적용하였다.

유한요소격자의 간격은 10~100m, 유한차분격자의 간격은 100m이며, 최대 수심은 24.4m이다. 대상영역에 적용된 유한요소의 격자수는 Table 3.1과 같이 환경사 방정식 파랑모형의 격자수는 해안 매립 개발 전 115,718개, 개발 후 102,294개이고 유동장 수치모형의 격자수는 개발 전 6357개, 개발 후 6217개이다. 유한차분 수치모형중 제3세대 파랑모형의 격자수는 개발 전·후 63,000개이고 정상상태 스펙트럼 파랑모형의 격자수는 개발 전 162,606, 개발 후 158,141개로 구성하였다. Fig. 3.2의 지점들은 수치 실험한 결과와 대상 영역에서 관측한 값을 비교하기 위해 나타낸 것이고, Fig. 3.3에서는 각 조건별로 항로에 따른 파랑변화를 알아보기 위한 수로를 나타내었다. 수치실험 결과의 비교를 위해 항로 전체적으로 파고의 변화를 알아 볼 수 있는 광역과 항내의 항로에서 파고변화를 알아보기 위해 세부역으로 나누었다. Fig. 3.4와 Fig. 3.5는 지점 P1에서 각각 2004년 12월 및 2005년 6월에 관측된 유의 파고 값을 나타낸다. 최고 파고가 4.6m로 관측되었으며, 연 중 가장 큰 값이었다. Fig. 3.6은 현장 지점 P1~P4에서 관측한 파랑데이터를 수치모형실험을 통해 얻은 값을 비교한 것이다. 겨울동안 실측된 값과 정상상태 스펙트럼 파랑모형으로 입사파 WNW 방향으로 수치 실험한 값이 4.4m와 4.1m로 상당히 만족스러운 결과를 보여주고 있지만, 항내의 P2~P4에서는 관측값과 수치 실험한 결과 값이 비교적 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 여름기간에 측량된 값이기 때문에 겨울일 때의 파랑조건으로 수치 실험한 결과 값이 실측값보다 높게 나타나는

것이다. 또한 이 지역은 WNW 방향의 계절풍이 SSW 방향에 비해서 상대적으로 높게 나타난다. Fig. 3.7~10은 호안도로공사 전·후의 대상영역의 수심도와 격자망을 나타낸 것이며, Fig. 3.11~14는 호안도로공사 영역과 군산항로 및 금강입구 영역에 대한 유한 요소 격자망을 나타낸다.

Table 3.1 Numerical model characteristics

Case		Number of Nodes (Present/ After)	
Energy Balance Model	3rd Generation model	63,000 / 63,000	F.D.M.
	Steady-State Spectrum model	162,606 / 158,141	F.D.M.
Mass and Momentum Conservation model	Steady-State Mild Slope Eq. model	115,718 / 102,294	F.E.M.
	Non Steady-State Mild Slope Eq. model	63,000 / 63,000	F.D.M.
Current Model		6357 / 6217	F.E.M.

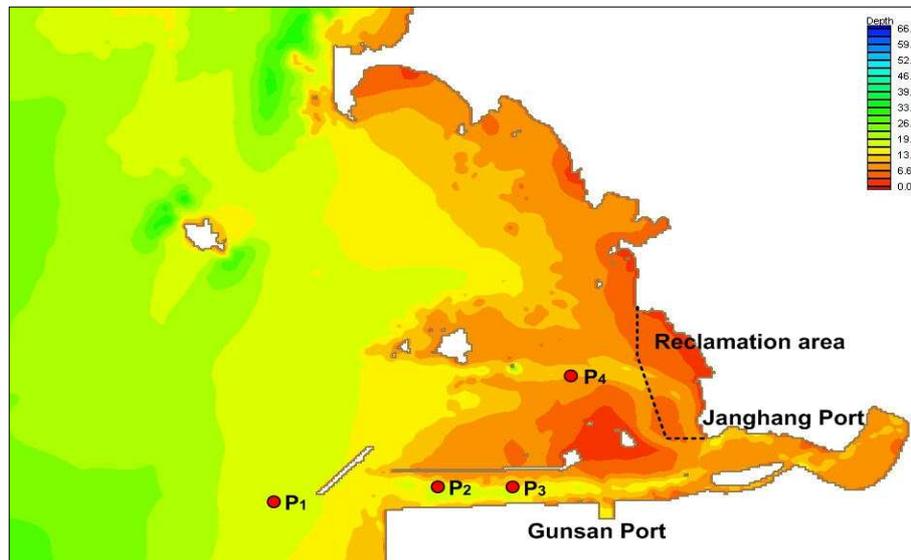


Fig. 3.2 Water depth at the model site

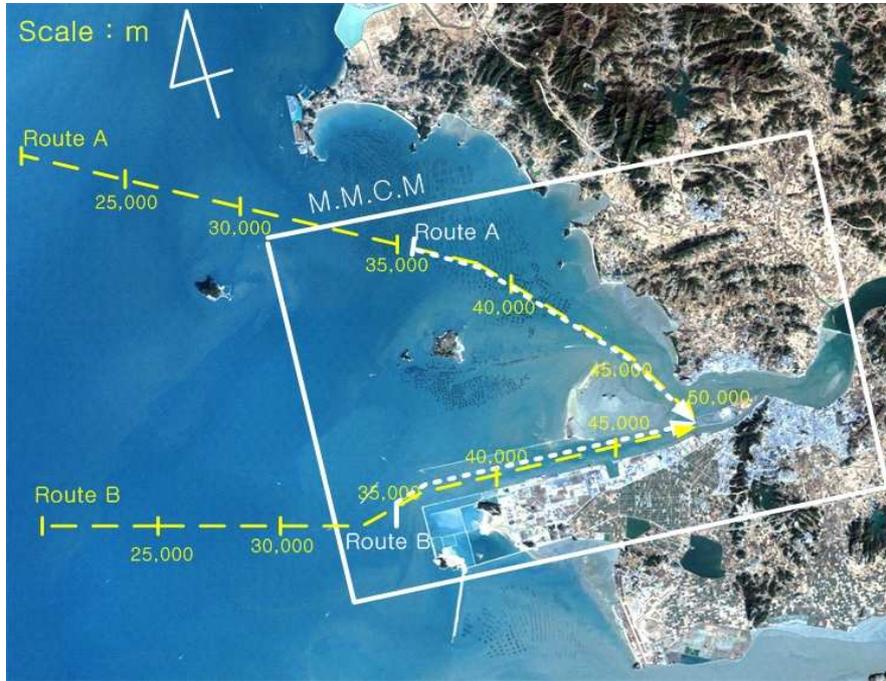


Fig. 3.3 Orientation of route lines for the comparison of numerical simulation results

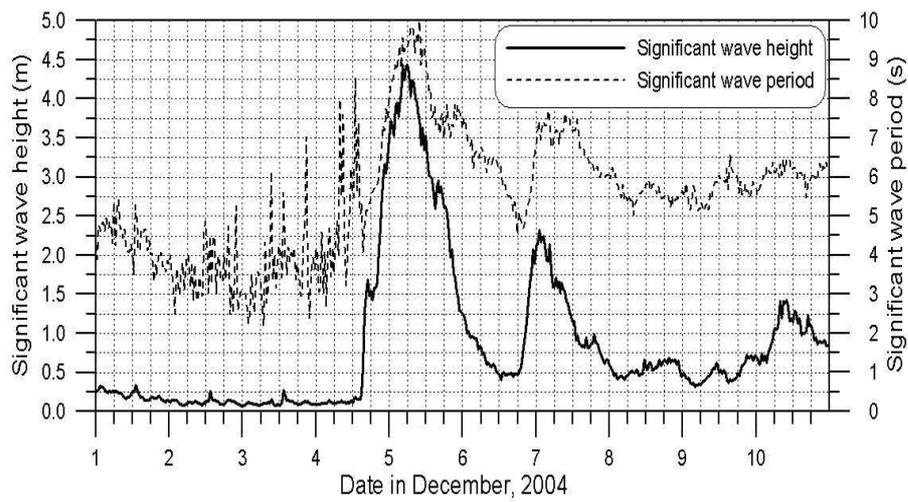


Fig. 3.4 The field measured significant wave heights at P1 in winter

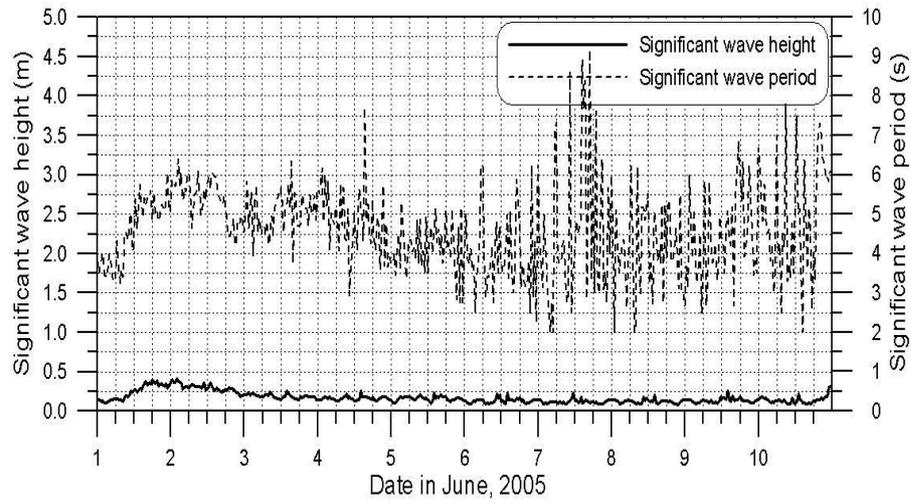


Fig. 3.5 The field measured significant wave heights at P1 in summer

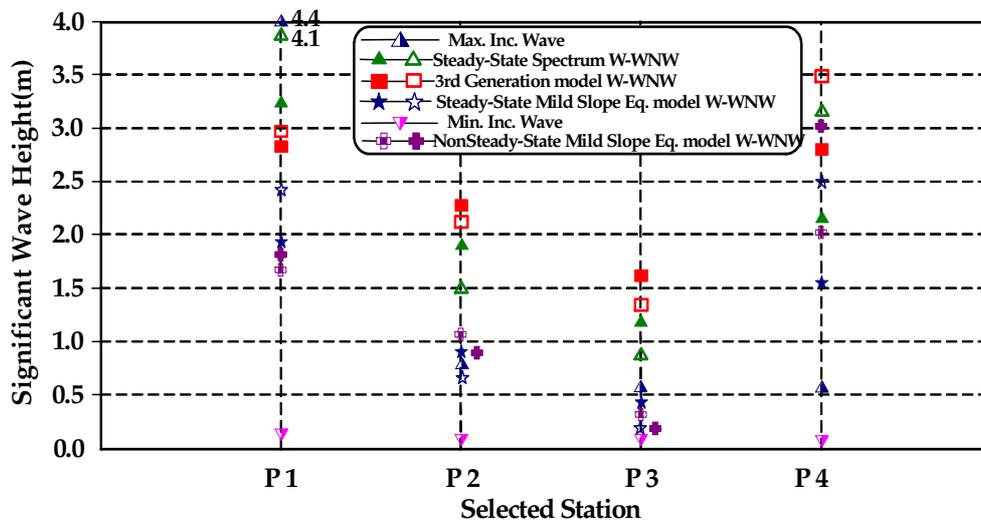


Fig. 3.6 Comparison with field measurement at the stations

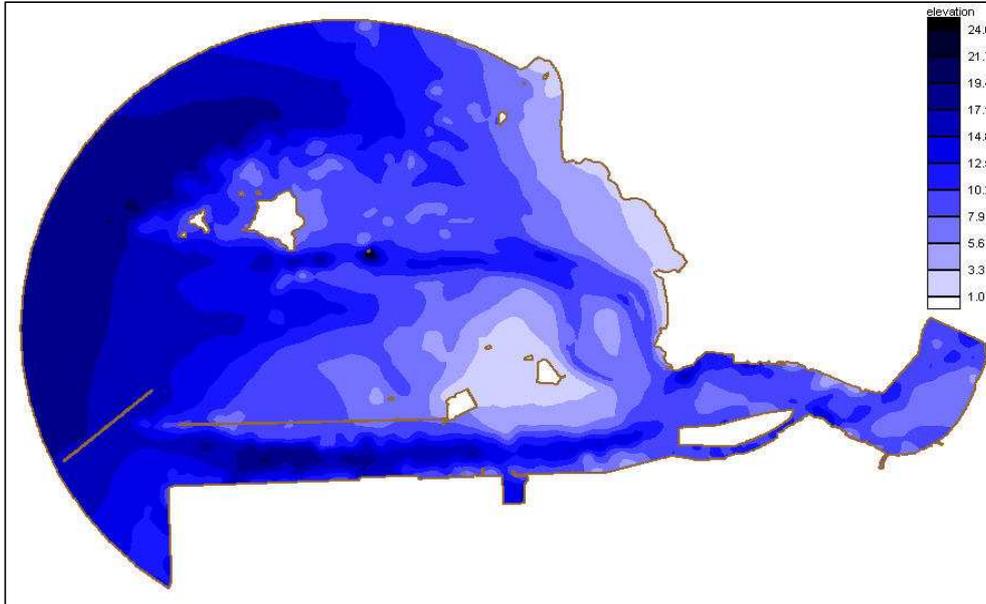


Fig. 3.7 Study area and depth for model simulation before reclamation in Gunsan-Janghang Harbor

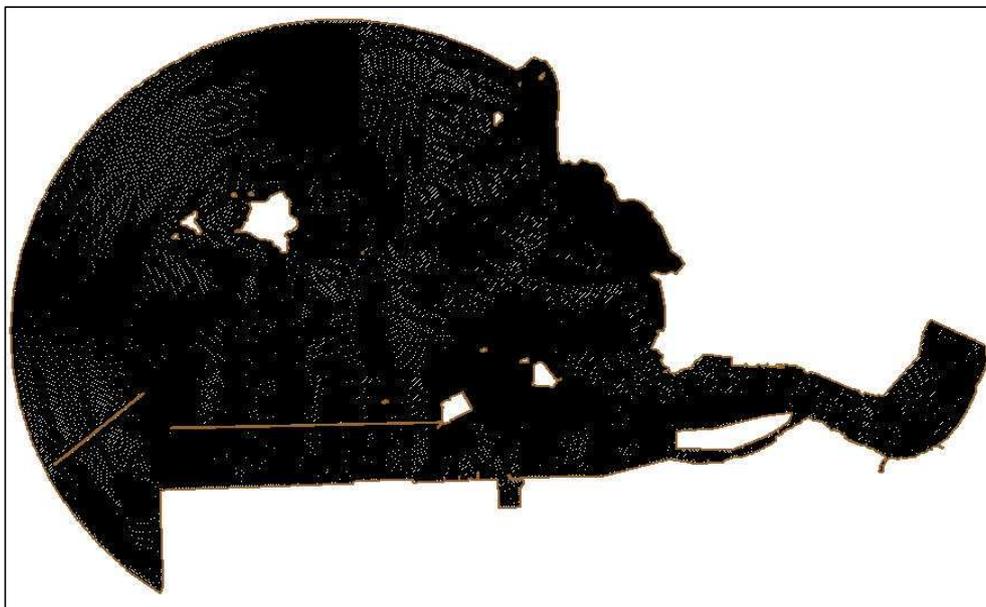


Fig. 3.8 Generated finite element mesh for F.E.M. before reclamation in Gunsan-Janghang Harbor

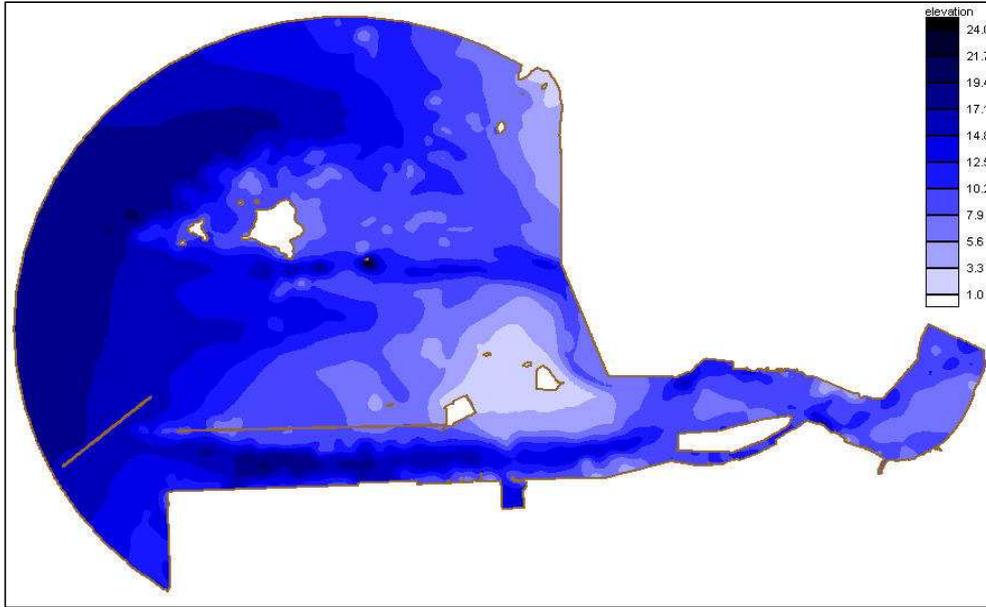


Fig. 3.9 Study area and depth for model simulation after reclamation in Gunsan-Janghang Harbor

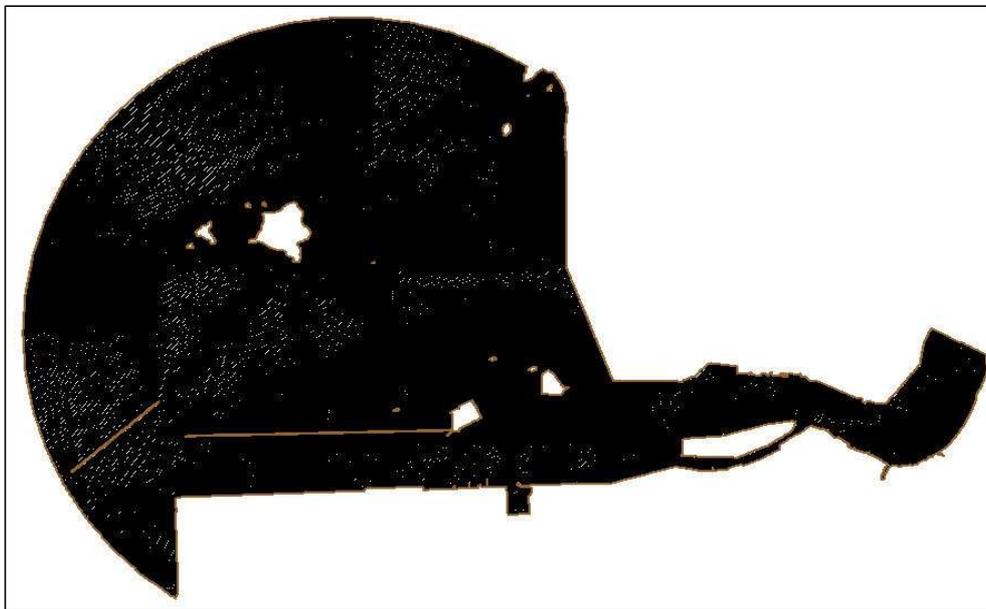


Fig. 3.10 Generated finite element mesh for F.E.M. after reclamation in Gunsan-Janghang Harbor

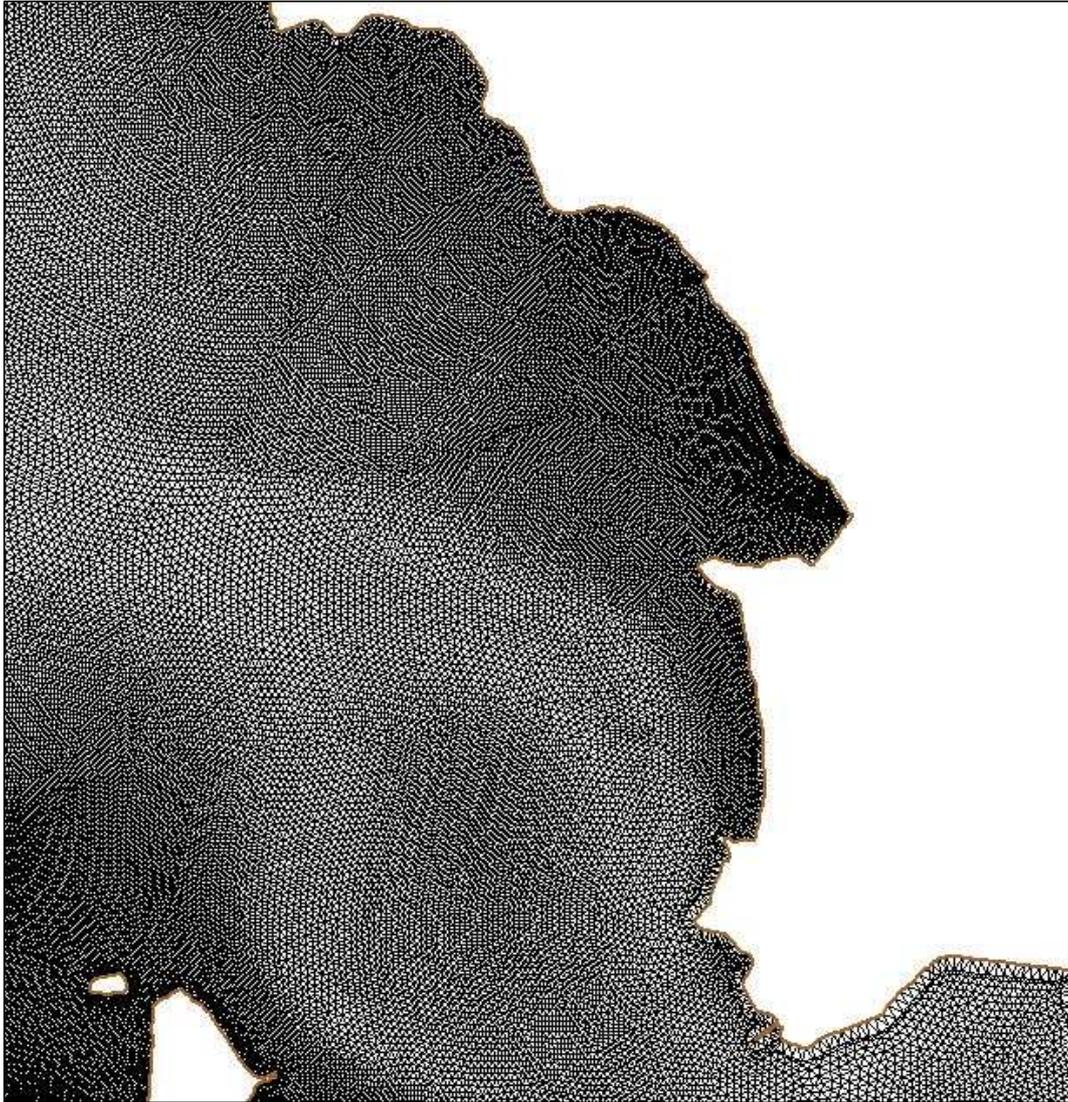


Fig. 3.11 Detailed mesh for F.E.M. at study area
(Janghang Coastline for shore protection work)

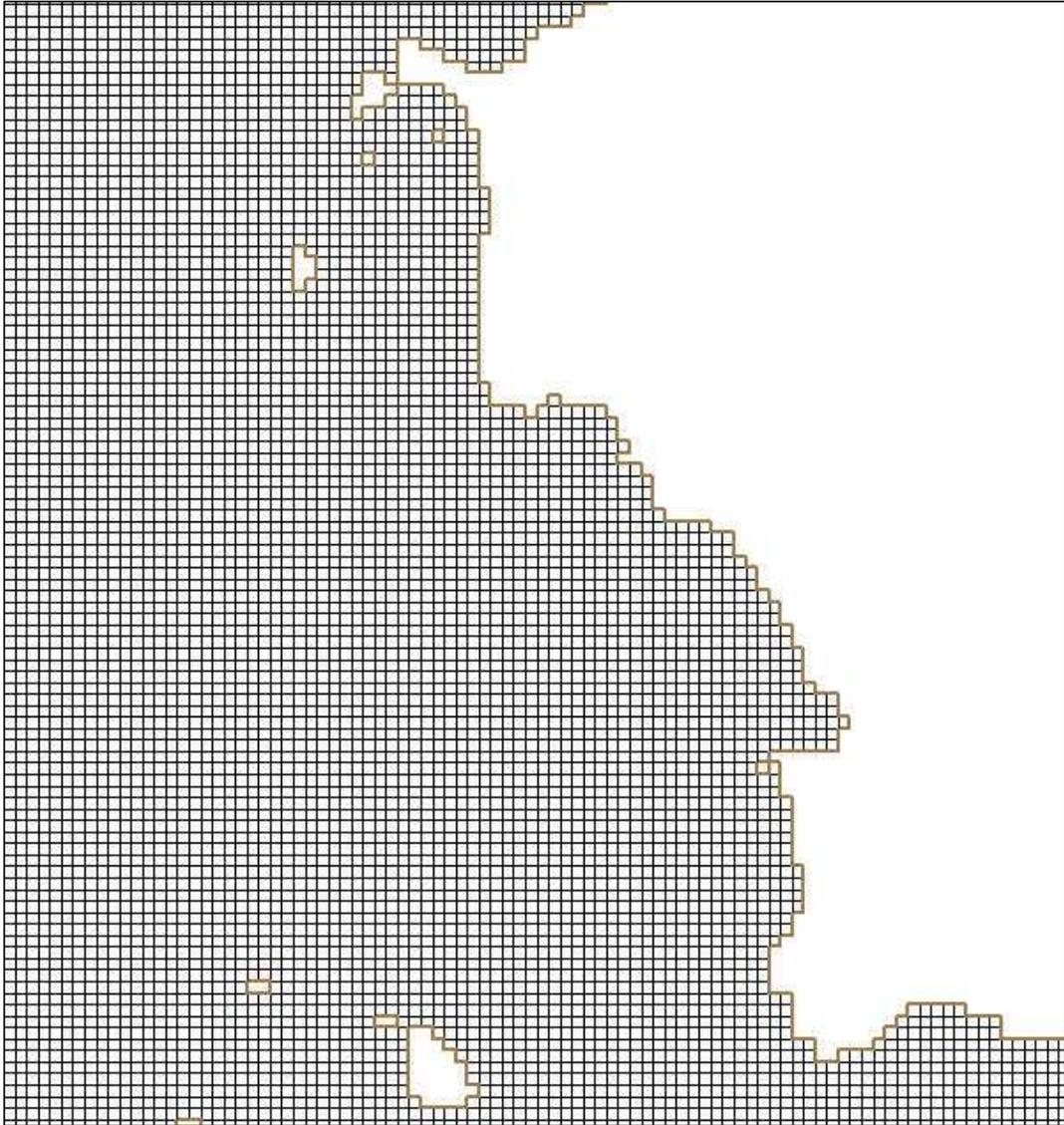


Fig. 3.12 Detailed mesh for F.D.M. at study area
(Janghang Coastline for shore protection works)

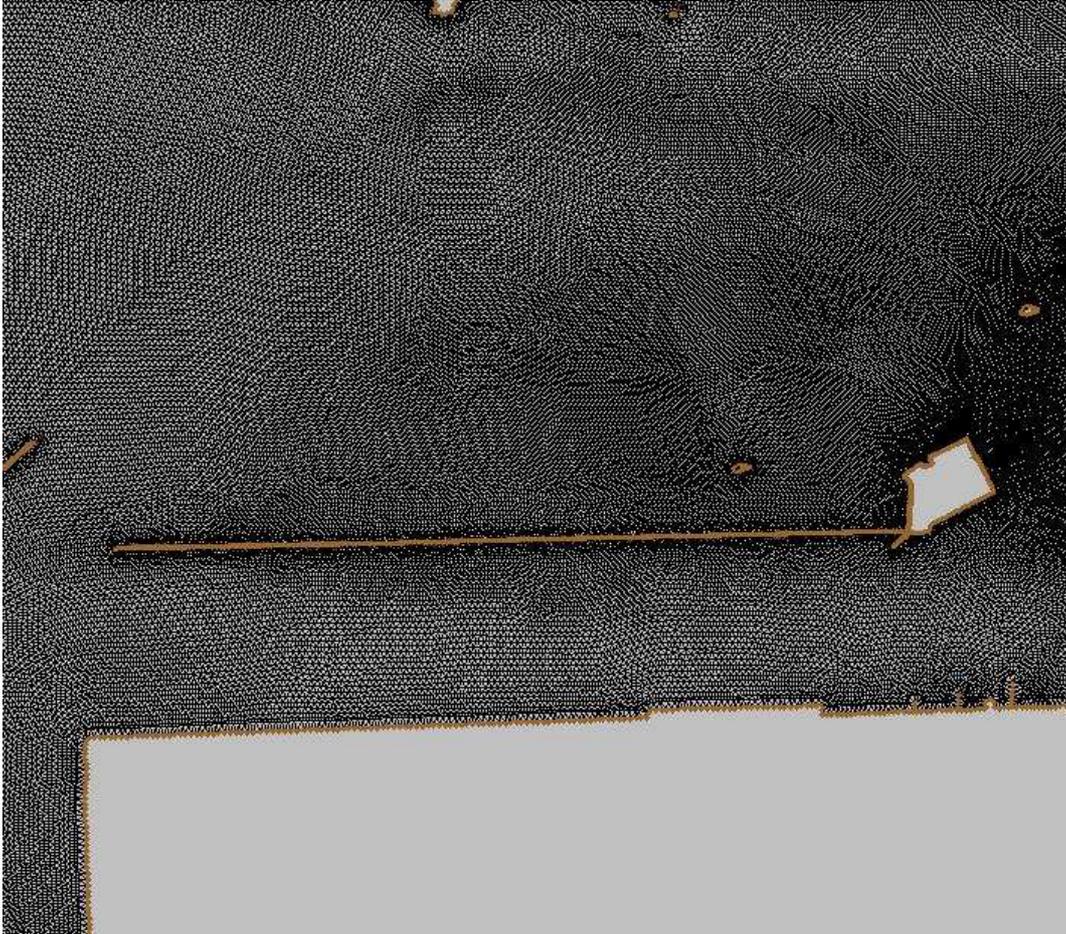


Fig. 3.13 Detailed mesh for F.E.M. at study area
(Gunsan waterway)

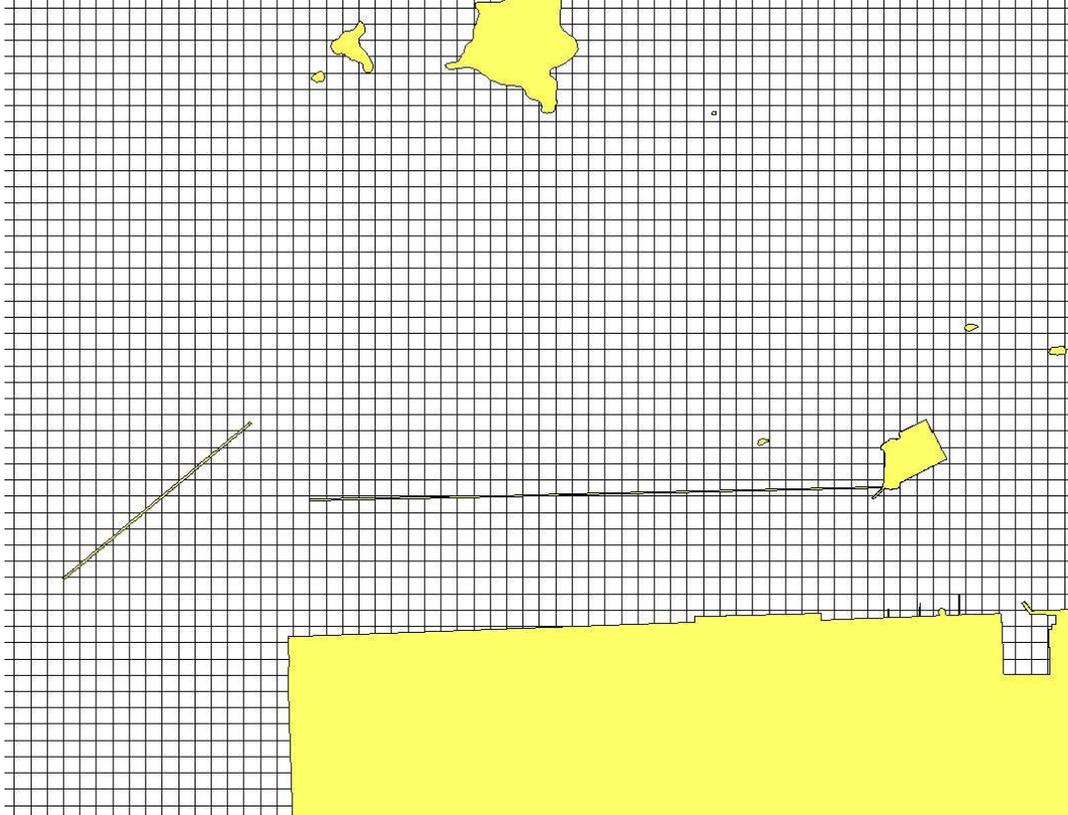


Fig. 3.14 Detailed mesh for F.D.M. at study area
(Gunsan Waterway)

3.2.2 입력 조건

모형실험의 수심자료는 이 해역에 대한 해양조사원 간행 수치해도(Chart No. 305, 349)를 이용하여 입력하였다. 파랑의 입력조건으로 Table 3.2에서와 같이 파향은 W, 파고는 4.2m, 주기는 8sec인 조건과, 파향은 WNW, 파고는 5.0m, 주기는 8.7sec인 조건으로 수치 실험하였다. Table 3.3은 기상청 자료를 토대로 극치 분석한 빈도별 바람자료로써 본 연구에서는 50년 빈도 바람자료를 적용하여 수치 실험하였다. Table 3.4는 각 계산 조건을 나타내는 것으로, 환경사 방정식에 기초한 파랑모형은 파랑에 대한 수치실험만 수행하였고, 에너지 평형 방정식에 기초한 모형은 표에서 보는 바와 같이 파랑과 바람의 영향을 동시에 고려하여 수치실험을 수행하였다. 또한 흐름과 파랑 및 바람을 동시에 고려하여 수치실험을 수행하였다. 흐름장 수치실험에 사용한 주요 입력자료 중 개방경계에서의 분조는 국립해양조사원에서 제공하는 조석정보 자료를 이용하였다. 해저마찰계수(C_f)는 0.0025를 적용하였다(해양연구소, 1989).

Table 3.2 Incident wave condition for design wave

Direction	Height	Period	Return Period	Remark
W	4.2m	8 sec	50 year	MOMAF
WNW	5.0m	8.7 sec	50 year	MOMAF

Table 3.3 Characteristics of wind

단위 : m/s

	Return Period	2 years	5 years	10 years	25 years	50 years	100 years
W	Wind Speed	19.79	22.95	24.29	25.64	26.46	27.14
WNW	Wind Speed	21.10	24.96	27.55	30.90	33.45	36.04

Table 3.4 Simulation conditions of wave and current

Project	Case	Wave		Wind		Current
		W	WNW	W	WNW	
Before & After	Mild slope Eq.	○				
			○			
	Energy balance Eq.	○				
		○				○
		○		○		
		○		○		○
			○			
			○			○
			○		○	
			○		○	○
	Current model	○				

3.3 결과 및 분석

3.3.1 파랑장 수치모형의 결과

1) 에너지 평형방정식에 기초한 모형에 의한 결과

(1) 제3세대 파랑모형

바람의 급격한 변화에 의한 파랑 변형과 파랑의 비선형 상호작용을 명확히 고려할 수 있는 제3세대 파랑모형을 사용하여 군장항 해역에 대해 W, WNW 방향의 입사파에 대해 수치 실험을 수행하였다.

Fig. 3.15~4.22는 W, WNW 방향의 입사파에 대한 조건별로 수치 실험한 결과를 파고 벡터도로 나타내었다. Fig. 3.23~3.26은 수로 A, B에 대한 파고의 변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 3.23~3.24에서 보는 바와 같이 W 방향의 입사파로 수치 실험하였을 때 수로 A에서는 외해역에서 바람 영향의 유무에 따라 많은 파고 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 외해의 넓은 풍역에서 바람에 의해 파랑이 성장했기 때문이라고 사료되며, 수로의 시점을 따라 19,000~26,000m되는 해역에서는 호안 건설 전보다 건설 후에 파고가 0.2~0.4m 증가한 것을 알 수 있다. 연안으로 접어들면서 파고가 줄어들기는 하지만 바람의 영향이 고려 될 때가 그렇지 않을 때보다 2배 가까이 높게 나타났다. 수로 B에서도 A에서와 거의 같은 양상으로 파랑의 변화가 나타나고 있고, 호안 건설 전·후에 파고가 0.1m내외로 아주 작은 차이가 나는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.25~26에서 WNW 방향의 입사파를 적용하여 수치 실험한 결과, 수로 A에서는 호안 건설전보다 호안 건설 후에 0.06~0.51m의 파고가 증가하였고, 바람의 영향으로 고려하여 수치 실험하였을 때는 호안 건설전과 건설 후에 파

고차가 거의 나지 않으며 항내에서 최고 0.45m의 파고차가 나는 것을 알 수 있다. 수로 B에서는 바람의 영향을 고려하지 않았을 시에는 항로를 따르는 영역에서 호안 건설 전·후의 파고가 전체적으로 0.1m내외로 작은 차이가 나는 것을 알 수 있다. 바람을 고려하여 수치 실험한 결과는 외해역에서는 파고차가 거의 없는 것을 알 수 있으며, 연안으로 접어들면서 호안 건설후보다 호안 건설전의 파고가 0.11~0.70m 증가하여 나타난 것을 알 수 있다.

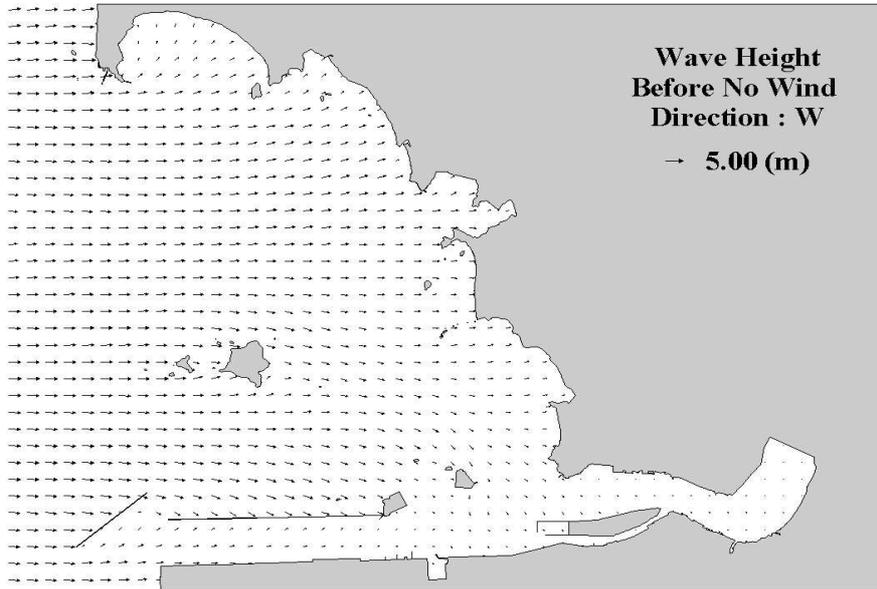


Fig. 3.15 Wave vector from the 3rd generation wave model for the *present configuration with wave(W)*

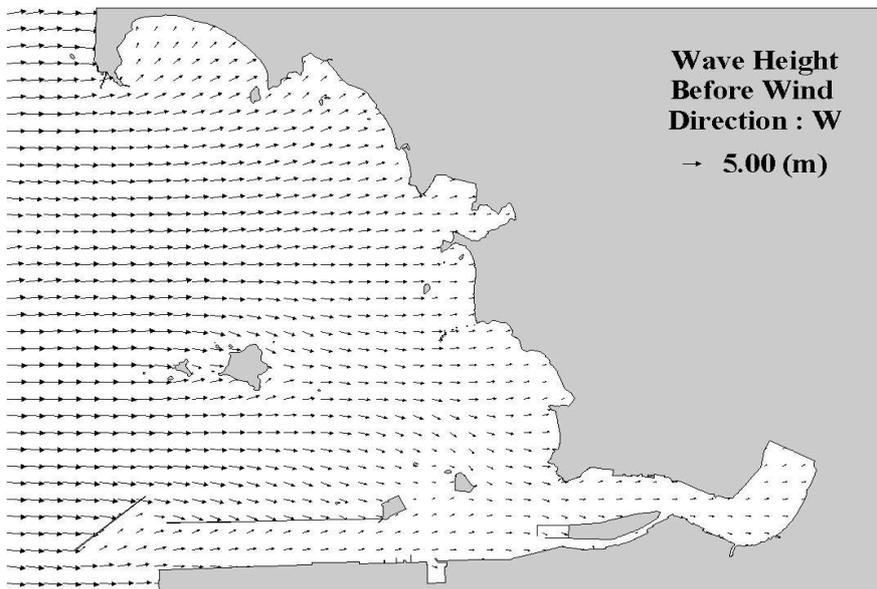


Fig. 3.16 Wave vector from the 3rd generation wave model for the *present configuration with wave(W) and wind(W)*

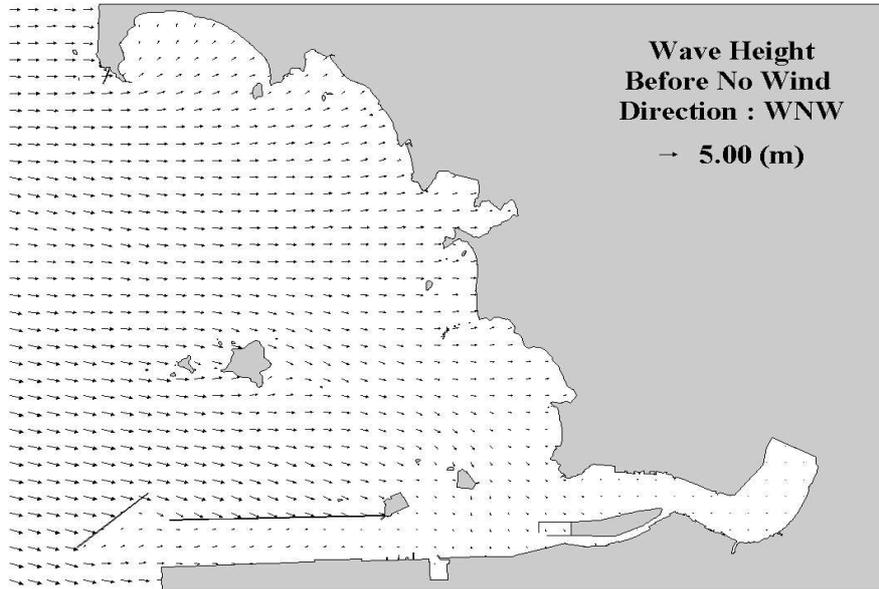


Fig. 3.17 Wave vector from the 3rd generation wave model for the present configuration with wave(WNW)

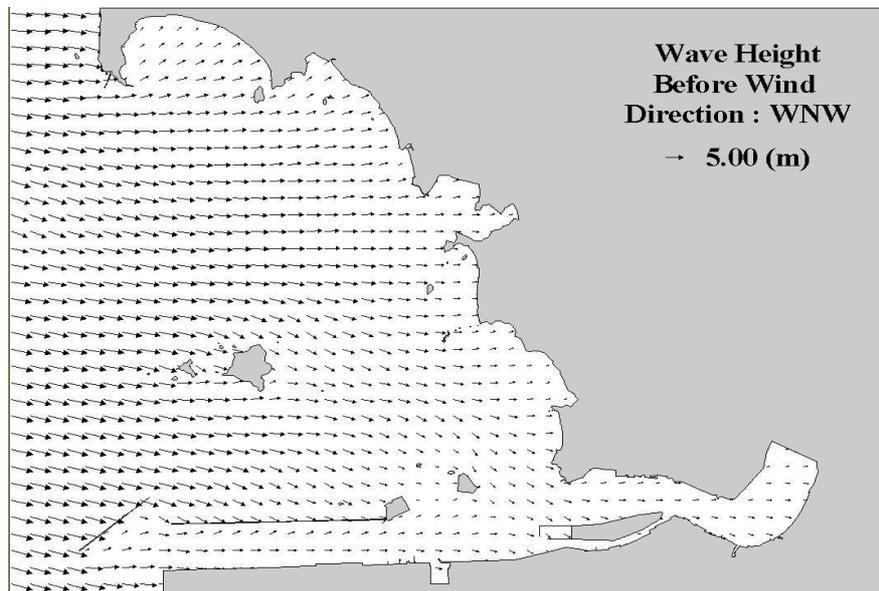


Fig. 3.18 Wave vector from the 3rd generation wave model for the present configuration with wave(WNW) and wind(WNW)

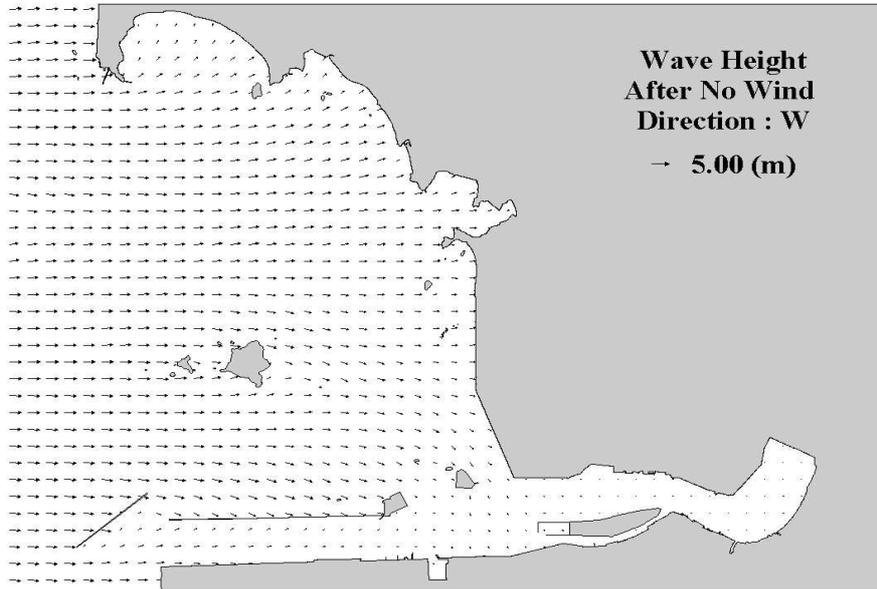


Fig. 3.19 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal reclamation plan with wave(W)

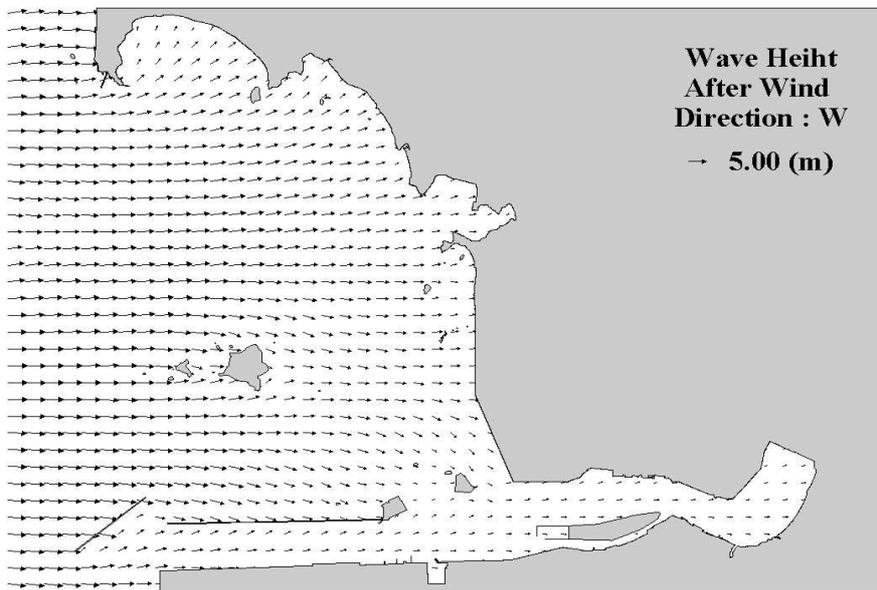


Fig. 3.20 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal reclamation plan with wave(W) and wind(W)

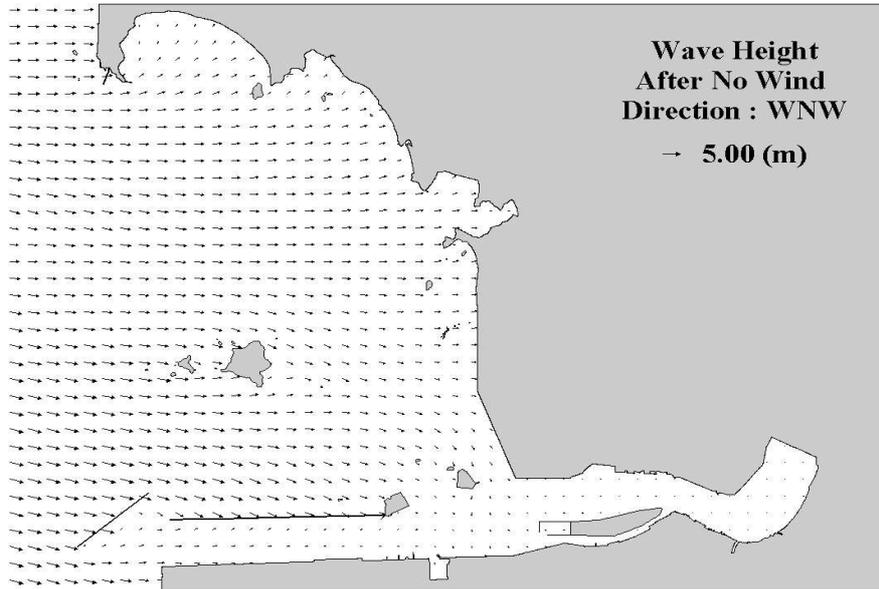


Fig. 3.21 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW)

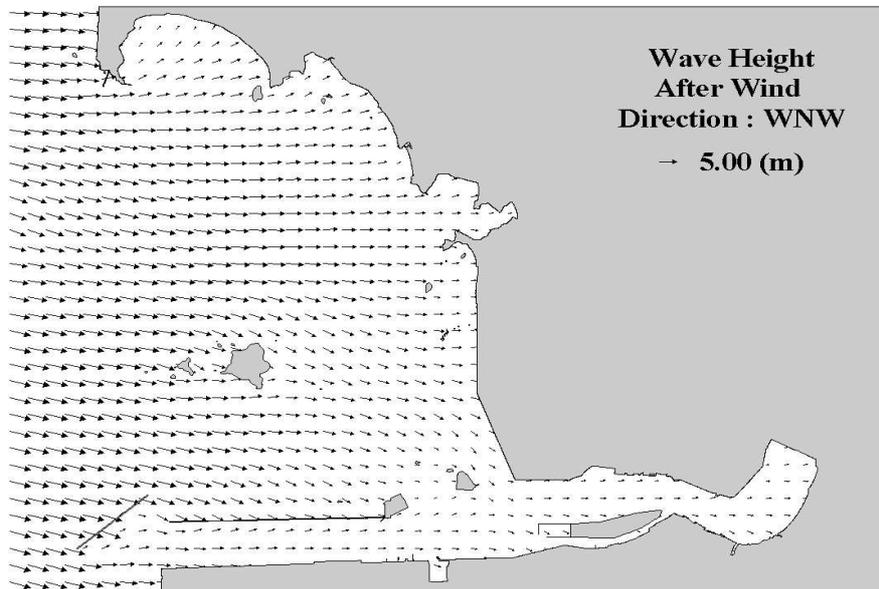


Fig. 3.22 Wave vector from the 3rd generation wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW) and wind(WNW)

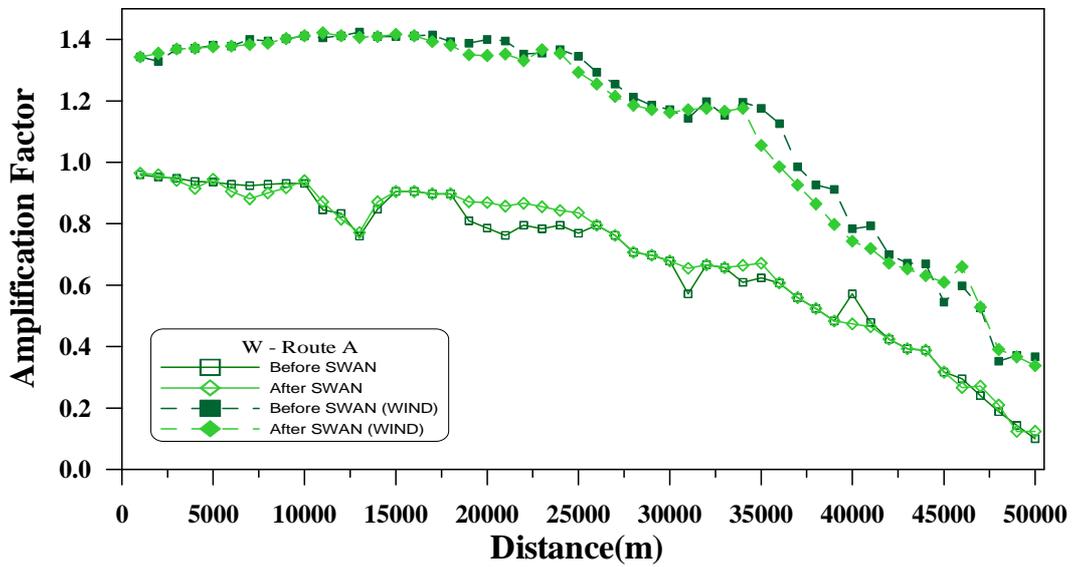


Fig. 3.23 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route A(wave direction W)

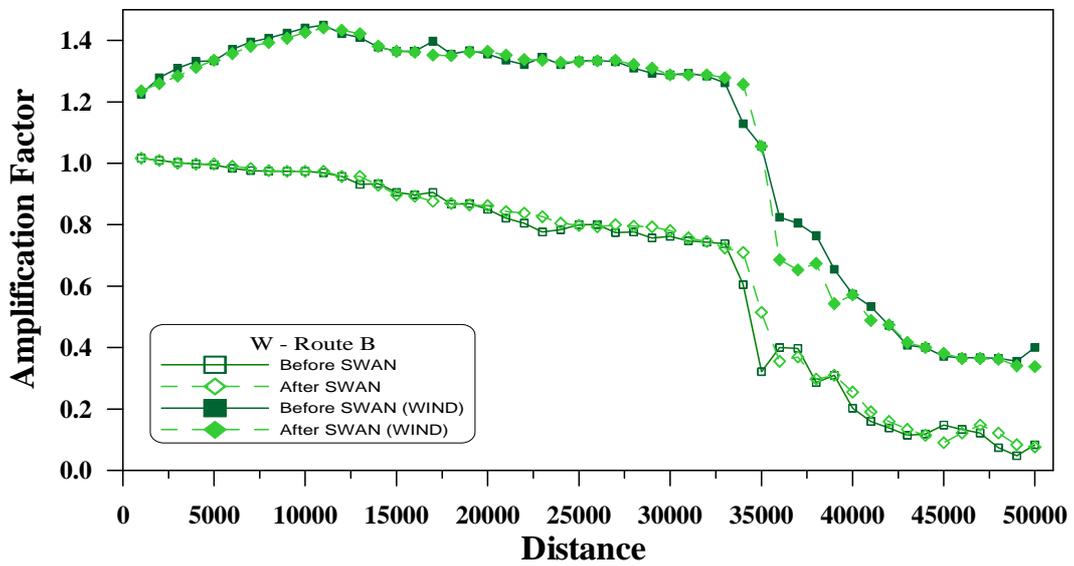


Fig. 3.24 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route B (wave direction W)

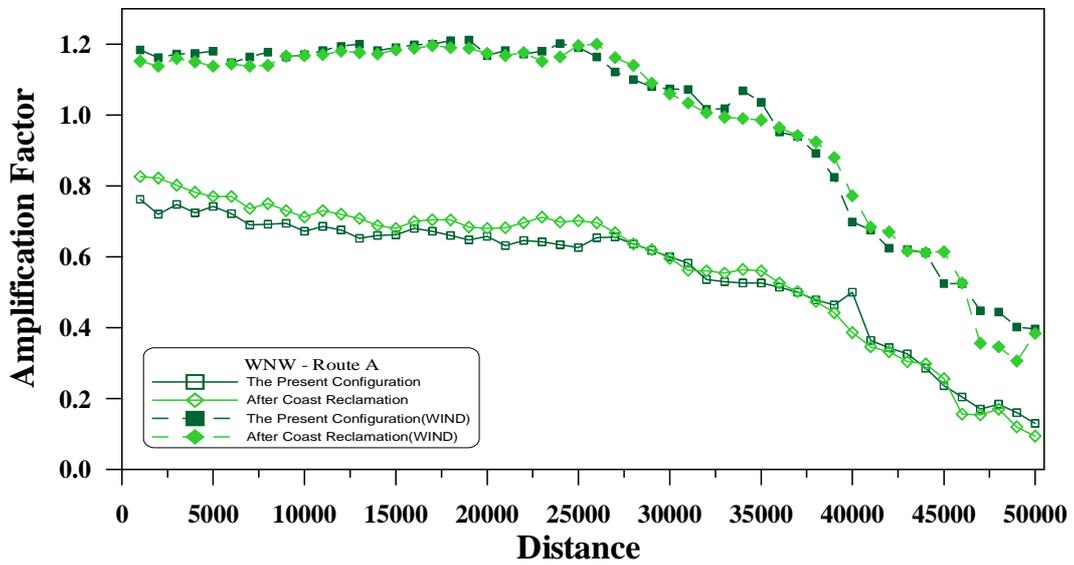


Fig. 3.25 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route A(wave direction WNW)

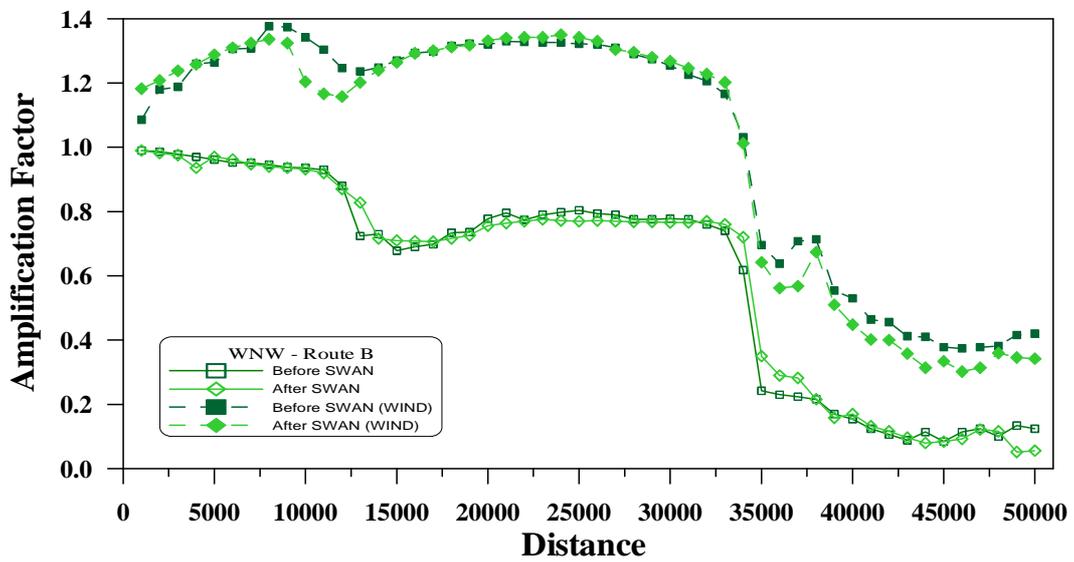


Fig. 3.26 Comparison of wave amplification factors from the 3rd generation wave model along the route B (wave direction WNW)

(2) 정상상태 스펙트럼 파랑모형

정상상태 스펙트럼 파랑모델의 적용은 외해에서의 파랑에 바람의 발달로 인한 인자를 더하여 항내의 파랑변형을 살펴보았다.

외해에서 W, WNW방향으로 입사하는 파를 설정하였으며, 바람 또한 파랑의 방향과 같은 W, WNW방향으로 설정하여 수치실험을 행하였다.

Fig. 3.27~3.34는 대규모 호안이 건설되기 전·후의 W, WNW 입사파에 대한 조건별로 수치 실험한 결과를 나타낸다. Fig. 3.35~3.38은 수로 A, B에 대한 파고의 변화를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 보는 바와 같이 W방향의 입사파로 수치실험 한 결과 수로 A에서는 외해역에서 바람의 에너지 손실이 거의 없이 연안으로 진행함에 따라 바람의 영향을 고려하였을 때보다 고려하지 않았을 때 파고가 0.1~0.4m 증가함을 알 수 있다. 또한, 바람의 영향이 없을 때는 파랑이 전파되는 거리가 짧아 금강입구까지 도달하지 않지만 바람의 영향을 고려하여 실험한 결과 금강입구까지 파랑이 도달되는 것을 알 수 있다. 수로 B에서도 수로 A에서와 마찬가지로 연안으로 접근하면서 파고가 바람의 영향을 고려하지 않았을 때보다 고려하였을 때 0.2~0.6m 증가하여 바람의 영향이 조금 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 건설 유무에 따른 파랑의 변화는 거의 나타나지 않았다.

WNW 방향의 입사파에 대한 결과를 보면, W방향에서 파가 입사할 때 보다 바람의 영향을 다소 많이 받아 바람의 영향을 고려하지 않았을 때보다 최고 0.6m의 파고가 증가하였다.

수로 B에서도 외해역에서는 바람의 영향을 고려하지 않았을 때보다 바람의 영향을 고려하였을 때 0.5m정도의 파고의 증가가 나타났으며, 연안으로 접근하면서는 0.9m까지 파고가 증가하는 것으로 나타났다.

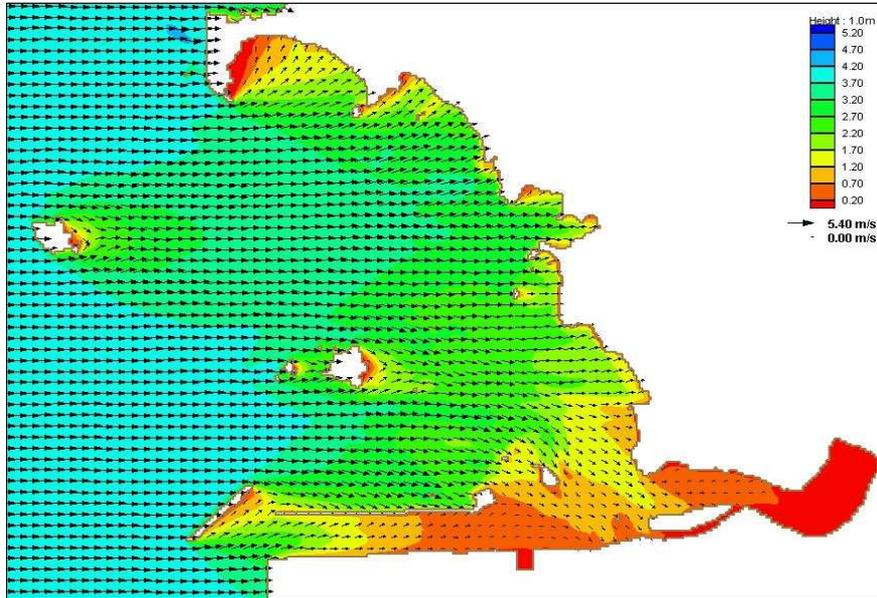


Fig. 3.27 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(W)

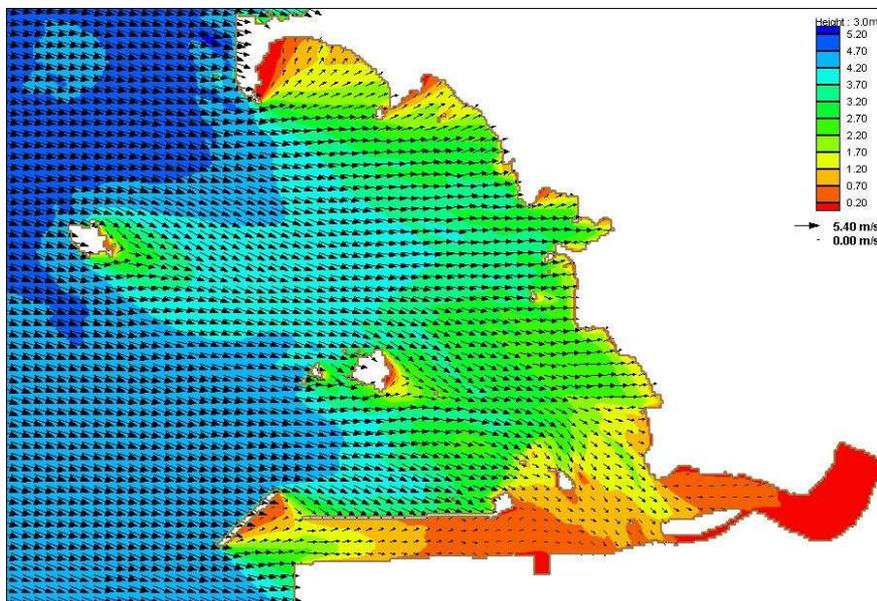


Fig. 3.28 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(WNW)

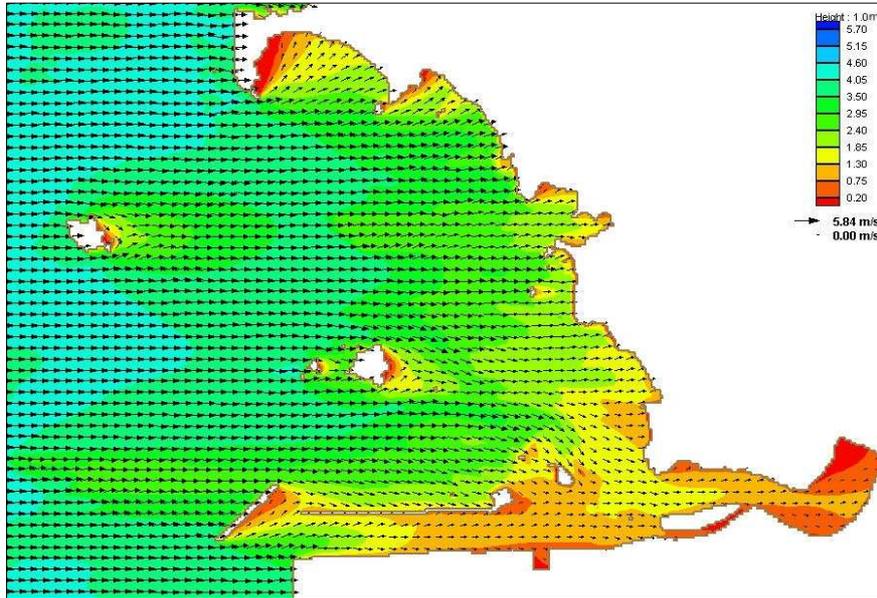


Fig. 3.29 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(W) and wind(W)

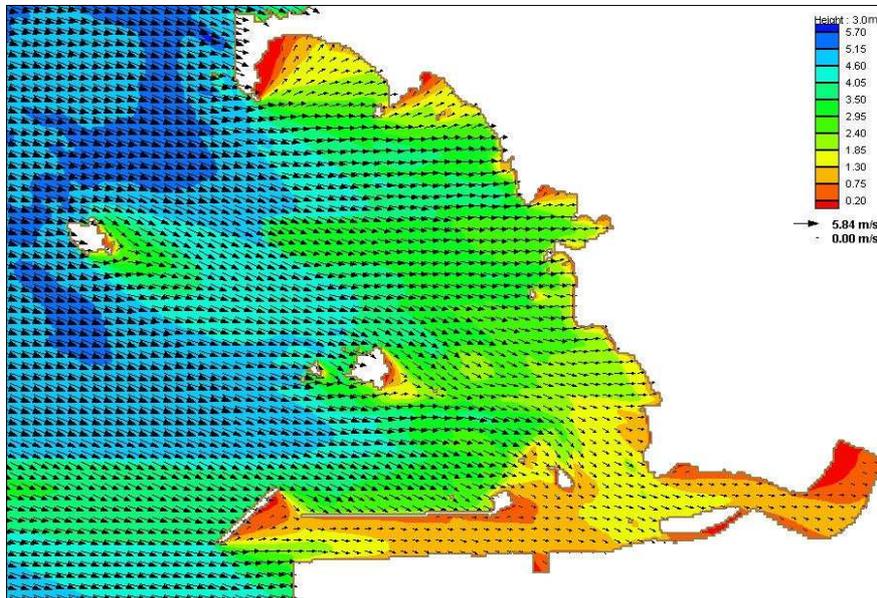


Fig. 3.30 Wave vector from the steady-state spectrum wave model for the present configuration with wave(WNW) and wind(WNW)

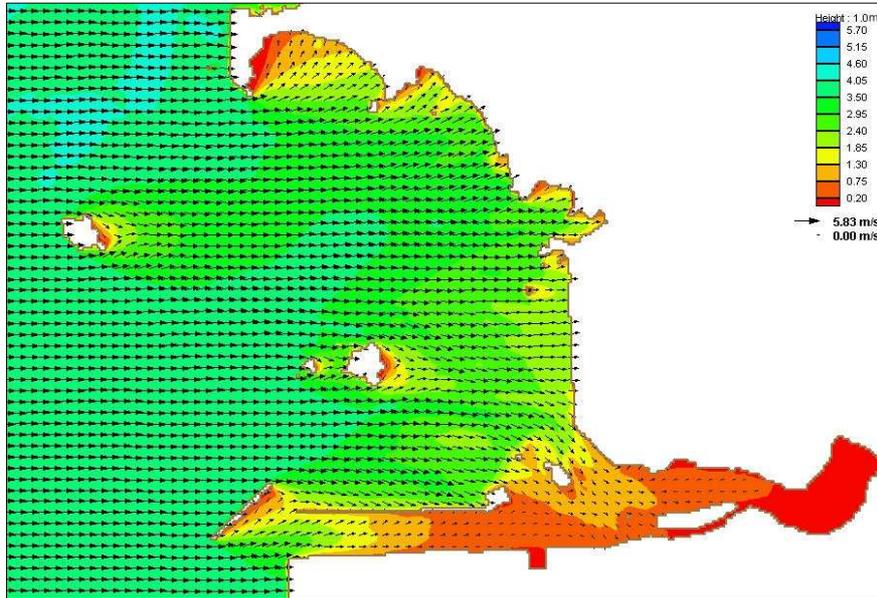


Fig. 3.31 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(W)

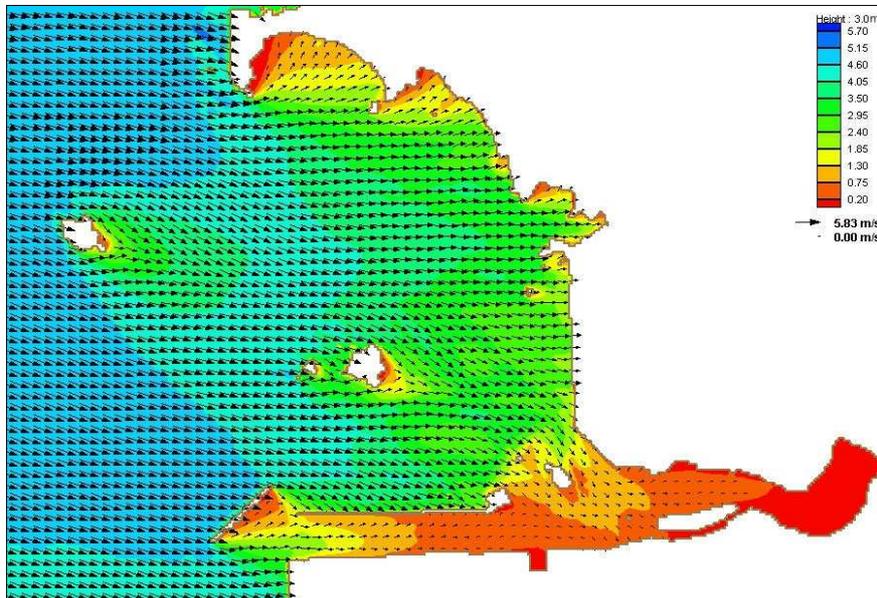


Fig. 3.32 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW)

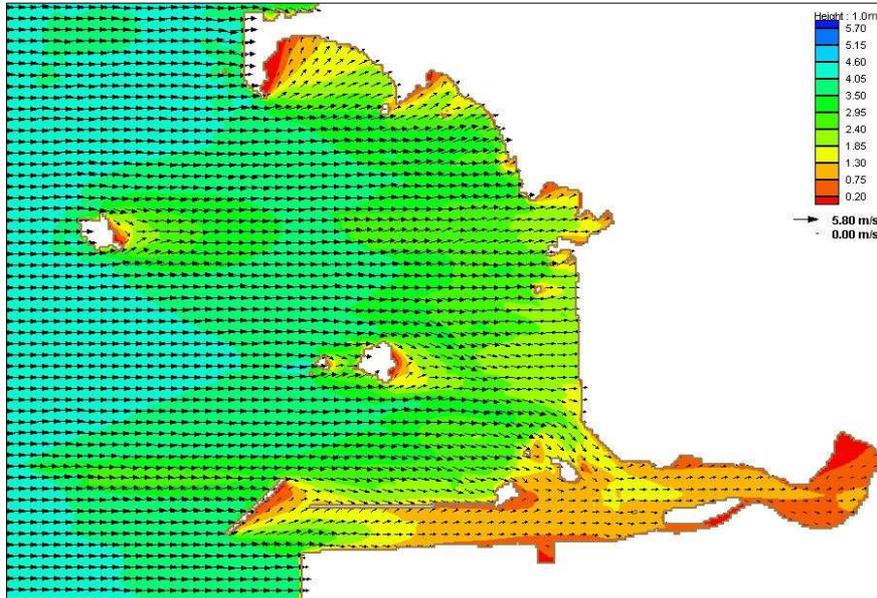


Fig. 3.33 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(W) and wind(W)

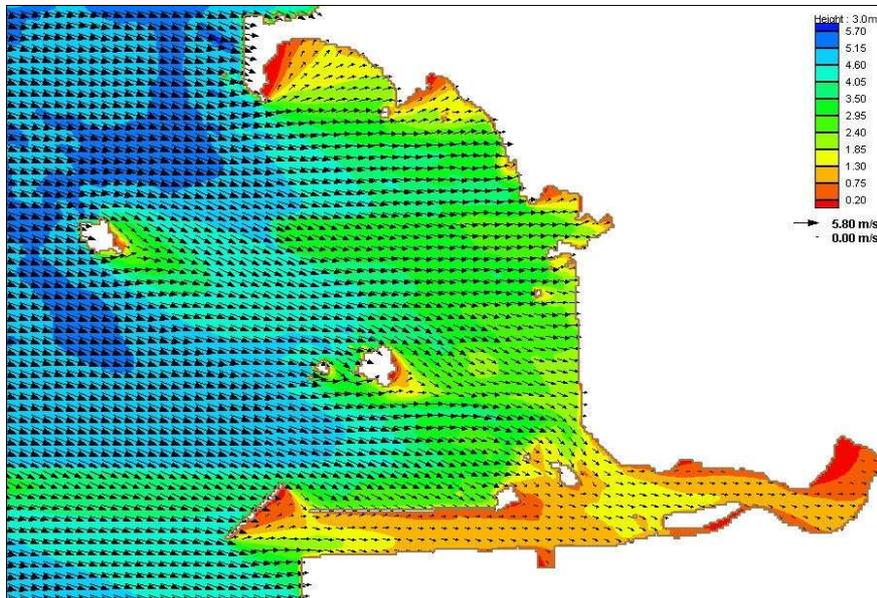


Fig. 3.34 Wave vector from the steady-state spectrum wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW) and wind(WNW)

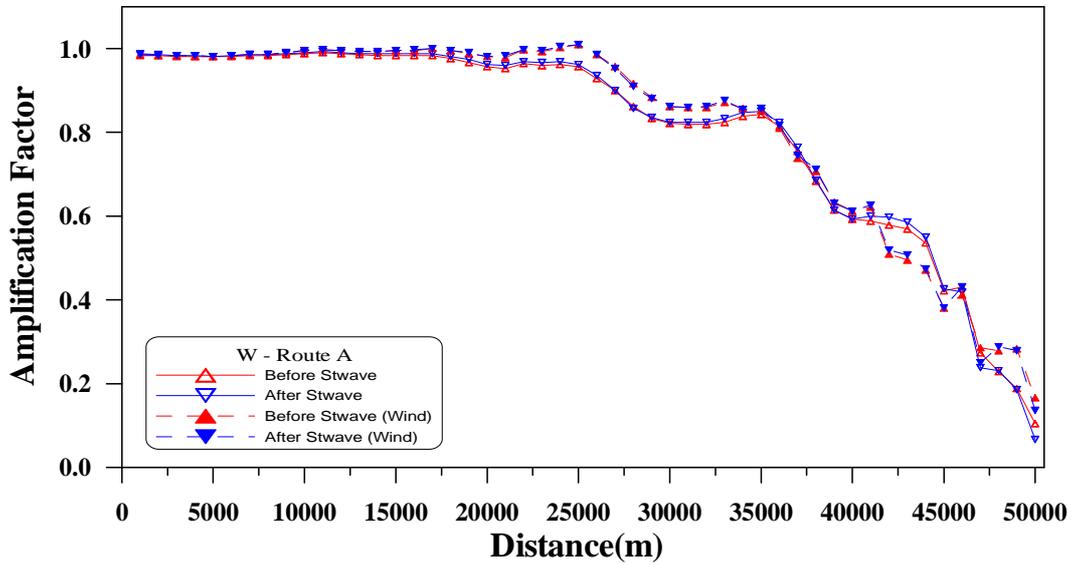


Fig. 3.35 Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route A(wave direction W)

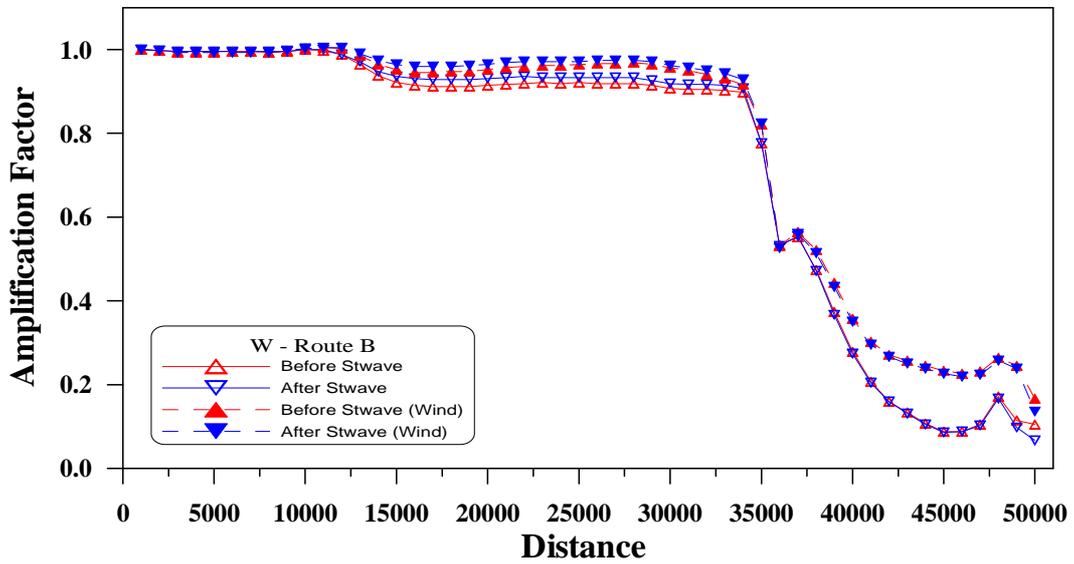


Fig. 3.36 Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route B(wave direction W)

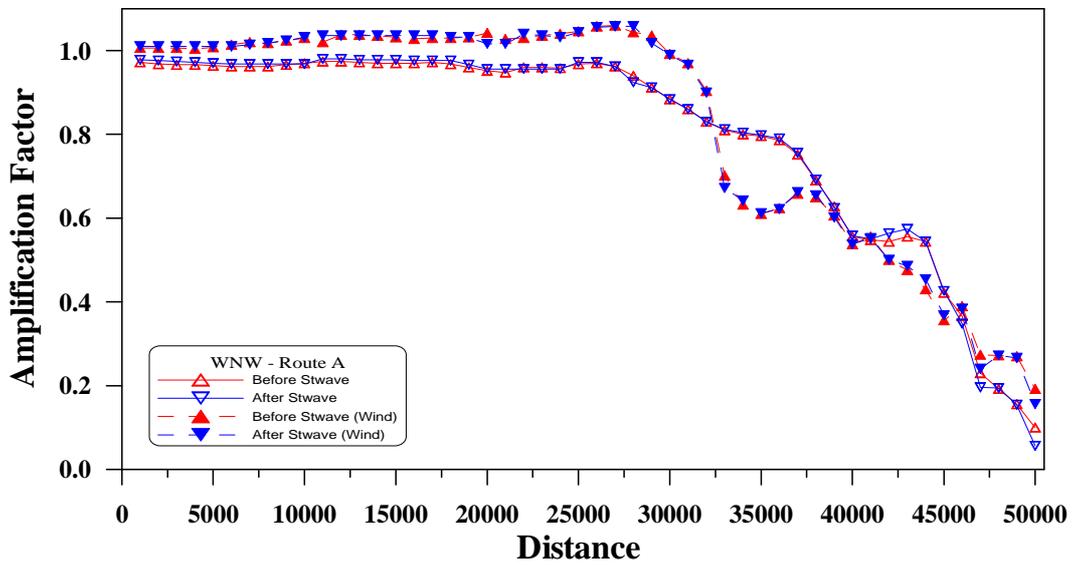


Fig. 3.37 Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route A (wave direction WNW)

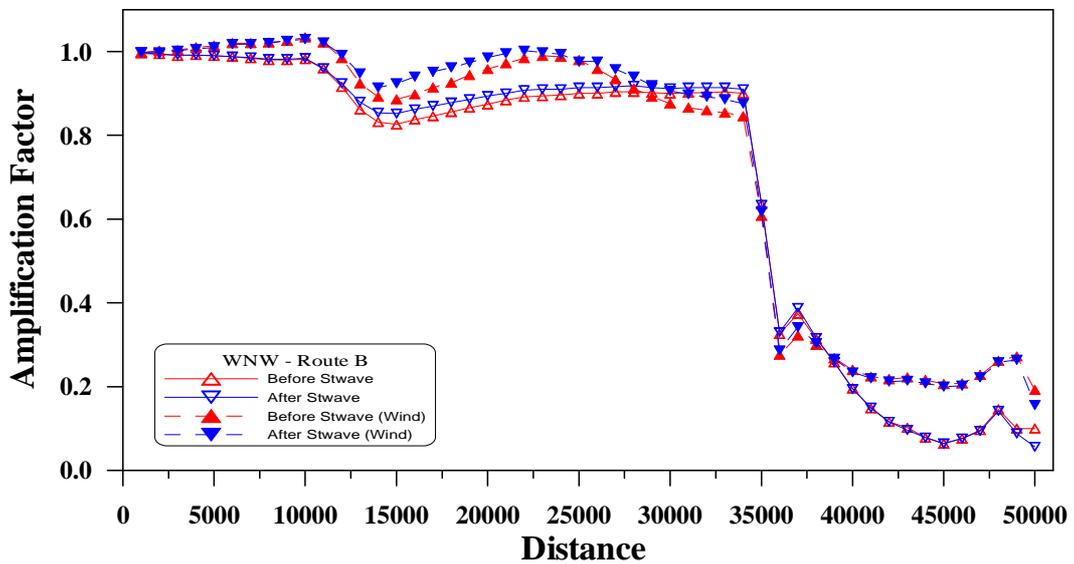


Fig. 3.38 Comparison of wave amplification factors from the steady-state spectrum wave model along the route B (wave direction WNW)

2) 결량 및 운동량 평형방정식에 기초한 모형에 의한 결과

(1) 정상상태 환경사방정식 모형에 의한 결과

정상상태 환경사 방정식에 기초한 파랑모형은 외해에서 파랑이 W, WNW 방향으로 입사하는 경우에 대해 수치실험을 수행하였다. Fig. 3.39~3.42는 파랑이 W, WNW방향에서 입사할 때 군장항내의 파고분포도를 나타내며, Fig. 3.43~3.44와 Fig. 3.45~3.46은 항로에 따른 파고도와 그래프를 나타낸 것이다.

W방향의 입사파를 적용하였을 때 수로 A에서 호안 건설 전 항로의 시점에서 최고 3.01m의 파고가 나타났고, 호안건설 영역에서는 0.81~2m에 이르는 파랑이 발생하였다. 군산항로를 따르는 수로 B에서는 방파제로 인해 파랑이 일부 차단되고, 방파제의 후면에서 약 2m의 파가 진행하지만 항로에는 큰 영향을 미치지 못하고, 1m이하의 다소 낮은 파랑이 발생하였다. 호안이 건설된 후의 수로 A에서는 항로의 시점에서는 건설 전과 거의 유사하지만 대상영역에서 호안의 건설로 인한 해안선의 변화로 반사파가 발생하여 호안건설 이전보다 약 1m가량 파고가 높게 발생하였다. 수로 B에서는 호안건설 전·후의 파랑변화는 크게 나타나지 않았다.

WNW 방향의 입사파를 적용하여 수치실험 한 결과, 수로 A에서는 호안건설 전에는 항내로 진행하면서 파고가 줄어드는 일반적인 양상을 보이고, 호안건설 후에는 호안에서의 다중반사 효과로 인해 파고가 1.36~2.39m에서 1.12~3.03m로 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 수로 B에서는 항로 시점영역에서 호안 건설 후보다 호안 건설 전에 파고가 최고 0.37m 증가 하였고, 항로를 따라 항내로 접어들면서 호안 건설 전보다 호안 건설 후의 파고가 0.04~0.43m 증가하는 것으로 나타났다.

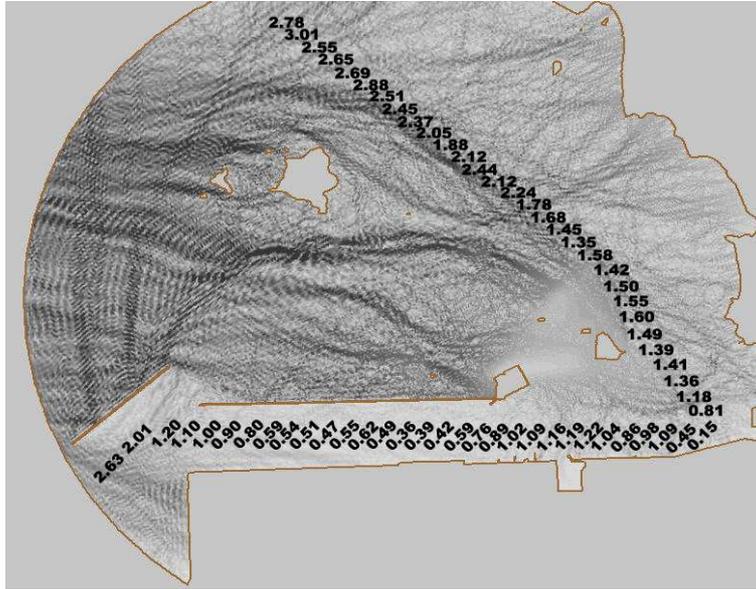


Fig. 3.39 Wave height p predictions from the steady-state mild slope Eq. wave model for the present configuration with wave direction of W

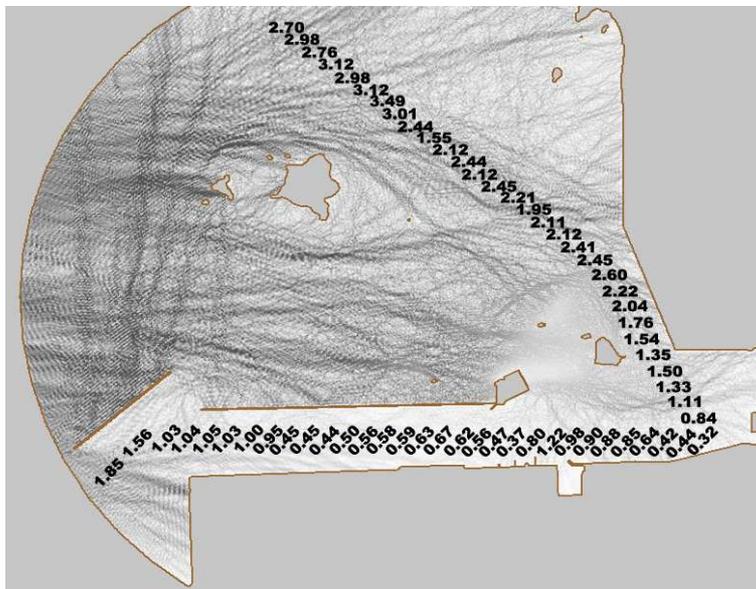


Fig. 3.40 Wave height p predictions from the steady-state mild slope Eq. wave model after coastal reclamation plan with wave direction of W

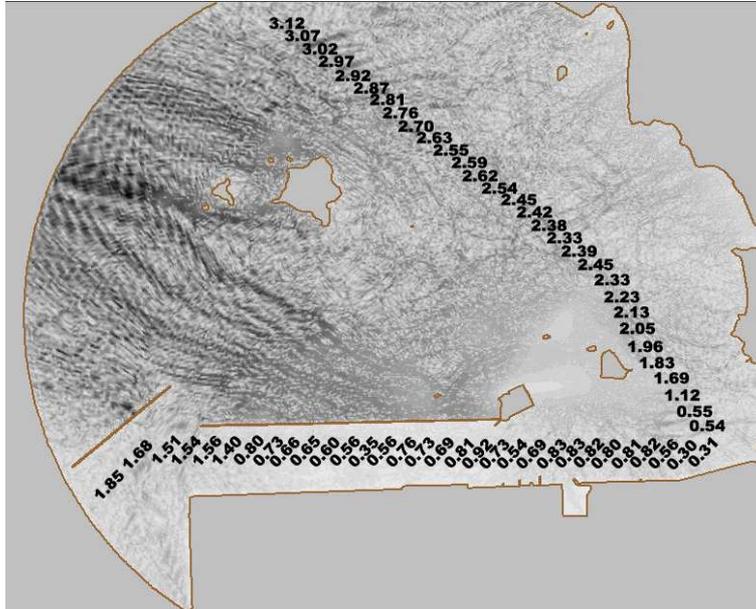


Fig. 3.41 Wave height *predictions* from the steady-state mild slope Eq. wave model for the *present configuration* with wave direction of WNW

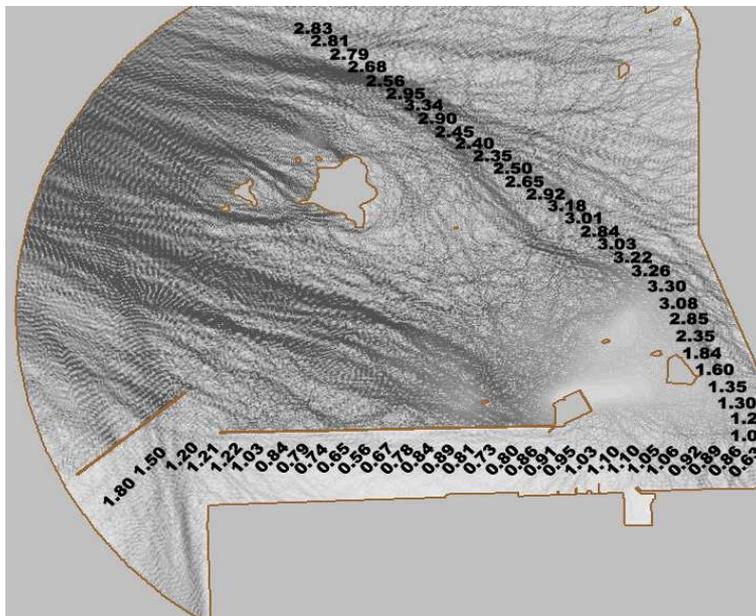


Fig. 3.42 Wave height *predictions* from the steady-state mild slope Eq. wave model after coastal reclamation plan with wave direction of WNW

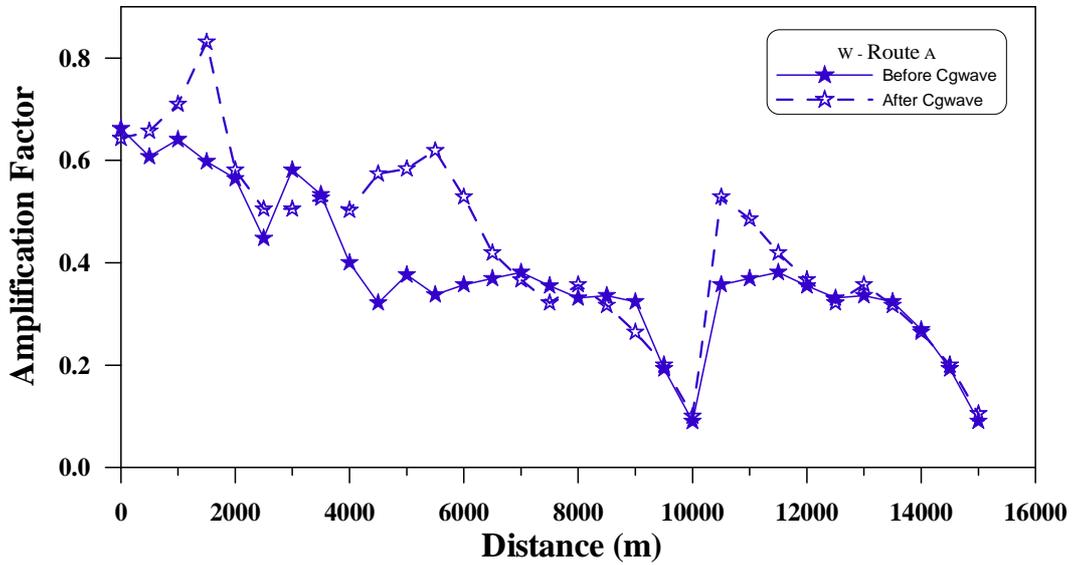


Fig. 3.43 Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction W)

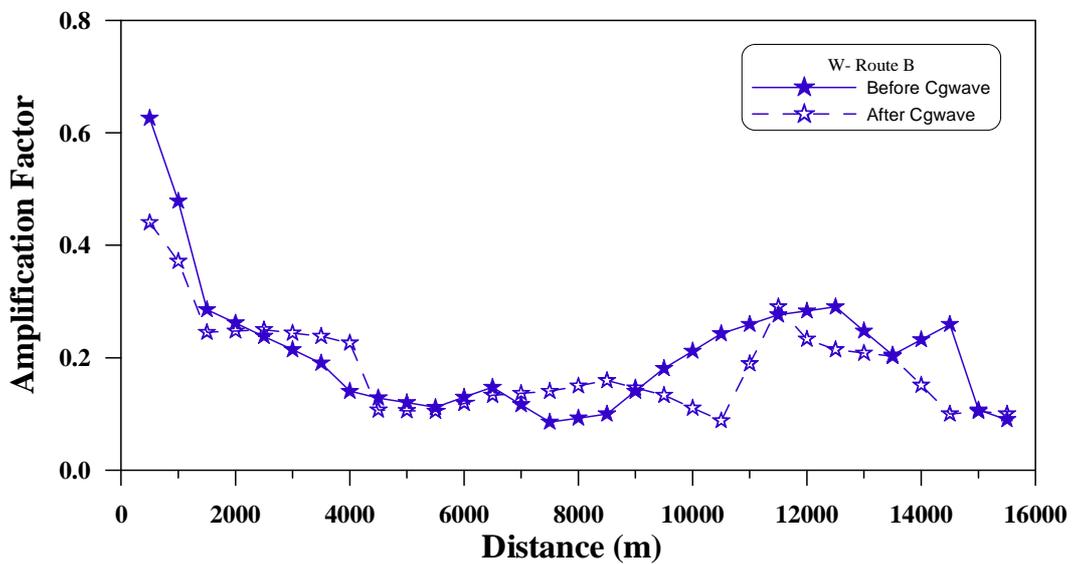


Fig. 3.44 Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route B (wave direction W)

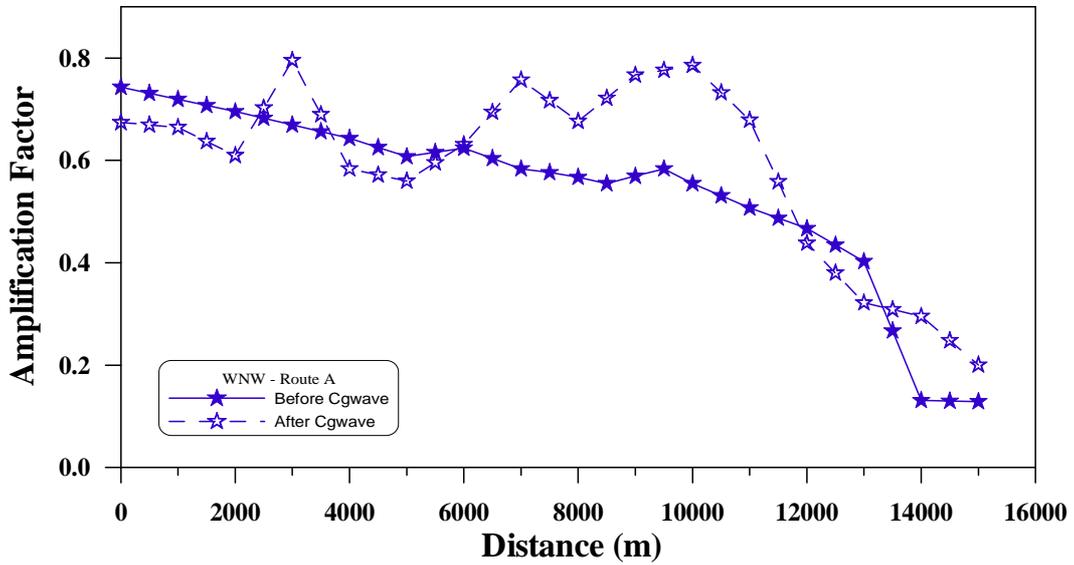


Fig. 3.45 Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction WNW)

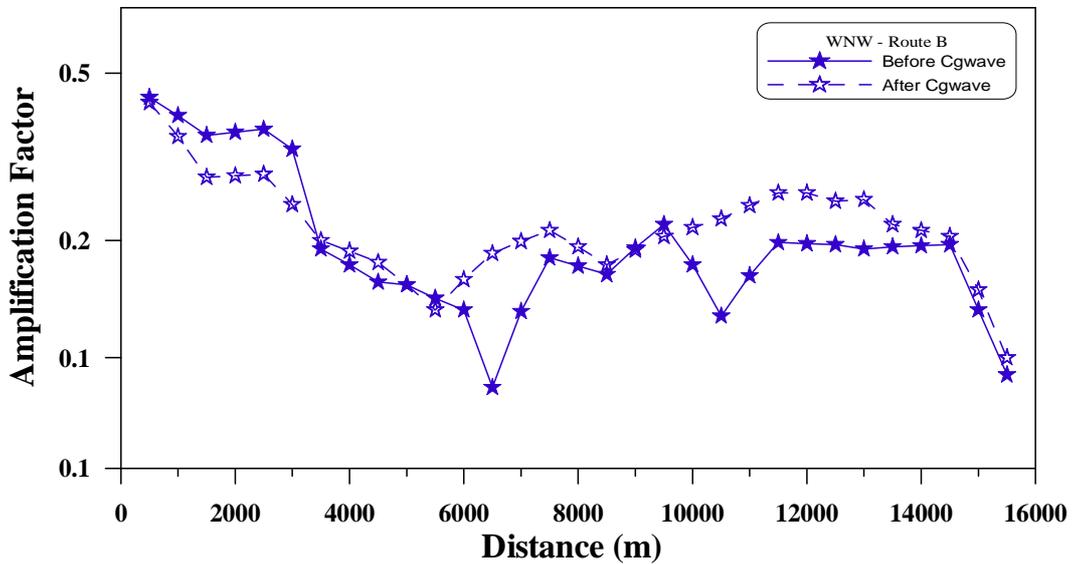


Fig. 3.46 Comparison of wave amplification factors from the steady-state mild slope Eq. wave model along the route B (wave direction WNW)

(2) 비정상상태 환경사방정식 파랑모형

본 절에서는 파향 W, WNW에 대하여 파랑의 천수, 굴절, 회절, 쇄파변형 및 파랑 흐름간의 간섭효과를 동시에 고려할 수 있는 비정상상태 환경사방정식 파랑모형을 적용하여 다음과 같이 수치실험을 수행하였다. Fig. 3.47~3.50에서 입사파 W, WNW 방향에 대한 매립 전·후의 파랑벡터도를 나타내었고, Fig. 3.51~3.54에서는 수로 A, B에 대해 매립 전·후의 파고비를 그래프로 나타내었다.

입사파 W에 대하여 수치 실험을 수행한 결과 수로 A를 따라 28,000m까지 호안 건설 전보다 호안 건설후의 파고가 0.10~0.94m로 다소 차이가 나지 않지만 그 이후 영역에서는 호안 건설후의 파고가 1.0m~2.07m로 증가하여 나타난 것을 알 수 있다. 수로 B에 대해서는 호안건설에 따른 영향이 적어 외해역에서부터 항내 금강입구까지 파고의 변화가 0.3m 내외로 거의 나타나지 않는다. 입사파 WNW 방향에 대한 수치모형실험의 결과로 수로 A에서는 W 파향에 대한 결과와 마찬가지로 외해역에서는 0.1m 내외로 파고의 차이가 거의 나지 않지만 내해로 접어들면서 호안 건설로 인한 해안선의 변화와 쇄파, 굴절 등 해역에서의 복잡한 영향으로 호안 건설 전보다 호안 건설후에 파고 차이가 최고 1.7m까지 발생하였다. 수로 B에서 호안 건설 전·후의 파고 분포를 살펴보면 역시 외해역에서는 파고의 차이가 거의 나지 않으며, 파랑의 입사방향에 대한 영향으로 항내에서 파고가 0.5~0.7m 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 3.51~3.54는 입사 파향 W, WNW에 대해 수로별 각각 수치모형의 결과값들을 그래프로 나타낸 것이다. 결과값이 외해에서 연안으로 접근하면서 거의 같은 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 바람 성장에 의한 파랑발달을 표현할 수 있는 에너지 평형 수치모형은 바람의 영향으로 타 모형의 파고보다 다소 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

군산항로를 따르는 수로 B에서는 크게 변화가 없는 양상을 보이고, 수로 A에서는 파랑이 진행되면서 섬들에 의해 회절이 발생하고 항내에서는 반사 및 쇄파, 천수 효과로 파의 산란이 발생하는 것을 알 수 있다.

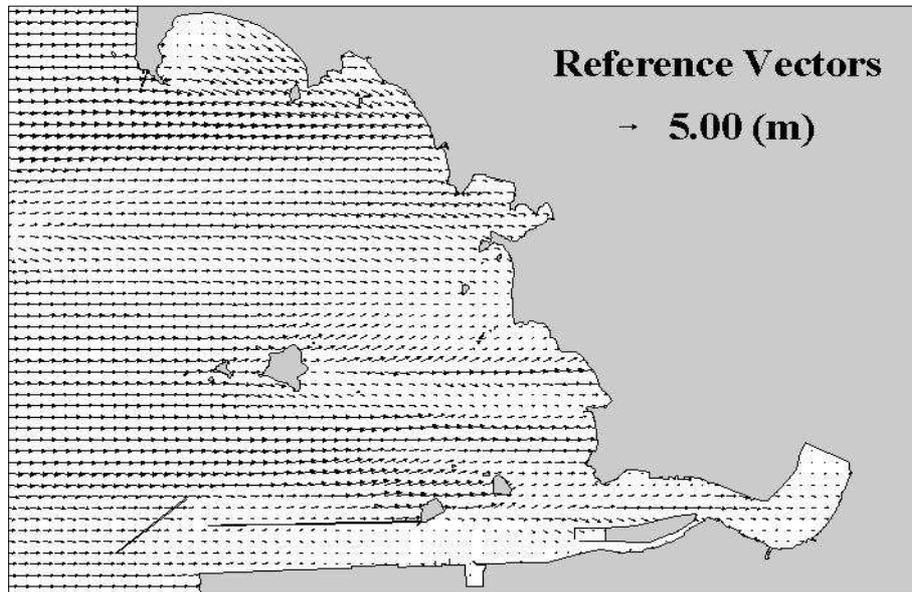


Fig. 3.47 Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model for the *present configuration with wave(W)*

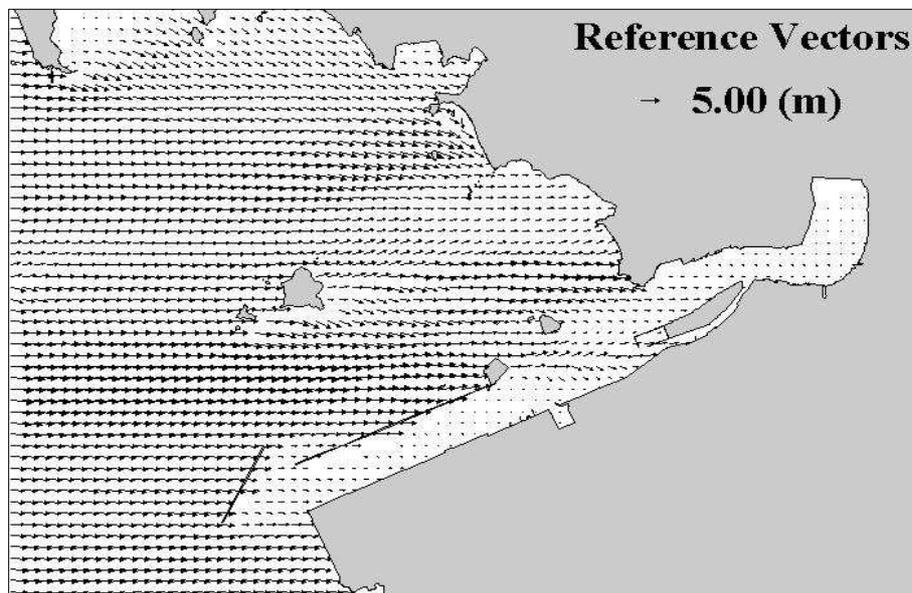


Fig. 3.48 Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model for the *present configuration with wave(WNW)*

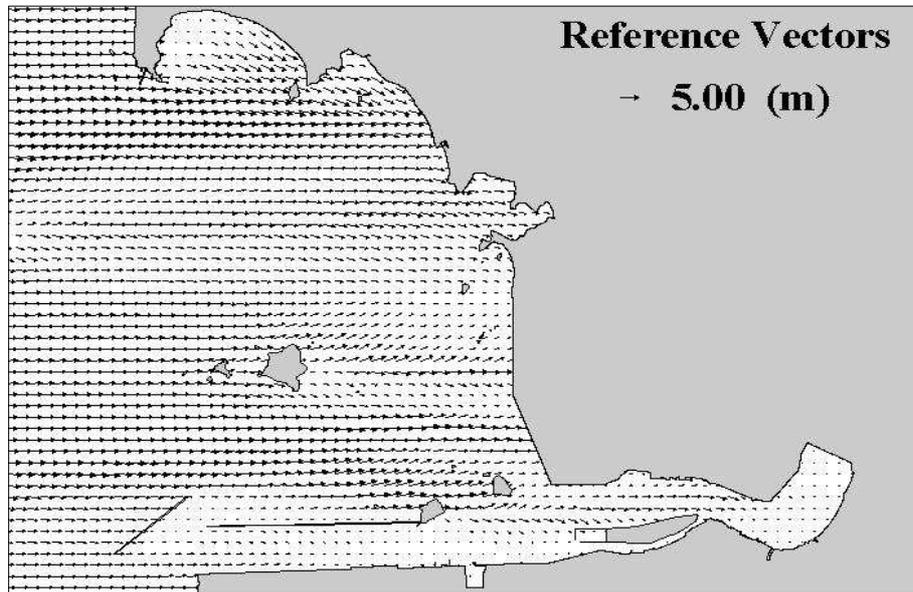


Fig. 3.49 Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model after coastal reclamation plan with wave(W)

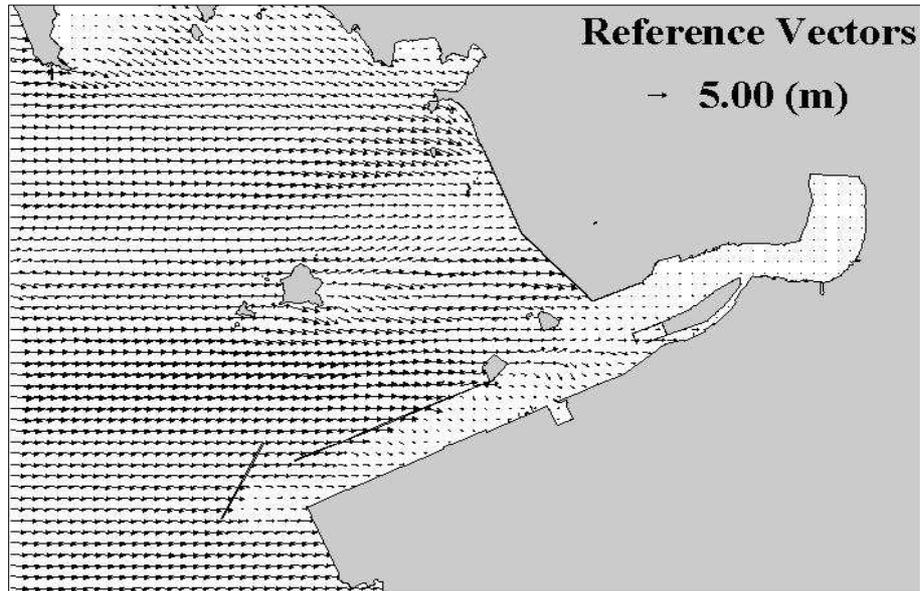


Fig. 3.50 Wave vector from the non steady-state mild slope Eq. wave model after coastal reclamation plan with wave(WNW)

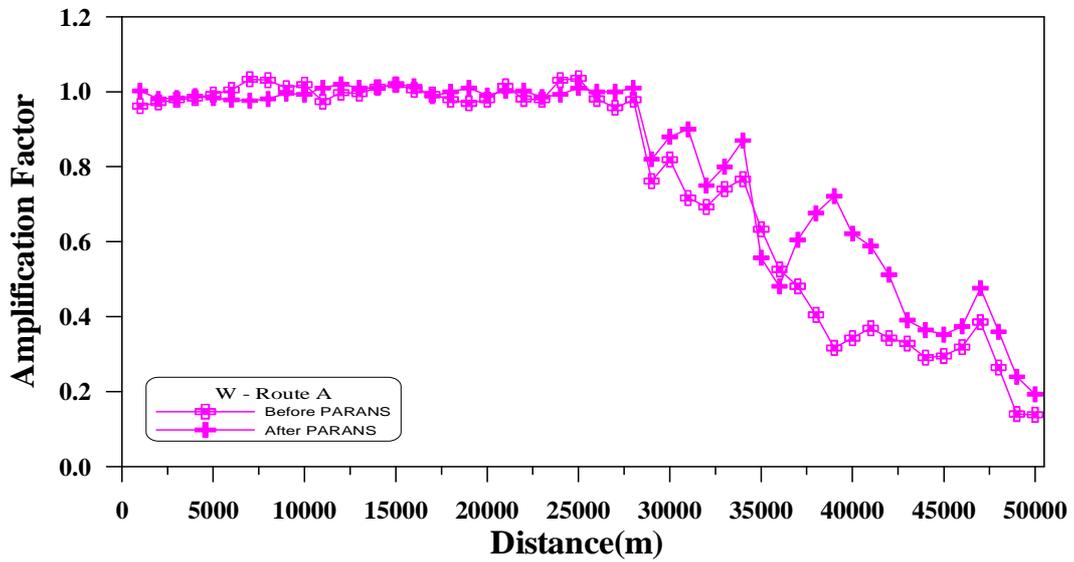


Fig. 3.51 Comparison of wave amplification factors from the non steady -state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction W)

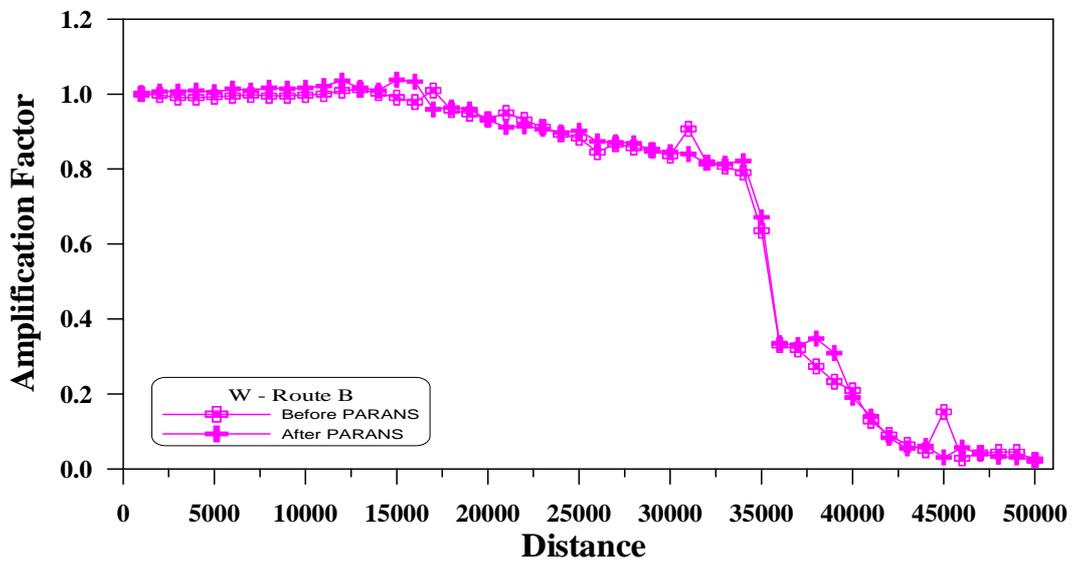


Fig. 3.52 Comparison of wave amplification factors from the non steady -state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction W)

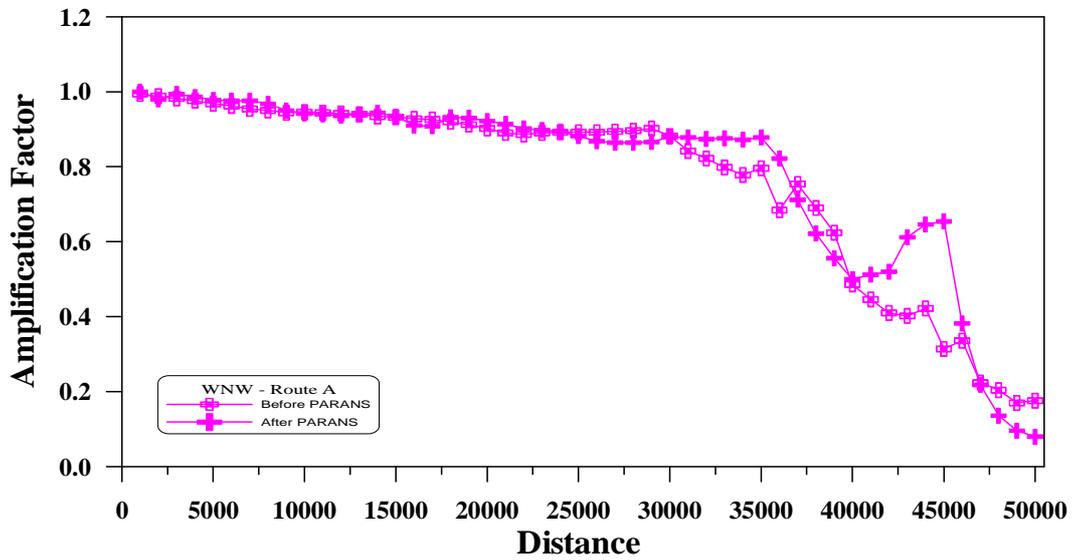


Fig. 3.53 Comparison of wave amplification factors from the non steady-state mild slope Eq. wave model along the route A(wave direction WNW)

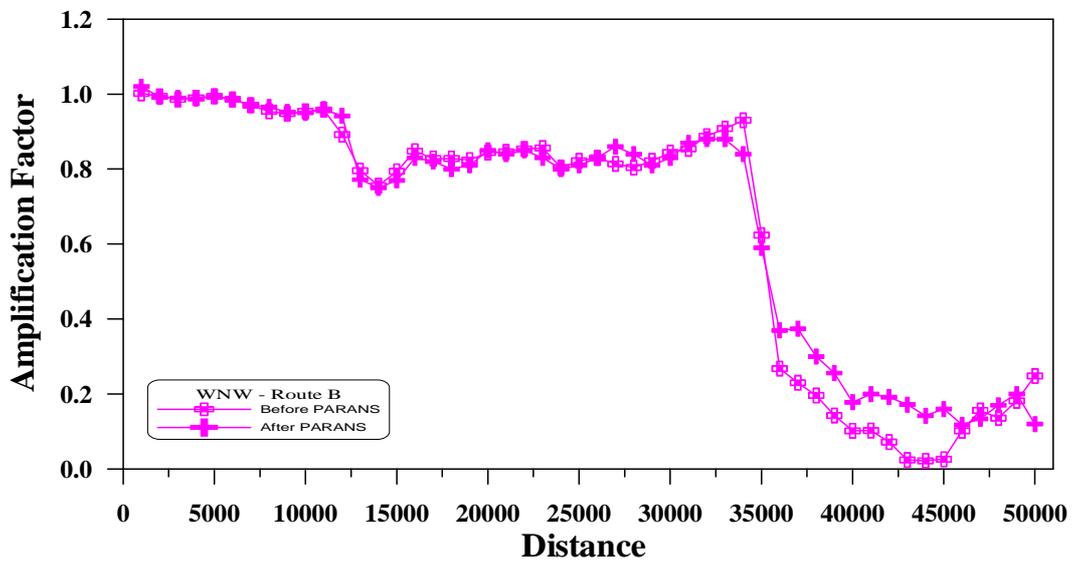


Fig. 3.54 Comparison of wave amplification factors from the non steady-state mild slope Eq. wave model along the route B(wave direction WNW)

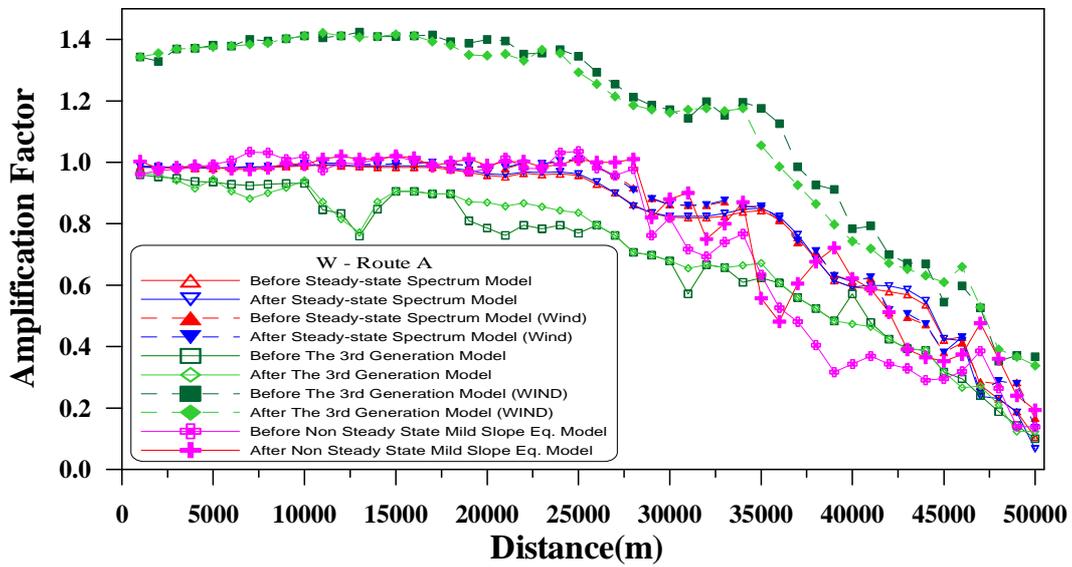


Fig. 3.55 Comparison of wave amplification factors along the route A (wave direction W)

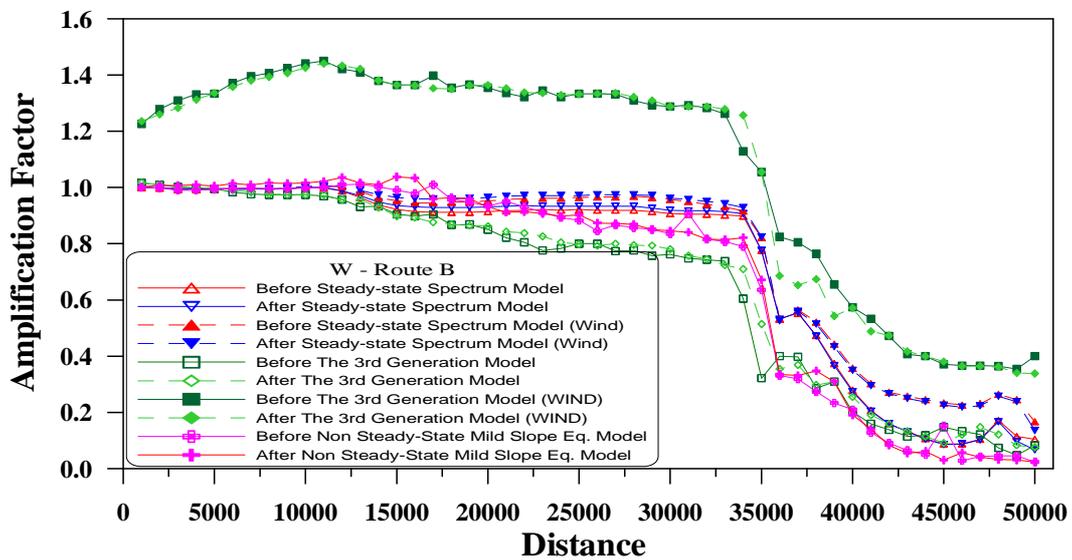


Fig. 3.56 Comparison of wave amplification factors along the route B (wave direction W)

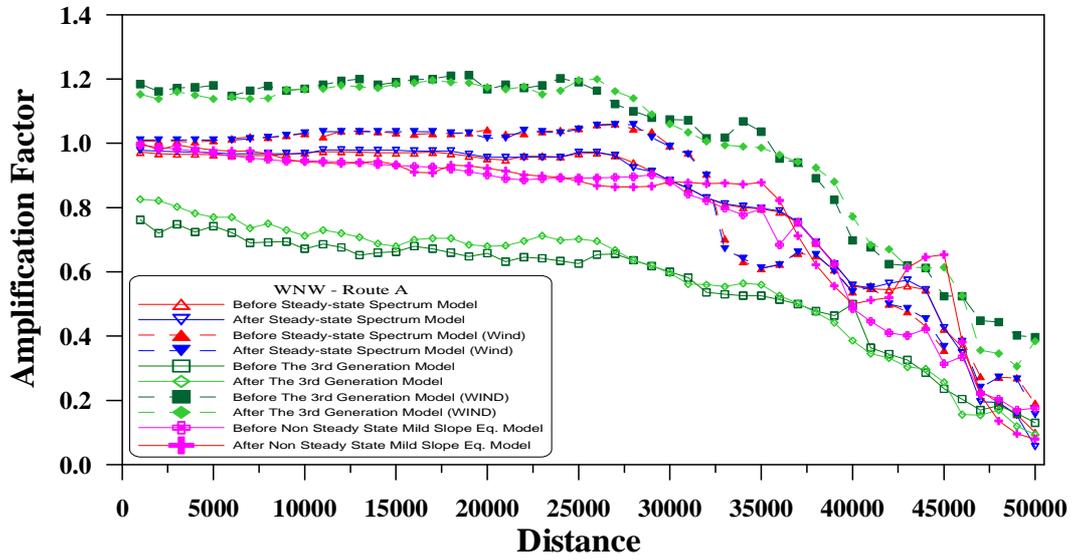


Fig. 3.57 Comparison of wave amplification factors along the route A (wave direction WNW)

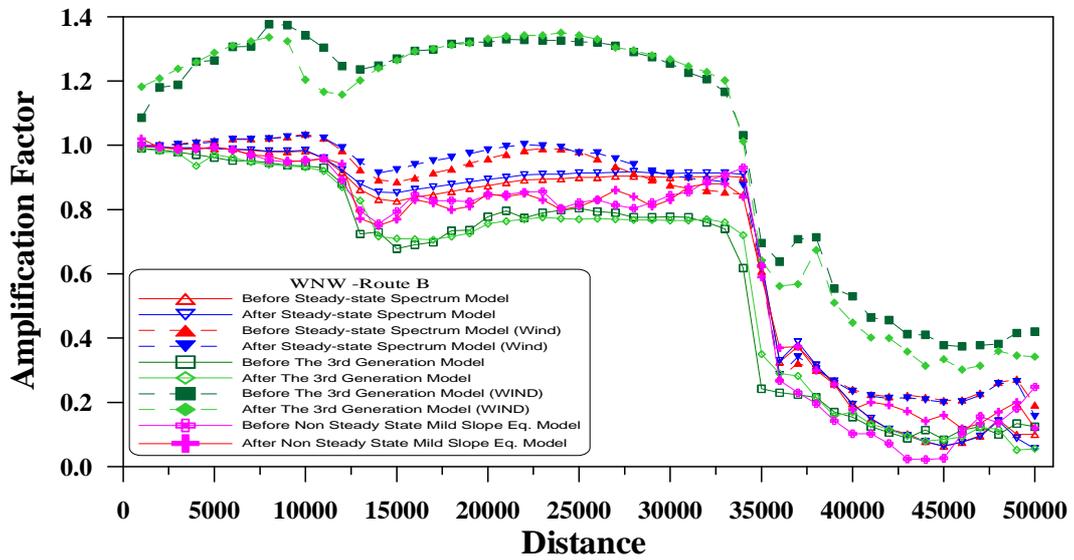


Fig. 3.58 Comparison of wave amplification factors along the route B (wave direction WNW)

3.3.2 흐름 및 바람의 영향을 고려한 수치모형 결과

1) 흐름장 결과

군산-장항 국가산업단지 내 호안도로 및 매립으로 인한 해안선의 변화로 인해 발생하는 흐름을 고려한 파랑수치모형을 수행하기 위해 흐름장 수치실험을 수행하였다. 파 흐름의 영향을 포함한 파랑 및 흐름과 바람의 영향을 모두 받는 파랑을 예측하였다.

Fig. 4.59는 조석 검증과 조류 검증을 위한 지점을 나타내고, 호안 및 매립 전의 유속을 비교하기 위한 지점을 나타내는 그림이다.

Fig. 4.60은 TL 1~2 지점에서 수치모형 실험에 의한 조석 결과와 국립해양조사원에서 관측한 조석을 비교하여 그래프로 나타내었다. 해양조사원에서 조사한 지점은 군산검조소에 위치하고 있다. 국립해양조사원에서 조사한 조석은 반일주조형이 탁월하므로, M2, S2의 영향이 조석의 주종을 이루는 것으로 분석되었고, 그림에서 보는 바와 같이 진폭이나 주기의 형태가 유사함을 알 수 있다.

Fig. 4.61은 V1~4 지점에서 실제 관측된 조류데이터와 본 연구에서 수행한 수치모형실험에 의한 조류의 데이터를 비교한 그림이다. 모든 지점에서 관측된 결과와 수치 모형에 의한 결과가 유사한 형태를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

대상영역의 호안 및 매립 전후의 최강 창조류 및 최강 낙조류 벡터도를 Fig. 4.62~4.63과 Fig. 4.65~4.66에서 나타내었다. Fig. 4.64는 호안 및 매립 후의 유속을 비교하기 위한 지점을 나타내고, Fig. 4.67은 국립해양조사원에서 관측한 최강 창조시와 최강 낙조시의 유속과 본 연구에서 선정한 Station 1~6에서의 유속과 비교한 그림이다.

흐름의 형태를 보면 최강창조류일 때 군산외항과 방파제 사이의 간격이 협소하여 유속이 다소 높게 나오고, 입구부에서 최고 0.71m/s의 유속이 나타났다. 군산 항로를 따라 수심이 깊고 폭이 좁아 다소 유속이 큰 것을 볼 수 있다. 또한 최강낙조류일 때도 군산항로를 따라 유속이 다소 높고, 방파제 입구부에서 최강창조 때보다는 약간 낮은 0.68m/s의 유속이 나타났다.

호안이 건설된 후의 흐름은 최강 창조류 시 군산항로부근에서 유속이 크게 나타나며, 호안의 건설로 인해 섬과의 간격이 건설 전보다 더욱 협소해져서 이 지역의 유속이 건설 전에는 0.29m/s에서 건설 후에 0.46m/s로 증가하는 것을 알 수 있다. 최강낙조류일 때도 역시 건설 전에 0.26m/s에서 건설 후에 0.43m/s로 건설 대상영역과 섬 사이의 간격이 좁아짐으로 유속이 빨라지는 현상이 발생하였다. 또한 지점별 시간에 따른 유속분포를 Fig. 4.68~69와 같이 나타내었다.

Fig. 4.70~4.73은 호안건설 대상해역에서의 잔차류를 나타낸다. 호안공사 전 현 상태에서 잔차류의 공간 분포는 금강하구에서 항로를 따라 외해방향으로 10cm/s 내외의 잔차류 분포가 나타나고, 공사해역 부근에서는 대부분이 남서방향으로 나가는 경향을 보이고 있으나 일부는 다시 돌아들어오는 현상이 나타났다. 방파제 뒤편으로 돌아 북서 방향으로 잔차류의 분포가 나타나고, 항로 입구부에서 잔차류가 빠르게 나타나는 현상이 나타났다. 항로 내에서는 미비하게 북동방향으로 잔차류 분포가 나타난다. 호안공사 후에는 남측 호안 전면에서 남쪽방향으로 잔차류의 변화가 나타나고, 이외의 지역은 현 상태와 유사한 경향을 나타낸다.



Fig. 3.59 Selected station for point for the present configuration

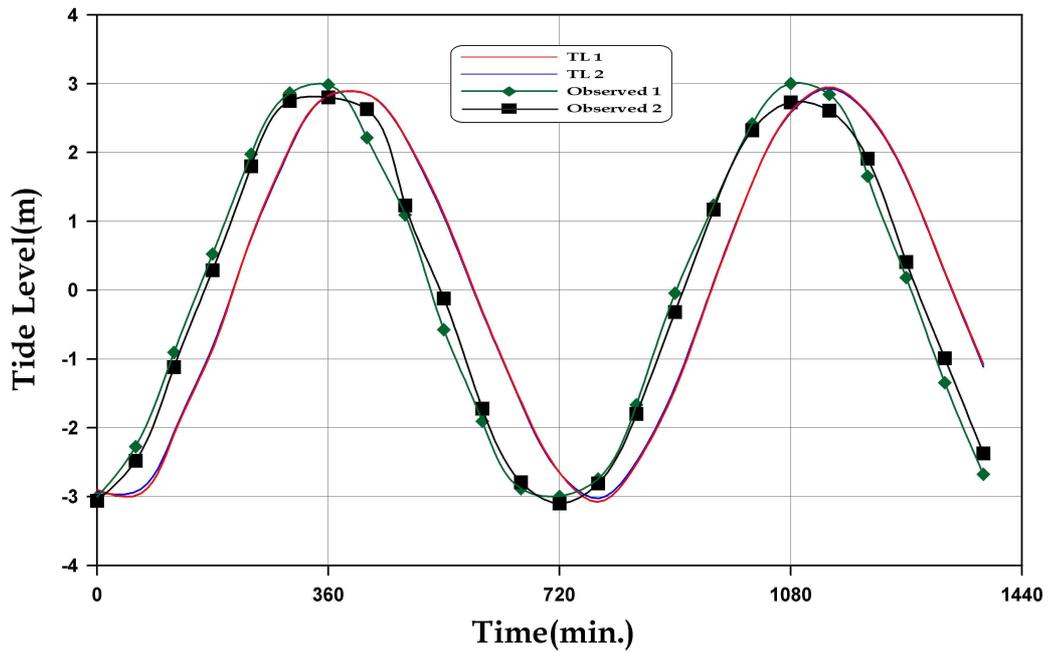


Fig. 3.60 Comparison of observed and calculated tides for the selected station

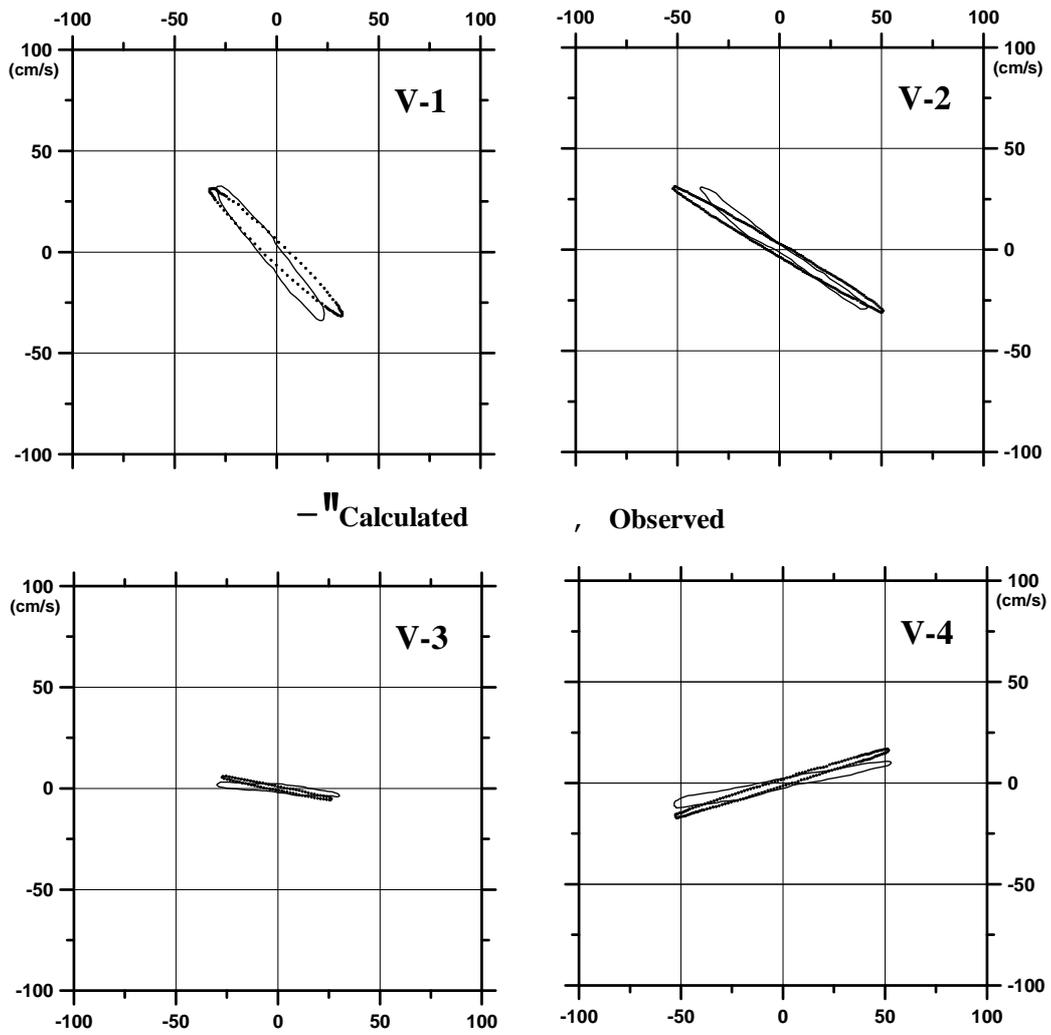


Fig. 3.61 Comparison of observed and calculated velocities for the selected station

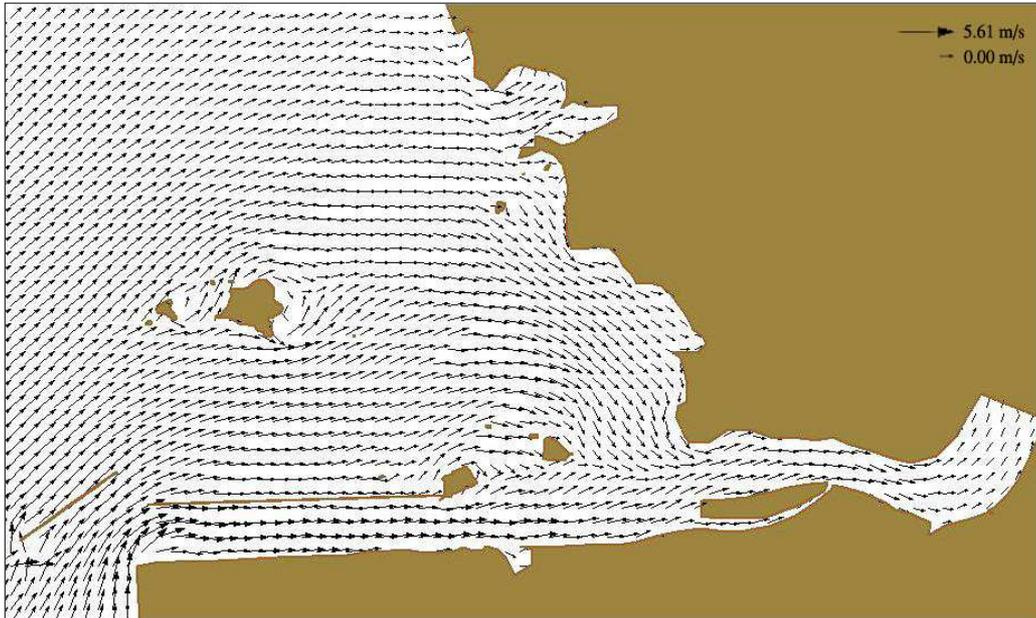


Fig. 3.62 Computed tidal current(maximum flood current) *point* for the *present configuration*

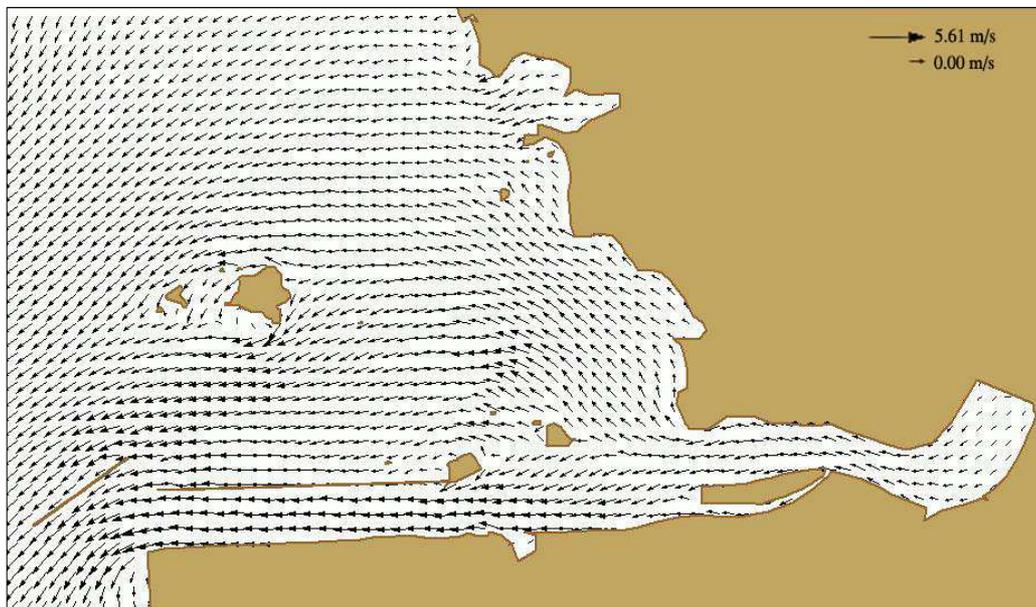


Fig. 3.63 Computed tidal current(maximum ebb current) *point* for the *present configuration*



Fig. 3.64 Selected station point after coastal reclamation plan

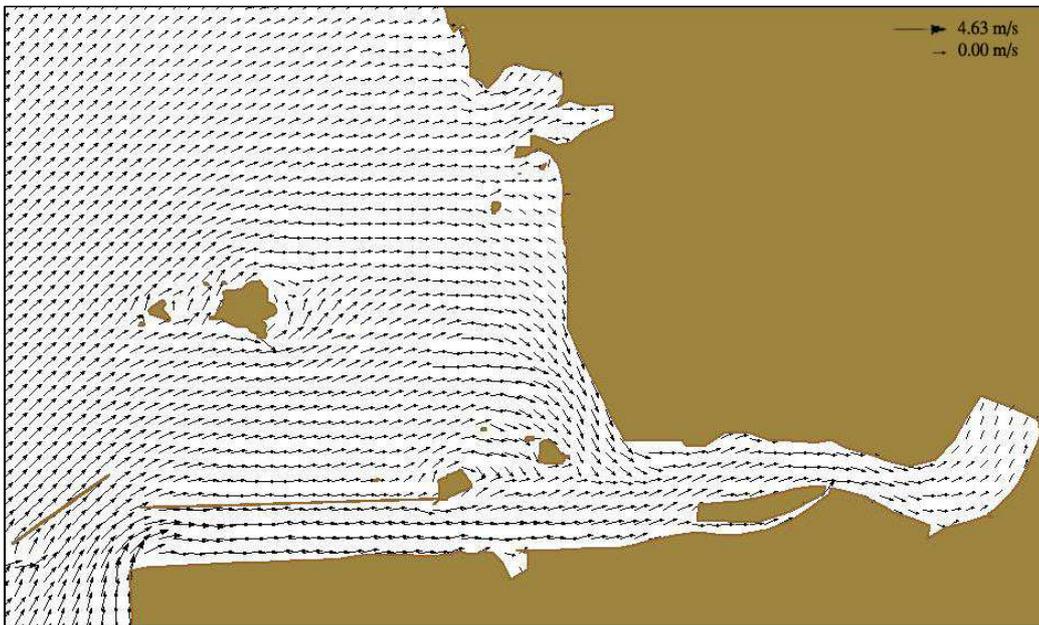


Fig. 3.65 Computed tidal current(maximum flood current) point after coastal reclamation plan

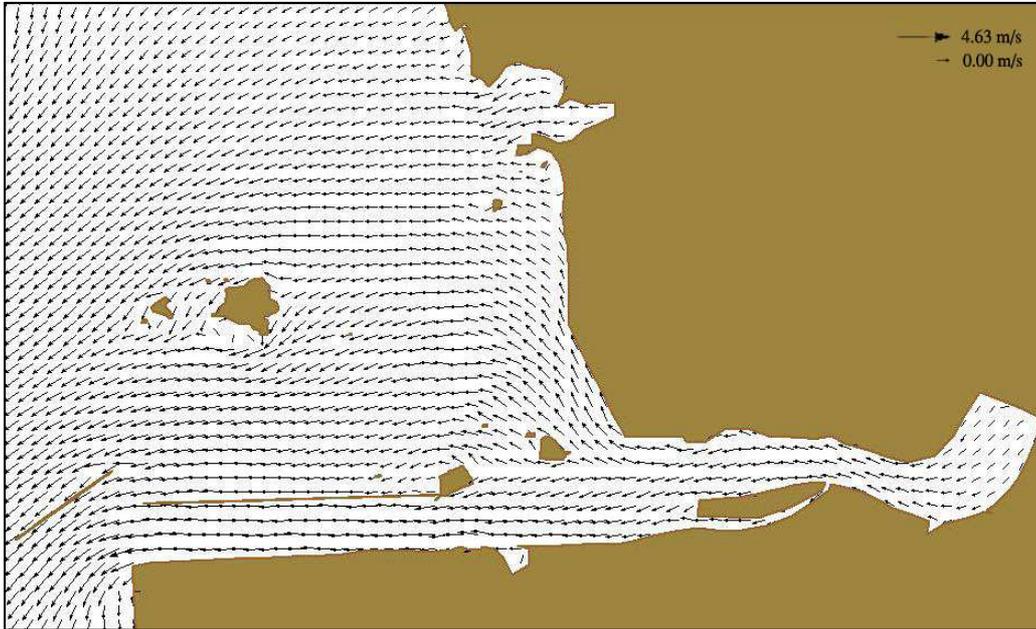


Fig. 3.66 Computed tidal current(maximum ebb current) *point* after coastal reclamation plan

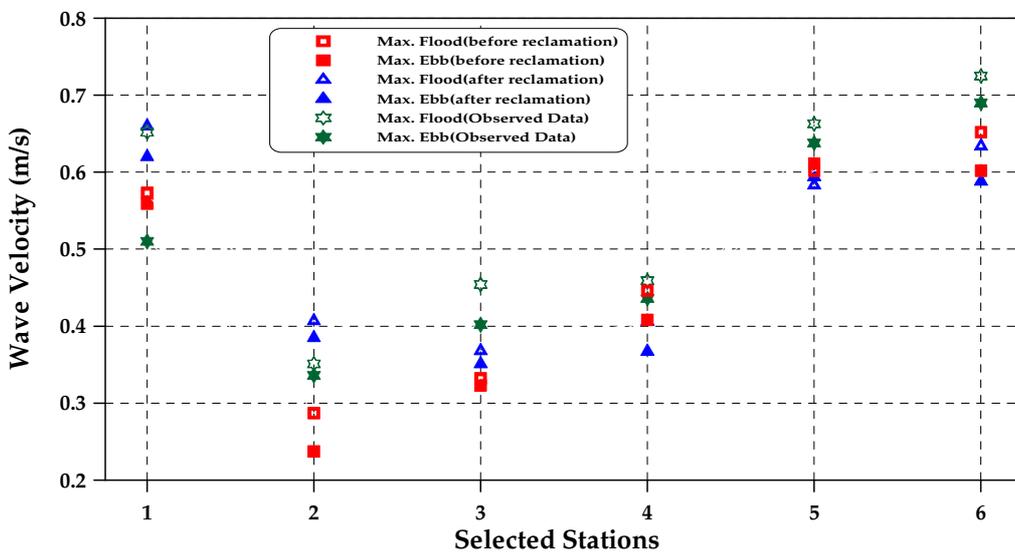


Fig. 3.67 Comparison of observed and calculated wave velocity for the selected station

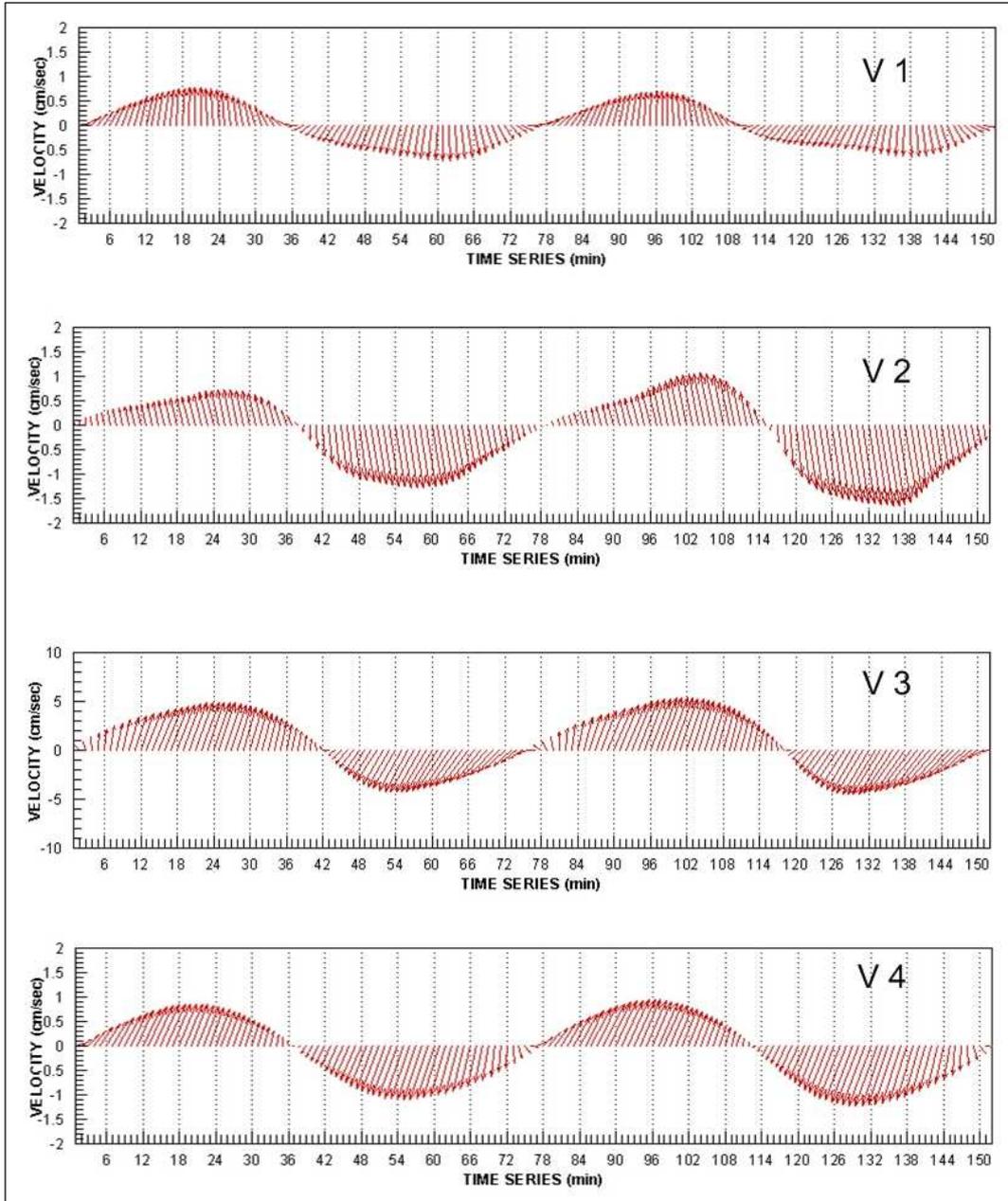


Fig. 3.68 Stick diagram of tidal current computed in for the present configuration

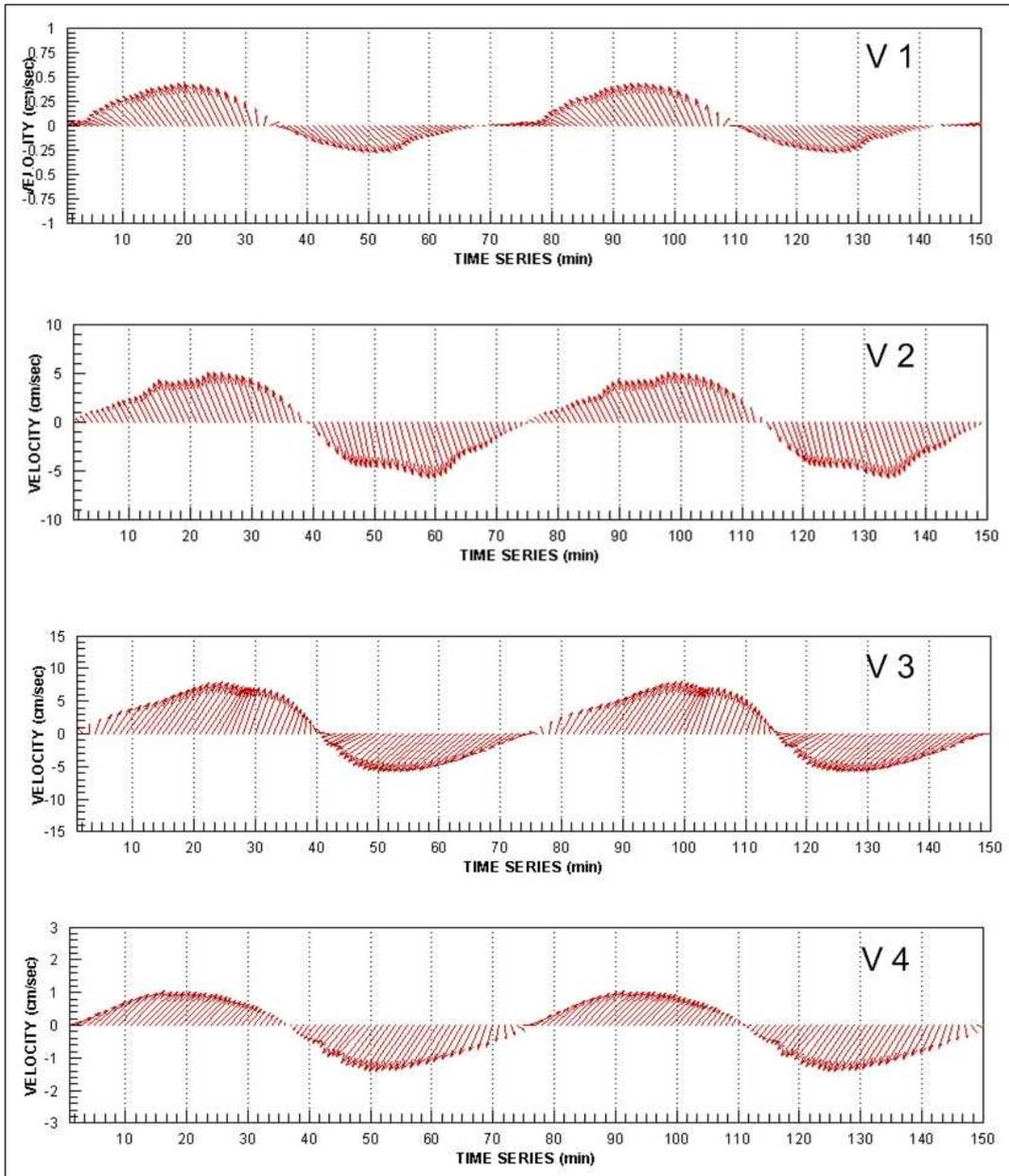


Fig. 3.69 Stick diagram of tidal current computed in after coastal reclamation plan

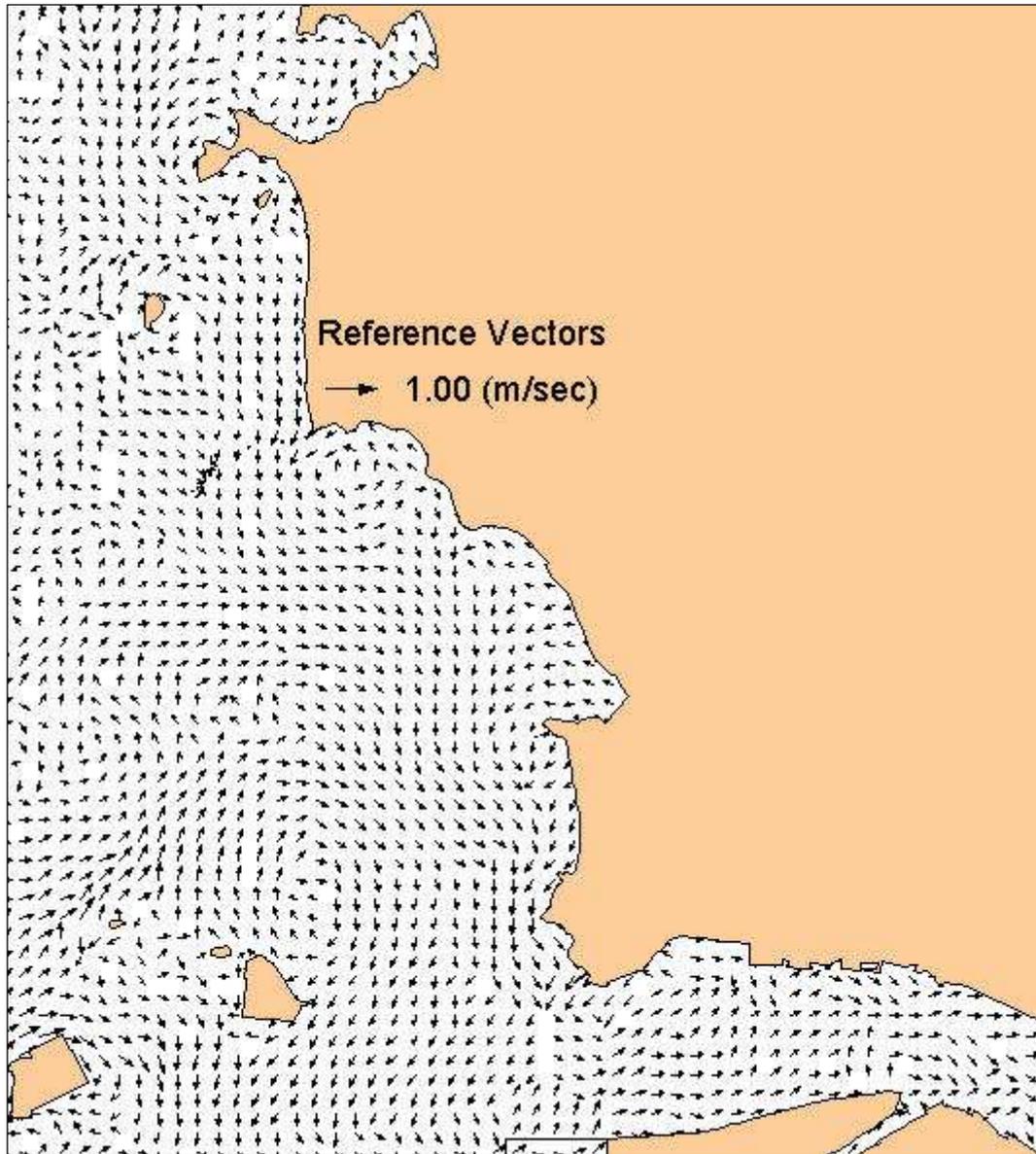


Fig. 3.70 Velocity distribution of residual current for the present configuration (Janghang Coastline)

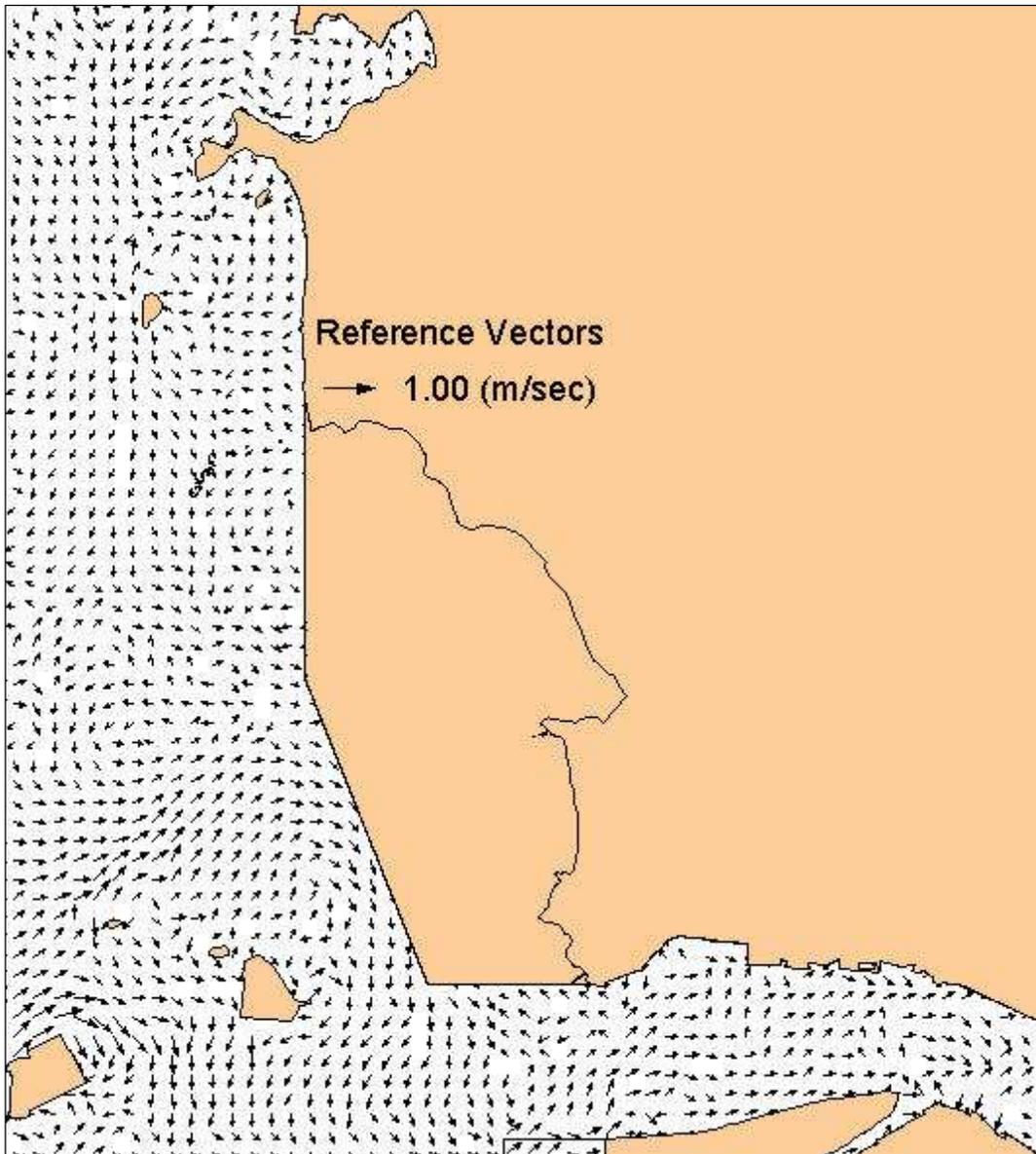


Fig. 3.71 Velocity distribution of residual current after coastal reclamation plan (Janghang Coastline)

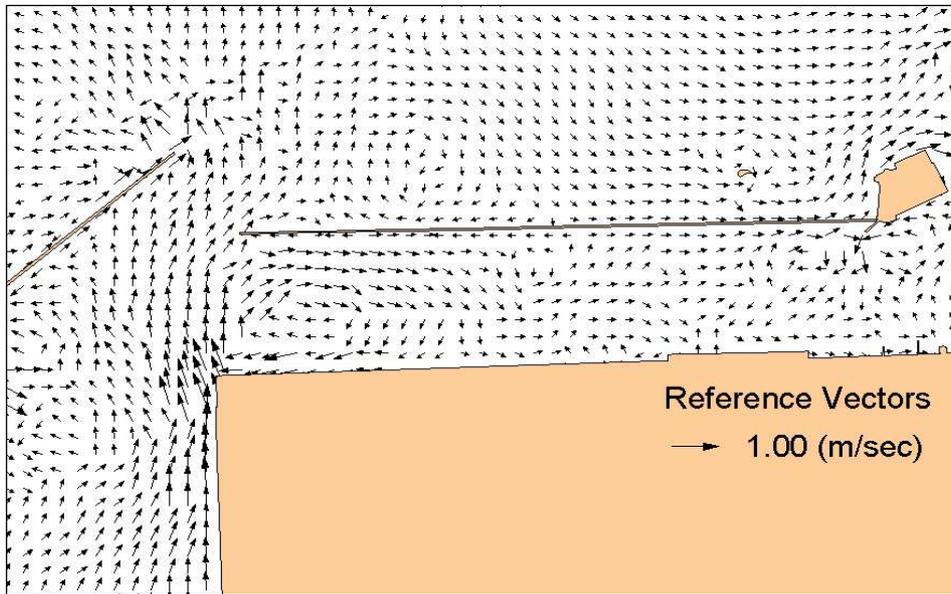


Fig. 3.72 Velocity distribution of residual current for the *present* configuration (Gunsan Waterway)

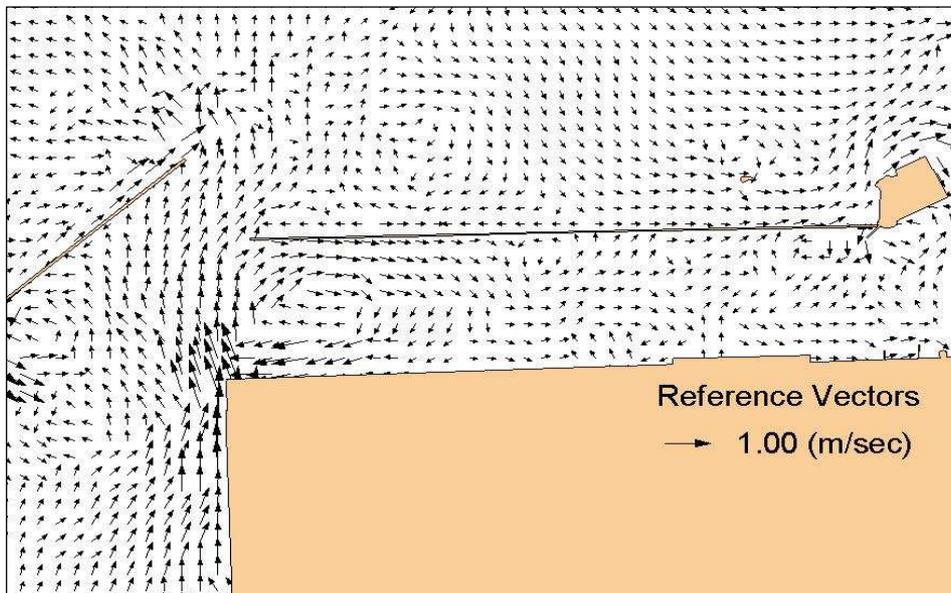


Fig. 3.73 Velocity distribution of residual current after coastal reclamation *plan* (Gunsan Waterway)

2) 흐름과 파랑을 고려한 경우의 결과

대상해역에서의 흐름의 영향을 정상상태 스펙트럼 파랑 모형에 접목시켜 흐름과 파랑의 효과를 동시에 고려한 파랑의 변화를 예측하였다.

W, WNW 파향으로 입사하는 파랑수치모델에 호안건설 전·후의 최강창조류, 최강낙조류, 고조, 저조시 흐름에 대한 조건을 고려하여 수치실험을 수행하였다. Fig. 3.74는 이들 흐름과 바람의 영향을 고려한 파랑 변형을 항로를 따른 A, B 두 수로에서 비교하기 위해 그림과 같이 나타내었다. Fig. 3.75 ~ 3.82는 W방향의 파랑이 입사할 때 호안건설 전·후에 대해 흐름의 조건을 고려하여 수치 실험한 결과를 벡터도로 나타내었고, Fig. 3.83~3.90은 WNW 방향의 파랑이 입사할 때의 결과를 벡터도로 나타내었다. W 방향으로 파랑이 입사하였을 때 항 입구 방파제와 섬 뒤로 회절이 발생하고 항내로 접어들면서 굴절도 발생하는 것을 알 수 있다. 대상영역의 호안건설 전 수로 A에서의 외해역에서는 각 흐름조건에 대한 파고의 변화는 거의 없이 유사하게 나타났고, 항내에서 최고파고는 고조시에 1.83~2.47m로 발생하였으며, 최저파고는 저조시에 0.35~1.05m로 가장 낮게 발생하였다. 지리적 영향으로 조차가 많이 발생하기 때문에 고조시와 저조시의 파고차가 많이 나는 것으로 사료된다. 수로 A의 시점을 따라 8,000m에 이르는 영역에서 최강 낙조시의 파고가 최강 창조시의 파고보다 최고 0.42m 높게 나타났고, 종점까지는 최강 창조시의 파고가 최강낙조시의 파고보다 0.38m 높게 나타났다. 군산항로를 따르는 수로 B에서는 항로 시점에서 10,000m에 이르는 영역에서 최강 낙조시의 파고가 최강 낙조시의 파고보다 최고 0.62m 높게 나타나며, 그 이후 종점까지 최강 창조시의 파고가 최강 낙조시보다 최고 0.44m 높게 나타났다. 또한 항로를 벗어난 항 입구역에서 고조시의 파고가 저조시의 파고보다 최고 1.45m 크게 나타났다. 대상영역의 호안 건설 후의 수로 A에서의 파고분포를 보면 호안건설 전과 같이

고조시에 파고가 2.04~2.9m로 항내의 항로가 협소해져 파랑이 집중되는 현상 때문에 매립 전보다 다소 높아졌으며, 저조시에는 파고가 0.3~1.27m로 매립전과 비슷한 양상을 보였다. 항로 시점에서부터 11,500m까지의 영역에서는 최강 창조시와 최강 낙조시의 파고가 거의 비슷한 양상으로 나타났으며, 나머지 영역에서는 최강 창조시의 파고가 최강 낙조시보다 0.44m 높게 나타났다. 수로 B에서는 항로를 따라 최강 낙조시의 파고가 최강 창조시보다 0.04~0.46m로 크게 나타났다. 호안건설 전과 마찬가지로 항로 내에서는 비슷한 파고분포를 나타냈고 항로를 벗어난 항 입구역에서는 고조시의 파고가 저조시보다 1.72m 높게 나타나 호안공사 전보다 다소 파고가 높아진 것을 알 수 있다.

파랑이 WNW 방향에서 입사될 때의 매립 전 수로 A에서는 W 방향의 파랑이 입사했을 때와 마찬가지로 외해역에서는 흐름의 조건별로 비슷한 양상으로 파가 진행되어 오고, 항내에서는 고조시의 파고가 2.33~3.2m로 파향이 W 방향일 때보다 파가 입사되는 방향이 다소 개방되어 있고, 섬에 의한 차폐가 덜하기 때문에 높은 파가 발생하였다. 최강 낙조시의 파고보다 최강 창조시의 파고가 수로 A의 모든 영역에서 0.02~0.28m 높게 나타났다. 수로 B에서는 군산항로 내에서는 최강 낙조시의 파고가 최강 창조시보다 0.01~0.37m 높게 나타났다. 파랑의 입사방향이 WNW 일 때는 방파제의 차폐로 항로 내에서 W 방향일 때보다 파고가 다소 낮게 발생하는 것을 알 수 있고, 항로를 벗어난 항 입구역에서 파랑에 노출되어 파고가 최강 낙조시보다 최강 창조시에 0.18m 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

호안건설 후의 수로 A에서는 고조시에 파고가 2.67~3.88m로 호안건설 전보다 높게 나타났고, 저조시에 0.22~1.3m의 파고가 발생하였다. 최강 창조시의 파고가 최강 낙조시보다 항로 전체 영역에서 0.03~0.56m로 높게 나타났다. 수로 B에서는 매립전과 거의 같은 양상을 나타내었다.

3) 흐름과 파랑과 바람을 고려한 경우의 결과

대상해역에 흐름과 파랑뿐만이 아니라 바람에 의한 영향까지 고려하였고, 해역에서의 실제 자연현상과 가장 가까운 외력 조건으로 W, WNW 방향의 입사파와 동일한 방향의 W, WNW 방향의 50년 빈도 바람의 영향을 고려하여 수치실험을 수행하였다. Fig 3.91~3.98은 W방향으로 입사하는 파랑과 W 방향의 바람 및 최강창조, 최강낙조, 고조, 저조시의 흐름조건을 고려하여 수치 실험한 결과를 벡터로 나타낸 그림이다.

W방향의 파랑이 입사했을 때 매립 전 수로 A에서는 흐름과 파랑을 고려한 수치실험에서와 마찬가지로 최고 파고는 고조시에 1.91~2.35m로 발생하였고, 가장 낮은 파고는 저조시에 0.5~0.93m로 발생하였다. 항로를 따라 7,500m까지 최강 낙조시의 파고가 최강 창조시의 파고보다 0.09~0.94m 높게 나타났으며 그 이후 영역에서는 최강 창조시의 파고가 최강 낙조시보다 0.06~0.27m 높게 나타났다. 수로 B에서는 바람이 고려되지 않았을 때와 비슷한 양상을 보이지만 전체적으로 파고가 0.4m 상승하였다. 호안 건설 이후에 수로 A에서 해안선의 변화로 인한 굴절 및 회절의 영향으로 항내 파고 분포가 고조시에 2.08~2.74m로 가장 높게 나타났으며, 저조시에는 0.4~0.92m로 매립전과 비슷한 양상으로 나타났다. 항로에 따라 최강 창조시의 파고가 최강 낙조시보다 0.03~0.72m 높게 나타났고, 일부구간 7,000~8,500m구간에서는 최강 낙조시의 파고가 최강 창조시보다 0.12~0.85m 높게 나타났다. 수로 B에서는 호안 건설의 영향을 거의 받지 않아 호안건설 전과 파고 분포가 거의 비슷한 양상으로 나타났고, 최강 창조시의 파고가 최강 낙조시의 파고보다 0.01~0.33m 높게 발생하였다.

WNW 방향의 파랑과 WNW 방향의 바람 및 흐름의 영향이 동시에 작용했을 때 수치실험의 결과는 Fig 3.99~3.106에 나타내었다. 호안건설 전 수로

A에서는 항내에서 가장 높은 파고가 고조시 2.19~2.89m로 나타났다. 겨울의 대륙으로부터의 강한 계절풍으로 인한 파랑의 발달로 W 방향의 파랑이 입사하였을 때 보다 조금 높은 파고가 출현하였고, 항로 시점으로부터 6,500m 영역까지 최강 낙조시의 파고가 최강 창조시보다 0.02~0.33m 높게 발생하였고, 6,500m부터 나머지 영역에서는 최강 창조시의 파고가 최강 낙조시보다 0.02~0.32m 높게 발생하였다. 수로 B에서도 W방향의 파가 입사하였을 때와 마찬가지로 거의 비슷한 양상을 보이지만 파랑이 입사되는 형상에 의해 전체적으로 파고가 약간 낮게 나타났다. 호안 건설 이후에 수로 A에서 고조시에 2.26~3.01m로 항내에서 파랑이 W 방향일 때보다 파랑의 영향을 직접적으로 받고 바람의 영향이 더하여져 모든 실험 조건들 중에서 제일 높은 파고가 출현하였고 저조시에도 역시 0.87~1.13m로 다소 높은 파고가 발생하였다. 최강 낙조시의 파고가 수로 A를 따라 8,500m까지 최강 창조시의 파고보다 0.05~1.32m로 다소 높게 나타났으며, 수로 B에 대한 결과는 매립 전과 거의 비슷한 양상을 보이고 매립에 의한 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타났다. Fig. 3.107~3.114은 파랑만 수치 실험한 결과와 파랑+바람, 파랑+흐름, 파랑+바람+흐름의 영향을 고려한 수치실험 결과를 조건별로 그래프로 비교한 그림이다.

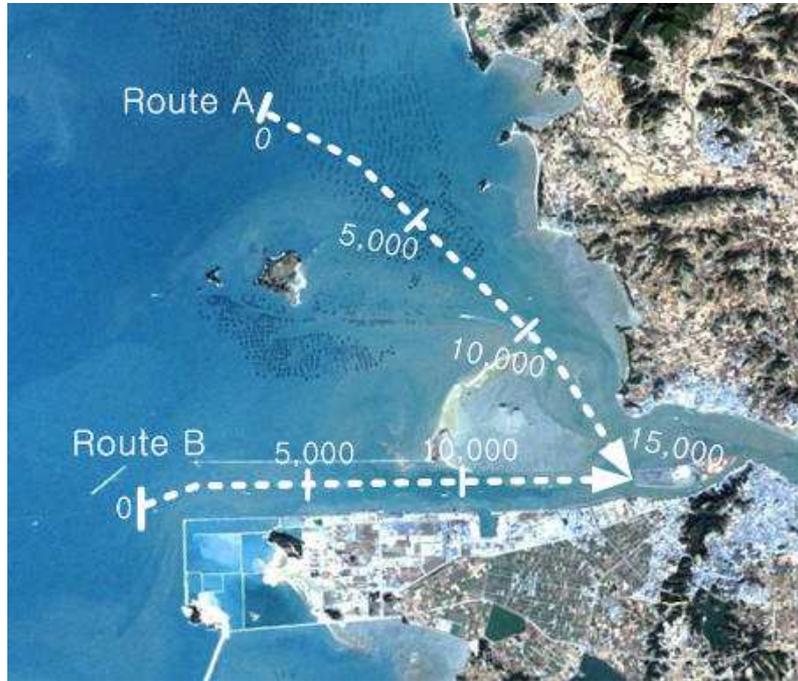


Fig. 3.74 route lines for the comparison of numerical model results

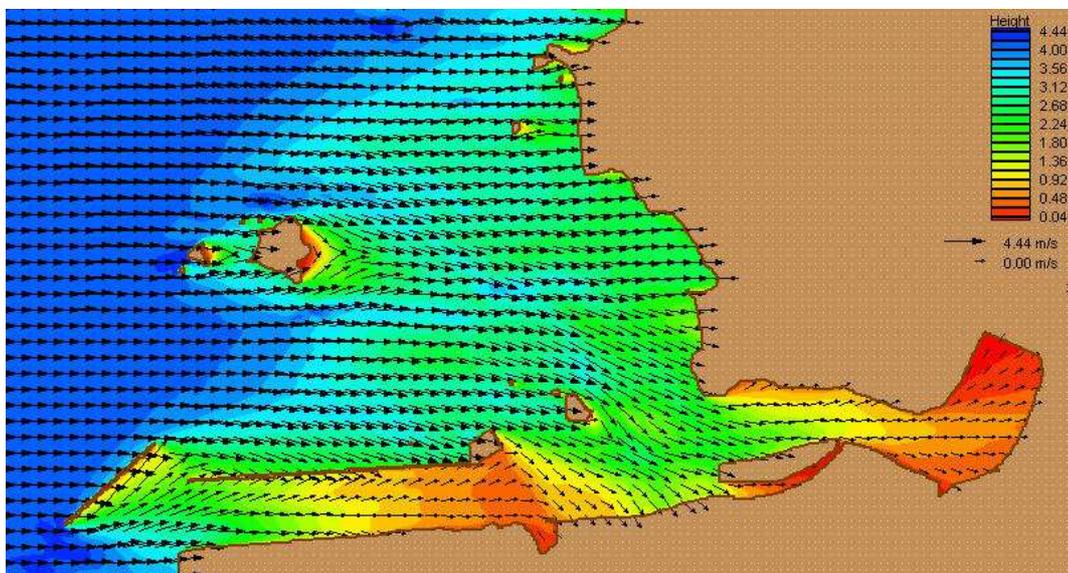


Fig. 3.75 Wave vector distributions with wave(W) and tide(H.W.L) for the present configuration

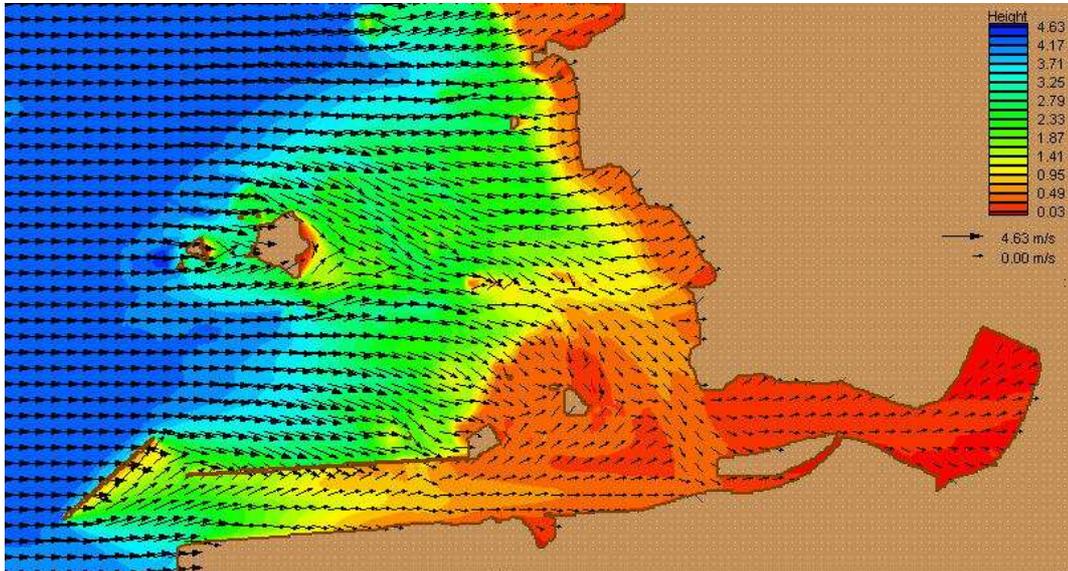


Fig. 3.76 Wave vector distributions with wave(W) and tide(L.W.L) for the *present* configuration

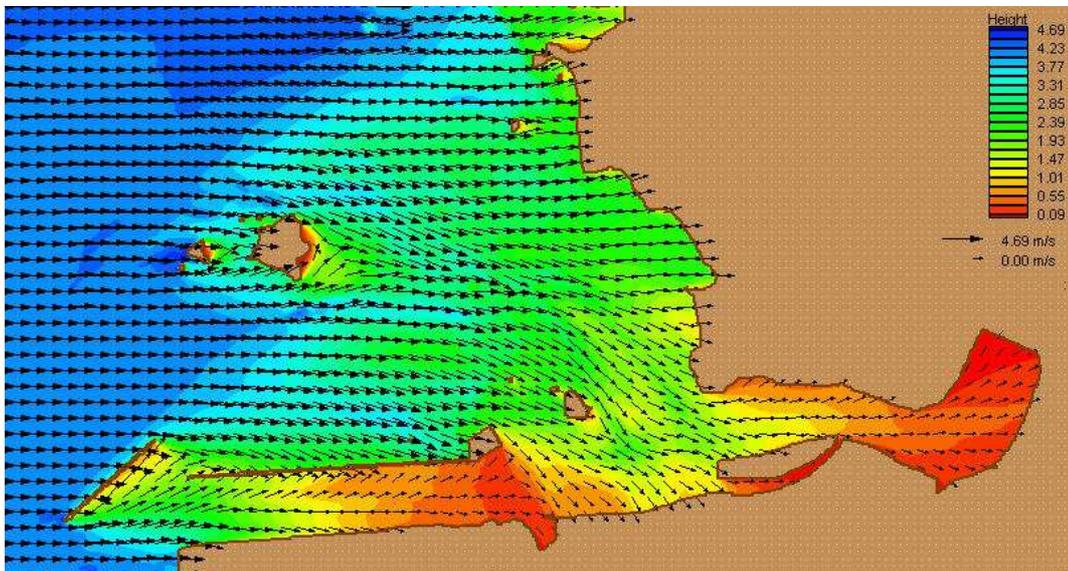


Fig. 3.77 Wave vector distributions with wave(W) and current(M.F.C) for the *present* configuration

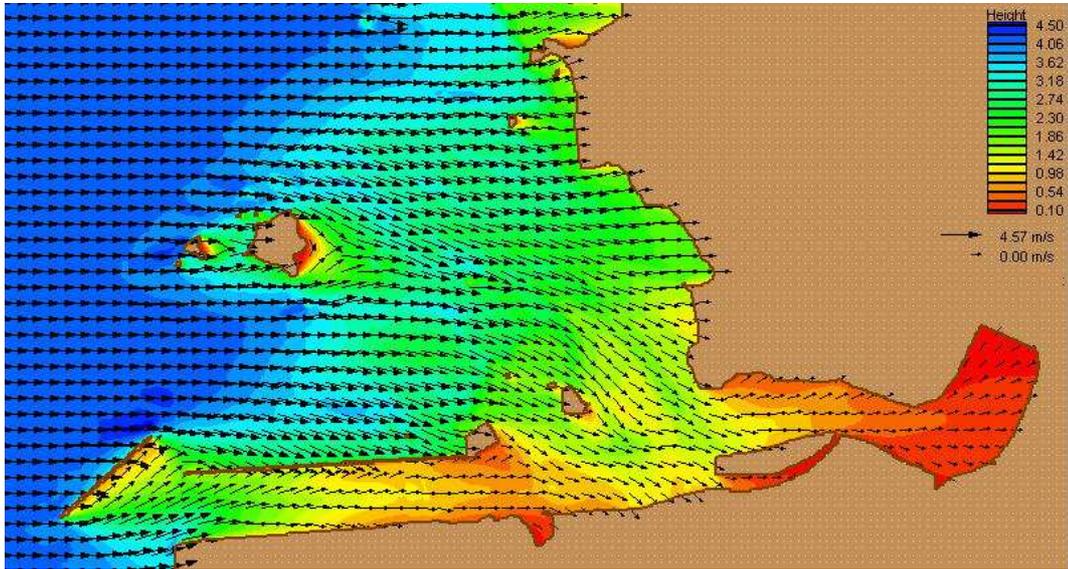


Fig. 3.78 Wave vector distributions with wave(W) and current(M.E.C) for the present configuration

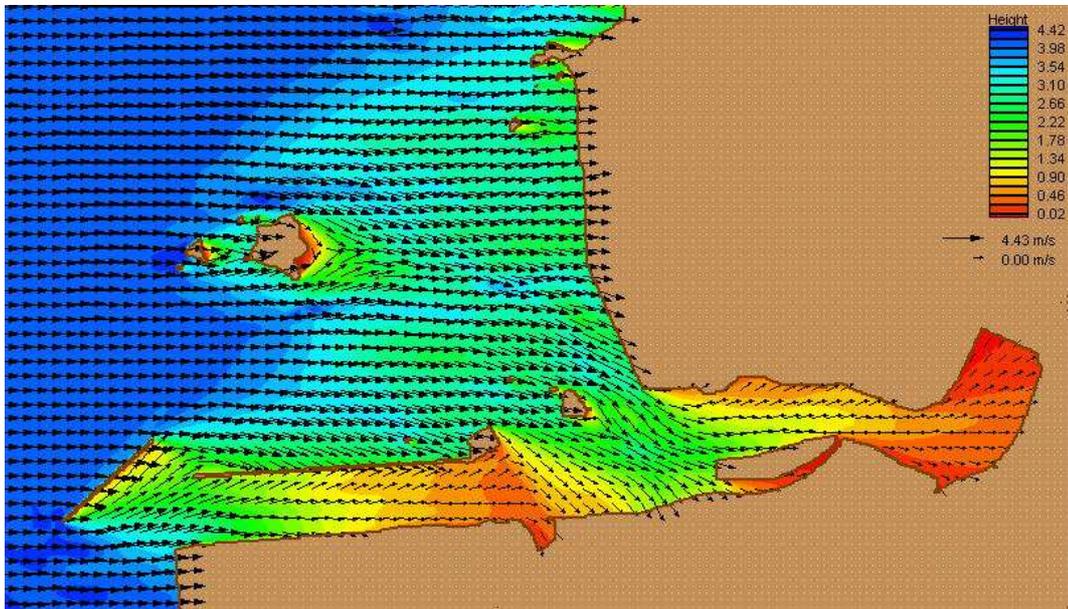


Fig. 3.79 Wave vector distributions with wave(W) and tide(H.W.L) after coastal reclamation plan

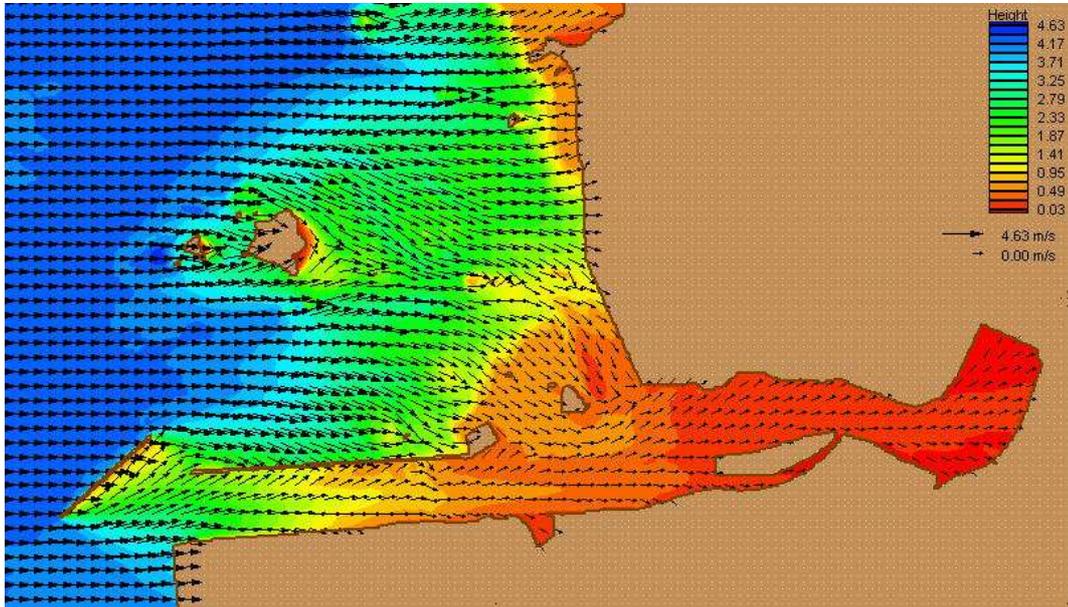


Fig. 3.80 Wave vector distributions with wave(W) and tide(L.W.L) after coastal reclamation plan

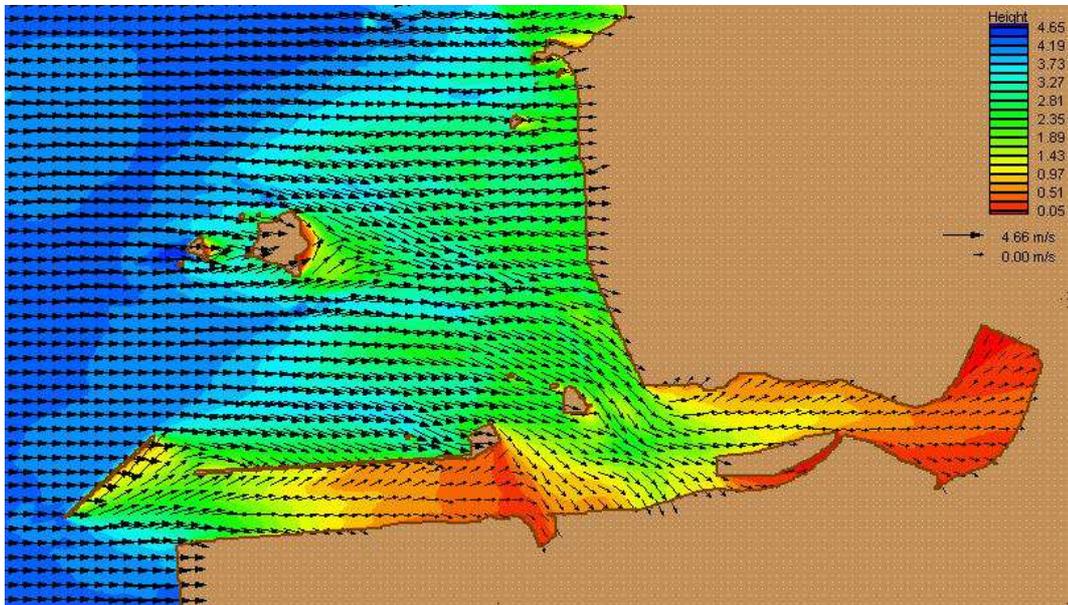


Fig. 3.81 Wave vector distributions with wave(W) and current(M.F.C) after coastal reclamation plan

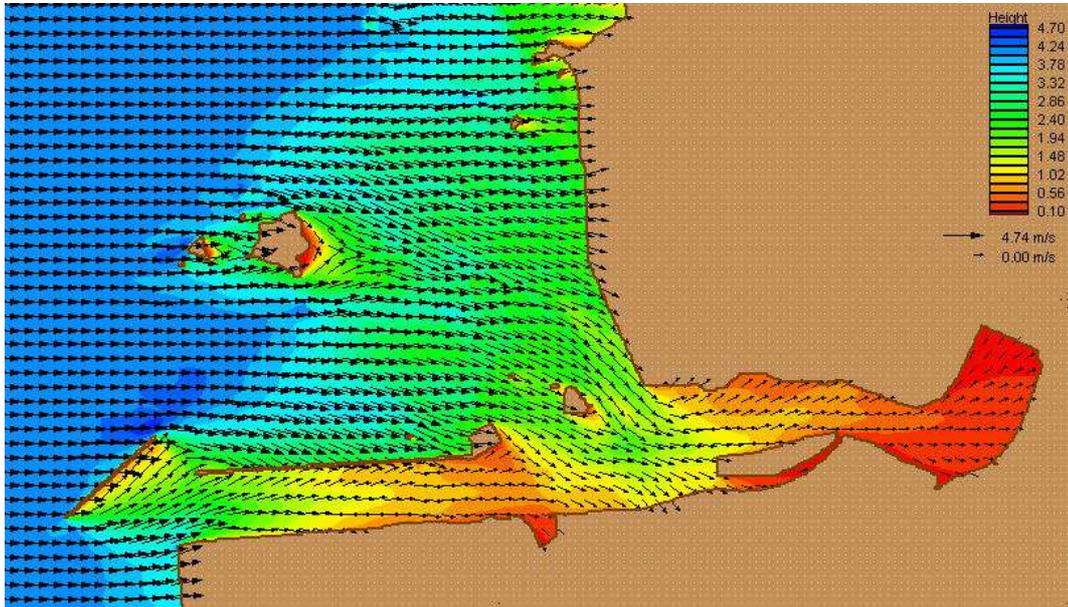


Fig. 3.82 Wave vector distributions with wave(W) and current(M.E.C) after coastal reclamation plan

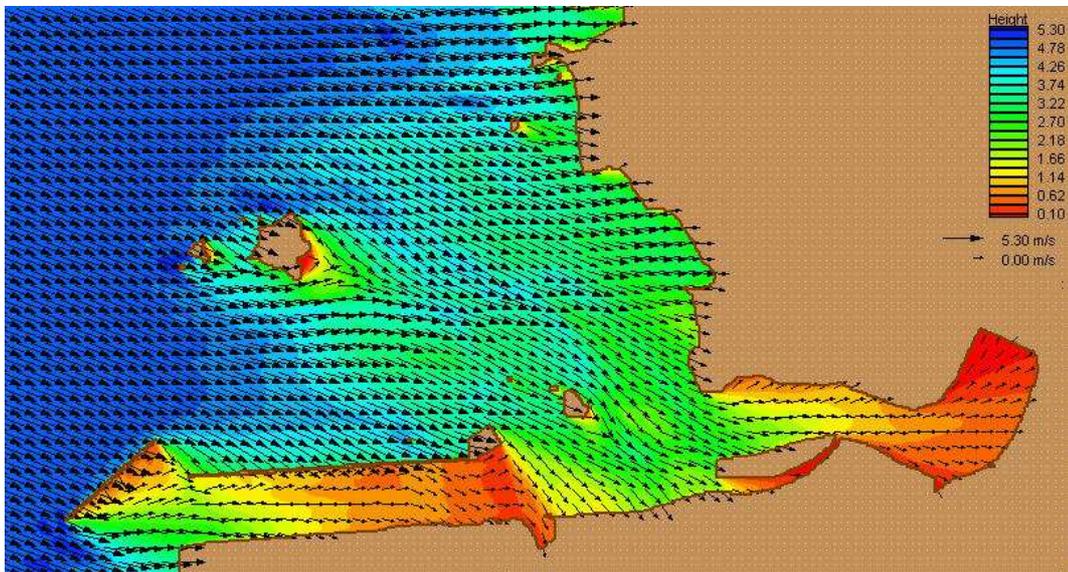


Fig. 3.83 Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(H.W.L) for the present configuration

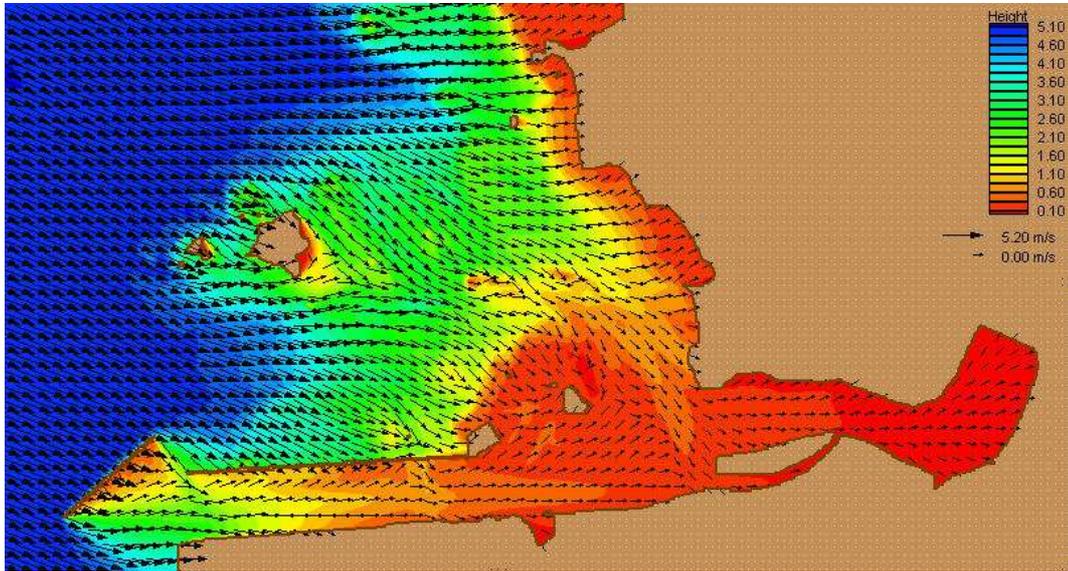


Fig. 3.84 Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(L.W.L) for the *present* configuration

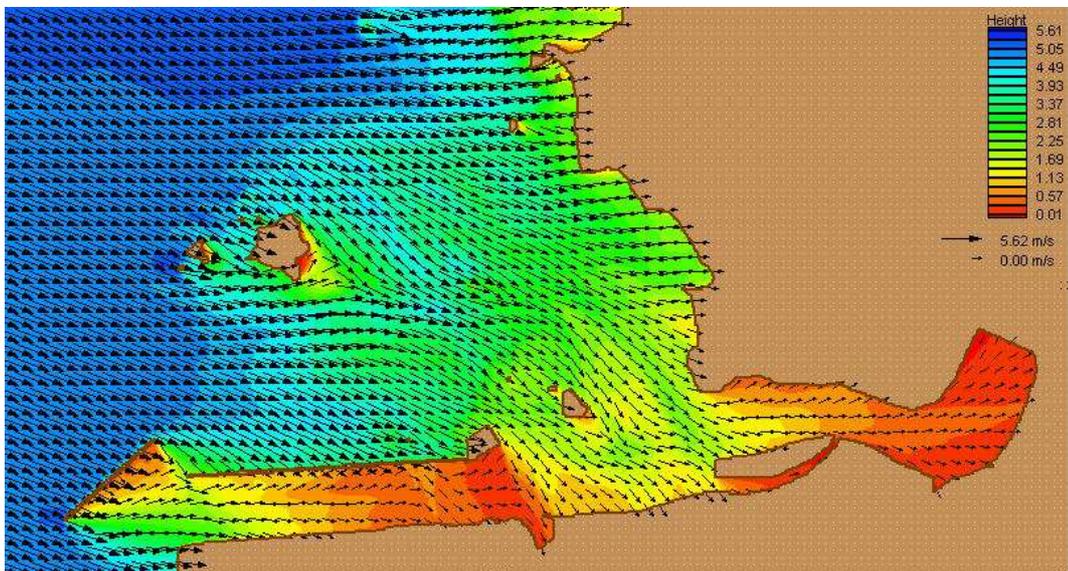


Fig. 3.85 Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.F.C) for the *present* configuration

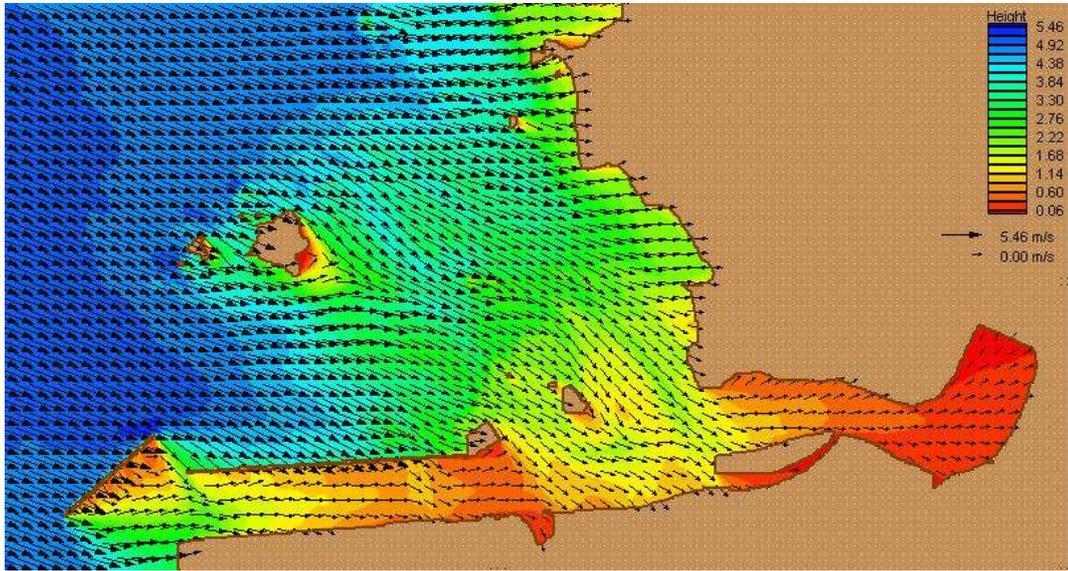


Fig. 3.86 Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.E.C) for the *present configuration*

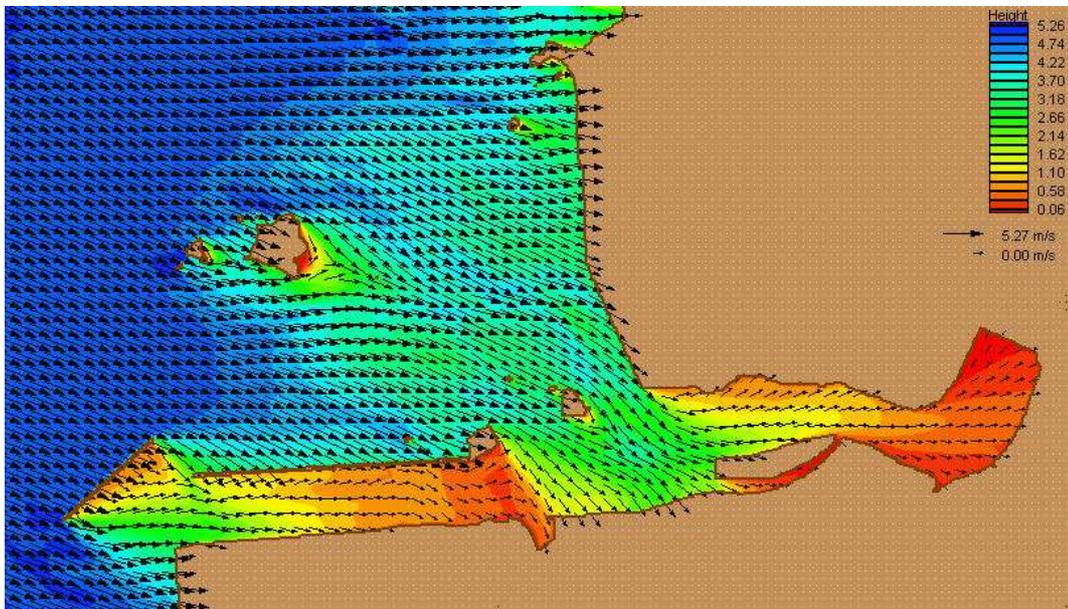


Fig. 3.87 Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(H.W.L) after coastal reclamation *plan*

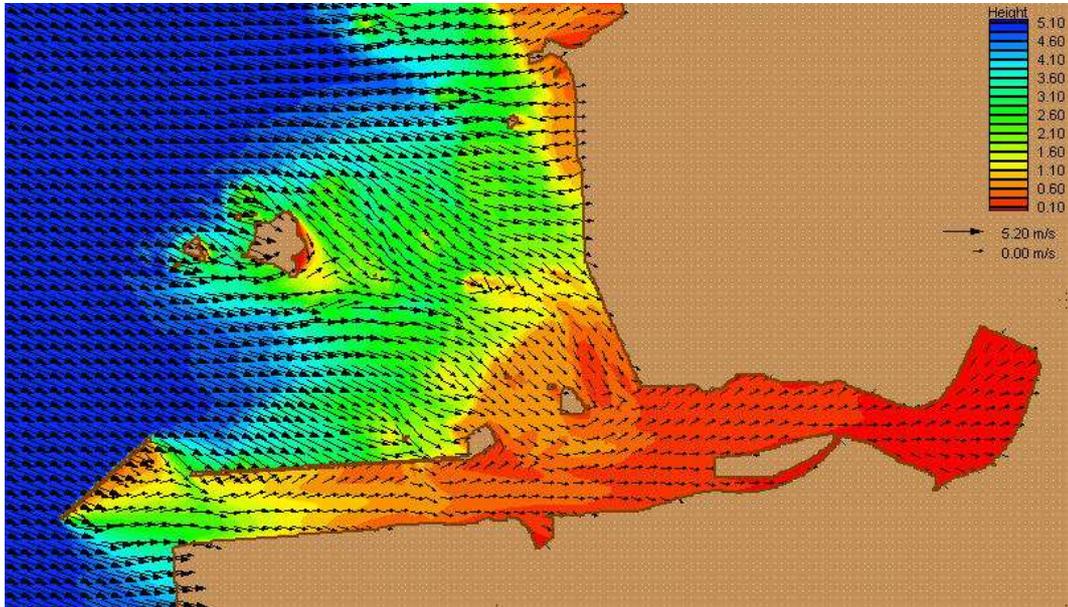


Fig. 3.88 Wave vector distributions with wave(WNW) and tide(L.W.L) after coastal reclamation plan

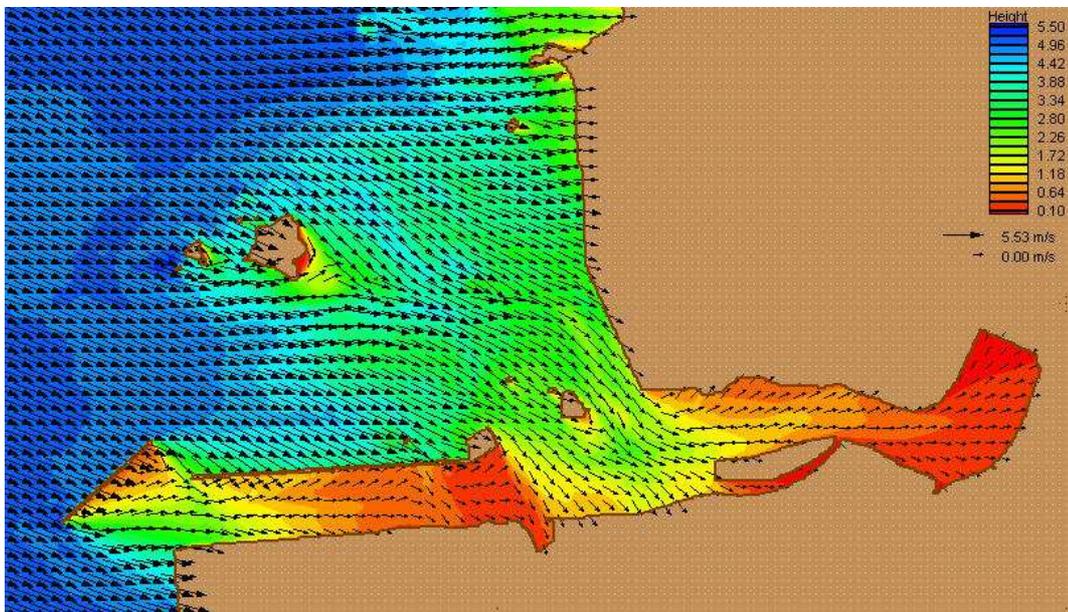


Fig. 3.89 Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.F.C) after coastal reclamation plan

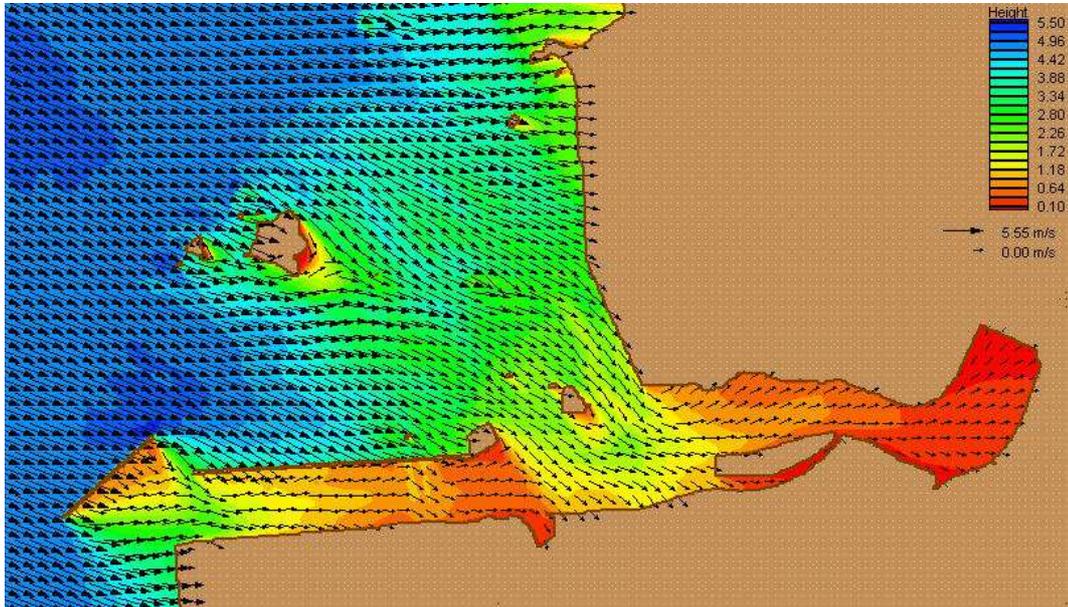


Fig. 3.90 Wave vector distributions with wave(WNW) and current(M.E.C) after coastal reclamation plan

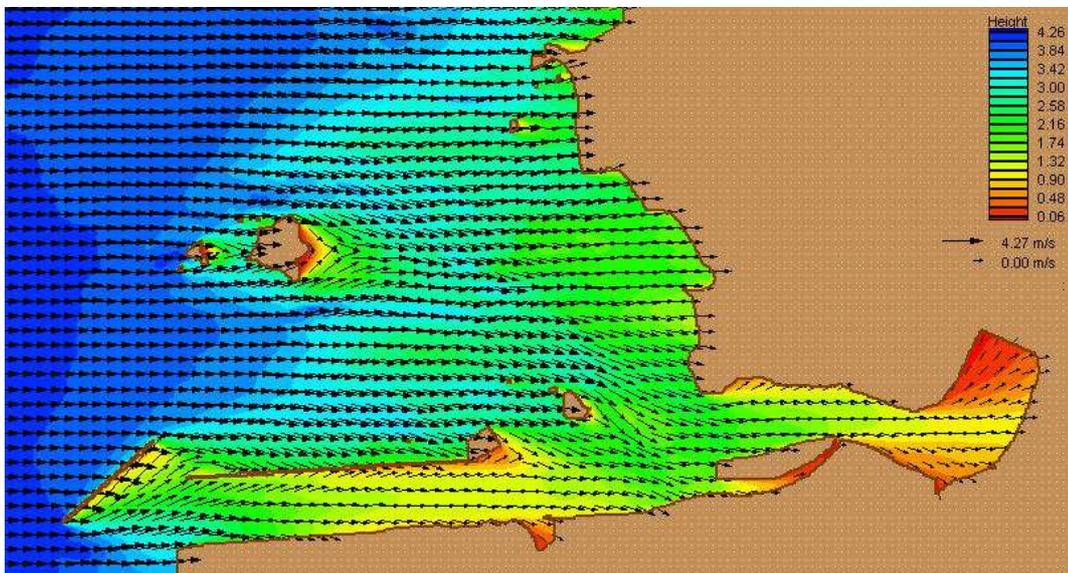


Fig. 3.91 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(H.W.L) for the present configuration

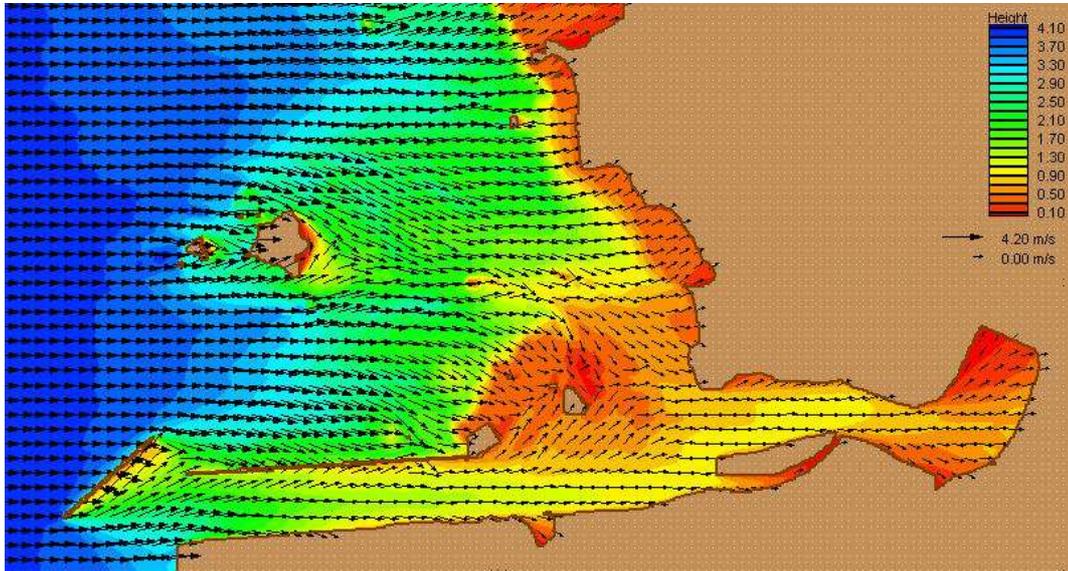


Fig. 3.92 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(L.W.L) for the *present* configuration

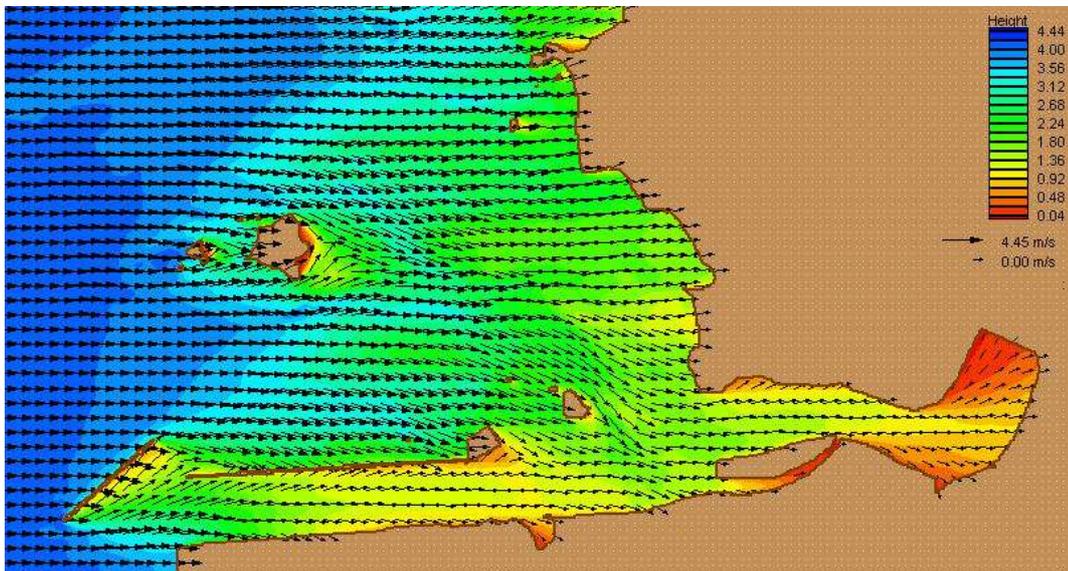


Fig. 3.93 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and current(M.F.C) for the *present* configuration

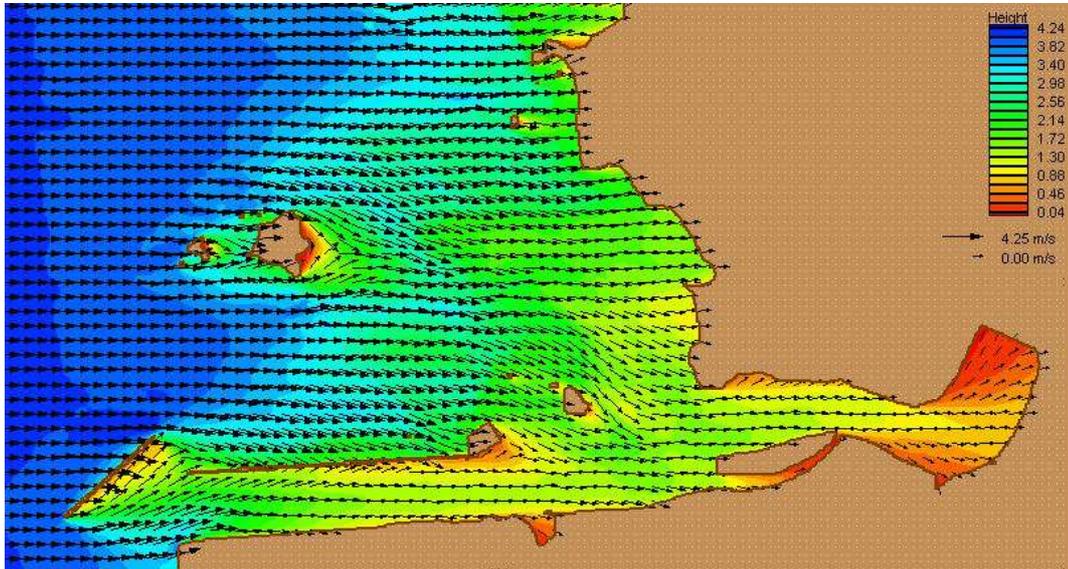


Fig. 3.94 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and current(M.E.C) for the *present* configuration

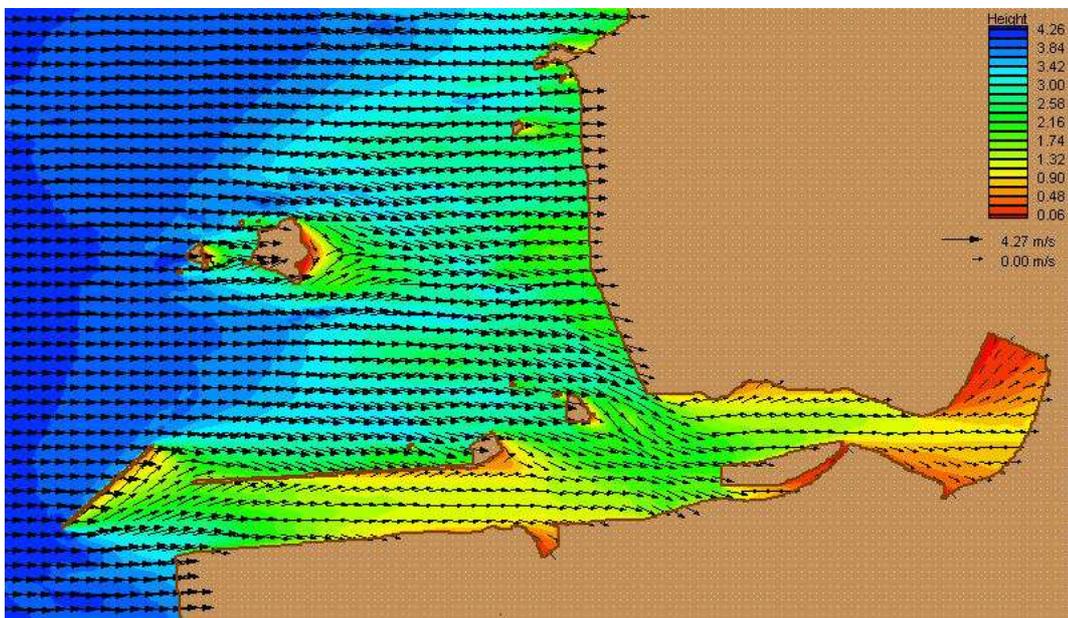


Fig. 3.95 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(H.W.L) after coastal reclamation plan

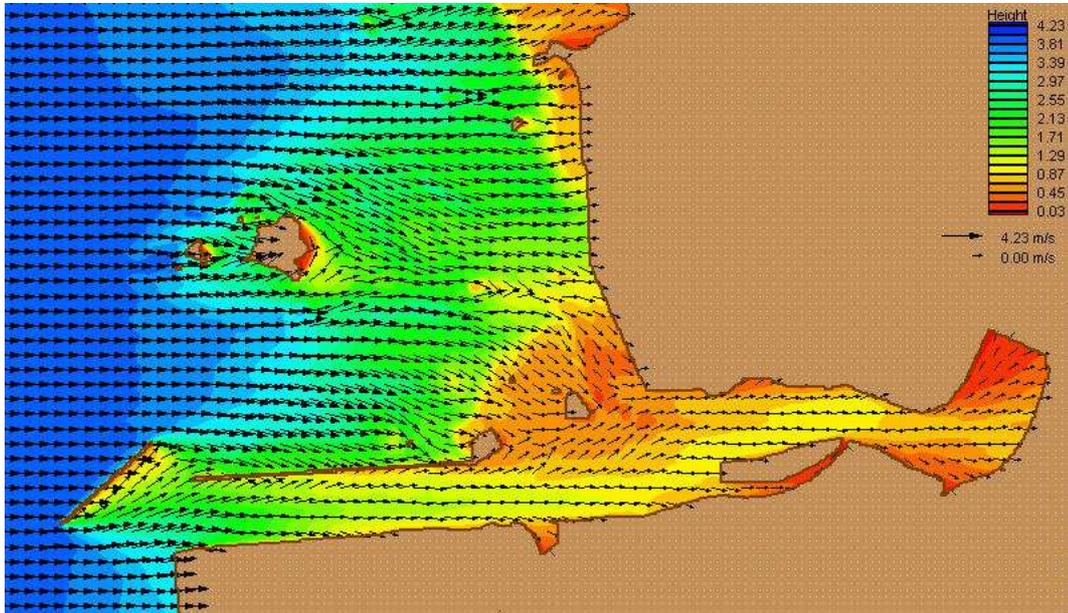


Fig. 3.96 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and tide(L.W.L) after coastal reclamation *plan*

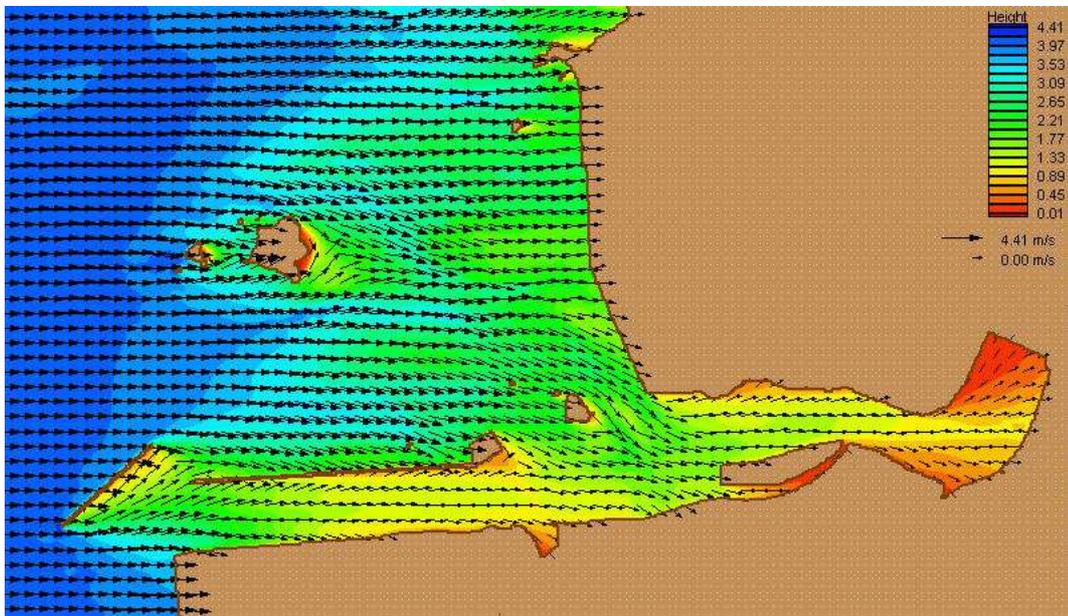


Fig. 3.97 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and current(M.F.C) after coastal reclamation *plan*

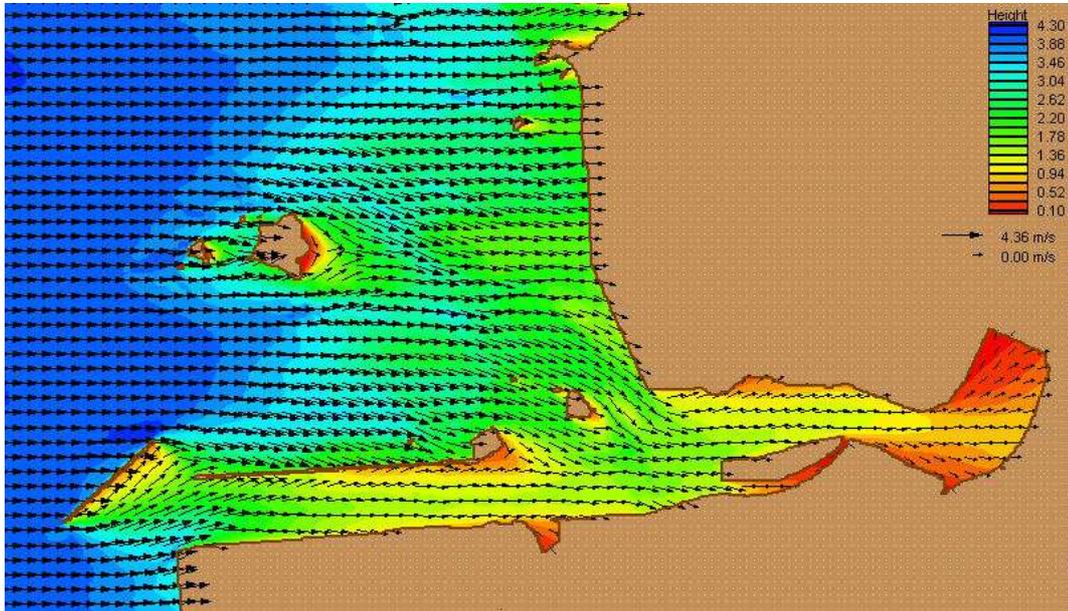


Fig. 3.98 Wave vector distributions with wave(W), wind(W), and current(M.E.C) after coastal reclamation *plan*

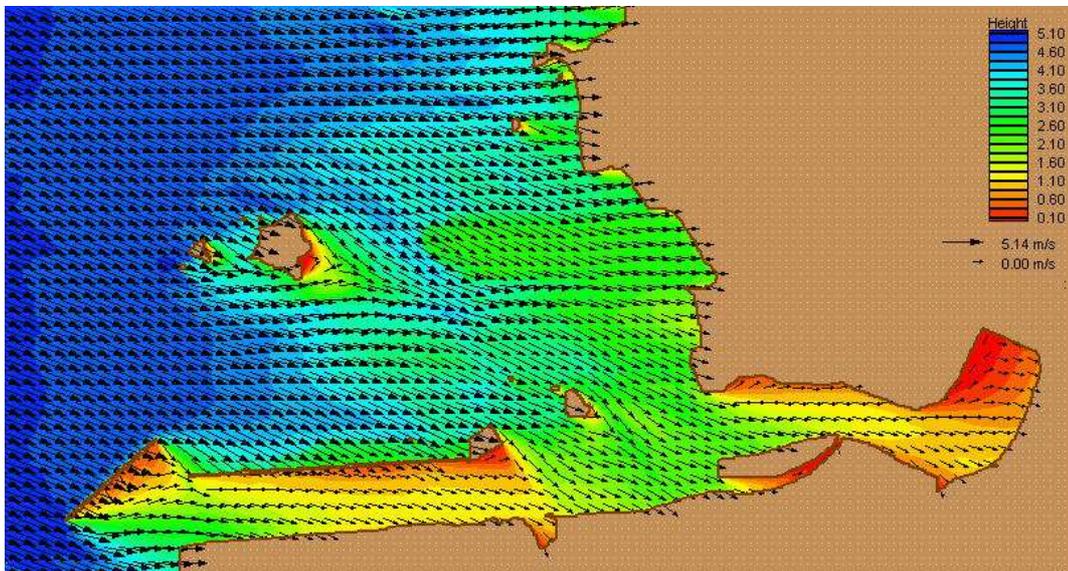


Fig. 3.99 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide(H.W.L) for the *present configuration*

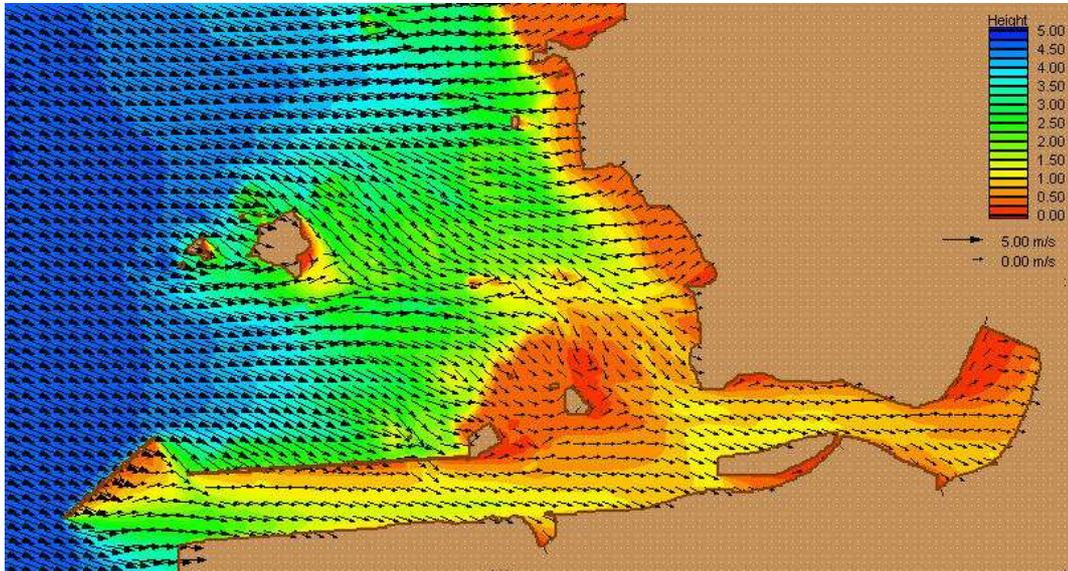


Fig. 3.100 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide(L.W.L) for the *present* configuration

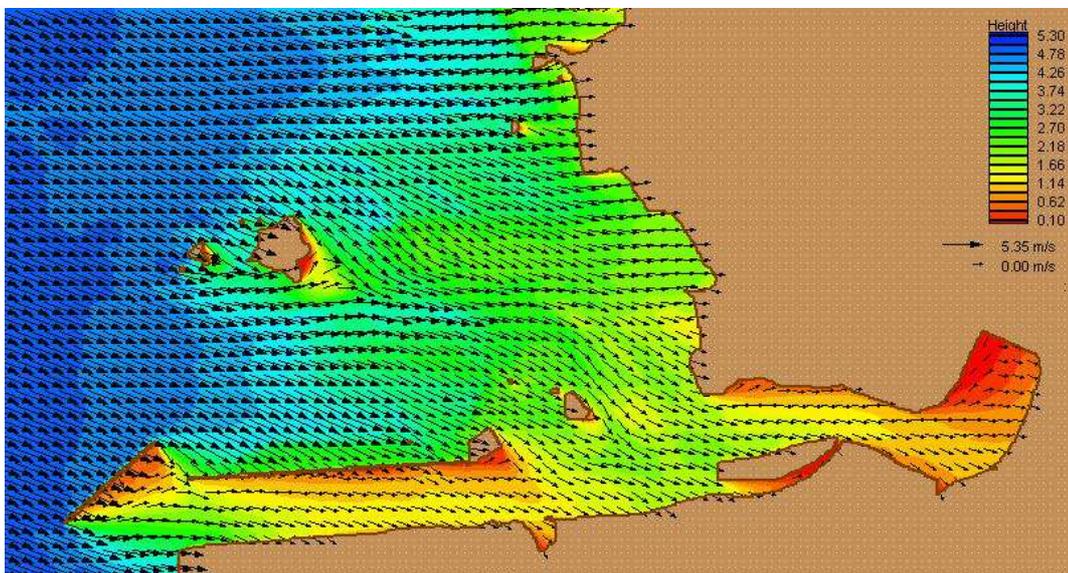


Fig. 3.101 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current(M.F.C) for the *present* configuration

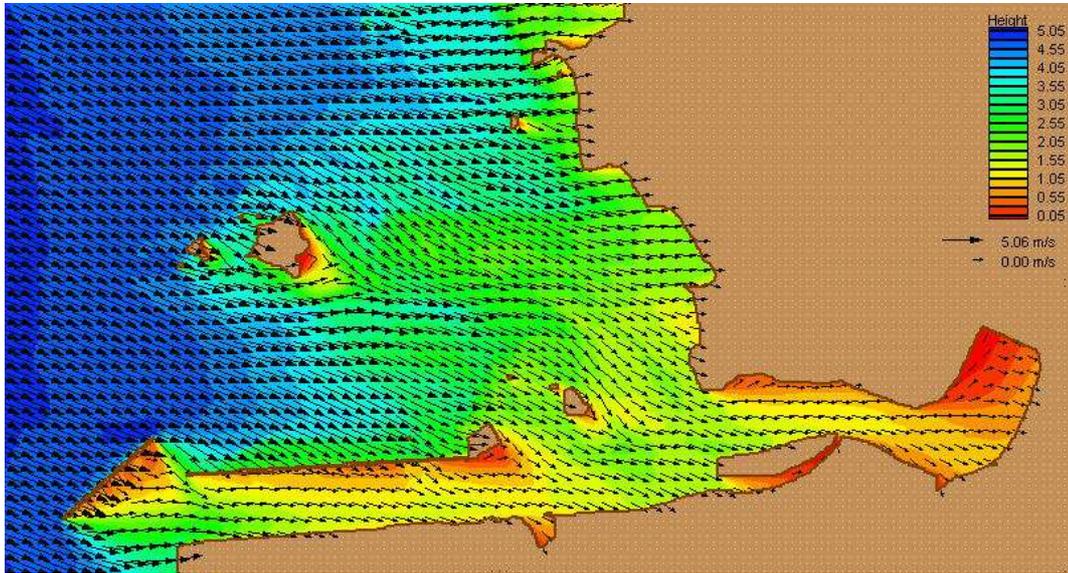


Fig. 3.102 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current(M.E.C) for the *present configuration*

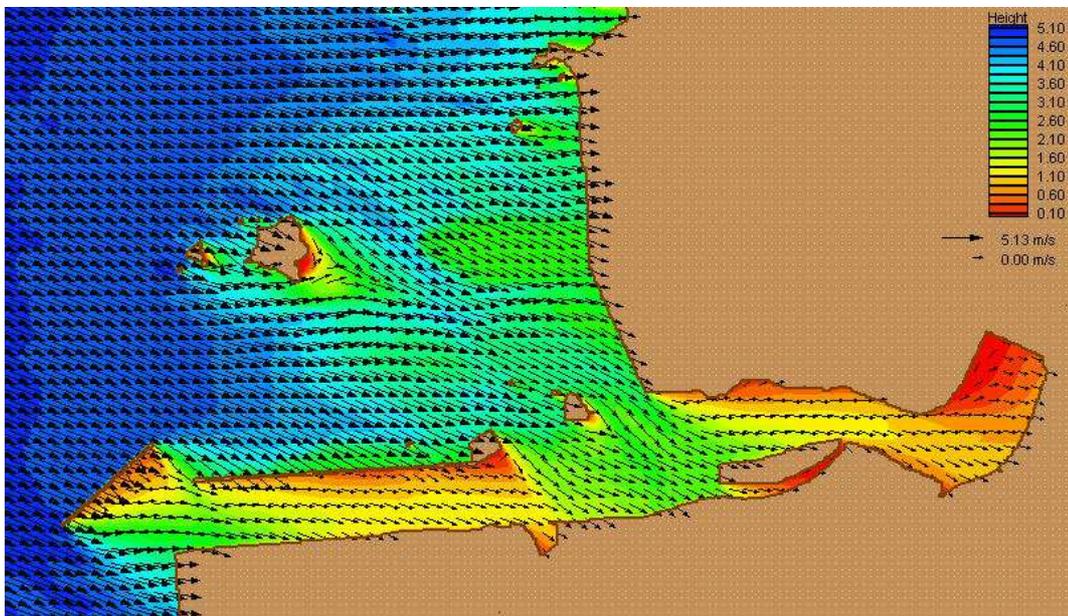


Fig. 3.103 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide(H.W.L) after coastal reclamation *plan*

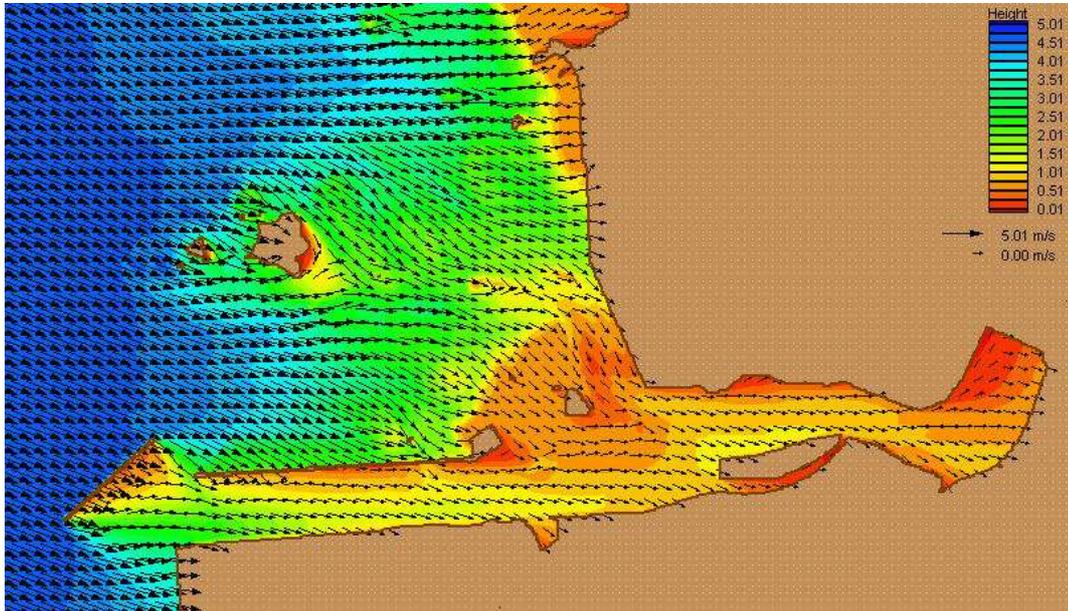


Fig. 3.104 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and tide(L.W.L) after coastal reclamation plan

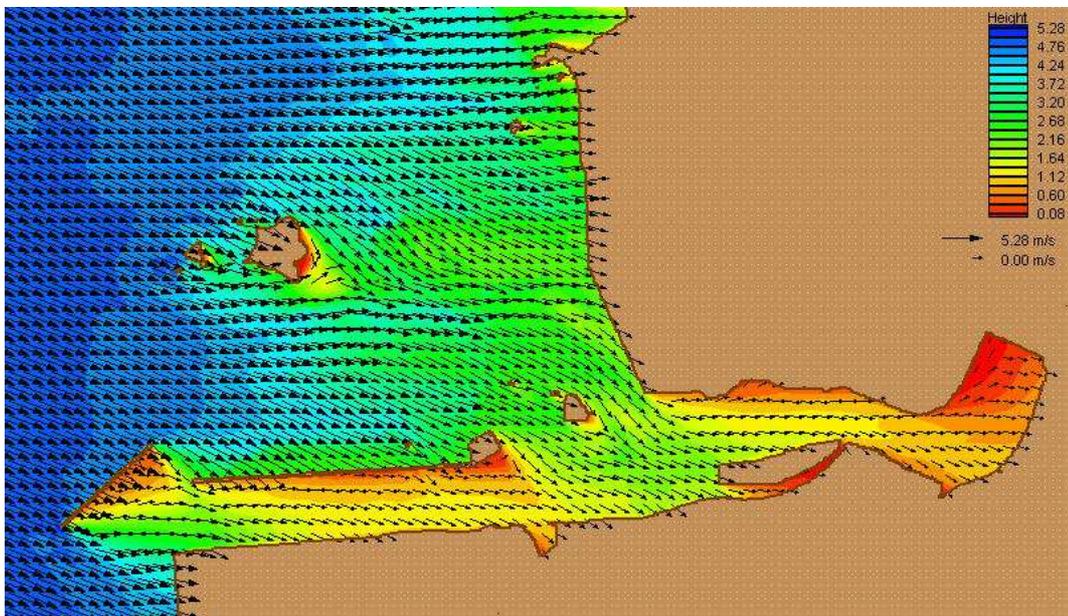


Fig. 3.105 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current(M.F.C) after coastal reclamation plan

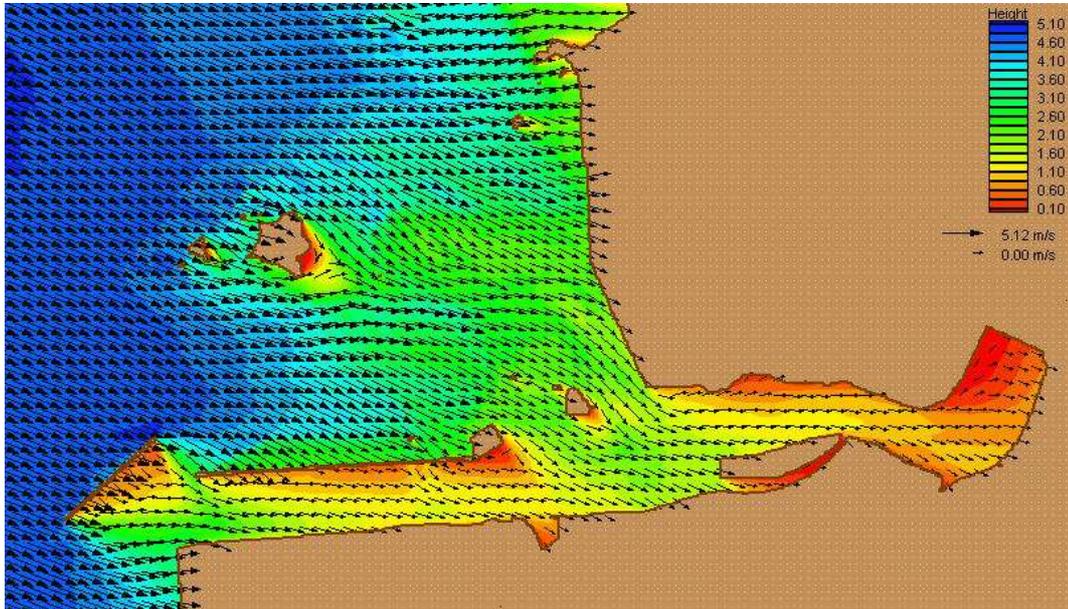


Fig. 3.106 Wave vector distributions with wave(WNW), wind(WNW), and current(M.E.C) after coastal reclamation plan

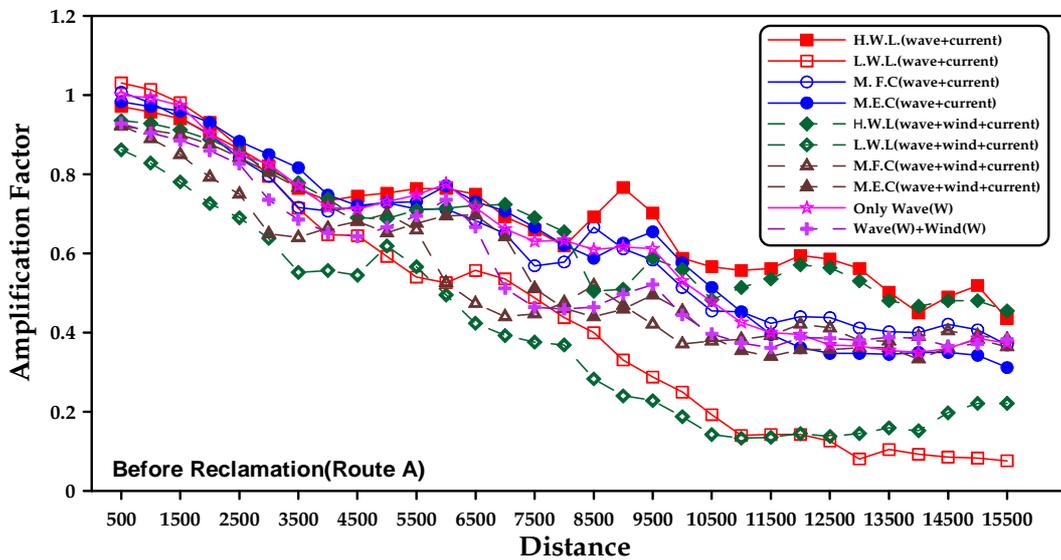


Fig. 3.107 Comparison of wave amplification factors along the route A for the present configuration(wave W and wind W)

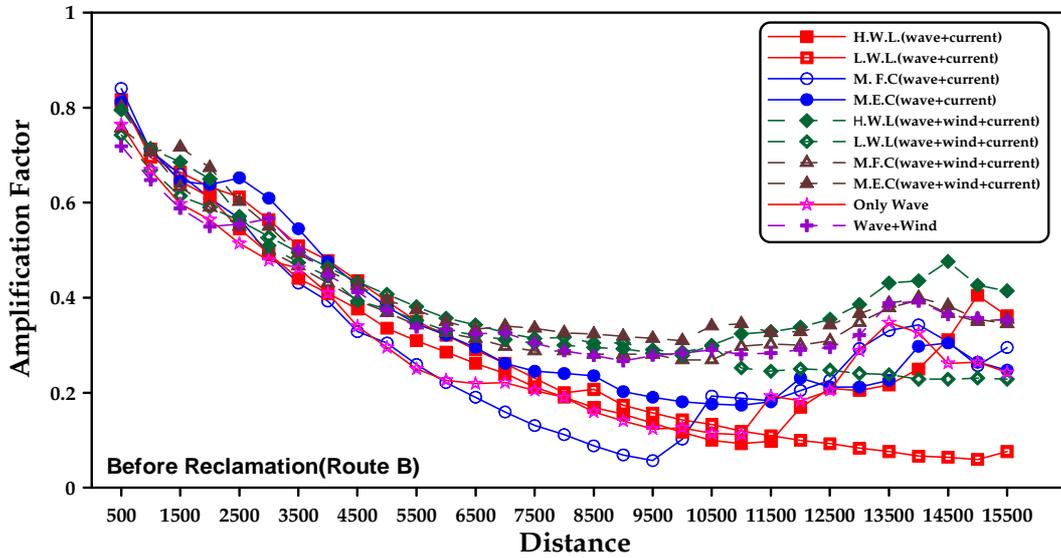


Fig. 3.108 Comparison of wave amplification factors along the route B for the present configuration(wave W and wind W)

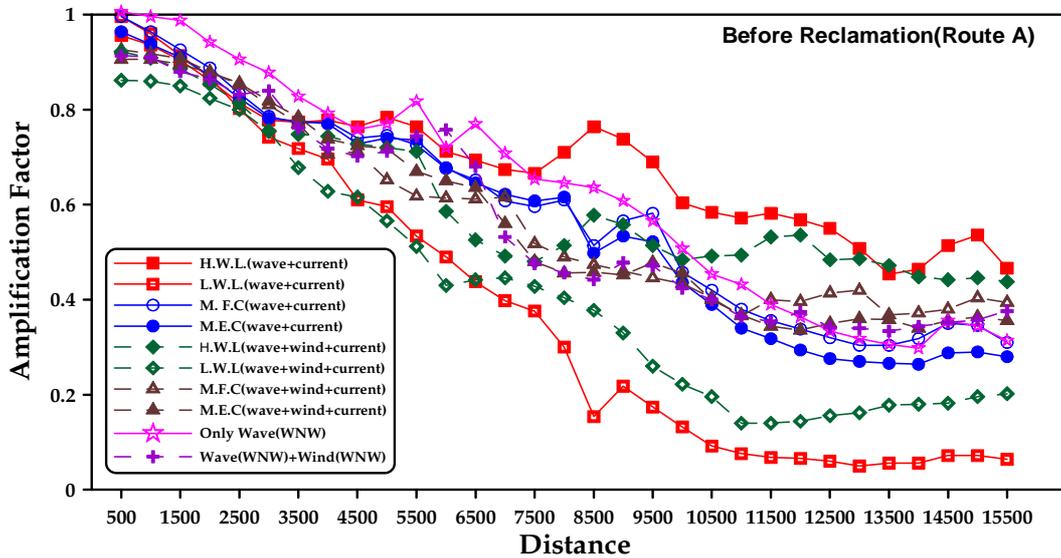


Fig. 3.109 Comparison of wave amplification factors along the route A for the present configuration(wave WNW and wind WNW)

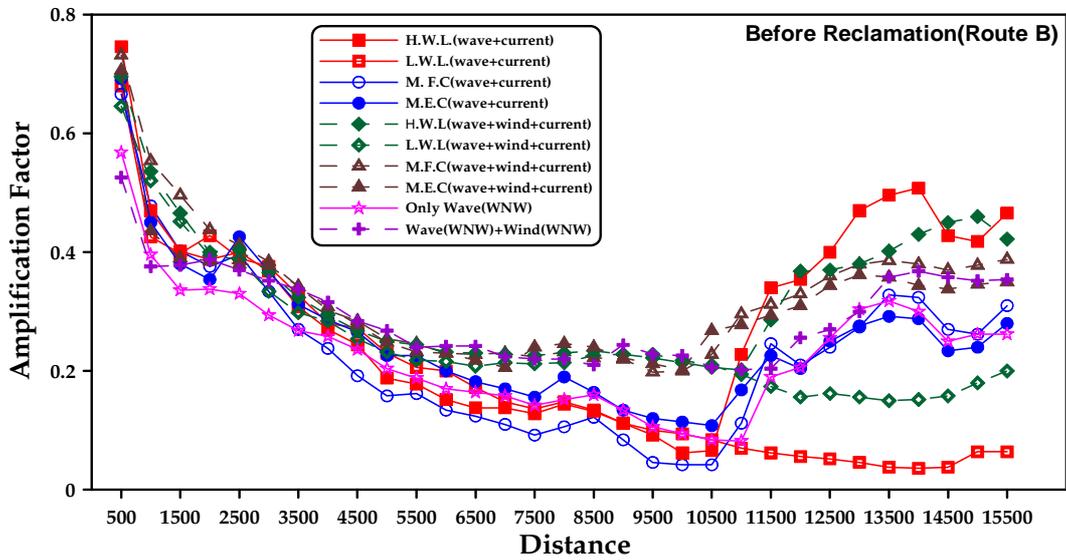


Fig. 3.110 Comparison of wave amplification factors along the route B for the present configuration(wave WNW and wind WNW)

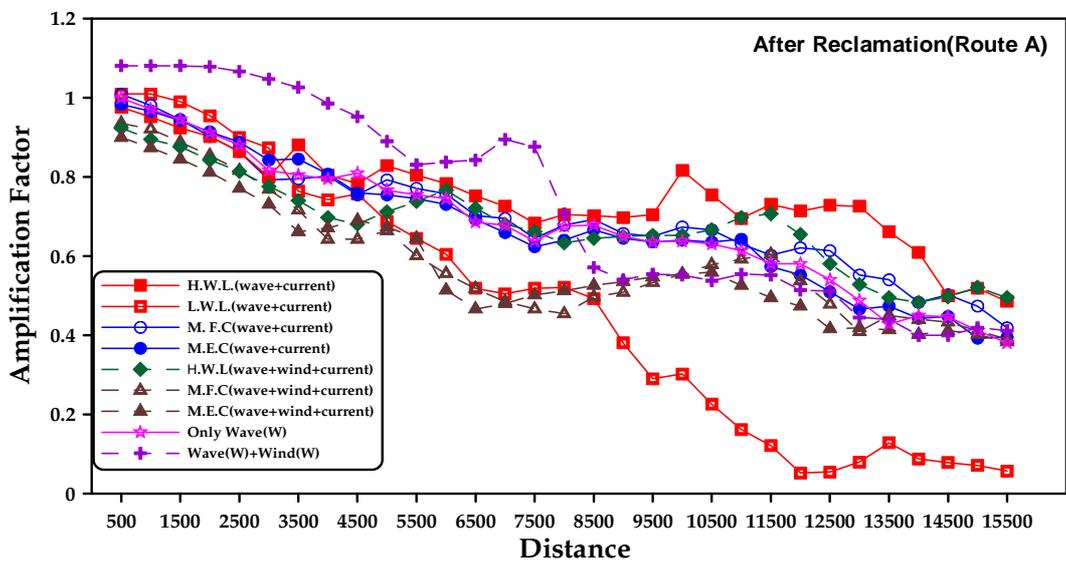


Fig. 3.111 Comparison of wave amplification factors along the route A after coastal reclamation plan(wave W and wind W)

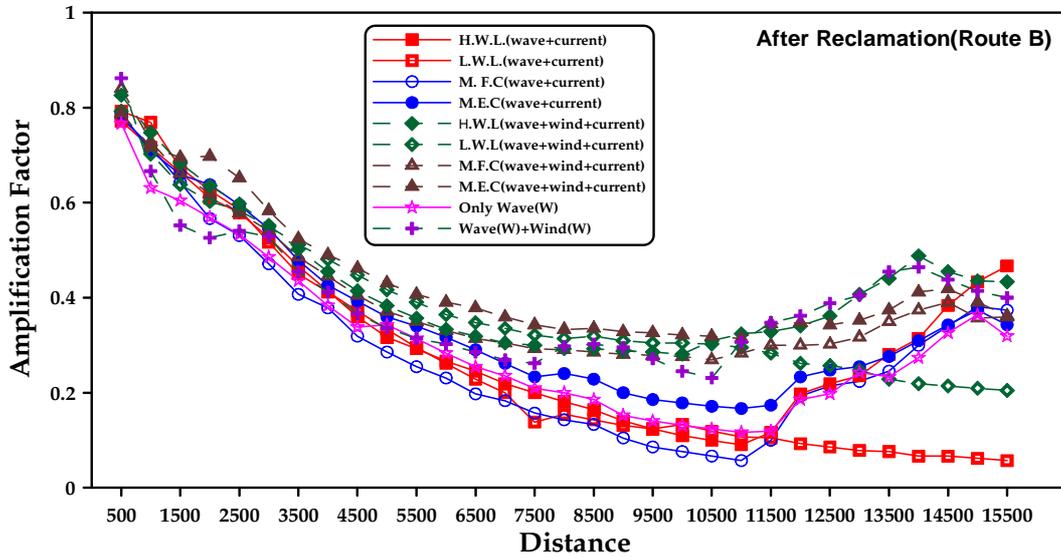


Fig. 3.112 Comparison of wave amplification factors along the route B after coastal reclamation plan(wave W and wind W)

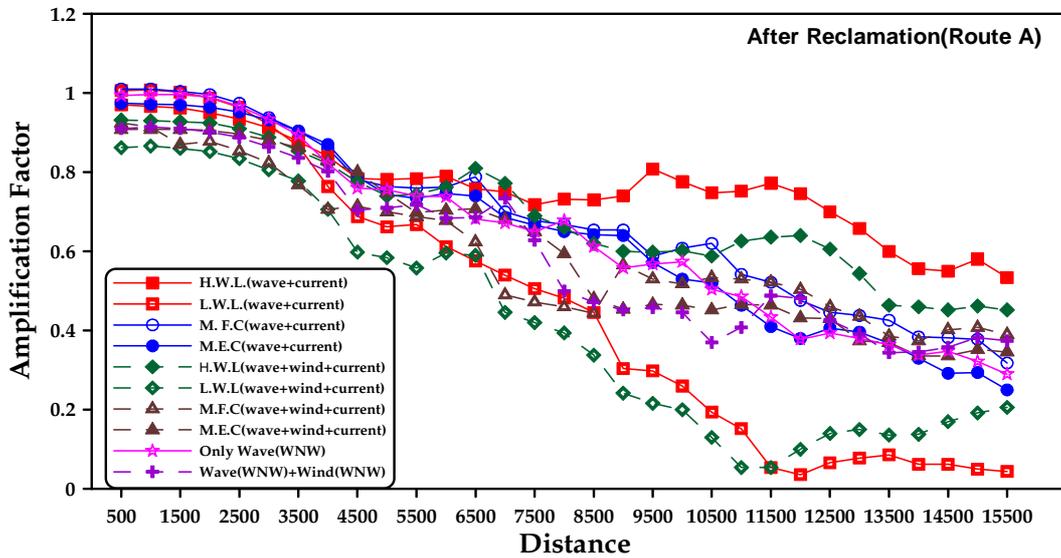


Fig. 3.113 Comparison of wave amplification factors along the route A after coastal reclamation plan(wave WNW and wind WNW)

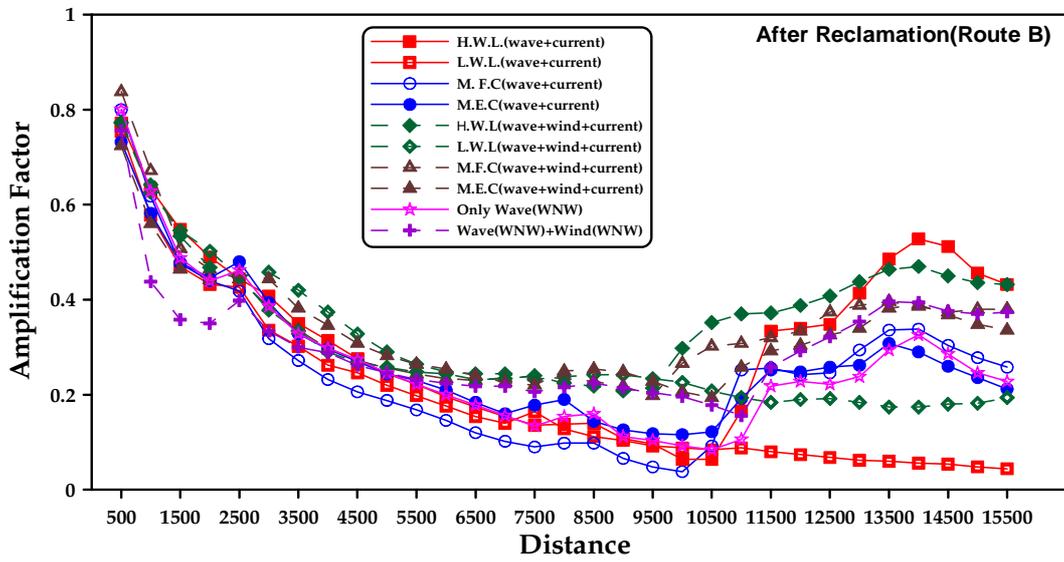


Fig. 3.114 Comparison of wave amplification factors along the route B after coastal reclamation plan(wave WNW and wind WNW)

제 4 장 결론

자연에서 일어나는 파랑의 굴절, 회절, 반사, 쇄파 등 많은 제 현상들을 하나의 수치모형에서 모두 재현하기는 어려운 일이지만 많은 기술자들의 연구를 통하여 최대한 많은 인자를 고려한 수치모형들이 개발되고 있다. 본 연구에서는 항만에서의 대규모 공사가 주위 해역이나 수로에 미치는 영향을 평가하기 위해 최근에 많이 사용되어지고 있는 파랑모형과 유동모형을 적용한 수치실험 결과를 토대로 수치모형이 가지고 있는 배경에 따른 변화의 특성을 분석하고 대상영역에 적용 시 유의점을 도출하고자 하였다.

본 연구의 대상영역은 충청남도 서천군 장항읍 마서면에 위치하는 해역으로, 군산-장항 국가산업단지와 신항만 건설이 완공될 경우 국토의 중부 서해안 지역의 거점 생산기지를 담당하여 중국과는 전략적으로 중요한 위치에 있으며, 이러한 도약을 위해 추진하는 대규모 호안도로건설 및 매립공사로 인한 대상 해역에서의 파랑과 흐름의 변화를 분석하여야 하는 입장이다.

본 연구에서는 에너지 평형방정식에 기초하여 바람 성장에 의한 파랑의 변형을 잘 표현할 수 있는 제3세대 파랑모형과 정상상태 스펙트럼 파랑모형, 질량보존 및 운동량 방정식에 기초하여 굴절 및 회절, 반사, 쇄파, 비선형 분산 등을 고려할 수 있는 정상상태 환경사방정식 파랑모형과 비정상상태 환경사방정식 파랑모형을 적용하여 파랑장의 변화를 평가하였으며, 아울러 흐름과 바람의 영향을 고려한 정상상태 스펙트럼 파랑모형도 검토하였다. 이와 병행하여 매립 공사로 인한 흐름장의 변화를 파악하기 위하여 대상해역에서의 흐름장 수치모형실험을 수행하였으며 각각 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 제3세대 파랑모형으로 수치실험을 수행한 경우 바람인자 적용여부에 따라 파고의 변화가 많이 나타났으며, 바람인자를 포함할 경우에 파고가 최대 2

배가량 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 외해에서부터의 바람의 성장에 의한 영향이 파랑에 크게 미친 것으로 사료된다.

2) 정상상태 스펙트럼 파랑모형으로 수치실험을 수행하였을 때 두 입사파에 대한 호안건설 전·후의 파고 변화는 거의 없었으며, 바람인자의 영향은 해안부근에서 약간의 파고가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 바람의 영향을 고려하지 않았을 경우에는 파랑의 전파거리가 짧아 금강 입구까지 파랑이 전달되지 않았지만 바람의 영향을 고려한 경우에는 금강입구까지 파랑이 전달되는 것을 확인하였다.

3) 정상상태 완경사방정식 파랑모형을 수행한 경우에는 입사파가 W 방향일 때 수로 A, B 구간의 파고 차이는 거의 나타나지 않았으나, 호안건설 대상역에서는 호안이 건설되었을 때 구조물에 의한 반사효과로 인해 파고가 호안 건설 전보다 약 1m 가량 높아 졌다. 또한 WNW 방향의 입사파인 경우에도 거의 같은 변화가 나타났으며, 호안 공사 후 W 방향의 입사파를 적용한 결과와 유사하게 파고가 약 1m가량 상승하였다.

4) 비정상상태 완경사방정식 파랑모형으로 수치실험을 수행한 결과 W방향 입사파일 때 수로 A에서는 매립후에 항내에서 파고가 다소 높게 나타났다. WNW 방향의 파랑이 입사되었을 경우에도 대상역의 대규모 호안 건설 및 매립으로 인한 반사파의 영향으로 항내의 파고가 다소 높아졌고, 외해역에서는 비슷한 양상을 나타냈다. 군산항로 해역에서는 매립 전·후에 별다른 양상은 나타나지 않았으며, 항내에서 파고가 약간 높아진 것으로 나타났다.

5) 장항항 해역의 흐름 특성은 항 입구부인 방파제와 군산항로의 간격이 협소하여 유속이 다소 빠르며, 호안공사 해역부근의 수로와 금강입구로 연결되는 해역에서는 금강입구부가 좁아짐에 따라 유속이 다소 빠르게 나타났다. 호안공사 완료시 섬과의 간격이 더욱 협소하여 유속이 더 빠르게 나타났으며, 항 입구부 및 이외 영역에서는 현 상태와 유사한 형태로 나타났다.

6) 연구대상 해역에서 흐름의 영향을 고려한 파랑의 변화와 흐름 및 바람의 영향을 고려한 파랑의 변화를 수치 실험한 결과, 흐름을 고려한 경우는 조차가 큰 서해안 해역에서 고조시 가장 높은 파고가 발생하였으며, 저조시 가장 낮은 파고가 발생하였다. 최강 창조시와 최강 낙조시에는 파고가 비슷한 양상으로 나타났으나 흐름의 진행방향과 파랑의 진행방향에 따라 파고의 고저가 나타나는 것을 알 수 있었다. 매립 전보다 매립 후에는 해안선의 변화로 인해 수로 A해역에서 비교적 큰 파고가 발생하였다. 수로 B해역에서는 군산항로를 따라 매립 전·후의 파고차는 거의 발생하지 않았다.

이상과 같이 기존의 지형과 호안축조와 같은 대규모 건설로 인하여 변화된 지형에 따른 파랑의 변형을 파악하기 위해 4개의 다른 수치모형을 사용하여 수치실험을 수행하였다. 비록 수치 실험한 결과와 파랑 및 흐름의 현장 관측 결과를 영역별로 세밀하게 비교 할 수는 없었지만 각각의 수치모델을 통한 파랑 변화와 유동의 일반적인 특성을 잘 재현했다고 사료된다.

각각의 파랑예측수치모형을 대상영역별로 적용하여 실험을 수행한 결과를 요약하여 정리하면

첫째, 본 연구의 대상영역과 같이 외해에서는 반사에 의한 영향이 그다지 크지 않고 서해안의 지리적 특성인 조류나 조석의 영향이 탁월하며, 겨울에는 대륙으로부터 강한 계절풍이 발생하는 영역에 대해서는 흐름과 바람의 영향을 모두 고려하여 수치 실험할 수 있는 정상상태 스펙트럼 파랑수치모형을 적용하는 것이 가장 바람직할 것으로 사료된다.

둘째, 조류나 조석의 영향이 거의 없고 도서가 많이 발달하지 않은 우리나라 동해와 같은 영역에서는 수심이 깊고 해안선이 단조로우므로 바람의 영향을 고려할 수 있는 제3세대 파랑모형이나 정상상태 스펙트럼 파랑모형을 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

셋째, 섬이 발달해 있는 우리나라 남해안이나 항만내의 정온도 및 설계파고를 산정하는데 있어서는 수심 변화에 의한 굴절, 섬 및 구조물에 의한 회절, 해안 구조물에 의한 반사, 쇄파 등 해안에서 발생하는 복잡한 물리현상을 재현할 수 있는 정상상태 환경사방정식이나 비정상상태 환경사방정식 파랑모형을 적용하는 것이 바람직할 것이다.

이상으로 본 연구에서는 파랑변형 수치모형들을 적용하여 수치실험을 수행하였고 그 결과 각각의 수치모형들이 내재하고 있는 특성에 따라 결과값의 차이가 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 수치실험 결과의 의미는 설계파고 산정시 각 대상지역에 고려해야 될 인자를 어떻게 적용하는가에 따라 설계파고의 증·감이 나타날 것이고 이것은 나아가 공사비 증감에의 영향은 물론이고 구조물에 대한 안정성에도 문제가 될 것이다.

따라서 본 연구에서 기술한 것과 같이 해안 호안공사나 항만공사등과 같은 해안 구조물 공사의 계획단계 및 시공단계에서 대상영역의 파랑변형을 파악하고자 수치실험을 수행할 경우에는 먼저 대상영역의 자연현상을 면밀히 파악하고, 이러한 물리적 특성조건들이 최대한 반영 될 수 있는 수치모형을 선택하여야 더욱 자연현상에 가까운 파랑을 재현할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 기상청 (2002). 기상연보
- [2] 해양연구소(1989). “연안환경 보전기술 개발연구”, BSPG0083-242-4
- [3] 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.
- [4] Eldeberky, Y. and Battjes, J.A. (1996). "Spectral modelling of wave-Breaking: Application to Boussinesq equations", *J. Geophys.Res.*, 101, No. C1, pp 1253-1264
- [5] Hasselmann, S., Hasselmann, k., Allender, J.H., and Barnett, T.P. (1985). "Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the monlinear transferfor application in wave models", *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 11,pp 1378-1391
- [6] Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., and Walden, H. (1973). "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)", *Deut. Hydrogr. Z.*, Suppl. A, 8(12), 1-95.
- [7] Janssen, P.A.E.M.(1989): "Wave induced stress and the drag of air

flow over sea waves", J. Phys. Oceanogr., 19, 745-754

[8] Janssen, P.A.E.M. (1991). "Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting", J. Phys. Oceanogr., 21, pp 1631-1642

[9] Jonson, I. G.(1990). "Wave-current interactions". The sea.9, part A, B. LeMehaute and D. M. Hanes, ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

[10] Komen, G.J., Hasselmann, S., and Hasselmann, K. (1984). "On the existence of a fully developed wind-sea spectrum", J. Phys.Oceanogr., 14, pp 1271-1285

[11] Mei, C. C. (1989). The applied dynamics of ocean surface waves. World scientific Publishing, Singapore.

[12] Nelson, R.C.(1987): "Design wave heights on very mild slopes: An experimental study", Civil. Eng. Trans., Inst. Eng. Aust., 29, 157-161

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

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

[15] Snyder, R.L., Dobson, F.W., Elliott, J.A., and Long, R.B. (1981). "Array measurement of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves", J. Fluid Mech., 102, pp 1-59.

[16] WAMDI group (1988). "The WAM model - a third generation ocean wave prediction model", J. Phys. Oceanogr., 18, pp 1775-1810

[17] Weber, S.L.(1991a): "Bottom friction for wind sea and swell in extreme

depth-limited situations", *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 149-172

[18] Xu, B., Panchang, V.G., and Demirbilek, Z.(1996). "Extension Reflection in Elliptic Harbor Wave Models", *J. Water way, Port, Coastal, and Ocean Engr.*, 122, 118-126