

工學碩士 學位請求論文

대규모 만에서 항만건설로 인한  
파랑반응특성

Characteristics of Wave Responses due to  
Port Construction in a Large Bay

指導教授 李重雨

2005年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

黃 鎬 東

# Characteristics of Wave Responses due to Port Construction in a Large Bay

*Ho-Dong Hwang*

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

## Abstract

Introduction of *wave model*, considered the effect of *shoaling*, *refraction*, *diffraction*, *partial reflection*, *bottom friction*, *breaking at the coastal waters* of *complex bathymetry*, is a very *important factor* for *most coastal engineering design and disaster prevention problems*. As *waves move from deeper waters to shallow coastal waters*, the *fundamental wave parameters will change* and the *wave energy is redistributed along wave crests* due to the *depth variation*, the *presence of islands*, *coastal protection structures*, *irregularities of the enclosing shore boundaries*, and other *geological features*.

*Moreover, waves undergo severe change inside the surf zone where wave breaking occurs and in the regions where reflected waves from coastline and structural boundaries interact with the incident waves. Therefore, the application of mild-slope equation model in this field would help for understanding of wave transformation mechanism*

where *many* other *models* could not deal with up to now.

The purpose of this study is to form a extended *mild-slope* equation *wave model* and *make comparison* and *analysis* on variation of harbor responses in the vicinities of Pohang *Old Harbor* and Pohang *New Port*, etc. due to construction of *New Port* in *Youngil Bay*. This type of trial *might* be a *milestone* for port *development* in *macroscale*, where the induced *impact analysis* in the existing port due to the *development* could be easily *neglected*.

# 목 차

ABSTRACT .....	i
LIST OF TABLES .....	v
LIST OF FIGURES .....	v
NOMENCLATURE .....	ix
<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구의 배경 .....	1
1.2 연구의 방법 .....	2
<b>제2장 기초이론</b> .....	<b>4</b>
2.1 지배방정식 .....	4
2.2 경계조건 .....	6
2.3 운동학적 파라메타 .....	10
<b>제 3 장 모델의 적용 및 검증</b> .....	<b>14</b>
3.1 복합요소법의 적용 .....	14
3.2 모델의 검증 .....	29
3.2.1 경사 해변에서 타원형 사주에의 적용 .....	29
3.2.2 장방형 항만에의 적용 .....	34
<b>제 4 장 수치실험 및 분석</b> .....	<b>39</b>
4.1 대상영역의 특성 .....	39
4.2 모델의 구성 및 입력조건 .....	41
4.2.1 모델의 구성 .....	41
4.2.2 입력 조건 .....	49
4.3 결과 및 분석 .....	50
4.3.1 영일만 신항 건설전 .....	50
4.3.2 영일만 신항 건설후 .....	58

4.3.3 영일만 신항 건설전·후의 비교 .....	68
<b>제 5 장 결론</b> .....	78
<b>참 고 문 헌</b> .....	80

## LIST OF TABLES

Table 4.1 Numerical <i>model</i> characteristics .....	41
Table 4.2 Incident <i>wave</i> condition for design <i>wave</i> . .....	49
Table 4.3 Simulation conditions. ....	49

## LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Definition sketch of <i>model</i> domain .....	9
Fig. 3.1 A typical <i>element</i> and notation .....	16
Fig. 3.2 Notation of boundary <i>segment</i> .....	21
Fig. 3.3 Definition sketch for <i>line</i> integrals along the open boundary .....	25
Fig. 3.4 Modeled domain of Berkhoff et al.(1982) .....	32
Fig. 3.5 Wave height comparinsons from <i>linear</i> and non- <i>linear</i> <i>wave</i> runs on a domain resolution of 15 point per <i>wavelength</i> (Section 3) .....	33
Fig. 3.6 Wave height comparinsons from <i>linear</i> and non- <i>linear</i> <i>wave</i> runs on a domain resolution of 15 point per <i>wavelength</i> (Section 5) .....	33
Fig. 3.7 Wave height comparinsons from 15 point per <i>wavelength</i> (Section7) .....	34
Fig. 3.8 Rectangular harbor with semi-circular open boundary .....	36
Fig. 3.9 Theoretical and numerical resonance curves for a fully reflecting rectangular harbor .....	37
Fig. 3.10 Harbor response curves for various values of coastal reflection coefficient .....	37
Fig. 3.11 Harbor response curves for various values of the friction factor .....	38
Fig. 4.1 Location <i>map</i> for numerical simulation .....	40
Fig. 4.2 Study area and depth for <i>model</i> simulation before construction of New Port in Yeongil Bay .....	42
Fig. 4.3 Generated finite <i>element</i> mesh for study area before construction of New Port in Yeongil Bay .....	43
Fig. 4.4 Study area and depth for <i>model</i> simulation after construction of New Port in Yeongil Bay .....	44

Fig. 4.5	Generated finite <i>element mesh</i> for study area after construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	45
Fig. 4.6	Generated finite <i>element mesh</i> for study area. ( <i>Pohang Old Port</i> ) .....	46
Fig. 4.7	Generated finite <i>element mesh</i> for study area ( <i>Pohang New Port</i> ) .....	47
Fig. 4.8	Generated finite <i>element mesh</i> for study area ( <i>Yeongil Bay New Port</i> ) .....	48
Fig. 4.9	Wave height <i>with Linear dispersion condition</i> before construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	52
Fig. 4.10	Wave height <i>with Breaking-Linear dispersion condition</i> before construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	53
Fig. 4.11	Linear dispersion <i>wave height</i> ( <i>Pohang Old</i> and <i>New Port</i> ) .....	54
Fig. 4.12	Linear dispersion and breaking included <i>wave height</i> ( <i>Pohang Old</i> and <i>New Port</i> ) .....	54
Fig. 4.13	Wave height <i>with Nonlinear dispersion condition</i> before construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	55
Fig. 4.14	Wave height <i>with Breaking-Nonlinear dispersion condition</i> before construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	56
Fig. 4.15	Nonlinear dispersion <i>wave height</i> ( <i>Pohang Old</i> and <i>New Port</i> ) .....	57
Fig. 4.16	Nonlinear dispersion and breaking included <i>wave height</i> ( <i>Pohang Old</i> and <i>New Port</i> ) .....	57
Fig. 4.17	Wave height <i>with Linear dispersion condition</i> after construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	60
Fig. 4.18	Wave height <i>with Breaking-Linear dispersion condition</i> after construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	61
Fig. 4.19	Linear dispersion <i>wave height</i> ( <i>Pohang Old</i> and <i>New Port</i> ) .....	62
Fig. 4.20	Linear dispersion and breaking included <i>wave height</i> ( <i>Pohang Old</i> and <i>New Port</i> ) .....	62
Fig. 4.21	Wave height <i>with Nonlinear dispersion condition</i> after construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	63
Fig. 4.22	Wave height <i>with Breaking-Nonlinear dispersion condition</i> after construction of <i>New Port</i> in <i>Yeongil Bay</i> .....	64
Fig. 4.23	Nonlinear dispersion <i>wave height</i> ( <i>Pohang Old</i> and <i>New Port</i> ) .....	65

Fig. 4.24 Nonlinear dispersion and breaking included <i>w</i> ave height (Pohang Old and New Port) .....	65
Fig. 4.25 Linear dispersion <i>w</i> ave height (Yeongil Bay New Port) .....	66
Fig. 4.26 Linear dispersion and breaking included <i>w</i> ave height (Yeongil Bay New Port) .....	66
Fig. 4.27 Nonlinear dispersion <i>w</i> ave height (Yeongil Bay New Port) .....	67
Fig. 4.28 Nonlinear dispersion and breaking included <i>w</i> ave height (Yeongil Bay New Port) .....	67
Fig. 4.29 Selected stations for <i>model simulation</i> .....	70
Fig. 4.30 Amplification factor of Pohang New Port before construction of New Port in Yeongil Bay .....	71
Fig. 4.31 Amplification factor of Pohang Old Port before construction of New Port in Yeongil Bay .....	71
Fig. 4.32 Amplification factor of at the site of Pohang New Port before construction of New Port in Yeongil Bay .....	72
Fig. 4.33 Amplification factor of at Pohang Old Port for the case of nonlinear-break .....	72
Fig. 4.34 Amplification factor of Pohang New Port after construction of New Port in Yeongil Bay .....	73
Fig. 4.35 Amplification factor of Pohang Old Port after construction of New Port in Yeongil Bay .....	73
Fig. 4.36 Amplification factor of at the site of Pohang New Port after construction of New Port in Yeongil Bay .....	74
Fig. 4.37 Amplification factor of at Pohang New Port for the case of nonlinear-break .....	74
Fig. 4.38 Nonlinear dispersion and breaking included <i>w</i> ave height (Pohang Old Port before construction) .....	75
Fig. 4.39 Nonlinear dispersion and breaking included <i>w</i> ave height (Pohang New Port before construction) .....	75
Fig. 4.40 Nonlinear dispersion and breaking included <i>w</i> ave height (Pohang Old Port after construction) .....	76

Fig. 4.41 Nonlinear dispersion and breaking included <i>w</i> ave height (Pohang New Port after construction) .....	76
Fig. 4.42 Amplification factor of at Pohang Old Port for the case of nonlinear-break following the fairway .....	77
Fig. 4.43 Amplification factor of at Pohang New Port for the case of nonlinear-break following the fairway .....	77

## NOMENCLATURE

$A$	Amplitude of the incident wave
$\tilde{a}$	$CC_g$
$B$	Coastal boundaries
$\tilde{b}$	$\frac{C_g}{C} \sigma^2 + \delta w + iC_g \sigma \gamma$
$\mathcal{A}(x, y)$	Phase velocity = $\sigma/k$
$C_g(x, y)$	Group velocity = $\partial\sigma/\partial k = nC$ with $n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$
$E$	Total number of elements
$F$	Functional
$e_i$	Elements around node I
$f_r$	Friction coefficient
$H/2$	Wave amplitude
$J_n$	n-th order Bessel functions
$K_r$	Reflection coefficient
$[K_1^e]$	Element matrix
$[K_3]$	Diagonal matrix of dimension $M$ by $M$
$[K_4]$	Fully populated $N_\Gamma \times M$ matrix
$L_P$	Length of segment $P$
$N_\Gamma$	Total number of segments (= total number of nodes) along the circular boundary $\Gamma$

$N_i^e$	Linear interpolation functions
$N_i(x, y)$	Linear interpolation function for node $i$
$N_i^e(x, y)$	Linear interpolation function corresponding to an <i>element</i> $e$ and one of its node $I$ .
$n$	Manning's dissipation coefficient
$P_1, P_2$	Boundary segments to either side on node $I$
$r$	Radius of the <i>semicircle</i>
$w$	Friction factor
$\alpha$	Complex coefficient ( $= \alpha_1 + \alpha_2$ )
$\alpha_i, \beta_i$	Unknown coefficients
$\beta$	Wave phase angle
$\Gamma$	Open boundary
$\gamma$	Wave breaking parameter
$\hat{n}$	Wave potential
$\hat{n}_i$	Solution $\hat{n}$ at node $I$
$\hat{n}_s$	Scattering wave potential
$\hat{n}^e$	Linear two-dimensional function
$\hat{n}_i^e$	Wave potentials at the nodes of the <i>element</i> $e$
$\{\hat{n}^\Gamma\}$	Subset of $\{\hat{n}\}$ for nodes situated on boundary $\Gamma$
$\hat{n}(x, y)$ wave	Complex surface elevation function, from which the height can be estimated
$\theta_I$	Incident wave angle with respect to the x-axis
$\sigma$	Wave frequency under consideration (in radians/second)
$\Omega$	Model domain

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구의 배경

항만 및 연안역의 개발에 있어서 파랑의 정확한 분석은 매우 중요한 작업이다. 심해역에서 수심이 얇은 천해역으로 이동함에 따라 기본적 특성이 변화하는 파에너지는 천해역과 섬, 해안 보호 구조물, 불규칙한 연안 경계와 다른 지리적 특징에 의하여 파봉선을 따라 재분산된다. 또한, 쇄파대에서 부딪힌 파나, 해안선 및 구조물의 경계에서 반사된 파가 그 입사파와 상호 작용을 하면서 급격한 변화를 일으키므로 이러한 파랑의 변환 과정에 대해 다양하게 관측과 계산이 필요한 실정이다.

그러나 항만개발 및 연안구조물의 시공과 설계에 사용되고있는 파랑의 분석은 아주 적은 양의 파랑관측 데이터만으로 이루어지고 있다. 그러한 이유는 파랑의 현장관측과 물리적 모델실험에 많은 자본과 시간을 필요로 하고, 분석 과정에 제약요인이 많기 때문이다. 그러므로 필요로 하는 해양 정보를 검증된 수치 모델로 분석하고 그 결과를 해안 프로젝트에 반영하는 것이 일반화되어 있다.

한편, 대규모 만에서의 항만개발이 진행되는 해역에서는 이로 인한 부차적 영향이 만의 전역에 미치게 되며, 다중반사 또는 쇄파로 인한 파랑은 만내에서도 변화무상하게 전파한다. 쇄파가 발생하는 쇄파대에서나, 해안선 및 구조물의 경계에서 반사된 파는 그 입사파와 상호 작용을 하는 영역을 통과하면서 급격한 변화를 일으키며, 동반한 파랑에너지는 항만 구조물 등에 외력으로 작용하고, 구조물의 손상과 항내의 정온도 확보를 어렵게 하여, 선박의 입·출항 및 접안 그리고 하역작업 등에 상당한 영향을 주어 항만의 생산성을 저감시키는 요인으로 작용하고 있다.

최근, 동북아 경제권 형성 및 대북방교역을 대비한 전략적 거점항만개발과 경북지역 등 배후권 화물의 원활한 처리를 위하여 영일만에 대규모 신항만 공사가 추진되고 있다. 이러한 신항만의 개발에 있어서 가장 기본적이며, 설계에 큰 영향을 미치는 것이 파랑이다. 특히, 파랑은 지형과 수심이 복잡한 연안해역에서 조석 및 바람에 의한 파의 성장 및 감쇠 등으로 인한 에너지의 재분포 과정을 거쳐 변화하게 된다. 본 연구에서 선택한 연구 대상역인 경북 포항시 흥해읍 달만갑과 대보면 호미곶(구 장기갑) 사이의 약 10km에 달하는 개구부로 이루어진 장방형 내만에 건설되어지는 영일만 신항의 경우에도 영일만의 입구부에 위치하고 있어서 상당한 구간이 외력에 노출되어 있으므로 만 내에서 에너지의 재분포 과정을 통한 파랑의 변화와 그로 인한 만내 기존의 항만에서 파랑반응 변화특성의 분석이 필요한 것이다.

본 연구에서는 영일만 신항만의 건설이 이루어질 영일만 내의 넓은 수역에 대해 파랑의 변환과정을 보다 종합적으로 해석하기 위해 확장완경사방정식 파랑모델을 구성하고, 신항건설 전·후의 해면변동과 신항만 개발에 따른 포항 구항해역 및 포항 신항해역 등 인접해역에서의 정온도 변화를 비교 분석하는 것을 골자로 하고 있으며, 이러한 시도가 광역항만권 개발에서 쉽게 누락시킬 수 있는 기존항만에 파급되는 영향을 반드시 분석하도록 하고자함에 목적이 있다.

## 1.2 연구의 방법

최근까지는, 심해에서 연안 설계 구역으로의 파향선(wave ray)을 추적하여 파랑의 변화를 알아내는 선형파랑파향이론이 많이 사용되어 왔다. 이 가정의 결과에서, 물리학적인 회절이 파향선 모델에서는 완전히 무시되었기 때문에 파랑의 교차와 혼합 현상이 발생할 때 이 이론은 적용할 수가 없었다.

1980년대 초부터 해안 설계자들과 연구자들은 굴절과 회절에 의한 복합적 영향의 중요성을 인식하여 이론들을 정립하고 수치 모델들을 조합하기 시작하였다. 실제로 심해로부터 천해로의 굴절과 회절의 복합적 영향을 적절히 묘사 가능한 몇몇의 파동이론들이 존재한다(Demirbilek and Webster, 1998). 이들 이론 중의 하나가 수정완경사방정식(Modified mild slope equation)이다.

이 식은 수심평균, 타원형 미분 방정식으로서 한 파장내에 수심과 흐름의 변화율이 아주 작다고 가정하고, 해저마찰을 고려하여 완경사방정식을 수정한 것이다. 연안의 파랑의 예측에 있어서 어려운 점은 파랑이 쇄파역 내에 진입하였을 때 쇄파가 어디에서 발생할 것인가 하는 것이다. 현재 사용되는 수치 모델에서, 쇄파영역은 계산 전에 알려져 있지 않고, 파고에 대한 수심의 비로 나타낸 기준 또는 쇄파공식으로 정한다. 육지로 둘러싼 경계면에서의 부분 반사 및 쇄파로 인한 소산 또한 확장완경사모델(Extended mild slope model)에서 경험적으로 포함시킬 수 있다. 한편 완경사모델의 축소버전이라 할 수 있는 포물선형 근사(parabolic approximation)는 많은 해안, 해양공학 문제에 대해 완경사모델에서 가정의 도입 근사화를 거치는 과정에 부정확하거나 부적절한 수치적 예측을 일으킬 수 있는 과도한 계산 과정을 상당히 줄일 수가 있다. 포물선형 근사는 여러 실험실의 연구와 현장적용으로 이미 폭넓게 증명되어 있으므로(Berkhoff et al., 1982; Liu and Tsay, 1984; Kirby and Dalrymple, 1984; Panchang et al., 1998), 포물선형 모델에 대한 세부적인 내용은 Booij(1981), Kirby(1983), Liu(1983), Liu and Tsay(1984), Kirby and Dalrymple(1984)를 참고하면 된다.

그러나 항만에서처럼 반사파가 가장 큰 고려사항일 때는 포물선형 근사는 반사를 무시하므로 본 연구에서는 적용할 수 없어서 전술한 바와 같이 확장완경사방정식을 사용하여 수치 실험을 수행하고 이 실험 결과를 분석하여 대규모 만에서의 항만건설로 인한 영향을 평가하기로 한다.

## 제2장 기초이론

### 2.1 지배방정식

연안의 표면파랑 모델을 구축하기 위하여 2차원 타원형 완경사 파랑 방정식을 사용하기로 한다. 그 방정식은 식 (2.1)과 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (2.1)$$

여기서,  $\hat{\eta}(x, y)$  = 복소해면변동함수

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

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

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

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

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

식 (2.1)은 임의의 모양의 해안영역에서의 파랑의 굴절과 회절 그리고 반사가 고려된 방정식이다. 그러나, 해안영역에서는 이 외에도 해저면의 마찰, 쇄파 등의 다른 인자들도 파랑의 거동에 영향을 미치게 되며, 이를 고려하면 완경사 방정식은 다음과 같이 확장이 가능하다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{n}) + \left( \frac{C_g}{C} \sigma^2 + \rho w + i C_g \sigma \gamma \right) \hat{n} = 0 \quad (2.2)$$

여기서,  $w$  = 마찰항

$\gamma$  = 쇄파파라메타

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

$$w = \left( \frac{2\rho\sigma}{k} \right) \left[ \frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2ka + \sinh 2ka) \sinh ka} \right] \quad (2.3)$$

여기서,  $a = H/2$ ; 파랑의 진폭

$f_r$  = 마찰계수

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

$$\gamma = \frac{0.15}{d} \left( 1 - \frac{0.4^2 d^2}{4d^2} \right) \quad (2.4)$$

위의 관계식 외에도, 비선형파의 시뮬레이션은 환경사방정식을 이용하여 실험할 수 있다. 이것은 이러한 시뮬레이션에 중요하다고 알려진 진폭을 고려한 파랑분산관계식을 사용할 수 있다. 식 (2.1) 및 (2.2)에 있는 선형분산관계식을 비선형 산란관계식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\omega^2 = gk[1 + (kd)^2 F_1 \tanh^5 kd] \tanh\{kd + kaF_2\} \quad (2.5)$$

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

$$F_2 = \left( \frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^4 \quad (2.6)$$

## 2.2 경계조건

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial n} = \alpha \hat{\eta} \quad (2.7)$$

$\alpha$ 는 복소계수로 식 (2.8)과 같이 사용한다.

$$\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (2.8)$$

여기서,  $K_r =$  반사계수

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

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kA} \left( \frac{\partial}{\partial r} - iA \right) \hat{u}_s \rightarrow 0 \quad (2.9)$$

여기서,  $\hat{u}_s =$  산란파의 포텐셜

$r =$  중심 축에서부터 임의의 점까지의 거리

$\hat{u}_s$ 는 Mei(1983)가 제시하였는데, 의도하는 산란파의 포텐셜  $\hat{u}_s$ 는 환경사 방정식의 해이고, 식 (2.9)의 방사조건식을 만족한다. 이는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\hat{u}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (a_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (2.10)$$

여기서,  $H_n(kr) =$  제1종 Hankel함수

제2종 Hankel함수는 무한대에서 Sommerfeld 방사조건을 만족하지 않으므로 식 (2.10)에서 제외되었다.

그러나  $\hat{n}_s$ 는 일정수심의 외부 영역을 필요로 한다. Fig. 2.1과 같은 항만 문제에서도, 식 (2.10)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.

$$\frac{\partial \hat{n}_s}{\partial r} + p \hat{n}_s + q \frac{\partial \hat{n}_s}{\partial \theta^2} = 0 \quad (2.11)$$

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  $\Gamma$ 를 따라 평균수심에 상응하는 파수를 채용하였다. 모델영역  $\Omega$ 내에서, 확장완경사방정식이 적용한다. 반원형호  $\Gamma$ 를 따라서 개방경계조건으로 위와 같이 포물선형 근사를 사용한다.

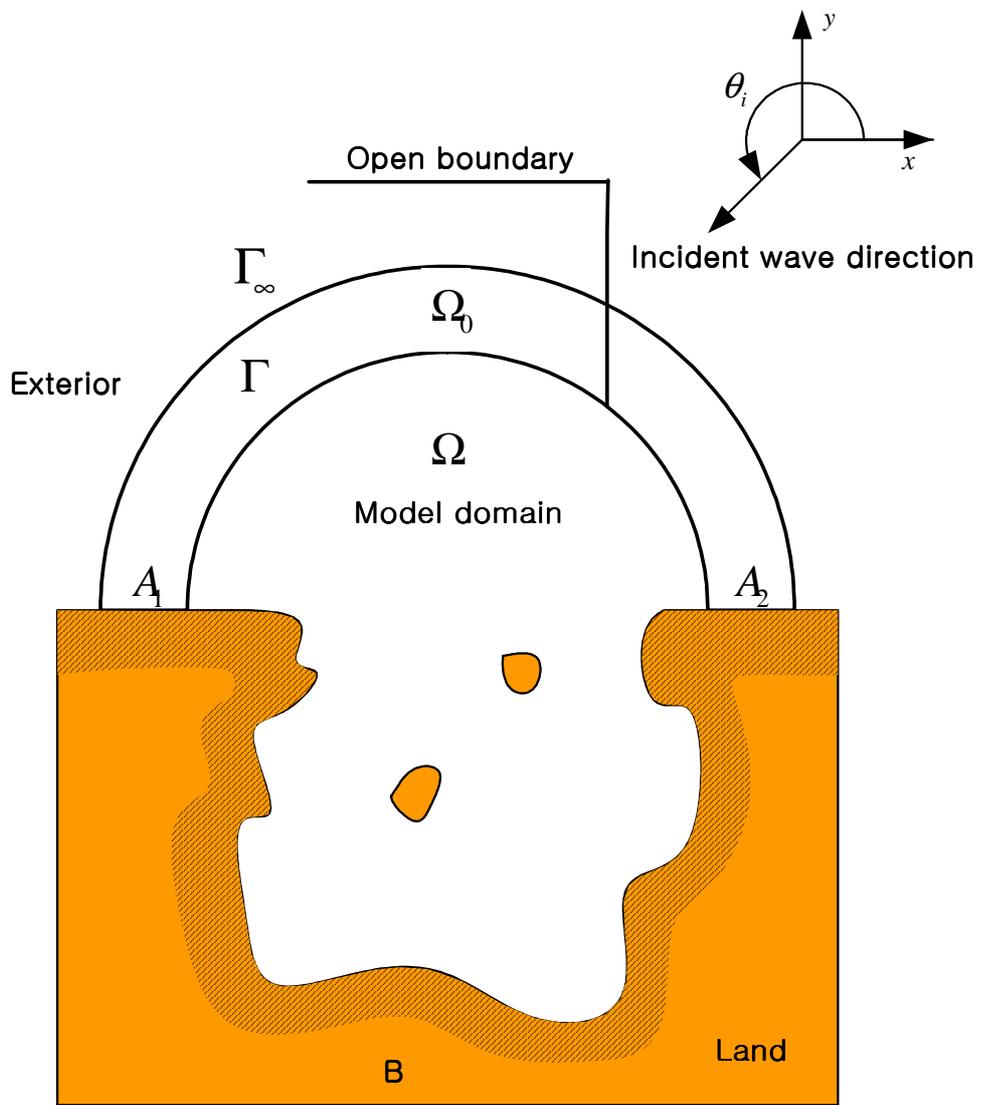


Fig. 2.1 Definition sketch of model domain

## 2.3 운동학적 파라메타

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

파랑표면의 미소 수립자의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi(x, y, z, t) = [\Phi_1 \cos \omega t + \Phi_2 \sin \omega t] Z(z) \quad (2.12)$$

$$Z(z) = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \quad (2.13)$$

$\hat{n}$ 의 항에서 포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{g}{i\omega} \hat{n} \quad (2.14)$$

식 (2.12)에서 이 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} A \left[ \hat{n}(x, y) e^{-i\left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right)} \right] Z(z) \quad (2.15)$$

$$\hat{n} = \hat{n}_1 + i\hat{n}_2 \quad (2.16)$$

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

$$\Phi = \frac{g}{\omega} [n_1 \cos \alpha + n_2 \sin \alpha] Z \quad (2.17)$$

수립자의 속도에 관한 식은 식(2.17)의  $\Phi$ 에 대해 방향별 도함수 식을 평가하여 구한다.

$$v_x = \frac{g}{\omega} \left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right) \cos \alpha + \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right) \sin \alpha \right] Z \quad (2.18)$$

$$v_y = \frac{g}{\omega} \left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right) \cos \alpha + \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right) \sin \alpha \right] Z \quad (2.19)$$

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

$$|v|^2 = (v_x)^2 + (v_y)^2 \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} |v|^2 = & \left( \frac{g}{\omega} \right)^2 Z^2 \left\{ \left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] \cos^2 \alpha \right. \\ & + \left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right] \sin^2 \alpha \\ & \left. - \left[ \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right] \sin(2\alpha) \right\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

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

$$\left\{ -\left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \sin(2\alpha) - 2 \left[ \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right] \cos(2\alpha) = 0 \quad (2.22)$$

식 (2.22)를 이항하여 정리하면 식(2.23)과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{2 \left[ \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right]}{-\left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right]} \right] \quad (2.23)$$

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

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = constant \quad (2.24)$$

속도에 의한 압력, 즉 운동 수두는 이와 같은 선형식에서 무시하였다. 식 (2.15)의  $\Phi$ 의 식은 이 식에서 대체 되었고, 식들을 다시 풀면 식 (2.25)로 나타낼 수 있다.

$$P = -\rho gz + \rho g h(\widehat{n} e^{-i\omega t}) Z + C \quad (2.25)$$

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

$$P_{max} = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} Z \quad (2.26)$$

파랑의 위상각  $\beta$ 는 다음의 식에서 구해진다.

$$\beta = \arctan \frac{\widehat{\eta}_2}{\widehat{\eta}_1} \quad (2.27)$$

$\cos\beta$ 는 -1에서 1까지 변화하고, 출력 값으로 쓰여지며, 파랑의 진폭  $A$ 는 다음 식에서 구해진다.

$$A = \sqrt{\widehat{\eta}_1 + \widehat{\eta}_2} \quad (2.28)$$

시간  $t$ 에서 순간 해수면 높이는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\eta = A[\widehat{\eta}e^{-i\omega t}] = [\widehat{\eta}_1 \cos\omega t + \widehat{\eta}_2 \sin\omega t] \quad (2.29)$$

## 제 3 장 모델의 적용 및 검증

### 3.1 복합요소법의 적용

본 연구에서는 기본방정식을 해석하기 위한 수치해석방법으로 복합형태지역에서의 해안 모델링에 아주 적합한 복합요소법을 사용하기로 한다(Lee, 1989).

일정수심의 개방해역에서의 산란파에서, 그 입사파는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{n}_I = A e^{ikr \cos(\theta - \theta_I)} = A \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(kr) \cos n(\theta - \theta_I) \quad (3.1)$$

여기서, A=진폭

$\theta_I$  = x축과 이루는 입사파향

$J_n$  = 제1종 n차 Bessel함수

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & \text{when } n=0 \\ 2 & \text{when } n \neq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

입사파향은  $\theta_I$ 가 0일 경우 입사파는 x축의 양의 방향을 따라 이동하는 것으로 한다.  $\Omega$ 영역을 유한요소망에 의한 수치모델영역,  $\Omega_0$ 는 무한대로 방사하는 외부영역으로 정의한다. 복잡한 지형과 구조물 및 섬들이 영역  $\Gamma$  내부에 존재한다고 하면,  $\Omega_0$ 에서 총파량은 입사파와 산란파의 합으로 식 (3.3)과 같이 정의한다.

$$\widehat{n}_{ext} = \widehat{n}_J + \widehat{n}_S \quad (3.3)$$

식 (2.2)는 일반형으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot (\widetilde{a} \nabla \widehat{n}) + \widetilde{b} \widehat{n} = 0 \quad (3.4)$$

여기서  $\widetilde{a} \equiv CC_g$

$$\widetilde{b} \equiv \frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma\omega + iC_g\sigma\gamma$$

Mei(1994)는 해안선과 구조물에서 식 (2.7)과 무한 영역에서의 식 (2.9)에 의한 경계조건으로 식 (3.4)를 푸는 문제는 다음의 범함수  $F$ 가 일정하다는 것을 나타낸 바 있다.

$$F = \int_{\Omega} \frac{1}{2} [\widetilde{a} (\nabla \widehat{n})^2 - \widetilde{b} \widehat{n}^2] dA - \int_{B} \frac{1}{2} \alpha \widetilde{a} \widehat{n}^2 ds + \int_{\Gamma} \left[ \left( \frac{1}{2} \widehat{n}_{,s} + \widehat{n} \right) \frac{\partial \widehat{n}_{,s}}{\partial n} - \widehat{n} \frac{\partial (\widehat{n}_{,s} + \widehat{n})}{\partial n} \right] ds \quad (3.5)$$

파랑 포텐셜의 해는  $\Omega$ 영역에서 범함수  $F$ 를 최소화하여 찾을 수 있다(Lee, 1989). 유한요소법에서, 계산영역인  $\Omega$ 영역은 단순 삼각형 요소들의 망으로 나눈다. 그 삼각형들의 크기는 파장과 수심변화의 스케일보다 훨씬 더 작아야 한다. 그리고 진폭의 변화가 급한 곳에서는 더 좋은 해상도가 요구된다. 각각의 삼각형 요소에서, 파랑포텐셜  $\widehat{n}$ 는 다음의 선형 2차원함수  $\widehat{n}^e$ 로 근사화 된다.

$$\hat{n}^e = \sum_{i=1}^3 N_i^e \hat{n}_i^e = [N_1^e + N_2^e + N_3^e] \begin{Bmatrix} \hat{n}_1^e \\ \hat{n}_2^e \\ \hat{n}_3^e \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

$\hat{n}^e$ 가 요소 e의 끝점에서 과랑포텐셜과  $N_i^e$ 를 나타내는 것은 선형적분함수 식으로 나타낼 수 있다.

$$N_i^e = \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2\Delta^e} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} a_i = x_j y_k - y_j x_k \\ b_i = y_j - y_k \\ c_i = x_k - x_j \end{cases} \quad (3.8)$$

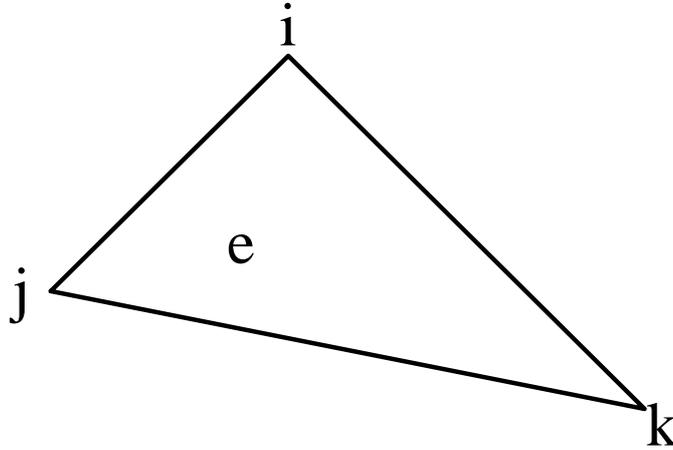


Fig. 3.1 A typical element and notation

$$\Delta^e = e \text{ 요소의 면적} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} \quad (3.9)$$

여기서,  $\int \int_e N_m^e dx dy = \frac{\Delta^e}{3}$

$$\int \int_e N_i^e N_j^e N_k^e dx dy = \begin{cases} \frac{6}{60} \Delta^e, & i=j=k \\ \frac{2}{60} \Delta^e, & i=j \text{ or } i=k \text{ or } j=k \\ \frac{6}{60} \Delta^e, & i \neq j \neq k \end{cases}$$

위의 식에서,  $(i, j, k)$ 는 반시계 방향으로 표현하였다. 요소  $e$ 에서, 아래의 관계식을 식 (3.5)식에 대입한다.

$$\nabla \widehat{\mathbf{n}}^e = \overset{\rightarrow}{i} \sum_{i=1}^3 \widehat{\mathbf{n}}_i^e \frac{\partial N_i^e}{\partial x} + \overset{\rightarrow}{j} \sum_{j=1}^3 \widehat{\mathbf{n}}_j^e \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} (\nabla \widehat{\mathbf{n}}^e)^2 &= \nabla \widehat{\mathbf{n}}^e \cdot \nabla \widehat{\mathbf{n}}^e \\ &= \left( \sum_{i=1}^3 \widehat{\mathbf{n}}_i^e \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^3 \widehat{\mathbf{n}}_j^e \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right)^2 \\ &= \{\widehat{\mathbf{n}}^e\}^T \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial N_1^e}{\partial x_a} \right)^2 & \left( \frac{\partial N_1^e}{\partial x_a} \frac{\partial N_2^e}{\partial x_a} \right) & \left( \frac{\partial N_1^e}{\partial x_a} \frac{\partial N_3^e}{\partial x_a} \right) \\ \left( \frac{\partial N_2^e}{\partial x_a} \frac{\partial N_1^e}{\partial x_a} \right) & \left( \frac{\partial N_2^e}{\partial x_a} \right)^2 & \left( \frac{\partial N_2^e}{\partial x_a} \frac{\partial N_3^e}{\partial x_a} \right) \\ \left( \frac{\partial N_3^e}{\partial x_a} \frac{\partial N_1^e}{\partial x_a} \right) & \left( \frac{\partial N_3^e}{\partial x_a} \frac{\partial N_2^e}{\partial x_a} \right) & \left( \frac{\partial N_3^e}{\partial x_a} \right)^2 \end{bmatrix} \{\widehat{\mathbf{n}}^e\} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} (\widehat{\mathbf{n}}^e)^2 &= \left( \sum_{i=1}^3 N_i^e \widehat{\mathbf{n}}_i^e \right)^2 \\ &= \{\widehat{\mathbf{n}}^e\}^T \begin{bmatrix} (N_1^e)^2 & (N_1^e N_2^e) & (N_1^e N_3^e) \\ (N_2^e N_1^e) & (N_2^e)^2 & (N_2^e N_3^e) \\ (N_3^e N_1^e) & (N_3^e N_2^e) & (N_3^e)^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

여기서,  $a=1,2$ ; dummy index notation

$$x_1 \equiv x, \quad x_2 \equiv y$$

즉, 식 (3.11)은  $\alpha=1$ 과  $\alpha=2$ 의 합을 나타내며,  $\{\widehat{n}^{\alpha}\}^T = [\widehat{n}_1^{\alpha} \widehat{n}_2^{\alpha} \widehat{n}_3^{\alpha}]$ 는 식 (3.6)에 나타낸다. 그리고, 식 (3.5)에서의 계수  $(\widetilde{a}, \widetilde{b})$ 는 요소  $e$ 에서 선형적으로 변화한다고 가정한다.

$$\widetilde{a}^e = \sum_{i=1}^3 \mathcal{N}_i^e \widetilde{a}_i^e, \quad \widetilde{b}^e = \sum_{i=1}^3 \mathcal{N}_i^e \widetilde{b}_i^e \quad (3.13)$$

식 (3.5)의 첫 번째 부분은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \int \int_{\Omega} \frac{1}{2} (\widetilde{a}(\nabla \widehat{n})^2 - \widetilde{b} \widehat{n}^2) dA \\ &= \frac{1}{2} \sum_{\alpha \in \Omega} \underbrace{\{\widehat{n}^{\alpha}\}}_{1 \times 3} \underbrace{[K_1^{\alpha}]}_{3 \times 3} \underbrace{\{\widehat{n}^{\alpha}\}}_{3 \times 1} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$K_{1,i,j}^{\alpha} = \widetilde{a}_{\beta}^e \int \int_e \mathcal{N}_{\beta}^e \left( \frac{\partial \mathcal{N}_i^e}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \mathcal{N}_j^e}{\partial x_{\alpha}} \right) dx dy - \widetilde{b}_{\beta}^e \int \int_e \mathcal{N}_{\beta}^e \mathcal{N}_i^e \mathcal{N}_j^e dx dy \quad (3.15)$$

여기서,  $\beta=1,2,3$  ; dummy index notation

$$\frac{\partial \mathcal{N}_i^e}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \mathcal{N}_j^e}{\partial x_{\alpha}} = \frac{1}{(2\Delta^e)^2} (b_i b_j + c_i c_j) \quad (3.16)$$

$$\int \int_e \mathcal{N}_{\beta}^e dx dy = \frac{\Delta^e}{3} \quad (3.17)$$

$$\tilde{a}_\beta^e \int_e \int_e \mathcal{N}_\beta^e \left( \frac{\partial \mathcal{N}_i^e}{\partial x_a} \frac{\partial \mathcal{N}_j^e}{\partial x_a} \right) dx dy = \frac{\tilde{a}_1^e + \tilde{a}_2^e + \tilde{a}_3^e}{12 \Delta^e} (b_i b_j + c_i c_j) \quad (3.18)$$

식 (3.15)의 두 번째 항은,

$$\begin{aligned} & \tilde{b}_\beta^e \int_e \int_e \mathcal{N}_\beta^e \mathcal{N}_i^e \mathcal{N}_j^e dx dy \\ &= \tilde{b}_i^e \int_e \int_e (\mathcal{N}_i^e)^2 \mathcal{N}_j^e dx dy + \tilde{b}_j^e \int_e \int_e \mathcal{N}_i^e (\mathcal{N}_j^e)^2 dx dy + \tilde{b}_k^e \int_e \int_e \mathcal{N}_i^e \mathcal{N}_j^e \mathcal{N}_k^e dx dy \\ &= \frac{\Delta^e}{60} (2 \tilde{b}_i^e + 2 \tilde{b}_j^e + 2 \tilde{b}_k^e) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$i \neq j$  이면,

$$\begin{aligned} & \tilde{b}_\beta^e \int_e \int_e \mathcal{N}_\beta^e \mathcal{N}_i^e \mathcal{N}_j^e dx dy \\ &= \tilde{b}_i^e \int_e \int_e (\mathcal{N}_i^e)^3 dx dy + \tilde{b}_{\mathcal{H}}^e \int_e \int_e \mathcal{N}_{\mathcal{H}}^e (\mathcal{N}_i^e)^2 dx dy + \tilde{b}_{\mathcal{K}}^e \int_e \int_e \mathcal{N}_{\mathcal{K}}^e (\mathcal{N}_i^e)^2 dx dy \\ &= \frac{\Delta^e}{30} (3 \tilde{b}_i^e + \tilde{b}_{\mathcal{H}}^e + \tilde{b}_{\mathcal{K}}^e) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$i = j \neq i$  일 때,  $\mathcal{H}$  과  $\mathcal{K}$  는 요소  $e$  의 다른 두개의 교점이다. 식 (3.15)는 다음과 같다.

$$\begin{cases} K_{1,i,j}^e = \frac{\tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 + \tilde{a}_3}{12 \Delta^e} (b_i b_j + c_i c_j) \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta^e}{60} (2 \tilde{b}_i^e + 2 \tilde{b}_j^e + 2 \tilde{b}_k^e) \text{ when } i \neq j \\ \frac{\Delta^e}{30} (3 \tilde{b}_i^e + \tilde{b}_{\mathcal{H}}^e + \tilde{b}_{\mathcal{K}}^e) \text{ when } i = j \end{array} \right. \end{cases} \quad (3.21)$$

모든 요소들에서 요소매트릭스  $[K_i^e]$  를 계산하고 나서, E는 요소의 전체 숫자이고, 이 요소들은 "전체" 행렬  $[K_1]$  으로 조합한다. 그러면, 식 (3.14)는 다

음과 같다.

$$I_1 = \frac{1}{2} \sum_{\mathcal{E} \in \Omega} \underbrace{\{\hat{\mathbf{n}}\}}_{1 \times 3} \underbrace{[K_1]}_{3 \times 3} \underbrace{\{\hat{\mathbf{n}}\}}_{3 \times 1} = \frac{1}{2} \{\hat{\mathbf{n}}\}^T [K_1] \{\hat{\mathbf{n}}\} \quad (3.22)$$

$$\{\hat{\mathbf{n}}\}^T = \{\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{n}_3, \dots, \dots, \hat{n}_M\} \quad (3.23)$$

여기서,  $N$  = 영역  $\Omega$ 에서 교점의 총 수이다.

식 (3.5)의 두 번째 항은 다음과 같이 정리된다.

$$I_2 = \int_B \frac{1}{2} \alpha \tilde{a} \hat{\mathbf{n}}^2 dS \quad (3.24)$$

여기서,  $B$  = 해안선과 육지경계를 나타낸다.

해안경계  $B$ 의  $p$ 부분을 따라서, 파랑표면고함수  $\hat{\mathbf{n}}$ 와 변수  $\tilde{a}$ 는 선형 함수에 의해 다음과 같이 근사된다.

$$\hat{\mathbf{n}}^P = N_i^P \hat{\mathbf{n}}_i^P + N_j^P \hat{\mathbf{n}}_j^P \quad (3.25)$$

$$\tilde{a}^P = N_i^P \tilde{a}_i^P + N_j^P \tilde{a}_j^P \quad (3.26)$$

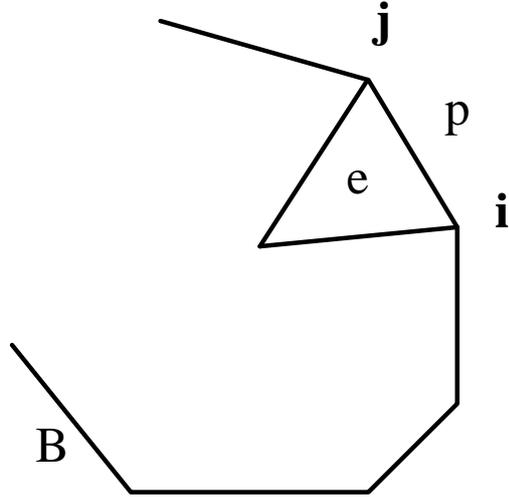


Fig. 3.2 Notation of boundary segment

여기서,  $i \rightarrow j$ 는 경계의 양의 방향이고, 해안 경계와 내부 육지 경계의 시계 방향과는 반시계 방향이다.

첫째로, 요소 P에서  $(\hat{n}^P)^2$ 식은 다음과 같이 매트릭스 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \{\hat{n}^P\}^2 &= \{N_i^P \hat{n}_i^P + N_j^P \hat{n}_j^P\}^2 \\ &= \{\hat{n}_i^P, \hat{n}_j^P\} \begin{bmatrix} (N_i^P)^2 & (N_i^P N_j^P) \\ (N_j^P N_i^P) & (N_j^P)^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{n}_i^P \\ \hat{n}_j^P \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.27)$$

이때 식 (3.24)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_{B2} \frac{1}{2} a \tilde{a} \hat{n}^2 ds \\ &= \frac{1}{2} \sum_{P=1}^{N_b-1} \{\hat{n}_i^P, \hat{n}_j^P\} [K_2^P] \begin{pmatrix} \hat{n}_i^P \\ \hat{n}_j^P \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.28)$$

여기서,  $N_b =$  경계를 따르는 마디들의 전체 개수

$$K_{2,i,j}^P = \alpha \tilde{a}_b P \int_{(point\ i)}^{(point\ j)} N_b^P N_i^P N_j^P ds \quad (3.29)$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{12} \alpha L^P (\tilde{a}_i^P + \tilde{a}_j^P) & i \neq j \\ \frac{1}{12} \alpha L^P (3\tilde{a}_i^P + \tilde{a}_j^P) & i = j \end{cases}$$

해안경계를 따르는 모든 부분들을 합치면 다음과 같다.

$$I_2 = \sum_{i=1}^{N_b-1} \frac{1}{2} \{ \hat{n}_i^P, \hat{n}_j^P \} [K_2] \begin{pmatrix} \hat{n}_i^P \\ \hat{n}_j^P \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \{ \hat{n}^B \}^T [K_2] \{ \hat{n}^B \} \quad (3.30)$$

$1 \times N_b \quad N_b \times N_b \quad N_b \times 1$

식 (3.5)의 세 번째 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{\Gamma} d \left[ \left( \frac{1}{2} \hat{n}_s + \hat{n}_l \right) \frac{\partial \hat{n}_s}{\partial n} - \hat{n}_l \frac{\partial (\hat{n}_s + \hat{n}_l)}{\partial n} \right] ds = I_3 - I_4 - I_5 + I_6$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \tilde{a} \hat{n}_s \frac{\partial \hat{n}_s}{\partial n} ds$$

$$I_4 = \int_{\Gamma} \tilde{a} \hat{n}_l \frac{\partial \hat{n}_s}{\partial n} ds \quad \dots \quad I_4$$

$$I_5 = \int_{\Gamma} \tilde{a} \hat{n}_l \frac{\partial \hat{n}_l}{\partial n} ds \quad \dots \quad I_5$$

$$I_6 = \int_{\Gamma} \tilde{a} \hat{n}_l \frac{\partial \hat{n}_s}{\partial n} ds \quad \dots \quad I_6$$

(3.31)

간략히 하기 위해, 개방경계  $\Gamma$ 는 반지름  $R$ 을 가지는 원으로 가정했다. 계산을 위해, 산란파의 시리즈와 입사파의 시리즈들은 유한개의 항으로 절단하였다. 원칙적으로, 어떠한 경우를 모델링 하기 위해서는 적당한 수의 항을 선정

하기 위해 많은 시행착오를 반복해야 한다. 여기서, 우리는 m번째 항 이하를 잘라버리는 것으로 가정하였다. 다음의 삼각함수의 직교성을 이용하여

$$\int_0^{2\pi} \sin n\theta \sin m\theta d\theta = \begin{cases} 0 & \text{일때 } n \neq m \\ \pi & \text{일때 } n = m \end{cases} \quad (3.32)$$

$$\int_0^{2\pi} \cos n\theta \cos m\theta d\theta = \begin{cases} 0 & \text{일때 } n \neq m \\ \pi & \text{일때 } n = m \neq 0 \\ 2\pi & \text{일때 } n = m = 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

식 (2.9)의  $\hat{n}_s$ 를 대체하기 위해, 식 (3.31)의 선적분  $I_3$ 를 다음과 같이 해석적으로 평가할 수 있다..

$$I_3 = \frac{\pi}{2} kR \tilde{a} \left[ 2\alpha_0^2 H_0 H_0' + \sum_{n=1}^m (\alpha_n^2 + \beta_n^2) H_n H_n' \right] \quad (3.34)$$

여기서,  $k, \tilde{a}$ 는  $\Gamma$ 를 따라 평균값을 취하며 Hankel 함수와 그 도함수는 다음과 같다.

$$H_n \equiv H_n^{(1)}(kR), \quad H_n' \equiv \left[ \frac{d}{d(kr)} H_n^{(1)}(kr) \right]_{r=R} \quad (3.35)$$

이후의 유도과정을 쉽게하기 위해, 미정계수  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 를 다음의 벡터형태로 정의한다.

$$\{\mu\}_{1 \times M}^T = \{\alpha_0, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \dots, \alpha_m, \beta_m\} \quad (3.36)$$

여기서,  $M=2m+1$ 일 때, 식 (3.34)는 다음과 같다.

$$I_3 = \frac{1}{2} \{\mu\}^T [K_3] \{\mu\} \quad (3.37)$$

여기서,  $[K_3] = M$ 의  $M$ 차원 사선 매트릭스

$$[K_3] = \pi k R \tilde{a} \text{diag}\{2H_0'H_0, H_1'H_1, H_1'H_1, \dots, H_m'H_m, H_m'H_m\} \quad (3.38)$$

식 (3.31)에서  $I_4$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_4 &= \int_{\Gamma} \tilde{a} \widehat{n} \frac{\partial \widehat{n}_s}{\partial n} ds \\ &\equiv \tilde{k} a \sum_{P=1}^{M_T} \int_{\text{segment } P} (N_i^P \widehat{n}_i^P + N_j^P \widehat{n}_j^P) \left[ \alpha_0 H_0' + \sum_{n=0}^m H_n' (\alpha_n \cos n\theta_P + \beta_n \sin n\theta_P) \right] ds \\ &= \frac{\tilde{k} a}{2} \sum_{P=1}^{M_T} L^P (\widehat{n}_i^P + \widehat{n}_j^P) \left[ \alpha_0 H_0' + \sum_{n=0}^m H_n' (\alpha_n \cos n\theta_P + \beta_n \sin n\theta_P) \right] \end{aligned} \quad (3.39)$$

여기서,  $L^P =$  세그먼트 P의 길이

$M_T =$  원형 경계  $\Gamma$ 를 따르는 세그먼트들의 개수

식 (3.39)에서,  $\frac{\partial \widehat{n}_s}{\partial n}$ 의 값은 세그먼트 P의 중심 값으로 보간 되었다. 식

(3.39)은 행렬형으로 다음과 같이 정의한다.

$$I_4 = \{\widehat{n}^\Gamma\}^T [K_4] \{u\} \quad (3.40)$$

여기서,  $\{\widehat{n}^\Gamma\}$  = 경계  $\Gamma$ 에 놓여진 교점에서  $\{\widehat{n}\}$ 의 부분집합

$[K_4]$  =  $N_\Gamma \times M$ 행렬에서 완전히 장소를 차지하고 있다.

$$\{\widehat{n}^\Gamma\}_{N_\Gamma}^T = \{\widehat{n}_1^\Gamma, \widehat{n}_2^\Gamma, \widehat{n}_3^\Gamma, \dots, \widehat{n}_{N_\Gamma}^\Gamma\} \quad (3.41)$$

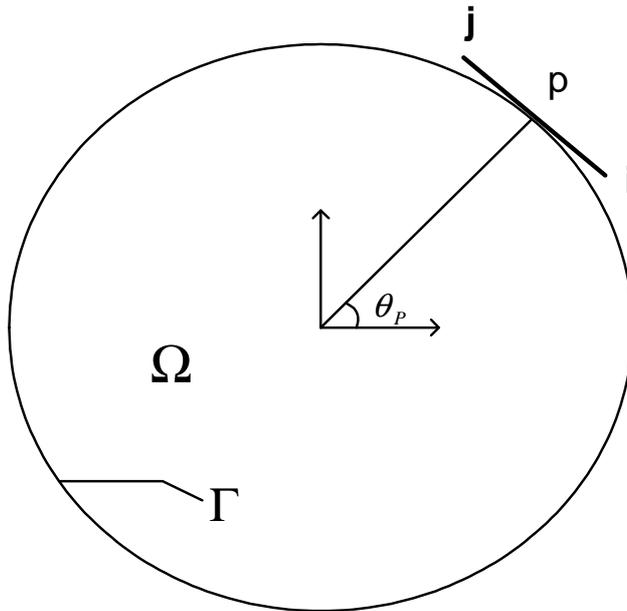


Fig. 3.3 Definition sketch for line integrals along the open boundary  $\Gamma$

$$[K_4] = \frac{\tilde{k}a}{2} \times \begin{bmatrix} 2H_0' L^1 \cdots H_n'(\cos n\theta_{M-1} + \cos n\theta_1)L^1 & H_n'(\sin n\theta_{M-1} + \sin n\theta_1)L^1 \cdots \\ 2H_0' L^2 \cdots H_n'(\cos n\theta_1 + \cos n\theta_2)L^2 & H_n'(\sin n\theta_1 + \sin n\theta_2)L^2 \cdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 2H_0' L^M \cdots H_n'(\cos n\theta_{M-1} + \cos n\theta_M)L^M & H_n'(\sin n\theta_{M-1} + \sin n\theta_M)L^M \cdots \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

여기서  $n=1,2,\dots,m$

식 (3.31)에서 다음의 적분은  $I_5$ 이다.  $I_4$ 에서의 방법으로,  $\partial \hat{n}_s / \partial n$ 의 중간 값을 취할 것이고, 경계  $\Gamma$ 에서 세그먼트는  $\hat{n}$ 의 선형변수로 취할 것이다. 식 (3.1)에 의해  $I_5$ 에서  $\hat{n}$ 를 대체하면,

$$\begin{aligned} I_5 &= \int_{\Gamma} \tilde{a} \hat{n} \frac{\partial \hat{n}_I}{\partial n} ds \\ &= \frac{i}{2} \tilde{k} a A \sum_{j=1}^M L^P (\hat{n}_i^P + \hat{n}_j^P) \cos(\Theta_P - \Theta_1) \exp[ikR \cos(\Theta_P - \Theta)] \\ &= \{Q_5\}^T \{\hat{n}^T\} \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\{Q_5\}^T = \frac{i}{2} \tilde{k} a A \{ (q_M + q_1)L^1, (q_1 + q_2)L^2, \dots, (q_{M-1} + q_M)L^M \} \quad (3.44)$$

$$q_P = \cos(\Theta_P - \Theta_1) \exp[ikR \cos(\Theta_P - \Theta)], \quad P=1, 2, \dots, M \quad (3.45)$$

식 (3.31)에서 적분  $I_6$ 는  $\hat{n}_s$ 와  $\hat{n}_I$ 를 포함한다.  $\hat{n}_I$ 의 Bessel-Fourier형이 사용되며, 해석적으로 적분을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
I_6 &= \int_{\Gamma} \tilde{\alpha} \widehat{n}_I \frac{\partial \widehat{n}_S}{\partial n} ds \\
&= \tilde{k} a A \int_{\Gamma} \sum_{n=0}^m \varepsilon_n i^n J_n(kr) \cos n(\Theta - \Theta_I) \sum_{n=0}^m H_n'(a_n \cos n\Theta + \beta_n \sin n\Theta) ds \\
&= \tilde{k} a A \int_0^{2\pi} \sum_{n=0}^m \varepsilon_n i^n J_n(kr) \cos n(\Theta - \Theta_I) \sum_{n=0}^m H_n'(a_n \cos n\Theta + \beta_n \sin n\Theta) R d\Theta \\
&= \{Q_6\}^T \{\mu\}
\end{aligned} \tag{3.46}$$

$$\begin{aligned}
\{Q_6\}^T &= 2\pi k R \tilde{\alpha} A \times \\
&\{J_0 H_0', iJ_1 H_1' \cos \Theta_I, iJ_1 H_1' \sin \Theta_I, \dots, i^m J_m H_m' \cos m\Theta_I, i^m J_m H_m' \sin m\Theta_I\}
\end{aligned} \tag{3.47}$$

한편, 항만과 같이 반폐쇄해역에서는 외부 파랑장을  $\widehat{n}_{ext} = \widehat{n}_I + \widehat{n}_R + \widehat{n}_S$ 로 하고,  $\widehat{n}_I$ 와  $\widehat{n}_R$ ,  $\widehat{n}_S$ 는 각각 입사파와, 반사파 그리고 산란파로 정의한다.

$$\begin{aligned}
\widehat{n}_0 &= \widehat{n}_I + \widehat{n}_R \\
&= A e^{ikr \cos(\Theta - \Theta_I)} + A e^{ikr \cos(\Theta + \Theta_I)} \\
&= 2A \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(kr) \cos n\Theta_I \cos n\Theta
\end{aligned} \tag{3.48}$$

Fig. 2.1에서, A는 입사파의 진폭이고,  $\Theta_I$ 는 외부 해안선을 따르는 입사 파향을 나타낸다. 외부영역에서의 산란파랑의 포텐셜은 외해 해안선 경계조건을 따르기 위해 다음과 같이 쓰여진다.(Xu, Panchang and Demirbilek1995)

$$\widehat{n}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) a_n \cos n\Theta \tag{3.49}$$

항만문제에 대응하는 함수는 식 (3.5)과 같은 형태를 가진다. 식 (3.5)에서  $\widehat{n}_j$ 는  $\widehat{n}_o$ 로 대체 되어야 한다, 식 (3.49)에 의해  $\widehat{n}_s$ 는 새로운 형식으로 바꾸고, 개방 경계  $\Gamma$ 는 Fig. 2.1에서 보여지는 대로 반원의 형태로 나타낸다.

항만 문제에서의 유한요소는 위에 설명된 개방해역 문제에서와 비슷한 방법으로  $\widehat{n}_j$ 와  $\widehat{n}_s$ 를 식 (3.48)과 식 (3.49)로 바꾸고 0에서  $\pi$ 까지  $I_4$ 에서  $I_6$ 까지 경계 적분을 수행함으로써 쉽게 구할 수 있다.

선형 삼각요소망에 의해서 식 (3.5)에서 정의된 범함수  $F$ 에서의 모든 적분을 고려하였다. 모든 적분들을 합치면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F &\equiv I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 + I_6 \\ &= \frac{1}{2} \{\widehat{n}\}^T [K_1] \{\widehat{n}\} - \frac{1}{2} \{\widehat{n}^B\}^T [K_2] \{\widehat{n}^B\} + \frac{1}{2} \{\mu\}^T [K_3] \{\mu\} \\ &\quad - \{\widehat{n}^\Gamma\}^T [K_4] \{\mu\} - \{Q_5\}^T \{\widehat{n}^\Gamma\} + \{Q_6\}^T \{\mu\} \end{aligned} \quad (3.50)$$

범함수  $F$ 는 일정하므로, 문제의 해는 다음과 같다.

$$-\frac{\partial F}{\partial \widehat{n}_i} = 0 \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \mu_j} = 0 \quad j=1, 2, 3, \dots, M \quad (3.52)$$

$$[K_1] \{\widehat{n}\} - [K_2] \{\widehat{n}^B\} - [K_4] \{\mu\} = \{Q_5\} \quad (3.53)$$

$$[K_3] \{\mu\} - [K_4]^T \{\widehat{n}^\Gamma\} = -\{Q_6\} \quad (3.54)$$

$$\{m\} = -[K_3]^{-1}\{Q_6\} + [K_3]^{-1}[K_4]^T\{\hat{n}^T\} \quad (3.55)$$

식 (3.55)에 의해 식 (3.53)의  $\{\mu\}$ 를 대입하면, 식 (3.53)는 다음과 같아진다.

$$[K_1]\{\hat{n}\} - [K_2]\{\hat{n}^B\} - [K_4][K_3]^{-1}[K_4]^T\{\hat{n}^T\} = \{Q_5\} - [K_4][K_3]^{-1}\{Q_6\} \quad (3.56)$$

$$[A]\{\hat{n}\} = \{f\} \quad (3.57)$$

식 (3.57)은 방정식의 선형행렬식이다, 이것은 개방해역에서의 환경사 방정식의 복합요소식이 된다. 경계조건에서, 해안 경계와 원형 개방경계는 식 (3.57)로 통합되며, 반복법(Iterative method)으로 연립방정식을 풀어 과량장을 구할 수 있다.

## 3.2 모델의 검증

수립한 수치 모델의 검증을 위하여 수리모형 실험 결과가 제시되어있는 경사 해변에서 타원형 사주(shoal) 및 장방형만에 대해 비선형성, 마찰효과 반사계수의 변화에 따른 반응 특성을 비교, 분석하였다.

### 3.2.1 경사 해변에서 타원형 사주에의 적용

확장완경사방정식을 이용한 수치모델의 해석결과를 Berkhoff(1982) 등이 제안한 타원형 사주영역에 대한 수리모형실험 결과와 비교·분석하였다.

Berkhoff(1982) 등은 해저지형이 복잡한 곳에서의 파랑의 변형을 분석한 포물선형 방정식 모형을 검증하기 위해 수리모형실험을 실시하였다. 수조의 저면은 Fig. 3.5에서 보는 바와 같이 타원형 사주가 경사 0.02인 평면상에 놓인 형태로 x방향과 20° 기울어져 있다. 등수심선은 사선으로 표시되어 있으며, 입사파가 도입되는 개방경계면에서의 수심은 모두 45cm로 일정하다. 주요 입력 자료 및 계산조건은 Table 4.1~2에 나타나 있다.

본 파랑변형 모형의 계산결과는 Fig. 3.5에 점선으로 표시된 단면 3, 5, 7로 표시된 3개의 단면에서 Berkhoff(1982) 등의 수리모형실험 결과와 비교하였다. Fig. 3.5에서의 단면 3, 5는 입사파가 사주에 의한 수심변화에 따라 회절과 굴절현상에 의해 파고변화가 발생하는 것을 y축 방향으로 관찰한 것이다. 또한 단면 7은 파고변화를 x축 방향에서 관찰한 것이다.

Fig. 3.6~8은 본 모형에 의한 수치실험 결과와 수리실험의 결과를 비교한 것으로 점선은 확장완경사방정식을 기초로 하고 선형분산조건으로 실험한 결과이다. 먼저 선형분산조건을 사용한 결과는 횡단면 3, 5에서 나타난 것과 같이 사주중심의 침두값에서 약간의 차이를 나타내었으며, 폭 방향으로는 각 단

면에서 수리실험 결과의 차이가 크게 나타났다.

즉, 사주 중앙부근에서는 에너지가 너무 집중되어 나타났고, 진행방향인 단면 7의 사주 뒤에서는 수리실험결과와 아주 다른 결과를 보여주고 있다. 이것은 타원형 사주 주변에서의 강한 비선형성으로 인한 결과로 판단되며, 선형 분산방정식의 적용한계를 나타냈다고 생각된다. 따라서 본 모형에서의 사주 주변에서의 파랑의 비선형성을 재현하기 위하여 식 (2.5)에서 보는바와 같이 Kirby와 Dalrymple(1986)이 제시한 천해 및 심해에서 비교적 잘 맞는 비선형 분산관계식을 적용하였다.

Fig. 3. 6~8에서 실선으로 나타난 결과가 확장완경사방정식 비선형 분산조건에서의 수치실험 결과이다.

여기서, 선형분산조건과 Kirby와 Dalrymple(1986)이 제시한 비선형 분산조건식을 적용한 결과와 비교해 볼 때 사주 부근에서 비선형 분산조건식을 적용한 결과가 수리모형 실험결과와 잘 일치하고 있는 것을 보여주고 있으며, 또한 단면 7의 사주 뒷부분에서도 파랑의 비선형성에 의한 파랑의 굴절과 회절이 잘 반영되어 수리모형 실험결과와 일치하는 것을 보여준다.

따라서, 본 연구에서 사용한 확장완경사방정식 파랑모형을 비선형조건으로 할 때 연구대상지에 적용시 적절한 결과가 도출 될 것으로 사료된다.

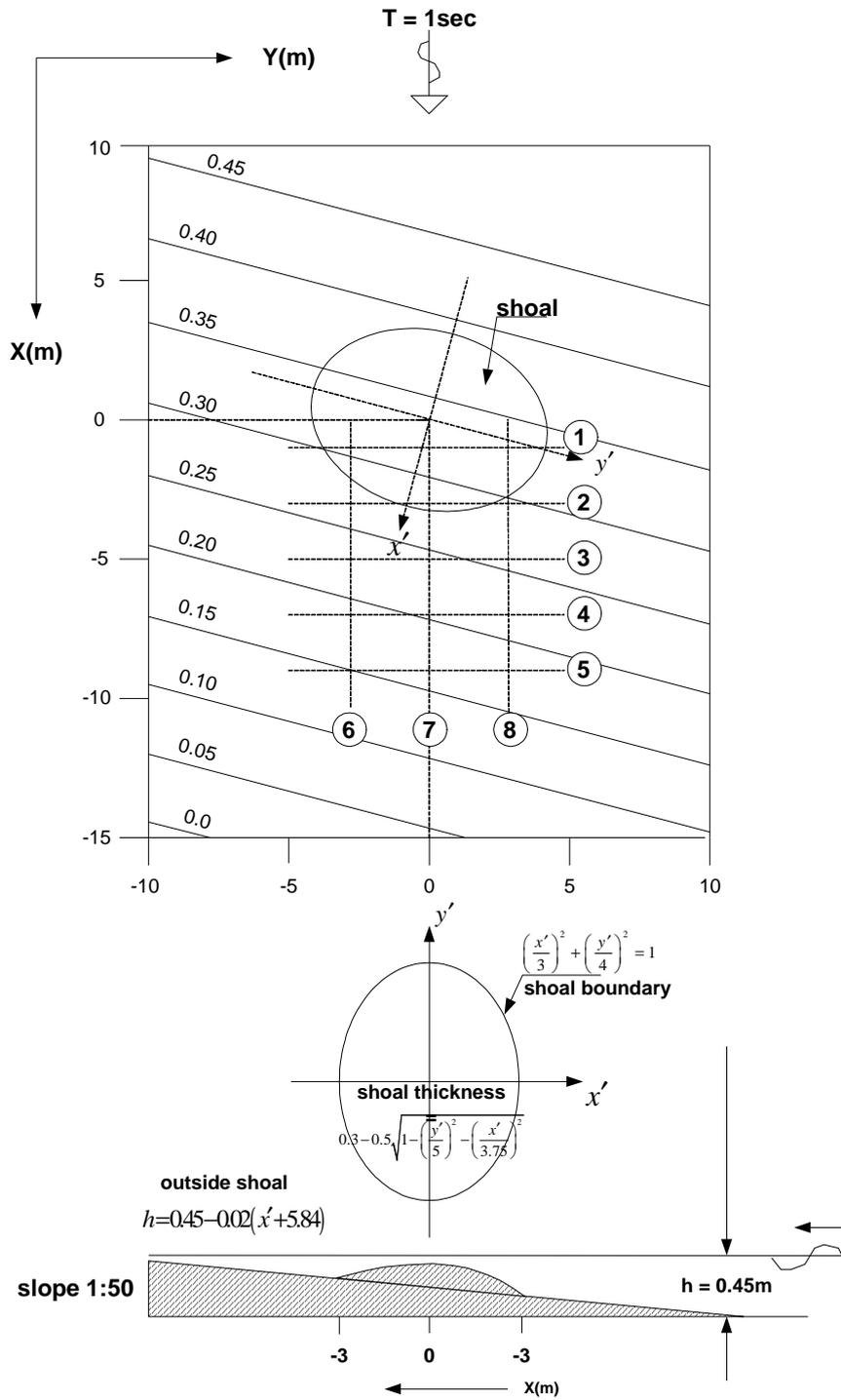


Fig 3.4 Modeled domain of Berkhoff et al.(1982)

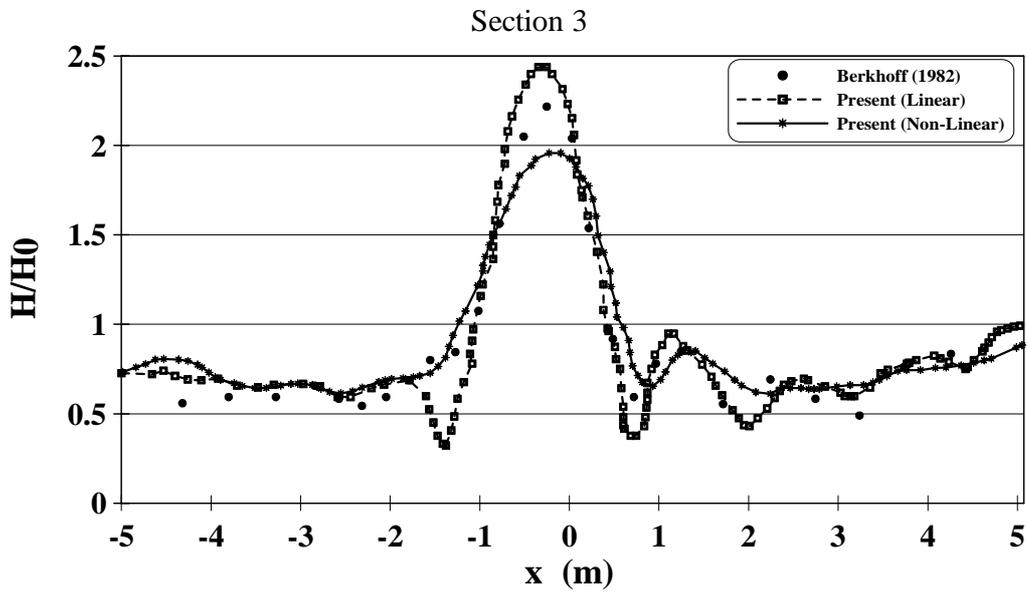


Fig. 3.5 Wave height comparisons from linear and non-linear wave runs on a domain resolution of 15 point per wavelength (Section 3)

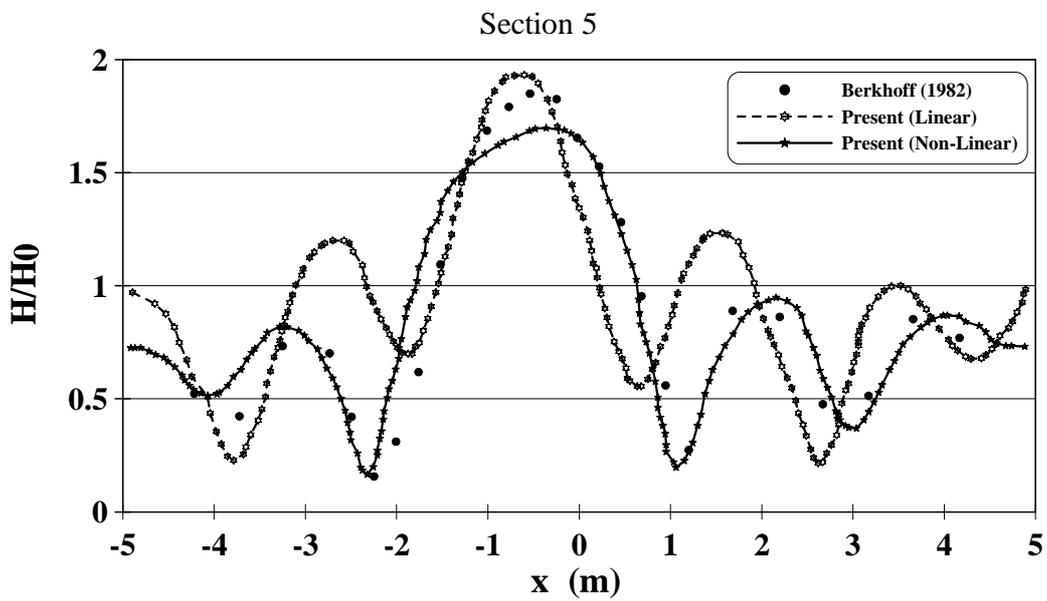


Fig. 3.6 Wave height comparisons from linear and non-linear wave runs

runs

on a domain resolution of 15 point per wavelength(Section 5)

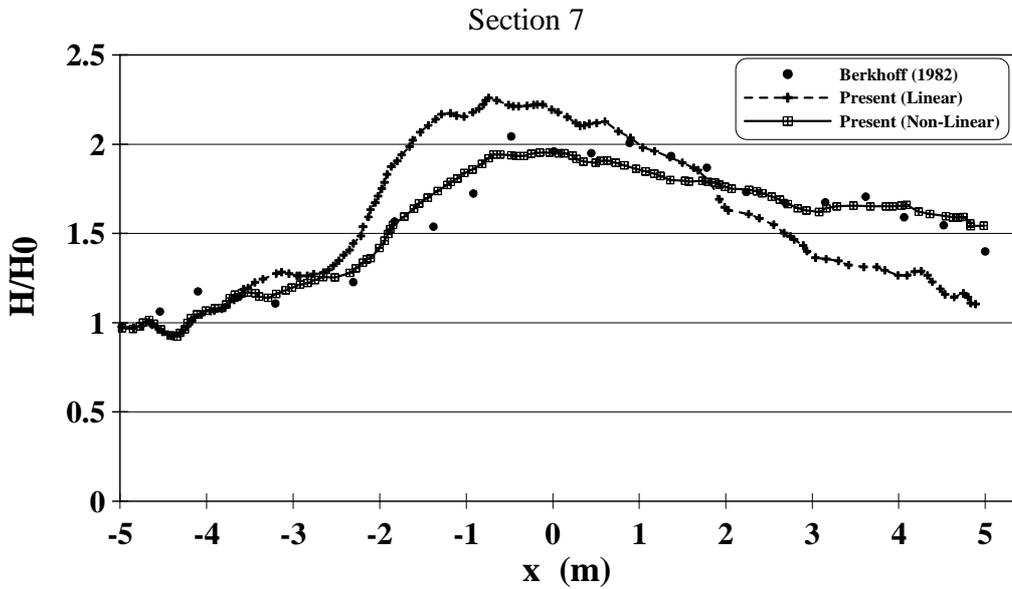


Fig. 3.7 Wave height comparinsons from 15 point per wavelength  
(Section 7)

### 3.2.2 장방형 항에서의 적용

장방형 항에서 공진에 대한 해저마찰효과, 파랑에너지의 분산효과를 비교 분석하기로 한다. 적용한 장방형 항만은 Fig. 3.9와 같이 수리모형에서 길이  $L=0.3111\text{m}$ , 폭  $B=0.0604\text{m}$ , 수심  $H=0.2572\text{m}$ 의 해역에 대하여 Ippen과 Goda(1963), Lee(1971)가 각각 수행한 해석해와 수리실험 결과를 이용하기로 한다. Ippen과 Goda(1963)는 선형과 이론으로부터 구한 해석해가 만의 공진주파수 부근에서 지나치게 큰 진폭치를 나타내었음을 Lee(1969)는 수리실험을 통해 밝혔으며, Chen(1986) 및 Lee(1989)는 해저마찰, 해안경계에서의

반사계수의 영향과 주파수에 따른 반응특성을 수치모델을 통해 분석하였다.

해안경계에서 해저마찰의 도입 없이 완전반사의 조건으로 적용한 선형파 모델 결과에서는 Fig. 3.10과 같이 Ippen과 Goda(1963)의 해석해와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 비교한 지점은 Fig. 3.9에서 표기한 항만 최 내측의 A 지점이다.

한편, Fig. 3.11은 해안에서 완전반사에 대해 반사계수를 변화시켰을 때의 결과를 나타내며, 반사계수가 감소됨에 따라 진폭이 점차 감쇠되는 것으로 나타났다. 특히, 반사계수의 변화는 공진의 침두치를 나타내는 주파수에는 아무런 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다.

Fig. 3.12는 수치모델에서 해저면 마찰의 효과를 나타낸 것으로 단순히 마찰계수를 증가시킴에 따라 점차 수리모형 실험치에 접근하였으며, 마찰계수가 증가시킬 때 공진의 침두주파수가 큰 쪽으로 약간씩 이동함을 보였다. 두 번째의 공진 침두치에 대해서 마찰로 인한 에너지 소산은 그리 두드러지지 않아서 단주기 파랑에서는 장주기 파랑보다 마찰효과가 그리 중요하지 않음을 알 수 있었다.

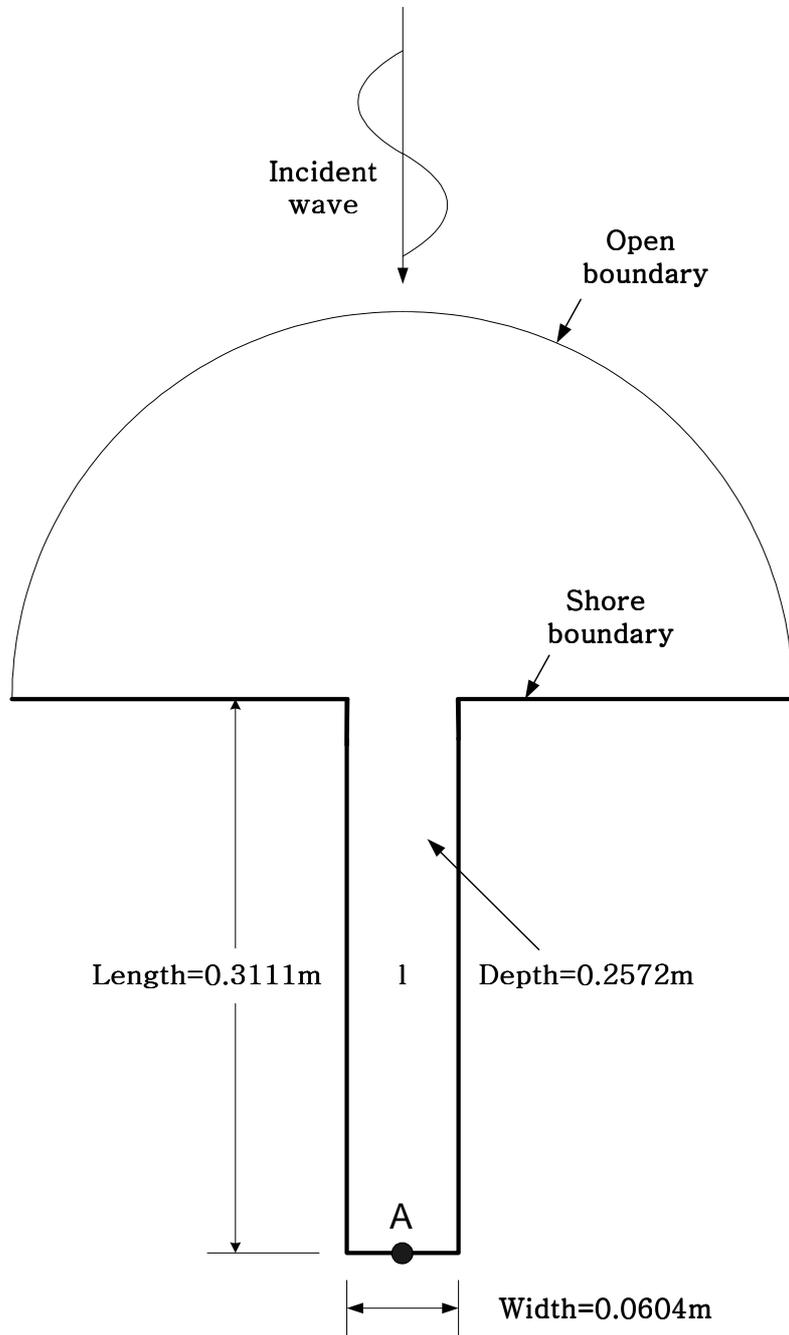


Fig. 3.8 Rectangular harbor with semi-circular open boundary

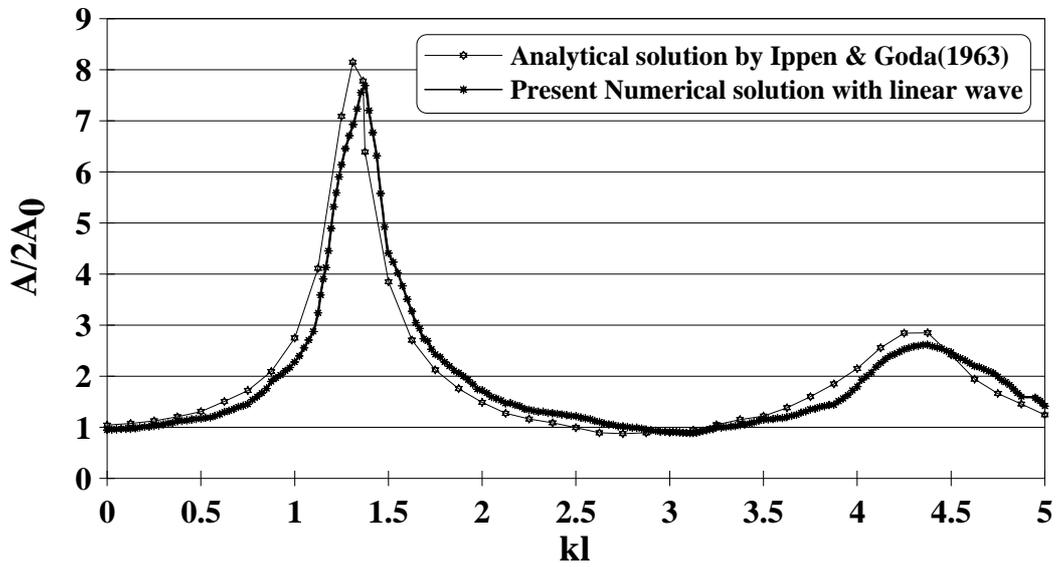


Fig. 3.9 Theoretical and numerical resonance curves  
for a fully reflecting rectangular harbor

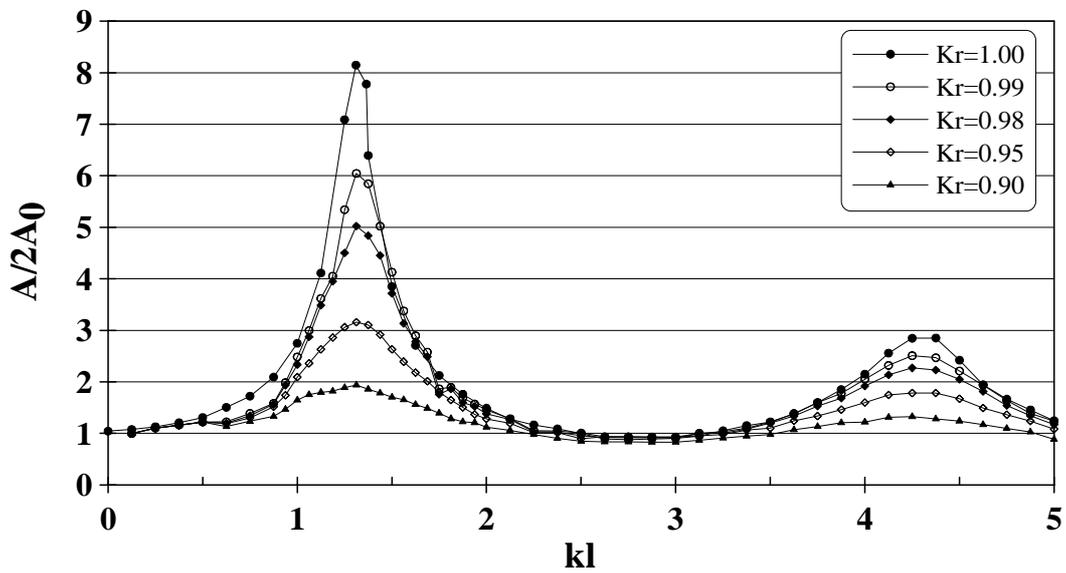


Fig. 3.10 Harbor response curves for various values  
of coastal reflection coefficient

Response Curves for rectangular Harbor

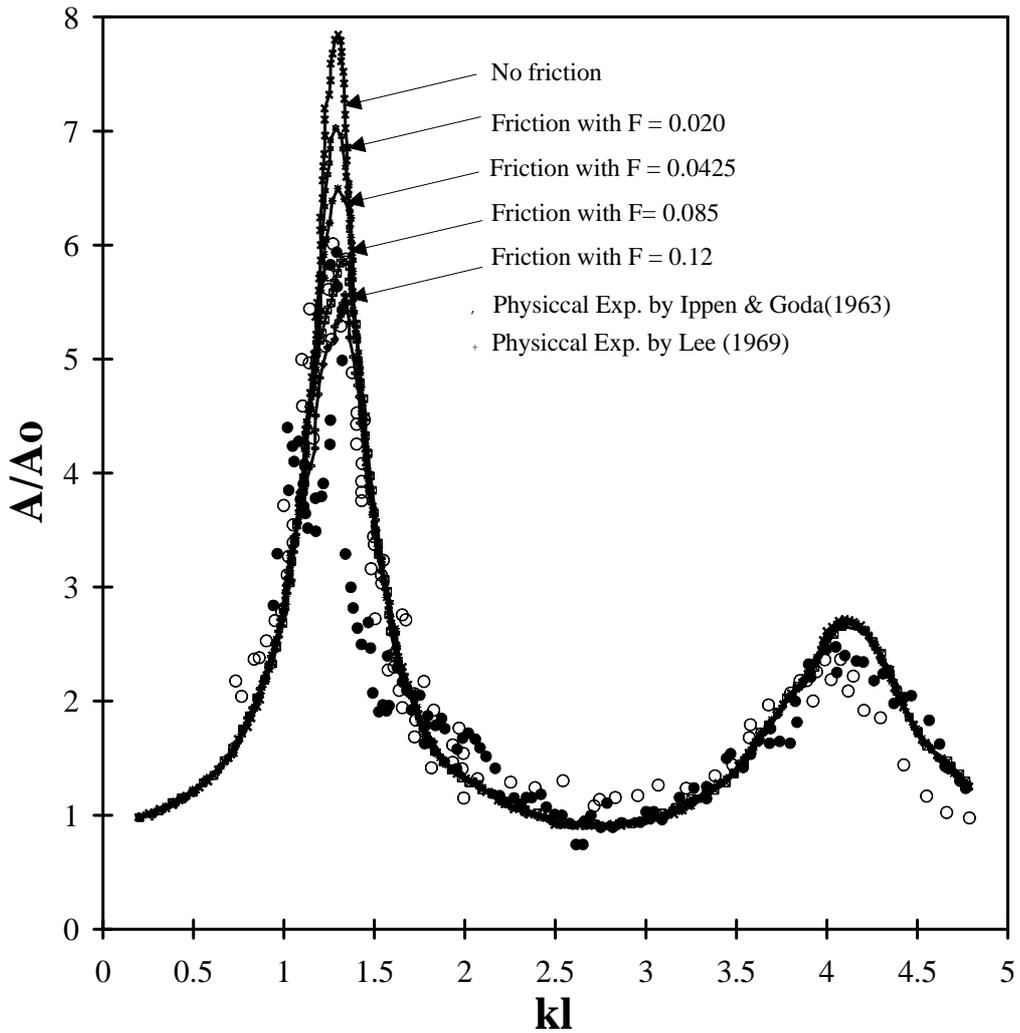


Fig. 3.11 Harbor response curves for various values of the friction factor

## 제 4 장 수치실험 및 분석

본 장에서는 확장 환경사방정식에 기초한 파랑모델을 영일만 신항이 건설중인 해역에 적용하여 신항 건설에 따른 항내 정온도의 변화를 알아보고자 한다. 정온도의 변화를 비교하기 위하여 영일만 신항 건설 전·후로 나누어 항내의 파고와 증폭비를 비교 분석하였다.

### 4.1 대상영역의 특성

본 연구의 대상영역인 영일만 연안은 경북 포항시 북구 흥해읍 죽천리 및 우목리 전면에 위치하고 있으며, 북으로는 경북권의 배후지로 남으로는 경주 및 울산과 접해있다. 영일만에 건설되어지고 있는 신항은 동북아 경제권 형성 및 대북방교역을 대비한 전략적 거점항만 개발과 경북지역 등 배후권 화물의 원활한 처리를 위하여 1992~2011년까지 2단계 계획으로 현재는 1단계(1992~2006년) 개발사업이 진행 중에 있다.

추진되고 있는 주요시설로는 정부시설로서 방파제 축조 8.8km, 안벽 1.68km(2만톤급, 8선석), 진입도로 6.12km 건설되어지고 있으며, 민간시설 부분에서는 컨테이너부두 1.0km(2만톤급, 4선석), 부지조성 197천평, 목재부두 등 4선석(3만톤급, 0.71km)등이 개발되었거나 진행중에 있다.

항만편람(港灣便覽) 및 항만설계기준서(港灣設計基準書)에 의하면 신항만 개발지역의 약최고고조면은 246cm이며, 평균해면은 123cm로 조사되었다.

항내 정온도에 큰 영향을 미치는 주 진입파랑은 NE 및 NNE계열의 파랑이며, 50년 빈도의 설계파고는 7.0m, 주기는 12sec로 조사되었다.

Fig 4.1은 영일만 신항만의 위치도이다.



Fig. 4.1 Location map for numerical simulation

## 4.2 모델의 구성 및 입력조건

### 4.2.1 모델의 구성

완경사 방정식 파랑모델의 대상영역은 포항구항, 포항신항, 그리고 영일만 신항을 모두 포함하고 있다. 모델은 유한요소망으로 삼각형 가변요소를 적용하였으며, 각 요소의 간격은 10~100m이다. 최대 수심은 1.0m에서 51.3m이다. 대상영역에 적용된 요소수는 Table 4.1과 같이 신항개발 전 115,718개, 신항개발 후 102,294개이다.

좌표축은 x축의 양의 방향을 진북에서 120도 방향으로 선택하였다.

Fig. 4.2~3은 영일만 신항 건설이전 대상영역의 수심도와 유한요소망을 나타낸 것이며, Fig. 4.4~5는 영일만 신항 건설이후 대상영역의 수심도와 유한요소망을 나타낸 것이다. Fig. 4.6~8은 대상영역에 포함되는 포항구항, 포항신항, 영일만 신항 건설후에 대한 확대된 유한요소망을 나타낸다.

Table 4.1 Numerical model characteristics

Case	Number of Elements	Number of Nodes	Calculation Time (P4 2.6Ghz 512M)
Present	115,718	59,692	86 Min
Yeongil port plan	102,294	52,792	57 Min

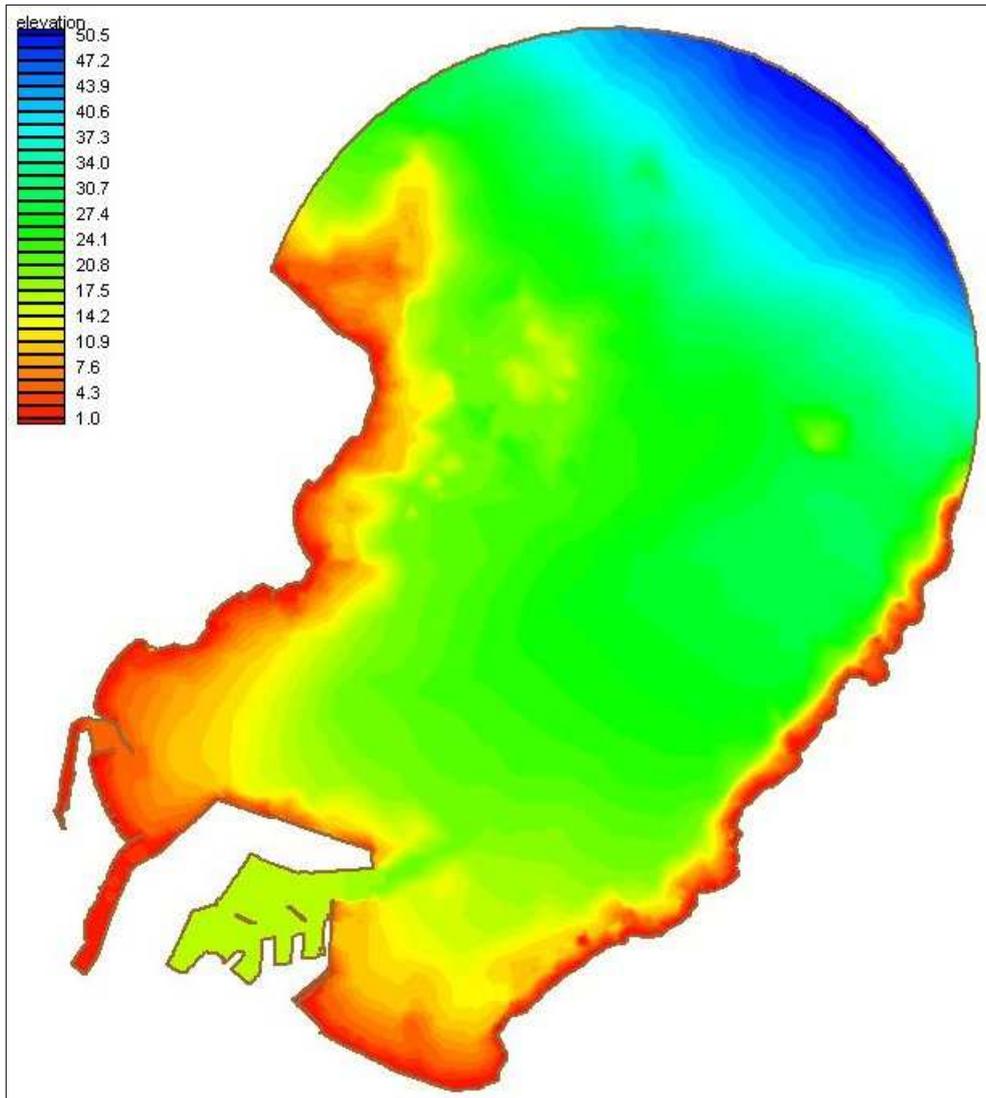


Fig. 4.2 Study area and depth for model simulation.  
before construction of New Port in Yeongil Bay



Fig. 4.3 Generated finite element mesh for study area.  
before construction of New Port in Yeongil Bay

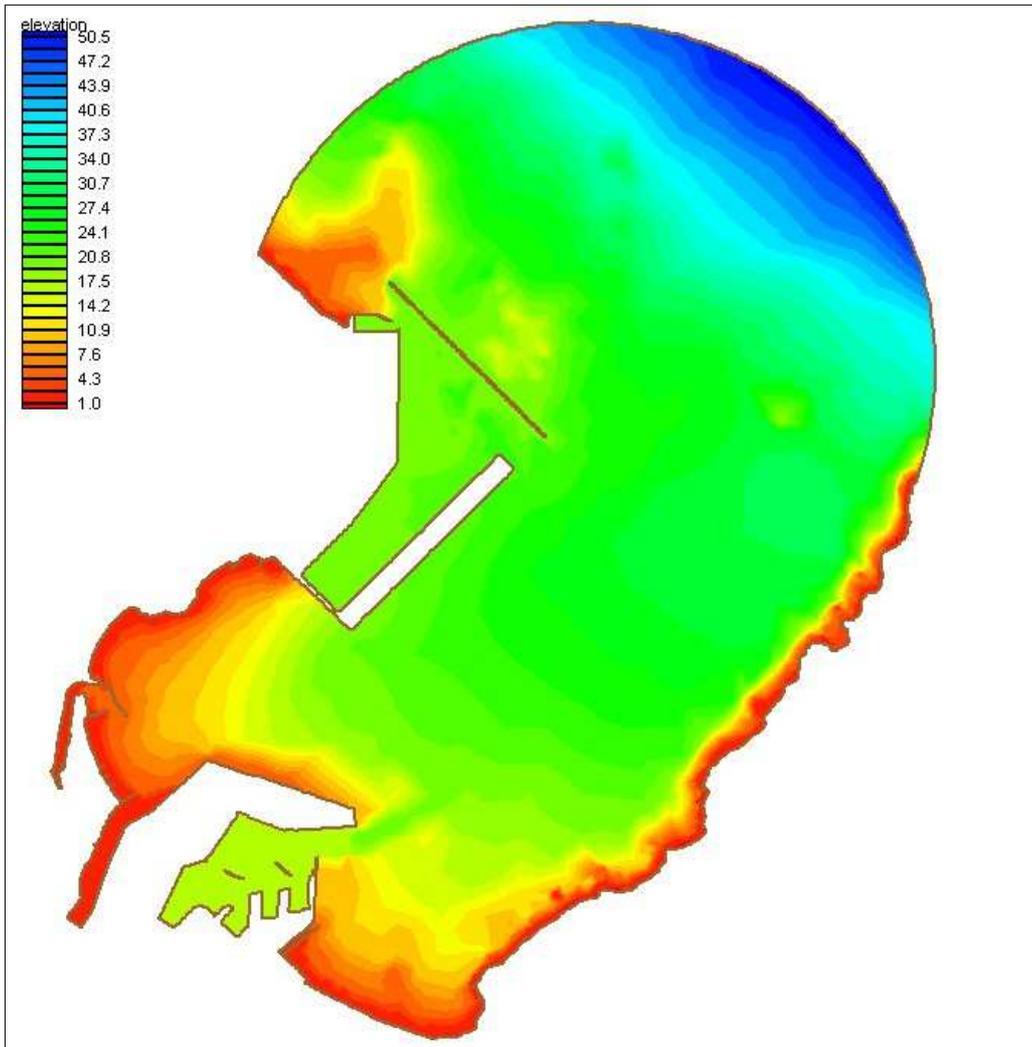


Fig. 4.4 Study area and depth for model simulation.  
after construction of New Port in Yeongil Bay

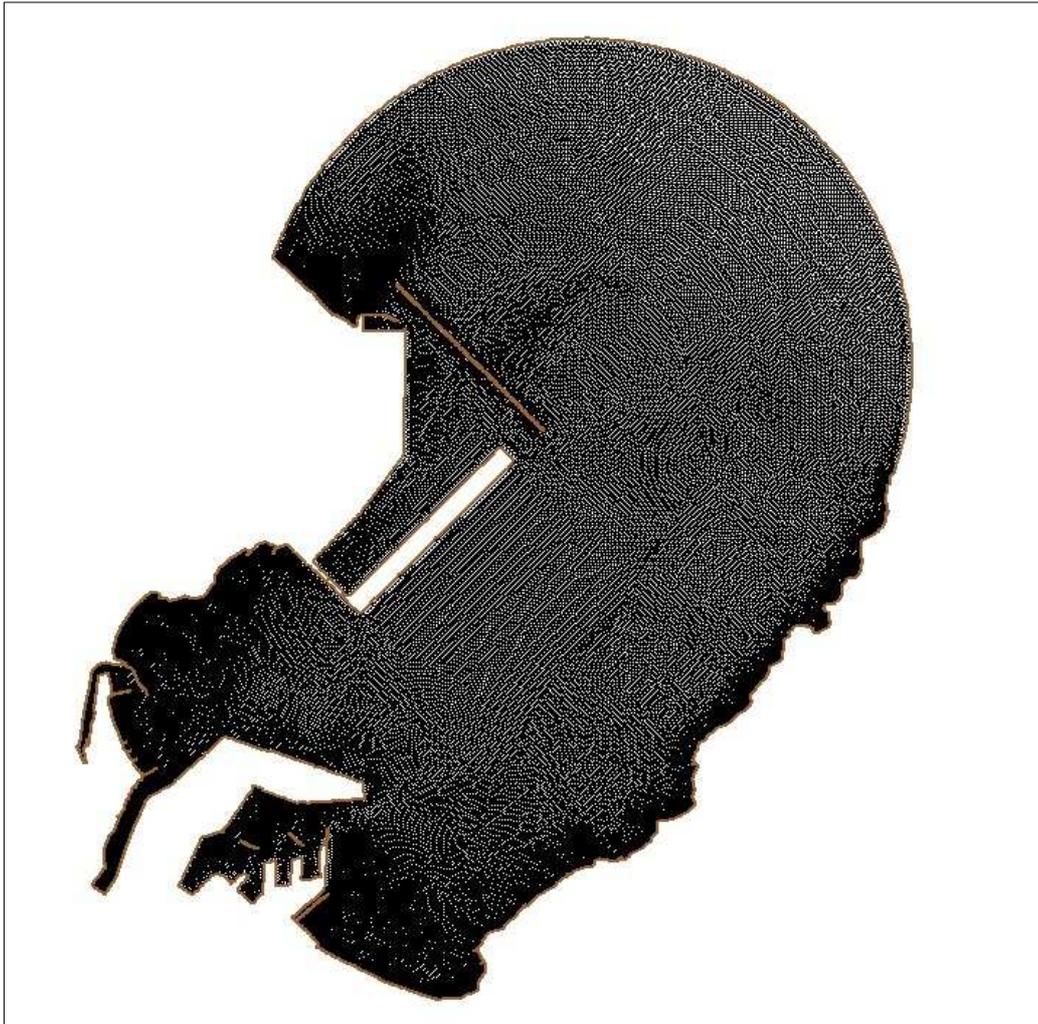


Fig. 4.5 Generated finite element mesh for study area.  
after construction of New Port in Yeongil Bay

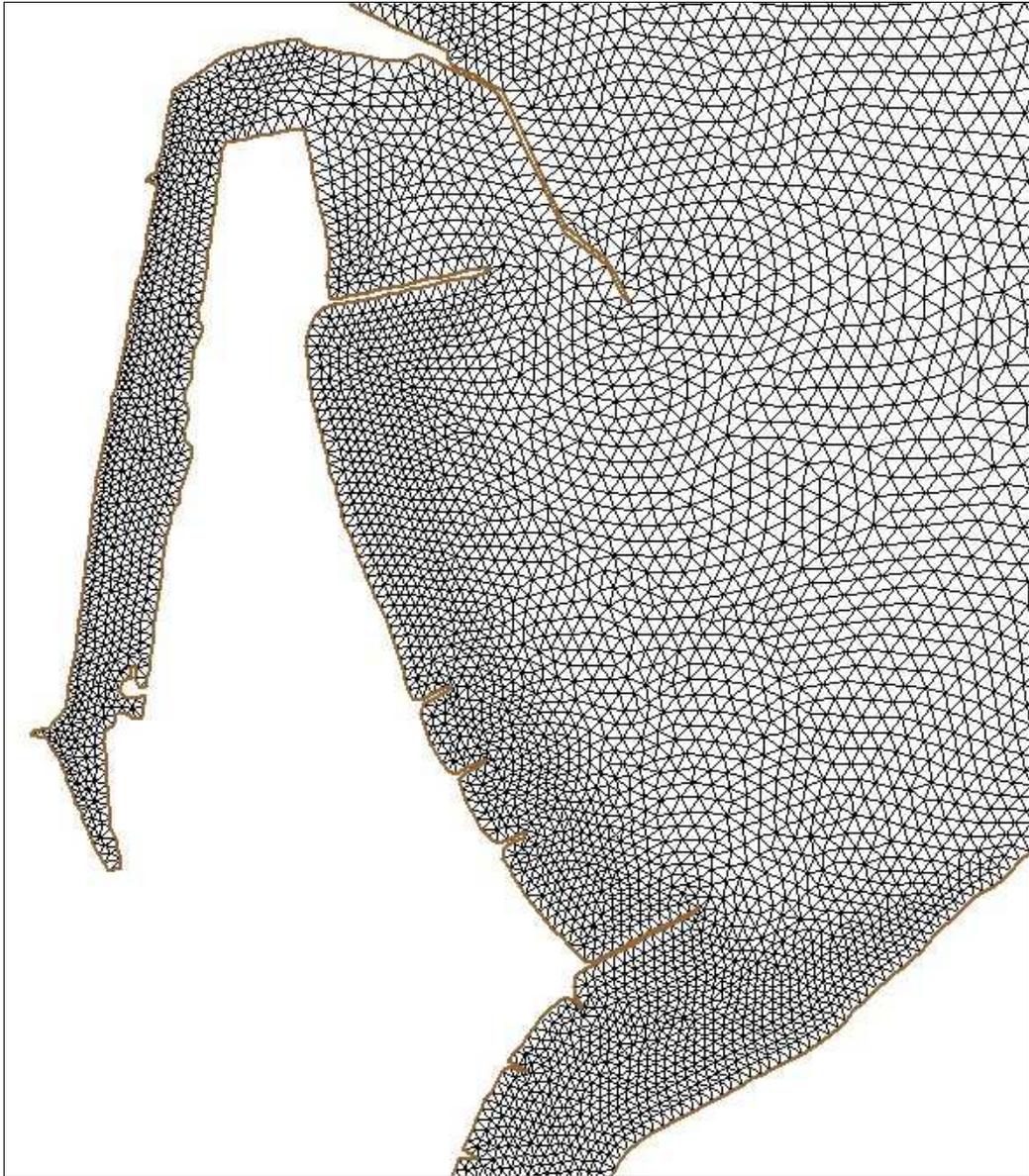


Fig. 4.6 Generated finite element mesh for study area.  
(Pohang Old Port)



Fig. 4.7 Generated finite element mesh for study area.  
(Pohang New Port)

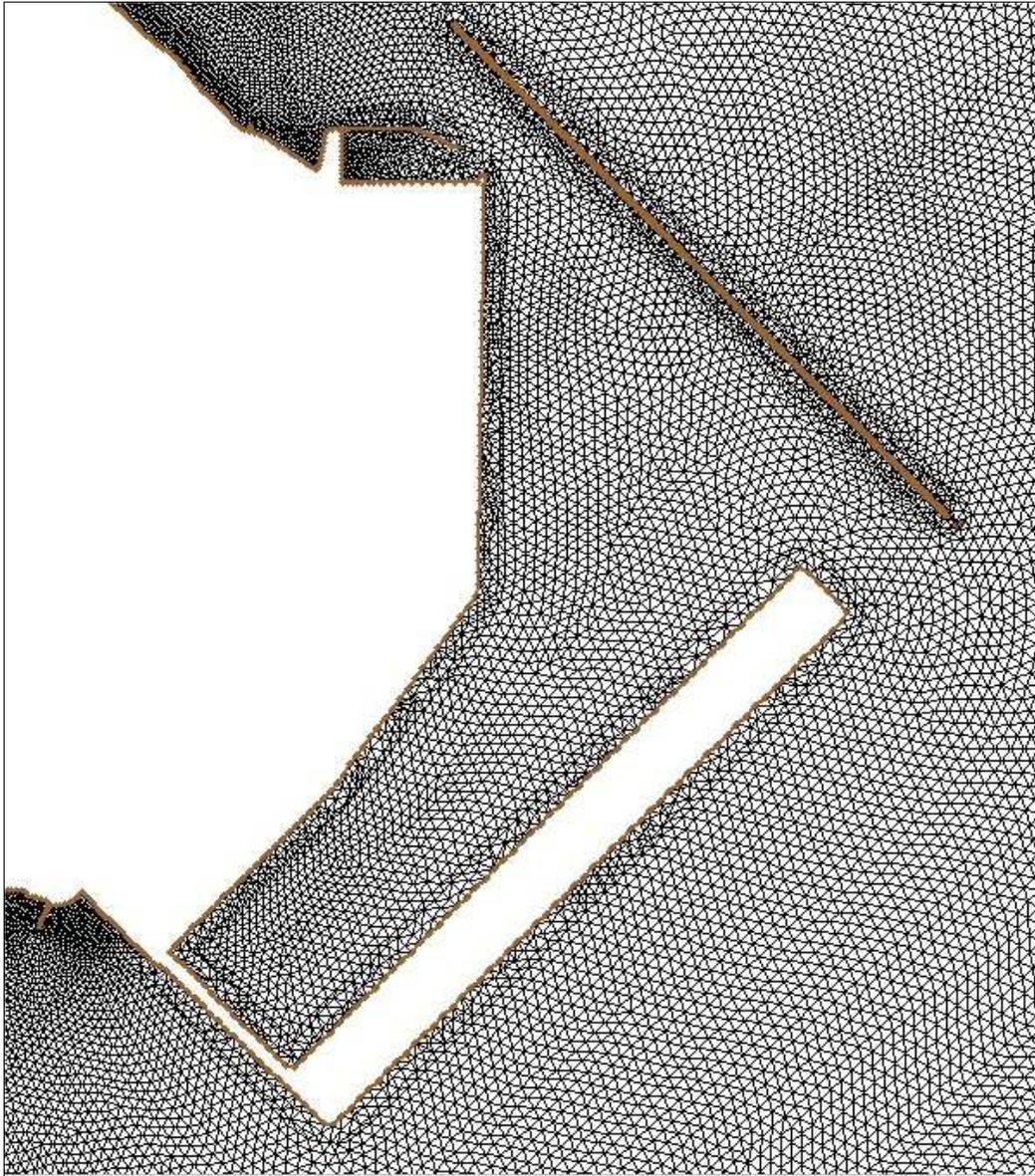


Fig. 4.8 Generated finite element mesh for study area.  
(Yeongil Bay New Port)

#### 4.2.2 입력 조건

모형실험의 수심자료는 이 해역에 대한 해양조사원 간행 수치해도(Chart No. 146)를 이용하여 입력하였다. 영일만 신항에서 항내의 수심을 계획 수심인 20m로 수정하였다. 파랑의 입력조건으로는 파향이 NE이고, 파고는 7m, 주기는 12sec이다. Table 4.3는 각 계산 case별 조건을 나타내며, 표에서 linear는 선형분산 조건, linear-break는 선형분산 및 쇄파의 조건, nonlinear는 비선형 분산 조건, nonlinear-break는 비선형 분산 및 쇄파의 조건을 의미한다.

Table 4.2 Incident wave condition for design wave.

Wave				
Direction	Height	Period	Return Period	Remark
NE	7.0m	12 sec	50 year	MOMAF, Typhoon SARAH(1984)

Table 4.3 Simulation conditions.

Port Project	Case	Wave Condition
Before Yeongil New Port	Case 1	linear
	Case 2	linear-breaking
	Case 3	nonlinear
	Case 4	nonlinear-breaking
After Yeongil New Port	Case 5	linear
	Case 6	linear-breaking
	Case 7	nonlinear
	Case 8	nonlinear-breaking

## 4.3 결과 및 분석

### 4.3.1 영일만 신항 건설전

영일만 신항 건설전의 영일만에 대한 Case 1~Case 4에 대한 파고 분포를 Fig. 4.9~4.10 와 Fig. 4.13~4.14에 각각 나타내었다.

#### 1) 선형분산과 조건 (Case 1)

외해에서 심해 설계파고를 적용한 결과 먼저 영일만 신항이 건설되기 전 선형 분산과의 조건만으로 수치 실험한 경우에는 NE 방향에서 입사하는 파랑이 굴절 및 천수효과가 반영되어 Fig. 4.11에서와 같이 포항구항의 항외에서는 파고가 1.49~3.08m인 반면, 항내로 들어오면서 파고가 급격히 줄어 0.11~0.25의 파고가 형성된다. 한편, 포항신항의 경우는 항외에서 1.37~4.41m의 파고가 형성되며 항내에서는 0.04~0.54m의 낮은 파고가 형성된다.

#### 2) 선형분산 및 쇄파조건 (Case 2)

Fig. 4.12은 선형분산 및 쇄파 조건으로 수치실험한 결과이다. 이 때 구항의 항외에서 파고는 0.84~2.73m의 파고가 형성되며, 항내에서는 전 조건의 결과보다 더 정온한 0.04~0.07m정도의 파고가 형성되었다. 신항에서는 항외에서 항외에서 1.76~2.72m의 파고가 형성되며 항내로 들면서 0.03~0.51m의 낮은 파고가 형성된다.

#### 3) 비선형분산과 조건 (Case 3)

Fig. 4.15은 비선형 분산을 조건으로 실험한 결과이며, 구항의 경우 항내에서는 0.08~0.13m의 파고가 발생하며, 항외에서는 0.96~2.78m의 파고가 발

생하였다. 신허에서는 항외 1.22~3.56m, 항내에서는 0.03~0.58m로 반응하여 선형분산과만 고려한 상황보다는 파고가 낮았다.

#### 4) 비선형분산 및 쇄파조건 (Case 4)

Fig. 4.16은 비선형 분산과 쇄파조건을 복합하여 수치실험한 결과이다. 구항의 항외는 0.70~1.91m의 파고가 형성되며, 항내에서는 0.04~0.07m 정도의 파고가 발생하는 것으로 나타났고, 포항 신허에서는 항외 1.08~2.44m의 파고가, 항내에서는 0.02~0.50m의 비교적 낮은 파고가 형성된다.

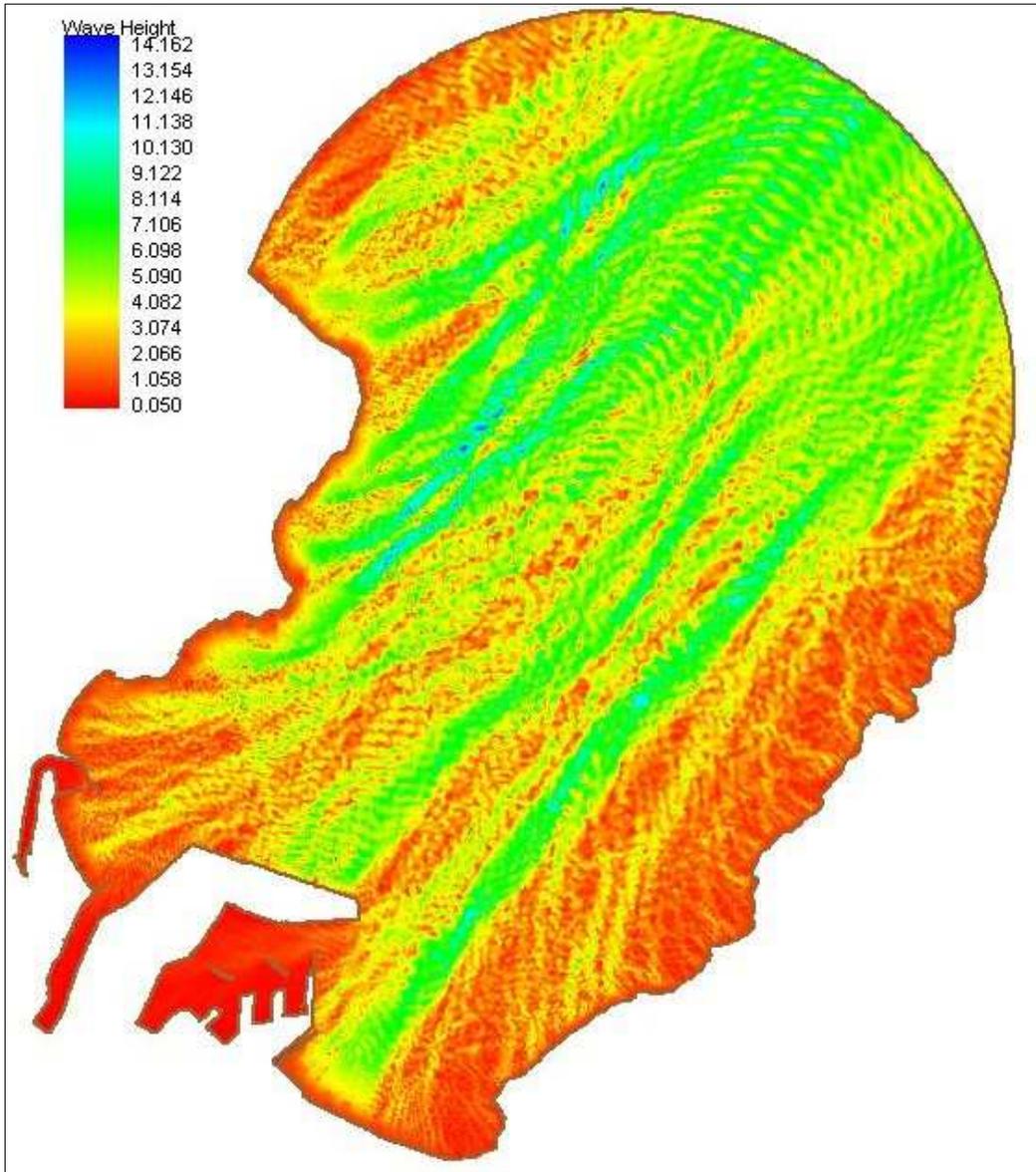


Fig. 4.9 Wave height with Linear dispersion condition  
before construction of New Port in Yeongil Bay

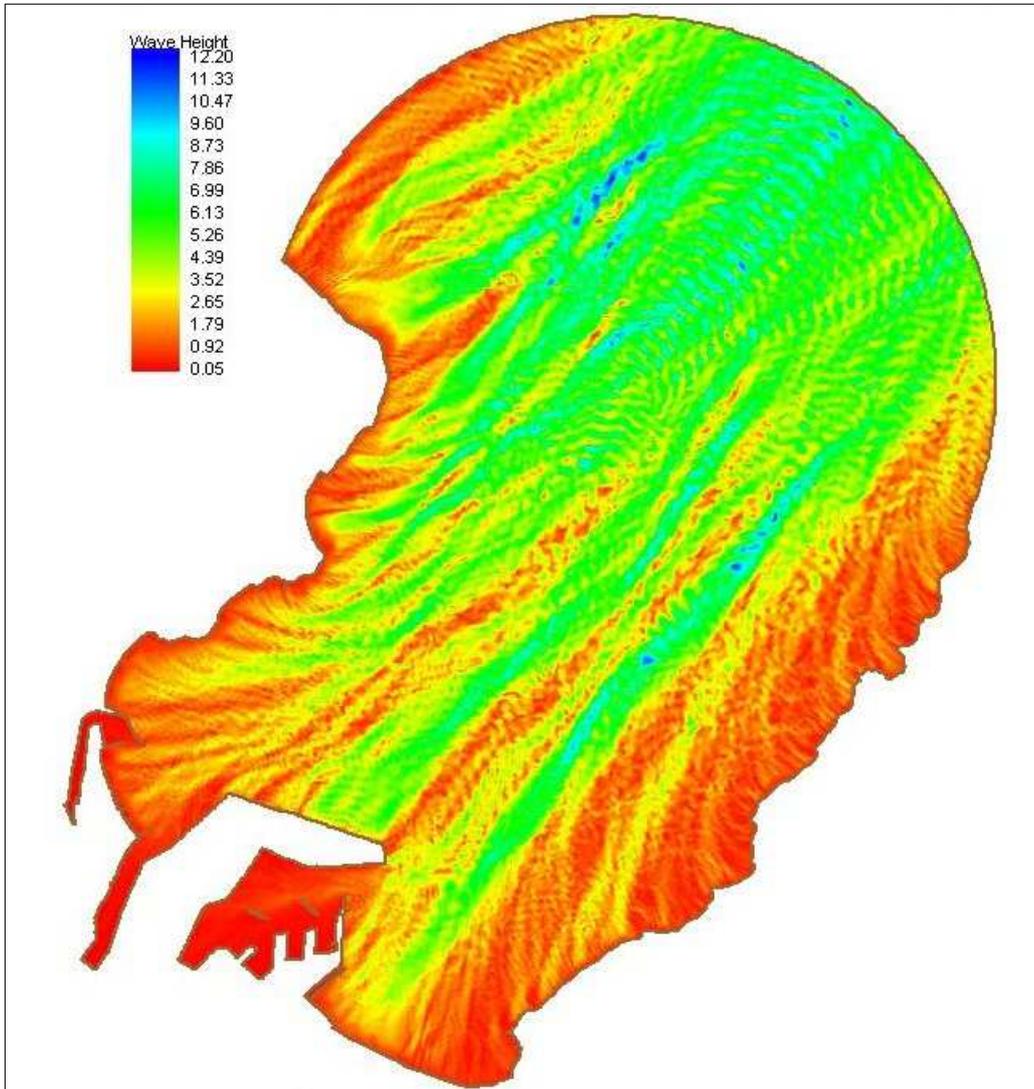


Fig. 4.10 Wave height with Breaking-Linear dispersion condition before construction of New Port in Yeongil Bay

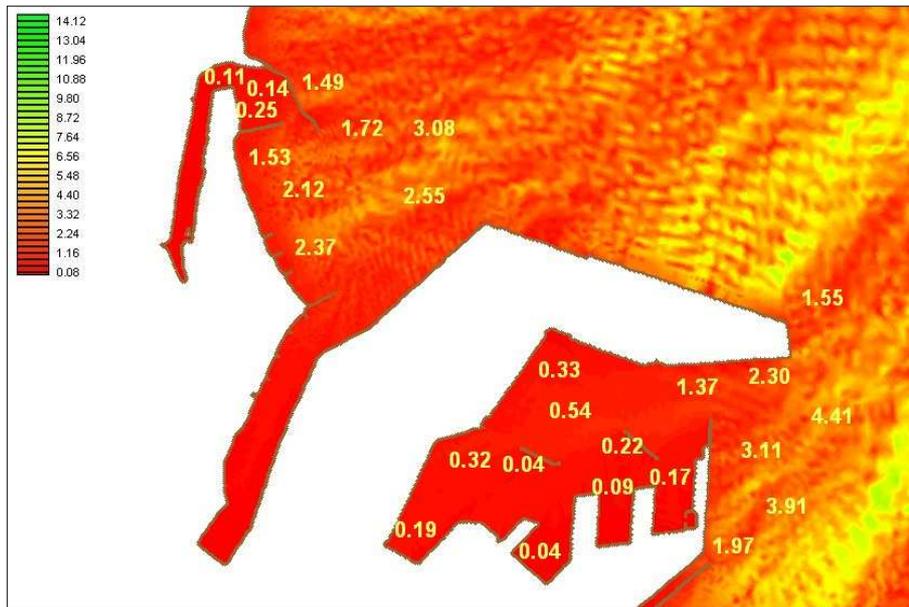


Fig. 4.11 Linear dispersion wave height  
(Pohang old and new port)

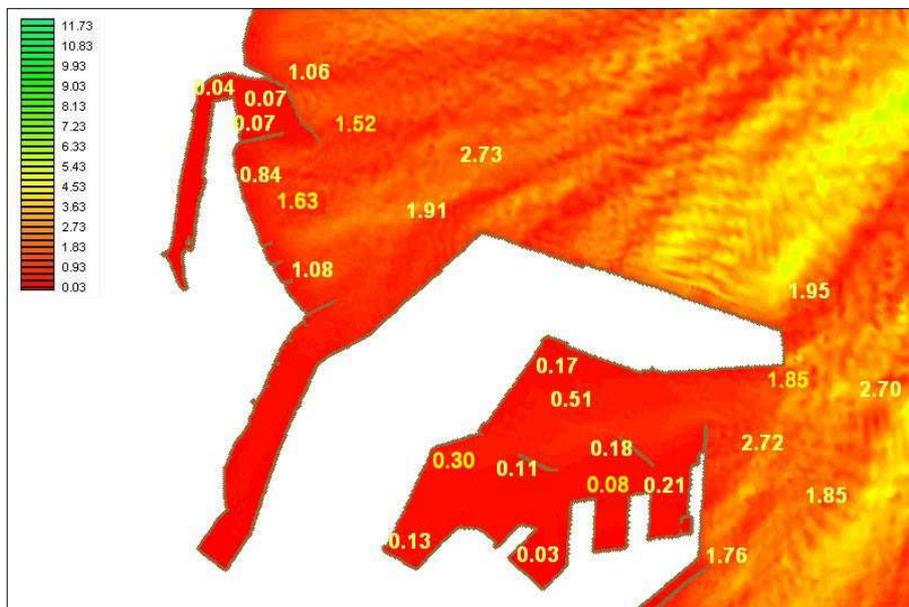


Fig. 4.12 Linear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang old and new port)

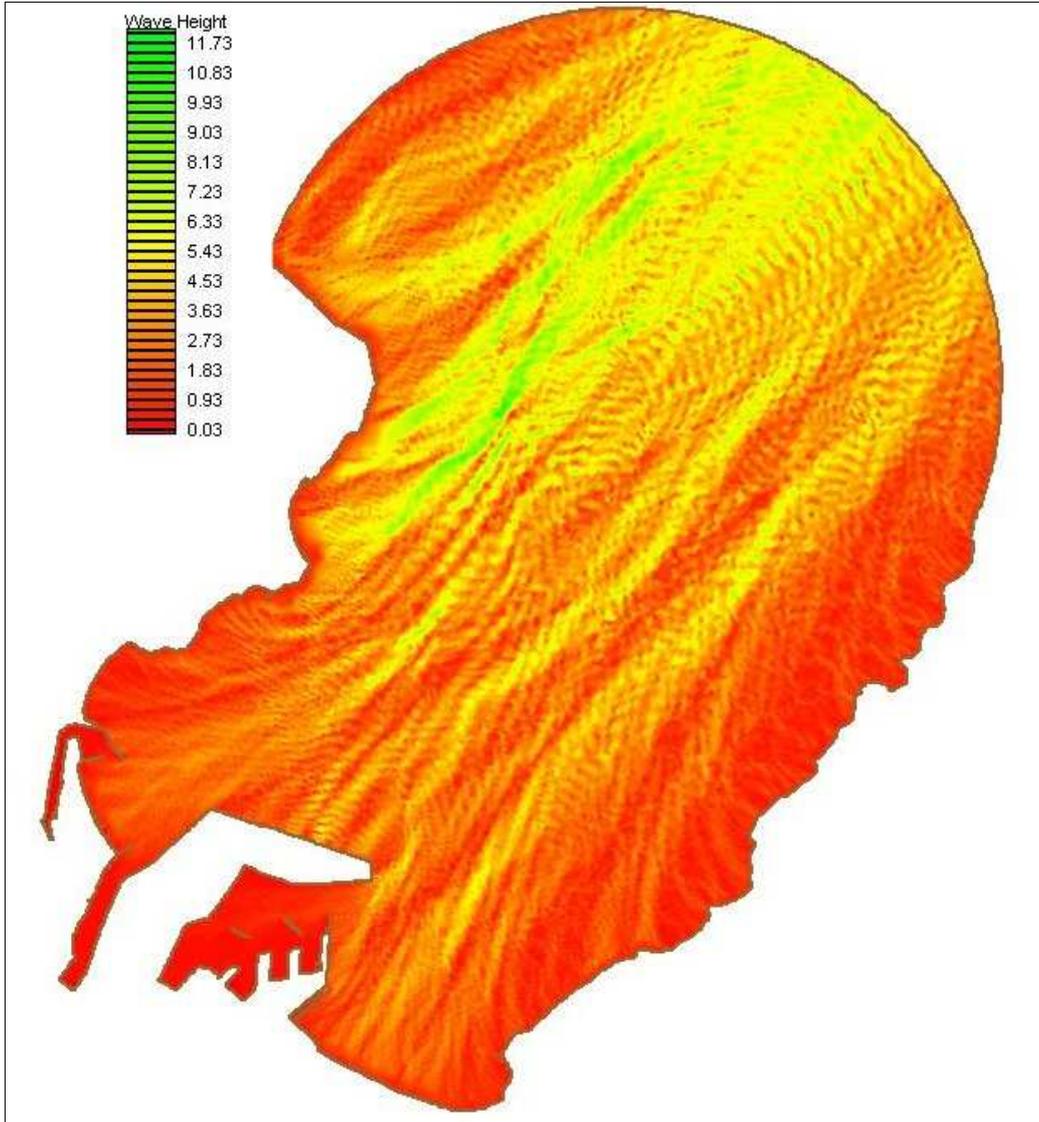


Fig. 4.13 Wave height with Nonlinear dispersion condition  
before construction of New Port in Yeongil Bay

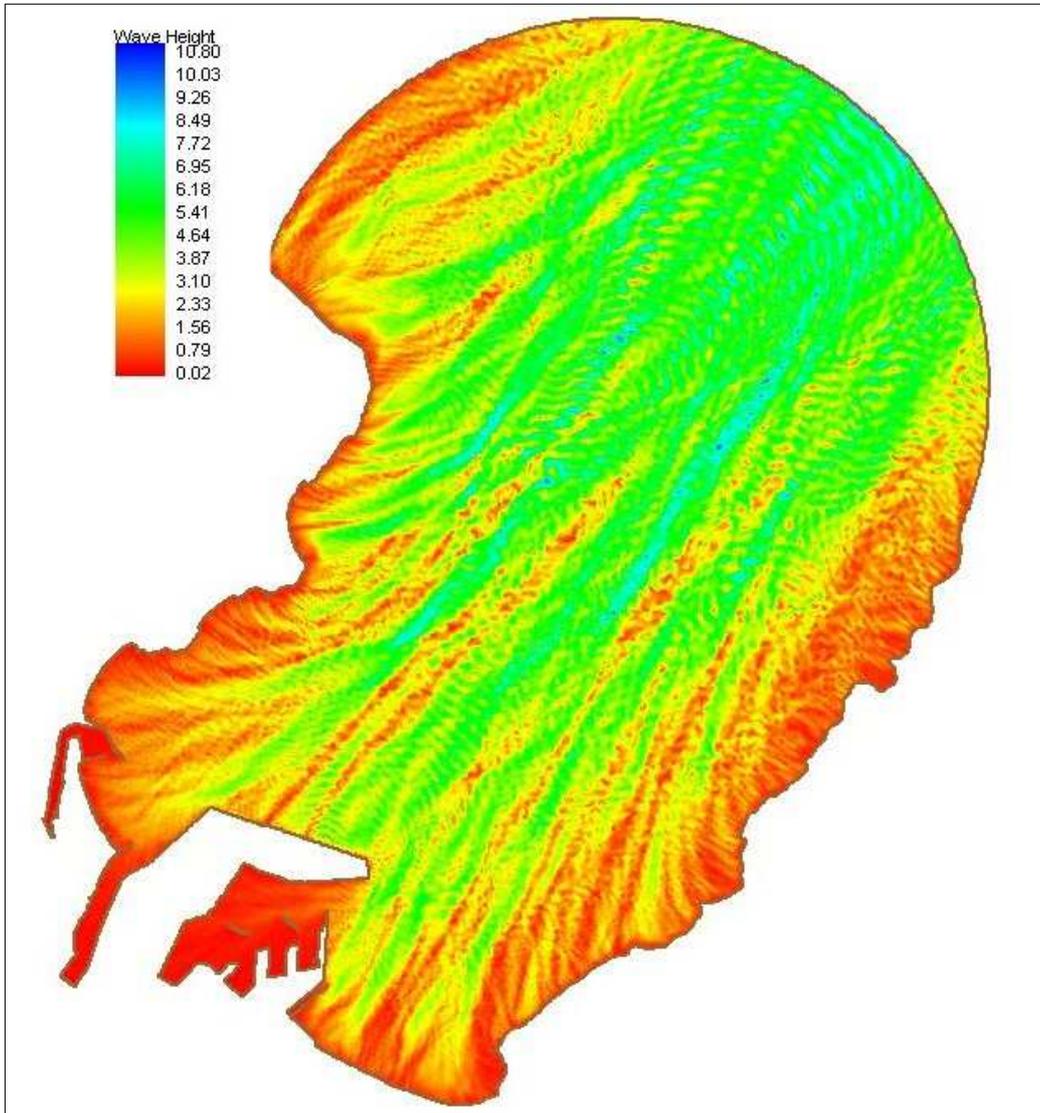


Fig. 4.14 Wave height with Breaking-Nonlinear dispersion condition before construction of New Port in Yeongil Bay

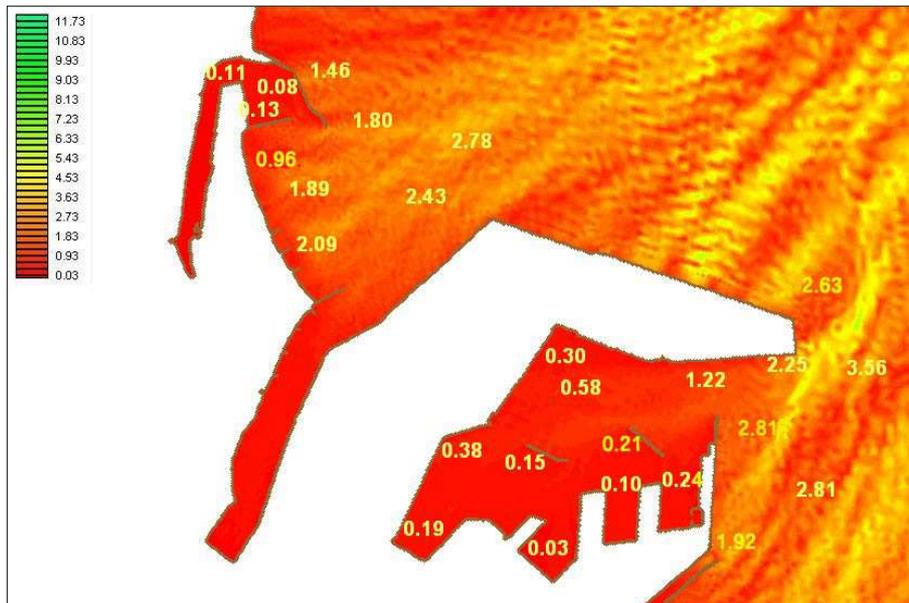


Fig. 4.15 Nonlinear dispersion wave height  
(Pohang old and new port)

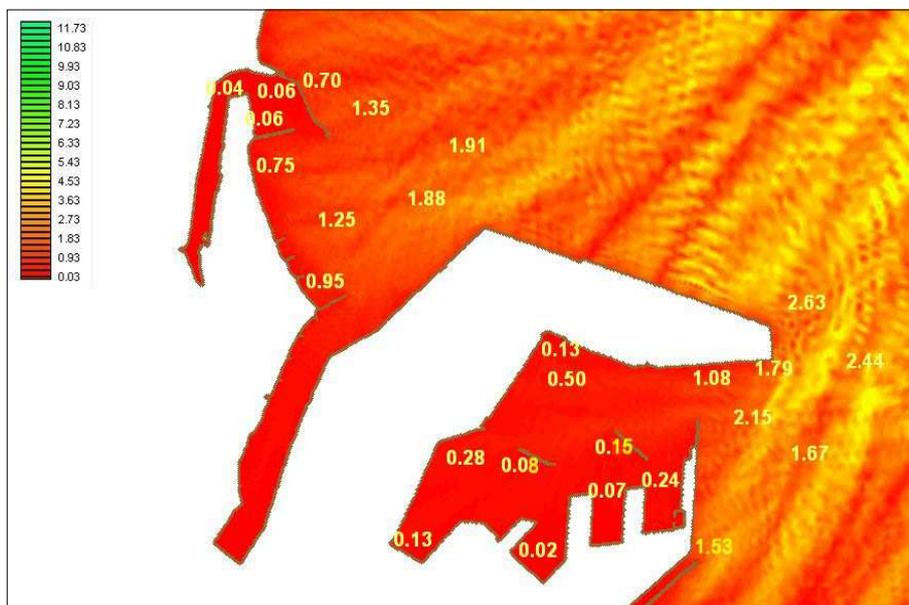


Fig. 4.16 Nonlinear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang old and new port)

### 4.3.2 영일만 신항 건설후

영일만 신항 건설후의 영일만에 대한 Case 5~Case 8에 대한 파고 분포를 Fig. 4.17~4.18과 Fig. 4.21~4.22에 각각 나타내었다.

#### 1) 선형분산과 조건 (Case 1)

외해에서 심해 설계파고를 적용한 결과 먼저 영일만 신항이 건설된 후 선형분산과의 조건만으로 수치 실험한 경우에는 NE 방향에서 입사하는 파랑이 굴절 및 천수효과가 반영되어 Fig. 4.19에서와 같이 포항구항의 항외에서는 파고가 1.40~2.60m인 반면, 항내로 들어오면서 파고가 급격히 줄어 0.007~0.67의 파고가 형성된다. 한편, 포항신항의 경우는 항외에서 1.52~4.25m의 파고가 형성되며, 항내에서는 0.04~0.55m의 낮은 파고가 형성된다.

한편, 영일만 신항에 대한 결과에서는 Fig. 4.25와 같이 나타났다. 영일만 신항의 방파제의 반사효과로 항외에서는 2.43~3.21m로 비교적 높은 파고가 발생했지만 항내에는 0.05~0.42m의 낮은 파고가 발생했다.

#### 2) 선형분산 및 쇄파조건 (Case 2)

Fig. 4.20은 선형분산 및 쇄파 조건으로 수치 실험한 결과이다. 이 때 구항의 항외에서 파고는 1.12~1.93m의 파고가 형성되며, 항내에서는 전 조건의 결과보다 더 정온한 0.008~0.15m정도의 파고가 형성되었다. 신항에서는 항외에서 1.51~4.53m의 파고가 형성되며, 항내로 들면서 0.03~0.48m의 낮은 파고가 형성된다.

영일만 신항에 있어서도 항외에서는 이전보다 다소 낮으나 1.7~2.7m의 비교적 높은 파고가 발생하였으며, 항내에서는 0.03~0.33m의 낮은 파고가 발생하여 항내의 정온도는 양호한 상태를 나타내었다.

### 3) 비선형분산과 조건 (Case 3)

Fig. 4.23은 비선형 분산을 조건으로 실험한 결과이며, 구항의 경우 항내에서는 0.008~0.34m의 파고가 발생하며, 항외에서는 1.34~2.51m의 파고가 발생하였다. 신항에서는 항외 1.43~4.36m, 항내에서는 0.03~0.3m로 반응하여 선형분산과만 고려한 상황보다는 파고가 낮았다.

Fig. 4.27은 영일만 신항에 대한 결과로서 항내에서 0.05~0.36m로 낮은 파고가 발생했으며, 항외에서는 2.17~2.64m의 비교적 높은 파고가 발생하였다.

### 4) 비선형분산 및 쇄파조건 (Case 4)

Fig. 4.24은 비선형 분산과 쇄파조건을 복합하여 수치실험한 결과이다. 구항의 항외는 1.21~2.07m의 파고가 형성되며, 항내에서는 0.006~0.18m정도의 파고가 발생하는 것으로 나타났고, 포항 신항에서는 항외 1.26~3.77m의 파고가, 항내에서는 0.02~0.46m의 비교적 낮은 파고가 형성된다.

또한, 영일만 신항에 있어서 항내의 파고는 0.02~0.26m로 가장 낮은 파고 분포를 나타내었고, 항외에서는 1.04~2.60m로 줄었지만 큰 변화를 가져온 것은 아니다.

이상으로 영일만 신항에서는 신항건설 전 대상부지에서의 파고는 3~8m로 매우 높았으나, 건설 후에는 항외에서의 파고가 2.52~3.67m로 다소 감소하였고, 방파제의 효과로 항내에서는 0.02~0.42m의 낮은 파고가 발생하므로 항내의 정온도는 양호한 상태이다.

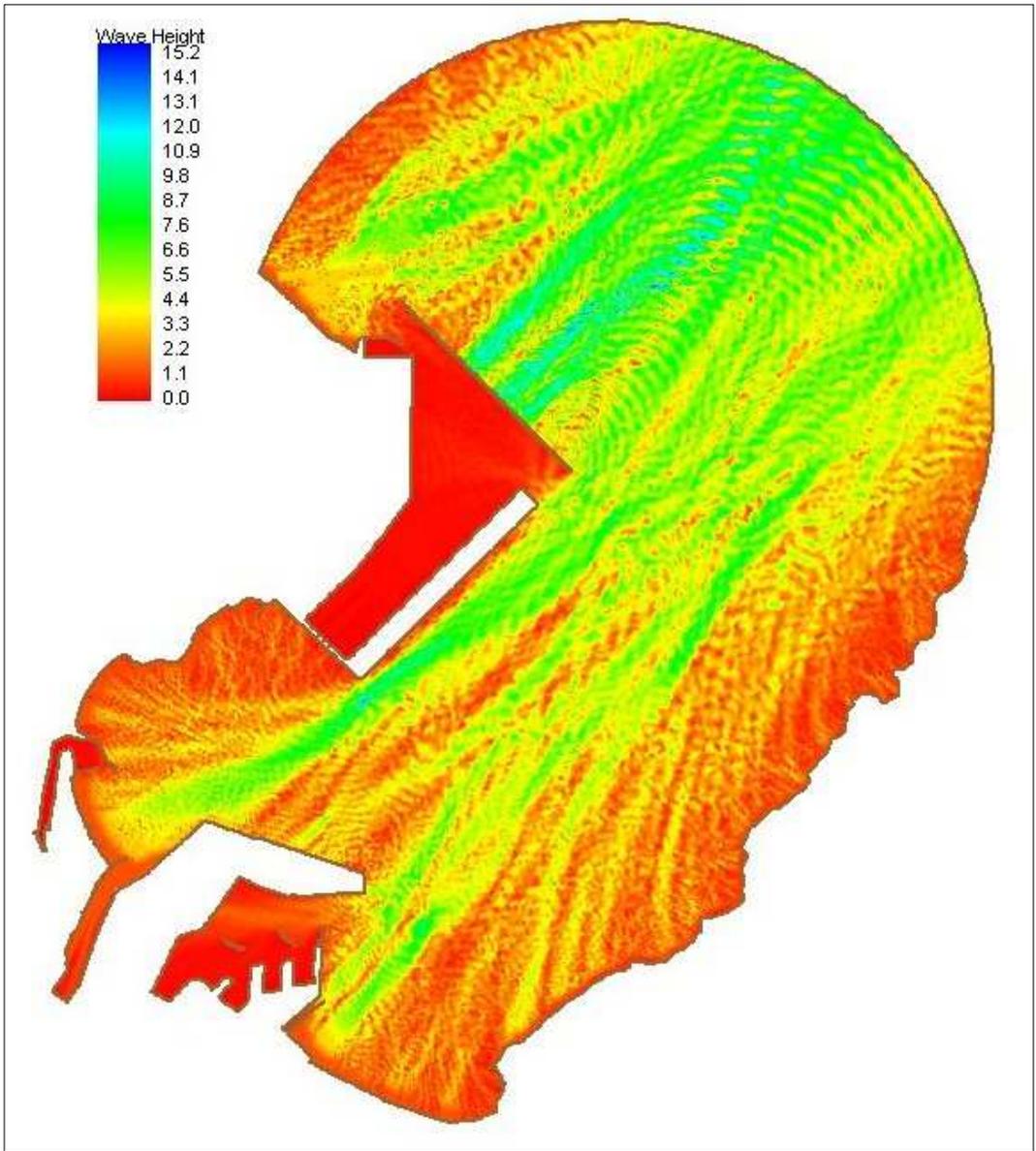


Fig. 4.17 Wave height with Linear dispersion condition after construction of New Port in Yeongil Bay

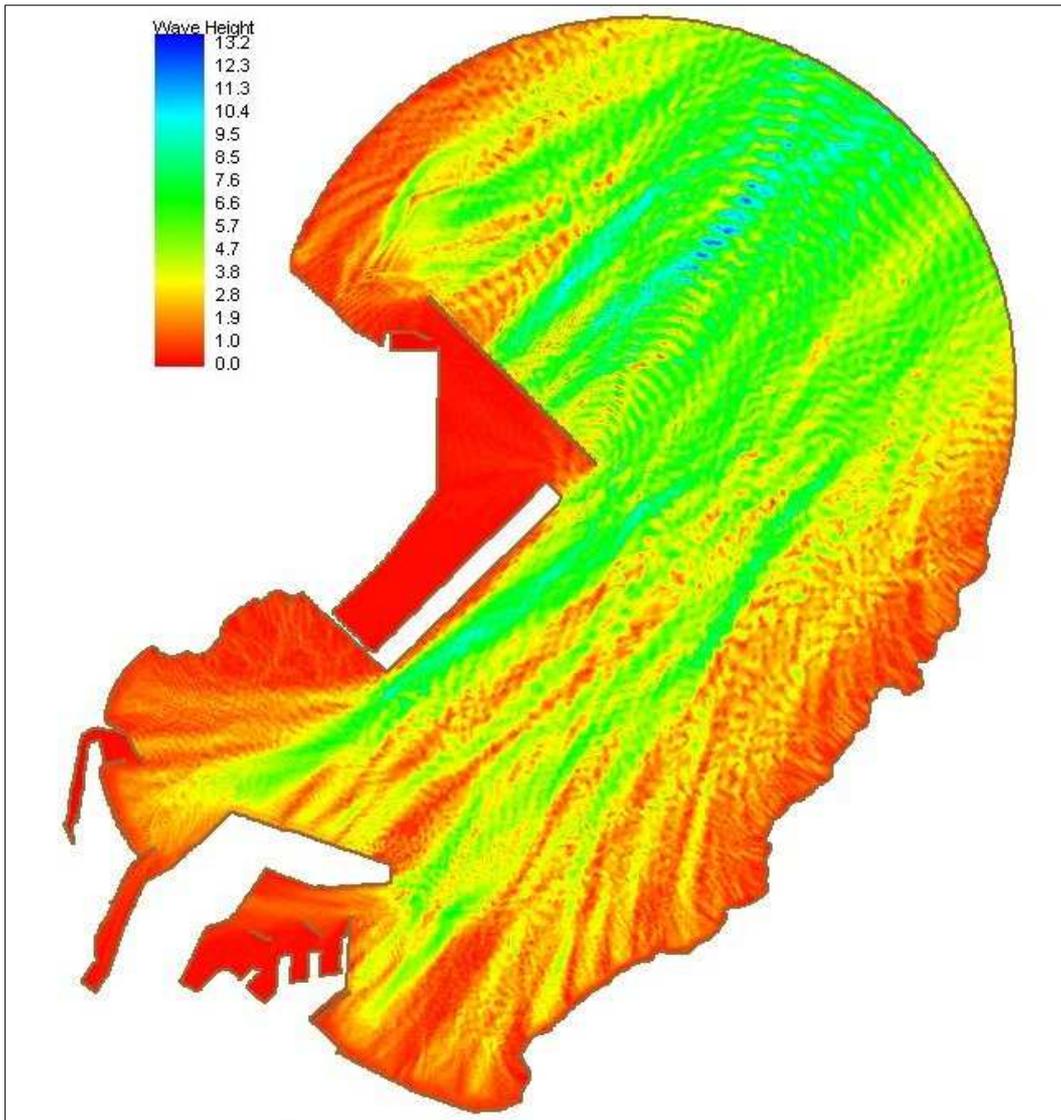


Fig. 4.18 Wave height with Breaking-Linear dispersion condition after construction of New Port in Yeongil Bay

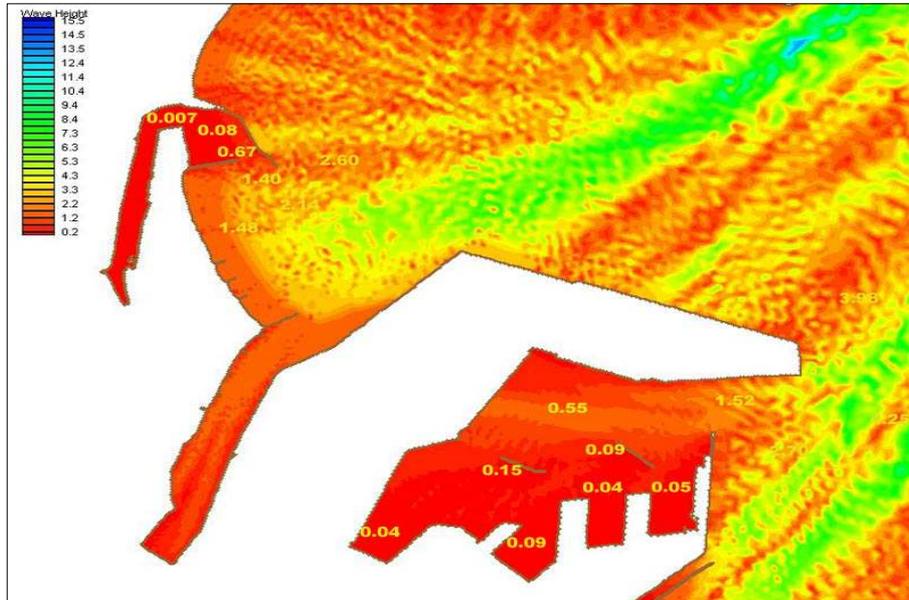


Fig. 4.19 Linear dispersion wave height  
(Pohang old and new port)

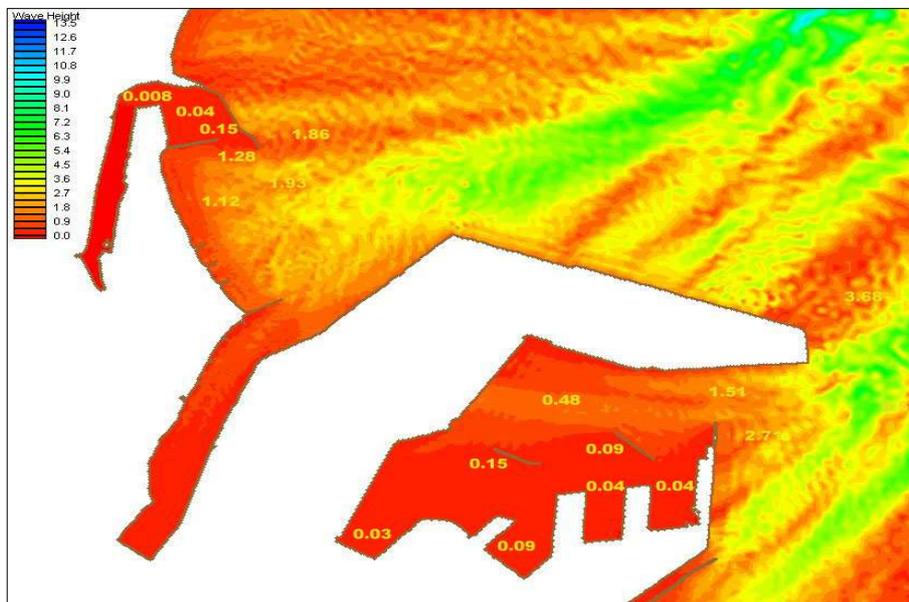


Fig. 4.20 Linear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang old and new port)

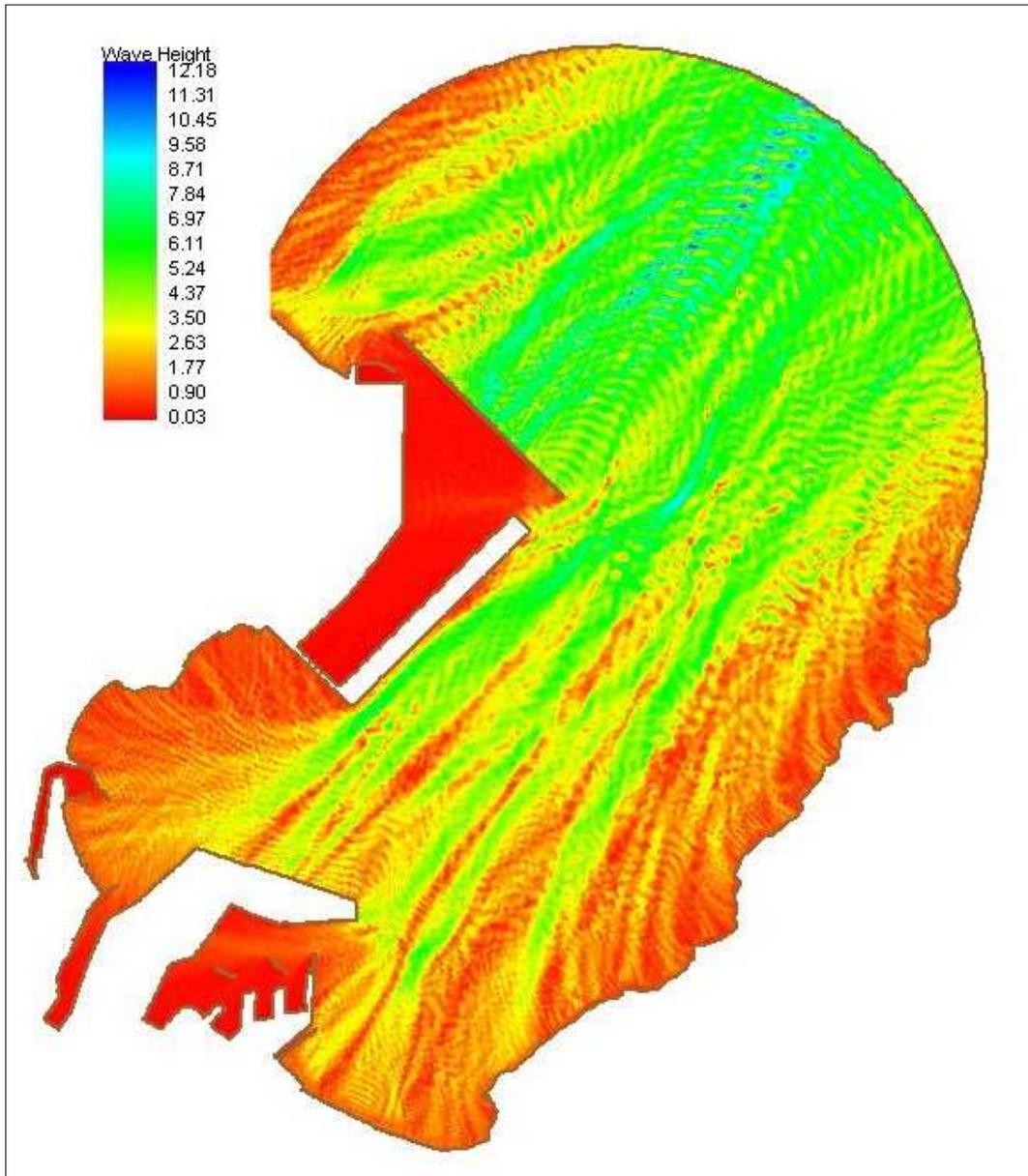


Fig. 4.21 Wave height with Nonlinear dispersion condition  
after construction of New Port in Yeongil Bay

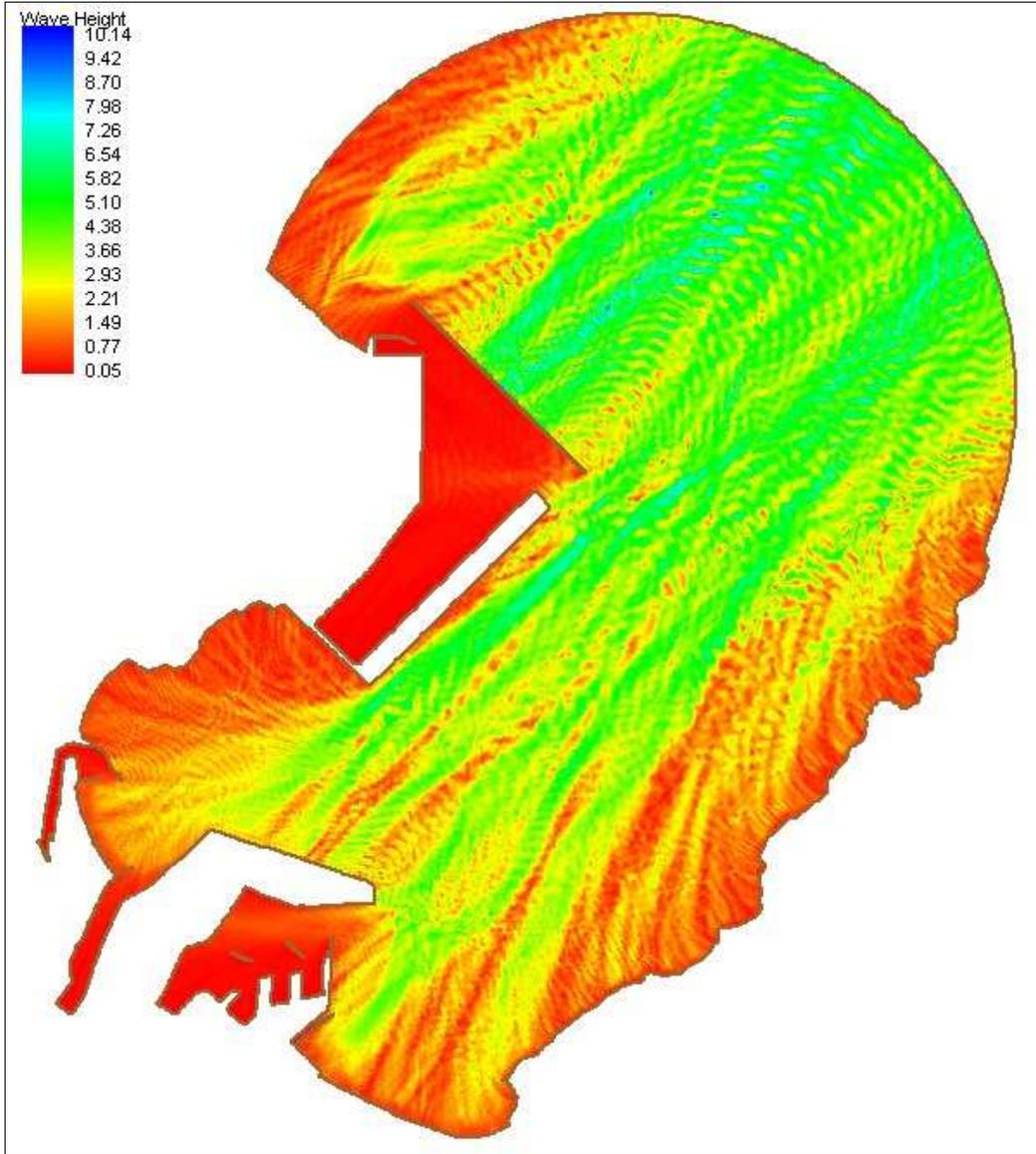


Fig. 4.22 Wave height with Breaking-Nonlinear dispersion condition after construction of New Port in Yeongil Bay

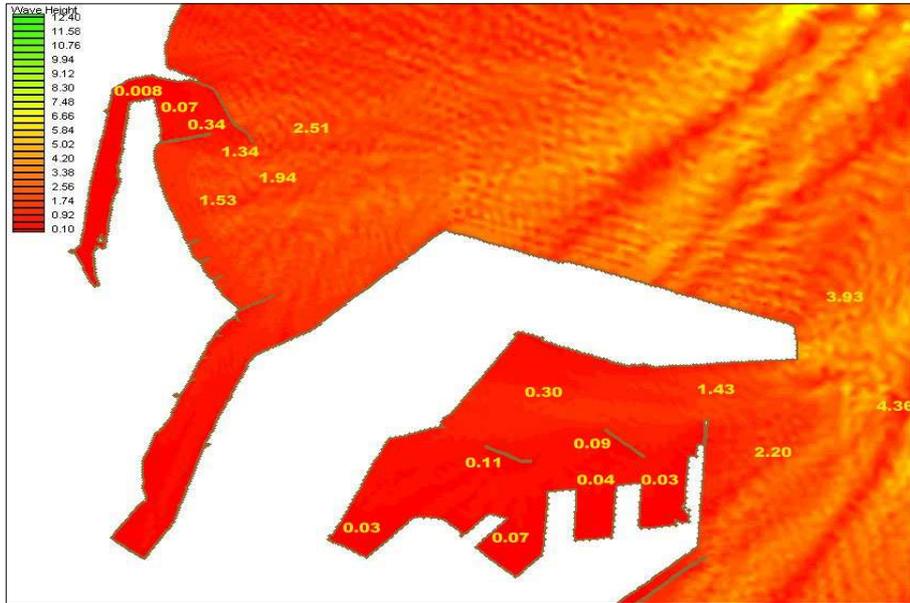


Fig. 4.23 Nonlinear dispersion wave height  
(Pohang Old and New Port)

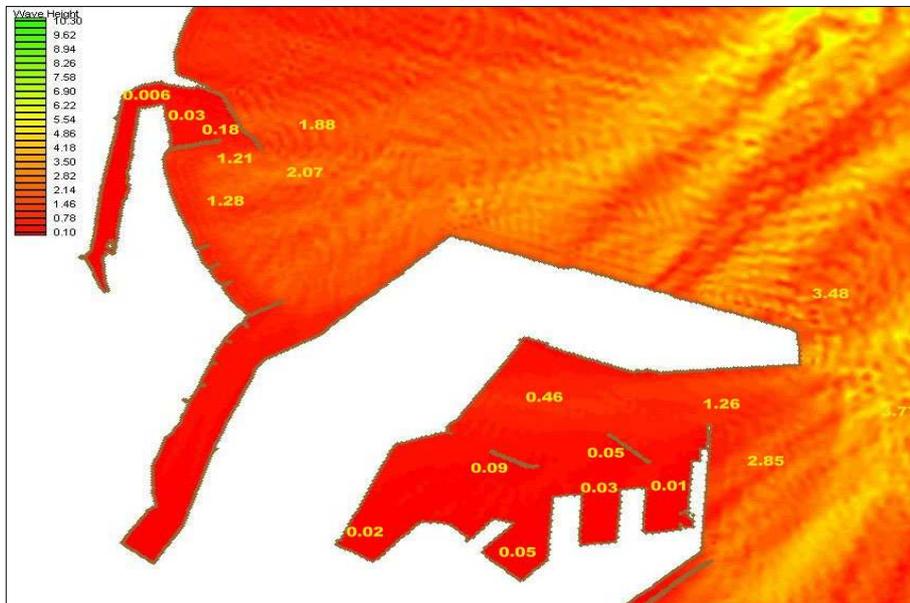


Fig. 4.24 Nonlinear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang Old and New Port)

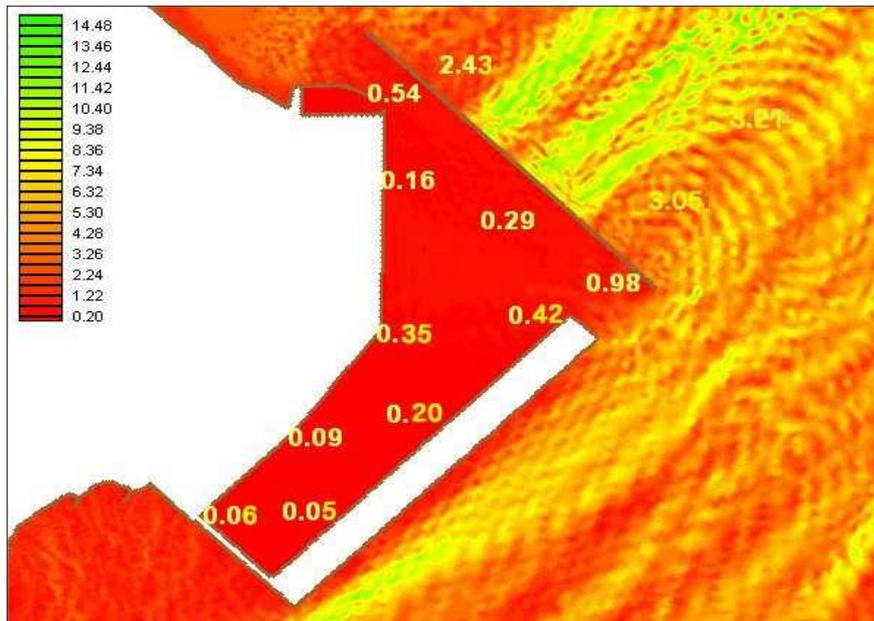


Fig. 4.25 Linear dispersion wave height  
(Yeongil Bay New Port)

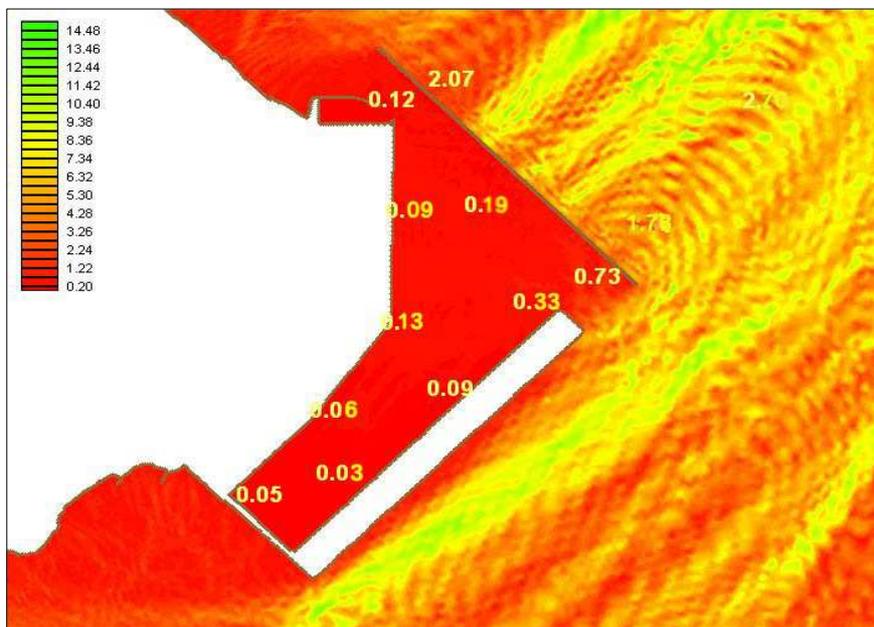


Fig. 4.26 Linear dispersion and breaking included wave height  
(Yeongil Bay New Port)

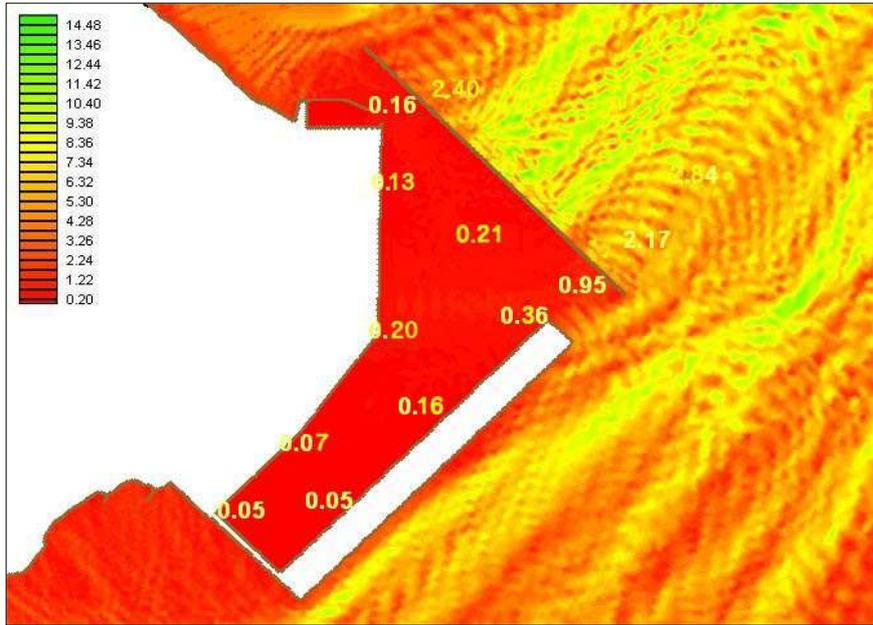


Fig. 4.27 Nonlinear dispersion wave height  
(Yeongil Bay New Port)

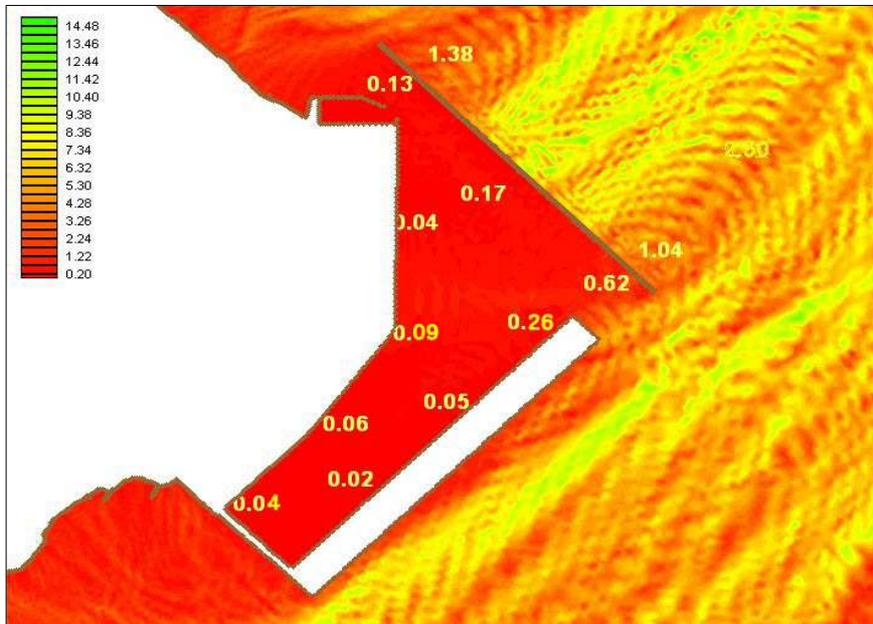


Fig. 4.28 Nonlinear dispersion and breaking included wave height  
(Yeongil Bay New Port)

### 4.3.3 영일만 신항 건설전 · 후의 비교

Fig. 4.29는 영일만 신항 개발지와 포항구항 및 신항에 대한 수치실험 비교 지점을 나타내고 있으며, 포항구항의 비교지점은 A~H이며, 포항신항의 비교지점은 A~K 그리고, 영일만 신항의 비교지점은 A~J이다.

Fig. 4.30~Fig. 4.32은 영일만 신항 개발 전에 포항구항, 포항신항 및 영일만신항 후보지에서 선택한 비교지점에 대한 실험조건 Case 1 ~ Case 4를 상호 비교 한 것이며, Fig. 4.34~Fig. 4.36는 영일만신항 개발 후에 3곳의 항만역에서 선택한 비교지점에 대한 실험조건 Case 5~Case 8을 상호 비교 한 것이다. 지점에 따라 다소 차이가 있으나, 결과는 선형분산, 비선형분산, 선형분산 및 쇄파, 비선형 분산 및 쇄파조건을 적용 순으로 항만반응이 감소 되는 것으로 나타났다.

따라서, 수치모델을 쇄파현상을 제외하거나 선형분산조건으로 단순화 시킨 형태로 적용해온 것과는 경우에 따라서 많은 차이가 있으므로 비선형분산 및 쇄파조건으로 연안해역에서의 파랑에 관한 수치실험을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

한편, 영일만 신항 건설 전 · 후에 쇄파와 비선형 분산 조건을 적용하여 포항구항과 신항의 파고비를 비교한 결과를 Fig. 4.33 및 Fig. 4.37에 각각 제시하였다. 포항구항에서는 영일만 신항건설 후보다 신항건설 전에 항내의 파고비가 조금 더 낮게 나타났으며, 포항신항에서는 영일만 신항건설 전보다 신항건설 후에 항내의 파고비가 조금 더 낮게 나타났다. 이것은 영일만 신항 계획에서 대규모 방파제 건설로 인해 반사 및 회절로 인한 영향이 포항 구항과 신항에 영향을 미친 탓으로 판단된다.

또한, 포항 신항과 구항에 대하여 항로에 준하는 비교지점에 따른 영일만 신항 건설 전후의 파고비를 비교 분석하였다.

Fig. 4.38~41은 영일만 신항 건설전·후의 포항 신항 및 구항에 대한 파고비 분포를 나타낸다. Fig. 4.38에서는 신항 건설전 포항구항의 파고 분포를 나타낸다. 항내에서는 0.02~0.15m로 낮은 파고가 발생하였고, 항외에서는 0.74~2.65m의 파고가 발생하였다.

이에 반해 Fig. 4.39에서는 신항 건설후 포항신항의 파고분포를 나타내며, 항내에서의 파고가 0.07~0.40m으로 신항 건설전 보다 다소 높아졌으며, 항외에서는 1.79~2.58m로 전반적으로 신항 건설전보다 파고가 높아진 것을 볼 수 있다. Fig. 4.40은 신항 건설후 포항구항의 파고 분포를 나타낸다.

항내에서의 파고는 0.18~1.07m의 파고분포를 나타냈으며, 항외에서는 2.26~3.46m의 파고가 발생하였다. Fig. 4.41에서는 신항 건설후 포항신항에 대한 파고분포로써 항내에서는 0.05~0.90m의 파고로 신항 건설전보다 파고가 높아진 것을 볼수있으며, 항외에서는 1.23~3.53m로 건설전보다 오히려 파고가 비교적 낮아진 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4.31, Fig. 4.37의 영일만 신항 건설전후의 항내 및 항외의 파고비를 비교한 것과 다소 차이가 발생하지만, 비교분석 지점에 따른 상대값의 차이로 결과 값이 차이를 보여, 영일만 신항 건설전·후에 따른 항만반응특성을 잘 나타냈다고 사료된다.

Fig. 4.42와 Fig. 4.43은 포항 구항과 신항에서 영일만 신항 건설 전·후에 따른 파고비를 항로에 준하는 비교지점에 대하여 비교한 결과이다.

포항 신항에서는 항외에서 파고비가 영일만 신항 건설 전에 비하여 약 54.4%~67.5%정도로 감소되었으나 항내에서는 건설 전에 비하여 170.8%~225.6%정도가 되어 높아지는 것으로 분석되었다. 한편, 포항 구항에서는 항외 및 항내 전체에서 파고비가 영일만 신항 건설전에 비하여 97.3%~350.0%정도로 높아지는 것으로 분석 되었다. 이것은 영일만 신항 건설에 따른 파랑의 반사 및 회절특성이 구항역에 집중되는 것으로 판단된다.

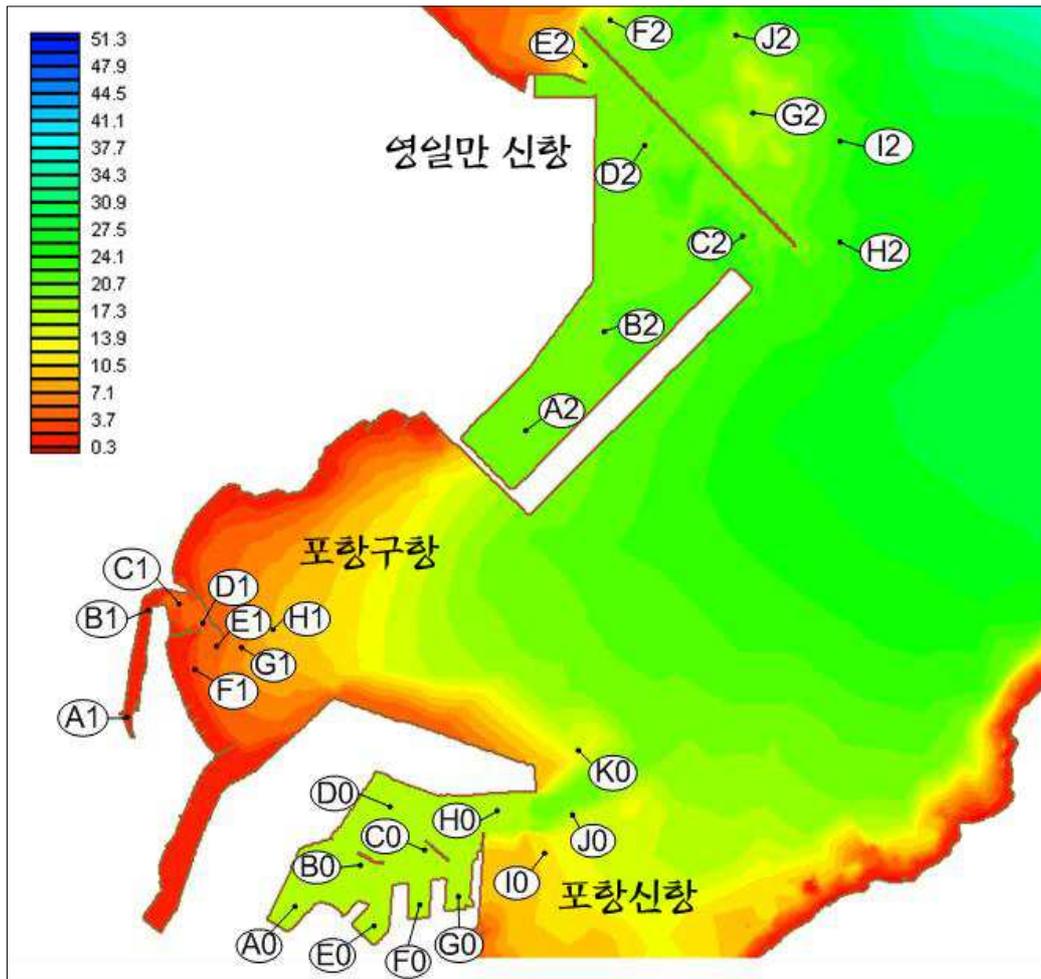


Fig. 4.29 Selected stations for model simulation

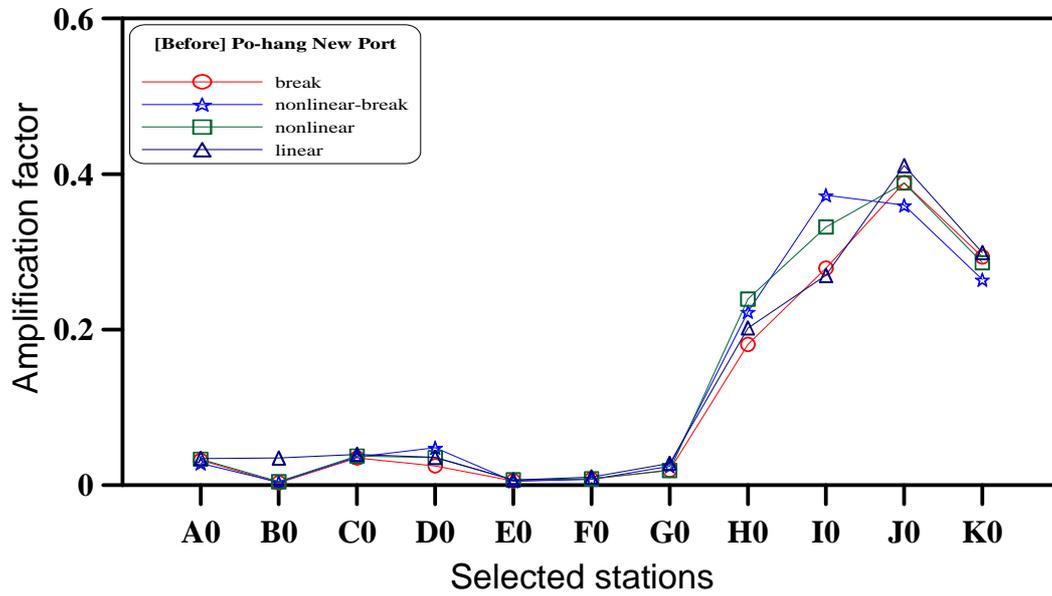


Fig. 4.30 Amplification factor of Pohang New Port before construction of New Port in Yeongil Bay

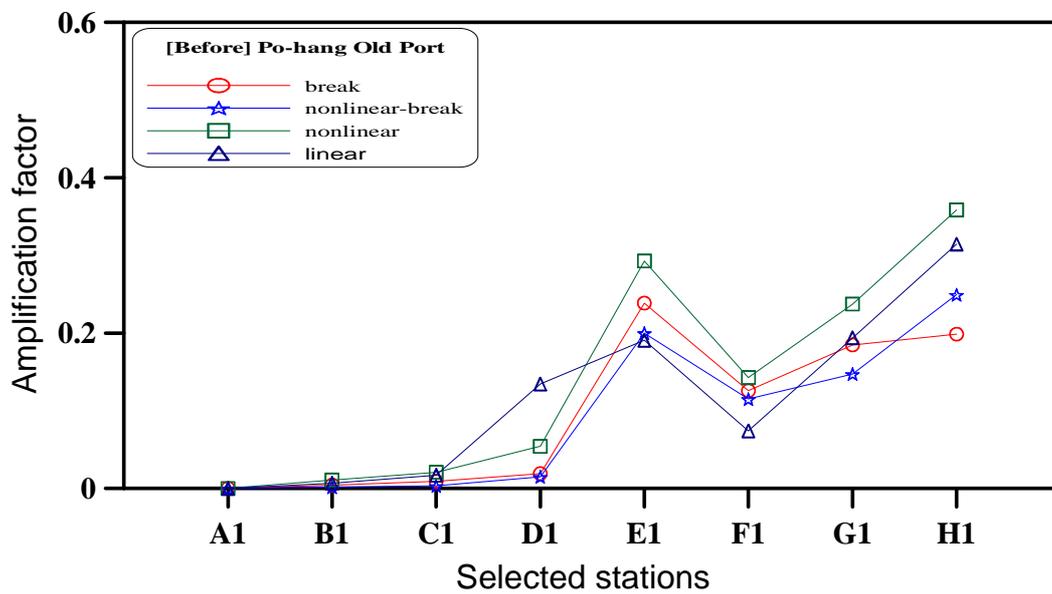


Fig. 4.31 Amplification factor of Pohang Old Port before construction of New Port in Yeongil Bay

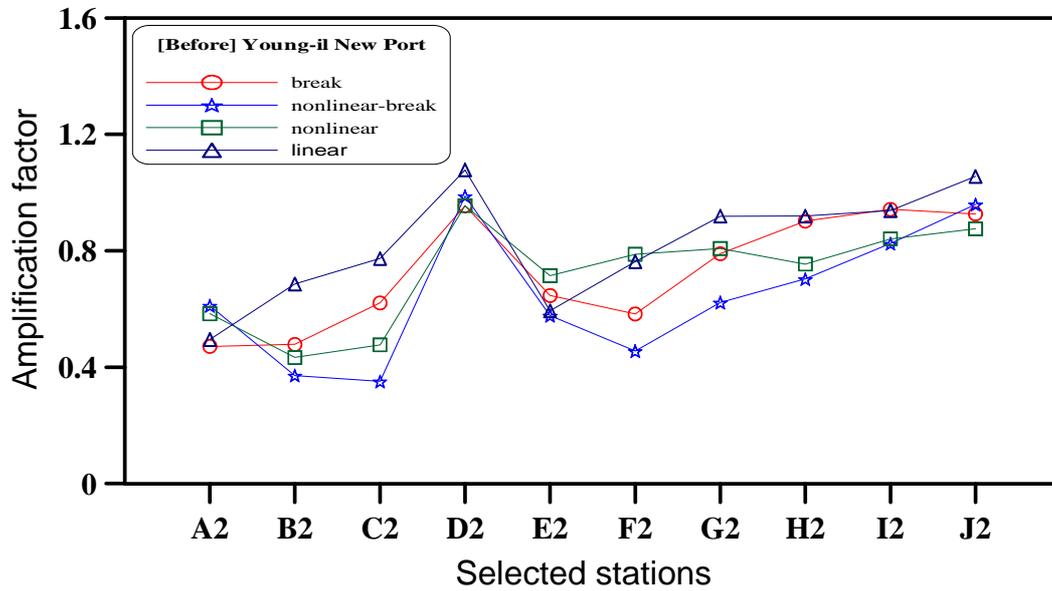


Fig. 4.32 Amplification factor of at the site of Pohang New Port before construction of New Port in Yeongil Bay

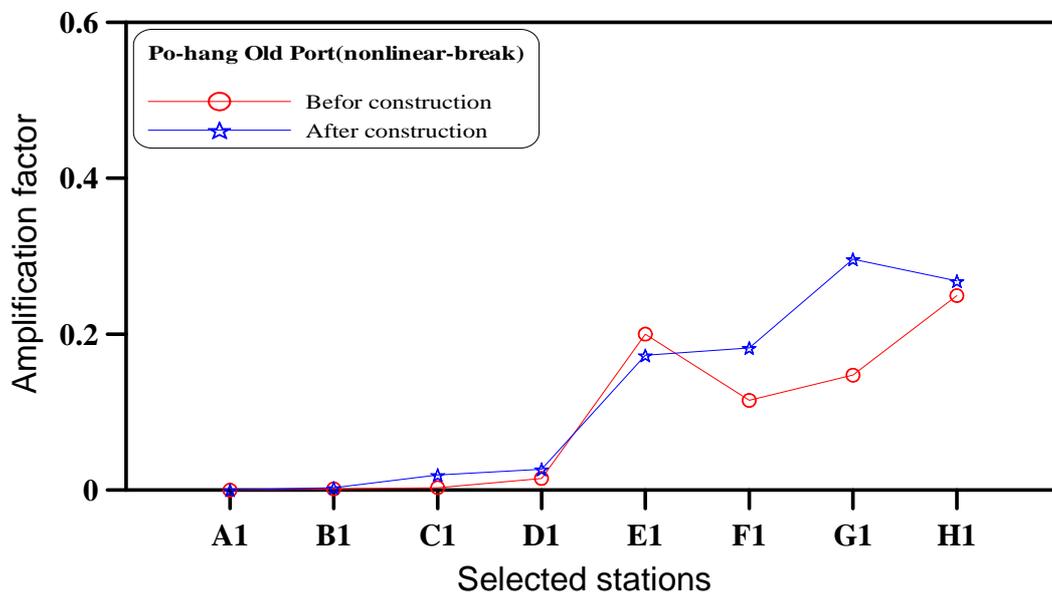


Fig. 4.33 Amplification factor of at Pohang Old Port for the case of nonlinear-break

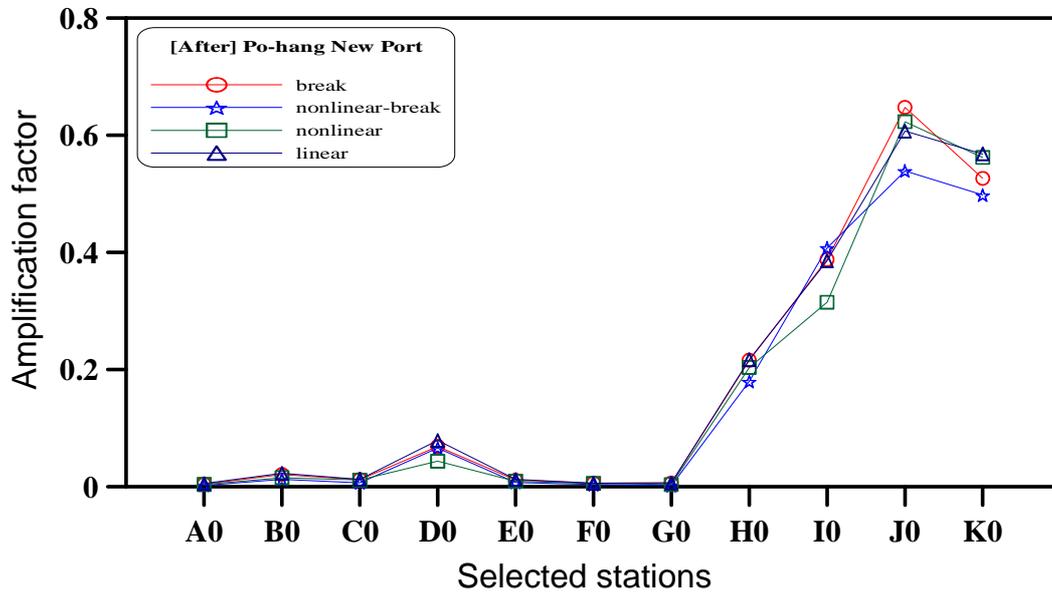


Fig. 4.34 Amplification factor of Pohang New Port after construction of New Port in Yeongil Bay

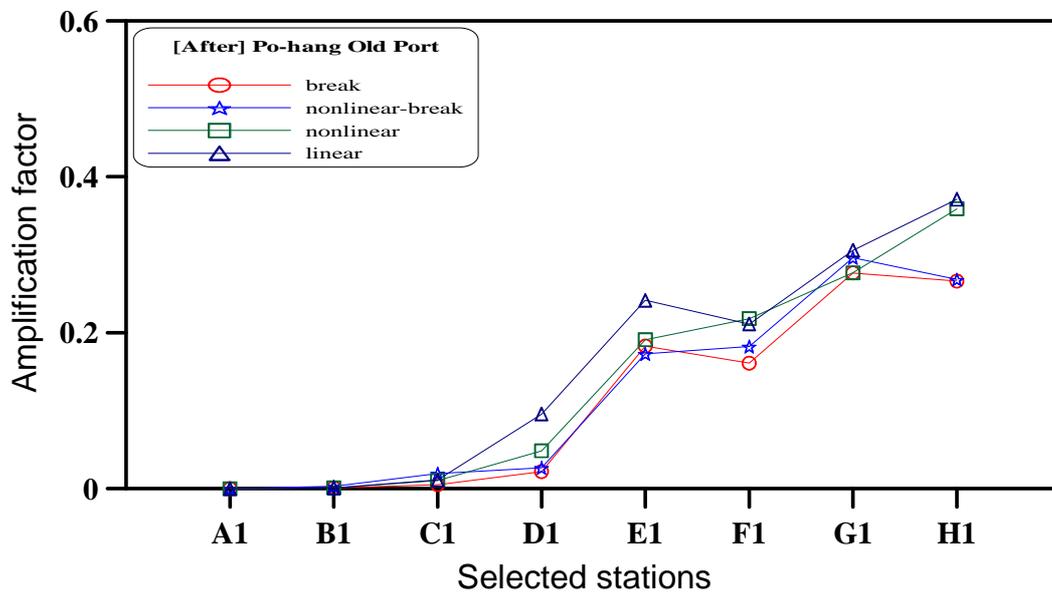


Fig. 4.35 Amplification factor of Pohang Old Port after construction of New Port in Yeongil Bay

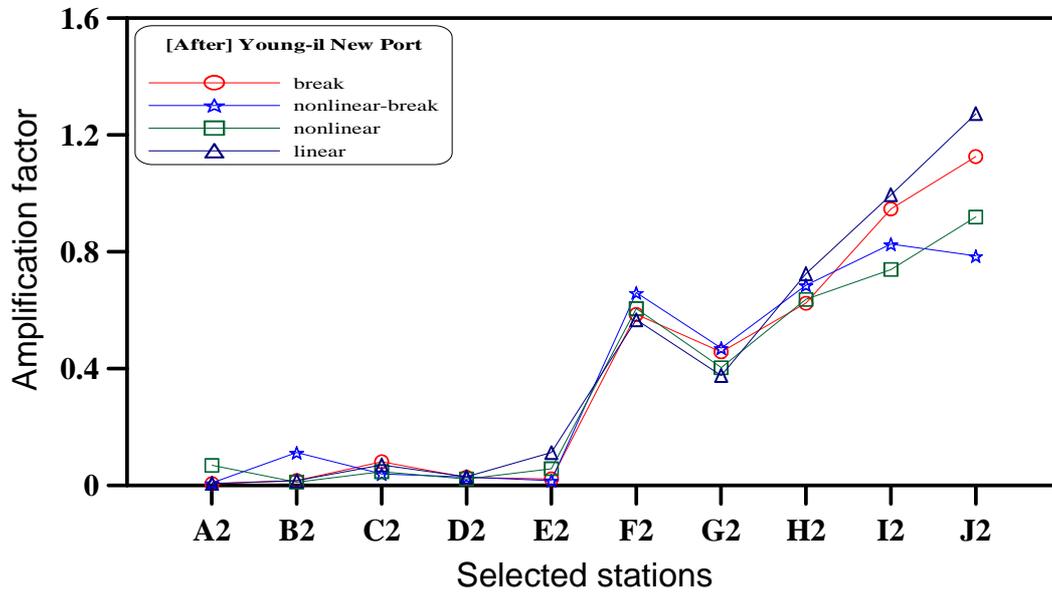


Fig. 4.36 Amplification factor of at the site of Pohang New Port after construction of New Port in Yeongil Bay

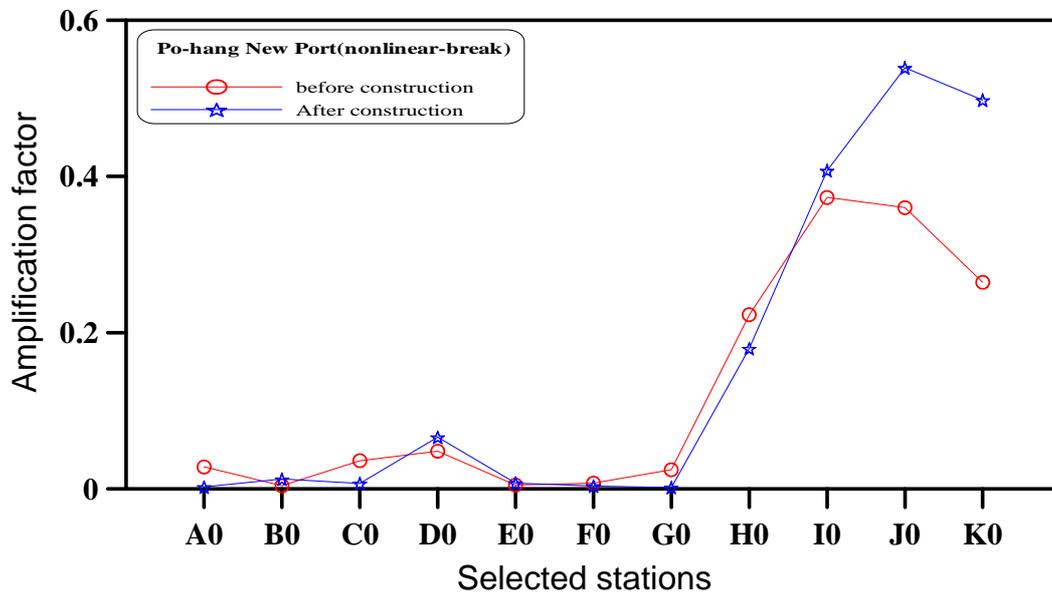


Fig. 4.37 Amplification factor of at Pohang New Port for the case of nonlinear-break

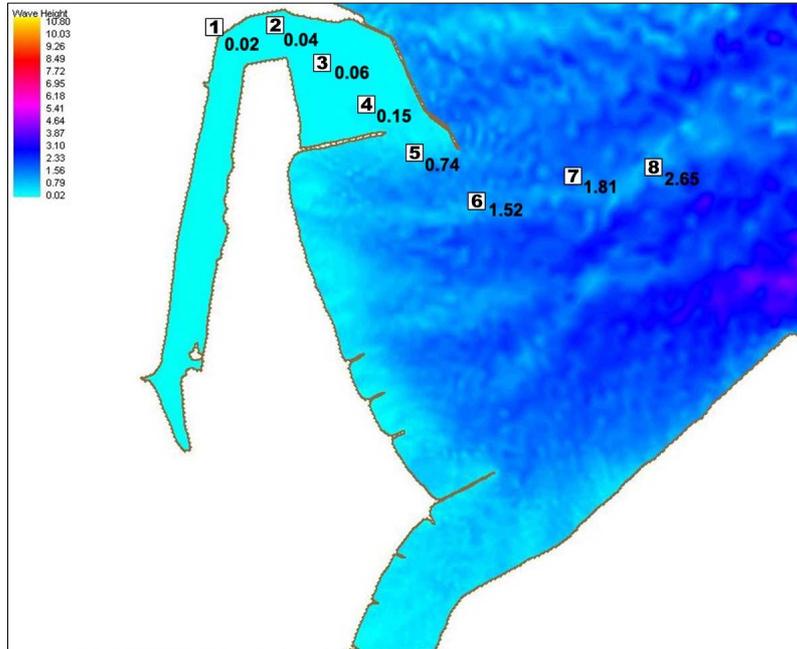


Fig. 4.38 Nonlinear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang Old Port before construction)

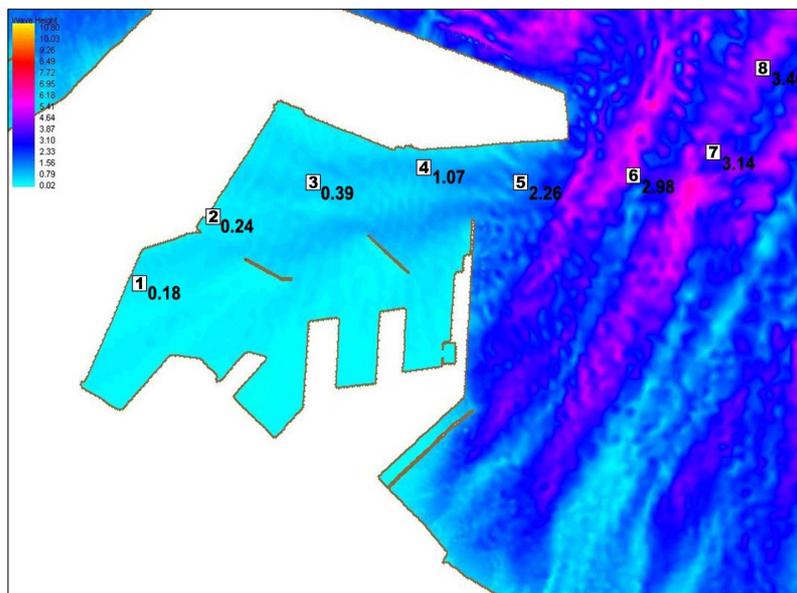


Fig. 4.39 Nonlinear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang New Port before construction)

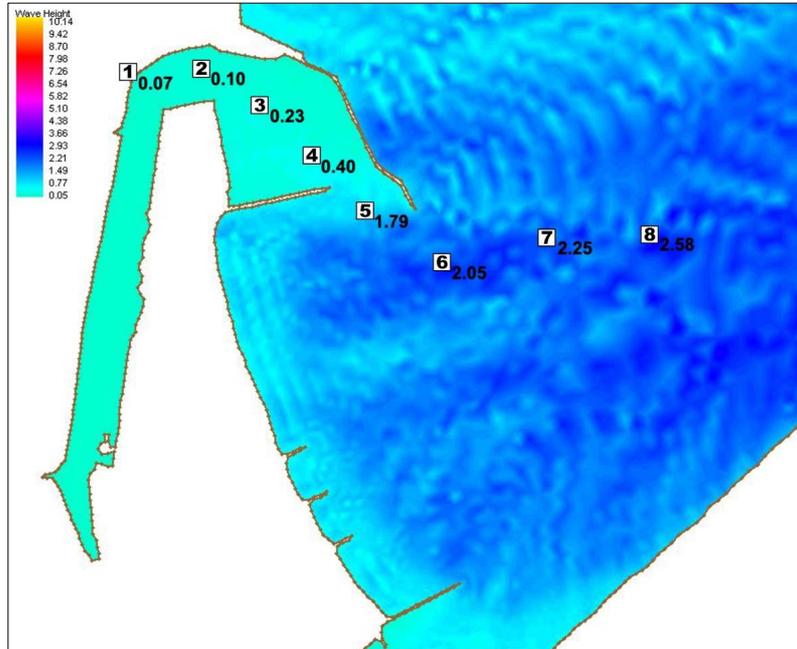


Fig. 4.40 Nonlinear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang Old Port after construction)

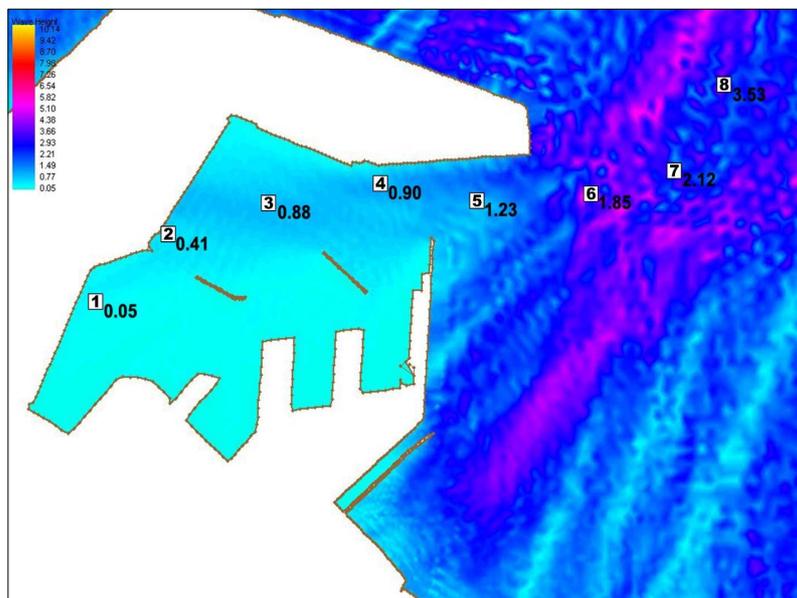


Fig. 4.41 Nonlinear dispersion and breaking included wave height  
(Pohang New Port after construction)

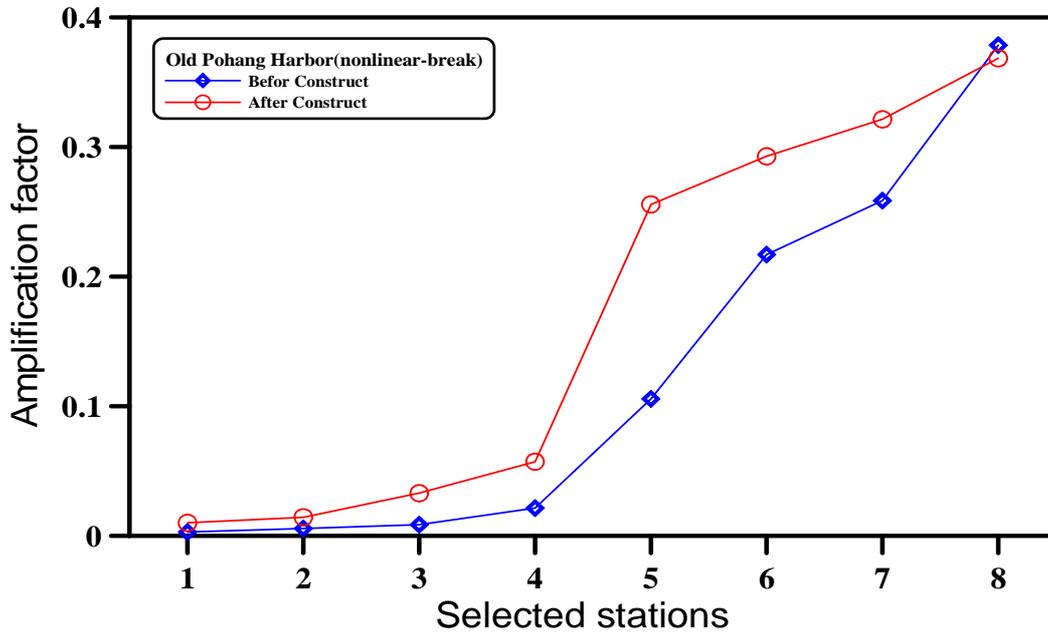


Fig. 4.42 Amplification factor of at Pohang Old Port for the case of nonlinear-break following the fairway

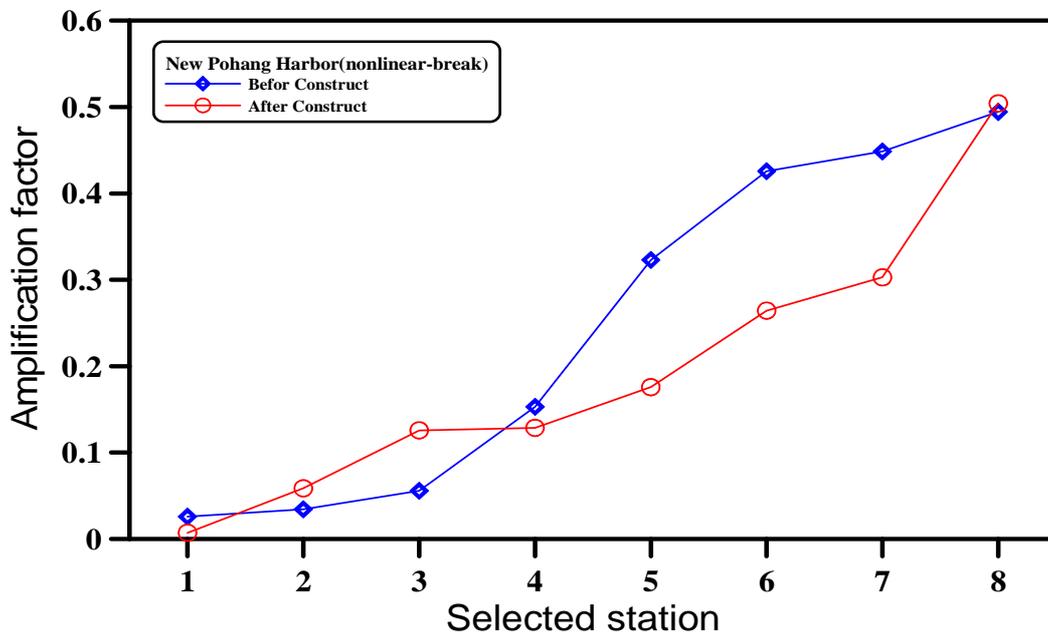


Fig. 4.43 Amplification factor of at Pohang New Port for the case of nonlinear-break following the fairway

## 제 5 장 결론

대규모 만에서의 항만개발이 진행되는 해역에서는 이로 인한 부차적 영향이 만의 전역에 미치게 되며, 다중반사 또는 쇄파로 인한 파랑은 만내에서도 변화무쌍하게 전파하여 동반한 파랑에너지가 항만 구조물 등에 외력으로 작용하고, 구조물의 손상과 항내의 정온도 확보를 어렵게 하여, 선박의 입·출항 및 접안 그리고 하역작업 등에 상당한 영향을 주어 항만의 생산성을 저감시키는 요인으로 작용하고 있으므로 본 연구에서는 영일만 신항만의 건설이 이루어질 영일만 내의 넓은 수역에 대해 파랑의 변환과정을 보다 종합적으로 해석하기 위해 확장완경사방정식 파랑모델을 구성하고, 신항건설 전·후의 해면변동과 신항만 개발에 따른 포항 구항해역 및 포항 신항해역 등 인접해역에서의 정온도 변화를 비교 분석하고자 하였다.

본 연구에서 선택한 연구 대상역인 경북 포항시 흥해읍 달만갑과 대보면 호미곶(구 장기갑) 사이의 약 10km에 달하는 개구부로 이루어진 장방형 내만에 건설되어지는 영일만 신항의 경우에도 영일만의 입구부에 위치하고 있어서 상당한 구간이 외력에 노출되어 있으므로 만 내에서 에너지의 재분포 과정을 통한 파랑의 변화와 그로 인한 만내 기존의 항만에서 파랑반응 변화특성의 분석이 필연적이다.

본 연구에서는 기본방정식을 해석하기 위한 수치해석방법으로 복합형태지역에서의 해안 모델링에 아주 적합한 복합요소법을 사용하였다. 대상해역에서 파랑 포텐셜의 해는 유한영역내에서 범함수  $F$ 를 최소화하여 찾도록 하고, 유한요소법에서 계산영역을 단순 삼각형 요소들의 망으로 나누어 선형 2차원함수로 근사화한 후 경계조건 및 방사조건을 도입하여 선형행렬식을 구성한 후에 반복법으로 연립방정식을 풀어 파랑장을 구하였다.

지금까지의 일반적인 항만의 정온도를 분석할 때 쇄파조건을 고려하지 않은 해저 마찰 경계면에서의 흡수 조건 또는 선형분산관계식 만으로 많이 다루어 왔다. 그러나 본 연구에서는 대상영역이 쇄파가 발생하는 영역에 위치하여, 쇄파-비선형 분산의 조건을 적용하여 항만내 파랑반응 특성을 비교하였다.

쇄파-비선형 분산 조건을 적용시 포항구항과 신항에서의 파고값들을 비교해보면 포항구항에서는 항내 파고비가 영일만 신항 건설 전보다 신항 건설 후에 조금 더 높게 발생했으며, 항외에서 또한 신항건설 전보다 건설 후에 높은 파고비를 나타내었다.

포항 신항에서는 항내에서 건설 전의 파고비가 건설 후보다 높은 파고비를 나타냈으며, 외항에서는 건설 후에 더 높은 파고비를 나타냈다. 아울러 각 case 별로 수행한 수치모델실험에서 항만을 포함한 연안해역에서는 비선형분산 및 쇄파조건으로 파랑에 관한 수치실험을 수행하는 것이 합리적임을 알았다.

또한, 지금까지는 대규모 신항만의 정온도를 분석할 때 항만개발이 진행되는 대상해역에 국한하여 수치실험 분석을 수행해왔지만, 본 연구에서는 영일만 신항 건설로 인하여 주위 항들에 대한 정온도까지를 수치실험으로 분석하였다.

이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 선형분산조건으로 단순화시킨 수치모델 실험이나 쇄파현상을 제외시킨 수치모델 실험에 있어서는 이미 검증된 수치실험 결과와 비교하여 경우에 따라서 결과에 큰 값의 차이가 발생하는 것으로 나타나 보다 복잡한 연안해역 조건에서의 수치실험은 비선형분산 및 쇄파조건으로 수행하여야 할 것으로 판단되었다.

(2) 영일만 신항건설 후에 영일만 신항 계획에서 대규모 방파제 건설로 인한 파랑의 반사 및 회절 등의 특성이 집중되어 포항 신항에서는 항외에서 파고비가 영일만 신항 건설 전에 비하여 약 54.4%~67.5%정도로 감소되었으나, 항내에서는 건설 전에 비하여 170.8%~225.6%정도가 되어 높아지는 것으로 분석되었다.

(3) 한편, 포항 구항에서는 항외 및 항내 전체에서 파고비가 영일만 신항 건설전에 비하여 97.3%~350.0%정도로 높아지는 것으로 분석 되었다. 이것은 영일만 신항건설 후의 포항 신항에서와 같이 파랑의 반사 및 회절특성이 구항역에 집중되는 것으로 판단된다.

이상으로 본 연구의 결과 앞으로 영일만 신항과 같은 대규모만의 신항만 프로젝트 사업에서 있어서의 설계 파라메타로서 인접해역의 항만이나 해안에 미치는 영향까지도 분석하여 종합적인 설계가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

Berkhoff, J. C. W. (1972), "Computation of Combined Refraction Diffraction," Proc. 13th International Coastal Engineering Conference, pp.741-790.

Berkhoff, J. C. W., Booij, N., and Radder, R. C. (1982), "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic Linear Waves", Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 255-279.

Booij, N. (1981), "A Note on the Accuracy of the Mild-slope Wave Equation", Coastal Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 191-203.

Chen, H. S. and Mei, C. C. (1974), "Oscillation and Wave Forces in a Man-made Harbor in the Open Sea", Proc. 10th Naval Hydrodynamics Symposium, pp. 573-596.

Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1985), "Wave Height Variation across Beaches of Arbitrary Profile", J. Geophys. Research, Vol. 90, pp. 1917-1927.

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

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

Demirbilek, Z., Briggs, M. and Green, D. (1996a), "Wave-current interaction at Inlets", Proc. 25th Intl. Coastal Engr., pp.1219-1232.

Demirbilek, Z. and Gaston, J. D. (1985), "Nonlinear Wave Loads on a Vertical Cylinder", *Ocean Eng.*, Vol. 12, pp. 375-385.

Demirbilek, Z. and Webster, W. C. (1992), "Application of the Green-Naghdi Theory of Fluid Sheets to Shallow-water Wave Problems, Report 1: Model Development, Report 2: User's Manual and Examples for GNWAVE", U.S. Army Waterways Exp. Station, Tech. Reports CERC-92-1 and CERC-92-13, Vicksburg, MS.

Demirbilek, Z., Xu, B., and Panchang, V. (1996b), "Uncertainties in the validation of harbor wave models", *Proc. 25th Intl. Coastal Engr. Conf.*, pp.1256-1267.

Demirbilek, Z. and Webster, W. C. (1998), "A Shallow water wave theory based on Green-Naghdi formulation", *Handbook of Coastal Engr.*, Vol.4 (ed. Herbich, J.B.), Gulf Publ. Co.

Ippen, A. T. and Goda, Y. (1963), "Wave Induced Oscillations in Harbors: The Solution for a Rectangular Harbor Connected to the Open-Sea", *Hydrodynamic Laboratory Report No. 59*, MIT.

Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A. (1984), "Verification of a Parabolic Equation for Propagation of Weakly-Nonlinear Waves", *Coastal Engineering*, Vol. 8, pp. 219-232.

Lee, J. J. (1969), "Wave Induced Oscillations in Harbors of Arbitrary Shape", Report No. KH-20, W.M. Keck Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena.

Lee, J. W. (1989), "Hybrid Element Analysis of Water Waves for Harbor Design", Ph.D. Diss., Department of Ocean Engineering, Univ. of Hawaii, HI, U.S.A.

Li, B. (1994), "A Generalized Conjugate Gradient Model for the Mild Slope Equation", Coastal Engineering, Vol. 23, pp. 215-225.

Liu, P.L.-F. (1983), "Wave-Current Interactions on a Slowly Varying Topography", J. Geophys. Research, Vol. 88, pp. 4421-4426.

Liu, P. L.-F. and Tsay, T. K. (1984), "Refraction-Diffraction Model for Weakly Nonlinear Water Waves", J. Fluid Mech., Vol. 141, pp. 265-274.

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

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

Panchang, V. G., Cushman-Roisin, B., and Pearce, B. R. (1988), "Combined Refraction-Diffraction of Short Waves for Large Coastal Regions", Coastal Engineering, Vol. 12, pp. 133-156.

Panchang, V. G., Ge, G., Cushman-Roisin, B., and Pearce, B. R. (1991), "Solution to the Mild-Slope Wave Problem by Iteration", Applied Ocean Research, Vol. 13, pp. 187-199.

Xu, B., Panchang, V. G., and Demirbilek, Z. (1996), "Exterior Reflections in Elliptic Harbor Wave Models", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engr., Vol. 122, pp. 118-126.