

工學碩士 學位論文

영일만에서의 신항건설에 따른
장주기파랑의 반응특성 연구

Variation of Harbor Oscillation Characteristics
due to Construction of New Port in Yeoungil Bay

指導教授 李 重 雨

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

田 旻 樹

本 論文을 田 旼 樹의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 工學博士 鞠 承 淇 印

위 원 工學博士 金 泰 亨 印

위 원 工學博士 李 重 雨 印

2006年 12月 22日

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科 田 旼 樹

Variation of Harbor Oscillation Characteristics due to Construction of New Port in Yeongil Bay

Min Su Jeon

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

Abstract

Today, harbor oscillation problems are the most significant factor to consider when designing harbors serving very large ships. In coastal harbors, large vessels moored in the elastic hawsers are often displaced due to the resonance between long period waves and mooring systems. As a result, cargo handling may be interrupted and the hawsers may be broken, especially when the amplification becomes extreme. The most significant harbor confronted with harbor oscillation problem in Korea is Pohang New port. Many cases of problems are being reported by the Pohang pilot association and the local office of MOMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries). However, it is difficult to prevent the arrival of long waves causing oscillations within this harbor. Moreover, the Korean government has already started a new port plan at the mouth of Yeongil Bay without addressing the problems that have occurred in Pohang New port. This study deals with the variation of harbor oscillation due to the construction of a 4.1 km breakwater at the bay mouth including the arrangement of the new berths. Numerical

methods used are in fairly standard form from the extended mild slope equation. The obtained numerical results were compared with field measurement from the previous and this will bring a certain level of discussion and consideration of variation to the future port development.

Key words : Coastal harbor, Harbor oscillation, Mooring system, Numerical method, Extended mild-slope equation

목 차

ABSTRACT	i
LIST OF TABLES	v
LIST OF FIGURES	v
NOMENCLATURE	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 방법	2
제 2 장 기본이론 및 수치모델	4
2.1 부진동의 기본 이론	4
2.2 수치모델 기본이론	11
2.3 경계조건	14
2.4 운동학적 파라메타	18
제 3 장 수치모델	22
3.1 대상영역 일반	22
3.2 수치모델(Numerical Model)의 수립	28
3.3 복합요소법의 적용	34
3.4 모델의 검증	48
3.5 과거 연구자료 및 현장관측자료	54
제 4 장 수치실험 및 분석	60
4.1 대상영역의 일반	60
4.2 포항신항의 고유공진주기	65
4.3 수치실험 및 분석	68

4.3.1	항만반응특성	68
1)	영일만 신항 건설 전	68
2)	영일만 신항 건설 후	71
3)	저감대책 도입후(방파제 확장)	74
4.3.2	항만별 반응특성 비교	77
1)	포항신항	77
2)	포항구항	79
3)	영일만 신항	82
4.3.3	부진동 저감공법 적용 분석	85
1)	포항 신항	85
2)	포항 구항	87
3)	영일만 신항	90
4.4	수치실험결과	92
 제 5 장 결론		95
 참 고 문 헌		98

LIST OF TABLES

Table 2.1 Observed surface seiche periods in typical lakes	9
Table 3.1 Finite element model characteristics	29
Table 3.2 Finite element model characteristics for Pohang New port	29
Table 3.3 Comparison points for the verification of the model	50
Table 3.4 Former study results for the oscillation periods in Yeongil bay and Pohang New port	55
Table 4.1 Summarized results of numerical analysis at Yeongil Bay	95

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Schematic diagram of a uninodal, binodal and trinodal seiche in a rectangular basin.	5
Fig. 2.2 Damaged pier by harbor oscillation	7
Fig. 2.3 Damaged rubber fender	7
Fig. 2.4 Definition sketch of model domain	17
Fig. 3.1 Two and three dimensional picture of water depth	23
Fig. 3.2 Location and dimension of Yeongil bay	23
Fig. 3.3 The map of Pohang New port	25
Fig. 3.4 Piers in Pohang New port	25
Fig. 3.5 The map of Pohang Old port	26
Fig. 3.6 Piers in Pohang Old port	26
Fig. 3.7 New development plan of Yeongil New port	27
Fig. 3.8 Breakwaters of Yeongil New port	27
Fig. 3.9 Two and three dimensional picture of water depth at the global water ..	30
Fig. 3.10 Selected stations for comparison of harbor responses	31
Fig. 3.11 Study area and depth for model simulation before construction of New port in Yeongil bay	32
Fig. 3.12 Study area and depth for model simulation after construction of New port in Yeongil bay	33
Fig. 3.13 Rectangular harbor with semi-circular open boundary	51
Fig. 3.14 Theoretical and numerical resonance curves for a fully reflecting rectangular harbor	52
Fig. 3.15 Harbor response curves for various values of coastal reflection coefficient	

.....	52
Fig. 3.16 Harbor response curves for various values of the friction factor	53
Fig. 3.17 Two field observation points	56
Fig. 3.18 Comparison of harbor response at 1st pier	57
Fig. 3.19 Comparison of harbor response at 1st pier	57
Fig. 3.20 Shutdown days of cargo handling work due to dynamic motion of the mooring vessel at Pohang New port(1987–2001)	58
Fig. 4.1 Location map of numerical model measurement stations	61
Fig. 4.2 Numerical model measurement stations in Pohang Old port	62
Fig. 4.3 Numerical model measurement stations in Yeongil New port (Before construction)	62
Fig. 4.4 Numerical model measurement stations in Yeongil New port (After construction)	63
Fig. 4.5 Numerical model measurement stations in Pohang New port	63
Fig. 4.6 Numerical model measurement stations in Pohang New port (for the minor numerical simulation)	64
Fig. 4.7 Rearranged port figure to reduce the amplification ratio	64
Fig. 4.8 Amplification ratio at station A in Pohang New port	65
Fig. 4.9 Amplification ratio at station B in Pohang New port	66
Fig. 4.10 Amplification ratio at station C in Pohang New port	66
Fig. 4.11 Amplification ratio at station D in Pohang New port	67
Fig. 4.12 Amplification contour lines of the before construction with a period of 1,800 sec	68
Fig. 4.13 Amplification contour lines of the before construction with a period of 2,200 sec	69
Fig. 4.14 Amplification contour lines of the before construction with a period of 3,360 sec	69
Fig. 4.15 Amplification contour lines of the before construction with a period of 4,980 sec	70
Fig. 4.16 Amplification contour lines of the before construction with a period of 5,020 sec	70
Fig. 4.17 Amplification contour lines of the after construction with a period of 1,980 sec	71
Fig. 4.18 Amplification contour lines of the after construction with a period of 2,200 sec	72
Fig. 4.19 Amplification contour lines of the after construction with a period of 3,360 sec	72

Fig. 4.20	Amplification contour lines of the after construction with a period of 4,400 sec	73
Fig. 4.21	Amplification contour lines of the after construction with a period of 5,020 sec	73
Fig. 4.22	Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 600 sec	74
Fig. 4.23	Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 1,650 sec	75
Fig. 4.24	Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 2,300 sec	75
Fig. 4.25	Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 2,980 sec	76
Fig. 4.26	Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 4,250 sec	76
Fig. 4.27	Harbor response comparison after the construction at station A0	77
Fig. 4.28	Harbor response comparison after the construction at station B0	78
Fig. 4.29	Harbor response comparison after the construction at station C0	78
Fig. 4.30	Harbor response comparison after the construction at station D0	79
Fig. 4.31	Harbor response comparison after the construction at station A1	80
Fig. 4.32	Harbor response comparison after the construction at station B1	80
Fig. 4.33	Harbor response comparison after the construction at station C1	81
Fig. 4.34	Harbor response comparison after the construction at station D1	81
Fig. 4.35	Harbor response comparison after the construction at station A2	82
Fig. 4.36	Harbor response comparison after the construction at station B2	83
Fig. 4.37	Harbor response comparison after the construction at station C2	83
Fig. 4.38	Harbor response comparison after the construction at station D2	84
Fig. 4.39	Harbor response comparison after the ports rearranged at station A0	85
Fig. 4.40	Harbor response comparison after the ports rearranged at station B0	86
Fig. 4.41	Harbor response comparison after the ports rearranged at station C0	86
Fig. 4.42	Harbor response comparison after the ports rearranged at station D0	87
Fig. 4.43	Harbor response comparison after the ports rearranged at station A1	88
Fig. 4.44	Harbor response comparison after the ports rearranged at station B1	88
Fig. 4.45	Harbor response comparison after the ports rearranged at station C1	89
Fig. 4.46	Harbor response comparison after the ports rearranged at station D1	89
Fig. 4.47	Harbor response comparison after the ports rearranged at station A2	90
Fig. 4.48	Harbor response comparison after the ports rearranged at station B2	91
Fig. 4.49	Harbor response comparison after the ports rearranged at station C2	91

Fig. 4.50 Harbor response comparison after the ports rearranged at station D2 ...92

NOMENCLATURE

A	Amplitude of the incident wave
\tilde{a}	CC_g
B	Coastal boundaries
\tilde{b}	$\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma y$
$C(x, y)$	Phase velocity = σ/k
$C_g(x, y)$	Group velocity = $\partial\sigma/\partial k = nC$ with $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$
E	Total number of elements
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_Γ	Total number of segments (= total number of nodes) along

	the circular boundary Γ
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 element 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 semicircle
w	Friction factor
α	$(= \alpha_1 + i\alpha_2)$ Complex coefficient
α_i, β_i	Unknown coefficients
β	Wave phase angle
Γ	Open boundary
γ	Wave breaking parameter
$\hat{\eta}$	Wave potential
$\hat{\eta}_i$	Solution $\hat{\eta}$ at node I
$\hat{\eta}_s$	Scattering wave potential
$\hat{\eta}^e$	Linear two-dimensional function
$\hat{\eta}_i^e$	Wave potentials at the corners (nodes) of the element e
$\{\hat{\eta}^\Gamma\}$	Subset of $\{\hat{\eta}\}$ for nodes situated on boundary Γ
$\hat{\eta}(x, y)$	Complex surface elevation function, from which the wave height can be estimated

Θ_I	Incident wave angle with respect to the x-axis
σ	Wave frequency under consideration (in radians/second)
Ω	Model domain

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

선박이 대형화됨에 따라 항만 내의 정온도 유지 문제는 안정된 접이안과 하역작업에서 필연적이라 할 수 있다. 특히, 선박이 고속화됨에 따라 상대적으로 선박의 항만 내의 체류시간을 최소화하는 것이 관건이 되고, 해운물류량의 증가와 선박의 대형화에 따른 대규모의 항만인프라 시설을 건설하기 위해 많은 예산을 투입하고 있는 만큼 항만가동률을 높이는 것도 항만계획자나 자사의 부두를 보유하고자 하는 기업에게는 주 관심사가 된다. 항만에서 부진동의 문제는 기상변동이나 해황의 변동으로 외해에서 발생한 파랑이 만내 또는 항만으로 입사되어 만이나 항만의 고유주기와 연계되어 공진현상이 나타나는 것으로 정박하고 있는 선박이나 항만구조물에 상당한 피해를 가져오는 것이다 (Lee and Raichlen, 1972). 국내에서는 80년대에 이르기까지도 부진동 현상을 설계과정에서 발견하지 못하고 항만을 건설 한 후 실제 부두의 운영과정에서 부진동의 현상을 발견하고 이에 대한 대책을 강구하고자 했지만 이미 상당한 토목공사가 이루어진 상태이거나 완료된 상태라 수정을 기하기가 더욱 어려운 실정이었다(허, 2002).

최근에는 새로운 항만의 건설이나 기존 항만의 정비에서 부진동의 문제가 예상되는 지역에서는 항만부진동의 검토를 설계과정에 포함시키고 있어서 과거에 문제가 되었던 부진동문제 해결에 어느 정도 기여하고 있다고 본다.

그러나, 부진동에 관한 많은 수의 과거 연구는 설계 중이거나 건설 중인 항만에 집중하여 평가해 왔다. 현대에는 해안역에서 광범위한 항만개발 및 연안역 개발이 계속적으로 진행되고 있지만, 신항의 건설에 따른 주변 항만의 영향을 고려하지는 않고 있다는 점에서 이에 대한 실질적 분석이 요구되는 실정이다.

1.2 연구 목적 및 방법

항만 부진동은 호수, 개구해안 및 항내에서 발생하는 장주기의 해면승강운동으로서 부진동 발생 시 파고는 상대적으로 적으나 파장이 길어서 선박의 계류는 물론 하역작업에 지장으로 초래한다. 항만부진동에 대한 연구는 1980년대부터 거론되었다. 항만부진동은 Harbor Oscillation, Seiche, Surging, Resonant Oscillations 등으로 일컬어진다. 최초로 장주기파에 대한 항만파고와 주기의 비에 다른 계류한계의 개념을 도입한 이는 Wilson(1967)으로 그 이전까지는 하역한계로 항만파고만을 제시하였다.

국내 항만에서의 부진동 현상이 가장 현저하게 나타나는 곳은 영일만의 포항신항으로 이를 해소하기 위한 노력이 반복되고 있으나, 이렇다 할 성과를 내놓지 못하고 있는 실정이다. 포항종합제철주식회사의 내부자료를 통하여 1987년부터 2001년까지의 포항신항의 장주기파랑 및 기상으로 인한 하역작업 불능일수를 분석한 결과, 포항항의 1, 2, 3, 4번 부두를 제외한 나머지 부두는 최근 3년간 화천에 의한 하역중단 99일과 선체동요로 인한 하역중단 58일에 의하여 연중 157일에서 항만하역작업의 지장이 발생했다.

특히, 영일만의 경우에는 포항신항에서의 부진동을 경감시키는 노력을 구체화하지 않은 상태에서 대규모 물류를 유치하거나 서비스하기 위하여 영일만 입구 북측에 대규모 방파제를 건설하여 마무리 단계에 와 있고 컨테이너 부두의 대대적인 개발을 후속으로 계획되고 있어서 이러한 구조물과 평면계획이 기존의 포항신항에 어떠한 형태로 부진동의 변화를 가져올 것인가가 관심이 될 수밖에 없다.

따라서, 본 연구에서는 영일만신항건설의 영향을 분석하기 위해 현장관측과 자료를 정리하고 본 연구에서 사용된 모델의 적용여부를 판단한 다음, 만의 형상이 바뀌기 전후를 대비하여 수치모델을 수립 시뮬레이션을 수행하여 영일

만신항 방파제를 포함한 영일만 전체에 대해 광역유한요소망을 구성하였으며 포항구항, 포항신항 그리고 영일만신항에서의 부진동 주기와 증폭현상을 분석하고, 포항신항, 포항구항 및 영일만 신항에 협역분석을 실시하여 이것이 다른 항만에 어떠한 변화를 가져오는 것인지를 분석하고 이에 관한 대책공법으로 영일만신항 북방파제와 포항신항의 방파제 길이를 증가시켜 부진동을 저감시키는 실험을 수행하도록 한다. 실제적으로 부진동을 저감시키기 위해서는 단순히 방파제길이를 늘이는 것 외에 다른 방법들이 사용가능하나, 본 연구에서는 선행연구의 의미로서 단순히 방파제 길이를 늘이는 방법을 적용한다.

본 연구에서는 제1장에서는 연구의 배경, 목적 및 방법을 다루고, 제2장에서는 본 연구에 사용된 수치모델의 구성 및 이론적인 배경을 설명하고, 제3장에서는 모델의 적용 및 검증, 그리고 수치실험 및 분석은 제4장에서 다루고, 최종적으로 제5장에서 결론을 맺고자 한다.

제 2 장 기본이론

2.1 부진동의 피해사례 및 기본이론

부진동은 항내 또는 항내에서 수면이 장주기로 승강하는 현상을 기술하는 것으로 항 또는 만의 고유진동주기에 비교적 가까운 주기를 가진 외부의 장주기파와의 공진현상에 의해서 입사파보다 훨씬 높은 파가 발생하는 현상을 말한다.

외해에서 이와 같은 미소진폭장주기파의 발생원인에 대한 여러 연구(이,1990)들이 계속 실행되었는데 어느 경우든 항만의 부진동은 선박에 대해 손상과 하역작업에의 지연을 초래하고 또한 항만고정구조물에 영향을 미치는 것은 물론, 조석이나 하천으로부터의 범람, 해일 등 기타 해면상승요인과의 중복에 따른 상승효과는 매우 심각하다.

수리모델(Hydraulic Model)을 통한 파랑의 분석은 단주기파에 대해서만 행할 수밖에 없으므로 부진동의 분석은 현장관측(Field Observation)과 수치실험(Numerical Model)을 통해서 실행하나 현장관측의 경우는 항만의 구조물 건설전 즉, 현 상태에서의 관측은 가능하나 구조물 변경에 대한 분석은 사후에 이루어져야하므로 예측은 불가능하며 기기설비의 과대 및 장시간에 걸친 조사가 필요하다.

부진동은 정상파의 특별한 경우이다. 정상파는 진행파가 직립 고체벽에 부딪혀서 에너지를 잃지 않고 완전 반사되어 이것이 입사파와 중복될 때 발생한다.

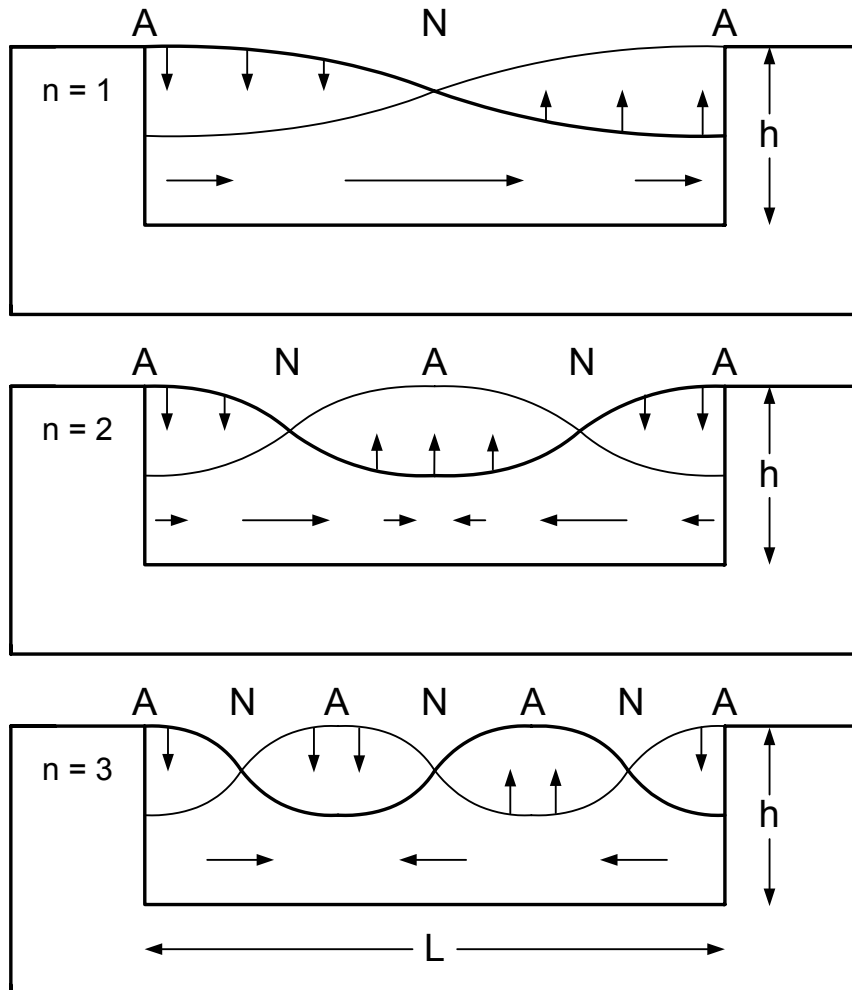


Fig. 2.1 Schematic diagram of a unimodal, binodal and trinodal seiche in a rectangular basin.

Fig. 2.1은 정상파와 부진동의 표면파형을 나타낸다. 수면의 변화에 따라 흐름의 수직, 수평 벡터의 방향은 그림에서 보는 바와 같이 변화한다. Wilson(1972)에 의하면 만에서 부진동이 발생하면 기본 mode의 부진동과 2, 3 mode의 부진동이 같이 발생하는 것으로 알려져 있다. 한편 Wilson(1972)이 밝힌 만이나 호수에서의 부진동의 발생원인은

- (1) 부진동의 주기와 일치하는 주기를 가진 기압변동이 발생하여 통과할 때
- (2) 전선의 통과로 인한 기압의 갑작스런 변동이 생길 때
- (3) 풍속과 풍압의 변동이 동반된 돌풍이 갑자기 수면에 가해질 때
- (4) 육지 쪽으로 부는 강한 바람에 의해 육지 쪽으로 쌓였던 물이 갑자기 방출될 때
- (5) 만이나 호수의 한쪽으로부터 갑작스럽게 다량의 물이 유입될 때 등이다.

특히, 만내로 들어오는 입사파의 주기가 만의 고유진동주기와 일치하면 공진이 발생하여 상당한 크기의 부진동이 생기게 된다(Lee and Raichlen, 1972).

부산 감천항은 이러한 부진동 현상이 현저하게 발생하는 지역 중 하나로서 여러 차례의 부진동 피해가 발생하고 있다. 이러한 피해는 단순 하역작업의 지장 뿐 아니라 항만시설물을 파괴를 포함한다. 최근의 피해로는 2005년 5월 부진동에 의하여 동요한 대형선박에 의하여 항만의 안벽과 방충재가 파괴되는 현상이 발생하였다. Fig. 2.2과 Fig. 2.3는 실제로 부진동에 의해 요동하는 선박에 의하여 파괴된 안벽과 방충재의 사진이다.



Fig. 2.2 Damaged pier by harbor oscillation



Fig. 2.3 Damaged rubber fender

이러한 부진동이 발생하는 항만에서는 항만의 고유 진동주기를 변형 시키거나 증폭비를 감쇄시키는 2가지 방법으로 진동을 저감시킬 수 있다. 항만이 가지고 있는 1개 이상의 고유진동주기에 대해 외해에서 외력으로 발생할 수 있는 여건에 대해 항만이 가지고 있는 고유진동주기가 공명이 되지 않도록 하는 것이지만 이것은 쉽지 않고, 다만 항만으로의 이용도가 크지 않거나 일시적인 박지로 활용할 수 있는 공간으로 공진을 유도하여 반응주파수를 걸러내는 적극적인 방법과 기존의 안벽의 구조를 변경하여 어느 정도 감쇄효과를 가져오도록 하는 평범한 방법이 있을 수 있다. 어느 것이나 항만건설에는 추가부담이 될 수밖에 없으며 이를 피하기 위해서는 사전에 충분한 검토를 행한 후 설계 및 건설이 뒤따라야 할 것이다.(허, 2002).

Table 2.1은 전세계 대표적인 만(灣)과 호수에서의 부진동 주기를 나타내는 표이다. 미국과 캐나다에 걸쳐있는 Erie호수에서의 제1고유진동주기는 858분에 이르는 것으로 나타났다.

Table 2.1 Observed surface seiche periods in typical lakes
and observed decay rates

Observed surface seiche periods in typical lakes and observed decay rates							
Lake and location	Observed periods of oscillation, min						Fractional decrease in amplitude of free uninodal seiche over each successive period
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Geneva (Switzerland-France)	74.0	35.5					0.030
Garda(Italy)	42.9	28.6	21.8	15.0	12.1	9.9	0.045
Loch Earn(Scotland)	14.5	8.1	6.0	4.0	3.5	2.9	
Erie(U.S. - Canada)	858.0	542.3	350.9	250.5			0.322
Konigssee(Germany)	11.6						0.204
Vattern(Sweden)	179.0	97.5	80.7	57.9	48.1	42.6	0.113
Yamanaka(Japan)	15.6	10.6	5.5				0.199
Baikal(Russia)	278.2						

항만부진동 문제를 해결하기 위해서는 일반적으로 현장관측, 수리모형실험 및 수치실험의 3가지 방법이 사용된다. 본 연구에서는 신항의 건설 등 주변 해역환경의 변화가 대상해역의 부진동 특성에 어떠한 영향을 끼치는지를 분석하는 것이 목적이므로, 현재의 항만조건에 대한 주변의 관측자료를 구하여 분석하고 부진동 예측을 위한 수치모델 수립 후, 현재조건에서 이를 재현하고 신항이 완성된 후의 평면배치계획을 적용하여 그 결과를 비교하기로 하였다.

영일만은 장방형의 형상을 하고 있고 영일만의 제1공진주기를 Merian공식 (SPM, 1984)으로 간략하게 계산해보면 개방형 항만에서

$$T_n = \frac{4l_B}{(2n-1)\sqrt{gh}}, n=0,1,2,\dots \quad (2.1)$$

을 사용하여 공진모드를 계산해 가면 공진모드는 62.7분, 20.9분, 12.5분으로 나타난다. T_n 은 n 번째 고유주기, l_B 는 만의 길이 (13.5km 적용), g 는 중력가속도 (9.8m/sec 적용), h 는 수심(약 21m)이다. 만구 보정계수

$$\alpha = \left[1 + \frac{2b}{\pi l_B} \left(0.9228 - \ln \frac{\pi b}{4l_B} \right) \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

를 곱해서 공진모드를 계산해 가면 공진모드는 81.3분, 27.1분, 16.3분으로 나타난다. b 는 만의 폭으로 9.5km이다.

한편, 포항신항의 형상은 폐쇄형 만이므로

$$T_n = \frac{2l_B}{n\sqrt{gh}}, n=1,2,3,\dots \quad (2.3)$$

을 적용하여 계산해 가면 공진모드는 9.9분, 5.0분, 3.3분으로 나타난다. 이는 개략적인 값으로 계산된 것이며, 만의 수심, 좌우 형상 만내의 에너지 손실 및 만 입구의 상태에 따라 달라진다.

일반적으로 식 (2.1)~(2.3)에서 알 수 있는 바와 같이 고유주기는 항만의 면적, 길이, 폭, 수심의 인자에 좌우되므로 이를 변경하는 방안을 찾아야만 저감할 수 있는 방법이 나올 수 있는 것이다.

한국해양연구소(1995)에서는 영일만의 Helmholtz natural period로 75.5분, 제2공진주기로 31.8분, 포항신항의 제1공진주기로 22.5분, 제2공진주기로 7분을

제시하였다.

정 등(1995)이 1994년 10월에서 1995년 3월까지 10개월간 포항신항 15만톤 부두와 제1부두 사이의 수심 8m 지점에서 부진동 관측을 통해 분석한 결과에서는 일부 누락된 경우도 있지만 영일만의 제1공진주기에 해당하는 80분이 80set의 자료에서 공통적으로 나타났고, 영일만의 제2공진주기 또는 포항신항의 제1공진주기 부근에 해당하는 32분, 29.1분, 26.7분 및 22.9분 등이 기록되었으며 포항신항의 제2공진주기 이하로 8분, 5분, 2.8분의 순으로 나타났다.

한편, Helmholtz의 저주파형 항만 고유주기(Freeman, 1974)를 사용할 수도 있다.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g}{A}} \sqrt{\frac{S}{l}} \quad (2.4)$$

이때 ω_o 는 고유주파수, A 는 항의 면적, S 는 수로의 단면적, l 은 항의 길이이다. 이 또한 개략적인 값으로 항만의 수심, 좌우 형상 및 항 입구의 상태에 따라 달라진다. 일반적으로 알려져 있는 수식에서 알 수 있는 바와 같이 고유주기는 항만의 면적, 길이, 폭, 수심의 인자에 좌우되므로 이를 변경하는 방안을 찾아야만 저감할 수 있는 길이 나올 수 있는 것이다.

2.2 수치모델 기본이론

완경사방정식(Mild Slope Equation)은 일반 선형파 이론의 한 분야로 Berkhoff(1972)에 의해 개발된 이후 Chen과 Mei(1974,1975)에 의해 유한요소법(Finite Element Method)과 복합요소법(Hybrid Element Method)으로 제안되어 많은 학자들에 의해 개량되어 왔다. 이 식 자체로 천수효과(Shoaling), 회절 및 굴절과 반사 등의 물리현상을 포함하므로 수치해석에 빈번하게 사용

되고 있으나 해저마찰, 경계면흡수, 반사파의 산란(Scattering) 등을 고려한 경우는 최근에 와서이고 그나마 이들 조건을 종합화한 시도는 Chen(1985,1986)과 Lee(1987,1989) 등이 있었다.

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

본 연구에서는 이러한 점을 보완하고 수치해석의 정도를 높이기 위하여 2차원 타원형 환경사 파랑 방정식을 사용하기로 한다. 그 방정식은 식 (2.5)과 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (2.5)$$

여기서, $\hat{\eta}(x, y)$ = 복소해면 변동함수

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

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

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

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

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

식 (2.5)는 임의의 모양의 해안영역에서의 파랑의 굴절과 회절 그리고 반사가 고려된 방정식이다. 그러나, 해안영역에서는 이 외에도 해저면의 마찰, 쇄파 등의 다른 인자들도 파랑의 거동에 영향을 미치게 되며, 이를 고려하면 완경사 방정식은 다음과 같이 확장이 가능하다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad (2.6)$$

여기서, w = 마찰항

γ = 쇄파파라메타

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

$$w = \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \quad (2.7)$$

여기서, $a = H/2$; 파랑의 진폭

f_r = 마찰계수

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

Demirbilek, 1994).

$$\gamma = \frac{0.15}{d} \left(1 - \frac{0.4^2 d^2}{4a^2} \right) \quad (2.8)$$

위의 관계식 외에도, 비선형파의 시뮬레이션은 완경사방정식을 이용하여 실험할 수 있다. 이것은 이러한 시뮬레이션에 중요하다고 알려진 진폭을 고려한 파랑분산관계를 사용할 수 있다. 식 (2.5) 및 (2.6)에 있는 선형분산관계식을 비선형 산란관계식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma^2 = gk[1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd] \tanh\{kd + kaF_2\} \quad (2.9)$$

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

$$F_2 = \left(\frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^4 \quad (2.10)$$

2.3 경계조건

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial n} = \alpha \hat{n} \quad (2.11)$$

α 는 복소계수로 식 (2.12)과 같이 사용한다.

$$a = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (2.12)$$

여기서, K_r = 반사계수

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

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{n}_s \rightarrow 0 \quad (2.13)$$

여기서, \hat{n}_s = 산란파의 포텐셜

r = 중심 축에서부터 임의의 점까지의 거리

\hat{n}_s 는 Mei(1983)가 제시하였는데, 의도하는 산란파의 포텐셜 \hat{n}_s 는 환경사 방정식의 해이고, 식 (2.13)의 방사조건식을 만족한다. 이는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\hat{n}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (\alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (2.14)$$

여기서, $H_n(kr)$ = 제1종 Hankel함수

제2종 Hankel함수는 무한대에서 Sommerfeld 방사조건을 만족하지 않으므로 식 (2.14)에서 제외되었다.

그러나 \hat{n}_s 는 일정수심의 외부 영역을 필요로 한다. Fig. 2.2와 같은 항만 문제에서도, 식 (2.14)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.

$$\frac{\partial \hat{n}_s}{\partial r} + p \hat{n}_s + q \frac{\partial \hat{n}_s^2}{\partial \Theta^2} = 0 \quad (2.15)$$

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

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

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

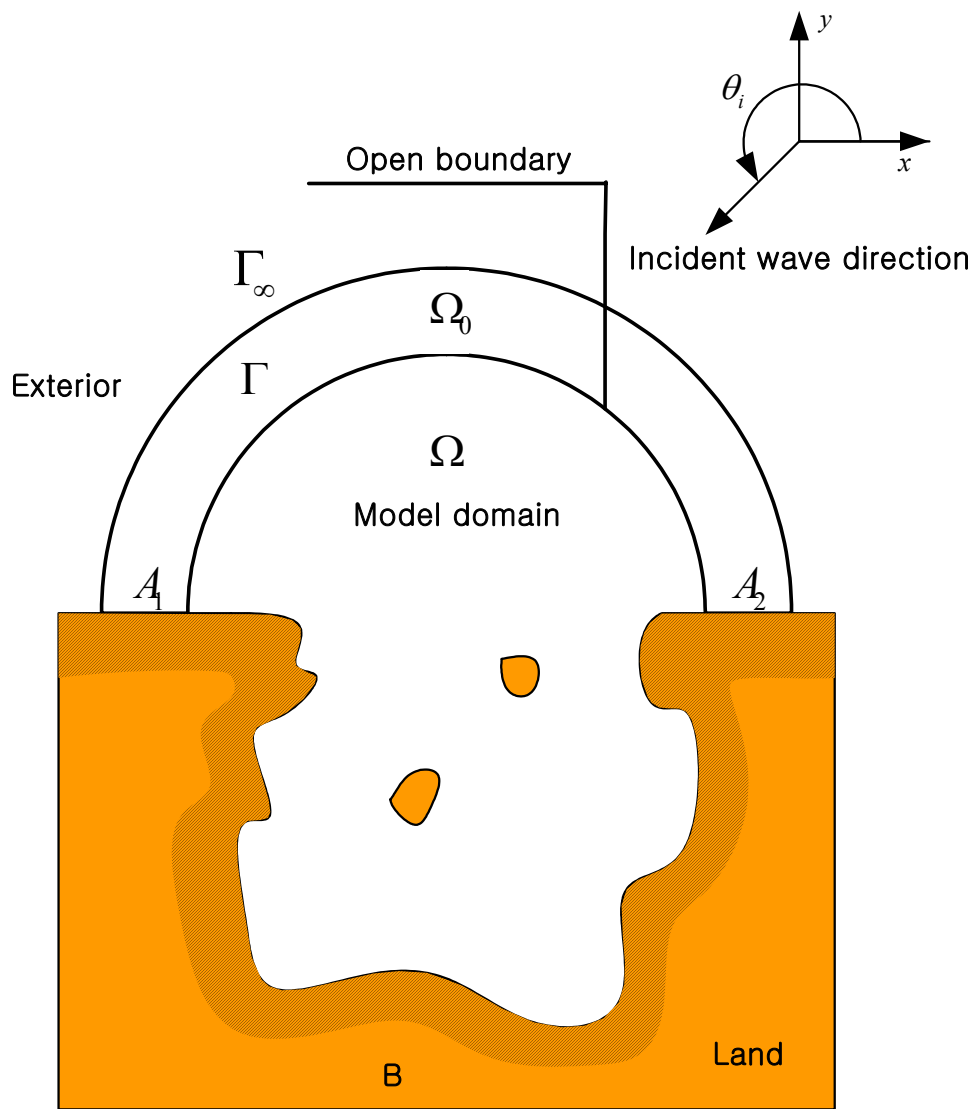


Fig. 2.4 Definition sketch of model domain

2.4 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.

$$\Phi(x, y, z, t) = [\Phi_1 \cos \omega t + \Phi_2 \sin \omega t] Z_{(z)} \quad (2.16)$$

$$Z_{(z)} = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \quad (2.17)$$

\hat{n} 의 항에서 포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{g}{\dot{\omega}} \hat{n} \quad (2.18)$$

식 (2.16)에서 이 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} K \left[\hat{n}(x, y) e^{-i\left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right)} \right] Z_{(z)} \quad (2.19)$$

$$\hat{n} = \hat{n}_1 + i\hat{n}_2 \quad (2.20)$$

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

$$\Phi = \frac{g}{\omega} [n_1 \cos \alpha + n_2 \sin \alpha] Z \quad (2.21)$$

수립자의 속도에 관한 식은 식(2.21)의 Φ 에 대해 방향별 도함수 식을 평가하여 구한다.

$$v_x = \frac{g}{\omega} \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right) \sin \alpha \right] Z \quad (2.22)$$

$$v_y = \frac{g}{\omega} \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right) \sin \alpha \right] Z \quad (2.23)$$

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.

$$|v|^2 = (v_x)^2 + (v_y)^2 \quad (2.24)$$

$$|v|^2 = \left(\frac{g}{\omega} \right)^2 Z^2 \left\{ \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] \cos^2 \alpha + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right] \sin^2 \alpha - \left[\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right] \sin(2\alpha) \right\} \quad (2.25)$$

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

$$\left\{ -\left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \sin(2\alpha) - 2 \left[\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right] \cos(2\alpha) = 0 \quad (2.26)$$

식 (2.26)을 이항하여 정리하면 식(2.27)과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2 \left[\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right]}{- \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_1}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n}_2}{\partial y} \right)^2 \right]} \right] \quad (2.27)$$

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

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = constant \quad (2.28)$$

속도에 의한 압력, 즉 운동 수두는 이와 같은 선형식에서 무시하였다. 식 (2.19)의 Φ 의 식은 이 식에서 대체 되었고, 식들을 다시 풀면 식 (2.29)로 나타낼 수 있다.

$$P = -\rho gz + \rho g K (\widehat{n} e^{-i\omega t}) Z + C \quad (2.29)$$

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

$$P_{\max} = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} Z \quad (2.30)$$

파랑의 위상각 β 는 다음의 식에서 구해진다.

$$\beta = \arctan \frac{\widehat{n}_2}{\widehat{n}_1} \quad (2.31)$$

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

$$A = \sqrt{\widehat{n}_1 + \widehat{n}_2} \quad (2.32)$$

시간 0에서 순간 해수면 높이는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\eta = K[\widehat{n}e^{-i\omega t}] = [\widehat{n}_1 \cos \omega t + \widehat{n}_2 \sin \omega t] \quad (2.33)$$

제 3 장 수치모델

3.1 대상영역 일반

영일만은 경상북도 포항시를 중심으로 북쪽으로는 흥해읍 용덕곶, 남쪽으로는 대보면의 장기곶 사이에 있는 만으로서, 행정구역상 포항시 중심지와 흥해읍·동해면·대보면에 둘러싸여 있다. 영일만은 북동쪽으로 열려 있으며, 입구의 너비는 12km, 만내의 너비는 약 10km, 입구의 수심이 16~19m 정도로 깊어 공업항 건설에 유리한 조건을 갖추었다. 해안선의 드나듦이 단조로우며, 해안단구가 발달했다. 형산강이 경상북도 경주시·포항시를 거쳐 만내로 유입하고, 그 밖에 냉천·여남천 등이 흘러들어온다. 대체로 해양성 기후의 특징을 보이거나 겨울 최저기온 -15°C 이하, 여름 최고 기온 35°C 이상으로 한서의 차가 크다. 만내에는 1940년대에 현대적인 해수욕장으로 개장된 송도해수욕장이 있다. 이 해수욕장은 2km에 이르는 반달형의 모래사장과 방풍림이 특징이다.

현재 영일만의 수산업은 그 명맥만을 유지할 뿐이고, 1962년 국제무역항으로 지정되고 1967년 포항종합제철소가 건설되면서 본격적인 동남해안공업지대의 거점지역으로 성장했다.

영일만내에 있는 포항 신항은 경상북도 포항시에 있는 항구로서 대조차 17cm, 소조차 4.8cm, 평균조차가 6.2cm로 항만건설에 유리한 입지조건을 갖추고 있다. 1962년 6월에 개항장이 된 구항과 포항종합제철(주)과 관련 산업이 입지함에 따라 건설된 신항이 있다. 국내 최초·최대의 인공항인 신항은 1968년 5월 내항의 착공을 시작으로 포항종합제철(주)의 확장과 선형(船型)의 대형화에 따라 외항·동항이 건설되었다. 내항은 포항종합제철(주) 제1기 생산규모(조강 130만t)에 맞추어 원료부두 710m, 제품부두 547.5m, 서부두, 동안벽, 북



Fig. 3.5 Two and three dimensional picture of water depth



Fig. 3.6 Location and dimension of Yeongil bay

방과제 1,922m, 동방과제 890.8m, 과제제(波除堤) 477m를 각각 1972년까지 완료했다. 이어 1973년 2월 준설을 완공하고, 1973년 3월에 처음으로 원료선이 입항했다. 포항종합제철(주) 공장설비의 확장에 따라 제1기 사업 완료 후에도 3만t급 또는 2,000t급 8선좌(船座)가 추가 건설되어 접안시설 규모는 총 17선좌가 되었다. 외항은 1973년 6월 준설투기장(浚渫投棄場) 조성을 위한 가호안(假護岸)이 착공되어 1985년 3월에 15만t 부두축조를 마지막으로 항로확폭준설(航路擴幅浚渫)을 제외한 전 사업이 완료되었다. 외항은 포항종합제철(주)의 확장에 따른 대형원료수송선을 접안 수용하고자 건설한 것으로 10만t 접안원료부두 3선좌 950m, 15만t 접안원료부두 340m, 방과제 2,050m, 방과호안 2,290m를 축조했으며, 1,056만 8,000m³의 준설작업을 실시했다. 동항(東港)은 1979년 5월 가호안 공사를 시작으로 1986년 말까지 도류제(導流堤)와 부두 1선좌를 제외한 2,546m의 중력식 안벽 10선좌와 방과제 550m, 호안 2,759m, 진입도로 2,800m를 건설했다. 특히, 동항은 항만의 입구에 인접해 있어 파랑의 영향을 많이 받아 항내의 부진동이 심한 단점이 있다.

포항신항에서 이러한 부진동과 정온도 문제에 대하여 과거 많은 연구들이 진행되어 왔다. 대표적으로 포항신항 파랑조사 및 모델실험용역(건설부, 1987), 포항항 종합계획 및 원료부두 용역설계(포항제철, 1988) 그리고 포항제철소 제4투기장조성 기본설계보고서(포항제철, 1992) 등을 들 수가 있다.

포항시는 동북아 경제권 형성 및 대북방 교역을 대비한 전략적 거점항만 개발과 경북지역 등 배후권 화물의 원활한 처리를 위하여 영일만 입구인 포항시 북구 흥해읍 전면 해상에 계획수심 12m로 영일만 신항을 시공 중에 있다(공사기간 2005년 8월 8일 ~ 2009년 8월 7일). 이 해역은 조수간만의 차가 거의 없는 자연환경을 가지고 있으며, 포항시는 배후부지에 친수공간을 확보하고, 여기에 배후 수송망, 배후산업단지 및 배후물류단지를 조성하고 있으며 경북 칠곡 ICD(내륙 컨테이너 기지) 14만평을 조성할 예정이다.



Fig. 3.7 The map of Pohang New port



Fig. 3.8 Piers in Pohang New port

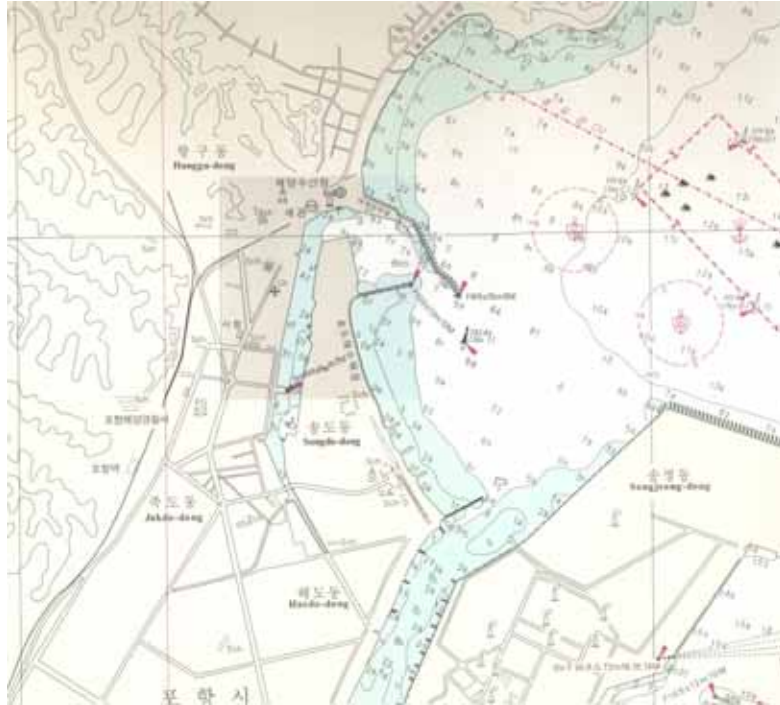


Fig. 3.9 The map of Pohang Old port



Fig. 3.10 Piers in Pohang Old port

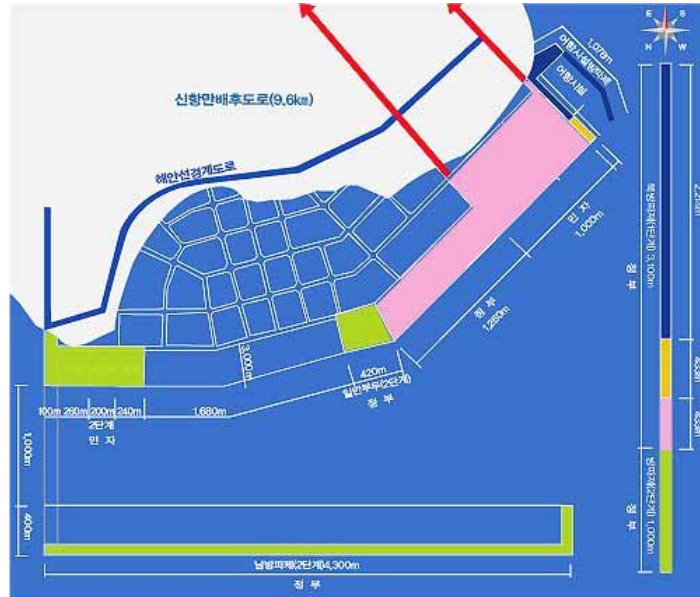


Fig. 3.11 New development plan of Yeongil New port



Fig. 3.12 Breakwaters of Yeongil New port

3.2 수치모델(Numerical Model)의 수립

본 논문에서는 영일만 신항의 1992~2011년까지 2단계에 걸친 개발 계획을 토대로 하여 시뮬레이션 모델을 수립하였다. 대상영역인 영일만 연안은 경북 포항시 북구 흥해읍 죽천리 및 우목리 전면에 위치하고 있으며, 대구광역시와 경북권, 경주 및 울산과 접해있다.

수치모델에는 파랑의 굴절, 구조물에 의한 파랑의 회절 및 부분반사, 해저마찰에 의한 에너지손실 등을 고려한 확장완경사방정식(extended mild slope equation)에 기초한 모델을 영일만 신항이 건설 중인 해역에 적용하여 신항 건설에 따른 항내 부진동의 변화를 알아보려고 한다. 부진동의 변화를 비교하기 위하여 영일만 신항 건설 전·후로 나누어 항내의 부진동 주기와 증폭비를 비교 분석하였다.

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 3.1과 같이 신항개발 전 115,718개, 신항개발 후 102,294개이다. 좌표축은 x축의 양의 방향을 진북에서 120도 방향으로 선택하였다. 포항신항의 협역모델에 사용된 요소수는 Table 3.2에 나타내었다.

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. 3.9은 영일만의 수심을 2차원으로 나타낸 그림이고, Fig. 3.10은 포항신항, 포항구항 및 영일만신항 내의 부진동 비교지점을 나타내는 그림이다. Fig. 3.11은 영일만 신항 건설이전 대상영역의 수심도와 유한요소망을 나타낸 것이

며, Fig. 3.12는 영일만 신항 건설이후 대상영역의 수심도와 유한요소망을 나타낸 것이다.

Table 3.2 Finite element model characteristics

Plan	Node	Open boundary	Element	Calculation Time
Before	59,692	239	115,718	2h 36min.
After	52,792	238	102,294	2h 29min.
Rearranged	51,246	238	101,974	2h 30min.

Table 3.3 Finite element model characteristics for Pohang New port

Plan	Node	Open boundary	Element	Calculation Time
Pohang New port	3,769	62	7,015	10min

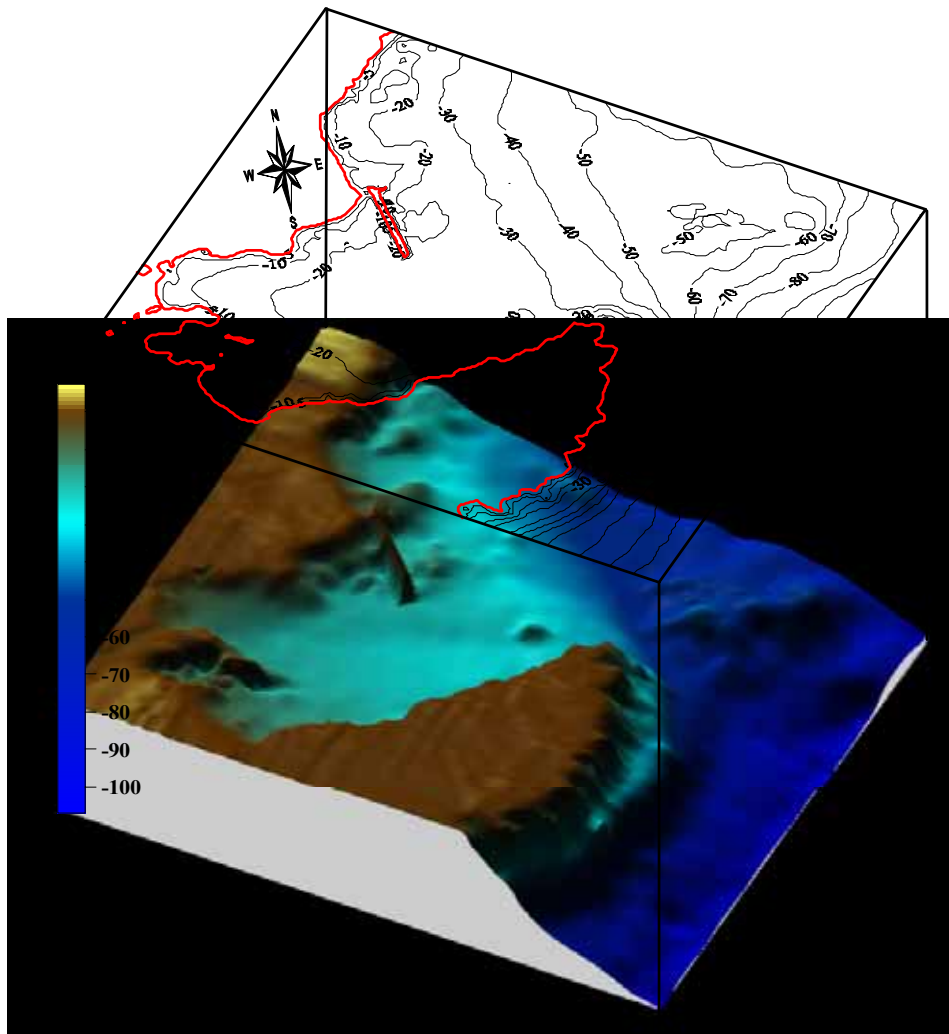


Fig. 3.13 Two and three dimensional picture of water depth at the global water

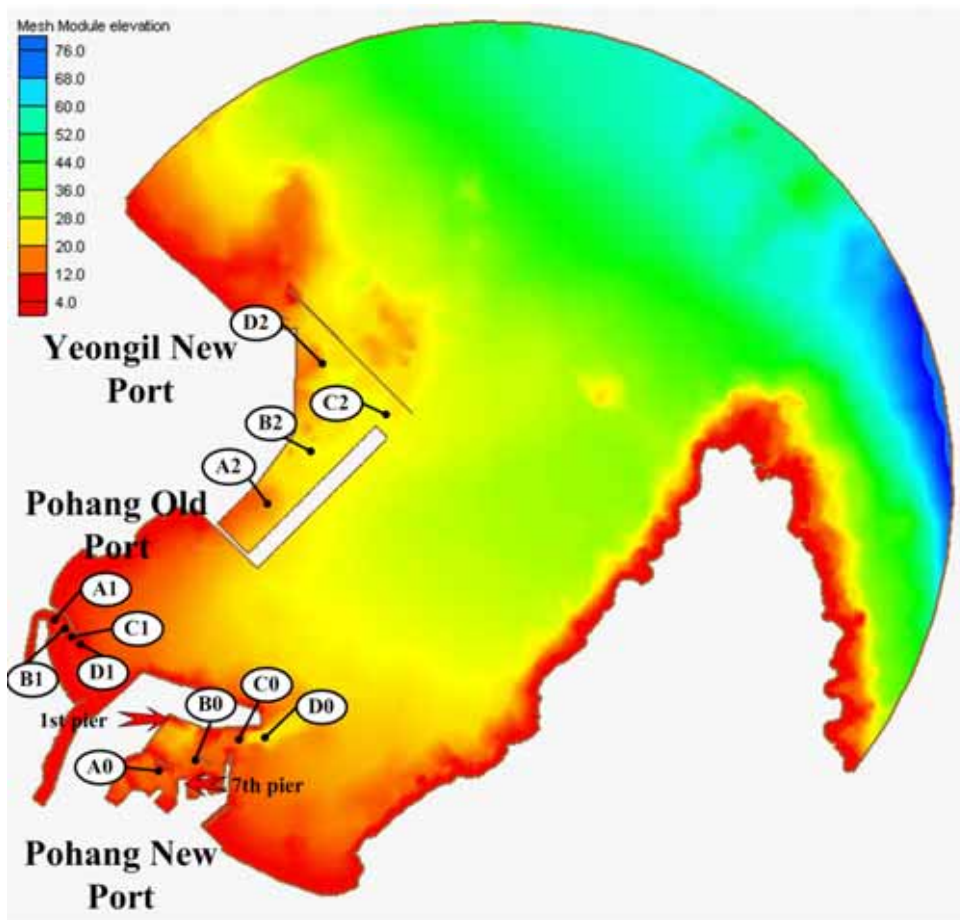


Fig. 3.14 Selected stations for comparison of harbor responses

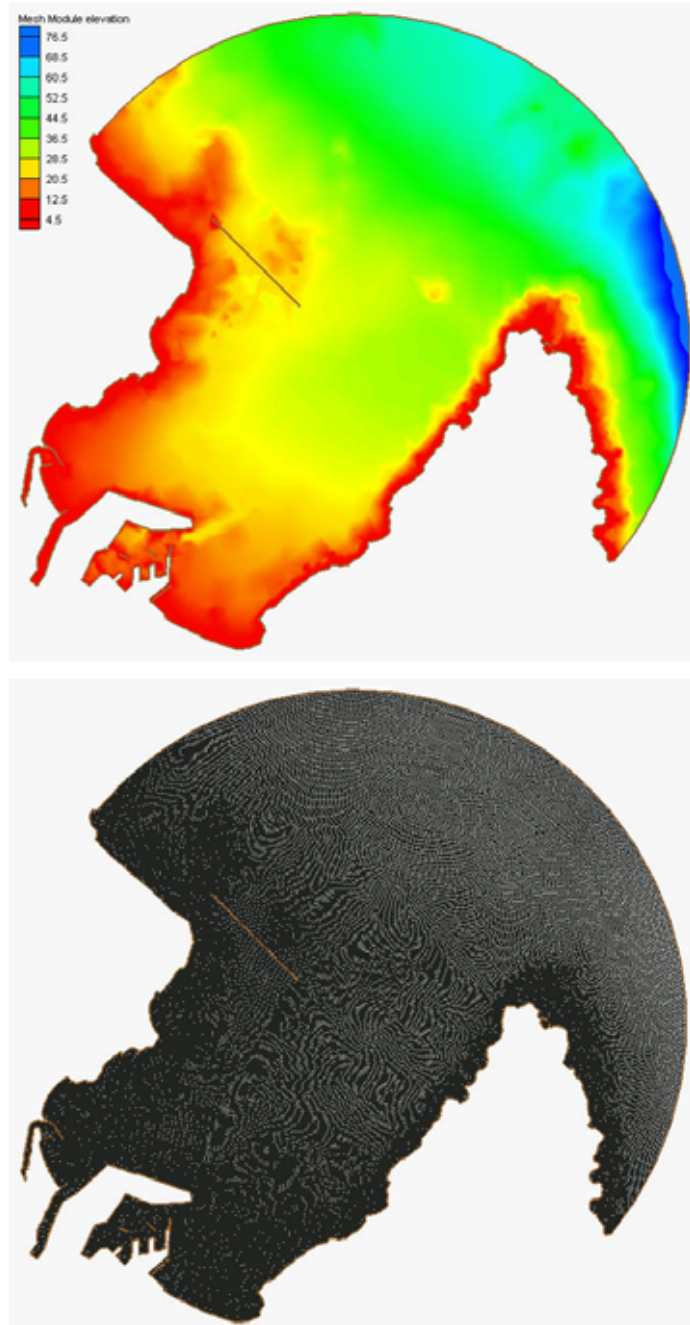


Fig. 3.15 Study area and depth for model simulation before construction of New port in Yeongil bay

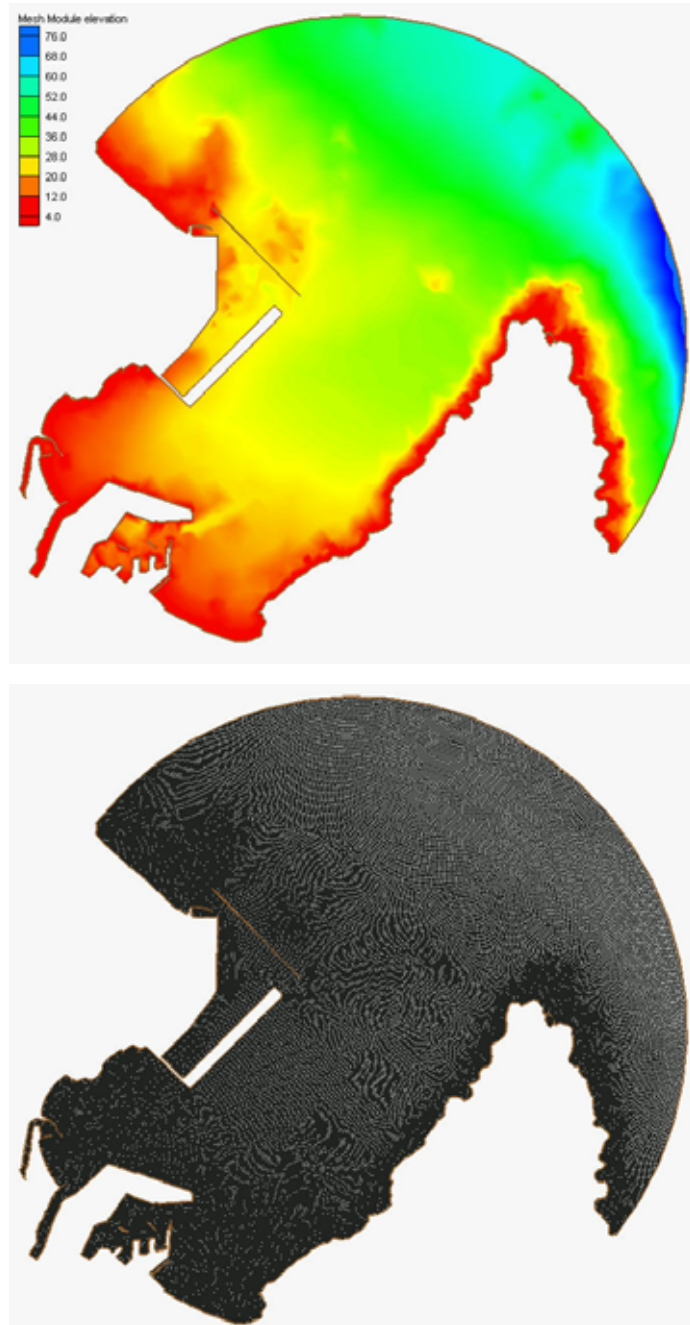


Fig. 3.16 Study area and depth for model simulation after construction of New port in Yeongil bay

영일만 항만의 부진동 변화에 대한 분석은 대상 영역을 Fig. 3.10에서 보이는 것과 같이 포항구항, 포항신항, 그리고 영일만 신항을 모두 포함하고 있다. 영일만 신항의 경우 현재 방파제 4.1km만이 완공단계에 있고 부두의 경우는 아직 공사 중에 있다. 영일만 항만에 대한 수치실험은 대상해역을 영일만 신항의 개발 전후로 제한하여 만내의 3개 항에서 주요 개소에 대한 반응 특성을 분석하는 것으로 하고 현재의 항만조건과 대비시켜 분석하였다.

환경사 방정식 파랑모델의 적용 해역은 계방경계영역을 영일만 신항 방파제의 북쪽 시작점 상단을 좌측한계, 장기곶 해안선을 우측한계로 한 반원영역으로 설정하고, 그 이내의 만 해역을 대상으로 하였다.

3.3 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

θ_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 θ_I 가 0일 경우 입사파는 x축의 양의 방향을 따라 이동하는 것으로 한다. Ω 영역을 유한요소망에 의한 수치모델영역, Ω_0 는 무한대로 방사하는 외부영역으로 정의한다. 복잡한 지형과 구조물 및 섬들이 영역 Γ 내부에 존재한다고 하면, Ω_0 에서 총파량은 입사파와 산란파의 합으로 식 (3.3)과 같이 정의한다.

$$\hat{n}_{ext} = \hat{n}_I + \hat{n}_S \quad (3.3)$$

식 (2.2)는 일반형으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 $\tilde{a} \equiv CC_g$

$$\tilde{b} \equiv \frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma x$$

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 F가 일정하다는 것을 나타낸 바 있다.

$$F = \int \int_{\Omega} \frac{1}{2} [\tilde{a} (\nabla \hat{n})^2 - \tilde{b} \hat{n}^2] dA - \int_B \frac{1}{2} \tilde{a} \hat{n}^2 ds + \int_{\Gamma} \tilde{a} \left[\left(\frac{1}{2} \hat{n}_S + \hat{n}_I \right) \frac{\partial \hat{n}_S}{\partial n} - \hat{n} \frac{\partial (\hat{n}_S + \hat{n}_I)}{\partial n} \right] ds \quad (3.5)$$

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

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

$\hat{\eta}^e$ 가 요소 e 의 끝점에서 파랑포텐셜과 N_i^e 를 나타내는 것은 선형적분함수 식으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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 e에서, 아래의 관계식을 식 (3.5)식에 대입한다.

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

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

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

여기서, $a=1,2$; dummy index notation

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

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

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

식 (3.5)의 첫 번째 부분은 다음과 같이 쓰여 진다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \int \int_{\Omega} \frac{1}{2} (\widetilde{a} (\nabla \widehat{n})^2 - \widetilde{b} \widehat{n}^2) dA \\ &= \frac{1}{2} \sum_{e \in \mathcal{E}} \{ \widehat{n}^e \}^T [K_1^e] \{ \widehat{n}^e \} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$\begin{matrix} 1 \times 3 & & 3 \times 3 & & 3 \times 1 \end{matrix}$

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

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

$$\frac{\partial N_i^e}{\partial x_\alpha} \frac{\partial N_j^e}{\partial x_\alpha} = \frac{1}{(2\Delta^e)^2} (b_i b_j + c_i c_j) \quad (3.16)$$

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

$$\widetilde{a}_\beta^e \int_e \int_\beta N_\beta^e \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x_a} \frac{\partial N_j^e}{\partial x_a} \right) dx dy = \frac{\widetilde{a}_1^e + \widetilde{a}_2^e + \widetilde{a}_3^e}{12 \Delta^e} (b_i b_j + c_i c_j) \quad (3.18)$$

식 (3.15)의 두 번째 항은,

$$\begin{aligned} & \widetilde{b}_\beta^e \int_e \int_\beta N_\beta^e N_i^e N_j^e dx dy \\ &= \widetilde{b}_i^e \int_e \int_\beta (N_i^e)^2 N_j^e dx dy + \widetilde{b}_j^e \int_e \int_\beta N_i^e (N_j^e)^2 dx dy + \widetilde{b}_k^e \int_e \int_\beta N_i^e N_j^e N_k^e dx dy \\ &= \frac{\Delta^e}{60} (2 \widetilde{b}_i^e + 2 \widetilde{b}_j^e + 2 \widetilde{b}_k^e) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$i \neq j$ 이면,

$$\begin{aligned} & \widetilde{b}_\beta^e \int_e \int_\beta N_\beta^e N_i^e N_j^e dx dy \\ &= \widetilde{b}_i^e \int_e \int_\beta (N_i^e)^3 dx dy + \widetilde{b}_{k1}^e \int_e \int_\beta N_{k1}^e (N_i^e)^2 dx dy + \widetilde{b}_{k2}^e \int_e \int_\beta N_{k2}^e (N_i^e)^2 dx dy \\ &= \frac{\Delta^e}{30} (3 \widetilde{b}_i^e + \widetilde{b}_{k1}^e + \widetilde{b}_{k2}^e) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$i = j \equiv i$ 일 때, $k1$ 과 $k2$ 는 요소 e 의 다른 두개의 교점이다. 식 (3.15)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{1,i,j}^e &= \frac{\widetilde{a}_1^e + \widetilde{a}_2^e + \widetilde{a}_3^e}{12 \Delta^e} (b_i b_j + c_i c_j) \\ &\begin{cases} \frac{\Delta^e}{60} (2 \widetilde{b}_i^e + 2 \widetilde{b}_j^e + 2 \widetilde{b}_k^e) & \text{when } i \neq j \\ \frac{\Delta^e}{30} (3 \widetilde{b}_i^e + \widetilde{b}_{k1}^e + \widetilde{b}_{k2}^e) & \text{when } i = j \equiv i \end{cases} \end{aligned} \quad (3.21)$$

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.

$$I_1 = \frac{1}{2} \sum_{e \in \Omega} \{\hat{n}^e\}^T [K_1^e] \{\hat{n}^e\} = \frac{1}{2} \{\hat{n}\}^T [K_1] \{\hat{n}\} \quad (3.22)$$

$\begin{matrix} 1 \times 3 & & 3 \times 3 & & 3 \times 1 \end{matrix}$

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

여기서, N = 영역 Ω 에서 교점의 총 수이다.

식 (3.5)의 두 번째 항은 다음과 같이 정리된다.

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

여기서, B = 해안선과 육지경계를 나타낸다.

해안경계 B의 p 부분을 따라서, 파랑 표면 고함수 \hat{n} 와 변수 \tilde{a} 는 선형 함수에 의해 다음과 같이 근사된다.

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

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

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

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

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

이때 식 (3.24)는 다음과 같다.

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

여기서, $N_b =$ 경계를 따르는 마디들의 전체 개수

$$\begin{aligned} K_{2,i,j}^P &= \alpha \widetilde{a}_b P \int_{(point\ i)}^{(point\ j)} N_b^P N_i^P N_j^P ds \\ &= \begin{cases} \frac{1}{12} \alpha L^P (\widetilde{a}_i^P + \widetilde{a}_j^P) & i \neq j \\ \frac{1}{12} \alpha L^P (3 \widetilde{a}_i^P + \widetilde{a}_j^P) & i = j \equiv i \end{cases} \end{aligned} \quad (3.29)$$

해안경계를 따르는 모든 부분들을 합치면 다음과 같다.

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

식 (3.5)의 세 번째 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \int_G \tilde{a} \left[\left(\frac{1}{2} \widehat{n}_s + \widehat{n}_I \right) \frac{\partial \widehat{n}_s}{\partial n} - \widehat{n} \frac{\partial (\widehat{n}_s + \widehat{n}_I)}{\partial n} \right] ds = I_3 + I_4 = I_5 + I_6 \\
 I_3 &= \frac{1}{2} \int_G \tilde{a} \widehat{n}_s \frac{\partial \widehat{n}_s}{\partial n} ds \\
 I_4 &= - \int_G \tilde{a} \widehat{n} \frac{\partial \widehat{n}_s}{\partial n} ds \quad \cdots \quad I_4 \\
 I_5 &= - \int_G \tilde{a} \widehat{n} \frac{\partial \widehat{n}_I}{\partial n} ds \quad \cdots \quad I_5 \\
 I_6 &= + \int_G \tilde{a} \widehat{n}_I \frac{\partial \widehat{n}_s}{\partial n} ds \quad \cdots \quad I_6
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

간략히 하기 위해, 개방경계 Γ 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 선정하기 위해 많은 시행착오를 반복해야 한다. 여기서, 우리는 m 번째 항 이하를 잘라버리는 것으로 가정하였다. 다음의 삼각함수의 직교성을 이용하여

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

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

식 (2.13)의 \widehat{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 Γ 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 쉽게 하기 위해, 미정계수 α_i 와 β_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

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

식 (3.31)에서 I_4 는 다음과 같다.

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

여기서, $L^P =$ 세그먼트 P의 길이

$N_\Gamma =$ 원형 경계 Γ 를 따르는 세그먼트들의 개수

식 (3.39)에서, $\partial \widehat{n}_s / \partial n$ 의 값은 세그먼트 P의 중심 값으로 보간 되었다. 식 (3.39)은 행렬형으로 다음과 같이 정의한다.

$$I_4 = \{ \widehat{n}^\Gamma \}^T [K_4] \{ \mu \} \tag{3.40}$$

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

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

$$\{ \widehat{n}^\Gamma \}_{L \times N_\Gamma}^T = \{ \widehat{n}_1^\Gamma, \widehat{n}_2^\Gamma, \widehat{n}_3^\Gamma, \dots, \widehat{n}_{N_\Gamma}^\Gamma \} \tag{3.41}$$

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

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 Γ 에서 세그먼트는 \hat{n} 의 선형변수로 취할 것이다. 식 (3.1)에 의해 I_5 에서 \hat{n} 를 대체하면,

$$\begin{aligned} I_5 &= \int_{\Gamma} \tilde{a} \hat{n} \frac{\partial \hat{n}_I}{\partial n} ds \\ &= \frac{i}{2} \tilde{k} \tilde{a} A \sum_{P=1}^{N_{\Gamma}} L^P (\hat{n}_i^P + \hat{n}_j^P) \cos(\theta_P - \theta_1) \exp[ikR \cos(\theta_P - \theta_I)] \\ &= \{Q_5\}^T \{\hat{n}^{\Gamma}\} \end{aligned} \quad (3.43)$$

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

$$q_P = \cos(\theta_P - \theta_1) \exp[ikR \cos(\theta_P - \theta_I)], \quad P = 1, 2, \dots, N_{\Gamma} \quad (3.45)$$

식 (3.31)에서 적분 I_6 는 \hat{n}_S 와 \hat{n}_I 를 포함한다. \hat{n}_I 의 Bessel-Fourier 형이

사용되며, 해석적으로 적분을 구할 수 있다.

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

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

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

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

Fig. 2.4에서, A는 입사파의 진폭이고, Θ_I 는 외부 해안선을 따르는 입사 파향을 나타낸다. 외부영역에서의 산란파랑의 포텐셜은 외해 해안선 경계조건을 따르기 위해 다음과 같이 쓰여 진다(Xu, Panchang and Demirbilek, 1995).

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

항만문제에 대응하는 함수는 식 (3.5)와 같은 형태를 가진다. 식 (3.5)에서 \widehat{n}_I 는 \widehat{n}_O 로 대체 되어야 한다, 식 (3.49)에 의해 \widehat{n}_S 는 새로운 형식으로 바꾸고, 개방 경계 Γ 는 Fig. 2.4에서 보여 지는 반원의 형태로 나타낸다. 항만 문제에서의 유한요소는 위에 설명된 개방해역 문제에서와 비슷한 방법으로 \widehat{n}_I 와 \widehat{n}_S 를 식 (3.48)과 식 (3.49)로 바꾸고 0에서 π 까지 I_4 에서 I_6 까지 경계 적분을 수행함으로서 쉽게 구할 수 있다.

선형 삼각 요소망에 의해서 식 (3.5)에서 정의된 범함수 F에서의 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 F는 일정하므로, 문제의 해는 다음과 같다.

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

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

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

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

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

식 (3.55)에 의해 식 (3.53)의 $\{\mu\}$ 를 대입하면, 식 (3.53)은 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 과랑장을 구할 수 있다.

3.4 모델의 검증

수립한 수치 모델의 검증을 위하여 수리모형 실험 결과가 제시되어있는 장방형만에 대해 비선형성, 마찰효과 반사계수의 변화에 따른 반응 특성을 비교, 분석하였다. 공진현상에서 발생하는 과랑에너지의 분산에서 저면마찰의 영향을 비교 분석하기로 한다. 저면마찰의 영향을 연구하기 위한 비교지점은 Table 3.3에 나타내었고, 적용한 장방형 항만의 개방경계와 형태는 Fig. 3.13과 같이 수리모형에서 길이 $L=0.3111m$, 폭 $B=0.0604m$, 수심 $H=0.2572m$ 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 통

해 분석하였다.

해안경계에서 해저마찰의 도입 없이 완전반사의 조건으로 적용한 선형파 모델 결과에서는 Fig. 3.14와 같이 Ippen과 Goda(1963)의 해석해와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 비교한 지점은 Fig. 3.13에서 표기한 항만 최 내측의 A지점이다.

한편, Fig. 3.15는 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. 3.16은 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.

Table 3.4 Comparison points for the verification of the model

<i>Amplitude</i>	<i>Kl</i>
0.13	0.2
0.13	0.4
0.13	0.6
0.13	0.8
0.13	1.0
0.13	1.1
0.38	1.2
0.38	1.3
0.25	1.4
0.25	1.5
0.25	1.6
0.30	1.8
0.25	2.0
0.25	2.5
0.30	3.0
0.25	3.5
0.35	4.0
0.35	4.2
0.35	4.4
0.25	4.6
0.30	4.8
0.30	5.0

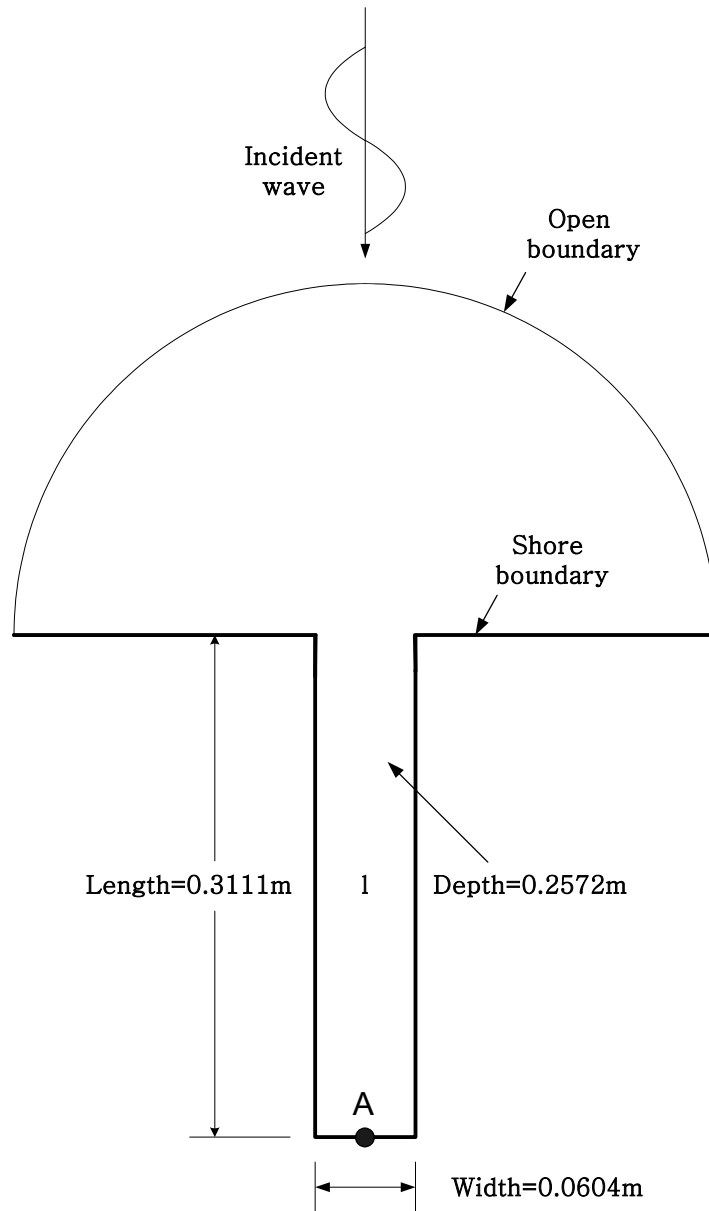


Fig. 3.17 Rectangular harbor with semi-circular open boundary

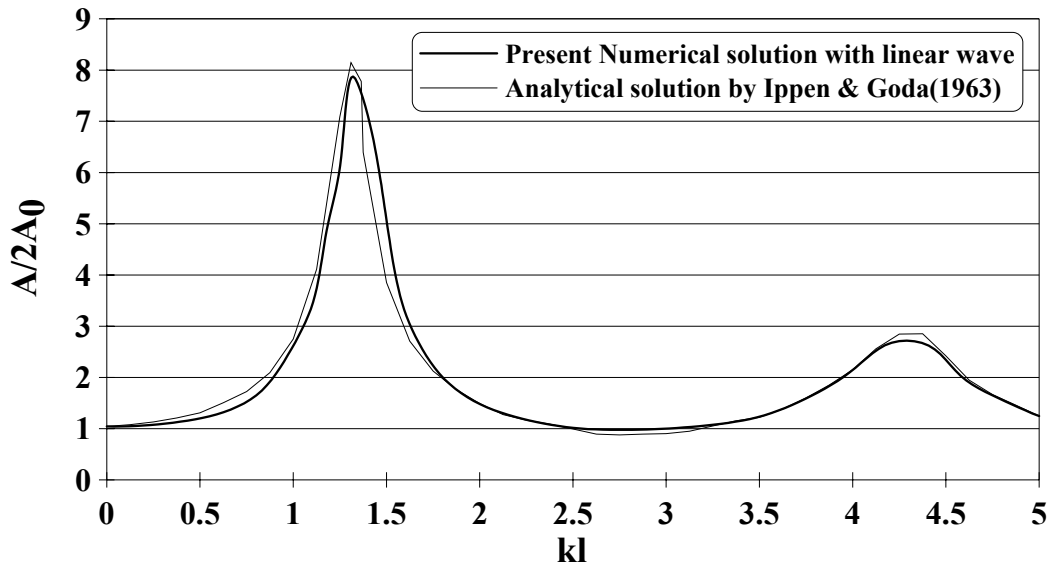


Fig. 3.18 Theoretical and numerical resonance curves for a fully reflecting rectangular harbor

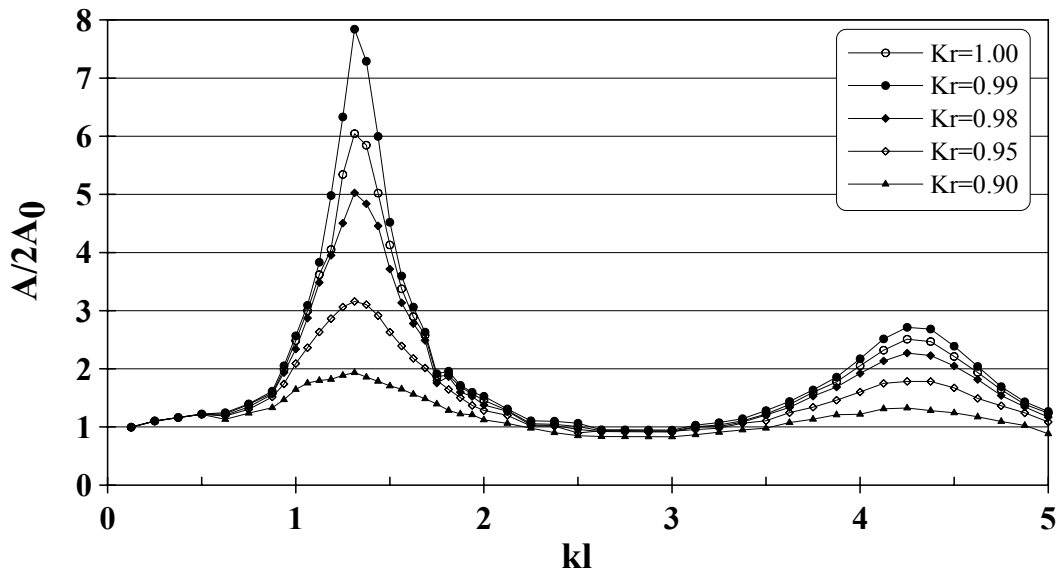


Fig. 3.19 Harbor response curves for various values of coastal reflection coefficient

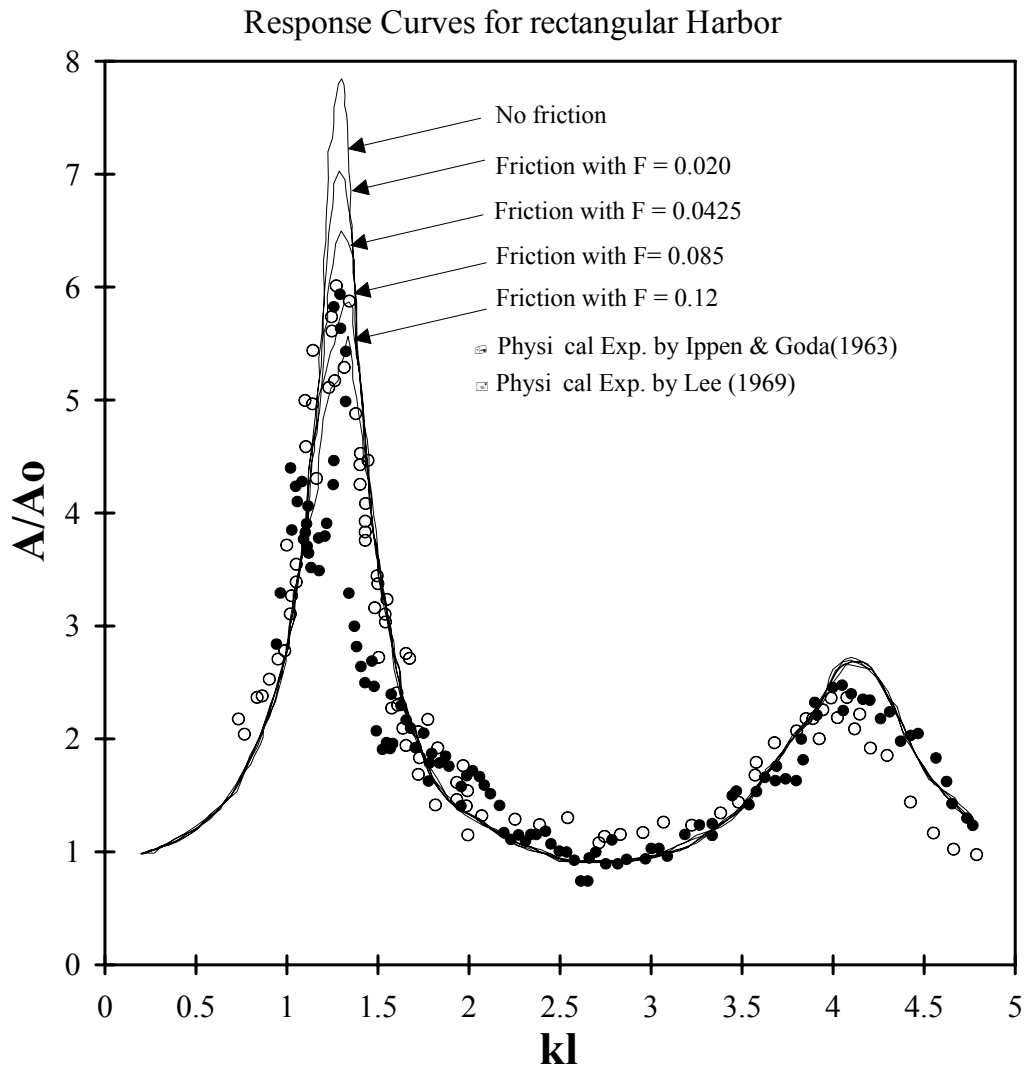


Fig. 3.20 Harbor response curves for various values of the friction factor

3.5 과거 연구자료 및 현장관측자료

앞서 언급한 바와 같이, 국내 항만에서의 부진동 현상이 가장 현저하게 나타나는 곳은 영일만의 포항신항이며 이미 포항종합제철단지를 조성하는 초기부터 거론이 되어 이를 해소하기 위한 노력이 반복되고 있으나, 현재까지도 이렇다 할 성과를 내놓지 못하고 있는 실정이다.

영일만 및 포항신항에서의 부진동은 검조자료의 분석(추, 1974; 1976)과 건설부에 의한 대규모 현장관측(한국해양연구소, 1987)을 통해 영일만내의 종방향 제1 및 제2 공진주기와 횡방향 공진주기 및 포항신항의 제1, 제2 공진주기, 그리고 국부적인 공진주기의 일부가 제시되었다. 추(1974, 1976)는 1968년부터 건설된 포항신항의 부진동 현상에 대해 1973~1974년의 2년간 포항신항내 검조소의 기록중 진폭이 20 cm 이상인 진동만을 선택하여 평균파법을 사용한 통계적 분석을 실시한 결과 부진동의 월별 발생빈도는 2월과 10월에 가장 높고 6~8월에 가장 낮은 것으로 분석하였다. 또한, 영일만의 제1 고유주기로 약 83.5분, 포항신항의 고유주기로 약 12.3분을 각각 제시하였다. 박 등(1986)은 포항신항의 제4기 확장사업후 검조 자료의 분석에서 신항내에서 20.0분과 6.6분을 제1 및 제2 고유주기로 각각 제시하였고, 영일만의 폭방향 제1, 제2 진동 주기로 20.7분과 15.1분을 각각 제시하였다. 특히, 지진해일이 내습한 1983년 5월과 태풍이 통과한 1985년 10월의 검조 자료의 스펙트럼 분석을 통하여 76.9분, 26.3분, 혹은 23.8분의 주기에서 에너지의 첨두치도 가려냈다.

한국해양연구소(1987)는 1987년 1월~3월과 8월~9월의 2회에 걸쳐 영일만과 포항신항 내외의 15개 정점에서 Aanderaa WLR-5 자동조위계를 사용하여 관측한 부진동 자료 분석을 통하여 영일만 길이방향으로 제1 고유주기를 약 80분, 제2 고유주기를 약 28분, 폭방향으로 17분 주기의 부진동이 존재함을 확인하였다. 또한, 포항신항에 대해서는 제1 고유주기가 대략 33분과 23분 중의

하나일 것으로 판단하고, 제2 고유주기는 약 8분인 것으로 관측을 통하여 확인하였다. 한국해양연구소(1995)는 포항신항내 15만톤 부두와 제1 부두가 만나는 지점에 수압식 파고계를 1994년 2월~1995년 1월까지 설치하여 연속적으로 수압변화를 관측하고, 자료를 분석하여 영일만 제1 공진주기인 주기 80분의 공진 모드의 진폭은 평균 0.08~0.1m, 최대 0.25m를 제시하였으며, 동계의 진폭이 하계보다는 컸으나 춘계 및 추계와는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 평가하였다. 위의 항만부진동 연구결과를 Table 3.4에 정리하였다.

이 밖에도 항만부진동에 대한 현장관측분석은 1990년대 이후 동해항, 묵호항, 죽변항, 온산항 및 울산신항만, 가장 최근에는 부산의 감천항 등에 대해 이루어 졌으며 신항만 계획과 항만재정비에서 검토가 이루어져 항만설계분야에서 점차 관심이 깊어져 부진동에 대한 연구가 급성장하게 되었다.

Table 3.5 Former study results for the oscillation periods in Yeongil bay and Pohang New port

연구자	공진주기(영일만)		공진주기(포항신항)	
	1주기	2주기	1주기	2주기
박 등(1986)	70.25분	7.5분	22.5분	7.5분
한국해양연구소(1995)	75.5분	31.8분	22.5분	7분
한국항만수리지	80분	27분	28~26분	8분

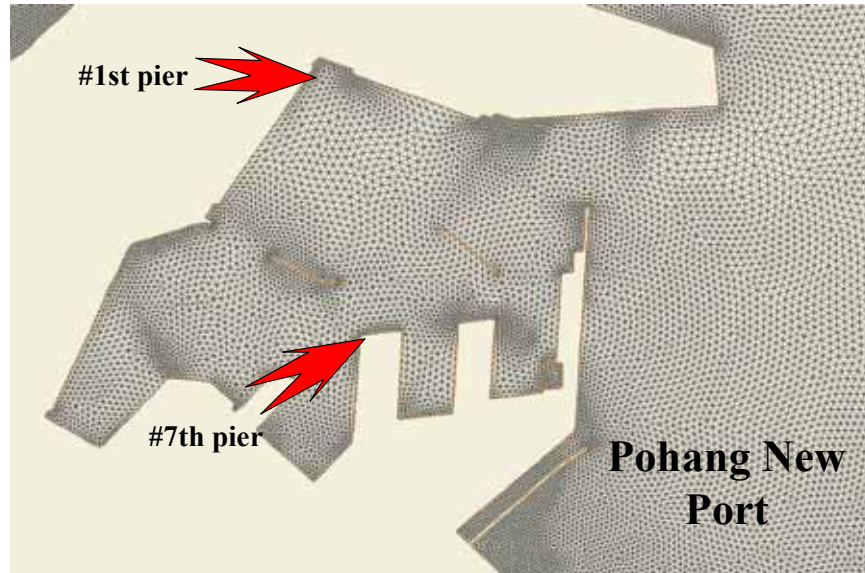


Fig. 3.21 Two field observation points

본 연구에서는 수치실험 결과의 검증을 위하여 정 등(1997)의 현장관측 자료를 인용하였다. Fig. 3.17에서는 포항신항내 1번부두와 7번부두의 현장관측 지점을 나타내었다. 7번 부두전면에서 1994년 3월 25일 9시부터 24시간마다 5초 간격 자료 16,384개(자료 길이는 약 22.8시간)에 대해 스펙트럼 분석을 하고 128개 주파수 성분에서의 에너지 스펙트럼의 시간적 변화를 나타낸 그림을 Fig. 3.18에서 나타내었다. Fig 3.19는 1번 부두전면에서 1994년 2월 21일 12시부터 48시간마다 8초 간격 자료 8,192개(자료 길이는 약 18.2시간)에 대해 스펙트럼 분석을 실시하고 128개 주파수 성분에서의 에너지 스펙트럼의 시간적 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3.20에서는 포항종합제철주식회사에서 1987년부터 2001년까지 포항신항의 부두 및 선석에서 하역작업 중단기록을 나타낸 그림으로서, 1991년부터 총 하역 중단시간이 크게 감소하였음을 볼 수 있었다. 1994년에는 하역중단시간과 선박수가 1992년과 1993년에 비해 상당히 감소하였는데, 이는 제7부두를 전천후 부두로 개선한 것에 연유된 것으로 사료된다.(정 등,1997)

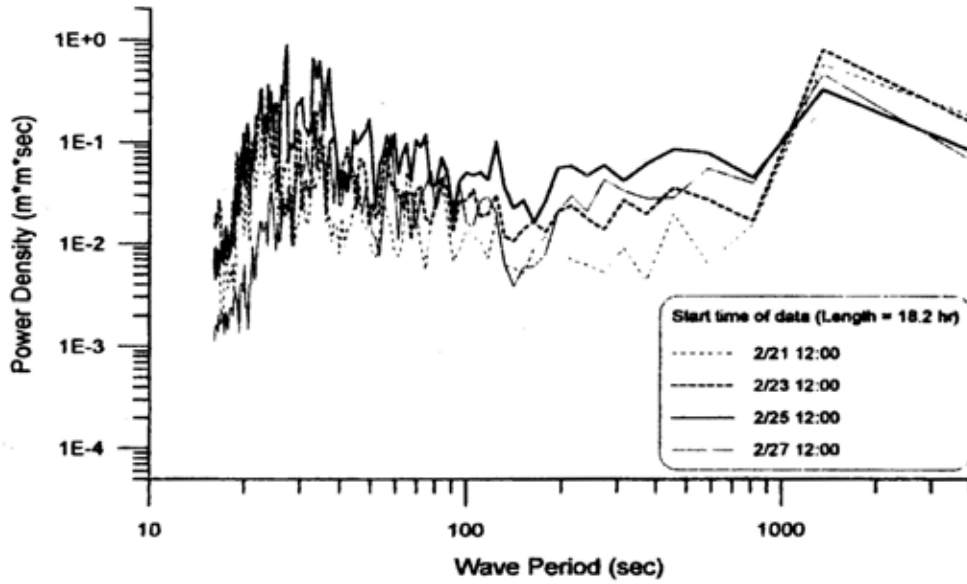


Fig. 3.22 Comparison of harbor response at 1st pier in Pohang New port

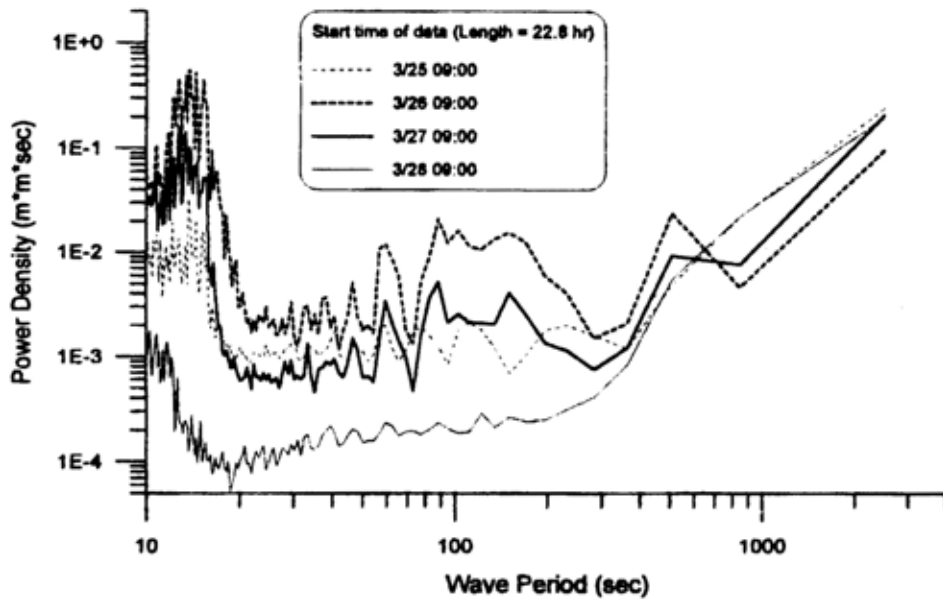


Fig. 3.23 Comparison of harbor response at 1st pier in Pohang New port

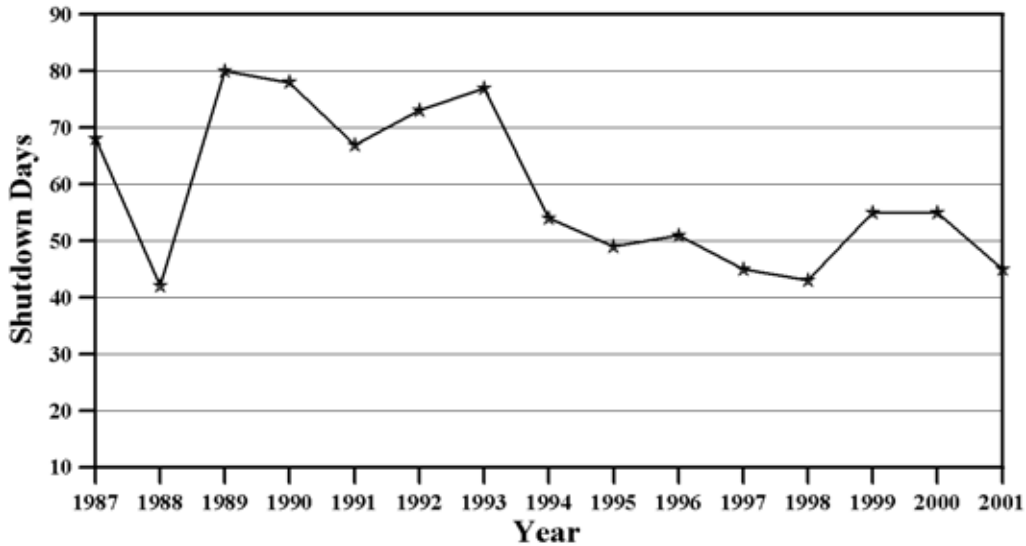


Fig. 3.24 Shutdown days of cargo handling work due to dynamic motion of the mooring vessel at Pohang New port(1987-2001)

포항중합제철주식회사의 내부자료(2003)를 통하여 1987년부터 2001년까지의 포항신항에 대한 장주기파랑 및 기상으로 인한 하역작업 불능일수를 분석한 결과 Fig. 3.20과 같이 나타났다. 포항항의 1, 2, 3, 4번 부두를 제외한 나머지 부두의 최근 3년간 평균 가동율은 황천 시 하역중단 99일(27%)과 선체동요로 인한 하역중단 58일(17%)을 제외하면 실제 정상하역가능일수는 208일(56%)밖에 되지 않는 것으로 된다. 최근 3년간의 평균치에 의하면 하역중단일수 58일 중 봄 12.1일(21%), 여름 3.7일(6%), 가을 17.4일(30%), 겨울 24.8일(43%)로 분류되었다.

포항항에서의 부진동에 관한 연구는 초기 현장관측기록을 통해 인지되기 시작하였고(추, 1974, 1976), 포항신항을 포함한 영일만에서의 부진동 현상을 2차원 차분모델로 분석 한 이후 박(1986), 건설부(1987), 강 등(1989), 해운항만청(1994), 정 등(1999)이 현장관측 및 수치모형실험 결과를 통하여 그 존재를 확인하기에 이르렀다. 부진동의 저감은 일단 발생하는 항만에서 그 진동주기를

변경시키거나 증폭비를 감쇄시키는 2가지 방법으로 접근하여야 한다. 즉, 항만이 가지고 있는 1개 이상의 고유진동주기에 대해 항만에 유입되는 주기가 공진이 되지 않도록 하는 것이지만 이것은 쉽지 않고, 다만 항만으로의 이용도가 크지 않거나 일시적인 박지로 활용할 수 있는 공간으로 공진을 유도하여 반응주파수를 걸러내는 적극적인 방법과 기존 안벽의 구조를 변경하여 어느 정도 감쇄효과를 가져오도록 하는 일반적인 방법이 있을 수 있다(이 등, 2001).

제 4 장 수치실험 및 분석

4.1 대상영역의 일반

본 장에서는 확장 환경사방정식에 기초한 수치모델을 영일만 신항이 건설 중인 영일만 해역에 적용하여 신항 건설에 따른 만내 항만부진동의 변화를 알아보고자 한다. 먼저 모델을 검증하기 위하여 포항신항의 협역에 대한 수치실험을 실시하여 모델의 적용성을 검증하였고, 부진동의 변화를 비교하기 위하여 영일만 신항 건설 전·후로 나누어 항내의 부진동 주기와 증폭비를 비교 분석하였다. 그리고 부진동의 저감방안으로서 영일만 신항 북방파제와 포항신항의 방파제 길이를 약 300~500m 연장 후 수치실험을 실시하였다.

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, 진폭은 1m, 주기는 60초에서 5,400초까지를 사용하였다.

대상영역인 영일만내의 포항신항, 포항구항 및 영일만신항을 Fig. 4.1에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 영일만은 전형적인 장방형만(Rectangular shape)으로서, 만의 폭은 12Km, 길이는 약 21Km이다.

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. 4.2~Fig. 4.6은 포항신항, 포항구항 및 영일만신항에서의 항내부진동을 비교하기 위해 선정된 지점들과 포항신항 협역모델의 Mesh를 나타내는 그림이다. Fig. 4.7은 진폭주기를 줄이기 위하여 적용된 영일만 신항 방파제와 포

항신항 방파제를 각 500m와 300m 연장시킨 형태를 나타내는 그림이다. 방파제의 형태에 대해서는 좀 더 많은 Case별 연구가 진행 되어야 하지만 본 연구에서는 선행연구의 의미로서 단순히 방파제의 길이를 연장하는 방법을 적용하였다.

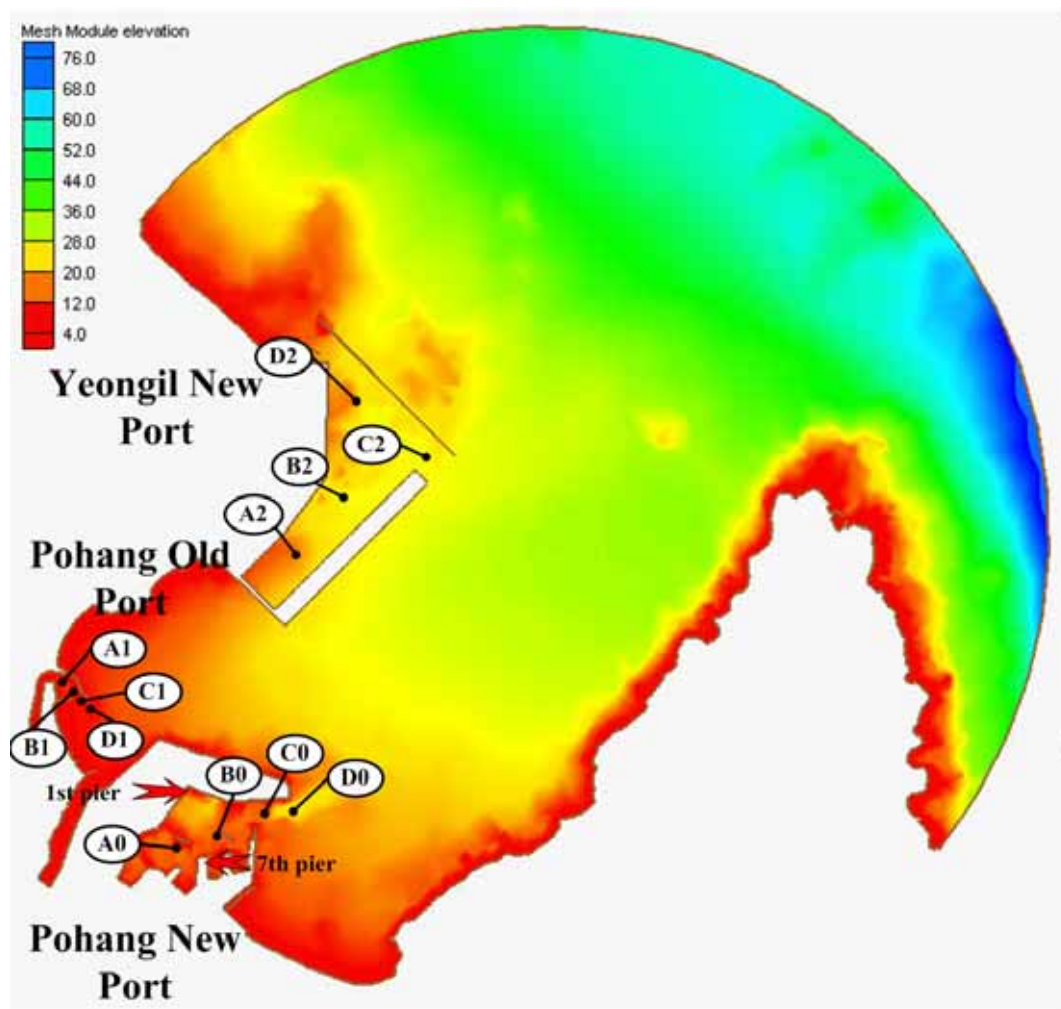


Fig. 4.25 Location map of numerical model measurement stations in Yeongil bay

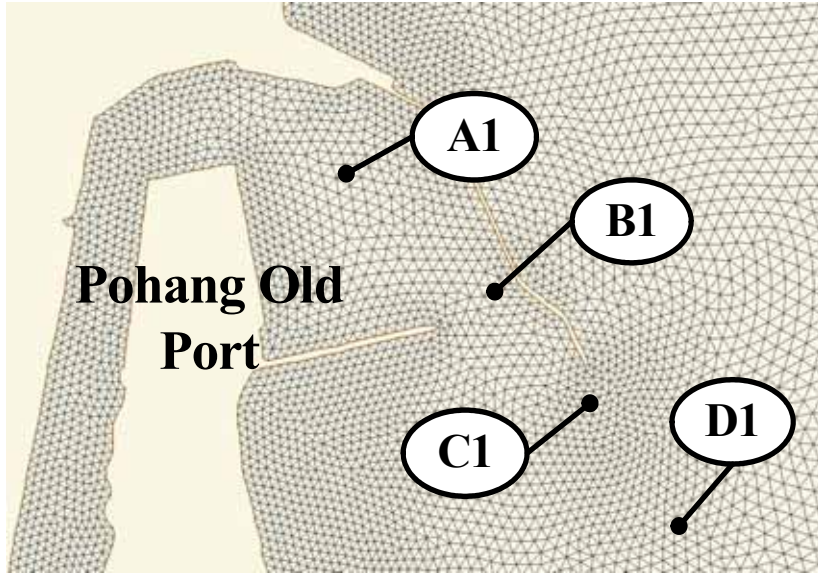


Fig. 4.26 Numerical model measurement stations in Pohang Old port

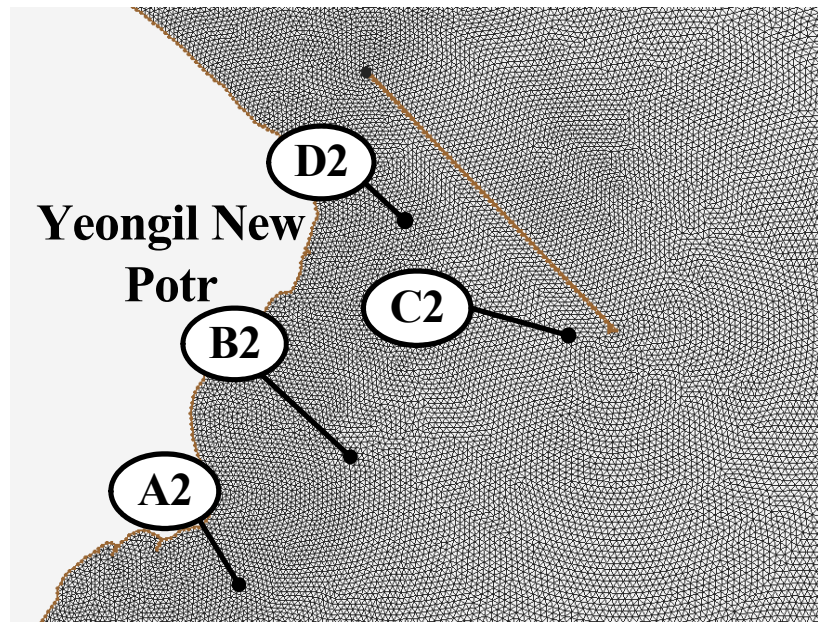


Fig. 4.27 Numerical model measurement stations in Yeongil New port (Before construction)

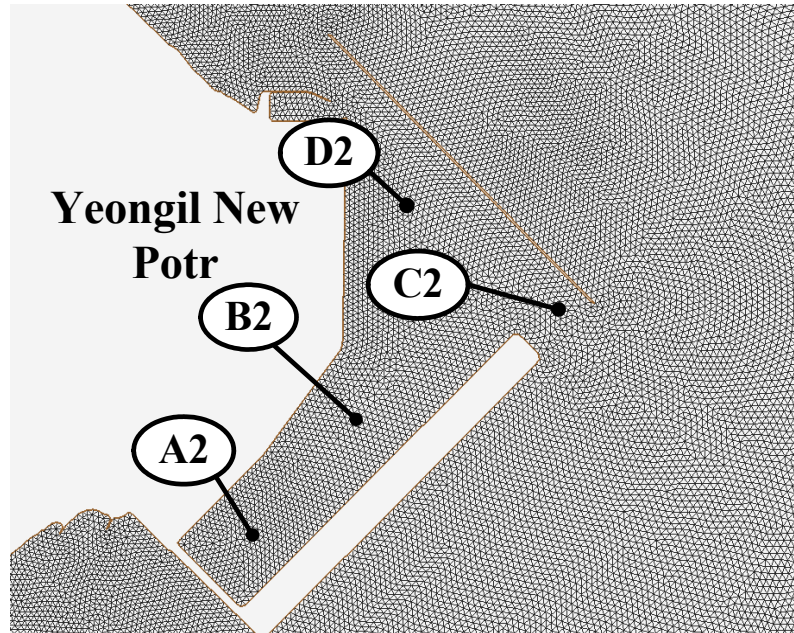


Fig. 4.28 Numerical model measurement stations in Yeongil New port (After construction)

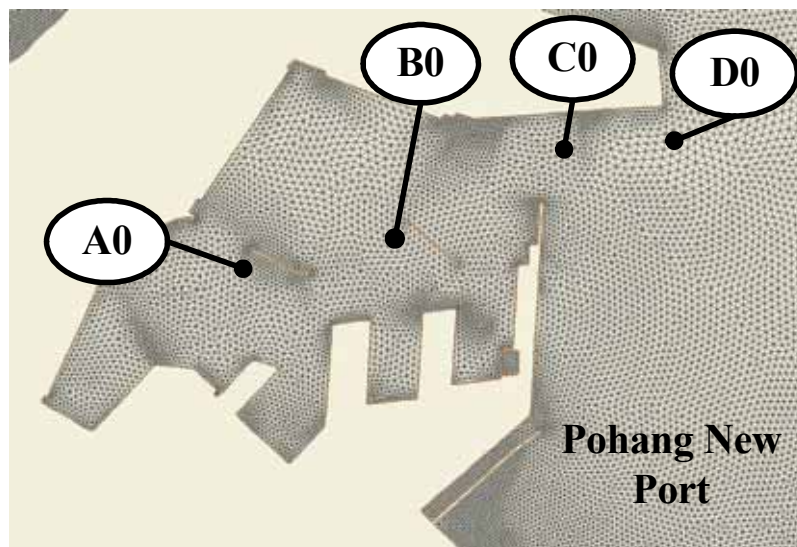


Fig. 4.29 Numerical model measurement stations in Pohang New port

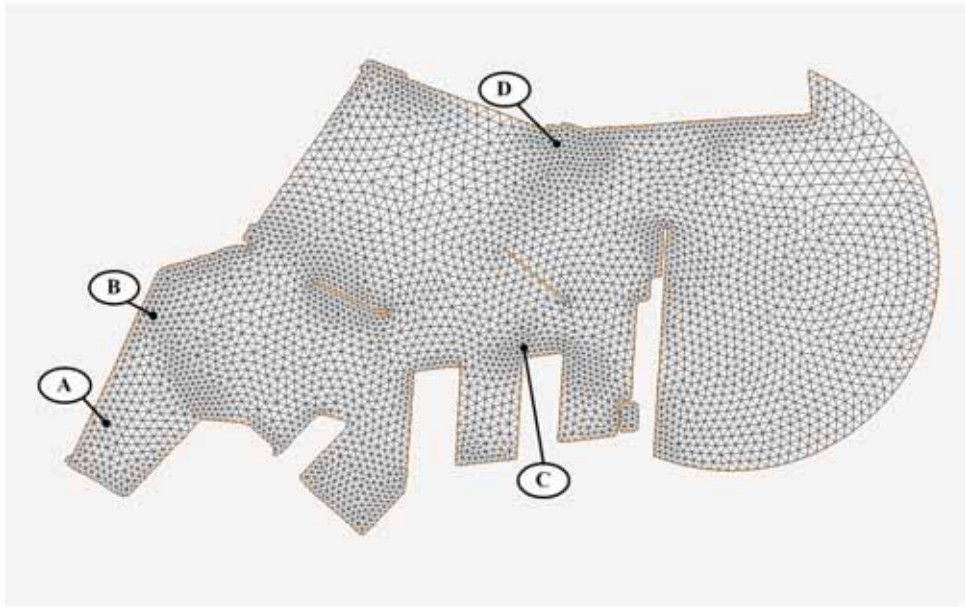


Fig. 4.30 Numerical model measurement stations in Pohang New port (for the minor numerical simulation)

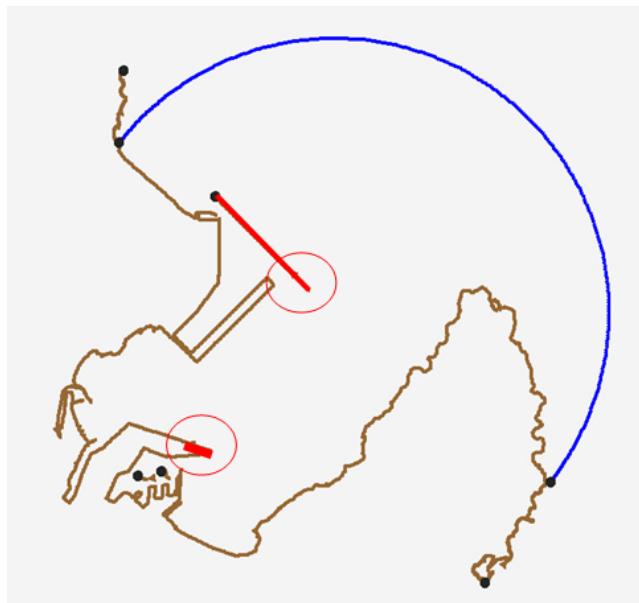


Fig. 4.31 Rearranged port figure to reduce the amplification ratio

4.2 포항신항의 고유공진주기

영일만 신항의 건설 전후 고유진동의 변화를 알아보기 전에 우선, 모델의 적용가능을 알아보기 위하여 수치모델을 포항신항의 협역에 적용하여 고유진동 주기를 알아보고 결과를 이전 연구결과와 비교하였다. 이 모델에는 4,183개의 Node와 7,710개의 Element가 사용되었고 계산시간은 주기당 평균 10분이 소요되었다. Table 3.4에서 정리한 한국해양연구소(1995), 박 등(1986) 그리고 한국항만수리지의 이전 연구의 결과인 제1 고유진동주기로서 22.5분~26분과 제2고유진동주기로서 7~8분이 잘 재현되는 것으로 나타났다. 이 결과를 Fig. 4.8~Fig. 4.11에 나타내었다.

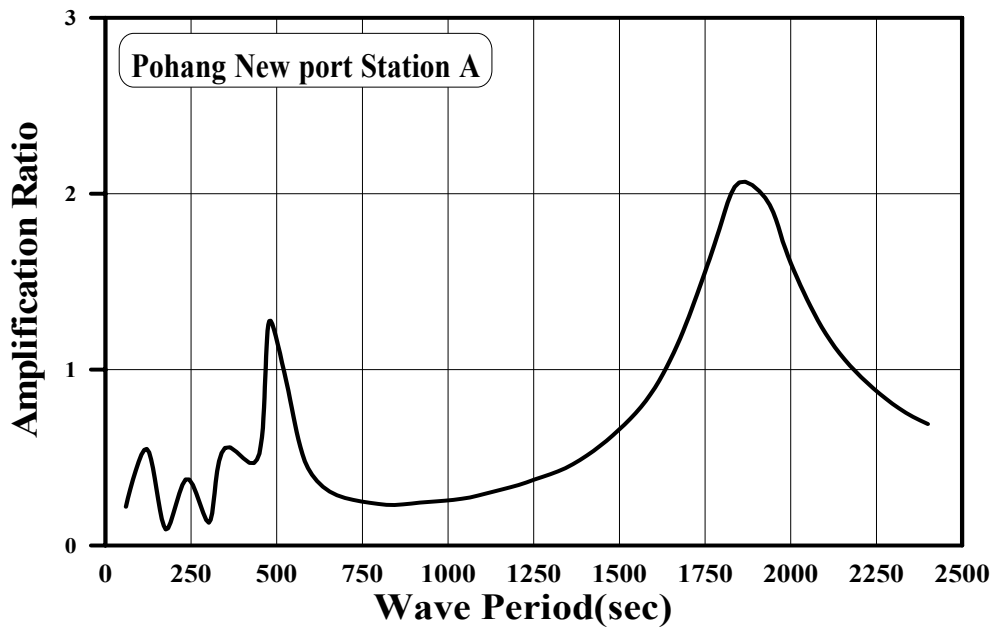


Fig. 4.32 Amplification ratio at station A in Pohang New port

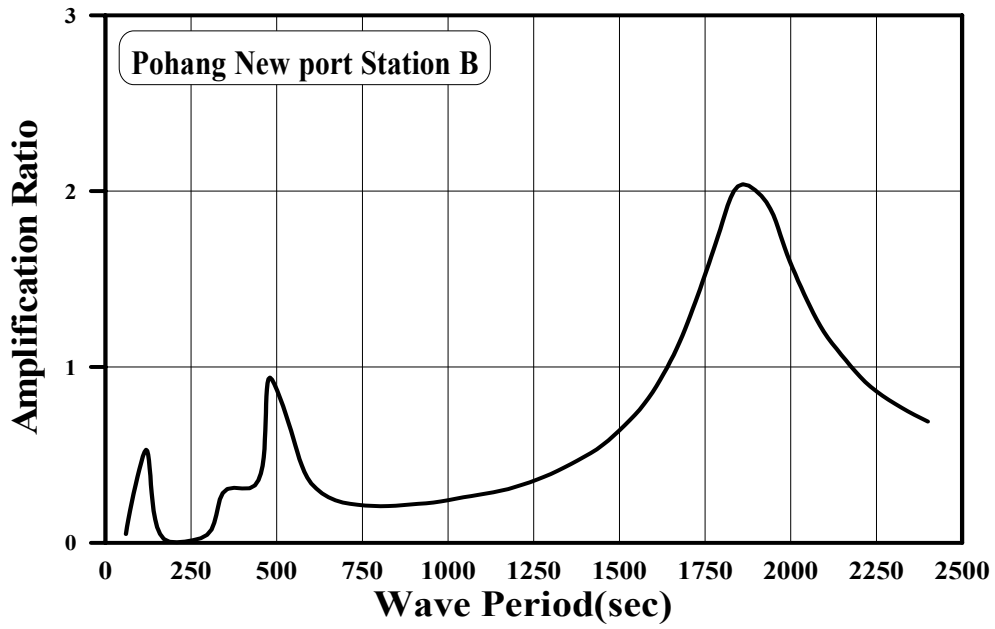


Fig. 4.33 Amplification ratio at station B in Pohang New port

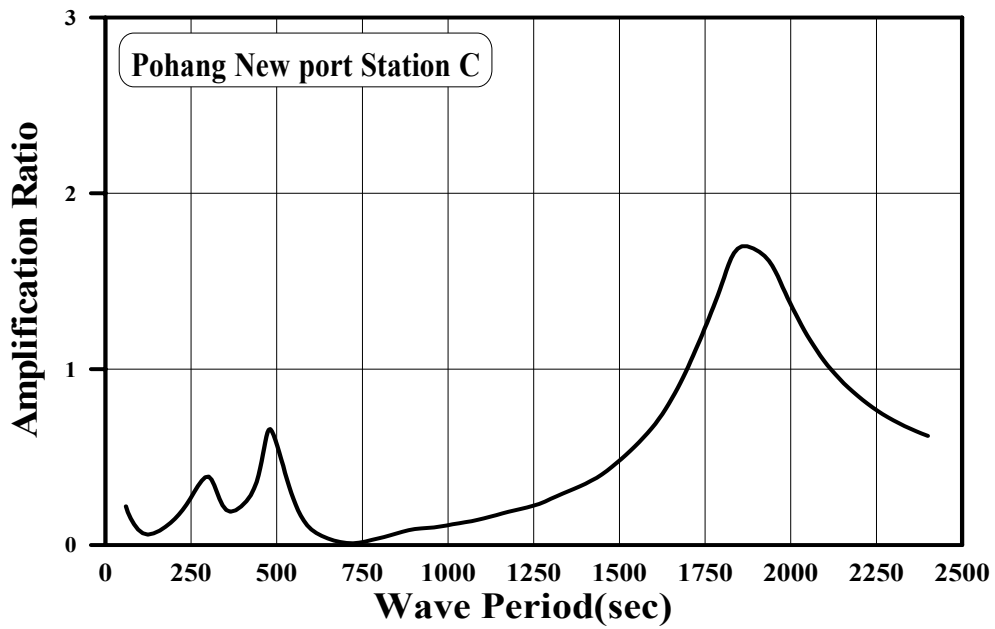


Fig. 4.34 Amplification ratio at station C in Pohang New port

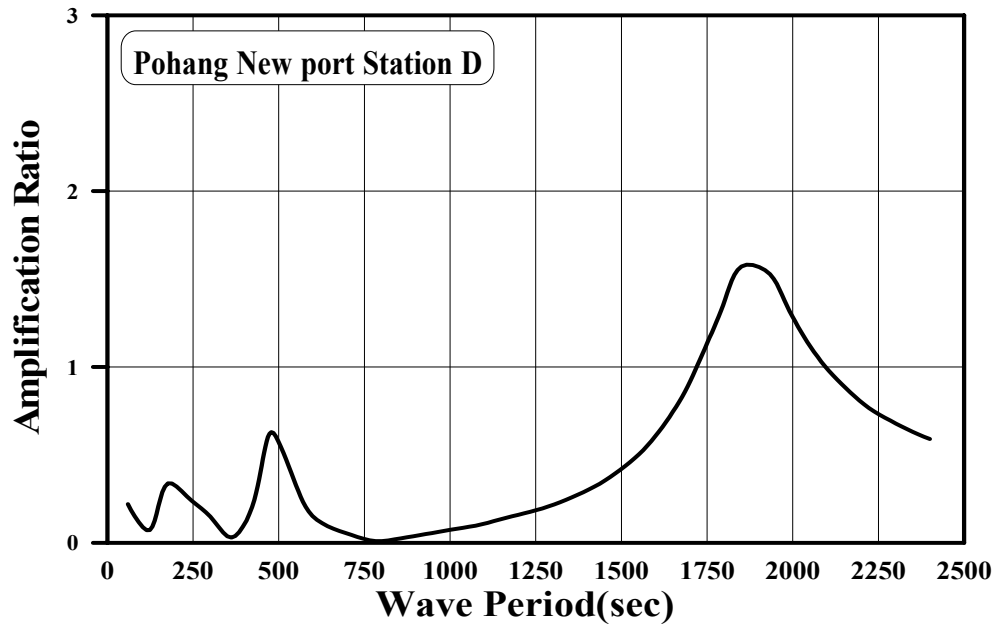


Fig. 4.35 Amplification ratio at station D in Pohang New port

4.3 수치실험 및 분석

4.3.1 항만반응특성

1) 영일만 신항 건설 전

영일만신항 건설전의 영일만의 평면에 대해 계산된 공진모드 중 주기 1,800초, 2,200초, 3,360초, 4,600초 그리고 5,020초에서 포항신항의 진폭비가 크게 상승하는 경우의 진폭비 등치선도를 Fig. 4.12 ~ Fig. 4.16에 나타내었다. 이 중 1800초에서는 B0지점에서 진폭비가 6.3으로 나타났고, 2,200초에서는 A0지점에서 7.1 그리고 3,360초에서는 B0지점에서 7.2가 나타났고 4,980초에서는 A0지점에서 5.3 그리고 5,020초에서는 B0지점에서 진폭비가 6.5로 나타났다. 신항건설전의 모델에 사용된 Node의 수는 59,692개이고 Element는 115,718개 계산시간은 1주기당 평균 2시간 36분이 소요되었다.

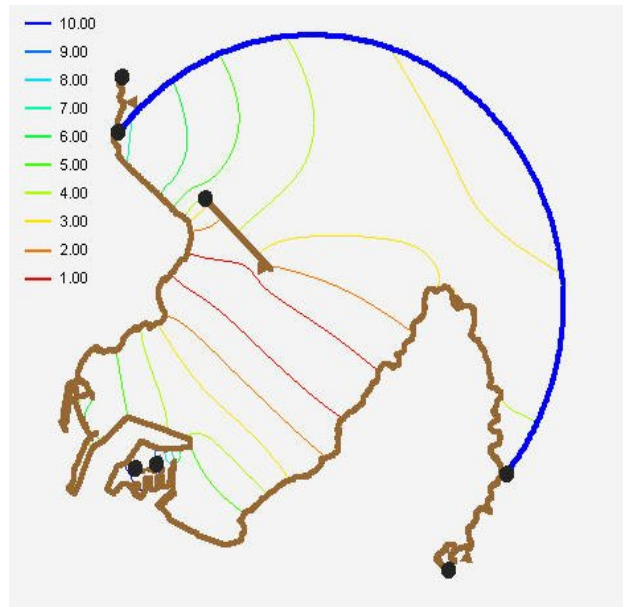


Fig. 4.36 Amplification contour lines of the before construction with a period of 1,800 sec

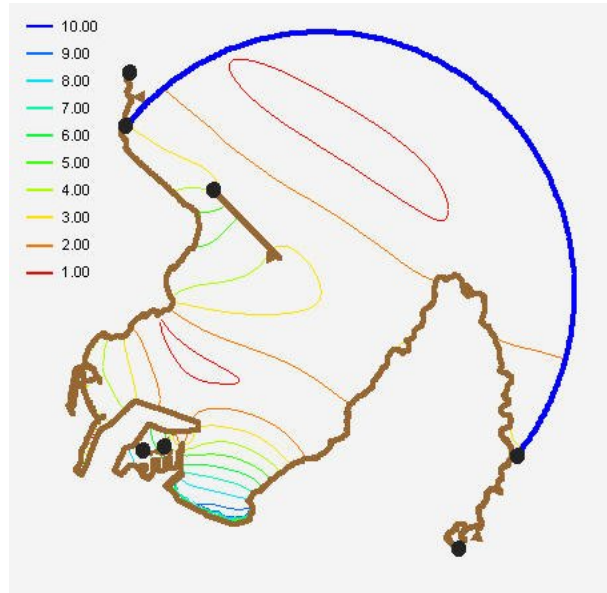


Fig. 4.37 Amplification contour lines of the before construction with a period of 2,200 sec

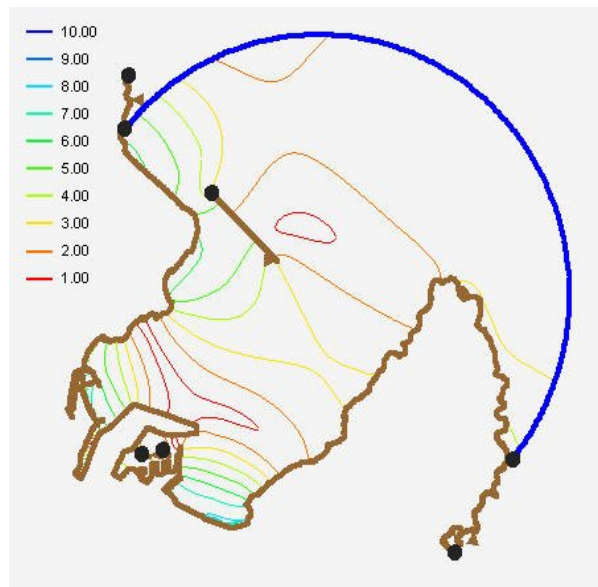


Fig. 4.38 Amplification contour lines of the before construction with a period of 3,360 sec

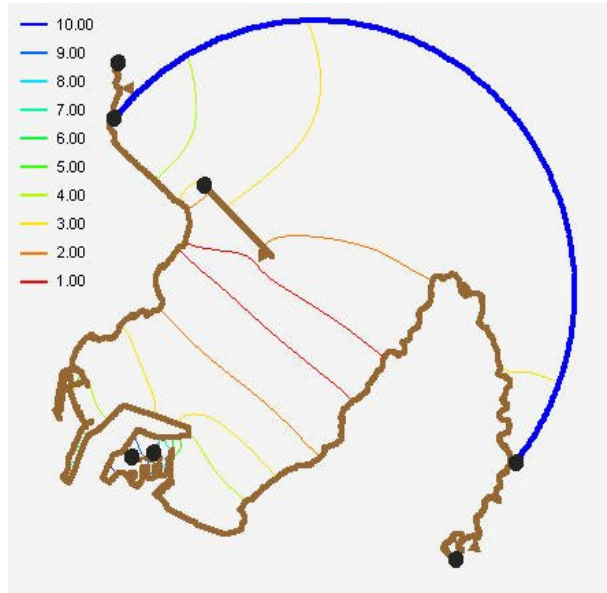


Fig. 4.39 Amplification contour lines of the before construction with a period of 4,980 sec

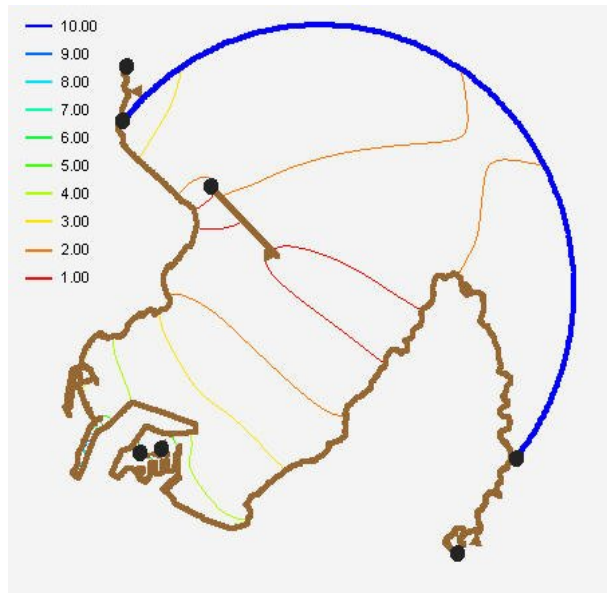


Fig. 4.40 Amplification contour lines of the before construction with a period of 5,020 sec

2) 영일만 신항 건설 후

영일만신항 건설 전의 영일만의 평면에 대해 계산된 공진모드 중 주기 1,980초, 2,200초, 3,360초, 4,400초 그리고 5,020초에서 진폭비가 상승하는 경우의 진폭비 등치선도를 Fig. 4.17 ~ Fig. 4.21에 나타내었다. 1,980초에서는 B0 지점에서 진폭비가 5.9로 증가하였고, 2,200초에서는 C0지점의 진폭비가 3.8로 높아졌고, 3,360초에서는 B0에서 4.2 그리고 4,400초에서는 A0지점에서 7.8 그리고 5,020초에서는 D0지점에서 진폭비 6.4가 나타났다. 신항건설 후의 모델에 사용된 Node의 수는 52,792개이고 Element는 102,294개 계산시간은 1주기당 평균 2시간 29분이 소요되었다.

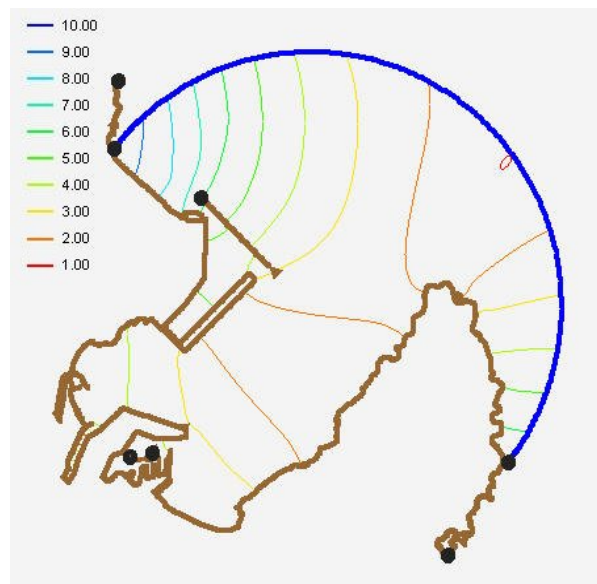


Fig. 4.41 Amplification contour lines of the after construction with a period of 1,980 sec

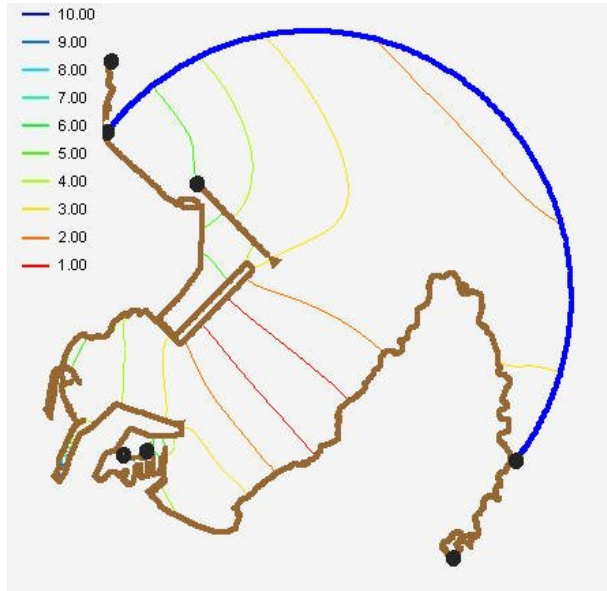


Fig. 4.42 Amplification contour lines of the after construction with a period of 2,200 sec

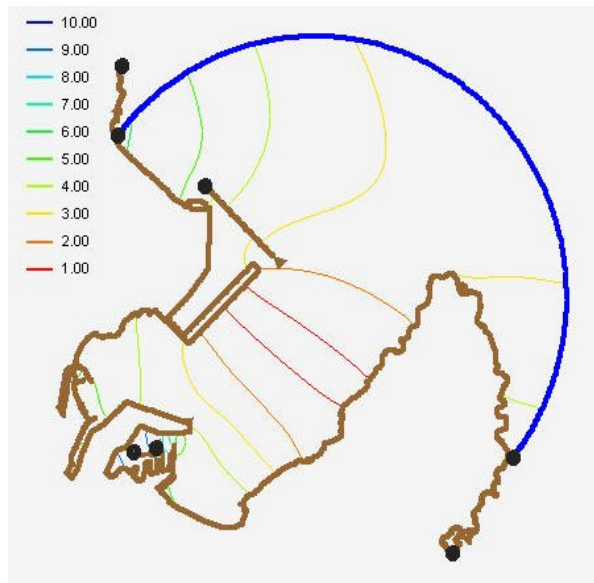


Fig. 4.43 Amplification contour lines of the after construction with a period of 3,360 sec

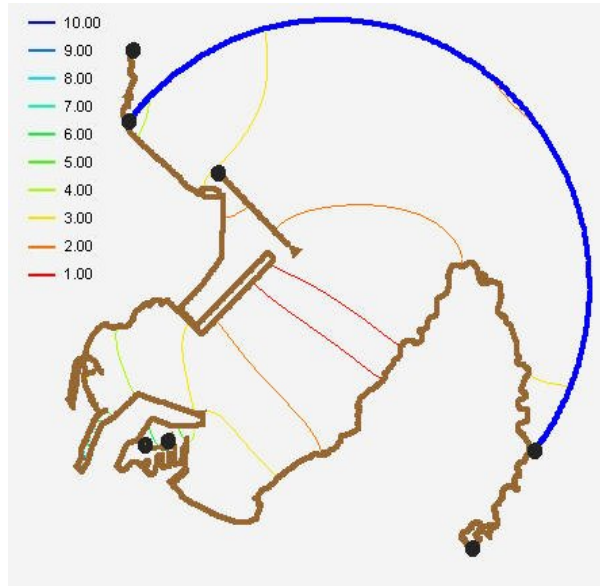


Fig. 4.44 Amplification contour lines of the after construction with a period of 4,400 sec

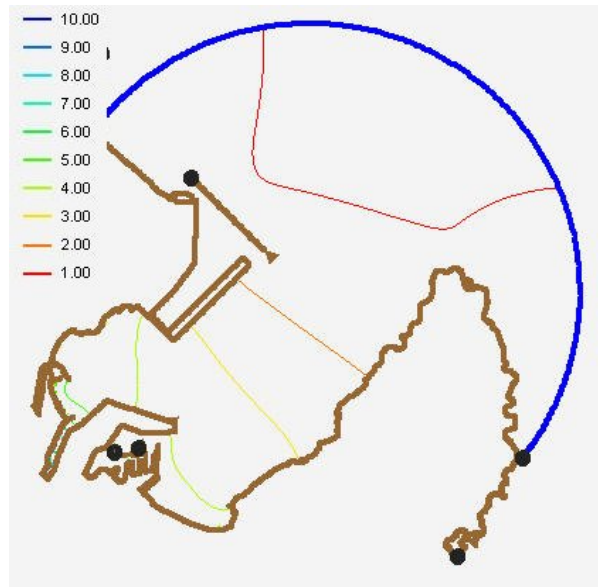


Fig. 4.45 Amplification contour lines of the after construction with a period of 5,020 sec

3) 저감대책 도입후(방파제 확장)

Fig. 4.22 ~ Fig. 4.26은 1차적 부진동 저감대책으로서 방파제의 길이를 연장하였을때의 부진동의 변화를 나타내는 그림으로 600초와 1650초, 2,300초, 2,980초 그리고 4,250초에서의 진폭비 등치선도이다. 600초에는 A0지점에서 3.2의 진폭비가 나타났고 1,650초에서는 A0에서 5.2 그리고 2,300초에서는 B0 지점에서 4.6 그리고 2,980초에서는 D0지점에서 2.9 그리고 4,250초에서는 C0 지점에서 4.6의 진폭비가 나타났다. 이 모델에 사용된 Node의 수는 51,246개이고 Element는 101,974개 계산시간은 1주기당 평균 2시간 30분이 소요되었다.

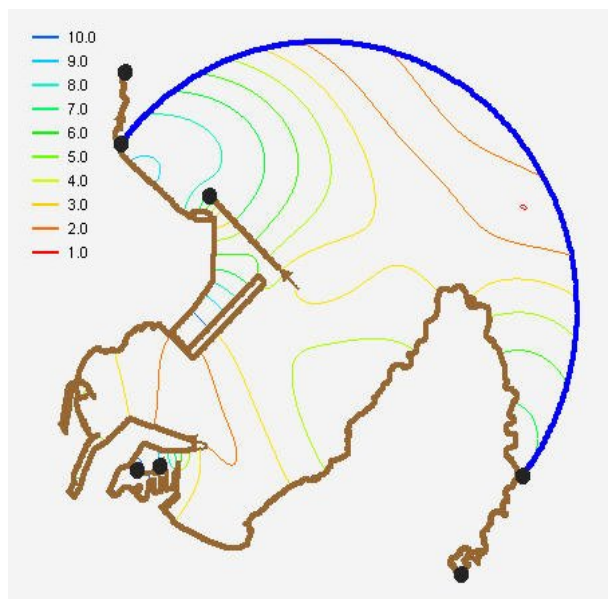


Fig. 4.46 Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 600 sec

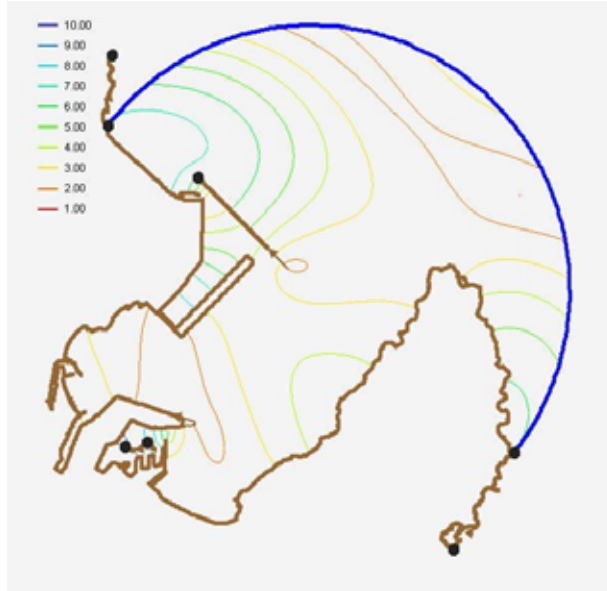


Fig. 4.47 Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 1,650 sec

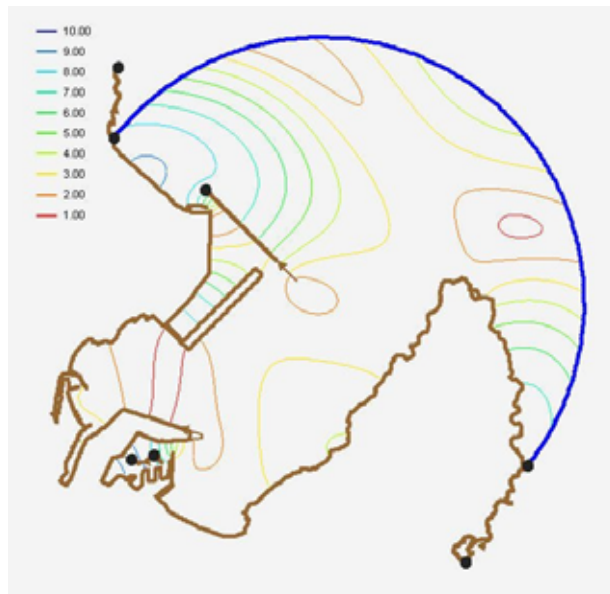


Fig. 4.48 Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 2,300 sec

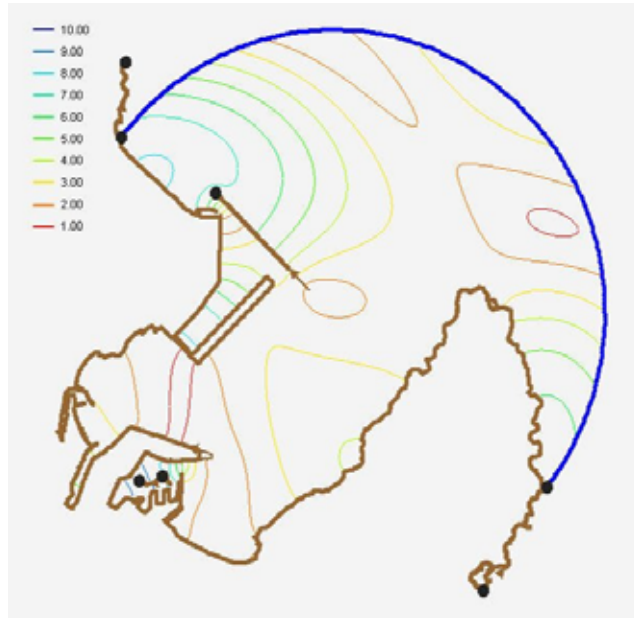


Fig. 4.49 Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 2,980 sec

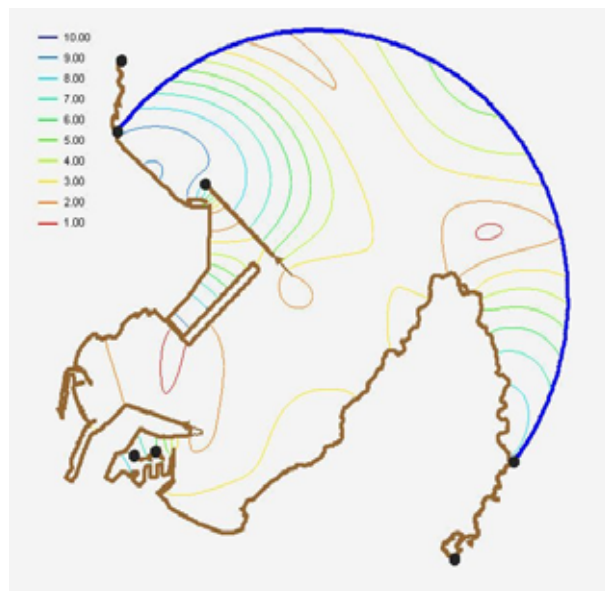


Fig. 4.50 Amplification contour lines of the rearranged port with a period of 4,250 sec

4.3.2 항만별 반응특성 비교

1) 포항신항

Fig. 4.27 ~ Fig. 4.30은 포항신항의 A0지점에서의 영일만신항의 건설 전과 건설 후의 항만부진동 주기와 진폭비의 변화를 나타내는 그래프이다. 지점에 따른 약간의 차이가 있지만 결과에서 신항 건설 후의 진폭비가 약 1~2 정도 증가하는 것으로 나타났다. 특히, Fig. 4.27의 신항내단에서는 30분 부근의 증폭비는 감소하지만 70분대의 증폭비는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 항만의 입구측으로 옮겨감에 따라 그 차이는 감소하고, 항만 입구 수로에서는 건설 후에 증폭비가 커지는 것으로 나타났다 (Fig. 4.30 참조).

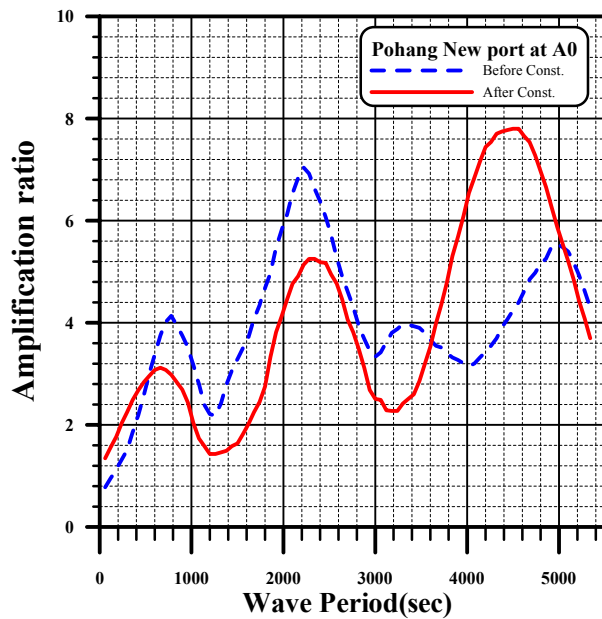


Fig. 4.51 Harbor response comparison after the construction at station A0

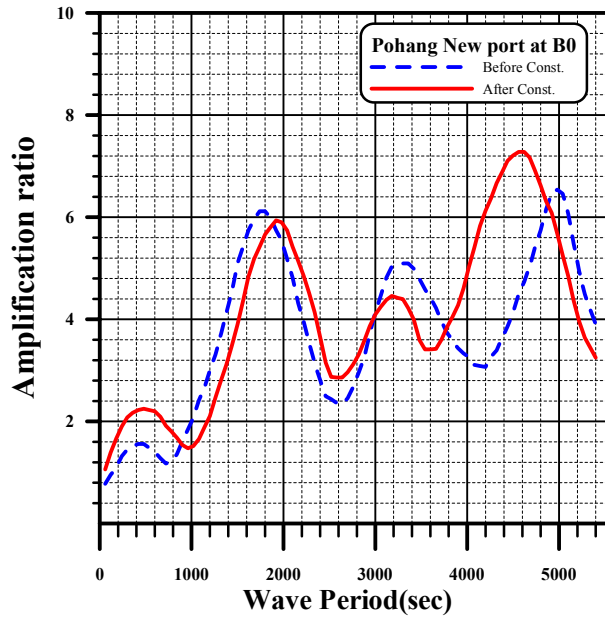


Fig. 4.52 Harbor response comparison after the construction at station B0

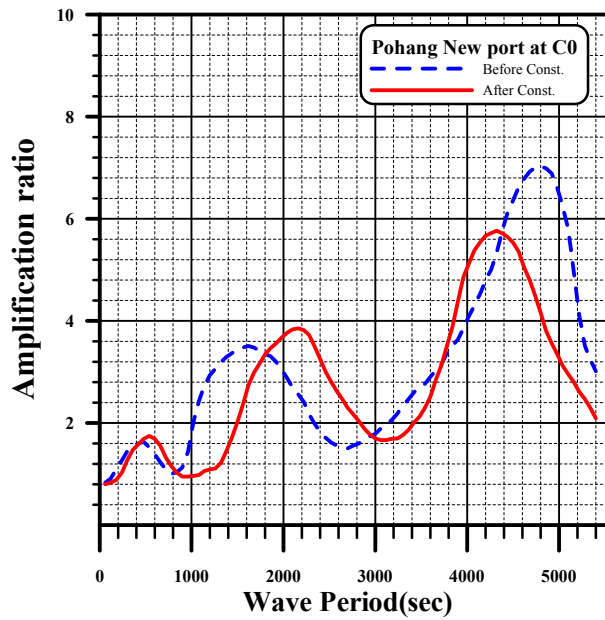


Fig. 4.53 Harbor response comparison after the construction at station C0

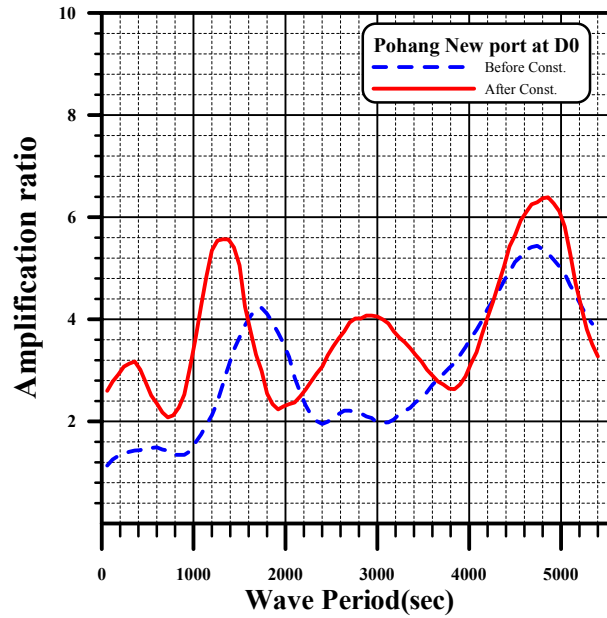


Fig. 4.54 Harbor response comparison after the construction at station D0

2) 포항구항

포항구항에서 영일만신항의 건설에 따른 진폭비와 주기의 변화는 Fig. 4.31 ~ Fig. 4.34에 나타내었다. 포항구항의 경우는 진폭비가 상대적으로 작은 것으로 나타났고 신항의 건설의 영향도 아주 적은 것으로 나타났다. 전반적으로 개발 후에 증폭비는 떨어지는 것으로 분석되었다.

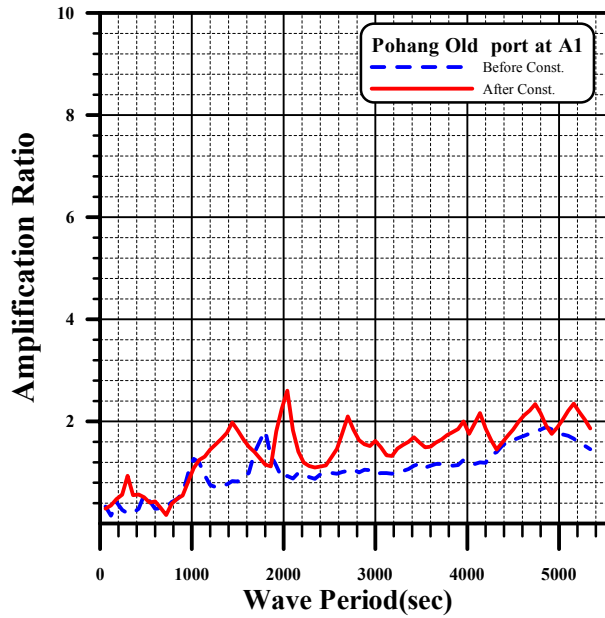


Fig. 4.55 Harbor response comparison after the construction at station A1

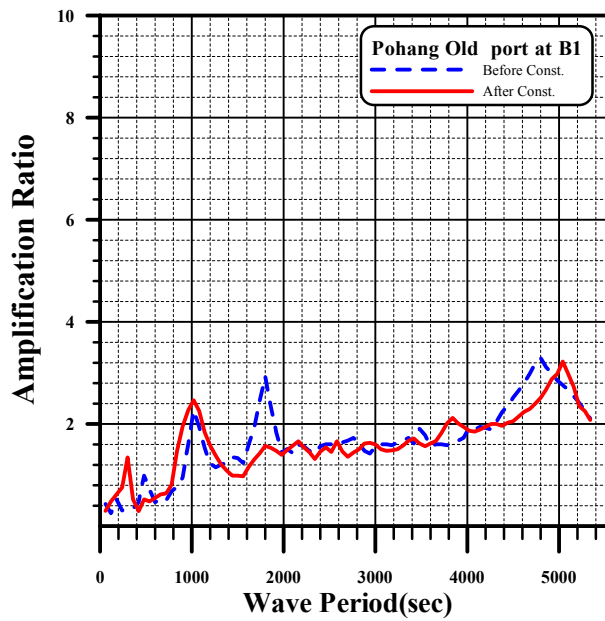


Fig. 4.56 Harbor response comparison after the construction at station B1

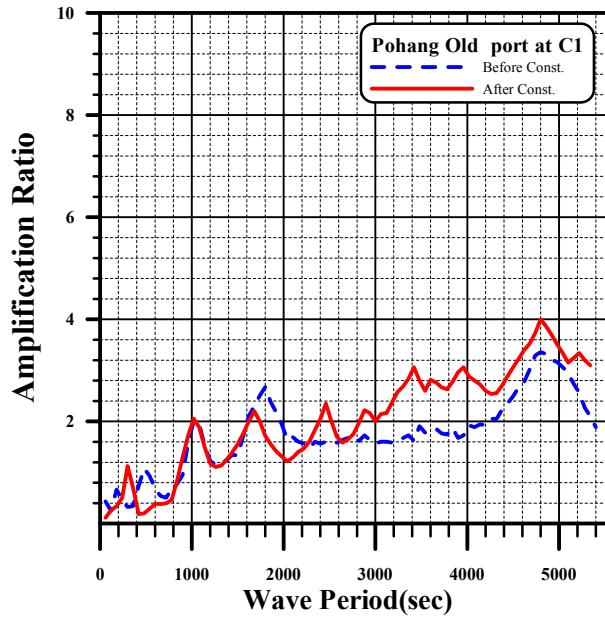


Fig. 4.57 Harbor response comparison after the construction at station C1

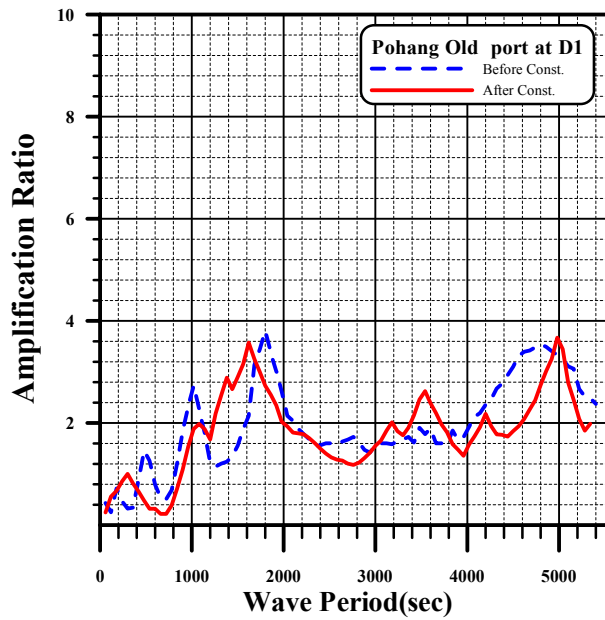


Fig. 4.58 Harbor response comparison after the construction at station D1

3) 영일만 신항

영일만신항에서의 반응은 Fig. 4.35 ~ Fig. 4.38에 나타내었다. 영일만 신항 건설 전의 부진동 주기는 영일만의 고유진동주기인 80분과 20분대에 작은 진동을 보이거나, 영일만 신항 건설 후는 영일만 신항을 둘러싼 방파제의 영향으로 장방향 영역에서 Fig. 4.35와 같이 전혀 다른 진동주기와 증폭비를 나타내었다. 특히 30분대에 이르는 주기에 대해 증폭비가 개발 전보다 2배로 커지는 경향을 나타내어 이에 대한 대책이 있어야 할 것으로 본다.

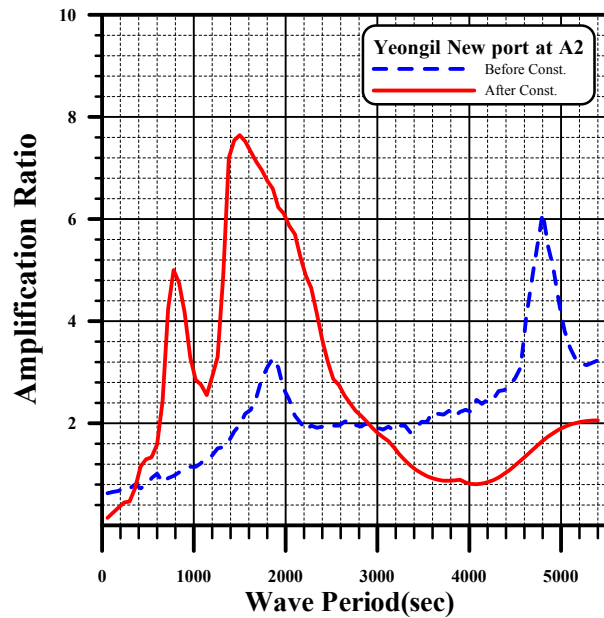


Fig. 4.59 Harbor response comparison after the construction at station A2

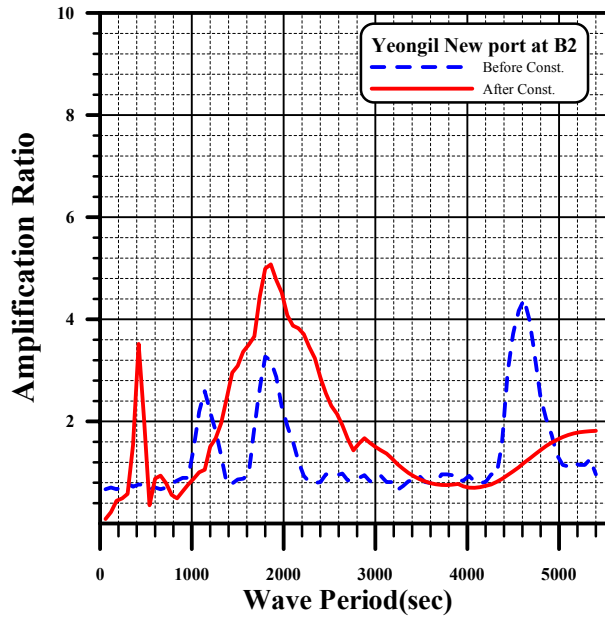


Fig. 4.60 Harbor response comparison after the construction at station B2

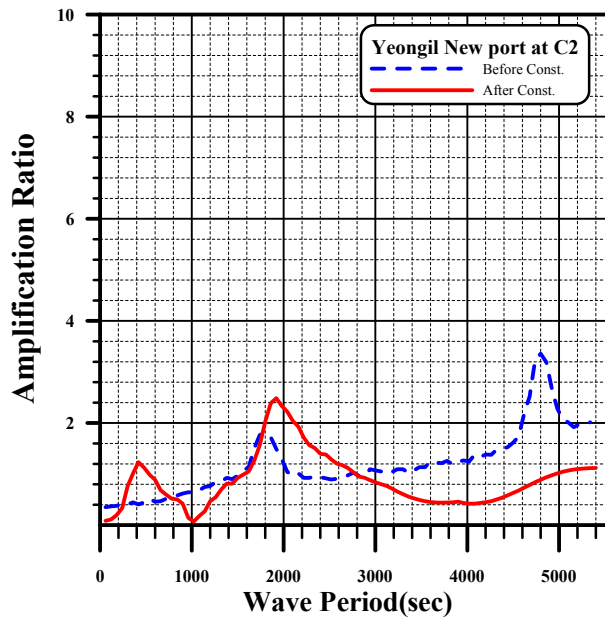


Fig. 4.61 Harbor response comparison after the construction at station C2

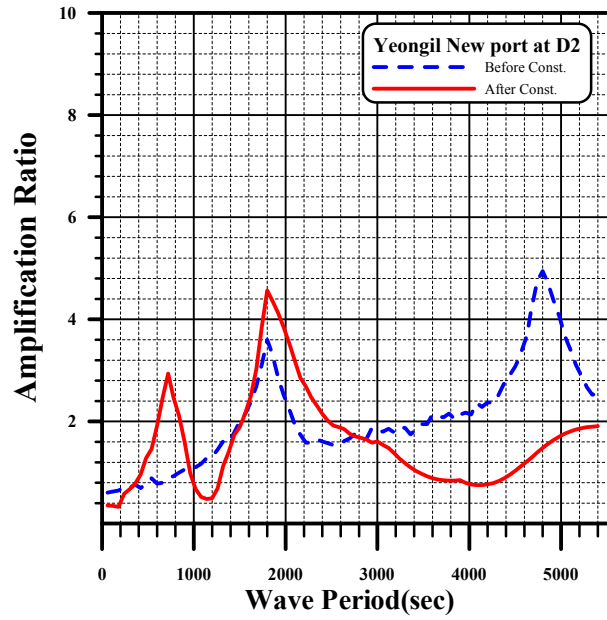


Fig. 4.62 Harbor response comparison after the construction at station D2

4.3.3 부진동 저감공법 적용 분석

1) 포항 신항

포항 신항에서 영일만 신항 건설 후의 증폭비를 감소시키기 위한 1차적 대책으로서 방파제의 길이를 연장시켜 적용한 결과 제1 고유진동주기로 나타난 80분대의 증폭비를 약 2.5정도 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 포항신항 내단측인 A0 지점(Fig. 4.39 참조)를 제외하고는 전반적으로 저감공법의 적용 이후에 낮은 반응을 나타내었다(Fig. 4.39 ~ Fig. 4.42 참조).

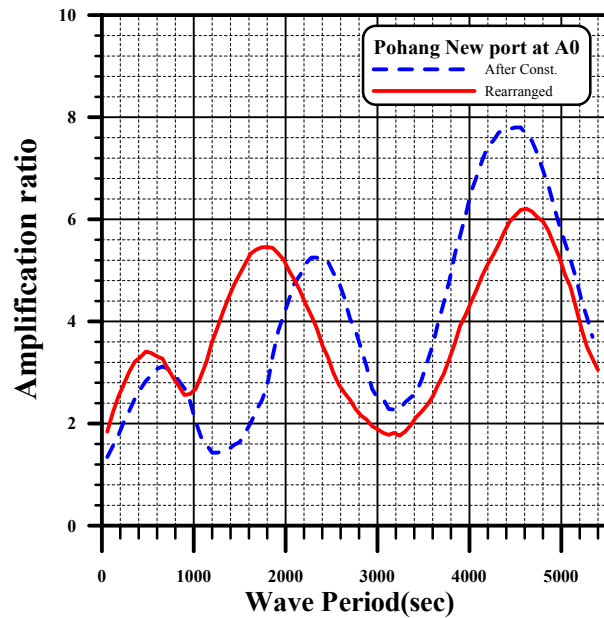


Fig. 4.63 Harbor response comparison after the ports rearranged at station A0

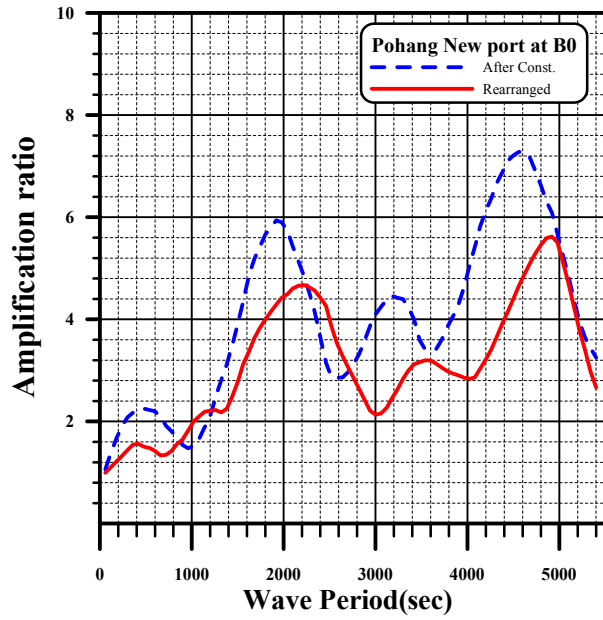


Fig. 4.64 Harbor response comparison after the ports rearranged at station B0

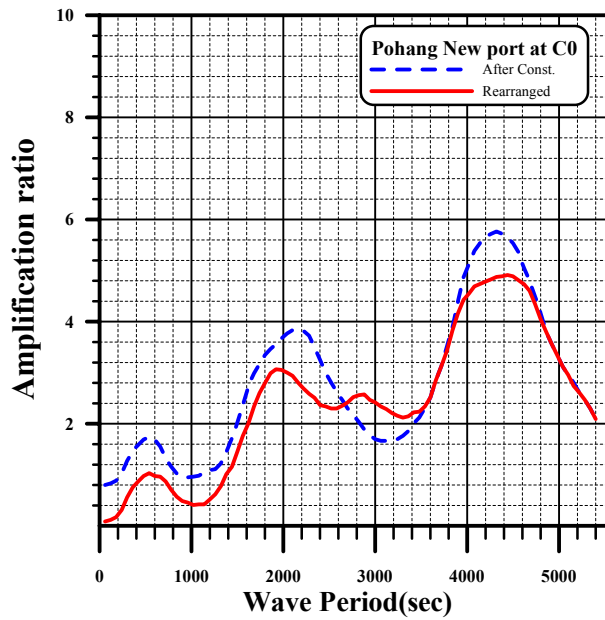


Fig. 4.65 Harbor response comparison after the ports rearranged at station C0

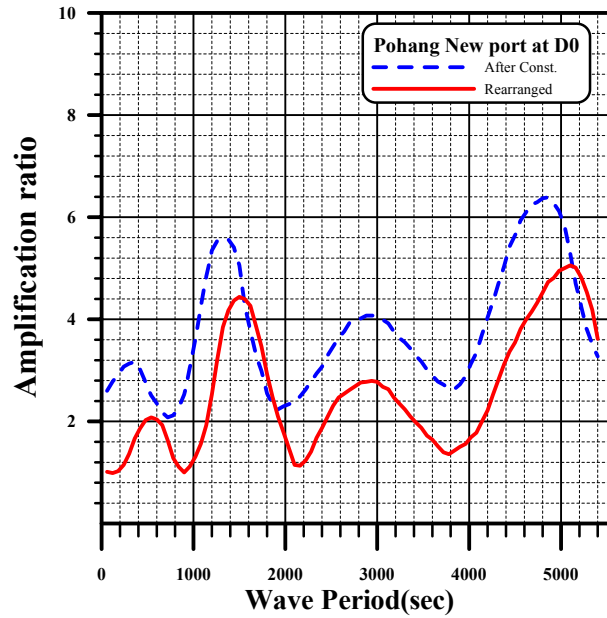


Fig. 4.66 Harbor response comparison after the ports rearranged at station D0

2) 포항 구항

Fig. 4.43 ~ Fig. 4.46은 포항구항에서의 방파제 길이 연장 후 결과를 나타내는 그림이다. 포항 구항에서는 영일만 신항의 건설에 따른 영향이 적었던 것과 마찬가지로 방파제의 길이연장에 큰 변화가 발생하지는 않았으나, 국소적으로 증폭비가 1~2정도 증가하는 주기가 발생하였다. 그러나 전반적인 경향은 저감공법 적용 이후가 낮아지는 것으로 분석되었다.

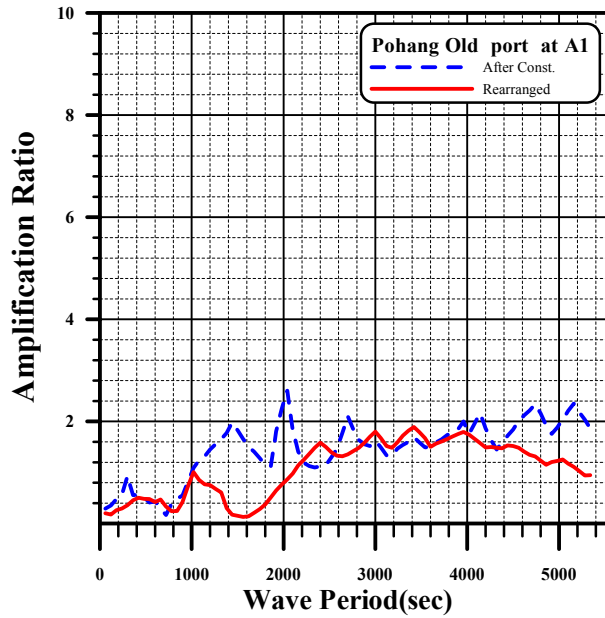


Fig. 4.67 Harbor response comparison after the ports rearranged at station A1

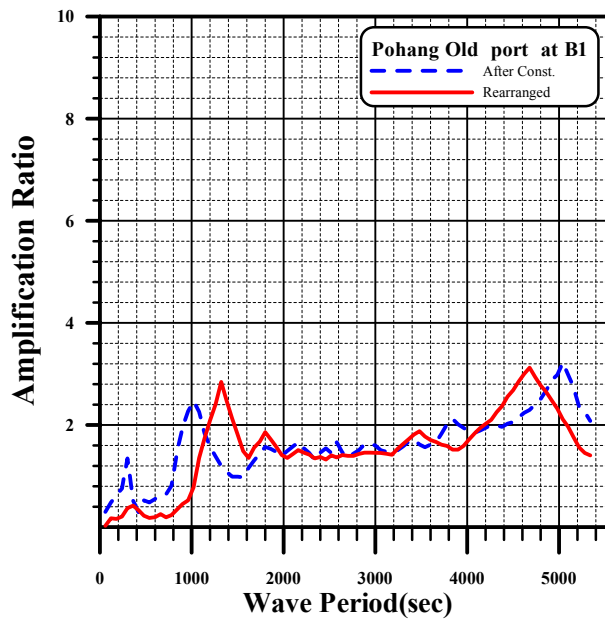


Fig. 4.68 Harbor response comparison after the ports rearranged at station B1

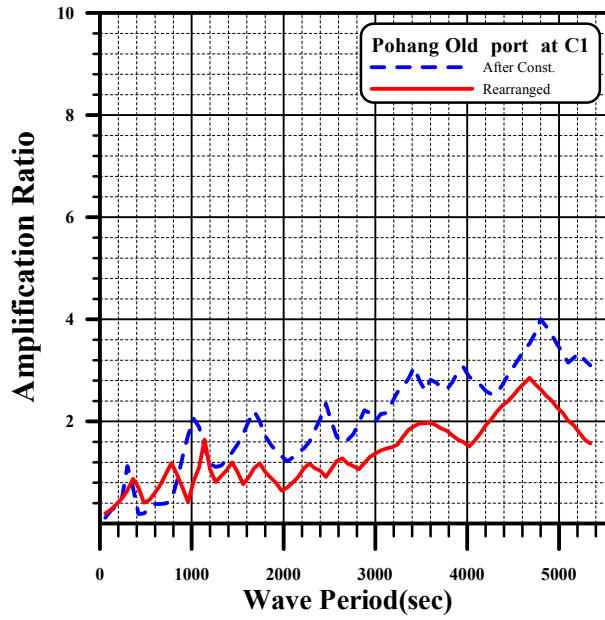


Fig. 4.69 Harbor response comparison after the ports rearranged at station C1

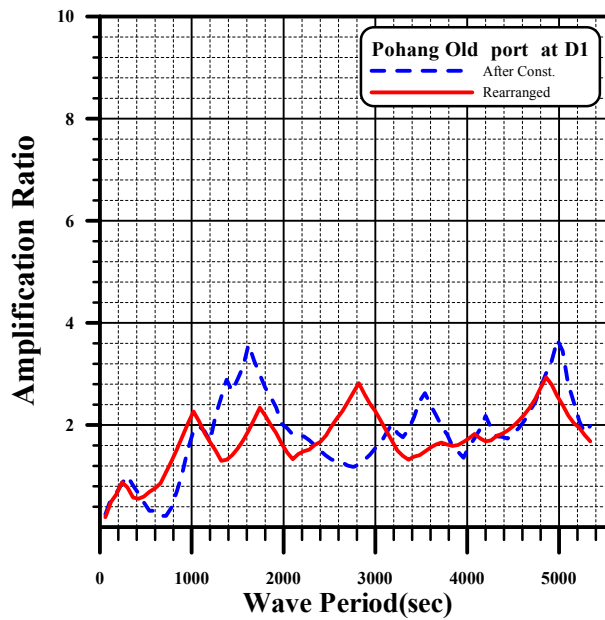


Fig. 4.70 Harbor response comparison after the ports rearranged at station D1

3) 영일만 신항

영일만 신항에서의 방파제길이 연장에 대한 부진동의 변화를 Fig. 4.47 ~ Fig. 4.50에 나타내었다. 영일만 신항 내에서는 방파제의 길이를 연장함에 따라 부진동의 주기가 장주기 쪽으로 약 5분정도 이동하는 것으로 분석되었으며, 특히 A2지점에서는 증폭비가 감소하지 않고 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 그러나 그 이외의 지점에서는 저감공법 이후가 낮게 반응하여 효과가 있는 것으로 분석되었다.

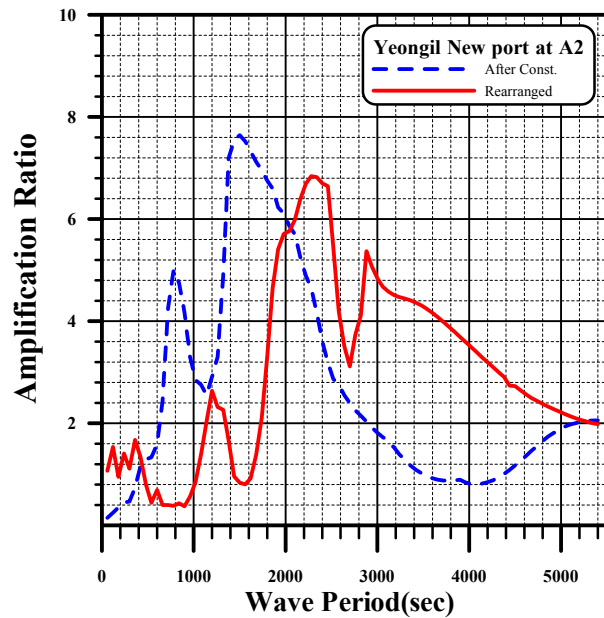


Fig. 4.71 Harbor response comparison after the ports rearranged at station A2

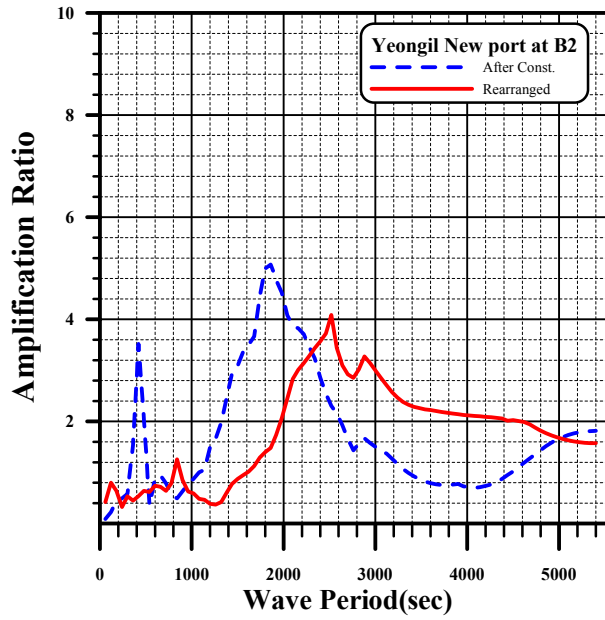


Fig. 4.72 Harbor response comparison after the ports rearranged at station B2

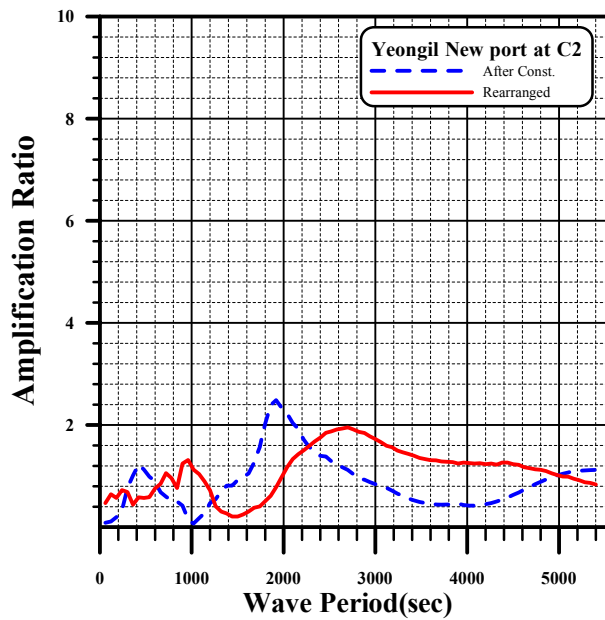


Fig. 4.73 Harbor response comparison after the ports rearranged at station C2

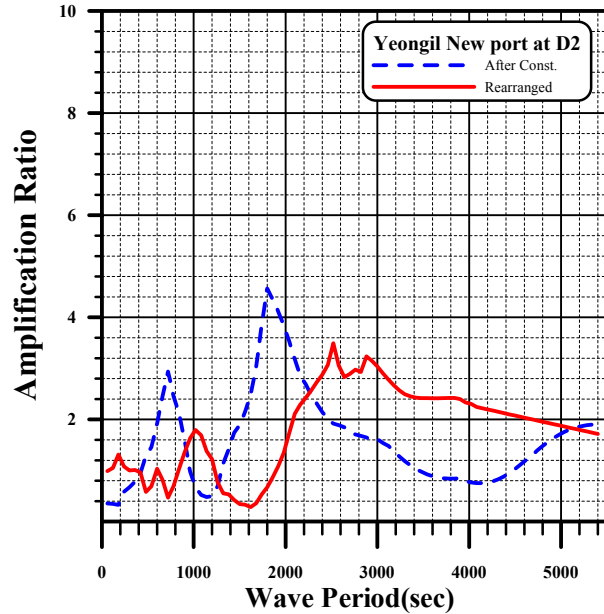


Fig. 4.74 Harbor response comparison after the ports rearranged at station D2

4.4 수치실험결과

수치실험 영역인 영일만은 북동쪽이 열린 장방형만으로서, 동해로부터 외파가 내습하며, 이 외파에 의해 영일만과 포항신항에 부진동이 빈번하게 발생하고 있다. 그리고 영일만 입구에 현재 건설되고 있는 영일만 신항은 영일만 전체와 포항신항의 기존 부진동 주기에 변화를 줄 것으로 예측된다.

Fig. 4.2의 포항구항에서의 A1, B1, C1, D1 그리고 Fig. 4.3와 Fig. 4.4의 영일만신항에서의 A2, B2, C2, D2와 Fig. 4.5의 A0, B0, C0, D0지점을 포함하는 포항신항에서의 영일만신항 건설전과 건설후의 진동주기와 진폭비를 찾았고 신항 건설후의 진동주기와 진폭비를 저감시키기 위하여 1차적 저감방안을 도입하여 영일만신항 북방파제와 포항신항의 방파제 길이를 증가시켜 시뮬레이

선한 결과를 다시 비교하였다.

수치실험 결과, 영일만의 기본진동주기 및 제2 진동주기는 기존의 연구자료들과 잘 일치하는 약 80분과 20분 가까이 나타났으며, 포항신항은 기본진동주기 및 제2 진동주기가 약 20분 및 7분에서 나타났다. 진폭비가 상승하는 주기로는 신항건설전에서 1,800초, 2,200초, 3,360초, 4,980초 그리고 5,020초에서 나타났으며 신항건설후에서는 1,980초, 2,200초, 3,360초, 4,400초 그리고 5,020초에서 진폭비의 상승이 나타났다. 그리고 부진동 진폭비를 감소시키기 위한 대책공법을 적용한 이후에는 600초, 1,650초, 2,300초, 2,980초 그리고 4,250초에서 진폭비가 상승하는 지점이 발생하는 것으로 나타났다. 결과에서 저감대책을 도입한 이후에 피크(Peak)치 값이 일부 변화하는 지점이 발생하였으나, 진폭비의 큰 흐름을 변화시키지는 않는 것으로 나타났다. 모델 결과에서 얻어진 영일만과 포항신항의 진폭비와 Phase는 이론식으로 밝혀진 영일만과 포항신항의 부진동의 주기 및 이전 연구자료의 영일만 부진동 특성과 잘 일치하는 것으로 나타났다는 점에서 본 연구의 수치실험 결과는 신뢰할 만한 수준에 있다고 볼 수 있다.

영일만 신항 건설 전후에 포항신항, 포항구항 및 영일만신항에서의 부진동주기를 비교한 결과를 Fig. 4.27 ~ Fig. 4.38에 각각 제시하였고 부진동을 저감시키기 위한 공법을 도입후 부진동주기를 비교한 결과를 Fig. 4.39 ~ Fig. 4.50에 각각 제시하였다.

현재의 부두형태에 대한 신항건설의 영향에 대한 실험에서는 영일만신항 북방파제의 영향에 의한 주기의 변화가 다소 있으나 이전의 연구결과와 대동소이한 것으로 나타났다. 특히, 포항신항의 경우는 A0에서 D0까지 제1고유진동주기인 80분대가 탁월해지는 것으로 연구되었다. 포항구항의 경우는 그 영향이 미미한 것으로 나타났고, 영일만신항은 내부 부진동이 20분대 이내로 이동하는 것으로 나타났다. 이것은 영일만 신항 계획에서 대규모 방파제 건설로

인해 반사 및 회절로 인한 영향이 포항 구항과 신항에 영향을 미친 탓으로 판단된다.

영일만신항과 포항신항의 방파제길이를 연장하는 1차적 대책공법을 도입한 이후의 수치실험결과에서는 포항신항의 경우 증폭비가 평균 2.5 ~ 3 정도 감소하는 것으로 나타났고 주기는 큰 변화가 없었다. 포항구항에서는 항내의 진폭비가 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났고, 영일만신항에서는 A2지점에서 특징적으로 증폭비가 0.5정도 증가하는 것을 제외하면 B2, C2와 D2지점에서 증폭비가 2 ~ 3정도 감소하며 진동주기가 장주기 쪽으로 5분정도 이동하는 것으로 나타났다.

이 결과를 Table 4.1에 정리하였다.

Table 4.1 Summarized results of numerical analysis at Yeongil bay
(Period in sec.(relative amplification ratio))

Bay Phase Comparison Point	Before Construction	After Construction	After Ports Rearranged
A0	660(4.1), 2200(7.1), 3180(4.1), 4980(5.3)	620(9), 2300(5.2), 4400(7.8)	600(3.2), 1650(5.2), 4620(6.1)
B0	600(1.8), 1800(6.3), 3360(7.2), 5020(6.5)	520(2.3), 1980(5.9), 3360(4.2), 4800(7.3)	400(1.6), 2300(4.6), 3420(3.1), 5020(5.6)
C0	240(1.8), 1480(3.7), 4600(7)	420(4.2), 2200(3.8), 4400(5.7)	480(1.6), 2200(3.1), 2900(2.6), 4250(4.6)
D0	500(1.6), 1650(4.2), 2960(2.2), 4900(5.3)	200(1.8), 1220(5.8), 2820(3.2), 5000(6.4)	560(2.1), 1520(4.2), 2980(2.9), 5150(5)
A1	540(1), 1000(1.3), 1800(1.8), 4900(1.9)	600(0.8), 1500(2), 2000(2.3), 2700(2.1), 3400(2.1), 4100(2.2), 4700(2.2), 5200(2.2)	400(0.8), 1000(1), 2400(1.7), 3000(1.8), 3400(1.9), 4000(1.7)
B1	500(1), 1000(2.1), 1800(3), 3500(1.9), 4800(3.2)	300(0.9), 980(2.1), 1720(3.1) 2600(2), 3800(2.1), 5100(3.3)	400(0.8), 1240(3), 1800(1.9), 3420(1.9), 4620(3.2)
C1	500(1), 1100(2.1), 1800(2.5), 3500(1.9), 4800(3.6)	300(1.1), 1000(2.1), 1700(2.2), 2450(2.3), 3400(2.9), 3950(2.8), 4800(4)	380(1), 800(1.2), 1180(1.8), 1760(1.3), 3420(2), 4620(2.8)
D1	500(1.2), 1000(2.9), 1800(3.7), 3400(2), 4700(3.6)	300(1), 1020(2), 1380(3), 1600(3.7), 3180(2.1), 3520(2.8), 4200(2.2), 5000(3.7)	240(1), 1000(2.2), 1660(2.2), 2800(2.7), 4860(2.8)
A2	800(4.9), 1500(7.5), 4800(6)	800(1.2), 1420(2.9), 5200(6)	400(1.7), 1200(2.4), 2250(6.7), 2960(5.1)
B2	1080(2.6), 1800(3.2), 4600(4.3)	400(3.8), 1820(5.1), 2940(1.9), 5200(1.8)	800(1.6), 2500(4.1), 2950(3.6)
C2	1800(2), 4800(3.2)	420(1.9), 1980(2.4), 5200(1.1)	240(1.1), 1000(1.3), 2640(2),
D2	1800(3.4), 4800(4.9)	660(3), 1800(4.6), 5200(1.9)	200(1.3), 1000(1.7), 2520(3.4), 2920(3.2)

제 5 장 결론

본 연구는 영일만 신항의 건설계획에 따라 포항구항, 포항신항 및 영일만신항을 포함한 영일만내의 광역해역에 대한 해면변화를 현장관측자료 및 수치실험을 통하여 분석하였다. 부진동에 대한 특성의 파악 및 예측은 항내에 정박하는 선박의 하역작업 및 접안, 이안시의 거동 그리고 입출항시 항 입구에서의 도선문제 등에 관련되는 중요한 문제로서 실제관측데이터와 수치실험 데이터를 비교하여 모델을 검증한 후 영일만 신항 건설후의 진동주기를 찾고 다시 진폭비를 감쇄시키기 위한 1차적, 이론적 대책을 수립한 후 진동주기를 찾았다.

최근에는 항만 부진동에 대한 검토를 설계과정에 포함시키고 있으나 대부분 설계 중이거나 건설 중인 항만에 집중되어 연구된 것이 사실이다. 현대에는 해안역에서 광범위한 크기의 항만개발 및 연안역개발이 계속적으로 진행되고 있지만, 신항의 건설에 따른 주변 항만의 영향을 고려하고 있지 않다는 점에서 영일만의 경우를 예로 들어 영일만 신항의 건설에 따른 포항신항과 포항구항에서의 영향을 분석하였다는데 본 연구의 의의가 있다.

모델의 적용은 우리나라에서 부진동의 영향이 가장 탁월한 지역 중 하나인 영일만을 선정하였으며, 유한요소망으로 삼각형 가변요소를 적용하여, 요소의 간격은 10~100m로 구성하여 1분에서 90분까지의 주기를 이용하였고, 정성적, 정량적인 파의 특성을 파악하기 위하여 유한요소법을 이용한 해석으로 이를 재현하였다.

영일만전체의 경우에서 수치실험 결과 과거 연구자료의 결과와 잘 일치하는 제1 고유진동주기는 약 80분 그리고 제2 고유진동주기는 약 20분으로 나타났으며 포항신항의 협역수치실험을 실시한 결과 제1고유진동주기가 22.5분~26분 그리고 제2고유진동주기가 7~8분에서 재현 되었다.

진폭비가 급격히 상승하는 주기로는 영일만신항 건설전에서 1,800초, 2,200초, 3,360초, 4,600초 그리고 5,020초에서 상승된 진폭비가 5.3에서 7.2까지 발생하는 것으로 나타났고, 건설후에는 1,980초, 2,200초, 3,360초, 4,400초 그리고 5,020초에서 3.8에서 7.8까지의 상승된 진폭비가 나타나는 것으로 연구되었다. 그리고 이 진폭비를 저감시키기 위한 대책공법을 적용하였을 때는 위의 주기에서도 증폭현상이 발생하였지만 특히 600초, 1,650초, 2,300초, 2,980초 그리고 4,250초에서 두드러진 증폭현상이 발생하는 것으로 나타났다.

지점별로 영향은 달랐으나 영일만신항의 건설에 따라 일반적으로 포항신항에서는 영일만신항의 건설후 진동주기가 약 5분에서 10분 이동하고 증폭비가 상대적으로 증가하는 것으로 나타났으며 대책공법 수립 후 실험에서는 진폭비가 상대적으로 저감되는 것으로 연구되었다. 그리고 포항구항에서는 영일만신항의 영향이 대체적으로 적은 것으로 나타났다. 영일만신항의 경우 신항건설전 부진동 주기는 약 80분과 20분 그리고 신항건설후 약 5분정도 벗어난 75분과 17분에서 나타났다. 부진동을 저감시키기 위해 방파제의 길이를 연장한 수치실험에서는 일부 지점을 제외한 거의 모든 지점에서 증폭비가 1 ~ 3정도 감소되는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 요약하면

- (1) 영일만 및 포항신항의 부진동 주기는 이론식의 결과 및 과거 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났고,
- (2) 영일만 신항의 건설에 따라 현재 건설된 북방파제와 곧 준공될 남방파제의 입사파랑의 영향에 의해 영일만 내 각항들의 부진동 주기는 약 2,000초대와 3,300초대 그리고 4,600초와 5,000초 대역에서 진폭비가 증가하는 것으로 나타났고, 영일만 신항의 건설후 주 진동주기가 약 5~10분 정도 이동하고 진폭비가 대체로 상승하며,

(3) 이론적 대책공법으로 영일만신항 북방파제와 포항신항의 방파제 길이를 300m와 500m 증가시킨 경우 진폭비의 큰흐름을 변화하지 않지만 급격히 증가하는 진폭주기를 변화시키고 약 20~30%까지 증가된 진폭비를 감쇄시킬 수 있는 것으로 나타났다.

연구과정에서 나타난 반사계수 및 저면마찰에 대한 좀 더 자세한 연구에 이은 적용이 필요할 것으로 나타났다. 또한, 지금까지는 새로운 항만의 부진동을 분석할 때 항만개발이 진행되는 대상해역에 국한하여 수치실험으로 분석을 수행해왔지만, 본 연구에서는 영일만 신항 건설로 인하여 주위 항들에 대한 부진동까지를 수치실험으로 분석하였다. 앞으로도 영일만과 같은 대규모만의 항만 프로젝트 사업에서 인접해역의 항만이나 해안에 미치는 영향까지도 분석하여 종합적인 설계되어야 할 것이다.

따라서 차후에는 대상해역에서 해안 및 항만 경계면의 반사계수 및 저면마찰의 특성을 좀 더 자세히 분석하여, 비교 한 후 수치실험을 병행하는 것이 정확한 예측에 도움이 될 것이라고 본다.

참 고 문 헌

1. 강석구, 이상룡, 소재귀(1989), “영일만과 포항신항의 부진동현상” 해양 연구, 11(2), pp. 31~41.
2. 건설부(1987), “포항신항 파랑조사 및 모델실험 용역 보고서”, 제2권 파랑 조사 및 모델실험편, pp. 440
3. 박한일(1986), “영일만과 포항신항의 해면부진동에 관한 수치실험 연구”, 서울대학교 대학원 해양학과.
4. 이상룡(1986), “항만부진동 해석을 위한 기초연구”, 한국과학기술원 해양연구소 연구보고 BSPE 00069-110-2.
5. 이중우, 김지연(1991), “부산항개발에 따른 파랑분석과 해면부진동에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제5권 제1호, pp. 25-34.
6. 정원무(1999), “항만부진동에 대한 현장연구와 유한요소 해석”, 서울대학교 대학원 토목공학과.
7. 추교승(1974), “포항항의 해면 부진동 현상” 수로연보, pp.3~10. 부경대학교.
8. 허명규(2002), “공진방파제를 이용한 항만부진동의 저감”, 한국해양대학교 해사산업대학원.
9. 한국해양연구소(1995), “포항신항 항만부진동 현장관측 및 수치실험”, BSPE 00469-784-2, pp. 180
10. 해운항만청(1994), “영일만 신항개발 외곽시설 실시설계 용역보고서”, 제2

권 수치모형실험편, pp. 551

11. Berkhoff, J. C. W. (1972), "Computation of Combined Refraction Diffraction," Proc. 13th International Coastal Engineering Conference, pp.741-790.
12. 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.
13. Dally, W. R., Dean, R. G., and R. A. Dalrymple, R. A. (1985), "Wave Height Variation across Beaches of Arbitrary Profile", J. Geophys. Research, Vol. 90, pp. 1917-1927.
14. 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.
15. Freeman, N.G., Hamblin, P.F., and Murty, T.S.(1974), Helmholtz resonance in harbours of the Great Lakes, Proc. 17th Conf. Great Lakes Res., pp.399-411.
16. 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.
17. 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.
18. Lee, J. J. and F. Raichen (1972), "Oscillations in harbors with connected basins" Waterways, Harbors and Coastal Engineering

Division, ASCE, Vol. 98, pp. 311-32.

19. Lee, J. W. (1989), "Hybrid Element Analysis of Water Waves for Harbor Design", Ph.D. Thesis, Department of Ocean Engineering, University of Hawaii.
20. 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.
21. Mei, C. C. (1983), "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves", John Wiley, New York.
22. Us Army Engineers Waterways Experiment Station(1984), Shore Protection Manual(4thed.), CREC, Us Government Printing Office, Washington, DC.
23. Willson, B. W. (1967). "The threshold of surge damage for moored ships." Proc. Inst. Civil Engineers, Vol. 38, pp.107-134.
24. Wilson, B. W. (1972), "Seiches" Advances in Hydrosience Vol. 8, Academic press, pp. 1-94.
25. 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.

감사의 글

먼저 지금까지 저를 아끼고 격려해주신 모든 분들에게 감사드립니다.

입학 때부터 지금까지 저의 학문적, 인간적 길을 넓혀주시고 항상 바른 사람으로 성장할 수 있도록 이끌어주신 존경하는 스승님 이중우 교수님께 진심으로 감사드립니다. 부족한 논문이지만 논문을 완성하는데 많은 조언을 주신 김태곤 교수님, 김도삼 교수님, 경갑수 교수님 그리고 논문을 세심하게 심사하여 주신 김태형 교수님 그리고 국승기 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

항상 저를 지도해 주시고 격려해 주신 양상용 선배님, 신승호 선배님, 정대득 선배님, 염원기 선배님, 김한필 선배님, 박동진 선배님, 김지연 선배님, 정영환 선배님 그리고 항상 후배들을 챙기시는 호형, 상호형, 지훈이형, 도경이형, 성철이형, 형철이형, 우철이형, 태환이형, 위민이형 그리고 박사과정에서 항상 부족한 후배들을 지도해 주시는 강민이형, 학승이형, 호동이형과 논문관련 데이터를 제공해주신 동호형 그리고 동기 훈이 그리고 함께 공부하는 우리 동훈이와 든직한 재현이, 다 잘하는 승철이, 착한 기담이, 항상 고생해 주는 필성과 기대에게 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 사랑하는 아버지와 어머니 그리고 저에게 끊임없는 격려를 보내는 이쁜 누나와 희경이 그리고 항상 저를 믿어주는 사랑하는 주영에게 이 논문을 바칩니다.

이 글에서 미처 감사의 말씀을 전하지 못한 모든 분들께도 감사드립니다.