

工學碩士 學位論文

공진방파제를 이용한 항만부진동의 저감

Reduction of Harbor Oscillations with
the Resonant Breakwaters

指導教授 文慶萬

2002年 8月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

海事工學科

許明揆

Reduction of Harbor Oscillations with the Resonant Breakwaters

Myeong Gyu Hur

*Korea Maritime University
Graduate School of Maritime Industrial Studies*

Abstract

Most of regular shaped harbors are confronted with harbor oscillation problem more or less. We often try to design the costal harbor such that whatever waves are unavoidable do not amplify. However, it is difficult to prevent the arrival of long waves causing oscillation with a harbor. This study deals with the reduction of harbor oscillation adopting the resonant breakwater outside the harbor entrance. Prior to the numerical model investigation on wave agitation in a harbor, the records of long wave are analyzed and theoretical and physical model approaches to the reduction of oscillations in a harbor are also introduced.

Numerical method used here are fairly standard form from the extended mild slope equation. Hybrid element model is based on a variational formulation of the boundary value problem. In this formulation an analytical solution is coupled with the finite element solution at the open

boundary.

Formed numerical model is then applied to both Busan Coastal Area and Gamcheon Harbor design plan. The numerical results are obtained in terms of wave periods and directions. General discussions and comparisons are made between the measurements and the calculations. The adopted reduction scheme is found to be reliable and excellent in reduction of amplification in the harbor.

KEY WORDS: Harbor oscillation; Resonant breakwater; Hybrid Element Method; Algebraic equation; Functional; Natural period

목 차

ABSTRACT	i
LIST OF TABLES	v
LIST OF FIGURES	vi
NOMENCLATURE	xii
제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구 목적	3
1.3 연구의 내용 및 방법	4
제2장 부진동의 현장관측과 저감방안	6
2.1 부진동의 발생원인과 국내기록현황	6
2.1.1 발생원인	6
2.1.2 국내기록현황	7
2.2 현장관측자료 분석	8
2.2.1 평상시 관측	10
2.2.2 폭풍시 관측	13
2.2.3 광역관측	18
2.3 부진동의 저감방안	20
2.3.1 이론적 배경 분석	20
2.3.2 부진동의 저감방안	22
2.4 부진동의 저감사례	28

제3장 부진동의 수치모델구성	34
3.1 수치모델의 이론적배경	34
3.1.1 지배방정식	35
3.1.2 수치 해석 방법	40
3.2 수치모델의 구성	42
3.2.1 광역모델의 구성	43
3.2.2 협역모델의 구성	46
제4장 수치실험 및 분석	51
4.1 현재상태의 실험 분석	51
4.1.1 광역모델 실험	51
4.1.2 협역모델 실험	64
4.2 부진동 저감방안 적용시의 실험 분석	86
4.2.1 수치모델의 구성	86
4.2.2 수치실험 및 분석	88
제5장 결론	124
5.1 현재의 항만조건	124
5.2 부진동 저감방안 도입 후	125
참고문헌	127

LIST OF TABLES

	Page
Table 2.1 Location of measurement and measurement period around Gamcheon Harbor in 1997	9
Table 2.2 Results of seiche data analysis measured at Sts. P1~P4 around Gamcheon Harbor in 1997	15
Table 4.1 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor (The present, S1~S14)	84
Table 4.2 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor (The present, S15~S28)	85
Table 4.3 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor (after resonant breakwater, S1~S14)	122
Table 4.4 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor (after resonant breakwater, S15~S28)	123

LIST OF FIGURES

	Page
Fig. 2.1 Location map of field measurement stations around Gamcheon Harbor	11
Fig. 2.2 Results of spectral analysis for long period waves data measured at Sts. P1, P2, P3 and P4 (Dec.2 13:00, 1997; (a) power densities, (b) relative amplitude ratios)	12
Fig. 2.3 Results of spectral analysis for long period waves data measured at Sts. P1, P2, P3 and P4 (Dec.6 13:00, 1997; (a) power densities, (b) relative amplitude ratios)	14
Fig. 2.4 Variations in long period waves component measured at Sts. P1~P4 in Gamcheon Harbor (a)height, (b)period	17
Fig. 2.5 Observation stations and Calculate stations of the global harbor oscillation (S: Spring, M: Summer, F: Fall, W: Winter)	19
Fig. 2.6 Long wave agitation increase from the sea to the basin (match the natural oscillation periods of all basins)	23
Fig. 2.7 The plan to unharmonize with resonant period (establish inner harbor structure)	23
Fig. 2.8 The plan to control resonance by escaping energy concentration	24
Fig. 2.9 Resonant breakwater and wave trap at the entrance of channel ..	25
Fig. 2.10 Wave energy of harbor side in breakwater	25
Fig. 2.11 Resonator with an finite channel	26
Fig. 2.12 Resonator with an infinite channel	26
Fig. 2.13 Multiple resonators with breakwaters(1)	27
Fig. 2.14 Multiple resonators with breakwaters(2)	27
Fig. 2.15 The first base of Barbers Point Harbor	29
Fig. 2.16 An aerial photograph of Barbers Point Harbor before developement	30
Fig. 2.17 Barbers Point Harbor hydraulic model(Hawaii University)	30
Fig. 2.18 Barbers Point Harbor hydraulic model for resonator plan	31

Fig. 2.19 The third base plan of Barbers Point Harbor	33
Fig. 2.20 An aerial photograph of Barbers Point Harbor after developement	33
Fig. 3.1 Institution domain and boundary for Numerical Analysis	39
Fig. 3.2 Finite element mesh for the global model	44
Fig. 3.3 Two and Three dimensional picture of water depth at the global water	45
Fig. 3.4 Finite element mesh for the present harbor	48
Fig. 3.5 Water depth contours around Gamcheon Harbor	49
Fig. 3.6 Selected stations for comparison of harbor response	50
Fig. 4.1 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(1,2,3,4)	53
Fig. 4.2 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(5,6,7,8)	54
Fig. 4.3 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(9,10,11,12)	55
Fig. 4.4 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(13,14,15,16)	56
Fig. 4.5 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(17,18,19,20)	57
Fig. 4.6 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(21,22,23)	58
Fig. 4.7 Computed amplification ratios in the global model (T=450sec, S10°W)	60
Fig. 4.8 Computed amplification ratios in the global model (T=450sec, ESE)	61
Fig. 4.9 Computed amplification ratios in the global model (T=26.6min, S10°W)	62
Fig. 4.10 Computed amplification ratios in the global model (T=26.6min, ESE)	63
Fig. 4.11 Response characters of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8)	

	(The present, S10°W)	66
Fig. 4.12	Response characteristics of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16) (The present, S10°W)	67
Fig. 4.13	Response characteristics of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24) (The present, S10°W)	68
Fig. 4.14	Response characteristics of selected station(25,26,27,28) (The present, S10°W)	69
Fig. 4.15	Response characteristics of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8) (The present, SSE)	70
Fig. 4.16	Response characteristics of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16) (The present, SSE)	71
Fig. 4.17	Response characteristics of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24) (The present, SSE)	72
Fig. 4.18	Response characteristics of selected station(25,26,27,28) (The present, SSE)	73
Fig. 4.19	Response characteristics of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8) (The present, ESE)	74
Fig. 4.20	Response characteristics of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16) (The present, ESE)	75
Fig. 4.21	Response characteristics of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24) (The present, ESE)	76
Fig. 4.22	Response characteristics of selected station(25,26,27,28) (The present, ESE)	77
Fig. 4.23a	Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor (present harbor, 335sec, S10°W)	78
Fig. 4.23b	Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor (present harbor, 335sec, SSE)	79
Fig. 4.23c	Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor (present harbor, 335sec, ESE)	80
Fig. 4.24a	Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor (present harbor, 636sec, S10°W)	81
Fig. 4.24b	Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor	

	(present harbor, 636sec, SSE)	82
Fig. 4.24c	Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor (present harbor, 636sec, ESE)	83
Fig. 4.25	Finite element mesh for resonator model	87
Fig. 4.26	Response character of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8) (after Resonant breakwater construction, S10°W)	90
Fig. 4.27	Response character of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16) (after Resonant breakwater construction, S10°W)	91
Fig. 4.28	Response character of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24) (after Resonant breakwater construction, S10°W)	92
Fig. 4.29	Response character of selected station(25,26,27,28) (after Resonant breakwater construction, S10°W)	93
Fig. 4.30	Response character of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8) (after Resonant breakwater construction, SSE)	94
Fig. 4.31	Response character of selected station(10,11,12,13,14,15,16) (after Resonant breakwater construction, SSE)	95
Fig. 4.32	Response character of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24) (after Resonant breakwater construction, SSE)	96
Fig. 4.33	Response character of selected station(25,26,27,28) (after Resonant breakwater construction, SSE)	97
Fig. 4.34	Response character of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8) (after Resonant breakwater construction, ESE)	98
Fig. 4.35	Response character of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16) (after Resonant breakwater construction, ESE)	99
Fig. 4.36	Response character of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24) (after Resonant breakwater construction, ESE)	100
Fig. 4.37	Response character of selected station(25,26,27,28) (after Resonant breakwater construction, ESE)	101
Fig. 4.38	Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 1,2)	102
Fig. 4.39	Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 3,4)	103

Fig. 4.40 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 5,6) ···	104
Fig. 4.41 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 7,8) ···	105
Fig. 4.42 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 9,10) ··	106
Fig. 4.43 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 11,12) ··	107
Fig. 4.44 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 13,14) ··	108
Fig. 4.45 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 15,16) ··	109
Fig. 4.46 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 17,18) ··	110
Fig. 4.47 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 19,20) ··	111
Fig. 4.48 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 21,22) ··	112
Fig. 4.49 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 23,24) ··	113
Fig. 4.50 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 25,26) ··	114
Fig. 4.51 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 27,28) ···	115
Fig. 4.52a Calculated response amplification ratio (after resonant breakwater, 335sec, S10°W) ···········	116
Fig. 4.52b Calculated response amplification ratio (after resonant breakwater, 335sec, SSE) ···········	117
Fig. 4.52c Calculated response amplification ratio (after resonant breakwater, 335sec, ESE) ···········	118
Fig. 4.53a Calculated response amplification ratio (after resonant breakwater, 636sec, S10°W) ···········	119

Fig. 4.53b	Calculated response amplification ratio (after resonant breakwater, 636sec, SSE)	120
Fig. 4.53c	Calculated response amplification ratio (after resonant breakwater, 636sec, ESE)	121

NOMENCLATURE

a	Dimensionless amplitude
a_0	Amplitude of incidence wave
C	Wave celerity
C_g	Group of wave celerity
$F(\Phi)$	Functional
g	Acceleration due to gravity
h	Mean water depth at (x, y)
i	$\sqrt{-1}$
k	Wave number
k_0	Wave number in shallow water
K_r	Reflection factor
n	Energy communication percentage of the wave
N	Interpolation function
N^2	Interpolation function a square
N^e	Interpolation function of exponent
N_i	Interpolation function in unit vector of x direction
N_j	Interpolation function in unit vector of y direction
N_i^e	Interpolation function in unit vector exponent of x direction
N_j^e	Interpolation function in unit vector exponent of y direction
N_k^e	Interpolation function in unit vector exponent of z direction
r	Horizontal distance from origin

R_1	Factor in proportion to horizontal gradient operator a square
R_2	Factor in proportion to horizontal gradient operator
$Re\{\}$	Real part of $\{\}$
s	Distance
x, y	Coordinate distance in horizontal direction
z	Coordinate distance in vertical direction
β	Bottom of the sea gradient a square of no dimension
λ	Bottom of the sea friction factor
Φ	Velocity potential, $\Phi(x, y, z, t)$
ω	Wave angular frequency
η	Water surface elevation
∇	Horizontal gradient operator
∇^2	Horizontal gradient operator a square
$\nabla\Phi$	Horizontal gradient operator of velocity potential
∇h	Bottom of the sea gradient a square
ν	Phase difference to the constituents of direction of particle a fluid
Φ_A	Velocity potential function of an interval A
Φ_C	Velocity potential function of an interval C
Φ^I	Incident velocity potential
Φ^e	Exponent potential
Φ^s	Scattered velocity potential
Φ_i^e	Differential of exponent potential in unit vector of x direction
Φ_j^e	Differential of exponent potential in unit vector of y direction
Φ_k^e	Differential of exponent potential in unit vector of z direction

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

항만은 선박이 안전하게 출입·정박할 수 있는 시설로서 이를 위한 외곽 및 수역시설과 하역시설 등을 두루 갖추어야 하며 항만 정온도를 유지하여야 한다. 일반적으로 항만 정온도에 영향을 미치는 인자로 단주기파, 장주기파, 바람 및 항내에서의 흐름 등을 든다. 항만 정온도를 개선하기 위한 일환으로 국내에서는 최근까지 단주기파의 항내 침입을 감소시키는데 노력을 집중하였고, 항내 계류 선박의 작업한계도 항내파고로 결정하였다. 그러나, 산업의 발전에 따라 선박이 대형화되고 천연항의 확장에 이어 인위적인 대형 항만이 건설됨에 따라 국내에서도 단주기파만으로는 설명이 어려운 피해가 출현하게 되었다. 이러한 하역불능의 피해의 원인으로 장주기파에 의한 항만부진동의 연구가 1980년대부터 거론되었다. 항만부진동은 harbor oscillation 또는 seiche 등으로 일컬어진다. 최초로 장주기파에 대한 항만파고와 주기의 비에 다른 계류한계의 개념을 도입한 이는 Wilson(1967)으로 그 이전까지는 하역한계로 항만파고를 제시하였다.

부진동에 대한 수학적 접근 방법은 1960년대로 거슬러 올라가지만 최근까지도 연구의 대상이 되고 있다. 초기에 Miles와 Munk(1961)은 Green 함수를 이용한 적분방정식의 해석으로 직사각형 항만의 공진 특성을 분석하였고, Ippen과 Goda(1963)는 외해에 직접 연결된 직사각형 항만에서 Fourier 변환을 이용한 변수분리법으로 해석하였다. Mei와 Petroni(1973)은 정합점근전개법(matched asymptotic expansion method)으로 반원형태의 방파제에 둘러싸인 항만에 대해 파향 및 항만입구의 변화에 대한 반응특성을 연구하였고, Chen과 Mei(1974)는 고유함수 전개법을, Mei와 Chen(1975)는 Helmholtz방정식을 사용하여 항만내부

의 운동을 해석하였다. Chen(1984)은 지배방정식으로 환경사방정식을 사용하였으며, Lee(1989)는 확장환경사방정식의 복합요소해석으로 단주기파에 의한 실제 항만에서 발생하는 부진동의 변화를 다양하게 분석하였다. 가까운 일본에서는 Hibiya and Kajiura(1982)등이 유한요소법을 이용한 2차원 수치 모델을 개발하여 나카사키만에 적용한 사례가 있다.

우리나라에서 부진동에 대한 연구는 이(1966), 추(1974) 등에 의해 항만부진동에 대한 통계적 분석 방법의 연구가 있었으며, 최근에는 이(1986), 이와 김(1991), 정(1999) 등에 의해 유한요소법을 이용한 부진동 수치모델에 관한 기초 연구가 시작되었다.

항만부진동에 대한 연구는 장주기파의 피해가 심각한 항만에서는 추진되지만 단주기파가 주종을 이루는 경우에는 상대적으로 관심이 적어서 우리나라의 경우에도 기존의 항뿐만 아니라 신항만에서 주로 대형 선박용 선석을 중심으로 이루어지고 있다. 특히, 서해안에 위치한 항만들의 항만정온도는 조석현상이 강하기 때문에 부진동의 영향은 상대적으로 작은 것으로 경시되고, 동·남해안의 항만들은 부진동의 영향을 상당히 받을 수 있을 것으로 추측되어 관심도가 높다고 하겠다.

일반적으로 부진동을 저감시키는 방안은 실제 항만에 도입하기가 매우 어렵다. 그것은 항만을 건설한 후 실제 운영과정에서 부진동의 현상을 발견하고 이에 대한 대책을 강구하고자 하지만 이미 상당한 토목공사가 이루어진 상태이고 항만공사 그 자체는 대규모 사업이기 때문에 수정을 기하기가 매우 어렵다.

부진동의 저감은 일단 발생하는 항만에서 그 진동주기를 변경시키거나 증폭비를 감쇄시키는 2가지 방법으로 접근하여야 한다. 항만이 가지고 있는 1개 이상의 고유진동주기에 대한 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. 여기서는 항만재개발 또는 정비 차원에서 접근할 수 있는 방안에 대하여 검토하기로 하고 이를 부산의 감천항에 도입하여 수치실험으로 이의 적용성을 평가해보기로 한다.

1.2 연구 목적

최근에는 새로운 항만의 건설이나 기존 항만의 정비에서 항만정온도의 검토를 설계과정에 반드시 포함시키고 있어서 과거에 문제가 되었던 정온도 확보에 어느 정도 기여하고 있다고 본다. 한편, 항내에서 계류작업이나 하역작업의 한계를 설계파나 유의파로 인한 단주기파의 파고를 적용하여 설정하고 있는 반면에 선박의 대형화로 인한 접이안 및 정박에서 단주기파와 다른 파랑으로 인한 피해와 어려움을 호소하고 있어서 이에 대한 대책을 확보하는데 고심을 해온 것도 사실이다. 바로 장주기파에 의한 항만부진동의 문제이며 이것은 외해로부터 항만입구로 입사하는 장주기파의 주기가 항만의 고유진동주기와 같거나 거의 같을 때 공진현상을 일으켜 비정상적으로 증폭되는 현상으로 우리나라의 대표적인 곳이 바로 포항 신항만이다. 또한, 감천항의 경우는 외해에 바로 노출되어 있으며 폭이 좁은 직사각형에 항만의 입구 양쪽에서 항의 폭보다 입구폭이 매우 작은 횡방향으로 방파제가 설치된 항만의 지형적 특징으로 컨테이너선 등 대형 선박의 접이안이 빈번하고 이와 함께 새롭게 부두를 정비하여 선박의 출입이 많아지므로 부진동에 대한 검토가 필요한 곳으로 알려져 있다.

본 연구는 이상과 같은 점에서 기존의 항만에서 부진동 특성을 파악하고 부진동을 저감할 수 있는 일반적 방안을 검토한 후에 그 중에서도 공진방파제를 도입하였을 때 항만반응특성을 분석하여 부진동의 저감정도를 평가하는 것에 목적을 두고 대상항만으로 감천항을 계획하였다.

부산항의 보조항으로 서부에 위치한 감천항은 부산 북항의 컨테이너 폭주에 따른 컨테이너 부두가 최근 신설되었지만 어항의 기능을 대폭 확대하고 있으며 냉동 및 수산가공시설과 공동시장의 부대시설로 재정비하고 있다. 또한 이곳은 중앙하수 처리장이 인접하여 위치하는 것으로 계획을 추진 중에 있고 부분적으로 항내 해안선을 매립으로 정비하여 새로운 부두시설을 계획하고 있다.

1.3 연구의 내용 및 방법

항만부진동 문제를 해결하기 위해서는 일반적으로 현장관측, 수리모형실험 및 수치실험의 3가지 방법이 이용된다. 현장관측은 대상해역에 관측기기를 설치하여 일정기간 동안 현상을 관측하여 수집된 자료를 분석하는 방법이며, 수리모형실험은 대상항만을 일정한 축척에 따라 축소한 모형을 제작하고 상사법칙에 기준하여 실제 현상을 재현한다. 수치실험은 물리적 법칙을 수식화한 지배방정식과 경계조건을 컴퓨터를 이용하여 해를 구하는 방법이다.

본 연구에서는 항만에서 선박 집안시설 및 방파제 등의 주변 해역환경이 변화함에 따른 항만부진동의 검토와 발생한 부진동의 저감을 위한 방안이 실제로 적용될 수 있을 것인가를 분석하는데 목적이 있으므로 현재의 항만조건에 대한 주변의 관측자료를 구하여 분석하고 부진동 예측을 위한 수치모형을 수립하여 현재조건에서 이를 재현한 후, 새로운 부두 및 방파제의 평면배치계획을 통해 부진동 변화를 예측하고 항만이 가진 입지적 조건에 따라 가능한 저감 방안을 도출하는 것을 목표로 하였다.

본 연구에 포함될 내용을 정리하면 다음과 같다. 연구대상으로 선정된 후보지에 대한 항만건설계획과 항만부진동 관측기록의 문헌조사와 이의 분석을 통해 항만이 가진 부진동 반응 특성을 파악하고, 부진동의 수치실험에 필요한 기본 및 적용에 관한 문헌조사를 통해 이론적 접근을 행하고 새로운 부두계획 후에 항만반응에 대한 변화를 예측하여 저감을 위해서는 입지적 여건을 최대한 반영토록 한다. 이를 위하여 항만의 현황 및 새로운 부두 계획안에 대한 분석 등 기본자료의 정리와 사업대상구역에 대한 종합적인 분석을 통하여 항만의 특성 평가를 수행한 후 저감방안을 적용하여 나타나는 제반현상을 기술하기로 한다.

수치모델 실험은 관련된 물리법칙을 수식화한 지배방정식과 이를 해석하기 위한 경계조건을 컴퓨터로 재구성하여 해를 구하는 것으로 기법은 복합요소법 (Hybrid Element Method, HEM)을 적용하기로 한다.

본 연구의 구성은 먼저 연구의 배경, 목적, 내용 및 방법을 제1장에서 제시하고, 제2장에서는 부진동의 현장관측 및 저감방안에 대한 이론적 배경분석을, 제3장에서는 수치모델의 이론적 배경과 모델 구성을 다룬다. 제4장에서 모델을 실제해역에 대해 광역 및 협역으로 나누어 적용하고, 현상태를 분석한 후에 저감방안의 도입에 따른 해석결과를 제시하여 제5장에서 결론에 이르는 것으로 하였다.

제 2 장 부진동의 현장관측과 저감방안

2.1 부진동의 발생원인과 국내기록현황

2.1.1 발생원인

항만에서의 부진동 주파수대는 너울에 기인한 주기 0.5~10분의 저중력파 (infragravity wave)와 주기 10~30분의 붕파(shelf wave)로 통상 구분되며, 이러한 장주기파의 발생원인으로는 먼저 태풍이나 저기압 통과시의 기압의 불균형에 의한 것을 드는데 일본 및 우리나라에서는 태평양의 남방 해상을 저기압이 통과하는 9~11월에 장주기파에 의한 선체 동요가 심화되는 것으로 알려져 있다. 또한, 돌풍, 해저지진, 해저사면의 붕괴, 내부파(internal wave) 등이 그 원인이 될 수 있는 것으로 알려지고 있으나 정확한 발생기구에 대해서는 아직까지 연구의 대상으로 되어 있다. 또 다른 원인은 파군에 관계된 구속파 (bound wave) 또는 저중력파에 의한 것으로 잉여응력의 개념을 도입한 Longuet - Higgins와 Stewart(1962)의 연구 이래 많은 연구자들의 성과가 제시되었으며 구속장파, 자유장파(free long wave 또는 surf beats), 모서리파 (edge wave) 등이 천해역에서는 저주파수의 장파로 에너지를 전달하는데 이것은 크기가 작으나 천해역에서 포획되거나 공진을 일으키게 된다. 대륙붕상의 구속 및 자유 저중력파의 에너지 수준은 너울의 에너지 수준이 매우 클 때만 비슷해지는데 관측결과에서 자유 저중력파는 천수심에서 생성되고 외해로 방사되며 결과적으로 대륙붕에서 포획되는 것으로 알려져 있다(Elgar 등, 1994; Herbers 등, 1995a).

2.1.2 국내기록현황

국내의 주요 항만에서의 부진동에 대한 기록은 이석우(1966)가 묵호항, 울산항, 부산항, 여수항, 제주항, 도동항(울릉도), 진리항(대흑산도) 등 7개 항만에서의 검조기록에서 각 항만에서의 부진동 출현에 대한 통계 분석을 행하여 제1고유주기를 제시하였다.

영일만 및 포항신항에서의 부진동은 역시 검조자료의 분석(추교승, 1974; 1976)과 건설부에 의한 대규모 현장관측(한국해양연구소, 1987)을 통해 영일만 내의 종방향 제1 및 제2 공진주기와 횡방향 공진주기 및 포항신항의 제1, 제2 공진주기, 그리고 국부적인 공진주기의 일부가 제시되었다. 추교승(1974, 1976)은 1968년부터 건설된 포항신항의 부진동 현상에 대해 1973~1974년의 2년간 포항신항내 검조소의 기록중 진폭이 20 cm 이상인 진동만을 선택하여 평균과법을 사용한 통계적 분석을 실시한 결과 신항내에는 60~84분 주기와 20~24분 주기의 부진동이 주로 발생하며, 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. 박한일 등(1986)은 포항신항의 제4기 확장사업후 검조 자료의 분석에서 신항내에서 20.0분과 6.6분을 제1 및 제2 고유주기로 각각 제시하였고, 영일만의 폭방향 제1, 제2 진동주기로 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 확

인하였다. 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.

부산의 남항, 북내항 및 북외항을 포함한 해역에서의 부진동에 대한 관측은 인공섬계획에서 이루어졌다. 한국해양연구소(1991)에서는 부산 해상신도시 건설계획에 대한 현장조사로 수압식 파고계를 이용하여 1990년 3월~11월에 부산항 내외의 4~8개 정점에서 4계절 현장관측을 실시하고 56분, 23~35분, 10분 등의 공진주기를 제시하였다.

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.

2.2 현장관측자료 분석

감천항에서의 부진동 특성을 파악하기 위한 장주기파의 관측은 한국해양연구소(1997)에서 Table 2.1 및 Fig. 2.1과 같은 항내외의 정점 P1~P4 4개소에서 1997년 11월 27일부터 12월 13일까지 수압식 파고계를 설치하여 지점별로 연속적으로 측정된 것이 유일한 실정이므로 본 장에서는 해양연구소의 관측결과를 요약하고 필요에 따라 인용하기로 한다. 그 중 P2는 두도와 감천항 입구

사이에 입구에서 외측으로 약 180m 지점에 위치하고, P3는 항만의 방파제 내측입구 중심에서 안쪽으로 약 130m 지점, P4는 감천항 내측 중앙부두에서 약 200 m 떨어진 지점에 위치시켰으며, 감천항의 남측에 위치한 목도 동쪽 약 300 m 해상에도 입사파의 특성을 파악하기 위해 정점 P1을 두었다. 사용한 관측장비는 수압식 파고계로 정점 P1과 P4에서는 장주기파 관측을 위해 5초마다, 그리고 항입구 부근의 정점 P2와 P3에서는 1초마다 수압자료가 자료 저장장치에 저장되었는데 정점 P1 및 P4의 경우 모든 자료가 회수되었으며 상태도 양호하였으나 정점 P2와 P3의 경우는 12월 10일 이후의 자료가 수집되지 못한 것으로 나타났다.

측정자료의 분석은 자료수집간격을 5초로 통일하고 5초 간격의 연속된 17,280개 자료를 1세트로 하여 모두 16세트의 자료를 구해 조석성분을 제거한 후 FFT를 이용한 스펙트럼분석을 통해 주요 주파수 성분에 대한 스펙트럼 밀도와 각 정점에서 상대진폭비로 정리하였다. 전체 16 세트의 관측자료를 평상시와 폭풍시의 두가지 경우로 나누어 부진동의 특성을 정리하였다. 평상시는 12월 2일 13시부터(자료번호 6번), 폭풍시는 12월 6일 13시(자료번호 10번)부터 약 22.8시간의 자료인데, 자료번호 14~16은 정점 P1과 P4에서만 얻어진 것이다.

Table 2.1 Location of measurement and measurement period around Gamcheon Harbor in 1997

Station	Measurement period	Data sampling interval (sec)	Location of measurement stations		Water depth(m)
			Longitude	Latitude	
P1	Nov. 27~Dec. 13	5.0	129 00 00.0 E	34 58 43.2 N	24.0
P2	Nov. 27~Dec. 10	1.0	129 00 45.3 E	35 02 43.6 N	17.0
P3	Nov. 27~Dec. 10	5.0	129 00 35.2 E	35 02 51.7 N	16.2
P4	Nov. 27~Dec. 13	1.0	129 00 01.2 E	35 04 03.1 N	10.2

2.2.1 평상시 관측

4개의 관측점에서 12월 2일 13시부터 약 22.8시간 동안 관측된 자료의 스펙트럼 분석 결과는 스펙트럼 밀도와 정점 P1에 대한 상대진폭비로 Fig. 2.2(a)(b)에 나타내었다. 스펙트럼 밀도는 정점 P1에서 주기 42.0분과 1분 근처의 미약한 첨두치를 보였고, 정점 P2에서 33.3~42.0분과 10.6~12.1분의 첨두치가 나타났다. 정점 P3에서는 33.3분과 10.6~12.1분의 비교적 뚜렷한 첨두치를 나타내었다. 항내의 정점 P4에서는 27.0~33.3분, 9.4~12.1분 및 5.6~6.2분의 뚜렷한 첨두치가 기록되었고, 아울러 1~3분 사이에 다수의 첨두치도 기록되었다. 상대진폭비는 항입구 외측의 정점 P2에서 33.3분(진폭비 3.0), 12.1분(2.4), 8.4분(2.0), 5.6분(2.0), 0.7분(2.0) 등의 첨두치가 나타났으나 상대진폭비가 2~3으로 매우 작았다. 항입구 내측의 정점 P3에서는 27.0~33.3분(4.0, 4.7), 10.6~12.1분(2.4, 2.7), 5.6분(2.0), 1.4분(2.0)에서 첨두치를 보였다. 정점 P4에서는 27.0~33.3분(11.2, 9.9), 9.4~12.1분(3.1~3.4), 5.6~6.2분(2.2, 2.4)의 첨두치가 출현하였다.

이상과 같이 평상시 자료에서는 스펙트럼 밀도와 상대진폭비를 통한 분석에 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이를 요약하면 평상시 항내의 부진동은 27.0분~33.3분의 주기를 가지는 Helmholtz 모드와 10.6~12.1분의 주기를 가지며 항입구 부근에 절점이 생기는 제1 공진 모드를 가지는 것으로 판단된다.

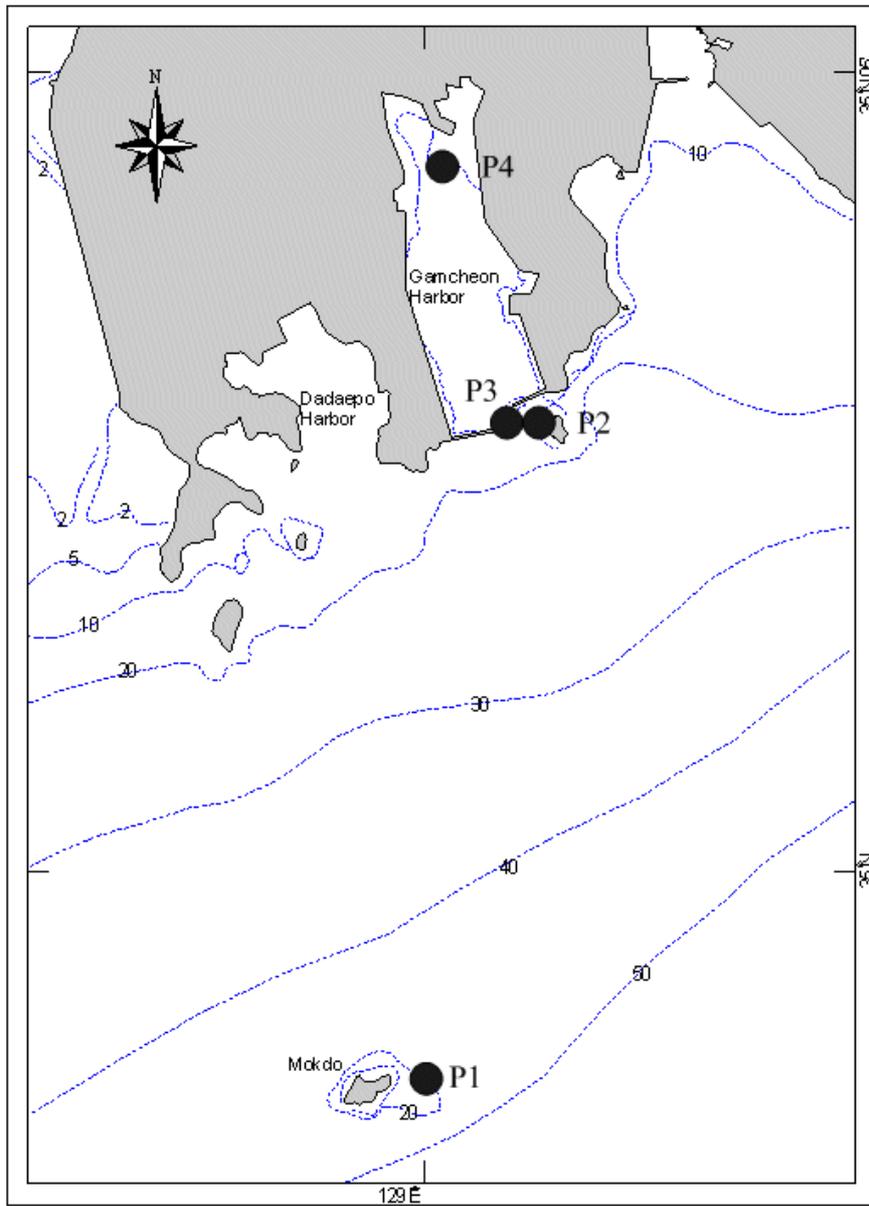


Fig. 2.1 Location map of field measurement stations around Gamcheon Harbor

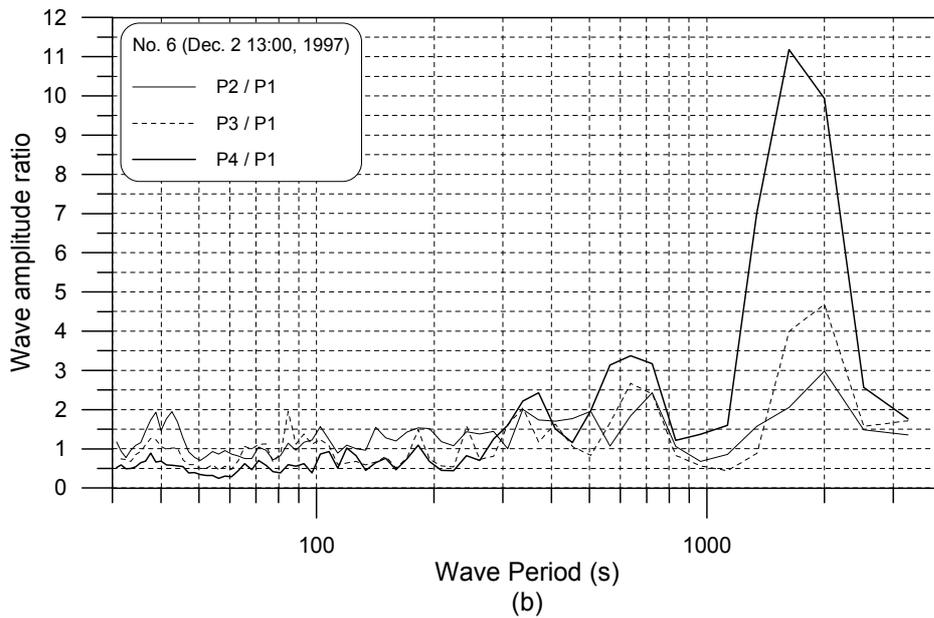
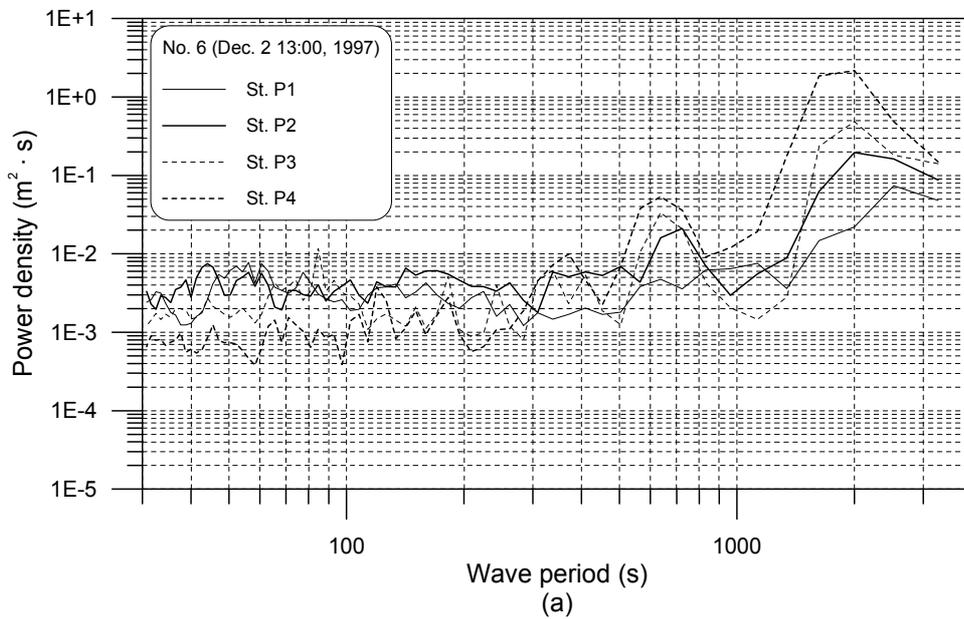


Fig. 2.2 Results of spectral analysis for long period waves data measured at Stations P1, P2, P3 and P4 (Dec.2 13:00, 1997; (a) power densities, (b) relative amplitude ratios)

2.2.2 폭풍시 관측

같은 관측지점에서 12월 6일 13시부터 약 22.8시간 동안 관측된 자료의 스펙트럼 분석 결과는 Fig. 2.3(a)(b)에 정리한 바와 같다. 스펙트럼 밀도를 보면 정점 P1에서는 뚜렷한 첨두치가 나타나지 않으나, 정점 P2에서는 42.0분, 10.6분 및 5.6분에서 비교적 구분하기 쉬운 첨두치가 출현하였다. 정점 P3에서는 33.3분, 10.6분 및 5.6분에서 뚜렷한 첨두치가 나타났으며, 정점 P4에서는 27.0~33.3분, 10.6분 및 5.6분에서 뚜렷한 첨두치가 나타났지만 평상시에 출현했던 1~3분 사이의 다수의 첨두치는 출현하지 않았다. 상대진폭비는 항입구 외측의 정점 P2에서 33.3분(상대진폭비 3.2), 12.1분(2.4), 8.4분(2.5), 5.6분(3.0), 3.0~4.0분(2.0~2.5) 등의 첨두치가 나타났고, 평상시에 비해 진폭비가 약간 컸으며, 주기 0.6~1.5분에서 상대진폭비가 2.0~2.3인 첨두치도 다수 나타났다. 항입구 내측의 정점 P3에서는 27.0~33.3분(4.2, 4.8), 10.6~12.1분(2.3, 2.7), 5.6분(4.2) 외에 4.0분(2.2), 3.0분(2.4), 0.6분(2.0) 등에서, 정점 P4에서는 27.0~33.3분(10.1, 9.8), 9.4~12.1분(2.5~3.2), 5.6분(4.3) 및 0.6분(2.0) 등에서 첨두치가 출현하였다.

이상에서 스펙트럼 밀도와 상대진폭비는 서로 비슷한 결과를 보이거나 10.6분과 5.6분의 첨두치는 평상시의 스펙트럼 밀도가 보다 분산되어 나타났고, 감천항의 제1 공진 모드로 보이는 10.6분 부근의 공진 모드가 평상시와 폭풍시에 모두 뚜렷한 것으로 분석되었다. 정점간 상대진폭비를 기준하여 감천항 수역의 공진 모드들을 정리하면 Table 2.2와 같으며 관측한 16개 자료에 대한 관측기간과 공진 모드 및 상대진폭비로 표시하였다. 이 표에서 항입구 외측의 정점 P2에서는 13개의 자료가 모두 33.3분에서 Helmholtz 모드가 출현하였고, 항입구 내측의 정점 P3에서는 33.3분이 4조, 27.0~33.3분이 9조이어서 파가 항입구를 통과하면서 주기가 약간 짧아지는 것으로 파악되었다. 항내측 정점 P4에서는 27.0~33.3분 및 27.0분이 각각 8조로 이러한 경향이 점차 두드러지는 것으로 나타났다.

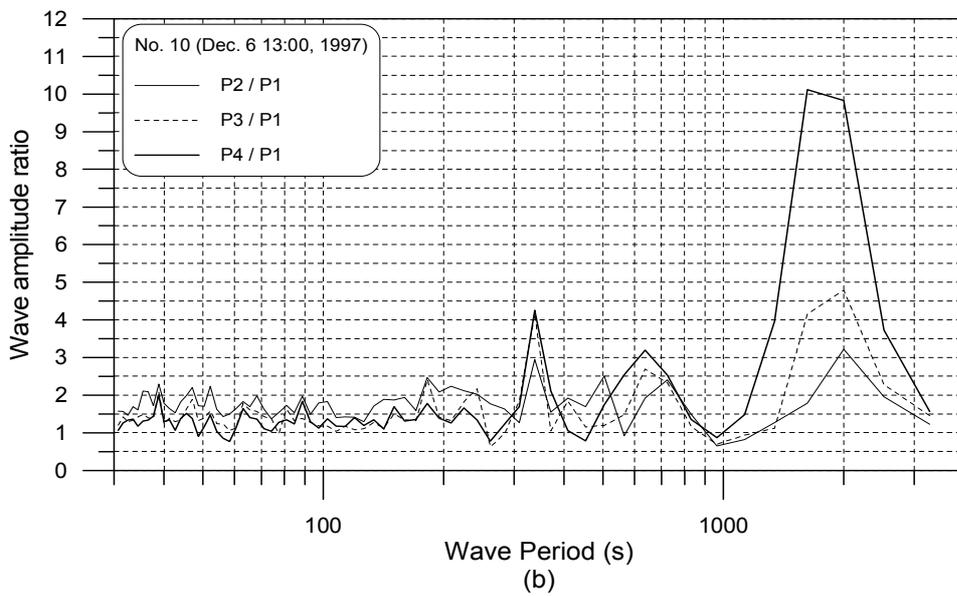
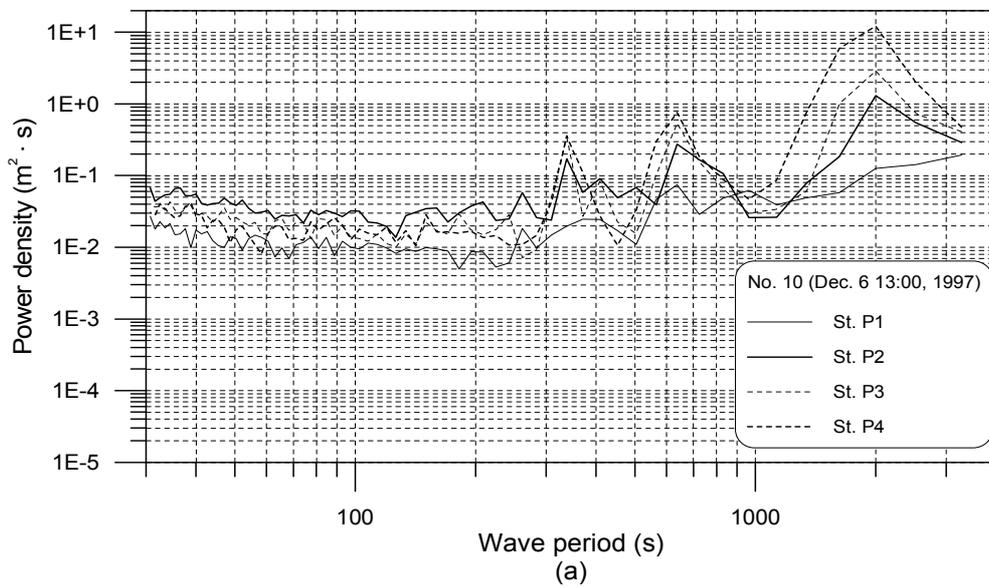


Fig. 2.3 Results of spectral analysis for long period waves data measured at Stations P1, P2, P3 and P4 (Dec.6 13:00, 1997; (a) power densities, (b) relative amplitude ratios)

Table 2.2 Results of seiche data analysis measured at Stations P1~P4 around Gamcheon Harbor in 1997

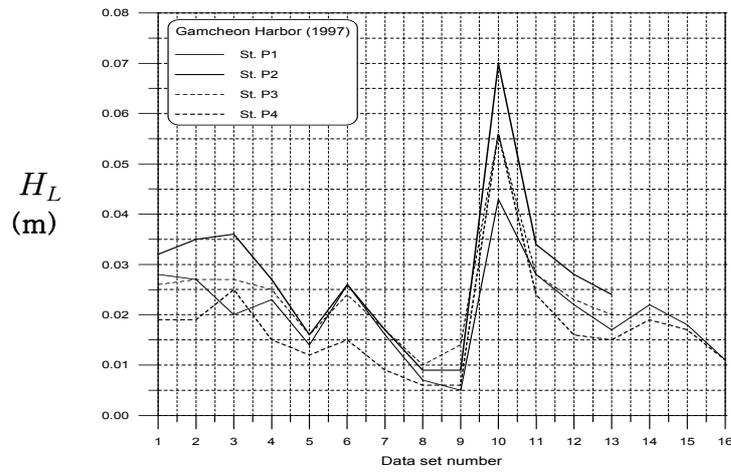
Data set no.	Measurement period	Resonant period in min. (relative amplitude ratio)		
		St. P2	St. P3	St. P4
1	11/27 13H ~11/28 12H	33.3(3.4), 12.1(2.8)	33.3(4.9), 10.6~12.1(3.0, 2.9), 6.8(2.3), 5.2(2.7)	27.0~33.3(10.0, 10.2), 9.4~12.1(4.0~3.4), 5.2~6.2(2.0~2.5)
2	11/28 13H ~11/29 12H	33.3(2.8),10.6~12.1(2.7), 8.4(2.3), 5.6(2.5)	27.0~33.3(3.2, 3.9), 10.6(3.6), 5.6(2.8)	27.0(11.3), 10.6(4.2), 5.6(2.9)
3	11/29 13H ~11/30 12H	33.3(2.7), 10.6~12.1 (2.8, 2.3), 8.4(2.8), 6.8(2.1), 5.2~5.6 (2.4, 2.5), 2.7(2.6)	27.0~33.3(5.1, 4.1), 10.6(4.0), 6.8(2.1), 5.2~5.6(3.0, 2.9)	27.0(14.9), 10.6(5.0) 5.2~5.6(3.1, 3.0)
4	11/30 13H ~12/01 12H	33.3(3.7), 10.6~12.1 (2.2), 5.6(2.4)	33.3(5.4), 10.6(3.0), 5.6(3.5)	27.0~33.3(13.4, 11.3), 10.6(3.7), 5.6(3.9)
5	12/01 13H ~12/02 12H	33.3(2.5), 12.1(2.4), 8.4(2.0), 5.6(2.5)	27.0~33.3(3.4, 3.6), 10.6(3.1), 5.6(2.9)	27.0(11.4), 10.6(3.8), 5.6~6.2(3.2, 2.8)
6	12/02 13H ~12/03 12H	33.3(3.0, 12.1(2.4), 8.4(2.0), 5.6(2.0),0.7(2.0)	27.0~33.3(4.0, 4.7) 10.6~12.1(2.4, 2.7), 5.6(2.0), 1.4(2.0)	27.0~33.3(11.2, 9.9), 9.4~12.1(3.1~3.4), 5.6~6.2(2.2, 2.4)
7	12/03 13H ~12/04 12H	33.3(3.2), 12.1(2.0), 8.4(2.3), 5.6(2.1)	33.3(4.4), 10.6(2.7), 5.2~5.6(2.0, 2.3)	27.0~33.3(10.1, 9.0), 10.6(3.4),5.6~6.2 (2.3, 2.0)
8	12/04 13H ~12/05 12H	33.3(2.7),5.6~6.2(2.3,2.1) 4.0(2.0), 3.5(2.0), 2.7(2.0)	27.0~33.3(3.8), 10.6(2.3) 5.2~5.6(2.1~2.4)	27.0(12.9), 10.6(3.1), 6.2(3.0)
9	12/05 13H ~12/06 12H	33.3(3.8), 10.6~12.1 (2.3, 2.6), 6.8(2.3), 1.5~3.0(2.0~2.1)	33.3(6.8), 10.6(3.8), 6.8(2.3), 5.6(3.0), 1.0~3.0(2.0~3.3)	33.3(13.6), 10.6(4.7), 5.6(2.8)
10	12/06 13H ~12/07 12H	33.3(3.2),12.1(2.4),8.4(2.5) 5.6(3.0),3.0~4.0(2.0~2.5) 0.6~1.5(2.0~2.3)	27.0~33.3(4.2, 4.8), 10.6 ~12.1(2.3, 2.7), 5.6(4.2) 4.0(2.2),3.0(2.4), 0.6(2.0)	27.0~33.3(10.1, 9.8), 9.4~12.1(2.5~3.2), 5.6(4.3), 0.6(2.0)
11	12/07 13H ~12/08 12H	33.3(3.4), 12.1(2.7), 8.4(2.1), 5.6(2.5)	27.0~33.3(4.2, 5.5), 10.6(3.3), 5.6(3.2)	27.0~33.3(12.0, 10.8), 10.6(4.1), 5.6(3.1)
12	12/08 13H ~12/09 12H	33.3(3.9), 12.1(3.7), 5.6(2.5), 4.7(2.8), 3.5(2.2) 0.6~0.7(2.0~2.5)	27.0~33.3(4.6, 5.8), 10.6~12.1(3.0), 5.2(3.5)	27.0~33.3(13.1, 12.8), 9.4~12.1(3.5~3.7), 5.2~6.2(3.0)
13	12/09 13H ~12/10 12H	33.3(3.7),10.6(2.6),5.6(3.3) 3.5(2.2),0.6~0.7(2.0~2.4)	27.0~33.3(5.1, 7.3), 10.6 (3.5), 5.6(3.7), 3.0(2.0)	27.0~33.3(13.0, 12.1), 10.6(4.2), 5.6(3.1)
14	12/10 13H ~12/11 12H			27.0(9.7), 10.6(4.6), 5.2~5.6(2.2, 2.4)
15	12/11 13H ~12/12 12H			27.0(9.5), 10.6(3.9), 5.6~6.2(2.4, 2.2)
16	12/12 13H ~12/13 12H			27.0(10.8), 10.6(4.4), 5.6(3.8)

감천항의 제1 공진으로 보여지는 9.4~12.1분의 공진 모드는 항입구 외측의 정점 P2에서도 대부분 2.0~2.8의 진폭비를 나타내어 절점이 항입구에서 상당히 외측으로 떨어진 지점에 형성되는 공진 모드인 것으로 생각된다. 이 공진 모드는 정점 P3에서 진폭비 2.3~4.0, 정점 P4에서 2.5~5.0 정도이고 항내로 갈수록 진폭비가 약간 증가하지만 30분대의 진폭비에 비해 그 값이 작았다. 한편, 정점 P2에서는 8.4분의 공진 모드가 7조로 2.0~2.8의 진폭비를 가지는데 이에 비해 항내의 P3에서는 9.4~12.1분 또는 6.8분의 공진 모드로 에너지가 전달되는 것으로 나타났다. 항입구 내외의 정점 P2와 P3에서는 여러 자료에서 6.8분에서 진폭비 2.1~2.3이 나타나는 것에 비해 정점 P4에서는 5.2~6.2분의 공진 모드로 에너지가 전달되는 것으로 나타났다. 주기의 변화는 5.2~6.2분의 공진 모드에서도 나타난다.

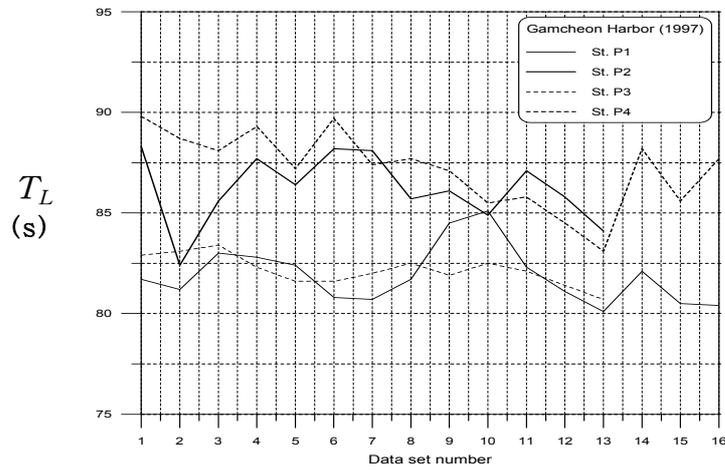
정점 P2에서는 10조가 진폭비 2.0~3.3, P3에서는 13조 전부가 2.0~4.2를 보이는 5.2~5.6분의 공진 모드가, 정점 P4에서는 주기 5.2~6.2분, 진폭비 2.0~4.3로 나타나서 주기에 약간의 변화를 나타내었다. 이외에도 정점 P2와 P3에서 0.6~4.0분 사이에 최대 3.3의 진폭비를 나타내는 국부적인 공진 모드가 출현하지만 항내 정점 P4에서는 전혀 나타나지 않았다. 종합적으로 감천항 수역에서는 주기가 약 30분, 상대진폭비가 대략 9~14인 Helmholtz 모드가 가장 우세하며, 다음으로 이것보다 주기가 짧은 9.4~12.1분과 5.2~6.2분의 공진 모드도 두드러지는 것으로 분석되었다.

한편, 관측자료의 스펙트럼 분석에서 장주기 성분 중 파고와 주기를 구하고 이의 변화를 조사한 결과는 Fig. 2.4(a),(b)와 같다. 파고 H_L 의 변화는 평상시 4개 정점에서 모두 4 cm 미만의 값을 나타내나, 폭풍파가 내습한 경우에는 모든 정점에서 파고가 다른 시기에 높은 값을 나타냈다. 즉, 정점 P1에서 4.2 cm, 정점 P3와 P4에서 5.6 cm, 정점 P2에서 7.0 cm의 값을 기록하였다. 정점 P2는 소파 시설이 없는 방파제 전면에 위치하므로 구조물에 의한 반사파로

인해 파고가 다른 정점보다 높았던 것으로 판단된다. Fig. 2.4(b)의 주기 T_L 은 모든 정점에서 80~90초 사이로 비슷한 값을 나타내지만 항입구 외측의 P2와 항내 최내단의 P4에서 약간 더 긴 것으로 분석되었다.



(a)



(b)

Fig. 2.4 Variations in long period waves component measured at Stations P1~P4 in Gamcheon Harbor : (a) height, (b) period

2.2.3 광역관측

현장관측자료로 해양연구소가 개발한 ISTG(Intelligent Seiche & Tide Gauge)를 1990년 사계에 걸쳐 계절별로 15일간 Fig. 2.5와 같이 각 Station에 투입한 자료를 분석하였다. 각 Station들은 모델검증 및 부두계획에 중요한 지점으로 현상태 뿐만아니라 제4장에서 부진동 광역모델 수치실험에서 해면변화를 조사하기 위한 지점을 나타낸다. 관측자료의 분석결과 북내항 동방과제 옆 St.3에서 춘계 수위변화는 약 50분대의 뚜렷한 진동이 조석주기에 부가되어 나타났으며, 북내항 제 5부두 옆 St.5의 하계 경우는 관측점이 내항 깊숙히 위치하여 단주기파는 거의 없이 수 분대와 10분 전후 및 50분대 주기가 혼재한다.

한편, 북내항 제 4부두 내단에서는 제 5부두에서와 마찬가지로 50분 주기가 두드러지면서 수 분 정도의 단주기 진동도 보였다. 북외항의 입구수로인 St.8에서는 계절에 따라 상당한 에너지의 단주기 파랑이 유입됨을 보이는데 이는 관측지점이 외해측에 노출되어 방파제 등에 의해 차폐되지 않기 때문으로 볼 수 있다. 춘계와 하계에 단주기 파랑 에너지의 유입이 적은 날의 관측기록에서는 십 분대 주기 진동이 중첩된 해수면의 상태를 보였다. 한편, 조도 북측해안의 St.9에서는 St.8의 10분대 전후 주기에 부가하여 25분 전후 주기 및 50분대 주기도 합성되어 나타났고, 북내항 간출암인 등무다리암 앞의 St.11에서는 수십분 주기의 진동이 조석주기에 중첩되어 나타나는데 약 50분대 진동이 가장 두드러지며 춘계에는 파고 10-20cm, 추계에는 23cm 정도로 높은 반응을 보였다. 또한 5분 주기의 반응도 기록에 나타났다. 영도대교 부근 영도조선소 앞 관측지점인 St.13에서는 20분 전후 주기대 반응이 파고 10-20cm로 탁월하였으며, 남항 방파제 내측점인 St.14에서는 10분대 장주기가 기록되었다.

남항 방파제 외측의 St.15에서는 St.14와 유사하나 외부에 노출됨으로 인해 단주기파 중첩이 다소 강하게 나타났다. 영도의 해망등 해역의 St.16에서 하계, 추

계, 동계의 관측치는 10-30분대의 장주기가 기록되었으나 파고는 수 cm에 불과하였다. 즉 진폭이 큰 단주기 성분의 요란으로 인해 장주기 성분은 쉽게 구별되지 않았고 단주기 파랑이 내습하기 전에만 장주기파의 특성이 기록에 나타났다. 송도해수욕장 부근인 St.17에서도 하계에는 영도측과는 달리 조석진동에 미약한 10분 전후 진동이 합성되어 기록되다가 추계 및 동계에는 20~30분대의 진동도 중첩되어 나타났다. 전체 관측결과를 분석해보면 부진동 중 55분대, 25분대, 15분대에서 증폭비가 큰 것으로 나타났으며 10분대 이하에서는 낮은 반응을 보였지만 관측점 및 계절에 따라 5분대에서 높은 반응을 보이는 곳도 있었다. 이 기간중 나타난 부진동 성격의 진동은 최대파고로 20~30cm 정도이며 10분 이하의 단주기 진동의 크기는 이보다 떨어진다.

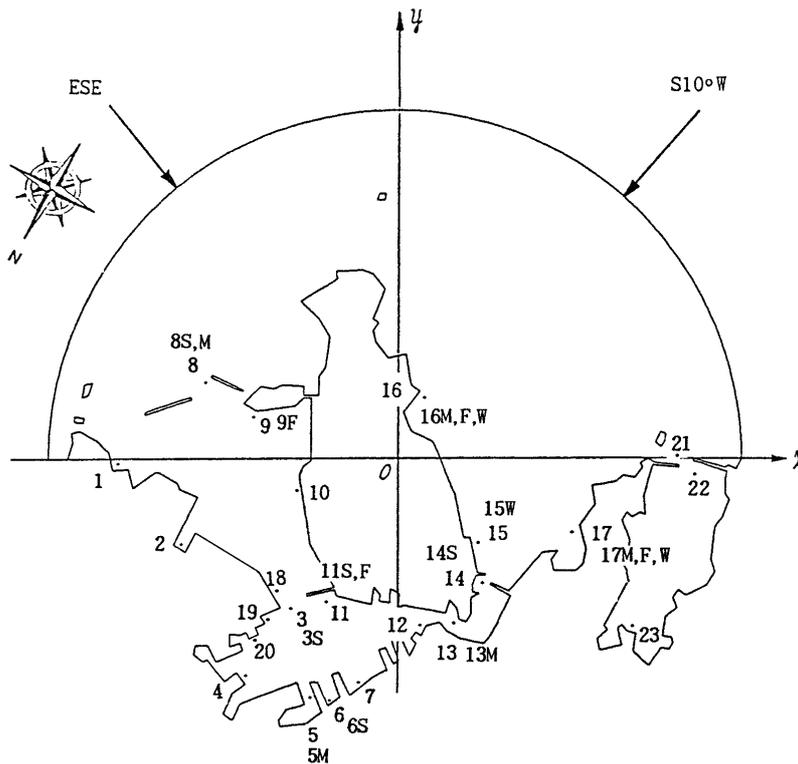


Fig. 2.5 Observation stations of the harbor oscillation
(S: Spring, M: Summer, F: Fall, W: Winter)

2.3 부진동의 저감방안

일반적으로 부진동을 저감시키는 방안은 실제 항만에 도입하기가 매우 어렵다. 그것은 항만을 건설한 후 실제 운영과정에서 부진동의 현상을 발견하고 이에 대한 대책을 강구하고자 하지만 이미 상당한 토목공사가 이루어진 상태이고 항만공사 그 자체는 대규모 사업으로 수정을 기하기가 매우 어렵기 때문이다. 여기서는 항만재개발 또는 정비 차원에서 접근할 수 있는 방안과 유사 저감사례를 검토하기로 한다.

2.3.1 이론적 배경 분석

부진동의 저감은 일단 발생하는 항만에서 그 진동주기를 변경시키거나 증폭비를 감쇄시키는 2가지 방법으로 접근하여야 한다. 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.

감천항의 경우는 장방형으로 건설이 되었고 항만의 입구가 대칭형의 방파제로 좁게 이루어진 점, 방파제의 전면은 직립제로 반사파의 영향이 큰 점, 외부에 길이 약 300m, 폭 약 150m의 두도가 있지만 이는 단주기 파랑의 전파에 영향을 미치는 수준에 불과하므로 부진동의 반응이 쉽게 예견되는 항만의 특징을 가지고 있다고 본다. 감천항의 제1공진주기를 Merian공식(SPM, 1984)으로 간략하게

계산해보면 개방형 항만에서

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

를 사용하여 약 1,366초가 된다. 여기서, T_n 은 n 번째 고유주기, l_B 는 항만의 길이 (4,000m 적용), g 는 중력가속도 (9.8 m/sec 적용), h 는 수심(약 14m)이다. 감천항의 형상이 방파제로 인해 폐쇄형 항만에 가까우므로

$$T_n = \frac{2l_B}{n\sqrt{gh}}, n=1,2,3,\dots \quad (2.2)$$

를 적용하여 683초도 찾을 수 있다. 이 두가지를 결합하면 1,366초, 683초, 455초, 342초, 273초, 228초 등 교호로 찾을 수 있으며, 이것은 감천항의 현장관측치에서도 나타나는 값이다. 그러나, 이 Merian 공식은 항입구의 절(node)의 위치를 잘못잡아 실제의 공진주기에 비해 다소 작은 주기를 예측하는 것으로 알려져 있다. 한편, Helmholtz의 저주파형 항만 고유주기(Freeman, 1974)는

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g}{A}} \sqrt{\frac{S}{l}} \quad (2.3)$$

를 사용하여 고유주기 2,146초를 얻을 수 있다. 이때 ω_o 는 고유주파수, A 는 항의 면적(4,000 m×1,000 m 적용), S 는 수로의 단면적(1,000 m×14 m 적용), l 은 수로의 길이(4,000 m 적용)이다. 이 또한 개략적인 값으로 항만의 수심, 좌우형상 및 항입구의 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.

2.3.2 부진동의 저감방안

가장 현실적인 문제로 항만에 유입하는 파랑이 증폭되지 않도록 하는 방안의 접근은 다음과 같은 세가지 방법을 고려할 수 있다.

1) 앞에서 현장관측자료를 스펙트럼 분석하여 에너지 첨두치를 가진 저주파수가 항만고유 주기와 일치되지 않도록 조정하는 것으로 항만을 설계할 때부터 이와 같은 기본mode 및 1차mode 등을 억제하도록 한다.

2) 연이은 내부 구역에서의 반응이 일치하지 않도록 특성을 변화시키도록 한다. Fig. 2.6에서 외해에서 내항으로 들어오면서 항만의 고유주기와 비슷한 장파는 증폭이 될 것이므로 입사파의 파고 H 에 대하여 각 구역의 증폭비 A_i 라고 할 때 일치된 파랑은 구역을 진행하면서 A_1A_2H , $A_1A_2A_3H$... 등으로 성장하게 된다. 이를 Fig. 2.7과 같이 설계단계에서 일치되지 않도록 조정하면 성장하게 되는 요인을 제거할 수 있는 것이다.

3) 포착에너지를 누출시켜 공진을 경감시키도록 한다. 작은 진폭을 가진 입사파의 에너지도 공진으로 인해 커지므로 성장하지 않도록 에너지 분산효과를 고려하는 것으로 Fig. 2.8과 같이 인접구역에 대형 관이나 단순 수로를 두어 연결시켜 과도한 에너지가 빠져나가도록 할 수 있다.

보다 적극적인 부진동의 저감방안으로는 공진방파제(resonant breakwater)의 건설이다. 공진방파제는 Fig. 2.9~Fig. 2.14와 같이 단일 또는 시리즈로 항만의 입구부에 설치하여 자주 발생하는 주기의 에너지를 포착(wave trap)하여 감쇄시키거나, 공진구간(resonators)에서 정진에 의한 파와 입사파의 상호작용으로 에너지가 항만내부로 전달되지 않고 인접구역에 분산하도록 조정하는 역할을

담당하게 하는 것으로 내부의 주항만(main harbor)에서 발생하는 부진동을 저감시키며 비교적 저면이 평활하고 저질이 부드러운 곳에 적용하는데 단점으로는 특정한 주파수에 대해 효과를 가지며 이의 설치를 위해 상당한 공간과 경비가 든다는 점이 있다.

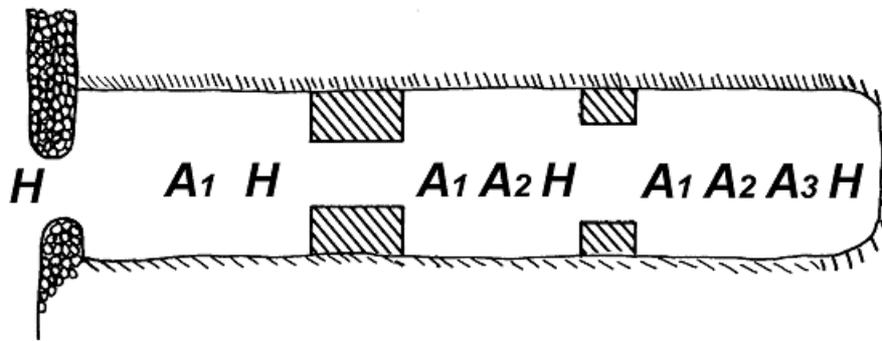


Fig. 2.6 Long wave agitation increases from the sea to the basin
(match the natural oscillation periods of all basins)

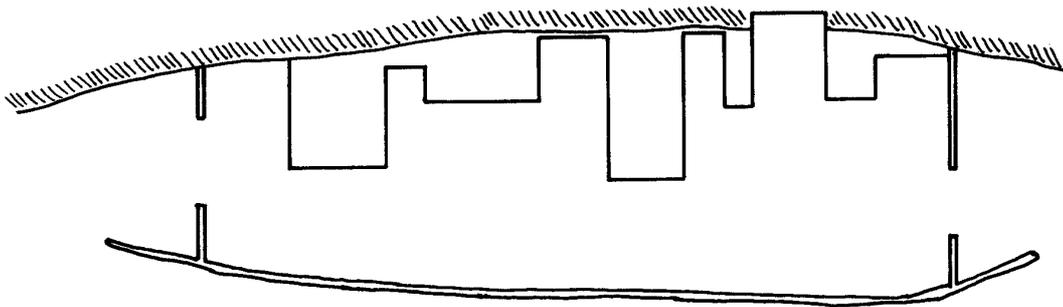


Fig. 2.7 The plan to unharmonize with resonant period
(establish inner harbor structure)



Fig. 2.8 The plan to control resonance by escaping energy concentration

입사파의 에너지를 포착하는 방법은 Fig. 2.9처럼 내향수로에 이르기 전에 입사된 파장을 외향에서 제어하도록 하고 구조물을 사석 또는 dolos로 구성하거나 Fig. 2.10과 같이 돌체 내부에 단위 포착구조물을 설치하여 에너지를 저감시키고, 일부 구간에 대해서는 부분적으로 포착한 에너지를 통과시키도록 한다.

Fig. 2.11과 Fig. 2.12는 원하는 주기에 대한 파장을 분석하여 1/4파장의 길이와 1/2파장의 폭에 해당되는 공진구간을 설정하여 이것을 제거토록하는 방법으로 이의 이론적 근거 및 실험치는 Valembois(1953) 및 Buchwald & Williams(1974) 등이 제시한 바 있다. 그림에 λ 와 W 는 공진구간의 길이와 폭을 나타내며 L 은 입사파의 파장을 나타낸다. James(1970, 1971)는 수조실험에서 공진구간 인접지역에서 입사파에너지의 최소한 반 정도를 감쇄시킨 것을 제시하였다. 공진구간의 효과는 설치하고자 하는 해역의 수로폭 및 수로의 개폐여부에 관계되며, 이를 여러 공진주기에 대해 적용하고자 하면 Fig. 2.13 및 Fig. 2.14와 같이 군(group)으로 공진방파제를 설치하여 여러 공진구역을 구성하고 필요한 주기를 제어하도록 한다.

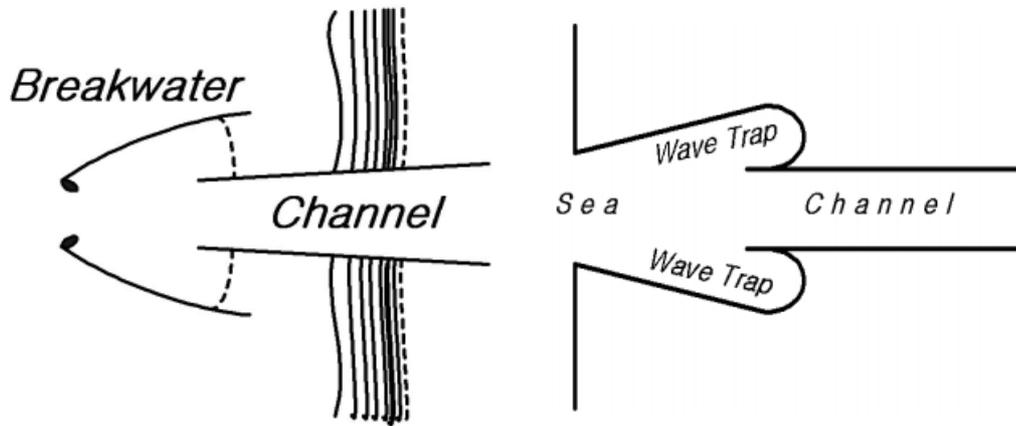
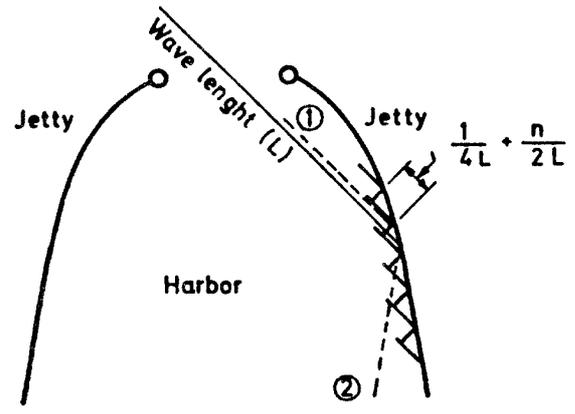


Fig.2.9 Resonant breakwater and wave trap at the entrance of channel



- ① Reflected with wave traps.
- ② Reflected without wave traps.

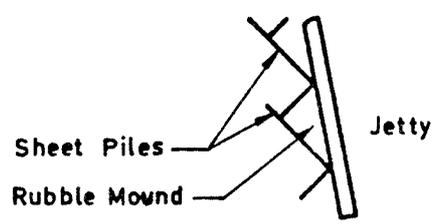


Fig. 2.10 Wave energy of harbor side in breakwater

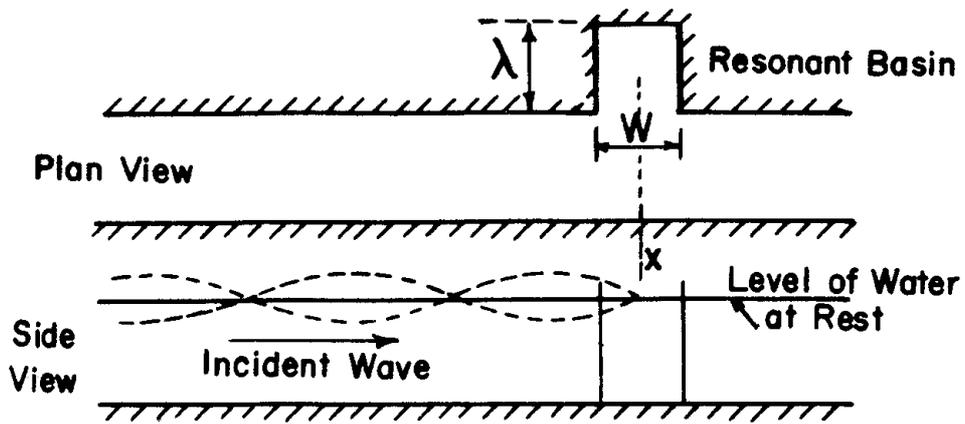


Fig. 2.11 Resonator with an finite channel

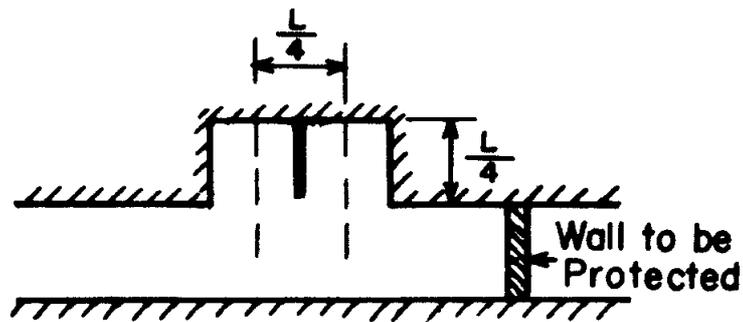


Fig. 2.12 Resonator with an infinite channel

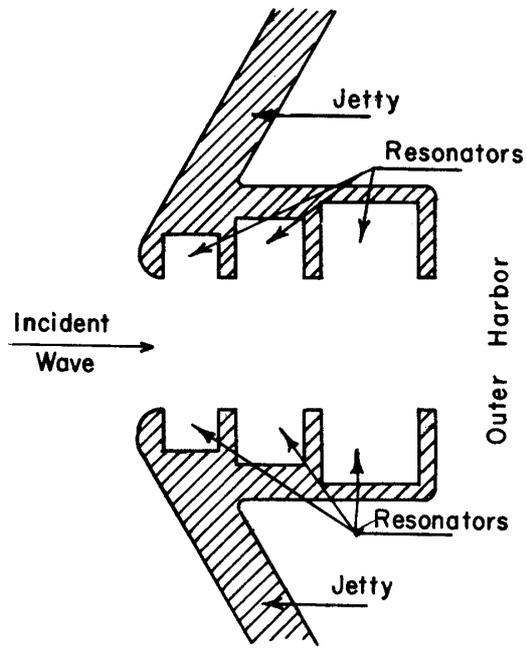


Fig. 2.13 Multiple resonators with breakwaters (1)

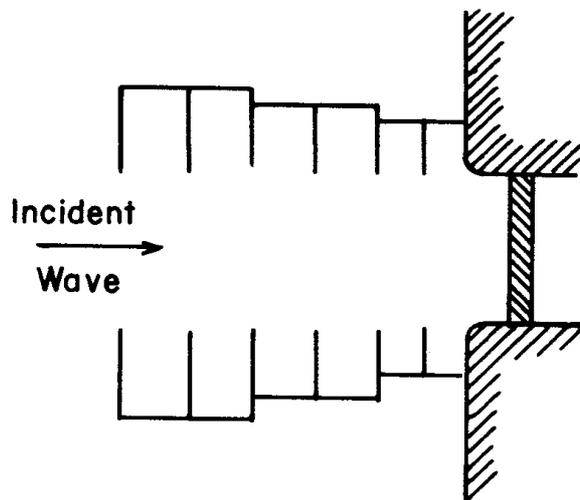


Fig. 2.14 Multiple resonators with breakwaters (2)

2.4 부진동의 저감사례

부진동을 저감한 사례로 하와이의 Barbers Point Harbor의 예를 든다. 이 부분은 Oahu섬의 서측에 인공적으로 준설하여 개발한 항만으로 개발초기부터 수없이 많은 실험을 실행하여 인접 Marina 프로젝트와 연계하여 발생된 부진동을 경감시킨 예이다. Fig. 2.15는 초기 항만개발계획에 따라 설계가 이루어져 건설이 된 항만배치도이고 개발초기의 항만부지의 현장사진 Fig. 2.16의 L형 수역은 개발 후에 공진구역으로 계획되었고 Fig. 2.18도면에서는 Barge Harbor로 표기하였다. 공진구역으로 내부에 침입하는 입사파의 일부가 차단되지만 다른 부진동의 인자가 강하게 나타나 수리 및 수치 실험을 통하여 새로운 안을 제안하게 된 것이다(Lee, 1985, Lee, 1989).

Fig. 2.17은 수리모델을 제작하여 항만반응 특성을 분석하고 있는 모습을 나타낸다. 수리모델실험에서는 Marina계획을 포함시켜 다루고 있다. Barbers Point Harbor의 규모는 약 600m×700m의 Deep Draft Harbor수역이 있으며 계획 수심이 10m인데 여전히 장주기 진동으로 인하여 특정한 시기에 선박의 입항에 어려움을 겪어 왔다. 그 후 2단계의 항만정비 방안으로 Marina를 포함한 리조트 공간의 개발을 도입하게 되었고 Fig. 2.18과 같이 4가지 주요 제안에 대하여 검토하게 되었다. 이 제안은 안벽에다 Igloos의 도입 여부에 따라 세부안으로 나누어 지는데, Marina의 계획에서 Barge Harbor과 대응하는 지점에 이와 비슷한 수역을 구성하였고 내부에 소형선의 계류장을 확보한 것이 앞 절에서 언급한 사항들을 고려한 것으로 본다.

수리실험결과 원래의 계획과 같은 (a)에 대하여 (b),(c),(d)의 세가지 안에서 수로를 1개로 하고 연결한 형태 (a)가 가장 유리하며, 수로를 분리한 형태(c)가 최악인 것으로 평가되었고, Igloos도 단주기 파랑에 대해서는 유효하지만 장주기 파랑에 대해서는 소용이 없는 것으로 평가되었다. 수치실험결과와는 Lee(1989)

의 연구에서 일부 제시되어 있으며, 수리실험과 유사한 평가를 하여 공진구역의 설정이 도움이 되는 것으로 파악되었다.

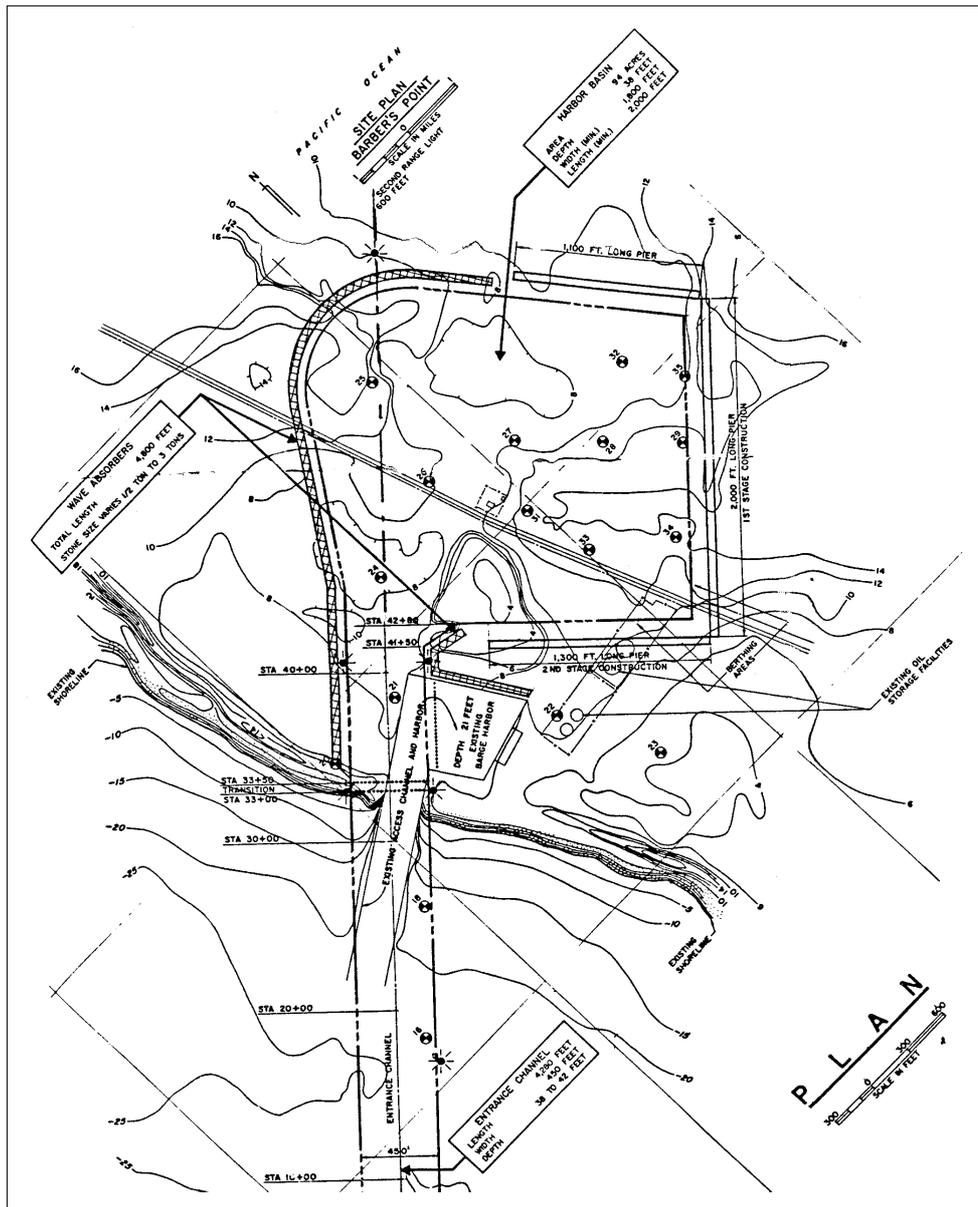


Fig. 2.15 The first base plan of Barbers Point Harbor



Fig. 2.16 An aerial photograph of Barbers Point Harbor before development

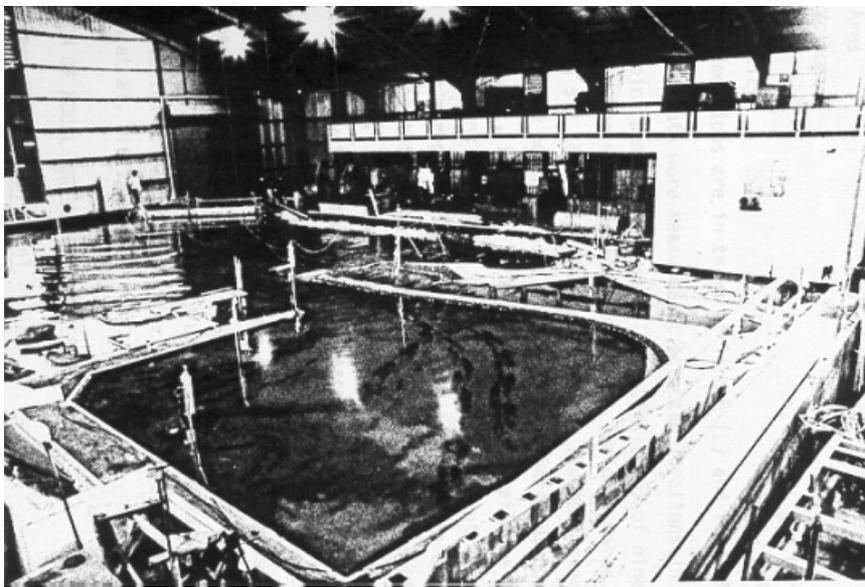
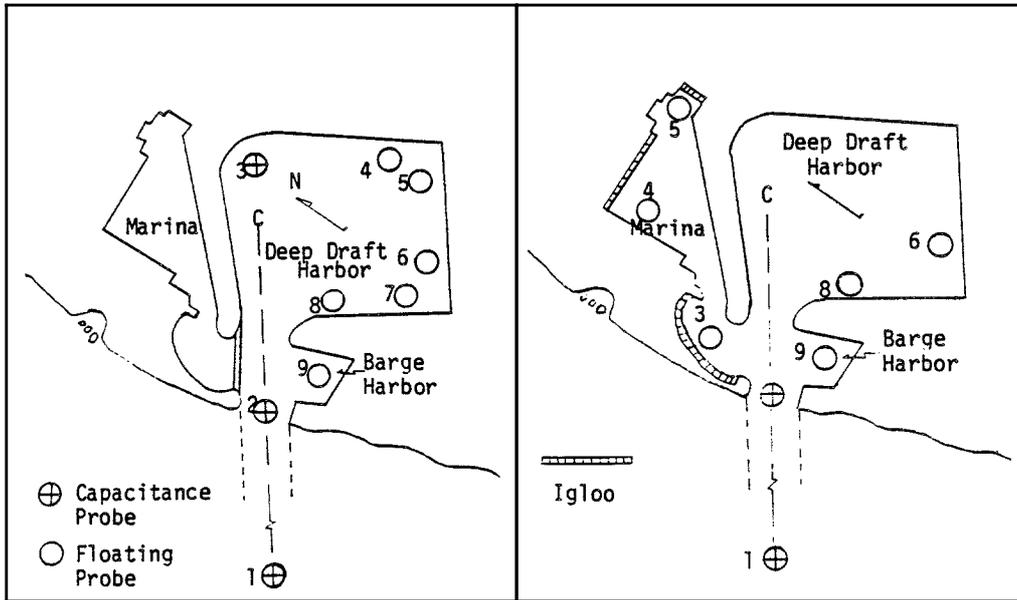
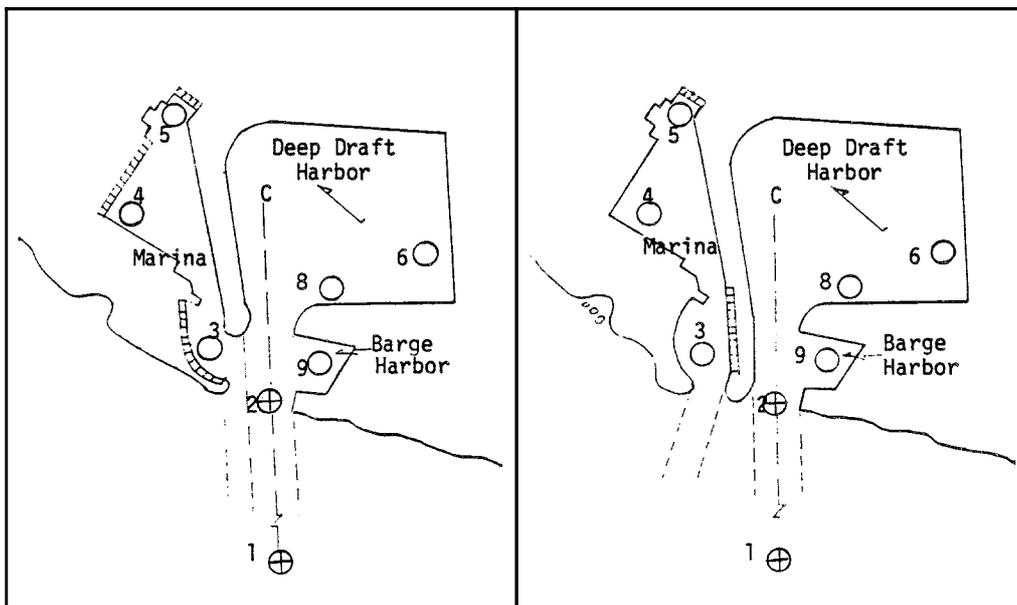


Fig. 2.17 Barbers Point Harbor hydraulic model(Hawaii University)



(a) Without Marina, Entrance Closed (b) With Marina, Entrance for Deep Draft Harbor



(c) With Marina, Entrance Enlarged (d) Separated Marina Entrance

Fig. 2.18 Barbers Point Harbor hydraulic model for resonantor plan

Fig. 2.18의 (b)안과 같이 마리나 수역을 공진수역으로 고려하였을 때의 저감효과에 대해 gage 6,7,8을 비교한 것은 Table 2.3과 같다. 비교적 단주기에 대한 수리실험을 수행하였지만 대체적으로 저감효과가 큼을 알 수 있다.

Table 2.3 Comparison of harbor response at selected stations

INCIDENT WAVE		RESPONSE (reduction ratio)			INCIDENT WAVE		RESPONSE (reduction ratio)		
Wave Gage#1		Gage#6	Gage#8	Gage#9	Wave Gage#1		Gage#6	Gage#8	Gage#9
Height (ft)	Period (sec)				Height (ft)	Period (sec)			
Direction S45°W					Direction S67.5°W				
12	6	4.4	0.9	0.9	12	15	3.0	1.2	0.5
18	6	0.7	0.4	0.4	18	15	6.0	1.8	2.9
12	8	0.2	0.4	0.8	36	15	0.6	0.6	0.9
12	8	1.8	0.3	0.9	Direction W				
12	12	0.9	1.2	0.9	12	12	0.8	2.5	0.3
18	12	0.5	0.7	0.6	18	12	0.4	2.0	0.3
12	15	1.7	0.7	0.4	12	15	1.8	2.2	0.4
36	15	1.7	0.4	0.5	18	15	0.4	4.3	0.6
Direction S22.5°W					12	20	0.3	-	0.3
12	14	0.3	0.5	0.7	18	20	0.3	-	0.4
18	14	0.2	0.2	2.2	36	15	0.7	1.4	-
36	14	1.5	2.2	1.6	-	-	-	-	-

한편, Fig. 2.19는 3단계 확장안으로 내측에 사각형구간에 준설로 항만을 확장하면서 아울러 발생하는 부진동을 부분적으로 억제하기 위한 방안을 제시하여 수리실험을 수행하였으며 Fig. 2.20과 같이 2000년대에 와서 최종적으로 완공이 되었다(Harkins & Dorrell, 2000).

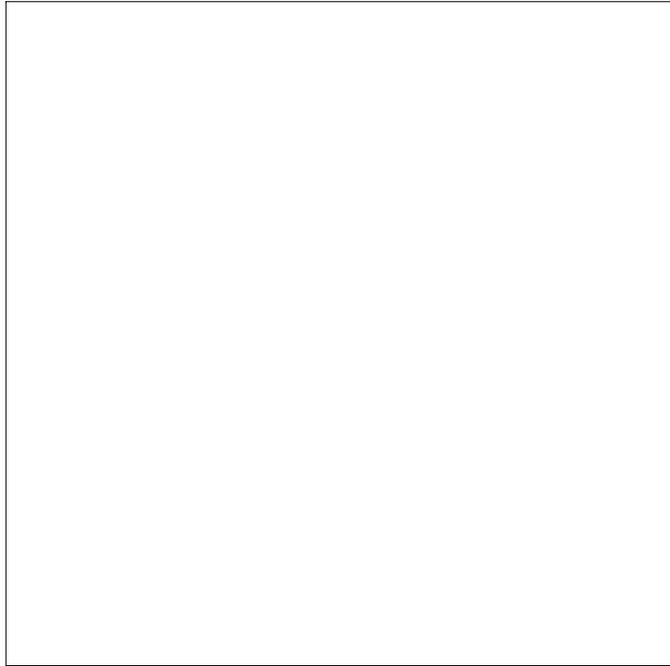


Fig. 2.19 The third base plan of Barbers Point Harbor



Fig. 2.20 An aerial photograph of Barbers Point Harbor after development

제 3 장 부진동의 수치모델구성

새로운 항만을 설계하거나 보완 수정하는 경우에는 사전에 수리모형 또는 수치모형을 이용, 외해의 입사파에 의한 항내교란의 정도를 검토하여 항만정온도를 충분히 확보할 수 있도록 구조물의 배치를 최적화하여야 한다. 본 장에서는 부진동에 대한 수치해석적 접근을 다룬다.

3.1 수치모델(Numerical Model)의 이론적 배경

항내교란을 일으키는 파는 주기에 따라 장주기파와 단주기파로 크게 나눈다. 이중 단주기파는 입사파향에 따라 항만의 입구에 방파제를 건설하는 등 구조물을 배치하여 항내침입을 어느 정도 막을 수 있다. 그러나, 장주기파는 항구의 형태, 수심 등에 따라 항만이 가지는 고유주기와 일치하거나 거의 일치할 때 공진현상을 일으켜 이상적으로 증폭되는 경우가 발생하며, 이를 항만부진동이라고 한다. 현실적으로 관측되는 항만부진동의 크기는 외해에서 입사하는 장주기파의 에너지 수준에 따라 밀접하게 관계되며, 검토시에는 증폭비로 평가한다.

일반적으로 해역에서의 파랑전파에 대한 연구경향은 기본방정식을 parabolic equation이나 elliptic equation으로 변환하고 각종 물리적인 현상을 이론식이나 경험식으로 이에 부가하여 점진적인 발전을 꾀하는 방향으로 그 중에는 선형이론과 비선형이론, 정상상태 및 비정상상태, 수치모델과 수리모델간의 비교가 주종을 이루고 있다. 그러나, parabolic equation으로 접근하는 경우 근사화 과정에서 반사파의 영향 등 물리적 현상의 일부를 무시하고 있어서 본 연구에서 시도하는 바와 같은 구조에서는 부적합하다고 하겠다. 본 연구에서의 수치모

텔은 파랑의 굴절, 구조물에 의한 파랑의 회절 및 부분반사, 해저마찰에 의한 에너지손실 등을 고려한 확장완경사방정식 (extended mild slope equation)을 사용하였다.

3.1.1 지배방정식

수심의 변화에 따른 파랑의 변화특성을 종래에는 수심이 완만하게 변화하는 것으로 가정하고 파랑에너지의 보존법칙을 적용하여 지배방정식을 수립하였는데 본 연구에서는 해저의 경사가 급하거나 사주가 발달된 해역에서 Massel (1989) 및 Booij (1983) 등이 논한 바 있는 해저면의 급한 경사 (steep slope) 와 곡률 (curvature) 등을 고려한 임의의 지형에 대해 급격한 변화성분을 정의하여 수식에 도입하였다. 즉, 모델수립에 지배방정식으로 타원방정식인 수정완경사방정식 (modified mild-slope equation)을 사용하기로 하고, 연구의 초기 단계에서 얻은 결과 (국과 이, 1992)에서부터 한 단계 나아가 경계조건을 개량하여 파랑의 변환이 해저형상에 따라 실제에 접근하도록 모델을 개량하였다.

먼저 직교좌표계의 원점 $O(x, y, z)$ 를 평균해면상에 두고 수평방향을 (x, y) 로, 수직상방향을 z 로 하여 각주파수가 $\omega (=2\pi/T)$ 인 비점성, 비압축성, 비회전성의 단일파가 $h(x, y)$ 의 수심에 전파되어 간다고 할 때, 식 (3.1)의 속도포텐셜 $\Phi(x, y, z, t)$ 은 해저마찰을 포함한 식 (3.2)의 수정완경사방정식 (Lee, 1989)으로 부터 구할 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ -i \frac{ag}{\omega} \phi(x, y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \right\} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \quad (3.2)$$

여기서 Re 는 복소값 중 실수부를, g 는 중력가속도, λ 는 해저마찰 factor, C, C_g 는 파속 및 파의 군속도, ϕ 는 2차원 복소 속도포텐셜함수를 나타낸다. 유도한 2차원 복소 속도포텐셜로부터 해면의 상하이동 η 는 식 (3.3)으로 구할 수 있게 된다.

$$\eta(x, y, t) = i \frac{\omega}{g} \phi e^{-i\omega t} \quad (3.3)$$

이로부터 Massel (1993, 1994)과 같이 해저구배의 제곱 $(\nabla h)^2$ 에 비례한 항으로 해저의 급경사를 고려하고, 곡률 $\nabla^2 h$ 에 비례한 해저곡률을 고려하면 식 (3.2)의 좌측 제2항이 변형되어 식 (3.4)와 같은 확장 완경사방정식이 된다.

$$\nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \left\{ 1 + R_1(kh) (\nabla h)^2 + R_2(kh) \frac{g}{\omega^2} \nabla^2 h \right\} \phi = 0 \quad (3.4)$$

이를 다시 정리하여

$$\nabla^2 \phi + \frac{\nabla(CC_g)}{CC_g} \nabla \phi + \frac{k^2}{\lambda} \left\{ 1 + R_1(kh) (\nabla h)^2 + R_2(kh) \frac{\nabla^2 h}{k_o} \right\} \phi = 0 \quad (3.5)$$

이 때 $k_o = \frac{\omega^2}{g}$ 로 심해파의 파수를 나타내고, $R_1(kh)$ 및 $R_2(kh)$ 는 각각

해저경사의 제곱 및 구배에 비례하는 계수로, 파의 에너지 전달률 $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$ 를 사용하여 식 (3.6) 및 식 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다

(Chamberlain & Porter, 1995).

$$R_1 = \frac{1}{n} \frac{csch kh \operatorname{sech} kh}{12(kh + \sinh 2kh)^3} \left[(2kh)^4 + 4(2kh)^3 \sinh 2kh - 9 \sinh 2kh \sinh 4kh + 6kh(2kh + 2 \sinh 2kh)(\cosh^2 2kh - \cosh 2kh + 3) \right] \quad (3.6)$$

$$R_2 = \frac{1}{n} \frac{\operatorname{sech}^2 kh}{4(2kh + \sinh 2kh)} (\sinh 2kh - 2kh \cosh 2kh) \quad (3.7)$$

식 (3.6) 및 식 (3.7)의 적용은 수심이 아주 얇은 천해역 ($kh \rightarrow 0$)이거나 수심이 아주 깊어지면 ($kh \rightarrow \infty$), 이들 비례계수는 0이 되어 식 (3.4) 및 (3.5)의 부가항이 0이 되어 식 (3.2)으로 된다.

한편, 해저마찰 Factor λ 는 해저면에서 Shear Stress 성분을 수평방향의 최대속도에 비례한다고 가정하여 식(3.8)과 같이 정리하는데

$$\lambda = 1 / \left(1 + i \frac{\beta a_0 e^{i\gamma}}{h \sinh kh} \right) \quad (3.8)$$

여기서 $\beta(x, y)$ 는 무차원의 해저마찰계수, γ 는 유체입자의 속도방향성분과의 위상차(Phase Difference), a_0 는 입사파의 진폭이다. 식 (3.8)에서 $\beta=0$ 으로

하면 $\lambda=1$ 이 되어 결과적으로 식 (3.5)는 해저마찰이 고려되지 않은 확장 완경사방정식으로 정리되고 Massel(1994)의 수식과 패턴이 같아진다. 최후에 정리된 식 (3.5)는 파랑의 굴절, 구조물에 의한 파랑의 회절 및 부분반사, 해저마찰에 의한 에너지손실, 해저면의 급격한 경사 및 곡률을 고려한 종합적인 파의 변형식이 된다. 여기에서 수치모델의 구성은 식 (3.5)를 이용하기로 한다. 식(3.5)의 해를 결정하기 위해서는 대상으로 하는 영역의 경계상에서 경계조건이 부과되지 않으면 안된다. 경계조건으로는 Fig. 3.1과 같이 유한해역구간 (A)에서의 해안 또는 구조물의 경계 (∂B)에서는 목적에 따라 파랑에너지를 부분흡수하는 고정경계조건을, 무한해역구간 (C)에서의 개방경계면 (∂C) 외측 무한원방에서는 산란파에 대하여 방사조건(radiation condition)을 적용하기로 한다.

고정경계조건은 파랑에너지를 부분적으로 흡수하도록 다음과 같이 반사계수 (K_r)를 사용하여 2차 부분흡수조건으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = i \frac{1-K_r}{1+K_r} \left(k\phi + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} \right) \quad (3.9)$$

여기서, 식 (3.9)의 제 2항 이하를 생략하면 보통 사용하는 1차 부분흡수조건이 되는데, 경계에 대한 반사율은 입사파의 파장과 진폭과는 독립하여 입사각의 크기에 따라 변한다. 이 경우 입사각이 경계면에 대해 35° 이상이 되면 실제로 발생하지 않는 반사파가 나타나게 되어 불안정하게 되는 반면, 2차 부분흡수조건을 사용할 경우에는 그 영역이 60° 까지로 확대되므로 (Behrendt, 1985) 수치모델 수립시 그만큼 정도가 높아진다.

또한, 개방경계면에서는 산란된 파 ϕ^s 에 대해서 Sommerfeld의 방사조건을 적용하기로 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi^s = 0 \quad (3.10)$$

이 때 r 은 원점으로부터의 수평거리로서 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이다.

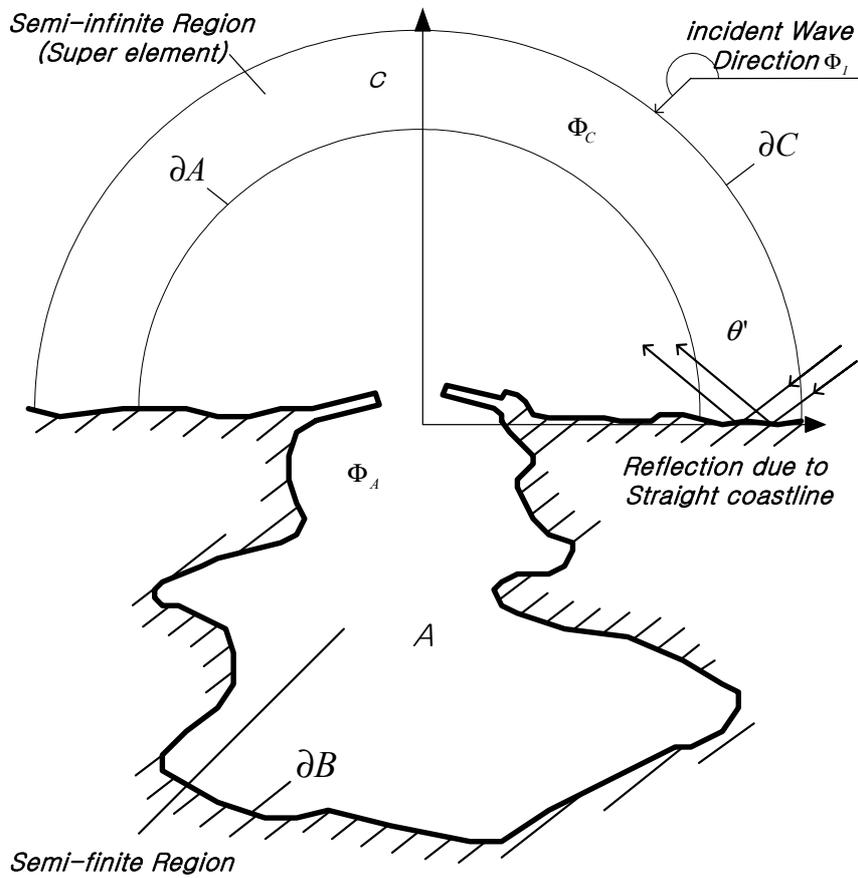


Fig. 3.1 Institution domain and boundary for Numerical Analysis

3.1.2 수치 해석 방법

본 연구에서는 기본방정식을 해석하기 위한 수치해석방법으로 유한요소법(Finite Element Method)과 경계적분법(Boundary Integration Method)을 복합한 복합요소법(Hybrid Element Method; Lee, 1989)을 사용하기로 한다. 대상해역의 파랑 지배방정식에 전술의 경계조건식을 도입하여 최종적으로 대수방정식으로 변환하기 위하여 변분법(Variational Method)을 사용하였다. 이때 유도된 범함수(Functional) $F(\phi)$ 가 일정하도록 즉, 경계조건식들을 지배방정식에 더해서 범함수를 구하고 이를 최소로 하기 위하여 미분 변환한다. 적분방정식의 형태로 변환된 최소화할 범함수는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 F(\phi) = & \int \int_A \frac{1}{2} \lambda CC_g \left[(\nabla \phi)^2 - \frac{k^2}{\lambda} \left\{ 1 + R_1(kh)(\nabla h)^2 + R_2(kh) \frac{\nabla^2 h}{k_o} \right\} \phi^2 \right] dA \\
 & + \int_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda CC_g (\phi_C - \phi^I) \frac{\partial(\phi_C - \phi^I)}{\partial n_A} ds \\
 & - \int_{\partial B} \frac{1}{2} \lambda CC_g i \left(\frac{1 - K_r}{1 + K_r} \right) \left\{ k\phi^2 + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} \right\} ds \\
 & - \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi_A \frac{\partial(\phi_C - \phi^I)}{\partial n_A} ds - \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi_A \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A} ds \\
 & + \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi^I \frac{\partial(\phi_C - \phi^I)}{\partial n_A} ds + \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi^I \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A} ds
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

여기서, ϕ_A , ϕ_C 는 각각 A 및 C 구간에서의 복소속도포텐셜을 나타낸다.

범함수 $F(\phi)$ 의 적분은 유한구간 A 에서의 면적분인 범함수 $F(\phi)$ 의 우측 첫항을 보간함수(interpolation function)인 N 을 도입하여 식 (3.12)와 같이 근사화한 속도포텐셜과 우측 2항 이하의 선적분형태의 경계조건식에서 속도포텐셜을 해석해와 수치적분기법의 결합으로 변환한다 (Lee, 1989).

$$\phi^e(x, y) = N_i^e \phi_i^e + N_j^e \phi_j^e + N_k^e \phi_k^e + \dots = \{N^e\}^T \{\phi^e\} \quad (3.12)$$

식(3.11)의 우측 면적분항을 유한요소 근사식으로 나타내면 식 (3.13)과 같다.

$$\int \int_A \frac{1}{2} (\lambda C C_g)^e \left[\nabla N_i \cdot \nabla N_j - \frac{k^2}{\lambda} \{1 + R_1(kh) (\nabla h)^2 + R_2(kh) \frac{\nabla^2 h}{k_o}\} \phi_i^e \phi_j^e \right] dA \quad (3.13)$$

식(3.11)을 복합요소법에 의한 변환과정을 거치면 식 (3.14)와 같이 일반적인 형태의 대수방정식(Algebraic Equation)으로 간략화하여 해를 구한다.

$$[K] \{\phi\} = \{Q\} \quad (3.14)$$

3.2 수치모델의 구성

본 연구의 대상해역으로 부산의 감천항을 선정하였는데 감천항은 부산남외항의 한계선인 두도의 안쪽에 위치하고 있어서 외해에서 유입되는 파는 두도와 감천항 동서방파제가 유일한 차단이고 파랑의 방향에 따라 직접 항내로 유입되게 된다. 감천항의 형태가 긴 직사각형이며 항 입구가 비록 외해와는 방파제에 의하여 차단되어 있어도 남향으로 개방되어 있어서 남해에서나 해안을 따라 발생한 장주기파의 유입이 쉬워 특정 장주기파와 감천항의 고유 진동주기와 일치할 경우 항내의 요란이 예견되고 있는 위치이다. 또한 동방파제 내측에 위치한 매립지를 부산시가 추진중인 공영수산물 도매시장의 부두와 중앙하수처리장으로 활용한다는 계획에 따라 만의 형태가 변화하게 되고, 현장관측자료에서도 수분에서 수십분의 주기를 가진 부진동에 의한 해면변동이 예측되고 있어서 저감을 위한 분석이 필요한 항만이기도 하다.

부산항 부근의 부진동 현상은 크게는 북항과 영도 서쪽의 2개의 만에서 개별적으로, 또는 연결된 협수로를 통해서 복합적으로 발생할 수 있으며, 작게는 북외항, 북내항, 남항, 남외항, 감천항 등 5개의 만에서 각각의 지형에 의한 고유주기를 가질 수 있다. 이상과 같이 여러 개의 만이 서로 연결되어 있고 각각이 외해 경계를 가지는 지형에서는 일반적인 형태의 항만에서와는 매우 다른 양상의 부진동이 발생하는 경우가 많다. 따라서, 수치모형 실험을 통하여 부산항 부근 항만 부진동을 거시적으로 파악하고, 언급한 감천항에서의 반응특성과 연계하여 분석을 행해야 한다.

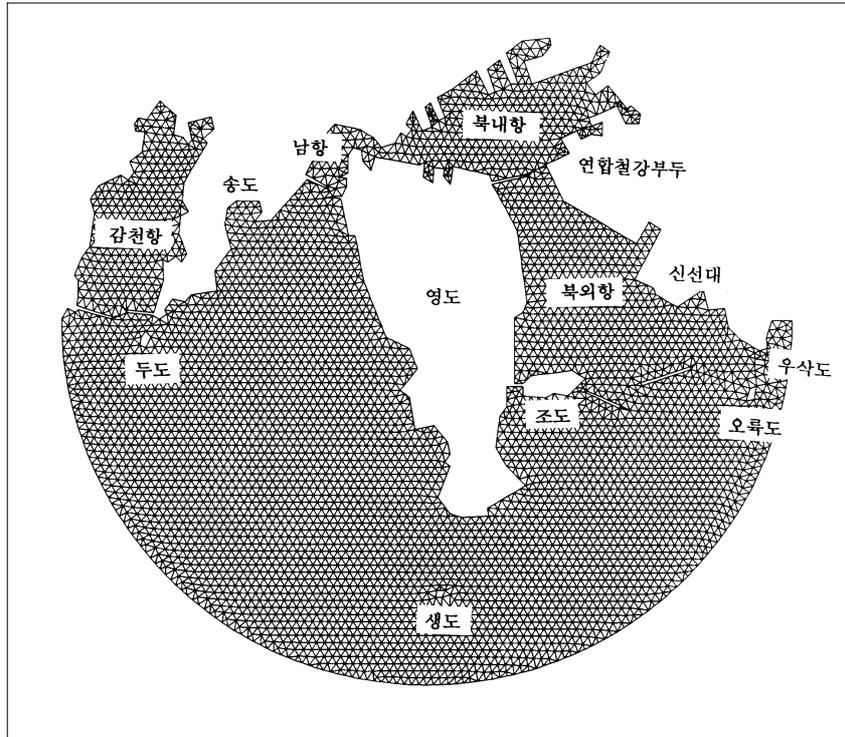
복합요소법에 의한 수치모델의 구성은 광역과 세부역의 2단계로 나누어 접근하기로 하고, 감천항을 포함한 부산항 전체 영역을 한계로 한 광역에서 감천항의 일반적 반응특성을 평가한 뒤 세부역에서는 공진방파제 도입에 따른 저감방안을 분석하기로 하였다.

3.2.1 광역모델의 구성

광역모델의 영역은 좌측이 감천항의 좌측단인 자담말, 북외항의 우측단인 승두말을 좌우한계로 하고, 영도를 중심으로 우삭도, 오류도, 생도, 두도의 섬과 북내외항 방파제 및 남항 방파제 등이 해안선과 분리하여 수제선을 이루고 있으며, 영도 서쪽의 만은 영도다리 부근의 좁은 수로에 의해 북내항과 연결되고 남항 방파제에 의해 둘로 나뉘며 입구는 외해로 향해 넓게 열려있다.

부산항 오류도측의 승두말과 감천항 우단측의 자담말을 모델의 좌우한계로 한 영역은 그 규모로 보아 영도의 중심에서 반경 6.75km 이내의 해역이 되는데 외해측을 개방경계면, 내륙측은 해안선을 그 경계면으로 구성하였다. 북내항은 4km x 2km해역으로, 수심은 제1부두 및 연안여객부두의 6-8m를 제외하고는 10-12m이다. 북외항의 경우는 3.5km x 2.5km해역으로 수심이 10-25m로 완만하게 변하며, 북내항에 이르는 수로는 13m 이상으로 유지되고 있다. 또한 남항은 1.2km x 1km해역으로 평균수심 6m 정도이며 남외항측은 6m-25m로 완만히 변화하고 있다. 감천항은 4km x 1.3km의 장방형해역으로 평균수심 12m를 유지하고 있다. 부두의 수제선은 매립 및 개발 계획에 따라 변경하였다.

관련해역을 삼각요소로 나누어 광역모델을 구성하면 Fig 3.2와 같으며, 광역유한요소망의 구성은 절점(Node)의 수 4,958개, 개방경계의 절점수 155개, 및 삼각요소(Element)의 수 9,209개로 이루어졌으며, 절점을 재정리하여 매트릭스의 밴드폭을 280으로 줄였다. 부산항 과량해석 조사보고서(1984) 및 기타 관측보고서(1994, 1995) 및 한국해양연구소의 감천항 관측보고서(1997)를 참고하여 부산항의 방향별 해면패턴을 조사한 결과 N 50°E와 S 10°W방향이 주를 이루는 것을 알았다. 한편 태풍기에는 ESE, N 50°E방향에서 강한 파가 발생하는데 이중 N 50°E방향은 영도 및 오류도, 승두말 등에 의해 파가 차단될 뿐 아니라 단주기파이므로 본 광역모델실험에서는 고려하지 않았다.



구 분	Node 수	개방경계 Node수	요소수	매트릭스밴드폭
광역모델	4,958	155	9,209	280

Fig. 3.2 Finite element mesh for the global model

태풍기에 ESE방향으로 태풍이 지나간 후 이 방향에 따른 장주기파가 도래하는 것으로 보고 이를 주방향으로 하였으며 S 10°W방향은 단주기파의 방향이기는 하나 남향쪽으로 그 영향이 크게 작용하므로 시뮬레이션에 고려하였다. 모델에 도입된 파향을 현재의 부산항에 도입하면 Fig 2.5에서와 같이 좌표축이 X축 진북(True North)에 대해 240° 기울어져서 S 10°W방향과 ESE방향의 경우는 각각 230°, 307.5°로 입사되는 것으로 나타난다. 이들 해역을

digitize하여 수심을 모델에 도입하면 현재의 부산항은 Fig 3.3과 같이 2차원 및 3차원의 형태로 나타낼 수 있다. 외해에서 내항쪽으로 점진적인 수심변화를 보이며, 북외항에서 북내항에 이르는 대상의 수로가 준설되어 있음을 알 수 있다.

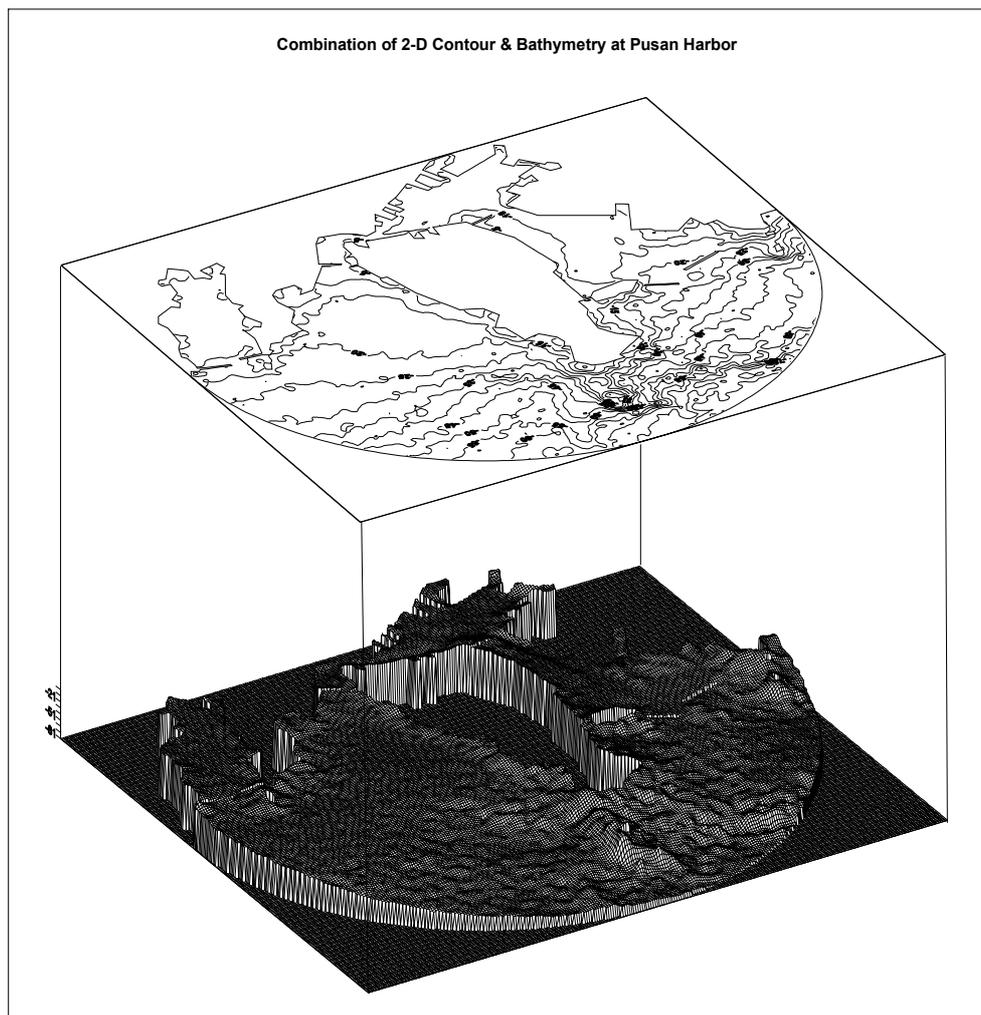


Fig. 3.3 Two and three dimensional picture of water depth at the global water

부산대교와 내항 남·동방과제를 연결한 선 안의 북내항 해면에는 남방과제 측에 수심이 얇은 해역과 간출암이 존재하고 있다. 남항에는 남부민동 해안에서 동쪽으로 남항방과제, 이와 마주보는 영도의 북서안에서 남서쪽으로 남항방사제가 있고 남항 중앙부에 수심 3.9m의 얇은 해역이 있다. 한편 영도 남단의 생도 부근역은 비교적 복잡한데 이는 단주기의 외파를 고려할 때 ESE방향에 대해서는 남항외측 해역에 barrier역할을, S10°W방향의 파에 대해서는 북외항측 해역에 barrier역할을 하고 있음을 알 수 있다.

감천항의 수심은 방과제 입구쪽이 약 16m, 항의 안쪽이 약 10m 전후로 내항으로 갈수록 약간씩 얇아지며 S10°W방향에 대해서는 서방과제가, ESE방향에 대해서는 두도 및 동방과제가 차단하는 형태를 취하나 SSE방향에 대해서는 수로 중앙이 열려져 있는 상태이므로 감천항에 대한 세부 분석에서는 SSE방향을 주방향으로 하고 부진동 실험에 포함시키기로 한다.

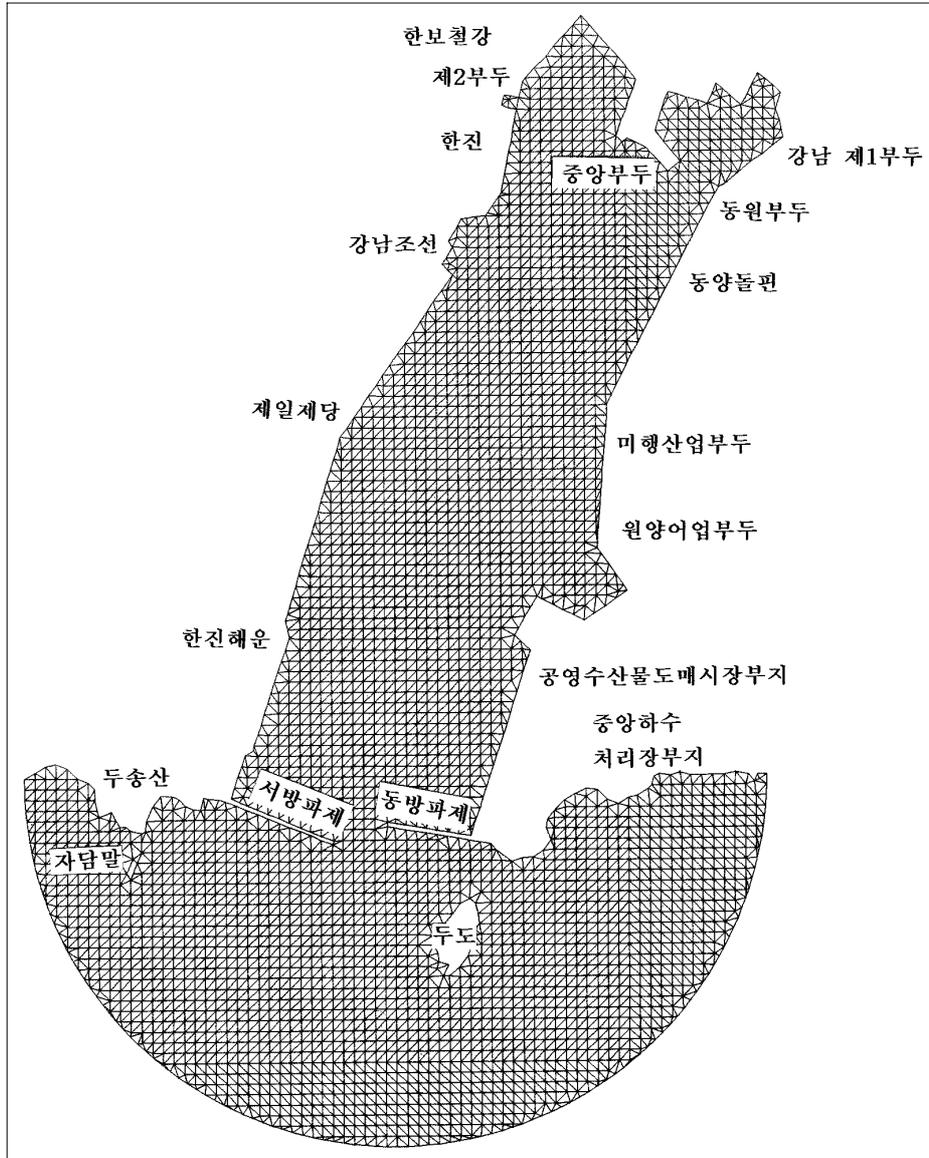
3.2.2 협역모델의 구성

협역모델은 대상해역을 감천항과 두도를 포함하는 전면수역으로 제한하여 항내외의 주요 개소에 대한 반응 특성을 분석하는 것으로 하고 먼저 현재의 항만조건에 대하여 모델을 구성하였다. 외해 개방경계 영역은 감천항 방과제로부터 반경 1.75km의 영역으로 하고 내항의 전역을 포함하도록 격자망을 Fig. 3.4와 같이 구성하였다. 여기서 절점수와 요소수는 각각 3,645개와 6,844개이고, 개방경계상의 절점수는 111개로 이루어져 있고, 절점번호를 재조정하여 밴드폭은 441로 되었다. 외해의 최고수심은 25.6m이며 두도 전면까지는 20m를, 두도에서 방과제사이 20m~16m정도이고 내항의 중앙부두까지 오면서 14m에서 12m로 점차 얇아지며, 일부 구간에서는 수심 6m 정도까지 내려간다. 감천항의 상세한 수심은 Fig. 3.5와 같으며 수치실험에서는 이 수심에다

평균해면의 위치 0.653m를 더하도록 모델을 구성하였다.

한편, 세부모델로 감천항 주요부분에 대한 여러 공진 mode를 찾아내기 위하여 28개소의 위치점(S)을 Fig. 3.6과 같이 지정하였으며 특히 공영수산물도매시장 전면의 부두역에는 4개의 위치점을 배치하였다. 부진동의 관측치와 비교를 위해서는 제3장의 관측점 P2, P3, P4에 해당하는 지점을 각각 S6, S26, S18(◎로 표기)로 나타내었다. 특히 이들 위치점은 추후 부두정비 및 항만재개발에 유용한 자료로 활용할 수 있도록 각 부두별로 대표점을 선택하였으며, 감천항 중앙 수로부분도 계산점을 할당하였다.

입사파의 파향은 S10°W, SSE, ESE 방향의 3가지 경우를 택하였으며, 좌표축은 진북에 대하여 x 축의 양의 방향은 235° 기울어져 각 파향이 225°, 257.5°, 302.5°로 모델에서 입력되도록 하였다.



구 분	Node 수	개방경계 Node수	요소수	매트릭스밴드폭
세부모델	3,645	111	6,844	441

Fig. 3.4 Finite element mesh for the present harbor

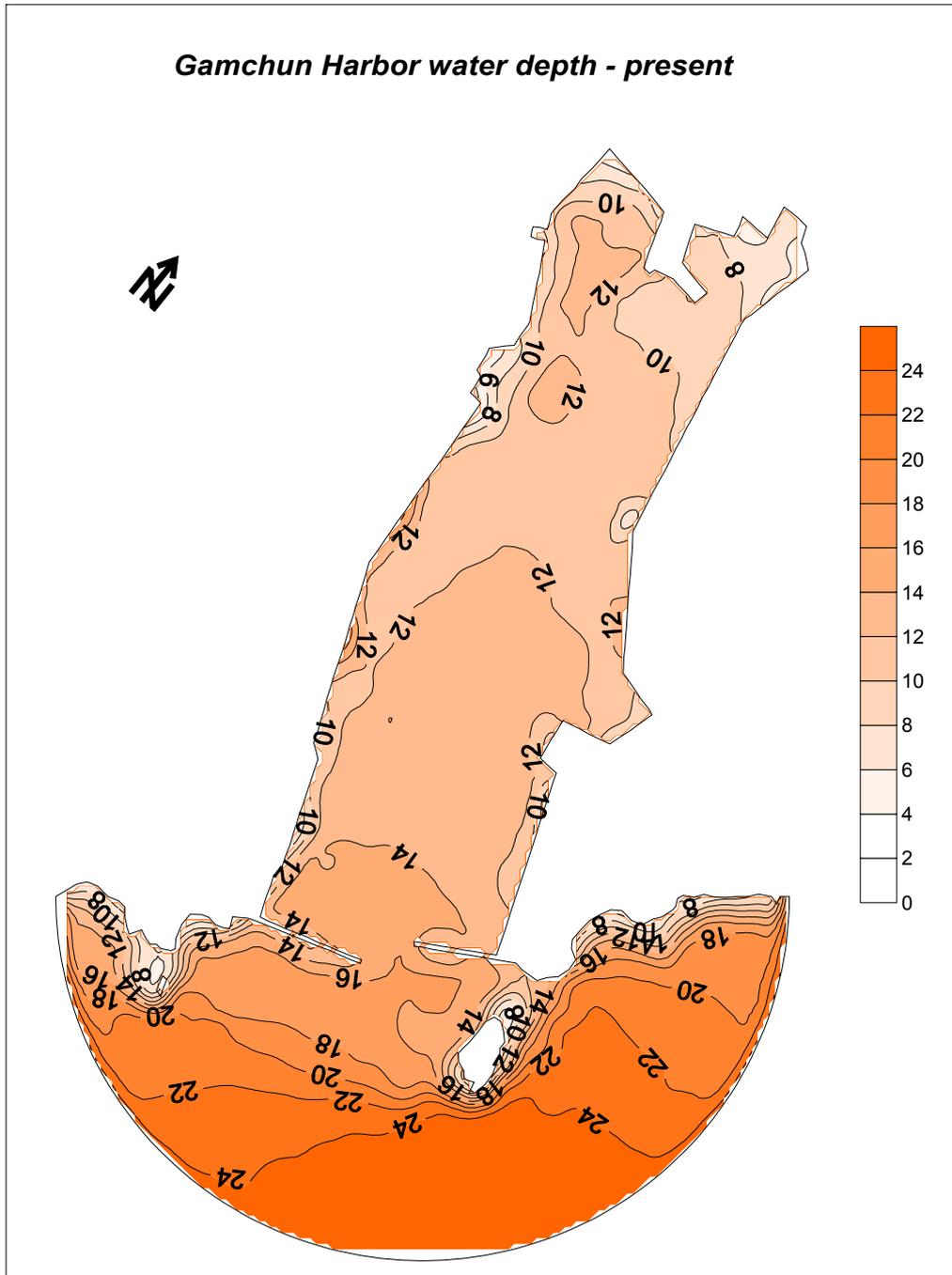


Fig. 3.5 Water depth contours around Gamcheon Harbor

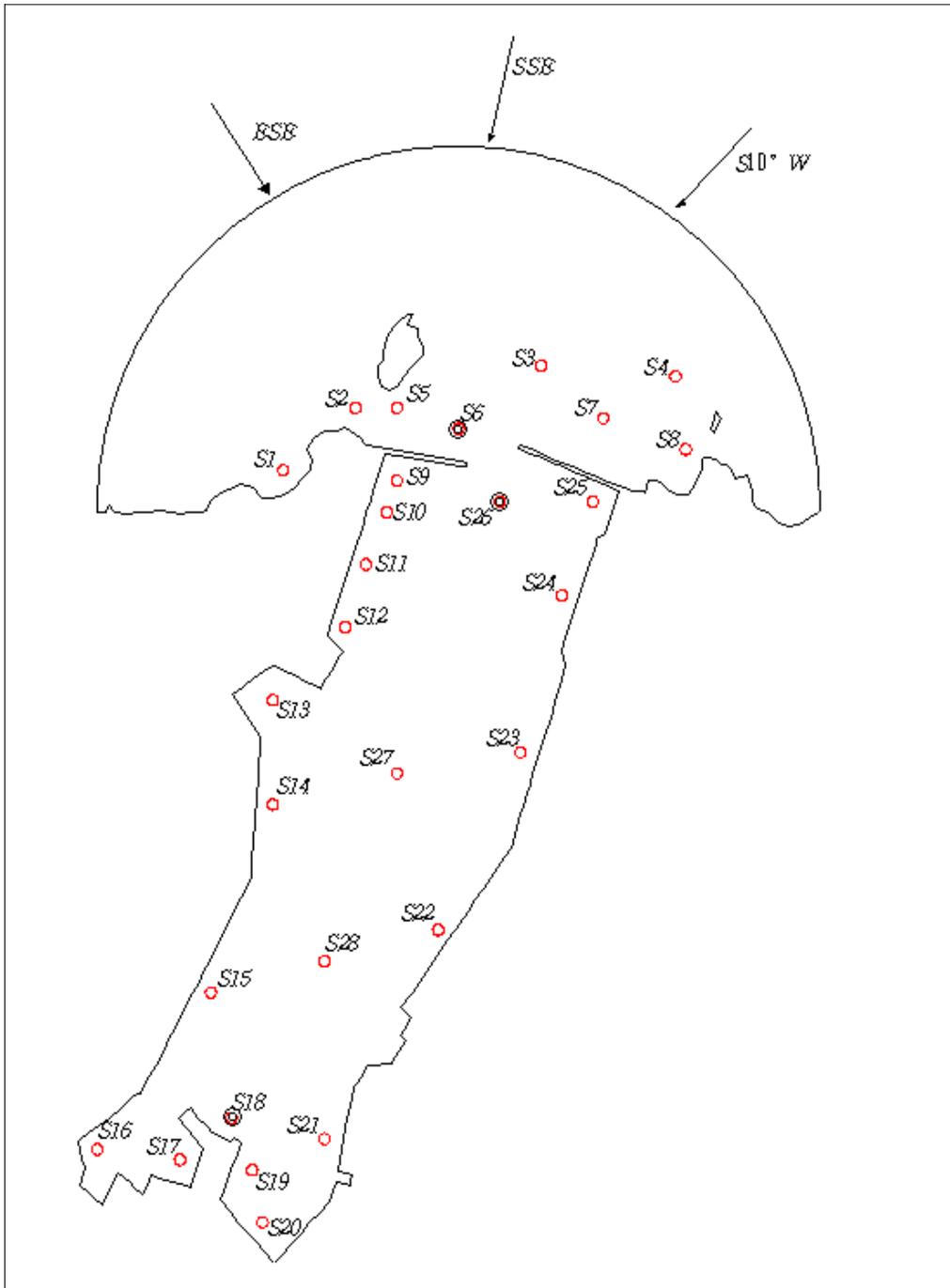


Fig. 3.6 Selected stations for comparison of harbor response

제 4 장 수치실험 및 분석

4.1 현재상태의 실험 분석

4.1.1 광역모델 실험

수립된 모델에서 관측된 자료로부터 단주기 1분에서부터 60분대의 장주기까지 S10°W 및 ESE방향에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 2.5에서 제시한 입사파의 파향과 주파수에 대한 시뮬레이션은 200차례 반복하였다. 4단계 콘테이너 부두까지 해안선이 정비된 현재의 부산항에 대해 선택주파수에 대한 방향별 시뮬레이션 결과를 23 Station에서의 반응특성곡선으로 나타내면 Fig. 4.1~Fig. 4.6과 같다.

먼저 현재의 부두에 대한 실험에서는 해저 수심도(Fig. 3.3 참조)에서와 같이 북외항에서 북외항 방파제의 영향이 다소 있으나 ESE방향이 S10°W방향의 파보다 높게 나타나는 반면, 남내외항에서는 이와 반대로 S10°W방향의 파가 높게 나타난다. 북외항 방파제 입구(St.8)와 3단계 콘테이너 부두(St.1)에서는 5분~7분의 주기에서 S10°W 방향의 파에 높게 반응하고 있다. 특히 북외항 방파제 입구에서는 입사파의 1~2배에 이르는 증폭비를 나타내어 구조물 주위에서의 일반적인 반응형태를 보이고 있으나, 3단계 콘테이너 부두(St.1)에서는 두 방향에서 증폭비가 3배 이상으로 강하게 증폭하여 8분~9분대에서 최고 5.2배로 되는데 선택외 지점의 경우는 6.5배까지 증폭된 것을 알 수 있었다. 또한 2분 이하의 단주기에서는 증폭비 0.5 이하로 정온도가 높지만 그 이상에서 10분까지는 비교적 고르게 증폭비 1 전후로 입사파가 그대로 진입해 옴을 알 수 있다.

이 해역에서 오류도 부근역의 부진동 관측기록을 보면 조석주기에 부가하여

비교적 단주기와 수 분대 주기에서 진동형태를 나타내며 해안부근인 St.1과 승두말 부근역에서는 더 높은 증폭비를 예상할 수 있다. 이와 반대 부분인 조도(St.9) 및 영도의 동측 선암말 부근역(St.10)도 주기에 따라 굴곡은 있으나 이와 유사한 양상을 보인다.

한편 북내항의 경우 북외항 및 북내항 방파제와 남항방파제 및 영도대교 아래의 병목구간 등 이중으로 파가 차단되어 단주기에서는 St.4에서 St.12 공히 평균 0.5 이하의 낮은 증폭비를 보이며, 북내항 방파제의 개방면 부근역(St.3, St.11)과 북내항의 남항측 한계부근(St.12)에서는 10분대로 옮겨감에 따라 증폭비 1로 접근하는데 이 주파수 영역으로는 아직 관측점인 St.3, St.6 및 St.11에서 기록되는 범주에 들지 않은 것을 알 수 있다.

영도의 중리부근(St.16)은 비교적 높고 굴곡이 심한 양상을 보이는 반면 송도 혈청소 부근역(St.17)은 5분대에서 증폭비 2 정도를 나타내나 송도해수욕장역은 수심이 낮고 경사가 완만한 해변으로 S10°W방향의 입사파에 대해 이보다 훨씬 높은 증폭비를 나타내고 있다. 횡방향의 부진동에 의해 파가 유입되는 영향으로 Fig. 4.4에 나타난 바와 같이 주기 8분~9분대에서 증폭비가 2.2~3.2로 높게 나타나며, 특히 St.15에서는 선택 주파수의 전영역에 걸쳐 평균 증폭비 2 이상 최고 5.7을 보이는데 이는 해안에 가깝고 남항방사제 부근으로 접근할수록 증폭비가 훨씬 높아져서 이들 해역이 태풍 및 저기압의 통과 전후에 상습적으로 과도로 침수되거나 파손되는 부분임을 관련시킬 수 있다.

감천항의 경우 항만 입구 방파제 전·후에 위치한 St.21과 St.22에서는 2~4분에서 방파제 바깥쪽의 증폭비가 약 3배로 증가한 반면, 방파제 내측에서는 1.5~2.0 정도로 낮은 것으로 나타났는데 이것은 직립제로 이루어진 방파제로부터의 중복파의 패턴을 나타낸 반면, 내측에서는 차폐되어 좁은 수로를 통과하면서 다소 감소된 것으로 보인다.

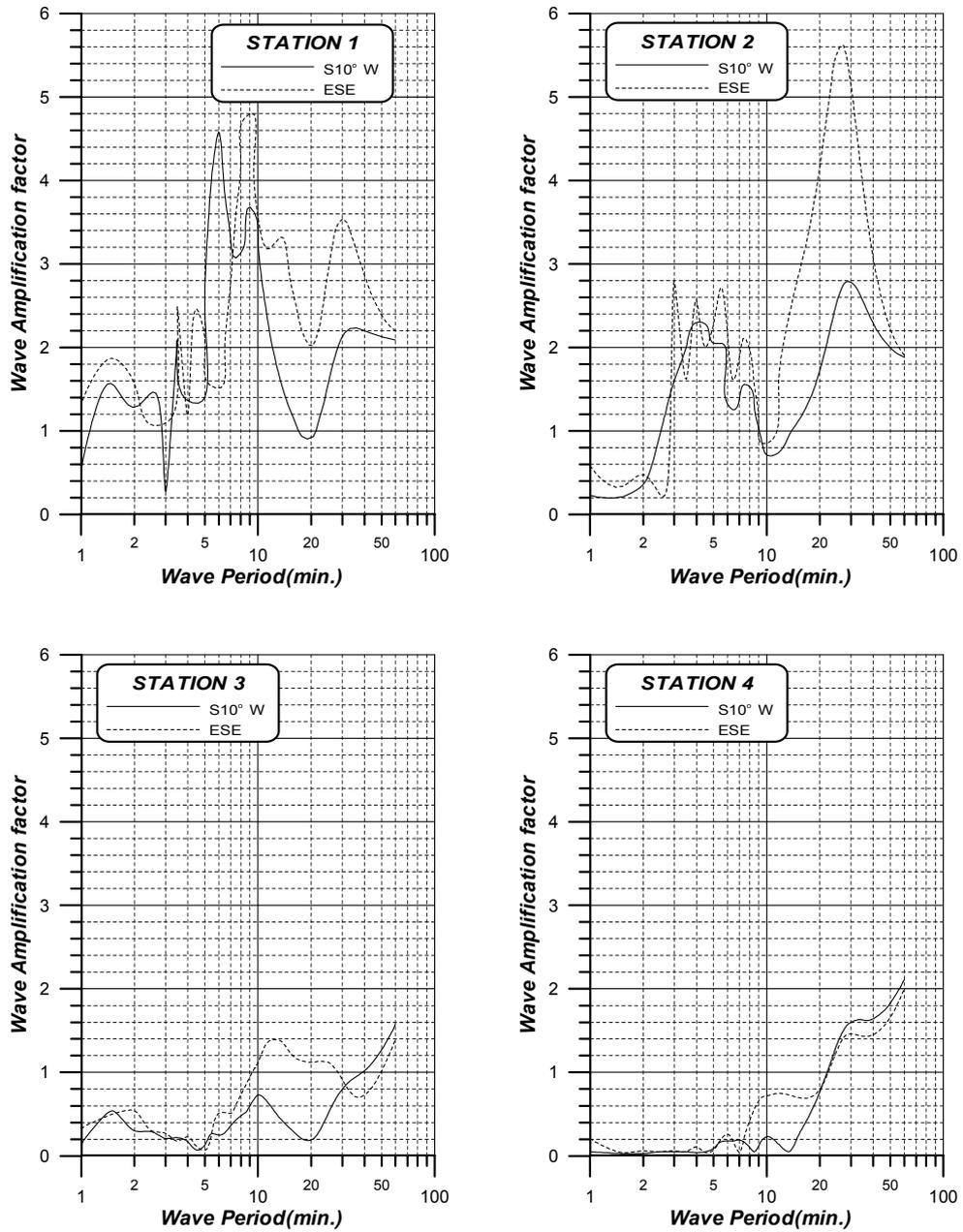


Fig. 4.1 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(1,2,3,4)

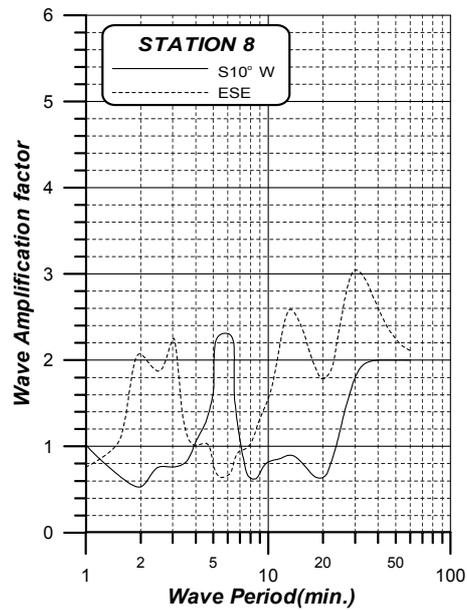
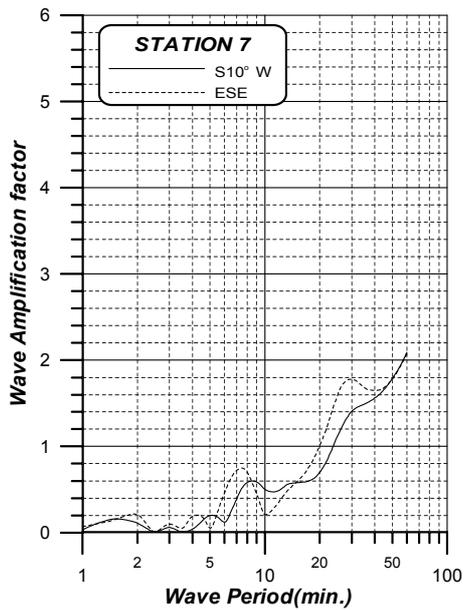
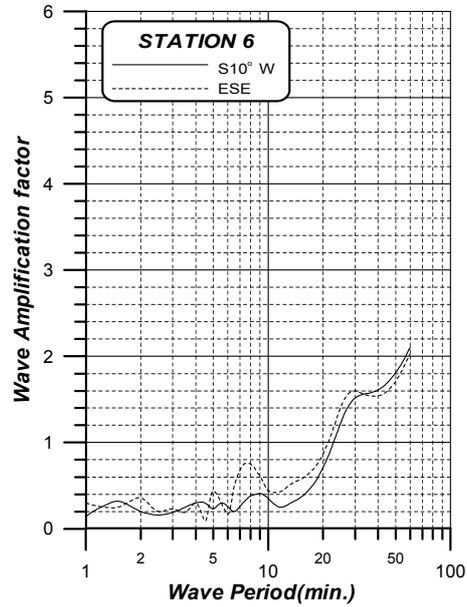
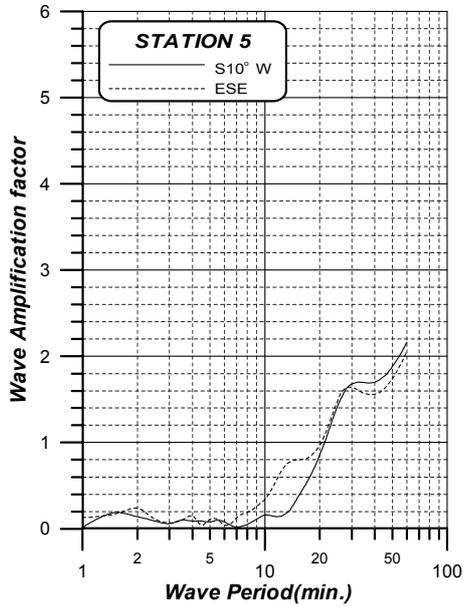


Fig. 4.2 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(5,6,7,8)

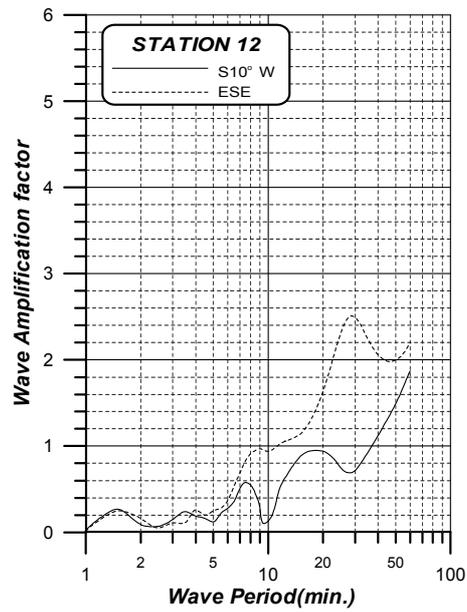
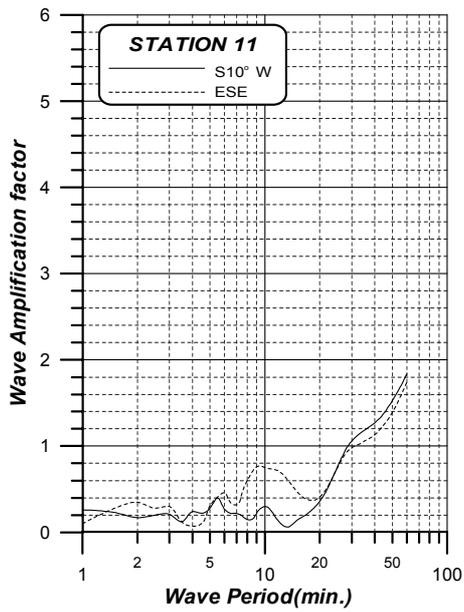
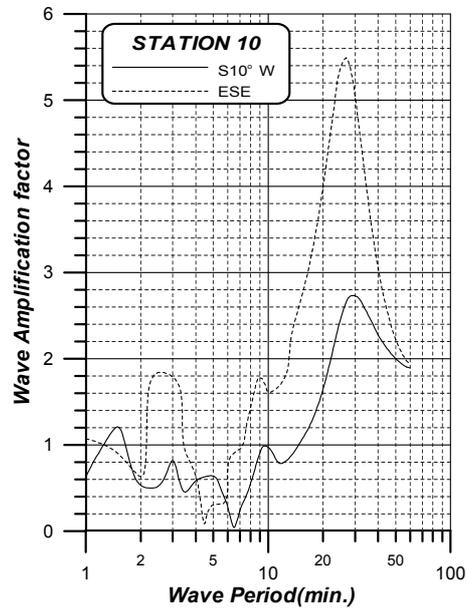
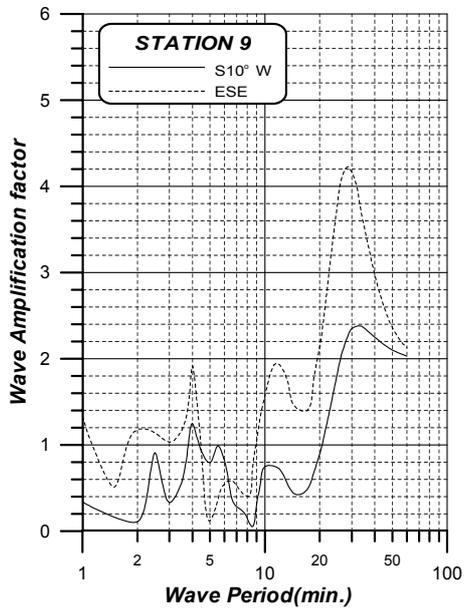


Fig. 4.3 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(9,10,11,12)

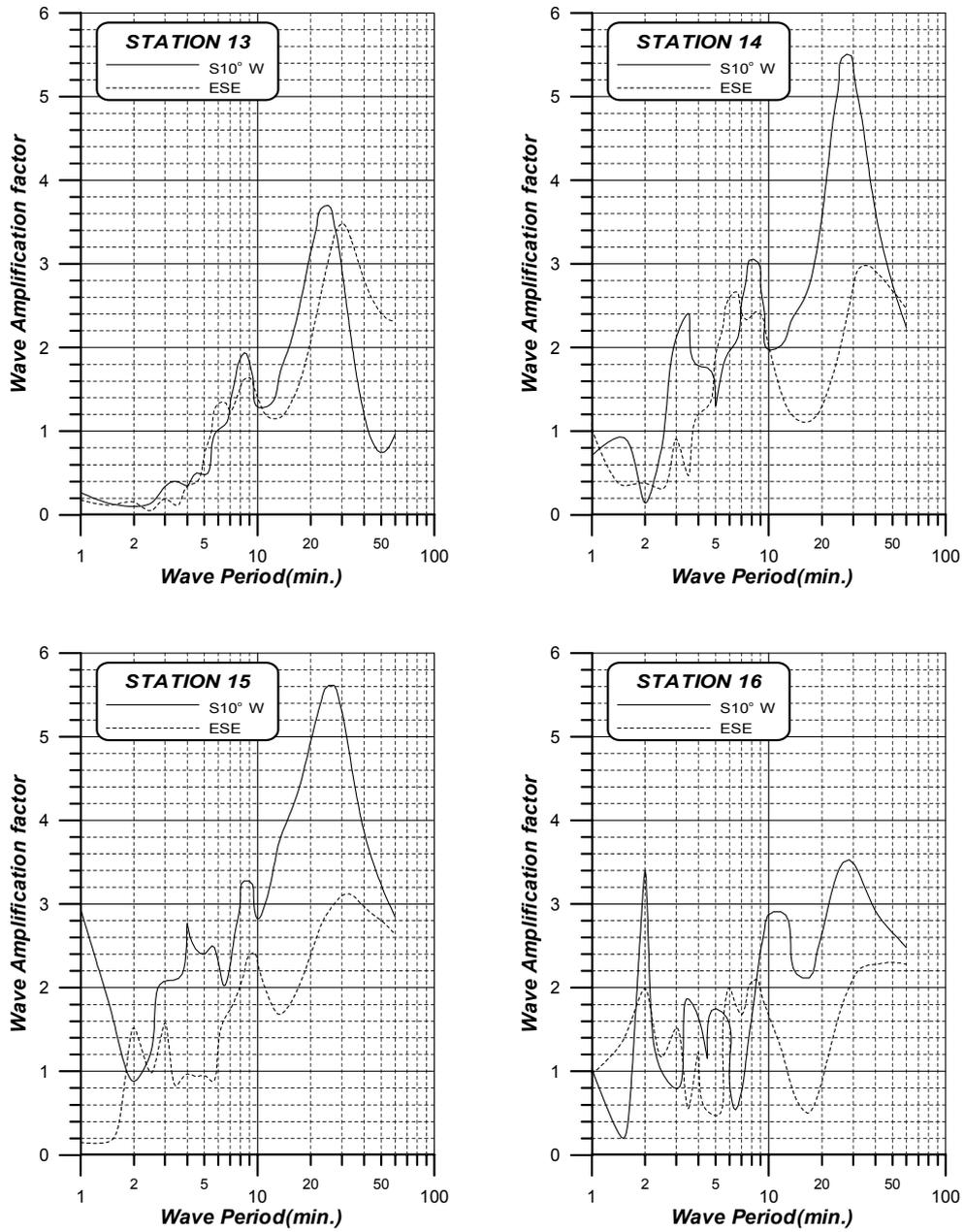


Fig. 4.4 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(13,14,15,16)

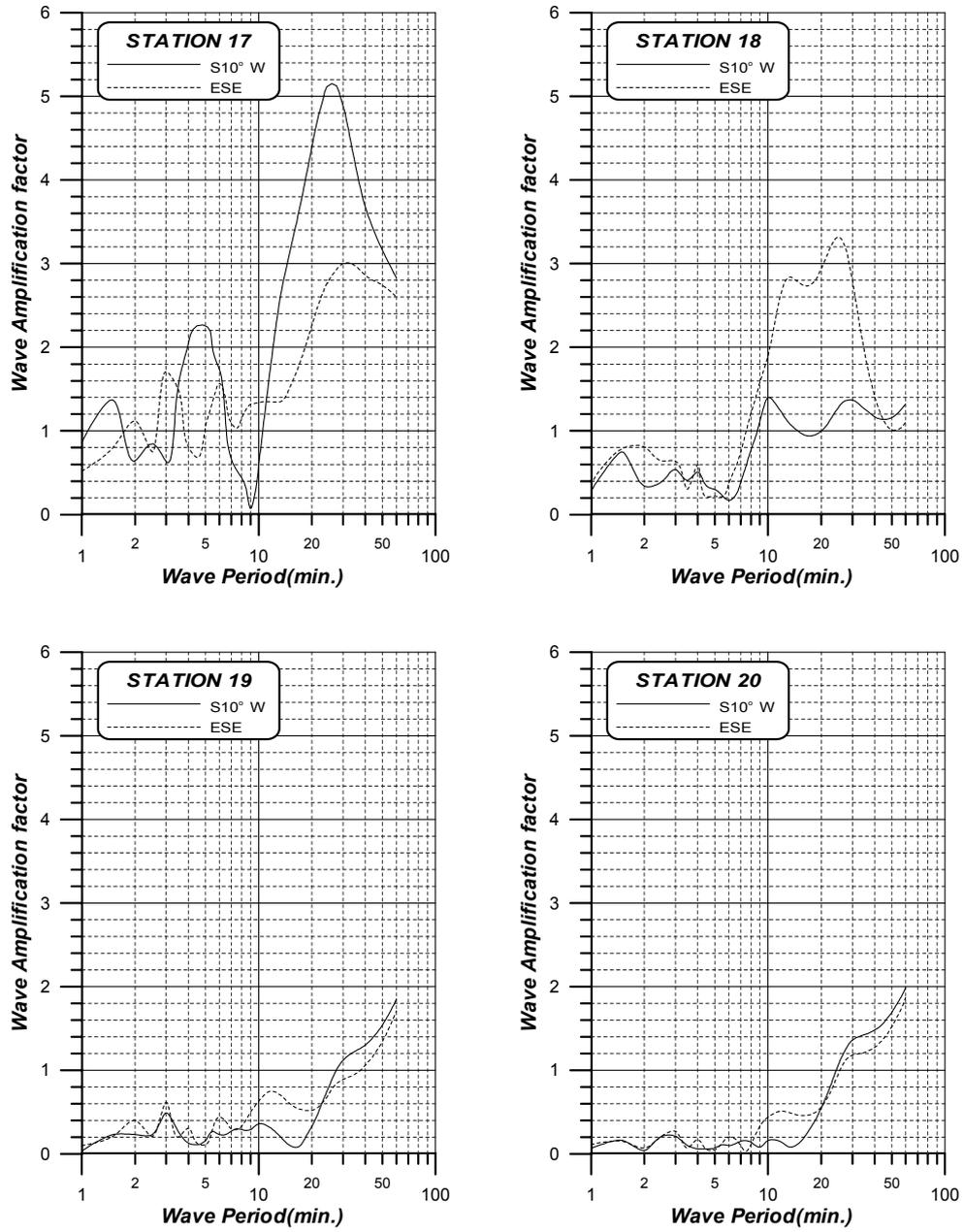


Fig. 4.5 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(17,18,19,20)

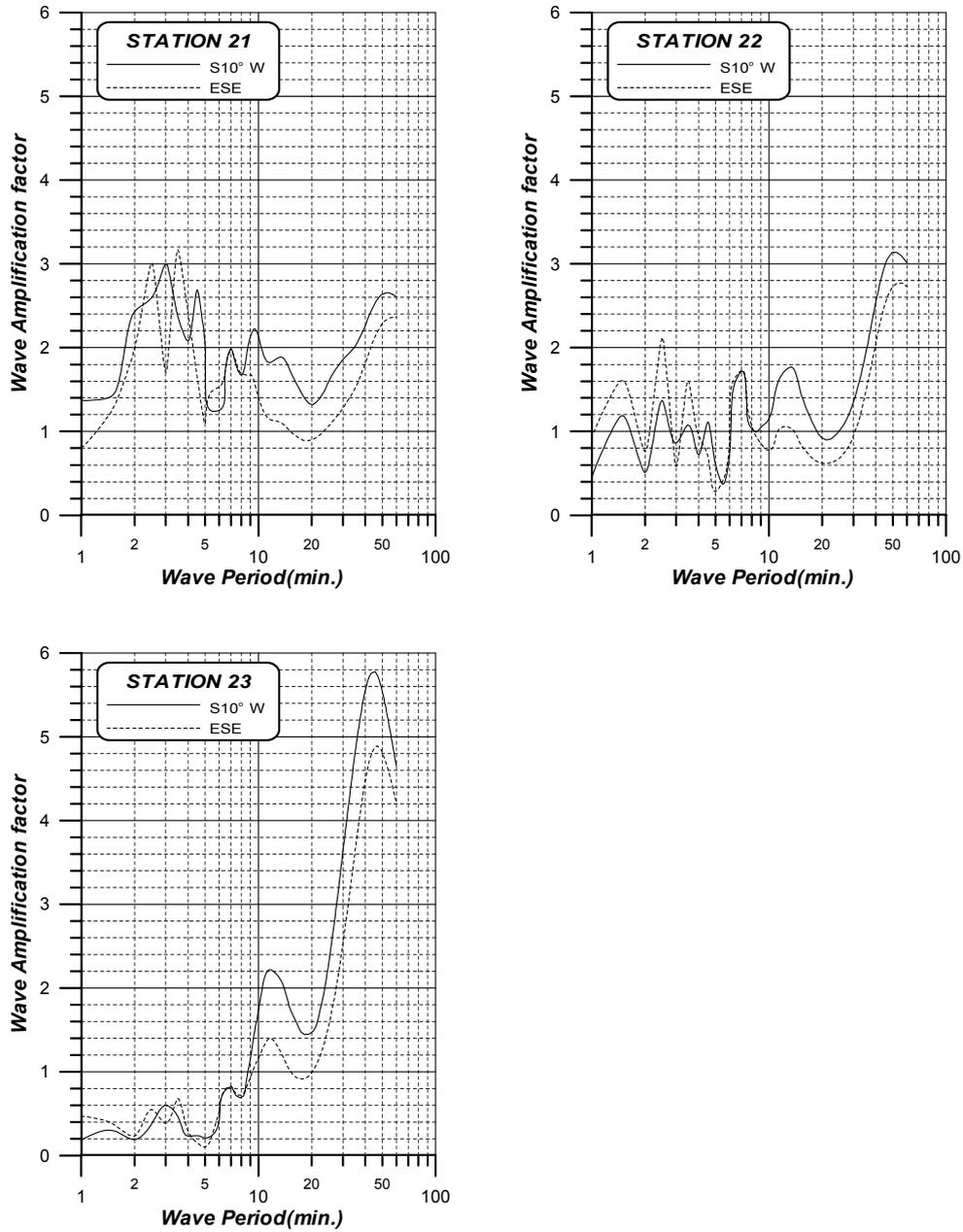


Fig. 4.6 Comparison of harbor response with respect to incident wave direction at selected station(21,22,23)

한편 7.5분, 9.5분, 12.2분에서 증폭비 1.8~2.2 정도로 반응을 나타내기도 하지만 뚜렷한 차이는 감천항 최 내측에서 주기 44분대에서 증폭비가 3.9~5.8에 이르는 경우가 나타났다. 전반적으로 ESE파향보다 S10°W파향이 10분 이상의 주기에서 높은 것으로 나타났으나, 10분 이하의 주기에 대해서는 ESE파향이 다소 높은 것으로 분석되었다.

여러 관측점에서 최대 증폭비를 기록하고 있는 7.5분과 26.6분의 장주기 파랑에 대한 파향별 반응특성은 Fig. 4.7~Fig. 4.10와 같다. 6.5분에서 높은 증폭비를 보이는 주요 지점은 S10°W 및 ESE 양쪽 모두 남항입구방파제부분, 감천항의 두도와 입구방파제전면, 하리 선착장부분, 용호동 해군부두예정지를 들 수 있으며 증폭비가 3.0에서 6.0이상으로 나타났다. 이 경우 감천항에서는 증폭비는 1.2정도이나 폐쇄형만에서 2차 모드(second harmonic)형의 반응을 나타내었다.

한편, 26.6분에서 S10°W방향은 남항측이 최고 6.0이상으로 북항측의 2.5보다 높은 반응을 나타내었지만, ESE방향은 이와 반대로 북외항측이 5.0이상으로 남항측의 3.0보다 높게 반응하여 지형적인 특성에 따라 파향의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 감천항의 경우에도 S10°W방향의 파는 항내측에 2.5 이상의 최대 증폭비를 나타내는 것에 대해 ESE방향에서는 1.5 정도로 반응한 것을 알 수 있다.

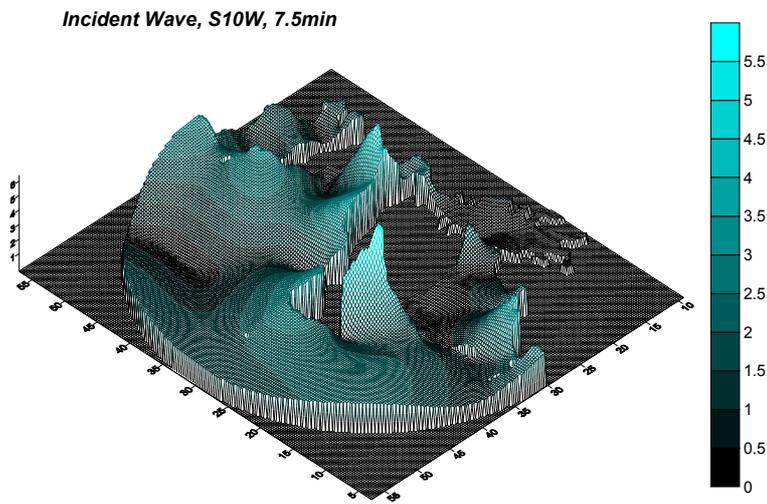
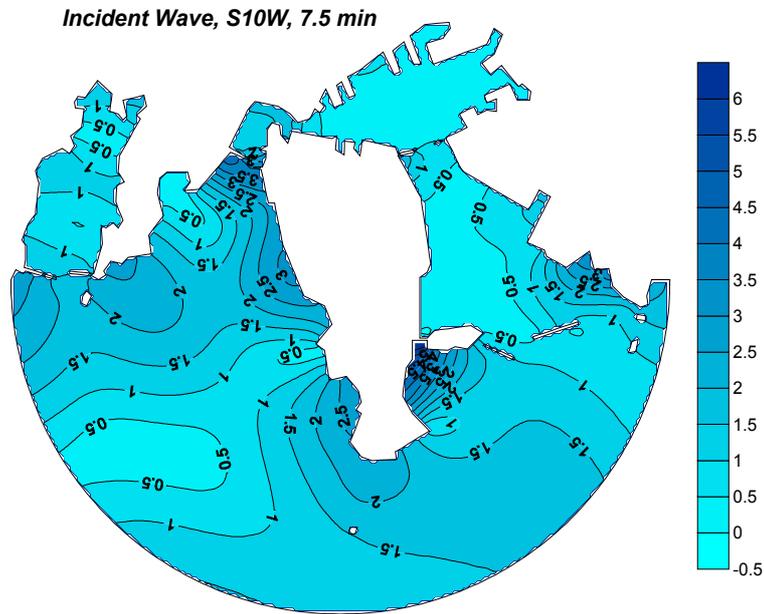


Fig. 4.7 Computed amplification ratios in the global model
($T=450\text{sec}$, $S10^\circ\text{W}$)

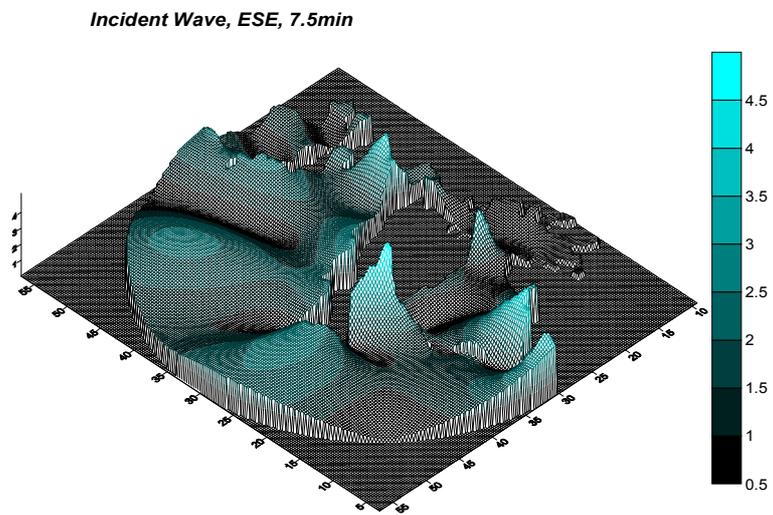
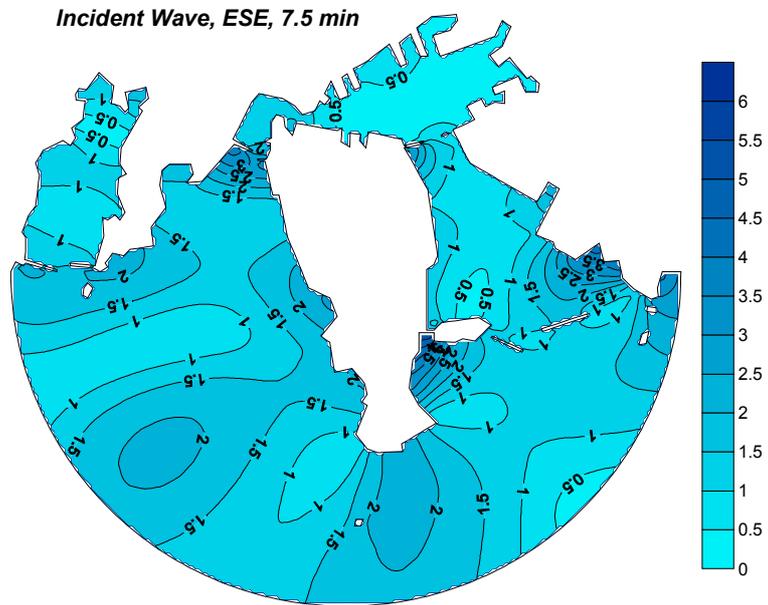


Fig. 4.8 Computed amplification ratios in the global model
($T=450\text{sec}$, ESE)

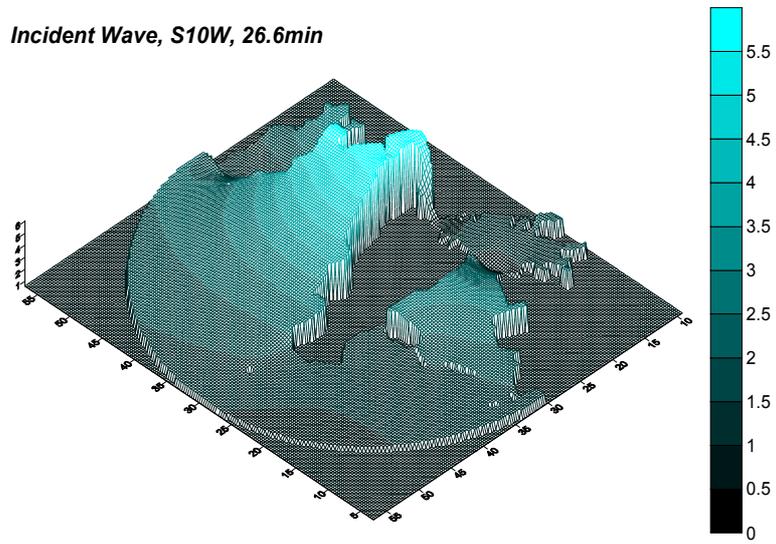
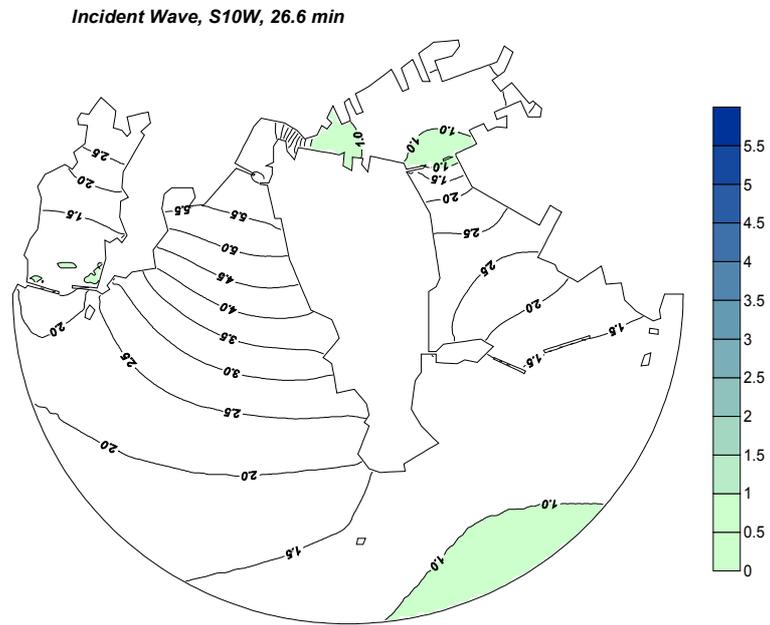


Fig. 4.9 Computed amplification ratios in the global model
($T=26.6\text{min}$, $S10^\circ\text{W}$)

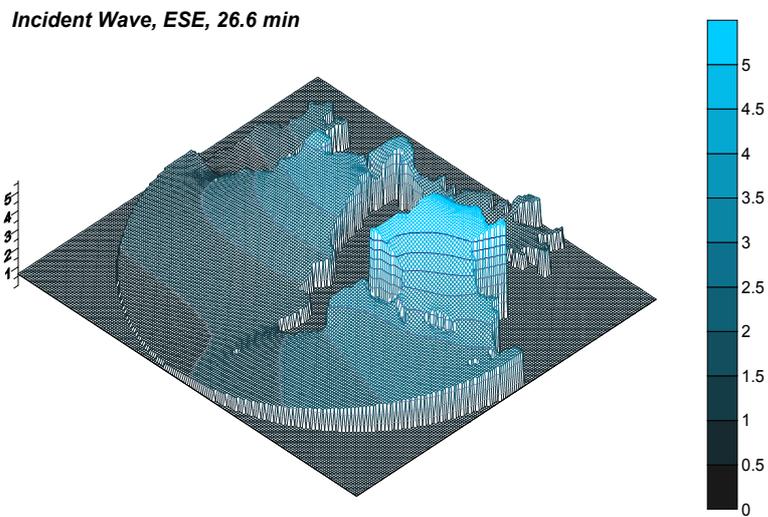
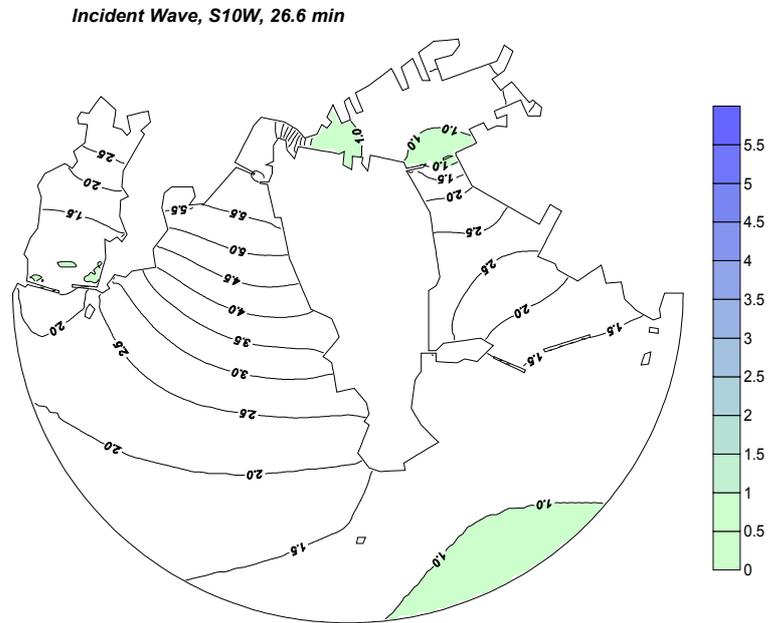


Fig. 4.10 Computed amplification ratios in the global model
($T=26.6\text{min}$, ESE)

4.1.2 협역모델 실험

현재의 항만조건에 대하여 유한요소망을 구성한 후 모델을 수립하였고 Fig. 3.4의 영역내에서 시뮬레이션의 시작주기를 30sec로 하여 제시한 입사파의 세가지 파향 S10°W, SSE, ESE와 주파수에 대한 시뮬레이션은 200차례 반복되었다. 각 실험 주파수 범위는 관측기록범위인 30sec~3,000sec로 제한하였으며, 부진동 관측기록 분석으로 나타난 특정주기나 모델에서 이상반응을 나타낸 주기와 방향에 대해서는 2차원 및 3차원 증폭비를 그림으로 나타내었다. 먼저 파향별 각 위치점 간에 반응특성을 비교하기 위하여 각 4개의 위치점으로 그룹화하여 방향별 반응특성을 파향 S10°W, SSE, ESE 순으로 정리한 것이 Fig. 4.11~Fig. 4.22이다.

감천항 방파제 바깥에서는 Fig. 4.11, Fig. 4.15, Fig. 4.19에서 주기 100sec에서 증폭비가 최고 3~4의 값을 나타내지만 두도에서 송도측에는 ESE파향, 두도에서 서방파제와 자담말 방향에는 S10°W파향에서 반응이 높게 나타났다. 이것은 해안선에서의 반사로 인한 영향이며 특히 소파제가 없는 감천항 방파제의 경우 항외에서 반사파의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 두도와 동방파제, 당강말 사이의 구간에 위치한 S5, S6지점은 두도로 인해 다소 차단되는 효과가 있지만, 장주기로 감에 따라 이것은 사라지게 된다.

동방파제 내측에 위치한 S9~S12지점은 부두개발 대상역으로 Fig. 4.12, Fig. 4.16, Fig. 4.20과 같이 100sec 이하의 주기에서는 입사파향 및 위치점에 따라 다른 반응을 나타내지만 장주기로 감에 따라 거의 유사한 반응을 나타내었으며 증폭비가 주로 0.5 부근의 값을 가지며 70sec 부근에서 1.6~2.3의 반응이 있으며, 350sec, 700sec 부근에서도 각각 1.3~1.8, 1.8~2.0의 증폭비를 나타내었고 3000sec 부근으로 가면서 증폭비가 3배 이상으로 나타났다. 이것은 항 입구의 절점 부근에 위치하였기 때문으로 볼 수 있다. 그러나, 같은 그림에서 내항측인 S13~S17은 이보다 크게 반응하며 특히 최내단에 위치한

S16, S17은 그 증폭비가 350sec, 700sec 부근에서 3.0이상을 나타내었으며, 3000sec 로 접근하면서 최대증폭비 5.4까지에 달하는 것으로 계산되었다. 이 경향은 Fig. 4.13, Fig. 4.17, Fig. 4.21의 S18~S21에서도 나타났다.

Fig. 4.14, Fig. 4.18, Fig. 4.22는 수로 중앙에 위치하여 주기에 따라 다소 차이가 있으나 평균적으로 증폭비 1~1.5 부근의 반응을 보였으며, 장주기에서는 2.8이상으로 나타났다. 전반적인 경향은 감천향이 길이방향으로 개발되었으므로 폭방향의 진동은 극히 미세하며 따라서 향내수역에서 동안과 서안의 구별보다 최내단에서 거리에 따라 반응의 크기가 달라지고, 일단 내향에서는 파향에 따른 변화는 장주기보다 단주기에서 나타나는 것으로 분석되었다.

앞에서 분석한 자료 중에서 주요 공진모드 또는 절점이 나타난 주기에 대한 부진동의 평면적인 분포특성은 Fig. 4.23 및 Fig. 4.24에 표시한 예와 같다. 이 두 그룹의 그림은 각각 335sec 및 636sec에 대한 감천향 반응특성을 2차원 및 3차원으로 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 4.23에서 파향은 (a)가 S10°W, (b)가 SSE, (c)는 ESE 방향으로 각각 서방과제 방향, 중앙수로 방향 및 두도방향에서 진입하고, 주기 335sec에서는 절점이 향만의 입구 방과제 부근과 내측의 두 지점에서 나타나며 개방형향만에서 제3모드(fifth harmonic)에 해당한다. S10°W방향에서는 서방과제 바깥쪽 자담말과 향내 최내단 서쪽인 한보철강 제2부두에서 반사파로 인한 높은 반응을 보였으며, SSE방향에서도 비슷한 양상을 나타내나 증폭비가 감소된 것으로 나타났다. 한편, ESE방향에서는 동방과제에서 송도측이 최대 증폭비 3.0으로 높았으며, 향내측에서는 비슷한 양상이나 세방향 중에서 가장 약한 것으로 나타났다. 이것은 두도의 영향을 받은 것으로 판단되며 입사방향으로 보아 향내유입이 차단되었기 때문으로 본다. 주기 636sec에 대해서는 향만입구와 만의 중앙부에서 절점이 형성된 제2모드(third harmonic)를 나타내었다. 향만반응의 특성은 주기 335sec에 대한 것과 유사한 경향을 나타내었다.

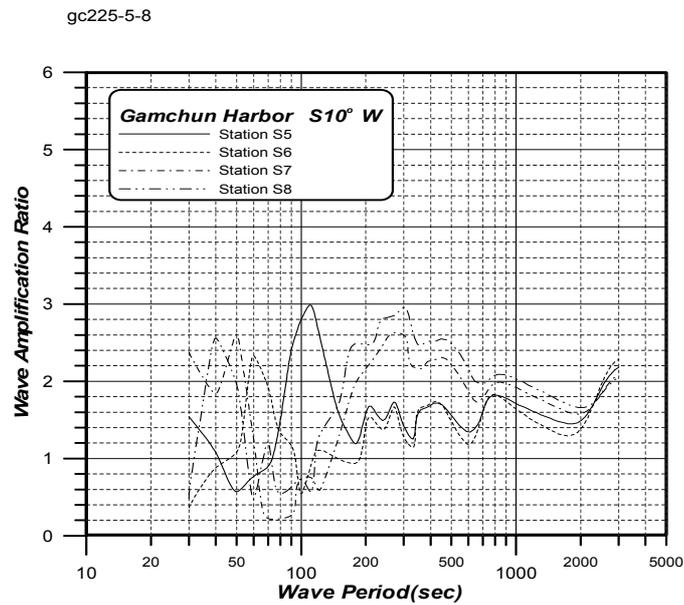
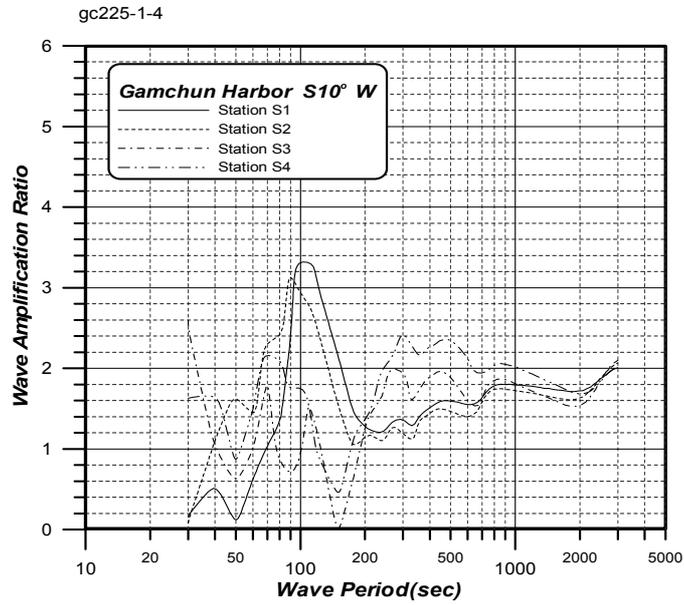
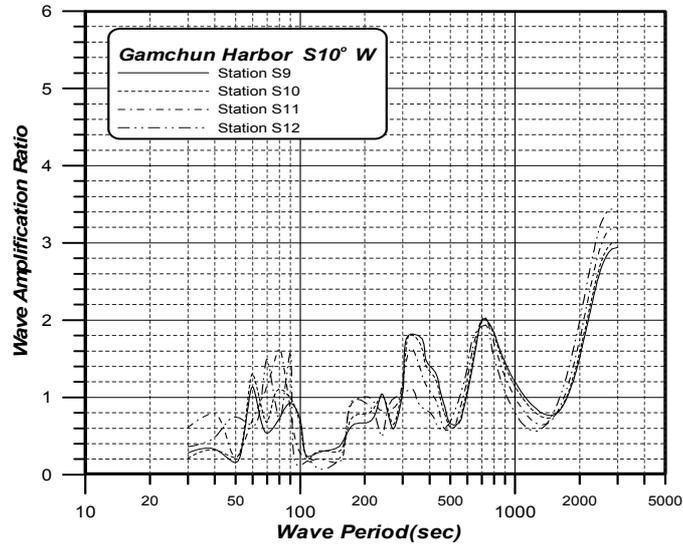


Fig. 4.11 Response characters of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8)
(The present, S10°W)

gc225-9-12



gc225-13-16

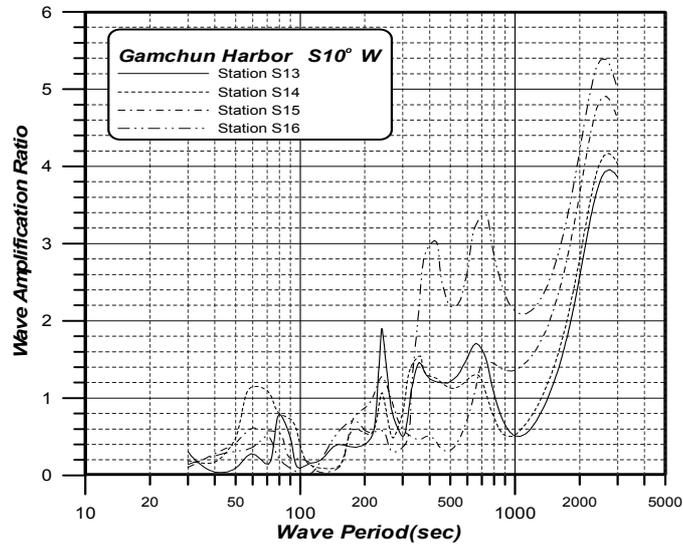
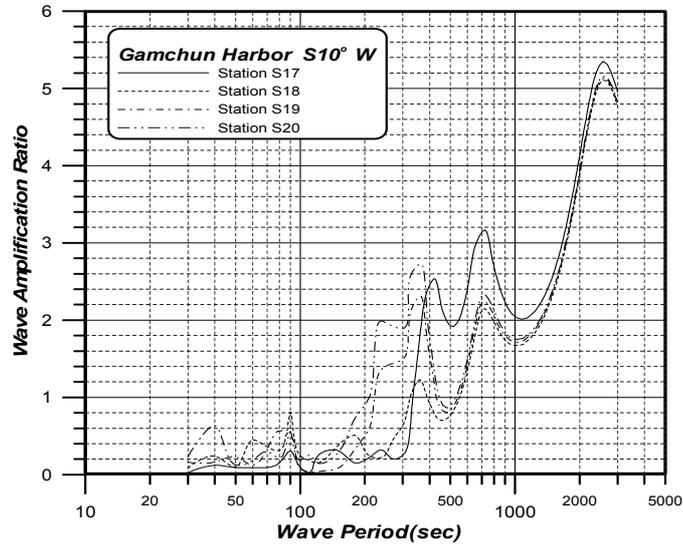


Fig. 4.12 Response characteristics of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16)

(The present, S10°W)

gc225-17-20



gc225-21-24

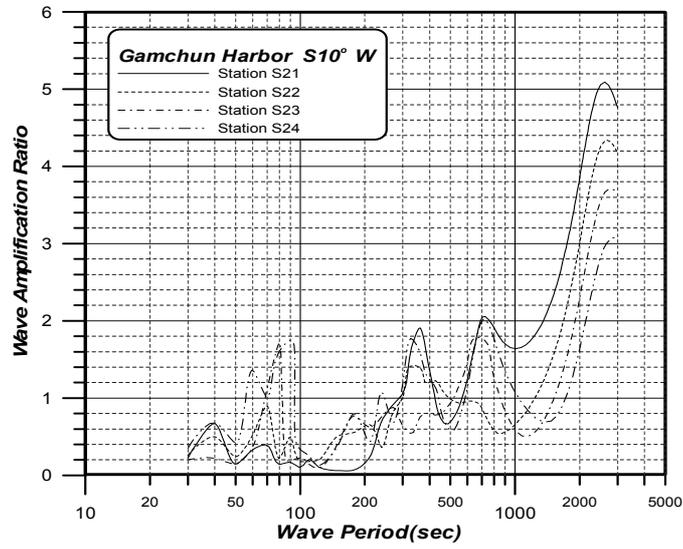


Fig. 4.13 Response characteristics of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24)
(The present, S10°W)

gc225-25-28

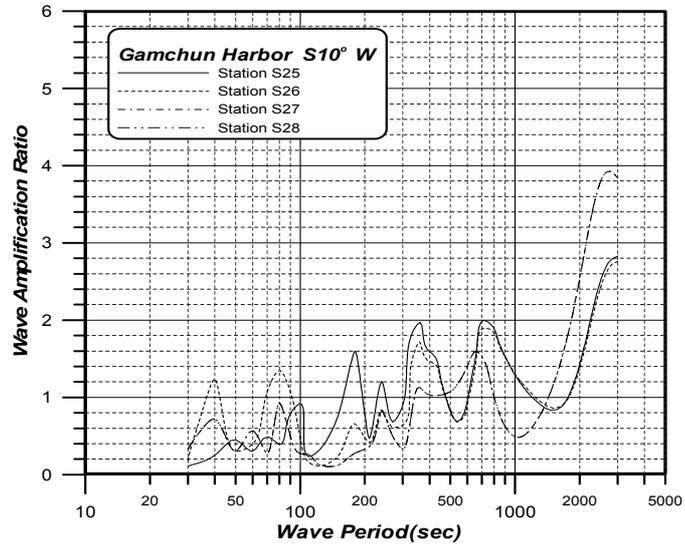


Fig. 4.14 Response characteristics of selected station(25,26,27,28)
(The present, S10°W)

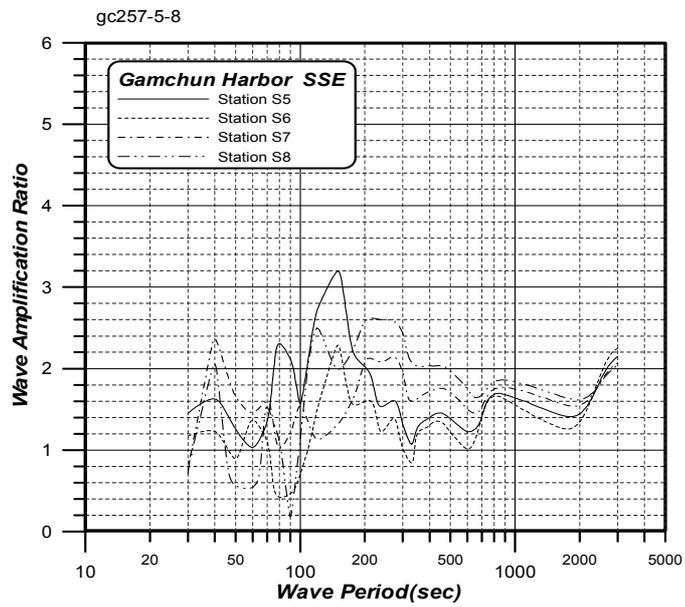
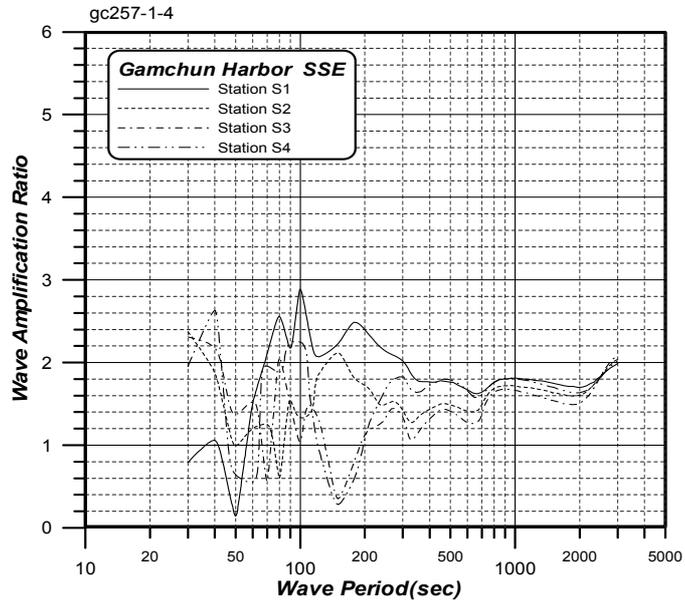


Fig. 4.15 Response characteristics of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8)
(The present, SSE)

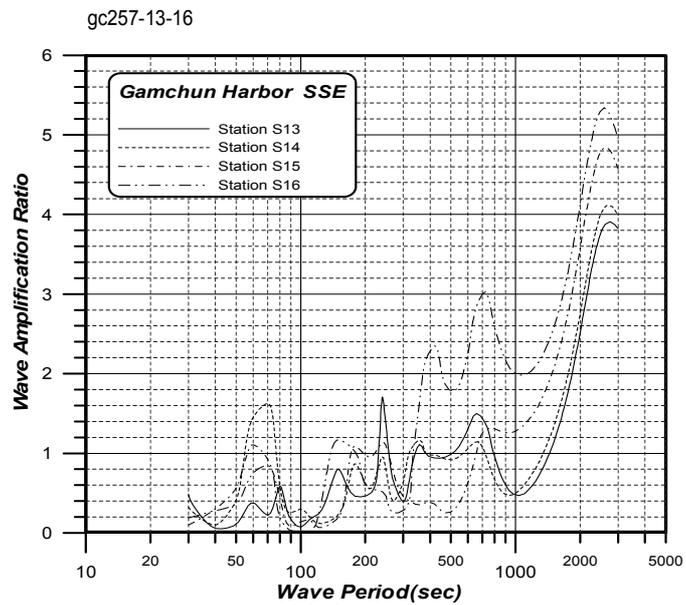
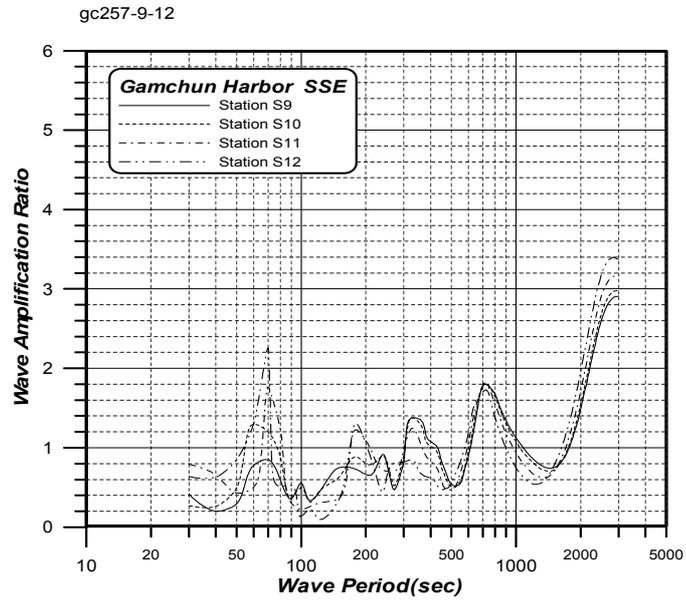


Fig. 4.16 Response characteristics of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16)
(The present, SSE)

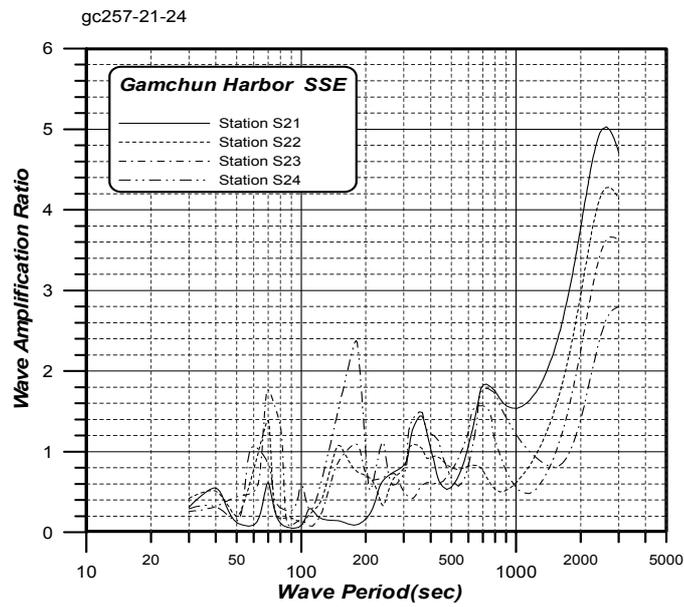
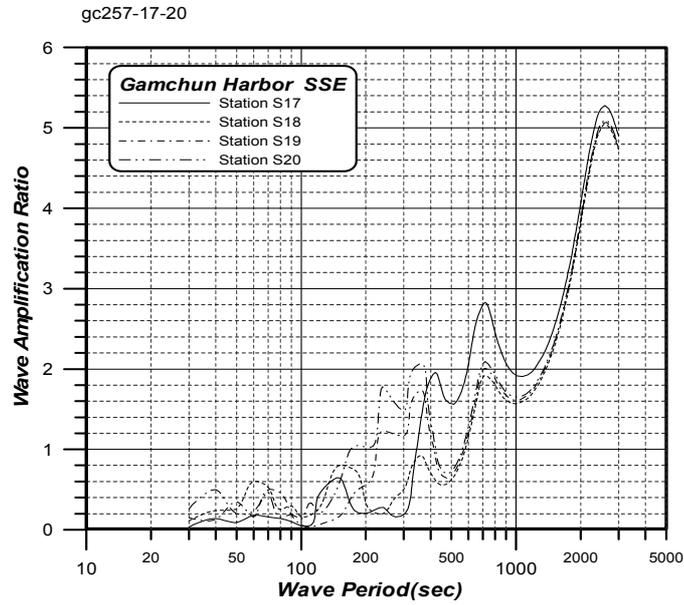


Fig. 4.17 Response characteristics of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24)
(The present, SSE)

gc257-25-28

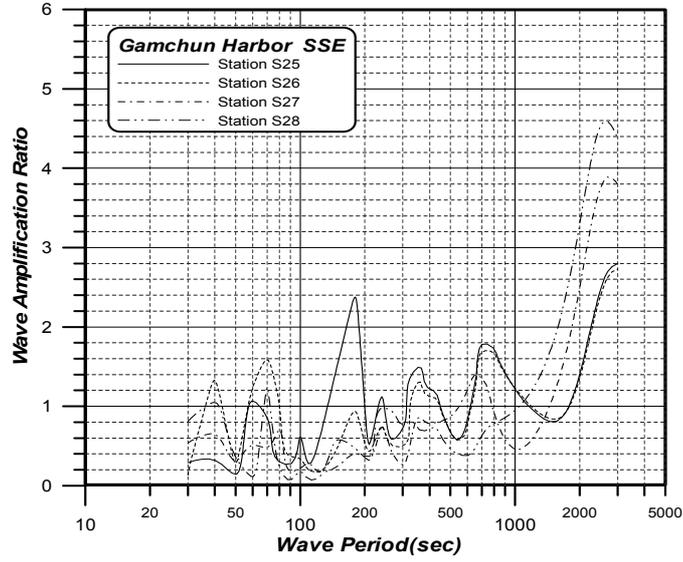


Fig. 4.18 Response characteristics of selected station(25,26,27,28)
(The present, SSE)

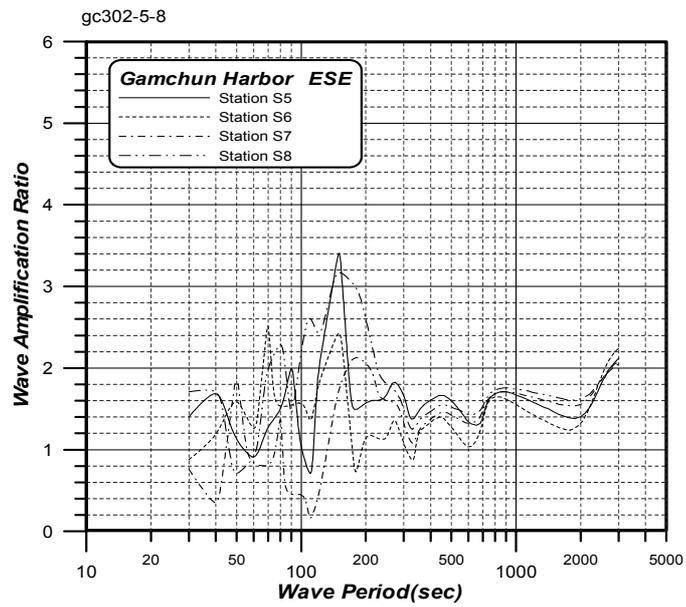
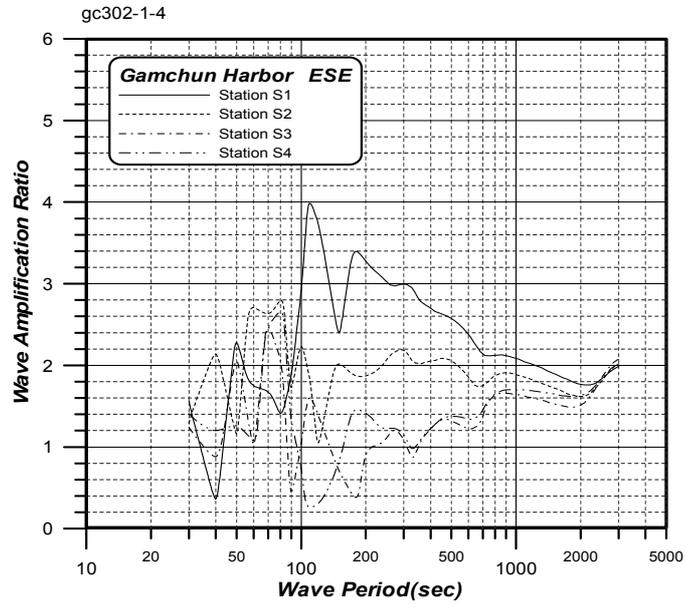


Fig. 4.19 Response characteristics of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8)
(The present, ESE)

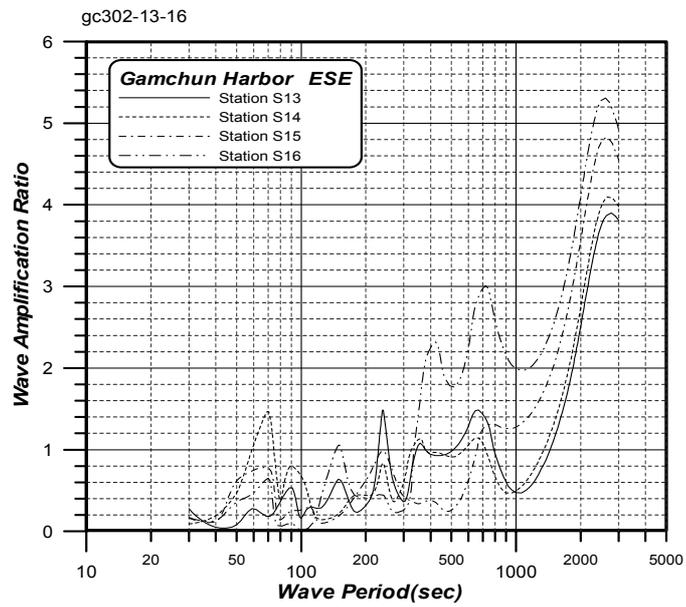
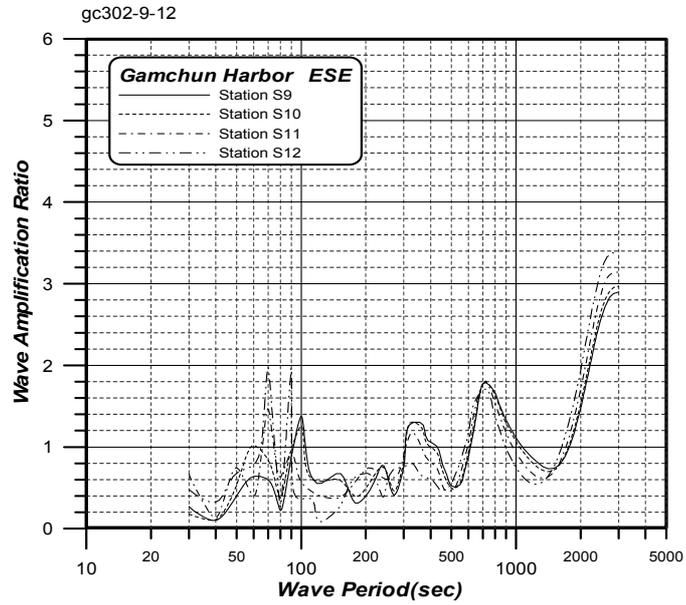


Fig. 4.20 Response characteristics of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16)
(The present, ESE)

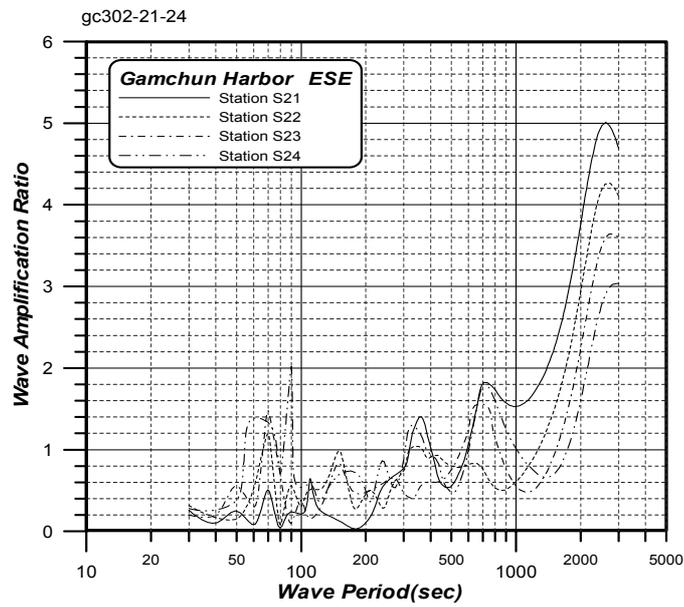
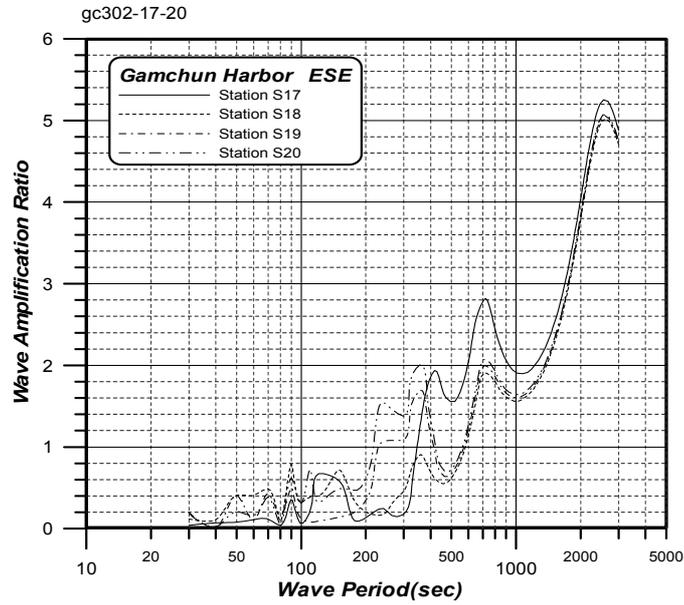


Fig. 4.21 Response characteristics of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24)
(The present, ESE)

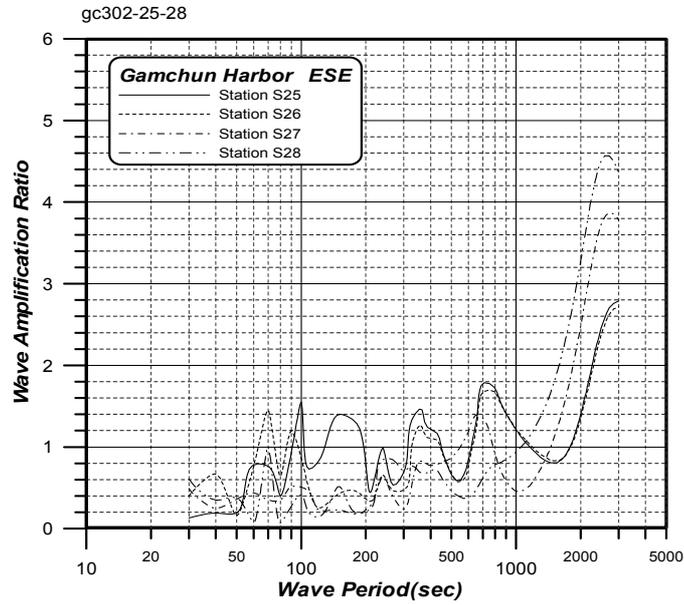


Fig. 4.22 Response characteristics of selected station(25,26,27,28)
(The present, ESE)

이상과 같이 현재의 감천항에 대한 부진동 수치실험 결과를 각 파향별, 위치점별로 이상반응을 나타낸 것을 요약하면 Table 4.1 및 Table 4.2와 같다. 반응의 크기와 주기가 위치에 따라 차이가 있으나 현장관측치와 유사한 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

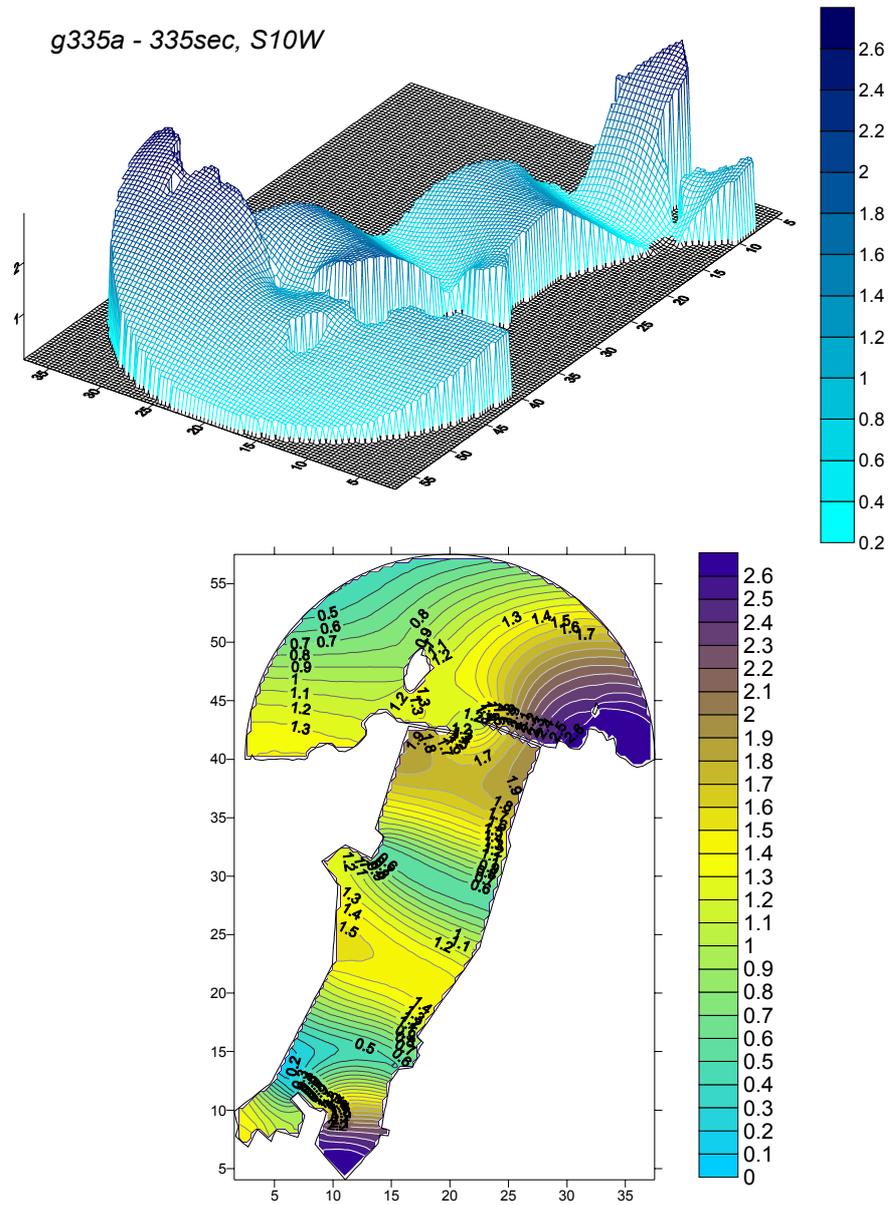


Fig. 4.23a Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor
(present harbor, 335sec, S10°W)

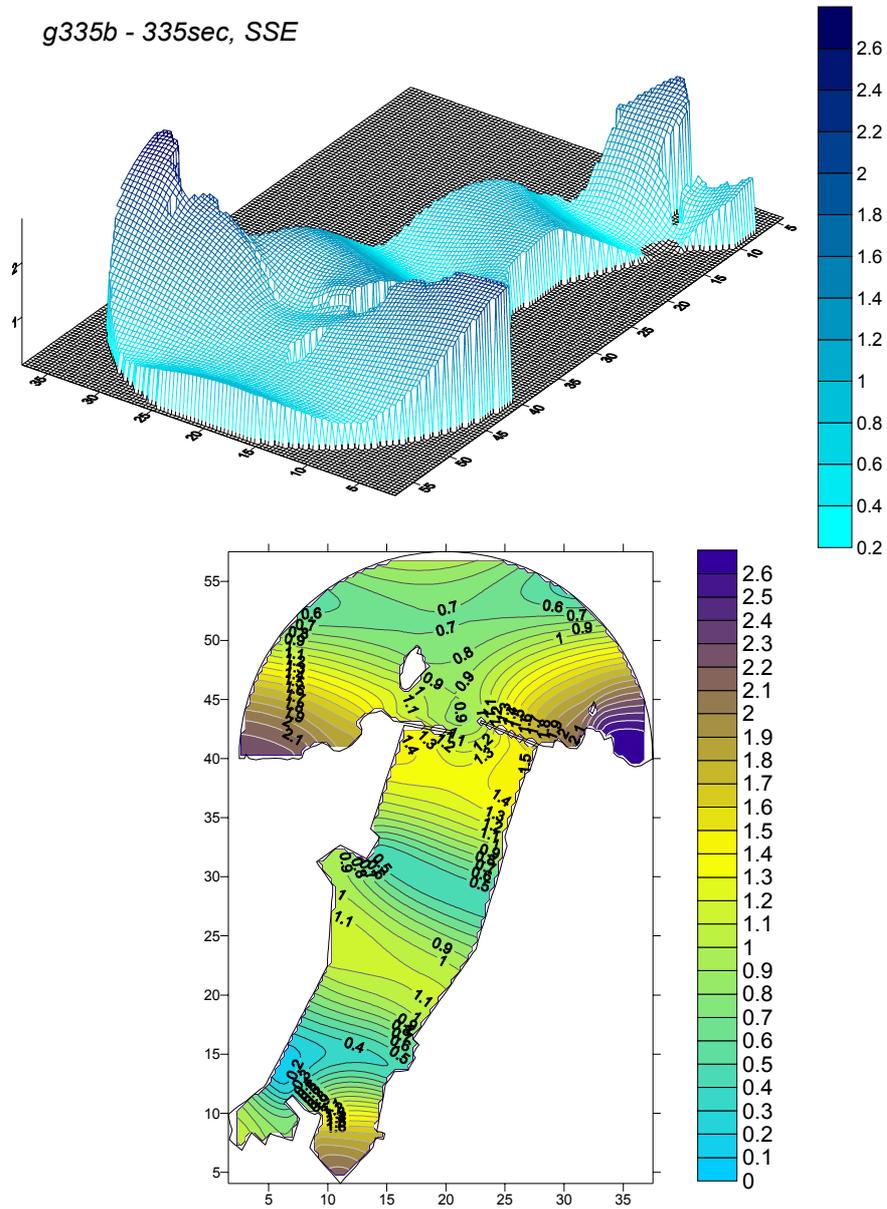


Fig. 4.23b Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor
(present harbor, 335sec, SSE)

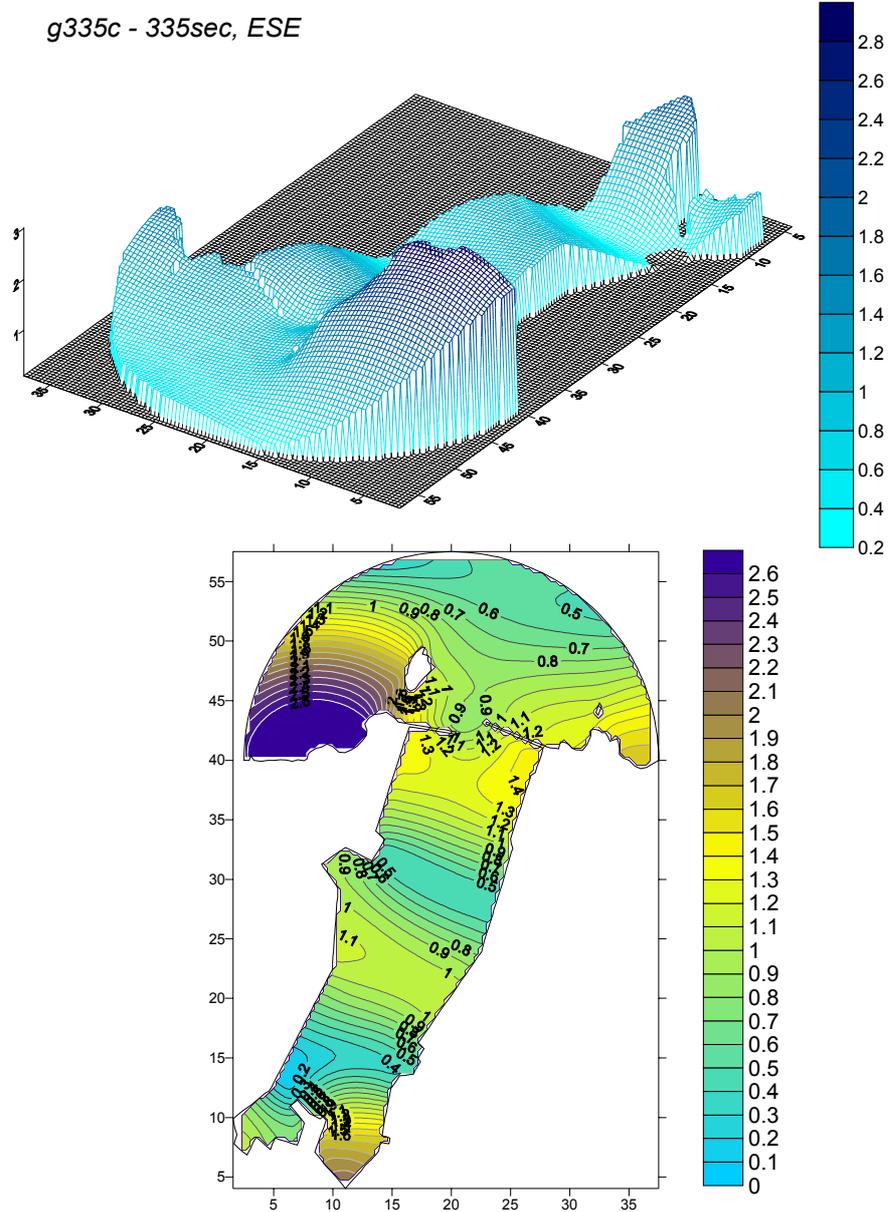


Fig. 4.23c Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor
(present harbor, 335sec, ESE)

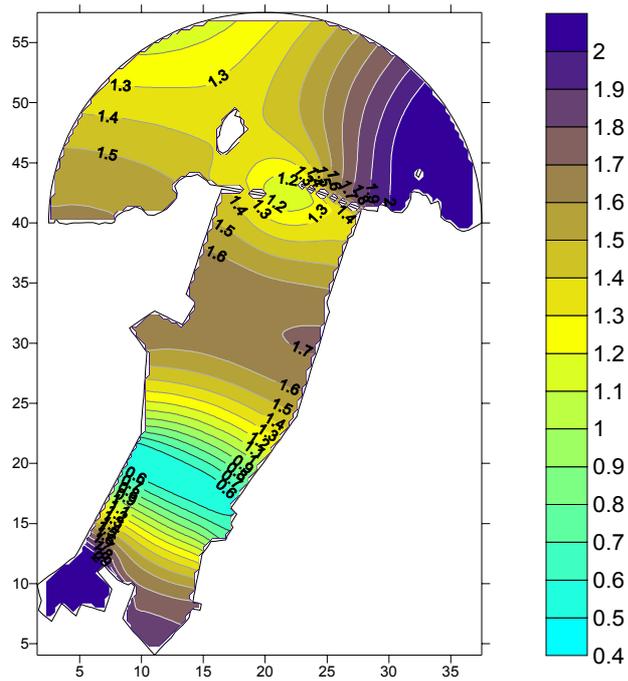
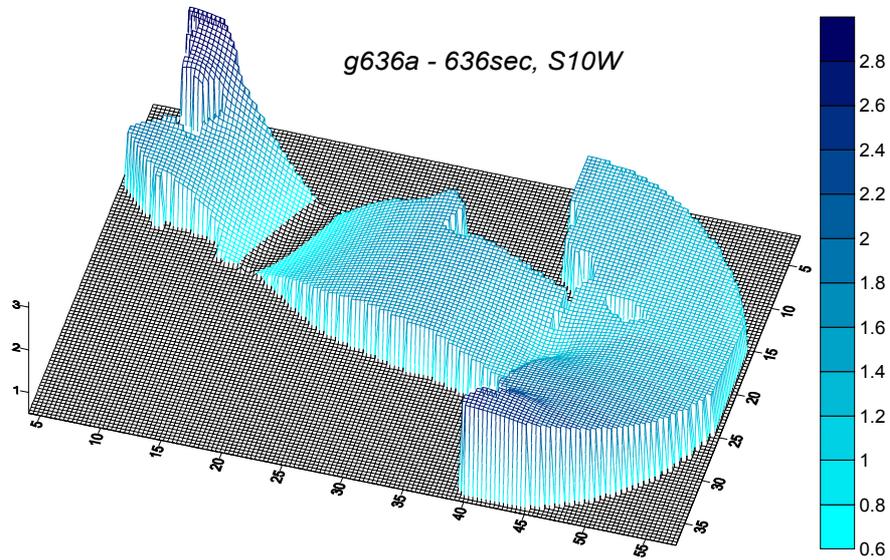


Fig. 4.24a Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor
(present harbor, 636sec, S10°W)

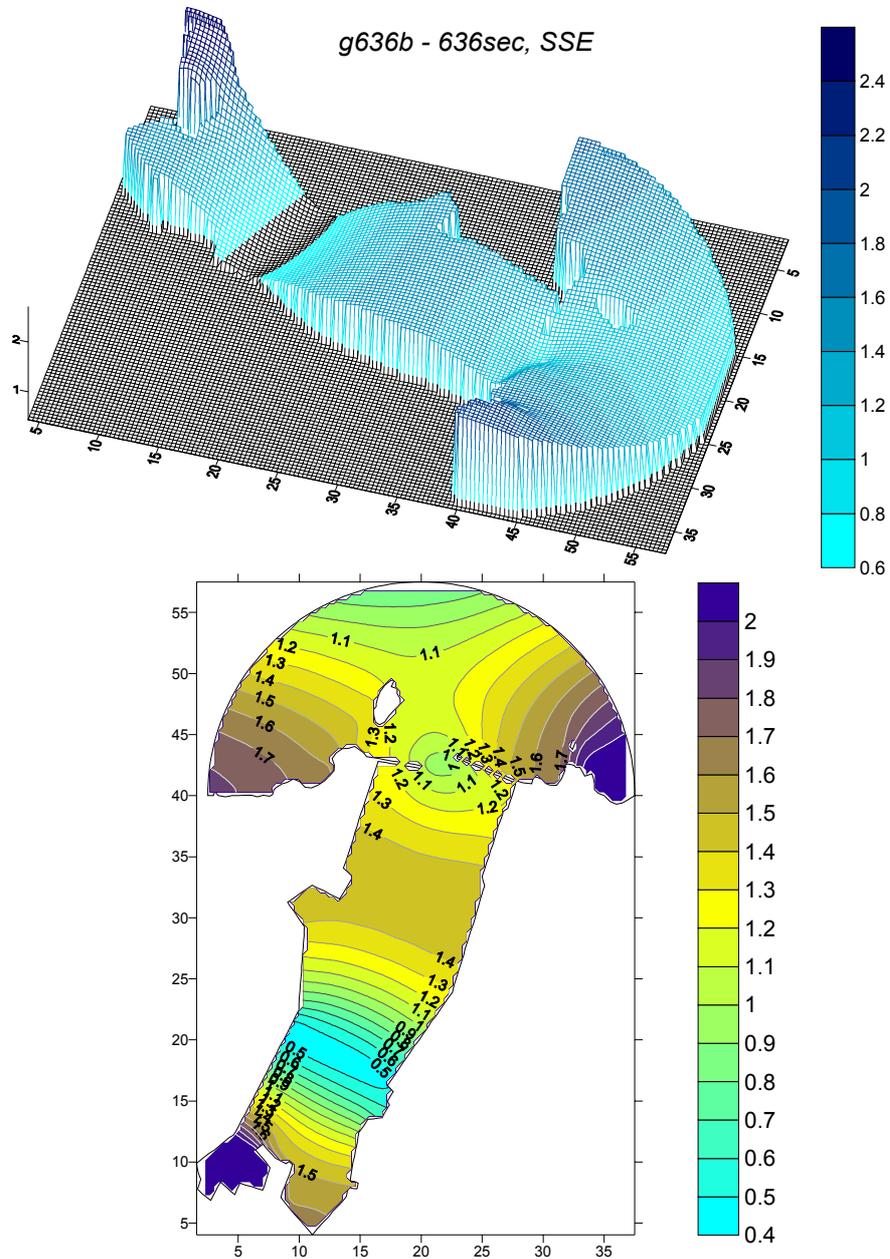


Fig. 4.24b Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor
(present harbor, 636sec, SSE)

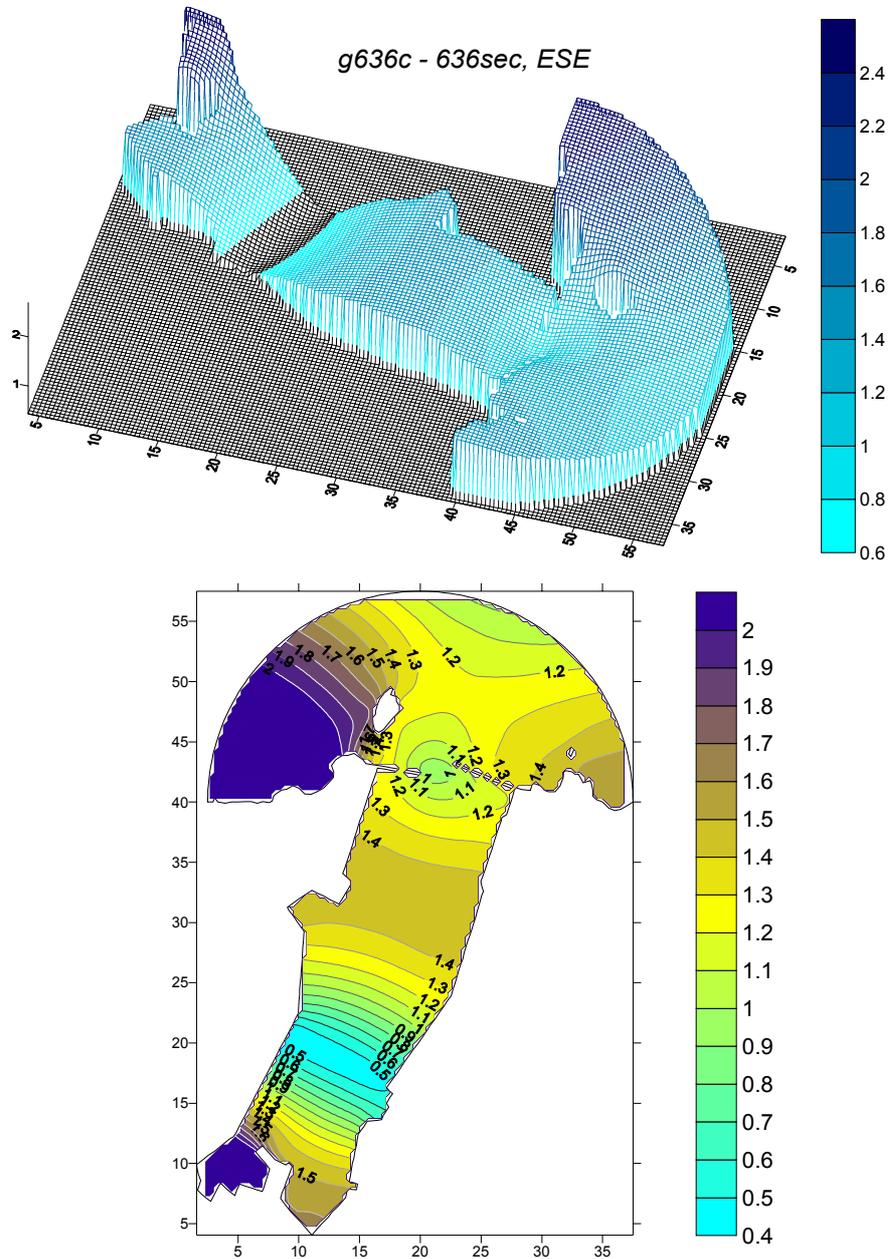


Fig. 4.24c Calculated response amplification ratio around Gamcheon Harbor
(present harbor, 636sec, ESE)

Table 4.1 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor
(The present, S1-S14)

No. of data	Resonant period in min. (relative amplitude ratio)		
	ESE	SSE	S10°W
1	49.8(2.28),118.5(3.99),178.6(3.4),301(1.3),3000(1.99)	40(1.06),80(2.56),100(2.89),960~1020(1.81),3000(1.99)	40(0.51),105(3.31),300(1.36),480(1.6),840~960(1.8),3000(2.01)
2	39.8(2.14),59(2.71),81(2.83),100(2.24),174(2.05),292(2.19),473(2.09),885(1.91),3000(2.02)	70(1.25),90(1.55),150(2.12),460(1.5),950(1.72),3000(2.04)	50(1.62),89(3.13),220(1.17),270(1.29),450(1.5),840(1.75),3000(2.07)
3	49.7(2.06),69(2.47),115(1.61),282(1.3),460(1.34),830(1.7),3000(2.08)	80(2.06),100(1.49),270(1.45),450(1.43),900(1.68),3000(2.08)	70(1.79),110(1.52),270(1.99),450(1.97),840(1.87),3000(2.1)
4	49(1.26),81(2.66),180(1.46),510(1.38),830(1.68),3000(2.02)	40(2.63),70(1.96),100(2.25),300(1.83),480(1.8),960(1.81),3000(2.02)	40(1.64),70(2.16),300(2.42),480(2.36),840(2.06),3000(2.04)
5	41(1.7),90(2),160(3.41),275(1.83),450(1.67),840~900(1.71),3000(2.12)	40(1.63),80(2.31),150(3.2),440(1.7),3000(2.15)	110(2.99),210(1.68),270(1.73),420(1.72),780(1.82),3000(2.18)
6	50(1.59),70(2.52),98(1.57),155(2.43),215(1.18),270(1.36),445(1.4),820(1.68),3000(2.24)	40(1.23),60(1.37),110(1.06),150(2.29),430(1.35),840(1.66),3000(2.25)	60(2.33),120(1.11),270(1.67),420(1.74),780(1.83),3000(2.18)
7	50(1.88),79(1.37),179(2.13),470(1.46),830~900(1.71),3000(2.08)	40(2.37),70(1.6),100(1.54),210(2.13),870(1.77),3000(2.07)	50(2.61),110(0.76),270(2.63),450(2.31),840(1.99),3000(2.09)
8	35(1.71),80(2.29),110(2.61),155(3.17),450(1.55),910(1.76),3000(2.05)	40(2.06),70(1.53),120(2.50),210(2.62),855(1.86),3000(2.04)	40(2.56),70(1.22),100(0.73),180(2.49),300(2.96),450(2.55),840(2.09),3000(2.05)
9	62(0.64),100(1.38),160(0.7),240(0.78),330~360(1.3),720(1.97),3000(2.9)	70(0.85),100(0.56),150(0.75),240(0.92),330(1.38),720(1.8),2950(2.91)	40(0.33),60(1.14),90(0.93),240(1.05),330(1.82),720(2.02),2940~3000(2.94)
10	60(1.02),100(1.26),150(0.6),242(0.76),320(1.31),710(1.81),2940(2.97)	60(1.3),180(0.89),240(0.9),300(1.38),720(1.82),2900(2.98)	40(0.32),60(1.31),80(1.11),240(1.03),330(1.82),720(2.04),2850~3000(3.01)
11	50(0.75),70(1.47),90(0.94),210(0.75),330(1.18),715(1.81),2980(2.97)	70(1.77),180(1.23),330(1.25),720(1.81),2900(2.98)	40(0.79),80(1.63),120(0.2),210(1.0),330(1.64),720(2.03),2880~2940(3.2)
12	69(1.98),89(1.97),210(0.67),330(0.8),720(1.72),2900(3.15)	70(2.260),110(0.23),180(1.31),720(1.73),2850(3.4)	50(0.75),70(1.5),90(1.60),110(0.18),180(0.98),330(1.11),720(1.94),2840(3.44)
13	60(0.28),89(0.54),158(0.54),240(1.49),360(1.08),650(1.49),2760~2940(3.38)	60(0.38),80(0.59),150(0.8),240(1.71),360(1.11),660(1.5)	60(0.28),80(0.79),150(0.4),210(0.45),360(1.46),660(1.71),2640~2700(3.96)
14	70(1.47),89(0.68),240(0.84),360(1.14),660(1.15),2760(3.9)	70(1.63),180(0.87),240(0.96),360(1.17),660(1.15),2750(3.12)	60(1.15),150(0.11),240(1.07),360(1.55),660(1.31),2700(3.17)

Table 4.2 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor
(The present, S15-S28)

No. of data	Resonant period in min. (relative amplitude ratio)		
	ESE	SSE	S10°W
15	70(0.78),110(0.3),240(0.99),398(0.38),760(1.32),2820(3.08)	60(1.11),110(0.16),180(1.09),240(1.14),780(1.32),2640(3.85)	60(0.61),240(1.28),390(0.51),780(1.46),2640(3.91)
16	70(0.65),150(1.06),420(2.32),710(3.01),2604(3.83)	70(0.85),150(1.17),425(2.35),720(3.03),2580(5.34)	70(0.51),180(0.71),420(3.04),720(3.39),2580(5.4)
17	90(0.36),120(0.67),245(0.25),420(1.94),715(2.82),2700(5.27)	40(0.14),60(0.18),150(0.65),420(1.96),2550(5.28)	40(0.12),90(0.31),240(0.32),420(2.54),720(3.17),2580(5.35)
18	70(0.49),90(0.79),360(0.91),720(1.91),2580(5.26)	60(0.6),155(0.8),360(0.93),720(1.92),2580(5.05)	40(0.24),60(0.45),90(0.81),180(0.51),360(1.23),720(2.15),2600(5.11)
19	50(0.41),69(0.43),355(1.7),710(2),710(2),2580~2640(5.02)	50(0.35),80(0.46),240(1.23),355(1.74),720(2.01),2580(5.08)	50(0.23),80(0.57),180(0.33),360(2.31),720(2.25),2550(5.14)
20	50(0.21),70(0.39),89(0.62),110(0.73),240(1.55),360(2.01),720(2.08),2580(5.06)	40(0.5),70(0.47),110(0.34),240(1.78),360(2.07),720(2.09),2600(5.1)	40(0.64),70(0.3),90(0.56),110(0.26),350(2.73),720(2.34),2580(5.17)
21	50(0.25),70(0.51),121(0.65),360(1.41),720(1.83),2580~2640(5.08)	40(0.55),70(0.62),110(0.3),360(1.45),720(1.84),2580(5.03)	40(0.67),70(0.39),110(0.21),360(1.91),720(2.06),2550(5.09)
22	70(1.2),90(0.56),160(0.99),210(0.51),330(1.04),620(0.83),2700(3.27)	40(0.51),70(1.39),150(1.08),330(1.09),420(0.95),660(0.83),2700(5.08)	40(0.5),70(0.9),90(0.5),210(0.66),330(1.42),430(1.23),600(0.96),2640(3.34)
23	50(0.56),70(1.48),100(0.38),150(0.84),270(0.66),660(1.56),2820(3.65)	70(1.77),100(0.15),180(1.1),660(1.57),2850(3.67)	40(0.22),60(0.36),80(1.72),100(0.23),180(0.77),270(0.88),390(0.81),660(1.79),2830(3.71)
24	60(1.39),90(2.02),180(0.72),360(1.19),720(1.81),2800~3000(3.04)	60(1.93),180(1.22),330(1.35),720(1.82),2940(3.05)	40(0.68),60(1.36),90(1.75),180(0.8),240(1.08),330(1.77),660(1.76),2900(3.09)
25	60(0.78),100(1.55),150(1.4),240(0.99),360(1.47),720(1.79),3000(2.79)	40(0.32),60(1.07),100(0.62),180(2.38),240(1.12),360(1.5),720(1.79),2940(2.79)	50(0.45),70(0.49),100(0.92),180(1.6),240(1.21),360(1.97),720(2),3000(2.83)
26	40(0.67),70(1.45),90(1.2),240(0.66),350(1.27),750(1.69),2980(2.72)	40(1.33),70(1.59),180(0.94),360(1.31),720(1.7),3000(2.73)	40(1.24),80(1.35),180(0.66),240(0.84),360(1.72),720(1.9),3000(2.76)
27	60(0.44),90(0.52),240(0.64),720(1.4),2760(3.87)	40(0.65),60(0.51),80(0.71),110(0.28),180(0.4),240(0.74),360(0.86),660(1.4),2670(3.89)	40(0.72),60(0.57),80(0.93),240(0.82),360(1.13),660(1.6),282(3.93)
28	50(0.38),70(1),100(0.42),240(0.85),330(0.77),420(0.73),2640(3.58)	40(1.05),70(1.24),100(0.18),150(0.58),240(0.98),330(0.81),390(0.74),2700(3.59)	40(1.15),70(0.77),180(0.33),270(1.13),420(0.96),2660(3.65)

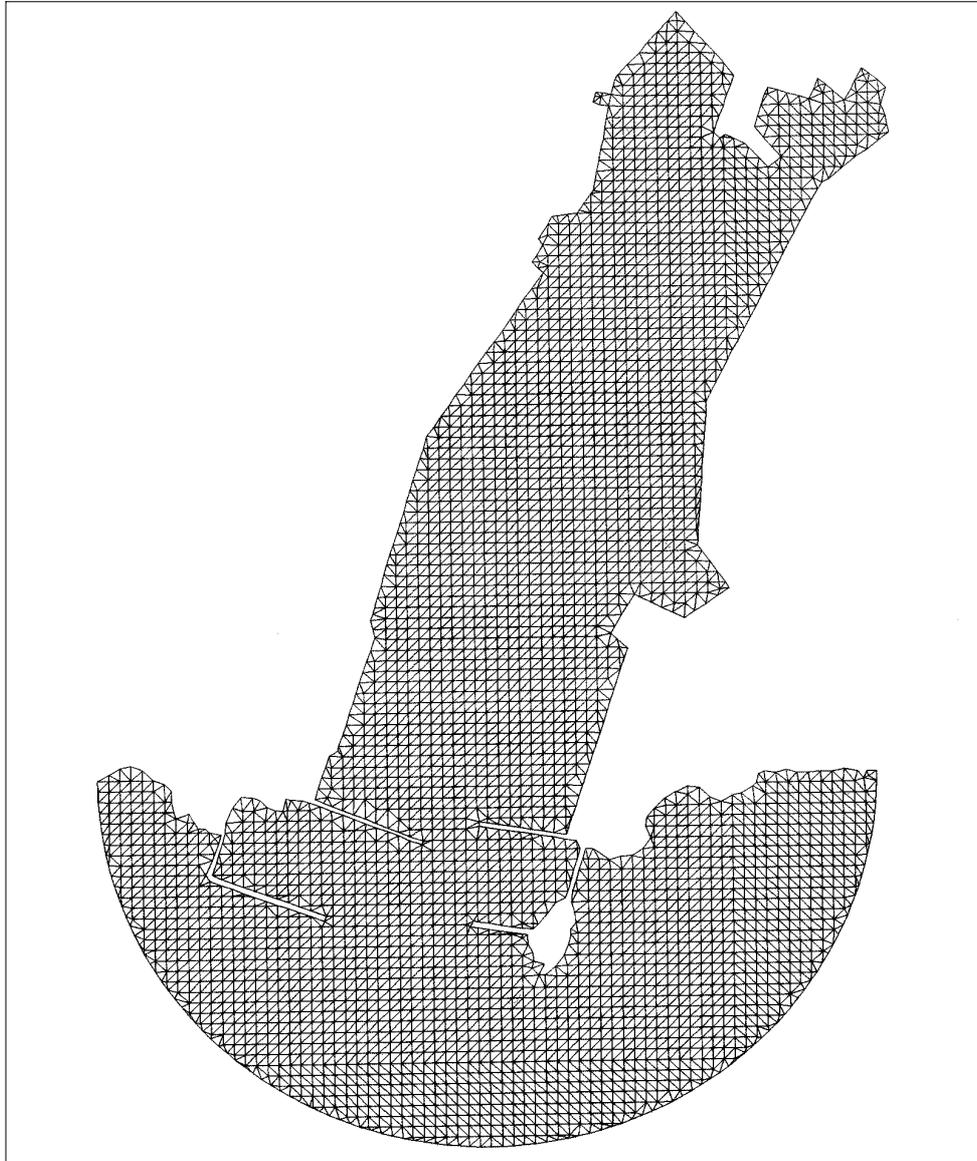
4.2 부진동 저감방안 적용시의 실험 분석

감천항의 부진동 저감을 위한 방법은 앞 절에서 기술한 바와 같이 대규모로 부두의 평면배치나 수심을 개조하지 않으면 공진구간의 설정을 통해 접근하는 것이 하나의 대책이 될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이를 위하여 감천항 방파제의 바깥부분 중 동방파제 시작점의 당강말과 두도, 서방파제 시작점의 자담말과 전면 암초를 연결한 공진방파제의 설치로 접근하기로 하였다. 공진 방파제는 워터프론트를 일반인에게 개방할 수 있는 여건을 구성할 수 있으며 두도 및 감천항 전면 암초를 관광 및 낚시터의 제공 등으로 활용할 수 있다는 부수적인 목적과 일치할 수 있으므로, 공영수산물도매시장과 중앙하수처리장 등과 연계하여 개발에 따른 불편을 대체공간제공으로 해소할 수 있는 기회를 가지게 되므로 계획여건은 좋다고 본다.

4.2.1 수치모델의 구성

수치모델은 4.1.2절에서 도입된 수심, 해안선 등 제반조건을 그대로 활용하면서 공진방파제를 외해의 해안경계조건으로 하여 모델을 구성하였다. 부진동의 저감을 위한 공진방파제는 혼성제형태로 하고 상부는 직립 케이슨을 도입하는 것으로 하여 이를 포함한 유한요소 격자망의 구성은 Fig. 4.25와 같다. 여기서 절점수와 요소수는 각각 3,675개와 6,855개이고, 개방경계상의 절점수는 111개로 이루어져 있고, 조정된 절점번호로 밴드폭은 441로 되었다.

항만반응특성을 파악하기 위하여 선택한 지점은 제3장 Fig. 3.6과 동일한 28 지점으로 하고 특히 부두개발과 관련된 S9~S12지점의 변화에 유의하였다.



구 분	Node 수	개방경계 Node수	요소수	매트릭스밴드폭
세부모델	3,675	111	6,855	441

Fig. 4.25 Finite element mesh for resonator model

4.2.2 수치실험 및 분석

2.4절에서 다양한 저감방안 중 현재의 항만조건에 대하여 공진방파제를 계획하도록 하여 모델을 수립하였고, 각 방향별로 동일 조건하에서 주파수에 대한 시뮬레이션을 실행하였다. 파향별 각 위치점간에 반응특성의 비교는 4개의 위치점을 그룹하여 나타내고 방향별 반응특성을 파향 S10°W, SSE, ESE 순으로 Fig. 4.26~Fig. 4.37이다. 감천항 방파제 바깥에서는 Fig. 4.26, Fig. 4.30, Fig. 4.34의 결과를 Fig. 4.28, Fig. 4.32, Fig. 4.36과 비교하면, S10°W에서 입사시 서방파제측 공진공간에서 300~500sec의 주기에서 이전보다 높은 반응을 나타내었는데 이는 공진만에서 파에너지를 흡수하고 있음을 알 수 있다. 이 주기에 대해서 내항측 관측점인 S16~S20(Fig. 4.4 및 Fig. 4.5 참조)에서는 60%까지 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 4.31 및 Fig. 4.32, Fig. 4.35 및 Fig. 4.36에서와 같이 다른 파향에 대해서도 유사한 경향을 나타내었으며 특히, 내항측의 최내단인 S16~S20지점에서 감쇄효과가 탁월한 것으로 분석되었다.

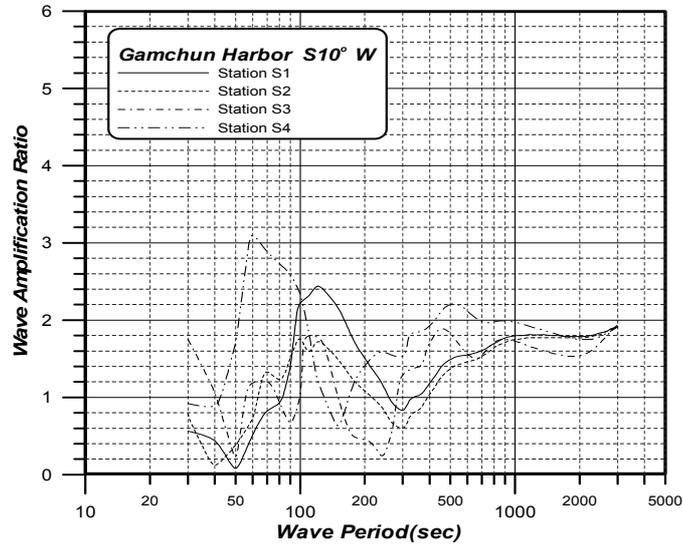
공진방파제의 건설효과에 대한 분석을 위하여 Fig. 4.38~Fig. 4.51에서 각 위치점 별로 개발전후의 방향별 반응특성을 정리하였다. 외항에 위치한 S2에서는 ESE방향에 대하여(Fig. 4.38 참조) 공진방파제로부터 반사로 인해 70~110sec의 주기에서 증폭비가 매우 높게 나타났으며, 300~500sec에서도 25%이상으로 높아졌다. Fig. 4.40의 S5는 동방파제측의 공진공간으로 주기 100~200sec에서 비교적 반응이 높아진 것으로 알 수 있으며, Fig. 4.39는 S10°W 방향에서 주기 300~500sec에서 반응이 커진 것을 나타낸다. 그 이외의 지점에 대한 비교 분석에서는 전반적으로 20~50%까지 증폭비를 낮출 수 있음을 알았다. 특히, Fig. 3.6의 감천항 최내단측인 S20에서는 ESE파향에서 335sec의 주기에 대한 증폭비가 2.0에서 1.0으로 감쇄되어 50%로 떨어진 것을 알 수

있다.

335sec 및 636sec의 주기에 대한 부진동의 평면적인 분포특성은 Fig. 4.52 및 Fig. 4.53에 파향별로 2차원 및 3차원으로 나타내었다. 제3모드(fifth harmonic) 및 제2모드(third harmonic)가 나타나는 것은 변화가 없으나 공진 방파제 내외측에 반응형태가 약간 달라져 있음을 알 수 있다. 먼저 335sec의 주기에 대한 반응특성을 비교해보면, 부두개발지역에서 S10°W, SSE, ESE순으로 증폭비가 각각 1.9, 1.4, 1.3에서 공진방파제의 건설 후에는 1.4, 0.9, 0.8로 24~38% 정도가 감쇄되는 것으로 나타났다. 이에 대응하는 서쪽의 선기조합 부두에서도 동일한 양상을 나타내었다. 한편, 최내단측인 남성조선, 한보철강 부두 근처의 S16~S20에서는 최고 50%정도의 감쇄효과를 나타내는 것으로 분석되었다. 제2모드에 해당하는 636sec주기에 대한 반응에서는 신설부두 전면에서 각각 1.6, 1.4, 1.4에서 1.2, 0.9, 0.9로 줄어들어 25~36% 정도 감쇄하는 것으로 나타났고, 최내단측에서는 이보다 더 감쇄되는 효과를 나타내었다.

이상과 같이 공진방파제의 건설에 대한 부진동의 특성을 수치실험으로 계산한 결과를 각 파향별, 위치점별로 요약하면 Table 4.3 및 Table 4.4와 같다. 반응의 크기와 주기가 위치에 따라 차이가 있으나 현재의 항만조건보다 최고 50%까지 저감시킬 수 있으며 평균적으로는 30%이상을 감쇄시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

gc225a-1-4



gc225a-5-8

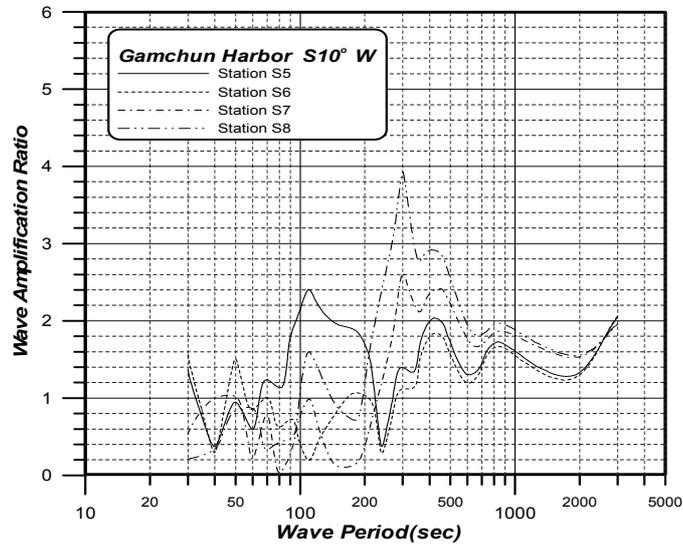
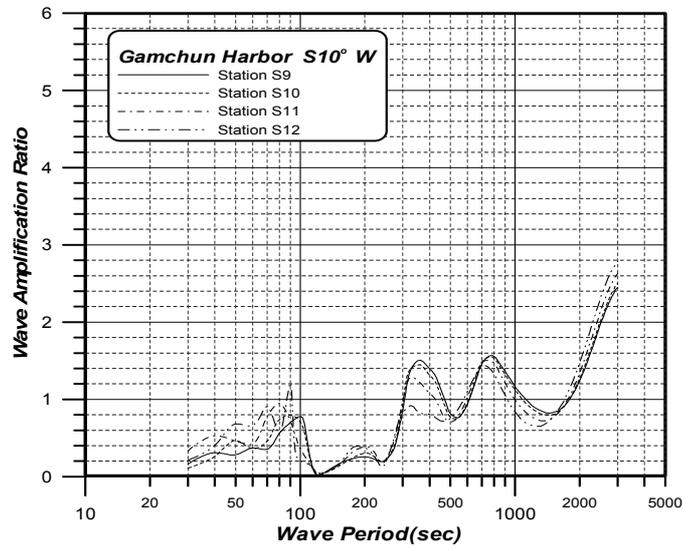


Fig. 4.26 Response character of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8)
(after Resonant breakwater construction, S10°W)

gc225a-9-12



gc225a-13-16

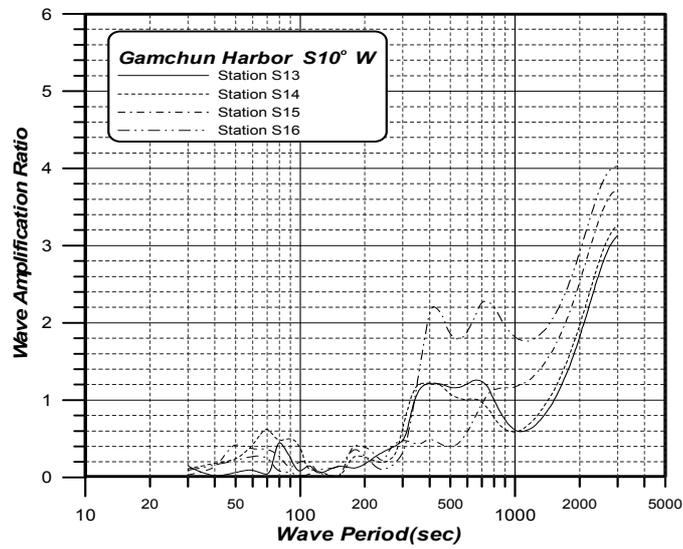
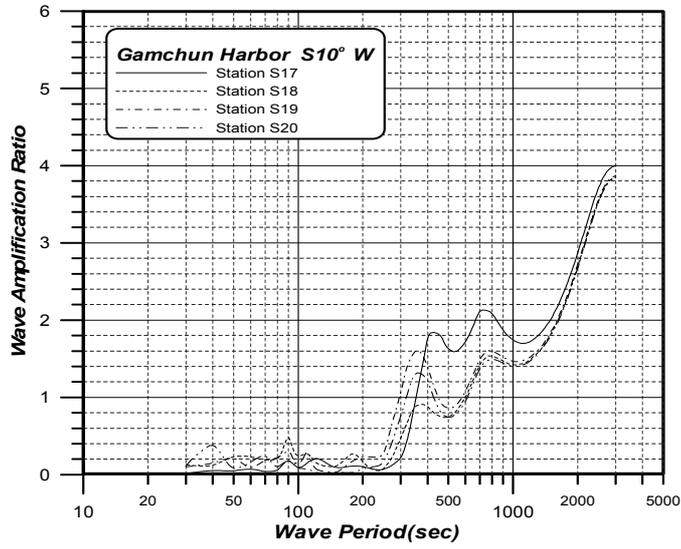


Fig. 4.27 Response character of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16)
(after Resonant breakwater construction, S10°W)

gc225a-17-20



gc225a-21-24

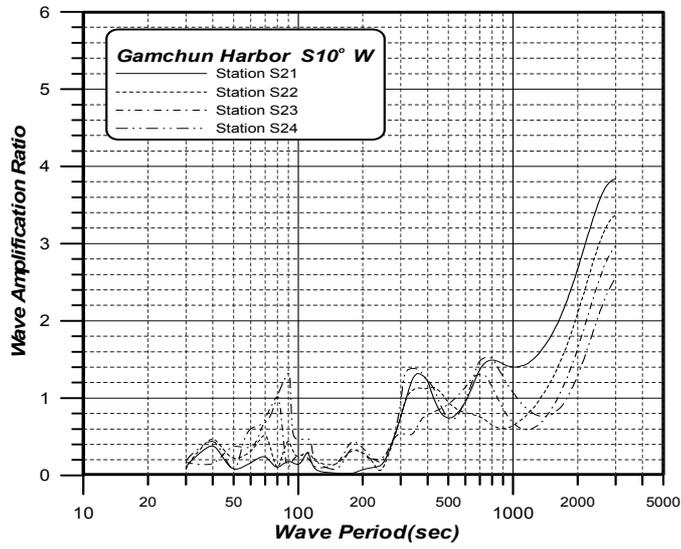


Fig. 4.28 Response character of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24)
(after Resonant breakwater construction, S10°W)

gc225a-25-28

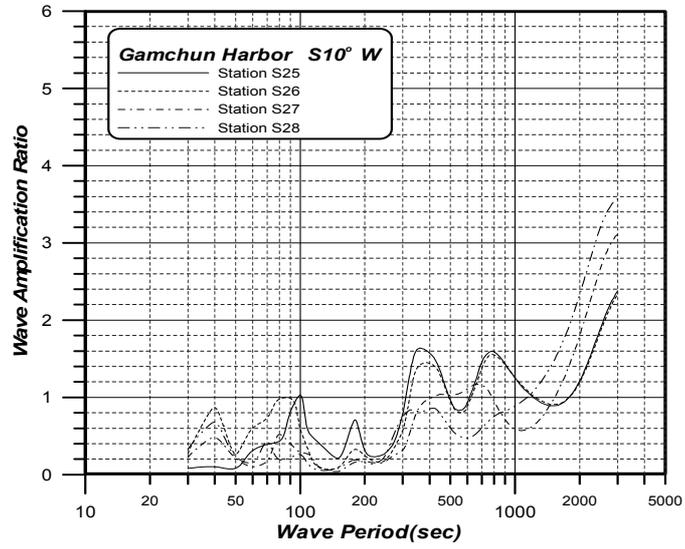


Fig. 4.29 Response character of selected station(25,26,27,28)
(after Resonant breakwater construction, S10°W)

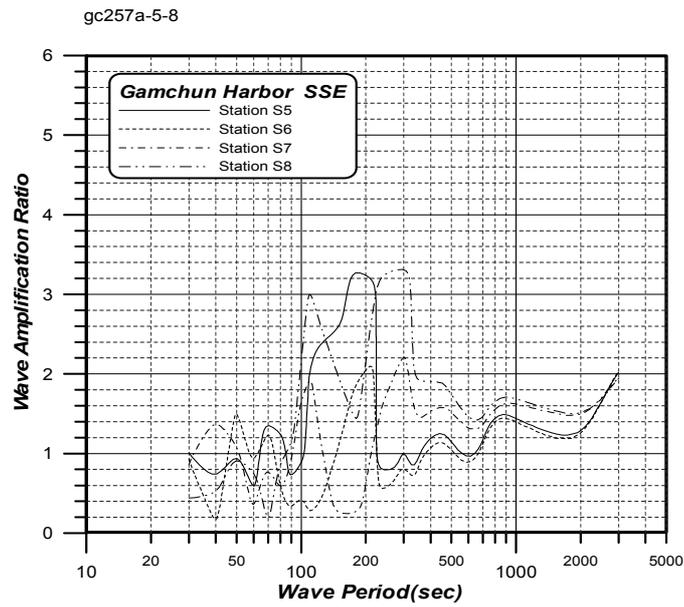
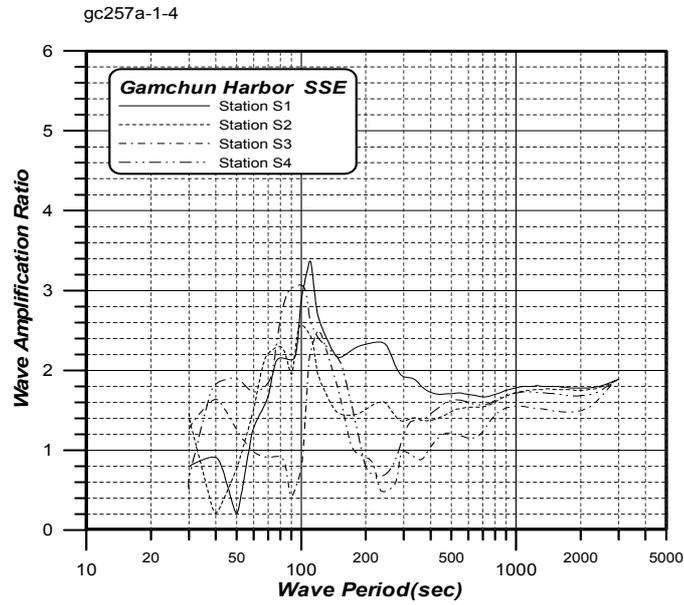


Fig. 4.30 Response character of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8)
(after Resonant breakwater construction, SSE)

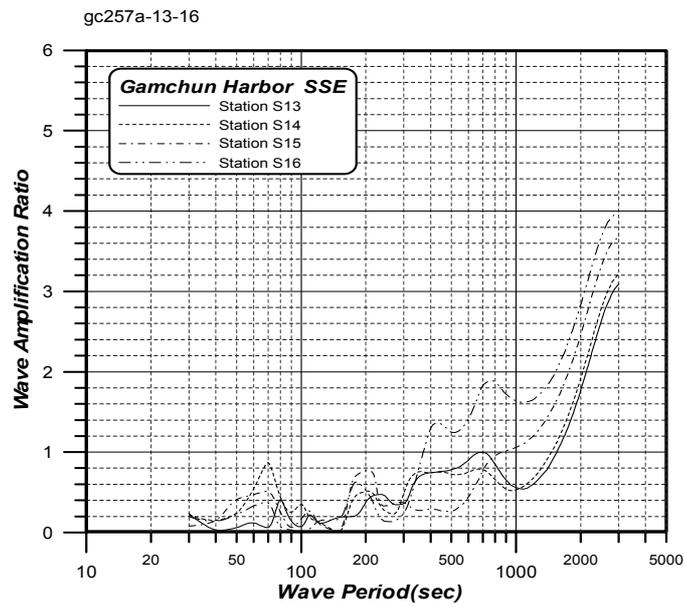
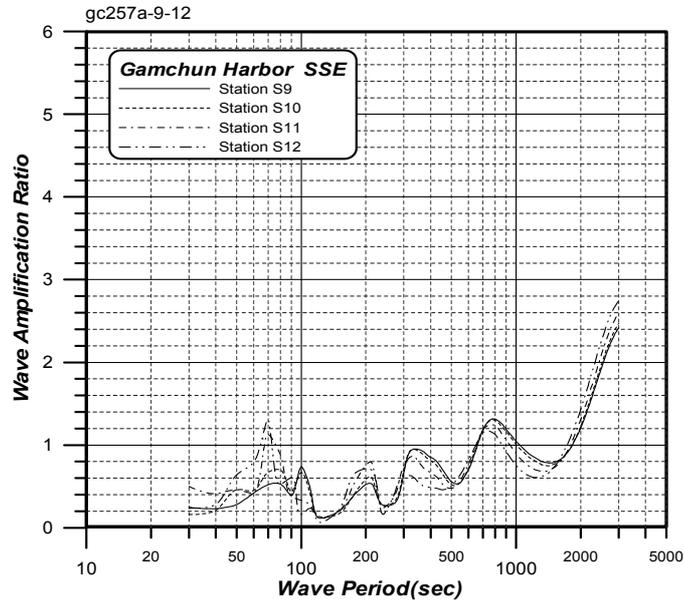


Fig. 4.31 Response character of selected station(10,11,12,13,14,15,16)
(after Resonant breakwater construction, SSE)

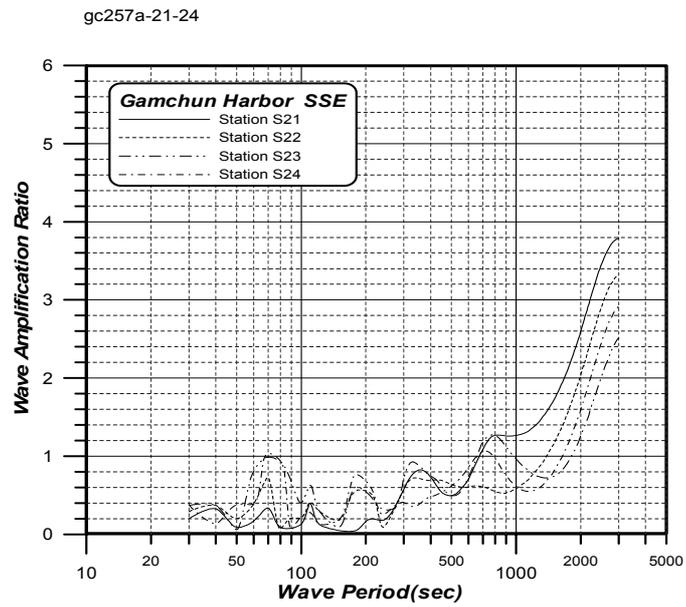
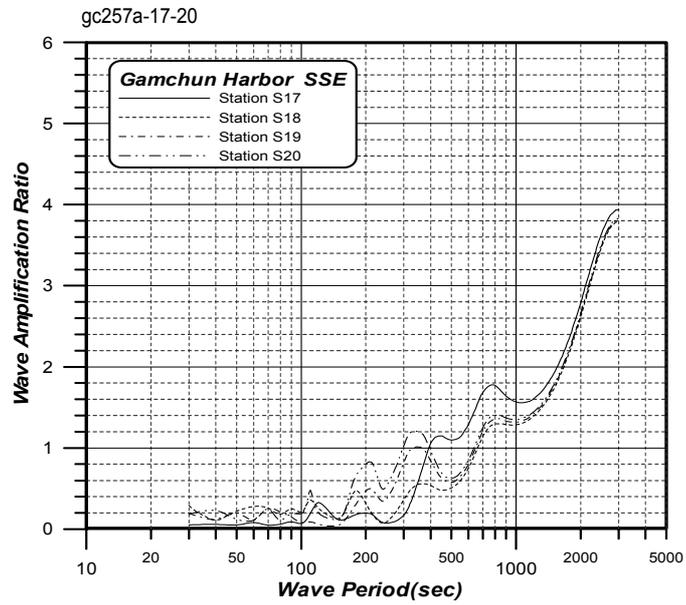


Fig. 4.32 Response character of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24)
(after Resonant breakwater construction, SSE)

gc257a-25-28

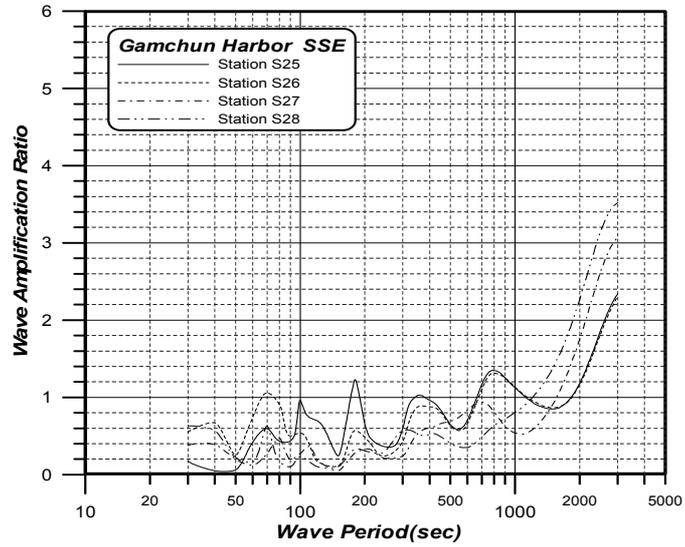


Fig. 4.33 Response character of selected station(25,26,27,28)
(after Resonant breakwater construction, SSE)

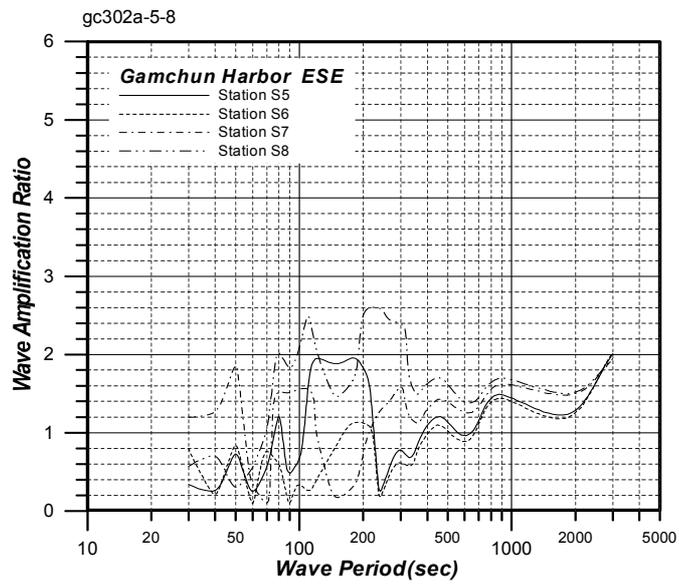
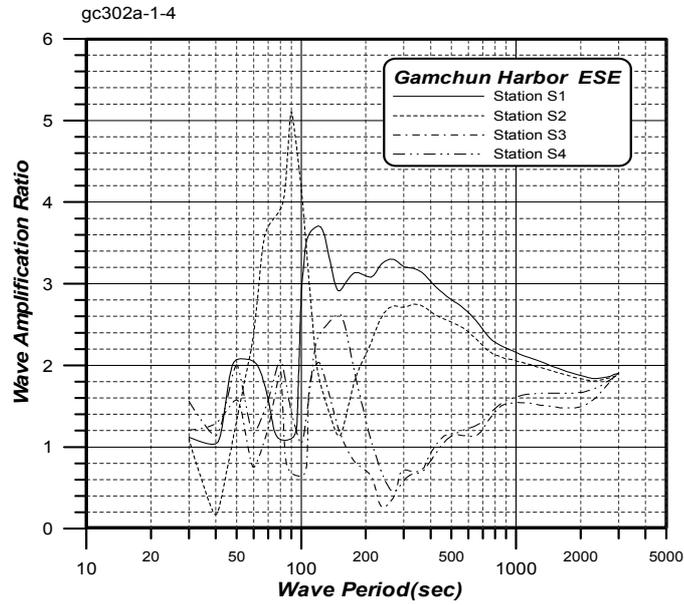


Fig. 4.34 Response character of selected station(1,2,3,4,5,6,7,8)
(after Resonant breakwater construction, ESE)

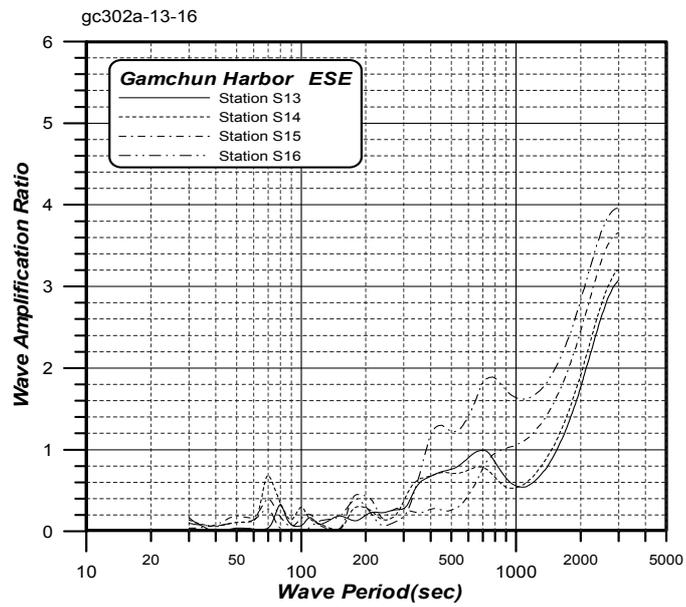
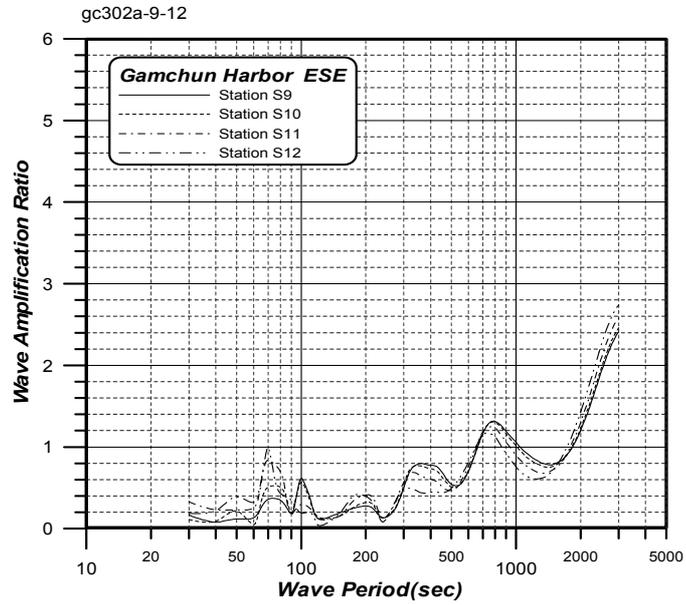


Fig. 4.35 Response character of selected station(9,10,11,12,13,14,15,16)
(after Resonant breakwater construction, ESE)

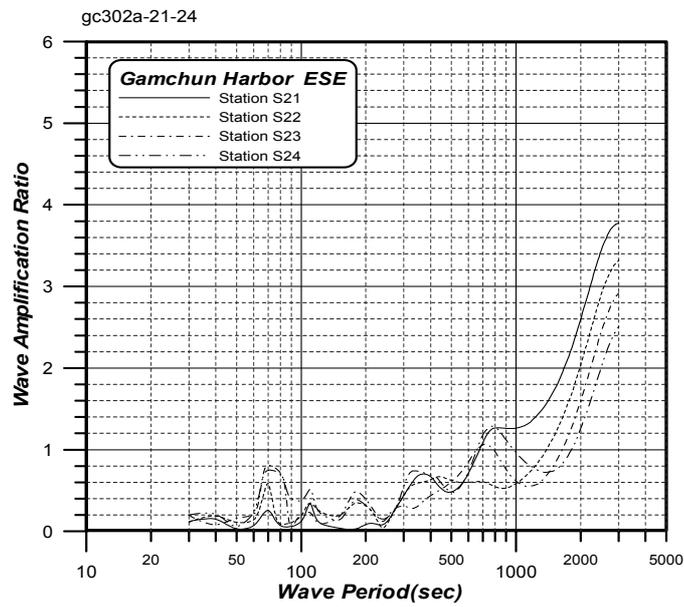
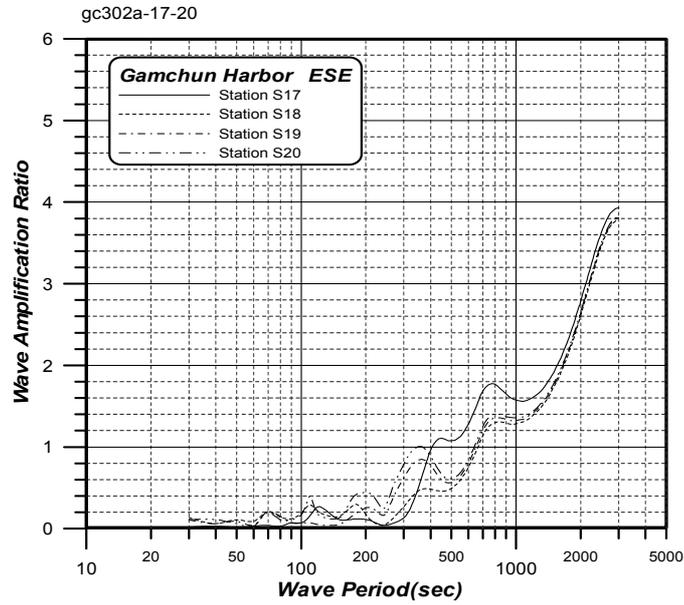


Fig. 4.36 Response character of selected station(17,18,19,20,21,22,23,24)
(after Resonant breakwater construction, ESE)

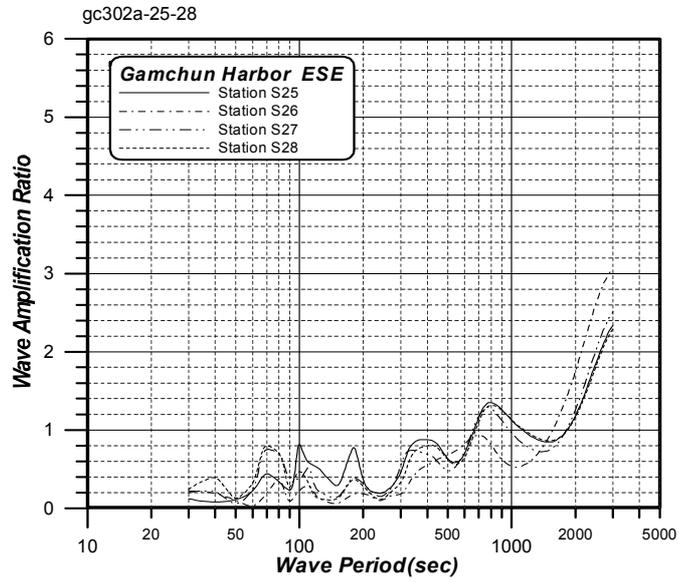


Fig. 4.37 Response character of selected station(25,26,27,28)
 (after Resonant breakwater construction, ESE)

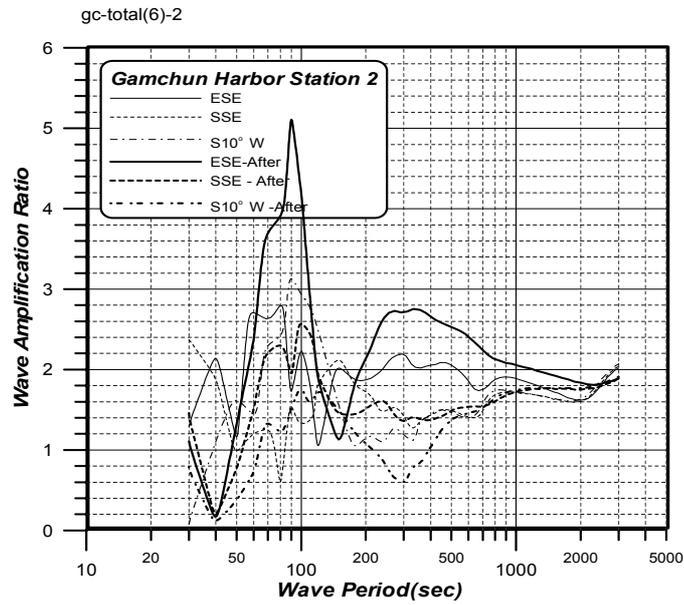
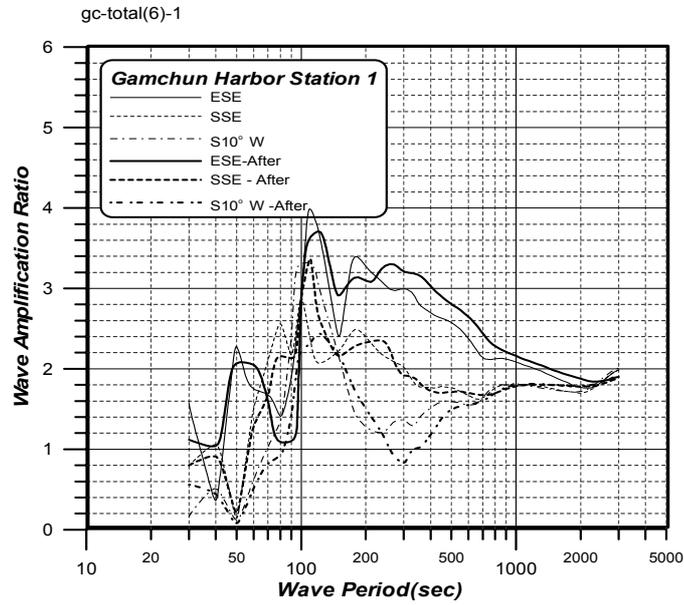


Fig. 4.38 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 1,2)

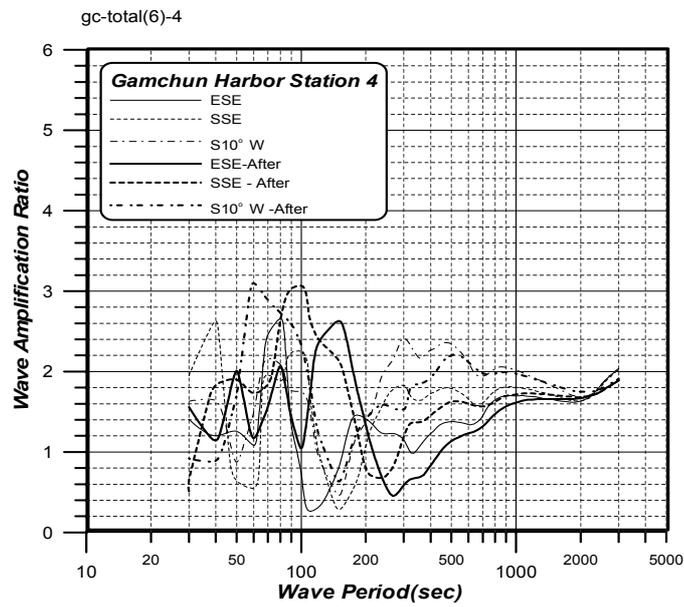
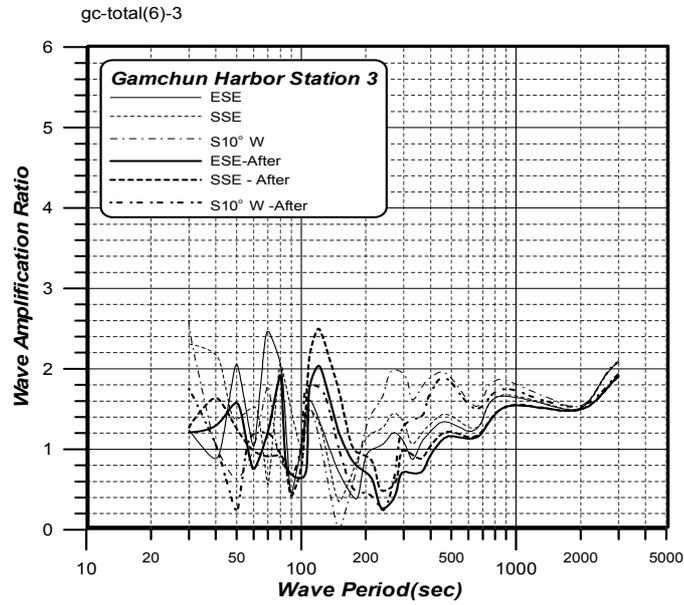


Fig. 4.39 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 3,4)

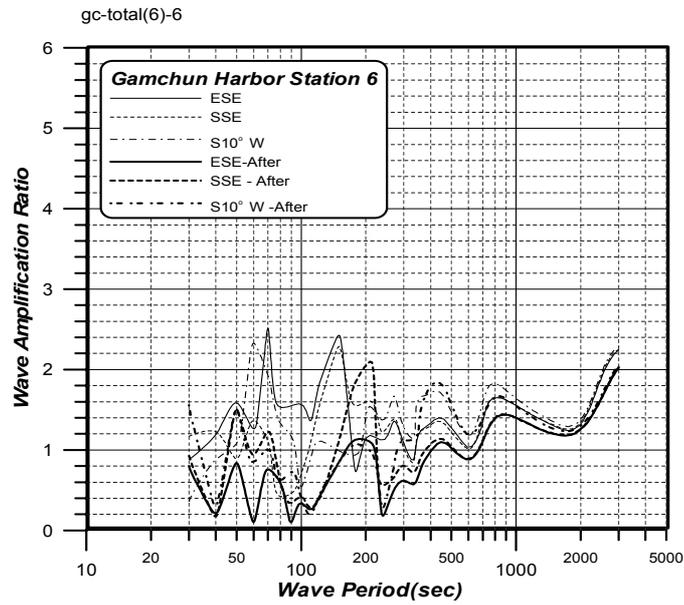
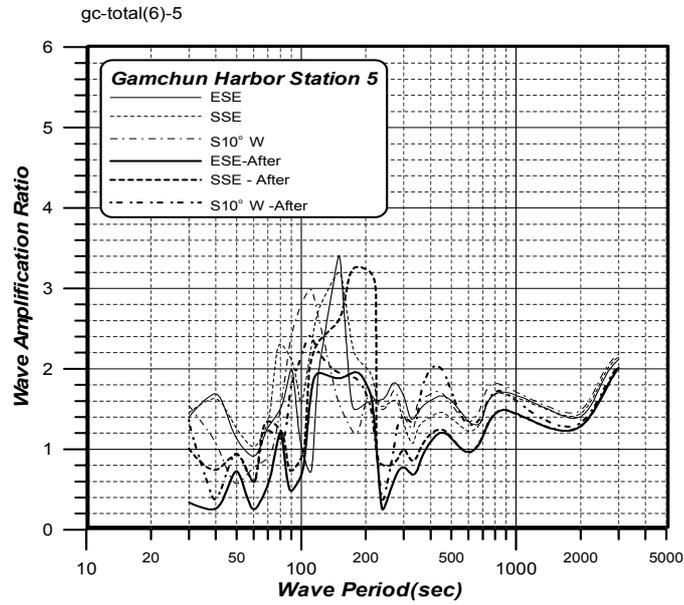


Fig. 4.40 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 5,6)

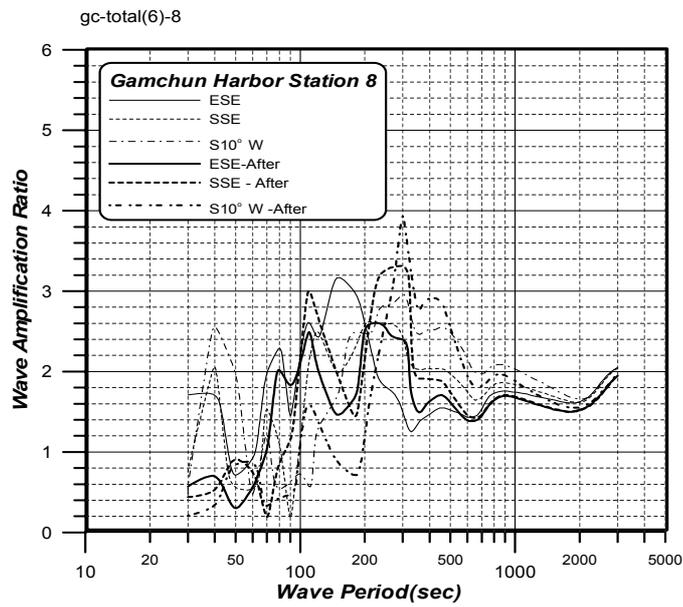
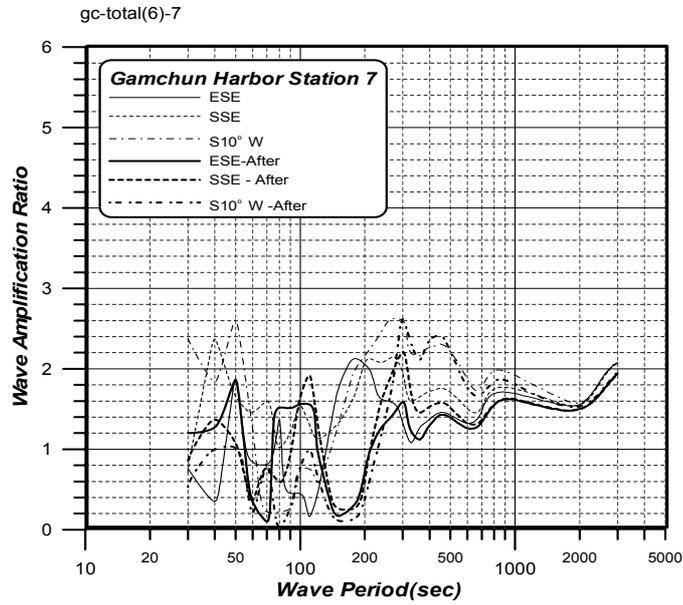


Fig. 4.41 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 7,8)

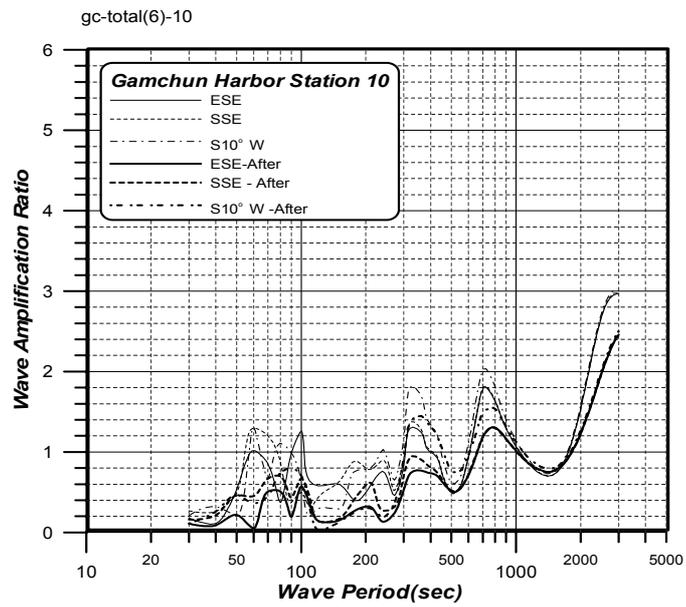
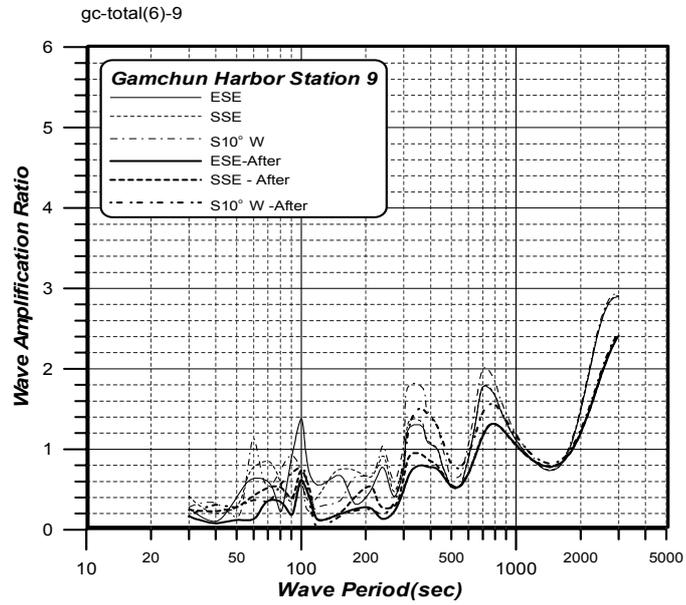


Fig. 4.42 Comparison of harbor respect to wave direction (after harbor construction and breakwater alteration, St. 9,10)

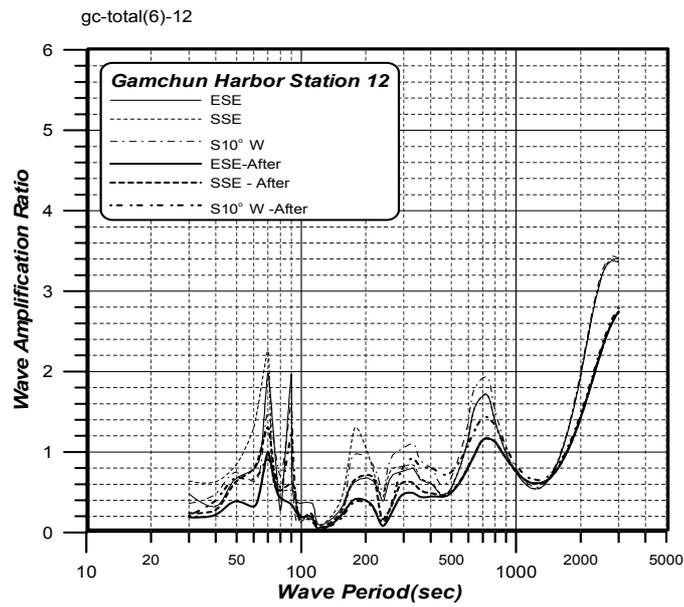
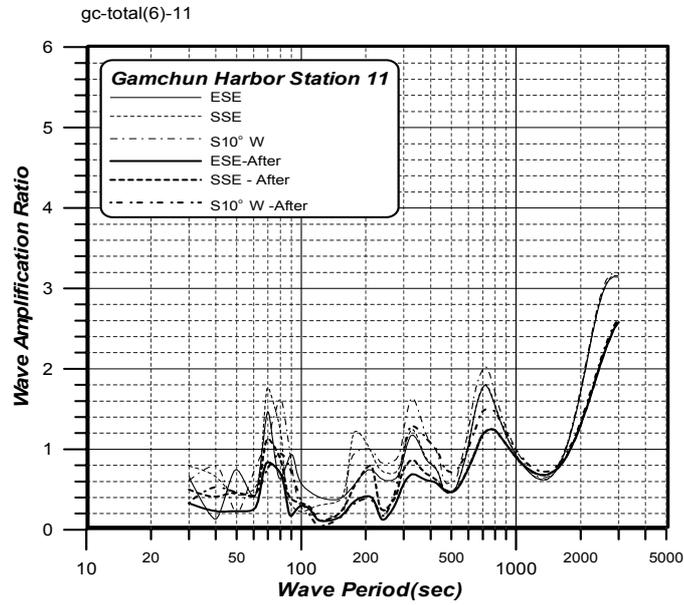


Fig. 4.43 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 11,12)

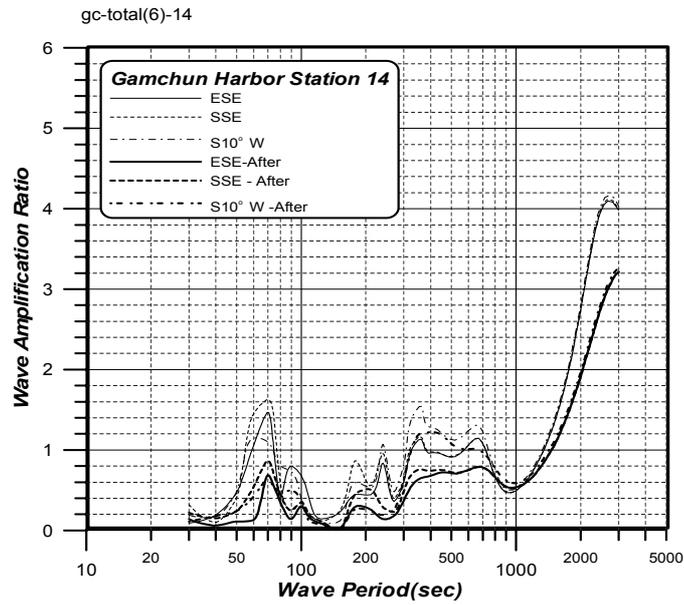
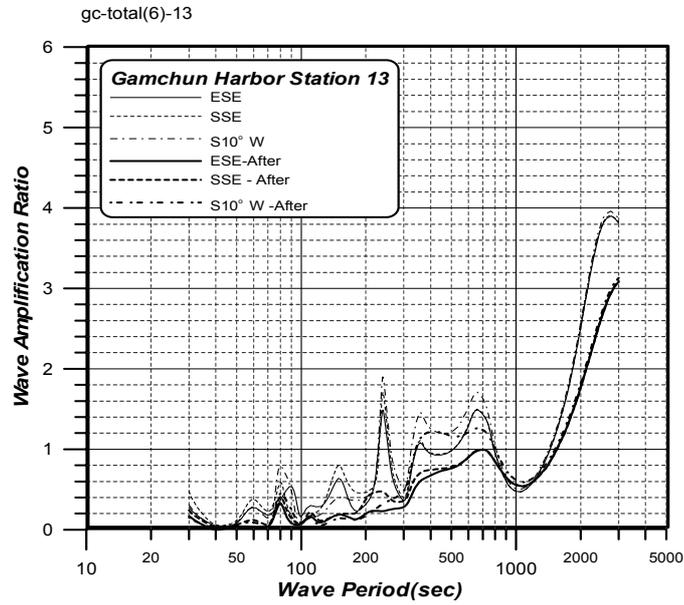


Fig. 4.44 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 13,14)

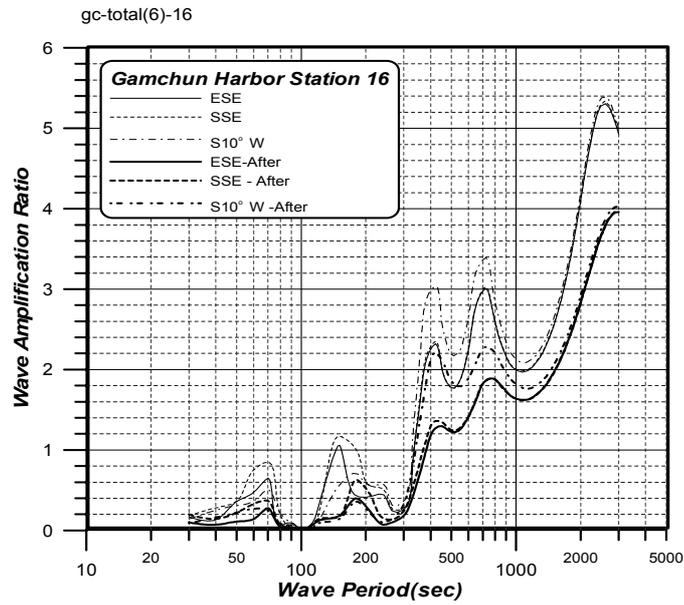
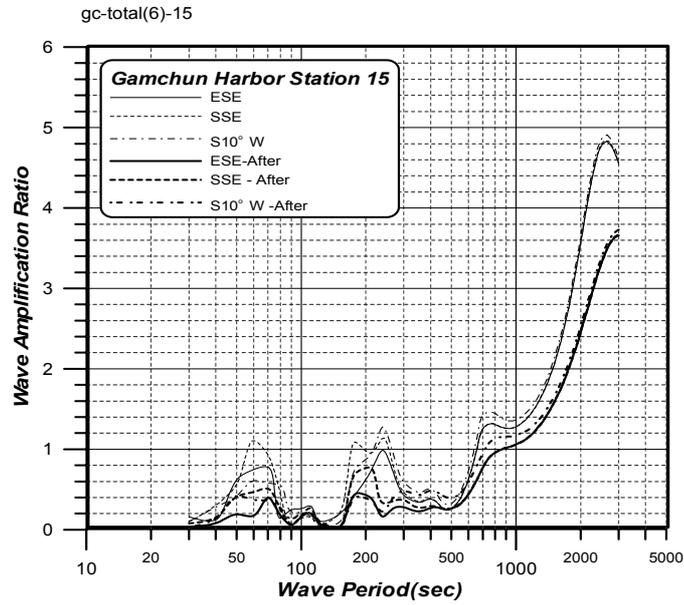


Fig. 4.45 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 15,16)

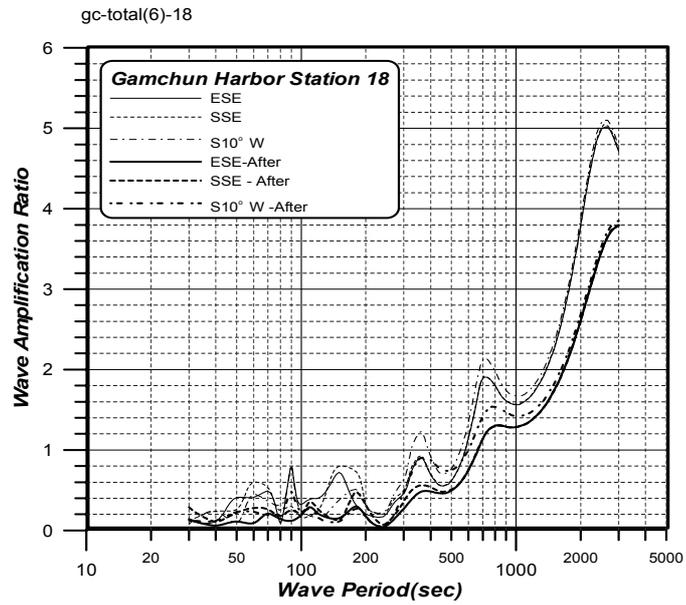
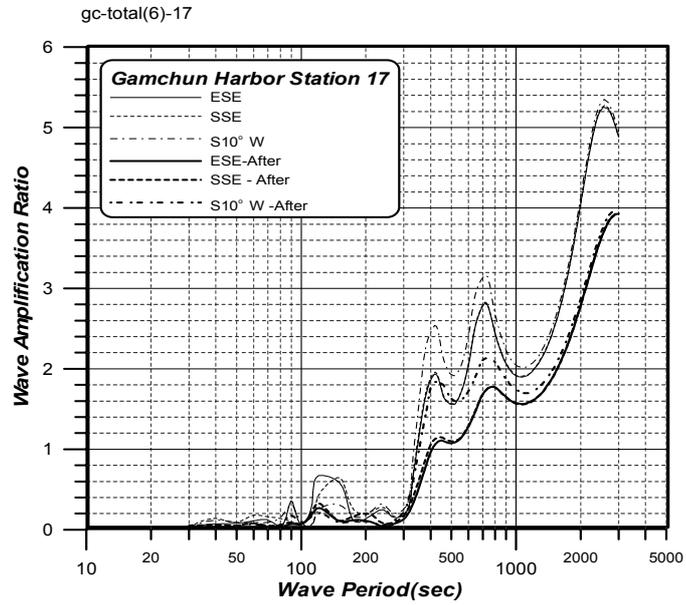


Fig. 4.46 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 17,18)

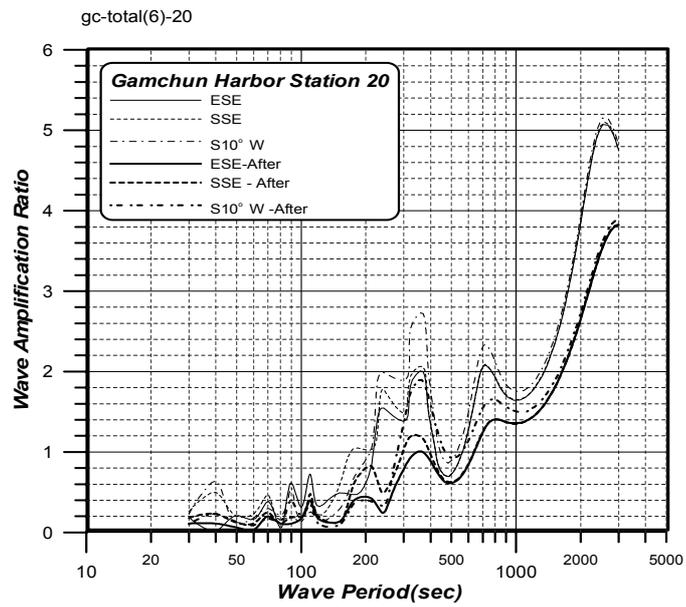
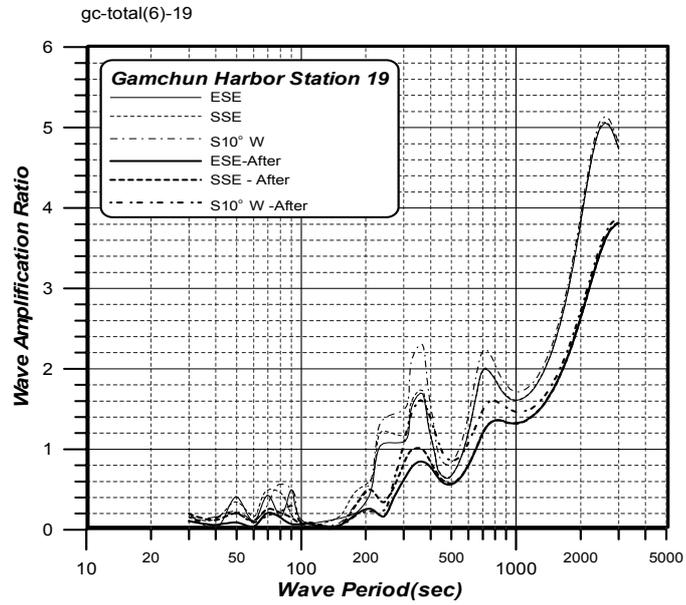


Fig. 4.47 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 19,20)

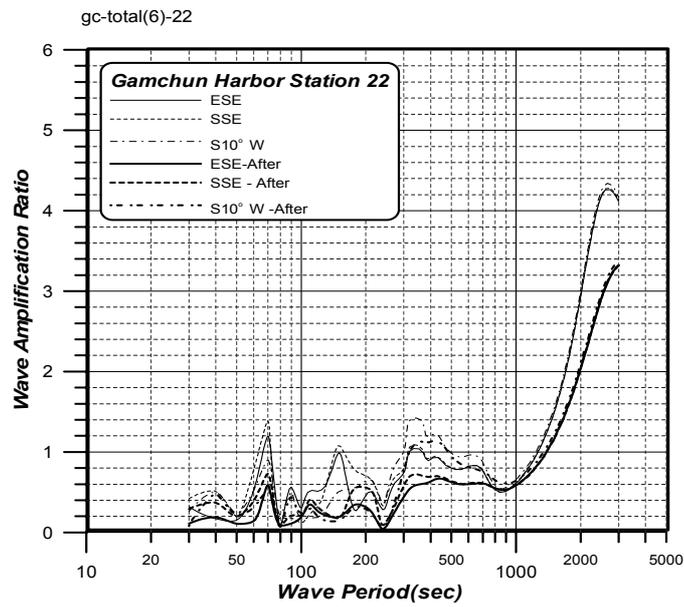
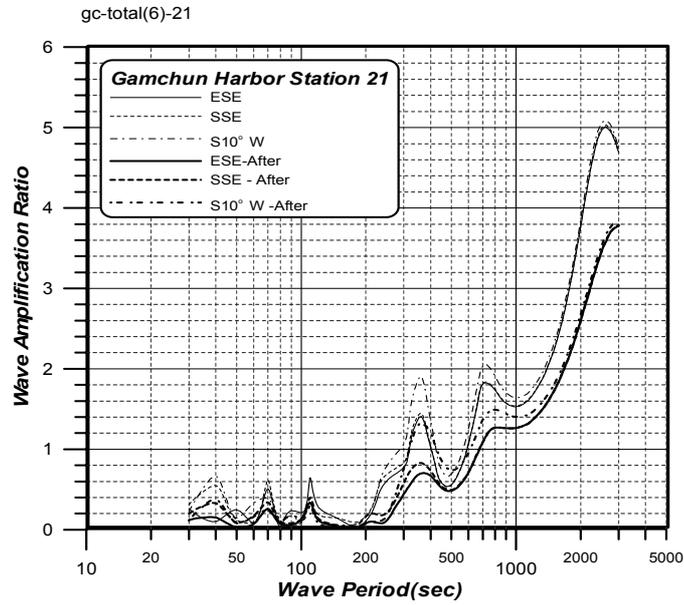


Fig. 4.48 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 21,22)

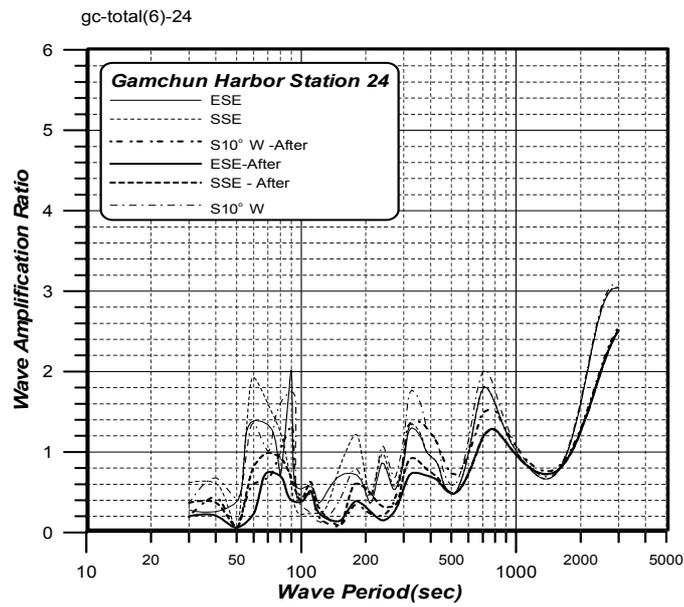
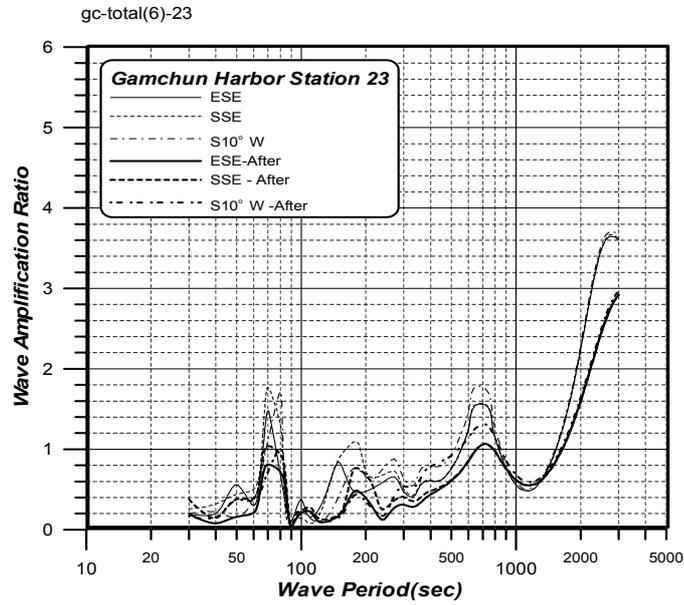


Fig. 4.49 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 23,24)

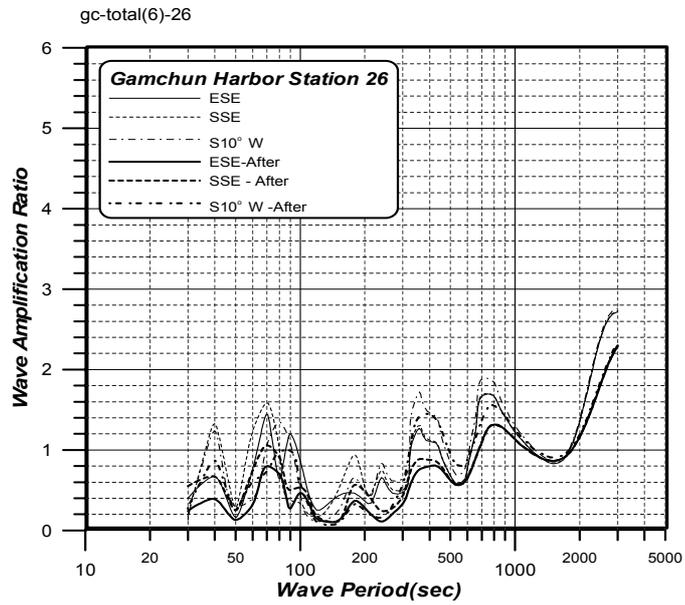
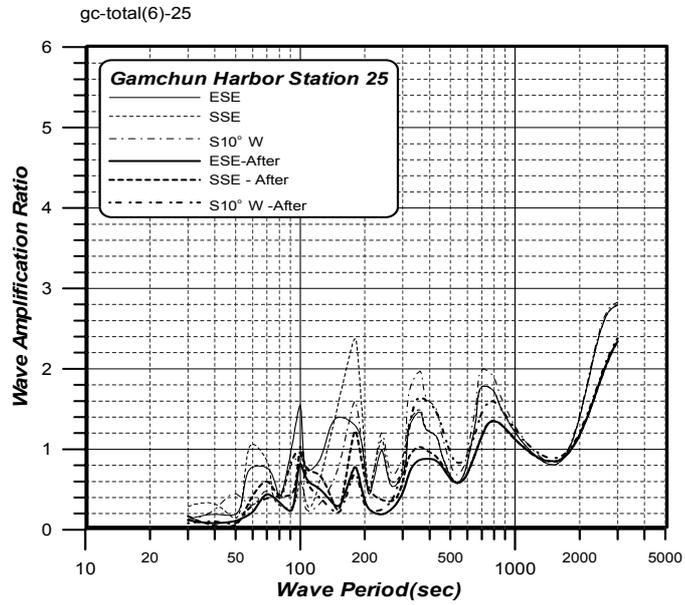


Fig. 4.50 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 25,26)

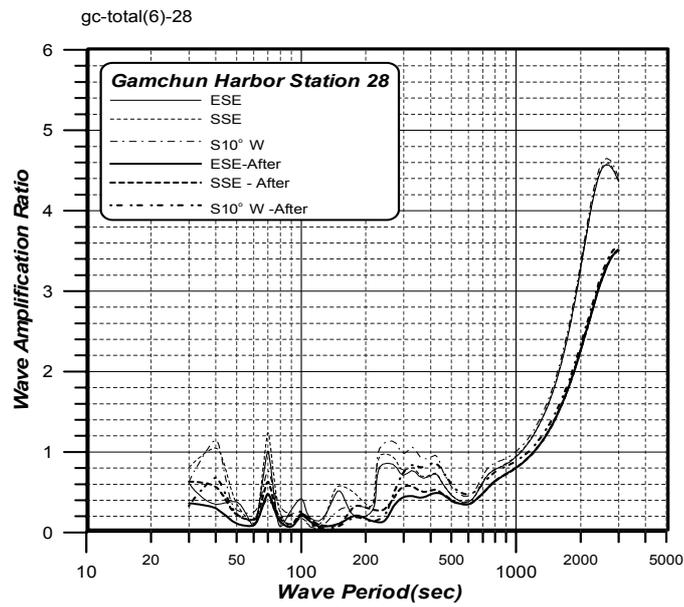
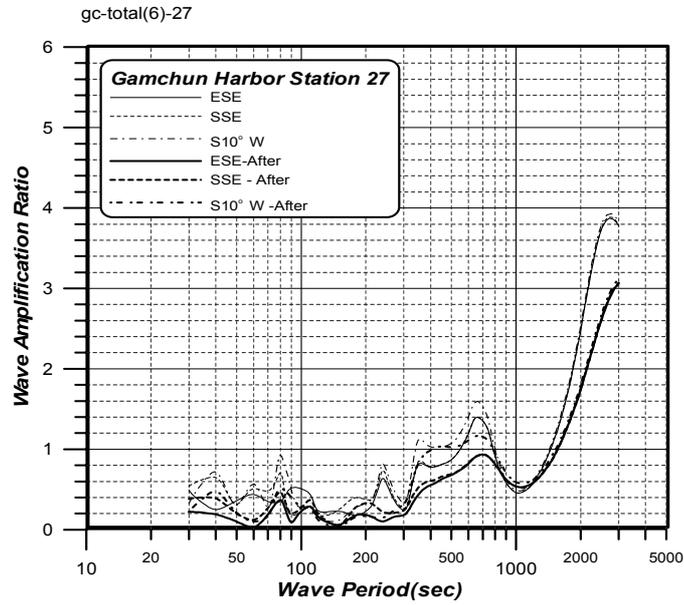


Fig. 4.51 Comparison of harbor respect to wave direction
(after harbor construction and breakwater alteration, St. 27,28)

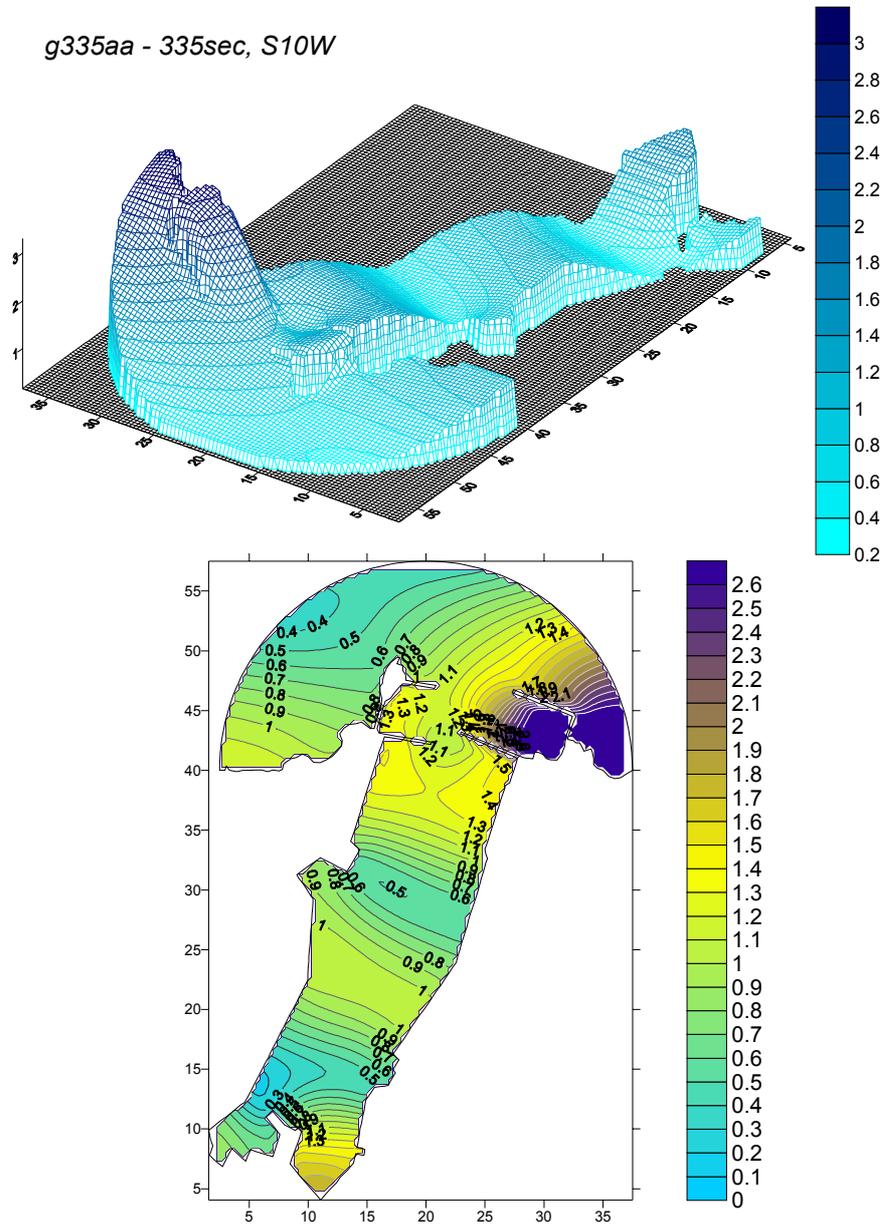


Fig. 4.52a Calculated response amplification ratio
(after resonant breakwater, 335sec, S10°W)

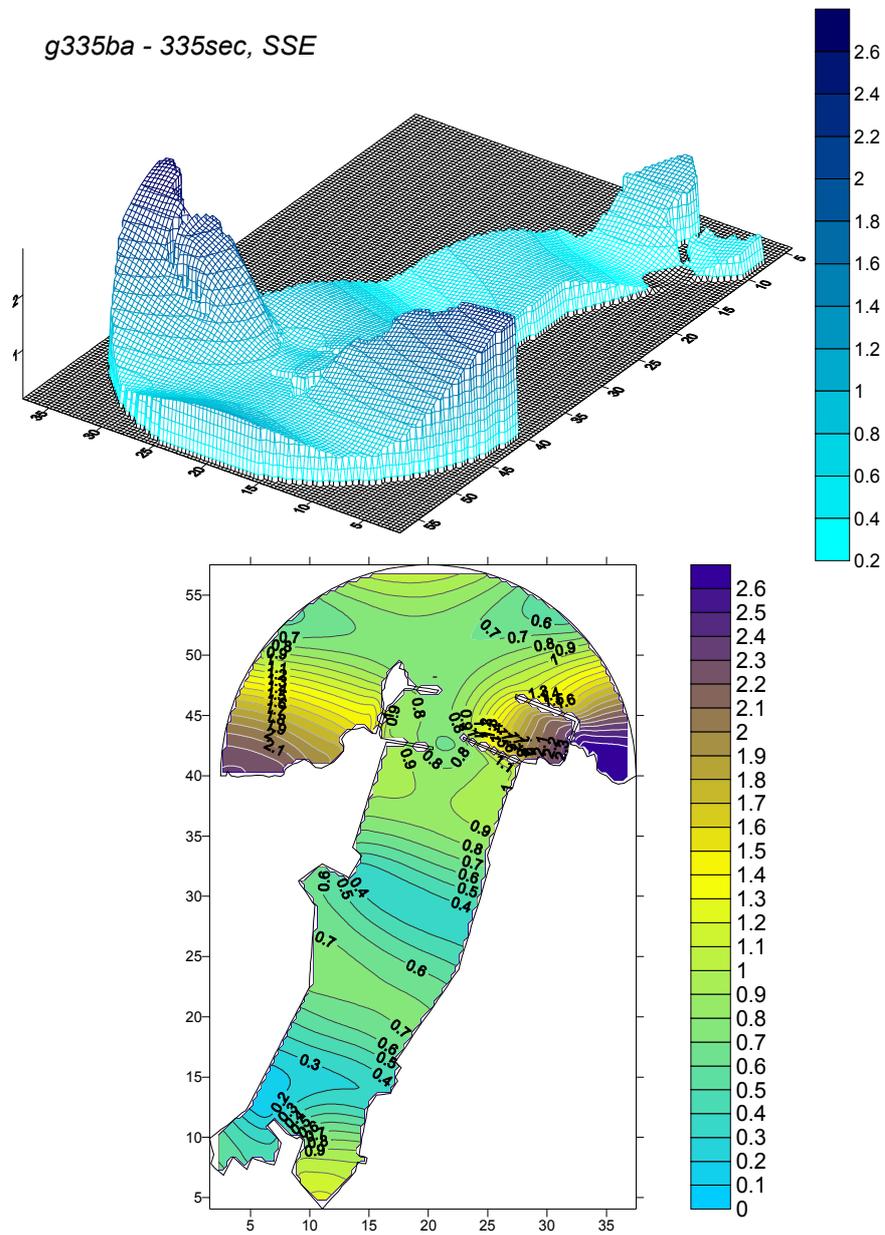


Fig. 4.52b Calculated response amplification ratio
(after resonant breakwater, 335sec, SSE)

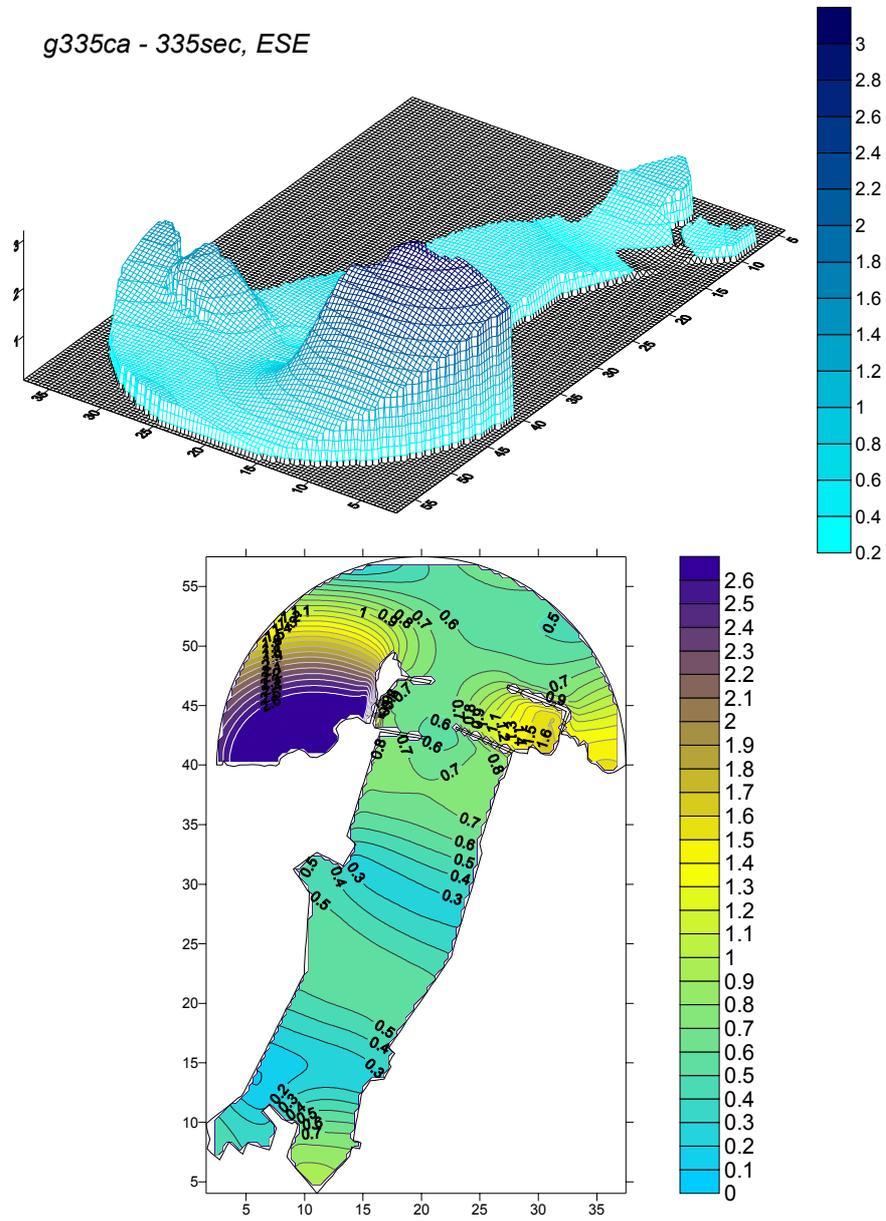


Fig. 4.52c Calculated response amplification ratio
(after resonant breakwater, 335sec, ESE)

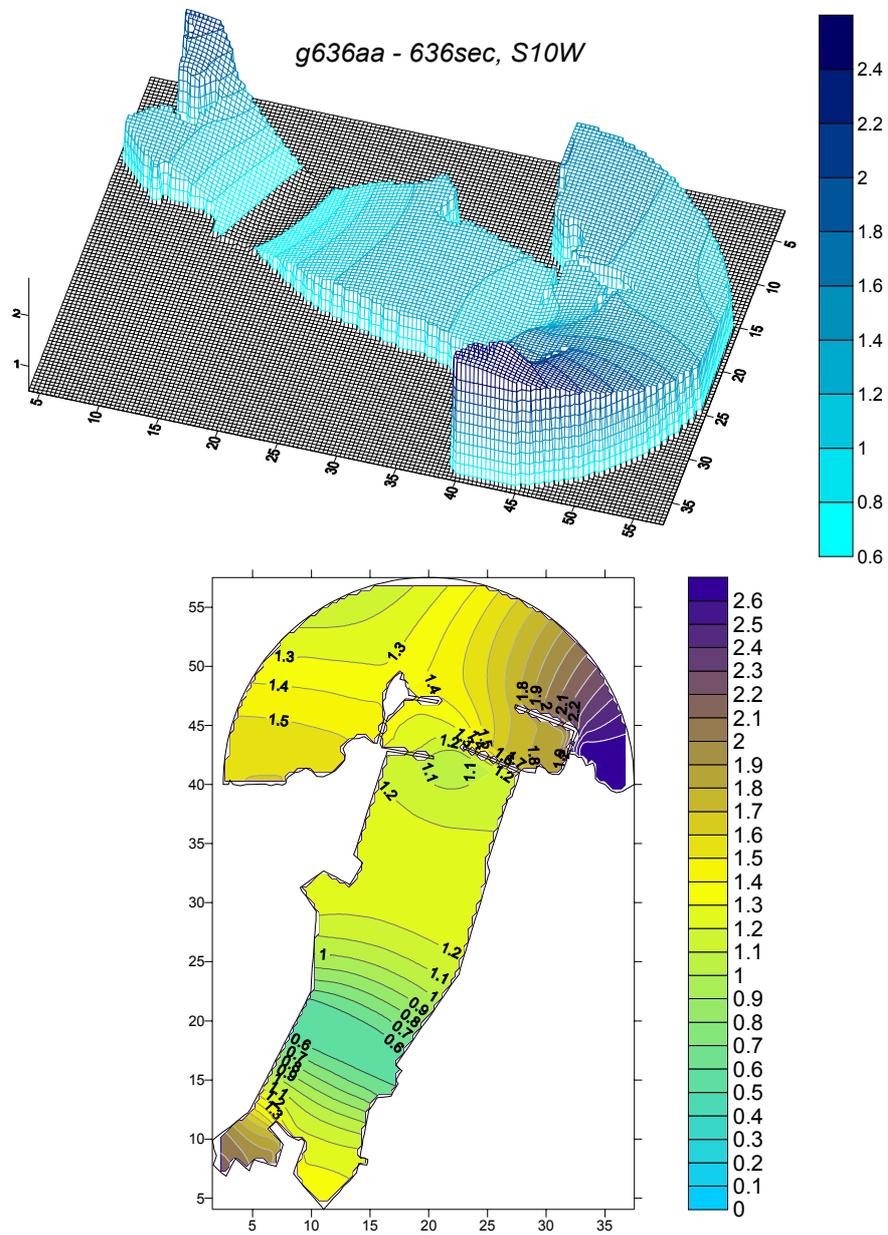


Fig. 4.53a Calculated response amplification ratio
(after resonant breakwater, 636sec, S10°W)

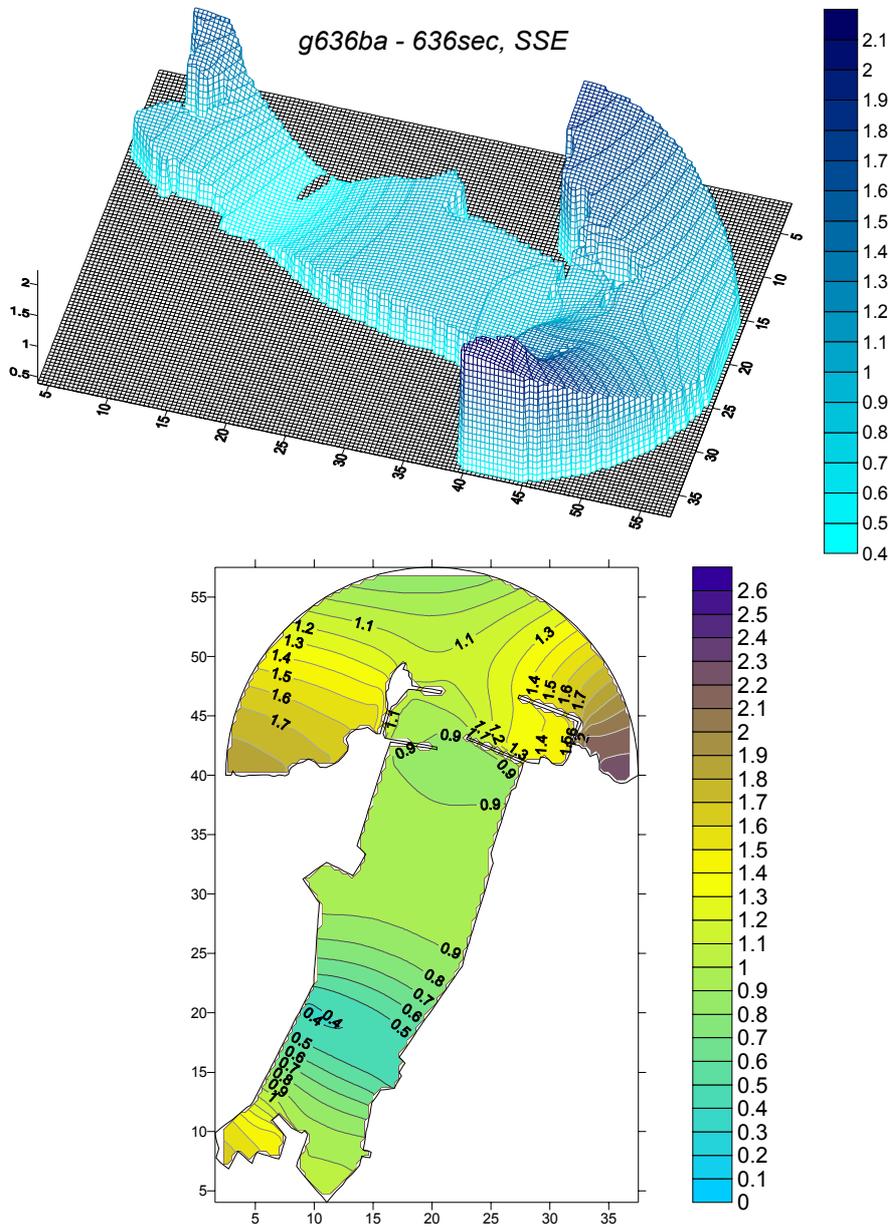


Fig. 4.53b Calculated response amplification ratio
(after resonant breakwater, 636sec, SSE)

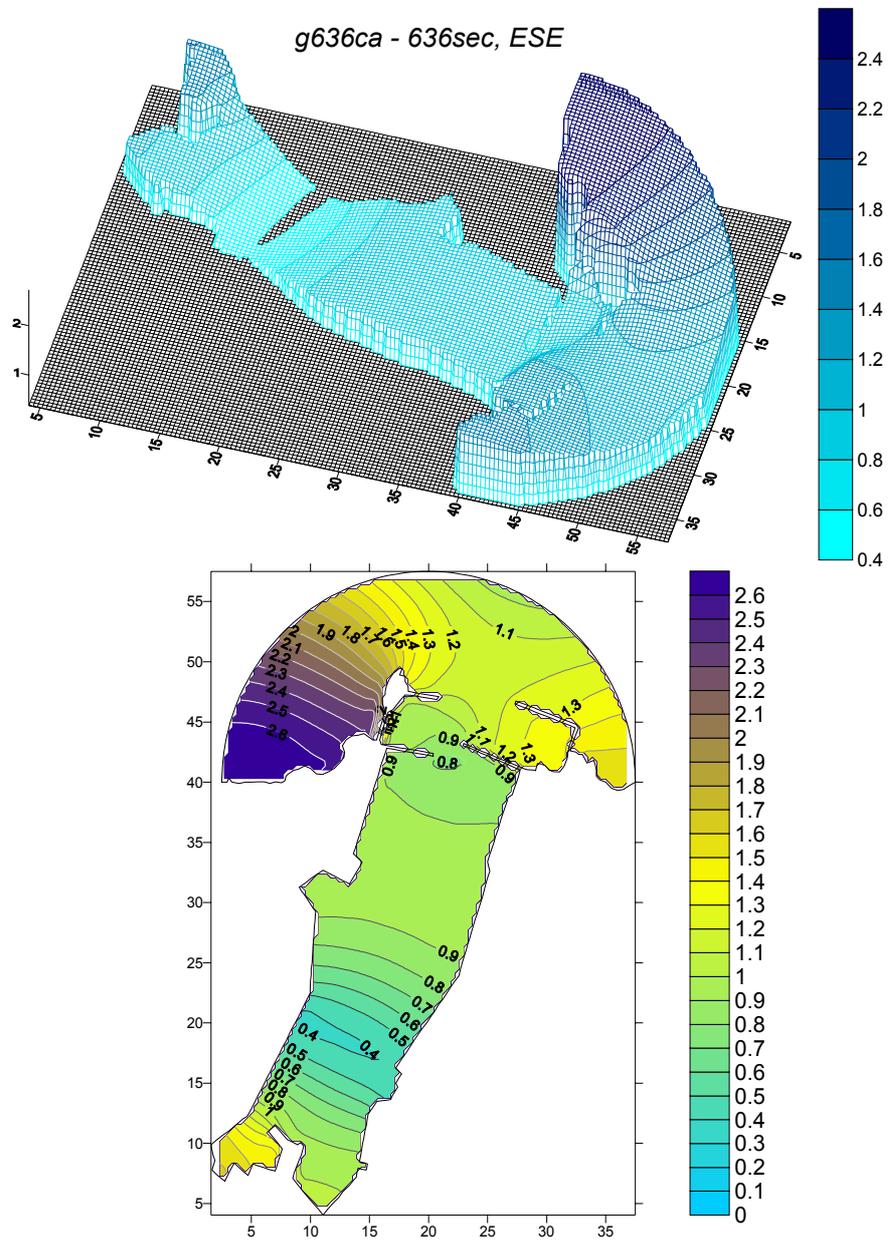


Fig. 4.53c Calculated response amplification ratio
(after resonant breakwater, 636sec, ESE)

Table 4.3 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor
(after resonant breakwater, S1~S14)

No. of data	Resonant Period in min.(relative amplitude ratio)		
	ESE-After B/W	SSE-After B/W	S10°W-After B/W
1	52(2.09),130(3.74), 185(3.18),280(3.2)	40(0.91),80(2.16),110(3.37),240(2.35),540(1.72),1260(1.81)	120(2.44),1260(1.81),3000(1.91)
2	89(4.12),270(2.73),330(2.75),3000(1.89)	80(2.3),100(2.57),240(1.61),330(1.41),1400(1.77)	70(1.33),100(1.76),120(1.72),3000(1.91)
3	49(4.12),78(1.94),120(2.04),300(0.72),510(1.16),1020(1.55),3000(1.91)	40(1.64),80(0.92),120(2.5),300(0.99),480(1.22),1000(1.55),3000(1.92)	70(1.2),110(1.8),450(1.89),900(1.75),3000(1.94)
4	50(2.01),80(2.07),150(2.63),1600(1.66),3000(1.89)	50(1.9),100(3.07),515(1.63),1140(1.73),3000(1.89)	60(3.1),240(1.59),540(2.2),870(1.99),3000(1.91)
5	50(0.73), 80(1.21), 120(1.95), 180(1.96), 290(0.79),450(1.21),880(1.5),3000(2.01)	50(0.94),70(1.35),180(3.27),300(1),450(1.25),900(1.49),3000(2.02)	50(0.95),70(1.24),110(2.41),300(1.4),420(2.04),840(1.73),3000(2.05)
6	50(0.84),70(0.76),100(0.34),180(1.13),300(0.62),450(1.1),880(1.45),3000(2.02)	50(1.5),70(1.23),100(0.42),210(2.1),3000(0.81),450(1.14),870(1.44),3000(2.03)	50(1.51),70(1.01),90(0.73),180(1.07),420(1.84),840(1.67),3000(2.06)
7	50(1.86),80(1.52),105(1.56),300(1.59),450(1.43),930(1.62),3000(1.94)	40(1.37),70(0.77),110(1.92),300(2.21),450(1.58),930(1.63),3000(1.94)	50(1.02),70(0.81),110(0.99),300(2.62),450(2.42),840(1.87),3000(1.96)
8	38(0.72),79(2.03),110(2.49),220(2.59),450(1.71),900(1.7),3000(1.95)	50(0.91),110(3),300(3.31),900(1.71),3000(1.95)	60(0.87),110(1.6),300(3.93),420(2.92),840(1.97),3000(1.97)
9	70(0.36),100(0.62),210(0.27),360(0.8),780(1.32),3000(2.42)	78(0.53),100(0.74),210(0.54),330(0.95),780(1.32),3000(2.42)	40(0.31),60(0.37),100(0.78),210(0.25),360(1.51),780(1.57),3000(2.45)
10	50(0.22),75(0.51),100(0.57),210(0.32),360(0.77),780(1.31),3000(2.46)	50(0.46),80(0.7),100(0.67),210(0.62),330(0.95),780(1.31),3000(2.42)	50(0.47),90(0.8),210(0.3),360(1.45),780(1.55),3000(2.5)
11	70(0.84),100(0.25),210(0.41),330(0.69),780(1.25),3000(2.58)	50(0.46),70(1.13),210(0.8),330(0.87),780(1.25),3000(2.59)	40(0.53),80(0.95),210(0.38),330(1.29),780(1.5),3000(2.63)
12	50(0.39),70(0.43),110(0.2),180(0.42),330(0.49),720(1.17),3000(2.74)	70(1.31),90(0.61),110(0.24),210(0.71),300(0.63),720(1.17),3000(2.75)	50(0.68),70(0.91),90(1.22),180(0.39),330(0.92),720(1.44),3000(2.79)
13	80(0.33),110(0.17),150(0.19),720(0.99),3000(3.08)	60(0.12),80(0.41),110(0.22),240(0.47),700(0.99),3000(3.09)	59(0.1),80(0.25),110(0.15),150(0.14),420(1.21),660(1.26),3000(3.13)
14	70(0.69),100(0.3),180(0.3),465(0.72),660(0.79), 3000(3.21)	70(0.87),100(0.35),210(0.51),360(0.76),435(0.75),660(0.79),3000(3.22)	70(0.62),90(0.5),180(0.27),405(1.22),3000(3.26)

Table 4.4 Results of seiche data analysis computed in Gamcheon Harbor
(after resonant breakwater, S15~S28)

No. of data	Resonant Period in min.(relative amplitude ratio)		
	ESE-After B/W	SSE-After B/W	S10°W-After B/W
15	50(0.19),70(0.4),110(0.21),180(0.45),285(0.29),420(0.28),3000(3.66)	70(0.51),110(0.27),210(0.77),300(0.37),405(0.29),3000(3.67)	50(0.42),105(0.2),180(0.41),300(0.48),405(0.48),3000(3.73)
16	70(0.28),180(0.4),450(1.3),780(1.89),3000(3.96)	70(0.37),180(0.63),420(1.36),780(1.89),3000(3.98)	60(0.27),180(0.36),420(2.21),720(2.28),3000(4.03)
17	70(0.04),120(0.27),180(0.12),450(1.11),780(1.78),3000(3.93)	40(0.06),60(0.08),90(0.09),120(0.33),210(0.19),450(1.15),780(1.78),3000(3.94)	60(0.07),90(0.18),120(0.21),180(0.11),420(1.84),720(2.13),3000(4)
18	50(0.11),70(0.21),110(0.29),180(0.3),360(0.49),840(1.31),3000(3.79)	60(0.28),90(0.25),110(0.36),180(0.48),360(0.56),840(1.3),3000(3.8)	55(0.23),90(0.48),110(0.27),180(0.27),330(0.75),780(1.54),3000(3.85)
19	50(0.09),70(0.21),100(0.07),210(0.26),260(0.85),840(1.36),3000(3.81)	50(0.2),70(0.26),110(0.09),210(0.5),360(1.01),840(1.36),3000(3.82)	50(0.21),90(0.3),225(0.23),360(1.61),780(1.61),3000(3.87)
20	70(0.2),110(0.4),210(0.43),360(1.01),810(1.4),3000(3.82)	40(0.23),70(0.25),110(0.48),210(0.83),330(1.21),810(1.4),3000(3.83)	40(0.23),70(0.17),90(0.4),110(0.35),210(0.39),360(1.9),780(1.66),3000(3.89)
21	40(0.15),70(0.26),110(0.34),210(0.1),360(0.7),840(1.27),3000(3.78)	40(0.33),70(0.34),110(0.4),210(0.2),360(0.83),840(1.27),3000(3.79)	40(0.38),70(0.24),90(0.18),110(0.29),360(1.32),780(1.49),3000(3.84)
22	40(0.19),70(0.59),110(0.35),180(0.35),450(0.67),660(0.61),3000(3.32)	40(0.37),70(0.73),110(0.41),180(0.56),330(0.72),420(0.7),660(0.62),3000(3.32)	40(0.47),70(0.52),90(0.44),110(0.3),180(0.32),360(1.13),420(1.14),3000(3.37)
23	70(0.81),110(0.23),180(0.49),300(0.31),720(1.07),3000(2.92)	70(1.04),110(0.28),180(0.77),300(0.41),720(1.07),3000(2.92)	50(0.37),80(1.02),100(0.26),180(0.44),300(0.54),720(1.31),3000(2.97)
24	40(0.21),70(0.75),110(0.52),180(0.39),330(0.74),780(1.29),3000(2.51)	70(0.99),110(0.63),180(0.61),330(0.93),780(1.28),3000(2.52)	40(0.44),90(1.32),110(0.48),180(0.35),330(1.38),780(1.53),3000(2.55)
25	70(0.44),100(0.82),180(0.78),390(0.88),780(1.35),3000(2.34)	70(0.6),100(0.96),180(1.23),360(1.03),780(1.35),3000(2.34)	40(0.1),100(0.81),180(0.71),360(1.64),780(1.6),3000(2.38)
26	40(0.39),70(0.8),100(0.47),180(0.37),420(0.81),810(1.31),3000(3.06)	40(0.67),70(1.06),100(0.54),180(0.57),360(0.89),780(1.31),3000(2.3)	40(0.87),90(0.99),180(0.33),390(1.45),780(1.56),3000(2.33)
27	80(0.37),110(0.29),180(0.18),720(0.93),3000(3.06)	40(0.39),80(0.47),110(0.37),210(0.33),720(0.93),3000(3.07)	40(0.48),80(0.52),195(0.16),450(1.04),660(1.17),3000(3.11)
28	70(0.48),100(0.21),180(0.21),330(450),420(0.49),3000(3.51)	0(0.63),100(0.23),80(0.33),315(0.57),200(0.53),3000(3.52)	40(0.68),70(0.43),100(0.26),180(0.19),330(0.84),420(0.86),3000(3.57)

제 5 장 결론

본 연구의 대상영역인 감천항은 우리나라의 제1관문도시로 태평양과 아시아를 연결하는 해상교통의 중심지에 위치하여 환태평양 및 동북아시아 지역의 국제무역 및 금융의 도시로 발돋움하기 위하여 노력하고 있는 부산항의 보조항으로 서부에 위치하고 있다. 감천항은 컨테이너부두개발 및 공영수산물 도매시장 건설 등과 관련하여 선박 접안시설 및 방파제 등의 건설로 인한 주변 해역환경의 변화에 따른 항만부진동의 검토와 건설 후의 부진동의 저감을 위한 방안의 검토가 필요한 실정이다. 따라서, 현재의 항만조건에 대한 주변의 부진동 관측자료를 구하여 분석하고, 복합요소법을 통한 수치모델을 수립하여 현재조건에서 이를 재현한 후, 감천항이 가진 입지적 조건을 검토하여 가능한 부진동 저감 방안을 수치실험으로 도출하는 것을 목표로 연구를 수행하였다.

5.1 현재의 항만조건

현재의 항만조건에 대한 수치실험에서는 감천항 방파제 바깥에서 주기 100sec에서 증폭비가 최고 3~4의 값을 나타내지만 두도에서 송도측에는 ESE과향, 두도에서 서방파제와 자담말 방향에는 S10°W과향에서 소파제가 없는 감천항 방파제로부터 반사파의 영향으로 높게 나타났다.

동방파제 내측에 위치한 부두개발 계획지점인 S9~S12지점은 100sec 이하의 주기에서 입사과향 및 위치점에 따라 다른 반응을 나타내지만 장주기로 감에 따라 거의 유사한 반응을 나타내었으며 증폭비가 주로 0.5 부근의 값을 가지며 70sec 부근에서 1.6~2.3의 반응이 있으며, 350sec, 700sec 부근에서도 각각 1.3~1.8, 1.8~2.0의 증폭비를 나타내었고 3000sec 부근으로 가면서 증폭비가 3배 이상으로 나타났다. 이것은 항 입구의 절점 부근에 위치하였기 때문으로 볼 수

있다.

내향측인 S13~S17은 이보다 크게 반응하며 특히 최내단에 위치한 S16, S17은 그 증폭비가 350sec, 700sec 부근에서 3.0이상을 나타내었으며, 3000sec로 접근하면서 최대증폭비 5.4까지에 달하는 것으로 계산되었다. 이 경향은 유사한 위치에 있는 S18~S21에서도 나타났다.

전반적인 경향은 길이방향으로 개발되었으므로 폭방향의 진동은 극히 미세하며 따라서 항내수역에서 동안과 서안의 구별보다 최내단에서 거리에 따라 반응의 크기가 달라지고, 일단 내향에서는 파향에 따른 변화가 장주기보다 단주기에서 나타난다. 주기 335sec에 대해서는 항만입구 및 내측의 두 지점에서 절점이 나타나는 개방형항만의 제3모드가, 636sec에 대해서는 항만입구와 만의 중앙부에서 절점이 형성된 제2모드가 나타났다. 현재 항만조건에서 부진동의 계산결과 방파제 내측에서 부두계획지점까지는 증폭비가 최고 3배로 보면 실제 계산에서는 평상시 12~17cm가 되며, 감천항 최내측에서는 최고 증폭비가 5.4에 달하므로 12~30cm의 반응이 있을 것으로 본다.

5.2 부진동 저감방안 도입 후

부진동의 저감방안으로는 ① 현장관측자료의 스펙트럼 분석으로부터 에너지 첨두치를 가진 저주파수가 항만고유 주기와 일치되지 않도록 조정하는 것으로 항만을 설계할 때부터 기본mode 및 1차mode 등을 억제, ② 연이은 내부 수역에서의 반응이 일치하지 않도록 특성을 변화, ③ 포착에너지를 누출시켜 공진을 경감하는 것 등을 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 공진방파제를 도입하여 높은 반응을 일으키는 mode를 변경하거나 감쇄시키는 방안을 제안하였다.

공진방파제 설치 후에 감천항 바깥에서는 S10°W에서 입사시 서방파제측 공진공간에서 300~500sec의 주기에서 이전보다 높은 반응을 나타내었는데 이는 공진만에서 파

에너지를 흡수하고 있기 때문이다. 이 주기에 대해서 내향측 관측점인 S16~S20에서는 60%까지 감소하는 것으로 나타났다.

다른 파향에 대해서도 유사한 경향을 나타내었으며 특히, 내향측의 최내단인 S16~S20지점에서 감쇄효과가 탁월한 것으로 분석되었다.

외향에 위치한 S2에서는 ESE파향에 대하여 공진방파제로부터 반사로 인해 70~110sec의 주기에서 증폭비가 매우 높게 나타났으며, 300~500sec에서도 25%이상으로 높아졌다. S5는 동방파제측의 공진공간으로 주기 100~200sec에서 비교적 반응이 커졌고, S10°W방향에서 주기 300~500sec에서 반응이 높아지는 것으로 나타났다.

전반적으로 20~50%까지 공진방파제가 증폭비를 낮출 수 있음을 알았다. 특히, 감쇠항 최내단측인 S20에서는 ESE파향에서 335sec의 주기에 대한 증폭비가 2.0에서 1.0으로 감쇄되어 50%로 떨어진 것을 알 수 있다.

335sec 및 636sec의 주기에 대한 반응특성은 부두개발지역에서 S10°W, SSE, ESE 순으로 증폭비가 각각 1.9, 1.4, 1.3에서 공진방파제의 건설 후에는 1.4, 0.9, 0.8로 24~38% 정도가 감쇄되는 것으로 나타났고, 대응점인 서쪽의 선기조합부두에서도 동일한 양상을 나타내었다. 최내단측인 남성조선, 한보철강부두 근처의 S16~S20에서는 최고 50%정도의 감쇄효과를 나타내었다.

제2모드에 해당하는 636sec주기에 대한 반응에서는 신설부두 전면에서 각각 1.6, 1.4, 1.4에서 1.2, 0.9, 0.9로 줄어들어 25~36% 정도 감쇄하는 것으로 나타났고, 최내단측에서는 이보다 더 감쇄되는 효과를 나타내었다.

이상으로 전체를 요약하면 반응의 크기와 주기가 위치에 따라 차이가 있으나 공진방파제의 건설안은 현재의 항만조건보다 최고 50%까지 저감시킬 수 있으며 평균적으로는 30%이상을 감쇄시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 국승기, 이중우(1992), “해저구조물 설치에 따른 파랑에너지 집중에 관한 연구”, 한국항만학회지, 제6권 제1호, pp.69~91.
2. 이상룡(1986), “항만부진동 해석을 위한 기초연구”, 한국과학기술원 해양연구소 연구보고 BSPE 00069-110-2.
3. 이석우(1966) , “한국 연안의 해면 부진동” 수로연보, pp.111~140.
4. 이중우, 김지연(1991), “부산항개발에 따른 파랑분석과 해면부진동에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제5권 제1호, pp.25-34
5. 정원무(1999), “항만부진동에 대한 현장연구와 유한요소 해석”, 서울대학교 대학원 토목공학과.
6. 추교승(1974), “포항항의 해면 부진동 현상” 수로연보, pp.3~10. 부경대학교.
7. Booji, N.(1983), A note on the accuracy of the mild-slope equation, Coastal Eng., Vol. 7, pp.191-203.
8. Bretschneider, C.L.(1970), Topics in Ocean Engineering, Vol.2, University of Hawaii, Gulf Publishing Co.
9. Buchwald, V.T. and Williams, N.V.(1974), Rectangular resonantors on infinite and semi-infinite channels, J. Fluid Mech, Vol.67, pp.32-46
10. Chamberlain, P.G. and Porter, D.(1995), The modified mild-slope equation, J. Fluid Mech., Vol.291, pp.393-407.

11. Chen. H.S.(1984), "Hybrid element modeling of harbor resonance," 4th Int. Conf. on Applied Numerical Modeling, pp.312-316.
12. Chen, H.S. and Mei, C.C.(1974), "Oscillations and wave forces on an offshore harbor," Report 190, R.M. Parsons Lab. for Water Resources and Hydrodynamics, MIT, Cambridge, MA.
13. 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.
14. Harkins, G.S. and Dorrell, C.C., Barbers Point Harbor Physical Model Navigation Study, ERDC CHL-TR-00-2, US Army Corps Engineer, 2000.
15. Hibiya, T. and Kajiura, K.(1982), "Origin of the Abiki phenomenon(a kind of seiche) in Nagasaki Bay," J. the Oceanographical Society of Japan, Vol. 38, pp.172-182.
16. Ippen, A.T. and Goda, Y.(1963), "Wave induced oscillations in harbor : The solution for a rectangular harbor connected to the open-sea," Report 59, Hydordynamic Laboratory, MIT.
17. James, W.(1970). Resonators on narrow channels, J. Fluid Mech. Vol.44, pp.615-621.
18. James, W.(1971), Response of rectangular resonantors, Proc. Inst. Civil Engrs, Vol.48, pp.51-63.
19. Lee, J.W.(1989), Hybrid element analysis of water waves for harbor design, Ph.D. Dissertation, University of Hawaii.
20. Lee, T.T(1985), Proposed West Beach Marina hydraulic model

- investigation, J.K.K. Look Laboratory of Oceanography Engineering, University of Hawaii, Tech. Report No.59.
21. Massel, S.R.(1983), Extended Refraction Diffraction Equation for Surface Waves, Coastal Engng. Vol.19, pp.97-126.
 22. Mei, C.C. and Petroni, R.P.(1973), "Waves in a harbor with protruding breakwaters," J. Waterways and Harbors Div., ASCE, Vol.99, No. WW2, pp.209-229.
 23. Mei, C.C. and Chen, H.S.(1975), "Hybrid-element method for water wave," Proc. of Symp. on Modeling Techniques, San Francisco.
 24. Miles, J.W. and Munk, W.(1961), "Harbor paradox," J. Waterways and Harbors Div., ASCE, Vol.87, No. WW3, pp.111-130.
 25. Us Army Engineers Waterways Experiment Station(1984), Shore Protection Manual(4thed.), CREC, Us Government Printing Office, Washington, DC.
 26. Williams, N.V.(1973), The application of the resonator to problems in oceanography, Ph.D. dissertation, University of New South Wales.
 27. Willson, B. W.(1967). "The threshold of surge damage for moored ships." Proc. Inst. Civil Engineers, Vol. 38, pp.107-134.

感謝의 글

본 논문이 완성되기까지 물심 양면으로 따뜻한 격려와 많은 지도를 아끼지 않으신 문경만 지도교수님과 이중우 교수님께 무한한 존경과 감사를 드립니다.

그리고 바쁘신 와중에도 심사를 맡아 학문적인 지도를 하여 주신 강신영 교수님께도 깊은 감사를 드리며, 항상 친구와 같이 많은 조언을 주신 이명훈 교수님께도 감사를 드립니다.

또한 본 논문이 완성되기까지 항만기술연구소 실험실에서 밤을 지새우면서까지 많은 도움을 준 김상호, 이지훈, 이우철, 이학승 석사과정 학우와 김태환, 황호동 학부과정 학생들에게도 감사를 드립니다.

아울러 바쁜 업무에도 틈틈히 본 논문이 완성될 수 있도록 도와주신 부산항 건설사무소 이상문 소장님을 비롯하여 신명 과장님, 여러 동료 직원에게도 감사를 드립니다.

그리고 오늘에 이르기까지 많은 어려움에도 불구하고 아낌없는 희생과 봉사로 우리가정을 이끌어온 사랑하는 아내와 마냥 어리고 귀엽기만 하던 우리집 두 공주가 어느덧 고등학생이 되어 대학진학을 위해 불철주야 책과 씨름하는 모습이 너무나 안스럽고 대견스러운 두 딸 진선이 혜령이와도 이 기쁨을 같이 하면서

그동안 도움을 주신 모든 분들께 다시 한번 깊이 감사드립니다.

2002년 6월

許 明 揆