



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

# 항만확장에 따른 정온도 변화 해석

Analysis of Harbor Tranquility due to Port Expansion



2018年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

文勝孝

本 論 文 을 文 勝 孝 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 工 學 博 士 이 재 하 (印)

委 員 工 學 博 士 김 태 형 (印)

委 員 工 學 博 士 이 중 우 (印)



2018年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

土 木 環 境 工 學 科

文 勝 孝

# Analysis of Harbor Tranquility due to Port Expansion

Seung-Hyo Moon

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

## Abstract

This study have examined port expansions plan for fishery port in the east coast of Korea, accordance with permission conditions for coastal port such as limit for the cargo volume and passenger demands on coastal tourism belt formation. The site have been chosen as a municipal coastal port by attracting the new ocean industry and building waterfront zone to leap as a hub of new marine tourism.

The five major alternative plans are being discussed, which is expansion of present fishery port on east side, different shaped of breakwater with dredging and reclamation for formation of a new south port, and massive construction on eastern and southern part for the future port expansion. Additionally the characteristics of the target port have affected by the fishery port function, consideration on an artificial island(M-land) project which is a recent successful foreign fishery port had been applied to plan F-land in this study.

Both numerical and hydraulic experiment could be considered for harbor tranquility analysis on proposed expansion plan. However, due to experiment limitations, numerical simulation approach was adopted for various expansion alternatives. Five 50years return period of deepwater design waves were

sampled and analyzed to use as input on the wave action balance equation model SWAN and the irregular wave model Bouss-2D based on the strong nonlinear Boussinesq equation.

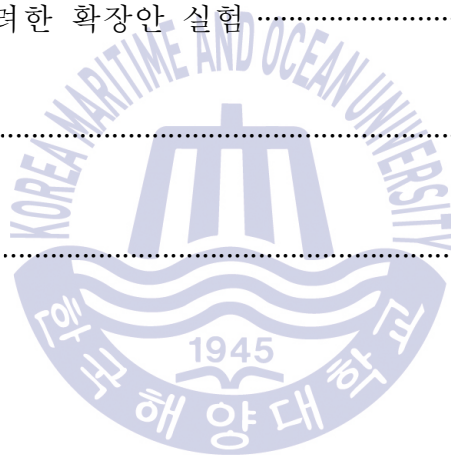
Allowable mooring wave height and harbor tranquility were figured out with both nesting method and reproduction of the strong nonlinear irregular wave properties, and analyzed differently with each proposed expansion plan. Results have shown generally high responses from Bouss-2D model and this was due to more precise reproduction of waves under shoaling effect, diffraction, reflection and other factors than wave action balance equation model. Therefore, Bouss-2D model should be used for harbor tranquility analyzation.

The numerical experimental results showed the most suitable plan was ALT-1, with satisfied harbor tranquility and reasonable economical sense. The extension of east breakwater and enlarged turning basin of F-Land plan have brought generally more stable harbor tranquility than ALT-1. F-land plan is more attractive because of parking space for visitors and fish storage space for fishermen. Also those results of other proposed plans hopefully could be used for basic data for future harbor expansion.

# 목 차

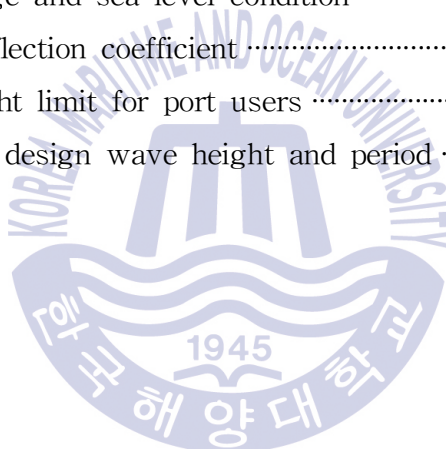
ABSTRACT .....	i
LIST OF TABLES .....	v
LIST OF FIGURES .....	v
제1장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 .....	1
1.2 연구의 내용 및 범위 .....	3
제2장 수치모델의 기초이론 .....	6
2.1 파랑작용평형방정식 모델 .....	6
2.2 Boussinesq 방정식 모델 .....	16
2.3 모형의 검증 .....	24
2.3.1 방파제 개구부에서의 비교 .....	24
2.3.2 반무한방파제에서의 비교 .....	25
2.4 Boussinesq 모델의 적용조건별 반응 .....	28
2.4.1 강비선형 조건 .....	28
2.4.2 약비선형 조건 .....	32
제3장 수치모델의 수립 .....	36
3.1 대상해역의 지리적 특성 .....	36
3.2 대상해역의 자연조건 .....	37
3.2.1 기상 .....	37
3.2.2 해상 .....	38

3.3 수치모델의 구성 .....	41
3.3.1 광역의 구축 .....	42
3.3.2 중간역의 구축 .....	45
3.3.3 협역의 구축 .....	47
<b>제4장 수치실험 및 분석 .....</b>	<b>52</b>
4.1 광역 실험결과 .....	52
4.2 중간역 실험결과 .....	58
4.3 협역 실험결과 .....	64
4.4 항만특성을 고려한 확장안 실험 .....	92
<b>제5장 결론 .....</b>	<b>96</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>99</b>



## LIST OF TABLES

Table 1.1	Predicted domestic cruise tour demands .....	3
Table 1.2	Predicted coastal cargoes at Gampo port .....	3
Table 3.1	Characteristic of winds at Pohang .....	37
Table 3.2	Occurrence of wind with respect to wind direction .....	38
Table 3.3	Characteristic of air temperature .....	38
Table 3.4	Deepwater design wave height and period .....	39
Table 3.5	Tidal levels of Gampo port .....	40
Table 3.6	Model range and sea level condition .....	42
Table 3.7	Applied reflection coefficient .....	50
Table 3.8	Wave height limit for port users .....	51
Table 4.1	Deepwater design wave height and period .....	58





## LIST OF FIGURES

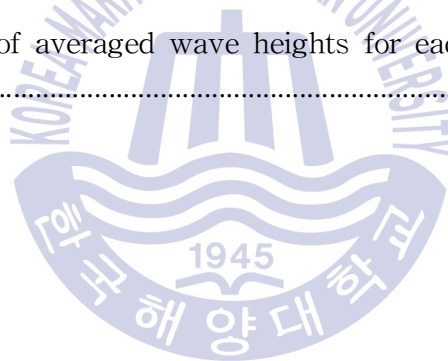
Fig. 1.1	Function of fishery port and coastal port .....	1
Fig. 1.2	Guideline for decision of coastal port in terms of passenger and cargo volume per year .....	4
Fig. 1.3	Schematic flow of research .....	5
Fig. 2.1	Comparison of relative wave height (Regular wave) .....	25
Fig. 2.2	Comparison of relative wave height (Irregular wave) .....	25
Fig. 2.3	Diffraction diagrams for irregular wave (swell-type) .....	26
Fig. 2.4	Comparison of theory and computation for semi-infinite breakwater ( $y/L=2$ ) .....	27
Fig. 2.5	Comparison of theory and computation for semi-infinite breakwater ( $y/L=4$ ) .....	27
Fig. 2.6	Comparison of wave response at $y/L=2$ , $y/L=4$ (H: 1m, T: 6sec) .....	29
Fig. 2.7	Comparison of wave response at $x/L=0$ , $x/L=1$ (H: 1m, T: 6sec) .....	29
Fig. 2.8	Goda's breaking limit .....	30
Fig. 2.9	Comparison of wave response at $y/L=2$ , $y/L=4$ (H: 3m, T: 6sec) .....	30
Fig. 2.10	Comparison of wave response at $x/L=0$ , $x/L=1$ (H: 3m, T: 6sec) .....	30
Fig. 2.11	Comparison of wave response at $y/L=2$ , $y/L=4$ (H: 1m, T: 12sec) .....	32
Fig. 2.12	Comparison of wave response at $x/L=0$ , $x/L=1$ (H: 1m, T: 12sec) .....	32
Fig. 2.13	Comparison of wave response at $y/L=2$ , $y/L=4$ (H: 3m, T: 12sec) .....	33
Fig. 2.14	Comparison of wave response at $x/L=0$ , $x/L=1$ (H: 3m, T: 12sec) .....	33
Fig. 2.15	Comparison of wave response at $y/L=2$ , $y/L=4$ (H: 7m, T: 12sec) .....	34
Fig. 2.16	Comparison of wave response at $x/L=0$ , $x/L=1$ (H: 7m, T: 12sec) .....	34
Fig. 3.1	The map of study area .....	36
Fig. 3.2	Referred grid points of deepwater wave input .....	39
Fig. 3.3	Bathymetry of the wide area .....	43
Fig. 3.4	Grid of wide area .....	44

Fig. 3.5	Bathymetry of the middle area .....	45
Fig. 3.6	Grid of middle area .....	46
Fig. 3.7	Bathymetry of the narrow area .....	47
Fig. 3.8	Formation of grids for narrow area .....	48
Fig. 3.9	Alternative 1 & 2 and cross sections for comparison .....	49
Fig. 3.10	Alternative 3 & 4 and cross sections for comparison .....	49
Fig. 3.11	Alternative 5 and cross sections for comparison .....	50
Fig. 4.1	Wave direction vector and height of E wave (Wide) .....	53
Fig. 4.2	Wave direction vector and height of NE wave (Wide) .....	54
Fig. 4.3	Wave direction vector and height of ESE wave (Wide) .....	55
Fig. 4.4	Wave direction vector and height of SE wave (Wide) .....	56
Fig. 4.5	Wave direction vector and height of SSE wave (Wide) .....	57
Fig. 4.6	Wave direction vector and height of E wave (Middle) .....	59
Fig. 4.7	Wave direction vector and height of NE wave (Middle) .....	60
Fig. 4.8	Wave direction vector and height of ESE wave (Middle) .....	61
Fig. 4.9	Wave direction vector and height of SE wave (Middle) .....	62
Fig. 4.10	Wave direction vector and height of SSE wave (Middle) .....	63
Fig. 4.11	Wave height of E wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D) .....	65
Fig. 4.12	Wave height of NE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D) .....	65
Fig. 4.13	Wave height of ESE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D) .....	66
Fig. 4.14	Wave height of SE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D) .....	66
Fig. 4.15	Wave height of SSE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D) .....	67
Fig. 4.16	Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-1, E wave) .....	68
Fig. 4.17	Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-1, NE wave) .....	68
Fig. 4.18	Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-1, ESE wave) .....	69

Fig. 4.19 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-1, SE wave) .....	69
Fig. 4.20 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-1, SSE wave) .....	70
Fig. 4.21 Wave height of E wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D) .....	72
Fig. 4.22 Wave height of NE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D) .....	72
Fig. 4.23 Wave height of ESE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D) .....	73
Fig. 4.24 Wave height of SE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D) .....	73
Fig. 4.25 Wave height of SSE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D) .....	74
Fig. 4.26 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-2, E wave) .....	74
Fig. 4.27 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-2, NE wave) .....	75
Fig. 4.28 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-2, ESE wave) .....	75
Fig. 4.29 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-2, SE wave) .....	76
Fig. 4.30 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-2, SSE wave) .....	76
Fig. 4.31 Wave height of E wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D) .....	77
Fig. 4.32 Wave height of NE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D) .....	77
Fig. 4.33 Wave height of ESE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D) .....	78
Fig. 4.34 Wave height of SE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D) .....	78
Fig. 4.35 Wave height of SSE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D) .....	79
Fig. 4.36 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-3, E wave) .....	79
Fig. 4.37 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-3, NE wave) .....	80
Fig. 4.38 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-3,	

ESE wave) .....	80
Fig. 4.39 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-3, SE wave) .....	81
Fig. 4.40 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-3, SSE wave) .....	81
Fig. 4.41 Wave height of E wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D) .....	82
Fig. 4.42 Wave height of NE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D) .....	82
Fig. 4.43 Wave height of ESE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D) .....	83
Fig. 4.44 Wave height of SE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D) .....	83
Fig. 4.45 Wave height of SSE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D) .....	84
Fig. 4.46 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-4, E wave) .....	84
Fig. 4.47 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-4, NE wave) .....	85
Fig. 4.48 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-4, ESE wave) .....	85
Fig. 4.49 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-4, SE wave) .....	86
Fig. 4.50 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-4, SSE wave) .....	86
Fig. 4.51 Wave height of E wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D) .....	87
Fig. 4.52 Wave height of NE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D) .....	88
Fig. 4.53 Wave height of ESE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D) .....	88
Fig. 4.54 Wave height of SE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D) .....	89
Fig. 4.55 Wave height of SSE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D) .....	89
Fig. 4.56 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-5, E wave) .....	90
Fig. 4.57 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-5, NE wave) .....	90

Fig. 4.58 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-5, ESE wave) .....	90
Fig. 4.59 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-5, SE wave) .....	91
Fig. 4.60 Comparison of averaged wave heights for each model (ALT-5, SSE wave) .....	91
Fig. 4.61 Example of fishery port development at Oinioshi port of Hotkaido, Japan .....	92
Fig. 4.62 Suggested F-Land .....	93
Fig. 4.63 Wave Height results according to wave direction .....	94
Fig. 4.64 Comparison of averaged wave heights for each model (F-Land, ESE wave) .....	94
Fig. 4.65 Comparison of averaged wave heights for each model (F-Land, SE wave) .....	95



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

어항의 특징은 어장개발 및 어선의 대피 등 어업전진기지, 수산물의 집산지 및 연안어업 지원 등의 기능을 담당하지만 연안항은 국가안보수호, 해양영토 수호 및 영해관리 전진기지 기능강화, 유사시 선박의 대피항만, 관광활성화 지원, 정주여건 개선의 기능을 담당한다(Fig. 1.1 참조). 또한, 연안항은 일정 수준의 연안화물 수송과 여객수송이 확보될 때 지정된다. 최근 연안공간은 관광수요의 증대로 해양레저 활동, 해안경관을 즐기는 인구가 증가하고 있고 소득증대에 따라 관광지의 확대, 환경유지 등의 필요성이 높아지는 상황이다. 우리나라 동해안의 연안항은 관광지의 확충에 따라 연간 190만 명의 해양관광객을 유치하고 있고 해상관광수요가 급증하고 있어서 이를 수용할 수 있도록 어항을 확장하고 관광 다변화를 통해 관광객 증가를 지원하고 있다.

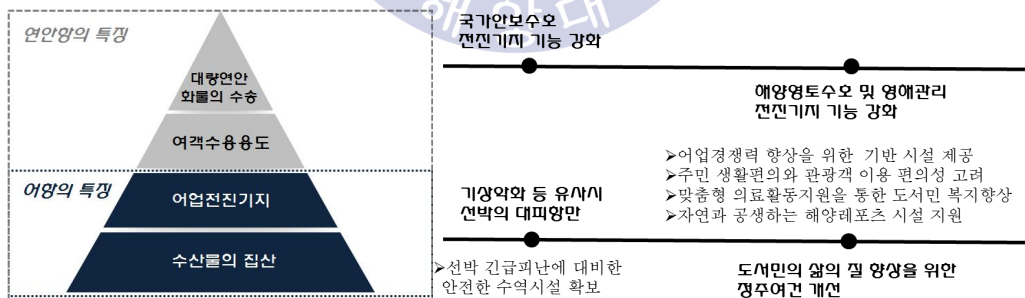


Fig. 1.1 Function of fishery port and coastal port

경주시의 경우 내륙의 역사문화관광자원의 명성에 걸맞게 해양관광거점으로 감포항을 선정하고 감포항의 확장, 친수공간 조성, 송대말 등대 사업 등 해양관광을 도약시키도록 집중 개발한다는 계획 하에 감포~울릉간 여객선

운항을 울릉군 사동항 여객부두 공사 준공 시기와 맞춰 꾸준히 추진해오고 있으며 감포항은 포항, 울산의 연안화물 및 원자력 물자의 지원항으로 어항의 기능에 부가하여 연안항으로 전환이 이루어지도록 지속적인 노력을 해오고 있다. 감포항의 경우는 해양문화관광의 활성화에도 기여하는 바가 커서 연안항으로 의의를 찾을 수 있으므로 어항시설, 친수시설과 함께 해상을 통한 연안화물 및 여객의 운송을 통한 연안항으로서의 기능 확대가 필요하다.

특히, 감포항은 수심이 깊고 고파랑 지역으로서 기상악화 시 피난기능의 역할 부여가 절실한 여건이나 과도한 사업비 문제가 있으므로, 기존의 운영여건을 감안하여, 평상시 파랑에 대한 항내 정온도를 확보할 수 있도록 외곽시설 부가와 이들의 평면배치에 대한 평가가 필요한 실정이다.

한편, 항만의 확장 또는 보수를 위한 설계와 시공과정에 정확한 파랑분석을 반영하는 것은 매우 중요하다. 다만 실제 현장관측과 수치실험 같이 시간과 비용이 요구되어 매우 적은 양의 파랑관측 데이터만이 이용되고 있다. 수치실험에는 광범위한 해역의 실험여건과 경제적 제약 및 해석에 시간적 제한이 따르므로 다양한 시도를 할 수 있는 수치실험을 진행하는 것이 일반화되어 있다. 이를 통해 항만의 정온도를 평가하여 항만구조물의 안정성 확보는 물론 접안이나 하역작업, 안전한 피난처로의 최소한의 수역을 얻을 수 있도록 하는 것이 중요한 요소 중 하나이다.

본 연구는 선회장, 화물처리장 및 야적장, 연안크루저부두, 화물부두, 해양레저센터, 해양수산공공시설, 관공선부두의 이설, 외곽시설 도입 등 감포항의 여러가지 항만확장 방안에 따른 항만정온도 여부의 분석을 수치모델실험으로 진행하였다.

## 1.2 연구의 내용 및 범위

본 연구의 대상해역인 감포항은 경북 경주시 감포읍 일대의 국가어항으로 장래 항만확장을 계획함에 따라 선행연구에서 연안항 지정 및 개발의 경제적·사회적 타당성 분석을 진행하였으며(경주시, 2014), 여객수요 추정 및 화물수요 추정은 Table 1.1 및 Table 1.2와 같다. 제 3차 전국 항만기본계획 수정계획 (2016, 해양수산부)에 따르면 연안항 지정을 위한 최소 여객기준은 연간 25만명, 최소 화물기준은 연간 11만톤으로 설정되어 있다. Fig. 1.2은 연간 여객수 및 연간 화물량을 기준으로 전국 연안항을 구분지은 것이다. 결과적으로 감포항은 2018년 기준 연간여객수 30만명, 화물량은 20만톤으로 항만 기본계획상 연안항 지정기준을 만족하는 결과를 가져왔다.

Table. 1.1 Predicted domestic cruise tour demands (Unit : 1,000)

구 분	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년
감포~울릉	80.8	82.6	84.4	80.8	77.5	74.2	71.1
유람선 (연안크루즈)	223.0	239.0	254.1	269.6	284.2	300.3	315.4
합계	303.8	321.6	338.5	350.4	361.7	374.5	386.5

Table. 1.2 Predicted coastal cargoes at Gampo port (Unit : ton)

구분	2018년	2023년	2028년	2033년	2038년	2043년	2048년
유입	145,516	152,183	159,155	166,447	174,074	182,049	190,390
유출	57,160	59,779	62,518	65,383	68,378	71,511	74,788
합계	202,676	211,962	221,674	231,830	242,452	253,560	265,178



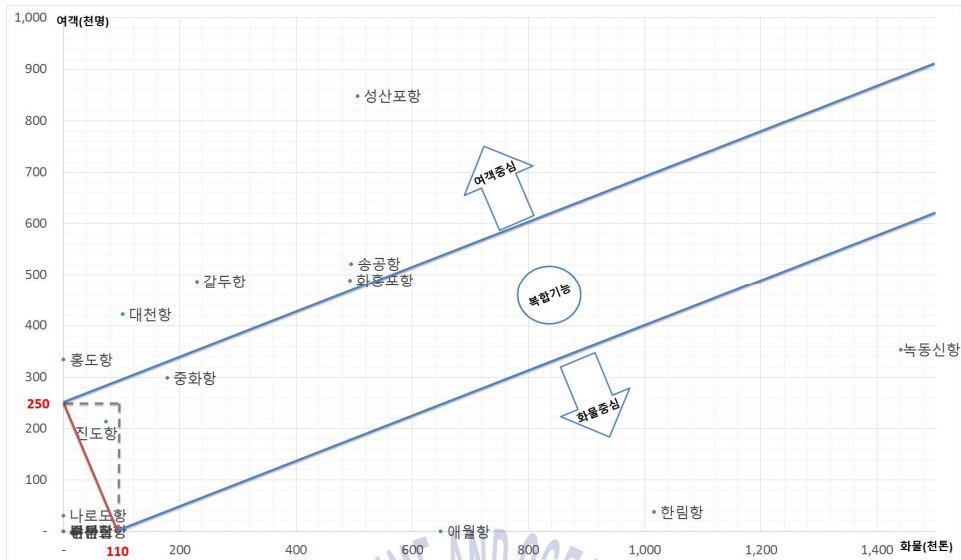


Fig. 1.2 Guideline for decision of coastal port in terms of passenger and cargo volume per year (Unit : × 1000)

본 연구에서는 신규항만의 개발, 기존 항내정온도 확보를 위한 수치실험을 진행하였고 수치모델을 각 개발안에 대해 구축하고, 추출된 심해설계 파라메타에 대하여 실험을 통해 최적조건을 도출하고자 하였다. 해안에서 파랑의 비선형적 반응특성을 분석하기 위하여 Boussinesq 방정식에 의한 수치모델로 대상해역을 해석하고 수정된 항만 확장안에 대한 제3세대 파랑모델해석과 비교하여 계류한계파고에 대하여 항만정온도 문제를 해석하고자 하였다.

Boussinesq 파랑모델인 BOUSS-2D는 미육군공단에서 개발한 시간영역 파랑해석 모델로 천수, 굴절, 반사 및 회절 현상의 반영이 가능하고 쇄파를 규칙파에 대한 경험계수에 의한 계산방법이 아닌 난류로 수치모델하여 파랑변형을 계산하는 모델이다. Nwogu(1993)는 평균수심 대신에 정수면으로부터 수면 아래로  $z_\alpha$  지점의 유속을 사용하여 보다 깊은 수심에서도 적용할 수 있는 약비선형 Boussinesq 방정식을 제안하였으며, Weiet al.(1995)는 파랑류, 해안에서의 파랑의 처오름, 평균수위 변동 등 강비선형 현상을 모의할 수 있

는 강비선형 Boussinesq 방정식을 유도하였다. Nwogu(1996)는 쇄파를 모의하기 위하여 1-방정식 난류모형을 도입하여 Boussinesq 모형을 확장하였으며, 저면마찰과 다공구조물을 감안하기 위한 항도 추가하였다. 국내 연구에서 홍과 양(2000)은 Boussinesq 방정식을 사용하여 장전항의 정온도를 평가하였고, 한 등(2003)은 수리모형실험과 비교 후 포항항에 적용한 사례가 있다. 류 등(2007)은 차귀도 주변 해역의 파랑 시물레이션을 통해 입사파에 대하여 파력발전 적지선정을 위한 기초정보를 제시하였다.

본 연구과정은 Fig. 1.3과 같으며 제2장에서는 대상항만의 기존자료수집 및 현황분석을 다루었으며, 제3장에서는 수치모형의 기초이론과 모델의 구성 및 검증을 수행하고, 제4장에서 2가지 수치모형의 결과를 비교 및 분석하여 이를 제5장에서 요약 및 정리하고자 한다.

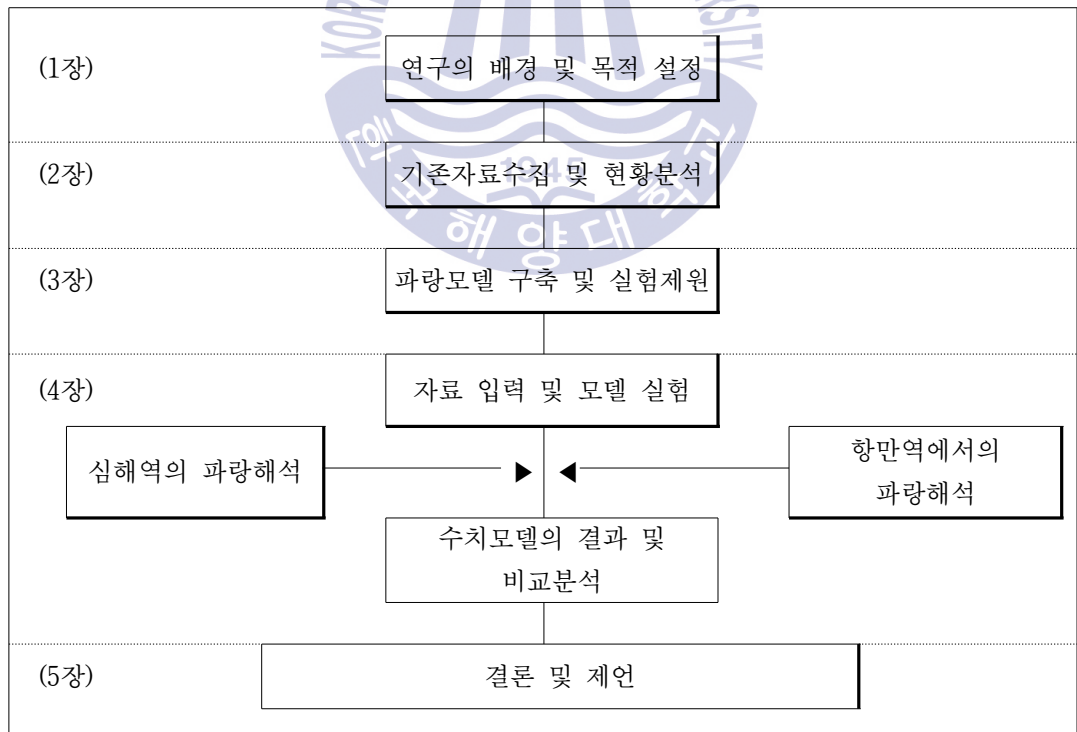


Fig. 1.3 Schematic flow of research

## 제 2 장 수치모델의 기초이론

대상해역에서 파랑변형특성 분석 및 항내에서의 반응특성과 계류한계과고에 대한 정온도를 산정하기 위하여 2가지 수치모델을 적용하였다. 심해설계과 산출 지점을 포함하는 광역에서는 파랑작용평형방정식 모델을, 항만역 주변해역을 세부역으로 파랑작용평형방정식 모델과 Boussinesq 방정식 모델을 적용하여 비교분석을 하였다. 각 모델의 기초이론은 다음과 같다.

### 2.1 파랑작용평형방정식 모델

파랑변형 수치해석에 사용된 모델은 Netherland Delft University에서 개발한 파랑수치모델로서 주어진 바람, 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하역구의 파랑을 계산하며 모델의 기본방정식은 파랑 작용 평형방정식으로 사용되는 원천항에 따라 제 1세대, 제2세대, 제 3세대 모델으로 구분된다. 본 연구에서는 제 3세대 모델을 사용 하였다.

심해파가 다방향·다주기의 불규칙파로 주어지므로, 수치모델은 불규칙파의 전파변형을 정도 높게 계산할 수 있어야 하며, 특히 합성파의 효과인 쇄파와 바닥마찰을 현실성 있게 고려하기 위해서는 방향별, 주기별 성분파를 동시에 해석할 수 있는 모델이 필수적이다. SWAN 모델은 방향 분산성이 강한 불규칙파의 해석에 유리하며, 각 성분파에 대한 계산이 동시에 이루어지므로 각 성분파의 합성파 정보를 필요로 하는 불규칙파의 부분쇄파 및 바닥마찰을 정도 높게 고려할 수 있는 장점이 있다.

SWAN 모델에서 고려되는 전파과정(propagation processes)은 지리적 공간상의 전파, 수심과 흐름에 의한 굴절 현상(refraction), 수심과 흐름에 의한 천수 현상(shoaling), 방해물에 의한 전달 및 차단·반사(blocking and reflection),

지형과 공간에 대한 회절(diffraction)이다. 또한 바람에 의한 파랑에너지 생성, 저면 마찰에 의한 파랑에너지 소산, 수심 감소에 따른 쇄파에 의한 파랑에너지 소산, 백파에 의한 파랑에너지 소산, 파랑 상호작용(4파 또는 3파 비선형 상호작용)을 고려한다.

쇄파대에서는 비선형성이 강한 반면 SWAN 모델에서 파랑은 2차원 작용스펙트럼으로 표현된다. 고려되는 스펙트럼은 에너지 밀도 스펙트럼(energy density spectrum)  $E(\sigma, \theta)$ 가 아니고 파작용 스펙트럼(wave action spectrum)  $N(\sigma, \theta)$ 으로 강한 비선형 조건에서도 스펙트럼을 사용하는 이유는 스펙트럼이 비선형 조건의 파랑을 통계적으로 충분히 서술할 수는 없지만 파랑의 2차 모멘트 스펙트럼 분포는 예측이 가능하기 때문이다.

파작용 스펙트럼과 에너지 밀도 스펙트럼의 관계는 다음과 같다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (2.1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 각주파수(intrinsic angular frequency)이고, 절대 각주파수(absolute angular frequency)  $w$ 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$w = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (2.2)$$

여기서,  $\vec{k}$ 와  $\vec{U}$ 는 파수와 유속 벡터이다.

## 가) 파 작용 평형방정식

파작용 평형방정식에 의해 파랑 스펙트럼의 발달이 기술된다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.3)$$

위 식에서 좌변의 1항은 파작용의 스펙트럼 시간 변화량, 2항과 3항은 지리적 공간에서의 파동 작용 전과, 4항은 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이, 그리고 5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다.

선형파 이론에 의한 파랑의 전파속도는 아래와 같다.

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (2.4)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (2.5)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (2.6)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (2.7)$$

여기서,  $s$ 와  $m$ 은 각각 파향선(wave ray)과 파향선에 직각인 좌표를 의미하고, 평형방정식의 우변은 원천항(source and dissipation)을 나타내며, 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.8)$$

여기서,  $S_{in}$ 은 바람에 의한 에너지 유입,  $S_{ds}$ 는 파랑에너지의 소산,  $S_{nl}$ 은

비선형 파랑 상호작용을 나타낸다.

## 나) 바람에 의한 에너지 유입

수치모델에 바람조건을 적용하였고, 바람에 의한 파랑의 생성은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2.9)$$

여기서,  $A$ 는 선형파의 성장을 의미하며,  $BE$ 는 파의 지수적 성장이다.

바람에 의한 파의 선형 성장을 계산하는  $A$ 는 Phillips(1957)에 의한 공진기구를 반영하는 것으로, Pierson-Moskowitz(PM) 주파수 보다 낮은 저주파의 성장을 제한하기 위하여 Cavaleri and Malanotte-Rizzoli(1981)의 식을 사용한다.

$$A = \frac{1.2}{2\pi g^2} \frac{\rho_a}{\rho_w} \{U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]\}^4 H(\sigma) \quad (2.10)$$

$$H = e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}}\right)^{-4}}, \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (2.11)$$

마찰속도(friction velocity)는 다음과 같이 모델에 적용된다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.12)$$

여기서, 풍속  $U_{10}$ 은 해면상 10m의 풍속이며,  $C_D$ 는 마찰계수(drag coefficient)로 다음과 같이 정의된다.

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.06 U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2.13)$$

$\theta_w$ 는 풍향,  $H$ 는 필터,  $\sigma_{PM}^*$ 는 Pierson-Moskowitz에 따른 완전히 발달한 해상상태(fully developed sea state)에서의 첨두 주파수(peak frequency)이다.

Komen et al.(1984)의 식은 Snyder et al.(1981)의 식에 근거를 두고 있으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$B = 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[ 0, \frac{28U_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \sigma \quad (2.14)$$

여기서,  $c$ 는 위상속도(phase speed),  $\rho_a$ 와  $\rho_w$ 는 각각 공기와 해수의 밀도이다. 이 식은 WAM 모델에서 채용되고 있는 식으로 Janssen(1991)은 경계층 효과와 해면의 조도에 의한 바람과 파랑의 상호작용을 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[ 0, \frac{U_*^2}{c^2} \cos^2(\theta - \theta_w) \right] \sigma \quad (2.15)$$

여기서,  $\beta$ 는 Miles 상수로서 무차원 임계고( $\lambda$ )를 사용하여 다음 식으로 계산된다.

$$\beta = \begin{cases} \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda & \text{for } \lambda \leq 1 \\ 0 & \text{for } \lambda > 1 \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\lambda = \frac{gz_e e^r}{c^2}, \quad r = \frac{\kappa c}{|U_* \cos(\theta - \theta_w)|} \quad (2.17)$$

여기서,  $k$ 는 von Karman 상수로서 0.41을 취하며,  $z_e$ 는 해면의 유효 조도이다. 풍속의 분포를 다음과 같이 간주하면,

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left[ \frac{z + z_e - z_o}{z_e} \right] \quad (2.18)$$

유효조도길이는 다음 식으로 계산된다.

$$z_e = \frac{z_o}{\sqrt{1 - \frac{\tau_w}{\tau}}} \quad (2.19)$$

여기서,  $\tau$ 는 총응력(total stress)이며, 조도 길이는 다음의 관계식으로 주어진다.

$$z_o = \hat{\alpha} \frac{U_*^2}{g} \quad (2.20)$$

여기서,  $\hat{\alpha} = 0.01$ 이며, 파랑 응력(wave stress)은 스펙트럼으로부터 계산된다.

$$\vec{\tau}_w = \rho_w \int \int \sigma B E(\sigma, \theta) \frac{\vec{k}}{k} d\sigma d\theta \quad (2.21)$$

SWAN 모델에서는 위에서 언급한 일련의 식과  $z = 10$  m 상공에서의 풍속  $U_{10}$ 을 사용하여 반복법으로  $B$ 를 구한다.



## 다) 회절

흐름이 없다고 가정하, 지리적 공간과 스펙트럼 공간상에 회절이 없는 상태에서 전파속도는  $C_{x,0}$ ,  $C_{y,0}$ 와  $C_{\theta,0}$ 로 정의한다.

$$C_{x,0} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \cos(\theta) \quad (2.22)$$

$$C_{y,0} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \sin(\theta) \quad (2.23)$$

$$C_{\theta,0} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial n} \quad (2.24)$$

여기서  $k$ 는 파수이고  $n$ 은 파향선에 직각인 법선 벡터이다. 다음과 같이 eikonal방정식을 적용하면

$$K^2 = k^2(1 + \delta) \quad (2.25)$$

여기서  $\delta$ 는 다음과 같이 정의되는 회절계수이다.

$$\delta = \frac{\Delta(cc_g \Delta H_s)}{cc_g H_s} \quad (2.26)$$

회절에 의한 전파속도는 다음과 같다.

$$C_x = C_{x,0} \bar{\delta}, \quad C_y = C_{y,0} \bar{\delta}, \quad C_\theta = C_{\theta,0} \bar{\delta} - \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial x} C_{y,0} + \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial y} C_{x,0} \quad (2.27)$$

여기서  $\bar{\delta} = \sqrt{1 + \delta}$ 이다.

## 라) 구조물에 의한 파랑의 전달 및 반사

모델에 적용되는 구조물에 의한 반사는 두 가지 방법으로 표현된다. 첫째는 반사각이 입사각과 동일하다고 가정한 경상반사(specular reflection). 두 번째는 반사각이 입사각과 일치하지는 않는 확산(diffuse)과 발산(scattered) 반사이며 이때 확산과 발산 반사는 코사인의 멱함수의 형태로 표현된다.

파랑의 전달은 구조물을 잠제로 가정하게 되며, 전달계수  $K_t$ 는 파고와 해면으로부터 구조물 천단까지 거리의 함수(Goda et al., 1967)로 다음과 같다.

$$K_t = 0.5 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{F}{H_i} + \beta \right) \right) \right] \text{ for } -\beta - \alpha < \frac{F}{H_i} < \alpha - \beta \quad (2.28)$$

여기서,  $F = h - d$ 는 방파제의 여유고,  $H_i$ 는 입사파고,  $h$ 는 구조물의 높이,  $d$ 는 평균해면,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 구조물 형상에 따른 계수로 기본적으로 2.6과 0.15를 사용한다(Seelig, 1979).

## 마) 저면에 의한 에너지 소산

저면에 의한 에너지 소산은 저면 마찰(bottom friction), 저면운동(bottom motion), 침투(percolation) 및 불규칙 저면상의 산란(bottom scattering) 등에 의하여 발생하며(Shemdin et al., 1978), 모래로 구성된 육봉에서의 에너지 소산은 주로 마찰에 의하여 발생한다. JONSWAP 실험에서 스펙트럼 파랑 모델에 사용할 수 있는 마찰 소산식이 유도 되어(Hasselmann et al., 1973), 선형 모형으로서 마찰계수의 선택이 적당할시 여러 조건, 특히 너울과 폭풍에 대해서 좋은 결과를 나타내어 왔다. Hasselmann and Collins(1968)는 항력 마찰(drag friction)를 기초로 한 저면마찰 소산의 비선형 모형을 제안하였고, Madsen et al.(1988)과 Weber(1991)는 보다 복잡한 와류 이론에 근거한 모형을 고안하였다.

SWAN모델에서는 저면마찰 소산을 계산시 Weber(1991) 식을 사용한다.

$$S_{ds,b}(\sigma,\theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma,\theta) \quad (2.29)$$

여기서,  $C_{bottom}$  은 저면마찰계수로 아래와 같이 정의되는 *rms* 저면 유속으로부터 구해진다.

$$u_{rms}^2 = \int \int \frac{\sigma^2}{\sinh^2 kd} E(\sigma,\theta) d\sigma d\theta \quad (2.30)$$

JONSWAP에서 사용된 경험적인 모형에서는 너울에 대해서도 적용할 수 있는  $C_{bottom} = 0.038 \text{ m}^2\text{sec}^{-3}$ 을 사용하였다. 일반적으로 저면마찰계수는 파랑 조건에 의존하지만 Bouws and Komen(1983)이 풍파에 대해서 제안한  $C_{bottom} = 0.067 \text{ m}^2\text{sec}^{-3}$ 은 많은 경우에서 유효한 것으로 보고되고 있다(Luo and Monbaliu, 1994).

Collins(1972)의 항력마찰 모형에서는 다음 식에서 유도된다.

$$C_{bottom} = c_{fw} g u_{rms} \quad (2.31)$$

여기서,  $c_{fw} = 0.015$ 이다(Collins,1972).

Madsen et al.(1988)의 와점성 모형에서는 아래의 식을 사용한다.

$$C_{bottom} = \frac{g}{\sqrt{2}} f_{wr} u_{rms} \quad (2.32)$$

여기서,  $f_{wr}$ 은 무차원 마찰계수로 Johnson(1966) 공식으로부터 구해졌다.

$$\frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} + \log_{10} \left[ \frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} \right] = m_f + \log_{10} \left[ \frac{a}{K_N} \right] \quad (2.33)$$

여기서,  $m_f = -0.08$  (Johnson and Carlsen, 1976),  $K_N$ 은 저면의 조도,  $a$ 는 저면 부근에서 수립자 운동의 진폭(excursion amplitude)이다.

$$\alpha^2 = 2 \int \int \frac{1}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.34)$$

여기서,  $a/K_N$ 이 1.57 보다 작으면, 무차원 마찰계수  $f_{wr} = 0.30$ 으로 한다 (Johnson, 1980).

#### 바) 쇄파에 의한 에너지 소산

임의의 파랑장에서 수심에 의하여 발생하는 쇄파에 의한 파랑 에너지 소산의 계산단계는 단파(bore) 모형이 적용될 수 있다(Battjes and Janssen, 1978; Thornton and Guza, 1983). 쇄파 소산의 스펙트럼 분포 특성은 쇄파가 파랑 스펙트럼의 형상에는 영향을 주지 않는 것으로 Battjes and Beji(1992)와 Vincent et al.(1994)의 실험으로부터 유추된다. 이를 바탕으로 Eldeberky and Battjes (1995)는 파랑 스펙트럼에 비례하는 쇄파 소산 공식을 도출하였고, 이것이 SWAN 모델에서 사용되는 쇄파 소산 공식이다.

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = - \frac{\alpha_{BJ} Q_b \bar{\sigma} H_m^2}{8\pi} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (2.35)$$

여기서,  $\alpha_{BJ}$ 는 경험상수로서 통상 1.0을 사용한다.  $Q_b$ 는 아래의 식으로 계산되는 쇄파율이다.

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (2.36)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 평균주파수이며 아래와 같이 계산된다.

$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int \int \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.37)$$

SWAN 모델에서 최대파고  $H_m = \gamma d$ 로 계산되며,  $\gamma$ 의 계산에는 Nelson(1987)의 식을 사용한다.

$$\gamma = 0.55 + 0.88e^{-0.012\cot\beta} \quad \text{for } 0 < \beta < 0.1 \quad (2.38)$$

여기서,  $\beta$ 는 해저면의 경사이다.

## 2.2 Boussinesq 방정식 모델

Nwogu(1993)는 파고가 수심에 비하여 충분히 작은 경우에 적용할 수 있는 약비선형 Boussinesq 방정식을 유도하였으며 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음과 같다.

$$\eta_t + \nabla \mathbf{u}_f = 0 \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\alpha,t} + g \nabla \eta + (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) \mathbf{u}_\alpha + z_\alpha [\nabla(\mathbf{u}_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}) \nabla h] \\ + \frac{1}{2} [(z_\alpha + h)^2 - h^2] \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}) = 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

여기서  $\eta$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $h$  및  $g$ 는 각각 수면변위, 수평유속, 수심 및 중력가속도이며,  $z_\alpha$ 는 정수면으로부터 유속 ( $\mathbf{u}_\alpha$ )이 정의되는 깊이,  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ 는 수평기울기 연산자,  $x$ 와  $y$ 는 공간좌표,  $t$ 는 시간, 첨자 가운데는 시간에 대한 편미분을 의미한다.

연속방정식의 유량  $\mathbf{u}_f$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_f = \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u} dz = (h + \eta) \mathbf{u}_\alpha \\ + h \left( z_\alpha + \frac{h}{2} \right) [\nabla(\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \nabla h] \\ + h \left[ \frac{(z_\alpha + h)^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right] \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \end{aligned} \quad (2.41)$$

한편, 수심이 알려져서 수심과 파고의 크기가 같은 정도일 경우 파랑은 강비선형이 되며 이에 대한 운동량 방정식과 유량식은 다음과 같다. (Nwogu, 1996)

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\alpha,t} + g \nabla \eta + (\mathbf{u}_\eta \cdot \nabla) \mathbf{u}_\eta + w_\eta \nabla w_\eta \\ + (z_\alpha - \eta) [\nabla(\mathbf{u}_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}) \nabla h] \\ + \frac{1}{2} [(z_\alpha + h)^2 - (h + \eta)^2] \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}) \\ - [(\mathbf{u}_{\alpha,t} \cdot h) + (h + \eta) \nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}] \nabla \eta \\ + [\nabla(\mathbf{u}_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}) \nabla h + (z_\alpha + h) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha)] z_{\alpha,t} \\ = 0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\mathbf{u}_f = (h + \eta) \left\{ \begin{aligned} & \mathbf{u}_\alpha + \left[ (z_\alpha + h) - \frac{h + \eta}{2} \right] [\nabla(\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \nabla h] \\ & + \left[ \frac{(z_\alpha + h)^2}{2} - \frac{(h + \eta)^2}{6} \right] \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

여기서 첨자  $\eta$ 는 수표면에서의 값을 의미하며  $w$ 는 물입자의 연직속도를 나타낸다. 그리고 강비선형 Boussinesq 방정식을 사용하는 경우  $z_\alpha$ 는 다음 식으로부터 계산된다.

$$z_\alpha + h = 0.465(h + \eta) \quad (2.44)$$

### 가) 선형분산관계식

Boussinesq 방정식에 대한 분산관계식은 유속이 정의되는 수심에 따라 변화하며 다음과 같다. (Nwogu, 1993)

$$\frac{C^2}{gh} = \frac{L^2}{T^2} \left[ \frac{1 - (\alpha + 1/3)(kh)^2}{1 - \alpha(kh)^2} \right] \quad (2.45)$$

여기서  $C$ ,  $L$  및  $T$ 는 각각 파랑의 위상전파속도, 파장 및 주기이며,  $k$ 는 파수 ( $= 2\pi/L$ )이고,  $\alpha = [(z_\alpha + h)^2/h^2 - 1]/2$  이며,  $\alpha$ 의 최적값은  $-0.392$ 로 이는  $z_\alpha = -0.535h$ 에 해당된다.

### 나) 약비선형 상호작용에 의한 에너지 전달

바다의 파랑은 주파수와 파향에 대한 여러 성분파의 중첩으로 표현되며, 자유수면 경계조건의 비선형성은 성분파간의 상호작용을 일으켜서 성분파간 에

너지의 교환이 이루어진다.

파랑성분간의 비선형 에너지 교환은 해수면이 바람으로부터 에너지를 얻어 파랑이 발달하는 과정을 잘 설명하고 있으며 심해에서는 4파 상호작용이 지배적인 것으로 알려져 있다.(Hasselmann, 1962) 천해에서는 4파 상호작용에 관계되는 공명조건이 파랑의 진행과 함께 변화하므로 4파 상호작용은 우세하지 못하며 3파 상호작용이 우세해진다.

2개 성분파의 진폭을  $a_1, a_2$ , 각주파수를  $w_1, w_2$ , 파수를  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ , 그리고 파향을  $\theta_1, \theta_2$ 라고 하면 수면 변위는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta^{(1)}(\mathbf{x}, t) = a_1 \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x} - w_1 t) + a_2 \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x} - w_2 t) \quad (2.46)$$

여기서  $\mathbf{k} = (k \cos \theta, k \sin \theta)$ 이며  $\eta^{(1)}$ 은 상호작용 전의 1차항을 의미하고, 두 개의 파랑이 상호작용하여 나타나는 2차항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta^{(2)}(\mathbf{x}, t) = & \frac{a_1^2}{2} G + (w_1, w_2, \theta_1, \theta_2) \cos(2\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x} - 2w_1 t) \\ & + \frac{a_2^2}{2} G + (w_1, w_2, \theta_1, \theta_2) \cos(2\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x} - 2w_2 t) \\ & + a_1 a_2 G_{\pm}(w_1, w_2, \theta_1, \theta_2) \cos(2\mathbf{k}_{\pm} \cdot \mathbf{x} - 2w_{\pm} t) \end{aligned} \quad (2.47)$$

여기서  $\mathbf{k}_{\pm} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ 이며 3파 상호작용의 결과로서 고주파인 Superharmonic 성분 ( $w_+ = w_1 + w_2$ )과 저주파 subharmonic 성분 ( $w_- = w_1 - w_2$ )이 추가적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

한편 2차 비선형 상호작용계수  $G_{\pm}(w_1, w_2, \theta_1, \theta_2)$ 는 다음과 같다.



$$G_{\pm}(w_1, w_2, \theta_1, \theta_2) = \frac{w_1 w_2 (k_{\pm} h)^2 \cos \Delta \theta [1 - (\alpha + 1/3)(k_{\pm} h)^2]}{2\lambda k_1' k_2' h^3} \quad (2.48)$$

$$+ \frac{w_{\pm} [1 - \alpha(k_{\pm} h)^2] [w_1 k_1' h (k_1 h \pm k_2 h \cos \Delta \theta) + w_2 k_1' h (k_1 h \cos \Delta \theta \pm k_2 h)]}{2\lambda k_1' k_2' h^3}$$

여기서  $k_{\pm}$ ,  $k'$ ,  $\lambda$ 는 각각 다음과 같이  $k_{\pm} = |k_1 \pm k_2|$ ,  $k' = k[1 - (\alpha + 1/3)(kh)^2]$ ,  $\lambda = w_{\pm}^2 [1 - \alpha(k_{\pm} h)^2] - gk_{\pm}^2 h [1 - (\alpha + 1/3)(k_{\pm} h)^2]$ 이며,  $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2$ 이다.

성분과랑간의 비선형 상호작용이 공학적으로 중요한 의미를 갖는 것은 이것이 저주파 성분 즉 장주기 성분을 발생시키기 때문으로 비록 비선형 상호작용에 의하여 발생된 장주기 성분이 에너지가 작다고 하더라도 장주기 특성상 항내로 용이하게 진입할 수 있기 때문에 이 주기가 항만의 고유주기에 근접할 경우 항내 수면에는 큰 요란이 발생할 수 있다.

## 다) 쇄파

쇄파는 강한 비선형 현상으로 주변에 강한 회전성 난류흐름을 발생시키며 모델화하기가 매우 어렵기 때문에 기존의 수치모델에서는 고립파의 이론적 한계과형경사 또는 경험적인 수심 의존적인 쇄파공식을 적용하였다.

Bouss-2D에서는 다음과 같은 가정 아래 1-방정식 난류에너지 모형으로 쇄파를 모의하였다.

- 쇄파의 형식은 붕파로 간주한다.
- 자유수면에서의 수평유속이 파의 위상속도를 초과하면 수표면에서 난류가 발생한다,
- 난류운동에너지의 생성률은 자유수면에서의 수평유속의 연직방향 기울기에 비례한다,
- 쇄파난류는 자유수면에서의 수평유속으로 수표면 근방에서 이송한다.

Bouss-2D에서 쇄파에 의한 에너지 소산은 운동량방정식의 우변에 다음과 같

은 원천항을 추가하여 반영된다.

$$F_{breaking} = -\frac{1}{h+\eta} \nabla [\nu_t(h+\eta) \nabla \cdot \mathbf{u}_a] \quad (2.49)$$

여기서  $\nu_t$ 는 난류와점성계수로서 쇄파에 의한 난류운동에너지를  $k_e$ , 난류의 길이규모를  $l_t$ 라고 하면 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\nu_t = \sqrt{k_e} l_t \quad (2.50)$$

한편 난류운동에너지의 생성, 이송, 확산 및 소산을 평가하는 1-방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_e}{\partial t} = & -\mathbf{u}_\eta \cdot \nabla k_e + \sigma \nabla \cdot \nabla (\nu_t k_e) \\ & + B \frac{l_t^2}{\sqrt{C_D}} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]_{z=\eta}^{1.5} - C_D \frac{k_e^{1.5}}{l_t} \end{aligned} \quad (2.51)$$

여기서  $B$ 는 난류운동에너지의 생성을 나타내는 변수로서 쇄파가 발생하면 1, 그렇지 않으면 0의 값으로  $C$ 를 위상속도라고 하면 다음과 같다.

$$B = \begin{cases} 0 & |u_\eta| < C \\ 1 & |u_\eta| \geq C \end{cases} \quad (2.52)$$

한편 Bouss-2D에서 위상속도  $C(t) = -\eta / |\nabla \eta|$ 로부터 구하며,  $C_D$ 와  $\sigma$ 는 경험 상수로서 각각 0.02와 0.2를 사용하며 난류의 길이규모로는 유의파고를 사용한다.

## 라) 저면마찰

파랑의 의한 유동에서 바닥경계층은 하천흐름이나 조석류와는 달리 저면의 작은 영역에 국한되므로 통상적으로 저면마찰은 파랑에너지의 감쇠에 큰 영향을 주지는 않으나 수심이 얇은 쇄파대내나 해안선 부근에서는 저면마찰도 파고감쇠의 중요한 원인이 된다. 저면의 난류경계층에 의한 에너지 소산은 운동량방정식의 우변에 다음과 같은 원천항을 추가하여 고려한다.

$$F_{friction} = -\frac{1}{h+\eta} f_w u_\alpha |u_\alpha| \quad (2.53)$$

여기서  $f_w$ 는 파랑에 의한 저면마찰계수로서 개수로나 조석수로에서 사용되는 Chezy 상수 ( $C_f$ )를 사용하는 경우에는  $f_w = g/C_f^2$ 이 된다.

## 마) 감쇠층

계산영역의 부분반사 경계면과 계산영역 밖으로 나가는 파랑에 대한 감쇠층 (Damping layer)에서의 수면변위와 유속 및 감쇠계수는 다음 식으로 주어진다.

$$F_\eta = -\mu(x)\eta \quad (2.54)$$

$$F_u = -\mu(x)u_\alpha \quad (2.55)$$

$$\mu_{nd}(x) = \frac{T}{30}\mu(x) \quad (2.56)$$

여기서,  $\mu(x)$ 는 감쇠계수,  $\mu_{nd}(x)$ 는 무차원 감쇠계수로 0~1의 값을 갖는다. 부분반사 경계는 감쇠층 두께와 무차원 감쇠계수를 조정하여 반사율을 고려할 수 있다.

## 바) 다공 구조물

Bouss-2D는 투과성의 다공영역 (Porous region)을 설정하여 투과성 구조물에 의한 부분반사와 전달을 모의할 수 있도록 하였다. 투과영역의 공극률을  $n$ 이라고 하면 다공영역에서 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같이 변형된다.

$$\eta_t + \nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{u}_f}{n} \right) = 0 \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\alpha,t} + ng \cdot \nabla \left( \frac{\mathbf{u}_\alpha}{n} \right) + z_\alpha [ \nabla (\mathbf{u}_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}) \nabla h ] \\ + \frac{1}{2} [ (z_\alpha + h)^2 - h^2 ] \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha,t}) + n f_1 \mathbf{u}_\alpha + n f_2 \mathbf{u}_\alpha |\mathbf{u}_\alpha| = 0 \end{aligned} \quad (2.58)$$

여기서  $f_1$ 과  $f_2$ 는 각각 층류 및 난류 마찰계수로서 다음과 같은 경험식으로 표현된다.

$$f_1 = \alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{d^2} \quad (2.59)$$

$$f_2 = \beta_0 \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{d} \quad (2.60)$$

여기서  $\nu$ 는 물의 동점성계수이며  $d$ 는 다공영역을 구성하는 입자의 크기이고,  $\alpha_0$ 와  $\beta_0$ 는 경험상수로서 각각 780 ~ 1500 및 1.5 ~ 3.6의 값을 갖는다.

## 2.3 모형의 검증

### 2.3.1 방파제 개구부에서의 비교

Bouss-2D를 검증하기 위하여 개구부를 갖는 방파제의 회절을 모의하고 Isaacson & Qu (1990)의 수치계산에 근거한 계산 결과와 비교·검증하였다. Isaacson & Qu는 2-D Helmholtz 방정식을 풀기 위해 경계적분방법을 사용하였다. 전체 실험형태는 직사각형 지형의 중앙부에 놓인 방파제의 개구부를 통한 파랑의 회절을 모의하였으며, 계산영역은 1200m×600m, 수심은 10m로 일정하게 하고 개구부의 폭은 120m, 경계에서는 반사를 억제하기 위하여 폭 60m의 damping layer를 설치하여 흡수처리 하였다.

파고 1.0m, 주기 7초에 대하여 규칙파와 불규칙파로 구분하고 수심 10m에 대한 천해파장(L)이 60m이므로 개구부 폭은 파장비 2L에 해당하며, 격자간격은  $\Delta x = \Delta y = 3.0\text{m}$ , 계산 시간간격은  $\Delta t = 0.15\text{sec}$ 를 적용하였다. 비교 그림은 개구부 중심점의 값에 대한 파고비로 가로축 및 세로축은 거리를 파장비로 나타낸 것이다. Bouss-2D 모델의 규칙파 실험 결과에서 방파제 내측의 파고가 낮은 구간에서는 약간의 진동이 발생하는데, 이는 방사형 경계에서 반사파에 기인한 것으로 판단된다.(Fig.2.1)

불규칙파 실험 시 스펙트럼은 표준 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였으며, 첨두주기는  $T_p = 7.0\text{sec}$ , 주파수 스펙트럼 첨두증폭계수 (Peak enhancement parameter)  $\gamma$ 는 3.3으로 적용하였다. 방향분포함수는 Wrapped normal 형에서  $\sigma_\theta = 20^\circ$ 의 방향분포 폭을 갖는 것으로 하였다. 방파제 법선에 대한 입사각은  $\alpha = 90^\circ$  즉, 직각입사 하는 경우로 하였으며, 방파제는 완전반사 조건으로 하였다. 이에 대한 결과로 Fig.2.2와 같이 Isaacson & Qu(1990)의 수치해석 결과와 매우 유사한 패턴을 보여주고 있다.

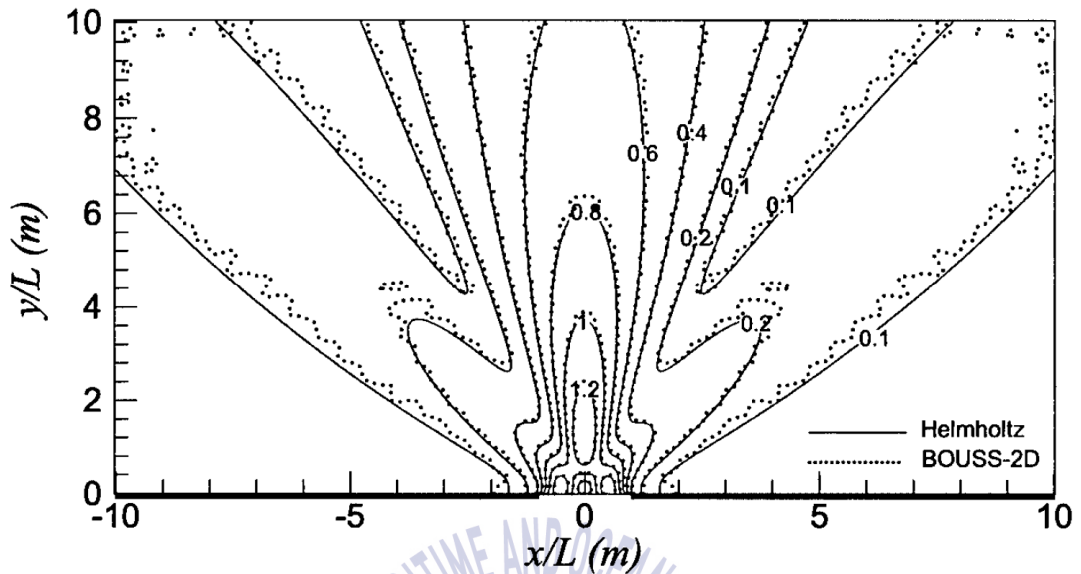


Fig.2.1 Comparison of relative wave height (Regular wave)

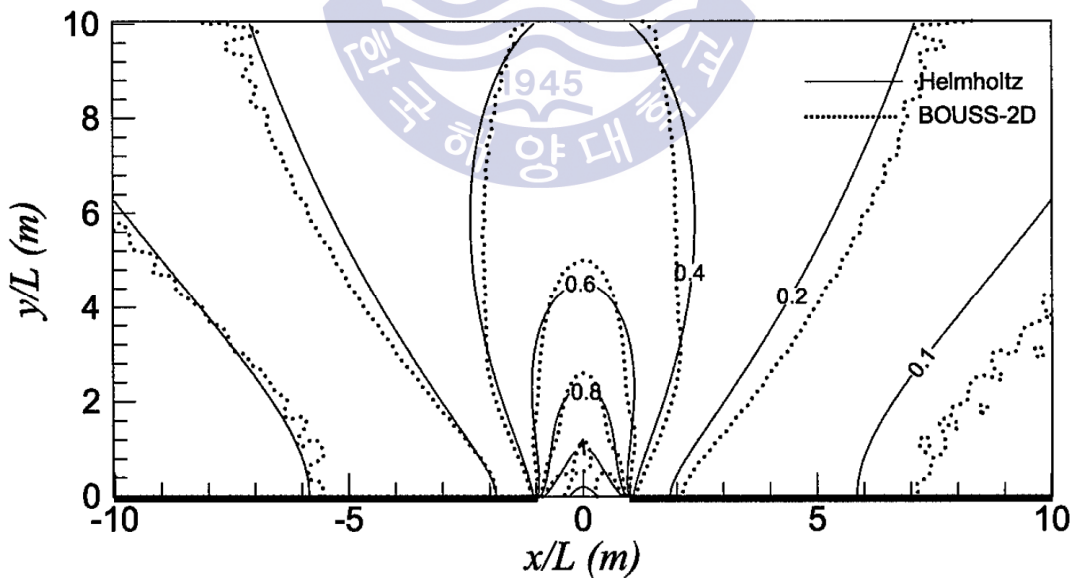


Fig.2.2 Comparison of relative wave height (Irregular wave)

### 2.3.2 반무한방파제에서의 비교

파랑작용평형방정식 모델과 Boussinesq 방정식 모델의 적용성을 확인하기 위하여 과거 회절이론(Goda, 1978)에서 제시한 불규칙파 반무한 방파제의 회절도실험을 참고하여 수치모형실험을 통해 비교하였다.

Fig.2.3은 Goda(1978)에 의해 작성된 불규칙파 회절도를 나타낸 것으로 실선은 파고비, 점선은 주기비를 나타낸다. 이때 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼과 Mitsuyasu 방향함수를 이용하여 방향분산계수는  $S_{max}$ 로 정의된다. Bouss-2D 모델과 SWAN 모델 실험에서는 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였으며, 형상계수  $\gamma=3.3$ , 방향분포계수는 고다 회절도에서 적용한  $S_{max}$ 와 유사한 분포를 가지는  $\sigma_\theta = 10^\circ$ 을 적용하였다. 수치실험검증은 파고  $H_0=1m$ , 주기  $T_p=10sec$ , 수심  $12m$ 의 조건으로 수행하였으며 이때 파장  $L=100m$ 이다.

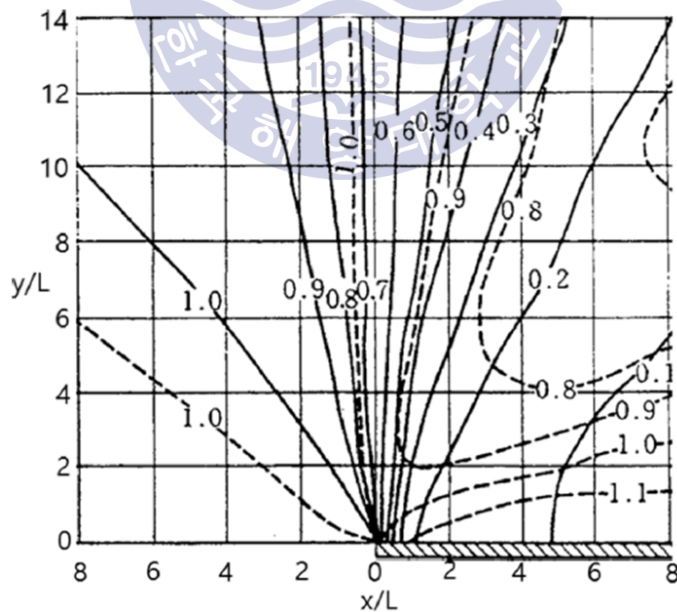


Fig.2.3 Diffraction diagrams for irregular wave (swell-type)

여기서 방파제에 수직방향으로 파랑의 주 진행방향을 고려하였고 좌표는 유  
의파의 파장(L)으로 무차원화 시켰다. 그래프에서 별표는 고다의 불규칙파 이  
론해, 파선은 SWAN의 결과, 실선은 Bouss-2D의 강비선형, 점선은 약비선형  
을 적용한 것이다.

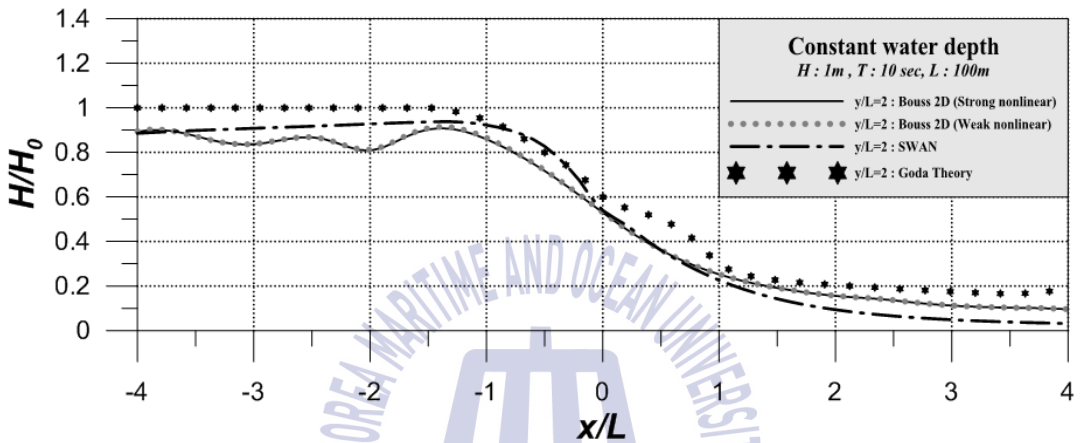


Fig. 2.4 Comparison of theory and computation for semi-infinite breakwater  
( $y/L=2$ )

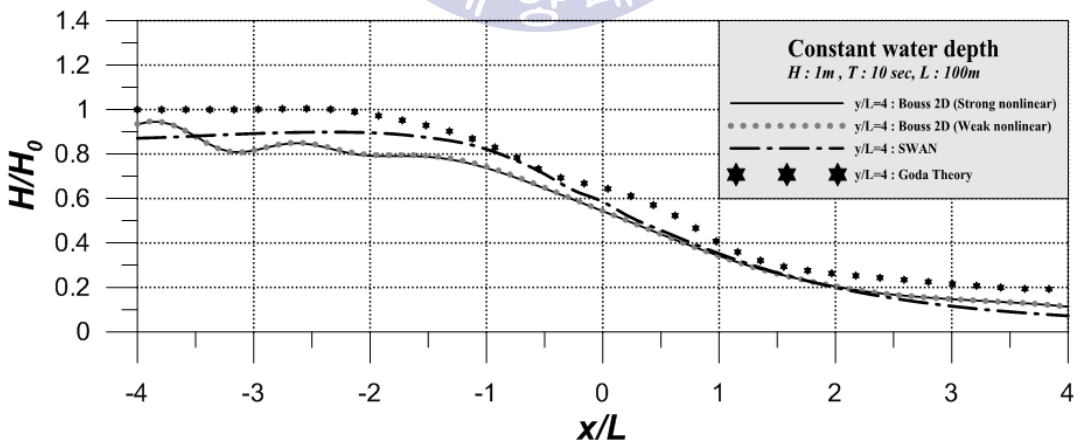


Fig. 2.5 Comparison of theory and computation for semi-infinite breakwater  
( $y/L=4$ )



비교한 그래프에서는 Bouss-2D 모델의 약·강비선형의 기법에 따른 변화는 거의 없었으며 전반적으로 고다의 이론해에 접근하는 경향을 보였다. 고다의 회절도에서 적용한 주파수 스펙트럼 및 방향분포 함수는 비교적 장주기파랑에 대한 것으로 모델에서 적용한 주기보다 에너지 전달이 다소 높게 나타나므로 전반적인 경향은 유사하나 다소 낮은 반응을 나타내었다.

## 2.4 Boussinesq 모델의 적용조건별 반응

Bouss-2D 모델의 특성상 약비선형의 특징은 심해에서의  $0 < h/L < 0.3$ 의 범위에서 한정된다. 이 범위에 대하여 약비선형, 강비선형 조건에서의 2가지 기법에 따라 반응을 살펴보고자 수치실험을 진행하였다.

### 2.4.1 강비선형 조건

강비선형 입사 조건을 위해 2.3.2와 같이 반무한 방파제에서 일정수심 20m, 주기 6초로 하였고 파장을 계산한 결과 55m이며  $h/L=0.36$ 이다. 따라서 입사 경계에서는 강비선형 조건으로 조파된다. 먼저 파고 1m의 조건으로 쇄파되지 않는 조건에서 Fig. 2.6은 반무한방파제에서 뒤로 2파장 및 4파장 거리에서 반응을 비교한 것이고 Fig. 2.7은 반무한 방파제에서 수직의 방향으로 방파제 끝단 및 방파제 끝단에서 1파장 떨어진 곳에서 반응을 비교한 것이다. 전반적으로 회절도와 유사한 반응을 나타내나 Bouss-2D 모델에서 너울에 대한 방향분포를  $\sigma_\theta = 10^\circ$ , 풍파는  $\sigma_\theta = 30^\circ$ 를 적용하는데, 모델에 사용한 주기가 6초이고 Goda의 회절도와 비교하기 위하여  $\sigma_\theta = 10^\circ$ 로 하였기 때문에 너울성 파랑의 성질을 가지는 이론치보다 낮게 나타났다.

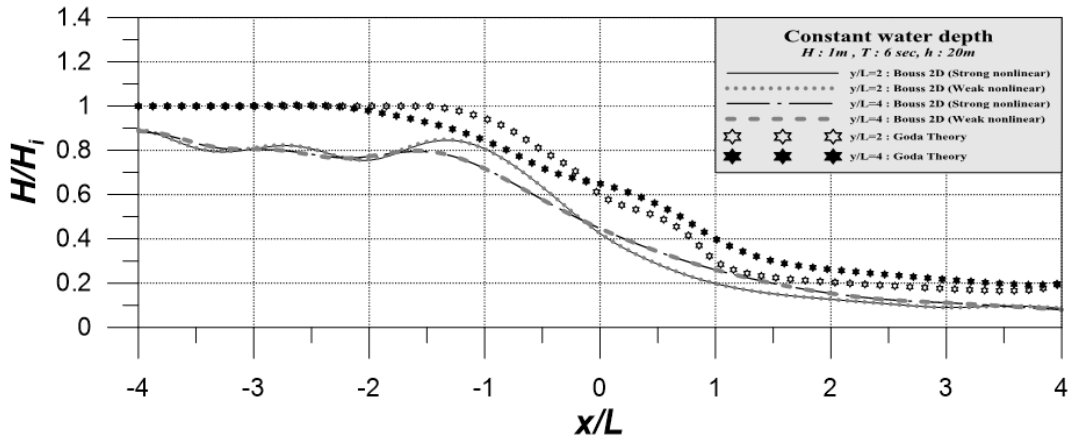


Fig. 2.6 Comparison of wave response at  $y/L=2$ ,  $y/L=4$  ( $H$ : 1m,  $T$ : 6sec)

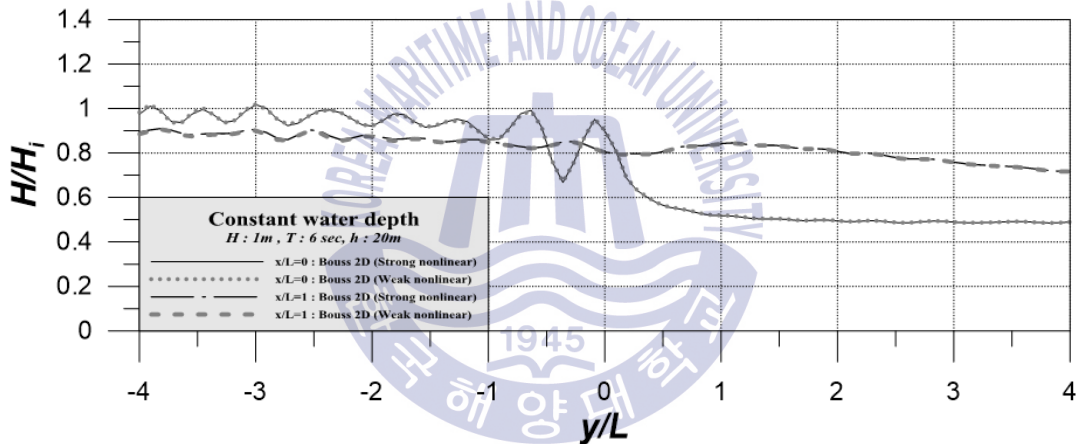


Fig. 2.7 Comparison of wave response at  $x/L=0$ ,  $x/L=1$  ( $H$ : 1m,  $T$ : 6sec)

다음으로 쇄파와 같이 강한 비선형성이 고려된 입사파가 진입 시에 두 가지 조건에 대하여 비교하고자 하였다. Fig. 2.8은 고다가 제시한 쇄파지표로 그래프에서  $h/L=0.36$ 는  $H_b/h_b \approx 0.22$  정도이며,  $H_b \approx 4.4m$ 이다. 따라서 방파제로부터 일부 반사되는 부분중복파의 영향을 고려하여 파고 3m로 파랑의 비선형특성을 반영한 실험을 진행하였다.

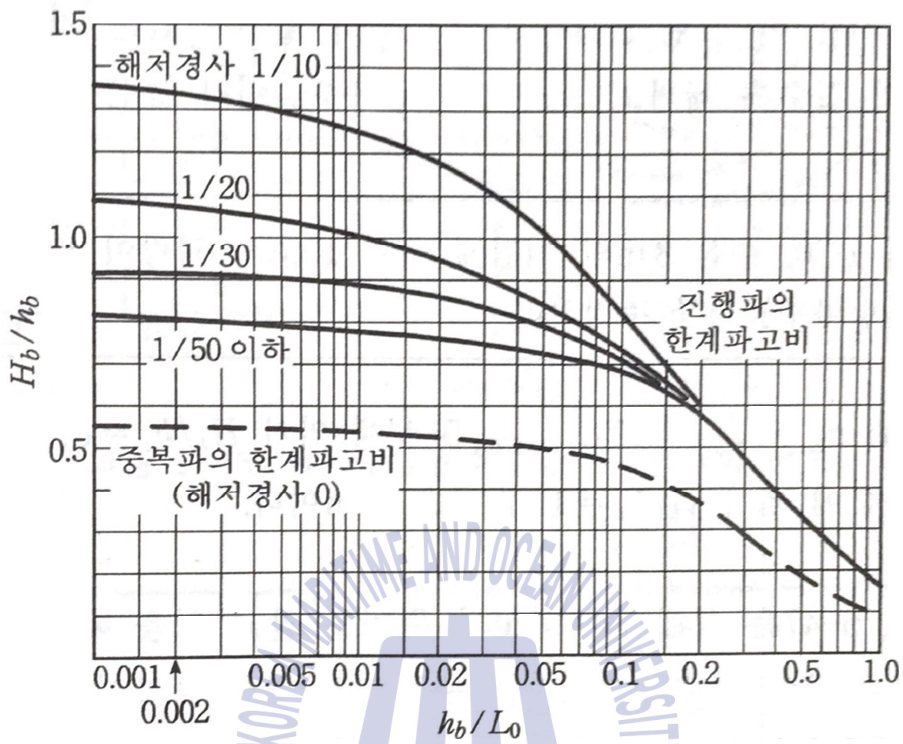


Fig. 2.8 Goda's breaking limit

파고 3m로 조파한 결과 Fig. 2.9 와 Fig. 2.10과 같이 약비선형 조건에서 결과가 높게 나온 것을 확인할 수 있다. 이는 강비선형 조건에서 회절, 쇄파, 저면마찰 등 복합적인 비선형성 특징들로 인하여 파랑의 감쇠가 일어난 것으로 본다.

약비선형 조건에서는 비선형 효과가 과소평가되어 방파제의 설계, 항내 정운도 해석 등 항만에서의 파랑해석을 정확히 계산하여 설계하는 과정의 문제점이 발생될 우려가 있다. 입사경계에서 수심과 파장의 관계는 강비선형이지만 파고 1m에서는 파랑의 비선형성이 상대적으로 약하기 때문에 강비선형과 약비선형의 차이는 거의 나타나지 않았다.

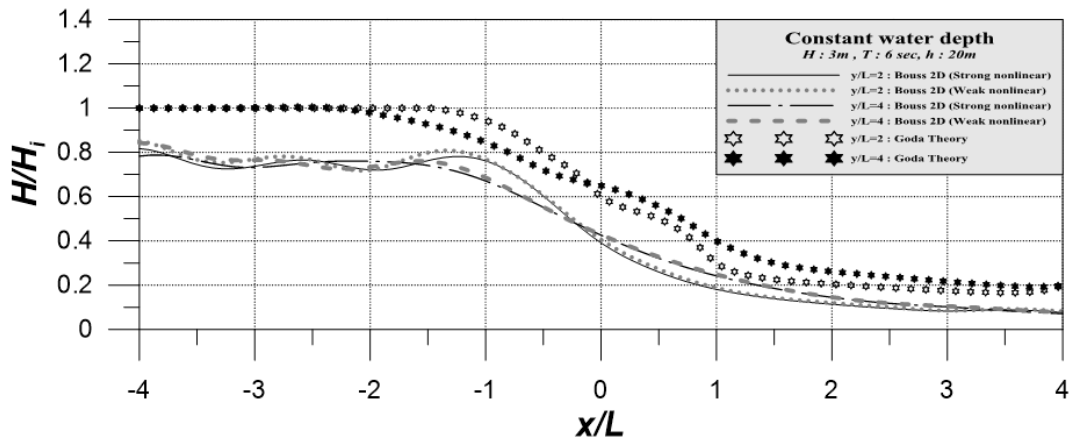


Fig. 2.9 Comparison of wave response at  $y/L=2, y/L=4$  ( $H: 3m, T: 6\text{sec}$ )

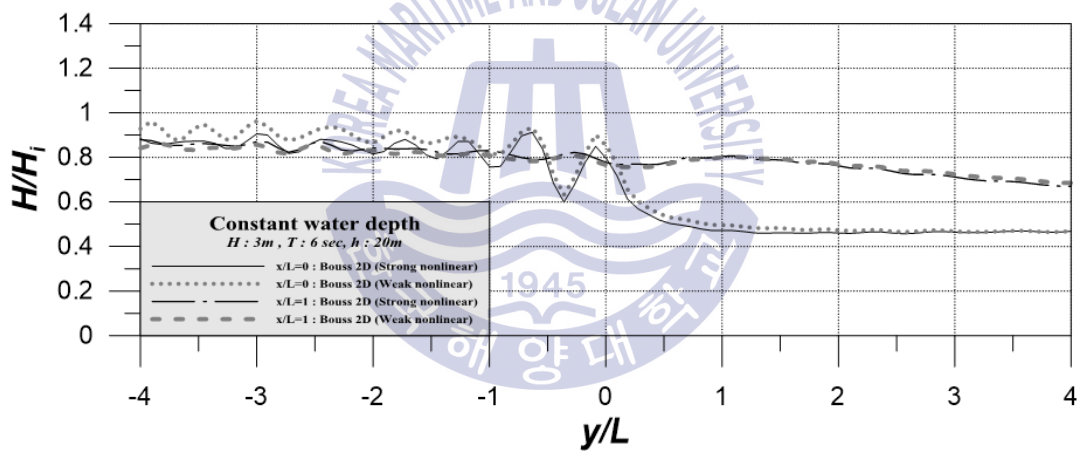


Fig. 2.10 Comparison of wave response at  $x/L=0, x/L=1$  ( $H: 3m, T: 6\text{sec}$ )

## 2.4.2 약비선형 조건

약비선형의 조건을 반영하기 위하여 수심 20m에서 주기 12초를 적용하였다. 이때 파장은 152.3m 로  $h/L=0.15$ 가 되어 약비선형 조건이 된다. 마찬가지로 파고 1m의 조건으로 수치모델을 구축하여 약비선형 조건과 강비선형 조건을 비교 분석을 하였다.

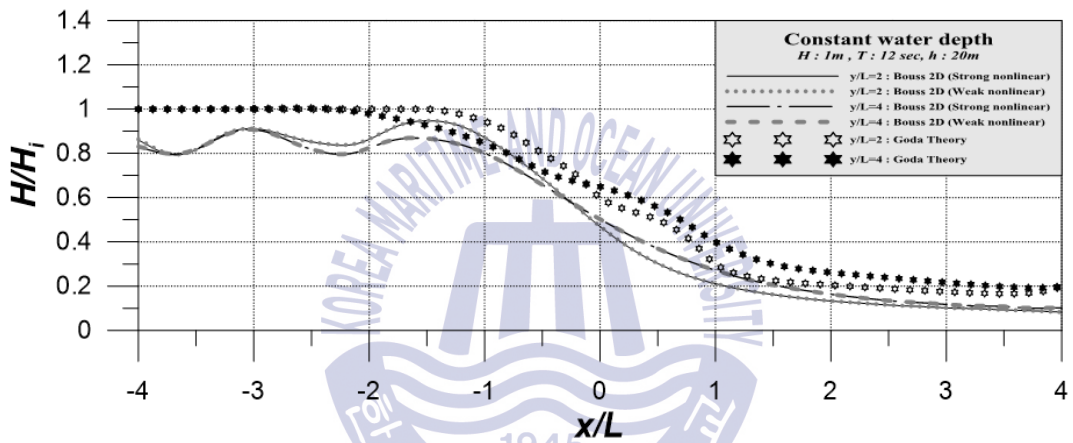


Fig. 2.11 Comparison of wave response at  $y/L=2$ ,  $y/L=4$  ( $H$ : 1m,  $T$ : 12sec)

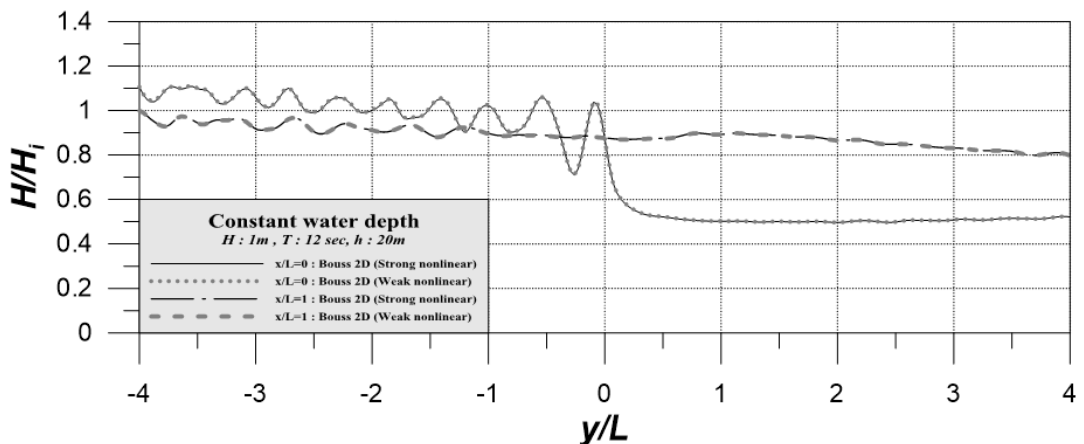


Fig. 2.12 Comparison of wave response at  $x/L=0$ ,  $x/L=1$  ( $H$ : 1m,  $T$ : 12sec)

Fig. 2.11과 Fig. 2.12는 파고 1m에서 약비선형 조건에서 두 가지 기법의 해석결과로 역시 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 앞서와 동일한 방법으로 Fig. 2.8에 제시한 쇄파지표를 살펴본 결과 그래프에서  $h/L=0.15$ 는  $H_b/h_b \approx 0.43$  정도이며,  $H_b \approx 8.6m$ 이다. 파랑의 비선형성을 포함하여 기법의 차이를 판단하기 위해 파고 3m 및 7m의 조건으로 수치실험을 수행하였다.

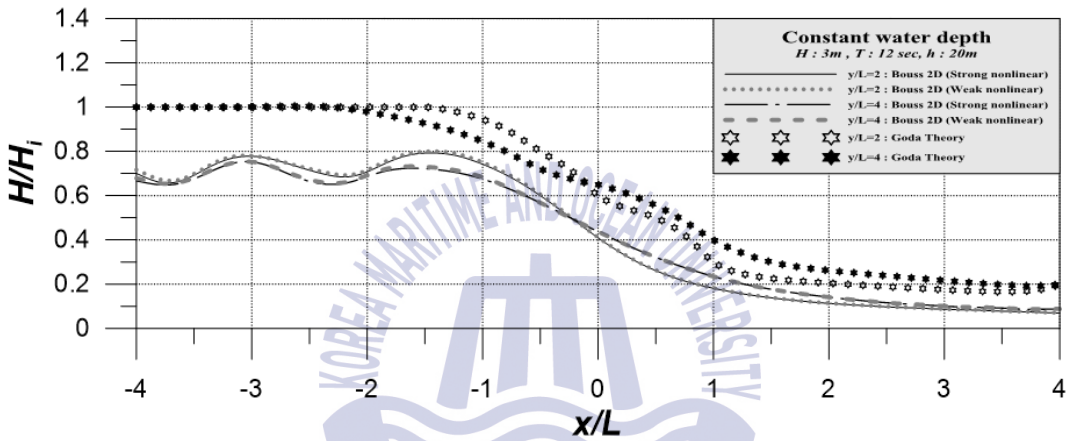


Fig. 2.13 Comparison of wave response at  $y/L=2, y/L=4$  ( $H: 3m, T: 12sec$ )

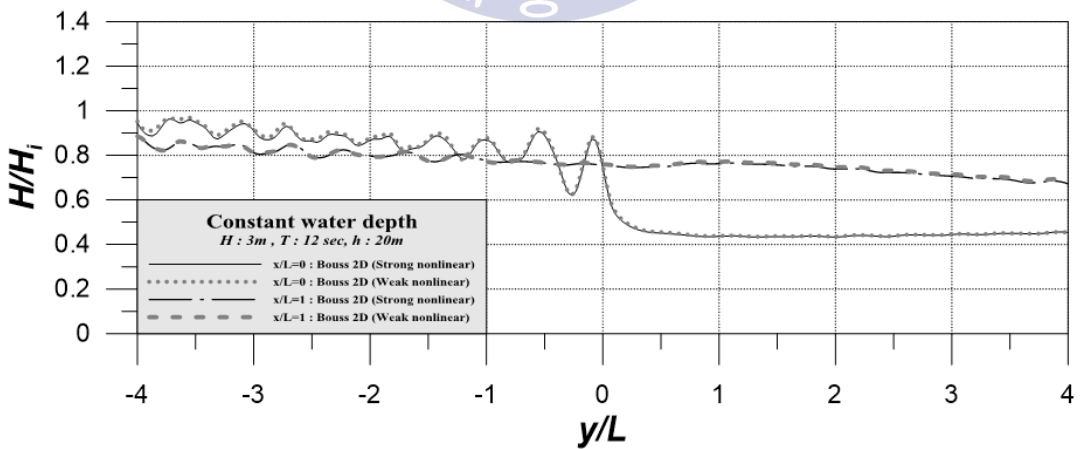


Fig. 2.14 Comparison of wave response at  $x/L=0, x/L=1$  ( $H: 3m, T: 12sec$ )

앞서 파고 3m, 주기 6초에서는 두 가지 조건의 영향이 차이를 보인 것으로 확인되지만 주기 12초에서는 약비선형 조건의 파랑이 다소 큰 것으로 나타났다. 좀 더 강한 비선형성을 위하여 약비선형 조건에서의 파고 7m로 조파하여 실험한 결과 Fig. 2.15 및 Fig. 2.16과 같이 약비선형 조건이 역시 파고가 높게 나온 것을 확인하였다. 입사경계에서는 약비선형 조건이지만, 이상파랑 정도의 큰 파고가 진입 시에 파랑은 복합적인 반응들의 강한 비선형특성이 일어나기 때문에 조건에 따라 차이를 보이는 결과를 가져왔다.

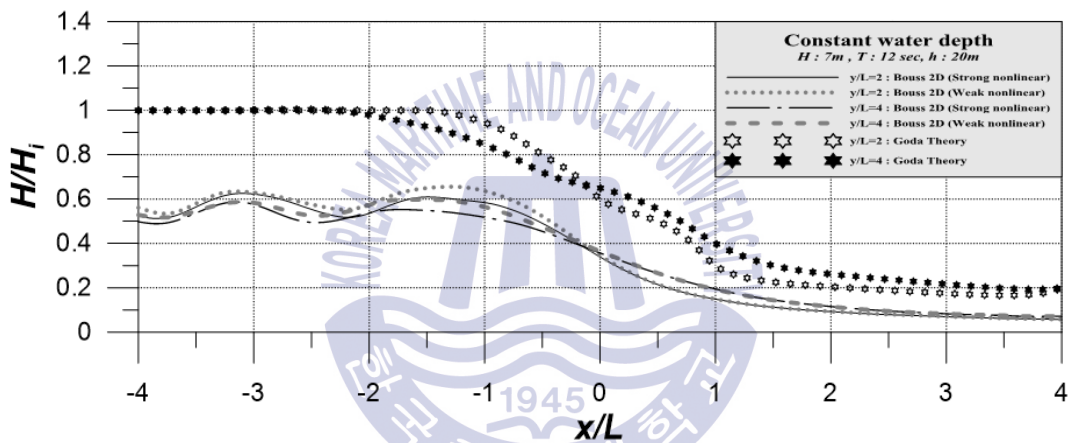


Fig. 2.15 Comparison of wave response at  $y/L=2$ ,  $y/L=4$  ( $H: 7m$ ,  $T: 12sec$ )

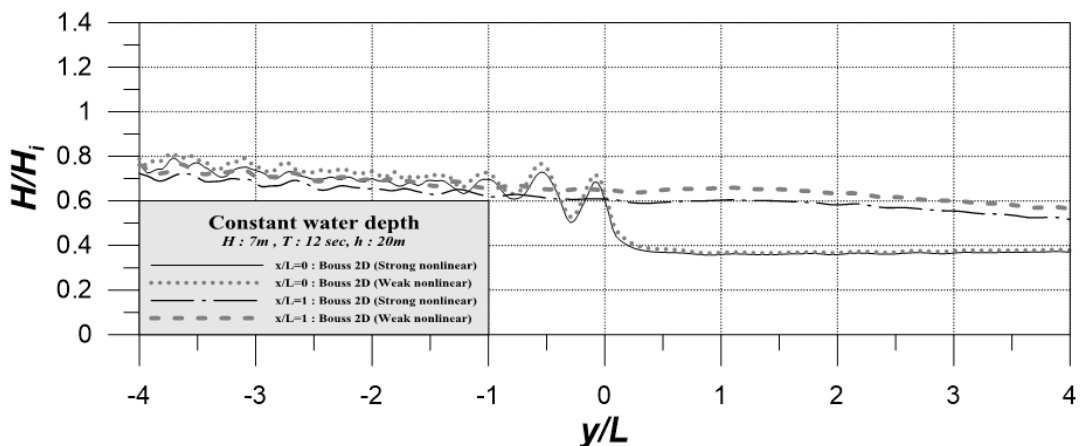


Fig. 2.16 Comparison of wave response at  $x/L=0$ ,  $x/L=1$  ( $H: 7m$ ,  $T: 12sec$ )

이상의 실험에서 입사 경계에서의 약비선형 조건으로는 상대적으로 파고가 낮은 파랑이 입사될 때에 강비선형 기법으로도 해석하여도 무방한 것을 알 수 있었으며, 쇄파가 일어날 정도의 비선형 파랑이 진입 시에는 두 조건상의 차이가 크게 나타났다. 쇄파와 같이 강한 비선형성이 나타나는 파랑은 강비선형 조건으로 해석해야 될 것으로 본다. 실제 항만에서의 심해 설계과 정온도 실험, 항만가동률 실험과 같은 수치실험을 진행할 시 수심이 깊은 심해에서 짧은 파장이 내습할 때, 이상파랑의 파고가 내습할 때의 항만역에서의 경우 등 다양한 상황에서는 파랑은 강한 비선형 조건으로 되어 약비선형 기법으로는 파랑의 비선형성을 제대로 반영하지 못하기 때문에 강비선형 기법으로 실험을 수행해야 할 것으로 판단된다.





## 제 3 장 수치모델의 수립

### 3.1 대상해역의 지리적 특성

본 연구의 대상항이 속한 경주시는 경상북도의 동남부에 위치하고 있으며 지형은 100m 이하의 저지와 100~200m간의 구릉성 산지가 대부분을 차지하고 있는 형산강 지구대이다. 감포항의 사업·경제적인 직접 세력권은 감포읍을 포함한 경주시 일원이며, 간접 세력권은 경상북도이다. 감포항 인근에 국가어항 2개(양포, 읍천)항과 지방어항 3개(전촌, 나정, 가곡)항이 있다.

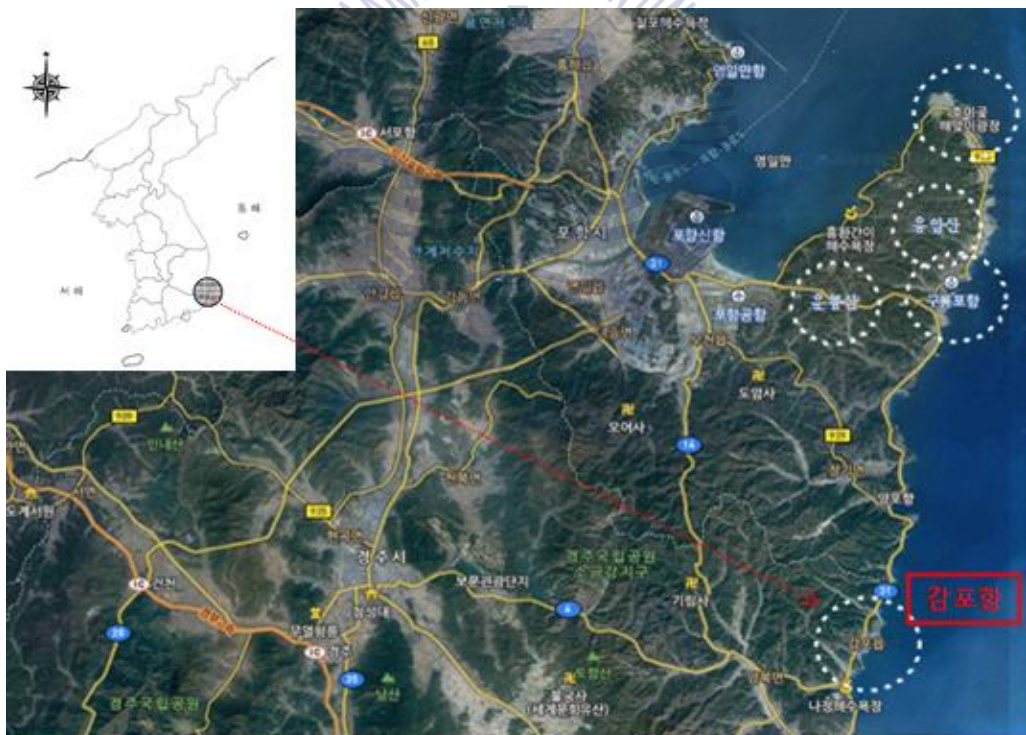


Fig. 3.1 The map of study area

감포항은 해안을 따라 북쪽의 포항과 남쪽의 울산광역시 중간에 위치하고 있고, 서쪽으로는 경주시 보문관광단지 및 세계적 유적지인 경주 관광권과 대구, 수도권과 접근성이 우수하며 근거리 여행지로 발전하고 있다. 감포 앞 바다는 대륙붕이 잘 발달하여 항시 어장이 형성됨으로써 다양하고 풍부한 해산물들로 활기를 띠고 있다.

## 3.2 대상해역의 자연조건

### 3.2.1 기상

대상해역의 기후는 전형적인 대한민국의 날씨로, 겨울에는 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하며, 여름에는 고온 다습한 북태평양 가장자리에 들어 무더운 날씨를 보이고, 봄과 가을에는 이동성이 고기압의 영향으로 맑고 건조한 날이 많다. 기상자료는 2016년 포항기상대에서 관측한 기상통계자료를 정리하였으며 연평균 풍속은 2.8m/sec, 최대 풍속은 20.3m/sec (NNE)이고, 연평균 기온은 14.2°C이며, 월 평균 최고기온은 29.4°C, 월 평균 최저기온은 -2.0°C로 기록 되었다. 풍향별 출현빈도는 WSW방향에서 23.9%로 가장 높고 SE방향에서 0.6%로 가장 낮았다.

Table 3.1 Characteristic of winds at Pohang (unit : m/s)

월별 구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
평균풍속	30	29	30	30	28	25	26	27	27	26	26	28
최대풍속	15	137	130	170	157	133	203	173	177	122	127	203
	NE	N	NNE	N	N	NE	N	SSE	NNE	NE	N	N

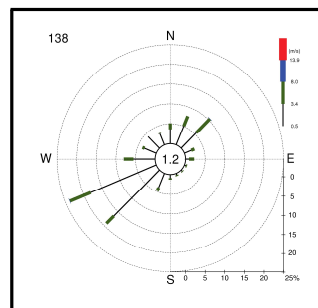
자료) 기상연보(포항), 1980~2010년

Table 3.2 Occurrence of wind with respect to wind direction (unit : %)

풍향	N	NE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
출현 빈도	51	78	105	28	22	0.7	0.6	0.7	1.2

풍향	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	정은
출현 빈도	4.8	19.1	23.9	8.1	3.9	4.1	3.2	1.2



자료) 기상연보(포항), 2016년

Table 3.3 Characteristic of air temperature (unit : °C)

월별		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
기온	평균	18	38	79	138	182	214	249	257	216	166	103	44
	최고	6.5	86	127	189	232	255	287	294	253	214	152	92
	최저	-20	-0.3	37	92	138	179	220	229	184	125	61	0.4

자료) 기상연보(포항), 1980~2010년

### 3.2.2 해상

#### 1) 파랑

대상해역의 심해설계파랑의 추정은 “전해역 심해설계파 추정보고서Ⅱ(한국 해양연구원, 2005. 12)”의 자료를 이용하여 Fig. 3.2와 같이 연구대상지 인근 해역으로 내습가능한 격자점에 대하여 50년 빈도 심해설계파를 추출하고 선정된 파랑은 Table 3.4에 정리하였다.

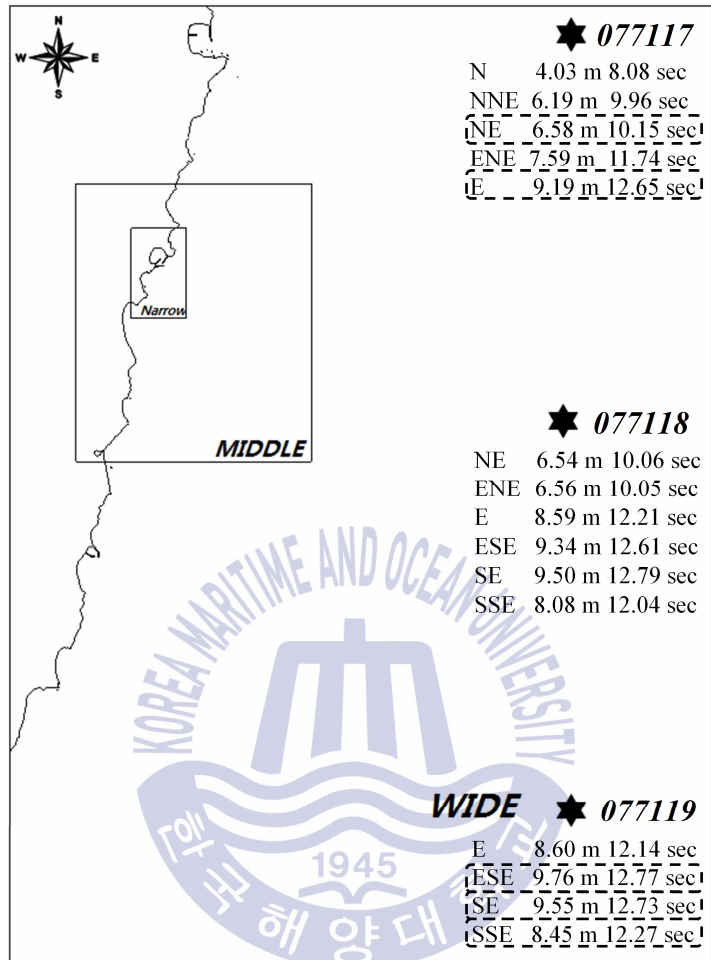


Fig. 3.2 Referred grid points of deepwater wave input

Table 3.4 Deepwater design wave height and period

Dir \ Return per.	10	20	30	50	100
E	5.02 m	6.72 m	7.79 m	9.19 m	11.20 m
Position : 077117	/9.35 s	/10.82 s	/11.65 s	/12.65 s	/13.97 s
NE	6.02 m	6.28 m	6.41 m	6.58 m	7.70 m
Position : 077117	/9.70 s	/9.91 s	/10.02 s	/10.15 s	/12.50 s
ESE	5.41 m	7.19 m	8.30 m	9.76 m	11.84 m
Position : 077119	/9.51 s	/10.96 s	/11.78 s	/12.77 s	/14.07 s
SE	5.40 m	7.10 m	8.16 m	9.55 m	11.53 m
Position : 077119	/9.57 s	/10.98 s	/11.77 s	/12.73 s	/13.99 s
SSE	5.18 m	6.56 m	7.38 m	8.45 m	9.94 m
Position : 077119	/9.60 s	/10.80 s	/11.47 s	/12.27 s	/13.30 s

## 2) 조석

기존 조석 자료 및 분석성으로부터 대상해역인 감포항의 조위는 Table 3.5 와 같으며 대조평균고조면 18.6cm, 소조평균고조면 16cm 이고, 평균해면 13.1cm, 약최고고조위 26.2cm를 나타낸다.

Table 3.5 Tidal levels of Gampo port

구 분		조 위(m)	조 위 도
약최고고조위	(A.H.H.W)	DL.(+) 0.262	
대조평균고조위	(H.W.O.S.T)	DL.(+) 0.186	
평균고조위	(H.W.O.M.T)	DL.(+) 0.173	
소조평균고조위	(H.W.O.N.T)	DL.(+) 0.160	
평균해면	(M.S.L)	DL.(+) 0.131	
소조평균저조위	(L.W.O.N.T)	DL.(+) 0.102	
평균저조위	(L.W.O.M.T)	DL.(+) 0.089	
대조평균저조위	(L.W.O.S.T)	DL.(+) 0.076	
약최저저조위	(A.L.L.W)	DL.(±) 0.000	

### 3.3 수치모델의 구성

심해설계과의 제원을 결정하고 입사파랑 내습 시 항내 도달 파랑의 분포 및 내습특성을 파악하기 위하여 광역, 중간역, 협역에 해당하는 계산영역을 설정하였다. 협역 계산영역은 기존 감포항의 동방파제 외측 또는 남측으로 항만을 확장하여 어항에 여객 및 화물복합기능의 추가하여 항내의 세부적인 지형변화 등에 따른 파랑변형을 고려할 수 있도록 설정하였으며, 격자와 요소간 간격은 입사파랑의 파장분해가 원활하게 이뤄지는 해상도를 고려하여 구성하였다.

광역은 동서로 20.0km, 남북으로 30.0km, 중간역은 동서로 8.5km, 남북으로 10km로 설정하였다. 협역은 세부적인 평면배치계획의 변화를 고려할 수 있도록 6.4km<sup>2</sup>의 면적으로 설정하였다. 광역은 유한차분 격자체계로서 그 적용 간격은 100m의 등간격(x방향 200개, y방향 300개)으로 총 50,000개의 등격자망을 구성하였고, 중간역의 경우는 50m의 등간격(x방향 170개, y방향 200개)으로 총 34,000개의 등격자망으로 하였다. 협역은 10m의 등간격(x방향 200개, y방향 320개)으로 총 64000개의 등격자망으로 하여 광역의 파랑이 내습하여 대상항만에서 세부파랑반응을 파악하도록 하였다. SWAN 모델에서는 광역,중간역, 협역을 네스팅(nesting)기법을 적용하여 개방경계를 연동시켰으며, Bouss-2D 모델에서는 SWAN 모델의 중간역 계산결과를 개방경계에 적용하여 해석하는 것으로 하였다. 실험은 약최고만조위 (Approx. H.H.W)인 0.262m를 기준해면으로 하였다.

Table 3.6 Model range and sea level condition

구 분		실험내용		
		광 역	중 간 역	협 역
사 용 모 형		SWAN (파랑작용평형방정식 모델)		SWAN (파랑작용평형방정식 모델) & Bouss-2D (Boussinesq 방정식 모델)
모 델 구 성	모 델범위	20.0km×30.0km	8.5km×10km	2km×3.2km
	격자구성	dx=dy=100m	dx=dy=50m	dx=dy=10m
	격자수	200개 × 300개	170개 × 200개	200개 × 320개
기준해면		약최고고조위 D.L(+) 0.262m		

### 3.3.1 광역의 구축

광역 해석은 심해설계과 지점으로부터 대상해역에 영향을 미치는 이상파랑의 파랑스펙트럼을 협역에 적용시키기 위한 목적으로 수행하였다. 광역의 격자망은 계산영역 20.0km × 30.0km이며 격자간격은 계산시간 단축, 천수변형 및 굴절이 순조롭게 진행되고, 중간역 경계와의 연계를 고려하여 100m로 설정하였다. 수심과 육지의 경계는 최근 수심 및 지형 측량 자료를 사용하였다 (Fig. 3.3 ~ Fig. 3.4).

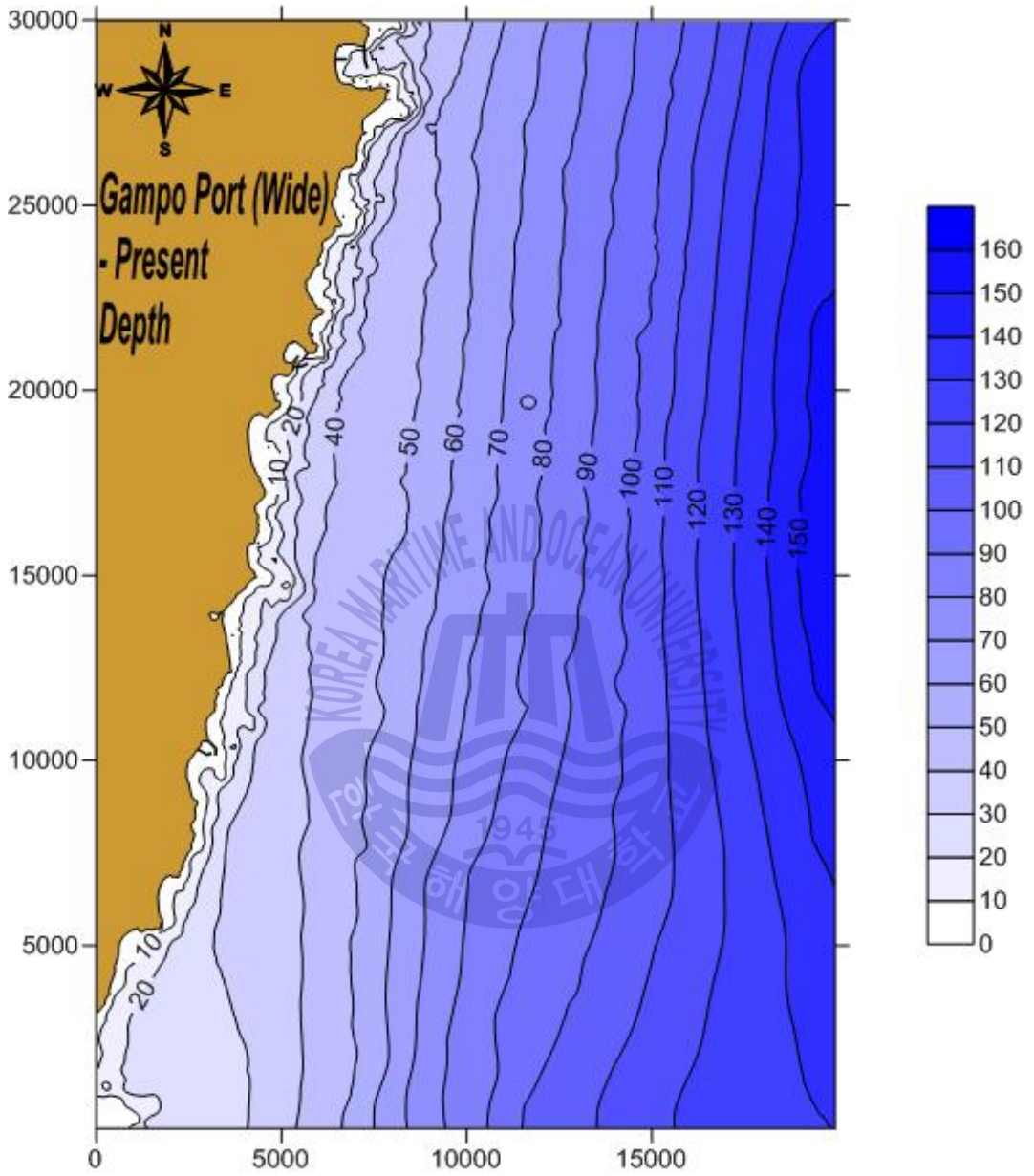


Fig. 3.3 Bathymetry of the wide area



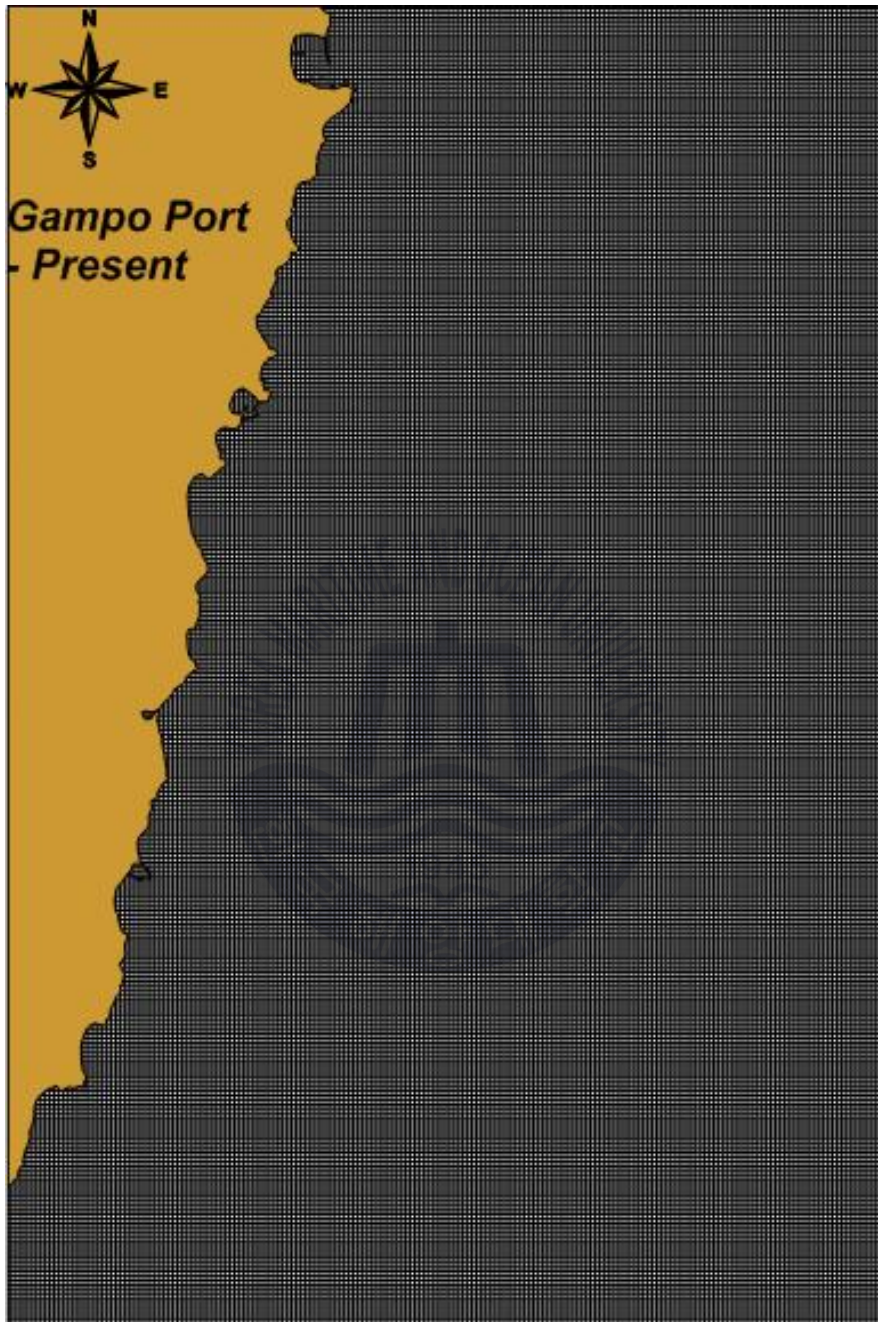


Fig. 3.4 Grid of wide area

### 3.3.2 중간역의 구축

중역 파랑변형모델의 영역은 8.5km × 10km 이고 50m 정방격자로 대상해역을 중심으로 파랑의 재현성을 높일 수 있도록 구성하였다.

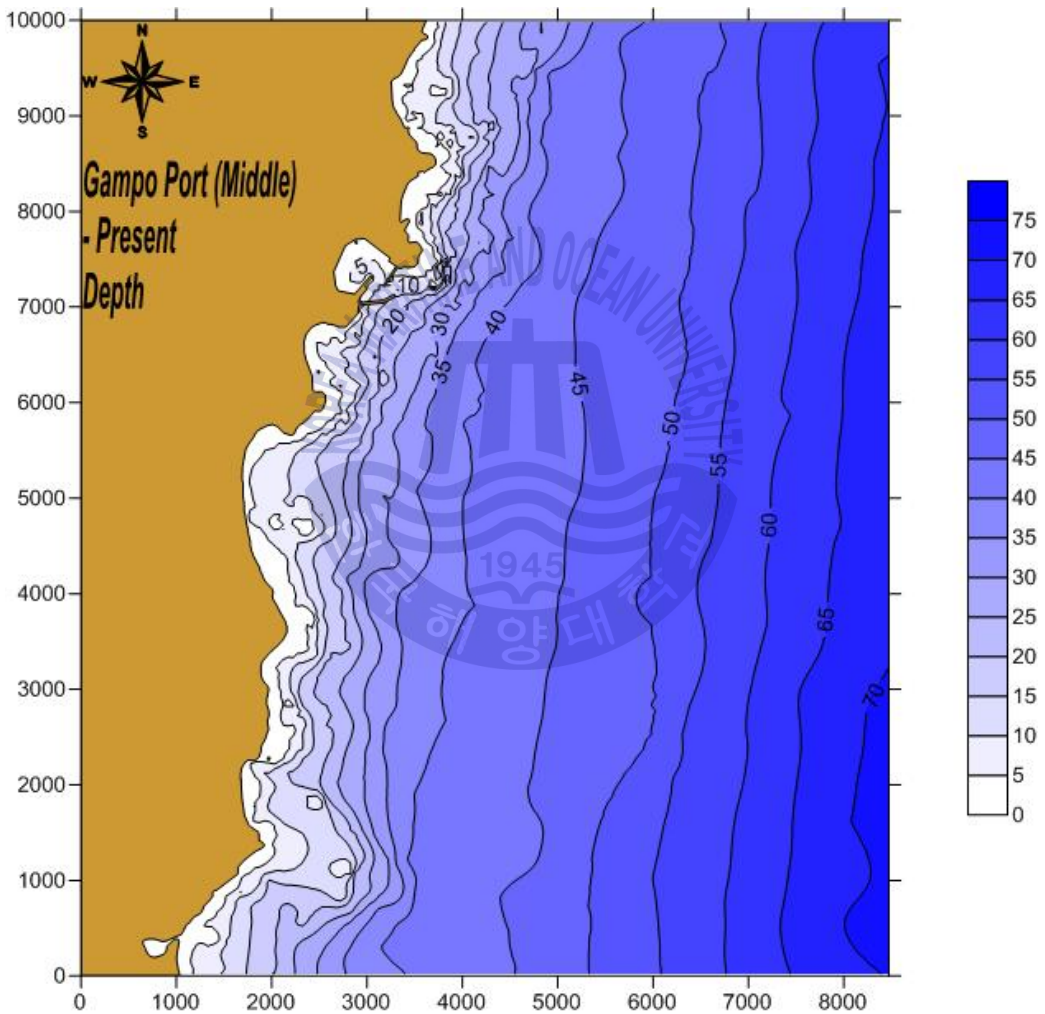


Fig. 3.5 Bathymetry of the middle area

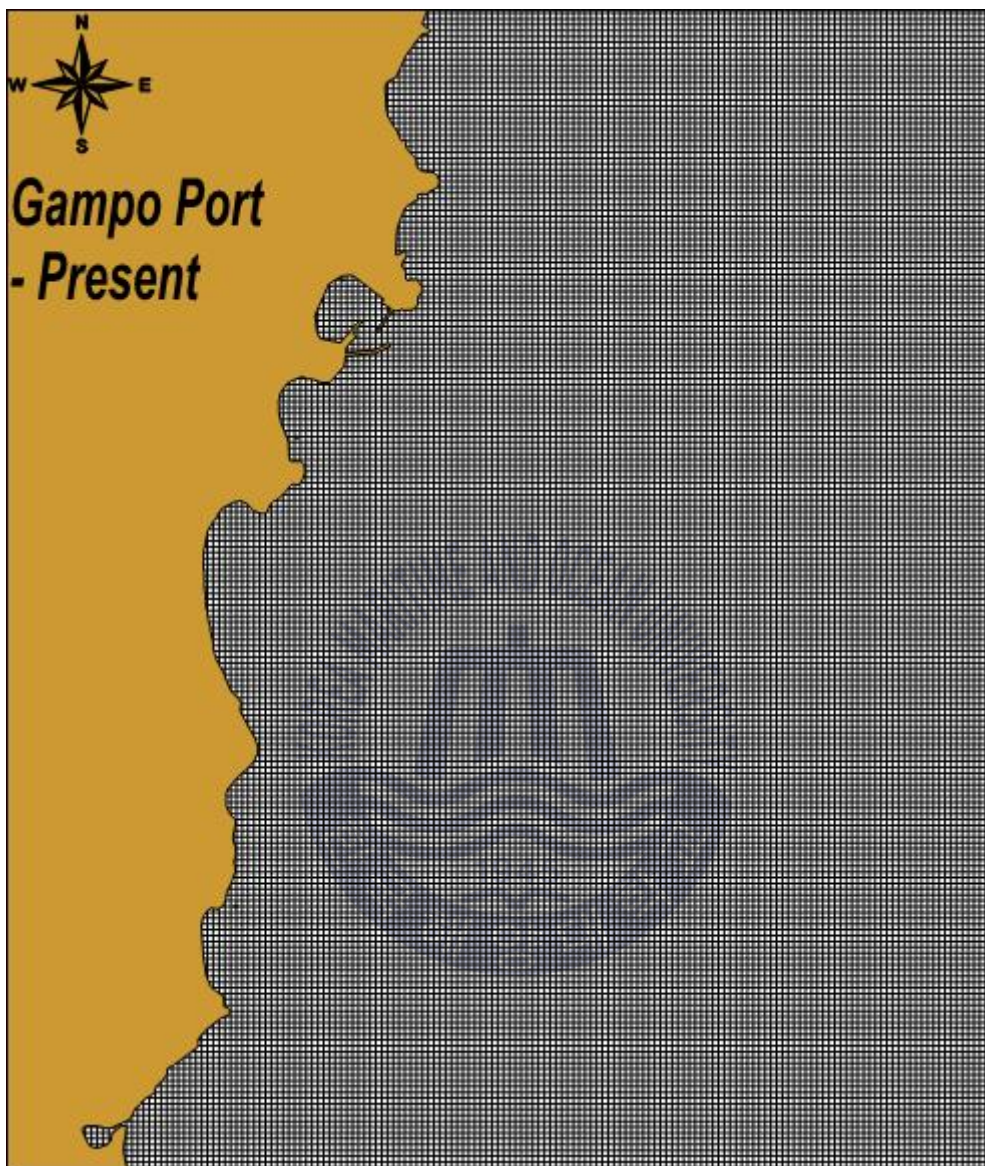


Fig. 3.6 Grid of middle area

### 3.3.3 협역의 구축

협역의 영역은 2km × 3.2km 으로 대상해역의 정밀하게 표현하기 위해 격자 간격을 10m로 설정하였다. 협역은 2가지 모델을 사용하여 파랑작용 평형방정식을 바탕으로 한 SWAN 모델과 Boussinesq 방정식을 기반으로 한 Bouss-2D 모델로 파랑반응특성을 비교분석하였다.

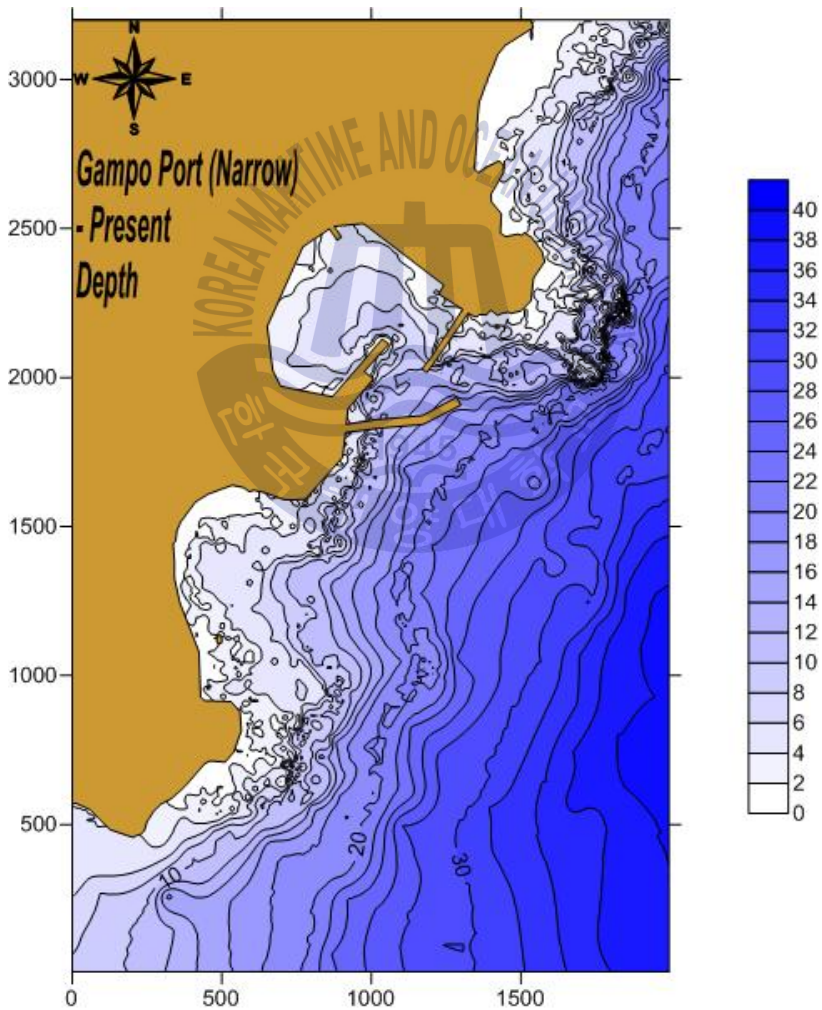
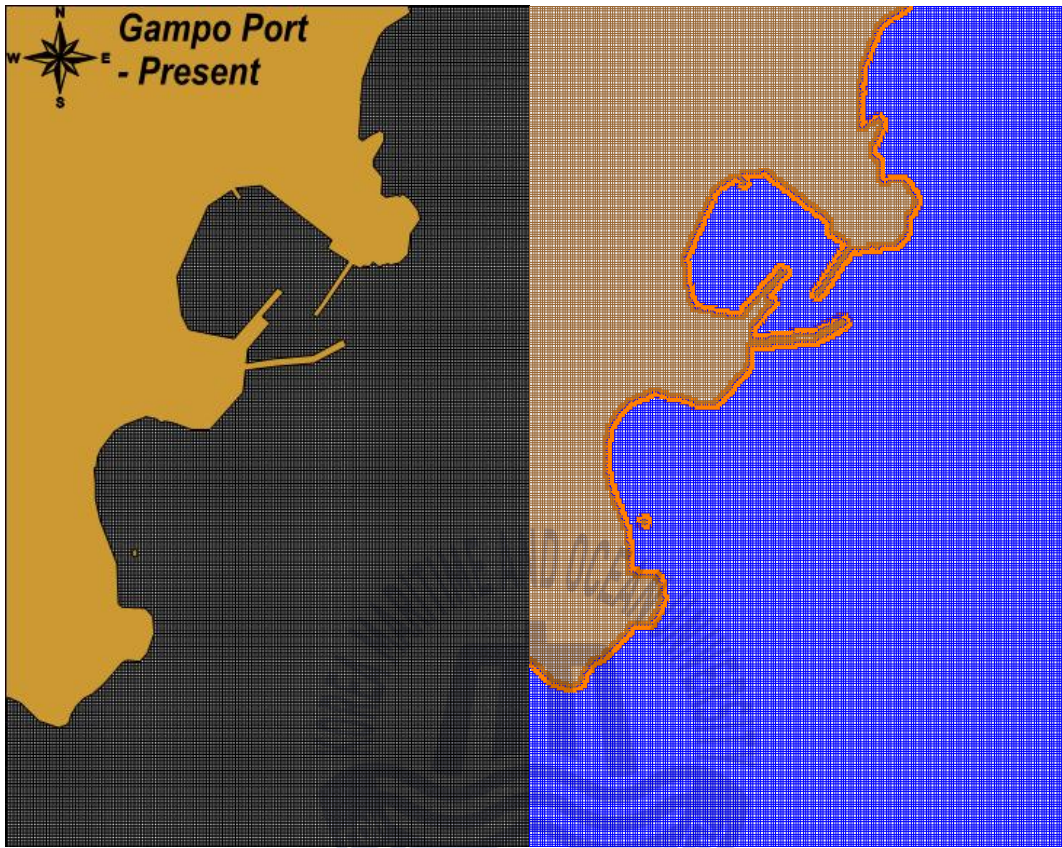


Fig. 3.7 Bathymetry of the narrow area



a) SWAN

b) Bouss-2D

Fig. 3.8 Formation of grids for narrow area

현재 북측으로 관광지인 송대말 등대와 간출암이 있어 손상을 주지 않는 최소한의 범위로 외측방과제를 신설하고 감포항의 기존 남방과제 100m를 제거하여 선박의 항내 진입의 제한을 최소로 하는 안을 ALT-1로 하였다. ALT-2안은 현재 자연해빈이 존재하고 있는 남측지역에 화물선/여객선 부두, 방과제를 신설하는 계획으로서 저수심의 해변지역에 신규 항만을 계획하는 대안이다. ALT-3안과 ALT-4안은 ALT-2안과 같이 남측신규항만개발을 목표로 하여 방과제의 형상을 다르게 한 것이고 ALT-5는 동측 및 남측으로 대규모 신규항만을 개발하는 것을 목표로 한 것이다. (Fig. 3.9 ~ 3.11)

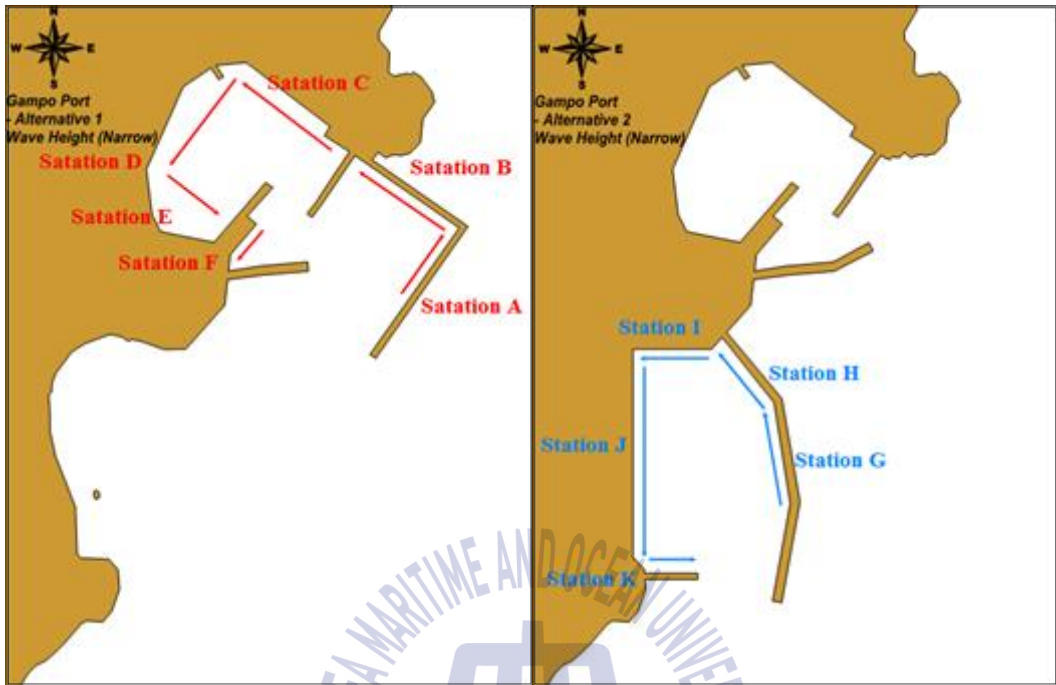


Fig. 3.9 Alternative 1 & 2 and cross sections for comparison

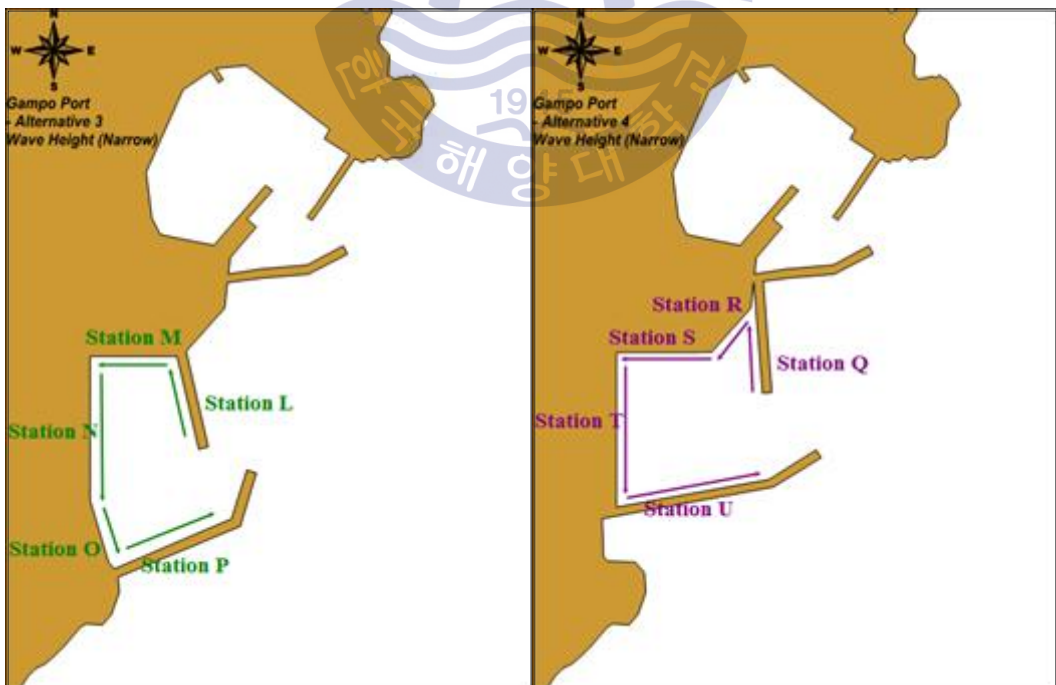


Fig. 3.10 Alternative 3 & 4 and cross sections for comparison

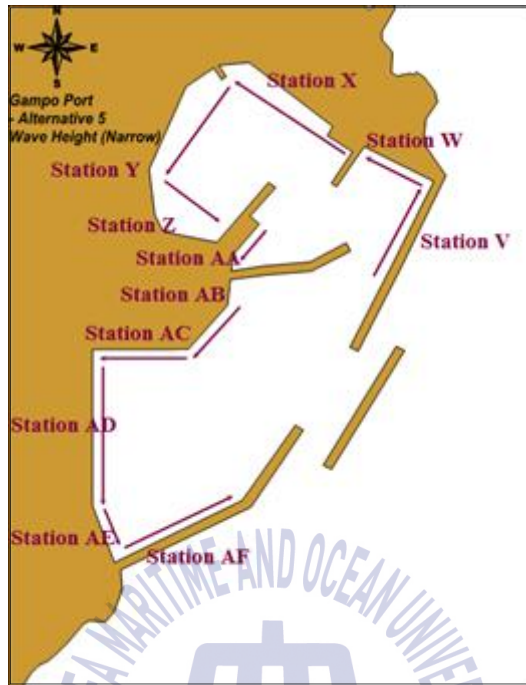


Fig. 3.11 Alternative 5 and cross sections for comparison

반사율의 적용은 항만설계 기준 및 Goda 이론을 참고하여 직립구조물 0.90, 일반해안 0.2, TTP나 사석 0.5로 적용하였다(Table 3.7).

Table 3.7 Applied reflection coefficient

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

Table 3.8은 일본항만협회가 제시한 항만이용에 지장을 초래하지 않는 파고의 한도를 정리한 것이며, 각 대안에 Station A ~ AF 까지 부두역을 설정하여(Fig. 3.9 ~ 3.11) 상세 파고분포도를 확인하고 심해설계파 정온도 여부를 확인하기 위해 계류한계파고를 화물선 및 어업지도선 1.1m, 어선 0.7m를 기준으로 본 연구에 활용하였다.

Table 3.8 Wave height limit for port users

선급		하역가능파고 (m)	계류가능파고(m)		정박가능파고 (m)
			횡접안	종접안	
100 T 이하	범위	0.3 ~ 1.0	0.2 ~ 1.5	0.3 ~ 1.2	0.3 ~ 3.0
	평균	0.55	0.84	0.68	1.60
100~500 T	범위	0.3 ~ 1.0	0.3 ~ 1.5	0.5 ~ 1.4	0.5 ~ 3.0
	평균	0.60	0.97	0.82	2.30
500~1000 T	범위	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.5	0.5 ~ 0.8	0.5 ~ 3.5
	평균	0.67	0.91	0.70	2.82
1000~3000 T	범위	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.6	0.7 ~ 1.0	1.0 ~ 4.0
	평균	0.75	0.95	0.82	3.25
3000~5000 T	범위	0.7 ~ 1.0	0.7 ~ 2.0	0.8 ~ 1.2	1.5 ~ 4.0
	평균	0.80	1.18	1.00	2.75
5000~10000 T	범위	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 2.4	0.8 ~ 1.5	2.0 ~ 4.4
	평균	0.91	1.40	1.15	3.20
10000~20000 T	범위	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 2.4	0.8 ~ 2.0	2.0 ~ 4.4
	평균	0.93	1.54	1.40	3.20
20000T 이상	범위	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 2.4	0.8 ~ 2.0	2.0 ~ 4.4
	평균	0.93	1.68	1.40	3.20

자료) 일본항만협회, 1974, 일본항만기술요보 No.21



## 제 4 장 수치실험 및 분석

파랑평형작용방정식에 기초한 SWAN 모델로 광역, 중간역, 협역으로 격자를 세분화하여 파랑반응특성을 분석하였고, Bouss-2D 모델에서는 SWAN에서 중간역의 결과를 입력제원으로 상세한 결과를 확인하였다. 선정된 5개의 파랑제원들로 외해에서부터 파랑변형실험을 수행하였고, 협역에서의 5가지의 대안들에 대하여 각 부두역을 설정하여 결과를 세분화하였다.

### 4.1 광역 실험결과

광역의 실험은 심해설계과 지점에서부터 중간역에서의 입사제원을 추출하기 위함이다. 중간역 입사경계에서의 파고는 E파향이 8.85 ~ 8.97m, NE 파향이 6.40 ~ 6.48m, ESE 파향 9.37 ~ 9.56m, SE파향이 9.07 ~ 9.25m, SSE 파향이 7.89 ~ 8.21m로 나타났으며 이는 심해설계과 제원보다 다소 감소한 값으로 결과가 나온 것으로 보아 광역에서의 파랑이 중간역까지 크게 영향을 받지 않고 에너지가 그대로 전파되는 것을 확인할 수 있다. Fig.4.1 ~ 4.5는 광역의 수치실험 결과를 등파고선도로 도식화 한 것이다.

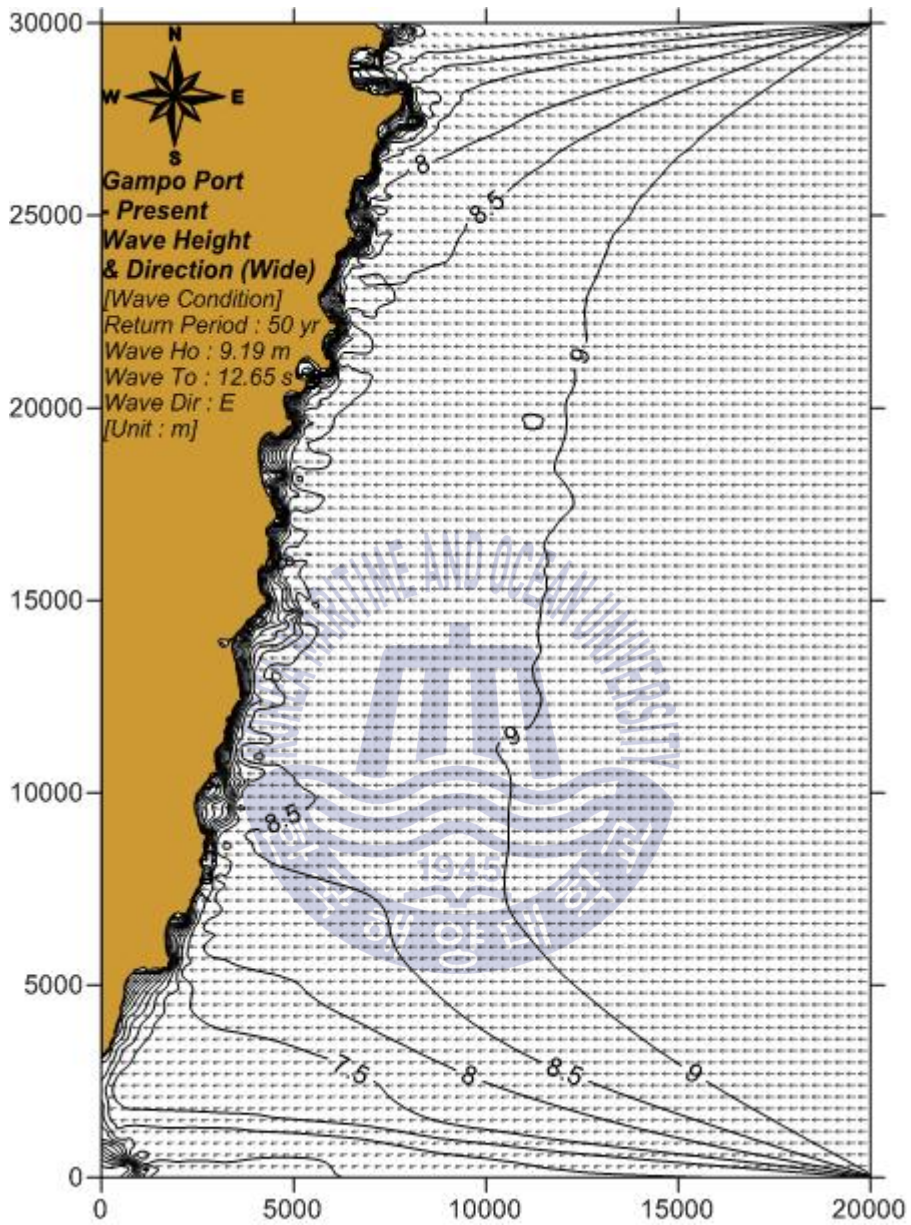


Fig. 4.1 Wave direction vector and height of E wave (Wide)

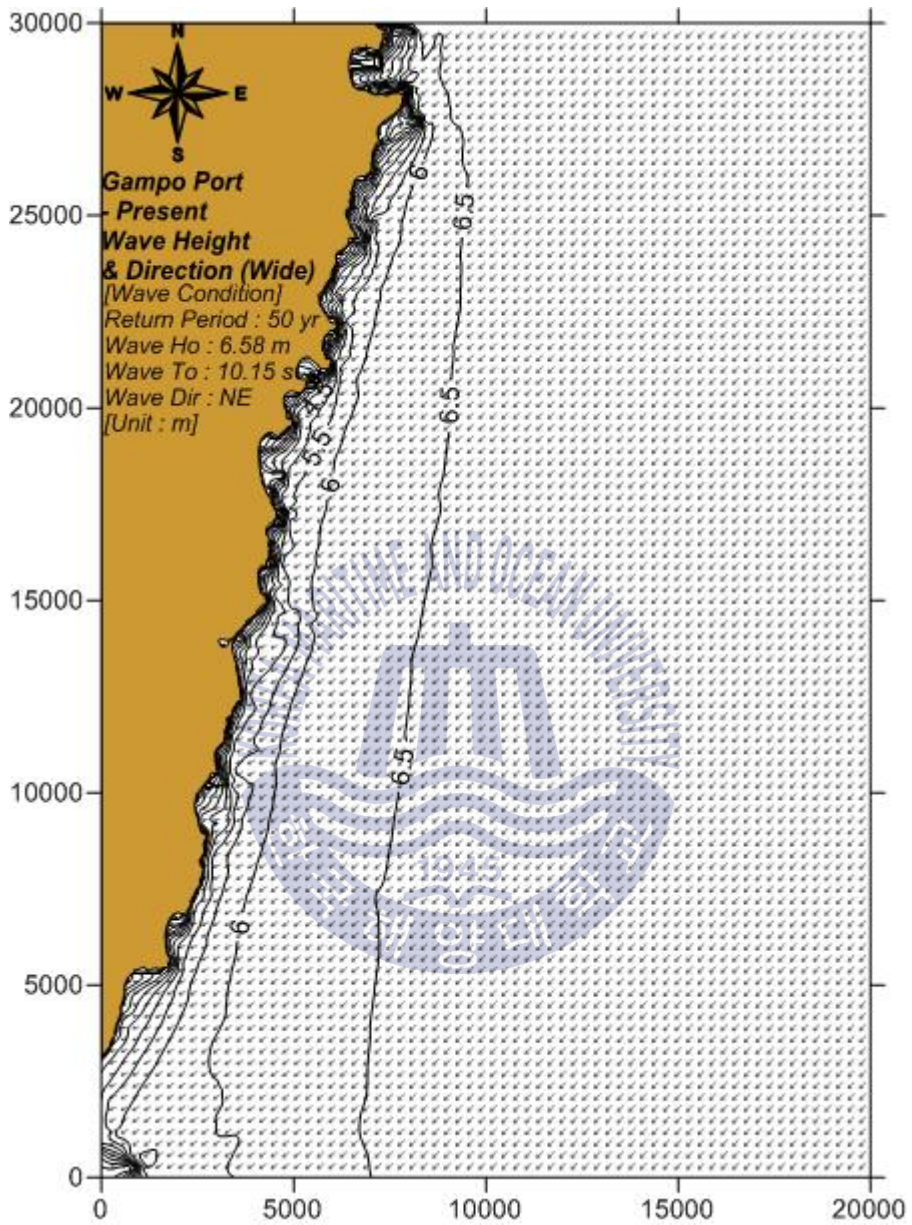


Fig. 4.2 Wave direction vector and height of NE wave (Wide)

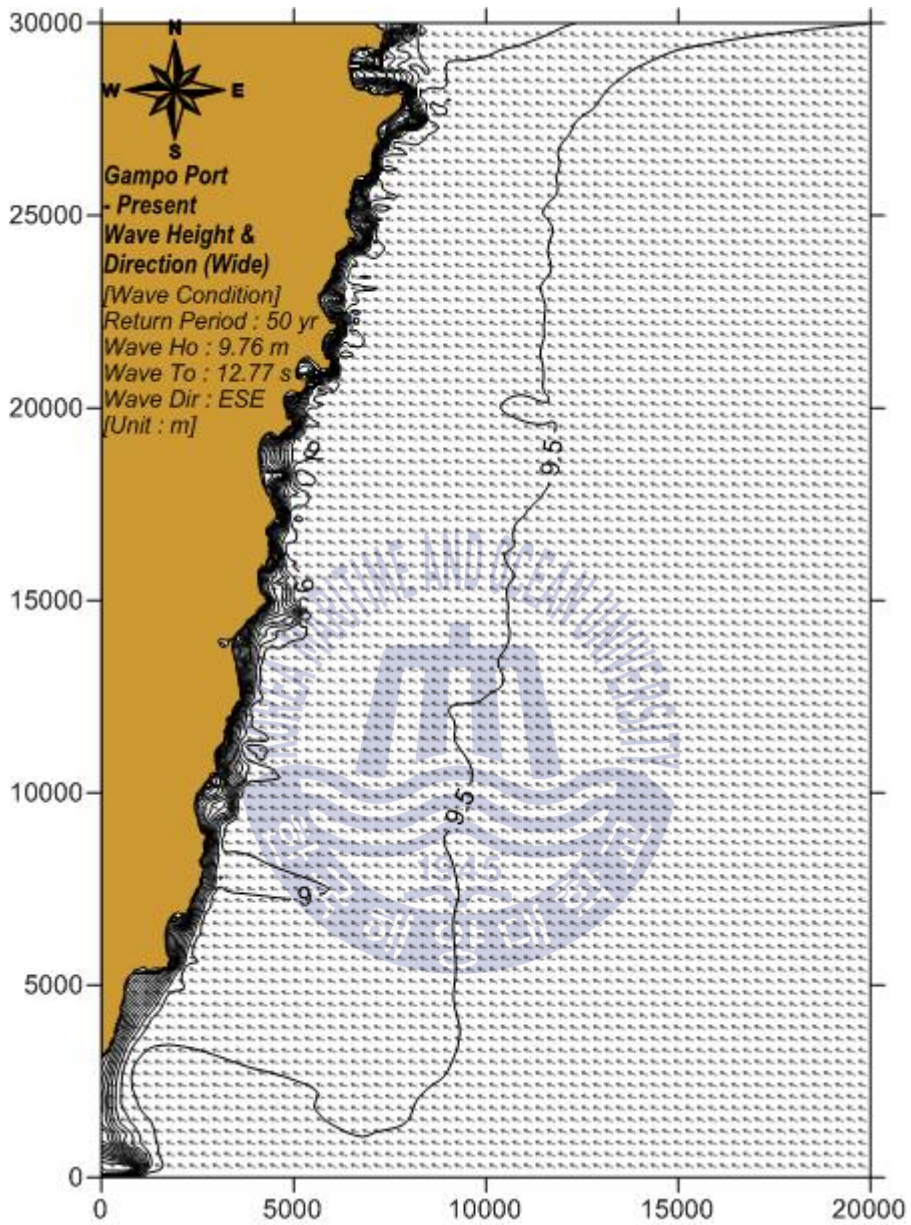


Fig. 4.3 Wave direction vector and height of ESE wave (Wide)

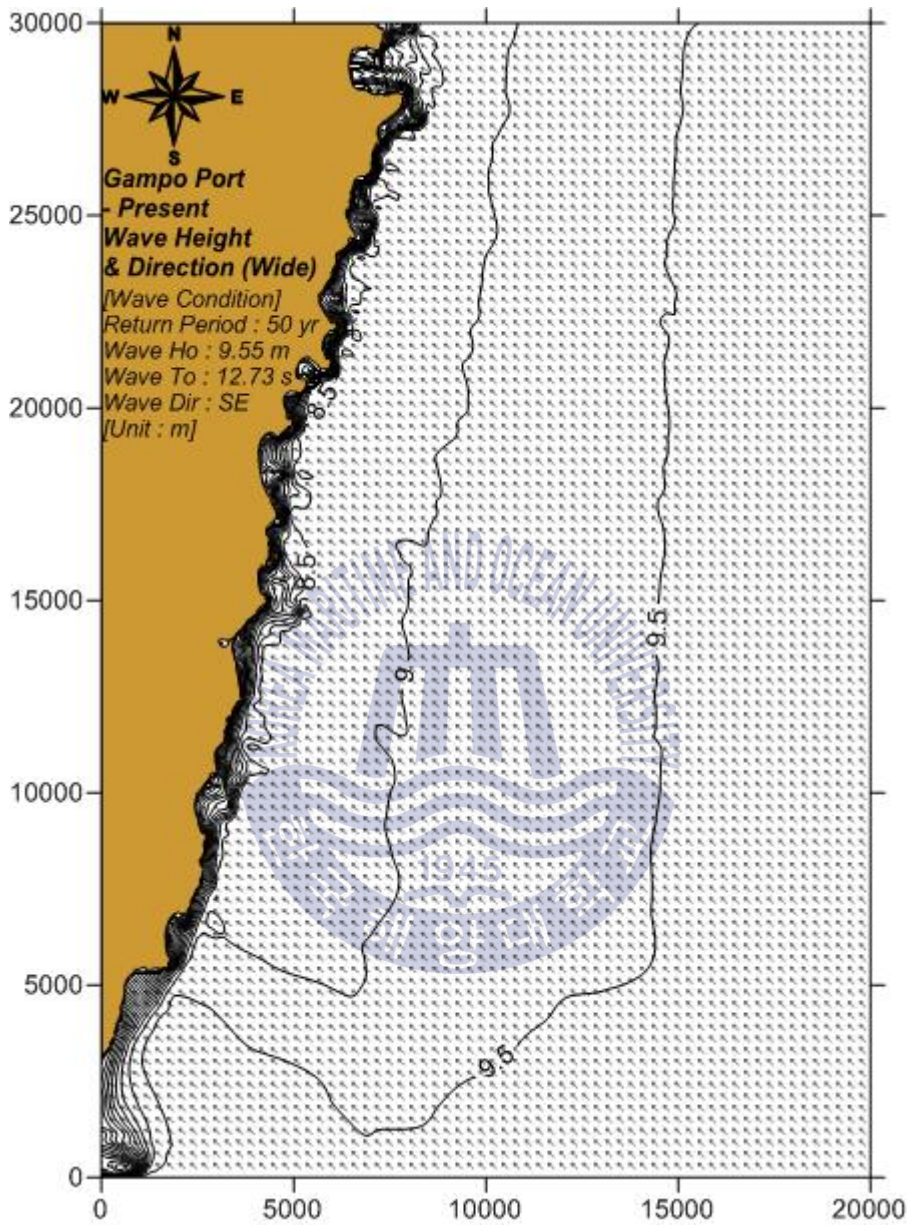


Fig. 4.4 Wave direction vector and height of SE wave (Wide)

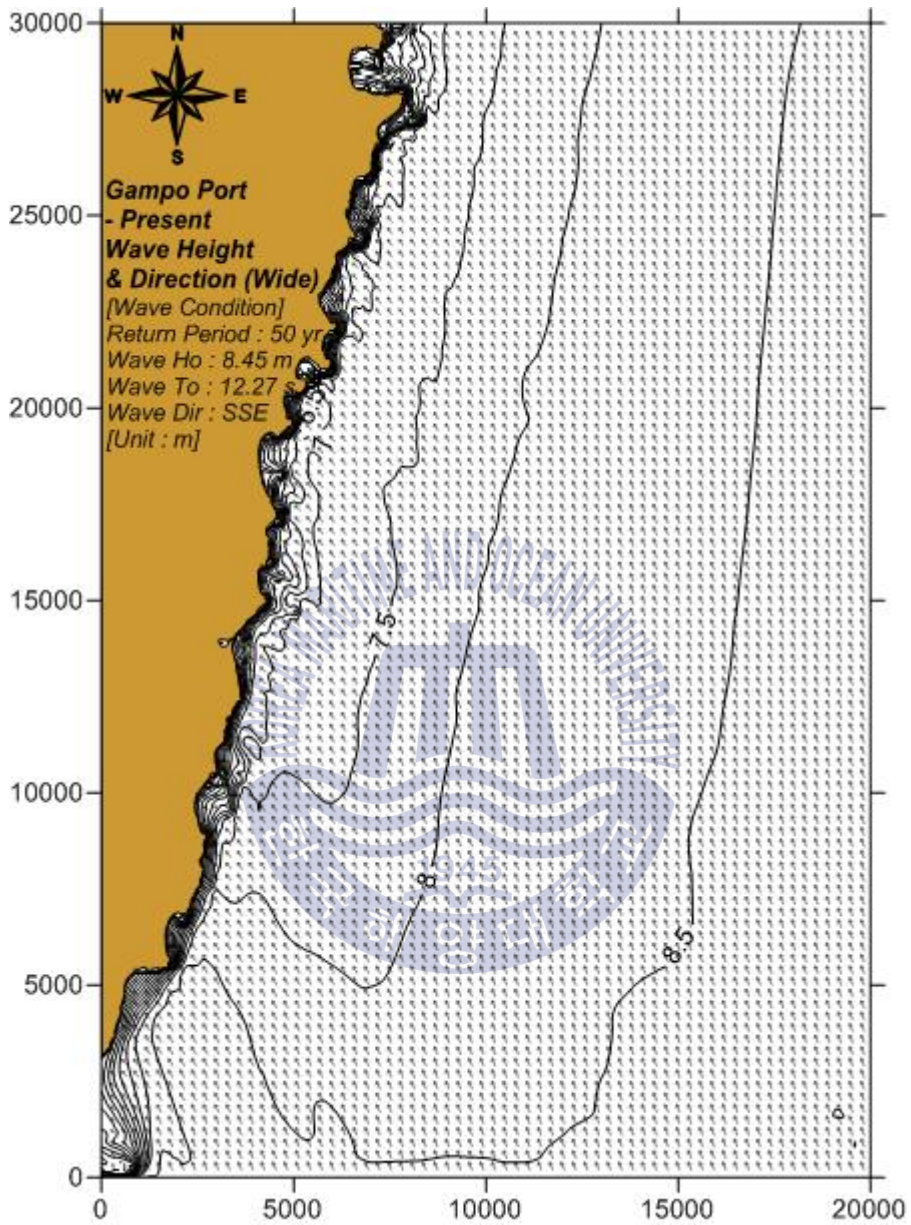


Fig. 4.5 Wave direction vector and height of SSE wave (Wide)

## 4.2 중간역 실험결과

심해설계파의 각 제원에 대하여 광역으로부터 중간역 연계 실험을 수행하였다. 광역 실험의 연계되어 Nesting 기법으로부터 실험한 중간역 모델은 광역의 실험결과와 동일한 흐름을 보인다. 중간역의 실험은 협역모델의 파고, 주기, 파향의 입사파랑 제원을 알기 위함이다. Table 4.1은 중간역으로 부터의 협역의 경계역에서 입사파랑의 제원이다.

Table 4.1 Deepwater design wave height and period

Direction	Position	a) Offshore Input Condition	b) Coastal Input Condition
E	077117	9.19 m / 12.65 s	8.4 m / 12.65 s
NE		6.58 m / 10.15 s	5.4 m / 10.77 s
ESE	077119	9.76 m / 12.77 s	9.2 m / 12.47 s
SE		9.55 m / 12.73 s	8.6 m / 12.73 s
SSE		8.45 m / 12.27 s	6.9 m / 12.27 s

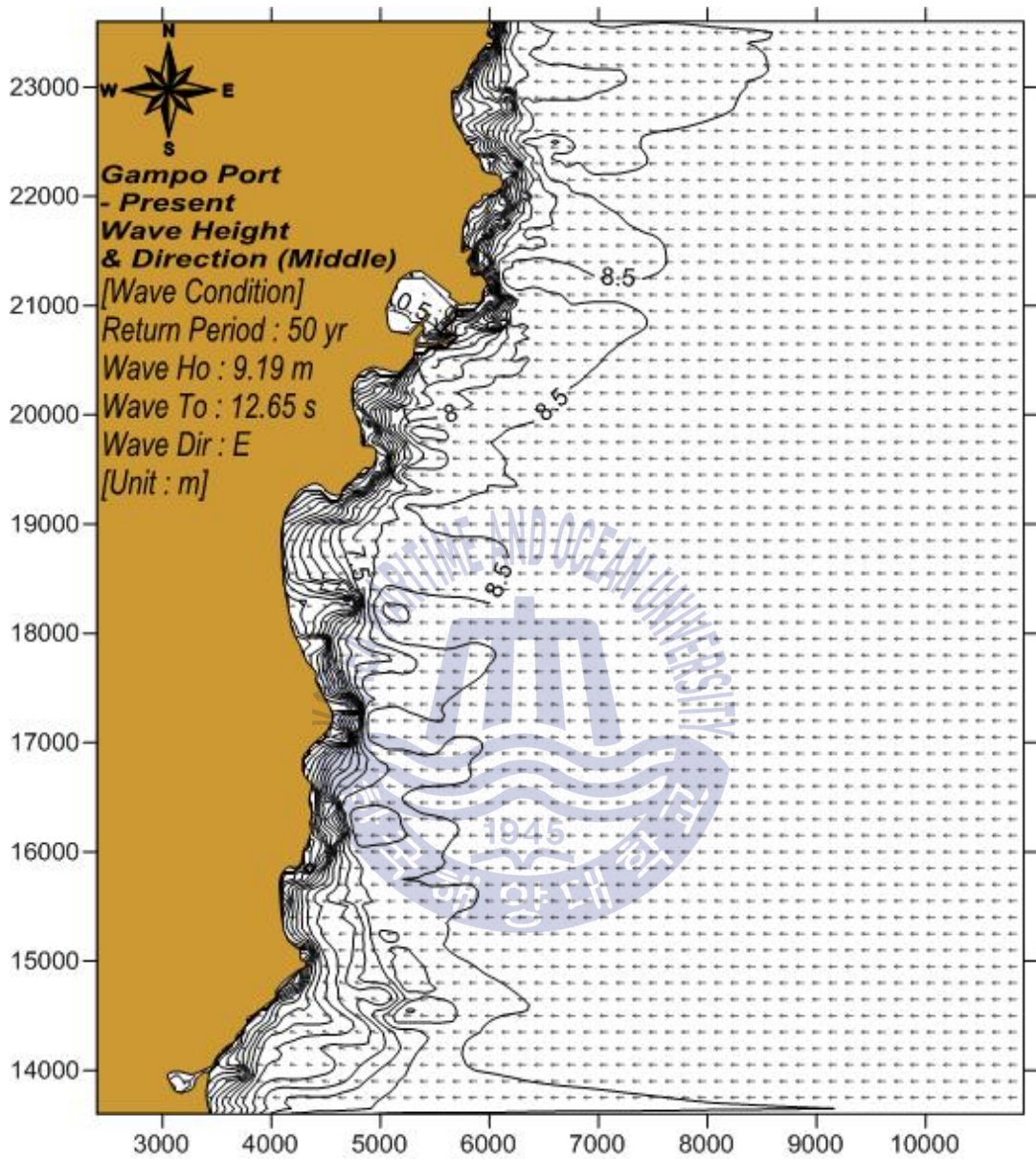


Fig. 4.6 Wave direction vector and height of E wave (Middle)



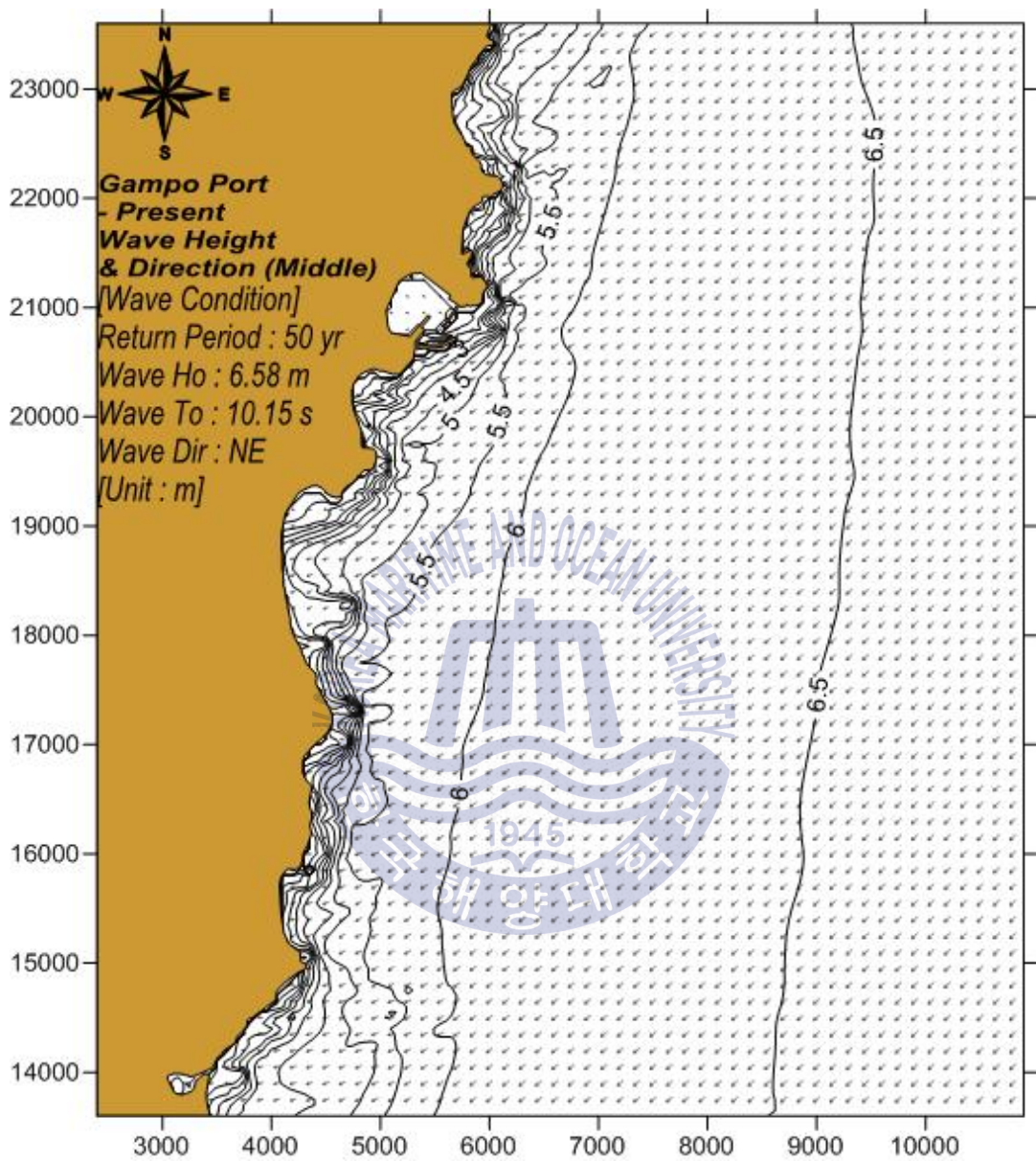


Fig. 4.7 Wave direction vector and height of NE wave (Middle)

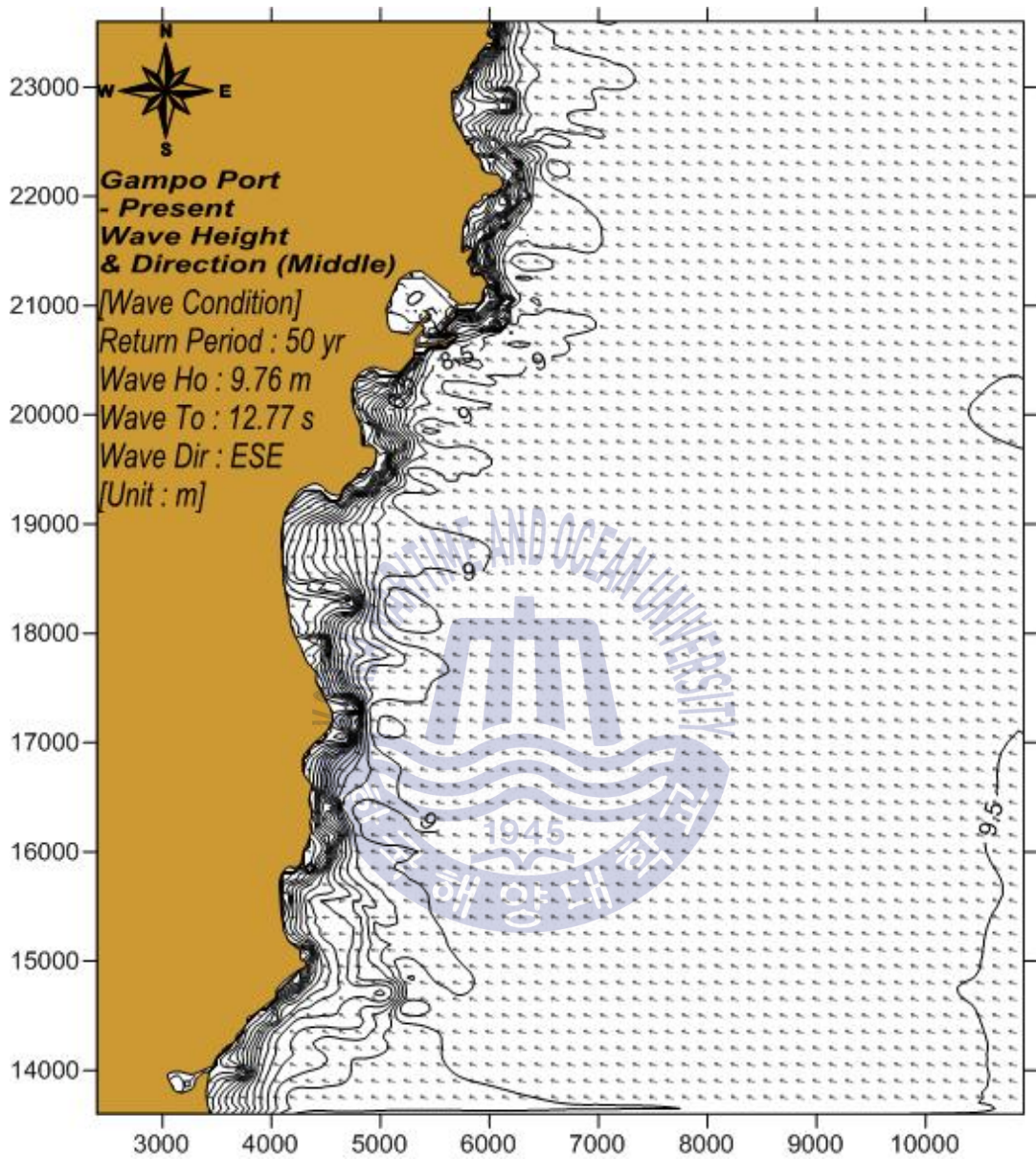


Fig. 4.8 Wave direction vector and height of ESE wave (Middle)

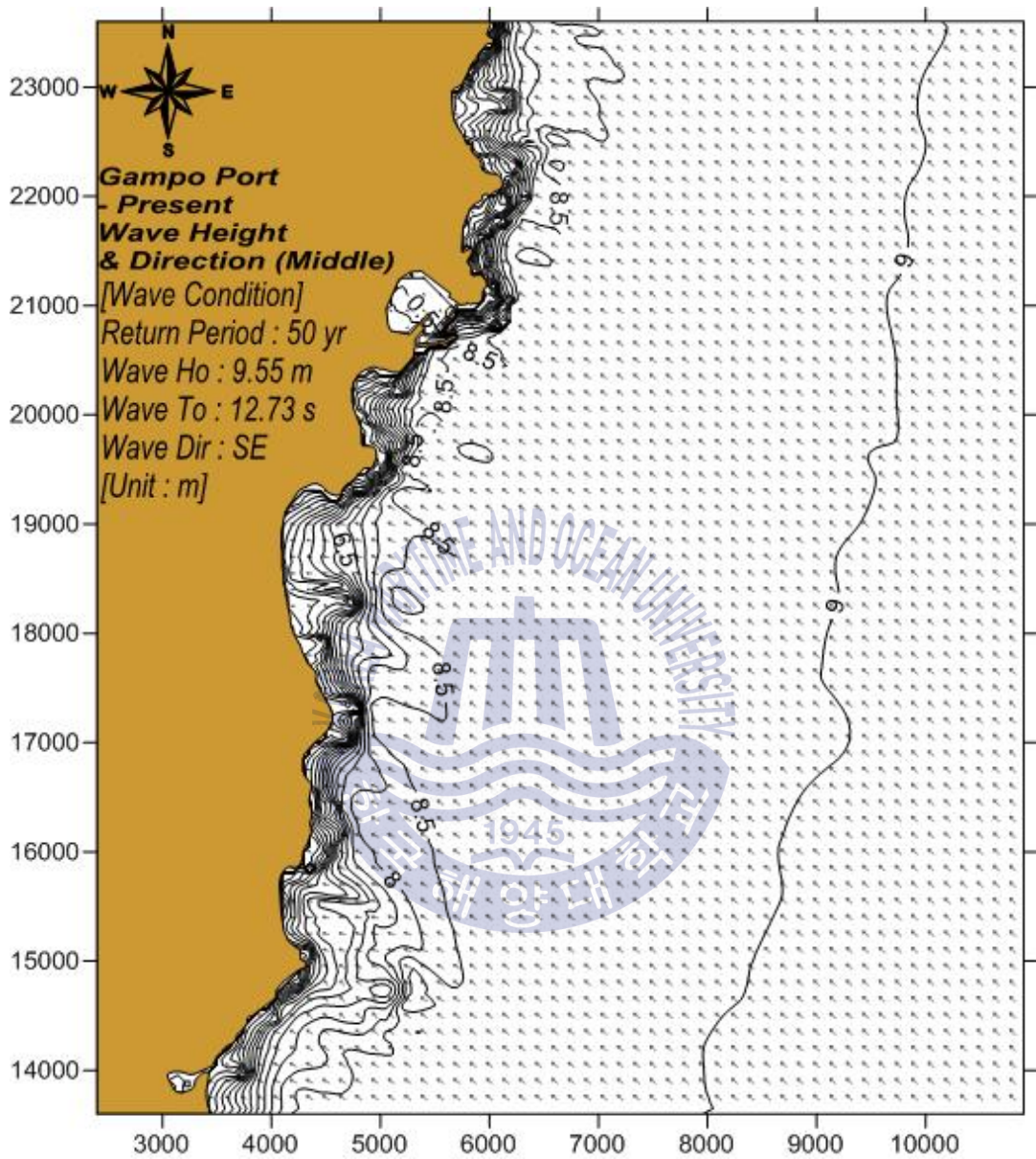


Fig. 4.9 Wave direction vector and height of SE wave (Middle)

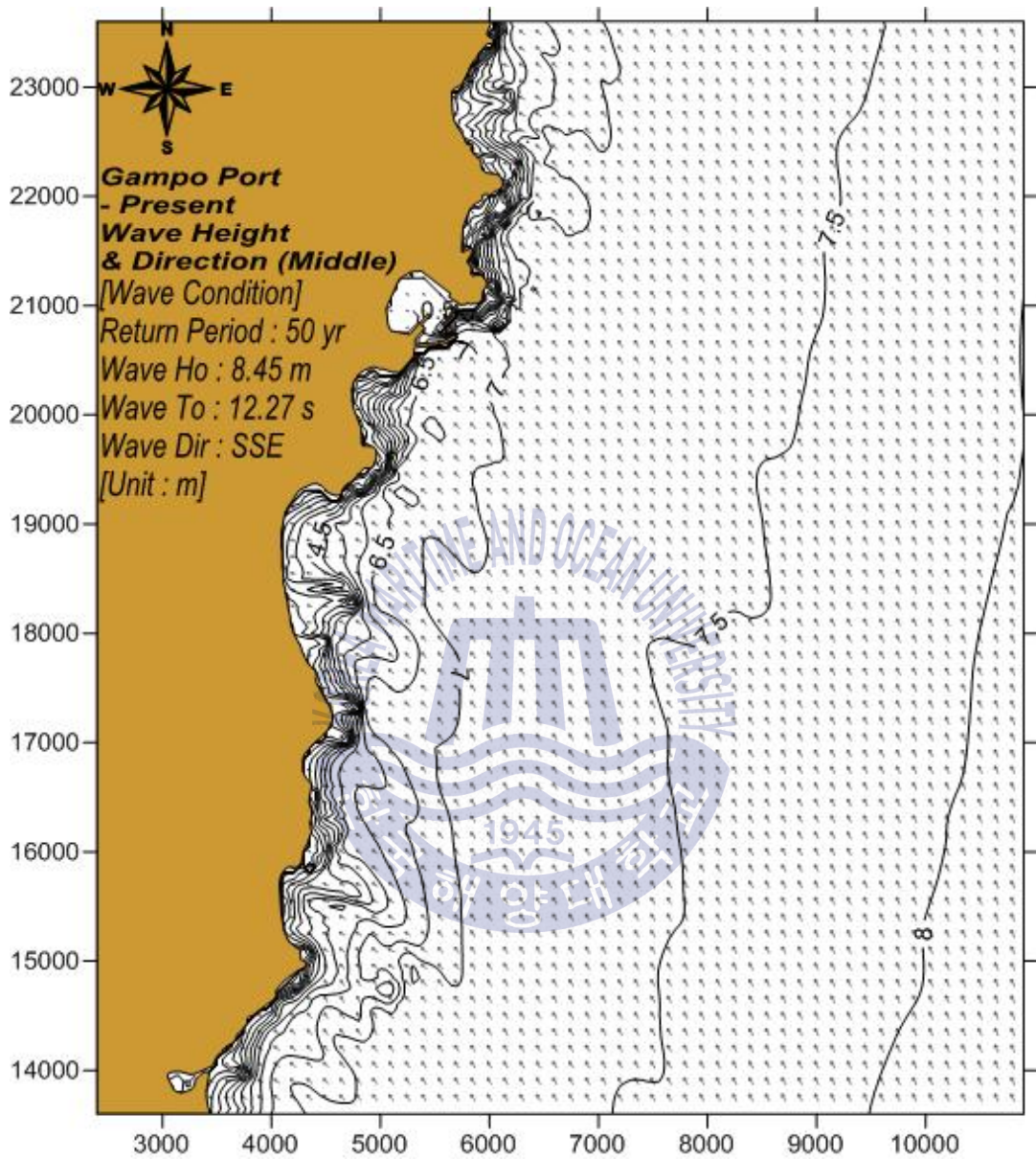


Fig. 4.10 Wave direction vector and height of SSE wave (Middle)

### 4.3 협역 실험 결과

협역의 실험은 2가지 모델을 통해 현재 상태와 5가지의 대안에 대하여 계류한계파고를 기준으로 정온도를 확인하였다. 정온도 여부를 알기 위하여 앞서 설정한 부두역에 대하여 반응을 분석하였다.(Fig. 3.9 ~ 3.11)

Fig. 4.11 ~ 4.15는 ALT-1안에 대한 등파고선도를 좌측은 SWAN모델, 우측은 Bouss-2D 모델로 구분하여 파향별로 정리한 것이다. ALT-1안의 경우는 기존 감포항의 어선부두인 ST. C & E와 신설 화물 및 여객부두인 ST. A & B를 정온도 평가 기준을 계류한계파고로 하였을 때, S계열의 ST. A를 제외하고 모든 파향에서 기준 잡은 계류한계파고 0.7m(어선) & 1.1m(화물선)보다 낮은 결과로 정온도를 확보하였다. Bouss-2D 모델에서 SE파, SSE파의 ST. A는 기준한 하물선 계류한계파고 1.1 m 보다 조금 넘는 1.15 m 정도의 파고를 나타낸다. 이는 S계열에서 추가 동측방파제의 끝단에서 회절되어 파랑의 에너지가 소산되지 않고 밀고 진입하여 추가 동측 항만의 ST. A에서 파고분포가 기준보다 다소 높은 경향을 보였다. 또한 항로의 통항안정을 위해 남방파제 100m 제거한 이유로 파랑의 진입이 기존의 상태보다 차단역할이 부족하여 파고가 다소 증가한 것으로 나타났다. 방파제 외측으로 소파제를 두어 파랑감쇠를 유도하거나 방파제 형상을 다르게 하여 S계열의 동측 화물부두의 정온도 확보를 위한 추가실험이 필요하다.

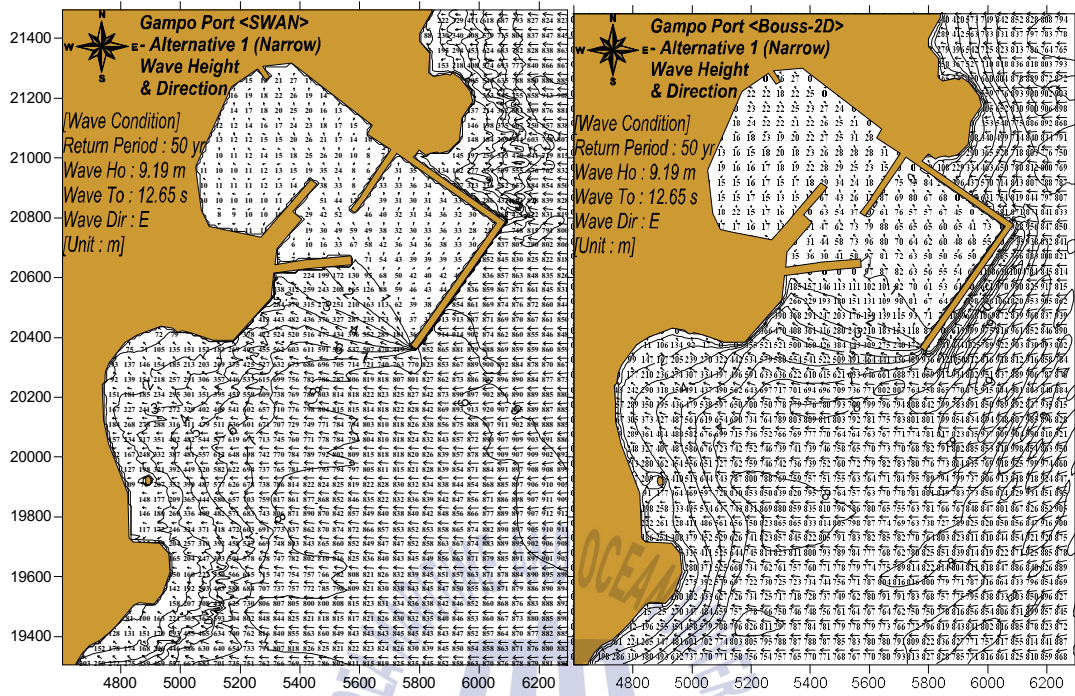


Fig. 4.11 Wave height of E wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D)

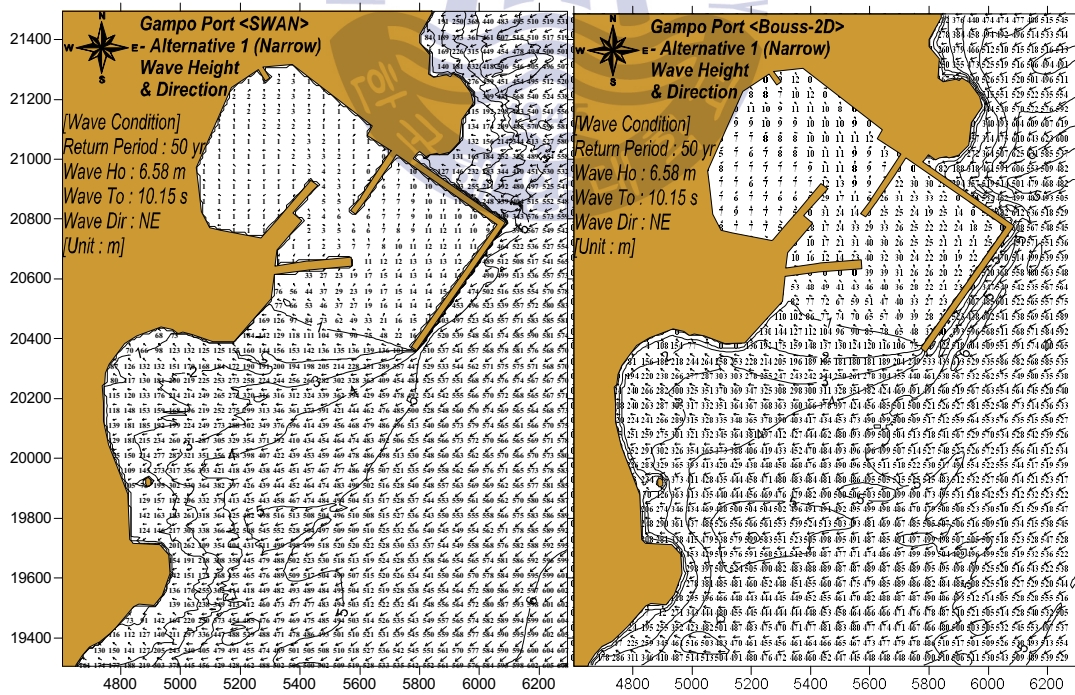


Fig. 4.12 Wave height of NE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D)

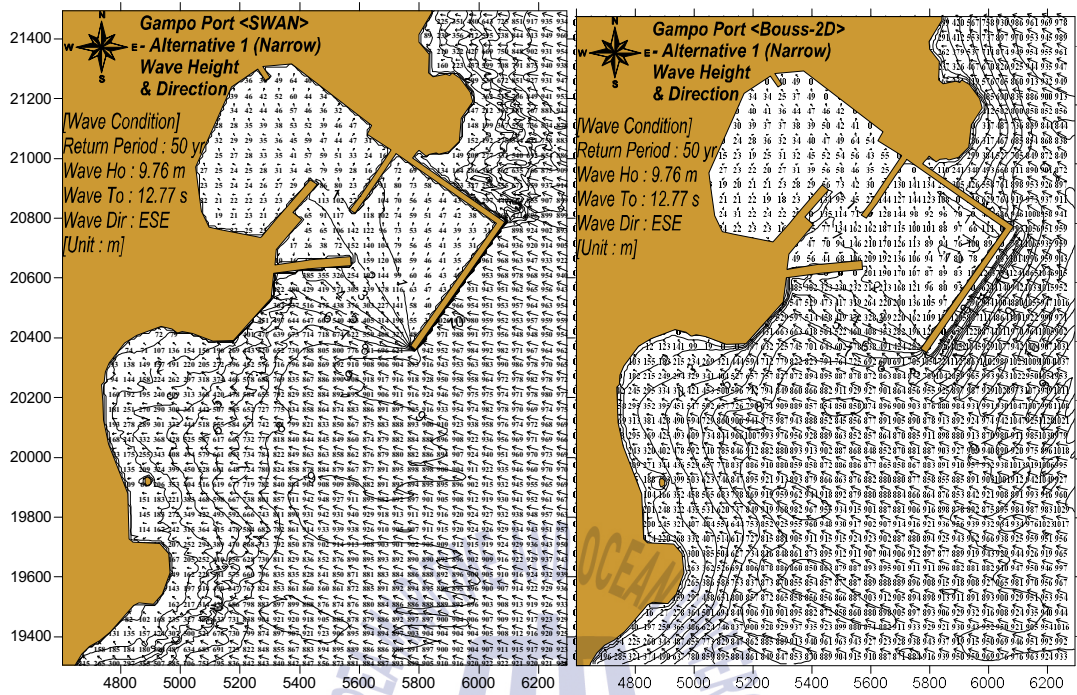


Fig. 4.13 Wave height of ESE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D)

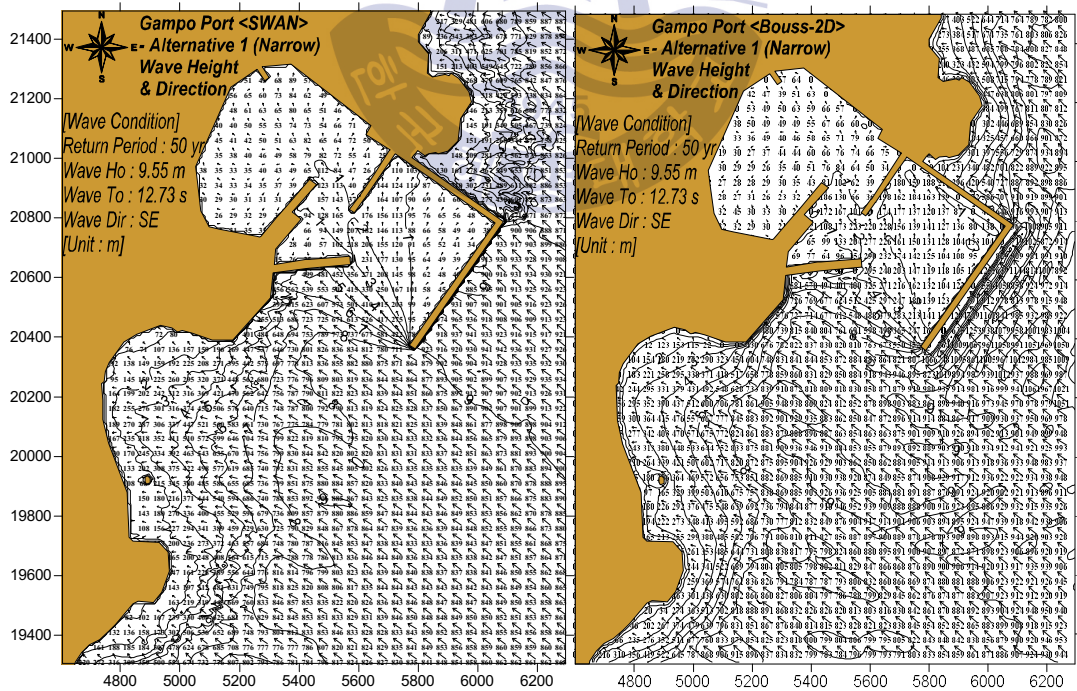


Fig. 4.14 Wave height of SE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D)

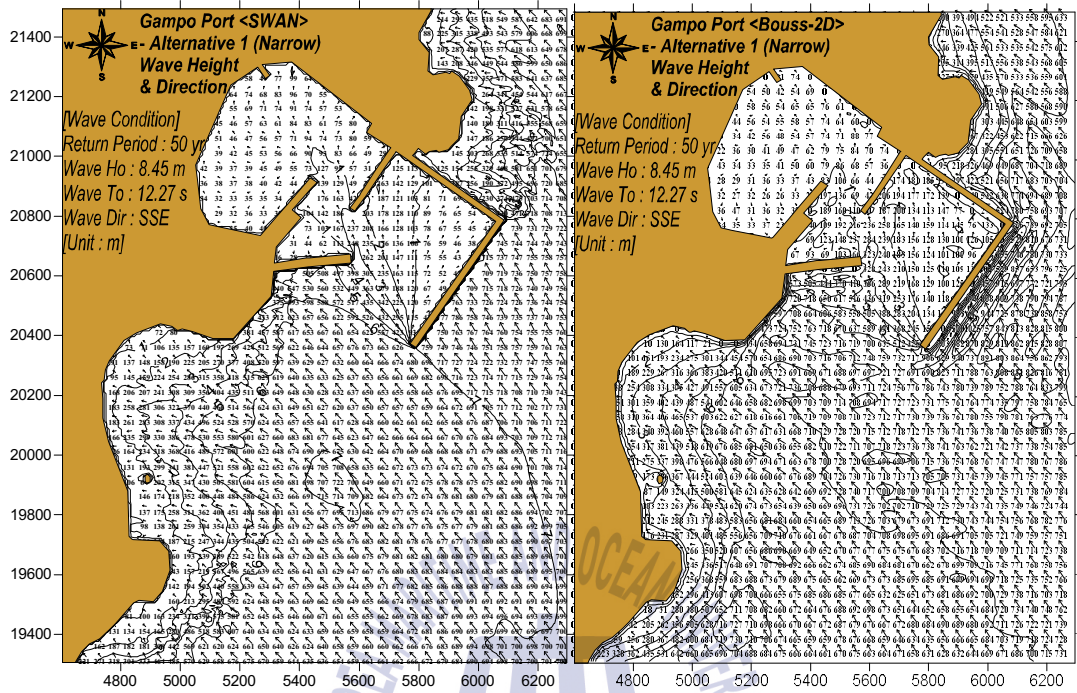


Fig. 4.15 Wave height of SSE wave at ALT-1 (SWAN & Bouss-2D)

Fig. 4.16 ~ 4.20에서의 그래프를 확인한 결과 일반적으로 Bouss-2D 모델의 결과가 파랑반응이 높게 나타나고 일부구간에서는 낮게 결과를 보인다. Bouss-2D모델의 경우 에너지 보존식에 근거한 파랑모델에서 재현하기 까다로운 파랑의 회절 현상을 모의할 수 있는 장점이 있으며 또한 모델의 특성상 강한 비선형성을 반영할 수 있기 때문에 쇄파, 천수 및 굴절, 반사 현상을 보다 정확하게 재현할 수 있기 때문이다. 또한 SWAN모델보다 파고가 낮게 나오는 부분은 S계열에 대한 기존 남방파제에 파랑이 차단되어 항내의 반응이 감소하는 것을 잘 재현하기 때문이다. 따라서 항내의 복합적인 반응이 잘 재현되는 Bouss-2D모델의 경우로 항내 정온도 실험을 진행해야 할 것으로 판단된다.



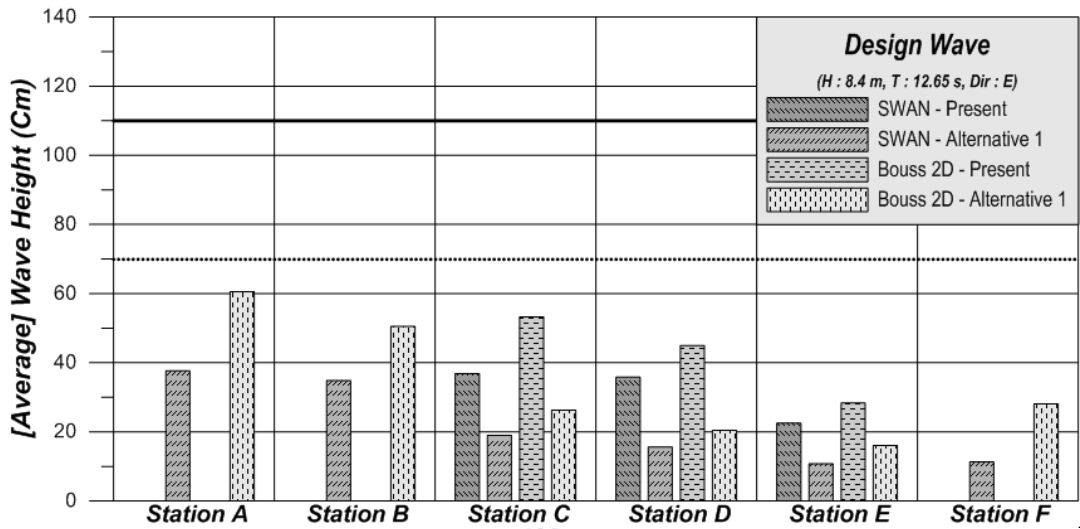


Fig. 4.16 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-1, E wave )

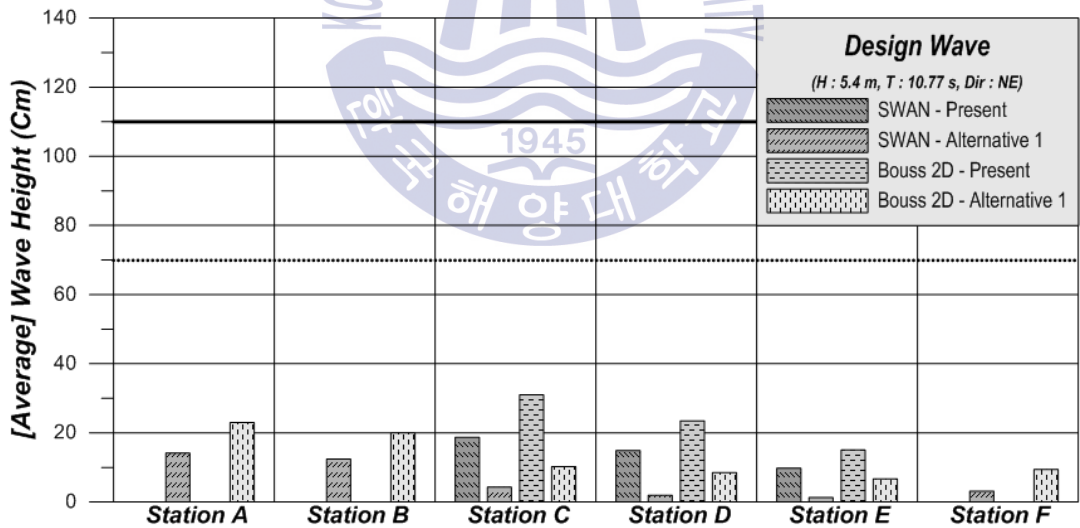


Fig. 4.17 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-1, NE wave )

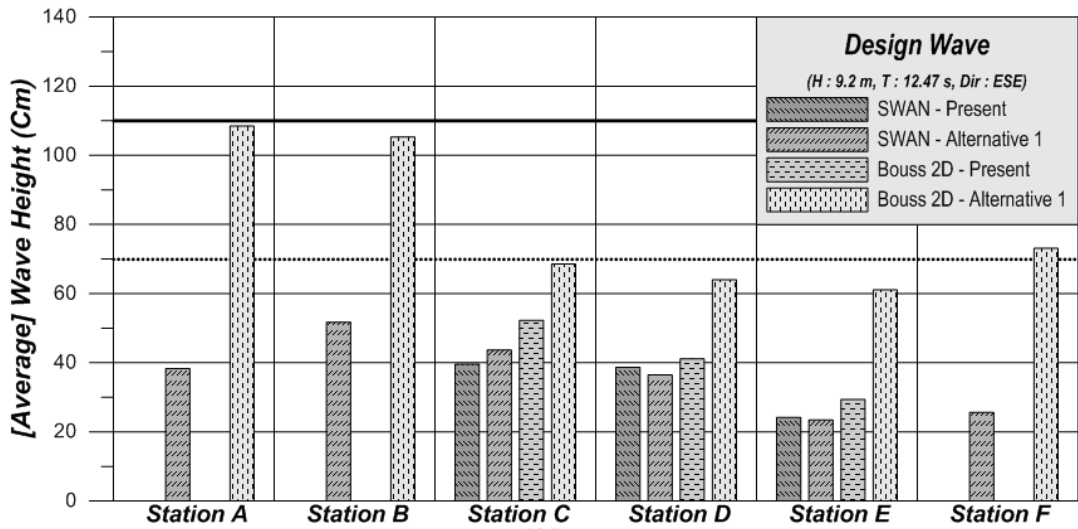


Fig. 4.18 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-1, ESE wave )

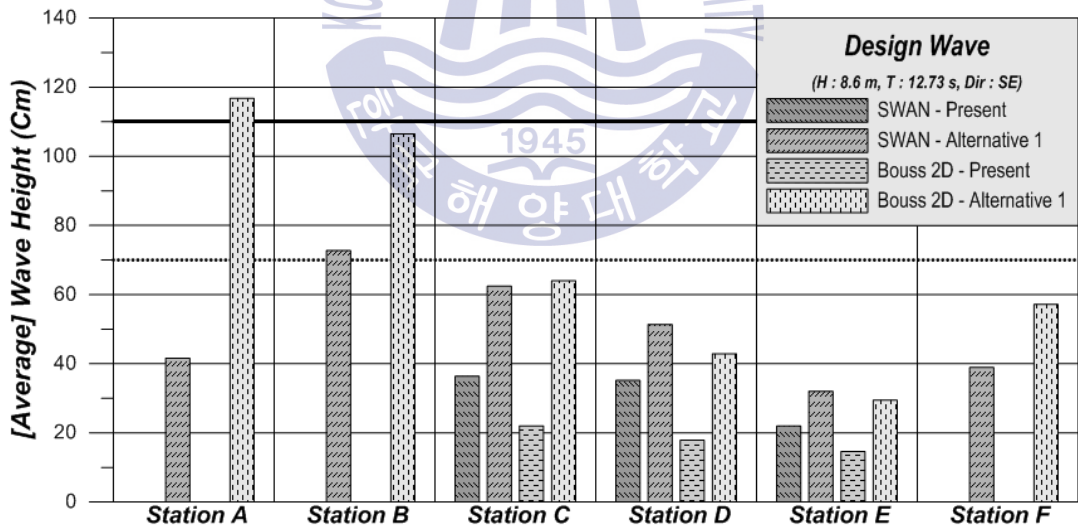


Fig. 4.19 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-1, SE wave )

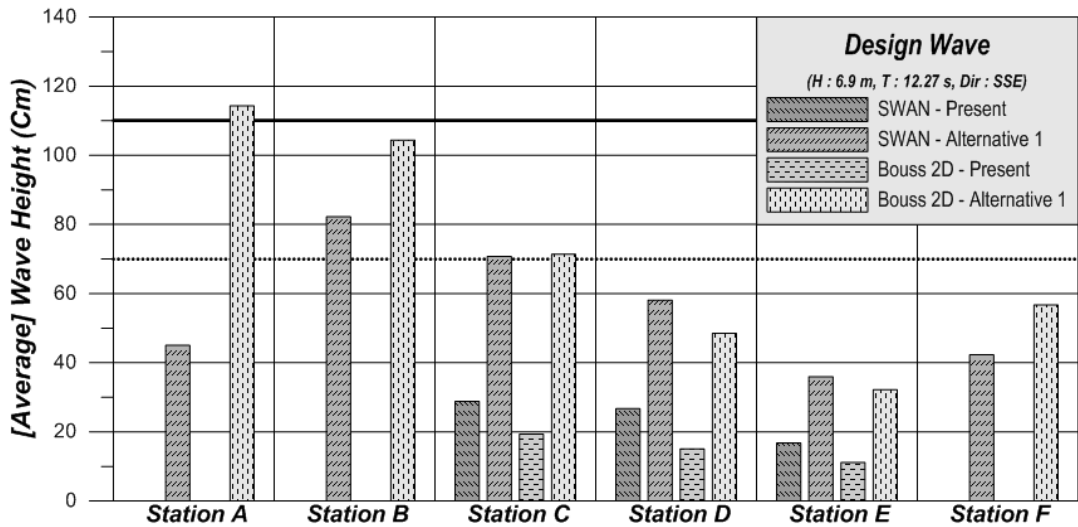


Fig. 4.20 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-1, SSE wave )

ALT-2 & 3 & 4안의 경우는 남측부두를 개발하는 것을 목표로 하였고, 정온도 확보를 위해 방파제 형상을 다르게 하여 파랑반응특성을 분석하였다. 먼저, ALT-2안의 경우 Fig 4.21 ~ 4.25에 등파고선도를 확인한 결과 E, NE 파향을 제외하고 S계열에서 어선 정박 부두인 신설 방파제 바로 뒤 부분 ST. G & H, 화물 및 여객부두 ST. I & J, 추가 남방파제 부분 ST. K 에서는 계류한계파고보다 높은 결과로 모든 Station에서 정온하지 않은 것을 확인하였다. S 계열에서 파랑이 항내로 차단되지 않은 상태로 내습하여 계류가 불안정한 것으로 나타났다. Fig. 4.26 ~ 4.30은 ALT-2안의 대한 결과를 그래프로 정리하였다. E파향과 NE파향에서 방파제 바로 뒤 부근 ST. G & H 와 계류시설 ST. I에서는 화물선 및 어선 계류한계파고에 대한 정온도를 확보하였다. 하지만 ESE, SE, SSE 파향이 진입 시에 Bouss-2D 모델에서 1.4m ~ 2.5m 까지 높은 파고분포를 확인하였다. 이는 추가 동방파제 끝단에서 회절의 영향을 받은 파랑과 S계열의 파랑이 추가되어 항내로 진입되는 파랑의

에너지가 상당히 높아 추가 계류시설에서 계류한계보다 높은 결과를 보여 정온하지 않은 것을 확인하였다.

Fig. 4.31 ~ 4.35는 ALT-3안의 결과를 등파고선도로 도식화 한 것이다. ALT-2안과 대비하여 S계열의 파랑은 저감되지만 여전히 정온도를 확보하지 못하는 경향으로 나타났다. 또한 E 파향과 NE 파향에 대하여 파랑을 차단되지 않고 항내로 진입하는 모습이 나타난다. 동측, 남측 방파제 선단에서 파랑이 집중되며 이는 곳 선박의 항행에도 문제가 생길 것으로 판단된다. Fig. 4.36 ~ 4.40은 ALT-3의 부두역에 대한 결과를 그래프로 정리한 것이다. 이를 확인한 결과로 ST. N & O 에서는 전 파향에 대하여 계류한계과고 보다 높은 1.15 m ~ 2.3 m 까지 파고분포를 보인다. SSE파향에서는 추가 남측 방파제가 파랑을 차단시켜 다소 낮게 결과를 보였다.

ALT-4안의 결과를 Fig. 4.41 ~ 4.45에 도식화하였으며 결과적으로 정온하지 못한 결과를 가져왔다. E파향과 ESE파향에서는 ALT-3안과 비슷하게 파랑이 크게 진입하지만 ALT-3안보다 동방파제와 남방파제 사이의 간격이 벌어졌기 때문에 높은 파고 분포를 보인다. 따라서 ALT-3안 보다 선박의 항행이 크게 영향을 받을 것으로 예상될 뿐만 아니라 심해설계과에 대한 계류가 어려울 것으로 판단된다. 이에 대한 그래프는 Fig. 4.46 ~ 4.50로 정리하였다. E파향에 대하여 ST. S & T & U에서 상당히 높은 파고를 보이며 특히 ST. T에서는 3m 가까이 파고분포를 보였다. 이는 파랑이 방파제에 차단되지 않고 부두 앞에서 반사에 대한 영향이 크게 나타난 것으로 판단된다.

따라서 ALT-2 & 3 & 4안의 경우는 남측 해변 앞 수심이 낮은 지역에 다량의 준설 및 매립으로 인하여 경제성의 문제를 안고 있을 뿐만 아니라 정온도 확보 조차되지 않는 것으로 판단된다.

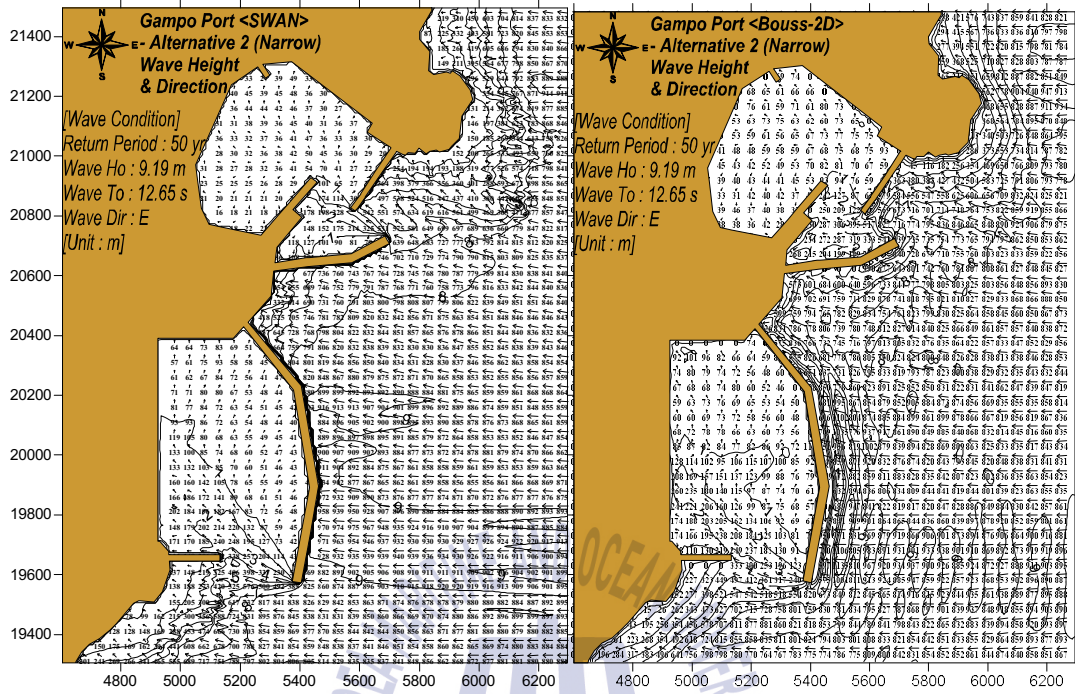


Fig. 4.21 Wave height of E wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D)

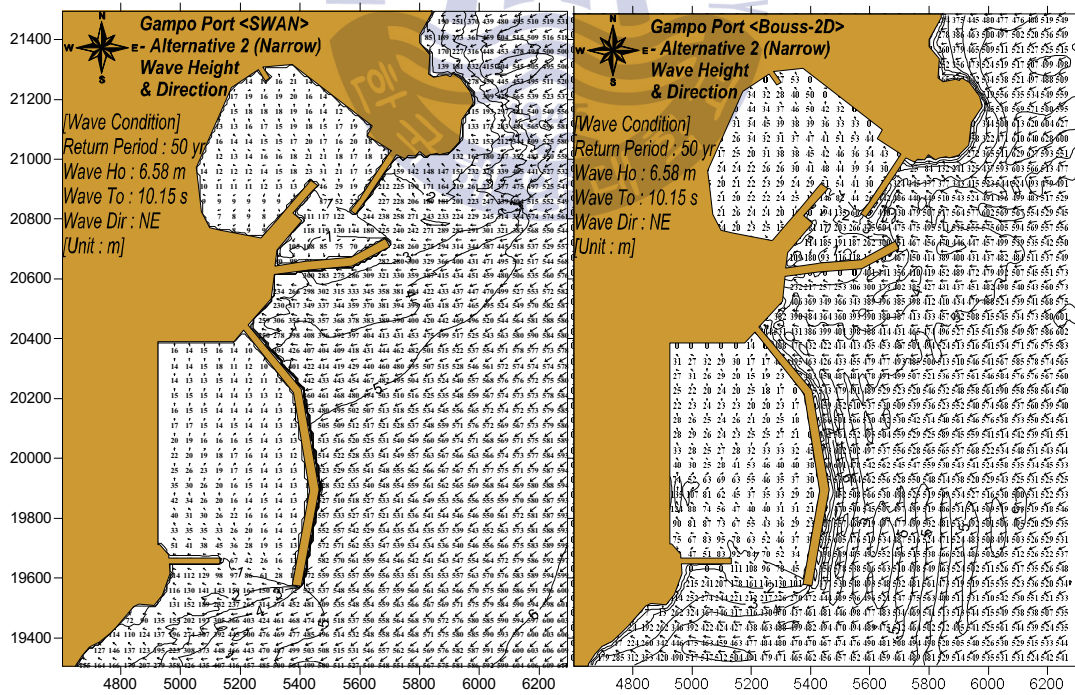


Fig. 4.22 Wave height of NE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D)

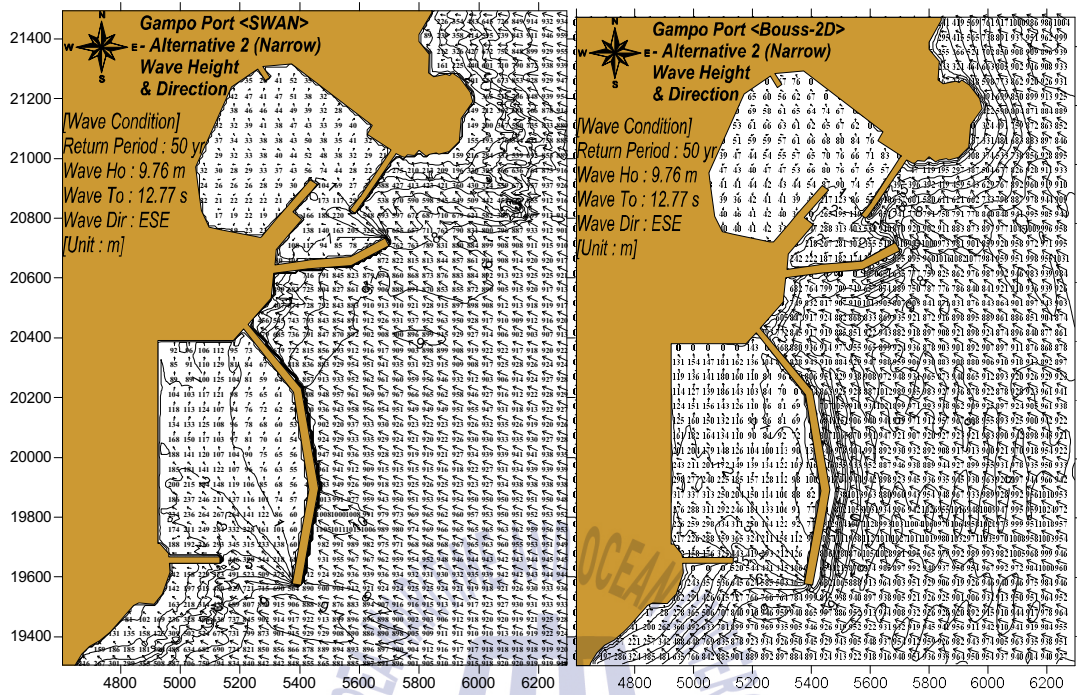


Fig. 4.23 Wave height of ESE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D)

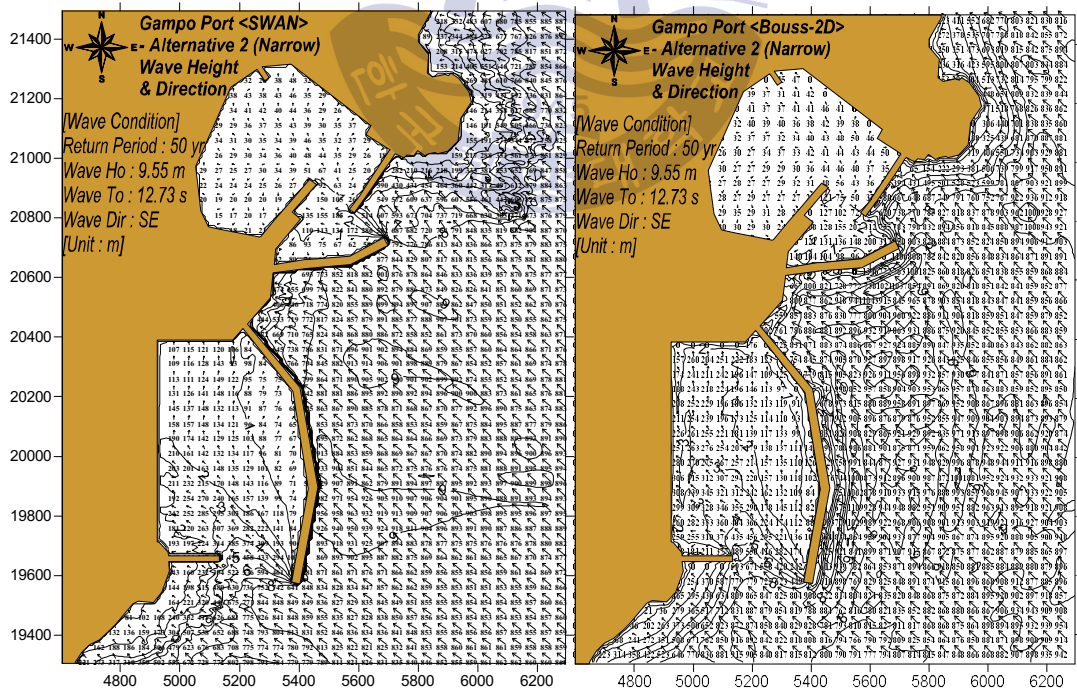


Fig. 4.24 Wave height of SE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D)

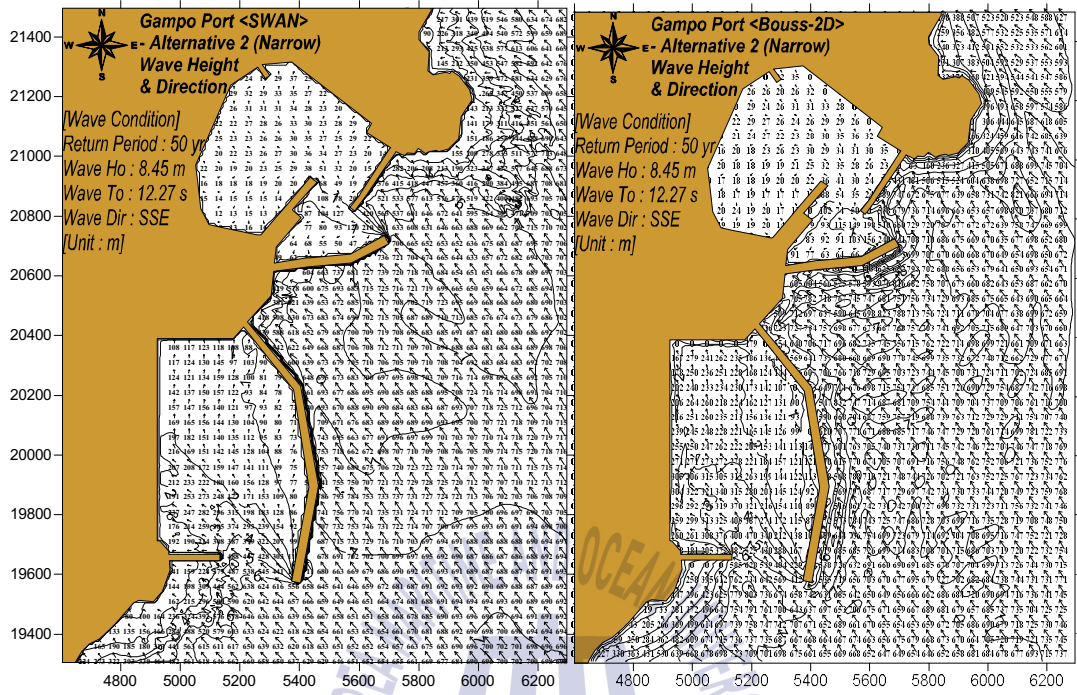


Fig. 4.25 Wave height of SSE wave at ALT-2 (SWAN & Bouss-2D)

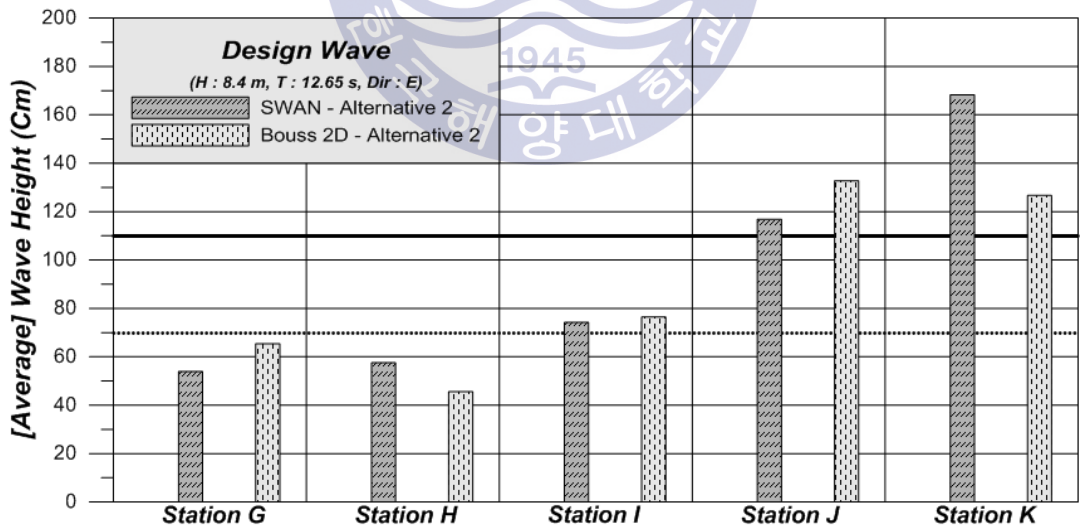


Fig. 4.26 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-2, E wave )

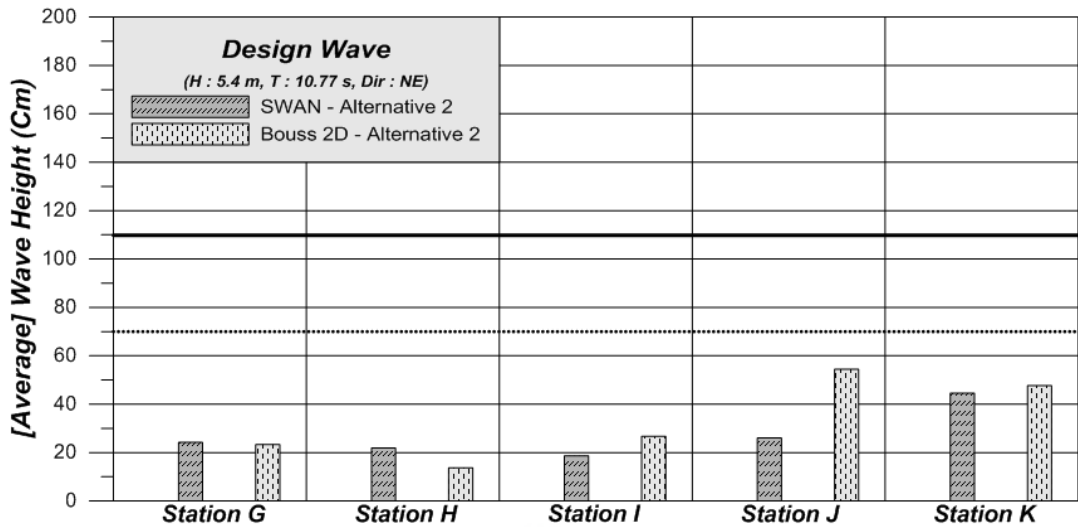


Fig. 4.27 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-2, NE wave )

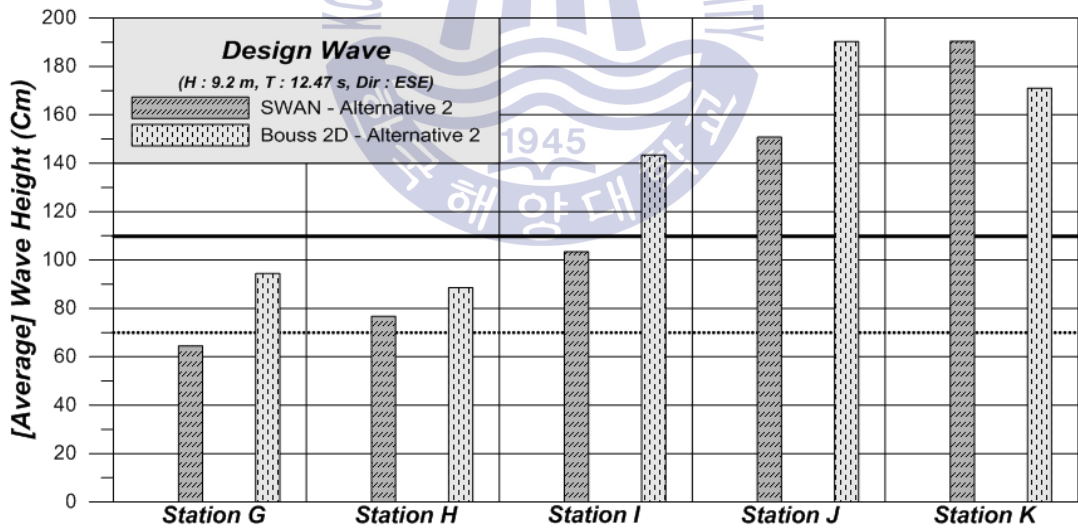


Fig. 4.28 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-2, ESE wave )



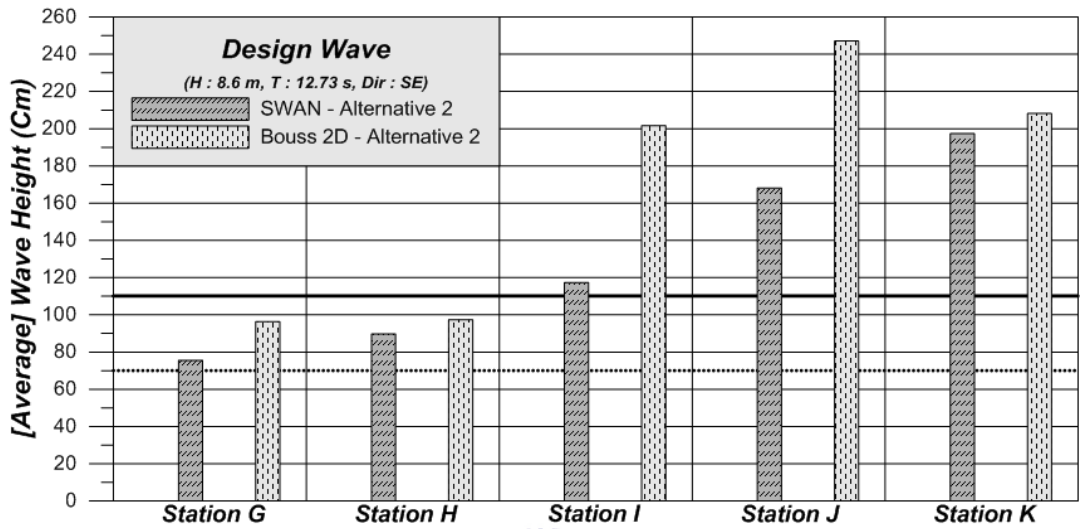


Fig. 4.29 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-2, SE wave )

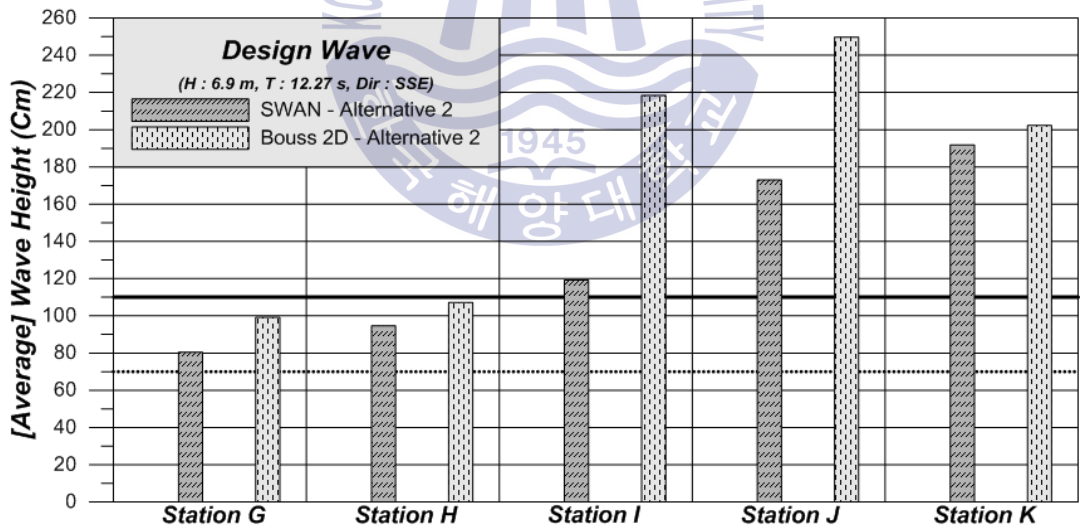


Fig. 4.30 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-2, SSE wave )

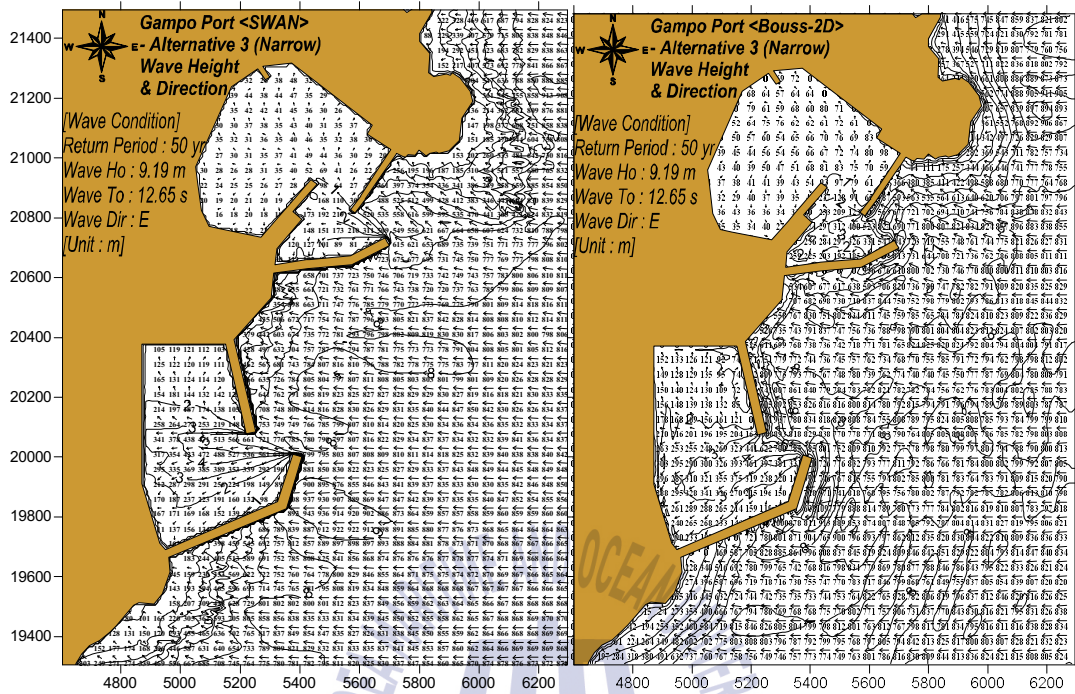


Fig. 4.31 Wave height of E wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D)

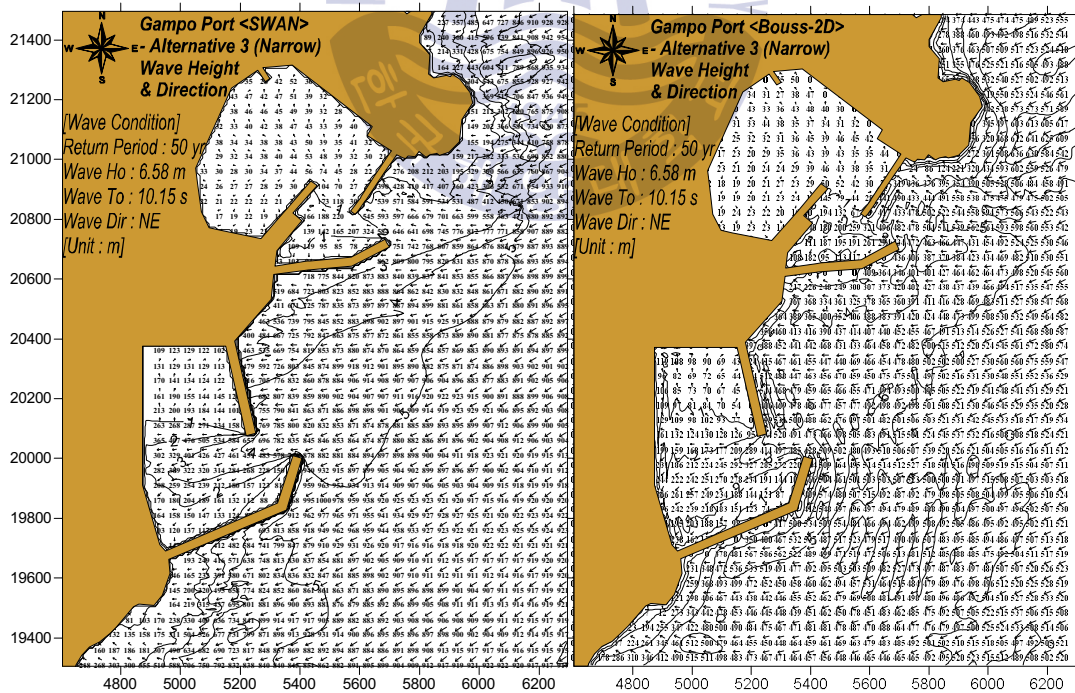


Fig. 4.32 Wave height of NE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D)

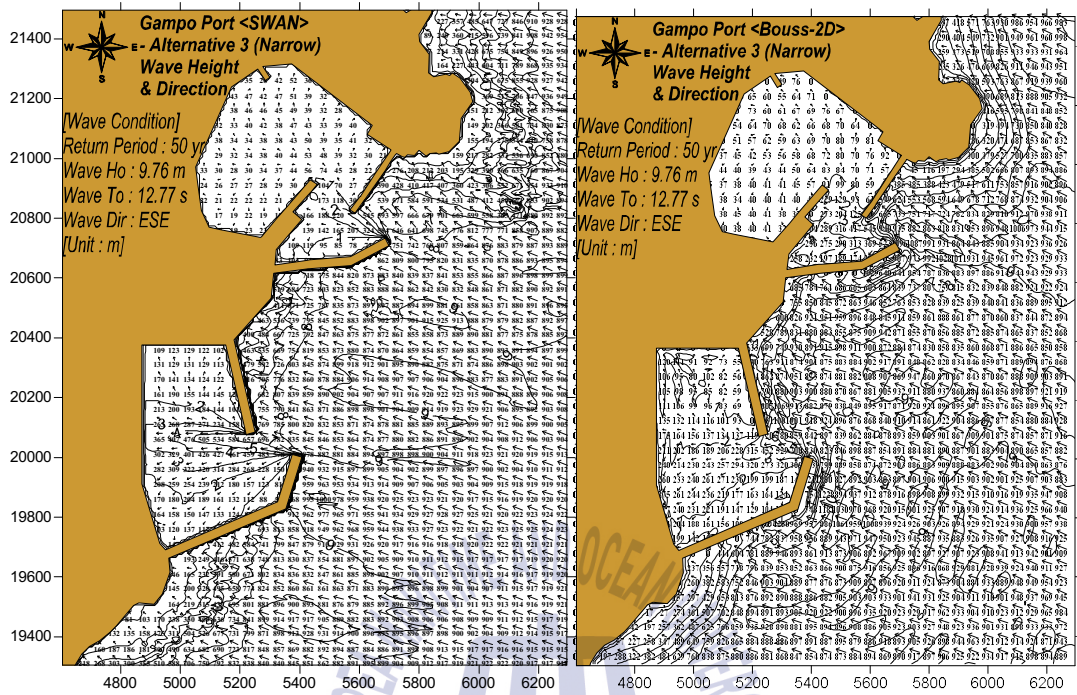


Fig. 4.33 Wave height of ESE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D)

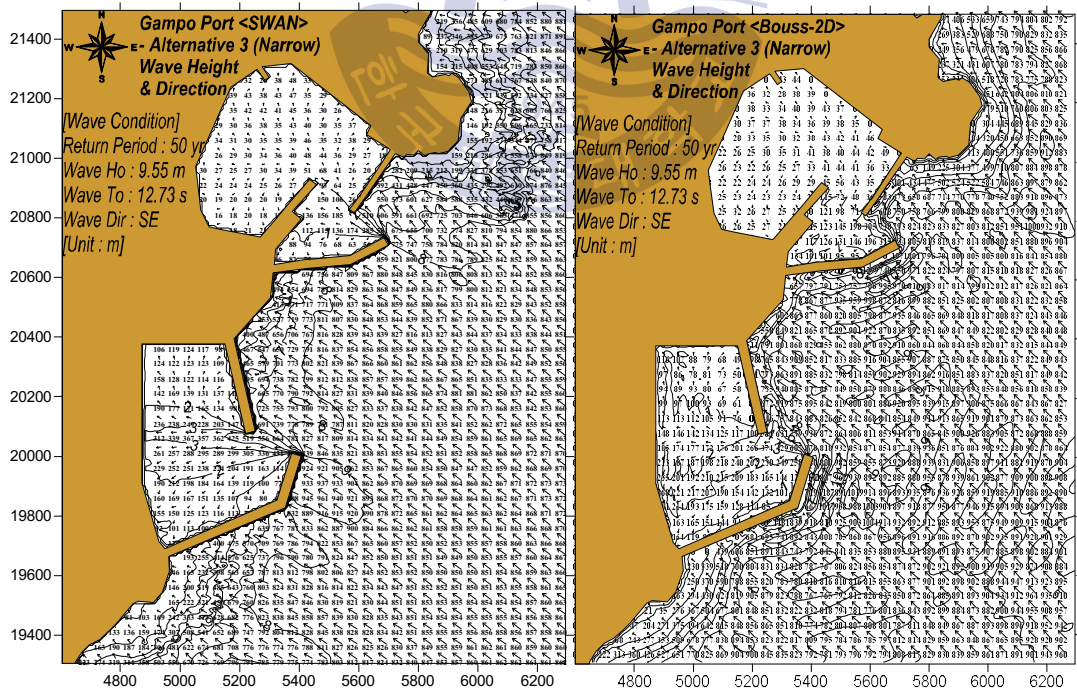


Fig. 4.34 Wave height of SE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D)

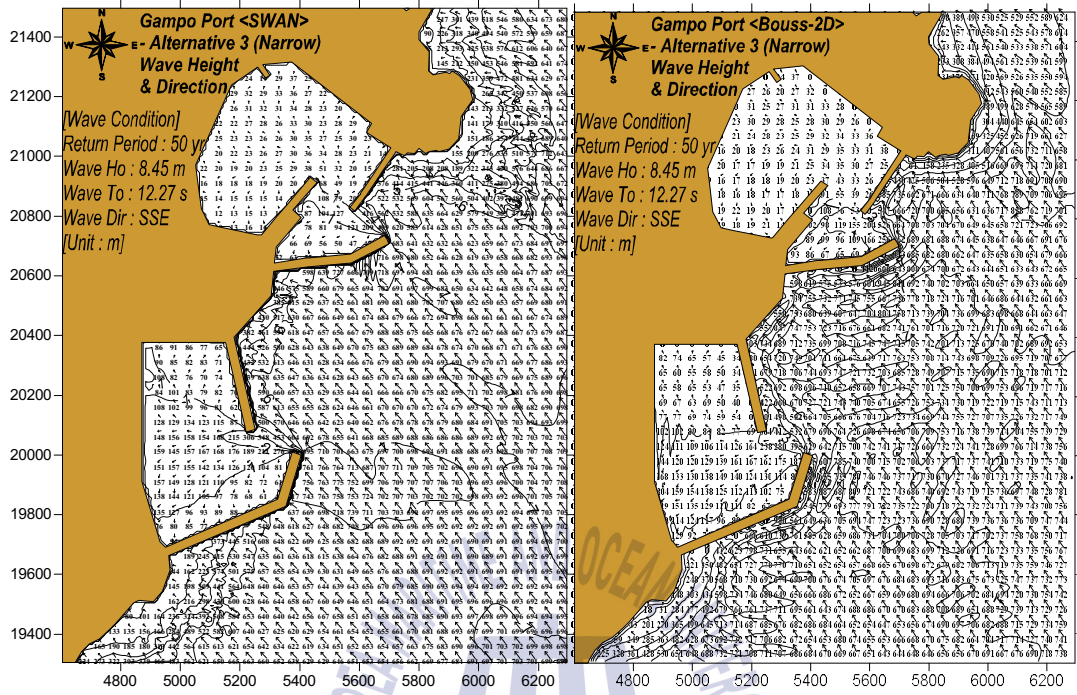


Fig. 4.35 Wave height of SSE wave at ALT-3 (SWAN & Bouss-2D)

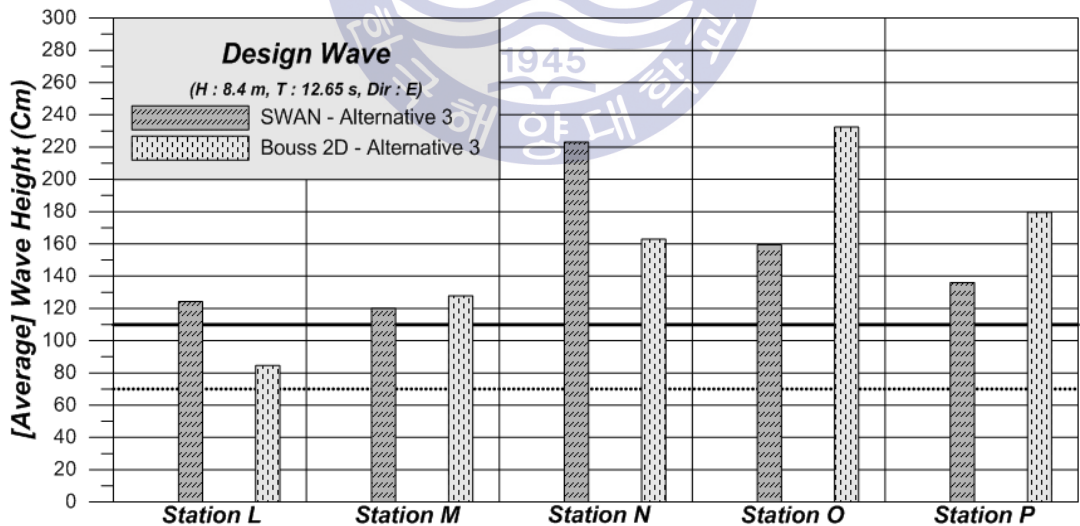


Fig. 4.36 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-3, E wave )

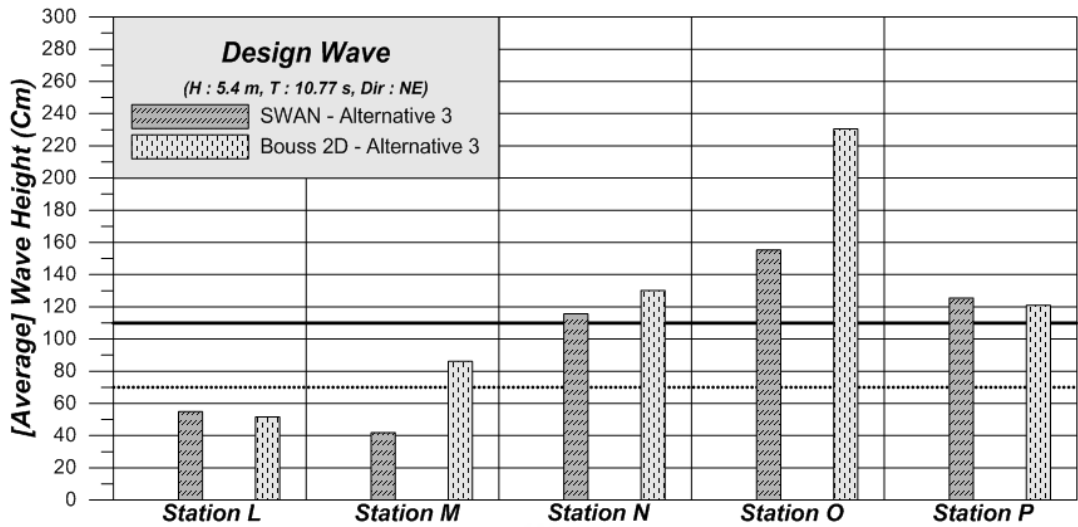


Fig. 4.37 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-3, NE wave )

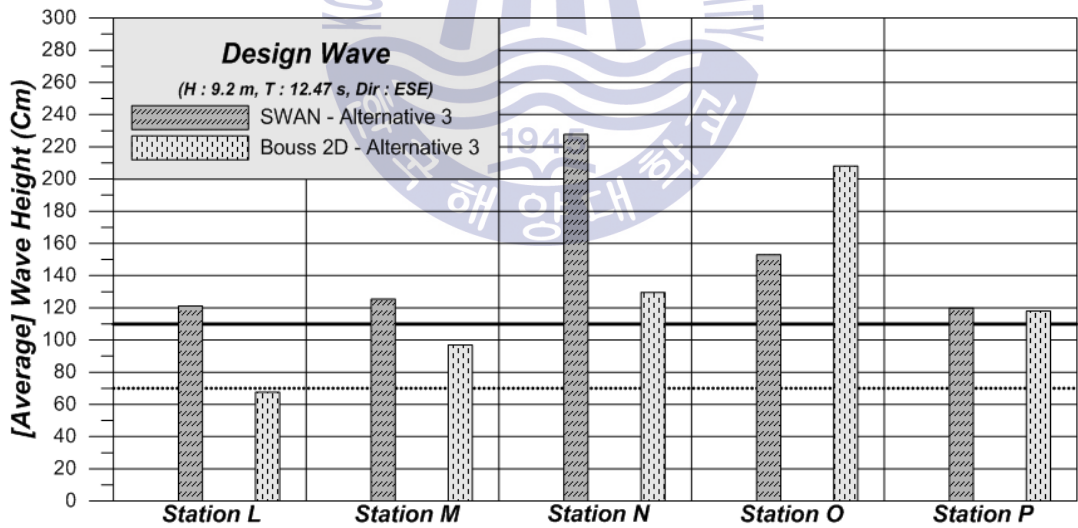


Fig. 4.38 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-3, ESE wave )

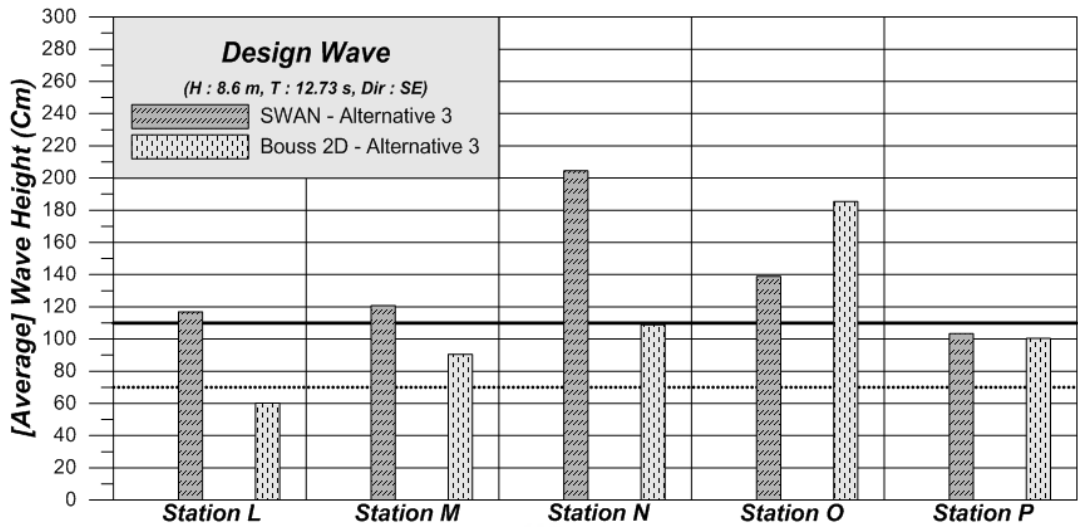


Fig. 4.39 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-3, SE wave )

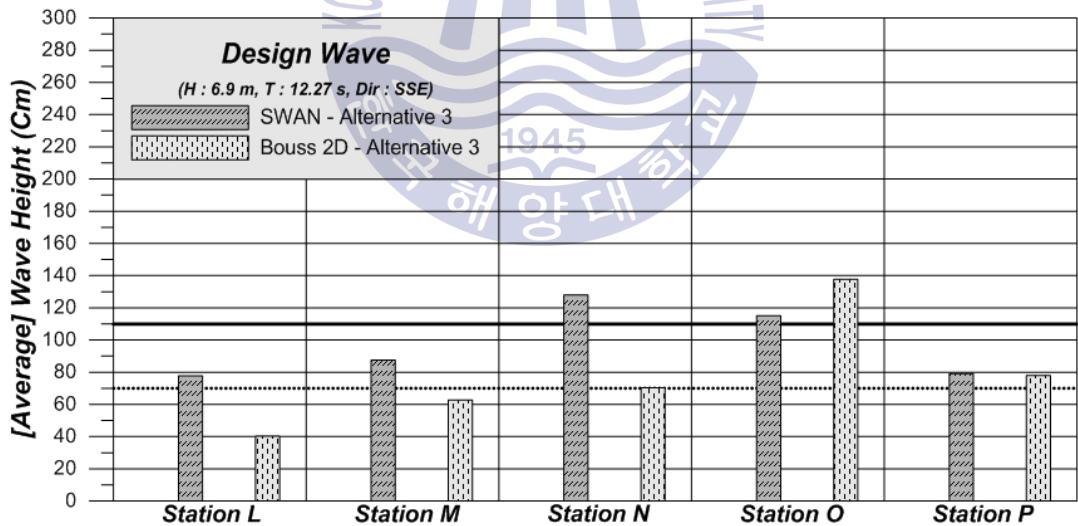


Fig. 4.40 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-3, SSE wave )

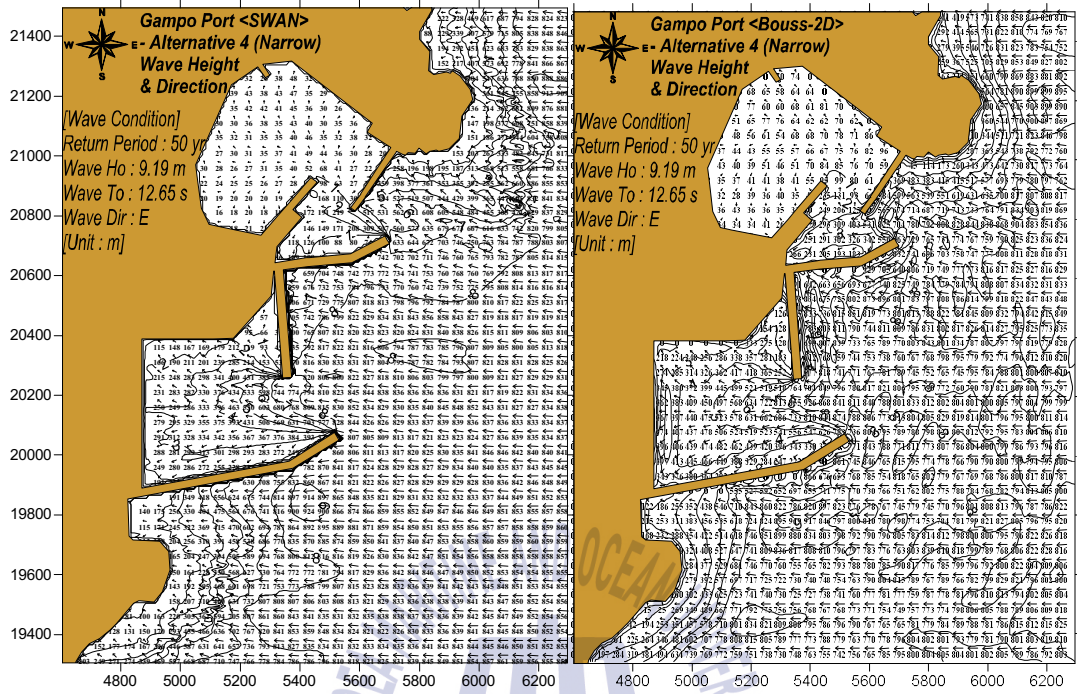


Fig. 4.41 Wave height of E wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D)

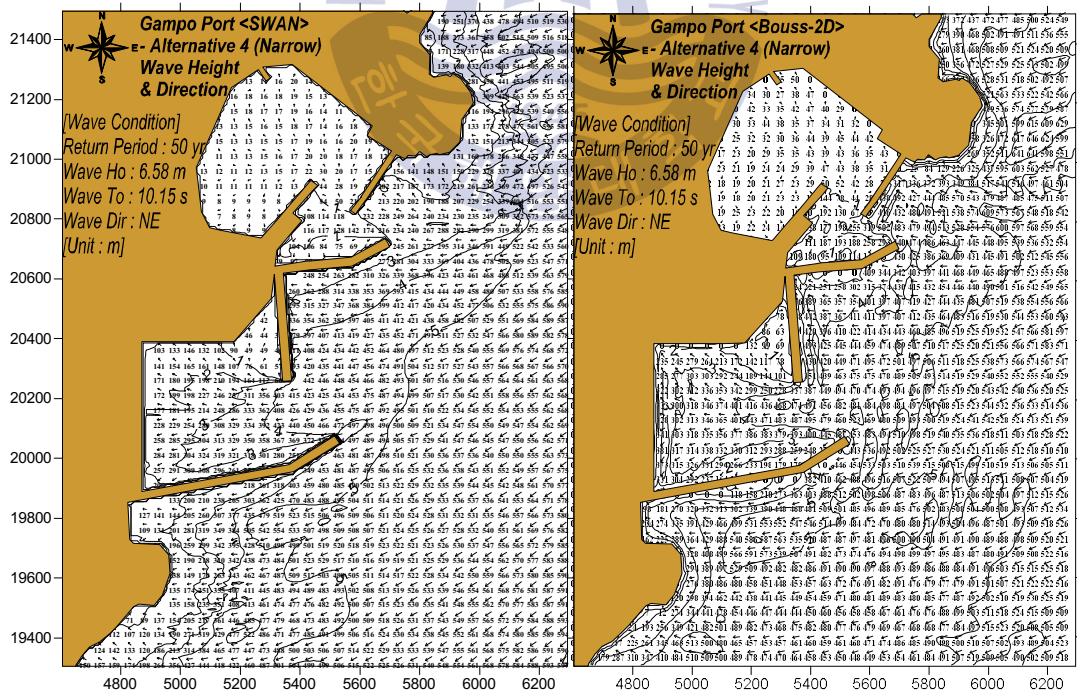


Fig. 4.42 Wave height of NE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D)

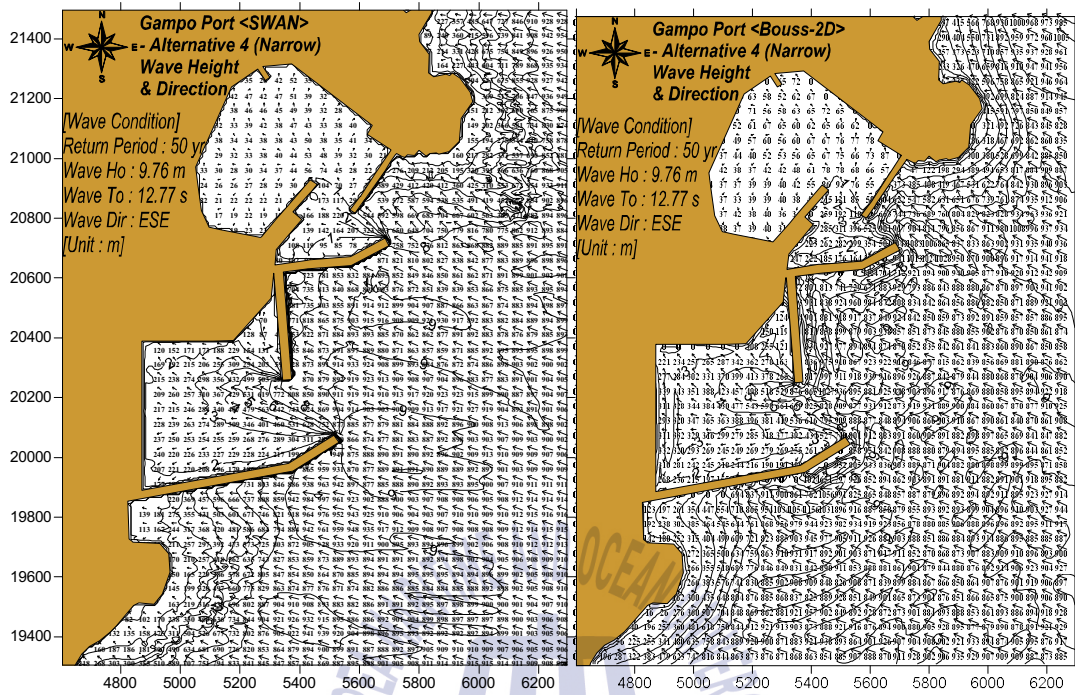


Fig. 4.43 Wave height of ESE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D)

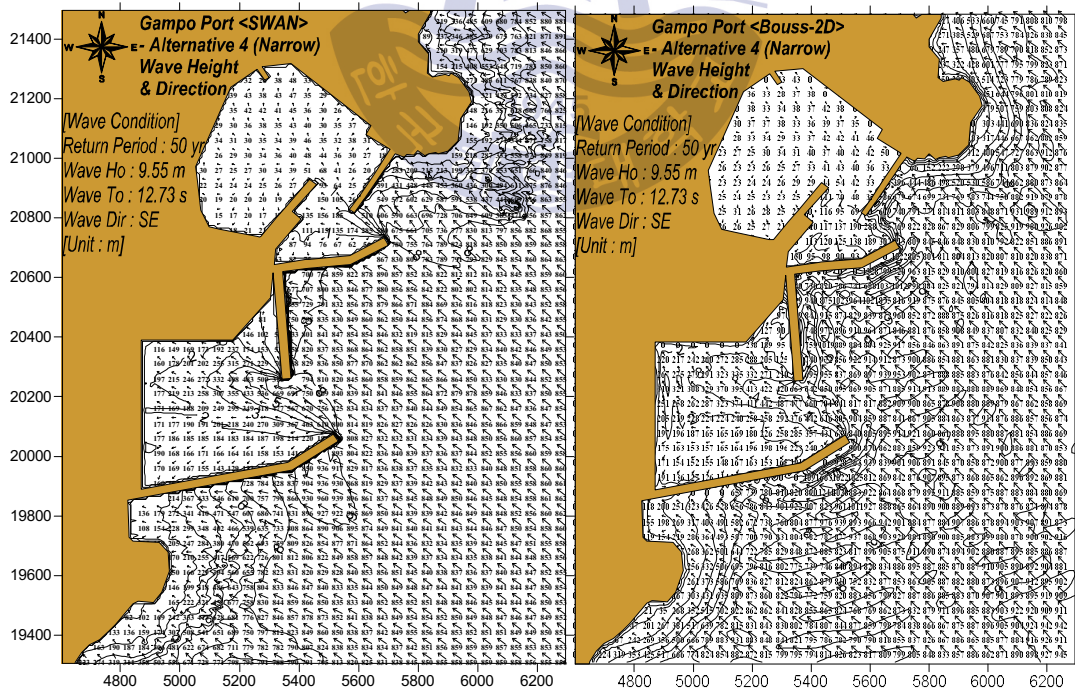


Fig. 4.44 Wave height of SE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D)



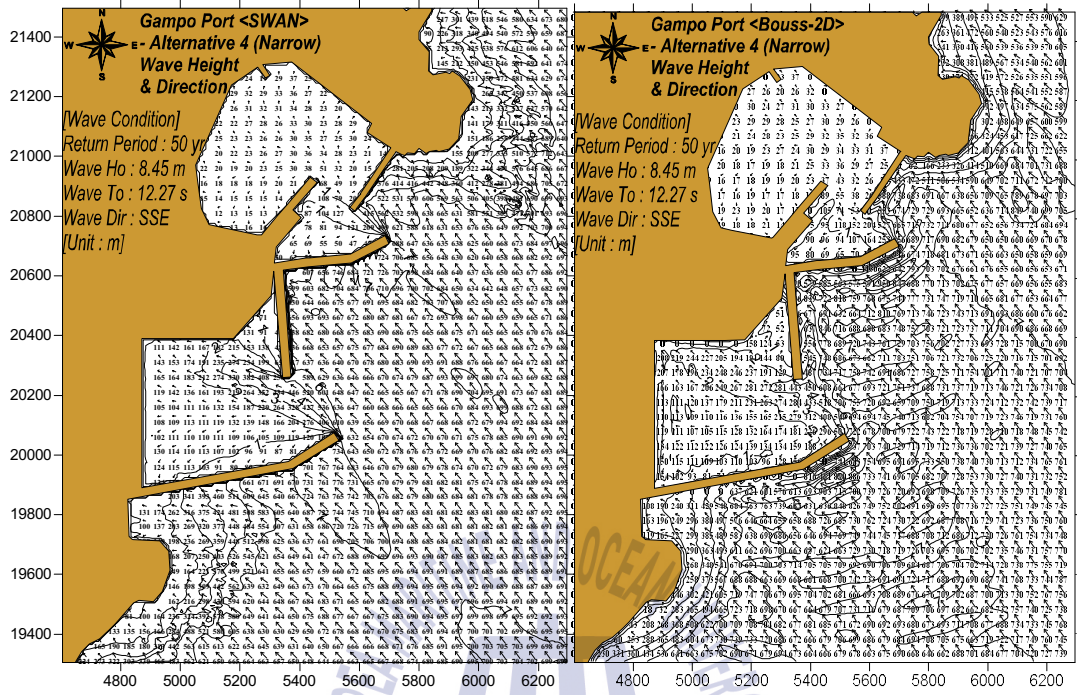


Fig. 4.45 Wave height of SSE wave at ALT-4 (SWAN & Bouss-2D)

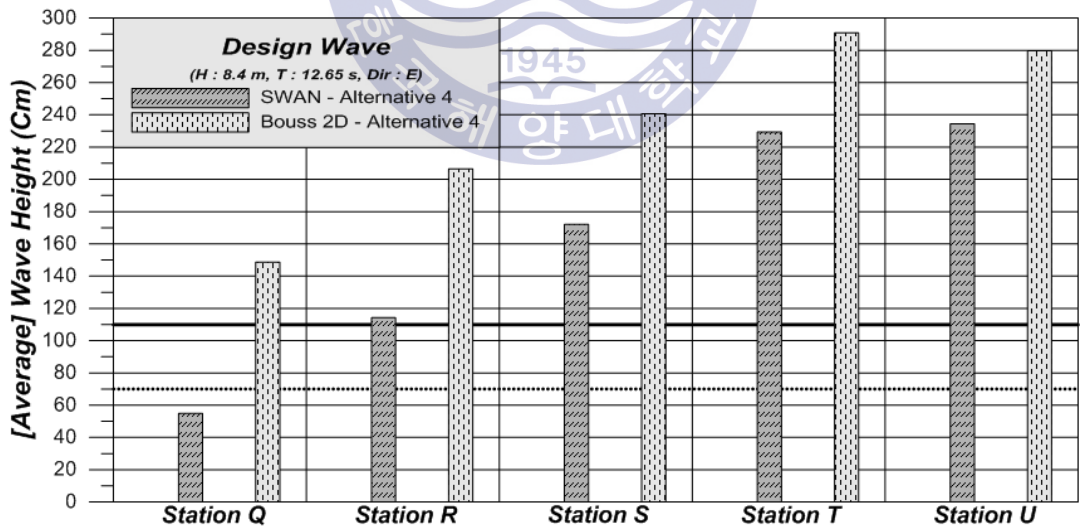


Fig. 4.46 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-4, E wave )

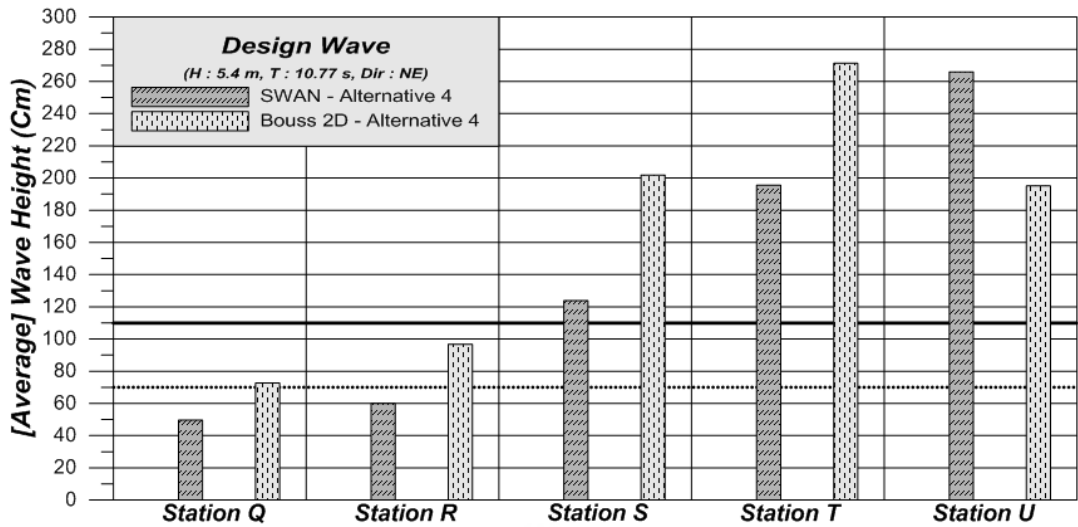


Fig. 4.47 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-4, NE wave )

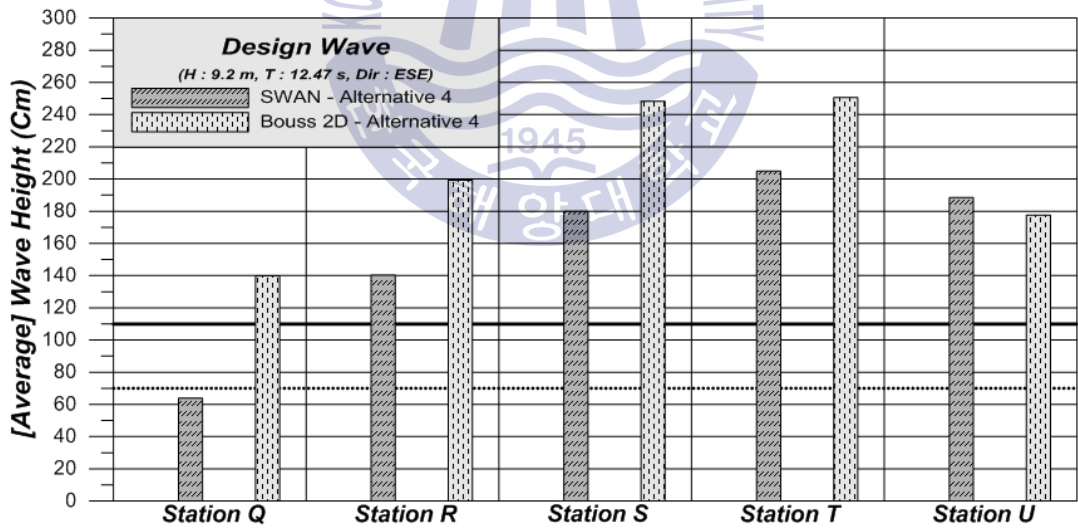


Fig. 4.48 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-4, ESE wave )

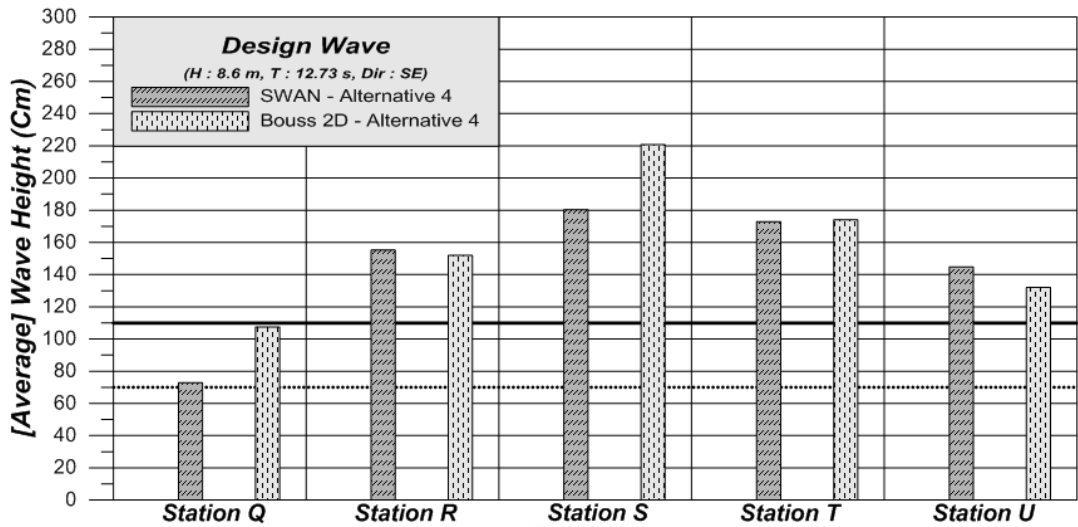


Fig. 4.49 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-4, SE wave )

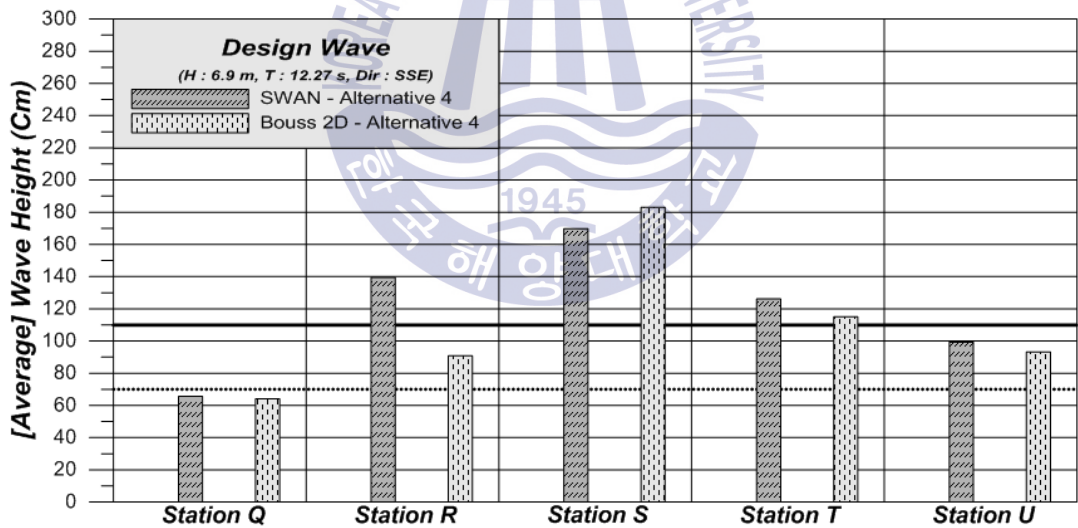


Fig. 4.50 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-4, SSE wave )

ALT-5의 경우는 기존 동측 방파제 길이의 축소로 항행여건을 개선하였고 북측과 남측에 이르는 대규모 외곽시설을 건설하여 파랑이 대폭 저감되었으며 항내정온도가 향상되었다. 남측 신규항만에서의 경우도 외곽방파제와 이안제의 탁월한 파랑 차단 효과로 인하여 앞서 ALT-2 & 3 & 4안과 비교하여 정온도가 크게 향상된 것을 확인할 수 있다(Fig. 4.51 ~ 4.55). 대규모 방파제 건설을 시행하는 경우이므로 비경제적이라 경제의 문제점은 가지고 있지만, 장래의 감포항 확대사업의 경우 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

Fig. 4.56 ~ 4.60은 11개의 부두역에 대하여 평균파고를 추출하여 정온도를 확인하려 한 것이다. 동측 신규항만의 경우는 0.5m 이내로 정온도가 크게 향상시킨 것으로 나타났고, 남측 신규항만도 화물선 계류한계파고인 1.1m 보다 아래의 결과를 보여 전체적으로 정온한 것으로 확인하였다.

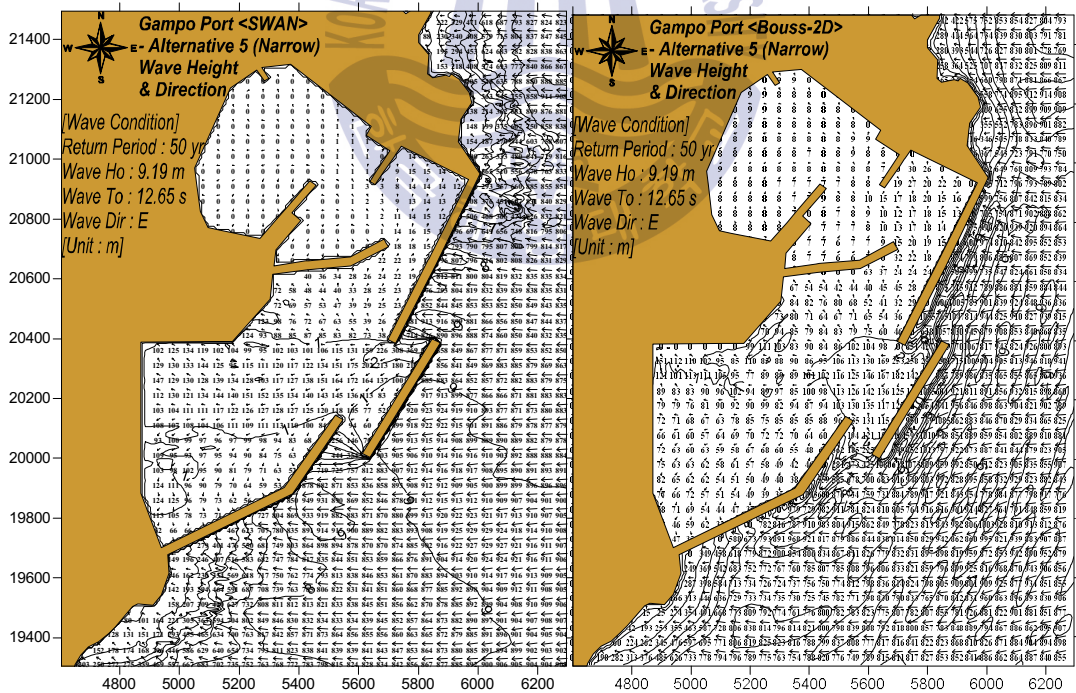


Fig. 4.51 Wave height of E wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D)

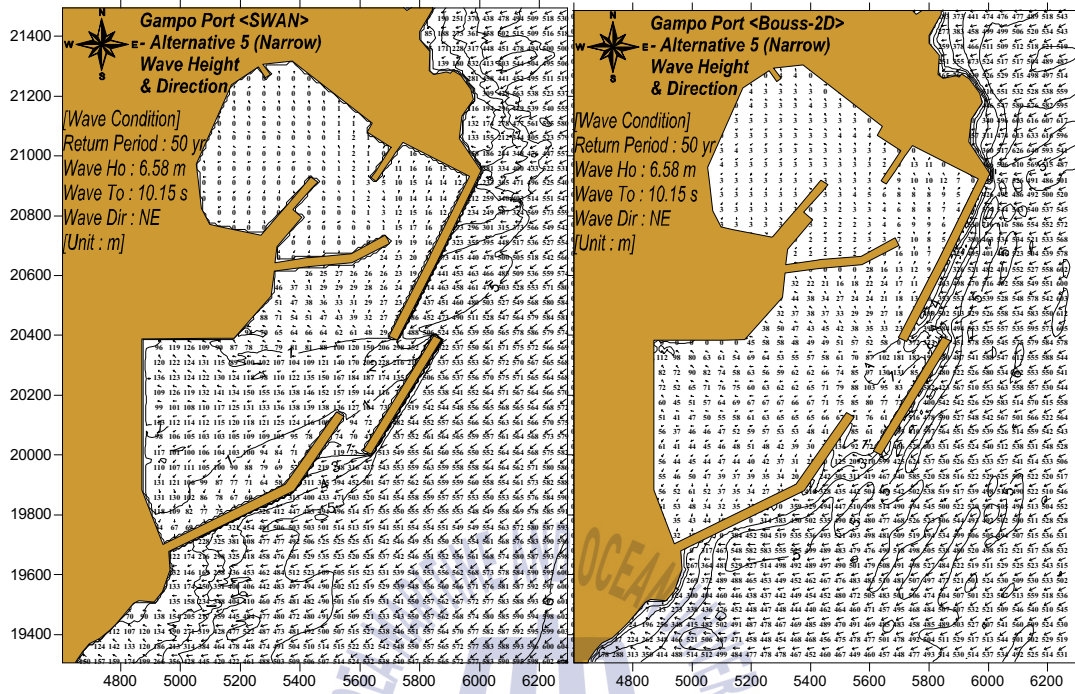


Fig. 4.52 Wave height of NE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D)

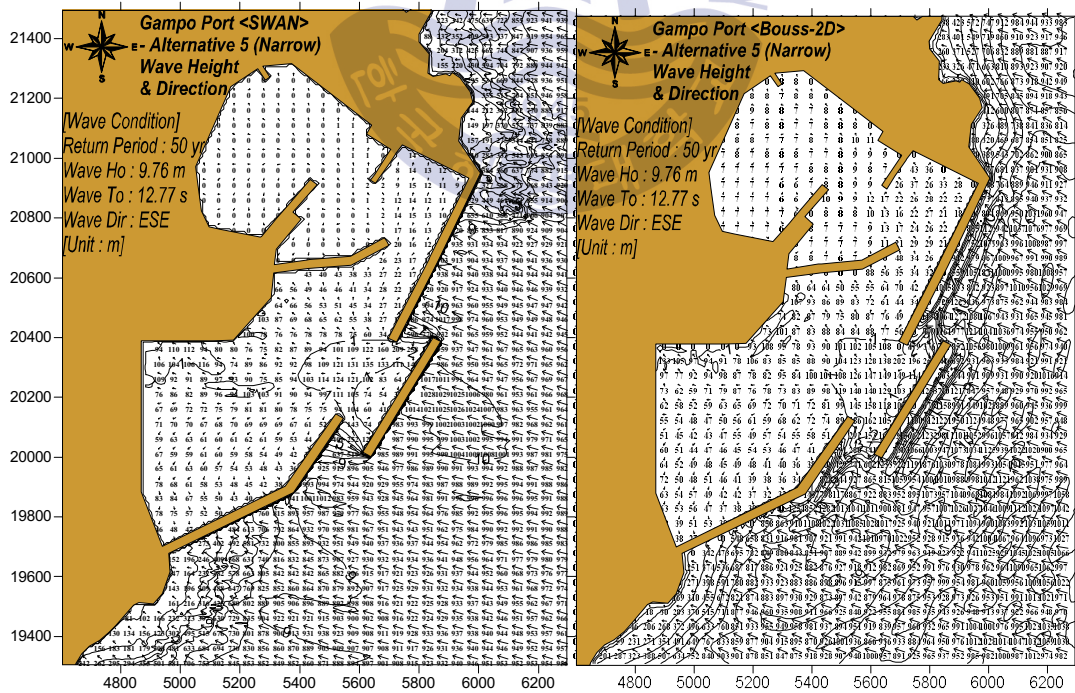


Fig. 4.53 Wave height of ESE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D)

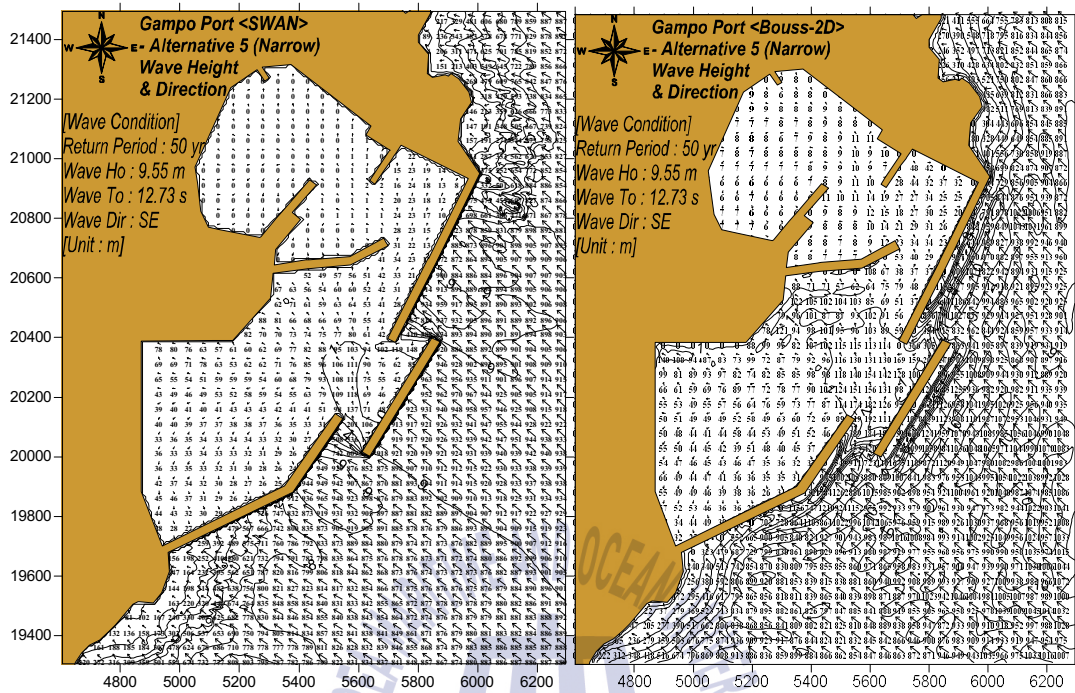


Fig. 4.54 Wave height of SE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D)

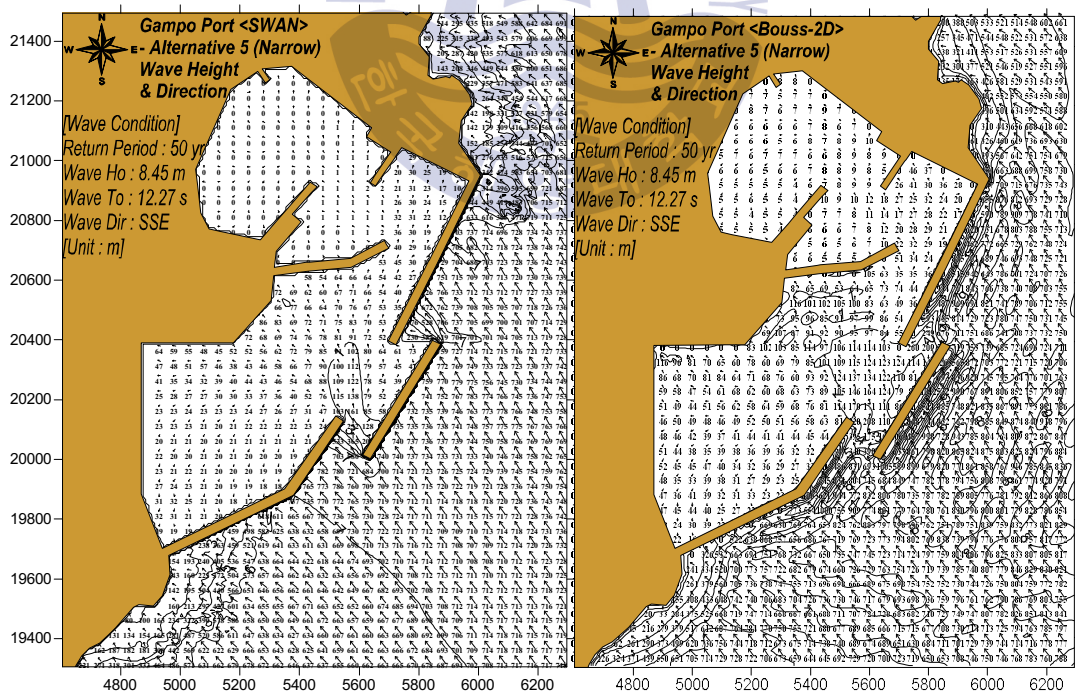


Fig. 4.55 Wave height of SSE wave at ALT-5 (SWAN & Bouss-2D)

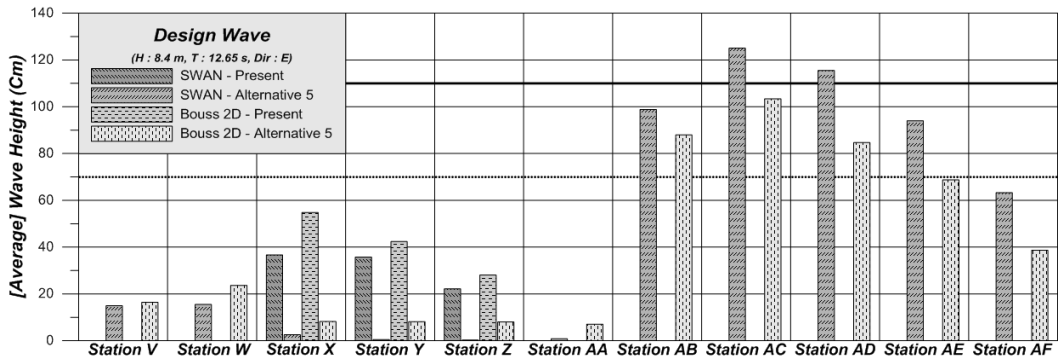


Fig. 4.56 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-5, E wave )

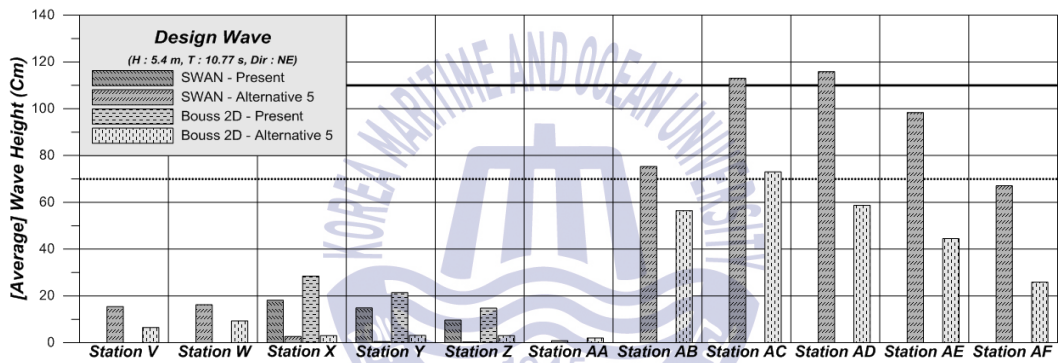


Fig. 4.57 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-5, NE wave )

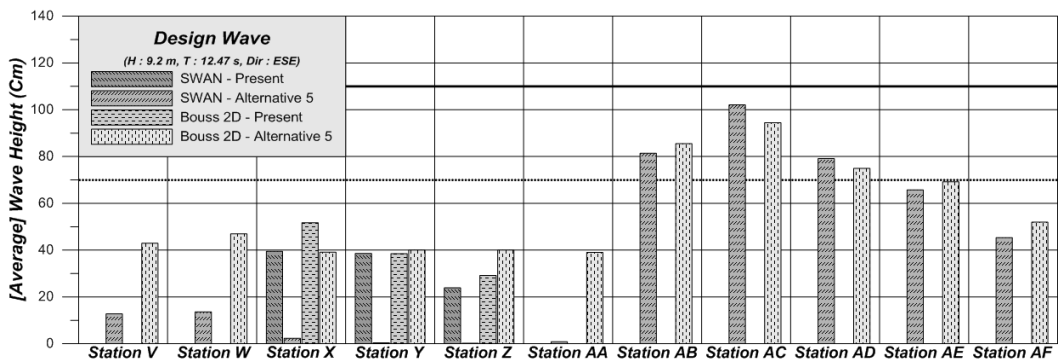


Fig. 4.58 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-5, ESE wave )

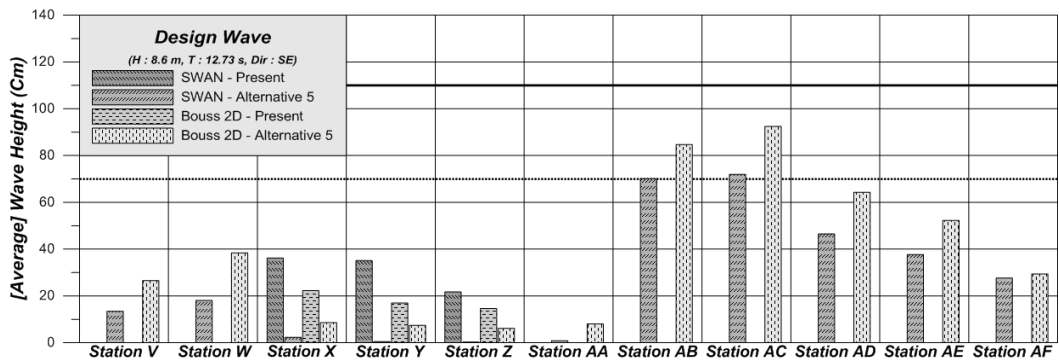


Fig. 4.59 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-5, SE wave )

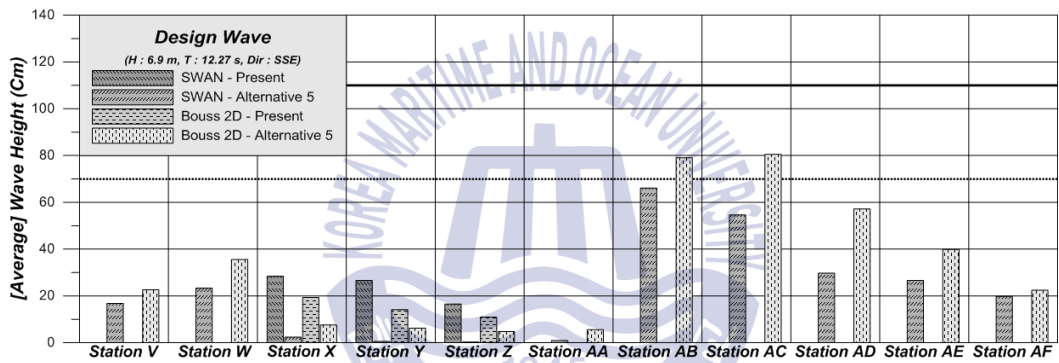


Fig. 4.60 Comparison of averaged wave heights for each model ( ALT-5, SSE wave )

심해설계과 5개의 파향으로 항내 정온도 실험을 검토한 결과 경제성 및 안정성을 평가한 결과 ALT-1안이 적합한 방안으로 판단될 수 있으며 ALT-5는 장래 감포항 확장 평명배치안의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 남측 신설부두를 계획한 ALT-2 & 3 & 4는 파랑의 진입을 제어하지 못하여 정온도를 확보하지 못할 뿐만 아니라 연안항의 필요성인 기상 악화 시 선박의 대피항만으로서 역할을 못하는 대안이다.



#### 4.4 항만특성을 고려한 확장안 실험

이상에서 연안항 지정을 위한 화물량 및 여객에 대한 기본시설 위주로 검토가 이루어졌으나 감포항의 경우 여전히 어항기능이 크게 작용하고 있으므로 일본의 어항인 홋가이도 오이나오시항과 같이 최근 수산업의 변화를 고려하여 부족한 계류시설 및 어항시설의 확충하기 위한 준비를 우선적으로 고려하고 어항 교류 광장의 형성을 반영할 필요가 있다. Fig. 4.61은 오이나오시항에서 수산물의 저장, 경매 및 판매를 위한 공간을 외곽시설인 방파제와 연계하여 인공 섬 (M-Land)을 계획하여 성공적으로 건설하였다. M-Land는 어항 지역의 랜드 마크가 되어 지역의 관광 레저기능과 복합하여 전망, 바다낚시 등의 기능 공간이 창출되어 미래어항의 발전방향을 제시하였다고 볼 수 있다.



Fig. 4.61 Example of fishery port development at Oinioshi port of Hokkaido, Japan

앞 절에서 논한 정온도 분석 결과 중 도출된 ALT-1안의 평면배치를 적용하되 정온도의 향상과 오이나오시항의 어항 및 관광기능을 부가한 배치안으로 Fig. 4.62와 같이 9600m<sup>2</sup>의 F-Land(Fish Land)를 구상하였다. F-Land에서 활발한 활동이 가능하도록 기존 동측 방파제를 100m 축소하여 어선 선회

장을 확보하고 항내의 정온도를 위하여 확장시킨 동방과제의 두부를 내측쪽으로 연장시키는 것으로 계획하였다.

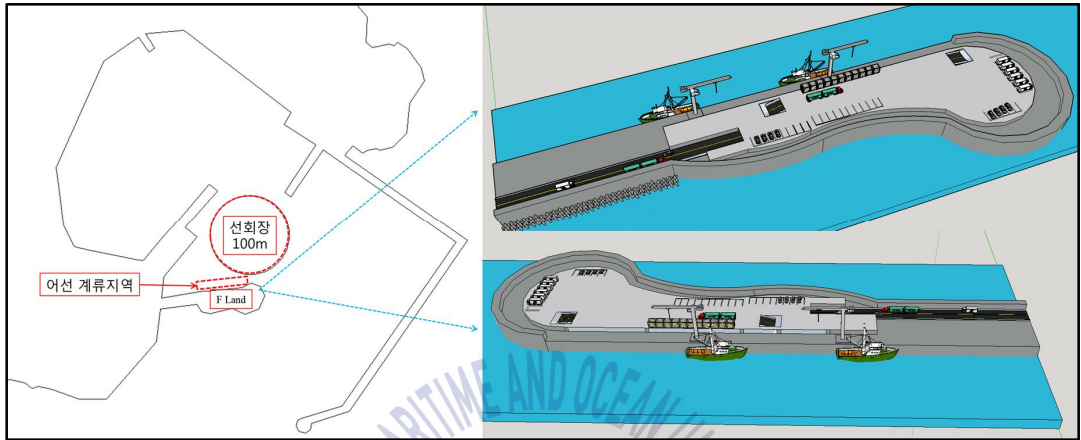


Fig. 4.62 Suggested F-Land

구상한 F-Land의 정온도를 분석하기 위하여 앞서 동일한 방법으로 ALT-1안과 비교를 진행하였다. Fig. 4.63은 ALT-1안의 ST. A & B에서 비교적 높은 파고를 보였던 ESE 파향과 SE 파향을 Bouss-2D모형을 구축하여 결과를 도식화하였다. 연장한 방파제가 파랑을 차단하여 전반적으로 파고가 낮아지는 결과를 가져왔다. 상세한 결과로 Fig. 5.64 & Fig. 5.65와 같이 그래프로 표현하였고 ESE 파향에서는 전체 Station에서 파고가 낮아진 결과를 보인 반면에 SE파향에 대해서는 ST. C & E에서 미소하게 증가한 것을 확인하였다. 이는 기존 동방과제의 100 m 축소로 인한 것으로 판단된다.

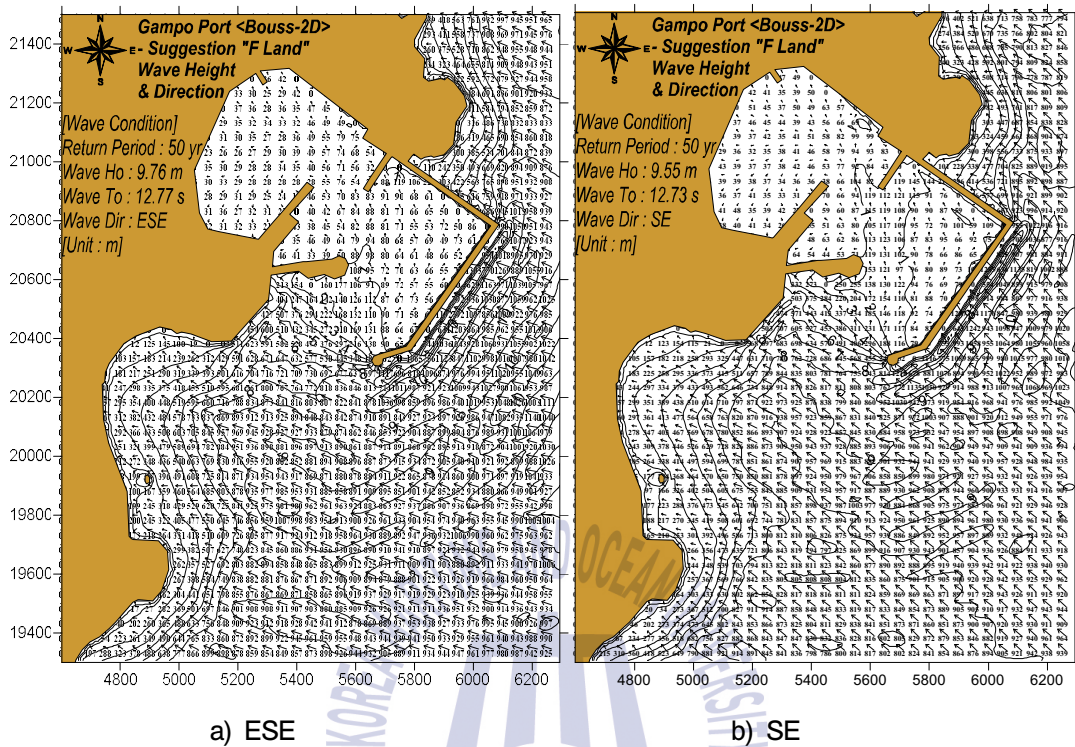


Fig. 4.63 Wave Height results according to wave direction

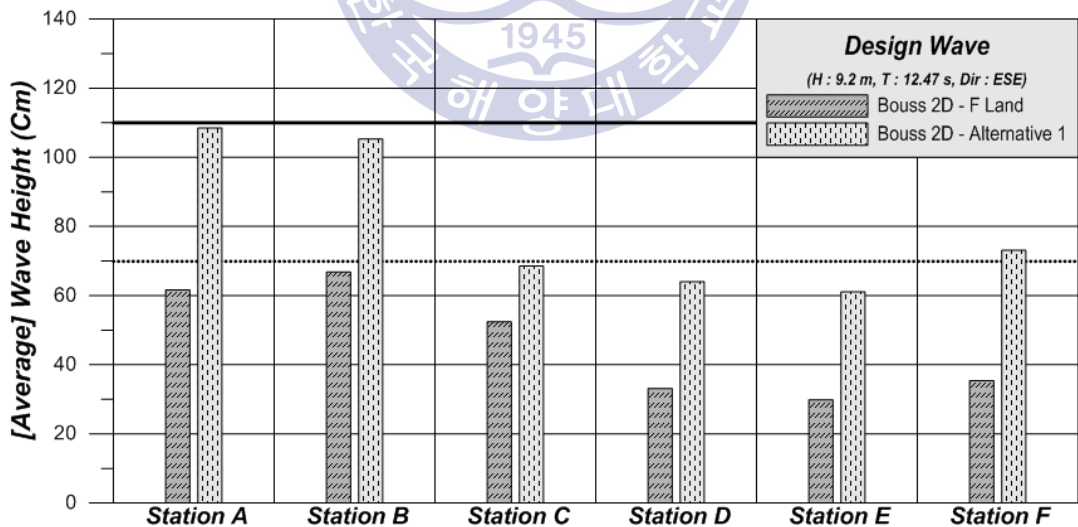


Fig. 4.64 Comparison of averaged wave heights for each model ( F-Land, ESE wave )

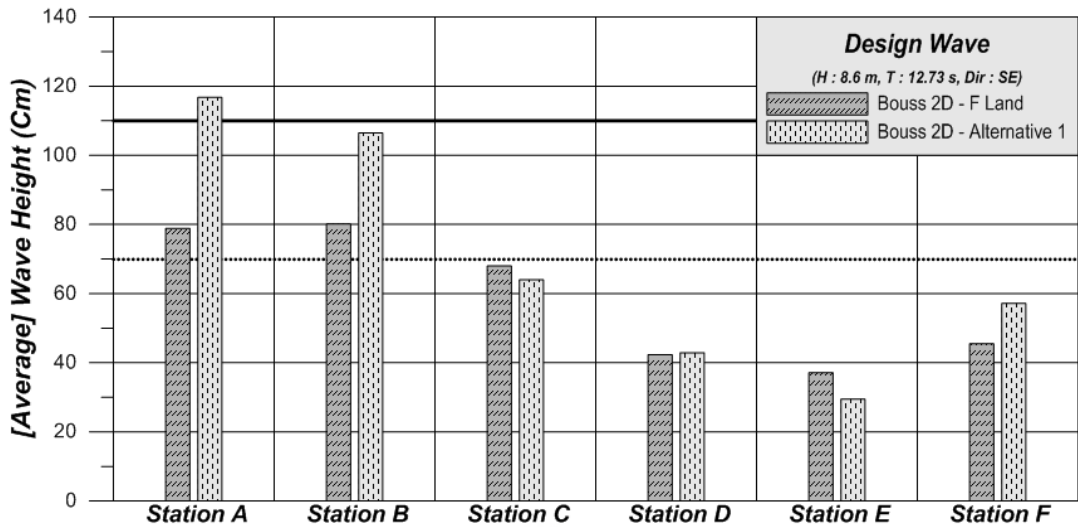


Fig. 4.65 Comparison of averaged wave heights for each model (F-Land, SE wave)

F-Land 파랑해석 결과 ALT-1안에 비하여 전체적으로 정온도 확보를 가져왔다. 기존 감포항의 복잡한 교통상황, 어선부두 확대, 어선 선회장 확보, 수산시장의 활성화 등 항만의 어항기능을 고려한 F-Land는 새로운 랜드마크로 친수공간과 연계하여 지역경제 활성화를 유도할 수 있는 대안으로 장래 연안항 지정사업의 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 제 5 장 결론

항만에서의 확장 또는 보수에 경우 정확한 파랑반응을 분석하는 것은 중요한 과정으로써 이때의 항내 정온도를 확보하는 것은 항만운영상 가장 기본적인 요소이다. 최근 우리나라의 동해안은 국가연안항과 연계하여 발전하고 있는 소규모 국가어항의 수요가 증가하고 있다. 따라서 추가 기능 확대에 효율적인 하역작업을 위한 해당 기관들의 노력이 지속되고 있는 가운데, 본 논문은 경주시 감포읍에 위치한 감포항의 확장, 친수공간 조성, 화물처리장 및 야적장, 화물부두, 해양레저센터 등 추가적인 항만조성과 외곽시설의 도입을 위한 기초적인 연구를 진행하였다.

본 연구의 수치해석을 위한 방법으로 이상파랑에 의한 파랑변형을 잘 모의할 수 있는 파랑작용평형방정식 모델과 Boussinesq 방정식 모델을 적용하여 파랑장의 변화를 평가하였으며, 심해설계과 제원은 외해 077117와 077119 지점에서 50년 빈도의 E, NE, ESE, SE, SSE로 추출하여 결과로 계류한계파고를 기준으로 각 5가지 대안들에 대한 정온도 평가를 진행하였다.

연구과정에 의하여 도출된 결론은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(1) 실험에 사용한 수치모델은 Goda의 불규칙파 회절도와 비교하여, 방향 분포 함수에 따라 다소 차이가 나타났으나 전반적으로 유사한 패턴을 보였다. 또한 Boussinesq 모델에서 약비선형 기법으로는 파랑의 강한 비선형특성이 과소평가되기 때문에 실제 해역에서 고파랑, 수심의 급변, 쇄파 등을 효과적으로 반영하기 위해서는 강비선형 기법으로 수치실험을 수행하여야 할 것으로 본다.

(2) 먼저 파랑작용평형방정식을 기반으로 한 SWAN 모형으로 외해에서의 파랑변형 실험을 진행하였다. 파랑 변형의 정밀도를 높이기 위해 격자간격을 광역 100 m, 중간역 50 m로 하여 협역으로 내습하는 파랑의 제원을 추출하였다. 광역에서 중간역까지 파랑의 에너지가 다소 감소되어 전파된 것을 확인하였고 협역의 입력조건에서는 입사파 대비 E파향 8.6 %, NE 파향 17.9%, ESE파향 5.7%, SE파향 9.9%, SSE파향 18.3% 감소하여 NE파향과 SSE파향에서 수심과 지형에 대한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

(3) 파랑작용평형방정식 모형에서는 회절현상을 에너지 보존식에 근거하기 때문에 재현하기 까다로운 단점이 있어 Boussinesq 방정식 모형에서 항내의 복합적 반응이 일반적으로 높게 나타났다. 또한 Bouss-2D모형은 연안 및 항내에서의 천수 및 굴절, 반사 현상을 보다 정확하게 재현할 수 있는 장점이 있다. 따라서 항내의 복합적인 반응이 잘 재현되는 Bouss-2D모형의 경우로 항내 정온도 실험을 진행해야 할 것이다.

(4) 남측신규항만의 개발을 목표로 한 ALT-2 & 3 & 4의 경우 남측의 자연해빈을 매립하여 화물 및 여객부두를 신설하고 선회장을 확보하여 신규항만을 개발함으로써 선박의 통항안전을 위하여 수심이 낮은 지역에 준설을 계획한 것이다. 이는 신규 방파제 건설하였음에도 불구하고 S계열에서의 모든 Station에서 정온하지 않은 것을 판단할 수 있었고 더하여 준설, 매립, 안벽 및 방파제 건설 등 대규모 건설계획이 이루어지는 만큼 경제성의 문제점도 안고 있다.

(5) ALT-1안의 경우는 기존 감포항 외측으로 동측신규 항만을 계획하여 화물 및 여객부두의 신설로 기존 시설과 연계하여 항만 확장을 계획한 것이다. 동측으로 부두를 확장하여 화물처리장 및 야적장, 연안크루저부두, 화물부두 등을 고려할 수 있으며 최근 관광객이 급증함에 따라 여객부두의 정온

도를 확보할 수 있는 ALT-1의 경우가 경제적으로도 알맞은 계획으로 판단된다. 다만, S 계열의 파랑에 대해서는 화물부두인 ST. A의 정온도 확보를 위하여 방파제의 형상, 소파제의 도입 등 추가적인 연구가 사료된다.

(6) ALT-5안의 경우는 대규모 외곽시설 및 이안제를 포함하여 남측 및 동측 신규항만을 건설하는 계획으로써, 외곽방파제의 탁월한 파랑차단으로 항내의 모든 Station에서 정온도를 확보하였다. 대규모 신규항만공사로 연안항 규모를 벗어나지만 장래의 확장 평면배치에 기초자료로 활용될 수 있다.

(7) 기존 감포항의 항만특성상 어항기능의 역할이 우세하여 최근 수산업의 변화, 부족한 계류 및 어항시설을 확충하기 위한 정비를 고려하였고 이를 ALT-1안의 평면배치를 적용하여 F-Land를 계획하였다. 활발한 어업활동이 가능하도록 기존 감포항의 동방파제를 축소하여 어선 선회장을 확보하고 확장한 동방파제를 연장하여 정온도 향상을 고려하였다. 파랑해석 결과 ALT-1안에 비하여 전체적으로 정온도 향상을 가져와 기존 감포항의 복잡한 교통상황, 어선부두 확대, 어선 선회장 확보, 수산시장의 활성화 등 항만의 어항기능을 고려한 F-Land는 새로운 랜드마크로 친수공간과 연계하여 지역경제 활성을 꾀할수 있는 대안으로 장래 평면배치에 참고자료로 활용될 수 있다.

이상과 같이 대상해역 외해로부터 이상파랑에 대한 기초적인 항내 정온도 분석으로 2가지 모델을 적용하였으며, 실험의 결과를 토대로 SWAN 모델에 반하여 회절, 굴절, 반사 등 파랑의 친수효과를 잘 재현하는 Bouss-2D가 항내 반응을 예측이 정밀하다는 것을 인지할 수 있었다. 정온도 분석을 진행한 결과 ALT-1안의 경우가 항만확장 계획에 따른 평면배치로 가장 유망한 결과를 얻었으며 어항기능과 방문객을 고려하여 인공섬 F-land를 반영한 수정안이 항만의 장래비전에 부합될 것으로 본다.

## 참고문헌

경주시(2014), “지방관리 연안항 지정을 위한 입지선정 및 타당성조사 용역보고서”

일본항만협회 (1974), “일본항만기술요보”, No.21

류황진, 신승호, 홍기용, 홍석원, 김도영 (2007), “Boussinesq 모델을 이용한 제주 차귀도 해역의 다방향 불규칙파 시뮬레이션”, 한국해양공학회지 제 21권, 1호, pp. 7-17.

한국해양연구원(2005), 전해역 심해설계과 추정 보고서II

한전용, 권세영, 심재철, 전인식 (2003), “Boussinesq 방정식을 이용한 불규칙파의 비선형 파랑전파 수치모의”, 한국해안해양공학회, 한국해안해양공학발표논문집, 제 14권, pp. 240-244

해양수산부 (2014), “항만설계 기준”

홍기용, 양찬규 (2000), “장전항 최적 설계를 위한 정온도 해석”, 한국해양환경·에너지학회지, 제 3권, 2호, pp. 49-59



Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen. (1978), "Energy loss and set-up due to breaking of random waves", Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp. 569-587.

Booij, N., L. H. Holthuijsen, and P. H. M. de Lange. (1992), "The Penetration of Short Crested Waves through a Gap", Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng, Venice, New York, pp. 1044-1052.

Booij, N., Holthuijsen, L., and Rus, R. C. (1996), "The SWAN wave model for shallow water", In Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, USA, pp. 668-676.

Bouws, E. and G. J. Komen. (1983), "Breaking waves propagating over a shoal", Proc. 23th Int. Conf. Coastal Engineering, ACSE, pp. 42-50.

Cavaleri, L., P. Malanotte-Rizzoli. (1981), "Wind wave prediction in shallow water. Theory and applications", J. Geophys. Res., Vol. 86, No. C11, 10, pp. 961-1000.

Collins, J. I. (1972), "Prediction of shallow water spectra", J. Geophys. Res., Vol. 77, No. 15, pp. 2693-2707.

Eldeberky, Y. and J.A. Battjes. (1995), "Parameterization of triad interactions in wave energy models". Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, pp. 140-148.

Goda, Y., H. Takeda, and Y. Moriya. (1967), "Laboratory Investigation of Wave Transmission over Breakwaters", Rep. port and Harbour Res. Inst., No.13.

Goda, Y., Takayama, T. and Suzuki, Y. (1978), "Diffraction diagrams for directional random waves", Proc. 16th International Conference Coastal Engineering, pp. 628-650.

Hasselmann, K. (1962), "On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part 1: General theory, J. Fluid Mech.", Vol. 12, pp. 481-500.  
Hasselmann, K., and J. I. Collins. (1968), "Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction", J. Mar. Res., Vol. 26, pp.1-12.

Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Krusema, A. Meerburg, P. Muller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden. (1973), "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)", Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., Vol. 12, A8.

Isaacson, M., and Qu, S. (1990), "Waves in a harbor with partially reflecting boundaries", Coastal Engineering, Vol. 14, pp. 193-214.

Johnson, I. G. (1966), "Wave boundary layers and friction factors", Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp. 127-148.

Johnson, I. G. and N. a. Carlsen. (1976), "Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer", J. Hydraulic Research, Vol. 14, pp. 46-60.

Johnson, I. G. (1980), "A new approach to rough turbulent boundary layers", Ocean Engineering, Vol. 7, pp. 109-152.

J. P. F. M. Janssen.(1991), "Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting", J. Phys. Oceanogr., Vol. 21, pp.1631-1642.

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

Luo, W. and J. Monbaliu. (1994), "Effects of the bottom friction formulation on the energy balance for gravity waves in shallow water", J. Geophys. Res., Vol. 99, No. C9, 18, pp. 501-511.

Madsen, O. S., Y. K. Poon and H. C. Graber. (1988), "Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory", Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp.492-504.

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

Nwogu, O. G. (1993), "Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 119(6), pp. 618-638.

Nwogu, O. G. (1996), "Numerical prediction of breaking wave and currents with a Boussinesq model", paper presented at the 25<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Engineering, ICCE'96, Orlando, FL.

Phillips, O. M. (1987), "The dynamics of the upper ocean", Cambridge University Press, pp. 336.

Seelig, W.N. (1979), "Effects of Breakwaters on Waves: Laboratory Tests of Wave Transmission by Overtopping", Proc. Conf. Coastal Structures, Vol.79, No. 2, pp.941-961.

Shemdin, P., K. Hasselmann, S. V. Hsiao and K. Herterich. (1978), "Non-linear and linear bottom interaction effects in shallow water in Turbulent Fluxes through the Sea Surface wave dynamics and prediction", NATO Conf. ser., Vol. 1, pp. 347-372.

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

Thornton, E. B. and R. T. Guza. (1983), "Transformation of wave height distribution", J. Geophys. Res., Vol. 88, C10, pp. 5925-5938.

Vincent, C. L., J. M. Smith and J. Davis. (1994), "Parameterization of wave breaking in models", Proc. of Int. Symp. Waves-Physical and Numerical Modelling, Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, M. Isaacson and M. Quick (Eds.), Vol. II, pp. 753-762.

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

Weber, S.L. (1991), "Eddy-viscosity and drag-law models for random ocean wave dissipation". J. Fluid Mech., 232, pp. 73-98.

Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., and Subramanya, R. (1995), "A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1, highly nonlinear unsteady waves", J. Fluid Mech., pp. 71-92.

## 감사의 글

어느덧 연구실에 들어 온지도 3년의 시간이 지나 졸업을 앞두고 있습니다. 학·석사연계과정으로 짧으면서도 긴 시간동안의 석사생활은 사소한 것부터 깨달으며 사회를 향해 노크하는 귀중한 배움의 연속이었습니다. 졸업이란 새로운 시작을 맞이하기까지 부족한 저에게 많은 조언과 도움을 주신 분들과 추억을 함께한 사람들과 감사의 마음을 전하고자 합니다.

우선 대학의 첫 단추이고 모든 것이 새롭고 어리숙했던 입학부터 석사학위 논문을 마무리 할 때까지 학문적인 가르침뿐만 아니라 올곧은 길로 인도해주신 존경하는 이중우 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 학생을 우선적으로 생각해주시고 항상 검소하신 삶에서 한 사람으로서 배울 점이 많았습니다. 새로운 시작에 앞서 교수님께서 주신 가르침을 늘 마음속에 간직하며 성장하겠습니다.

또한 부족한 제 논문을 심사해주신 이재하 교수님, 김태형 교수님께 진심으로 감사드리며 학부과정부터 깊이 있는 가르침을 주신 김태곤 교수님, 김도삼 교수님 그리고 경갑수 교수님께 이 자리를 통하여 감사의 인사를 드립니다.

특히 바쁘신 와중에 학문으로써 가르침과 사회에 대한 아낌없는 조언을 해주신 김강민 선배님께 진심으로 감사드립니다. 부족한 저에게 선배님께서 주신 관심은 석사생활을 하는데 더욱 열심히 하는 계기가 되었습니다.

그리고 항상 연구실 후배를 챙겨주시고 격려해 주신 이지훈 선배님, 이우철 선배님, 정재현 선배님, 이승철 선배님, 남기대 선배님, 박상길 선배님 등 많은 선배님과 학부과정부터 친동생처럼 아껴주셨던 희재형, 동현이형, 효재형, 용훈이형께 감사의 인사를 드립니다.

대학입학부터 1년 동안 같이 기숙사 생활을 하며 동생의 어리광을 받아주신 정석이형, 군 복학 후에도 항상 저에게 많은 조언과 방향을 제시해주셔서 연구실에 들어와 이렇게 논문을 마무리할 수 있었습니다.

연구실에서 가장 함께한 추억이 많은 창식이형, 같이 지내온 시간들은 제가 성장할 수 있었던 값진 순간이었습니다. 서울에서 회사생활을 하시면서도 제 질문에 야근까지 하시면서 가르쳐 주시고 조언해주셔서 정말 감사합니다. 또한 아직도 배울 것이 많은 형 옆에서 묵묵히 자리를 지키며 같이 공부하며 생각을 나눈 성민에게, 앞으로의 선택을 항상 응원하고 기대한다는 말과 함께 그동안의 연구실 생활에 대하여 감사하다는 말을 전합니다. 그리고 막내 현우에게, 1학년 때 부족한 회장을 만나 벌써 3학년을 수료하고 이제 4학년을 맞이할 준비를 하는데 앞으로 석사과정에 교수님께서 강조하신 ‘초심’을 간직하여 지냈으면 하는 마음을 전합니다.

석사과정에서 많은 조언과 가르침을 주신 백동진 선배님, 따스한 선배님의 마음에 감사의 인사를 드립니다. 친구처럼 함께 웃고 떠들면서 친형처럼 고민을 잘 들어주시던 상민이형, 형이 있어 동기들이 없었던 공대 2호관 6층에서 힘들고도 즐거웠던 추억들을 많이 쌓고 이 시간을 잘 마칠 수 있었습니다. 또한 항상 노력하는 주현이형, 같이한 석사생활에서 형의 열정을 배울 수 있었습니다. 영원할 것 같았던 대학생에서 어느덧 졸업을 앞둔 지훈, 재겸, 진렬에게 우리들의 6년이란 시간동안의 추억들에 대하여 고마움을 느끼며, 이외 일일이 인사드리지 못한 분들께 죄송스러운 마음과 함께 감사의 말씀을 드립니다.

1년 중 며칠, 자주 못가는 고향이지만 항상 반기는 취업해서 정신없는 경수, 애월인에서 노형인 영관, 서울에서 힘들게 공부하는 주형과 은석, 온화한 고향 그 자리에 있는 친구들의 응원과 격려 덕에 타지에서의 공부에 힘이 되었던 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 철없는 장남을 이렇게 좋은 환경에서 공부할 수 있게 따끔한 충고와 따뜻한 사랑으로 지속적으로 지지해주신 아버지와 어머니에게 이 논문을 바치며, 항상 말씀하신 ‘현명한 선택’으로 사회에 나가 자랑스러운 아들이 되겠습니다. 또한 군 복학하고 열심히 공부하는 하나밖에 없는 내 동생, 챙겨준 것도 없는 못난 형을 응원해줘서 고맙고 나 또한 항상 응원한다는 말을 전합니다.

2018년 2월

문승효 드림