

本 論 文 을 朴 相 吉 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 工 學 博 士 김 태 곤



委 員 工 學 博 士 김 태 형



委 員 工 學 博 士 이 중 우



2011年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

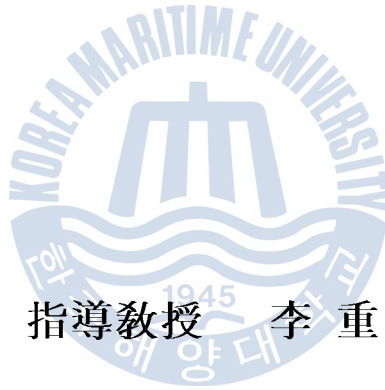
土 木 環 境 工 學 科

朴 相 吉

工學碩士 學位論文

연안 파랑과 흐름하에서 슬릿형 해안구조물의  
반응 해석

Response Analysis of the Slit Type Coastal Structures  
under Waves and Currents



指導教授 李重雨

2011年 2月

韓國海洋大學校 大學院

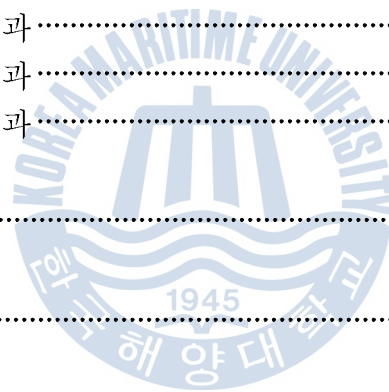
土木環境工學科

朴相吉

# 목 차

LIST OF TABLES .....	iii
LIST OF FIGURES .....	iii
ABSTRACT .....	viii
<b>제1장 서론</b> .....	1
1.1 연구의 배경 .....	1
1.2 연구의 동향 .....	2
1.3 연구의 내용 및 범위 .....	4
<b>제2장 수리모형실험 적용내용</b> .....	7
2.1 수리모형실험 결과 .....	7
2.2 모형적용 내용 .....	11
2.3 슬릿형 설계의 현장적용사례 .....	13
<b>제3장 수치모형의 기초이론</b> .....	17
3.1 파랑변형 수치모형 .....	17
3.1.1 파작용 평형방정식 .....	18
3.1.2 바람에 의한 에너지 유입 .....	19
3.1.3 회절 .....	22
3.1.4 구조물에 의한 파랑의 전달 및 반사 .....	23
3.1.5 저면에 의한 에너지 소산 .....	24
3.1.6 쇄파에 의한 에너지 소산 .....	26
3.2 해수유동 수치모형 .....	28
3.2.1 해수유동 지배방정식 .....	28
3.2.2 해수유동 해석 방법 .....	30

3.3 해수교환 수치모형	35
3.3.1 해수교환 지배방정식	35
3.3.2 Lagrange 입자추적법	38
<b>제4장 수치실험 및 분석</b>	41
4.1 수치모형의 구성	41
4.1.1 파랑변형 수치모형	41
4.1.2 해수유동 수치모형	55
4.1.3 해수교환 수치모형	61
4.2 수치실험 결과 및 분석	62
4.2.1 파랑변형 결과	62
4.2.2 해수유동 결과	89
4.2.3 해수순환 결과	103
<b>제5장 결론</b>	114
<b>참 고 문 헌</b>	117



## LIST OF TABLES

Table 1.1 Comparison of breakwater types	6
Table 4.1 Incident wave condition for design wave	45
Table 4.2 Characteristics of wind	45
Table 4.3 Cases of the numerical simulation for wave transformation	46
Table 4.4 Specifications of wave gauge	49
Table 4.5 Specifications of water velocity	49
Table 4.6 Field observations of wave height & velocity	51
Table 4.7 Analysis of field observation and numerical simulation	51
Table 4.8 Incident wave condition for design wave	52
Table 4.9 Characteristics of wind	53
Table 4.10 Cases of the numerical simulation for wave transformation	53
Table 4.11 Summary of numerical experiment for waves	54
Table 4.12 Summary of numerical experiment for current	56
Table 4.13 Harmonic components used for verification at PT-1,2,3	59
Table 4.14 Summary of numerical experiment	62

## LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 Rubble mound, slit type, and curtain wall breakwaters considered	5
Fig. 2.1 Prototype unit block (1/25) for the initial design	8
Fig. 2.2 Prototype model setup	8
Fig. 2.3 Alternative unit block design(1/40)	9
Fig. 2.4 Alternative model setup	9
Fig. 2.5 Comparison of reflection and transmission rates from prototype experiment	10
Fig. 2.6 Comparison of reflection and transmission rates from alternative experiment	10
Fig. 2.7 Reflection and transmission rates for incident wave height	12
Fig. 2.8 Reflection and transmission rates for incident wave period	12
Fig. 2.9 Optimum slit design to real field application(Seoli harbor)	14

Fig. 2.10 Optimum slit design to real field application(Chojun harbor).....	14
Fig. 2.11 Optimum slit design to real field application(Honghyun harbor)...	15
Fig. 2.12 Comparison of wave overtopping at the typhoon "dianmu" for the slit type and rubble mound breakwater.....	15
Fig. 2.13 Underwater snap shot wear the slit type breakwater at chojun harbor(breakwater functions as a fish-breeding ground).....	16
Fig. 4.1 Theory & experiment of semi-infinite breakwater.....	42
Fig. 4.2 Computational domain of semi-infinite breakwater.....	42
Fig. 4.3 Comparison of theory and computation for semi-infinite breakwater .....	42
Fig. 4.4 Theory & experiment of a breakwater gap with $B/L=5.0$ .....	43
Fig. 4.5 Computational domain of a breakwater gap with $B/L=5.0$ .....	43
Fig. 4.6 Comparison of theory and computation for a breakwater gap with $B/L=5.0$ .....	43
Fig. 4.7 Numerical experiments for permeable breakwaters.....	44
Fig. 4.8 Grid of wide area.....	46
Fig. 4.9 Grid of narrow area.....	47
Fig. 4.10 Depth of study area.....	48
Fig. 4.11 Observations of point.....	49
Fig. 4.12 Observation of wave height.....	50
Fig. 4.13 Observation of water velocity.....	50
Fig. 4.14 Grid of wide area for wave model.....	54
Fig. 4.15 Grid of narrow area for wave model.....	55
Fig. 4.16 Grid of wide area for current model.....	57
Fig. 4.17 Grid of narrow area for current model.....	57
Fig. 4.18 Stations for observation.....	58
Fig. 4.19 Time series of surface elevation.....	59
Fig. 4.20 Result of tidal current.....	60
Fig. 4.21 Wave height of port(SE wave direction).....	63
Fig. 4.22 Wave height of port(SEE wave direction).....	64
Fig. 4.23 Wave height of port(S wave direction).....	64
Fig. 4.24 Wave height vector of wide area(Dir:SE).....	65
Fig. 4.25 Wave height vector of narrow area(Case 1, Dir:SE).....	65
Fig. 4.26 Wave height vector of narrow area(Case 2, Dir:SE).....	66

Fig. 4.27 Wave height vector of narrow area(Case 3, Dir:SE).....	66
Fig. 4.28 Wave height of detail (Dir:SE).....	67
Fig. 4.29 Wave height vector of wide area(Dir:SSE).....	68
Fig. 4.30 Wave height vector of narrow area(Case 1, Dir:SSE).....	68
Fig. 4.31 Wave height vector of narrow area(Case 2, Dir:SSE).....	69
Fig. 4.32 Wave height vector of narrow area(Case 3, Dir:SSE).....	69
Fig. 4.33 Wave height of detail (Dir:SSE).....	70
Fig. 4.34 Wave height vector of wide area(Dir:S).....	71
Fig. 4.35 Wave height vector of narrow area(Case 1, Dir:S).....	71
Fig. 4.36 Wave height vector of narrow area(Case 2, Dir:S).....	72
Fig. 4.37 Wave height vector of narrow area(Case 3, Dir:S).....	72
Fig. 4.38 Wave height of detail (Dir:S).....	73
Fig. 4.39 Check point of wave height.....	74
Fig. 4.40 Wave height of port(SE wave direction).....	75
Fig. 4.41 Wave height of port(SSE wave direction).....	75
Fig. 4.42 Wave height of port(S wave direction).....	76
Fig. 4.43 Wave height vector of wide area(Dir:SE).....	77
Fig. 4.44 Wave height of narrow area(Dir:SE, Case A).....	78
Fig. 4.45 Wave height of narrow area(Dir:SE, Case B).....	78
Fig. 4.46 Wave height of narrow area(Dir:SE, Case C).....	79
Fig. 4.47 Wave height of north breakwater area(Dir:SE, Case A).....	79
Fig. 4.48 Wave height of north breakwater area(Dir:SE, Case B).....	80
Fig. 4.49 Wave height of north breakwater area(Dir:SE, Case C).....	80
Fig. 4.50 Wave height vector of wide area(Dir:SSE).....	81
Fig. 4.51 Wave height of narrow area(Dir:SSE, Case A).....	82
Fig. 4.52 Wave height of narrow area(Dir:SSE, Case B).....	82
Fig. 4.53 Wave height of narrow area(Dir:SSE, Case C).....	83
Fig. 4.54 Wave height of north breakwater area(Dir:SSE, Case A).....	83
Fig. 4.55 Wave height of north breakwater area(Dir:SSE, Case B).....	84
Fig. 4.56 Wave height of north breakwater area(Dir:SSE, Case C).....	84
Fig. 4.57 Wave height vector of wide area(Dir:S).....	85
Fig. 4.58 Wave height of narrow area(Dir:S, Case A).....	86
Fig. 4.59 Wave height of narrow area(Dir:S, Case B).....	86
Fig. 4.60 Wave height of narrow area(Dir:S, Case C).....	87

Fig. 4.61 Wave height of north breakwater area(Dir:S, Case A).....	87
Fig. 4.62 Wave height of north breakwater area(Dir:S, Case B).....	88
Fig. 4.63 Wave height of north breakwater area(Dir:S, Case C).....	88
Fig. 4.64 Max. flood current vector of wide area.....	90
Fig. 4.65 Max. ebb current vector of wide area.....	91
Fig. 4.66 Max. flood current vector of narrow area(Case A).....	92
Fig. 4.67 Max. flood current post of narrow area(Case A).....	92
Fig. 4.68 Max. ebb current vector of narrow area(Case A).....	93
Fig. 4.69 Max. ebb current post of narrow area(Case A).....	93
Fig. 4.70 Max. flood current vector of narrow area(Case B).....	94
Fig. 4.71 Max. flood current post of narrow area(Case B).....	94
Fig. 4.72 Max. ebb current vector of narrow area(Case B).....	95
Fig. 4.73 Max. ebb current post of narrow area(Case B).....	95
Fig. 4.74 Comparison of flood current(Case B-Case A).....	96
Fig. 4.75 Comparison of ebb current(Case B-Case A).....	96
Fig. 4.76 Max. flood current vector of narrow area(Case C).....	97
Fig. 4.77 Max. flood current post of narrow area(Case C).....	97
Fig. 4.78 Max. ebb current vector of narrow area(Case C).....	98
Fig. 4.79 Max. ebb current post of narrow area(Case C).....	98
Fig. 4.80 Comparison of flood current(Case C-Case A).....	99
Fig. 4.81 Comparison of ebb current(Case C-Case A).....	99
Fig. 4.82 Max. flood current vector of narrow area(Case D).....	100
Fig. 4.83 Max. flood current post of narrow area(Case D).....	100
Fig. 4.84 Max. ebb current vector of narrow area(Case D).....	101
Fig. 4.85 Max. ebb current post of narrow area(Case D).....	101
Fig. 4.86 Comparison of flood current(Case D-Case A).....	102
Fig. 4.87 Comparison of ebb current(Case D-Case A).....	102
Fig. 4.88 Initial particles injected.....	104
Fig. 4.89 Particle behavior of Case A (24hrs(1day)later).....	105
Fig. 4.90 Particle behavior of Case A (144hrs(6day)later).....	105
Fig. 4.91 Particle behavior of Case A (264hrs(11day)later).....	106
Fig. 4.92 Particle behavior of Case A (360hrs(15day)later).....	106
Fig. 4.93 Particle behavior of Case B (24hrs(1day)later).....	107
Fig. 4.94 Particle behavior of Case B (144hrs(6day)later).....	107



Fig. 4.95 Particle behavior of Case B (264hrs(11day)later).....	108
Fig. 4.96 Particle behavior of Case B (360hrs(15day)later).....	108
Fig. 4.97 Particle behavior of Case C (24hrs(1day)later).....	109
Fig. 4.98 Particle behavior of Case C (144hrs(6day)later).....	109
Fig. 4.99 Particle behavior of Case C (264hrs(11day)later).....	110
Fig. 4.100 Particle behavior of Case C (360hrs(15day)later).....	110
Fig. 4.101 Particle behavior of Case D (24hrs(1day)later).....	111
Fig. 4.102 Particle behavior of Case D (144hrs(6day)later).....	111
Fig. 4.103 Particle behavior of Case D (264hrs(11day)later).....	112
Fig. 4.104 Particle behavior of Case D (360hrs(15day)later).....	112
Fig. 4.105 Comparison of water exchange rates.....	113



# Response Analysis of the Slit Type Coastal Structures under Waves and Currents

SANG-GIL PARK

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

## Abstract

Redevelopment of the domestic small fishing ports is being started in earnest by applying the environmentally friendly technology in order to attract tourists. For the purpose of improving water quality in the harbor, selection of breakwater type might have the priority to secure calmness and stability and to enhance circulation to the coastal and harbor areas. Therefore, from this study, the hydraulic characteristics of reflective and transmission rates with the installation efficiency and stability of the cylindrical slit type of blocks were analyzed through the hydraulic model experiment. These results were introduced to the numerical analysis for the prediction of wave transformation and water circulation in and out of the structure planned. Two small fishing ports in southern Korea, are affected by the waves of SE through SSW directions and weak tidal currents. The results from the slit type block breakwater compared with those from the rubble mound and curtain wall breakwaters to show the effectiveness of harbor calmness and water circulation. Considering that weak tidal current at the selected areas, the pass rate of a long period wave seems to be still excellent. It was found through this study that the primary objective of wave control and the secondary objective of improving water exchange by the cylindrical slit type coastal structure are satisfied simultaneously.

# 제1장 서론

## 1.1 연구의 배경

소규모 어항은 연안어업활동 지원기지로써, 어촌주민의 생활 및 경제권의 중심지로써 지역사회 발전의 핵심기반으로 도서·벽지어촌과 외부사회를 연결하는 교통·정보의 기능을 갖는다. 종래의 어항은 사람과 화물을 효율적으로 처리하려는 고유기능에 중점을 두어 개발되었기 때문에, 어항의 평면 배치안에 따른 환경적인 변화를 고려하지 않았으며 일반적으로 어항으로 인해 해양환경에 악영향을 미치고 있다.

기존의 직립식 또는 사석식 공법으로 건설한 항만은 방파제가 자연흐름을 차단 내지 변류하여 항내 토사퇴적, 해수교환 억제, 수질악화, 주변 해빈변형, 생태계파괴 등의 부작용이 야기되고, 이들 문제점을 해소하기 위하여 항내 토사준설, 방파제 해수소통을 위한 굴착공사, 선착장 연장공사, 대체어항조성 등에 많은 예산이 추가로 투입되고 있다. 또한 항내로 내습되는 파 에너지의 대부분을 반사시킴으로써 방파제 전면해역의 파고가 증대되어 구조물의 피해가 발생하거나 선박의 안전한 계류에 문제점을 발생시키고 있다.

그러나 근래에 와서는 사람과 해양생태계가 서로 공존하는 항만 즉 환경친화적 항만을 건설하려는 노력이 국제적으로 확산되고 있다. 환경친화적 항만의 구체적 개념은 자연과 조화를 이루어 생물이 살기 좋은, 그래서 자연을 훼손하는 것이 아니라 오히려 자연 환경을 창조함으로써 인간에게 쾌적감(amenity)을 주고, 환경 부하가 적은, 환경 관리가 잘된 항이라 할 수 있다. 이를 실현하려면 어항을 개발할 때에 간석지나 조간대와 같은 해조류의 서식지를 보호하여야 하며 오염원이 항내로 유입되지 않고, 유입된 오염원이 잘 희석되도록 하기 위해서는 항내·외간에 해수교환이 잘 이루어지도록 하여야

한다.

따라서 본 연구에서는 새롭게 설계한 친환경 구조물인 슬릿형(silt type) 해안 및 항만구조물을 소규모 어항에 적용하였을 때의 현장적용성을 수치모형 실험을 통해 분석하여 그 타당성을 제시하고 장래 슬릿형 해안 및 항만 구조물의 적용을 확대하고 건설산업 및 설계분야에 기초자료를 제공하는데 있다.

## 1.2 연구의 동향

슬릿형 해안 및 항만구조물의 적용에 따른 물리적 해양환경의 변화를 예측하기 위하여 최근 보편화하여 사용하고 있는 파랑모형, 유동모형 및 해수교환모형 등으로 수치실험을 통해 해석하고자 한다.

파랑 모형은 경험적인 모형과 에너지 평형방정식에 기초한 모형으로 분류한다. 경험적인 모형은 Sverdrup과 Munk(1947)가 2차 세계대전 중 풍파를 예측하기 위해 수행한 연구로서 불규칙한 파랑을 정량적으로 기술하기 위해 유의파라는 통계량을 도입하였고, 그 이후 Brestschneider (1952)와 Wilson (1965)이 많은 관측 자료를 보완하여 SMB법으로 명명하였다.

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

에너지 평형방정식에 기초한 모형은 Gelci et al.(1957)에 의해 처음 개발되었지만, 파랑발달과 소산과정에 대한 충분한 이해가 부족했다. 이 후에 파랑생성이론을 Phillips(1957)와 Miles(1957)가 발표하고, Hasselmann(1962)이 비선형 상호작용에 의한 에너지 평형에 대한 연구를 발표함으로써 파랑모형에

대한 이론적인 틀이 확립되었다.

에너지 평형방정식에 의한 수치모형은 파랑의 발생, 소산 및 비선형 상호작용의 고려여부와 평가방법에 따라 제1세대, 제2세대, 제3세대 모형으로 분류된다. 제3세대 모형의 대표 격인 SWAN모형(Booij et al., 1999)은 WAM모형이 연안역에서 중요한 수심변화에 의해 발생하는 쇄파, 3파 비선형 상호작용 등을 포함할 수 없음을 해결하기 위해 음해법을 이용하여 파랑의 전파를 계산하고, 수심변화에 의해 발생하는 쇄파 및 3파 비선형 상호작용을 고려할 수 있도록 개발되었다.

본 연구에 사용된 파랑변형 수치모형 프로그램인 SWAN모형은 델프트(Delft)대학에서 개발하여 최근 파랑장 해석에 널리 이용되고 있으며, 최근 버전에서 회절계수를 도입함으로써 회절파 해석이 크게 개선되어 더 정확한 불규칙파 파랑 특성 재현이 가능하게 되었다. Booij 등(1996)은 바람을 고려하여 SWAN 모형의 소개와 천해역에서의 적용성을 검토하였고, 류황진 등(2004)은 SWAN 모형을 이용하여 바람장을 고려한 제주해역 장기 파랑분포 특성을 연구하였다.

해수유동 해석에 사용한 POM(Princeton Ocean Model)은 A.Blumberg와 G.Mellor(1987)에 의해 설계된 연안역과 개방 해양(Open Ocean)에 대한 해수순환 수치 모델이다. 3차원 해수유동모델로 하구와 연안해역에 많이 적용되어 진다. Kourafalou 등(1996)은 POM을 South Atlantic Bight에 적용하여 밀도류에 영향을 미치는 여러가지 파라미터에 대한 민감도해석을 하였다. Oey(1996)은 멕시코만류의 흐름해석시 플룸(plume)의 확장은 수평확산계수의 선택에 아주 민감하게 반응하는 것을 확인하였다. 국내의 경우 강태순(1999)은 3차원 해양순환모델을 이용한 남해동부해역 해수유동 특성에 대한 수치계산을 수행하였으며, 주귀홍(2002) 및 윤은찬(2003)은 조석과 밀도차를 고려한 수치계산을 통하여 낙동강 하천플룸의 거동을 해석하였다.

입자추적에 의한 해수교환 해석에 적용된 Lagrangian 방법은 Lagrange 좌표계 즉, 물질좌표계에서 개개의 입자의 거동을 추적해가면서 물질수송을 해석하는 방법이다. 이 방법은 Monte Carlo 방법 또는 Random walk 방법으로 잘 알려져 있다. 본 연구에는 Lagrange 적인 입자추적방식에 의한 Random walk 방법을 적용하였다. 이 방법은 1950년대부터 지하수분야의 확산 및 분산해석에 적용되어 왔으며, 1981년 Prickett 등에 의하여 폭 넓은 수송모델이 제시되었으며, 1986년 Kinzelbach 는 여기에 대하여 상세히 소개하였다. 1994년 서일원 등은 2차원 Random walk 모형을 이용하여 순간점원 방출에 대한 횡확산 해석을 행하고 해석해와 비교하여 방출입자 개수에 따른 수치해의 정확도에 대하여 논하고 모형의 유용성에 대하여 검토하였다.

본 연구와 관련한 슬릿형 해안구조물의 설계는 실험시설의 여건에 따라 석문소파블럭 방파제 단면 수리모형실험(한국해양대학교 부설 산업기술연구소, 2008)과 석문소파블럭의 단면 안정성 수리모형실험(부경대학교 해양산업개발연구소, 2010)을 통해서 수행되었으며, 다양한 설계에 대한 실험 이후 2010년 현재 남해안의 2개 어항에 설치되었거나 설치예정에 있다.

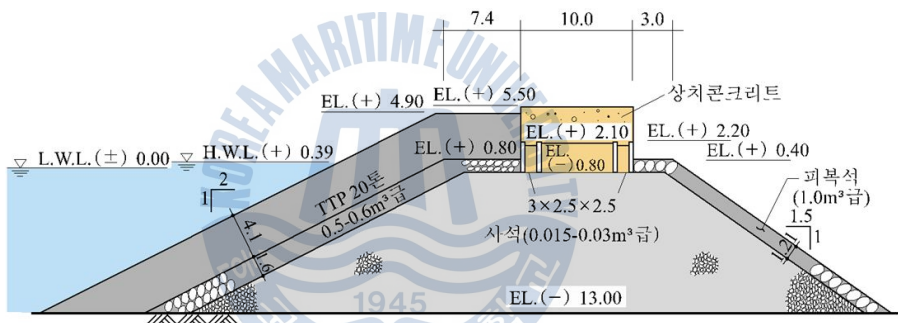
### 1.3 연구의 내용 및 범위

본 연구는 앞서 수행된 수리모형실험에서의 슬릿형 해안구조물의 수리특성 결과를 적용하여 연구 대상항의 조건에 따른 수치모형실험을 실시하였다.

슬릿형 해안구조물은 투과성 구조물이기 때문에 파고에 의한 반사의 영향이 줄어들고 일부 파에너지를 항내로 투과한다. 따라서 파랑변형 수치모형실험을 통해 기존의 구조물형식과 비교하여 항내의 정온도와 반사파로 인한 주변해역의 영향을 파악하고, 동시에 해수유동 수치모형실험을 통해서 슬릿형 해안구조물이 해수유동에 어떤 이점이 있는지 파악하였다. 또한, 항내 해수순

환을 검토하기 위하여 입자추적모형을 적용하여 해수교환율을 평가하였다. 따라서, 연구의 범위는 수리모형실험의 결과를 정리해서 분석한 후, 이들을 수치모형에 반영하여 실험역 2개소에 적용하고, 기존의 사석식구조물과 커튼식 직립구조물에 대한 비교를 수행하는 것으로 하였다.

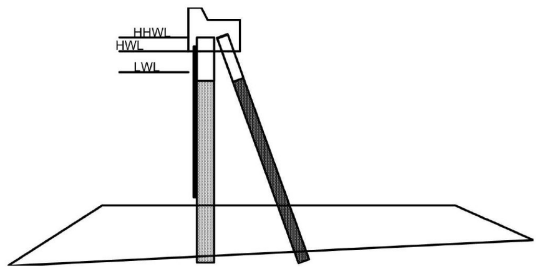
본 연구에서는 해수순환에 유리한 슬릿형 방파제에 대하여 경사식 방파제는 일반적인 사석식을 적용하였고, 커튼식 방파제는 강관말뚝식 커튼방파제로 고려하였다. 본 연구에 적용한 각 방파제의 형식과 장단점은 Fig.1.1 및 Table 1.1에 정리하였다.



(a) Rubble mound breakwater



(b) Cylindrical slit type breakwater



(c) Curtain wall breakwater

Fig. 1.1 Rubble mound, slit type, and curtain wall breakwaters considered

Table 1.1 Comparison of breakwater types

구분		내용
경사식	특징	돌, 콘크리트 블록, 소파 블록을 투하하여 방파제를 형성
	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공정이 단순하고 지반의 요철에 관계없이 시공 가능</li> <li>- 연약지반에서도 시공 가능</li> <li>- 파에 대한 세굴에 대해 순응성이 비교적 좋다</li> <li>- 파가 크지 않은 수심이 얇은 장소에 소규모 방파제로 적용</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수심이 크면 다량의 재료가 필요</li> <li>- 시공시 파에 의한 재해의 위험이 큼</li> <li>- 제체를 투과하는 파에 의해 향내가 교란</li> </ul>
슬릿형	특징	실린더형 슬릿식 방파제로 단위블럭형태로 구성
	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 경사체와 비교하여 전면 수역을 넓게 사용 가능</li> <li>- 반사파의 영향으로 인한 피해가 낮음</li> <li>- 파가 크지 않은 장소에 소규모 방파제로 적합</li> <li>- 향내 흐름 및 해수의 교환을 향상시켜서 수질개선에 용이</li> <li>- 단위블록화하여 대량생산으로 제작경비 절감 및 건설이 용이함</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 일체성이 부족</li> <li>- 장주기파에 대한 안정성 취약</li> </ul>
커튼식	특징	방파판과 기둥의 형태에 따라 분류가 가능 (직립형, 다열식, 2열식, 파일식, 지그재그형)
	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존구조물과 비교하여 구조물이 차지하는 면적이 좁음</li> <li>- 해저면 파일시공과 반파판의 설치가 시공의 대부분이므로 시공시간이 기존의 방파제에 비하여 짧음</li> <li>- 방파제 전면벽체 설치 위치에 따라 방파제 선단부, 하단부, 또는 중단부 등의 다양한 위치에 해수유통구를 만들 수 있음</li> <li>- 연약지반일 경우 시공이 용이하다.</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 내구성이 짧고, 지속적인 유지관리 필요</li> <li>- 개발기간이 길고 국내 시공경험이 없음</li> <li>- 대형파랑에 대한 취약성</li> </ul>



## 제2장 수리모형실험 결과 분석

### 2.1 수리모형실험 결과

수치모형실험에 적용하기 위한 슬릿형 해안 및 항만구조물에서의 반사율 및 투과율을 도출하기 위하여 본 항만기술실험실이 관계한 2가지의 수리실험 결과를 분석하였다. 수리실험여건상 먼저 우리나라 남해안의 삼천포 및 남해 수역의 해상조건을 적용한 초기설계에 대한 실험과 슬릿단면을 변경하여 거제도 해역의 해상조건을 적용한 변형단면 실험이다.

먼저 초기모형은 기존에 실시된 연구에서 Fig. 2.1과 같이 슬릿형 소파구조물에 대한 수리모형실험을 수행하였다. 모형은 1/25의 상사로 제작되었으며, 설계조건은 남해안의 삼천포를 기준으로 하였으며 설계수심은 8m, 약최고만조위는 3.135m이고, 설계파고( $H_{1/3}$ )는 2.5m, 주기( $T_{1/3}$ )는 6sec이다. Fig. 2.2와 같은 단면에 대한 수리모형실험을 진행하였고, 실험에 사용된 수조는 길이 28m, 높이 1.25m, 폭 5.4m이다 (남, 2010).

후속 수리실험 연구의 대상항인 거제도 구조라항에 대하여 추가적으로 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 블록형상은 기존의 구조형식에 대한 단점인 결함에 따른 안정성 저하를 보강하기 위하여 Fig. 2.3과 같이 변경하였다. 실험은 1/40축적으로, 설계조건은 남해 구조라항을 기준으로 하였으며 수심은 10.28m, 약최고고조위 DL(+) 2.14m에 대하여 실시하였다. 설계 파고( $H_{1/3}$ )는 2.0m, 주기( $T_{1/3}$ )는 2.62sec 이다. 실험 단면은 Fig. 2.4와 같으며, 수리실험은 폭 1.0m, 높이 1.0m, 길이 35m의 수로에서 수행되었다(부경대학교 해양산업개발연구소, 2010).



Fig. 2.1 Prototype unit block (1/25) for the initial design



Fig. 2.2 Prototype model setup



Fig. 2.3 Alternative unit block design(1/40)

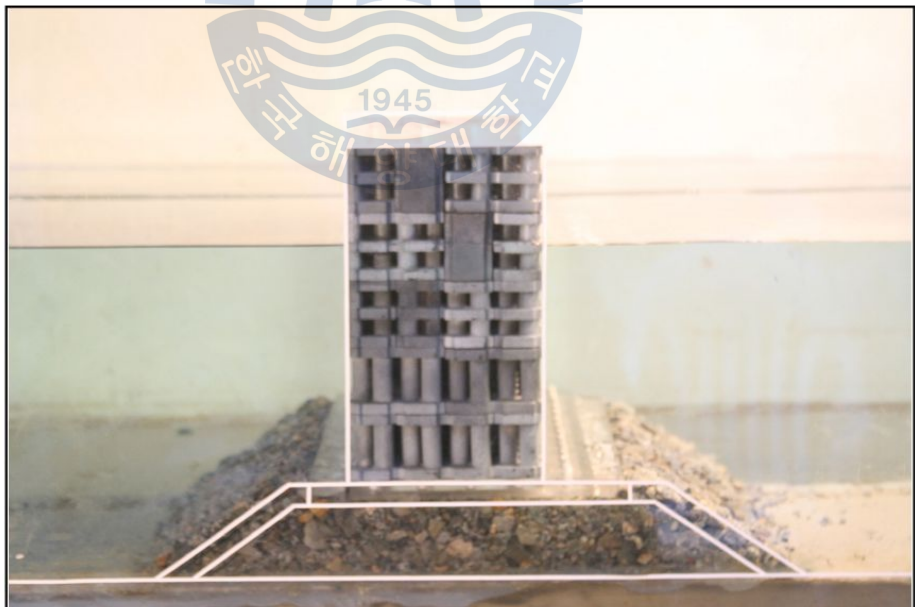


Fig. 2.4 Alternative model setup

초기모형과 후속모형에서 실험을 통하여 반사계수와 투과계수는 각각 Fig. 2.5와 Fig. 2.6에 정리한 바와 같다. 초기모형실험에서는 반사계수가 0.33~0.68, 투과계수는 0.19~0.48을 나타내었고, 후속모형실험에서는 반사계수가 0.41~0.67, 투과계수는 0.23~0.66을 기록하였다.

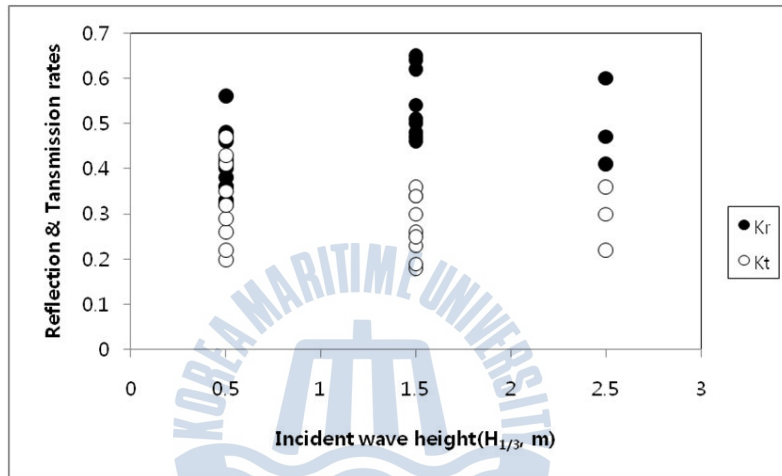


Fig. 2.5 Comparison of reflection and transmission rates from prototype experiment

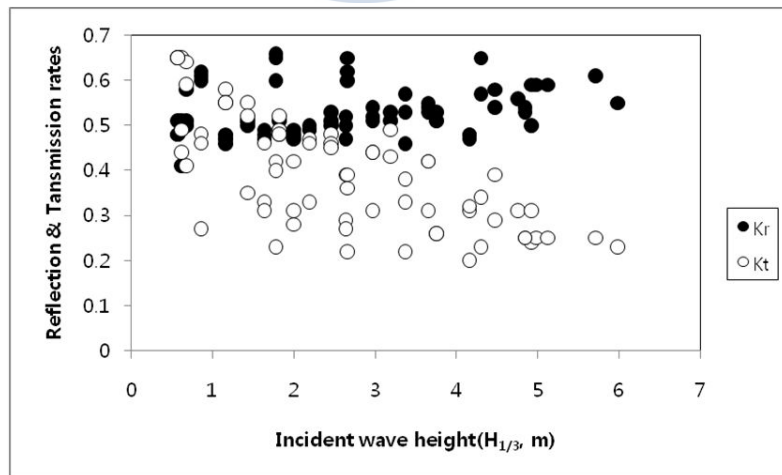


Fig. 2.6 Comparison of reflection and transmission rates from alternative experiment

앞서 실시된 두 번의 실험을 통해서 구조물에 대한 수리특성과 안정성을 검토하였고, 전체 수리실험 결과를 종합하여 Fig. 2.7과 Fig. 2.8에 정리하여 나타내었다. 입사파고에 따른 결과(Fig. 2.7)에서는 파고가 클수록 반사계수는 증가하고, 투과계수는 감소한다. 입사주기에 따른 결과(Fig. 2.8)를 보면 주기가 증가할수록 반사계수는 감소하고, 투과계수는 증가하는 것으로 분석된다. 또한 평균적으로 반사계수( $K_r$ )는 0.53, 투과계수( $K_t$ )는 0.35로 분석되었다.

## 2.2 모형적용 내용

이상의 수리모형실험 결과를 종합할 때, 해역의 조건이나 적용한 구조물의 단면 특성에 따라 달라지나 개략적인 슬릿형 구조물의 반사계수는 0.53이고, 투과계수는 0.35로 볼 수 있다. 분석 자료에서와 같이 파고가 증가할수록 반사율은 증가하고 투과율은 감소한다. 또한 주기에 따라서는 주기가 길어짐에 따라 구조물의 반사율은 감소하고 투과율은 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 슬릿형 구조물을 현장에 계획하여 적용된 수치실험을 진행할 경우, 도출한 구조형식에 따른 수리특성을 적절히 반영할 예정이다.

따라서, 수치실험에서는 먼저 해역의 특성에 따라 외해조건을 광역모형으로 구축하여 구조물 설치 대상해안역에서의 입력 조건을 구한 뒤 앞서의 수리실험결과를 참고하고 대상 해안 및 항만의 설계조건에 따른 구조물의 특성을 고려하여 수치모형을 수립하였다.

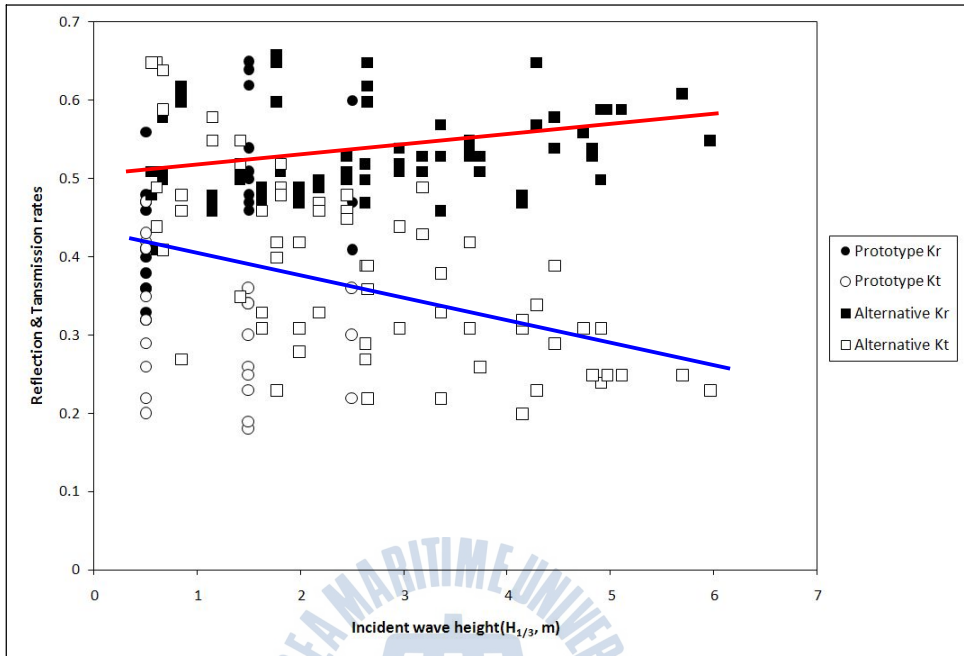


Fig. 2.7 Reflection and transmission rates for incident wave height

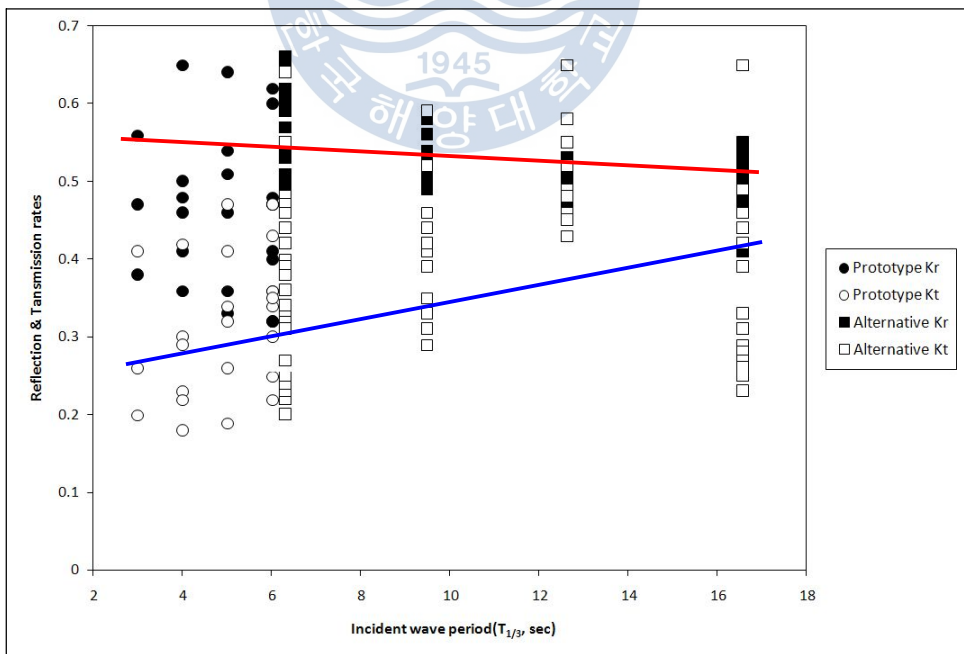


Fig. 2.8 Reflection and transmission rates for incident wave period

## 2.3 슬릿형 설계의 현장적용사례

슬릿형 구조물은 현재 국내 어항 남해군 설리항, 초전항, 흥현항 등에 시공되어 있다. Fig. 2.9는 남해군 설리항에 호안구조물로 시공된 사진이다. 구조물은 2010년 5월 20일에 착공되어 8월 10일에 완공되었으며, 호안구조물로 설치가 되어 선박이 접안 가능하도록 하였다. 추후 전면에 슬릿형 방파제가 설치가 될 예정으로 되어있다. Fig. 2.10은 남해군 초전항에 시공된 사진이다. 구조물은 2010년 5월 26일 착공하여 8월 17일 완공되었으며, 기존 경사식 사석방파제에서 슬릿형 방파제로 연장하였다. 남해군 흥현항 또한 초전항과 같은 시기에 건설되었고, 슬릿형 방파제는 현재 20m정도 건설되어 있고 추가로 더 연장할 계획에 있다.(Fig. 2.11)

최근 중형급 태풍(벤무)이 2010년 8월 11일 남해에 접근하였다. 남해 흥현항에는 높이 2~4m의 파도가 발생하여 기존의 방파제에는 월파현상이 발생하고 항내에 선박이 대피하였으나 슬릿형 방파제를 설치한 20m구간에서는 월파현상이 전혀 일어나지 않았고, 태풍의 영향에 방파제는 안정하였다. (Fig. 2.12)

슬릿형 방파제는 친환경적인 구조물로서 어초로서의 기능도 할 것으로 예상하였다. 따라서 인공어초의 가능 여부를 확인하기 위하여 초전항 방파제에서 수중촬영을 하였다.(Fig. 2.13) 수중촬영은 구조물 시공 후 3개월이 되었을 때 실시하였다. 수중촬영을 한 결과 슬릿형 방파제 근처에 많은 어류가 서식하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 슬릿형 방파제가 친환경 구조물로 인공어초의 기능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.



Fig. 2.9 Optimum slit design to real field application (Seoli harbor)



Fig. 2.10 Optimum slit design to real field application (Chojun harbor)





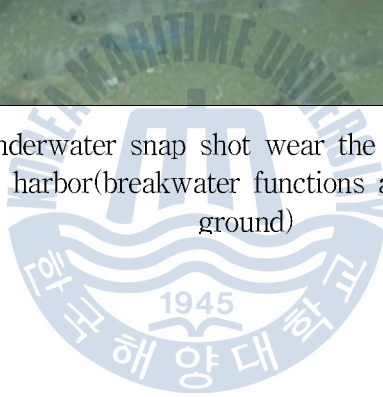
Fig. 2.11 Optimum slit design to real field application (Honghyun harbor)



Fig. 2.12 Comparison of wave overtopping at the typhoon "dianmu" for the slit type and rubble mound breakwater



Fig. 2.13 Underwater snap shot wear the slit type breakwater at chojun harbor(breakwater functions as a fish-breeding ground)



## 제3장 수치모형의 기초이론

### 3.1 파랑변형 수치모형

파랑변형 수치해석에 사용된 SWAN(Simulating Wave Nearshore) 모형은 네덜란드 델프트(Delft) 공과대학에서 개발한 파랑수치모델로서 주어진 입사 경계에서의 파 스펙트럼, 바람과 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구의 파랑을 계산한다.

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 모델은 바람에 의한 파랑에너지 생성, 백파에 의한 파랑에너지 소산, 수심 감소에 따른 쇄파에 의한 파랑에너지 소산, 저면 마찰에 의한 파랑에너지 소산, 파랑 상호작용(4파 또는 3파 비선형 상호작용)을 고려한다.

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

파작용 스펙트럼과 에너지 밀도 스펙트럼의 관계는 다음과 같다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.1)$$

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

$$w = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (3.2)$$

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

### 3.1.1 파작용 평형방정식

파랑 스펙트럼의 발달은 파작용 평형방정식에 의해 기술된다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3.3)$$

위 식에서 좌변의 1항은 파작용 스펙트럼의 시간 변화량, 2항과 3항은 지리적 공간에서의 파동의 전파, 4항은 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이, 그리고 5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다.

선형파 이론에 의한 파랑의 전파속도는 아래와 같다.

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (3.4)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (3.5)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (3.6)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (3.7)$$

여기서,  $s$ 와  $m$ 은 각각 파향선(wave ray)과 파향선에 직각인 좌표를 의미한다.

평형방정식의 우변은 원천항(source and dissipation)을 나타내며, 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (3.8)$$

여기서,  $S_{in}$ 은 바람에 의한 에너지 유입,  $S_{ds}$ 는 파랑에너지의 소산,  $S_{nl}$ 은 비선형 파랑 상호작용을 나타낸다.

### 3.1.2 바람에 의한 에너지 유입

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

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (3.9)$$

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.

$$A = \frac{1.2}{2\pi g^2} \frac{\rho_a}{\rho_w} \{U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]\}^4 H(\sigma) \quad (3.10)$$

$$H = e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*}\right)^{-4}}, \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (3.11)$$

모델에 적용되는 마찰속도(friction velocity)는 다음과 같이 정의된다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (3.12)$$

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

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.06 U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3.13)$$

$\theta_w$ 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.

$$B = 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[ 0, \frac{28U_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \sigma \quad (3.14)$$

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.

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[ 0, \frac{U_*^2}{c^2} \cos^2(\theta - \theta_w) \right] \sigma \quad (3.15)$$

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

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda \quad \text{for } \lambda \leq 1 \quad (3.16)$$

$$\beta = 0 \quad \text{for } \lambda > 1$$

$$\lambda = \frac{gz_e e^r}{c^2}, \quad r = \frac{\kappa c}{|U_* \cos(\theta - \theta_w)|} \quad (3.17)$$

여기서,  $\kappa$ 는 von Karman 상수로서 0.41을 취하며,  $z_e$ 는 해면의 유효 조도이다.

풍속의 분포를 다음과 같이 간주하면,

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left[ \frac{z + z_e - z_o}{z_e} \right] \quad (3.18)$$

유효조도길이는 다음 식으로 계산된다.

$$z_e = \frac{z_o}{\sqrt{1 - \frac{\tau_w}{\tau}}} \quad (3.19)$$

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

$$z_o = \hat{\alpha} \frac{U_*^2}{g} \quad (3.20)$$

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

$$\vec{\tau}_w = \rho_w \int \int \sigma B E(\sigma, \theta) \frac{\vec{k}}{k} d\sigma d\theta \quad (3.21)$$

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

### 3.1.3 회절

흐름이 없다고 가정하고 지리적 공간과 스펙트럼 공간상에 회절이 없는 상태에서의 전파속도를  $C_{x,0}, C_{y,0}$ 와  $C_{\theta,0}$ 로 정의한다. 이들은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{x,0} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \cos(\theta) \quad (3.22)$$

$$C_{y,0} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \sin(\theta) \quad (3.23)$$



$$C_{\theta,0} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial n} \quad (3.24)$$

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

$$K^2 = k^2(1 + \delta) \quad (3.25)$$

여기서  $\delta$ 는 다음과 같이 정의되는 회절계수이다.

$$\delta = \frac{\Delta(cc_g \Delta H_s)}{cc_g H_s} \quad (3.26)$$

회절에 의한 전파속도는 다음과 같다.

$$C_x = C_{x,0} \bar{\delta}, \quad C_y = C_{y,0} \bar{\delta}, \quad C_\theta = C_{\theta,0} \bar{\delta} - \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial x} C_{y,0} + \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial y} C_{x,0} \quad (3.27)$$

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

### 3.1.4 구조물에 의한 파랑의 전달 및 반사

본 모델의 파랑에너지의 전달과 반사를 표현하기 위한 방법으로 다음과 같이 표현하였다. 구조물에 의한 반사는 두 가지 방법으로 표현된다. 첫째는 경상반사(specular reflection)로 반사각이 입사각과 동일하다고 가정한다. 두 번째는 확산(diffuse)과 발산(scattered) 반사로 반사각이 입사각과 일치하지는

않는다. 확산과 발산 반사는 코사인의 멱함수의 형태로 표현된다.

파랑의 전달은 구조물을 잠재로 가정, 전달계수  $K_t$ 는 파고와 해면으로부터 구조물 천단까지 거리의 함수이다(Goda et al., 1967).

$$K_t = 0.5 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{F}{H_i} + \beta \right) \right) \right] \text{ for } -\beta - \alpha < \frac{F}{H_i} < \alpha - \beta \quad (3.28)$$

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).

### 3.1.5 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 유도되었는데(Hasselmann et al., 1973), 이 식은 선형 모형으로서 마찰계수의 선택이 적당한 경우 여러 조건 특히 너울과 폭풍에 대해서 좋은 결과를 주는 것으로 알려져 있다.

Hasselmann and Collins(1968)는 항력 마찰(drag friction)에 기초하여 저면 마찰 소산의 비선형 모형을 제안하였으며, Madsen et al.(1988)과 Weber(1991)는 보다 복잡한 와류 이론에 근거한 모형을 고안하였다. SWAN 모델에서는 Weber(1991)의 식을 사용하여 저면마찰 소산을 계산한다.

$$S_{ds,b}(\sigma,\theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma,\theta) \quad (3.29)$$

여기서,  $C_{bottom}$ 은 저면마찰계수로서 다음 식으로 정의되는  $rms$  저면 유속으로부터 구해진다.

$$u_{rms}^2 = \int \int \frac{\sigma^2}{\sinh^2 kd} E(\sigma,\theta) d\sigma d\theta \quad (3.30)$$

JONSWAP에서 사용된 경험적인 모형에서는  $C_{bottom} = 0.038 \text{ m}^2\text{sec}^{-3}$ 을 사용하였는데 이 값은 너울에 대해서도 적용할 수 있다. 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.

$$C_{bottom} = c_{fw} g u_{rms} \quad (3.31)$$

여기서,  $c_{fw} = 0.015$ 이며(Collins,1972), Madsen et al.(1988)의 와점성 모형에서는 다음 식을 사용한다.

$$C_{bottom} = \frac{g}{\sqrt{2}} f_{wr} u_{rms} \quad (3.32)$$

여기서,  $f_{wr}$ 은 Johnson(1966) 공식으로부터 구해지는 무차원 마찰계수이다.

$$\frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} + \log_{10} \left[ \frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} \right] = m_f + \log_{10} \left[ \frac{a}{K_N} \right] \quad (3.33)$$

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

$$a^2 = 2 \int \int \frac{1}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (3.34)$$

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

### 3.1.6 쇄파에 의한 에너지 소산

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

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = - \frac{\alpha_{BJ} Q_b \bar{\sigma} H_m^2}{8\pi} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (3.35)$$

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

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (3.36)$$

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

$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int \int \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (3.37)$$

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

$$\gamma = 0.55 + 0.88e^{-0.012\cot\beta} \quad \text{for } 0 < \beta < 0.1 \quad (3.38)$$

여기서,  $\beta$ 는 해저면의 경사이다.

## 3.2 해수유동 수치모형

수치모의에 사용된 모델은 잘 알려진 POM(Princeton Ocean Model)로서 3차원 연안해양 수치모델로서 그 프로그램 코드가 공개되어 세계적으로 검증 받은 바 있으며, 국내에서는 한국해양연구원, 인하대학교, 충남대학교, 군산대학교 등이 한국 연근해에 성공적으로 적용시킨 바 있다.

금회 수치모의에서는 2차원 모드(2-D Circulation)에 의해 계산을 행하였으며 연직적으로 적분된 방정식(외부모드)을 분리된 기본 방정식을 적용한다. 모드분리(Simans(1974), Madala and Piacsek(1977))로 알려진 이 기법은 속도와 열역학적 특성의 3차원 계산으로부터 개별적으로 속도수송을 풀어버림으로써 계산시간에 있어서 조금의 손실도 없이 자유 수면승강을 계산한다.

### 3.2.1 해수유동 지배방정식

외부모드 방정식의 체적수송은 깊이에 대한 내부모드 방정식을 적분하는 것으로 얻어진다. 그것에 의하여 모든 연직구조는 제거되어 진다.

외부 모드와 내부모드의 지배방정식은  $(x, y, z, t)$ 에서  $(x^*, y^*, \sigma, t^*)$ 좌표로 변형된다.

여기서,  $x^*=x, y^*=y, \sigma = \frac{z-\eta}{H+\eta}, t^*=t$ 이다.  $\sigma=-1$ 에서  $\sigma=0$  까지 연속방정식을 적분하고 경계조건을 사용하여 다음과 같이 수면변위에 대한 방정식을 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y} = 0 \quad (3.39)$$

그리고 운동량 방정식은 연직적분한다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \overline{UD}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U^2 D}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{UV D}}{\partial y} - f \overline{VD} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - D \overline{F_x} \\
 &= -\overline{wu}(0) + \overline{wu}(-1) - \frac{\partial D \overline{U'^2}}{\partial x} - \frac{\partial D \overline{U' V'}}{\partial y} \\
 & \quad - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' d\sigma \\
 & \quad + \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial x} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \sigma' \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma d\sigma
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \overline{VD}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{UV D}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V^2 D}}{\partial y} + f \overline{VD} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - D \overline{F_y} \\
 &= -\overline{wv}(0) + \overline{wv}(-1) - \frac{\partial D \overline{U' V'}}{\partial x} - \frac{\partial D \overline{V'^2}}{\partial y} \\
 & \quad - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' d\sigma \\
 & \quad + \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial y} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \sigma' \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma d\sigma
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

여기서, 연직적분된 속도는 다음과 같이 정의된다.

$$(\overline{U}, \overline{V}) \equiv \int_{-1}^0 (U, V) d\sigma \tag{3.42}$$

바람응력성분은  $-\overline{wu}(0)$ 이고,  $-\overline{wv}(-1)$ 이다.

$U'^2$ ,  $U'V'$ ,  $V'^2$ 을 포함하는 식(3.40), (3.41)의 항들은 연직적분(평균)속도로 부터 출발한 속도의 외적의 연직 평균으로 표현된다. 그리고 그것은 종종 분

산향을 나타내기도 한다. 이와 같이

$$(\overline{U'^2}, \overline{U'V'}, \overline{V'^2}) = \int_{-1}^0 (U'^2, U'V', V'^2) d\sigma \quad (3.43)$$

여기서,  $(U', V') = (U - \bar{U}, V - \bar{V})$ 이다.

$\overline{F_x}, \overline{F_y}$ 의 양은 수평운동량 확산의 연직적분이고 다음과 같이 정의된다.

$$D\overline{F_x} = \frac{\partial}{\partial x} (2A_M \frac{\partial \overline{UD}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} A_M (\frac{\partial \overline{UD}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{VD}}{\partial x}) \quad (3.44)$$

$$D\overline{F_y} = \frac{\partial}{\partial y} (2A_M \frac{\partial \overline{VD}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} A_M (\frac{\partial \overline{UD}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{VD}}{\partial x}) \quad (3.45)$$

### 3.2.2 해수유동 해석 방법

계산방법은 조석운동을 푸는 단시간 단계를 포함하는 천해파 방정식(3.39), (3.40), (3.41)을 외부모드를 이용하여 방정식을 푸는 것이다. 외부모드 해는 시간에 고정된 식(3.40), (3.41)의 오른쪽 항을 얻을 수 있고 큰 시간 스텝 후, 100차수 후에 내부모드 계산이 수행된다.

수치 모델 적용시 수평 와동 점성 계수로 상수 값을 사용하기도 하나, 아래의 식과 같이 격자 크기와 유속장을 수평 와동 점성 계수에 관련시킨 Smagorinsky type diffusivity가 보다 발전적이다(Smagorinsky, 1962; 한국해양연구소, 1993).

$$A_M = c \Delta x \Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2} \quad (3.46)$$



여기서,  $c$  : 무차원 상수

$\Delta x, \Delta y$  : x-방향과 y-방향의 격자 크기

본 수치 모델링에서는 수평와동 점성계수로 Smagorinsky type diffusivity 에 수심 적분으로 인한 분산 효과(dispersion effect)를 고려하여 사용하였으며, 수평 난류 확산 계수는 수평 와동 점성 계수와 같은 값을 사용하였다.

격자구성은 엇갈림 격자(staggered grid)에 속하는 Arakawa C-grid를 이용하였으며, 기본 방정식은 flux-conservative form으로 표현하여서 방정식을 차분화할 때 질량과 에너지의 보존에 유의하였고, 차분화 방법으로는 유한체 적법(Finite Volume Method)을 사용함으로써 질량과 부피 보존이 잘 되게 하였다. 수면 경사를 반음해법으로, 수평 확산항을 CS(Centered Space)법으로 해석하였고, 시간에 대하여는 leapfrog scheme을 사용하였다. 운동 방정식의 이류항은 CS법으로 해석하였고, 물질 보존 방정식의 이류항은 BS(Backward Space)법으로 해석하였다.

시간 미분항을 차분화하는데 three-time level scheme인 leapfrog scheme 을 이용하면 Coriolis 항을 처리하는데 유리하지만 각 time step마다 physical mode와 computational mode를 형성하는 time-step splitting이 생긴다 (Roache, 1972). Time-step splitting으로 인한 불안정성(instability)을 제거하기 위해 Euler-backward scheme(Blumberg, 1977; Wang and Kravitz, 1980)이나 weak time filter(Asselin, 1972; Blumberg and Mellor, 1987)를 적용한다(Park and Kuo, 1993). 본 모델링에서의 수치 해는 각 time step(n)마다 아래 식(Asselin, 1972)을 이용하여 평활화(smooth) 되었다.

$$T_s^n = T^n + \frac{\alpha}{2}(T^{n+1} - 2T^n + T_s^{n-1}) \quad (3.47)$$

여기서,

$T$  : unsmoothed numerical solution

$T_s$ : smoothed solution

$a = 0.05$

수심 적분된 기본 방정식에서 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 수치 안정 조건은 다음과 같다(Blumberg and Mellor, 1987).

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_t} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (3.48)$$

여기서,

$$C_t = 2\sqrt{gH} + U_{\max}$$

$U_{\max}$  : 최대 수심평균 속도

모델 영역내의 간석지 처리를 위해 Flather and Heaps(1975)가 제안한 방법을 기초로 모델특성에 맞게 수정하여 적용하였다(Park and Oh, 1998). 간석지는 다음의 조건을 만족하지 않으면 노출되었다고 간주하여 유속을 영으로 처리하였다.

$$(i) \quad D_{i-1}^{n+1} > D_c \text{ and } D_i^{n+1} > D_c \quad (3.49)$$

$$\text{or } (ii) \quad D_{i-1}^{n+1} \leq D_c \text{ and } D_i^{n+1} > D_c \text{ and } \eta_i^{n+1} - \eta_{i-1}^{n+1} > \epsilon$$

$$\text{or } (iii) \quad D_{i-1}^{n+1} > D_c \text{ and } D_i^{n+1} \leq D_c \text{ and } \eta_i^{n+1} - \eta_{i-1}^{n+1} > \epsilon$$

여기서,

$D$  : 총수심

$n+1$  : time step

$i$  : 격자 번호

$D_c$  : 임계(critical) 수심 깊이 (0.1 m)

$\eta$  : 조위

$\epsilon$  : 임계(critical) 해수면 기울기 (0.05 m/cell)

모델링에서 바람 응력의 효과는 고려하지 않았고, 해수 유동장에 대한 초기 조건은 해수 유동이 없는 것(cold start)으로 설정하였다.

해수 유동의 폐경계 조건으로 육지 경계면을 가로지르는 유량은 없다고 하였고, 저면 마찰은 Manning의 마찰 계수를 이용한 quadratic stress law를 사용하였다.

$$\text{Quadratic stress law: } \vec{\tau} = C_D \sqrt{U^2 + V^2} \vec{U} \quad (3.50)$$

여기서,

$$C_D = gn^2 \Delta z^{-1/3}$$

$n$  : Manning의 마찰 계수

$\Delta z$  : bottom layer thickness (수심 적분된 경우는 total 수심)

조위의 개방 경계 조건으로 개방경계면에 위치한 관측자료를 이용하여 외해측 개방 경계에서 M2, S2, K1, O1 분조에 의한 조위 변화를 관측 자료에 근거하여 시·공간 함수로 주었다.

조류의 개방 경계 조건은 다음과 같이 처리하였다. 개방 경계에 수직

(normal)한 속도 성분은, 모델 영역 외부의 속도 성분을 필요로 하는 이류항 (advective term)과 수평 와동항(horizontal eddy viscosity term)을 무시하고 운동 방정식을 풀어 구하였다. 개방 경계에 접한(tangential) 속도 성분은, 흐름이 모델 영역 외부로부터 내부를 향할 때는 내부 값과 같은 값으로 처리하였고, 흐름이 모델 영역 내부로부터 외부로 향할 때는 아래 식에 의해 구하였다.

$$\frac{\partial U_t}{\partial t} + U_n \frac{\partial U_t}{\partial x_n} = 0 \quad (3.51)$$

여기서,

$U_t$  : 개방 경계에 접한(tangential) 속도 성분

$U_n$  : 개방 경계에 수직(normal)한 속도 성분

$x_n$  : 개방 경계에 수직(normal)한 좌표(coordinate)

### 3.3 해수교환 수치모형

해역에 방류된 방류수 중에 포함된 오염물질 등은 흐름에 의하여 이류하고, 난류성분에 의하여 확산되며 물질의 성질에 따라 자체분해 또는 침강 등에 의하여 농도감쇠가 일어난다. 이러한 물질의 확산을 실험하기 위하여 Lagrange적인 추적방법에 의하여 물질확산을 계산하는 Random Walk방법을 이용한 RNDLEE모형을 사용하였다. RNDLEE 모형의 구성을 살펴보면 다음과 같다.

#### 3.3.1 해수교환 지배방정식

흐름장에 놓여진 입자가 passive contaminant인 경우 시간  $t + \Delta t$ 에서 입자의 새로운 위치  $X(t + \Delta t)$ 는 표류속도벡터  $U$ 와 분산속도성분  $u'$ 에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$X(t + \Delta t) = X(t) + U \cdot \Delta t + u' \cdot \Delta t \quad (3.52)$$

식(3.52)에서 우변 제 3항은 분산에 의하여 입자가 이동하는 것을 나타내는 것으로서 확률과정론적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u' \cdot \Delta t = R\sigma$$
$$\sigma = \sqrt{2\alpha_L |u'(X(t), t)| \cdot \Delta t} \quad (3.53)$$

여기서,  $R$ 은 평균치 0, 표준편차 1인 정규분포로서 식(3.53)은 이류향을 무

시한 확산방정식의 기본해와 일치한다.

한편, 식(3.53)에 따르는 확률과정에서는 개개의 입자의 집합에 관한 시공간적 확률분포  $C(x, y, t)$ 는 다음과 같은 Fokker-Plank 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} = \frac{\partial^2(D_{xx}C)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(D_{xy}C)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2(D_{yy}C)}{\partial y^2} \quad (3.54)$$

$$U = u + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{D_{xx}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{D_{xy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.55)$$

$$V = v + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial x} + \frac{D_{yy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{D_{xy}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.56)$$

$$D_{xx} = D_L \cos^2 \theta + D_T \sin^2 \theta \quad (3.57)$$

$$D_{yy} = D_L \sin^2 \theta + D_T \cos^2 \theta \quad (3.58)$$

$$D_{xy} = (D_L - D_T) \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (3.59)$$

여기서,  $\theta = \text{atan}(v/u)$ ,  $D_L$  및  $D_T$  는 각각 흐름방향의 종분산계수 및 흐름과 직각방향의 횡분산계수로서 식(3.60)과 같다.

$$D_L = \alpha_L | u'(x(t), t) | \quad (3.60)$$

여기서,  $\alpha_L$ 은 혼합거리를 나타낸다.

분산은 난류확산에 있어서 연직방향의 속도분포로 인한 걸보기 확산을 고려한 것으로서 Elder는 2차원 개수로에서 식(3.60)과 같이 구하였다.

$$D_L = 5.93h U_* \quad (3.61)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $U_*$ 는 마찰속도로서 식(3.62)와 같이 구할 수 있다.

$$U_* = \frac{\sqrt{g}}{C} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.62)$$

$$C = -18.0 \log(k/12h) \quad (3.63)$$

단,  $g$ 는 중력가속도,  $C$ 는 chezy의 저항계수,  $k$ 는 조도높이이다.

일반적으로 횡분산계수  $D_T$ 는 종분산계수  $D_L$ 의 약 1/4 정도의 값을 취한다.

식(3.52)에서 분산에 의한 속도성분  $u'$ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$u'_L = R_1 (2D_L / \Delta t)^{1/2} \quad (3.64)$$

$$u'_T = R_2 (2D_T / \Delta t)^{1/2} \quad (3.65)$$

여기서,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 평균치 0, 표준편차 1의 정규분포를 갖는 난수이고, 분산속도의  $x$  및  $y$  방향의 성분은 다음과 같이 된다.

$$u' = u'_L \cos\theta - u'_T \sin\theta \quad (3.66)$$

$$v' = u'_L \sin\theta + u'_T \cos\theta \quad (3.67)$$

### 3.3.2 Lagrange 입자추적법

Lagrange적인 입자추적모형에서 격자점  $(i, j)$ 에서 농도  $C_{ij}$ 는 식(3.68)과 같이 나타내어진다.

$$C_{ij}(t) = \frac{M}{N} \frac{n_{ij}(t)}{h_{ij} \Delta x \Delta y} \quad (3.68)$$

여기서,  $M$ 은 오염물질의 총 질량,  $N$ 은 투입된 총 입자수,  $n_{ij}$ 는 격자  $(i, j)$ 내에 있는 입자수,  $h_{ij}$ 는 수심 그리고  $m = M/N$  즉, 1개 입자당 오염물질의 양이다.

해수 중에 함유된 부유토사는 시간이 경과함에 따라 침강에 의하여 제거되며, COD나 BOD같은 물질은 시간에 따라 점차 분해된다. 따라서, 이들 물질의 농도  $C$ 에 관한 식은 입자의 침강속도나 감쇠계수  $\lambda$ 에 의하여 식(3.69)과 같이 나타내어진다.

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C \quad (3.69)$$

위 식의 해는 다음과 같은 지수적 감쇠로 나타내어진다.

$$C(t) = C_0 \exp(-\lambda t) = C_0 \exp(-t/t_0) \quad (3.70)$$

여기서,  $C_0$ 는  $t=0$ 에서의 초기농도이고,  $t_0$ 는  $1/\lambda$ 로서 농도가 초기농도보다  $e^{-1}$ 배로 감소하는데 걸리는 지수배 반감기이다.



식(3.71)는 개개입자의 양  $m$ 의 감쇠로서 나타낼 수 있다.

$$m(t + \Delta t) = m_0 \exp(-\lambda \cdot \Delta t) = m_0 \exp(-t/t_0) \quad (3.71)$$

따라서, 시간에 따른 농도감쇠는 식(3.71)에 의하여 개개입자의 감쇠 질량  $m$ 을 구하여 식(3.69)으로부터 농도  $C(t)$ 를 구할 수 있다.

한편, 농도감쇠를 구하는 또 다른 방법의 하나는 식(3.69)를 농도  $C$  대신에 입자의 개수  $N$ 으로 식(3.72)와 같이 나타내고 이를 차분화하여 나타내면 식(3.73)과 같다.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (3.72)$$

$$N^{n+1} = N^n (1 - \lambda \Delta t) \quad (3.73)$$

여기서,  $\Delta t$  시간동안의 입자제거율  $N^{n+1}/N^n$ 은  $(1 - \lambda \Delta t)$ 가 되며 식(3.72)과 비교하여 나타내면 다음과 같다.

$$\exp(-\lambda \Delta t) \approx (1 - \lambda \Delta t) \quad (3.74)$$

위 식은  $\lambda \Delta t$ 의 값이  $10^{-2}$ 정도로 작으면 거의 일치한다. 따라서, 평균치 0.5, 표준편차  $1/\sqrt{12}$ 인 일정분포를 갖는 난수 [RN]을  $N$ 개 발생시켜 [RN]값이  $0 \sim \lambda \Delta t$  사이에 있으면 그 입자를 제거시킴으로서 농도 감쇠를 표현할 수 있다. 이 방법은 연속점원방출에서와 같이 방출입자의 개수가 시간에 따라 증가하는 경우에 계산시간을 줄일 수 있는 유용한 방법이 된다.

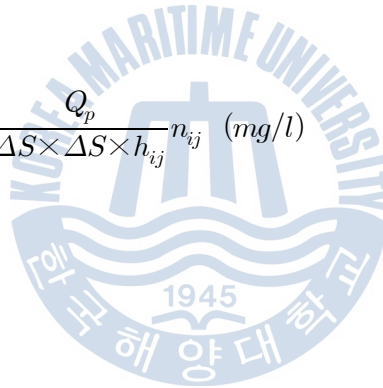
연속점원 방출에 있어서  $\Delta t$ 시간 간격으로 매시간 step별로  $N_0$ 개의 입자를

방출하는 경우에 있어서 격자점  $(i, j)$ 에서의 농도  $C_{ij}$ 의 계산방법은 다음과 같다.  $\Delta t$ 시간 간격으로  $N_0$ 개의 입자를 방출하는 것으로 나타내면 입자 1개가 갖는 오염부하량  $Q_p$ 는 식(3.75)와 같이 된다.

$$Q_p = \frac{1000Q_T}{24 \times 3,600} \frac{\Delta t}{N_0} \quad (g/ea) \quad (3.75)$$

어떤 격자점  $(i, j)$ 내에  $n_{ij}$ 개의 입자가 균질하게 놓여 있다고 하다면 그 점에서의 농도  $C_{ij}$ 는 식(3.76)과 같이 된다.

$$C_{ij} = \frac{Q_p}{\Delta S \times \Delta S \times h_{ij}} n_{ij} \quad (mg/l) \quad (3.76)$$



## 제4장 수치실험 및 분석

### 4.1 수치모형의 구성

#### 4.1.1 파랑변형 수치모형

##### (1) 파랑모델의 검증

회절도 이론(Goda, 1975)에서 제시한 반무한 방파제와 양익방파제의 회절도 실험을 하였다. 입사파 조건으로 주기 5sec, 파고 1m를 부여하였다. 여기서 파랑의 주 진행 방향은 방파제에서 수직이고 좌표는 유의파의 파장(L)으로 무차원화 시켰다.

회절계수는 파랑의 차폐역에서의 회절파의 파고와 입사파의 파고의 비로 정의된다.

$$K_d = \frac{H}{H_i} \quad (4.1)$$

Fig. 4.1~4.3은 반무한방파제에 대한 회절계수 이론과 수치실험결과를 나타내었고, Fig. 4.4~4.6은 양익방파제에 대한 회절계수 이론과 수치실험결과를 나타내었다. 실험결과 이론과 비교하여 방파제 선단부근에서 회절계수의 차이가 조금 있으나 전반적으로 비슷하게 나타났다. 따라서 SWAN모델에 의한 회절현상은 비교적 잘 재현됨을 알 수 있다.

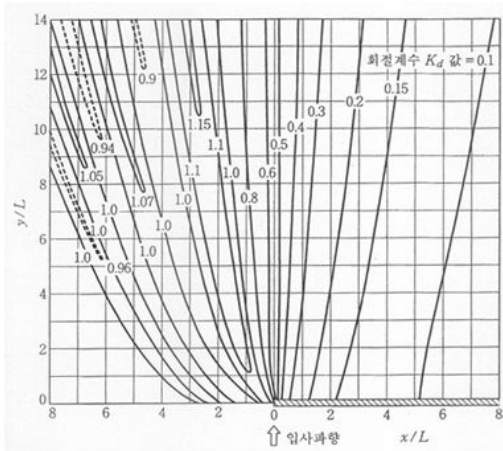


Fig. 4.1 Theory & experiment of semi-infinite breakwater

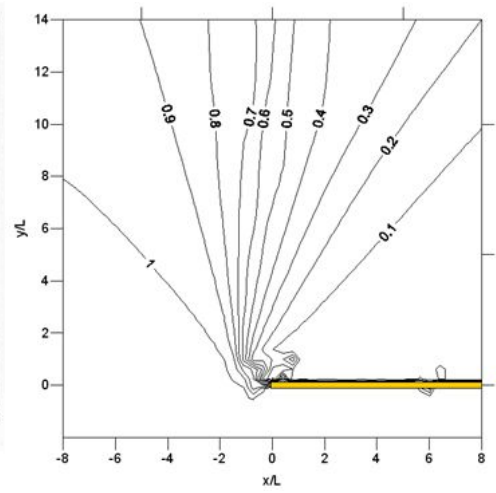


Fig. 4.2 Computational domain of semi-infinite breakwater

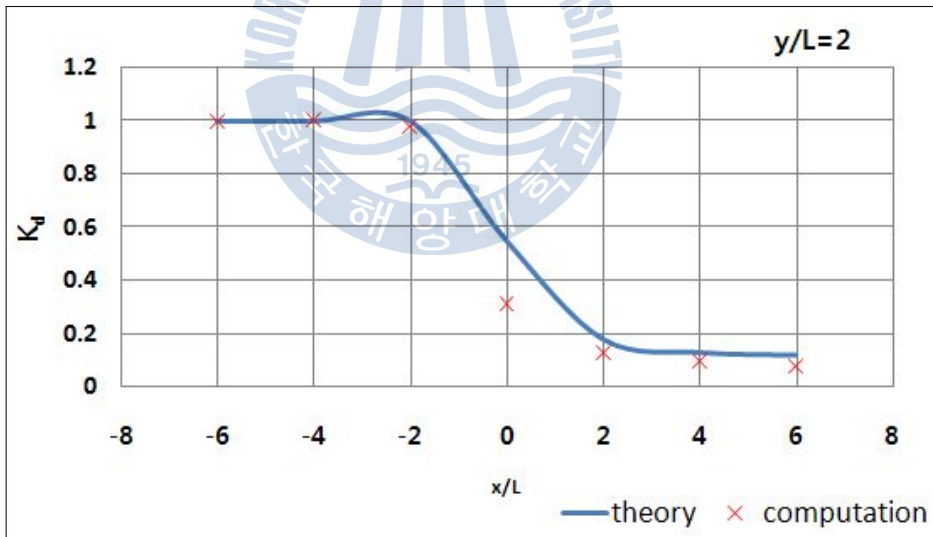


Fig. 4.3 Comparison of theory and computation for semi-infinite breakwater

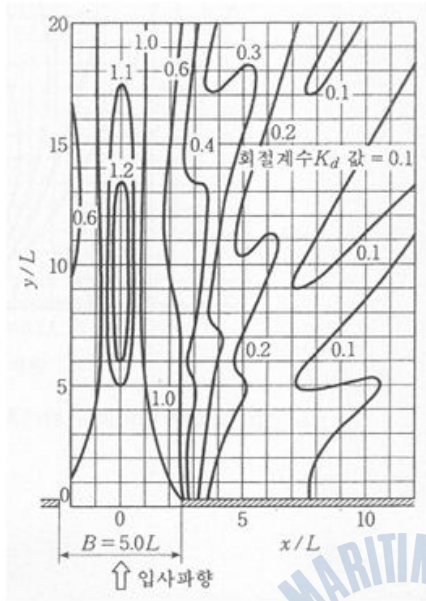


Fig. 4.4 Theory & experiment of a breakwater gap with  $B/L=5.0$

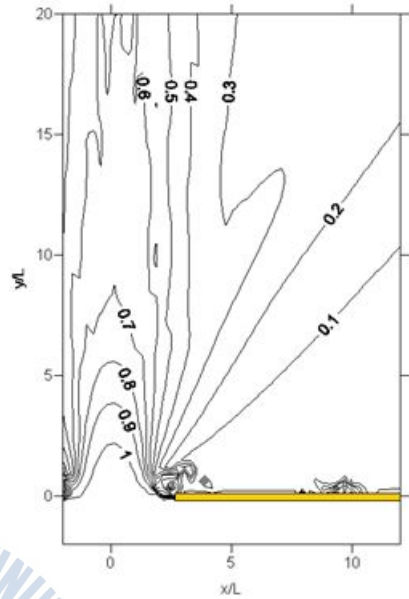


Fig. 4.5 Computational domain of a breakwater gap with  $B/L=5.0$

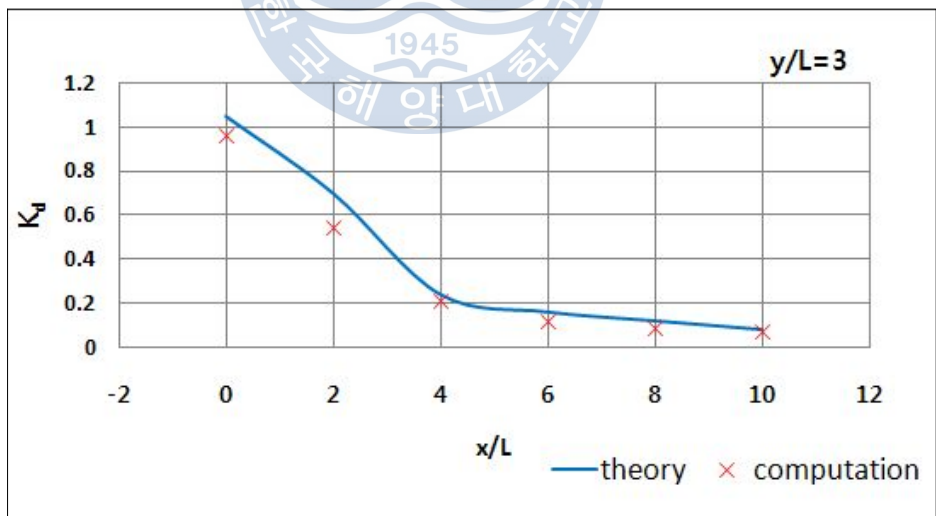


Fig. 4.6 Comparison of theory and computation for a breakwater gap with  $B/L=5.0$

실린더 슬릿형 방파제의 특징은 투과성이다. 따라서 수치모델이 투과성 방파제의 효과를 잘 재현하는가를 확인하였다. Fig. 4.7은 구조물의 반사율(0.65), 투과율(0.18)을 고려하였을 때 구조물 후면의 파고이다. 입사파 조건으로 파고2.5m, 주기5sec를 부여하였다. 실험결과 방파제 후면의 파고는 0.45m로 SWAN 모델이 투과성방파제의 효과를 잘 재현함을 알 수 있다.

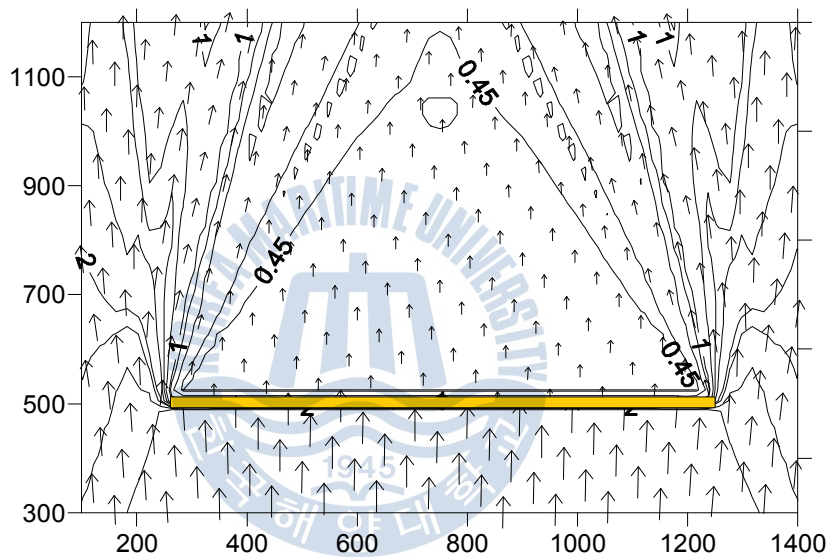


Fig. 4.7 Numerical experiments for permeable breakwaters

## (2) 설리항에의 적용

대상해역은 경상남도 남해군 미조면 송정리에 위치한다. 설리항은 소규모 어항으로 어항활동의 변화 등 제반여건 변동으로 인해 최근 어항 개발이 진행 중이다.

설리항은 호안을 남쪽으로 연장하고 기존 서방파제를 대신하여 방파제를 건설할 계획에 있다. 연장하게될 호안과 방파제는 새로운 공법인 슬릿형 해안구조물을 이용하여 시공될 예정이고 호안일부는 이미 시공되어있다.

파랑의 입력조건으로 Table 4.1에서와 같이 파향 SE, SSE, S에 대한 조건

으로 수치실험을 하였다.(전해역 심해설계과 추정 보고서Ⅱ(2005)) Table 4.2는 기상청 자료 1976년부터 2005년까지(30년간) 관측된 연 최대풍속자료를 토대로 대표적 극치확률모형인 Gumbel 확률모형을 이용한 극치해석으로부터 바람자료를 획득하였다. 본 연구에서는 50년 빈도 바람자료를 적용하여 수치실험하였다. 조위는 삭망평균만조위인 DL(+) $3.135\text{m}$ 를 적용하였다.

대상해역의 영역은 광역과 세역으로 구분하였다. 광역은 심해설계과 추정 보고서 지점 2곳을 포함하게 설정하였으며 세역은 설리항내를 중점적으로 수치모의 할 수 있게 구성하였다. Fig. 4.8와 같이 광역 파랑변형모형의 영역은  $13\text{km}\times 8\text{km}$ 로 설정하였으며, 이에 대한 격자간격은  $20\text{m}$ 로 구성하였다. 세역 파랑변형모형의 영역은  $1.4\text{km}\times 1.1\text{km}$ 로 설정하였으며, 이에 대한 격자간격은  $2\text{m}$ 로 하였다.(Fig. 4.9)

Table 4.1 Incident wave condition for design wave

Direction	Height(m)	Period(sec)	Return Period	Grid Point
SE	11.39	15.43	50 year	068126
SSE	12.40	16.35	50 year	
S	6.16	11.87	50 year	067126

Table 4.2 Characteristics of wind

Direction	5 years	10 years	20 years	30 years	40 years	50 years	100 years	Probability model
SE	12.94	15.34	17.64	18.96	19.89	20.62	22.84	Gumbel
SSE	14.39	17.82	21.11	23.00	24.33	25.37	28.55	Gumbel
S	17.31	20.56	23.69	25.48	26.74	27.73	30.76	Gumbel

설계과랑 실험은 심해설계과와 동시에 설계품을 입력하여 수행하였고 이를 통해 방파제 전면의 설계파고를 예측하였다. Table 4.3과 같이 총 3가지 케이스를 수행하였고 다음과 같이 수행하였다.

Table 4.3 Cases of the numerical simulation for wave transformation

Case	내용
Case 1	현상태 : 방파제 전면 설계 파고 추정
Case 2	직립식방파제 건설시 주변 파고 추정
Case 3	슬릿형방파제 건설시 주변 파고 추정

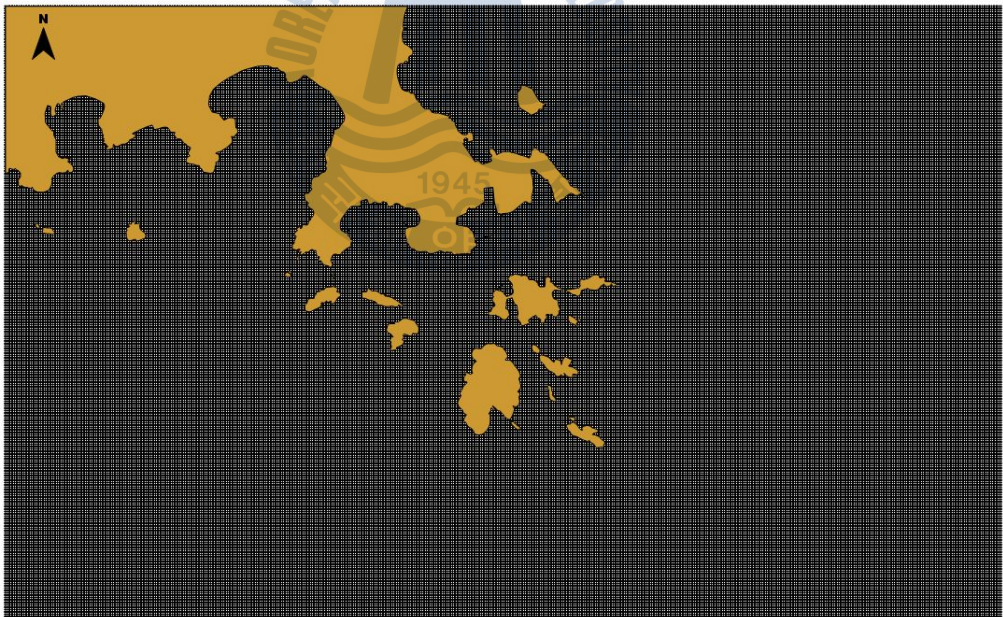


Fig. 4.8 Grid of wide area



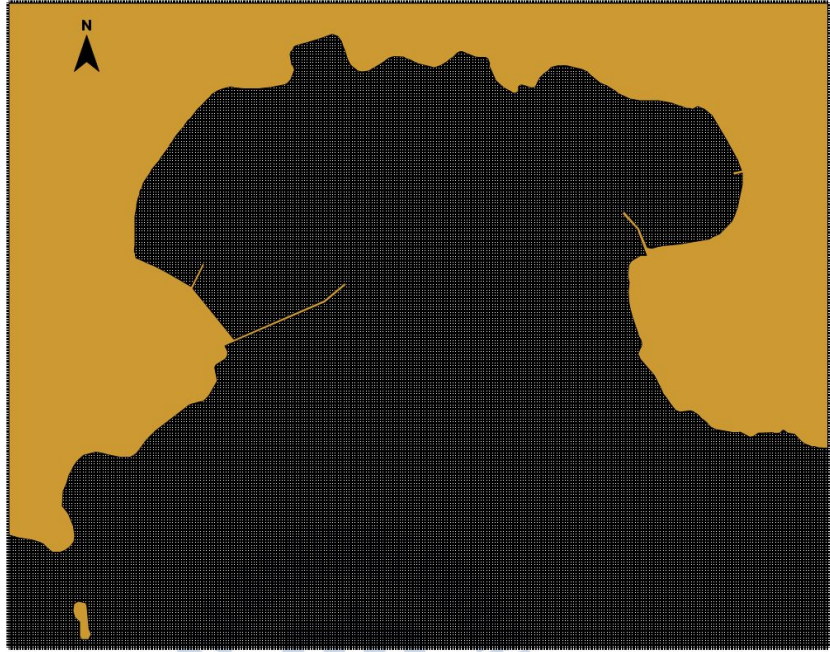


Fig. 4.9 Grid of narrow area

수치실험결과 파고변형 비교위치는 Fig. 4.10과 같다. 총 13포인트를 비교하였으며 구조물에 영향을 미치게 될 것으로 예상되는 위치와 구조물에 의해 반사파, 회절 등의 영향으로 파고가 변할 것으로 예상되는 위치를 선정하였다.

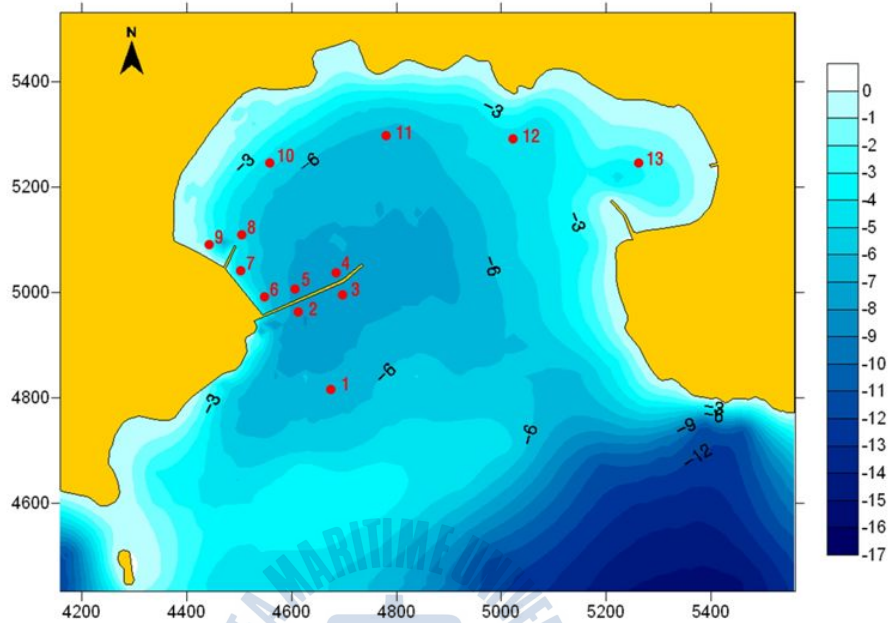


Fig. 4.10 Depth of study area

대상해역에 파고와 유속을 관측하였다. 압력식 파고계와 도플러 방식의 유속계를 사용하였고, 계측기의 특징은 Table 4.4~4.5와 같다. 파고계와 유속계의 관측위치는 대상해역에 대한 정보를 얻을 수 있도록 Fig. 4.11과 같이 선정하였다. 슬릿형 해안구조물이 시공된 대상해역을 관측하기 위하여 네 지점에서 7시간동안 동시에 관측하였다.

파고와 유속을 관측한 결과를 Fig. 4.12, Fig. 4.13과 같이 나타내었고, 이를 정리하면 Point 1에서 Point 3로 갈수록 파고는 38%정도 감소하였고, 주기는 4%로 약간 증가하였다. 유속은 평균 9.55cm/s로 나타났다.(Table 4.6)

Table 4.4 Specifications of wave gauge

Pressure Range	0 ~ 50m
Accuracy	0.01% FS
Repeatability	0.005% FS
Hysteresis	0.005% FS
Tide Resolution	0.05mm
Pressure Output	Every 0.5sec, continuous
Wave Resolution	0.1cm

Table 4.5 Specifications of water velocity

Pressure Range	$\pm 0.01, 0.1, 0.3, 1, 2, 4\text{m/s}$
Accuracy	$\pm 0.5$ of measured value $\pm 1\text{mm/s}$
Acoustic frequency	10Mhz
Resolution	0.45dB
Dynamic range	60dB



Fig. 4.11 Observations of point



Fig. 4.12 Observation of wave height

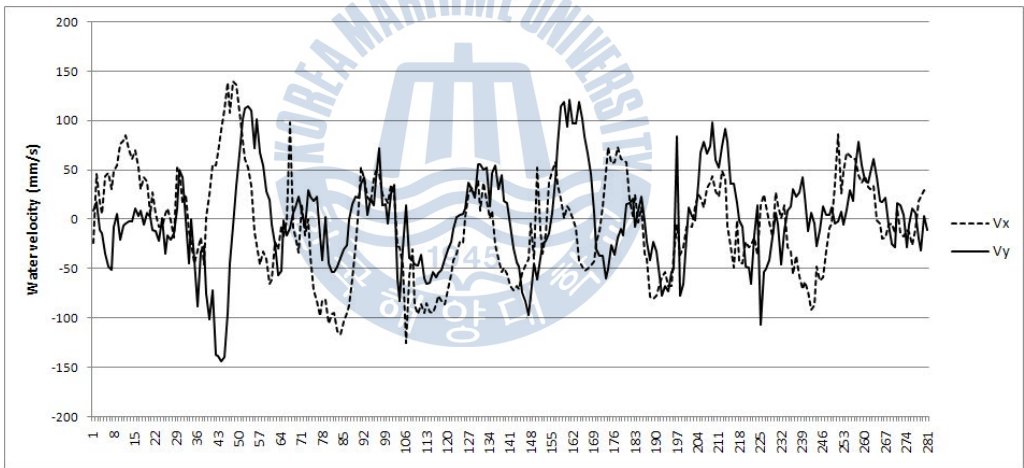


Fig. 4.13 Observation of water velocity

Table 4.6 Field observations of wave height & velocity

Point	H <sub>max</sub> (m)	T <sub>max</sub> (sec)	H <sub>1/10</sub> (m)	T <sub>1/10</sub> (sec)	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (sec)	H <sub>mean</sub> (m)	T <sub>mean</sub> (sec)	Depth (m)
1	0.36	7.20	0.30	7.11	0.24	7.12	0.16	7.22	9.46
2	0.27	7.12	0.23	7.14	0.19	7.04	0.12	7.13	8.72
3	0.14	7.50	0.12	7.62	0.09	7.59	0.06	6.75	3.47
velocity (cm/s)	V <sub>x</sub>	4.5	V <sub>y</sub>	6.83	V	9.55			

현장관측결과를 이용하여 파랑변형수치실험을 하였다. 슬릿형 또는 직립형 호안이 건설되었을 때 수치실험을 통해서 대상항에 미치는 영향에 대한 실험이다. 실험결과 두가지 경우에 대한 파고의 차이가 거의 나지 않았다. 이는 입사파고가 낮아서 인 것으로 판단되며, 평상파랑에는 슬릿형과 직립형의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다.(Table 4.7)

Table 4.7 Analysis of field observation and numerical simulation

Point	Field Observation		Numerical simulation (Upright share protection)		Numerical simulation (Slit type share protection)	
	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (sec)	H (m)	T (sec)	H (m)	T (sec)
1	0.24	7.12	0.246	7.109	0.245	7.112
2	0.19	7.04	0.190	6.858	0.190	6.857
3	0.09	7.59	0.098	7.786	0.096	7.767

## (2) 구조라항에의 적용

대상해역은 경상남도 거제시 일운면 구조라리에 위치한 구조라항이다. 대상항은 소규모 어항으로 기존 남방파제를 연장하고 북방파제를 신설할 계획에 있다. 건설하는 북방파제는 슬릿형 해안구조물로 건설될 예정이다.

대상해역의 파랑입력조건으로 Table 4.8과 같이 파향 SE, SSE, S에 대한 조건으로 수치실험을 하였다. 50년 빈도를 사용하였으며 심해설계파 추정보고서의 두지점을 포함하도록 하여 파랑조건에 사용하였다.(전해역 심해설계파 추정 보고서Ⅱ(2005)) Table 4.9은 기상청 자료 1976년부터 2005년까지(30년간) 관측된 연 최대풍속자료를 토대로 대표적 극치확률모형인 Gumbel 확률모형을 이용한 극치해석으로부터 바람자료를 획득하였다. 본 연구에서는 50년 빈도 바람자료를 적용하여 수치 실험하였다. 조위는 삭망평균만조위인 DL(+2.14m)를 적용하였다. Table 4.10와 같이 총 3가지 케이스에 대해서 실험을 진행하였다.

Table 4.8 Incident wave condition for design wave

Direction	Height(m)	Period(sec)	Return Period	Grid Point
SE	10.83	13.99	50 year	072126
SSE	13.66	16.43	50 year	
S	10.46	15.06	50 year	071126

Table 4.9 Characteristics of wind

Direction	5 years	10 years	20 years	30 years	40 years	<b>50 years</b>	100 years	Probability model
SE	10.43	12.18	13.86	14.83	15.51	<b>16.04</b>	17.66	Gumbel
SSE	9.46	10.88	12.25	13.03	13.58	<b>14.01</b>	15.33	Gumbel
S	9.16	10.58	11.94	12.72	13.27	<b>13.70</b>	15.01	Gumbel

Table 4.10 Cases of the numerical simulation for wave transformation

Case	Contents
Case A	○ 현재상태(해수유통구 20m, 남방파제 70m 연장)
Case B	○ 북방파제(일반경사식) 및 친수공간 축조
Case C	○ 북방파제(슬릿형) 및 친수공간 축조

대상해역의 영역은 광역과 세역으로 구분하였다. 광역은 심해설계파 추정정보고서 지점 2곳을 포함하고 계산의 효율성, 천수변형 및, 굴절이 순조롭게 진행될 수 있게 설정하였으며 세역은 구조라항내를 해저 지형 및, 구조물을 정밀하게 표현할 수 있도록 구성하였다. Fig. 4.14과 같이 광역 파랑변형모형의 영역은 16km×16km로 설정하였으며, 이에 대한 격자간격은 25m로 구성하였다. 세역 파랑변형모형의 영역은 2.0km×1.8km로 설정하였으며, 이에 대한 격자간격은 5m로 하였다.(Fig. 4.15)

Table 4.11 Summary of numerical experiment for waves

구분	광역	세역
적용모델	○ SWAN model	
모델범위	○ 구조라항 일대해역 ○ 16km x 16km	○ 구조라항 전면해역 ○ 2km x 1.8km
격자체계	○ 640 x 640 ○ $\Delta S=25m$	○ 400 x 360 ○ $\Delta S=5m$
실험조건	○ 심해설계파, 풍속	
실험내용	○ 현황재현	○ 현재상태 ○ 계획안(북방파제, 친수공간 조성)



Fig. 4.14 Grid of wide area for wave model



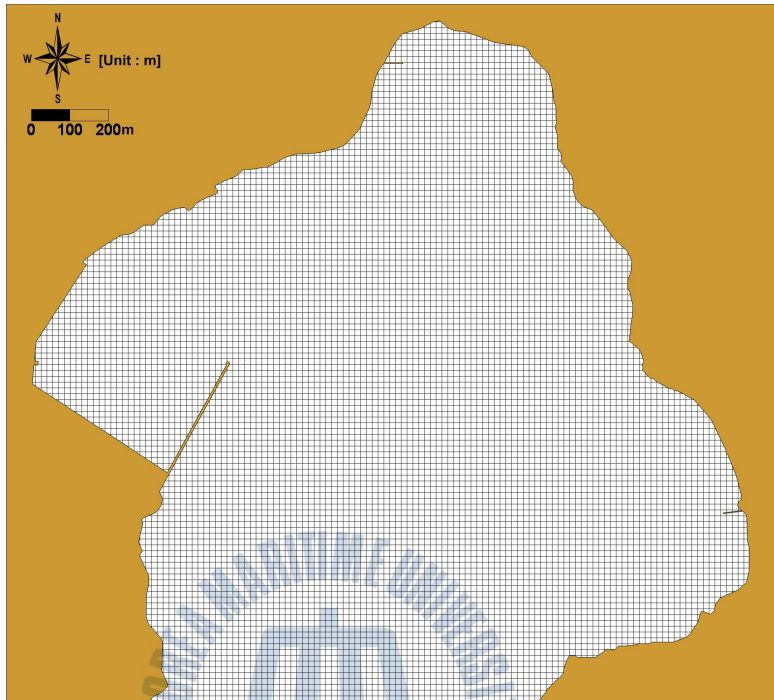


Fig. 4.15 Grid of narrow area for wave model

#### 4.1.2 해수유동 수치모형

광역에 대한 실험을 거쳐 거제도 동안에서의 전반적인 유동양상을 파악한 후 구조라항의 세부적인 유동 및 해수순환 양상을 파악하기 위하여 세부격자를 채용하여 세역을 구성하였다. 북방파제는 해수교환이 일정부분 가능한 슬릿방파제를 사용할 예정이므로, 일반 경사식 방파제와 커튼식 방파제를 비교하기 위하여 3가지 실험안으로 실험을 수행하여 그 효과를 비교할 수 있도록 하였다.

본 실험에서의 계산영역은 북쪽으로는 장승포항, 남쪽으로는 다포도까지를 포함하는 광역과 광역에서 추출된 경계조건을 바탕으로 세역을 구성하였다. 광역은 동서로 23.0km, 남북으로 16.0km로, 세역은 구조라항 일대해역

(2,000m × 1,800m)으로 설정하였다. 계산격자망은 x, y 직각좌표계에서 광역은 x방향으로 160개, y방향으로 230개의 격자선으로 구분하여 100m 간격의 등격자로 구성하였으며, 세역은 x방향으로 100개, y방향으로 110개의 격자선으로 구분하여 10~40m 가변격자로 구성하였다.(Table 4.12)

Table 4.12 Summary of numerical experiment for current

구 분	광 역	세 역
적용모델	○ POM(Princeton Ocean Model)	
모델범위	○ 구조라항 일대해역 ○ 16.0km × 23.0km	○ 구조라항 전면해역 ○ 2,000m × 1,800m
격자체계	○ 160 × 230 (36,800개) ○ ΔS=100m	○ 100 × 110 (11,000개) ○ ΔS=10, 20, 40m
실험조건	○ 약최대조(M2+S2+K1+O1)	
실험내용	○ 현황 재현	○ 현재 상태 ○ 계획안(북방파제, 친수공간조성)
실험안	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Case A : 현재 상태</li> <li>○ Case B : 북방파제(일반경사식) 및 친수공간 축조</li> <li>○ Case C : 북방파제(석문블럭) 및 친수공간 축조</li> <li>○ Case D : 북방파제(커튼식) 및 친수공간 축조</li> </ul>	

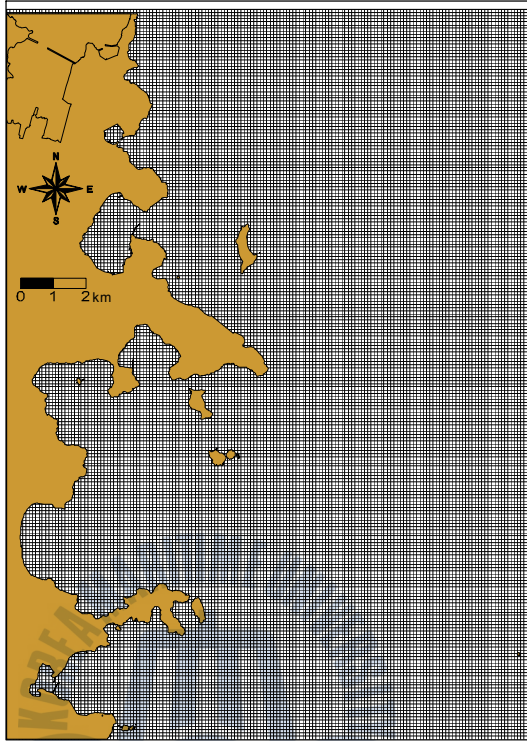


Fig. 4.16 Grid of wide area for current model

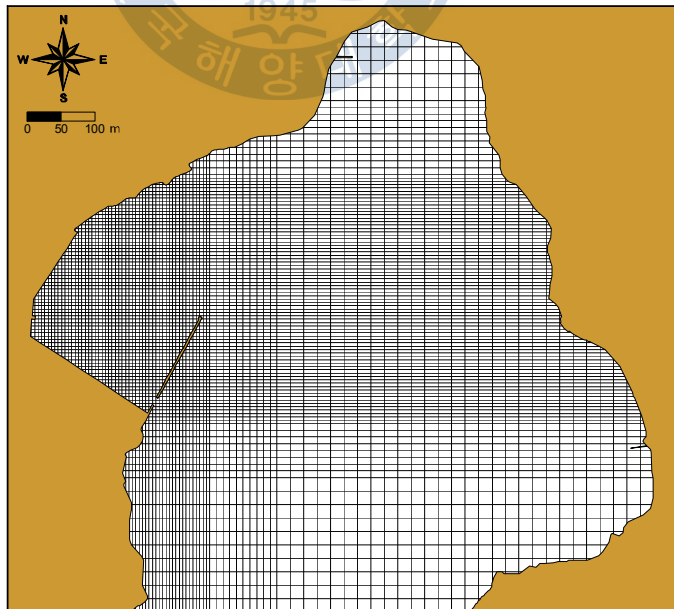


Fig. 4.17 Grid of narrow area for current model

### (1) 조위의 검증

수치모형의 조위 검증은 계산영역의 개방경계값을 입력하였을 때, PT-1~3의 관측점에서의 관측된 조위값과 본 수치실험을 통해 재현된 조위를 비교하였는데, 4대 분조를 고려하여 초기의 대조기에서 소조기를 거쳐 다음 대조기까지 30일간의 시계열 변화를 Fig. 4.19에 나타내었다. 이러한 결과로 볼 때 본 계산에서 관측치와 계산치의 조위값의 차이는 매우 미소하여 본 수치실험이 본 사업대상 해역 인근의 유동을 잘 표현하고 있다고 볼 수 있다. 조위 검증에 사용된 PT-1~3의 조화상수는 Table 4.13에 제시하였다.

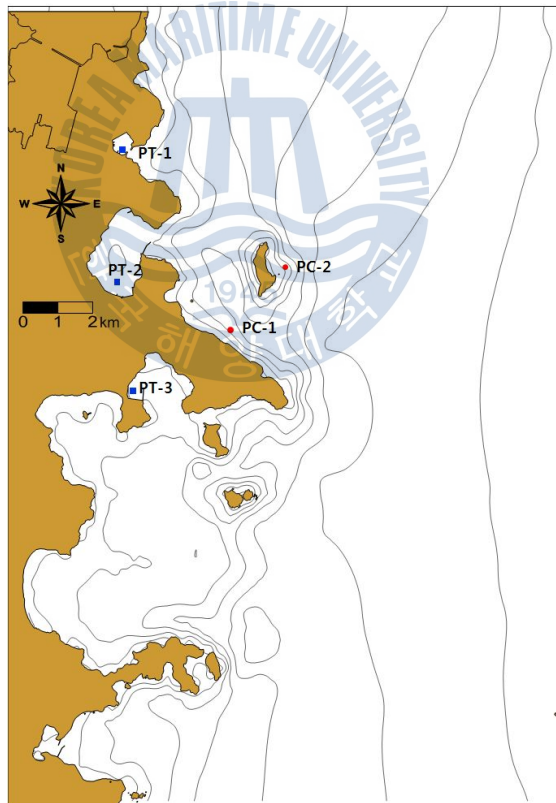


Fig. 4.18 Stations for observation

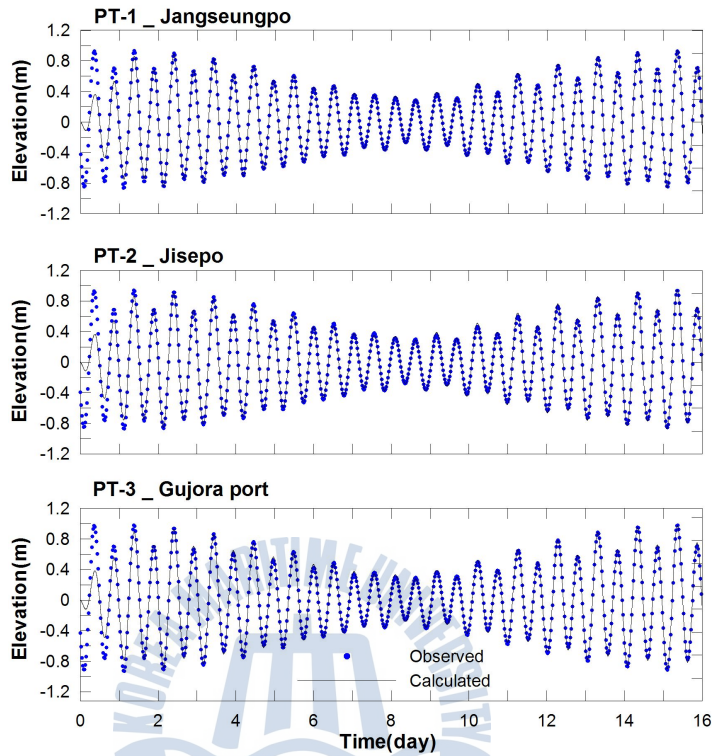


Fig. 4.19 Time series of surface elevation

Table 4.13 Harmonic components used for verification at PT-1,2,3

분 조	장승포항 34° 51' 35" N 128° 43' 38" E		지세포항 34° 49' 39" N 128° 42' 25" E		구 조 라 34° 48' 57" N 128° 42' 02" E	
	진폭 (cm)	지각 (°)	진폭 (cm)	지각 (°)	진폭 (cm)	지각 (°)
M2	56.6	238.5	56.6	240.3	58.5	242.7
S2	25.6	265.5	25.4	272.3	27.0	267.2
K1	7.8	147.8	8.6	156.7	11.3	174.4
O1	4.2	135.5	5.2	132.0	10.3	137.3

자료 : 해양조사원, 기본수준점 성과표

## (2) 조류의 검증

인근에서 관측된 연속조류 관측자료(PC-1, 2)를 이용하여 계산치를 비교하였다. Fig. 4.20에 나타난 바와 같이 시간에 따른 x, y방향의 위상과 유속차는 크지 않고 거의 유사한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

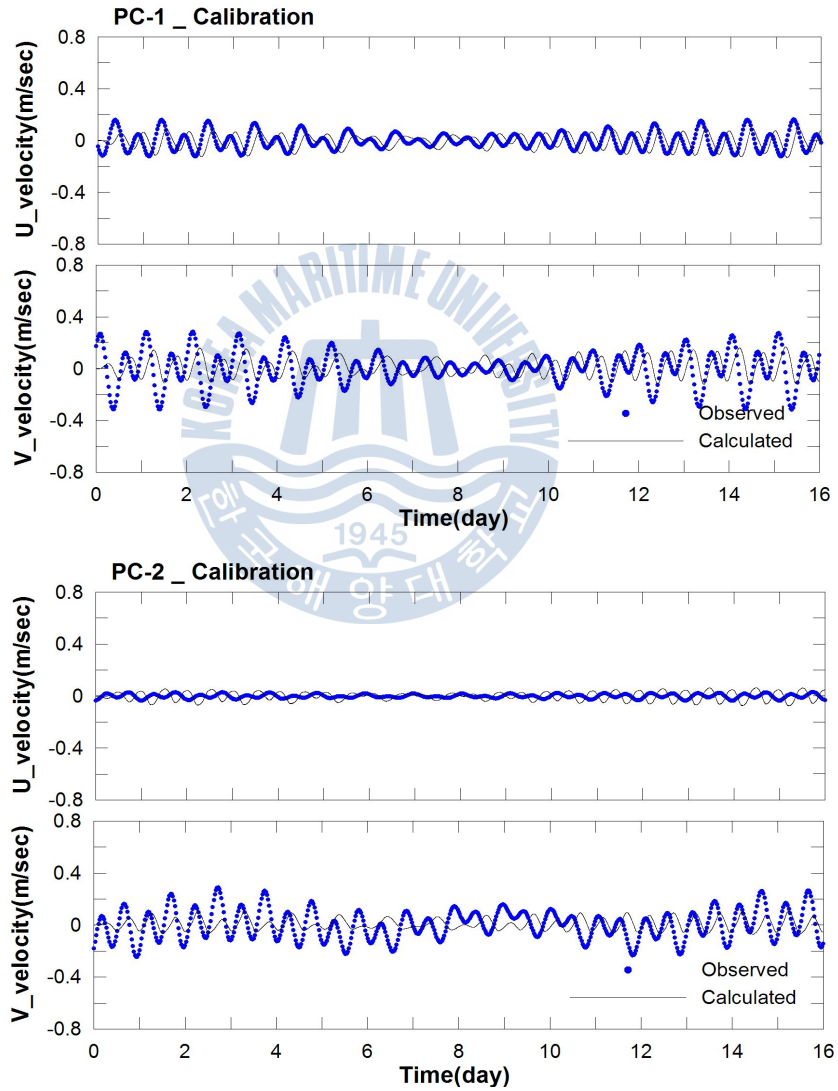


Fig. 4.20 Result of tidal current

### 4.1.3 해수교환 수치모형

구조라항은 천연항으로 훌륭한 입지를 가진 반면에 항내 해수순환에 불리한 형세를 가지고 있다. 또한, 항내 유속이 2.5cm/sec 이하를 유지하고 있어 항내 수질개선에 효과적인 외곽시설의 도입이 필요한 항이기도 하다.

따라서, 본 실험에서는 슬릿형 방파제에 의한 해수교환평가를 실시하기 위하여 2차원 입자추적모형을 이용한 입자 거동특성을 분석하였다. 분석된 입자의 분포에 따라, 항내 해수교환율을 계산하였다. 앞서의 해수유동실험에서 계산된 조위, 조류 조건을 이용하였다.

입자의 거동특성을 파악함으로써 수질개선 효과에 대한 평가항목인 해수교환율과 체류시간을 구할 수 있다. 해수교환율은 항내 초기 투기입자에 대하여 감소된 입자의 비율로 정의하여 계산하였다.

체류시간 = 15일 동안 항내 잔존 입자수 파악

해수교환율 = (항내 초기 입자수 - 항내 잔존 입자수) / 항내 초기 입자수

입자의 보다 정확한 거동특성을 파악하기 위하여 대, 중, 소조기가 포함되는 기간인 15일 동안 계산을 수행하였으며, 계산간격은 180sec로 수행하였다.

Table 4.14 Summary of numerical experiment

구 분	내 용
실험목적	○ 해수교환을 평가 및 수질개선 효과 검토
적용모형	○ RNDLEE모형(2차원 입자추적 모형)
격자체계	○ 해수유동 모형과 동일
계산시간	○ 대,중,소조기가 포함되는 15일간(계산간격 180초)
외력조건	○ 해수유동 모형의 결과치(u, v, n)
실험안	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Case A : 현재 상태</li> <li>○ Case B : 북방파제(일반경사식) 및 친수공간 축조</li> <li>○ Case C : 북방파제(석문블럭) 및 친수공간 축조</li> <li>○ Case D : 북방파제(커튼식) 및 친수공간 축조</li> </ul>

## 4.2 수치실험 결과 및 분석

### 4.2.1 파랑변형 결과

#### (1) 설리항

수치실험을 통해 방파제 건설전과 건설 후 방파제 형식이 직립식인 경우와 슬릿형인 경우로 나누어 실험하였다.

실험결과 항내 부분인 Point 4~7에 대한 분석결과 직립형 방파제보다 슬릿형 방파제의 경우 파고가 0.17m 정도 높게 나타났다. 그러나 항내 정온도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한 방파제건설로 인한 대상항 주변지역의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.(Fig. 4.21~4.23)



Fig. 4.24, 4.29, 4.34는 SE, SSE, S파향에 대한 광역 실험결과이다. 광역 실험결과를 네스팅하여 세역에 대한 수치실험결과를 확인하였다.(Fig. 4.25~4.27, Fig. 4.30~4.32, Fig. 4.35~4.37) 방파제 부근에 대한 파랑변형을 상세하게 확인하기 위하여 세부역을 확대하여 파향별로 Fig. 4.28, Fig. 4.33, Fig. 4.38과 같이 나타내었다. 방파제건설로 인한 파의 차단이 직립형 방파제와 슬릿형 방파제에 따른 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 판단할 수 있다.

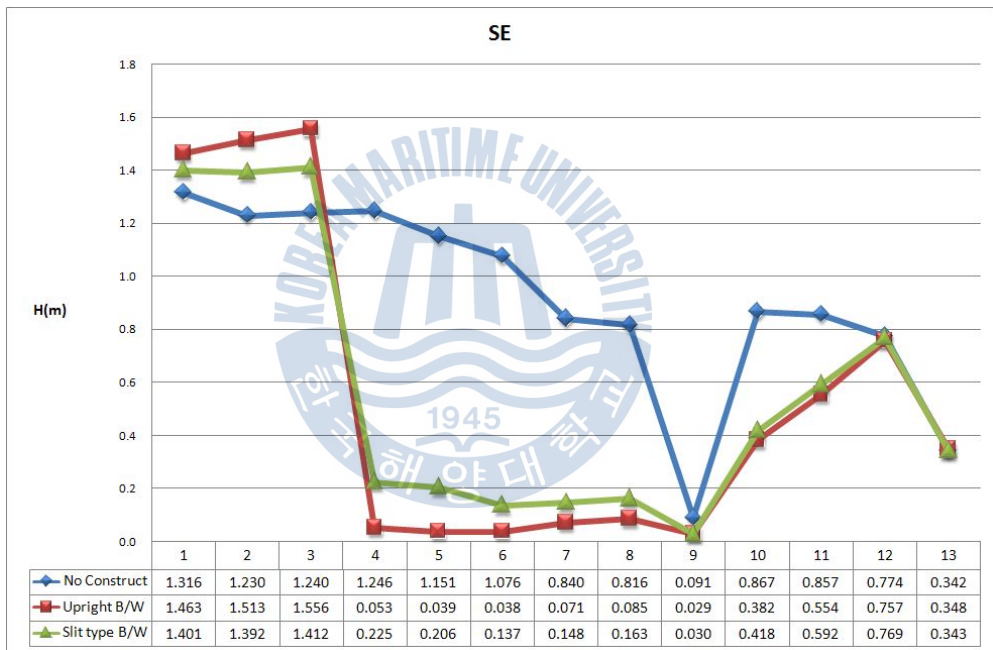


Fig. 4.21 Wave height of port(SE wave direction)

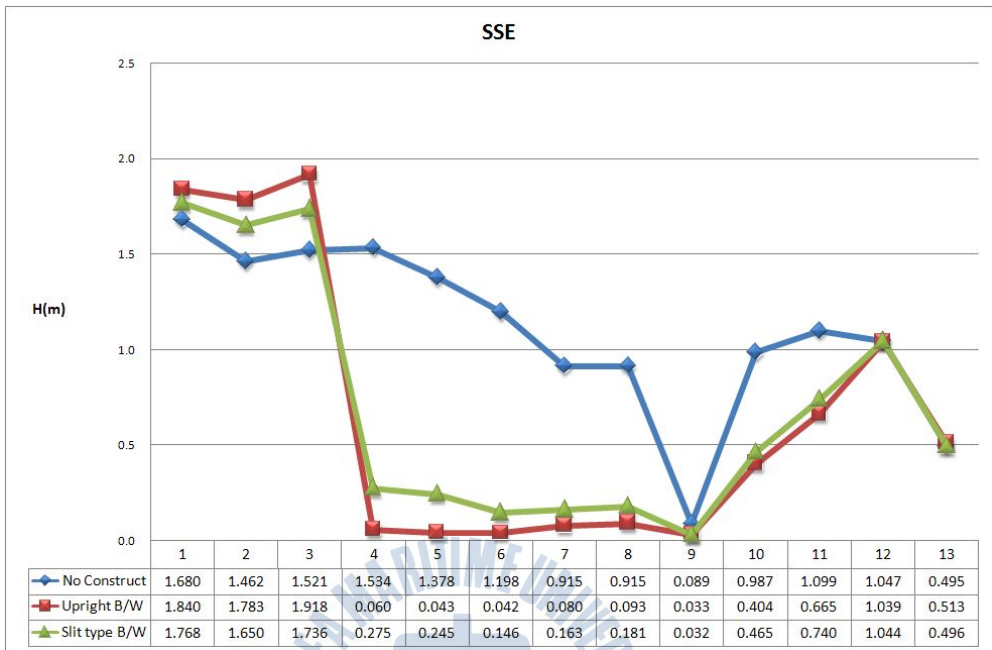


Fig. 4.22 Wave height of port(SEE wave direction)

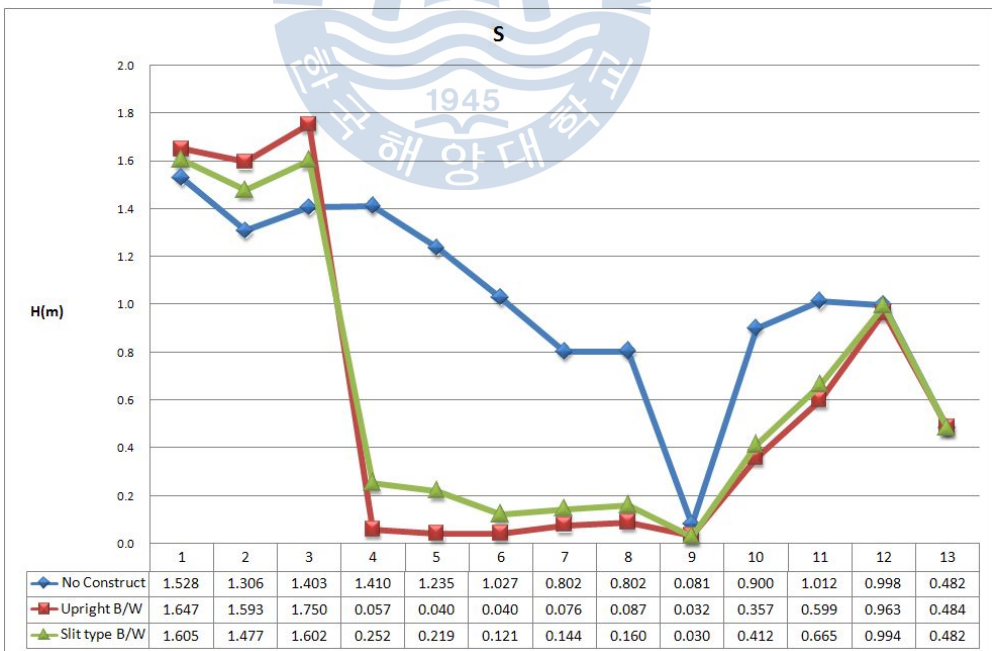


Fig. 4.23 Wave height of port(S wave direction)

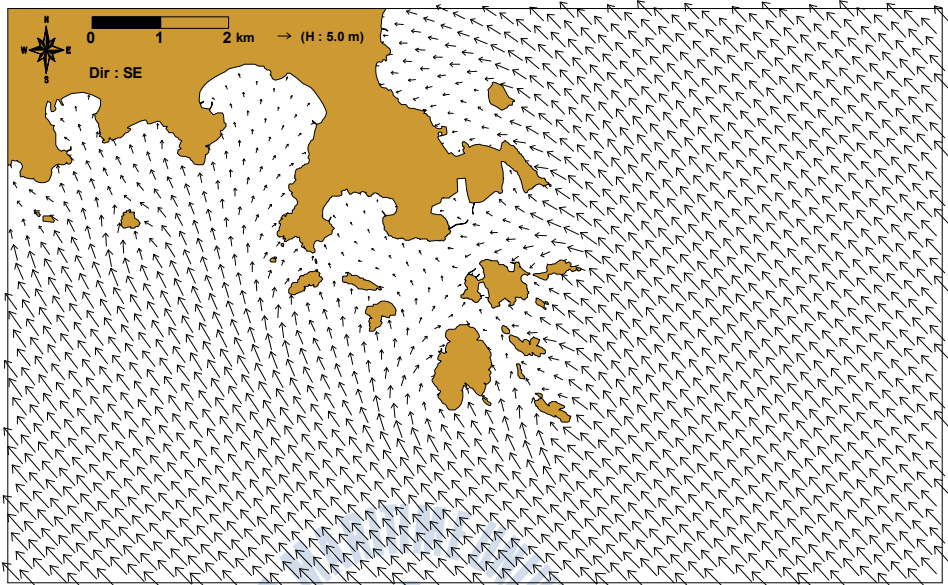


Fig. 4.24 Wave height vector of wide area(Dir:SE)

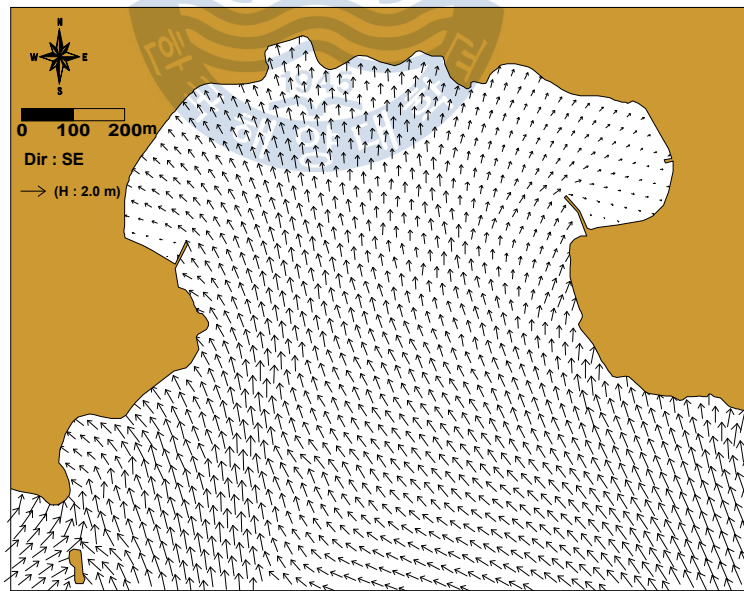


Fig. 4.25 Wave height vector of narrow area(Case 1, Dir:SE)

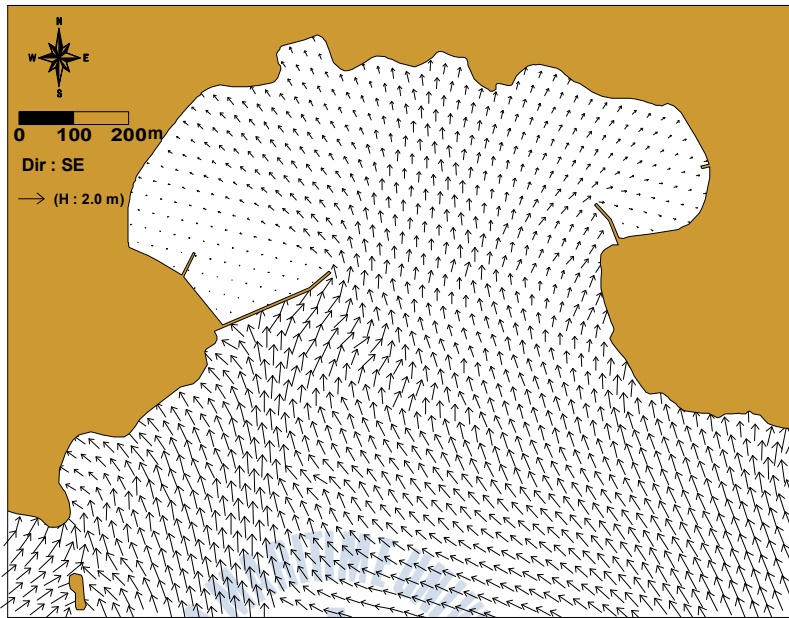


Fig. 4.26 Wave height vector of narrow area(Case 2, Dir:SE)

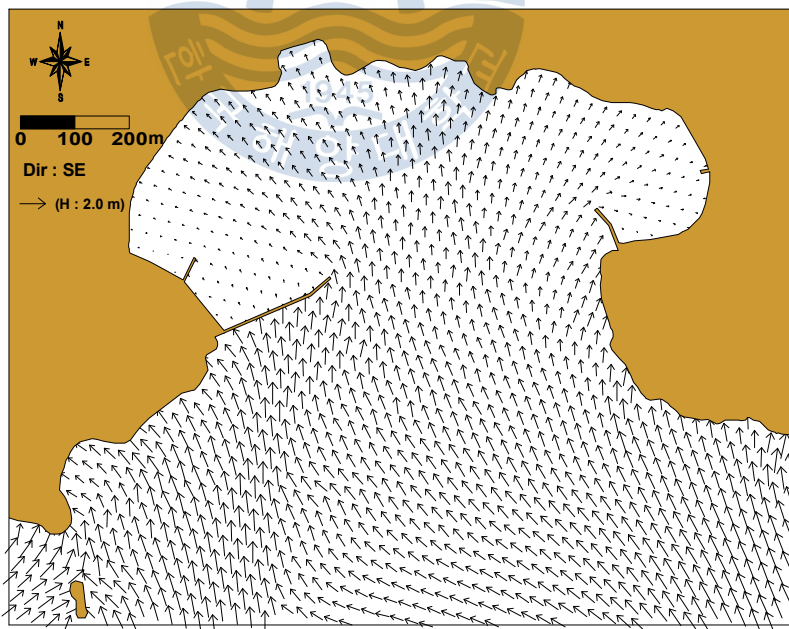


Fig. 4.27 Wave height vector of narrow area(Case 3, Dir:SE)

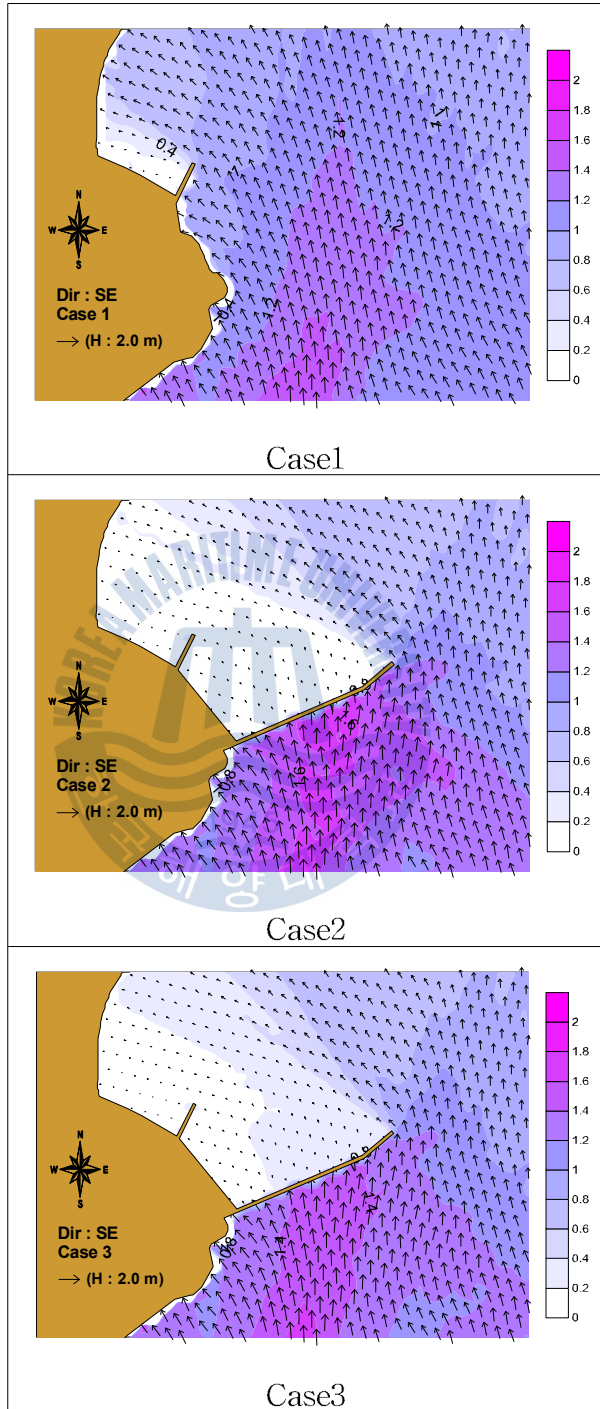


Fig. 4.28 Wave height of detail (Dir:SE)

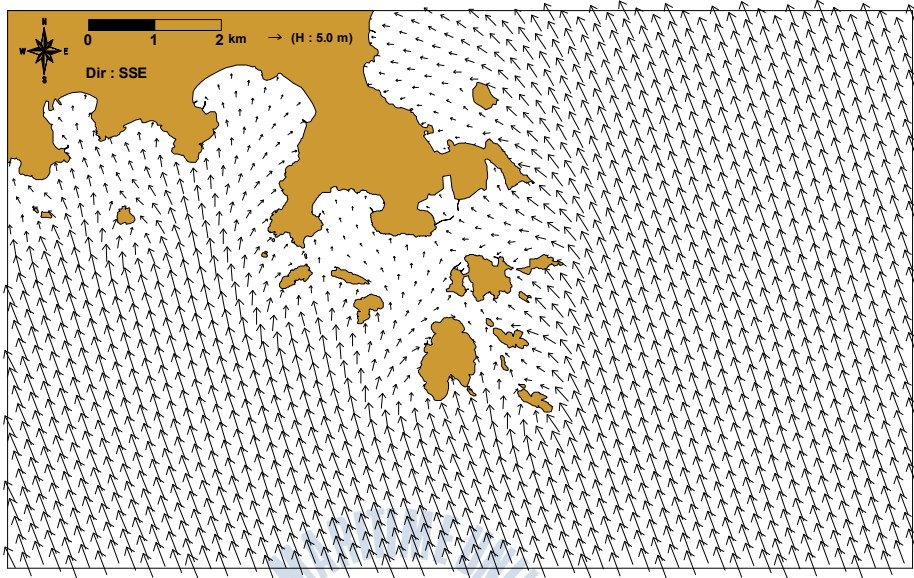


Fig. 4.29 Wave height vector of wide area(Dir:SSE)

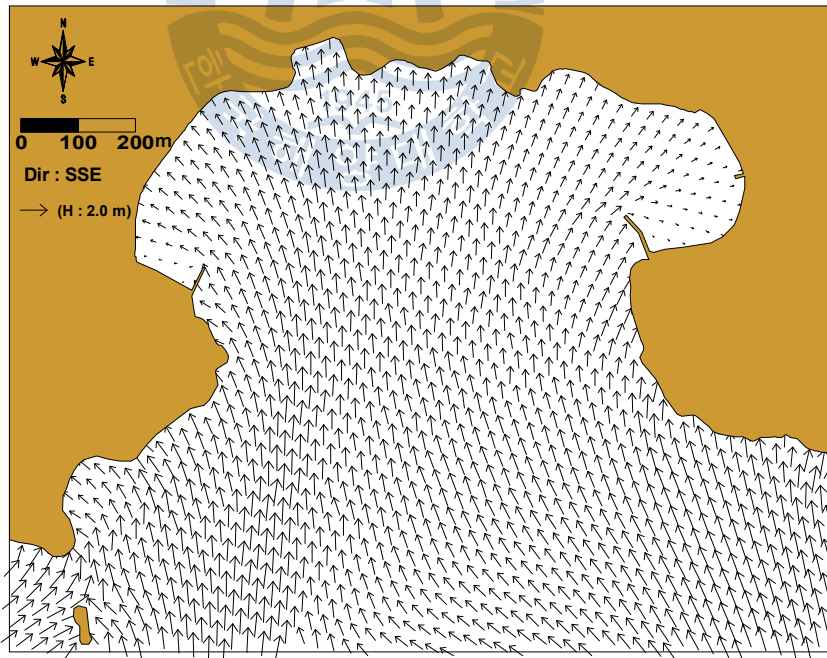


Fig. 4.30 Wave height vector of narrow area(Case 1, Dir:SSE)

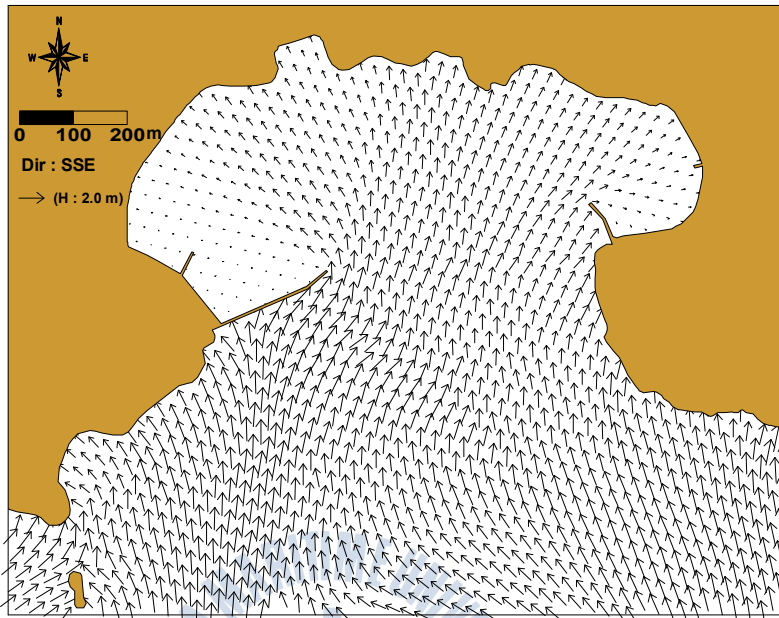


Fig. 4.31 Wave height vector of narrow area(Case 2, Dir:SSE)

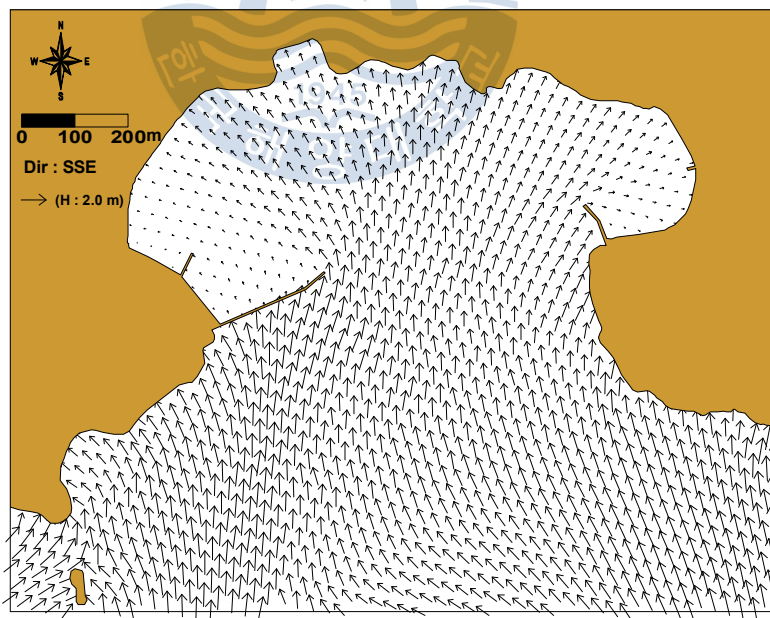


Fig. 4.32 Wave height vector of narrow area(Case 3, Dir:SSE)

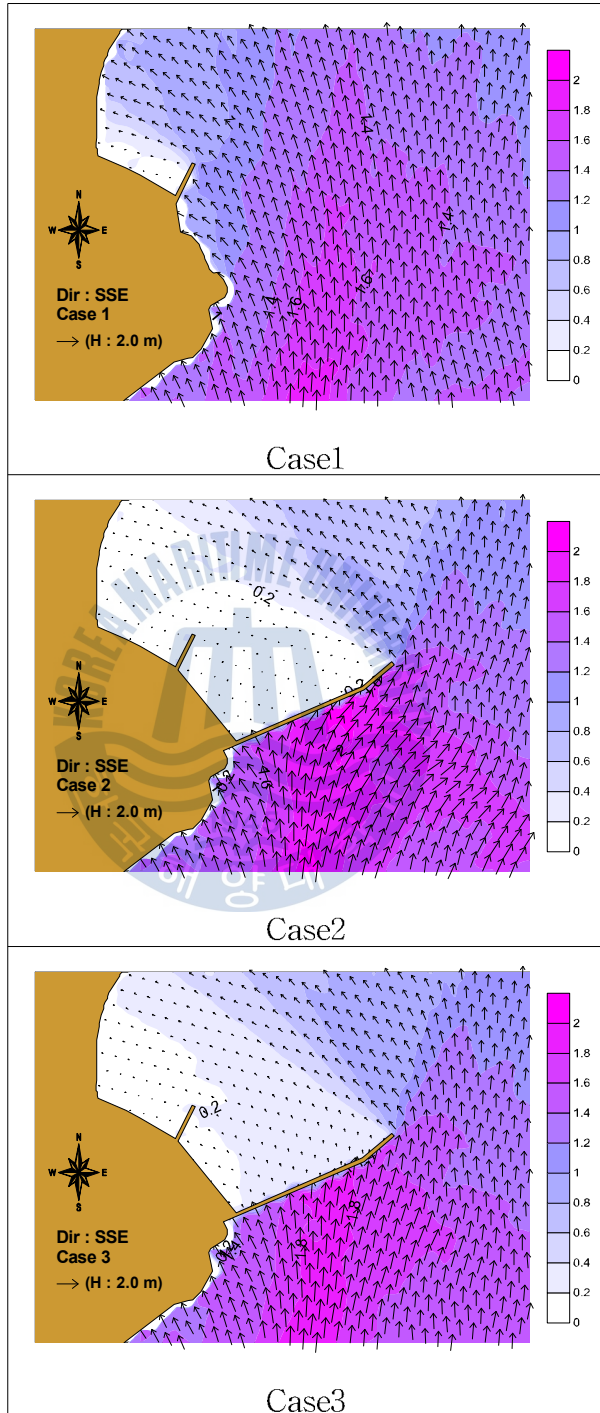


Fig. 4.33 Wave height of detail (Dir:SSE)



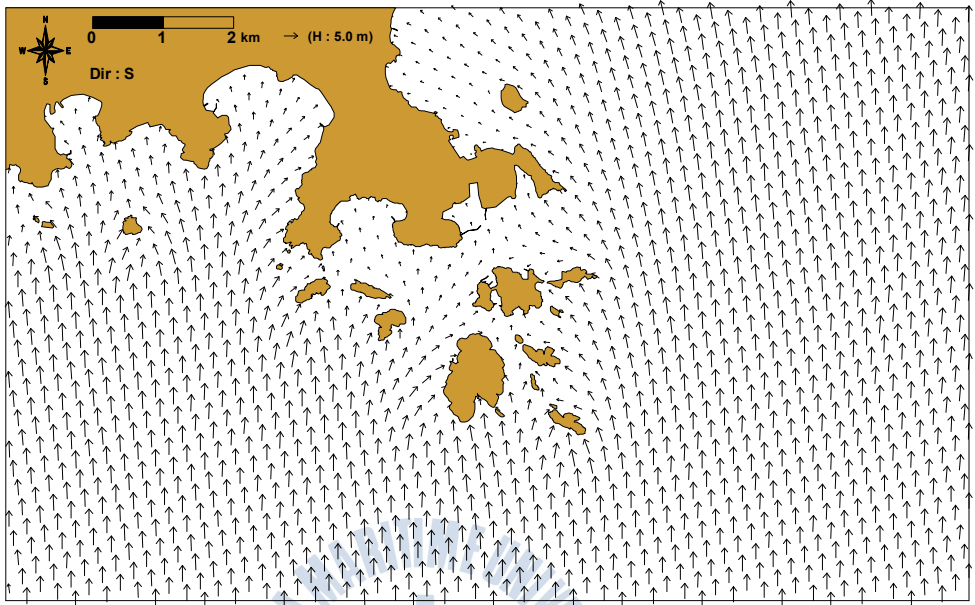


Fig. 4.34 Wave height vector of wide area(Dir:S)

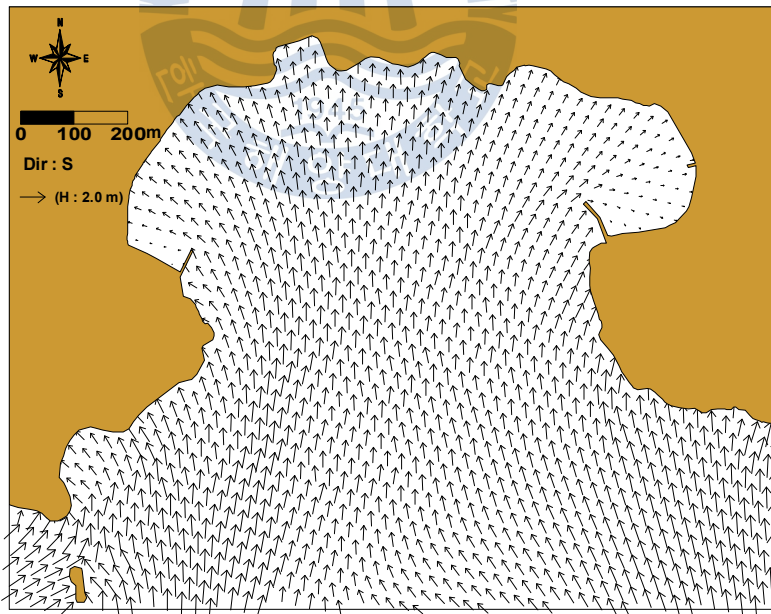


Fig. 4.35 Wave height vector of narrow area(Case 1, Dir:S)

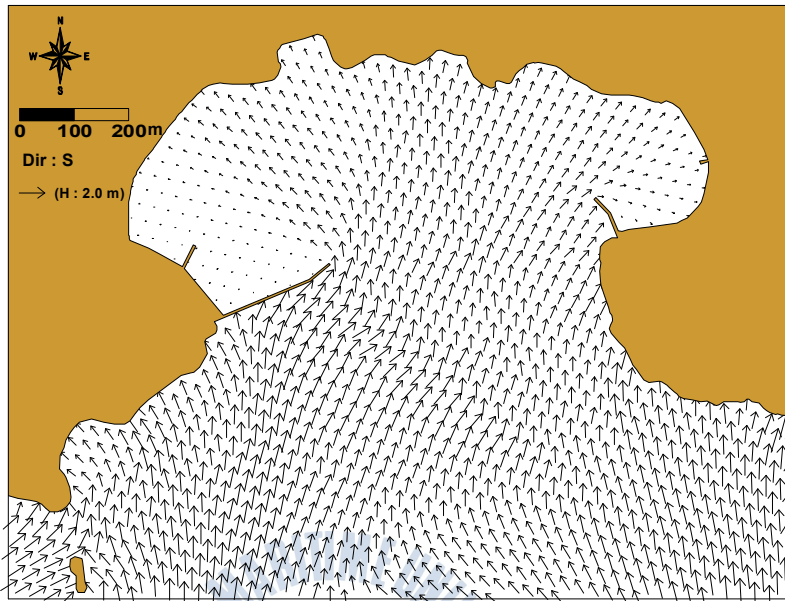


Fig. 4.36 Wave height vector of narrow area(Case 2, Dir:S)

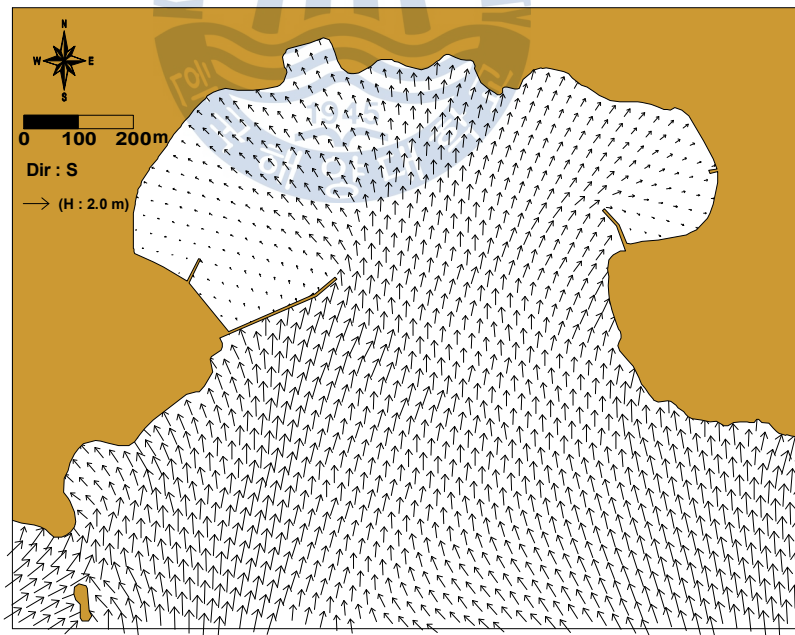


Fig. 4.37 Wave height vector of narrow area(Case 3, Dir:S)

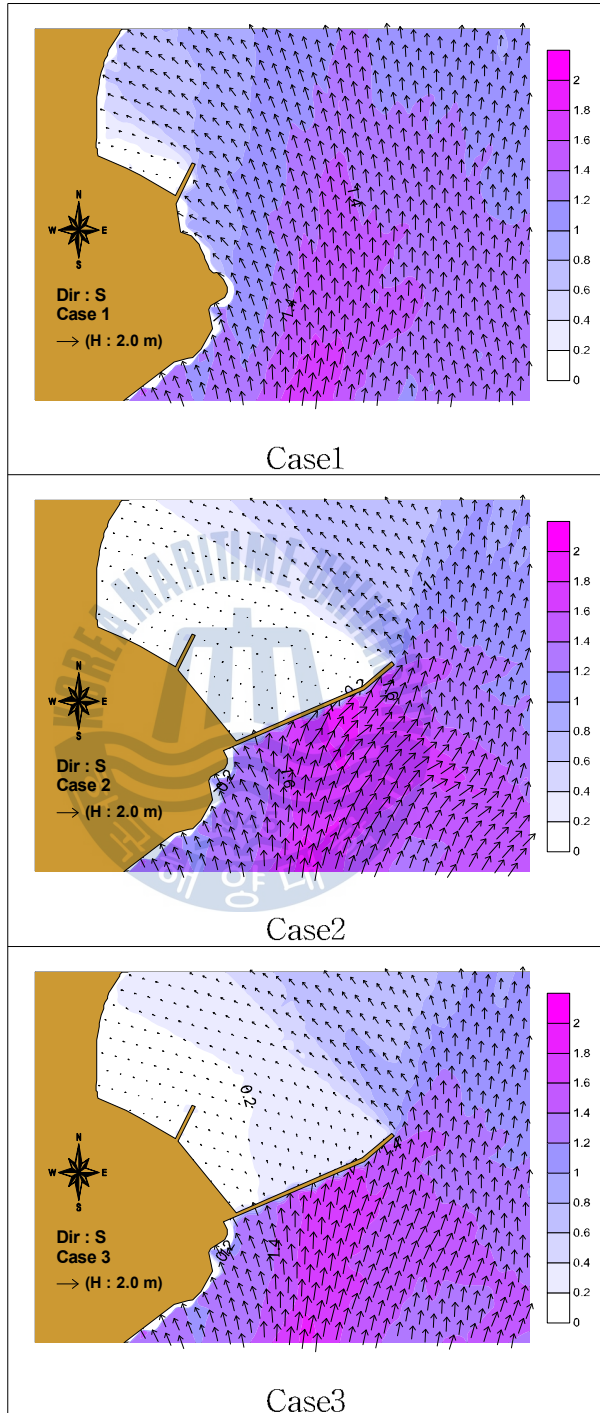


Fig. 4.38 Wave height of detail (Dir:S)

## (2) 구조라항

수치실험을 통해 경사식 방파제와 슬릿형 방파제의 구조형식에 따른 주변 해역과 항내의 파랑변형을 실험하였다.

수치실험결과를 Fig. 4.39와 같이 항내 포인트를 선정하여 방파제 형식에 따른 변화를 비교하였다. 비교결과 Point4번에서 경사식 방파제가 슬릿형 방파제보다 0.04m 정도 더 높게 나타났다(Fig. 4.40~4.42). 항내에 들어오는 파고가 낮아서 방파제 형식에 따른 큰 변화는 나타나지 않았으나 투파의 특성이 있는 슬릿형 방파제보다 오히려 경사식 방파제의 경우 항내 파고가 약간 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 항내 파고가 육지에서 반사되어 들어오는 파의 영향을 받은 것으로 육지에서 반사된 파를 경사식 방파제보다 슬릿형 방파제가 더 낮게 반사함에 따른 영향이다.

각 파향별 광역에 대한 실험결과를 Fig. 4.43, 4.50, 4.57에 나타내었고, 이를 네스팅한 세역에 대한 실험결과는 파향별로 Fig. 4.44~4.46, Fig. 4.51~4.53, Fig. 4.58~4.60에 나타내었다. 또한 방파제 부근에 대한 파랑의 변화를 확인하기 위하여 실험결과를 확대하여 나타내었다(Fig. 4.47~4.49, Fig. 4.54~4.56, Fig. 4.61~4.63).

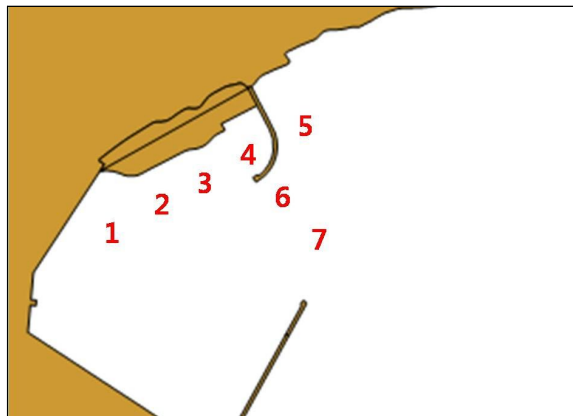


Fig. 4.39 Check point of wave height



Fig. 4.40 Wave height of port(SE wave direction)

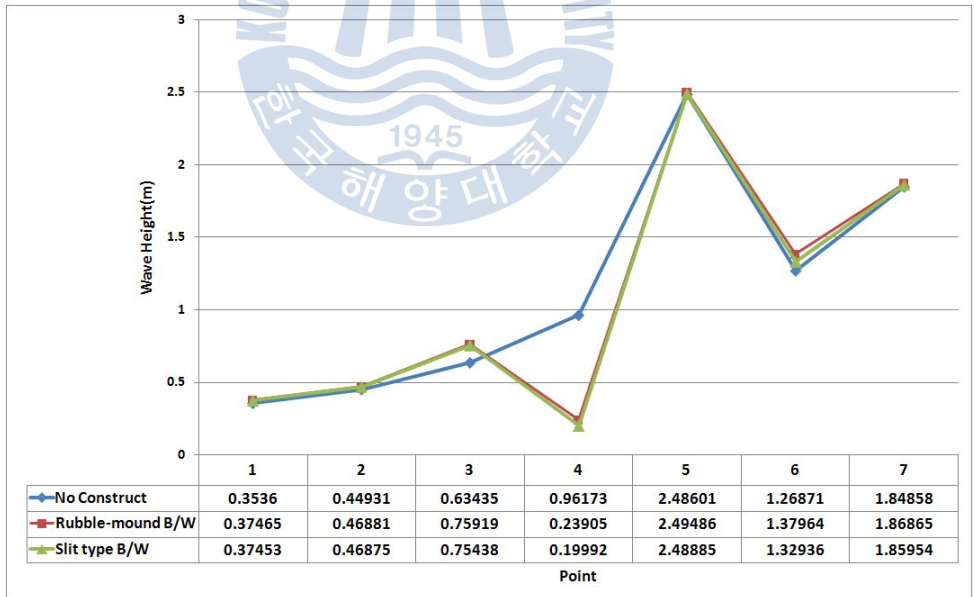


Fig. 4.41 Wave height of port(SSE wave direction)

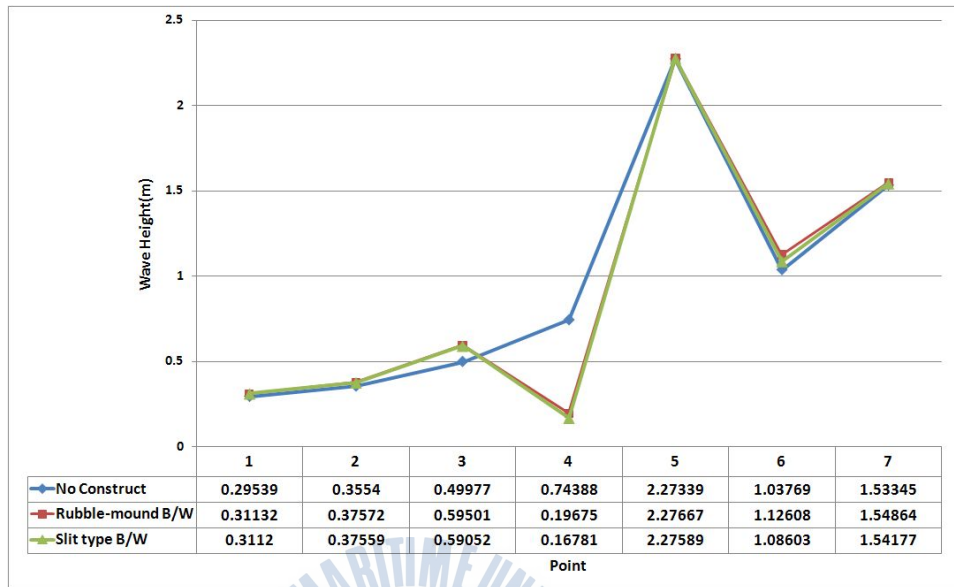
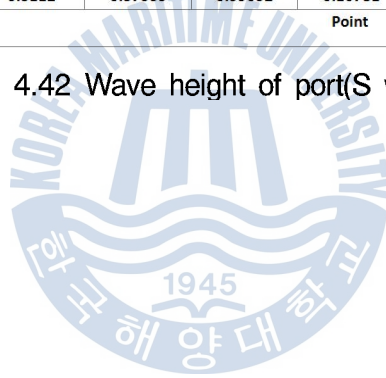


Fig. 4.42 Wave height of port(S wave direction)



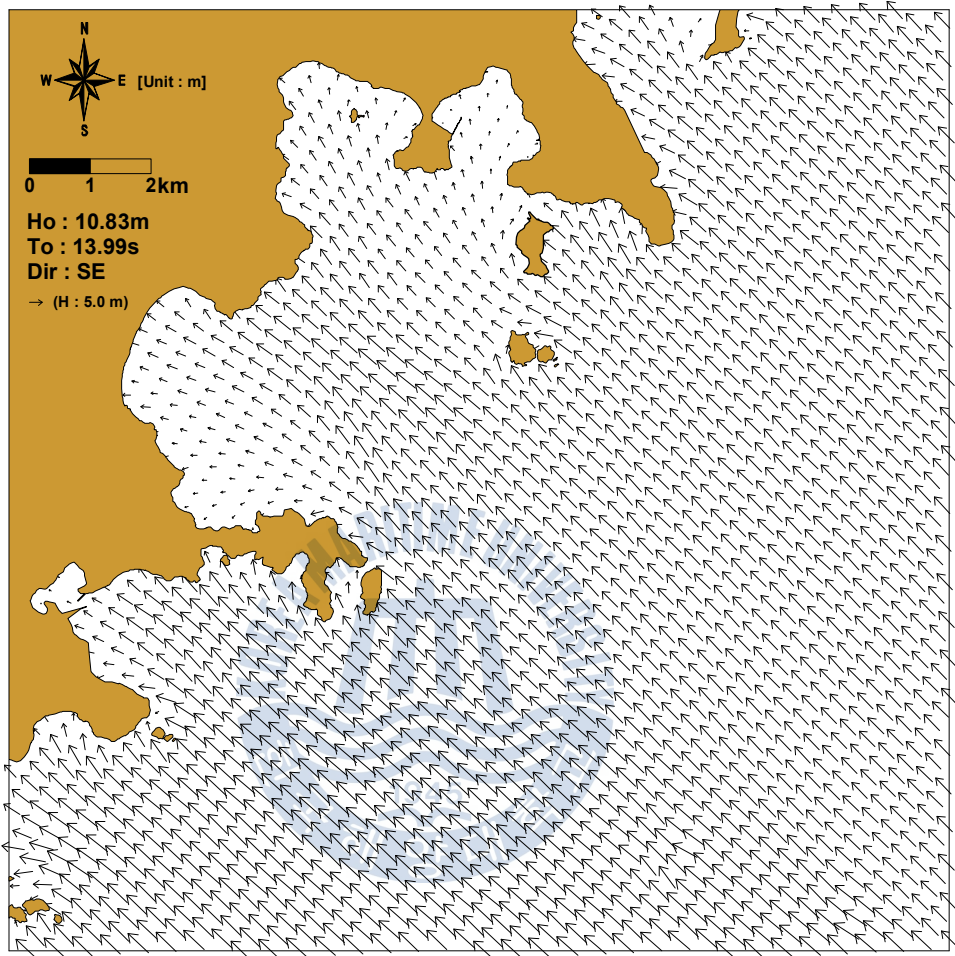


Fig. 4.43 Wave height vector of wide area(Dir:SE)

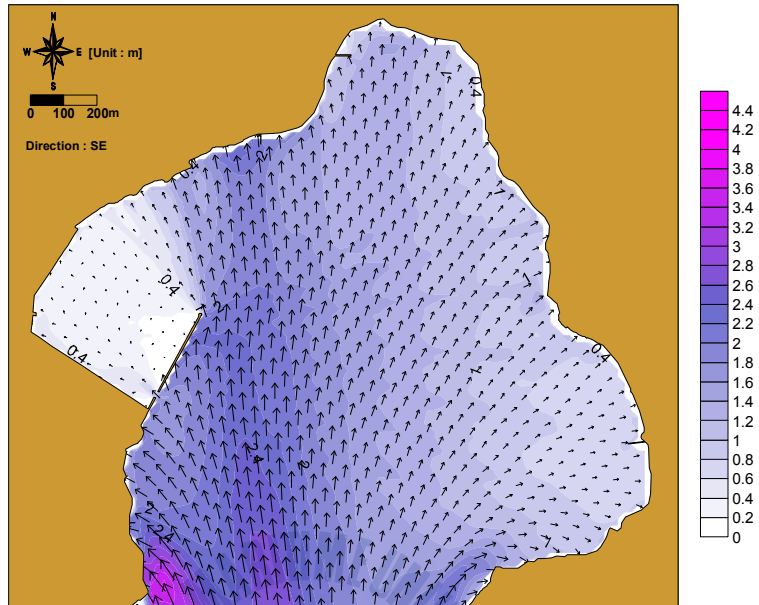


Fig. 4.44 Wave height of narrow area(Dir:SE, Case A)

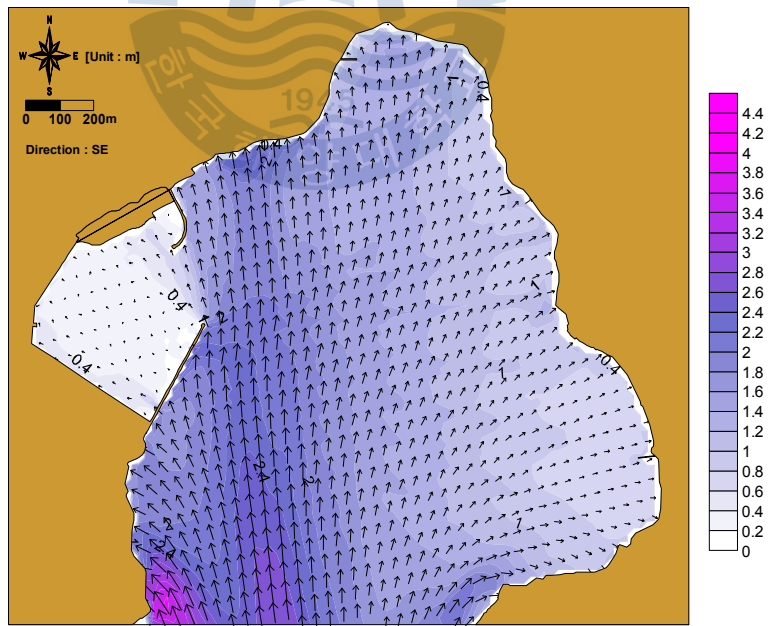


Fig. 4.45 Wave height of narrow area(Dir:SE, Case B)



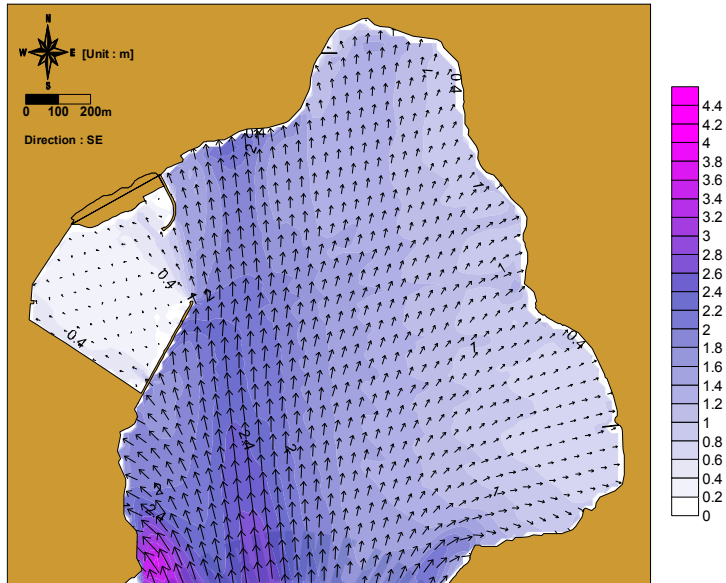


Fig. 4.46 Wave height of narrow area(Dir:SE, Case C)

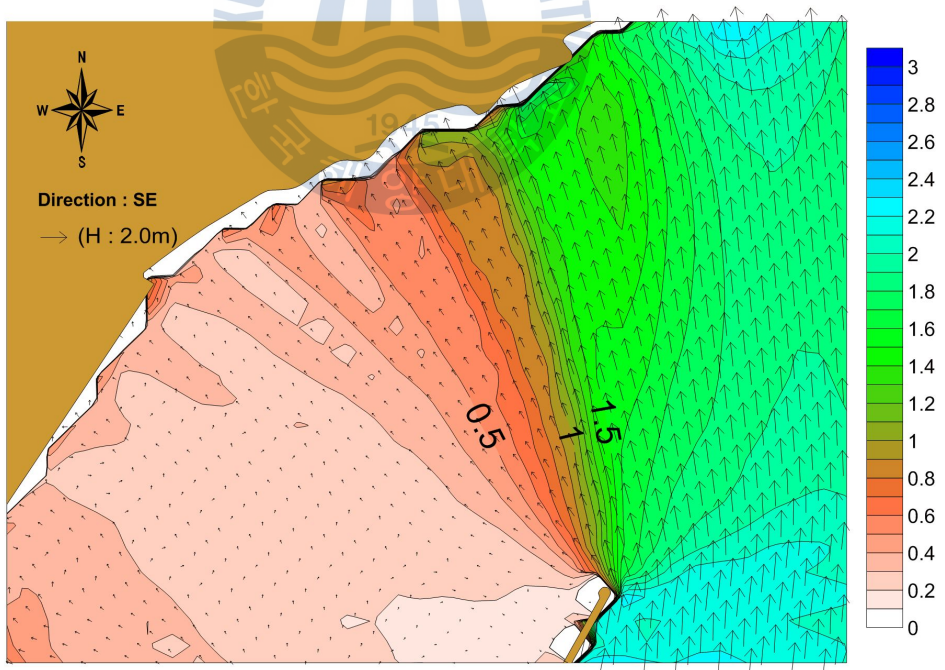


Fig. 4.47 Wave height of north breakwater area(Dir:SE, Case A)

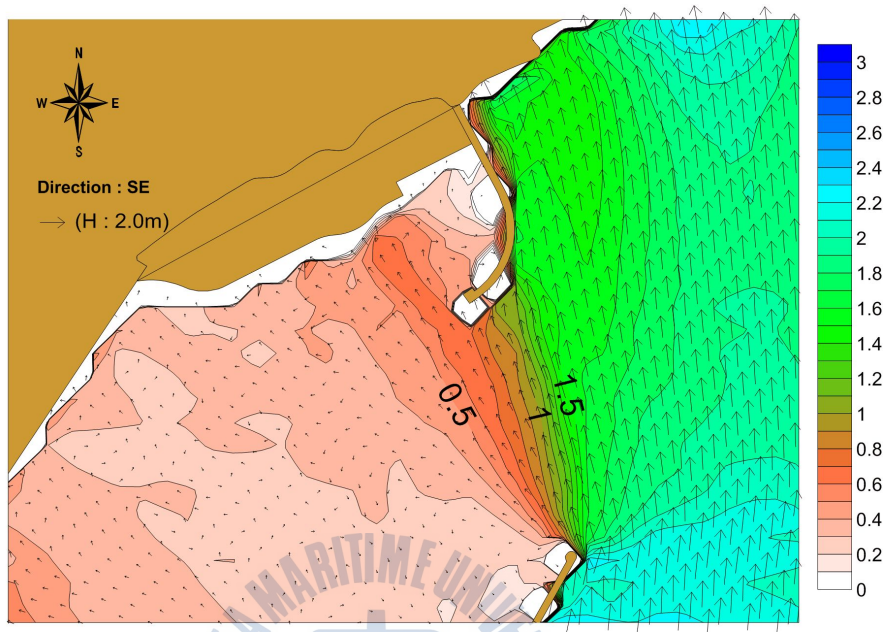


Fig. 4.48 Wave height of north breakwater area(Dir:SE, Case B)

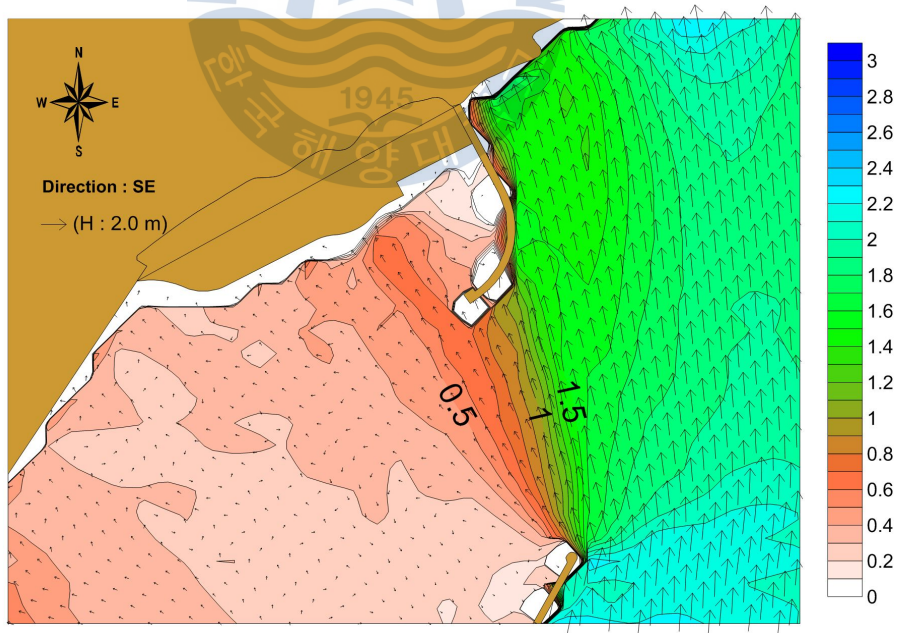


Fig. 4.49 Wave height of north breakwater area(Dir:SE, Case C)

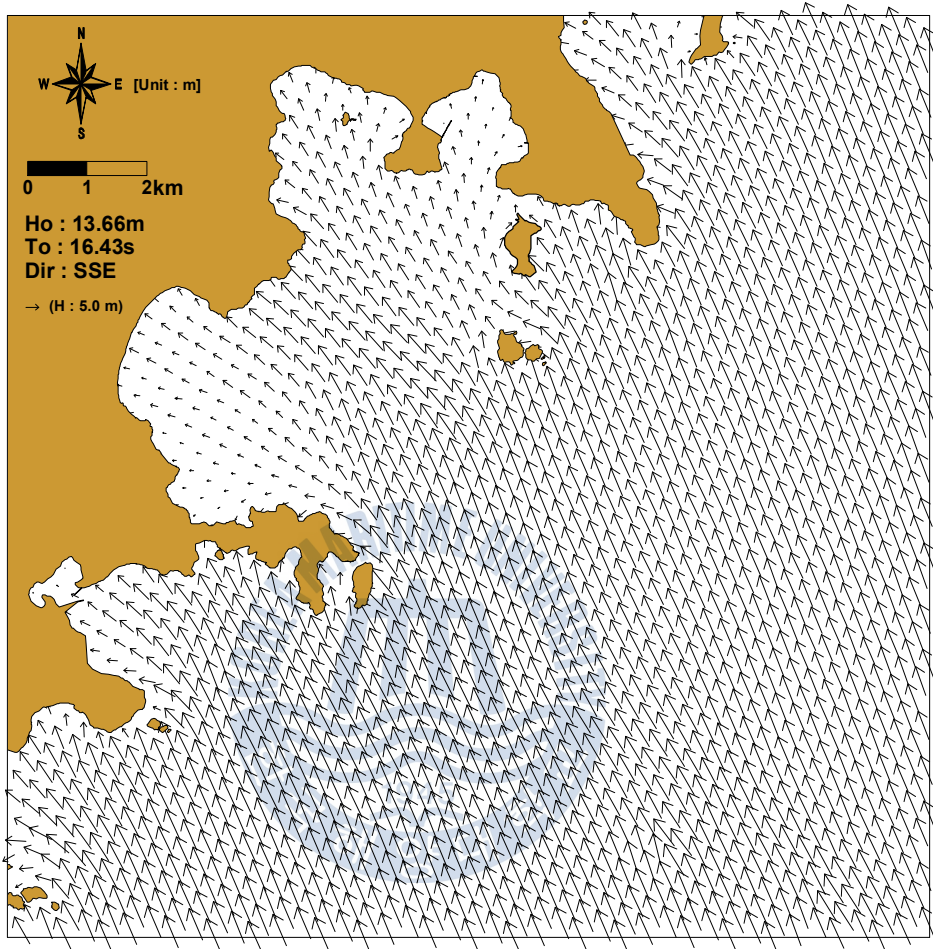


Fig. 4.50 Wave height vector of wide area(Dir:SSE)

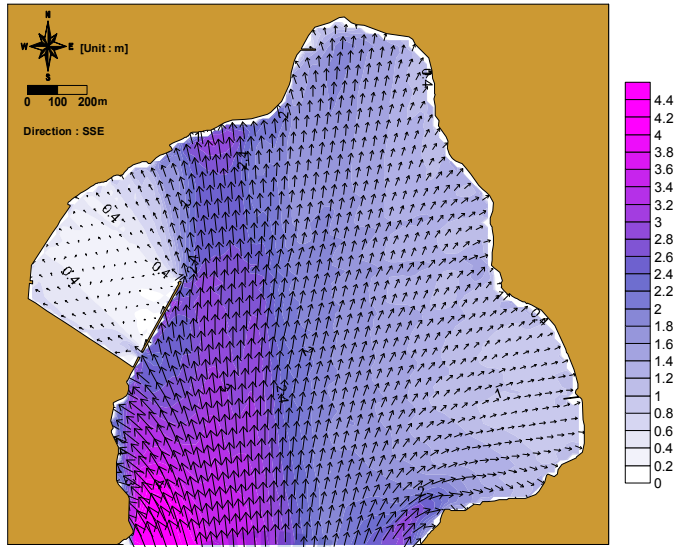


Fig. 4.51 Wave height of narrow area(Dir:SSE, Case A)

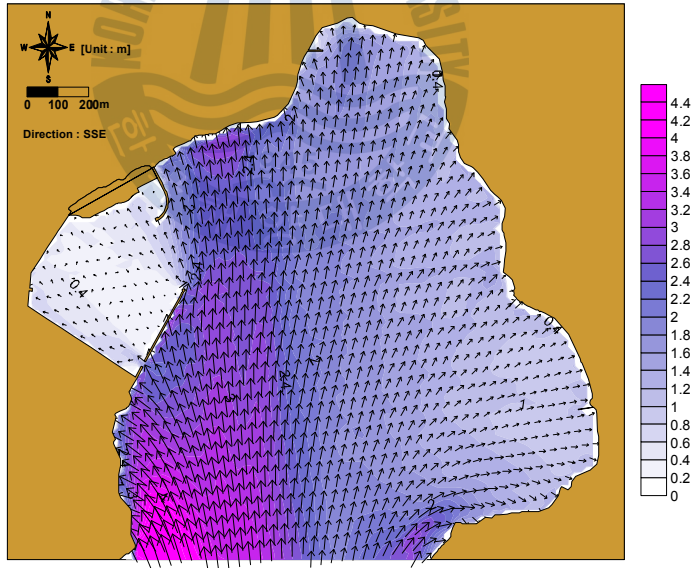


Fig. 4.52 Wave height of narrow area(Dir:SSE, Case B)

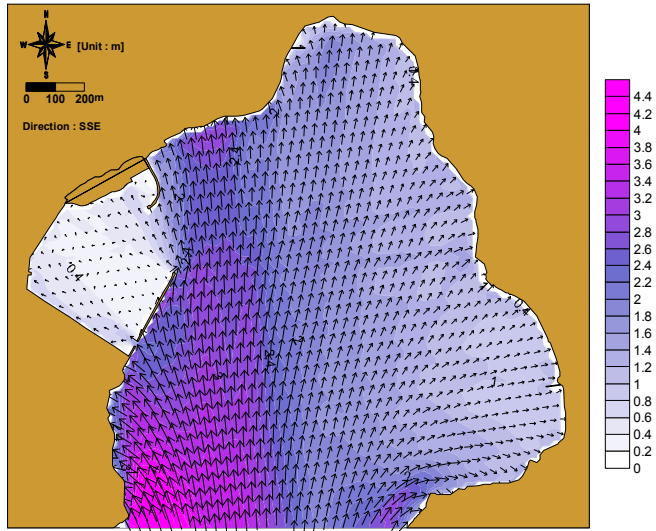


Fig. 4.53 Wave height of narrow area(Dir:SSE, Case C)

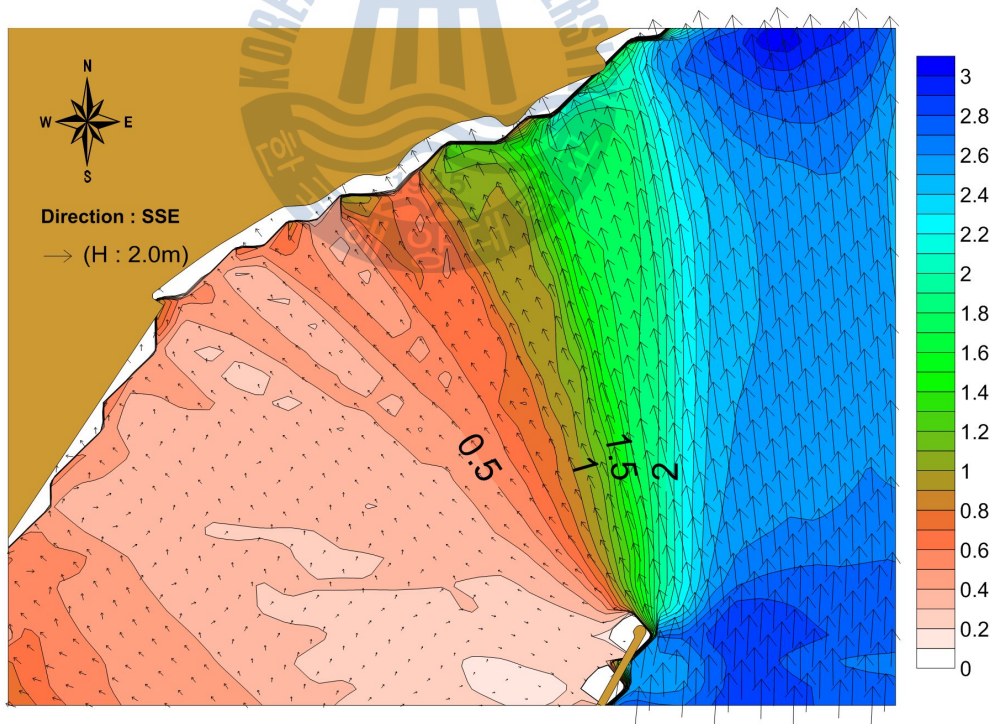


Fig. 4.54 Wave height of north breakwater area(Dir:SSE, Case A)

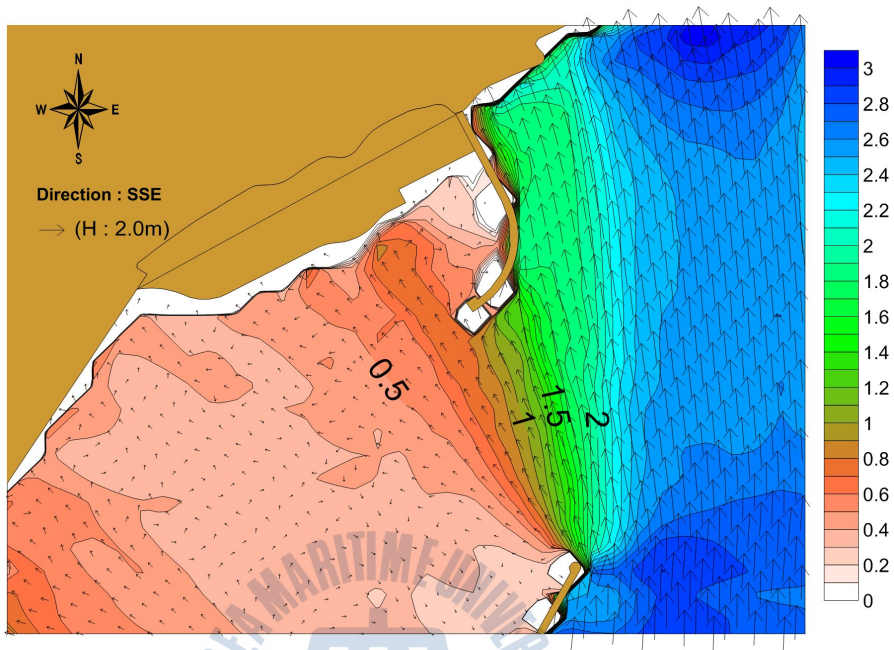


Fig. 4.55 Wave height of north breakwater area(Dir:SSE, Case B)

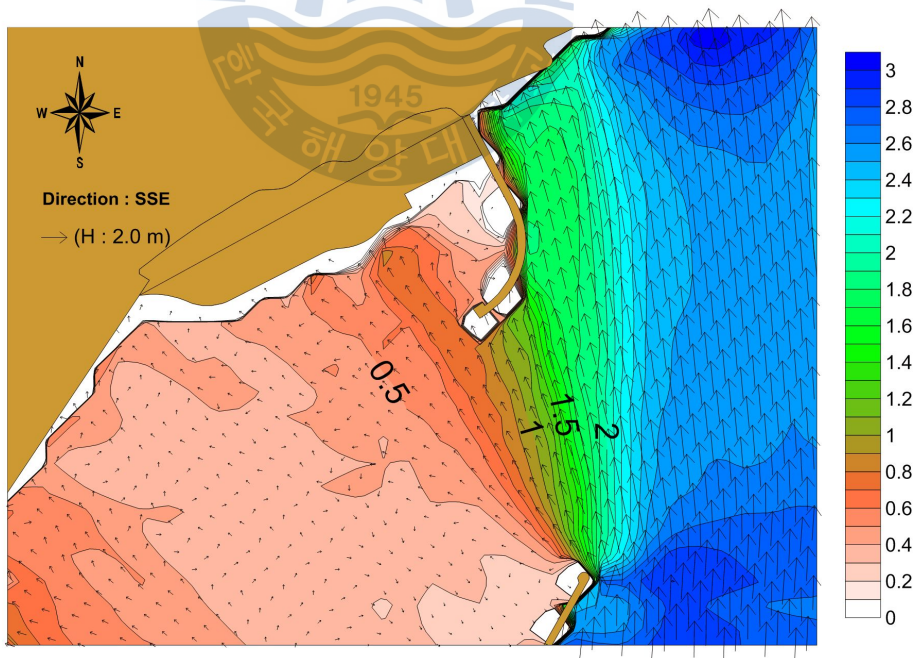


Fig. 4.56 Wave height of north breakwater area(Dir:SSE, Case C)

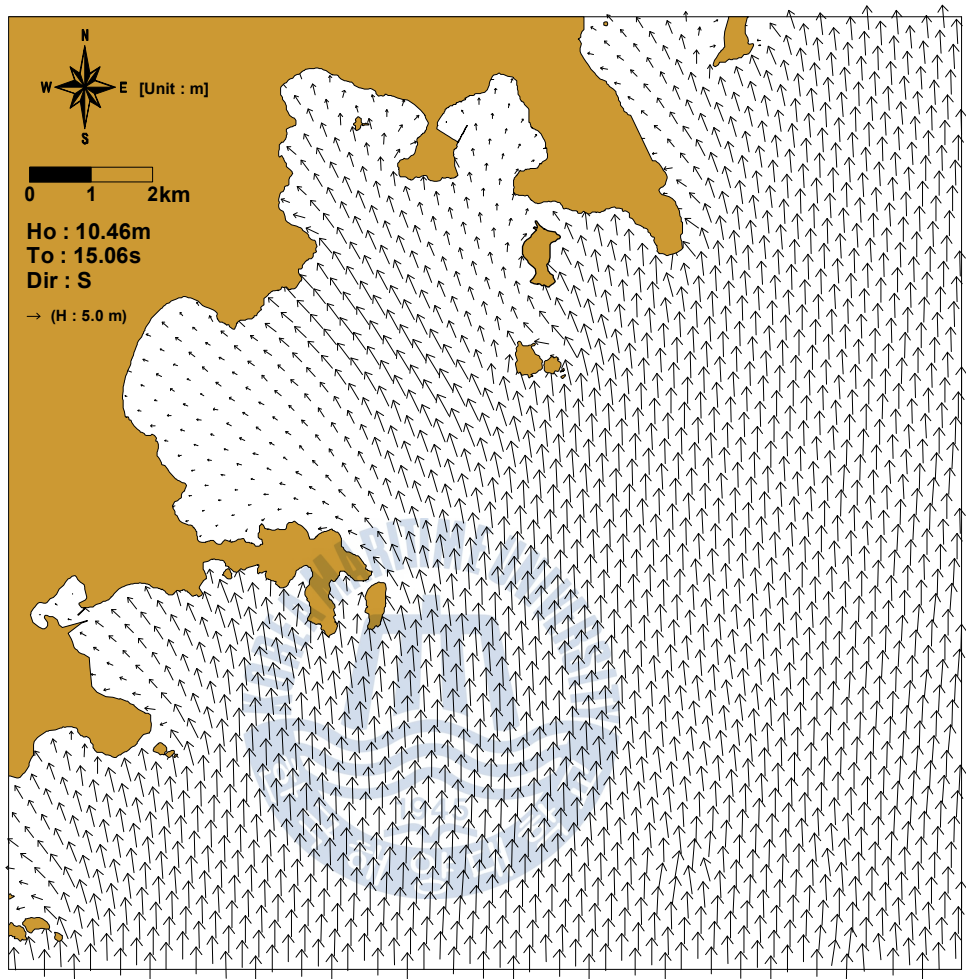


Fig. 4.57 Wave height vector of wide area(Dir:S)

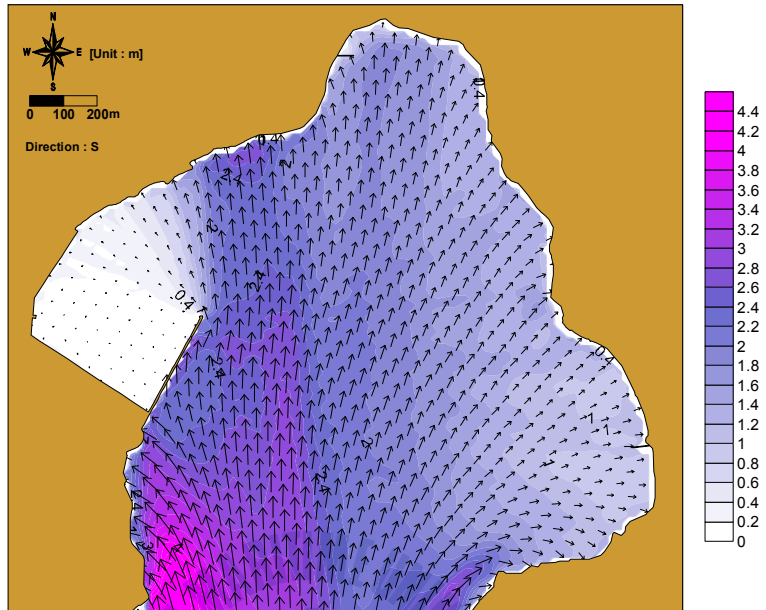


Fig. 4.58 Wave height of narrow area(Dir:S, Case A)

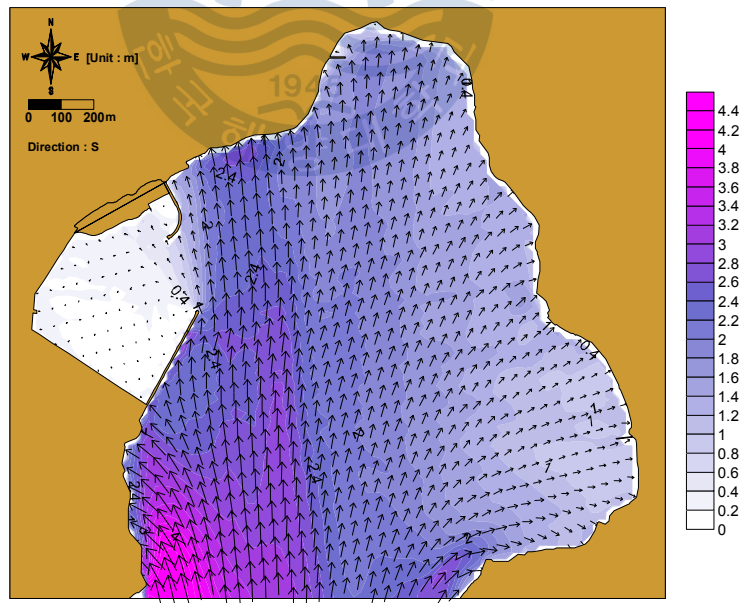


Fig. 4.59 Wave height of narrow area(Dir:S, Case B)



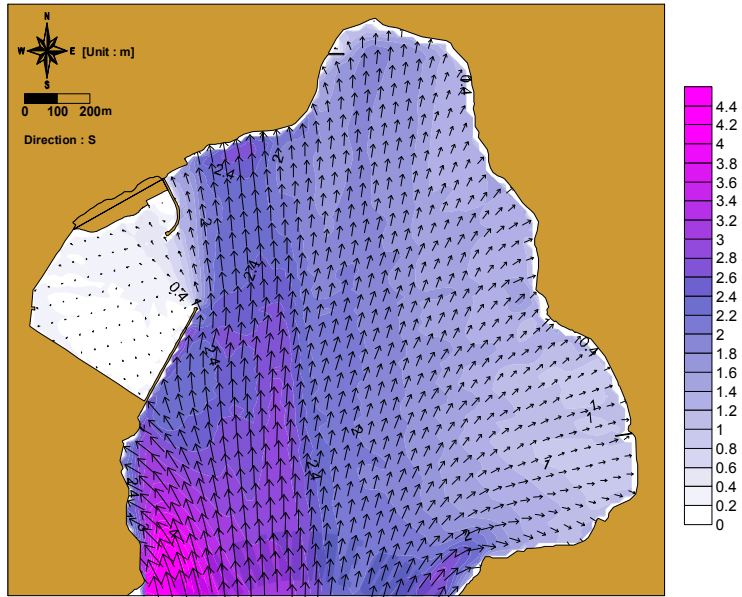


Fig. 4.60 Wave height of narrow area(Dir:S, Case C)

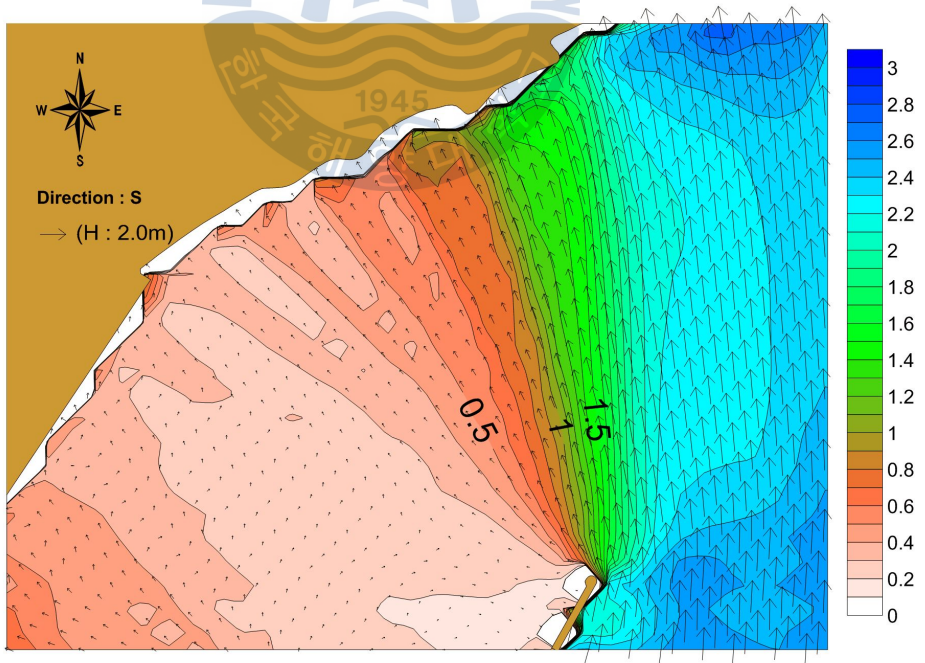


Fig. 4.61 Wave height of north breakwater area(Dir:S, Case A)

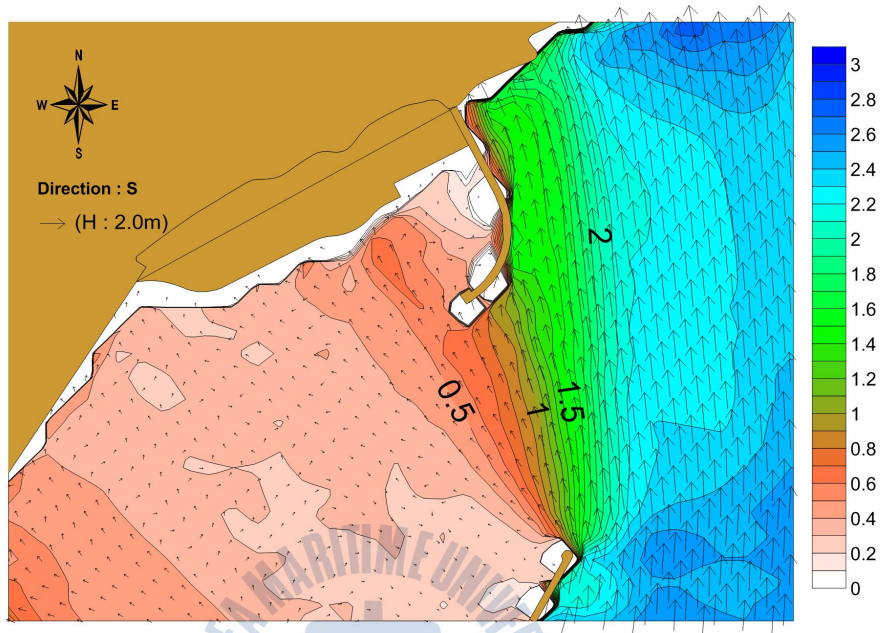


Fig. 4.62 Wave height of north breakwater area(Dir:S, Case B)

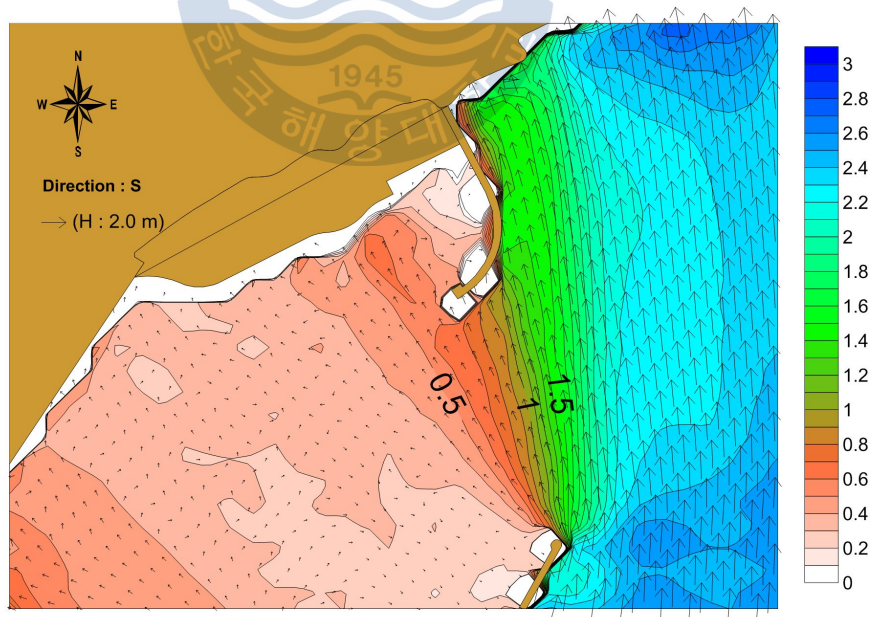


Fig. 4.63 Wave height of north breakwater area(Dir:S, Case C)

## 4.2.2 해수유동 결과

광역모형에 대한 수치실험결과를 최강 창·낙조류 벡터도로 나타내었다. 최강 창조시 유속은 장승포 전면해역으로부터 유입되어 대상해역인 구조라항 전면해역을 거쳐 거제도 남쪽 끝단해역으로 유출되는 양상을 보이고 있다(Fig. 4.64). 최강 낙조시는 이와 반대의 흐름 양상을 보이며, 구조라항 부근에서의 최강 창, 낙조시 최대 유속은 2.5cm/s 정도인 것으로 나타났다(Fig. 4.65).

광역모형에서 추출된 경계조건을 이용하여 구성된 세역모형의 계산 결과를 최강 창·낙조류 벡터도 및 분포도로 나타내었다. 창·낙조류 모두 기존의 남방파제를 중심으로 항내·외를 반복하는 흐름을 보이고 있다.

북방파제를 일반사석식으로 축조할 경우(Case B)와 슬릿형을 이용할 경우(Case C), 커튼식(Case D)으로 실험한 결과를 그림(Fig. 4.70~4.73, Fig. 4.76~4.79, Fig. 4.82~4.85)에 각각 제시하였다. 해수소통이 원활하지 않은 Case B의 경우는 현재상태와 비교하여 흐름 양상의 큰 변화는 없으나 북방파제와 남방파제 사이의 좁아진 수로로 인하여 0.4cm/sec 까지의 유속증가가 나타나고 북방파제를 중심으로 최대 0.6cm/sec의 유속감소가 나타나고 있다(Fig. 4.74, 4.75). 해수소통이 원활한 Case C는 현재상태와 비교하여 흐름 양상의 큰 변화가 없이 친수호안을 중심으로 0.1~0.2cm/sec 이내의 유속감소가 나타나고(Fig. 4.80, 4.81), 해수소통이 일부가능한 Case D의 경우는 북방파제와 남방파제 사이 수로에서 0.3cm/sec까지의 유속증가가 나타나고 북방파제를 중심으로 0.6cm/sec까지의 유속감소가 나타나고 있다(Fig. 4.86, 4.87).

사업시행으로 인한 유속변화는 북방파제 부근에서는 감소를, 북방파제와 남방파제 부근에서는 증가를 나타내고 그 변화는 사업구역에 국한되어 나타나고 있다.

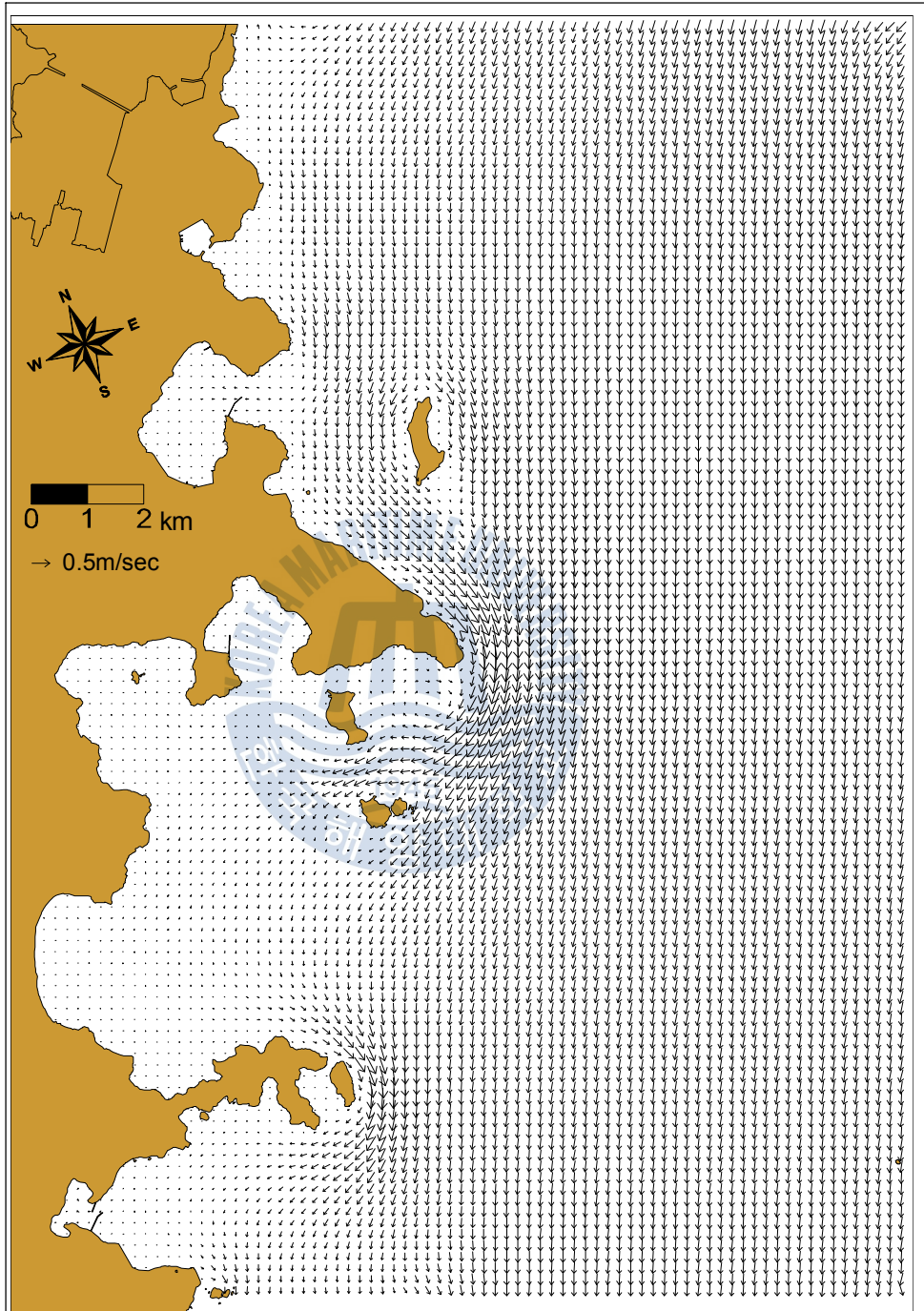


Fig. 4.64 Max. flood current vector of wide area

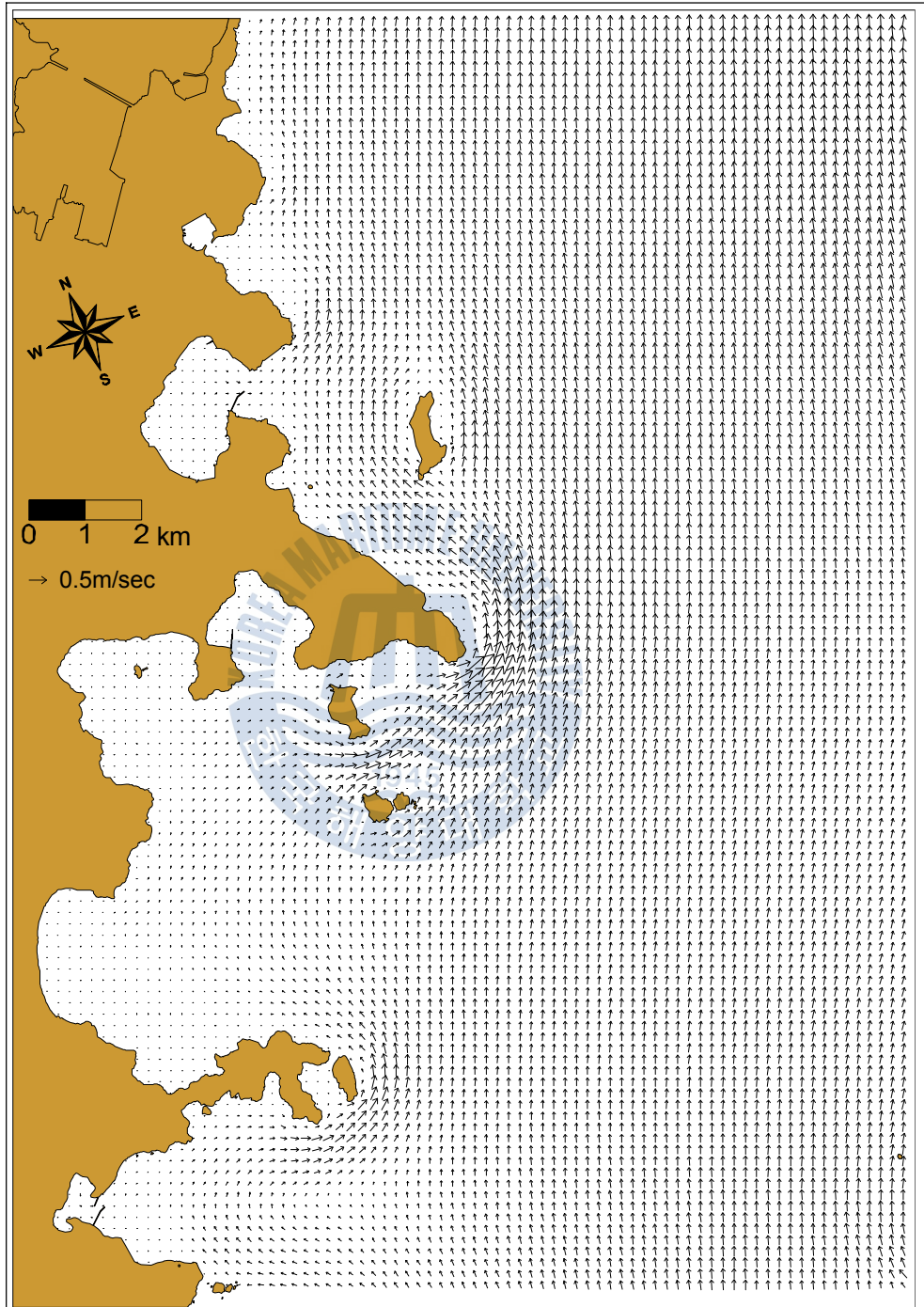


Fig. 4.65 Max. ebb current vector of wide area

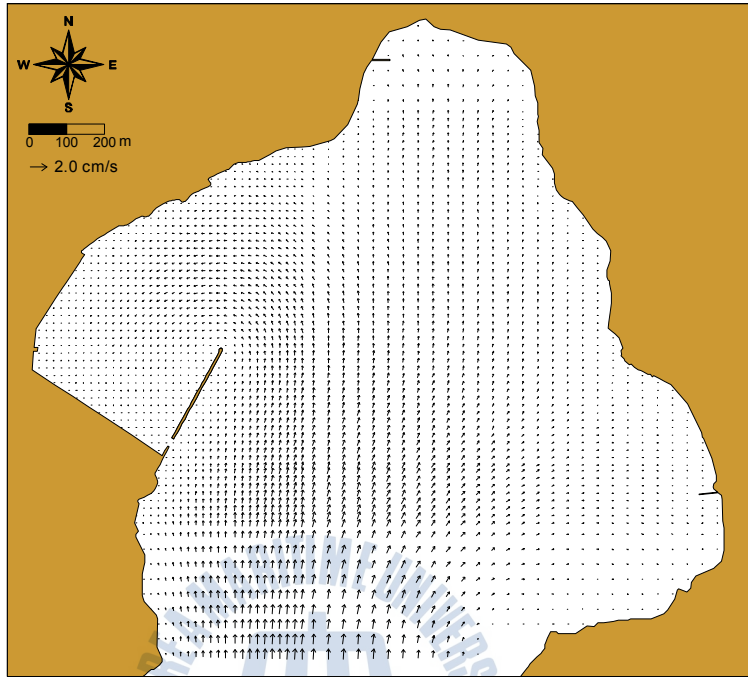


Fig. 4.66 Max. flood current vector of narrow area(Case A)

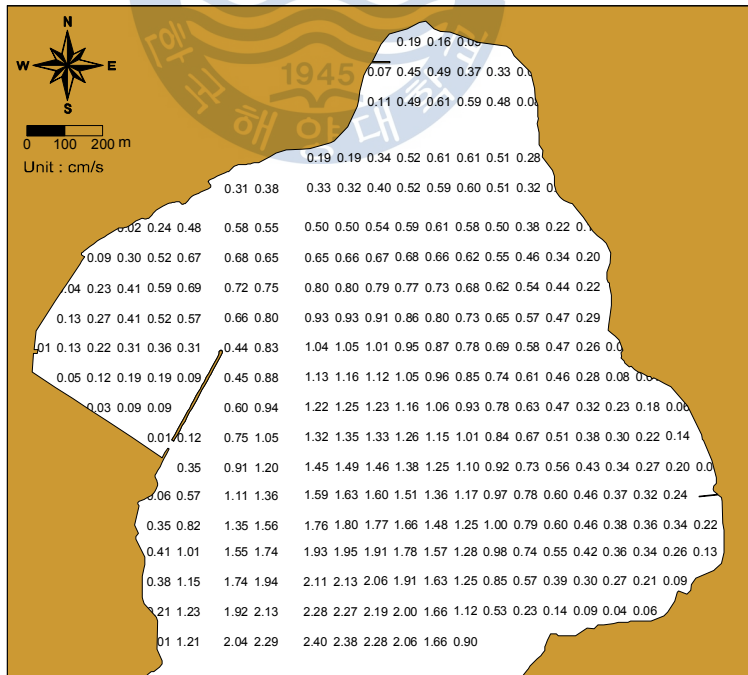


Fig. 4.67 Max. flood current post of narrow area(Case A)

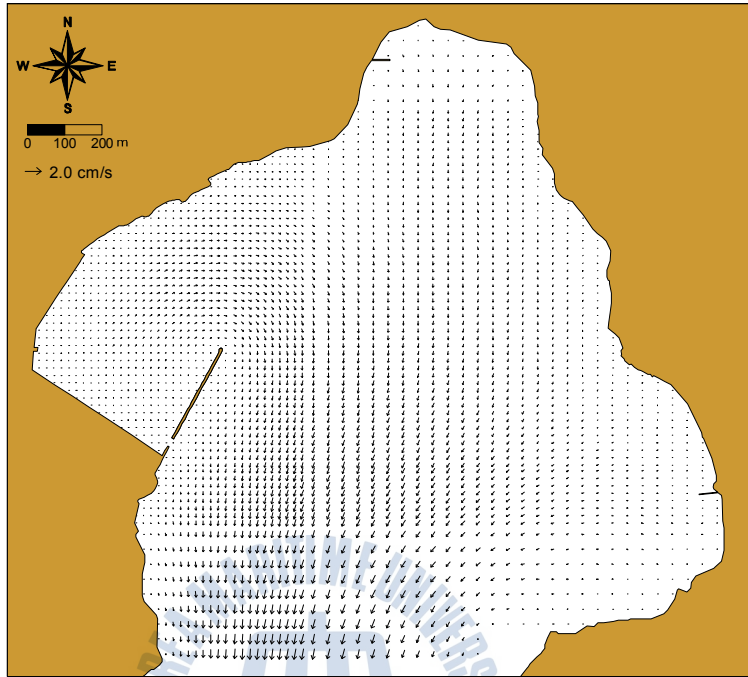


Fig. 4.68 Max. ebb current vector of narrow area(Case A)

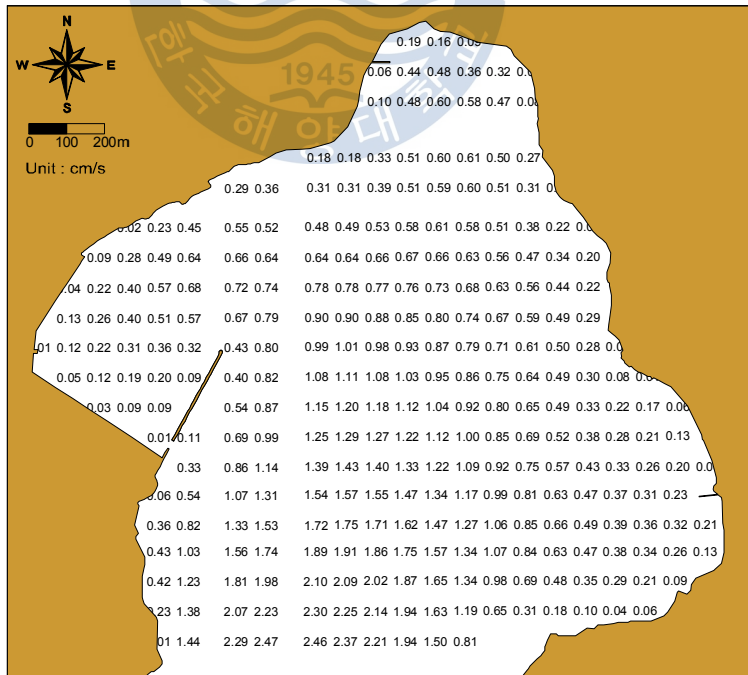


Fig. 4.69 Max. ebb current post of narrow area(Case A)





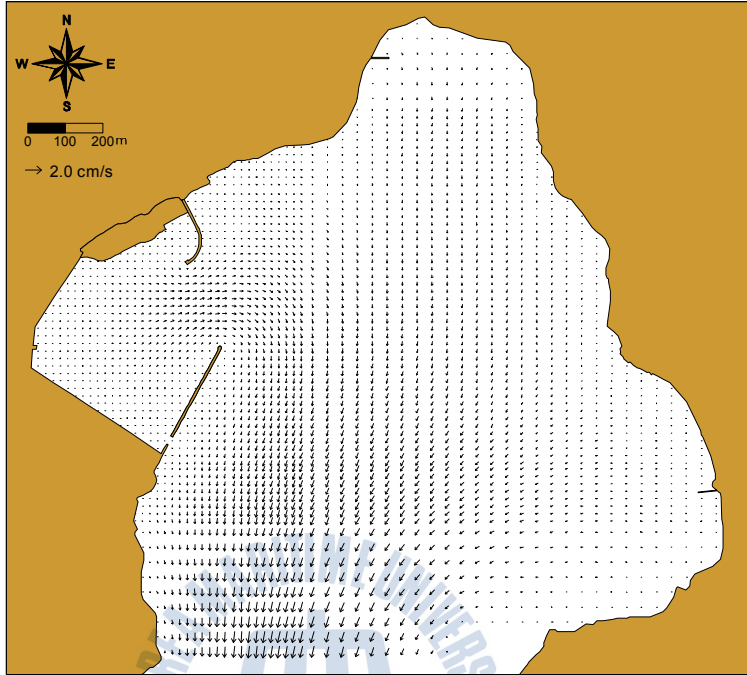


Fig. 4.72 Max. ebb current vector of narrow area(Case B)

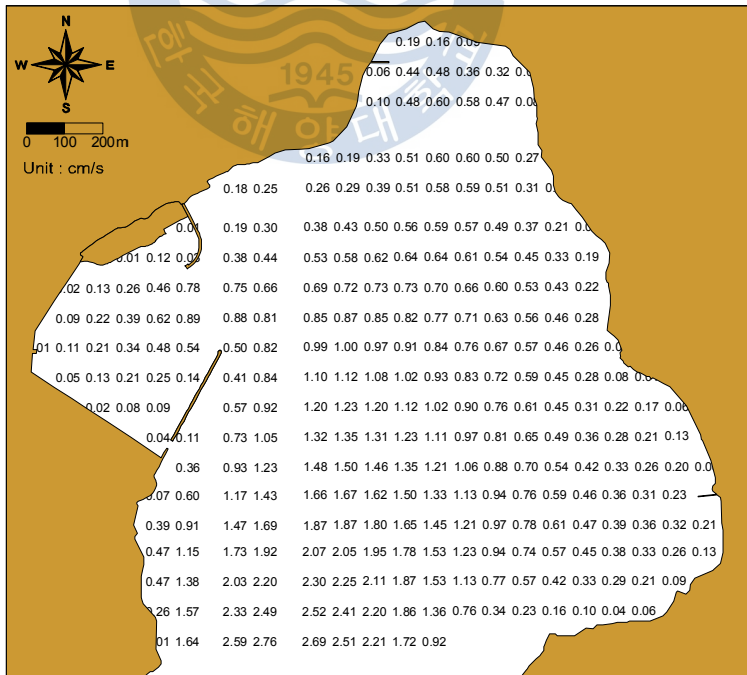


Fig. 4.73 Max. ebb current post of narrow area(Case B)



Fig. 4.74 Comparison of flood current(Case B-Case A)

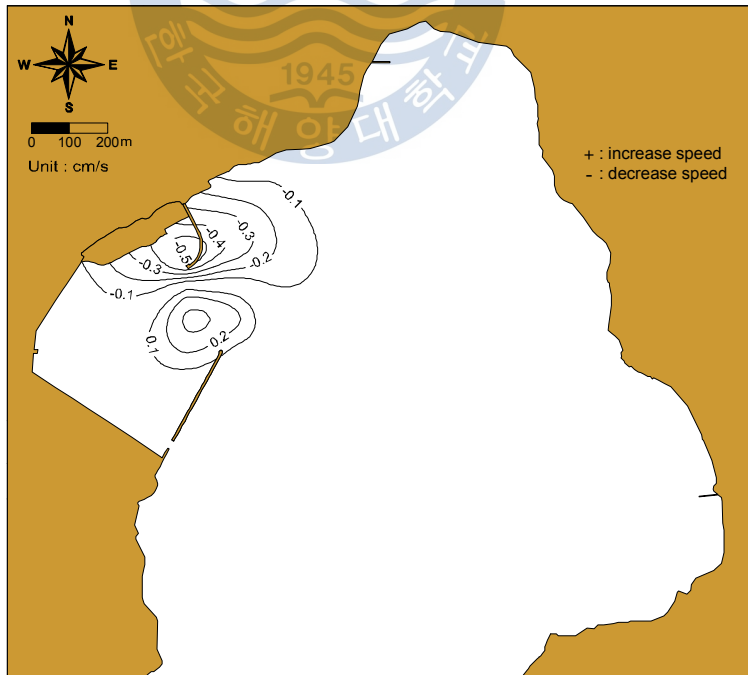


Fig. 4.75 Comparison of ebb current(Case B-Case A)





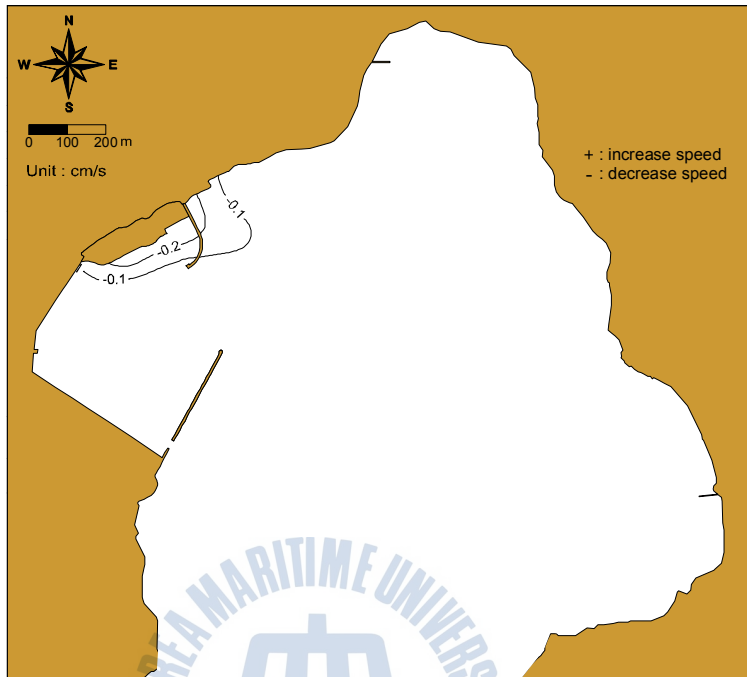


Fig. 4.80 Comparison of flood current(Case C-Case A)



Fig. 4.81 Comparison of ebb current(Case C-Case A)



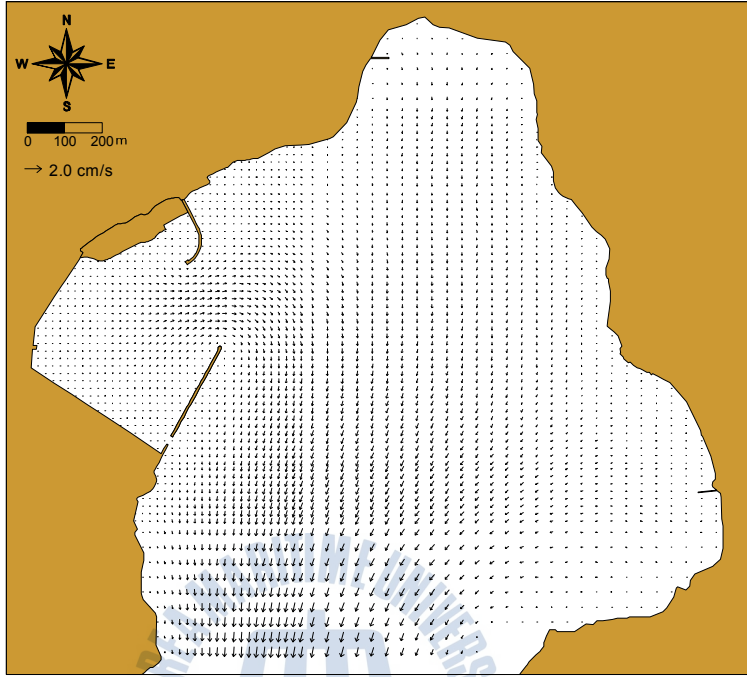


Fig. 4.84 Max. ebb current vector of narrow area(Case D)

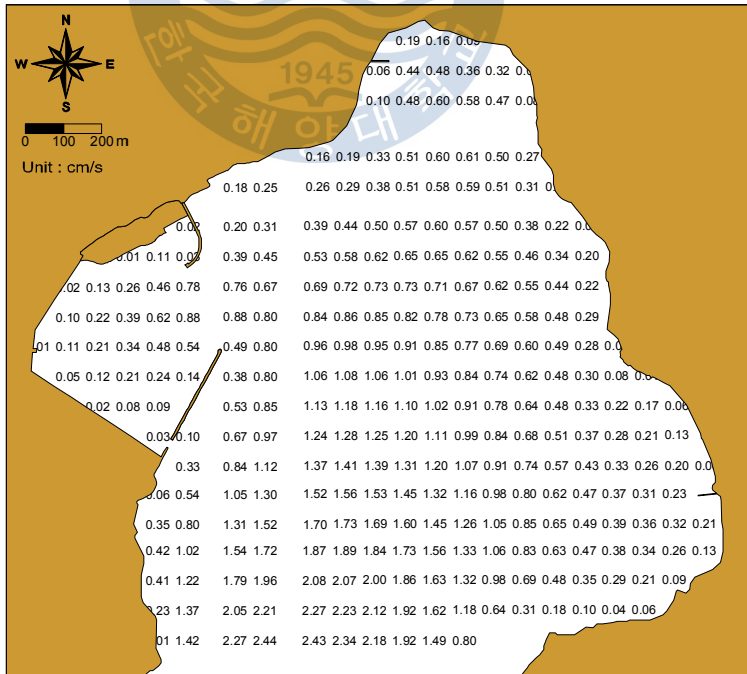


Fig. 4.85 Max. ebb current post of narrow area(Case D)

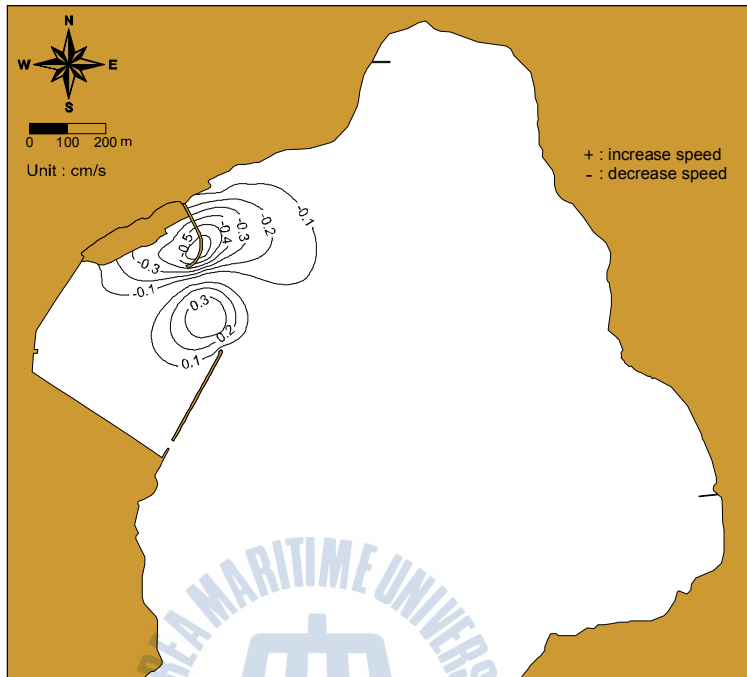


Fig. 4.86 Comparison of flood current(Case D-Case A)

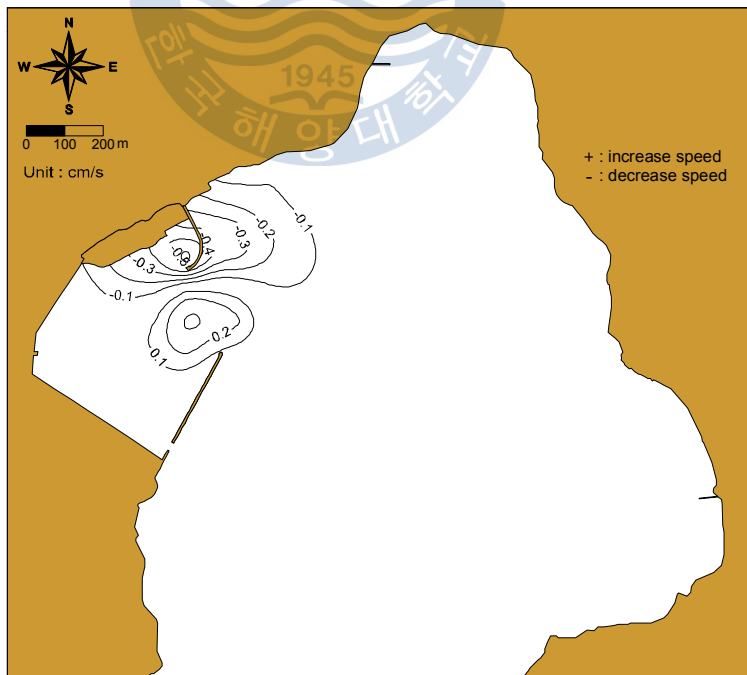


Fig. 4.87 Comparison of ebb current(Case D-Case A)



### 4.2.3 해수순환 결과

항내 초기입자는 Fig. 4.88과 같다. 수치실험결과 현재상태와 각 계획안(북방파제를 일반사석식, 슬릿형과 커튼형으로 축조했을 경우)에 따른 입자거동 특성을 아래의 그림에 결과를 나타내었다(Fig. 4.89~4.104). 15일 이후 해수교환율은 현재상태(Case A)가 89.06%, 북방파제를 경사식 방파제로 축조할 경우(Case B)가 89.51%, 그리고 북방파제를 해수소통이 원활한 슬릿형 방파제로 축조할 경우(Case C)가 90.85%, 북방파제를 해수소통이 일부 가능한 커튼 방파제로 축조할 경우(Case D)가 91.30%로 나타났다(Fig. 4.105). 실험안별 해수교환율은 Case D인 커튼 방파제로 축조했을 경우가 가장 양호하게 나타나고 있으나 수치적인 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 현재상태의 해수교환율이 다소 낮게 나타난 것은 상대적으로 북방파제의 친수공간 영역이 계산에서 제외되었기 때문인 것으로 판단된다. 북방파제의 구조형식에 따른 큰 차이가 나타나지 않은 이유는 유속이 최대 2.5cm/sec로서 작기 때문인 것으로 판단된다.

자세한 해수교환 추이를 분석하면, 대조기에서 중조기로 이어지는 144시간(6일)까지의 기간은 외력(조위, 조류)이 가장 강하여, 입자의 운동이 가장 활발하게 일어나고 있다. 이 기간내에 해수교환이 가장 많이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

해수교환율 평가실험에서, 사용된 오염원은 연속방류형태가 아닌 순간방류 형태이기 때문에 15일 동안 어떠한 오염원의 외부투입이 허용되지 않는 조건하에서 수행되었다. 즉, 실제 현상에서는, 이보다 가혹한 조건하에 놓일 것이기 때문에 해수교환율은 더욱 저하될 것이다. 따라서, 해수소통이 가능한 석문블럭을 이용하여 북방파제를 축조하는 것이 항내 오염방지를 위해 타당할 것으로 판단된다.

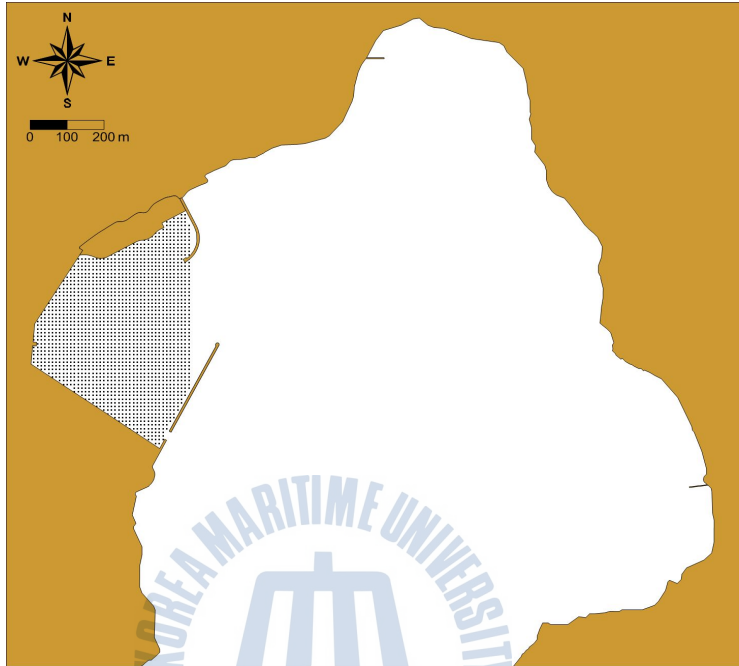


Fig. 4.88 Initial particles injected

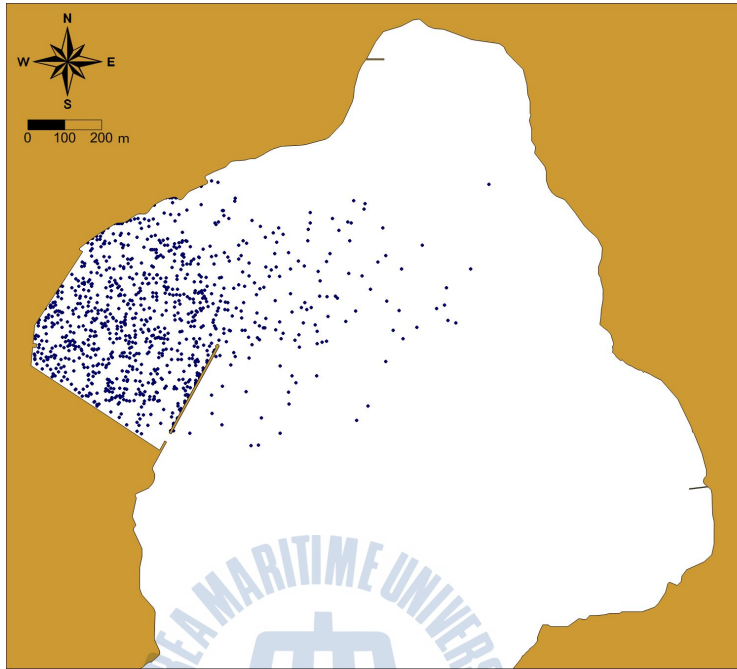


Fig. 4.89 Particle behavior of Case A (24hrs(1day)later)

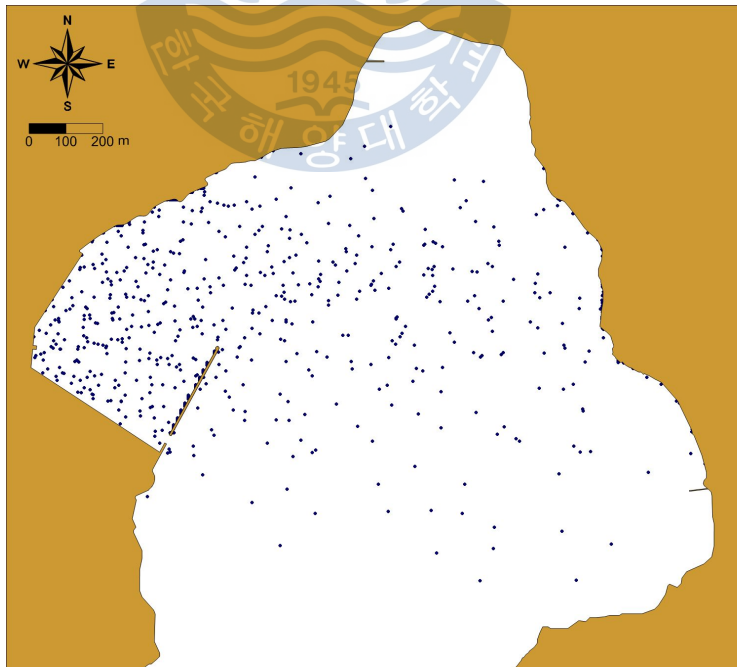


Fig. 4.90 Particle behavior of Case A (144hrs(6day)later)

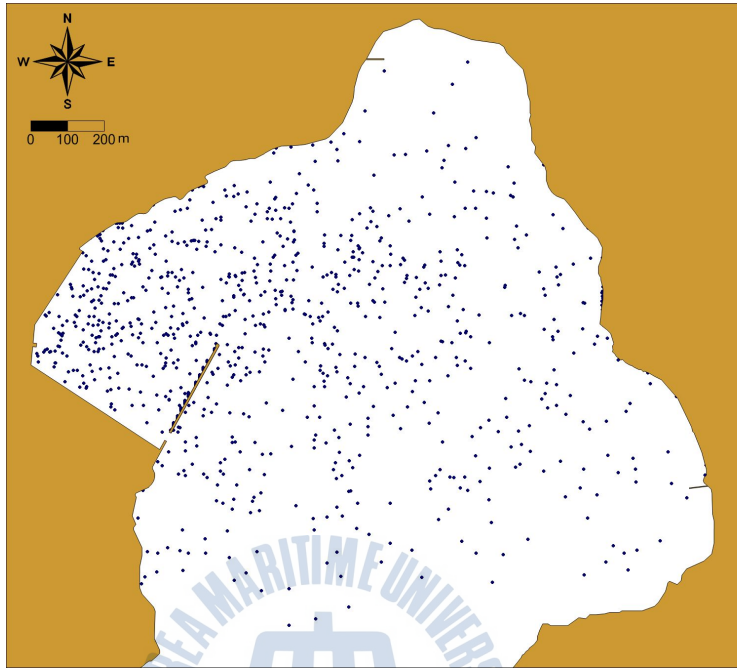


Fig. 4.91 Particle behavior of Case A (264hrs(11day)later)

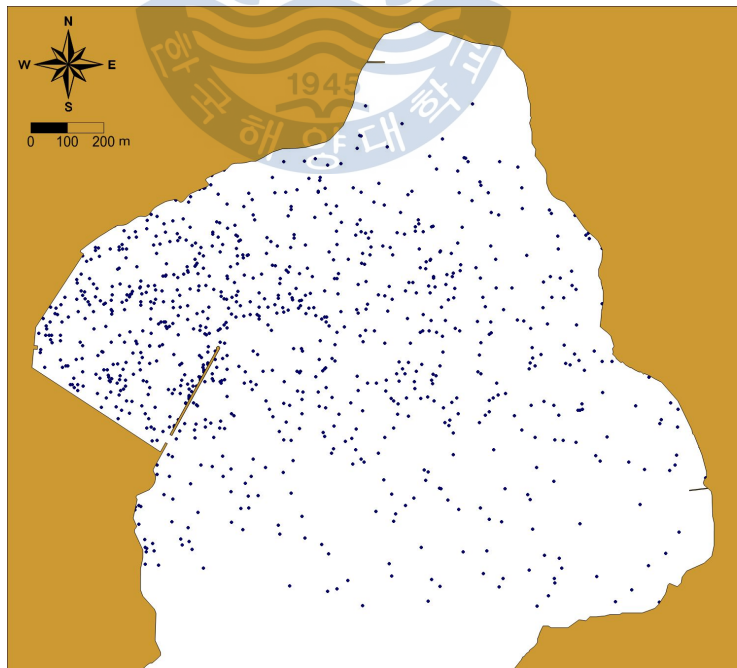


Fig. 4.92 Particle behavior of Case A (360hrs(15day)later)

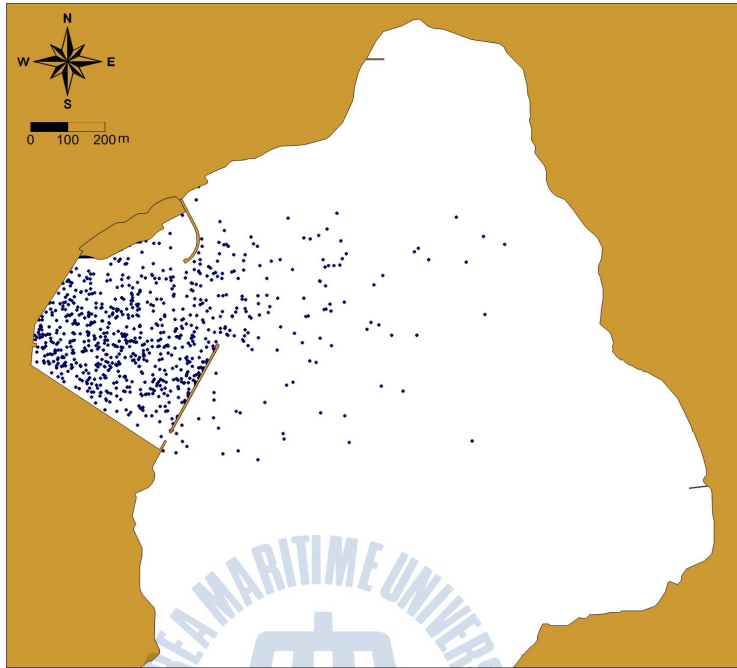


Fig. 4.93 Particle behavior of Case B (24hrs(1day)later)

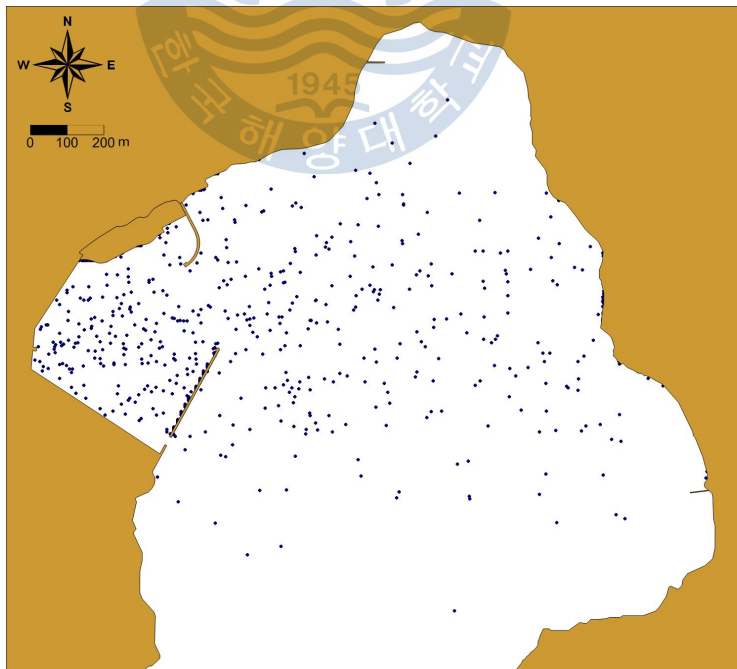


Fig. 4.94 Particle behavior of Case B (144hrs(6day)later)

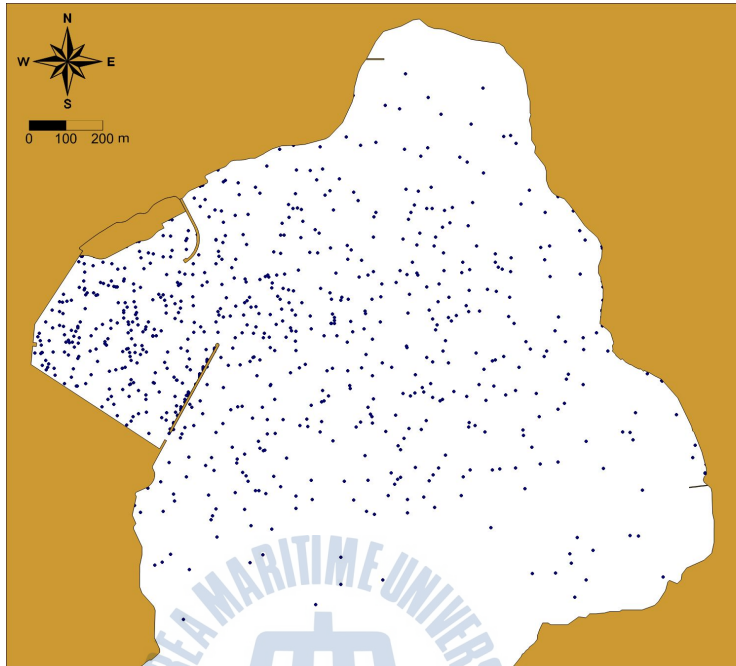


Fig. 4.95 Particle behavior of Case B (264hrs(11day)later)

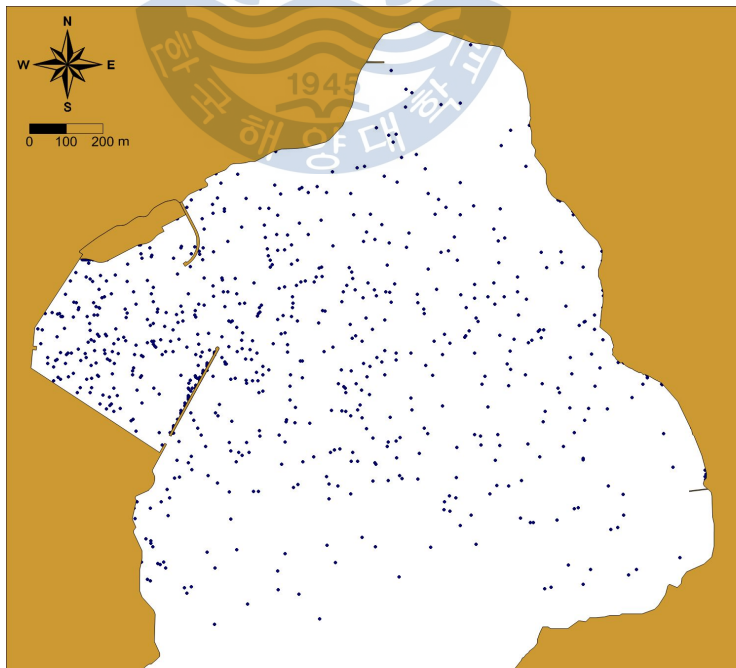


Fig. 4.96 Particle behavior of Case B (360hrs(15day)later)

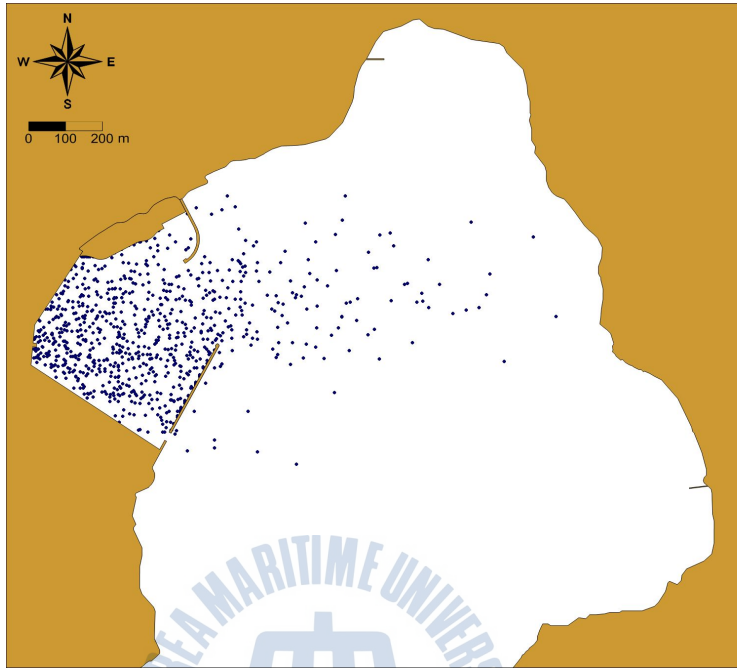


Fig. 4.97 Particle behavior of Case C (24hrs(1day)later)

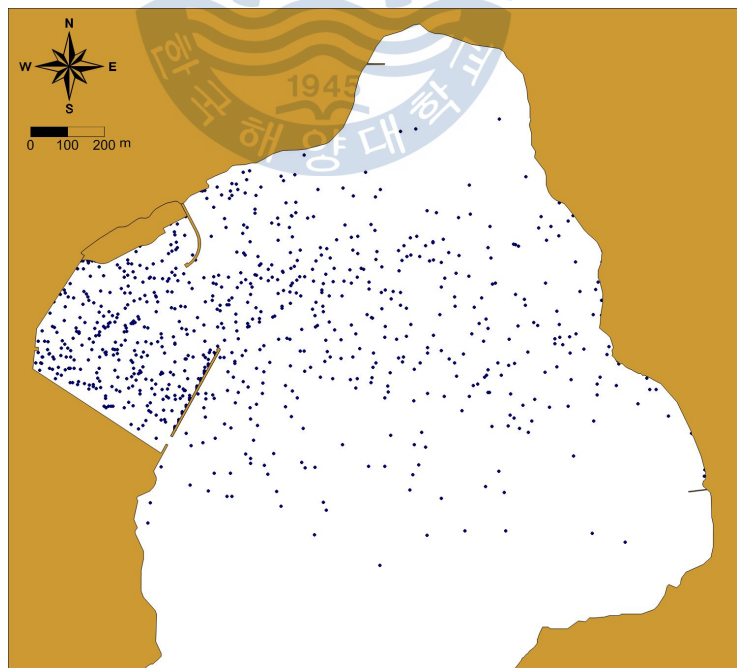


Fig. 4.98 Particle behavior of Case C (144hrs(6day)later)

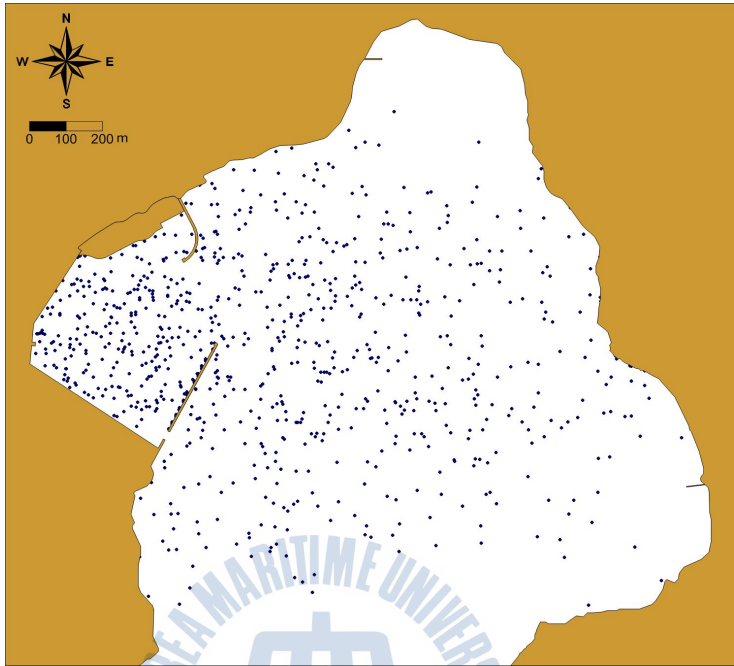


Fig. 4.99 Particle behavior of Case C (264hrs(11day)later)

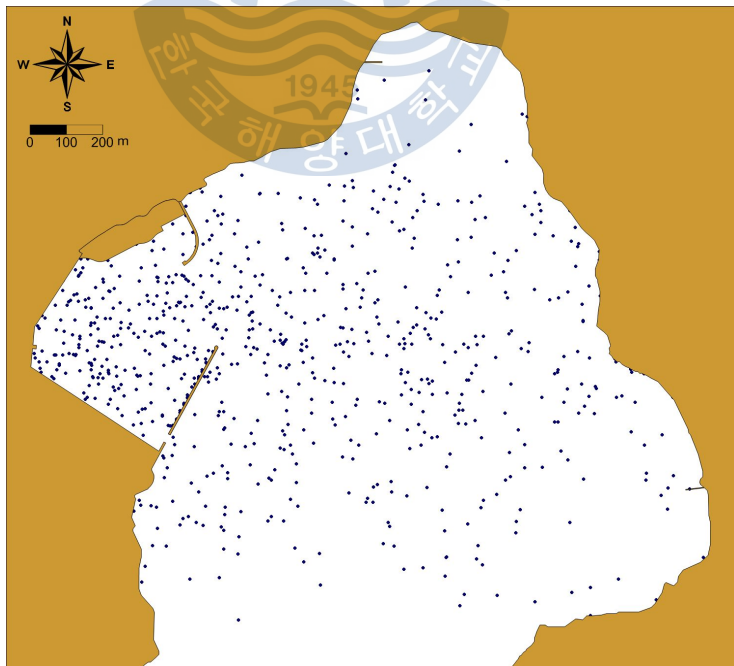


Fig. 4.100 Particle behavior of Case C (360hrs(15day)later)



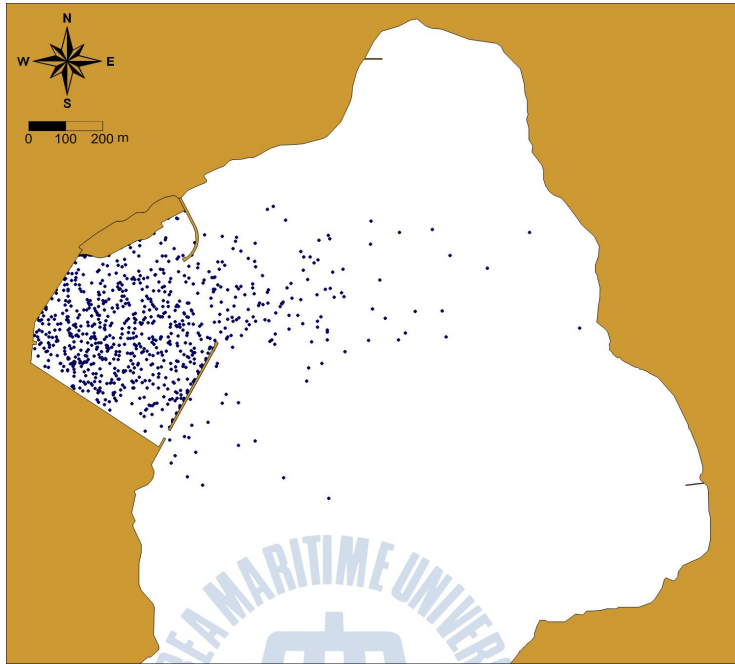


Fig. 4.101 Particle behavior of Case D (24hrs(1day)later)

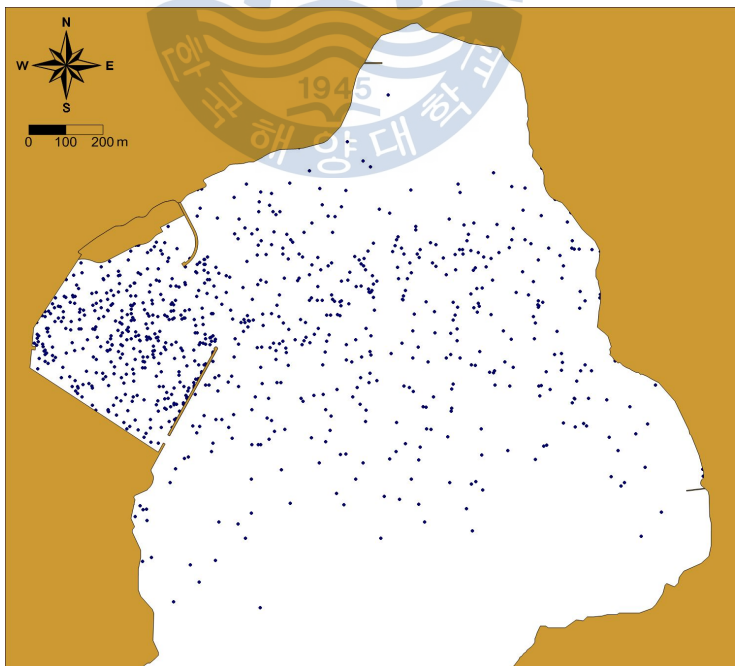


Fig. 4.102 Particle behavior of Case D (144hrs(6day)later)

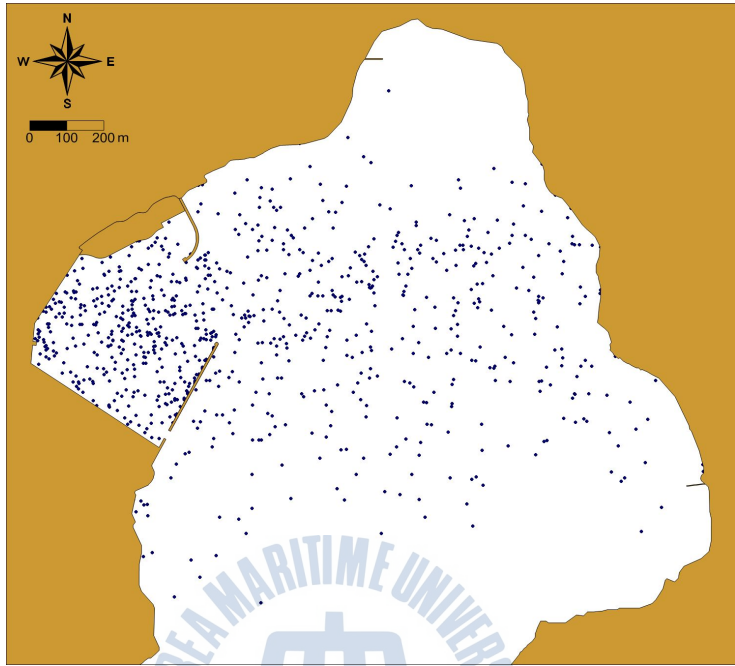


Fig. 4.103 Particle behavior of Case D (264hrs(11day)later)

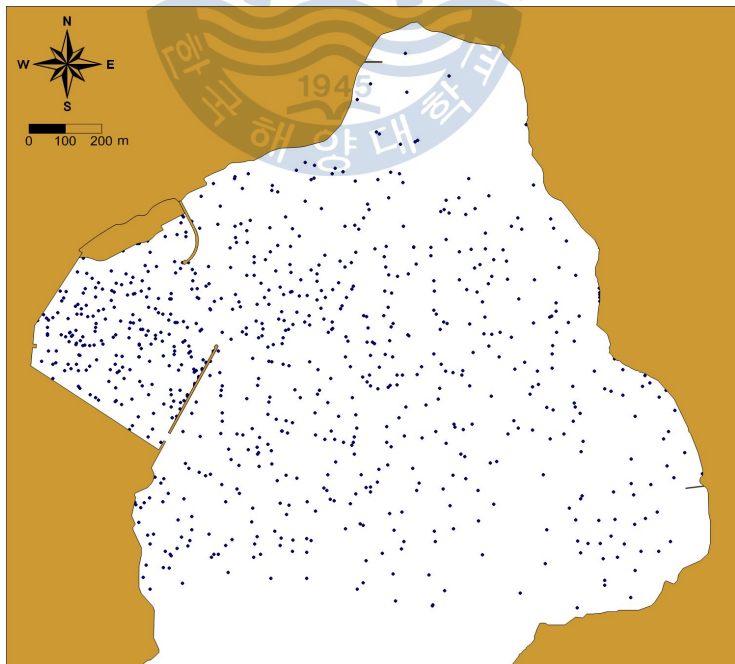


Fig. 4.104 Particle behavior of Case D (360hrs(15day)later)

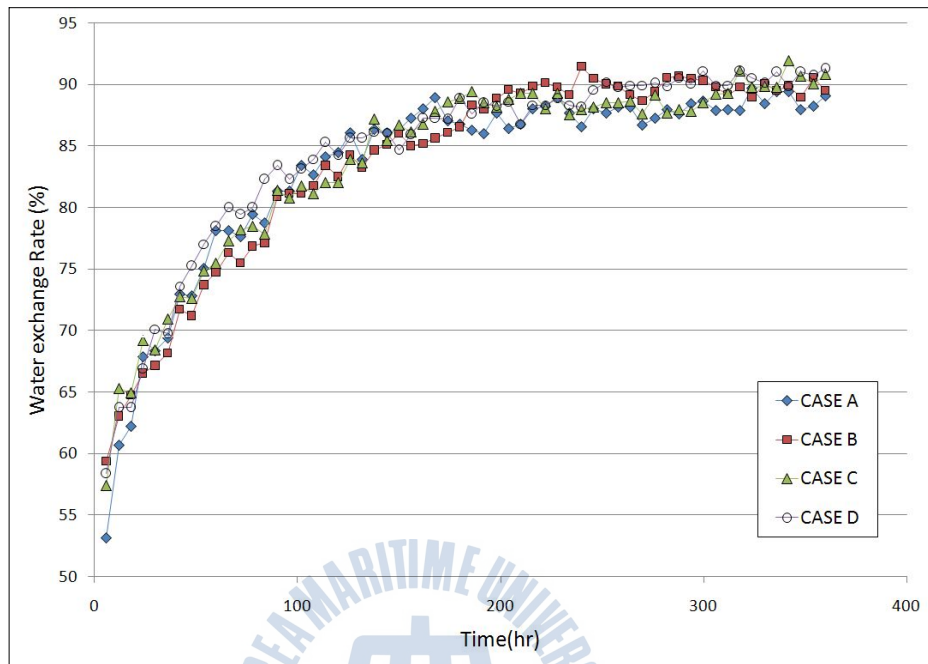
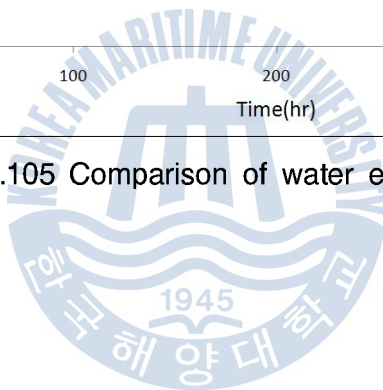


Fig. 4.105 Comparison of water exchange rates



## 제5장 결론

본 연구는 앞서 수행한 수리모형실험에서의 슬릿형 해안구조물의 수리특성 결과를 적용하여 연구 대상해역의 조건에 따라 파랑, 해수유동, 입자추적을 통한 해수교환 수치모형실험을 수행하고 파랑과 흐름에 대한 구조물의 반응을 해석하고자 하였다.

슬릿형 해안구조물은 투과성 구조물로서 파고에 의한 반사의 영향이 줄어들고 일부 파에너지를 향내로 투과하는 특성을 가진다. 이러한 파랑의 전파 및 변형특성을 파악하기 위하여, 먼저 파랑변형 수치모형실험을 수행하였다. 기존의 구조물형식과의 상대적인 수치실험비교를 통하여 향내 정온도와 반사파로 인한 주변해역의 파랑분포 특성을 파악하였다. 이와 동시에, 조석과 같은 장주기파에 대한 향내 해수순환 특성을 파악하기 위하여 해수유동 수치모형실험을 수행하여, 슬릿형 해안구조물이 해수유동에 미치는 영향을 파악하였다. 또한, 상세한 향내 해수순환을 검토하기 위하여 입자추적모형을 도입하여 해수교환율을 평가하였다. 수치실험을 통해 해수순환에 유리한 슬릿형 방파제를 일반 경사식 방파제와 커튼식 방파제와 비교하여 분석하였으며 각각 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 수리모형실험을 통한 슬릿형 방파제의 반사계수(0.35-0.6)와 투과계수(0.25-0.35)의 범위를 구하였으나, 수치실험에서는 이 값 중 우리나라 남해의 소규모 어항에서는 슬릿형을 반영할 경우 반사계수는 0.53 투과계수는 0.35로 적용할 수 있는 것으로 분석하였다.
- 2) 파랑과 흐름에 대한 현장관측을 통해 설리항의 방파제 및 호안건설에 대한 평가를 수행하였으며, 설계파랑 및 현장관측조건에 대한 수치실험으로

장래 설리항 방파제 및 호안 확장시 기본자료로 활용할 수 있게 하였다.

- 3) 설리항에서 파랑변형 수치실험을 통해 방파제 건설 전과 건설 후에 대해서 방파제 형식이 직립식인 경우와 슬릿형인 경우로 나누어 실험하였다. 실험결과 외해에는 방파제의 반사파로 인해 파고가 약간 증가하였다. 항내에는 직립식방파제보다 슬릿형방파제의 경우 약간 파고가 증가하였으나 정온도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한 방파제 건설로 인한 주변지역의 파랑의 영향은 거의 없는 것으로 해석되었다.
- 4) 구조라항에서 파랑변형 수치실험결과를 방파제 형식에 따라 비교하였다. 비교결과, 항내 경사식이 슬릿형보다 0.04m 정도 더 높게 나타났다. 항내에 들어오는 파고가 낮아서 경사식과 슬릿형에 따른 큰 변화는 나타나지 않았으나 투과의 특성이 있는 슬릿형 방파제보다 오히려 경사식 방파제의 경우 항내 파고가 약간 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 항내 파고가 육지에서 반사되어 들어오는 파의 영향을 받은 것으로 항내에서 다중 반사된 파를 슬릿형 방파제에서는 투과가 이루어져 낮아지는 것으로 해석된다.
- 5) 해수유동실험 결과, 해수소통이 원활하지 않은 경사식 방파제의 경우는 현재상태와 비교하여 흐름 양상의 큰 변화는 없으나 북방파제와 남방파제 사이의 좁아진 수로로 인하여 0.4cm/sec 까지의 유속증가가 나타나고 북방파제를 중심으로 최대 0.6cm/sec의 유속감소를 보였다. 해수소통이 원활한 슬릿형 방파제는 현재상태와 비교하여 흐름 양상의 큰 변화가 없이 친수호안을 중심으로 0.1~0.2cm/sec 이내의 유속감소가 나타나고, 해수소통이 일부가능한 커튼식 방파제의 경우는 북방파제와 남방파제 사이 수로에서 0.3cm/sec까지로 유속이 증가하였으며, 북방파제를 중심으로 0.6cm/sec 까지의 유속감소를 보였다. 따라서 경사식과 커튼식 방파제의 경우는 유속

단절로 인하여 항내 유속이 변화함을 알 수 있는 반면 투과가 가능한 슬릿형 방파제를 설치했을 경우는 항내 유속이 설치전과 비슷하게 유지되기 때문에 실제 해수순환에 유리한 구조형식인 것으로 나타났다.

6) 해수교환율실험 결과, 현재상태가 89.06%, 북방파제를 경사식 방파제로 축조할 경우가 89.51%, 그리고 북방파제를 해수소통이 원활한 슬릿형 방파제로 축조할 경우가 90.85%, 북방파제를 해수소통이 일부 가능한 커튼 방파제로 축조할 경우가 91.30%로 나타났다. 북방파제의 구조형식에 따른 큰 차이가 나타나지 않은 이유는 유속이 최대 2.5cm/sec로서 작기 때문인 것으로 판단된다. 사용된 오염원은 연속방류형태가 아닌 순간방류형태이기 때문에 15일 동안 어떠한 오염원의 외부투입이 허용되지 않는 조건하에서 수행되었다. 즉, 실제 현상에서는 이보다 가혹한 조건하에 놓일 것이기 때문에 해수교환율은 더욱 저하될 것이기 때문에 해수소통이 가능한 슬릿형 블럭을 이용한 북방파제를 축조하는 것이 항내 오염방지를 위해 타당할 것으로 판단된다.

7) 슬릿형구조물이 축조된 해역에 대한 태풍 및 폭풍에 대한 반응을 현장에서 조사한 결과 안정성은 물론 파랑저감 및 월파 감소에 탁월하며, 해수교환에 기여하고 있음을 확인하였다.

이상의 결과는 슬릿형 구조물이 이미 적용된 연안이나 앞으로 계획하게 되는 대상해역에 중요한 자료로 이용될 수 있으며, 해수유동과 파랑 증첩으로 인한 대상구조물 건설 전후에 대한 연구를 후속연구로 진행할 예정이다. 특히, 구조물 설치 대상해역에서 건설 이후 파랑 및 흐름관측은 후속 연구와 장래 슬릿형 방파제, 호안의 확장 적용에 중요한 계기가 될 것으로 본다.

## 참 고 문 헌

강시환(2009), 파랑-해류 상호작용에 의한 천해 설계파랑 변형, 한국해양해양공학회 논문집 제21권 제4호, pp. 308-315.

강태순(1999), 3차원 해양순환모델을 이용한 남해동부해역 해수유동 특성연구, 부경대학교 공학석사학위논문.

기상청(1976~2005), 기상연보.

김명원(2006), POM을 이용한 섬진강 하구역의 해수유동 특성, 전남대학교 석사학위논문.

남기대(2010), 실린더형 슬릿 방파제의 개발을 위한 실험적 해석, 한국해양대학교 석사학위논문.

류황진, 홍기용, 신승호, 송무석, 김도영(2004), SWAN 모델을 이용한 제주해역 장기 파랑분포 특성 연구, 한국해양환경공학회지 제7권 제3호 pp. 137-145.

부경대학교 해양산업개발연구소(2010), 석문소파블록의 단면 안정성 수리모형실험.

박상길, 이중우, 남기대, 김필성(2009), 실린더 슬릿형 소파블록 방파제의 실험역 적용을 위한 수치실험분석, 한국항해항만학회 춘계학술대회 논문집 pp. 158-160.

박상길, 이중우, 강석진, 김석문, 길문모(2010), 슬릿형 해안구조물의 현장 적용성 분석, 한국항해항만학회 춘계학술대회 논문집 pp. 231-233.

서일원, 정태성(1999), 2차원 Random-Walk모형을 이용한 자연하천의 횡확산 해석, 한국수자원학회논문집, 제32권, 제1호, 1999, pp. 61-70.

신민철(2005), 천해역에서 SWAN 모형의 적용성 검토, 공학석사 학위 논문.

신민철(2005), 친환경 커튼식 방파제의 수리특성 연구, 국민대학교 석사학위논문.

이훈(2006), 군산-장항항 해역에서 파랑 예측 수치모형의 분석, 한국해양대학교 석사학위논문.

윤은찬(2003), 낙동강 하천플룸의 3차원 혼합거동 특성 해석, 부경대학교 공학석사학위논문.

주귀홍(2002), 낙동강 하천유출수의 3차원 거동 해석, 부경대학교 공학박사학위논문.

한국해양연구원(2005), 전해역 심해설계과 추정 보고서 II.

한재명, 이종석, 오영민, 김춘호, 김광진(2006), 자연 친화형 소파블럭의 개발, 대한토목학회 정기학술대회 pp. 609-612.

허천우, 김병국(2002), GIS와 해수유동모델 POM과의 연계 방안 연구, 한국GIS학회 춘계학술대회논문집 pp. 61-68.



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.

Blumberg, A.F. (1977), Numerical Tidal Model of Chesapeake Bay, J. Hydraulic Division, Vol.103, pp.1-10.

Blumberg, A.F. and G.E. Mellor (1983), A Description of A Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, American Geophysical Union (ed. Heaps, N.S.), Washington, D.C., pp.1-16.

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 RIS,R. (1996), The SWAN wave model for shallow water, In Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando,USA, pp.668-676.

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.

Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. *Bound.-layer Meteor.*, 6, pp.107-127.

Holthuijsen, L.H., Booij, N., and T.H.C. Herbers (1989), A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engineering*, No.13, pp.23-54.

Jiang, J., and D.B. Fissel (2008), Data on Large Waves and Winds for Victoria International Marina, Technical Report for Victoria International Marina Authority by ASL Environmental Sciences Inc., Canada, 38p.

Kinzelbach, R. 1986. First record of the Leatherback Turtle, *Dermochelys coriacea*, from Jordan. *Zoology in the Middle East*, pp.1-87.

Kourafalou, V.H., L.Y. Oey, D.W. John, and N.L. Thomas (1996), The fate of river discharge on the continental shelf, 2, Transport of coastal low-salinity water under realistic wind and tidal forcing. *J. of Geophys. Res.*, Vol.101, No.C2, pp.3435-3455.

Lee, J.W., Park, S.G., Kim, S.M., and Kang, S.J. (2009), Design and Construction of the Cylindrical Slit Type Shore Structures, Asia Navigation Conference 2009, Shizuoka, Japan, Japan Institute Navigation, pp.292-298.

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.

Oey, L.Y., Mellor, G.L. and Hires, R.L. (1985), A three dimensional simulation of the Hudson Raritan estuary. 1, Description of the model and model simulation. *J. of Phys. Oceanogr.*, Vol.15, pp.1676-1692.

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.

Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.*, 91, pp.99-164.

Thompson, R.O.R.Y., 1983. Low Pass filter to suppress inertial and tidal frequencies. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, pp.1077-1083.

Vincent, C.L., J.M. Smith and J. Davis, 1994. Parameterization of wave breaking in models. *Proc. of Int. Symp.: Physical and Numerical Modelling*. Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, M. Isaacson and M. Quick (Eds.), 2, pp.753-762.

Weber, S.L., 1991a. Bottom friction for wind sea and swell in extreme depth-limited situations. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, pp.149-172.

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

Yoon, S.B. and Liu, P.L.F. (1989), Interaction of Currents and Weakly Nonlinear Waver Waves in Shallow Water, *J. Fluid Mech.*, Vol. 205, pp.397-419.

## 감사의 글

연구실에 들어올 때가 엇그제 같은데 벌써 이렇게 석사논문을 쓰고 졸업을 하게 되었습니다. 연구실 석사 2년을 포함해서 총 6년 동안 부족한 저를 돌봐주시고 이렇게 논문을 완성할 수 있도록 지도해 주신 이중우 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 학부생부터 많은 가르침을 주신 김태곤 교수님, 김도삼 교수님, 경갑수 교수님, 김태형 교수님께 감사의 인사를 드립니다.

본 논문에 많은 도움을 주신 부만건설의 김석문 사장님과 세일종합기술공사의 김강민 선배님에게도 감사의 인사를 드립니다.

그리고 항상 연구실 후배를 챙겨주시고 격려해 주신 양상용 선배님, 신승호 선배님, 정대득 선배님, 염원기 선배님, 김한필 선배님, 박동진 선배님, 김지연 선배님, 정영환 선배님 그리고 항상 후배들을 격려와 사랑을 아끼지 않는 이호 선배님, 안도경 선배님, 김상호 선배님, 이지훈 선배님, 이우철 선배님, 이학승 선배님, 황호동 선배님, 이훈 선배님, 금동호 선배님, 전민수 선배님, 오동훈 선배님, 재현이형, 승철이형, 기담이형, 필성이형, 기대형, 그리고 저에게 항상 아낌없이 좋은 말씀을 해주신 강석진 선배님, 권소현 선배님, 이형하 선배님, 부족한 선배를 만나서 고생한 일본과 규광이, 착한 정석이, 말 없는 희재에게 감사의 인사를 드립니다.

소중한 친구들 MC하 선욱이, 비스트 현기, 빼 성진이, 앵춘 영준이, 멋있는 남우, 깎시 선현이, 하단 길태, 연애인 재학, 박사 유나, 진호 모두 고맙고 성공해서 사회에서 보자. 그리고 웅기형, 진은이형, 수정이누나, 현석이형, 진우, 소연이, 성규, 동진이, 효상이, 민선이, 보배, 성심이, 민지, 솔이에게도 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 사랑하는 아버지, 어머니, 그리고 여동생에게 이 논문을 바칩니다.

저에게 많은 도움을 주신 분들에게 직접 찾아뵈어 인사를 드려야 하나 이렇게 글로써 감사의 마음을 전합니다. 그리고 미처 언급하지 못한 모든 분들에게 진심으로 감사의 말씀을 드리며, 건승하시고 항상 건강하시길 바랍니다.

2011년 1월  
박상길 드림