

**해일피해 예측 정밀격자 수치모델
구축 및 설계 해면 추산 연구보고서**

2010. 8.

주관연구기관 / 한국해양연구원

협동연구기관 / 한양대학교

협동연구기관 / (주)세광종합기술단

협동연구기관 / (주)헤이앤씨

**국 토 해 양 부
한국해양연구원**

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

본 보고서를 “해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2010 년 8 월

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 이동영

연 구 원 : 박광순 전기천 김상익
심재설 강시환 권재일
김선정 유제선 윤종주
최진용 최정운 황수림
정진용 민인기 이주용
강석민 김태균 최우리

협동연구기관명 : 한양대학교

협동연구책임자 : 조용식

협동연구기관명 : (주)헤인이엔씨

협동연구책임자 : 주재욱

협동연구기관명 : (주)세광종합기술단

협동연구책임자 : 김남훈

요 약 문

I. 제 목

- 해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 목 적

- 정밀 격자 폭풍해일 모델 수립 및 추산체제 구축
- 동해안 지진해일 해석을 위한 수치모형 구축
- 항만구조물의 안정성 평가를 위한 기초자료 확보
- 폭풍해일에 의한 재현년도에 따른 정밀격자 설계해면 추산
- 지진해일에 의한 동해 연안 및 항만 정밀 설계해면 산출
- 항만시설물 안전성 평가를 위한 전국 52개 전 항만의 천해 설계파 산출
- 지진 및 폭풍해일에 대한 항만 및 연안 구조물의 안정성 평가 기준 정립
- 전국 각 항별(무역항 28개, 연안항 24개) 항만구조물 안전성 평가
- 자연 재해 저감을 위한 항만의 보수·보강 방안 수립

○ 필요성

- 우리나라는 해마다 태풍에 의한 연안 침수에 의해 막대한 재산피해를 입고 있어, 이러한 피해를 줄일 수 있는 대책이 필요하다. 강력한 태풍 내습시 연안 저지대에 해일을 유발시켜 인명의 손실뿐만 아니라 항만 시설의 파괴 그리고 주택, 농경지, 각종 시설의 침수 등의 피해를 입고 있어 이를 줄일 수 있는 대책이 요구된다.
- 최근 태풍 매미, 루사 등으로 인한 해면 상승으로 인명피해와 재산피해가 국민적 관심으로 부상되고 있고, 서남아시아 지진해일로 국제적으로 자연재해 저감 대책 수립의 필요성이 대두되고 있다.
- 연안해일 발생 및 이상 해면 상승에 따른 연안침수, 제반 연안방재 시설물의 붕괴 및 유실, 해안 침식 등에 의한 연안재해를 단기에보로 줄이는데 한계가 있으며, 재기년도별 설계해면을 산출하여 연안 및 항만 개발시에 설계해면 결과를 고려하여 사전에 대비하여야 하고 기존 시설물에 대한 안전성의 점검으로 사전 조치가 요구된다.

- 연안 해일에 의한 재해를 근본적으로 줄이기 위해서는, 연안시설물의 안전관리 및 국토 안전관리를 위한 장기대책 수립과 더불어, 연안재해 사전 방지를 위한 연안방재 시설물의 설계조건 추산으로 해일재해에 대한 과학적 대처기술의 개발이 시급히 요구된다.
- 정밀 격자망에 의한 국지 이상 해면상승의 설계해면을 산출하여 제공하고, 설계해면정보를 토대로 연안개발 및 구조물 건설을 제한하고, 기존 시설물의 대피 이전 혹은 보호 등 대책을 세우는 것이 요구된다.
- 최근 태풍 강도가 증가하고 있는 추세에 대비하여 항만시설물의 안전을 확보하기 위해서는 기존 항만 구조물의 안전성 평가와 이에 따른 보충, 보완 대책 수립이 요구된다. 또한, 우리나라의 항만 구조물은 1988년 한국해양연구소가 산출한 심해 설계파에 근거하여 설계된 것이 많은데 2005년 한국해양연구소에서 재산출하여 상당히 증가된 심해 설계파를 제안한 바 있다. 이에 따라 이에 대한 천해 설계파 산출로 기존 항만 시설물의 안정도 평가 및 보완 대책이 필요하다.
- 폭풍해일 및 지진해일에 의한 해면상승과 신규 심해설계파의 증가를 고려하여 산출한 기존 항만 시설물에 대한 안전성 평가를 토대로 보수 및 보강 우선순위를 결정하여 방재계획을 수립함으로써 예산의 효율적인 활용과 인명 및 재산피해의 최소화가 필요하다.
- 국내에는 해일에 대한 항만시설 설계기준 및 안전성 평가기준이 수립되지 않은 상태로 폭풍해일 및 지진해일에 대한 항만구조물 설계기준 정립하여 보완할 필요가 있다.

III. 연구개발 내용 및 범위

- 해면 관측자료의 수집, 분석, 정리 및 집중 현장관측 실험
- 정밀 격자 폭풍해일 수치 모델 수립 및 폭풍 해일 장기 추산 체제 구축
- 관측자료를 이용한 폭풍해일 모델의 검증 및 개선과 조석과 파랑의 상호작용을 고려한 해일 및 파랑 산출체제 수립
- 주요 태풍분석 및 정밀격자 기압장, 해상풍 산출로 폭풍해일 모델 입력자료 산출
- 장기 폭풍 해일 시뮬레이션 및 극치 통계분석으로 전 연안 및 항만의 재현빈도별 설계 해면 산출
- 설계해면 산출에 지구 기후변화에 따른 해수면 상승 및 태풍 강도변화 영향 분석
- 항만 시설물 안정성 평가를 위해 새로 산정된 심해 설계파를 적용한 전 항만의 천해 국지 설계파 추산

- 동해 연안항 및 무역항에 적용하기 위한 지진해일 모델 수립
- 동해 연안 및 항만에서 지진해일 모의를 통한 설계 해면 추산
- 항만 시설물의 보수·보강방안 수립을 위한 기초자료 조사
- 항만시설 안정성 평가 및 설계기준 정립
- 안전성 종합평가 및 보수·보강 방안 마련

IV. 연구개발 결과

- 과거 장기간 해수면 관측자료를 분석하여 해면상승 경향을 파악하였으며, 이를 외삽하여 지구 온난화에 따른 해면상승을 추산했다.
- 기후변화 따른 태풍강도 변화에 대한 문헌을 조사하였고, 이에 따른 연안 구조물 방재 대책에 대해 토의하였다.
- 집중 현장실험을 통해 연안에서 각종 해수동력학적 과정의 이해도를 높여서 천해 파랑 추산 및 해수면 추산모델을 평가하고 검증했다.
- 폭풍에 의한 정밀격자 이상 해면추산 및 전국 항만 천해 설계 추산을 위해 가용한 많은 수심자료를 분석하였으며, 한반도 전 연안에 대해 정밀격자 수심망을 구축했다.
- 각종 폭풍해일 산출모델을 테스트하고 비교 평가하여 폭풍해일 추산에 활용했다.
- Nesting 기법을 이용하여 광역 해수순환 모형을 수립하고, 이로부터 우리나라 동해, 황해 및 남해 해역으로 구성된 중간해역, 그리고 관심해역인 여러 연안지역에 대한 상세역으로 연계되는 폭풍해일 산출시스템을 구축했다. 아울러 가변격자의 unstructured grid 모델인 FVCOM 모델을 이용하여 광역을 포함하고 또 연안에서 최소 격자로 각각 1 km, 300 m 및 70 m 격자의 폭풍해일 산출시스템을 수립했다.
- 1951년 이후에 우리나라에 영향을 준 201개의 태풍에 대해 태풍 분석을 실시하여 태풍 파라메타 데이터베이스를 구축하였고, 정밀격자 해상풍 산출시스템을 통해 폭풍해일을 장기간 시뮬레이션하여 얻은 결과들을 데이터베이스화 하였다.
- 장기 산출된 폭풍해일 자료를 극치 분석하여 전 연안에 대해서 각 재기년도별 폭풍해일 설계해면을 추산하였고, 이 결과를 데이터베이스화 하였다. 52개 무역항 및 연안항과 전연안 정밀 격자에서 산출된 폭풍해일에 의한 설계해면을 제시했다.
- 2005년 해양연구원이 발표한 심해 설계파를 입력자료로 사용하여 52개 항만에 대한 정밀격자 천해 파랑 변환모델로부터 천해 설계파를 산출하였으며, 이 결과를 항만 구조물 안정성 평가의 기반 자료로 제공했다.

- 국립해양조사원이 제공하는 상세 수심을 이용하여 동해안 정밀격자를 생성하여 FDM, FEM 정밀격자를 이용하여 1983년 및 1993년 지진해일에 대한 동해 무역항(8개), 연안항(5개)에서의 설계해면을 산출하였다.
- 지진해일에 대한 동해 무역항(8개) 및 연안항(5개) 항만구조물의 안정성 평가를 위한 기초자료를 확보하였으며 항만구조물의 안정성 평가를 위한 지진해일에 대한 가시화 DVD를 제작하였다.
- 기존 항만시설의 설계 자료를 수집 및 분석하고, 과거에 발생한 태풍 및 지진해일 사례들을 조사하였다. 또한, 국내외 안전성 평가기준 등 관련 자료를 조사하고, 안전성 평가기준 개발 및 추진계획을 수립하였다.
- 심해파 개정에 따른 기존 시설물 간 안전성 평가를 무역항 28개항 및 연안항 24개항에 대하여 수행하였다.
- 무역항 28개항 및 연안항 24개항의 기존 항만 시설물의 정밀 안정성 평가 및 대책을 수립하였다.

V. 연구개발 결과의 활용계획

- 정밀 수심 격자, 기상 입력 자료, 조석과 조류의 산출체제 수립은 향후에 항만 정밀격자 해양 예보시스템 구축에 활용하여 효율적 항만 이용과 각종 해상활동 지원에 활용된다. 장기 태풍 분석 및 활용에 따른 해상풍 산출 체제는 향후 설계과 개선, 재해도 작성 등에 필수 자료로 활용될 예정이다.
- 정밀 폭풍해일 예보시스템은 기상청에서 제공하는 단기 기상예보 자료와 연결하여 단기 정밀 폭풍해일 예보시스템 구축에 활용되어, 전국 연안 및 항만의 정밀 격자 폭풍해일 예보 지원으로 활용될 수 있으며, 수립된 3차원 해양순환 모델은 연안 및 항만에서 선박 운항지원 체제 및 공사 시 부유사 이동, 해난 사고 시 유류 오염 확산 예보, 수색 구조 예보 지원 시스템 구축에 활용될 수 있다.
- 전 해안 항만에서 폭풍에 의한 설계해면 산출결과는 항만 및 연안 시설물의 설계 시 설계조건으로 사용되며, 또한 전 연안에 대한 매립 계획 수립 및 설계, 기존 항만 연안 시설물의 안정성 평가, 태풍 등 악기상에 대한 국가적 자연재해 대응 장기계획 수립에 활용될 예정이다.
- 천해 설계과 산출을 위해 준비한 정밀격자 천해파랑 산출 격자망과, 수치모델 및 그 입력자료로 사용하기 위해 수립한 조석 및 조류 산출체제는 기상청의 단기 기상예보 결과와 연결하여, 전 연안 및 항만 일대에서 정밀격자 파랑예보 지원시스템 구축에 활용된다.

- 지진해일 최대 해일고 예측을 통해 지진해일 발생 시 주민들이 안전하고 신속하게 대피할 수 있도록 하기 위한 예경보시스템을 구축하는데 기초자료를 제공하여 인명피해를 최소화할 수 있는 방재자료로 활용된다.
- 연안 및 항만시설물 설계시에 설계조건으로 활용함으로써 지진해일에 대비한 기존 항만시설 방재대책 수립을 위한 기초 자료로 활용된다.
- 항만시설물의 안전성 평가결과는 전국 무역항 및 연안항의 항만시설물, 연안부지 및 시설의 안전성 평가, 보강 방안 수립에 기본 자료로 활용될 수 있다
- 항만시설물 보수·보강대책 수립 결과는 태풍해일과 지진해일에 대비하기 위해서 요구되는 기존 항만시설에 대한 방재대책의 계획수립 및 보강설계에 활용될 수 있으며, 또한 해일 및 고파에 대비한 항만시설물 방재대책 수립 및 우선순위 결정, 보수·보강 예산 및 상세 설계 시 활용될 수 있다.

SUMMARY

I. Title of the Study

- Development of Storm Surge and Tsunami Prediction System and Estimation of Design Water Level for major ports in Korea

II. Objectives and Significance

- Storm surge and tsunami simulation capacity is essential for the reduction of coastal hazard induced by typhoon and tsunami.
- Port structures that were designed and constructed earlier using former design criteria need to be checked if they would be safe with the increased design criteria to prepare proper counter measure to protect them.
- Proper estimation of design water level due to storm surge and tsunami, together with shallow water design waves, is important in designing new coastal structures and development as well as evaluating the stability of existing structures.
- Objectives of the study are (1) to develop and establish fine mesh storm surge and tsunami simulation models, (2) to estimate design water level due to storm surge and tsunami for the coastal waters of Korea, (3) to estimate shallow water design wave height for 52 major ports in Korea, and (4) to evaluate stability of the 52 major port structures using the estimated design criteria and to prepare counter measures to protect the existing port structures.

III. Contents and Scope

- Water level data collection and analysis
- Establishment, validation and improvement of fine mesh storm surge models for the coastal waters of Korea
- Analysis of major typhoon and estimation of fine mesh atmospheric pressure and wind fields as input for storm surge simulation.
- Long-term simulation of storm surge
- Extreme statistics analysis of the simulated storm surge data and determination

- of design water level
- Analysis of water level increase and typhoon intensity variation due to global warming
- Estimation of shallow water design wave height for the analysis of stability of port structures
- Estimation of detailed design water level induced by tsunami for 8 trade ports and 5 coastal ports of east coast of Korea
- Basic data survey for repair/reinforcement measures of port facilities
- Stability evaluation of existing port facilities and establishment of design criteria
- Comprehensive evaluation of stability of port structures and setting up repair/reinforcement measures

IV. Results

- Water level observation data in the past were analysed to see the long-term variation of water level. The sea level rise for next 50 years were roughly estimated from the data analysis.
- The conventional method of design criteria estimation that assumes steady state climate condition is discussed in regard to the possible increase of typhoon intensity with global climate change in the future.
- Fine mesh depth grid system for the coastal waters of Korea has been prepared using most of the available bathymetry data.
- Typhoon parameters for the past 201 typhoons were analyzed using available data in this region such as observed surface air pressure, satellite remote sensing data, etc.
- Meteorological input data needed in storm surge simulation model such as sea-surface winds and air pressure for all the major typhoons and extra-tropical storms have been prepared to simulate long-term storm surges for the coastal waters of Korea.
- Fast prediction system for tide and tidal current for all the major port area has been established to be used as input for shallow water wave transformation.
- Two fine mesh storm surge modelling systems with coastal grid of about 300 meters have been established: one using structured grid model, MOHID, and

- the other using unstructured grid model, FVCOM.
- Storm surges induced by 201 typhoon have been simulated and design water level for the fine mesh with grid size about 300 meters along the coast of Korea has been determined by means of extreme statistic analysis of the simulated data.
 - Shallow water design wave heights for major 52 ports in Korea were determined by means of shallow water wave transformation of the offshore incident design wave condition estimated by KORDI in 2005.
 - A data base and data retrieval system for the various information for 52 major ports have been developed.
 - Information of the East Sea tsunami offered by JMA(Japan Meteorological Agency), MLIT(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism) and JCG(Japan Coast Guard) was surveyed.
 - Numerical tsunami simulation systems using FDM and FEM models were established using fine mesh bathymetry data provided by the KHOA(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration).
 - Maximum water level for 8 trade ports and 5 coastal ports of the east coast of Korea were simulated for tsunami occurred in 1983 and 1993.
 - Design data of existing port facilities are collected and analyzed, prior typhoon/tsunami records and domestic/international stability evaluation criteria are investigated, stability evaluation criteria are developed and execution plan is established.
 - Simplified stability evaluation of existing structures following revision of deepwater wave is performed for 28 trade ports and 24 coastal ports.
 - Detailed stability evaluations and countermeasures for existing port facilities of 28 trade ports and 24 coastal ports are set up.

V. Applications of the Results

- Technical basis for the establishment of storm-surge warning system in Korea.
 - Policy determination and assessment of coastal defense measures to the natural disasters, especially for the port and harbours in Korea.
 - Establishment of effective counter-measures for the safety of coastal regions by
-

assessing and checking the present situations of coastal structure conditions in Korea.

- Provision of engineering design data for the governmental agencies needed for the planning of coastal development projects.
- New development of storm-surge forecasting system by using the obtained data and the fine-scaled model developed from this study.
- Fine mesh depth data, meteorological input data, tide and tidal current estimation system that were established in this study would be used in developing fine mesh coastal and port information system.
- Fine mesh wind estimation system using typhoon parameters for major typhoons will be used in re-calculation of design wave height and production of hazard map in the future.
- Fine mesh storm surge simulation system can be used in building storm surge forecasting system by interfacing KMA's weather forecast for short-term prediction of storm surge.
- The established 3-D circulation models can be used in various application in the coastal waters such as oil spill dispersion modelling, search and rescue, fine sediment transport modeling, etc.
- The design water level and shallow water design wave height estimated in this study will be used in the design and management of coastal development as well as coastal disaster reduction measures along the coast of Korea.
- Shallow water wave simulation system studied in this study would be used in building fine mesh coastal wave information system to meet the need of the users in coastal area.
- When tsunami attack to a port, the prediction for sea level rise in harbor and shoreline erosion measures and the prediction for changing topography were used as basic data, a prevention measure for inundation sea water and protecting facilities.
- The maximum water level induced by tsunami estimated in this study will be used in planning coastal disaster reduction measures as well as in the stability analysis for the existing harbor facilities along the east coast of Korea

- The result of stability evaluation for port structures can be used in setting up reinforcement measures to port and coastal facilities, coastal sites in Korean trade and coastal ports.
- The result of repair/reinforcement countermeasures can be used for establishing and executing countermeasures of existing port facilities which enables to prepare against increasing typhoon intensity and tsunami as well as for setting priorities, budget and detailed plans in developing countermeasures for prevention of port facilities against storm surge or high waves.

CONTENTS

Summary

Contents

Chapter I. Introduction

Section 1. The necessity of research and development

Section 2. Overview of project

Chapter II. Present status of technical development

Section 1. International progress and development

Section 2. Domestic progress and development

Chapter III. Contents and results

Section 1. Reduction of coastal disaster due to storm surge and wave

Section 2. Basic data for design storm surge and wave estimation

Section 3. Storm surge model and estimation of design storm surge

Section 4. Tsunami model and estimation of tsunami design water level

Section 5. Shallow water design wave for the analysis of stability of coastal structures

Section 6. Stability analysis of coastal structures and suggestions for re-inforcing coastal structures

Chapter IV. Degree of achievement and contribution to the relevant area

Section 1. Attainment degree of research and development

Section 2. Contribution degree of related field

Chapter V. Future plan for application of the results

Chapter VI. Project-related international scientific technology

Section 1. Numerical models for storm surge

Section 2. Design sea level for tsunami

Section 3. Design of coastal structures in consideration of tsunami

Chapter VII. References

Appendix:

1. Design sea level for storm surge
2. Overview of harbors
3. Korea Harbor Database (KHDB) manual

목 차

제 1 장 연구개발 과제의 개요	1
제 1 절 연구개발의 필요성	1
제 2 절 연구개발의 내용	3
1. 연구개발의 최종목표	3
2. 연구개발 목표 및 내용	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1 절 국제적 동향	5
1. 연구 동향	5
2. 상세 기술개발 내용	6
제 2 절 국내 폭풍 및 지진 해일 추산기술 현황	12
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
제 1 절 연안 시설물의 설계 해면 산출 방법 및 요약	15
1. 태풍에 의한 설계해면 산출	15
2. 지진해일 산출에 대한 고찰	24
제 2 절 폭풍해일, 설계파 산정을 위한 기본 자료	42
1. 수심자료	42
2. 기상입력자료	49
3. 조석 조류 정보	80
제 3 절 폭풍해일 수치 모델 수립 및 설계해면 산출	97
1. 폭풍해일 수치 모델	97
2. 폭풍해일 모델의 비교 평가, 검증	114
3. 장기 폭풍 해일 산출 및 설계해면 추산	134
4. 지구 온난화의 영향 분석	147
5. 폭풍해일 설계 해면 적용에 대한 제언	166
제 4 절 지진해일 추산 모델 및 동해안항만 설계해면 산출	169
1. 지진해일에 의한 동해연안 간이 설계해면 추산	169
2. 지진해일에 의한 동해 무역항(8개)의 국지 정밀 설계해면 산출	184
3. 지진해일에 의한 동해 연안항(5개)의 국지 정밀 설계해면 산출	203

제 5 절 구조물 안정성 분석을 위한 천해 설계과 산출	226
1. 개요	226
2. 심해입사파의 설정	227
3. 천해 설계과 산출 모델	235
4. 전국 무역항 및 연안항에 대한 천해 설계과 산출	249
제 6 절 정밀안전성 평가 및 보수·보강 우선순위	258
1. 정밀안전성 평가	258
2. 보수·보강방안 수립	295
3. 보수·보강 우선순위 결정	306
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	335
제 1 절 연구개발 목표 달성도	335
제 2 절 다른 분야 기여도	337
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	339
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	343
제 1 절 폭풍에 의한 해수면 상승 산출 모델링 연구조사	343
제 2 절 해외 지진해일 설계해면 연구조사	344
1. 일본	344
2. 미국	344
제 3 절 해외 주요시설 지진해일 영향고려 현황조사	345
1. 일본	345
2. 미국	346
제 7 장 참고 문헌	347
< 부록 >	
1. 전 연안 50년 빈도 폭풍해일 설계해면고	355
2. 기초자료조사	369
3. 한국항만정보(KHDB) 프로그램 Manual	381

표 차례

표 3.1.1 동해의 기반 골격 유한요소 격자 체계	37
표 3.1.2 수정되고 있는 동해의 유한요소 격자 체계	37
표 3.2.1 WRF 모델과 MM5 모델	52
표 3.2.2 전체 영역과 한반도 주변에서 각각 MM5 모델과 WRF 모델에 의한 바람으로 모의된 결과의 BIAS, RMSE, SI, CORR	56
표 3.2.3 Specification of WRF grids	60
표 3.2.4 HIRLAM 모델의 격자 정보	61
표 3.2.5 WRF 모델과 HIRLAM 모델 결과의 통계분석	65
표 3.2.6 폭풍해일 시뮬레이션에 사용된 태풍 목록	78
표 3.3.1 MOHID 수치모형의 계산격자	104
표 3.3.2 격자별 절점 및 셀의 개수	113
표 3.3.3 수치 실험에 사용된 8개의 태풍	117
표 3.3.4 8개 태풍에 대한 수치 실험에서 FVCOM 과 MOHID의 모델 결과와 비교 ..	118
표 3.3.5 태풍 ‘매미’ 주요 지점 통과 일시(KMT)	120
표 3.3.6 조석 효과 반영된 해일고 모의 결과 비교(cm)	124
표 3.3.7 격자 간격에 따른 해일고 모의 결과 비교(cm)	127
표 3.3.8 2D, 3D에 따른 해일고 모의 결과 비교(cm)	132
표 3.3.9 재기년도 별 최대 해일고 예(울진)	138
표 3.3.10 28개 무역항에서의 재기년도 별 설계해일고	143
표 3.3.11 24개 연안항에서의 재기년도 별 설계해일고	144
표 3.1.12 전국 무역항에서의 설계해면 산출 결과 비교	145
표 3.1.13 전국 연안항에서의 설계해면 산출 결과 비교	146
표 3.3.14 각 검조소의 평균해면의 선형 변동 상수	153
표 3.3.15 각 검조소별 년 평균해면의 증가율 및 각 해역별 평균 증가율	161
표 3.3.16 세기 말 지구 평균 기온 온난화와 해수면 상승 전망	166
표 3.4.1 각 영역별 계산 조건	169
표 3.4.2 1983년, 1993년 지진해일에 대한 유한차분, 유한요소 수치모의에 따른 최대 지진해일고 비교	183
표 3.4.3 각 영역별 계산 조건	184

표 3.4.4	1983년, 1993년 지진해일에 대한 유한차분, 유한요소 수치모의에 따른 최대 지진해일고 비교	201
표 3.4.5	각 영역별 계산 조건	203
표 3.4.6	발생 가능 최대 지진해일 단층파라미터	204
표 3.4.7	1983년, 1993년 지진해일과 발생가능 최대 지진해일에 대한 유한차분, 유한요소 수치모의에 따른 최대 지진해일고 비교	225
표 3.5.1	SWAN 모델의 세대별 구분	248
표 3.5.2	52개 대상항만 목록	250
표 3.5.3	각 항별 상위 30개 태풍 선정	255
표 3.6.1	정밀안전성 평가 대상	258
표 3.6.2	무역항 정밀안전성 평가 대상	259
표 3.6.3	연안항 정밀안전성 평가 대상	260
표 3.6.4	설계고조위 산정방법	261
표 3.6.5	설계조위 결정	262
표 3.6.6	마루높이 산정기준	262
표 3.6.7	마루높이 검토기준	262
표 3.6.8	피복재 소요질량 검토기준	263
표 3.6.9	상부공 안전율	264
표 3.6.10	상부공 안전율	264
표 3.6.11	무역항 정밀안전성 평가 결과	265
표 3.6.12	연안항 정밀안전성 평가 결과	283
표 3.6.13	무역항 보수·보강 대상시설	295
표 3.6.14	연안항 보수·보강 대상시설	296
표 3.6.15	마루높이 보수·보강 기준	297
표 3.6.16	무역항 보수·보강 공사비	300
표 3.6.17	연안항 보수·보강 공사비	303
표 3.6.18	무역항 보수·보강 우선순위 평가항목	306
표 3.6.19	화물처리 실적에 의한 무역항 등급 점수 (단위 : 천RT/년)	307
표 3.6.20	화물선 입·출항 실적에 의한 무역항 등급 점수	308
표 3.6.21	접안시설 연장에 의한 무역항 등급 점수	309
표 3.6.22	태풍피해 규모에 의한 무역항 등급 점수	310
표 3.6.23	방파제별 태풍피해 중복도에 의한 무역항 등급 점수	312

표 3.6.24 태풍피해 금액 대비 보강금액에 의한 무역항 등급 점수	313
표 3.6.25 설계과고 증가에 따른 무역항 등급 점수	314
표 3.6.26 방파제 시설보강 연장에 의한 시설물별 등급 점수(1/2)	315
표 3.6.27 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수	317
표 3.6.28 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수	318
표 3.6.29 무역항 보수·보강 우선순위 선정 결과	319
표 3.6.30 연안항 보수·보강 우선순위 평가항목	320
표 3.6.31 화물수송 실적에 의한 연안항 등급 점수 (단위 : 천RT/년)	321
표 3.6.32 여객수송 실적에 의한 연안항 등급 점수	322
표 3.6.33 접안시설 연장에 의한 연안항 등급 점수	323
표 3.6.34 태풍피해 규모에 의한 연안항 등급 점수	324
표 3.6.35 방파제별 태풍피해 중복도에 의한 연안항 등급 점수	326
표 3.6.36 태풍피해 금액 대비 보강금액에 의한 연안항 등급 점수	327
표 3.6.37 설계과고 증가에 따른 연안항 등급 점수	328
표 3.6.38 시설 보강연장에 의한 시설물별 등급 점수(1/2)	329
표 3.6.39 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수	331
표 3.6.40 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수	332
표 3.6.41 연안항별 보수·보강 우선순위 선정 결과	333
표 5.1.1. 활용 분야 요약	340

그림 차례

그림 2.1.1	영국의 POL storm surge model의 구성도	8
그림 2.1.2	덴마크 기상연구소(DMI)의 해양예보모델에 사용되는 도메인	9
그림 2.1.3	미국 NOAA의 SLOSH 해일예측모델을 사용하여 헤리케인 리타(Rita)에 대하여 계산한 최대 해일고 분포 예측결과	10
그림 2.1.4	미동부 대서양 연안에 미육군 공병대 ADCIRC 모델을 사용하기 위하여 생성한 비구조 격자의 예	11
그림 3.1.1	미국 뉴욕주의 2개의 도시에서 측정된 평균 기온의 장기 변화의 예	20
그림 3.1.2	설계 해면	25
그림 3.1.3	지진해일의 파력 모식도	26
그림 3.1.4	Gaussian hump의 초기수면 변위	30
그림 3.1.5	기존의 수치 기법($t=40$)	30
그림 3.1.6	수립된 모델의 수치 기법($t=40$)	30
그림 3.1.7	기존의 수치 기법($r=70$)	31
그림 3.1.8	수립된 모델의 수치 기법($r=70$)	31
그림 3.1.9	속초항 파고 및 처오름 높이 예측	31
그림 3.1.10	최대 처오름 높이 비교(관측치와 수치모의 결과)	32
그림 3.1.11	우리나라 동해안의 지진해일 위험도 구획화를 위한 시뮬레이션의 결과	32
그림 3.1.12	동해의 3차원 가시화 및 해저단면 Profile	33
그림 3.1.13	현재의 수심(좌) 및 동해 중부 해령의 지진해일 영향을 알아보기 위해 해령을 삭제한 수심(우)	34
그림 3.1.14	현재의 수심에서의 지진해일 최대해일고	34
그림 3.1.15	동해 중부 해령을 삭제한 지진해일 최대해일고	34
그림 3.1.16	1983년 지진해일에 의한 시간에 따른 수위변화	35
그림 3.1.17	현재의 수심에서의 결과	35
그림 3.1.18	동해 중부 해령을 삭제한 결과	35
그림 3.1.19	두 경우의 차이	35
그림 3.1.20	현재의 수심에서의 지진해일 최대해일고	36
그림 3.1.21	동해 중부 해령을 삭제한 지진해일 최대해일고	36
그림 3.1.22	1993년 지진해일에 의한 시간에 따른 수위변화	36

그림 3.1.23 현재의 수심에서의 결과	36
그림 3.1.24 동해 중부 해령을 삭제한 결과	36
그림 3.1.25 두 경우의 차이	37
그림 3.1.26 동해안 8개 무역항의 상세격자	39
그림 3.1.27 동해안 5개 연안항의 상세격자	40
그림 3.1.28 성균관대학교에서 보유 중인 병렬 계산 시스템(Beowulf system)	41
그림 3.1.29 병렬 계산 (Linux Clusters)과 병렬 가시화 (Chromium and DMX based) System	41
그림 3.1.30 한반도 주변 및 해외 지진해일 관련 자료를 수집하여 DVD 자료집 작성	41
그림 3.2.1 국립해양조사원의 수치해도	43
그림 3.2.2 경기만 지역의 수치해도에서 추출된 수심 및 해안선 자료	44
그림 3.2.3 국립해양조사원의 1분자료(해도 원도)	45
그림 3.2.4 Choi(Digital Atlas for Neighboring Seas of Korean Peninsular, 1999)의 수심자료	46
그림 3.2.5 Seo(2007)의 30초 격자 수심자료	46
그림 3.2.6 해양조사원 측심자료를 이용한 상세격자수심 보정	47
그림 3.2.7 정밀격자 수심 격자 구성망(150m 및 60m 격자수심)	48
그림 3.2.8 60m 상세격자 수심도 구성 예	48
그림 3.2.9 해양연구원 Kordi Operational Storm surge prediction sYstem (KOSY)의 도식도	50
그림 3.2.10 2007년 3월 31일의 기상모델의 바람속력과 해면기압의 결과, 왼쪽부터 MM5, WRF, COAMPS 의 결과	54
그림 3.2.11 2007년 3월 30일 영광에서의 관측 결과와 기상 모델의 바람의 속력과 해면기압의 시간 변화의 비교	54
그림 3.2.12 2003년 9월 12 18시(위), 2003년 3월 13일 6시(아래)의 해면 바람 분포. 왼쪽부터 QuikSCAT 자료, MM5 모델, WRF 모델의 결과	55
그림 3.2.13 WRF Modeling System의 순서도	58
그림 3.2.14 WRF Preprocessing System의 순서도	58
그림 3.2.15 WRF 모델의 격자	59
그림 3.2.16 태풍 'Lupit' (0920) 시 WRF 모델의 결과 (2009/10/19 06LST)	60
그림 3.2.17 태풍 'Lupit' (0920) 시 HIRLAM 모델의 결과 (2009/10/19 06LST)	61
그림 3.2.18 황해중부부이(▲)와 이어도 해양과학기지(★)의 위치	62

그림 3.2.19 황해 부이와 이어도에서 관측한 바람속력과 WRF 모델로 예측한 바람속력 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours	63
그림 3.2.20 황해 부이와 이어도에서 관측한 해면기압과 WRF 모델로 예측한 해면기압 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours	63
그림 3.2.21 황해 부이와 이어도에서 관측한 바람속력과 HIRLAM 모델로 예측한 바람속력 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours	64
그림 3.2.22 황해 부이와 이어도에서 관측한 해면기압과 HIRLAM 모델로 예측한 해면기압 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours	64
그림 3.2.23 태풍 ‘매미’(0314) 시 ECMWF 모델의 기압장	66
그림 3.2.24 기상관측소로부터의 상관관계와 태풍 중심에서부터의 거리를 이용한 최대풍 반경의 계산	71
그림 3.2.25 QuikSCAT 위성에서부터 바람장으로 최대풍 반경 계산 (●: 태풍의 중심)	72
그림 3.2.26 GMS 위성으로 부터의 최대풍 반경의 계산	73
그림 3.2.27 최대풍 반경과 태풍중심 기압의 Correlation	74
그림 3.2.28 기상청에서의 태풍 예보	74
그림 3.2.29 1000 hPa 등압선까지의 거리를 이용하여 산출한 최대풍 반경과 강풍 반경으 로 산출한 최대풍 반경의 상관관계	75
그림 3.2.30 태풍 ‘Chaba’ (0004) 내습시 해상풍 모델의 압력과 바람장의 비교, (a) MASCON, (b) CE model, (c) TPM-1 and (d) TPM-2	76
그림 3.2.31 장기가 폭풍해일 시뮬레이션에 사용되 태풍 경로	77
그림 3.2.32 등조위선 및 등조시선(M2) - NAO	83
그림 3.2.33 등조위선 및 등조시선(K1) - NAO	84
그림 3.2.34 FVCOM 모형에 적용된 격자망 및 수심도	86
그림 3.2.35 FVCOM을 이용한 정밀격자 조석자료 산출결과(위 : M2, 아래 : S2)	87
그림 3.2.36 FVCOM을 이용한 정밀격자 조석자료 산출결과(위 : K1, 아래 : O1)	88
그림 3.2.37 NAO99jb 단기 해양 조석 모델 자료	91
그림 3.2.38 FES2004 소개 홈페이지	92
그림 3.2.39 FES2004에서 제시된 M2 등조위도와 등조시선	93
그림 3.2.40 TPX0 7.2 자료 웹페이지	93
그림 3.2.41 EOT08a 자료 예	94

그림 3.2.42 모델에 의한 조석(zeta)자료 vs 조화상수로 구한 조석자료	95
그림 3.2.43 모델에 의한 조류(u)자료 vs 조화상수로 구한 조류자료	96
그림 3.2.44 모델에 의한 조류(v)자료 vs 조화상수로 구한 조류자료	96
그림 3.3.1 Staggered grid system	99
그림 3.3.2 MOHID 모델에서의 유한체적요소	101
그림 3.3.3 MOHID 수치 모형의 광역격자(좌)와 중간격자(좌, 우) 및 상세격자(우)	103
그림 3.3.4 유한차분모델, 유한요소모델, 유한체적모델 비교 (Chen, FVCOM workshop 2006)	105
그림 3.3.5 바람 응력계수 산정식 비교, Large and Pond (dots), Smith and Banke (dashes), Geernaert et al. (dash-dots), Charnock (dash and 3 dots)	112
그림 3.3.6 FVCOM의 삼각형 가변격자	112
그림 3.3.7 최소격자간격 1km 격자망	114
그림 3.3.8 최소격자 300m 격자망	114
그림 3.3.9 최소격자간격 70m 격자망	114
그림 3.3.10 Typhoon tracks from 1951 to 2007	115
그림 3.3.11 각 조위관측소에서 관측된 50cm 이상의 폭풍해일고의 나타난 횟수	116
그림 3.3.12 각 조위관측소에서 관측된 최대 폭풍해일고 (cm)	116
그림 3.3.13 태풍 매미(MAEMI)의 진로도(2003년 9월 8일~9월 13일)	120
그림 3.3.14 태풍 매미 내습시의 마산 조위관측소에서의 모델 결과와 관측치 비교	123
그림 3.3.15 주요 관측점에서의 조석 포함한 해일고 산출 모의 결과 비교(완도, 통영, 제주, 후포 : 좌상부터 시계방향)	124
그림 3.3.16 태풍 '매미' 내습 시 여수, 통영, 마산 그리고 부산에서의 폭풍해일 수치 모델 (MOHID) 결과	125
그림 3.3.17 태풍 '매미' 내습 시 (S) - (TS - T) 결과(좌) 동시간의 조석 (우)	126
그림 3.3.18 태풍 매미 내습시의 마산 조위관측소에서의 수치모델 결과와 관측치 비교(격자 간격에 해일고 크기 비교)	127
그림 3.3.19 주요 관측점에서의 격자 크기에 해일고 산출 모의 결과 비교(통영, 여수, 완도, 후포 : 좌상부터 시계방향)	128
그림 3.3.20 중간격자(상)와 상세격자(하)에서의 폭풍해일 결과	129
그림 3.3.21 태풍 '매미' 내습 시 여수, 통영, 마산 그리고 부산에서의 폭풍해일 수치 모델 (MOHID)의 중간역(coarse) 과 상세역 (fine)에서의 결과 비교	130
그림 3.3.22 덴마크 기상연구소(DMI)에서 수행한 각 모델간의 성능비교	131

그림 3.3.23 태풍 매미 내습시의 마산 조위관측소에서의 수치모델 결과와 관측치 비교(2D, 3D에 해일고 크기 비교)	132
그림 3.3.24 주요 관측점에서의 2D, 3D 계산에 따른 해일고 산출 모의 결과 비교(통영, 여수, 서귀포, 후포 : 좌상부터 시계방향)	133
그림 3.3.25 태풍 '매미' 내습 시 여수, 통영, 마산 그리고 부산에서의 폭풍해일 수치 모델 (MOHID)의 2D 와 3D 계산 결과 비교	134
그림 3.3.26 경기만 일대 국지 정밀 폭풍해일 산출 격자의 예	135
그림 3.3.27 폭풍해일 장기 산출에 의한 설계해면	136
그림 3.3.28 장기간 폭풍해일 시뮬레이션에 사용된 태풍의 진행 경로	137
그림 3.3.29 폭풍해일고의 극치분석 예(울진)	138
그림 3.3.30 설계 해일고의 공간 분포 a) 10년 빈도, b) 30년 빈도, c) 50년 빈도, d) 100년 빈도	140
그림 3.3.31 Design storm에 의한 해일고 (a) FVCOM 모델 , (b) MOHID 모델 결과	140
그림 3.3.32 전국 해안을 따라 설계해일고 산출 정점	141
그림 3.3.33 해안을 따라 설계 해일고 산출 정점의 확대 그림	142
그림 3.3.34 국립해양조사원의 검조소위치	150
그림 3.3.35 각 검조소에서의 년 평균해면의 시간적 변화	151
그림 3.3.36 각 관측소의 년 평균해면의 편차	152
그림 3.3.37 각 검조소별 년 평균해면의 시간에 따른 변동 관계식	154
그림 3.3.38 일본의 해수면 변동 연구에 주로 사용된 검조소	162
그림 3.3.39 일본의 각 검조소에서 지난 30년간 해수면 변동	162
그림 3.3.40 동일본과 서일본에서의 년 평균해면의 변동	163
그림 3.3.41 중국 연안 평균해면 변화 곡선	164
그림 3.3.42 중국 연안 각 검조소에서의 평균해면의 변화 곡선	164
그림 3.4.1 13개 항구의 A, B 영역	170
그림 3.4.2 각 항구별 C 영역의 위치와 수심분포	170
그림 3.4.3 1983년 지진해일 전파도 (단위 : 분)	171
그림 3.4.4 1993년 지진해일 전파도 (단위 : 분)	171
그림 3.4.5 속초항 최대 지진해일고 (단위 : m)	172
그림 3.4.6 옥계항 최대 지진해일고 (단위 : m)	172
그림 3.4.7 묵호항 최대 지진해일고 (단위 : m)	172
그림 3.4.8 동해항 최대 지진해일고 (단위 : m)	173

그림 3.4.9 삼척항 최대 지진해일고 (단위 : m)	173
그림 3.4.10 포항항 최대 지진해일고 (단위 : m)	173
그림 3.4.11 울산항 최대 지진해일고 (단위 : m)	174
그림 3.4.12 부산항 최대 지진해일고 (단위 : m)	174
그림 3.4.13 주문진항 최대 지진해일고 (단위 : m)	174
그림 3.4.14 후포항 최대 지진해일고 (단위 : m)	175
그림 3.4.15 구룡포항 최대 지진해일고 (단위 : m)	175
그림 3.4.16 부산남항 최대 지진해일고 (단위 : m)	175
그림 3.4.17 울릉항 최대 지진해일고 (단위 : m)	176
그림 3.4.18 동해안 무역항(8개소)에 대한 유한요소 정밀격자	177
그림 3.4.19 동해안 연안항(5개소)에 대한 유한요소 정밀격자	178
그림 3.4.20 1983년 동해중부 지진해일의 전파도	179
그림 3.4.21 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 전파도	179
그림 3.4.22 속초항의 유속장	180
그림 3.4.23 속초항의 유속장	181
그림 3.4.24 주문진항의 유속장	181
그림 3.4.25 주문진항의 유속장	182
그림 3.4.26 상세역 수심분포(속초항, 옥계항)	184
그림 3.4.27 상세역 수심분포(목호항, 동해항)	185
그림 3.4.28 상세역 수심분포(삼척항, 포항항)	185
그림 3.4.29 상세역 수심분포(울산항, 온산항)	185
그림 3.4.30 상세역 수심분포(부산항, 감천항)	185
그림 3.4.31 속초항 최대 지진해일고 (단위 : m)	186
그림 3.4.32 옥계항 최대 지진해일고 (단위 : m)	186
그림 3.4.33 목호항 최대 지진해일고 (단위 : m)	187
그림 3.4.34 동해항 최대 지진해일고 (단위 : m)	187
그림 3.4.35 삼척항 최대 지진해일고 (단위 : m)	187
그림 3.4.36 포항항 최대 지진해일고 (단위 : m)	188
그림 3.4.37 울산항 최대 지진해일고 (단위 : m)	188
그림 3.4.38 온산항 최대 지진해일고 (단위 : m)	188
그림 3.4.39 부산항 최대 지진해일고 (단위 : m)	189
그림 3.4.40 감천항 최대 지진해일고 (단위 : m)	189

그림 3.4.41	속초항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	189
그림 3.4.42	옥계항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	190
그림 3.4.43	목호항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	190
그림 3.4.44	동해항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	190
그림 3.4.45	삼척항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	191
그림 3.4.46	포항항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	191
그림 3.4.47	울산항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	191
그림 3.4.48	온산항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	192
그림 3.4.49	부산항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	192
그림 3.4.50	감천항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)	192
그림 3.4.51	CDT 기법으로 구성한 조격자와 세격자	193
그림 3.4.52	작성된 동해 전체격자를 병렬계산을 위한 도메인 분할 결과	193
그림 3.4.53	동해의 무역항(8개)에서의 세격자 시스템	194
그림 3.4.54	일본 나오에즈항 격자체계 및 구성	195
그림 3.4.55	속초항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	195
그림 3.4.56	옥계항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	195
그림 3.4.57	목호항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	196
그림 3.4.58	동해항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	196
그림 3.4.59	삼척항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	196
그림 3.4.60	속초항 지진해일고 시계열	197
그림 3.4.61	옥계항 지진해일고 시계열	197
그림 3.4.62	목호항 지진해일고 시계열	197
그림 3.4.63	동해항 지진해일고 시계열	198
그림 3.4.64	삼척항 지진해일고 시계열	198
그림 3.4.65	속초항에서의 유속장	199
그림 3.4.66	속초항에서의 유속장	200
그림 3.4.67	지진해일 전파의 고해상도 동영상 Blu-ray DVD제작	202
그림 3.4.68	임원항의 지진해일 유발유속 가시화 예	202
그림 3.4.69	상세역 수심분포(주문진항, 후포항)	203
그림 3.4.70	상세역 수심분포(구룡포항, 부산남항)	204
그림 3.4.71	상세역 수심분포(울릉항)	204

그림 3.4.72 1983년, 1993년의 지진해일 및 지진공백역 가상지진해일(Hypoth1, Hypoth2, Hypoth3) 위치 및 초기수면변위	205
그림 3.4.73 주문진항 최대 지진해일고 (단위 : m)	205
그림 3.4.74 후포항 최대 지진해일고 (단위 : m)	206
그림 3.4.75 구룡포항 최대 지진해일고 (단위 : m)	206
그림 3.4.76 부산남항 최대 지진해일고 (단위 : m)	207
그림 3.4.77 울릉항 최대 지진해일고 (단위 : m)	207
그림 3.4.78 1분 유한차분 모델 수위의 시계열 및 이론식(Kaistrenko's equation)을 사용하여 변환한 수위의 시계열 (1983년)	208
그림 3.4.79 1분 유한차분 모델 수위의 시계열 및 이론식(Kaistrenko's equation)을 사용하여 변환한 수위의 시계열(1993년)	209
그림 3.4.80 1983년 지진해일에 대한 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이), 관측된 처오름 높이	210
그림 3.4.81 1993년 지진해일에 대한 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이), 관측된 처오름 높이	210
그림 3.4.82 가상 지진 해일(Hypoth1)에 대한 동해 주요 해빈에서의 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이)	211
그림 3.4.83 가상 지진 해일(Hypoth1)에 대한 동해 주요 해빈에서의 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이)	211
그림 3.4.84 가상 지진 해일(Hypoth3)에 대한 동해 주요 해빈에서의 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이)	212
그림 3.4.85 CDT 기법으로 구성한 조격자와 세격자	212
그림 3.4.86 동해의 무역항 및 연안항에서의 더욱 상세화 된 세격자 시스템	213
그림 3.4.87 일본 항구의 상세화 된 격자체계 및 구성	213
그림 3.4.88 주문진항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	214
그림 3.4.89 후포항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	215
그림 3.4.90 구룡포항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	216

그림 3.4.91 부산남항 최대 지진해일고 (단위 : cm)	217
그림 3.4.92 울릉도 최대 지진해일고 (단위 : cm)	218
그림 3.4.93 주문진항 지진해일고 시계열	219
그림 3.4.94 후포항 지진해일고 시계열	219
그림 3.4.95 구룡포항 지진해일고 시계열	219
그림 3.4.96 부산남항 지진해일고 시계열	220
그림 3.4.97 부산남항 지진해일고 시계열	220
그림 3.4.98 주문진항에서의 유속장	221
그림 3.4.99 주문진항에서의 유속장	221
그림 3.4.100 동해안 해변에서의 1983년 지진해일에 대해 더욱 상세화 된 유한 요소 모델 수위의 시계열 및 이론식을 사용하여 변환한 수위의 시계열	222
그림 3.4.101 동해안 해변에서의 1993년 지진해일에 대해 더욱 상세화 된 유한 요소 모델 수위의 시계열 및 이론식을 사용하여 변환한 수위의 시계열	223
그림 3.4.102 동해 주요 해변 39개소의 가상지진해일 세 케이스에 대해 더욱 상세화된 유한 요소 모델의 최대해일고 및 이론식을 사용하여 변환한 수위의 최大海일고(처오름 높이)	224
그림 3.5.1 설계파 추산 흐름도	228
그림 3.5.2 주요 연안 격자점의 위치도	229
그림 3.5.3 설계파 검색 프로그램에 의한 재기년도별 설계파의 검색 예	230
그림 3.5.4 2005년 개정설계파의 격자점의 심해설계파를 경계조건으로 사용한 예	231
그림 3.5.5 52개 항만의 위치와 심해설계파 격자점	251
그림 3.5.6 부산신항 전면 해상의 수심분포도	252
그림 3.5.7 16개 방향의 심해입사파에 대한 천해파랑 산출결과의 예	253
그림 3.5.8 16개 천해파랑 산출결과에서의 최대값의 공간분포	254
그림 3.5.9 추자도항에서의 극치분석에 의한 천해 설계파(좌), 30개 태풍 최대 파고 및 파향(우)	256
그림 3.5.10 갈두항에서의 극치분석에 의한 천해 설계파(좌), 30개 태풍 최대 파고 및 파향(우)	256
그림 3.5.11 거제도에서의 심해 설계파를 경계조건으로 사용한 방법(좌)과 천해파랑을 산출하여 극치 분석한 방법(우)의 유의파고 및 파향의 비교.	256
그림 3.5.12 각 항의 주요 영역에서의 최대파고 및 파향 분포도(A01~A04)	257
그림 3.6.1 상치콘크리트 보수·보강방안	297

그림 3.6.2 사석경사제 피복재 보수·보강방안(1)	298
그림 3.6.3 사석경사제 피복재 보수·보강방안(2)	298
그림 3.6.4 직립제 피복재 보수·보강방안(1)	299
그림 3.6.5 직립제 피복재 보수·보강방안(2)	299
그림 6.2.1 설계 해면	345
그림 6.3.1 지진해일의 파력 모식도	346

제 1 장 연구개발 과제의 개요

제 1 절 연구개발의 필요성

- 우리나라는 해마다 태풍에 의한 연안 침수에 의해 막대한 재산 피해를 입고 있어 이러한 피해를 줄일 수 있는 대책이 필요하다. 강력한 태풍의 내습시 연안 저지대에 해일을 유발시켜 인명의 손실뿐만 아니라 항만시설의 파괴 그리고 주택, 농경지 및 각종 시설의 침수 등에 의한 피해를 발생시키고 있어 이를 줄일 수 있는 대책이 요구된다.
- 최근 태풍 매미, 루사 등으로 인한 해면 상승으로 인명피해와 재산피해가 국민적 관심으로 부상되고 있고, 서남아시아 지진해일로 국제적으로 자연재해 저감대책 수립의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 동해안에서 연안항 및 무역항에 대한 지진해일 안정성 검토가 필요한 실정이다.
- 연안에서는 파랑, 조석, 폭풍해일이 서로 상호작용을 강하게 일으키며, 이에 따른 국지 해수면 상승을 산출하기 위해서는 파랑, 조석, 폭풍해일 모두를 정확히 계산해야 하므로, 파랑, 조석 및 해일 모델이 복합적으로 운영되는 정밀 이상해면 추산모델의 개발이 요구된다.
- 연안해일 발생 및 이상 해면상승에 따른 연안침수, 제반 연안방재 시설물의 붕괴 및 유실, 해안침식 등에 의한 연안재해를 발생 직전의 단기예보로는 피해를 줄이는데 한계가 있으며, 재기년도별 설계해면을 산출하여 연안 및 항만 개발시에 사전에 대비하여야 하고 기존 시설물의 안전의 점검으로 사전 조치가 필요하다.
- 연안에서의 자연재해 피해는 천문조, 기상조, 파랑 등에 의해 해수면 상승으로 역학적 파괴력은 없이 단지 침수만으로도 피해가 발생하며, 평소에는 미치지 못하던 파랑이 높아진 해수면을 따라 영향을 미치게 되어 Wave runup으로 침수도 커질 뿐만 아니라 파력의 작용으로 해안침식, 구조물 파괴 등의 피해가 발생한다.

이러한 연안재해 방지를 위한 대책은 첫째 단기예보에 의한 대피 등으로 피해를 저감시킬 수 있고, 둘째 장기예보로 방조제 등 연안 방호시설의 건설, 저지대로부터의 이주, 각종 공사나 개발시 연안방호시설의 적정한 설계를 통해 재해피해를 방지하거나 최소화할 수가 있다. 이상 해수면 상승에 의한 방재대책은 주로 두 번째에 해당되는 장기예측에 의한 사전대책이 주요 문제이다.

- 연안방재 측면에서 연안의 방호시설이나, 항만, 해안구조물의 설계에 있어서 구조물 축조 지점에 내습하는 파랑이나 이상해면 상승의 최대 규모를 적정하게 평가하는 일이 대단히 중요하다. 파랑의 경우 극치 추정에는 수십년 이상의 장기간에 걸치는 고파 관측자료를 필요로 하나 장기 파랑 관측자료를 입수하는 일은 대단히 어려운 일이므로 과거 수십년의 이상 기상요란에 대한 파랑추산에서 얻어지는 고파의 극치자료의 통계해석에 의거하여 행해지는 것이 통례이다. 마찬가지로 이상해면의 경우에도 극치추정은 수십년 이상의 장기간에 걸친 관측자료를 필요로 하나 관측지점이 한정되어 있어 관측자료를 얻는 일이 대단히 어려운 일이므로 수십년 이상의 과거 이상 기상상태에 대한 이상해면 추산에서 얻어지는 이상해면의 극치자료의 통계해석에 의거하여 행해지는 것이 통례이다.
- 연안 해일에 의한 재해를 근본적으로 줄이기 위해서 연안시설물의 안전관리 및 국토 안전관리를 위한 장기대책을 수립하고 연안 재해 방지를 위해서는 연안 방재시설물의 설계조건 추산으로 해일재해에 대한 과학적 대처기술의 개발이 시급히 요구된다.
- 정밀 격자망에 의한 국지 이상 해면상승의 설계해면을 산출하여 제공하고 설계해면 정보를 토대로 해일 재해 피해저감을 위한 연안 개발, 구조물 건설의 제한, 기존 시설물의 대피 이전 혹은 보호 등 대책을 세우는 것이 요구된다.
- 향후 더욱 강해지는 추세의 태풍에 의한 항만시설물의 안전을 확보하기 위해서는 기존 항만 구조물의 안전성 평가와 이에 따른 보충, 보완 대책 수립이 요구된다. 또한, 우리나라의 항만 구조물은 1988년 한국해양연구소가 산출한 심해 설계파에 근거하여 설계된 것이 많은데 2005년 한국해양연구소에서 재산출하여 상당히 증가된 심해 설계파를 제안한 바 있다. 이에 따라 이에 대한 천해 설계파 산출로 기존 항만 시설물의 안정도 평가 및 보완 대책이 필요하다.

- 폭풍해일 및 지진해일에 의한 해면상승과 신규 심해파의 증가 추세를 고려한 기존 항만 시설물에 대한 안전성 평가를 토대로 보수 및 보강 우선순위를 결정하여 방재계획을 수립함으로써 예산의 효율적인 활용과 인명 및 재산피해의 최소화가 필요하다.
- 국내에는 해일에 대한 항만시설 설계기준 및 안전성 평가기준이 수립되지 않은 상태로 폭풍해일 및 지진해일에 대한 항만구조물 설계기준 정립하여 보완할 필요가 있다.

제 2 절 연구개발의 내용

1. 연구개발의 최종목표

연안에서 태풍, 폭풍 및 지진해일에 의한 연안재해 방지를 위해 정밀격자 이상 해면 수치모델링 기술을 개발하고 그 적용을 통해 우리나라 주요 연안 및 항만에 대한 설계해면을 산출하는데 주요 목적이 있다. 그리고 전국 무역항 및 연안항에 대해 개정된 심해 설계파를 이용하여 천해 설계파를 추산하고, 추산된 설계 해면자료와 더불어 항만 구조물의 안정성을 분석하고 항만 시설물의 보수보강 방법, 우선순위, 소요예산 등 대책 기반을 수립하는 것도 이사업의 한 목적으로 하고 있다.

2. 연구개발 목표 및 내용

- 해면 관측자료의 수집, 분석, 정리 및 집중 현장관측 실험
- 정밀 격자 폭풍해일 수치 모델 수립 및 폭풍 해일 장기 추산 체제 구축
- 관측자료를 이용한 폭풍해일 모델의 검증 및 개선과 조석과 파랑의 상호작용을 고려하여 체제 수립
- 주요 태풍분석 및 정밀격자 기압장, 해상풍 산출로 폭풍해일 모델 입력자료 산출
- 장기 폭풍 해일 시뮬레이션 및 극치 통계분석으로 전 연안 및 항만의 재현빈도별 설계 해면 산출
- 설계해면 산출에 지구 기후변화에 따른 해수면 상승 및 태풍 강도변화 영향 분석
- 항만 시설물 안정성 평가를 위해 새로 산정된 심해 설계파를 적용한 전 항만의 천해 국지 설계파 추산

- 동해 연안항 및 무역항에 적용하기 위한 지진해일 모델 수립
- 동해 연안 및 항만에서 지진해일 모의를 통한 설계 해면 추산
- 항만 시설물의 보수·보강방안 수립을 위한 기초자료 조사
- 항만시설 안정성 평가 및 설계기준 정립
- 안전성 종합평가 및 보수·보강 방안 마련

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국제적 동향

1. 연구 동향

- 유럽은 북해의 저지대에서 폭풍해일에 대한 피해가 많아 이 분야에서 영국, 네덜란드, 덴마크, 독일 등을 중심으로 각국에서 많은 연구가 수행되어 영국, 네덜란드, 덴마크 등 여러 나라는 해일경보 시스템을 운용하고 있다. 그동안 개발된 기술이 상용화되어 방재 및 연안 개발 등에 활용(DHI Mike System, Delft의 DELFT3D, 등)되고 있으며, 최근에 와서는 유럽 공동체의 여러 연구기관에서 여러 차례에 걸쳐 MAST Program(The Marine Science and Technology Programme)에 대한 공동연구를 수행하고 있다.
- 일본의 경우 폭풍해일 등 방재 관련 연구는 태풍 5913호(1953년 9월)로 인해 동해지구 연안에 막대한 피해를 입고 나서 방파제를 포함한 연안구조물의 개량복구방침을 수립한 후에 최극해면에 대한 체계적인 연구가 시작되었다. 이후, 기상연구소, 방재과학기술연구소, 항만공항기술연구소 및 각 대학의 방재 관련 연구소에서 지속적인 연구가 활발히 수행되고 있으며, 방재과학기술연구소에서 폭풍, 호우, 호설, 홍수, 해일, 지진, 쓰나미, 화산분화 등 일본에서 자연재해를 일으키는 현상들에 대한 기초연구를 장기간에 걸쳐 수행하고 있다.
- 미국은 폭풍해일 예보업무를 담당하고 있는 해양대기청(NOAA) 주관으로 허리케인에 의한 폭풍해일의 실시간 감시시스템과 예측시스템 구축에 많은 연구를 수행하고 있으며, 연안방재 시설물 설계와 관련하여 미육군 공병대(US Army Coastal Engineering Research Center)의 지원으로 감시망 구축과 예측기술 개발에 대한 연구를 수행하고 있다. 해군의 Office of Naval Research에서 Coastal Dynamics Program과 Ocean Modelling and Prediction Program을 장기간 운영하여 연안에서 조석, 폭풍해일 및 파랑 등에 의한 이상 해면상승 관련 현상의 기초 연구에 투자하고 있다.

- 해일, 파랑 등 해상의 제반 상태에 대해 정확히 추산하기 위해서는 태풍에 의한 해상에서의 정확한 풍역의 결정이 가장 중요한 요소인데 미공병단(CE) 지원하에 Oceanweater, Inc(OWI)에서 개발한 해상풍 추산모형은 미공병단의 wind 모형을 포함하는 수치 소용돌이 경계층 모형들 중 하나로 개발되어 사용되고 있다.
- 일본과 미국 등에서는 지진해일에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본 Tohoku 대학교에서는 지진해일 방재대책과 피해저감에 대한 연구를 수행하여, 지진해일 발생시 해안지역의 주민에게 조기경보 발령시스템을 활용하고 있다. 일본 기상청에서는 지진해일 조기 감지망과 긴급 정보위성 통보시스템에 대한 연구성과로 5분정도에 지진해일을 경보할 수 있는 체제를 구축하였다. 미국 Cornell 대학교에서는 지진해일의 3차원 전파와 처오름현상 연구를 수행하였다.
- 또한 전자계산기 성능의 발전과 이론적 방법과 경험적 방법에 의한 특성계수 등을 도입하여 동수역학 이론에 근거한 수치모형실험을 통해 태풍 및 폭풍시 시공간적으로 해면 변동성을 추산하는 수치모형기법이 발전되어 왔다.
- ADCIRC 모델, FVCOM 모델 등 Unstructured grid 모델에 의한 폭풍해일 산출 모델이 개발되어 실용화 되었고 이를 파랑모델과 결합시켜 더욱 정밀 격자에서 해수면의 추정이 가능하게 되었다.

2. 상세 기술개발 내용

연안 구조물의 설계조건에서 가장 중요하게 고려해야 할 요소는 바람, 파랑, 해면 등 자연적 요인의 극치값을 결정하는 것이다. 이러한 자연적 요인의 극치값은 가장 이상적으로는 원하는 재현기간(return period)에 걸쳐 관측된 자료로부터 얻어질 수 있다. 연안 구조물 설계시 고려되는 재현기간은 구조물의 중요성과 내구연한에 따라 다르지만 통상적으로 50년을 사용한다. 파랑자료의 경우, 50년 이상 장기간에 대하여 축적된 관측자료 또는 추산자료가 거의 없으므로 확보된 단기간의 자료로부터 외삽(extrapolation)하여 극치값을 계산하며, 이 때 극치통계기법이 사용된다. 연안공학에서 극치통계기법 중, 고극치해면은 연안구조물의 설계, 연안방어체계 수립 및 이행 등에 활용하며, 저극치해면은 연안에 위치한 원자력 발전소의 취수구 및 조력 발전소의 터빈 위치를 결정하는데 사용한다.

해일 및 파랑에 대한 장기간 관측자료가 드문 반면, 과거 장기간에 걸쳐 기록되어 온 폭풍 및 태풍 등 악기상 관측자료를 수치계산법에 적용하여 구한 파랑 예측자료를 활용하면 보다 정확한 파랑의 극치값 추정이 가능하다. 1970년대 중반 이후, 폭풍해일의 수치실험과 시뮬레이션이 급속하게 개발되어 왔다. 해일 예·경보를 위해 개발된 수치모형에는, 천문조와 해일의 비선형 상호작용을 고려한 예측방법, 해일과 파랑의 상호작용을 고려한 예측방법(Masterbroek et al., 1993)들이 개발되었다(Heaps, 1983). 예측 모형기법으로는 유한요소법 (Finite Element Method, FEM)과 유한차분법 (Finite Difference Method, FDM)으로 나눌 수 있다. 특히, 유한요소법에 의한 수심적분된 천해파 방정식의 해에 기초한 2차원 수치모델은 천문조와 태풍 기인 폭풍해일과 같은 large-scale 과정에 기인한 해수면 상승이나 흐름을 계산하기 위해 광범위하게 활용되어 왔다(Lynch and Gray 1979; Lynch 1983; Le Provost and Vincent 1986; Foreman 1988; Vincent and Le Provost 1988; Gray 1989; Walters and Werner 1989; Werner and Lynch 1989; Westerink and Gray 1991; Westerink et al. 1992; Blain et al. 1994; Kolar et al. 1994b; Feyen et al. 2000).

폭풍 및 태풍해일 예측 또는 추산과 관련하여 해상에서 정확한 풍역 결정이 가장 중요한 요소다. 태풍 해상풍 추산 기술은 1960년대 말 뉴욕대학의 Cardone 모형 (Cardone, 1969, 1994)이 개발되었고, 이후 미공병단 (CE)의 지원으로 보다 정밀한 해상풍 예측을 위한 소용돌이 경계층 모형이 개발되었다 (Tompson et al., 1996). 한편, 유럽에서는 1980년초에 북해를 대상으로 네덜란드의 왕립기상연구소와 독일의 막스프랑크 기상연구소의 공동연구로 개발된 해상풍 추산모델 (Günther, 1981)이 있고, 태풍 영향권 내에서 기압장을 파라미터화하여 해상풍을 구하는 방법 (Schloemer, 1954; Fujita, 1962; Holland, 1980) 등이 개발되었다.

개발된 주요 해일 예경보 모델로는, 먼저, 영국의 Met Office에서 48시간 예보를 수행하는데 사용하고 있는 POL storm surge model이다(그림 2.1.1 참조). 이 시스템은 Bristol Channel과 Severn Estuary의 복잡한 지역에서 예측을 위해 1km의 정밀격자와 1-D river 모델을 가진 12km의 대륙붕모델 (CS3)로 구성되어 있다. 이 모델은 Met Office의 12km 격자 "mesoscale" 기상예보모델로부터 기상자료를 입력으로 운용된다.

덴마크의 기상연구소(DMI : Danish Meteorological Institute)에서는 3차원의 DMI-BSHcmod 모델을 사용하여 폭풍해일 예보를 수행하고 있다. 이 시스템은 수치기상예보

(NWP: numerical weather prediction) 모델을 기반으로 모든 해양예보를 수행한다. 이 3차원 메인 모델이 작동하지 않을 때는 2차원 모델인 Mog2D가 백업용으로 사용되고 있다. DMI의 2-D 및 3-D 모델은 북해와 발틱해 전체를 포함한다(그림 2.1.2 참조).

미국은 해양대기청 (NOAA)을 주관으로 플로리다 마이애미에 위치한 National Hurricane Center (NHC)와 하와이 호놀룰루에 위치한 Central Pacific Hurricane Center (CPHC)를 두고 허리케인에 의한 폭풍해일을 하루 4번 72시간 동안 감시 및 예측하는 시스템을 구축하고 있다. 또한, NOAA의 National Weather Service (NWS)에서는 자체 연구 개발한 SLOSH 해일예보모델 (Jelesnianski et al, 1992)을 태풍해일의 현업예보에 활용하고 있다 (Kim et al, 1996; Chen and Shatter, 2001).

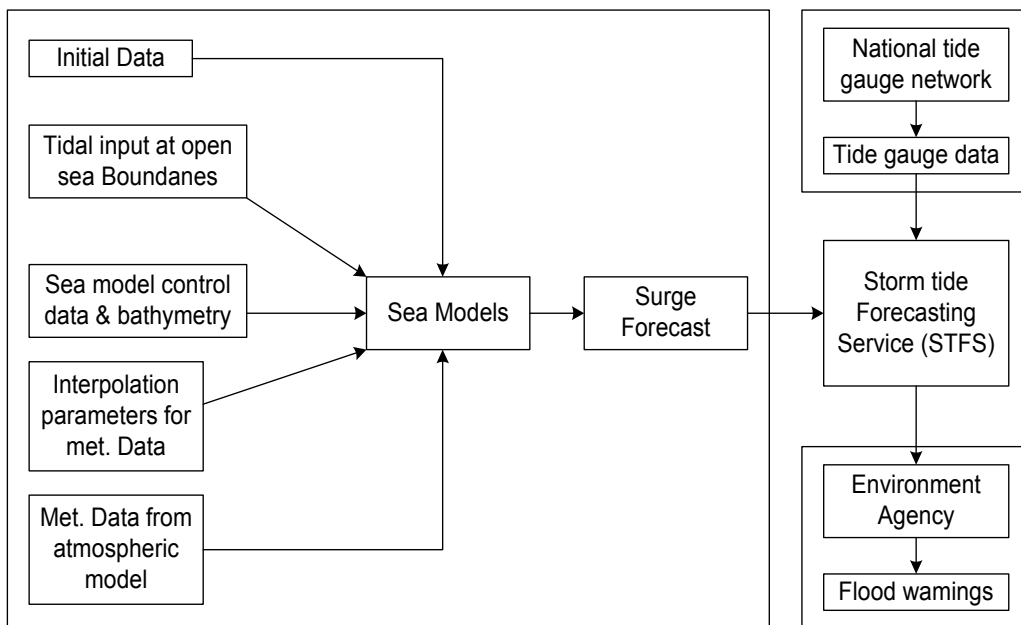


그림 2.1.1 영국의 POL storm surge model의 구성도

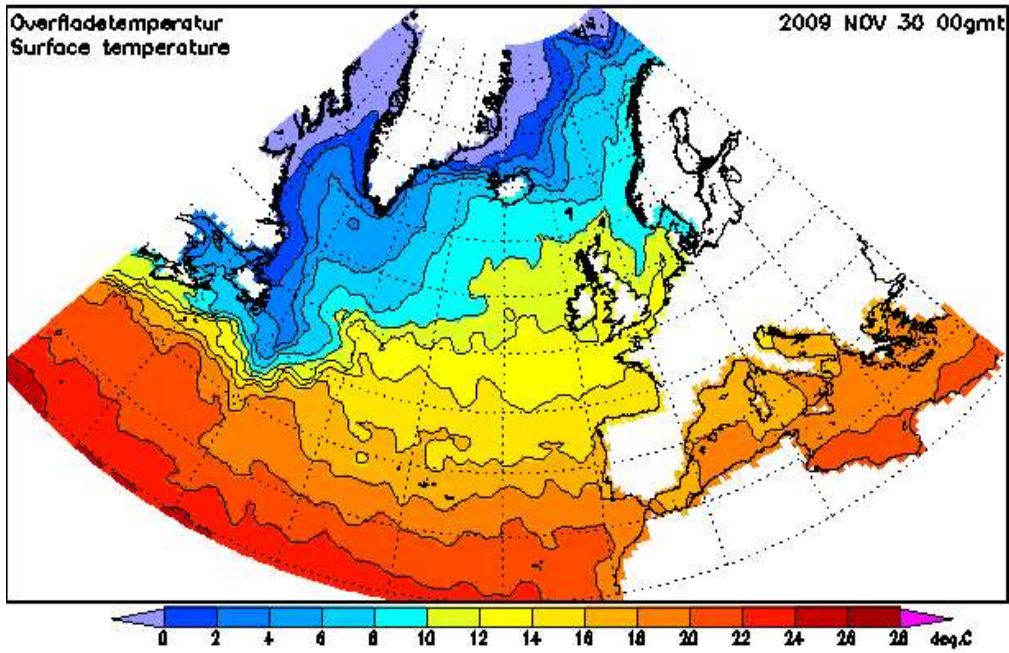


그림 2.1.2 . 덴마크 기상연구소(DMI)의 해양예보모델에 사용되는 도메인

처음에 SLOSH는 curvilinear, polar coordinate grid schemes를 사용하였으나, 최근 해안선 근처에서 셀 크기를 고해상도로 할 수 있는 elliptical, hyperbolic grids 시스템을 사용하고 있다. 각 grid cell은 dry역 (침수 안된 지역)과 wet역 (침수된 지역)을 구분할 수 있는 다수의 요소 (elements)를 포함하고 있다. SLOSH 모델은 NOAA의 NHC와 지역 기상예보센터에서 허리케인의 중심기압, 크기, 경로를 고려함으로써 허리케인에 의한 해일고를 예측하는데 사용되고 있다. SLOSH 모델은 허리케인의 크기, 강도, 경로 어떤 특정 지역에서 해일에 의한 침수를 평가하기 위해 연안지형을 사용한다. 그림 2.1.3은 NHC에서 예보하는 폭풍해일의 예측결과의 한 예를 보여주고 있다.

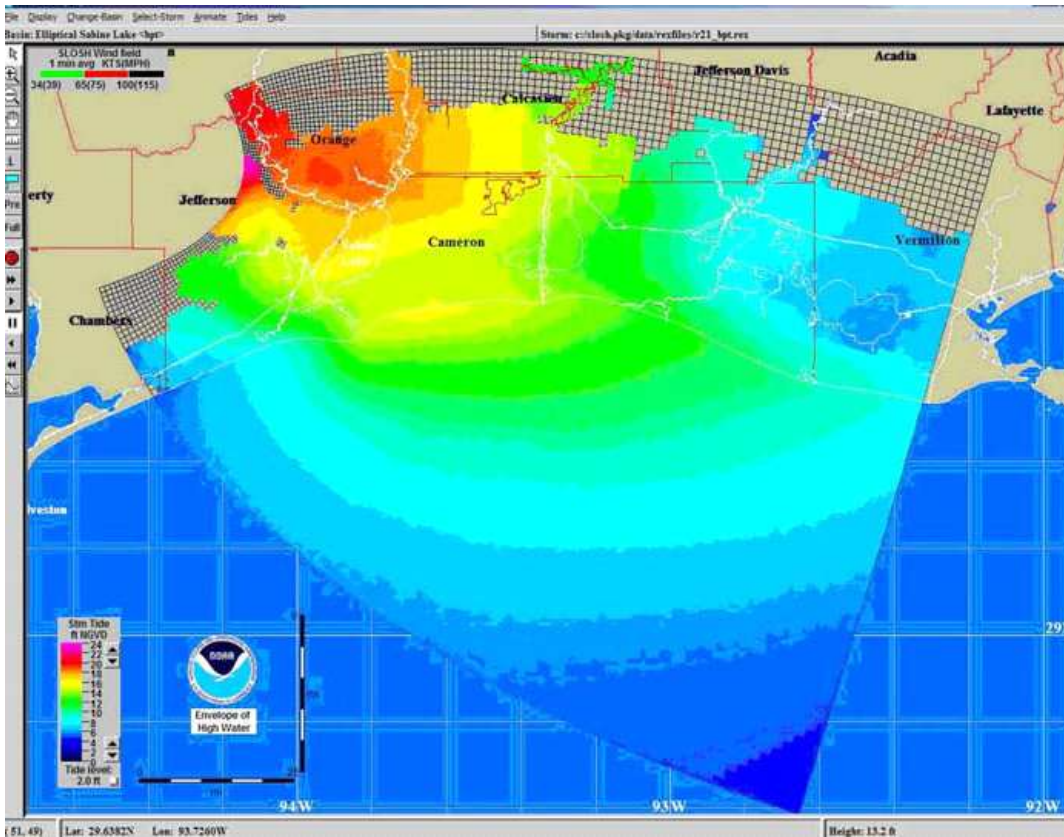


그림 2.1.3 미국 NOAA의 SLOSH 해일예측모델을 사용하여 허리케인 리타(Rita)에 대하여 계산한 최대 해일고 분포 예측결과

한편, 최근 미육군 공병대 등에서 허리케인에 의한 침수범람과 폭풍해일을 계산하기 위해 ADCIRC (ADvanced CIRculation model)을 사용하고 있는데(Luettich et al., 1992), 이 모델은 유한요소법 (FEM)을 사용해서 공간을 분리하고 유한차분법(FDM)을 사용해서 시간을 분리함으로써 고도로 유연한 비구조 격자(unstructured grid)의 사용을 가능하게 한다. ADCIRC은 태풍해일 시뮬레이션뿐만 아니라 염분, 오염물 수송, 3차원 퇴적물 이동, 지형변화 모델링에도 적용할 수 있다. 최근 많은 대학에서 폭풍해일과 파랑에 의한 침수범람을 예보하기 위해 ADCIRC를 사용하고 있다. 이들 예보는 NWS의 태풍특성정보에 기반하고 있으며 신속한 예보를 위해서 coarse mesh를 사용하고 있다 (그림 2.1.4 참조).

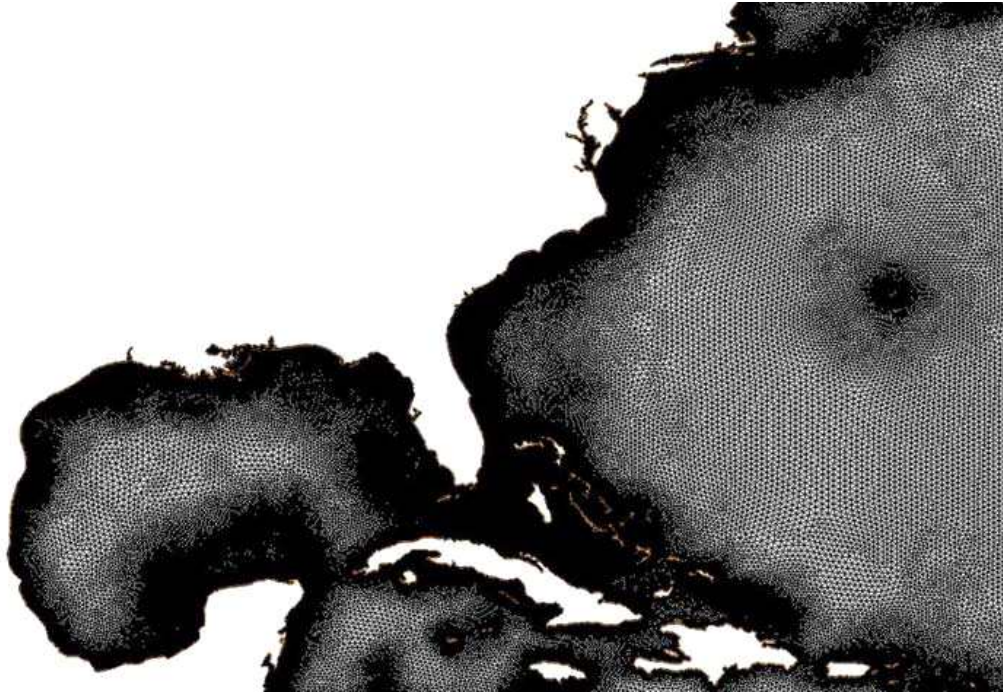


그림 2.1.4 미동부 대서양 연안에 미육군 공병대 ADCIRC 모델을 사용하기 위하여 생성한 비구조 격자의 예

중국의 경우, 1993년부터 1995년에 걸쳐 13개의 심각한 폭풍해일이 발생하여 막대한 재산피해와 인명피해를 입었는 바, 국가해양예보센터(National Marine Forecast Station)와 많은 지방 해양예보센터에서 연안 도시의 해양 재해방지를 위한 예보능력을 강화하기 시작했다. 중국에서 폭풍해일에 대한 수치모델에 대한 연구는 각 지역에서의 예보능력을 향상시키기 위해 “8차 5개년 계획”에 따라 수행되고 있으며, 국립해양환경예보센터(NMEFC : National Marine Environmental Forecasting Centre)의 국지 지역 폭풍해일 수치예보시스템에 대한 연구가 이 계획의 핵심사업이었다. Wang Xinian 과 Yin Qingjiang (2002)에 의해 태풍폭풍해일 모델이 개발되었고, 이 모델은 중국 연안을 5개 예보지역으로 구분하고 있다.

일본의 경우, 기상청 (JMA : Japan Meteorological Agency)에서 폭풍해일 예보를 위한 모델을 하루 8회 운용하여 일본 연안을 따라 290개 지점에서의 폭풍해일을 33시간 예보를 수행하고 있다. JMA의 폭풍해일 모델은 연직으로 수심적분된 운동방정식으로 구성된 2차원의 천해방정식을 사용하고 있다. 폭풍해일 모델의 운용을 위해 2가지 종류의 기상 모델을 사용하는데 하나는 태풍구조의 간단한 파라미터 모델이고, 다른 하나는 JMA nonhydrostatic mesoscale model이다 (Saito et al., 2006).

제 2 절 국내 폭풍 및 지진 해일 추산기술 현황

- 한국해양연구소와 성균관대는 교육과학기술부(전, 과학기술부) 지원하에 협력 연구를 통해서 “해상 연안재해 대응기술 개발”이라는 연구과제 수행으로 태풍시의 해상풍, 파랑, 해일 등의 각종 해양모델을 수립하여 한반도 연안에서 연안방제를 위한 이상해면을 추산한 바 있다. 그리고 기상연구소 및 대학 연구소에서 광역의 폭풍해일 모델의 수립과 적용에 대한 연구를 수행하였다.
- 과거에 해안방재 구조물 설계를 위한 설계해면은 간단하게 조석정보와 태풍에 의한 기압하강에 의한 해수면 상승을 간단하게 고려하여 설계해 왔는데 근래에 와서 연안, 항만시설 설계시에 해일 수치모델에 의해 설계해면을 산출하여 활용하는 경우가 많아져 폭풍해일 정밀 산출에 대한 경험이 늘고 있다.
- 한국해양연구원에서는 90년대 초에 그리고 90년도 말에 교과부(전, 과학기술부)의 연구지원으로 폭풍해일 및 태풍해일 수치 시뮬레이션 기법과 극치 확률통계 기법을 적용하여 우리나라 해역 전역에서의 설계해면 산출 연구 사업을 수행하였으나 격자의 크기가 크고 신뢰도에 대한 충분한 검증이 안되어 해일 재해 증장기 대책으로 활용하는데 한계가 있었다.
- 한국해양연구원에서는 설계파 산출을 위해 장기간의 태풍 자료 정밀분석과 태풍에 의한 정밀 해상풍 산출 등 장기 폭풍해일 시뮬레이션을 위한 입력자료 생산의 기반을 마련했다. 전 해상에 걸쳐 18 km 간격의 격자에 대한 설계파 재산출로 전국 항만 시설물의 안정도 평가를 위한 천해 설계파 산출을 위한 기반이 수립되었다.
- 지구 기후변화에 따른 평균 해수면 상승과 태풍강도의 변화에 의한 이상해면, 해일 등에 의해 우리나라 주변 연안에서의 자연재해 피해가 확대될 것이 예상되나 이러한 자연재해 피해저감에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다. 최근 한국해양연구원에서는 설계파 산출시에 지구 온난화에 의한 태풍 강도의 변화 고려를 위해 시도하고 있으나 아직 초보적인 단계이다.

- 지진해일에 관한 국내에서의 본격적인 연구는 1993년 국립방재연구소에서 1983년 발생한 동해 중부 지진해일과 1993년 발생한 북해도 남서 외해 지진해일에 대한 초오름높이 조사를 실시하면서 부터이다. 지금까지 한양대학교 및 성균관대학교를 중심으로 지진해일과 관련하여 여러 가지 연구가 수행되어 지진해일 수치해석에 필요한 여러 기법들을 개발하였고, 일부 실제문제나 단순화된 문제에 적용하여 지진해일 수치해석에 필요한 역량을 확보하였다

- 우리나라는 항만 및 어항 설계기준서와 일본의 항만설계기준, 미국의 Shore Protection Manual, DM 26-1, DM 26-2, DM 26-3의 기준을 준용하고 있는 실정이다. 또한, 아직까지 획일적으로 재현기간별 시설물의 설계파랑과 주기에 의한 시설물 안전설계기준에 준해 설계하고 있는 실정이나 최근에 한국해양연구소의 항만공학 연구실을 중심으로 항만 구조물 안전 설계 관련 연구가 시작되고 있다.

- 국내의 경우 1997년 8월 백중사리시에 발생한 서해연안 해수범람을 계기로 해일 예측 모델에 대한 많은 연구가 수행되었다. 우리나라에서 최근 제한된 수의 조화상수에 의한 모델 결과로서 검조소가 아닌 임의의 지역에서 천문조의 추산 방법에 대한 연구가 이루어졌다. 한편 교과부(전, 과기부)의 방재기술개발 사업의 세부과제로 1995-1997년 기간에 수행된 해상 연안재해 대응기술 개발(과기부, 1998)에서는 우리나라 주변 해역에 1/12도 해상도 조석·해일 모형을 개발, 적용하여 과거의 주요 태풍에 대한 모형의 매 해상 격자점에서의 조석과 해일의 시계열을 발생시켜 이 시계열에 의한 자료로부터 한반도 주변해역의 극치해일과 극치해류를 추정할 수 있는 시계열 시뮬레이션 자료를 산출하였고, 우리나라 전 연안에서의 재현년도별 해일고 높이분포 등을 산출하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연안 시설물의 설계 해면 산출 방법 및 요약

1. 태풍에 의한 설계해면 산출

가. 개요

폭풍해일의 후보에 의한 설계 해면의 추산은 기본적으로 지구의 기후 변화는 아주 느려 지질학적 변화 주기는 워낙 크기 때문에 50년 혹은 100년과 같은 상대적으로 매우 짧은 기간 동안에는 거의 정상 상태라고 가정한다. 따라서 과거 50년 동안의 기후의 특성은 향후 50년간의 기후의 특성과 같다는 가정 하에서 과거 장기간의 후보에 의해 폭풍해일의 특성을 알아낸다. 후보 기간이 충분히 길지 못하거나 후보의 입력 자료의 정확성이 보장되지 못하는 경우에는 후보를 제한된 기간에 대해 수행하여 극치 통계에 의해 외삽에 의해 원하는 기간 동안의 극값을 구한다.

과거에는 지구의 기후 변화는 아주 주기가 크기 때문에 50년의 기간은 거의 정상 상태라는 가정에 문제가 없었다. 그러나 최근에는 전지구의 온난화로 해수온 상승이 뚜렷이 나타나 이에 따른 폭풍의 강도나 빈도의 변화가 예상 된다. 지구의 기후 변화가 빠른 속도로 진행 되어 50년 내로 상당한 수온 상승과 해수면 상승이 예상되며 이에 따른 폭풍의 강도도 크게 달라질 수 있을 것이다. 이 경우에는 고전적인 설계조건의 산출 방법이 기본 가정을 받아들일 수 없게 되며 그 산출 결과도 신뢰성이 의문시 된다.

나. 설계 해면의 산출 방법 및 오차 저감

해면은 조석의 영향, 바람에 의한 풍성류에 의한 연안에서 해수면 상승 및 기압 변동에 의한 해수면 상승으로 크게 3가지로 나눌 수 있다. 태풍에 의한 해상풍의 효과와 기압의 효과는 보통 동시에 발생하여 이를 합쳐서 폭풍해일이라 부른다. 폭풍해일과 조석은 상호 비선형 작용으로 선형적 합과는 조금 차이가 나는데 이는 조석의 위상에 따라 달라진다. 조석 정보와 폭풍해일 정보를 따로 얻고 이를 합칠 때에 이들 간의 상호 작용을 고려하는 것이 현실적이다. 구조물 설계를 위한 설계해면은 조석의 영향이 큰 경우

에 폭풍해일이 겹칠 경우를 고려하기 때문에 만조시에 해일에 도달하여 조석과 해일간의 상호 작용을 고려하여야 한다.

설계 해면 산출 방법은 다음과 같이 3가지로 나눌 수 있다.

- I) 과거 장기간 기상 자료를 이용하여 우리나라에 영향을 크게 준 폭풍에 대해 폭풍해일을 시뮬레이션하여 각 지점에서 극치 분석하여 설계 해면을 산출하는 방법으로 재기년도 별 설계해면이 산출 되는 잇점이 있다. 해양구조물의 설계에서 사용되는 재현기간은 동안의 관측자료 또는 산출 자료가 없는 경우에는 제한된 기간의 자료로부터 극치통계 법에 의해 외삽하여 극치값을 계산하게 된다. 이 방법은 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있고 또 우리나라 서해안과 같이 큰 태풍이 내습하는 것이 흔하지 않는 경우에 과거 태풍의 영향을 적게 받은 지역은 설계 해면이 작게 나오는 문제점이 있다.
- II) 과거에 영향을 가장 크게 준 태풍을 설계 태풍으로 정하여 각 항만 마다 가장 영향을 크게 줄 수 있는 태풍의 진로를 택하여 수치 모형 실험으로 설계 해면을 정하는 방법으로 계산 시간이 적게 걸리는 장점이 있다. 일본의 경우는 이세만 태풍을 설계 태풍으로 사용하는데 우리나라는 남해 동부지역은 과거에 큰 영향을 준 태풍 사라, 태풍 셀마, 태풍 매미 등 거대 태풍을 설계 태풍으로 잡을 수 있지만 이런 강도의 태풍이 서해안에도 영향을 미친 적이 없어 전 해안에 대해 일률적인 적용은 문제가 있다. 현실적인 방법은 “서해와 남해 서부”와 “남해 중부, 동부”를 구분하여 각각에 대해 설계 태풍을 정하여 여기에 대해 각 항에서 큰 영향을 주는 경우를 설계 해면으로 정할 수 있다.
- III) 과거 태풍 분석으로 각 지점에 따라 서로 다른 설계 태풍을 설정하여 이로부터 설계 해면을 구하는 방법인데 설계태풍을 구하는데 방법에 따른 차이가 있을 수 있다.

설계 해면 산출 방법은 고전적인 방법으로 지구의 기후적 특성이 크게 변하지 않고 정상적이라는 가정으로 과거 장기간의 통계적 특성을 추산하여 같은 기간 동안의 미래에 대한 예측 자료로 사용하고자 하는 그 방법 차체에 대한 오차가 클 수 있다. 지구 기후 변화에 의해 이 고전적인 추정 방법 차체가 의문이다. 아직은 이이에 대한 해결이 없고 지구 기후 변화의 영향에 대해 더 많은 연구가 필요하다.

폭풍의 경우는 시, 공간적인 변화가 큰 경우 많다. 하층 대기 경계층에서 안정도,

sea surface roughness 등에 의한 하층 대기의 연직 profile 및 shear stress의 추산에 오차가 있으며 특히 빨리 움직이는 폭풍의 경우는 더 켄 수 있다. 태풍모델에 의해 시공간적 변화를 잘 제현 할 수 있는 모델을 택하여야 하고 그 입력으로 필요한 태풍 파라메타에 대한 추산을 가능하면 정확히 하는 것이 요구된다. 해상에서는 관측 자료가 크게 부족하기 때문에 위성 관측 자료, 수치 모델 결과 등 이용할 수 있는 자료를 총동원하여 정확한 태풍 분석이 필요하다. 폭풍해일은 남해안과 같은 복잡한 해안에서는 국지적 영향으로 공간적 변화가 커지게 되는데 이를 잘 고려하기 위해서는 정밀 격자 수심 자료가 필요하다. 가용한 수심 정보를 잘 이용하여 수심 격자망을 정확하게 구상하는 것이 중요하다.

해수면은 조석과 폭풍해일의 복합 영향으로 조석 정보를 정확히 추산하는 것과 조석과 해일의 상호 영향을 잘 파악하는 것이 필요하다. 조석과 폭풍해일의 상호 작용은 장파 방정식에서 비선형 이류항, 마찰 소산항, 천해항 등에서 조석과 해일은 상호 작용은 복잡하여 폭풍 해일을 해상풍에 의한 부분과 기압에 의한 부분을 구분하여 파악하는 것이 유리하다. 해수면은 파랑의 영향도 상당히 받는다. 폭풍해일 모델에서 바람의 효과는 파랑에 의한 표층 해면의 거침 정도에 따라 다르기 때문에 이를 잘 추산하기 위해서는 파랑 자료가 필요하며 연안에서 구조물의 위치에 따라 쇄파에 의한 Wave Setup의 영향을 받는 지역에는 이를 추산하기 위해 파랑 정보가 필요하다. 과거 장기 파랑 산출 결과 데이터 베이스를 이용하여 이 영향 들을 고려할 수 있다. 극치 통계의 오차를 줄이기 위해 충분히 긴 기간의 폭풍 해일 산출이 요구되나 과거의 기상 입력 자료는 그 신뢰성이 현재보다는 상당히 떨어지기 때문에 적용 기간은 무작정 늘릴 수는 없다. 1950년대 이후의 태풍에 대해서는 정밀한 추산이 필요하다. 가장 중요한 오차 발생 요소는 폭풍해일 수치 모델의 신뢰성 문제이다. 기상 자료에 의해 얻어지는 추산치를 관측 자료로부터 충분히 보정하여 수치 모델에 수치 모델에 의한 추산에 신뢰성을 높이는 것이 무엇보다 중요하다.

다. 지구 온난화 영향

지구의 기후 변화가 빠른 속도로 진행 되어 50년 내로 상당한 수온 상승과 해수면 상승이 예상되며 이에 따른 폭풍의 강도도 크게 달라질 수 있을 것이다. 이 경우에는 고전적인 설계조건을 산출 방법이 기본 가정을 받아들일 수 없게 되며 그 산출 결과도 해면 극치 산출에서 지구 기후 변화의 영향은 다음을 고려할 수 있다.

- i) 지구 기후 변화에 따른 평균 해수면 변화
- ii) 지구 기후 변화에 따른 해수 온도 및 대기 특성 변화로 태풍의 강도 변화에 따른 파랑 및 해일의 크기 변화

현재 전 세계 여러 곳에서 지구 온난화의 징조가 발견되고 있다. 극지의 빙하가 녹는 것은 그 대표적인 예라 할 수 있다. 우리나라에서도 여름철이 길어지고 생태권 대변화가 일어나는 등 지구 온난화의 영향이 나타나고 있다. 지구 기후변화에 대해서 최근에 와서는 인구 대활동이 지구 온난화에 큰 영향을 미친다는 증거가 많이 제시되고 있어, 2007년 2월 2일 파리에서 개최된 지구온난화 제4차 회의에서 유엔-정부 간 기후변화 위원회(IPCC)는 석유, 석탄 등 화석 연료 사용에 따른 지구 온난화가 해빙·폭염 등 자연 재해를 초래할 것임을 경고하고, 기후변화에 국제사회가 신속히 대응할 것을 촉구하고 있다.

지구 기후변화의 영향으로 물, 식량, 에너지 등 여러 분야에서 큰 문제가 예상된다. 해양과 연안 분야에서도 여러 문제가 예상되는데, 그 중에서 해수면의 상승과 태풍의 강도 변화에 따른 연안항만 재해 문제에 대해 살펴보고자 한다. 방파제 등 연안 시설물은 수명 동안에 내습할 최대의 파랑에 의해 파괴되지 않고 견디어낼 수 있도록 설계한다. 우리나라 남부 해안의 방재 시설물을 설계할 때에는, 과거 우리나라에 영향을 준 태풍을 정밀 분석하여, 설계파와 설계해면을 산출한 후 극치 통계에 의해 설계조건을 산출하고 있다.

전 세계적으로 관심의 대상이 되고 있는 지구 온난화에 따른 태풍의 강도 변화와 이에 따른 연안항만 구조물 방재 대책 수립에 관한 정책 방향 결정을 위해 이 문제에 대한 현황과 대책에 대해 살펴보고자 한다.

(1) 지구 온난화에 따른 해수면의 변화

지구 온난화에 의한 여러 현상들 중에서, 항만 구조물의 안전에 영향을 주는 것은 해수면 상승과 태풍의 강도 변화에 따른 연안 구조물의 외력의 변화이다. 이중 해수면 상승에 관해서는 그 정도에 대해서는 조금씩 다르지만, 지구 온난화에 따른 기온 및 해수 온도의 상승에 관해서는, 해수면이 상승한다는 사실에는 대부분의 전문가들이 동의하고 있다. 해수면 상승은 점진적으로 일어나기 때문에 이에 대한 적응도 점진적으로 필요하다. IPCC 제4차 보고서(2007)는 이대로 온실 효과 가스가 계속 증가한다면, 2100년도에는 약 18~59cm 해면이 상승한다고 보고하고 있다. 이는 제3차 보고서(2001)의 예측에 비해 상승폭을 좁히고 있다.

검조소에서의 해수면의 관측 자료는 지구 온난화에 따른 해수면의 변화와, 지각 변동에 의한 지반의 변동의 결과의 값으로, 이를 외삽하여 해수면의 변동을 추산하여 설계에 활용할 수 있겠다. 상대적 해수면의 상승은 지역적인 편차가 심하여 세계 각 지역마다 변화율이 달리 기록되고 있어서, 우리나라 항만에서의 상대적 해수면의 상승은, 그동안 해양조사원 검조소에서 관측된 장기 해수면의 변화 추세와 기후 변화의 여러 시나리오에 따라 추산한 예측 값으로 부터 종합하여 설정하는 것이 바람직하다고 본다. 해면 상승으로 인한 연안항만 구조물의 전면에 수심이 조금씩 깊어져 파랑의 작용도 조금씩 커지는 경향도 고려하여야 할 것이다.

(2) 기후 변화와 태풍의 강도 변화에 대한 논란

MIT의 기상학자 Emanuel 박사가 1987년에 태풍의 지구 기후 변화의 영향에 관한 논문을 발표한 이후로, 지구 온난화에 따라 태풍의 빈도와 강도가 강화된다고 주장하는 논문이 많이 발표되었다. 최근에는, 특히 2000년도 초기에 들어 세계 각지에서 열파, 호우, 홍수, 태풍 등의 이상 기상이 빈발하고 있다. 2003년 우리나라 남동 해안을 덮친 태풍 매미에 의한 피해, 2004년 일본에 태풍이 평상시보다는 훨씬 많이 상륙하여 일본 항만국에서 운영하고 있는 파랑 관측망(NOWPHAS)의 여러 관측소에서 최대파 관측 기록을 갱신한 사실, 그리고 미국 플로리다 주에는 재기년도 100년 이상의 허리케인이 4개나 한해에 내습한 사례와, 그 다음해인 2005년에는 미국에서 강력한 허리케인이 발생해, 뉴올리언스시의 대부분이 침수하는 등, 큰 피해를 가져온 사건으로, 태풍의 강도가 강해져서 자연 재해가 크게 늘 것에 대한 우려가 많이 일어나고 있다. 특히 미국에서 허리케인 카트리나 내습으로 인한 대규모 피해 발생을, 언론에서는 지구 온난화의 영향으로 보도하는 경우가 많았고, 국내에서도 여러 언론에서 지구 온난화에 의한 태풍의 강도 변화로 수퍼 태풍의 내습 가능성에 대해 보도함에 따라 일반인의 관심을 끌게 되었다.

지구 온난화에 의한 기온이나 수온의 상승과 이에 따른 해수면 상승에 관해서는, 그 정도 차이에 대해서는 이견이 있지만, 상승 그 자체에 대해서는 일반적으로 받아들여지고 있는 반면에, 태풍의 강도가 지구 온난화에 따라 크게 세어질 것이라는 예상에는 많은 논란이 있어, 아직은 넓은 공감대를 형성하지 못하고 있다. 태풍의 발달에 직접적인 해수로부터 에너지 공급에 관해서만 본다면, 해수온도 상승과 태풍 강도 강화를 직접 연결시킬 수가 있겠지만, 지구 온난화에 따른 여러 다른 조건의 변화는 태풍의 증대를 억제시키는 작용을 할 수 있어 태풍의 강도가 그렇게 강해지지만은 않을 것이란 의견도 많다. 태풍의 관측, 분석에 근래에 와서 이용되는 위성, Radar, 항공기 등에 의한 관측 기술이 활용되기 이전의 태풍 관측 자료는 신뢰성이 적어서 그 분석 결과가 문제일 수 있

어 NOAA의 Landsea 박사는 여러 연구자가 태풍의 강도 변화에 이용한 데이터베이스는 신뢰성이 적어 재분석이 필요하다고 주장하고 있다. 기후 변화 분석에 이용되는 장기간의 관측 자료는, 주로 인간이 밀집해 있는 지역에서 이루어져 그 해석에 주의를 기울일 필요가 있다. 흥미있는 예로 그림 3.1.1에서 보는 바와 같이 미국의 같은 뉴욕주의 뉴욕시와, 알바니시에서 측정된 년평균 기온의 장기 변화는 그 변화 특성이 달라 대도시에서의 관측 자료는 도시화의 영향이 많이 포함되어 있음을 보여 준다.

과거 태풍 자료 분석도 해석자에 따라서 기후 변화의 영향이 뚜렷이 있다고 주장하는 연구자도 있고, 아울러 과거의 태풍 자료 분석에서, 지구 온난화에 따른 일관된 변화 경향은 찾아내지 못하고, 관측 자료에서 보이는 태풍 강도의 변화는 태풍의 장주기 변화에 따른 것이라고 설명하는 연구자들도 있다. 후자와 같은 의견을 가진 필자는 2005년에 해양수산부의 “해일 피해 방지 대책” 기획”사업을 수행하면서, 태풍에 의한 연안항만 방재 관련 연구사업을 만들려면, 최근에 온 큰 태풍들이 지구 온난화의 영향이고, 향후 더 큰 태풍이 올 것이라는 주장이 팽배한 기간 내에, 서두르지 않으면, 조금 지나 큰 태풍이 오지 않게 되면 태풍 재해에 대한 관심이 줄어 태풍 재해 관련 연구 사업을 일으키는 것이 어려울 것이라고 말해 왔었다. 최근에는 그렇게 큰 태풍이 내습하지 않아 이를 뒷받침하는 것 같아 보이지만, 가까운 장래에 어떻게 달라질지 모르는 일이다.

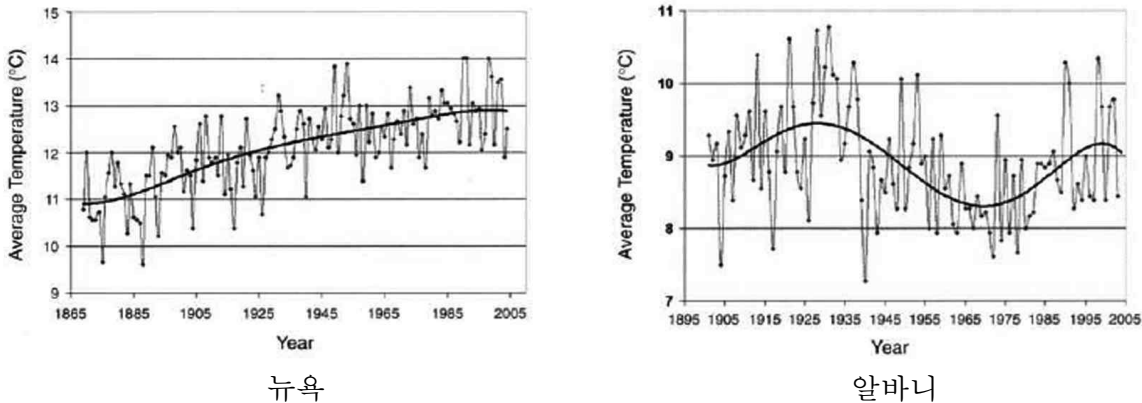


그림 3.1.1 미국 뉴욕주의 2개의 도시에서 측정된 평균 기온의 장기 변화의 예

(3) 지구 온난화에 따른 연안 재해 방지 정책

지구 온난화가 태풍에 주는 영향에 대해서, 지구 온난화에 관한 평가서를 발표하고 있는 「기후 변동에 관한 정부 간 위원회」(IPCC ; Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2007년에 발표된 기후 변동에 관한 제4차 평가보고서에서, 1970년경부터 해수 온도의 상승에 수반해, 강한 열대 저기압이 증가하는 경향을 시사하고 있다. 아직 태풍의

강도 변화에 지구 기후 변화의 영향이 크게 나타나지 않았다고 보는 관점을 가진 사람들도 지구 온난화가 진행되면, 그 영향이 보여 올 가능성이 있다는데 동의를 할 것이다. 태풍의 영향을 받기 쉬운 우리나라에 있어서는 장래의 태풍의 강도가 증대해, 최대풍속이나 강수의 강도는 증가할 가능성이 높다는 평가에 귀를 기울여 연안항만 재해 저감 정책에 어떻게 반영할 것인지를 검토하는 것이 요구된다.

다른 기상 현상과 비교하면, 열대 저기압은 좁은 영역에서 매우 격렬한 풍우 등을 가져오는 현상으로, 지구 온난화에 수반하는 열대 저기압 활동의 변화를 수치 모델에 의해 상세하게 추정하는 것은 현재의 기술 수준으로는 충분하지 않다. 현재 상태로는 지구 온난화에 따른 태풍의 강도 증가를 정량적으로 추정하는 것은 어렵다. 최근에 Emanuel 교수팀은 여러 수치 모델에 의한 기후 변화에 따른 태풍 강도 변화에 관한 수치 실험에서 그 결과는 각 모델 마다, 각 지역 마다 다른 경향을 보여 일반적으로 결론지을 수 없다고 보고하고 있다. 지구 온난화에 따라 태풍의 발생수나 강도뿐만 아니라 진로도 달라질 수 있기 때문에 불확실성은 더욱 커진다. 기후의 온난화에 따라 태풍의 발생과 진로가 달라져서, 현재는 크게 영향 받지 않은 지역에서도 앞으로는 큰 피해를 입을 수 있을 가능성도 있을 수 있겠다.

연안 방재 시설물의 설계 및 장기 방재 대책 수립의 기본 자료로는, 재기년도별로 예상되는 바람, 파랑, 해일의 극값의 정확한 추산이다. 한국해양연구소에서는 기본 사업으로 “파랑 관측 및 산출” 사업을 수행하면서, 2005년에 전 해상 심해 설계파를 산출, 발표하여 현재 연안 시설물의 설계 및 방재 대책에 활용되고 있다. 구조물의 파괴 시에 인명피해가 거의 없고, 비교적 쉽게 복구가 가능한 항만 시설의 설계를 위해서, 불확실한 지구 기후변화의 영향을 고려하지 않은 채 아직 전통적인 방법으로 파랑의 극치 통계에 의해 설계조건을 설정했었다.

그러나 지구 기후 변화가 진행되고 있다는 데는 공감대를 형성하고 있고, 그 징조가 여기저기 나타나기 때문에, 앞으로는 이를 무시할 수는 없다고 보며, 앞으로 지구 기후 변화 영향으로 자연재해가 커질 것이라는 전망에 대비하여 인명과 관계되는 구조물의 설계시에는 지구 온난화의 영향을 고려하여 대비하는 것이 요구된다. 그러나 현재로서는 기후 변화에 따른 태풍 강도의 증대에 대한 불확실성이 너무 많아 일반 연안구조물의 설계시에는 지구 기후변화의 영향을 고려하는 데는 기술적으로 어렵다고 판단된다. 불확실한 정보를 토대로 설계파를 크게 높여 이에 대한 대책을 마련하기 위해서는 막대한 국가 예산이 요구되는 등 혼란이 초래될 수 있어 이에 대한 철저한 검토가 요구된다.

현대과학이 크게 발전하여 지구환경 문제에 의한 기후 변화에 따른 태풍의 강도, 발생 빈도, 진로의 변화를 정량적으로 예측한다는 것은, 가까운 장래에 기대하기는 어려울

것 같다. 인명 피해가 별로 없고 일반적으로 완전한 파괴보다는 부분적인 피해로 복구가 가능한 방파제 같은 구조물을 모두, 전혀 피해가 없게 하려고 한다면 그 비용이 엄청나게 늘어나 매우 비경제적이어서 엄청난 국가 예산을 크게 낭비할 수도 있을 것이다.

앞으로, 지속적으로 기상 및 해양을 철저히 모니터링하고 지구 기후 변화에 대한 경향과 효과에 관한 지식을 축적하여, 과학적 근거를 바탕으로 하여 지구 온난화의 영향을 고려하는 방법을 도출하는데 노력하여야 할 것이다. 더욱 정확한 장기간의 연속파랑 산출에 의한 각종 파랑 통계 제원의 확보와 상세 설계파 정보는, 항만 건설, 연안 개발에 따른 퇴적물의 이동에 의한 항만 매몰, 침식, 해안선 변형 등 여러 연안 문제의 근본적인 접근이 가능하게 되어서, 그 파급 효과는 아주 크다고 말할 수 있겠다. 한국해양연구원에서는 더욱 정확한 태풍 분석을 통하여 태풍의 강도 변화 특성을 분석하고, 태풍에 의한 해상풍 산출의 개선, 광역 파랑 모델의 개선, 검증 및 여러 현장 실험 등을 통해서 천해 파랑 산출의 신뢰성을 높이기 위한 노력을 지속적으로 진행하고 있으며, 이에 필요한 각종 데이터베이스를 개선하고 있다. 그동안의 준비해온 기술을 바탕으로 내년부터는 장기 파랑 산출을 다시 실시하여, 설계파의 재산출 및 연안 침식, 해안 매몰, 연안 방재 등에 필요한 기본 파랑 정보 시스템을 개선할 계획이다. 이 장기 파랑 산출 개선 작업을 통하여서, 우리나라 전 지역에서의 연안 및 해양 구조물의 설계시 필요한 핵심 정보를 제공할 수 있고, 또 이 과정에서 지구 기후 온난화의 영향에 대해 더욱 심도 있는 평가가 이루어 질 수 있을 것으로 예상된다.

(4) 폭풍에 의한 연안 항만 구조물의 설계 조건 산출

연안 구조물 방재를 위한 핵심 자료로, 설계조건(설계파, 설계해면 등) 산출에서, 지구의 기후는 지질학적 시간에 비해 비교적 짧은 기간 동안에는 통계적 특성이 크게 달라지지 않는 정상 상태라는 가정 하에서, 장기간 파랑 및 폭풍해일을 추산하여 극치 통계 처리에 의해 설계조건을 산출하고 있다. 최근에는 많은 전문가들이 지구 온난화로 태풍의 강도와 빈도가 커져 앞으로 태풍으로 인한 피해가 심각해지리라 경고하고 설계파, 설계 해면 추산에 지구 온난화의 영향을 고려해야 한다는 주장이 제기되고 있다. 그러나, 아직은 과학 기술이 지구 온난화에 따른 태풍의 강도 변화를 정량적으로 추정할 수 있는 수준까지 도달되지 못하여, 지구온난화에 인한 피해 예측을 고려하여 연안 구조물을 건설하는 경우에는 과대 설계에 의한 건설비의 낭비를 초래할 수 있고, 그 반대의 경우에는 많은 피해를 입게 될 가능성도 있어서, 기후 변화에 따른 연안항만 재해 저감 대책 수립에 어려움이 있다.

지구 기후변화에 의한 평균 해수면의 상승에 관해서는 많은 전문가들이 동의하고 있으며 태풍의 강도, 빈도의 강화에 대해서는 아직 많은 논란이 있지만, 앞으로 지구 온난화가 더 진행되면 그 영향이 나타날 것이라는 데는 의심의 여지가 없다. 지구 기후 변화에 따른 태풍의 강도, 빈도, 진로 등의 변화에 따른 연안 구조물 설계 조건이 달라지는 것을 정확히 추정하는 것은 아직은 기술적인 어려움이 많아서, 그 오차가 크기 때문에 지금 당장 불확실한 정보에 근거하여 지구 온난화의 영향을 고려한 연안 구조물의 설계 조건 추정을 바탕으로 연안항만 구조물 재해 방지에 적용하는 것은, 많은 예산을 낭비할 여지가 많기 때문에, 좀 더 기본적인 관측 시스템을 보강하여 파랑 장기 산출을 지속적으로 보완하고, 국제적인 발전 추이를 잘 지켜보면서, 향후 지구 온난화 영향 가능성에 유동적으로 대응하는 것이 바람직하다고 본다.

라. 폭풍에 의한 설계 해면 산출 요약

장기 시뮬레이션에 의한 극치해면을 산출하기 위하여 과거 56년간 우리나라에 영향을 끼친 태풍에 대하여 폭풍해일을 산출하였다. 1951년~2006년의 56년간 201개 태풍을 선정하였으며, 태풍 해상풍 모델을 이용하여 태풍 통과시의 기압장과 바람장을 산출하였다. 산출된 기압장과 바람장을 입력자료로 하여 폭풍해일모델(KORDI-S)을 3단계 내삽격자 시스템을 이용하여 과업영역에서의 폭풍해일을 산출하였으며, 신속한 산출을 위해 2차원 폭풍해일 모델을 사용하였다. 우리나라 주변해역과 동지나해를 포함하는 약 9km 격자간격의 광역격자에서부터 300m 해상도의 정밀한 격자 3단계의 격자망에서의 폭풍해일을 산출하였다. 또한 unstructured grid 정밀격자 모델 FVCOM을 이용하여서도 상기의 1951년~2006년의 56년간 201개 태풍에 대한 폭풍해일고를 산출하였다. 태풍 통과시의 기압장과 바람장은 태풍 해상풍 모델을 동일하게 적용하였다. FVCOM 정밀모델의 최소격자는 약 300m 정도이며, 극치분석에 의한 빈도별 해일고를 산출하였다.

KORDI-S 모델과 FVCOM 모델은 동일하게 과거 201개 태풍을 모두 모의하여 그 결과를 극치분석하여 빈도별 설계해면을 산출하였고, 설계태풍(Design storm)을 이용한 설계해면의 추정은 MOHID 모델을 적용하였다. 설계태풍은 과거 50여 년간 우리나라의 남해와 서해에 크게 피해를 준 대표 태풍 MAEMI(0314)와 VERA(8613), PRAPIROON(0012)을 기준으로 하였다(약 50년 빈도). 서해의 경우 중복부는 PRAPIROON, 중남부는 VERA를 사용하였으며, 남해의 경우 MAEMI를 이용하여 폭풍해일고를 계산하였다. 각각의 이동경로를 경도에 따라 ± 0.25 도 간격으로 이동하여 태풍의 경로변화에 따른 각 해역의 최대해일고를 산출하여 설계해면을 추산하였다. 설계태풍에 의한 모의 시, 이동경로만 동서방향으로 변경하였을 뿐 태풍의 다른 물리적 특성은 변경하지 않았다.

극치해면의 산출 방법에는 극치확률법(extreme probability method)과 결합확률법(joint probability method)이 있는데, 전자의 방법은 연속관측 조위자료 중 매년 최고치를 추출하여 표본자료를 구성하고 그 표본자료를 극치확률 분석함수에 적용하여 극치해면을 외삽(extrapolation)으로 구하는 방법(Fuehrboter, 1978; Blackman and Graff, 1978;; 심재설 등, 1989)이고, 후자의 방법은 조위자료를 천문조와 해일 성분으로 분리한 다음, 이 두 성분이 서로 독립이라 가정하고 각각의 확률밀도함수를 결합하여 극치해면을 산출한다. 본 과업에서는 정밀국지격자에서 장기산출된 이상해면 자료와 임의지역에서 산출된 조석에 대해 극치확률법과 결합확률법을 적용하여 빈도별 극치해면을 산출하였다.

2. 지진해일 산출에 대한 고찰

가. 지진해일 설계해면 연구조사

(1) 일본

- (가) 설계해면은 항만시설의 구조 설정 및 안전성 검토에 사용되는 것으로 조석, 폭풍해일, 지진해일 등에 의한 이상조위의 실측치 또는 추산치를 사용하여 결정함
- (나) 폭풍해일 및 지진해일은 자주 발생하지 않는 현상으로 동시에 발생하지 않는 것으로 가정함. 폭풍해일 또는 지진해일에 의해 부진동이 유발되는 경우가 있으나 설계해면 산출시에는 이러한 현상을 동시에 고려하지 않고, 부진동을 이외에 발달하는 장주기 수면진동으로 고려함

(2) 미국

(가) 설계해면을 정할 때 고려사항 (그림 3.1.2 참조)

- ① 최대 삭망평균만조위(High Water Ordinary Spring Tide, HWSpT)와 평균고조위(Mean High Water, HW)의 차이
- ② 폭풍해일에 의한 해수면 상승
- ③ 100년간 상승하는 해수면 높이(North Sea Coast에서는 100년에 20~30cm가 상승함)
- ④ Wave setup
- ⑤ 지진해일
- ⑥ 부진동
- ⑦ 기상학적 요인

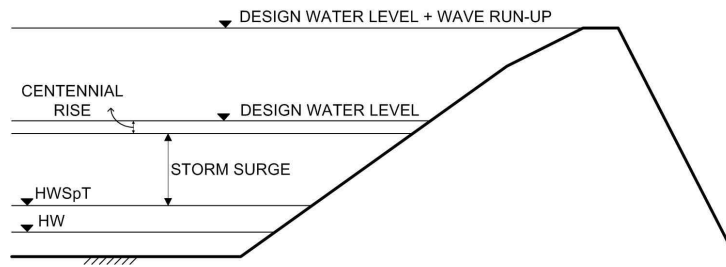


그림 3.1.2 설계 해면

- (나) 설계해면은 파랑에 의한 물리적인 힘에 의해 영향을 받음. 즉, 파고가 높아지면 설계해면이 높아지고 파고가 낮아지면 설계해면이 낮아짐
- (다) 기상학적인 요인에 의해서도 해수면이 변화하지만 기상학적 요인은 설계해면에 크게 영향을 미치지 못하므로 생략이 가능함
- (라) 고립파는 실제로 존재하지는 않지만 지진에 의해 나타나는 지진해일과 같이 주기가 긴 파랑은 고립파와 비슷한 성질을 가짐

나. 일본 및 미국의 주요시설 지진해일 영향고려 현황조사

(1) 일본

- (가) 지진해일은 최고조위, 최저조위, 편차, 파고 및 주기 등을 고려함. 이러한 특성은 장기간에 걸친 실측치, 기존 재해시의 흔적고 등에 의해 적절한 방법으로 결정함
- (나) 지진해일 모형실험은 입사파형을 사전에 정의하고 지진단층모델의 해저지반 변동량과 초기의 수위변동량이 같다고 가정하여 방파제의 효과와 매립 등의 지형변경의 지진해일에 대한 영향을 검토할 수 있음. 지진해일의 수리모형 실험은 모형의 경계에서 사전의 수치모형실험에서 재현한 지진해일 파형을 조파하는 것으로 방파제의 효과 등을 검토할 수 있음
- (다) 지진해일에 의한 파력은 장파에 의한 파력으로 주어짐. 그림 3.1.3는 지진해일의 파력 모식도이고 여기서 $H/L < 0.04$ 의 비쇄파 조건에 대해 정수면상으로부터 $y=1.5H$ 의 높이에서 0, 정수면에서 p 로 되는 직선분포로하고, 수면아래는 균일함. 그리고 $p=1.1\rho_0gH$ 임. 파향에 대한 보정은 하지 않고, 파고 H 는 진행파로서의 지진해일 파고임

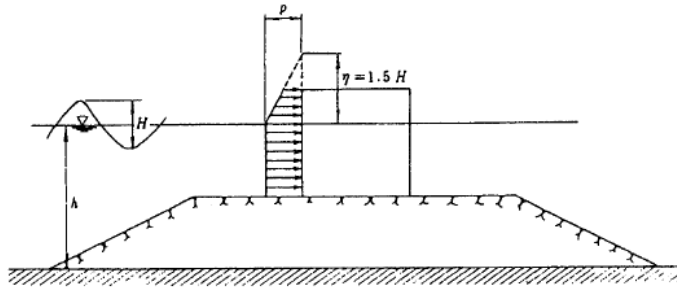


그림 3.1.3 지진해일의 파력 모식도

- (라) 지진해일에 대한 대책을 세우기 위해서는 대상 지역을 상정하고 적절한 모형실험으로 지진해일의 파고, 처오름 높이, 도달 시각 등을 계산할 필요가 있음. 모형실험을 위해서는 지진해일의 초기 파형을 알아야하고 이를 위해 가상지진을 상정함. 가상지진의 설정할 때는 다음 세 가지를 고려함. 첫 번째로 대상 지역의 기왕 최대 지진해일, 두 번째로 비교적 각종 자료가 있는 최근의 지진으로 방재계획상 적절한 규모의 것, 세 번째로 지진 공백역에 있어서의 상정 지진임
- (마) 지진해일 대책을 주목적으로 하는 방파제인 지진해일 방파제는 지진해일 영향의 저감효과 등을 감안하여 평면배치, 마루높이 등을 적절히 설정해야함. 또한 지진해일 방파제는 파랑 등의 외력에 대한 구조의 안정이외에 지진해일 내습시의 특성을 감안하여 구조물의 안정성을 확보해야함

(2) 미국

- (가) 지진해일에 대한 연구결과와 이론상의 문제는 1960년대부터 거론됨. 지진해일은 작은 진폭의 매우 긴 파장으로 바다를 횡단하고 지진해일은 육지에 도달할 때 천수변형, 공명 현상, 회절 및 집중 현상 등에 의해 매우 거대해짐
- (나) 하와이의 힐로만에서는 지진해일에 의해 바닷물이 해수면보다 11m가 높아졌음
- (다) 방파제 등의 주요시설의 설계 시 지진해일에 대한 영향을 고려해야 하며, 적절한 수리모형 및 수치모형 실험을 통하여 검토해야 함

다. 동해 주요 연안항 및 무역항 조사

(1) 무역항

- (가) 부산항은 한반도 동남단(북위 35° 04' 42", 동경 129° 01' 01")에 위치하여 태평양과 유라시아대륙을 잇는 관문역할을 하고 있는 대한민국 제1의 항만이고, 세계 3위의 컨테이너항만임. 또한 1876년에 부산포라는 이름으로 개항하였고 지속

적인 항만 개발을 통해 북항, 남항, 감천항, 다대포항 등 4개의 항에 6개의 컨테이너터미널과 국제여객터미널 등을 갖추었음. 또한 앞으로도 계속 발전하고 있는 대한민국 제 1의 항만임

- (나) 동해안의 주요 무역항으로는 부산항, 울산항, 포항항, 삼척항, 동해항, 묵호항, 옥계항, 속초항 등 8개의 항이 있음
- (다) 울산항은 북위 35° 25′ 33″, 동경 129° 25′ 01″ 에 위치한 항만법상 1종항이며 공업항임. 1992년부터 한국에서 가장 많은 화물을 처리하고 있으며 2011년 준공을 목표로 총 사업비 2조 9,000억 원을 투입하여 울산신항만사업을 단계적으로 시행하고 있음
- (라) 포항항은 항만법상 1종항으로 1962년 6월 개항장이 되었고 영일만 깊숙이 위치하고 있으며 구항과 신항으로 구분됨. 구항은 1917년 지방항으로 지정되어 울릉도와 영남 내륙지방을 연결하는 유일한 관문이고, 신항은 포항종합제철공장 및 관련 공업단지가 들어서게 되면서 건설한 공업항임
- (마) 삼척항은 강원도 삼척시에 있는 항구로서, 항내수면적이 21만㎡의 항만법상 1종항이며 공업항임. 예전에는 작은 어항이었으나 현재는 동해항과 더불어 시멘트 반출의 전진기지임
- (바) 동해항은 북평항이고도 하며 항내수면적이 100만㎡인 항만법상의 1종항임. 주요 항만시설은 접안시설로 북부두, 남부두, 일반부두에 안벽 1,625m, 물량장 200m가 있으며 외곽시설로는 방파제 2,260m, 호안 3,114m가 있음
- (사) 묵호항은 국제무역항으로서 석탄과 시멘트의 출항, 선박의 대피항, 어업기지 등으로 이용됨. 최초에 1941년 태백산지에서 생산되는 석탄을 수출하기 위해 건설되었음
- (아) 옥계항은 1987년에 항만건설을 착공하고 1991년에 무역항으로 지정되어 개항하였으며 항내 수면 5,550,690㎡, 정온수면적 246,000㎡으로 시멘트 산업발전의 교두보 역할을 하고 있음
- (자) 속초항은 강원도 속초시에 있는 항구로서 어항, 철광석 적출항, 관광항 등 여러 가지 기능이 결합된 무역항이며, 항내 수면적이 3,132,000㎡, 수심이 5~10m의 분포를 보임

(2) 연안항

- (가) 동해안의 주요 연안항으로는 부산남항, 구룡포항, 월포항, 후포항, 울릉항, 주문진항 등 6개의 항이 있음

- (나) 부산남항은 하루 800여톤을 상장하는 부산공동어시장과 수산물도매시장인 자갈치 시장, 수산물 냉동 및 가공업체 등이 이곳에 집중해 있어 수산물 유통에 중요한 역할을 하고 있으며 총면적 90,000m²의 항구임
- (다) 구룡포항은 경상북도 포항시 남구 구룡포읍에 위치하고 있고, 항내수면적이 633,000m²이고, 수심이 4~15m의 분포를 나타냄. 또한 포항 일원의 어업 및 수산물 유통의 기지향으로 다목적 항만으로서의 역할과 어업 및 수산물 유통기지향의 역할과 포항항의 보조항으로서의 역할을 담당하고 있는 항만임
- (라) 월포항은 경북 포항시 청하면에 위치하고 있고 항내수면적이 95,000m²이고, 수심이 2.5~5.0m의 분포를 나타냄. 또한 경북 중부지방의 연안화물을 수송하기 위한 연안항으로서 태풍 내습 시 선박의 안전계류를 위한 대피항으로서의 역할을 담당하고 있는 항만임
- (마) 후포항은 경북 울진군 평해면에 위치하고 있고, 항내수면적이 565,000m²임. 또한 연안화물선, 여객선, 어선 등이 이용하는 다목적 항만으로 경북 북부지방과 강원 남부지방의 연안화물 수송의 거점항임
- (바) 울릉항은 경북 울릉군 울릉읍에 위치하고 있고, 항내수면적이 2,801,000m²이며 수심이 2.3~5m의 분포를 보임. 또한 여객 및 화물을 수송하는 도동항과 관광객 및 연안화물 운송하는 사동항으로 구분이 됨. 또한 다목적 항만으로서의 역할과 태풍 내습 시 선박의 대피항으로서의 역할을 함
- (사) 주문진항은 강원 강릉시 주문진읍에 위치하고 동해항과 속초항의 중간에 위치한 항구로서 항내수면적이 210,000m²이고, 태풍 내습 시 대피항으로서의 역할을 하고 있음

라. 동해 연안항 및 무역항에 적용하기위한 지진해일 모델 수립

- (1) 지진해일의 초기파장은 수십에서 수백 km에 이르기 때문에 비선형항과 바닥마찰항의 영향은 상대적으로 작아서 무시할 수 있는 반면에 분산효과는 파장의 크기에 따라 중요성이 변하기 때문에 분산효과를 고려할 수 있는 지배방정식을 사용하는 것이 바람직하다.
- (2) 기존의 모델에서는 분산효과를 고려하지 못했지만 새롭게 수립한 모델에서는 선형천수방정식을 차분하여 수치분산을 고려함으로써 분산효과를 재현할 수 있다.

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (3.1.1)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gh_{i+1/2,j} \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \\
& + \frac{\alpha g}{12\Delta x} h_{i+1/2,j} \left[\zeta_{i+2,j}^{n+1/2} - 3\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i-1,j}^{n+1/2} \right] \\
& + \frac{\gamma g}{12\Delta x} h_{i+1/2,j} \left[\left(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + \zeta_{i+1,j-1}^{n+1/2} \right) - \left(\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i,j-1}^{n+1/2} \right) \right] = 0
\end{aligned} \tag{3.1.2}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gh_{i,j+1/2} \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y} \\
& + \frac{\alpha g}{12\Delta y} h_{i,j+1/2} \left[\zeta_{i,j+2}^{n+1/2} - 3\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j-1}^{n+1/2} \right] \\
& + \frac{\gamma g}{12\Delta y} h_{i,j+1/2} \left[\left(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j+1}^{n+1/2} \right) - \left(\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j}^{n+1/2} \right) \right] = 0
\end{aligned} \tag{3.1.3}$$

- (3) 선형천수방정식을 차분한 위의 식을 Taylor 급수를 이용하여 기준 격자점 (i, j, n) 에 대하여 전개한 후 P 와 Q 를 소거하면 다음과 같은 ζ 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - C_0^2 \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) - C_0^2 \frac{(\Delta x)^2}{12} (1 + \alpha - C_r^2) \left(\frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \zeta}{\partial y^4} \right) \\
& + (1 + \alpha - \gamma) C_0^2 \frac{(\Delta x)^2}{6} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^2 \partial y^2} = O((\Delta x)^3, (\Delta x)^2 \Delta t, \Delta x (\Delta t)^2, (\Delta t)^3)
\end{aligned} \tag{3.1.4}$$

- (4) 위의 식을 분산을 고려할 수 있는 선형 Boussinesq 방정식과 같도록 α 와 γ 를 결정하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{4h^2 + gh(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2}{(\Delta x)^2} \tag{3.1.5}$$

$$\gamma = \alpha + 1 \tag{3.1.6}$$

- (5) 기존의 모델과는 달리 수심이 변하는 경우, 격자간격과 계산 시간간격 대신 분산보정 계수 α 와 γ 를 변화시킴으로서 분산효과의 정확성을 유지하면서 균일한 크기의 공간 격자와 시간 격자를 이용할 수 있는 장점이 있음
- (6) 기법의 정확성을 검증하기 위해서, 가상 진원에 의해 발생된 초기 자유수면변위가 Gauss분포를 가지는 지진해일의 전파에 대하여 수치모의를 수행하였고, 그 결과를 Carrier가 구한 선형 Boussinesq 방정식의 해석해와 비교하였음

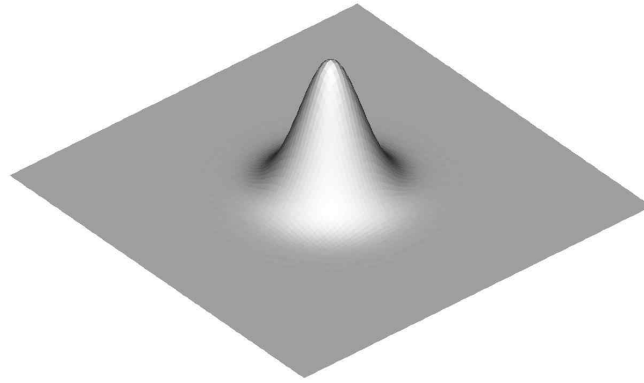


그림 3.1.4 Gaussian hump의 초기수면 변위

(7) 검증에 사용된 조건, $\Delta x = \Delta y = 0.3$, $\Delta t = 0.1$, $h = 0.1$

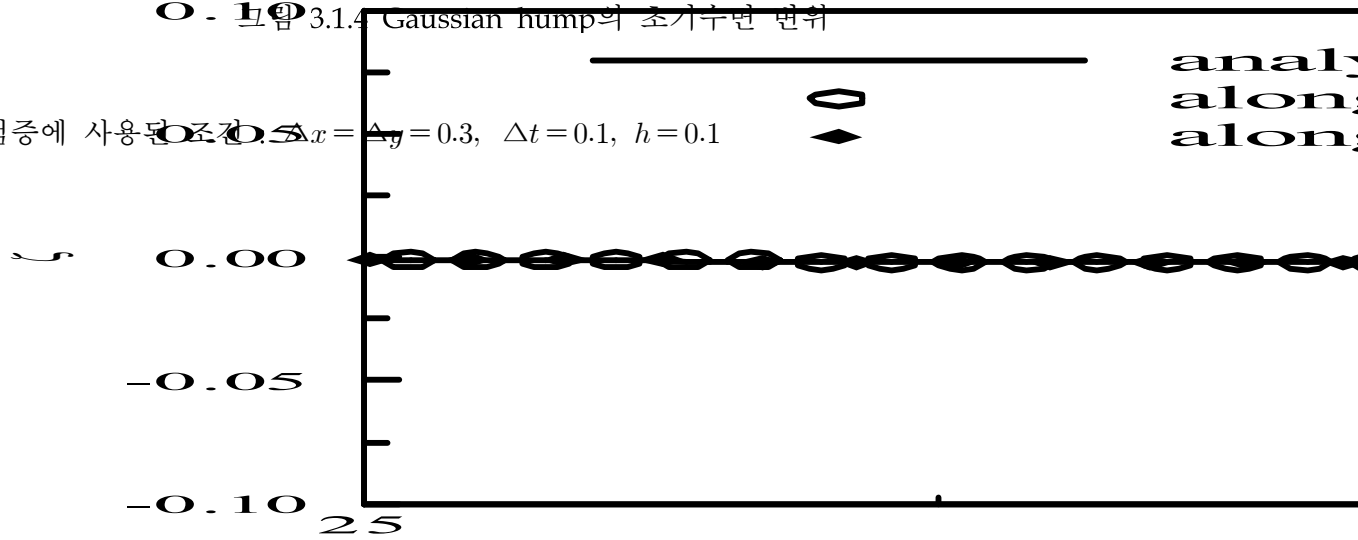


그림 3.1.5 기존의 수치 기법(t=40)

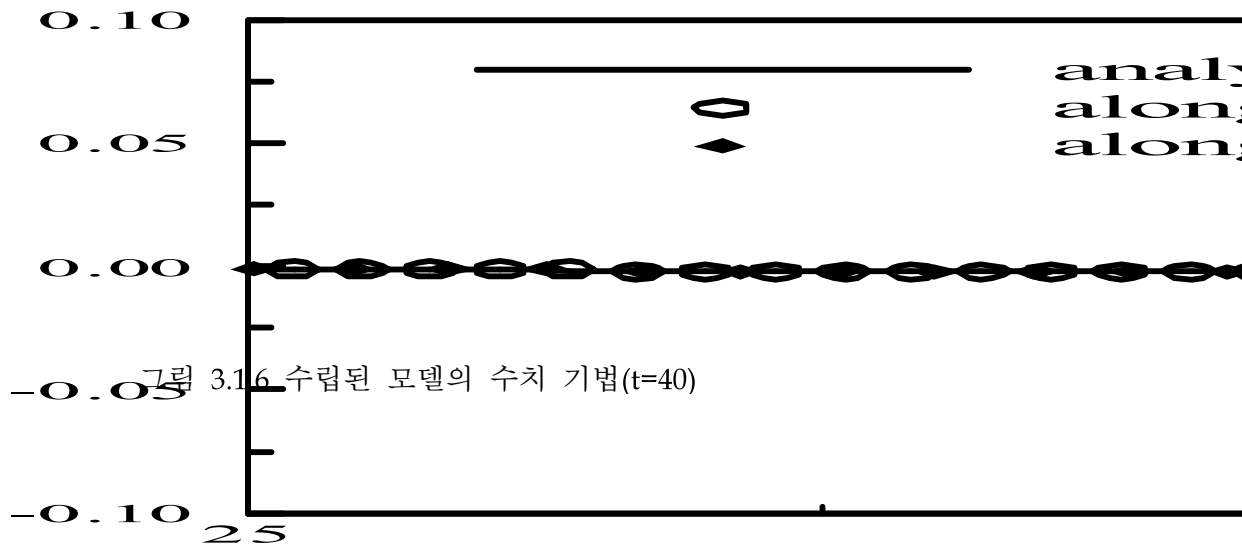


그림 3.1.6 수립된 모델의 수치 기법(t=40)

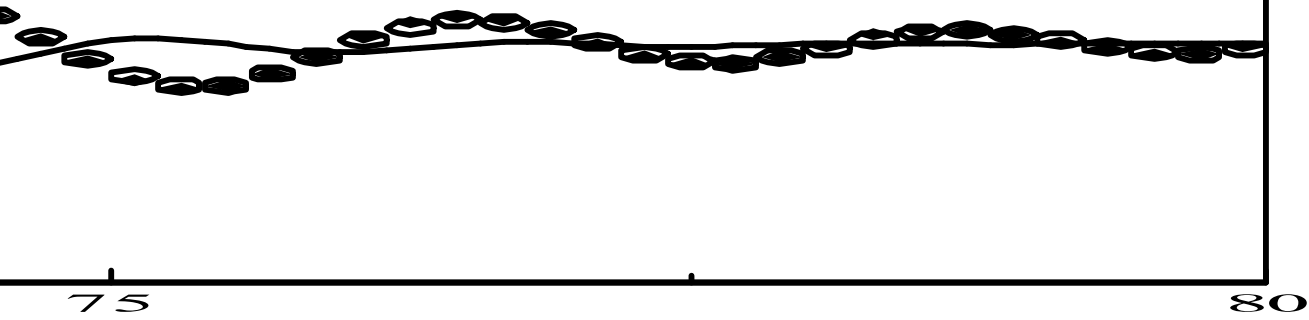


그림 3.1.7 기존의 수치 기법(r=70)

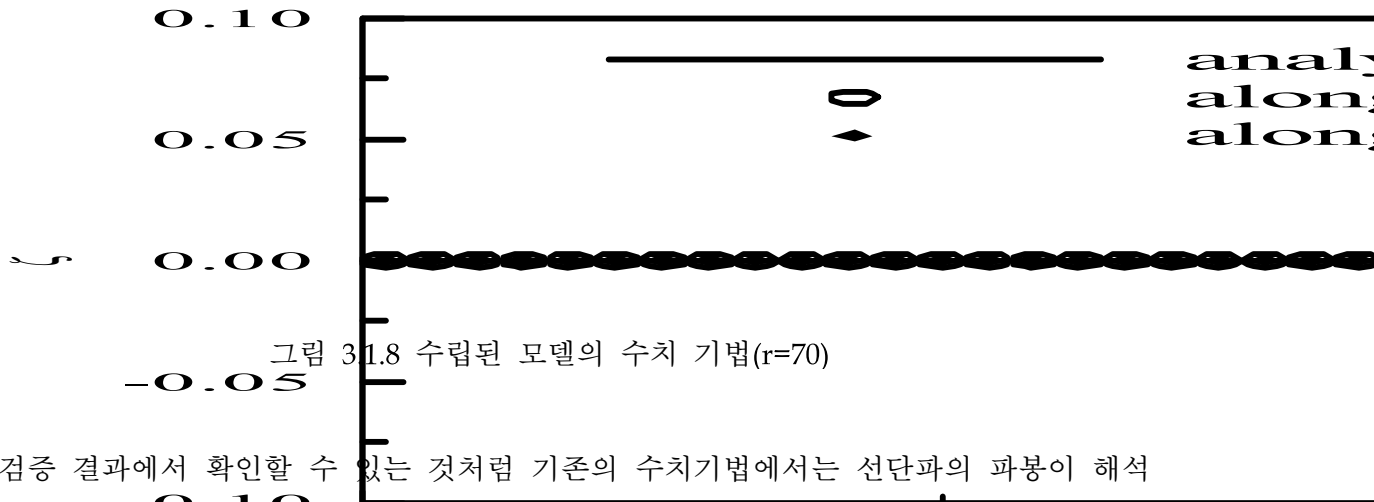


그림 3.1.8 수립된 모델의 수치 기법(r=70)

- (8) 검증 결과에서 확인할 수 있는 것처럼 기존의 수치기법에서는 선단파의 파봉이 해석해보다 작게 나타나고 있는데 이는 기존의 기법이 분산효과를 해석해보다 크게 고려하였기 때문임. 반면에 새로운 기법의 결과는 해석해와 비교적 정확하게 일치하고 있으며 결과적으로 분산효과를 적절히 고려할 수 있을 것으로 판단됨
- (9) 모델의 적용성을 검토하기 위하여 1983년 동해 중부 지진해일을 수치 모의하여 속초항에서의 파고 및 처오름 높이를 예측하였음

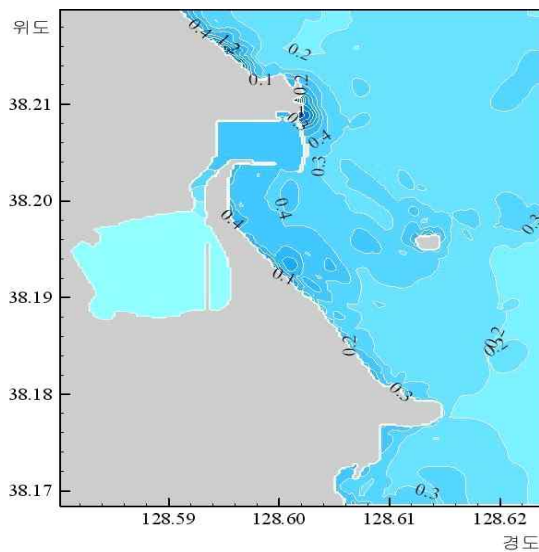


그림 3.1.9 속초항 파고 및 처오름 높이 예측

(10) 실제지형에 대한 모델의 정확성을 검증하기 위하여 1983년 동해 중부 지진해일을 수치 모의하여 강원도 삼척시 임원항 부근에서의 최대 처오름 높이를 예측하여 관측치와 비교하였음. 계산된 결과는 관측치를 매우 잘 재현하여 개발된 수치모형의 정확성이 매우 우수하다는 것을 증명하고 있음

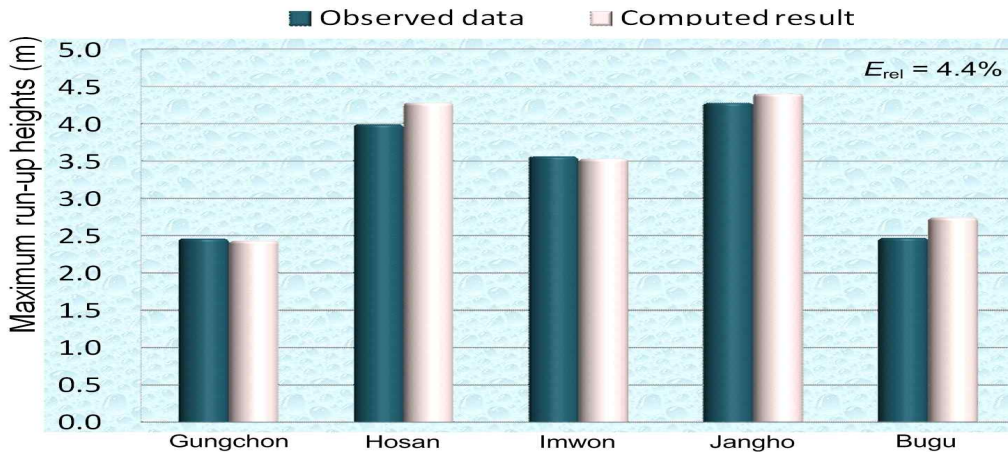


그림 3.1.10 최대 처오름 높이 비교(관측치와 수치모의 결과)

마. 동해안 지진해일 취약 구획도 작성

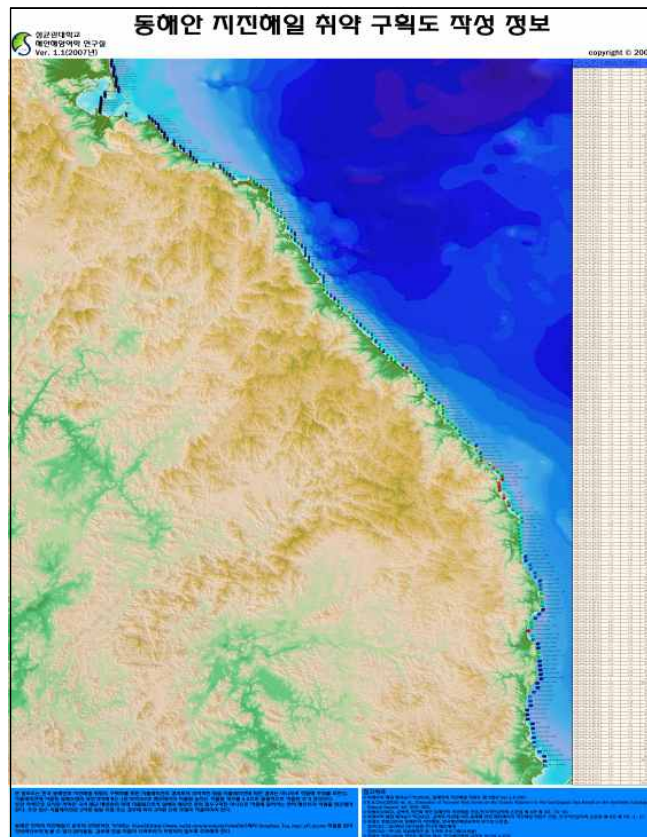


그림 3.1.11 우리나라 동해안의 지진해일 위험도 구획화를 위한 시뮬레이션의 결과

- (1) 한국 동해안의 지진해일 위험도 구획화를 위한 시뮬레이션의 결과 표출로서 국지적인 범람 시뮬레이션에 의한 결과는 아님(해안에서의 처오름 높이는 처오름 계수를 4.0으로 일괄적으로 적용한 초기 성과)
- (2) 시뮬레이션에 사용된 동해모형의 유한격자체계는 1분격자가 사용되었음
- (3) 적색으로 표시된 지역은 국지 평균 해면상의 최대 처오름으로서 실제의 해안선 상의 침수구역은 아니므로 적용에 있어서는 현지 해안선과 지형을 참조할 것
- (4) 추후 침수 시뮬레이션은 2차원 범람 모형 또는 경우에 따라 3차원 난류 모형의 적용이 요구됨
- (5) 동해안 전역의 지진해일고 분포의 3차원적인 가시화는 iView3D 웹페이지 (<http://www.ivs3d.com/products/iview3d/>) (배포프로그램)에서 iView3D Viewer를 다운 받고 (http://wave.skku.ac.kr/hazard/Donghae_tsu.gz)에서 지진해일 취약구획도 파일을 다운로드하여 iView3D를 통해 인터랙티브하게 볼 수 있음

바. 수치모형에 의한 동해 중부의 해령의 영향평가

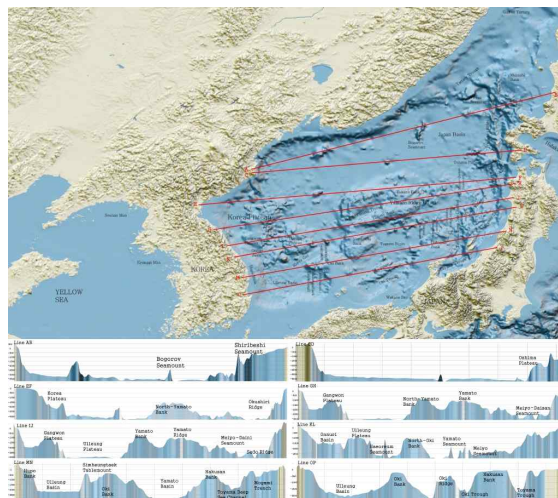


그림 3.1.12 동해의 3차원 가시화 및 해저단면 Profile

- (1) 동해의 해저의 지형은 대규모의 해저 지형(해저는 육상과 동일하게 산과 계곡과 같은 지형변화가 존재하는데 편의상 심해 분저, 중앙 해령, 대륙붕단 부근으로 나뉜다)이 존재하는데 해저 분저는 수심 5,000m 전후 평탄한 분지 형상을 말하며, 일반적으로 중앙해령과 대륙붕단의 사이에 위치한다. 정확한 수심작성을 위해 기 편집된 1분자료를 개선시켰음

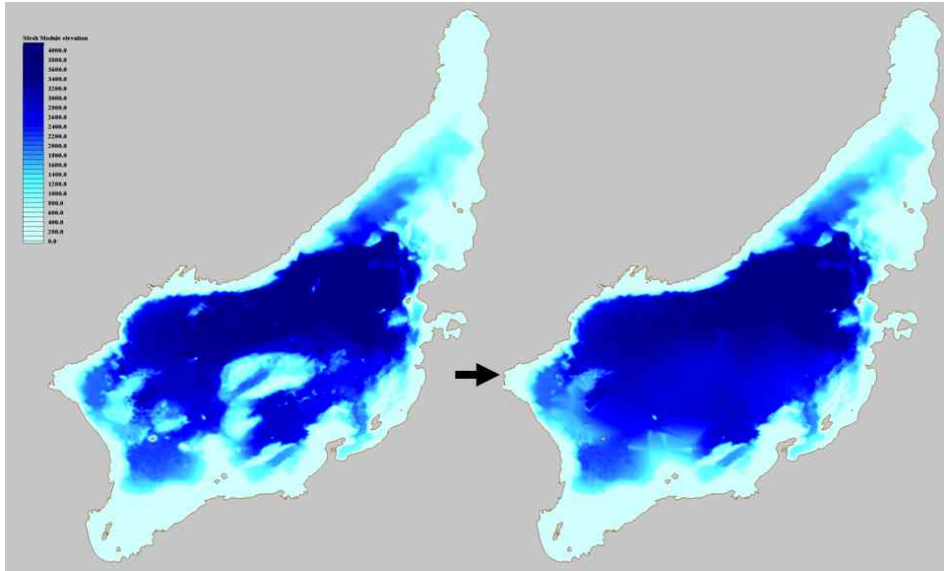


그림 3.1.13. 현재의 수심(좌) 및 동해 중부 해령의 지진해일 영향을 알아보기 위해 해령을 삭제한 수심(우)

- (2) 수심에서 야마토 해령과 해산들을 평평하게 만든 수심으로 지진해일을 산정해서 비교한 결과를 제시함
- (3) 1983년 동해중부 지진해일

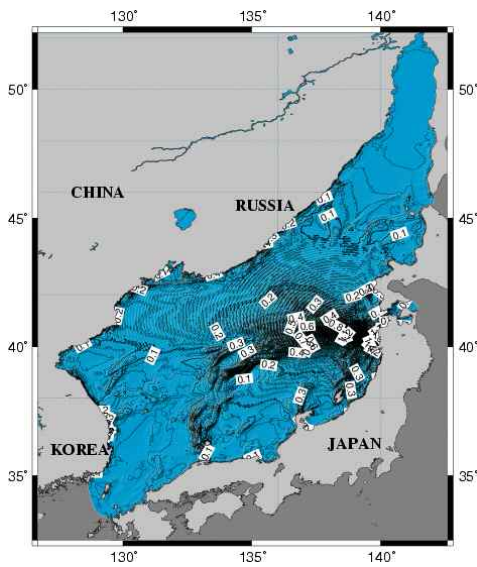


그림 3.1.14 현재의 수심에서의 지진해일 최대해일고

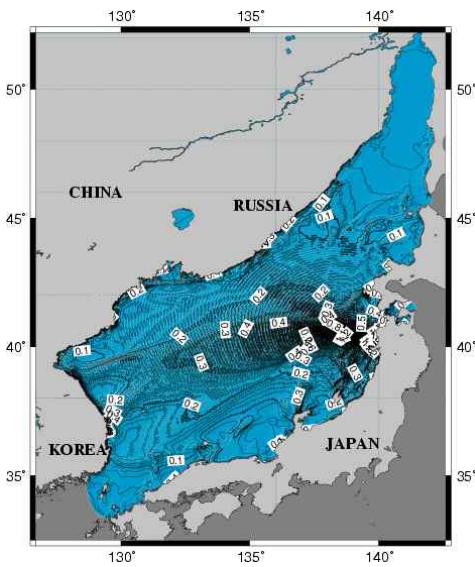


그림 3.1.15 동해 중부 해령을 삭제한 지진해일 최대해일고

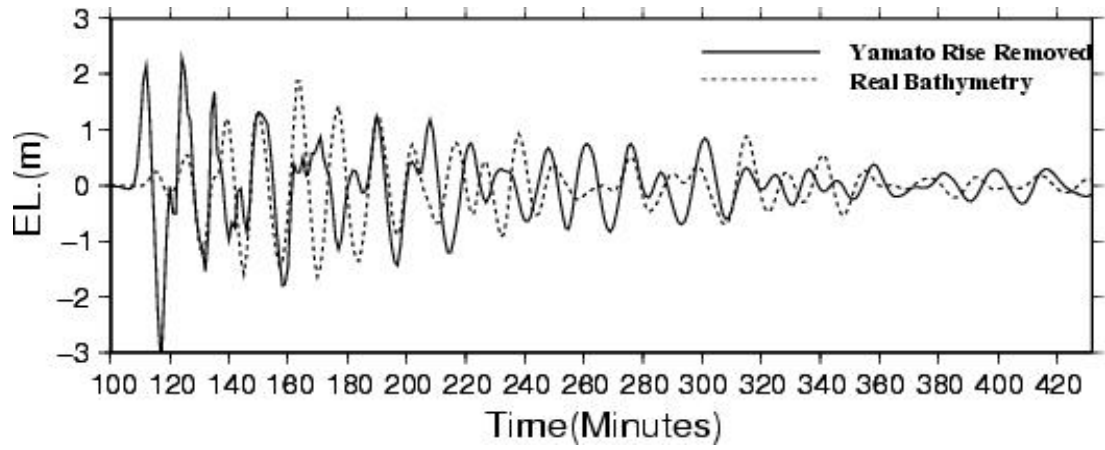


그림 3.1.16 1983년 지진해일에 의한 시간에 따른 수위변화

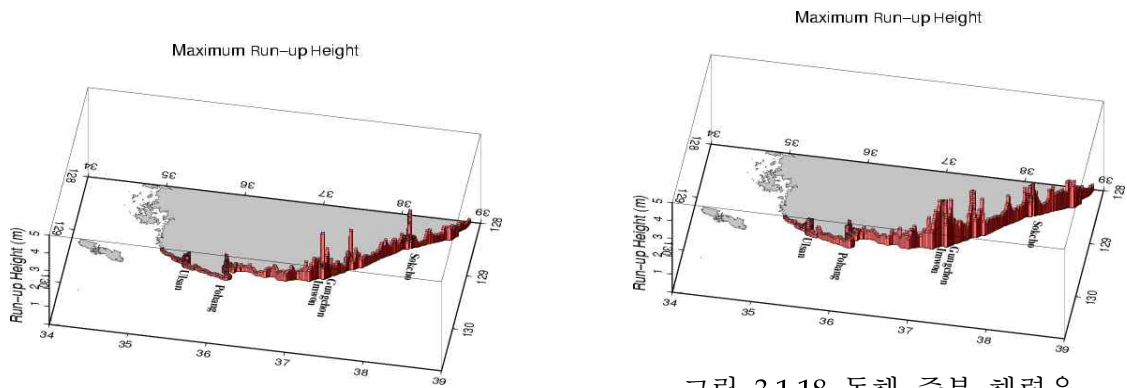


그림 3.1.17 현재의 수심에서의 결과

그림 3.1.18 동해 중부 해령을 삭제한 결과

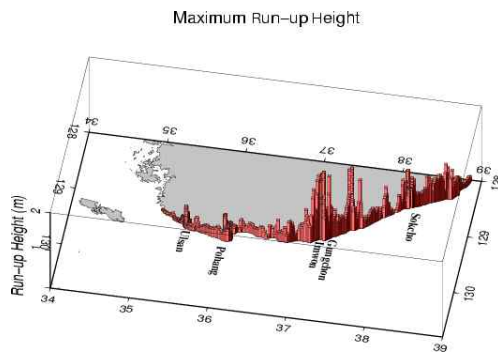


그림 3.1.19 두 경우의 차이

(4) 1993년 북해도 지진해일

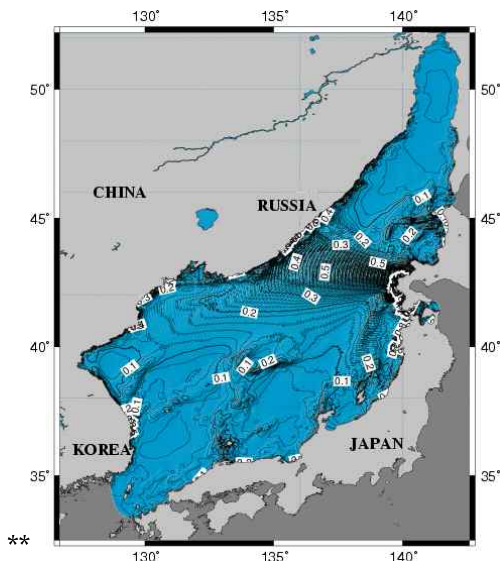


그림 3.1.20 현재의 수심에서의 지진해일 최대해일고

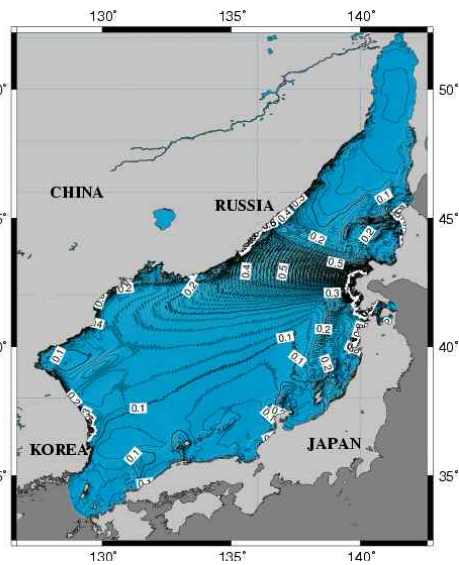


그림 3.1.21 동해 중부 해령을 삭제한 지진해일 최대해일고

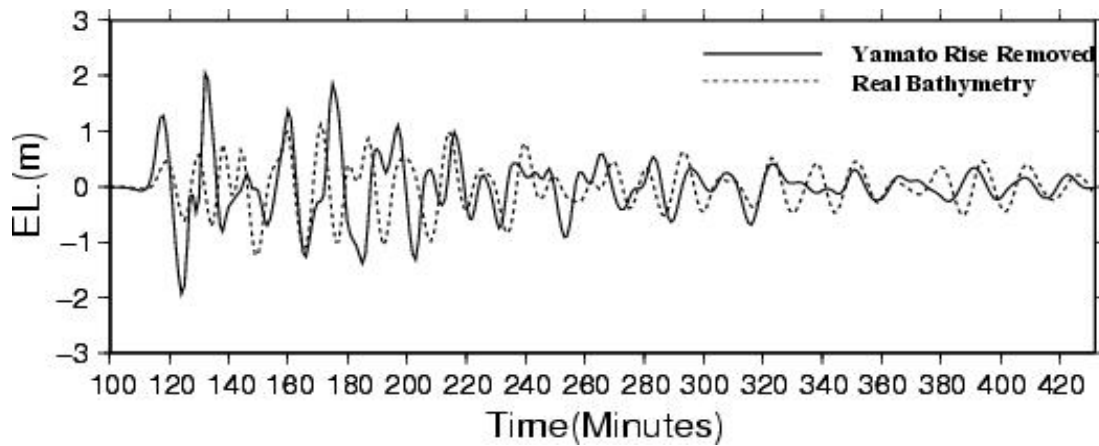


그림 3.1.22 1993년 지진해일에 의한 시간에 따른 수위변화

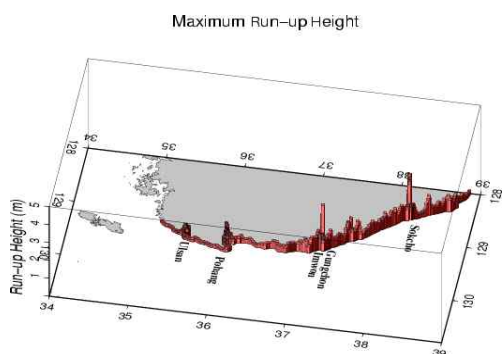


그림 3.1.23 현재의 수심에서의 결과

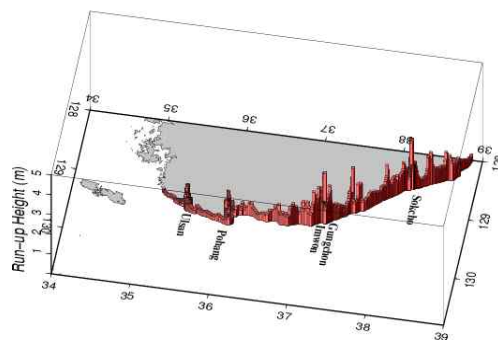


그림 3.1.24 동해 중부 해령을 삭제한 결과

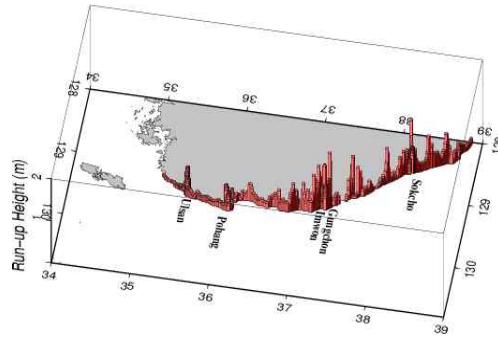


그림 3.1.25 두 경우의 차이

사. 동해안 연안항 / 무역항 영역의 상세 유한요소 격자 작성

- (1) 성균관대학교에서 기 작성된 동해의 병렬 유한요소 모형(1983년과 1993년의 지진해일 시뮬레이션)의 격자 체계와 동해 연안항 및 무역항 상세수심 및 상세 표고자료를 기반으로 동해 주요 어항과 항만역의 범람역이 포함된 상세 격자 작성 과업

표 3.1.1 동해의 기반 골격 유한요소 격자 체계

Region	Node No.	Element No.
동해 전역	137,057	264,853

표 3.1.2 수정되고 있는 동해의 유한요소 격자 체계

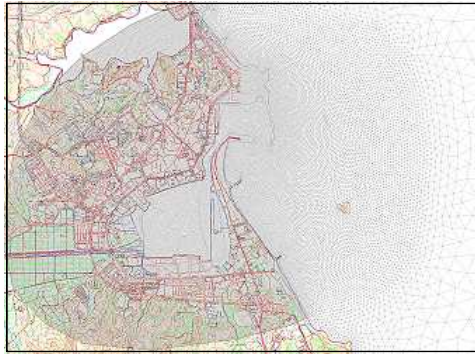
Region		Node No.	Element No.
무역항 (8)	속초항	48,112	95,604
	옥계항	51,432	102,442
	묵호항	37,351	74,344
	동해항	120,081	239,191
	삼척항	26,622	52,963
	포항항	219,470	431,565
	울산항	328,671	644,496
	부산항	280,825	560,093
연안항 (5)	주문진항	34,397	65,823
	후포항	14,092	26,826
	월포항	26,166	50,593
	구룡포항	22,612	43,336
	울릉항	111,089	219,270
기타 (2)	임원항	29,854	59,014
	오쿠시리(일본)	219,492	435,237
동해 전역		1,635,641	3,226,048

주) 상기자료는 국립해양조사원으로부터 보안을 요청받은 사항임

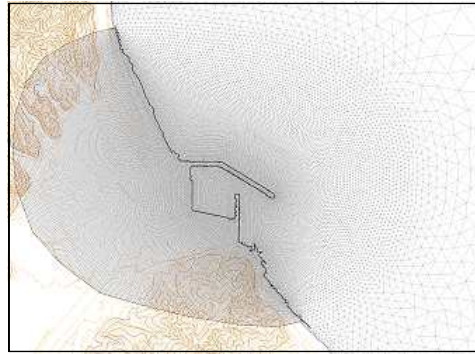
(2) 격자 통합과정 수립

(가) 작성된 8개 무역항구역, 5개 연안항구역 및 1983년 동해중부 지진해일의 피해를 가장 많이 입은 임원항과 일본의 오키시리 섬의 상세 격자를 성균관대학교에서 기 골격이 작성된 동해의 병렬 유한요소 모형의 격자 체계에 접합하여 1개의 지진해일 사상에 대한 동해안의 주요 전지역에서의 상세한 계산 결과를 도출하기 위한 통합 격자 체계 수립하여 방대한 초기시물레이션을 시작하고 자료처리체계 구성을 시작함

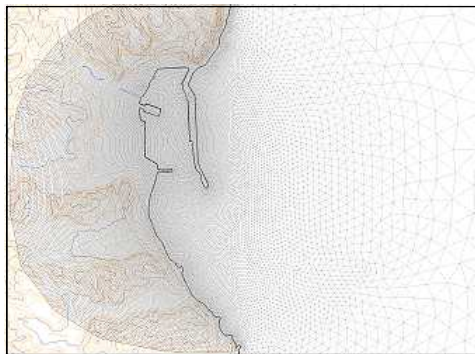
(3) 동해안 8개 무역항의 상세격자 작성



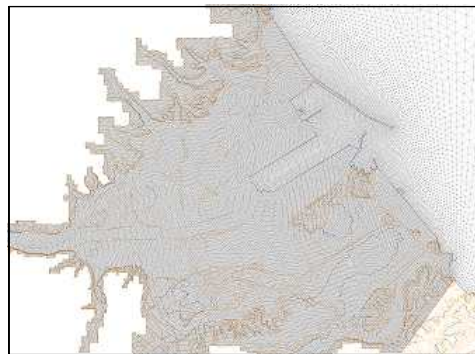
(a) 속초항



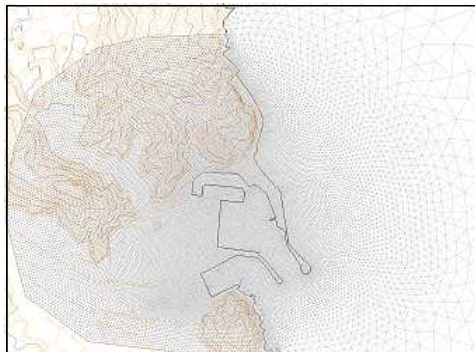
(b) 옥계항



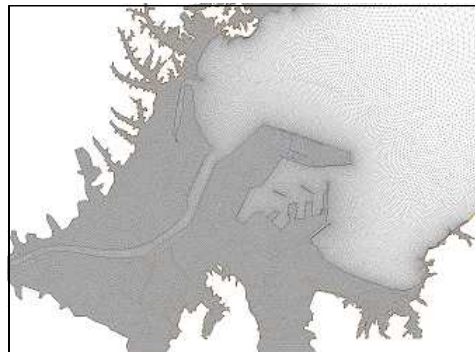
(c) 묵호항



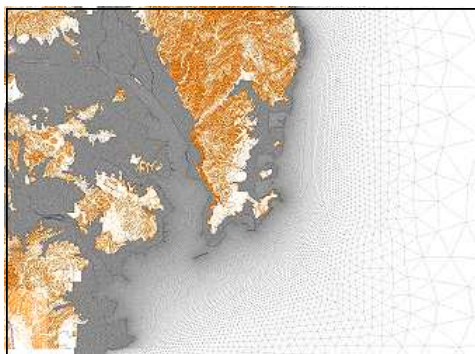
(d) 동해항



(e) 삼척항



(f) 포항항



(g) 울산항



(h) 부산항

그림 3.1.26 동해안 8개 무역항의 상세격자

(4) 동해안 5개 연안항의 상세격자 작성

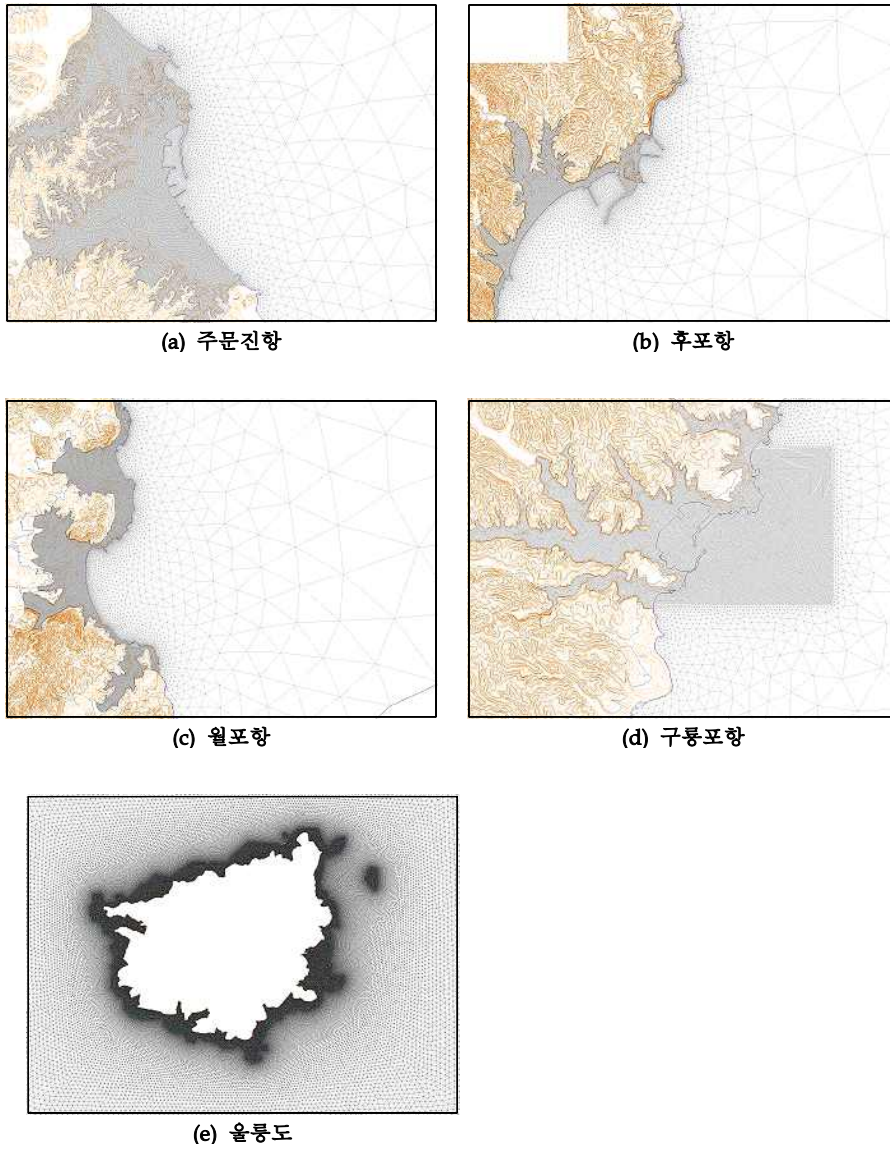


그림 3.1.27 동해안 5개 연안항의 상세격자

아. 지진해일 병렬산정 및 병렬가시화 체계 수립

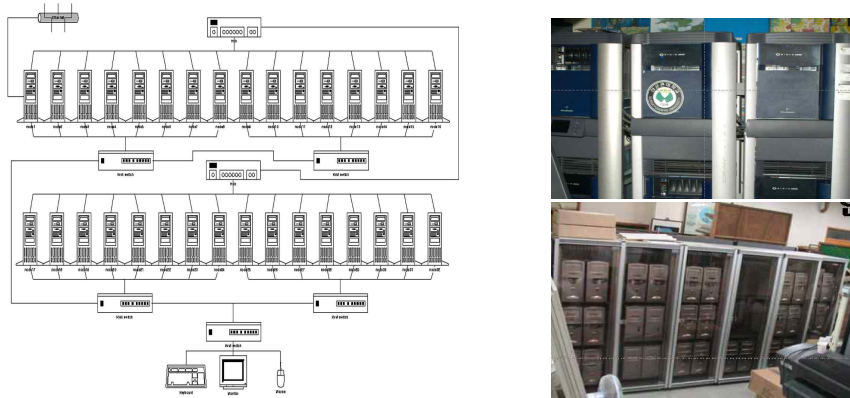


그림 3.1.28 성균관대학교에서 보유 중인 병렬 계산 시스템(Beowulf system)

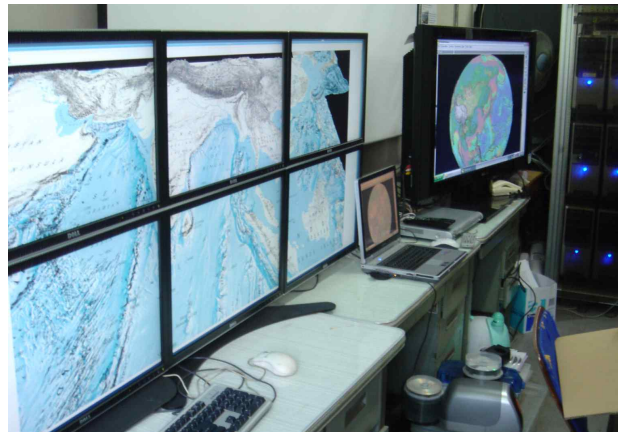


그림 3.1.29 병렬 계산 (Linux Clusters)과 병렬 가시화 (Chromium and DMX based) System

자. 지진해일 관련 자료 DVD 작성



그림 3.1.30 한반도 주변 및 해외 지진해일 관련 자료를 수집하여 DVD 자료집 작성

제 2 절 폭풍해일, 설계파 산정을 위한 기본 자료

1. 수심자료

해양예보모델의 구축에 있어서 가장 기본적이고 중요한 요소가 바로 정밀한 수심자료의 구축이다. 수심자료는 각 연안의 경우, 한국, 중국, 일본 등의 수치해도를 이용하여 정밀하게 산출할 수 있지만 황해와 동중국해를 포함한 광역 격자체계에서는 정밀하게 실측된 수심자료의 데이터베이스가 적다. 예보모델의 구축에 있어서 격자 크기가 작아지면 해저지형을 보다 실제에 가까운 형태로 둘 수 있으므로 모델의 결과를 향상시킬 수 있다. 그러나 모델의 격자크기는 한정되어 있으므로 여기에 가장 적합한 수심을 결정하는 것이 중요하다. 황해 및 동중국해는 쿠로시오 해역의 대륙사면을 제외한 해역에서는 수심의 변화가 크지 않으나 동해는 해저지형의 변화가 크므로 격자크기에 따라 실제 해저지형의 변화 정도가 매우 크다고 할 수 있다. 정밀한 수심자료를 구축하기 위하여 국립해양조사원에서 발행된 전체 수치해도 및 1분단위(약 2km, 그림 3.2.1)의 해도 원도자료에서 데이터를 취하고, 연안역을 벗어난 지역의 수심은 최병호(Digital Atlas for Neighboring Seas of Korean Peninsular, 1999, 그림 3.2.2), 서승남(2007, 그림 3.3)의 수심자료를 이용하였다.

대한민국 발간 수치해도의 경우 212종의 수치해도를 dxf파일 형식으로 제공하고 있으며 총 276개 도엽(분도 포함)으로 이루어져 있다. 도엽당 자료수는 측심과 등심선 자료 등이 각각 약 1,000~5,000개로 이루어져 있다. 기존의 수심자료 데이터베이스는 여러 가지 축척의 해도로부터 수심을 입력하여 일정한 크기의 해역을 단위로 자료를 정리하였다. 그러나, 축척에 따라 수심의 해상도가 다르므로, 고해상도 축척의 해도의 범위와 저해상도 축척의 해도의 범위가 겹쳐지는 경우에는 고해상도 축척의 해도에서 추출된 수심자료만을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서, 개선된 수심자료의 데이터 베이스에서는 수심자료가 어떤 해상도의 수치해도에서 추출되었는지를 알 수 있도록, 수치해도 단위로 수심자료를 정리하였다.

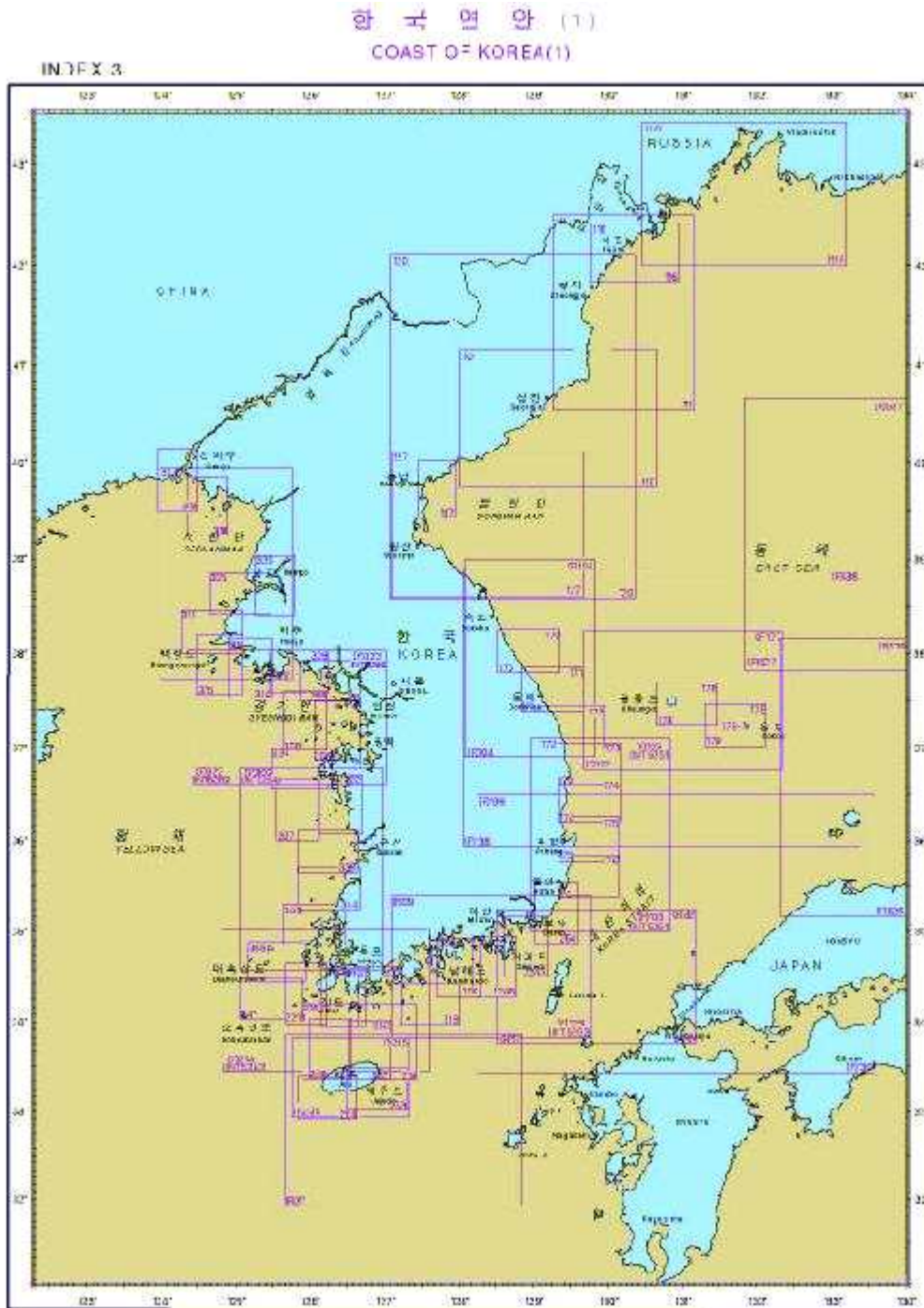


그림 3.2.1 국립해양조사원의 수치해도

개선된 수심자료 데이터 베이스는 국립해양조사원의 300여 개의 수치해도를 사용하였으며, 각 수치해도의 축척과 범위 등의 특성에 대한 데이터 베이스도 함께 구축하였다(그림 3.2.1). 국립해양조사원에서는 종이해도 뿐만 아니라 전자해도와 수치해도를 발행하고 있다. 전자해도란 전자해도표시시스템(ECDIS)에서 사용하기 위해 종이해도 상에 나타나는 해안선, 등심선, 수심, 항로표지(등대, 등부표), 위험물, 항로 등 선박의 항해와 관련

된 모든 해도정보를 국제수로기구 (IHO)의 표준규격(S-57)에 따라 제작된 디지털해도를 말하며, 수치해도는 그래픽 소프트웨어에서 일반적으로 널리 사용되는 DXF(Drawing eXchange Format) 파일으로 제작된 디지털해도를 말한다. 수치해도에는 항해에 관련된 모든 정보가 수록되어 있어서, 수심자료 데이터 베이스를 구축하기 위해 수심, 등심선 및 해안선 등의 필요한 정보만을 추출할 필요가 있다. 수치해도의 좌표체계는 Bessel 타원체를 적용한 UTM(Universal Transverse Mercator)을 사용하고 있으며, 최근에는 세계측지계(WGS-84)를 병행하여 해도가 제작되고 있으며, 2004년 말 이후에는 세계측지계로 단일화할 예정이다. 그림 3.2.2는 경기만 지역의 수치해도에서 수심과 해안선 자료만을 추출한 예를 보인 것이다. 수치해도의 좌표는 UTM(Universal Transverse Mercator)좌표계를 사용하였으며, 이를 WGS-84(World Geodetic System)을 사용하는 위도, 경도로 변환하였다. 수심자료는 측심된 자료와 등수심선 등을 포함하고 있으며, 해안선 자료는 자연적으로 형성된 해안선과 부두, 방파제 등의 인공적인 구조물 등으로 구분되어 있다. 해안선 자료를 통합하여 육지를 폐곡선으로 둘러싸도록 구성하면, 임의의 격자점이 폐곡선 내부 혹은 외부에 있는지를 알 수 있으므로 육지와 바다를 구분할 수 있는 논리수심자료를 산출할 수 있다.

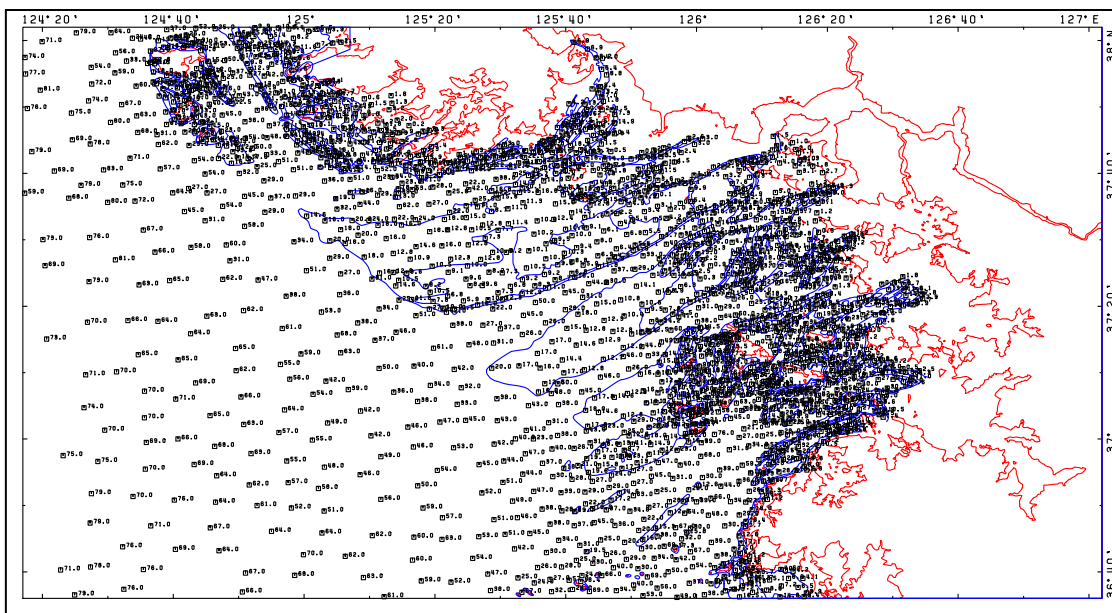


그림 3.2.2 경기만 지역의 수치해도에서 추출된 수심 및 해안선 자료

최병호(Digital Atlas for Neighboring Seas of Korean Peninsular, 1999, 그림 3.2.4의 자료는 최병호 등이 1999년도에 발표한 수심자료로서 등심선을 주 자료로 하고 있으며 1

분 간격의 자료가 황해 및 동중국해를 포함한 광역으로 제공되고 있다. 서승남(2007, 그림 3.2.5)의 자료는 북위 30~44도, 동경 117~143도의 범위로 수치자료를 제작하였으며 격자간격은 30초(약 900m)이다. 이 자료셋은 기존 해도자료를 취합하여 만든 것으로 GEBCO, SatBath, JEGG500, 국립해양조사원자료, DTED 위성고도자료 등을 이용하였다.

이 외의 해역의 수심자료는 글로벌 DBDB 5분간격 데이터, ETOPO1, ETOPO2 및 일본측 자료는 JODC의 500m 격자수심을 이용하여 수심자료를 완성하였다.

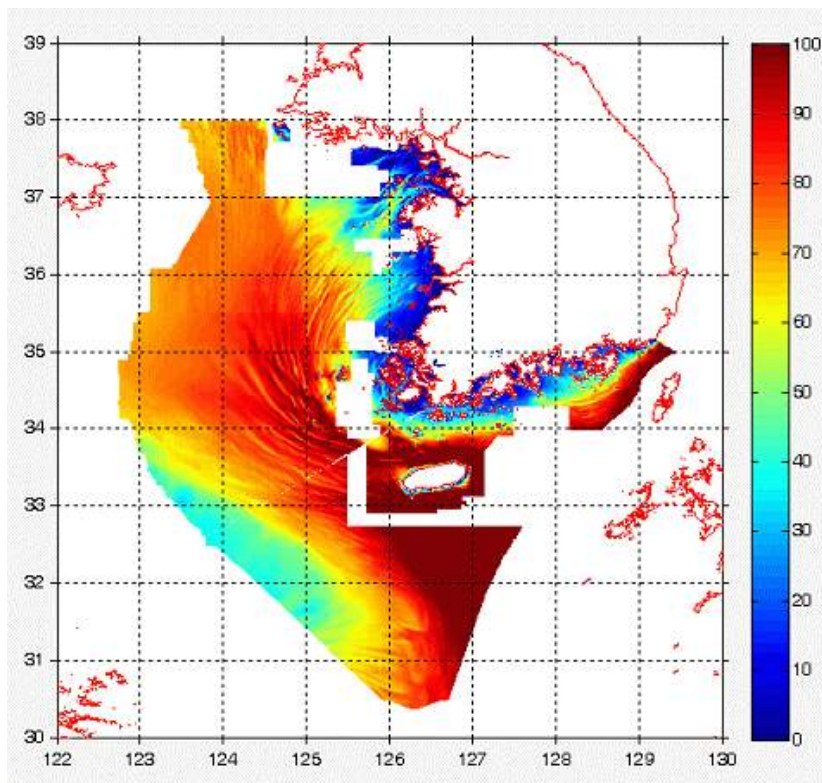


그림 3.2.3 국립해양조사원의 1분자료(해도 원도)

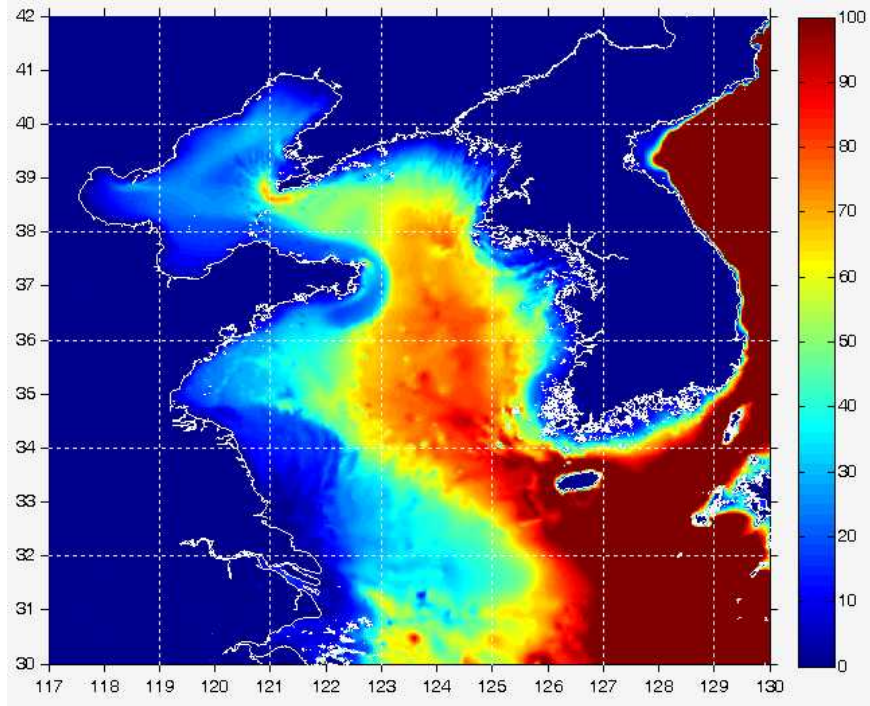


그림 3.2.4 Choi(Digital Atlas for Neighboring Seas of Korean Peninsular, 1999)의 수심자료

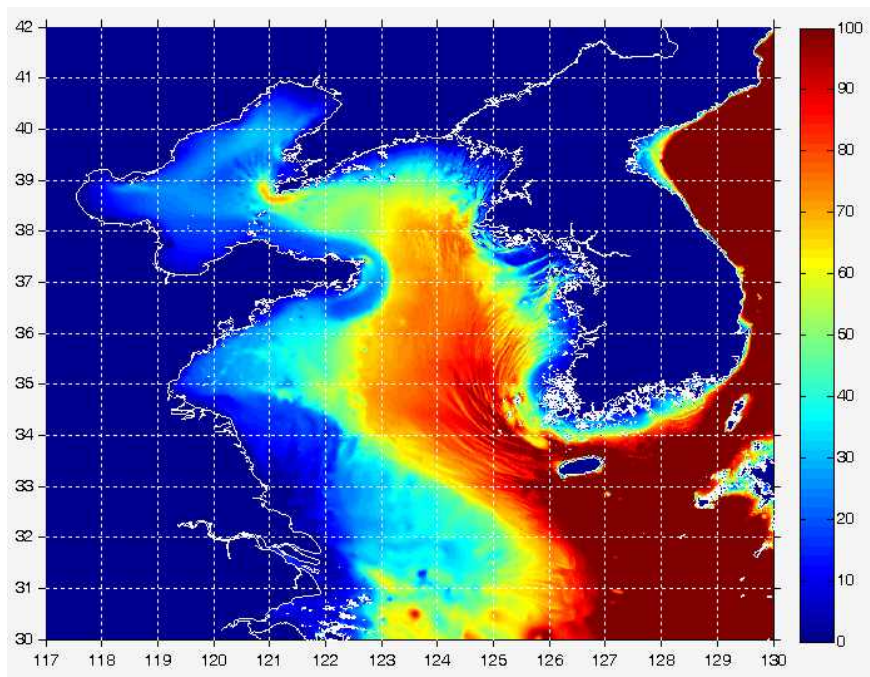


그림 3.2.5 Seo(2007)의 30초 격자 수심자료

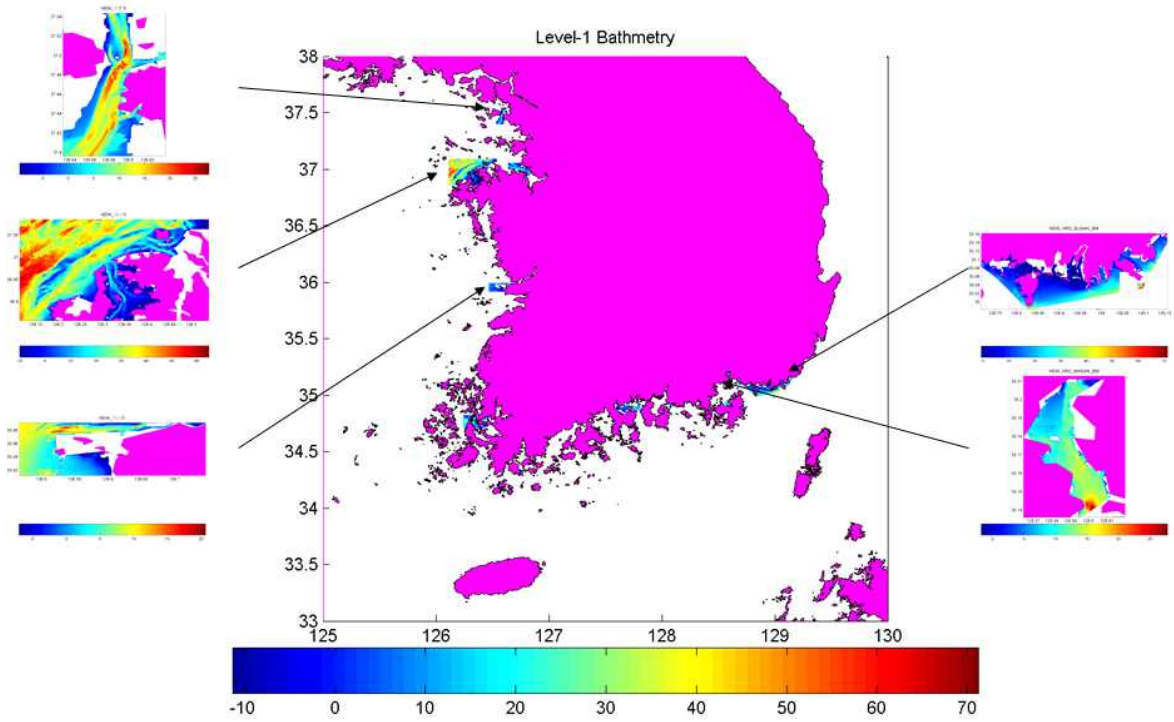


그림 3.2.6 해양조사원 측심자료를 이용한 상세격자수심 보정

이상의 여러 상세 수심자료를 이용하여 연안에 정밀 수심 격자망 구성하였으며, 전 연안을 따라 다음의 그림과 같이 주요해역에 대해 0.5도 간격으로 150m 격자 및 60m 격자수심을 구하였다.

그리고 전 52개 항만에 정밀 격자 천해 파랑 모델을 수립하기 위해 주요 항만 일대 (52개 항만에) 60 m 수심 격자망 구성하여(그림 3.2.7~8) 천해 파랑 모델을 수행하였다.

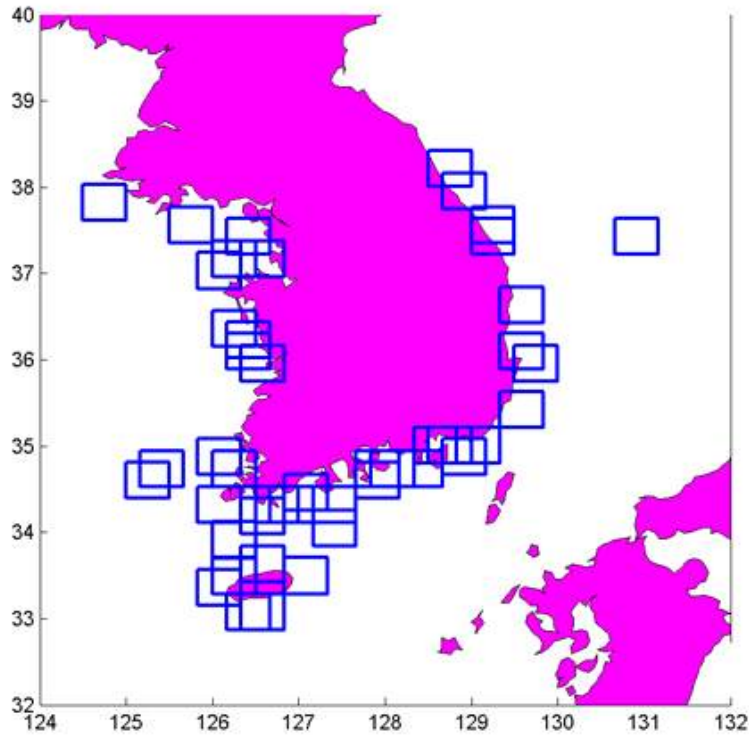


그림 3.2.7 정밀격자 수심 격자 구성망(150m 및 60m 격자수심)

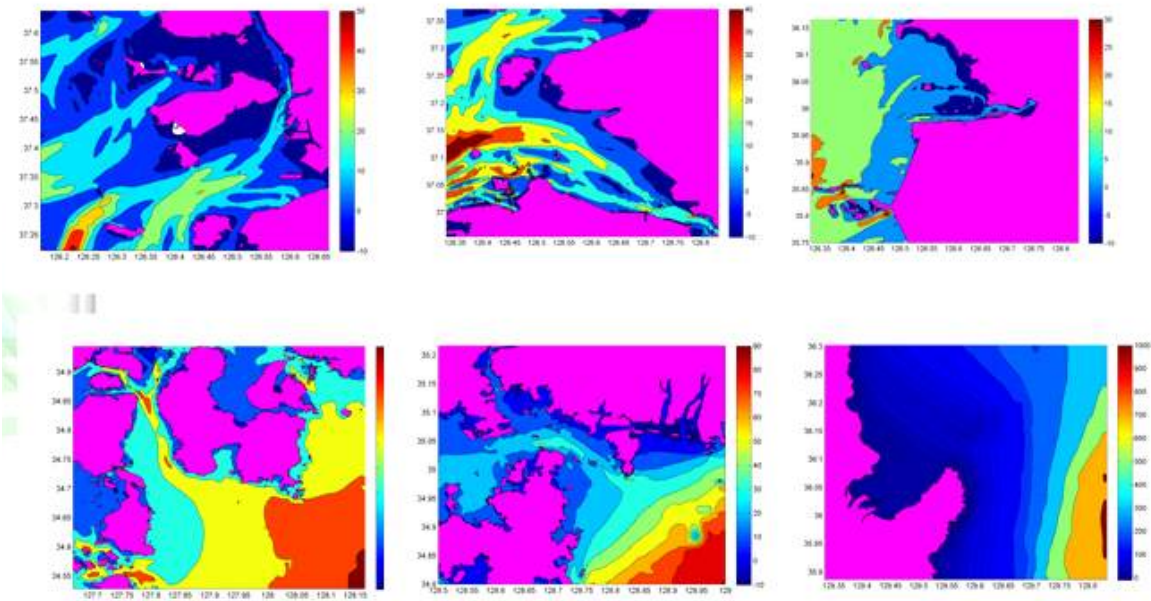


그림 3.2.8 60m 상세격자 수심도 구성 예

2. 기상입력자료

항만 및 연안 공학에서 파랑의 영향은 가끔 발생하는 이상파랑이 지배적이다. 방파제 등 구조물의 설계, 퇴적물 이동 및 이에 따른 해안선 변화등 주요한 문제는 태풍 등 이상파랑에 의해 일어난다. 이 이상파랑 시에 정확한 파랑 산출이 무엇보다도 중요하다.

이상 파고시의 장기파랑산출 및 통계처리에 의한 설계파산출의 가장 중요한 오차는 파랑모델의 입력인 해상풍의 산출에 있다(V.J. Cardone, 1996). 특히 태풍은 시·공간적 변화가 매우 크고, 관측자료가 거의 없는 해상에서 종관 기상분석에 의한 태풍시의 해상풍산정은 오차가 커서, 시·공간적으로 크게 변하는 태풍시의 파랑 산출에 한계가 있다. 종래에 사용해오던 태풍 해상풍 추정 방식으로는 태풍 파라미터의 정밀 산정, 태풍시 해상풍의 해면 마찰 영향 개선, 태풍 이동 영향 개선 등을 제한된 자료로 추정하는 데는 한계가 있어, 앞 장에서 소개한 바와 같이 태풍 해상풍모델을 개선하여 태풍시 해상풍 오차를 줄였다.

폭풍해일은 태풍 및 온대성 저기압 등의 기상현상에 의해 나타나는 강한 바람과 현저한 기압강하로 인하여 수위가 크게 변동하는 현상이며, 심해에서는 크기와 영향이 비교적 미약하나 연안에서는 지형적인 영향과 조석, 조류 등의 영향으로 크게 증폭될 수 있다. 폭풍해일은 비교적 수심이 낮은 곳에서 빈번히 일어나고 있는데 이것은 해저마찰의 효과가 크다는 것을 의미하고 있으며, 이 밖에 풍파나 너울의 효과, 기상 요란의 이동과 장파와의 공명 현상, 지구자전의 효과, 내만의 자유진동 등이 폭풍해일 현상에 복잡하게 영향을 미치고 있다. 따라서 폭풍해일을 예측하기 위해서는 국지적인 조건, 즉, 해안선과 천해의 지형적 특성 (만, 열도, 섬, 대륙사면의 폭과 경사 등)이 매우 중요하며, 태풍, 폭풍 등 악기상의 영향권이 충분히 포함될 수 있는 원해의 광역적 특성과 함께 연안해역의 세부 지형적 요소가 잘 반영되도록 구성해야 한다 (Kang et al., 2009). 본 연구에서는 서해안과 남해안의 복잡한 지형조건을 고려하기 위하여 정밀격자 (약 300m)에서의 폭풍해일 예측시스템을 구축하였으며, 정밀격자 폭풍해일 모델의 입력자료로 사용하기 위한 정밀격자 해상풍 예측시스템을 수립하였다.

우리나라에서 큰 폭풍해일은 주로 태풍에 의해 일어나므로 태풍에 의한 해상풍을 정확히 산출하는 것은 매우 중요하다. 비태풍시는 수치 기상모델의 초기 조건을 이용하여도 큰 문제가 없지만 태풍의 경우에 수치 기상모델을 사용하는 것은 부정확할 수 있다. 태풍은 일반적인 온대성 저기압 및 고기압과는 달리 해면기압과 바람의 분포가 중심부근

에서 변화가 크며 기압장이 빠른 속도로 이동한다. 그러므로 실제 관측된 기상자료를 얻기 힘든 해상지역을 태풍이 이동할 때는 일기도 격자점상의 기압으로 해상풍을 구하는 것은 큰 오차를 낼 수 있다.

본 연구에서는 해상풍 모델을 비태풍시와 태풍시로 나누어 수립하였다. 비태풍시는 Weather Research and Forecasting model (이후 WRF 모델)을, 태풍시는 미육군 공병대 태풍해상풍 모델 (US Army Corps of Engineers wind model, 이후 CE 모델)을 선정하였다. 태풍해상풍 모델은 파라미터 (중심기압, 최대풍 반경, 주변기압 등)를 사용하여 태풍 기압분포를 나타내므로 이러한 파라미터를 신속하게 산출하기 위해 태풍해상풍 입력 체제를 개선하였다.

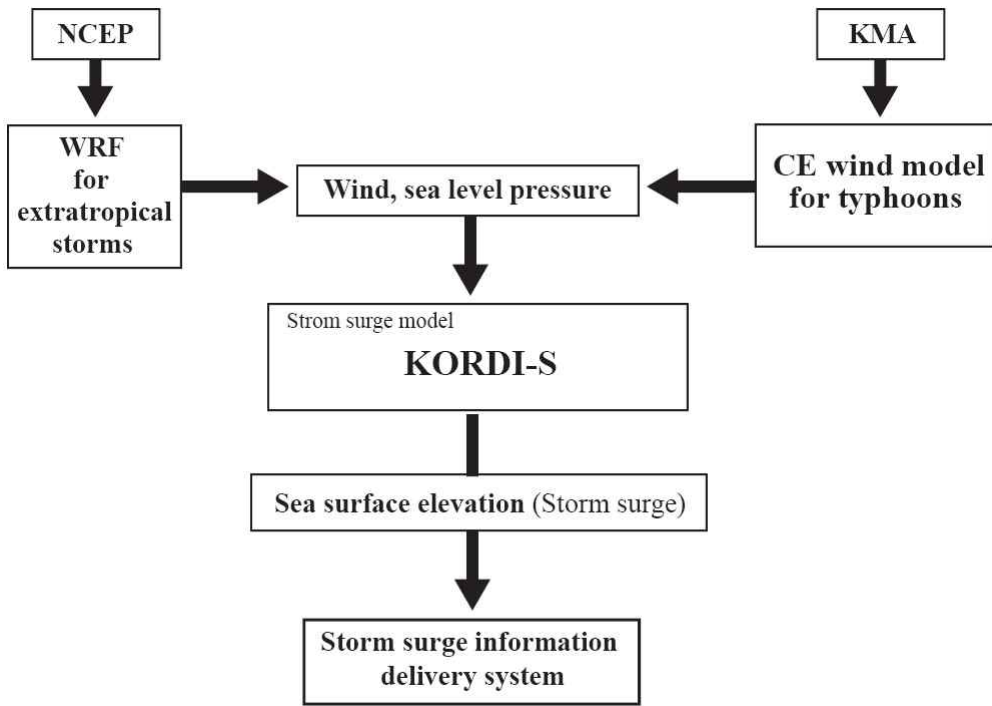


그림 3.2.9 해양연구원 Kordi Operational Storm surge prediction sYstem (KOSY)의 도식도

가. 비태풍시 정밀격자 해상풍 예측시스템

(1) 정밀격자의 수치기상모델

폭풍해일과 파랑 등을 예측하기 위해서는 자연현상을 수치적으로 해석하는 해양 수치모델이 사용되고 있으며, 해일 및 파랑을 일으키는 기상외력인 바람과 기압 등의 기상 자료가 해양 수치모델의 입력자료로 필요하다. 따라서 바람 및 기압을 정확히 산출하는

것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 MM5 (Fifth-generation Mesoscale Model)와 WRF 및 COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System) 등의 모델을 수립하여 비교·검토하였다.

MM5 모형은 비압축성 비정수계 (Noncompressible non-hydrostatic) 모형으로 수평 격자는 Arakawa-B 격자 체계를 사용하며, 연직 격자로는 모형의 하층경계가 지형을 따라가는 시그마 좌표계 (σ -coordinate)를 사용한다. 시간 적분방법으로 2차 등넘기 (second-order leapfrog) 시간 적분 방법을 사용하였으며, 이류항에 대해서는 2차 중심 차분법 (second-order centered differencing)을 이용한다. WRF 모형은 완전 압축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 모형으로 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며, 연직 격자로는 Eulerian 질량 좌표계 (mass-based terrain following coordinate)를 사용한다. 수치계산은 MM5 모형과 달리 3차 Runge-Kutta split-explicit 시간적분을 사용한다.

모형 성능의 객관적인 비교를 위하여 모형 영역 및 실험 설계는 모두 동일하게 구성하였다 (표 3.2.1). 모형의 등지격자 영역을 각각 81km, 27km, 9km 해상도의 3개 영역으로 Lambert-conformal 투영법을 사용하여 나누었으며, 등지격자 모형의 외부경계조건을 생성하기 위해서 two-way interacting nested grid system 방법을 사용하였다. 첫 번째 등지격자 모델링 영역은 81km 간격으로 동서와 남북방향으로 각각 61×61의 수평영역으로 설정하였으며, 그 중심은 36.5°N, 128.0°E 이다. 두 번째 도메인의 격자 간격은 27km로 61×61, 세 번째 도메인의 격자 간격은 9km로 91×91의 수평영역으로 설정하였다. 초기자료와 경계 자료는 격자 간격 1.0°×1.0°인 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 GFS (General Forecast System) 자료를 사용하였다.

MM5와 WRF 모형 모두 물리과정을 선택적으로 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 동일한 물리 과정을 설정하였다. 구름물리 과정 (microphysics scheme)은 simple ice scheme (Dudhia, 1989)을 사용하였으며, 적운모수화 과정 (cumulus parameterization scheme)은 Grell (Grell et al., 1994; Grell and Devenyi, 2002), 행성 경계층 모수화 방법 (planetary boundary layer)은 Eta PBL (Janjic, 1990, 1996, 2002; Mellor and Yamada, 1982), 지면 모수화 과정 (land surface model)은 five-layer Yil (Dudhia, 1996) 방안을 사용하였다. 그리고 복사 모수화 방안으로는 장파복사 (long wave radiation)에 대해서는

Rapid RTM 복사 모수화 방안 (Mlawer et al., 1997)을, 단파복사 (short wave radiation)에 대해서는 simple MM5 방안 (Dudhia, 1989)을 사용하였다.

COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System)는 미해군 연구소 (Naval Research Laboratory)에서 개발한 중규모 예보모델이다. COAMPS는 1997년 처음 개발된 이후 계속 개선되어 왔으며, 병렬컴퓨터의 급속한 발달에 대응하기 위해 MPI (Message Passing Interface) 기법과 영역분할법 (domain decomposition technique)을 사용하며, 3차원 MVOI (Multivariate Optimum Interpolation)법에 기초한 자료동화 과정과 비정수계 다중격자 예보모델을 갖추고 있다. 모델은 압축성 비정수계 운동방정식에 기초하며 (Klemp and Wilhelmson, 1978), subgrid-scale mixing (Mellor and Yamada; 1982, Yamada; 1982)항을 갖는다. 탄성파와 비선형 불안정을 줄이기 위한 확산 계수를 사용한다. 수평격자는 Arakawa-C를 사용하며 연직 격자는 Gal-Chen and Somerville (1975)의 격자체계를 사용한다.

표 3.2.1 WRF 모델과 MM5 모델

Model configuration	WRF (Weather Research and Forecasting)	MM5 (NCAR/PennState fifth generation Mesoscale Model)
grid & nest	Arakawa C grid Multiple nest (for this case, 3 nests : 81km, 27km, 9km)	Arakawa B grid multiple nests (for this case, 3 nests : 81km, 27km, 9km)
vertical coordinate system	(hybrid) sigma - z (pressure) - Terrain following	Sigma coordinate
vertical resolution	27 levels	
initial field & boundary condition	GFS (General Forecast System) data (temperature, U, V, relative humidity, height, pressure, soil moisture) SST is prescribed with initial GFS data set	
physical scheme	Simple ice scheme Grell scheme Eta PBL scheme RRTM / Simple MM5 scheme Five-layer soil model	

(2) 수치모델결과의 상호비교

모형의 특성과 적합성을 파악하기 위하여 폭풍해일이 크게 나타난 저기압의 발달시와 태풍 통과시의 경우에 대하여 MM5, WRF 및 COAMPS 모형을 수행하여 그 결과를 상호 비교하였다. 저기압의 발달시는 영광에서 1 m가 넘는 이상해면이 발생한 경우를 선정하였으며, 태풍 통과시는 마산에서 2.1 m에 달하는 폭풍해일이 발생한 경우를 선정하였다.

저기압 발달 모의에 대한 평가를 위해 MM5, WRF, COAMPS의 3개 모형의 결과를 비교하였다 (Lee et al., 2008; Heo et al., 2009). 그림 3.2.10는 2007년 3월 31일 01 LST에서의 각 모형에 의해 모의한 풍속과 해면기압장을 나타낸 것이다. 여기서 3개 모형 모두 남서해안에 저기압을, 저기압의 북쪽에 고기압이 분포한 형태를 잘 모의하였다. WRF 모형은 발달된 meso- β 규모의 저기압을 잘 모의하고 있는 반면, COAMPS 모형은 남서해안 먼 바다에서 저기압이 발달된 모습을 보인다. 해면기압이 낮은 곳에서 강한 풍속이 분포하는 모습을 보인다.

그림 3.2.11은 폭풍해일이 발생한 영광지역에서 관측된 풍속의 변화와 모형의 풍속값을 나타낸 것이다. 관측된 풍속의 경우 30일 13시와 17시에 5~6 m/s로 약간 상승된 값을 보이고 있으며, 30일 21시 경에는 거의 무풍을 보인 후 풍속은 계속 증가하여 31일 1시에 11.6 m/s로 최대값을 나타내었다. 반면, 모든 모형에서 작은 상승은 모의하지는 못하였으나, 30일 19시 이후에 풍속이 증가하는 형태는 모의하고 있다. 최대풍속은 MM5 모형의 경우 관측에 비해 빠르게, WRF 모형의 경우 관측에 비해 지연되어 나타나고 있다. COAMPS 모형은 최대 풍속이 나타나는 시간은 잘 모의하고 있으나, 그 크기가 작다.

저기압 발달 원인을 조사하기 위해 저층 온난이류, 저층 수증기 플럭스와 온도의 cross-section 등을 비교하였다. 본 보고서에는 그림으로 나타내지 않았으나, 900 hPa에서의 저층 온난이류에서는 WRF 모형이 MM5와 COAMPS 모형에 비해 더 강한 온난이류를 모의함을 보여주었으며, 수증기 플럭스의 수렴은 COAMPS 모형의 경우 MM5와 WRF 모형에 비해 수증기의 수렴이 적게 나타난다. 온도의 cross-section에서는 MM5 모형의 경우 온난핵의 발달이 크지 않았으며, COAMPS 모형은 온난핵이 발달하면서 동쪽으로 확장하는 모습을 보인 반면, WRF 모형은 온난핵이 발달하면서 동쪽으로 이동하는 모습을 나타내었다.

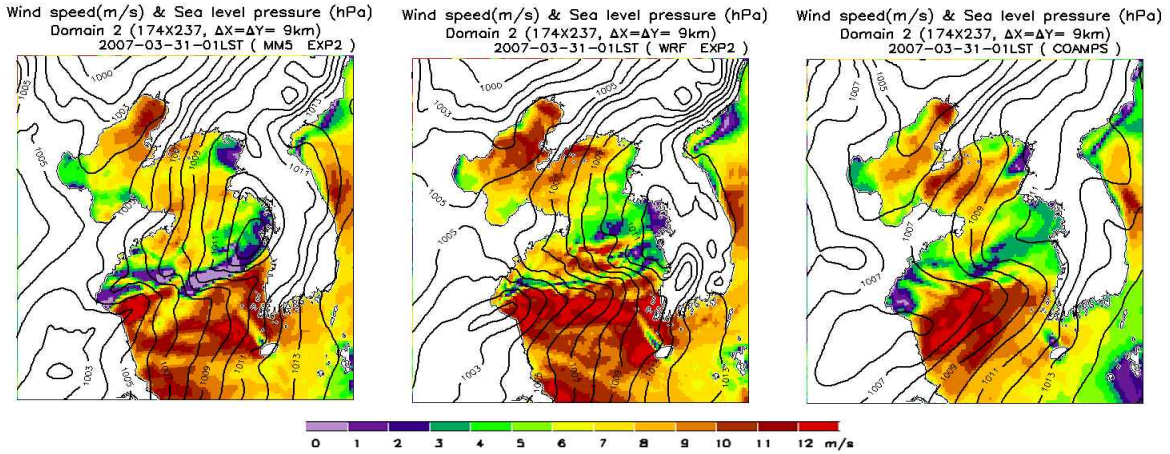


그림 3.2.10. 2007년 3월 31일의 기상모델의 바람속력과 해면기압의 결과, 왼쪽부터 MM5, WRF, COAMPS 의 결과

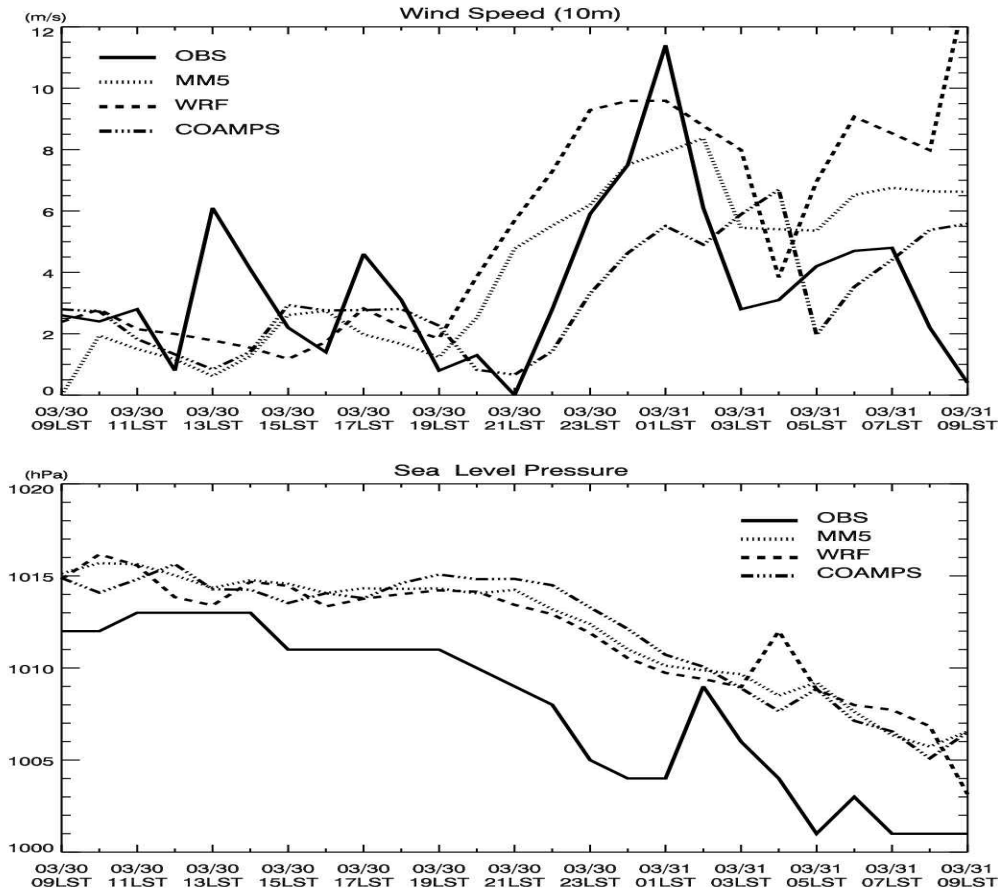


그림 3.2.11 2007년 3월 30일 영광에서의 관측 결과와 기상 모델의 바람의 속력과 해면기압의 시간 변화의 비교

태풍 모의에 대한 평가를 위해서 2003년 태풍 '매미'의 통과 시에 MM5와 WRF 모형의 결과와 관측자료를 비교하였다. 각 모형은 2003년 9월 11일 00 UTC부터 9월 12일 00 UTC까지 24시간 수치모의를 수행하였으며, 산출된 모의결과는 QuikSCAT 위성관측 결과와 비교하였다. 그림 3.2.4는 우리나라에서 태풍의 영향을 크게 받은 12일과 13일에 관측된 QuikSCAT 바람장과 MM5와 WRF 모형이 모의한 바람장을 나타낸 것이다. 여기서 MM5와 WRF 모형은 태풍의 진로와 바람의 분포를 전반적으로 잘 모의하였으나 최대 풍속은 약하게 모의하였다. 12일 18시와 13일 06시에 풍속의 최대값을 보면, QuikSCAT은 42.4m/s, 37.2m/s, MM5모형은 28.9m/s, 23.4m/s, WRF 모형은 25.1m/s, 20.4m/s로 모의되었다.

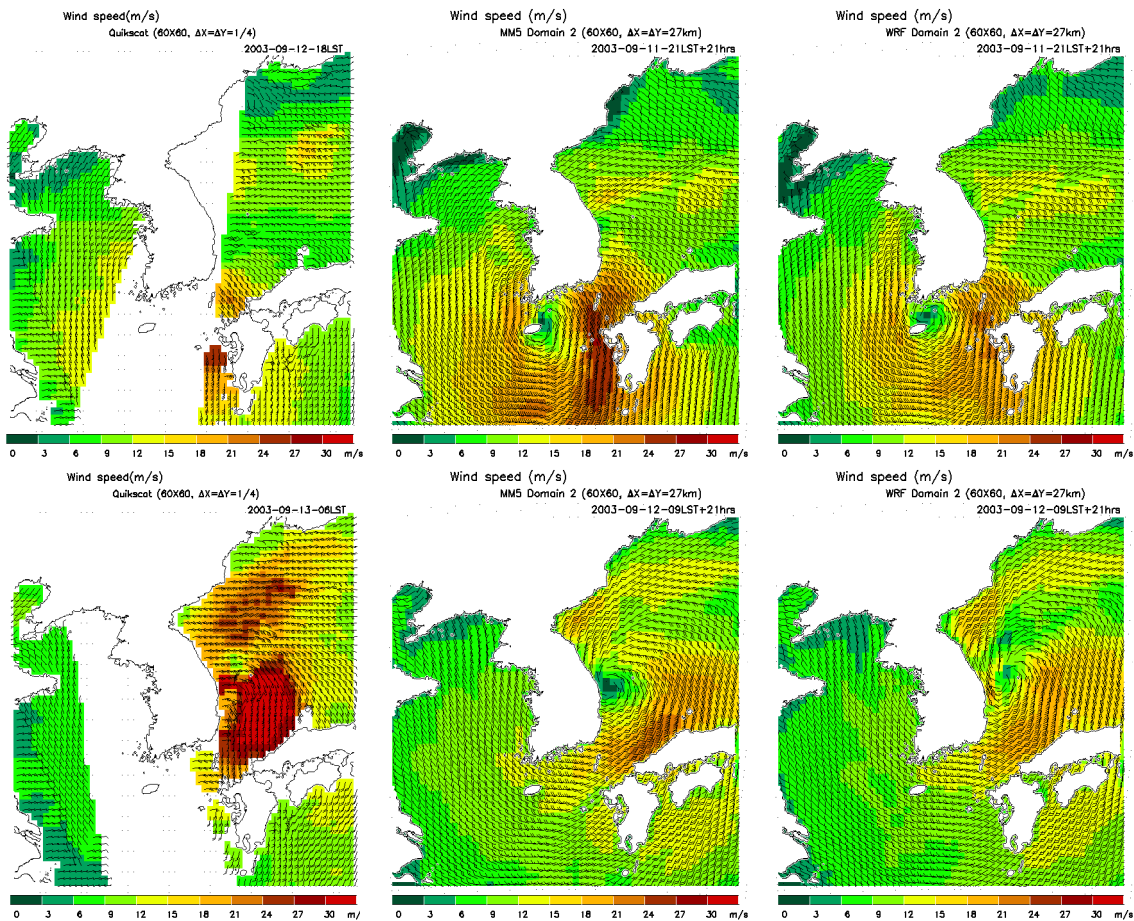


그림 3.2.12 2003년 9월 12 18시(위), 2003년 9월 13일 6시(아래)의 해면 바람 분포. 왼쪽부터 QuikSCAT 자료, MM5 모형, WRF 모형의 결과

같은 시간대의 QuikSCAT 자료와 모형 결과 사이의 BIAS (mean error), RMSE (Root Mean Square Error), SI (Scatter Index), CORR (Correlation Coefficient)의 통계적 요소들이 검증에 사용되었다 (표 3.2.2). 여기서, 전체 영역과 우리나라 주변 해협 (위도

31.875°N~37.875°N, 경도 123.375°E~132.875°E)에 대하여 각각 통계검증 결과를 제시하였다. BIAS값은 모든 경우에서 음의 값이 나타나며, 이는 모형이 모의한 결과가 관측에 비해 작다는 것을 의미한다. MM5의 경우 강한 풍속의 값이 WRF보다 더 넓게 분포함으로써 BIAS가 WRF보다 작게 나타낸다. 한반도 주변 해안의 영역을 평균한 통계검증 결과는 전체 영역에 대해 평균한 통계검증 결과에 비해 BIAS와 SI는 조금 더 작은 값을 가지지만, RMSE는 더 큰 값을 가지며, 상관계수는 더 낮게 나타난다. 두 영역 모두 통계검증 결과를 보면, BIAS를 제외하고, RMSE와 SI 모두 MM5모형이 크게 나왔으며, 상관계수도 WRF 모형보다 작은 값을 가진다. 통계검증 결과에 미루어 볼 때, WRF 모형이 MM5 모형보다 풍속을 더 잘 모의함을 알 수 있다.

표 3.2.2 전체 영역과 한반도 주변에서 각각 MM5 모델과 WRF 모델에 의한 바람으로 모의된 결과의 BIAS, RMSE, SI, CORR

Region		Model	
		MM5	WRF
Whole domain	BIAS	-0.66	-1.26
	RMSE	4.99	4.81
	SI	0.45	0.42
	CORR	0.66	0.70
Around the coast of the Korean peninsula	BIAS	-0.59	-1.24
	RMSE	5.67	5.46
	SI	0.42	0.40
	CORR	0.59	0.66

(3) 정밀격자 수치기상모델의 수립

연안에서 폭풍 해일을 정밀하게 예측하기 위해서는 여러 해양요소를 복합적으로 고려하는 정밀격자에서의 해양모델을 수립하여야 하며, 이러한 모델의 입력자료로 정밀격자에서의 정확한 해상풍 및 해면기압이 필요하다. 일반적으로 해양현상의 규모는 기상현상의 규모보다 작으므로 해양모델의 입력자료로 사용되는 기상입력자료는 일반적인 기상예보모델보다 더 정밀한 격자에서의 수치기상모델로 산출되어야 한다. 특히, 연안에서는 지형 및 기온 등의 변화가 심하기 때문에 정확한 폭풍해일 모델의 입력 자료를 생산하기

위해 중규모 기상현상을 모의할 수 있는 모형이 요구되며, 본 연구에서는 WRF 모델을 사용하여 폭풍해일모델의 입력자료를 생산하는 체제를 수립하였다.

WRF는 미국의 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), NCAR (National Center for Atmospheric Research), UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) 등의 기관과 대학에서 공동으로 개발하였으며, 운용적인 예보와 기상 연구 요구를 모두 제공하는 차세대 중규모 수치 기상 예보시스템이다. 모델 내에 multiple dynamical cores, 3DVAR 자료동화 시스템과 컴퓨터의 병렬화와 시스템 확장을 위한 소프트웨어 구조를 가지고 있어, 수 m부터 수천 km까지의 범위에 걸쳐 적용 가능하다. 그리고 완전 압축성 비정수계 모형으로 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계, 연직 격자로는 Eulerian 질량 좌표계와 3차 Runge-Kutta split-explicit 시간 적분을 사용하며, 이류에 대한 유한 차분법은 6차 중심 차분법을 도입한다. 또한, 플럭스 형태의 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라량을 보존한다.

현재 사용 중인 WRF 모델은 WRF-ARW version 3.0이며, 세 개의 주요 구성요소로 이루어져 있다. 첫 번째는 WPS (WRF Preprocessing System)로써 WRF를 실행하기 위한 초기 자료를 만들어주는 전처리 과정이며, 두 번째는 WRF에서 실제 계산이 이루어지는 실행 과정, 세 번째는 WPP (WRF Postprocessor)로써 NetCDF 포맷으로 생산되는 결과물을 처리하는 후처리 과정이다 (그림 3.2.13).

WPS 프로그램은 실제 자료를 사용한 모의를 위한 전처리 과정이며, 모델의 계산영역의 설정, 지형자료 (terrain, land-use, soil types)의 내삽 과정과 전 지구 혹은 광역의 모델결과로부터 경계 자료를 내삽하는 과정으로 이루어져 있다. WRF 모형의 코드는 초기화 프로그램 (real.exe)과 수치 적분 프로그램 (wrf.exe)으로 구성되어 있다. WPP 프로그램은 WRF 모형의 결과물을 후처리하는 과정으로써 모형의 연직 좌표계의 결과들로부터 표준 고도의 결과들로 내삽하는 과정과 사용자들이 필요한 결과물을 산출하는 과정으로 이루어져 있다.

전처리 과정 (WPS)은 크게 geogrid, ungrib, metgrid의 세 부분으로 나누어져 있다 (그림 3.2.14). geogrid는 모형의 도메인을 설정하고 지형과 지표 상태를 각 도메인의 격자에 맞도록 내삽하는 프로그램이며, ungrib는 GRIB 형태로 압축된 경계자료와 기상자료들의 압축을 푸는 프로그램, metgrid는 ungrib에서 압축이 해제된 자료들을 각 도메인의 격자에 내삽하는 프로그램이다. geogrid에서 필요한 전지구 자료는 WRF 다운로드 페

이지에서 제공한다. ungrib에서는 다른 광역모델이나 전지구 모델에서 제공하는 GRIB 파일에서 필요한 정보를 추출할 수 있도록 각 GRIB 파일에 맞는 V표이 정의되어 있으며, 본 연구에서는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)의 GFS (Global Forecast System) 자료로부터 매 6시간 간격의 72시간 예보자료를 내려받기 하도록 설정하였다. metgrid에서는 수평 내삽 과정이 수행되어 그 결과는 WRF real 프로그램의 입력자료로 사용되며, 여기서 연직 내삽 과정과 초기화 과정이 수행된다.

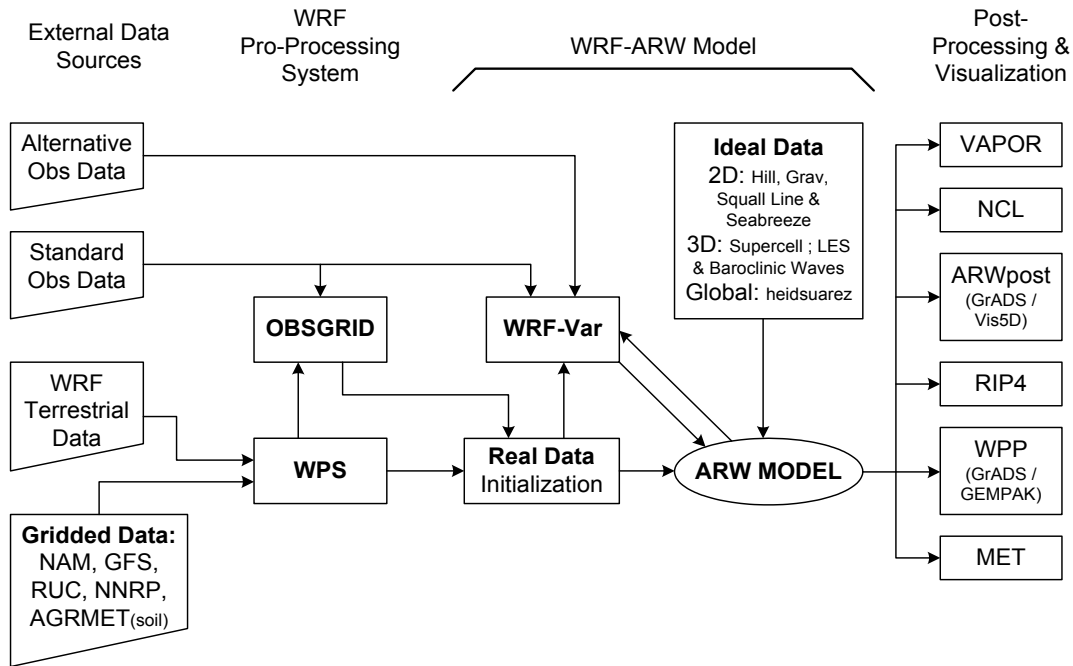


그림 3.2.13 WRF Modeling System의 순서도

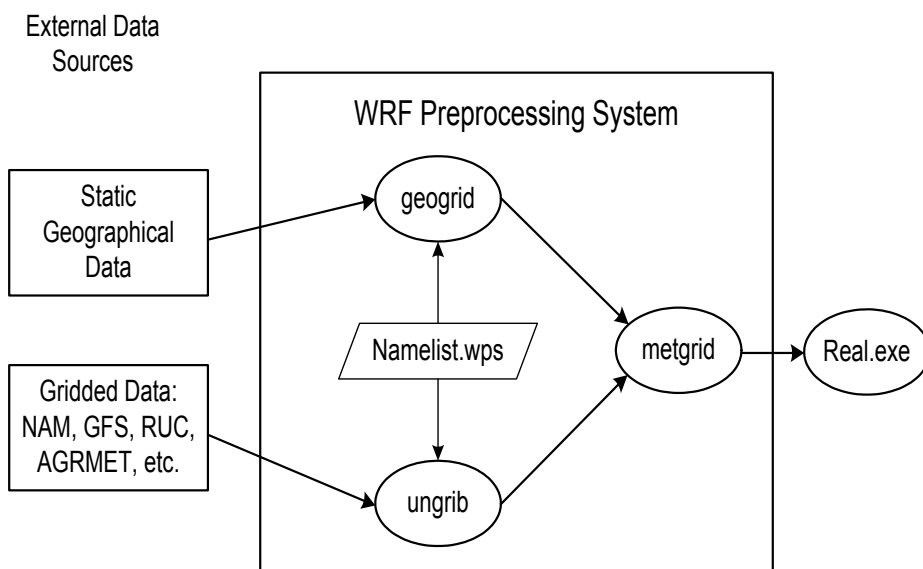


그림 3.2.14 WRF Preprocessing System의 순서도

모델의 계산격자는 태풍의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 동지나해 남쪽해역까지 포함된 광역격자 (Domain 1)와 우리나라 근해를 포함하는 상세격자 (Domain 2)을 nesting한 격자 시스템으로 설정하였다 (그림 3.2.15). 광역격자와 상세격자는 기준위도 (true latitude)와 기준경도 (standard longitude)를 각각 35.0°N 와 127.5°E 로 설정한 Lambert Comformal 도법의 지도상에서 등거리 간격으로 설정되었다. 광역격자는 경도 $104.6^{\circ}\text{E}\sim 150.4^{\circ}\text{E}$, 위도 $14.9^{\circ}\text{N}\sim 52.5^{\circ}\text{N}$ 의 범위에서 20km의 수평해상도로 163×217 의 약 36,000개의 격자로 구성되어 있으며, 상세격자는 경도 $121.1^{\circ}\text{E}\sim 133.6^{\circ}\text{E}$, 위도 $29.9^{\circ}\text{N}\sim 39.6^{\circ}\text{N}$ 의 범위에서 4km의 수평해상도로 270×270 의 약 73,000개의 격자로 구성되어 있다 (표 3.2.3). 광역격자와 상세격자는 one-way nesting으로 연결되어 있으며, 연직으로는 지형을 따라가는 시그마 좌표계에서 28개로, 적분시간간격은 광역격자에서 100초로 설정하였다.

WRF 모델은 클러스터 시스템에서 MPI (Message Passing Interface)를 사용하여 하루에 2번 수행하고 있다. 즉, 00UST (09LST)와 12UST (21LST)를 예측시작시간으로 72시간 예측을 수행하고 있으며, NCEP의 GFS에 자료가 올라오는데 4시간 가량 소요되므로 예측시스템이 수행되기 시작되는 시간은 13시와 01시로 설정하였다.

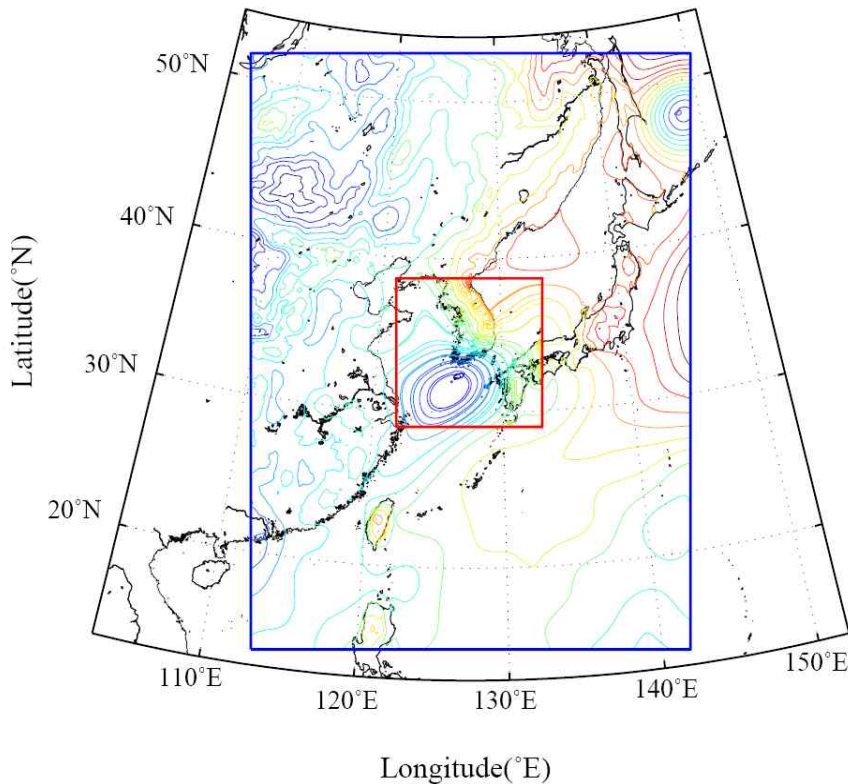


그림 3.2.15 WRF 모델의 격자

표 3.2.3 Specification of WRF grids

	Domain 1	Domain 2
Longitude	104.6°E ~ 150.4°E	121.1°E ~ 133.6°E
Latitude	14.9°N ~ 52.5°N	29.9°N ~ 39.6°N
Grid number	163 × 217	270 × 270
Horizontal Resolution	20 km	4 km

WRF 모델은 입력자료로 사용되는 NCEP 자료를 내려받기 하는데 30분정도 소요되며, 모델의 수행시간이 약 3시간 30분 정도 소요되어 총 소요시간은 4시간 정도 소요되고 있다. 그림 3.2.16은 Typhoon Lupit (0920)의 통과시 광역격자에서의 2009년 10월 19일 오전 6시의 해상풍과 해면기압을 예측한 결과의 예이다.

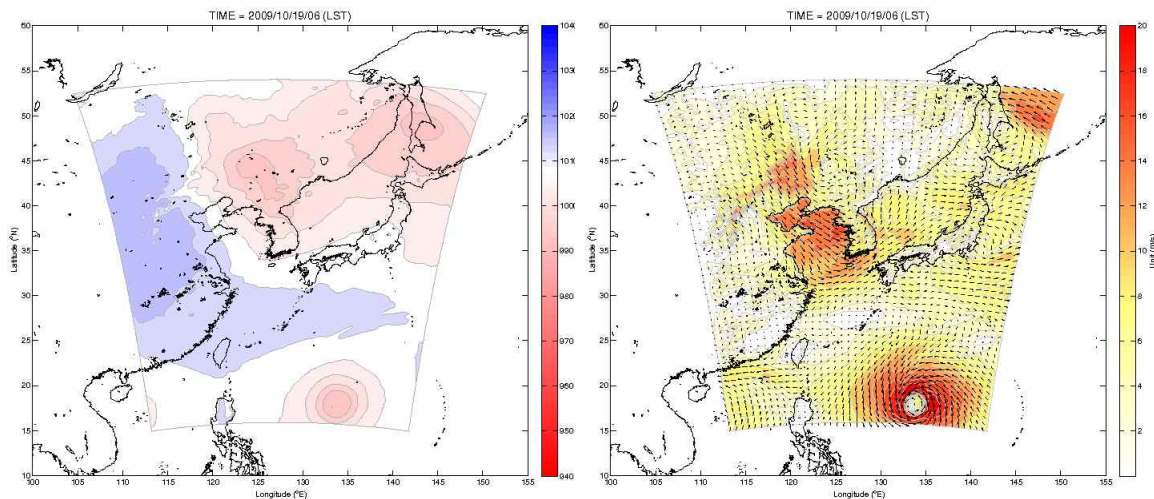


그림 3.2.16 태풍 ‘Lupit’ (0920) 시 WRF 모델의 결과 (2009/10/19 06LST)

(4) WRF 모델의 검증

WRF 모델의 검증을 위하여 모델의 예측결과를 DMI (Danish Meteorological Institute)를 비롯한 유럽의 기상연구소에서 개발한 HIRLAM (High Resolution Limited Area Model)의 모델 결과와 황해중부부이 및 이어도 해양과학기지의 관측 자료와 비교하였다.

HIRLAM 모델의 영역은 104.7°E~143.5°E, 14.95°N~46.1°N의 범위에서 0.075도 (약 7.5km)의 수평해상도로 518×416의 격자로 (약 215,000개) 구성되어 있다 (표 3.2.4). 모델

결과는 DMI로부터 ftp를 통해 하루에 두 번씩 (06, 18 UTC) 해상풍과 해면기압의 매 시간 간격의 72시간 예보자료를 받고 있다. 그림 3.2.17는 HIRLAM 모델에 의해 Typhoon LUPIT (0920)의 통과시 해상풍과 해면기압을 예측한 결과의 예이다.

표 3.2.4 HIRLAM 모델의 격자 정보

Longitude	104.675°E ~ 143.45° E
Latitude	14.95° N ~ 46.075°N
Grid number	518 × 416
Horizontal Resolution	0.075 degree (~7.5 km)

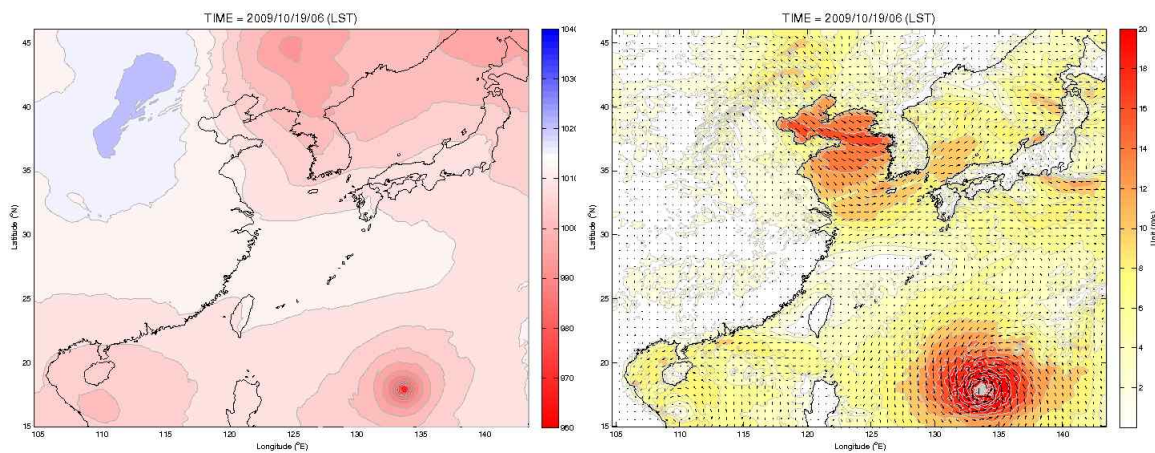


그림 3.2.17 태풍 ‘Lupit’ (0920) 시 HIRLAM 모델의 결과 (2009/10/19 06LST)

WRF 모델의 해상풍과 해면기압의 검증을 위하여 황해중부부이와 이어도 해양과학기지의 관측 자료와 비교하였다. 그림 3.2.48은 황해중부부이와 이어도 해양과학기지의 위치를 나타낸 것이며, ▲와 ★는 각각 황해중부부이와 이어도 해양과학기지의 위치이다. 그림에서 보는 바와 같이 관측 지점의 위치는 연안에서 멀리 떨어져있어, 연안역과 달리 주변의 지형에 대한 영향이 없는 해상풍을 잘 나타내므로, 이 지점에서의 관측자료는 산출된 해상풍을 검증하기 적합한 자료로 사료된다 (정 등, 2008).

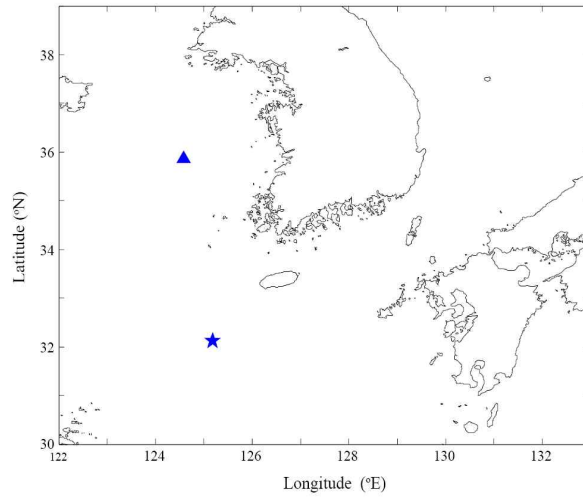


그림 3.2.18 황해중부부이(▲)와 이어도 해양과학기지(★)의 위치

그림 3.2.19은 황해중부부이와 이어도 해양과학기지에서 WRF 모델의 예측시간에 따른 해상풍 결과와 관측자료를 비교한 것이며, 그림 3.2.20는 황해중부부이와 이어도 해양과학기지에서 WRF 모델의 예측시간에 따른 해면기압 결과와 관측자료를 비교한 것이다. 비교·검증에 사용된 바람과 기압의 자료는 2009년 7월 7일부터 10월 11일까지의 자료를 사용하였으며, 이상 값으로 추정되는 자료와 결측 자료는 제외하였다. 그림 3.2.21과 그림 3.2.22는 각각 해상풍과 해면기압에 대하여 황해중부부이와 이어도 해양과학기지에서 HIRLAM 모델과 관측자료를 비교한 것이다. 그림 3.2.19~3.2.22에서 WRF와 HIRLAM 모델 모두 예측 초기에는 관측치와 비교적 잘 일치하는 예측된 결과를 나타내었으며, 예측 시간이 경과함에 따라 점차 오차가 커짐을 보여 주고 있다. 해면기압의 예측결과 (그림 3.2.20, 그림 3.2.22)는 해상풍의 예측결과 (그림 3.2.19, 그림 3.2.21)보다 비교적 오차와 산포도가 적은 것으로 나타났다. 그림 3.2.20, 그림 3.2.22에서 이어도 해양과학기지의 모델 산출치와 관측치의 편차가 일정한 형태를 보이고 있다. 이는 이어도 해양과학기지의 기압센서가 고도 약 40여m에 설치되어 있으나 해면기압으로 고도보정이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

그림 3.2.19~3.2.22에서 보는 바와 같이 WRF 모델의 결과가 HIRLAM 모델의 결과보다 산포도가 작은 것으로 나타났으며, 이는 본 연구에서 수행한 WRF 모델의 수립이 성공적이었다는 것을 의미한다. 또한 황해중부부이에서의 산포도가 이어도 과학기지에서의 산포도보다 작은 것으로 나타났으며, 이는 황해중부부이 부근에서의 기상의 변동성이 이어도 부근보다 더 작기 때문인 것으로 사료된다. WRF와 HIRLAM 모델의 결과와 황해중부부이와 이어도 해양과학기지에서 관측된 자료의 통계 분석 결과 (표 3.2.5)에서도

전체적으로 예측시간이 증가할수록 Bias, STD (standard deviation), SI (scatter index)가 모두 증가하며, 일반적으로 해면기압보다 해상풍의 오차값이 더 크게 나타났다. 해상풍의 경우 bias, STD, SI 모두 WRF 모델이 HIRLAM 모델보다 작게 나타났으며, 해면기압의 경우는 bias를 제외하고는 WRF 모델이 HIRLAM 모델보다 작았다. 따라서 본 연구에서 수립한 WRF 모델의 결과는 충분히 신뢰할 만한 것으로 사료된다.

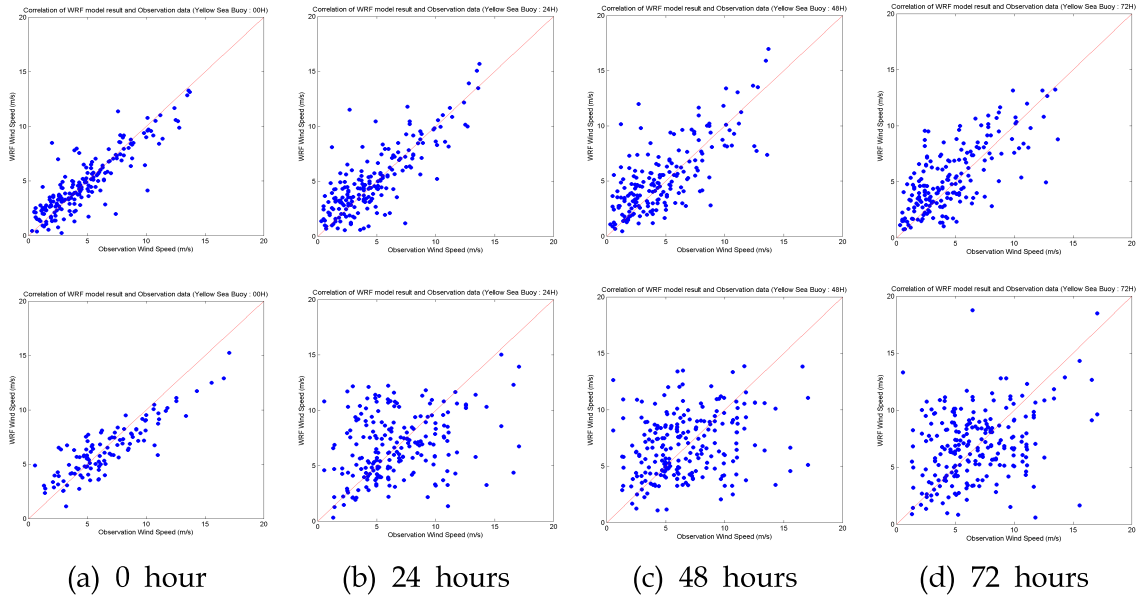


그림 3.2.19 황해 부이와 이어도에서 관측한 바람속력과 WRF 모델로 예측한 바람속력 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours

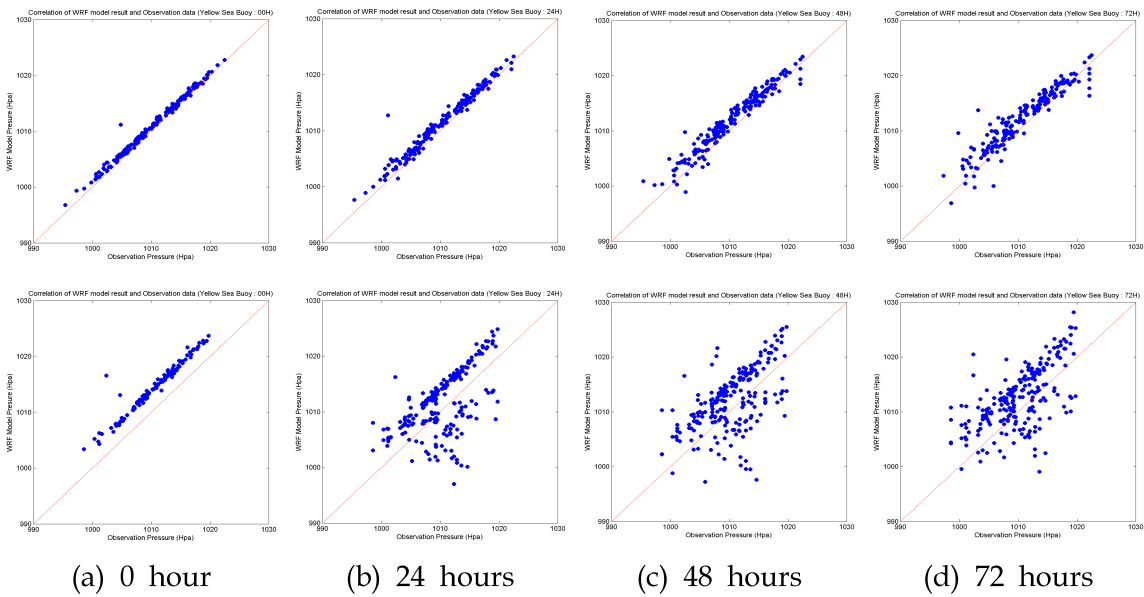


그림 3.2.20 황해 부이와 이어도에서 관측한 해면기압과 WRF 모델로 예측한 해면기압 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours

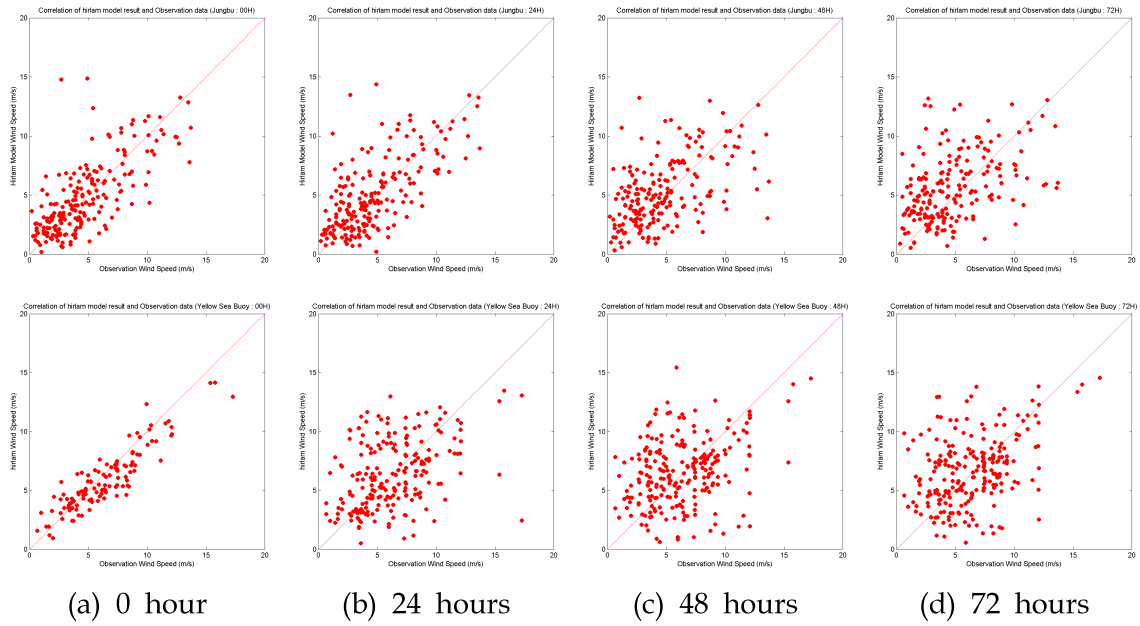


그림 3.21 황해 부이와 이어도에서 관측한 바람속력과 HIRLAM 모델로 예측한 바람속력 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours

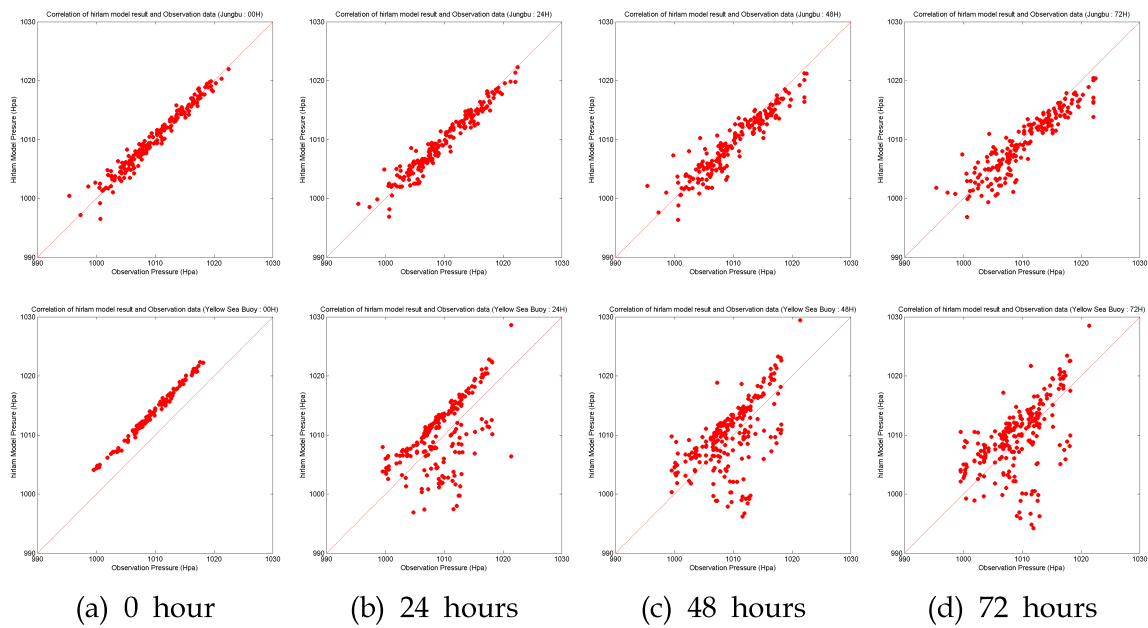


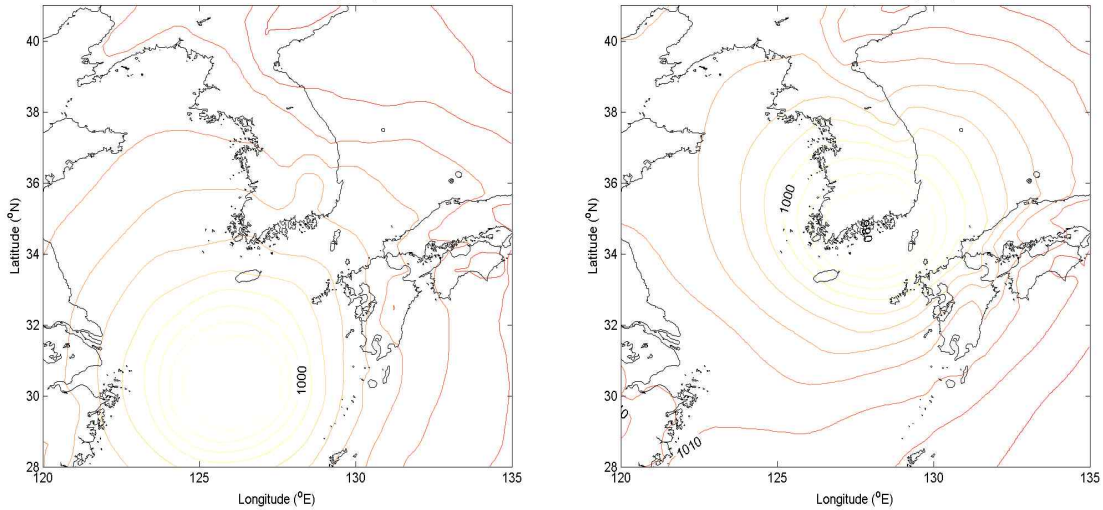
그림 3.22 황해 부이와 이어도에서 관측한 해면기압과 HIRLAM 모델로 예측한 해면기압 결과의 비교 (a) 0 hour, (b) 24 hours, (c) 48 hours and (d) 72 hours

표 3.2.5 WRF 모델과 HIRLAM 모델 결과의 통계분석

Variable	Forecasting time	WRF			HIRLAM		
		Bias	STD	SI	Bias	STD	SI
Wind	0	0.04	1.51	0.31	0.13	2.28	0.49
	24	0.33	1.90	0.40	0.32	2.49	0.53
	48	0.55	2.28	0.48	0.54	2.91	0.62
	72	0.72	2.28	0.49	0.87	3.18	0.68
Pressure	0	0.76	0.58	0.0006	0.21	1.05	0.0010
	24	1.15	1.07	0.0011	-0.27	1.34	0.0013
	48	1.46	1.39	0.0014	-0.71	1.95	0.0019
	72	1.49	1.94	0.0019	-0.90	2.33	0.0023

나. 태풍시 정밀격자 해상풍 예측시스템

태풍은 일반적인 온대성 저기압과 고기압과는 달리 해면기압과 바람의 분포가 중심 부근에서 변화가 크다. 그러므로 실제 관측된 기상자료를 얻기 힘든 해상지역을 태풍이 이동할 때는 일기도 격자점상의 기압으로 해상풍을 구하는 것은 큰 오차를 낼 수 있다 (강 등, 2002a). 그림 3.2.23는 태풍 '매미'시 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 전구 모델에 의한 기압장을 나타낸 것이다. 여기서 태풍의 중심기압은 990 hPa 내외로 RSMC (Regional Specialized Meteorological Center)의 자료에 의하면 2003년 9월 12일 00UTC (09LST)에는 930 hPa, 12UTC (21LST)에는 955 hPa로 나타났다. 이는 공간해상도와 모수화 과정 등의 제한으로 수치기상모델로는 태풍을 모의하기 어려워 수치기상모델에서의 태풍 강도는 실제보다 상당히 과소평가되기 때문이다.



(a) 2003/09/12 00UTC

(a) 2003/09/12 12UTC

그림 3.2.23 태풍 ‘매미’(0314) 시 ECMWF 모델의 기압장

태풍 중심역에서의 기압분포에 대한 추산오차를 줄이기 위해 태풍영향권내의 등압선을 동심원으로 가정하여 태풍의 기압분포를 몇 개의 파라미터 (중심기압, 최대풍 반경, 주변기압 등)로 표시하는 태풍 기압분포모형이 여러 형태로 제시되어 왔다. 태풍의 바람 추정은 파라미터에 의해 정의된 기압장으로부터 경도풍을 해석적으로 구한 후 이를 태풍의 이동 속도 영향, 해면 마찰 영향 등을 고려하여 경험식으로 보정하는 방법이 일반적으로 이용되고 있으며, 이동 속도와 마찰의 영향을 고려하는 방법에 따라 여러 가지 경험적 태풍해상풍 모델이 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 태풍의 이동 속도 영향, 해면 마찰 영향 등을 경험적으로 추정하지 않고, 해상의 대기경계층(Planetary Boundary Layer; PBL) 내에서의 물리적인 과정을 포함한 원시운동방정식(Primitive Equation of Motion)을 수치적으로 해석할 수 있는 태풍해상풍 모델을 수립하였으며 기존의 경험적 태풍해상풍 모델과 비교하였다.

(1) 태풍해상풍모델

일반적으로 태풍기압 분포형은 두 가지 형태로 크게 분류될 수 있다 (C. L. Bretschneider, 1984).

① Rankin vortex model

$$(P(r) - P_0) / (P_\infty - P_0) = A e^{-B \frac{r_0}{r}} \tag{3.2.1}$$

② BRET-general model

$$(P(r) - P_0) / (P_\infty - P_0) = 1 - \left[1 + a \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]^{-b}$$

(3.2.2)

여기서,

$P(r)$ = 태풍의 중심으로부터 거리 r 인 지점의 해면기압

P_0 = 중심해면기압

P_∞ = 태풍영향권 밖에서의 해면기압

r_0 = 중심으로부터 최대풍속이 발생하는 지점까지의 거리 (최대풍 반경)

A, B, a, b 는 경험적으로 얻어지는 상수이며 특별히 식 (3.2.1)에서 $A=B=1$ 일 때는 Original Rankin vortex model (Schloemer, 1954)이 되고 식 (3.2.2)에서 $a=b=1$ 일 때는 BRET model-X (by V. Bjerkness), $a=b-1=2$ 일 때는 Fujita model (by T. Fujita) 이 된다.

해면 마찰영향, 태풍이동영향을 무시하고 단순화한 방정식에서 해석적으로 경도풍을 구하고 점차 무시된 영향을 보정해 준다. 경도풍의 운동방정식은 극좌표계에서

$$\frac{U^2}{r} + fU = \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r}$$

(3.2.3)

여기서,

$$U = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r}} \quad (3.2.4)$$

$\frac{\partial P}{\partial r}$ 은 태풍 기압모형에서 해석적으로 구해진다. ρ_a 와 f 는 공기밀도와 Coriolis 파라미터이다.

무시된 해면 마찰의 영향과 태풍 이동의 영향을 보정하여 해면 10 m 고도의 해상풍을 얻을 수 있다. 일반적으로 태풍이동영향은 위에서 구한 정지한 태풍 때의 해상풍 Vector \vec{U} 에다 태풍이동속도 V_f 에 따른 보정값 \vec{U}_{SM} 의 Vector 합으로 구하며, 마찰의 영향은 경험 마찰계수를 적용시켜 해상풍을 구한다. Jeleznianski (1966)에 의하면 아래와 같다.

$$\vec{U} = \vec{U}_s(r) + \vec{U}_{SM}(r) \quad (3.2.5)$$

$$\vec{U}_{SM} = \frac{Rr \vec{V}_f}{R^2 + r^2} \quad (3.2.6)$$

본 연구에서는 태풍의 이동 속도 영향, 해면 마찰 영향 등을 경험식으로 추정하지 않고, 해상의 대기경계층 (Planetary Boundary Layer; PBL) 내에서의 물리적인 과정을 포함한 원시운동방정식 (Primitive Equation of Motion)을 수치적으로 해석할 수 있는 CE 모델을 수립하였다. CE 모델은 1970년대 초 뉴욕대학에서 최초로 개발되었고, 이후 미공병단 (CE) 지원 하에 Ocean Weather Inc. (OWI)의 Cardone et al. (1992)에 의해 수정되었다.

CE 모델은 대기경계층 (Planetary Boundary Layer, PBL) 내에서 운동량의 수직 이류는 수평방향 이류에 비해 무시할 만큼 작다고 가정하고 전단 응력은 PBL의 상부에서 0이라고 가정하면, PBL내의 연직 평균된 수평방향 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{V}}{dt} + f\vec{k} \times \hat{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (K_H \nabla \hat{V}) - \frac{C_D}{h} |\hat{V}| \hat{V} \quad (3.2.7)$$

여기서 $d/dt = \partial/\partial t + \hat{V} \cdot \nabla$, $\partial/\partial t$ 는 고정된 좌표내의 시간 도함수, $\hat{\cdot}$ 는 고정 좌표를 나타내고, ∇ 은 2차원 연산자이다. \hat{V} 는 연직 평균된 수평방향 속도, f 는 코리올리 계수, \vec{k} 는 수직방향 단위 벡터, ρ 는 대기의 평균 밀도, p 는 대기압, K_H 는 수평방향 난류 점성 계수, C_D 는 항력 계수, h 는 PBL의 높이이다.

태풍시의 기압장을 큰 규모의 기압장과 태풍에 의한 기압장이 합한 것으로 가정하면 태풍시의 기압장은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$p = p_c + \bar{p} \quad (3.2.8)$$

여기서 p_c 는 태풍에 의한 기압장으로 태풍과 함께 이동한다고 가정하며, \bar{p} 는 태풍이 없다고 가정했을 때의 큰 규모 기상현상에 의한 기압장으로 다음과 같이 큰 규모의 지균

풍 \widehat{V}_g 로 나타낼 수 있다.

$$f\vec{k} \times \widehat{V}_g = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p}$$

(3.2.9)

식 (3.2.8), (3.2.9)를 식 (3.2.7)에 대입하고, 태풍중심을 원점으로 하는 이동 격자좌표계를 사용하면 식 (3.2.7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + f\vec{k} \times (\vec{V} - \vec{V}_g) = -\frac{1}{\rho} \nabla p_c + \nabla \cdot (K_H \nabla \vec{V}) - \frac{C_D}{h} |\vec{V} + \vec{V}_c| (\vec{V} + \vec{V}_c) \quad (3.2.10)$$

여기서 \vec{V} 는 태풍의 이동에 대한 상대 풍속 ($= \widehat{V} - \vec{V}_c$)이고, \vec{V}_g 는 상대 지균풍속 ($= \widehat{V}_g - \vec{V}_c$)이며, \vec{V}_c 는 태풍의 이동에 따른 좌표계의 이동 속도이다.

Cardone et al. (1992)은 태풍의 PBL 높이 h 가 380~700 m의 범위를 갖으며, h 에 대한 CE 해상풍 모델의 민감도를 조사한 결과, 500~625 m의 범위에서 정확한 바람을 계산하는 것으로 나타났다.

(2) 태풍해상풍 모델의 입력자료 추산체제

태풍시의 해상풍 산출을 위해서는 태풍해상풍 모델의 입력 자료로 다음과 같은 태풍 파라미터가 필요하다.

- 태풍 중심의 위치 (매 3시간 내지 6 시간마다의 태풍 중심 위치)
- 태풍 중심 기압
- 최대풍 반경
- 태풍 외부의 기압
- 태풍이 없을 경우 평균 바람장

① 태풍 파라미터산출을 위한 기상자료의 수집

태풍에 의한 파랑의 산출에서 태풍에 의한 해상풍 추산을 위해 필요한 태풍 파라미터들을 정확하게 추산하는 것이 가장 중요한 문제가 된다. 여기서는 우리나라에 영향을 준 과거 주요 태풍에 대해 가용한 모든 자료를 활용하여 태풍 해상풍 추산에 필요한 각

중 파라미터를 구했다. 사용된 기상 자료는 ① 한국, 일본, 중국, 미국의 태풍 자료집, ② ECMWF 해면 기압장 및 바람장, ③ 한국, 일본 및 중국의 지상, 기상 관측 자료 (해면 기압, 바람), ④ 태풍 통과시의 인공위성 원격 탐사 자료 (고층운 온도 및 해면 바람), ⑤ 미공군 항공기에 의한 태풍 관측 자료 등이다.

태풍의 위치와 태풍의 중심 기압은 가장 기초적인 태풍 파라미터로 각 국의 기상청에서는 태풍 통과시에 태풍의 위치와 중심기압의 관측자료를 발표하고 있다. 본 연구에서는 한국, 중국, 일본, 미국 등의 자료를 입수하였으며, 자료의 일관성을 위해 RSMC (Regional Specialized Meteorological Center)-Tokyo의 자료를 사용하였다. 태풍 외부의 기압은 태풍시의 과거의 지상 일기도 (일본 기상협회 인쇄 천기도)와 ECMWF의 해면기압장에서 등압선이 원형을 이루지 않는 등압선의 기압으로 독취하였으며, 태풍이 없다고 가정했을 때의 바람장은 ECMWF의 바람장자료에서 태풍중심에서 일정거리 (약 500 km) 이내의 바람을 평균한 값으로 산출하였다.

최대풍반경은 태풍해상풍 모델에서 가장 중요할 뿐만 아니라 추정하기 어려운 파라미터이다. 과거 태풍에 대한 정보는 지극히 제한적이므로, 입수 가능한 모든 자료를 최대한으로 이용하는 것이 무엇보다 중요하다. 최대풍 반경을 산출하기 위해 기상관측소의 해면기압 및 바람의 관측자료와 GEOSAT, TOPEX, ADEOS, ERS-1, ERS-2 및 QuikSCAT 등의 위성에 의한 해상풍 자료 뿐만 아니라, GMS 위성 등 정지 위성의 상층구름온도 자료도 수집하였다.

② 최대풍 반경의 추산

태풍해상풍 모델은 태풍중심 부근의 기압분포를 몇 개의 파라미터로 표시할 수 있다는 가정에서 출발하므로, 최대풍 반경은 태풍중심 부근의 실제 기압분포 자료에서 산출하는 것이 기본이다. 기압관측 자료로부터 최대풍 반경을 산출하기 위해 우리나라 각 기상 관측소에서 측정된 태풍 통과시의 해면기압 자료는 1960년에서부터의 자료를 모두 수집하였으며, 중국과 일본의 지상 관측 자료는 최근 20여 년간의 자료를 수집하여 태풍중심에서 최대풍 반경을 구하는데 이용했다.

해면기압 자료를 이용하여 다음과 같이 최대풍 반경 r_0 를 추정할 수 있다. 다음의 Original Rankin vortex model (R. W. Schloemer model)의 해면기압 분포식에

$$P(r) = P_0 + \Delta P e^{-r_0/r} \quad (3.2.11)$$

$$\Delta P = P_\infty - P_0$$

여기서 양변에 대수를 취하면,

$$\ln(P_{(r)} - P_0) = \ln(\Delta P) - r_0/r \quad (3.2.12)$$

따라서 $\ln(P_{(r)} - P_0)$ 와 $1/r$ 은 일차적 상관관계를 가지며 최소자승법으로 구한 일차 상관 관계식의 $\ln(P_{(r)} - P_0)$ 축 절편의 지수 값이 ΔP , 기울기가 r_0 가 된다.

기압 관측자료는 한국 기상청의 전국 주요 22개 관측소 (강릉, 동해, 서울, 인천, 울릉도, 영월, 서산, 울진, 청주, 대전, 추풍령, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 통영, 목포, 여수, 완도, 제주, 양평)에서 1960년부터 현재까지 매 3시간 간격으로 측정되어온 해면기압 자료와 그리고 일본 및 중국 기상 관측소에서 입수한 최근 20여 년간 관측된 기압 자료를 이용하였다 (그림 3.2.24).

태풍이 육지에서 떨어진 먼 바다에 위치할 때는 태풍중심으로부터의 거리가 편중되어 나타나기 때문에 위의 방법을 사용하기 어렵다. PARI (일본 항만공항연구소)에서는 일기도에서 나타난 1000 hPa의 등압선을 이용하여, 태풍중심에서 1000 hPa 등압선까지

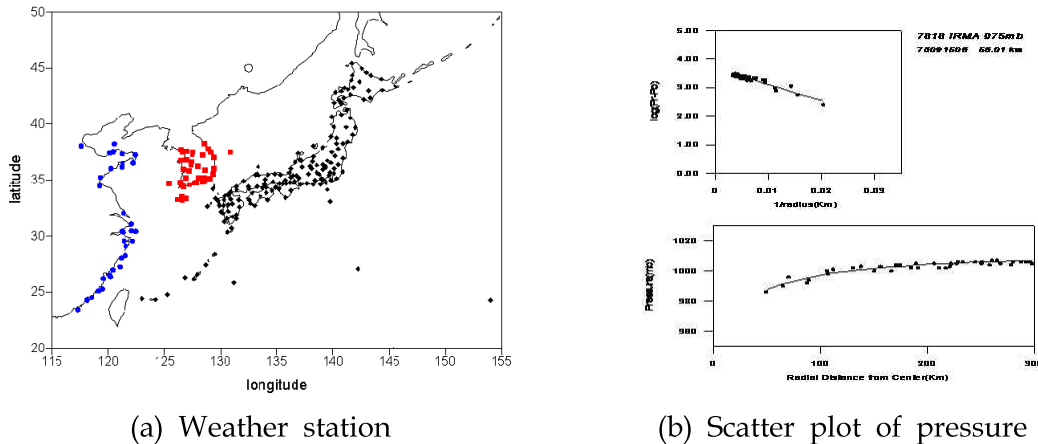


그림 3.2.24 기상관측소로부터의 상관관계와 태풍 중심에서부터의 거리를 이용한 최대풍 반경의 계산

의 거리를 이용하여 최대풍반경을 산출하였다. 그러나 이러한 방법은 태풍중심 부근의 기압 관측자료가 없는 경우에는 일기도에서 1000 hPa의 등압선을 임의적으로 표시하기 때문에 객관적인 방법이라고 할 수 없다. 태풍이 해상에 있을 때는 위성관측 자료를 사용할 수 있으며, GEOSAT, TOPEX, ADEOS, ERS-1, ERS-2 등의 위성에 의한 해상풍자료를 사용하였다 (Jun and Lee, 1999). 최근에는 QuikSCAT 등의 위성에 의한 해상풍 자료의 해상도가 상당히 높아지고 관측영역이 넓어져, 위성에 의한 해상풍 관측자료에서 최대풍

이 나타나는 지점과 태풍중심사이의 거리를 직접 산출할 수도 있다(그림 3.2.25). 그러나 태풍중심 부근으로 인공위성이 통과하는 경우가 많지 않을 뿐만 아니라, 통과하는 시간이 일정하지 않기 때문에 제한적으로 사용될 수밖에 없다. 이를 보완하기 위해 일정한 시간간격으로 자료를 획득할 수 있는 GMS 정지위성의 상층구름온도 자료로부터 최대풍 반경을 산출하는 방법을 사용하였다. 즉, 태풍 부근에서는 풍속이 클수록 수렴에 의한 상승기류가 활발히 발생하여 구름의 높이가 높아지므로, 상층 구름의 온도가 최저로 나타나는 지역이 최대풍이 발생하는 지역이라는 것을 이용하여 태풍시의 상층운의 온도를 분석하여 최대풍 반경을 추산할 수 있다. 그림 3.2.26은 태풍 영향시에 GMS 위성의 구름온도 자료의 분석의 예이다.

본 연구에서는 기상관측소의 기압자료와 인공위성의 자료 등 여러 자료로부터 최대풍반경을 산출하는 방법을 시도하였으며, 이러한 방법은 모두 관측자료를 근거로 하고 있는 것이다. 태풍해상풍 모델을 예측모델로 사용하기 위해서는 태풍 파라미터에 대한 예측자료가 요구된다.

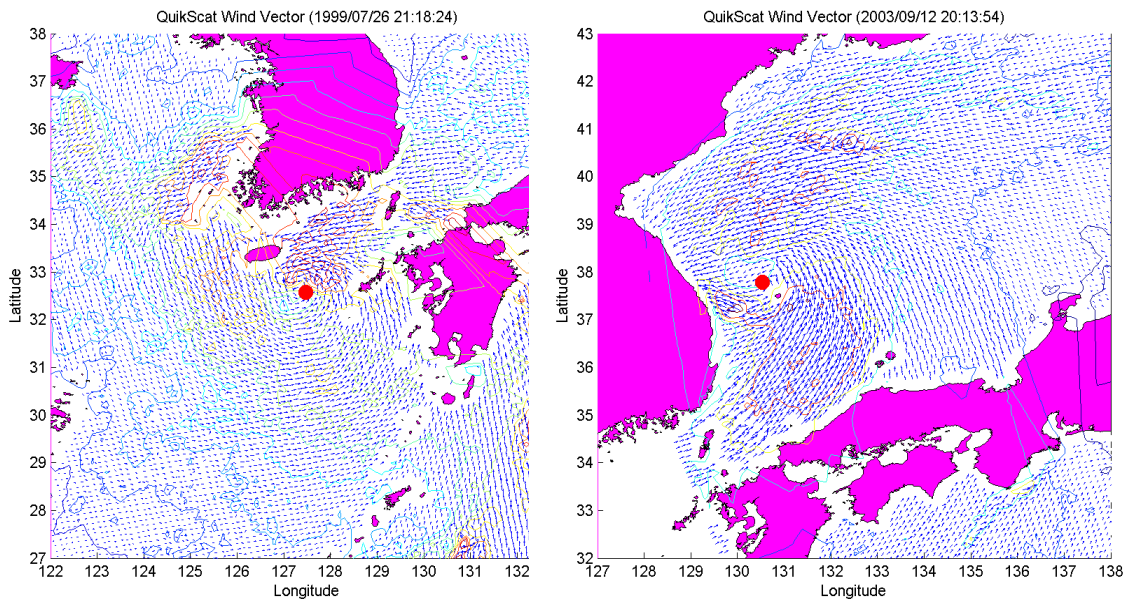


그림 3.2.25 QuikSCAT 위성에서부터 바람장으로 최대풍 반경 계산 (●: 태풍의 중심)

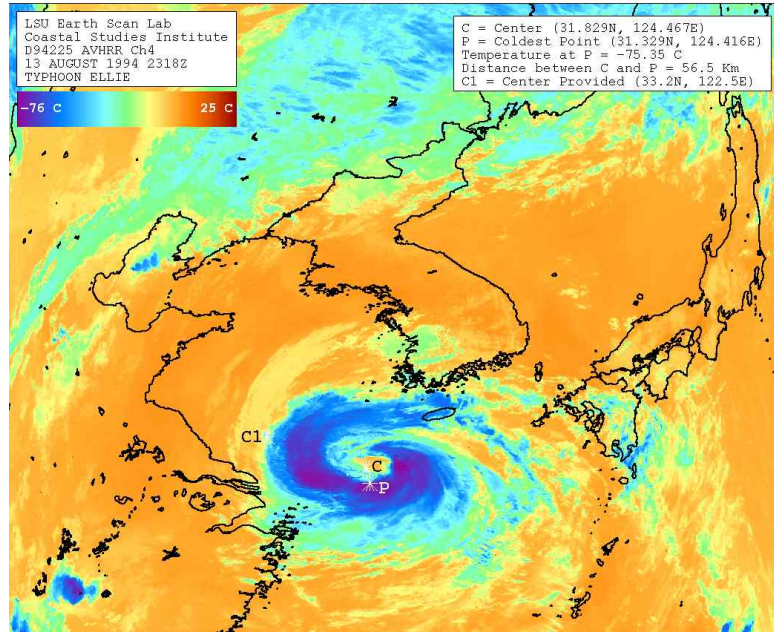


그림 3.2.26 GMS 위성으로 부터의 최대풍 반경의 계산

③ 태풍 파라미터의 산출 체계 연구

태풍의 예측은 일반적으로 태풍의 중심위치와 태풍 중심기압만을 예측하므로, 그 외의 파라미터는 간접적으로 예측할 수밖에 없다. 태풍파라미터 사이에는 일정한 상관관계를 나타내고 있으며 (강 등, 2002b), 최대풍 반경을 예측하기 위해서 과거의 자료로부터 태풍 중심기압과 최대풍 반경사이의 상관관계로부터 최대풍 반경을 예측하는 시스템을 구축하였다. 그림 3.2.27은 일본항공연구원에서 1000 hPa 등압선의 반경으로부터 산출한 최대풍 반경과 태풍 중심기압간의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림 3.2.27(a)에서 1000 hPa까지는 중심기압이 증가함에 따라 최대풍 반경이 증가하는 형태를 보이고 있으나, 1000 hPa 이상에서는 뚜렷한 형태를 보이고 있지 않다. 이는 태풍이 저위도에서 고위도로 이동하면서 강도가 증가하다가 소멸하는 과정을 보이고 있는데, 태풍이 일반 저기압으로 변질되는 경우에는 등압선이 동심원 형태로 나타나지 않기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 그림 3.2.27(b)에서 보는 바와 같이 1000 hPa 이하의 자료만을 사용하여 최대풍 반경과 중심기압사이의 경험식을 유도하였다.

$$R_{\max} = 2606.7(1013 - P_0)^{-0.8811} \quad (3.2.13)$$

여기서, P_0 , R_{\max} 는 각각 태풍 중심기압과 최대풍 반경을 의미하며, hPa과 km의 단위를 사용한다.

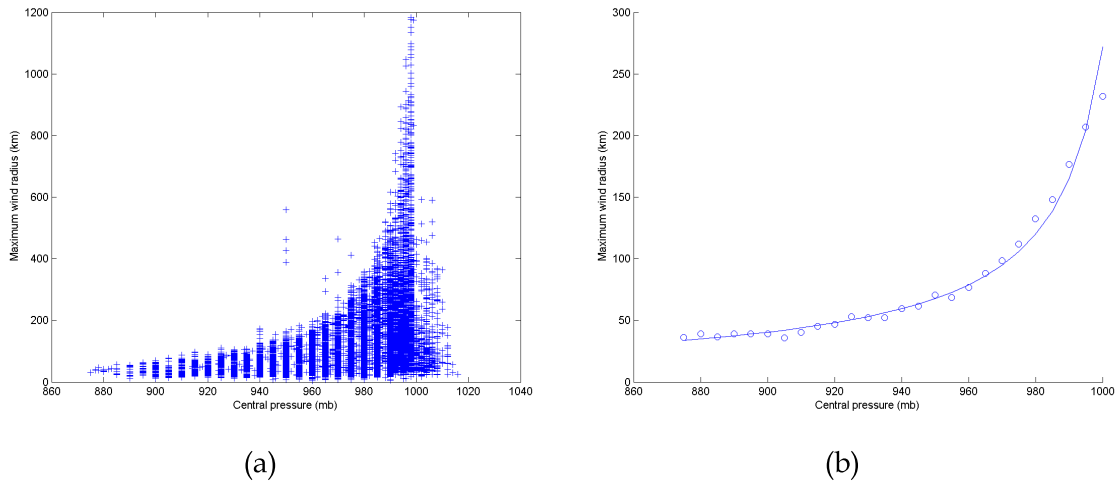


그림 3.2.27 최대풍 반경과 태풍중심 기압의 Correlation

최근 기상청에서는 태풍위치, 중심기압과 강풍 반경의 값을 보고하고 있으며 이에 대한 태풍의 예측자료도 보고하고 있어 (그림 3.2.28), 이를 이용하여 최대풍 반경을 산출하는 방법을 연구하였다. 즉, 기상청에서 보고하는 15 m/s, 25 m/s의 강풍 반경으로부터 태풍해상풍 모델에서 사용되는 태풍 파라미터사이의 관계식을 반복법을 이용하여 최대풍 반경을 산출하였다. 일본항공연구연구소에서 산출한 최대풍 반경과 통계적인 강풍 반경으로부터 산출한 최대풍 반경을 비교하였다. 그림 3.2.29은 1000 hPa 등압선까지의 거리를 이용하여 산출한 최대풍 반경과 강풍 반경 등의 파라미터간의 관계식을 반복법으로 산출한 최대풍 반경의 상관관계를 도시한 것이다. 여기서, 상관관계가 낮게 나타난 것은 최대풍 반경이 클수록 방법에 따른 변동 폭이 크게 나타나기 때문이다.

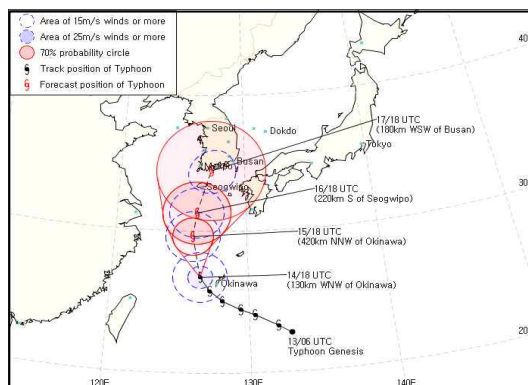


그림 3.2.28 기상청에서의 태풍 예보

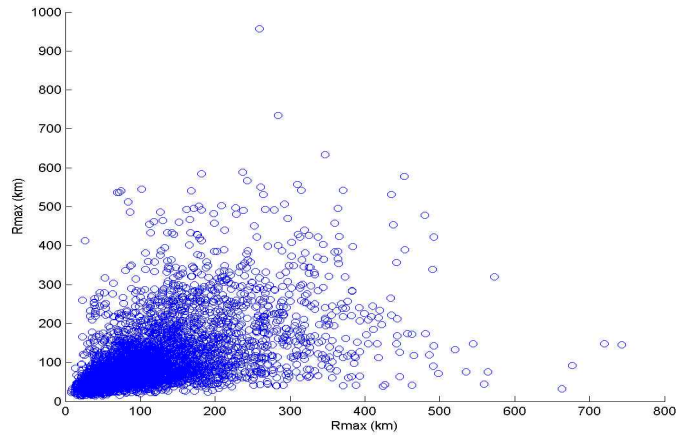


그림 3.2.29 1000 hPa 등압선까지의 거리를 이용하여 산출한 최대풍 반경과 강풍 반경으로 산출한 최대풍 반경의 상관관계

(3) 태풍해상풍 모델의 개선방안

일본의 PARI에서 사용하는 태풍해상풍 모델 (MASCON)의 결과를 입수하여, 해양연구원에서 수립한 모델과 비교하였다. MASCON은 마찰이 무시되는 상층과 마찰을 고려하는 표층사이의 고도차로써 지형효과를 고려하는 모델이며, 해양연구원에서는 태풍이동속도를 고려하는 방법에 따라 TPM-1과 TPM-2모델을 사용하며, 대기경계층에서의 마찰영향을 운동방정식에 기초하여 수치적으로 산출하는 CE 모델 등을 사용하였다. 그림 3.2.30는 Chaba (0004) 내습시 4개의 태풍해상풍 모델로 산출한 바람장을 나타낸 것이다.

그림 3.2.30에서 보는 바와 같이 TPM-1, TPM-2모델은 MASCON과 CE 모델에 비해 태풍중심에서의 풍속이 더 작게 나타났다. 표층사이의 고도차로써 지형효과를 고려하는 MASCON과 대기경계층에서의 마찰영향을 운동방정식에 기초하여 수치적으로 산출하는 CE 모델이 비슷한 결과를 보인 것은 MASCON과 CE 모델이 더 신뢰성이 있다고 사료된다. 그러나 모델의 특성상 태풍 중심 부근이외의 지역에서는 비현실적인 기압 및 바람 분포를 나타내고 있어, 태풍해상풍 모델과 수치기상모델을 결합하여 해상풍과 해면기압을 산출하는 방법이 요구된다.

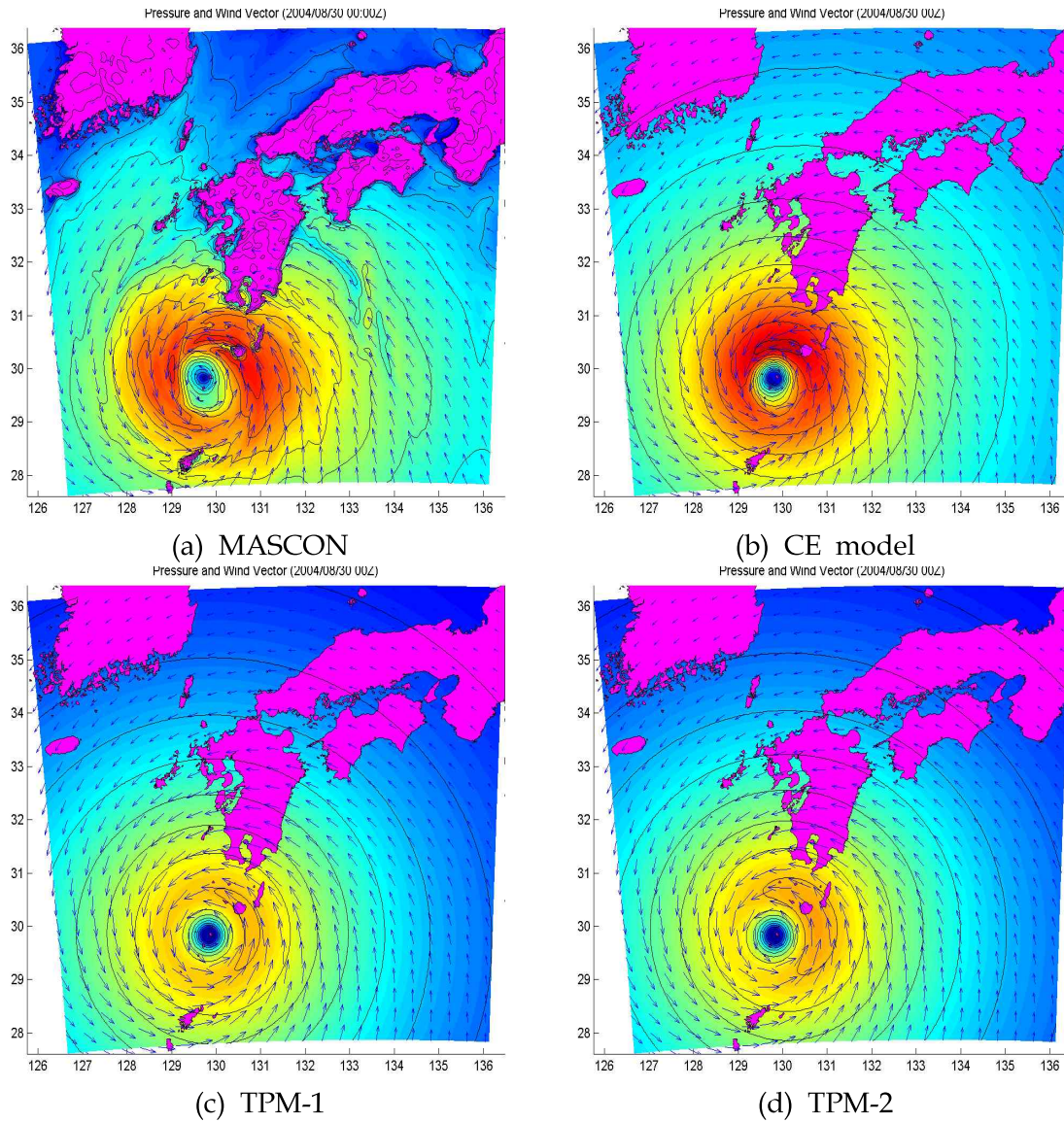


그림 3.2.30 태풍 'Chaba' (0004) 내습시 해상풍 모델의 압력과 바람장의 비교, (a) MASCON, (b) CE model, (c) TPM-1 and (d) TPM-2

일반 기상분석에 의한 바람장은 태풍 부근의 정밀한 공간적 변화를 잘 나타내지 못하지만, 태풍 영향권 밖의 해상풍 추산에는 유효한 방법이라 할 수 있다. 따라서 태풍 주위에서는 태풍 파라미터에 의한 태풍 모델로 계산한 것을 더 큰 비중을 두어 고려하고 태풍 주위 기압장의 해상풍은 일반 기상 분석의 풍계를 이용하는 방법으로 이 두 가지 산출 방법을 결합하여 나타내면 다음 식과 같다.

$$u(r) = U_t(r)W(r) + U_a(r)[1 - W(r)] \quad (3.2.14)$$

여기서 U_t 는 태풍 모델에 의한 해상풍, $U_a(r)$ 는 일반 기상 분석의 해상풍을 나타내

고 $W(r)$ 은 Weighting function으로 태풍 중심에서 거리의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$W(r) = \begin{cases} 1 & , \text{ if } r \leq R_{\max} \\ e^{(1-r/R_{\max})} & , \text{ if } r > R_{\max} \end{cases} \quad (3.2.15)$$

상기 여러 방법에 의해 1951년 이후 우리나라에 영향을 준 태풍 201개에 대해 태풍 파라메타를 추천하여 다음과 같이 데이터 베이스화 했다.

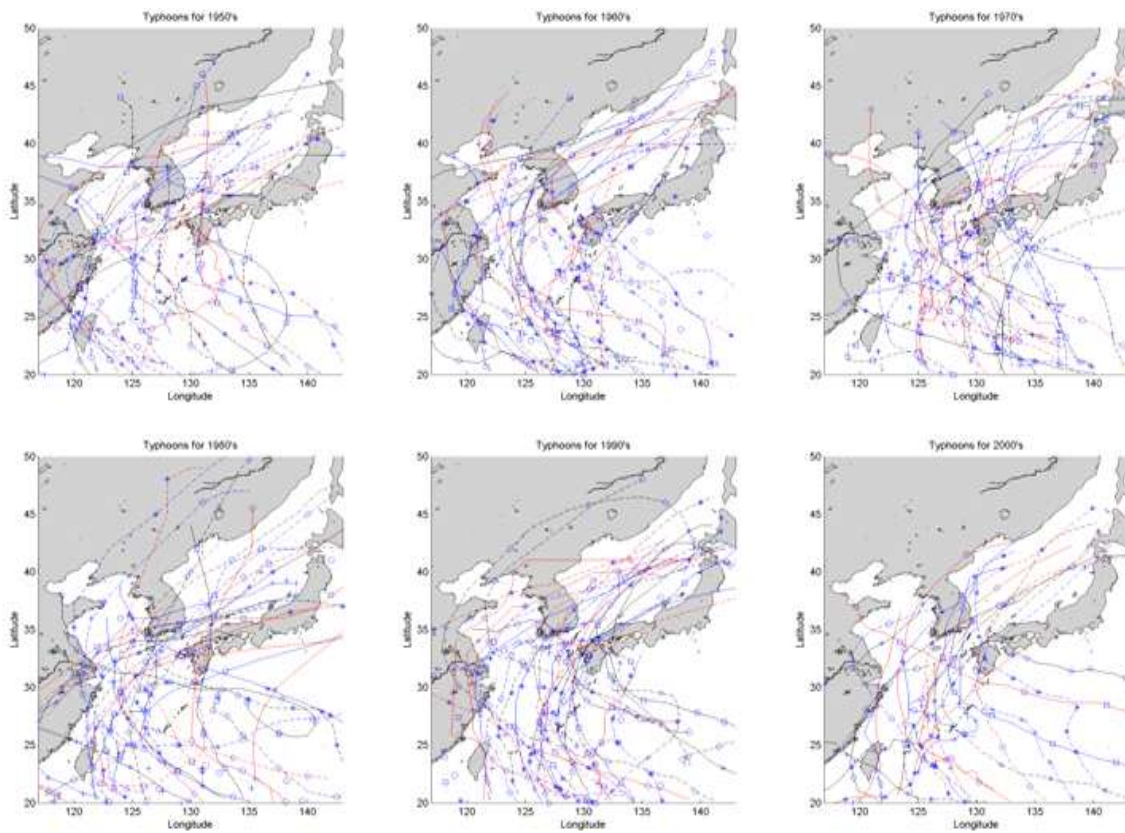


그림 3.2.31 장기가 폭풍해일 시뮬레이션에 사용된 태풍 경로

표 3.2.6 폭풍해일 시뮬레이션에 사용된 태풍 목록

일련번호	태풍번호	태풍이름	최저기압	태풍기간	번호	태풍번호	태풍이름	최저기압	태풍기간
1	5111	MARGE	919	08.16~08.23	51	6410	GRACE	998	07.26~08.04
2	5114	PAT	980	09.25~09.30	52	6411	HELEN	930	07.29~08.04
3	5201	CHARLOTTE	960	06.11~06.17	53	6420	WILDA	895	09.20~09.26
4	5204	FREDA	990	07.10~07.16	54	6513	HARRIET	970	07.24~07.29
5	5209	KAREN	955	08.14~08.19	55	6515	JEAN	940	08.02~08.07
6	5211	MARY	985	08.31~09.04	56	6518	MARY	950	08.16~08.25
7	5304	KIT	910	07.02~07.08	57	6523	SHIRLEY	940	09.05~09.11
8	5309	PHYLLIS	980	08.20~08.25	58	6615	WINNIE	970	08.19~08.26
9	5407		996	08.21~08.28	59	6617	BETTY	986	08.22~09.02
10	5412	JUNE	925	09.09~09.15	60	6618	CORA	918	09.02~09.09
11	5507	CLARA	920	07.11~07.17	61	6707	BILLIE	980	07.05~07.10
12	5508	DOT	995	07.14~07.17	62	6710		975	07.20~07.30
13	5512		990	07.22~07.24	63	6715		988	08.10~08.13
14	5522	LOUISE	930	09.24~09.30	64	6804	MARY	925	07.23~08.03
15	5523	MARGE	965	09.30~10.05	65	6807	POLLY	965	08.11~08.17
16	5609	BABS	960	08.11~08.18	66	6816	DELLA	930	09.21~09.27
17	5611	DINAH	970	08.30~09.06	67	6909	CORA	935	08.18~08.23
18	5612	EMMA	930	09.04~09.10	68	6911	ELSIE	895	09.24~10.02
19	5613	FREDA	980	09.14~09.23	69	7002	OLGA	910	07.01~07.07
20	5705	VIRGINIA	940	06.24~06.27	70	7004	RUBY	985	07.15~07.19
21	5707	AGNES	905	08.16~08.22	71	7006		994	07.28~08.01
22	5710	BESS	950	08.29~09.08	72	7009	WILDA	940	08.10~08.16
23	5819	GRACE	910	09.02~09.07	73	7010	ANITA	910	08.17~08.22
24	5904	WILDA	990	07.05~07.09	74	7011	BILLIE	945	08.25~09.01
25	5905	BILLIE	970	07.14~07.19	75	7119	OLIVE	935	07.31~08.07
26	5909	JOAN	885	08.28~09.02	76	7120	POLLY	980	08.07~08.13
27	5911	LOUIS	965	09.02~09.08	77	7128	BESS	905	09.19~09.26
28	5913	NOR	988	09.09~09.14	78	7207	RITA	955	07.22~07.27
29	5914	SARAH	905	09.14~09.18	79	7209	TESS	950	07.16~07.25
30	5915	VERA	895	09.23~09.27	80	7220	HELEN	955	09.14~09.21
31	6006	POLLY	950	07.19~07.29	81	7303	BILLIE	915	07.15~07.20
32	6008	SHIRLEY	910	07.29~08.06	82	7305	DOT	975	07.16~07.21
33	6015	CARMEN	975	08.18~08.23	83	7310	IRIS	970	08.12~08.18
34	6019		1008	08.31~09.02	84	7408	GILDA	945	07.02~07.07
35	6104	BETTY	947	05.26~05.29	85	7411	JEAN	994	07.17~07.21
36	6107	DORIS	986	06.27~07.07	86	7416	POLLY	950	08.28~09.05
37	6110	HELEN	970	07.26~08.07	87	7502	MAMIE	992	07.25~07.30
38	6115	KATHY	988	08.15~08.18	88	7505	PHYLLIS	920	08.14~08.18
39	6118	NANCY	890	09.13~09.16	89	7513	CORA	945	10.02~10.06
40	6123	TILDA	925	09.29~10.07	90	7609	THERESE	925	07.15~07.21
41	6205	JOAN	985	07.07~07.11	91	7611	WILDA	985	07.22~07.24
42	6209	NORA	968	07.30~08.03	92	7612	ANITA	980	07.23~07.27
43	6210	OPAL	900	08.04~08.10	93	7615	DOT	990	08.18~08.24
44	6217	AMY	940	09.03~09.09	94	7617	FRAN	910	09.07~09.14
45	6304	SHIRLEY	945	06.17~06.21	95	7707	AMY	985	08.18~08.27
46	6305	TRIX	984	06.30~07.05	96	7803	POLLY	985	06.14~06.21
47	6309	BESS	930	08.04~08.13	97	7808	WENDY	960	07.22~08.04
48	6405	BETTY	960	07.02~07.07	98	7811	CARMEN	960	08.13~08.20
49	6407	DORIS	995	07.14~07.17	99	7818	IRMA	970	09.10~09.15
50	6409	FLOSSIE	980	07.24~07.30	100	7910	IRVING	955	08.13~08.18

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<계속>

일련번호	태풍번호	태풍이름	최저기압	태풍기간	일련번호	태풍번호	태풍이름	최저기압	태풍기간
101	7911	JUDY	910.0	08.19~08.26	152	9306	PERCY	975	07.27~08.01
102	8003	ELLEN	945.0	05.19~05.22	153	9307	ROBYN	940	08.07~08.11
103	8007	IDA	980.0	07.09~07.15	154	9313	YANCY	925	08.30~09.03
104	8012	NORRIS	945.0	08.26~08.31	155	9407	WALT	915	07.18~07.28
105	8013	ORCHID	960.0	09.08~09.12	156	9411	BRENDAN	992	07.29~08.03
106	8019	WYNNE	900.0	10.09~10.14	157	9413	DOUG	930	08.06~08.13
107	8104	IKE	965.0	06.12~06.17	158	9414	ELLIE	965	08.07~08.17
108	8105	JUNE	965.0	06.19~06.24	159	9416	FRED	925	08.18~08.26
109	8110	OGDEN	975.0	07.28~08.01	160	9426	ORCHID	925	09.25~09.29
110	8118	AGNES	950.0	08.28~09.04	161	9429	SETH	915	10.08~10.13
111	8120	CLARA	960.0	09.20~09.27	162	9503	FAYE	950	07.19~07.24
112	8211	CECIL	920.0	08.07~08.13	163	9507	JANIS	990	08.20~08.28
113	8213	ELLIS	920.0	08.23~08.28	164	9612	KIRK	955	08.09~08.14
114	8310	FORREST	900.0	09.23~09.29	165	9708	PETER	970	06.26~06.29
115	8403	ALEX	960.0	07.02~07.06	166	9711	TINA	955	08.05~08.10
116	8407	ED	950.0	07.24~08.03	167	9713	WINNIE	920	08.13~08.25
117	8409	GERALD	980.0	08.15~08.24	168	9809	YANNI	965	09.27~09.30
118	8410	HOLLY	960.0	08.17~08.22	169	9905	NEIL	980	07.25~07.27
119	8412	JUNE	985.0	08.30~09.03	170	9907	OLGA	970	07.30~08.03
120	8505	HAL	965.0	06.22~06.27	171	9908	PAUL	985	08.03~08.07
121	8507	JEFF	970.0	07.25~08.03	172	9909	RACHEL	992	08.05~08.11
122	8508	KIT	960.0	07.31~08.12	173	9910	SAM	980	08.21~08.27
123	8509	LEE	975.0	08.09~08.15	174	9914	WENDY	996	09.03~09.07
124	8510	MAMIE	975.0	08.14~08.20	175	9917	ANN	985	09.16~09.19
125	8512	ODESSA	955.0	08.25~09.02	176	9918	BART	930	09.17~09.25
126	8513	PAT	955.0	08.24~09.01	177	9920	DAN	955	10.07~10.12
127	8520	BRENDA	955.0	10.03~10.07	178	0004	KAI-TAK	960	07.08~07.10
128	8605	NANCY	955.0	06.23~06.25	179	0006	BOLAVEN	980	07.25~07.31
129	8613	VERA	940.0	08.23~08.29	180	0010	BILIS	920	08.21~08.27
130	8616	ABBY	945.0	09.17~09.22	181	0012	PRAPIROON	965	08.26~09.01
131	8705	THELMA	940.0	07.13~07.18	182	0014	SAOMAI	933	09.11~09.16
132	8708	ALEX	970.0	07.26~08.02	183	0102	CHEBI	965	06.22~06.25
133	8712	DINAH	915.0	08.27~08.31	184	0204	NOGURI	975	06.04~06.11
134	8719	KELLY	955.0	10.13~10.17	185	0205	RAMMASUN	945	07.02~07.07
135	8906	ELLIS	985.0	06.22~06.25	186	0208	NAKRI	983	07.07~07.13
136	8911	JUDY	940.0	07.24~07.28	187	0209	FENGSHEN	920	07.21~07.28
137	8921	VERA	980.0	09.13~09.18	188	0215	RUSA	950	08.26~09.01
138	9005	OFELIA	970.0	06.22~06.26	189	0306	SOUDELOR	955	06.17~06.20
139	9007	ROBYN	992.0	07.08~07.13	190	0314	MAEMI	910	09.08~09.13
140	9014	ZOLA	960.0	08.18~08.23	191	0407	MINDULLE	965	06.30~07.03
141	9015	ABE	955.0	08.27~09.03	192	0410	NAMTHEUN	945	07.25~08.01
142	9109	CAITLIN	940.0	07.25~07.30	193	0415	MEGI	970	08.16~08.20
143	9112	GLADYS	965.0	08.18~08.24	194	0416	CHABA	910	08.25~08.31
144	9113		992.0	08.26~08.31	195	0418	SONGDA	925	09.01~09.08
145	9117	KINNA	955.0	09.11~09.14	196	0514	NABI	925	09.02~09.08
146	9119	MIREILLE	930.0	09.24~09.28	197	0515	KHANUN	945	09.09~09.13
147	9209	IRVING	980.0	07.31~08.05	198	0601	CHANCHU	945	05.17~05.19
148	9210	JANIS	935.0	08.05~08.09	199	0603	EWINIAR	950	07.06~07.12
149	9211	KENT	930.0	08.10~08.19	200	0610	WUKONG	980	08.12~08.21
150	9216	POLLY	975.0	08.27~09.04	201	0613	SHANSHAN	919	09.12~09.19
151	9219	TED	985	09.21~09.25					

3. 조석 조류 정보

연안침수, 유류오염사고 등과 같이 연안에서 발생하는 재해는 해수면과 해수의 흐름과 깊은 관련이 있다. 그러므로 연안해역에서의 정확한 해수면과 유속의 예측은 해양산업뿐만 아니라 해안지역의 방호 및 해난사고시 수색구조, 유류확산 추정에서 매우 중요하다. 해수의 유동은 천체의 운동에 의한 주기적인 천문조, 폭풍해일, 지진해일, 저기압, 부진동, 파랑 등 여러 요인의 복합적인 작용의 결과로서 나타나기 때문에 정확한 예측이 어려운 자연현상이다. 여기서는 해수면의 가장 중요한 성분인 조위를 임의의 연안지점에서의 조위를 수치모델결과와 관측자료를 이용하여 신속하게 산출하는 방법에 대하여 논의한다. 지난 몇 년간 지속적인 연구를 통하여 한국해양연구소는 우리나라 전 해상의 조석·조류 데이터 베이스 구축에 이어 전 연안에 자동수심격자망 산출시스템과 전 연안 250m 간격의 정밀격자 연안모델 수립체제를 구축하여 거의 실용단계에 와 있다. 따라서 연안모델의 결과와 관측자료를 상호 유기적으로 결합하면 보다 신뢰성 있는 연안정보를 생산할 수 있다고 사료된다.

해면 산출에 있어 조석 부분과 해일 부분을 구별하여 독립적으로 산출 시에는 원하는 지점에서의 정밀 격자 조석 정보가 필요하며, 본 연구에서는 52개 항만 일대에서 천해 파랑 산출시에 각 격자점에서 조석 조류 정보를 신속하게 산출하여 입력 자료로 사용할 수 있는 체제 구축하였다.

현재 연안조류추산시스템은 자동 연안 수심격자망 수립체제에 의해 연안 250m의 정밀 격자망에서 이루어지며 외해경계조건은 조석·조류 데이터베이스 자료로부터 자동으로 구해진다. 그러나 조석·조류 데이터베이스는 4개의 주요 분조에 대한 조화상수만을 사용하는데 복잡한 지형을 갖는 연안에서의 정밀계산을 위해서는 40개 정도의 조화상수를 이용하는 것이 바람직한데 이는 대단히 어렵다. 그리고 실제로 현업업무에 활용하기 위해서는 모든 계산이 신속하게 이루어져야만 한다는 점도 간과할 수 없다.

가. 조석 조류 산출 체제 수립

한반도 주변 해역에서 국지파랑의 예보모델에 필요한 조류 정보를 신속하고 정확히 제공하는 체제가 구축하기 위해서는 먼저 전 해양에 대한 조석 조류 정보의 데이터 베이스 구축이 선행되어야 하고 이를 이용하여 원하는 지역의 조석 조류 정보를 효과적으로

생산 제공하는 시스템의 구축이 필요하다. 조석·조류는 천체의 운동에 의해 주기적인 특성을 나타내므로, 이를 주기에 따라 조화분석하여 주기별 조화상수를 얻는다. 장기간의 조석·조류의 자료를 조화분석하여 얻어진 조화상수를 이용하면, 그 지점에서의 임의의 시간의 조석·조류를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 한반도 주변 해역에서 정밀 격자의 조석 모델을 수립하여 신뢰성 있는 2차원 조석, 조류정보를 산출하여 데이터 베이스를 구축하고 이를 이용하여 임의의 해상 또는 연안의 정밀 세부 격자에 대해 조석, 조류 정보를 신속 정확히 산출하는 시스템을 개발하였다.

조화상수를 얻을 수 있는 관측지점은 한정되어 있으므로, 모든 격자점에서의 조화상수를 산출하기 위한 모델을 수행하게 된다. 우리나라 연안 해역에서의 고해상도 조석정보를 산출하기 위해서는 우선 동북아시아 전 해상에 대해 조석정보를 산출하여야 한다. 이를 위해 광역 조석 수치 모델의 외해경계 조건에 따른 광역격자망상에서 모델반응 평가를 위한 기본실험을 실시하고, 한반도 주변 해역을 포괄하는 격자망에서 4개 분조의 입력조건에서 조석, 조류에 대한 일차적인 정보를 산출하여 이를 데이터 베이스화 했다.

한국 주변 해역에 대한 조석 연구는 Choi and Fang (1993)에 기술된 바와 같이 황해 및 동중국해를 대상으로 많은 연구가 수행되었고, 현재는 주로 수치 모델을 이용한 결과가 주종을 이루고 있다. 최근, 조석모델의 개방경계로서 많이 사용되고 있는 일본의 National Astronomical Observatory의 'NAO.99b tidal prediction system'에서는 16개 조화상수를 제공하고 있다. NAO에서는 전지구 해양조석 예보모델을 TOPEX/POSEIDON 위성자료로 자료 동화하여 각 지역별, 시간별 예보정보를 제공하고 있다. NAO에서 제공되는 조석정보 중 일본과 황해 및 동중국해를 포함한 1/12도 간격으로 제공되는 북위 20~65도, 동경 110~165도까지의 조화상수자료는 반일주조 9개(M2, S2, N2, K2, 2N2, MU2, NU2, L2, T2), 일주조 7개(K1, O1, P1, Q1, OO1, M1, J1)분조이다. 그림 3.2.32과 그림 3.2.33는 반일주조와 일주조의 주요 분조인 M2와 K1에 대한 등조위선 및 등조시선을 나타내었다.

이 연구에서는 Topex/Poseidon (T/P) 자료를 북동 아시아 해역의 조석 산정을 위해 수치 모델에 혼합(blending)하였다. T/P 위성은 1992년 8월부터 9.9156일 주기로 북위 66도에서 남위 66도까지 거의 전지구에 대하여 고도자료를 제공하고 있으며, T/P 고도계 자료를 이용한 여러 개의 전지구 조석모델 (단순히 T/P 자료를 분석한 경우와 이들 자료를 수치 모델에 혼합한 경우 등)이 발표되었고, 이들 전지구 모델을 상호 비교하기에

이르렀다(Andersen 등, 1995). 대양에서는 조석의 공간 변화가 상당히 평활하다는 가정이 어느 정도 타당하나, 한국 주변 해역 특히 황해 및 동중국해의 경우에는 이러한 가정을 적용하기 어렵다. 연안 근처의 조석은 공간적으로 상당히 변할 수 있다는 사실을 고려하여 최근 Yanagi 등 (1997)은 황해 및 동중국해에 대해 T/P 궤도를 따라 5분×5분의 분해능으로 고도계 자료를 분석한 결과를 제시하였다.

위성 고도계는 정해진 준거 타원체(reference ellipsoid)와 위성 궤도와와의 거리를 측정하기 때문에, 고도계 자료에서 시간에 따라 변하는 해저면(정확히는 geoid)을 기준으로 한 거리를 계산하기 위해서는 부하 조석(load tide)의 보정이 필요하다. 본 연구에서는 T/P 고도계 자료를 수치 모델에 동화시킨 수치 결과이며, 연구된 해역은 110°E~165°E, 20°N~65°N 내의 북동 아시아 해역으로, 경·위도 방향 모두 5분 격자의 유한 차분 모델이 사용되었다.

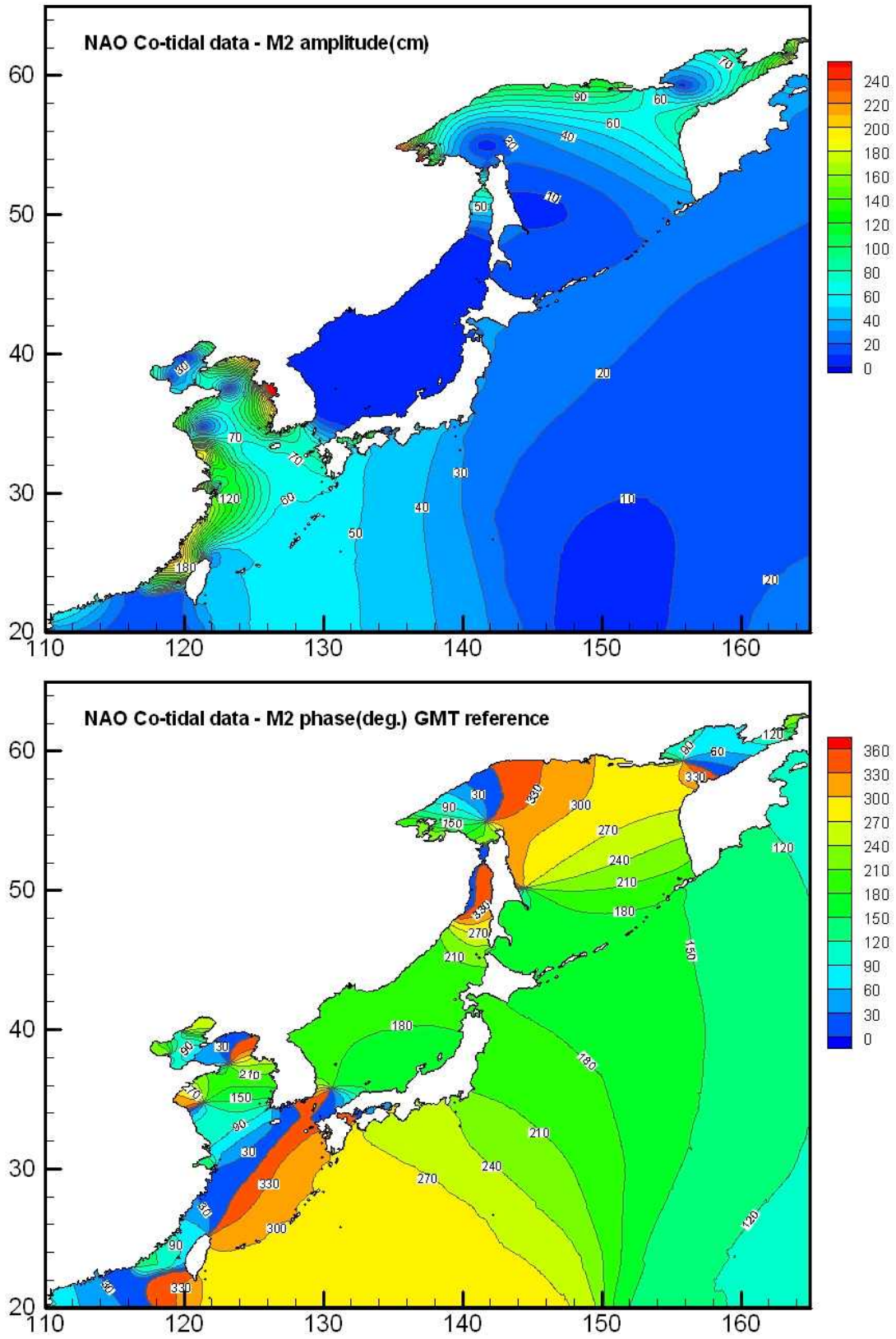


그림 3.2.32 등조위선 및 등조시선(M2) - NAO

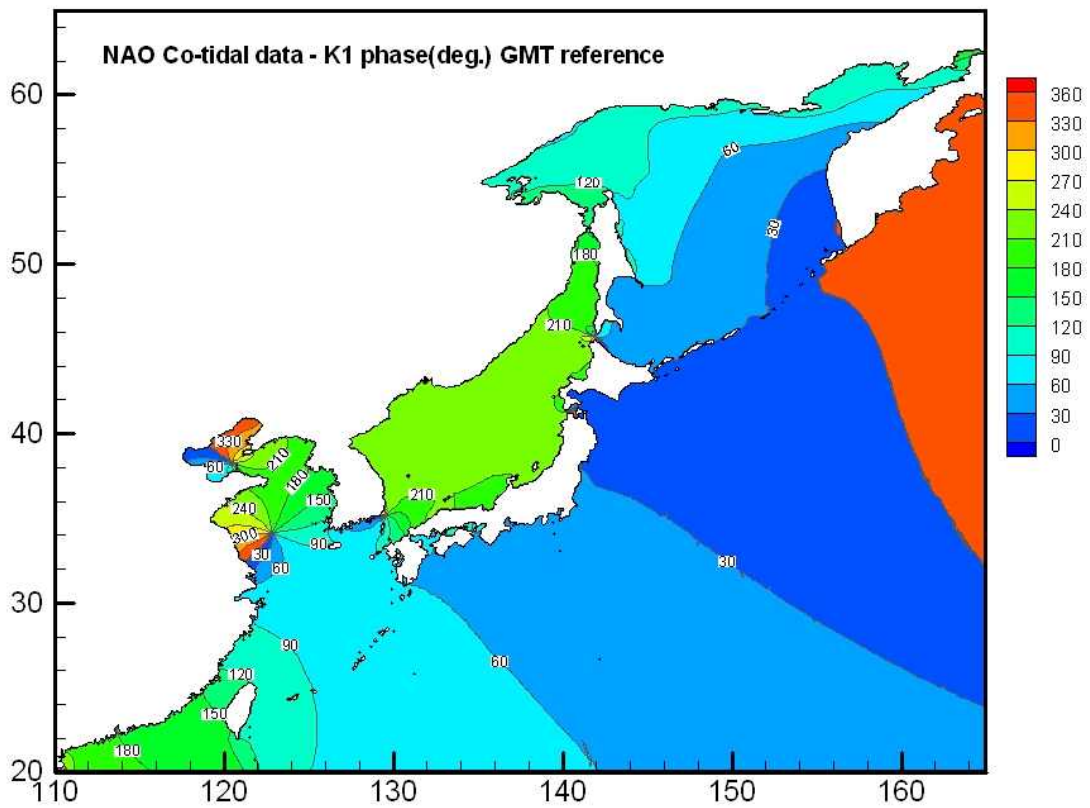
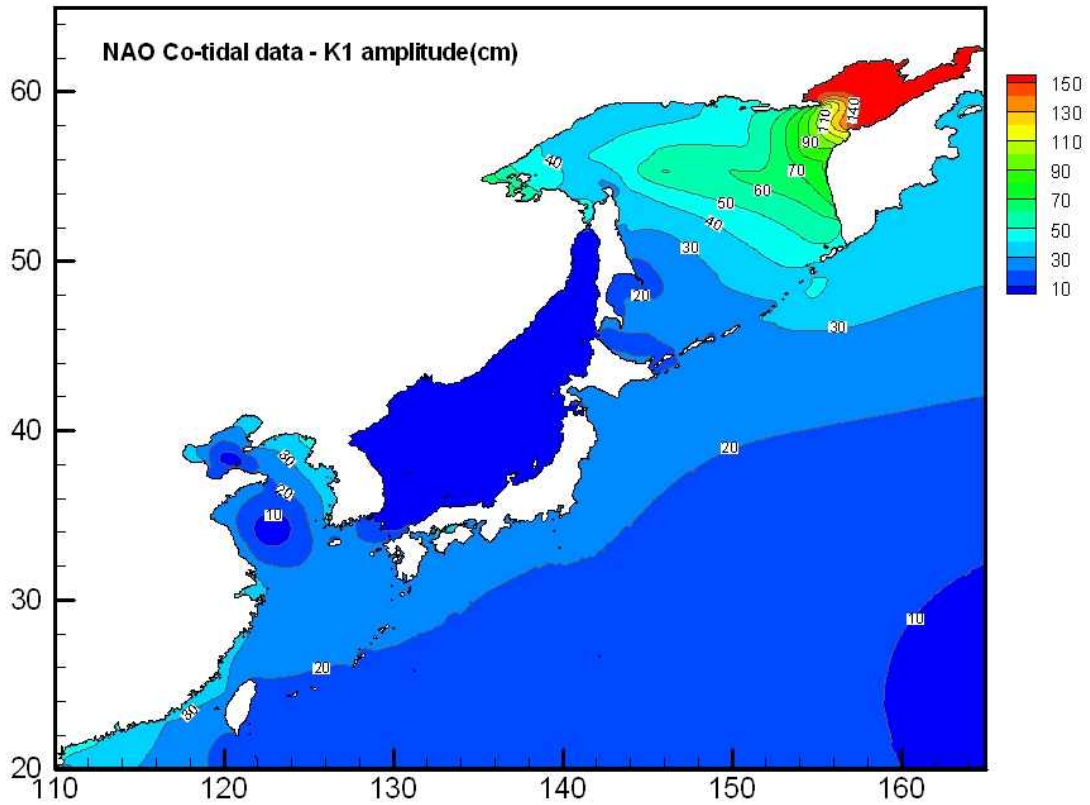


그림 3.2.33 등조위선 및 등조시선(K1) - NAO

검조소의 조위 정보와 조석 모델에 의한 각 격자점에서의 조석 및 조류의 공간 분포를 연결하여 임의의 지점에서 조석 및 조류의 시간적 변화를 예측할 수 있는 시스템을 구축하였다(Kang, 1997). 조석의 분조는 장주기 성분, 일주조(diurnal tide), 반일주조(semi-diurnal tide), 1/4일주조(quarter-diurnal tide) 등의 여러 종류로 구성되어 있으며 각각은 여러 개의 분조로 구성되어 있다. 예를 들면 반일주조는 M2, S2, K2, N2 등 여러 분조로 구성된다. 각각의 조석 종류(tidal type)는 주파수가 비슷한 협대역 스펙트럼(narrow banded spectrum)으로 진폭과 주기가 천천히 변하는 변조된 군파(group wave)로 간주할 수 있다. 조석관측소에서 군파의 진폭과 주기정보와 모델에서 산출된 각 type의 대표 분조의 공간 분포를 이용하여 각 격자점에서의 각 tidal type의 변조된 조위 또는 조류를 얻을 수 있다. 본 연구에서 적용된 기본적인 가정은 ①진폭 등비증가와 ②위상차 일정이다. 진폭 등비증가 가정은 조석형태별로 조위기준점(검조소) 조위의 진폭이 f 배 커지면 모델영역 격자점의 조위와 조류의 진폭도 f 배만큼 커지는 것을 말한다. 한편 위상차 일정 가정은 조석형태별로 기준조위점의 조위 위상과 모델영역 격자점의 조위(조류) 위상 사이의 차는 조위의 진폭에 관계없이 일정함을 말한다. 검조소에서 관측된 조위자료를 이용하여 조석형태별 변조조석을 계산한다. 임의의 검조소에서 i 분조의 실 시간 조위 $\zeta_i(t)$ 는

$$\zeta_i(t) = f_i H_i \cos(\sigma_i t - k_i + V_i + u_i)$$

(3.2.16)

에 의해 계산된다. 여기서 σ_i 는 분조의 각속도, V_i 는 천문인자, H_i 는 조석조화상수 진폭, k_i 는 조석조화상수 지각(위상), f_i 는 노드변조진폭, u_i 는 노드변조위상이다. 또한 $V_i = f_i H_i$ 와 $\phi_i = k_i - V_i - u_i$ 로 정의되며 1개월 미만 기간 동안에 대해서는 상수로 취급할 수 있다.

본 연구에서는 정밀한 조화상수를 산출하기 위해 황해 및 동중국해 그리고 동해를 모두 포함하면서 한국 연안에서는 매우 정밀한 최소격자 300m 내외의 격자크기를 가지는 가변격자 유한체적모델 FVCOM을 이용하였다. 조석 및 조류 모델링에 적용하는 2차원 수치모델은 수심적분된 연속방정식과 x, y 방향의 운동량 방정식을 기본식으로 취한다. 3차원에서의 확장은 연직방향을 고려하게 된다. FVCOM 모형에 대한 자세한 설명은 3장 3절에 더 자세히 다룬다.

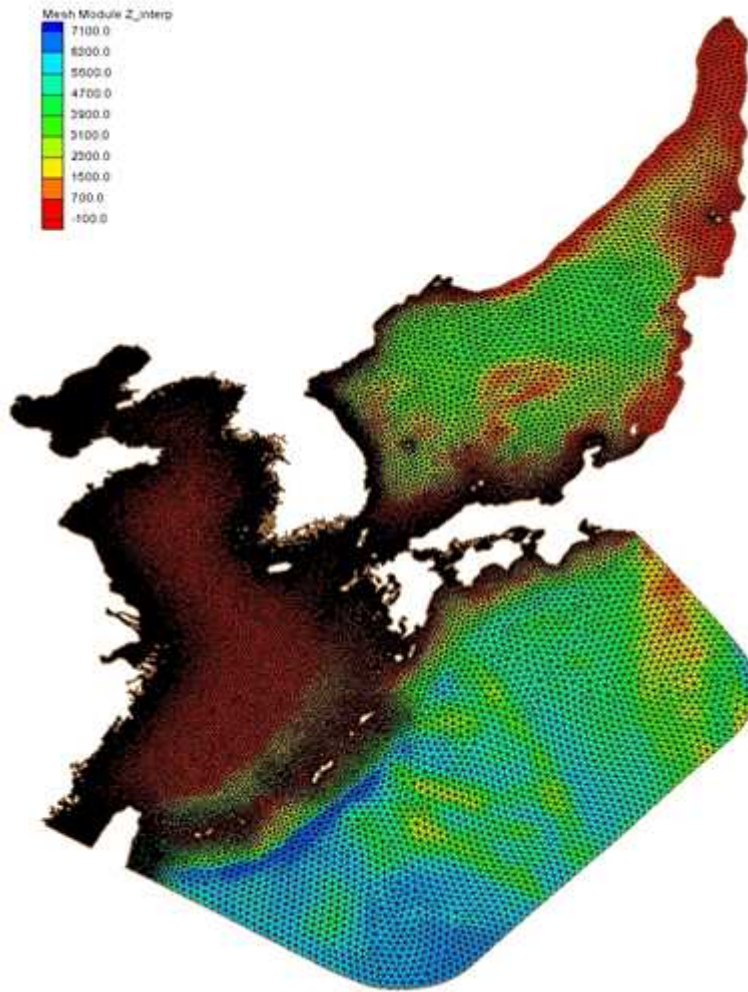


그림 3.2.34 FVCOM 모형에 적용된 격자망 및 수심도

모델의 개방경계에 적용된 입력 자료는 1/12도 격자의 NAO99jb 자료중 주요 8개 분조를 사용하였으며 총 100일간을 조석조류 시뮬레이션하여 앞의 10일 자료를 제외한 90일의 매시간 자료를 매 격자마다 조화분해하였다. 조화분해는 조석과 조류를 모두 실시하여 데이터베이스화 하였다. FVCOM 모델을 이용하여 획득한 M2 와 S2 반일주조 조석도는 그림 3.2.35과 3.2.36에 나타냈다. 그림 3.54과 3.55에서 실선과 점선은 각각 위상과 조위를 나타내며, 조위의 단위는 cm, 위상은 단위는 동경 135°을 기준으로 한 deg이다. 조석도의 일반적인 패턴은 기존 연구 결과 (예, 이와 정, 1996; Lee et al, 2002; Lefevre et al., 2000)와 비슷하다. 기존의 관측과 모델에서 나타나는 것과 같이 황해의 두 무조점과 발해만의 두 무조점, 그리고 양쯔강 하구의 무조점이 그림 3.2.35와 3.2.36에 잘 나타나고 있다.

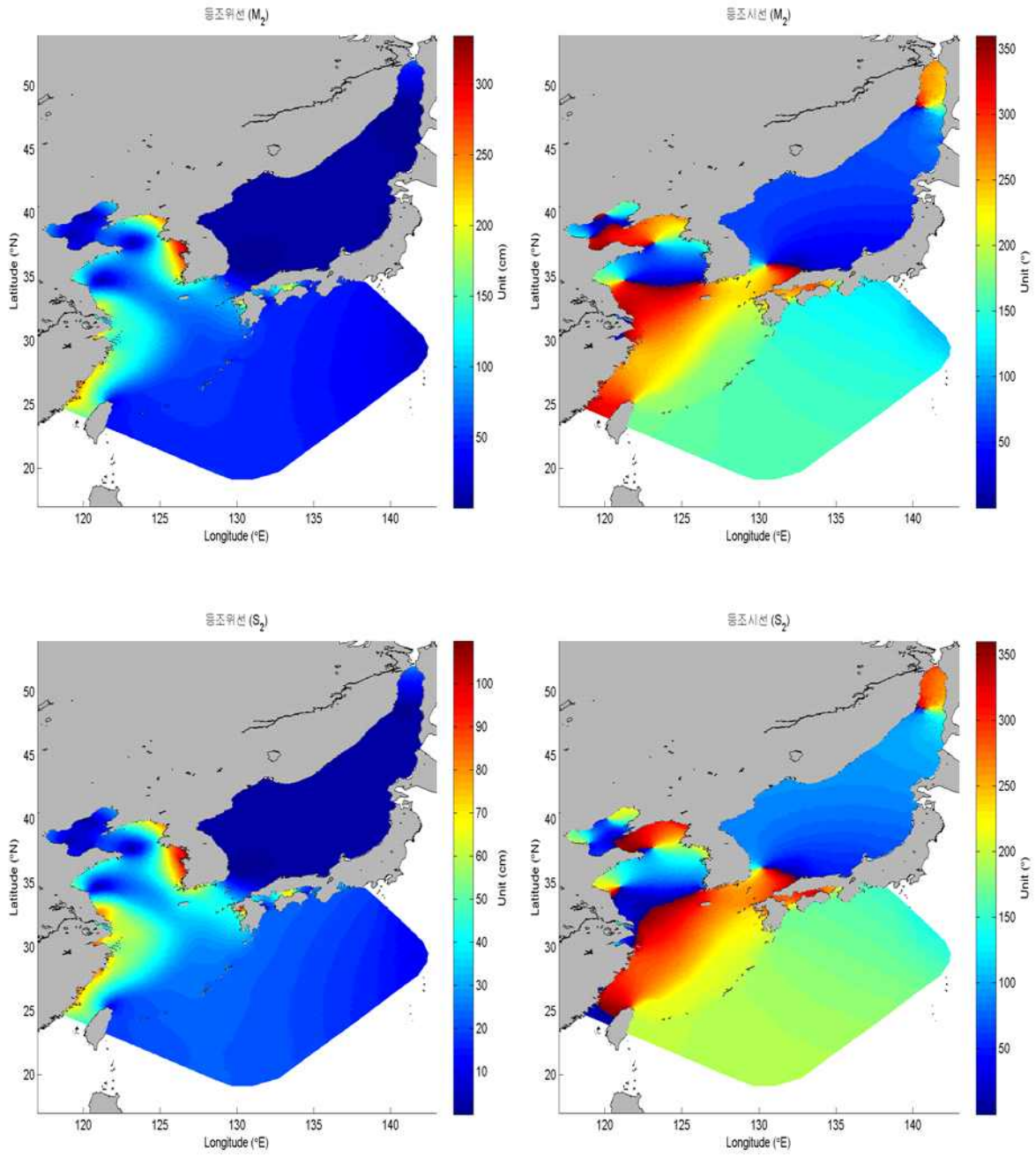


그림 3.2.35 FVCOM을 이용한 정밀격자 조석자료 산출결과(위 : M2, 아래 : S2)

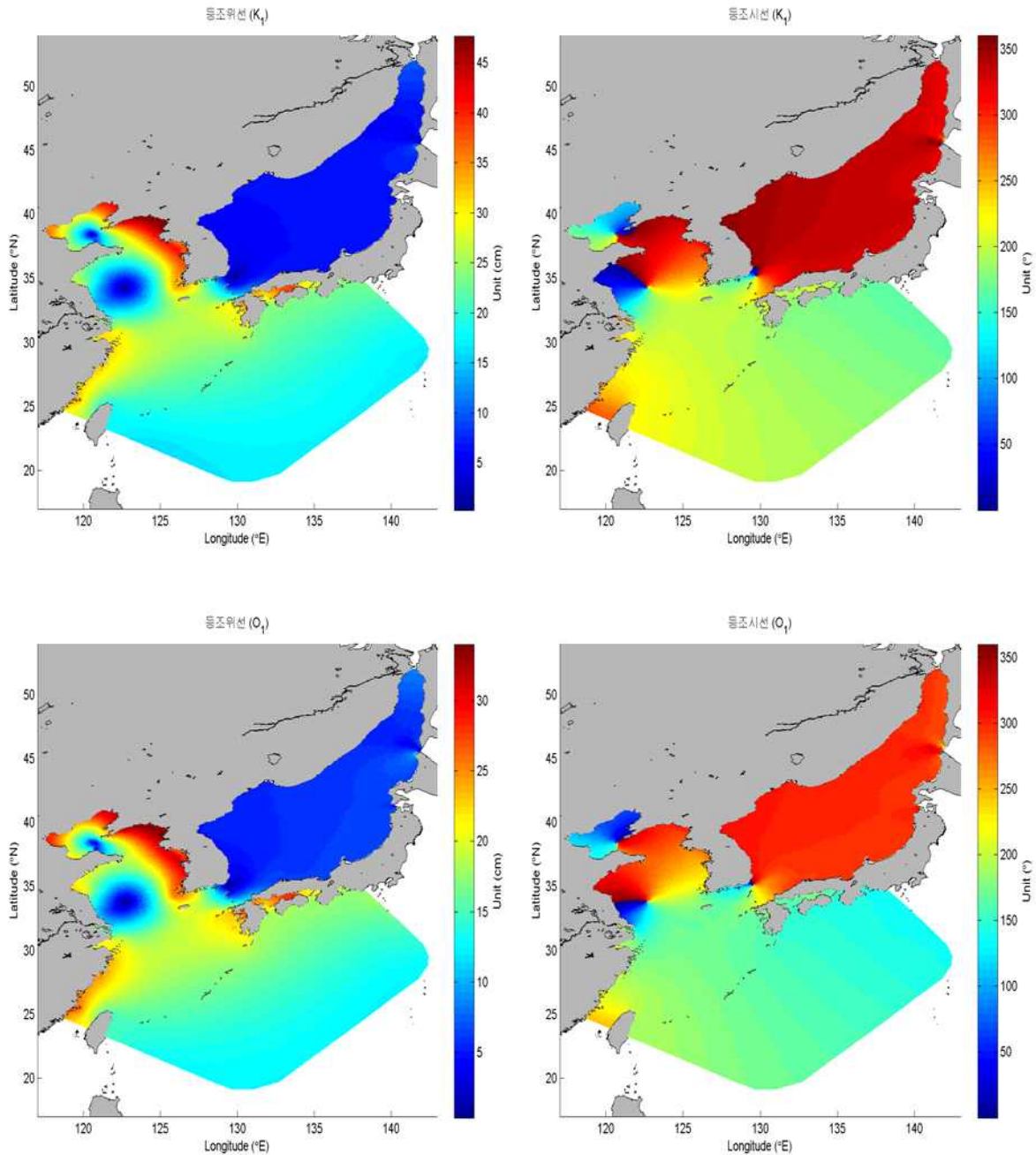


그림 3.2.36 FVCOM을 이용한 정밀격자 조석자료 산출결과(위 : K1, 아래 : O1)

본 연구에서 조석 및 조류자료의 조화 분석에는 IOS 패키지를 이용하였다. IOS package는 캐나다 해양연구소의 M.G.G Foreman(1977)에 의해 개발되어 공개된 프로그램으로서 세계적으로 공인되고 가장 많이 사용되고 있는 조석 및 조류자료의 분석 및 예측 프로그램이다. IOS 프로그램에는 조위해석, 조류해석, 조위예측, 조류예측 등의 서브 프로그램으로 구성되어 있다. IOS 패키지는 Doodson(1921), Godin(1972) 등의 조류해석 연구에 기초를 두고 있으며 69개의 분조로 구성된 기준 데이터셋으로부터 고려할 분조를

설정하기 위해 Rayleigh 분포가 사용되었으며, 69개 분조중 45개는 천문조로부터, 그리고 77개의 천해분조가 사용자에 의해서 추가될 수 있다. 진동수, nodal factor, astronomical argument 등의 산정은 Doodson(1921)의 조류포텐셜 전개에 근거하고 있으며, 천문학적 인 변수들을 계산하기 위해 초기시간을 1976년 1월 1일로 사용하고 있다. 입력 자료의 시간간격은 1시간 간격의 자료를 사용할 수 있으며 경우에 따라 임의의 시작시간에 의한 자료에 대해서도 조화분해를 수행할 수 있다. 그리고 불가피한 결측이 발생하여 자료가 불연속적이더라도 특별한 보간 작업 없이 조화분해를 수행 할 수 있다. 또한 IOS 패키지는 벡터(유속 및 유향)에 대하여 조류조화분해를 실시하며, 조류 타원요소 분석을 통하여 조류타원도의 장축크기, 단축크기, 장축기울기 뿐만 아니라 이심률, 조류의 회전방향 등을 분석할 수 있다. IOS Package의 조류조화분석에 대한 기본적인 수식은 다음과 같다.

임의의 유속을 복소수 신호 $Z(t)$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$Z(t) = X_0(t) + \sum_{j=1}^M X_j \cos 2\pi(\sigma_j t - \phi_j) + \left[Y_0(t) + \sum_{j=1}^M Y_j \cos 2\pi(\sigma_j t - \theta_j) \right] \quad (3.2.17)$$

여기서,

$$CX_j = X_j \cos 2\pi\phi_j, SX_j = X_j \sin 2\pi\phi_j, CY_j = Y_j \cos 2\pi\theta_j \text{ and } SY_j = Y_j \sin 2\pi\theta_j$$

따라서 유속은 다음과 같이 나타난다.

$$Z(t) = X_0(t) + \sum_{j=1}^M (CX_j \cos 2\pi\sigma_j t + SX_j \sin 2\pi\sigma_j t) + i \left[Y_0(t) + \sum_{j=1}^M (CY_j \cos 2\pi\sigma_j t + SY_j \sin 2\pi\sigma_j t) \right] \quad (3.2.18)$$

다시 정리하면 유속은 다음과 같다.

$$Z(t) = X_0(t) + iY_0(t) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M \{ [(CX_j + SY_j) + i(CY_j - SX_j)] \exp(2\pi i \sigma_j t) + i[(CX_j - SY_j) + i(CY_j + SX_j)] \exp(-2\pi i \sigma_j t) \}$$

(3.2.19)

여기서 분조 계수 j 를 제거한 후 다음의 식에 의해 정의하면,

$$a^+ = \left[\left(\frac{CX+SY}{2} \right)^2 + \left(\frac{CY-SX}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2.20)$$

$$a^- = \left[\left(\frac{CX-SY}{2} \right)^2 + \left(\frac{CY+SX}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\epsilon^+ = \arctan \left(\frac{CY-SX}{CX+SY} \right)$$

$$\epsilon^- = \arctan \left(\frac{CY+SX}{CX-SY} \right)$$

따라서 임의의 분조에 의한 조류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z(t) &= Z^+(t) + Z^-(t) = a^+ \exp(i\epsilon^+ + 2\pi i \sigma t) + a^- \exp(i\epsilon^- - 2\pi i \sigma t) \\ &= \exp \left[i \left(\frac{\epsilon^+ + \epsilon^-}{2} \right) \right] \left\{ (a^+ + a^-) \cos \left[\left(\frac{\epsilon^+ - \epsilon^-}{2} \right) + 2\pi \sigma t \right] + i (a^+ - a^-) \sin \left[\left(\frac{\epsilon^+ - \epsilon^-}{2} \right) + 2\pi \sigma t \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.2.21)$$

조류는 σ 의 각속도를 갖고 회전하는 두 개의 벡터 $Z^+(t)$ 와 $Z^-(t)$ 로 구성되며 전자는 a^+ 의 크기를 가지며 $t=0$ 일 때 양의 x (동서)축으로부터 반시계방향으로 ϵ^+ 라디안에 위치하며 반시계방향으로 회전하는 벡터이고, 후자는 a^- 의 크기로 $t=0$ 일 때 양의 x 축으로부터 반시계방향으로 ϵ^- 라디안에 위치하며 시계방향으로 회전하는 벡터이다. 합성벡터 $Z(t)$ 의 회전은 $a^+ > a^-$ 이면 반시계방향으로 회전하고, $a^+ < a^-$ 이면 시계방향으로 회전하며, $a^+ = a^-$ 이면 직선운동을 한다. 따라서 한주기 동안에 합성 조류벡터는 장축길이가 $a^+ + a^-$, 단축길이가 $a^+ - a^-$ 인 타원운동 또는 직선운동을 하게 된다.

우리나라 해역 특히 황해와 남해에서는 조류에 의한 기초력이 대표적인 흐름요인이다. 천문조는 달 및 태양의 운행에 기인한 몇 가지의 규칙적인 조석의 합성이므로 각각의 규칙적인 분조를 정밀하게 조화분해하여 각 분조의 조화상수를 생성한 이후에 상기의 IOS 조화분석 프로그램을 이용하여 임의의 지점, 임의의 시간에서의 조위와 조류속을 바로 계산할 수 있도록 하였다. 이러한 일련의 과정은 간단히 프로그램화하였기 때문에 조석 조류에 대한 특별한 지식이 없는 사람도 간략한 위치 정보와 원하는 기간을 입력하면 원하는 지점에서의 조석 조화 자료를 신속히 산출할 수가 있다.

나. 조석의 경계조건

우리나라 주변 바다에 대한 조석 정보를 생산하기 위한 광역 조석 모델의 외해 경계 조건으로 사용 할 수 있는 전구 조석 모델로는 NAO99b/NAO99jb(Matsumoto et al. 2000), FES2004(Lyard et al., 2006), TPXO 7.2 (Egbert and Erofeeva, 2010) EOT08a (Savcenko and Bosch,2008), GOT4.7/00.2/99.2(Ray, 1999, 2008), ANDERSEN-06, CSR4.0 (Eanes, 1999), FVCOM 등이 있다. 주요한 것을 간단히 소개하면 다음과 같다.

(1) NAO99b/NAO99jb : 단기 해양 조석 모델

- 0.5도의 전지구 자료와 1/12도 간격의 지역(110E-165E, 20N-65N) 자료
- 16개 분조자료 제공(M2,S2,K1,O1,N2,P1,K2,Q1,M1,J1,OO1,2N2,Mu2,Nu2,L2,T2)
- Topex/Poseidon 위성자료(Cycle 9-198)를 이용한 전지구 조석자료동화
- 일본 지역을 포함한 지역모델에서는 연안 조위 관측자료를 이용한 자료보정 실시

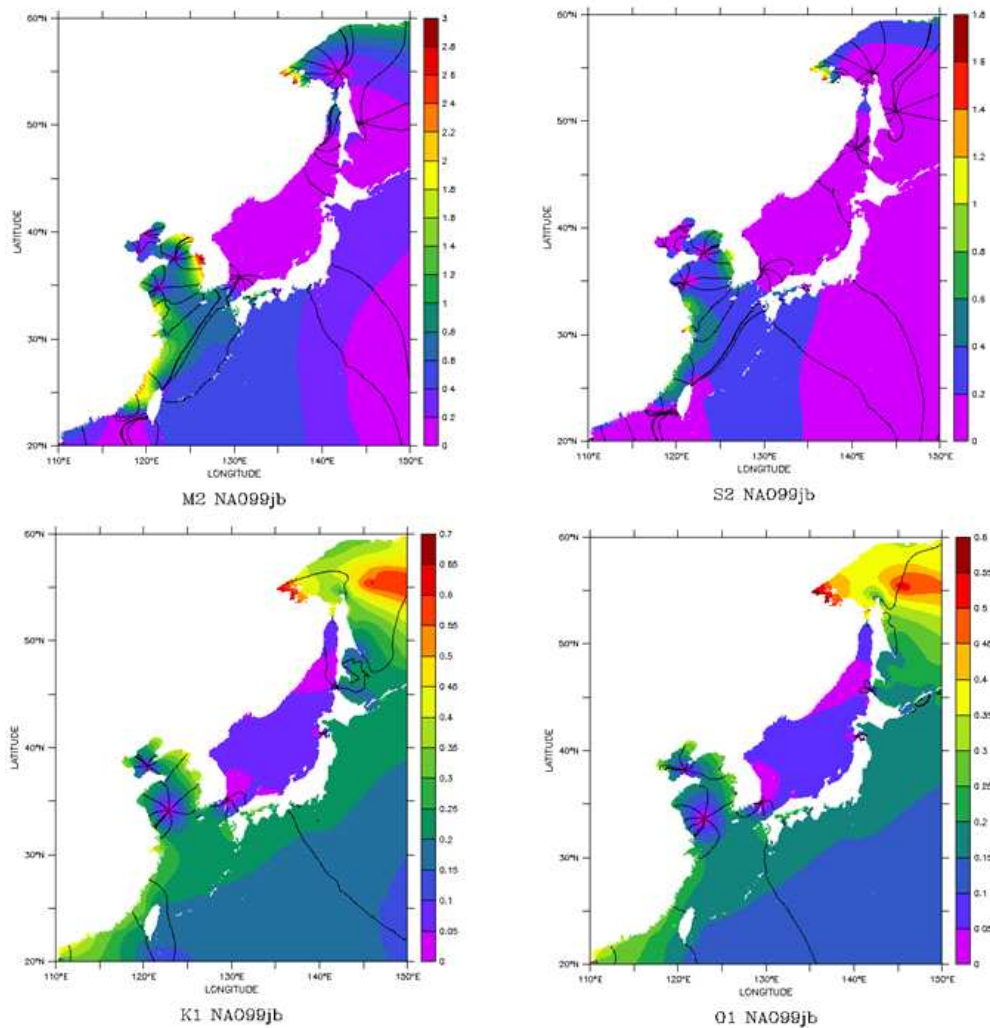


그림 3.2.37 NAO99jb 단기 해양 조석 모델 자료

(2) NAO.99L : 장기 해양 조석 모델

- 전지구 조석 모델, 7개 분조 해석(Mtm, Mf, MSf, Mm, Msm, Ssa, Sa)
- T. Takanezawa(NAO)에 의해 개발됨
- Pure hydrodynamical 모델
- 0.5도 간격 모델(Sa는 1.0도 간격으로 제공됨) : Loading tide model
- Radial displacement Global models for the above 23 constituents 0.5 deg

(3) FES2004

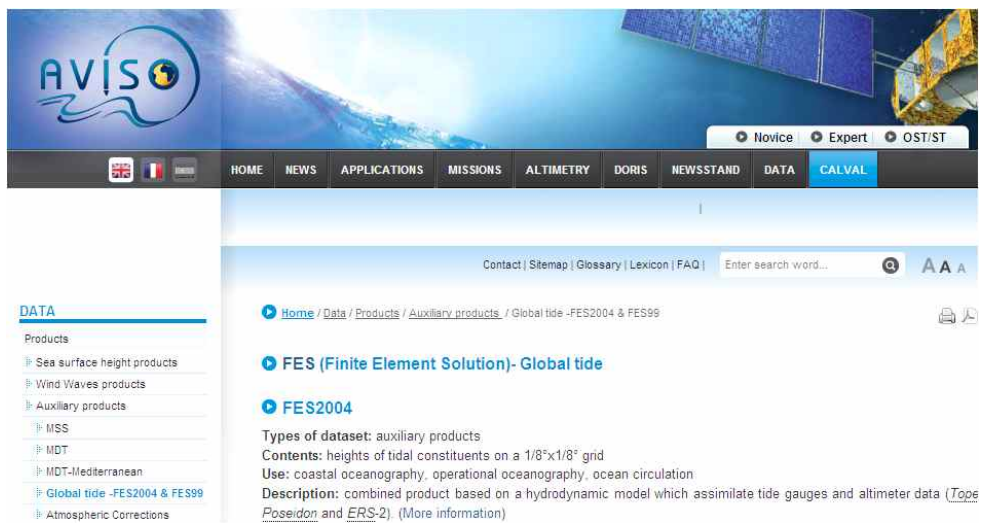


그림 3.2.38 FES2004 소개 홈페이지

- FES (Finite Element Solution) 조석 모델의 최신 버전
- 1990년대 초 Christian Le Provost에 의해 시작되었던 전지구 수역학 조석 모델의 개선 버전
- LEGOS 와 CLS에서 개발, 유지되고 품질 평가됨.
- 새 버전에서는 2차원 조석모델에 대해 전지구 유한요소 격자(약 100만개의 노드 포함)가 새로이 적용
- 새로운 고해상도 해저 지형 자료를 사용하고, 극해역의 해빙을 고려함.
- 검조소 조위계 자료와 위성 고도계 자료(T/P and ERS-2)를 revised representer 동화 기법을 사용하여 모델 해를 개선
- 15개 분조 자료(조위 및 위상)를 1/8°격자상에서 제공하고, 28개의 다른 분조들을 specific admittance 방법과 장주기파 계산법을 이용해 보정
- 새로운 tide loading effects 계산 (Olivier Francis)

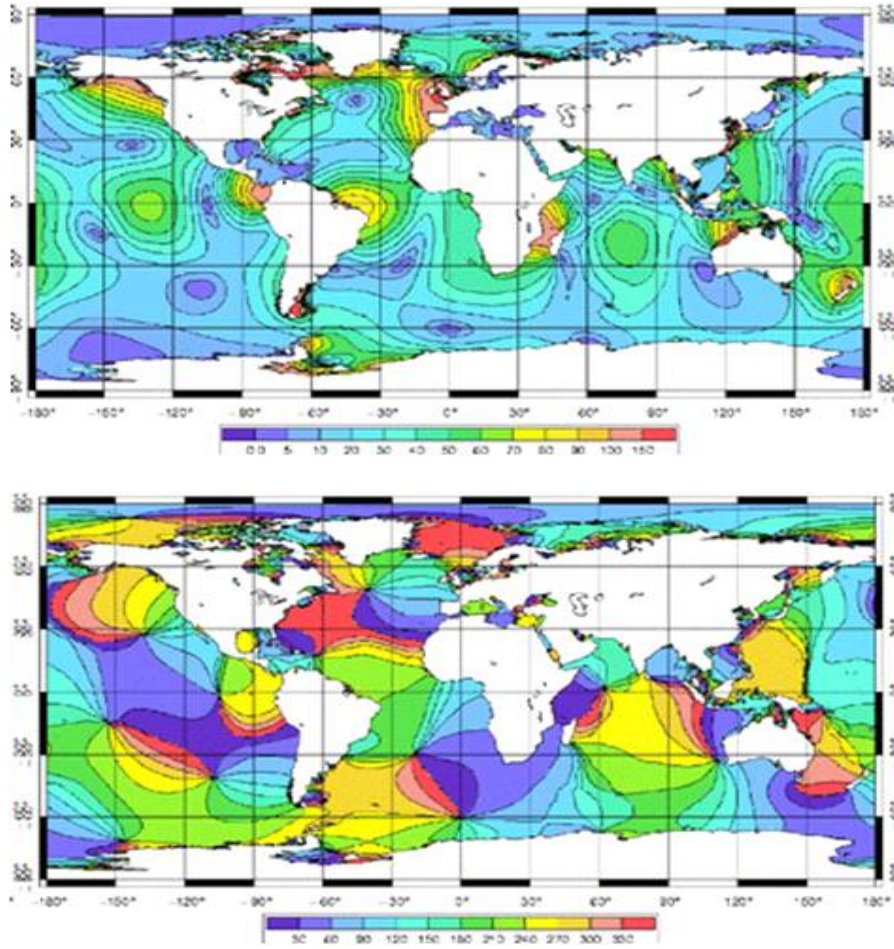


그림 3.2.39 FES2004에서 제시된 M2 등조위도와 등조시선

(4) TPX0 7.2 :오레곤 주립 대학(OSU)의 TOPEX/Poseidon 전지구 역해법

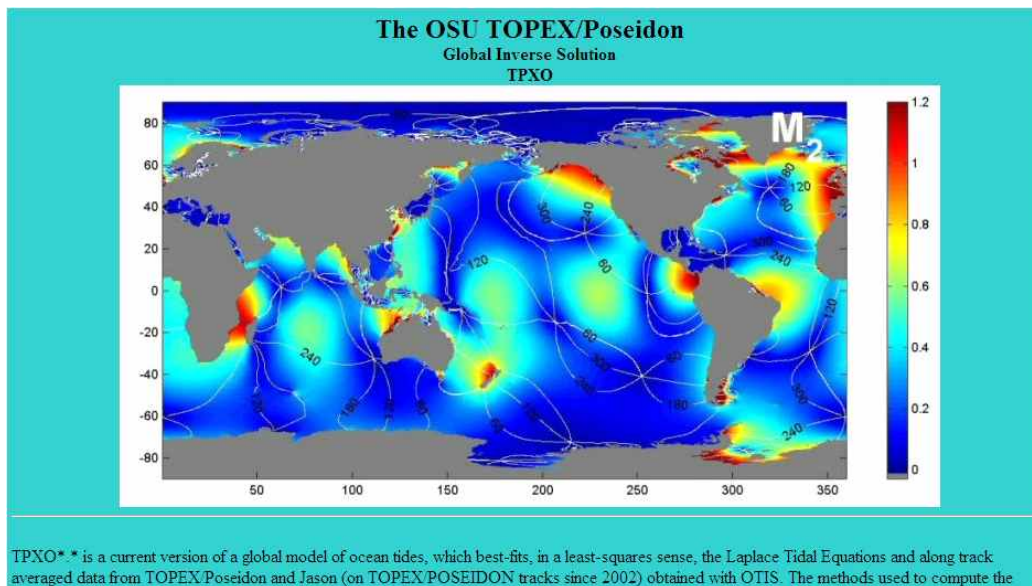
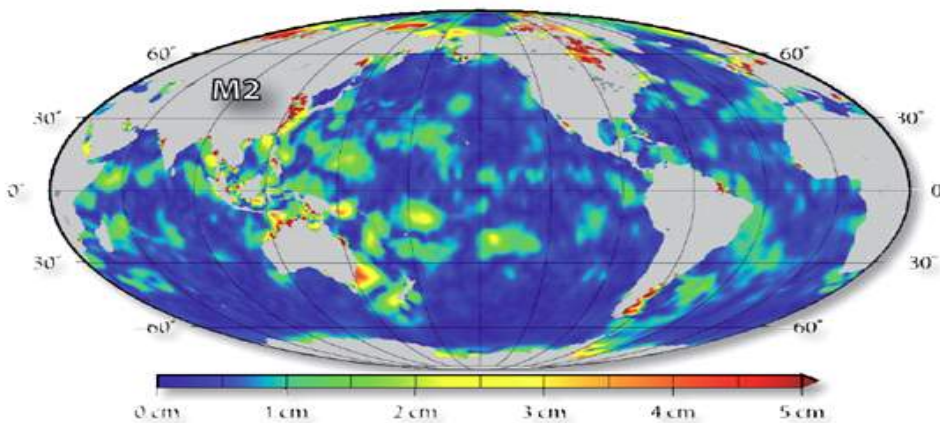


그림 3.2.40 TPX0 7.2 자료 웹페이지

- 최소 자승법과 라플라스 조석 방정식, 그리고 TOPEX/Poseidon 과 Jason 위성의 지상궤도를 따라 역함수 기법으로 계산한 전구 조석 모델 버전
- 계산 기법 참조: Egbert, Bennett, and Foreman [EBF, 1994] 그리고 Egbert and Erofeeva in [Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides , Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol.19,N2, February 2002].
- 8개 분조 자료를 복소 진폭으로 표현 (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1) 하고 2개의 장주기 분조 (Mf,Mm)와 함께 1440x721, 1/4 도 해상도를 갖는 전구 결과 제공

(5) EOT08a : Empirical Ocean Tide Model from multi-mission satellite altimetry



Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)

그림 3.2.41 EOT08a 자료 예

(6) GOT4.7/00.2/99.2

(7) ANDERSEN-06

(8) CSR4.0

다. 임의 연안 조위 예측

본 연구에서는 IOS 패키지를 이용한 프로그램을 이용하여 각 격자점의 데이터베이스화된 정밀격자의 조석 및 조류의 조화상수를 이용하여 각 성분을 합성하여 조석 및 조류의 시계열을 산출한다. 이 방법은 조화상수 DB를 사용하여 가장 손쉽게 원하는 연안 지점의 조석과 조류를 제공한다. 다음의 그림에는 FVCOM 모델에서 계산된 임의의 격자점에서의 조석조류 시계열 자료와 DB의 8개 조화상수를 IOS 패키지를 이용하여 합성하여 그 결과를 비교한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 일부에서 약간의 차이를 보여주고 있으나 두 결과는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 연안방재업무 등의 실용적인 목적을 위해서는 8개 주요 분조에 대한 조화상수를 활용하여 복잡한 수치 모델을 이용한 계산 없이도 신속히 조석조류 정보를 계산 해낼 수 있으며 이를 간이로 이용하여도 충분하다고 사료된다.

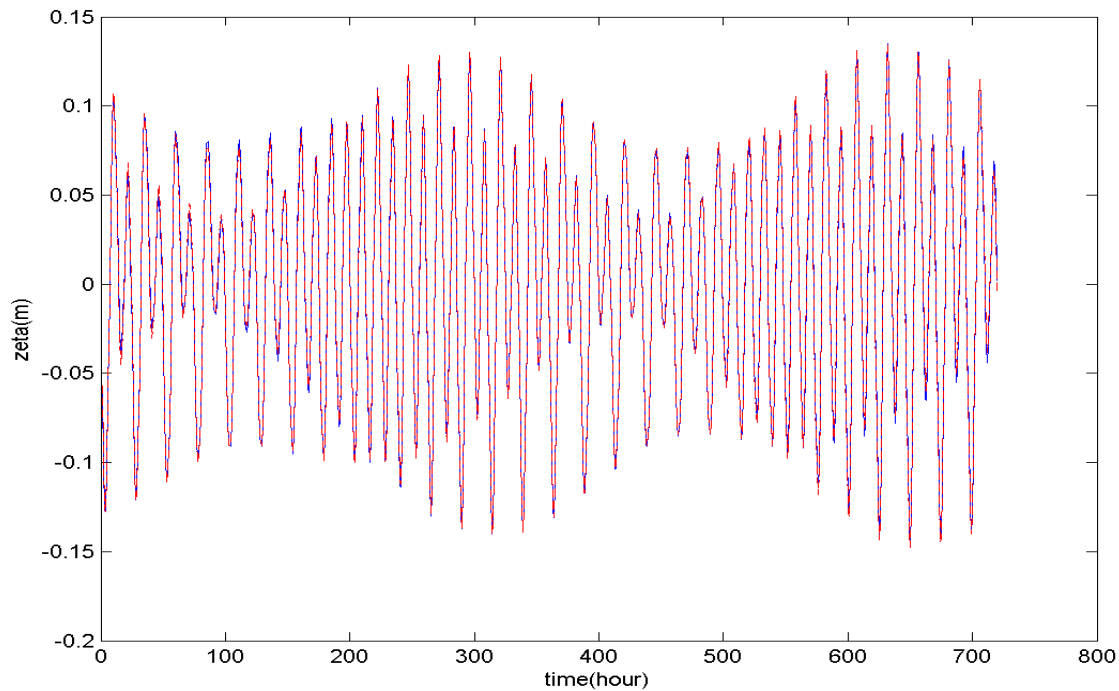


그림 3.2.42 모델에 의한 조석(zeta)자료(푸른선) vs 조화상수로 구한 조석자료(붉은선)

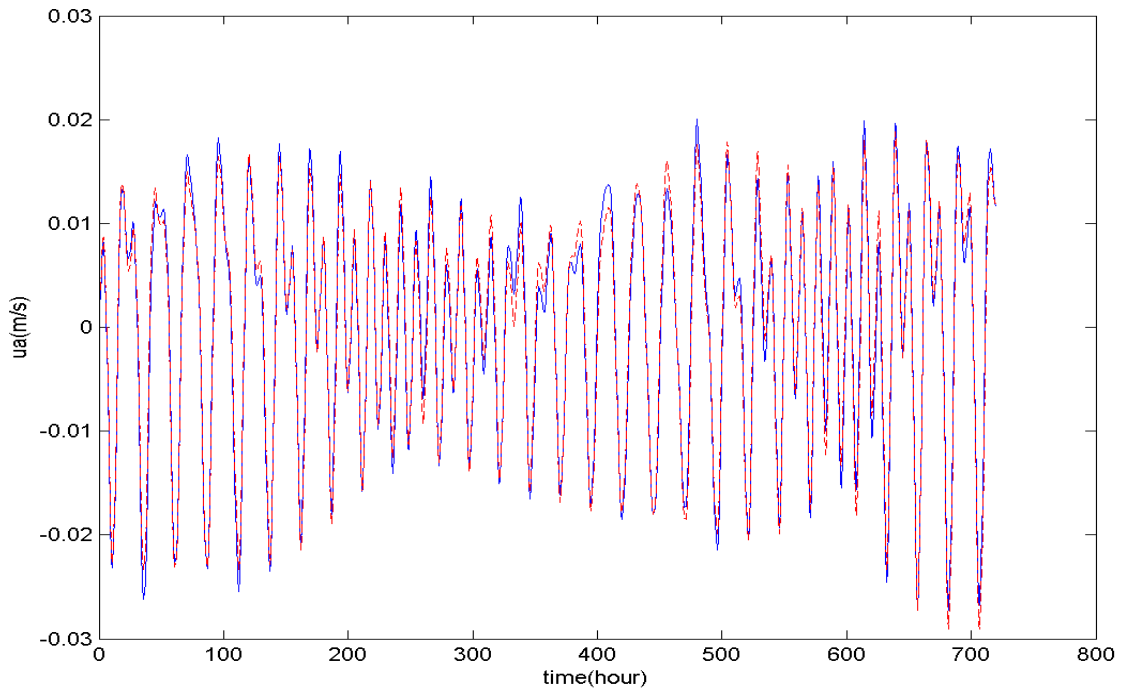


그림 3.2.43 모델에 의한 조류(u)자료(푸른선) vs 조화상수로 구한 조류자료(붉은선)

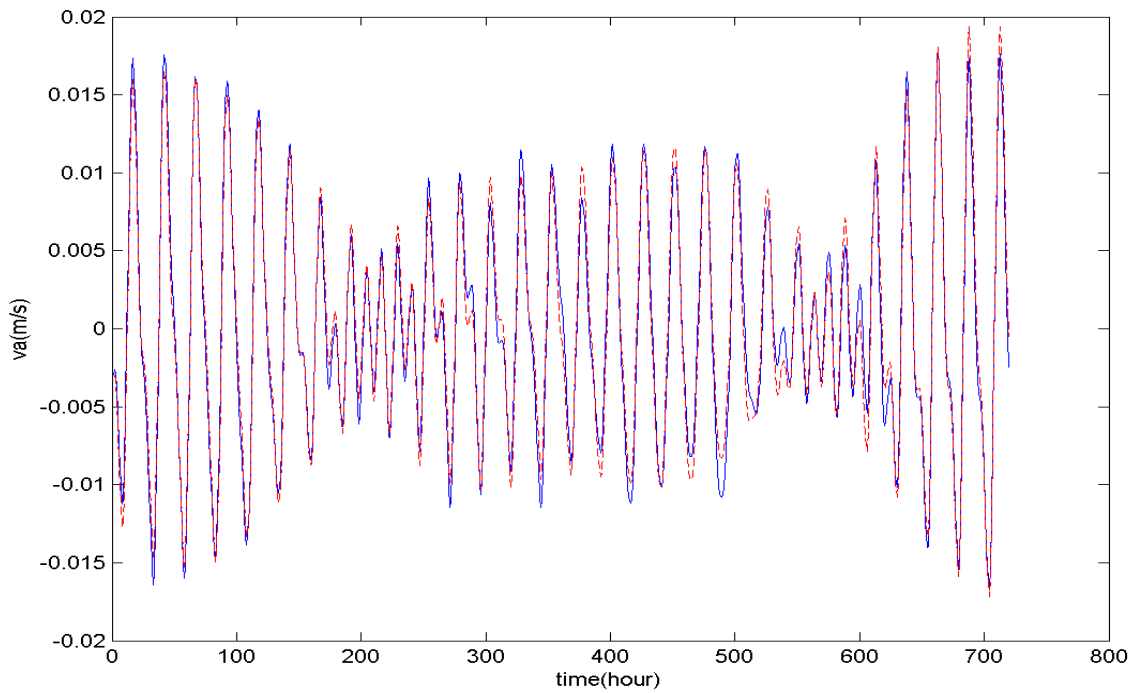


그림 3.2.44 모델에 의한 조류(v)자료(푸른선) vs 조화상수로 구한 조류자료(붉은선)

제 3 절 폭풍해일 수치 모델 수립 및 설계해면 산출

이상해면 상승에 의해 피해를 크게 입고 있는 지역은 주로 지형의 수심 구배가 완만한 지역이다. 이 경우는 얕은 수심에서 국지 해상풍의 영향, 폭풍해일이 전파할 때 지형의 영향 등 국지 현상을 잘 재현할 수 있는 국지 정밀 폭풍 해일 모델을 수립하여 적용하여야 한다. 이의 효과적 적용을 위해 신속하게 계산하는 신속 계산 모델과 및 정밀 계산을 위한 모델을 구분하여 수립하였다. 수립된 폭풍해일 모델을 적용하여 과거 장기 간의 태풍에 대한 폭풍해일을 추산하여 설계해면을 산출하였다.

1. 폭풍해일 수치 모델

가. 신속 예보와 장기 산출을 위한 폭풍해일 모델

신속 폭풍해일의 예보를 위해 미국 해양대기청의 폭풍해일 예측 모델과 같이 비선형 이류항을 생략한 선형 모델로 해면을 산출하는 모델을 이용해 왔다(Jelesnianski et al., 1992). 최근에는 전산기의 발달로 계산 속도가 향상되어 비선형 이류항을 포함하는 폭풍해일모델을 이용하여 신속한 폭풍해일 산출이 가능하게 되었다. 비선형 폭풍해일 모델 중에서 Fractional Step Method에 의한 조석모델을 확장하여 외해 경계면에서의 경계조건(해면)과 대기-해양 경계면에서 경계조건(바람에 의한 Shear stress)을 적용하고 또 대기압의 공간 분포에 의한 수평 압력 경도력을 고려하여 운동방정식을 연직으로 적분한 장과 방정식을 푸는 방법을 이용하여 신속한 폭풍해일 모델을 수립하였다.

폭풍해일모델의 기본방정식은 지구의 곡률과 위도에 따른 편향력을 고려한 지구좌표계상에서 수립되었다. 수직축에 따른 유속분포가 균일하여 수직방향의 가속성분을 무시할 수 있다고 가정하여 구한 수심적분된 연속방정식과 2차원 운동방정식은 다음과 같다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left[\frac{\partial \bar{U}}{\partial \chi} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial \phi} \right] = 0 \quad (3.3.1)$$

운동 방정식:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \chi} = \frac{f \bar{V}}{\cos \phi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{R \cos \phi \partial \chi} - \frac{\tau_{bx} - \tau_{sx}}{H} \quad (3.3.2)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{g}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} = -f \cos \bar{U} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{R \partial \phi} - \frac{\tau_{by} - \tau_{sy}}{H} \quad (3.3.3)$$

여기서,

$$\bar{U} = HU, \quad \bar{V} = HV \cos \phi$$

η : 정수면 상에 대한 수위

h : 정지수면 하의 수심

R : 지구의 곡률반경

χ, ϕ : 경도 및 위도

f : Coriolis 계수

H : 총 수심

g : 중력가속도

ρ : 해수의 밀도

P : 기압

τ_s, τ_b : 각각 바람과 바닥면에 의해 생기는 마찰응력

U, V : 수심적분된 유속성분으로 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} u(z) dz, \quad V = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} v(z) dz$$

여기서, Coriolis 계수 $f = 2\omega \sin \phi$ 이며 ω 는 지구회전 각속도이다. 해저면의 마찰응력과 바람에 의한 전단응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{bx} = k_b \frac{\bar{U}}{H} \sqrt{\bar{U}^2 + \left(\frac{\bar{V}}{\cos \phi}\right)^2} \quad (3.3.4)$$

$$\tau_{by} = k_b \frac{\bar{V}}{H} \sqrt{\bar{U}^2 + \left(\frac{\bar{V}}{\cos \phi}\right)^2}$$

$$\tau_{sx} = k_s W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3.3.5)$$

$$\tau_{sy} = k_s W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

여기서,

k_b : 저면 마찰 계수

k_s : 바람 전단응력 계수

W_x, W_y : 경, 위도 방향의 풍속

폭풍해일의 기본방정식 ((식)4.1~(식)4.2)은 fractional step method에 의해 수치해석되었다. Fractional step method는 Chorin(1968)이 지적한 대로 이송, 확산과 같은 유체 흐름의 복합적인 물리현상이 매순간 각각 독립적인 과정의 합으로 설명될 수 있다는 인식에 근거하며 복잡한 문제를 수치해석하는 데 상당히 효과적인 기법으로 주목받고 있다. Fractional step method는 아직 이론적으로 완벽하게 입증되지 못했지만 경제적이면서 최적의 방법으로 간주되어 이미 널리 사용되는 수치해석 수단이 되고 있다. 확산 및 전파항은 각 방향에 대하여 tridiagonal matrix를 형성하도록 ADI 음해법으로 유한차분되어 손쉽게 수치해석된다. 확산항의 수치해석시 미지수인 Q_x 와 Q_y 는 격자 중앙에 위치하도록 하여 유한차분되었고 전파항의 수치해석시 미지수인 η , u 와 v 는 <그림 4-2>와 같이 staggered grid system상에서 유한차분되었다.

복잡한 수리현상을 수치모형화하는 경우 대상이 되는 물리현상 또는 적용된 수치해석 기법에 적합하도록 초기조건을 설정해야 한다. 본 수치모형은 파랑이나 조석의 영향이 전혀 없는 상태에서부터 계산이 시작된다고 가정하여 전 계산 영역에 대하여 초기조건으로 해수위 η 와 유량벡터 Q 를 모두 영으로 두고 계산을 시작하였다. 본 수치모형에서는 일반적으로 적용되는 경계조건으로서의 육지 경계 조건과 외해 경계 조건으로 나눌 수 있다. 육지경계면에서는 staggered grid system상 유속 벡터가 위치하도록 하여 유속을 0으로하여 완전차수조건을 적용하여 경계처리되며, 외해경계에서는 시간에 따른 적절한 수위의 변화를 주어 조석이 대상영역에 제공되도록 하였다. 개방경계조건으로 입력되는 시간별 해수위는 광역격자에서는 0으로 설정하였으며, 내부격자의 계산시에는 외부격자에서 산출된 계산치를 내부격자의 계산시에 사용되는 공간간격과 시간간격에 맞도록 선형 내삽하여 경계치를 부여하였다.

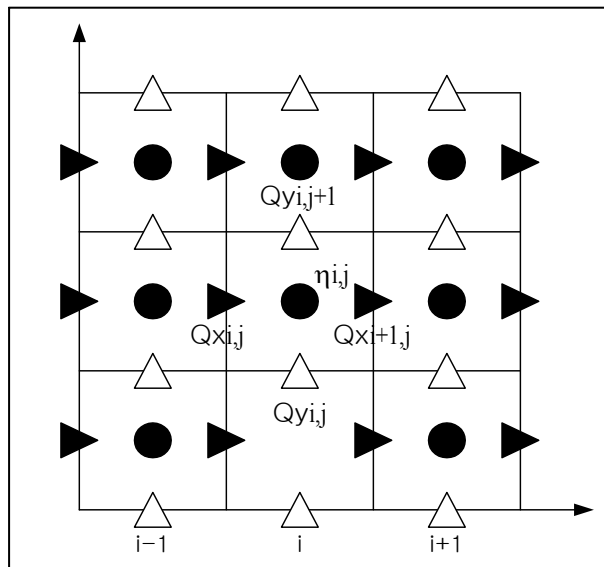


그림 3.3.1 Staggered grid system

그 동안 적용되던 연안순환 예측을 위한 수치모형은 수치계산을 절약하기 위하여 준 독립된 해역시스템에 독자적으로 적용하지 못하고 경계를 부분적으로 처리하는 관계로 경계로 인한 오차가 쉽게 관심 영역에 과급되었다. 계산시간이 빠른 해수순환 예측모형을 nesting 기법을 이용하여 동해, 황해 및 남해는 물론 대만을 일부 포함하는 동지나해를 포함하는 광역 해수순환 모형을 수립하고, 이로부터 우리나라 동해, 황해 및 남해 해역으로 구성된 중간해역, 그리고 관심해역인 상세역으로 손쉽게 연계되는 시스템을 수립하여 신속한 연안 국지 해수순환예측이 가능하도록 하였다.

나. Structured grid에 의한 정밀 폭풍해일 수치 모델

연안에서 풍성류, 폭풍해일의 정밀 산출과 더불어 나아가서 3차원 연안 순환과 확산이동을 계산할 수 있는 정밀 수치 모델을 수립했다. Structured grid 모델로 POM 모델, COHERENS 모델, DMI BSHcmod 모델, ROMS 모델, MOHID 모델 등 여러 모델 들이 수립되었는데 여기서는 각종 응용을 위한 확장이 용의한 MOHID 모델을 폭풍해일 산출에 활용했다.

MOHID (MOdelo HIDrodinamico)는 연안과 하구역에 적용할 수 있는 유한 체적법 (finite volume)을 사용하는 다기능 3차원 수치해석 모델로서 본 사업의 수치 모델 수립의 하나의 모델로 선택되었다. MOHID는 기본적으로 조석 및 해일과 같은 연안 및 하구역에서 물리적 작용을 계산해 낼 뿐 아니라 baroclinic hydrodynamic module을 포함하고, 3차원 퇴적물, eulerian 수송과 lagrangian 수송 module을 포함한다. 이 밖에도 turbulence module, water quality, ecology and oil transformation module을 포함하고 있어 난류 및 생태, 퇴적물 부유 및 오염물 등의 계산 적용이 가능한 모델이다.

MOHID는 1985년에 Neves (1985)에 의해 2차원 조석 모델로 처음 만들어져서 이후에 non-hydrostatic 의 Boussinesq model, 2차원 eulerian 과 lagrangian 수송 module을 포함하게 되었다 (Silva, 1992). 3차원 모델은 수직 Sigma 좌표를 사용하였고 (Santos, 1995), 이후 유한 체적이라는 개념을 도입하여 (Martins, 1999) 3D mesh version 을 완성하였다. 여기에는 3D eulerian 수송모델, 3D lagrangian transport model Leitao(1996)이 포함되었다. MOHID 모델은 여러 연안과 하구역에 적용되어 그 우수성을 인정받고 있으며, 현재는 포르투갈에서 담수의 흐름과 물성에서 대하여 적용 및 연구를 진행 중이다.

(1) 기하학적 해석

MOHID는 방정식의 불연속성을 해결하기 위해 유한 체적 접근법 사용한다. 이 접근은 지배 방정식의 형태에서 cell control volume을 적용하는데, 부피 Ω 에 있는 Q와 U

의 보존 법칙은, 다음과 같음 쓰여진다:

$$\partial_t \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_S \vec{F} d\vec{S} = \int_{\Omega} Q d\Omega \quad (3.3.6)$$

여기서 F 는 부피 표면 S 로 흐르는 흐름이다. 그러면 컨트롤 볼륨 Ω_j 와 U_j 가 결정되는데,

$$\partial_t (U_j \Omega_j) + \sum_{faces} \vec{F} \cdot \vec{S} = Q_j \Omega_j \quad (3.3.7)$$

이 방법에서 방정식을 풀어나가는 절차는 층마다 독립적이다. 수평적으로는 Catesian 이나 curvilinear 좌표를 사용할 수 있고, 수직적으로는 sub-domains 수직 좌표를 사용한다. MOHID에서 이용된 부피요소는 그림 3.3.2에서 보인다. 여기서의 수평은 Catesian 직각 좌표 이고, Arakawa C (Arakawa and Lamb, 1977) 방법을 사용한다.

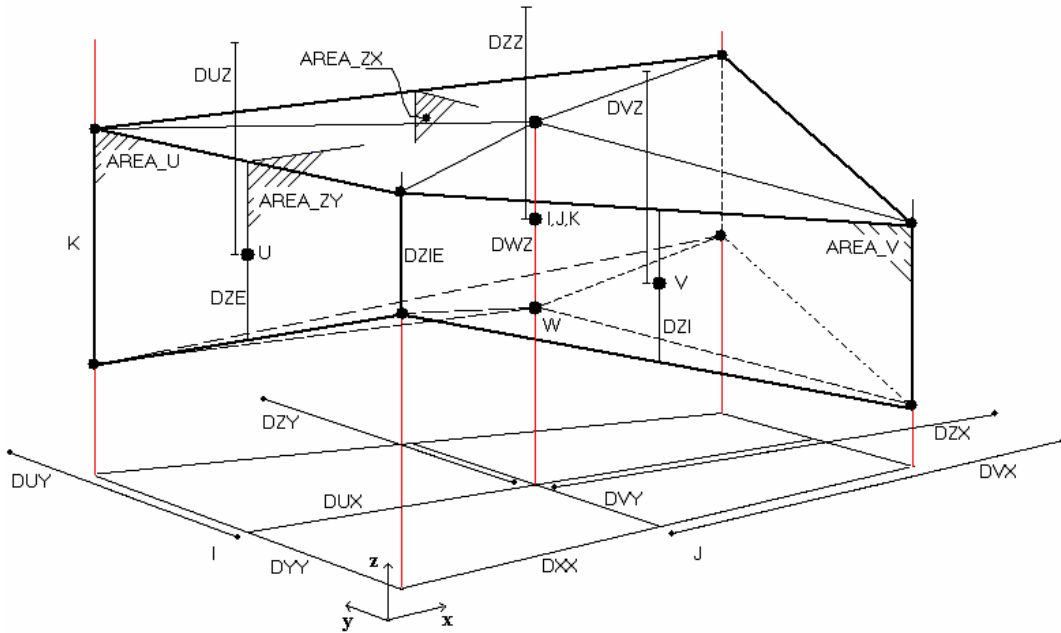


그림 3.3.2 MOHID 모델에서의 유한체적요소

(2) 지배 방정식

MOHID에 사용하는 x 방향으로의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_1}{\partial x_j} &= f u_2 - g \left(\frac{\rho(\eta)}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x_1} dz + \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x_1} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_j \frac{\partial u_1}{\partial x_j} \right) &- \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{11}(z)}{\partial x_1} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{12}(z)}{\partial x_2} \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

x_1, x_2 : Cartesian 좌표계의 수평 직교 좌표의 요소

z : 수직 좌표의 요소

u_1, u_2 : 각 x_1, x_2 의 속도 요소

ρ : 밀도

f : Coriolis 계수

g : 중력가속도

p_a : 대기압

K_j : 난류 점성 계수

S_{11}, S_{12} : radiation stresses

식 (3.3.8)에서 우변 첫 번째 항은 전향력을 나타내고, 두 번째 항은 밀도 차에 의한 경압력 (baroclinic)을 세 번째 항은 순압력 (barotropic)을 나타내며 네 번째항은 대기에 의한 압력을 나타낸다. 그리고 다섯 번째 항은 난류 확산 항이고, 여섯 번째와 일곱 번째 항은 radiation stress 를 나타낸다.

또한, 3D 질량보존은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0 \quad (3.3.9)$$

수평 난류는 Smagorinsky(1963)에서부터 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$K_H = C\Delta x_1 \Delta x_2 \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2}\right)^2 / 2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)^2} \quad (3.3.10)$$

또한, 표면에서의 경계에서는 Wind stress 는 quadratic friction 방법을 사용하여 경계조건을 생성하고,

$$(\tau_1, \tau_2) = \rho_{air} C_D \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot (u_1, u_2) \quad (3.3.11)$$

여기서, C_D 는 바람함수의 항력 계수, W 는 수면 위 10m에서의 바람 속도이다.

바닥경계 조건에서의 마찰은

$$(\tau_1, \tau_2) = \rho_{water} C_D \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot (u_1, u_2) \quad (3.3.12)$$

으로, 여기서 C_D 는 바닥 경계의 항력계수로 다음과 같이 표현된다.

$$C_D = \left(\frac{\kappa}{\log\left(\frac{z + z_0^b}{z_0^b}\right)} \right)^2$$

(3) 우리나라 연안에 대한 폭풍해일 모델의 수립

MOHID 모델을 이용한 격자 크기가 약 9 km의 광역 폭풍해일 모델을 수립하고 이어 격자 크기가 약 2km 그리고 약 300m의 중간역 및 상세역 격자 모델을 수립하여 단계적으로 연계시스템을 구축하였다. 광역격자망은 경도 115°~145°E, 위도 20°~52°N의 해역에 격자간격 1/12°(약 9km)로 설정하였다. 중간격자망은 124°~130°E, 32°~39°N의 해역에서 1/60°(약 2km)로 설정하였다. 또한 상세역은 전국을 6개로 나누어 1/360°(약 300m)의 간격으로 설정하였다. (그림 3.3.3, 표 3.3.1).

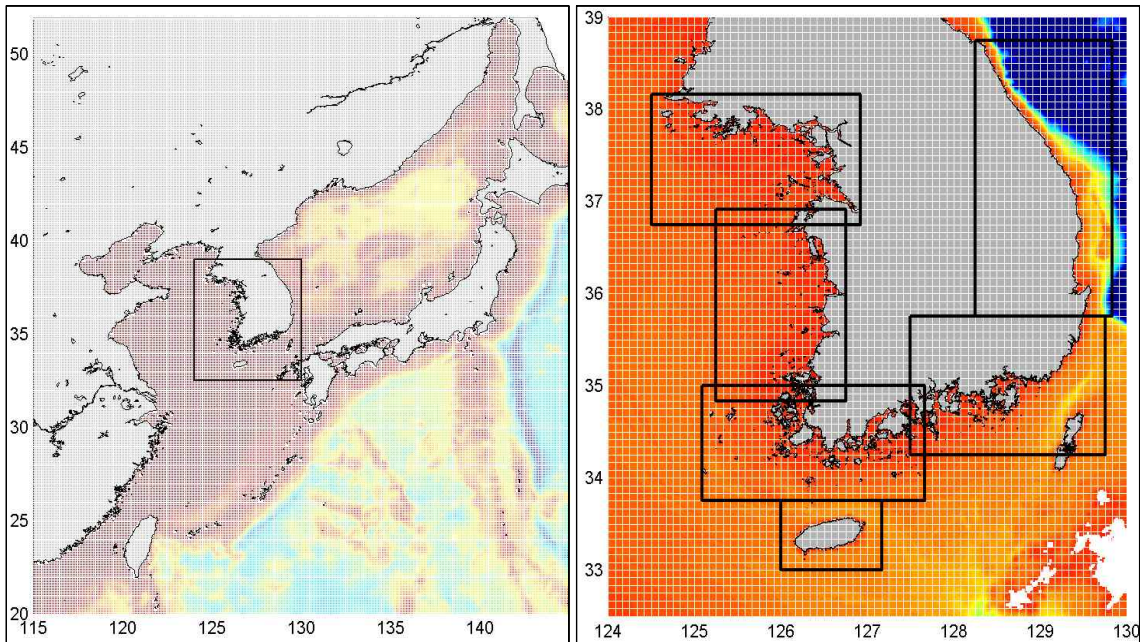


그림 3.3.3 MOHID 수치 모형의 광역격자(좌)와 중간격자(좌, 우) 및 상세격자(우)

표 3.3.1 MOHID 수치모형의 계산격자

수치모형	광역	중간역	상세역					
			1	2	3	4	5	6
경도 범위 (°E)	115.0 ~ 145.0	124.0 ~130.0	124.50 ~126.92	125.25 ~126.75	125.08 ~127.67	127.50 ~129.75	128.25 ~129.83	126.00 ~127.17
위도범위 (°N)	20.0 ~52.0	32.0 ~39.0	36.75 ~38.17	34.83 ~36.92	33.75 ~35.00	34.25 ~35.75	35.75 ~38.75	33.00 ~33.75
격자간격	1/12°	1/60°	1/360°					
격자수	313×361	481×481	871×511	541×751	931×451	811×541	571×1081	421×271

다. Un-structured grid에 의한 정밀 폭풍해일 수치 모델

연안에서 정밀 격자의 모델 수립을 위해 가변 격자인 Unstructured grid 모델이 수립되어 이용되었다. 폭풍해일 산출에 ADCIRC 모델과 FVCOM 모델이 고려되었는데 3차원 모델이 이미 현업화 되었고 또 향후 연안 환경, 생태 모델링 등으로도 많은 응용이 가능한 FVCOM 모델을 도입되어 정밀 폭풍해일 산출에 활용하였다.

FVCOM은 유한차분모델 또는 유한요소모델과는 다른 적분형태의 지배방정식을 갖는다. 이 적분식은 유한차분법의 흐름계산을 이용하여 수치적으로 풀 수 있고 유한요소법과 같은 삼각형 격자망을 이용한다. 유한체적법은 개개의 제한된 요소와 완전한 계산 영역으로 질량보존된다. FVCOM은 유한차분법의 간단한 이산법의 능률성과 유한요소법의 기하학상의 유연성이 잘 조화되었다고 할 수 있다. 또한 유한체적법 다기능 3차원 수치해석 모델로서 복잡한 연안, 하구역, 조간대역 및 대륙붕에서 물리적 작용을 이해하는 도구로 사용할 수 있을 뿐 아니라, 생태, 퇴적물 부유 및 오염물 이동 모델과 연동시켜 생태학적 작용을 이해하거나 퇴적물 이동 및 폐기물 이동을 관찰하고 예측하는 도구로 사용할 수 있다.

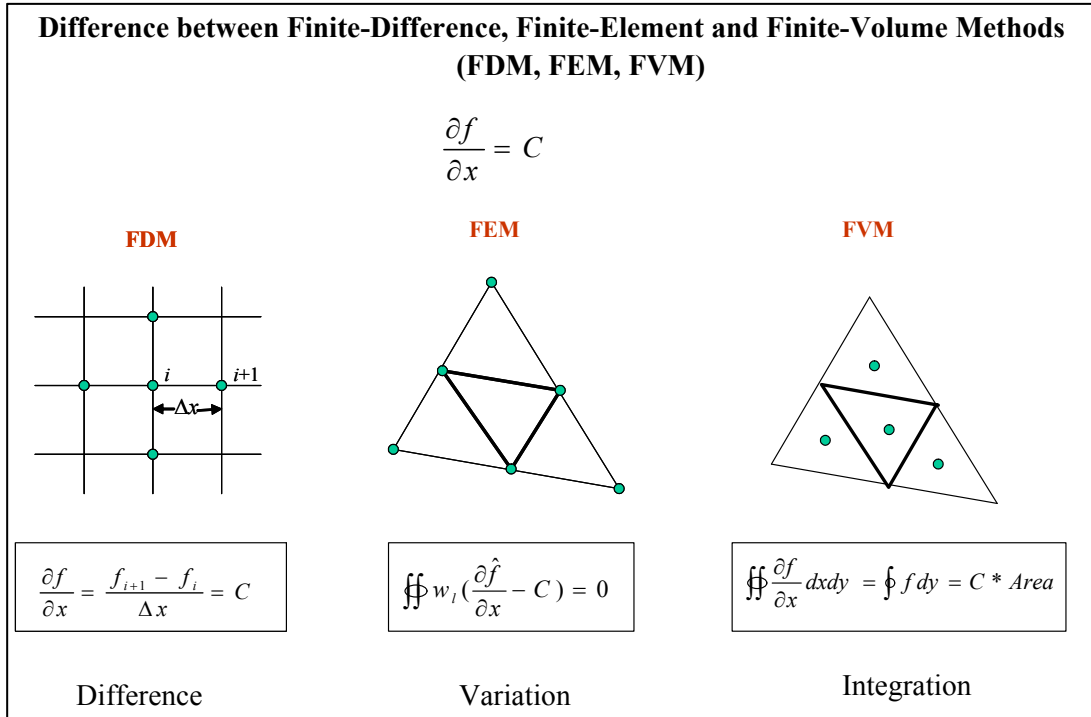


그림 3.3.4 유한차분모델, 유한요소모델, 유한체적모델 비교 (Chen, FVCOM workshop 2006)

(1) 지배방정식

FVCOM 모델은 연속방정식과 수평방향 운동방정식, 열염보존 방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질보존방정식들로 구성되어 있으며, 염 및 열보존 방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다.

수직방향으로 σ 좌표계를 사용하고 수평방향으로는 삼각형의 가변격자를 사용한다. 2.5 방정식 난류마감모형(Mellor & Yamada, 1982)을 사용하며, 질량보존 기법을 이용한 조건대 처리가 가능하고, 수평와동 점성계수로 Smagorinsky의 수평 확산 기법을 사용한다.

(2) Cartesian Coordinate의 기본 방정식

기본 방정식은 운동량, 연속성, 온도, 염분, 밀도 방정식으로 되어있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \tag{3.3.13}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \tag{3.3.14}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3.3.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3.16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T \quad (3.3.17)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial S}{\partial z}) + F_S \quad (3.3.18)$$

$$\rho = \rho(T, S) \quad (3.3.19)$$

x, y, z : 동쪽, 북쪽, Cartesian 좌표계의 수직좌표

u, v, w : 각 x, y, z 의 속도 요소

T : 수온

S : 염분

ρ : 밀도

f : Coriolis 계수

g : 중력가속도

K_m : 수직 난류 점성 계수

K_h : 열의 수직 난류 확산 계수

F_u, F_v, F_T, F_S : 수평 운동량, 열, 염의 확산

여기서 K_m 와 K_h 의 변수는

전체 수심은 $D=H+\zeta$, 여기서 H 는 저면으로부터의 수심이고 ζ 은 자유 수면의 높이이다. 여기서 K_m 와 K_h 의 변수는 Mellor & Yamada(1982)의 2.5 방정식 난류마감모형을 사용하고 있다.

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + u \frac{\partial q^2}{\partial x} + v \frac{\partial q^2}{\partial y} + w \frac{\partial q^2}{\partial z} = 2(P_s + P_b - \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (K_q \frac{\partial q^2}{\partial z}) + F_q \quad (3.3.20)$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} + u \frac{\partial q^2 l}{\partial x} + v \frac{\partial q^2 l}{\partial y} + w \frac{\partial q^2 l}{\partial z} = l E_1 (P_s + P_b - \frac{\tilde{W}}{E_1} \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z}) + F_l \quad (3.3.21)$$

$q^2 = (u^2 + v^2)/2$ 은 난류운동에너지, l 은 난류길이, K_q 는 난류운동에너지의 수직난

류점성계수, F_q 와 F_l 은 각각 난류운동에너지의 수평확산과 길이를 나타낸다. $P_s = K_m(u_z^2 + v_z^2)/2$ 와 $P_b = (gK_h\rho_z)/\rho_0$ 는 전단력과 부력을 나타낸다. $\varepsilon = q^3/B_l$ 은 난류소멸항, $W = 1 + E_2 l^2 / (\kappa L^2)$ 은 벽에 근접한 함수, $L^{-1} = (\zeta - z)^{-1} + (H + z)^{-1}$, $\kappa = 0.4$ 는 Von Kármán 수이다. H 는 수심, ζ 는 자유표층수면높이이고, F_q 와 F_l 은 수평확산의 영향을 줄이고 유지하게 한다.

$$K_m = lqS_m, \quad K_h = lqS_h, \quad K_q = 0.2lq \quad (3.3.22)$$

바람장에 의한 난류확산계수(ν_w)는 해수면 마찰속도에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_w = \lambda_* u_{*s} \quad (3.3.23)$$

여기에서 λ_* 는 조화상수이며 해수면 마찰속도 u_{*s} 는 다음과 같다

$$\rho_0 u_{*s} = \tau_s^{1/2} = (\tau_{sx}^2 + \tau_{sy}^2)^{1/2} \quad (3.3.24)$$

수평확산은 수평방향 격자간격과 유속변화의 크기에 비례하게 적용되었다 (Smagorinsky, 1963).

$$\nu_H = C_{m0} \Delta x \Delta y D_T, \quad \lambda_H = C_{s0} \Delta x \Delta y D_T \quad (3.3.25)$$

$$D_T^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \quad (3.3.26)$$

여기서 Δx , Δy 는 수평방향 격자간격이며, C_{m0} 와 C_{s0} 는 0.2(Oey and Chen, 1992b)를 적용하였다.

수온을 나타내는 표층과 바닥 층의 경계는 다음식과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho c_p K_h} [Q_n(x, y, \zeta, t)], \quad z = \zeta(x, y, t) \quad (3.3.27)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{A_H \tan \alpha}{K_h} \frac{\partial T}{\partial n}, \quad z = -H(x, y) \quad (3.3.28)$$

여기서 $Q_n(x, y, t)$ 은 표층의 열흐름망이다.

식 (3.3.28)에서 A_H 는 수평열확산계수, α 는 바닥수심경사, 그리고 n 은 수평좌표 이다.

염분의 표층과 저층 경계는:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = \frac{s(\hat{P} - \hat{E})}{K_h \rho}, \quad \text{at } z = \zeta(x, y, t) \quad (3.3.29)$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{A_H \tan \alpha}{K_h} \frac{\partial S}{\partial n}, \quad \text{at } z = -H(x, y) \quad (3.3.30)$$

여기서 \hat{P} 와 \hat{E} 는 각각 강수와 증발의 비율이다.

u, v, w 의 표층과 저층의 경계는:

$$K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o} (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \quad w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad \text{at } z = \zeta(x, y, z) \quad (3.3.31)$$

$$K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o} (\tau_{bx}, \tau_{by}), \quad w = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y}, \quad \text{at } z = -H(x, y) \quad (3.3.32)$$

여기서 (τ_{sx}, τ_{sy}) 와 $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_d \sqrt{u^2 + v^2} (u, v)$ x, y 는 표층바람과 바닥마찰의 요소이다. 전단응력 C_d 는 바닥에서 부터의 높이 z_{ab} 에 의해 결정된다.

$$C_d = \max \left(k^2 / \ln \left(\frac{z_{ab}}{z_o} \right)^2, 0.0025 \right) \quad (3.3.33)$$

여기서 $k=0.4$ 는 von Karman 계수이고 z_o 는 바닥의 거친 정도를 나타내는 변수이다. 운동량과 열과 염흐름은 차단된 공간에서 각각:

$$v_n = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial s}{\partial n} = 0 \quad (3.3.34)$$

여기서 v_n 은 속도, n 은 경계에서의 좌표이다.

(3) σ -coordinate의 지배방정식

불규칙한 바닥지형에 수직좌표계로 σ -coordinate를 사용했다.

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H + \zeta} = \frac{z - \zeta}{D} \quad (3.3.35)$$

여기서 σ 는 저층($\sigma = -1$)에서 부터 표층($\sigma = 0$)까지 이다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0 \quad (3.3.36)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD \\ & = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gD}{\rho_o} \left[\frac{\partial}{\partial x} (D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma') + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + DF_x \end{aligned} \quad (3.3.37)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} - fuD \\ & = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gD}{\rho_o} \left[\frac{\partial}{\partial y} (D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma') + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + DF_y \end{aligned} \quad (3.3.38)$$

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta u D}{\partial x} + \frac{\partial \theta v D}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial \theta}{\partial \sigma}) + D\hat{H} + DF_{\theta} \quad (3.3.39)$$

$$\frac{\partial s D}{\partial t} + \frac{\partial s u D}{\partial x} + \frac{\partial s v D}{\partial y} + \frac{\partial s \omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial s}{\partial \sigma}) + DF_s \quad (3.3.40)$$

$$\rho = \rho(\theta, s) \quad (3.3.41)$$

이 σ -좌표는 수평확산 형태를 갖는다. 이 때

$$DF_x \approx \frac{\partial}{\partial x} [2A_m H \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [A_m H (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \quad (3.3.42)$$

$$DF_y \approx \frac{\partial}{\partial x} [A_m H (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y} [2A_m H \frac{\partial v}{\partial x}] \quad (3.3.43)$$

$$D(F_\theta, F_s, F_{q^2}, F_{q^2 l}) \approx [\frac{\partial}{\partial x} (A_h H \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h H \frac{\partial}{\partial y})](\theta, s, q^2, q^2 l) \quad (3.3.44)$$

A_m 와 A_h 는 각각 수평의 난류, 열확산 계수이다.

표층 $\sigma = 0$,

$$(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma}) = \frac{D}{\rho_o K_m} (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = \frac{D}{\rho c_p K_h} [Q_n(x, y, t) - SW(x, y, 0, t)]$$

$$\frac{\partial s}{\partial \sigma} = -\frac{s(P-E)D}{K_h}, \quad q^2 l = 0, \quad q^2 l = 0, \quad q^2 = B_1^{2/3} u_{\tau s}^2 \quad (3.3.45)$$

바닥 $\sigma = -1$,

$$(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma}) = \frac{D}{\rho_o K_m} (\tau_{bx}, \tau_{by}), \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = \frac{\partial s}{\partial \sigma} = 0, \quad q^2 l = 0, \quad q^2 = B_1^{2/3} u_{\tau b}^2 \quad (3.3.46)$$

수평방향 유속의 해면 경계조건은 바람의 조건에 의한 해면 바람 응력(wind stress)으로서 다음의 식으로 계산된다.

$$\rho_o V_T \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z}, \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \right) = (\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_D^s (U_{10}^2 + V_{10}^2)^{1/2} (U_{10}, V_{10}) \quad (3.3.47)$$

항력계수(C_D^s) 산정에는 범용적으로 수치모델 상에서 적용되는 다음과 같은 여러 공식들이 있다.

- Large and Pond(1981)

$$C_D^s = 0.0012 \quad \text{if } |U_{10}| \leq 11\text{m/s} \quad (3.3.48)$$

$$C_D^s = 10^{-3}(0.49 + 0.065|U_{10}|) \quad \text{if } |U_{10}| \geq 11\text{m/s}$$

- Smith and Banke(1975)

$$C_D^s = 10^{-3}(0.63 + 0.066|U_{10}|) \quad (3.3.49)$$

- Geernaert et al.(1986)

$$C_D^s = 10^{-3}(0.43 + 0.097|U_{10}|) \quad (3.3.50)$$

- Charnock(1955)

$$\ln(z_a g / (a|U_{10}|^2)) - \ln C_D^s = \kappa / (C_D^s)^{0.5} \quad (3.3.51)$$

여기서, reference height $z_a = 10\text{m}$, $a = 0.014$ (Charnock 상수)

- Wu(1980)

$$C_D^s = 10^{-3}(0.8 + 0.065|U_{10}|) \quad (3.3.52)$$

(U_{10}, V_{10})은 10m 상공 대기에서의 x, y방향 풍속을 나타내며 공기의 밀도(ρ_a)는 1.2kg/m³ 이다. 상기에 제시된 식들에 대해 풍속에 따른 응력 계수 분포를 비교하여 <그림 3.3.5>에 나타내었다.

FVCOM 모델에서 C_D^s 는 Large and Pond(1981)가 제안한 식을 다음과 같이 수정하여 사용하였다.

$$C_D^s = 0.0012 \quad \text{if } |U_{10}| \leq 11\text{m/s} \quad (3.3.53)$$

$$C_D^s = 10^{-3}(0.49 + 0.065|U_{10}|) \quad \text{if } |U_{10}| \geq 11\text{m/s}$$

$$C_D^s = 10^{-3}(0.49 + 0.065*25) \quad \text{if } |U_{10}| \geq 25\text{m/s}$$

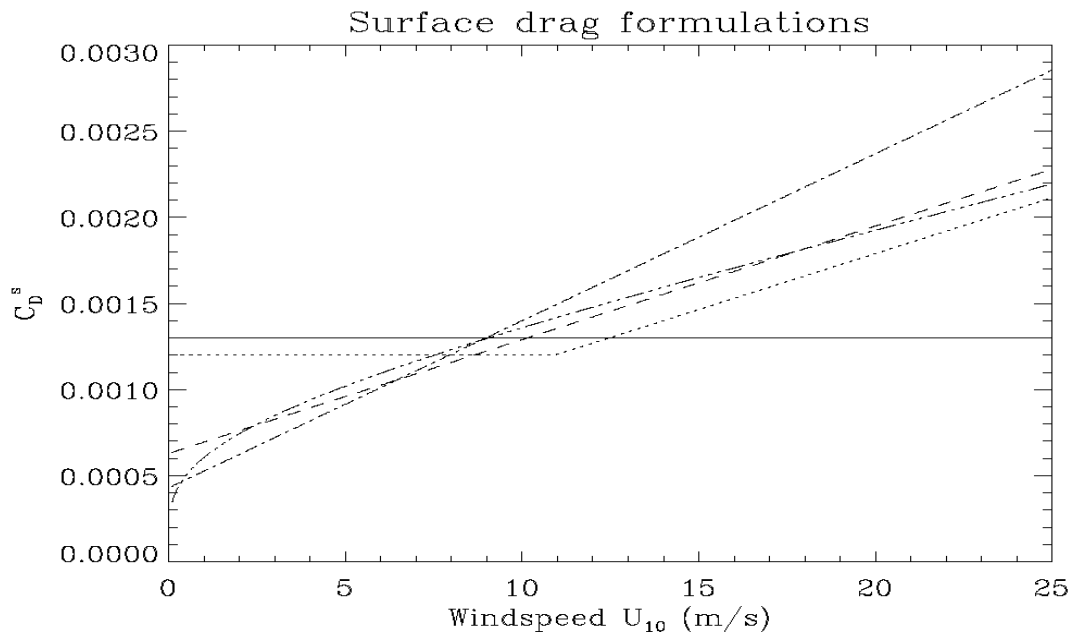


그림 3.3.5 바람 응력계수 산정식 비교, Large and Pond (dots), Smith and Banke (dashes), Geernaert et al. (dash-dots), Charnock (dash and 3 dots)

(4) Unstructured grids

유한요소법과 유사하며, 수평적으로 겹치지 않는 삼각형의 가변격자이다. 세 개의 노드와 중심, 세 개의 옆면으로 이루어진다.

여기서 N과 M은 모델 계산 영역의 전체 중심점과 노드의 수로 한다.

$$[X(i), Y(i)], \quad i = 1 : N \tag{3.3.54}$$

$$[X_n(j), Y_n(j)], \quad j = 1 : M \tag{3.3.55}$$

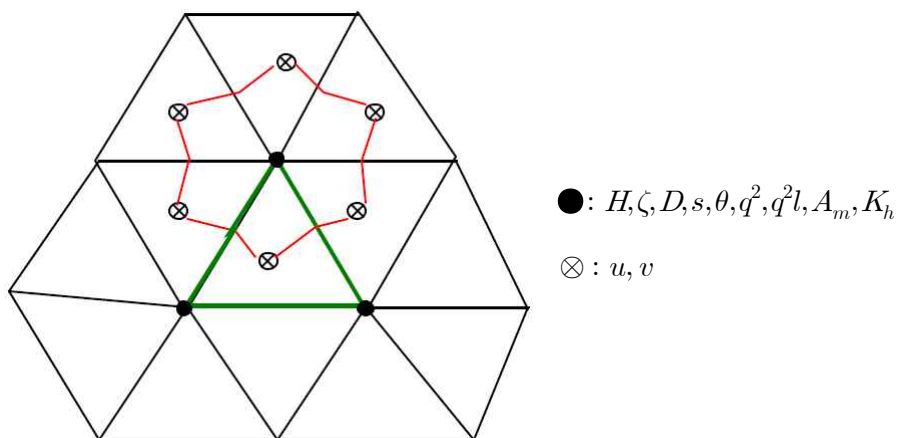


그림 3.3.6 FVCOM의 삼각형 가변격자

(5) Wet/Dry

노드에서의 wet/dry는 아래의 식을 기준으로 판별한다.

$$\begin{cases} wet, & \text{if } D = H + \zeta + h_B > D_{\min} \\ dry & \text{if } D = H + \zeta + h_B \leq D_{\min} \end{cases} \quad (3.3.56)$$

삼각셀에서는 다음과 같은 wet/dry의 판별기준이 적용된다.

$$\begin{cases} wet, & \text{if } D = \min(h_{B,\hat{i}}, h_{B,\hat{j}}, h_{B,\hat{k}}) + \max(\zeta_{\hat{i}}, \zeta_{\hat{j}}, \zeta_{\hat{k}}) > D_{\min} \\ dry & \text{if } D = \min(h_{B,\hat{i}}, h_{B,\hat{j}}, h_{B,\hat{k}}) + \max(\zeta_{\hat{i}}, \zeta_{\hat{j}}, \zeta_{\hat{k}}) \leq D_{\min} \end{cases} \quad (3.3.57)$$

(6) 모델의 구성

기본 해수유동 모델에는 조석, 바람, heat flux, 강수, 증발, 하천 유출, 지하수 등이 외력으로 들어간다. 좌표로는 Cartesian 및 Spherical 좌표가 모두 이용된다. 이 모델은 MPI 병렬 사용이 가능하여 방대한 모델 계산시간을 효율적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 모델결과는 netcdf 및 binary로 출력된다. 추가 모듈로는 조건대 처리에 유용한 3D wet/dry가 있고, 3D 퇴적물, 생물, 수질, 입자추적, Nudging 및 OI data assimilation이 가능하며 최근에 Unstructured 격자버전의 SWAN이 연동되어 파랑모형과의 연계가 가능하게 되었다.

(7) 우리나라 연안에 대한 폭풍해일 모델 수립

FVCOM 모델을 이용하여 한반도 일대에 대해 연안 최소 격자가 약 1 km, 약 300m 그리고 약 70m 로 3가지의 다른 격자망에 대한 폭풍해일 모델을 수립하였다. 수립된 모델의 각 격자망의 절점과 셀의 수는 다음 표 3.3.2에 나타낸 바와 같으며 그림 3.3.7, 3.3.8 그리고 3.3.9과 같다.

표 3.3.2 격자별 절점 및 셀의 개수

	1km 격자	300m 격자	70m 격자
절점 수(node)	130,439 개	240,517 개	278,661 개
셀 수(element)	254,138 개	455,906 개	511,790개

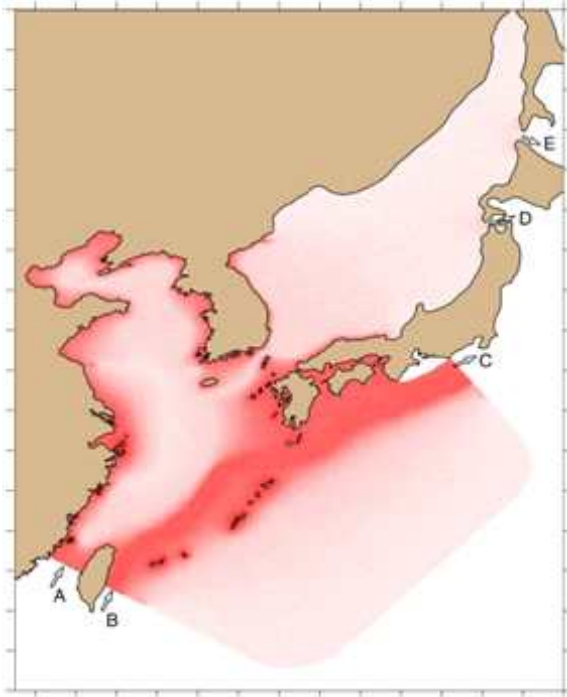


그림 3.3.7 최소격자간격 1km 격자망



그림 3.3.8 최소격자 300m 격자망

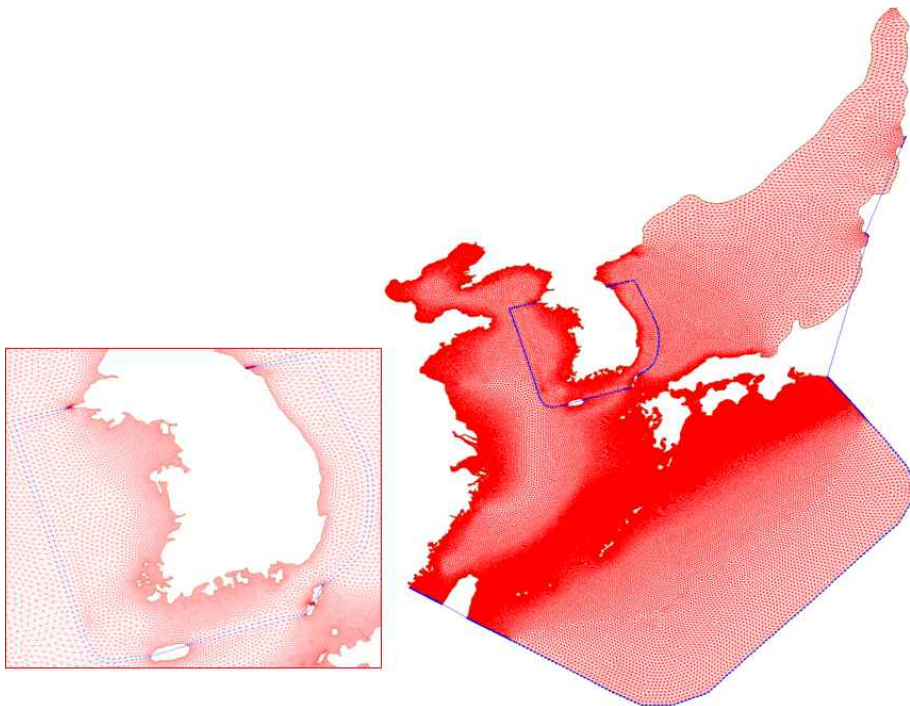


그림 3.3.9 최소격자간격 70m 격자망

2. 폭풍해일 모델의 비교 평가, 검증

가. 과거 8개 태풍에 대한 해일고 검토

그림 3.3.10에는 1951년부터 2007년까지 136개 태풍의 이동 경로를 나타내었다. 국립

해양조사원의 1분 및 1시간 관측 자료를 사용하여, 각각의 태풍기간의 해일고를 산출하였다. 그림 3.3.11은 이러한 태풍 통과시 관측된 자료의 횡수와 50 cm 이상의 해일고를 기록한 횡수를 나타낸 것이다. 목포의 경우를 살펴보면 태풍시 관측된 검조소 관측자료가 가장 많았으며 (116 회), 50cm 이상의 해일고를 관측한 횡수 또한 32회로 가장 많았다.

단순히 일정 파고 이상과 이하로 나눈 구분은 태풍 통과시 검조소자료의 유무를 고려하여야 하기 때문에 엄밀히 말해서 잦은 해일고의 발생을 나타내지는 않는다. 하지만, 이 그림을 통하여 태풍에 의해 50 cm 이상의 해일고 발생은 남서해안에 많이 나타남을 알 수 있다. 그림 3.1.12는 각각의 관측소에서 기록된 최대해일고와 이 시기의 태풍명을 나타냈었다. 관측된 최대 해일고는 태풍 ‘매미’ 내습시 마산에서 관측된 212 cm가 가장 컸으며, 여수와 통영에서도 169 cm 와 161 cm로 기록되었다. 해일고 발생기록이 많은 목포의 최대 해일고로는 Forrest (8310) 통과시 80 cm로 관측되었다.

동해의 경우는 깊은 수심으로 인하여 바람에 의한 해수면 상승보다는 기압효과에 의해 해수면 상승이 발생하는 것으로 추정되며, 따라서 남서해안보다는 상대적으로 작은 최대 해일고를 기록한 것으로 사료된다. 그러나 얕은 수심으로 인하여 바람효과가 클 것으로 예상되는 서해의 경우도 태풍이 직접적으로 통과한 Prapiroon (0012) 경우를 제외하면 동해와 크게 다르지 않은 결과를 보이고 있다.

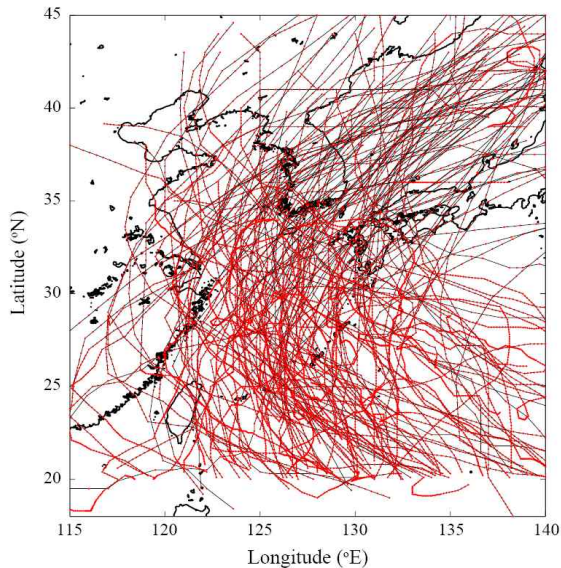


그림 3.3.10 Typhoon tracks from 1951 to 2007

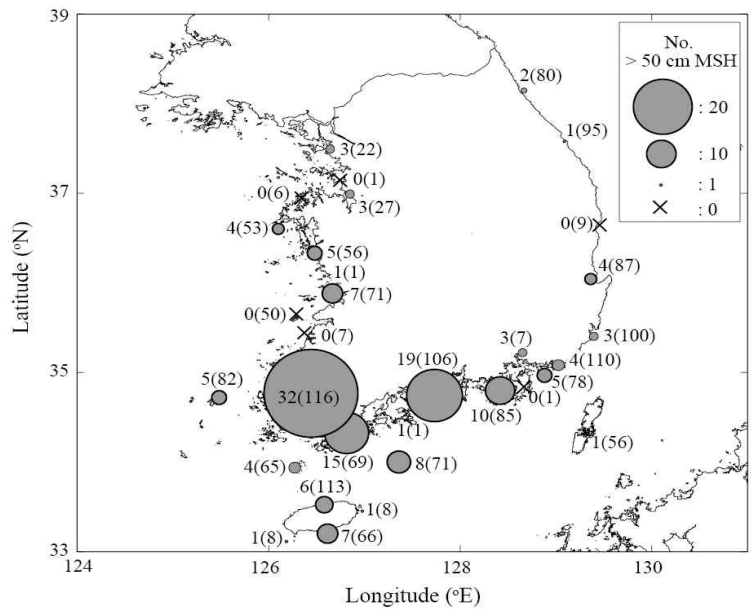


그림 3.3.11 각 조위관측소에서 관측된 50cm 이상의 폭풍해일고의 나타낸 횟수

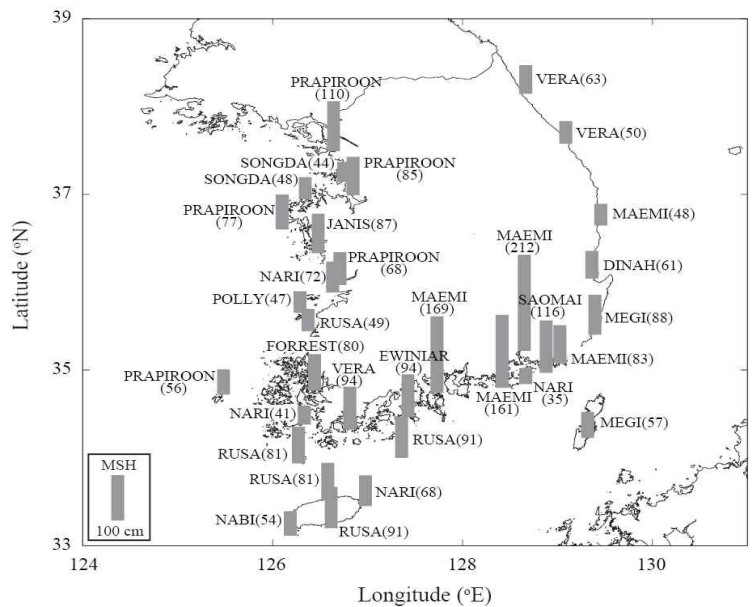


그림 3.3.12 각 조위관측소에서 관측된 최대 폭풍해일고 (cm)

이와 같은 방법으로 표 3.3.3와 같이 8개의 태풍을 선정하여 FVCOM 과 MOHID를 이용한 수치 실험을 수행하였다.

표 3.3.3 수치 실험에 사용된 8개의 태풍

No.	Typhoon Number	Typhoon Name	Minimum Central Pressure(hPa)	Period	Remark
1	5914	SARAH	905	1959. 09.14 - 09.18	
2	7207	RITA	955	1972. 07.14 - 07.27	
3	8613	VERA	925	1986. 08.17 - 08.30	
4	8712	DINAH	915	1987. 08.27 - 09.01	
5	9713	WINNIE	920	1997. 08.13 - 08.25	
6	0012	PRAPIROON	965	2000. 08.26 - 09.01	
7	0209	FENGSHEN	920	2002. 07.13 - 07.28	
8	0314	MAEMI	910	2003. 09.08 - 09.13	

FVCOM과 MOHID 모두 태풍 파라메타 모델을 이용한 기압과 바람장을 기상 입력으로 하였고, 조석에 대한 개방 경계 조건은 NAO99jb의 16개 분조를 이용하였다. 두 모델 모두 상세격자 기준 시간 간격을 10 sec 로 계산하였으며, 조석 계산 시 3일간 위밍업 하였다. 즉, 앞서 언급한 격자 체계를 제외하고는 모든 조건을 동일하게 설정하여 수치 실험을 수행하였다.

8개 태풍에 대한 수치실험의 결과는 표 3.3.4에 간략하게 제시하였다. 표에는 관측결과가 존재하는 지역 중 각각의 태풍이 발생시킨 최대 해일고의 모델 결과를 관측 결과와 같이 나타내었다. 태풍 '매미'의 경우 유일하게 1분 관측 자료가 존재하는데, 1시간 관측결과와 비교했을 때, 수치 실험의 결과는 크게 나타났지만, 1분 관측결과와 비교하면 유사한 결과를 보였다. 내륙에 직접 영향을 미친 매미를 제외한 다른 태풍은 관측결과와 수치 실험 결과에 다소 큰 차이를 보이는데, 이는 두 가지 원인을 생각할 수 있다. 하나는 태풍 파라메타 모델의 특성상 태풍 주변에서 멀어질수록 기압과 바람의 정확도가 떨어지는 입력조건에서의 오차를 내포하는 것이고, 또 하나는 관측 간격이 1시간 이내인 보다 정밀한 관측 자료의 부재로 인한 정밀하면서 객관적인 비교 관측 자료의 부재로 인한 차이로 볼 수 있다. 이에 수치 모델에 대한 평가 및 검증 작업은 태풍 '매미'를 중점적으로 수행하였고, FVCOM과 MOHID 각각의 경우에서 조석·폭풍해일의 상호작용에 대한 분석, 정밀 격자에서의 모델 결과, 2차원 모델과 3차원 모델의 결과를 비교하여 모델에 대한 평가를 실시하였다.

표 3.3.4 8개 태풍에 대한 수치 실험에서 FVCOM 과 MOHID의 모델 결과와 비교

관측정점		5914	7207	8613	8712	9713	0012	0209	0314
인천	관 측	51	-	57.0	40.4	-	110.0	24.0	17.0
	FVCOM	43.8	-	57.6	27.1	-	143.7	24.5	41.34
	MOHID	45.1	-	56.2	28.3	-	150.0	25.1	43.1
군산	관 측	-	-	44.0	31.0	-	68.0	23.0	41.0
	FVCOM	-	-	77.7	30.3	-	63.1	24.6	45.2
	MOHID	-	-	70.1	30.5	-	54.0	24.5	44.3
목포	관 측	-	67	-	37.0	28.0	59.0	29.0	36.0
	FVCOM	-	54.5	-	34.6	20.7	37.7	21.5	40.9
	MOHID	-	56.3	-	37.1	26.0	42.0	18.0	29.0
통영	관 측	-	-	61.0	55.0	15.0	19.0	12.0	161.0
	FVCOM	-	-	35.9	64.3	8.6	17.9	11.7	171.8
	MOHID	-	-	56.0	71.2	21.0	19.0	11.0	171.0
제주	관 측	-	47	51.0	50.0	12.0	37.0	28.0	44.0
	FVCOM	-	43.9	34.6	47.3	10.1	26.3	18.1	67.9
	MOHID	-	44.2	45.1	46.0	14.0	25.0	19.0	61.0
여수	관 측	-	36.0	71.0	22.0	15.0	25.0	19.0	169.0
	FVCOM	-	50.6	53.8	63.3	10.2	25.1	19.3	189.6
	MOHID	-	45.3	59.2	63.0	19.0	27.0	18.5	171.0
마산	관 측	-	-	-	-	-	-	-	212.0
	FVCOM	-	-	-	-	-	-	-	211.9
	MOHID	-	-	-	-	-	-	-	221.0
부산	관 측	-	-	49.0	73.0	9.0	12.0	14.0	83.0
	FVCOM	-	-	24.8	88.9	8.1	13.6	10.0	127.2
	MOHID	-	-	29.1	93.0	14.0	14.0	12.0	109.0
포항	관 측	-	-	36.0	61.0	8.0	8.0	16.0	52.0
	FVCOM	-	-	18.5	54.4	5.6	10.8	8.9	73.3
	MOHID	-	-	22.3	55.0	14.0	8.0	11.2	56.0
울릉	관 측	-	-	-	35.0	2.2	-	11.1	-
	FVCOM	-	-	-	31.2	5.5	-	9.14	-
	MOHID	-	-	-	-	-	-	-	-
속초	관 측	-	-	63.0	16.0	17.0	25.0	8.0	32.0
	FVCOM	-	-	32.6	13.0	6.4	15.4	9.9	23.9
	MOHID	-	-	37.5	12.0	7.0	15.0	9.0	27.0
울산	관 측	51	25	43.0	63.0	8.0	10.0	10.0	63.0
	FVCOM	-	14.9	21.1	60.1	7.4	12.0	9.5	68.0
	MOHID	-	16.3	35.1	69.0	34.0	19.0	9.2	61.0
목호	관 측	-	16	50.0	19.0	15.0	17.0	4.0	39.0
	FVCOM	-	13.1	24.8	18.2	5.4	13.2	5.0	39.3
	MOHID	-	14.2	32.3	17.0	12.0	11.0	6.0	42.0
가덕도	관 측	-	-	40.0	53.0	10.0	15.0	12.0	55.0
	FVCOM	-	-	28.6	80.7	7.1	14.7	9.9	79.0
	MOHID	-	-	30.2	88.0	15.0	16.0	10.2	149.0

표 3.3.4 (계속)

관측정점		5914	7207	8613	8712	9713	0012	0209	0314
거문도	관 측	-	-	54.0	45.0	15.0	20.0	22.0	89.0
	FVCOM	-	-	34.9	54.4	8.8	18.8	18.7	111.9
	MOHID	-	-	37.3	50.0	15.0	17.0	18.2	88.0
완도	관 측	-	-	94.0	20.0	15.0	39.0	25.0	56.0
	FVCOM	-	-	82.7	47.2	12.8	39.2	32.5	77.4
	MOHID	-	-	84.1	41.0	18.0	35.0	30.2	65.0
추자도	관 측	-	-	54.0	25.0	16.0	-	36.0	41.0
	FVCOM	-	-	43.4	40.7	10.5	-	19.6	51.0
	MOHID	-	-	45.4	39.0	14.0	-	20.3	47.0
서귀포	관 측	-	-	64.0	44.0	12.0	32.0	33.0	48.0
	FVCOM	-	-	37.0	45.9	9.1	23.9	25.3	67.2
	MOHID	-	-	63.1	50.0	17.0	23.0	15.2	61.0
대흑산	관 측	-	-	52.0	21.0	13.0	-	-	16.0
	FVCOM	-	-	52.5	32.8	10.8	-	-	18.0
	MOHID	-	-	53.2	32.0	16.0	-	-	27.0
위도	관 측	-	-	42.0	25.0	34.0	-	-	-
	FVCOM	-	-	44.7	32.8	15.0	-	-	-
	MOHID	-	-	43.2	31.0	25.0	-	-	-

** 관측 : 2003년 이전 1 시간 자료
2003년 이후 1 분 자료

나. 조석과 폭풍해일의 상호 영향 분석

태풍 저기압에 따른 효과와 연안역 바람에 의한 물의 밀립 등의 요인에 의해서 태풍해일이 발생하게 된다. 태풍해일 예측을 위해서는 검조소 주변 태풍의 풍속과 기압에 대한 시계열 자료가 필요하다. 본 연구에서는 태풍예보에 수록된 태풍중심위치, 중심기압, 최대풍속, 최대풍속반경 등의 자료로부터 태풍장을 재현하여 추정된 시간 공간적 자료로부터 수치모델에 적용하였다.

해양조사원에서 '연안해양정보 실시간제공 시스템'으로 제공하는 검조소 조위 관측 자료로부터 1시간 간격 고조 시계열을 만드는 방법은 다음과 같다. 우선 검조소 관측조위와 조화 예측 자료의 차이로부터 조석편차 시계열을 작성한다(1분 간격자료). 이 조석편차 시계열에 디지털 필터를 적용하여 장주기 고조와 단주기 풍파 성분 시계열을 분리한다(장주기와 단주기 구분 기준은 1시간을 적용). 이와 같이 추출된 각 1시간 동안의 자료로부터 고조 시계열의 평균치 자료와 1시간 풍파 자료의 RMS 시계열 자료를 작성한다.

본 연구에서 테스트한 8개 주요태풍의 경우 태풍이 진행함에 따라 해일 최대치가 나타나는 시간은 지역에 따라 다르게 나타난다. 해일 최대치가 나타나는 시간은 태풍에 의한 기압강하가 최대로 크게 나타나는 시간과 거의 일치한다. 해일예측에 있어서 핵심적

인 요소는 태풍강도와 태풍경로 뿐만 아니라 태풍의 이동속도, 수심(해저지형) 및 조석(간만조)에 따라 크게 좌우된다. 만조시 발생한 해일이 큰 피해를 준다는 사실 뿐 아니라 해일의 강도가 조석에 따라서 달라지는 점을 고려할 때, 해일예측에 있어서 실시간 조석 예측도 아주 중요하다.

(1) 태풍 '매미'의 관측 결과

FVCOM 모델과 MOHID를 이용한 조석과의 상호 작용에 의한 해일고의 영향에 대해 알아보기 위해서 태풍 '매미' 내습시의 해일고 산출 수치모의를 진행하였다. 태풍 매미는 2003년 9월 8일~9월 13일 사이에 발생하여 한반도에 기록적인 피해를 준 대형 태풍이다 (그림 3.3.13). 특히 2003년 9월 12일에 남해안 사천만으로 상륙하면서 광양만을 포함한 경상남도 일대 해안에 대규모 해일을 발생시키고, 많은 지역에서 기왕 최대 해일고 및 기왕고극조위를 기록하였다. 태풍 매미는 2003년 9월 11일 09시경에 중심기압 910hPa로 최저기압을 나타냈으며, 10분 평균 최대 풍속 54m/s, 최대크기 460 km(반경)를 기록하였다.

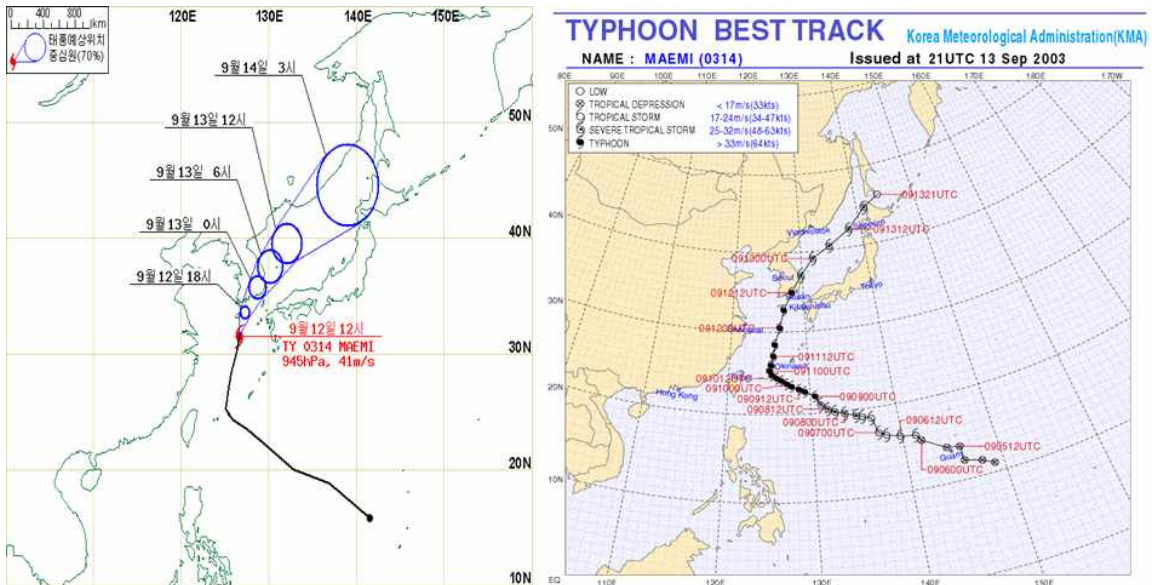


그림 3.3.13 태풍 매미(MAEMI)의 진로도(2003년 9월 8일~9월 13일)

표 3.3.5 태풍 '매미' 주요 지점 통과 일시(KMT)

12일 18시	12일 20시	12일 21시	12일 23시	13일 00시	13일 01시	13일 02시	13일 02시 30분
제주도 성산포 동쪽	경남 사천시 부근 상륙	경남 함안군 부근	대구 남서쪽 20km 부근	대구 북동쪽 35km 부근	경북 청송군 부근	경북 울진군 부근	동해안 진출

9월 12일~13일간 각 검조소의 실측 자료를 예보값과 분석하여 해일관측 성과를 4개 해역으로 나누어보면 다음과 같다.

◎ 남해 서부역

추자도, 완도, 거문도와 제주도에서는 태풍 '매미'가 제주도를 통과하기 이전인 12일 10~12시 사이에 해일이 발생하였는데, 고조위 편차는 30cm 이하이고 고조시 편차도 -23~+23분에 불과하다. 고조위 편차가 높지 않은 것은 태풍이 제주도를 통과하여 사천만으로 상륙하기 전인 16~10시 사이에 이 해역 조석은 저조에서 창조 중반에 해당하기 때문에, 태풍 통과전의 고조위가 다소 상승하고 태풍 통과후의 고조위는 반대로 음의 해일을 나타내었다. 그러나, 태풍이 각 검조소를 통과할 시점에 나타난 최대 조위편차는 제주도 완도에서 64~71cm, 거문도에서 112cm를 기록하였다.

◎ 남해 중부역

광양과 여수에서는 태풍 '매미'가 사천만에 상륙하는 시각인 12일 20시(예보 고조시 약 2시간 전)에 각각 고조위 편차 95cm와 43cm를 나타냈는데, 광양의 고조위 편차가 여수보다 50cm 이상 큰 것은 해일파가 여수 해만을 거쳐 수심이 얕은 광양만으로 파급되면서 증폭된 것으로 판단된다. 광양과 여수에서의 최대 조위편차는 예보 고조시 약 2시간 전에 태풍이 통과할 때 해일이 발생하여 최고조위를 나타내면서 그 값은 각각 176cm, 137cm로서 고조위 편차보다 훨씬 큰 값을 기록하였다.

◎ 남해 동부역

남해동부 해역에서는 태풍 '매미'가 사천만에 상륙한 시각인 12일 20시 후 1~2시간 사이에 고조위 편차가 최대로 나타났는데 통영 143cm 마산 248cm, 부산에서 77cm를 기록하였다. 실측 고조시는 통영에서 20시 45분이고 마산에서 21시 48분인데, 예보 고조시는 모두 22시 03분으로서 마산에서 약 1시간 늦게 나타났다. 이는 통영이 어느 정도 외해에 개방되어 있기 때문에 태풍 통과 직후 해일고가 최대를 나타낸 후 감소한 반면에, 반차폐성 해만의 끝에 위치한 마산은 지형적 요인에 의한 해일파의 증폭과 남풍 계열의 바람에 의한 해수퇴적 효과가 중첩되어 태풍 통과후 1시간에 해일이 나타났다. 또한, 마산과 부산에서 부진동 효과에 의하여 해일고는 각각 13cm 및 25cm 증폭되었다. 부산은 태풍 중심에서 떨어져 있고 외해에 비교적 개방되어 있기 때문에 77cm의 고조위 편차를 나타내었다. 통영, 마산 및 부산의 최대 조위편차는 각각 170cm, 248cm 및 79cm를 기록하였다.

◎ 동해 남부역

태풍 “매미”가 울진을 통과하기 전후에 울산, 포항, 후포에서는 고조위 편차가 50cm 내외를 나타내었고, 최대 조위편차는 고조위 편차보다 약간 큰 50~70cm를 나타내었다.

이상을 종합하면, 태풍 ‘매미’가 사천만을 통과한 시각인 9월 12일 20시경 이후 태풍의 위험 반원에 위치한 남해안의 동측인 통영, 마산 및 부산 등에서 부진동을 제외한 해일고(고조위편차)는 각각 143cm, 248cm 및 77cm의 높은 값을 나타냈다. 특히, 마산항에서는 예보 고조위에 위치하여 강한 남풍에 의한 긴 취송거리에 걸친 해수수송에 의한 해수퇴적 그리고 부진동과 해파가 가세함으로서 마산항에서의 해일피해가 더욱 심했던 것으로 보인다. 그런데 마산항의 부진동은 진폭이 13cm 밖에 안되었지만 여수항의 부진동은 진폭이 115cm에 달하였으며, 해파는 가덕도에서 최대유의파고 7~8m가 관측되었으므로 마산항에서도 상당한 해파가 일어났을 것으로 보인다. 다행히, 태풍 ‘매미’가 제주도, 거문도 등을 통과한 시각은 저조시였으며 여수, 통영항에서는 고조전 2시 및 1시였으므로 해일이 고조시각과 겹치지 않았으며 부산항과 울산항, 후포항에서는 해일이 고조시각과 겹쳤으나 태풍 중심에서 약간 떨어져 있어 큰 해일은 일어나지 않은 것으로 보아야 할 것이다.

모델이 각 영역에서 각 상황별로 어떻게 폭풍해일을 잘 재현하는지와 조석과 폭풍해일의 상호영향 분석에 대한 연구를 위해 다음과 같이 세 가지의 경우에서 수치 실험을 수행하였다.

- i) 조석, 기압, 해상풍 모두 적용 (case-TS)
- ii) 조석만을 고려 (case-T)
- iii) 기압과 바람 자료만을 이용하여 수치 실험 (case-S)

즉, case-S 와 case-TS에서 case-T를 차감한 결과를 비교하여 조석이 폭풍해일에 미치는 영향을 수치 실험을 통해 그 상호 영향에 대하여 분석하였다.

(2) FVCOM을 이용한 조석과 폭풍해일의 상호 영향 분석

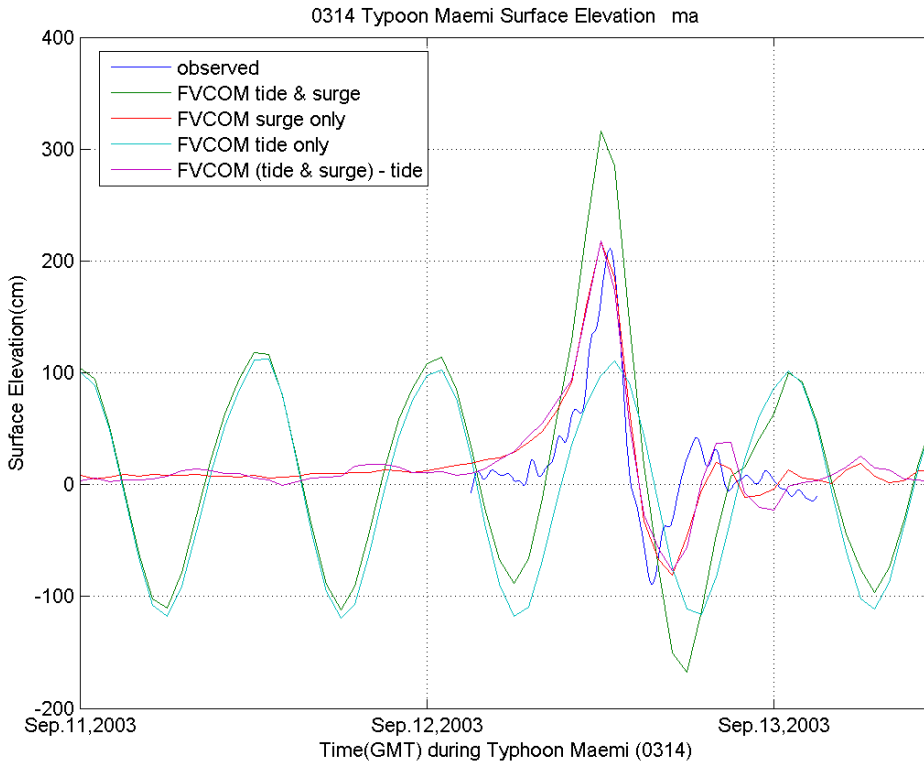


그림 3.3.14 태풍 매미 내습시의 조위관측소에서의 모델 결과와 관측치 비교

그림 3.3.14에는 각 케이스별로 모델결과와 1분단위의 관측 결과값이 제시되어있다. 연안에서 최소 격자크기가 약 300~400m까지 적용된 정밀 격자망이 사용되었으며 자세한 격자망은 그림 3.3.15에 나타나 있다. 그림 3.3.15에서 나타난 결과를 보면 FVCOM 모델은 관측치를 매우 정확히 잘 재현하고 있으며, 조석이 포함된 해일고 모의에서 조위성분을 제외한 결과와 태풍에 의한 해일고만 모의한 것을 비교하였을 때도 1분 간격 해일고 관측치와 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 매미의 경우 완전히 만조가 되기 약간 전에 최대 해일고를 보였으므로 상대적으로 매우 큰 피해를 입힌 것으로 나타났다. 조석성분이 포함되어 해일고가 모의된 경우에서 조석만 모의한 결과를 선형적으로 빼주어 생성한 결과와 태풍에 의한 해일고만 모의한 결과를 비교해 보면 마산의 경우는 뚜렷한 차이를 보이지 않는 것으로 나타났지만 이는 지역별로 편차가 있는 것으로 나왔으며, 통상 조석과의 비선형 효과가 고려된 경우인 조석과 함께 돌린 경우가 더 큰 해일고를 보이는 것으로 모의되었다. 각 관측지점에서의 주요 해일고의 최대치와 비선형 효과에 의한 모델 최대치 차이는 다음의 표에 나타내었다. 태풍의 효과가 미미했던 동해에서는 상대적으로 작은 편차를 보였고 태풍의 서측에 위치한 여수, 완도, 통영, 제주 등의 자료에서는 상대적으로 비선형 효과가 크게 나타나는 것으로 모의되었다.

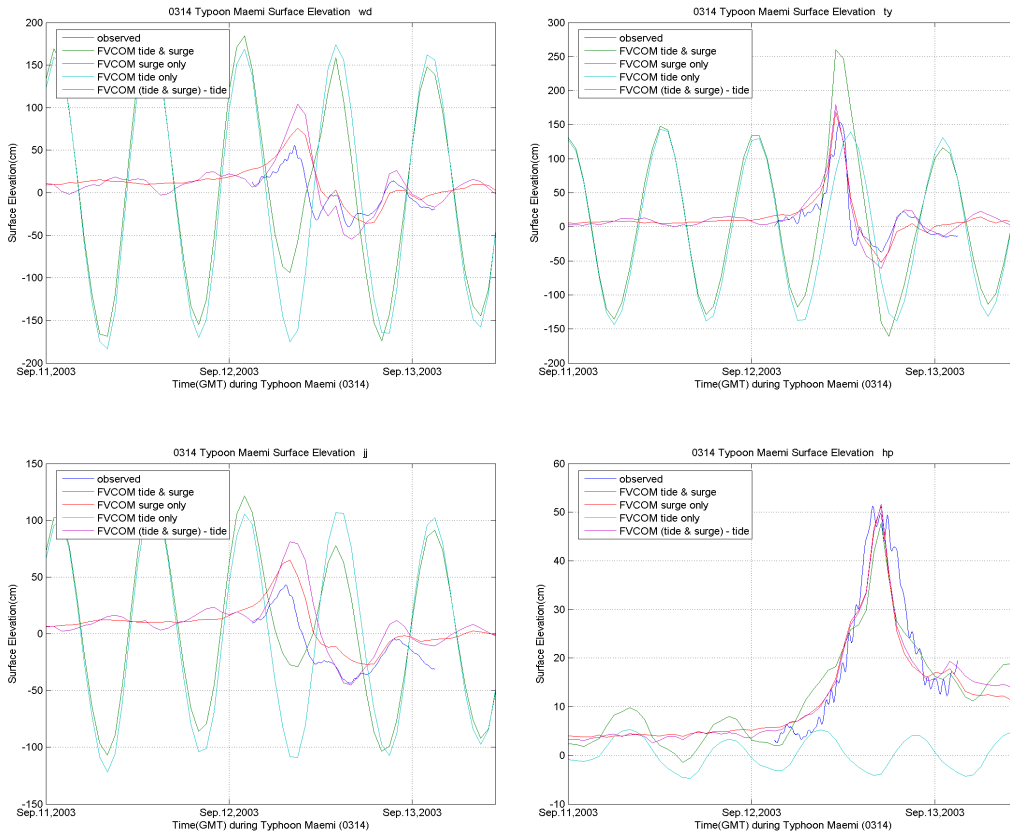


그림 3.3.15 주요 관측점에서의 조석 포함한 해일고 산출 모의 결과 비교(완도, 통영, 제주, 후포 : 좌상부터 시계방향)

표 3.3.6 조석 효과 반영된 해일고 모의 결과 비교(cm)

관측소	관측최대값	모델 해일고 최대값 ①surge only	모델 해일고 최대값 ②(tide+surge)-s urge only	비선형 효과 (②-①)
여수(ys)	167.5	184.9 (17.4)	195.6 (28.1)	10.8
완도(wd)	55.4	75.6 (20.2)	104.4 (49.0)	28.8
통영(ty)	153.4	169.4 (16.0)	179.5 (26.1)	10.1
서귀포(sg)	47.5	60.8 (13.3)	59.3 (11.8)	-1.5
부산(ps)	82.7	124.6 (41.9)	123.3 (40.6)	-1.3
포항(ph)	60.2	74.4 (14.2)	75.2 (15.0)	0.8
마산(ma)	211.0	216.9 (5.9)	217.9 (6.9)	1.0
제주(jj)	43.1	65.2 (22.1)	81.1 (38.0)	15.9
후포(hp)	51.3	51.2 (-0.1)	51.7 (0.4)	0.5

(2) MOHID를 이용한 조석과 폭풍해일의 상호 영향 분석

그림 3.3.16은 태풍 '매미' 시 조위 관측소에서의 관측 결과와 모델결과를 나타낸다. 모델은 폭풍해일만을 고려한 경우 (Only surge)와 조석과 함께 고려한 경우(TS)에서 조

석만을 고려한 경우(T) 를 제거한 결과, 즉 조석의 효과를 고려한 경우(With tide)로 나누어서 제시하였다. 전반적으로 폭풍해일의 수치 실험의 결과는 관측 결과와 유사하게 나타났고, 조석의 영향은 상황에 따라 다른 결과를 보였다. 폭풍 해일에서의 조석의 영향을 보다 객관적으로 파악하기 위하여 각 격자점 별 Only surge와 With tide의 결과를 비교해 보았다. 그림 3.3.17에서와 같이 $S - (TS - T)$ 는 조석에 의한 조위 변화와 같은 패턴으로 나타나는 것이 확인 되었다. 즉, 조위가 높은 경우 S 가 더 크고, 조위가 낮을 경우 (TS-T)가 더 크다. 따라서 실제적으로 조석의 영향은 폭풍 해일고를 낮춰주는 역할을 한다. 이는 수심이 낮은 연안에서 이 비선형성은 더욱 두드러지는데 수심이 낮을수록 해일고는 조석에 민감하게 될 것이고, 또한 바람의 영향도 더 크게 작용하게 되므로 이와 같은 결과를 보이는 것으로 사료된다.

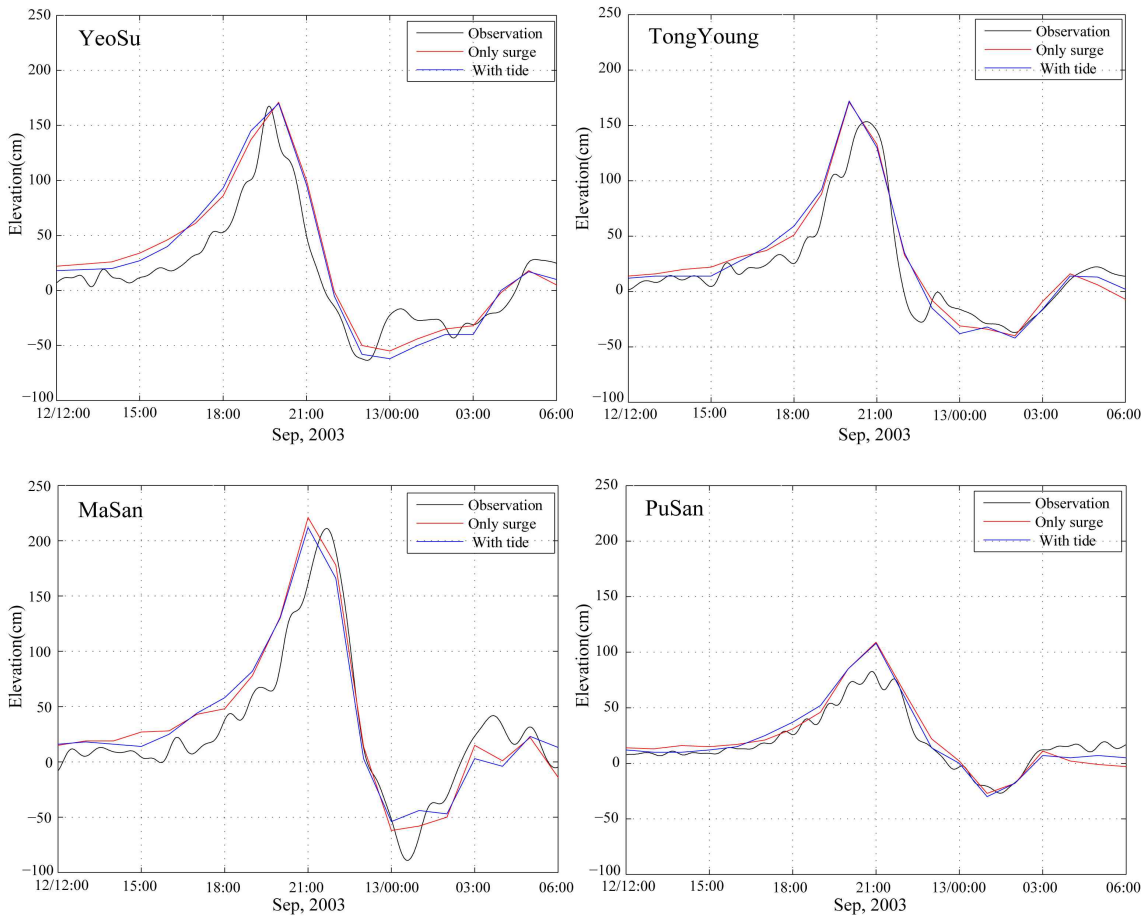


그림 3.3.16 태풍 '매미' 내습 시 여수, 통영, 마산 그리고 부산에서의 폭풍해일 수치 모델 (MOHID) 결과

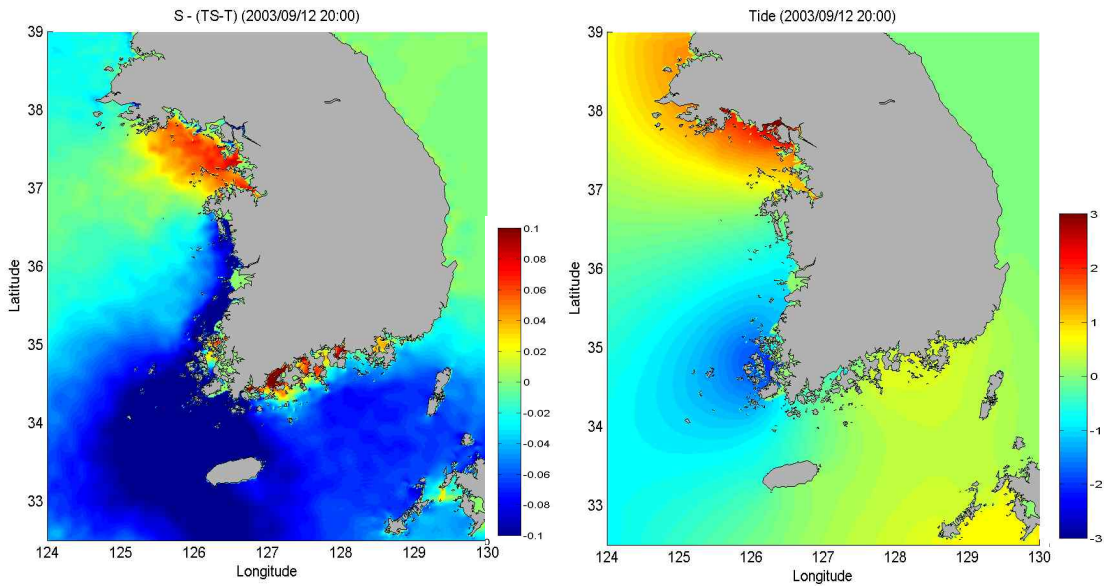


그림 3.3.17 태풍 '매미' 내습 시 (S) - (TS - T) 결과(좌) 동시간의 조석 (우)

다. 격자 크기에 따른 평가

(1) FVCOM을 이용한 격자 크기에 따른 폭풍해일 테스트

FVCOM 정밀격자 모형을 적용하여 격자크기가 연안 최소격자 간격 1 km, 300 m, 70 m 에 따른 모델의 정밀도를 비교·평가하여 격자 크기의 영향을 평가했다. 사용된 격자는 그림 3.3.6~9에 나타난 바와 같이 3가지 격자망이 있으며 전체적인 영역의 크기는 동일하다. 첫 번째는 연안에서 최소 격자의 크기가 약 1km에 이르는 격자간격이 가장 큰 격자망이다. 두 번째는 연안에서 최소 격자크기가 약 300~400m까지 적용된 격자망이다. 마지막 격자망은 가장 조밀한 격자 간격을 가지는 것으로서 연안에서의 최소격자간격이 약 60~70m 정도로 수립한 격자이다. 본 모의에서는 단지 격자의 크기만을 달리 주고 수치실험을 실시하였다. 태풍 '매미' 내습시 조석을 제외한 해일고만 모의하였으며, 모두 조간대 처리 모듈을 적용하고 3차원으로 모의하였다.

그림 3.3.18과 표 3.3.5에 제시된 모의된 결과를 보면 태풍 매미의 내습시 가장 피해가 컸던 마산, 통영 등의 지역에서는 300m 격자가 가장 일치하는 결과를 보이고 있다. 그러나 다른 지역에서는 오히려 300m 격자가 기존의 관측치에 비해 비교적 크게 모의되는 결과를 보이는 것으로 나타났다. 격자의 크기가 작아지면 해일고 모의도 크게 되는 것이 일반적이나 이는 반드시 그러한 것은 아니며 지형조건이나 외력의 조건 등에 크게 좌우되는 것으로 보인다. 특히 통영이나 마산지역은 최대 해일고 값이 큰 격자망에서 오히려 격자간격이 작은 격자망에서보다 크게 산출되었다. 이는 유한체적법의 계산과정에서 각 격자에서 계산되는 질량이 정밀한 격자망에서의 경우와는 다르게 정밀한 격자망을 따라 분산되지 못하고 단순화된 해안선을 따라 과일업되면서 지형에 따라 질량이 크게

분포하게 되면서 해수면이 동반 상승한 것으로 보인다. 본 연구에서 적용된 3가지 격자망 중에서는 모델의 계산 시간을 고려한 운용상의 효율성과 정밀성을 전반적으로 고려할 때, 객관적으로 300m 격자망이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

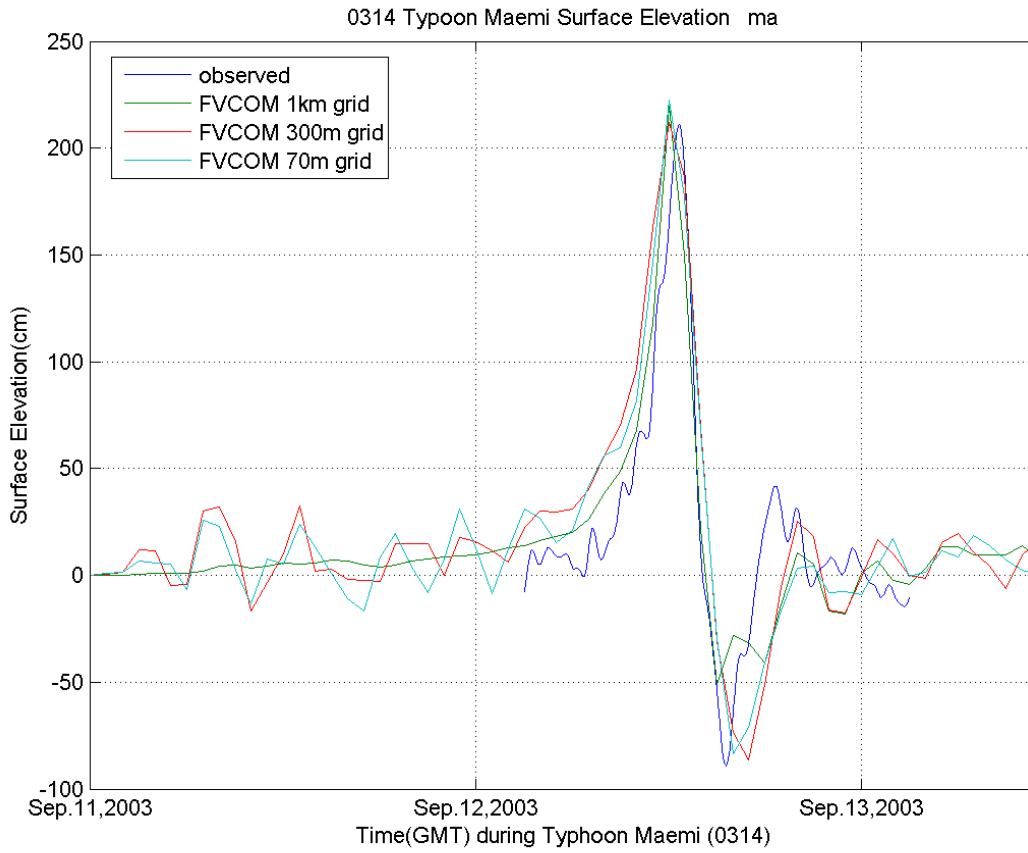


그림 3.3.18 태풍 매미 내습시의 마산 조위관측소에서의 수치모델 결과와 관측치 비교(격자 간격에 해일고 크기 비교)

표 3.3.7 격자 간격에 따른 해일고 모의 결과 비교(cm)

관측소	관측최대값	모델 해일고 최대값 (1km 격자)		모델 해일고 최대값 (300m 격자)		모델 해일고 최대값 (70m 격자)	
		값	차이	값	차이	값	차이
여수(ys)	167.5	168.7	(1.2)	189.7	(22.2)	177.4	(9.9)
완도(wd)	55.4	61.4	(6.0)	77.4	(22.0)	77.4	(22.0)
통영(ty)	153.4	180.4	(27.0)	171.8	(18.4)	172.1	(18.7)
서귀포(sg)	47.5	56.9	(9.4)	67.3	(19.8)	67.6	(20.1)
부산(ps)	82.7	101.9	(19.2)	127.3	(44.6)	128.1	(45.4)
포항(ph)	60.2	75.3	(15.1)	73.3	(13.1)	60.3	(0.1)
마산(ma)	211.0	219.6	(8.6)	211.9	(0.9)	222.3	(11.3)
제주(jj)	43.1	61.3	(18.2)	67.9	(24.8)	63.5	(20.4)
후포(hp)	51.3	48.1	(-3.2)	50.5	(-0.8)	37.2	(-14.1)

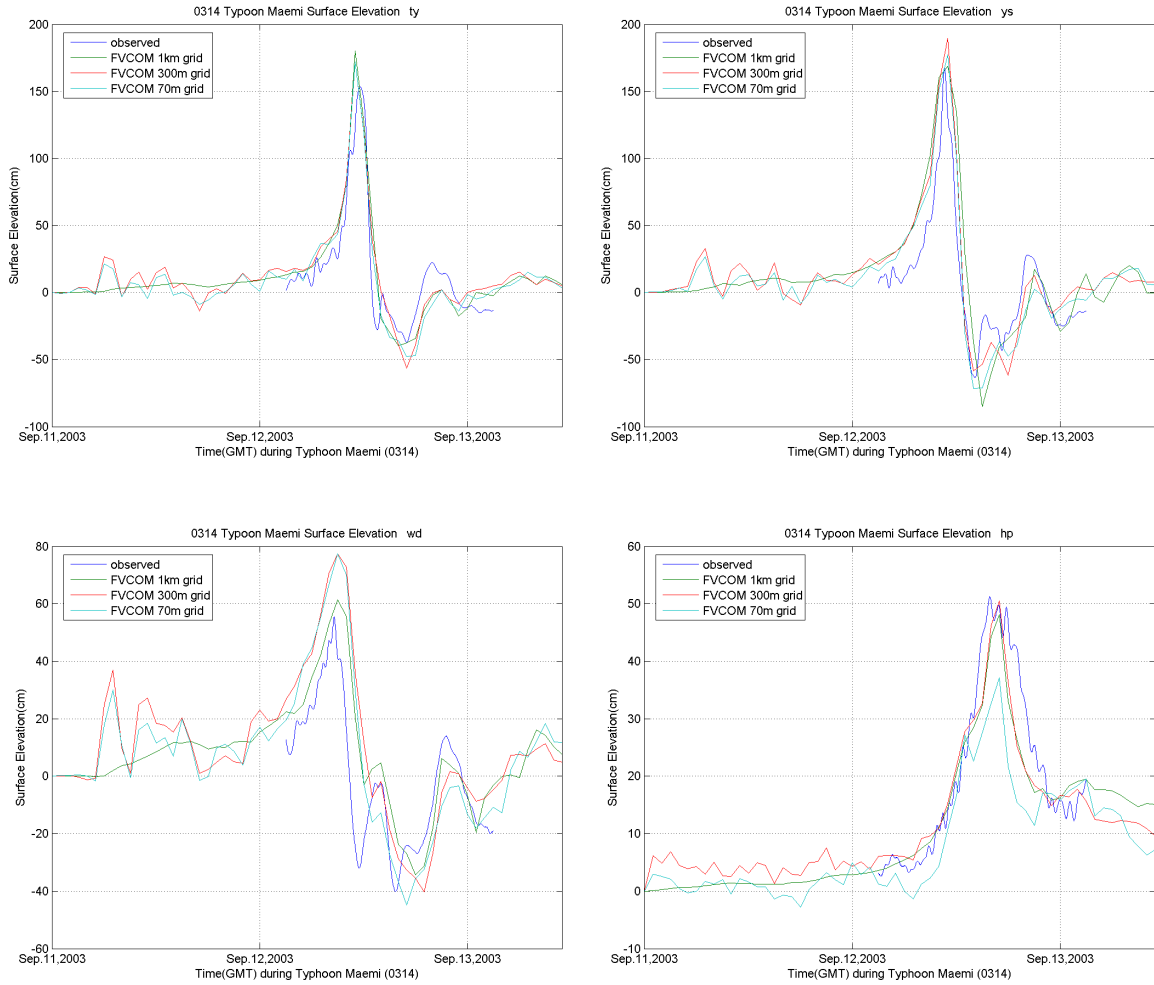


그림 3.3.19 주요 관측점에서의 격자 크기에 해일고 산출 모의 결과 비교(통영, 여수, 완도, 후포 : 좌상부터 시계방향)

(2) MOHID 모델을 이용한 격자 크기에 따른 폭풍해일 테스트

광역(약 9 km 격자망), 중간역(약 2 km 격자망), 상세역(약 300 m 격자망) 3단계로 나누어 수립된 각 모델에서의 폭풍해일 결과를 비교 평가하여 격자 크기의 영향을 분석했다. 상세역에서 MOHID의 경우 계산시간이 다소 많이 소요 되는 관계로 각 태풍별로 1개의 300m 격자에서 계산을 수행하였다. 일반적으로 계산시간은 5일 모의하는데 약 24 시간 소요 (PC 기준)된다. 따라서 계산상의 시간 확보를 위해 8개 태풍의 경로를 참조하여 태풍이 통과했거나 가까이 통과한 300m간격의 상세역 격자 1~2개만을 선택하여 계산하였다.

계산결과 중간역과 상세역에서의 차이는 쓰인 연안이나 외해에서는 크게 나타나지는 않지만, 반 차폐된 하구 및 항만 내측에서는 다소 큰 차이를 보인다. 이는 두 가지 원인으로 분석해 볼 수 있는데, 하나는 상세 격자는 하구 및 연안에서 정밀하게 계산을 수행

하기 때문에 발생하는 단순 크기 차이에 의한 결과 차이이고, 또 하나는 정밀한 기상 입력에 따른 항만 및 하구에서의 기상 조건차이에 의한 차이이다. 따라서 개방된 항만이나 연안, 그리고 외해에서는 중간격자의 결과와 상세 격자의 결과의 차이가 거의 발생하지 않으므로 시간상으로 유리한 중간격자의 결과를 사용해도 무방할 것이며, 항만 및 하구에서의 정밀한 결과는 필요에 따라 더 정밀한 격자를 이용하여 계산하는 것도 고려해 볼 만하다.

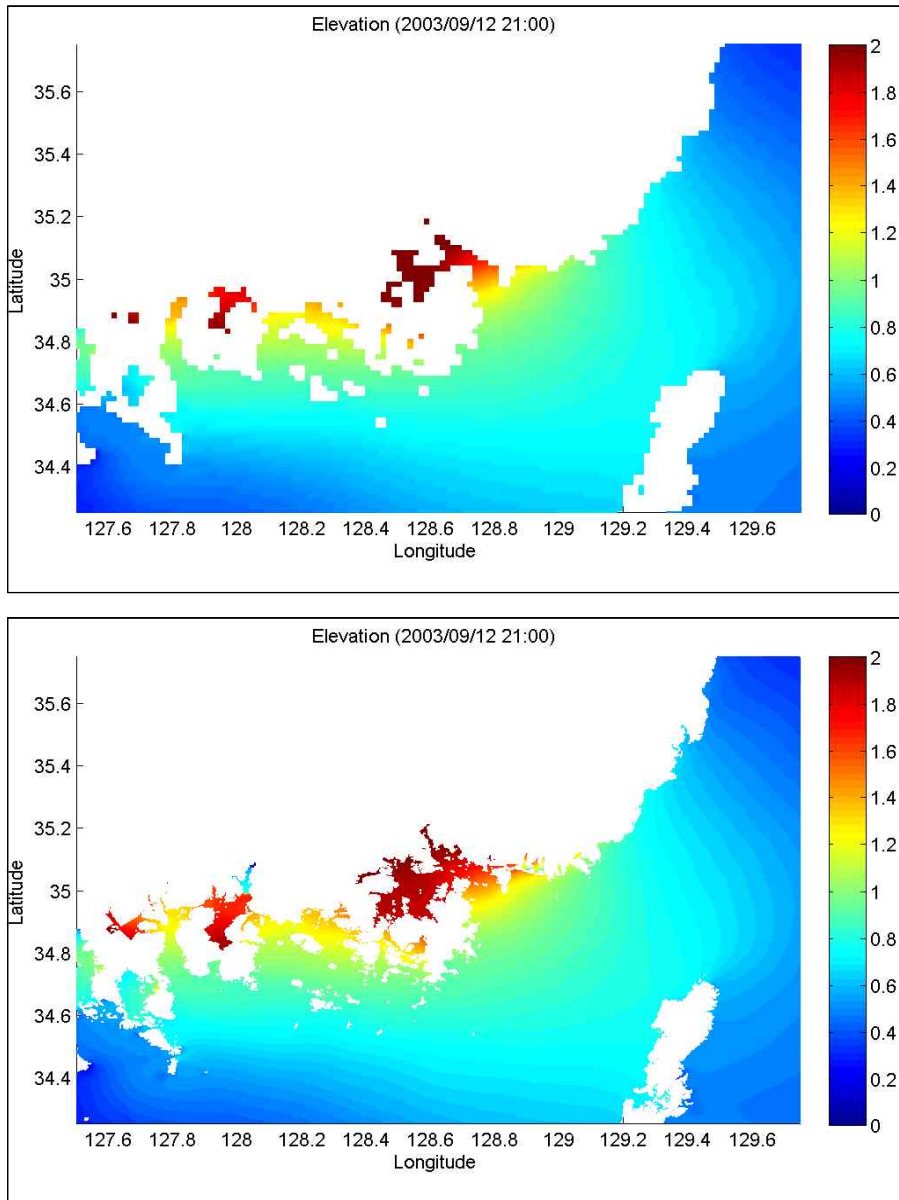


그림 3.3.20 중간격자(상)와 상세격자(하)에서의 폭풍해일 결과

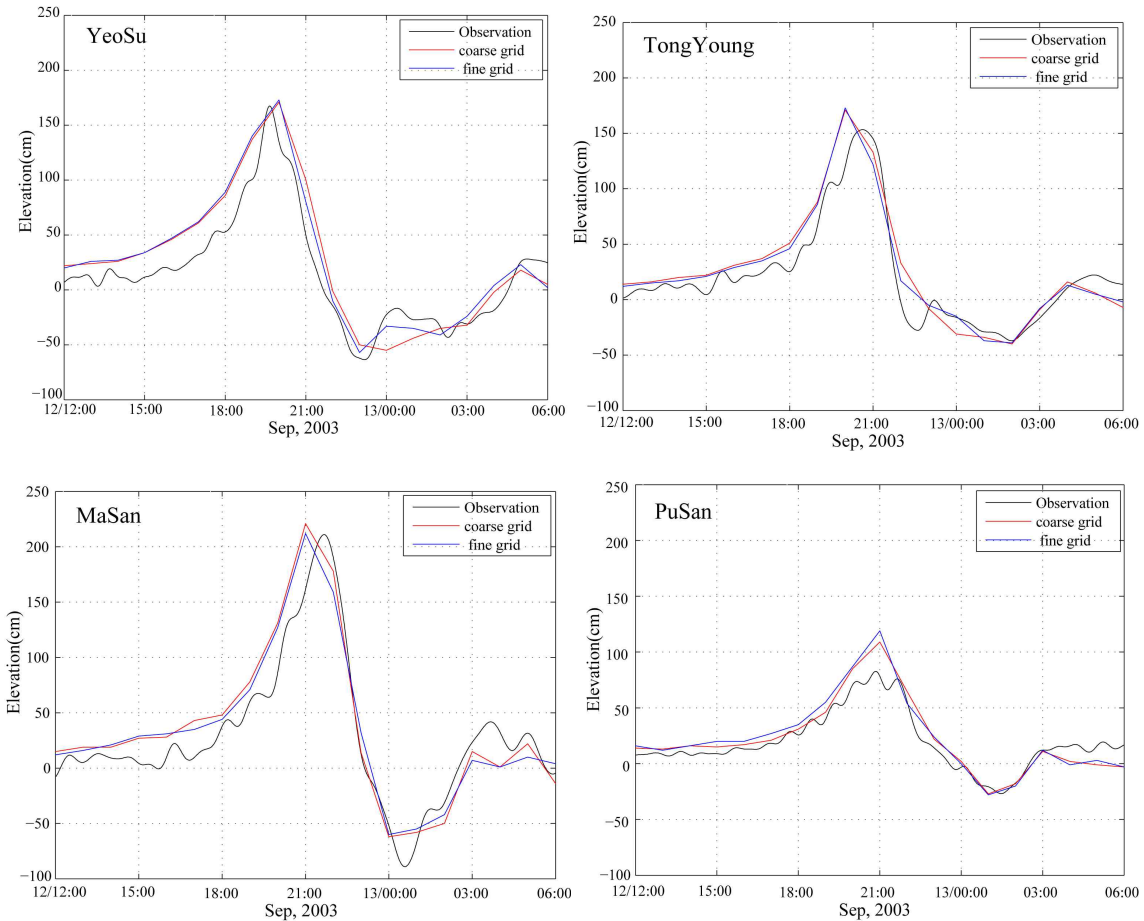


그림 3.3.21 태풍 '매미' 내습 시 여수, 통영, 마산 그리고 부산에서의 폭풍해일 수치 모델 (MOHID)의 중간격(coarse) 과 상세격 (fine)에서의 결과 비교

라. 2차원 모델과 3차원 모델의 평가

폭풍해일 예보에 있어서 대부분 2D 모델이 사용되어왔다. 2D 모델은 높은 정밀도와 빠른 계산시간이 장점이었다. 과거의 3D 모델은 태풍해일 예보모델로서 2D모델에 비해 특별히 뛰어난 정밀도를 나타내지 못하며 오히려 긴 계산시간과 3차원 연직와동확산의 계산에 따른 여러 오차들을 보여주는 단점이 있었다. 하지만 폭풍해일은 원칙적으로 3차원 현상이다. 특히 연안 부근에서는 유동이 연직으로 변화가 커서 연직 적분한 평균 유속과는 큰 차이를 보여 2D 모델은 해저 마찰에 의한 소실을 계산할 때에 오차를 낼 수 있다. 그리고 연직 일도 변화가 커서 성층을 이루는 경우에 연직 방향의 운동량 확산은 연직 밀도 분포에 따라 달라지게 되어 해수 유동에 영향을 미친다. 최근 덴마크 기상연구소에서는 각 폭풍해일 수치 모델의 비교 실험에서 그림 3.3.22에서 보는 바와 같이 3차원 해양 순환 모델인 CMOD 모델이 2D 모델보다 상대 오차가 적은 것으로 나타나서 향후 폭풍해일의 모델에 3D 모델을 사용하고 있다. 이에 대한 확산 실험을 위해 FVCOM 모델과 MOHID 모델을 이용하여 2D 모델과 3D 모델의 비교 평가를 수행했다.

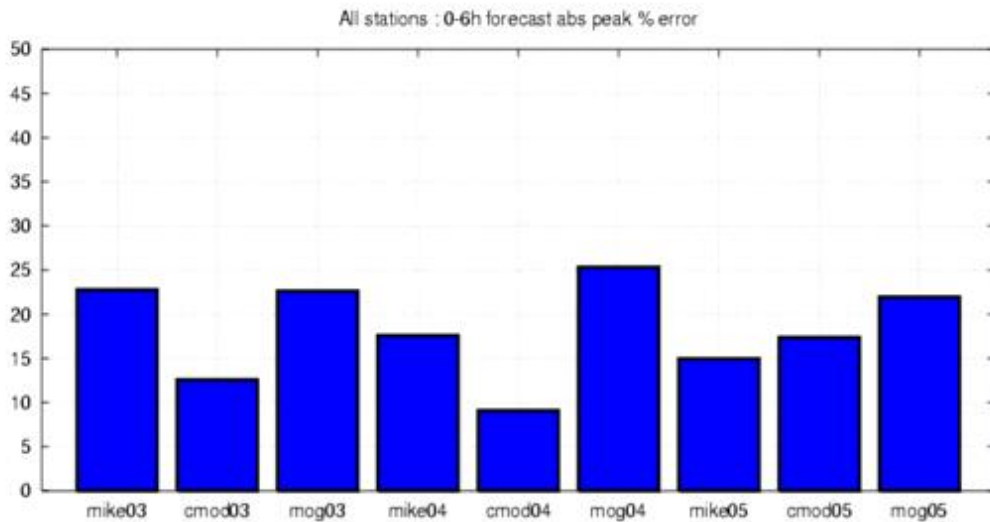


그림 3.3.22 덴마크 기상연구소(DMI)에서 수행한 각 모델간의 성능비교

(1) FVCOM

3차원 모델은 해수유동, 수온, 염분 등의 Heat flux 자료와 surface elevation 등에 대한 2D와 3D방정식을 풀어나가게 된다. 본 연구에서는 수온 및 염분에 대한 방정식은 계산하지 않고 3차원 층별 유속 계산에 있어서 난류 모형 및 저면 마찰 소실에 따른 3차원 효과를 고려하여 3차원 모델을 수행하였으며, 수심평균 적분된 2차원 모델의 결과와 비교하였다. FVCOM 모델에서의 3차원 층별 분포는 11개의 sigma 층으로 나누었다. 모델의 계산시간은 2차원 external은 2초 간격, 3차원 internal은 5번에 한 번씩 계산하게 구성하였다.

3D에 대한 결과를 보면 표 3.3.8와 같이 나타나며 2D로 모의한 결과가 대체로 2D로 모의한 결과보다 크게 나타났다. 특히 마산의 경우에만 3D 결과가 2D의 결과보다 정확히 일치하는 것으로 나타났고 나머지 관측소의 경우 오히려 2D의 결과가 더 좋은 것으로 모의되었다. 이번 실험의 결과에서는 태풍에 의한 해일고의 산출에 있어서 일반적으로 알려진 3D 모의의 경우가 더 좋은 결과를 보인다는 것이 뚜렷이 나타나지는 않았으나 태풍시와 같이 급격히 해양의 연직구조가 변화하는 경우에 수심이 상대적으로 얇은 연안에서는 해양의 성층구조가 완전히 바뀔 수 있으며, 이를 정확히 계산하기 위해서는 3D 모델이 적합한 것은 당연하다. 지역에 따라 3D 모델의 결과가 더 우수하기도 하고 또 그렇지 않은 경우도 있는데 이는 지형적인 요인도 있지만 해일고 수치모델에 적용된 태풍해상풍 모델로 수치재현된 태풍바람장과 기압의 분포가 실제 태풍의 경우와 차이가 나기 때문일 것으로 보인다.

표 3.3.8 2D, 3D에 따른 해일고 모의 결과 비교(cm)

관측소	관측최대값	모델 해일고 최대값	
		(2D 모델)	(3D 모델)
여수(ys)	167.5	148.9 (-18.6)	189.9 (22.4)
완도(wd)	55.4	66.3 (10.9)	77.8 (22.4)
통영(ty)	153.4	168.6 (15.2)	171.6 (18.2)
서귀포(sg)	47.5	65.6 (18.1)	67.5 (20.0)
부산(ps)	82.7	110.0 (27.3)	127.3 (44.6)
포항(ph)	60.2	59.4 (-0.8)	73.4 (13.2)
마산(ma)	211.0	189.7 (-21.3)	211.9 (0.9)
제주(jj)	43.1	66.7 (23.6)	68.1 (25.0)
후포(hp)	51.3	48.4 (-2.9)	50.5 (-0.8)

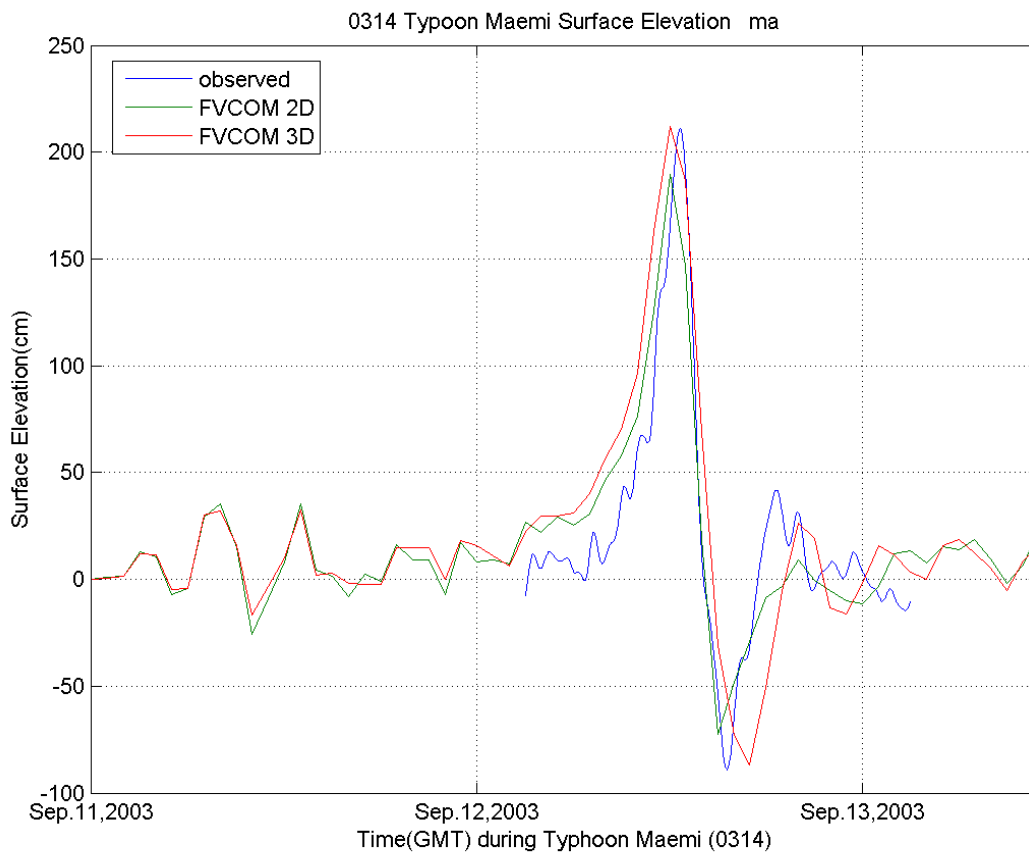


그림 3.3.23 태풍 매미 내습시의 마산 조위관측소에서의 수치모델 결과와 관측치 비교(2D, 3D에 해일고 크기 비교)

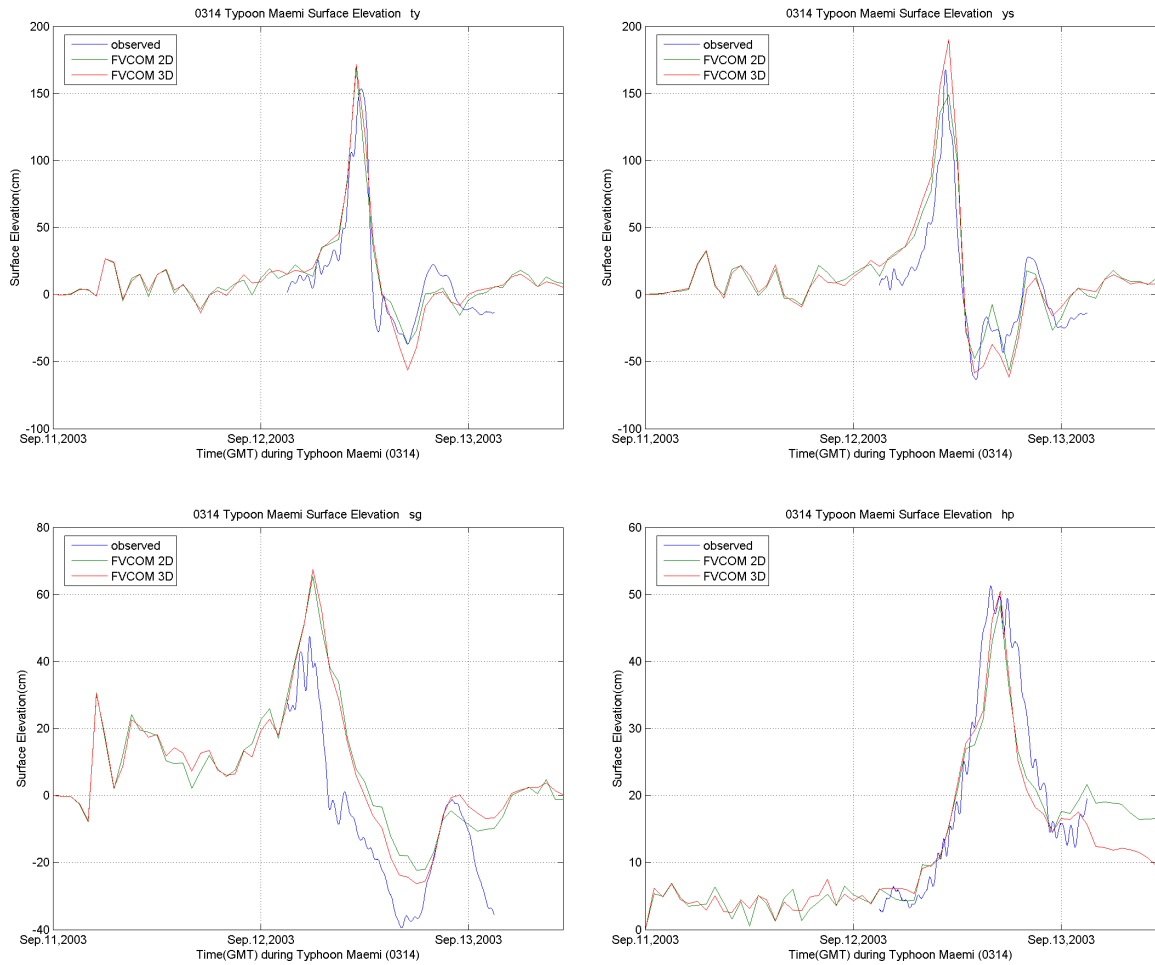


그림 3.3.24 주요 관측점에서의 2D, 3D 계산에 따른 해일고 산출 모의 결과 비교(통영, 여수, 서귀포, 후포 : 좌상부터 시계방향)

(2) MOHID

FVCOM과 마찬가지로 3D 모델의 계산 과정에서 성층에 영향을 미치는 수온 및 염분을 초기 경계조건으로 입력해 주지 않고, 3차원 층별 유속 계산에 있어서 난류 모형 및 저면 마찰 소실에 따른 3차원 효과를 고려하여 3차원 모델을 수행하였다. 수직 층은 11개의 sigma 층으로 나누었고, 이를 수직 적분한 2D 결과와 비교하였다. 태풍 ‘매미’에 대한 폭풍해일을 2D, 3D로 계산한 결과는 그림 3.3.25 과 같다.

수치 실험 결과 전반적으로 3D의 결과가 2D의 결과 보다 크게 모의되었고, 이는 앞서 언급한 바와 같이 남해안 폭풍해일의 경우 내만에서는 압력이 아닌 바람의 영향이 크게 작용하기 때문에 나타나는 결과로 보인다. 즉, 수심을 수직으로 나눈 3D의 경우 2D의 결과보다 바람에 민감하게 작용할 수 있으므로 수심이 비교적 얇은 연안이나, 항만 내측에서 더 큰 차이를 보인다. 하지만 이는 수층별 수온 및 염분의 초기조건이 입력되지 않은 상황에서는 객관적인 비교가 불가능하다.

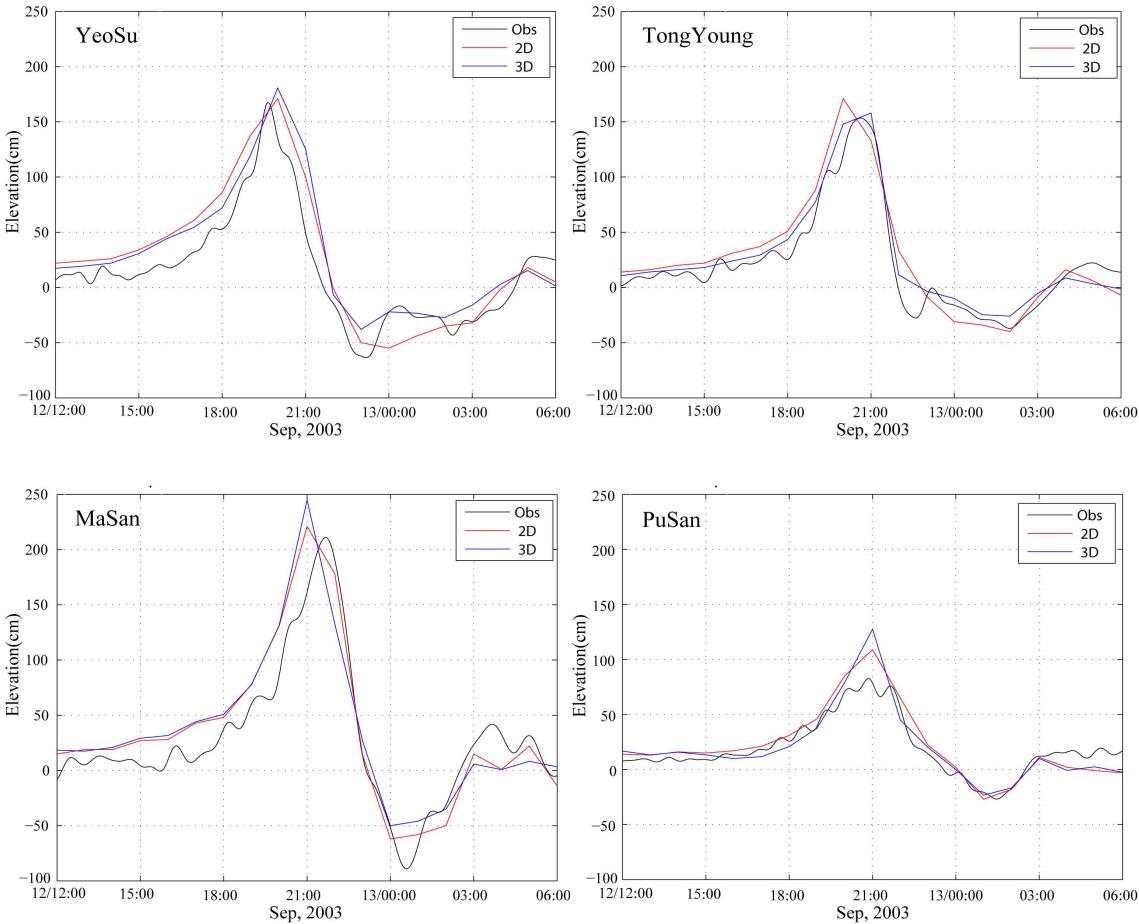


그림 3.3.25 태풍 '매미' 내습 시 여수, 통영, 마산 그리고 부산에서의 폭풍해일 수치 모델 (MOHID)의 2D 와 3D 계산 결과 비교

3. 장기 폭풍 해일 산출 및 설계해면 추산

가. 개요

우리나라 남해, 서해안 일부 지역은 지형이 매우 복잡하여 공간 스케일이 상당히 작은 곳이 많아 1~2 km의 격자망으로는 국지 폭풍해일을 잘 재현하지 못하는 지역이 많이 있다. 연안에서 상세 격자에 대해 폭풍 해일의 산출이 적합한 unstructured grid 모델인 FVCOM 모델을 기반으로 하여 국지 폭풍해일을 제대로 재현하기 위해서, 그리고 효율적으로 전 연안 설계 해면을 생산하기 위해서 연안 격자를 70m, 300m, 1km, 2km 등 여러 종류의 격자 크기로 하여 테스트한 결과 연안 격자 약 300m가 적절하다고 판단되어 전 연안에 약 300m 격자로 산출하였다. 정밀 격자 설계 해면 산출 격자의 예는 그림 3.3.26과 같다.

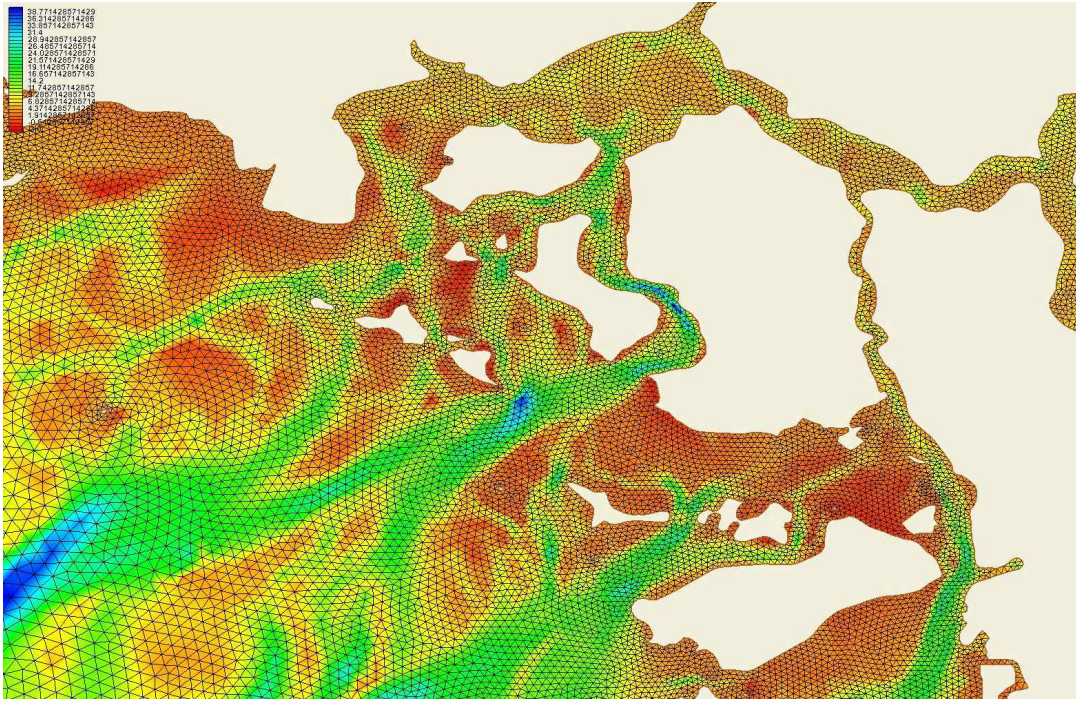


그림 3.3.26 경기만 일대 국지 정밀 폭풍해일 산출 격자의 예

전 연안에 대해 정밀 격자의 설계해면을 산출하기 위해서는 간접적으로 폭풍해일 추산 수치 모델을 이용하여 과거 장기간의 기상 입력 자료로부터 전 연안 각 격자점에서 장기간 폭풍 해일고를 산출하여 이를 통계 분석하여 설계해면을 구하는 방법과 폭풍 자료의 분석을 통하여 Design Storm을 설정하여 이에 대한 폭풍해일을 산출하여 설계해면을 구하는 방법을 적용하였다. 방법들 간에는 서로 장단점이 있는데 재기년도별 설계해면의 산출을 위해서는 장기간의 폭풍해일 산출을 통한 방법이 일반적으로 이용되고 있다. FVCOM 모델에 의한 폭풍해일 모델의 산출과 더불어 structured grid 모델로 수립한 신속 폭풍해일 산출 모델 및 MOHID 모델에 의한 폭풍해일 산출 결과도 제시하여 참고로 할 수 있게 했다.

그림 3.3.27은 태풍 통과시의 태풍 해상풍 모델에 의해 산출한 해면기압 및 해상풍을 입력자료로 폭풍해일을 산출하는 과정에 대한 계산 흐름도를 나타낸 것이다.

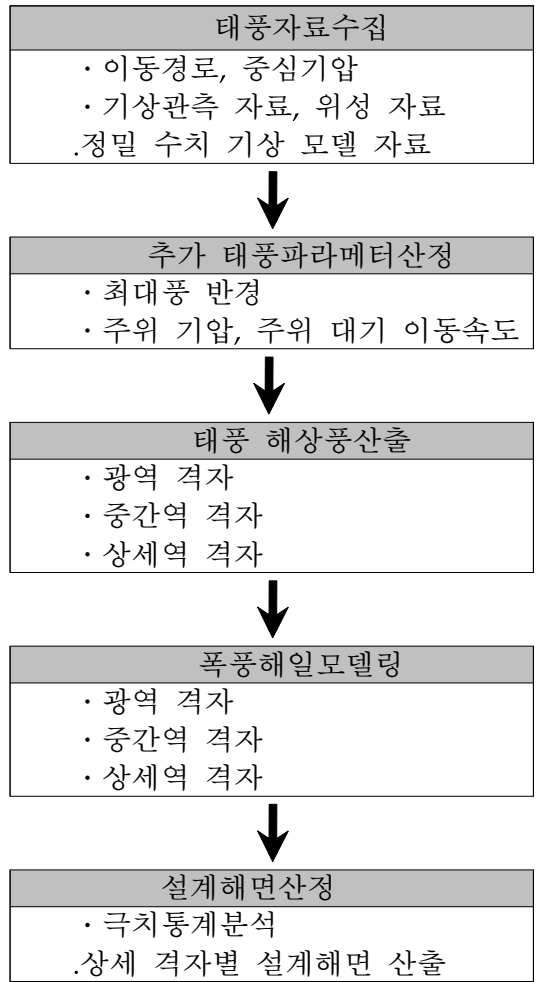


그림 3.3.27 폭풍해일 장기 산출에 의한 설계해면

태풍에 의한 폭풍해일의 계산은 1951년부터 2006년까지 우리나라에 영향을 미친 201개의 태풍에 대하여 수행하였다.

나. 장기 폭풍해일 산출

우리나라에 영향을 미치는 태풍은 일반적으로 북서태평양에서 발생하여 필리핀, 타이완 및 오키나와를 포함하는 동지나해를 지나서 한반도 인근에 도달하기 때문에 본 과업에서는 태풍의 영향을 고려하기 위하여 남해는 물론 동해와 서해 및 타이완 주변해역을 포함하는 광역격자를 구성하였다. 장기 시뮬레이션에 의한 극치해면을 산출하기 위하여 1951년~2006년의 56년간 201개 태풍을 선정하였으며, 태풍 해상풍 모델을 이용하여 태풍 통과시의 기압장과 바람장을 산출하여 폭풍해일 모델의 입력으로 사용하였다. 적용한 태풍의 진행 경로는 그림 3.3.28과 같다.

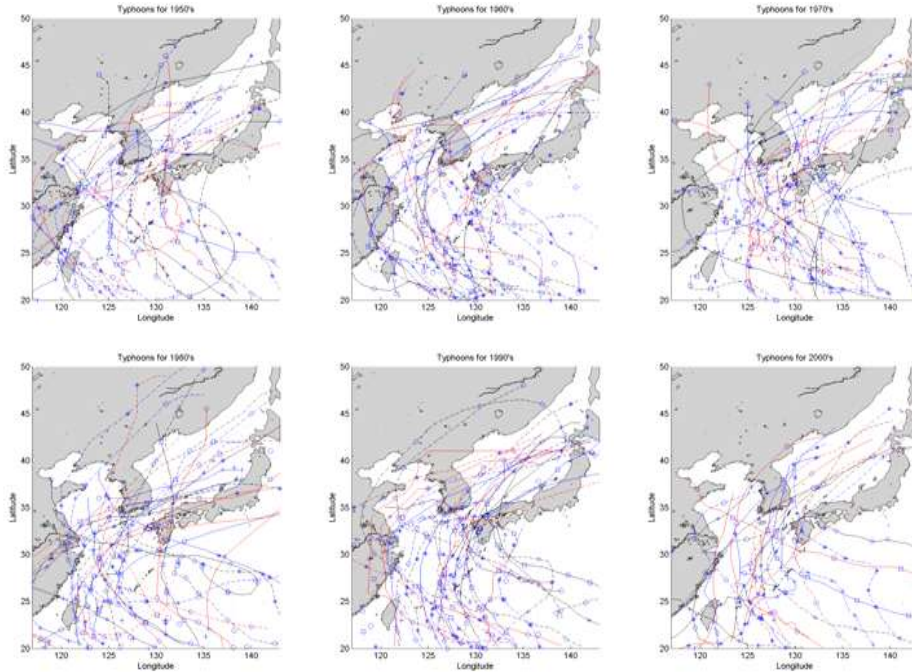


그림 3.3.28 장기간 폭풍해일 시뮬레이션에 사용된 태풍의 진행 경로

태풍 통과시의 기압장과 바람장은 태풍 해상풍 모델을 동일하게 적용하였다. Unstructured grid 모델인 FVCOM 모델은 여러 다른 크기의 격자망 중에서 연안 최소격자는 약 300m 인 정밀 격자망을 이용하여 장기간 폭풍해일을 산출하였고 KORDIS 모델과 MOHID 모델은 우리나라 주변해역과 동지나해를 포함하는 약 9km 격자간격의 광역격자에서부터 약 2km의 중간역 그리고 더 나아가 300m 해상도의 정밀한 격자 3단계의 격자망에서의 폭풍해일을 산출하였다.

다. 극치 통계 분석 및 설계 해면 산출

위에서 201개의 태풍에 대해 산출한 폭풍해일을 극치 통계 분석하여 설계해면을 구할 수 있다. 적용한 unstructured grid 모델로 FVCOM 모델의 격자망은 앞의 그림 3.3.8과 같다. 이는 동북아시아 지역을 대상으로 하는데 우리나라 연안에서 최소 격자가 300m 내외이며 외해에서는 1-10 km로 큰 가변 격자이다.

극치통계해석에서 사용된 통계모형은 Gumbel 분포, Weibull 분포 그리고 GEV(일반화극치) 분포 등이 있으나 여기서는 파랑과 해면의 극치해석에서 사용되는 Weibull 분포를 이용하였다. Weibull 극치모형에는 관측자료로부터 결정해야만 하는 모수(parameter)가 3개가 포함되어 있다. 모수의 추정법에는 최소자승법(Least Square Method; LSM), 통상모멘트법(Conventional Moment Method; CMM), 확률가중적률법(Probability Weighted Method; PWM), 최우법(Maximum Likelihood Method; MLM) 그리고 Bayesian 법

(Bayesian Method; BM) 등이 있으나 여기서는 적용이 비교적 편리하여 많이 사용되는 LSM, CMM 및 PWM을 적용하였다. 그러므로 본 과업에서 3가지 방법의 극치확률법으로 설계해면을 산출하였으나, LSM의 33333333 결과 가장 상관성이 양호한 것으로 나타나 최종적인 재현기간별 폭풍해일고의 산출에는 LSM을 사용하여 계산하였다 (그림 3.3.28). 표 3.3.7은 극치분석법으로 산출한 재현기간별 폭풍해일고를 나타낸 것이다.

또한 극치통계학은 최대 및 최소치의 시계열을 다루는 분야로서 수문학에서 성공적으로 응용되고 있다. 연안공학에서는 빈도별 설계파랑의 산정에서 극치통계기법이 적용되고 있다(수산청, 1988). 한편, 고극치해면은 연안구조물의 설계, 연안방어체계 수립 및 이행 등에 필요하며 저극치해면은 연안에 위치한 원자력 발전소의 취수구 및 조력 발전소의 터빈 위치를 결정하는데 필수적인 요소이다.

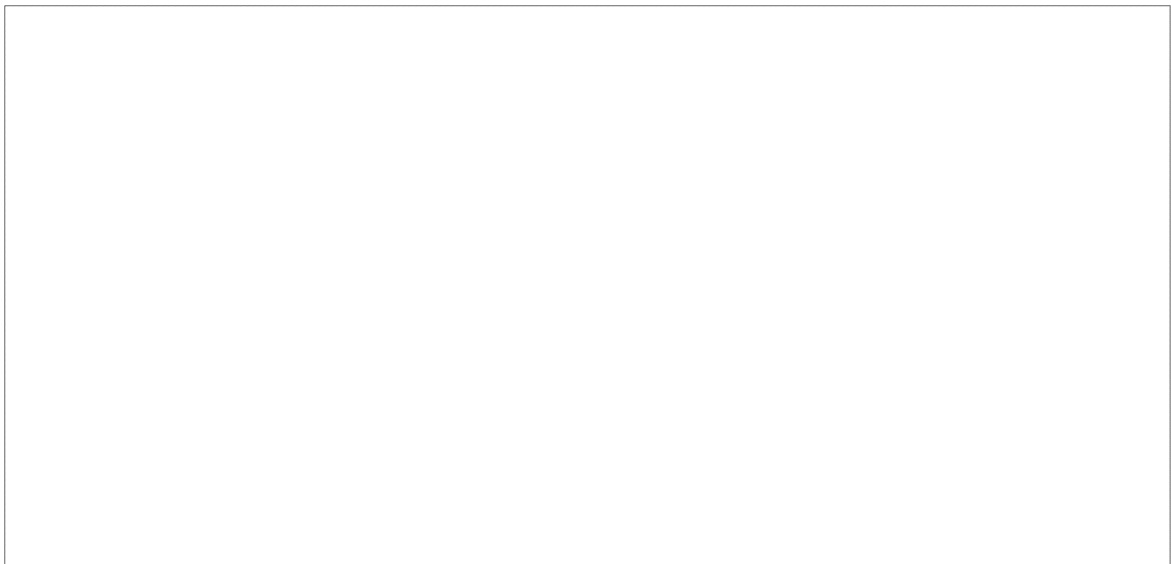


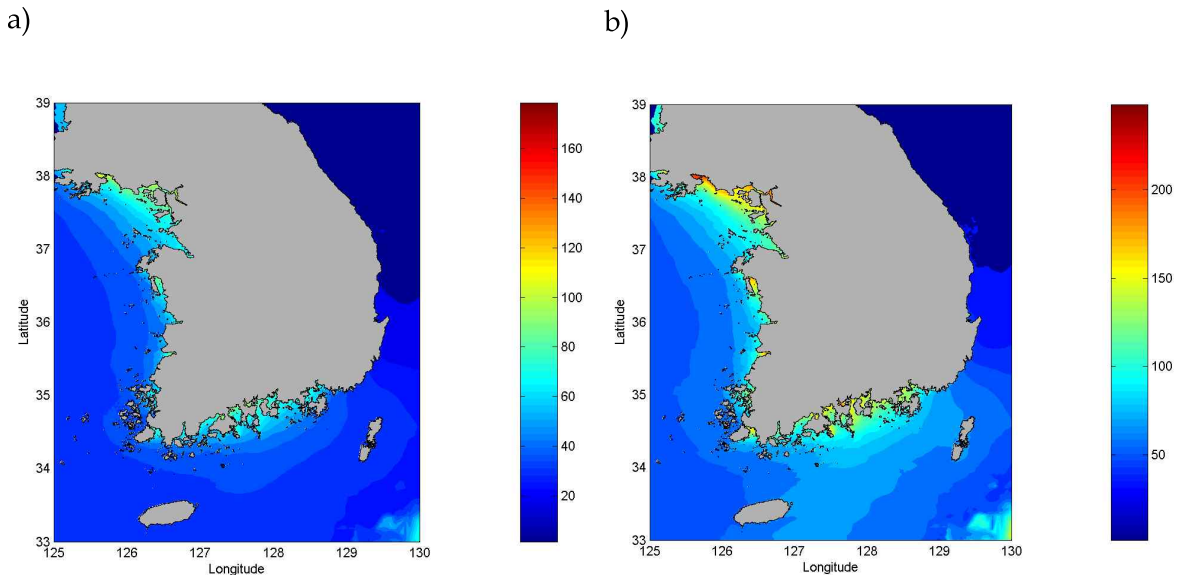
그림 3.3.29 폭풍해일고의 극치분석 예(울진)

표 3.3.9 재기년도 별 최대 해일고 예(울진)

재기년도(년)	해일고(cm)
10	25.42
15	29.56
20	32.60
25	35.02
30	37.03
50	42.81
100	51.00
150	55.97
200	59.56

극치해면의 산출 방법에는 극치확률법(extreme probability method)과 결합확률법(joint probability method)이 있는데, 전자의 방법은 연속관측 조위자료 중 매년 최고치를 추출하여 표본자료를 구성하고 그 표본자료를 극치확률 분석함수에 적용하여 극치해면을 외삽(extrapolation)으로 구하는 방법(Fuehrboter, 1978; Blackman and Graff, 1978;; 심재설 등, 1989)이고, 후자의 방법은 조위자료를 천문조와 해일 성분으로 분리한 다음, 이 두 성분이 서로 독립이라 가정하고 각각의 확률밀도함수를 결합하여 극치해면을 산출한다(Pugh and Vassie, 1978; Walden et al., 1982; 심재설 등, 1989). 본 과업에서는 정밀국지격자에서 장기산출된 이상해면 자료와 임의지역에서 산출된 조석에 대해 극치확률법과 결합확률법을 적용하여 빈도별 극치해면을 산출하였다. 일반적으로 극치확률법에서는 적합한 극치확률분포 모형의 설정과 모형에 포함된 모수(parameter)의 추정으로 설계해면을 구했다. 각 격자점에서 각 재기년도별 설계해면을 산출하여 데이터 베이스를 만들었다.

201개의 태풍에 대한 폭풍해일 산출 결과로부터 극치 분석을 통한 각 재기년도 별 설계해면의 공간 분포는 그림 3.3.30에서와 같다. Design storm에 의해 산출한 결과는 그림 3.3.31에서와 같다.



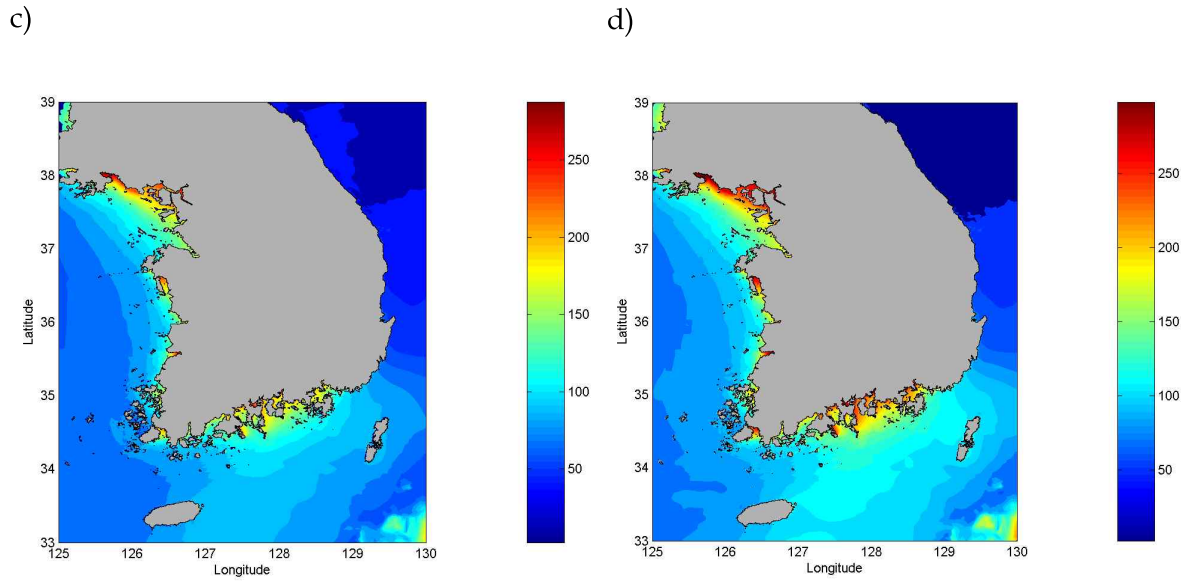


그림 3.3.30 설계 해일고의 공간 분포 a) 10년 빈도, b) 30년 빈도, c) 50년 빈도, d) 100년 빈도

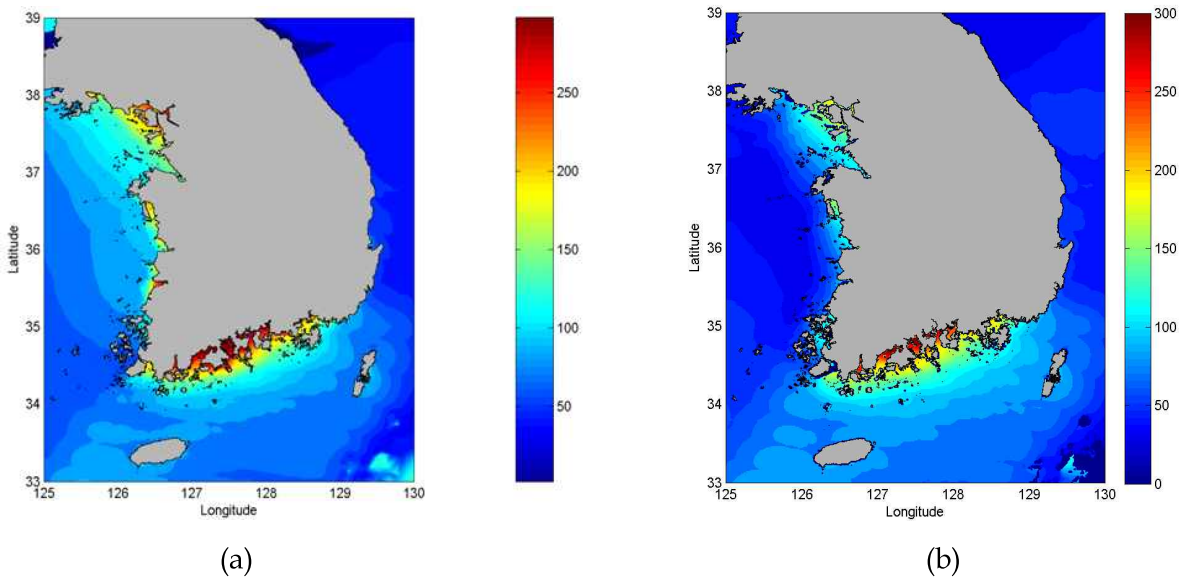


그림 3.3.31 Design storm에 의한 해일고 (a) FVCOM 모델 , (b) MOHID 모델 결과

약 300 m 격자망에서 산출된 설계 해면 정보에서 해안선을 따른 격자점에서의 값을 정량적으로 제시하기 위하여 서해 중부 해안에서부터 반시계 방향으로 번호를 매겨 그림 3.3.32에서와 같이 설계해면 추산 정점을 정하였다. 이 그림에서는 추산점을 따라 100개 점 마다 번호가 표시되어 있다. 설계해면 추산 지점은 각 해역에 대해 확대한 그림 3.3.33에서 더 잘 볼 수 있다. 이렇게 연안을 따라 20,020개 지점에서 설계 해면 정보를

산출하였다.

전 연안의 야구 300 m 격자 간격의 격자망에 대해 산출한 설계파 정보 중에서 28개 무역항과 24개 연안항에 대한 FVCOM 모델에 의한 장기 산출 자료 분석에 의한 각 재기 년도별 설계 해면 산출 결과는 각각 표 3.3.10과 3.3.11에서 보여 주어 52개 항만에서 설계해면 정보를 제공했다. 다른 산출 방법에 의한 산출 결과도 사용자가 참고할 수 있게 KORDIS 모델과 FVCOM 모델에 의한 50년도 재기년도의 설계 해면과 FVCOM 모델에서의 201개 태풍 산출 결과 중에서의 격자별 최대값, 그리고 FVCOM 모델과 MOHID 모델을 이용한 Design storm에 대한 설계 해면 자료를 모두 표 3.3.12 와 3.3.13에 제시하여 서로 비교할 수 있게 하였다. 여기에 각항에서 약최고 고조위와 천해 설계 파도 같이 제시하였다. 전국 해안에 대해 매 10개점 마다, 총 20,020개 지점에서의 설계 해면 정보는 부록에 실었다.

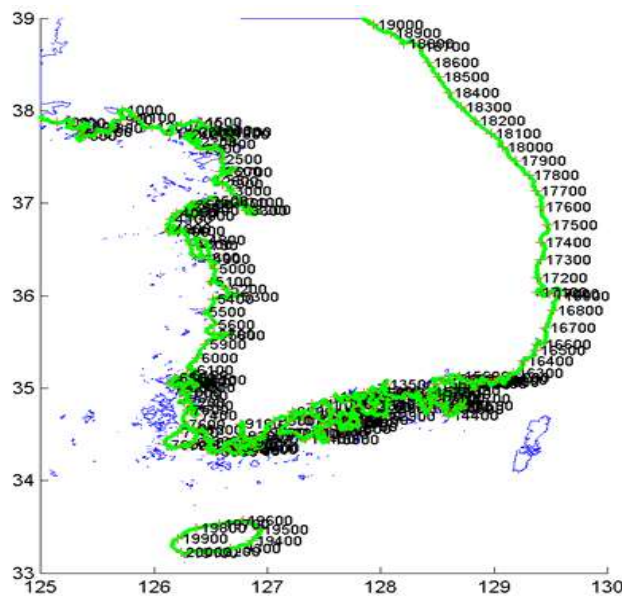


그림 3.3.32 전국 해안을 따라 설계해일고 산출 정점

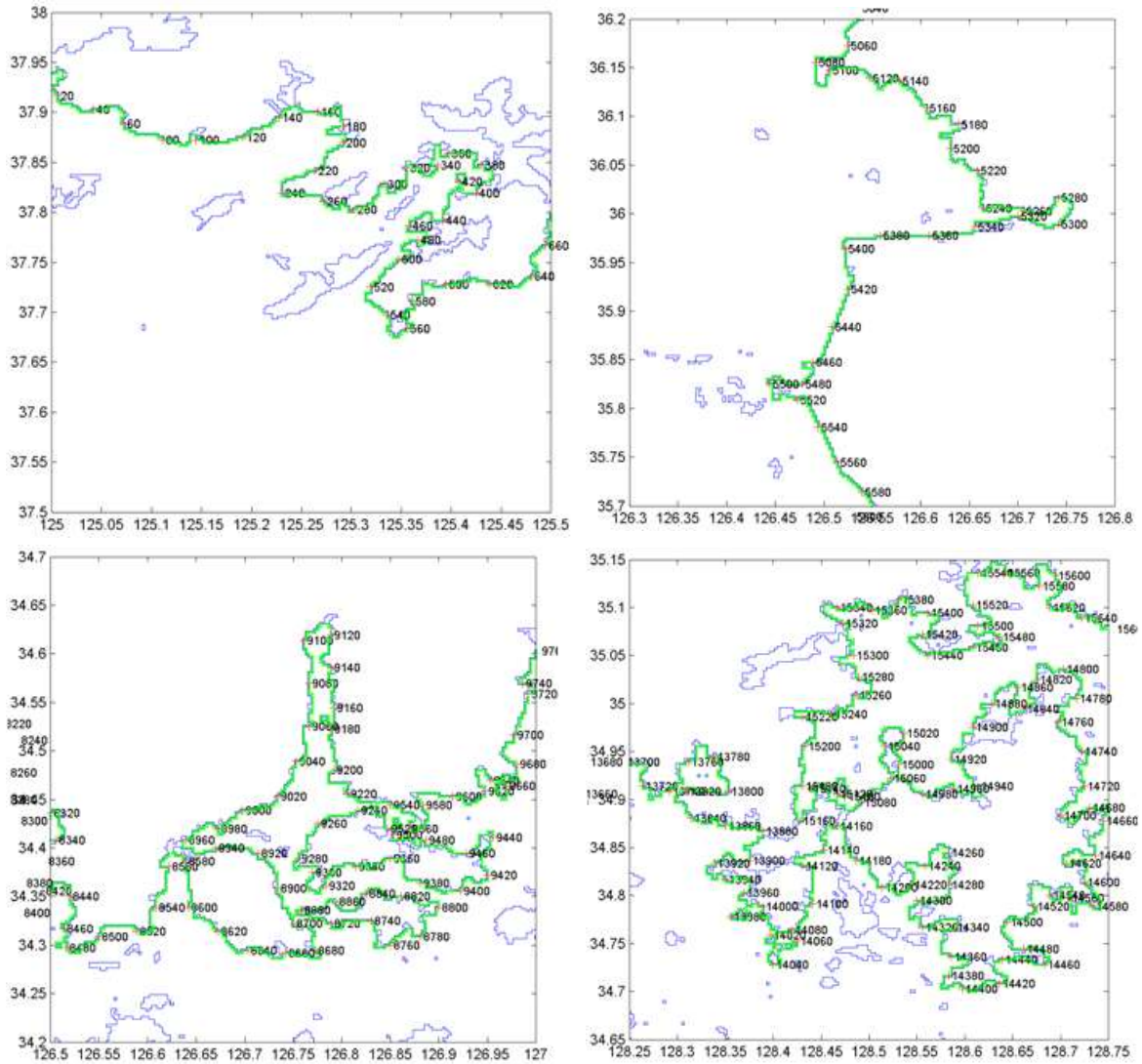


그림 3.3.33 해안을 따라 설계 해일고 산출 정점의 확대 그림

표 3.3.10 28개 무역항에서의 재기년도 별 설계해일고

코드명	항만명	재기년도 (년)				
		10.0	30.0	50.0	100.0	200.0
A01	인천항	1.35	1.77	1.97	2.24	2.52
A02	평택항	1.18	1.49	1.64	1.83	2.03
A03	대산항	0.90	1.11	1.20	1.33	1.45
A04	태안항	0.81	0.98	1.06	1.17	1.27
A05	보령항	1.17	1.57	1.77	2.03	2.31
A06	장항항	1.18	1.55	1.73	1.97	2.22
A07	군산항	1.23	1.63	1.82	2.07	2.33
A08	목포항	0.85	1.11	1.23	1.40	1.58
A09	완도항	0.90	1.12	1.22	1.35	1.48
A10	여수항	1.34	1.91	2.20	2.61	3.03
A11	광양항	1.47	1.97	2.21	2.55	2.89
A12	삼천포	1.20	1.69	1.94	2.29	2.65
A13	통영항	1.05	1.50	1.73	2.05	2.38
A14	고현항	1.04	1.49	1.72	2.03	2.36
A15	장승포항	0.80	1.16	1.34	1.59	1.86
A16	옥포항	0.83	1.22	1.41	1.68	1.96
A17	마산항	1.24	1.80	2.07	2.46	2.87
A18	진해항	1.09	1.59	1.83	2.18	2.55
A19	부산항	0.66	0.95	1.10	1.31	1.52
A20	울산항	0.46	0.65	0.74	0.88	1.02
A21	포항항	0.58	0.86	0.99	1.19	1.40
A22	삼척항	0.26	0.37	0.42	0.49	0.57
A23	동해항	0.27	0.37	0.43	0.50	0.58
A24	묵호항	0.30	0.43	0.50	0.59	0.69
A25	옥계항	0.26	0.36	0.41	0.48	0.55
A26	속초항	0.25	0.35	0.41	0.48	0.56
A27	제주항	0.58	0.76	0.85	0.96	1.08
A28	서귀포항	0.56	0.74	0.83	0.95	1.07

표 3.3.11 24개 연안항에서의 재기년도 별 설계해일고

코드명	항만명	재기년도 (년)				
		10.0	30.0	50.0	100.0	200.0
B01	육기포항	0.78	0.97	1.05	1.17	1.28
B02	연평도항	0.94	1.19	1.31	1.46	1.61
B03	대천항	1.06	1.42	1.58	1.82	2.05
B04	비인항	0.97	1.28	1.42	1.62	1.83
B05	송공항	0.83	1.07	1.19	1.35	1.51
B06	대흑산도항	0.58	0.71	0.77	0.85	0.92
B07	홍도항	0.56	0.69	0.75	0.83	0.91
B08	팽목항	0.73	0.93	1.02	1.14	1.27
B09	추자항	0.58	0.72	0.78	0.87	0.95
B10	갈두항	0.75	0.92	0.99	1.08	1.18
B11	화흥포항	0.89	1.16	1.28	1.46	1.63
B12	신마항	0.99	1.22	1.33	1.46	1.60
B13	녹동신항	1.00	1.23	1.33	1.47	1.60
B14	거문도항	0.72	1.02	1.16	1.37	1.58
B15	나로도항	0.98	1.31	1.46	1.68	1.90
B16	부산남항	0.67	0.97	1.11	1.32	1.54
B17	구룡포항	0.39	0.57	0.67	0.79	0.93
B18	후포항	0.31	0.45	0.52	0.61	0.72
B19	주문진항	0.26	0.36	0.41	0.49	0.56
B20	울릉항	0.26	0.38	0.43	0.51	0.60
B21	애월항	0.58	0.75	0.83	0.93	1.04
B22	한림항	0.55	0.69	0.76	0.84	0.93
B23	화순항	0.61	0.79	0.88	1.00	1.11
B24	성산포항	0.65	0.92	1.05	1.24	1.44

표 3.1.12 전국 무역항에서의 설계해면 산출 결과 비교

정점 번호	항구명	설계해면(m)					MSL (m)	천해 설계과 (m)
		50년빈도		태풍최대	design storm			
		KORDI-S	FVCOM	FVCOM	FVCOM	MOHID		
A01	인천항	1.59	1.97	2.13	2.03	1.54	4.64	2.03
A02	평택항	1.93	1.64	1.59	1.52	1.17	4.65	1.92
A03	대산항	0.84	1.20	1.21	1.18	0.89	4.14	1.96
A04	태안항	0.71	1.06	1.01	1.10	0.75	3.85	-
A05	보령항	1.41	1.77	2.03	1.74	0.95	3.83	-
A06	장항항	1.79	1.73	1.63	1.63	1.36	3.74	-
A07	군산항	1.91	1.82	1.70	1.60	1.43	3.71	3.80
A08	목포항	1.16	1.23	1.32	0.84	1.24	2.43	-
A09	완도항	1.28	1.22	1.16	1.88	1.94	2.43	3.50
A10	여수항	1.56	2.20	2.22	2.56	2.16	1.81	4.45
A11	광양항	2.14	2.21	2.45	2.96	2.59	1.91	-
A12	삼천포항	1.82	1.94	1.93	2.38	2.07	1.65	4.43
A13	통영항	1.87	1.73	1.93	1.86	1.58	1.41	2.66
A14	고현항	1.96	1.72	1.79	1.77	1.83	0.98	-
A15	장승포항	1.29	1.34	1.31	1.41	1.24	0.94	4.19
A16	옥포항	1.37	1.41	1.46	1.59	1.37	1.07	4.29
A17	마산항	2.50	2.07	2.45	2.52	2.33	0.98	-
A18	진해항	1.96	1.83	2.20	2.23	1.83	1.00	4.38
A19	부산항	1.29	1.10	1.10	1.15	1.11	0.95	10.11
A20	울산항	0.94	0.74	0.78	0.88	0.76	0.30	9.55
A21	포항항	0.82	0.99	1.28	1.35	0.64	0.12	6.60
A22	삼척항	0.39	0.42	0.39	0.47	0.51	0.17	5.79
A23	동해항	0.39	0.43	0.39	0.48	0.52	0.19	7.12
A24	목호항	0.38	0.50	0.50	0.49	0.53	0.20	5.91
A25	옥계항	0.38	0.41	0.34	0.48	0.54	0.19	6.73
A26	속초항	0.38	0.41	0.39	0.39	0.40	0.20	5.16
A27	제주항	0.67	0.85	0.88	0.82	0.68	1.42	7.51
A28	서귀포항	0.69	0.83	0.89	0.86	0.76	1.52	10.07

표 3.1.13 전국 연안항에서의 설계해면 산출 결과 비교

정점 번호	항구명	설계해면(m)					MSL(m)	천해 설계과 (m)
		50년빈도		태풍최대	design storm			
		KORDI-S	FVCOM	FVCOM	FVCOM	MOHID		
B01	용기포항	0.69	1.05	1.04	0.92	0.70	2.10	3.40
B02	연평도항	1.02	1.31	1.28	1.17	1.02	3.67	2.40
B03	대천항	1.24	1.58	1.89	1.66	1.23	3.84	2.46
B04	비인항	1.21	1.42	1.64	1.57	1.38	3.55	3.26
B05	송공항	0.89	1.19	1.20	0.89	1.07	2.25	-
B06	대흑산도	0.49	0.77	0.77	0.67	0.60	1.85	2.73
B07	홍도항	0.52	0.75	0.79	0.67	0.42	1.68	5.62
B08	팽목항	0.87	1.02	1.04	0.90	0.76	1.91	-
B09	추자항	0.60	0.78	0.74	0.82	0.87	1.68	5.05
B10	화홍포항	1.14	0.99	0.87	1.51	1.70	2.00	3.76
B11	갈두항	1.19	1.28	1.20	1.75	1.95	1.99	2.62
B12	신마항	1.65	1.33	1.34	2.25	2.39	2.04	-
B13	녹동신항	1.55	1.33	1.31	2.57	2.29	2.09	-
B14	거문도항	0.89	1.16	1.23	1.11	0.97	1.70	5.81
B15	나로도항	1.33	1.46	1.52	2.28	1.98	1.91	2.56
B16	부산남항	1.04	1.11	1.13	1.14	1.16	0.65	3.72
B17	구룡포항	0.52	0.67	0.77	0.76	0.44	0.12	5.92
B18	후포항	0.43	0.52	0.54	0.59	0.43	0.14	7.39
B19	주문진항	0.41	0.41	0.39	0.44	0.51	0.20	4.66
B20	울릉항	0.42	0.43	0.49	0.48	0.61	0.16	10.12
B21	애월항	0.59	0.83	0.88	0.83	0.67	1.36	5.68
B22	한림항	0.56	0.76	0.78	0.81	0.75	1.43	5.34
B23	화순항	0.79	0.88	0.93	1.09	0.96	1.53	8.49
B24	성산포항	0.82	1.05	1.16	0.99	0.80	1.33	9.33

4. 지구 온난화의 영향 분석

가. 개요

현대과학이 크게 발전하였다 하더라도 지구환경 문제에 의한 기후 변화에 따른 이상 파랑의 강도, 발생 빈도의 변화를 정량적으로 예측하는 것을 가까운 장래에 기대하기는 어려운 것 같다. 앞으로 지속적으로 기상 및 해양을 철저히 모니터링하고 지구의 기후 변화에 대한 경향과 효과에 대한 지식을 축적하여 과학적 근거를 바탕으로 지구 온난화의 영향을 고려하는 방법을 도출하는데 노력하여야 할 것이다. 기존의 태풍 강도 변화 등의 정보를 활용하여 비정상 상태의 극치 해석 방법에 대한 연구 개발을 통해 기후 변화의 영향을 간접적으로 고려하는 시도가 필요하다고 본다.

현재까지 연안 구조물의 방재를 위한 핵심 자료인 설계조건(설계파, 설계해면 등) 산출에서, 지구의 기후는 지질학적 시간에 비해 비교적 짧은 기간 동안에는 통계적 특성이 크게 달라지지 않는 정상 상태라는 가정 하에서, 장기간 파랑 및 폭풍해일을 추산하여 극치 통계처리에 의해 설계조건을 산출하고 있다. 최근에는 많은 전문가들이 지구 온난화로 태풍의 강도와 빈도가 커져 앞으로 태풍으로 인한 피해가 심각해지리라 경고하고 있고, 이에 따라 설계파, 설계 해면 추산에 지구 온난화의 영향을 고려해야 한다는 주장이 제기되고 있다. 그러나 아직은 과학 기술이 지구 온난화에 따른 태풍의 강도 변화를 정량적으로 추정할 수 있는 수준까지 도달되지 못하여, 불확실한 예측에 의한 영향을 적용하여 연안 구조물을 설계하여 건설할 경우 과대 설계에 의한 막대한 건설비의 낭비를 초래할 수 있고, 그 반대의 경우에는 많은 피해를 입게 될 가능성도 있어서, 기후 변화에 따른 연안항만 재해 저감 대책 수립에 어려움이 있다.

지구 기후변화의 영향으로 해양과 연안 분야에서 발생할 수 있는 여러 문제가 있는데, 그 중에서 해수면의 상승과 태풍의 강도 변화에 따른 연안항만 재해 문제에 대해 살펴보고자 한다. 방파제 등 연안 시설물은 수명 동안에 내습할 최대의 파랑에 의해 파괴되지 않고 견디어낼 수 있도록 설계한다. 우리나라 남부 해안의 방재 시설물을 설계할 때에는, 과거 우리나라에 영향을 준 태풍을 정밀 분석하여, 설계파와 설계해면을 산출한 후 극치 통계에 의해 설계조건을 산출하고 있다. 지구온난화에 의한 지구 기온 상승으로 인한 해수면 상승은 해수면 침식, 침수 범람 피해 등 연안 지방에 많은 문제를 일으키게 된다. 해면 상승은 직접적으로는 시설물의 설계고의 추산에 그리고 간접적으로는 수심의 변화가 파랑이나 흐름에 영향을 미쳐 시설의 안전성이나 기능성에 영향을 주는 것이 예상되어 지구온난화에 의한 해수면 상승이 연안 시설물 설계에 영향을 미칠 수 있다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 유엔정부간 기후변화위원회) 의 해면 상승의 추정에는 큰 폭이 있다. IPCC의 제3차 보고서(2001)에서는, 2100년까지 0.09~0.88m의 상승이라고 예측했으며 최근에 수정보고(제4차 보고서(2007))에서 0.18~0.59m의 상승으로 예측의 폭을 좁히고 있다. 하지만 우리나라 각 해역에서 연안 시설물을 설계할 때에 지구 기후변화에 의한 해수면 상승을 어떻게 반영해야 하느냐는 문제가 있다. 즉, 해수면 상승이 조석, 폭풍해일 등으로 설정되는 설계해면 추산에 얼마나 영향을 미칠지 그리고 해수면 상승에 따른 연안 국지 파랑의 증가로 인한 천해설계파 설정에 얼마나 영향을 미칠지에 대한 것들이 아직 미지수이다.

이러한 지구온난화에 따른 폭풍의 강도의 변화를 어떻게 고려하느냐에 대한 문제는 연안 시설물의 설계에 어떻게 반영하여야 하는 지에 대한 문제로 이어진다. 연안 시설물 설계에 있어서 불확실한 정보에 의존 한다는 것은 제정적인 문제나 안정적인 문제에 있어서 바람직하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 단기간의 연구로 활용 가능한 기술의 개발은 어렵고 우리나라가 국제기구에서 추진하는 전 지구 관측 프로그램에 적극 참여하며 우리나라 주변 해양에 대한 장기간의 신뢰성 있는 관측 자료의 축적이 우선시 된다. 다시 말해서 기후 변화에 따른 장기 해일 특성 변화 예측을 연안해일 재해 저감 사업으로서 단기간에 적용 가능한 결과를 내기는 기대하기 어렵지만 외국에서의 이 분야의 연구를 지속적으로 따라가서 그 결과를 우리가 우리 지역에 대해 제대로 해석하고 활용할 수 있는 수준의 노력은 최소 투자해야 할 것이다.

나. 온난화에 따른 평균 해수면 변동의 추산

지구 온난화에 의한 여러 현상들 중에서, 항만 구조물의 안전에 영향을 주는 것은 해수면 상승과 태풍의 강도 변화에 따른 연안 구조물의 외력의 변화이다. 이중 해수면 상승에 관해서는 그 정도에 대해서는 조금씩 다르지만, 지구 온난화에 따른 기온 및 해수 온도의 상승에 관해서는, 해수면이 상승한다는 사실에는 대부분의 전문가들이 동의하고 있다. 해수면 상승은 점진적으로 일어나기 때문에 이에 대한 적응도 점진적으로 필요하다. IPCC 제4차 보고서(2007)는 이대로 온실 효과 가스가 계속 증가한다면, 2100년도에는 약 18~59cm 해면이 상승한다고 보고하고 있다. 이는 제3차 보고서(2001)의 예측에 비해 상승폭을 좁히고 있다.

1. 방법

해수면의 변화가 전 세계적으로 일률적으로 일어나지 않고 각 지역 별로 차이가 있다. 미래의 전 지구적인 해수면 변동은 주로 해양의 총 해수량, 해수층의 온도, 그리고

해양이 해수를 담는 용량을 결정하는 해저의 모양 등에 의해 결정된다.

총 해수의 량, 해수 온도는 지구 기후변화의 영향으로 변동하지만 마지막의 해저 지형은 지구 기후변화와 관계없이 지질학적 변화로 그 크기가 적어서 일반적으로 무시한다. 특정 지역에서의 해수면 추정은 국지적인 지반의 침강 혹은 상승을 고려하여야 하는데 이의 정량적인 추산도 매우 어려운 문제이다.

IPCC의 수정보고(제4차 보고서(2007))에서는 현재(1980~1999년)와 21세기말(2090~2099년)의 사이에 예측되는 해면 수위 상승은, B1 시나리오 0.18~0.38 m, B2 시나리오 0.20~0.43 m, A1B 시나리오 0.21~0.48 m, A1T 시나리오 0.20~0.45 m, A2 시나리오 0.23~0.51 m, A1FI 시나리오 0.26~0.59 m 등으로 지구 기후변화의 각 시나리오 마다 조금씩 차이가 있으며 전체가 0.18-0.59 m 사이에 포함된다. 최근의 연구에서 해면 상승 예측에 관련되는 몇 개의 연구에성에 보다 좋은 정보를 얻을 수 있어서 IPCC의 3 차 평가보고서(2001년)에 나타난 범위의 폭 (0.09~0.88m) 보다 좁아졌다. 모든 시나리오에 대해, 21 세기의 평균해면 상승률이 1961~2003 년의 평균해면 상승률을 추월 가능성은 꽤 높다. A1B 시나리오의 2090~2099 년으로는, 상승률의 중위 추정치는 년 당 3.8 mm 이다.

지구 기후변화의 영향과 국지적 지각 변동의 영향을 종합적으로 포함한 실제 해수면의 변동을 과거 장기간의 검조소 자료 분석으로 파악하고 장래의 예측을 실시하는 것으로 과거의 해면 상승의 추정은 주로 검조 기록을 해석한다. 전 세계적으로 지역적인 변화가 있어 우리 해역에서의 추산을 위해서는 우리나라의 장기간 검조소 자료의 검토와 더불어 인접 국가인 일본과 중국의 장기간 관측 자료의 검토가 필요하다. 가장 간단한 방법은 각 해역별로 분석된 변화율을 연안 시설물의 사용 기간인 향후 50년 또는 100년의 장래에 대해 적용하는 것이다. 다른 방법은 검조소 자료를 이용하여 전반기의 상승률과 후반기의 상승률을 구분하여 분석하여 상승률의 변화를 구해 내어 적용하는 방법과 우리나라 각 해역에서 분석된 해수면 변동률을 기반으로 IPCC의 각 시나리오에서 추정된 해수면 상승률의 변화를 우리 해역에 간접적으로 보정해 주는 방법 등으로 향후 20년, 30년, 50년, 100년 등에 대한 평균 해수면 상승을 추산하고 이를 상호 비교 평가하여 설계에 적용할 수 있는 예측치를 생산 제공하고자한다.

2. 우리나라 각 검조소의 해수면 변화

우리나라의 해수면 변동에 대하여는 대부분 연안 조석관측소(검조소) 자료를 중심으로 여러 연구자들의 조사가 있다. 우리나라 검조소 자료를 연안 시설물의 설계 조건 추

산의 입장에서 정밀 분석하고자 한다. 그 결과와 일본 등 인접 국가의 자료의 분석 그리고 각국의 연구기관에서 전 지구 그리고 특히 북서 태평양의 예측 결과를 종합하여 각 해역별 예상 상승치를 추산에 활용한다.

가. 분석 자료 및 분석 방법

우리나라에서 해수면 관측은 국립해양조사원의 검조 관측소에서 관측 기록과 그 외에 연안항만 개발 건설 사업 지원 또는 연안 연구 등을 위한 관측 자료들이 있는데 후자는 그 기간이 짧아 본 목적으로는 이용하기가 어렵다. 여기서는 조사원 검조 기록 중 그 관측 기간이 충분히 긴 것을 이용했다. 그림 3.3.34는 분석에 이용된 검조 관측소의 위치를 보여 준다.



그림 3.3.34 국립해양조사원의 검조소위치

본 조사에서는 계절적인 변화 특성 보다는 장기간의 변화 특성을 보는 것이 주목적이기 때문에 각 검조 관측 자료에서 매년 평균을 구하여 년 평균해면을 정리했다. 이 분석에서 이상 자료는 평균해면 계산에 영향을 미치기 때문에 모든 자료를 일일이 그림을 그려 확인하고 이상한 부분을 수정하여 분석에 사용하였다.

나. 각 검조관측소에서 해수면의 변화

그림 3.3.35는 동서 남해 각 검조소에서 분석한 평균해면의 변동을 보여 준다. 각 검조소가 기준면이 다르기 때문에 레벨은 다르나 일반적으로 변동을 하면서 조금씩 상승하는 추세를 보여 주고 있다. 그림 3.3.36은 각 관측소에서 상대적 변화를 보기 위해 각 관측소에 장기 평균에서의 편차를 보여 준다. 각 관측소 마다 상승폭이 조금씩 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 각 검조소에서 평균해면의 변화를 시간(단위: 년)의 선형함수로 가정할 때, 그 기울기와 접선은 표 3.3.14와 같다.

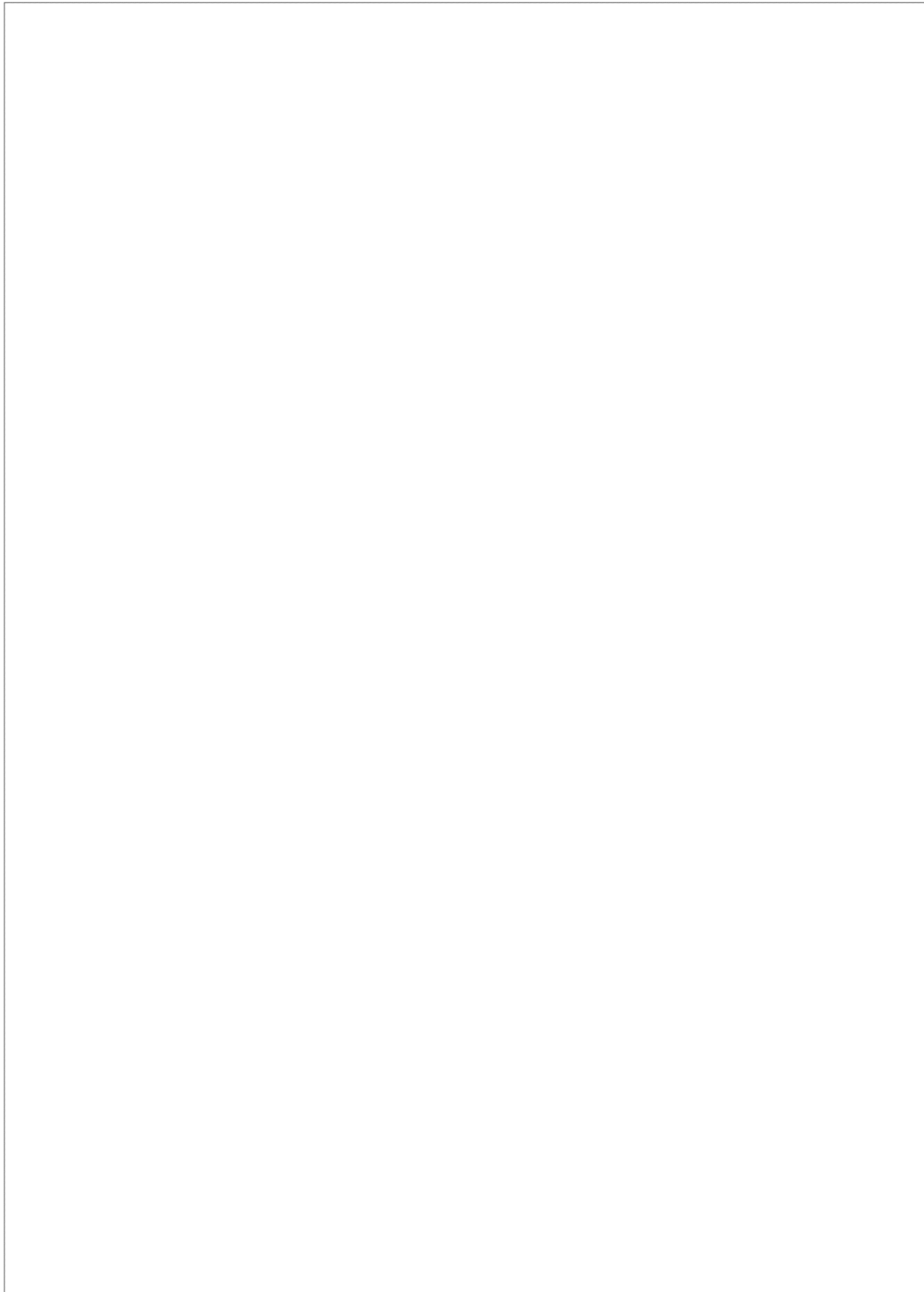


그림 3.3.35 각 검조소에서의 년 평균해면의 시간적 변화



그림 3.3.36 각 관측소의 년 평균해면의 편차

표 3.3.14 각 검조소의 평균해면의 선형 변동 상수

검조소	기울기	접선
속초	0.224691	-7.0778
목호	0.073375	-1.9901
울릉	0.200390	-6.5898
포항	0.372858	-11.7055
울산	0.043694	-1.1972
추자	0.216185	-7.7630
통영	0.218555	-7.1395
제주	0.521982	-13.3602
거문	0.585128	-20.7720
서귀	0.585893	-21.5183
가덕	0.238229	-7.8997
완도	0.202237	-7.1963
여수	0.147183	-3.8494
부산	0.175554	-4.3163
안흥	0.324132	-11.6148
대흑산	0.074128	-2.3227
목포	0.767269	-19.5836
인천	0.062778	-1.5653
보령	0.777097	-28.5972
군산외항	0.166877	-5.8324

그림 3.3.37은 각 검조소별 년 평균해면의 변동을 시간(년)에 따라 선형적으로 변한다고 할 때 관계식을 보여 준다.

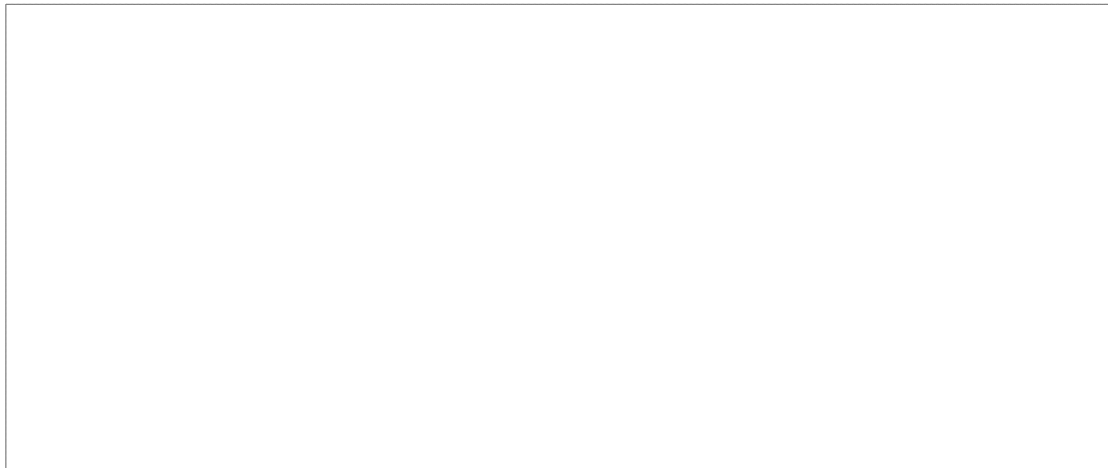
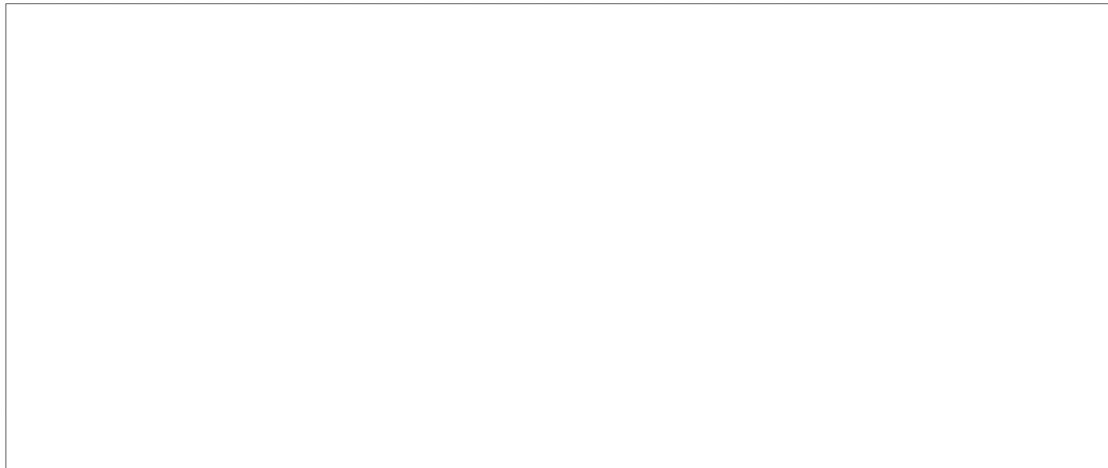
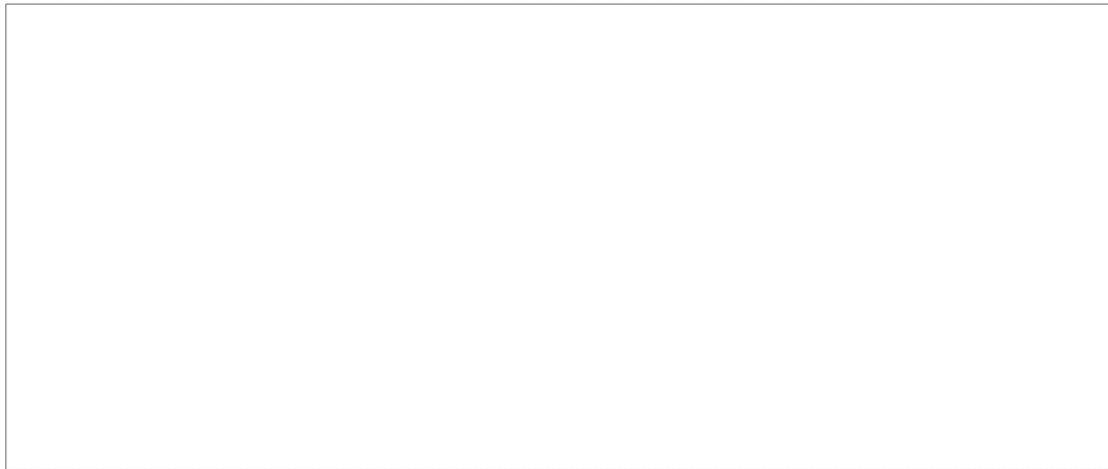


그림 3.3.37 각 검조소별 년 평균해면의 시간에 따른 변동 관계식

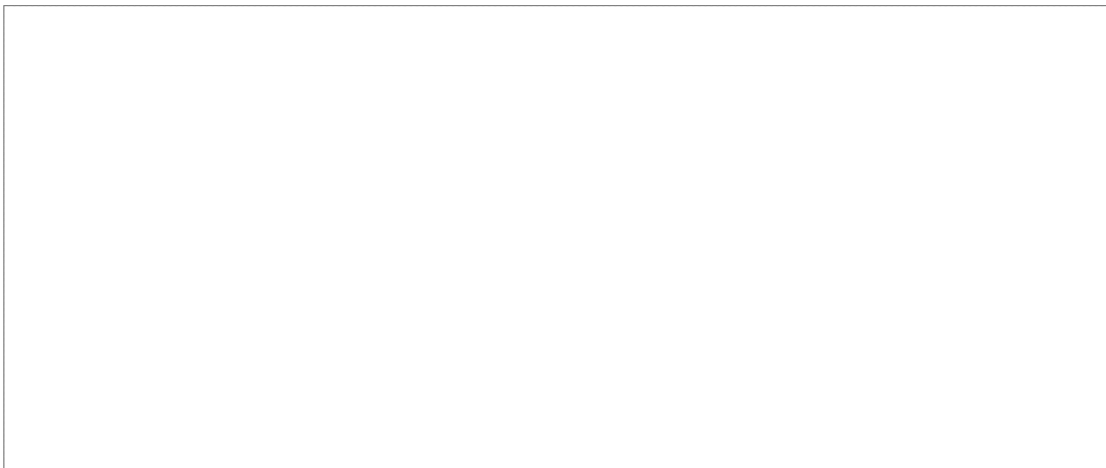
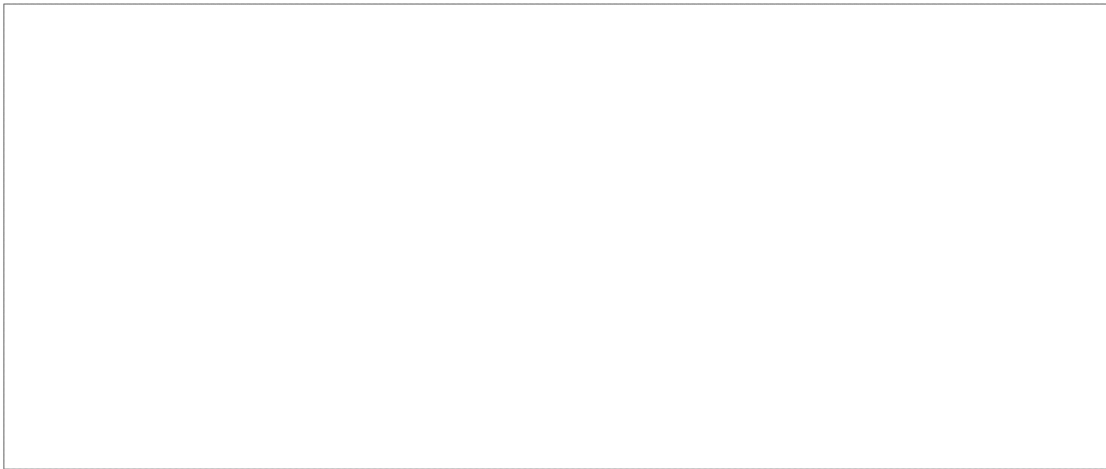
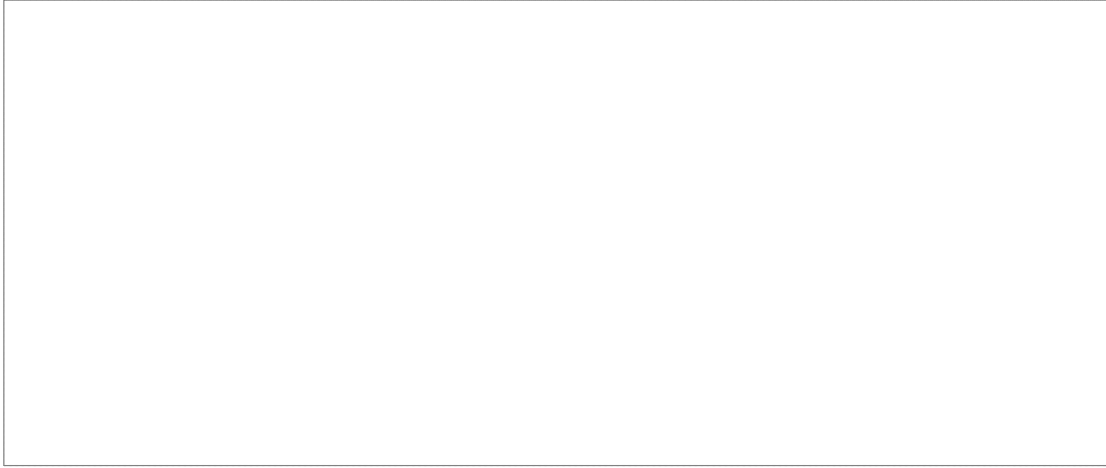


그림 3.3.37 계속

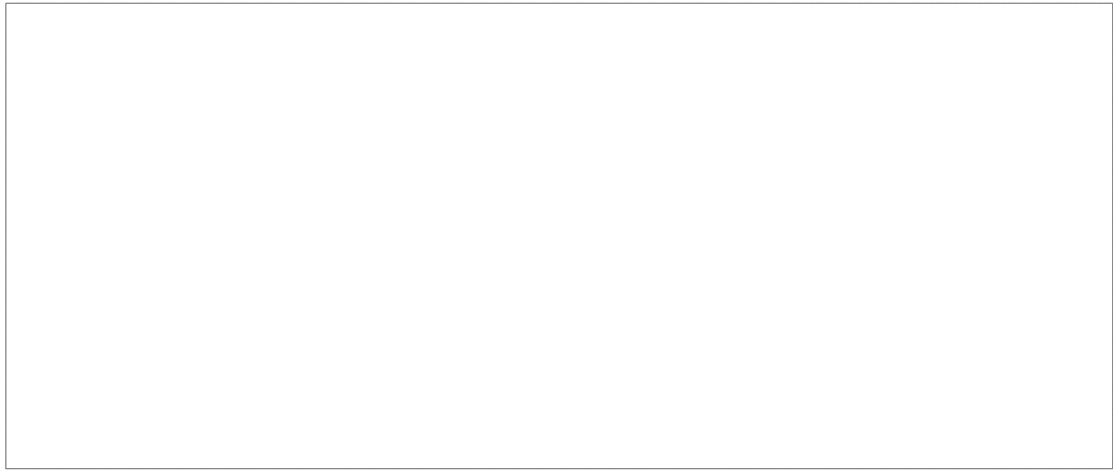
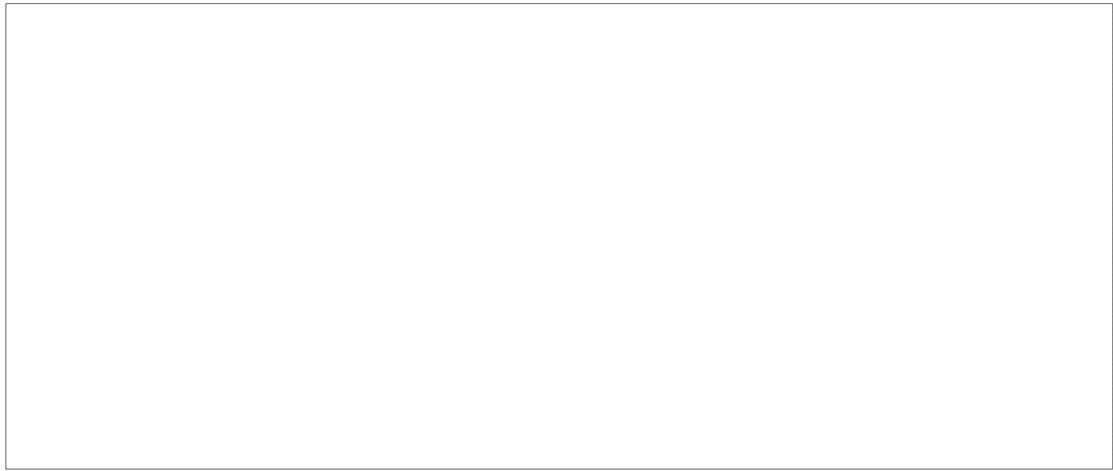
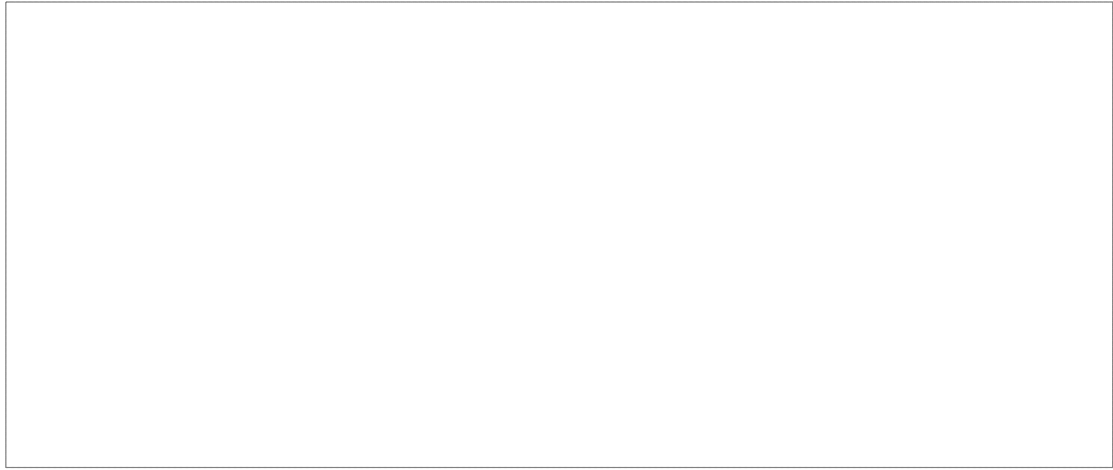


그림 3.3.37 계속

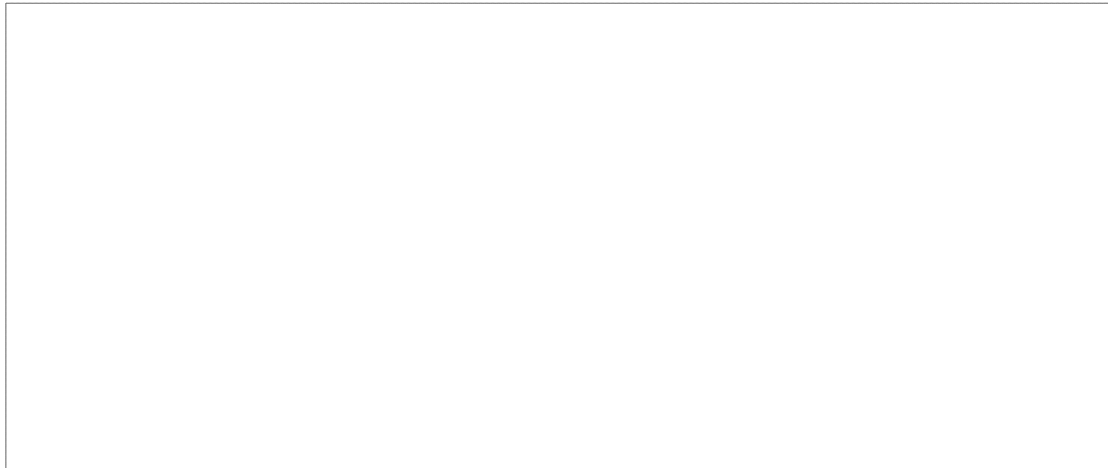
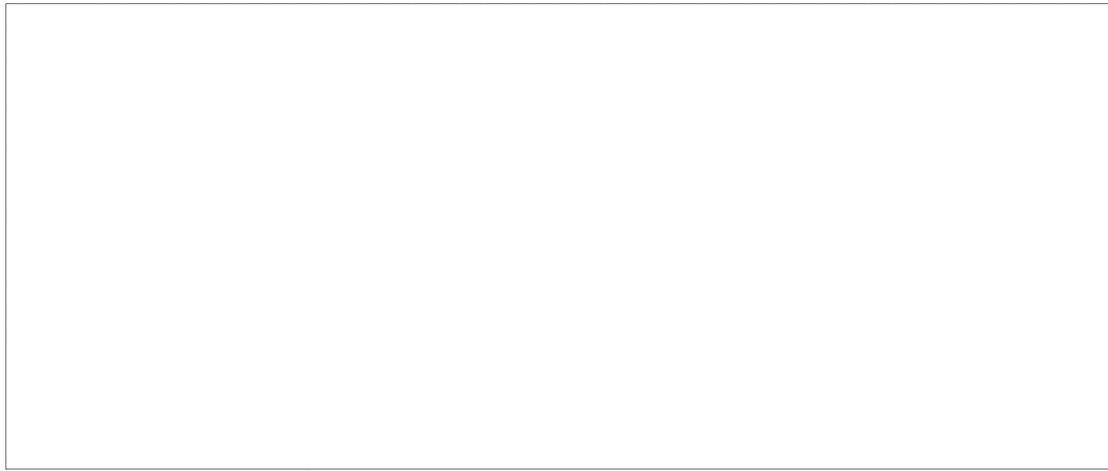
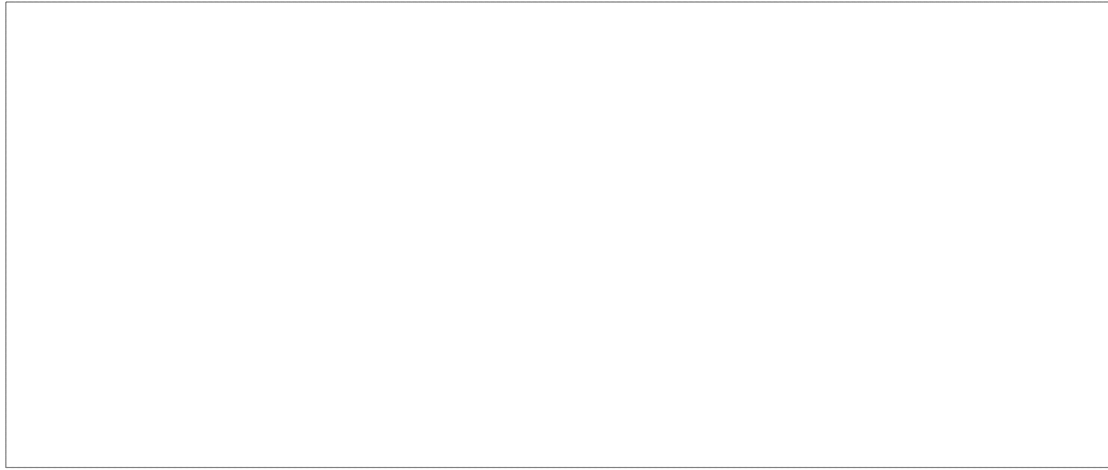


그림 3.3.37 계속

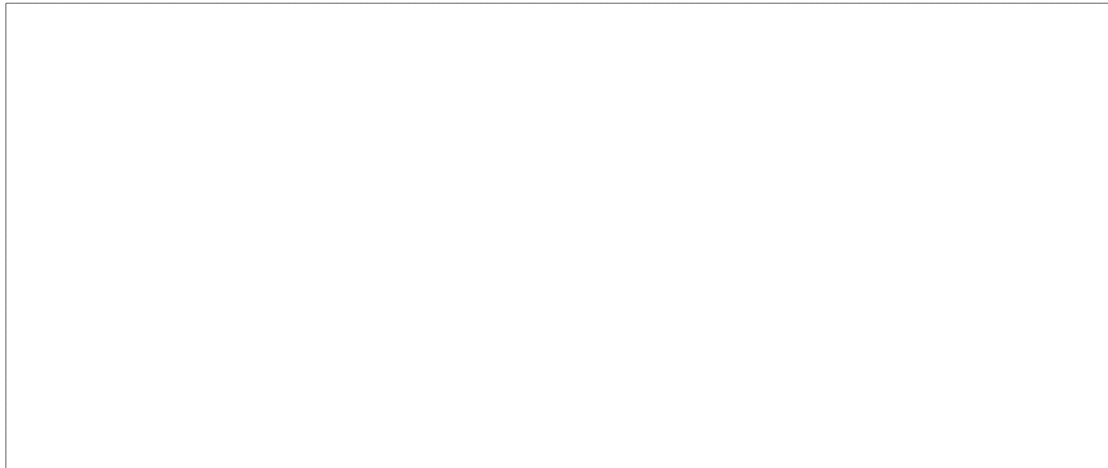
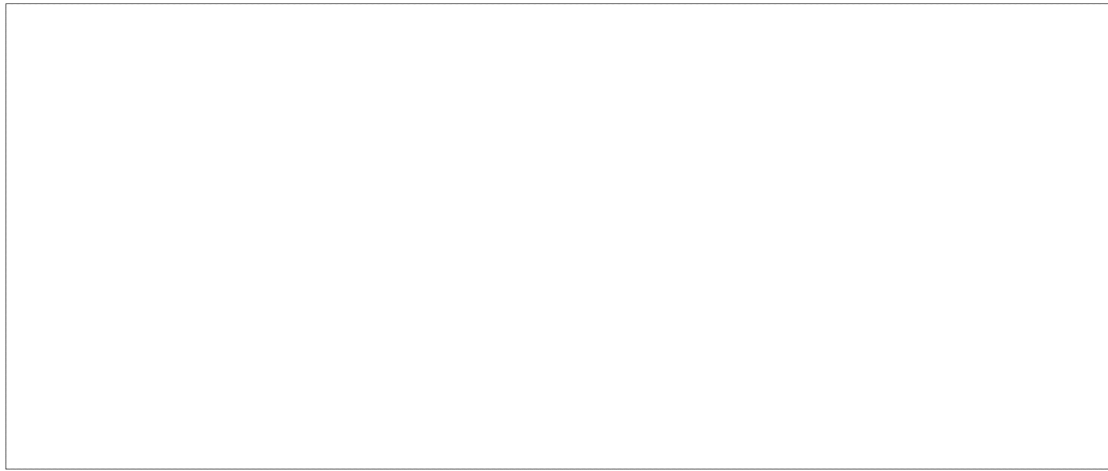


그림 3.3.37 계속

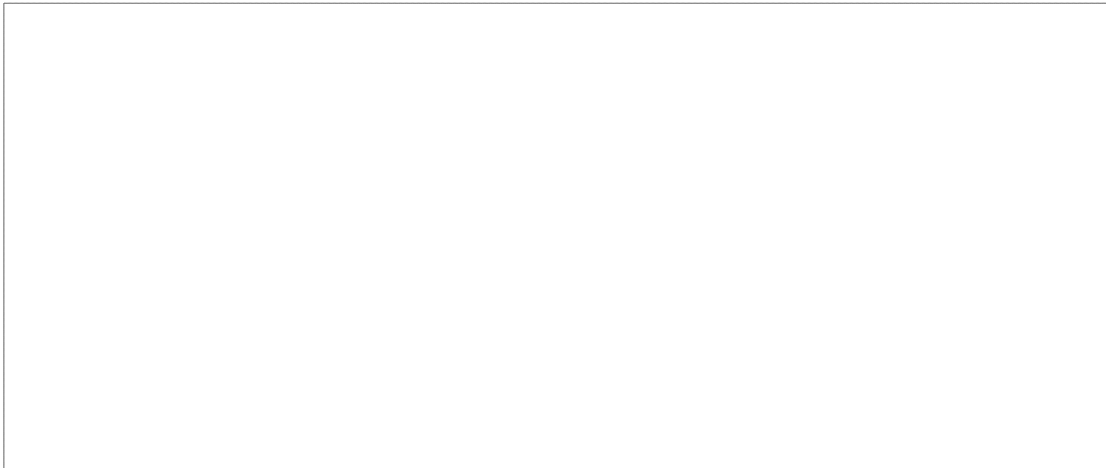
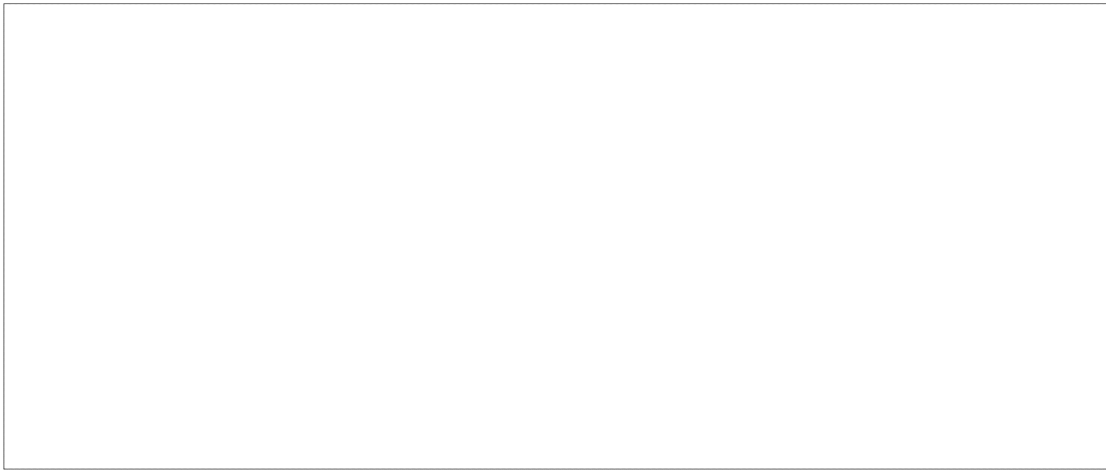
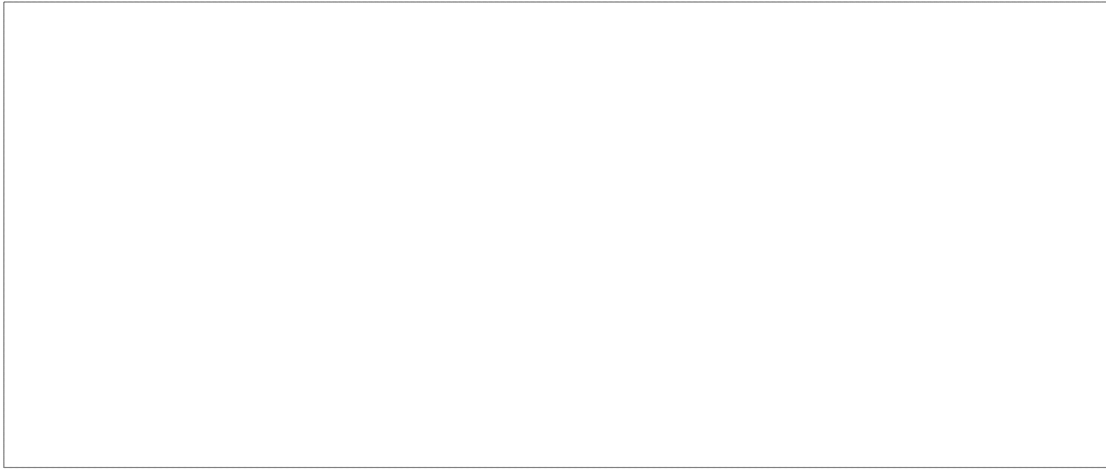


그림 3.3.35 계속

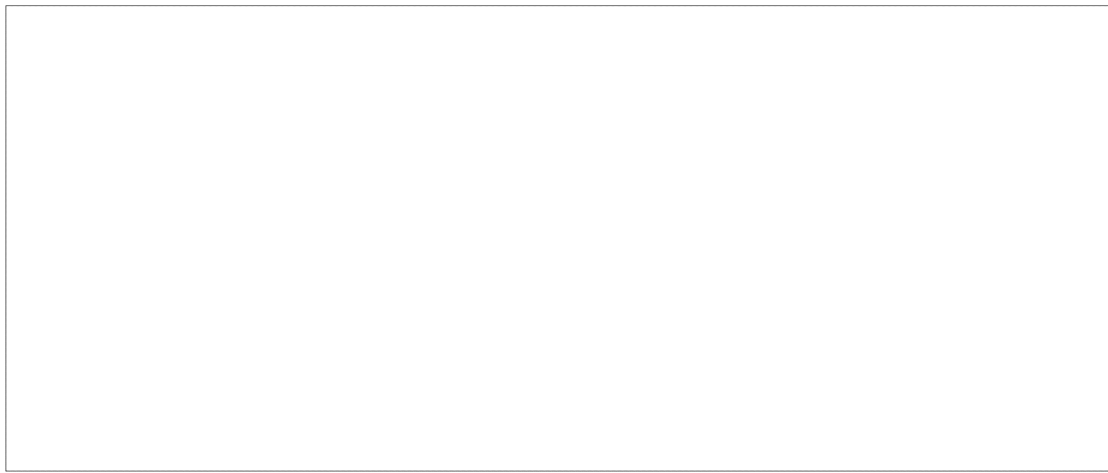
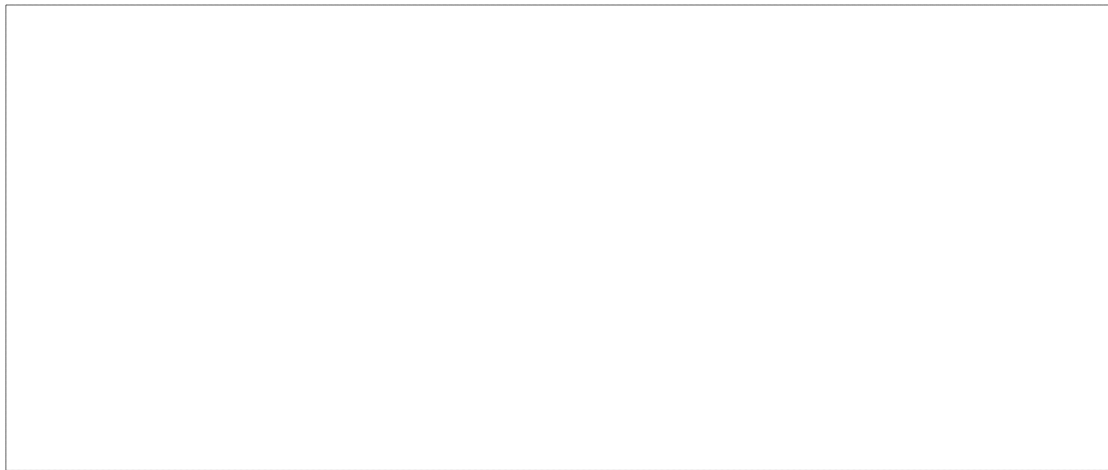


그림 3.3.37 계속

표 3.3.15에서는 각 검조소별 년 평균해면의 연간 증가율과 각 해역별 평균 증가율을 보여준다. 우리나라 해역의 년 평균해면의 평균 증가율은 동해가 2.2mm/year, 남해는 3.2mm/year, 서해는 3.7mm/year이 되며 전체평균은 3.1mm/year로 나타났다. 남해 중 제주, 서귀, 거문도가 높아, 제주해역으로 분리하면 제주해역 평균은 0.564cm/year 으로 가장 높게 나타난다.

다. 인접 국가의 해수면 변화 분석 결과

그림 3.3.38은 일본에서 장기 해면 변동 연구에 많이 사용된 검조소위치를 보여 준다. 이 그림 중에 빨강 색깔로 된 검조소는 지각변동의 영향이 적다고 추정되고 있는 검조소로 많은 일본 주변의 해면 수위의 변동에 관한 종래의 연구에 이용되었다.

과거 30년간의 일본 주변의 해양 기원 해면 수위 변동률(단위 : mm/년)는 그림 3.3.39에서 보여 주는 것과 같이 이시카와현 와지마, 아이치현 나고야 부근을 지나는 자오선(동경 137 도선)의 동서에서 경향이 정반대로 나타난다.

동일본(검조소 번호 1~26, 45~48)과 서일본(27~44)에서 평균한 해양 기원의 해면 수위 변동 경향은 그림 3.3.40과 같이 서일본에서는 상승(+2.4 mm/년), 그리고 동일본에서 하강(-3.1 mm/년)을 보여준다.

표 3.3.15 각 검조소별 년 평균해면의 증가율 및 각 해역별 평균 증가율

관측해역	검조소	년 평균해면의 증가율 (cm/year)
동해	속초(SC)	0.225
	목호(MH)	0.073
	울릉(UR)	0.200
	포항(PH)	0.373
	울산(US)	0.044
	평 균	0.183
남해	추자(CJ)	0.216
	통영(TY)	0.219
	제주(JJ)	0.522
	거문(KM)	0.585
	서귀(SG)	0.586
	가덕(KD)	0.238
	완도(WD)	0.202
	여수(YS)	0.147
	부산(PS)	0.176
	평 균	0.321
서해	안흥(AH)	0.324
	대흑산(DH)	0.074
	목포(MP)	0.767
	인천(IC)	0.063
	보령(BR)	0.777
	군산외항(KO)	0.167
	평 균	0.362
관측소전체	평 균	0.299

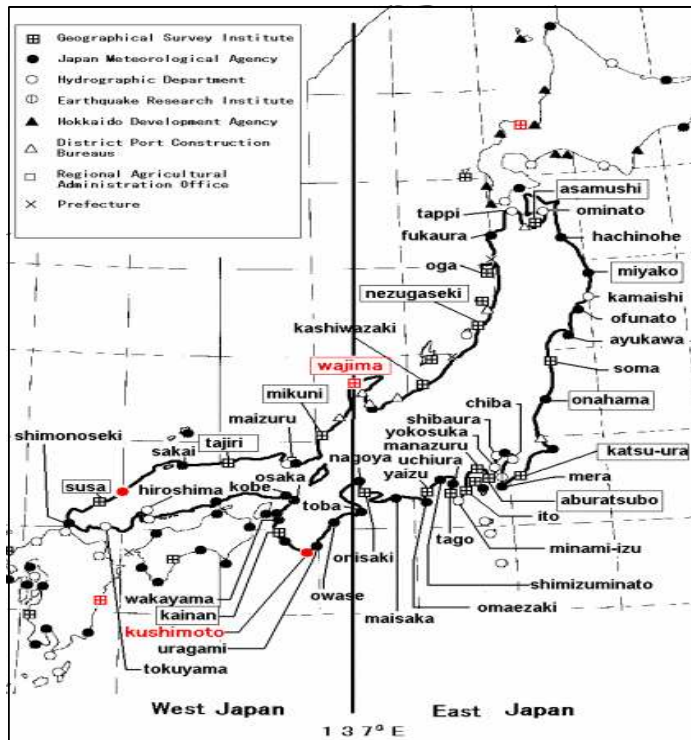


그림 3.3.38 일본의 해수면 변동 연구에 주로 사용된 검조소

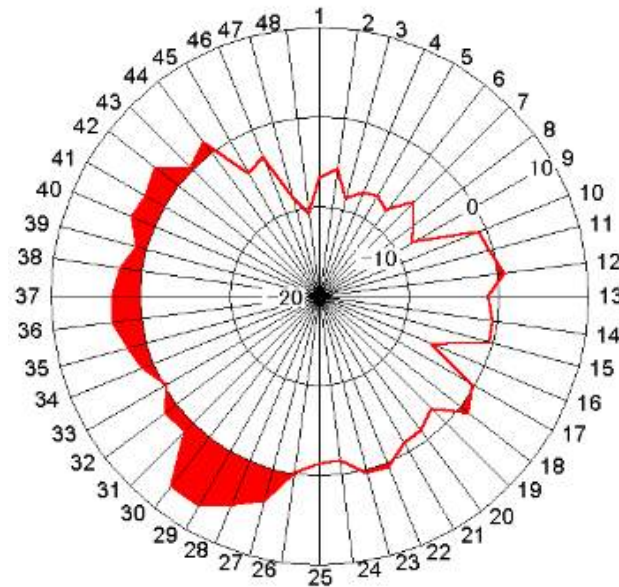


그림 3.3.39 일본의 각 검조소에서 지난 30년간 해수면 변동

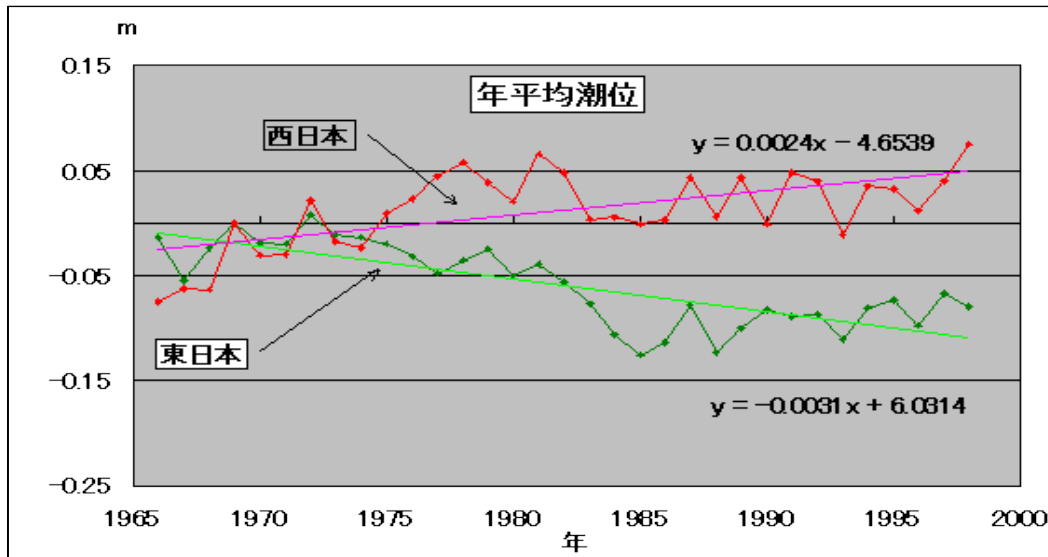


그림 3.3.40 동일본과 서일본에서의 년 평균해면의 변동

중국 국가 해양국은 최근 해수면 상승 영향평가 분석 결과를 발표 했다. 최근 30년간 중국 연근해의 평균 해수면은 현저하게 상승했고, 상승속도는 전 지구의 평균치를 유지했다. 중국 연근해의 해수면 전체의 상승은 90 mm에 달했다. 그 중, 천진 연안의 상승률 196 mm로 가장 높게 나타났고, 상해가 다음으로 115 mm, 산둥, 절강이 100 mm 내외, 복건, 옌둥이 약 50~60 mm로 전체적으로 북방이 빠르고 남방이 느리게 나타났다.

2007년 중국 연근해 해수면 상승속도는 전지구의 평균을 능가했다. 2007년 중국 연근해 해수면 평균상승속도는 약 2.5mm/년 으로 이는 전 지구의 해수면 상승 속도인 1.8 mm/년 보다 크게 나타났다. 발해, 황해, 동중국해와 남중국해는 각각 2.2mm/년, 2.5mm/년, 3.1mm/년 그리고 2.4mm/년 이다. 기후변화와 중국연근해의 해수면상승은 밀접한 관계가 있다. 최근 30년 이래, 중국연근해 기온상승은 1.1℃, 수온 상승은 0.9℃, 동기간 중국연근해 해수면이 크게 상승했다. 이 때, 상승폭이 90 mm에 도달했다. 그림 3.3.41은 중국 연안의 평균 해수면의 변화 곡선을 보여 주고 그림 3.3.42는 중국의 각 검조소에서의 해수면 변화 곡선을 보여 준다.



그림 3.3.41 중국 연안 평균해면 변화 곡선

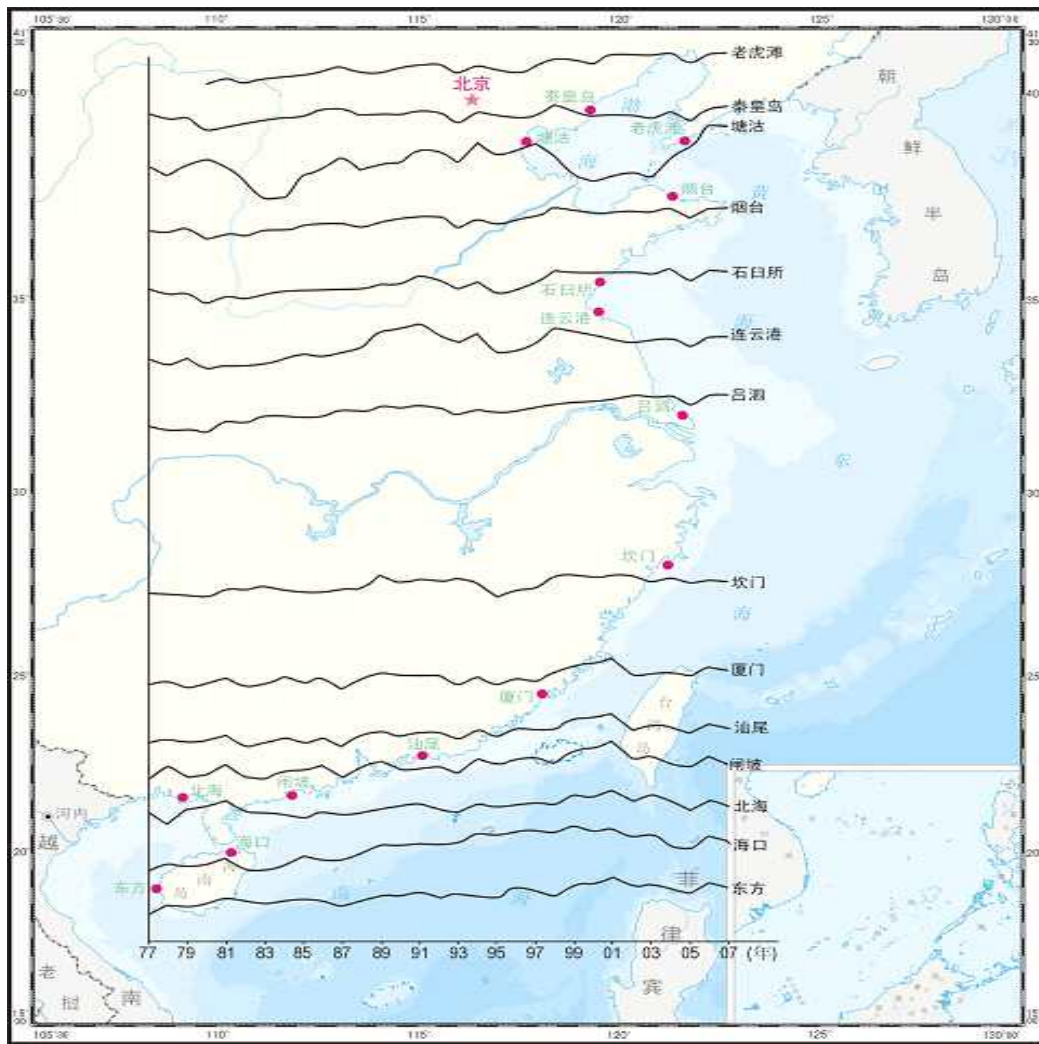


그림 3.3.42 중국 연안 각 검조소에서의 평균해면의 변화 곡선

라. 기후변화 시나리오에 따른 해수면 변화 추산

지구온난화에 의한 해면 상승은 장기적으로 일어난다, 그리고 아직은 예측의 불확실성이 많은 현상이기 때문에, 장래의 예측을 정확하게 실시하는 것은 매우 어렵다. 우리나라와 인접 국가에서 장기간 해수면 변동 분석 결과와 IPCC의 지구온난화의 각 시나리오에 따른 추정 결과를 종합적으로 평가하여 활용하지만 지속적인 정밀한 해수면 변동의 모니터링을 통해 그리고 기후 연구의 진전에 의한 시뮬레이션 결과에 따라 수시로 체크하여 예측의 확실성을 높여야 한다.

해수면 변동률 분석 결과에 IPCC의 각 배출 시나리오에 따른 미래 기후변화예측에 대한 해수면 상승전망을 살펴보도록 한다. 현재의 기후변화 완화 정책과 그에 관련된 지속가능 발전 관행으로는 전 지구 온실가스 배출량이 다음 몇 십 년 동안에도 계속 증가할 것이라는 공감대가 높고 증거 또한 많다. SRES는 IPCC 배출시나리오에 관한 특별보고서(IPCC, 2000)에서 설명된 시나리오를 말한다. SRES 시나리오는 크게 4개 시나리오(A1, A2, B1, B2)로 나뉘며, 그것들은 대체 발달경로를 탐구하고 폭넓은 범위의 인구통계적, 경제적, 기술적 변화 동인과 결과적인 온실가스 배출을 다룬다. SRES 시나리오는 현재의 기후정책 외의 추가 기후정책을 포함하지 않는다. 미래 기후변화에 대한 평가에는 배출량 전망이 폭넓게 사용되고, 사회경제적, 인구통계적, 기술적 변화에 관한 기본 가정들이 최근의 기후변화 취약성과 영향 평가에 입력 자료로 사용된다. A1 시나리오의 줄거리는 세계 경제의 매우 급속한 성장, 금세기 중반에 최고에 도달할 지구촌 인구, 새롭고 좀 더 효율적인 기술의 급속한 도입을 가정한다. A1 시나리오는 설명하는 기술변화 방향에 따라 다음 3개 군, 화석 집약적(A1FI), 비화석 에너지 자원(A1T), 모든 자원 간의 균형(A1B)으로 나뉜다. B1 시나리오는 지구 인구는 A1과 같지만 경제구조는 서비스 및 정보 경제 쪽으로 좀 더 급속히 변하는 수렴적 세계(convergent world)를 기술한다. B2 시나리오는 인구와 경제 성장이 A1과 B1의 중간인 세계를 기술하며 경제적, 사회적, 환경적 지속가능성에 대한 지역적 해법을 강조한다. A2 시나리오는 인구증가율이 높고 경제발달은 느리고 기술변화도 느린 매우 이질적인 세계를 기술한다.

향후 20년 동안 SRES 배출 시나리오 범위에 대하여 약 0.2°C/10년 상승률로 온난화가 진행될 것으로 전망된다. 온실가스와 에어러솔 농도가 2000년 수준으로 일정하게 유지된다 하더라도 기온은 0.1°C/10년 비율로 온난화 될 것으로 예상된다. 그 후의 기온 전망은 배출 시나리오에 따라 달라진다.

해수면 상승을 일으키는 중요한 효과 중 일부분에 대한 이해가 너무 제한적이기 때문에 이 보고서는 가능성(likelihood)을 평가하지 않고 해수면 상승의 최적추정치나 상한을 제시하지도 않았다. 모델에 기초한 21세기 말 지구평균 해수면 상승 전망도 표 3.3.16

은 에 나타냈다. 이 추정치들은 1개의 단순 기후 모델과 몇 개의 EMIC (중간 복잡도 기후 모델), 다수의 AOGCM뿐 아니라 관측치 한계를 포함하는 계층적 모델로부터 추정되었다. SRES B1, A1T, B2, A1B, A2, A1FI 시나리오에서, 2100년의 인위적 온실가스 및 에어러솔로 인한 복사강제력 계산치에 대응하는 대략적 CO₂ 농도는 각각 약 600, 700, 800, 850, 1,250, 1,550ppm이다. 기온 변화는 1980~1999년 기간의 기온과의 차이이다.

표 3.3.16 세기 말 지구 평균 기온 온난화와 해수면 상승 전망

시나리오	기온변화 (°C, 1980~1999년 대비 2090~2099년)		해수면 상승 (m, 1980~1999년 대비 2090~2099년)
	최적추정치	가능범위	모델에 기초한 범위 (빙하 유출의 향후 급속한 역학적 변화는 제외)
2000년 농도로 일정	0.6	0.3~0.9	유효한 자료 없음
B1 시나리오	1.8	1.1~2.9	0.18~0.38
A1T 시나리오	2.4	1.4~3.8	0.20~0.45
B2 시나리오	2.4	1.4~3.8	0.20~0.43
A1B 시나리오	2.8	1.7~4.4	0.21~0.48
A2 시나리오	3.4	2.0~5.4	0.23~0.51
A1FI 시나리오	4.0	2.4~6.4	0.26~0.59

5. 폭풍해일 설계 해면 적용에 대한 제언

해안선이 복잡한 서남해안에 대해 더욱 정밀한 폭풍 해일고의 산정을 위해 연안 수심격자 간격이 약 300 m 의 정밀 격자망에 의한 폭풍해일 모델에 의해 폭풍해일 시뮬레이션에 의해 폭풍 해일고를 산출했다. 1951년에서 2006년 사이에 우리나라에 영향을 준 201개의 태풍에 대한 폭풍해일고 산출 결과를 극치 해석하여 설계해면을 구하였고 아울러 Design Storm을 설정하여 이에 대한 폭풍해일을 산출하여 설계해면을 구하는 방법도 적용하여 그 결과를 제시했다. 폭풍해일 모델은 KORDIS 모델, MOHID 모델 그리고 FVCOM 모델 등 3개의 폭풍해일 모델을 적용하여 그 결과를 제시했다. 전 연안에 대해 매 300 m 마다 폭풍해일에 의한 설계 해면을 산출하여 데이터 베이스를 만들었고 해안선을 따라 매 10개 격자 마다의 설계해면 산출 결과를 부록에 제시했다. 워낙 많은

산출 결과를 매 300m 라는 정밀 격자에 대해 구하느라 그 계산 지점의 선정, 내삽 등 과정에서 약간의 오차를 보일수가 있기 때문에 실제 특정 지점에서 설계 하면 산정을 위해서는 그 점 주위의 각 격자점에서의 산출 결과를 비교 분석하여 확인하는 것이 안전하다고 할 수 있겠다. 산출 결과는 201개의 태풍에 대한 산출 결과를 극치분석한 것과 design storm에 의한 산출 결과를 동시에 제시했는데 일반 적용시에는 전통적인 장기 폭풍해일 산출에 의한 결과를 적용하는 것을 추천하며, 이 중에서도 unstructured grid 모델인 FVCOM 모델의 결과를 적용하는 것이 더 낫다고 생각된다. 이용자의 요구에 따라 design storm에 의한 설계 해면도 적용할 수도 있을 것이다.

폭풍에 의한 해수면의 상승은 풍파의 영향을 받는다. 풍파는 해면의 조도를 좌우하게 되어 바람의 응력뿐만 아니라 해저면 마찰에 영향을 주고 또 쇄파의 영향으로 풍성류에 영향을 주어 폭풍해일의 산정에 영향을 준다. 폭풍해일의 산출에 풍파의 영향을 고려하는 수치 모델은 수립되어 있지만 많은 태풍에 의한 해일고 산정에 작업량이 너무 많아 설계하면 산출에 적용하지 않았다. 일반적으로 태풍에 의한 해일 발생시에 고파도 동시에 발생함으로 향후 더욱 정밀한 폭풍해일에 의한 설계하면 산출을 위해 풍파의 영향을 고려하는 것이 필요하다. 해저면이 완만하여 풍파가 해안에 도달하기 전에 쇄파가 일어나는 경우에 Wave set-up에 의한 해수면 상승을 고려하여야 한다. 이 경우에 최대 해일고가 일어나는 시각에 꼭 최대파가 일어나는 것이 아니지만 일반적으로 태풍 통과시에 해일과 풍파가 같이 일어나기 때문에 안전한 설계를 위해서는 설계파에 의한 wave-set-up을 계산하여 폭풍해일에 의한 설계 해면에 선형적으로 더해 줄 수 있으나 더욱 정확한 계산이 필요한 경우에 폭풍해일 계산 시에 풍파의 계산을 통한 wave set-up를 동시에 계산하는 것이 요구된다.

조석과 폭풍해일은 장파 방정식에서 이류항, 해저면 마찰 소산항 등 비선형 항에 의해 서로 영향을 주고 또 흐름으로부터 해수면을 계산시의 연속 방정식에서도 서로 영향을 주는데 이 조석과 폭풍해일의 상호 작용은 폭풍해일과 조석과의 위상에 따라 다르게 나타난다. 일반적으로 조석에 의한 고조위에 폭풍해일을 선형적으로 합하면 실제 해수면 보다 더 크게 된다. 안전한 설계를 위해서는 이 방법을 택할 수 있지만 경제적인 설계를 위해서는 조석과 폭풍해일에 위상에 따른 보정이 필요하다. 조석에 의한 약최고 고조위에 폭풍 해일고를 선형적으로 더할 때에 조석과 폭풍해일의 상호 작용의 영향을 보정해 주는 방법에 대해서는 추후 발표할 예정이다.

본 연구에서의 빈도분석은 현재의 지구의 기후가 향후 50년, 100년의 기간 동안에 그 통계적 특성이 변하지 않는다는 가정을 바탕으로 과거 장기간의 자료를 분석하여 통계적으로 미래를 예측한 것이다. 아직은 지구 기후 변화에 의해 태풍의 강도나 빈도에

대한 정량적인 예측이 불가능하기 때문에 이를 고려한 설계 해면 산출은 현재 기술로는 한계가 있다. 현재로서는 비록 논란은 되고 있지만 지구 기후 변화의 영향을 반영하지 않고 전통적인 방법에 의한 설계 해면을 추산할 수밖에 없는 상황이다. 설계해면 산정 시 지구 기후 변화 영향을 고려하기 위해서는 이와 관련된 자료와 연구 결과를 면밀히 추적하고, 동북아시아 지역에 대한 중장기적인 연구 개발이 필요할 것으로 생각된다.

서해 중부 이북의 연안에서는 비태풍성 폭풍의 영향도 무시할 수 없기 때문에 이에 대한 추산도 수행하여 태풍시와의 비교 평가도 해볼 필요가 있겠다. 이 경우 비태풍성 폭풍은 비교적 그 발생 빈도가 태풍보다 크기 때문에 산출 기간을 태풍보다는 상대적으로 짧은 기간에 대해 수행해도 큰 문제는 없을 것이다. 특히 2월의 백중 사리와 동시에 발생하는 비 태풍성 폭풍에 의한 해일은 그 영향이 클 수 있기 때문에 주위를 요한다.

제 4 절 지진해일 추산 모델 및 동해안항만 설계해면 산출

1. 지진해일에 의한 동해연안 간이 설계해면 추산

가. 동해안 무역항 및 연안항 정밀격자 생성(유한차분모형)

(1) 우리나라 동해에 영향을 미치는 지진해일은 주로 일본의 서해안 지역에서 발생하므로 지진해일을 모의하기 위해서는 동해 전체를 포함하여 계산을 수행해야함. 또한 진원역으로부터 대화퇴(Yamato Rise)를 거쳐 전파되는 지진해일의 거동을 정도 높게 해석하기 위해서는 지진해일이 전파되는 해저 지형을 실제에 가깝게 표현할 수 있도록 조밀한 크기의 유한차분 격자를 사용하여야함. 그러나 조밀한 크기의 격자를 사용하게 되면 계산시간의 증가와 계산시간 간격의 세분화에 따른 누적오차의 증대가 유발될 수 있으므로 본 과제에서는 해당 영역을 다른 격자크기를 갖는 영역들로 세분화하여 다중격자 연결모형을 사용함. 지진해일 전파모형을 사용하는 예비모의에서는 다중격자 연결모형을 사용하기위해 각 항구마다 총 3개의 영역을 사용하였고 A, B 영역은 13개 항구 모두 동일함(그림 3.4.1). 각 영역별 계산 조건은 표 3.4.1과 같음

표 3.4.1. 각 영역별 계산 조건

	A 영역	B 영역	C 영역	
격자간격	60 sec (약 1,440m)	20 sec (약 495m)	6.67 sec (약 165m)	
계산시간간격	3 sec	1 sec	0.33333 sec	
격자수	900×931	925×1,408	속초, 주문진, 옥계, 묵호, 동해, 삼척, 후포, 포항, 구룡포항	496×679
			울산항	496×559
			부산, 부산남항	559×364
			울릉항	460×667
외해경계조건	자유투과	다중격자연결	다중격자연결	
수치모형	선형모형	선형모형	선형모형	

(2) 국립해양조사원에서 제공받은 동해 상세 수심을 사용함으로써 정확도 높은 수심자료가 구축됨. 구축된 수심자료의 크기와 수심분포는 다음 그림 3.4.1, 3.4.2와 같음

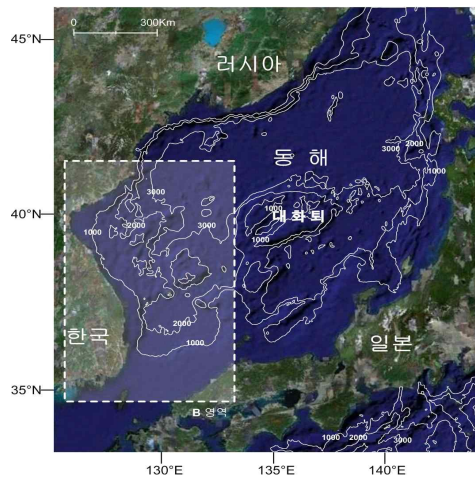


그림 3.4.1 13개 항구의 A, B 영역

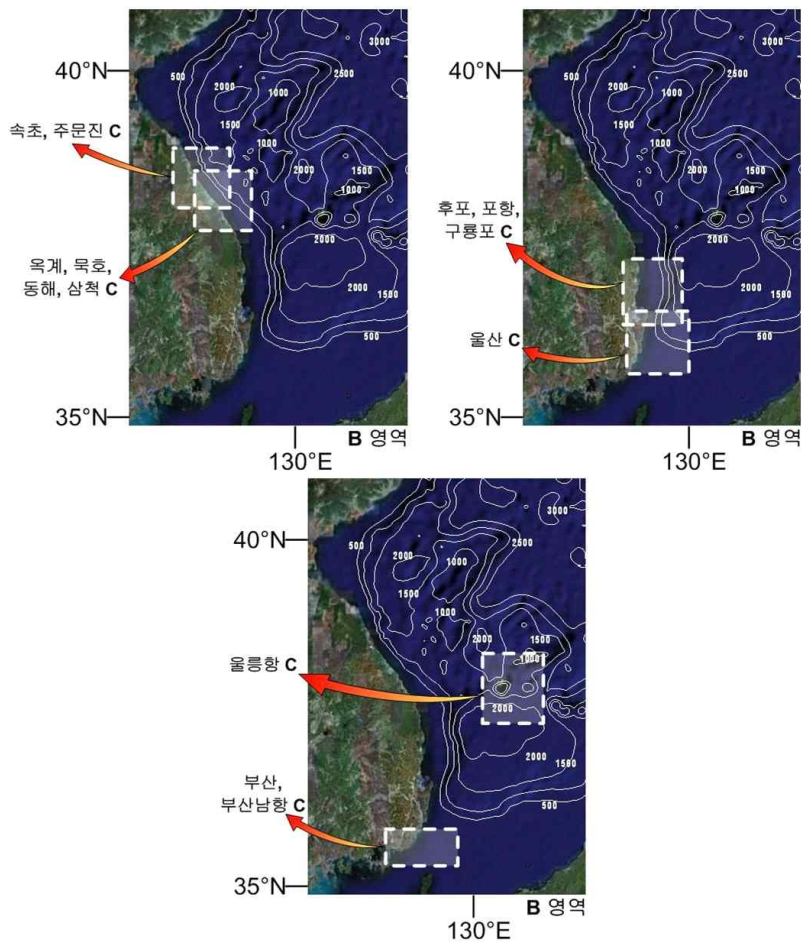


그림 3.4.2 각 항구별 C 영역의 위치와 수심분포

나. 1983년 및 1993년 지진해일 예비모의(유한차분모형)

(1) 그림 3.4.3, 3.4.4는 각각 1983년, 1993년 지진해일의 제 1과가 영역내의 임의 지점을 통과하는데 소요되는 시간을 나타낸 것으로, 지진해일이 전파되는 양상을 보여줌. 일본의 서해안에 파원을 두고 전파해 오는 지진해일은 동해 중심부에 집중되고 파원의 위치로부터 대화퇴를 이은 직선 연장선 방향으로 에너지 분기가 이루어지며, 에너지가 분기되는 위치는 동해의 중심부에 해당됨. 또한 그림에 나타나있듯이 지진해일이 전파하는 도중 동해 중심부의 대화퇴 부근에서 굴절을 일으킴

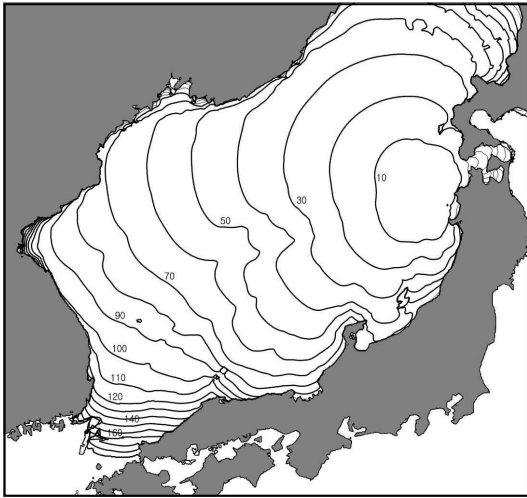


그림 3.4.3 1983년 지진해일 전파도
(단위 : 분)

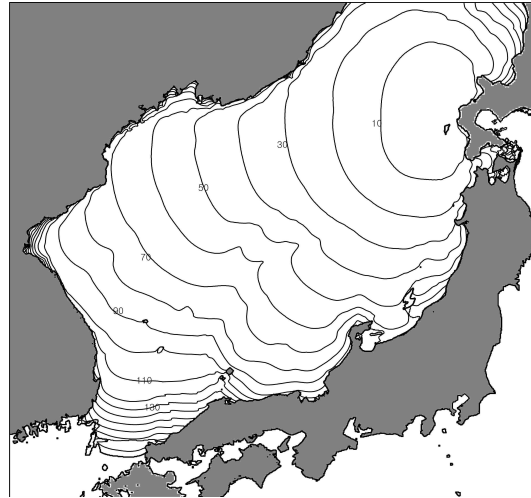


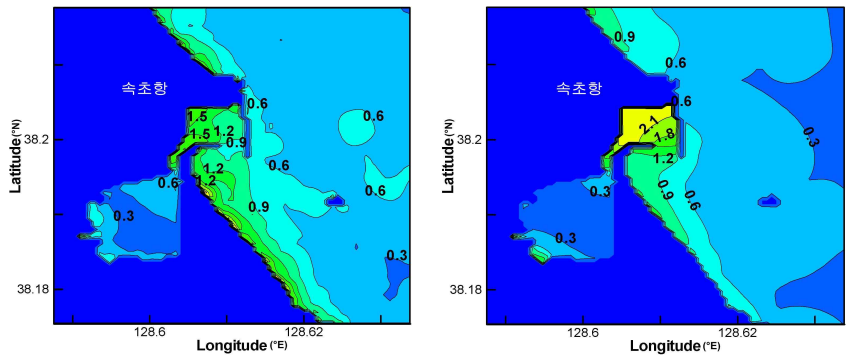
그림 3.4.4 1993년 지진해일 전파도
(단위 : 분)

다. 동해 연안항과 무역항의 간이 안전성 평가를 위한 설계해면 산출(유한차분모형)

(1) 동해 항만 구조물의 간이 안전성평가를 위한 설계해면 산출을 위해 역사 지진해일인 1983년, 1993년 지진해일에 대한 예비모의 실시하였고 선형 모형인 전파모형을 사용하였음. 예비모의 시 사용된 전파모형은 1차년도에 수립되고 검증된 분산효과를 고려할 수 있는 모형임. 동해 13개의 연안항 및 무역항에 대한 예비모의 결과는 다음 그림과 같음

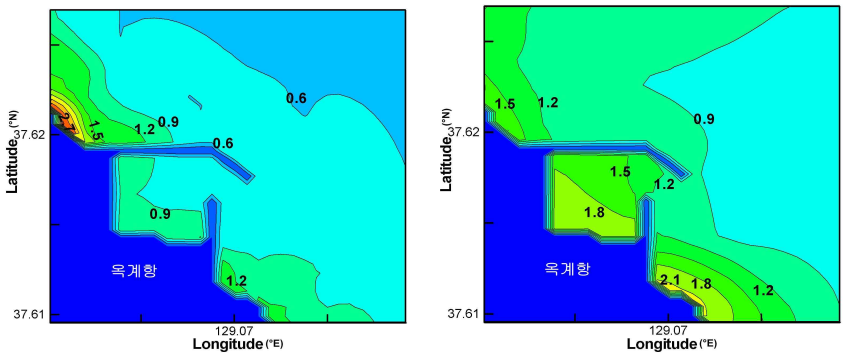
(2) 최대 지진해일고

(가) 속초항



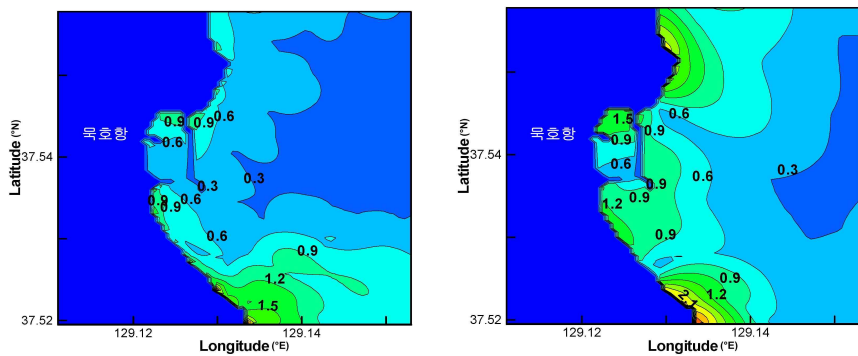
(a) 1983년 지진 해일 (b) 1993년 지진해일
 그림 3.4.5 속초항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(나) 옥계항



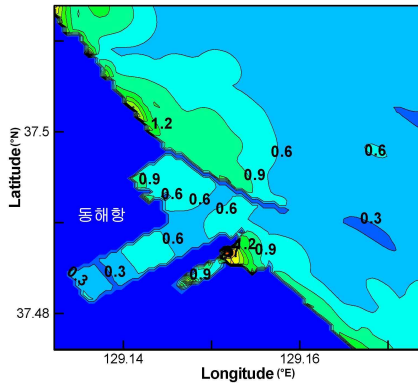
(a) 1983년 지진해일 (b) 1993년 지진해일
 그림 3.4.6 옥계항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(다) 묵호항

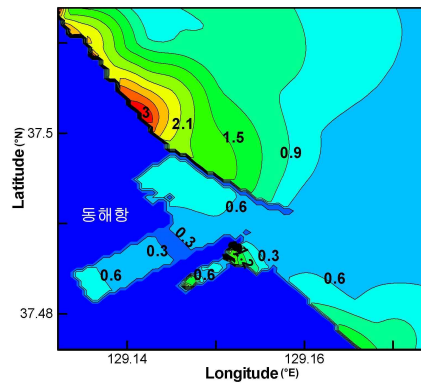


(a) 1983년 지진해일 (b) 1993년 지진해일
 그림 3.4.7 묵호항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(라) 동해항



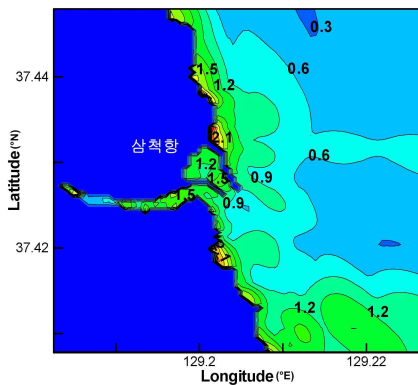
(a) 1983년 지진해일



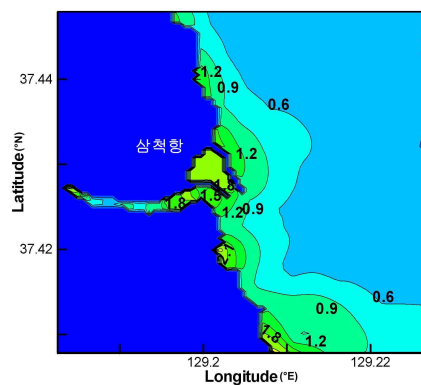
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.8 동해항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(마) 삼척항



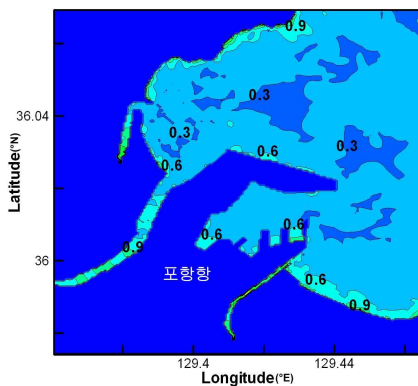
(a) 1983년 지진해일



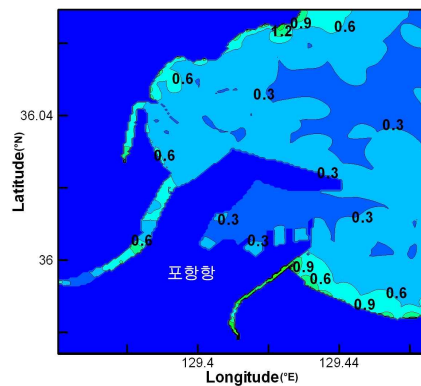
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.9 삼척항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(바) 포항항



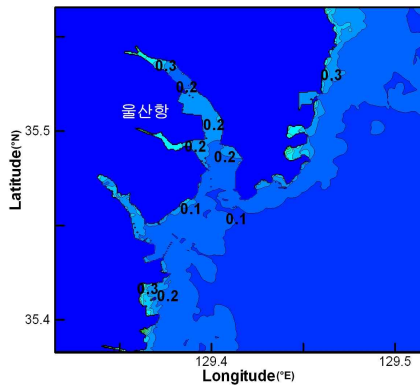
(a) 1983년 지진해일



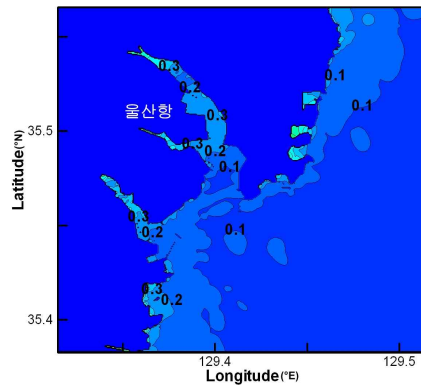
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.10 포항항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(사) 울산항



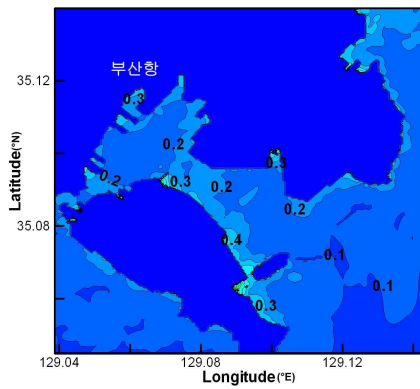
(a) 1983년 지진해일



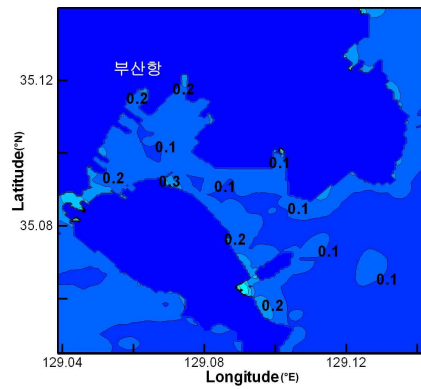
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.11 울산항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(아) 부산항



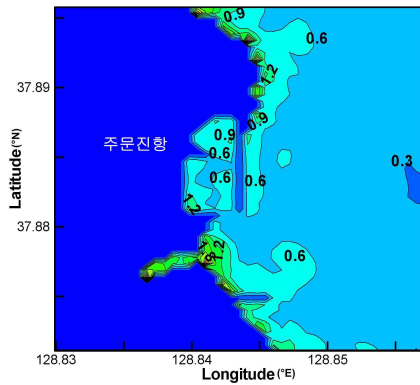
(a) 1983년 지진해일



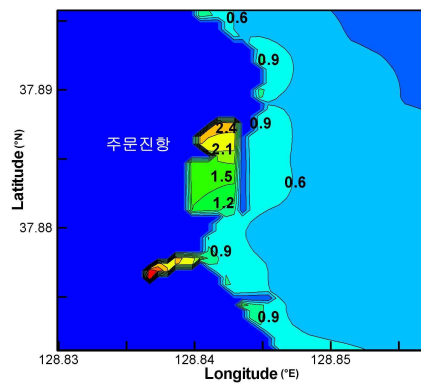
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.12 부산항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(자) 주문진항



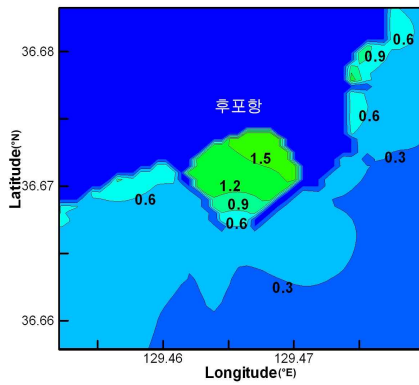
(a) 1983년 지진해일



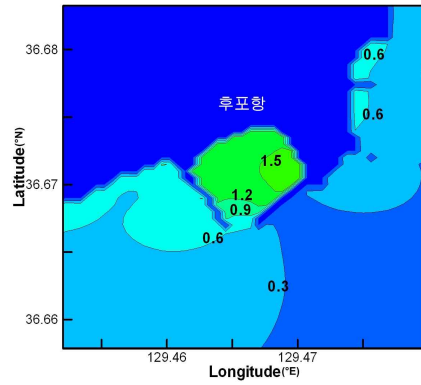
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.13 주문진항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(차) 후포항



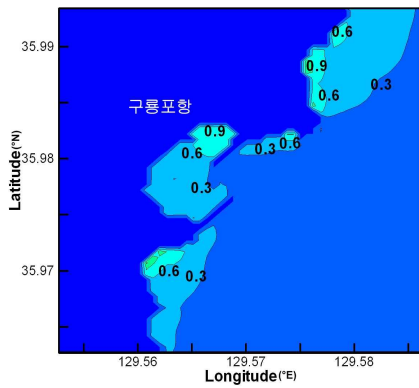
(a) 1983년 지진해일



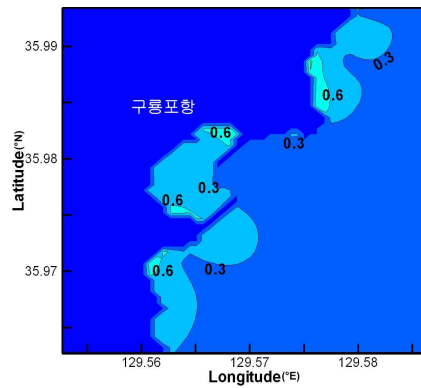
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.14 후포항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(카) 구룡포항



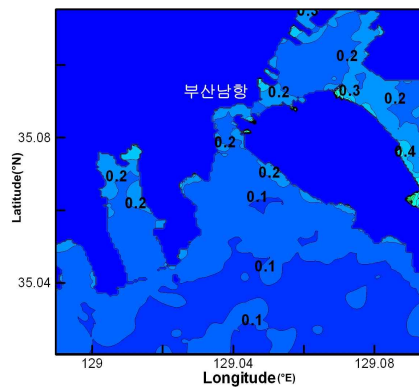
(a) 1983년 지진해일



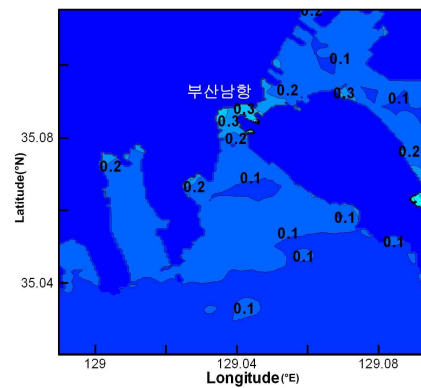
(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.15 구룡포항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(타) 부산남항



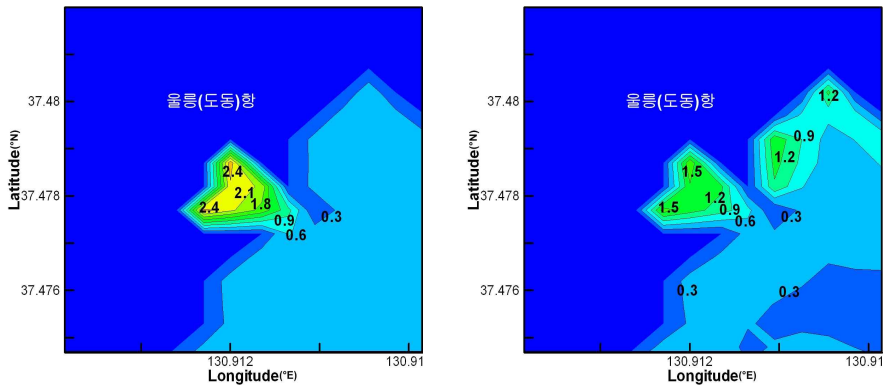
(a) 1983년 지진해일



(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.16 부산남항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(과) 울릉항



(a) 1983년 지진해일

(b) 1993년 지진해일

그림 3.4.17 울릉항 최대 지진해일고 (단위 : m)

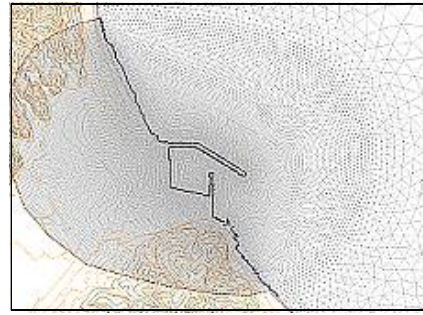
라. 동해안 무역항 및 연안항 정밀격자 생성(유한요소모형)

(1) 동해 무역항(8개소) 및 연안항(5개소)의 정밀 유한요소격자를 상세수심 및 상세 표고자료를 기반으로 작성 과업. SRTM자료(육지, 바다), 1:5000 수치지형도(육지), 동해의 연안항 및 무역항의 상세수심도(국립해양조사원)와 Google Earth를 기반으로 하여 상세화 된 유한요소 격자를 생성함. 절점(Node)과 삼각격자(Element)의 연결상태, 삼각격자의 방향성, 삼각격자 형태의 적합성 등을 검사함

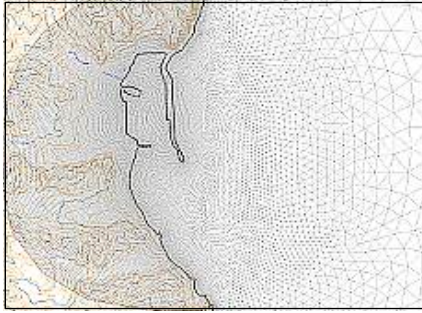
(2) 동해안 8개 무역항 및 5개 연안항의 상세격자 작성. 동해안의 8개 무역항(속초항, 옥계항, 묵호항, 동해항, 삼척항, 포항항, 울산항 및 부산항)과 동해안의 5개 연안항(주문진항, 후포항, 구룡포항, 부산남항 및 울릉도)의 상세격자를 상세수심 및 상세 표고자료를 기반으로 항만역과 범람역이 포함된 상세 유한요소격자체계를 작성함



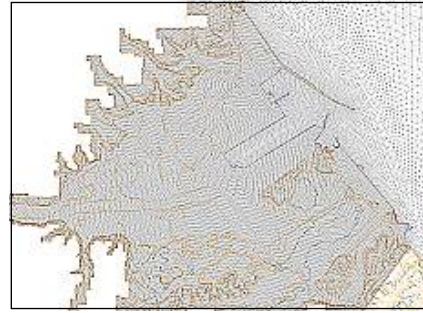
(a) 속초항



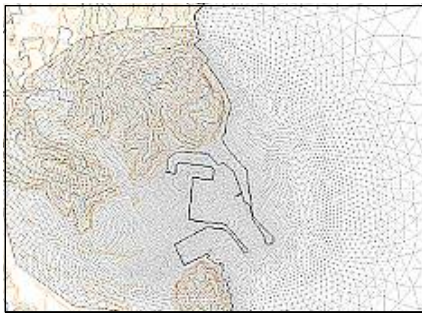
(b) 옥계항



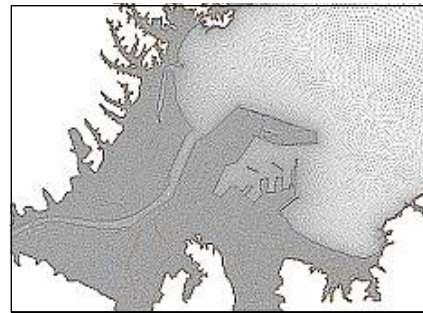
(c) 묵호항



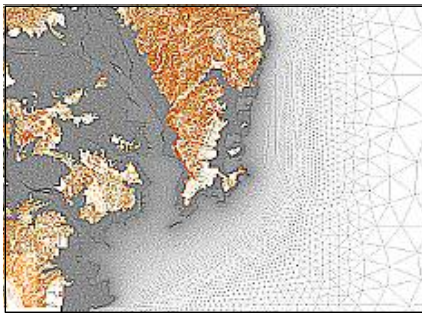
(d) 동해항



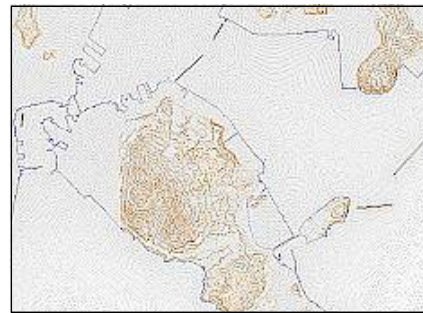
(e) 삼척항



(f) 포항항



(g) 울산항



(h) 부산항

그림 3.4.18 동해안 무역항(8개소)에 대한 유한요소 정밀격자

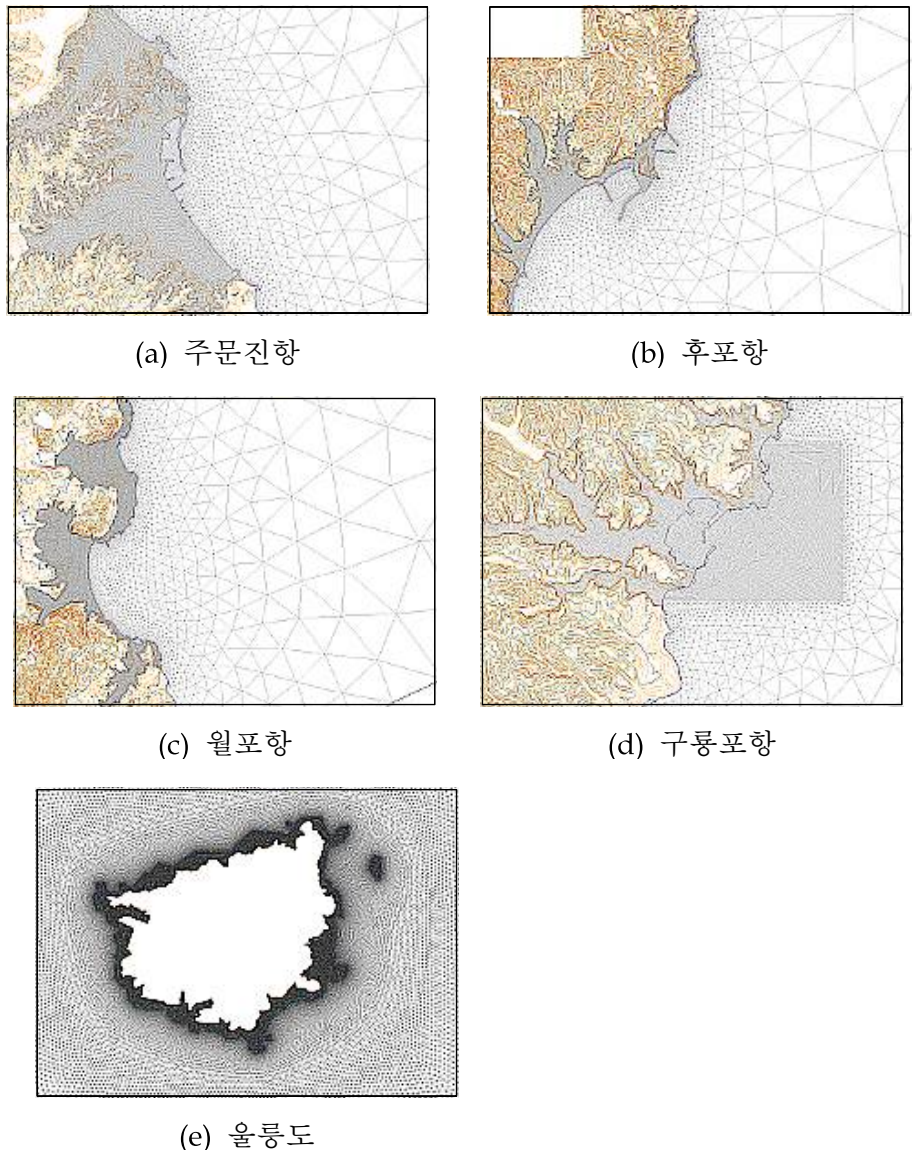
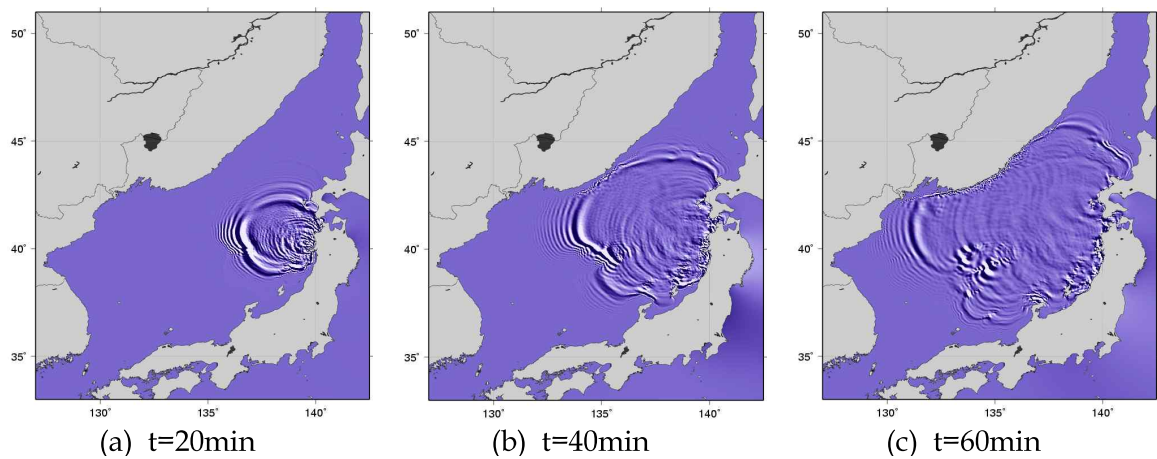


그림 3.4.19 동해안 연안항(5개소)에 대한 유한요소 정밀격자

마. 1983년 및 1993년 지진해일 예비모의(유한요소모형)

(1) 상세 유한요소격자체계를 이용한 1983년 동해중부 지진해일



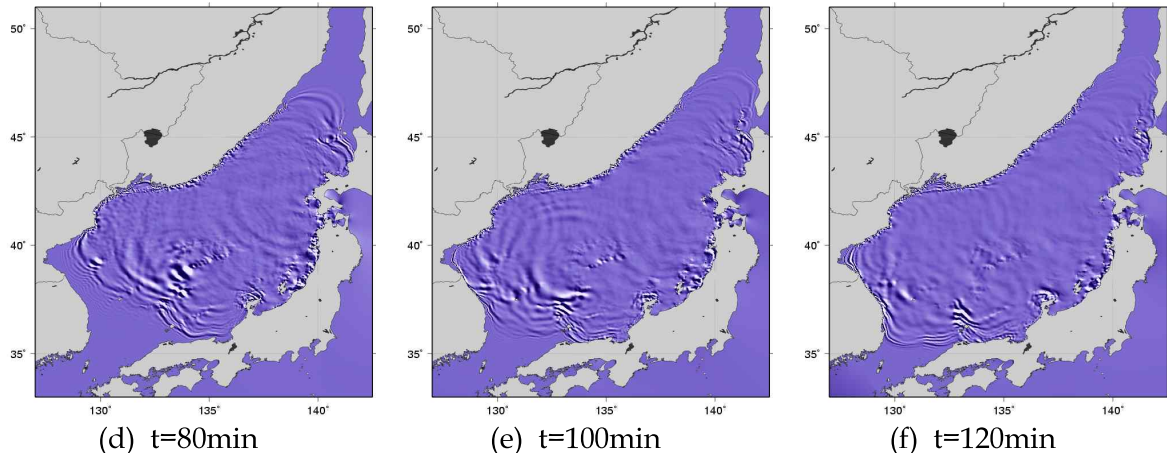


그림 3.4.20 1983년 동해중부 지진해일의 전파도

(2) 상세 유한요소격자체계를 이용한 1993년 북해도 남서 외해 지진해일

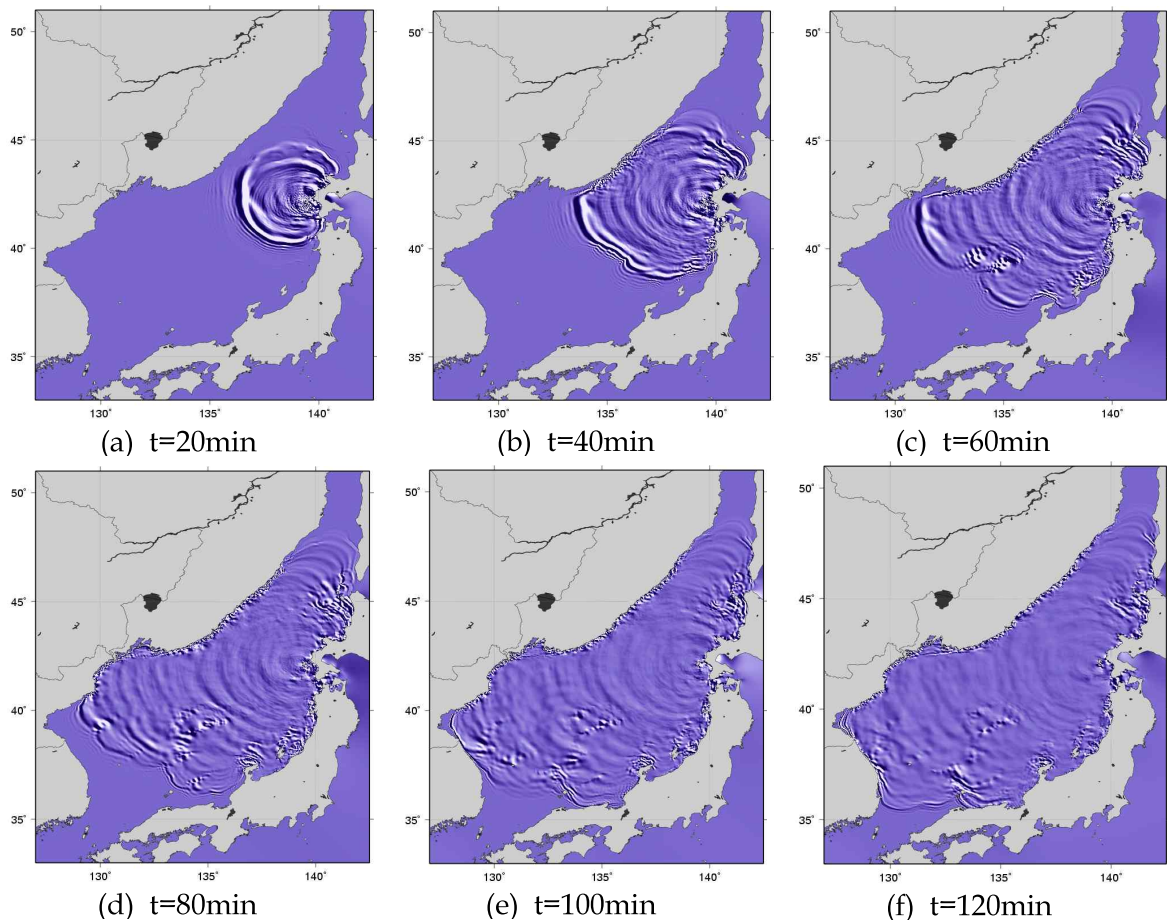


그림 3.4.21 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 전파도

바. 동해 무역항의 간이 안전성 평가를 위한 설계해면 산출(유한요소모형)

(1) 1983년 동해중부 지진해일의 속초항에서의 유속장 분석

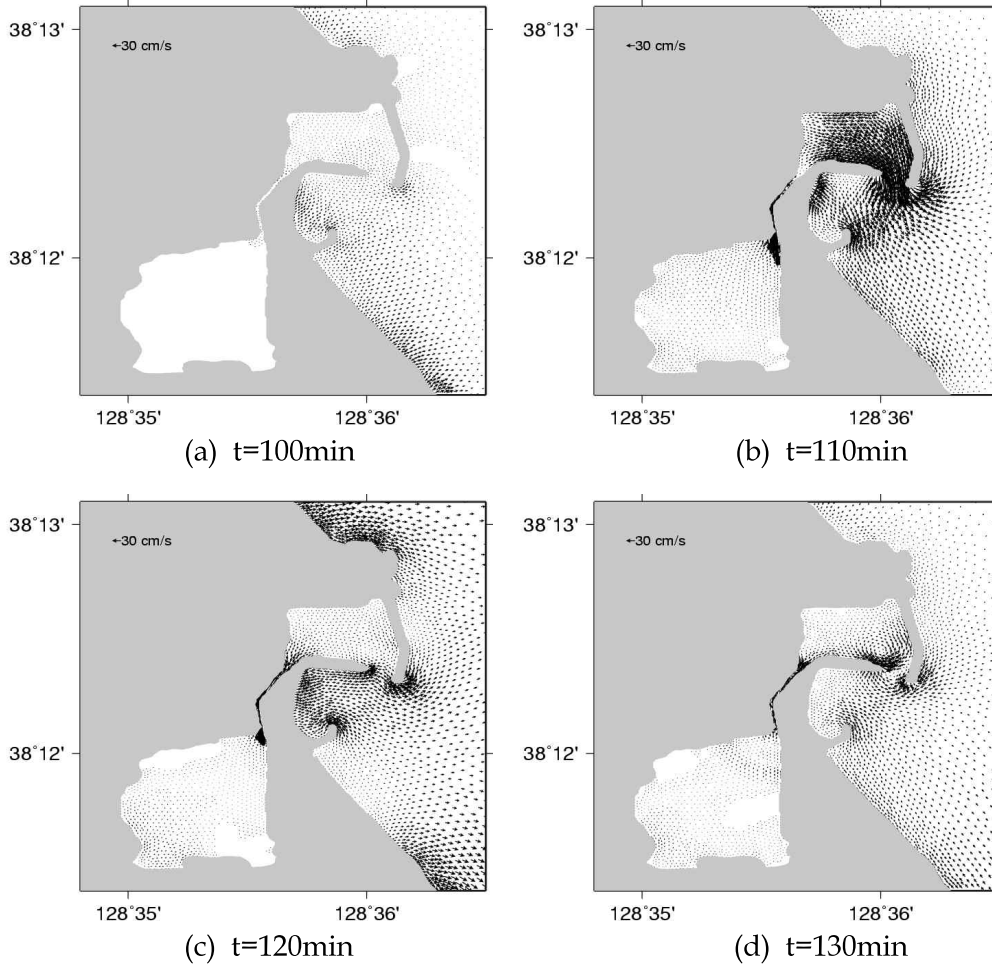
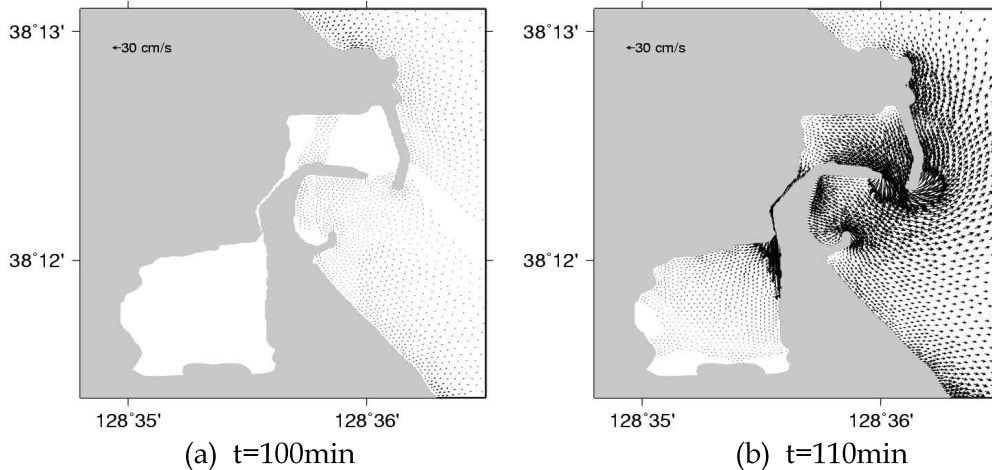


그림 3.4.22 속초항의 유속장

(2) 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 속초항에서의 유속장



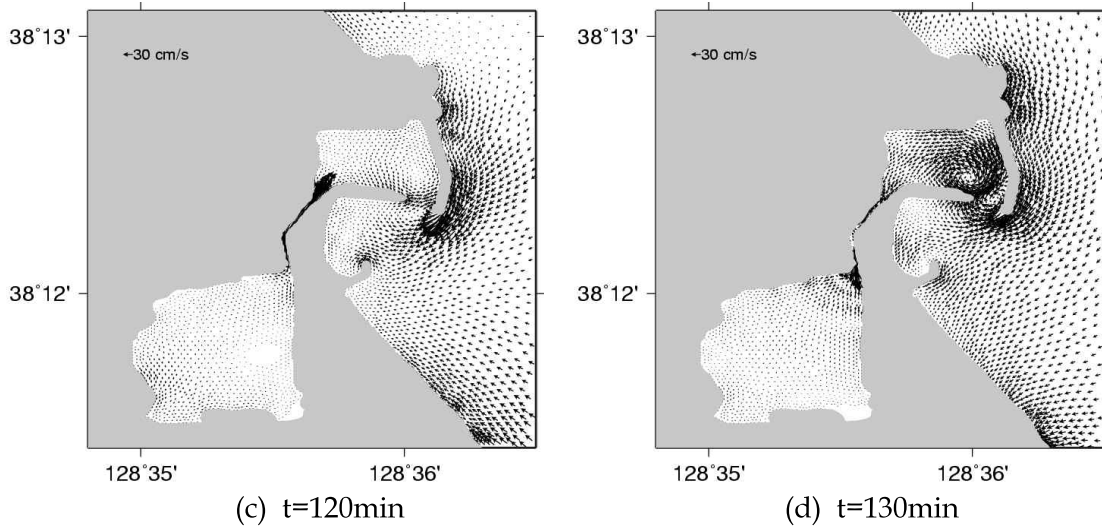


그림 3.4.23 속초항의 유속장

(3) 1983년 동해중부 지진해일의 주문진항에서의 유속장 분석

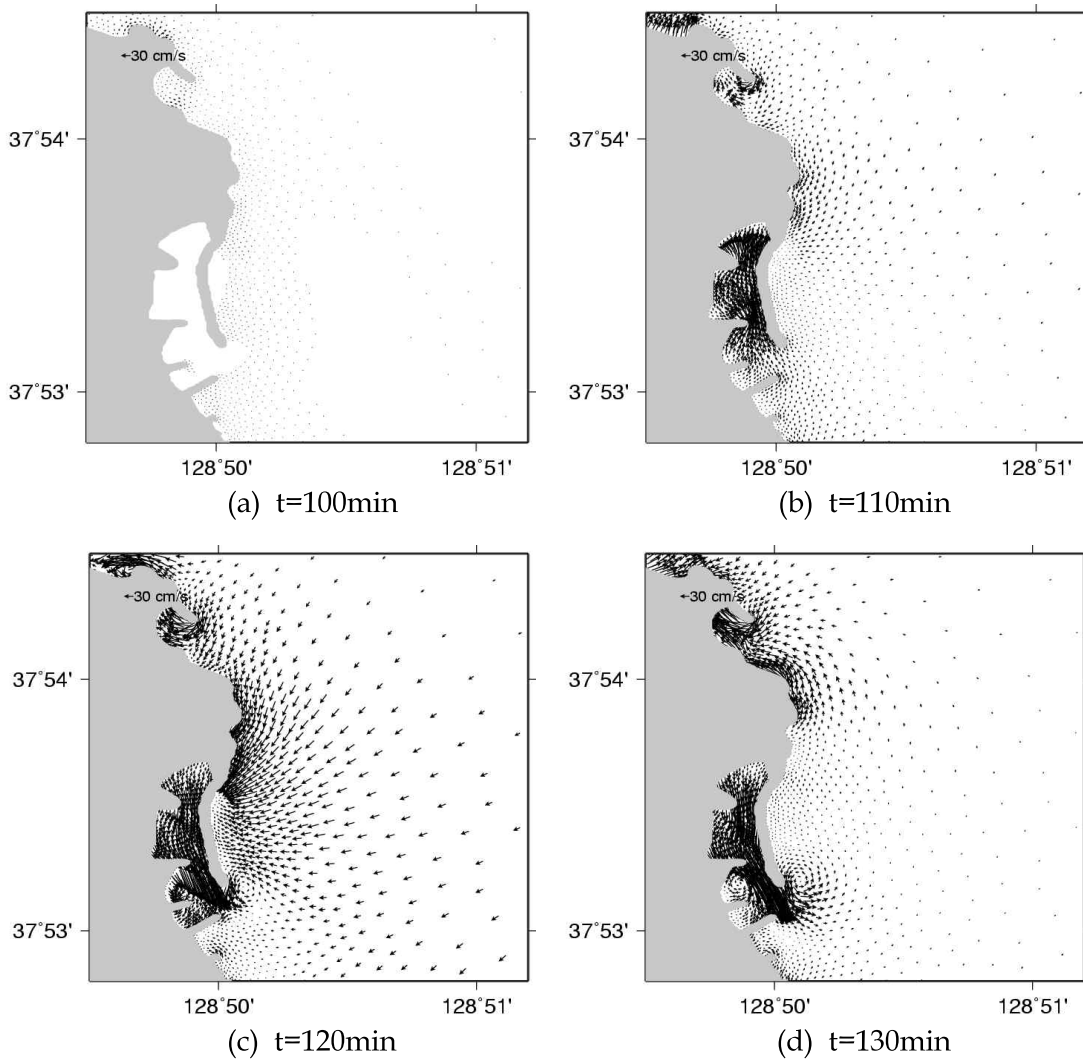


그림 3.4.24 주문진항의 유속장

(4) 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 주문진항에서의 유속장

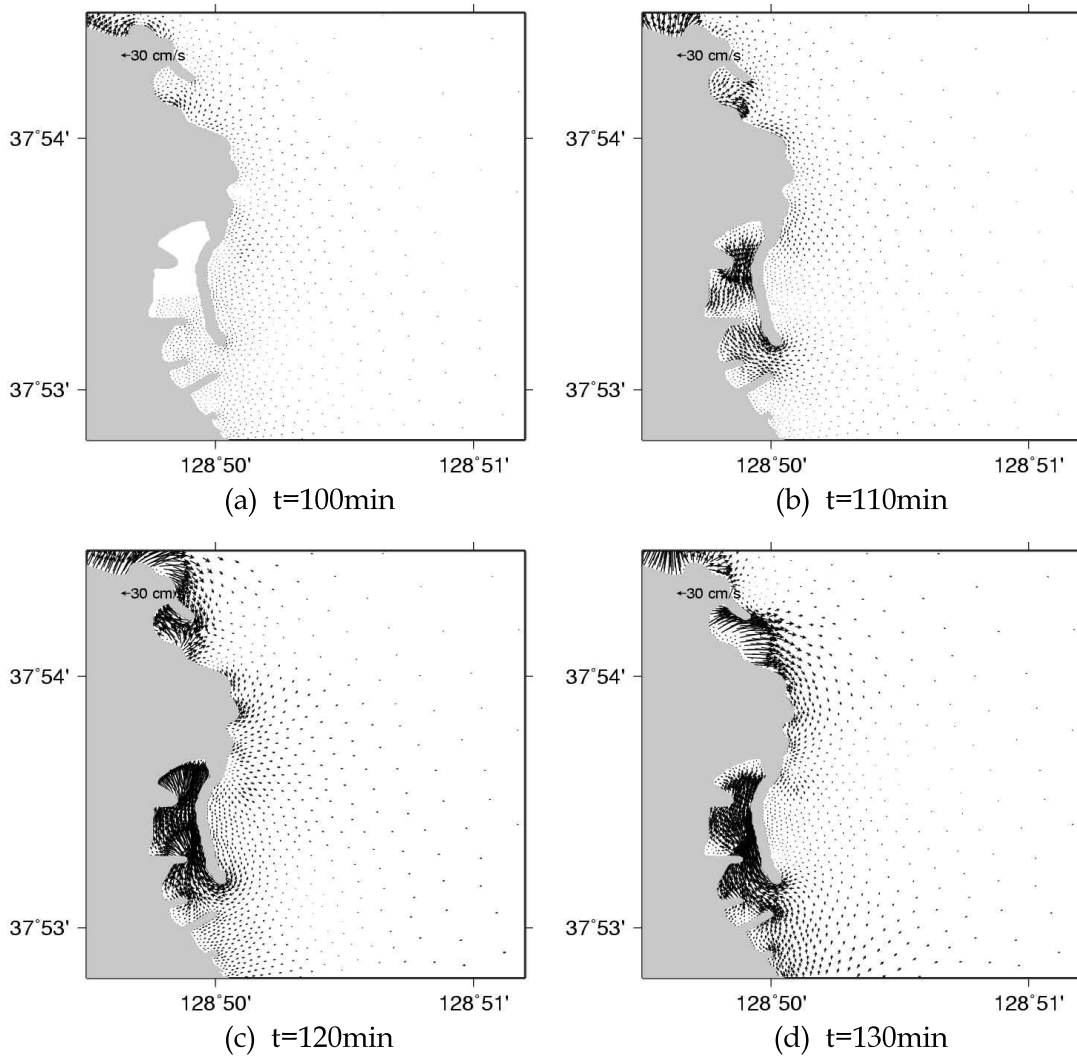


그림 3.4.25 주문진항의 유속장

사. 유한차분, 유한요소 모형의 지진해일 수치모의 결과 비교

표 3.4.2 1983년, 1993년 지진해일에 대한 유한차분, 유한요소 수치모의에 따른 최대 지진해일고 비교

항 명	역사 지진해일	유한차분모형 최대 지진해일고 (단위 : cm)	유한요소모형 최대 지진해일고 (단위 : cm)
속초항	1983년	100	60
	1993년	90	70
옥계항	1983년	120	80
	1993년	100	60
목호항	1983년	90	60
	1993년	90	70
동해항	1983년	90	60
	1993년	110	70
삼척항	1983년	100	40
	1993년	120	40
포항항	1983년	60	30
	1993년	40	20
울산항	1983년	30	20
	1993년	30	10
부산항	1983년	30	20
	1993년	20	10
주문진항	1983년	70	70
	1993년	80	70
후포항	1983년	70	60
	1993년	60	50
구룡포항	1983년	40	50
	1993년	30	30
부산남항	1983년	30	10
	1993년	20	10
울릉항	1983년	100	50
	1993년	90	40

2. 지진해일에 의한 동해 무역항(8개)의 국지 정밀 설계해면 산출

가. 동해안 무역항(8개) 상세영역 세분화

(1) 2차년도의 간이 설계해면을 산출하기 위하여 사용했던 영역은 총 3개로 분할되었는데 무역항의 국지 정밀 해면 산출을 위하여 영역을 5개로 세분화함. 지진해일은 원해에서의 거동은 파형의 변화가 거의 없기 때문에 선형 모형으로 수치모의가 가능하지만 해안선에 가까워오면서 비선형성이 증가하기 때문에 수치모형 역시 비선형 모형을 사용함. 또한 울산항과 부산항은 두 개의 항구로 구분하여 각각 계산하였으며, D와 E영역의 계산 조건은 표 3.4.3과 같음

표 3.4.3 각 영역별 계산 조건

	D 영역		E 영역	
격자간격	2.22 sec (약 55m)		0.7407 sec (약 18.33m)	
계산시간간격	0.11111 sec		0.03704 sec	
격자수	속초, 옥계, 묵호, 동해, 삼척항	421×466	속초, 옥계, 묵호, 동해, 삼척항	250×259
	포항	421×466	포항	598×865
	울산	481×607	울산	울산항 550×601
			온산항 559×493	
부산	517×469	부산	부산항 403×385	
			감천항 658×640	
외해경계조건	다중격자연결		다중격자연결	
수치모형	선형모형		비선형모형	

(2) 새로 분할된 영역에서의 상세 수심 자료는 국립해양조사원에서 제공받았으며, 각 영역의 수심자료 크기와 수심분포는 다음과 같음

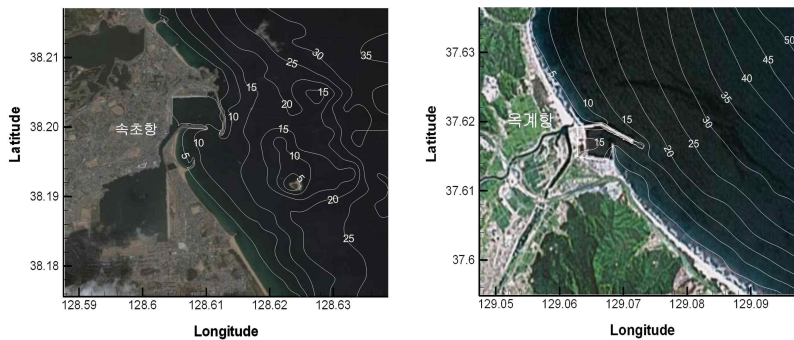


그림 3.4.26 상세역 수심분포(속초항, 옥계항)

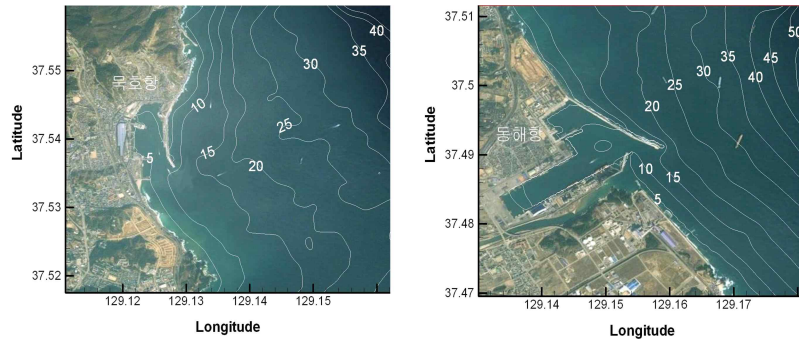


그림 3.4.27 상세역 수심분포(묵호항, 동해항)

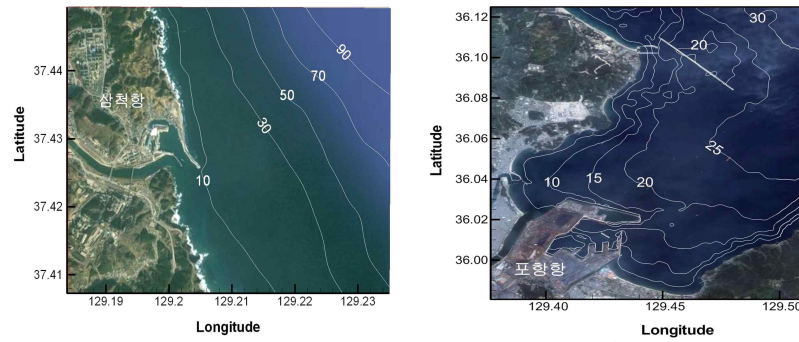


그림 3.4.28 상세역 수심분포(삼척항, 포항항)

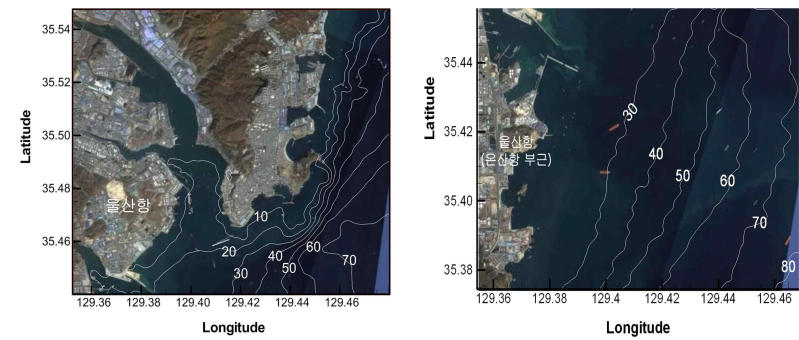


그림 3.4.29 상세역 수심분포(울산항, 온산항)

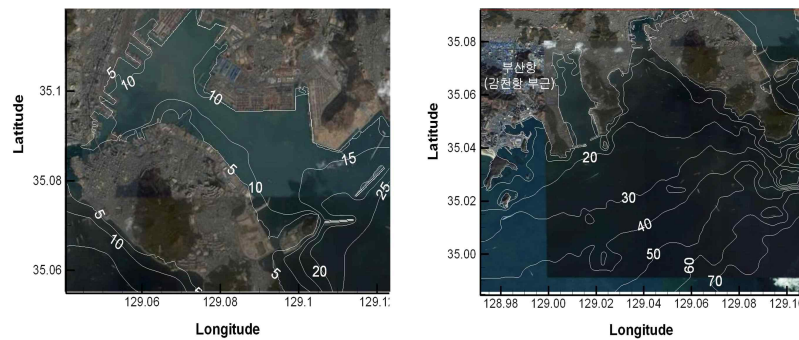


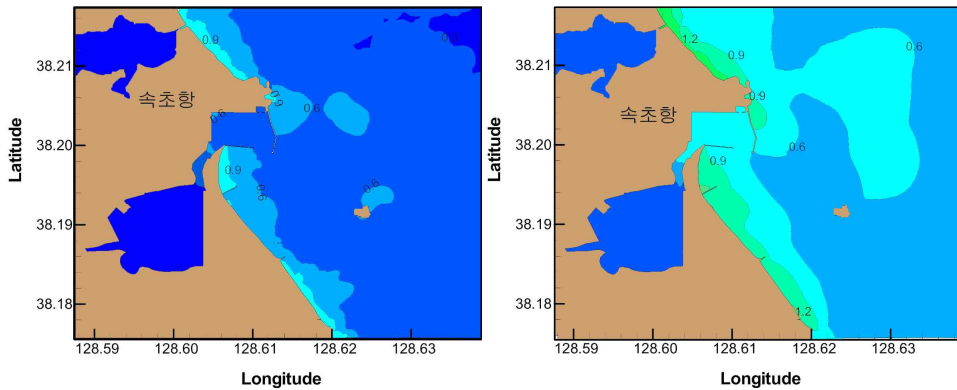
그림 3.4.30 상세역 수심분포(부산항, 감천항)

나. 지진해일에 의한 동해 무역항(8개)의 국지 정밀설계해면 산출(유한차분모형)

(1) 지진해일에 대한 동해 무역항(8개)의 국지 정밀 설계해면 산출을 위해 역사 지진 해일인 1983년 동해 중부 지진해일, 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 대한 수치모의 실시하였음. A, B, C 영역은 선형 모형인 지진해일 전파모형을 사용하고 D, E 영역은 비선형 모형인 지진해일 범람모형을 사용하였음. 동해 무역항 8개수치모의 결과는 다음 그림과 같음

(2) 최대 지진해일고

(가) 속초항

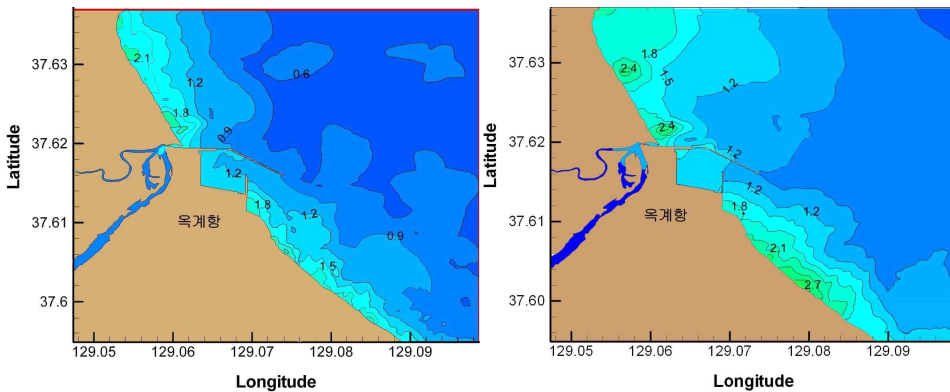


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.31 속초항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(나) 옥계항

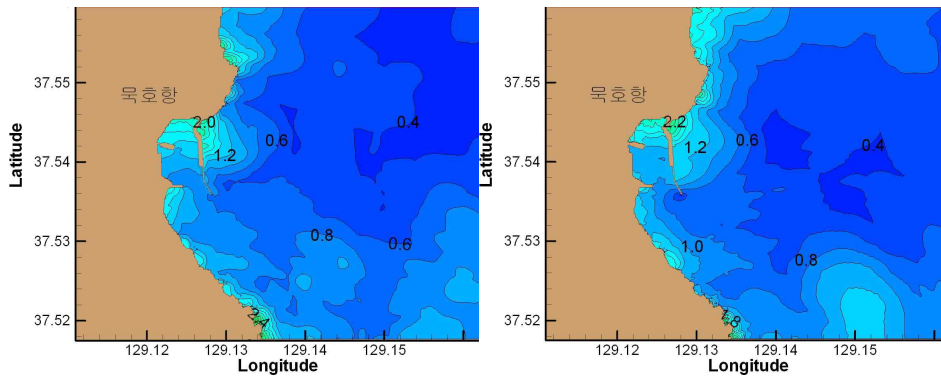


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.32 옥계항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(다) 묵호항

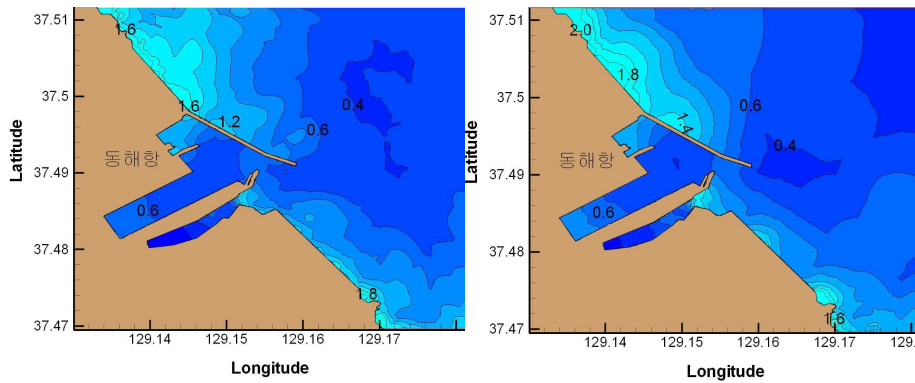


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.33 묵호항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(라) 동해항

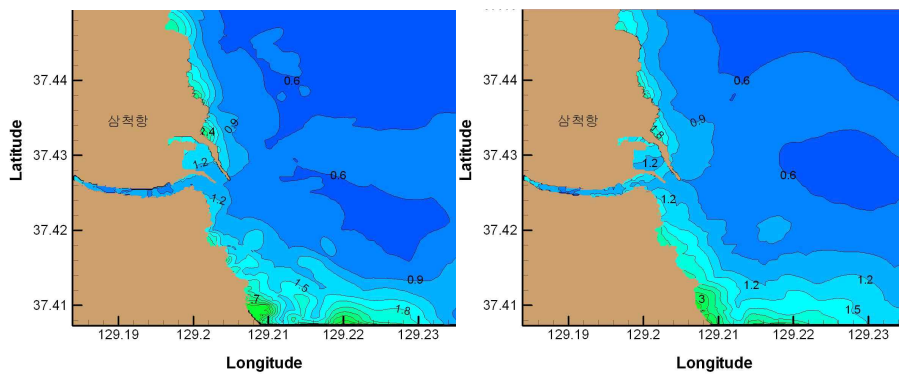


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.34 동해항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(마) 삼척항

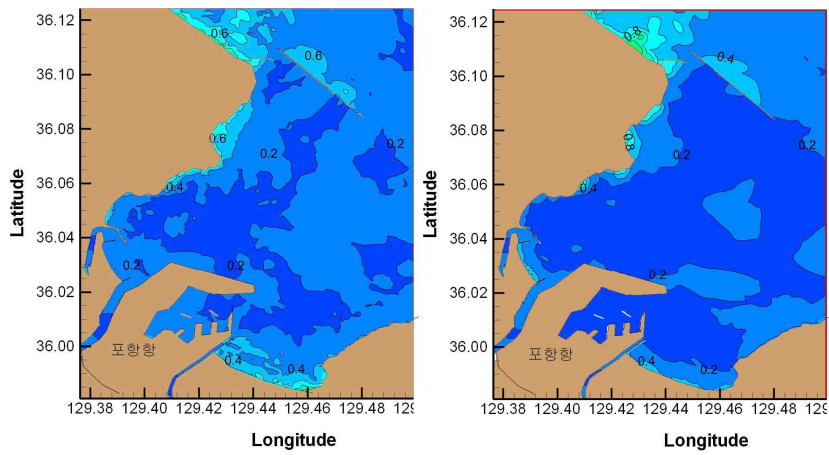


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.35 삼척항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(바) 포항항

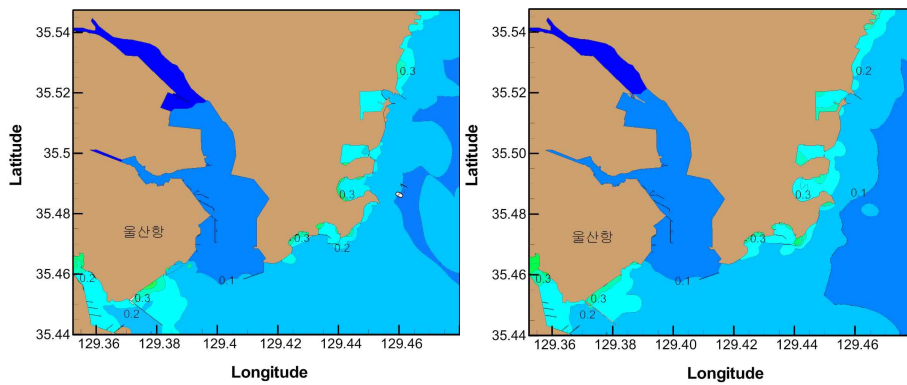


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.36 포항항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(사) 울산항

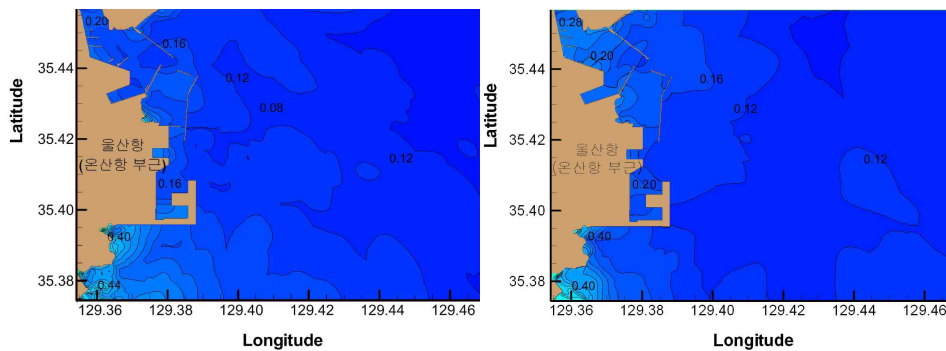


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.37 울산항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(아) 온산항



(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.38 온산항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(자) 부산항

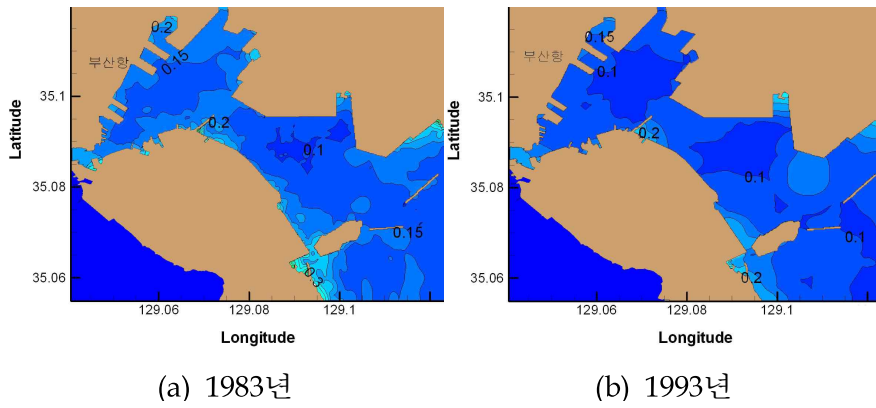


그림 3.4.39 부산항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(차) 감천항

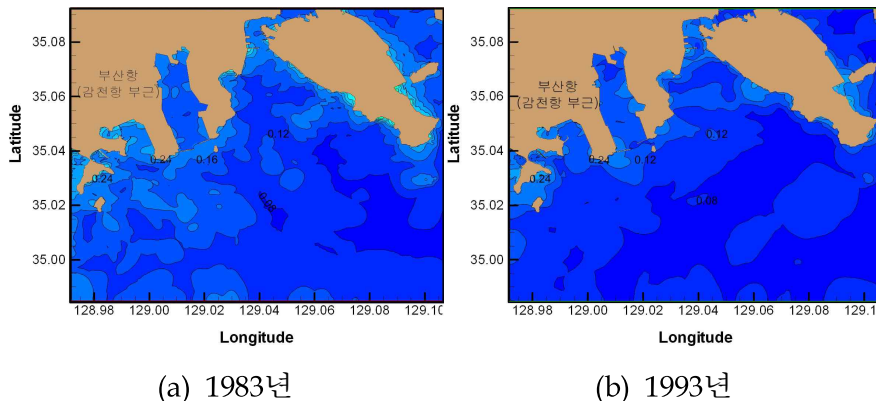


그림 3.4.40 감천항 최대 지진해일고 (단위 : m)

다. 지진해일에 대한 동해 무역항(8개)의 안정성 평가를 위한 자료 구축

(1) 방파제 부근에서의 최대 지진해일고

(가) 속초항

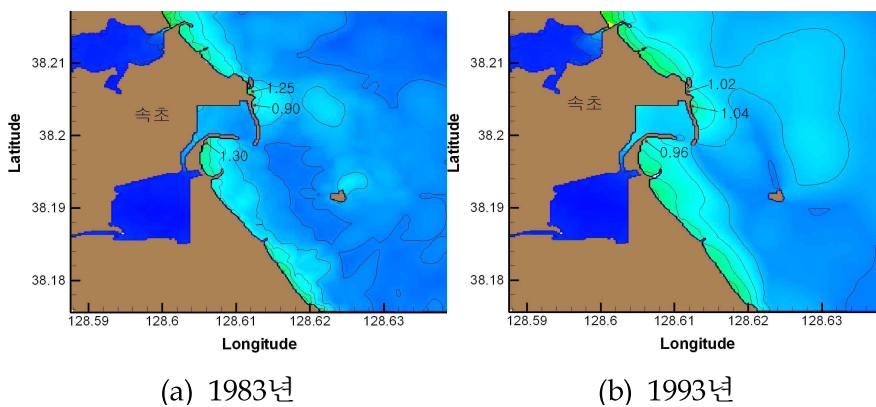
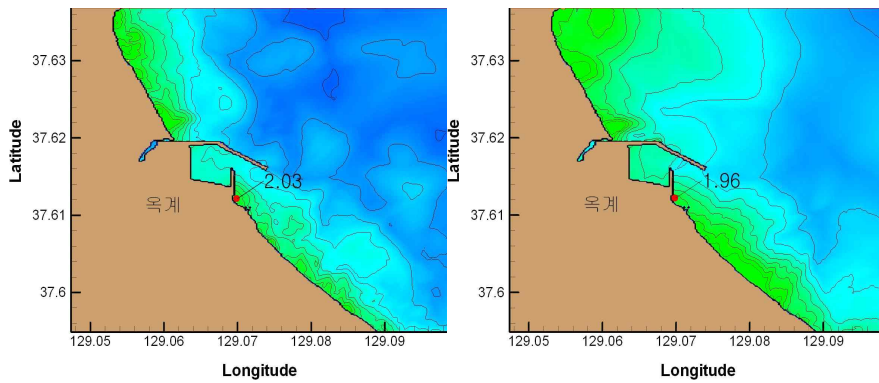


그림 3.4.41 속초항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(나) 옥계항

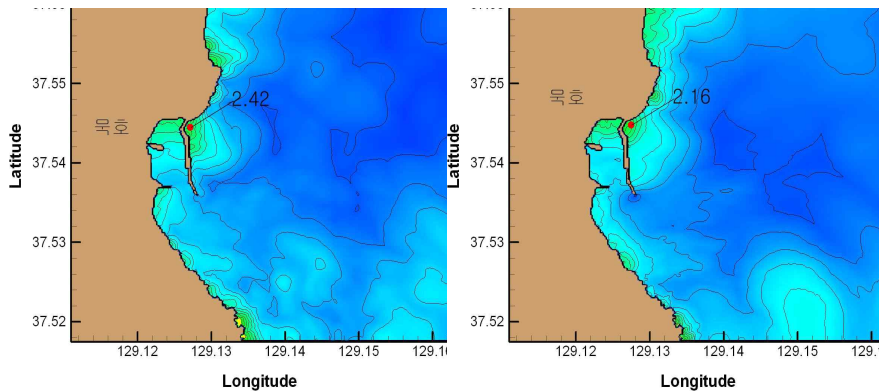


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.42 옥계항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(다) 묵호항

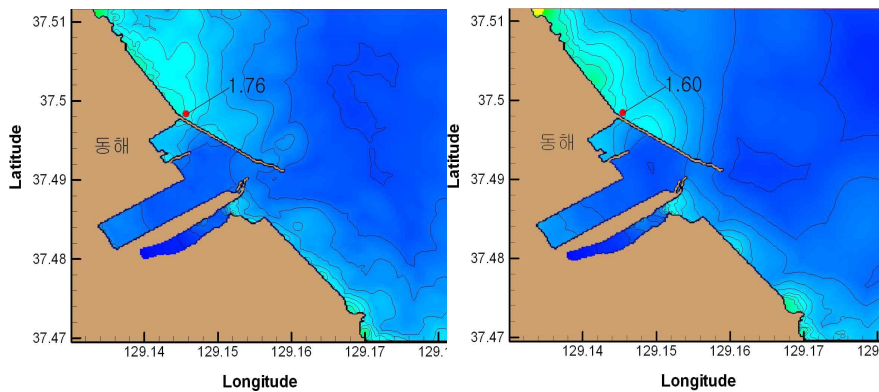


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.43 묵호항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(라) 동해항



(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.44 동해항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(마) 삼척항

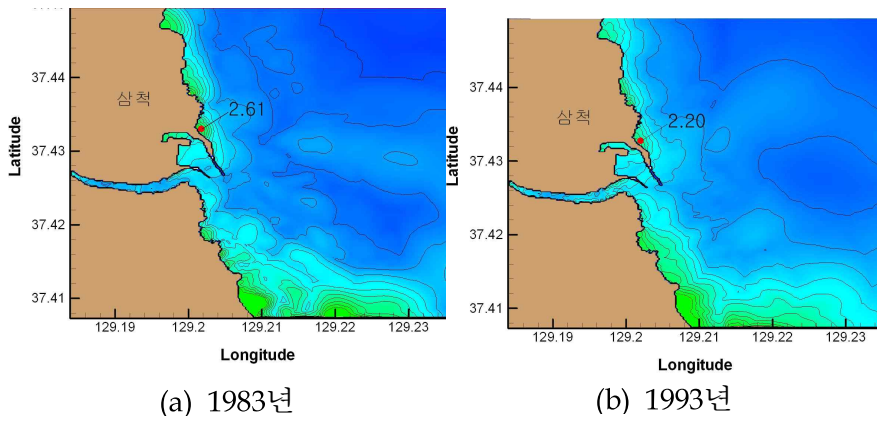


그림 3.4.45 삼척항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(바) 포항항

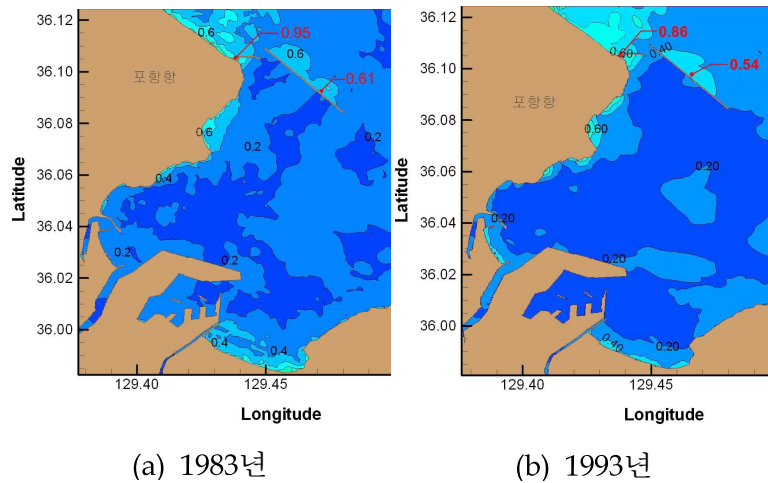


그림 3.4.46 포항항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(사) 울산항

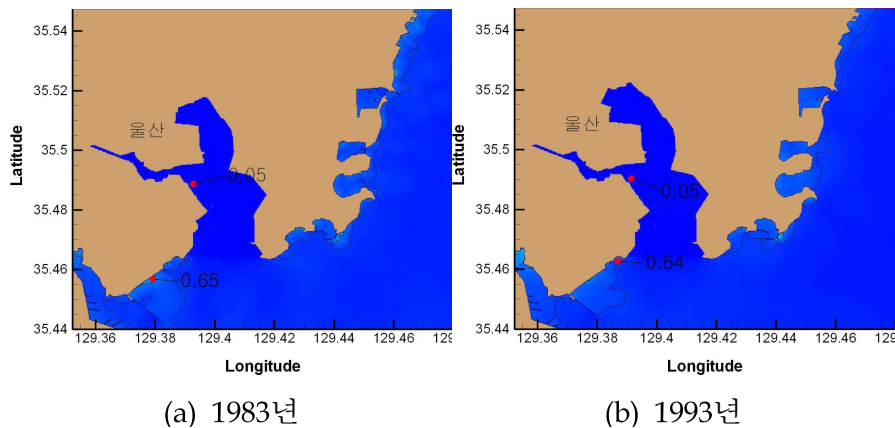
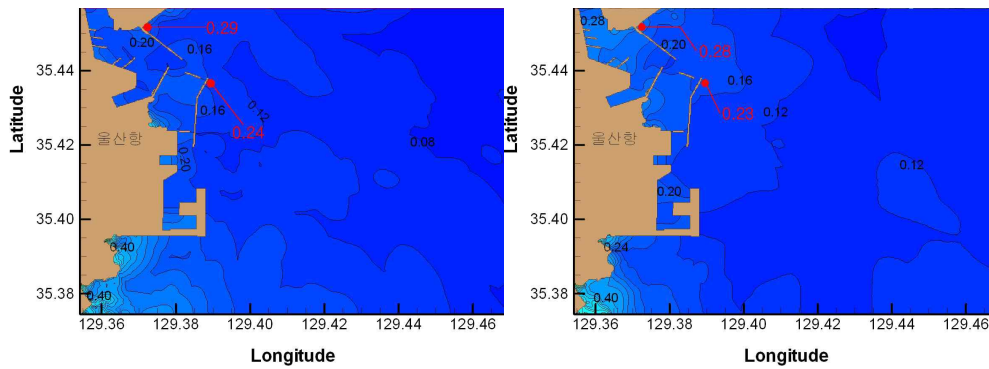


그림 3.4.47 울산항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(아) 온산항

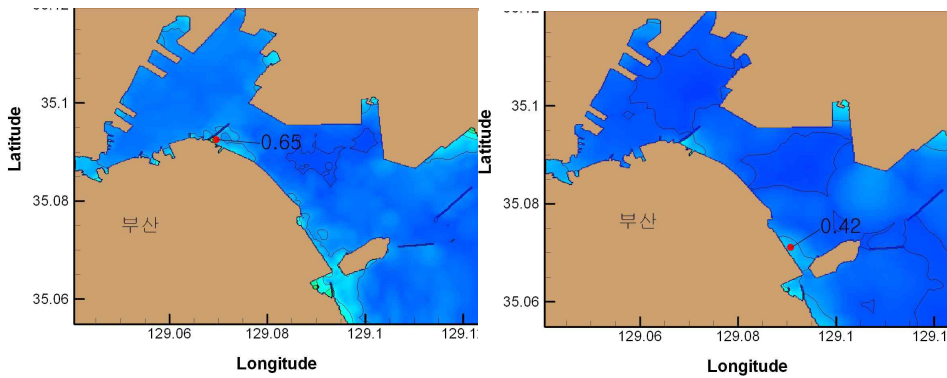


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.48 온산항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(자) 부산항

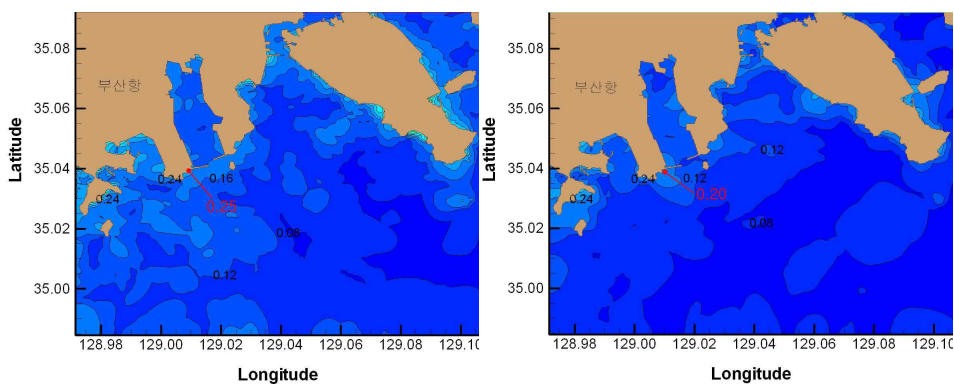


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.49 부산항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

(차) 감천항



(a) 1983년

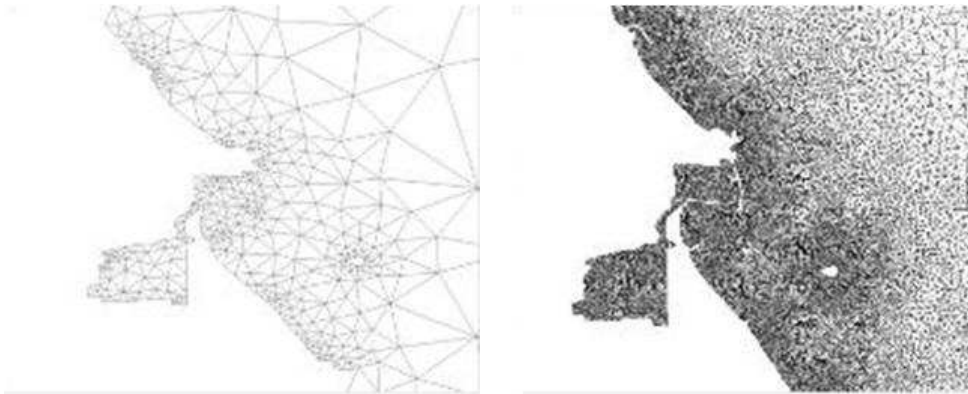
(b) 1993년

그림 3.4.50 감천항 방파제 최대 파고 발생 위치 및 최대값 (단위 : m)

라. 동해안 무역항 (8개)에 대한 유한요소 정밀격자 생성

(1) 동해 무역항 및 연안항의 정밀 유한요소격자를 상세수심도와 Google Earth를 기반으로 하여 상세화 된 유한요소 격자를 생성함. 절점(Node)과 삼각격자(Element)의 연결상태, 삼각격자의 방향성, 삼각격자 형태의 적합성 등을 검사함

(2) Conforming Delaunay Triangulation (CDT) 기법으로 격자를 재구성함



(a) 조격자

(b) 세격자

그림 3.4.51 CDT 기법으로 구성한 조격자와 세격자

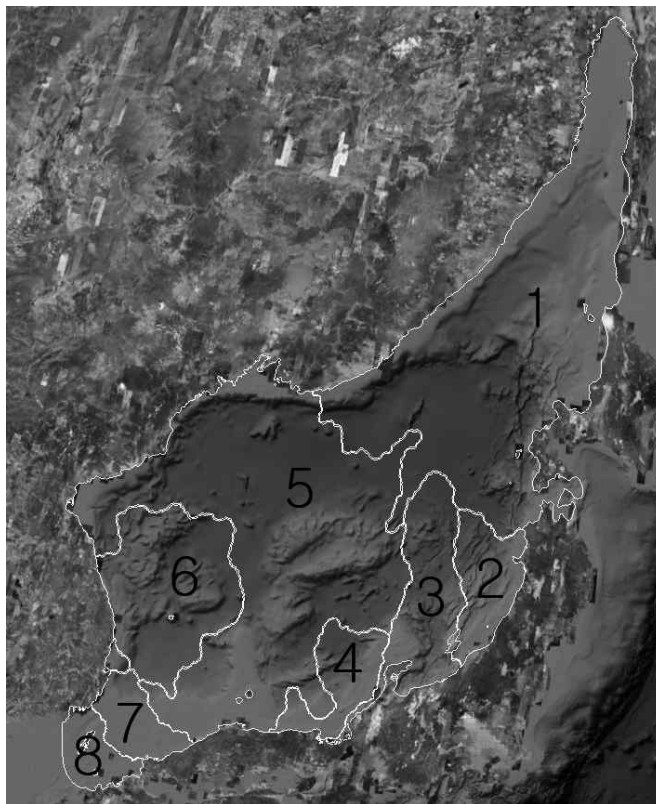


그림 3.4.52 작성된 동해 전체격자를 병렬계산을 위한 도메인 분할 결과

(3) 작성된 각 항구(총 8개항)에서의 세격자 시스템

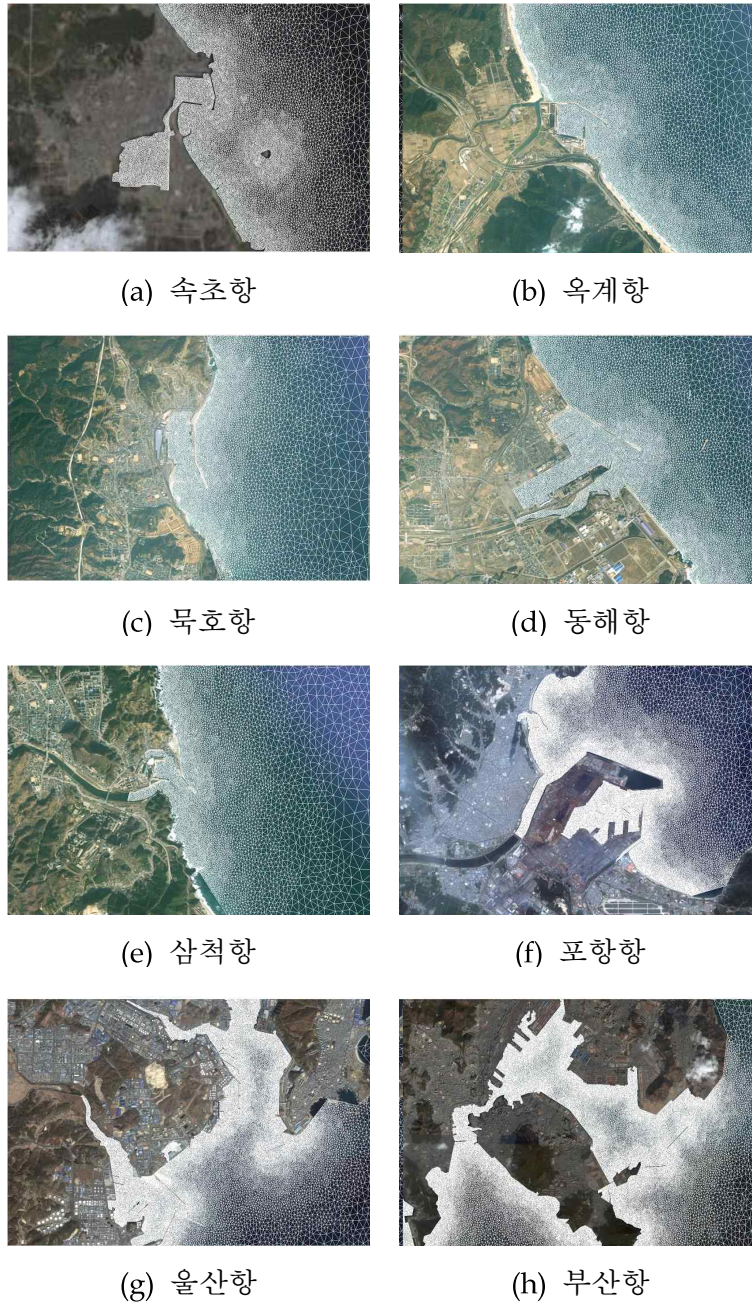
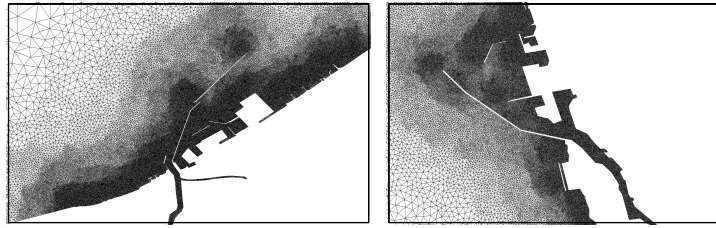


그림 3.4.53 동해의 무역항(8개)에서의 세격자 시스템

(4) 일본측 주요항구(9개항)도 격자에 포함하여 구성하여 지진해일 시뮬레이터의 범용성 확보



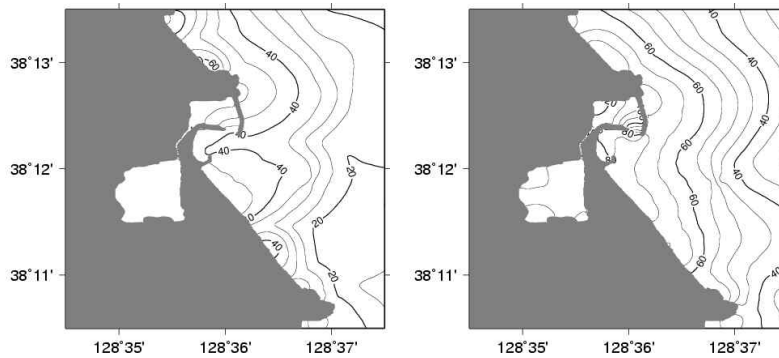
(a) 나오에츠항 (b) 조격자

그림 3.4.54 일본 나오에츠항 격자체계 및 구성

마. 동해안 무역항 (8개) 안정성평가를 위한 설계해면 산출

(1) 1983년 동해중부 지진해일 및 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 최대 지진해일고

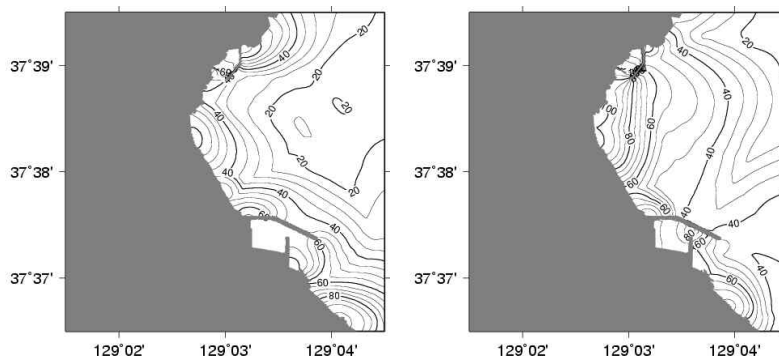
(가) 속초항



(a) 1983년 (b) 1993년

그림 3.4.55 속초항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

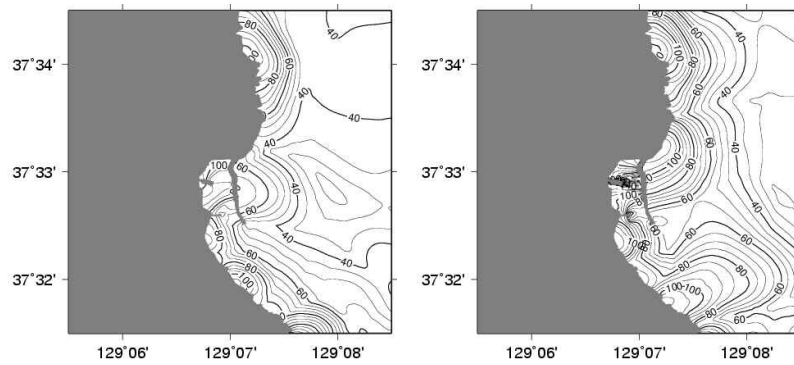
(나) 옥계항



(a) 1983년 (b) 1993년

그림 3.4.56 옥계항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

(다) 묵호항

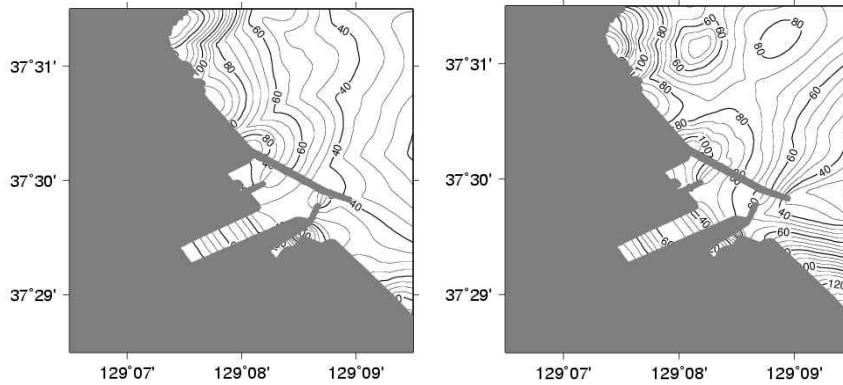


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.57 묵호항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

(라) 동해항

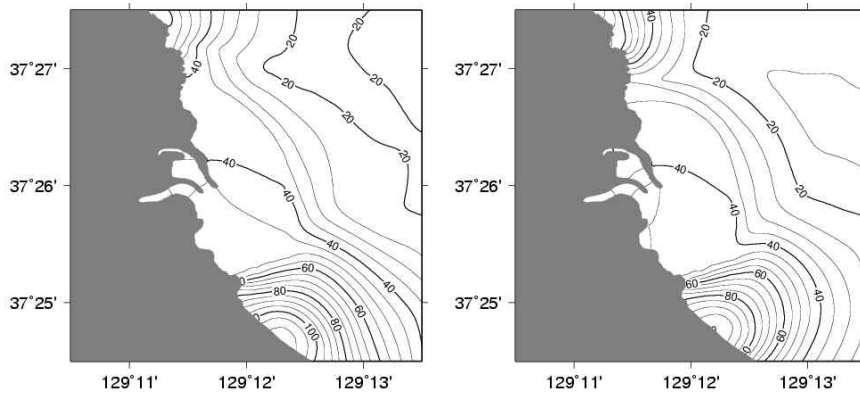


(a) 1983년

(b) 1993년

그림 3.4.58 동해항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

(마) 삼척항



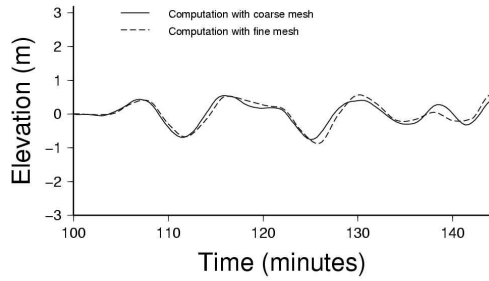
(a) 1983년

(b) 1993년

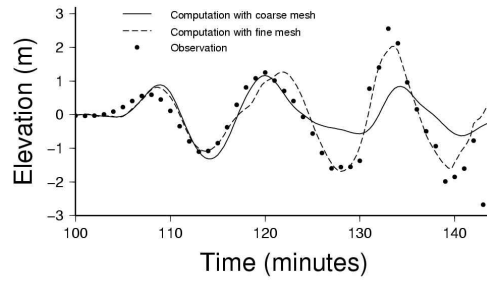
그림 3.4.59 삼척항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

(2) 1983년 동해중부 지진해일 및 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 지진해일고의 시계열

(가) 속초항



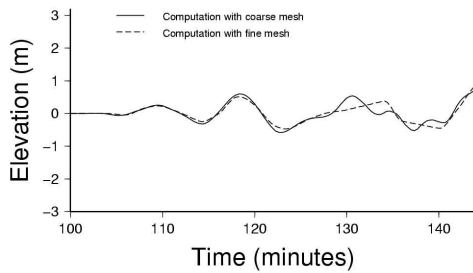
(a) 1983년



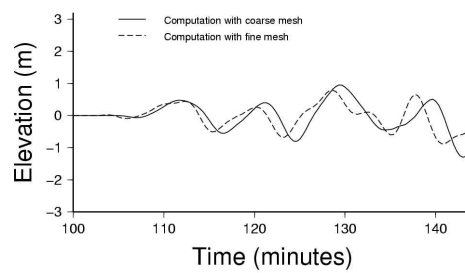
(b) 1993년

그림 3.4.60 속초항 지진해일고 시계열

(나) 옥계항



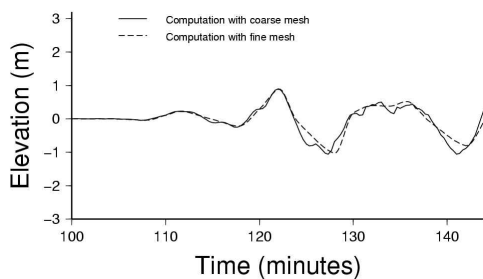
(a) 1983년



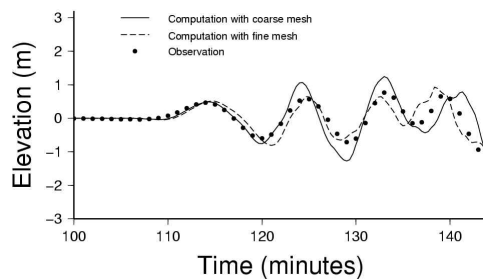
(b) 1993년

그림 3.4.61 옥계항 지진해일고 시계열

(다) 묵호항



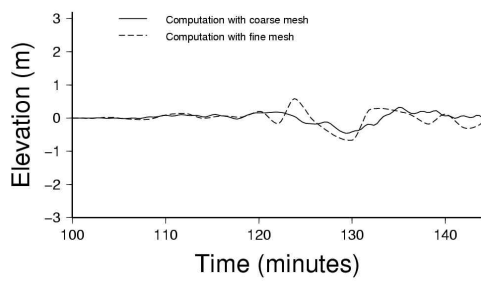
(a) 1983년



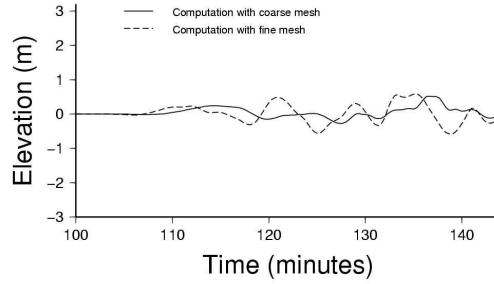
(b) 1993년

그림 3.4.62 묵호항 지진해일고 시계열

(라) 동해항



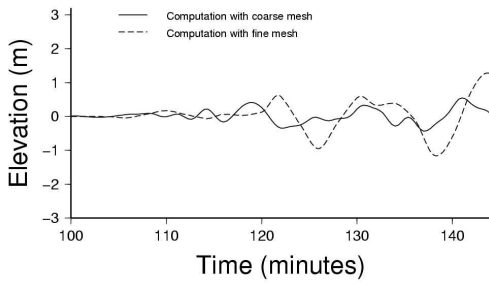
(a) 1983년



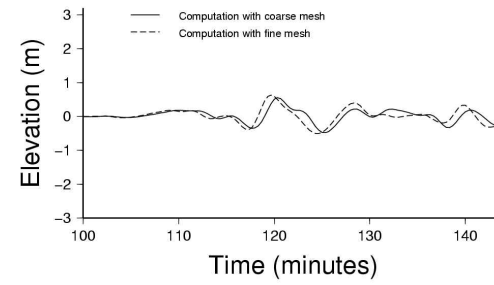
(b) 1993년

그림 3.4.63 동해항 지진해일고 시계열

(마) 삼척항



(a) 1983년



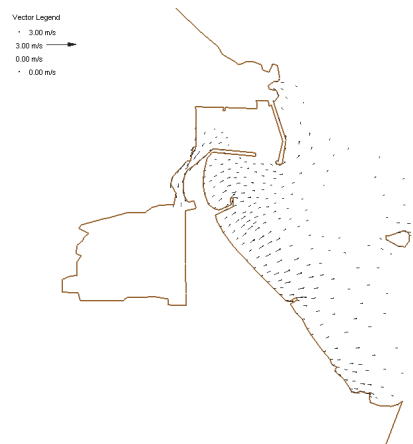
(b) 1993년

그림 3.4.64 삼척항 지진해일고 시계열

(3) 1983년 동해중부 지진해일의 속초항에서의 유속장



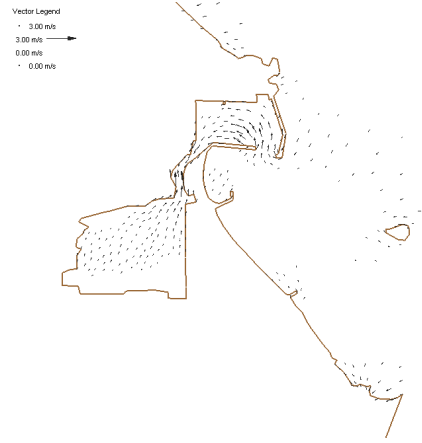
(a) t=105min



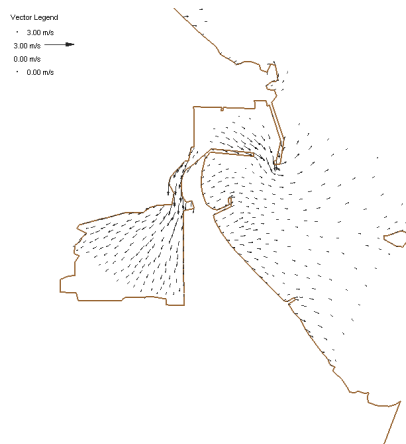
(b) t=110min



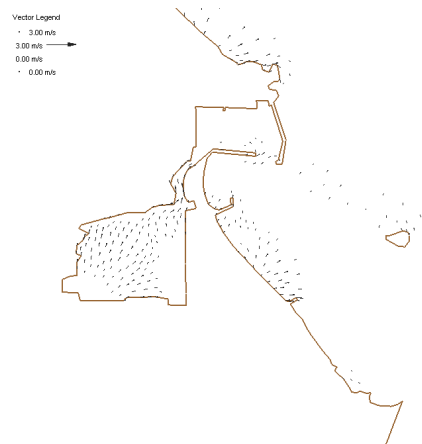
(c) t=115min



(d) t=120min



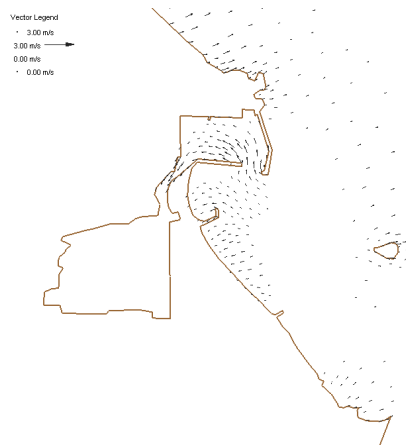
(e) t=125min



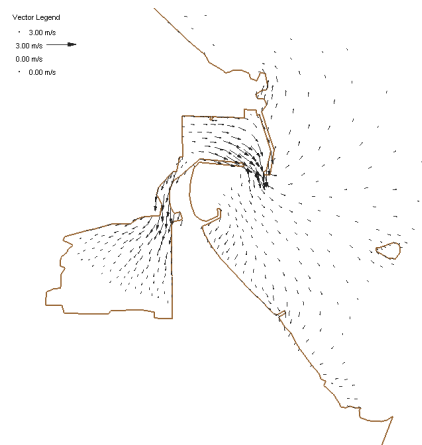
(f) t=130min

그림 3.4.65 속초항에서의 유속장

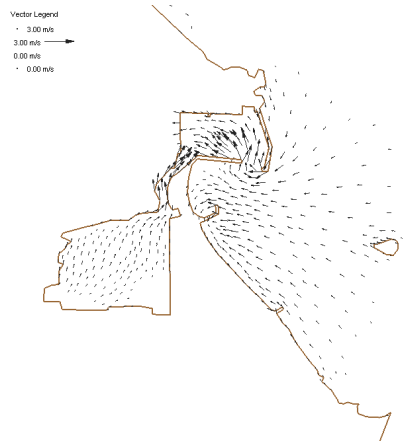
(4) 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 속초항에서의 유속장



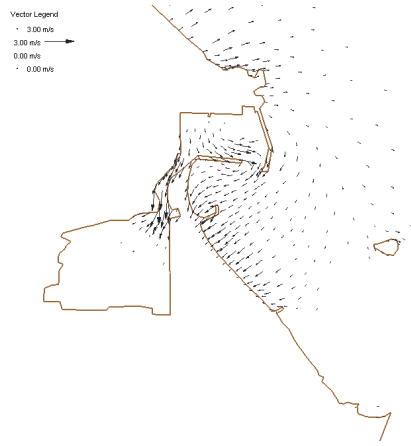
(a) t=110min



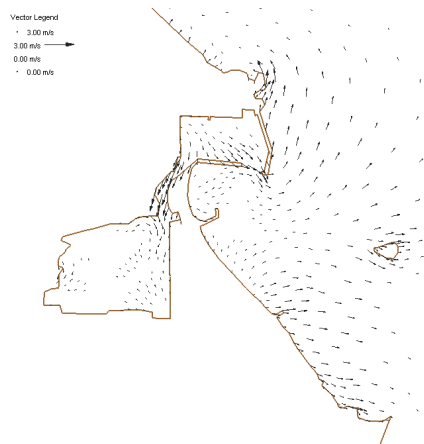
(b) t=115min



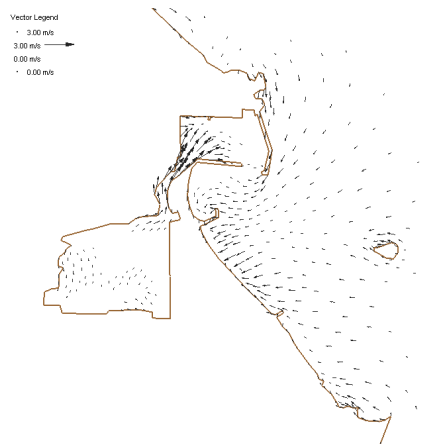
(c) t=120min



(d) t=125min



(e) t=130min



(f) t=135min

그림 3.4.66 속초항에서의 유속장

바. 유한차분, 유한요소 모형의 지진해일 수치모의 결과 비교

표 3.4.4. 1983년, 1993년 지진해일에 대한 유한차분, 유한요소 수치모의에 따른 최대 지진해일고 비교

항 명	역사 지진해일	유한차분모형 최대 지진해일고 (단위 : cm)	유한요소모형 최대 지진해일고 (단위 : cm)
속초항	1983년	95	48
	1993년	86	69
옥계항	1983년	95	62
	1993년	116	51
목호항	1983년	146	73
	1993년	122	98
동해항	1983년	139	82
	1993년	146	91
삼척항	1983년	120	43
	1993년	114	37
포항항	1983년	26	28
	1993년	18	20
울산항	1983년	17	19
	1993년	17	12
부산항	1983년	15	16
	1993년	10	9

사. 항만구조물의 안정성 평가를 위한 지진해일에 대한 가시화 DVD 제작

(1) 지진해일 전파의 고해상도 동영상 Blu-ray DVD제작

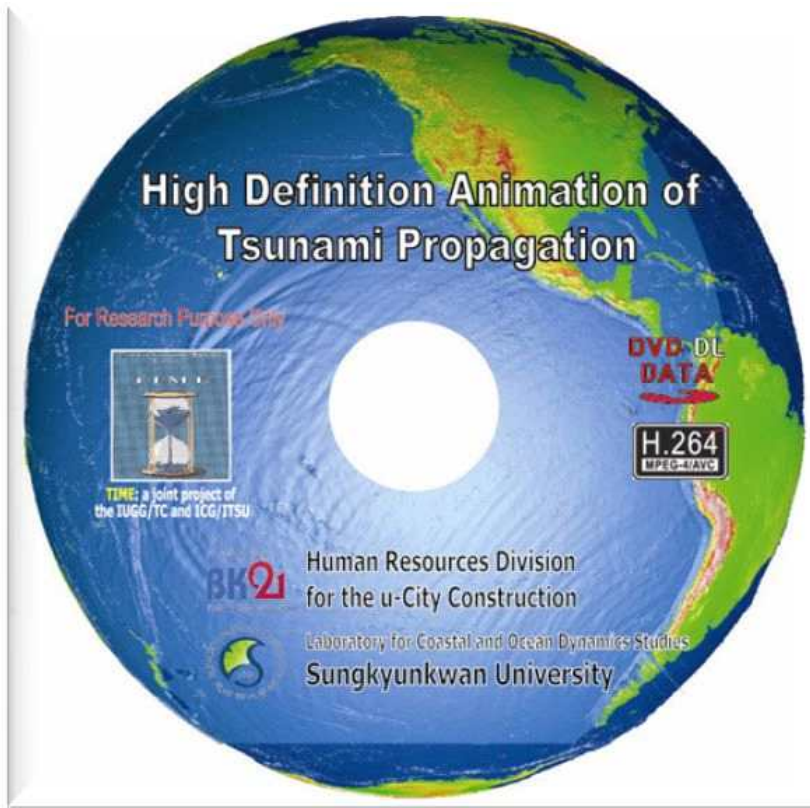


그림 3.4.67 지진해일 전파의 고해상도 동영상 Blu-ray DVD제작

(2) 3차원 가시화법과 고해상도 동영상 DVD 제작에 필요한 자료와 도구를 수록한 DVD 제작(우측: 임원항의 지진해일 유발유속 가시화 예)

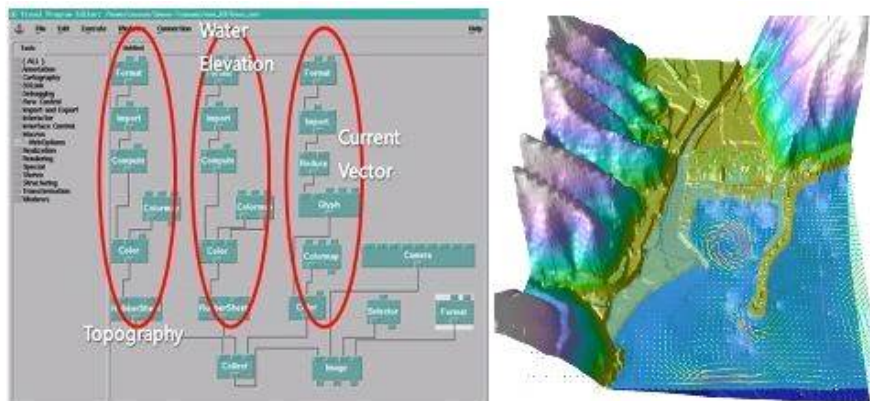


그림 3.4.68 임원항의 지진해일 유발유속 가시화 예

3. 지진해일에 의한 동해 연안항(5개)의 국지 정밀 설계해면 산출

가. 동해안 연안항(5개) 상세영역 세분화(유한차분모형)

(1) 2차년도에 간이 설계해면을 산출하기 위하여 사용했던 영역은 총 3개로 분할되었는데 무역항의 국지 정밀 해면 산출을 위하여 영역을 5개로 세분화함. 지진해일은 원해에서의 거동은 파형의 변화가 거의 없기 때문에 선형 모형으로 수치모의가 가능하지만 해안선에 접근하면서 비선형성이 증가하기 때문에 수치모형 역시 비선형 모형을 사용함. 또한 울산항과 부산항은 두 개의 항구로 구분하여 각각 계산하였으며, D와 E영역의 계산 조건은 표 3.4.5와 같음

표 3.4.5 각 영역별 계산 조건

	D 영역		E 영역	
격자간격	2.22 sec (약 55m)		0.7407 sec (약 18.33m)	
계산시간간격	0.11111 sec		0.03704 sec	
격자수	주문진, 울릉항	433×454	주문진, 울릉항	256×259
	후포, 구룡포항	421×466	후포, 구룡포항	250×259
	부산남항	517×469	부산남항	304×316
외해경계조건	다중격자연결		다중격자연결	
수치모형	선형모형		비선형모형	

(2) 새로 분할된 영역에서의 상세 수심자료는 국립해양조사원에서 제공받았으며, 각 영역의 수심자료 크기와 수심분포는 다음 그림과 같음

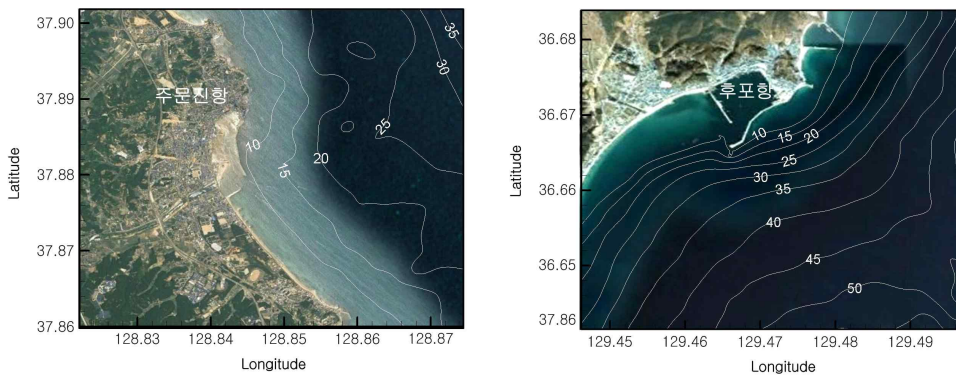


그림 3.4.69 상세역 수심분포(주문진항, 후포항)

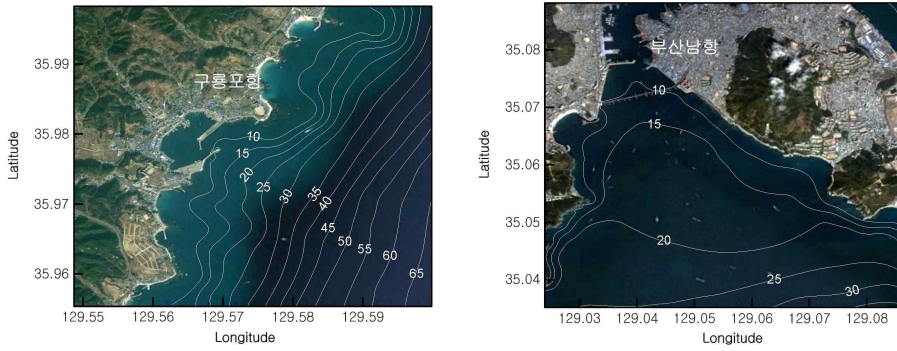


그림 3.4.70 상세역 수심분포(구룡포항, 부산남항)

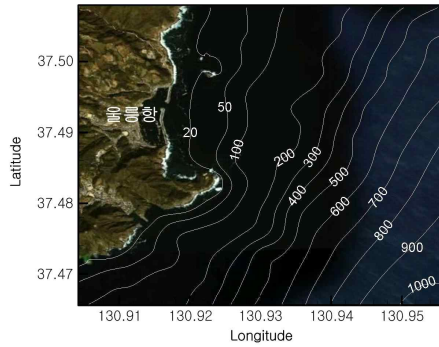


그림 3.4.71 상세역 수심분포(울릉항)

나. 지진해일에 의한 동해 연안항(5개)의 국지 정밀설계해면 산출(유한차분모형)

(1) 지진해일에 대한 동해 무역항(8개)의 국지 정밀설계해면 산출을 위해 역사 지진해일인 1983년 동해 중부 지진해일, 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 대한 수치모의 실시하였음. 또한 발생 가능 최대 지진해일 3가지(Hypoth1, Hypoth2, Hypoth3)중에서 Hypoth2와 Hypoth3에 대하여 초기 수면변위를 산정하였음. 표 3.4.36은 발생 가능 최대 지진해일에 대한 단층파라미터를 나타내고 그림 3.4.72는 초기파형을 표현함

표 3.4.6. 발생 가능 최대 지진해일 단층파라미터

Case	Location		H (km)	θ ($^{\circ}$)	δ ($^{\circ}$)	λ ($^{\circ}$)	L (km)	W (km)	D (m)
	Long. ($^{\circ}$ E)	Lat. ($^{\circ}$ N)							
Hypoth 1	141.153	45.896	5	180	60	105	140	22	12.00
Hypoth 2	139.0	39.917	5	185	60	105	139	29.5	12.00
Hypoth 3	139.645	40.053	5	180	60	105	89.2	21.5	12.00

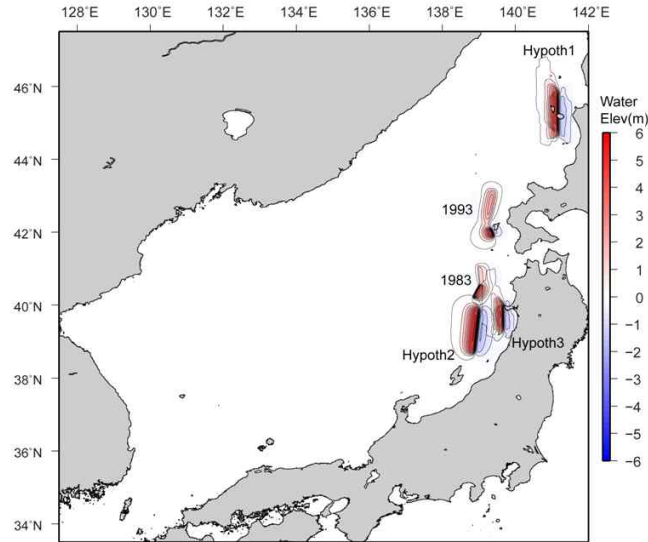


그림 3.4.72 1983년, 1993년의 지진해일 및 지진공백역 가상지진해일(Hypoth1, Hypoth2, Hypoth3) 위치 및 초기수면변위

(2) A, B, C, D 영역은 선형 모형인 지진해일 전파모형을 사용하고 E 영역은 비선형 모형인 지진해일 범람모형을 사용하였음. 동해 연안항 5개의 수치모의 결과는 항목 (3)과 같이 최대 지진해일고로 표현하였으며 그 결과는 다음 그림과 같음

(3) 최대 지진해일고
(가) 주문진항

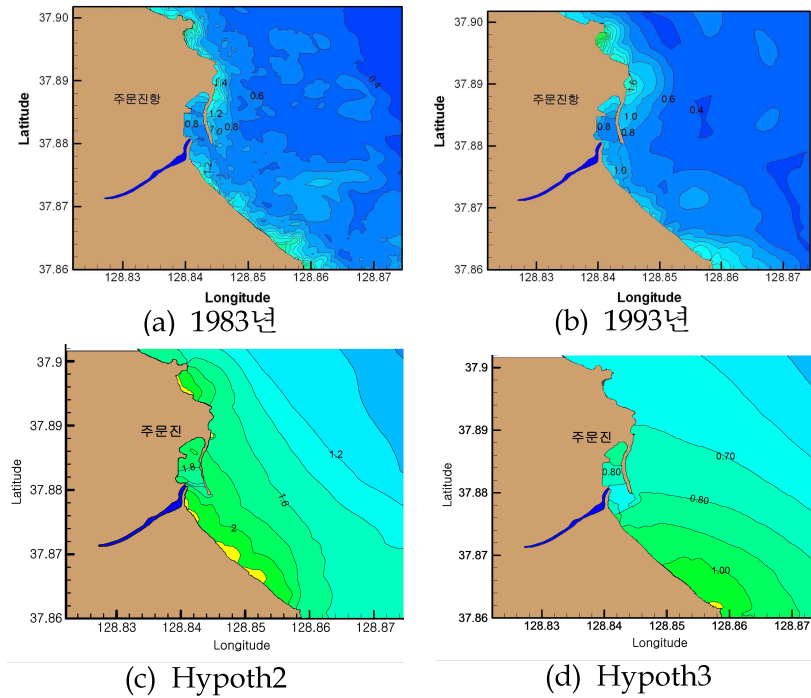
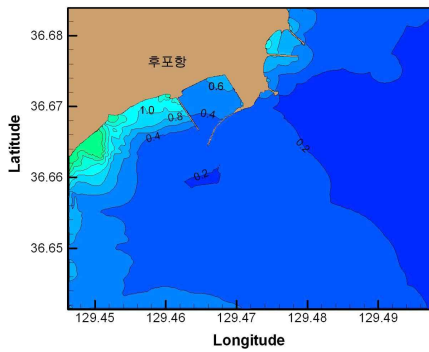
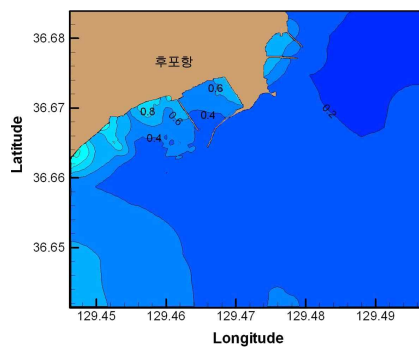


그림 3.4.73 주문진항 최대 지진해일고 (단위 : m)

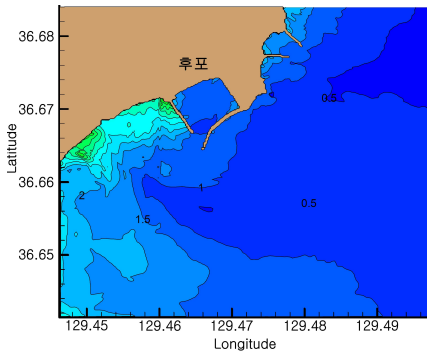
(나) 후포항



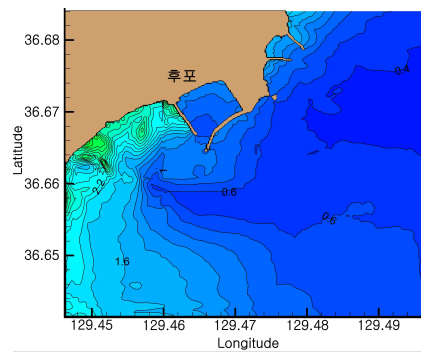
(a) 1983년



(b) 1993년



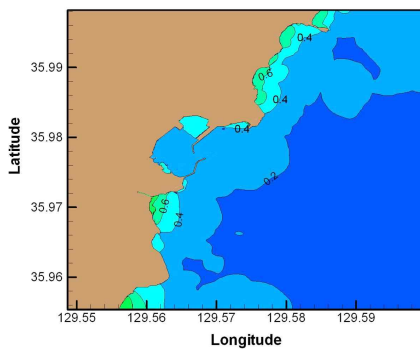
(c) Hypoth2



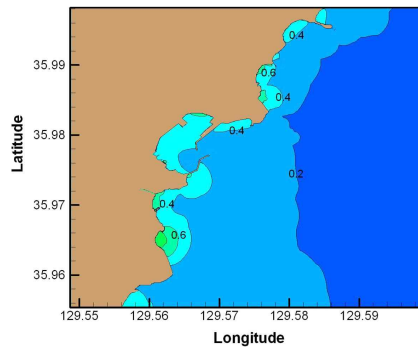
(d) Hypoth3

그림 3.4.74 후포항 최대 지진해일고 (단위 : m)

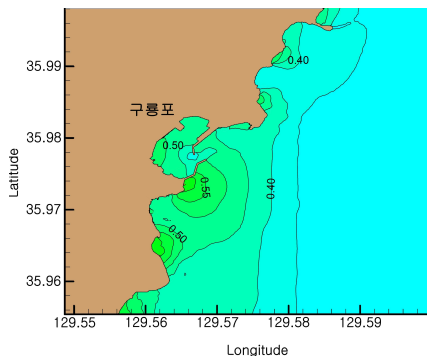
(다) 구룡포항



(a) 1983년



(b) 1993년



(c) Hypoth2

(d) Hypoth3

그림 3.4.75 구룡포항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(라) 부산남항

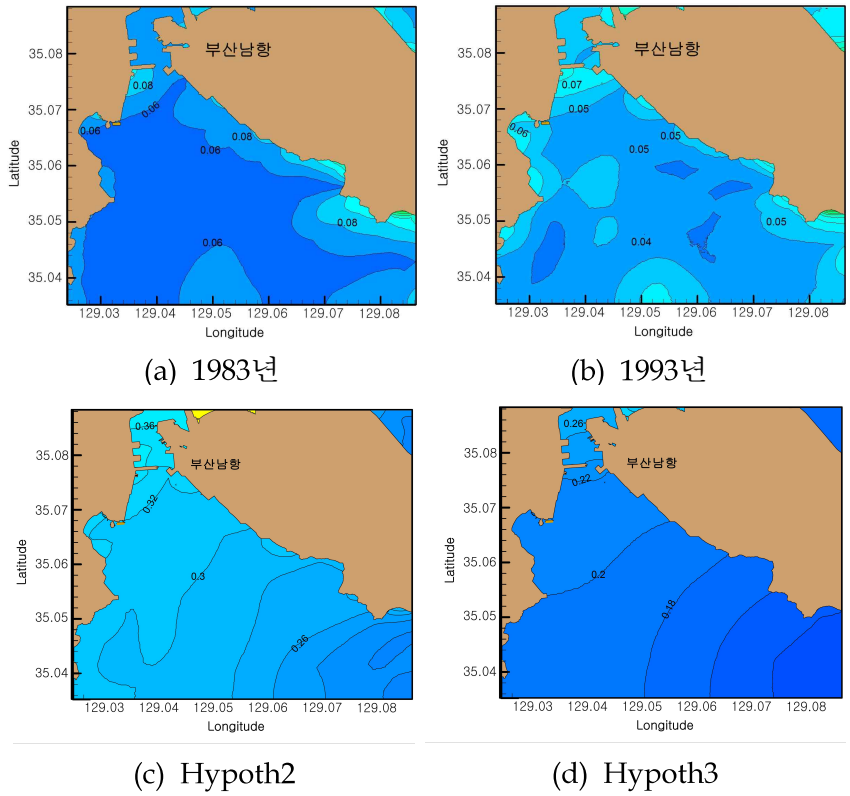


그림 3.4.76 부산남항 최대 지진해일고 (단위 : m)

(마) 울릉항

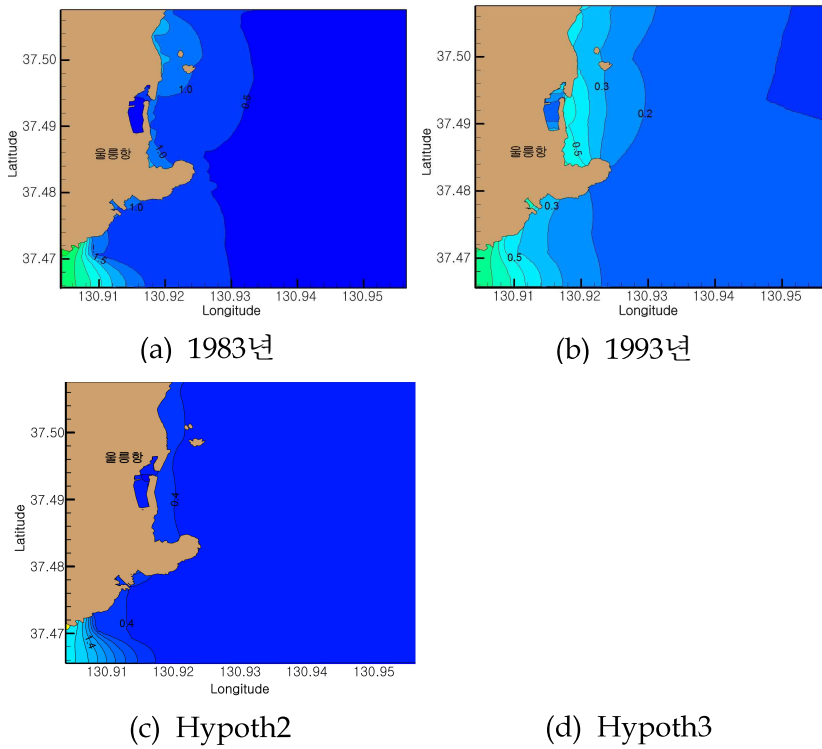


그림 3.4.77 울릉항 최대 지진해일고 (단위 : m)

다. 동해안 주요 해변에서의 처오름 높이 산정(유한차분모형)

(1) 1분(약 1.5 km) 격자크기의 유한차분모델 COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)을 이용하여 1983년, 1993년의 지진, 발생 가능 최대 지진해일 (Hypoth1, Hypoth2, Hypoth3)에 대한 지진해일을 모의함(그림 3.4.81 참조)

(2) 모델에서 동해의 주요 해변 39개소의 수위의 시계열을 추출한 후, 이론식을 매트랩으로 코딩한 프로그램을 이용하여 실제 지형에 있어서의 수위의 시계열로 변환함

(3) 변환된 수위의 시계열에서 최대치(최대 지진해일고)는 해변의 처오름으로 간주할 수 있음

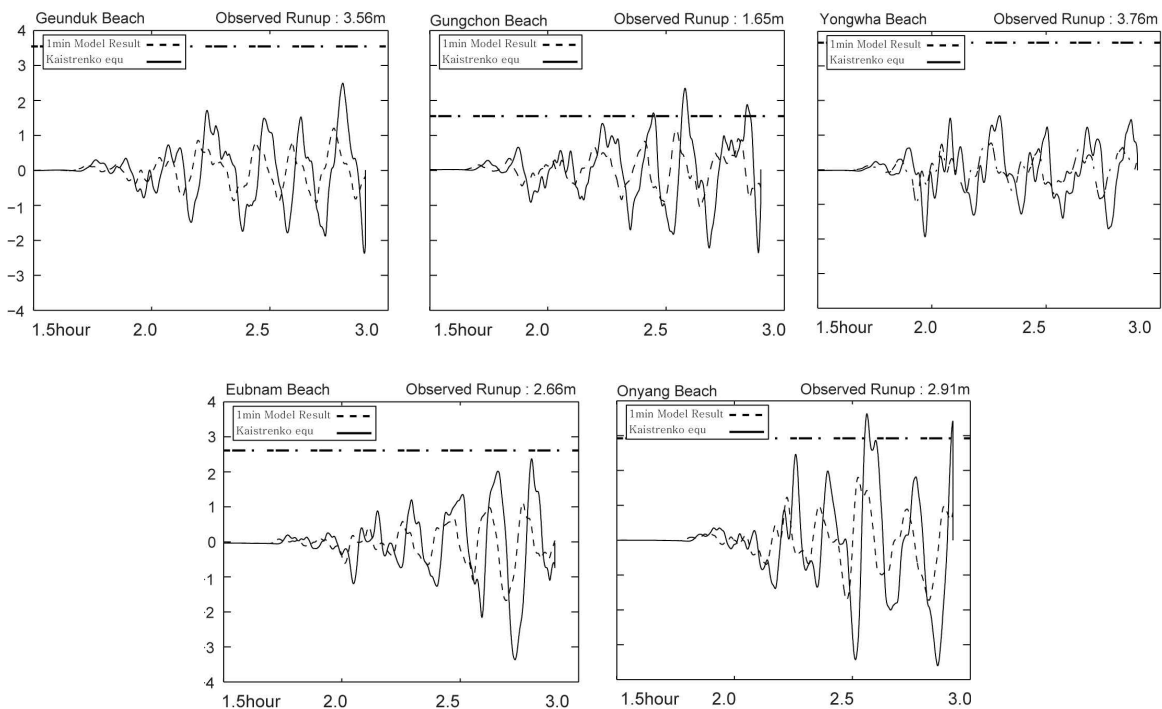


그림 3.4.78 1분 유한차분 모델 수위의 시계열 및 이론식(Kaistrenko's equation)을 사용하여 변환한 수위의 시계열 (1983년)

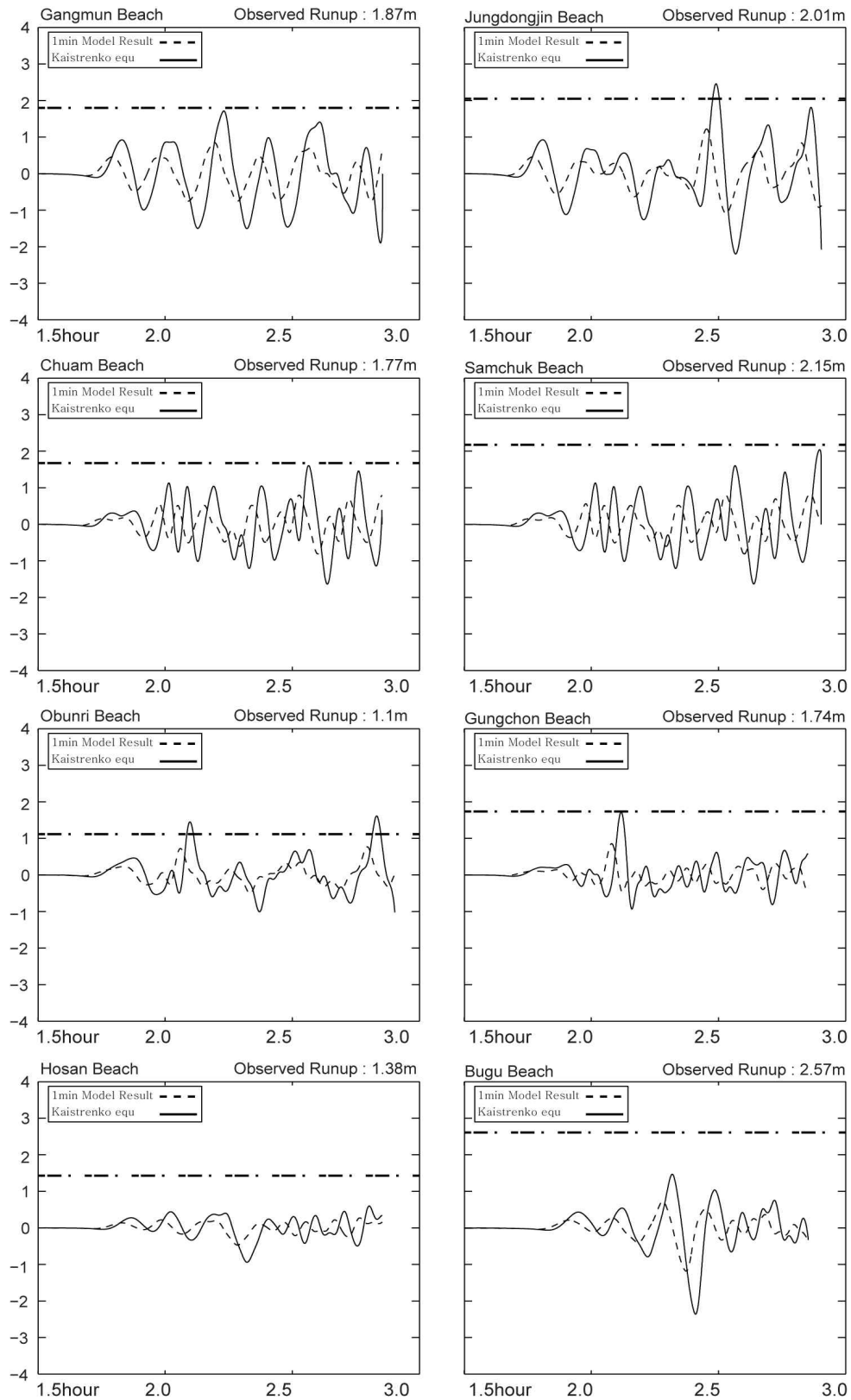


그림 3.4.79 1분 유한차분 모델 수위의 시계열 및 이론식(Kaistrenko's equation)을 사용하여 변환한 수위의 시계열(1993년)

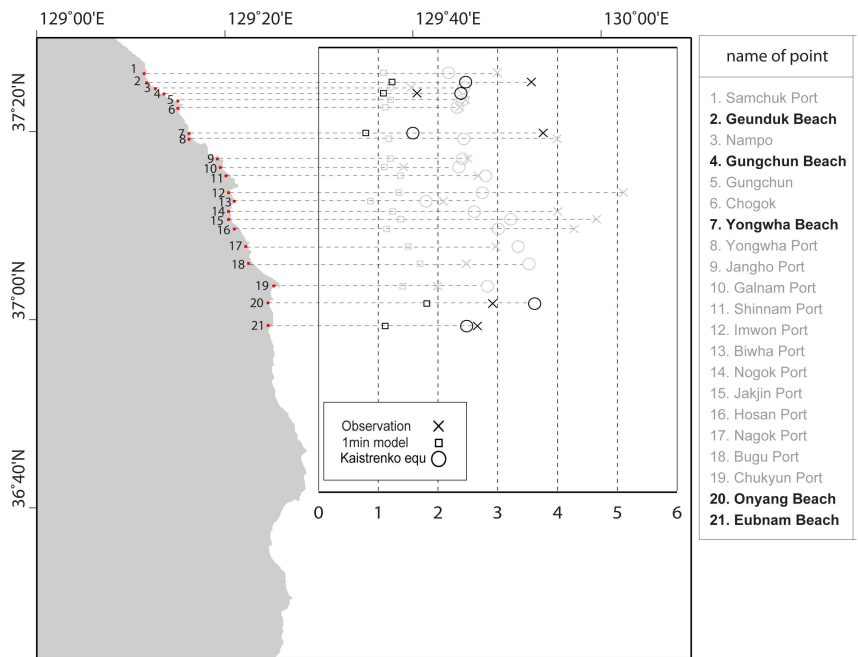


그림 3.4.80 1983년 지진해일에 대한 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이), 관측된 처오름 높이

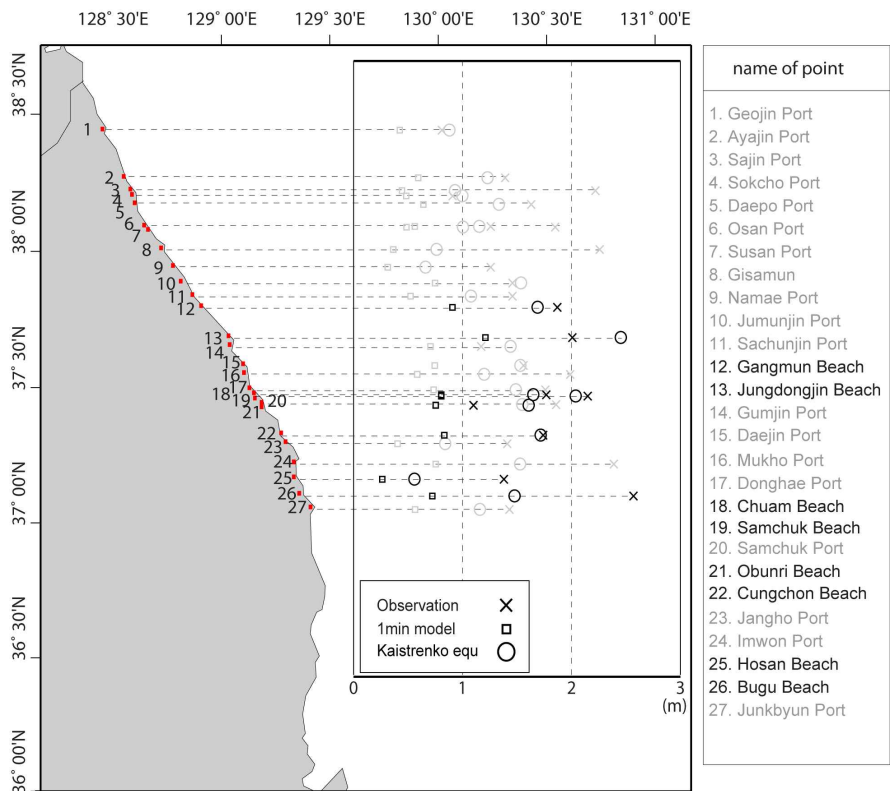


그림 3.4.81 1993년 지진해일에 대한 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이), 관측된 처오름 높이

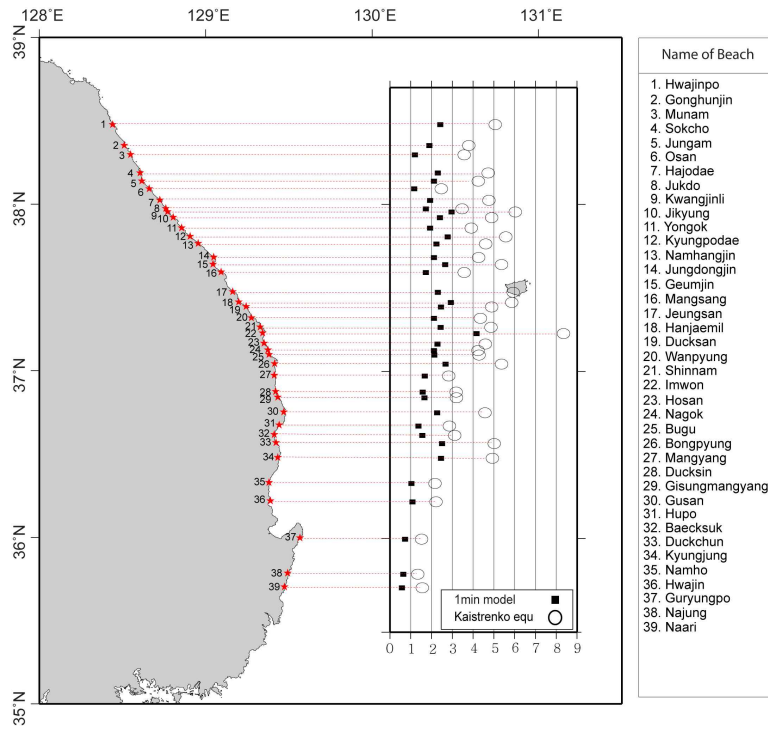


그림 3.4.82 가상 지진 해일(Hypoth1)에 대한 동해 주요 해변에서의 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이)

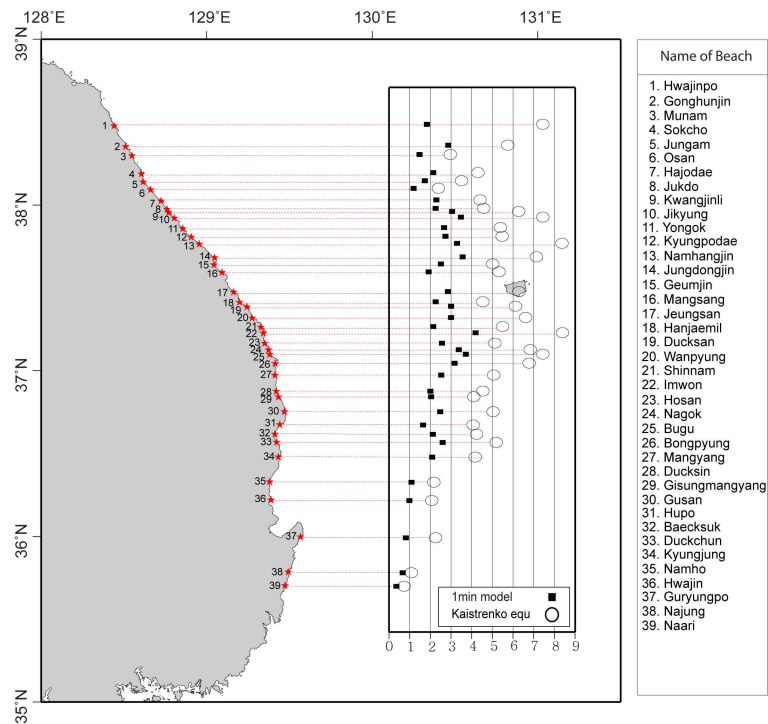


그림 3.4.83 가상 지진 해일(Hypoth1)에 대한 동해 주요 해변에서의 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이)

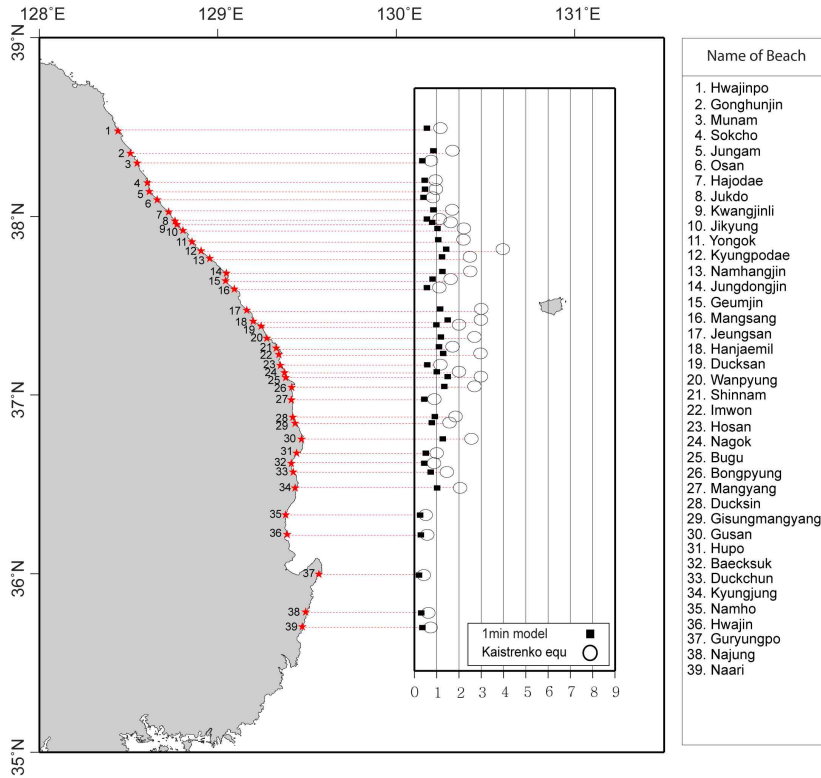
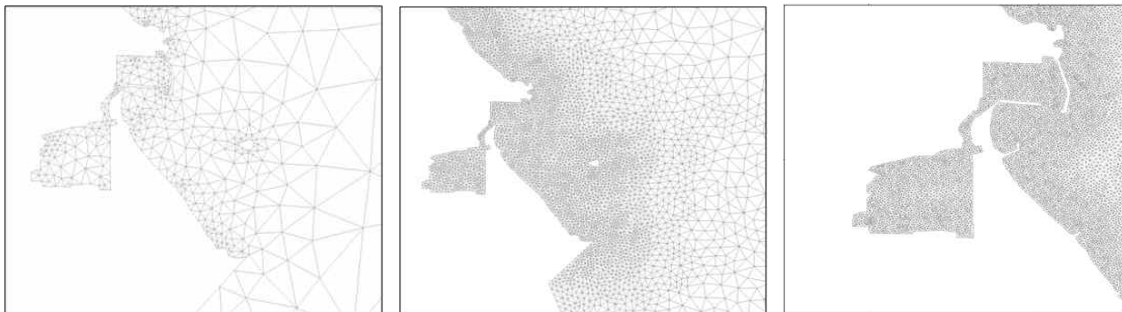


그림 3.4.84 가상 지진 해일(Hypoth3)에 대한 동해 주요 해변에서의 최대 지진 해일고의 비교. 유한차분모델의 최대해일고, 이론식(Kaistrenko equation)으로 변환한 최대해일고(처오름 높이)

라. 동해안 연안항(5개) 안정성 평가를 위한 설계해면 산출(유한요소모형)

(1) 동해 무역항 및 연안항의 정밀 유한요소격자를 상세수심도와 Google Earth를 기반으로 하여 더욱 상세화 된 유한요소 격자를 생성함. 절점(Node)과 삼각격자(Element)의 연결상태, 삼각격자의 방향성, 삼각격자 형태의 적합성 등을 검사함

(2) Conforming Delaunay Triangulation (CDT) 기법으로 격자를 재구성함



(a)조격자(coarse mesh; 약 45,000노드)

(b)세격자(fine mesh; 약 179,000노드)

(c) 더욱 상세화 된 격자(finest mesh; 약 638,000노드)

그림 3.4.85 CDT 기법으로 구성한 조격자와 세격자

(3) 작성된 각 항구에서의 더욱 상세화 된 격자 시스템

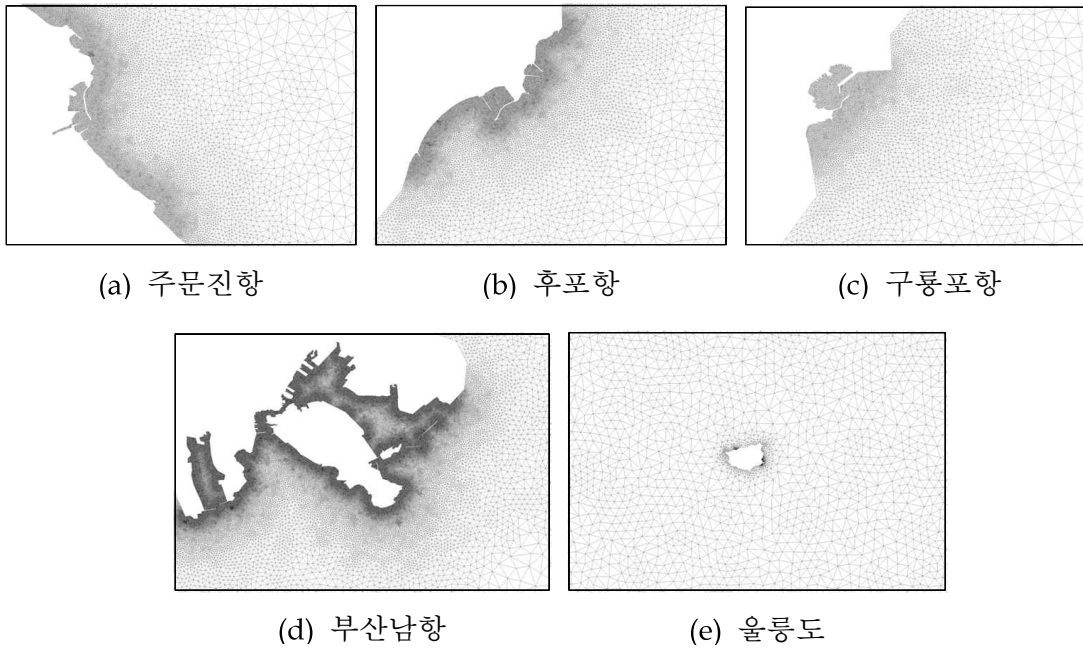


그림 3.4.86 동해의 무역항 및 연안항에서의 더욱 상세화 된 세격자 시스템

(4) 일본측 주요항구(9개항)도 격자에 포함하여 구성하여 지진해일 시뮬레이터의 범용성 확보

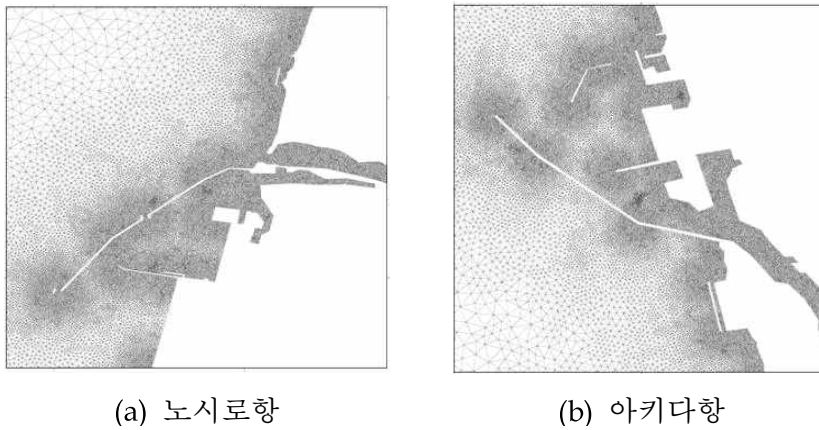


그림 3.4.87 일본 항구의 상세화 된 격자체계 및 구성

마. 동해안 연안항(5개) 안정성평가를 위한 설계해면 산출(유한요소모형)

(1) 1983년 동해중부 지진해일, 1993년 북해도 남서 외해 지진해일 및 지진공백역 가상지진해일 세 경우의 최대 지진해일고

(가) 주문진항

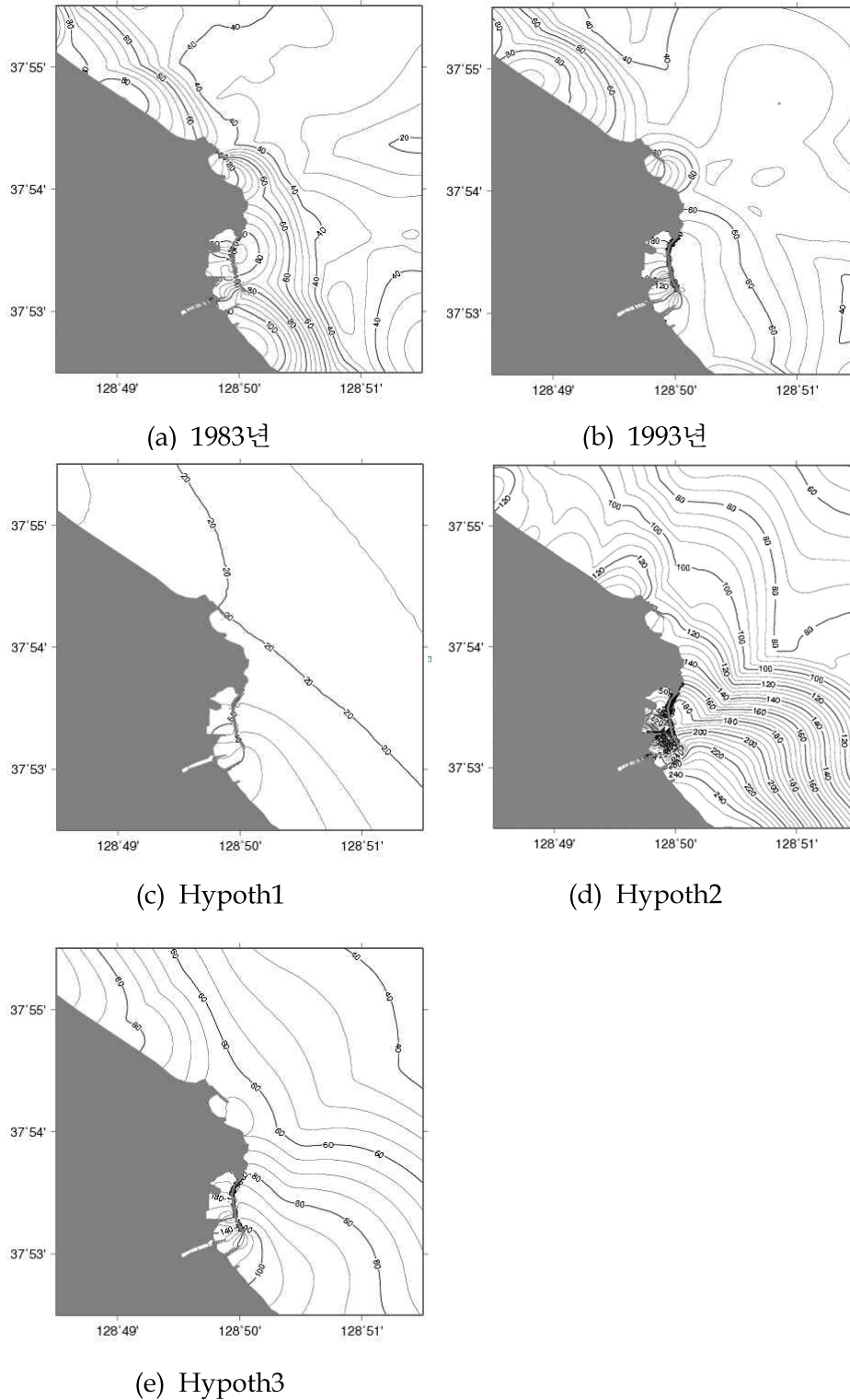
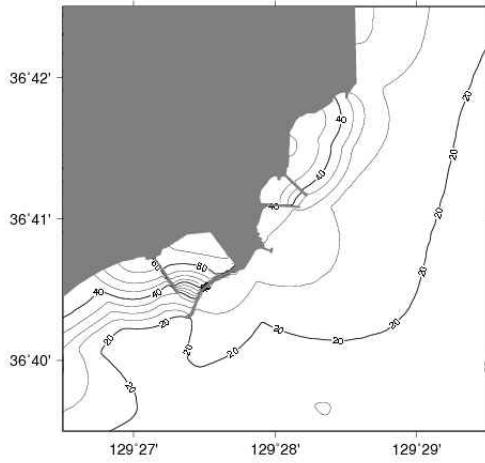
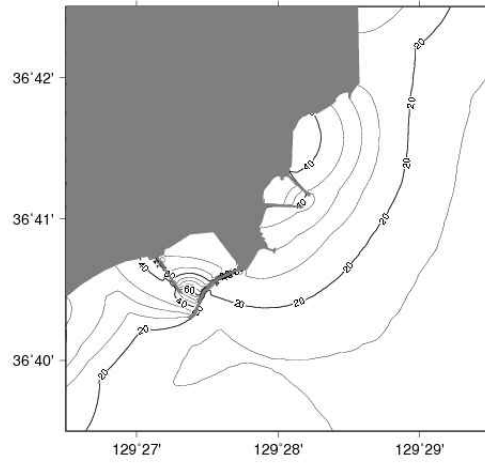


그림 3.4.88 주문진항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

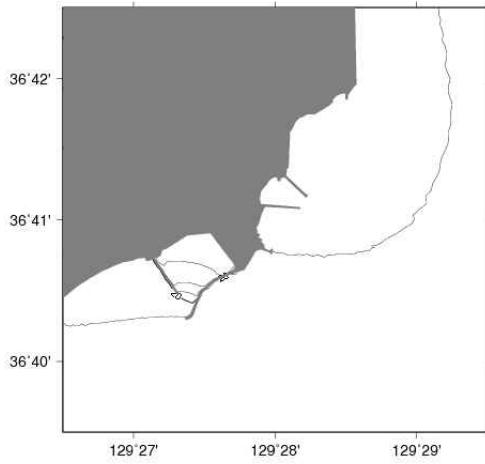
(나) 후포항



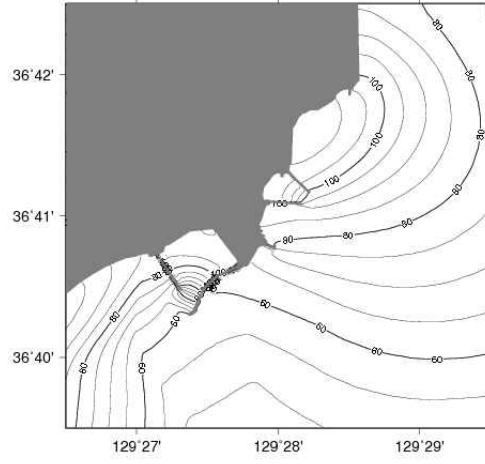
(a) 1983년



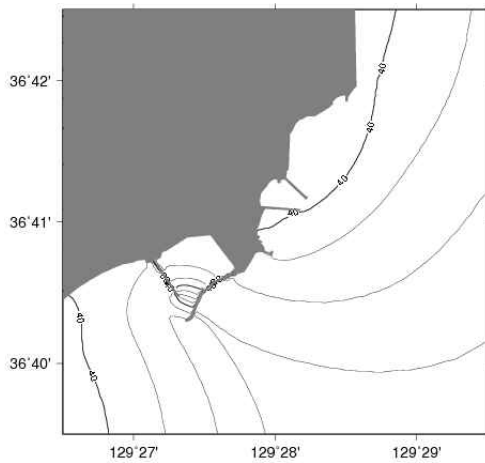
(b) 1983년



(c) Hypoth1



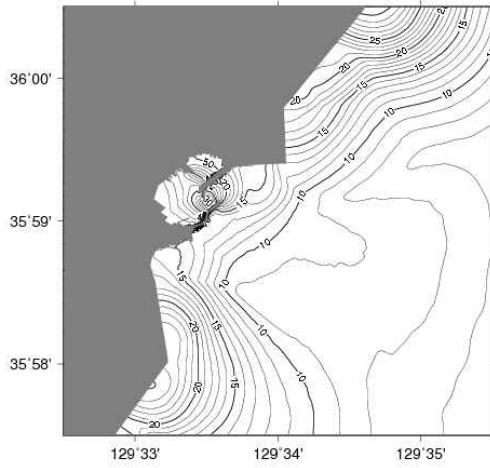
(d) Hypoth2



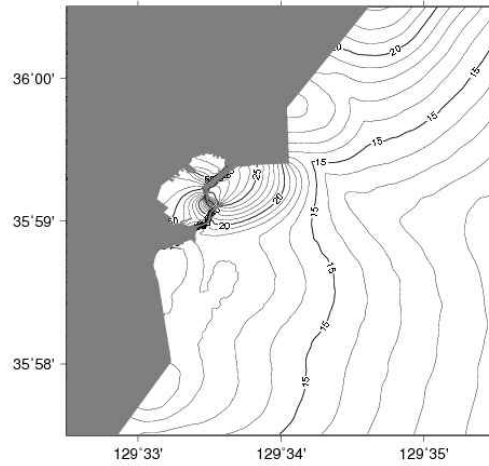
(e) Hypoth3

그림 3.4.89 후포항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

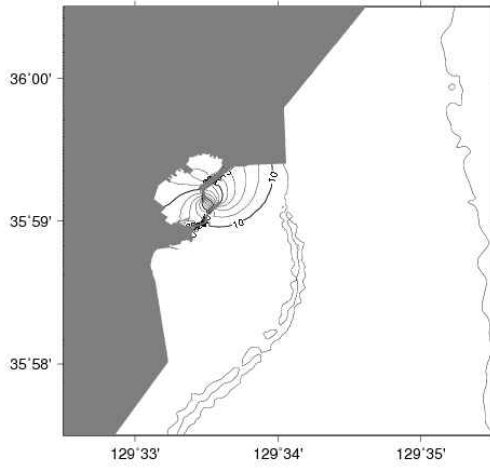
(다) 구룡포



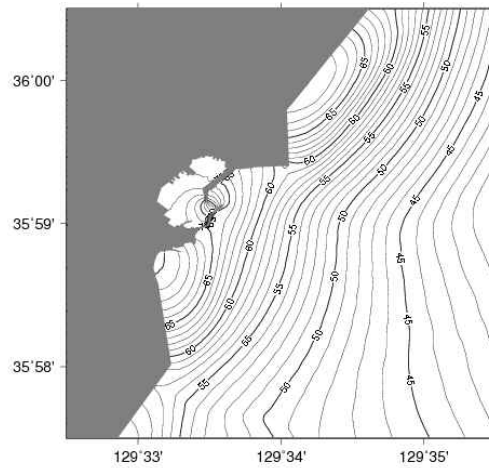
(a) 1983년



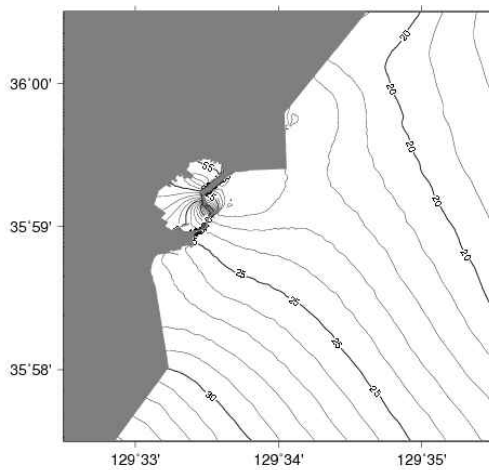
(b) 1993년



(c) Hypoth1



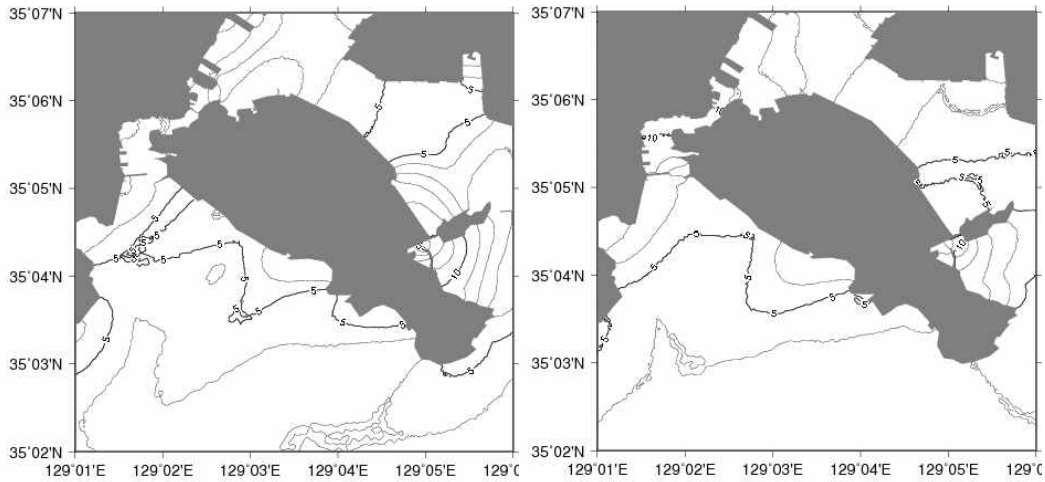
(d) Hypoth2



(e) Hypoth3

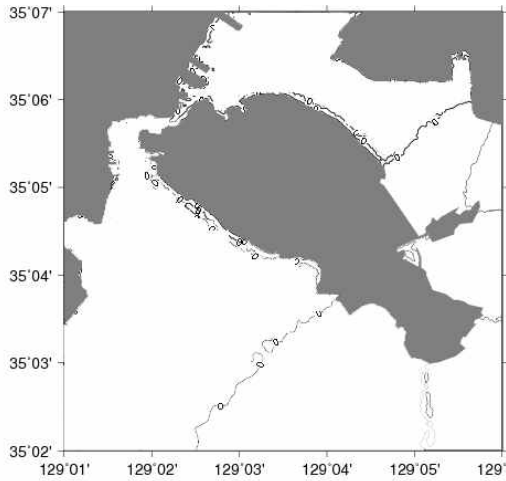
그림 3.4.90 구룡포항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

(라) 부산남항

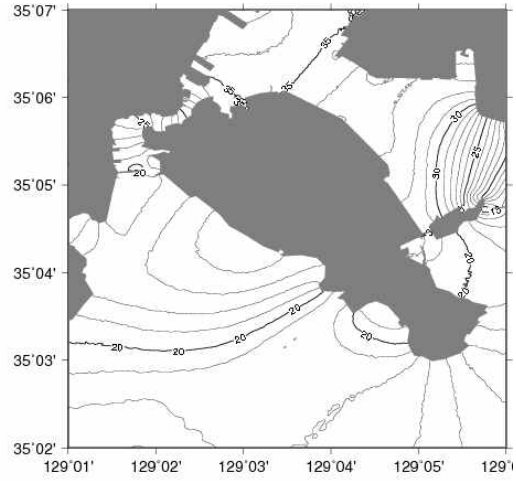


(a) 1983년

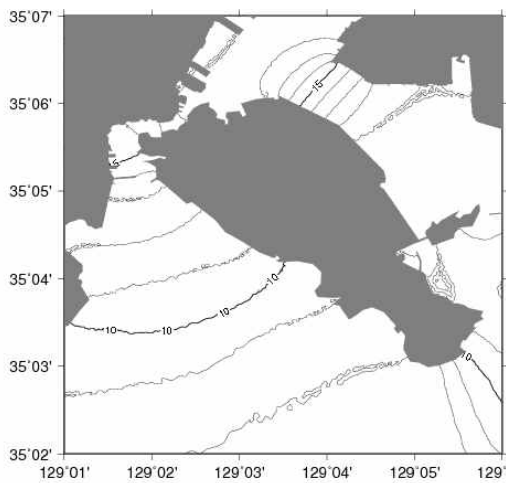
(b) 1993년



(c) Hypoth1



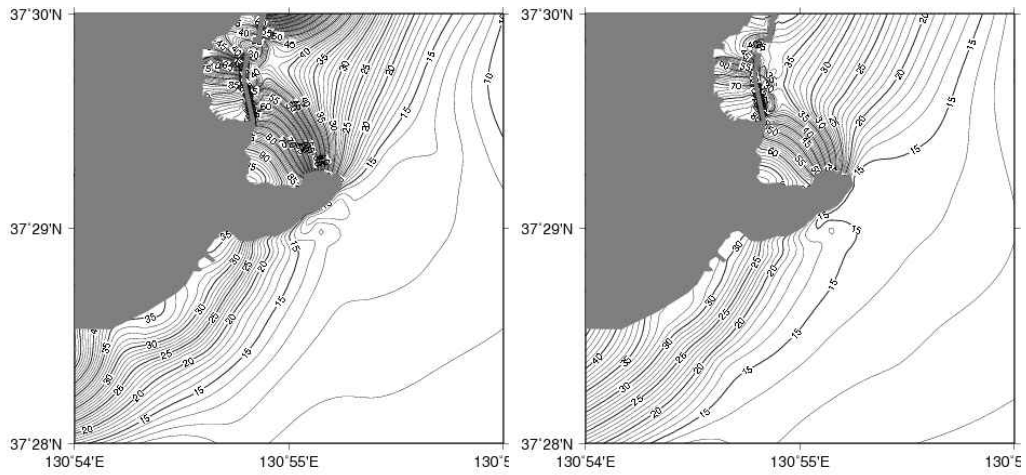
(d) Hypoth2



(e) Hypoth3

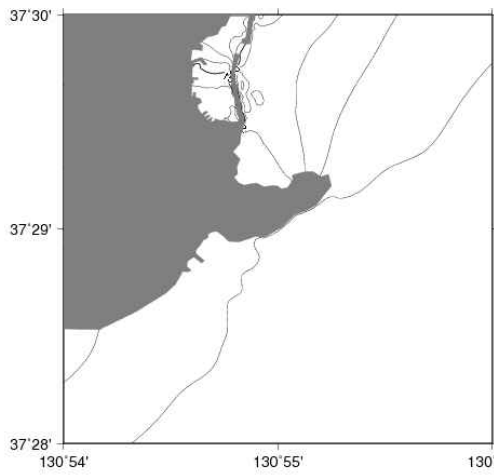
그림 3.4.91 부산남항 최대 지진해일고 (단위 : cm)

(마) 울릉도

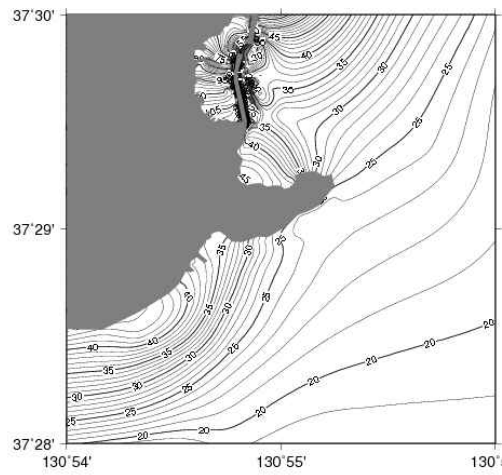


(a) 1983년

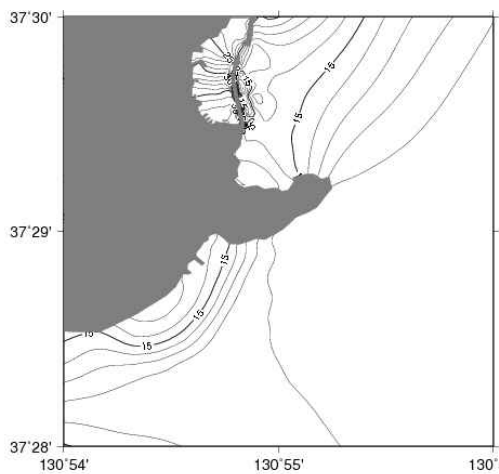
(b) 1993년



(c) Hypoth1



(d) Hypoth2

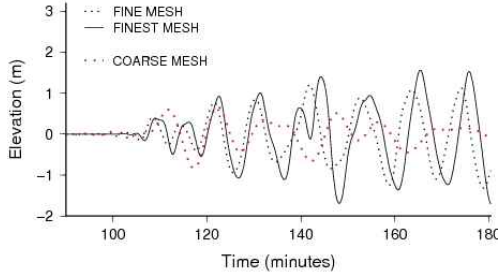


(e) Hypoth3

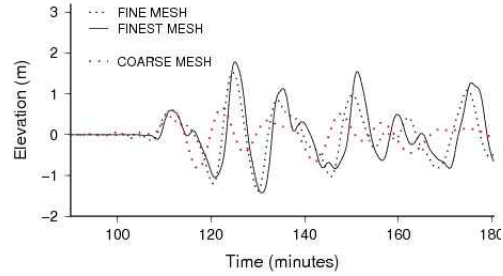
그림 3.4.92 울릉도 최대 지진해일고 (단위 : cm)

(2) 1983년 동해중부 지진해일 및 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 지진해일고의 시계열

(가) 주문진항



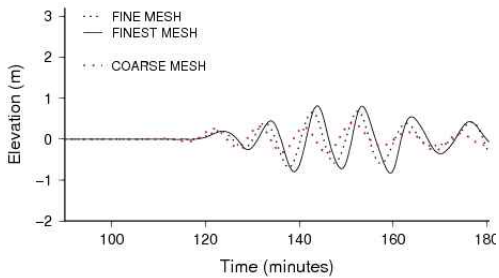
(a) 주문진항, 1983년



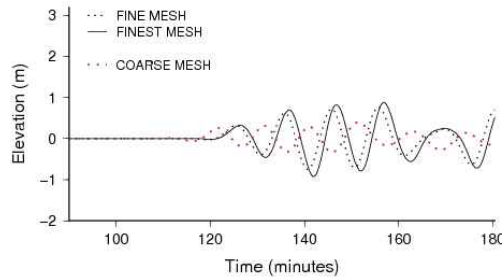
(b) 주문진항, 1993년

그림 3.4.93 주문진항 지진해일고 시계열

(나) 후포항



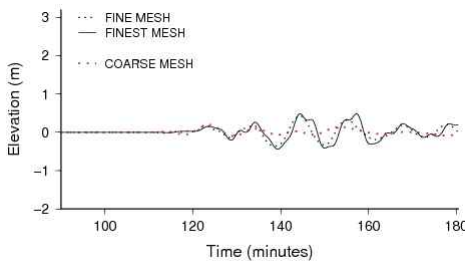
(a) 후포항, 1983년



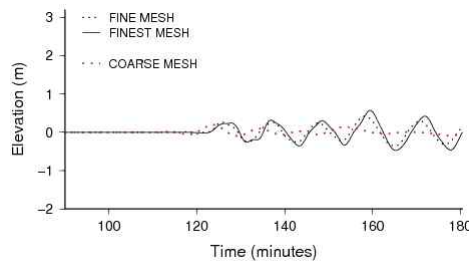
(b) 후포항, 1993년

그림 3.4.94 후포항 지진해일고 시계열

(다) 구룡포항



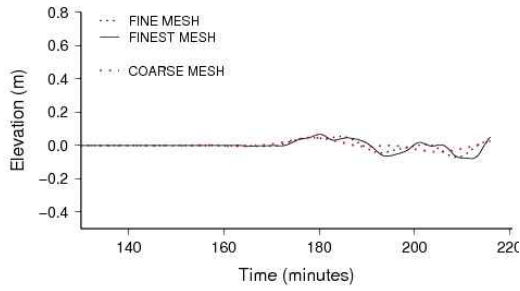
(a) 구룡포항, 1983년



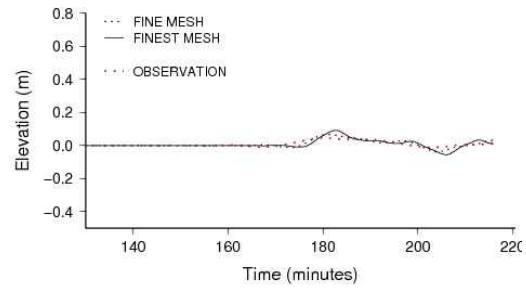
(b) 구룡포항, 1993년

그림 3.4.95 구룡포항 지진해일고 시계열

(라) 부산남항



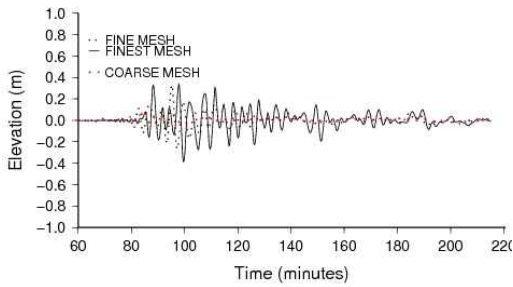
(a) 부산남항, 1983년



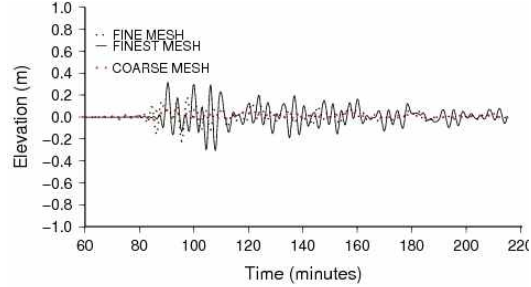
(b) 부산남항, 1993년

그림 3.4.96 부산남항 지진해일고 시계열

(마) 울릉도



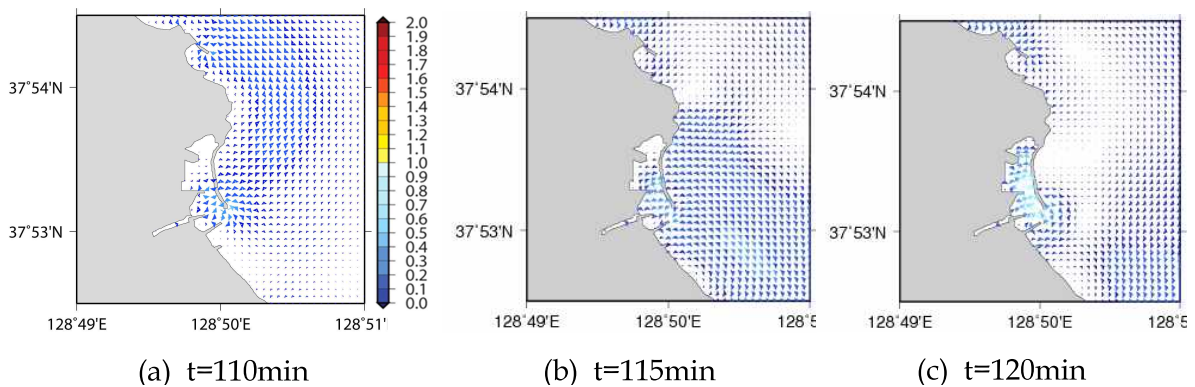
(a) 울릉도, 1983년



(b) 울릉도, 1993년

그림 3.4.97 부산남항 지진해일고 시계열

(3) 1983년 동해중부 지진해일의 주문진항에서의 유속장



(a) t=110min

(b) t=115min

(c) t=120min

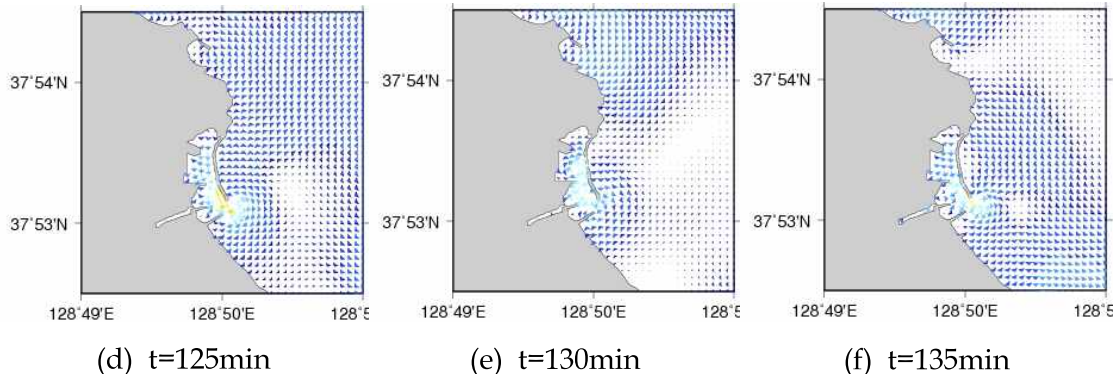


그림 3.4.98 주문진항에서의 유속장

(4) 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 주문진항에서의 유속장

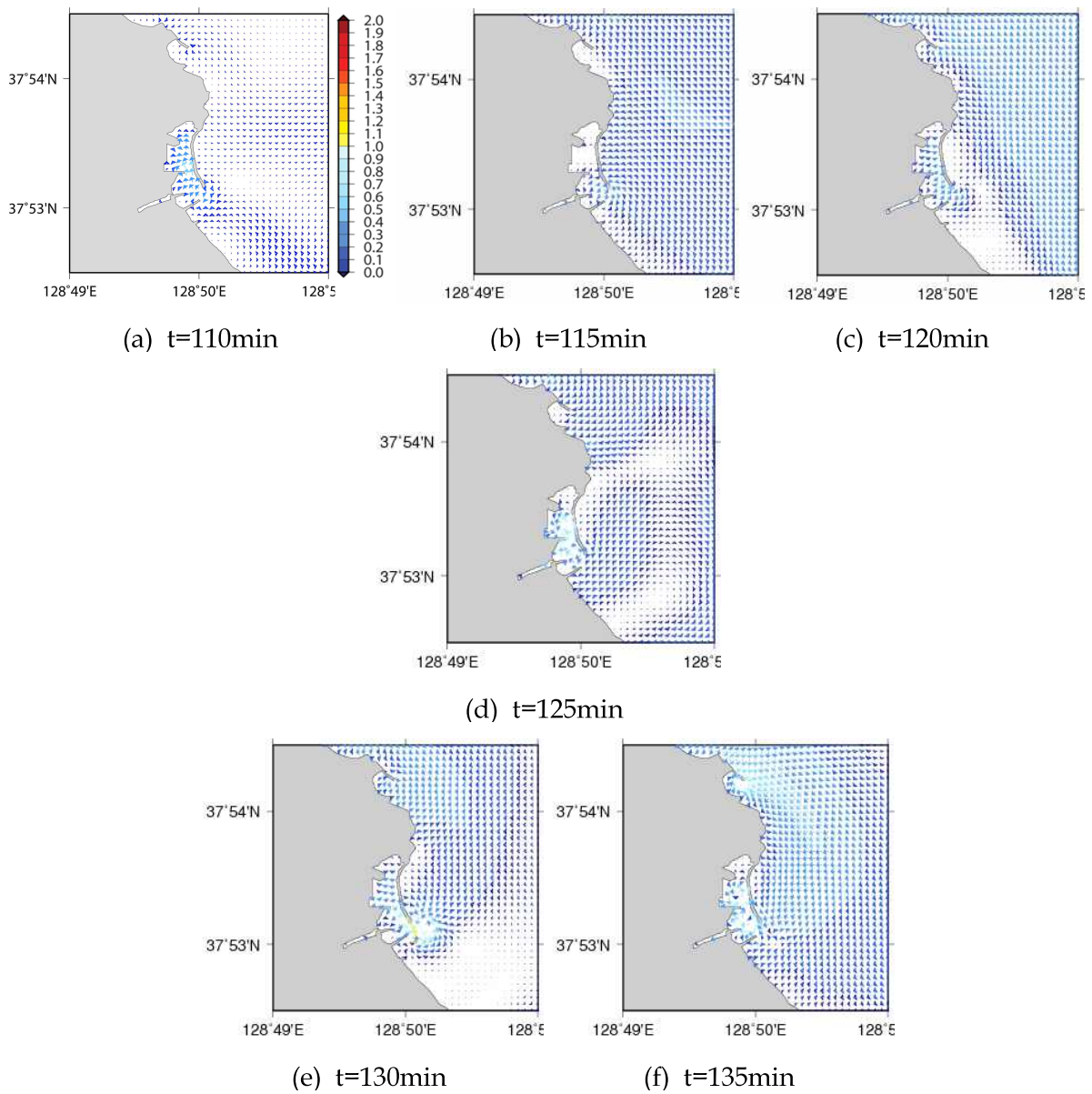
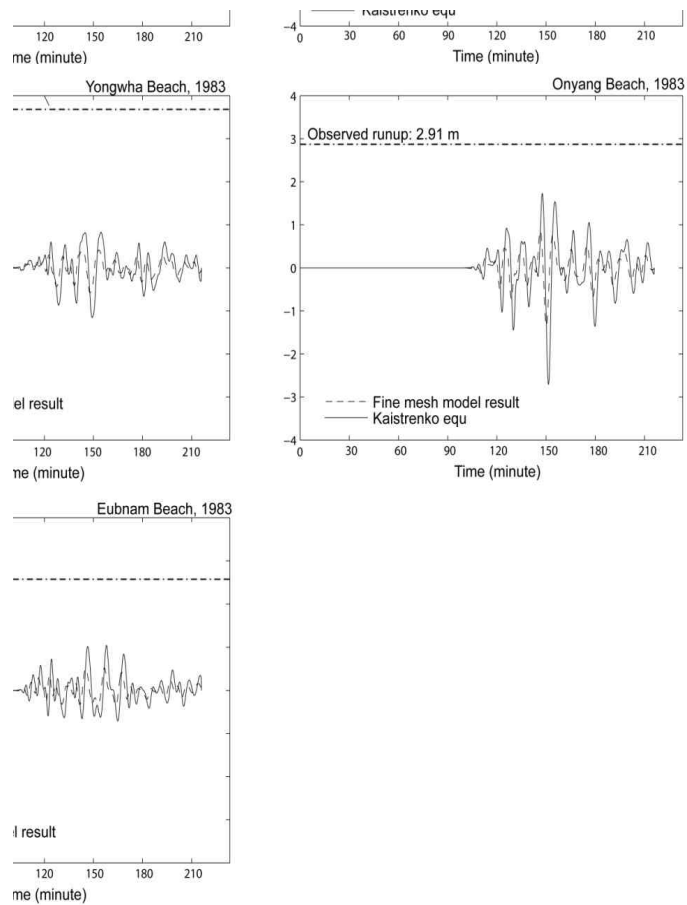
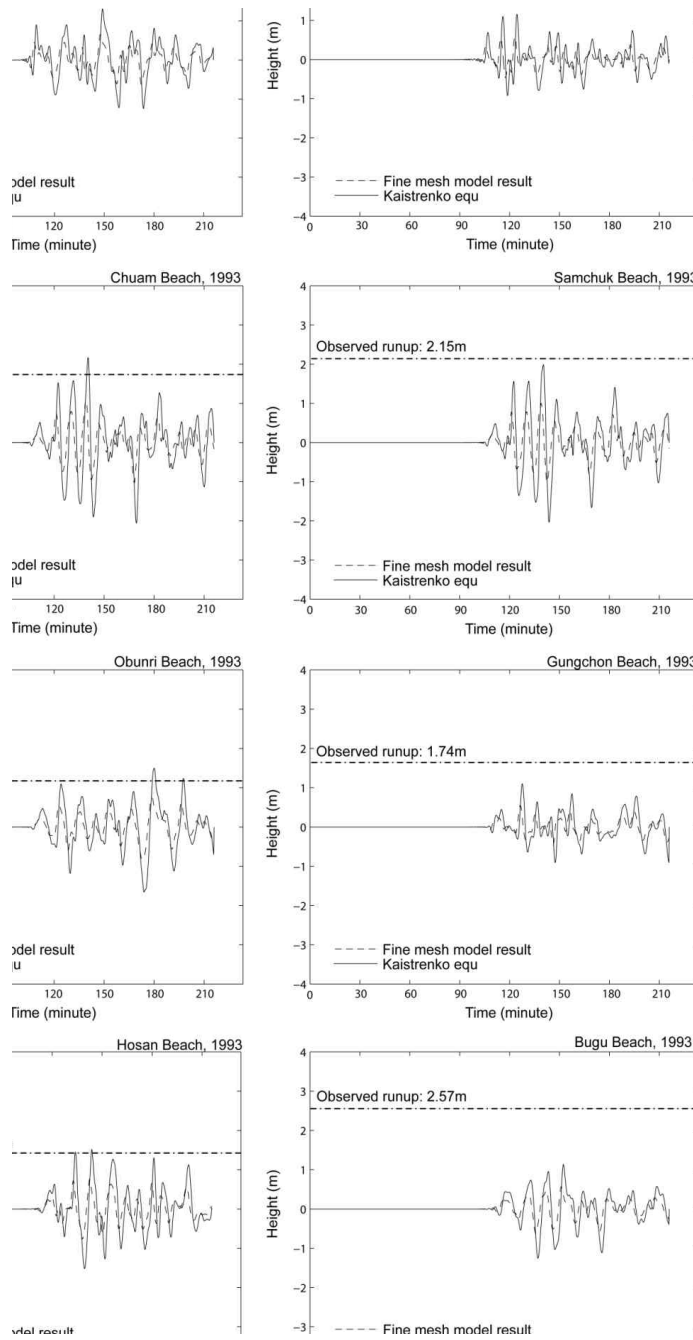


그림 3.4.99 주문진항에서의 유속장

바. 동해안 해빈에서의 처오름 높이 산정(유한요소모형)

(1) 유한요소모형 결과를 이용하여 동해 주요 해빈에서의 수위 시계열 및 처오름 높이 산정





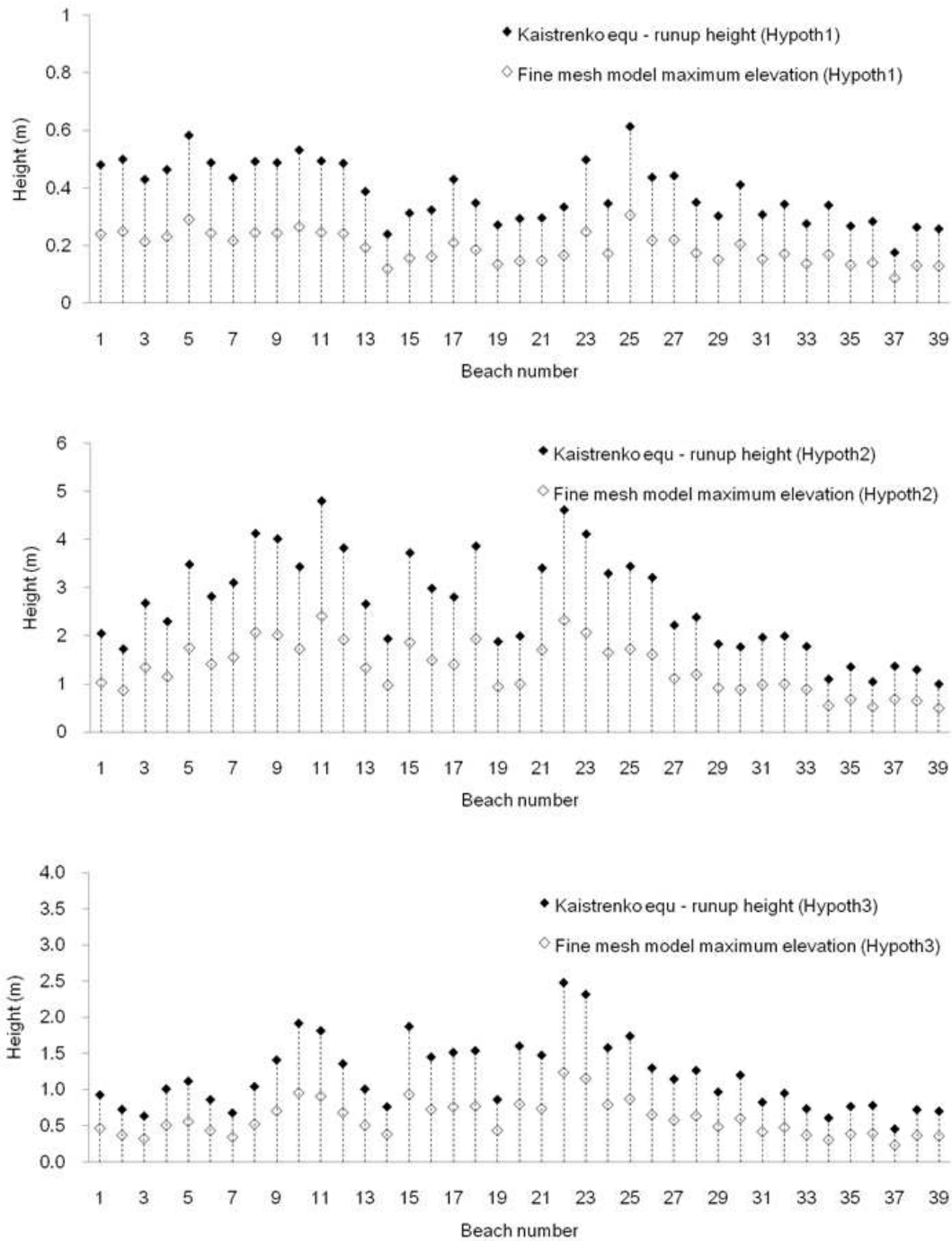


그림 3.4.102 동해 주요 해변 39개소의 가상지진해일 세 케이스에 대해 더욱 상세화 된 유한 요소 모델의 최대해일고 및 이론식을 사용하여 변환한 수위의 최대해일고(처오름 높이)

사. 유한차분, 유한요소 모형의 지진해일 수치모의 결과 비교

표 3.4.7 1983년, 1993년 지진해일과 발생가능 최대 지진해일에 대한 유한차분, 유한요소 수치모의에 따른 최대 지진해일고 비교

항 명	지진해일 및 발생가능 최대 지진해일	유한차분모형 최대 지진해일고 (단위 : cm)	유한요소모형 최대 지진해일고 (단위 : cm)
주문진항	1983년	118	92
	1993년	103	84
	Hypoth2	176	201
	Hypoth3	83	104
후포항	1983년	86	59
	1993년	67	48
	Hypoth2	132	78
	Hypoth3	128	56
구룡포항	1983년	42	46
	1993년	36	28
	Hypoth2	55	65
	Hypoth3	28	37
부산남항	1983년	8	5
	1993년	7	5
	Hypoth2	32	28
	Hypoth3	22	14
울릉항	1983년	105	58
	1993년	68	43
	Hypoth2	49	34
	Hypoth3	14	15

제 5 절 구조물 안정성 분석을 위한 천해 설계파 산출

1. 개요

항만 설계를 위한 설계파의 산출, 연안구조물의 시공계획 수립을 위한 파랑통계자료의 산출, 항만매몰, 연안침식 및 해안선 변화 등에 대한 파랑의 영향을 산출하기 위하여 장기간의 파랑자료가 필요하다. 천해 파랑의 산출은 먼저 이 지역으로 입사하는 심해 입사파를 산출하고, 이로부터 천해파 변환 모델에 의해 구조물의 설치 위치에서의 천해 파랑을 산출하는 과정을 밟게 된다. 파랑 산출은 심해 입사파의 산출과 이를 천해 변환하는 천해파 산출로 구분할 수 있으며, 구조물의 설계를 위한 설계파 산출과 작업 조건, 정온, 퇴적물 이동 등을 평가하기 위한 장기 파랑 통계 자료로 구분된다.

한국해양연구원은 2005년 “전해역 심해설계파 추정보고서 II”에서 전 해상의 세부 격자에 대해 수치 모델에 의해 간접적으로 장기간 파랑 자료를 산출하였으며, 이로부터 전 해상에 대한 설계파를 일괄 계산하여 해상 및 연안 구조물의 설계에 참고할 수 있도록 제공했다. 그 결과는 1988년에 설정한 설계파보다 지역적으로 상당한 차이를 보이는 곳이 많았으며, 특히 태풍에 의한 설계파가 높아졌다. 향후 공사할 시설물은 새로 산출된 장기 파랑 산출 정보를 참고하여 설계파를 정밀 산정하여 설계하면 될 것이나, 이미 완공된 기존의 시설물과 현재 공사 중인 시설물에 대해서는 새로운 설계조건을 어떻게 적용하느냐가 문제이다. 설계파가 높아진 시설물에 대해서는 정부의 예산 문제와 연계되어 모든 시설물을 한꺼번에 보완한다는 것은 불가능하다. 따라서, 중요 시설물에 대해 자세한 검토를 통해 우선 순위와 국가 예산 지원 능력들을 고려하여 단계적으로 보완해 나가도록 하는 계획을 세우고, 이를 점차적으로 실시해나가는 것이 요구된다. 또한, 구조물의 특성에 따라 최적의 경제적인 설계를 할 수 있게 설계조건이 설정되어야 할 것이다.

천해파랑 산출시스템의 핵심은 원하는 지점과 시간에 파랑을 생산할 수 있는 각종 수치 모델의 수립이며, 또 이를 실제 적용하는데 필요한 각종 입력자료 및 입력자료의 생산체제이다. 입사파의 산출을 위한 파랑모델과 또 원해에서 측정 또는 산출한 입사파랑을 항만 부근 천해 각 지점으로 변환시킬 수 있는 천해파랑 스펙트럼 변환 모델 그리고 항 부근 국지파랑추산 모델들이 체계적으로 연계되는 시스템이다. 천해 파랑 모델은 크게 파랑 스펙트럼 변환 모델과 환경사 방정식에 의한 파랑 변환 모델의 두 종류의 파랑 모델을 이용하였다. 연안 입사파에서 천해파 및 항내파의 산출은 2차원 파랑 스펙트럼을 외해 경계 조건으로 하고 해상풍, 조석, 조류의 영향을 모두 고려하여 천해 파랑 모델에 의해 연안 각 격자점에서 2차원 파랑 스펙트럼 모델을 계산하는 정밀 산출과, 실시

간 현장 관측 자료 또는 광역 파랑 산출 결과를 입력으로 하여 주요 연안에 대해 미리 수립된 데이터 베이스를 이용하여 원하는 지점에서 천해 파랑을 거의 반자동으로 신속하게 산출하는 등 2가지 방법으로 수립된 것을 이용하여 전 기간에 대해 주요 연안 및 항만에 세부 격자점에서 파랑 자료를 생산 제공할 수 있게 했다. 방파제와 같은 항만의 외곽시설물 설계에 필요한 파랑의 제원 산출시 반사파의 영향을 고려하지 않고 진행파 성분만을 고려해야 하는 경우에는 SWAN 모델을 상세역에서도 적용 가능하다.

2. 심해입사파의 설정

가. 심해 설계파

효율적인 천해파랑 산출을 위해 필요한 외해 경계 조건으로 입사파 제원이 먼저 생산되어 천해파랑 모델과 체계적으로 연계되어 적용할 수 있게 되어야 한다. 항만 설계를 위한 설계파의 산출, 연안구조물의 시공계획 수립을 위한 파랑통계자료의 산출, 항만매물, 연안침식 및 해안선 변화 등에 대한 파랑의 영향을 산출하기 위하여 장기간의 파랑 자료가 필요하다. 한국해양연구원에서는 “천해파랑 산출 시스템 구축 용역”사업과 “해상 파랑관측 및 조사”사업 등을 통해 장기간의 파랑산출을 수행하였다. “천해파랑 산출 시스템” 구축 과업의 주목적은 “파랑관측”의 한계점을 보완하기 위한 수치 모델에 의한 “간접적” 보완 시스템이 구축되어 전 해상 및 연안의 연속 파랑 자료를 산출하여 장기파랑산출 자료의 데이터베이스를 구축하였다.

우리나라에 큰 파랑을 일으키는 경우는 대륙성 고기압의 강한 장출, 온대성 저기압 그리고 열대성 저기압의 내습의 경우로 분류할 수 있다. 대륙성 고기압의 장출과 온대성 저기압의 경우에는 일어나는 빈도가 많고 또 서로 연계가 되어 있는 현상으로 볼 수 있으나, 열대성 저기압의 경우에는 발생 구조가 완전히 다른 현상으로 항만 구조물이나 퇴적물에 미치는 영향도 다르다. 1/6도 간격의 격자망에서 1979년에서 2003년까지 25년간에 대한 장기파랑자료를 재산출하였다. 바람자료는 유럽 중규모 예보센터(ECMWF)에서 spectral model에 의해 재분석한 매 6시간 간격의 전지구 Gaussian 격자점 자료를 사용하였다. 그리하여, 25년간(1979년~2003년)의 전 계산 격자점에서의 파고와 주기 및 파향에 대하여 약 1/6도 격자간격과 매 1시간 간격으로 정밀도가 개선된 데이터베이스를 구축하였다. 태풍에 의한 이상파랑시에는 ECMWF의 바람자료가 태풍의 중심 부근에서의 공간변화를 나타내기에는 해상도가 불충분하여 태풍시에는 태풍해상풍 모델에 의해 산출된 바람장을 사용하였다. 53년간(1951년~2003년)의 128개 태풍에 대하여 태풍해상풍 모델을 사용하여 태풍시의 바람장을 산출하였으며, WAM모델을 사용하여 태풍시의 파랑을 산출하였다.

천해 파랑 산출을 위해서는 외해 경계 조건인 심해의 입사파 제원이 천해 파랑 모델과 체계적으로 연계되어 거의 반자동적으로 적용할 수 있게 되어야 한다. 입사파 정보는 광역 파랑 산출 시스템에서 생산하는 파랑 제원으로 한다. 파랑이 산출되는 모든 격자 중에서 연안을 따라 입사파로 이용될 수 있는 격자점에서는 격자점의 이름과 원하는 기간을 입력하면 전체 데이터 파일에서 원하는 자료를 읽어서 이를 천해파 산출의 입력으로 바로 이용할 수 있게 연계하였다. 1979년부터 2003년까지 25년간의 기간에 대해 연속 산출한 파랑 자료와 1951년부터 2003년 사이의 주요 태풍에 대해 산출한 파랑 자료를 이용하여 각각 극치 통계 분석을 실시하였다. 비태풍성 폭풍과 태풍은 기상학적인 특성과 발생 빈도가 다를 뿐만 아니라 해상풍의 산출 방법과 산출 기간도 다르기 때문에, 이들을 서로 독립적인 현상으로 취급하여 따로 극치 통계처리하여 각각에 대한 재현기간별 극값을 구하였다. 비태풍성 폭풍에 의한 이상파랑과 태풍시의 이상파랑에 대한 극치분석을 각각 수행하여 16개 방향별로 설계파를 기상요인별로 따로 산출하였다. 최종적으로 각 격자점에서 방향별 재현기간별 설계파는 비태풍시와 태풍시의 2개의 산출값 중에서 큰 값을 선택하는 방법을 사용하여 설정하였다. 장기간 파랑 후산에 의한 설계파 추산의 흐름도는 그림 3.5.1과 같으며, 설계파가 산출된 격자점은 그림 3.5.2와 같다.

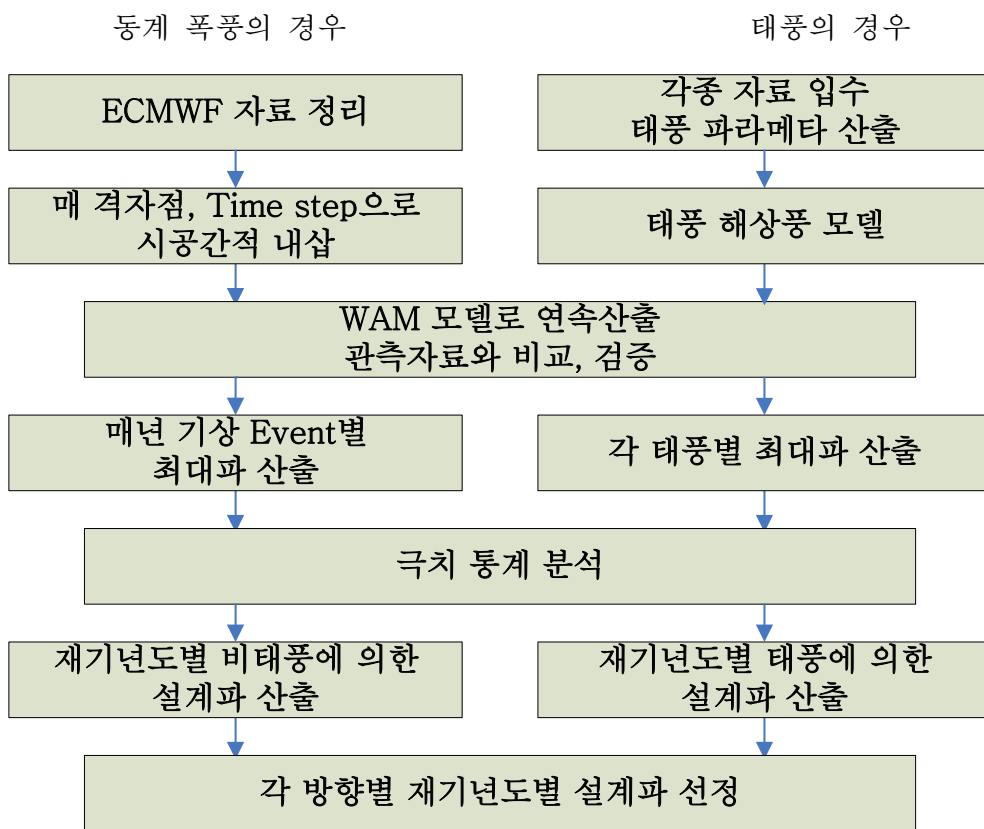


그림 3.5.1 설계파 추산 흐름도

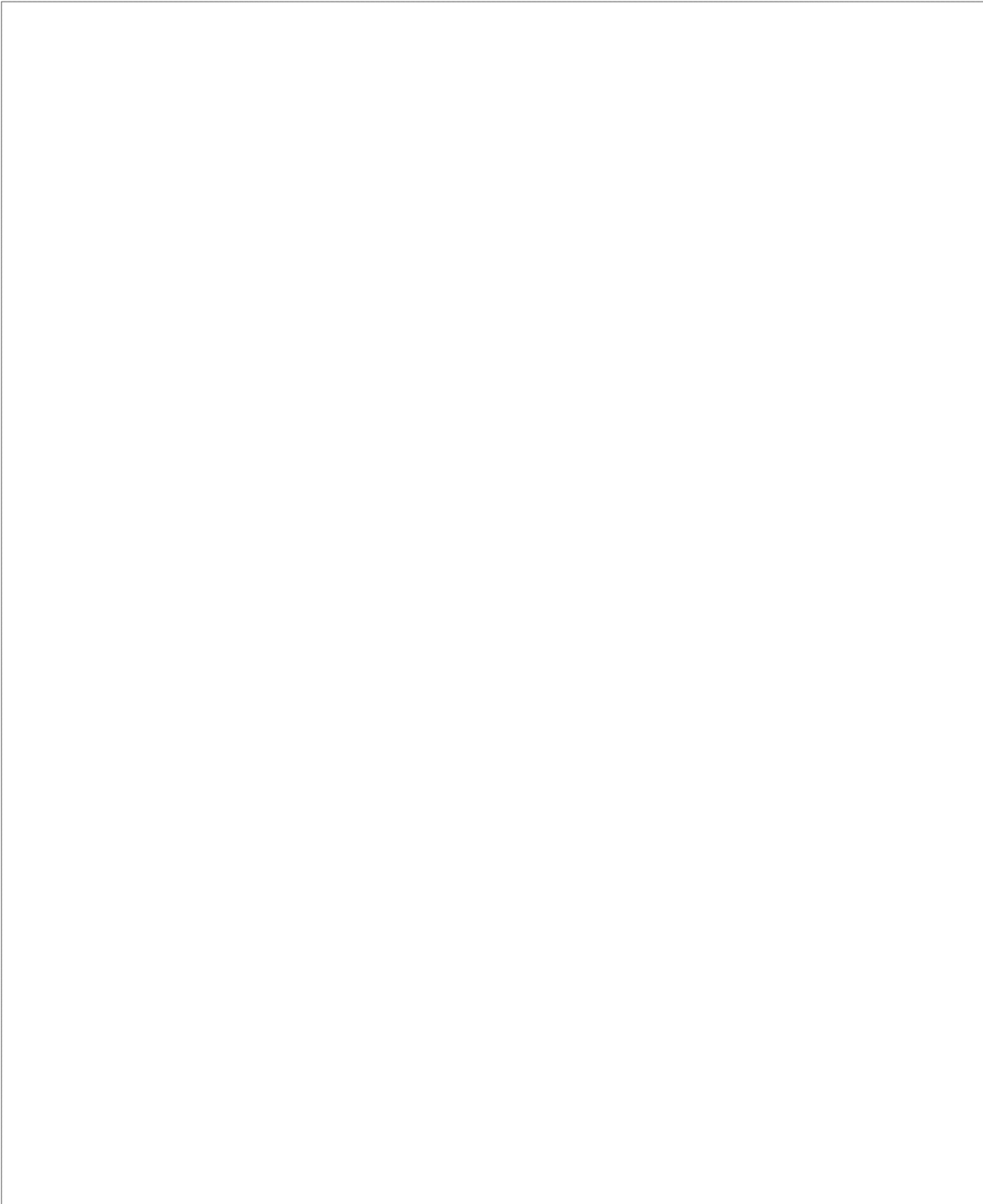


그림 3.5.2 주요 연안 격자점의 위치도

나. 천해파 모델 경계면에서 설계파의 유의파 정보 결정

심해 설계파 추산 과정에서 사용된 모델은 2차원 파랑 스펙트럼 모델로 모든 격자점에서 2차원 파향 스펙트럼이 결과로 얻어진다. 이 결과로부터 2차 적분하여 유의파 정보를 얻고 이를 극치 통계 분석하여 설계파가 유의파 형태로 얻어진다. 설계파 검색 프로그램에 의하여 전 해역 대해 그림 3.5.3에서 보는 바와 같은 18km 격자간격의 격자점에 대해 각 재기년도별 16개 방향별 설계파의 파고 주기 방향의 정보가 데이터 베이스화 되어 주어진 격자점에 주어진 재기년도에 대한 설계파가 검색 된다.

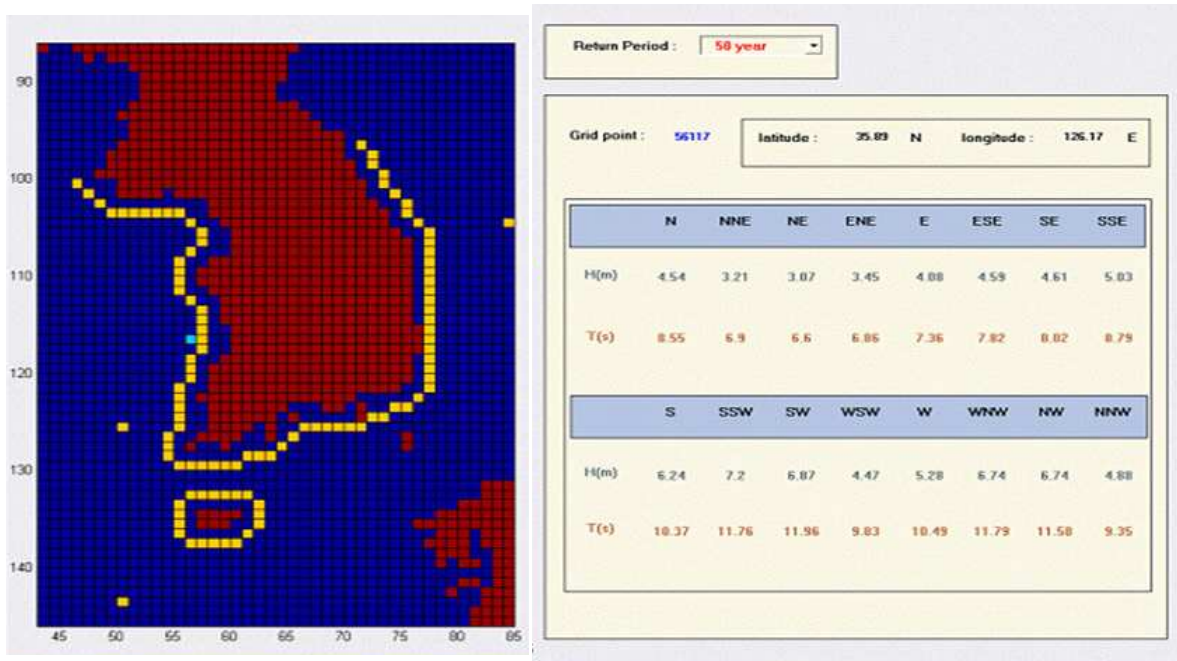


그림 3.5.3 설계파 검색 프로그램에 의한 재기년도별 설계파의 검색 예

천해파 산출 모델 구역은 지역에 따라 다를 수 있는데 주어진 천해파 산출 모델의 외해 경계면에서 설계파가 상기 18km 격자점에서 구한 값으로부터 내삽하여 얻을 수 있다. 동해와 같이 바로 수심이 깊어지는 경우에는 연안으로 입사하는 심해 입사 설계파를 정의하는 것은 비교적 용이하나, 지형 변화가 심한 서해와 남해에서는 입사 설계파를 일률적으로 해안선에서 일정한 거리의 위치의 입사파로 정의할 수 없다. 즉, 지역에 따라 천해 파랑 모델의 범위가 다르게 설정하여야 하므로 연안격자점만으로는 천해파랑 모델의 경계조건으로 활용하기 어렵다. 따라서, 가능하면 해상의 여러 격자점에서 방향별 설계파가 제공된다면, 사용자가 자유롭게 격자점을 선택하여 이용할 수 있을 것이다. 기존설계파에서는 연안을 따라 20여개 격자점에서만 설계파를 산출하였으나, 2005년의 개정 설계파에서는 한반도 주변 전 해상격자점(약 20000개 지점)에서 설계파를 산출하였다.

본 연구에서는 천해파랑 모델의 경계와 2005년도 개정 설계파의 격자점(그림 3.5.2)이 일치하도록 천해파랑 모델의 격자범위를 설정하여, 경계상에 있는 모든 격자점에서의 방향별 입사설계파의 파고와 주기를 경계조건으로 활용할 수 있도록 하였다(그림 3.5.4).

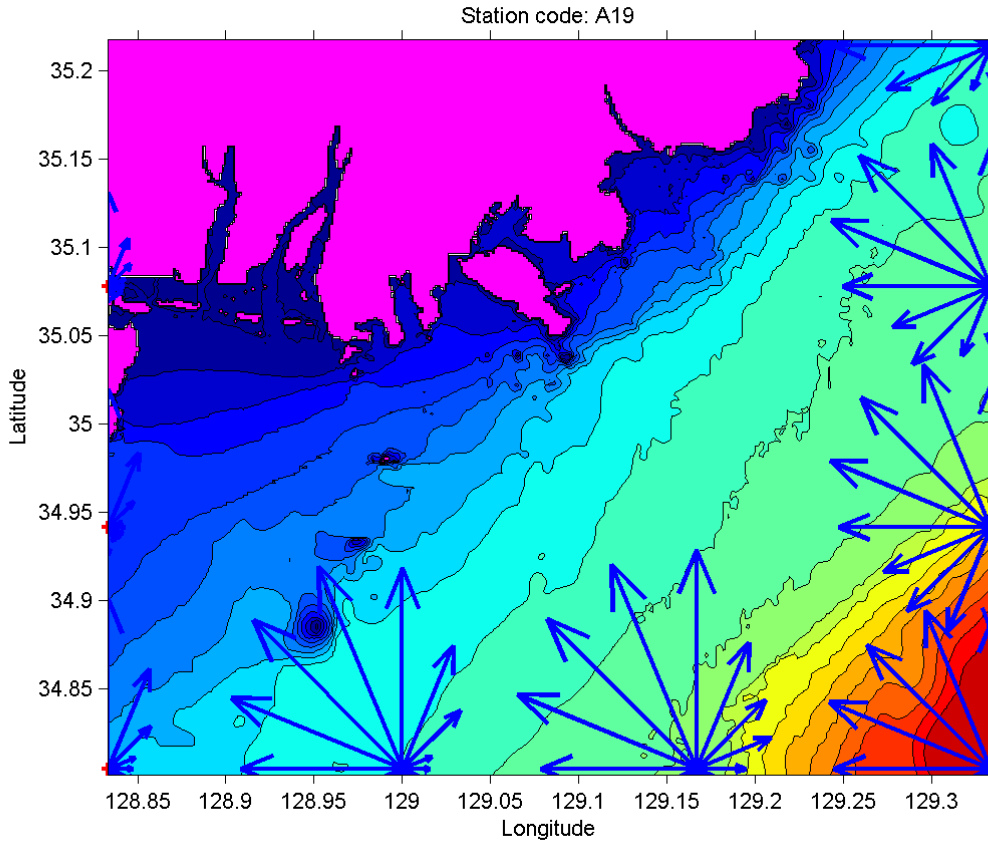


그림 3.5.4 2005년 개정설계파의 격자점의 심해설계파를 경계조건으로 사용한 예

최근의 정밀 천해 파랑변환 모델은 입력 자료로 주파수와 방향의 함수로써 2차원 파랑, 파향 스펙트럼을 사용하나 입사설계파는 각 방향별 유의 파고 자료로 제공되고 있어 정밀 천해파 산출을 위해서는 파랑 관측 자료 분석으로 부터 주파수 스펙트럼과 나아가 파향-주파수 2차원 스펙트럼을 만들어서 천해파랑 산출에 입력으로 사용하는 것이 현실적이다.

다. 천해파 모델 경계조건으로 2차원 파랑 스펙트럼의 결정

천해에서의 파랑의 변환은 파의 방향과 주기에 따라 달라진다. 천해 설계파를 구하기 위한 천해 파랑 모델은 이전에는 유의파 모델을 많이 이용해 왔으나 더 정확한 천해파 변환을 위해 요즘에는 전산기의 발달로 2차원 파랑 스펙트럼 변환 모델이 이용된다.

따라서 천해파 변환 모델의 각 외해 경계 격자점에서 2차원 파랑 스펙트럼이 입력되어야 한다. 심해 설계파 데이터 베이스에서 검색하여 천해파 모델 외해 경계면에 각 격자점에 내삽한 유의파 심해 설계파 정보로부터 각 경계 격자점에서 2차원 파랑 스펙트럼을 추산하여 천해파 모델의 경계 조건으로 사용되는 것이 요구된다.

불규칙파의 스펙트럼은 일반적으로 다음과 같이 주파수 스펙트럼 $S(f)$ 과 파향 분산 함수 $G(f, \theta)$ 로 표시될 수 있다고 가정한다.

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (3.5.1)$$

여기서 주파수 스펙트럼은 주파수별 파 에너지 밀도를 나타내고, 파향 분산 함수는 방향별 상대적 크기를 나타내며 다음 관계를 만족하는 것으로 한다.

$$\int_0^{2\pi} G(f, \theta) d\theta = 1 \quad (3.5.2)$$

주파수 스펙트럼은 천해파 모형의 외해 경계에서 관측되거나 JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 측면과 외해측 경계조건을 만들어 적용한다.

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}} \gamma e^{-\frac{1}{2} \frac{(f-f_m)^2}{\sigma^2}} \quad (3.5.3)$$

여기서, α : Phillips 상수(Phillips' constant)

f_m : 첨두주파수(peak frequency)

γ : 첨두향상계수(peak enhancement constant)

σ 는 스펙트럼의 폭을 결정하는 파라미터로 다음과 같다.

$$\sigma = \sigma_a \quad \text{for} \quad f \leq f_m \quad (3.5.4)$$

$$\sigma = \sigma_b \quad \text{for} \quad f > f_m$$

Hasselmann et al.(1973)이 북해에서 관측한 심해파랑자료의 분석결과에 의하면 α 와

f_m 은 취송거리(fetch)와 풍속의 함수로 결정되며, γ , σ_a , σ_b 의 평균값은 각각 3.3, 0.07, 0.09로 나타남. 특히, γ 의 분포범위는 1.0~6.0이다.

천해에서는 JONSWAP 스펙트럼에서 천해 영향을 고려하는 함수를 적용하여 다음과 같이 TMA 스펙트럼을 만들어 이용하다.

$$S(f) = S_J(f) \phi(f, h) J_0 \quad (3.5.5)$$

여기서 $S_J(f)$ 는 Jonswap스펙트럼을 나타내고 $\phi(f, h)$ 는 수심의 영향을 반영하는 인자로서 Hughes (1984)에 의해서 다음과 같이 주어졌다.

$$\phi = \begin{cases} 0.5(\omega_h)^2 & \text{if } \omega_h < 1 \\ 1 - 0.5(2 - \omega_h)^2 & \text{if } 1 < \omega_h < 2 \\ 1 & \text{if } \omega_h > 2 \end{cases} \quad (3.5.6)$$

여기서 $\omega_h = 2\pi f \sqrt{h/g}$ 이다.

분석된 각 주파수 별의 파향 분포를 Mitsuyasu et al. (1975)가 제안한 다음 방향분포함수로 최소 자승법에 의해 s 값과 θ_p 값이 추정된다.

$$G(f : \theta) = G_0 \cos^{2s} \frac{\theta - \theta_p}{2} \quad (3.5.7)$$

여기서 $G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)}$, θ 는 파향, θ_p 는 주 파향이며 s 는 에너지의 방향분산도를 나타내는 파라메타로서 방향분산계수(spreading coefficient)라고 부른다. 같은 주파수대에서 뚜렷이 2개의 방향이 나타날 때는 아래와 같이 두개의 주 방향에 대한 파향 분산 계수와 두 방향 사이의 에너지 분포 비로서 방향 분산을 나타낼 수 있다.

$$G(f : \theta) = a_1 G_1 \cos^{2s_1} \frac{\theta - \theta_{p_1}}{2} + a_2 G_2 \cos^{2s_2} \frac{\theta - \theta_{p_2}}{2} \quad (3.5.8)$$

위의 식에서의 s_1 , θ_{p_1} 그리고 s_2 , θ_{p_2} 및 두 주 방향 간의 에너지의 분포를 나타내는

a_1, a_2 로써 나타낼 수 있다.

입사파가 파랑 모델 또는 관측망의 실시간 관측 자료로 주어질 때 천해의 각 격자점에서의 파랑 스펙트럼의 추산은 실시간 관측 자료의 분석 결과를 입력으로 하여 천해 파랑 스펙트럼 변환 모델에 의해 계산될 수 있다. 이 시스템에 사용되는 모델들은 사용자가 간편하게 즉각적으로 사용할 수 있도록 하는데 주안점을 두어, 전반적으로 입력자료를 줄여 자동화 하던가 또는 간단한 파라메타만을 입력케 함으로써 신속한 필요 정보의 산출을 가능케 한다.

파랑 관측 시스템에서 생산하는 파랑 자료를 정밀 분석하여 즉시 천해 파랑 산출에 연결될 수 있게 하는 체계를 수립하였다. 방향스펙트럼을 추정하는 방법으로는 일정간격의 방향에 대한 방향분포함수의 값을 관측 파동량간의 Cross스펙트럼으로부터 직접 계산하는 방법과, 방향분포함수를 몇 개의 파라메타로 표현하여 그 파라메타를 계산하는 방법으로 구분할 수 있는데, 주요 파랑 스펙트럼 추정 방법에는 선행 보고서에서 보여준 것과 같이 직접 Fourier 변환법(DFT), Longuet-Higgins 방법 (LHM), 확장최우법(EMLM), 최대엔트로피법(MEP), Bayesian 파랑 분석법(BDM) 등이 있으며, 천해 파랑 산출 시스템과 연결시에는 LHM 법 및 MEP 법이 이용된다. 정밀 분석하여 저장된 압축 결과 파일에서 원하는 시각의 자료를 검색하여 2차원 파랑 스펙트럼으로 합성한다. MEP 법은 각 주파수별로 방향 분산함수를 아래와 같이 표시할 때 각 주파수별 파랑 에너지와 분산함수 계수를 계산한다.

$$\hat{G}(\theta|f) = e^{-\lambda_0 - \sum_{i=1}^4 \lambda_i l_i(\theta)} \tag{3.5.9}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } l_0(\theta) &= 1 \\ l_1(\theta) &= \cos \theta \\ l_2(\theta) &= \sin \theta \\ l_3(\theta) &= \cos 2\theta \\ l_4(\theta) &= \sin 2\theta \end{aligned}$$

정밀 분석된 파랑 자료의 기록량을 줄이기 위해 정밀 파랑분석방법에 의해 분석된 방향분포함수를 이용하여, 분석된 각 주파수별의 파랑 분포를 Mitsuyasu et al. (1975)가 제안한 방향분포함수의 주 파향 θ_p , 에너지의 방향분산도를 나타내는 파라메타로서 방향 분산계수 s 를 최소자승법에 의해 추정하여 적은량으로 기록하였다가 천해파랑 산출시 각 주파수별 파랑 분산을 아래와 같이 계산하여 입력 자료로 활용한다.

3. 천해 설계파 산출 모델

가. 천해 파랑 스펙트럼 변환 모델

파랑이 해안에 가까워짐에 따라 더욱 많은 천해 영향을 받게 되며, 특히 수심의 제한으로 쇄파가 일어나 궁극적으로 소산된다. 연안 국지의 파랑을 구하기 위하여 이러한 광역 파랑모델에 각종 천해 과정을 포함시켜 구하는 것은 비경제적이고 또 한계가 있다. 이 광역 파랑모델의 결과를 천해변환모델의 입력자료로 사용하여 정밀한 연안 국지파랑 자료를 산출한다.

바람에 의해 발달한 기술한 바와 같이 파고, 주기, 파향이 서로 다른 불규칙파로서 이를 취급하는 방법은 파를 파고, 주기, 파향이 다른 성분파의 중첩으로 보고, 파의 에너지를 주파수와 파향의 함수로 나타내는 것이다. 실제 바다의 파랑은 불규칙한 모양으로 일반적으로 이용되고 있는 선형파 이론에서는 이것을 무수히 많은 성분파의 선형적 합으로 간주하고 파랑에너지를 주파수와 파향의 함수인 2차원 스펙트럼으로 표현한다.

파랑 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (CC_g E) + C_g \cos \theta \frac{\partial}{\partial x} (CC_g E) + C_g \sin \theta \frac{\partial}{\partial y} (CC_g E) \\ & + \frac{C_g}{C} \left\{ \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \frac{\partial}{\partial \theta} \{CC_g E\} = \sum_i \{Q_i CC_g\} \end{aligned} \quad (3.5.10)$$

여기서 C , C_g 는 각각 위상 속도와 군속도를 나타내며, 위의 식에서 Q_i 는 에너지 발생과 소산률(Dissipation)을 나타낸다. 또한 Phillips(1977)는 파랑에너지 보존방정식 다음과 같이 나타내었다.

이 방정식은 파수 영역에서 아래와 같이 정리되며,

$$\frac{\partial}{\partial t} \{F(\vec{k}) \delta A\} + \frac{\partial}{\partial x} \{UF(\vec{k}) \delta A\} + \frac{\partial}{\partial y} \{VF(\vec{k}) \delta A\} = \sum_i Q_i \quad (3.5.11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{dy}{dt} \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{dk_x}{dt} \frac{\partial F}{\partial k_x} + \frac{dk_y}{dt} \frac{\partial F}{\partial k_y} = \sum_i Q_i \quad (3.5.12)$$

주파수 영역에서는

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} E(f, \theta) + \frac{\partial}{\partial x} \{UE(f, \theta)\} + \frac{\partial}{\partial y} \{VE(f, \theta)\} \\ + \frac{\partial}{\partial f} \left\{ \frac{df}{dt} E(f, \theta) \right\} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{d\theta}{dt} E(f, \theta) \right\} = \sum_i Q_i \end{aligned} \quad (3.5.13)$$

로 된다.

천해에서는 파랑에너지 스펙트럼을 구하기 위하여 위의 파랑에너지 보존방정식을 푸는 데는 우선 각 지점에서 각 성분파의 파수 k 와 파향 θ 를 구해야 하고, 또 파랑에너지의 발생과 소산도 천해에서는 심해에서와 같은 효과에 천수 및 굴절에 의한 파랑 변형, 해저마찰, 모래에서 Percolation, Mud Bottom의 운동 등에 의한 에너지 소산, 파의 불안정에 따른 백파에 의한 소산, 쇄파대 부근에서 쇄파에 의한 소산 등을 계산하여 이를 이용해 위의 방정식을 수치적으로 풀어야 한다. 비선형적 특성을 갖는 것을 파랑 에너지 스펙트럼의 변환을 다룰 때는 선형화 과정이 필요하다.

실제의 파랑은 주파수와 파향의 함수로 2차원 파랑 스펙트럼에 작용하는 모든 과정을 고려하여 파랑의 발달, 진행, 변환을 추산하는 것은 매우 어렵다. 실용적인 파랑산출 모델을 위해서는 파랑의 표현방법이나 계산방법에 대한 단순화가 필요하다.

파랑의 특성을 주파수와 파향의 함수로 표시할 때 주파수대를 N 격자, 파향대를 M 격자로 나누어 각 격자에서 파랑에너지를 취급할 경우, 1차원 파랑스펙트럼 모델은 각각 $N \times M$ 개의 성분파의 주파수와 파향에 따라 발달, 전파, 변형 특성이 다르게 된다. 또 이들 성분파 사이에 상호작용도 일어나 에너지의 재분배가 일어나기도 한다. 이들 $N \times M$ 개의 성분파를 다 고려하여 이들 주파수와 파향에 따라 에너지의 방정식을 풀어 파랑을 추산하는 방법이다.

간단하게 접근하는 방법으로 2차원 파랑스펙트럼을 1차원 주파수 스펙트럼과 방향 분포함수의 곱으로 가정하여 방향 분포함수를 제한된 수의 파라미터의 연속함수로 표현하여 단순화하는 방법을 생각할 수 있다. 2차원 스펙트럼은 변수 분리로 1차원 주파수 스펙트럼 $S(f)$ 와 방향분포함수 $G(\theta; f)$ 로 편리하게 표현할 수 있다.

$$E(f, \theta) = S(f) G(\theta; f) \quad (3.5.14)$$

$$S(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (3.5.15)$$

Lee(1984)는 2차원 파랑 스펙트럼의 변환을 주파수 스펙트럼($S(f)$)와 방향분포함수 $G(\theta;f)$ 의 각각을 서로 상호 작용을 고려하며 천해 변환시키는 효과적인 천해 파랑 스펙트럴 모델을 개발했다.

나. SWAN 모델

SWAN(Simulation Waves Nearshore) 모델은 수치 파랑 모델로서 주어진 바람, 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구의 파랑을 계산한다. 이 모델의 기본방정식은 파랑작용의 평형방정식(wave action balance equation)이며 사용되는 원천항(source terms)에 따라 제 1 세대, 제 2 세대 및 제 3 세대 모델로 분류된다.

(1) SWAN 모델의 개요

SWAN 모델에서 고려되는 전파과정(propagation processes)은 다음과 같다.

- 공간좌표 상에서의 이류 수송(advection)
- 수심과 흐름에 의한 굴절 현상(refraction)
- 수심과 흐름에 의한 천수 현상(shoaling)
- 반대 흐름에 의한 파랑의 블록화 및 반사(blocking and reflection)

또한, SWAN 모델에서는 다음과 같은 원천항을 고려한다.

- 바람에 의한 파랑에너지 생성
- 백파에 의한 파랑에너지 소산
- 쇄파에 의한 파랑에너지 소산
- 저면 마찰에 의한 파랑에너지 소산
- 비선형상호작용에 의한 에너지 교환
 - 제 2 차 비선형상호작용
 - 제 3 차 비선형상호작용

SWAN Cycle 2 는 비정상 또는 정상 모드(mode)의 파랑장을 모의할 수 있다. 정상 모드는 모델 해역 내에서 파랑의 도달시간(travel time)이 바람, 조석의 시간 규모보다 작은 경우에 사용할 수 있다. 한편 회절(diffraction)에 의한 파랑의 변형은 SWAN 모델에서 취급하지 않기 때문에 수 파장 내에서 파고의 공간적 변화가 현저한 곳에서는 사용할 수 없다. 따라서 구조물 주변에서의 모델 결과는 정확성이 떨어진다. 수심과 흐름은 모델의 입력자료이므로 파랑에 의한 평균수위 변동(wave set-up) 및 연안류는 계산되지 않는다.

(2) SWAN 모델의 이론적 배경

쇄파대 등에서는 비선형성이 강하지만 SWAN 모델에서 파랑은 2차원 작용 스펙트럼으로 표현된다. 비선형성이 강한 조건에서도 스펙트럼을 사용하는 이유는 스펙트럼이 그러한 조건의 파랑을 통계적으로 충분히 서술할 수는 없지만 파랑의 2차 모멘트의 스펙트럼 분포는 예측이 가능하다는 생각 때문이다. 여기서 고려되는 스펙트럼은 에너지 스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ 이 아니라 작용스펙트럼(wave action spectrum) $N(\sigma, \theta)$ 이다. 흐름이 존재하는 경우 작용스펙트럼은 보존되지만 에너지스펙트럼은 보존되지 않기 때문에 작용스펙트럼이 에너지스펙트럼보다 일반화된 물리량이다. 작용밀도 스펙트럼과 에너지밀도 스펙트럼의 관계는 다음과 같다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.5.16)$$

여기서, σ 는 각주파수(intrinsic angular frequency)로 절대각주파수(absolute angular frequency) ω 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (3.5.17)$$

여기서 \vec{k} 와 \vec{U} 는 각각 파수와 유속의 벡터이다.

파랑 스펙트럼의 발달은 작용평형 방정식에 의하여 기술된다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3.5.18)$$

위 식에서 좌변의 제1항은 작용의 시간 변화량, 제2항과 제3항은 지리적 공간에서의 작용의 전파, 제4항은 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이 그리고 제5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다. 선형파 이론에 의한 파랑의 전파속도는 아래와 같다.

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (3.5.19)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (3.5.20)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (3.5.21)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (3.5.22)$$

여기서, s 와 m 은 각각 파향선(wave ray)과 파향선에 수직인 좌표를 의미한다. 평형 방정식의 우변은 원천항(source and dissipation)을 나타내며 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형상호작용에 의한 에너지 전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (3.5.23)$$

SWAN 모델에서 바람에 의한 파랑의 생성은 다음 식으로 표현된다.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (3.5.24)$$

여기서, A 는 Phillips(1957)에 의한 공진 기구를 반영하는 것으로서 Cavaleri and Malanotte-Rizzoli(1981)의 식을 사용한다. SWAN 모델에서는 저주파 성분을 제한하기 위하여 Tolman(1992)에 의한 수정식을 사용한다.

$$A = \frac{1.2}{2\pi g^2} \frac{\rho_a}{\rho_w} [U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]]^4 H(\sigma) \quad (3.5.25)$$

마찰속도는 Wu(1982)의 식을 사용한다.

$$U_* = U_{10} \sqrt{(0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3}} \quad (3.5.26)$$

한편, PM 주파수보다 적은 주파수대에서의 에너지 유입은 다음과 같이 필타 H 에 의하여 감소된다.

$$H = e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}}\right)^{-4}} \quad (3.5.27)$$

여기서, σ_{PM} 은 PM 주파수로서 $\sigma_{PM} = g/(28 U_*)$ 로 주어진다.

한편, B 는 Miles(1957)의 전단 기구를 나타내며 SWAN 모델에서는 Komen et al.(1984)의 식과 Janssen(1991)의 식 중에서 선택할 수 있도록 하였다. Komen et al.(1984)의 식은 Snyder et al.(1981)의 식에 근거를 두고 있으며, WAM 모델에서도 채용되고 있다.

$$B = 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[0, \frac{28 U_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \sigma \quad (3.5.28)$$

Janssen(1991)은 경계층 효과와 해면의 조도에 의한 바람과 파랑의 상호작용을 고려하여 다음과 같이 나타내었다.

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[0, \frac{U_*^2}{c^2} \cos^2(\theta - \theta_w) \right] \sigma \quad (3.5.29)$$

여기서, β 는 Miles 상수로서 무차원 임계고(λ)를 사용하여 다음 식으로 계산된다.

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda \quad \text{for } \lambda \leq 1 \quad (3.5.30)$$

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

$$\lambda = \frac{gz_e e^r}{c^2}$$

(3.5.31)

$$r = \frac{\kappa c}{|U_* \cos(\theta - \theta_w)|}$$

(3.5.32)

여기서, κ 는 Von Karman 상수로서 0.41을 취하며 z_e 는 해면의 유효 조도이다. 풍속의 분포를

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left[\frac{z + z_e - z_o}{z_e} \right] \quad (3.5.33)$$

로 간주하면 유효조도길이는 다음 식으로 계산된다.

$$z_e = \frac{z_o}{\sqrt{1 - \frac{\tau_w}{\tau}}} \quad (3.5.34)$$

여기서, τ 는 총응력(total stress)이며 조도길이는 Charnock(1955)의 관계식으로 주어진다.

$$z_o = \hat{\alpha} \frac{U_*^2}{g} \quad (3.5.35)$$

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

$$\vec{\tau}_w = \rho_w \int \int \sigma B E(\sigma, \theta) \frac{\vec{k}}{k} d\sigma d\theta \quad (3.5.36)$$

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

심해 파랑의 모델링에 있어서 백파(whitecapping)는 가장 이해가 어려운 자연현상이다. 제 3세대 SWAN 모델에서는 Hasselmann(1974)이 제안한 표면펄스모델(surface pulse model)을 응용한다. 이 모형에 포함된 계수는 심해에서 충분히 발달된 파랑(fully arisen seas)의 에너지 평형을 고려하여 구해진다. 따라서 백파 모형의 계수 결정은 바람 입력

항의 계산법에 의존하게 된다. SWAN 모델에서 바람 입력의 계산에 두 가지 식을 사용하고 있으므로 백파 모형도 두 가지의 옵션을 갖게 된다. 먼저 Komen et al.(1984)의 바람 입력식을 사용한 경우 백파 소산은 다음 식으로 주어지며, WAM 모델의 cycle 3 version에서 사용된 바 있다.

$$S_{br}(\sigma, \theta) = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \theta) \quad (3.5.37)$$

$$\Gamma = \Gamma_K \alpha_1 \left(\frac{s}{s_{PM}} \right)^m \quad (3.5.38)$$

여기서 s 는 파형경사(overall wave steepness)이며 s_{PM} 은 PM 스펙트럼에 대한 s 값이다. 또한 평균 파형경사 \bar{s} 는

$$\bar{s} = \bar{k} \sqrt{E_{tot}} \quad (3.5.39)$$

로 정의된다. $\bar{\sigma}$ 와 \bar{k} 는 각각 다음과 같이 정의되는 평균 주파수 및 평균 파수이다.

$$\bar{\sigma} = \left(E_{tot}^{-1} \int \int \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1} \quad (3.5.40)$$

$$\bar{k} = \left(E_{tot}^{-1} \int \int \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (3.5.41)$$

$$E_{tot} = \int \int E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (3.5.42)$$

여기서 E_{tot} 는 총 에너지, $\alpha_1 = 2.36 \times 10^{-5}$, $m=4$ 이다. Janssen(1991)의 바람 입력에 대응하는 백파 소산 모형은 다음과 같다.

$$\Gamma = \Gamma_J = \alpha_2 \left(\frac{s}{s_{PM}} \right)^4 \left[(1 - \delta) + \delta \frac{k}{k} \right] \quad (3.5.43)$$

여기서, $\alpha_2 = 4.104 \times 10^{-5}$, $\delta = 0.5$ 이다. 이 상수들은 Komen et al.(1984)와 Janssen(1991)이 이상적인 파랑 성장 조건하에서의 에너지 균형을 고려하여 얻은 것이다. 그러나 Young and Banner(1991)와 Banner and Young(1994)는 에너지 평형을 고려하여 구한 쇄파 소산 모형의 계수는 스펙트럼의 고주파 꼬리 형상(high frequency tail)에 크게 좌우된다는 사실을 발견하였다.

저면에 의한 에너지 소산은 저면마찰(bottom friction), 저면 운동(bottom motion), 침투(percolation) 및 불규칙 저면상의 산란(bottom scattering) 등에 의하여 발생한다 (Shemdin et al. 1978). 모래로 구성된 대륙붕에서의 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 주었다.

Hasselmann and Collins(1968)는 항력 마찰(drag friction)에 기초하여 저면마찰 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.

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (3.5.44)$$

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

$$u_{rms}^2 = \int \int \frac{\sigma^2}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (3.5.45)$$

JONSWAP에서 사용된 경험적인 선형 모형에서는 $C_{bottom} = 0.038 m^2 sec^{-3}$ 을 사용하였는데, 이 값은 너울에 대해서도 적용할 수 있다. 일반적으로 저면마찰계수는 파랑 조건(wave condition)에 의존하지만 Bouws and Komen(1983)이 풍파에 대해서 제안한 $C_{bottom} = 0.067 m^2 sec^{-3}$ 은 많은 경우에서 유효한 것으로 보고되었다(Cavalieri et al., 1989; Tolman, 1994; Luo and Monbaliu, 1994). Collins(1972)의 항력마찰 모형에서는 다음 식

이 유도된다.

$$C_{bottom} = c_{fw} g u_{rms} \quad (3.5.46)$$

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

$$C_{bottom} = \frac{g}{\sqrt{2}} f_{wr} u_{rms} \quad (3.5.47)$$

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

$$\frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} + \log_{10} \left[\frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} \right] = m_f + \log_{10} \left[\frac{a}{K_N} \right] \quad (3.5.48)$$

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

$$a^2 = 2 \int \int \frac{1}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (3.5.49)$$

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

무작위 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. 이러한 사실에 근거하여 Eldeberky and Battjes(1995)는 파랑 스펙트럼에 비례하는 쇄파 소산 공식을 도출하였으며, 이 공식이 SWAN 모델에서 사용되는 쇄파 소산 공식이다.

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{\alpha_{BJ} Q_b \bar{\sigma} H_m^2}{8\pi} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (3.5.50)$$

여기서, α_{BJ} 는 수치상수이며 Q_b 는 다음 식으로 계산되는 쇄파이다.

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (3.5.51)$$

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

$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int \int \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (3.5.52)$$

그리고, 최대파고는 $H_m = \gamma d$ 이다. SWAN 모델에서 γ 의 계산에는 Nelson (1987)의 식을 사용한다.

$$\gamma = 0.55 + 0.88e^{-0.012\cot\beta} \quad \text{for } 0 < \beta < 0.1 \quad (3.5.53)$$

여기서 β 는 해저면의 경사이다. 한편 α_{BJ} 는 쇄파의 발달의 관측으로부터 추정될 수 있으며 모델에서는 통상 1.0을 사용한다.

심해에서 4파 비선형상호작용(또는 제3차 비선형상호작용, quadruplet wave-wave interactions) 효과는 스펙트럼의 첨두주파수를 저주파 쪽으로 이동시키는 것이다. 이 현상은 약비선형으로서 수학적 방정식은 Hasselmann (1962)에 의하여 도출되었다. 4파 비선형상호작용을 엄밀하게 계산하는 데는 매우 많은 계산 시간이 소요되므로 WAM 모델에서는 이산상호작용근사법(discrete interaction approximation)을 사용하고 있으며 SWAN 모델에서도 이것을 그대로 도입하였다. 이 근사법은 무수히 많은 4파 상호작용 배치 중에서 가장 영향이 큰 하나의 배치만을 고려하는 것이다(실제로는 이 배치에 대한 경상(mirror symmetrical)도 고려하므로 총 배치 수는 2개이다). 배치에 포함된 4파의 주파수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_2 &= \sigma & (3.5.54) \\ \sigma_3 &= \sigma(1+\lambda) = \sigma^+ \\ \sigma_4 &= \sigma(1-\lambda) = \sigma^-\end{aligned}$$

여기서, $\lambda=0.25$ 이며, 첫 번째 배치에서 두 개의 파수 벡터는 동일하다. 반면에 다른 두 파는 각각 상대적으로 $\theta_3 = 11.5^\circ$, $\theta_4 = -33.6^\circ$ 의 각을 갖는다. 한편 두 번째 배치에서는 $\theta_3 = -11.5^\circ$, $\theta_4 = 33.6^\circ$ 가 된다. 심해에서의 이산상호작용 근사는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad (3.5.55)$$

위 식 우변의 제1항은 제 1 배치에 의한 비선형상호작용이며 제2항은 제 2 배치(제 1 배치의 경상 배치)에 의한 비선형항으로 아래와 같이 계산된다.

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4}(\alpha_1\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_2\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_3\sigma, \theta) \quad (3.5.56)$$

여기서 $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 1+\lambda$, $\alpha_3 = 1-\lambda$ 이며 각 항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\delta S_{nl4}(\alpha_i\sigma, \theta) = C(2\pi)^2 g^{-4} \left(\frac{\sigma}{2\pi}\right)^{11} & \left[E^2(\alpha_i\sigma, \theta) \left\{ \frac{E(\alpha_i\sigma^+, \theta)}{(1+\lambda)^4} + \frac{E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1-\lambda)^4} \right\} \right. \\ & \left. - 2 \frac{E(\alpha_i\sigma, \theta)E(\alpha_i\sigma^+, \theta)E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1-\lambda^2)^4} \right] \quad (3.5.57)\end{aligned}$$

여기서, $C = 3 \times 10^7$ 이다. 한편 $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$ 는 위 식에 경상 배치의 상대 파향을 대입하여 구한다. Hasselmann and Hasselmann(1981)은 JONSWAP 스펙트럼에 대하여 천해에서의 4파 상호작용을 엄밀 계산하였다. 그들은 이 계산으로부터 천해에서의 상호작용을 심해파에 대한 값으로 표현하는 아래와 같은 공식을 도출하여 WAM 모델에 도입하였으며 SWAN 모델에서도 같은 방법으로 천해에서의 4파 상호작용을 고려한다.

$$S_{nl4}(\text{finite depth}) = R(k_p d) S_{nl4}(\text{deep water}) \quad (3.5.58)$$

여기서 k_p 는 JONSWAP 스펙트럼의 첨두 파수이며 d 는 수심이다. SWAN 모델에서 $k_p d$ 는 $0.75 \bar{k} d$ 로 대체된다.

파장과 파고에 비하여 수심이 얇아지게 되면 3파 비선형상호작용(또는 제2차 비선형 상호작용, triad interactions)의 영향을 무시할 수 없게 된다. 3파 비선형상호작용은 파랑의 에너지를 저주파 영역에서 고주파 영역으로 이동시킨다. 3파 비선형상호작용에 의해서 생성되는 저주파 영역은 SWAN 모델에서는 고려하지 않는다.

Eldeberky(1996)는 3파 비선형상호작용을 계산하기 위한 LTA (lumped interaction approximation)라고 하는 근사법을 제안하였으며, SWAN 모델에서는 이 방법을 채용하였다.

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = s_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (3.5.59)$$

$$S_{nl3}^+ = \max \left\{ 0, \alpha_E 2\pi c c_g J^2 |\sin \beta| \left[E^2 \left(\frac{\sigma}{2}, \theta \right) - 2E \left(\frac{\sigma}{2}, \theta \right) E(\sigma, \theta) \right] \right\} \quad (3.5.60)$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(2\sigma, \theta) \quad (3.5.61)$$

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh \left[\frac{0.2}{U_r} \right] \quad (3.5.62)$$

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 (gd + 2c_{\sigma/2}^2)}{k_{\sigma} d \left(gd + \frac{2}{15} gd^3 k_{\sigma}^2 - \frac{2}{5} \sigma^2 d^2 \right)} \quad (3.5.63)$$

여기서, α_E 는 조정할 수 있는 비례상수이며 J 는 상호작용계수이고 U_r 은 Ursell 파라미터로서 다음 식으로 구한다.

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2}, \quad \bar{T} = \frac{2\pi}{\sigma} \quad (3.5.64)$$

여기서, 3파 비선형상호작용은 $0.1 < U_r < 10$ 인 경우에만 계산한다.

Table 3.5.1에서는 원천항에 사용되는 공식에 따라서 SWAN 모델을 세대별로 정리하였다. 저면마찰소산에 대해서는 각 세대 모두 3가지의 선택이 있으며, 4파 비선형상호작용은 제 3세대 모델에서만 고려한다.

표 3.5.1 SWAN 모델의 세대별 구분

		n th generation mode of SWAN		
		1 st	2 nd	3 rd
Linear wind growth:	Cavaler & Malanotte-Rizzoli (1981) (modified)	×	×	
	Cavaleri & Malanotte-Rizzoli (1981)			×
Exponential wind growth:	Snyder et al. (1981) (modified)	×	×	
	Snyder et al. (1981)			× ¹
	Janssen (1989, 1991)			× ²
Whitecapping:	Holthuijsen and de Boer (1988)	× ³	× ⁴	
	Komen et al. (1984)			× ¹
	Janssen (1991), Komen et al. (1994)			× ²
Quadruplet interaction:	Hasselmann et al. (1985)			×
Triad interactions:	Eldeberky (1996)	×	×	×
Depth-induced breaking:	Battjes & Janssen(1978) with Nelson (?)	×	×	×
Bottom friction:	Hasselmann et al. JONSWAP (1973)	×	×	×
	Collins (1972)	×	×	×
	Madsen et al. (1988)	×	×	×

1. WAM cycle 3에서 사용
2. WAM cycle 4에서 사용
3. Pierson-Moskowitz spectrum
4. scaled Pierson-Moskowitz spectrum

다. 환경사 방정식 모델

파랑에너지 보존방정식에 의한 파랑추정의 문제점은 구조물 등에 의한 회절현상을 다루는데 어려움이 있다. Mild Slope Equation을 이용한 모델을 이용하면 회절, 반사 취급은 용이하다. 천해 파랑 산출 시스템 구축 사업에서 5가지의 환경사 방정식 모델을 수립되었는데 각 모델의 방정식의 유도 및 특성은 한국해양연구원 보고서에 수록되어 있는데 각 모델들의 주요 특성을 요약하면 다음과 같다.

1. 쌍곡선형 I : 기본식이 조석 모델의 것과 유사하여 한파장내 대략 10개 이상의 격자가 요구되므로 반사파의 해석이 가능하나 쇄파대내에서 상당히 적은 격자간격을 요구할 뿐만 아니라 넓은 지역에 적용하기에는 부적절
2. 쌍곡선형 II : 기본식이 파랑 주기 및 파장에 대하여 평균화되어 미지수가 파고와 wave number 벡터로 되어 있어서 반사파의 해석이 불가능하나 격자간격에 대한 제한을 피할 수 있으며 회절항에 대한 수치방법의 개선이 요구된다.
3. 타원형 : 타원형의 기본식이 상미분식화되어 한두 번의 계산수행으로 해를 구할 수 있으므로 광역에서의 반사파 산정에 우월하나 수치 안정도에 따른 격자한계로 항 내부 진동해석은 어려움
4. 타원형 II : 기본식이 쌍곡선형 II와 유사하나 반복계산에 의하여 초기 조건을 수립시켜 파고, 파향, 파장의 해를 구함. 안정되고 빠른 결과를 제공하도록 일반화된 Lax-Friedrich(L-F) scheme에 alternating direction Gauss-Seidel 방법을 사용
5. 포물선형 : 기본식이 포물선형으로 음해법에 의한 빠른 수치해석이 가능하나 포물선형 기본식의 유도과정에서 주어진 가정과 수치 감쇄 (numerical damping)로 인하여 해의 정확도를 신뢰하기 어려움

4. 전국 무역항 및 연안항에 대한 천해 설계파 산출

본 연구에서는 2005년에 해양연구원에서 발간한 “전해역 심해설계파 추정보고서 II”에서 산출한 각 격자점에서의 16개 방향별 50년 빈도의 심해설계파를 입력조건으로 52개 항만 일대의 천해에서의 설계파랑을 산출하였다. 천해파랑모델은 SWAN모델을 사용하였으며, 모델의 격자범위는 경계에서 심해설계파의 격자점과 일치하도록 설정하였다. 표 3.5.2은 52개 대상항만 목록을 나타낸 것이며, 그림 3.5.5는 52개 항만의 위치와 심해설계파의 격자점을 나타낸 것이다.

표 3.5.2 52개 대상항만 목록

무역항			연안항		
코드	항 명	위 치	코드	항 명	위 치
A01	인천항	인천광역시	B01	연평도항	인천광역시 옹진군 연평면
A02	평택항	경기도 평택시	B02	대천항	충청남도 보령시
A03	대산항	충청남도 서산시	B03	비인항	충청남도 서천군 서면 마량리
A04	태안항	충청남도 태안군	B04	대흑산도항	전라남도 신안군 흑산면 홍도리
A05	보령항	충청남도 보령시	B05	홍도항	전라남도 신안군 흑산면
A06	장항항	전라남도 군산시	B06	팽목항	전라남도 진도군 임희면 연동리
A07	군산항	전라남도 군산시	B07	화홍포항	전라남도 완도군 완도읍
A08	목포항	전라남도 목포시	B08	신마항	전라남도 강진군 마량면 마량리
A09	완도항	전라남도 완도군	B09	녹동신항	전라남도 고흥군 도양읍 봉암리
A10	여수항	전라남도 여수시	B10	나도로항	전라남도 고흥군 봉래면
A11	광양항	전라남도 광양시/여수시/순천시	B11	거문도항	전라남도 여수시 삼산면
A12	삼천포항	경상남도 사천시	B12	부산남항	부산광역시 중구 남포동/영도구 남항동
A13	통영항	경상남도 통영시	B13	구룡포항	경상북도 포항시 남구 구룡포읍
A14	마산항	경상남도 마산시	B14	월포항	경상북도 포항시 북구 청하면
A15	옥포항	경상남도 거제시	B15	후포항	경상북도 울진군 후포면 후포리
A16	고현항	경상남도 거제시	B16	주문진항	강릉시 주문진읍 주문진리
A17	장승포항	경상남도 거제시	B17	울릉항	경상북도 울릉군 울릉읍 도동리
A18	진해항	경상남도 진해시	B18	애월항	제주도 북제주군 애월읍 애월리
A19	부산항	부산광역시/경상남도 진해시	B19	성산포항	제주도 남제주군 성산읍 성산리
A20	울산항	울산광역시	B20	화순항	제주도 남제주군 안덕면 화순리
A21	포항항	경상북도 포항	B21	한림항	제주도 북제주군 한림읍 한림리
A22	삼척항	강원도 삼척시	B22	용기포항	인천광역시 옹진군 백령면 진촌리
A23	동해항	강원도 동해시	B23	추자항	제주도 남제주군 추자면 대서리, 예초리
A24	목호항	강원도 동해시	B24	갈두항	전라남도 해남군 송지면
A25	옥계항	강원도 강릉시			
A26	속초항	강원도 속초시			
A27	제주항	제주도 제주시			
A28	서귀포항	제주도 서귀포시			

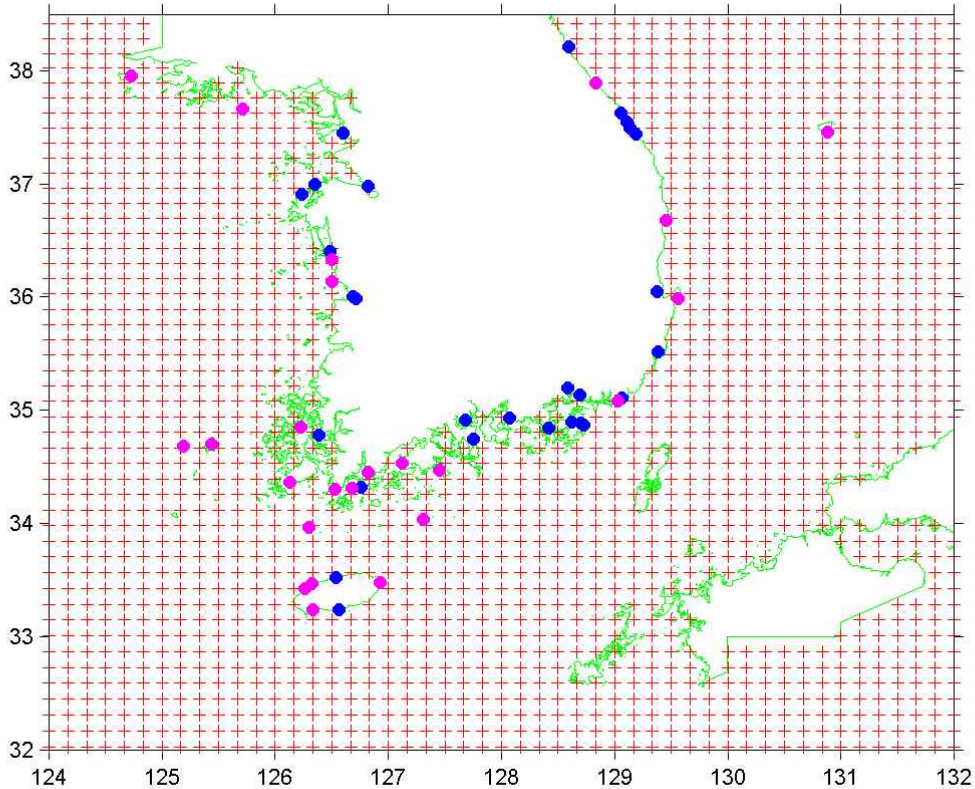


그림 3.5.5 52개 항만의 위치와 심해설계과 격자점

천해 설계과의 산출은 수치모델에 의해 우선 광역에 대한 파랑 산출이 이루어지고 연안의 입사파 정보를 생산하여 이를 입력으로 천해파 변환 모델에 의해 변환하여 구조물 설치 지점에서 장기간의 천해파 자료를 확보하여 이를 극치 통계 분석을 통해 이루어져야 하지만 이 방법을 적용하기 위해서는 많은 양의 천해파랑 변환 모델을 적용해야 하는 번거러움과 많은 계산 시간이 필요하다. 이에 천해파 변환에서 장기 입사파 자료의 극치 분석을 통해 입사 설계파를 먼저 구하고 이를 원하는 천해역에서의 천해파랑으로 변환하여 간단하게 천해 설계파를 구하는 방법을 적용하고 꼭 필요한 경우에 대해서만 천해에서의 장기 파랑 산출로 천해 설계파를 구했다.

1) 해상풍 영향을 무시한 천해파랑 변환에 의한 천해 설계파 산출

트인 연안의 경우 천해 설계파 산정은 연안 입사파를 장기 산출하여 극치통계 처리하여 재기년도별 설정한 심해 입사 설계파를 천해파 모델의 경계조건으로 사용하여 굴절, 천수, 해저마찰소산, 회절 등 주요 천해 반환 메카니즘을 고려하여 계산한다. 이 경우

많은 경우에 국지 해상풍의 영향을 무시할 수 있다. 각 방향별 입사 설계파를 천해 파랑으로 변환하여 각 격자점의 천해파를 구하여 주어진 격자점에서 가장 큰 값을 천해 설계파로 제공한다. 실제 연안 구조물 설계시에 천해파의 크기뿐 아니라 구조물에 작용하는 방향도 중요하므로 방향별 입사 설계파로부터 구한 천해에서의 파랑정보를 모두 제공하였다.

예로서 그림 3.5.6는 부산신항에 적용한 천해파 모델의 영역과 수심분포를 나타낸 것이며, 그림 3.5.7는 16개 방향의 입사조건에 의한 천해파랑 산출결과의 예를 보인 것이며, 그림 3.5.8은 16개 방향의 천해파랑 산출결과의 최대값의 공간분포를 나타낸 것이다.

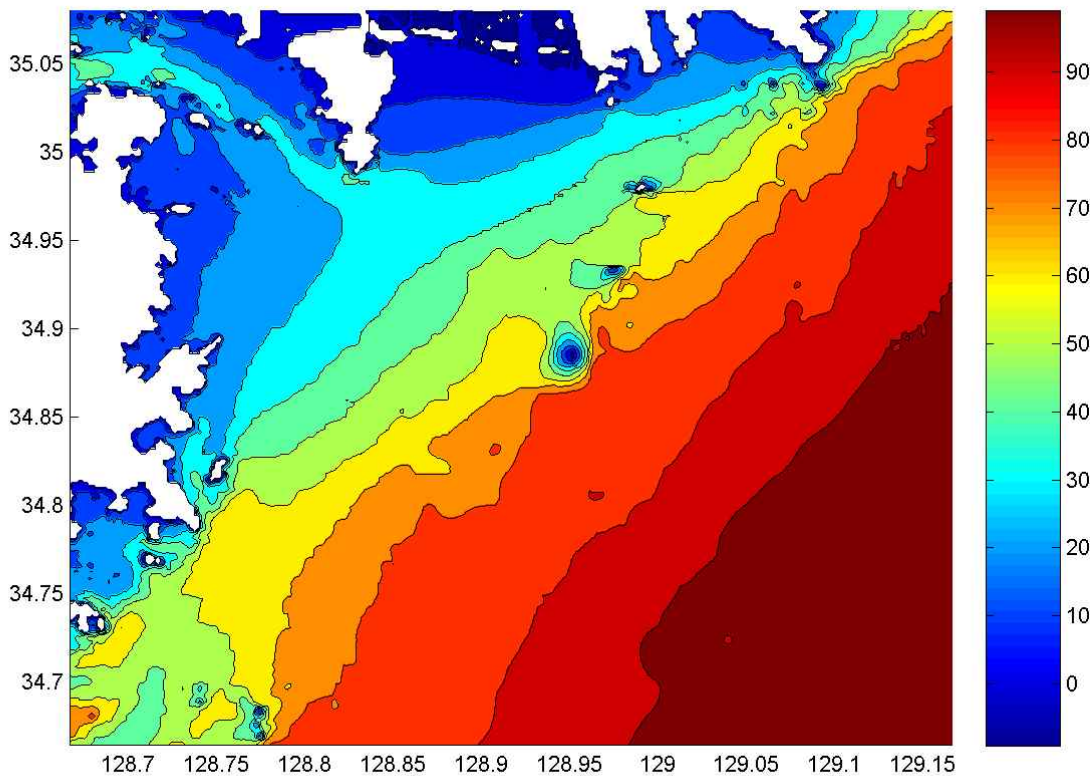


그림 3.5.6 부산신항 전면 해상의 수심분포도

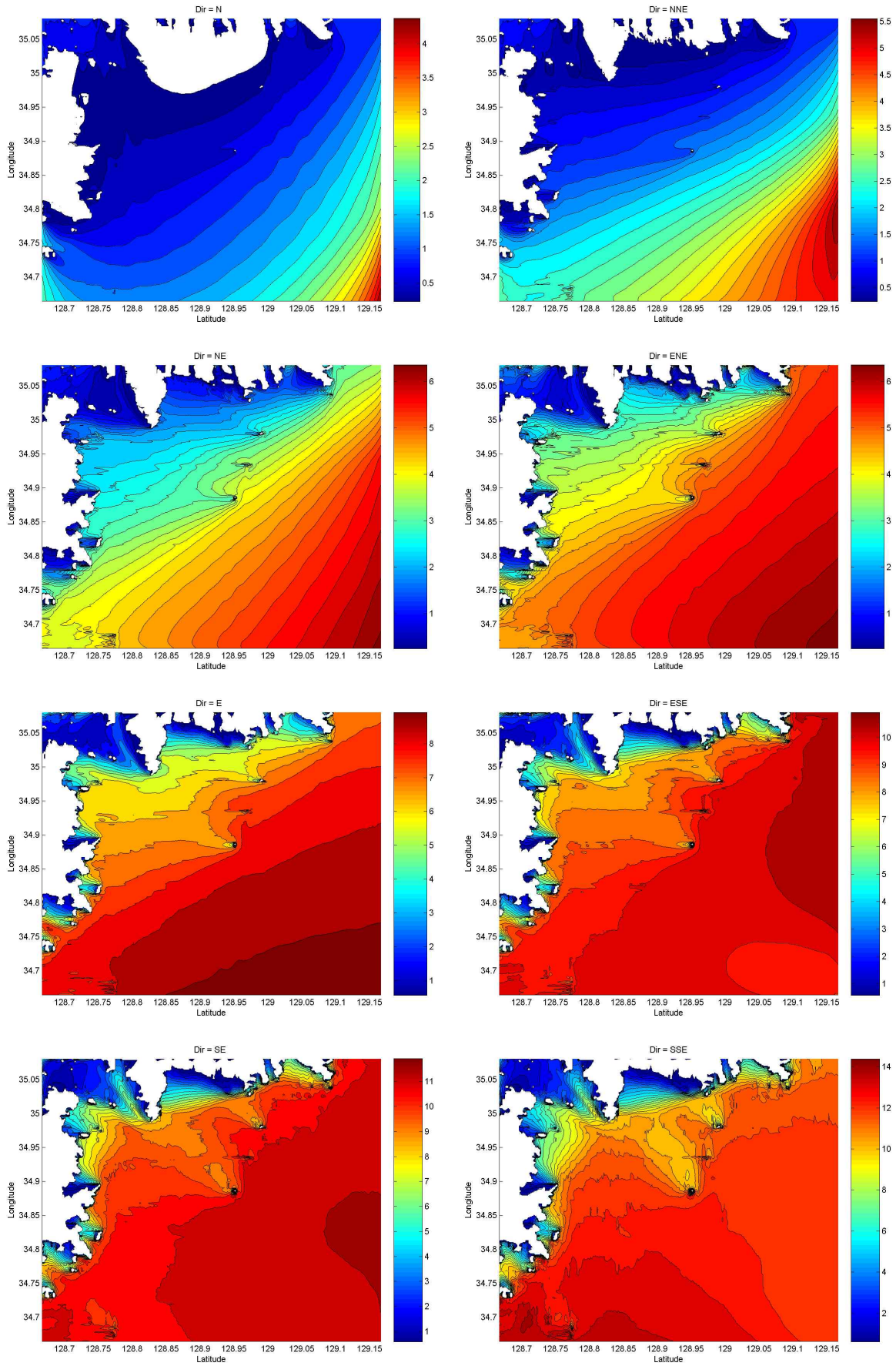


그림 3.5.7 16개 방향의 심해입사파에 대한 천해파랑 산출결과의 예

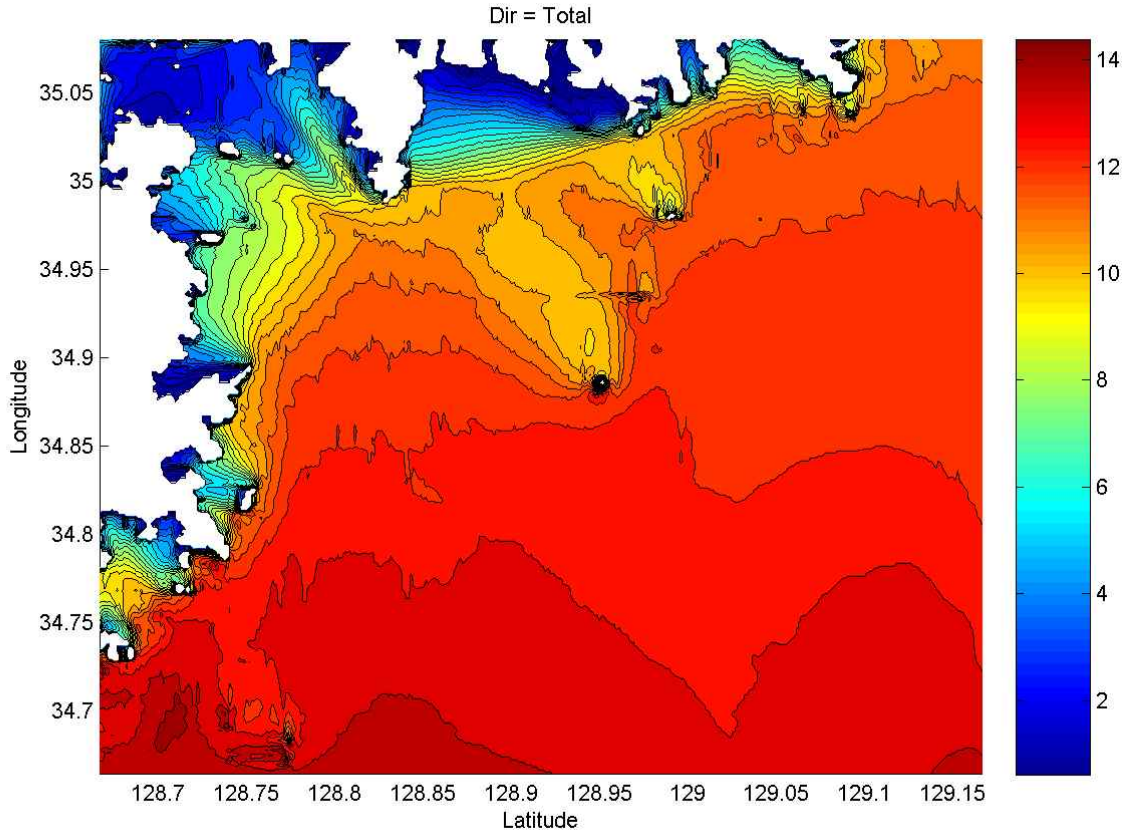


그림 3.5.8 16개 천해파랑 산출결과에서의 최대값의 공간분포

2) 국지 해상풍의 작용을 무시할 수 없는 경우의 천해 설계파 산출

천해 설계파는 주로 파랑에너지가 충분히 발달한 경우에 일어나므로 좁은 지역의 연안에서는 바람의 영향이 크게 중요하지 않는 경우가 대부분이지만 파랑에너지가 섬·반도 등에 의해 감소되는 경우에는 파의 스펙트럼이 평형 상태에 미치지 못해 파랑의 진행에 국지 바람이 영향을 미칠 수 있는데, 이때는 천해 파랑 변환에 국지적 바람의 영향을 고려하여야 하기 때문에 입사파의 시계열 자료를 입력으로 하여 국지 해상풍을 고려한 천해 파랑 모델을 적용하여 천해의 원하는 위치에서의 파랑 자료를 구하고 이를 국지 분석하여 설계파를 구했다. 입사경계조건은 1951년부터 2003년까지의 모든 태풍에 대하여 심해 파랑 모델을 수립하여 계산한 후 경계점에서의 파고 상위 30개 태풍에 대한 파고, 주기, 파향을 사용하였고, 바람은 태풍 파라메타를 이용하여 태풍 해상풍 모델에 의해 시뮬레이션하였다.

반차폐 내만에서의 바람은 파고에 있어서 무시 할 수 없을 정도의 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 반 차폐 내만에서의 바람의 영향을 파악해 보기 위하여 과거 50년 동안의 128개의 태풍을 대상으로 항만별 상위 30개의 태풍을 선정하여 각 태풍에

매 시간 단위의 천해파를 계산하였다. 상위 30개의 태풍의 선정은 광역 모델 결과를 기초로 하여 최대파고를 보이는 태풍을 비교하여 결정하였고, 각 태풍에 대한 시간을 태풍 내습 및 최대 영향이 큰 시점에서의 천해파랑을 산출하였다. 선정된 항만별 30개 태풍의 예는 표 3.5.3과 같다. 항만별 30개 태풍에 대해 계산된 천해파는 각 격자별로 극치 분석을 실시했다. 그림 3.5.9~3.5.11에는 각 태풍에 대한 천해파 산출 결과의 최대값과 극치 분석 결과에서 50년 재기년도의 천해설계파와 비교의 예를 보여 준다.

표 3.5.3 각 항별 상위 30개 태풍 선정

송공항	대흑산 도항	홍도항	평목항	추자항	갈두항	화홍 포항	신마항	녹동 신항	거문도 항	나로도 항	부산 남항
7910	0012	0012	7910	7910	7910	7910	6411	8705	5914	5914	0314
5209	7910	7910	5209	5914	5914	5914	8705	3014	0314	0314	5914
7011	5209	5209	5914	6411	8705	8705	5914	5914	8705	8705	5707
6015	6209	6209	8705	8705	6411	6411	0314	6411	0215	0215	8712
0012	6015	6015	6411	5209	0314	0314	7910	0215	5707	5707	8705
0205	205	7310	7011	7011	7011	7011	7011	7910	9809	6411	9503
6411	7310	0205	0012	0314	0215	0215	0215	7011	6411	9809	0215
7310	6411	6411	6015	0215	5707	5707	5707	9809	8712	8712	0014
5914	7120	7120	7310	9907	9809	9809	9907	9429	9503	9503	7408
8705	5914	5111	0205	9429	8712	8712	9809	5707	9429	9429	9109
5111	7011	5914	9907	5707	5209	5209	5209	9907	6304	9109	8410
0314	5111	8509	0314	6015	9109	9109	8712	8712	9109	8520	8520
9907	8705	7011	9429	0012	9907	9907	7811	5209	8520	6304	9429
0215	8509	8705	0215	7310	8410	8410	9109	9503	7011	7011	9809
6209	7303	7303	5707	0205	6304	6304	9429	9109	7408	8410	6304
5707	0314	314	8712	9809	9503	9503	6304	6304	8410	7408	8118
6205	6205	6205	7303	6304	9429	9429	8410	7811	7910	9711	5609
9429	8712	8712	5111	8712	0205	0205	7310	7310	9711	7910	7910
8712	9907	6409	6304	8520	6015	6015	9503	8410	9907	9907	9711
9809	0215	5707	0209	8118	7310	7310	8520	9905	5209	5209	7119
7303	5707	209	6209	5111	0012	0012	0205	7408	0014	0014	6807
9219	0209	9907	6205	9109	7408	7408	9711	8520	9905	5612	7009
7120	6409	0215	8118	8410	9905	9905	6015	0205	8118	8118	6411
6304	9219	9413	8520	7303	8520	8520	7408	9711	5609	5609	9112
8520	9429	5211	9809	0209	0209	0209	9905	0012	5612	9905	9219
0209	9413	9219	9109	7811	5111	5111	0012	6015	8911	8911	9307
8509	5211	9429	8410	9503	9711	9711	5111	5612	7811	7310	5209
8118	8118	9414	5612	5612	7811	7811	209	5111	7310	7811	9313
9413	9414	8118	7120	6209	5612	5612	5612	8118	8508	8508	7818
7811	8520	5905	9414	6205	8118	8118	8118	5609	9112	0209	5522

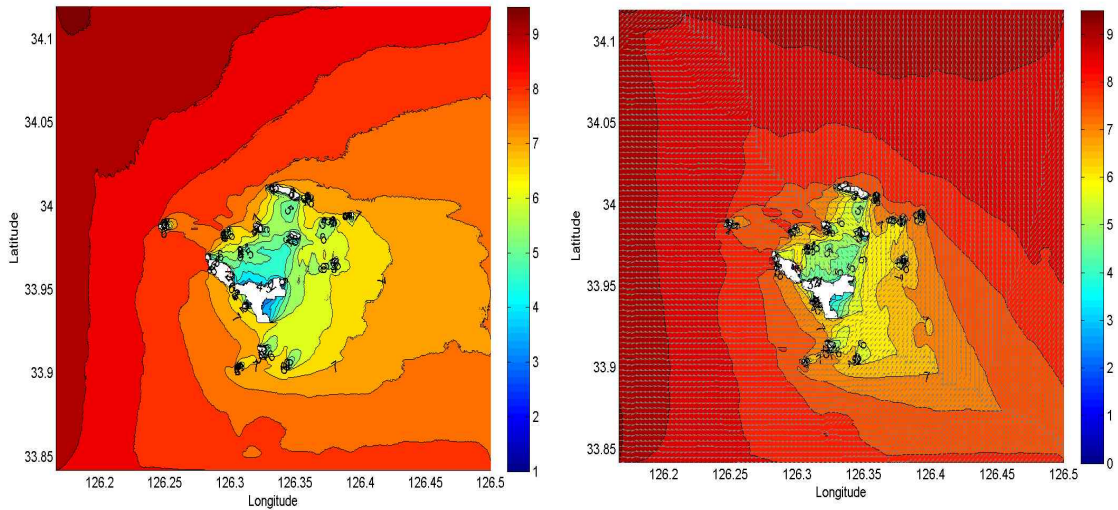


그림 3.5.9 추자도항에서의 극치분석에 의한 천해 설계파(좌), 30개 태풍 최대 파고 및 파향(우)

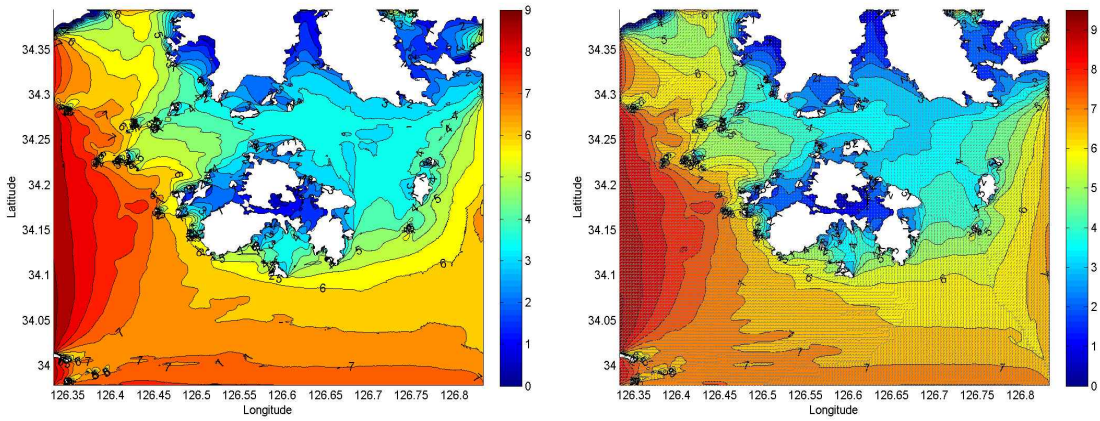


그림 3.5.10 갈두항에서의 극치분석에 의한 천해 설계파(좌), 30개 태풍 최대 파고 및 파향(우)

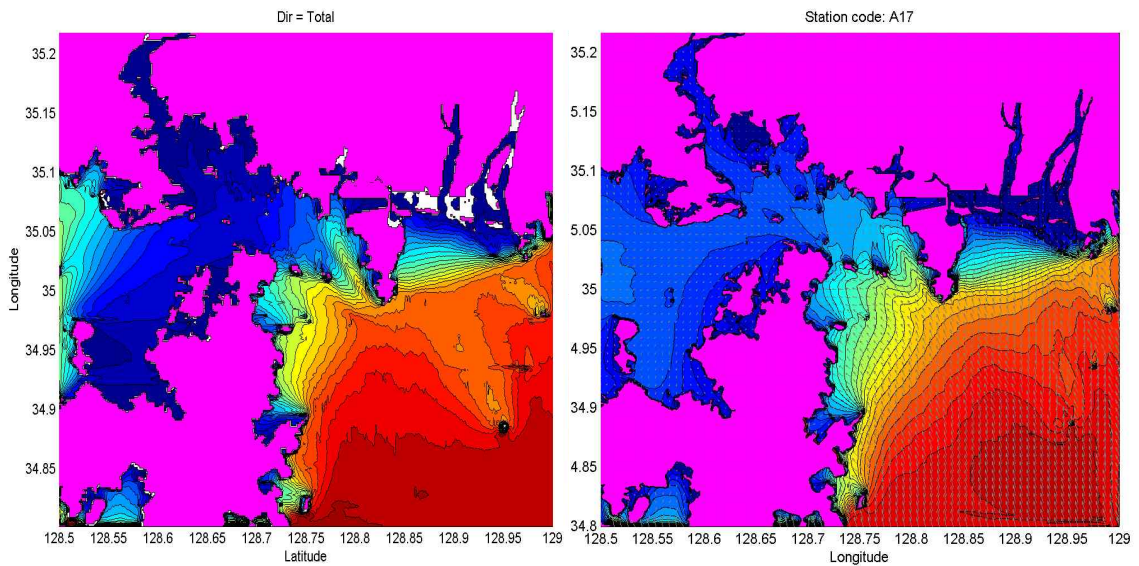


그림 3.5.11 거제도에서의 심해 설계파를 경계조건으로 사용한 방법(좌)과 천해파랑을 산출하여 극치 분석한 방법(우)의 유의파고 및 파향의 비교.

3) 조석, 조류의 영향을 고려한 천해 파랑의 산출

서해안의 항의 경우에는 심해 입사파로부터 천해 파의 변환 과정에서 조석, 조류의 영향을 고려해야 되는 경우가 많다. 조석의 영향은 만조시가 가장 크지만 조류의 영향은 장소에 따라 창조 혹은 낙조시 유속 및 유속의 수평 경사가 클때가 크다. 천해파 변환 시에 13시간 동안 매 시간마다 각 격자점에서 조석 조류를 입력으로 하여 천해 파랑 변환하여 그 중에서 가장 파고가 큰 경우의 값을 천해 설계파로 설정하였다.

28개 무역항과 24개 연안항에 대해 각항에 따라 해당되는 방법을 적용하여 매 60 m 격자점에 대해 천해 설계파를 그림 3.5.12의 예에서와 같이 산정하고 항만 시설물 위치에 해당하는 천해 설계파 제원을 뽑아 항만구조물 안정성 평가를 위한 기초 자료로 제공했다.

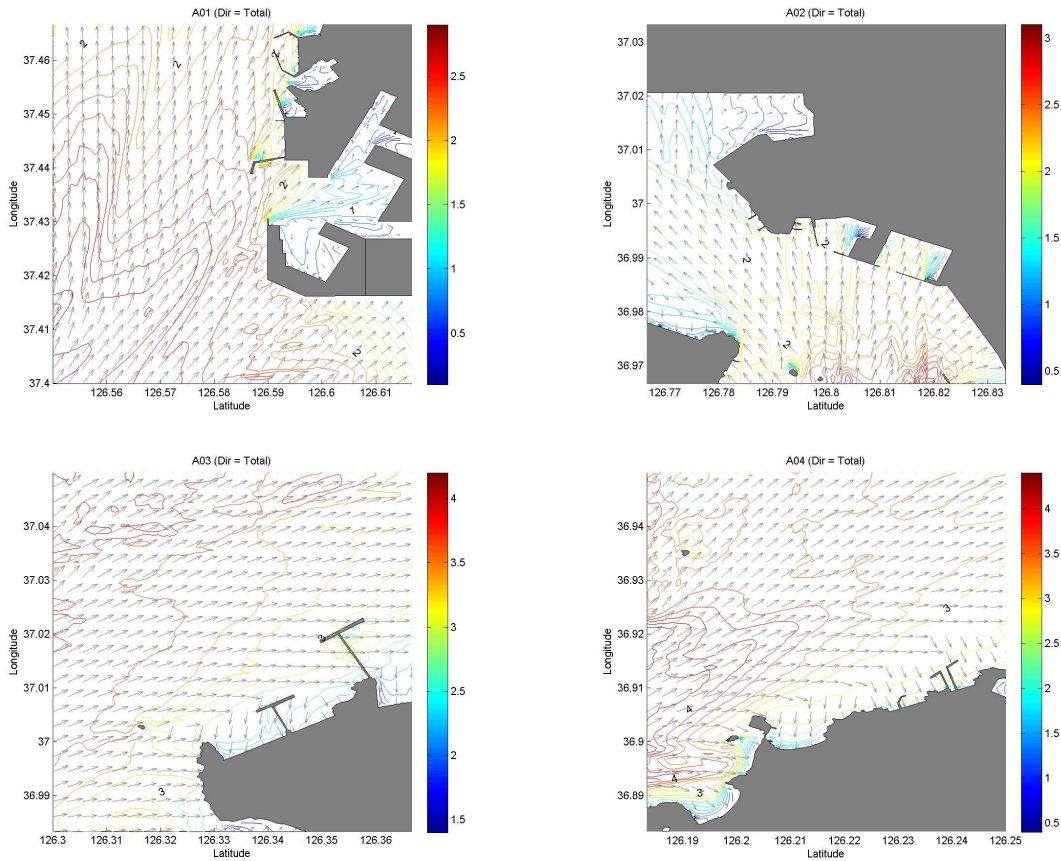


그림 3.5.12 각 항의 주요 영역에서의 최대파고 및 파향 분포도(A01~A04)

제 6 절 정밀안전성 평가 및 보수·보강 우선순위

1. 정밀안전성 평가

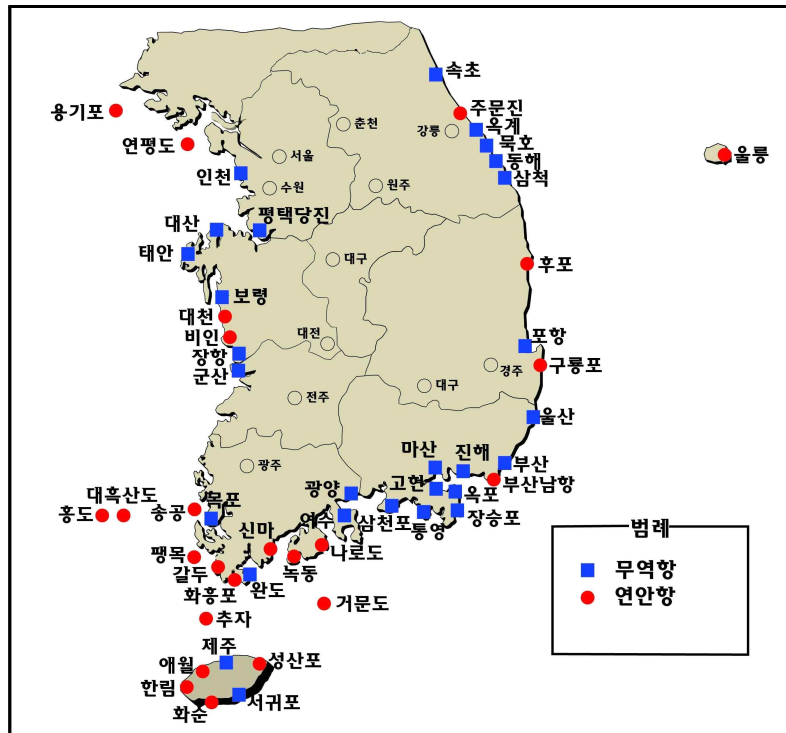
가. 정밀안전성 평가기준

(1) 정밀안전성 평가대상

- 정밀안전성 평가대상은 무역항 28개항, 연안항 26개항의 주요 시설 중 태풍 및 해일피해 방지를 위한 외곽시설인 방파제를 평가대상으로 선정하였으며,
- 1차년도(2006.8 ~ 2007. 7) 용역에서 수집·분석한 각 항별, 구간별 방파제 단면을 대상으로 개정된 심해 설계파 및 변화된 설계해면(폭풍 및 지진해일고)을 고려한 정밀안전성 평가를 수행하였다.

표 3.6.1 정밀안전성 평가 대상

구 분	무역항	연안항	비 고
(주)해인이엔씨	12개항	14개항	
(주)세광종합기술단	16개항	10개항	
합 계	28개항	24개항	



- 각 항별로 외곽시설이 공사중이거나, 향후 방파제 보강계획 및 방파제 관련계획이 수립된 항만 및 외곽시설에 대해서는 중복투자의 문제점이 있으므로 관련계획 분석을 통해 금회 정밀안전성 평가대상에서 제외하였으며, 무역항 및 연안항의 정밀안전성 평가 대상은 다음과 같다.

표 3.6.2 무역항 정밀안전성 평가 대상

항 별	방파제시설	총시설연장(m)	대상단면	비 고
속초항	3	1,461	9	
옥계항	2	1,305	12	
목호항	2	1,574	15	
동해항	2	2,110	11	
삼척항	2	1,031	15	
포항항	5	5,464.4	18	
울산항	7	4,256	23	
인천항	4	1,993.88	10	
평택항	1	166	1	
대산항	2	980	5	
보령항	-	-	-	외곽시설 없음
태안항	-	-	-	외곽시설 없음
군산항	1	3,000	2	
장항항	-	-	-	외곽시설 없음
목포항	-	-	-	외곽시설 없음
완도항	2	550	4	
광양항	-	-	-	외곽시설 없음
여수항	5	2,523	7	· 동방파제 232m 연장 공사 중 (2010년 5월 완공예정) · 북방파제 보강 공사중 (2011년 5월 완공예정) · 파제제 매립계획 (세계박람회 유치 관련시설 부지조성 : 2011년)
마산항	-	-	-	외곽시설 없음
삼천포항	5	2,340	13	
통영항	6	1,637	9	
고현항	-	-	-	외곽시설 없음
장승포항	2	231	2	
옥포항	2	1,385	2	
진해항	-	-	-	외곽시설 없음
부산항	2	1,704	4	· 감천항 동·서방파제 보강공사 T/K 설계중 · 북항 남방파제는 현재 북항대교 공사로 보강 완료
제주항	4	3,530	23	· 「제주의항 서방파제 축조공사」 중, 동방파제 항외측 230m 기 매립 · 「동방파제 수제선 정비」 항내측 매립계획('06) · 「제주의항 2단계 계획('06~'11)」 동방파제 500m 매립 예정
서귀포항	4	1,848.5	15	
합 계	63	39,089.78	200	

표 3.6.3 연안항 정밀안전성 평가 대상

항 별	방파제시설	총시설연장(m)	대상단면	비 고
주문진항	2	1,170	10	
후포항	3	1,904.5	16	
구룡포항	4	1,090	10	
울릉항	6	1,347.6	18	
용기포항	1	140	5	
연평도항	4	991.1	8	
대천항	3	1,220	6	
비인항	3	879.5	9	
대흑산도항	5	1,343	14	
홍도항	2	200	3	
팽목항	-	-	-	외곽시설 없음
화흥포항	3	304	6	
신마항	-	-	-	외곽시설 없음
갈두항	1	240	3	
송공항	-	-	-	외곽시설 없음
녹동신항	-	-	-	외곽시설 없음
나로도항	4	704	7	
거문도항	7	1,915	16	
부산남항	2	558	4	
한림항	2	2,418	15	
애월항	2	360	4	
성산포항	4	2,144	22	
화순항	2	995	8	
추자항	3	505	9	
합 계	63	20,428.7	193	

(2) 정밀안전성 평가범위

- 기존 피해이력이 있는 방파제는 유실된 기초사석이나 피복재 등이 수중부에 광범위하게 분포되어 있어서 피해보수·보강 공사시 수상부를 위주로 원상 복구하는 실정이며,
- 피해 이력이 있는 방파제 제체는 강력한 파압작용으로 인한 활동, 전도, 침하 피해를 입었으므로 제체하부지반에 대한 정량적인 물리량이 설계당시와는 많은 차이를 보일 수 있다.
- 따라서, 방파제 단면에 대한 정확한 안전성 평가를 위해서는 각 시설물별로 수심측량, 현황측량, 지반조사 및 실험 등의 현장조사가 필요하나, 이를 위해서는 막대한 현장 조사비가 소요된다.
- 그러므로 본 과업에서는 정밀한 현장조사를 전제로 하는 전체 제체 안전성 평가는 불가능하고 지반상부 제체부만을 평가범위로 설정하였으며,
- 금회 정밀안전성 평가 결과 보수·보강이 필요한 것으로 평가된 시설에 대해서는 향후 정밀한 현장조사를 실시하여 보수·보강 계획을 수립함이 타당할 것으로 판단된다.

(3) 정밀안전성 평가항목

(가) 설계고조위 결정

- 설계고조위는 천문조와 폭풍해일, 지진해일 등에 의한 이상조위의 실측치 또는 추산치에 기초하여 결정하며, 설계고조위의 산정방법은 다음과 같다.

표 3.6.4 설계고조위 산정방법

구 분		산정방법
제1방법	기왕의 고극조위	· 설계지역에서 관측된 연도별 고극조위 중 최고값
제2방법	확률분석에 의한 고극조위	· 연도별 고극조위 자료를 확률빈도 분석
제3방법	약최고 고조위 + 폭풍해일고	· 약최고 고조위에 폭풍해일고를 더한 조위
제4방법	약최고 고조위 + 지진해일고	· 약최고 고조위에 지진해일고를 더한 조위

- 제4방법의 경우 과거 동해안 지역의 지진해일 발생횟수가 미미하여 공학적으로 의미가 없는 것으로 판단되며, 따라서, 제1, 2, 3방법 중에서 가장 큰 조위를 설계조위로 적용, 마루높이 검토시 설계조위로 적용하였다.
- 구조물 안정성 검토를 위한 파력 계산시 설계조위는 구조물에 가장 불리하게 작용하는 조위를 설계조위로 적용하였다.

표 3.6.5 설계조위 결정

구 분	설계조위
마루높이 산정	· 제 1, 2, 3 방법 중 가장 큰 조위 설계조위로 적용
구조물 안정성 검토	· 구조물에 가장 불리한 조위

(나) 마루높이 검토

- 외곽시설의 마루높이는 항만 및 어항 설계기준에 의한 방법, 처오름높이, 전달과 고를 고려한 방법 등 다음의 3가지 방법을 비교·검토하였다.

표 3.6.6 마루높이 산정기준

구 분		산정 방식	비 고
제1방법	항만 및 어항설계기준에 의한 방법	설계조위 + $0.6H^{1/3} \sim 1.25H^{1/3}$	
제2방법	처오름 높이에 의한 방법	$R = Ho' \times R/Ho' \times \gamma \times K$	
제3방법	파고전달율에 의한 방법	$HT = KTO \times HI$	

- 외곽시설의 마루높이는 항내 박지 수면적, 배후 시설물 유무, 대상선박의 규모 등을 고려하여 방파제의 경우 최소 $0.6H^{1/3}$ 이상을 확보토록 하였으며, 방파호안의 경우 배후 시설물의 월파 방지를 위해 최소 $1.0H^{1/3}$ 이상을 확보토록 검토하였다.

표 3.6.7 마루높이 검토기준

구 분	검토 기준	적용 기준
방파제	항내 수면적 충분, 배후시설 영향 없음	$0.6 H^{1/3}$ 이상 확보
	항내 수면적 협소, 배후시설 영향 있음	$1.0 H^{1/3}$ 이상 확보
방파호안	배후 시설물의 월파 방지	$1.0 H^{1/3}$ 이상 확보

(다) 피복재 소요질량 검토

- 기존 방파제의 피복재 소요질량 검토는 방파제 형식, 사면 경사, 피복재 종류 등의 조건을 고려한 피복재 소요질량 산정식을 적용하여 검토를 수행하였다.
- 경사제의 경우 사면경사 1: 1.5구간은 Hudson공식과 Van Der Meer 공식 중 최대값을 적용하였으며, 그 외 경사구간에 대해서는 T.T.P 2층거치 및 사면경사 1:1.5의

조건에서만 적용가능한 Van Der Meer 공식을 제외한 Hudson공식을 기준으로 각 구간별 피복재 소요질량을 산정하였다.

- 직립제 및 혼성제의 경우 설치수심, 사석부의 두께, 전면 어깨폭 및 구배 등의 사석부 형상이 고려된 확장된 다니모또식을 적용하여 소요질량을 산정하였다.
- 또한, 방파제 제두부구간은 파가 여러 방향에서 내습하고 피복재는 전방보다 후방으로 떨어지는 위험이 있으므로, 제간부 질량의 1.5배를 적용하여 산정하였다.

표 3.6.8 피복재 소요질량 검토기준

구 분	Hudson공식	Van Der Meer	확장된 다니모또식	
공 식		$M = \frac{\rho_r \cdot H_{1/3}}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha}$ <p>여기서, M : 사석 또는 블록의 안정에 필요한 최소질량(t) ρ_r : 사석 또는 블록의 밀도 H : 안정계산에 사용하는 파고 S_r : 사석 또는 블록의 해수에 대한 비중 N_s^3 : 피복재의 형상, 구배 또는 피해율에 의해 결정되는 계수</p>		
N_s^3	$K_D \cdot \cot \alpha$	$(3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85) \cdot S_{om}^{-0.2}$	$\max(1.8, \{1.3 \cdot \frac{N1-K}{K^{1/3}} \cdot \frac{h}{H_{1/3}} + 1.8 \exp[-15 \frac{(1-K^2)}{K^{1/3}} \frac{h}{H_{1/3}}]\})$	
특 징	<ul style="list-style-type: none"> · KD값에 의한 소요질량 산정 · 파랑조건은 파고만이 고려되고 파장은 고려되지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> · 안정수 NS에 의해 소요질량 산정 · 파랑조건 중 파고와 주기 모두 고려 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 안정수 NS에 의해 소요질량 산정 · 설치수심, 사석부 형상 등 고려 가능 	
설계파고	<ul style="list-style-type: none"> · 적용파고 (H1/3, H1/10)에 대한 명확한 기준이 없음 	<ul style="list-style-type: none"> · H1/3에 상응하는 불규칙파 	<ul style="list-style-type: none"> · H1/3에 상응하는 불규칙파 	
적용구조물	경사제 T.T.P(1:1.5)	●	●	-
	경사제 T.T.P (1:1.5외)	●	-	-
	혼성제	-	-	●
	직립제	-	-	●

(라) 상부공 안정검토

- 방파제 상부공에 작용하는 파력공식은 Goda(合田)의 파력공식을 적용하여 상치 콘크리트의 활동(Sliding) 및 전도(Overturning)에 대한 안정검토를 수행하였다.

표 3.6.9 상부공 안전율

구 분	안전율	구분	안전율
활동	1.2	전도	1.2

(마) 제체 안정검토

- 제체의 안정성검토는 사석경사제의 경우 직선활동을, 혼성제 및 직립제의 경우 사석마운드 지지력 및 직선활동 검토를 수행하였다.

표 3.6.10 상부공 안전율

구 분	안전율	구분	안전율
직선활동	1.2	사석마운드 지지력	50tf/m ²

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

나. 정밀안전성 평가결과

(1) 무역항 정밀안전성 평가결과

표 3.6.11 무역항 정밀안전성 평가 결과

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
1. 속초항	북방파제 (701m)	(1)구간 (228.0m)	4.62	8.45	9.18	E	5.50	6.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	1.15	4.66	1.31	N.G	
		(2)구간 (455.0m)	5.16	8.85	9.18	E	5.50	5.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 12.5	O.K	2.08	8.55	1.45	O.K	
		(3)구간 (18.0m)-두부	5.16	8.85	9.18	E	5.50	5.50	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 20.0	O.K	4.08	35.35	2.85	O.K	
	신수로 방파제 (330m)	(1)~(3)구간 (100.0m)	3.18	8.06	9.19	ENE	3.50	3.50	O.K	피복석 1.0m ³	TRIPOD 13.0	N.G	9.84	77.43	2.17	O.K	
		(4)구간 (210.0m)	4.12	8.03	9.19	E	4.50	4.50	O.K	T.T.P 8.0	T.T.P 10.0	N.G	1.89	5.59	1.48	O.K	
		(5)구간 (20.0m)-두부	4.12	8.03	9.19	E	4.50	4.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 16.0	N.G	1.82	4.88	1.95	O.K	
	기존 남방파제 (430m)	(1)~(2)구간 (380.0m)	2.41	6.38	8.06	ESE	6.00	6.00	O.K	피복석 1.0m ³	TRIPOD 2.0	N.G	2.09	5.02	-	O.K	
		(3)구간 (30.0m)	2.41	6.38	8.06	ESE	3.00	3.50	N.G	피복석 1.0m ³	TRIPOD 2.0	N.G	3.66	20.57	1.79	O.K	
		(4)구간 (20.0m)-두부	2.41	6.38	8.06	ESE	3.50	3.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 5.0	O.K	2.78	16.06	1.78	O.K	

$$T_m = \frac{m_0}{m_1}, T_p: \text{smoothed peak period} (m_n = \int_0^\infty f^n E(f)df)$$

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
2. 옥계항	남방파제 (285.4m)	(1)구간 (135.4m)	4.34	9.30	10.24	ENE	5.00	5.50	N.G	T.T.P 6.3	T.T.P 12.5	N.G	1.30	5.79	1.66	O.K	
		(2)구간 (110.0m)	4.45	8.90	10.24	ENE	5.00	5.50	N.G	T.T.P 16.0	T.T.P 12.5	O.K	0.55	1.95	1.36	N.G	
		(3)구간 (40.0m)-두부	4.45	8.90	10.24	ENE	5.00	5.50	N.G	피복석 0.5m ³	TRIPOD 4.0	N.G	2.64	4.39	3.47	O.K	
	북방파제 (1,020.0m)	(1)구간 (185.0m)	4.11	9.47	10.24	ENE	5.70	6.50	N.G	T.T.P 6.3	T.T.P 12.5	N.G	1.75	7.76	1.91	O.K	
		(2)구간 (70.0m)	4.58	9.50	10.24	ENE	5.50	6.50	N.G	T.T.P 16.0	T.T.P 12.5	O.K	2.09	8.48	1.50	O.K	
		(3)구간 (30.0m)	5.00	9.54	10.24	ENE	5.50	6.50	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 16.0	O.K	2.57	11.57	1.60	O.K	
		(4)구간 (55.0m)	5.36	9.54	10.24	ENE	5.50	6.50	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 20.0	O.K	2.29	10.11	1.72	O.K	
		(5)~(6)구간 (315.0m)	6.23	9.42	9.62	ENE	5.50	6.50	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 32.0	O.K	1.70	7.00	2.39	O.K	
		(7)~(8)구간 (211.0m)	6.33	9.51	9.63	ENE	5.50	6.80	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 40.0	N.G	1.67	6.85	1.76	O.K	
		(9)구간 (60.0m)	6.73	9.18	9.64	ENE	5.50	6.80	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 40.0	N.G	1.60	6.47	1.80	O.K	
		(10)구간 (40.0m)	6.73	9.18	9.64	ENE	5.50	6.80	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 40.0	N.G	1.60	6.47	1.96	O.K	
(11)구간 (54.0m)-두부	6.67	9.36	10.24	ENE	5.50	7.70	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 64.0	N.G	2.81	20.39	2.50	O.K			

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계과				마루높이(DL(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
3. 목호항	방파제 (1,173.5m)	(1)~(4)구간 (18.0m)	2.76	9.53	10.23	ESE	5.10	4.40	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	-	-	-	-	
		(5)구간 (188.0m)	4.17	9.66	10.23	E	7.00	6.20	O.K	A.T.B 8.0TON	T.T.P 5.0	O.K	-	-	-	-	
		(6)구간 (138.0m)	4.34	9.67	10.23	E	7.00	6.40	O.K	A.T.B 13.0TON	T.T.P 6.3	O.K	-	-	-	-	
		(7)구간 (71.0m)	4.34	9.67	10.23	E	7.00	6.40	O.K	A.T.B 13.0TON	T.T.P 6.3	O.K	-	-	-	-	
		(8)~(9)구간 (143.0m)	4.16	9.78	10.23	E	7.00	6.20	O.K	A.T.B 13.0TON	T.T.P 5.0	O.K	1.37	5.62	-	O.K	
		(10)구간 (115.0m)	4.12	9.72	10.23	E	7.00	6.10	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 6.3	O.K	1.43	5.92	-	O.K	
		(11)~(12)구간 (62.0m)	5.14	9.32	10.23	E	8.00	7.40	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 12.5	O.K	2.81	9.31	1.81	O.K	
		(13)구간 (33.0m)	5.20	9.48	10.23	E	8.00	7.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 10.0	O.K	3.32	11.93	2.23	O.K	
		(14)구간 (39.0m)	5.20	9.48	10.23	E	8.00	7.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 12.5	O.K	2.71	8.49	1.90	O.K	
		(15)구간 (66.5m)	5.48	9.10	10.23	E	8.00	7.80	O.K	T.T.P 32.0	T.T.P 16.0	O.K	2.41	7.14	1.64	O.K	
		(16)구간 (280.0m)	5.87	8.89	10.23	E	7.50	7.50	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 32.0	O.K	2.77	13.22	1.78	O.K	
	(17)구간 (20.0m)-두부	5.91	8.87	10.23	ENE	7.50	7.50	O.K	T.T.P 50.0	T.T.P 32.0	O.K	2.85	13.61	2.76	O.K		
	해경부두 방사제 (400.0m)	(1)구간 (270.0m)	2.61	8.96	9.10	E	4.00	4.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	-	-	-	-	
		(2)구간 (110.0m)	2.61	8.96	9.10	E	4.00	4.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	1.92	4.24	1.43	O.K	
(3)구간 (20.0m)-두부		2.37	6.87	9.10	ESE	4.00	3.90	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	4.06	15.83	2.27	O.K		

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
4. 동해항	북방파제 (1480.0m)	(1)~(3)구간 (650.0m)	6.50	9.68	10.36	ENE	9.00	9.00	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 40.0	O.K	2.58	14.72	-	O.K	
		(4)~(5)구간 (215.84m)	6.77	9.41	10.36	ENE	5.70	8.10	N.G	T.T.P 40.0	T.T.P 40.0	O.K	1.92	3.98	1.95	O.K	
		(6)~(7) 구간	(594.16 m)	7.12	9.13	10.37	ENE	5.50	8.50	N.G	T.T.P 40.0	T.T.P 50.0	N.G	1.76	3.32	1.89	O.K
			(20.0m) -두부	7.12	9.13	10.37	ENE	5.50	9.00	N.G	T.T.P 40.0	T.T.P 64.0	N.G	1.85	2.95	2.35	O.K
	남방파제 (630.0m)	(1)~(2)구간 (180.0m)	2.03	6.87	10.23	ENE	3.90	3.50	O.K	피복석 0.5m ³	피복석 0.5m ³	O.K	2.35	19.10	-	O.K	
		(3)구간 (100.0m)	3.67	8.20	10.23	ENE	4.70	4.70	O.K	피복석 1.0m ³	T.T.P 5.0	N.G	7.81	58.34	-	O.K	
		(4)구간 (60.0m)	4.62	8.76	10.23	ENE	6.50	6.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 16.0	N.G	3.09	13.77	-	O.K	
		(5)구간 (50.0m)	4.85	8.78	10.23	ENE	6.50	6.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 20.0	O.K	3.96	22.04	-	O.K	
		(6)~(7)구간 (170.0m)	5.19	8.93	10.23	E	6.50	6.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 16.0	N.G	1.84	4.53	2.65	O.K	
		(8)구간 (50.0m)	5.07	8.91	10.23	E	6.50	6.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 12.5	O.K	2.77	7.00	2.54	O.K	
		(9)구간 (20.0m)-두부	5.07	8.91	10.23	E	6.50	6.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 20.0	O.K	2.99	2.15	2.56	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
5. 삼척항	방파제 (670.0m)	(1)~(2)구간 (128.5m)	5.33	9.60	10.03	ENE	7.50	7.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 8.0	O.K	3.08	15.39	-	O.K	
		(3)구간 (41.0m)	5.22	9.62	10.03	E	7.50	7.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 20.0	N.G	1.23	5.60	-	O.K	
		(4)구간 (35.0m)	5.07	9.66	10.03	E	7.50	7.30	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	1.32	5.22	-	O.K	
		(5)구간 (65.5m)	5.07	10.02	10.55	ENE	7.50	7.30	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	1.34	6.00	1.32	O.K	
		(6)구간 (17.0m)	5.07	10.02	10.55	ENE	7.50	7.30	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	1.35	6.21	1.32	O.K	
		(7)구간 (33.0m)	5.07	10.02	10.55	ENE	7.50	7.30	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 12.5	O.K	1.42	5.69	1.35	O.K	
		(8)~(11)구간 (180.0m)	5.48	10.04	10.56	ENE	5.50	5.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 16.0	O.K	1.06	5.17	1.53	N.G	
		(12)구간 (20.0m)	5.48	10.04	10.56	ENE	5.50	5.50	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 16.0	O.K	3.12	20.94	3.22	O.K	
		(13)구간 (60.0m)	5.79	10.08	10.56	ENE	5.50	5.50	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 20.0	O.K	3.63	21.84	2.30	O.K	
		(14)구간 (55.0m)	5.79	10.08	10.56	ENE	5.50	5.50	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 16.0	O.K	1.76	7.84	1.71	O.K	
	(15)구간 (35.0m)-두부	5.79	10.08	10.56	ENE	5.50	5.50	O.K	T.T.P 50.0	T.T.P 25.0	O.K	2.18	9.18	2.60	O.K		
	방사제 (361.0m)	(1)구간 (123.0m)	0.66	3.28	10.04	ESE	2.81	1.80	O.K	트라이바 3.0TON	피복석 0.2m ³	O.K	159.96	3137.50	2.17	O.K	
		(2)~(3)구간 (38.0m)	0.54	3.16	10.05	ESE	2.50	1.60	O.K	트라이바 3.0TON	피복석 0.1m ³	O.K	200.85	3959.38	2.84	O.K	
		(4)구간 (182.0m)	3.69	8.81	10.05	E	2.50	3.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 6.3	O.K	0.90	4.16	1.43	N.G	
		(5)구간 (18.0m)-두부	3.69	8.81	10.05	E	3.50	3.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 8.0	O.K	2.13	14.61	2.87	O.K	

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고	
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정		
				Tm	Tp													
6. 포항항	구 항	북방파 호안 (521.7m)	1구간(161.0m)	1.49	4.81	10.60	E	2.50	3.00	N.G	피복석 0.8m ³	피복석 0.8m ³	O.K	-	-	-	-	
			2구간(139.0m)	2.14	5.34	9.88	E	4.00	3.50	O.K	T.T.P 5	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	-	
			3구간(106.9m)	2.32	5.41	9.88	E	3.00	4.00	N.G	T.T.P 5	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	-	
			1-1구간(114.8m)	2.40	5.57	9.88	E	5.90	4.00	O.K	T.T.P 10	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	-	
	북방파제 (505.7m)	1-2, 1-3구간 (69.5m)	2.50, 2.50	5.62, 5.62	9.88	E, E	5.90, 5.90	3.00 3.00	O.K O.K	T.T.P 10, T.T.P 25.0	T.T.P 3.2, T.T.P 3.2	O.K O.K	13.36 12.28	93.77 89.45	3.25 3.13	O.K O.K		
		1-4구간(103.4m)	2.57	5.65	9.88	E	4.50	3.00	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 3.2	O.K	7.77	37.83	2.84	O.K		
		1-5구간(84.3m)	2.60	5.70	9.88	E	4.50	3.00	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 3.2	O.K	3.14	17.50	2.21	O.K		
		2-1구간(130.6m)	2.71	5.77	9.89	E	4.50	3.00	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 3.2	O.K	5.93	39.73	2.30	O.K		
		2-2구간(106.7m)	2.74	5.78	9.89	E	4.50	3.00	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 3.2	O.K	5.41	37.60	2.35	O.K		
		두부구간(11.2m)	2.74	5.78	9.89	E	4.50	3.00	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 5.0	O.K	5.58	38.12	4.18	O.K		
	신 항	동방파제	300.0m	3.60	6.41	9.26	NE	4.00	3.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 8.0	O.K	2.92	28.86	2.30	O.K	
		동방파 호안 (1,037m)	1구간(250.0m)	3.54	6.34	9.27	NE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 8.0	O.K	-	-	-	-	
	영 일 만 신 항	북방파제 (3,100m)	A-TYPE(1,408 m)	6.58	8.67	9.87	NE	5.00	5.50	N.G	T.T.P 5.00	T.T.P 16.0	N.G	3.18	43.56	2.40	O.K	
			B-TYPE(792m)	6.60	8.66	9.87	NE	4.50	5.50	N.G	T.T.P 3.20	T.T.P 16.0	N.G	2.69	37.04	2.12	O.K	
			C1-TYPE(450m)	6.57	8.66	9.88	ENE	4.50	5.50	N.G	T.T.P 3.20	T.T.P 16.0	N.G	2.41	30.25	2.05	O.K	
			C2-TYPE(450m)	6.43	8.74	9.88	ENE	4.50	5.50	N.G	T.T.P 3.20	T.T.P 32.0	N.G	2.25	28.29	2.17	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고		
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활 동 (1.2)	판정			
				Tm	Tp														
7. 울산항	본 항	동방파 제 (646m)	A구간(247m)	8.45	10.01	11.08	SSE	6.50	7.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 20.0	N.G	2.98	33.75	1.69	O.K		
			B구간(190m)	8.37	10.05	11.08	SSE	4.50	7.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 25.0	N.G	6.89	116.21	1.66	O.K		
			C구간(209m)	8.32	10.19	11.08	SE	6.50	7.00	N.G	T.T.P 5.0	S/L 70.0	N.G	2.82	25.04	1.57	O.K		
	신	중앙 방파제 (400m)	제간부 A구간(120m)	5.97	9.99	10.45	E	7.00	5.50	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 32	N.G	5.84	19.74	1.54	O.K		
			제간부 B구간(200m)	6.54	10.29	10.45	E	7.00	6.00	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 40	N.G	4.80	26.87	1.63	O.K		
			제두부 A-1구간(20m)	5.79	9.94	10.45	E	7.50	5.50	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 40	O.K	9.19	42.80	1.68	O.K		
			제두부 A-2구간(20m)	5.79	9.94	10.45	E	7.50	5.50	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 40	O.K	9.19	42.80	1.69	O.K		
			제두부 B구간(40m)	6.54	10.29	10.45	E	7.50	6.00	O.K	T.T.P 50.0	T.T.P 64	N.G	6.60	26.76	1.66	O.K		
		항	중앙 방파호 안 (500m)	제간부 A구간(300m)	5.33	9.70	10.45	E	7.00	7.00	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 20	O.K	4.36	14.48	1.75	O.K	
				제간부 B구간(160m)	5.47	9.60	10.45	E	7.00	7.50	N.G	T.T.P 25.0	T.T.P 20	O.K	7.21	27.05	1.68	O.K	
				제두부 A구간(20m)	5.31	9.63	10.45	E	7.50	7.00	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 32	O.K	12.76	70.34	1.96	O.K	
	제두부 B구간(20m)	5.62		9.33	10.45	E	7.50	7.50	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 40	O.K	13.66	77.86	1.81	O.K			

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
7. 울산항	남방파제 1공구 (1,000m)	간부 A구간(970m)	9.55	10.26	10.63	SE	8.00	7.50	O.K	S/L 80.0	S/L 100	N.G	5.70	118.80	1.23	O.K	
		두부 B구간(30m)	9.55	10.26	10.63	SE	7.50	7.50	O.K	S/L 80.0	S/L 100	N.G	2.64	7.39	2.40	O.K	
	남방파제 2공구 (1,100m)	간부 A구간(560m)	9.36	10.35	10.63	SE	8.50	7.50	O.K	삼각블록 7.0	삼각블록 10	N.G	3.47	46.96	1.50	O.K	
		간부 B구간(507.7 m)	9.24	10.37	10.63	SE	8.50	7.50	O.K	삼각블록 7.0	삼각블록 10	N.G	3.45	46.79	1.55	O.K	
		두부 C구간(32.3m)	9.14	10.33	10.62	SE	8.50	7.50	O.K	삼각블록 7.0	삼각블록 15	N.G	2.49	34.07	1.71	O.K	
	범월갑 방파호안 (365m)	간부 A구간(130m)	5.35	10.47	10.63	SE	9.00	7.00	O.K	S/L 20.0	S/L 20	O.K	22.64	215.13	3.92	O.K	
		간부 B구간(150m)	6.58	9.99	10.89	SE	10.50	8.50	O.K	S/L 50.0	S/L 40	O.K	2.07	7.01	1.85	O.K	
		간부 C구간(85m)	6.85	9.82	10.89	SE	12.00	8.50	O.K	S/L 50.0	S/L 50	O.K	1.64	1.82	1.39	O.K	
	범월갑 방파제 (245m)	간부 A구간(145m)	6.84	9.72	10.89	SE	7.50	6.00	O.K	S/L 50.0	S/L 40	O.K	6.16	26.58	1.96	O.K	
		간부 B구간(54.2m)	6.20	9.22	10.90	SSE	7.50	5.50	O.K	S/L 50.0	S/L 30	O.K	7.77	38.88	2.03	O.K	
		두부 C구간(45.8m)	5.84	8.96	10.90	SSE	7.50	5.50	O.K	피복석 0.60m ³	피복석 0.70m ³	N.G	2.53	51.46	2.46	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설물별		구간별	설계과				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
				파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
					Tm	Tp												
8. 인천항	내항	갑문시설 외곽 방파제	216m	1.89	4.25	8.55	SW	12.50	12.50	O.K	피복석 0.8m ³	피복석 0.1m ³	O.K	2.98	9.31	1.62	O.K	
	역무선 항구 (600.88m)	역무선 항구 방파제	A구간(240m)	1.90	4.08	8.51	SW	11.50	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	3.28	21.45	2.95	O.K	
			B구간(286m)	2.01	4.14	8.53	SW	11.50	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	3.74	29.55	3.82	O.K	
			C구간(두부) (22m)	2.00	4.13	8.53	SW	11.50	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	13.28	98.90	7.12	O.K	
	보안 항구	남방파제 (700m)	A구간(166.5 m)	1.67	4.01	8.51	SW	11.00	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	2.64	16.80	2.06	O.K	
			B구간(293.5 m)	1.90	4.01	8.54	SW	11.50	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	2.68	19.98	2.26	O.K	
			C구간(228m)	1.95	4.06	8.55	SSW	11.50	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	2.23	18.54	2.26	O.K	
			두부(12m)	1.92	4.05	8.56	SSW	11.50	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	9.02	78.51	3.38	O.K	
	북방파제 (477m)	A구간(207m)	1.90	4.18	8.53	SW	12.50	12.50	O.K	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	3.01	9.39	1.41	O.K		
		B구간(270m)	2.03	4.16	8.57	SSW	11.00	12.50	N.G	피복석 0.2m ³	피복석 0.1m ³	O.K	2.15	13.53	1.34	O.K		

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
9. 평택항	관리부두 방파제	166m	1.92	3.88	6.16	S	10.00	13.00	N.G	피복석 0.3m ³	피복석 0.1m ³	O.K	1.01	9.65	1.84	N.G	
10. 대산항	관리부두 서 방파제 (660m)	A구간(330m)	1.88	4.31	4.87	NNW	10.50	10.50	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 2.0	O.K	2.90	8.88	1.59	O.K	
		B구간(312m)	1.96	4.39	4.86	NW	10.50	10.50	O.K	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	4.06	30.05	2.71	O.K	
		두부구간(18m)	1.93	4.41	4.86	NW	10.50	10.50	O.K	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	5.70	50.47	3.33	O.K	
	서측호 안 (320m)	일반구간(220m)	1.47	4.10	5.20	NNW	11.00	11.00	O.K	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	11.65	61.09	-	-	
		접속구간(100m)	1.51	4.07	5.20	NNW	11.00	11.00	O.K	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	10.30	50.65	-	-	
11. 보령항	방파제시설 없음																
12. 태안항	방파제시설 없음																
13. 군산항	북방파제 (3,000.0m)	(1)구간 (30.0m)-두부	3.80	6.60	8.44	W	10.50	11.60	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 16.0	O.K	2.54	11.44	1.99	O.K	
		(2)구간 (2,970.0m)	3.80	6.60	8.44	W	10.50	11.60	N.G	T.T.P 20.0	T.T.P 10.0	O.K	1.92	7.14	1.60	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
14. 장항항	방파제시설 없음																
15. 목포항	방파제시설 없음																
16. 완도항	북 방파제 (300.0m)	(1)구간 (293.0m)	1.91	4.47	11.74	N	5.50	6.40	N.G	피복석 1.0m ³	피복석 0.3m ³	O.K	1.98	4.04	1.44	O.K	
		(2)구간 (7.0m)-두부	1.91	4.47	11.74	N	5.50	6.40	N.G	피복석 1.0m ³	피복석 0.5m ³	O.K	3.07	9.76	1.63	O.K	
	남 방파제 (250.0m)	(1)구간 (234.0m)	3.50	13.08	13.08	SSE	8.00	8.50	N.G	피복석 0.4m ³	피복석 0.01m ³	O.K	0.86	1.06	1.13	N.G	
		(2)구간 (16.0m)-두부	3.50	13.08	13.08	SSE	8.00	8.50	N.G	피복석 0.7m ³	피복석 0.1m ³	O.K	1.16	2.22	1.62	N.G	
17. 광양항	방파제시설 없음																

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활 동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
18. 여수항	서방파제 (768.0m)	(1)구간 (361.0m)	4.38	13.08	13.45	ESE	9.00	9.00	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 10.0	O.K	2.14	3.59	-	O.K	
		(2)구간 (407.0m)	4.21	13.08	13.45	ESE	8.50	8.50	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 10.0	O.K	1.54	5.68	-	O.K	
	동방파제 (418.0m)	(1)구간 (148.0m)	4.21	13.08	13.45	ESE	6.00	8.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 10.0	O.K	0.82	1.85	1.05	N.G	
		(2)구간 (215.0m)	4.45	13.08	13.45	ESE	7.50	8.80	N.G	T.T.P 20.0	T.T.P 8.0	O.K	1.22	3.40	1.43	O.K	
		(3)구간 (55.0m)-두부	4.45	13.08	13.45	ESE	8.80	8.80	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 12.5	O.K	1.58	6.05	2.56	O.K	
	북방파제 (830.0m)	(1)~(5)구간 (830.0m)	보강 공사중														
	파제제 (407.0m)	(1)구간 (407.0m)	개발계획으로 파제제 기능 상실														
	구항방파제 (100.0m)	(1)구간 (88.0m)	1.71	5.85	11.17	ESE	5.80	6.50	N.G	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	2.43	3.53	1.74	O.K	
		(2)구간 (12.0m)-두부	1.71	5.85	11.17	ESE	5.80	6.50	N.G	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	4.18	8.21	2.49	O.K	
19. 마산항																	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설물별		구간별	설계과			마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고	
				파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)		판정
					Tm	Tp												
20. 삼천포항	신 항	남방과제 (450m)	A구간(160m)	3.65	7.65	11.62	SSE	6.50	7.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 6.3	O.K	2.57	12.15	2.14	O.K	
			B구간(140m)	3.58	7.65	11.62	SSE	6.50	7.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 6.3	O.K	5.36	28.71	1.92	O.K	
			C구간(113m)	3.41	7.65	11.61	SSE	6.50	7.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 5.0	O.K	12.45	84.74	1.72	O.K	
			D구간(24m)	3.35	7.65	11.60	SSE	6.50	7.50	N.G	T.T.P 20.0	T.T.P 5.0	O.K	12.94	89.87	1.72	O.K	
			E구간(두부구간) (13m)	3.25	7.65	11.60	SSE	6.50	7.50	N.G	T.T.P 20.0	T.T.P 8.0	O.K	19.86	204.29	1.86	O.K	
	구 항	동방과제 동방과호안 서방과제	250m	2.12	4.47	8.82	S	6.00	6.50	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 2.0	O.K	32.66	254.15	1.91	O.K	
			225m	2.07	4.47	8.81	SE	6.40	7.50	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	O.K	
			210m	2.12	4.47	8.82	S	4.50	6.50	N.G	피복석 1.0m ³	피복석 0.5m ³	O.K	0.98	3.22	0.85	N.G	
	삼 천 포 화 력 발 전 소	방과제 (1,205m)	A-1구간(800m)	4.43	13.08	13.08	S	5.50	8.00	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 10.0	O.K	1.02	3.18	1.42	N.G	
			A-2구간(100m)	4.30	13.08	13.08	S	5.50	8.00	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 10.0	O.K	1.03	3.23	1.73	N.G	
A-3구간(40m) (두부)			4.28	13.08	13.08	S	5.50	8.00	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 10.0	O.K	1.35	4.77	1.95	O.K		
B-1구간(225m)			3.99	11.44	11.78	S	6.00	8.00	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 8.0	O.K	-	-	-	-		
B-2구간(40m) (두부)			3.81	7.65	11.79	S	6.00	7.50	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 12.5	O.K	-	-	-	-		

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고	
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정		
				Tm	Tp													
21. 통영항	동호항	서방파제	160m	1.85	5.11	13.95	SE	4.10	6.00	O.K	피복석 0.4m ³	피복석 0.2m ³	O.K	2.04	14.04	1.93	O.K	
		동방파제 (200m)	A구간(111.2m)	2.54	5.11	12.72	SSE	6.00	7.50	N.G	피복석 1.0m ³	피복석 0.7m ³	O.K	-	-	-		
			B구간(78.8m)	2.60	5.11	12.72	SSE	6.00	6.50	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 3.2	O.K	67.80	845.03	1.80	O.K	
			C구간(10.0m) (두부)	2.60	5.11	12.72	SSE	6.70	6.50	O.K	T.T.P 3.2	T.T.P 5.0	N.G	-	-	-		
	남방파제 (650m)	A구간(330m)	2.54	5.11	12.70	SSE	6.00	7.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	5.87	28.35	-			
		B구간(320m)	2.66	4.77	12.72	SSE	6.00	6.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 4.0	O.K	5.78	16.27	1.23	O.K		
	도남항	동방파제	320m	2.08	4.77	10.07	ESE	4.00	6.50	N.G	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	1.39	0.77	2.31	N.G	
		서방파제	172m	1.98	5.11	10.07	ENE	4.00	6.50	N.G	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	1.37	0.76	1.57	N.G	
		중앙방파제	135m	2.04	5.11	10.07	ENE	4.00	6.50	N.G	피복석 0.1m ³	피복석 0.1m ³	O.K	1.37	0.76	1.57	N.G	
22. 고흔항	방파제시설 없음																	
23. 장승포항	서방파제	145m	3.40	11.38	13.57	SE	4.50	5.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 5.0	O.K	18.39	229.68	2.62	O.K		
	동방파제	86m	4.19	11.02	13.57	SE	4.50	6.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 8.0	O.K	11.35	110.30	2.20	O.K		
24. 옥포항	남방파제	1,000m	4.09	6.32	8.44	ENE	4.00	6.00	N.G	T.T.P 6.3	T.T.P 12.5	N.G	328.20	3759.0 4	1.64	O.K		
	북방파제	385m	4.29	6.42	8.15	ENE	4.00	6.50	N.G	T.T.P 6.3	T.T.P 16.0	N.G	327.75	3752.6 6	1.64	O.K		
25. 진해항	방파제시설 없음																	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
26. 부산항	북향	오륙도 방파제 (1,004m)	A구간(662m)	9.87	11.14	12.50	SE	10.50	9.00	O.K	T.T.P 4.0	SEALOCK 100.0	N.G	1.93	2.01	1.52	O.K
			B구간(342m)	10.11	11.03	12.48	SE	10.50	9.00	O.K	T.T.P 8.0	SEALOCK 100.0	N.G	1.36	2.44	1.61	O.K
		조도 방파제 (700m)	A구간(306m)	9.28	10.98	12.58	SSE	6.00	8.50	N.G	T.T.P 12.5	SEALOCK 80.0	N.G	1.07	1.75	1.63	N.G
			B구간(394m)	10.11	11.34	12.56	SSE	6.00	9.00	N.G	T.T.P 12.5	SEALOCK 100.0	N.G	0.85	1.25	1.38	N.G
		남방파제	간부(451m)	2.71	6.28	9.94	E	2.90	4.50	N.G	피복석 0.3m ³	피복석 0.5m ³	N.G	2.12	4.31	2.88	O.K
		감천항	서방파제 (650m)	A구간(110m)	6.56	10.15	10.15	SE	5.00	9.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 40.0	N.G	-	-	-
	B구간(390m)			8.10	10.70	12.85	SSE	6.30	8.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 25.0	N.G	1.22	2.51	1.84	O.K
	C구간(150m)			8.26	10.66	12.85	SSE	6.40	8.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 72.0	N.G	1.13	3.84	1.67	N.G
	동방파제 (500m)		A구간(100m)	5.28	8.89	12.88	S	5.80	8.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 3.2	O.K	-	-	-	-
			B구간(366m)	7.69	10.45	12.86	S	5.80	7.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 20.0	N.G	1.18	2.24	1.74	N.G
			C구간(34m)	7.69	10.45	12.86	S	5.80	7.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 32.0	N.G	1.24	2.36	2.70	O.K

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
27. 제주항	서방파제 (2,090.0m)	(1)구간 (150.0m)	1.66	7.27	7.57	WNW	5.00	5.50	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 3.2	O.K	-	-	-	-	
		(2)구간 (240.0m)	3.10	8.85	9.87	N	5.50	6.70	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 3.2	O.K	-	-	-	-	
		(3)구간 (260.0m)	4.68	10.22	10.47	N	8.10	8.10	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	1.93	5.65	1.64	O.K	
		(4)구간 (90.0m)	4.85	10.31	10.47	N	8.10	8.10	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	1.94	5.82	2.15	O.K	
		(5)구간 (38.2m)	4.85	10.31	10.47	N	8.10	8.10	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	1.88	6.43	1.70	O.K	
		(6)구간 (58.5m)	5.12	10.47	10.47	N	8.10	8.10	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 20.0	O.K	1.86	5.10	1.67	O.K	
		(7)구간 (33.3m)	5.12	10.47	10.47	N	8.10	8.10	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 20.0	O.K	1.89	5.22	1.67	O.K	
		(8)~(10)구간 (768.2m)	6.22	9.22	10.03	NNW	8.10	8.10	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 25.0	N.G	1.85	6.23	1.81	O.K	
		(11)구간 (121.8m)	6.51	9.10	10.05	NW	8.10	8.10	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 40.0	N.G	1.79	6.09	1.57	O.K	
		(12)구간 (30.0m)	6.64	9.13	10.05	NNW	8.10	8.10	O.K	T.T.P 25.0	SEALOCK 40.0	N.G	1.76	5.94	1.72	O.K	
		(13)구간 (170.0m)	7.19	9.20	10.07	NNW	8.10	8.10	O.K	T.T.P 25.0	SEALOCK 60.0	N.G	1.65	5.53	1.55	O.K	
		(14)구간 (30.0m)	7.19	9.20	10.07	NNW	8.10	8.10	O.K	T.T.P 32.0	SEALOCK 60.0	N.G	1.65	4.98	1.77	O.K	
		(15)구간 (33.0m)	7.19	9.20	10.07	NNW	6.80	8.10	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 64.0	N.G	1.21	4.84	1.64	O.K	
		(16)구간 (27.0m)	7.40	9.29	10.05	NW	8.00	8.50	N.G	T.T.P 50.0	T.T.P 64.0	N.G	1.10	3.37	1.68	N.G	
		(17)구간 (40.0m)-두부	7.51	9.33	10.05	NW	8.00	8.50	N.G	T.T.P 64.0	SEALOCK 100.0	N.G	1.93	9.09	2.04	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파			마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고	
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)		판정
				Tm	Tp												
27. 제주항	동방파제 (1,000.0m)	(1)~(7)구간 (730.0m)	개발계획으로 방파제 기능 상실														
		(8)구간 (220.0m)	5.64	8.92	9.85	NNE	6.00	9.30	N.G	T.T.P 20.0	T.T.P 25.0	N.G	0.79	3.32	1.36	N.G	
		(9)구간 (30.0m)	5.64	8.92	9.85	NNE	6.00	7.00	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 25.0	O.K	0.99	3.85	1.39	N.G	
		(10)구간 (20.0m)- 두부	5.83	9.26	9.86	NNE	6.00	7.20	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 40.0	N.G	1.08	4.00	1.97	N.G	
	연육 방파제 (400.0m)	(1)구간 (80.0m)	2.47	8.45	9.01	NW	8.00	6.70	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 4.0	O.K	3.98	19.07	2.41	O.K	
		(2)구간 (300.0m)	3.29	9.10	9.89	NNE	8.70	7.70	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 5.0	O.K	2.78	11.42	2.07	O.K	
		(3)구간 (20.0m)- 두부	3.29	9.10	9.89	NNE	9.70	7.70	O.K	T.T.P 32.0	T.T.P 8.0	O.K	6.31	25.88	2.52	O.K	
돌제	(16)구간 (40.0m)	3.10	8.85	9.87	N	7.00	7.00	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 5.0	O.K	3.10	12.13	2.38	O.K		

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활 동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
28. 서귀포항	서방파제 (280m)	A구간(250m) (간부)	2.81	8.95	11.64	SSW	6.50	6.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	22.04	227.91	2.77	O.K	
		B구간(30m) (두부)	2.70	8.58	10.54	SSW	4.00	7.00	N.G	피복석 0.4m ³	T.T.P 10.0	N.G	-	-	-	-	
	남방파제 (387.5m)	A구간(44m)	7.90	11.12	11.64	SSW	7.50	13.00	N.G	T.T.P 32.0	50.0	N.G	-	-	-		
		B구간(196m)	7.90	11.12	11.64	SSW	8.00	9.00	N.G	T.T.P 64.0	64.0	O.K	-	-	-		
		C구간 (17.5m, 연결구간)	8.28	10.85	12.18	SE	8.50	9.00	N.G	T.T.P 64.0	64.0	O.K	-	-	-		
		D구간(85.1m)	8.28	10.85	12.18	SE	8.50	9.00	N.G	T.T.P 64.0	64.0	O.K	-	-	-		
		E구간(44.9m) (두부)	8.28	10.85	12.18	SE	8.50	9.00	N.G	T.T.P 64.0	T.T.P 72.0	N.G	3.12	39.99	2.87	O.K	
		A구간(72.4m)	10.00	11.31	12.18	SSE	8.50	14.00	N.G	T.T.P 64.0	SEALOCK 100.0	N.G	-	-	-		
	외항 방파제 (670m)	B구간(527.6m)	10.07	11.28	12.18	SSE	15.00	14.00	O.K	T.T.P 72.0	SEALOCK 100.0	N.G	-	-	-		
		C구간(50.0m)	9.63	11.16	12.20	SSE	8.50	13.00	N.G	T.T.P 72.0	SEALOCK 100.0	N.G	0.64	1.46	1.18	N.G	
		D구간(20.0m) (두부)	9.63	11.16	12.20	SSE	8.50	10.00	N.G	T.T.P 72.0	SEALOCK 100.0	N.G	0.94	2.84	1.77	N.G	
		A구간(95m)	3.63	9.53	12.18	ESE	5.00	7.50	N.G	피복석 1.0m ³	T.T.P 10.0	N.G	-	-	-		
	동방파 호안 (511m)	B구간(285m)	5.13	10.08	12.18	SE	5.00	9.00	N.G	피복석 1.0m ³	T.T.P 20.0	N.G	-	-	-		
		C구간(71.4m)	5.77	10.43	12.18	SSE	6.00	10.00	N.G	T.T.P 10.0	25.0	N.G	-	-	-		
D구간(59.6m)		5.77	10.43	12.18	SSE	7.00	10.00	N.G	T.T.P 25.0	25.0	O.K	-	-	-			

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

(2) 연안항 정밀안전성 평가결과

표 3.6.12 연안항 정밀안전성 평가 결과

항별	시설물별	구간별	설계과				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
1. 주문진항	동방파제 (920m)	(1)구간 (140.0m)	2.49	7.20	8.10	SE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 5.0	피복석 0.5m ³	O.K	-	-	-	-	
		(2)~(3)구간 (35.0m)	2.66	6.84	8.10	SE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 5.0	피복석 0.9m ³	O.K	-	-	-	-	
		(4)구간 (35.0m)	2.67	6.81	8.10	SE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 5.0	피복석 0.7m ³	O.K	2.09	4.16	2.33	O.K	
		(5)구간 (10.0m)	2.76	6.77	8.10	SE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 16.0	피복석 0.7m ³	O.K	3.13	10.97	3.01	O.K	
		(6)구간 (100.0m)	3.21	7.21	9.33	ESE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 3.2	O.K	1.98	12.88	1.95	O.K	
		(7)구간 (580.0m)	4.66	8.04	8.91	E	5.00	5.00	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 10.0	O.K	1.95	8.08	1.53	O.K	
		(8)구간 (20.0m)	4.65	8.04	8.91	E	5.00	5.00	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 16.0	O.K	1.96	8.12	2.65	O.K	
	제2돌체 (250m)	(1)구간 (140.0m)	3.54	8.10	9.26	ESE	2.00	3.10	N.G	피복석 0.5m ³	T.T.P 6.3	N.G	3.56	11.02	2.63	O.K	
		(2)구간 (100.0m)	3.54	8.10	9.26	ESE	2.00	3.10	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 8.0	N.G	1.52	7.68	1.96	O.K	
		(3)구간 (10.0m)	3.54	8.10	9.26	ESE	2.00	3.10	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 10.0	N.G	0.94	3.19	2.13	N.G	

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기 (sec)		파향	기준	금변	판정	기준	금변	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
2. 후포항	동방파호안 (446.0m)	A구간(70.0m)	2.72	10.53	10.57	E	5.00	4.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	-	
		B구간(376.0m)	3.82	9.34	10.39	SSE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 6.3	N.G	-	-	-	-	
	동방파제 (851.5m)	C구간(106.0m)	4.33	9.70	10.39	SSE	5.00	3.50	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 12.5	N.G	25.90	344.41	3.28	O.K	
		D구간(70.0m)	4.35	9.70	10.39	SSE	5.00	3.50	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 10.0	N.G	5.96	39.49	1.62	O.K	
		E구간(226.0m)	4.56	9.81	10.40	SSE	5.00	4.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 10.0	N.G	5.22	32.68	1.83	O.K	
		F구간(70.0m)	5.01	9.97	10.40	SSE	5.00	7.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 20.0	N.G	3.08	13.39	1.73	O.K	
		G구간(55.0m)	5.53	10.02	10.40	SSE	5.00	7.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 20.0	N.G	1.66	6.16	1.22	O.K	
		H구간(89.0m)	6.55	9.99	10.40	SSE	5.00	7.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 40.0	N.G	1.02	3.41	1.09	N.G	
		I구간(64.5m)	7.15	9.82	10.40	SSE	4.50	5.50	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 50.0	N.G	2.02	10.24	1.59	O.K	
		J구간(17.5m)	7.26	9.71	10.41	SSE	4.60	5.50	N.G	T.T.P 40.0	T.T.P 64.0	N.G	3.74	19.06	1.64	O.K	
		K구간(133.5m)	7.39	9.38	10.41	SSE	5.00	5.50	N.G	T.T.P 40.0	T.T.P 64.0	N.G	4.76	24.84	1.65	O.K	
		K(두부)구간 (20.0m)	7.39	9.38	10.41	SSE	5.00	5.50	N.G	T.T.P 50.0	SEALOC K 100.0	N.G	5.85	35.57	1.94	O.K	
	서방파제 (607.0m)	1구간(118.0m)	1.47	6.16	10.41	SSE	2.00	2.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 0.5	O.K	-	-	-	-	
		2구간(370.0m)	3.46	8.92	10.41	SSE	3.50	3.00	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 5.0	O.K	71.83	1756.28	3.54	O.K	
		3구간(104.0m)	3.90	8.87	10.41	SSE	3.50	3.50	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 8.0	O.K	2.33	10.41	2.01	O.K	
		4구간(15.0m)	3.92	8.77	10.41	SSE	3.50	3.50	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 10.0	O.K	7.54	57.85	2.06	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계과				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고	
			파고 (m)	주기 (sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정		
				Tm	Tp													
3. 구룡포항	북방파호안 (457.0m)	1구간(182.0m)	3.74	9.96	10.46	SE	5.00	5.00	O.K	T.T.P 8.0	T.T.P 6.3	O.K	-	-	-	-		
		2구간(125.0m)	4.51	10.46	10.46	SE	5.00	6.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	-	-	-	-		
		3구간(150.0m)	4.33	10.19	10.46	SE	5.00	6.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 10.0	O.K	-	-	-	-		
	북방파제 (120.0m)	4구간(110.0m)	3.86	9.75	10.20	E	3.50	3.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 6.3	O.K	2.17	8.76	1.63	O.K		
		5구간(10.0m)	3.31	9.24	10.20	E	4.10	3.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 6.3	O.K	4.37	22.01	2.42	O.K		
	남방파호안 (269.0m)	1구간(122.0m)	3.69	10.98	10.98	ESE	4.00	5.00	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 5.0	N.G	-	-	-	-		
		2구간(147.0m)	5.56	10.61	10.98	ESE	6.00	7.00	N.G	T.T.P 20.0	T.T.P 20.0	O.K	-	-	-	-		
	남방파제 (244.0m)	3구간(174.0m)	5.79	10.38	10.38	SE	4.00	5.00	N.G	T.T.P 25.0	T.T.P 25.0	O.K	1.83	8.30	1.63	O.K		
		4구간(45.0m)	5.86	10.31	10.38	SE	4.00	5.00	N.G	T.T.P 25.0	T.T.P 25.0	O.K	1.63	6.71	1.71	O.K		
		5구간(25.0m)	5.92	10.26	10.38	SE	4.60	5.00	N.G	T.T.P 25.0	T.T.P 40.0	N.G	1.79	7.62	2.07	O.K		
4. 울릉항	도 동 항	북방파호안 (52.0m)	1구간(52.0m)	5.87	11.27	11.67	SE	10.00	7.00	O.K	T.T.P 32.0	T.T.P 32.0	O.K	-	-	-	-	
		북방파제 (92.6m)	2구간(28.8m)	5.64	11.38	11.67	SE	6.00	4.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 25.0	N.G	-	-	-	-	
			3구간(63.8m)	7.79	10.79	11.67	SE	6.00	6.00	O.K	T.T.P 32.0	T.T.P 64.0	N.G	-	-	-	-	
		남방파제 (40.0m)	1구간(7.5m)	6.62	11.67	11.67	SE	6.00	5.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 40.0	N.G	-	-	-	-	
			2구간(32.5m)	7.17	11.53	11.67	SE	6.00	5.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 50.0	N.G	-	-	-	-	

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기 (sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
4. 울릉항	남방파호안 (147.0m)	A구간(100.0m)	4.29	12.07	12.07	ESE	6.00	5.50	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 12.5	O.K	-	-	-	-	
		B-1구간(47.0m)	5.28	12.02	12.07	ESE	6.00	6.50	N.G	T.T.P 25.0	T.T.P 20.0	O.K	-	-	-	-	
	남방파제 (603.0m)	B-2구간(53.0m)	6.27	11.97	11.97	ESE	6.00	5.00	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 32.0	N.G	3.25	21.67	1.66	O.K	
		C구간(190.9m)	8.80	11.80	11.97	ESE	6.00	6.50	N.G	T.T.P 40.0	SEALOCK 80.0	N.G	2.46	17.84	1.61	O.K	
		D구간(259.1m)	9.64	11.38	11.97	ESE	9.00	7.00	O.K	피복석 0.2m ³	SEALOCK 100.0	N.G	1.17	1.90	1.44	N.G	
		E구간(80.0m)	10.06	10.95	11.97	ESE	7.00	7.50	N.G	T.T.P 50.0	SEALOCK 100.0	N.G	1.87	6.36	1.55	O.K	
		F구간(20.0m)	10.12	10.94	11.97	ESE	7.00	7.50	N.G	T.T.P 50.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.64	11.90	2.15	O.K	
		북방파호안 (413.0m)	A구간(33.0m)	3.46	11.62	11.62	ESE	3.00	5.00	N.G	피복석 0.5m ³	T.T.P 6.3	N.G	-	-	-	-
	B구간(50.0m)		3.46	11.62	11.62	ESE	4.00	5.00	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 6.3	O.K	-	-	-	-	
	C구간(150.0m)		6.40	11.59	11.62	ESE	7.50	7.50	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 32.0	N.G	-	-	-	-	
	D구간(70.0m)		6.40	11.59	11.62	ESE	6.50	7.50	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 32.0	N.G	-	-	-	-	
	E구간(80.0m)		6.40	11.59	11.62	ESE	5.00	7.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 32.0	N.G	-	-	-	-	
	F구간(30.0m)		3.10	9.70	10.43	E	5.00	7.50	O.K	T.T.P 8.0	T.T.P 5.0	O.K	-	-	-	-	
	5. 용기포항	방파제 (140.0m)	A-1구간(20.0m)	3.40	6.71	9.98	SSE	6.68	8.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 8.0	O.K	-	-	-	-
A-2구간(20.0m)			3.40	6.71	9.98	SSE	6.65	8.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 8.0	O.K	-	-	-	-	
B구간(40.0m)			3.36	6.80	9.98	SSE	6.50	8.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 6.3	O.K	-	-	-	-	
C구간(30.0m)			3.21	6.77	9.98	SSE	6.00	8.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 5.0	O.K	-	-	-	-	
D구간(30.0m)			3.27	6.89	9.98	SSE	6.00	8.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 5.0	O.K	-	-	-	-	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설물별	구간별	설계과				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기 (sec)		파향	기존	금변	판정	기존	금변	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
6. 연평도항	동방파제 (392.4m)	전구간(392.4m)	2.37	4.74	5.87	ESE	10.00	10.00	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 3.2	O.K	4.93	16.44	1.82	O.K	
	남방파호안 (145.9m)	A구간(96.9m)	2.32	4.73	5.87	ESE	9.00	11.00	N.G	T.T.P 1.0	T.T.P 3.2	N.G	-	-	-	-	
		B-1구간(49.0m)	2.37	4.70	5.87	ESE	9.00	11.00	N.G	T.T.P 2.0	T.T.P 3.2	N.G	-	-	-	-	
	남방파제 (104.1m)	B-2구간(43.0m)	2.38	4.70	5.87	ESE	9.00	11.00	N.G	T.T.P 2.0	T.T.P 3.2	N.G	4.63	26.89	2.13	O.K	
		C구간(61.1m)	2.40	4.71	5.87	ESE	9.00	11.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	3.93	19.24	1.88	O.K	
	서방파제 (348.7m)	A구간(91.8m)	2.02	5.07	10.36	S	8.60	10.00	N.G	T.T.P 4.0	T.T.P 2.0	O.K	1.02	5.88	1.81	N.G	
		B구간(82.2m)	2.05	5.08	10.37	S	8.60	10.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 2.0	O.K	0.96	3.08	1.97	N.G	
C구간(174.7m)		1.66	4.41	8.50	SSE	8.00	9.50	N.G	T.T.P 4.0	T.T.P 2.0	O.K	1.36	11.45	2.42	O.K		
7. 대천항	북방파제 (920.0m)	A구간(60.0m)	2.25	5.55	8.61	SSW	11.10	10.50	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	-	-	-	-	
		B구간(810.0m)	2.09	4.98	8.06	WSW	10.60	10.50	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	-	
		C구간(50.0m)	2.09	4.98	8.06	WSW	11.10	10.50	O.K	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	-	-	-	-	
	서방파호안 (132.0m)	A구간(132.0m)	2.46	5.86	8.61	SSW	9.00	11.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	-	
	서방파제 (168.0m)	B구간(115.0m)	2.43	5.73	8.61	SSW	9.00	11.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 2.0	O.K	2.43	31.05	1.52	O.K	
C구간(53.0m)		2.32	5.67	8.61	SSW	9.00	11.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 3.2	O.K	8.48	184.78	2.85	O.K		
8. 비인항	동방파제 (350.0m)	1구간(10.0m)	1.39	3.13	5.59	E	7.70	9.50	N.G	피복석 0.40m ³	피복석 0.20m ³	O.K	3.21	14.50	2.53	O.K	
		2구간(125.0m)	1.40	3.15	5.59	E	7.50	9.50	N.G	피복석 0.20m ³	피복석 0.10m ³	O.K	0.82	2.66	1.72	N.G	
		3구간(120.0m)	1.44	3.19	5.59	E	7.50	9.50	N.G	피복석 0.20m ³	피복석 0.10m ³	O.K	0.77	2.19	1.77	N.G	
		4구간(85.0m)	1.50	3.51	5.59	ESE	7.50	9.50	N.G	피복석 0.20m ³	피복석 0.20m ³	O.K	0.64	1.11	1.46	N.G	
		5구간(10.0m)	1.56	3.54	5.59	ESE	7.70	9.50	N.G	피복석 0.40m ³	피복석 0.20m ³	O.K	2.73	12.11	2.22	O.K	
	남방파호안 (274.5m)	1구간(219.5m)	3.26	5.71	7.54	SSW	9.80	12.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 6.3	N.G	-	-	-	-	
		2구간(55.0m)	3.22	5.64	7.52	SSW	9.80	12.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 6.3	N.G	-	-	-	-	
	남방파제 (255.0m)	3구간(240.0m)	3.19	5.62	7.52	SSW	9.80	10.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 6.3	N.G	4.96	16.68	1.84	O.K	
4구간(15.0m)		2.82	5.46	7.52	SSW	9.80	10.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 6.3	N.G	8.35	39.56	2.44	O.K		

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금변	판정	기존	금변	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
9. 대흑산도항	북방파제 (250m)	(1)구간 (238.0m)	1.93	4.58	6.83	NE	6.50	6.50	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 10.0	O.K	3.64	31.37	1.62	O.K	
		(2)구간 (12.0m)-제두부	1.95	4.54	6.83	NE	6.50	6.50	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 10.0	O.K	5.21	54.26	1.72	O.K	
	남방파제 (320m)	(1)구간 (120.0m)-방파 호안	1.60	4.59	8.43	N	8.50	8.50	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 10.0	O.K	-	-	-	-	
		(2)구간 (180.0m)	1.90	4.69	6.83	NE	8.50	8.50	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 10.0	O.K	7.05	48.12	1.70	O.K	
		(3)구간 (20.0m)-제두부	1.91	4.63	6.83	NE	8.50	8.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 12.5	O.K	5.59	30.54	2.14	O.K	
	중앙방파제 (500m)	(1)구간 (90.0m)	0.98	3.44	6.83	NE	5.50	5.50	O.K	피복석 0.6m ³	피복석 0.6m ³	O.K	7.20	55.84	2.07	O.K	
		(2)구간 (50.0m)	0.98	3.44	6.83	NE	5.50	5.50	O.K	피복석 0.6m ³	피복석 0.6m ³	O.K	7.20	55.84	2.07	O.K	
		(3)구간 (340.0m)	0.98	3.44	6.83	NE	5.50	5.50	O.K	피복석 0.6m ³	피복석 0.6m ³	O.K	7.20	55.84	2.07	O.K	
		(4)구간 (20.0m)	0.98	3.44	6.83	NE	5.50	5.50	O.K	피복석 0.6m ³	피복석 0.6m ³	O.K	7.20	55.84	2.07	O.K	
	내영산도 방파제 (150m)	(1)구간 (130.0m)	2.55	8.60	9.90	NW	5.50	6.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 5.0	O.K	1.37	8.70	1.46	O.K	
		(2)구간 (20.0m)-제두부	2.73	8.94	9.91	NW	5.50	6.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 5.0	O.K	1.18	7.19	1.74	N.G	
	외영산도 방파제 (123m)	(1)구간 (20.0m)	2.36	8.78	9.89	NW	5.50	6.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 5.0	O.K	1.55	10.30	1.52	O.K	
		(2)구간 (50.0m)	2.36	8.78	9.89	NW	5.50	6.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 5.0	O.K	1.55	10.30	1.52	O.K	
		(3)구간 (53.0m)	2.36	8.78	9.89	NW	5.50	6.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 5.0	O.K	1.55	10.30	1.52	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고(m)	주기(sec)		파향	기준	금번	판정	기준	금번	판정	활동(1.2)	전도(1.2)	직선활동(1.2)	판정	
				Tm	Tp												
10. 홍도항	방파제(100m)	(1)구간(100.0m)	5.28	10.63	11.32	SE	8.00	7.50	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 20.0	O.K	1.74	6.60	1.70	O.K	
		(2)구간(80.0m)	5.62	10.54	11.32	SE	8.00	7.70	O.K	T.T.P 50.0	T.T.P 32.0	O.K	1.79	7.23	2.17	O.K	
	방파호안	(1)구간(20.0m)	4.35	10.42	11.31	SE	10.00	8.60	O.K	T.T.P 40.0	T.T.P 10.0	O.K	2.87	9.22	-	O.K	
11. 팽목항	방파제시설 없음																
12. 화흥포항	정도항 방파제(84m)	(1)구간(74.0m)	3.31	6.95	10.32	SSW	7.70	7.70	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 10.0	O.K	2.21	9.04	1.56	O.K	
		(2)구간(10.0m)-제두부	3.76	7.85	10.99	SSE	7.70	7.70	O.K	T.T.P 10.0	T.T.P 12.5	N.G	1.75	6.91	1.95	O.K	
	정도항 파제제(80m)	(1)구간(70.0m)	2.84	5.24	10.54	SW	3.90	6.80	N.G	피복석 0.5m ³	T.T.P 5.0	N.G	-2.89	-128.93	1.70	N.G	
		(2)구간(10.0m)-제두부	2.89	5.25	10.54	SW	3.90	6.80	N.G	피복석 0.5m ³	T.T.P 8.0	N.G	-2.89	-128.93	1.68	N.G	
	대신항 방파제(140m)	(1)구간(130.0m)	2.68	5.32	10.54	SW	7.00	8.00	N.G	피복석 0.6m ³	T.T.P 4.0	N.G	3.22	13.99	1.56	O.K	
		(2)구간(10.0m)-제두부	2.68	5.32	10.54	SW	7.00	8.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 6.3	N.G	3.22	13.99	1.56	O.K	
13. 신마항	방파제시설 없음																
14. 갈두항	방파제(240m)	(1)구간(55.0m)	2.32	4.41	10.15	SSE	5.20	7.00	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 2.0	O.K	-	-	-	-	
		(2)구간(170.0m)	2.54	5.17	10.31	S	5.20	7.00	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 2.0	O.K	1.75	15.20	2.29	O.K	
		(3)구간(15.0m)	2.62	5.26	10.30	S	5.20	7.00	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 3.2	O.K	1.65	14.88	2.60	O.K	

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고(m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동(1.2)	전도(1.2)	직선활동(1.2)	판정	
				Tm	Tp												
15. 송공항	방파제시설 없음																
16. 녹동신항	방파제시설 없음																
17. 나로도항	동방파제	(1)구간 (100.0m)	2.15	4.64	8.38	SW	5.50	6.50	N.G	피복석 0.7m³	피복석 0.3m³	O.K	-	-	-	-	
	서방파제 (250m)	(1)구간 (150.0m)	2.56	5.42	8.32	SW	8.00	8.00	O.K	T.T.P 3.2	피복석 0.5m³	O.K	2.21	7.20	1.74	O.K	
		(2)구간 (80.0m)	2.47	5.17	8.34	SW	8.00	8.00	O.K	T.T.P 8.0	피복석 0.7m³	O.K	4.56	17.12	2.01	O.K	
		(3)구간 (20.0m)	2.44	5.11	8.36	SW	8.00	8.00	O.K	T.T.P 12.5	피복석 1.0m³	O.K	5.19	18.91	2.12	O.K	
	남측파제제	(1)구간 (113.0m)	2.30	5.13	8.25	SW	8.00	8.00	O.K	T.T.P 32.0	피복석 0.3m³	O.K	4.27	17.63	2.35	O.K	
	북측파제제 (241m)	(1)구간 (50.0m)	0.97	3.01	5.05	W	5.00	6.00	N.G	피복석 0.7m³	피복석 0.1m³	O.K	-	-	-	-	
(2)구간 (191.0m)		1.57	3.81	6.82	WSW	6.00	6.50	N.G	피복석 0.7m³	피복석 0.1m³	O.K	-	-	-	-		
18. 거문도항	동방파제 (970m)	(1)구간 (100.0m)	5.67	10.41	12.08	SSE	6.50	8.00	N.G	피복석 0.5m³	T.T.P 3.2	N.G	1.38	6.15	2.23	O.K	
		(2)구간 (200.0m)	5.81	10.32	12.07	SSE	6.50	8.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 32.0	N.G	2.48	2.19	2.03	N.G	
		(3)구간 (65.0m)	5.48	9.98	12.07	SSE	6.50	8.00	N.G	T.T.P 12.5	T.T.P 25.0	N.G	0.99	0.42	1.34	N.G	
		(4)구간 (20.0m)-제두부	3.35	8.71	12.62	ESE	6.50	6.50	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 16.0	O.K	1.30	6.73	1.70	N.G	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금변	판정	기존	금변	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판 정	
				Tm	Tp												
18. 거문도항	북방파제 (140m)	(1)구간 (120.0m)	3.14	6.32	6.62	NNE	5.00	6.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 5.0	O.K	0.96	4.50	1.33	N.G	
		(2)구간 (20.0m)-제 두부	3.14	6.32	6.62	NNE	5.00	6.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 8.0	N.G	1.52	11.14	2.06	O.K	
	남방파제 (130m)	(1)구간 (110.0m)	2.54	7.22	12.63	E	6.50	6.50	O.K	T.T.P 8.0	T.T.P 3.2	O.K	2.38	3.25	1.73	O.K	
		(2)구간 (20.0m)-제 두부	2.81	7.54	12.63	E	6.50	6.50	O.K	T.T.P 12.5	T.T.P 5.0	O.K	2.46	21.33	2.13	O.K	
	제1동방파제 (220m)	(1)구간 (200.0m)-방파호안	4.82	11.21	12.06	SE	5.00	9.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 12.5	N.G	-	-	-	-	
		(2)구간 (20.0m)-제 두부	4.64	11.04	12.05	ESE	5.00	9.50	N.G	T.T.P 6.3	T.T.P 16.0	N.G	-	-	2.55	O.K	
	제2동방파제 (180m)	(1)구간 (170.0m)-방파호안	1.67	4.91	8.47	ENE	5.00	6.30	N.G	4원주블록	4원주블록	O.K	-	-	-	-	
		(2)구간 (10.0m)-제 두부	1.76	5.07	8.47	ENE	5.00	6.30	N.G	4원주블록	4원주블록	O.K	3.11	62.67	1.69	O.K	
	제1서방파제 (110m)	(1)구간 (90.0m)	4.38	10.74	12.05	ESE	5.00	9.50	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 10.0	N.G	-	-	-	-	
		(2)구간 (20.0m)-제 두부	4.44	10.82	12.05	ESE	5.00	9.50	N.G	T.T.P 6.3	T.T.P 16.0	N.G	-	-	-	-	
	제2서방파제 (165m)	(1)구간 (155.0m)	2.13	5.48	8.47	ENE	5.00	6.00	N.G	4원주블록	4원주블록	O.K	2.27	26.91	1.90	O.K	
		(2)구간 (10.0m)-제 두부	2.01	5.41	8.47	ENE	5.00	6.00	N.G	4원주블록	4원주블록	O.K	2.87	40.50	1.96	O.K	
19. 부산남항	동방파제 (134.0m)	전구간(134.0m)	3.50	8.49	12.97	S	9.55	5.00	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 5.0	O.K	60.17	651.23	3.62	O.K	
	서방파제 (424.0m)	A구간(369.0m)	3.68	7.94	12.95	S	8.50	6.50	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 6.3	O.K	-	-	-	-	
		B구간(40.0m)	3.72	7.93	12.95	S	8.50	5.00	O.K	T.T.P 16.0	T.T.P 6.3	O.K	-	-	2.31	O.K	
		C구간(15.0m)	3.58	7.72	12.96	S	8.50	5.00	O.K	T.T.P 20.0	T.T.P 10.0	O.K	-	-	2.56	O.K	

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
20. 한림항	북방파제 (1,578m)	항외측 매립으로 방파제 기능상실															
		(2)~(3)구간 (170.0m)	3.87	9.03	10.27	WNW	4.50	6.00	N.G	피복석 0.6m ³	T.T.P 4.0	N.G	2.51	24.35	2.61	O.K	
		(4)구간 (570.0m)	4.13	9.50	9.94	NW	4.50	6.00	N.G	피복석 0.6m ³	T.T.P 4.0	N.G	-0.35	-33.47	2.13	N.G	
		(5)구간 (110.0m)	3.97	8.15	9.57	WNW	6.00	6.00	O.K	T.T.P 8.0	T.T.P 6.3	O.K	1.35	5.30	1.39	O.K	
		(6)구간 (220.0m)	4.39	8.23	9.57	WNW	6.00	6.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 12.5	N.G	1.41	4.30	1.23	O.K	
		(7)~(8)구간 (20.0m)	4.51	8.24	9.57	WNW	6.00	6.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 8.0	O.K	1.29	3.21	1.14	N.G	
		(9)구간 (10.0m)	4.56	8.25	9.57	WNW	6.00	6.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 8.0	O.K	1.95	7.43	1.45	O.K	
		(10)구간 (215.0m)	5.15	8.85	10.28	NW	6.00	7.00	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 20.0	N.G	1.19	3.97	1.37	N.G	
		(11)구간 (15.0m)	5.25	8.84	10.28	NW	6.00	7.00	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 12.5	N.G	1.40	5.30	1.36	O.K	
	(12)구간 (50.0m)-두부	5.34	8.83	10.28	NW	6.00	7.00	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 20.0	N.G	1.18	3.92	2.13	N.G		
	서방파제 (840m)	진입도로 축조로 방파제 기능상실															
		(2)구간 (164.0m)	2.44	5.63	9.13	WNW	5.00	6.00	N.G	피복석 1.0m ³	피복석 0.5m ³	O.K	-	-	-	-	
		(3)구간 (201.0m)	4.22	7.96	9.60	NW	6.00	8.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 8.0	O.K	-	-	-	-	
		(4)구간 (293.0m)	4.72	8.05	9.59	WNW	6.00	8.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 16.0	N.G	0.84	3.09	1.41	N.G	
		(5)구간 (12.0m)-두부	4.75	8.05	9.59	WNW	6.00	8.00	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 16.0	N.G	1.53	5.48	2.30	O.K	

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항별	시설물별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비고
			파고 (m)	주기(sec)		파향	기존	금번	판정	기존	금번	판정	활동 (1.2)	진도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판정	
				Tm	Tp												
21. 애월항	북방파제 (270m)	(1)구간 (118.0m)-방파호안	5.37	10.27	10.38	NW	6.40	10.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 16.0	N.G	5.39	28.21	-	O.K	
		(2)구간 (152.0m)-방파호안	5.68	10.21	10.37	NW	7.80	10.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 20.0	N.G	1.96	6.44	-	O.K	
	동방파제 (90m)	(1)구간 (70.0m)-방파호안	5.17	10.00	10.36	NW	6.40	9.50	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 16.0	N.G	4.62	26.10	-	O.K	
		(2)구간 (20.0m)-제두부	4.94	9.93	10.37	NW	6.40	9.50	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 20.0	N.G	6.57	37.31	4.21	O.K	
22. 성산포항	북방파제 (600.0m)	A구간(15.8m)	3.55	9.36	11.23	ENE	5.00	6.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 5.0	O.K	-	-	-	-	
		B구간(168.3m)	3.68	9.27	11.23	ENE	5.00	6.00	N.G	T.T.P 8.0	T.T.P 6.3	O.K	-	-	-	-	
		C구간(397.9m)	3.69	9.22	11.23	ENE	5.00	6.00	N.G	중공삼각블록 8.0	중공삼각블록 6.0	O.K	-	-	-	-	
		D구간(18.0m)	3.18	8.37	11.24	ENE	5.00	5.50	N.G	중공삼각블록 8.0	중공삼각블록 6.0	O.K	-	-	-	-	
	동방파제 (820.0m)	A구간(70.0m)	8.41	12.09	12.82	ESE	7.00	10.50	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 80.0ton	N.G	3.12	12.87	2.23	O.K	
		B-1구간(35.0m)	8.51	12.02	12.82	ESE	10.50	11.50	N.G	T.T.P 10.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.07	4.72	1.65	O.K	
		B-2구간(35.0m)	8.58	12.00	12.82	ESE	10.50	11.50	N.G	T.T.P 20.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.06	4.69	1.65	O.K	
		C구간(120.0m)	8.87	11.98	12.82	ESE	11.00	9.00	O.K	T.T.P 32.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.35	6.95	1.71	O.K	
		D-1구간(60.0m)	9.05	12.04	12.82	ESE	11.00	12.00	N.G	T.T.P 32.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.41	7.46	1.68	O.K	
		D-2구간(60.0m)	9.14	12.07	12.82	ESE	11.00	12.00	N.G	T.T.P 32.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.40	7.45	1.68	O.K	
		E-1구간(170.0m)	9.31	12.20	12.82	ESE	9.00	9.50	N.G	T.T.P 25.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.43	8.29	1.71	O.K	
		E-2구간(120.0m)	9.33	12.21	12.82	ESE	9.00	9.50	N.G	T.T.P 25.0	SEALOCK 100.0	N.G	2.33	8.17	1.70	O.K	
		E-3구간(30.0m)	9.29	12.17	12.82	ESE	6.50	9.50	N.G	T.T.P 25.0	SEALOCK 100.0	N.G	1.04	4.76	1.69	N.G	
F구간(100.0m)	9.25	12.12	12.82	ESE	6.50	9.50	N.G	T.T.P 40.0	SEALOCK 100.0	N.G	1.02	4.57	1.67	N.G			
G구간(20.0m)	9.12	11.98	12.82	ESE	6.50	9.50	N.G	T.T.P 40.0	SEALOCK 100.0	N.G	0.70	2.43	1.82	N.G			

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

<표 계속>

항 별	시설물 별	구간별	설계파				마루높이(DL.(+))			피복재 소요중량(ton)			상부공 안정				비 고
			파고 (m)	주기 (sec)		파향	기존	금변	판정	기존	금변	판정	활동 (1.2)	전도 (1.2)	직선활동 (1.2)	판 정	
				Tm	Tp												
22. 성산포항	서방파 호안 (460.0m)	A구간(58.7m)	1.42	4.24	8.34	NNW	5.00	5.00	O.K	피복석 0.80m ³	피복석 0.10m ³	O.K	-	-	-	-	
		B구간(56.0m)	1.59	4.66	8.36	NNW	5.00	5.50	N.G	피복석 0.80m ³	피복석 0.10m ³	O.K	-	-	-	-	
		C구간(202.3m)	1.68	4.68	8.37	NNW	5.00	5.50	N.G	피복석 0.80m ³	피복석 0.10m ³	O.K	-	-	-	-	
		D구간(143.0m)	1.55	4.22	8.42	NNW	4.50	5.50	N.G	피복석 0.80m ³	피복석 0.10m ³	O.K	-	-	-	-	
	서방파제 (264.0m)	E구간(64.0m)	1.28	2.92	7.27	WNW	5.00	4.50	O.K	T.T.P 8.0	T.T.P 0.5	O.K	147.04	2402.44	3.38	O.K	
		F구간(165.0m)	1.23	2.83	7.51	WNW	5.00	4.50	O.K	피복석 0.80m ³	피복석 0.10m ³	O.K	6.43	22.58	1.86	O.K	
G구간(35.0m)		1.24	2.86	7.51	WNW	5.00	4.50	O.K	T.T.P 8.0	T.T.P 1.0	O.K	446.88	5467.65	2.12	O.K		
23. 화순항	동방파 호안 (237.0m)	A구간(102.0m)	5.82	11.04	12.51	ESE	8.00	10.00	N.G	피복석 1.0m ³	T.T.P 25.0	N.G	-	-	-	-	
		B구간(66.0m)	6.01	9.24	10.63	SSW	8.00	10.50	N.G	T.T.P 25.0	T.T.P 32.0	N.G	-	-	-	-	
		C구간(69.0m)	5.98	9.25	10.63	SSW	9.00	10.50	N.G	T.T.P 32.0	T.T.P 32.0	O.K	-	-	-	-	
	동방파제 (758.0m)	D구간(166.5m)	5.92	9.36	10.63	SSW	10.50	8.00	O.K	T.T.P 50.0	T.T.P 32.0	O.K	2.30	6.67	1.54	O.K	
		E구간(131.5m)	6.39	9.81	11.63	SSE	11.00	8.00	O.K	T.T.P 64.0	T.T.P 40.0	O.K	3.21	11.77	2.05	O.K	
		F구간(220.0m)	7.82	10.22	11.63	SSE	12.00	9.00	O.K	T.T.P 72.0	T.T.P 64.0	O.K	31.65	361.36	1.99	O.K	
		G구간(140.0m)	8.36	10.55	11.63	SSE	13.00	9.50	O.K	T.T.P 80.0	T.T.P 80.0	O.K	41.69	580.15	2.06	O.K	
H구간(100.0m)	8.49	10.66	11.63	SSE	13.50	9.50	O.K	SEALOCK 100.0	SEALOCK 60.0	O.K	11.77	40.51	2.22	O.K			
24. 추자항	대서리 방파제 (140m)	(1)구간(60.0m)	5.05	8.11	10.00	ENE	5.80	9.00	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 8.0	N.G	0.55	2.17	-	N.G	
		(2)구간(75.0m)	5.03	8.09	10.00	ENE	5.80	9.00	N.G	T.T.P 3.2	T.T.P 8.0	N.G	0.56	2.20	0.81	N.G	
		(3)구간(5.0m)-두부	4.96	8.07	10.00	ENE	5.80	9.00	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 12.5	N.G	0.67	1.79	1.46	N.G	
	파제제 (200m)	(1)구간(12.0m)-두부	4.84	8.23	10.90	E	7.00	7.50	N.G	T.T.P 40.0	T.T.P 25.0	O.K	0.41	-12.71	4.76	N.G	
		(2)구간(176.0m)	4.98	8.32	10.90	E	7.00	7.00	O.K	T.T.P 25.0	T.T.P 20.0	O.K	-	-	-	-	
		(3)구간(12.0m)-두부	4.99	8.33	10.90	E	7.00	7.50	N.G	T.T.P 40.0	T.T.P 25.0	O.K	0.23	-15.98	4.73	N.G	
	예초리 방파제 (165m)	(1)구간(85.0m)	4.76	8.57	10.89	NW	5.10	8.80	N.G	T.T.P 5.0	T.T.P 16.0	N.G	-0.15	-5.33	1.16	N.G	
		(2)구간(65.0m)	4.79	8.66	10.91	NW	6.00	8.80	N.G	T.T.P 6.3	T.T.P 16.0	N.G	0.56	1.30	0.98	N.G	
		(3)구간(15.0m)-두부	4.79	8.68	10.91	NW	6.00	8.80	N.G	T.T.P 10.0	T.T.P 25.0	N.G	0.77	2.28	1.70	N.G	

2. 보수·보강방안 수립

가. 보수·보강 기준

(1) 보수·보강 대상시설

- 무역항 및 연안항의 외곽시설에 대해 폭풍 및 지진해일에 의한 설계해면 상승 및 개정된 심해파를 고려한 구조물 정밀안정성 평가 결과 보수·보강이 필요한 대상 시설은 무역항이 방파제 47개, 연장 25,006.6m, 대상단면 109개이며, 연안항이 방파제 44개, 연장 12,315.6m, 대상단면 129개로 평가되었다.

표 3.6.13 무역항 보수·보강 대상시설

항 별 (28개항)	방파제시설		시설연장(m)		대상단면		비 고
	전 체	대 상	전 체	대 상	전 체	대 상	
속초항	3	3	1,461.0	968.0	9	6	
옥계항	2	2	1,305.0	1,305.0	12	12	
묵호항	2	-	1,574.0	-	15	-	
동해항	2	2	2,110.0	1,160.0	11	6	
삼척항	2	2	1,031.0	403.0	15	3	
포항항	5	2	5,464.4	3,367.9	18	6	
울산항	7	6	4,256.0	3,311.8	23	13	
인천항	4	1	1,993.88	100.0	10	1	
평택항	1	1	166.0	166.0	1	1	
대산항	2	-	980.0	-	5	-	
보령항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
태안항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
군산항	1	1	3,000.0	3,000.0	2	2	
장항항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
목포항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
완도항	2	2	550.0	550.0	4	4	
광양항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
여수항	5	2	2,523.0	463.0	7	4	
마산항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
삼천포항	5	5	2,340.0	2,075.0	13	11	
통영항	6	6	1,637.0	1,637.0	9	9	
고현항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
장승포항	2	2	231.0	231.0	2	2	
옥포항	2	2	1,385.0	1,385.0	2	2	
진해항	-	-	-	-	-	-	외곽시설 없음
부산항	2	2	1,704.0	1,704.0	4	4	
제주항	4	2	3,530.0	1,880.0	23	12	
서귀포항	4	4	1,848.5	1,299.9	15	11	
합 계	63	47	39,089.78	25,006.6	200	109	

표 3.6.14 연안항 보수·보강 대상시설

항 별 (24개항)	방파제시설		시설연장(m)		대상단면		비 고
	전 체	대 상	전 체	대 상	전 체	대 상	
주문진항	2	1	1,170.0	250.0	10	3	
후포항	3	2	1,904.5	1,227.5	16	11	
구룡포항	4	3	1,090.0	788.0	10	7	
울릉항	6	5	1,347.6	1,195.6	18	16	
용기포항	1	1	140.0	140.0	5	5	
연평도항	4	3	991.1	598.7	8	7	
대천항	3	2	1,220.0	300.0	6	3	
비인항	3	3	879.5	879.5	9	9	
대흑산도항	5	2	1,343.0	273.0	14	3	
홍도항	2	-	200.0	-	3	-	
팽목항	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
화흥포항	3	3	304.0	230.0	6	5	
신마항	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	1	1	240.0	240.0	3	3	
송공항	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
나로도항	4	2	704.0	341.0	7	3	
거문도항	7	6	1,915.0	1,765.0	16	13	
부산남항	2	-	558.0	-	4	-	
한림항	2	2	2,418.0	1,940.0	15	12	
애월항	2	2	360.0	360.0	4	4	
성산포항	4	2	2,144.0	1,221.3	22	14	
화순항	2	1	995.0	237.0	8	3	
추자항	3	3	505.0	329.0	9	8	
합 계	63	44	20,428.7	12,315.6	193	129	

(2) 상치콘크리트 보수·보강 기준

(가) 마루높이

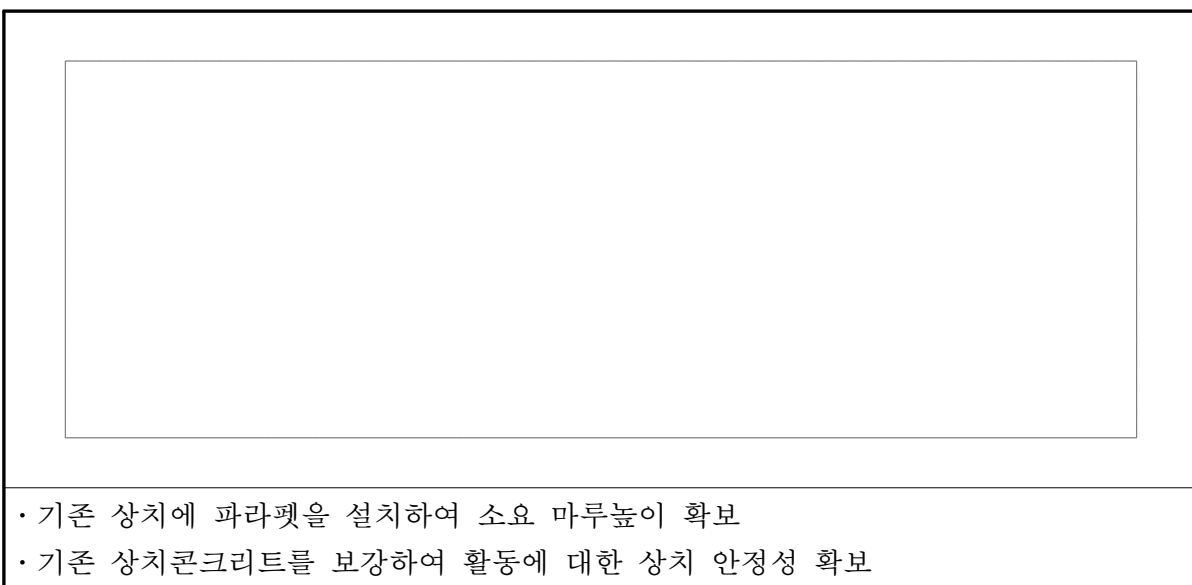
- 마루높이 검토결과 소요 마루높이에 미달되는 구간에 대해서는 파라펫 설치, 상치증고 등으로 소요 마루높이를 확보토록 하였으며,
- 항내 박지 수면적, 방파제 배후 시설물 유무, 대상선박의 규모 등을 고려하여 방파제는 설계조위 + 0.6H1/3 이상을, 방파호안은 설계조위 + 1.0H1/3 이상을 확보토록 하여 배후 시설물의 월파에 의한 피해를 최소화하도록 보수·보강 방안을 수립하였다.

표 3.6.15 마루높이 보수·보강 기준

구 분	검토 기준	적용 기준
방파제	항내 수면적 충분, 배후시설 영향 없음	0.6 H1/3이상 확보
	항내 수면적 협소, 배후시설 영향 있음	1.0 H1/3이상 확보
방파호안	배후 시설물의 월파 방지	1.0 H1/3이상 확보

(나) 상부공 안정성

- 상부공 안정성(활동, 전도) 검토결과 안정이 미확보된 구간에 대해서는 상치 확폭, 상치 증고 등을 통해 안정성을 확보토록 하였으며, 기존 상치와의 접합부는 전단철근을 설치하여 신규콘크리트의 일체성을 확보토록 보강계획을 수립하였다.
- 또한, 마루높이 증고 및 상치콘크리트 보강에 따라 상치에 작용하는 파력이 증가하는 구간에 대해서는 보수·보강 후 상부 안정성 검토를 추가로 수행하였다.



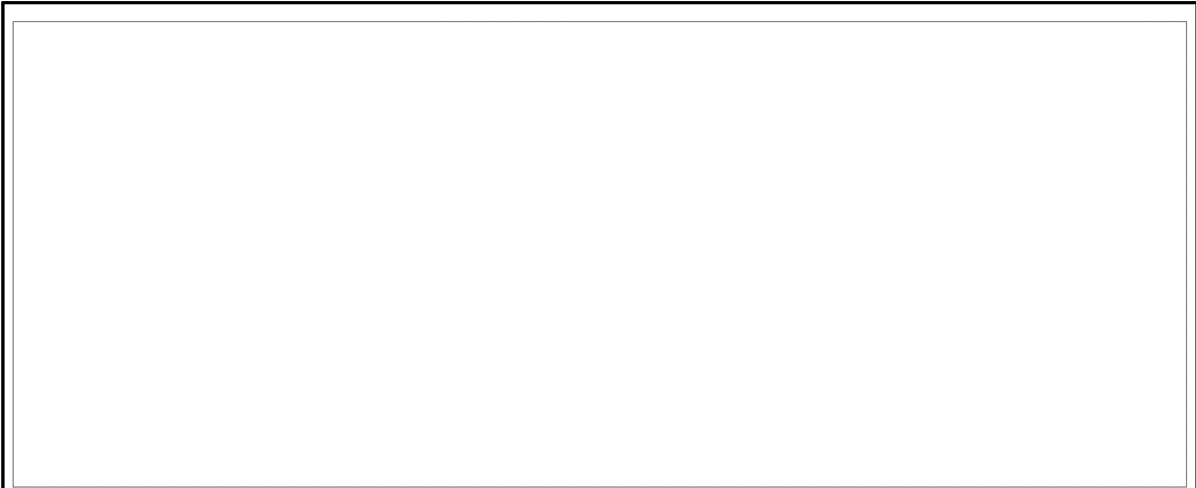
- 기존 상치에 파라펫을 설치하여 소요 마루높이 확보
- 기존 상치콘크리트를 보강하여 활동에 대한 상치 안정성 확보

그림 3.6.1 상치콘크리트 보수·보강방안

(3) 피복재 보수·보강방안

(가) 사석경사제

- 피복재 소요 질량 검토결과 소요 질량에 미달되는 구간에 대해서는 구조물의 안정성, 시공성, 기존 T.T.P 유용성 및 경제성을 고려한 보강계획을 수립하였다.
- 사석경사제의 경우, 기존 T.T.P 상부구간을 제거하여 전면소단부로 유용하고, 소요 피복재 규격의 T.T.P로 기존 T.T.P 상부를 보강토록 하였으며,



· 기존 T.T.P 8ton급 상부구간을 제거하여 전면소단부로 유용하고 소요피복재 규격으로 보강

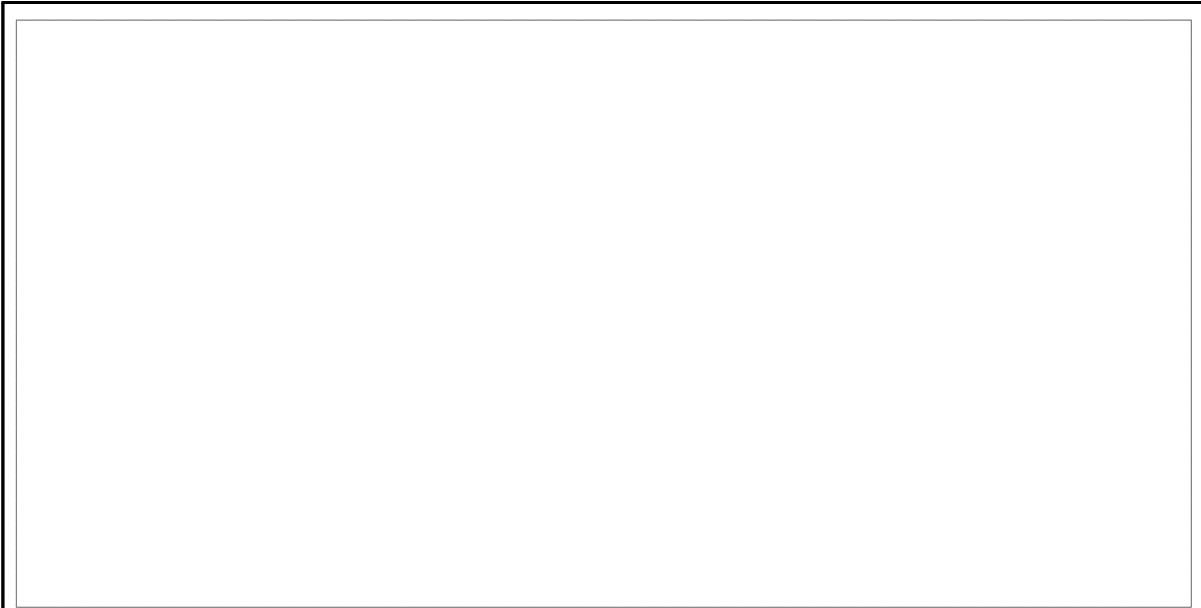
그림 3.6.2 사석경사제 피복재 보수·보강방안(1)



· 기존 상치에 파라펫을 설치하여 소요 마루높이(DL(+))7.60m 확보
· 기존 T.T.P 20ton급 상부구간을 제거하여 전면소단부로 유용하고 소요피복재 규격인 T.T.P40ton급으로 보강

그림 3.6.3 사석경사제 피복재 보수·보강방안(2)

○ 직립제의 경우, 구체의 외적 안정성이 미확보된 구간에 대해 항외측에 소파블록을 거치울 통해 파력을 저감시켜 안정성을 확보토록 하였다.



- 기존 상치에 파라펫을 설치하여 소요 마루높이(DL(+))8.50m 확보
- 기존 구체의 안정성 확보를 위해 전면부에 소요피복재 규격으로 보강

그림 3.6.4 직립제 피복재 보수·보강방안(1)



- 기존 피복재 상부에 소요 피복재 규격으로 보강

그림 3.6.5 직립제 피복재 보수·보강방안(2)

나. 보수·보강 개략공사비 산정

(1) 경비산출 기준

○ 보수·보강에 따른 소요경비는 2010년도 정부표준품셈 및 정부발주공사의 견적기준, 가격정보, 물가자료 등을 토대로 산정하였다.

- 2010년 상반기 건설공사 실적공사비 공종 및 단가 적용(국토해양부, 한국건설기술연구원)
- 인건비 : 대한건설협회 2010년 상반기 노임단가 적용
- 유류대 및 기준 환율 : 조달청 고시 2010년 6월 기준
- 사석 : 견적기준 적용
- 재료비 : 2010년 6월 물가자료, 물가정보 기준

(2) 무역항 개략공사비 산정결과

○ 무역항 28개항의 보수·보강 개략공사비 산정결과 총 604,988백만원이 소요되는 것으로 추정되었으며, 각항별 보수·보강 개략공사비는 다음과 같다.

표 3.6.16 무역항 보수·보강 공사비

항 별	시설명	보강공사비 (백만원)	비 고
속초항	북방과제	466	
	신수로방과제	5,139	
	남방과제	2,826	
	부대비	1,686	
	소 계	10,117	
옥계항	북방과제	2,868	
	남방과제	18,999	
	부대비	4,373	
	소 계	26,240	
목호항	방과제	-	
	해정부두 방사제	-	
	부대비	-	
	소 계	-	
동해항	북방과제	42,173	
	남방과제	5,771	
	부대비	9,589	
	소 계	57,533	
삼척항	방과제	1,326	
	방사제	411	
	부대비	347	
	소 계	2,084	

<표 계속>

항 별	시설명	보강공사비 (백만원)	비 고
포항항	구항 북방파호안	488	
	구항 북방파제	-	
	신항 동방파제	-	
	신항 동방파호안	-	
	영일만신항 북방파제	22,485	
	부대비	4,596	
	소계	27,569	
울산항	분항 동방파제	18,415	
	신항 중앙방파제	28,623	
	신항 중앙방파호안	736	
	신항 남방파제1공구	37,554	
	신항 남방파제2공구	4,335	
	범월갑 방파제	1,631	
	범월갑 방파호안	-	
	부대비	18,259	
소계	109,553		
인천항	내항 외곽방파제	-	
	역무선항구 방파제	1,370	
	보안항구 남방파제	-	
	보안항구 북방파제	-	
	부대비	274	
	소계	1,644	
평택항	관리부두 방파제	798	
	부대비	160	
	소계	958	
대산항	서방파제	-	
	서측호안	-	
	부대비	-	
	소계	-	
보령항	-	-	외곽시설없음
태안항	-	-	외곽시설없음
군산항	북방파제	2,084	
	부대비	417	
	소계	2,501	
장항항	-	-	외곽시설없음
목포항	-	-	외곽시설없음
완도항	북방파제	8,349	
	남방파제	267	
	부대비	1,723	
	소 계	10,339	
광양항	-	-	외곽시설없음
여수항	서방파제	-	
	동방파제	5,018	
	구항 방파제	59	
	부대비	1,015	
	소 계	6,092	

<표 계속>

항 별	시설명	보강공사비 (백만원)	비 고
마산항	-	-	외곽시설없음
삼천포항	신항 남방파제	1,902	
	구항 동방파제	465	
	구항 동방파호안	711	
	구항 서방파제	455	
	화력발전소 방파제	6,444	
	부대비	1,995	
	소 계	11,972	
통영항	동호항 서방파제	460	
	동호항 동방파제	1,245	
	동호항 남방파제	743	
	도남항 동방파제	3,386	
	도남항 서방파제	1,890	
	도남항 중앙방파제	1,623	
	부대비	1,869	
	소 계	11,216	
고현항	-	-	외곽시설없음
장승포항	서방파제	119	
	동방파제	70	
	부대비	38	
	소 계	227	
옥포항	남방파제	20,958	
	북방파제	8,948	
	부대비	5,982	
	소 계	35,888	
진해항	-	-	외곽시설없음
부산항	오륙도 방파제	86,720	
	조도 방파제	54,791	
	부대비	28,302	
	소 계	169,813	
제주항	서방파제	39,339	
	동방파제	11,520	
	돌제	-	
	연육방파제	-	
	부대비	10,172	
	소 계	61,031	
서귀포항	서방파제	1,688	
	남방파제	10,188	
	외항방파제	29,795	
	동방파호안	8,506	
	부대비	10,034	
소 계	60,211		
합 계		604,988	

(3) 연안항 개략공사비 산정결과

○ 연안항 24개항의 보수·보강 개략공사비 산정결과 총 306,692백만원이 소요되는 것으로 추정되었으며, 각항별 보수·보강 개략공사비는 다음과 같다.

표 3.6.17 연안항 보수·보강 공사비

항 별	시설명	보강공사비 (백만원)	비 고
주문진항	동방과제	-	
	제2돌제	3,044	
	부대비	609	
	소계	3,653	
후포항	동방파호안	5,911	
	동방과제	28,789	
	서방과제	-	
	부대비	6,939	
	소계	41,639	
구룡포항	북방파호안	811	
	북방과제	-	
	남방파호안	939	
	남방과제	4,957	
	부대비	1,342	
	소계	8,049	
울릉항	도동항 북방파호안	-	
	도동항 북방과제	9,864	
	도동항 남방과제	2,833	
	사동항 남방파호안	302	
	사동항 남방과제	40,357	
	사동항 북방파호안	7,403	
	부대비	12,151	
	소계	72,910	
용기포항	구항 방과제	157	
	부대비	31	
	소계	188	
연평도항	동방과제	-	
	남방파호안	2,129	
	남방과제	802	
	서방과제	2,173	
	부대비	1,021	
	소계	6,125	

<표 계속>

항 별	시설명	보강공사비 (백만원)	비 고
대천항	북방파제	-	
	서방파호안	838	
	서방파제	636	
	부대비	296	
	소계	1,770	
비인항	동방파제	889	
	남방파호안	5,966	
	남방파제	6,203	
	부대비	2,612	
	소계	15,670	
대 흑산도항	북방파제	-	
	남방파제	-	
	중앙방파제	-	
	외영산도방파제	204	
	내영산도방파제	45	
	부대비	50	
	소계	299	
홍도항	방파호안	-	
	방파제	-	
	소계	-	
팽목항	-	-	외곽시설없음
화홍포항	정도항방파제	1,442	
	정도항파제제	782	
	대신항방파제	1,285	
	부대비	4,211	
	소계		
신마항	-	-	외곽시설없음
갈두항	방파제	343	
	부대비	69	
	소계	412	
송공항	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	외곽시설없음
나로도항	동방파제	51	
	서방파제	-	
	남측파제제	-	
	북측파제제	85	
	부대비	27	
	소계	163	

<표 계속>

항 별	시설명	보강공사비 (백만원)	비 고
거문도항	북방과제	1,696	
	동방과제	21,663	
	제1동방과제	5,778	
	제2동방과제	455	
	제1서방과제	2,727	
	제2서방과제	297	
	부대비	6,523	
	소계	39,139	
부산남항	동방과제	-	
	서방과제	-	
	부대비	-	
	소계	-	
한림항	북방과제	23,978	
	서방과제	9,136	
	부대비	6,623	
	소계	39,737	
애월항	북방과제	4,694	
	동방과제	2,011	
	부대비	1,341	
	소계	8,046	
성산포항	북방과제	-	
	동방과제	31,648	
	서방과호안	1,536	
	서방과제	-	
	부대비	6,636	
	소계	39,820	
화순항	동방과호안	7,602	
	동방과제	-	
	부대비	1,520	
	소계	9,122	
추자항	대서리방과제	6,004	
	과제제	78	
	예초리방과제	7,034	
	부대비	2,623	
	소계	15,739	
합 계		306,692	

3. 보수·보강 우선순위 결정

가. 무역항 보수·보강 우선순위 결정

(1) 기본방향

○ 각 무역항별로 항만기여도, 태풍피해 영향, 안정성 분석 등 각 평가항목별로 등급 점수를 부여하고, 평가항목별 등급점수에 가중치를 곱하여 평가점수가 큰 순서대로 보수·보강 우선순위를 결정토록 하였다.

○ 외곽시설이 공사중이거나, 향후 방파제 보강계획 및 관련계획이 수립된 항만 및 외곽시설에 대해서는 중복투자 등의 문제점이 있으므로 금회 보수·보강 우선순위 결정에서 제외하였다.

표 3.6.18 무역항 보수·보강 우선순위 평가항목

평가 항목		가중치	비 고	
항만별	1. 항만기여도	가. 화물처리실적	1.0	
		나. 화물선 입·출항실적	0.6	
		다. 접안시설 연장	0.7	
		소 계	2.3	
시설물별	2. 태풍피해영향	가. 시설별 피해규모	0.6	
		나. 시설별 피해중복도	0.6	
		다. 태풍피해금액	1.5	· 보수·보강금액대비
		소 계	2.7	
	3. 안정성 분석	가. 설계파고 증가	1.0	· 기존설계파고 대비
		나. 시설물 보강연장	1.5	
		다. 보수·보강 공사비	2.5	
		소 계	5.0	
합 계		10.0		

주) : 전체 무역항의 등급점수는 평가항목별로 28점~1점까지 있으며, 각 항만별로 산정된 평가점수(=등급점수×가중치)를 100점 만점으로 환산함. (예, 28점(등급점수)×10점(가중치)=280점(합계, 만점기준), 280점÷2.8(환산계수) = 100점(평가점수))

(2) 무역항 우선순위 항목별 평가

(가) 항만기여도

○ 항만기여도는 화물처리실적, 화물선 입·출항 실적, 접안시설 연장 등 각 검토항목별로 등급점수를 차등 부여하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

■ 화물처리 실적

표 3.6.19 화물처리 실적에 의한 무역항 등급 점수 (단위 : 천RT/년)

항 별	화물처리실적(천톤)				등급 점수	비 고
	2006년	2007년	2008년	평 균		
속초항	185	253	284	241	13	
옥계항	6,131	6,463	7,040	6,545	18	
목호항	1,738	2,236	2,697	2,223	-	보수·보강계획 없음
동해항	21,353	22,168	23,080	22,200	23	
삼척항	6,417	6,801	7,093	6,770	19	
포항항	54,971	61,875	67,658	61,501	25	
울산항	165,717	168,652	170,314	168,228	27	
인천항	129,566	138,139	141,815	136,507	26	
평택항	44,235	48,093	50,723	47,684	24	
대산항	52,649	53,516	60,994	55,720	-	보수·보강계획 없음
보령항	9,258	9,213	11,254	9,908	-	방파제 없음
태안항	8,670	11,345	12,195	10,737	-	방파제 없음
군산항	17,502	17,686	17,563	17,584	21	
장항항	1,246	1,384	1,309	1,313	-	방파제 없음
목포항	8,979	14,203	14,509	12,564	-	방파제 없음
완도항	234	608	167	336	14	
광양항	195,069	198,189	203,216	198,825	-	방파제 없음
여수항	2,789	8,344	14,052	8,395	20	
마산항	11,907	13,193	15,680	13,593	-	방파제 없음
삼천포항	19,918	20,644	21,150	20,571	22	
통영항	226	228	229	228	12	
고현항	2,032	2,494	3,323	2,616	-	방파제 없음
장승포항	-	0.4	0.4	0.4	11	
옥포항	1,635	1,642	1,895	1,724	16	
진해항	744	850	1,463	1,019	-	방파제 없음
부산항	229,939	243,565	241,683	238,396	28	
제주항	2,214	2,071	1,928	2,071	17	
서귀포항	481	328	273	361	15	

주) 자료 : 국토해양부 해운항만물류정보시스템 (www.spidc.go.kr) 항만별 화물처리실적 통계 참조

■ 화물선 입·출항 실적

표 3.6.20 화물선 입·출항 실적에 의한 무역항 등급 점수

항 별	화물선 입·출항 실적(척수)				등급 점수	비 고
	2006년	2007년	2008년	평 균		
속초항	1,380	1,285	1,051	1,239	13	
옥계항	2,331	2,323	2,430	2,361	14	
목호항	2,797	3,038	2,847	2,894	-	보수·보강계획 없음
동해항	6,429	6,587	6,246	6,421	21	
삼척항	2,464	2,469	2,606	2,513	16	
포항항	19,445	18,851	20,453	19,583	25	
울산항	52,080	55,979	55,098	54,386	27	
인천항	41,905	43,351	41,453	42,236	26	
평택항	11,709	12,818	13,756	12,761	24	
대산항	10,312	11,221	11,791	11,108	-	보수·보강계획 없음
보령항	613	677	697	662	-	방파제 없음
태안항	517	666	746	643	-	방파제 없음
군산항	8,340	8,517	8,779	8,545	22	
장항항	1,545	1,837	1,528	1,637	-	방파제 없음
목포항	19,176	18,771	18,425	18,791	-	방파제 없음
완도항	2,283	3,227	2,529	2,680	17	
광양항	43,645	44,616	43,977	44,079	-	방파제 없음
여수항	10,296	11,991	12,141	11,476	23	
마산항	19,259	20,834	22,617	20,903	-	방파제 없음
삼천포항	2,436	2,333	2,524	2,431	15	
통영항	4,168	4,242	5,240	4,550	18	
고현항	6,744	7,875	9,164	7,928	-	방파제 없음
장승포항	25	31	42	33	11	
옥포항	4,693	4,477	5,358	4,843	19	
진해항	2,817	4,218	4,704	3,913	-	방파제 없음
부산항	100,787	102,852	115,931	106,523	28	
제주항	5,201	5,118	5,068	5,129	20	
서귀포항	1,245	1,019	825	1,030	12	

주) 자료 : 해양분야통계연보(2007), 국토해양통계연보(2008, 2009)

■ 접안시설 연장

표 3.6.21 접안시설 연장에 의한 무역항 등급 점수

항 별	접안시설 연장(m)	등급점수	비 고
속초항	3,194	18	
옥계항	874	12	
목호항	2,196	-	보수·보강계획 없음
동해항	3,412	19	
삼척항	2,164	14	
포항항	12,803	25	
울산항	16,683	27	
인천항	15,105	26	
평택항	6,837	24	
대산항	838	-	보수·보강계획 없음
보령항	90	-	방과제 없음
태안항	287	-	방과제 없음
군산항	6,373	23	
장항항	330	-	방과제 없음
목포항	7,802	-	방과제 없음
완도항	2,661	16	
광양항	19,591	-	방과제 없음
여수항	3,539	20	
마산항	7,336	-	방과제 없음
삼천포항	4,888	22	
통영항	4,649	21	
고현항	314	-	방과제 없음
장승포항	1,151	13	
옥포항	388	11	
진해항	1,416	-	방과제 없음
부산항	36,763	28	
제주항	3,096	17	
서귀포항	2,227	15	

주) 자료 : 국토해양통계연보 (2008, 2009)

(나) 태풍피해 영향

- 태풍피해 영향은 각 항만별, 시설물별 태풍 내습시 피해규모, 방파제별 피해중복도, 피해금액 대비 보강금액 등 각 검토항목별로 등급점수를 차등 부여하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

■ 태풍피해 규모

표 3.6.22 태풍피해 규모에 의한 무역항 등급 점수

항 별	시설명(m)	피해현황	피해금액 (백만원)	등급점 수	비 고
속초항	방파제	· '85.10 (제20호 브랜다)	200	20	
옥계항	-	-	-	1	
묵호항	북방파제	· '91.02 (폭풍내습)	210	-	보수·보강계획 없음
		· '02.09 (제15호 루사)	768		
	소 계	978			
동해항	북방파제	· '87.02 (폭풍내습)	1,673	23	
삼척항	방파제	· '85.10 (제20호 브랜다)	54	21	
		· '02.09 (제15호 루사)	470		
	소 계	524			
포항항	방파제	· '76.09 (제7호 프랜)	33	19	
		· '85.10 (제20호 브랜다)	66		
		· '87.08 (제12호 다이너)	95		
	소 계	194			
울산항	방파제	· '02.08 (제15호 루사)	450	26	
		· '03.09 (제14호 매미)	3,000		
	소 계	3,450			
인천항	방파제	· '85.08 (제9호 리)	7	14	
평택항	-	-	-	1	
대산항	-	-	-	-	보수·보강계획 없음
보령항	-	-	-	-	방파제 없음
태안항	-	-	-	-	방파제 없음
군산항	방파제	· '98.11 (태풍내습)	370	22	
		· '02.08 (제15호 루사)	412		
	소 계	782			
장항항	-	-	-	-	방파제 없음
목포항	내 항	· '99.08 (제7호 올가)	40	-	방파제 없음
완도항	내 항	· '99.08 (제7호 올가)	70	16	
광양항	내 항	· '99.08 (제7호 올가)	800	-	방파제 없음
		· '02.08(제15호 루사)	477		
	소 계	1,277			

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

<표 계속>

항 별	시설명(m)	피해현황	피해금액 (백만원)	등급점수	비 고
여수항	동방파제	· '84.08 (제10호 홀리)	450	25	
		· '95.07 (제3호 페이)	84		
		· '99.08 (제7호 올가)	20		
		· '02.08 (제15호 루사)	25		
		· '03.09 (제14호 매미)	873		
	서방파제	· '95.07 (제3호 페이)	103		
		· '99.08 (제7호 올가)	30		
	기 타	· '99.08 (제7호 올가)	25		
· '02.08 (제15호 루사)		1,133			
소 계		2,743			
마산항	-	-	-	-	방파제 없음
삼천포항	방파제	· '87.07 (제5호 셸마)	11	17	
		· '95.07 (제3호 페이)	50		
		· '03.09 (제14호 매미)	53		
	소 계	114			
통영항	동호만 남방파제	· '03.09 (제14호 매미)	51	15	
고현항	-	-	-	-	방파제 없음
장승포항	동방파제	· '03.09 (제14호 매미)	193	18	
옥포항	-	-	-	1	
진해항	-	-	-	-	방파제 없음
부산항	남방파제	· '85.10 (제20호 브랜드)	4	27	
		· '98.01 (동계계절풍)	452		
	조도방파제	· '01.11 (보수보강)	1,198		
	감천항 동방파제	· '81.09 (제18호 애그니스)	12		
		· '01.11 (보수보강)	321		
	감천항 서방파제	· '87.07 (제5호 셸마)	150		
		· '01.11 (보수보강)	390		
	신항 동방파제	· '03.09 (제14호 매미)	4,000		
소 계		6,527			
제주항	동방파제	· '83.09 (제10호 포레스트)	66	24	
		· '02.08 (제15호 루사)	520		
	서방파제	· '02.08 (제15호 루사)	550		
		· '03.09 (제14호 매미)	644		
	어항구방파제	· '03.09 (제14호 매미)	10		
	소 계		1,790		
서귀포항	동방파제	· '77.09 (제9호 베이브)	7	28	
		· '79.08 (제10호 어빙)	80		
		· '82.08 (제11호 세실)	313		
	남방파제	· '00.08 (제12호 프라피룬)	235		
	외항방파제	· '99.08 (제7호 올가)	520		
		· '00.08 (제12호 프라피룬)	19		
	방파제	· '03.09 (제14호 매미)	9,900		
		· '99.08 (제7호 올가)	39		
소 계		11,113			

주) 자료 : 『항만시설(방파제) 태풍피해 취약지역 보강방안 용역, 해양수산부, 2006』 보고서 참조

■ 방파제별 태풍피해 중복도

표 3.6.23 방파제별 태풍피해 중복도에 의한 무역항 등급 점수

항 별	시설명	반복 피해횟수					합 계	등급점수	비 고
		1회	2회	3회	4회	5회			
속초항	방파제	1	-	-	-	-	1	19	
옥계항	-	-	-	-	-	-	-	1	
목호항	방파제	2	-	-	-	-	2	-	보수·보강계획 없음
동해항	"	1	-	-	-	-	1	19	
삼척항	"	2	-	-	-	-	2	21	
포항항	"	3	-	-	-	-	3	23	
울산항	"	-	1	-	-	-	4	24	
인천항	"	1	-	-	-	-	1	19	
평택항	-	-	-	-	-	-	-	1	
대산항	-	-	-	-	-	-	-	-	보수·보강계획 없음
보령항	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
태안항	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
군산항	방파제	2	-	-	-	-	2	21	
장항항	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
목포항	내 항	1	-	-	-	-	1	-	방파제 없음
완도항	"	1	-	-	-	-	1	19	
광양항	"	2	-	-	-	-	2	-	방파제 없음
여수항	방파제	2	1	-	-	1	31	28	
마산항	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
삼천포항	방파제	3	-	-	-	-	3	23	
통영항	"	1	-	-	-	-	1	19	
고현항	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
장승포항	방파제	1	-	-	-	-	1	19	
옥포항	-	-	-	-	-	-	-	1	
진해항	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
부산항	방파제	2	3	-	-	-	14	26	
제주항	"	1	2	-	-	-	9	25	
서귀포항	"	2	-	2	-	-	20	27	

주) 1) : 합계 = (1회×중복횟수×1.0) + (2회×중복횟수×2.0) + (3회×중복횟수×3.0) + (4회×중복횟수×4.0) + (5회×중복횟수×5.0)

주) 자료 : 『항만시설(방파제) 태풍피해 취약지역 보강방안 용역, 해양수산부, 2006』 보고서 참조

■ 태풍피해 금액 대비 보강금액

표 3.6.24 태풍피해 금액 대비 보강금액에 의한 무역항 등급 점수

항 별	시설명(m)	①피해금액 (백만원)	②보강금액 (백만원)	② ÷ ①	등급점수	비 고
속초항	방파제	200	200	1.0	28	
옥계항	-	-	-	-	1	
목호항	방파제	978	978	1.0	-	보수·보강계획 없음
동해항	"	1,673	1,673	1.0	28	
삼척항	"	524	524	1.0	28	
포항항	"	194	194	1.0	28	
울산항	"	3,450	4,450	1.29	16	
인천항	"	7	7	1.0	28	
평택항	-	-	-	-	1	
대산항	-	-	-	-	-	보수·보강계획 없음
보령항	-	-	-	-	-	방파제 없음
태안항	-	-	-	-	-	방파제 없음
군산항	방파제	782	785	1.0	28	
장항항	-	-	-	-	-	방파제 없음
목포항	내 항	40	40	1.0	-	방파제 없음
완도항	"	70	70	1.0	28	
광양항	"	1,277	1,287	1.0	-	방파제 없음
여수항	방파제	2,743	2,743	1.0	28	
마산항	-	-	-	-	-	방파제 없음
삼천포항	방파제	114	114	1.0	28	
통영항	"	51	70	1.37	15	
고현항	-	-	-	-	-	방파제 없음
장승포항	방파제	193	193	1.0	28	
옥포항	-	-	-	-	1	
진해항	-	-	-	-	-	방파제 없음
부산항	방파제	6,527	6,527	1.0	28	
제주항	"	1,790	2,551	1.43	14	
서귀포항	"	11,113	11,578	1.04	17	

주) 자료 : 『항만시설(방파제) 태풍피해 취약지역 보강방안 용역, 해양수산부, 2006』 보고서 참조

(다) 안정성 분석

- 안정성 분석은 각 항만별, 시설물별 설계파고 증가율(원설계파 대비), 외측피복재 보수·보강연장, 상치콘크리트 보수·보강연장, 보수·보강 공사비등 각 검토항목별로 등급점수를 차등 부여하였으며, 그 결과는 다음과 같음.

■ 설계파고 증가

표 3.6.25 설계파고 증가에 따른 무역항 등급 점수

항 별	시설명	①원설계파			②개정설계파			파고차 ②-①	등급 점수	비고
		파고(m)	주기(s)	파향	파고(m)	주기(s)	파향			
속초항	방파제	3.00	14.00	NE	2.41	6.38	ESE	-0.59m	0	
옥계항	방파제	3.50	14.00	E	4.45	8.90	ENE	+0.95m	16	
목호항	방파제	6.90	14.00	E	5.91	8.87	ENE	-0.99m	-	보수·보강 계획 없음
동해항	방파제	7.40	12.00	ENE	7.12	9.13	ENE	-0.28m	0	
삼척항	방사제	4.00	14.00	E	3.69	8.81	E	-0.31m	0	
포항항	방사제	5.79			2.50			-3.29m	0	
울산항	방사제	6.50			9.55			+3.05m	28	
인천항	방사제	5.10			1.67			-3.43m	0	
평택항	방사제	1.40			1.92			+0.52m	4	
대산항	방사제	3.55			1.88			-1.67m	-	보수·보강 계획 없음
보령항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
태안항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
군산항	방파제	4.80	8.70	W	3.80	6.46	W	-1.0m	0	
장항항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
목포항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
완도항	방파제	2.83	13.00	S	3.50	13.08	SSE	+0.67m	10	
광양항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
여수항	방파제	4.00	12.00	SE	4.38	13.08	ESE	+0.38m	4	
마산항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
삼천포항	방파제	7.21			3.81			-3.40m	0	
통영항	방파제	2.49			1.85			-0.64m	0	
고현항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
장승포항	방파제	4.5			3.4			-1.10m	0	
옥포항	방파제	3.5			4.29			+0.79m	10	
진해항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	방파제 없음
부산항	방파제	6.7			10.11			+3.41m	28	
제주항	방파제	6.30	11.00	NE	7.51	9.33	NW	+1.21m	16	
서귀포항	방파제	4.71			5.77			+1.06m	16	

■ 시설 보강연장

표 3.6.26 방과제 시설보강 연장에 의한 시설물별 등급 점수(1/2)

항 별	시설명(m)	①총연장(m)	②보강연장(m)	②÷①	등급 점수	비 고
속초항	북방과제	701.0	228.0		17	
	신수로방과제	330.0	330.0			
	남방과제	430.0	410.0			
	소 계	1,461.0	968.0	0.663		
옥계항	북방과제	1,020.0	1,020.0		28	
	남방과제	285.4	285.4			
	소 계	1,305.4	1,305.4	1.000		
묵호항	방과제	1,174.0	-		-	보수·보강계획 없음
	해경부두 방사제	400.0	-			
	소 계	1,574.0	0	0		
동해항	북방과제	1,480.0	830.0		15	
	남방과제	630.0	330.0			
	소 계	2,110.0	1,160.0	0.550		
삼척항	방과제	670.0	221.0		13	
	방사제	361.0	182.0			
	소 계	1,031.0	403.0	0.391		
포항항	구항 북방과호안	521.7	267.9		16	
	구항 북방과제	505.7	-			
	신항 동방과제	300.0	-			
	신항 동방과호안	1,037.0	-			
	영일만신항 북방과제	3,100.0	3,100.0			
	소 계	5,464.4	3,367.9	0.616		
울산항	동방과제	646.0	646.0		19	
	중앙방과제	400.0	360.0			
	중앙방과호안	500.0	160.0			
	남방과제1공구	1,000.0	1,000.0			
	남방과제2공구	1,100.0	1,100.0			
	범월갑방과호안	365.0	-			
	범월갑방과제	245.0	45.8			
소 계	4,256.0	3,311.8	0.778			
인천항	갑문시설 외곽방과제	216.0	-		11	
	역무선항구방과제	600.88	22.0			
	남방과제	700.0	-			
	북방과제	477.0	-			
	소 계	1,993.88	22.0	0.011		
평택항	관리부두방과제	166.0	166.0	1.000	28	
대산항	서방과제	660.0	-		-	보수·보강계획 없음
	서측호안	320.0	-			
	소 계	980.0	0	0		
보령항	-	-	-	-	-	방과제 없음
태안항	-	-	-	-	-	방과제 없음
군산항	북방과제	3,000.0	3,000.0	1.000	28	
장항항	-	-	-	-	-	방과제 없음
목포항	-	-	-	-	-	방과제 없음

<표 계속> 방파제 시설보강 연장에 의한 시설물별 등급 점수(2/2)

항 별	시설명(m)	①총연장(m)	②보강연장(m)	②÷①	등급 점수	비 고
완도항	북방파제	300.0	300.0		28	
	남방파제	250.0	250.0			
	소 계	550.0	550.0	1.000		
광양항	-	-	-	-	-	방파제 없음
여수항	서방파제	768.0	-		12	
	동방파제	418.0	363.0			
	구항 방파제	100.0	100.0			
	소 계	1,286.0	463.0	0.360		
마산항	-	-	-	-	-	방파제 없음
삼천포항	신항 남방파제	450.0	450.0		21	
	구항 동방파제	250.0	250.0			
	구항 동방파호안	225.0	225.0			
	구항 서방파제	210.0	210.0			
	한전부두 방파제	1,205.0	940.0			
	소 계	2,340.0	2,075.0	0.887		
통영항	동호항 서방파제	160.0	160.0		28	
	동호항 동방파제	200.0	200.0			
	동호항 남방파제	650.0	650.0			
	도남항 동방파제	320.0	320.0			
	도남항 서방파제	172.0	172.0			
	도남항 중앙방파제	135.0	135.0			
	소 계	1,637.0	1,637.0	1.000		
고현항	-	-	-	-	-	방파제 없음
장승포항	서방파제	145.0	145.0		28	
	동방파제	86.0	86.0			
	소 계	231.0	231.0	1.000		
옥포항	남방파제	1,000.0	1,000.0		28	
	북방파제	385.0	385.0			
	소 계	1,385.0	1,385.0	1.000		
진해항	-	-	-	-	-	방파제 없음
부산항	오륙도방파제	1,004.0	1,004.0		20	
	조도방파제	700.0	700.0			
	소 계	1,704.0	1,704.0	0.791		
제주항	서방파제	2,090.0	1,610.0		14	
	동방파제	1,000.0	270.0			
	돌제	40.0	-			
	연육방파제	400.0	-			
	소 계	3,530.0	1,880.0	0.533		
서귀포항	서방파제	280.0	30.0		18	
	남방파제	387.5	88.9			
	외항방파제	670.0	670.0			
	동방파호안	511.0	511.0			
	소 계	1,848.5	1,299.9	0.703		

■ 보수·보강 공사비

표 3.6.27 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수

항 별	보강공사비 (백만원)	등급점수	비 고
속초항	10,117	17	
옥계항	26,240	21	
목호항	-	-	보수·보강계획 없음
동해항	57,533	24	
삼척항	2,084	14	
포항항	27,569	22	
울산항	109,553	27	
인천항	1,644	13	
평택항	958	12	
대산항	-	-	보수·보강계획 없음
보령항	-	-	방과제 없음
태안항	-	-	방과제 없음
군산항	2,501	15	
장항항	-	-	방과제 없음
목포항	-	-	방과제 없음
완도항	10,339	18	
광양항	-	-	방과제 없음
여수항	6,092	16	
마산항	-	-	방과제 없음
삼천포항	11,972	20	
통영항	11,216	19	
고현항	-	-	방과제 없음
장승포항	227	11	
옥포항	35,888	23	
진해항	-	-	방과제 없음
부산항	169,813	28	
제주항	61,031	26	
서귀포항	60,211	25	
합 계	604,988		

(3) 무역항 보수·보강 우선순위 결정

- 항만별, 시설물별 10개 평가항목의 가중치 합계를 10.0으로 설정하고, 각 항별로 등급점수(A)×가중치(B)의 합계인 평가점수가 100 점 만점이 되도록 환산하여 등급점수를 산정하였으며, 그 결과는 다음과 같음.

표 3.6.28 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수

항 별	1. 항만 기여도			2. 태풍피해 현황			3. 안정성 분석			합 계	평가점수 (100점기준)
	화물처리 실 적 (가중치 B:1.0)	화물선 입출항 (가중치 B:0.6)	접안시설 연 장 (가중치 B:0.7)	시설별 피해규모 (가중치 B:0.6)	시설별 피해중복도 (가중치 B:0.6)	태풍피해 금 액 (가중치 B:1.5)	설계과 증 가 (가중치 B:1.0)	시설보강 연장 (가중치 B:1.5)	보수보강 공사비 (가중치 B:2.5)		
속초항	13.0	7.8	12.6	12.0	11.4	42.0	0	25.5	42.5	166.8	59.6
옥계항	18.0	8.4	8.4	0.6	0.6	1.5	16.0	42.0	52.5	148.0	52.9
목호항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
동해항	23.0	12.6	13.3	13.8	11.4	42.0	0	22.5	60.0	198.6	70.9
삼척항	19.0	9.6	9.8	12.6	12.6	42.0	0	19.5	35.0	160.1	57.2
포항항	25.0	15.0	17.5	11.4	13.8	42.0	0	24.0	55.0	203.7	72.8
울산항	27.0	16.2	18.9	15.6	14.4	24.0	28.0	28.5	67.5	240.1	85.8
인천항	26.0	15.6	18.2	8.4	11.4	42.0	0	16.5	32.5	170.6	60.9
평택항	24.0	14.4	16.8	0.6	0.6	1.5	4.0	42.0	30.0	133.9	47.8
대산항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
보령항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
태안항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
군산항	21.0	13.2	16.1	13.2	12.6	42.0	0	42.0	37.5	197.6	70.6
장항항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
목포항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
완도항	14.0	10.2	11.2	9.6	11.4	42.0	10.0	42.0	45.0	195.4	69.8
광양항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
여수항	20.0	13.8	14.0	15.0	16.8	42.0	4.0	18.0	40.0	183.6	65.6
마산항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
삼천포항	22.0	9.0	15.4	10.2	13.8	42.0	0	31.5	50.0	193.9	69.3
통영항	12.0	10.8	14.7	9.0	11.4	22.5	0	42.0	47.5	169.9	60.7
고현항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
장승포항	11.0	6.6	9.1	10.8	11.4	42.0	0	42.0	27.5	160.4	57.3
옥포항	16.0	11.4	7.7	0.6	0.6	1.5	10.0	42.0	57.5	147.3	52.6
진해항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
부산항	28.0	16.8	19.6	16.2	15.6	42.0	28.0	30.0	70.0	266.2	95.1
제주항	17.0	12.0	11.9	14.4	15.0	21.0	16.0	21.0	65.0	193.3	69.0
서귀포항	15.0	7.2	10.5	16.8	16.2	25.5	16.0	27.0	62.5	196.7	70.3

표 3.6.29 무역항 보수·보강 우선순위 선정 결과

구 분	평가점수	우선순위	비 고
속초항	59.6	13	
옥계항	52.9	16	
묵호항	-	-	
동해항	70.9	4	
삼척항	57.2	15	
포항항	72.8	3	
울산항	85.8	2	
인천항	60.9	11	
평택항	47.8	18	
대산항	-	-	
보령항	-	-	
태안항	-	-	
군산항	70.6	5	
장항항	-	-	
목포항	-	-	
완도항	69.8	7	
광양항	-	-	
여수항	65.6	10	
마산항	-	-	
삼천포항	69.3	8	
통영항	60.7	12	
고현항	-	-	
장승포항	57.3	14	
옥포항	52.6	17	
진해항	-	-	
부산항	95.1	1	
제주항	69.0	9	
서귀포항	70.3	6	

나. 연안항 보수·보강 우선순위 결정

(1) 기본방향

- 각 연안항별로 항만기여도, 태풍피해 영향, 안정성 분석 등 각 평가항목별로 등급 점수를 부여하고, 평가항목별 등급점수에 가중치를 곱하여 평가점수가 큰 순서대로 보수·보강 우선순위를 결정토록 하였다.
- 외곽시설이 공사중이거나, 향후 방파제 보강계획 및 관련계획이 수립된 항만 및 외곽시설에 대해서는 중복투자 등의 문제점이 있으므로 금회 보수·보강 우선순위 결정에서 제외하였다.

표 3.6.30 연안항 보수·보강 우선순위 평가항목

평가 항목		가중치	비 고	
항 만 별	1. 항만기여도	가. 화물수송 실적	0.8	
		나. 여객수송 실적	0.8	
		다. 접안시설 연장	0.7	
		소 계	2.3	
시 설 물 별	2. 태풍피해영향	가. 시설별 피해규모	0.6	
		나. 시설별 피해중복도	0.6	
		다. 태풍피해금액	1.5	· 보수·보강금액대비
		소 계	2.7	
	3. 안정성 분석	가. 설계파고 증가	1.0	· 기존설계파고 대비
		나. 시설물 보강연장	1.5	
		다. 보수·보강 공사비	2.5	
		소 계	5.0	
합 계		10.0		

주) : 전체 연안항의 등급점수는 평가항목별로 24점~1점까지 있으며, 각 항만별로 산정된 평가점수(=등급점수×가중치)를 100점 만점으로 환산함. (예, 24점(등급점수)×10점(가중치)=240점(합계, 만점기준), 240점÷2.4(환산계수) = 100점(평가점수))

(2) 연안항 우선순위 항목별 평가

(가) 항만기여도

- 항만기여도는 화물수송실적, 여객수송실적, 어선입출항실적 등 각 검토항목별로 등급점수를 차등 부여하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

■ 화물처리 실적

표 3.6.31 화물수송 실적에 의한 연안항 등급 점수 (단위 : 천RT/년)

항 별	화물수송실적(천톤)				등급점수	비 고
	2004년	2005년	2006년	평 균		
주문진항	41	78	72	64	16	
후포항	-	-	-	-	1	
구룡포항	-	-	-	-	1	
울릉항	240	231	279	250	19	
용기포항	-	44	55	50	15	
연평도항	-	-	-	-	1	
대천항	-	-	-	-	1	
비인항	-	-	-	-	1	
대흑산도항	14	14	22	17	14	
홍도항	-	-	-	-	-	보수·보강계획 없음
팽목항	139	146	177	154	-	외곽시설없음
화흥포항	210	254	290	251	20	
신마항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	162	178	195	178	17	
송공항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	1,146	1,222	1,231	1200	-	외곽시설없음
나로도항	-	-	-	-	1	
거문도항	153	198	195	182	18	
부산남항	-	-	-	-	-	보수·보강계획 없음
한림항	1,049	778	837	888	24	
애월항	765	579	522	622	23	
성산포항	375	398	599	457	21	
화순항	871	499	483	618	22	
추자항	-	-	1	1	13	주1)자료부족으로 인하여 2006년 11,12월 자료만 사용

■ 여객수송 실적

표 3.6.32 여객수송 실적에 의한 연안항 등급 점수

항 별	여객수송실적(명)				등급점수	비 고
	2004년	2005년	2006년	평 균		
주문진항	-	-	-	-	1	
후포항	-	-	-	-	1	
구룡포항	-	-	-	-	1	
울릉항	507,959	467,725	559,203	511,629	24	
용기포항	241,573	222,937	240,783	235,098	19	
연평도항	52,641	55,016	58,037	55,231	16	
대천항	419,995	422,665	426,364	423,008	22	
비인항	-	-	-	-	1	
대흑산도항	303,410	318,580	334,509	318,833	20	
홍도항	342,975	361,298	415,747	373,340	-	보수·보강계획 없음
팽목항	146,177	129,625	143,670	139,824	-	외곽시설없음
화흥포항	377,219	392,308	408,000	392,509	21	
신마항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	458,596	460,211	471,229	463,345	23	
송공항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	228,498	328,293	320,900	292,563	-	외곽시설없음
나로도항	-	3,569	7,431	5,500	14	
거문도항	196,419	251,216	220,163	222,599	18	
부산남항	-	-	-	-	-	보수·보강계획 없음
한림항	17,311	26,740	22,746	22,265	15	
애월항	-	-	-	-	1	
성산포항	-	-	-	-	1	
화순항	-	-	-	-	1	
추자항	101,264	127,212	112,693	113,723	17	

■ 접안시설 연장

표 3.6.33 접안시설 연장에 의한 연안항 등급 점수

항 별	접안시설 연장(m)	등급점수	비 고
주문진항	1,245	17	
후포항	1,347	18	
구룡포항	2,391	24	
울릉항	851	14	
용기포항	419.6	10	
연평도항	265	9	
대천항	1,480.6	20	
비인항	259.5	8	
대흑산도항	1,924	23	
홍도항	243	-	보수·보강계획 없음
팽목항	177	-	외곽시설없음
화홍포항	443	11	
신마항	-	-	외곽시설없음
갈두항	83.5	7	
송공항	225	-	외곽시설없음
녹동신항	916.5	-	외곽시설없음
나로도항	725	13	
거문도항	1,494.5	21	
부산남항	4,341.6	-	보수·보강계획 없음
한림항	1,740	22	
애월항	942	15	
성산포항	1,470	19	
화순항	630	12	
추자항	1,146	16	

(나) 태풍피해 영향

- 태풍피해 영향은 각 항만별, 시설물별 태풍 내습시 피해규모, 방파제별 피해중복도, 피해 금액 대비 보강금액 등 각 검토항목별로 등급점수를 차등 부여하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

■ 태풍피해 규모

표 3.6.34 태풍피해 규모에 의한 연안항 등급 점수

항 별	시설명(m)	피해현황	피해금액 (백만원)	등급점 수	비 고
주문진항	동방파제	· '85.10(제20호 브랜다)	100	18	
후포항	방파제	· '85.10(제20호 브랜다)	193	21	
		· '86.08(제13호 베라)	83		
		· '87.08(제12호 다이너)	66		
		· '02.08(제15호 루사)	650		
		· '03.09(제14호 매미)	735		
	소 계		1,727		
구룡포항	방파제	· '87.08(제12호 다이너)	39	19	
		· '91.07(제9호 캐클린)	191		
		· '03.09(제14호 매미)	58		
		소 계		288	
울릉항	사동항 방파제	· '00.09(제14호 사모마이)	506	24	
		· '03.09(제14호 매미)	5,429		
		· '04.08(제15호 메기)	1,592		
		· '04.08(제15호 메기)	918		
	도동항 방파제	· '85.10(제20호 브랜다)	905		
		· '85.08(제13호 애드)	46		
		· '87.08(제12호 다이너)	65		
		· '03.09(제14호 매미)	40		
	소 계		9,501		
용기포항	-	-	-	1	
연평도항	-	-	-	1	
대천항	-	-	-	1	
비인항	-	-	-	1	
대흑산도항	-	-	-	1	
홍도항	방파호안	· '99.02(폭풍내습)	300	-	보수·보강계획 없음
팽목항	-	-	-	-	외곽시설없음

<표 계속>

항 별	시설명(m)	피해현황	피해금액 (백만원)	등급점 수	비 고
화흥포항	-	-	-	1	
신마항	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	-	-	-	1	
송공항	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	-	-	외곽시설없음
나로도항	-	-	-	1	
거문도항	동방파제	· '87.07(제5호 셸마)	43	23	
		· '98.10(제9호 예니)	180		
		· '02.08(제15호 루사)	2,000		
		· '03.09(제14호 매미)	201		
	제1동방파제	· '02.08(제15호 루사)	577		
	제1서방파제	· '02.08(제15호 루사)	366		
		· '03.09(제14호 매미)	930		
	북방파제	· '02.08(제15호 루사)	14		
		· '03.09(제14호 매미)	249		
소 계		4,560			
부산남항	-	-	-	-	보수·보강계획없음
한림항	-	-	-	1	
애월항	-	-	-	1	
성산포항	동방파제	· '97.09(제19호 올리와)	80	20	
		· '02.08(제15호 루사)	190		
		· '03.09(제14호 매미)	262		
	소 계	532			
화순항	구방파제	· '81.09(제18호 애그니스)	84	22	
	동방파제	· '81.09(제18호 애그니스)	20		
		· '02.08(제15호 루사)	210		
		· '03.09(제14호 매미)	640		
		· '06.07(제3호 에위니아)	910		
소 계		1,864			
추자항	-	-	-	1	

주) 자료 : 「항만시설(방파제) 태풍피해 취약지역 보강방안 용역, 해양수산부, 2006」 보고서 참조

■ 방파제별 태풍피해 중복도

표 3.6.35 방파제별 태풍피해 중복도에 의한 연안항 등급 점수

항 별	시설명	반복 피해횟수					합 계	등급점수	비 고
		1회	2회	3회	4회	5회			
주문진항	방파제	1	-	-	-	-	1	18	
후포항	방파제	5	-	-	-	-	5	20	
구룡포항	방파제	3	-	-	-	-	3	19	
울릉항	방파제	7	-	-	-	-	7	21	
용기포항	-	-	-	-	-	-	-	1	
연평도항	-	-	-	-	-	-	-	1	
대천항	-	-	-	-	-	-	-	1	
비인항	-	-	-	-	-	-	-	1	
대흑산도항	-	-	-	-	-	-	-	1	
홍도항	방파호안	1	-	-	-	-	1	-	보수·보강계획 없음
팽목항	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
화흥포항	-	-	-	-	-	-	-	1	
신마항	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	-	-	-	-	-	-	-	1	
송공항	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
나로도항	-	-	-	-	-	-	-	1	
거문도항	방파제	1	2	-	1	-	25	24	
부산남항	방파제	-	1	1	-	-	13	-	보수·보강계획 없음
한림항	-	-	-	-	-	-	-	1	
애월항	-	-	-	-	-	-	-	1	
성산포항	방파제	-	-	1	-	-	9	22	
화순항	방파제	1	-	-	1	-	17	23	
추자항	-	-	-	-	-	-	-	1	

주) 1) : 합계 = (1회 × 중복횟수 × 1.0) + (2회 × 중복횟수 × 2.0) + (3회 × 중복횟수 × 3.0) + (4회 × 중복횟수 × 4.0) + (5회 × 중복횟수 × 5.0)

주) 자료 : 「항만시설(방파제) 태풍피해 취약지역 보강방안 용역, 해양수산부,2006」 보고서 기준

■ 태풍피해 금액 대비 보강금액

표 3.6.36 태풍피해 금액 대비 보강금액에 의한 연안항 등급 점수

항 별	시설명	①피해금액 (백만원)	②보강금액 (백만원)	② ÷ ①	등급점수	비 고
주문진항	방파제	100	100	1.0	24	
후포항	방파제	1,727	1,962	1.14	21	
구룡포항	방파제	288	300	1.04	22	
울릉항	-	9,501	11,281	1.19	20	
용기포항	-	-	-	-	1	
연평도항	-	-	-	-	1	
대천항	-	-	-	-	1	
비인항	-	-	-	-	1	
대흑산도항	-	-	-	-	1	
홍도항	방파호안	300	300	1.0	-	보수·보강계획없음
팽목항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
화흥포항	-	-	-	-	1	
신마항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	-	-	-	-	1	
송공항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
나로도항	-	-	-	-	1	
거문도항	방파제	4,560	4,560	1.0	24	
부산남항	방파제	635	635	1.0	-	보수·보강계획없음
한림항	-	-	-	-	1	
애월항	-	-	-	-	1	
성산포항	방파제	532	652	1.23	19	
화순항	방파제	1,864	3,131	1.68	18	
추자항	-	-	-	-	1	

(다) 안정성 분석

- 안정성 분석은 각 항만별, 시설물별 설계파고 증가율(원설계파 대비), 외측피복재 보수·보강연장, 상치콘크리트 보수·보강연장, 보수·보강 공사비등 각 검토항목별로 등급점수를 차등 부여하였으며, 그 결과는 다음과 같음.

■ 설계파고 증가

표 3.6.37 설계파고 증가에 따른 연안항 등급 점수

항 별	시설명	①원설계파			②개정설계파			파고 차 ②-①	등 급 점 수	비고
		파고(m)	주기(s)	파향	파고(m)	주기(s)	파향			
주문진항	방파제	2.50	8.10	ESE	3.64	8.10	ESE	1.04	16	
후포항	방파제	7.20	14.00	E	7.39	9.38	SSE	0.19	4	
구룡포항	방파제	5.70	13.00	SSE	5.92	10.26	SE	0.22	4	
울릉항	방파제	6.50	11.00	S	10.06	10.95	ESE	3.56	28	
용기포항	방파제	3.20	9.00	SE	3.40	6.71	SSE	0.20	4	
연평도항	방파제	2.40	5.90	SE	2.40	4.71	ESE	0.00	4	
대천항	방파호안	2.30	5.40	SW	2.46	5.86	SSW	0.16	4	
비인항	방파호안	3.20	10.00	SW	3.26	5.71	SSW	0.06	4	
대흑산도항	방파제	2.70	11.00	NNW	2.36	8.78	NW	-0.34	0	
홍도항	방파제	6.50	13.00	S	5.62	10.54	SE	-0.88	-	보강계획없음
팽목항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
화흥포항	방파제	1.90	5.25	WSW	2.89	5.25	WSW	0.99	10	
신마항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	방파제	3.30	5.26	S	2.62	5.26	S	-0.68	0	
송공항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	외곽시설없음
나로도항	방파제	1.60	5.60	W	1.57	3.81	W	-0.03	0	
거문도항	방파제	1.76	11.21	SE	4.82	11.21	SE	3.06	28	
부산남항	방파제	5.00	15.00		3.72	7.93	S	-1.28	-	보강계획없음
한림항	방파제	4.80	11.00	NNW	5.34	8.83	NW	0.54	10	
애월항	방파제	4.30	10.00	NW	5.17	10.00	NW	0.87	10	
성산포항	방파제	10.21	15.38	ESE	9.33	12.21	ESE	-0.88	0	
화순항	방파호안	10.00	15.00	S	6.01	9.24	SSW	-3.99	0	
추자항	방파제	3.20	8.11	ENE	5.05	8.11	ENE	1.85	22	

■ 시설 보강연장

표 3.6.38 시설 보강연장에 의한 시설물별 등급 점수(1/2)

항 별	시설명(m)	①총연장(m)	②보강연장(m)	②÷①	등급점수	비 고
주문진항	동방과제	920.0	-		7	
	제2돌제	250.0	250.0			
	소 계	1,170.0	250.0	0.214		
후포항	동방과호안	446.0	376.0		14	
	동방과제	851.5	851.5			
	서방과제	607.0	-			
	소 계	1,904.5	1,227.5	0.645		
구룡포항	북방과호안	457.0	275.0		16	
	북방과제	120.0	-			
	남방과호안	269.0	269.0			
	남방과제	244.0	244.0			
	소 계	1,090.0	788.0	0.723		
울릉항	도동항 북방과호안	52.0	-		19	
	도동항 북방과제	92.6	92.6			
	도동항 남방과제	40.0	40.0			
	사동항 남방과호안	147.0	47.0			
	사동항 남방과제	603.0	603.0			
	사동항 북방과호안	413.0	413.0			
	소 계	1,347.6	1,195.6	0.887		
용기포항	방과제	140.0	140.0	1.000	24	
연평도항	동방과제	392.4	-		13	
	남방과호안	145.9	145.9			
	남방과제	104.1	104.1			
	서방과제	348.7	348.7			
	소 계	991.1	598.7	0.604		
대천항	북방과제	920.0	-		10	
	서방과호안	132.0	132.0			
	서방과제	168.0	168.0			
	소 계	1,220.0	300.0	0.246		
비인항	동방과제	350.0	350.0		24	
	남방과호안	274.5	274.5			
	남방과제	255.0	255.0			
	소 계	879.5	879.5	1.000		

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

<표 계속> 시설 보강연장에 의한 시설물별 등급 점수(2/2)

항 별	시설명	①총연장(m)	②보강연장(m)	②÷①	등급점수	비 고
대흑산도항	북방파제	250.0	-		8	
	남방파제	320.0	-			
	중앙방파제	330.0	-			
	외영산도방파제	123.0	123.0			
	내영산도방파제	150.0	150.0			
	소 계	1,173.0	273.0	0.233		
홍도항	방파호안	100.0	-		-	보수·보강 계획없음
	방파제	100.0	-			
	소 계	200.0	-			
팽목항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
화홍포항	정도항방파제	84.0	10.0		17	
	정도항파제제	80.0	80.0			
	대신항방파제	140.0	140.0			
	소 계	304.0	230.0	0.757		
신마항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
갈두항	방파제	240.0	240.0	1.000	24	
송공항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	-	-	-	외곽시설없음
나로도항	동방파제	100.0	100.0		11	
	서방파제	250.0	-			
	남측파제제	113.0	-			
	북측파제제	241.0	241.0			
	소 계	704.0	341.0	0.484		
거문도항	북방파제	140.0	140.0		20	
	동방파제	970.0	950.0			
	남방파제	130.0	-			
	제1동방파제	220.0	220.0			
	제2동방파제	180.0	180.0			
	제1서방파제	110.0	110.0			
	제2서방파제	165.0	165.0			
	소 계	1,915.0	1,765.0	0.922		
부산남항	-	-	-	-	-	보수·보강 계획없음
한림항	북방파제	1,578.0	1,270.0		18	
	서방파제	840.0	670.0			
	소 계	2,418.0	1,940.0	0.802		
애월항	북방파제	270.0	270.0		24	
	동방파제	90.0	90.0			
	소 계	360.0	360.0	1.000		
성산포항	북방파제	600.0	-		12	
	동방파제	820.0	820.0			
	서방파호안	460.0	401.3			
	서방파제	264.0	-			
	소 계	2,144.0	1,221.3	0.570		
화순항	동방파호안	237.0	237.0		9	
	동방파제	758.0	-			
	소 계	995.0	237.0	0.238		
추자항	대서리방파제	140.0	140.0		15	
	파제제	200.0	24.0			
	예초리방파제	165.0	165.0			
	소 계	505.0	329.0	0.651		

■ 보수·보강 공사비

표 3.6.39 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수

항 별	보강공사비(백만원)	등급점수	비 고
주문진항	3,653	12	
후포항	41,639	23	
구룡포항	8,049	16	
울릉항	72,910	24	
용기포항	188	8	
연평도항	6,125	14	
대천항	1,770	11	
비인항	15,670	18	
대흑산도항	299	9	
홍도항	-	-	보수·보강계획없음
팽목항	-	-	외곽시설없음
화홍포항	4,211	13	
신마항	-	-	외곽시설없음
갈두항	412	10	
송공항	-	-	외곽시설없음
녹동신항	-	-	외곽시설없음
나로도항	163	7	
거문도항	39,139	20	
부산남항	-	-	보수·보강계획없음
한림항	39,737	21	
애월항	8,046	15	
성산포항	39,820	22	
화순항	9,122	17	
추자항	15,739	19	
합 계	306,692		

(3) 연안항 보수·보강 우선순위 결정

- 항만별, 시설물별 10개 평가항목의 가중치 합계를 10.0으로 설정하고, 각 항별로 등급점수(A)×가중치(B)의 합계인 평가점수가 100점 만점이 되도록 환산하여 등급점수를 산정하였으며, 그 결과는 다음과 같음.

표 3.6.40 보수·보강 공사비에 의한 시설물별 등급 점수

항 별	1. 항만 기여도			2. 태풍피해 현황			3. 안정성 분석			합 계	평가점수 (100점 기준)
	화물처리 실 적 (가중치 B:0.8)	여객수송 실 적 (가중치 B:0.8)	접안시설 연 장 (가중치 B:0.7)	시설별 피해규모 (가중치 B:0.6)	시설별 피해중복도 (가중치 B:0.6)	태풍피해 금 액 (가중치 B:1.5)	설계과 증 가 (가중치 B:1.0)	시설물 보강연장 (가중치 B:1.5)	보수보강 공사비 (가중치 B:2.5)		
주문진항	12.8	0.8	11.9	10.8	10.8	36.0	16	10.5	30.0	139.6	58.2
후포항	0.8	0.8	12.6	12.6	12.0	31.5	4	21.0	57.5	152.8	63.7
구룡포항	0.8	0.8	16.8	11.4	11.4	33.0	4	24.0	40.0	142.2	59.3
울릉항	15.2	19.2	9.8	14.4	12.6	30.0	28	28.5	60.0	217.7	90.7
용기포항	12.0	15.2	7.0	0.6	0.6	1.5	4	36.0	20.0	96.9	40.4
연평도항	0.8	12.8	6.3	0.6	0.6	1.5	4	19.5	35.0	81.1	33.8
대천항	0.8	17.6	14.0	0.6	0.6	1.5	4	15.0	27.5	81.6	34.0
비인항	0.8	0.8	5.6	0.6	0.6	1.5	4	36.0	45.0	94.9	39.5
대흑산도항	11.2	16.0	16.1	0.6	0.6	1.5	0	12.0	22.5	80.5	33.5
홍도항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
팽목항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
화홍포항	16.0	16.8	7.7	0.6	0.6	1.5	10	25.5	32.5	111.2	46.3
신마항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
갈두항	13.6	18.4	4.9	0.6	0.6	1.5	0	36.0	25.0	100.6	41.9
송공항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
녹동신항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
나로도항	0.8	11.2	9.1	0.6	0.6	1.5	0	16.5	17.5	57.8	24.1
거문도항	14.4	14.4	14.7	13.8	14.4	36.0	28	30.0	50.0	215.7	89.9
부산남항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
한림항	19.2	12.0	15.4	0.6	0.6	1.5	10	27.0	52.5	138.8	57.8
애월항	18.4	0.8	10.5	0.6	0.6	1.5	10	36.0	37.5	115.9	48.3
성산포항	16.8	0.8	13.3	12.0	13.2	28.5	0	18.0	55.0	157.6	65.7
화순항	17.6	0.8	8.4	13.2	13.8	27.0	0	13.5	42.5	136.8	57.0
주자항	10.4	13.6	11.2	0.6	0.6	1.5	22	22.5	47.5	129.9	54.1

표 3.6.41 연안항별 보수·보강 우선순위 선정 결과

구 분	평가점수	우선순위	비 고
주문진항	58.2	6	
후포항	63.7	4	
구룡포항	59.3	5	
울릉항	90.7	1	
용기포항	40.4	13	
연평도항	33.8	16	
대천항	34.0	15	
비인항	39.5	14	
대흑산도항	33.5	17	
홍도항	-	-	
팽목항	-	-	
화흥포항	46.3	11	
신마항	-	-	
갈두항	41.9	12	
송공항	-	-	
녹동신항	-	-	
나로도항	24.1	18	
거문도항	89.9	2	
부산남항	-	-	
한림항	57.8	7	
애월항	48.3	10	
성산포항	65.7	3	
화순항	57.0	8	
추자항	54.1	9	

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

번호	세부 연구목표	달성내용	달성도 (%)
1	폭풍해일 수치 해석모델 수립, 검증 및 개선	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전국 52개 항만 폭풍해일 및 천해 설계파 산출 기반 입력자료 산출 체제 확립 <ul style="list-style-type: none"> - 전국 52개 항만 일대 연안 정밀수심 격자망 수립 - 전국 52개 항만 일대 정밀격자 조석 조화상수 산출 (8개 분조) - 1951년 이후 주요 태풍자료 분석 및 보완, Design Storm 설정 - 태풍 해상풍 모델의 폭풍해일 및 천해 파랑모델에 적용 체제 ○ 현장 실험자료의 분석 및 활용 <ul style="list-style-type: none"> - Duck 실험자료 도입 정밀 분석, Wave setup 및 파랑에 의한 해류 분석 - 일본 PARI의 파랑자료 이용, 반 폐쇄 내만에서의 파랑모델 검증 ○ 만리포 현장 실험 실시 및 현장 실험자료 분석 ○ 장주기파 자료 분석 및 특성 조사, 보령 이상파 분석 	100%
2	폭풍해일에 의한 전국 28개 무역항의 정밀 설계해면 산출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해수면 장기 관측자료 분석, 각 해역별 장기 해수면 상승 추산 ○ 태풍 201개에 대한 해상풍 및 기압 정밀산출과, 폭풍해일 장기 시뮬레이션 및 결과분석에 의한 전국 52개 항만항에 대한 재기년도별 설계해면 산출 ○ 가상 태풍에 대한 정밀 폭풍해일 시뮬레이션 ○ wave setup을 전국 52개 항만에 대해 산출 	100%
3	지진해일에 의한 동해 8개 무역항 정밀 설계해면 추산	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1983년 및 1993년 지진해일에 대한 동해 무역항 (8개) 및 연안항(5개)에서의 설계해면 산출(유한차분 수치모형) ○ 동해안의 무역항 및 연안항을 상세화시킨 유한요소 정밀격자를 이용한 지진해일 수치모의의 최대 수면높이를 계산 ○ 지진해일에 대한 동해 무역항(8개) 및 연안항(5개) 항만구조물의 안전성 평가를 위한 기초자료 확보 ○ 항만구조물의 안전성 평가를 위한 지진해일에 대한 가시화 DVD 제작 	100%

번호	세부 연구목표	달성내용	달성도 (%)
4	개정 심해 설계과에 의한 전국 52개 항만의 천해 설계과 산출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 천해 설계과 산출의 개선 <ul style="list-style-type: none"> - 천해 파랑모델의 외해 경계조건 개선 - 부분 차폐 해안에서는 국지 해상풍 영향 고려, 천해 설계과 산출 - 서해안 항만에 대한 조석, 조류 영향 고려 시뮬레이션 ○ 전국 52개 항만에 대한 정밀격자 천해 설계과 산출 <ul style="list-style-type: none"> - 트인 해안의 경우, 16개 방향별 심해 설계제원 이용 천해 설계과 산출 - 남해안 반차폐 항만에 큰 태풍 20개씩 천해과까지 시뮬레이션 후 극치 해석으로 천해 설계과 산출 - 서해안 각 항에 대해 조석조류 고려 천해 설계과 산출 ○ 산출된 정밀 격자 천해 설계과를 전국 52개 항만의 주요 지점에 대해 검색, 안정성 평가 자료로 제공 	100%
5	심해과 개정에 따른 전국 52개 항만 기존 시설물 간이 안전성 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산출된 설계해면, 천해설계과 연계 전국 52개 항만 정밀안전성 평가 ○ 국내·외 보수·보강 방안 대책사례 조사 ○ 보수·보강 기본방향 설정 	100%

제 2 절 다른 분야 기여도

분야	성취 내용	다른 기여 분야
해일 및 파랑 모델 기초 입력 자료	전 연안 60 m 격자 간격 수심 격자망 구축	- 각종 연안 요소 예보시스템 구축에 기본 자료 제공
	주요 태풍 분석, 정밀 격자 해상풍 산출 체제 수립	- 설계파 재산출에 기반 자료로 제공
정밀 해일 산출 체제	해일 및 천해파 산출 체제 구축	- 재해도 작성에 기반 기술 - 연안 방재 예보시스템 구축
	3차원 연안 순환모델 수립	- 유류오염 확산 예측 - 수색구조 - 선박운항 지원 - 적조 예보 - 환경 오염 모델링
전국 연안 및 항만 설계조건 산출	전국 연안 항만 설계해면 산출	- 연안 방재대책 수립 - 재해도 작성 - 매립 계획 대책
	전국 항만 천해설계파 산출 (천해파 산출 기술)	- 항만 방재 대책 - 연안 침식 대책 - 연안 서비스 개선
항만 및 연안 시설물 설계	지진해일 처오름높이를 예 측함으로써 연안 및 항만의 주요시설물 설계시 침수피 해에 경제적이고 효율적으로 대처할 수 있는 근거 제공	지진해일 처오름높이 예측에 따른 다양한 연구성과는 연안재해 뿐만 아니라 하천 범람 등의 자연재해에 확대적용할 수 있는 자료를 제공함 으로써 침수피해방지시설 기술을 확대하는데 기여
연안침식 대책	처오름높이 예측은 해안선 침식대책, 지형변화 예측 등 에 기본자료로 제공	
항만시설물 보수 및 보강 대책 수립	발생가능한 범람 피해를 예 측하여 시설물의 안전을 고 려한 보수·보강 대책 방안 수립에 기본자료로 제공	

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

정밀 수심 격자, 기상 입력 자료, 조석과 조류의 산출체제 수립은 향후 항만 정밀 격자 해양 예보시스템 구축에 활용하여 효율적 항만 이용과 각종 해상 활동 지원에 활용된다. 장기 태풍 분석 및 활용에 따른 해상풍 산출 체제는 향후 설계과 개선, 재해도 작성 등에 필수 자료로 활용될 예정이다.

정밀 폭풍해일 예보시스템은 기상청에서 제공하는 단기 기상예보 자료와 연결하여 단기 정밀 폭풍해일 예보시스템 구축에 활용되어 전국 연안, 항만의 정밀 격자 폭풍해일 예보 지원으로 활용될 수 있으며, 수립된 3차원 해양 순환 모델은 연안, 항만에서 선박 운항 지원 체제 및 공사시 부유사 이동, 해난 사고시 유류 오염 확산 예보, 수색 구조 예보 지원 시스템 구축에 활용될 수 있다.

전 해안 항만에서 폭풍에 의한 설계해면 산출결과는 항만 및 연안 시설물의 설계시 설계조건으로 사용되며, 또한 전 연안에 대한 매립 계획 수립 및 설계, 기존 항만 연안 시설물의 안정성 평가, 태풍 등 악기상에 대한 국가적 자연재해 대응 장기계획 수립에 활용될 예정이다.

천해 설계과 산출을 위해 준비한 정밀격자 천해파랑 산출 격자망과, 수치모델 및 그 입력자료로 사용하기 위해 수립한 조석 및 조류 산출체제는 기상청의 단기 기상예보 결과와 연결하여, 전 연안 및 항만 일대에서 정밀격자 파랑예보 지원시스템 구축에 활용된다.

기존 경험에 근거한 원시적인 접근방식에 비하여 고정밀 수치모형을 도입한 과학적인 접근방법을 통해 학술적인 가치와 실용적인 가치를 동시에 만족시키는 우수한 연구 성과를 기대할 수 있다.

본 연구를 통해 산출된 지진해일 설계해면은 항만 및 연안 시설물의 설계 조건에 반영하여 경제적이고 효율적인 최적설계에 활용한다.

고정밀 수치모형을 활용한 안정성 평가 자료를 구축하여 항만구조물 안정성 평가 결과에 신뢰도를 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다. 항만시설물 안전성 평가결과는 항만 시설물, 연안부지 및 시설의 안전성평가, 보강방안 수립에 기본 자료로 활용될 수 있다.

항만시설물 보수·보강대책 수립 결과는 증가되는 태풍 강도, 지진해일에 대비한 기존 항만시설 방재대책을 위한 계획수립 및 보강설계에 활용될 수 있으며, 또한 해일 및 고파에 대비한 항만시설물 방재대책 수립 및 우선순위 결정, 보수·보강 예산 및 상세 설계시 활용될 수 있다.

상기 각종 활용을 요약 정리하면 다음 표와 같다.

표 5.1.1. 활용 분야 요약

구분	활용분야	활용 내용
태풍자료 및 정밀격자 기상 입력 체제	심해 설계과 개선에 기상 입력으로 활용	폭풍해일 장기 추산을 위해 확보한 과거 장기 태풍 정밀 분석자료와 정밀격자 기상 입력자료는 향후 심해 설계과 개선을 위해 장기 파랑 재추산에 기상 입력자료로 활용
	태풍에 의한 재해도 작성	폭풍해일 장기 추산을 위해 확보한 과거 장기 태풍 정밀 분석자료와 정밀격자 기상입력 자료는 향후 폭풍에 의한 저지대 침수범위 추정으로 재해도 작성에 필수 기상 입력 자료로 활용
정밀 수심격자망 자료	정밀격자 연안 모델 수립	항만 일대 연안에서 각종 정밀격자 연안 모델 수립에 수심 격자망으로 활용(부유사 이동, 연안침식 대책, 유류 오염, 수색구조 등)
정밀 격자 조석, 조류	조석 조류 예보	항만 일대의 정밀격자에 대해 조석 및 조류 예보 지원으로 각종 연안 해상활동 지원에 활용
	파랑 예보에 활용	황해의 연안에서 파랑예보의 정확도를 높이기 위해 천해파랑 모델의 입력자료로 정밀격자 조석 조류 활용
정밀 폭풍해일 수치모델	방재 예보시스템	수립된 폭풍해일 모델은 기상청의 기상예보 자료와 연결 폭풍해일 예보 지원시스템 구축에 활용
	유류 오염, 수색 구조, 적조 대책	정밀격자 3차원 연안 순환모델은 유류오염 확산, 수색구조, 적조 확산 예측 지원시스템 구축에 활용
	해양 환경 관리	황해 해양환경, 생태 예측시스템의 입력으로 활용하여 황해환경 및 자원보전 관리 기반기술 수립에 기여
	해양환경 생태 모델 확장	수립한 여러 종류의 3차원 해양순환 및 확산 모델은 앞으로 황해에서 해양 환경 및 생태 모델로 발전시키는데 활용
	연안 국지 해일/퇴적물 모델로 확장	Unstructured grid 모델로 도입한 FVCOM 모델을 확장시켜 연안에서 파랑모델과 연결시켜 국지 해일 침수모델 및 퇴적물 이동 모델로의 확장에 활용

구분	활용분야	활용내용
전 연안 폭풍해일 설계해면(해일고)	연안 개발 계획	각종 연안개발 계획 수립에 기본 자료로 활용 연안 매립 계획 및 설계에 기반 자료로 활용
	연안 구조물 설계	방파제 설계시 첨단고 결정에 활용 각종 연안 시설물 설계시에 설계해면 자료로 활용
	연안 구조물 안정성 분석	각종 시설물의 안정성 분석 및 평가에 천해 설계과와 같이 기본 입력자료로 활용
	연안 방재 대책 수립	태풍에 의한 연안재해 저감대책 수립에 기본 자료로 활용
천해 파랑 산출 체제	국지파랑 예보시스템 구축	기상청의 기상예보 결과와 연결하여 항만 일대 정밀 격자 파랑예보 지원 시스템 구축에 활용
	각종 연안 활용	연안침식, 항만매몰, 연안 퇴적물 이동예측 등 각종 연안공학에 핵심기술로 정밀격자 천해파랑 모델 활용
천해 설계과	연안 시설물 안정성 평가	기존의 방파제 등 각종 연안 시설물의 안정성 분석 및 대책 수립에 활용
	연안 구조물 설계	항만 일대에 연안 구조물 계획 및 설계에 활용
	연안 방재 대책 수립	이상파에 의한 연안재해 방지대책 수립에 활용
지진해일 설계해면 산출기반 구축	항만 및 연안 시설물 설계	본 연구를 통해 산출된 지진해일 설계해면은 항만 및 연안 시설물의 설계조건에 반영하여 경제적이고 효율적인 최적설계에 활용.
설계해면 추산 및 간이 안정성 평가	항만시설물의 안정성 평가	고정밀 수치모형을 활용한 안정성 평가자료를 구축하여 항만구조물 안정성 평가에 활용
무역항 항만시설물의 안정성 평가 및 보수·보강 기본방향 설정	지진해일에 대한 항만내의 안정성 검토	지진해일 내습시 항만내의 해면상승 현황 예측에 활용
연안항 항만시설물의 안정성 평가 및 보수·보강 방안 수립	각종 연안 대책	해안선 침식대책 및 지형변화 예측에 기본 자료로 활용, 해수범람 연안침수 및 시설물 보호를 위한 방재대책에 활용
	항만시설물 보수, 보강 대책 수립	지진해일에 대비한 기존 항만 시설 방재 대책을 위한 계획 수립, 추진에 활용

구분	활용분야	활용내용
항만 시설물의 안전성 평가	항만 시설물 설계시 안전성 평가	항만시설물, 연안부지 및 시설의 안전성 평가, 보강 방안 수립에 기본 자료로 활용, 항만 시설물의 안전성 평가의 기반 자료로 천해 설계과 산출 결과 활용
항만시설물 보수, 보강 대책 수립	항만시설물 보수·보강 설계	증가되는 태풍 강도, 지진해일에 대비한 기존 항만 시설 방재 대책을 위한 계획 수립 및 보강설계에 활용, 해일 및 고파에 대비한 항만 시설물 방재 대책 수립 및 우선 순위결정, 보수·보강 예산 및 상세 설계시 활용

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 폭풍에 의한 해수면 상승 산출 모델링 연구조사

최근에 복잡한 해안선을 지닌 연안에 대해서 nesting 과정을 거치지 않고 효율적으로 잘 적용할 수 있는 unstructured grid 모델들이 많이 개발되어 실용화 되고 있는 추세이다. 아울러 파랑에 의한 연안 순환과 해면 상승의 영향까지 잘 고려할 수 있는 파랑과 연안 순환 모델이 연계되어 폭풍해일 추산과 연안 침수 범람 추산에 실용화되고 있는 추세이다. 예를 들면 unstructured grid 모델인 ADCIRC 모델은 미육군공병대의 천해파랑 모델인 STWAVE 모델 결과로 부터 ADCIRC 모델 격자로 내삽하여 서로 couple시켜 연안 순환과 해수면 상승에 파랑의 영향을 고려하는 모델로 발전시켜 활용해오는 것을 최근에는 세계적으로 널리 사용되고 있는 천해파랑 모델인 SWAN 파랑 모델을 unstructured grid 모델로 개발한 것과 couple시켜 서로 같은 격자망을 연안 순환과 파랑을 연계시켜 먼저 SWAN 모델에서 구해지는 radiation stress가 ADCIRC 모델의 외력으로 입력되어 수위와 연안 순환이 계산되고 그 결과가 다시 SWAN 모델에서 입력으로 작용하여 파랑 계산시에 수위와 흐름의 영향이 잘 고려되게 하고 연안 순환과 폭풍해일 시뮬레이션에서 바람, 파랑, 조석, 강 유입 등이 모두 잘 고려되는 모델로 발전시켜 멕시코 만에서 허리케인 Katrina, Rita에 의한 파랑과 폭풍해일의 시뮬레이션으로 충분히 검정하여 신뢰도를 높이고 있다.

본 과업에서 정밀 격자 폭풍해일 추산에 주로 사용한 FVCOM 모델은 연안 폭풍해일에 뿐만 아니라 일본 요코하마 대학에서는 2004년 인도네시아 쓰나미 침수 범람 모델로 발전시켜 FVCOM 모델이 각종 연안 방재에 활용성을 높이고 있고, 3차원 해양 순환 모델로 해양 환경, 생태 모델로 발전 시켜 활용되고 있다. 이 모델은 전 지구의 조석 및 3차원 해양 순환 모델로 발전시켰을 뿐만 아니라 고해상도화 된 계산 영역에 쿠로시오 변동 등 지역해양 예보모델로도 활용되고 있다. 최근에는 연안에서 unstructured grid 모델로 SWAN 모델을 발전시켜 같은 격자망에서 연안 순환과 파랑 모델을 coupling시켜 연안 순환과 해수면 추산에 파랑의 영향을 잘 고려할 수 있게 하여 연안 방재 및 연안 퇴적물 이동의 시뮬레이션에도 이용할 수 있게 발전시켰다. 최신 FVCOM 모델과 파랑 모델을 연계시킨 연안 모듈은 가까운 시일에 메뉴얼도 발간되어 배포될 예정이다.

미국 정부 기관으로부터 많은 지원을 받고 있는 ADCIRC 모델을 3차원 모델로 발전시켜 환경, 생태 문제로 확장시킬려는 노력을 많이 하고 있는데 젊은 연구원들 중에는

3차원 모델로 쉽게 일반화 되지는 않을 것이란 비공식적인 의견을 표시하는 자도 많은 것 같아 3차원으로 범용적 활용성이 인정되고 있는 FVCOM 모델이 장점이 더 많은 것으로 사료된다. 그 밖에도 unstructured grid 모델 중에서 공개된 것으로 ELCIRC (Eulerian-Lagrangian Circulation) 모델과 같이 비교적 안정적이고 효율적인 것으로 3차원 연안 순환 예보에 활용 될 수 있는 모델이 점차 개발되어 공개되고 있어 앞으로는 unstructured grid 모델로서 3차원 연안 순환 모델링이 더욱 일반화될 것으로 보인다.

제 2 절 해외 지진해일 설계해면 연구조사

1. 일본

(1) 설계해면은 항만시설의 구조 설정 및 안전검토에 사용되는 것으로 조석, 폭풍해일, 지진해일 등에 의한 이상조위의 실측치 또는 추산치를 사용하여 결정한다.

(2) 폭풍해일 및 지진해일은 자주 발생하지 않는 현상으로 동시에 발생하지 않는 것으로 가정한다. 폭풍해일 또는 지진해일에 의해 부진동이 유발되는 경우가 있으나 설계해면 산출시에는 이러한 현상을 동시에 고려하지 않고, 부진동을 이외에 발달하는 장주기 수면진동으로 고려한다.

2. 미국

(1) 설계해면을 정할 때 고려사항 (그림 6.1.1 참조)

가. 최대 삭망평균만조위(High water ordinary spring tide, HWSpT)와

평균고조위(Mean high water, HW)의 차이

나. 폭풍해일에 의한 해수면 상승

다. 100년간 상승하는 해수면 높이(North Sea Coast에서는 100년에 20 ~ 30cm가 상승함)

라. Wave setup

마. 지진해일

바. 부진동

사. 기상학적 요인

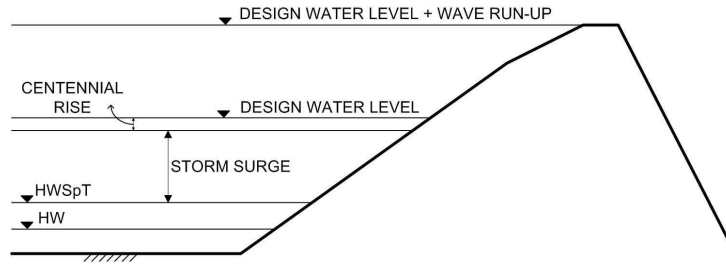


그림 6.2.1 설계 해면

(2) 설계해면은 파랑에 의한 물리적인 힘에 의해 영향을 받는다. 즉, 파고가 높아지면 설계해면이 높아지고 파고가 낮아지면 설계해면이 낮아진다.

(3) 기상학적인 요인에 의해서도 해수면이 변화하지만 기상학적 요인은 설계해면에 크게 영향을 미치지 못하므로 생략이 가능하다.

(4) 고립파는 실제로 존재하지는 않지만 지진에 의해 나타나는 지진해일과 같이 주기가 긴 파랑은 고립파와 비슷한 성질을 갖는다.

제 3 절 해외 주요시설 지진해일 영향고려 현황조사

1. 일본

(1) 지진해일은 최고조위, 최저조위, 편차, 파고 및 주기 등을 고려한다. 이러한 특성은 장기간에 걸친 실측치, 기존 재해시의 흔적고 등에 의해 적절한 방법으로 결정한다.

(2) 지진해일 모형실험은 입사파형을 사전에 정의하고 지진단층모델의 해저지반 변동량과 초기의 수위변동량이 같다고 가정하여 방파제의 효과와 매립 등의 지형변경의 지진해일에 대한 영향을 검토할 수 있다. 지진해일의 수리모형 실험은 모형의 경계에서 사전의 수치모형실험에서 재현한 지진해일 파형을 조파하는 것으로 방파제의 효과 등을 검토할 수 있다.

(3) 지진해일에 의한 파력은 장파에 의한 파력으로 주어진다. 그림 2는 지진해일의 파력 모식도이고, 여기서 $H/L < 0.04$ 의 비쇄파 조건에 대해 정수면상으로부터 $y = 1.5H$ 의 높이에서 0이고, 정수면에서 p 로 되는 직선분포로 하고, 수면 아래는 균일하다. 그리고 $p = 1.1\rho_0gH$ 이다. 파향에 대한 보정은 하지 않고, 파고 H 는 진행파로서의 지진해일 파고이다.

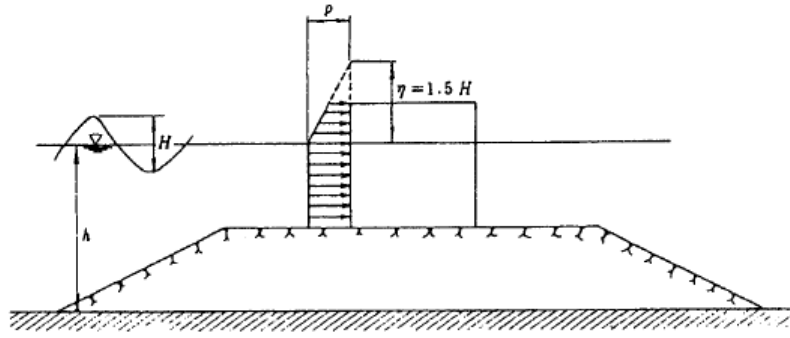


그림 6.3.1 지진해일의 파력 모식도

(4) 지진해일에 대한 대책을 세우기 위해서는 대상 지역을 상정하고 적절한 모형실험으로 지진해일의 파고, 처오름 높이, 도달 시각 등을 계산할 필요가 있다. 모형실험을 위해서는 지진해일의 초기 파형을 알아야하고 이를 위해 가상 지진을 상정한다. 가상지진의 설정할 때는 다음 세 가지를 고려한다. 첫 번째로 대상 지역의 기왕 최대 지진해일, 두 번째로 비교적 각종 자료가 있는 최근의 지진으로 방재계획상 적절한 규모의 것, 세 번째로 지진 공백역에 있어서의 상정 지진이다.

(5) 지진해일 대책을 주목적으로 하는 방파제인 지진해일 방파제는 지진해일 영향의 저감효과 등을 감안하여 평면배치, 마루높이 등을 적절히 설정해야 한다. 또한 지진해일 방파제는 파랑 등의 외력에 대한 구조의 안정이외에 지진해일 내습시의 특성을 감안하여 구조물의 안정성을 확보해야 한다.

2. 미국

(1) 지진해일에 대한 연구결과와 이론상의 문제는 1960년대부터 거론된다. 지진해일은 작은 진폭의 매우 긴 파장으로 바다를 횡단하고 지진해일은 육지에 도달할 때 천수변형, 공명 현상, 회절 및 집중 현상 등에 의해 매우 거대해 진다.

(2) 하와이의 힐로만에서는 지진해일에 의해 바닷물이 해수면보다 11m가 높아졌다.

(3) 방파제 등의 주요시설의 설계 시 지진해일에 대한 영향을 고려해야 하며, 적절한 수리모형 및 수치모형 실험을 통하여 검토해야 한다.

제 7 장 참고 문헌

- 강시환, 전기천, 방경훈, 박광순, 2002, 동북아시아 해상에서의 태풍중심기압과 최대풍속의 경험적 관계식, 한국기상학회지, 38권 5호, 523-530.
- 강시환, 전기천, 박광순, 방경훈, 2002. 해상풍 관측자료에 근거한 태풍 해상풍 모형간의 상호비교, 한국해양학회지, 7권 3호, 100-107.
- 문일주, 오임상, 2003. 파랑-해양순환 접합모형을 이용한 폭풍해일에 대한 파랑과 조석의 영향 연구. 한국기상학회지, 제39권, 제5호, pp. 563-574.
- 방익찬, 오임상, 1994. 우리나라 근해의 장기적인 해수면 변화
- 오임상, 알렉산더 비 라뷔노비치, 박명숙, 로알드 엔 만수로브, 1993. 동해 해수면의 계절적인 변동에 대하여, 한국해양학회지, 28권 1호, 1-16.
- 이다운, 이호만, 서장원, 유승협, 윤용훈, 2005. 신경망을 이용한 폭풍해일 예측연구. 한국기상학회지, 제41권, 제5호, pp. 661-670.
- 이석우, 1967. 한국연안의 월평균해면의 변화에 대하여
- 이종섭, 1999. 부산항 조석과 조위편차의 장기변동특성
- 이종찬, 권재일, 박광순, 전기천, 해일고 산정 수치모의 실험, 태풍 매미, 2008. 한국해양공학회지, 20권 1호, 93-100.
- 인태훈, 이봉희, 조대희, 조용식, 2003. 범람 모의를 위한 이동경계조건. 한국수자원학회논문집, 제36권, 제6호, pp. 937-947.
- 최병호, 에픽 페리놉스키, 홍성진, 2006. 병렬 FEM 모형을 이용한 1993년 동해 지진해일 시뮬레이션. 한국지진공학회논문집, 제10권, 제3호, pp. 35-45.
- 국립해양조사원, 1969-2000 수로기술연보
- 수산청, 1988. 해역별(동해·남해) 심해파 추정 보고서.
- 한국해양연구소, 1989. 연안방재시설의 설계기준 산출 연구(I). BSPG 00076-230-2.
- 한국해양연구소, 1993-7. 천해파랑 산출시스템 구축 사업보고서 I-IV 해양수산부.
- 한국해양연구원, 2001. 대규모 연안개발에 따른 조위예측 연구개발 보고서, pp.190
- 한국해양연구원, 2005. 전해상 심해설계파 추산 보고서.
- IPCC, IPCC AR4 Synthesis Report, 2008.
- Arakawa, A. and Lamb V.R., 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA General Circulation Model. Methods of Computational Physics, 17, pp.174-264

- Bister, M., and K. Emanuel, 2002a. Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity. 1. Interannual to interdecadal variability. *J. Geophys. Res.*, 107, 4801, doi:10.1029/2001JD000776.
- Bister, M., and K. Emanuel, 2002b. Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity. 2. Climatology from 1982 - 1995. *J. Geophys. Res.*, 107, 4621, doi:10.1029/2001JD000780.
- Black, P.G., 1992. Evolution of maximum wind estimates in typhoons. *On Tropical Cyclone Disasters*, China Ocean Press, Beijing, China.
- Carrier, G.F., 1991. Tsunami propagation from a finite source. *Proceedings of Workshop*, NGDC, Hawaii, pp.101-115.
- Cartwright, D. E. and M. S. Longuet-Higgins, 1956. Statistical distribution of the maxima of random function, *Proc. Roy. Soc., London*, Vol. A237, pp. 212-232.
- Chen, C., H. Liu, and R. Beardsley, 2003. An unstructured grid, finite volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20(1), 159-186.
- Chen, C., G. Cowles, and R. C. Beardsley, 2004. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual, 1st ed., Tech. Rep. 04-0601, 183 pp., School of Mar. Sci. and Technol., Univ. of Mass., Dartmouth.
- Chen, C., R. C. Beardsley, and G. Cowles, 2006a. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system, *Oceanography*, 19(1), 78 - - 89.
- Chen, C., G. Cowles, and R. C. Beardsley, 2006b. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual, 2nd ed., Tech. Rep. 06-0602, 315 pp., School of Mar. Sci. and Technol., Univ. of Mass., Dartmouth.
- Chen, C., H. Huang, R. C. Beardsley, H. Liu, Q. Xu, and G. Cowles. 2006c. A finite-volume numerical approach for coastal ocean circulation studies: Comparisons with finite-difference models, *J. Geophys. Res.*, 112, C03018, doi:10.1029/2006JC003485.
- Cho, Y.-S. and Kim, H.-J., 2006. Sea level change due to typhoons in Korean Peninsula, *Journal of Coastal Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 678-682.
- Cho, Y.-S., Lakshumanan, C., Choi, B.-H. and Ha, T., 2008. Observations of run-up and inundation levels from the tele tsunami in the Andaman and Nicobar Islands: A field report. *Journal of Coastal Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 216-223.

- Cho, Y.-S., 1995 Numerical Simulations of Tsunami Propagation and Run-up. Ph.D. thesis, Cornell University.
- Cho, Y.-S. and Yoon, S.B., 1998 A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations. Coastal Engineering Journal, Vol. 40, pp. 191-205.
- Cho, Y.-S., Sohn, D.-H. and Lee, S.-O., 2007. Practical modified scheme of linear shallow-water equations for distant propagation of tsunamis. Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 1,769-1,777
- Choi, B.-H., Hong, S.-J. and Pelinovsky, E., 2006. Distribution of runup heights of the December 26, 2004 tsunami in the Indian Ocean. Geophysical Research Letters, Vol 33, No. 13, L13601.
- Choi, Byung Ho, Sang Jun Roh, Jae Hak Lee and Fang Guohong, 1999. An Analysis on the mean sea level change of the seas adjacent to Korea. Acta Oceanologica Sinica, Vol. 18, No.3, 337-353.
- Dean, R. G. and R. A. Dalrymple, 1984. Water wave mechanics for engineers and scientists, Prentice-Hall, Inc., NJ, pp. 353.
- Denbo, D.W., McHugh, K.T., Osborne, J.R., Sorvik, P. and Venturato A.J., 2007. NOAA tsunami forecasting system: Design and implementation using service oriented architectur. The 23rd Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, 87th AMS Annual Meeting, San Antonio.
- Emanuel, K. A., 1986. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I. J. Atmos. Sci., 42, 1062-1071.
- Emanuel, K. A., 1995: Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. J. Atmos. Sci., 52, 3969-3976.
- Emanuel, K., R. Sundararajan, and J. Williams, 2008: Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89, 347-367.
- Fujita, 1962(see T. Uji, 1975), Numerical Estimation of Sea Waves in a Typhoon Area, Meteorol. Res. Inst. (JMRI) Tokyo, Papers in Meteorol. and Geophys. Vol. 26, No. 4, 199-217.
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of marine structures, Univ. of Tokyo Press.,

pp. 323.

- Gotoh, H., Harada, E. and Ohniwa, K., 2009. Contribution of the evacuation simulator for a town area remodeling plan for protection against disasters of tsunami. APAC2009.
- Gumbel, E. J., 1958. Statistics of extremes. Columbia Univ. Press, New York, 375p.
- Hanslow, D. and Nielsen, P., 1993. Shoreline set-up on natural beaches. Journal of Coastal Research SI, pp. 1 - 10.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, DselmaCartwright, K. Enke, J. A. Wieng, H. Gienapp, DselmaHasselmann, P. Krusemann, A. Meerburg, P. Muller, DseJ. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973. Measurement of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wavenappject(JONSWAa), Dearsch, Hydrogr. Z., Suppl. A., Vol. 8, No. ee.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J. H. Allender and T. P. Barnett, 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models, J. Phys. Oceanogr., Vol. 15, pp. 1378-1391.
- Holland, G., 1996. The maximum potential intensity of tropical cyclones. J. Atmos. Sci., .
- Imamura, F. and Goto, C., 1988 Truncation error in tsunami simulation by the finite difference method. Coastal Engineering Journal, Vol. 31, pp. 245-263.
- Imamura, F., Shuto, N. and Goto, C., 1988. Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunamis. Proceedings of 6th Congress Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Japan, pp. 265-272.
- Kajiura, K. and Shuto, N., 1990. Tsunami, in the sea, edited by B. Le Mehaute. and D.M. Hanes., Vol. 9, Part B, John Wiley & Sons, pp. 395-420.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P. A. E. M. Janssen, 1994. Dynamics and modelling of ocean waves, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 532.
- Liang, N. K. and C. C. Chien, 1984. A typhoon wave hindcasting technique, Proc. 19th ICEC pp. 561-576.
- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S.B. and Seo, S.N., 1994. Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo. Hawaii, in Recent

- Development in Tsunami Research, edited by M.I. El-Sabh. Kluwer Academic Publishers, pp. 99-115.
- Liu, P.L.-F., Wu, T.-R., Raichlen, F., Synolakis, C.E. and Borrero, J.C., 2005. Run-up and rundown generated by three-dimensional sliding masses. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 536, pp. 107 - 144.
- Lynch, D.R. and Officer, C.B., 1985, Analytic test cases for three-dimensional hydrodynamic models, *Int. J. Numer. Methods in Fluids*, 5 : 529-543.
- Martins, F., 1999. *Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma Abordagem de Coordenada Vertical Genérica*. Ph. D, Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Tecnico
- Mei, C.C., 1989. *The applied dynamic of ocean surface waves*. World Sciectific.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974, A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31: 1792-1896.
- Miller, B. I., 1958: On the maximum intensity of hurricanes. *J. Meteor.* 15, 184-195.
- Na, J. Y., J. W. Seo and S. K. Han, 1992, Monthly-mean sea surface winds over the adjacent seas of the Korea Peninsular, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 27, 1-10.
- National Fisheries Research and Development Agency, 1986, *Mean Oceanographic Charts of the Adjacent Seas of Korea*, Pusan, Korea. 186pp.
- Neves, R. J. J., 1985. *Étude Experimentale et Modélisation des Circulations Trasitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado*. Ph. D. Thesis, Univ. Liège
- Occhipinti, G., Lognonne, P., Kherani, E.A. and Hebert, H., 2006. Three-dimensional waveform modeling of ionospheric signature induced by the 2004 Sumatra tsunami. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L20104.
- Oh, Im Sang, Moon, Il Ju and Youn, Yong Hoon, 1997. Daily Mean Sea Level and Atmospheric Pressure Along the Coasts of the Northwestern Pacific Ocean. *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 32, No.4, 171-180.
- Resio, D. and Perrie, W. 1991. A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-wave interactions, *J. Fluid Mech.*, Vol. 223, pp. 603-629.
- Santos, A. J., 1995. *Modelo Hidrodinâmico Tridimensional de Circulação Oceânica e Estuarina*. Ph. D, Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

- Seung, Y. H. and K. Kim, 1993, A numerical modeling of the East Sea circulation, J. Oceanol. Soc. Korea, 28, 292-304.
- Shyy, W., 1985. A study of finite difference approximations to steady-state, convection-dominated flow problems. Journal of Computational Physics, Vol. 87, pp. 415-438.
- Smolarkiewicz, P. K., 1984. A fully multidimensional positive definite advective transport algorithm with small implicit diffusion, J. Comput. Phys., 54, 325-362.
- Titov, V., Rabinovich, A.B., Mofjeld, H.O., Thomson, R.E. and González, F.I., 2005. The global reach of the 26 December 2004 Sumatra Tsunami. Science, Vol. 309. No. 5743, pp. 2,045-2,048.
- The SWAMP Group(24 Authors), 1985. Ocean Wave Modelling. Plenum Press, New York, pp. 256.
- Tolmann, H. L., 1992. Effects of numerics on the physics in a third- generation wind-wave model, J. Phys. Oceanogr., Vol. 22, pp. 1095-1111.
- U. S. Army Engineer Waterway Experiment Station., 1984. Shore Protection Manual. Vicksburg, Mississippi, U.S.A.
- The WAM-Development and Implementation Group : S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, L. Bertotti, C. V. Cardone, J. A Ewing, J. A. Greenwood, A. Guillaume, P. A. E. M. Janssen, G. J. Komen, P. Lionello, M. Resitad, and L. Zambresky., 1988. The WAM Model - a third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Oceanogr., Vol. 18, No. 12, 1775-1810.
- Venturato, A.J., Denbo, D.W., McHugh, K.T., Osborne, J.R., Sorvik, P. and Moore, C., 2007. NOAA tsunami forecasting system: Using numerical modeling tools to assist in tsunami warning guidance. The 23rd Conference on Interactive Information Processing Systems(IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, The 87th AMS Annual Meeting, San Antonio, USA.
- Wu, J., 1980. Wind-stress coefficient over sea surface near neutral conditions - A revisit, J Phys. Oceanor., Vol. 10, pp. 727-740.
- Yanagi, Tetsuo and Tatsuya Akaki, 1993. Variation of the mean sea level around Japan. Umi no Kenkyu, Vol. 2, No.6, 423-430 (in Japanese).
- Yanagi, Tetsuo and Tatsuya Akaki, 1994. Sea Level Variation in the Eastern Asia. Journal of Oceanography, Vol. 50, 643-651.

부 록

부록 1

전 연안 50년빈도 폭풍해일 설계해면고

부록 1. 전 연안 50년빈도 폭풍해일 설계해면고

격자 번호	경도(deg.)	위도(deg.)	설계 해면 (m)										
10	125.00833	37.93333	1.04	610	125.41944	37.73056	1.22	1250	126.06944	37.78611	2.36		
20	125.00556	37.91667	1.01	620	125.43889	37.72778	1.23	1260	126.08611	37.78056	2.30		
30	125.02222	37.90556	1.05	630	125.46389	37.72500	1.24	1270	126.08889	37.76667	2.26		
40	125.04167	37.90278	1.19	640	125.48056	37.73611	1.30	1280	126.10000	37.75000	2.19		
50	125.06667	37.90556	1.08	650	125.48056	37.75278	1.34	1290	126.11944	37.74722	2.13		
60	125.07222	37.88889	1.02	660	125.49444	37.76667	1.34	1300	126.14167	37.74167	2.07		
70	125.08889	37.87778	1.13	670	125.49722	37.78611	1.38	1310	126.15833	37.75278	2.06		
80	125.11111	37.87222	1.20	680	125.50833	37.80278	1.63	1320	126.16389	37.77500	2.09		
90	125.13333	37.86667	1.21	690	125.51111	37.77778	1.49	1330	126.16111	37.79444	2.11		
100	125.14444	37.87222	1.24	700	125.53056	37.76944	1.40	1340	126.15000	37.81111	2.14		
110	125.16944	37.86944	1.23	710	125.55000	37.76667	1.37	1350	126.15000	37.82778	2.15		
120	125.19167	37.87500	1.31	720	125.54722	37.78611	1.56	1360	126.16667	37.83889	2.35		
130	125.21111	37.88333	1.30	730	125.56111	37.78333	1.51	1370	126.19167	37.84167	2.26		
140	125.22778	37.89444	1.22	740	125.57778	37.77778	1.43	1380	126.21389	37.84722	2.30		
150	125.24444	37.90556	1.20	750	125.56667	37.76667	1.34	1390	126.21944	37.85833	2.31		
160	125.26667	37.90000	1.23	760	125.59167	37.76389	1.37	1400	126.23889	37.85000	2.36		
170	125.28333	37.90556	1.27	770	125.61389	37.76389	1.33	1410	126.25833	37.84167	2.25		
180	125.29167	37.88611	1.25	780	125.61389	37.78611	1.45	1420	126.27778	37.84444	2.22		
190	125.27778	37.87778	1.20	790	125.61667	37.80000	1.51	1430	126.29444	37.85556	2.24		
200	125.29167	37.86944	1.21	800	125.61667	37.81111	1.58	1440	126.31389	37.86389	2.26		
210	125.27500	37.85833	1.19	810	125.63333	37.82222	1.61	1450	126.33056	37.87500	2.37		
220	125.26389	37.84167	1.16	820	125.63611	37.83056	1.65	1460	126.35278	37.88056	2.42		
230	125.24167	37.83611	1.20	830	125.62222	37.83889	1.64	1470	126.37778	37.88333	2.52		
240	125.23056	37.81944	1.17	840	125.62222	37.85556	1.72	1480	126.39722	37.89167	2.57		
250	125.25278	37.81944	1.19	850	125.63889	37.86111	1.77	1490	126.40833	37.89167	2.66		
260	125.27222	37.81111	1.17	860	125.63333	37.88333	1.88	1500	126.41111	37.87778	2.65		
270	125.28889	37.80556	1.15	870	125.64444	37.90000	2.01	1510	126.41944	37.85833	2.48		
280	125.30278	37.80278	1.18	880	125.66389	37.89167	1.94	1520	126.43889	37.85000	2.35		
290	125.32222	37.81111	1.20	890	125.68889	37.89444	1.94	1530	126.45833	37.84167	2.30		
300	125.33333	37.82778	1.22	900	125.70833	37.90278	2.04	1540	126.46667	37.82222	2.08		
310	125.35000	37.82222	1.23	910	125.72500	37.91389	2.15	1550	126.48611	37.81944	2.07		
320	125.35556	37.84444	1.27	920	125.73611	37.93056	2.32	1560	126.50833	37.81389	2.08		
330	125.37222	37.83889	1.30	930	125.72778	37.93333	2.35	1570	126.52778	37.80556	2.11		
340	125.38611	37.84722	1.32	940	125.71667	37.93889	2.39	1580	126.54444	37.79444	2.14		
350	125.38333	37.86667	1.39	950	125.71944	37.95833	2.57	1590	126.56111	37.78333	2.22		
360	125.39722	37.85833	1.44	960	125.70556	37.97222	2.67	1600	126.57500	37.76944	2.20		
370	125.42500	37.85833	1.53	970	125.68889	37.97222	2.69	1610	126.60000	37.77222	2.29		
380	125.43056	37.84722	1.39	980	125.68889	37.98889	2.73	1620	126.61389	37.78611	2.34		
390	125.43889	37.83333	1.33	990	125.70833	37.99167	2.72	1630	126.63611	37.79167	2.38		
400	125.42500	37.81944	1.31	1000	125.71667	38.00556	2.80	1640	126.65556	37.79444	2.51		
410	125.41389	37.83056	1.30	1010	125.72222	38.01667	2.87	1650	126.65556	37.81667	2.54		
420	125.40833	37.83056	1.32	1020	125.74722	38.01389	2.87	1660	126.66667	37.83333	2.55		
430	125.39722	37.81389	1.28	1030	125.76111	38.00000	2.79	1670	126.67222	37.82778	2.54		
440	125.39167	37.79167	1.24	1040	125.78333	37.99444	2.77	1680	126.68333	37.81111	2.54		
450	125.37222	37.80000	1.22	1050	125.80556	37.99444	2.78	1690	126.67778	37.78889	2.56		
460	125.35833	37.78611	1.17	1060	125.80278	37.98056	2.70	1700	126.67500	37.76944	2.52		
470	125.37500	37.78056	1.20	1070	125.79167	37.96389	2.59	1710	126.68333	37.75556	2.54		
480	125.36667	37.77222	1.16	1080	125.80278	37.94722	2.47	1720	126.68889	37.73333	2.49		
490	125.35000	37.76111	1.12	1090	125.82500	37.94167	2.47	1730	126.68611	37.71389	2.51		
500	125.34722	37.75278	1.10	1100	125.83611	37.92500	2.45	1740	126.67778	37.69444	2.52		
510	125.33333	37.73889	1.08	1110	125.85000	37.91111	2.44	1750	126.68056	37.67500	2.55		
520	125.31944	37.72500	1.06	1120	125.86111	37.89444	2.43	1760	126.66944	37.67500	2.54		
530	125.31944	37.70833	1.03	1130	125.88056	37.88611	2.42	1770	126.66111	37.68889	2.53		
540	125.33611	37.69722	1.00	1140	125.89167	37.86944	2.41	1780	126.66667	37.71111	2.51		
550	125.33889	37.67778	1.00	1150	125.90000	37.85000	2.40	1790	126.67222	37.73333	2.48		
560	125.35556	37.68333	1.12	1160	125.90556	37.82778	2.32	1800	126.65833	37.74722	2.47		
570	125.35278	37.69722	1.25	1170	125.91667	37.81111	2.19	1810	126.65278	37.76944	2.47		
580	125.36111	37.71111	1.38	1180	125.93611	37.81944	2.37	1820	126.63611	37.77500	2.37		
590	125.37222	37.72778	1.41	1190	125.95833	37.82500	2.37	1830	126.61944	37.76389	2.39		
600	125.39444	37.72778	1.30	1200	125.98056	37.83056	2.37	1840	126.60000	37.75556	2.27		
				1210	126.00000	37.82222	2.36	1850	126.57778	37.75556	2.24		
				1220	126.02500	37.82500	2.35	1860	126.56111	37.76667	2.20		
				1230	126.04444	37.81667	2.27	1870	126.54167	37.77500	2.17		
				1240	126.06111	37.80556	2.31	1880	126.53056	37.76944	2.11		

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

1890	126.51389	37.76389	2.10	2530	126.60556	37.42778	1.90	3170	126.82500	36.94722	1.63
1900	126.50556	37.78333	2.12	2540	126.60833	37.40278	1.85	3180	126.84722	36.95000	1.65
1910	126.48611	37.79167	2.09	2550	126.61944	37.38611	1.84	3190	126.86389	36.93889	1.70
1920	126.46944	37.80278	2.10	2560	126.62778	37.37222	1.80	3200	126.84444	36.93056	1.65
1930	126.45278	37.81389	2.14	2570	126.64444	37.36111	1.83	3210	126.83889	36.91389	1.68
1940	126.43889	37.82778	2.21	2580	126.62222	37.35556	1.76	3220	126.85833	36.90556	1.74
1950	126.42222	37.82778	2.32	2590	126.59444	37.35556	1.75	3230	126.88056	36.91111	1.78
1960	126.39722	37.82500	2.34	2600	126.58333	37.34444	1.70	3240	126.90556	36.91389	1.92
1970	126.38611	37.80833	2.30	2610	126.61111	37.34444	1.74	3250	126.90833	36.88889	1.85
1980	126.36667	37.80000	2.29	2620	126.63611	37.34167	1.75	3260	126.88056	36.88889	1.77
1990	126.34722	37.79167	2.27	2630	126.66111	37.34444	1.81	3270	126.86111	36.88056	1.72
2000	126.35278	37.76944	2.31	2640	126.66111	37.36111	1.86	3280	126.83889	36.88611	1.68
2010	126.35278	37.74722	2.29	2650	126.67500	37.37500	1.93	3290	126.81944	36.89444	1.68
2020	126.35278	37.72500	2.24	2660	126.69444	37.38333	2.02	3300	126.81389	36.91667	1.66
2030	126.35556	37.70556	2.21	2670	126.71944	37.38056	2.07	3310	126.80000	36.93056	1.63
2040	126.36389	37.69722	2.20	2680	126.70833	37.36389	1.99	3320	126.79167	36.95000	1.61
2050	126.33889	37.70000	2.22	2690	126.69444	37.35000	1.92	3330	126.78333	36.96944	1.60
2060	126.32222	37.71111	2.22	2700	126.68333	37.33333	1.86	3340	126.76667	36.98056	1.60
2070	126.32222	37.73333	2.24	2710	126.66111	37.32778	1.76	3350	126.74722	36.98889	1.58
2080	126.32778	37.75000	2.27	2720	126.63889	37.32222	1.73	3360	126.72778	36.99167	1.57
2090	126.30556	37.75000	2.26	2730	126.61667	37.31667	1.71	3370	126.70833	36.99444	1.53
2100	126.28611	37.74722	2.23	2740	126.59722	37.30833	1.67	3380	126.69167	37.00000	1.55
2110	126.28889	37.73889	2.23	2750	126.58056	37.29722	1.65	3390	126.66389	37.00000	1.50
2120	126.28611	37.71389	2.19	2760	126.56667	37.28333	1.63	3400	126.63889	37.00278	1.49
2130	126.26944	37.70833	2.15	2770	126.54722	37.28611	1.62	3410	126.61667	37.00833	1.48
2140	126.28611	37.69722	2.17	2780	126.54722	37.27500	1.60	3420	126.59722	37.01667	1.47
2150	126.30278	37.68611	2.16	2790	126.55833	37.25833	1.60	3430	126.57778	37.02500	1.45
2160	126.31944	37.67500	2.16	2800	126.56111	37.23889	1.59	3440	126.55833	37.03333	1.43
2170	126.32500	37.65833	2.15	2810	126.54167	37.23056	1.56	3450	126.53889	37.04167	1.40
2180	126.33889	37.64444	2.19	2820	126.53056	37.24722	1.55	3460	126.52500	37.05556	1.39
2190	126.35556	37.65556	2.14	2830	126.51389	37.25833	1.57	3470	126.50556	37.06389	1.38
2200	126.37500	37.66389	2.15	2840	126.52500	37.24167	1.55	3480	126.48889	37.05833	1.34
2210	126.38056	37.68611	2.18	2850	126.54167	37.23056	1.56	3490	126.48056	37.03889	1.32
2220	126.37778	37.70000	2.20	2860	126.54444	37.21111	1.54	3500	126.46667	37.02500	1.28
2230	126.38889	37.68333	2.17	2870	126.54722	37.20278	1.52	3510	126.46667	37.00833	1.27
2240	126.40556	37.67222	2.19	2880	126.56667	37.19444	1.53	3520	126.45000	37.00833	1.25
2250	126.40556	37.65000	2.16	2890	126.57778	37.21111	1.58	3530	126.42778	37.01389	1.25
2260	126.38611	37.64167	2.14	2900	126.59722	37.20833	1.60	3540	126.42778	37.02500	1.25
2270	126.36667	37.63333	2.12	2910	126.61667	37.21111	1.62	3550	126.41944	37.01667	1.25
2280	126.37222	37.61667	2.11	2920	126.62500	37.22500	1.64	3560	126.39444	37.01389	1.23
2290	126.38611	37.60278	2.12	2930	126.64167	37.21389	1.69	3570	126.37222	37.00833	1.21
2300	126.40278	37.59167	2.12	2940	126.64167	37.19167	1.61	3580	126.35556	37.00833	1.20
2310	126.43056	37.59167	2.16	2950	126.65833	37.18611	1.61	3590	126.33611	37.00000	1.19
2320	126.45833	37.59167	2.15	2960	126.65556	37.16667	1.61	3600	126.32778	36.98611	1.16
2330	126.47500	37.59722	2.17	2970	126.65278	37.15278	1.57	3610	126.35000	36.98055	1.17
2340	126.49722	37.59722	2.20	2980	126.67778	37.15556	1.63	3620	126.37222	36.98055	1.20
2350	126.50833	37.58056	2.17	2990	126.68333	37.15000	1.63	3630	126.36944	36.96666	1.19
2360	126.52500	37.58611	2.20	3000	126.67778	37.13333	1.59	3640	126.34444	36.96944	1.19
2370	126.51667	37.60556	2.23	3010	126.68056	37.11389	1.58	3650	126.33889	36.95833	1.18
2380	126.53611	37.61389	2.25	3020	126.69444	37.10000	1.56	3660	126.35278	36.95000	1.22
2390	126.53611	37.62500	2.28	3030	126.71111	37.08889	1.63	3670	126.36667	36.94166	1.24
2400	126.53889	37.63889	2.29	3040	126.72778	37.07778	1.66	3680	126.38333	36.93611	1.24
2410	126.55000	37.62222	2.28	3050	126.74167	37.06389	1.67	3690	126.36944	36.92222	1.22
2420	126.55833	37.60278	2.28	3060	126.75000	37.05000	1.67	3700	126.38889	36.91944	1.24
2430	126.57222	37.58889	2.27	3070	126.74722	37.03056	1.62	3710	126.40000	36.93055	1.26
2440	126.58333	37.57222	2.20	3080	126.77222	37.02778	1.69	3720	126.41389	36.92222	1.28
2450	126.59722	37.55833	2.18	3090	126.79444	37.02222	1.78	3730	126.41389	36.90555	1.33
2460	126.60278	37.54167	2.14	3100	126.78056	37.00833	1.66	3740	126.41944	36.90000	1.36
2470	126.60000	37.51667	2.08	3110	126.79444	36.99444	1.61	3750	126.39722	36.89444	1.33
2480	126.60556	37.49444	2.06	3120	126.81389	36.99167	1.66	3760	126.38056	36.88333	1.28
2490	126.60833	37.48611	2.06	3130	126.82778	36.97778	1.64	3770	126.36389	36.87222	1.22
2500	126.59444	37.47222	1.97	3140	126.83889	36.96111	1.65	3780	126.36389	36.85555	1.27
2510	126.59167	37.44722	1.90	3150	126.83889	36.95000	1.65	3790	126.35000	36.84166	1.23
2520	126.60278	37.44167	2.02	3160	126.82500	36.96389	1.65	3800	126.34722	36.86111	1.20

부록 1. 전 연안 50년빈도 폭풍해일 설계해면고

3810	126.32778	36.86388	1.21	4450	126.28889	36.61944	1.38	5090	126.49444	36.13055	1.34
3820	126.31944	36.84444	1.21	4460	126.28889	36.59722	1.33	5100	126.50556	36.14722	1.39
3830	126.30000	36.84166	1.21	4470	126.29167	36.58333	1.45	5110	126.53056	36.15000	1.52
3840	126.30556	36.85833	1.21	4480	126.31111	36.59166	1.80	5120	126.54722	36.13888	1.51
3850	126.31389	36.87222	1.21	4490	126.31389	36.56666	1.47	5130	126.56111	36.13055	1.53
3860	126.32778	36.88611	1.20	4500	126.32778	36.55277	1.40	5140	126.57778	36.13611	1.57
3870	126.32222	36.90277	1.20	4510	126.32778	36.53055	1.21	5150	126.59444	36.12500	1.62
3880	126.30833	36.91666	1.20	4520	126.32500	36.51111	1.21	5160	126.60556	36.10833	1.65
3890	126.30833	36.93333	1.19	4530	126.33611	36.49444	1.14	5170	126.61944	36.10000	1.69
3900	126.30833	36.95000	1.18	4540	126.32778	36.47500	1.02	5180	126.63889	36.09166	1.76
3910	126.30556	36.96944	1.16	4550	126.33333	36.45833	1.06	5190	126.61944	36.08333	1.65
3920	126.29722	36.97222	1.15	4560	126.34167	36.43888	1.07	5200	126.63056	36.06666	1.65
3930	126.28611	36.96111	1.13	4570	126.35278	36.43333	1.11	5210	126.64167	36.05555	1.68
3940	126.28889	36.93611	1.12	4580	126.36111	36.41388	1.14	5220	126.65833	36.04444	1.73
3950	126.28611	36.91666	1.11	4590	126.38056	36.41666	1.52	5230	126.66111	36.02500	1.70
3960	126.28056	36.90000	1.11	4600	126.39722	36.41111	1.54	5240	126.66389	36.00555	1.62
3970	126.25833	36.90555	1.08	4610	126.41667	36.40277	1.59	5250	126.68333	36.00833	1.72
3980	126.24167	36.91111	1.07	4620	126.42778	36.41388	1.76	5260	126.70556	36.00277	1.81
3990	126.21944	36.90555	1.05	4630	126.43056	36.42777	1.81	5270	126.73056	36.00000	1.89
4000	126.20000	36.89722	1.04	4640	126.42222	36.44166	1.85	5280	126.74167	36.01666	2.07
4010	126.18611	36.88888	1.02	4650	126.41111	36.45833	1.89	5290	126.75278	36.00555	2.03
4020	126.18889	36.88055	1.04	4660	126.41111	36.47500	1.99	5300	126.74167	35.98888	2.02
4030	126.18889	36.85833	0.99	4670	126.40278	36.49444	2.02	5310	126.71944	35.98888	1.83
4040	126.19167	36.84444	0.99	4680	126.39444	36.51388	2.09	5320	126.70000	35.99722	1.77
4050	126.17778	36.83055	0.98	4690	126.38611	36.52777	2.11	5330	126.67778	35.99166	1.65
4060	126.18056	36.81666	0.98	4700	126.38056	36.54444	2.19	5340	126.65556	35.98611	1.50
4070	126.17222	36.82500	0.98	4710	126.37500	36.56666	2.29	5350	126.63333	35.98055	1.43
4080	126.16944	36.84444	0.99	4720	126.37222	36.57500	2.31	5360	126.60833	35.97777	1.38
4090	126.15556	36.84722	0.98	4730	126.38333	36.59166	2.37	5370	126.58056	35.97777	1.29
4100	126.15278	36.83333	1.00	4740	126.37500	36.60555	2.40	5380	126.55833	35.97777	1.23
4110	126.15000	36.81388	0.95	4750	126.36389	36.61111	2.40	5390	126.53333	35.97500	1.19
4120	126.14444	36.79722	0.95	4760	126.36111	36.62500	2.42	5400	126.52222	35.96388	1.13
4130	126.13333	36.78055	0.93	4770	126.38333	36.61944	2.44	5410	126.52500	35.93888	1.12
4140	126.11111	36.77500	0.92	4780	126.40833	36.61666	2.44	5420	126.52500	35.92222	1.07
4150	126.11944	36.75555	0.92	4790	126.42500	36.60555	2.41	5430	126.51667	35.90277	1.05
4160	126.13056	36.73888	0.92	4800	126.44444	36.59722	2.39	5440	126.50833	35.88333	1.00
4170	126.12222	36.71944	0.90	4810	126.46111	36.58611	2.37	5450	126.50000	35.86388	0.98
4180	126.11111	36.70277	0.92	4820	126.46667	36.56388	2.28	5460	126.48889	35.84722	0.99
4190	126.12778	36.71388	0.99	4830	126.46667	36.54166	2.26	5470	126.48889	35.84166	0.99
4200	126.14444	36.72500	1.06	4840	126.48333	36.53055	2.26	5480	126.47778	35.82500	1.00
4210	126.15278	36.74444	1.13	4850	126.48056	36.50555	2.07	5490	126.45556	35.83055	0.98
4220	126.16944	36.75555	1.20	4860	126.48056	36.48333	2.00	5500	126.44444	35.82500	1.00
4230	126.18611	36.74444	1.22	4870	126.48611	36.46111	1.93	5510	126.45556	35.80833	1.23
4240	126.20556	36.73611	1.46	4880	126.49444	36.44166	1.94	5520	126.47222	35.80833	1.29
4250	126.20278	36.71666	1.25	4890	126.49167	36.42222	1.80	5530	126.48611	35.80000	1.24
4260	126.19444	36.70833	1.06	4900	126.48611	36.40000	1.76	5540	126.49444	35.78055	1.51
4270	126.17500	36.71666	1.06	4910	126.48056	36.38333	1.68	5550	126.50556	35.76388	1.49
4280	126.15556	36.70833	1.01	4920	126.50278	36.37777	1.80	5560	126.51389	35.74444	1.46
4290	126.15000	36.69166	1.13	4930	126.52222	36.36944	1.77	5570	126.52500	35.72777	1.55
4300	126.13056	36.68888	0.96	4940	126.53889	36.35833	1.87	5580	126.53889	35.71388	1.50
4310	126.13333	36.66944	1.09	4950	126.54722	36.34444	1.87	5590	126.55000	35.69722	1.47
4320	126.15278	36.67777	1.42	4960	126.52778	36.33611	1.77	5600	126.53056	35.68888	1.37
4330	126.17500	36.67777	1.41	4970	126.50833	36.32777	1.58	5610	126.51944	35.67222	1.36
4340	126.20000	36.67500	1.55	4980	126.50833	36.31666	1.66	5620	126.50278	35.66111	1.36
4350	126.21111	36.69166	1.76	4990	126.51667	36.29722	1.70	5630	126.48611	35.65000	1.32
4360	126.23333	36.69722	1.75	5000	126.53333	36.28611	1.76	5640	126.46667	35.64166	1.20
4370	126.23611	36.71666	1.87	5010	126.54444	36.26944	1.66	5650	126.46667	35.63055	1.68
4380	126.25833	36.71666	1.87	5020	126.53611	36.25000	1.46	5660	126.46111	35.60833	1.44
4390	126.26944	36.71666	1.88	5030	126.53056	36.23333	1.40	5670	126.48056	35.60000	2.03
4400	126.26389	36.70000	1.80	5040	126.53611	36.21111	1.41	5680	126.49167	35.58333	1.96
4410	126.26389	36.67777	1.68	5050	126.52778	36.19166	1.33	5690	126.51111	35.58055	1.91
4420	126.28056	36.67222	1.75	5060	126.52500	36.17222	1.35	5700	126.53056	35.57777	1.93
4430	126.29444	36.65833	1.67	5070	126.50833	36.16111	1.24	5710	126.54722	35.58333	1.99
4440	126.30000	36.63611	1.46	5080	126.49167	36.15555	1.24	5720	126.56944	35.58888	2.18

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

5730	126.59167	35.58888	2.35	6370	126.33611	35.15277	1.27	7010	126.25278	34.94166	1.31
5740	126.61667	35.58611	2.51	6380	126.32778	35.13888	1.19	7020	126.26667	34.95555	1.39
5750	126.63611	35.59444	2.49	6390	126.30833	35.13055	1.17	7030	126.28333	34.94444	1.48
5760	126.65833	35.58888	2.48	6400	126.28889	35.13888	1.06	7040	126.27500	34.93055	1.36
5770	126.66667	35.56944	2.49	6410	126.27500	35.14722	1.03	7050	126.29444	34.93333	1.43
5780	126.65556	35.56944	2.50	6420	126.26111	35.14444	0.99	7060	126.29444	34.95000	1.48
5790	126.63333	35.57500	2.51	6430	126.25000	35.12777	0.96	7070	126.30833	34.95277	1.48
5800	126.61389	35.57222	2.50	6440	126.24444	35.11111	0.94	7080	126.31111	34.93888	1.46
5810	126.60556	35.55277	2.46	6450	126.24444	35.10000	0.94	7090	126.30556	34.92222	1.40
5820	126.59167	35.54444	2.42	6460	126.22222	35.10555	0.92	7100	126.28889	34.91666	1.39
5830	126.56389	35.54444	2.25	6470	126.20833	35.11944	0.91	7110	126.28611	34.90277	1.49
5840	126.54722	35.53333	2.14	6480	126.20278	35.12500	0.91	7120	126.30000	34.88888	1.39
5850	126.52500	35.53333	1.92	6490	126.19444	35.11666	0.90	7130	126.28333	34.88888	1.32
5860	126.50278	35.52777	1.73	6500	126.18333	35.11111	0.88	7140	126.27500	34.86944	1.29
5870	126.48889	35.51944	1.66	6510	126.16389	35.10277	0.87	7150	126.26389	34.86388	1.20
5880	126.47778	35.50833	1.60	6520	126.15833	35.08611	0.85	7160	126.23889	34.86111	1.08
5890	126.46667	35.49166	1.55	6530	126.15833	35.07500	0.91	7170	126.23056	34.85277	1.14
5900	126.45556	35.47500	1.53	6540	126.17500	35.06388	1.02	7180	126.22500	34.84722	1.20
5910	126.44444	35.45833	1.50	6550	126.19444	35.05555	1.12	7190	126.24722	34.84166	1.13
5920	126.43333	35.44166	1.47	6560	126.19444	35.04444	1.05	7200	126.26944	34.84166	1.18
5930	126.41944	35.42777	1.31	6570	126.17500	35.05277	1.01	7210	126.28333	34.85555	1.35
5940	126.40833	35.41111	1.39	6580	126.15556	35.05555	0.96	7220	126.30278	34.85277	1.50
5950	126.40556	35.39166	1.58	6590	126.13333	35.05555	0.95	7230	126.31944	34.85277	1.66
5960	126.41389	35.37222	1.60	6600	126.13611	35.04166	1.06	7240	126.33333	34.85000	1.62
5970	126.40000	35.36944	1.54	6610	126.15278	35.03055	1.10	7250	126.33889	34.83333	1.47
5980	126.39444	35.36388	1.39	6620	126.16944	35.02500	1.16	7260	126.32778	34.81666	1.31
5990	126.38611	35.34444	1.36	6630	126.18889	35.01666	1.28	7270	126.31389	34.80277	1.28
6000	126.37778	35.32500	1.31	6640	126.20000	35.01111	1.28	7280	126.33333	34.79444	1.18
6010	126.37222	35.30277	1.30	6650	126.20000	35.03333	1.31	7290	126.33889	34.79444	1.18
6020	126.36111	35.28611	1.23	6660	126.21111	35.05000	1.40	7300	126.33889	34.81111	1.22
6030	126.33889	35.28611	1.14	6670	126.22778	35.05555	1.57	7310	126.36111	34.81666	1.27
6040	126.32500	35.27222	1.15	6680	126.22778	35.03888	1.43	7320	126.36944	34.81388	1.29
6050	126.32500	35.25000	1.23	6690	126.22778	35.01666	1.37	7330	126.35278	34.80277	1.23
6060	126.30833	35.25000	1.16	6700	126.25000	35.01111	1.40	7340	126.36111	34.78888	1.17
6070	126.30000	35.23055	1.13	6710	126.24722	34.98611	1.37	7350	126.35833	34.78055	1.18
6080	126.30000	35.20833	1.16	6720	126.25556	34.97222	1.38	7360	126.35278	34.76388	1.12
6090	126.32222	35.20277	1.24	6730	126.27222	34.98333	1.43	7370	126.35556	34.74444	1.11
6100	126.33889	35.19166	1.30	6740	126.26389	35.00277	1.44	7380	126.37500	34.73611	1.18
6110	126.35833	35.20000	1.36	6750	126.26111	35.01666	1.43	7390	126.38333	34.72222	1.12
6120	126.36389	35.18888	1.42	6760	126.27500	35.03055	1.55	7400	126.36944	34.70833	1.11
6130	126.35833	35.17222	1.31	6770	126.26389	35.04722	1.56	7410	126.35556	34.69444	1.10
6140	126.37222	35.15833	1.37	6780	126.28333	35.05555	1.63	7420	126.34722	34.71388	1.10
6150	126.38611	35.14444	1.41	6790	126.29722	35.04722	1.62	7430	126.33333	34.72777	1.11
6160	126.40278	35.13333	1.49	6800	126.31389	35.05277	1.71	7440	126.33056	34.74166	1.10
6170	126.41389	35.11666	1.57	6810	126.31111	35.06666	1.72	7450	126.31111	34.75000	1.08
6180	126.43056	35.10555	1.61	6820	126.31944	35.08611	1.83	7460	126.32222	34.76666	1.09
6190	126.45278	35.10000	1.63	6830	126.33611	35.08055	1.86	7470	126.32500	34.78611	1.14
6200	126.45278	35.08888	1.62	6840	126.33611	35.06388	1.77	7480	126.30833	34.78055	1.14
6210	126.44167	35.08333	1.60	6850	126.34722	35.05833	1.77	7490	126.29167	34.77500	1.09
6220	126.44722	35.06666	1.59	6860	126.35278	35.03611	1.73	7500	126.29722	34.76388	1.07
6230	126.43333	35.05277	1.56	6870	126.37222	35.04444	1.75	7510	126.28333	34.75000	1.04
6240	126.41667	35.04166	1.74	6880	126.38889	35.03333	1.74	7520	126.27500	34.73055	0.98
6250	126.41389	35.02777	1.78	6890	126.37500	35.01944	1.73	7530	126.26944	34.70833	0.90
6260	126.40278	35.04444	1.71	6900	126.35833	35.00833	1.67	7540	126.25833	34.69166	0.94
6270	126.40833	35.06666	1.60	6910	126.34167	34.99722	1.59	7550	126.25833	34.66944	0.88
6280	126.39167	35.07777	1.46	6920	126.35833	34.98611	1.66	7560	126.26111	34.65000	0.91
6290	126.38056	35.07777	1.41	6930	126.34167	34.97500	1.52	7570	126.26944	34.63611	0.93
6300	126.36667	35.07500	1.37	6940	126.32222	34.97777	1.46	7580	126.28889	34.62777	0.95
6310	126.35000	35.08055	1.35	6950	126.30278	34.98611	1.45	7590	126.27500	34.61388	0.92
6320	126.35278	35.09444	1.36	6960	126.29444	34.96666	1.42	7600	126.26944	34.60833	0.90
6330	126.33611	35.10555	1.36	6970	126.28056	34.96944	1.40	7610	126.27778	34.59444	0.86
6340	126.34167	35.12222	1.35	6980	126.25833	34.96388	1.35	7620	126.29722	34.58611	0.84
6350	126.34722	35.14444	1.36	6990	126.24444	34.95555	1.32	7630	126.29167	34.57500	1.07
6360	126.33889	35.16388	1.28	7000	126.23333	34.95000	1.32	7640	126.27222	34.58333	0.87

부록 1. 전 연안 50년빈도 폭풍해일 설계해면고

7650	126.25000	34.58888	0.86	8290	126.46944	34.43611	1.76	8930	126.69167	34.40000	1.56
7660	126.23889	34.57222	0.86	8300	126.46667	34.42777	1.66	8940	126.66944	34.40000	1.72
7670	126.24444	34.55555	0.92	8310	126.48333	34.43055	1.75	8950	126.64722	34.39444	1.62
7680	126.23333	34.53888	0.89	8320	126.50000	34.43611	1.81	8960	126.63889	34.40833	1.80
7690	126.21389	34.53055	0.80	8330	126.50833	34.42222	1.72	8970	126.65556	34.41944	1.69
7700	126.21111	34.51666	0.81	8340	126.50556	34.40833	1.54	8980	126.67222	34.41944	1.66
7710	126.19167	34.51388	0.80	8350	126.48611	34.40555	1.45	8990	126.68333	34.42500	1.65
7720	126.17778	34.50000	0.80	8360	126.49444	34.38611	1.36	9000	126.69722	34.43888	1.64
7730	126.16667	34.48333	0.80	8370	126.47500	34.37777	1.24	9010	126.71944	34.44444	1.60
7740	126.14444	34.47777	0.78	8380	126.47222	34.36388	1.18	9020	126.73333	34.45277	1.59
7750	126.12778	34.46666	0.79	8390	126.46944	34.35000	1.12	9030	126.74722	34.46666	1.60
7760	126.11667	34.45000	0.82	8400	126.46944	34.33333	1.07	9040	126.75278	34.48888	1.57
7770	126.10000	34.43888	0.85	8410	126.47500	34.34444	1.16	9050	126.76389	34.50555	1.65
7780	126.09167	34.41944	0.85	8420	126.49167	34.35555	1.24	9060	126.76667	34.52500	1.66
7790	126.10000	34.40000	0.86	8430	126.50556	34.36388	1.28	9070	126.76944	34.54444	1.64
7800	126.11111	34.38333	0.86	8440	126.51944	34.35000	1.23	9080	126.76667	34.56944	1.62
7810	126.12778	34.38333	0.86	8450	126.52222	34.33055	1.12	9090	126.76944	34.59444	1.59
7820	126.13611	34.37500	0.91	8460	126.51389	34.31666	1.02	9100	126.76111	34.61388	1.57
7830	126.13611	34.35833	0.94	8470	126.50556	34.30277	0.94	9110	126.77500	34.62777	1.56
7840	126.15278	34.36388	1.23	8480	126.51667	34.29722	0.96	9120	126.78889	34.61944	1.57
7850	126.16667	34.35000	0.99	8490	126.53056	34.30000	0.97	9130	126.78056	34.60000	1.59
7860	126.18611	34.35277	1.20	8500	126.55000	34.30833	0.98	9140	126.78889	34.58611	1.61
7870	126.20833	34.35833	1.30	8510	126.56667	34.31944	1.03	9150	126.79167	34.56666	1.63
7880	126.22500	34.36944	1.73	8520	126.58889	34.31388	0.95	9160	126.79167	34.54444	1.65
7890	126.24444	34.37777	1.65	8530	126.60556	34.31944	1.31	9170	126.78611	34.53333	1.66
7900	126.26944	34.38055	1.35	8540	126.60833	34.33888	1.28	9180	126.78889	34.52222	1.67
7910	126.26667	34.39444	1.41	8550	126.61944	34.35555	1.39	9190	126.79167	34.50277	1.69
7920	126.28333	34.38333	1.35	8560	126.62222	34.38055	1.52	9200	126.79167	34.48055	1.67
7930	126.28611	34.36388	1.21	8570	126.62222	34.39166	1.66	9210	126.79444	34.46666	1.49
7940	126.30556	34.37222	1.48	8580	126.63889	34.38611	1.54	9220	126.80556	34.45555	1.45
7950	126.30556	34.38888	1.68	8590	126.64167	34.36111	1.43	9230	126.82500	34.44722	1.34
7960	126.30278	34.40277	1.67	8600	126.64167	34.33888	1.21	9240	126.81667	34.43888	1.35
7970	126.31389	34.40833	1.72	8610	126.65833	34.32777	1.09	9250	126.79444	34.43333	1.39
7980	126.32222	34.41111	1.76	8620	126.67222	34.31388	1.02	9260	126.77500	34.42500	1.35
7990	126.33333	34.40000	1.79	8630	126.68611	34.30000	0.99	9270	126.76389	34.40833	1.32
8000	126.34167	34.41388	1.92	8640	126.70278	34.29444	1.07	9280	126.75556	34.38888	1.33
8010	126.35278	34.43055	1.82	8650	126.72222	34.29166	0.99	9290	126.75833	34.38055	1.32
8020	126.36667	34.44444	1.69	8660	126.74167	34.29166	1.08	9300	126.76944	34.37500	1.31
8030	126.36667	34.46111	1.76	8670	126.76667	34.28888	1.00	9310	126.76667	34.35555	1.29
8040	126.36389	34.47500	1.83	8680	126.77222	34.29444	1.19	9320	126.78333	34.36111	1.29
8050	126.37500	34.48055	1.86	8690	126.76944	34.31388	1.16	9330	126.79167	34.38055	1.28
8060	126.38056	34.49166	1.94	8700	126.75000	34.32222	1.17	9340	126.81389	34.38055	1.23
8070	126.38056	34.50833	2.05	8710	126.76667	34.32777	1.14	9350	126.83333	34.37777	1.19
8080	126.36389	34.51944	2.06	8720	126.78889	34.32222	1.14	9360	126.85000	34.38888	1.23
8090	126.35278	34.53611	2.01	8730	126.80278	34.32500	1.14	9370	126.86389	34.37500	1.16
8100	126.34167	34.55277	2.01	8740	126.83056	34.32500	1.01	9380	126.88056	34.36388	1.14
8110	126.32222	34.54444	2.01	8750	126.83611	34.30277	0.99	9390	126.90000	34.35555	1.12
8120	126.30833	34.55833	1.94	8760	126.85000	34.30000	1.01	9400	126.92222	34.35555	1.06
8130	126.31944	34.55833	1.98	8770	126.86389	34.31388	1.08	9410	126.93333	34.36666	1.09
8140	126.33611	34.56944	2.17	8780	126.88056	34.30833	1.03	9420	126.95000	34.37222	1.22
8150	126.35833	34.56388	2.18	8790	126.88333	34.32777	1.13	9430	126.94444	34.39444	1.27
8160	126.37778	34.56111	2.13	8800	126.90000	34.33888	1.15	9440	126.95556	34.41111	1.25
8170	126.38333	34.54444	2.10	8810	126.88056	34.34166	1.13	9450	126.94167	34.40833	1.25
8180	126.38611	34.53055	2.17	8820	126.86111	34.35000	1.17	9460	126.92778	34.39444	1.22
8190	126.40278	34.54166	2.19	8830	126.84167	34.35277	1.18	9470	126.90833	34.40277	1.30
8200	126.41944	34.55277	2.05	8840	126.82500	34.35277	1.20	9480	126.88611	34.40833	1.34
8210	126.43611	34.54166	2.08	8850	126.81389	34.33611	1.16	9490	126.86944	34.40833	1.34
8220	126.45000	34.52777	2.14	8860	126.79444	34.34444	1.28	9500	126.85278	34.41388	1.33
8230	126.45000	34.52222	2.18	8870	126.77778	34.33888	1.32	9510	126.85833	34.43055	1.29
8240	126.46667	34.51111	2.18	8880	126.75833	34.33611	1.25	9520	126.84722	34.41944	1.32
8250	126.45833	34.49722	2.08	8890	126.74167	34.33888	1.33	9530	126.83611	34.43611	1.33
8260	126.45556	34.47777	1.95	8900	126.73333	34.35833	1.35	9540	126.85000	34.44444	1.33
8270	126.46944	34.46388	1.91	8910	126.72778	34.38055	1.35	9550	126.86944	34.43611	1.31
8280	126.45556	34.45000	1.75	8920	126.71389	34.39444	1.44	9560	126.86944	34.41944	1.28

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

9570	126.88611	34.42500	1.40	10210	127.10278	34.50833	1.26	10850	127.49722	34.63333	1.60
9580	126.88333	34.44444	1.90	10220	127.12222	34.50555	1.31	10860	127.47500	34.63888	1.85
9590	126.88889	34.45555	1.90	10230	127.13611	34.51944	1.35	10870	127.49167	34.64444	1.64
9600	126.91389	34.45277	1.64	10240	127.15556	34.52222	1.35	10880	127.47500	34.65555	1.61
9610	126.93333	34.44444	1.25	10250	127.17500	34.52500	1.36	10890	127.47222	34.67500	1.69
9620	126.94722	34.45833	1.36	10260	127.19444	34.52777	1.37	10900	127.45556	34.66388	1.99
9630	126.93889	34.47777	1.64	10270	127.21111	34.52222	1.39	10910	127.44167	34.67777	1.96
9640	126.95278	34.46944	1.43	10280	127.23056	34.52500	1.36	10920	127.43056	34.68888	2.05
9650	126.96111	34.45555	1.38	10290	127.24722	34.51944	1.34	10930	127.45278	34.68333	1.82
9660	126.96944	34.46388	1.39	10300	127.26667	34.51111	1.38	10940	127.45556	34.69166	1.78
9670	126.97222	34.47222	1.38	10310	127.28056	34.49722	1.46	10950	127.43611	34.70000	1.86
9680	126.98056	34.48611	1.44	10320	127.26667	34.48333	1.34	10960	127.44722	34.71666	1.79
9690	126.96667	34.50000	1.55	10330	127.28611	34.47500	1.35	10970	127.44167	34.71111	1.80
9700	126.97778	34.51666	1.58	10340	127.30000	34.46111	1.35	10980	127.42778	34.70833	1.94
9710	126.98611	34.53611	1.56	10350	127.29722	34.44722	1.38	10990	127.41389	34.71111	2.02
9720	126.99167	34.55833	1.58	10360	127.29722	34.44166	1.39	11000	127.39722	34.71111	2.03
9730	127.00556	34.56111	1.56	10370	127.31389	34.43055	1.51	11010	127.40000	34.72500	1.98
9740	126.98611	34.56944	1.60	10380	127.32778	34.43333	1.58	11020	127.38056	34.72777	1.99
9750	126.99444	34.58333	1.63	10390	127.32500	34.44166	1.73	11030	127.38056	34.75000	1.98
9760	127.00278	34.60277	1.67	10400	127.33889	34.45000	1.79	11040	127.40000	34.75833	1.96
9770	127.01667	34.61666	1.69	10410	127.33889	34.46666	1.68	11050	127.39444	34.77500	1.97
9780	127.03056	34.63055	1.71	10420	127.34167	34.48055	1.75	11060	127.39444	34.79166	2.04
9790	127.05000	34.63333	1.71	10430	127.35556	34.48888	1.67	11070	127.41389	34.80000	2.06
9800	127.06111	34.65000	1.70	10440	127.37222	34.47777	1.45	11080	127.42778	34.81388	2.12
9810	127.07500	34.66388	1.71	10450	127.39167	34.48611	1.37	11090	127.40833	34.81666	2.17
9820	127.09722	34.66944	1.74	10460	127.38889	34.50555	1.59	11100	127.39444	34.82500	2.21
9830	127.11111	34.68333	1.79	10470	127.40833	34.50833	1.34	11110	127.41667	34.83055	2.23
9840	127.12500	34.69722	1.82	10480	127.41944	34.51388	1.36	11120	127.43889	34.83611	2.23
9850	127.14167	34.69166	1.83	10490	127.43889	34.51666	1.38	11130	127.46389	34.83888	2.21
9860	127.16944	34.69166	1.77	10500	127.45278	34.50277	1.56	11140	127.48611	34.83888	2.17
9870	127.19167	34.69722	1.75	10510	127.44167	34.48611	1.18	11150	127.49444	34.85833	2.27
9880	127.20278	34.71388	1.85	10520	127.44167	34.46944	1.30	11160	127.49444	34.87500	2.33
9890	127.21389	34.73055	1.97	10530	127.45278	34.45277	1.26	11170	127.51389	34.86666	2.29
9900	127.22500	34.74722	2.01	10540	127.46389	34.44166	1.26	11180	127.52222	34.84722	2.16
9910	127.24167	34.75833	2.03	10550	127.48056	34.43055	1.19	11190	127.53889	34.83611	2.12
9920	127.25278	34.74166	2.00	10560	127.48889	34.42222	1.14	11200	127.52500	34.82222	2.04
9930	127.26667	34.73333	2.00	10570	127.49722	34.41388	1.24	11210	127.53056	34.80555	1.91
9940	127.28333	34.73333	1.99	10580	127.51667	34.42222	1.41	11220	127.55556	34.80833	1.96
9950	127.29722	34.74166	1.99	10590	127.53611	34.42500	1.46	11230	127.56389	34.78888	1.87
9960	127.31667	34.75000	1.99	10600	127.53889	34.44444	2.01	11240	127.56111	34.77500	1.77
9970	127.32500	34.73055	2.04	10610	127.52222	34.45555	2.31	11250	127.55833	34.76666	1.70
9980	127.33333	34.71111	2.05	10620	127.50833	34.46944	2.33	11260	127.57778	34.75833	1.71
9990	127.32222	34.69444	2.08	10630	127.48333	34.46666	2.01	11270	127.58333	34.75277	1.71
10000	127.31944	34.67500	2.09	10640	127.46389	34.47500	2.13	11280	127.57500	34.73333	1.70
10010	127.30278	34.66944	2.00	10650	127.48333	34.48333	2.20	11290	127.56667	34.74722	1.66
10020	127.28056	34.67500	1.91	10660	127.50556	34.48888	2.17	11300	127.55833	34.73888	1.61
10030	127.28611	34.69722	1.98	10670	127.50000	34.50555	2.17	11310	127.55556	34.71944	1.55
10040	127.28056	34.71944	1.99	10680	127.47778	34.51111	2.31	11320	127.55556	34.70833	1.55
10050	127.26111	34.71666	1.92	10690	127.47500	34.53055	2.28	11330	127.55000	34.69166	1.55
10060	127.24722	34.70277	1.82	10700	127.47222	34.54444	2.17	11340	127.56111	34.67500	1.64
10070	127.23889	34.68888	1.75	10710	127.44722	34.54722	1.96	11350	127.55278	34.66111	1.54
10080	127.23056	34.67500	1.67	10720	127.43056	34.55277	2.17	11360	127.56667	34.64722	1.57
10090	127.22500	34.65277	1.59	10730	127.41667	34.56111	2.21	11370	127.56389	34.63888	1.49
10100	127.20000	34.65000	1.57	10740	127.42778	34.57222	2.14	11380	127.54722	34.63888	1.50
10110	127.18333	34.63888	1.52	10750	127.43333	34.58333	2.12	11390	127.53333	34.62500	1.50
10120	127.17222	34.62222	1.48	10760	127.44444	34.56666	2.12	11400	127.53333	34.61388	1.55
10130	127.16667	34.60000	1.42	10770	127.45833	34.55277	2.08	11410	127.51944	34.62777	1.55
10140	127.15556	34.59444	1.41	10780	127.45556	34.56944	2.14	11420	127.51111	34.63611	1.61
10150	127.14167	34.59166	1.38	10790	127.45833	34.58333	2.07	11430	127.51667	34.61944	1.64
10160	127.13056	34.57500	1.35	10800	127.47222	34.56944	2.07	11440	127.52778	34.60277	1.65
10170	127.11389	34.56388	1.32	10810	127.47500	34.57222	2.04	11450	127.54722	34.59444	1.70
10180	127.11667	34.54444	1.24	10820	127.48889	34.58055	2.06	11460	127.56111	34.59166	1.68
10190	127.12500	34.52500	1.18	10830	127.50556	34.59166	1.87	11470	127.56111	34.60277	1.65
10200	127.10833	34.51944	1.24	10840	127.50278	34.61111	1.70	11480	127.55833	34.61666	1.56

부록 1. 전 연안 50년빈도 폭풍해일 설계해면고

11490	127.55278	34.62777	1.52	12130	127.78333	34.70000	2.27	12770	127.91389	34.74166	1.77
11500	127.56944	34.63333	1.53	12140	127.78889	34.71666	2.08	12780	127.90556	34.76111	1.81
11510	127.58333	34.63611	1.63	12150	127.76944	34.72500	2.10	12790	127.92222	34.77222	1.77
11520	127.58611	34.65000	1.87	12160	127.75556	34.73888	2.18	12800	127.94722	34.77500	1.59
11530	127.60833	34.64444	1.59	12170	127.75278	34.75833	2.22	12810	127.94444	34.75555	1.68
11540	127.62500	34.63333	1.55	12180	127.74722	34.77500	2.27	12820	127.93889	34.73333	1.69
11550	127.62500	34.62222	1.53	12190	127.75833	34.79166	2.24	12830	127.94444	34.72222	1.66
11560	127.63611	34.60555	1.48	12200	127.76944	34.80833	2.22	12840	127.95278	34.71388	1.69
11570	127.65000	34.59722	1.51	12210	127.77222	34.83333	2.15	12850	127.97222	34.71111	1.65
11580	127.65278	34.58333	1.52	12220	127.77778	34.85555	2.05	12860	127.98611	34.71944	1.71
11590	127.63889	34.56944	1.48	12230	127.76111	34.86666	2.08	12870	128.00556	34.71111	1.57
11600	127.64722	34.56111	1.43	12240	127.73889	34.86111	2.09	12880	128.02222	34.72222	1.73
11610	127.66667	34.55277	1.42	12250	127.72500	34.86944	2.21	12890	128.02222	34.70000	1.62
11620	127.68056	34.56666	1.50	12260	127.75000	34.87222	2.12	12900	128.03889	34.70000	1.61
11630	127.69722	34.56111	1.49	12270	127.74444	34.89444	2.14	12910	128.05833	34.70833	1.70
11640	127.71111	34.56944	1.50	12280	127.72222	34.90000	2.13	12920	128.05000	34.71666	1.86
11650	127.72500	34.56111	1.44	12290	127.70000	34.89444	2.19	12930	128.03611	34.73055	1.94
11660	127.74167	34.56666	1.75	12300	127.69444	34.87777	2.29	12940	128.05278	34.74166	1.85
11670	127.73889	34.58611	1.81	12310	127.71389	34.86944	2.26	12950	128.05556	34.76111	1.96
11680	127.72222	34.59166	1.52	12320	127.71667	34.86111	2.27	12960	128.05000	34.78333	2.01
11690	127.71667	34.58611	1.51	12330	127.69167	34.86388	2.27	12970	128.05556	34.80000	2.04
11700	127.70833	34.57777	1.51	12340	127.68056	34.84722	2.42	12980	128.06389	34.81944	2.01
11710	127.68889	34.57777	1.53	12350	127.66111	34.84444	2.52	12990	128.04722	34.82500	2.02
11720	127.67222	34.57777	1.69	12360	127.64722	34.85833	2.57	13000	128.03056	34.83611	2.06
11730	127.65556	34.58888	1.55	12370	127.63333	34.87222	2.61	13010	128.05000	34.83333	2.01
11740	127.65556	34.60555	1.50	12380	127.61667	34.88333	2.53	13020	128.06944	34.83055	1.94
11750	127.64167	34.61944	1.64	12390	127.61389	34.89722	2.47	13030	128.08611	34.83611	1.94
11760	127.63889	34.63888	1.73	12400	127.60000	34.91111	2.43	13040	128.06944	34.84722	1.95
11770	127.63889	34.65555	1.80	12410	127.60000	34.92777	2.33	13050	128.06667	34.86666	2.02
11780	127.63056	34.67500	2.06	12420	127.61111	34.92222	2.32	13060	128.05556	34.88333	2.01
11790	127.63056	34.68611	2.00	12430	127.62222	34.90555	2.38	13070	128.04167	34.89722	1.93
11800	127.62222	34.70000	2.02	12440	127.63333	34.88888	2.43	13080	128.02500	34.88611	1.96
11810	127.62500	34.71388	1.94	12450	127.65000	34.88888	2.38	13090	128.02222	34.89444	1.94
11820	127.64444	34.70555	1.85	12460	127.66667	34.90000	2.28	13100	128.03056	34.91388	2.09
11830	127.64444	34.72777	1.83	12470	127.68611	34.90833	2.19	13110	128.01667	34.92222	1.86
11840	127.65556	34.74444	1.91	12480	127.69722	34.92500	2.22	13120	128.00000	34.91111	1.87
11850	127.67222	34.73888	1.79	12490	127.71111	34.91111	2.16	13130	127.98889	34.89444	1.90
11860	127.68889	34.72777	1.74	12500	127.73333	34.90555	2.10	13140	127.97500	34.88055	1.87
11870	127.70833	34.71944	1.69	12510	127.75833	34.90833	2.08	13150	127.96111	34.86666	1.92
11880	127.70278	34.70277	1.67	12520	127.76667	34.88888	2.11	13160	127.96944	34.84722	1.91
11890	127.71944	34.70833	1.62	12530	127.78611	34.89166	2.10	13170	127.98611	34.83611	1.89
11900	127.73611	34.69722	1.56	12540	127.78333	34.91666	2.19	13180	127.97500	34.82500	1.89
11910	127.73333	34.71111	1.63	12550	127.76944	34.93055	2.25	13190	127.96111	34.81111	1.86
11920	127.72778	34.72777	1.66	12560	127.77500	34.95277	2.14	13200	127.94444	34.81111	1.85
11930	127.74444	34.71666	1.73	12570	127.78889	34.93888	2.14	13210	127.93889	34.83333	1.98
11940	127.75556	34.70000	1.74	12580	127.81111	34.93888	2.08	13220	127.91389	34.83611	2.08
11950	127.75278	34.68055	1.84	12590	127.83056	34.94722	1.98	13230	127.91111	34.85000	2.14
11960	127.73889	34.67777	1.61	12600	127.85278	34.94722	1.95	13240	127.90000	34.86666	2.12
11970	127.74167	34.66388	1.59	12610	127.86389	34.93611	1.94	13250	127.91111	34.88333	2.07
11980	127.72222	34.65555	1.52	12620	127.85278	34.91944	1.97	13260	127.92500	34.89722	1.98
11990	127.72222	34.63888	1.59	12630	127.85278	34.90277	1.97	13270	127.92778	34.91666	2.06
12000	127.71111	34.62222	1.57	12640	127.83056	34.90277	1.99	13280	127.92500	34.94166	2.02
12010	127.70278	34.60833	1.55	12650	127.82500	34.88611	2.06	13290	127.90000	34.94444	2.09
12020	127.72222	34.60555	1.57	12660	127.81667	34.86666	2.05	13300	127.88611	34.95277	2.07
12030	127.73611	34.60277	1.56	12670	127.80833	34.84722	2.04	13310	127.90000	34.96666	2.16
12040	127.75278	34.59166	1.78	12680	127.81667	34.82777	2.03	13320	127.91389	34.98055	2.20
12050	127.77500	34.58611	1.81	12690	127.82778	34.81111	2.04	13330	127.91944	34.99166	2.17
12060	127.79722	34.58611	1.83	12700	127.83611	34.79166	2.00	13340	127.92778	35.01111	2.19
12070	127.80556	34.60000	2.04	12710	127.84722	34.77500	1.97	13350	127.93611	34.99722	2.18
12080	127.79167	34.61388	2.17	12720	127.83889	34.76111	2.00	13360	127.93611	34.98055	2.07
12090	127.80000	34.63333	2.08	12730	127.84722	34.74722	1.94	13370	127.94722	34.97500	2.03
12100	127.80000	34.65555	2.14	12740	127.86111	34.73333	1.93	13380	127.96111	34.97777	2.00
12110	127.79722	34.66944	2.14	12750	127.87778	34.72222	1.81	13390	127.97500	34.96388	2.01
12120	127.78056	34.68055	2.17	12760	127.90278	34.72500	1.83	13400	127.99444	34.96666	2.00

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

13410	128.00833	34.98055	2.01	14050	128.40833	34.74166	1.41	14690	128.71667	34.87777	1.35
13420	128.01944	34.99722	2.07	14060	128.42500	34.75277	1.43	14700	128.70000	34.88333	1.36
13430	128.00833	35.01388	2.18	14070	128.40278	34.75277	1.45	14710	128.71389	34.89722	1.31
13440	128.02222	35.02777	2.26	14080	128.41944	34.76388	1.50	14720	128.72500	34.91388	1.33
13450	128.02778	35.05000	2.33	14090	128.43333	34.77777	1.58	14730	128.71944	34.93611	1.45
13460	128.03611	35.06944	2.33	14100	128.44167	34.79166	1.45	14740	128.72222	34.95000	1.47
13470	128.05278	35.08055	2.32	14110	128.44167	34.81388	1.56	14750	128.71111	34.96666	1.43
13480	128.05833	35.07500	2.32	14120	128.43056	34.83055	1.66	14760	128.69722	34.98055	1.55
13490	128.04444	35.06111	2.33	14130	128.43333	34.83888	1.65	14770	128.69722	34.99722	1.72
13500	128.03889	35.03888	2.31	14140	128.45278	34.84722	1.63	14780	128.71667	35.00555	1.52
13510	128.03611	35.01944	2.16	14150	128.45278	34.86388	1.76	14790	128.71944	35.02500	1.48
13520	128.04167	35.00833	2.14	14160	128.46667	34.87222	1.69	14800	128.70278	35.03611	1.46
13530	128.04167	34.98611	2.01	14170	128.47500	34.85277	1.61	14810	128.68611	35.04166	1.51
13540	128.04722	34.96944	1.93	14180	128.48611	34.83611	1.53	14820	128.67500	35.02500	1.63
13550	128.03056	34.95833	1.89	14190	128.50000	34.82222	1.44	14830	128.66667	35.00555	1.62
13560	128.03889	34.93888	1.84	14200	128.51389	34.80833	1.54	14840	128.66111	34.99444	1.66
13570	128.05556	34.92777	1.88	14210	128.52778	34.80000	1.43	14850	128.64722	34.99722	1.68
13580	128.07778	34.92222	1.93	14220	128.54444	34.81111	1.44	14860	128.65556	35.01666	1.65
13590	128.09444	34.92222	1.85	14230	128.53889	34.82777	1.57	14870	128.63889	35.01666	1.70
13600	128.10278	34.90833	1.87	14240	128.55833	34.83055	1.50	14880	128.62778	35.00000	1.76
13610	128.12222	34.90000	1.84	14250	128.56944	34.84722	1.59	14890	128.62222	34.98888	1.77
13620	128.13889	34.88888	1.94	14260	128.58333	34.84444	1.54	14900	128.60833	34.97500	1.77
13630	128.15278	34.90277	1.95	14270	128.58611	34.83055	1.46	14910	128.59722	34.95833	1.78
13640	128.16944	34.89722	1.91	14280	128.58333	34.81111	1.39	14920	128.58611	34.94166	1.80
13650	128.19167	34.89166	1.91	14290	128.57222	34.79444	1.37	14930	128.60000	34.92777	1.77
13660	128.20000	34.90555	2.28	14300	128.55000	34.79444	1.32	14940	128.61389	34.91388	1.77
13670	128.20556	34.92222	2.21	14310	128.54167	34.77500	1.24	14950	128.60833	34.90833	1.75
13680	128.20556	34.93888	2.26	14320	128.55556	34.76666	1.20	14960	128.58889	34.91111	1.78
13690	128.22500	34.94166	2.18	14330	128.57500	34.77500	1.28	14970	128.57222	34.91111	1.77
13700	128.24444	34.93888	2.04	14340	128.58889	34.76666	1.18	14980	128.55556	34.90555	1.77
13710	128.26667	34.93333	1.92	14350	128.57500	34.75277	1.22	14990	128.54167	34.91944	1.75
13720	128.26389	34.91388	1.96	14360	128.58611	34.73611	1.20	15000	128.53056	34.93611	1.82
13730	128.27222	34.90000	1.89	14370	128.60000	34.72777	1.18	15010	128.52500	34.95277	1.82
13740	128.29167	34.90833	1.81	14380	128.58333	34.71666	1.20	15020	128.53611	34.96944	1.81
13750	128.30556	34.92222	1.86	14390	128.58056	34.70277	1.18	15030	128.51667	34.97222	1.85
13760	128.31111	34.93888	1.95	14400	128.59722	34.70277	1.16	15040	128.51667	34.95555	1.85
13770	128.32222	34.95555	2.03	14410	128.61667	34.70555	1.26	15050	128.51389	34.93611	1.84
13780	128.33889	34.94444	1.90	14420	128.63611	34.70833	1.21	15060	128.52222	34.92222	1.79
13790	128.34167	34.92500	1.84	14430	128.63611	34.71944	1.31	15070	128.50556	34.91111	1.83
13800	128.35278	34.90833	1.78	14440	128.63889	34.73333	1.31	15080	128.49167	34.89722	1.83
13810	128.33056	34.90833	1.79	14450	128.66389	34.73611	1.19	15090	128.47500	34.89166	1.82
13820	128.30833	34.90833	1.82	14460	128.68333	34.72777	1.16	15100	128.47500	34.90277	1.84
13830	128.30278	34.89722	1.80	14470	128.68056	34.74166	1.16	15110	128.47222	34.92222	1.85
13840	128.31389	34.88055	1.74	14480	128.66111	34.74444	1.22	15120	128.46667	34.90555	1.84
13850	128.33611	34.87500	1.68	14490	128.64444	34.75555	1.29	15130	128.45556	34.91111	1.84
13860	128.35000	34.87222	1.65	14500	128.64444	34.77222	1.32	15140	128.43889	34.91111	1.87
13870	128.36944	34.86944	1.64	14510	128.66389	34.77500	1.24	15150	128.44167	34.89166	1.92
13880	128.38889	34.86666	1.59	14520	128.67222	34.78888	1.29	15160	128.42778	34.87777	1.90
13890	128.37500	34.85277	1.61	14530	128.67222	34.81111	1.30	15170	128.42222	34.90000	1.95
13900	128.37500	34.83611	1.55	14540	128.68889	34.80000	1.26	15180	128.43056	34.91388	1.88
13910	128.35556	34.84444	1.60	14550	128.70000	34.80555	1.15	15190	128.43056	34.93611	1.98
13920	128.33889	34.83333	1.65	14560	128.70833	34.79722	1.09	15200	128.43333	34.95555	1.97
13930	128.33611	34.81944	1.61	14570	128.71667	34.78333	1.18	15210	128.44444	34.97222	1.92
13940	128.35000	34.81666	1.56	14580	128.73333	34.78888	1.13	15220	128.43056	34.98611	1.91
13950	128.36667	34.81666	1.52	14590	128.73889	34.80000	1.14	15230	128.43611	34.99166	1.91
13960	128.36944	34.80277	1.48	14600	128.72500	34.81388	1.18	15240	128.46111	34.98888	1.86
13970	128.37222	34.78888	1.48	14610	128.72500	34.83611	1.17	15250	128.47500	34.99166	1.85
13980	128.35556	34.77777	1.49	14620	128.70556	34.83333	1.24	15260	128.48611	35.00833	1.92
13990	128.37500	34.78055	1.47	14630	128.71389	34.84722	1.22	15270	128.50278	35.01388	1.90
14000	128.38889	34.78888	1.50	14640	128.73611	34.84166	1.16	15280	128.48889	35.02777	1.96
14010	128.39444	34.77222	1.40	14650	128.73333	34.86111	1.23	15290	128.47500	35.04166	2.02
14020	128.39722	34.75833	1.43	14660	128.74444	34.87777	1.27	15300	128.48333	35.05000	1.99
14030	128.40000	34.74444	1.41	14670	128.75000	34.89444	1.26	15310	128.47778	35.06666	2.03
14040	128.40000	34.72777	1.39	14680	128.73056	34.89166	1.28	15320	128.47222	35.08333	2.08

부록 1. 전 연안 50년빈도 폭풍해일 설계해면고

15330	128.45556	35.09444	2.11	15970	128.93056	35.09166	1.73	16610	129.43056	35.48055	0.75
15340	128.46667	35.10000	2.10	15980	128.95000	35.08888	1.62	16620	129.44444	35.49444	0.70
15350	128.48611	35.10277	2.08	15990	128.94167	35.06944	1.37	16630	129.45000	35.51666	0.72
15360	128.50278	35.09722	2.04	16000	128.95556	35.06111	1.27	16640	129.45278	35.54166	0.76
15370	128.51944	35.09166	2.00	16010	128.96389	35.04166	1.07	16650	129.46111	35.56111	0.76
15380	128.53056	35.10833	2.02	16020	128.97500	35.02500	1.05	16660	129.45556	35.57777	0.83
15390	128.54444	35.10000	1.98	16030	128.97500	35.04166	1.17	16670	129.46389	35.59722	0.75
15400	128.56111	35.09444	1.96	16040	128.98889	35.05555	1.11	16680	129.45278	35.61388	0.77
15410	128.56667	35.08333	1.93	16050	129.00278	35.04722	1.09	16690	129.44444	35.63333	0.82
15420	128.55556	35.07222	1.94	16060	128.99722	35.06944	1.14	16700	129.45278	35.65277	0.77
15430	128.54444	35.06111	1.91	16070	129.00278	35.07500	1.12	16710	129.46667	35.66666	0.70
15440	128.56111	35.05000	1.82	16080	129.01111	35.05555	1.10	16720	129.47500	35.68611	0.71
15450	128.58611	35.05277	1.79	16090	129.02222	35.06666	1.19	16730	129.47500	35.70833	0.74
15460	128.60833	35.05833	1.76	16100	129.02778	35.08888	1.14	16740	129.48611	35.72500	0.67
15470	128.63056	35.06388	1.71	16110	129.04444	35.07777	1.02	16750	129.48889	35.74444	0.68
15480	128.63611	35.06944	1.74	16120	129.06111	35.06666	0.95	16760	129.49444	35.76666	0.69
15490	128.61667	35.07222	1.91	16130	129.07778	35.05555	0.95	16770	129.49444	35.78888	0.70
15500	128.61389	35.08055	1.95	16140	129.09444	35.05555	1.02	16780	129.50556	35.80555	0.64
15510	128.62500	35.09166	1.82	16150	129.08611	35.06944	1.13	16790	129.51111	35.82222	0.63
15520	128.60833	35.10277	1.93	16160	129.09167	35.08055	1.05	16800	129.51944	35.84166	0.63
15530	128.60000	35.12222	1.96	16170	129.07778	35.08888	1.11	16810	129.52778	35.86111	0.62
15540	128.61389	35.13611	1.96	16180	129.06111	35.10000	1.12	16820	129.52778	35.87222	0.60
15550	128.62778	35.14444	2.05	16190	129.04167	35.09722	1.18	16830	129.52778	35.88333	0.64
15560	128.64167	35.13611	1.91	16200	129.04722	35.11388	1.23	16840	129.53333	35.90555	0.62
15570	128.66111	35.12777	1.84	16210	129.06667	35.12222	1.09	16850	129.51944	35.91944	0.65
15580	128.67778	35.12222	1.76	16220	129.07222	35.10555	1.09	16860	129.53333	35.93333	0.62
15590	128.67778	35.14444	1.90	16230	129.09444	35.10000	1.06	16870	129.54444	35.95000	0.64
15600	128.69444	35.13333	1.78	16240	129.10556	35.09444	1.02	16880	129.55556	35.96666	0.63
15610	128.69722	35.11388	1.75	16250	129.12222	35.10000	1.00	16890	129.55556	35.98888	0.67
15620	128.68889	35.10000	1.66	16260	129.13056	35.11944	1.03	16900	129.57222	36.00000	0.62
15630	128.70833	35.10277	1.62	16270	129.11667	35.13333	1.33	16910	129.58333	36.01666	0.58
15640	128.72222	35.08888	1.55	16280	129.12500	35.15277	1.17	16920	129.58056	36.03611	0.57
15650	128.73889	35.08333	1.48	16290	129.14167	35.15277	0.97	16930	129.57778	36.05555	0.60
15660	128.75556	35.07777	1.42	16300	129.16389	35.15833	0.94	16940	129.57222	36.07777	0.57
15670	128.76111	35.06111	1.36	16310	129.18333	35.15555	0.94	16950	129.55278	36.08611	0.56
15680	128.77778	35.06666	1.40	16320	129.20000	35.16666	0.96	16960	129.53889	36.07222	0.56
15690	128.78333	35.07777	1.42	16330	129.21389	35.18055	0.96	16970	129.52500	36.05833	0.57
15700	128.80833	35.07500	1.44	16340	129.22778	35.19444	0.96	16980	129.51111	36.04444	0.60
15710	128.81389	35.06944	1.46	16350	129.22500	35.21388	1.03	16990	129.50000	36.02777	0.62
15720	128.79167	35.06388	1.32	16360	129.24167	35.22500	0.96	17000	129.48333	36.01666	0.62
15730	128.79722	35.04722	1.25	16370	129.25000	35.24444	0.96	17010	129.46389	36.00833	0.65
15740	128.80833	35.03055	1.23	16380	129.25000	35.26111	0.98	17020	129.45000	35.99444	0.67
15750	128.81667	35.01666	1.16	16390	129.25556	35.27222	0.96	17030	129.42778	36.00000	0.82
15760	128.82222	35.00000	1.17	16400	129.26111	35.29444	1.02	17040	129.42500	36.01944	0.74
15770	128.83611	34.99166	1.26	16410	129.26667	35.31666	1.03	17050	129.40278	36.01388	0.82
15780	128.83889	35.01111	1.46	16420	129.28333	35.32222	0.90	17060	129.40833	36.02500	0.74
15790	128.84444	35.02777	1.50	16430	129.30000	35.32222	0.89	17070	129.43056	36.02500	0.70
15800	128.85278	35.04722	1.81	16440	129.31667	35.33333	0.87	17080	129.41944	36.03611	0.72
15810	128.83611	35.05833	1.83	16450	129.33333	35.34444	0.84	17090	129.39722	36.03611	0.82
15820	128.85556	35.06111	1.84	16460	129.34722	35.35277	0.82	17100	129.38056	36.03611	0.99
15830	128.87500	35.06388	1.51	16470	129.36111	35.36111	0.83	17110	129.38056	36.05833	0.96
15840	128.89444	35.05555	1.30	16480	129.34722	35.37500	0.95	17120	129.40000	36.06666	0.77
15850	128.91667	35.05555	1.21	16490	129.35556	35.39444	0.91	17130	129.41944	36.07500	0.75
15860	128.90556	35.06111	1.28	16500	129.36111	35.41111	0.90	17140	129.42778	36.09444	0.73
15870	128.88611	35.06944	1.41	16510	129.35833	35.42500	1.01	17150	129.43056	36.11388	0.65
15880	128.86111	35.07222	1.58	16520	129.36667	35.43888	0.87	17160	129.41389	36.12500	0.67
15890	128.84167	35.07500	1.62	16530	129.36944	35.45277	0.85	17170	129.40000	36.13888	0.78
15900	128.85000	35.08333	1.51	16540	129.37778	35.47222	0.88	17180	129.40000	36.16111	0.71
15910	128.87222	35.07777	1.47	16550	129.38889	35.48888	0.78	17190	129.39444	36.18333	0.66
15920	128.88889	35.08888	1.62	16560	129.38889	35.50555	0.76	17200	129.37778	36.19444	0.66
15930	128.89444	35.11111	2.05	16570	129.39444	35.51666	0.76	17210	129.38056	36.20833	0.68
15940	128.90000	35.10555	2.00	16580	129.40000	35.50000	0.73	17220	129.38333	36.22777	0.62
15950	128.89444	35.08333	1.57	16590	129.40278	35.48055	0.75	17230	129.38056	36.24722	0.61
15960	128.91389	35.08055	1.55	16600	129.41667	35.47222	0.76	17240	129.37778	36.26666	0.61

해일피해예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산 연구

17250	129.37778	36.28888	0.61	17890	129.19167	37.43611	0.42	18530	128.47500	38.40833	0.42
17260	129.38056	36.31388	0.60	17900	129.18889	37.45555	0.42	18540	128.46389	38.42500	0.42
17270	129.38333	36.33333	0.60	17910	129.17222	37.46666	0.42	18550	128.45556	38.44444	0.42
17280	129.38889	36.35555	0.60	17920	129.15833	37.48055	0.42	18560	128.46111	38.45555	0.41
17290	129.40000	36.37222	0.58	17930	129.14167	37.49166	0.43	18570	128.45000	38.47222	0.41
17300	129.41111	36.38888	0.56	17940	129.13333	37.51111	0.45	18580	128.43889	38.48888	0.41
17310	129.42500	36.40277	0.54	17950	129.12500	37.53055	0.47	18590	128.42778	38.50555	0.41
17320	129.43333	36.42222	0.54	17960	129.11389	37.54722	0.50	18600	128.42500	38.52500	0.41
17330	129.43611	36.44722	0.55	17970	129.12222	37.56666	0.43	18610	128.41111	38.53888	0.40
17340	129.43889	36.46666	0.54	17980	129.11111	37.58333	0.41	18620	128.40556	38.56111	0.40
17350	129.44167	36.48611	0.53	17990	129.09444	37.59444	0.41	18630	128.39167	38.57500	0.40
17360	129.45000	36.50555	0.53	18000	129.07778	37.60555	0.41	18640	128.37778	38.58888	0.40
17370	129.44444	36.52222	0.52	18010	129.06389	37.61944	0.41	18650	128.36389	38.60277	0.40
17380	129.44167	36.54722	0.52	18020	129.05000	37.63333	0.41	18660	128.35556	38.62222	0.40
17390	129.43056	36.56388	0.52	18030	129.05278	37.65277	0.40	18670	128.36111	38.64444	0.40
17400	129.41667	36.57777	0.55	18040	129.05833	37.67500	0.40	18680	128.35833	38.66388	0.40
17410	129.41389	36.59722	0.54	18050	129.04167	37.68611	0.40	18690	128.35833	38.68055	0.39
17420	129.41389	36.61944	0.54	18060	129.02778	37.70000	0.40	18700	128.34167	38.69166	0.39
17430	129.42222	36.63888	0.53	18070	129.01389	37.71388	0.40	18710	128.32778	38.70555	0.39
17440	129.43056	36.65833	0.53	18080	129.00000	37.72777	0.41	18720	128.31111	38.71666	0.39
17450	129.44444	36.67222	0.52	18090	128.98611	37.74166	0.41	18730	128.29444	38.72777	0.39
17460	129.46667	36.67777	0.49	18100	128.97222	37.75555	0.41	18740	128.27778	38.73888	0.39
17470	129.47500	36.69722	0.50	18110	128.95556	37.76666	0.42	18750	128.27500	38.75833	0.39
17480	129.47500	36.71944	0.51	18120	128.94167	37.78055	0.42	18760	128.25833	38.75833	0.39
17490	129.47500	36.74166	0.50	18130	128.92500	37.79166	0.43	18770	128.25833	38.74166	0.39
17500	129.47222	36.76111	0.49	18140	128.91111	37.80555	0.43	18780	128.23889	38.73888	0.39
17510	129.47222	36.77777	0.49	18150	128.89444	37.81666	0.44	18790	128.22222	38.73888	0.39
17520	129.46389	36.79722	0.48	18160	128.88056	37.83055	0.44	18800	128.20556	38.72777	0.39
17530	129.45556	36.81666	0.48	18170	128.86944	37.84722	0.43	18810	128.18889	38.72777	0.41
17540	129.44722	36.83611	0.48	18180	128.85556	37.86111	0.43	18820	128.19444	38.73888	0.39
17550	129.43333	36.85000	0.48	18190	128.84167	37.87500	0.42	18830	128.19722	38.75277	0.39
17560	129.42222	36.86666	0.48	18200	128.83056	37.89166	0.41	18840	128.17778	38.76111	0.39
17570	129.41944	36.89166	0.48	18210	128.83056	37.90833	0.40	18850	128.16667	38.77777	0.39
17580	129.41944	36.91388	0.47	18220	128.81111	37.91666	0.41	18860	128.15000	38.78888	0.39
17590	129.42222	36.93888	0.47	18230	128.79722	37.93055	0.41	18870	128.13611	38.80277	0.39
17600	129.41667	36.96111	0.48	18240	128.78611	37.94722	0.41	18880	128.12778	38.82222	0.39
17610	129.41111	36.98333	0.47	18250	128.76944	37.95833	0.42	18890	128.10556	38.82777	0.40
17620	129.41944	37.00277	0.49	18260	128.76389	37.98055	0.41	18900	128.09167	38.84166	0.40
17630	129.41111	37.02222	0.49	18270	128.75000	37.99444	0.41	18910	128.07222	38.85000	0.40
17640	129.41389	37.04166	0.51	18280	128.73333	38.00555	0.41	18920	128.05556	38.86111	0.40
17650	129.42778	37.05555	0.46	18290	128.72778	38.02222	0.40	18930	128.03889	38.85000	0.41
17660	129.41944	37.06944	0.48	18300	128.71389	38.03611	0.40	18940	128.01944	38.85833	0.41
17670	129.40278	37.08055	0.54	18310	128.69722	38.04722	0.41	18950	128.00000	38.86666	0.42
17680	129.38889	37.09444	0.49	18320	128.68333	38.06111	0.41	18960	127.98611	38.88055	0.41
17690	129.37778	37.11111	0.48	18330	128.67500	38.08055	0.41	18970	127.97222	38.89444	0.42
17700	129.37500	37.13611	0.49	18340	128.66111	38.09444	0.41	18980	127.95833	38.90833	0.42
17710	129.36389	37.15277	0.46	18350	128.64722	38.10833	0.42	18990	127.95556	38.92777	0.42
17720	129.35000	37.16666	0.46	18360	128.63333	38.12222	0.42	19000	127.93333	38.92777	0.43
17730	129.34444	37.18888	0.46	18370	128.61944	38.13611	0.44	19010	127.91667	38.93888	0.44
17740	129.34722	37.20833	0.62	18380	128.61111	38.15555	0.43	19020	127.90278	38.95277	0.44
17750	129.34444	37.22777	0.70	18390	128.61111	38.17777	0.41	19030	127.89444	38.96666	0.43
17760	129.35278	37.24166	0.55	18400	128.60556	38.19444	0.41	19040	127.87778	38.96111	0.45
17770	129.34167	37.25833	0.56	18410	128.60000	38.21111	0.41	19050	127.88333	38.97777	0.43
17780	129.33056	37.27500	0.51	18420	128.59167	38.22500	0.41	19060	127.86667	38.98333	0.44
17790	129.31667	37.28888	0.49	18430	128.58056	38.24166	0.41	19070	127.85000	38.98888	0.45
17800	129.30278	37.30277	0.52	18440	128.56667	38.25555	0.40	19080	126.27500	33.19722	0.85
17810	129.28611	37.31388	0.50	18450	128.55833	38.27500	0.41	19090	126.29444	33.19444	0.84
17820	129.26944	37.32500	0.46	18460	128.55000	38.29444	0.41	19100	126.29722	33.21388	0.95
17830	129.26389	37.34722	0.46	18470	128.54167	38.31388	0.41	19110	126.31111	33.22777	0.90
17840	129.25278	37.36388	0.43	18480	128.53056	38.33055	0.41	19120	126.32778	33.23888	0.88
17850	129.25000	37.38333	0.42	18490	128.51667	38.34444	0.41	19130	126.35000	33.23333	0.85
17860	129.23056	37.39166	0.43	18500	128.51111	38.36666	0.41	19140	126.36944	33.23055	0.87
17870	129.21389	37.40277	0.42	18510	128.50278	38.38055	0.41	19150	126.39167	33.23611	0.88
17880	129.20000	37.41666	0.42	18520	128.48889	38.39444	0.41	19160	126.41389	33.24166	0.83

부록 1. 전 연안 50년빈도 폭풍해일 설계해면고

19170	126.43333	33.23333	0.82	19810	126.35278	33.47500	0.80
19180	126.45556	33.23888	0.80	19820	126.33056	33.46944	0.79
19190	126.46944	33.22500	0.80	19830	126.30833	33.46388	0.80
19200	126.49167	33.23055	0.83	19840	126.29722	33.44722	0.81
19210	126.51667	33.23333	0.86	19850	126.27500	33.44166	0.80
19220	126.53889	33.23888	0.84	19860	126.26111	33.42777	0.78
19230	126.55833	33.23611	0.85	19870	126.25278	33.40833	0.75
19240	126.57222	33.24444	0.80	19880	126.23889	33.39444	0.76
19250	126.59167	33.23611	0.83	19890	126.21944	33.38611	0.76
19260	126.60278	33.23611	0.84	19900	126.20556	33.37222	0.76
19270	126.61944	33.24722	0.89	19910	126.18889	33.36111	0.84
19280	126.63889	33.25555	0.93	19920	126.17500	33.34722	0.75
19290	126.65556	33.26666	0.87	19930	126.16389	33.33055	0.79
19300	126.67778	33.26666	0.89	19940	126.16389	33.31388	0.76
19310	126.70278	33.26944	0.85	19950	126.16111	33.28888	0.77
19320	126.72500	33.27500	0.91	19960	126.17222	33.27222	0.82
19330	126.74444	33.27777	0.93	19970	126.18333	33.25555	0.78
19340	126.76111	33.28888	0.98	19980	126.20000	33.24444	0.78
19350	126.77500	33.30277	0.89	19990	126.22500	33.24166	0.79
19360	126.79722	33.30277	0.87	20000	126.23889	33.22777	0.79
19370	126.82222	33.30555	0.89	20010	126.25278	33.21388	0.81
19380	126.84167	33.31388	0.92	20020	126.26389	33.19722	0.80
19390	126.84722	33.33055	0.98				
19400	126.86111	33.34444	1.01				
19410	126.86944	33.36388	1.03				
19420	126.88333	33.37777	0.98				
19430	126.90000	33.38888	0.93				
19440	126.90833	33.40833	1.07				
19450	126.91944	33.42500	0.98				
19460	126.93611	33.43055	0.99				
19470	126.92500	33.44722	1.11				
19480	126.93889	33.45555	0.95				
19490	126.93889	33.46666	1.01				
19500	126.92222	33.47222	1.20				
19510	126.90278	33.48055	1.20				
19520	126.91389	33.49722	1.09				
19530	126.90278	33.51388	1.07				
19540	126.88889	33.52777	1.01				
19550	126.86667	33.52777	1.11				
19560	126.84444	33.53333	1.22				
19570	126.83056	33.54722	1.15				
19580	126.81667	33.56111	1.02				
19590	126.79722	33.55833	1.04				
19600	126.77778	33.56666	1.08				
19610	126.75556	33.56111	1.10				
19620	126.73333	33.56111	0.98				
19630	126.71111	33.55555	0.93				
19640	126.68889	33.55000	0.96				
19650	126.66944	33.54722	0.94				
19660	126.65278	33.55277	1.06				
19670	126.63611	33.54722	0.86				
19680	126.61667	33.53888	0.90				
19690	126.59444	33.53888	0.87				
19700	126.57778	33.52777	0.87				
19710	126.55556	33.52222	0.87				
19720	126.53333	33.52222	0.85				
19730	126.51111	33.51666	0.84				
19740	126.48889	33.52222	0.81				
19750	126.47222	33.51111	0.83				
19760	126.45278	33.50277	0.81				
19770	126.43056	33.49722	0.81				
19780	126.40833	33.49166	0.83				
19790	126.39167	33.49166	0.80				
19800	126.37222	33.48333	0.79				

부록 2

기초자료조사

2.1 태풍 발생현황

2.1.1 태풍의 개요

가. 태풍의 구분

- 태풍은 북태평양 남서부인 필리핀 부근해역에서 발생하는 열대성 저기압 중에서 중심부근의 최대 풍속이 17m/s 이상되는 강한 폭풍우를 동반하는 것을 말하며, 연중 28개 정도가 발생하고 이중 2~3개가 우리나라에 직·간접적으로 영향을 주고 있다.
- 폭풍우는 반드시 태풍을 동반하는 것은 아니며, 온대성 저기압에서도 발생하는 경우가 많으며 그 발생원인과 양상이 서로 다르기 때문에 열대성 및 온대성 저기압으로 구별된다.
- 세계기상기구(WMO)에서는 중심부근의 최대풍속에 따라 4계급으로 분류하고, 우리나라와 일본은 열대폭풍(TS, Tropical Storm)이상을 태풍이라 하며 계급별 구분 기준은 다음과 같다.

<표 2.1.1>

열대저기압과 태풍의 구분

중심부근 최대풍속	세계기상기구 WMO	우리나라	일본	미국 (JTWC)	미국 (NHC)		
17m/s 미만	TD	열대저기압	약한 열대저기압	TD	TD		
17~25m/s 미만	TS		약 중	-	TS	TS	
25~33m/s 미만	STS						
33~43m/s 미만	TY	태풍	태풍	강	TY	Hurricane (Category1)	
43~44m/s 미만						매우강	Hurricane (Category2)
44~50m/s 미만							매우강
50~54m/s 미만		매우강	Hurricane (Category4)				
54~59m/s 미만			매우강	Hurricane (Category5)			
59~65m/s 미만		매우강		매우강	매우강	STY (Super Typhoon)	Hurricane (Category4)
65~69m/s 미만	매우강		매우강				매우강
69m/s 이상							

※ TD : Tropical Depression (약한 열대저기압), TS : Tropical Storm (열대 폭풍)

STS : Severe Tropical Storm (강한 열대폭풍), TY : Typhoon (태풍)

- 태풍단계의 강도 구분에는 각국의 차이가 있으며, 우리나라와 일본은 태풍의 크기를 강풍 반경(15m/s)에 따라 다음과 같이 분류한다.

<표 2.1.2> 강풍반경(15m/s)에 따른 태풍구분

강풍반경	300km 미만	300km 이상	500km 이상	800km 이상	비 고
우리나라	소형	중형	대형	초대형	
일 본	-		대형	초대형	

나. 태풍의 영향

- 태풍에 수반된 해안의 현상으로는 풍랑, 너울, 고조(폭풍 또는 저기압에 의한 해일)가 발생하며, 이로 인해 많은 인명과 재산피해를 주고 있다.
- 해면상승의 원인은 다음 4가지로 분류할 수 있다.
 - 바람에 의해 해안에 해수가 밀려와서 발생하고 풍속의 제곱에 비례한다.
 - 기압하강에 의한 효과로 기압이 1hPa 하강하면 해면은 약 1cm 높아진다.
 - 정진작용에 의한 것으로 고유주기(30~50분)로 흔들리기 때문에 고조현상이 발생한다.
 - 풍랑에 의해 높은 파랑이 발생 해안의 방파제를 넘어 항내의 선박이나 시설물에 피해가 발생한다.

다. 태풍의 경로

- 우리나라 부근을 통과하는 태풍경로를 살펴보면 크게 다음과 같이 3가지 유형으로 분류된다.
 - 한반도 남해안과 일본 구주사이를 통과하여 북동쪽으로 진행후 동해로 빠지는 태풍
 - 한반도 서해를 북상하여 만주로 빠지는 태풍
 - 제주도 부근에서 북상하다가 경기만 부근에서 한반도의 가장 좁은 부분인 중부를 횡단하여 동해북부로 빠지는 태풍
 - 상기 태풍경로 중 남해를 거쳐 동해로 빠지는 태풍은 동·남해안에 가장 위력적인 영향을 미치고, 남해에서 서해로 북상하는 태풍도 남해안에 풍랑 등을 크게 유발시켜 많은 피해를 끼치는 것으로 나타남.
- 국내발생 태풍은 태평양에서 발생하는 저기압에 의한 선풍으로 하절기에 2~3회 정도 발생하여 한반도를 통과한 후 소멸되거나 동해로 빠져나가고 있다.

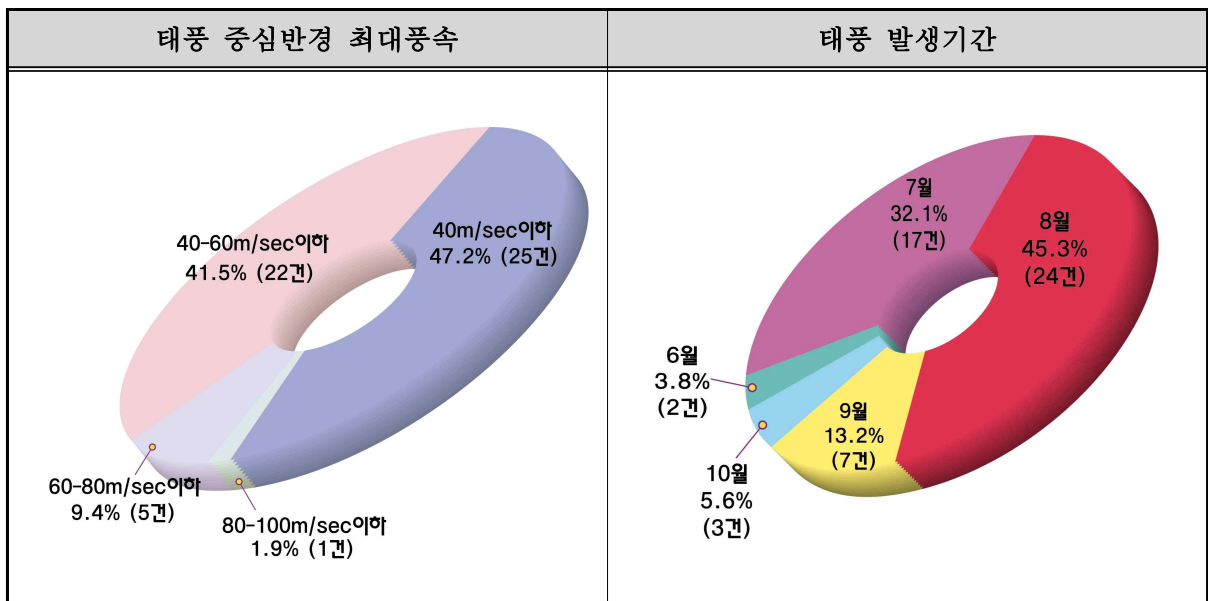
2.1.2 한반도에 영향을 미친 태풍발생 현황

가. 태풍발생현황

- 55년간(1951년~2005년)의 태풍 중에서 한반도에 가장 큰 영향을 미친 50개의 주요 태풍의 목록번호, 이름, 발생기간 및 중심최저기압 등을 요약·정리하면 <표 2.1.3>과 같다.
- <표 2.1.3>과 같이, 1979년 제11호 태풍‘Judy’, 1983년 제10호 태풍 ‘Forrest’는 태풍 중심 최저기압이 각각 887, 885 hPa를 기록하여 900 hPa 이하인 경우도 있다.
- 그러나, 태풍은 고위도로 북상하면서 강도가 약해지는 경우가 대부분이며 한반도에 상륙할 당시의 태풍 강도와는 많은 차이가 있다.
- 특히 최근에는 주로 강도가 큰 태풍이 자주 내습하는 경향이 있으나, 실제 발생 태풍의 강도는 큰 차이는 보이지 않고 있다.
- 그러나, 우리나라 남해안을 포함한 태풍 이동경로 상의 해역에서는 지구온난화의 영향으로 수온이 상승하여 태풍이 고위도로 북상하면서도 세력이 어느 정도 유지되어 진행하는 경향이 있다.
- 그러므로 지구 온난화로 수온이 상승함으로 인해 태풍의 이동경로와 내습강도에 영향을 미치는 것으로 사료된다.
- 따라서, 50개 주요 태풍 중심반경의 최대풍속 및 영향기간에 대한 분석결과 최대풍속은 40m/sec이하가 47.2% 등으로 나타났으며, 발생기간은 8월에 가장 많이 출현하는 것으로 분석되었으며 그 결과는 다음 <그림 2.1.1>과 같다.

<그림 2.1.1>

주요태풍 최대풍속 및 발생기간



<표 2.1.3>

주요 태풍현황

태풍 번호	태풍이름	발생일	발생위치		중 심 최저기압 (hPa)	중 심 최대풍속 (m/s)	영향기간 (월.일 ~월.일)	피해구간
			N	E				
5914	SARAH	1959. 9.11	13.6	146.5	905	87	9.15~9.18	중·남부
6015	CARMEN	1960.8.15	24.0	128.8	970	39	8.22~8.23	중북부,서해안
6110	HELEN	1961.7.23	11.9	146.3	975	51	8.2~8.4	전국
6304	SHIRLEY	1963.6.12	12.8	135.3	935	72	6.19~6.20	남부,동해안
6615	WINNIE	1966.8.21	28.0	132.0	971	31	8.23~8.25	호남,서해안
6617	BETTY	1966.8.21	18.2	168.9	986	31	8.29~8.31	전국
7120	POLLY	1971. 8. 4	11.0	142.7	980	31	8. 9~8.12	중부,서해안
7303	BILLIE	1973. 7.11	10.0	129.0	916	67	7.18~7.19	서해안
7310	IRIS	1973. 8. 7	17.7	140.9	972	44	8.16~8.18	전국
7408	GILDA	1974.6.26	17.0	150.0	944	46	7.6~7.7	남부
7502	MAMIE	1975. 7.24	17.3	143.3	992	21	7.30~7.31	남해안,서해안
7808	WENDY	1978.7.22	18.5	139.5	962	41	8.1~8.3	남해안
7911	JUDY	1979.8.16	12.0	147.9	887	69	8.24~8.26	남부
8110	OGDEN	1981. 7.27	22.0	148.5	975	33	7.31~8. 2	서해안,남해안
8118	AGNES	1981. 8.26	16.0	148.0	947	49	8.31~9. 4	전국
8210	BESS	1982.7.22	10.9	165.0	901	72	8.1~8.3	동해안
8211	CECIL	1982. 8. 4	16.0	130.0	914	64	8.12~8.15	전국
8508	KIT	1985. 7.31	21.5	146.0	960	36	8. 8~8.11	전국
8520	BRENDA	1985.9.30	15.8	129.6	960	44	10.5~10.6	남부
8605	NANCY	1986.6.21	10.8	132.8	960	38	6.23~6.25	영·호남,충청
8613	VERA	1986. 8.13	17.0	133.5	925	45	8.27~8.29	전국
8705	THELMA	1987. 7. 7	11.0	150.0	915	50	7.15~7.16	전국
8712	DINAH	1987.8.21	11.7	150.7	915	50	8.30~8.31	전국(충청제외)
8911	JUDY	1989.7.21	11.0	141.0	940	50	7.28~7.29	경기,충남, 영·호남
9109	CAITLIN	1991.7.22	12.0	138.5	940	40	7.28~7.30	영남,전남,제주

<표 계속>

태풍 번호	태풍이름	발생일	발생위치		중 심 최저기압 (hPa)	중 심 최대풍속 (m/s)	영향기간 (월.일~월.일)	피해구간
			N	E				
9112	GLADYS	1991.8.15	22.0	153.0	965	30	8.22~8.26	강원,충북, 영·호남,제주
9219	TED	1992. 9.18	14.1	140.0	985	25	9.22~9.26	중부,영·호남
9306	PERCY	1993. 7.27	21.0	130.4	975	30	7.29~7.30	경기,충남,경북
9307	ROBYN	1993. 8. 1	7.0	154.0	940	43	8. 8~8.11	강원,남부
9407	WALT	1994. 7.14	11.0	129.0	915	55	7.26~7.28	남해안,제주
9411	BRENDAN	1994. 7.25	14.3	129.5	992	23	7.31~8. 1	전국
9413	DOUG	1994. 8. 1	15.0	144.0	925	50	8. 9~8.12	제주,전남
9414	ELLIE	1994. 8. 6	28.5	146.5	965	35	8.14~8.16	경기
9429	SETH	1994.10. 2	8.5	160.0	910	55	10.10~10.12	전국(제주제외)
9503	FAYE	1995. 7.16	16.0	141.9	950	40	7.22~7.24	제주,경남,전남
9612	KIRK	1996. 8. 5	26.7	130.7	955	38	8. 5~8.16	제주,경남
9711	TINA	1997. 7.31	13.3	135.0	950	40	8. 7~8. 9	남해안,제주
9809	YANNI	1998. 9.28	21.5	124.0	965	33	9.28~9.30	전국
9810	ZEB	1998.10.11	11.0	141.5	900	55	10.11~10.18	동해안,남해안
9905	NEIL	1999. 7.25	22.0	127.5	980	25	7.26~7.28	중부,서해
9907	OLGA	1999. 7.30	14.8	133.3	970	33	8. 2~8. 4	동해안,남해안
9908	PAUL	1999. 8. 4	20.0	140.0	985	23	8. 4~8. 7	제주
0004	KAI-TAK	2000. 7. 6	19.6	120.0	960	39	7.10~7.11	중부,남부,제주
0006	BOLAVEN	2000. 7.26	25.2	126.4	980	28	7.30~7.31	중부,남부
0012	PRAPIRCON	2000. 8.27	19.0	131.7	965	36	8.31~9. 1	전국
0014	SAOMAI	2000. 9. 3	16.2	150.0	925	49	9.12~9.16	전국
0205	RAMMASUN	2002. 6.29	11.3	136.4	945	44	7. 4~7. 6	전국
0209	FENGSHEN	2002. 7.15	24.1	150.0	920	51	7.26~7.27	전남,제주
0215	RUSA	2002. 8.23	21.2	150.0	950	41	8.30~9. 1	전국
0314	MAEMI	2003. 9. 5	11.0	149.0	910	54	9.12~9.13	전국
0407	MINDULLE	2004. 6.23	14.0	147.0	940	46	7. 2~7. 4	제주,남부
0415	MEGI	2004. 8.16	18.0	133.0	970	33	8.17~8.19	전국
0514	NABI	2005. 8.29	14.5	135.0	925	49	9.6~9.7	제주,동남해안

자료 : 한국태풍 80년보(중앙기상대 1984), 기상연보(1985 ~ 2005년)

<그림 2.1.2>

태풍 경로도

태풍경로도 (1)	태풍경로도 (2)
태풍경로도 (3)	태풍경로도 (4)

<그림 계속>

태풍경로도 (5)	태풍경로도 (6)

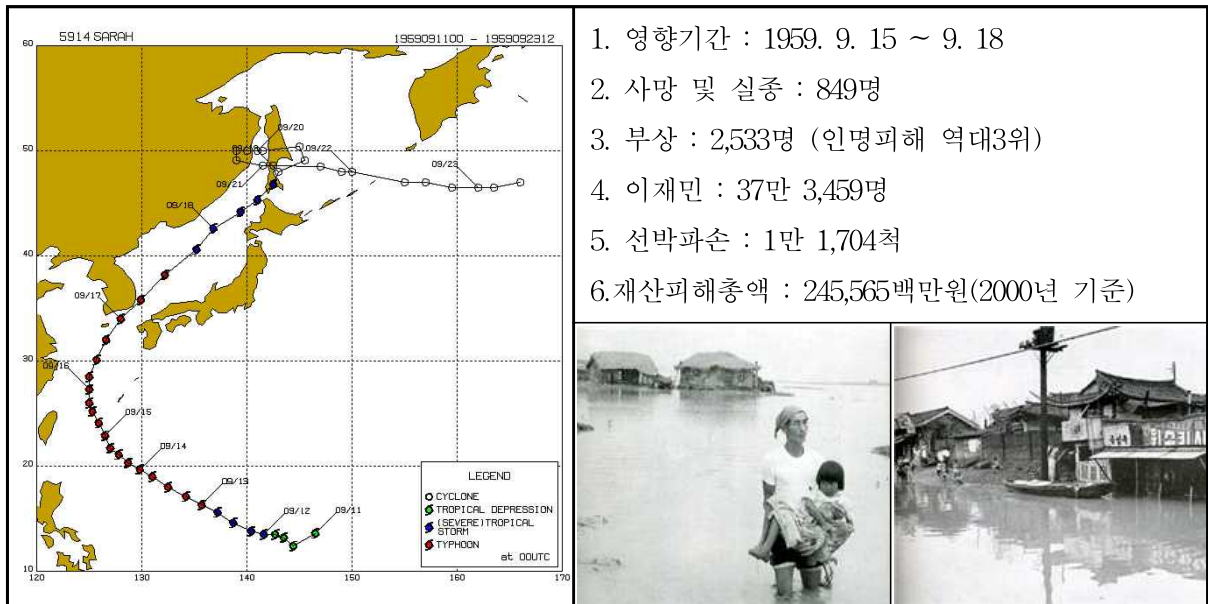
나. 주요 태풍개요

1) 태풍 사라

- 1959년 9월에 발생한 태풍 사라 (태풍번호 5914, 국제명 SARAH)는 열대저기압 등급 중에서 가장 높은 “카테고리 5급”까지 발달했던 태풍으로, 대한민국 최대 명절인 추석날 한반도를 강타하여 당시 사회에 큰 상처를 남겼다.
- 1959년 9월 12일 괌 섬 서쪽 해상에서 발생한 태풍 사라는 점차 발달하면서 북서진하여, 9월 15일 일본 오키나와 부근 해상에 이르러서는 중심기압 905hPa, 1분 평균 최대풍속 85m/s에 달하는 매우 강력한 태풍이 되었다.
- 태풍은 미야코섬 부근을 통과한 뒤 전향하여, 한반도를 향해 북상하기 시작, 북위 30도를 넘어서면서 서서히 쇠약해지기 시작했지만 그럼에도 중심기압 935hPa 의 강한세력을 유지하였고, 추석이었던 9월 17일 오전 12시경에 중심기압 945hPa 의 세력으로 부산 앞 바다를 통과했다.
- 중심기압 945hPa 의 강력한 세력으로 한반도에 접근한 태풍 사라의 위력은 한반도에 영향을 미쳤던 과거의 다른 태풍에 비해 월등한 것으로, 상륙을 하지 않았음에도 남부 지방에서는 전례 없는 폭풍우가 일어났다.
- 호우와 함께 동반된 강풍으로 제주에서는 최대순간풍속 46.9m/s 가 관측되어 당시 최대 순간풍속 역대 1위를 기록했으며, 그 외에도 울릉도에서 46.6m/s, 여수에서 46.1m/s 등이 관측되었다.

<그림 2.1.3>

태풍 사라의 진로도 및 개요



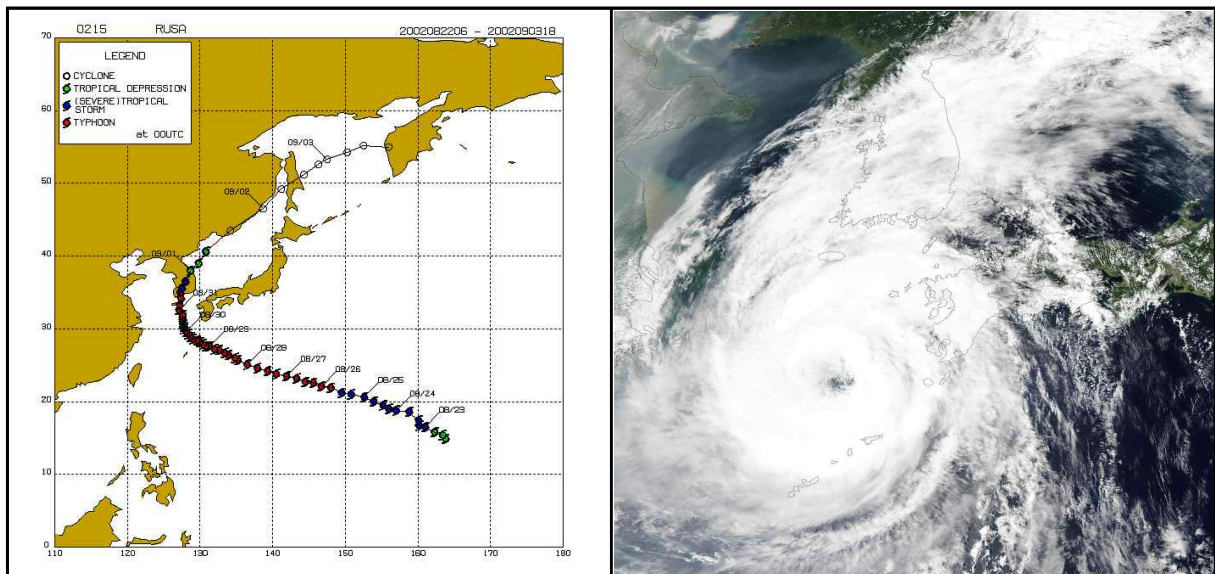
2) 태풍루사

- 2002년 8월 23일 서태평양 마리아나제도의 관점에서 동북쪽으로 1,800km 떨어진 해상에서 열대성 폭풍으로 발달해 29~30일 중심기압이 950hPa(헥토파스칼)로 강해지면서 태풍으로 바뀌었다.
- 이어 일본 규슈[九州]의 가고시마[鹿兒島] 남쪽 해상을 거쳐 31일 12시 무렵 제주도 서귀포 동쪽 58km 지점에서 방향을 북쪽으로 바꾸어 같은 날 15시 30분경 전라남도 고흥반도 남쪽 해안에 상륙하였다. 그 뒤 전라남도 순천, 전라북도 남원·무주, 충청북도 영동·보은·충주, 강원도 평창·인제·강릉·속초를 지나 9월 1일 15시경 속초 북동쪽 130km 지점에서 열대성저기압으로 약화되어 소멸하였다.
- 태풍으로 인해 강릉지방의 경우 연평균강수량(1,402mm)의 62%인 870.5mm가 하루만에 내렸으며, 8월 평균강수량의 3.3배에 달하는 극치가 발생하였다.
- 피해 규모는 124명이 사망하고 60명이 실종되었으며, 2만 7,619세대 8만 8,625명의 이재민이 발생하였다. 또 건물 1만 7,046동과 농경지 14만 3,261ha가 물에 잠기고, 전국의 도로·철도·전기·통신 등 주요 기간망과 생활 기반시설이 붕괴되거나 마비되어 총 5조 4,696억 원의 재산 피해를 냈다.

<표 2.1.4> 태풍 루사의 진로(2002. 8~9)

8월 31일 (12시)	8월 31일 (18시)	9월 1일 (03시)	9월 1일 (12시)	9월 1일 (15시)
제주도 서귀포 동쪽 58km	전남 순천	충북 보은	강원 인제	강원 속초 130km

<그림 2.1.4> 태풍 루사의 진로도 및 위성사진



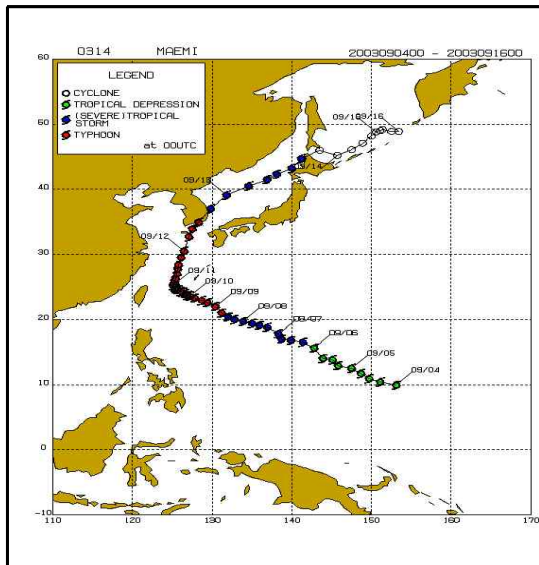
3) 태풍매미

- 태풍 매미가 우리나라 기상관측 이래 순간최대 풍속 극값을 경신한 주된 원인은 우리나라를 통과한 태풍 중 중심기압이 가장 낮았으며, 우리나라를 중심으로 북쪽에는 찬 성질을 가진 대륙 고기압이 위치하고 남쪽에는 발달한 열대 대기압인 태풍이 위치하여 고기압과 태풍간의 기압경도력이 강했기 때문이다.

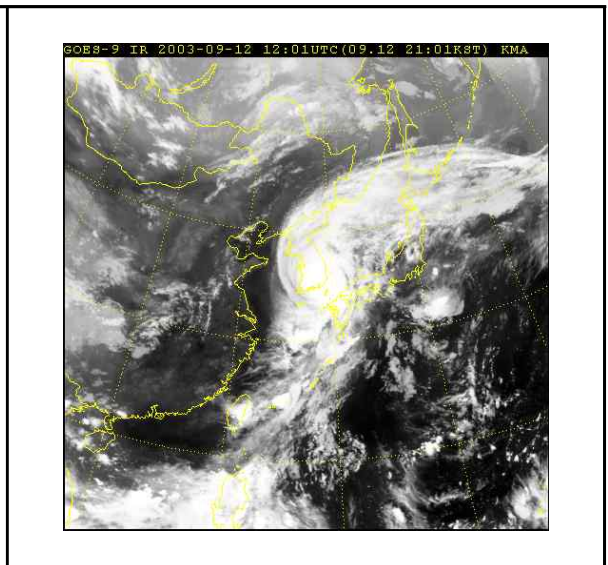
<표 2.15> 태풍 매미의 진로(2003. 9)

12일 (18시)	12일 (20시)	12일 (21시)	12일 (23시)	13일 (00시)	13일 (01시)	13일 (02시)	13일 (02시30분)
제주시 성산포 동쪽	경남 사천시 부근 착륙	경남 함안군 부근	대구 남서쪽 20km부근	대구 북동쪽 35km부근	경북 청송군 부근	경북 울진군 부근	동해안 진출

<그림 2.15> 태풍 매미의 진로도



<그림 2.16> 태풍 매미의 위성사진



<표 2.16> 주요 태풍 통과시의 최저기압

구분	사 라	셀 마	루 사	매 미
일 자	1959. 9. 17	1987. 7. 15	2002. 8. 31	2003. 9. 12
지 역	부산	여수	여수	통영
최저기압	952	972	970	954

<표 2.1.7> 태풍 「매미」 통과시 최대풍속 및 순간최대풍속(2003년 9월 12일)

(단위 : m/s)

지 역	제 주	고 산	여 수	통 영	부 산
최 대 풍 속(시:분)	35.5(18:12)	51.1(16:05)	35.9(19:51)	30.0(20:53)	26.1(22:10)
순간최대풍속(시:분)	60.0(18:11)	60.0(16:10)	49.2(18:57)	43.8(20:57)	42.7(21:01)

<표 2.1.8>

파랑관측 결과

구 분	H _S (m)	H _{max} (m)	T _{1/3} (sec)	비 고
부산신항 동방파제 전면	8.0	10.8	16.6	
울산신항 전면	9.4	14.7	-	
거제도부이	7.0	16.0	16.7	

○ 해 일

- 태풍 매미가 사천만을 통과한 이후 태풍의 위험반원에 위치한 남해안의 동측인 통영, 마산 및 부산 등에서 부진동을 제외한 해일고는 각각 143cm, 248cm 및 77cm의 높은 값을 나타내고 있다.
- 특히, 마산항에서는 예보 고조위 191cm 보다 높은 248cm의 해일고(고조위 편차)가 발생하였는데, 이는 마산항이 진해만의 내측에 위치하여 강한 남풍에 의한 긴 취송거리에 걸친 해수수송으로 인한 해수퇴적 현상이 발생되고 부진동과 해파가 가세함으로써 마산항에서의 해일피해가 더욱 심했다.

○ 태풍매미에 의한 남·동해안의 해일현상 분석

- 태풍매미는 남해안 중부인 사천시로 상륙하여 북동진하면서 태풍의 위험반원에 속하는 광양, 통영, 마산, 부산항 등지에서 1.0~2.5m의 고조위 편차를 발생시켜 큰 해일피해를 입혔다.
- 특히, 마산항에서는 대조기 고조시 예보조위 191cm에 해일에 의한 해면상승 248cm와 부진동의 진폭 13cm가 추가되어 총 452cm까지 해면이 상승하였는데, 이는 남쪽으로 개방되어 있는 마산만의 안쪽으로 취송거리가 긴 강한 남풍에 의한 해수수송으로 해수퇴적현상이 현저하였기 때문이다.
- 이밖에 진해만의 최대유의파고(HS)가 6m 이상이었음을 감안할 때 마산항에서도 해파의 영향이 가세하며 마산항 부두 일대에 해일피해가 극심하였던 것으로 볼 수 있다.

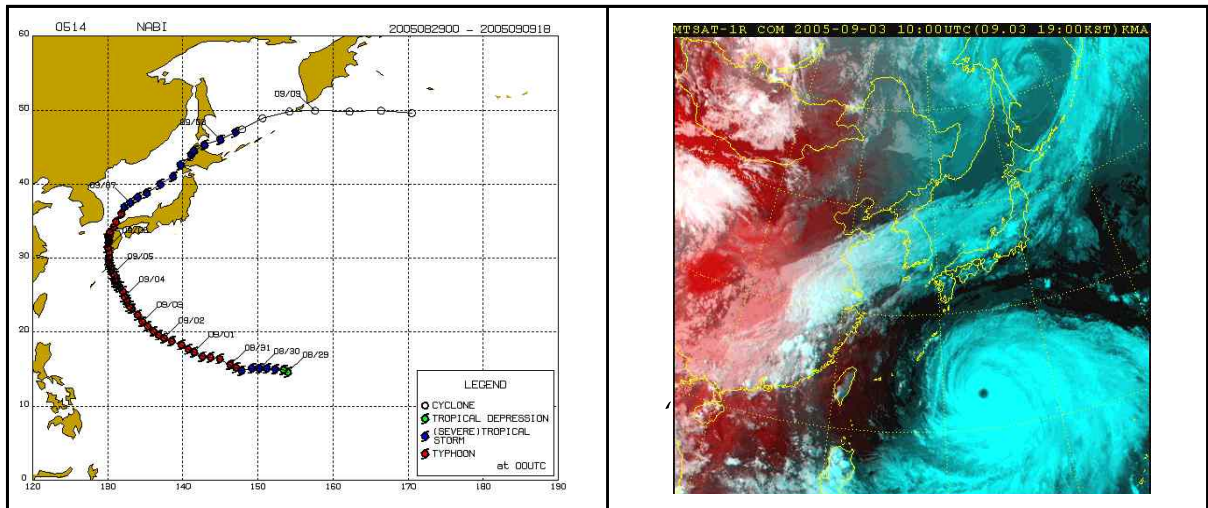
4) 태풍나비

- 태풍 나비(NABI)는 2005년 8월 29일 21시경 미국의 괌 동북동쪽 해상 1,210km 지점에서 발생하여 우리나라 동해안을 거쳐 2005년 9월 8일 15시경 소멸되었으며, 중심 최대기압 925hPa, 중심최대풍속 49m/sec를 기록한 초강력 태풍이었다.
- 우리나라는 태풍 나비로 인해 6명이 사망하고 약 1,120억원의 재산피해가 발생하였다.

<표 2.1.9> 태풍 나비의 진로(2005. 9)

6일 (12시)	6일 (15시)	6일 (18시)	6일 (21시)	7일 (00시)	7일 (03시)	7일 (06시)
일본 가고시마 북북서 50km	일본 가고시마 북쪽 160km	부산 남동쪽 230km	부산 동남동쪽 200km	부산 동쪽 210km	독도 남쪽 140km	독도 동남동쪽 80km

<그림 2.1.7> 태풍 나비의 진로도 및 위성사진



<그림 2.1.8> 포항 영일만 태풍 나비 내습 전경사진



부록 3

한국항만정보(KHDB) Program Manual

By KORDI / Ver. 2.0

- 우리나라는 국토의 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 많은 항만시설을 보유하고 있음.
- 개별 항만시설에 대한 기반 정보들을 수록한 보고서들은 많이 있으나 전국적으로 산재해 있는 항만시설중 사용자가 원하는 항만의 기반자료를 검색하는 것은 어려운 실정임.
- 전국 항만에 대한 기반자료를 데이터베이스화하여 접근성이 용이한 프로그램의 개발을 통해 사용자가 손쉽게 원하는 항만에 대한 기반정보를 검색할 수 있는 시스템을 수립.
- 사용자의 접근성이 편리한 매트랩(Matlab) 언어 기반의 GUI(Graphical User Interface)를 활용하여 개발하였고, Standalone 프로그램화하여 사용자가 어떤 컴퓨터 환경에서든 해당 항만에 대한 정보검색이 용이함.

□ [그림3.1]은 전국 항만기반자료 데이터베이스(Korea Harbor DataBase, 이하 KHDB로 명시)의 초기화면임. [프로그램 정보]버튼은 본 프로그램이 제공하는 각 항만에 대한 기상조건, 해상조건, 시설조건, 해양환경에 대한 간략한 정보를 소개([그림3.2]). [나가기]버튼을 클릭하면 프로그램이 종료되고, [다음]버튼을 클릭하면 KHDB의 메인화면이 나타남([그림3.3]).



그림 3.1. KHDB의 초기화면

그림 3.2. KHDB에 대한 소개화면
[프로그램 정보]



그림 3.3. KHDB의 메인화면

□ [KHDB의 메인화면]에서 우측 창을 살펴보면, 해당프로그램에 대한 설명이 제시되어 있음. 사용자가 정보획득을 원하는 항을 우선적으로 선택해야하는데 항을 선택하는 방법은 두 가지가 있음. ㉠ 왼쪽 창의 우리나라 지도에서 원하는 항만의 이름을 마우스로 클릭하여 선택 ㉡ 프로그램 상단 메뉴창의 우측편 리스트상자에서 가나다순으로 정리되어 있는 항의 이름을 선택.

□ 사용자가 정보획득을 원하는 항만을 위의 ㉠ 또는 ㉡의 방법으로 선택하면, [그림 3.4]와 같이 [KHDB 메인화면]의 상단 메뉴바 좌측의 “한국 항만 정보”라는 이름이 사용자가 선택한 항의 이름으로 바뀌고, 우측 창에 선택한 항의 위성사진과 항만의 위치가 위경도로 표시됨. 이 때 제시되는 항만의 위경도 정보는 항만의 중심부의 위경도 좌표임.

* [그림 3.4]에서는 사용자의 이해를 돕기 위해 “부산항”을 선택하여 예를 들었음.



그림 3.4. [KHDB의 메인화면]에서 “부산항”을 선택한 화면

- 일단 우선적으로 항만을 선택한 후에 상단 메뉴바의 [기상조건], [해상조건], [시설조건], [해양 환경]의 정보창이 활성화됨.
- [기상조건] : 사용자가 정보획득을 원하는 항만을 선택한 후 상단 메뉴의 정보창 중 [기상조건]을 선택하면 [KHDB의 메인화면]과는 별도로 새로운 창이 [그림 3.5]와 같이 나타남. [기상조건]은 [기상개황], [바람], [기온/강수량], [현상일수], [작업가능일수]의 다섯 개의 창으로 구성되어 있음. [기상조건 메인화면]에는 해당 항만의 [기상개황]에 대한 정보가 제시되고, 상단 메뉴의 [바람], [기온/강수량], [현상일수], [작업가능일수]를 클릭하면 각각에 해당되는 정보가 별도의 창에 표시됨([그림 3.6] ~ [그림 3.9]).

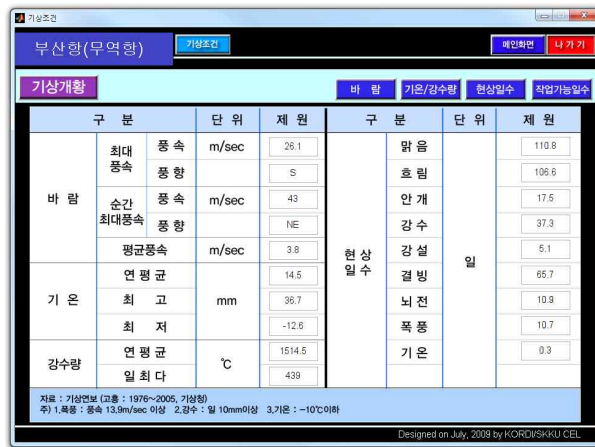


그림 3.5. [기상조건] 메인화면 ([부산항]의 예)

- [그림 3.5]의 [기상개황]정보에서는 바람, 기온, 강수량, 현상일수에 대한 대략적인 정보를 제공함.
- [그림 3.6]의 [바람]정보에서는 바람장미도, 월별 풍속정보 및 정온율, 연평균 풍속, 최대풍속 등을 제공함.

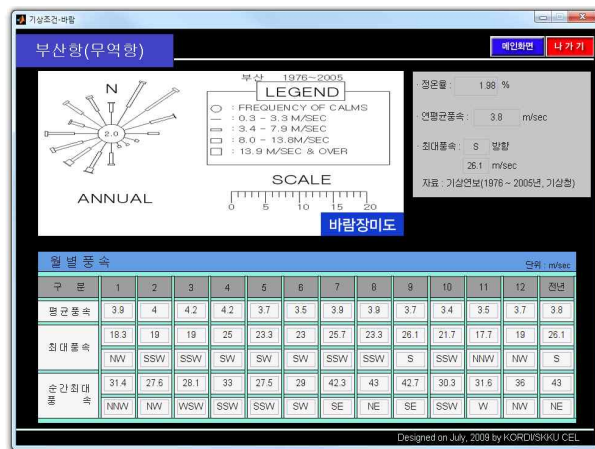


그림 3.6. [기상조건]의 [바람]정보 ([부산항]의 예)

□ [그림 3.7]의 [기온/강수량]정보에서는 월별 평균, 최고, 최저 기온에 대한 정보와 월별 강수량, 1일 및 1시간 최다강수량에 대한 정보를 제공함.

구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연년
월평균기온	2.9	4.8	8.5	13.6	17.5	20.7	24.1	25.7	22.1	17.4	11.4	5.8	14.5
월최고기온	17.5	20.3	22.9	28.1	34	30.1	35.8	36.7	35.2	29.1	25.6	20.4	36.7
월최저기온	-11.5	-12.6	-9.7	-0.1	7.3	10.8	14.5	16.8	10.6	1.8	-4.6	-11.5	-12.6
월평균최고	7.5	9.5	13.3	18.1	21.7	24.3	27.3	28.1	26.2	22.3	16.3	10.4	18.8
월평균최저	-0.8	0.7	4.8	9.8	14.1	17.8	21.8	23.2	19.3	13.7	7.8	1.8	11.2

구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연년
월별강수량	34.6	46.1	82.3	142	147.6	227.4	271.5	264.1	160.4	59.8	53.3	25.4	1514.5
1일최다강수량	51	61.5	58	146.5	200.4	224.6	197.5	439	246.5	122.4	173	78.8	439
1시간최다강수량	8	13.9	13.7	48	37.2	46.2	73	94.6	86.7	37.6	24.6	7.5	86.7

그림 3.7. [기상조건]의 [기온/강수량]정보 ((부산항)의 예)

□ [그림 3.8]의 [현상일수]정보에서는 월별 현상일수에 대한 정보를 제공함.

구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	연년	월평균
맑음	15	11.9	9.4	8.1	7.4	3.3	3.8	4.6	6	11.5	14.1	19.8	110.8	9.2
흐림	4.6	5.8	9.2	9.2	10.5	14.6	16.1	11.9	11.1	6.1	4.6	2.9	106.6	8.9
안개	0.1	0.3	0.7	1.9	3	5	6.2	0.5	0.2	0.1	0.2	0.2	17.5	1.5
강수	1.3	1.6	3.2	3.9	3.7	4.8	5.5	5.6	3.8	1.8	1.3	0.9	37.3	3.1
강설	1.8	1.2	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0.2	1.2	5.1	0.4
결빙	23.6	16.5	5.6	0.2	0	0	0	0	0	0.1	3.5	16.1	65.7	5.5
뇌전	0.8	1	0.9	1.4	0.6	1.3	1.4	1.1	0.6	0.4	0.6	0.7	10.7	0.9
폭풍	0.1	0.2	0.4	0.9	1.2	0.7	2.8	2.8	1	0.5	0.4	0.1	10.9	0.9
기온	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0

그림 3.8. [기상조건]의 [현상일수]정보 ((부산항)의 예)

□ [그림 3.9]의 [작업가능일수]정보에서는 월간 및 연간 작업가능일수와 가동율에 대한 정보를 제공함.

구분	연간 작업가능일수	월간 작업가능일수	가동율	비고
해상	289	22.4	73.7	
육상	260	21.7	71.23	

자료 : 토목학회지 17-1호(1969년)에 연구발표된 논문 "건설 기계화 시공과 설계상의 제 문제점" 을 근거로 하여 작업가능일수 산정

그림 3.9. [기상조건]의 [작업가능일수]정보 ((부산항)의 예)

□ [해상조건] : 사용자가 정보획득을 원하는 항만을 선택한 후 [KHDB의 메인화면](그림 3.4)에서 상단 메뉴의 정보창 중 [해상조건]을 선택하면 [KHDB의 메인화면]과는 별도로 새로운 창이 [그림 3.10]과 같이 나타남. [해상조건] 메인화면은 크게 세 개의 창으로 이루어져 있는데 좌측 창은 4대 분조값과 더불어 해당 항만의 해수면 정보를 제공함. 우측 창의 상하단으로 구분지어져 있는 우측 상단은 심해 및 천해 설계파 제원 및 주변 해상의 심해설계파 정보를 제공해주고, 우측 하단은 해일고 및 해당 항만의 조류 및 파랑정보를 제공해줌.

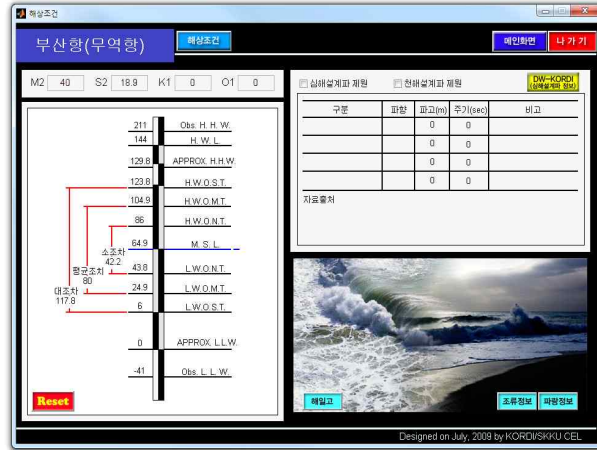


그림 3.10. [해상조건]의 메인화면([부산항]의 예)

□ [그림 3.10]의 좌측 창에서 평균해수면을 비롯한 해수면 정보들과 이로부터 M2와 S2의 분조값이 추정되어 나타남. 좌측 창의 [Reset]버튼을 선택하면 해당 항만의 해수면 정보들이 초기화되는데 이 때 M2, S2, K1, O1의 4대 분조값을 직접 입력해서 상단의 [해상조건]버튼을 클릭하면 새로이 입력한 4대 분조에 의해서 계산되는 해수면 정보들이 좌측 창에 표시됨.

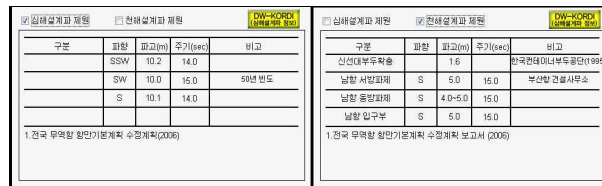


그림 3.11. [해상조건]의 심해/설계파 정보([부산항]의 예)

□ [그림 3.10]의 우측 상단에 [심해설계파 제원] 혹은 [천해설계파 제원] 탭을 선택하면 [그림 3.11]과 같이 해당항만의 심해 및 천해설계파에 대한 정보가 제공됨. 이 때 제공되는 각 설계파에 대한 정보는 해당항만에서 기수행된 관련보고서의 내용을 참고.

□ [그림 3.10]의 우측 하단에서는 해당 항만의 [해일고], [조류정보] 및 [파랑정보]를 제공함. [해일고]버튼을 누르면, [그림 3.11]의 첫 번째 그림처럼 해당항만의 해일고 정보가 제공되고, [조류정보] 및 [파랑정보]버튼을 누르면 [그림 3.11]의 두 번째, 세 번째 그림처럼 해당항만의 조류 및 파랑에 대한 정보가 제공됨.

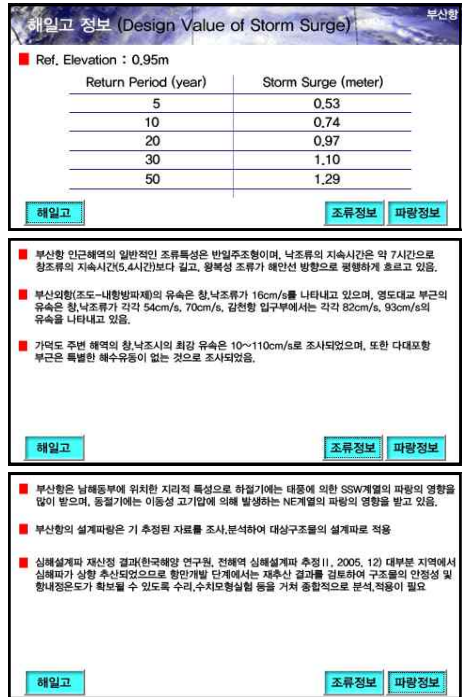


그림 3.12. [해상조건]의 해일고 및 조류/파랑 정보([부산항]의 예)

□ [시설조건] : 사용자가 정보획득을 원하는 항만을 선택한 후 [KHDB의 메인화면](그림 3.4)에서 상단 메뉴의 정보창 중 [시설조건]을 선택하면 [KHDB의 메인화면]과는 별도로 새로운 창이 [그림 3.13]과 같이 나타남. [시설조건]은 크게 세 개의 창으로 구분되는데 좌측 창에는 해당 항만의 시설물에 대한 전반적인 시설현황도가 표시되고, 우측 상단창은 좌측 시설현황도에 표시된 번호에 위치한 시설의 상세단면도가 제시되는 창임. 우측 하단창은 해당항만의 외곽시설 및 접안시설에 대한 정보를 제공해주는 버튼과 위치 번호판으로 구성되는데 위치번호판은 좌측 시설현황도에 표시된 번호의 시설에 대한 상세단면도 정보를 얻기 위한 것으로 좌측 시설현황도에 표시된 번호를 우측 위치번호판에서 선택하면 우측 상단창에 해당 번호의 시설물의 상세단면도가 [그림 3.14]와 같이 제시됨.



그림 3.13. [시설조건]의 메인화면([부산항]의 예)



그림 3.14. 시설현황도 창(좌측) ①번 시설에 대한 상세단면도 제시화면([부산항]의 예)

□ [그림 3.13]의 화면에서 우측하단의 [외곽시설] 및 [접안시설] 버튼을 클릭하면, 해당 항만에 설치된 외곽시설 및 접안시설의 정보가 별도의 창에 제공됨([그림 3. 15]).



그림 3.15. [외곽시설]과 [접안시설]에 대한 정보제공창 ([부산항]의 예)

□ [해양환경] : 사용자가 정보획득을 원하는 항만을 선택한 후 [KHDB의 메인화면]([그림 3.4])에서 상단 메뉴의 정보창 중 [해양환경]을 선택하면 [KHDB의 메인화면]과는 별도로 새로운 창이 [그림 3.16]과 같이 나타남. [해양환경]창은 좌측의 메뉴바와 우측의 창으로 구분되는데 좌측의 [수심분포도], [파향분포도], [파고분포도], [주기분포도]의 버튼을 클릭하면 각각 [그림 3.17] ~ [그림 3.20]과 같이 우측창에 해당 정보가 제시됨.



그림 3.16. [해양환경]의 메인화면([부산항]의 예)

□ [그림 3.4]의 [KHDB 메인화면] 좌측창에 표시된 바와 같이 본 프로그램은 항만을 연안항과 무역항으로 구분했음. [그림 3.17]과 같은 [수심분포도]는 현재 무역항에 해당되는 항만에 대해서만 정보를 제공함.

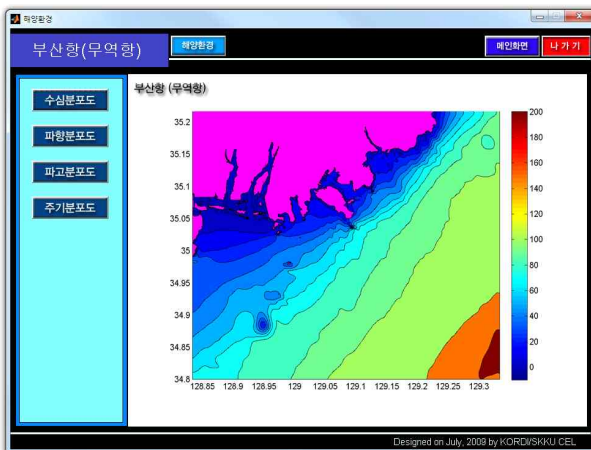


그림 3.17. [해양환경]의 [수심분포도]화면([부산항]의 예)

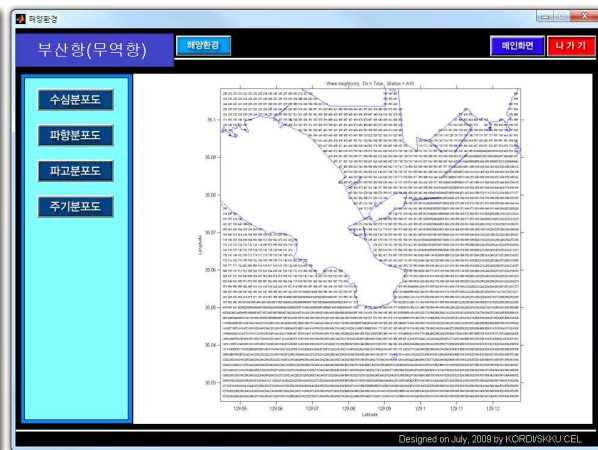


그림 3.18. [해양환경]의 [파향분포도]화면([부산항]의 예)

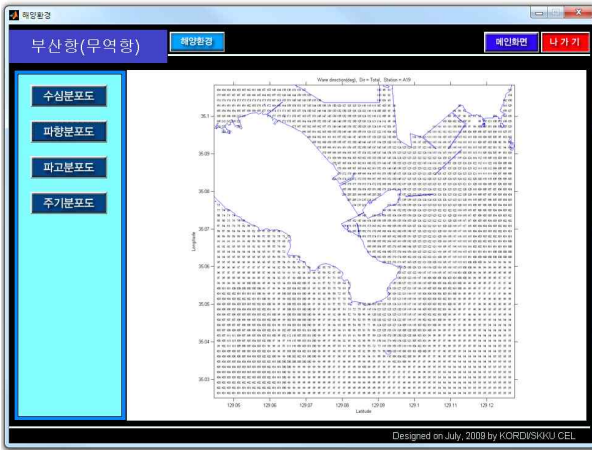


그림 3.19. [해양환경]의 [파고분포도]화면([부산항]의 예)

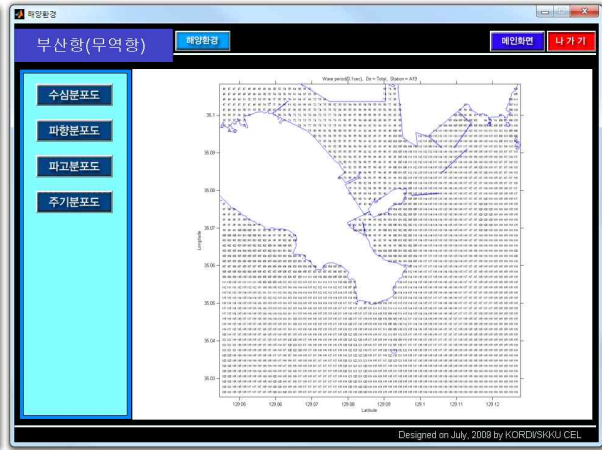


그림 3.20. [해양환경]의 [분포도]화면([부산항]의 예)

한국항만정보(KHDB) 설치방법

By KORDI / Ver. 2.0

■ KHDB.exe파일을 설치합니다.

- KHDB.exe 파일 설치후, 프로그램 실행전에 MCRInstall.exe를 설치합니다.
- MCRInstaller.exe파일은 "한국항만정보 설치파일('KHDB.exe')를 설치하면 생성되는 C:/program files/KHDB 폴더내에 있습니다.

■ MCRInstaller.exe를 설치합니다.

- 실행시키면 Matlab component Runtime이라는 창이 뜨면서 설치가 됩니다.
 - 한번 설치한 컴퓨터에서는 다시 설치하지 않으셔도 됩니다.
- * MCRInstaller를 설치하지 않으시면 프로그램이 실행되지 않습니다.
- * 본 프로그램은 Standalone 프로그램으로 Matlab이 설치되어 있지 않은 컴퓨터에서도 실행이 가능합니다.