

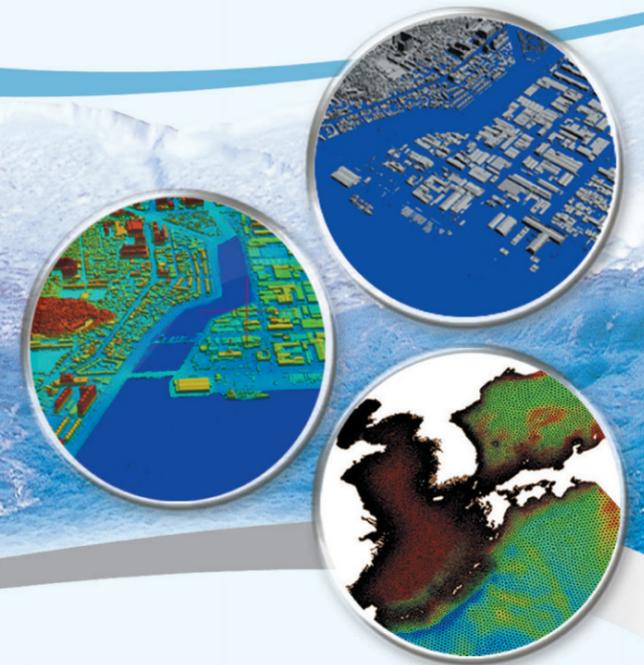
해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도 (Hazard Map) 작성기술 개발

부산·마산·여수

Estimation of storm surge inundation and hazard mapping : Busan, Masan, Yeosu

KORDI 한국해양연구원

해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도 (Hazard Map) 작성기술 개발 :: 부산·마산·여수 2010.12 한국해양연구원



2010. 12

KORDI 한국해양연구원

● 주의

1. 이 보고서는 한국해양연구원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양연구원에서 수행한 기본연구 사업의 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도 (Hazard Map) 작성기술 개발

부산 · 마산 · 여수

Estimation of storm surge inundation and
hazard mapping : Busan, Masan, Yeosu

2010. 12

**해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도
(Hazard Map) 작성기술 개발: 부산, 마산, 여수**

Estimation of storm surge inundation and hazard
mapping: Busan, Masan, Yeosu

2010. 12

한국해양연구원

제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 “해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도(Hazard Map) 작성기술 개발: 부산, 마산, 여수” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2010년 12월 31일

총괄연구책임자 : 심 재 설

참 여 연 구 원 : 전 기 천 이 동 영 김 상 익
강 시 환 서 승 남 이 종 찬
안 희 도 김 선 정 권 재 일
임 학 수 윤 종 주 김 진 아
정 진 용 김 태 균 민 인 기
최 정 운

위 탁 기 관 명 (주)혜인 E&C

위 탁 기 관 명 (주)지오시스템리서치

위 탁 기 관 명 (주)중앙항업

위 탁 기 관 명 (주)오양엔지니어링

위 탁 기 관 명 (주)미래해양

위탁연구책임자 조 휴 상, 김 동 철

위탁연구책임자 문 승 록

위탁연구책임자 김 상 봉

위탁연구책임자 신 기 철

위탁연구책임자 남 수 용

요 약 문

I. 제목

해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도 (Hazard Map) 작성기술 개발
: 부산, 마산, 여수 (2008. 1. 1 ~ 2010.12.31)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구에서는 우리나라 태풍 통과시 가장 많은 피해를 입힌 남해 동부해역을 중심(부산, 마산, 여수)으로 한 태풍해일 침수범람 예상지역 침수범람예측 및 재해도 작성 기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 연안에서의 태풍해일로 인한 침수범람 지역을 정밀하게 예측해야하고, 이는 정밀격자의 기상수치모델과 여러 해양요소를 복합적으로 고려하는 연안 정밀격자 태풍해일모델을 수립하여야 하며, 육상 고도 및 수심이 체계적으로 연결되는 기술을 개발하여 연안지형의 DB/GIS를 확립하여야 한다.

이를 통해 태풍 내습시 예상되는 해일기인 침수지역의 조기경보 및 초기 대처 능력의 향상으로 국민의 생명과 재산을 보호하며, 자연재해 예측·저감화 기술의 국제 경쟁력 확보가 가능하다. 또한 연안재해 요인에 대한 효율적인 예보체제 구축으로 신속한 연안재해 예방활동 지원과 국가 재난관리 정책수립의 기초자료를 제공함으로써 정부에 대한 신뢰를 제고할 수 있고, 관련부처의 자연재해 방재사업을 지원할 수 있는 수요 지향적 기술을 제공할 수 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 침수범람 예측 및 재해도 작성 기반기술 조사
 - 선진 태풍해일 침수범람 예측 및 재해도 작성 기술 현황조사
 - : 일본(CDIT), 미국(NOAA, 육군공병단)의 침수범람예측기술 분석 및 개선점 제시
 - 해일 침수범람 예측 및 재해도 작성기준의 표준화 및 관련제도 검토
 - Lidar 측량을 통한 정밀지형도 시범작성
 - 해일침수범람 재해방지 시설 계획
- 육도-해도 접합 정밀 지형도 작성
 - 지상 또는 항공 라이다를 통한 정밀 지형측량

- 멀티빔을 통한 정밀 수심측량
- 육도/해도 접합 맵핑기술 개발
- 연안지형 DB/GIS 시범 구축 (만리포, 부산, 마산, 여수)
- 태풍해일 침수범람 예측을 위한 정밀 수치모델링 및 검증과 개선
 - 해일 침수범람 예측을 위한 정밀 수치모델링
 - 예측모델별 반응도 실험
 - 태풍해일 침수범람 예측 수치모델 결과 검증 및 성능개선
 - 태풍시 현장관측 및 자료분석, 모델결과와의 비교
 - 주요 태풍에 대한 정밀격자 해일고 및 침수역 시범추산과 통계/극치분석
 - wave set-up에 의한 침수역 확장 영향이 고려된 모형 시범수립 (만리포 해역)
- 해일침수범람 재해방지 시설 기본설계
 - 해일 침수범람 재해방지 시설 제안

IV. 연구개발 결과

- 일본 CDIT, 미국 NOAA 및 미육군공병단의 침수범람 예측기술 조사 등 선진 태풍해일 침수범람 예측 및 재해도 작성기술과 지진해일에 대비한 재해도 작성 관련기술 검토
- 해일 침수범람 예측과 재해도 작성기준의 표준화 연구 수행을 통한 해일 침수범람 예측 및 재해도 작성지침(안) 수립
- 해일 침수범람 예측 및 재해도 작성 기반 자료확보를 위한 육상/항공 라이다 정밀 지형측량 및 다중빔 음향측심기를 이용한 정밀 수심조사를 통한 부산, 마산, 여수 지역의 육도-해도 접합 정밀 지형도를 작성
- Unstructure grid 모델 도입을 통한 정밀격자 폭풍해일 침수범람 모델수립 및 육도-해도 접합 정밀지형도를 이용한 정밀격자 해일모델의 해일고 예측을 통한 침수범람 예측 정확도 향상 및 예측 모델별 반응도 실험 수행
- 3차원 unstructured grid 모델의 정밀격자 폭풍해일 침수범람 모델의 검증 및 정밀격자 해일모델의 해일고 예측을 통한 침수범람 예측기술 개발과 태풍시 현장관측과 자료분석을 통하여 태풍해일 침수범람 예측 수치모델 성능개선 및 관측자료와의 검증
- 태풍 매개변수와 상세 연안지형자료를 통한 주요 50개 태풍에 대한 해일고 및

침수역 시범추산과 통계/극치분석

- 유체역학 수치모델인 COBRAS를 통한 만리포해변의 쇄파대에서의 파랑변형 모의를 통하여 wave setup에 의한 침수역 확장영향이 고려된 모형의 시범 수립
- 해일 침수범람 재해방지시설에 대한 선진 사례조사 및 방지시설 계획에 대한 조사와 국내 재해방지시설 문헌 및 설치사례에 대한 조사·분석
- 국내 해일 침수범람 특성 분석 및 Flow3D(CFD 모델) 시뮬레이션을 통한 국내 실정에 맞는 마산지역 해일 침수범람 재해방지시설 제안

V. 연구개발결과의 활용계획

- 육도-해도 접합 정밀지형도 작성기술은 폭풍해일 침수범람 예측모델의 정확도 향상을 위한 정밀 입력자료로 사용되어, 입력자료 정밀도 향상에 따른 예측결과의 향상을 보여주었으며, 이 기술은 국립해양조사원의 침수예상도 제작기술 사업에 기술 이전되어 사용되고 있다. 나아가 정밀 지형도의 GIS기반 3차원 공간 분석을 통하여 경사도 및 체적변화 등의 정량적 변화량 산정을 통한 형태학적 변화를 살펴봄으로서 추후 해양환경 관측결과와의 연계한 분석을 통하여 연안관리 및 모니터링에도 효과적으로 활용 가능하다.
- 해일 침수범람에 활용되는 수치모델을 분석하고 실제해역에 적용하며, 모의 결과에 대한 침수 예상지역의 범위를 추정함으로써, 침수범람 예측 및 재해도 작성에 활용한다.
- 해일고 산정을 통한 폭풍해일 모의 결과를 검증하고, 기존 침수지역에 대한 비교평가를 실시하며, 향후 발생 가능한 폭풍해일에 대한 시나리오를 선정하여 빈도별 피해가능 범위를 파악함으로써, 과거에 내습한 태풍에 의한 해일고의 정확한 지역적 분포특성을 파악하여 국지적인 방재계획 수립에 활용 가능하다.
- 호안 및 제방 등의 연안 방어구조물로 태풍에 기인한 해일 및 범람을 완전히 방어하는 것은 불가능하므로, 재해 발생에 따른 피해를 예측함으로써 신속하게 대처하여 피해를 최소화할 수 있다.

SUMMARY and KEYWORDS

I. Title of the Study

Estimation of storm surge inundation and hazard mapping
: Busan, Masan, Yeosu

II. Objectives and Significance

The objectives of study are to estimate and predict the storm-surge inundation and construct hazard map mainly about Busan, Masan, Yeosu southeastern part of Korea. That areas have suffered major damages frequently when the typhoon hit the Korea peninsula. To do that, we have to predict the storm-surge inundation precisely, and for this, we have to establish the fine-grid storm-surge model can be consider the meteorologic model and ocean environment component at the same time. And to make a fine resolution grid for model, it needs to coastal map registering with elevation and depth especially at inter-tidal zone in most of coastal area.

To do that, it's possible to provide early alert and response where we can expect to storm-surge inundation area, so we can protect and keep people's life and property and that's improved the national competitiveness to predict and reduction the natural hazard. Moreover, the effective implementation of coastal hazard forecast, it can be possible to planning the disaster prevention activities and providing reference data to establish the national disaster management policy. It will be enhanced trust in government and provided demand-oriented technology to support natural disaster prevention project.

III. Contents and Scope

The content and the scope of study are as follows:

- Research of advanced storm-surge inundation prediction
 - Case studies of CDIT (Japan) and NOAA (USA), storm-surge prediction and

some suggestion of improvement

- Standardization of storm-surge prediction and hazard mapping from relevant institutional review
- Construction of high-resolution coastal topographical map from LiDAR measurement (Masa, Busanm Yeosu)
- Facility planning for storm-surge inundation flooding disaster prevention
- Fine-scale resolution coastal mapping
 - Precise topographic survey using aerial or terrestrial LiDAR
 - Precise depth survey using Multi-beam
 - Construction of fine-scale resolution coastal mapping registering LiDAR and Multi-beam
 - Implementation of DB
- Establishment of fine-scale storm-surge prediction model and verification/improvement
 - Establishment of fine-scale storm-surge prediction model
 - Analysis of accuracy and adaptability among the numerical models
 - Verification and improvement of storm-surge prediction results
 - Typhoon field observation and data analysis, comparison with prediction model results
 - Estimation and statistics/extreme analysis about storm-surge height about the inundation of major historical typhoons
 - Establishment of inundation model considering with wave set-up
- Basic design of storm-surge disaster prevention facilities

IV. Results

- Research and data collection of advanced storm-surge and inundation prediction and hazard map construction from CDIT (Japan), NOAA and USACE (USA)
- Establishment the preliminary standardization of storm-surge inundation prediction and construction of hazard map

- Construction of precise and high-resolution coastal map from LiDAR's topographic survey and Multi-beam depth survey to improvement the precision and resolution of storm-surge prediction
- Establishment of unstructured grid numerical model for improving the prediction precision and do the comparison with other numerical models
- Verification of surge height using 3-dimensional unstructured storm-surge prediction model and filed observation data and improving the prediction accuracy
- Estimation and statistical and extreme analysis of surge height and inundation area using typhoon parameters and high-resolution coastal map about 50 major past typhoon
- Establishment of wave setup hydrodynamic numerical model COBRAS to consider the wave transformation at intertidal zone
- Best practice surveys and analysis to flood disaster prevention facilities
- Suggestion of tsunami inundation disaster prevention facilities at Masan from the simulation using Flow3D (CFD model)

V. Applications and Recommendation

- Precise and high-resolution's coastal map has constructed and used as an input of inundation model to improve the prediction results. This coastal mapping technique is transferred to other company and used to make flood expectation map. Furthermore, there are many applications to quantitative analysis of coastal erosion problem based on 3D geo-spatial analysis. That means we can evaluate the morphological change variation over a specific period through the quantitative volumetric calculation. So it's very useful to coastal management and monitoring technique.
- Through the cross comparison and analysis of various kinds of storm-surge models, we can choose appropriate model and apply it to our sea of Korea. With this results, we can presume the storm-surge inundation range and make the hazard map.

- From the estimation of storm-surge height, we can verify the model results and performance and do the comparative evaluation based on the existing flood zone. Also, through the prediction of the possible range of damage, we can establish the localized disaster plan from identifying frequency analysis of damages with on several simulation scenarios.
- We can minimize the damage by estimating disaster quickly because it's impossible to protect perfectly the inundation or tsunami with coastal protection structure such as revetment and levee.

VI. Keywords

- coastal mapping, storm-surge, inundation, coastal disasters, numerical model, storm-surge prediction model, GIS, LiDAR, multi-beam, hazard map

CONTENTS

Summary and Keywords	v
Contents	ix
List of Figures	xvii
List of Tables	xxv
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Review of the state-of-the-art in	3
Section 1. Domestic progress and development	3
1. Storm-surge inundation prediction model	3
2. Storm-surge inundation hazard map and protection facility	5
Section 2. International progress and development	7
1. The case of Japan	10
2. The case of USA	15
Chapter 3. Case study of flooding damages	19
Section 1. Case of domestic	19
Section 2. Case of overseas	26
Chapter 4. Considerations of inundation prediction and hazard map	27
Section 1. Typhoon information	27
Section 2. Coordination and unification of standard	28
Section 3. Processing of offshore and discontinuity at coastal area	30
Section 4. Classification of numerical model grid system	30
Section 5. Variation of typhoon intensity	32
Section 6. Virtual typhoon scenario configuration	33

Chapter 5. Construction of high-resolution topographical map	35
Section 1. Topographic measurement using LiDAR	35
Section 2. Depth survey using MBES	37
Section 3. Coastal mapping	38
 Chapter 6. Prediction of storm-surge inundation	 41
Section 1. Calculation of surge height for verification	41
1. Surge height from observation	41
2. Digital image processing for surge height calculation	42
Section 2. Analysis and establishment of storm-surge inundation prediction (INSPECT)	45
Section 3. Analysis and establishment of storm-surge inundation prediction (FVCOM)	65
Section 4. Analysis of climate change effects	134
 Chapter 7. Standardization of storm-surge inundation prediction	 157
Section 1. Selection of prediction model and Considerations	157
Section 2. Establishment of prediction model	162
Section 3. Establishment of input data	165
Section 4. Verification of prediction model	167
 Chapter 8. Standardization of construction of hazard map	 169
Section 1. Case studies of hazard map	169
Section 2. Standardization of hazard map construction	174
 Chapter 9. Utilization and maintenance of hazard map	 177
Section 1. Utilization of Hazard map	177
Section 2. Maintenance of Hazard map	178

Chapter 10. Facilities for flood disaster prevention	179
Section 1. Survey of flood disaster prevention facilities	179
1. Japan	179
2. USA	194
3. Netherlands	196
4. England	199
5. Italy	200
Section 2. Survey and suggestion disaster prevention facilities	202
1. Case of 3D CFD simulation for disaster prevention facility	202
2. 3D CFD simulation for disaster prevention facility design appropriate to Korea	205
3. Analysis of inundation characteristics in Masan and survey of development cases of inundation prevention facilities	229
4. Suggestion of inundation prevention facilities in Masan	237
 Chapter 6. References	 247

목 차

요약문	i
Summary and Keywords	v
Contents	ix
목차	xiii
List of Figures	xvii
List of Tables	xxv
제 1 장 연구 개발 과제의 개요	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	3
제 1 절 국내 기술개발 현황	3
1. 태풍해일 침수범람 예측모델	3
2. 태풍해일 침수범람 재해도 작성 및 방제시설	5
제 2 절 국외 기술개발 현황	7
1. 일본	10
2. 미국	15
제 3 장 침수범람 피해사례 조사	19
제 1 절 국내 피해사례	19
제 2 절 국외 피해사례	26
제 4 장 태풍해일 침수범람 모델 및 재해도 작성을 위한 고려사항	27
제 1 절 태풍 정보	27
제 2 절 좌표계 및 기준면 통일	28
제 3 절 외해지역과 연안지역의 불연속 처리(Nested grid)	30
제 4 절 수치모형 격자체계에 따른 구분	30
제 5 절 미래 태풍 강도 변화에 관한 연구	32

제 6 절 가상 시나리오 구성에 관한 연구	33
제 5 장 육도-해도 접합 정밀지형도 작성	35
제 1 절 LiDAR 측량을 통한 정밀 지형측량	35
제 2 절 다중빔 음향측심기를 이용한 정밀 수심측량	37
제 3 절 육도-해도 접합을 통한 정밀 지형도 작성	38
제 6 장 태풍해일 침수범람 예측	41
제 1 절 예측결과 검증을 위한 정밀 해일고 산정	41
1. 관측자료에 따른 해일고	41
2. 디지털 영상처리기법을 활용한 해일고 산정	42
제 2 절 해일 침수범람 수치모델 분석 및 적용 (INSPECT 모형)	45
1. 모델 개요	45
2. INSPECT 수치모형	46
3. 모형의 수립 및 검증	50
4. 태풍 주요인자에 따른 반응도 실험	53
5. 부산 및 여수지역 침수범람위험도 작성	56
제 3 절 해일 침수범람 수치모델 분석 및 적용(FVCOM 모형)	65
1. 수심자료	65
2. 기상입력자료	69
3. 태풍시 정밀격자 해상풍 모델	70
4. 조석 조류 정보	85
5. unstructured grid 모델에 의한 정밀 폭풍해일 수치 모델(FVCOM)	99
6. 과거 8개 태풍에 대한 해일고 검토	111
7. 조석과 폭풍해일의 상호 영향 분석	115
8. 격자 크기에 따른 평가	120
9. 2D 모델과 3D 모델의 평가	122
10. 주요 태풍에 대한 정밀격자 해일고 및 침수역 시범추산과 통계/극치분석	126
제 4 절 기후변화(지구 온난화)의 영향 분석	134

1. 개요	134
2. 온난화에 따른 평균 해수면 변동의 추산	138
3. 우리나라 각 검조소의 해수면 변화	139
제 7 장 해일 침수범람 예측 표준화 연구	157
제 1 절 해일 침수범람 예측 표준화	157
1. 예측모형 선정 및 고려사항	157
2. 기존모형의 검토	160
3. 예측모형의 표준안	162
제 2 절 예측모형의 구축	162
1. 연안육역의 표고자료	162
2. 해안선 및 해저지형	163
3. 계산 격자망 구성	163
4. 예측모형 구축 표준안	164
제 3 절 예측모형의 입력자료 구축	165
1. 예측모형 입력자료 목록	165
2. 예측모형 입력자료 표준안	167
제 4 절 예측모형의 검증	167
1. 해일 및 범람모의 결과 검증자료	167
2. 예측모형 검증 표준안	168
제 8 장 재해도 작성기준의 표준화	169
제 1 절 국내외 재해도 작성 사례	169
제 2 절 재해도 작성기준	174
1. 재해도에 포함 할 내용	174
제 9 장 재해도 활용 및 유지보수	177
제 1 절 재해도 활용방안	177
제 2 절 재해도 유지보수	178

제 10 장 침수범람 재해 방지시설	179
제 1 절 국외 재해방지시설 조사	179
1. 일본	179
2. 미국	194
3. 네덜란드	196
4. 영국	199
5. 이탈리아	200
제 2 절 국내 재해방지시설 조사 및 제안	202
1. 재해방지 시설물 설치를 위한 3차원 CFD 시뮬레이션 사례	202
2. 우리나라 지역특성에 맞는 재해방지시설 개발을 위한 3차원 CFD 시뮬레이션	205
3. 마산지역 해일침수범람 특성분석 및 재해방지시설 개발사례	229
4. 마산지역 재해방지시설 제안	237
제 11 장 참 고 문 헌	247

List of Figures

Fig. 2.2.1. Schematic method of hazard map	10
Fig. 2.2.2. Effect of grid size on inundation	11
Fig. 2.2.3 List of Hazard map Manual (Japan, 2004)	12
Fig. 2.2.4. Application of Hazard map	12
Fig. 2.2.5. Implementation of Hazard map from Administration of Land, Infrastructure and Transport of Japan	13
Fig. 2.2.6. Hazard map of Hyogo, Japan	14
Fig. 2.2.7. Example of Hazard map by the local government of Japan	15
Fig. 2.2.8. Prediction of Storm surge at Hurricane Gustav(2008)	15
Fig. 2.2.9. Schematic illustration of wave effects extending above and landward of stillwater intercept on transect	16
Fig. 2.2.10. Hazard map of Hurricane Katrina and Rita	17
Fig. 2.2.11. Handouts of Hazard map	17
Fig. 3.1.1. Tide of Masan at Typhoon Maemi	21
Fig. 3.1.2. Scenes of flooding at Masan (Typhoon Maemi)	21
Fig. 3.1.3. Hazard map of Masan	22
Fig. 3.1.4. Similar direction of Storm surge at Masan, Korea and Nagoya, Japan	23
Fig. 3.1.5. Classification of Typhoon damages by region	25
Fig. 3.2.1. Situation of Isewan tsunami disaster at Nagoya	26
Fig. 4.1.1. Hurricane observation information providers	27
Fig. 4.2.1. Bathymetry of Korea	29
Fig. 4.4.1. Classification of Grid type	31
Fig. 4.5.1. Hurricane intensity change due to the global warming	32
Fig. 5.1.1. Concept of Lidar measurement	36
Fig. 5.3.1. High-resolution topographical map of Yeosu, Masan and Busan	39
Fig. 5.3.2 Estimate of flood inundation areas	40
Fig. 6.1.1. Comparison of typhoon MAEMI(0314) surge height	42

Fig. 6.1.2. Digital image processing of coastal line	43
Fig. 6.1.3. Process of calculation of surge height from image processing	45
Fig. 6.2.1 Concept of boundary condition	49
Fig. 6.2.2. Schematics of overtopping	49
Fig. 6.2.3. Nesting Grid Information	50
Fig. 6.2.4. Typhoon path: MAEMI(0314), RUSA(0215)	51
Fig. 6.2.5. Wind field and surge height of typhoon MAEMI(0314)	51
Fig. 6.2.6. Wind field and surge height of typhoon RUSA(0215)	52
Fig. 6.2.7. Time-series graph of surge height	53
Fig. 6.2.8. Surge height variation following to typhoon parameters	55
Fig. 6.2.9. Result of sensibility analysis	55
Fig. 6.2.10. Different inundation results by the different grid size	56
Fig. 6.2.11. Analysis of tide level at Busan and Yeosu	57
Fig. 6.2.12. Frequency analysis of surge height b/w observation and modeling	63
Fig. 6.2.12. Inundation result of Busan and Yeosu (50 year frequency's surge height)	64
Fig. 6.3.1. Digital bathymetry (NORI)	66
Fig. 6.3.2. Depth and costal line from digital bathymetry in Kyungggi bay	67
Fig. 6.3.3. 1 minute Bathymetry (NORI)	68
Fig. 6.3.4. Calibration of fine-grid depth using NORI's depth information	69
Fig. 6.3.5. Distribution of typhoon maemi's pressure from ECMWF	71
Fig. 6.3.6. Calculation of maximum wind speed	77
Fig. 6.3.7. Calculation of wind speed from QuikSCAT	78
Fig. 6.3.8. Calculation of maximum wind field from GMS satellite	78
Fig. 6.3.9. Correlation of maximum wind radius and typhoon center pressure ..	79
Fig. 6.3.10. Typhoon track from KMA	80
Fig. 6.3.11. Correlation of maximum wind radius and strong wind radius using Co1000 hPa isobar	80

Fig. 6.3.12. Comparison of pressure and wind field of typhoon 'Chaba' (0004) (a) MASCON, (b) CE model, (c) TPM-1 and (d) TPM-2	81
Fig. 6.3.13. Typhoon track using long-term storm-surge simulation	82
Fig. 6.3.14. 등조위선 및 등조시선(M2) - NAO	87
Fig. 6.3.15. 등조위선 및 등조시선(K1) - NAO	88
Fig. 6.3.16. FVCOM 모형에 적용된 격자망 및 수심도	90
Fig. 6.3.17. Find grid tidal data simulation using FVCOM(Upper: M2, Lower: S2) ..	91
Fig. 6.3.18. Find grid tidal data simulation using FVCOM (Upper: K1, Lower: O1)	92
Fig. 6.3.19. NAO99jb Short-tem ocean tide model	95
Fig. 6.3.20. FES2004 Web site	96
Fig. 6.3.21. M2 co-tidal amplitude, co-tidal phase in FES2004	97
Fig. 6.3.22. TPX0 7.2 web site	98
Fig. 6.3.23. Example of EOT08a data	99
Fig. 6.3.24. Comparison of difference b/w finite-difference, finite-element and finite-volume method (Chen, FVCOM workshop2006)	100
Fig. 6.3.25. Comparison of wind stress coefficient equation, Large and Pond (dots), Smith and Banke (dashes), Geernaert et al. (dash-dots), Charnock (dash and 3 dots)	107
Fig. 6.3.26. Triangular grid in FVCOM	108
Fig. 6.3.27. Grid (min. distance: 1km)	109
Fig. 6.3.28. Grid (min. distance: 300m)	110
Fig. 6.3.29. Gird (min. distance: 70m)	110
Fig. 6.3.30. Typhoon tracks from 1951 to 2007	112
Fig. 6.3.31. Statistics of surge height at Tide observation station	112
Fig. 6.3.32. Track of typhoon Maemi	116
Fig. 6.3.33. Comparison of typhoon Maemi's surge height b/w observation and prediction	119
Fig. 6.3.34. Comparison of typhoon Maemi surface elevation	121
Fig. 6.3.35. Performance b/w numerical model from DMI	123

Fig. 6.3.36. Comparison of typhoon Maemi surface elevation b/w 2D and 3D model	125
Fig. 6.3.37. Flow chart of designing surface elevation by long-term storm surge calculation	127
Fig. 6.3.38. Typhoon track used to long term storm-surge simulation	127
Fig. 6.3.39. Maximum surge height of Typhoon Maemi	129
Fig. 6.3.40. Extreme frequency maximum surge height by statistical analysis ..	130
Fig. 6.3.41. Maximum surge height by senario: Masan, Busan, Yeosu	131
Fig. 6.3.42. Maximum inundation range from numerical model : Masan, Yeosu, Busan	133
Fig. 6.3.43. Mean sea level for each year of the temporal variation at each tide observation station	140
Fig. 6.3.44. Year variation in mean sea level of each tide observation station ..	141
Fig. 6.3.45. Variation of mean sea level of each observation station	145
Fig. 6.3.46. Observation station of Japan for sea	147
Fig. 6.3.47. Sea-level variation of each stations in Japan from 30 years	148
Fig. 6.3.48. Average sea-level fluctuations in east and west Japan	148
Fig. 6.3.49. Example of long-term change of average temperature in 2 city of New York	153
Fig. 7.3.1. Example of Typhoon NARI (0711) information from KMA	166
Fig. 8.1.1. Hazard map of western coast of Korea (1998)	169
Fig. 8.1.2. Example of Hazard map(1999)	170
Fig. 8.1.3. Damages of Typhoon RUSA(0215)	171
Fig. 8.1.4. Types and Characteristics of hazard maps	172
Fig. 8.1.5. Example of Hazard map (MLTM, 2006, 2007)	172
Fig. 9.1.1. Schematic of hydrodynamics flood level	177
Fig. 10.1.1. Damage of Mahori coast	179
Fig. 10.1.2. Disaster Prevention Structure of Mahori coast	180
Fig. 10.1.3. Profile of Disaster Prevention Structure, Mahori coast	180
Fig. 10.1.4. Before and After of Coastal Improvement Project at Mahori coast ..	180

Fig. 10.1.5. Damage of Typhoon at Urayasu, Japan	181
Fig. 10.1.6. Maintenance of Drainage for inundation at Urayasu, Japan	182
Fig. 10.1.7. Levee Project of Urayasu, Japan	182
Fig. 10.1.8. Nagoya heightened breakwater	183
Fig. 10.1.9. Inundation Protection Wall of Nagoya	184
Fig. 10.1.10 Installation of Flare shore protection structure of Oita, Japan	185
Fig. 10.1.11. Profile of Flare(Hybrid-type) Shore Protection	185
Fig. 10.1.12. Flare(Hybrid-type) Shore Protection using blocks	186
Fig. 10.1.13. Plan of Beppu Mochigahama coast maintenance	186
Fig. 10.1.14. Plane and Profile of Beppu Mochigahama coast maintenance plan	187
Fig. 10.1.15. Water gate(豊洲水門, 東雲水門) and Seawall	188
Fig. 10.1.16. Map of Facilities for inundation at Tokyo port, Japan	188
Fig. 10.1.17. Location of Disaster Prevention Facilities at Nagoya port, Japan	189
Fig. 10.1.18. Seawall at Nagoya port, Japan	189
Fig. 10.1.19. Discharge water of overtopping through Sluice gate	190
Fig. 10.1.20. Inner side of Sluice gate	191
Fig. 10.1.21. Sluice gate and Control room at Yodogawa, Japan	192
Fig. 10.1.22. Fishery harbor and Harbor view of Matsui, Japan	192
Fig. 10.1.23. Before and After the construction of Tanowoora Seaside Park	193
Fig. 10.1.24. Profile view of Multi-line Shore Protection (New Orleans)	194
Fig. 10.1.25. Plane view of Multi-line Shore Protection (New Orleans)	195
Fig. 10.1.26. Profile of Texas Shore Protection	195
Fig. 10.1.27. Texas Shore Protection Road and Behind the site	196
Fig. 10.1.28. Afsluit-dijk of Netherlands	197
Fig. 10.1.29. Region of Delta Project at Netherland	198
Fig. 10.1.30. Storm surge Sluice gate of Netherland	198
Fig. 10.1.31. Seawall and Sea Dike at Netherland	199
Fig. 10.1.32. Thames barrier at England	200
Fig. 10.1.33. Target Area of Venice Flood Barrier Project	201

Fig. 10.1.34. Sluice gate of Venice	201
Fig. 10.2.1. Flap-type Breakwater heightened standard section(Shintak Jung et al., 2009)	204
Fig. 10.2.2 Location of the installation of flap-type breakwater	204
Fig. 10.2.3. Experimental result of flap-type breakwater (rotation degree: 57.18°)	205
Fig. 10.2.4. Experimental result of flap-type breakwater (rotation degree: 42.0°) ..	205
Fig. 10.2.5. Experimental result of flap-type breakwater (rotation degree: 37.63°)	205
Fig. 10.2.6. Definition of FAVOR method fluid	210
Fig. 10.2.7. Area of 3D inundation simulation	211
Fig. 10.2.8. Tidal observation and prediction at typhoon MAEMI (2003)	211
Fig. 10.2.9. Hazard map of Masan (2004)	213
Fig. 10.2.10. DEM form LiDAR measurement	213
Fig. 10.2.11. Experimental result 1 of linearly inundation defence	213
Fig. 10.2.12. Experimental result 2 of linearly inundation defence	214
Fig. 10.2.13. Experimental result 1 of area inundation defence	215
Fig. 10.2.14. Experimental result 2 of area inundation defence	216
Fig. 10.2.15. Experimental result 3 of area inundation defence	216
Fig. 10.2.16. Experimental result 1 of Prescription hill	216
Fig. 10.2.17. Experimental result 2 of Prescription hill	217
Fig. 10.2.18. Experimental result 1 of inundation (wide area)	217
Fig. 10.2.19. Experimental result 2 of inundation (wide area)	217
Fig. 10.2.20. Experimental result 3 of inundation (wide area)	218
Fig. 10.2.21. Experimental result 4 of inundation (wide area)	218
Fig. 10.2.22. Experimental result 5 of inundation (wide area)	218
Fig. 10.2.23. Experimental result 6 of inundation (wide area)	219
Fig. 10.2.24. Experiment of whole area of Masan (1)	219
Fig. 10.2.25. Experiment of whole area of Masan (2)	219
Fig. 10.2.26. Experiment of whole area of Masan (3)	220

Fig. 10.2.27. Experiment of whole area of Masan (4)	220
Fig. 10.2.28. Experiment of whole area of Masan (5)	220
Fig. 10.2.29. Experiment of whole area of Masan (6)	221
Fig. 10.2.30. Experiment of whole area of Masan (7)	221
Fig. 10.2.31. Experiment of whole area of Masan (fine grid-1)	221
Fig. 10.2.23. Experiment of whole area of Masan (fine grid-2)	222
Fig. 10.2.24. Experiment of whole area of Masan (fine grid-3)	222
Fig. 10.2.34. Experiment of whole area of Masan (fine grid-4)	222
Fig. 10.2.35. Experiment of whole area of Masan (fine grid-5)	223
Fig. 10.2.36. Experiment of whole area of Masan (fine grid-6)	223
Fig. 10.2.37. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-1)	223
Fig. 10.2.38. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-2)	224
Fig. 10.2.39. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-3)	224
Fig. 10.2.40. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-4)	224
Fig. 10.2.41. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-5)	225
Fig. 10.2.42. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-6)	225
Fig. 10.2.43. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-7)	225
Fig. 10.2.44. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-8)	226
Fig. 10.2.45. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-9)	226
Fig. 10.2.46. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-10)	226

Fig. 10.2.47. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-11)	227
Fig. 10.2.48. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-12)	227
Fig. 10.2.49. Disaster planning area of Masan	231
Fig. 10.2.50. Section in the construction and planning at Masan's A area	232
Fig. 10.2.51. Section in the construction and planning at Masan's B area	233
Fig. 10.2.52. Section in the construction and planning at Masan's C area	234
Fig. 10.2.53. Section in the construction and planning at Masan's D area	235
Fig. 10.2.54. Section in the construction and planning at Masan's E area	236
Fig. 10.2.55. High-resolution DEM from LiDAR	237
Fig. 10.2.56. Tsumani disaster prevention (area defense)	237
Fig. 10.2.57. Tsumani disaster prevention (linear defense)	238
Fig. 10.2.58. Automatic standable prevention barrier	238
Fig. 10.2.59. Inundation simulation of wide area	238
Fig. 10.2.60. Simulation of floating flap barrier	238
Fig. 10.2.61. Location of storm-surge prevention facility in Masan	239
Fig. 10.2.62. Area A & D - Standable barrier (area protection)	240
Fig. 10.2.63. Area B - prevention hill (area protection)	240
Fig. 10.2.64. Area C(left) - water gate at estuary, Area E(right) - floating flap barrier	240
Fig. 10.2.65. Suggestion of disaster prevention facilities at Masan	241

List of Tables

Table 2.1.1. Example of storm surge inundation Hazard map in Korea	5
Table 2.2.1 Disaster Prevention Facilities at major cities in Japan	8
Table 2.2.2. Manual about Storm surge and Tsunami in Japan	11
Table 3.1.1. Damages of Typhoon Maemi	20
Table 3.1.2. Comparison of typhoon Maemi and Isewan	22
Table 3.1.3. Damages from Major typhoons in Korea	23
Table 6.2.1. Grid size per nesting area	50
Table 6.2.2. Comparison of surge height at wach site (unit: cm)	52
Table 6.2.3. Sensitivity analysis following typhoon information	54
Table 6.2.4. Maximum surge height at each site about major 50 typhoons	58
Table 6.2.5. Result of frequency analysis from INSPECT at Masan with major 50 typhoons	60
Table 6.2.6. Result of frequency analysis from INSPECT at Busan with major 50 typhoons	60
Table 6.2.7. Result of frequency analysis from INSPECT at Masan with major 50 typhoons (surge height 1hr observation data)	61
Table 6.2.8. Result of frequency analysis from INSPECT at Y대su with major 50 typhoons	61
Table 6.2.9. Result of frequency analysis from INSPECT at Yeosu with major 50 typhoons (surge height 1hr observation data)	62
Table 6.3.1. 폭풍해일 시뮬레이션에 사용된 태풍 목록	83
Table 6.3.2. Number of node and element	109
Table 6.3.3. 8 Typhoons information	113
Table 6.3.4. Results of typhoon simulation from FVCOM	114
Table 6.3.5. Time information of typhoon Maemi (KMT)	116
Table 6.3.6. Comparison of model results b/w surge and tide effect(cm)	120
Table 6.3.7. Comparison of model results depend on grid size (cm)	122
Table 6.3.8. Comparison of simulation results b/w 2D and 3D (cm)	124

Table 6.3.9. Surge height of major 10 typhoons at Busan, Masan, Yeosu	129
Table 6.3.10. Maximum surge height (FVCOM)	130
Table 6.3.11. Variation constants of mean sea level at 14 tidal stations	141
Table 6.3.12. Yearly mean increasement rate of mean sea level	146
Table 6.3.13. Expectation of increasement of sea level owing to global warming	151
Table 7.1.1. Consideration of storm surge prediction numerical model	158
Table 7.1.2. Comparison of inundation estimation at Japan and USA	161
Table 7.2.1. Classification of characteristics by resolution of numerical digital map	162
Table 7.3.1 Input parameters of numerical model	165
Table 7.3.2. Roughness coefficient based on land use	166
Table 8.1.1. Classification of Hazard map purpose	170
Table 8.1.2. Classification of Hazard map by using purpose	171
Table 8.1.3. Example of Hazard map	173

제 1 장 연구 개발 과제의 개요

지구온난화에 따른 기후변화로 인한 해수면 상승과 태풍의 강도 및 발생빈도의 증가는 우리나라 및 전 세계 연안국의 태풍해일에 기인한 침수범람과 같은 자연재해 피해를 증가시키며, 그 규모 또한 예측하기 힘든 대형화의 추세에 놓여 있다. 태풍의 강도 및 내습빈도 증가로 막대한 인명 피해가 발생하고, 재산 피해규모 또한 급격한 증가추세에 있어, 연안지역에서의 자연재해로부터 국민의 재산 및 인명 보호 욕구를 고조시킨다. 우리나라는 거의 매년 태풍, 온대성 저기압 등의 악기상으로 인한 연안침수, 시설물의 붕괴, 유실 그리고 해안침식 등에 따른 연안재해가 빈번히 발생되고 있다. 특히 바다와 인접한 연안은 매년 자연재해가 반복되는 지역으로 최근 14년간 (1989~2002년) 전국에서 발생한 1,000여건의 자연재해 중 약 41%인 409건이 해일, 해수범람, 태풍 등에 의한 연안재해로 그 피해 규모는 2조 1,000억 원에 달하고 있다 (해양수산부 2005). 특히 2003년 제14호 태풍 '매미'의 내습으로 마산만 일대 해일이 발생하여 재산 피해 6,000억 원 및 약 32명의 인명피해가 발생한 이래 연안의 자연재해로부터 국민의 재산 및 인명 보호 욕구가 고조되어 왔고, 이를 위해 연안 국지에서의 정밀 해일예측 시스템의 개발 및 구축에 대한 필요성이 증대되어 왔다. 이에 신속하고 정확하게 자연재해에 대비하고 대처할 수 있는 기반기술의 개발 및 확보로 국민의 생명과 재산을 보호해야 한다. 호안 및 제방 등의 연안 방어구조물로 태풍에 기인한 해일 및 범람을 완전히 방어하는 것은 불가능하므로, 재해 발생에 따른 피해를 사전에 예측함으로써 신속하게 대처하여 피해를 최소화할 수 있다.

이를 위하여 과거에 내습한 태풍에 의한 해일고의 정확한 지역적 분포특성의 파악은 국지적인 방재계획의 수립하는데 필수적이므로, 이에 대한 충분한 자료분석 및 추산기술이 확립하여야 한다. 연안에서의 태풍해일로 인한 침수범람 지역을 정밀하게 예측하기 위해서는 정밀격자의 기상수치모델과 여러 해양요소를 복합적으로 고려하는 연안 정밀격자 태풍해일모델을 수립하여야 하며, 보다 정밀하고 정확한, 육상 고도 및 수심이 체계적으로 연결되는 기술을 개발하여 이를 입력자료로 사용해야 한다. 해외 선진국에서는 연안에서의 해수 침수범람지역 예측 및 재해도 작성 기술을 위해 최신 기술인 항공Lidar 측량, 항공사진측량, 위성영상, SHOALS 등 다양한 측량기법을 사용하여 정밀한 DEM자료를 생산하고 있으며, 국내에도 이러한

기반기술의 확보가 시급히 이루어져야 한다. 해일에 의한 침수범람 지역을 최소화하고 이러한 연안재해로부터 인명과 재산을 보호하기 위해서는 연안방호 구조물 등 재해방지시설의 설치가 필요하며, 현재 이렇다 할 재해방지시설이 없는 우리나라의 현실을 감안한다면 우리나라 지역 실정에 맞는 이러한 재해 방지시설의 제안 및 기반기술 확보가 시급한 실정이다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 태풍해일 침수범람 예측모델

전 세계 해양의 상황을 실시간으로 감시·파악함과 함께, 해양 변동·기후변동의 파악·해명 등을 발전시켜, 기후 예보의 정밀도를 비약적으로 향상시키려는 지구 규모의 고도 해양감시시스템이 추진 중에 있다. 최근에는 전지구의 온난화로 해수면이 상승하여 폭풍해일로 인한 피해가 날로 심각해지리라 예상되고 있으며, 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다(IPCC, 2007). 또한 폭풍의 내습은 생태계의 변화는 물론 해저면 및 해안선의 변형에도 커다란 영향을 미치므로 환경인자, 토사 이동 및 해안선 침식 연구를 위해서도 필요한 연구가 되고 있다. 여러 국제프로그램(CHAMMP, WCRP, GCOS, WOCE, LOICS 등)에서 기후 변화에 의한 해수면 변화의 장기 정밀관측을 통한 해수면 상승 및 해안 변형의 실태 파악을 위한 연구가 수행되고 있다.

우리나라에서는 마산 등을 비롯하여 2003년 남해동부 연안에 내습한 태풍 매미에 의해 막대한 물적, 인적피해가 발생하였으며, 이를 계기로 폭풍 해일고 산정 및 원인규명의 기술적인 측면 뿐 만 아니라 연안방재와 관련된 활발한 연구가 이루어지고 있으나, 각종 연구결과의 활용을 위해서는 보완이 필요한 실정이며, 국내 연안 도시의 취약성을 보완하면서 해일 피해를 막을 수 있는 방어능력을 갖춘 해일 방재 구조물의 설치가 필수적이다. 마산시의 경우 2003년 피해 이후 해일의 원인 및 피해영역을 파악한 후 지역적 특성을 고려하여 휴식공간으로도 활용이 가능한 방재언덕과 방조계단, 방호벽 및 방조수문의 설치를 계획 중에 있다.

우리나라의 경우 연안재해를 유발하는 요인인 여러 요소의 예측 모델 (조석, 해일, 파랑 등)은 비교적 잘 수립되어 있고, 과기부 국책연구과제 등의 선행연구를 통해 관련 핵심 기술 (과거 태풍정밀 분석기술, 태풍 해상풍 산출 기술, 정밀격자 태풍해일 수치모델링 기술 등)이 확보되어 있으나, 수치모델의 충분한 검증 미흡, 기상 입력자료와 연계하여 통합 적용 체제의 구축기술 및 국지정밀 해일예보 현업화 기술이 미흡하다. 예를 들면 폭풍해일 수치 모델을 필요시 이를 즉각 이용하여 원

하는 정보를 생산하기 위한 입력정보의 생산·제공 체제가 미비하여 오차가 커서 실제 활용을 못하는 경우가 대부분이다. 특히 태풍시의 폭풍해일 예보를 위한 정밀격자에서의 해면기압 및 해상풍 추산에는 기상수치모델의 격자 크기보다 더욱 정밀한 격자에서의 작은 시간 간격마다의 해면기압 및 해상풍이 요구되나 그 예측 기술개발과 예측 체제가 취약하여 신뢰성 있는 폭풍해일 예보지원 체제의 현업화를 위한 노력이 계속되고 있다.

해일, 파랑 등 해상의 제반 상태에 대해 정확히 추산하기 위해서는 해상에서의 정확한 풍력의 결정이 가장 중요한 요소이다. 태풍 해상풍 추산 기술은 1960년대 말 뉴욕대학의 Cardone 모형(Cardone, 1969)이 개발되었고, 이후 미공병단(CE) 지원하에 보다 정밀한 해상풍 예측을 위해 원시 운동방정식에 근간을 둔 수치 소용돌이 경계층 모형이 최근 연구개발 되었다(Tompson et al., 1996).

태풍의 이동경로와 세기 관련 예측모델은 CLIPER, LBAR, GFDL, UKMET, NOGAPS 등이 있으며, 이를 실용적으로 활용하여 24, 48, 72시간 내의 태풍경로를 100km 오차범위 내에서 예측하고 있다. 연안폭풍해일의 예보를 위해서는 SLOSH, HDR, ADCIRC 등이 개발되어 연안해일의 예측을 위해 활용되고 정확도 향상을 위한 기술개발에 주력하고 있다.

한국해양연구원에서는 1980년대 후반부터 해안재해예보시스템 구축 연구사업, 방재 구조물 설계조건 연구사업, 국가해양관측시스템 개발, 천해파랑 산출시스템 등의 여러 연구사업을 통해 조석, 폭풍해일 및 파랑예보시스템 구축 연구를 지속적으로 수행해 왔고, 또 과학기술부의 자연재해방재기술개발 사업의 일환으로 수행된 "해상연안재해 대응기술개발" 1단계 사업('95-'99)을 통해 태풍, 폭풍해일 예측체계 개발 및 실시간 해일관측 연구가 수행되었다. 또한 기본사업으로 수행한 "연안 국지해일 정밀 예보지원 체제 현업화 기술"('07-'09)과 2009년부터 국토해양부의 지원으로 해양연구원에서 수행중인 "운용해양(해양예보) 시스템개발" 사업을 통하여 연안해일 관측실험부터 정밀 해상풍 예측 시스템 및 정밀격자 국지 폭풍해일모델 수립을 통하여 현업에 실제로 운용될 수 있는 폭풍해일 예측시스템 구축 기술을 개발하고 있다. 이 현업화 지원기술의 최종 성과물인 폭풍해일 예측시스템의 확보는 태풍 및 폭풍해일, 이상해면 상승에 의한 연안 침수범람 재해도 작성에 기반연구 자료로 직접 활용될 수 있어 큰 기대효과가 예상된다.

기상청에서는 태풍진로와 세기에 대한 예보기술은 매우 높은 정확도를 보이고

있으나, 태풍의 빠른 이동에 따른 태풍 바람장의 예측, 이를 이용한 정밀 연안해일 예측에 대한 기술은 정립되어 있지 않고, 또한 정밀 국지 해일 예·경보 시스템에서 활용된 적이 없다. 현재 기상연구소에서 1/12도 (약 9km) 수평 분해능으로 파랑 (WAVEWATCH III 모델 사용) 및 폭풍해일 (POM 모델 사용)을 예보하는 수치모델을 운영하고 있으나, 섬이 산재한 남해안과 서해안의 경우 및 연안 근처는 모델 분해능으로 인하여 정확도가 떨어진다.

2. 태풍해일 침수범람 재해도 작성 및 방제시설

또한 재해도 작성과 관련해서는 2006년 소방방재청에서 재해지도작성 등에 관한 지침(소방방재청 고시 제2006-6호)이 마련되었으나, 제도적 개선 및 보완이 필요하며, 태풍 및 폭풍해일, 이상해면 상승에 의한 연안 침수범람재해도(Hazard Map) 작성 기술 미확보된 상태이다. 국내에서 작성된 재해도는 과거 대부분 침수흔적조사 및 측량성과를 이용하여 작성되었다. 특히, 1997년 서해안 침수범람 및 2003년 태풍 MAEMI(0314)의 대규모 피해에 따라 재해도 제작 및 작성지침 등의 개발을 위해 정부 및 연구기관을 중심으로 연구가 진행되고 있다.

재해도 제작지침은 우리나라와 같이 매년 태풍의 피해가 발생하고 있는 일본의 선진사례가 일부 도입된 바 있으며, 2006년 소방방재청 고시를 통해 재해지도의 구분 및 작성과 관련된 기준이 마련되었고, 이를 근거로 국토해양부에서는 시범적으로 해안침수예상도를 제작하고 있다(해양수산부, 2006; 2007).

Table 2.1.1은 국내 폭풍해일 침수범람 재해도에 대한 최근 10년간의 사례를 제시하였으며, 기타 유사사례를 통해 폭풍해일 침수범람 재해도 작성시 보완 및 참고할 사항을 검토하였다. 특히, 홍수범람위험도의 감사원 지적사항과 최근 지자체에서 작성되고 있는 재해도를 유사사례로 검토하였다.

Table 2.1.1. Example of storm surge inundation Hazard map in Korea

구분	주요내용	출처
서해안 해수범람 흔적조사	- 서해안 5개 시도, 29개 시군구에 대하여 각 지구별로 침수흔적도는 침수심 1 m 단위로, 침수예상도는 0.5 m 단위로 작성하고 침수 제반사항 수록	행정자치부, 1998
자연재해 경감 학술대회	- 해안재해 조사 지침서(안)에서 해안재해현상, 피해 파악을 위한 조사항목 및 방법 설정 - 해안재해지도 작성에 관한 표준방법 확립을 목적으로 해안재해지도 작성지침(안) 마련	한국해안해양 공학회, 1999

폭풍 해일 침수 범람 재해 도	해안범람 피난지도	<ul style="list-style-type: none"> - 해안범람피난지도(부제 : 해안재해지도)의 시범제작을 통해 이상고조, 해일 등으로 범람 발생시 주민 피난정보 제공 - 피난지도는 침수흔적에 기반하여 작성 - 해안재해지도 작성지침(안)을 마련하여 제작주체, 작성방안 및 개정 등의 사항 명시 	행정자치부, 1999
	폭풍해일 방재지도	<ul style="list-style-type: none"> - 폭풍해일 수치모형 수립 및 과거 해일 산정모의를 통한 모형의 정확성 평가 - 폭풍해일 내습시 국가차원에서 수행할 방재대책을 일본 지역방재계획을 중심으로 우리나라에 맞도록 재설정 	국립방재 연구소, 2002
	재해지도 작성기준 등에 관한 지침	<ul style="list-style-type: none"> - 자연재해대책법 등을 근거로 재해지도를 침수흔적도, 침수예상도(해안침수예상도, 홍수범람위험도), 재해정보지도로 구분하여 각각의 제작 주체, 작성주기, 작성 및 도식방법 등을 명시 	소방방재청 고시 제2006-6호
	해안침수 예상도 시범제작	<ul style="list-style-type: none"> - 연안관리정보시스템 구축사업의 일환으로 해안침수예상도를 2006년(마산, 군산, 목포지역)과 2007년(부산, 여수, 통영지역)에 시범제작 - 시나리오 폭풍해일 DB 구축을 통한 피해예측정보 가시화 시스템 구축에 활용 및 적용 	해양수산부, 2006; 2007
기타 유사 사례	홍수 대피지도	<ul style="list-style-type: none"> - 침수실적을 토대로 침수흔적도 작성 - 극한 강우에 대한 4가지 유형의 제방 범람 및 붕괴 시나리오를 적용하여 범람예상지도 작성 	서울특별시, 2004
	서울시 방재지도 작성방안	<ul style="list-style-type: none"> - 서울시 재난특성을 분석하여 도시방재지도의 유형을 구분하였으며, 단계별 방재지도 작성계획(풍수해, 화재위험, 지진, 설해, 산사태 등) 수립 	서울시정개발 연구원, 2004
	하천범람 상황조사 지침	<ul style="list-style-type: none"> - 하천범람상황조사 지침 연구보고서를 통해 국내 홍수위험지도 제작의 문제점을 분석하고 개선방향 제안 	건설교통부, 2005
	홍수범람 위험도 작성에 관한 사항	<ul style="list-style-type: none"> - 지형자료 구축 부적정(1:5,000 지형도를 사용하여 실제 지형 표고와 오차발생), 홍수범람해석 부정확(실제 홍수범람의 물리적 현상을 단순화하여 해석), 제작 및 활용 부적절(활용방안 미수립, 활용 실적 미미)에 대해 지적 	감사원, 2007
	충청남도 방재정보 시스템	<ul style="list-style-type: none"> - 과거의 자연재해 DB화로 피해예측 및 사전대응이 가능하도록 재해지도를 제작하고, 충청남도 재난안전대책본부에서 인터넷을 통해 일부지역 시범 서비스 	충청남도, 2008

제 2 절 국외 기술개발 현황

미국, 유럽 (영국, 네델란드, 덴마크, 독일 등), 일본에서는 독자적인 침수범람 예측 및 재해도 작성기술을 보유하고 현업에 운영하고 있다.

미국은 폭풍해일 예보업무를 담당하고 있는 해양대기청(NOAA)을 주관으로 플로리다 마이애미에 National Hurricane Center (NHC)와 하와이 호놀룰루에 Central Pacific Hurricane Center (CPHC)를 두고 매 Hurricane에 의한 폭풍해일을 하루 4번 72시간 동안 감시하는 시스템과 예측하는 시스템을 구축하고 있다. 이로써 국가 허리케인센터(NHC)와 수많은 연구센터(CPHC, JTWC 등)에서 허리케인의 발생부터 소멸까지 모니터링과 예측을 실시하는 체계를 갖추고 있다. 예측 모형으로는 간단한 통계학적 기법에 의한 모형으로부터 복잡한 3차원 수식에 의한 모형 등이 있으나 통계학적 그리고 2차원적인 모형은 Tropical Prediction Center (TPC)에 의하여, 그리고 3차원 모형은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)과 Environmental Modeling Center (EMC)에 의하여 운용되고 있다. NWS(National Weather Service)에서는 자체 연구 개발한 SLOSH 해일 예보 모형을 전국 연안에 걸쳐 20여개의 영역으로 나누어서 현업 예보에 활용하고 있으며, 이 예보 모형을 근간으로 작성된 재해도 (Hazard Map)를 이용하여 지방정부 및 지자체는 허리케인 내습시 예·경보 및 피난처 대피 등 재해저감 및 방재에 적극 활용하는 단계이다.

최근 2007년 5월 미국 육군공병대에서는 허리케인으로 인한 침수범람 확률 예측 백서(White Paper on Estimating Hurricane Inundation Probability)를 formulation of design storm events, estimates based only on historical storms, the empirical simulation technique, the joint probability method, the empirical track model 등의 다양한 방법을 통하여 작성한바 있다.

일본에서는 이세만 태풍 내습(1953년 9월)으로 일본 연안에 막대한 피해를 준 이후 일본 기상청을 중심으로 태풍시 해일 등을 신속하고 정확하게 파악하기 위한 검조소의 원격 자기검조장치 갱신 및 예보시스템을 구축하여 왔으며, 전국 연안에서 지진해일 및 폭풍해일을 상시 감시하고 쓰나미나 태풍해일에 관한 정보를 신속하게 발표하고 있다. 일본의 경우 폭풍해일 등 방재 관련 연구는 기상청 기상연구소, 문부과학기술성 산하 방재과학기술연구소, 국토교통성 산하 항만공항기술연구소 및 각 대학의 방재 관련 연구소에서 수행되고 있으며, 현재 문부과학기술성 산하 방재

과학기술연구소에서 폭풍, 호우, 호설, 홍수, 해일, 지진, 쓰나미, 화산분화 등 일본에서 자연재해를 일으키는 현상들에 대한 기초연구를 장기간에 걸쳐 수행하고 있고, 그 결과들을 문서화하여 잘 정리하고 있다. 또한, 지자체(현 중심)에서 인구밀집 또는 상업적 중요 지역에 태풍의 진로 및 세기에 따른 침수예상지역 및 대피로 등을 명시한 침수재해도를 작성하여 홍보활동에 주력하고 있는 실정이다. 2004년 일본의 방재를 담당하는 내각부는 농림수산성, 국토교통성과 공동으로 폭풍해일, 지진해일의 피해를 경감하고 종래의 해안보전시설을 정비하기 위해 위험도 정보제공 정책을 실시하고 있다. 또한, 해일방재도의 작성은 해일방재도연구회를 설치하여 지방자치단체가 해일방재도를 작성, 활용하도록 지원하는데 필요한 여러 과제를 검토하여 해일방재도 매뉴얼을 작성하였다.

일본 PARI 등에서는 폭풍 및 지진해일 산정 모의시 2차원 모형의 한계성을 극복하기 위하여 3차원 VOF(Volume Of Fluid) 기법을 활용한 3차원 범람시물레이션 체계를 구축하여 육상의 지형 정보(건물, 구조물 등)를 모형 내에 3차원적으로 구현한 3차원적 범람 시물레이션을 시도하고 수리모형실험을 병행하여 적용성을 검토하고 있다. 일본에서는 해안피해 지역에 대해 방재기능을 강화함과 안전성과 친수성을 가지는 자연친화적인 고조호안을 계획하는 고조대책사업으로 호안 마루높이를 높이지 않고 완경사 호안을 계획하는 등 양질의 해안 공간을 제공하고 있다. 일본 나고야 지역은 피해 재발을 방지하기 위해 외해에 고조방파제를 설치하고, 배후지역에 방조벽 설치 및 관리를 통하여 해일에 의한 피해를 최소화 하려는 노력을 기울이고 있다. 동북대학의 재해제어연구센터는 해일 발생확률을 고려한 방재 사업의 효과에 대한 평가 기법을 이미 개발하여 이 기법으로 게센누마 만을 대상으로 항구적 수문을 정비하는 해일 방재사업의 효과에 대한 정량적 평가를 실시하였으며, 과거의 최대 해일규모 및 침수지역을 근거로 피해인구를 산출하는 방법보다 더 정확한 해일피해 추정수법을 개발하였다.

Table 2.2.1 Disaster Prevention Facilities at major cities in Japan

고베시	<ul style="list-style-type: none"> - 지형적 요건으로 태풍해일보다 지진해일을 더 위협한 재해로 인식 - 도시 및 항구 배후지에 경사가 급한 산맥을 가진 지역적 특성으로 인해 하수범람문제에 매우 민감 - 고베시의 재해도는 침수현황 위주로 제작 - 하천과 하수도는 양수장의 설치 및 운용으로 대처
-----	---

오사카	<ul style="list-style-type: none"> - 지진해일에 대한 방재가 우선시 - 재해에 대응하기 위한 상황실을 독립적으로 운영 - 항구시설을 보호하는 수문과 방재문을 바로 조정할 수 있는 시스템
히로시마현	<ul style="list-style-type: none"> - 지진해일보다 태풍해일을 더 위험한 요소 - 외부기업에 의뢰한 수치모의실험에 근거한 재해도를 지자체단위로 작성하여 배포
오키나와	<ul style="list-style-type: none"> - 지진해일과 폭풍해일을 일괄적으로 다룸 - 장래발생이 예상되는 지진해일과 폭풍해일에 대해 침수, 피해 예측을 실시하여 오키나와현의 방재 대책의 기초자료로 사용 - 각 세부 지자체에서 작성하는 지진해일, 폭풍해일의 주민 피난용 재해지도에 활용하는 기초자료를 작성

유럽 북해에서 폭풍해일 피해가 많았던 저지대 국가인 영국, 네덜란드, 덴마크, 독일 등을 중심으로 많은 연구가 수행되어 왔음(Murty, 1984). 주요 연구 관심사항은 중위도에서 실용화될 수 있는 폭풍해일 예·경보 시스템 개발이며, 현재 영국의 STWS, 네덜란드, 덴마크의 해일경보시스템이 운용되고 있다. 그동안 개발된 기술이 상용화되어 방재 및 연안 개발 등에 활용(DHI Mike System, Delft의 DELFT3D 등)되고 있으며, 최근에 와서는 유럽 공동체에서 Environmental Programme의 일환으로 CENAS 프로젝트(1990-1994)를 수행하여 해수면 상승과 대륙붕 침강으로 인한 아드리해 상부 해안의 안전성 조사차원에서 폭풍해일 모형이 수행되었으며 이후 MAST Program(The Marine Science and Technology Programme)의 제 4차(1994-1998), 제 5차(1999-2003)에 걸쳐 유럽의 여러 연구 기관이 공동으로 폭풍해일에 대한 연구를 수행하고 있다.

네덜란드에서는 대홍수로 제방 및 배후지역에 큰 피해를 입었고, 기존 제방의 보수가 아닌 새로운 개념의 간척사업인 Delta Project로 방조제를 건설하되 만 입구에 수문을 달아 평소에는 바닷물이 드나들 수 있게 하고 홍수가 예상되면 이를 닫는 계획을 수립하였다.

영국은 Thames강 인근에서는 이전부터 크고 작은 범람피해가 많았으며, 1953년 대홍수로 런던 중앙부의 호안이 범람하자 이를 계기로 Waverly 위원회를 설립하고, 20년간의 검토와 설계를 거쳐 Thames Barrier를 설치한다. 평상시에는 수저면에 있다가 작동시 수면으로 상승하는 구조로서 1983년 완공 후 2008년 1월까지 107번의 해일피해 예방에 성공한바 있다.

1. 일본

- 일본 연안개발기술연구센터에 의해 제안된 폭풍해일 위험지도 매뉴얼에 따르면, 위험지도 제작을 위한 시나리오 태풍은 규모와 경로로 구분하여 설정하고 있다.
- 시나리오 태풍의 규모는 해당지역에 최대피해를 유발한 태풍 또는 이세만 태풍의 규모(중심기압, 최대풍속 등)로 설정하고 태풍의 경로는 해당지역 최대피해 태풍으로 설정하도록 권장한다. 이러한 규모 및 경로의 결합을 통해 예상되는 최대 해일고는 위험지도 제작주체가 최종 검토하여 설정한다. Fig. 2.2.1은 침수범람 결과를 침수심 및 시간경과에 따라 제시하는 도식방안의 예이다.

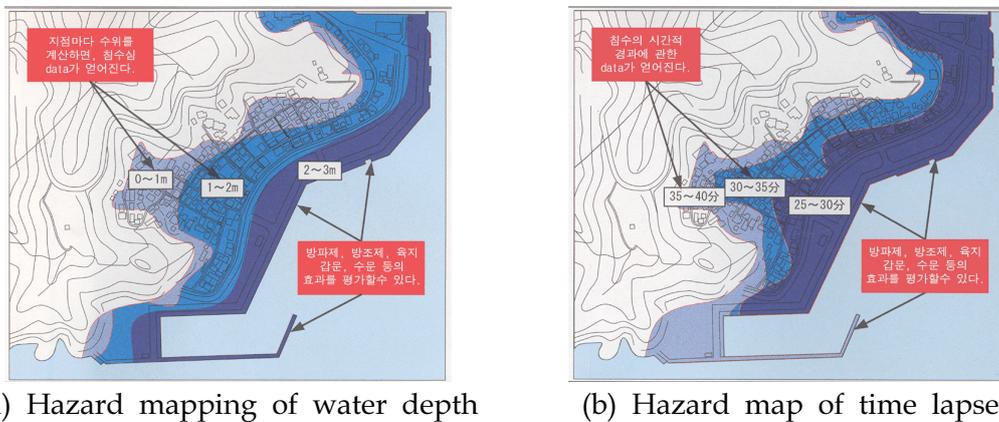


Fig. 2.2.1. Schematic method of hazard map

- 해안관리자(관련기관)는 작성주체에게 해안보전시설 등의 피해 메카니즘과 폭풍해일 침수 예측시 이용하는 수심과 표고 데이터, 과거 피해에 따른 침수범위 등을 제공해야 한다.
- 표고 데이터의 선정에 관한 매뉴얼 내용

시뮬레이션에 사용하는 표고치는 침수심도에 직접 영향을 미치므로 정확도가 높은 데이터를 필요로 한다. 특히, 폭풍해일에 의한 침수가 예상되는 지역의 표고 데이터는, 침수심도의 평가를 위하여 1 m 보다 상세한 정도가 필요하다. 이와 같은 정확도의 데이터가 존재하지 않는 지역에서는, 지형도의 측점에 의한 수정, 보정과 해안의 전문가에 의한 확인과 같은 방법에서 필요정보를 확보하여야 한다.

- Fig. 2.2.2은 격자간격이 범람모의에 미치는 영향에 대한 예시로써, A 구역내에서 50 m 격자구성은 녹색선으로 지형을 근사하여, 이에 따른 모의 결과에서 B 선과 같이 침수하지 않고 있다. 한편, 실제의 침수구역은 흑색선으로 표시되어

C선까지 침수하게 되어, 50 m 격자의 지형근사를 이용하여 침수구역을 과소평가되는 것으로 나타난다.

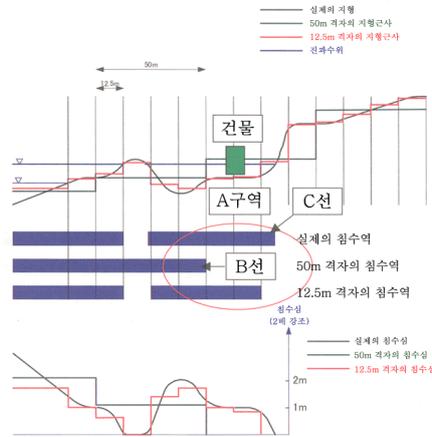


Fig. 2.2.2. Effect of grid size on inundation

- 12.5 m 격자의 지형근사 경우에는 보다 정확도가 높은 침수구역을 표현하는 것이 가능하다. 따라서 예시의 지형조건에 따라 A 구역에서 50 m격자에서는 침수하지 않는다고 예측되지만, 12.5 m의 격자에 대해서는 침수하게 된다고 예측될 수 있다.
- 일본은 지진해일·폭풍해일 위험지도의 작성 및 활용에 대하여 지속적으로 매뉴얼을 개발하고 있으며, 최근의 매뉴얼 개발은 Table 2.2.1과 같다.

Table 2.2.2. Manual about Storm surge and Tsunami in Japan

연도	매뉴얼	검토주체	참여기관
1998	지역방재계획에 있어서 지진해일대책 강화 매뉴얼	태평양 연안부 지진방재 계획방안 조사위원회	국토청, 농림수산성, 기상청, 건설성, 소방청
1998	지진해일 재해예측 매뉴얼	지진해일 피해예측 매뉴얼에 관한 조사위원회	국토청, 소방청, 기상청
2001	지역방재계획에 있어서 폭풍해일대책 강화 매뉴얼	폭풍해일 방재 정보 등에 대한 방안 연구회	내각부, 농림수산성, 국토교통성, 소방청
2002	지진해일대책 추진 매뉴얼	지진해일대책 추진 매뉴얼 검토위원회	소방청
2004	지진해일·폭풍해일 위험지도 매뉴얼	지진해일·폭풍해일 위험지도 연구회	내각부, 국토교통성, 농림수산성

- 일본 위험지도 매뉴얼(일본 연안기술개발기술연구센터, 2004)
 - 일본은 지방자치단체에 의한 위험지도의 작성 및 활용을 위해 내각부, 국토교통성 및 농림수산업성은 지진해일·폭풍해일 위험지도 연구회를 설치하여 평상시 및 재해발생시 예측 가능한 문제점 등을 검토하여 Fig. 2.2.3과 같은 목차를 구성하는 매뉴얼을 작성하였다.
 - Fig. 2.2.4는 재난 발생단계에 따른 위험지도 활용방안을 주민피난용과 행정검토용으로 구분하여 제시하고 있다.

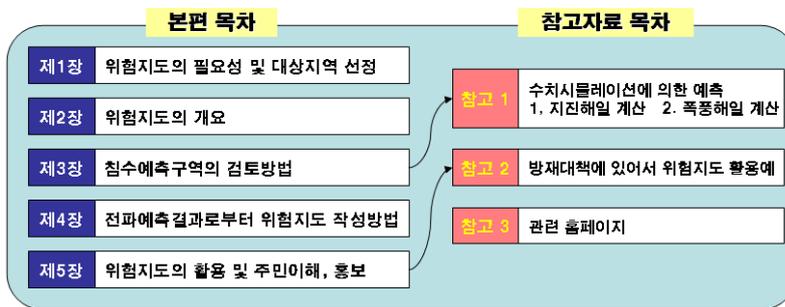


Fig. 2.2.3 List of Hazard map Manual (Japan, 2004)

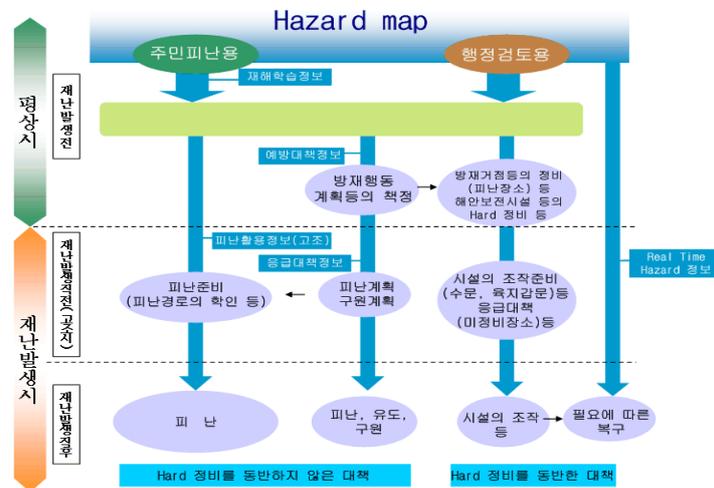


Fig. 2.2.4. Application of Hazard map

- 일본은 현재 국토교통성 홈페이지(www.gsi.go.jp)를 통해 지자체별 구축현황 및 지자체 홈페이지 연결을 통해 재해도를 제공하고 있다.
- 재해도는 Fig. 2.2.5와 같이 폭풍해일, 지진해일, 홍수, 토사재해, 화산 등으로 구분하고 있는데, 지역별로 구축현황은 차이가 있는 것으로 나타나고 있다.

- Fig. 2.2.5는 일본 효고현 토요오카시의 재해도를 나타낸 것으로 그림과 같이 주요위험지역에 대한 상세지도를 제공하고 있으며, 사용자가 쉽게 이해하도록 범례 및 도식에 관한 사항을 제시하고 있다.
- Fig. 2.2.6은 일본 지자체에서 제공하는 재해도를 나타낸 것으로 지자체별로 지도 표기방법이 다소 차이가 나타나고 있다. 특히 지역별로 위험지역은 강조하고 있으며, 범례 및 내용 등을 쉽게 설명하기 위한 다양한 방법이 시도되고 있다.
- 일본은 지진해일 및 폭풍해일에 관한 위험지도를 함께 표기하기 위한 매뉴얼을 지속적으로 개발하고 있다. 2007년 국토 교통성에서 제안한 지진해일 계산 시스템 매뉴얼(안)에 따르면 기존의 위험지도 작성방법에 추가하여 입력 및 출력을 일괄로 처리할 수 있도록 시도하고 있다.

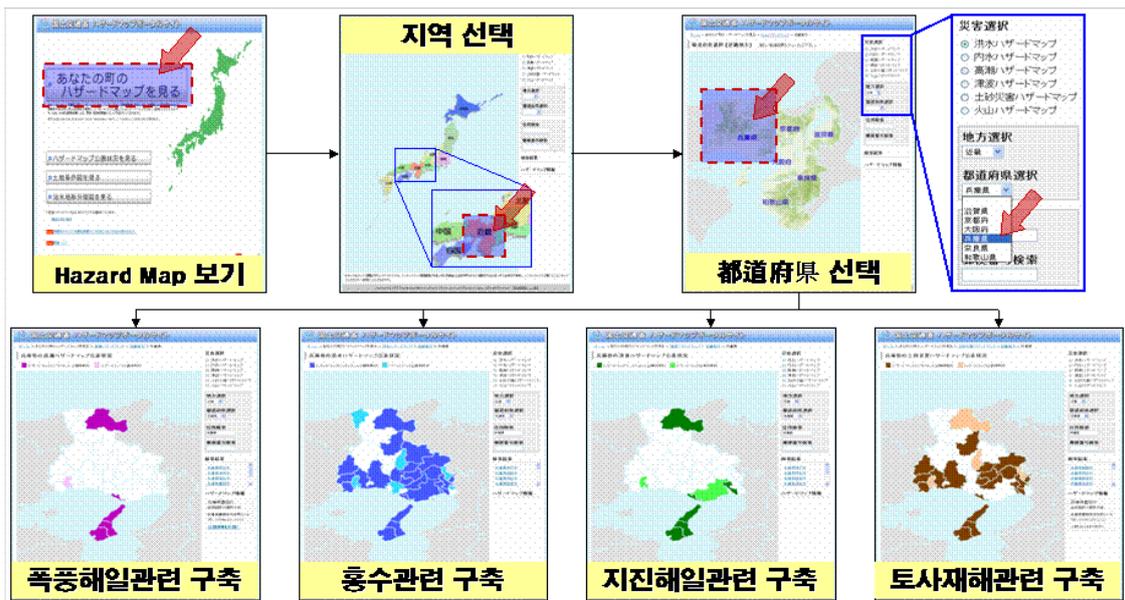
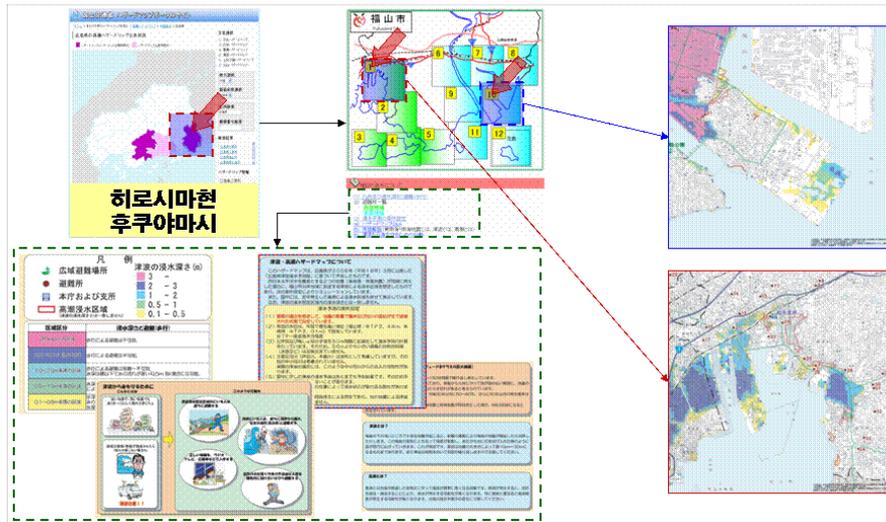


Fig. 2.2.5. Implementation of Hazard map from Administration of Land, Infrastructure and Transport of Japan



(c) Hiroshima

Fig. 2.2.7. Example of Hazard map by the local government of Japan

2. 미국

- 미국은 NOAA NHC(National Hurricane Center)에서 허리케인에 따른 해일 예측을 위해 SLOSH(Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes) 모형을 미국 동부해역을 39개 계산영역으로 구분하여 활용하고 있다(www.nhc.noaa.gov).
- 미국은 허리케인 내습에 따른 72시간동안 매 6시간 간격의 기상예측정보를 토대로 해일을 예측하고 있으며, 예측오차는 $\pm 20\%$ (10 ft 예측시 8~12 ft 범위)로 제시하고 있다.
- Fig. 2.2.8은 2008년 9월초 허리케인 Gustav 내습시 NOAA NHC에서 제공한 것으로 해일고 1.52 m(5 ft) 이상일 확률로 제시하고 있다.

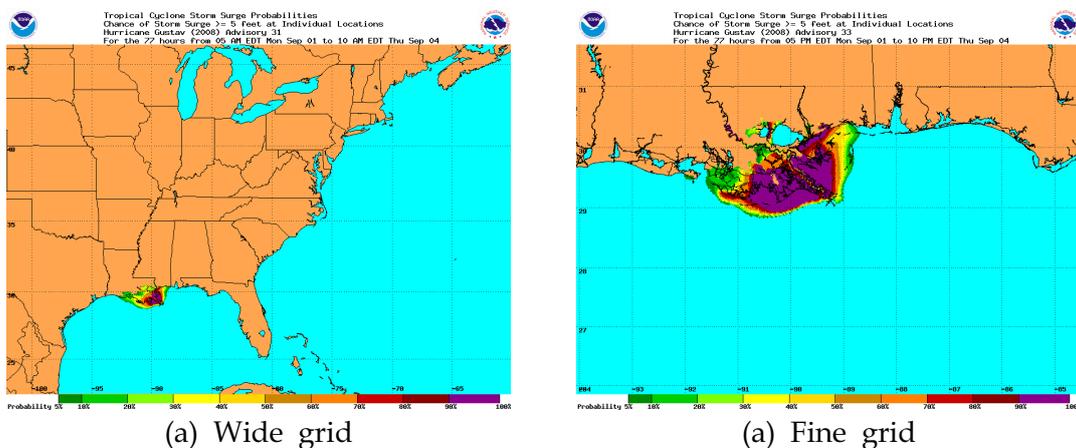


Fig. 2.2.8. Prediction of Storm surge at Hurricane Gustav(2008)

- FEMA에서 위험지도 제작을 위한 적용하는 시나리오는 1-percent-annual-chance에 해당하는 wave runup, setup and overtopping을 고려(Fig. 2.2.9)하도록 하고 있다.
- 미국은 지진해일 재해 저감을 위한 노력으로 TIME(Tsunami Inundation Mapping Efforts) Project를 통해 미서부 지진해일 위험지구에 대한 지진해일 위험지도를 작성하고 배포하였다.

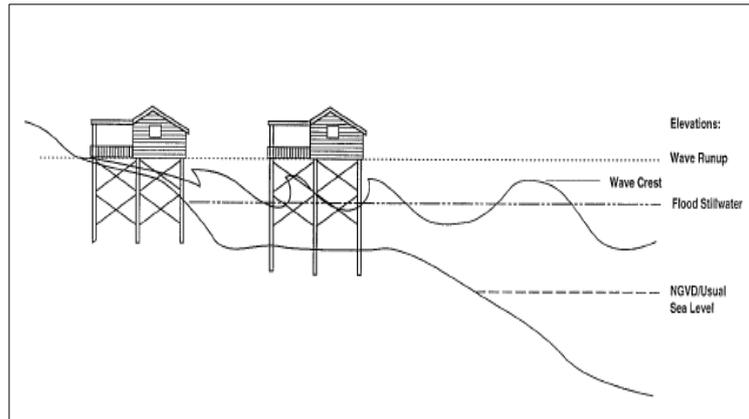


Fig. 2.2.9. Schematic illustration of wave effects extending above and landward of stillwater intercept on transect

- 지진해일 위험 완화 프로그램을 이용하여 지진해일이 국가 안전체계 확립과 세계 지진해일 정보를 공유하고, 지진해일의 위험평가 등을 추진하고 있으며, 특히, 2005년 태풍 카트리나 해일범람 피해를 계기로 해일범람예측도 정보 제공정책을 시행중에 있다.
- Fig. 2.2.10은 FEMA에서 작성된 2005년 허리케인 Katrina와 Rita에 의한 침수범람 지도로서 Fig. 2.2.10(a)와 같은 인덱스 맵으로부터 대상지역을 선정하며, Fig. 2.2.10(b) 침수범람지도를 확인할 수 있다.
- 허리케인 및 지진에 의한 위험지도와 함께 Fig. 2.2.11의 유인물 및 소책자 형태의 자료를 통해 내용을 소개하고 위험성을 홍보하는 수단으로 활용되고 있다.
- NOAA의 경우 허리케인 발생에 따른 연안지역의 해일고 예측에 중점을 두고 있으며, 이때 적용하는 허리케인의 정보는 기상예측정보에 의존하고 있다.

제 3 장 침수범람 피해사례 조사

제 1 절 국내 피해사례

2003년 태풍 매미

2003년 9월 12일 18시경 제주도 부근 해상, 20시경 경남 사천시 부근 해안에 상륙한 후 함안, 대구, 청송 등 영남 내륙 지방을 7시간 만에 통과 한 뒤 13일 03시 울진 부근 동해안으로 진출한 9월 태풍 매미는 그 이동 경로가 우리나라에 엄청난 피해를 남겼던 '사라'와 '루사' 등의 9월 태풍과 흡사했지만 그 위력은 기상 관측 100년 이래 가장 강했던 것으로 평가된다. 2003년 제14호 태풍 "매미"로 인한 피해 상황은 인명피해 132명(사망 119, 실종 13), 이재민 4,089세대 10,975명, 침수피해로 주택 21,015동, 농경지 37,986ha, 재산피해 4조 7,810억원(도로, 하천 등 공공시설 : 3조 2,640억원, 건물, 선박 등 사유시설 : 1조 5,170억원), 시도별 피해로 부산 3,810억원, 강원도 8,279억원, 경북 6,691억원, 경남 23,062억원 등의 피해가 발생하였다 (Table 3.1.1).

태풍 "매미" 진로의 동편에 위치한 남해안 전역에 해일 피해가 극심하였으며, 진해, 통영시(사망 3명, 실종 2명의 인명피해 및 약 2,200억원의 재산피해), 거제시(사망 3명, 실종 1명의 인명피해 및 약 2,000억원의 재산피해), 부산광역시에서 해일로 인한 연안 침수 피해 발생하였다. Fig. 3.1.1는 마산항에서 관측한 해수면수위 자료이며, 최고높이는 439cm로서 만조시 조위예측치 약 200cm보다 239cm나 높게 나타났다. 특히 마산시는 태풍 "매미"로 인한 해일로 8,000여 상가와 주택이 Fig. 3.1.2에서 보는 바와 같이 침수되었고 6,000억원의 재산과 32명(사망 18명, 부상 14명)의 인명피해가 발생하였다. Table 3.1.2에서는 태풍 "매미"로 인한 마산해일 피해상황과 이와 유사했던 1959년도의 태풍 "이세완"에 의한 나고야시 해일재해 피해상황을 보여주고 있으며, Fig. 3.1.3은 마산만과 이세만이 공통적으로 V자형 폐쇄성 내만으로 태풍의 중심에 근접시에는 해일재해의 큰 위험성에 노출되고 있음을 보여주고 있다.

Table 3.1.1. Damages of Typhoon Maemi

재해기간 : 2003. 09. 11~2003. 09. 13(2003. 09. 30 현재)

구분 \ 지역명		부산	대구	강원	전남	경북	경남	제주	총계		
총이재민		명	5,349	56	1,117	7,750	6,462	39,798	247	61,034	
인명	사망	명	14	4	11	11	16	60	2	119	
	실종	명	3		2	1	3	4		13	
	부상	명	128	7	10	22	16	159	2	366	
	계	명	145	11	23	34	35	223	4	498	
침수	농경지	ha	670	106.8	1,052.05	2,626.73	4,249.55	14,956.02		24,152.63	
	도시	ha	68	1.45	0.76			253		323.21	
	계	ha	738	108.25	1,052.81	2,626.73	4,249.55	15,209.02		24,475.84	
건물	주건물	유실, 전파	동	162	24	87	145	132	926	7	1,521
		반파	동	224	278	290	947	561	2,384	97	4,889
		침수	동	2,139	808	3,756	207	2,119	11,092	168	20,389
	계	동	2,525	1,110	4,133	1,299	2,812	14,402	272	26,799	
	피해액	백만원	7,070	2,694	6,909	18,304	8,672	62,111	1,463	108,609	
선박	동력	전파	척	417	1	2	136	26	1,769	15	2,383
		반파	척	411	1		134	27	2,416	41	3,064
	무동	전파	척	60		1		13	208	1	283
		반파	척	8			2	6	87		103
	계	척	896	2	3	272	72	4,480	57	5,833	
피해액	백만원	10,643	2	4	1,330	133	22,144	388	34,787		
농경지	전답	ha		14.19	949.27	7.71	824.13	70.93	13.5	1,893.04	
	답	ha	4.11	63.35	844.56	78.85	976.32	1,187.34		3,174.74	
	계	ha	4.11	77.54	1,793.83	86.56	1,800.45	1,258.27	13.5	5,067.78	
	피해액	백만원	69	2,567	48,135	542	32,592	15,977	147	100,478	
제조업	전작	ha	909.17	220.29	2,188.95	621.23	8,823.35	7,144.00	14,867.26	35,607.75	
	답작	ha	2,875.00	576.72	2,234.84	9,122.20	6,492.55	15,093.09	30.2	46,771.63	
	기타	ha	371.04	10.22	179.65	7,670.91	9,851.92	19,390.91	2.37	40,759.24	
	계	ha	4,155.21	807.23	4,603.44	17,414.34	25,167.82	41,628.00	14,899.83	123,138.62	
주요공공시설	도로	도로	개소	52	64	497	160	625	606	47	2,150
		교량	개소	2	3	26	1	24	34		90
		피해액	백만원	15,246	8,215	178,576	7,706	56,579	118,761	3,123	394,070
	하천	하천	개소	3	123	256	46	1,244	824	39	2,668
		피해액	백만원	1,465	55,420	112,164	4,436	126,904	344,041	4,013	678,407
	소하천	소하천	개소		72	384	227	1,481	1,375	17	3,685.00
		피해액	백만원		13,123	84,993	14,671	97,446	145,954	712	366,355
	수도	상하수도	개소	21	351	153	60	166	336	10	1,120
		피해액	백만원	3,330	9,391	25,923	3,356	6,202	33,080	536	82,339
	항만	항만시설	개소	62		2	9	8	18	5	127
		피해액	백만원	60,110		508	9,501	11,109	25,765	11,456	123,692
	여항	여항시설	개소	20		1	63	32	234	19	376
		피해액	백만원	13,828		255	7,933	14,782	90,908	2,099	134,303
	피해액 소계	백만원	177,120	124,230	751,825	116,382	587,891	1,462,619	32,395	3,332,521	
총 피해액	백만원	381,087	180,264	827,914	196,888	669,118	2,306,194	49,304	4,775,652		

자료 : 중앙재해대책본부

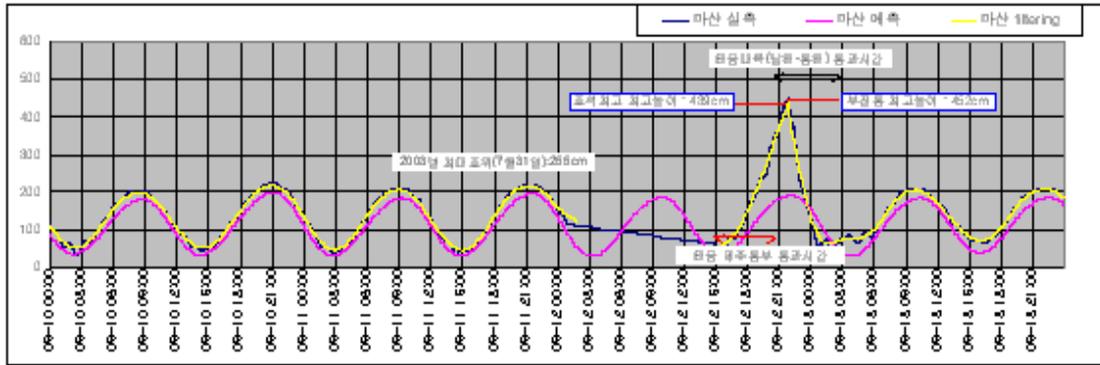


Fig. 3.1.1. Tide of Masan at Typhoon Maemi

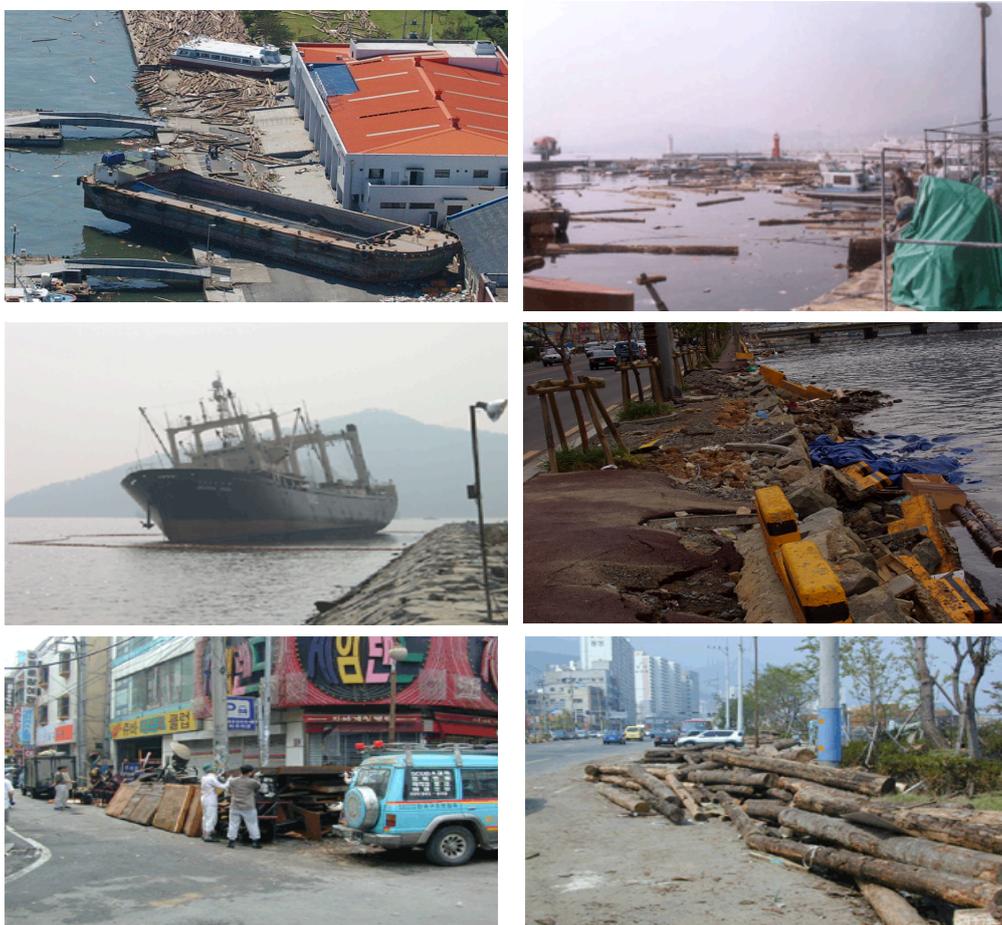


Fig. 3.1.2. Scenes of flooding at Masan (Typhoon Maemi)



Fig. 3.1.3. Hazard map of Masan

Table 3.1.2. Comparison of typhoon Maemi and Isewan

구 분		태풍 「매미」	태풍 「이세완」
태풍크기·영향	발 생	2003.9.6. 15:00경(괘 부근)	1959. 9. 21.(마리나군도 부근)
	시 기	2003. 9. 12. 21:50경(마산)	1959. 9. 26. 22:00경(나고야)
	중심기압	959hpa	895.4hpa
	풍 향	남남동(마산)	남남동(나고야)
	최대풍속	38.8m/s(마산), 순간최대풍속 60m/s	37m/s(나고야), 순간최대풍속 75m/s
	강 우 량	38mm	40 - 70mm
	평소 만조수위	1.81m (9. 12 예보치)	1.86m
	최고 수위높이	4.39m (↑ 2.58m)	5.31m (↑ 3.45m)
피해상황	인명피해(명)	사망 18, 부상 14	사망 5,098, 부상 38,921
	건물파손(동)	438	833,965
	침수가옥(동)	8,135	363,611
	선박피해(척)	797	7,576



Fig. 3.1.4. Similar direction of Storm surge at Masan, Korea and Nagoya, Japan

앞서의 국내에서 발생한 해일피해를 도표화 하면 Fig. 3.1.5 및 Table 3.1.3과 같다. 피해 사례를 분석한 결과 서해안의 피해가 동해, 남해에 비하여 많았다. 각 해역별 재해 원인을 살펴보면 서해안의 경우 저기압에 의한 피해가 상대적으로 높은 빈도를 차지하고 있었고, 남해안의 경우는 태풍피해의 빈도가 상대적으로 높게 나타난다. 동해안의 경우 다른 해역에 비하여 큰 영향을 미치는 피해 원인이 없이 다양한 양상의 해일 피해가 보인다.

Table 3.1.3. Damages from Major typhoons in Korea

피해년월	피해요인	피해지역	피해내용
1904.8.20	태풍	경남연안	감시선 및 각 관서 파손, 부두유실
1912.5.18	저기압	황해도	제방결괴 19개소(약 870m), 전담침수 약 410정보, 가옥침수 약 77호, 익사자 1명
1921.9.23	태풍	동해안	선박파손
1923.8.13	태풍	관서지방 및 용암포지방	건물침수 2,960호, 가옥 유실 1,860호, 전파 99호, 반파 166호, 사망 538명, 행방불명 619명
1952.8.17	태풍	남해, 서해안	가옥 및 전담침수
1956.2.27	저기압	동해안 일부	선박 700여척 피해
1956.2.29	저기압	동해안(5m 해일)	피해액 2억 54만원
1956.8.16	태풍 (BABS)	남해안	여수~미평간 침수 선로호반 50m 유실 동해남부선 호계역 구내 침수
1957.8.20	태풍	여수지방	사망 7명, 부상 195명, 실종 8명 전라선 여수부근 유실
1958.4.6	저기압	전북 부안군 동진면 장소리	제방붕괴로 논밭 15만평 침수

피해년월	피해요인	피해지역	피해내용
1958.4.7	저기압	충남 아산군 신암면 중예리	방파제 400여m 붕괴로 논 11정보 침수
1959.9.17	태풍 (사라)	영덕지방, 남해안(여수, 진도, 완도, 고흥)	가옥 1,000여동(2,500세대) 폐허, 가옥 1만여동 침수 초대형 태풍으로 인한 극심한 해일피해
1959.11.3	저기압	서해안 아산만 일대	논침수 17정보, 벼 41,500석 유실, 밭 1,550정보 유실, 제방 48개소, 가옥 100여동 침수
1959.11.4	저기압	전북 무안군	제방유실 17m, 논밭 침수 65정보
1960.6.2	저기압	서해안 아산만 일대	농경지 500여정보 유실
1960.6.11	저기압	진도	논, 밭, 염전 150여정보 유실, 제방 붕괴
1960.6.11	저기압	무안군 일대	제방붕괴 110m, 농경지 225정보 침수, 염전 49정보 침수, 소금 125가마 유실
1960.8.22	태풍	남해안	수백호의 가옥 침수
1961.7.29	저기압	당진지방	제방 30m 붕괴 농작물 57정보 침수
1961.8.12	저기압	서산 보령지방	범선 19척 침몰, 2척 전파, 제방 745m 붕괴
1961.8.21	저기압	서산 남면 몽산포, 삼천포	어선 8척, 발동선 1척 파손, 방파제 25m 유실, 어시장 2동 전파, 어선 3척 유실
1962.8.2	태풍	남해연안 및 제주도	이재민 504명, 사망 18명, 실종 34명, 부상 16명, 가옥 전파 50동, 반파 798동, 침수 322동, 유실 5동, 선박 전파 323척, 반파 347척, 침몰 110척, 경작지 유실 55정보, 매물 60정보
1962.8.2	태풍	여수지방, 고흥, 완도, 목포	선로침수 280m, 노반유실 100m, 여수항 제1부두벽 7m 붕괴, 인근지역 통신두절
1963.1.5	저기압	동해안	이재민 1,015명, 피해액 3,984만 4천 4백원
1965.7.29	태풍	서해안	제방붕괴 6,243m, 전답 1,391 정보, 가옥전파 8동, 제방반파 1,900m, 농작물 3,150석 유실
1966.8.19	저기압	서해안, 평택,당진 남해안 해남, 영광	제방 전파 22개소(2,502m), 반파 19개소(4,085m), 농경지 15정보 매물, 가옥 5동 침수, 전답 287정보 침수, 1.9정보 유실제방 10여m 붕괴, 논 15정보 침수, 염전 30만 7천평 침수
1966.8.24	태풍	여수(남해안),포항	농경지 150정보 침수, 가옥전파 1동, 도로 1개소, 제방 6개소, 수리시설 2개소, 전답 10만평 피해
1968.10.24~26	폭풍 해일	강원도 지역	저기압의 세력발달로 인한 폭풍우 피해
1970.7.6	태풍	영동지방 속초, 목호	제방무너져 8,000여명 대피, 선박침수 14척, 조난 11척, 산사태로 가옥 전파 2동, 매물, 사망 10명
1971.1.4~5	폭풍 해일	동해안 일대	저기압의 급격한 발달과 북서계절풍에 따른 폭풍설, 강풍, 해일피해
1971.10.6	서고동저 기압차	서해안(아산, 당진, 서산, 예산)	제방유실 13개소, 농경지 50만평 침수
1972.2.1	저기압	동해안(4~6m)	선박 15척, 어로작업장에 5,000여척

피해년월	피해요인	피해지역	피해내용
1972.2.29	저기압	동해안	사망 4명, 이재민 300명, 방파제 4개소 유실, 건물 77동, 선박 18척
1976.10.24	저기압	전남지방	제방 30m 붕괴, 전답 3ha 유실, 염전 10ha 침수
1978.11.27	저기압	동해안	선박피해 959척, 항만시설 92개소
1983.5.26	지진해일	동해안 일대	동해중부 지진에 의한 대규모 해일피해
1993.8	폭풍해일	부산지역	온대성 저기압에 의한 강풍피해
1993.7.12	지진해일	동해안 일대	일본 북해도 남서부 외해지진에 의한 해일피해
1996. 7.26~28	호우피해	임진강 유역	서해안 만조시점과 맞물린 폭우에 의한 범람피해
1997. 8.19~21	백중사리 태풍 위니	서해안 일대 (인천,경기,전북)	백중(음력 7월15일)일의 극고조와 태풍위니의 간접영향으로 해면상승, 범람피해
2002. 7. 5~6	태풍 라마순	남해안 일대 (전북,경남,제주)	강풍으로 인한 높은 파도등으로 해안가 시설피해
2003. 9.12~13	태풍 매미	부산, 마산	강우와 홍수, 강풍이 만조시간대(김해지역)와 겹치면서 높은 해일발생
2005.8. 2~11	국지성 집중호우	부안, 김제, 정읍	해안가 저지대 침수피해
2006. 3.11~13	풍랑피해	충남	강풍과 풍랑으로 인한 해안가 피해
2006. 9.16~18	태풍 산산	강원도, 경남지역	강한 바람과 해상의 높은 너울로 인한 방파제 피해
2006.10.22~25	너울성 파도	강원, 경북지역	저기압의 발달로 강한 바람을 동반한 너울성파도 피해

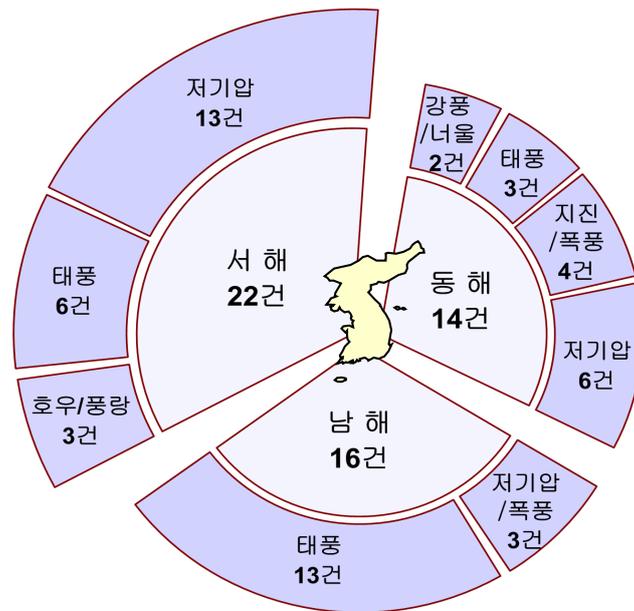


Fig. 3.1.5. Classification of Typhoon damages by region

제 2 절 국외 피해사례

1953년 유럽에서는 북해 온대성폭풍(North Sea Storm)에 의한 해일로 북해 주변국에서 4,000여명의 사망자(네덜란드 1800명, 영국 300명 등), 70만호의 가옥침수 파괴의 연안 해일재해 발생. 이를 계기로 폭풍해일에 관한 체계적인 연구와 예·경보시스템 개발의 계기를 마련하였다.

1959년 9월 27일 일본 동해안의 이세만에 위치한 나고야시에서는 태풍 “Isewan”에 의한 해일로 5,000여명의 사망자, 120여만호의 가옥침수 파괴 등 일본 최대의 해일재해 발생(Fig. 3.1.2). 이를 계기로 일본정부는 “고조재해 피해저감 대책”을 수립, 입법화하여 해일 예·경보시스템 개발과 함께 연안지역의 해일방어 구조물 설치 등 연안방재사업을 연차적으로 시행해 오고 있다.



- | | | |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> (1) Low ground with slender dikes (2) Saturday night, before a special day (3) No violent typhoon before (4) Lauan (200,000 ton) from timber yards | } | ➡ About 5,000 killed |
|---|---|---|

Fig. 3.2.1. Situation of Isewan tsunami disaster at Nagoya

1970년 11월 13일 벵갈만을 강타한 열대성 사이클론(Tropical Cyclone)에 의한 해일로 Bangladesh에서 200,000여명 사망하였고, 1970-79년의 10년 동안 전 세계적으로 연안 해일재해로 약 500,000명의 사망자 발생하였으며, 1990년 9월 8일 미국 텍사스 주의 Galveston에서 Hurricane 해일로 8,000여명 사망하였다. 이를 통해 미국의 연안 해일재해 대응방안 수립 및 기술개발의 계기를 마련하게 되었다.

미국의 뉴올리언스 지역은 2005년 이전에 1915, 1940, 1947, 1965 및 1969년에 홍수 피해를 입었으며, 또한, 2005년 8월 29일에 태풍 카트리나가 미국 남부 뉴올리언스에 내습을 하여 큰 피해를 일으켰다. 1,599명의 인명과 2,000억 달러의 재산 피해가 발생하였으며, 45만명 이상의 이재민이 발생하였다.

제 4 장 태풍해일 침수범람 모델 및 재해도 작성을 위한 고려사항

제 1 절 태풍 정보

태풍 정보는 주로 국외(일본, 미국)의 관측자료를 활용하고 있는 실정이다. 재해도에 직접 활용을 위해서는 우리나라 관측정보의 공유 및 오차에 대한 보완이 필요하다. 또한 기상청, 소방방재청, 해양조사원 등의 유기적인 협력체계 구성을 토대로 현황 및 피해정보의 공유가 요구된다(Fig. 4.1.1).

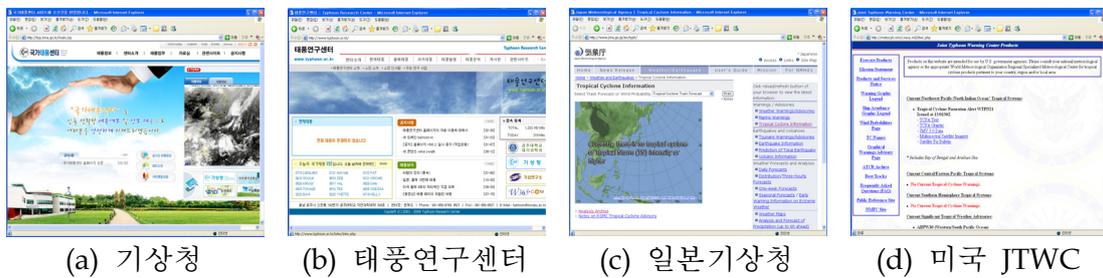


Fig. 4.1.1. Hurricane observation information providers

폭풍해일에 대한 빈도해석 방법은 과거 관측자료를 토대로 신뢰성을 만족시키기 위해 다양하게 시도되고 있다. 과거 관측자료 바탕의 빈도분석은 기후변화 양상에 따라 미래 상황을 재현하지 못할 경우도 발생할 수 있으나, 실자료를 활용하는 측면에서 중요한 근거자료로 제시될 수 있으며, 관련 연구를 통해 새로운 시도가 되고 있다. 폭풍해일과 관련된 연구 중 빈도해석에 관한 연구는 다음과 같다.

이론적 해석방법은 해일 반응을 관성력, 기압 경사, 바람에 의한 해면 응력 등에 의해 구성되는 유체역학 방정식이 활용되며, 곧은 해안선, 간단한 해저지형 등의 조건하에서 단순히 연안구조물의 설계지침을 얻기 위한 기초계산으로 활용되고, 실제 지형에 적용하기에는 적합지 않다.

경험 및 통계적 방법은 해일 자료 및 기상자료가 충분히 축적되어 있는 지역에서 해일고와 기상요소(바람, 기압, 태풍경로 등)들 간의 통계적 관계식을 도출한 후 이 관계식을 이용하여 예상되는 기상조건 및 과거의 특성 기상상태에서의 해일고를 추정하는 방법이 있고, 관측치를 토대로 빈도별 극치값을 구하는 극치확률해석 방

법이 있다.

동수역학 이론에 기초한 수치모형을 이용한 해일고 및 고극조위의 산정은 복잡한 지형, 지구자전효과, 변화하는 기상상태 등을 포괄적으로 고려할 수 있기 때문에 과거 현상에 대한 추산은 물론 예보의 목적으로도 광범위하게 활용되고 있다. 이 방법의 단점은 주 입력자료인 해상풍 예보, 기압변동의 예측 등이 용이치 않고 모형 범위가 클 경우 해상도, 경계조건 및 주요 입력 상수 적용치에 따른 전 연안역에서 지역 특성이 고려된 조위 및 위상 재현이 용이치 않은 점이 있다.

정점 또는 특정지역에 대한 산정은 이용할 수 있는 자료에 따라 적용성이 제한되는데 연안 관측지점에서는 기존 관측성과를 이용하여 재현기간별 극치분석에 의해 평가하거나, 조석 등의 주기적인 성분을 제외한 기상외력에 의해 발생하는 태풍 및 폭풍에 의한 해일성분을 통계처리하여 독립적 또는 복합적으로 극치해면을 산출한다.

넓은 공간역에 대해서는 관측자료가 부족하므로 동수역학적 모형을 이용한 과거 현상에 대한 재현 및 미래 발생가능한 태풍 사상에 대해 해일고 유속성분을 구한후 관측치와 모형치를 비교하여 상관 관계식을 도출함으로써 공간적으로 극치해일고 및 유속을 산정하는 방법이 있다.

EST(Empirical Simulation Technique) 기법은 태풍에 따른 기상 및 관련자료를 입력자료로 해일고과 같은 결과를 시뮬레이션을 통해 산정한 후 통계처리하는 과정으로 입력변수 등은 중심기압, 최대풍속반경, 최대 풍속, 태풍 중심으로부터 대상지역까지의 최소거리, 태풍 중심의 진행속도 등이 있다.

제 2 절 좌표계 및 기준면 통일

우리나라의 지형도와 해도는 횡메카토르 투영법에 따라 제작되며 지리학적 경위도 및 평면 직각좌표계의 상환 변환은 TM, UTM 투영에 따른 변환식을 이용할 수 있다.

연안에 대한 범람 모의를 위해서는 육상의 지형자료와 해상의 수심자료에 대한 좌표체계를 동일하게 처리해야하고, 평면 및 구면좌표계의 경우 국토지리정보원의 좌표변환 프로그램 및 관련 상용 프로그램을 통해 변환을 통한 좌표계의 통일이 가능하다. 연직방향의 경우, 지형도는 평균해수면과 해도는 약최저저조위면을 일반적으

로 기준으로 하고 있으며, 범람모의시 이에 대한 동일 기준면으로 설정이 필요하다. 서승원(1999)은 황해와 동중국해의 조석을 모의함에 있어 구면좌표계와 직교좌표계를 각각 적용한 결과, 두 좌표계에 의한 결과는 거의 동일함을 제시하였다. 폭풍해일 수치모형은 nesting 격자망을 사용하여 격자간의 연속성을 유지하기 위해 직교좌표계가 주로 활용되고 있다(문승록 등, 2007; 허동수 등, 2008).

수심 정보는 해도 이외에 GEBCO(2003), Global Seafloor Topography(2007), JEGG(2005), 최병호 등(2002)의 1' 자료, 서승남(2008)의 KorBathy30s 등이 있어, 우리나라 주변해역 수심자료로 활용이 가능하다(Fig. 4.2.1).

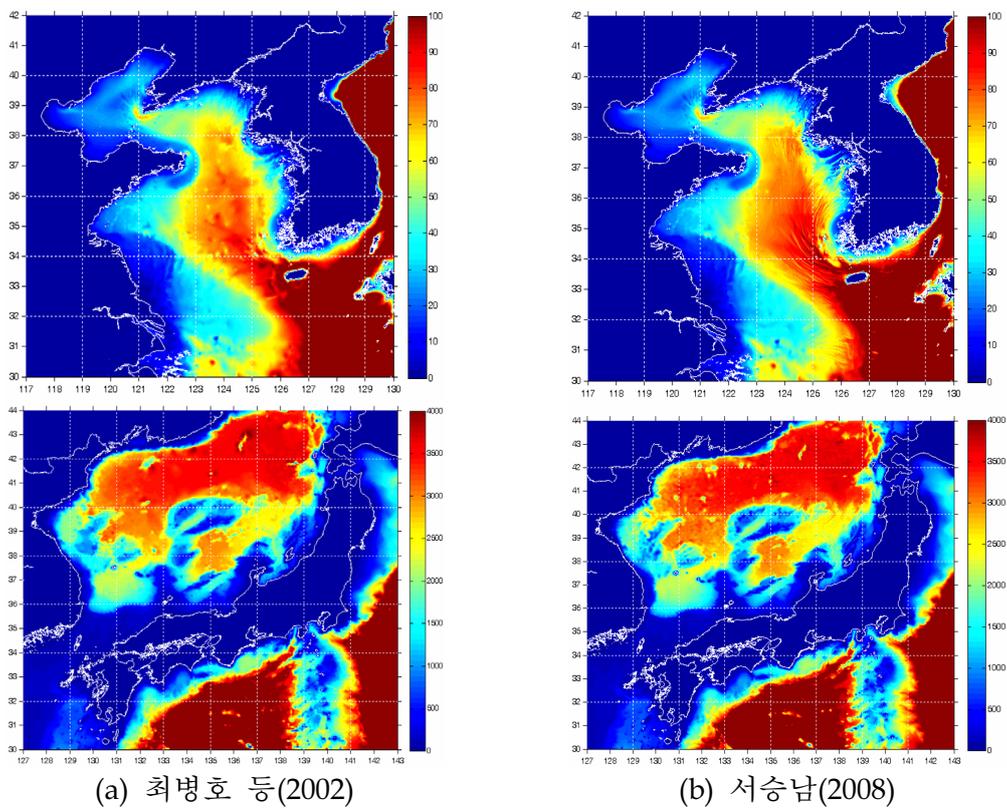


Fig. 4.2.1. Bathymetry of Korea

제 3 절 외해지역과 연안지역의 불연속 처리(Nested grid)

해일모의를 위해서는 광범위한 영역의 계산이 필수적이며, 특정지역에서 해일 및 범람영향을 파악하기 위해서는 광역의 계산결과를 상세한 영역까지 정확히 전달하는 것이 중요한 사항이다. 과거에는 광역을 먼저 계산하고, 그 계산결과에서 세부역의 외해경계를 추출하여 재사용하는 변환 경계조건 방법이 활용된 바 있다. 이러한 방법은 전단계 영역의 계산결과 중 조위 및 유속 형태만으로 하위 단계의 세부역의 경계조건으로 활용하므로, 수치적 처리 오류와 지형조건에 따라 경계처리시 부적합성이 노출되기도 하고, 계산의 연속성에 논란이 야기된다. 이와 관련된 최근 연구에서 활용되는 방법은 nesting 격자망을 활용하여 격자간격을 1/2 또는 1/3씩 감소시키면서 광역과 세부역을 연결시키는 방법이며, 이때 광역과 세부역의 계산결과는 상호 영향을 줄 수 있는 결합 모형이 활용되고 있다.

제 4 절 수치모형 격자체계에 따른 구분

- Uniform grid : 전체 영역을 통해 격자크기가 동일한 격자시스템으로서 양해법 또는 음해법을 적용하게 되는데, CFL 조건 때문에 격자크기를 줄이기 위해서는 음해법이 더욱 경제적인 경우가 많다. ADI 방법의 도입을 통해 효율적인 계산을 시도하게 되는데, 가속도항과 같은 비선형항을 선형화하기 때문에 특히 유속 산정시 부정확한 결과를 낳게 되는 경우가 많고, 일반적인 경우에도 조위는 잘 맞는 반면 조류속은 오차가 적지 않게 되므로 후술되는 여타 그리드시스템을 도입하게 된다.
- Telescoping grid : 각 방향으로 독립적인 가변격자를 채택하는 방법으로 불필요한 영역의 격자망에까지 세밀하게 구성되므로 비경제적인 측면이 있다. 또한 중앙차분이 여의치 않아 수치일산이 크게 발생하는 등 정확도에 다소 문제가 발생하므로 오염확산 등과 같이 확산항이 중요한 경우에 대한 모의에 있어서는 부적절한 방법으로 알려져 있다.
- Nested grid : 주관심대상 영역과 같이 일부 영역에서만 세격자체계로 설정하는 방법으로, 전체 영역(광역) 내부에 세부영역(세부역)을 추가로 수립하게 되는데 광역에서 계산된 결과가 세부역의 경계조건으로 사용하게 된다. 세부역의 계산결과

가 광역의 결과에 영향을 미치는지 여부에 따라 coupled와 uncoupled(세부역의 영향이 광역에 미치지 못함)로 구분되는데, 최근에는 대부분 coupled 모형을 적용하고 있다. 이 시스템 역시 양해법과 음해법 모두 가능한데 양해법의 경우 세부역의 격자크기에 따라 시간간격이 결정되고, coupled 모형에 대해 음해법을 사용할 경우 매우 복잡해지는 단점이 있으며, 세부역의 경계부근의 수심처리에 다소 주의가 필요하다.

- Curvilinear grid : 육지경계에 연하도록 좌표계를 경계좌표계로 변환시키는 방법으로서 유속계산이 가장 우수하여 ADI 효과를 극복하기에는 최적의 방법이다. geometrical term이 추가되므로 noise가 발생하기 쉽다는 단점이 있으며 격자체계 생성이라는 추가적 작업이 필요하다. 격자체계는 직교성과 비직교성으로 구분되는데, 직교성은 타원형 방정식을 풀어 그리드를 생성하며 좌표계가 매끈하게 형성되는 반면 비직교성은 대수적 방법에 의해 쉽게 격자가 형성되지만 오차 발생에 주의가 필요하다.

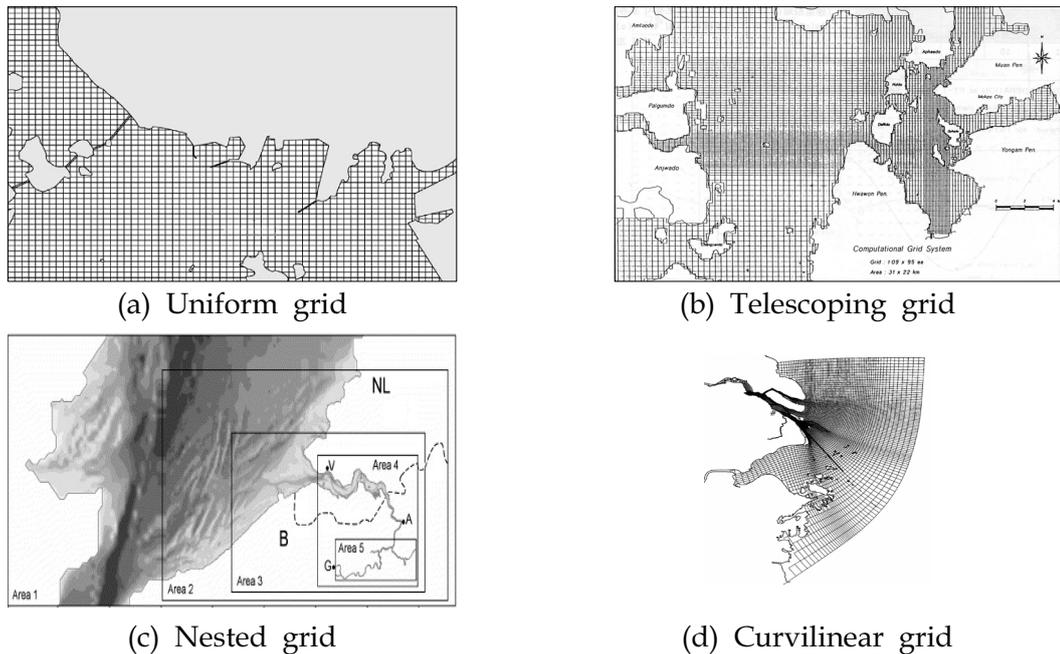


Fig. 4.4.1. Classification of Grid type

제 5 절 미래 태풍 강도 변화에 관한 연구

오재호(2007)는 미래 태풍의 변화를 분석하기 위해 IPCC 보고서에서 미래 기후로 예측되는 여러 시나리오 중 A2 시나리오(CO₂, CH₄, N₂O 등의 온실가스 농도가 100년 후 현재의 거의 2배가 되는 시나리오)에 의한 미래 기후 자료를 이용하여 2003년 9월 13일(MAEMI), 2002년 9월 1일(RUSA) 우리나라를 통과한 태풍과 같은 가상의 미래 기후환경에서 태풍을 모의하여, 실제 사례와 비교(Fig. 4.5.1)하였다. 연구결과에 의하면, 미래 기후 환경에서의 태풍 매미는 우리나라 상륙시 10 hPa 정도의 중심기압 차이를 보인다. 또한 태풍이 진행해가는 동안 진행경로의 오른쪽(태풍 위험반원)에서의 두드러진 풍속 증가, 지역적으로 차이는 있으나 최고 22 hPa의 해수면 기압차이가 발생하는 지역이 나타난다. 또한, 태풍 루사의 경우 미래 기후에서의 태풍 매미와 유사한 특징을 보였으며, 태풍의 접근시 6 hPa 정도의 중심기압 감소가 나타났고, 지역적으로 20 hPa 내외의 해면기압 변화가 있었다. 한반도 내륙지역의 48시간 누적강수량이 200 mm 정도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 강릉지역에서의 지역적인 강수량 증가 및 감소 지역이 나타났고, 이들의 변화량은 최대 200 mm 정도에 이르는 것으로 나타났다.

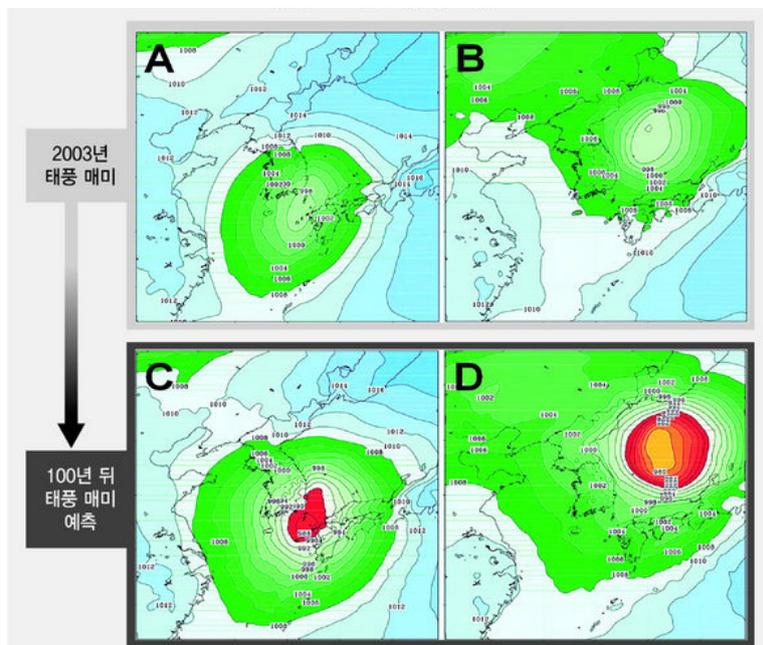


Fig. 4.5.1. Hurricane intensity change due to the global warming

제 6 절 가상 시나리오 구성에 관한 연구

최병호 등(2004)은 미래 상황에 대한 설계 해면 추정에 있어 1 m(또는 50 cm)를 가산시킨다던지 또는 과거의 지역적으로 발생한 가장 큰 영향을 준 태풍에 대해 중심기압을 10~15% 강압시키고 풍속은 15~20% 증가시킨 경우의 시뮬레이션으로서의 산정 값을 취하는 방법 역시 현재로서는 현업설계시 반영시키는데 큰 경제적인 부담과 시간소요가 될 것으로 보이나 근년의 설계 기준은 지구온난화의 영향을 고려할 것을 권장하였다. 폭풍해일예측을 통한 상황대처 방안 강구를 위해 행정자치부 국립방재연구소(2002)는 중심기압을 960 hPa로 선정하고 10 m 이상의 최대풍속이 발생하는 반경을 150 km로 가정하여 가상태풍에 의해 해일의 최고수위를 산정한 바 있다. 태풍의 진로는 대한해협 통과, 남해안 상륙, 군산지역 상륙 그리고 인천지역으로 상륙하는 4가지 경우로 설정하였으나, 사용된 공간격자나 태풍 경로에 있어 다양성을 확보하지 못했으며, 태풍 모형의 운영도 중심기압과 태풍의 진행속도를 일정하게 하여 실제 발생하는 태풍과는 차이가 있었다. Mcinnes et al.(2003)은 호주의 북동해안에서 태풍이 정남방향으로 진행하는 것을 0°로하여 진행방향이 335°, 35°, 75°, 105°인 경우에 대한 모의를 수행하였고, 이때 태풍의 중심기압은 945 hPa, 진행속도 25 km/h로 하였다.

허동수 등(2006a, 2006b)은 태풍 MAEMI(0314), SARAH(5914), THELMA (8705)의 상륙시 이동경로에 이들 각각의 태풍특성(중심기압, 태풍의 이동속도 및 태풍반경)을 조합시킨 모의 조건으로 부산 및 경남연안에 대하여 가상 태풍에 의한 폭풍해일고를 산정하고 지역별 분포특성을 검토한 바 있다. 또한, 태풍의 경로에 2005년 미국에 큰 피해를 유발한 허리케인 카트리나와 결합을 통한 시나리오(허동수 등, 2008)를 설정한 바 있다. 문승록 등(2007)은 검증된 과거 태풍은 시나리오 대상 태풍으로 선정한 후 태풍의 주요 인자를 다양하게 변경하여 시나리오를 구성하고, 중심기압과 최대풍 반경은 과거 태풍 정보로부터 일정비율 증가 또는 감소시키고, 이동경로는 좌우측으로 이동시켜 태풍이 우리나라에 영향을 줄 수 있는 범위까지 확장하여 가상태풍 시나리오를 구성하였다. 이를 토대로 50년 및 100년 빈도에 해당하는 해일이 유발하는 범람결과를 토대로 해안 침수예상도를 시범제작에 활용한 바 있다.

제 5 장 육도-해도 접합 정밀지형도 작성

제 1 절 LiDAR 측량을 통한 정밀 지형측량

항공라이다 측량의 정의는 레이저를 이용하여 지표면의 고도를 측정하는 것으로 'ALS(Airborne Laser Scanner)' 또는 'LiDAR(Light Detection And Ranging)'라 불리기도 한다. 항공라이다 시스템은 기본적으로 GPS, INS 및 레이저 스캐너의 세 가지 구성요소로 이루어져 있으며, 부수적으로 중해상도 디지털카메라와 촬영용 네비게이션 카메라가 탑재되어 있다. 이론적으로는 어떠한 광원(light source)도 라이다에 쓰일 수 있지만, 대부분의 라이다장비는 한정된 레이저만 이용하고 있다. 간단히 말하자면, 라이다(LiDAR)는 레이저를 이용하여 특정 지점까지의 거리를 측정하고 있는 것이다. 라이다 장비는 거리를 측정할 때 이러한 빛의 속도와 광선, 정밀시계, 발신/수신기 등을 이용한다. 빛이 되돌아오는데 까지 걸린 시간을 반으로 나누고 빛의 속도를 곱하면 수신측과 반사대상물 사이의 거리가 결정되는 것이다. 하지만 정지상태가 아닌 비행기와 같은 이동체에서 측정을 할 경우, 지상좌표로 나타낼 비행기의 정확한 위치를 알 수 없을 뿐만 아니라 그 거리의 정확성도 보증할 수 없게 된다. 따라서 라이다에는 두 가지의 추가적 기술인 관성항법장치와 GPS가 탑재된다.

라이다 시스템의 결과물은 X,Y,Z 의 3차원 포인트 데이터가 주된 획득자료이다. 이외에도 반사강도(intensity)라는 부분에 있어 매질의 특성에 따라 반사되어 돌아오는 에너지의 양이 달라 육안으로 대략적인 구분이 가능하다. 금속물질 같은 것은 높은 에너지 반사를 나타내고, 검게 포장된 도로는 대체로 낮게 나타난다. 이런 것을 이용하면 대상물의 표면 형태를 구분(금속지붕의 건물과 도로 구분)할 수 있으며 지물추출에 대한 자동화도 이끌어 낼 수 있다. 항공라이다측량의 장점으로는 높은 효율성과 정확도에 있으며, 레이저 스캐너는 능동센서 시스템이므로 기후에 관계없이 주야로 자료획득이 가능하며, 또한 스캐너로부터 지표면까지 거리를 직접 산출할 수 있으므로 고밀도의 표고정보를 신속하고 효율적으로 얻을 수 있다. 특히 접근이 어려운 해안지역의 표고정보나 지도제작 분야에 효과적으로 이용할 수 있다. 최근에는 항공 라이다 장비는 레이저스캐너와 더불어 디지털 카메라를 일체형으로

제작하여 고해상도 디지털 영상을 동시에 취득하고 있으며, 항공 라이다 데이터로 어려웠던 지상의 정성적인 분석까지도 수행할 수 있도록 발전되었다.

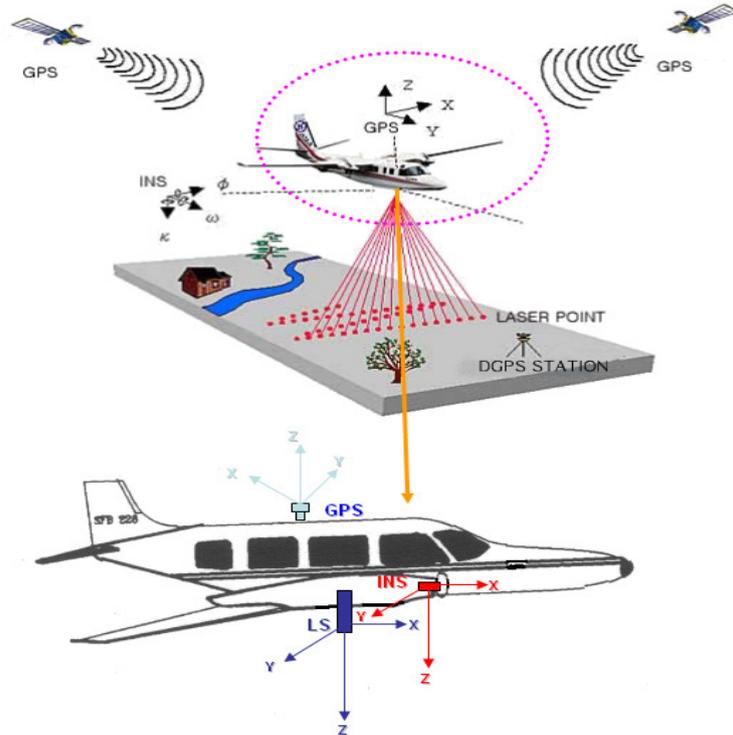


Fig. 5.1.1. Concept of Lidar measurement

항공레이저측량의 원리는 항공기에 레이저펄스 송수신기, GPS수신기 및 관성항법장치를 탑재하여 비행방향을 따라 일정한 간격으로 지형의 기복을 측량한다. 이때 지상에 설치된 기준점으로부터 DGPS 기법에 의해 레이저 스캐너의 정확한 위치를 결정하고, 관성항법장치에서 레이저 펄스의 회전각을 측정 후, 지상에서 반사된 레이저 파의 정확한 수직거리를 결정하는 방법을 말한다. 미국을 비롯한 전 세계에서 수십만 km²의 지역이 라이다를 통해 관측되었으며, 이를 이용하여 실제적인 활용분야를 포함한 폭넓은 연구가 이루어지고 있다. 대부분의 항공라이다측량 장비에서 레이저 파는 일정한 순서로 비행방향을 가로질러 이동하여 측량대상지역을 포괄하게 되며, 이러한 동작은 비행기의 진행방향에 의해 반복 측량된다.

제 2 절 다중빔 음향측심기를 이용한 정밀 수심측량

해저 정밀지형측량은 다중빔 음향측심기(MBES: Multi-beam Echo Sounder)를 이용하여 일정한 방사각(Swath Angle)을 갖는 수십 개 이상의 빔을 수중에서 수신하여 한 번에 수심의 2~7배 정도 범위의 자료를 취득하는 수심측량 방법이다. 상대적으로 매우 조밀한 해저면의 수심값을 취득하여 종래의 수심측량보다 해저면의 지세와 수중 구조물의 형태를 자세히 파악할 수 있다.

다중빔 음향측심은 고성능 음향측심기와 이를 지원하는 여러 센서류를 사용하는 시스템이므로 해상특성을 고려한 조사계획의 수립과 각 장비에 대한 사전 테스트가 이루어져야 한다. 이에 따라 현장 및 조사항목의 기초자료를 수집, 분석하고 조사구역에 대한 측선배치 및 선속계획을 수립하였으며, DGPS 및 각종 센서에 대한 장비 테스트는 시험탐사시 실시하였다. 현장 조사시 양질의 측심 데이터 취득을 위한 파라미터 조정을 실시간으로 수행하고, 수심보정을 위한 음속 측정과 조위관측 등은 병행하였다. 현장조사를 통하여 저장된 다중빔 수심자료는 각종 보정을 포함한 자료처리과정을 거친 후 최종 수심도를 작성하였다.

국제수로기구(IHO) 특등급 수준에 부합하는 Reson사의 Seabat 9001 다중빔 음향측심기를 이용하여 탐사를 수행하였으며, 수심측량 결과 역시 이에 상응하는 수준을 만족하였다. Seabat 9001은 발진 주파수 455kHz에 수직 빔 폭 1.5°의 부채꼴형 음파 빔을 송출한다. 60개의 빔을 동시에 수신하며, 이때 수직 빔 폭은 15°, 수평 빔 폭은 1.5°이다. 따라서 전체 측심 폭은 90°이고 수심의 약 2배에 이른다. 60개의 빔이 5cm의 측심 분해능으로 측심값을 획득하며, 조사선박의 측선 항행과 위치 측정을 위해 Wide Area DGPS 시스템을 사용하였다. 사용된 GPS는 Navcom의 StarFire 시스템이다. Wide Area 방식은 광역기준망에서 처리된 정밀 위치정보를 위성망을 통하여 GPS에서 단독으로 수신함으로써 이동국과 상대적으로 가까운 거리에 별도의 Reference 기지국 없이도 정밀한 위치값을 얻을 수 있다. 조사시 사용한 StarFire는 C-Nav NET-1, NET-2망을 사용하여 해상에서 오차 0.1m 이내의 정밀 위치를 측정한다. 조사선박의 위치측정값은 선박에 설치한 컴퓨터에서 구동하는 Hypack 이라 불리는 수로측량 전문 프로그램과 연결되어 계획하고 GPS와 연동하여 조사선의 항행을 유도하며, 다중빔 음향측심기와 모션센서, 자이로컴파스의 데이터를 취득한다. 측선간격은 측심 전 영역을 포함하도록 수심과 소나 지향각(roll angle)에 따라 조정하였다.

10m 이상의 수심지역에 대해서는 다중빔 소나 지향각을 0°로 장착하여 자료의 신뢰도를 높였으며 측선간격은 10~30m로 측량하였으며, 10m 이내의 선박 접근이 어려운 낮은 수심지역에 대한 조사를 수행하기 위하여 소나 지향각을 40~45°로 장착하고 10~40m의 측선간격으로 측량하였다.

제 3 절 육도-해도 접합을 통한 정밀 지형도 작성

육도-해도 접합을 위해서는 지상과 바다가 동일한 수직기준면에 의하여 산정된 지형과 수심을 나타내야 하므로 수직좌표계의 기준점 통일이 필요하다. 지형 및 수심자료의 지리좌표계 변환시 수직좌표의 기준을 인천 평균해면을 기준으로 환산함으로써 두 자료의 접합을 수행하였다. 또한 정확한 접합을 위하여 조간대 영역에서 충분히 중첩되는 지형정보 및 수심자료 획득을 위하여 측량 시점을 사리 간조 및 만조시에 맞추어 함께 수행하였다.

폭풍해일 및 침수범람 예측의 경우 국지적으로 발생하는 침수지역을 예측해야하므로 그 지역의 평균해면을 기준으로 침수범람지역을 예측하여야 한다. 따라서 인천 평균해면을 기준으로 한 표고 및 수심을 대상지역 평균해면을 기준으로 환산하기 위하여 인천 평균해면과 대상지역 평균해면의 상관관계를 밝혀내야 한다. 이를 위해 대상지역에 파고조위계 설치를 통한 조위관측을 통하여 산출한 대상지역 평균해면과 인천항 평균해면의 차이를 통해 대상지역 평균해면고로 변경하여 예측모델의 입력 자료로 사용하고 있다.

이러한 방법으로 부산, 마산, 여수의 육도-해도 접합을 통해 작성한 정밀 지형도 DEM (Digital Elevation Map)은 Fig. 5.3.1과 같다. 또한 Fig. 5.3.2에서는 정밀 지형도상 침수범람이 가능한 예상지역을 보여주고 있다.

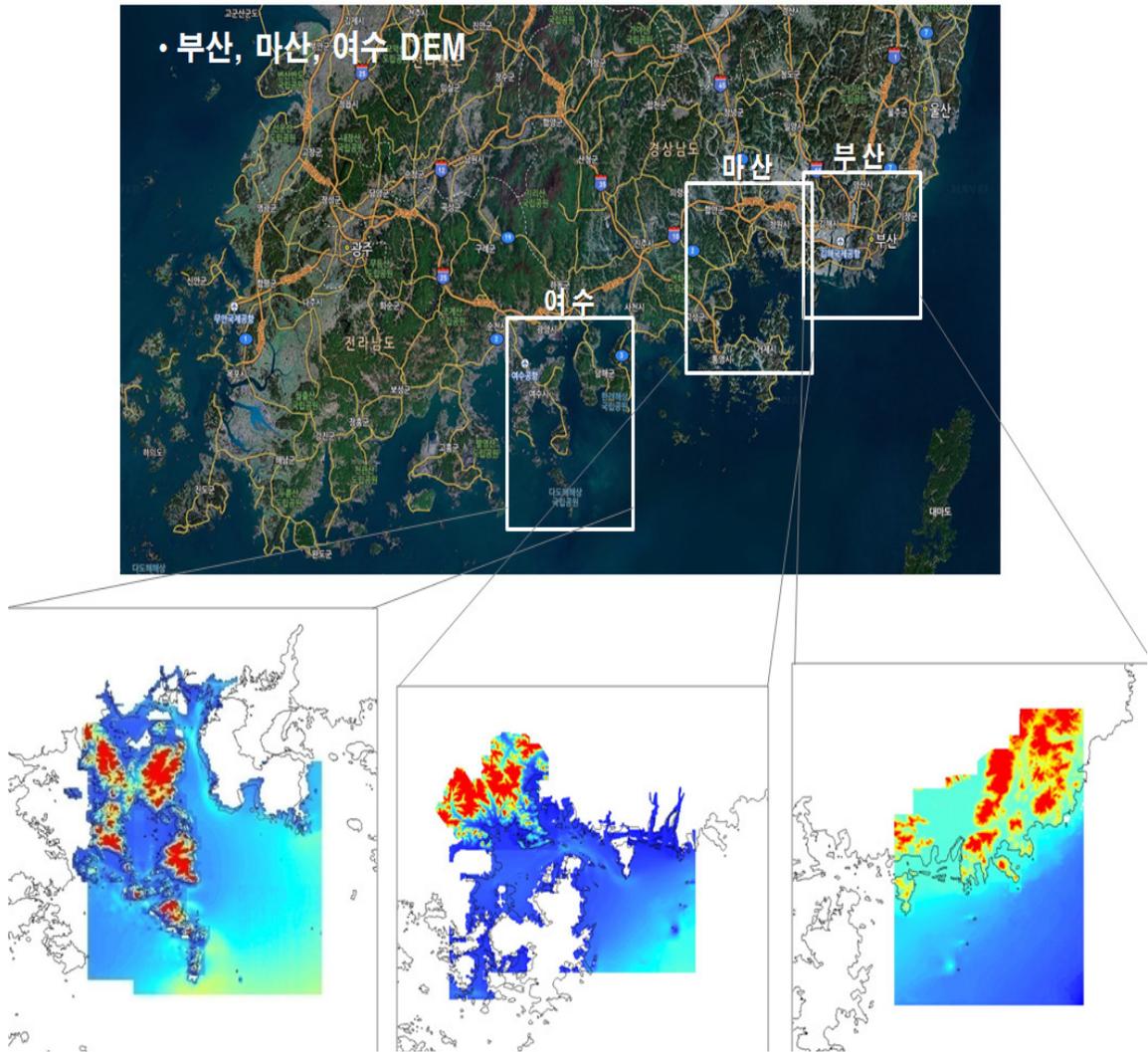


Fig. 5.3.1. High-resolution topographical map of Yeosu, Masan and Busan

육도-해도 접합을 통해 작성한 정밀 지형도는 폭풍해일 및 침수범람 예측모델의 정확성 향상을 위한 정밀 입력자료로 사용되고 있으며, 입력자료 정밀도 향상에 따른 예측결과의 향상을 보여주고 있다. 나아가 정밀 지형도의 GIS기반 3차원 공간분석을 통하여 경사도 및 체적변화 등의 산정을 통한 형태학적 변화량을 살펴봄으로서 추후 해양환경 관측결과와의 연계한 분석을 통하여 연안 관리 및 모니터링에도 효과적으로 활용될 수 있다.

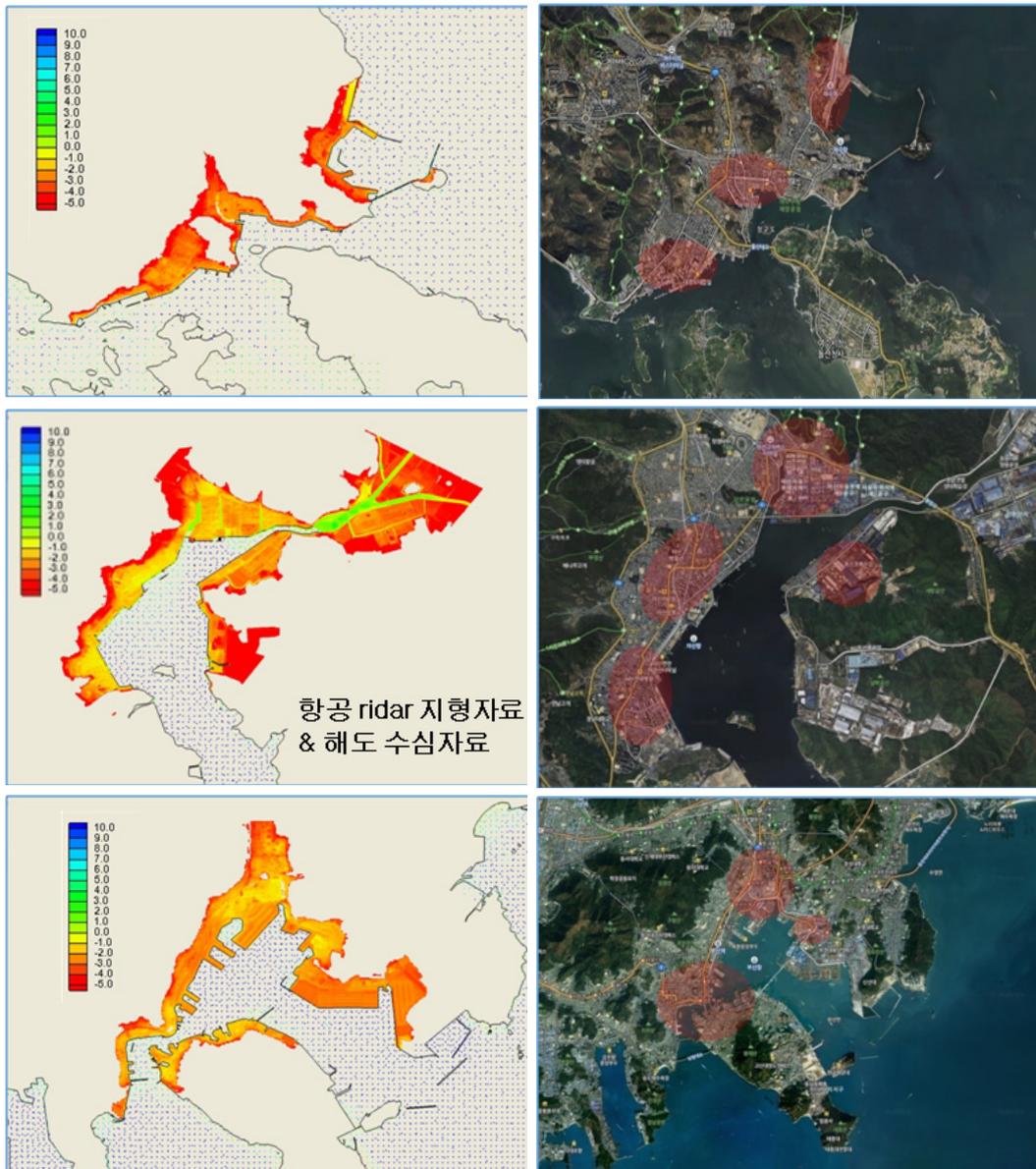


Fig. 5.3.2 Estimate of flood inundation areas

제 6 장 태풍해일 침수범람 예측

제 1 절 예측결과 검증을 위한 정밀 해일고 산정

1. 관측자료에 따른 해일고

해일고 검증은 관측자료와 비교를 통해 검증할 수 있는데, 공간적 검증은 관측자료 미비에 따라 어려움이 있으므로 대상지역 국립해양조사원 기준조석관측소의 정점별 비교를 통해 검증이 가능하다. 다만, 해일모의 정확성 확보를 위해 범람예측 대상지역을 비롯한 인근지역에서도 비교·검증이 필요하다.

우리나라는 1960년대부터 연안에 설치된 30여개소의 기준조석관측소에서 조석관측을 실시하고 있으며, 현재 국립해양조사원에서 운용하고 있다. 조석관측자료는 1분 및 1시간간격의 자료로 제공하고 있는데, 1분 자료의 경우 2002년 이후 제공되고 있으며, 이전 자료는 검조기록지에 표시된 아날로그 자료를 1시간 간격으로 독취하여 제공하고 있다.

기준조석관측소에서 관측된 해수면은 조석, 기상조건, 해류, 파랑, 밀도변화 등 다양한 요인에 의해 결정된 것이고 예보조위는 조석에 의한 해수면 변화를 나타내므로 관측해수면에서 예보조위를 뺀 잔차조위는 조석이외의 영향에 의한 해수면 변화를 의미한다. 잔차조위는 대부분 기상조건에 의해 초래된 해면변화이므로(Pugh, 1987) 태풍시 발생한 잔차조위는 폭풍해일과 같은 의미로 사용되고 있다(윤용훈, 1999).

이러한 폭풍해일의 정량적 추정에 필요한 조석편차를 산출하기 위해서는 정확한 조석예측이 선행되어야 하는데, 강용균(2004)은 이를 위해 고려할 사항을 제시하였다. 우선 장주기 조석을 고려한 조석기준면과 관련하여, 월평균 해면변위의 계절적인 변화는 년도마다 조금씩 다르다는 점이 고려되어야 하고, 조석예측을 위한 조화상수가 정확해야 한다는 것이다.

Fig. 6.1.1은 태풍 'MAEMI(0314)'의 영향으로 발생한 마산의 해일고를 1분 자료와 1시간 자료로 분석한 결과이다. 1분 자료와 1시간 자료에 의한 해일고는 최대해일고의 크기와 발생하는 시점에서 큰 차이를 보이고 있다. 또한, 1분 자료의 경우 마산항의 태풍 'MAEMI(0314)'시 해일고가 238 cm로 나타났으나, 1시간자료의 경우

해일고가 186 cm로 나타났다.

이처럼 해일고 분석에 있어 관측자료의 1시간 자료와 1분 자료의 차이가 극명하며, 1시간 관측자료로부터 발생된 해일고를 파악할 경우 실제 발생된 해일고에 비해 과소평가 될 것으로 사료된다.

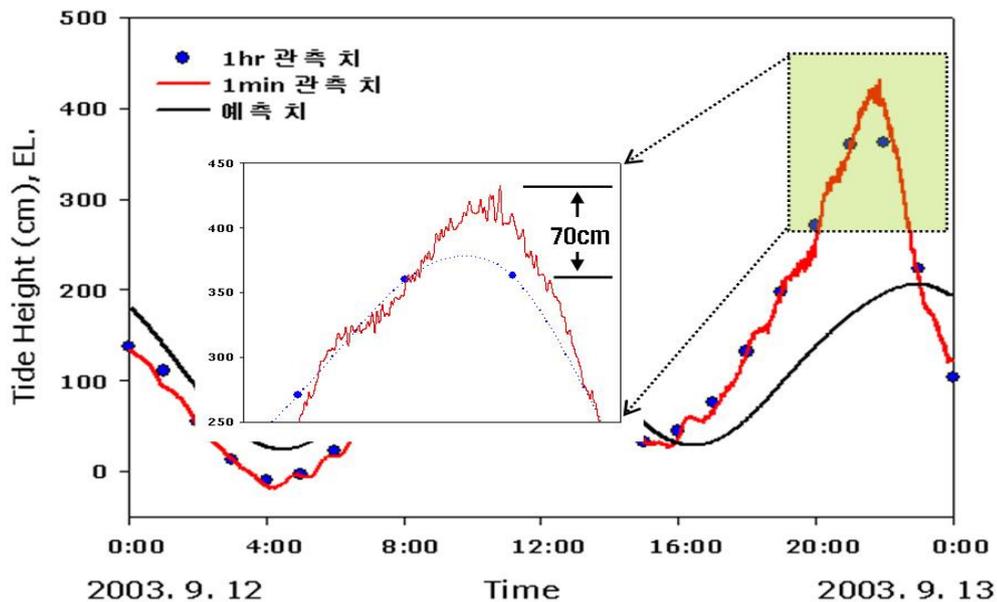


Fig. 6.1.1. Comparison of typhoon MAEMI(0314) surge height

2. 디지털 영상처리기법을 활용한 해일고 산정

그러나 2002년 이전 관측자료는 아날로그 자료인 검조기록지와 이를 독취한 1시간 자료만이 존재하고 있어, 폭풍해일과 관련된 연구에 적합한 검증자료를 확보하기는 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서 검조기록부를 이미지로 변환하고, 영상처리기법을 적용하여 아날로그 자료를 디지털 자료로 변환함으로써 태풍시기의 해일고 산출에 활용하고자 한다.

패턴 인식은 대상 영상에 포함된 물체의 특징을 인식하는 영상자료 처리과정으로 색 분석과 경계추출 방법을 이용하여 대상의 경계를 분석하는 방법이다. 영상추출 기능을 향상시키기 위하여 이미지 강화 기능인 대조도(contrast)를 통해 밝은 부분은 더욱 밝게, 어두운 부분은 더욱 어둡게 되며 관측조위를 표시하는 선은 더욱 선명한 색을 나타낸다. 이미지 강화가 완료되면 영상의 상태를 확인하여 프로세스를 종료한다.

Fig. 6.1.2는 패턴 인식을 활용하여 해안선을 분석한 예시이며, 영상의 Profile을 분석한 것은 영상의 상태가 좋은 경우 가시광선 영역에서 해안은 파란색 계열의 값이 높게 나타나며, 육지는 빨간색 계열의 값이 높게 나타난다. 즉 해안과 육지의 경계는 파란색과 빨간색이 교차하는 부분이 된다. 원 영상에서 RED 계열의 값이 BLUE 계열의 값보다 높은 경우 대상지역을 녹색으로 나타내는 RED 패턴분석에 의해 육지와 바다의 경계를 쉽게 판단할 수 있다. 디지털 영상처리기법의 주요과정의 개략적인 활용방법은 다음과 같다.

○대조도(Contrast) 이미지 강화 : 대조도는 영상의 어두운 부분과 밝은 부분 사이의 빛 세기의 차이를 측정하여 밝은 부분은 더욱 밝게 어두운 부분은 더욱 어둡게 설정함으로써 대상물의 인식도를 높인다. 그러나 대조도의 값의 차이가 크면 오히려 원영상의 질을 떨어뜨리므로 적절한 대조도 값을 사용하여야 한다.

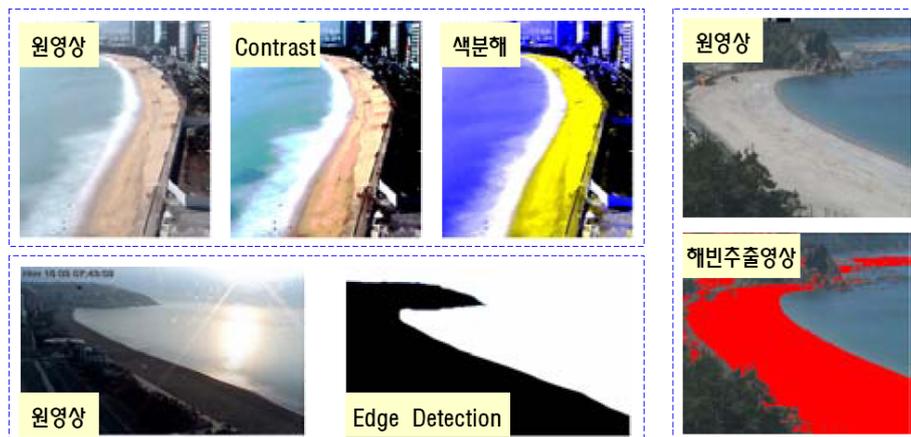


Fig. 6.1.2. Digital image processing of coastal line

○색 분석(Hue) : 관측 기록선 고유의 특성을 분석하기 위하여 Red, Green, Blue의 값을 원색을 나타내는 색조로 변환하고 대상물의 고유색이 나타내는 경계를 이용하여 관측 기록선을 추출한다. 색조 분석의 경우 Red, Green, Blue를 비교하여 최대값에 따라 각각의 대표색으로 변환된다. Red의 값이 크면 Hue 칼라는 노란색과 적색의 값을 나타내며, Green 값이 크면 녹색의 형태를 나타내며 Blue의 값이 크면 청색의 값으로 나타난다.

○Edge Detection : 화소에서 색의 농도가 급격하게 변하는 지점을 Edge라 하며, 이러한 Edge들을 추적하여 관측치를 추출한다. Edge 추출방법은 각각의 화소에서 함수의 변화량을 조사하는 미분 연산을 사용한다.

○에러 Marking : 색분석 영상의 오차는 대부분 sink나 peak로 분류된다. Sink

는 더 높은 값으로 둘러싸여 있는 내부의 영역으로 depression 또는 pit라고도 한다. 이에 반해 peak는 더 낮은 값으로 둘러싸여 있는 영역이다. GRID 자료의 보정 알고리즘은 cell-by-cell 단위로 처리된다. 연산의 진행방향은 우하단 cell에서부터 오른쪽에서 왼쪽으로, 하단에서 상단으로 이동한다. 자료의 peak 오류와 sink 오류를 판단하기 위한 허용범위를 지정하여 각 셀 값이 허용범위 이상이면 오류로 처리하고 인접 셀과의 경사를 계산하여 평균값을 오류 셀의 보정값으로 사용한다. 이러한 영상처리기법을 이용하여 검조기록지를 분석하는 과정은 다음과 같다(Fig. 6.1.3).

국립해양조사원 검조기록지에 표시된 아날로그 자료를 활용하기 위해 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 태풍의 영향에 있었을 것으로 예상되는 충분한 시기에 대하여 일정기간별로 촬영하였다.

각각의 시기별로 그림파일로 저장한 후 편집프로그램을 이용하여 태풍 영향기간 동안의 관측자료를 확인할 수 있도록 시계열파일 형태로 조합하였다. 이렇게 생성한 태풍기간의 시계열 관측조위는 해당연도의 1시간 관측자료의 조화분해를 통해 생성한 해당기간의 예측치와 동일 편집프로그램(Surfer, CAD 등)에 중첩한 후 최대 해일고를 득취할 수 있다.

그러나 최대 해일고만 획득할 경우 사진촬영 및 편집에 따른 오차를 확인할 수 없는 단점이 있다. 또한 폭풍해일 연구시 최대 해일고 뿐만 아니라 태풍내습에 따른 시간별 해일양상도 매우 중요한 사항이지만 이를 검토할 수 없다. 이에 본 연구에서는 서술한 바와 같이 시계열파일 형태로 조합된 image를 디지털 영상처리기법을 적용하여 연속 관측자료를 획득한 후, 이를 이용하여 천문조 성분을 제거함으로써 해일고를 산출하였다.

본 연구에서는 태풍 내습시 1시간 및 1분 자료에 따른 해일고 차이 및 특성을 고찰하고, 과거 검조기록지의 아날로그 원시자료로부터 디지털 이미지로 변환하고 영상처리 기법을 활용하여 연속시계열 해일고를 추출하는 방법을 제시하였다.

해일고 관측자료는 그 중요성이 매우 크지만 막대한 노력에 비해 얻을 수 있는 성과가 제한이 있기에 관련연구가 부족한 실정이다. 하지만 본 연구에서 적용한 방법의 개선 및 보완을 통해 태풍시기 뿐만 아니라 과거 조위관측자료에 대한 재검토 및 재생산이 가능할 것으로 사료된다.

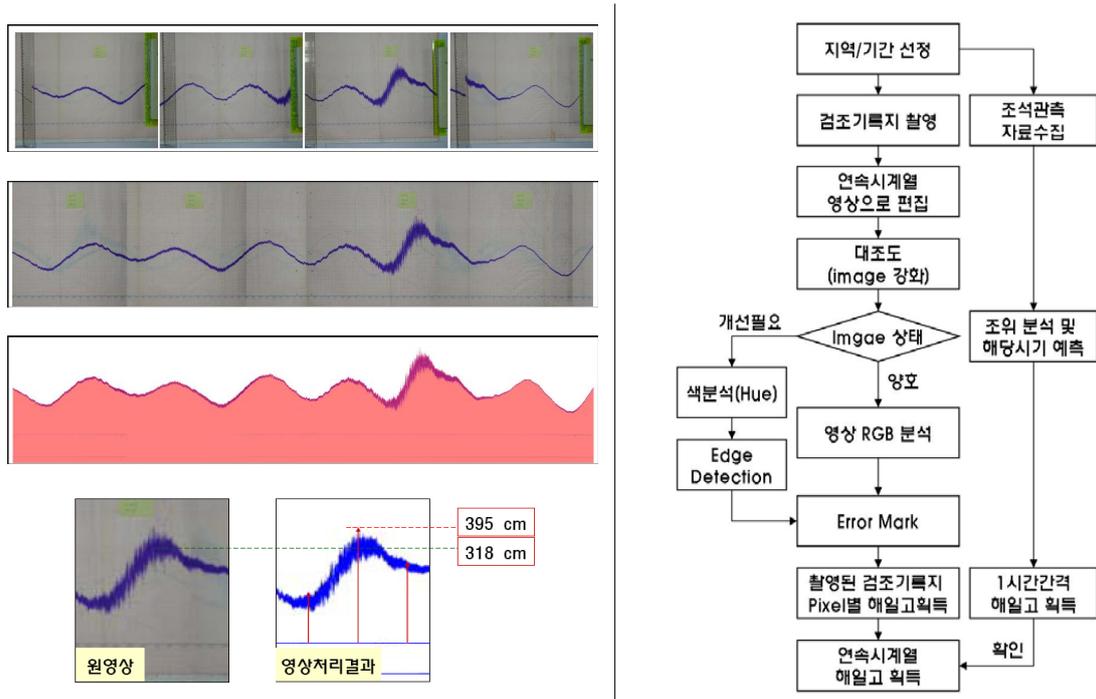


Fig. 6.1.3. Process of calculation of surge height from image processing

제 2 절 해일 침수범람 수치모델 분석 및 적용 (INSPECT 모형)

1. 모델 개요

해일침수범람의 주요 원인인 폭풍해일을 예측하기 위해서는 기본적으로 태풍에 의한 기압강하, 해상풍, 진행속도 등에 의한 해수면 변화양상을 충분히 재현할 수 있어야 한다. 또한 해일 발생에 따라 수반되는 범람 및 침수에 대한 평가를 위해서는 육지이동경계(wet/dry) 처리가 가능해야 한다.

해양환경 및 지역적 특성에 따라 다양한 양상으로 나타난다. 따라서 해양환경을 반영하기 위해서는 필요에 따라 조석과 파랑 등을 결합한 모의가 필요하며, 지역적 특성을 반영하기 위해서는 서남해안과 같이 복잡한 해안선 및 섬지역에 대한 해석이 필요하다.

우리나라에 적합한 재해도 작성을 위해서는 태풍에 의한 기압강하, 해상풍, 진

행속도 등을 감안한 폭풍해일과 육지이동경계 처리 및 월류가 고려되는 범람이 동시에 모의가 가능해야 하며, 재해도 작성을 위한 조위면은 서남해안의 경우 대조기 만조시에도 일부 저지대가 범람됨을 감안하여 원칙적으로 약최고고조위를 고려하는 것이 타당할 것이다. 또한, 해일침수범람에 따른 연안구조물, 해안침식 및 연안 인접 하천 등도 지역적 특성을 고려하여 반영하는 것이 바람직할 것이다.

해일 및 범람모의가 가능하며 국제적 인지도가 있는 수치모형은 ADCIRC, FVCOM, INSPECT, SLOSH, MIKE Series 등이 있으며, 기존의 해수유동 모형에 기반하여 해상풍을 고려하는 모형도 다양하게 연구되고 있다.

해일침수범람 수치모델의 적용성과 사용성을 충분히 검증한 후 우리나라 해안의 특성을 충분히 재현하는 모형으로 선정하는 것이 바람직하며, 필요시 추가적인 모형의 개발 및 보완도 필요하다.

연구에서는 마산해역의 최신 정밀측량성과를 활용하여 해일침수범람 모의에 필요한 입력자료를 구축하며, INSPECT 모형을 적용하여 해일 및 범람결과는 관측 해일고 및 기존 관련연구와 비교를 통해 검증한다.

2. INSPECT 수치모형

해일 거동은 천수 장파이론으로 유도된 연속방정식과 운동방정식에 의해 수치 해석한다. 천수 장파이론은 파고 H 와 파장 L 의 비 H/L (상대파고) 및 수심 h 와 파장 L 의 비 h/L (상대수심)가 모두 작다. 압력은 정수압 분포이고, 수평의 유속 성분 u, v 는 연직방향으로 일정한 분포로 가정한다. 즉, 해저에서 수면까지를 연직 방향으로 적분한 방정식으로 표현된다.

연속방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

운동방정식

$$\frac{du}{dt} = +fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

여기서, h : 순간 총수심

u, v : x, y 방향의 유속 성분

- p : 압력
 f : Coriolis parameter
 A_h, A_v : 수평 및 연직 와동점성 계수

해면 전단응력

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

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

여기서, ρ_a : 공기 밀도($1.22 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$)

C_D : 해면 마찰 계수

W_x, W_y : 해상 10 m의 x, y 풍속 성분

저면 전단응력

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{h^{7/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{h^{7/3}} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

여기서, ρ_w : 해수 밀도(1.03 g/cm^3)

g : 중력가속도

n : Manning의 조도계수

해일산정에 사용하는 해상풍은 자유대기의 바람을 해면마찰을 고려하여 변환한 것이다. 기압분포는 Myers(1954)의 식을 사용하며 다음과 같다.

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)$$

여기서, $P(r)$: r 지점의 기압(hPa)

P_c : 태풍 중심기압(hPa)

ΔP : 기압심도(대기압과 태풍 중심기압의 차)

r_0 : 태풍반경(중심부터 경도풍 최대인 지점까지의 거리)

r : 태풍중심으로부터의 거리

태풍 주변의 기압분포는 동심원으로 가정하게 되며, 임의 지점의 기압 $P(r)$ 과 태풍중심으로부터의 거리 r 의 함수로서 주어진다. 태풍중심으로부터의 거리 r 과 그 지점의 법선방향의 기압경사 $\partial P/\partial r$ 이 주어지면, 경도풍속 $U_1(r)$ 을 산정할 수 있으며, Myers 기압분포를 대입하면 다음과 같다.

$$U_1(r) = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(\frac{r_0}{r}\right)}$$

태풍의 이동에 따른 풍속 $U_2(r)$ 은 경도풍속 $U_1(r)$ 과 태풍의 진행속도 V 에 비례하는 것으로 가정하면 다음과 같다.

$$U_2(r) = \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V$$

태풍모델에 의한 해면마찰의 영향을 받지 않는 자유대기의 바람은 경도풍속 $U_1(r)$ 과 $U_2(r)$ 을 벡터 합성하여 계산된다.

자유대기로부터 해면까지 기압경도력, 전향력, 마찰력이 역학적으로 균형을 이루며 고도에 따라 풍향, 풍속은 변화한다.

바람의 연직분포를 나타내는 해석해가 에크만에 의해서 유도된다. 그러나 에크만 해석해는 와동점성계수가 고도와 함께 변화하지 않는다고 가정한 해이므로 해면과 같은 난류경계층에서는 바람의 대수분포를 가정한 이론을 병용한다. 경계층에 에크만해가 성립하는 에크만 경계층과 전향력을 무시하여 연직방향으로 바람의 대수분포를 가정한 접지경계층에 분할해서 적용하였다.

위도에 따라 다르게 나타나는 경도풍과 해상풍의 관계를 산정하기 위하여 0.60 ~ 0.70 정도의 풍속 저감율을 곱하고, 30° 정도의 각도에서 저기압부에 풍향을 편향시킨다.

육상으로의 처오름을 고려하지 않으면 해안경계를 연직벽으로 가정하여 연안에 직각인 유량을 0으로 한다. 또한 계산의 안정성을 확보하기 위해서 해안경계 외해측 해저면의 노출이 발생되지 않도록 한다. 육상으로의 처오름(조간대 모의)을 고려

3. 모형의 수립 및 검증

광역 격자망인 계산영역 Area-1은 태풍의 발생 및 진행경로의 재현을 충분히 반영하기 위해 한반도, 일본, 대만 등을 포함한 동중국해를 대상영역으로 하였으며, Area-8의 최소격자간격은 30 m로 대상지역의 지형을 반영할 수 있도록 구성하였다.

계산영역의 수심자료 및 해안선자료는 국립해양조사원에서 발행하는 수치해도, 수치지형도 및 수심측량자료 등을 활용하였다. 총 8개 영역 모형의 격자 크기와 격자수는 표와 같다. 영역간 접속경계는 2분할법과 3분할법을 결합하여 적용하였다.

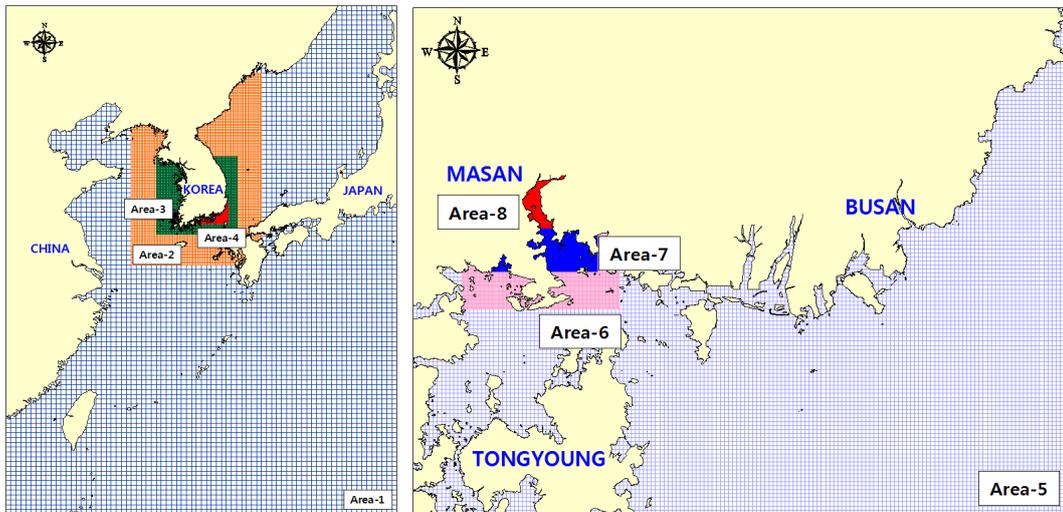


Fig. 6.2.3. Nesting Grid Information

Table 6.2.1. Grid size per nesting area

구분	$\Delta x = \Delta y$ (m)	$N_x \times N_y$
Area-1	29,160	82×110
Area-2	9,720	82×124
Area-3	4,860	102×102
Area-4	1,620	127×85
Area-5	540	166×130
Area-6	180	121×154
Area-7	60	253×319
Area-8	30	312×348

수치모형의 검증을 위한 대상태풍은 태풍 MAEMI(0314)와 RUSA(0215)로 선정하였다(Fig. 6.2.4). 모형 신뢰성 확보를 위하여 부산, 가덕도, 통영에서 태풍

MAEMI(0314), RUSA(0215)에 대하여 검증 수행하였다. 태풍 RUSA(0215)와 MAEMI(0314)의 내습 시간별 바람장과 해일고 분포도는 그림과 같다.

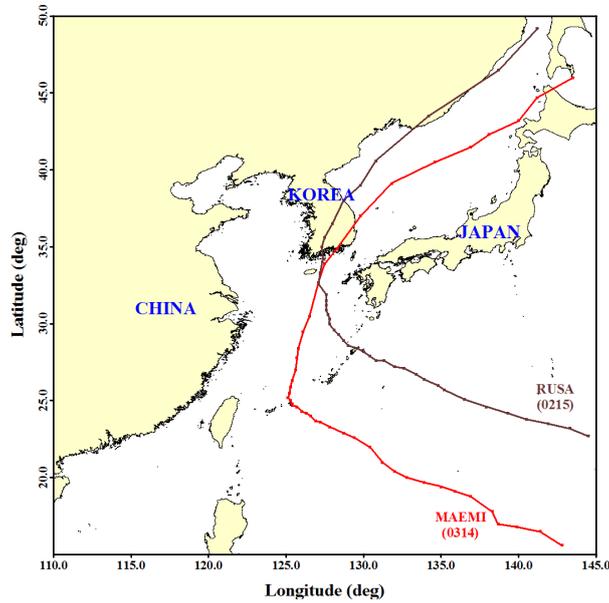


Fig. 6.2.4. Typhoon path: MAEMI(0314), RUSA(0215)

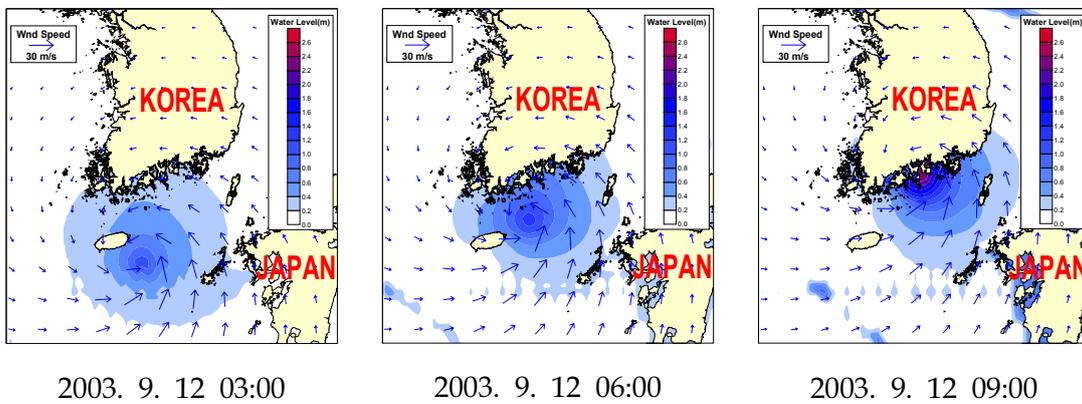
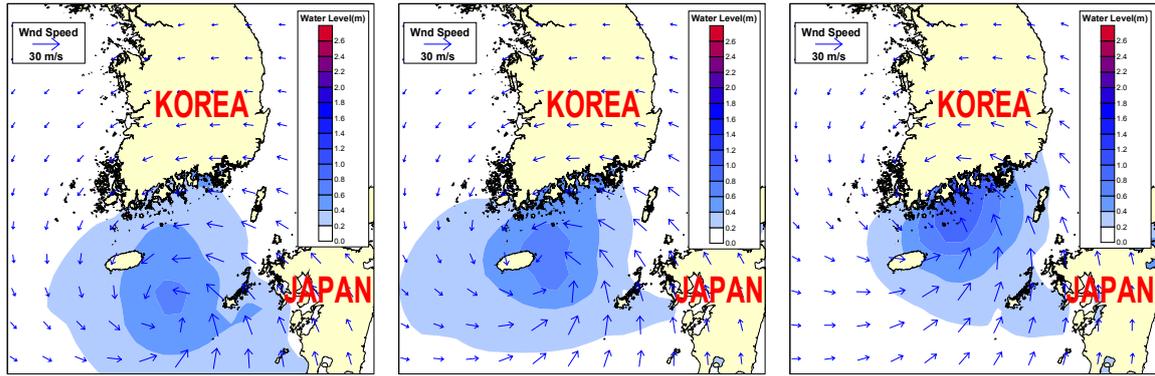


Fig. 6.2.5. Wind field and surge height of typhoon MAEMI(0314)



2002. 8. 31 00:00

2002. 8. 31 03:00

2002. 8. 31 06:00

Fig. 6.2.6. Wind field and surge height of typhoon RUSA(0215)

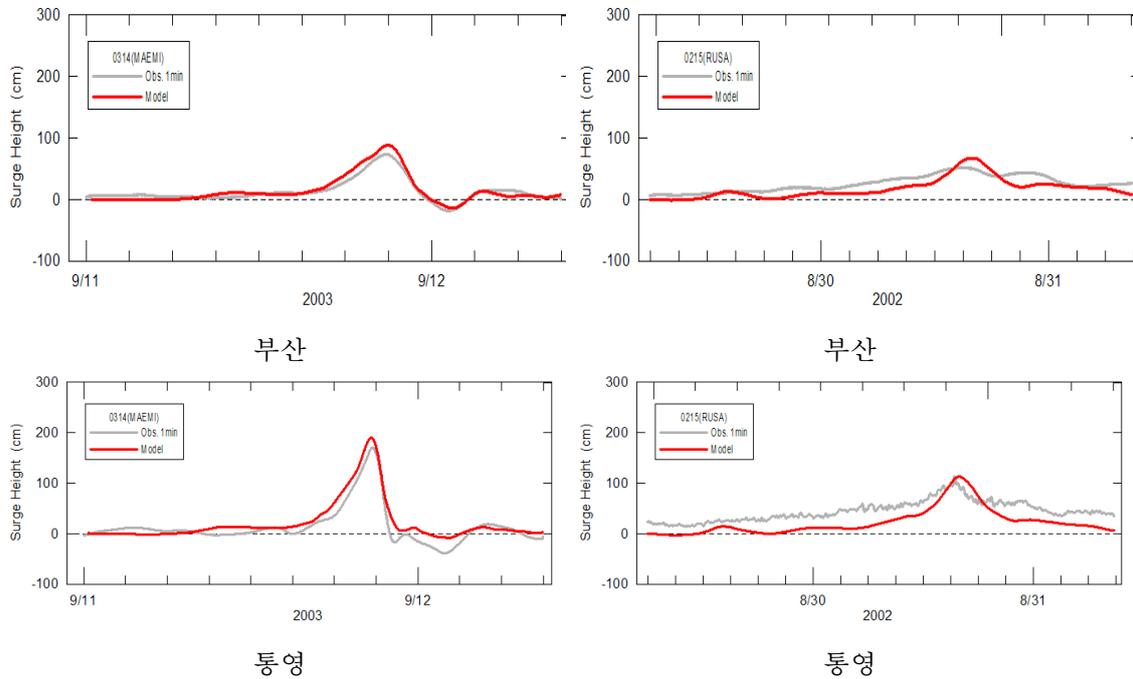
Table 6.2.2 Comparison of surge height at each site (unit: cm)

(a) 태풍 MAEMI(0314)

구분	부산	통영	마산
관측치	73.3	170.1	219.5
계산치	87.7	190.0	219.2

(b) 태풍 RUSA(0215)

구분	부산	통영	가덕도
관측치	51.5	113.6	68.3
계산치	67.1	112.7	81.8



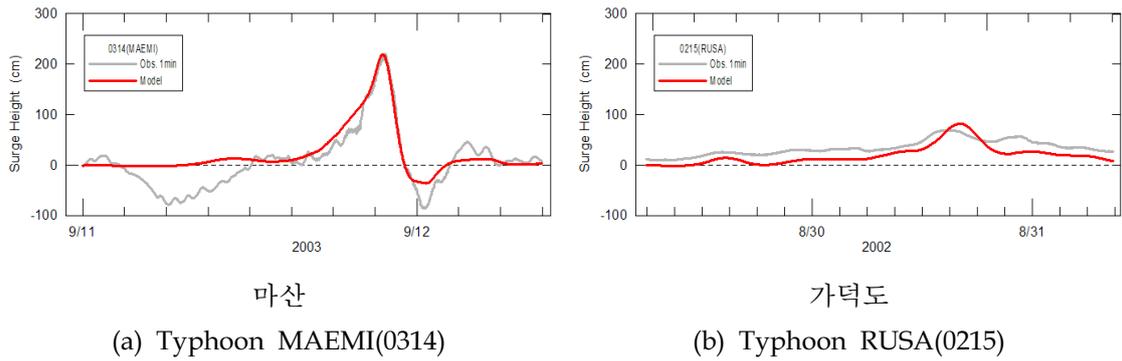


Fig. 6.2.7. Time-series graph of surge height

4. 태풍 주요인자에 따른 반응도 실험

해일침수범람을 모의하기 위해서는 대상영역에 대한 수심도, 육상표고, 해안선 등의 지형정보와 함께 주요외력으로 작용하는 태풍의 특성을 모형에 반영하기 위한 기상정보로 입력자료도 확보되어야 한다. 또한 추가적인 계산조건으로 태풍 경로를 고려한 계산시간, 바닥마찰계수, 항력계수, 확산계수, 수면에서의 해상풍에 대한 저항감 및 방향, 입출력에 대한 시간간격 등이 있다.

수치모의 외력을 결정하는 태풍의 기상정보 형식은 계산모형에 따라 공간분포(기압장, 바람장 등) 또는 태풍 주요변수(중심기압, 최대풍속, 최대풍 반경 등)로 입력할 수 있다. 모형의 적용성 및 대상지역의 특성 반영 등을 위해서는 이러한 입력자료가 매우 중요하므로 충분한 자료수집 및 검토가 선행되어야 한다.

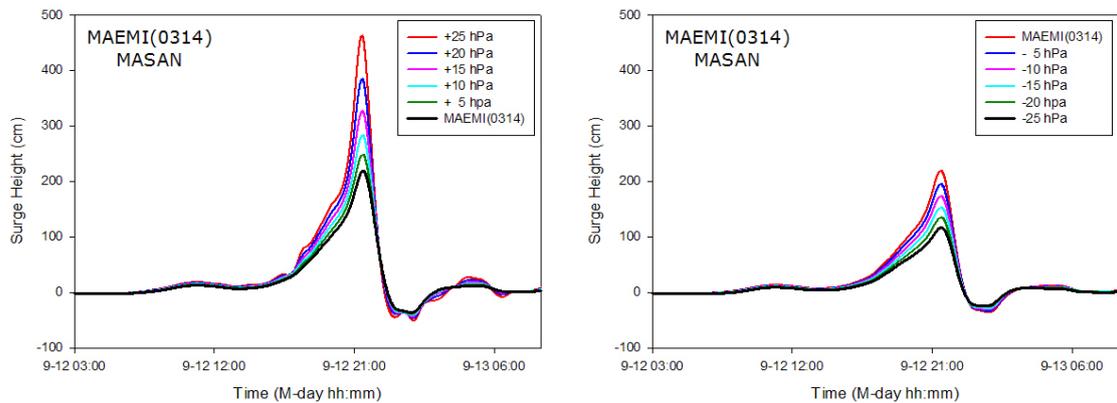
해일침수범람 수치모의 결과에 영향을 미치는 주요변수에 관련된 기존 연구를 수집하여, 각 변수에 대한 주요 내용 및 특성을 분석하여 반응도 실험에 적용한 주요변수를 선정한다.

대상지역에 적용된 해일침수범람 모의 결과와 다양한 주요변수 변화에 따른 해일 특성의 변화 양상을 파악하여 대상지역 태풍 내습시 피해양상 예측에 활용할 수 있는 기초자료로 제공할 수 있을 것이다. 태풍의 주요인자에 따른 반응도 실험은 마산지역에 극심한 피해를 유발한 태풍 매미를 기준으로 다음과 같이 구성하였다 (Table 6.2.3).

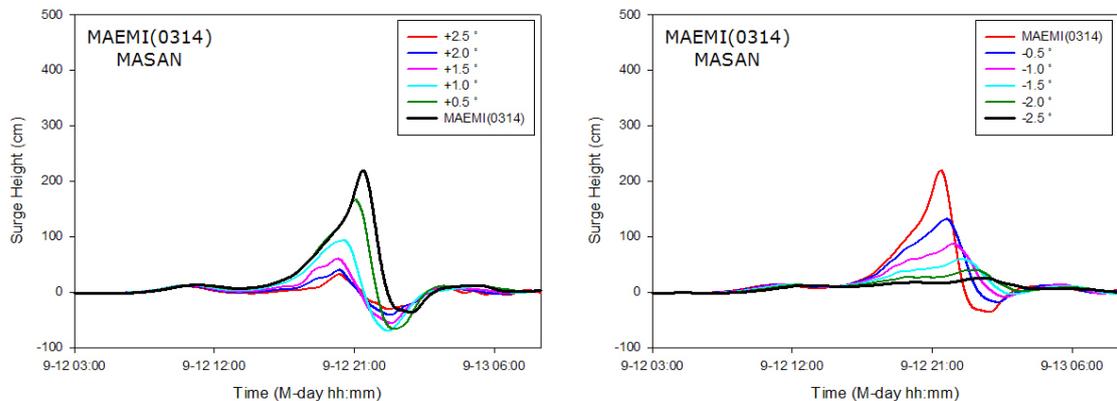
Table 6.2.3 Sensitivity analysis following typhoon information

구 분	민감도 실험 Cases		비 고
중심기압 (hPa)	11 cases	+25, +20, +15, +10, +5, 0 -5, -10, -15, -20, -25	중심기압 증감
이동경로 (경도, °)	11 cases	+2.5, +2.0, +1.5, +1.0, +0.5, 0 -0.5, -1.0, -1.5, -2.0, -2.5	이동경로 좌우이동
최대풍반경 (km)	7 cases	+30%, +20%, +10%, 0%, -10%, -20%, -30%	최대풍반경 증감

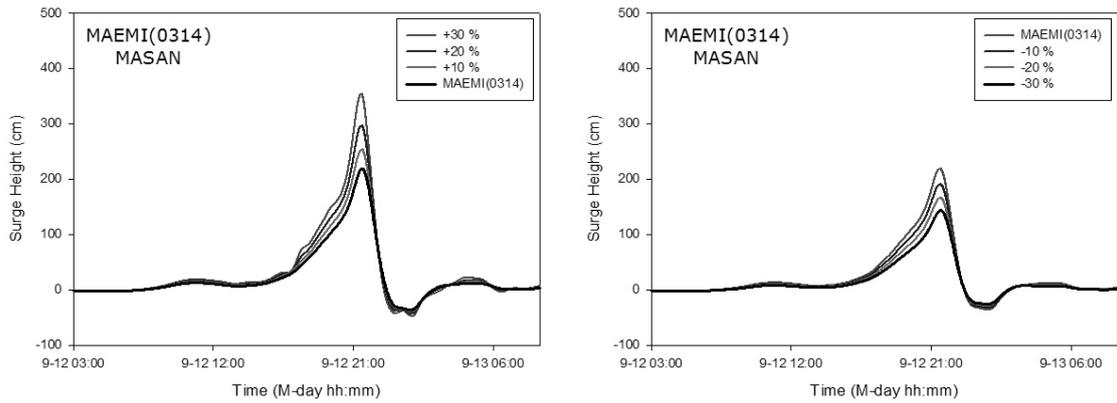
태풍의 주요 변수인 중심기압, 이동경로, 최대풍반경, 내습각도, 태풍의 이동속도에 대한 케이스별 마산에서의 해일고를 결과에 따르면, 대상지역에 영향을 미치는 주요 변수는 일차적으로 태풍의 이동경로인 것으로 파악된다. 즉, 대상지역에 해일의 영향은 태풍의 이동경로에 따라 결정되며, 해당 태풍의 중심기압, 최대풍반경 등에 따라 해일의 크기가 결정되는 것으로 사료된다.



(a) 중심기압에 따른 해일고 변화



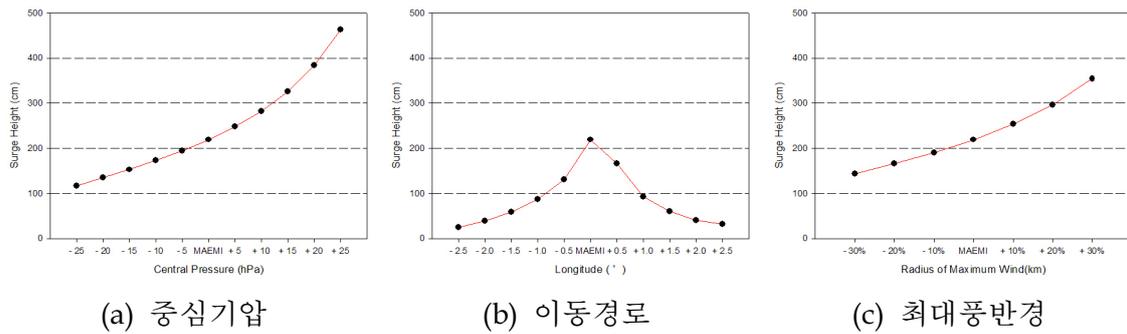
(b) 이동경로에 따른 해일고 변화



(c) 최대풍 반경에 따른 해일고 변화

Fig. 6.2.8. Surge height variation following to typhoon parameters

태풍의 변수에 따른 마산에서의 해일고 변화양상은 Fig. 6.2.9와 같다.



(a) 중심기압

(b) 이동경로

(c) 최대풍반경

Fig. 6.2.9. Result of sensibility analysis

태풍의 주요변수에 대한 민감도 분석과 더불어 침수범람의 주요한 영향을 미칠 것으로 판단되는 격자망 크기와 지형 표고자료에 따른 범람양상도 파악하였다.

격자망 크기는 해일고 검증에 적용한 30m를 비롯하며, 180m에 대한 해일범람 결과를 파악하였으며, 지형 표고자료의 경우에는 1:1,000 지형도와 Lidar 관측자료 (2008년 관측성과)를 활용한 입력자료로 범람양상을 파악하였다.

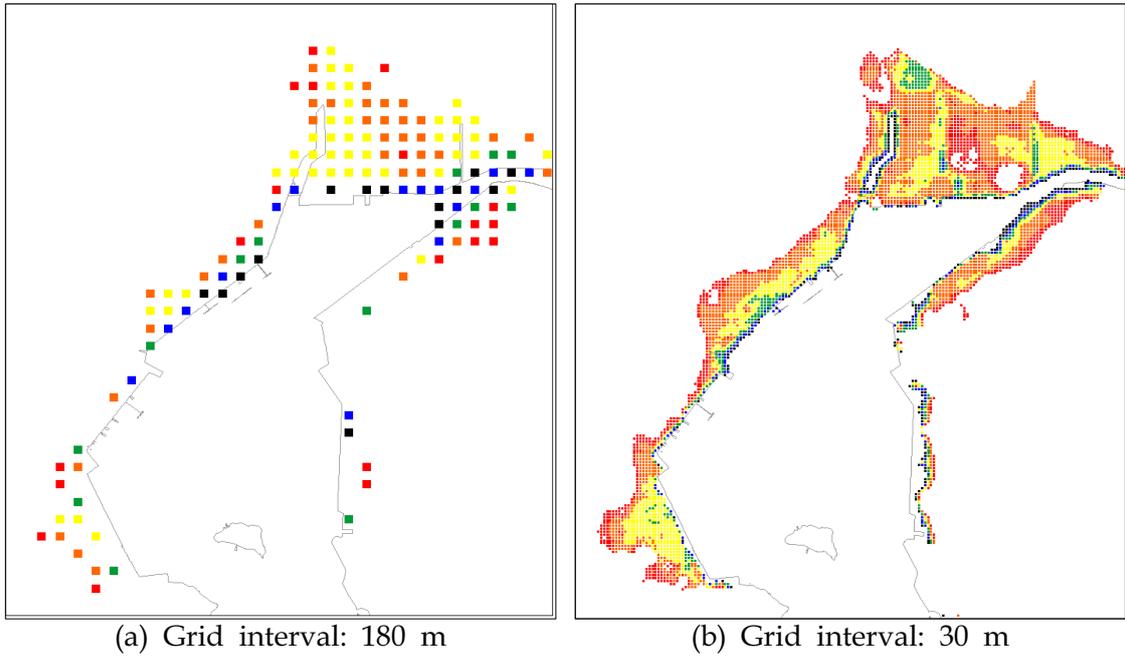
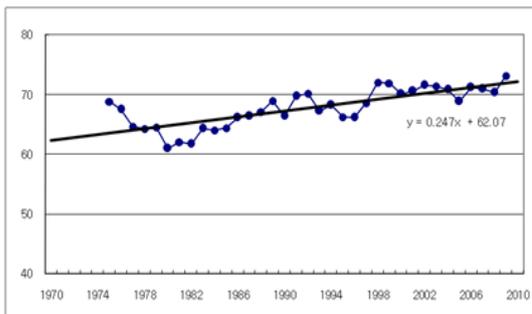


Fig. 6.2.10. Different inundation results by the different grid size

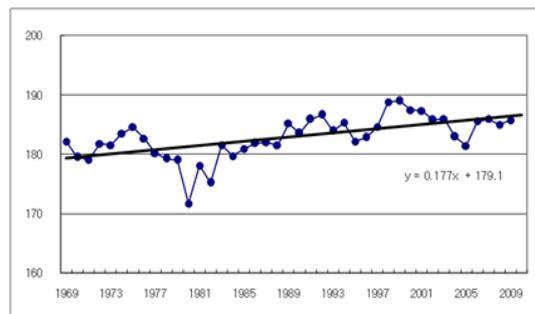
5. 부산 및 여수지역 침수범람위험도 작성

(1) 부산 및 여수지역 평균해수면 변화

빈도별 재해도 작성시 평균해수면 변화를 고려하는 것은 매우 중요한 사항이다. 따라서 부산과 여수의 1시간 조석관측자료를 활용하여 각각의 연평균해수면 변화율을 파악하였고, 4대 분조 합의 변화도 파악하였다.



(a) 연평균해수면(부산)



(b) 연평균해수면(여수)

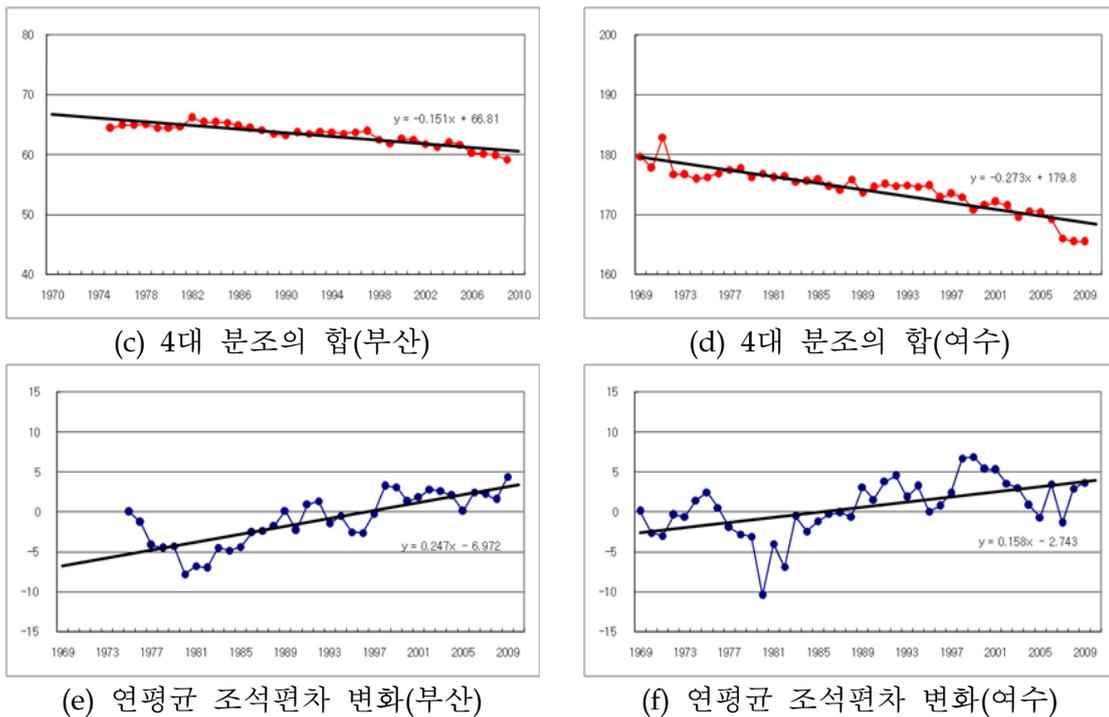


Fig. 6.2.11. Analysis of tide level at Busan and Yeosu

관측치에 대한 연평균 산술평균에 의해 산정된 연평균해수면은 부산과 여수에 서 기존연구와 동일하게 증가하는 양상을 나타내고 있다. 그러나 연별 조석관측자료의 조화분석을 통해 4대 분조 합은 연평균해수면과 반대로 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 경향은 추가로 분석된 연평균 조석편차 변화를 통해 설명할 수 있을 것으로 사료된다. 조석편차는 비조석성분인 태풍, 기상변화 등의 원인으로 야기되는 것으로 연평균 조석편차가 증가하고 있는 것은 과거보다 현재의 조석환경에서 부산과 여수가 비조석성분이 증가하고 있음을 알 수 있다. 부산과 여수지역에 피해와 큰 해일을 유발한 태풍 50개를 선별하여 해일 및 범람모의를 적용하였다. 마산의 경우는 조석관측기간이 짧아 과거 태풍의 해일고를 산정할 수 없어서 부산과 여수에 적용한 태풍을 그대로 적용하였다. 수치모의는 약최고고조위의 조건에서 적용하여, 조석 영향과 상관없이 해일고가 크게 발생하면 범람이 발생할 수 있도록 하였다.

Table 6.2.4에 제시한 바와 같이, 2000년 이후 대상지역에 극심한 피해를 유발한 태풍 매미, 루사 등에 의해 큰 해일이 유발됨을 알 수 있다. 또한 태풍 사라(5914) 내습시 모의결과에 따르면 상당히 큰 해일고가 발생했음을 확인할 수 있어, 당시의 피해를 짐작할 수 있다.

(2) 해일고 극치분석 및 침수범람 범위 추정

지역별 산정된 해일고를 통해 빈도별 해일고를 산정하였다. 극치분포 해석에 사용되는 극치분포함수는 홍수량, 강우량, 풍속, 파고, 조위 분석 등의 분석 대상자료에 따라 매우 다양하게 제안되고 있으며, 분석하고자 하는 극값의 성격 또는 지역적 특성에 따라 범용적으로 사용되는 극치분포 함수가 다른 양상을 보인다. 어떤 극치분포 함수를 사용하여도 원하는 신뢰도를 확보한다면, 기본적으로 분석과정상의 문제는 발생하지 않는다(정신택 등, 2008).

본 연구에서는 일반적으로 극치분포 해석에 널리 이용되는 GEV(Generalized Extreme Value), Gumbel, Weibull 분포함수를 선정하여 수행하였다.

Table 6.24. Maximum surge height at each site about major 50 typhoons

태풍번호	통영	가덕도	울산	마산	부산	여수	태풍번호	통영	가덕도	울산	마산	부산	여수
5111	19.4	14.7	10.9	20.4	13.0	24.0	9007	34.8	33.9	26.4	32.9	32.1	40.2
5209	23.4	17.3	11.9	25.6	15.6	33.9	9109	39.3	61.8	68.1	47.5	68.0	42.5
5412	8.7	11.3	16.1	6.5	13.5	7.7	9112	41.2	38.6	22.8	56.9	34.4	42.5
5609	16.9	20.5	26.4	15.0	22.3	17.3	9119	13.7	24.1	33.2	21.5	29.5	15.6
5612	51.0	84.7	103.2	60.0	101.9	43.5	9219	60.4	42.4	22.5	55.6	36.9	49.9
5707	116.0	103.8	51.6	182.0	83.4	91.6	9307	71.5	123.1	122.6	112.6	119.1	95.6
5914	148.2	160.2	107.0	171.9	153.2	132.7	9414	25.9	21.4	12.9	24.3	19.0	39.2
6015	20.3	15.1	9.8	21.5	13.4	27.9	9429	108.5	80.4	41.5	115.7	67.2	108.2
6104	119.7	81.2	41.1	109.4	69.0	99.1	9503	108.2	72.0	34.1	112.9	56.5	118.3
6304	105.5	70.3	34.8	112.8	57.9	112.9	9711	64.8	50.0	27.7	76.0	41.4	68.2
6411	30.2	21.6	12.6	30.5	18.5	55.4	9809	54.4	39.3	22.4	51.9	33.3	89.5
6807	47.5	64.3	66.5	53.5	70.0	37.3	9905	25.5	19.9	10.9	26.0	16.7	46.6
7207	63.2	46.0	26.2	66.4	39.2	95.7	9907	26.8	19.0	11.9	25.5	16.7	42.6
7310	36.7	28.8	19.5	36.4	25.9	51.5	9918	10.9	16.2	19.7	10.0	18.2	12.9
7408	40.1	54.8	40.0	41.7	51.9	39.3	0012	16.7	12.9	8.3	14.4	11.6	23.6
7910	43.8	32.1	19.8	48.7	27.9	56.5	0014	99.4	102.3	49.1	172.1	83.1	66.5
8013	8.0	10.3	12.1	8.1	11.1	6.6	0205	13.9	11.9	8.4	12.7	10.8	18.9
8118	42.5	59.4	54.7	38.7	59.6	42.4	0209	10.2	9.0	4.8	9.9	7.6	16.9
8410	40.7	50.7	47.3	42.2	51.8	43.8	0215	112.7	81.8	42.7	121.4	67.1	146.2
8520	24.2	19.4	12.9	20.1	17.3	31.4	0306	35.0	44.0	40.6	35.3	45.5	37.1
8605	65.4	55.3	38.2	60.0	51.9	66.8	0314	190.0	112.5	53.0	219.2	87.7	194.5
8613	47.4	36.0	21.0	44.8	31.2	66.1	0415	62.6	80.6	70.1	72.2	76.5	45.4
8616	34.4	28.4	20.5	33.8	25.4	39.1	0418	28.8	31.2	48.1	25.1	39.7	34.8
8705	99.8	67.8	34.8	117.0	55.8	131.5	0603	46.3	34.2	19.9	55.0	29.6	58.0
8712	76.4	119.2	118.5	90.0	128.2	65.2	0613	18.7	24.5	30.6	19.8	27.7	22.0

- GEV(Generalized Extreme Value) 방법

$$F(x) = \exp \left[- \left\{ 1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \right]$$

여기서, α : 규모 매개변수

β : 형상 매개변수

x_0 : 위치 매개변수

- Gumbel(EV1, The Extreme Value Type 1) 방법

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left\{ - \frac{(x-x_0)}{\alpha} \right\} \right]$$

여기서, α : 규모 매개변수

x_0 : 위치 매개변수

- Weibull 방법

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left\{ \frac{(x-x_0)}{\alpha} \right\}^{\beta} \right]$$

여기서, α : 규모 매개변수($\alpha > 0$)

β : 형상 매개변수($\beta > 0$)

x_0 : 위치 매개변수($x_0 \leq x < \infty$)

본 연구에서는 매개변수를 추정하는 방법으로 모멘트법(Method of Moments), 최우도법(Method of Maximum Likelihood), 확률가중모멘트법(Method of Probability Weighted Moments)를 사용하였다.

적합도 검정의 경우, 모집단의 확률분포형을 알지 못하면 기존의 확률분포형으로 모집단의 성질을 정확히 나타내기 어려우므로 대상 확률분포형에서 적절한 확률분포형을 선정하는 것 또한 매우 어렵다.

임의의 확률분포형에 대한 적합도 검정은 그 확률분포의 상대도수함수와 누가도수함수의 이론값과 표본값을 비교하여 판별하는 방법을 사용하고 있는데, 본 연

구에서 적합도 검정은 χ^2 -검정, Kolmogorov-Smirnov 검정, Cramer von Mises 검정 그리고 확률도시 상관계수(Probability Plot Correlation Coefficient) 검정 방법을 적용하여, 4가지 검정을 모두 통과한 확률분포형 중에서 최대, 최소 및 평균값을 제시하였다.

Table 6.2.5. Result of frequency analysis from INSPECT at Masan with major 50 typhoons

구분	MOM			MML			MPWM		
	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU
2	50.4	51.4	46.6	44.0	50.4	48.7	45.4	51.7	46.6
3	70.7	72.4	68.5	61.6	67.7	69.7	63.3	72.0	68.6
5	93.9	95.8	94.4	85.0	86.9	93.9	86.1	94.6	94.4
10	123.9	125.2	127.4	121.4	111.0	124.2	119.7	123.1	127.3
20	153.6	153.3	158.8	165.5	134.1	152.5	158.0	150.3	158.7
30	171.1	169.5	176.7	195.8	147.4	168.4	183.2	166.0	176.5
50	193.4	189.8	198.6	239.7	164.0	187.8	218.4	185.6	198.4
70	208.3	203.1	212.9	272.7	175.0	200.3	243.9	198.5	212.6
80	214.3	208.3	218.5	286.7	179.3	205.2	254.6	203.6	218.2
100	224.3	217.1	227.7	311.6	186.5	213.3	273.2	212.1	227.5
150	242.7	233.1	244.4	361.4	199.6	227.8	309.6	227.5	244.1
200	256.0	244.4	256.1	400.8	208.8	238.0	337.6	238.5	255.8
300	275.0	260.3	272.5	462.7	221.9	252.1	380.4	253.9	272.1
500	299.4	280.3	292.8	553.0	238.3	269.5	440.5	273.2	292.3
적합도	x00x	000x	000x	x000	0000	0000	0000	0000	0000

Table 6.2.6. Result of frequency analysis from INSPECT at Busan with major 50 typhoons

구분	MOM			MML			MPWM		
	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU
2	39.9	40.3	38.7	36.8	39.8	39.9	37.6	40.3	38.8
3	53.4	54.0	53.7	49.2	51.9	54.3	50.3	54.0	53.7
5	68.6	69.3	70.3	64.8	65.3	70.0	65.8	69.2	70.3
10	88.1	88.5	90.7	87.3	82.2	88.8	87.3	88.3	90.4
20	107.1	107.0	109.2	112.4	98.4	105.8	110.5	106.7	108.8
30	118.1	117.6	119.5	128.7	107.7	115.2	125.0	117.2	119.0
50	132.1	130.8	132.0	151.1	119.4	126.4	144.4	130.4	131.4
70	141.4	139.5	139.9	167.2	127.0	133.5	158.1	139.0	139.2
80	145.1	142.9	143.0	173.9	130.0	136.3	163.7	142.5	142.3

구분	MOM			MML			MPWM		
	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU
100	151.3	148.7	148.2	185.5	135.1	140.9	173.3	148.2	147.4
150	162.6	159.1	157.3	207.9	144.2	149.1	191.5	158.5	156.4
200	170.7	166.5	163.6	225.0	150.7	154.7	205.2	165.9	162.7
300	182.1	176.9	172.4	250.9	159.9	162.5	225.5	176.2	171.3
500	196.7	190.0	183.2	286.8	171.4	172.1	252.9	189.3	182.0
적합도	000x	000x	000x	0000	0000	0000	0000	0000	0000

Table 6.2.7. Result of frequency analysis from INSPECT at Masan with major 50 typhoons (surge height 1hr observation data)

구분	MOM			MML			MPWM		
	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU
2	32.4	32.6	33.4	30.8	32.4	33.9	31.1	32.6	33.8
3	40.2	40.6	42.3	38.1	39.4	42.5	38.5	40.5	42.2
5	49.0	49.4	51.4	47.0	47.2	51.2	47.5	49.3	50.8
10	60.3	60.5	61.7	59.7	57.0	61.1	60.0	60.3	60.4
20	71.3	71.2	70.5	73.7	66.4	69.5	73.2	70.9	68.6
30	77.7	77.3	75.2	82.6	71.8	74.0	81.5	77.0	73.0
50	85.8	85.0	80.8	94.8	78.6	79.2	92.6	84.6	78.1
70	91.2	90.0	84.2	103.5	83.0	82.5	100.4	89.6	81.3
80	93.4	92.0	85.6	107.1	84.8	83.7	103.6	91.6	82.5
100	97.0	95.3	87.8	113.2	87.7	85.8	109.0	94.9	84.5
150	103.6	101.4	91.6	125.1	93.1	89.4	119.3	100.9	88.1
200	108.3	105.6	94.3	134.1	96.8	91.9	127.0	105.1	90.5
300	115.0	111.7	97.9	147.6	102.2	95.3	138.4	111.1	93.8
500	123.5	119.2	102.3	166.1	108.8	99.4	153.8	118.6	97.7
적합도	000x	000x	000x	0000	0000	0000	x000	0000	0000

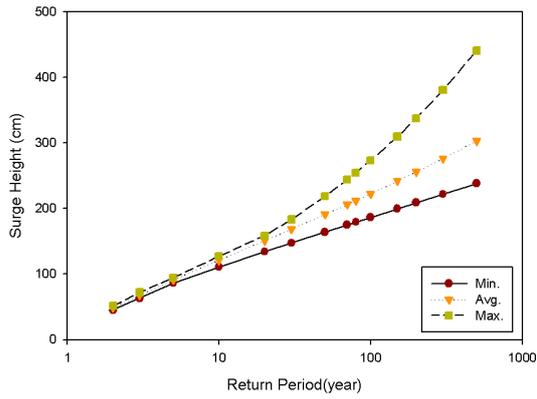
Table 6.2.8. Result of frequency analysis from INSPECT at Y대su with major 50 typhoons

구분	MOM			MML			MPWM		
	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU
2	50.8	51.4	50.0	47.9	50.9	51.2	48.0	51.4	50.4
3	67.1	68.0	68.2	63.1	65.6	68.8	63.3	67.9	68.3
5	85.6	86.6	88.3	81.7	82.0	87.8	81.9	86.2	87.9
10	109.3	109.9	112.6	108.1	102.7	110.5	108.0	109.2	111.3
20	132.4	132.3	134.5	136.9	122.4	130.8	136.0	131.2	132.4
30	146.0	145.1	146.6	155.1	133.8	141.9	153.6	143.9	143.9
50	163.1	161.2	161.1	179.9	148.1	155.2	177.4	159.8	157.8

구분	MOM			MML			MPWM		
	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU
70	174.5	171.8	170.4	197.4	157.4	163.6	194.0	170.2	166.7
80	179.0	176.0	174.0	204.6	161.1	166.9	200.8	174.3	170.1
100	186.6	182.9	179.9	217.0	167.3	172.3	212.6	181.2	175.8
150	200.5	195.6	190.5	240.9	178.4	181.9	235.0	193.6	185.8
200	210.5	204.5	197.9	258.8	186.4	188.5	251.7	202.5	192.8
300	224.6	217.2	208.0	285.7	197.5	197.7	276.7	214.9	202.4
500	242.7	233.1	220.4	322.3	211.6	208.8	310.4	230.6	214.2
적합도	xoox	xoox	xoox	xooo	xooo	oooo	xooo	xooo	xooo

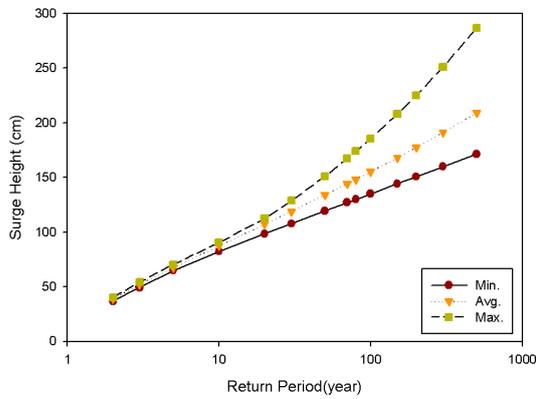
Table 6.2.9. Result of frequency analysis from INSPECT at Yeosu with major 50 typhoons (surge height 1hr observation data)

구분	MOM			MML			MPWM		
	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU	GEV	GUM	WBU
2	54.5	57.3	55.5	49.4	56.7	58.5	50.3	58.3	59.2
3	70.7	76.1	76.1	61.4	69.4	77.4	62.4	74.4	76.6
5	90.4	97.0	98.9	78.9	83.4	97.7	79.4	92.4	94.9
10	117.8	123.4	126.4	109.8	101.1	121.4	107.2	114.9	116.0
20	147.0	148.6	151.3	152.4	118.1	142.5	143.0	136.5	134.4
30	165.2	163.2	165.1	184.7	127.9	153.9	168.7	149.0	144.4
50	189.6	181.3	181.7	235.5	140.1	167.5	207.4	164.5	156.1
70	206.7	193.2	192.2	276.6	148.1	176.1	237.4	174.7	163.5
80	213.7	198.0	196.3	294.8	151.3	179.5	250.5	178.8	166.4
100	225.6	205.8	203.1	328.2	156.6	185.0	273.9	185.5	171.1
150	248.4	220.1	215.2	398.9	166.2	194.7	322.0	197.7	179.4
200	265.4	230.2	223.6	458.4	173.0	201.4	361.2	206.4	185.1
300	290.5	244.5	235.2	557.9	182.5	210.7	424.5	218.6	192.9
500	324.4	262.4	249.4	715.1	194.6	221.9	520.2	234.0	202.4
적합도	xooo	oooo	oooo	xxxx	xxox	xxox	xxxx	xxxx	xxxx

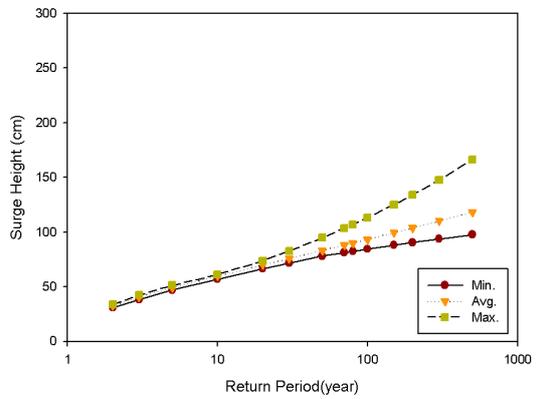


※ 마산 조석관측소는 2002년 12월부터 관측이 개시되어 자료기간이 짧음

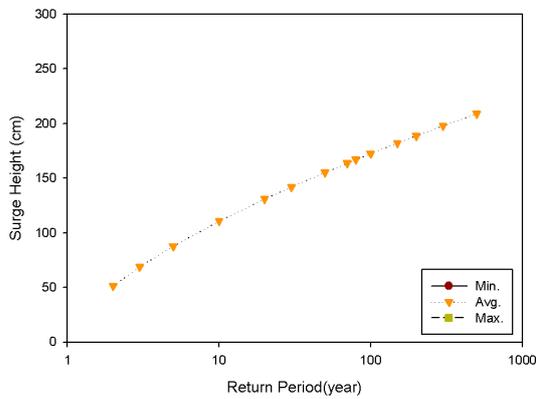
(a) 수치모의 결과 빈도분석(마산)



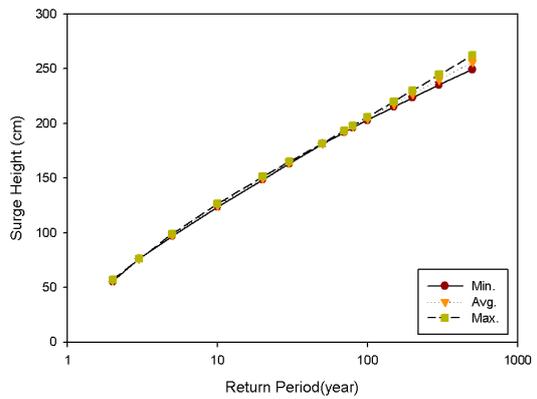
(b) 수치모의 결과 빈도분석(부산)



(c) 해일고(1hr 관측자료) 빈도분석(부산)



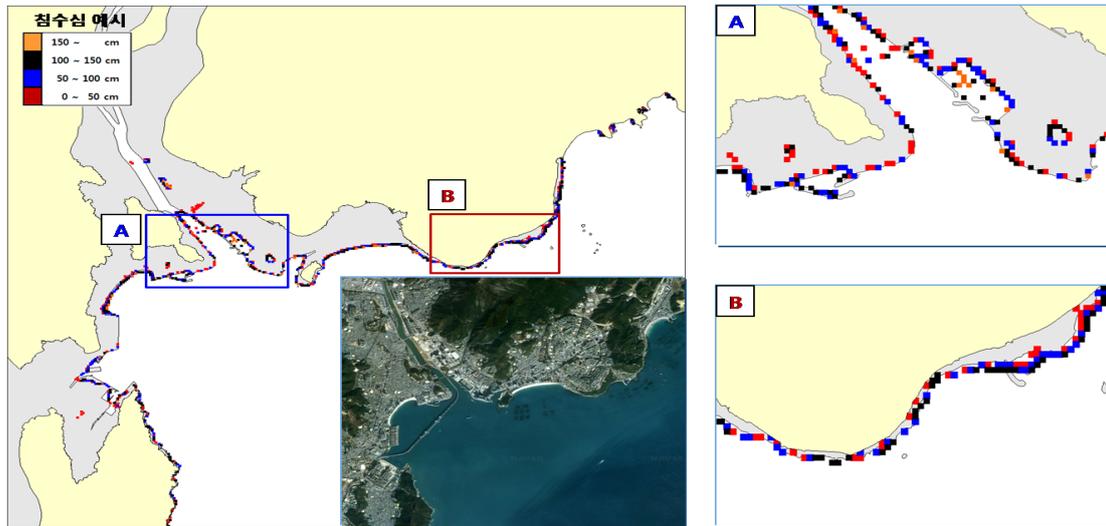
(d) 수치모의 결과 빈도분석(여수)



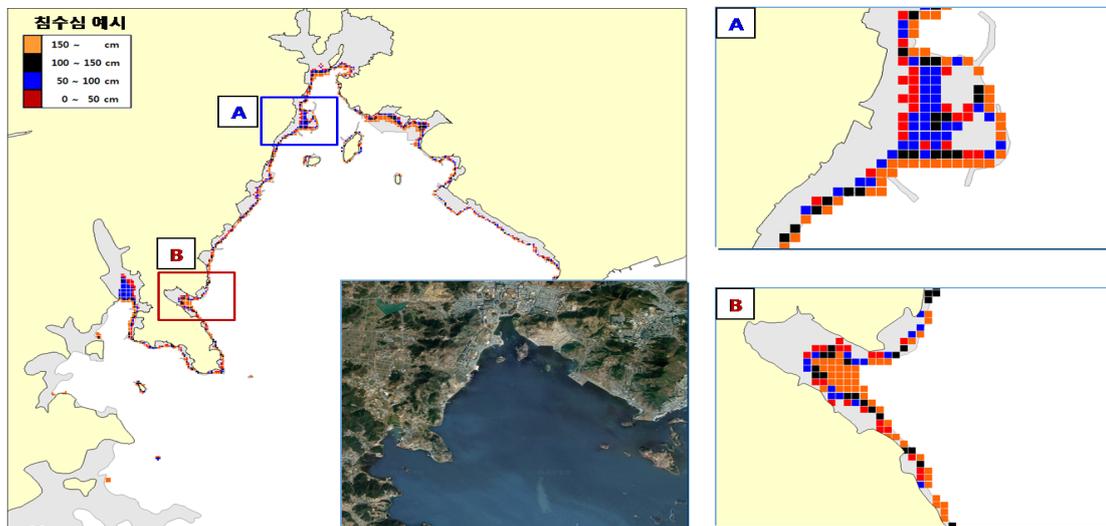
(e) 해일고(1hr 관측자료) 빈도분석(여수)

Fig. 6.2.12. Frequency analysis of surge height b/w observation and modeling

이상과 같은 부산 및 여수지역의 해일고 빈도분석결과와 과거 50개 영향태풍에 대한 수치모의 결과를 통해 부산 및 여수지역에 대한 침수범람 위험범위를 산정하였다. 이는 부산 및 여수지역에 50년 빈도 해일고에 해당하는 수치모의 결과의 범람 범위를 중첩하여 작성하였다(Fig. 6.2.13).



(a) BUSAN



(b) YEOSU

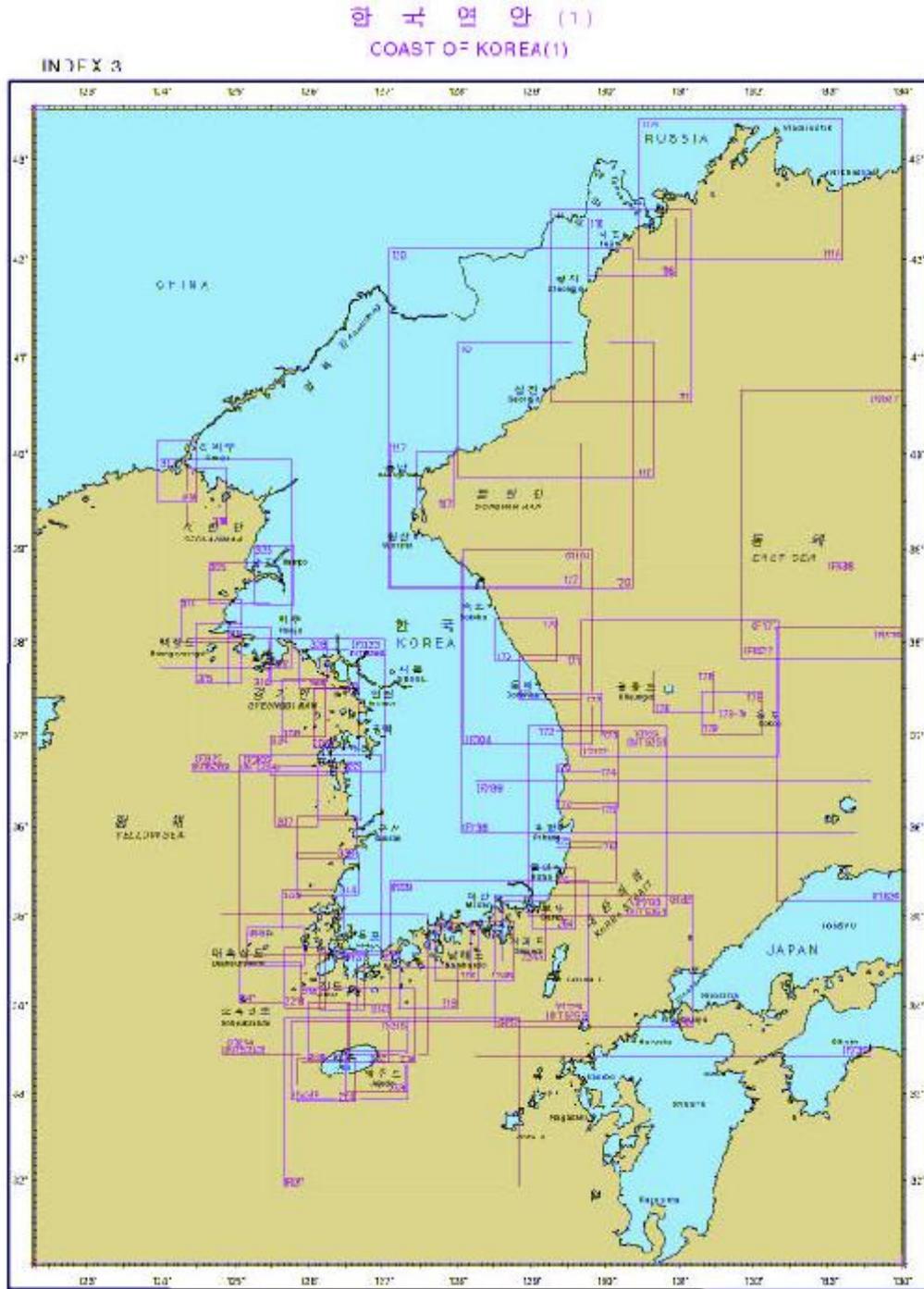
Fig. 6.2.12. Inundation result of Busan and Yeosu (50 year frequency's surge height)

제 3 절 해일 침수범람 수치모델 분석 및 적용(FVCOM 모형)

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 6.3.1)의 해도 원도자료에서 데이터를 취하고, 연안역을 벗어난 지역의 수심은 최병호(Digital Atlas for Neighboring Seas of Korean Peninsular, 1999, Fig. 6.3.2), 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 1000~5000개로 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.



24

Fig. 6.3.1. Digital bathymetry (NORI)

개선된 수심자료 데이터 베이스는 국립해양조사원의 300여 개의 수치해도를 사용하였으며, 각 수치해도의 축척과 범위 등의 특성에 대한 데이터 베이스도 함께 구축하였다(Fig. 6.3.1). 국립해양조사원에서는 종이해도 뿐만 아니라 전자해도와 수치해도를 발행하고 있다. 전자해도란 전자해도표시시스템(ECDIS)에서 사용하기 위

해 종이해도 상에 나타나는 해안선, 등심선, 수심, 항로표지(등대, 등부표), 위험물, 항로 등 선박의 항해와 관련된 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 디지털 해도를 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. Fig. 6.3.2는 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.

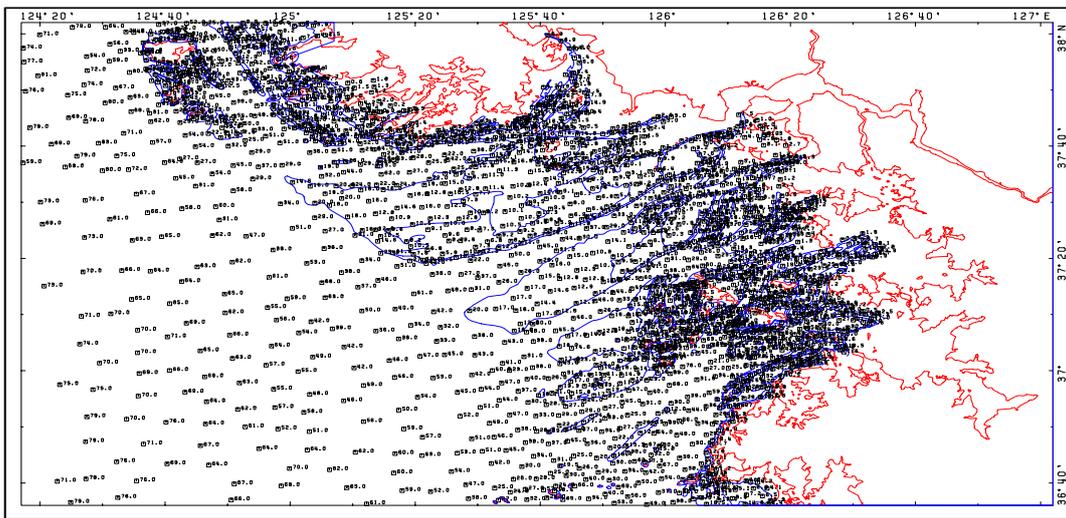


Chart A1258

Scale 1:250000

Fig. 6.3.2. Depth and costal line from digital bathymetry in Kyunggi bay

최병호(Digital Atlas for Neighboring Seas of Korean Peninsular, 1999)의 자료는 최병호 등이 1999년도에 발표한 수심자료로서 등심선을 주 자료로 하고 있으며 1분 간격의 자료가 황해 및 동중국해를 포함한 광역으로 제공되고 있다. 서승남(2007)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.

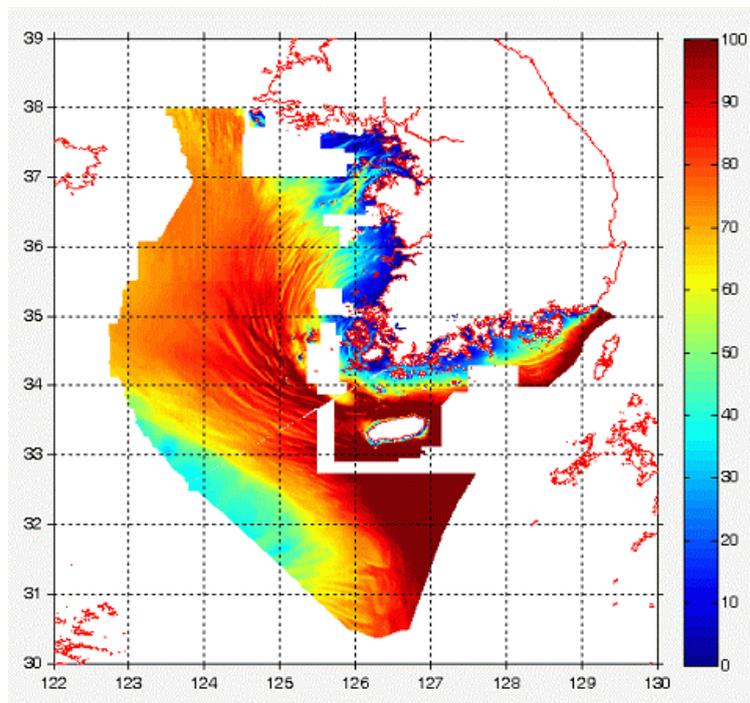


Fig. 6.3.3. 1 minute Bathymetry (NORI)

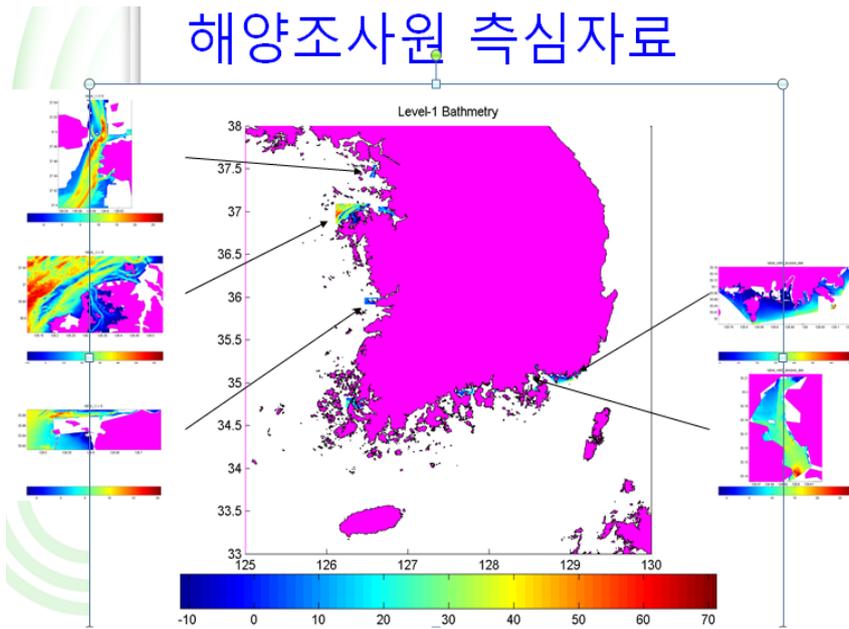


Fig. 6.3.4. Calibration of fine-grid depth using NORI's depth information

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

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 중심부근에서 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.

3. 태풍시 정밀격자 해상풍 모델

태풍은 일반적인 온대성 저기압과 고기압과는 달리 해면기압과 바람의 분포가 중심부근에서 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). Fig. 6.3.5는 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.

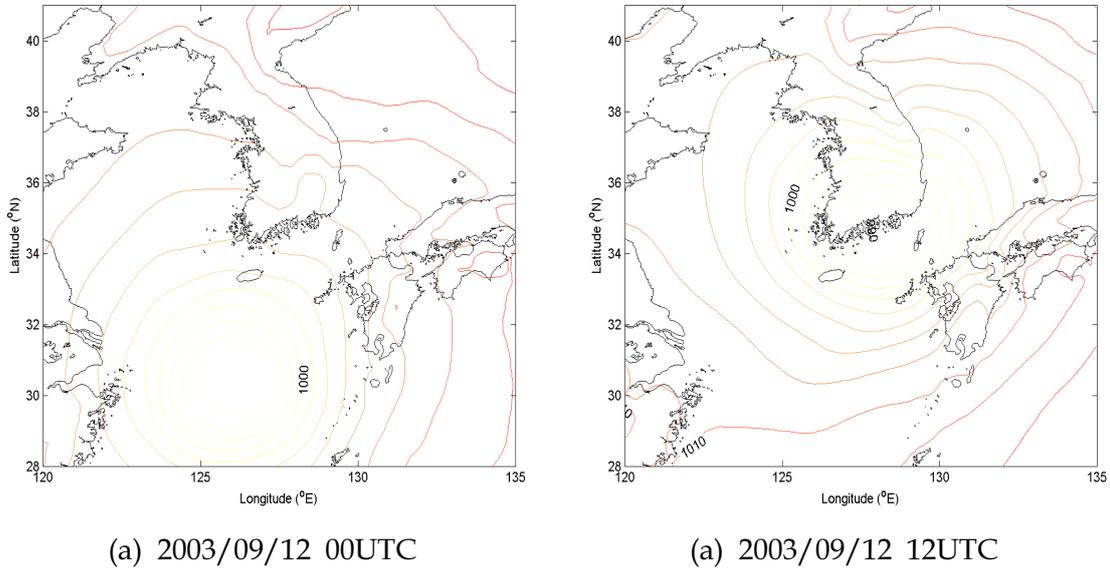


Fig. 6.3.5. Distribution of typhoon maemi's pressure from ECMWF

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 바람추정은 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 경험식으로 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

$$(P(r) - P_0)/(P_\infty - P_0) = Ae^{-B\frac{r_0}{r}} \quad (6.3.1)$$

② BRET-general model

$$(P(r) - P_0)/(P_\infty - P_0) = 1 - \left[1 + a\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right]^{-b} \quad (6.3.2)$$

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 (6.3.1)에서 $A=B=1$ 일 때는 Original Rankin vortex model (Schloemer, 1954)이 되고 식 (6.3.2)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

$$\frac{U^2}{r} + fU = \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (6.3.3)$$

여기서,

$$U = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r}} \quad (6.3.4)$$

$\frac{\partial P}{\partial r}$ 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. Jelesnianski (1966)에 의하면 아래와 같다.

$$\vec{U} = \vec{U}_s(r) + \vec{U}_{SM}(r) \quad (6.3.5)$$

$$\vec{U}_{SM} = \frac{Rr \vec{V}_f}{R^2 + r^2} \quad (6.3.6)$$

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.

$$\frac{d\hat{V}}{dt} + f\vec{k} \times \hat{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (K_H \nabla \hat{V}) - \frac{C_D}{h} |\hat{V}| \hat{V} \quad (6.3.7)$$

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.

$$p = p_c + \bar{p} \quad (6.3.8)$$

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 지균풍 \hat{V}_g 로 나타낼 수 있다.

$$\vec{f}k \times \hat{V}_g = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} \quad (6.3.9)$$

식 (6.3.8), (6.3.9)를 식 (6.3.7)에 대입하고, 태풍중심을 원점으로 하는 이동 격자 좌표계를 사용하면 식 (6.3.7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{f}k \times (\vec{V} - \vec{V}_g) = -\frac{1}{\rho} \nabla p_c + \nabla \cdot (K_H \nabla \vec{V}) - \frac{C_D}{h} |\vec{V} + \vec{V}_c| (\vec{V} + \vec{V}_c) \quad 6.3.10$$

여기서 \vec{V} 는 태풍의 이동에 대한 상대 풍속 ($= \hat{V} - \vec{V}_c$)이고, \vec{V}_g 는 상대 지균풍 속($= \hat{V}_g - \vec{V}_c$)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 각종 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 도출하였으며, 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 최대한 이용하는 것이 무엇보다 중요하다. 최대풍 반경을 산출하기 위해 기상 관측소의 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 태풍 중심에서 최대풍 반경을 구하는데 이용했다.

해면기압 자료를 이용하여 다음과 같이 최대풍 반경 r_0 를 추정할 수 있다. 다

음의 Original Rankin vortex model (R. W. Schloemer model)의 해면기압 분포식에

$$P(r) = P_0 + \Delta P e^{-r_0/r} \quad (6.3.11)$$

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

여기서 양변에 대수를 취하면,

$$\ln(P(r) - P_0) = \ln(\Delta P) - r_0/r \quad (6.3.12)$$

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 해면기압자료와 그리고 일본 및 중국 기상 관측소에서 입수한 최근 20여 년 간 관측된 기압 자료를 이용하였다.

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 등압선까지의 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 최대풍이 나타나는 지점과 태풍중심사이의 거리를 직접 산출할 수도 있다(Fig. 6.3.6). 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. Fig. 6.3.8은 태풍 영향시에 GMS 위성의 구름온도 자료의 분석의 예이다.

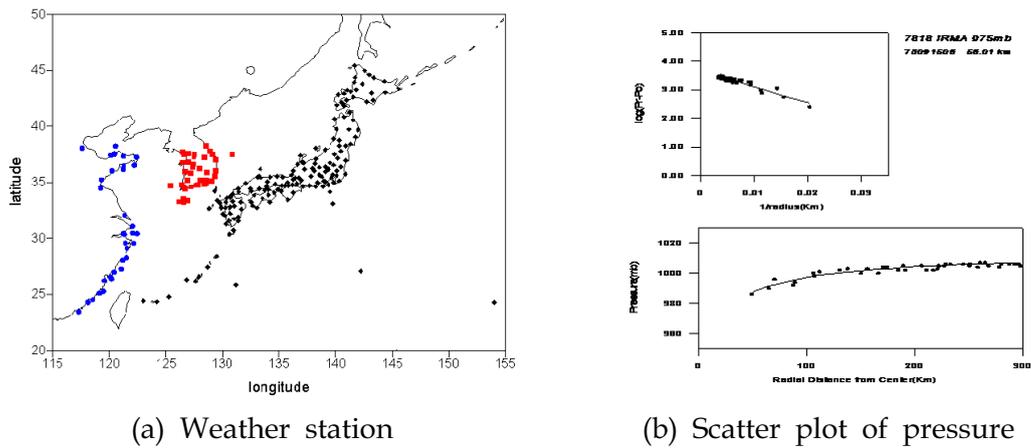


Fig. 6.3.6. Calculation of maximum wind speed

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.

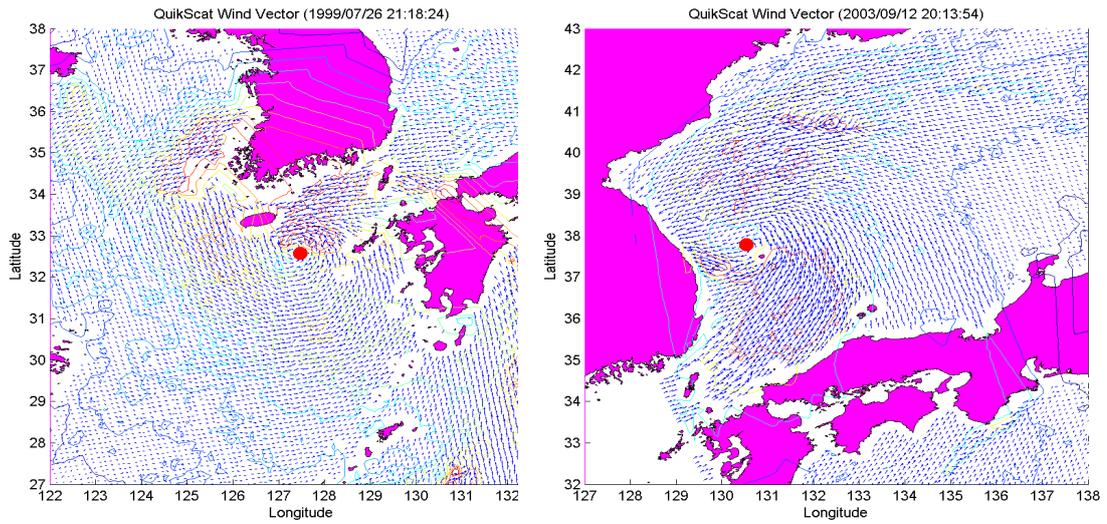


Fig. 6.3.7. Calculation of wind speed from QuikSCAT
 (●: center of typhoon)

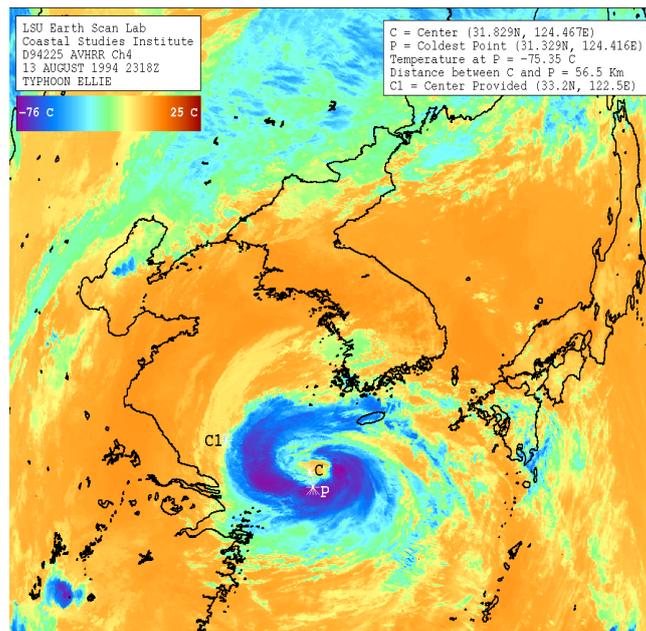


Fig. 6.3.8. Calculation of maximum wind field
 from GMS satellite

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 과

거의 자료로부터 태풍 중심기압과 최대풍 반경사이의 상관관계로부터 최대풍 반경을 예측하는 시스템을 구축하였다. Fig. 6.3.9은 일본항공연구연구소에서 1000 hPa 등압선의 반경으로부터 산출한 최대풍 반경과 태풍 중심기압간의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 6.3.9(a)에서 1000 hPa까지는 중심기압이 증가함에 따라 최대풍 반경이 증가하는 형태를 보이고 있으나, 1000 hPa 이상에서는 뚜렷한 형태를 보이지 않는다. 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 Fig. 6.3.9(b)에서 보는 바와 같이 1000 hPa 이하의 자료만을 사용하여 최대풍 반경과 중심기압사이의 경험식을 유도하였다.

$$R_{\max} = 2606.7(1013 - P_0)^{-0.8811} \quad (6.3.13)$$

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

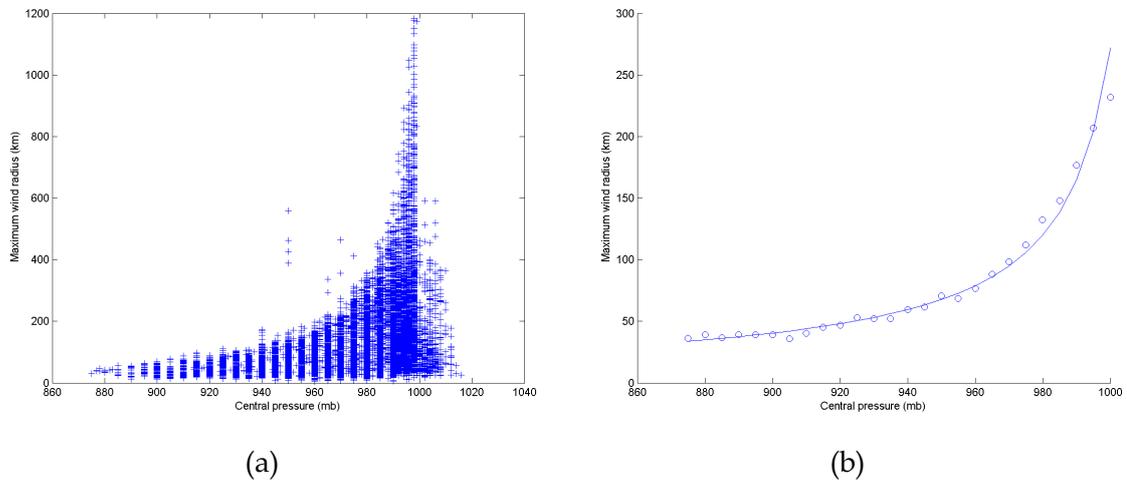


Fig. 6.3.9. Correlation of maximum wind radius and typhoon center pressure

최근 기상청에서는 태풍위치, 중심기압과 강풍 반경의 값을 보고하고 있으며 이에 대한 태풍의 예측자료도 보고하고 있어 (Fig. 6.3.10), 이를 이용하여 최대풍 반경을 산출하는 방법을 연구하였다. 즉, 기상청에서 보고하는 15 m/s, 25 m/s의 강풍 반경으로부터 태풍해상풍 모델에서 사용되는 태풍 파라미터사이의 관계식을 반복법

을 이용하여 최대풍 반경을 산출하였다. 일본항공연구소에서 산출한 최대풍 반경과 통계적인 강풍 반경으로부터 산출한 최대풍 반경을 비교하였다. Fig. 6.3.11은 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.

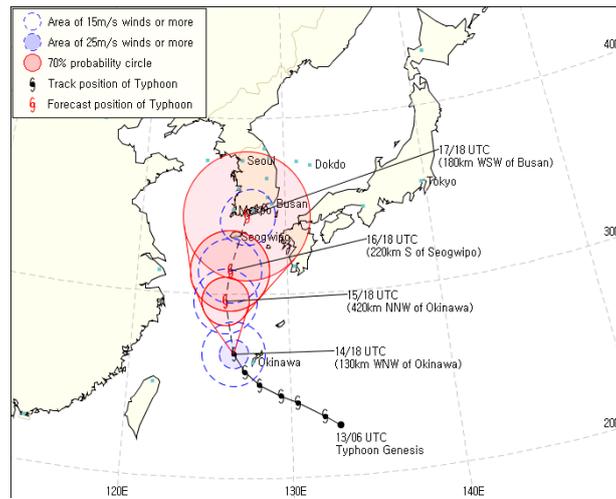


Fig. 6.3.10. Typhoon track from KMA

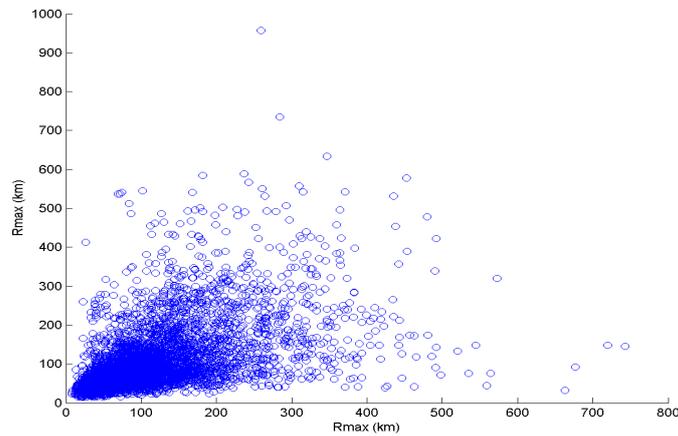


Fig. 6.3.11. Correlation of maximum wind radius and strong wind radius using Co1000 hPa isobar

(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. Fig. 6.3.12는 Chaba (0004) 내습시 4개의 태풍해상풍 모델로 산출한 바람장을 나타낸 것이다.

Fig. 6.3.12에서 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.

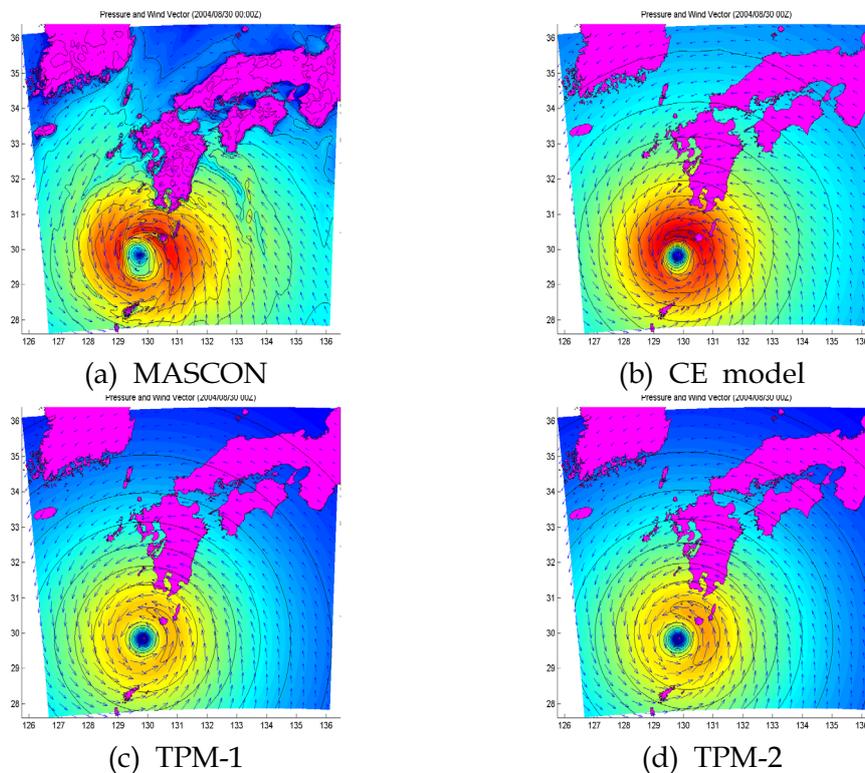


Fig. 6.3.12. Comparison of pressure and wind field of typhoon 'Chaba' (0004) (a) MASCON, (b) CE model, (c) TPM-1 and (d) TPM-2

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.

$$u(r) = U_t(r)W(r) + U_a(r)[1 - W(r)] \quad (6.3.14)$$

여기서 U_t 는 태풍 모델에 의한 해상풍, $U_a(r)$ 는 일반 기상 분석의 해상풍을 나타내고 $W(r)$ 은 Weighting function으로 태풍 중심에서 거리의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$W(r) = \begin{cases} 1 & , \text{ if } r \leq R_{\max} \\ e^{(1-r/R_{\max})} & , \text{ if } r > R_{\max} \end{cases} \quad (6.3.15)$$

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

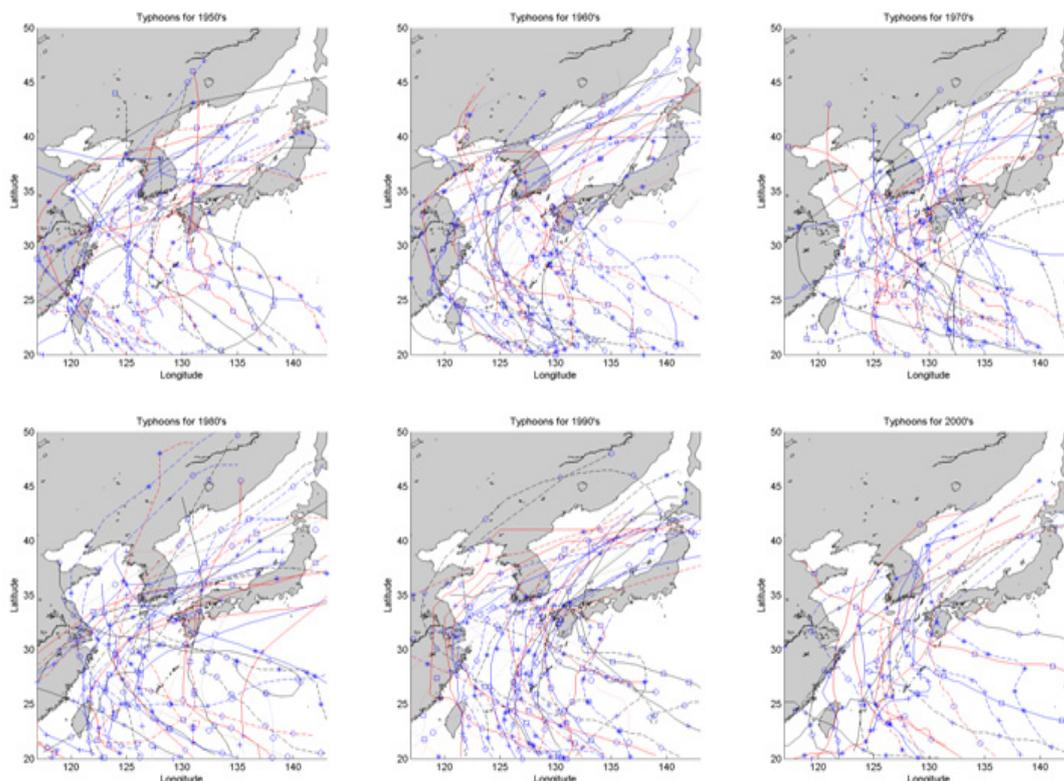


Fig. 6.3.13. Typhoon track using long-term storm-surge simulation

Table 6.3.1. 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

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					

4. 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 한국해양연구원은 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 필요하다. 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 연구

에서는 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 예보 모델을 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. Fig. 6.3.14과 Fig. 6.3.15는 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 공간적

으로 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 궤도와의 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.

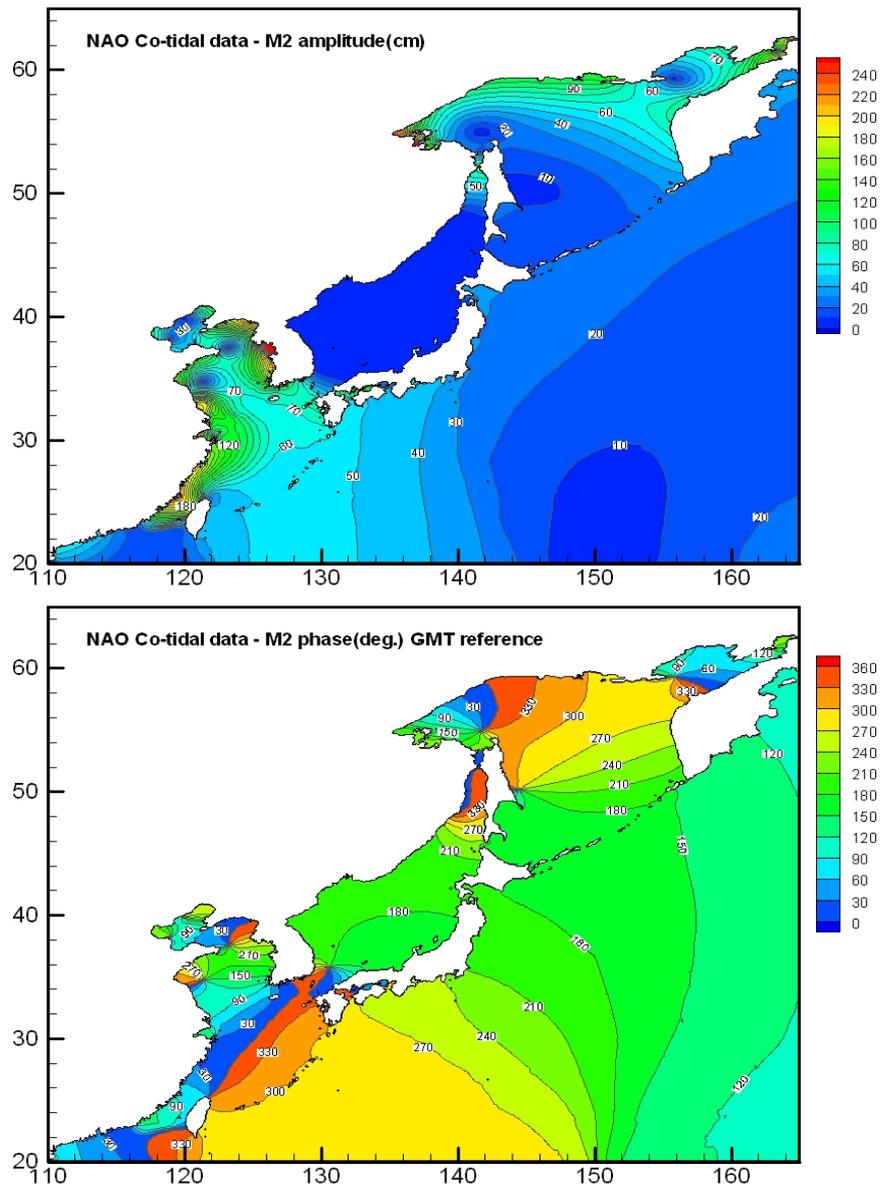


Fig. 6.3.14. 등조위선 및 등조시선(M2) - NAO

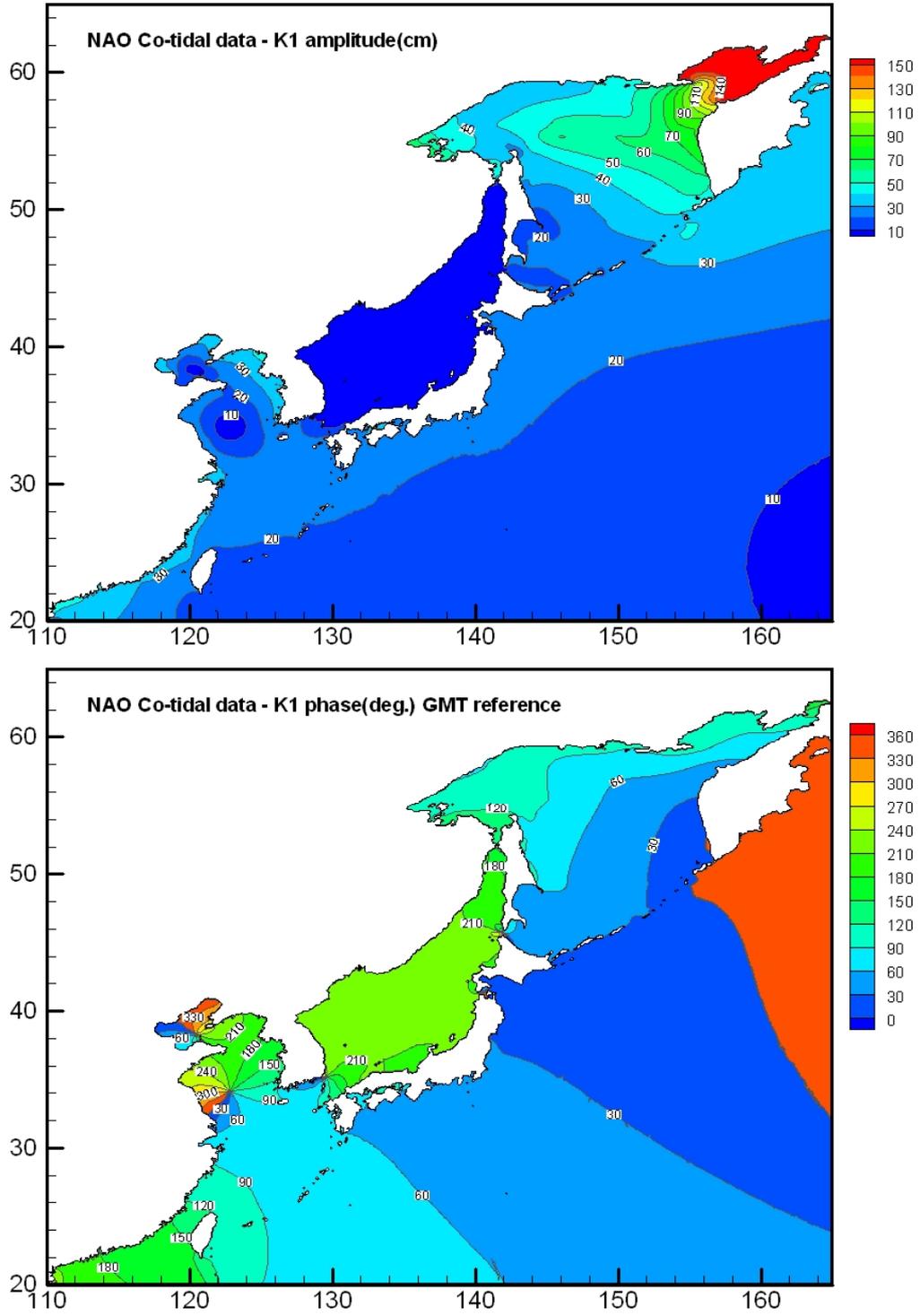


Fig. 6.3.15. 등조위선 및 등조시선(K1) - NAO

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 실시간 조위 $\zeta_i(t)$ 는

$$\zeta_i(t) = f_i H_i \cos(\sigma_i t - k_i + V_i + u_i) \quad (6.3.16)$$

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 $Y_i = f_i H_i$ 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 400m 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 다음 절에 더 자세히 다룬다.

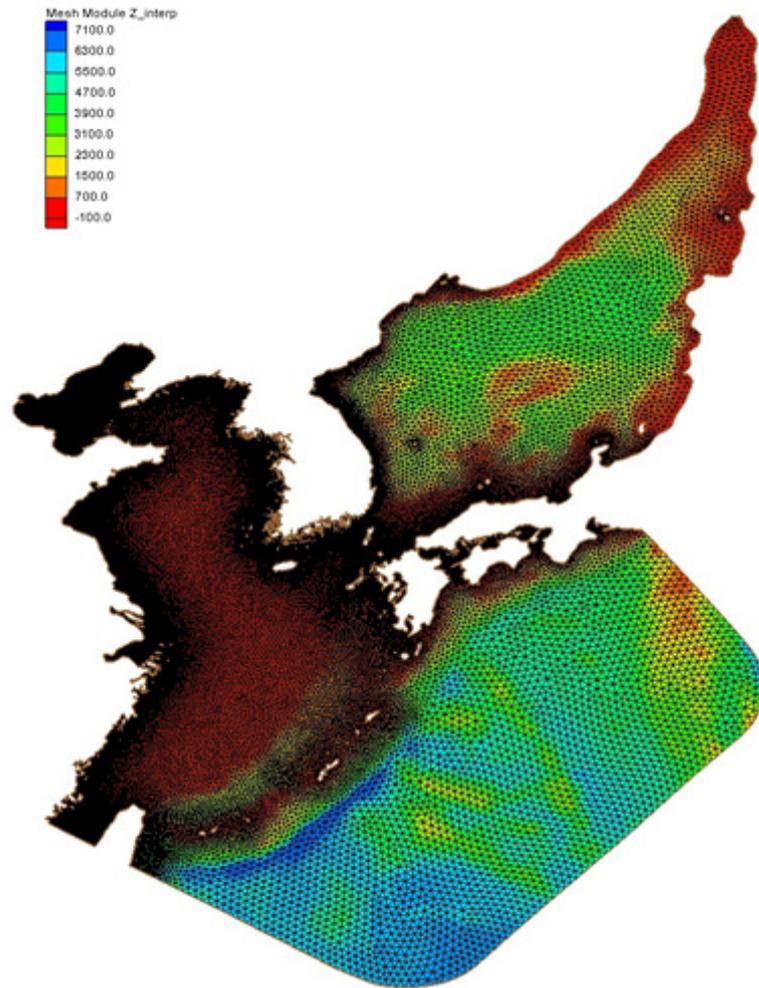


Fig. 6.3.16. FVCOM 모형에 적용된 격자망 및 수심도

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, S2 K1, O1 분조에 대한 조석도는 Fig. 6.3.17과 3.2.20에 나타냈다. Fig. 6.3.19과 3.2.20에서 실선과 점선은 각각 위상과 조위를 나타내며, 조위의 단위는 cm, 위상은 단위는 동경 135°을 기준으로 한 deg이다. 조석도의 일반적인 패턴은 기존 연구 결

과 (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 Fig. 6.3.17와 3.2.18에 잘 나타나고 있다.

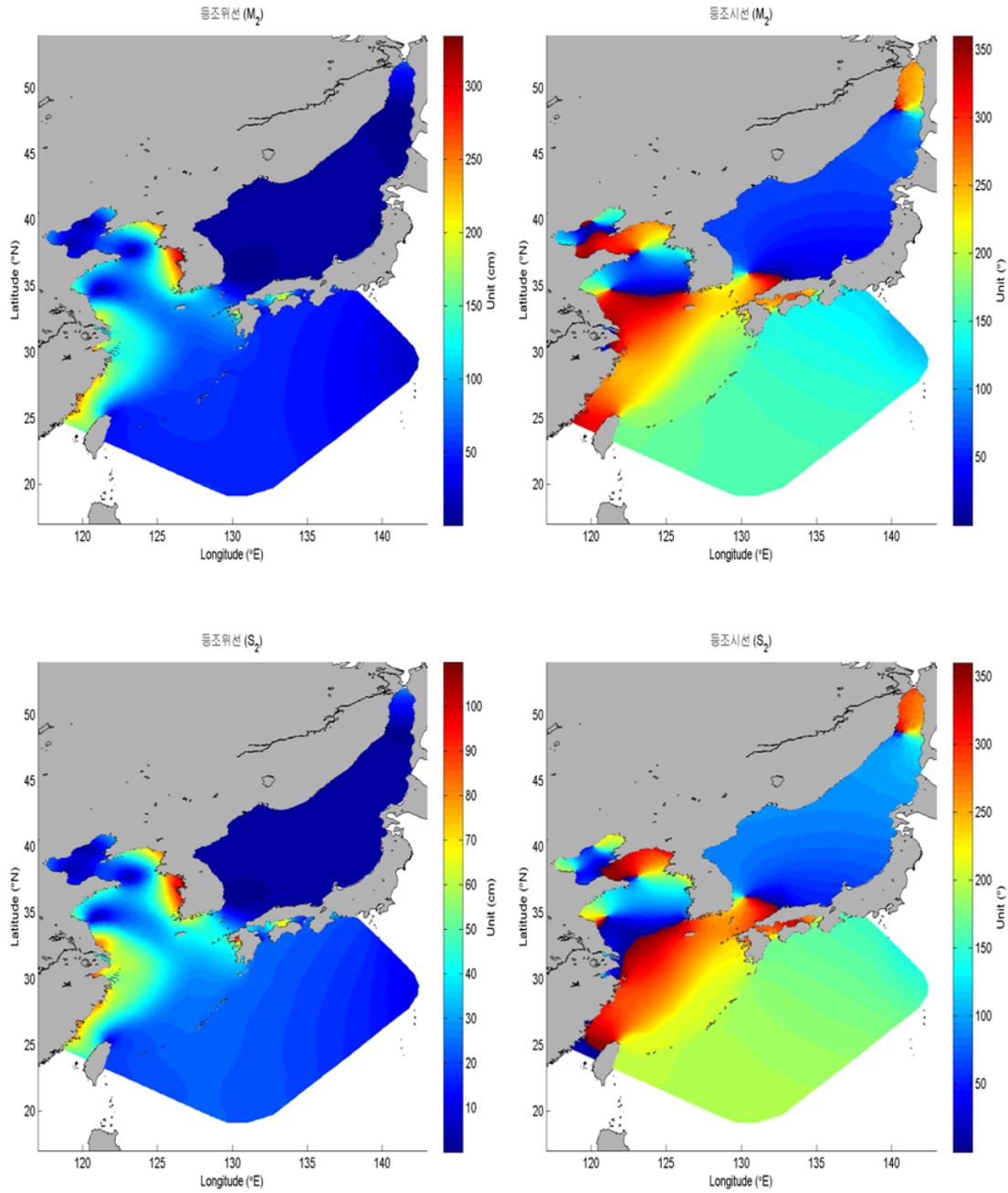


Fig. 6.3.17. Find grid tidal data simulation using FVCOM(Upper: M2, Lower: S2)

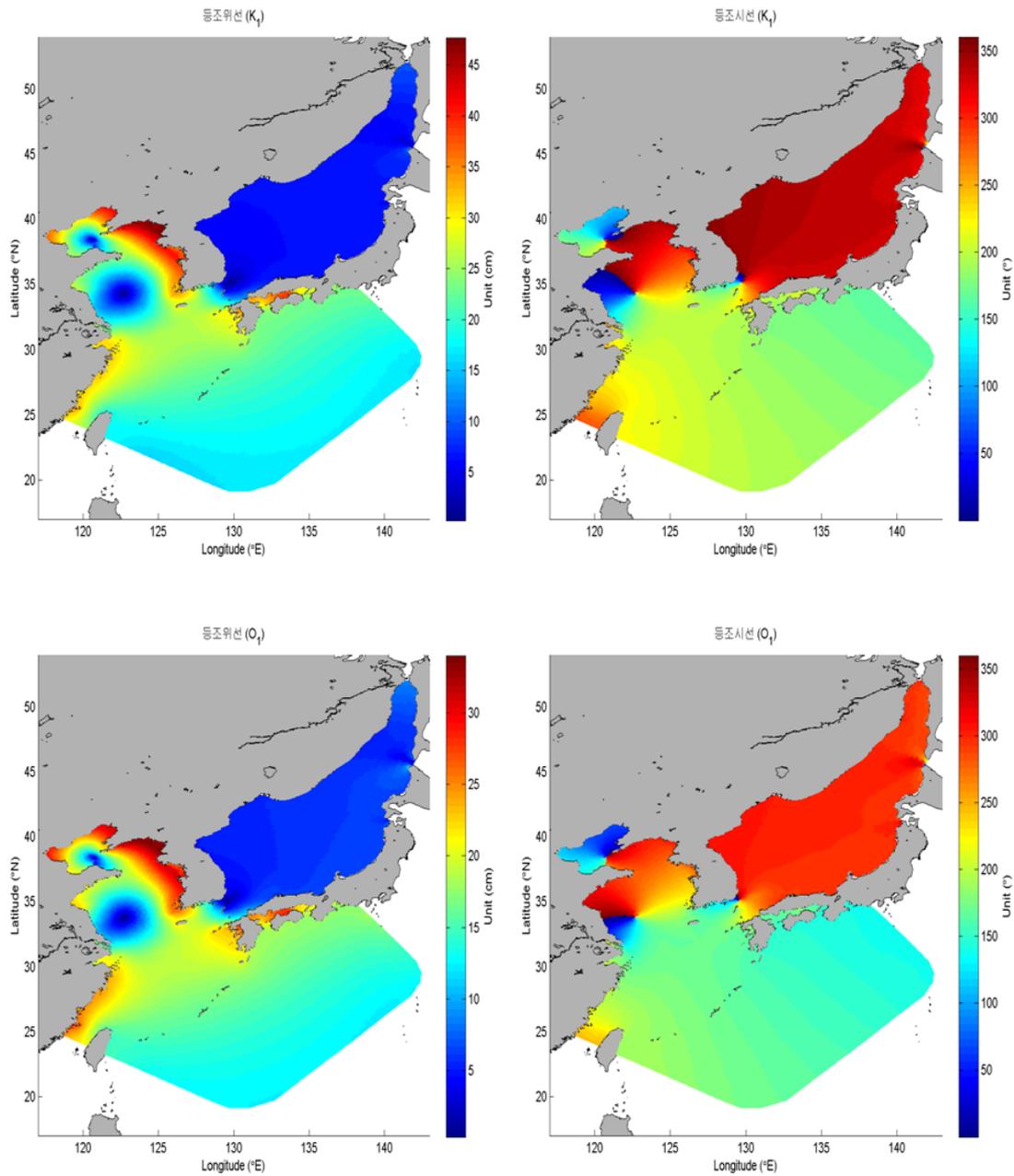


Fig. 6.3.18. Find grid tidal data simulation using FVCOM (Upper: K1, Lower: O1)

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 서브프로그램으로 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, 69 개 분조중 45개는 천문조로부터, 그리고 77개의 천해분조가 사용자에게 의해서 추가 될 수 있다. 진동수, nodal factor, astronomical argument 등의 산정은 Doodson(1921)의 조류포텐셜 전개에 근거하고 있으며, 천문학적인 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.

$$Z(t) = X_0(t) + \sum_{j=1}^M X_j \cos 2\pi(\sigma_j t - \phi_j) + \left[Y_0(t) + \sum_{j=1}^M Y_j \cos 2\pi(\sigma_j t - \theta_j) \right] \quad (6.3.17)$$

여기서,

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

따라서 유속은 다음과 같이 나타낸다.

$$Z(t) = X_0(t) + \sum_{j=1}^M (CX_j \cos 2\pi\sigma_j t + SX_j \sin 2\pi\sigma_j t) + i \left[Y_0(t) + \sum_{j=1}^M (CY_j \cos 2\pi\sigma_j t + SY_j \sin 2\pi\sigma_j t) \right] \quad (6.3.18)$$

다시 정리하면 유속은 다음과 같다.

$$Z(t) = X_0(t) + i Y_0(t) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M \left\{ [(CX_j + SY_j) + i(CY_j - SX_j)] \exp(2\pi i \sigma_j t) + i [(CX_j - SY_j) + i(CY_j + SX_j)] \exp(-2\pi i \sigma_j t) \right\} \quad (6.3.19)$$

여기서 분조 계수 j 를 제거한 후 다음의 식에 의해 정의하면,

$$a^+ = \left[\left(\frac{CX+SY}{2} \right)^2 + \left(\frac{CY-SX}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.3.20)$$

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

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

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

따라서 임의의 분조에 의한 조류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z(t) &= Z^+(t) + Z^-(t) = a^+ \exp(i\epsilon^+ + 2\pi i\sigma t) + a^- \exp(i\epsilon^- - 2\pi i\sigma t) \\ &= \exp \left[i \left(\frac{\epsilon^+ + \epsilon^-}{2} \right) \right] \left\{ (a^+ + a^-) \cos \left[\left(\frac{\epsilon^+ - \epsilon^-}{2} \right) + 2\pi\sigma t \right] + i (a^+ - a^-) \sin \left[\left(\frac{\epsilon^+ - \epsilon^-}{2} \right) + 2\pi\sigma t \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.3.21)$$

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 기조력이 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 프로그래밍화하였기 때문에 조석 조류에 대한 특별한 지식이 없는 사람도 간단한 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 경계조건으로 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

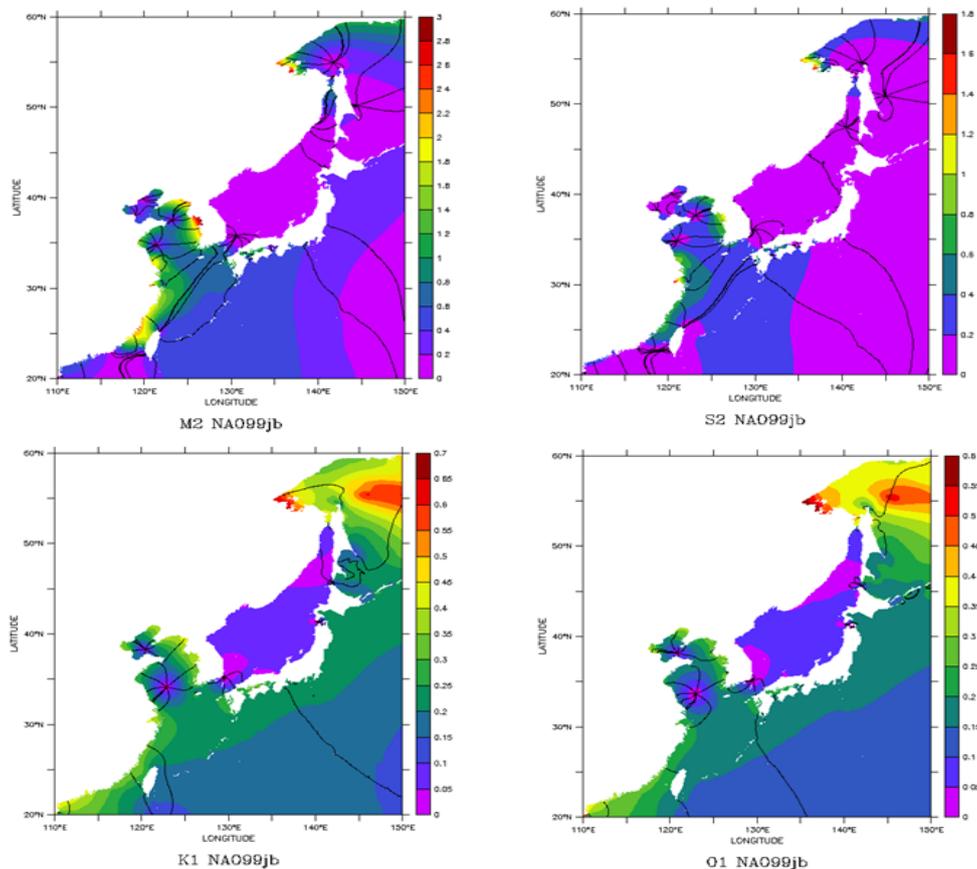


Fig. 6.3.19. NAO99jb Short-tem ocean tide model

(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

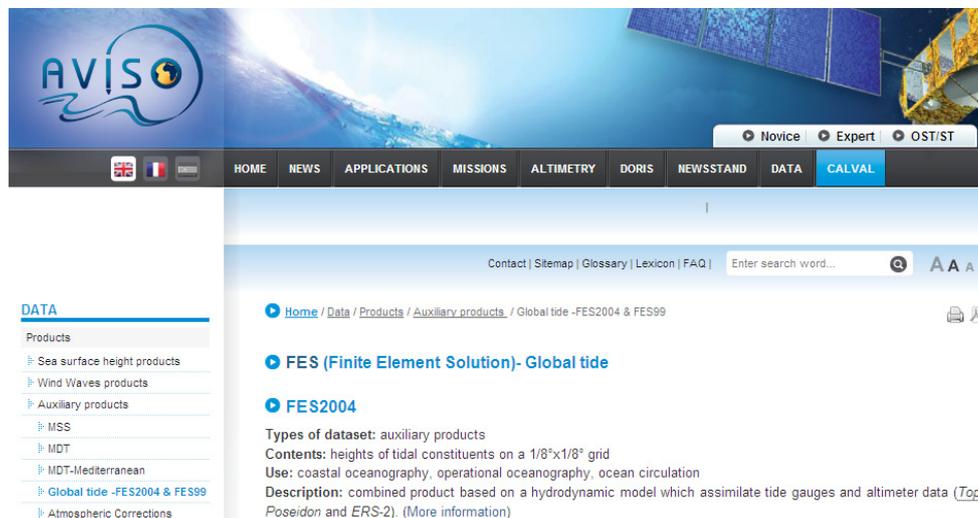


Fig. 6.3.20. FES2004 Web site

- 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 분

- 조들을 specific admittance 방법과 장주기파 계산법을 이용해 보정
 - 새로운 tide loading effects 계산 (Olivier Francis)

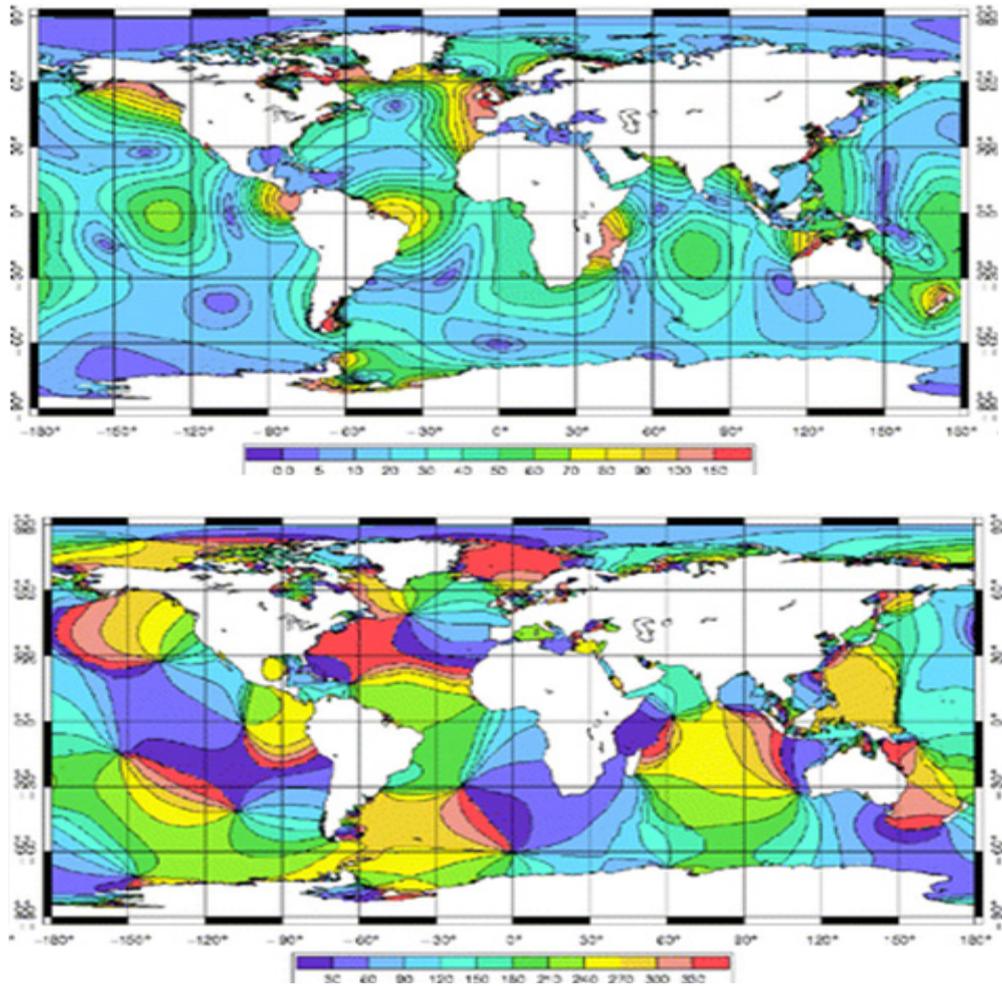


Fig. 6.3.21. M2 co-tidal amplitude, co-tidal phase in FES2004

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

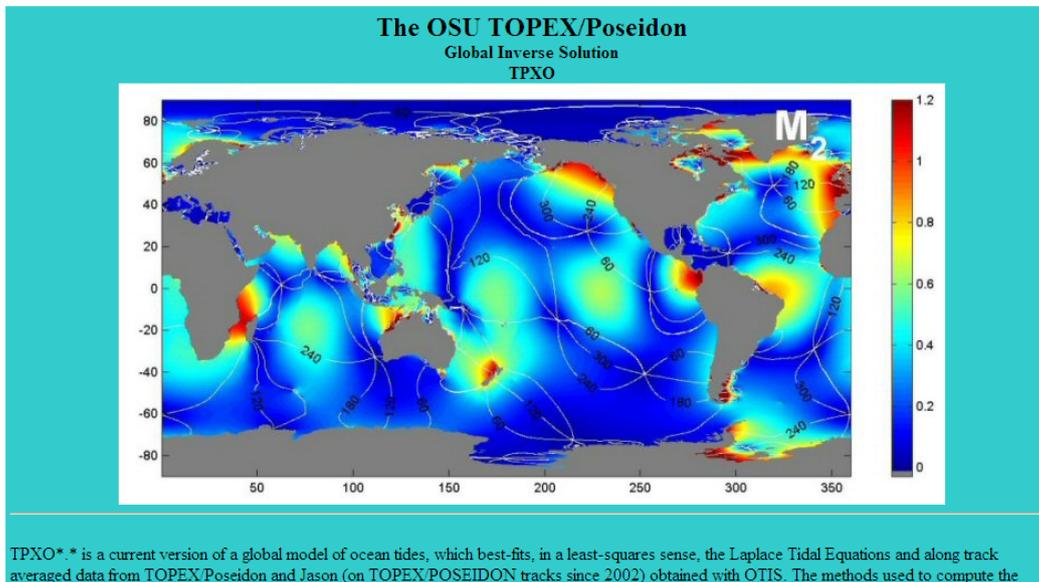
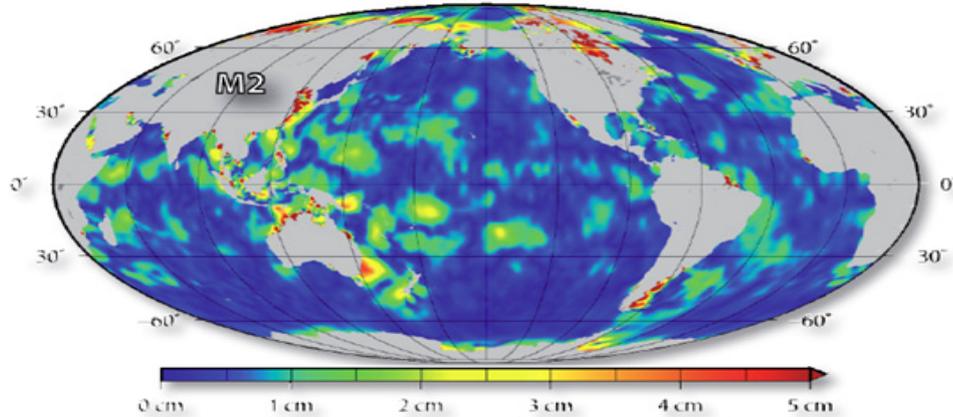


Fig. 6.3.22. TPX0 7.2 web site

- 최소 자승법과 라플라스 조석 방정식, 그리고 TOPEX/Poseidon 과 Jason 위성
의 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) 하
고 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)

Fig. 6.3.23. Example of EOT08a data

5. unstructured grid 모델에 의한 정밀 폭풍해일 수치 모델(FVCOM)

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 계산영역으로 질량보존된다. FVCOM은 유한차분법의 간단한 이산법의 능력성과 유한요소법의 기하학상의 유연성이 잘 조화되었다고 할 수 있다. 또한 유한체적법 다기능 3차원 수치해석 모델로서 복잡한 연안, 하구역, 조간대역 및 대륙붕에

서 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.

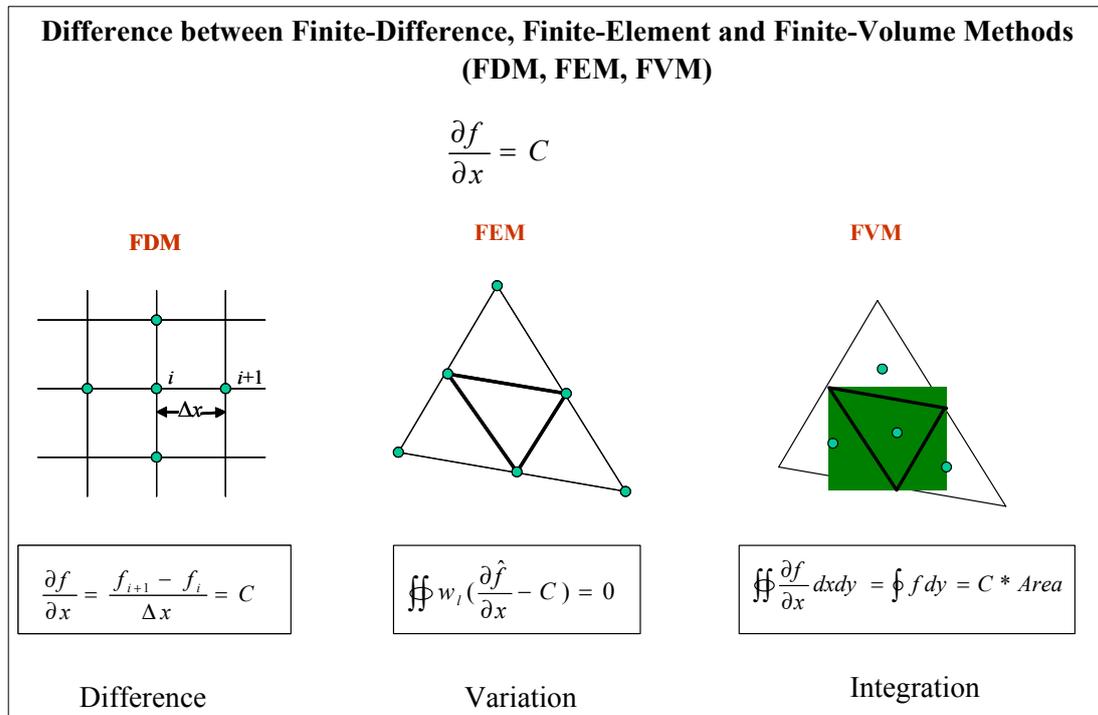


Fig. 6.3.24. Comparison of difference b/w finite-difference, finite-element and finite-volume method (Chen, FVCOM workshop2006)

가. 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 조간대 처리가 가능하고, 수평와동 점성계수로 Smagorinsky의 수평 확산 기법을 사용한다.

나. Cartesian Coordinate의 기본 방정식

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial u}{\partial z}) + F_u \quad (6.3.22)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial v}{\partial z}) + F_v \quad (6.3.23)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (6.3.24)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.3.25)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T \quad (6.3.26)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial S}{\partial z}) + F_S \quad (6.3.27)$$

$$\rho = \rho(T, S) \quad (6.3.28)$$

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 난류마

감모형을 사용하고 있다.

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + u \frac{\partial q^2}{\partial x} + v \frac{\partial q^2}{\partial y} + w \frac{\partial q^2}{\partial z} = 2(P_s + P_b - \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (K_q \frac{\partial q^2}{\partial z}) + F_q \quad (6.3.29)$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} + u \frac{\partial q^2 l}{\partial x} + v \frac{\partial q^2 l}{\partial y} + w \frac{\partial q^2 l}{\partial z} = l E_1 (P_s + P_b - \frac{\tilde{W}}{E_1} \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z}) + F_l \quad (6.3.30)$$

$q^2 = (u'^2 + v'^2)/2$ 은 난류운동에너지, l 은 난류길이, K_q 는 난류운동에너지의 수직난류점성계수, 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. $\epsilon = q^3/B_l$ 은 난류 소멸항, $W = 1 + E_2 l^2 / (\kappa L^2)$ 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.

$$K_m = lqS_m, \quad K_h = lqS_h, \quad K_q = 0.2lq \quad (6.3.31)$$

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

$$\nu_w = \lambda_* u_{*s} \quad (6.3.32)$$

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

$$\rho_0 u_{*s} = \tau_s^{1/2} = (\tau_{sx}^2 + \tau_{sy}^2)^{1/2} \quad (6.3.33)$$

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

$$\nu_H = C_{m0} \Delta x \Delta y D_T, \quad \lambda_H = C_{s0} \Delta x \Delta y D_T \quad (6.3.34)$$

$$D_T^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \quad (6.3.35)$$

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.

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho c_p K_h} [Q_n(x, y, \zeta, t)], \quad z = \zeta(x, y, t) \quad (6.3.36)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{A_H \tan \alpha}{K_h} \frac{\partial T}{\partial n}, \quad z = -H(x, y) \quad (6.3.37)$$

여기서 $Q_n(x, y, t)$ 은 표층의 열흐름망이다.

식 (6.3.28)에서 A_H 는 수평열확산계수, α 는 바닥수심경사, 그리고 n 은 수평좌표이다.

염분의 표층과 저층 경계는:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = \frac{s(\hat{P} - \hat{E})}{K_h \rho}, \quad \text{at } z = \zeta(x, y, t) \quad (6.3.38)$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{A_H \tan \alpha}{K_h} \frac{\partial S}{\partial n}, \quad \text{at } z = -H(x, y) \quad (6.3.39)$$

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

u , v , w 의 표층과 저층의 경계는:

$$K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o} (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \quad w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad \text{at } z = \zeta(x, y, z) \quad (6.3.40)$$

$$K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o} (\tau_{bx}, \tau_{by}), w = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y}, \text{ at } z = -H(x, y) \quad (6.3.41)$$

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.

$$C_d = \max \left(k^2 / \ln \left(\frac{z_{ab}}{z_o} \right)^2, 0.0025 \right) \quad (6.3.42)$$

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

$$v_n = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial s}{\partial n} = 0 \quad (6.3.43)$$

여기서 v_n 은 속도, n 은 경계에서의 좌표이다.

다. σ -coordinate의 지배방정식

불규칙한 바닥지형에 수직좌표계로 σ -coordinate를 사용했다.

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H + \zeta} = \frac{z - \zeta}{D} \quad (6.3.44)$$

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

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0 \quad (6.3.45)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial \sigma} - fvD \\ & = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gD}{\rho_o} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + DF_x \end{aligned} \quad (6.3.46)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v D}{\partial t} + \frac{\partial uv D}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial v \omega}{\partial \sigma} - fu D \\ &= -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gD}{\rho_o} \left[\frac{\partial}{\partial y} (D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma') + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + DF_y \end{aligned} \quad (6.3.47)$$

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta u D}{\partial x} + \frac{\partial \theta v D}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial \theta}{\partial \sigma}) + D\hat{H} + DF_{\theta} \quad (6.3.48)$$

$$\frac{\partial s D}{\partial t} + \frac{\partial su D}{\partial x} + \frac{\partial sv D}{\partial y} + \frac{\partial s \omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial s}{\partial \sigma}) + DF_s \quad (6.3.49)$$

$$\rho = \rho(\theta, s) \quad (6.3.50)$$

이 σ -좌표는 수평 확산 형태를 갖는다. 이 때

$$DF_x \approx \frac{\partial}{\partial x} [2A_m H \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [A_m H (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \quad (6.3.51)$$

$$DF_y \approx \frac{\partial}{\partial x} [A_m H (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y} [2A_m H \frac{\partial v}{\partial x}] \quad (6.3.52)$$

$$D(F_{\theta}, F_s, F_{q^2}, F_{q^2 l}) \approx [\frac{\partial}{\partial x} (A_h H \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h H \frac{\partial}{\partial y})](\theta, s, q^2, q^2 l) \quad (6.3.53)$$

A_m 와 A_h 는 각각 수평의 난류, 열 확산 계수이다.

표층 $\sigma = 0$,

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

$$\frac{\partial s}{\partial \sigma} = -\frac{s(P-E)D}{K_h}, \quad q^2 l = 0, \quad q^2 l = 0, \quad q^2 = B_1^{2/3} u_{rs}^2 \quad (6.3.54)$$

바닥 $\sigma = -1$,

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma}\right) = \frac{D}{\rho_o K_m}(\tau_{bx}, \tau_{by}), \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = \frac{\partial s}{\partial \sigma} = 0, \quad q^2 l = 0, \quad q^2 = B_1^{2/3} u_{\tau b}^2 \quad (6.3.55)$$

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

$$\rho_o v_T \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z}, \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \right) = (\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_D^s (U_{10}^2 + V_{10}^2)^{1/2} (U_{10}, V_{10}) \quad (6.3.56)$$

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

- Large and Pond(1981)

$$C_D^s = 0.0012 \quad \text{if } |U_{10}| \leq 11 \text{ m/s} \quad (6.3.57)$$

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

- Smith and Banke(1975)

$$C_D^s = 10^{-3} (0.63 + 0.066 |U_{10}|) \quad (6.3.58)$$

- Geernaert et al.(1986)

$$C_D^s = 10^{-3} (0.43 + 0.097 |U_{10}|) \quad (6.3.59)$$

- Charnock(1955)

$$\ln(z_a g / (a |U_{10}|^2)) - \ln C_D^s = \kappa / (C_D^s)^{0.5} \quad (6.3.60)$$

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

- Wu(1980)

$$C_D^s = 10^{-3} (0.8 + 0.065 |U_{10}|) \quad (6.3.61)$$

(U_{10}, V_{10}) 은 10m 상공 대기에서의 x, y방향 풍속을 나타내며 공기의 밀도(ρ_a)는 1.2kg/m^3 이다. 상기에 제시된 식들에 대해 풍속에 따른 응력 계수 분포를 비교하여 Fig. 6.3.25에 나타내었다.

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

$$C_D^s = 0.0012 \quad \text{if } |U_{10}| \leq 11\text{m/s} \quad (6.3.62)$$

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

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

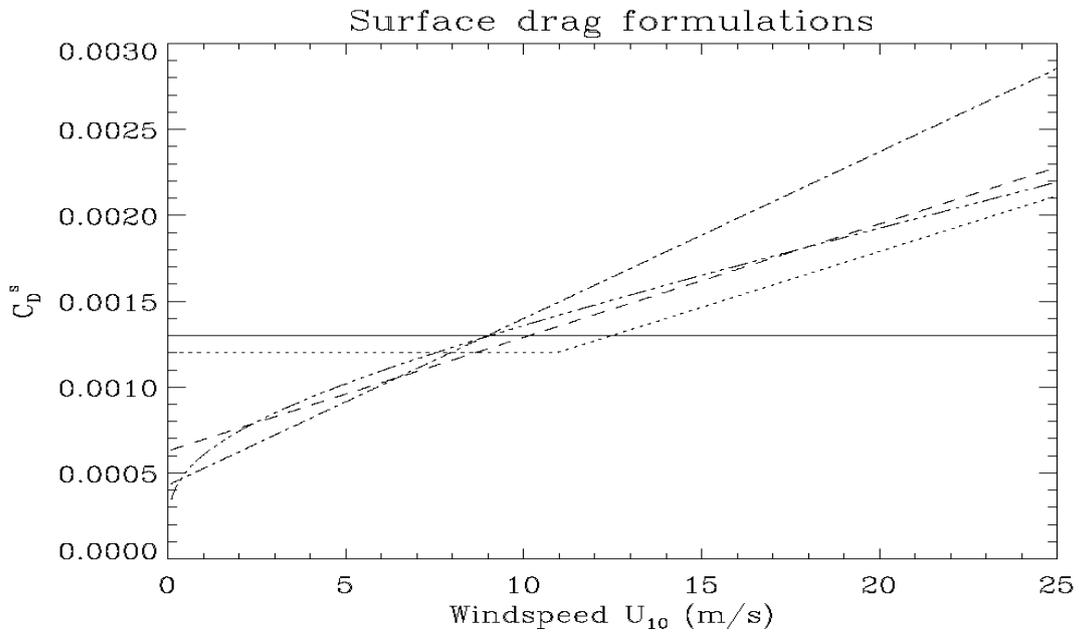


Fig. 6.3.25. Comparison of wind stress coefficient equation, Large and Pond (dots), Smith and Banke (dashes), Geernaert et al. (dash-dots), Charnock (dash and 3 dots)

라. 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.

$$[X(i), Y(i)], \quad i = 1 : N \quad (6.3.63)$$

$$[X_n(j), Y_n(j)], \quad j = 1 : M \quad (6.3.64)$$

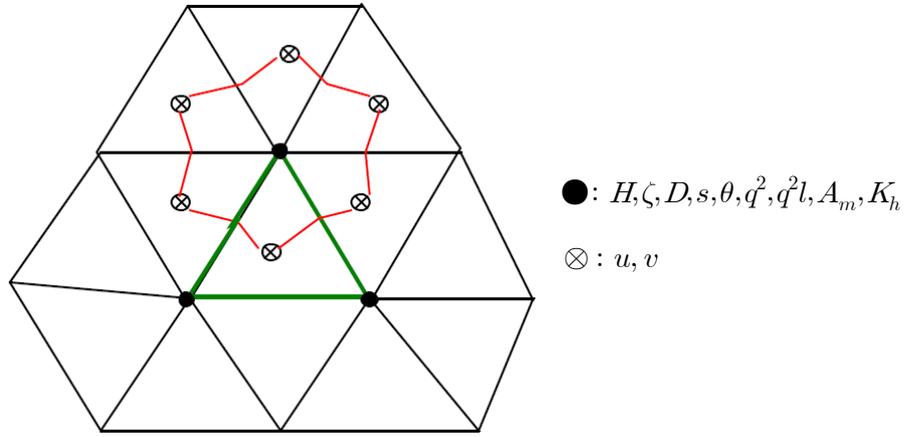


Fig. 6.3.26. Triangular grid in FVCOM

마. Wet/Dry

노드에서의 wet/dry는 아래의 식을 기준으로 판별한다.

$$\begin{cases} wet, & \text{if } D = H + \zeta + h_B > D_{\min} \\ dry & \text{if } D = H + \zeta + h_B \leq D_{\min} \end{cases} \quad (6.3.65)$$

삼각셀에서는 다음과 같은 wet/dry의 판별기준이 적용된다.

$$\begin{cases} wet, & \text{if } D = \min(h_{B,\hat{i}}, h_{B,\hat{j}}, h_{B,\hat{k}}) + \max(\zeta_{\hat{i}}, \zeta_{\hat{j}}, \zeta_{\hat{k}}) > D_{\min} \\ dry & \text{if } D = \min(h_{B,\hat{i}}, h_{B,\hat{j}}, h_{B,\hat{k}}) + \max(\zeta_{\hat{i}}, \zeta_{\hat{j}}, \zeta_{\hat{k}}) \leq D_{\min} \end{cases} \quad (6.3.66)$$

바. 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.

사. 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 Table 6.3.2에 나타낸 바와 같으며 Fig. 6.3.27~29과 같다.

Table 6.3.2. Number of node and element

	1km 격자	300m 격자	70m 격자
절점 수(node)	130439 개	240517 개	278661 개
셀 수(element)	254138 개	455906 개	511790개

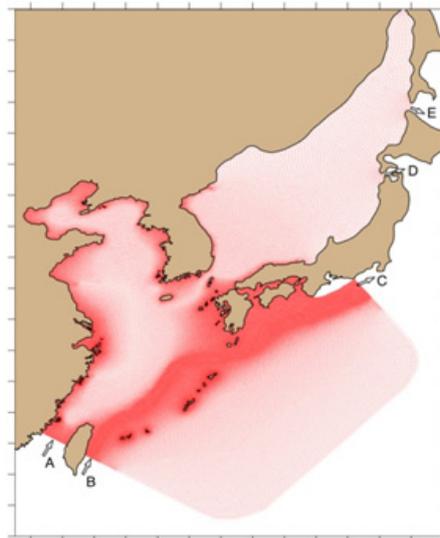


Fig. 6.3.27. Grid
(min. distance: 1km)



Fig. 6.3.28. Grid
(min. distance: 300m)

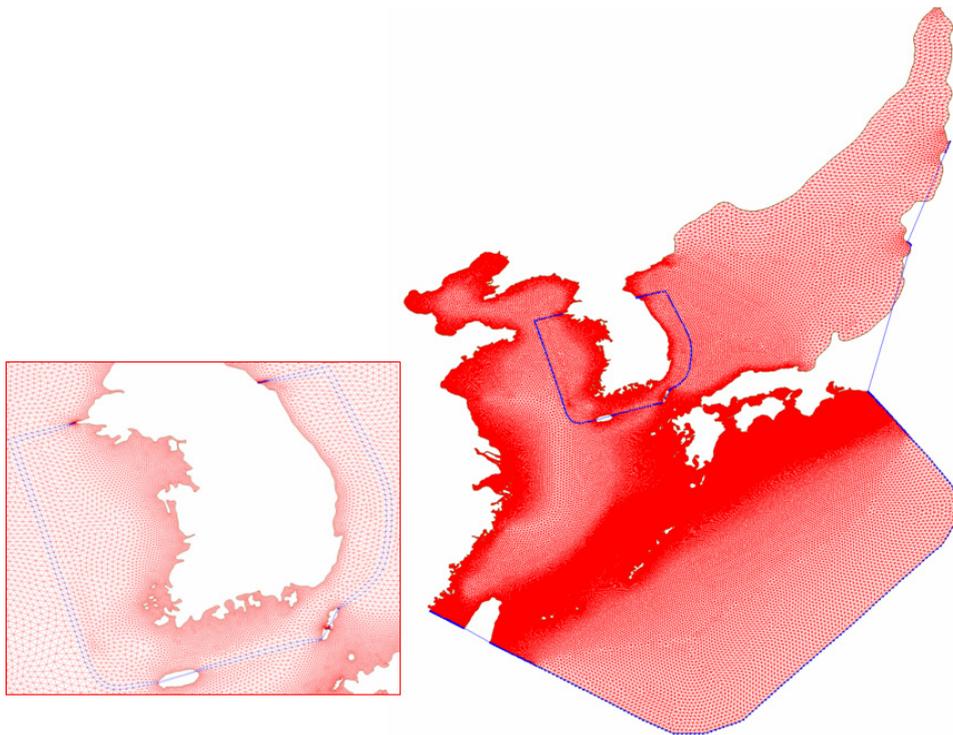


Fig. 6.3.29. Grid (min. distance: 70m)

6. 과거 8개 태풍에 대한 해일고 검토

Fig. 6.3.30에는 1951년부터 2007년까지 136개 태풍의 이동 경로를 나타내었다. 국립해양조사원의 1분 및 1시간 관측 자료를 사용하여, 각각의 태풍기간의 해일고를 산출하였다. Fig. 6.3.31은 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. Fig. 6.3.31는 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 기압효과 (inverse barometric effect)에 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. 태풍이 고위도로 진행함에 따라 그 강도가 약해지는 점과 함께 악기상시 검조소자료의 유실 등을 감안하여 서해에서 폭풍해일에 대한 보다 깊은 연구가 필요하다고 사료된다. Fig. 6.2.15의 결과는 침수범람 예측 및 침수범람재해도 작성에 기초자료로 활용이 가능하다고 사료된다.

Table 6.3.3. 8 Typhoons information

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	

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

8개 태풍에 대한 수치실험의 결과는 Table 6.3.4에 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 관측 결과와 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, FVCOM의 경우에서 조석·폭풍해일의 상호작용에 대한 분석, 정밀 격자에서의 모델 결과, 2D vs 3D의 결과를 비교하여 모델에 대한 평가를 실시하였다.

Table 6.3.4. Results of typhoon simulation from FVCOM

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
군산	관 측	-	-	44.0	31.0	-	68.0	23.0	41.0
	FVCOM	-	-	77.7	30.3	-	63.1	24.6	45.2
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
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
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
마산	관 측	-	-	-	-	-	-	-	212.0
	FVCOM	-	-	-	-	-	-	-	211.9
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
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
울릉	관 측	-	-	-	35.0	2.2	-	11.1	-
	FVCOM	-	-	-	31.2	5.5	-	9.14	-
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
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
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
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
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
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
추자도	관 측	-	-	54.0	25.0	16.0	-	36.0	41.0
	FVCOM	-	-	43.4	40.7	10.5	-	19.6	51.0
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
대흑산	관 측	-	-	52.0	21.0	13.0	-	-	16.0
	FVCOM	-	-	52.5	32.8	10.8	-	-	18.0
위도	관 측	-	-	42.0	25.0	34.0	-	-	-
	FVCOM	-	-	44.7	32.8	15.0	-	-	-

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

7. 조석과 폭풍해일의 상호 영향 분석

태풍 저기압에 따른 역수은주 효과(inverse barometer effect), 연안역 바람에 의한 물의 밀립 등의 요인에 의해서 태풍해일(storm surge)이 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 관측자료로부터 1시간 간격 고조 시계열을 만드는 방법은 다음과 같다. 우선 검조소 관측조위와 조화 예측 자료의 차이로부터 조석편차 시계열을 작성한다(1분 간격 자료). 이 조석편차 시계열에 디지털 필터를 적용하여 장주기 고조와 단주기 풍파(wave) 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 핵심적인 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

FVCOM을 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. 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.

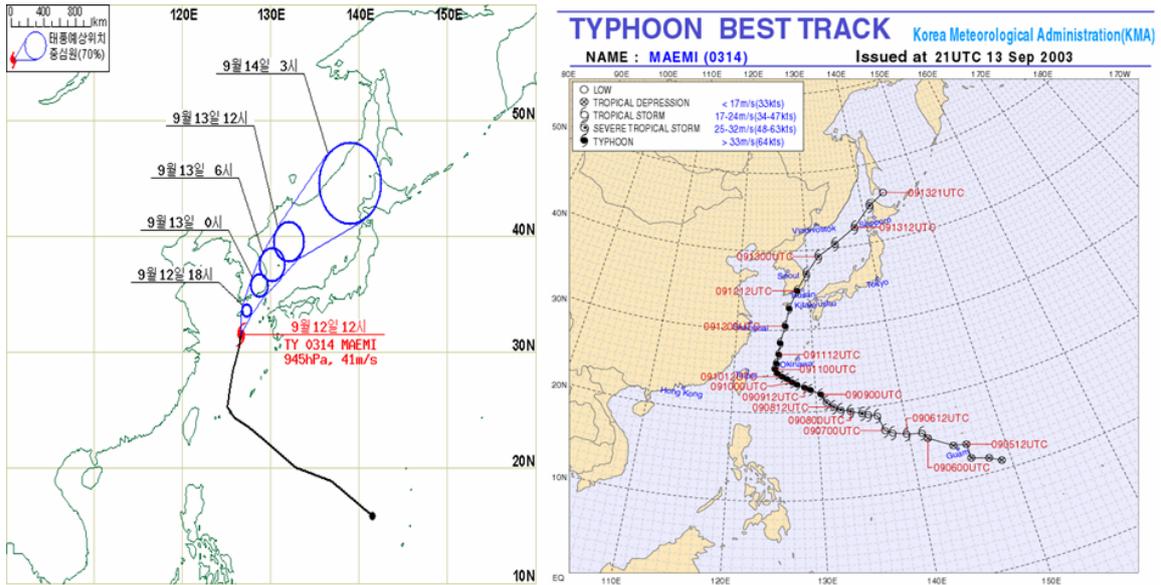


Fig. 6.3.32. Track of typhoon Maemi

Table 6.3.5. Time information of typhoon Maemi (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 제주도와 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 통과 후 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 가세함으로써 마산항에서의 해

일피해가 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

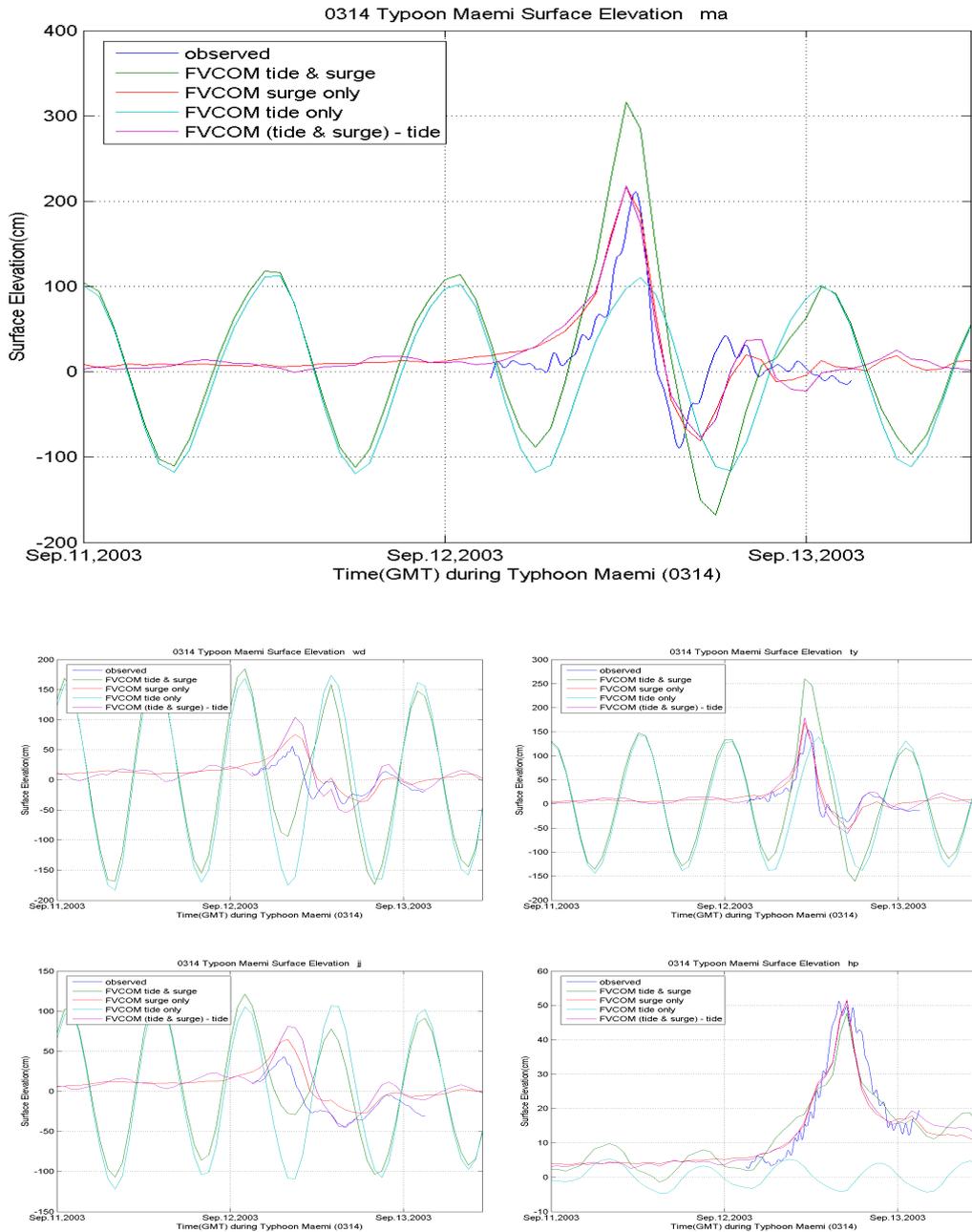


Fig. 6.3.33. Comparison of typhoon Maemi's surge height b/w observation and prediction

Fig. 6.3.33에는 각 케이스별로 모델결과와 1분단위의 관측 결과값이 제시되어있다. 연안에서 최소 격자크기가 약 300~400m까지 적용된 정밀 격자망이 사용되었으며 자세한 격자망은 Fig. 6.3.28에 나타나 있다. Fig. 6.3.35에서 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.

Table 6.3.6. Comparison of model results b/w surge and tide effect(cm)

관측소	관측최대값	모델 해일고 최대값 ①surge only	모델 해일고 최대값 ②(tide+surge)-surge 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 (20.2.0)	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

8. 격자 크기에 따른 평가

(1) FVCOM을 이용한 격자 크기에 따른 폭풍해일 테스트(최소격자 간격 1 km, 400 m, 70 m)

FVCOM 정밀격자 모형을 적용하여 해일고 산출모의를 수행하였으며, 이번 모의에서는 격자크기에 따른 모델의 정밀도를 비교·평가하여 보았다. 사용된 격자는 Fig. 6.3.27~29에 나타낸 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 적용

된 격자망이다. 마지막 격자망은 가장 조밀한 격자 간격을 가지는 것으로서 연안에서의 최소격자간격이 약 60~70m 정도로 수립한 격자이다. 각 격자망의 절점과 셀의 수는 다음 Table 6.3.2에 나타낸 바와 같다.

격자별 수심은 동일한 자료를 이용하였으며 본 모의에서는 단지 격자의 크기만을 달리 주고 수치실험을 실시하였다. 태풍 '매미' 내습시 조석을 제외한 해일고만 모의하였으며, 모두 조건대 처리 모듈을 적용하고 3차원으로 모의하였다.

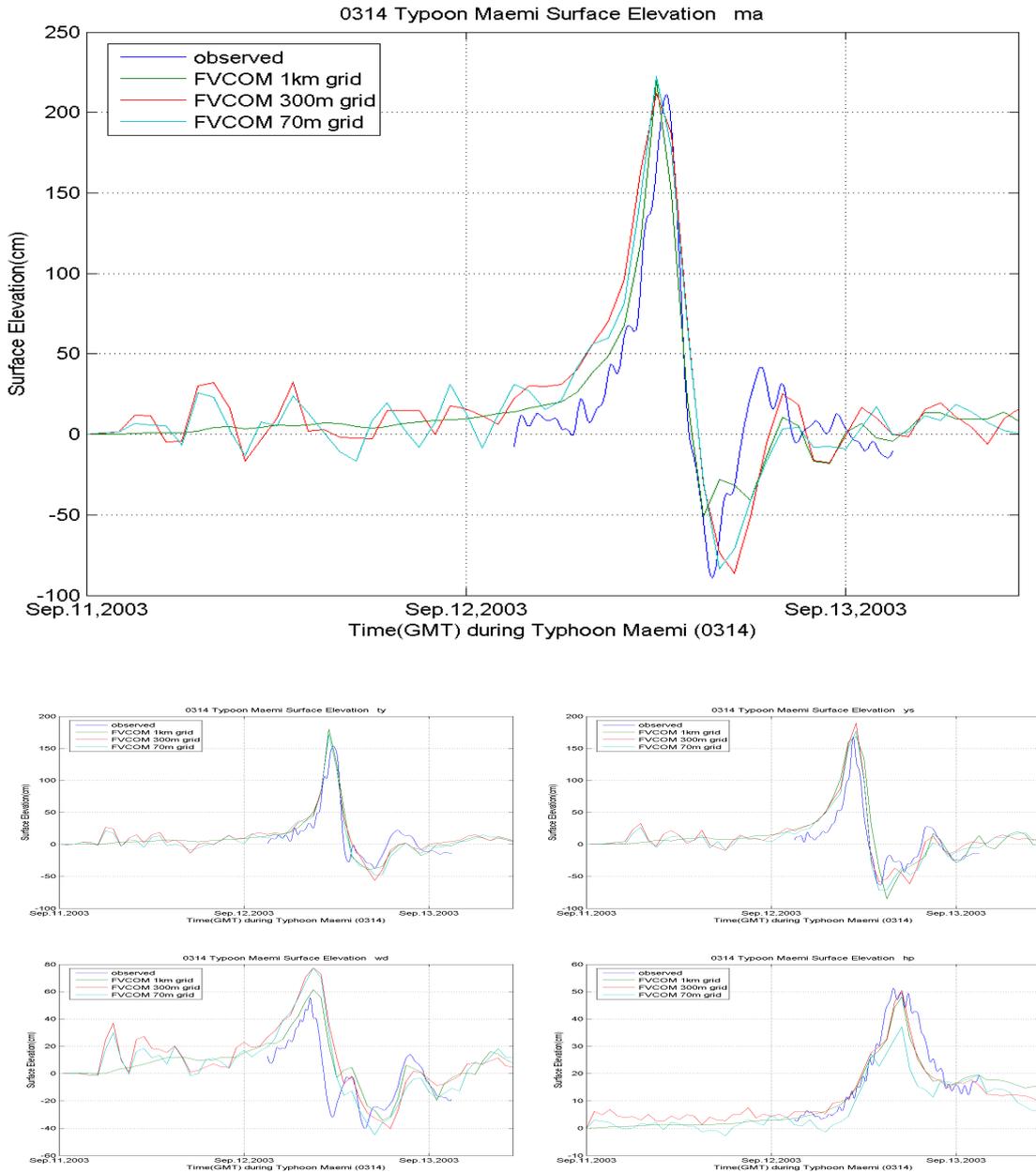


Fig. 6.3.34. Comparison of typhoon Maemi surface elevation following to grid size

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 일반적이거나 이는 반드시 그러한 것은 아니며 지형조건이나 외력의 조건 등에 크게 좌우되는 것으로 보인다. 특히 통영이나 마산지역은 최대해일고값이 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 파일업되면서 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.

Table 6.3.7. Comparison of model results depend on grid size (cm)

관측소	관측최대값	모델 해일고 최대값 (1km 격자)	모델 해일고 최대값 (300m 격자)	모델 해일고 최대값 (70m 격자)
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)

9. 2D 모델과 3D 모델의 평가

폭풍해일 예보에 있어서 대부분 2D 모델이 사용되어왔다. 2D 모델은 높은 정밀도와 빠른 계산시간이 장점이었다. 과거의 3D 모델은 태풍해일 예보모델로서 2D 모델에 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 Fig. 6.3.35에서 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 모델을 이용하여 2D 모델과 3D 모델의 비교 평가를 수행했다.

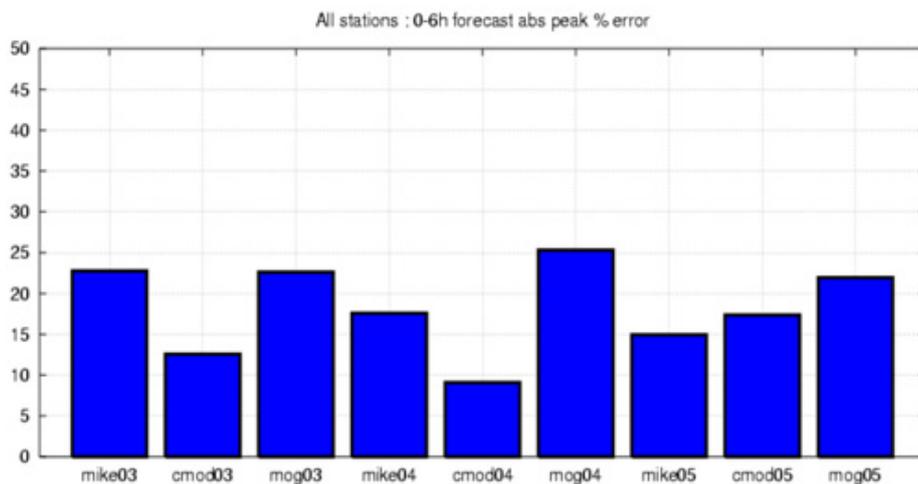


Fig. 6.3.35. Performance b/w numerical model from DMI

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 Table 6.2.16과 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. 3D모델에 대한 보완을 위한 연구도 계속 진행 중에 있다.

Table 6.3.8. Comparison of simulation results b/w 2D and 3D (cm)

관측소	관측최대값	모델 해일고 최대값 (2D 모델)	모델 해일고 최대값 (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)

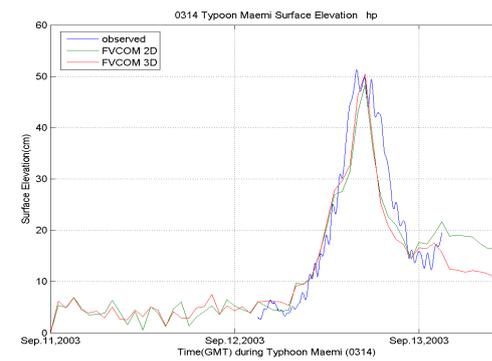
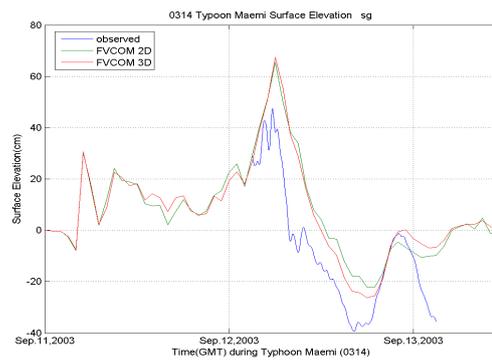
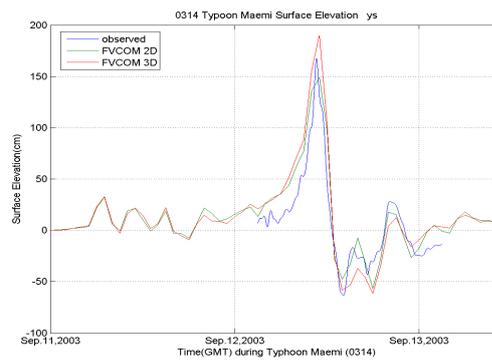
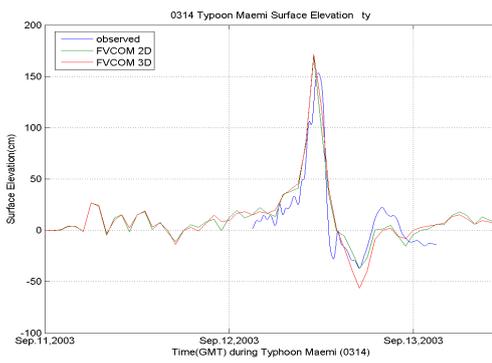
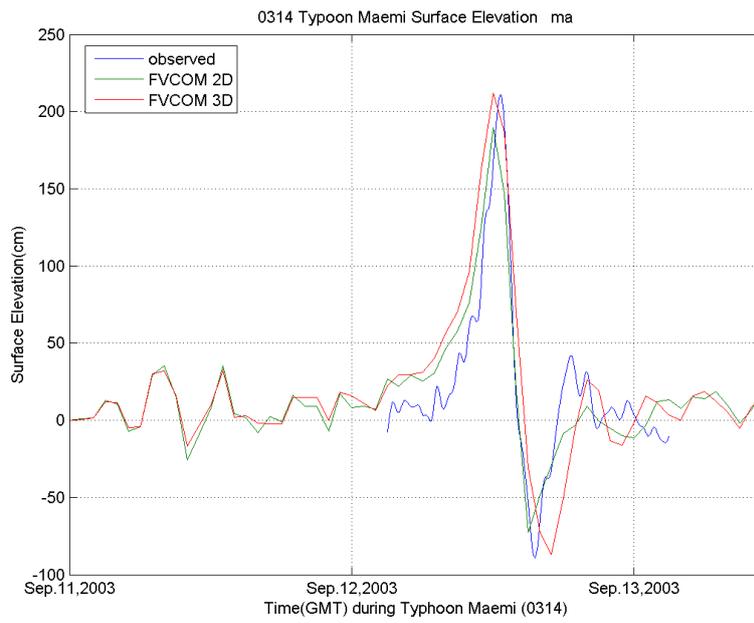


Fig. 6.3.36. Comparison of typhoon Maemi surface elevation b/w 2D and 3D model

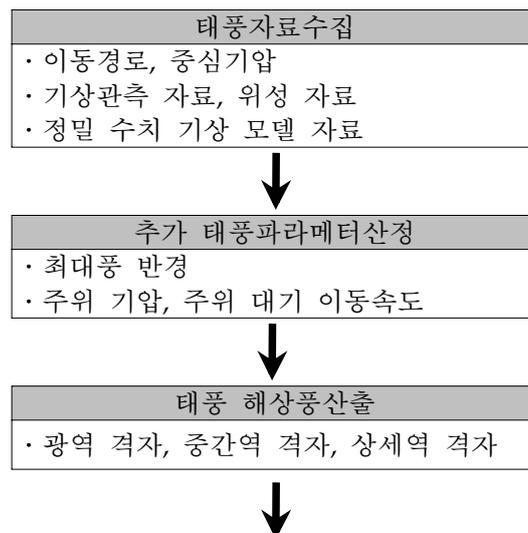
10. 주요 태풍에 대한 정밀격자 해일고 및 침수역 시범추산과 통계/극치분석

가. 개요

장기간 해면 관측 자료가 있는 지점에서는 그 해면 관측 자료를 분석하여 극치 분석을 통한 설계해면을 산출할 수 있다. 전 연안에 대해 정밀 격자의 침수범람 방재를 위한 설계해면을 산출하기 위해서는 간접적으로 폭풍해일 추산 수치 모델을 이용하여 과거 장기간의 기상 입력 자료로부터 전 연안 각 격자점에서 장기간 폭풍해일고를 산출하여 이를 통계 분석하여 설계해면을 구하는 방법과 폭풍 자료의 분석을 통하여 Design Storm을 설정하여 이에 대한 폭풍해일을 산출하여 설계해면을 구하는 방법으로 크게 두 가지를 들 수 있다. 이 방법들 간에는 서로 장단점이 있는데 재기년도별 설계해면의 산출을 위해서는 장기간의 폭풍해일 산출을 통한 방법이 일반적으로 이용되고 있다.

Fig. 6.3.37는 태풍 통과시의 태풍해상풍 모델에 의해 산출한 해면기압 및 해상풍을 입력자료로 폭풍해일을 산출하는 과정에 대한 계산 흐름도를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 FVCOM 모델을 이용하여 201개 전 태풍에 대해 폭풍해일을 산출하고 정밀 계산 모델을 이용하여 주요 큰 태풍 20개에 대해 폭풍해일을 시뮬레이션하여 이들의 복합으로 설계 해면을 산출했다. 태풍에 의한 폭풍해일의 계산은 1951년부터 2008년까지 우리나라에 영향을 미친 201개의 태풍에 대하여 수행하였다. 적용한 태풍의 진행 경로는 Fig. 6.3.38과 같다.



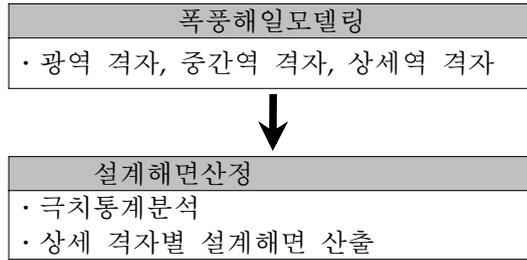


Fig. 6.3.37. Flow chart of designing surface elevation by long-term storm surge calculation

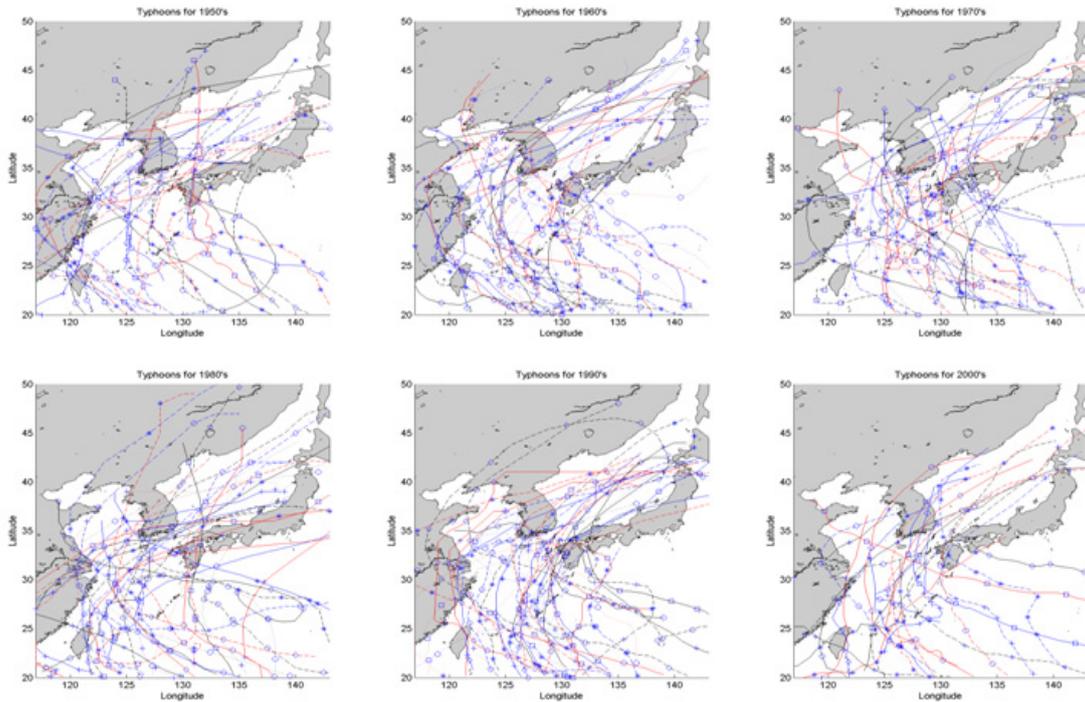


Fig. 6.3.38. Typhoon track used to long term storm-surge simulation

나. 장기 폭풍 해일 산출 및 통계/극치분석

극치통계학은 최대 및 최소치의 시계열을 다루는 분야로서 수문학(hydrology)에서 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.

극치해면을 산정할 때 연안구조물의 내구년수에 해당하는 기간의 관측자료가 축적되어 있으면 가장 이상적이다. 파랑에 의한 피해를 막기 위하여 항만에 건설되는 방파제는 50년 빈도의 설계파랑을 사용하고 있으며 대부분의 연안구조물의 목

표 내구년수(target life time)는 50년 이상이다. 우리나라의 경우 50년 이상의 조위의 관측 자료는 없는 실정이므로 극치통계학의 빈도해석기법을 사용하여 원하는 빈도의 해면을 추산하여야 한다. 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 추정이 필연적인 과정이다. 극치통계해석에서 사용된 통계 모형은 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), 통상 모멘트법(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 결과 가장 상관성이 양호한 것으로 나타나 최종적인 재현기간별 폭풍해일고의 산출에는 LSM을 사용하여 계산하였다. Table 6.2.18에는 극치분석법으로 산출한 재현기간별 폭풍해일고를 나타낸 것이다.

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 격자를 구성하였다.

장기 시뮬레이션에 의한 극치해면을 산출하기 위하여 과거 56년간 우리나라에 영향을 끼친 태풍에 대하여 폭풍해일을 산출하였다. 1951년~2006년의 58년간 201개 태풍을 선정하였으며, 태풍 해상풍 모델을 이용하여 태풍 통과시의 기압장과 바람장을 산출하여 모델의 입력자료로 활용하였다(Table 6.3.1).

FVCOM 정밀모델의 최소격자는 약 400m 정도이며, 극치분석에 의한 빈도별 해일고를 산출하였다. Table 6.3.9은 FVCOM 모델로 산정한 폭풍해일고의 상위 10개 태풍에 대한 격자별 최대해일고를 나타낸 것이다.

Table 6.3.9. Surge height of major 10 typhoons at Busan, Masan, Yeosu

순위	태풍번호	마산	태풍번호	여수	태풍번호	부산
1	5707	252.3	0314	143.7	0314	128.1
2	0314	246.6	0215	141.8	5914	95.9
3	0014	215.3	8705	115.4	8712	80.0
4	9503	154.8	9429	111.5	5707	63.5
5	8705	153.4	9503	109.6	0014	61.2
6	0215	132.2	6304	94.4	0415	56.8
7	6304	124.2	9809	88.0	8705	51.5
8	9429	114.1	5707	80.5	5612	44.0
9	5914	112.8	8613	75.7	9429	43.7
10	6104	92.7	5914	74.0	6304	40.0

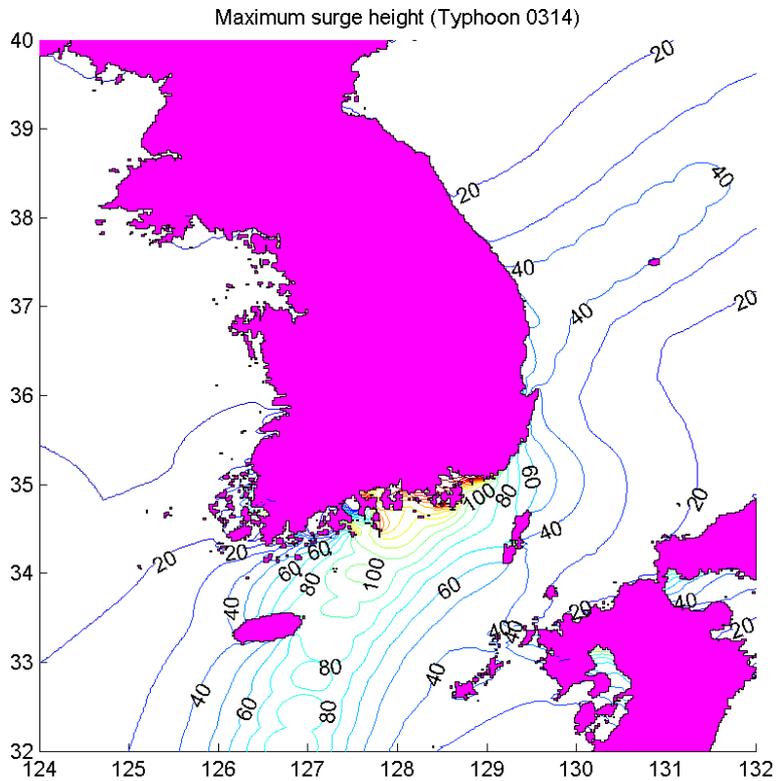


Fig. 6.3.39. Maximum surge height of Typhoon Maemi

Table 6.3.10. Maximum surge height (FVCOM)

재현기간	10	20	30	50	100	150	200
마산	119.44	157.04	180.10	210.15	252.50	278.04	296.48
부산	61.70	83.16	96.53	114.15	139.30	154.62	165.75
여수	91.84	119.79	136.93	159.27	190.75	209.73	223.44

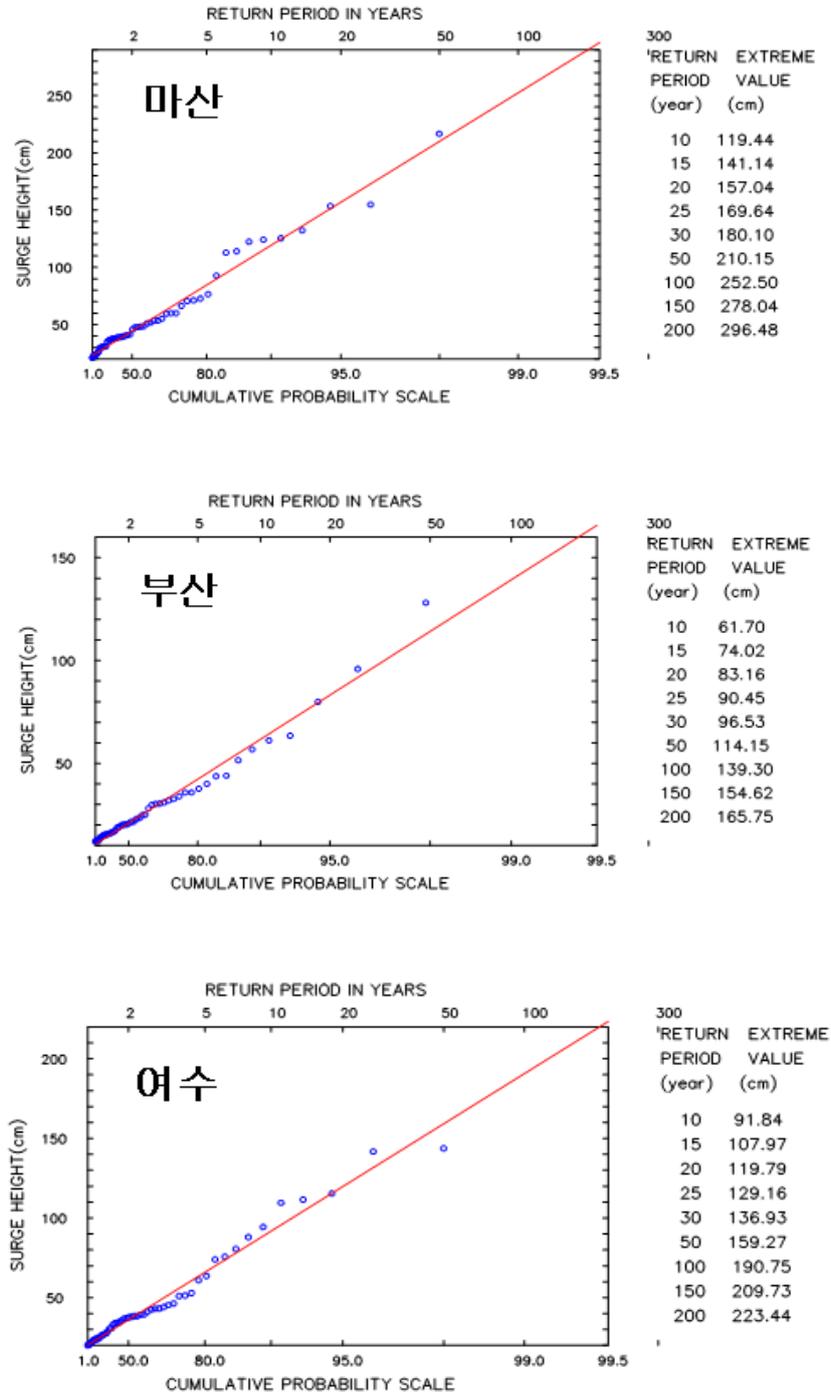


Fig. 6.3.40. Extreme frequency maximum surge height by statistical analysis

다. 침수범람 시나리오 산정

침수범람 모의를 위한 시나리오의 산정을 위하여 각 대상해역 별 과거 50년간의 폭풍해일고 산정치 중 상위 50개의 태풍을 선정하였다. 그리고 선정한 상위 50개 태풍에 대한 폭풍해일과 조석을 함께 모의하여 최대해일고를 산정하였다. 이 자료를 이용하여 각 대상해역 별 재기년도 별 극치분석 실시하였다.

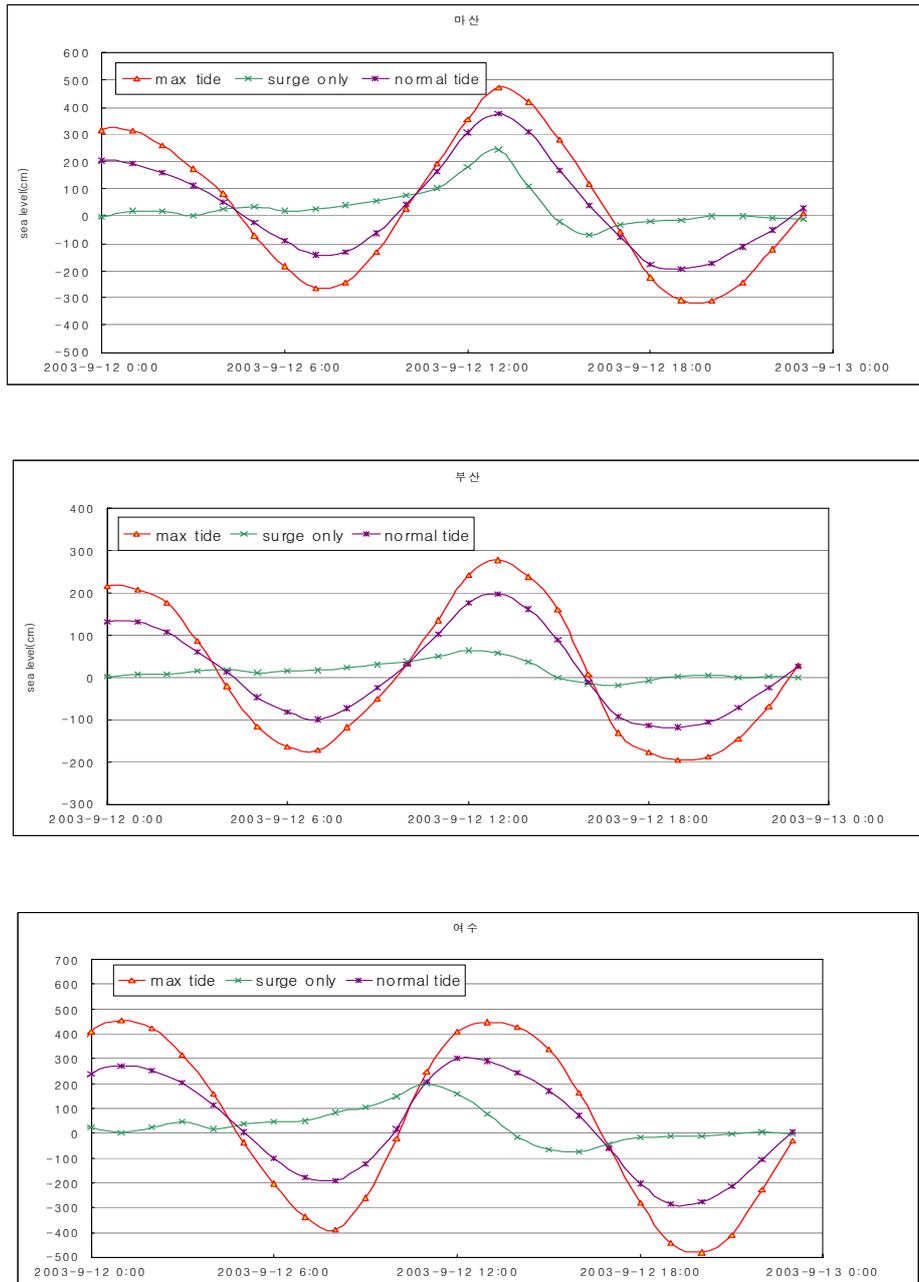


Fig. 6.3.41. Maximum surge height by senario: Masan, Busan, Yeosu

최대가능 침수범람 시나리오의 모의를 위해 대조최고 고조면시에 태풍이 내습하는 경우를 선정, 이를 위하여 개방경계의 입력 8개 분조값을 합쳐서 반일주조 M2에 적용하였다. 이러한 모의는 약최저면에서 주요 4개분조의 합만큼 더해서 구한 평균해수면값에 다시 주요 4개분조의 합을 더한 약최고고조위의 조석이 적용되는 경우보다 훨씬 더 큰 조석외력이 12시간 주기로 계속 들어왔다 나갔다가 반복하는 매우 거대한 조석이 적용된 경우이다. 8개 분조의 amplitude가 모두 최대로 적용되는 일명 8중사리의 경우로서 실제로 내습할 확률이 굉장히 적지만 매우 적은 확률이어도 실제 내습이 가능한 최대조석의 경우이므로 최대 침수범람역 모의를 위한 익스트림 케이스에 적용하였고, 이 최대 조석이 내습하는 조건에 맞추어서 태풍 매미의 내습을 모의하여 가상 최대 범람역 산출의 시나리오로 이용하였다.

Fig. 6.3.41에는 마산 해역에서의 시나리오에 따른 최대해일고 산출결과를 나타내었으며 붉은선은 8중사리 가능최대해일고, 보라선은 실제 태풍 매미 시의 조석과 폭풍해일 결합모델의 결과, 녹색선은 실제 태풍 매미 시의 폭풍해일 모델의 결과이다. 최대가능해일고의 경우에는 기존의 결과에 비해 약 1미터 이상 높은 해일고가 발생 할 수 있음을 보여주고 있다.

대상해역의 침수범람역 산출 결과를 보면 기존 태풍 매미(0314) 등 태풍의 내습에 큰 피해를 입었던 마산의 경우에는 8개의 합성분조의 합을 적용한 최대범람가능 시나리오의 경우에 약 4.7m의 조석과 폭풍해일이 결합된 해일고가 발생할 수 있는 것으로 나왔으며 이에 따른 범람 피해는 Fig. 6.3.42와 같이 표고 3m 만의 저지대에 걸쳐서 광범위하게 나타나는 것으로 모의되었다. 그리고 기존의 태풍내습 모의로는 범람의 피해가 상대적으로 적게 모의되는 여수와 부산지역의 경우에도 본 연구의 최대가능 범람시나리오를 적용하였을 때, 해안 저지대를 중심으로 범람 피해역이 발생하는 것으로 모의되었다. 이는 향후 매우 강한 태풍이 사리시의 만조시와 맞물려 내습할 경우에 발생할 수 있는 범람 피해지역을 나타내주고 있다고 할 수 있다.

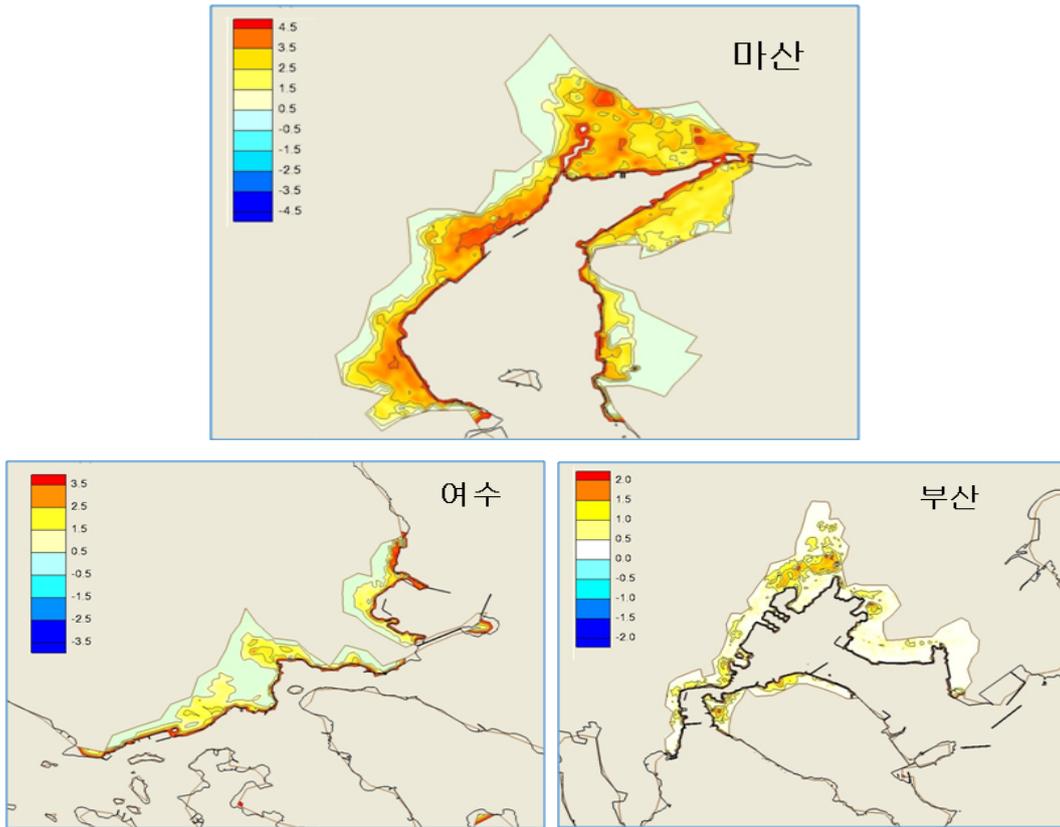


Fig. 6.3.42. Maximum inundation range from numerical model
: Masan, Yeosu, Busan

제 4 절 기후변화(지구 온난화)의 영향 분석

1. 개요

지구온난화에 의한 지구 환경 변화가 예상되어 현재 사용하는 설계조건인 장기 통계적 추산 방법 자체에 문제가 있을 수 있다. 지구의 기후적 특성이 지구 온난화의 영향으로 달라지고 있어 과거 수십 년간의 파랑의 통계적 특성이 향후 같은 기간의 통계적 특성과 같다는 가정 자체가 무너지고 있어 과거의 파랑 자료 연속 산출에 의한 각 재현 빈도의 설계조건인 산출은 근본적인 방법 자체에 대한 의문이 제기된다. 현 상황으로 불확실한 지구 기후 변화의 영향을 고려하는 것은 현재로는 불확실성이 많아 기술적으로 무리라고 판단된다. 본 산출에서는 지구 기후 변화를 무시하고 정상 상태라는 가정에서 과거 파후 산출 결과를 분석한 결과를 제시했다. 지구 기후 변화를 고려하지 않은 파후 특성으로 제시하고 지구 기후 변화의 영향을 정량적으로 고려하는 방법은 추후의 연구 과제로 남겨 두었다.

지구 온난화 영향을 반영하는 방법이 불확실하다고 하여 이를 전혀 고려하지 않을 수도 없을 것이다. 지구 기후 변화가 진행되고 있다는 데는 여러 전문가들 사이에 공감대를 점차 형성하고 있고 그 징조가 여기저기 나타나기 때문에 이를 전혀 무시할 수는 없다고 보며 앞으로 지구 기후 변화 영향으로 자연재해가 크질 것이라는 전망이 우세하기 때문에 이에 대비하여 인명과 관계되는 민감한 구조물의 설계시에는 지구 온난화 영향을 일부 고려하여 설계하여 재해의 증가에 대비를 해야 할 것이다. 가장 간단한 방법으로는 지구 기후 변화를 무시한 결과에서 지구 기후 변화에 의한 위험을 고려하기 위해 간단히 설계파를 5-10% 증대 시키는 것도 고려해 볼 수 있다. 그러나 불확실한 정보를 토대로 설계파를 크게 높이면 지금으로써는 막대한 국가 예산이 요구되는 등 혼란이 초래될 수 있어 이에 대한 철저한 검토가 요구된다.

현대과학이 크게 발전하여 지구환경 문제에 의한 기후 변화에 따른 이상 파랑의 강도, 발생 빈도의 변화가 정량적으로 예측할 수 있게 되는 것을 가까운 장래에 기대하기는 어려운 것 같다. 앞으로 지속적으로 기상 및 해양을 철저히 모니터링하고 지구 기후 변화에 대한 경향과 효과에 대한 지식을 축적하여 과학적 근거를 바탕으로 하여 지구 온난화의 영향을 고려 방법을 도출하는데 노력하여야 할 것이다. 기존의 태풍 강도 변화 등의 정보를 활용하여 비정상 상태의 극치 해석 방법

에 대한 연구 개발로 기후 변화의 영향을 간접적으로 고려하는 시도가 필요하다고 본다.

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 통계처리에 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, 불확실한 예측에 따라 그 영향을 적용하여 연안 구조물을 설계하여 건설하는 경우에는 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.

현재 전 세계 여러 곳에서 지구 온난화의 징조가 발견되고 있다. 극지의 빙하가 녹는 것은 그 대표적인 예라 할 수 있다. 우리나라에서도 여름철이 길어지고 생태계의 변화가 일어나는 등 지구 온난화의 영향이 나타나고 있다. 지구 기후변화에 대해서 최근에 와서는 인간의 활동이 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 자연재해를 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.

지구온난화에 따른 해면 상승은 우리나라 주변 해역의 해양 환경, 생태 등 여

러 영향과 동시에 연안 시설에 대해서도 영향을 줄 것이 염려되고 있다. 지구온난화에 의한 지구 기온 상승으로 인한 해수면 상승은 해수면 침식, 침수 범람 피해 등 연안 지방에 많은 문제를 일으키게 되어 많은 관심을 보이고 있다. 해면 상승은 직접적으로는 시설물의 설계고의 추산에 그리고 간접적으로는 수심의 변화가 파랑이나 흐름에 영향을 주어 시설의 안전성이나 기능성에 영향을 주는 것이 예상되어 지구온난화에 의한 해수면 상승이 연안 시설물 설계에 영향을 미칠 수 있다. 조석, 폭풍해일 등으로 설정되는 설계해면 추산에 얼마나 영향을 미칠지 그리고 해수면 상승에 따른 연안 국지 파랑의 증가로 인한 천해설계과 설정에 얼마나 영향을 미칠지가 연안, 항만 기술자들의 관심이다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)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. 실제 우리나라 각 해역에서 연안 시설물을 설계할 때에 지구 기후변화에 의한 해수면 상승을 어떻게 반영해야 하느냐는 문제가 관심이 되었다.

지구온난화에 따른 폭풍의 강도의 변화를 고려하느냐에 대해서는 아직 많은 논란이 있다. 아직 이에 대한 우리의 지식이 불충분하여 예측에 많은 오차를 유발할 수밖에 없는 상황에서 경비가 많이 소요되는 연안 시설물의 설계를 불확실한 정보에 의존한다는데 많은 논란이 있어 일반 연안 시설물의 설계에 아직은 이를 고려하는 것이 시기 상조라는 의견이 지배적이다. 그러나 지구기후변화에 의한 여러 변화들 중에서 해수면 상승은 대체로 받아들여지는 현상이기 때문에 연안 시설물을 설계 시에 지구 기후변화에 의한 해수면 상승은 고려가 필요하다고 볼 수 있다.

장기간의 해수면 극치는 지구 기후변화에 의한 평균 해수면의 장기변화, 그리고 지구 기후변화에 의한 해수온도의 상승 등에 따른 태풍의 강도, 빈도의 변화 등 복합 요소에 의해 결정되는데 아직 이에 대한 정확한 예측이 안 되고 있다. 기후변화에 따른 장기 해일 특성 변화 예측은 아직 초기 단계로 단기간의 연구로 활용 가능한 기술의 개발은 어렵다고 본다. 우리나라가 국제기구에서 추진하는 전 지구 관측 프로그램에 적극 참여하며 우리나라 주변 해양에 대한 장기간의 신뢰성 있는 관측 자료의 축적이 요구된다. 기후 변화에 따른 장기 해일 특성 변화 예측을 연안해일 재해 저감 사업으로서 단기간에 적용 가능한 결과를 내기는 기대하기 어렵

지만 외국에서의 이 분야의 연구를 지속적으로 따라가서 그 결과를 우리가 우리 지역에 대해 제대로 해석하고 활용할 수 있는 수준의 노력은 최소 투지해야 할 것이다.

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. 태풍의 강도와 빈도가 커져 폭풍해일로 인한 피해가 날로 심각해지리라 예상되고 있으며 최근에 예를 들어 2000년의 프라피룬, 2002년의 루사, 2003년의 매미 등 큰 피해를 주는 A급 태풍의 잦은 내습은 불길한 징조를 보이고 있다. 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.

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

2. 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.

해수면의 변화는 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 불확실성에 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 년으로 는, 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.

3. 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 추산의 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.

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

Fig. 6.3.43는 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. Fig. 6.3.44은 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 Table 6.3.11와 같다.

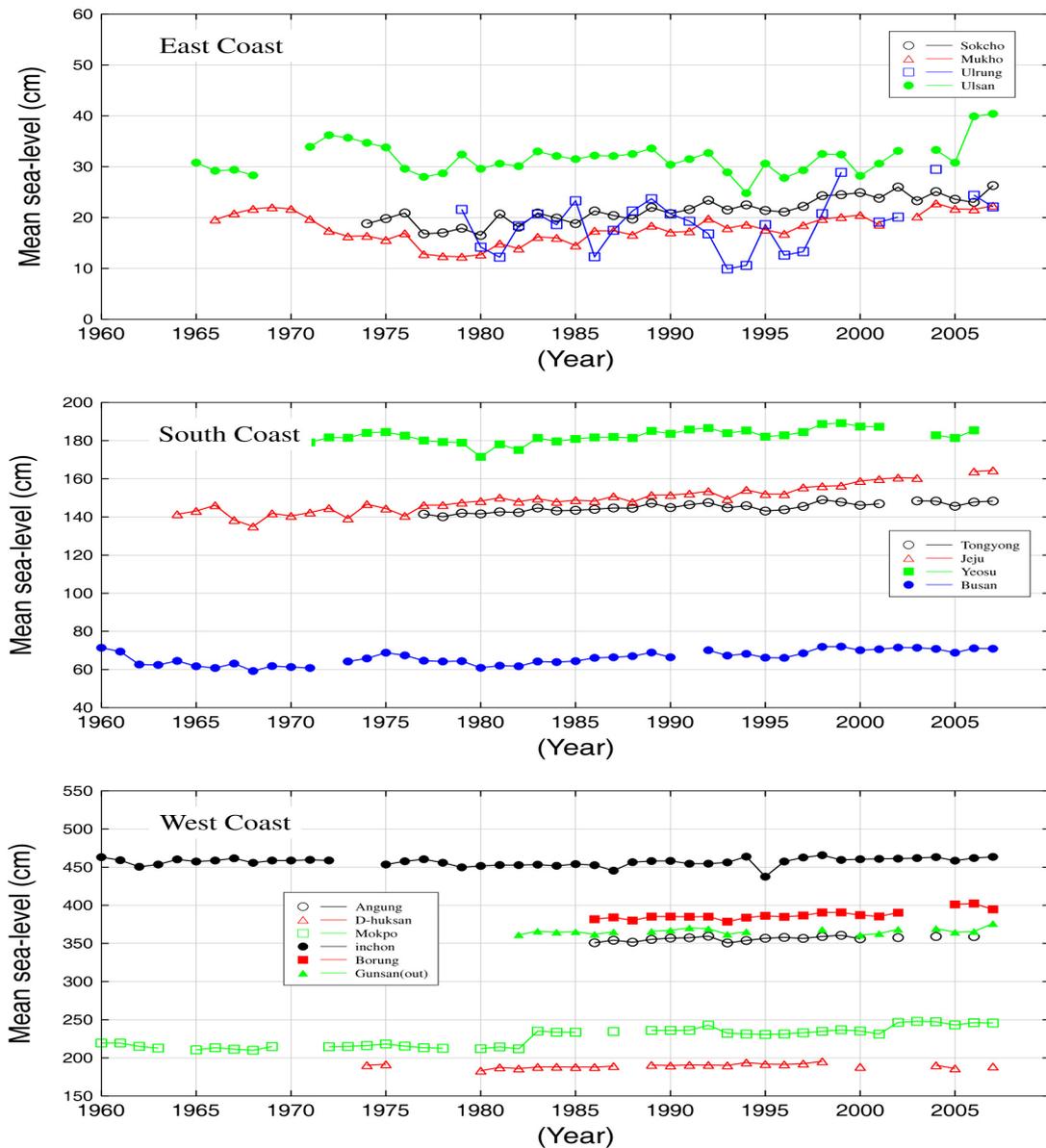


Fig. 6.3.43. Mean sea level for each year of the temporal variation at each tide observation station

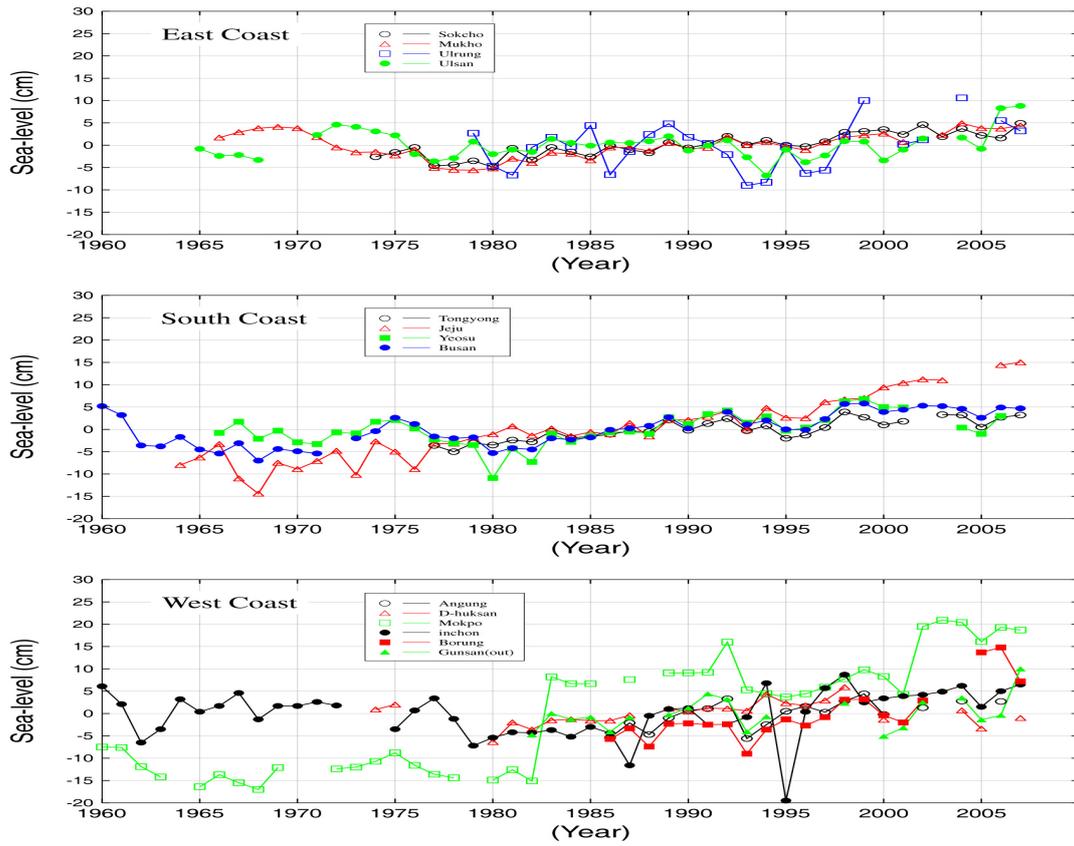
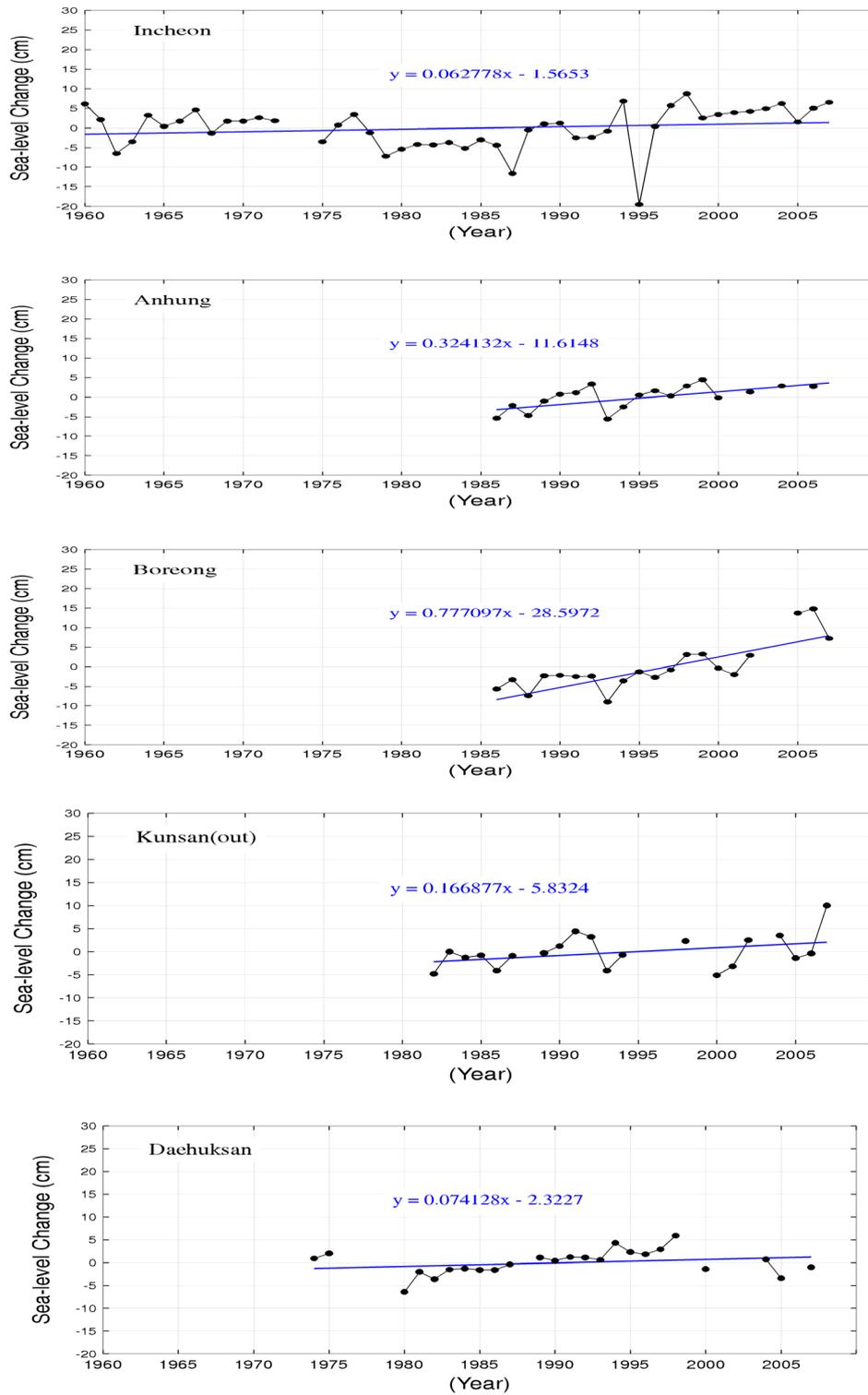


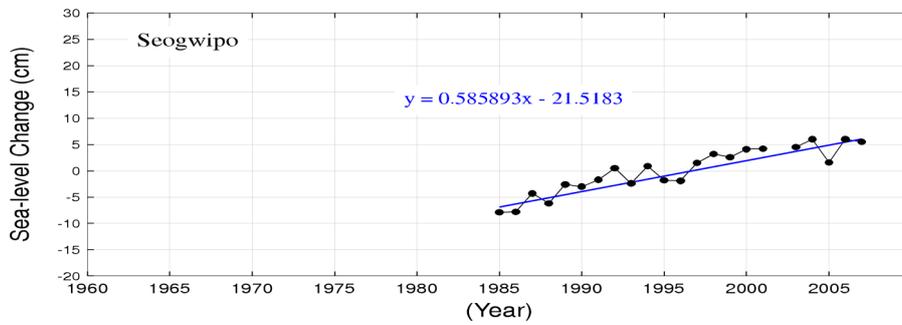
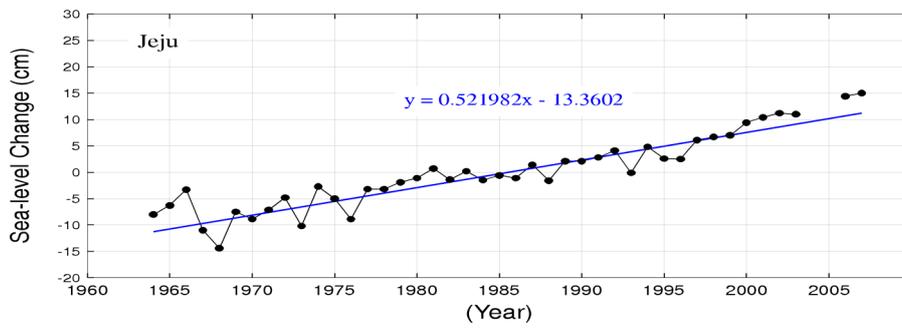
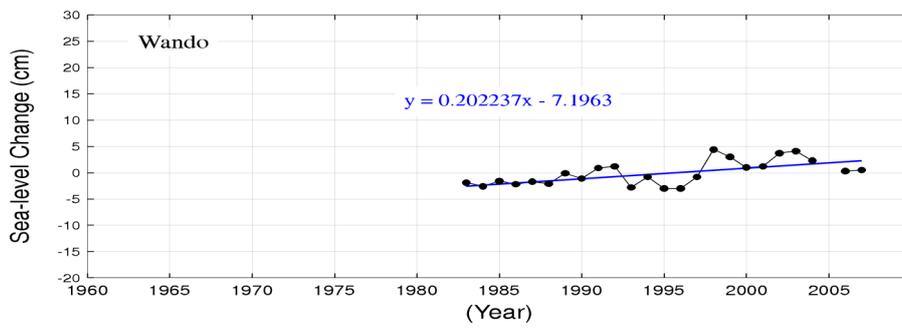
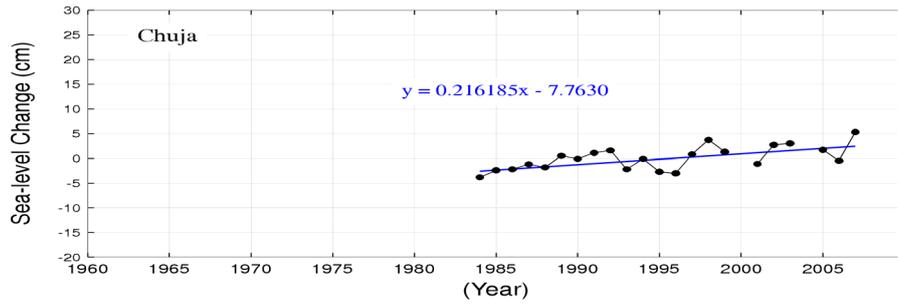
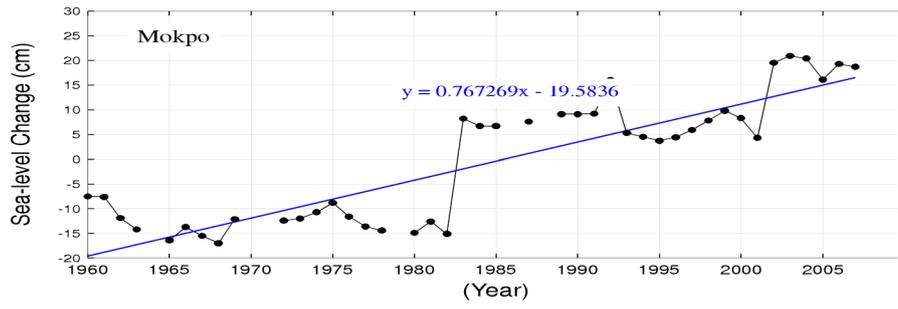
Fig. 6.3.44. Year variation in mean sea level of each tide observation station

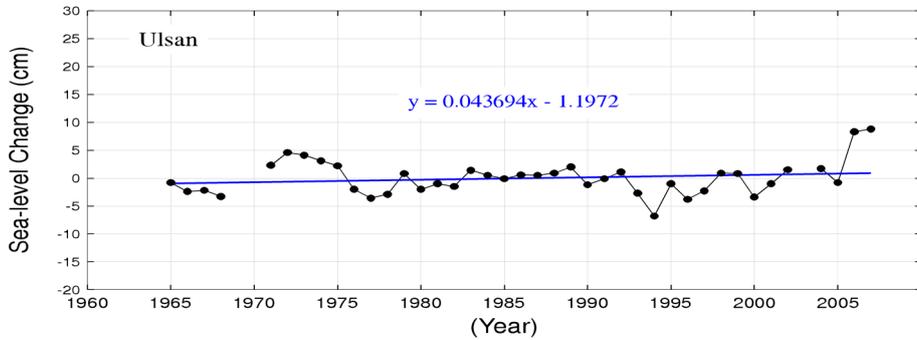
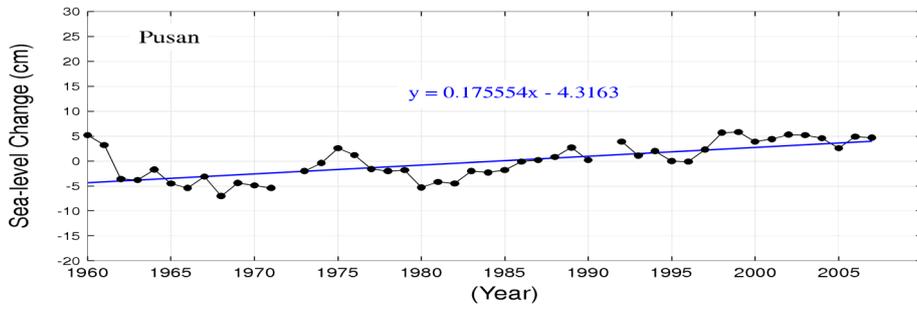
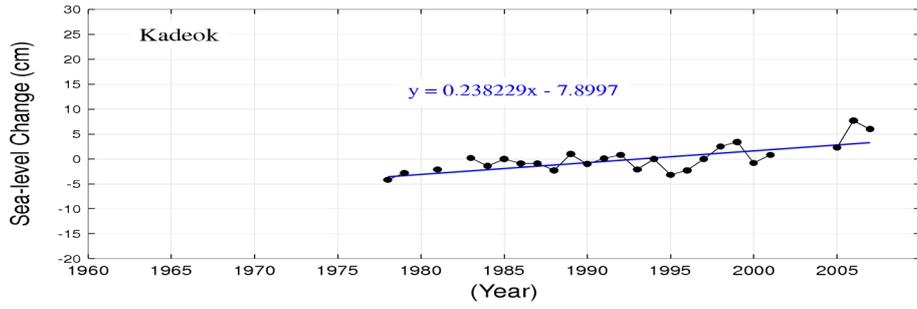
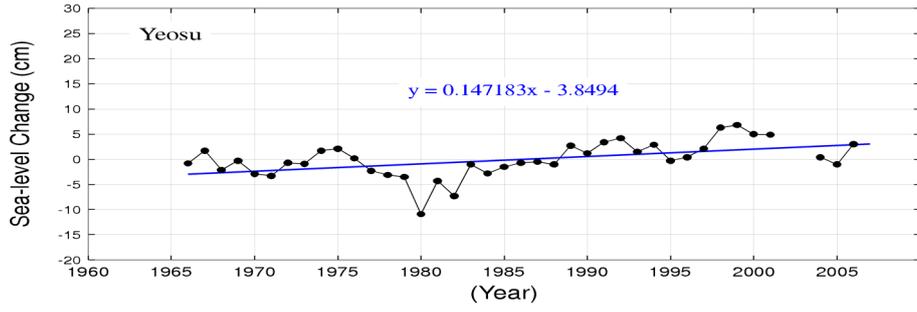
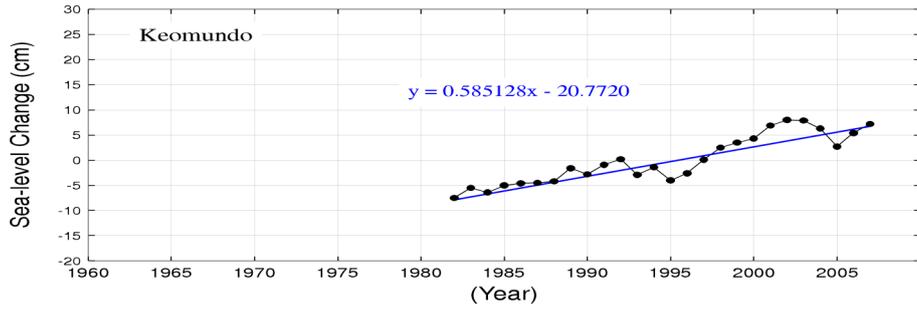
Table 6.3.11. Variation constants of mean sea level at 14 tidal stations

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

Fig. 6.3.45은 각 검조소별 년 평균해면의 변동을 시간(년)에 따라 선형적으로 변한다고 할 때 관계식을 보여 준다.







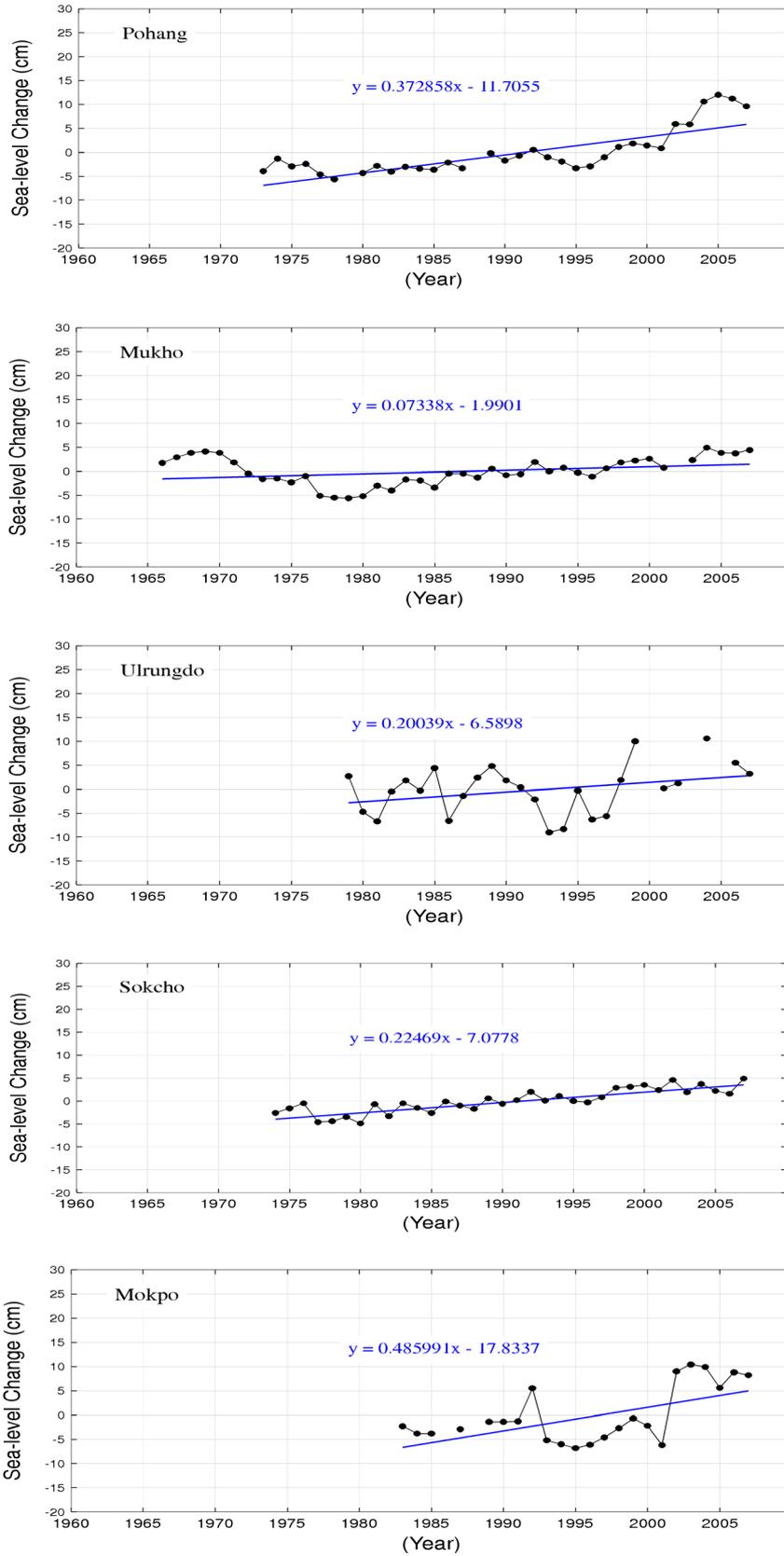


Fig. 6.3.45. Variation of mean sea level of each observation station

Table 6.3.12에서는 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.

Table 6.3.12. Yearly mean increasement rate of mean sea level

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

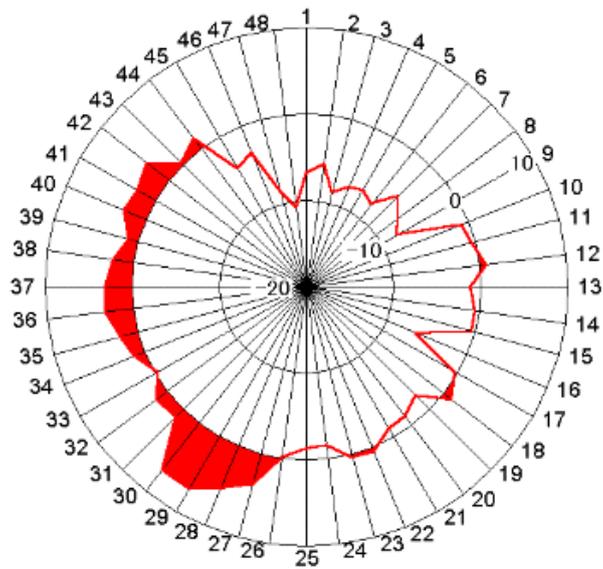


Fig. 6.3.47. Sea-level variation of each stations in Japan from 30 years

동일본(검조소 번호 1~26, 45~48)과 서일본(27~44)에서 평균한 해양 기원의 해면 수위 변동 경향은 그림 42와 같이 서일본에서는 상승(+2.4 mm/년), 그리고 동일본에서 하강(-3.1 mm/년)을 보여준다.

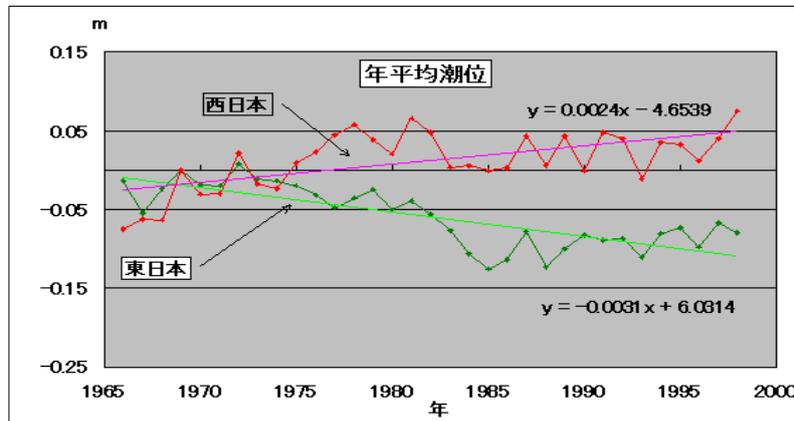


Fig. 6.3.48. Average sea-level fluctuations in east and west Japan

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, 천

진 연안의 상승률 196 mm로 가장 높게 나타났고, 상해가 다음으로 115 mm, 산둥, 절강이 100 mm 내외, 복건, 엄동이 약 50~60 mm로 전체적으로 북방이 빠르고 남방이 느리게 나타났다.

2007년 중국 연근해 해수면 상승속도는 전지구의 평균을 능가했다. 2007년, 중국 연근해 해수면 평균상승속도는 약 2.5 mm/년로 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, 상승 폭이 90 mm에 도달했다.

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 IPCC(유엔정부간 기후변화위원회)의 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 변동을 분석 결과에 IPCC의 각 배출 시나리오에 따른 미래 기후변화에 측에 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 기후 정책 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 시나리오

의 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 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 상승률로 온난화가 진행될 것으로 전망된다. 온실가스 및 에어러솔 농도가 2000년 수준으로 일정하게 유지된다 하더라도 기온은 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 비율로 온난화 될 것으로 예상된다. 그 후의 기온 전망은 배출 시나리오에 따라 달라진다.

기후변화 모델링이 진전된 덕분에 지금은 여러 배출 시나리오에서 온난화 전망의 최적 추정치와 가능한 불확실성 범위를 제시할 수 있다. Table 6.3.13은 6가지 SRES 마커(대표) 시나리오(기후-탄소 순환 피드백 포함)에 따른 지구 평균 기온 온난화의 최적추정치와 가능한 범위를 나타낸 것이다.

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 16에 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, 1250, 1550ppm이다. 기온 변화는 1980~1999년 기간의 기온과의 차이이다.

Table 6.3.13. Expectation of increasement of sea level owing to global warming

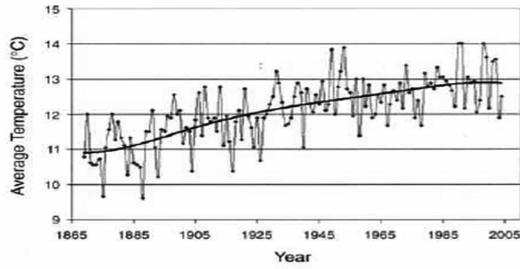
시나리오	기온변화 (°C, 1980~1999년 대비 2090~2099년)		해수면 상승 (m, 1980~1999년 대비 2090~2099년)
	최적추정치	가능범위	모델에 기초한 범위 (빙하 유출의 향후 급속한 역학적 변화는 제외)
2000년 농도로 일정	0.6	0.3~0.9	유효한 자료 없음
B1 시나리오	1.8	1.1~2.9	0.18~0.38
A1T 시나리오	2.4	1.4~3.8	0.20~0.45
B2 시나리오	2.4	1.4~3.8	0.20~0.43
A1B 시나리오	2.8	1.7~4.4	0.21~0.48
A2 시나리오	3.4	2.0~5.4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

마. 태풍 강도 변화

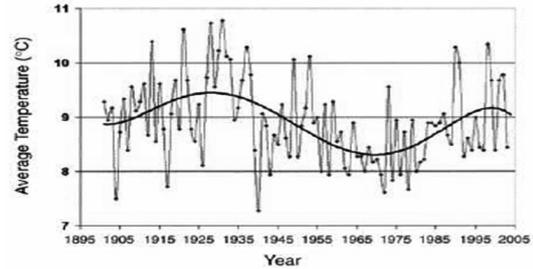
MIT의 기상학자 Emanuel 박사가 1987년에 태풍의 지구 기후 변화의 영향에 관한 논문을 발표한 이후로, 지구 온난화에 따라 태풍의 빈도와 강도가 강화된다고 주장하는 논문이 많이 발표되었다. 최근에는, 특히 2000년도 초기에 들어 세계 각지에서 열파, 호우, 홍수, 태풍 등의 이상 기상이 빈발하고 있다. 2003년 우리나라 남동 해안을 덮친 태풍 매미에 의한 피해, 2004년 일본에 태풍이 평상시보다는 훨씬 많이 상륙하여 일본 항만국에서 운영하고 있는 파랑 관측망(NOWPHAS)의 여러 관측소에서 최대파 관측 기록을 갱신한 사실, 그리고 미국 플로리다주에는 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 있어 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 Fig. 6.3.49에서 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 기간내에, 서두러지 않으면, 조금 지나 큰 태풍이 오지 않게 되면 태풍 재해에 대한 관심이 줄어 태풍 재해 관련 연구사업을 일으키는 것이 어려울 것이라고 말해 왔었다. 최근에는 그렇게 큰 태풍이 내습하지 않아 이를 뒷받침하는 것 같아 보이지만, 가까운 장래에 어떻게 달라질지 모르는 일이다.



〈New York〉



〈Albani〉

Fig. 6.3.49. Example of long-term change of average temperature in 2 city of New York

바. 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 해수면의 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 진행된다면, 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 풍우등을 가져오는 현상으로, 지구 온난화에 수반하는 열대 저기압 활동의 변화를 수치 모델에 의해 상세하게 추정하는 것은 현재의 기술 수준으로는 충분하지 않다. 현재 상태로는 지구온난화에 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 않

은 지역에서도 앞으로는 큰 피해를 입을 수 있을 가능성도 있을 수 있겠다.

연안 방재 시설물의 설계 및 장기 방재 대책 수립의 기본 자료로는, 재기년도 별로 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 지역에서 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.

제 7 장 해일 침수범람 예측 표준화 연구

제 1 절 해일 침수범람 예측 표준화

1. 예측모형 선정 및 고려사항

(1) 예측모형 구축시 고려사항

해일침수범람의 주요 원인인 폭풍해일을 예측하기 위해서는 기본적으로 태풍에 의한 기압강하, 해상풍, 진행속도 등에 의한 해수면 변화양상을 충분히 재현할 수 있어야 한다. 또한 해일 발생에 따라 수반되는 범람 및 침수에 대한 평가를 위해서는 육지이동경계(wet/dry) 처리가 가능해야 한다.

해일침수범람은 해양환경 및 지역적 특성에 따라 다양한 양상으로 나타난다. 따라서 해양환경을 반영하기 위해서는 필요에 따라 조석과 파랑 등을 결합한 모의가 필요하며, 지역적 특성을 반영하기 위해서는 서남해안과 같이 복잡한 해안선 및 섬지역에 대한 해석이 필요하다.

일본의 경우는 대조평균고조위(7월~10월)을 위험지도 작성시 기본 조위면으로 정하고 있으며, 폭풍해일에 의해 연안에 인접한 하천의 경우는 지형여건을 충분히 고려하여 하천주변의 범람도 고려할 것을 권장하고 있다. 또한, 홍수에 대한 영향을 고려하고자 할때는 하천유량을 함께 고려할 수 있다. 이밖에도 필요에 따라 월류 및 월파에 따른 연안 보전시설 등의 연안시설물 파괴조건도 고려할 수 있다.

미국 FEMA는 최소 20년 이상의 관측자료가 확보된 지역에 대한 100년 빈도 정수면(still-water level)을 기본 조위면으로 정하고 있으며, 이 조위면으로 연안구조물의 안정성 및 연안 침식을 평가하고 있다. 위험지도 작성을 위한 해일고 산정은 Wave Runup, Setup 그리고 Overtopping을 고려하도록 정하고 있다. NOAA의 경우는 허리케인 내습시 연안에서 해일발생 평가가 주관심대상으로 실시간 수집되는 기상관측 및 예측정보를 이용하고 있다.

우리나라에 적합한 재해도 작성을 위해서는 태풍에 의한 기압강하, 해상풍, 진행속도 등을 감안한 폭풍해일과 육지이동경계 처리 및 월류가 고려되는 범람이 동시에 모의가 가능해야 하며, 재해도 작성을 위한 조위면은 서남해안의 경우 대조기 만조시에도 일부 저지대가 범람됨을 감안하여 원칙적으로 약최고고조위면을 고려하

는 것이 타당할 것이다. 또한, 해일침수범람에 따른 연안구조물, 해안침식 및 연안에 인접한 하천 등도 지역적 특성을 고려하여 반영하는 것이 바람직할 것이다.

Table 7.1.1은 예측모형 구축시 고려사항으로 해일모의, 범람모의 및 정확성을 향상을 위한 항목으로 구분하여 제시하였다.

Table 7.1.1. Consideration of storm surge prediction numerical model

항목		세부내용
해일 모의	기압 공간장	<ul style="list-style-type: none"> - 태풍과 같은 저기압의 접근과 통과에 따라 수면이 상승하게 됨 - 폭풍해일 수치모의에서 먼저 태풍의 기압분포를 산정한 후, 이로부터 바람의 분포를 결정하게 됨, 기압은 특정시점의 정적조건하의 영향과 태풍 이동에 따른 동적조건을 동시에 고려하여 함 - 태풍의 기압분포는 일반적으로 동심원의 기압분포모델이 사용되고 있으며, 최근에는 실제 기압분포를 고려하기 위한 연구가 진행되고 있음
	바람 공간장 (최대 풍반경, Coriolis 포함)	<ul style="list-style-type: none"> - 해일모의시 해수면 변위 및 운동은 기압과 바람에 의해 주로 결정됨 - 태풍의 중심부는 주변에 비해 기압이 낮기 때문에 중심을 향하는 바람이 형성되고, 지구 자전에 따라 북반구에서는 오른쪽 방향의 힘(Coriolis force)이 작용하여 태풍 중심주변으로는 반시계방향의 바람이 불게 됨 - 태풍의 주요 파라미터인 최대풍 반경을 산출하기 위해서는 기압 및 바람장 자료가 요구되며, 태풍에 육지에 접근할 때 인근의 기상 관측소의 자료로부터 산정한다. 그러나 태풍이 먼 바다에 위치할 때는 관측소까지 거리가 멀어 일반적인 방법으로는 산정이 어려움 - 해상풍 산정을 위해 태풍중심과 1,000 mb 등압선까지의 거리, 인공위성 관측을 통한 시도 등이 있으나 객관성이 부족하여, 최근에는 태풍위치, 중심기압, 강풍반경 등의 관계로부터 반복법을 이용하여 해상풍을 산출함
	태풍 이동 속도	<ul style="list-style-type: none"> - 해상풍과 태풍 이동의 합성을 통해 태풍의 좌우측의 비대칭이 결정됨 - 북반구에서는 이러한 영향에 따라 태풍 진행에 따른 오른쪽을 위험반원, 왼쪽으로 안전 및 가항반원이라 함 - 또한 태풍 이동속도가 해당 해역의 장파 전파속도와 유사할 경우는 태풍의 영향을 받는 타지역에 비해 해일고가 증폭되므로 태풍 이동속도 및 방향에 대한 충분한 검토가 필요함
	해상풍 저감계수	<ul style="list-style-type: none"> - 마찰 영향을 받지 않는 바람인 자유대기풍은 해면부근에서 해면 마찰저항에 의해 풍속이 다소 작아지고 풍향도 태풍 중심을 향해 편향되어짐 - 이때의 풍속저감계수는 추산치와 관측치에 맞도록 선정되는 경험치로 일반적으로 0.6~0.7의 값이 사용되고, 풍속의 편향은 30~40° 정도임

	항력계수	<ul style="list-style-type: none"> - 항력계수는 모델 내에서 바람자료와 해면 변화를 직접 연결시켜 주는 것으로써 이의 적절한 산정은 모델 결과의 정확성에 중요한 영향을 끼침 - 항력계수에 대해서는 아직까지 검토해야 할 요소가 많이 존재하며, 계수를 조절함에 따라 과거 내습한 해일고를 보다 정확하게 재현할 수 있으나, 폭풍해일고의 예측적인 측면에서는 어떠한 값을 이용해야 할지 아직 불명확한 상태임 - 항력계수가 풍속에 따라 변화하는 것은 확실하나 이외에도 해면상태, 취송시간, 취송거리 또 대상해역의 크기 등의 요인이 관련지어진 복합적인 것임
	확산계수	<ul style="list-style-type: none"> - 수평 난류 점성계수는 격자 크기와 유속 경사에 의한 식으로 계산되며, 일반적으로 수평 난류 점성계수와 수평 난류 확산계수를 동일하게 취급, 대표적으로 Smagorinsky 식이 적용됨 - 수평 난류점성항 및 확산항을 통해 모델격자보다 작은 규모의 난류 혼합을 표현하며, 식물군락에 의한 저항, 파랑의 영향 등도 고려할 수 있음 - 격자 크기가 작고, 유속 경사가 작을수록 수평 난류점성계수가 감소함
	육지 이동경계 처리	<ul style="list-style-type: none"> - 범람모의를 위해서 해당격자점에서 침수/노출되는 지를 판단하여야 함 - 이는 계산영역의 경계를 정하는 방법으로, 경계면 자체의 이동을 동수역학적으로 해석하는 자유수면 흐름 문제와는 성격이 달라 이동경계라는 표현보다 침수/노출 또는 육지이동경계 처리기법이라 함 - 다양한 계산방법이 연구되고 있는데, 일반적으로 파 선단부에서의 지형을 계단상으로 가정하고 육지측 격자점(노출격자)의 지반고보다 바다쪽 수위가 높을 경우에 그 차를 수심으로 사용하여 유량을 계산하는 방법으로 계산최소수심을 설정하여 그 값 이상에 대해서 계산함
	바닥마찰 계수	<ul style="list-style-type: none"> - 바닥마찰은 비선형 장파이론식 적용시 사용되며, Manning 계수 또는 roughness 계수로 입력됨 - 범람이 발생하여 육지부 흐름이 생성되면, 이때의 바닥마찰은 바다에서의 계수값과 상이하게 되고 토지이용현황에 따라 추가적으로 구분되어야 함 - 토지이용현황에 따라 평균적인 마찰계수를 적용
	wave setup, overtopping	<ul style="list-style-type: none"> - 해일의 영향에 직접적인 범람이 발생하는 상황 이외에도 해안 형태, 방파제 및 제방 등의 해안시설물 등의 영향에 따라 수위가 상승하거나, 천단고를 월류하는 경우가 발생 - 범람모의시 이러한 부분까지 포함할 경우 해안에 인접한 도로, 시설물 등의 피해를 예측하는 데 효과적이며, 범람원인 규명을 위한 기초자료로 활용 가능함
정확도 향상	조석 및 파랑	<ul style="list-style-type: none"> - 실제 해일 및 범람 피해의 발생은 태풍과 같은 기상여건과 조석 및 파랑 등의 거동이 복합적으로 작용함 - 우리나라 서남해안과 같이 대조기 고조시에도 위험수위에 도달하는 곳에서는 조석의 영향을 충분히 고려해야 하는데, 태풍 내습시 조위, 위상 등이 복합적으로 검토되어야 함

	<ul style="list-style-type: none"> - 특히, 태풍과 조석 및 파랑의 영향이 동시에 고려될 때는 상호간의 비선형적 결합에 따른 현상이 나타날 수 있어, 모의시 이러한 복합적인 고려는 과거 태풍에 대한 검증에 있어 매우 중요하다. 또한 지역별 해일양상에 따른 조위 및 파랑과의 관계를 통해 피해를 예측하는 기본자료로 활용 가능함
하천 영향	<ul style="list-style-type: none"> - 하천 영향을 해일이 하천에 영향을 미치는 경우와 호우 등이 해안으로 영향을 주는 경우로 구분됨 - 수면변위에 따라 직접 영향을 받으며 만의 안쪽으로 길게 위치하거나, 수심이 얇은 만과 인접한 하천은 해일의 영향을 받기 쉬고, 하천주변에 범람이 발생할 가능성이 있으며, 모의시 하천 주변 및 배후지의 지역특성을 반영하여야 함 - 태풍 내습시 동반되는 호우에 대한 영향을 하천이 범람하게 되어, 그 영향이 해안까지 전파되는 경우는 해안저지대에 주로 발생하고 있으며, 이런 경우 해안으로 유입되는 하천유량을 모의시 반영함

2. 기존모형의 검토

해일 및 범람모의가 가능하며 국제적 인지도가 있는 수치모형은 ADCIRC, FVCOM, INSPECT, SLOSH, MIKE Series 등이 있으며, 기존의 해수유동 모형에 기반하여 해상풍을 고려하는 모형도 다양하게 연구되고 있다.

NOAA는 허리케인에 따른 해일예측을 위해 SLOSH 모형을 미국 동부해역을 39개 계산영역으로 구분하여 활용하고 있으며, FEMA는 자체개발한 RUNUP 모형 및 DHL, USACE 등의 경험식 등을 활용하도록 정하고 있다.

일본은 미국과 같이 해일침수범람 예측시 특정 모형을 적용하는 것을 규정하지 않고, '외해에서는 선형장파이론을 적용하고 육상 및 천해에서는 마찰 등을 고려한 비선형장파이론을 적용한다' 등으로 필수적인 고려사항을 제시하고 있다. 세부적으로 기압저하, 해상풍, 지구자전, 해저마찰 등의 반영과 해일의 여진동(resurgence) 구간을 수치모의 기간에 포함해야 한다는 등의 사항이 있으며, 그 밖에 쇄파, 해변마찰, 월파유량 등은 현행의 기술수준에 근거하도록 권장하고 있다(Table 7.1.2).

예측 표준화를 위한 수치모형을 선정하기 위해서는 이상과 같은 조건을 만족하며, 적용성과 사용성을 충분히 검증한 후 우리나라 해안의 특성을 충분히 재현하는 모형으로 선정하는 것이 바람직하며, 필요시 추가적인 모형의 개발 및 보완도 가능해야 한다.

Table 7.1.2. Comparison of inundation estimation at Japan and USA

구분		일본	미국
대상태풍		시나리오 태풍	실제 허리케인(기상예측정보 활용)
입력 정보	표고	- 표고오차 1 m 이하의 정확도가 확보된 지형도 활용 (축척 1:2,500 국토기본도)	- 표고오차 1.5 m 이하 정확도
	격자간격	- 침수예측지역 정확도를 확보할 수 있고 구조물 등 영향을 고려하여 선정 (통상 50 m)	- NOAA : 미국 동부해역을 39개 계산영역으로 구분하여 활용, 상황에 따라 수백m~km 격자간격으로 구성
	조도계수	- 토지이용상황에 따라 6가지로 설정	- 일정 범위내에서 적절한 값으로 설정
조위면 고려사항		- 대조평균고조위(7월 ~ 10월)	- NOAA : 실시간 예측 - FEMA : 100년 빈도 정수면 (최소 20년 자료확보)
수치모형		- 연안에서 바닥마찰 등을 고려한 천수방정식 모형(기압, 바람 등 외력고려) - 전구파와 여진동 시기가 충분히 고려된 기간동안 모의 - 외력상의 불확실성 요소인 태풍속도, 계산상 불확실성(처오름, 마찰계수, 월파량)은 필요시 고려	- NOAA : SLOSH 모형 - FEMA : 경험식 및 자체개발모형(RUNUP2.0, DHL, USACE 경험식 등) - NHC 활용정보 : 허리케인 위치정보, 진행속도, 중심기압, 최대풍속 - 최대풍반경은 중심기압 및 최대풍속 등을 활용하여 산정
도식방안		- 설정된 외력, 침수예측구역(침수심), 피난장소 및 경로, 기타 방재정보 포함	- NOAA : 5 feet 보다 큰 해일고가 발생할 확률을 색으로 구분하여 표시 - FEMA : Zone VE, Zone AE, Zone AH, Zone AO, Zone X 로 구분하여 표시
구체적 활용방안		- 국토교통성 홈페이지를 통해 지자체별 구축현황과악 및 지자체 홈페이지 연결 가능, 재해도는 지자체별 홈페이지에서 제공 - 폭풍해일, 지진해일, 홍수, 토사재해, 화산 등으로 구분(국토교통성) - 외국인을 위한 홈페이지 제작, 홍보	- NOAA : NHC 홈페이지를 통해 태풍의 예상경로 등과 같이 지역별 예상해일고 제공 - FEMA : 홈페이지 통한 지역별 제공 - 다양한 핸드북 및 전단지 제작을 통해 홍보(허리케인 지식, 과거피해, 대피요령 등)
주관/제작		- 연방정부 / 주정부	- 중앙정부 및 광역지자체 / 지자체
기타		- 폭풍 및 지진해일 등의 연안재해를 통합하려는 작성지침(세부사항은 구분하여 작성) - 재해정보제공 및 정보전달에 중점	- NHC 홈페이지를 통한 사용자 설문 실시(기술적 정확도, 사용자 편의성)

3. 예측모형의 표준안

1. 예측모형은 해일과 범람모의를 동시에 수행할 수 있는 국내외 전문가나 공인 기관으로부터 검증되거나 공인된 모형을 사용하여야 한다.
2. 예측모형은 해일모의에 필요한 해상풍, 조석, 파랑 등과 범람모의에 필요한 육지이동경계 처리, 연안육역 조도계수 반영 및 월류 등을 계산할 수 있어야 한다.
3. 필요시 해일거동 특성을 반영하기 위해 연안구조물, 연안에 인접한 하천 등을 고려하고, 계산조건에 필요한 각종 계수 산정식을 모형에 수정하여 반영할 수 있어야 한다.
4. 예측모형은 이상과 같은 조건을 만족하며 대상지역에 대한 적용성을 실측자료(해일고, 침수흔적 등)를 이용하여 충분히 검증해야 한다.

제 2 절 예측모형의 구축

1. 연안육역의 표고자료

육역의 지형자료는 수치지형도, 토지종합정보망 도면 DB, 건축물 대장(연안에 위치한 건물의 표고), 해안선 조사측량 결과 DB, 일반사업 측량 성과 등을 통해 획득이 가능하다.

범람모의시 상세하고 정확한 해안에 인접한 지형자료의 확보는 매우 중요하며, 해안침수예상도 제작시 침수심을 50 cm 간격으로 표시하게 규정되어 수치지형도 1:5,000의 표고점 오차는 ± 1.66 m로 현재 지형상태를 반영하기 어렵다. 따라서 수치지형도 1:1,000(표고점 오차 ± 0.33 m)와 LiDAR 측량성과를 적극 활용해야 한다 (Table 7.2.1).

Table 7.2.1. Classification of characteristics by resolution of numerical digital map

구분		1/1,000	1/5,000	LiDAR
평면(X, Y) 오차		± 0.70 m	± 3.50 m	1/2,000 × 고도
높이(Z) 오차	표고점	± 0.33 m	± 1.66 m	15~35 cm
	등고선	± 0.50 m	± 2.50 m	-

일본은 수직방향 오차가 1 m이하의 정확도가 확보된 지형도(1:2,500 국토기본도)를 활용하도록 정하고 있고, 미국은 1.5 m 이하 등고선 해상도를 활용하고 있다.

현재 수치지형도 1:5,000은 전국을 대상으로 구축되어 있으나, 1:1,000은 필요에 따라 부분적으로 주요 도심을 중심으로 구축되어 있는 실정이다. 특히, 도심에 인접한 연안지역의 해안침수예상도 제작시에는 반드시 수치지형도 1:1,000 또는 정밀 측량성과를 활용해야 표고오차에 따른 영향을 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다.

축척 1:1,000 상세지형도가 구축되지 않았을 경우, 도심지를 제외한 지역에서는 축척 1:5,000 이하의 지형도로부터 수치표고를 추출하고 보간을 통하여 구축할 수 있으나 정확도 향상을 위해 보완 측량이 필요하다.

2. 해안선 및 해저지형

해안선은 최소 축척 1:25,000 이하의 가능한 축척이 큰 최신 수치해도를 기준으로 작성하며, 자연해안선 이외의 주요 연안시설물(등대, 방파제, 방조제, 야적장, 하역시설 등)에 대한 검토를 통해 반영여부를 결정해야 한다. 또한 국립해양조사원의 해안선조사 측량성과가 있는 지역은 해안선 구축시 적극 활용한다.

수치지형도, 연안정보도 및 고해상도(1 m급 이상) 인공위성 영상자료 등을 이용하여 최근의 해안선으로 보완이 가능하다.

해저지형에 대한 자료는 국립해양조사원 수치해도, SHOALS 측량성과, 국토지리정보원의 연안해역기본도 등을 활용하며, 수심자료가 부족한 경우 국립해양조사원의 측량기준에 부합되는 보완측량을 실시하고 성과에 대한 심사를 받아야 한다.

동일한 지역에 다른 축척의 지도가 중복되는 경우, 대축척 지도가 소축척 지도의 정보(표고 및 수심의 밀집도, 정확도)보다 신뢰할 수 있을 것으로 예상되므로 대축척 지도의 정보를 적극 활용해야 한다.

3. 계산 격자망 구성

격자망 구성전에 수집된 해저지형과 표고자료의 기준면을 동일하게 설정하여야 한다. 좌표계의 변환은 평면 및 구면좌표계의 경우 국토지리정보원의 좌표변환 프로그램이 활용이 가능하여 좌표계를 동일하게 할 수 있다.

연직방향의 경우, 지형도는 평균해수면을, 해도는 약최저저조위면을 기준으로 하고 있어 지역의 특성을 고려하여 동일한 연직기준면으로 변환하여야 한다.

일본의 경우, 침수예측지역의 정확도를 확보할 수 있고 연안구조물 등의 영향을 고려하여 선정하도록 되어 있으며, 격자망 구성시 격자간격보다 격자의 수심 및 표고 정보가 더욱 중요하다고 명시하고 있다.

격자망은 해저 및 해안지형을 표현할 수 있도록 계산모형에 적합하도록 삼각형 또는 사각형 형태의 2차원 격자망으로 구성하되, 해일 및 범람모의가 동시에 계산되도록 작성하여야 한다.

우리나라 태풍의 영향을 파악하기 위해 황동중국해를 포함하여 태풍 경로 재현이 가능하도록 충분히 넓은 범위가 계산영역으로 선정함과 동시에 범람을 고려하여 상세역의 격자망 크기는 계산용량, 허용오차 및 안정성 등을 고려하여 최소 격자간격 50 m 이하의 정밀한 격자로 구성하여야 한다.

4. 예측모형 구축 표준안

1. 표고자료는 축척 1:1,000의 수치지형도와 LiDAR 측량성과 등을 이용한다. 다만, 축척 1:1,000 수치지형도가 구축되지 않았을 경우, 해안 도심지를 제외한 지역에서는 축척 1:5,000 이하의 지형도를 참조할 수 있다.
2. 해안선은 최신 수치해도를 기준으로 하며, 가능한 국립해양조사원 해안선조사 측량성과를 활용한다.
3. 해저지형자료는 수치해도, SHOALS 측량성과 및 연안해역기본도 등을 이용한다.
4. 해저지형, 표고 및 해안선 자료는 동일 수직 및 수평좌표계로 통일하여 계산 격자망을 구성한다.
5. 계산격자망은 해일 및 범람 동시모의를 위하여 태풍 경로 재현이 가능토록 충분히 넓은 범위를 계산영역으로 선정하며, 범람지역은 계산용량, 허용오차 및 모형의 안정성 등을 고려하여 정밀한 격자망(격자간격 50 m이하)을 구성한다.

제 3 절 예측모형의 입력자료 구축

1. 예측모형 입력자료 목록

해일침수범람을 모의하기 위해서는 대상영역에 대한 수심도, 육상표고, 해안선 등의 지형정보와 함께 주요외력으로 작용하는 태풍의 특성을 모형에 반영하기 위한 기상정보로 입력자료도 확보되어야 한다. 또한 추가적인 계산조건으로 태풍 경로를 고려한 계산시간, 바닥마찰계수, 항력계수, 확산계수, 수면에서의 해상풍에 대한 저항률 및 방향, 입출력에 대한 시간간격 등이 있다.

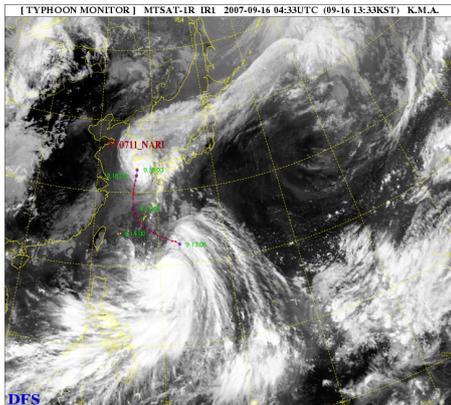
수치모의 외력을 결정하는 태풍의 기상정보 형식은 계산모형에 따라 공간분포(기압장, 바람장 등) 또는 태풍 주요변수(중심기압, 최대풍속, 최대풍 반경 등)로 입력할 수 있다.

모형의 적용성 및 대상지역의 특성 반영 등을 위해서는 이러한 입력자료가 매우 중요하므로 충분한 자료수집 및 검토가 선행되어야 한다. Table 7.3.1은 예측모형의 주요 입력자료 항목의 내용 및 자료획득 방법 등을 제시하였다.

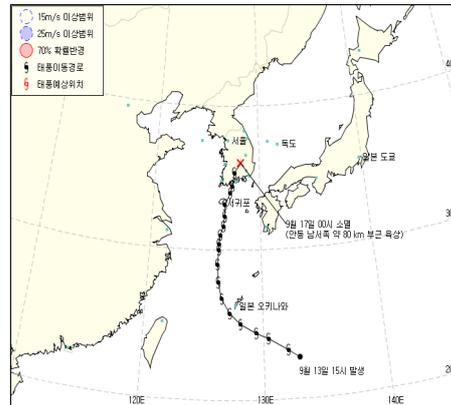
Table 7.3.1 Input parameters of numerical model

구분		주요내용 및 자료획득 방안
기상 정보	기압 및 바람장	<ul style="list-style-type: none"> - 우리나라 기상청(KMA)에서는 중심기압(hPa), 강풍(풍속 15 m/s 이상)반경과 최대풍속 등을 제공하고 있으며, 일본기상청(JMA)에서는 30과 50knot에 대한 장·단반경을 제공하고 있어 이를 이용하여 모형의 입력자료로 활용(Fig. 7.3.1 참조) - 태풍의 시간별 특성값을 입력하는 수치모형은 자체적으로 해상풍을 계산하는 경우가 많으며, 모형에 따라 시간별 공간(계산격자별)적인 기압 및 바람장 정보를 필요로 함 - 공간분포정보가 필요한 경우는 기상청의 기상도를 후처리하여 해상풍 모델 등을 활용하여 그 결과를 수치모델에 적용
	최대풍 반경	<ul style="list-style-type: none"> - 최대풍 반경은 많은 관측소의 자료분석을 통해 산정할 수 있으나, 먼 해상에 태풍이 위치할 경우는 해당 방법의 적용이 어려움 - 이러한 최대풍 반경은 기상청 관측정보인 중심기압, 풍속에 따른 영향반경 등을 고려하여 산정하거나, 최근에는 태풍 해상풍 모델에서 사용되는 관계식을 반복법을 이용하여 산출하는 방법 등이 있음
	기타	<ul style="list-style-type: none"> - 이상과 같은 태풍에 대한 주요정보 이외에 기상청 등에서 제공하는 정보는 시간에 따른 태풍 중심위치, 강도 및 크기 평가, 진행방향 및 속도 등이 있음, 이러한 정보 토대로 태풍이동경로에 대한 예측정보 등을 제공하고 있음

계산 및 지역 특성 정보	마찰 계수	<ul style="list-style-type: none"> - 먼 해상에서와 달리 연안에서 바닥마찰은 예측모형 결과에 많은 영향을 줌 - 특히, 범람모의시 육역은 해상의 조건이 상이하기 때문에 이러한 육역의 토지이용현황에 따라 적절하게 계수를 부여함이 중요함 - 수치모형에 따라 manning 계수, roughness 등으로 부여함
	모델 수행 시간	<ul style="list-style-type: none"> - 대상지역에 따라 태풍별 해일과 범람지속시간이 상이함을 고려 - 태풍이 우리나라에 영향을 미치지 않은 시점부터 태풍이 통과한 후 영향이 미치지 않은 시간까지 충분히 모의되어야 함
	항력 계수	<ul style="list-style-type: none"> - 수치모의시 항력계수는 바람에 따른 수면전단응력을 결정하여 해일 고의 크기의 변화를 야기함 - 대상지역이 태풍의 최대풍 반경내에 위치하게 될 경우 항력계수 산정식에 따라 결과의 차이가 발생하므로 관측된 해일 양상과 검토가 필요함
	기타	<ul style="list-style-type: none"> - 확산계수, 수면에서의 해상풍에 대한 저감을 및 방향, 입출력에 대한 시간간격 등의 계산조건도 해일 및 범람모의시 필요하므로 충분한 고려가 필요함



(a) NARI(0711) 위성영상



(b) NARI(0711) 진로(기상청)

Fig. 7.3.1. Example of Typhoon NARI (0711) information from KMA

Table 7.3.2. Roughness coefficient based on land use

토지이용	조도계수	토지이용	조도계수
주택지	0.04~0.08	임지	0.03
공장지등	0.04	물가	0.025
농지	0.02	기타(공지, 녹지)	0.025

2. 예측모형 입력자료 표준안

1. 태풍정보는 이동경로, 중심기압, 최대풍속, 풍속 영향 반경 등을 참조하고, 최대풍 반경은 이러한 값의 관계로부터 적용성이 확보된 경험식 및 프로그램으로 산정한다.
2. 예측모형 적용에 선행하여 지역특성을 반영한 바닥마찰계수와 항력계수 등을 관측 해일고와의 검증과정을 통해 검토한다.
3. 기타 매개변수는 모형의 특성과 실제현상을 충실히 반영할 수 있도록 적용하고, 설정근거를 제시하여야 한다.
4. 예측모형 수행시간은 우리나라에 태풍 영향이 없는 시점부터 태풍이 통과한 후 영향이 없는 시점까지 충분히 고려하여야 한다.

제 4 절 예측모형의 검증

1. 해일 및 범람모의 결과 검증자료

해일 및 범람모의 결과의 검증을 위해서 활용할 수 있는 자료는 태풍내습시 관측된 조위자료, 해일침수범람 피해현황 조사자료 등이며, 지형도 및 위성사진 등의 영상자료도 참고자료로 활용이 가능하다.

해일고 검증은 관측자료와 비교를 통해 검증할 수 있는데, 공간적 검증은 관측자료 미비에 따라 어려움이 있으므로 대상지역에 해당하는 국립해양조사원 기준조석관측소의 정점별 비교를 통해 검증이 가능하다. 다만, 해일모의 정확성 확보를 위해 범람예측 대상지역을 비롯한 인근지역에서도 비교·검증이 필요하다.

해일고는 태풍 영향시기의 관측조위와 예측조위의 차이로, 예측조위는 당해연도 조위관측자료의 분석을 통해 공인된 방법 및 조석 조화분해 프로그램을 이용하여 생성하여야 한다.

또한, 해일발생시기의 기상관측자료와 수치모의에서 활용된 기압 및 바람장 입력자료의 비교를 통해서도 해일진행 양상의 재현성을 확인할 수 있고, 태풍내습시 대상지역 인근에 대한 유속 및 유향 등과 관련된 관측자료가 확보된다면 해일 전파 속도 등과 비교할 수 있다.

범람모의는 당시의 조석, 파랑 및 기타 외적요인에 따라 현상이 달라지며, 범람과 관련된 조사 및 관측은 태풍에 의한 피해가 발생한 후에 가능하므로 일반적으로

정성적인 관점에서 비교하여 검증할 수 있다.

한편, 침수범람 피해에 따른 사후조사 및 관측을 통해 작성되는 침수흔적도와 범람모의 결과의 비교분석을 통해 최대침수범위 등은 확인할 수 있으며, 범람모의 결과는 지형도 및 위성사진 등의 영상자료를 통해 도출 가능한 결과인가에 대한 판단도 필요하다.

이처럼 해일 및 범람모의에 대한 결과에 대한 정량적인 평가는 조위관측자료에 대부분 의존하므로 조위관측자료의 분석에도 많은 노력이 필요하다. 특히, 최근 제공되는 1분 관측자료의 활용이 필요하다. 다만, 1분간격 조위관측자료가 제공되지 않은 과거자료의 경우는 검조기록부를 독취하여 1분 이하 간격의 자료를 추출하여 검증자료로 활용한다.

2. 예측모형 검증 표준안

1. 예측모형의 검증은 국립해양조사원 기준조석 관측소의 조위관측자료(1분간격 이하 관측자료 이용)로부터 해일고를 산정하고, 계산결과와 비교한다.
2. 1분자료 부재시, 검조기록부를 독취하여 1분 자료를 추출하거나 동일 관측시기에 대한 인근 조위관측 1분 자료와 그 지점에 해당하는 계산결과를 비교하여 검증할 수 있다. 다만, 1분 간격 관측자료의 획득이 불가하면 가능한 최소 시간 간격의 관측자료를 참조하고, 반드시 해당 관측자료 시간간격에 대한 해일고 오차범위를 비교하여 명시하여야 한다.
3. 검증을 위한 해일고는 관측조위와 예측조위의 차이로 산정하며, 이때 예측조위는 당해연도 조위관측자료의 분석을 통해 공인된 방법 및 조석 조화분해 프로그램을 이용하여 생성한다.
4. 해일모의 적용성을 확보하기 위해 해일고 검증은 대상지역에 위치한 기준조석 관측소와 인근 관측소의 관측자료와 비교·검증한다. 계산상 인근 관측소의 격자구성이 대상지역의 격자간격과 상이하면, 대상지역에서 격자크기에 대한 해일고 변화를 파악하고 이를 고려한다.
5. 침수범람 결과는 지형도 및 위성영상 등을 참조하여 합리적인지 판단한 후, 침수흔적도 및 과거 피해조사 자료 등과 비교한다.

제 8 장 재해도 작성기준의 표준화

제 1 절 국내의 재해도 작성 사례

- 서해안 해수범람 흔적조사(행정자치부, 1998)
 - 1997년 8월 19일 ~ 21일동안 백중사리 및 태풍 Winnie 영향에 따라 서해안의 많은 간척 농경지 범람 및 항구도시인 인천, 군산, 목포 등에서 대규모 침수 피해가 발생하였다.
 - 서해안 범람피해 이후 해안재해에 대한 체계적 조사 및 필요성이 인식되어 1998년 서해안 5개 시도 29개 시군구에 대하여 각 지구별로 침수흔적도는 1m 단위로, 침수예상도는 0.5m 단위로 침수 제반사항을 수록하였다. Fig. 8.1.1은 서해안 해수범람 흔적조사 및 종합대책 수립(행정자치부, 1998)에 수록된 주요 침수지역에 대한 정보를 나타낸 것이다.

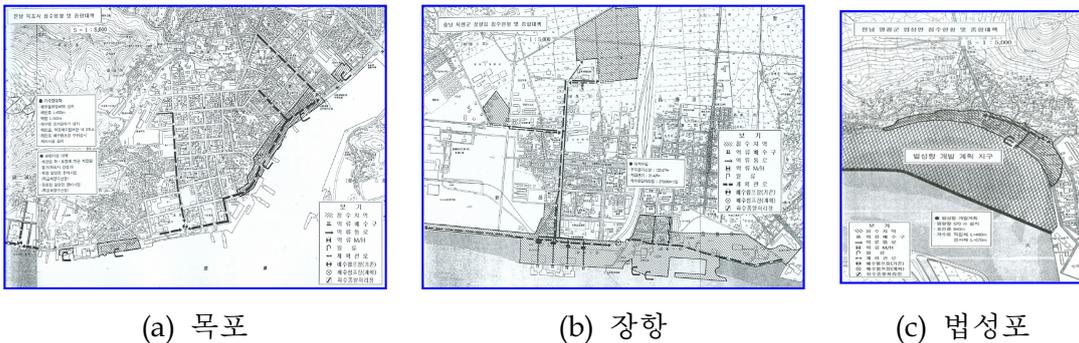


Fig. 8.1.1. Hazard map of western coast of Korea (1998)

- 자연재해경감 학술대회(한국해안·해양공학회, 1999)
 - 해안재해 조사 지침서(안)에서 해안재해 현상, 피해의 파악을 위한 조사항목 및 방법을 설정하였으나, 피해현황에 대한 구체적인 명시방법 및 표준방안 등은 포함되지 않았다.
 - 해안재해지도 작성에 관한 표준방법 확립을 목적으로 해안재해지도 작성지침(안)을 마련하여, 중앙정부의 각 부처와 지자체의 역할분담에 대한 추가검토의 필요성 및 해일과 고조의 발생, 전파 및 범람에 대한 해석의 표준화 방안 마련을 제안하였다.

○ 해안범람 피난지도 시범제작(행정자치부, 1999)

- Fig. 8.1.2와 같이 학성 3리 해안범람피난지도(부제 : 해안재해지도)의 시범제작을 통해 이상고조, 해일로 범람 발생시 주민 대피정보 등을 작성하여 지도에 기재하였다.
- 예상 침수심은 5단계로 분류(0.5 m 미만, ~ 1.0 m, ~2.0 m, ~5.0 m, 5.0 m 이상)하고, 과거 침수실적 지역 및 피난방향 등을 표시하였다. 그밖에 피난시 주의사항, 우리집 방재메모 및 기타 관련기관 정보 등을 삽입하였다. 피난지도는 침수흔적에 기반하여 작성되었으며, 연안상세지형도, 시설물 현황, 위험정보에 대한 자료는 미비하였다.
- 해안재해지도 작성지침(안)을 마련하여 제작주체, 작성방안 및 개정 등의 사항을 명시하였고, Table 8.1.1과 같이 활용목적에 따라 기재항목을 제시하였다.

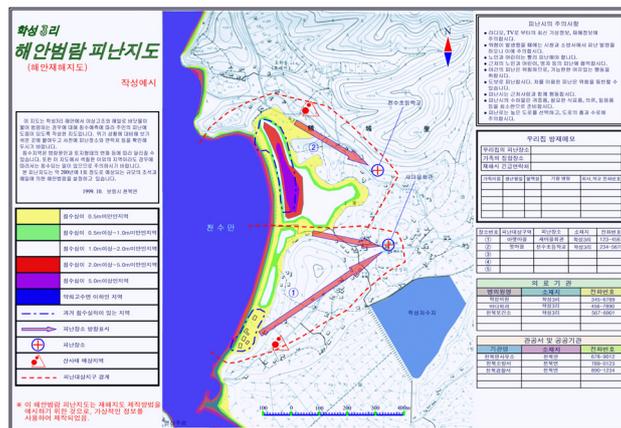


Fig. 8.1.2. Example of Hazard map(1999)

Table 8.1.1. Classification of Hazard map purpose

구분	주민이 활용		행정적으로 활용
	피난활용형	재해학습형	방재정보형
대상자	지역주민	성인, 아동, 고령자용	방재행정담당자
작성 목적	범람위험성 인식, 안전한 피난에 활용	해안범람 학습 의식고취, 피난활용형에 대한 해석	피난유도 및 방재활동에 적극 활용
주요 기재 항목	침수예상과 침수심, 침수실적, 피난필요지역, 피난방향 및 피난소등	범람 메커니즘, 해안의 위험성, 기상정보에 관한 사항 및 피난활용형 내용	피난요하는 시설, 중요 방재장소, 라이프라인 관련시설, 피난활용형 내용
축척	1/10,000(표준)	적당히 선택	적당히 선택

- 폭풍해일 방재지도(국립방재연구소, 2002)
 - 폭풍해일예측을 통한 상황대처 방안 연구보고서(2002)를 통해 폭풍해일 수치 모형 수립 및 과거 해일 산정모의를 통한 모형의 정확성을 평가하였으며, 폭풍해일 내습시 국가차원에서 수행할 방재대책을 일본 지역방재계획을 중심으로 우리나라에 맞도록 재설정하여 정리하였다.
 - Fig. 8.1.3은 보고서에 수록된 해안지역 방재지도 예시이고, Table 8.1.2는 활용 목적에 따른 제공하는 정보를 나타낸 것이다.



Fig. 8.1.3. Damages of Typhoon RUSA(0215)

Table 8.1.2. Classification of Hazard map by using purpose

피난활용 정보	재해학습 정보
<p><침수정보></p> <ul style="list-style-type: none"> -침수예상(구역, 침수순위, 예상도달시간) -침수실적(최대침수구역, 최대침수역) -보전시설 정비상황(천단고, 노령화 정도) <p><피난정보및기타></p> <ul style="list-style-type: none"> -피난이 필요한 지역(위험순위, 구호시설) -피난 장소(공공시설, 학교, 병원) -피난경로 및 위험지역(토사재해위험지역) -피난기준, 정보전달수단, 작성주체 등 	<p><학술및지역정보></p> <ul style="list-style-type: none"> -폭풍해일 발생기구(기상요인, 지형특성) -폭풍해일 위험성(범람형태, 피해내용) -기상 관련 기초지식(기상용어, 강우형태) -과거 폭풍해일정보(기상, 수문, 피해상황) -지역의 역사(지형 형성사, 재해사) <p><내용해설및기타></p> <ul style="list-style-type: none"> -폭풍해일 방재지도 보는법 및 사용법 -방재정보의 전달경로 -폭풍해일시 주의사항, 피난장소 생활 등

- 재해지도 작성기준 등에 관한 지침(소방방재청 고시 제2006-6호)
 - 자연재해대책법, 연안관리법 및 하천관리법 등을 근거로 Fig. 8.1.4와 같이 재해지도를 침수흔적도, 침수예상도(해안침수예상도, 홍수범람위험도), 재해정보지도로 구분하여 각각의 제작 주체 및 작성주기 등을 명시하였다.

- 특히, 폭풍해일에 의한 해안침수예상도는 국토해양부에서 제작하도록 규정하였으며, 5년을 개정주기로 하고 있다.

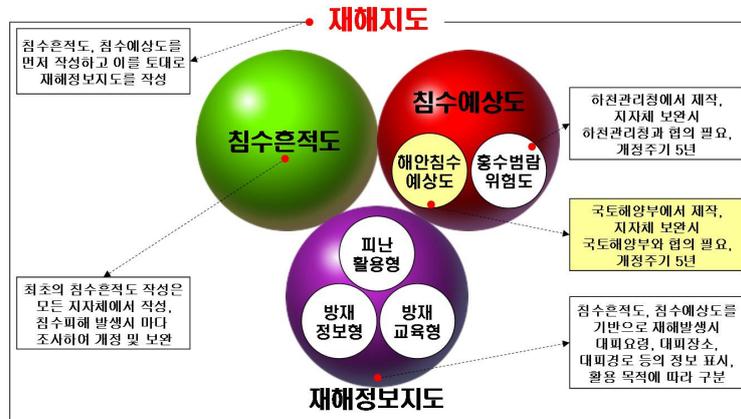
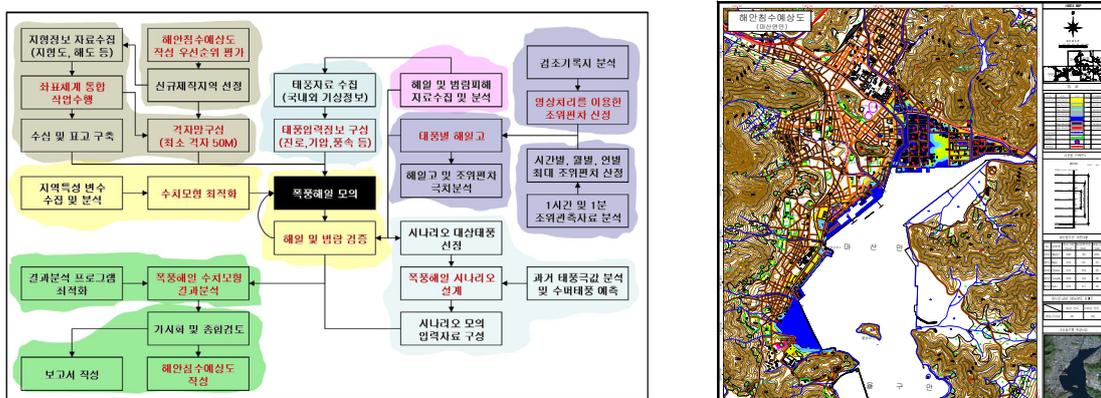


Fig. 8.1.4. Types and Characteristics of hazard maps

- 국토해양부는 연안관리정보시스템 구축사업의 일환으로 해안 침수예상도를 Fig. 8.1.5와 같이 시범제작하고 있다.



(a) 해안침수예상도 작성방안

(b) 시범제작(마산)

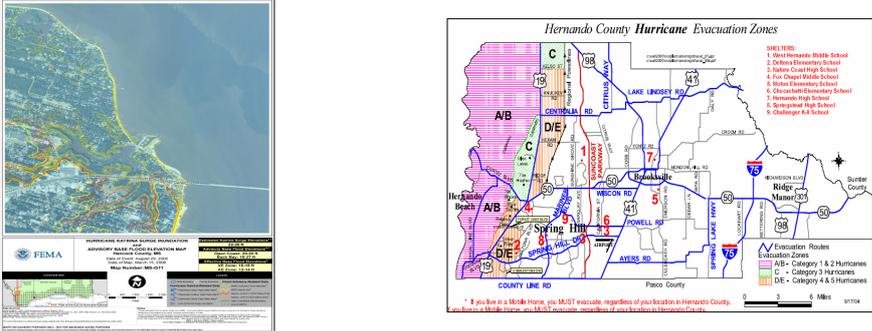
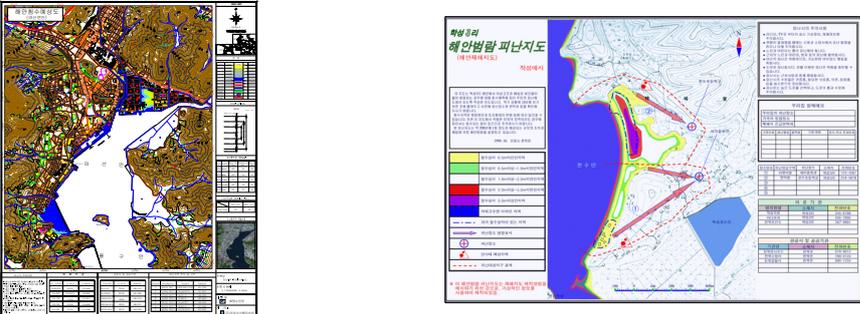
Fig. 8.1.5. Example of Hazard map (MLTM, 2006, 2007)

- 2006년(마산, 군산, 목포지역)과 2007년(부산, 여수, 통영지역)에 시범제작하였으며, 시나리오 폭풍해일 DB 구축을 통한 피해예측정보 가시화 시스템 구축에 활용 및 적용을 시도하고 있다.
- 국토해양부는 해안침수예상도 홍보 및 활용을 위해 지자체 의견 수렴을 위해 지자체 방문 및 설문을 당해연도 시범구축지역을 중심으로 매년 실시하고 있

다. 2007년 지자체 방문에 따른 주요 의견으로는 해안침수예상도 작성 환영 및 협조의지, 해안침수예상도 작성지역 확대요구, 정밀시뮬레이션 시스템 구축 필요성 및 중앙부처의 행정 및 교육지원의 필요성 등이 있다.

Table 8.1.3은 국내외 재해도의 주요 도식내용과 재해도 예시를 나타낸 것이다.

Table 8.1.3. Example of Hazard map

구분	재해도 예시	
일본		<ul style="list-style-type: none"> - 축척 1:2,500 (지형도 활용) - 침수심은 50cm 간격이며, 색으로 구분 - 사용자 이해를 위한 범례 제시
미국		<ul style="list-style-type: none"> - 축척 1:1,000~1:250,000(위성영상 활용) - 침수 위험지역을 영역(선)색으로 구분하여 표시 - 도로를 중심으로 대피로 및 피난처(학교) 표시
우리나라		<ul style="list-style-type: none"> - 축척 1:5,000(지형도 활용) - 일본과 같이 침수심은 50cm 간격이며, 색으로 구분하여 위험지역 표시 - 대피로 및 주요기관 연락처 등을 표시

일본 재해도는 지형도를 기본지도로 작성하여, 침수심을 50 cm간격으로 구분하여 다른색으로 침수영역을 표현하고 있다. 재해도 작성에 관한 일반적인 사항 및 재해도에 도식된 내용을 일반인이 이해할 수 있도록 쉬운 범례 등을 제시하고 있다(일본 국토교통성 홈페이지, www.gsi.go.jp).

미국은 넓은 범위에 대하여 재해도를 작성함에 따라 위성영상 및 행정구역도 등을 이용하여 작성하고 있으며, 위성영상에 위험지역을 제시할 때는 위험지역을 선의색으로 구분하여 제시하고 있다. 또한 학교, 체육관 등 대규모 공공시설을 중심으로 피난처를 제시하고 큰 도로를 이용한 대피로를 추가로 제시한다(미국 FEMA 홈페이지, www.fema.gov)

과거 우리나라 재해도와 관련된 사항은 일본지침을 재설정하여 도식하는 방법이 적용되어 침수심 도식 방법 및 관련 방재정보 표시 등이 일본 재해도와 유사하다.

재해지도 작성에 관한 일반적인 원칙은 소방방재청 고시(제2006-6호)에서 정하고 있으나, 해안침수예상도에 관한 부분은 많은 수정 및 보완이 요구되며, 이러한 해안 침수예상도의 작성기준은 국내외 재해도의 장점을 반영하여 보완이 가능할 것이다.

제 2 절 재해도 작성기준

1. 재해도에 포함 할 내용

폭풍해일에 의한 재해도에는 침수가 예상되는 지역의 범위, 침수심이 반드시 포함되어야 하며, 재해도 작성시 기본 조위면과 해일침수범람에 대한 시나리오(50년 및 100년 빈도) 등의 사항이 표기되어야 한다.

또한, 재해도 작성지침에서 정하고 있는 범례와 해당 재해도와 관계된 사항을 적절한 공간에 표시하고, 필요시 사전 조사된 과거 침수흔적 등도 표기하면 재해도 이해에 도움이 될 것이다.

재해도 작성에 활용되는 기본지도는 육상의 연안시설물, 지형 및 도로정보, 공공시설 등의 정보가 표기된 수치지형도 및 위성영상을 활용하여 작성함이 바람직하며, 필요시 위성영상 및 현지조사 등을 통해 지형지물 정보를 수정 및 보완한다.

(2) 침수심 및 침수정보의 도식방안

재해지도의 작성 사항 및 표시방법은 지침(소방방재청 고시 제2006-6호)에 의거

작성하는 것을 원칙으로 하고 있다. 주요 도식방법으로는 침수심 등급 구분을 색으로 설정하고 침수심 등급은 7단계 구분으로 각 50 cm마다 간격을 두는 것을 표준으로 하고 있다.

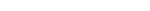
그러나, 침수범위를 표현할 때 동일 침수등급에 해당하는 지역을 색으로 표시하면 기본지도 색과 구분이 명확하지 않은 경우가 있다. 특히 위성영상을 기본지도로 활용하는 경우 등을 고려하여 침수심 간격을 선으로 표현하는 방법 또는 침수등급에 따른 색을 강조하기 위해 기본지도의 색상을 약하게 처리하는 방법 등을 혼용하여 보완 할 수 있다.

침수심은 어른 무릎의 침수범람을 최소 고려대상으로 50 cm로 설정하고 있어 어린이 및 노약자를 기준으로 최소 침수심을 25 cm로 고려하는 것이 바람직할 것이다. 이를 위해 기존의 수심 등급을 7단계에서 8단계로 확대할 필요가 있다.

대피로 및 피난처 등의 정보는 재해정보지도에서 도식하도록 정하고 있으나, 폭풍해일에 의한 침수범람 정보와 함께 개괄적인 피난 정보를 제공하면 재해도의 활용을 극대화할 수 있을 것으로 기대되므로 도로를 중심으로 한 대피로와 피난처로 활용 가능한 학교 및 병원 정보를 재해도에 도식하는 것이 바람직하다.

(3) 도식방안 표준안

1. 재해도는 축척 1:5,000의 지형도 및 위성영상을 기본지도로 작성한다.
2. 침수심, 대피로, 피난처 정도는 다음의 도면표시 기호를 따른다.
3. 기타 도면표시 기호는 소방방재청 고시 제2006-6호에 따라 표시한다.

구분	명칭	기호			
침수심 구분	0.0m~0.25m미만	지형도 사용시 적용		위성영 상 사용시 적용	
	0.25m~0.5m미만				
	0.5m~1.0m미만				
	1.0m~1.5m미만				
	1.5m~2.0m미만				
	2.0m~2.5m미만				
	2.5m~3.0m미만				
	3.0m 이상				
대피장소	대피경로				
	대피장소	 (학교, 체육관 등 대피소)	 (병원)	 (관공서)	

제 9 장 재해도 활용 및 유지보수

제 1 절 재해도 활용방안

재해도는 폭풍해일에 따른 침수심 및 피해범위 등 피해지역을 제시하기 때문에 위험단계별 대피계획 수립 및 안전한 대피 경로의 설정에 활용할 수 있다.

따라서, 재해도 작성을 통해 Fig. 9.1.1과 같이 재해위험지역을 예측 및 진단할 수 있으며, 이를 토대로 취약지역을 선정하고 지역 특성을 고려한 대책을 수립할 수 있다.

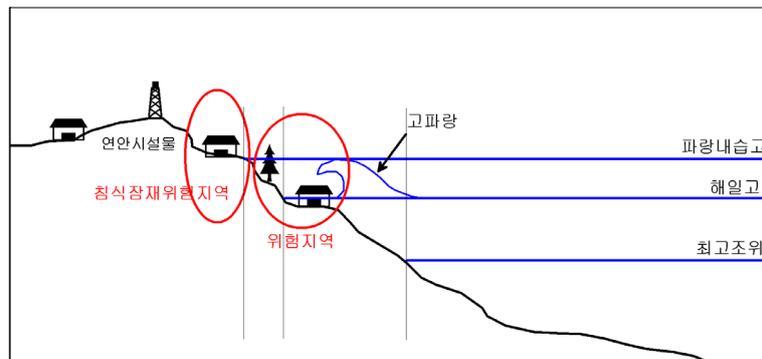


Fig. 9.1.1. Schematic of hydrodynamics flood level

일본 국토교통성에서는 각 지자체별 재해지도 구축현황 및 재해지도를 지자체 홈페이지를 통해 열람할 수 있도록 제공하고 있다. 또한 일부 지자체에서는 관내에 거주하는 외국인을 위한 별도의 홈페이지를 제작 및 홍보하고 있다.

미국 NOAA는 홈페이지를 통해 허리케인 예상경로 등과 같은 기상정보와 그에 따른 지역별 해일고를 실시간으로 제공하고 있으며, FEMA의 경우도 도번(map index)을 통해 원하는 지역의 재해도를 열람할 수 있도록 제공하고 있다. 또한 허리케인에 대한 상식, 과거피해 및 대피요령 등이 수록된 다양한 형태의 핸드북과 전단지를 제작하여 홍보하고 있다.

재해도 작성시 다양한 개별 시나리오 결과를 활용한 DB 구축으로 태풍 피해에 측정정보에 대한 실시간 제공시스템 구축이 가능할 것이다. 필요에 따라 긴급이 요구되는 피난활용 2차원 시스템, 재해교육을 위한 3차원 시스템 등을 구축할 수 있다.

또한 선진사례에서와 같이 지자체의 태풍위험지역에 대한 핸드북, 전단지 등의 기초자료로 활용할 수 있다.

우리나라는 해안지역의 비율이 매우 높으며 해안지역 개발 요구가 많아 연안역의 개발과 보전사업의 계획 및 설계에 있어 재해도의 제작은 매우 중요하다. 또한, 해일 및 범람모의를 통해 현재 각 연안의 시설물에 대한 범람위험성 평가 및 방호 기능을 판단할 수 있으며, 향후 해일 및 범람발생지역에 대한 추정을 통해 연안방재 대책을 수립하는 자료로 활용이 가능하다.

제 2 절 재해도 유지보수

소방방재청 고시에 따르면 5년 주기로 재해도는 개정하도록 정하고 있다. 그러나 급변하는 연안환경에 적절히 대처하기 위해 다양한 유지보수가 필요하다.

연안 주거환경의 집중에 따른 유지보수, 해안선 및 해안시설물 표고 변화(주변 연안 및 지형의 변화)에 따른 유지보수, 기후변화 및 해수면상승 등 연안환경변화에 따른 유지보수, 태풍 및 고파랑 강화(대상영역 및 폭풍해일 시나리오 확대)에 따른 유지보수 등이 필요하다. 특히, 최근 수퍼태풍에 대한 우려가 가중되고 있어, 이를 반영하기 위해서는 많은 폭풍해일 시나리오 모의를 통한 피해예측이 필요하다.

또한 여수와 같이 향후 대규모 공사(엑스포 개최)에 따른 해안선 변화가 예상될 경우는, 그 변화가 반영된 재해도 작성이 필요하다.

제 10 장 침수범람 재해 방지시설

제 1 절 국외 재해방지시설 조사

1. 일본

(1) 요코스카 마호리해안(일본, 호안)

요코스카 마호리 해안은 배후에 주택이 2,700세대, 주민 8,000명이 거주하고 있으며 이 지역은 1995년, 1996년의 2년간에 걸쳐 태풍으로 인한 고조와 월파로 큰 피해가 발생하였다. 이러한 피해에 대한 대책으로 방재기능을 강화함과 아울러 안전성과 친수성을 가지는 자연친화적인 고조호안을 계획하였고 호안의 재정비 사업을 실시하였다. 고조의 위험으로부터 주민의 생명과 재산을 지키기 위해 고조 대책 사업이 실시되어, 2006년 3월에 1,650m 구간이 완성되었다.

특히, 1996년 9월 22일의 태풍 17호는 호안과 접해있는 국도가 물에 잠기고 중앙분리 연석이 날아가 버려 교통기능이 마비되는 피해도 있었으며 1996년 당시 풍속기록과 조위관측기록을 보면 북동 방향의 강한 바람이 몇 시간 계속 불어와 3.51m의 파랑이 발생한 것으로 추정된다.

해안에 설치된 호안은 태풍시 고조와 만조에 대해 보호 효과가 높고, 또한 주변 환경과의 조화에 뛰어난 새로운 형태의 호안이며, 계단식으로 쌓아, 만조를 서서히 감쇄시켜주며, 석축 호안을 넘은 물은 구조물의 내부를 통과하여 바다로 배수함으로써 주택지로 해수의 범람을 방지한다. 또 쇄파 기능의 향상을 위해 높이가 아니라 폭으로 보호하는 호안 구조를 채택하였다.



Fig. 10.1.1. Damage of Mahori coast

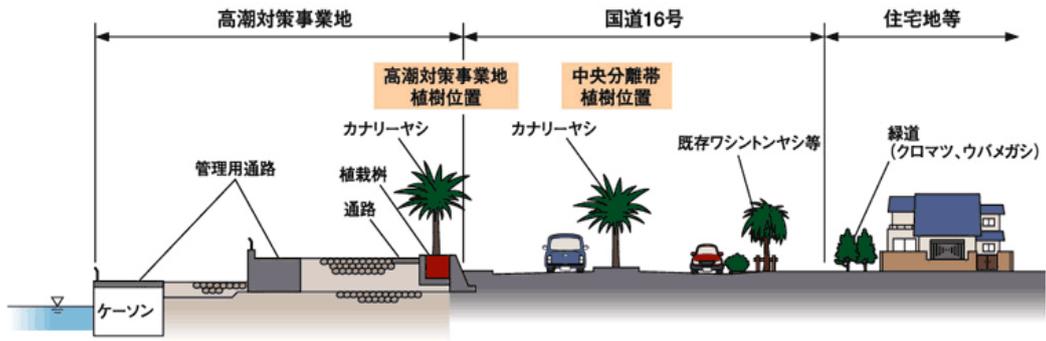


Fig. 10.1.2. Disaster Prevention Structure of Mahori coast

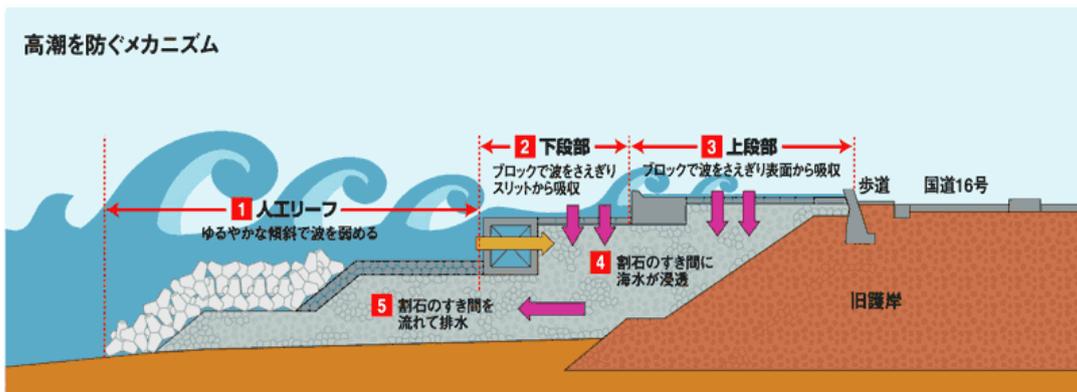


Fig. 10.1.3. Profile of Disaster Prevention Structure, Mahori coast



Fig. 10.1.4. Before and After of Coastal Improvement Project at Mahori coast

(2) 우라야스 해안(일본, 제방)

우라야스시의 경우 시 전체면적의 75%가 해면매립으로 구성되어 있으며, 이 과정에서 하천의 범람을 방지하기 위해 총 7~8m 높이의 콘크리트 파라펫을 만들었다. 우라야스시에서는 지상의 대부분이 건물과 아스팔트 도로로 덮여있어 빗물이 지하에 뿌리 내리게 어렵게 되어 있어 단시간에 집중 호우가 내린 경우 대량의 빗물이 강이나 하수구(빗물 관)에 모여 있으므로, 하천 범람이나 저지대에 침수가 발생한다. 저지대책하천사업(고조대책)을 진행하고 있으며 총 4,910m 중 2,300m에 달하는 구간에 호안의 마루높이를增高하지 않고 완경사호안을 계획하였다. 우라야스시의 해안은 도쿄만 안쪽 지역에 위치하고 배후에 대규모 주택 단지와 공업 단지를 비롯해 중요한 관광 자원인 도쿄 디즈니 리조트 및 관련 시설 등 도시 기능 집적 지역을 포함하고 있다. 1960년대 매립 조성 때 건설된 제방은 노쇠하여 약해지고 부등 침하로 인해 제방 기능의 저하가 발생하고 있다. 이에 따라 해안고조대책 사업을 통해 호안과 제방의 개량을 통해 방재 기능을 회복하여 주민의 생명과 재산을 지키며 배후지에 대한 도로 정비계획과 통합하여 제방에 녹지와 편의 시설을 설치하여 양질의 해안 공간을 만들고자 하고 있다.



<태풍 키티(1949년 9월) 내습시>



<태풍 키티(1949년 9월) 내습시>



<태풍 키티(1949년 9월) 내습시>



<태풍 10호(1969년 8월) 내습시>

Fig. 10.15. Damage of Typhoon at Urayasu, Japan

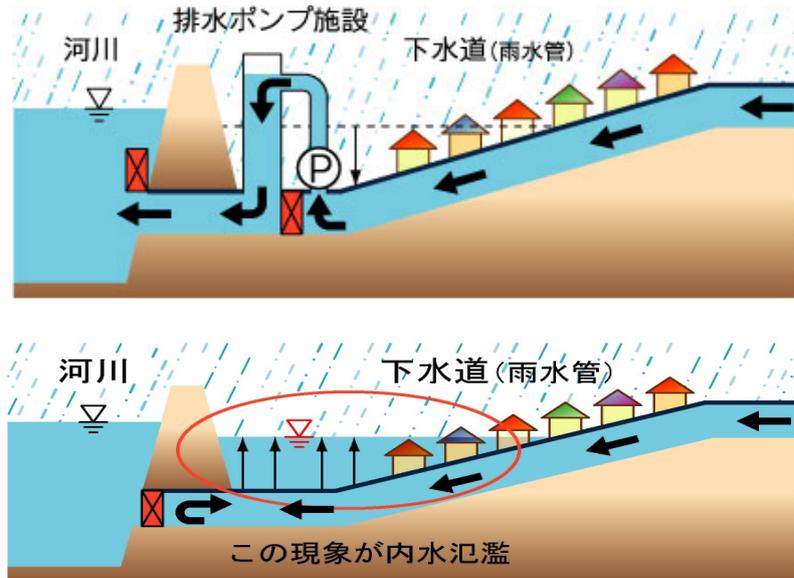


Fig. 10.1.6. Maintenance of Drainage for inundation at Urayasu, Japan

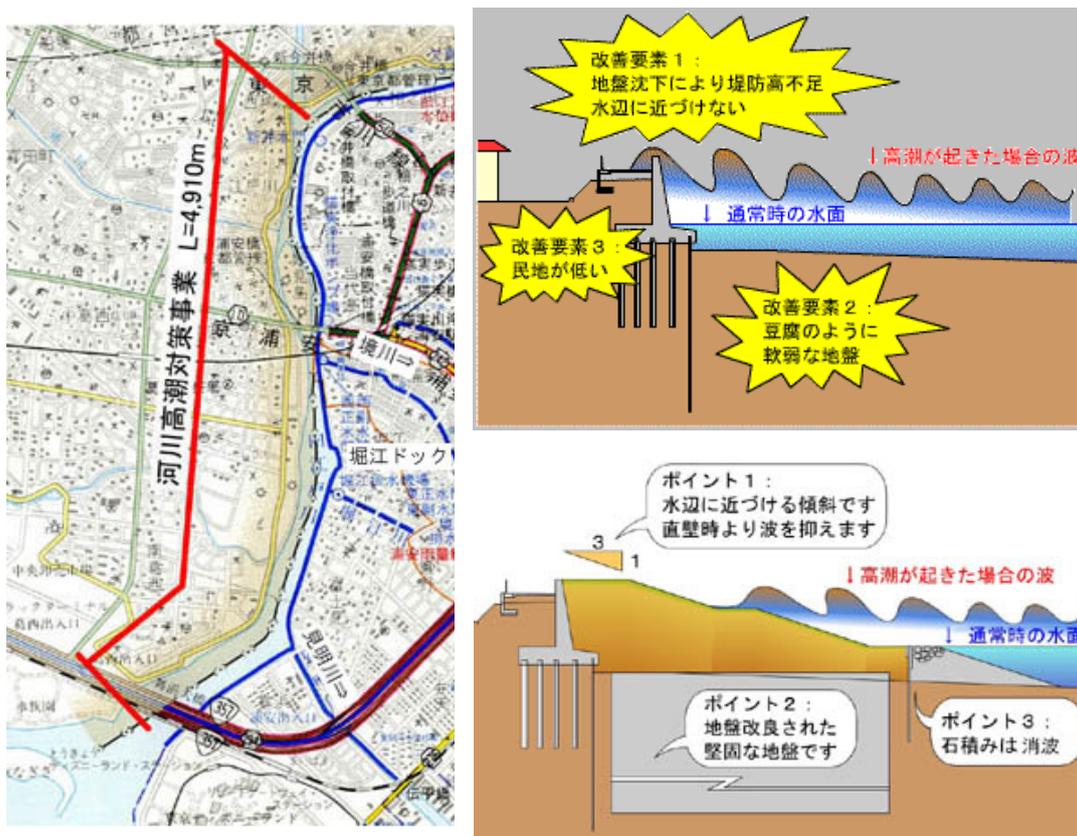


Fig. 10.1.7. Levee Project of Urayasu, Japan

(3) 나고야(일본, 고조방파제)

1959년 9월 26일에 내습한 이세만태풍은 최대 순간풍속 50m/s, 최고수위 N.P+5.31m를 기록하면서 이세완 연안에서 사망, 행방불명자 4,500명, 부상자 64,700명, 유출가옥 4,600호, 전·반파가옥 142,500호, 침수가옥 179,000호 등 총 피해금액이 5,000억엔에 달한다. 이세완과 같은 커다란 재해를 두 번 다시 받지 않도록 1959년 10월에 1959년 태풍15호에 의하여 재해를 받은 이세만 등에 접한 지역에 있어서 고조대책사업에 관한 특별조치법이 제정되었으며, 1959년 11월 건설 및 농림부의 3개 부서에 이루어진 이세완 등 고조대책협의회가 설립되어 1960년 2월에 이세만 등 고조대책사업계획이 결정된바 있다. 고조대책사업의 커다란 기둥의 하나가 나고야항 외해에 전체길이 8,250m, 마루높이 6.5m의 나고야항 고조방파제의 건설이다. 1959년 발생한 Vera(5915) 태풍(이세완 태풍으로 불림)에 의해 나고야 해역에 큰 피해가 발생하였다. 피해 발생 후 1960년대 초에 해일에 대한 피해를 줄이기 위해 항 외측에 고조방파제를 1962년 1월에 착공하여 1964년 8월에 완공하였다(2년 8개월).

고조방파제의 설계조건 중 설계파는 파고 3.0m, 주기 7sec이며, 마루높이는 D.L.(+)6.5m로 하였다. 공사비는 당시 약 1,084억원(108.4억엔)이었으며, 구조물의 연장은 1964년 건설당시 8,294m 였으나 2008년 현재 7,593m로 줄어들었다. 고조방파제로 인하여 항 내측 호안에서 감소되는 해일고는 약 50cm로 예측하였다.



Fig. 10.1.8. Nagoya heightened breakwater

(4) 나고야(일본, 방조벽)

이세완태풍에 의한 고조의 최고조위가 N.P+5.31m이었으므로 나고야항의 입구에 높이 N.P+6.50m의 고조방과제를 건설하고, 또한 나고야항의 주위에는 높이 N.P+6.00~6.50m의 방조벽을 쌓아서 정기적으로 점검이나 보수를 행하여 방재기능을 확보하였다. 나고야항 주변 지역의 지반고가 D.L.(-)1.0m 정도로 저지대에 분포되어 있으며, 1959년 태풍 내습시 발생한 고조위는 D.L.(+)5.31m였으며, 이후 건설된 나고야 항내의 구조물의 마루높이는 D.L.(+)6.0~6.5m 였다. 이세완 태풍이후 1960년도 초에 연장 26.4km에 달하는 60여개의 방조벽을 설치하였으며, 현재 56개의 방조벽을 관리(37개는 사기업에서 관리)하고 있다. 현재 비상시 방조벽을 닫기 위한 인력은 3명, 시간은 6분 정도 필요하다고 하며, 방조벽을 관리하는 사기업에 비상 메시지를 보내는 시간은 사용할 수 있는 비상라인이 5~6개 정도여서 20분 정도가 소요될 것으로 예상하고 있으며, 근래에 전자동식으로 교체하여(6곳은 이미 교체함) 중앙통제시스템을 도입할 예정이다.

수문도 설치하였고 해일이 내습할 때 작동하며, 내측에 물을 외해로 내보내기 위해 펌프를 설치한 뒤 지속적으로 개량하고 있다.



Fig. 10.1.9. Inundation Protection Wall of Nagoya

(5) 벳부(일본, Flare(Hybrid type)호안)

벳부 국도 10호선의 교통량의 증가로 인해 도로 확장사업을 추진하게 되었으며, 170m 구간에 Hybrid type의 방파호안을 설치하게 된다. 해일보다는 파랑의 반파를 위한 구조물로 이 지역의 설계파는 파고 3.5m, 주기 7.2sec 이다. 사석 경사제 단면형식의 경우 현지 해역 수심이 깊고 급경사이기 때문에 시공성이 좋지 않다. 현재 시공되고 있는 이 구조물은 일반적인 단면보다 공사비는 대략 2배정도 된다. 블록당 공사비는 1억원(천만엔)/block, m당 공사비는 약 8천만원(8백만엔)/m 정도이다. Flare호안 블록의 부게는 60t/block이며, 폭은 7.2m, 길이는 14m 정도 된다. 블록은 콘크리트 블록 배후의 H형 빔과 콘크리트 말뚝의 설치 형태에 따라 A형과 B형이 있으며, 시공시 번갈아 가며 설치한다. 기초 지반은 H형 파일을 15.0m 정도 깊이까지, 지금이 1300~1500mm 되는 콘크리트 말뚝을 최소 21.0m 깊이까지 설치한 후 사석으로 뒷채움을 한다.



Fig. 10.1.10 Installation of Flare shore protection structure of Oita, Japan

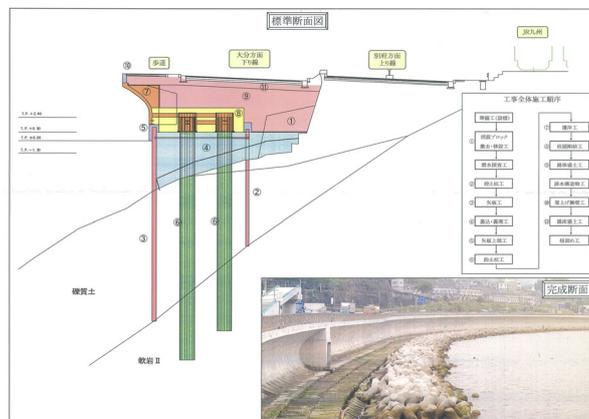


Fig. 10.1.11. Profile of Flare(Hybrid-type) Shore Protection



Fig. 10.1.12. Flare(Hybrid-type) Shore Protection using blocks

(6) 벳부(일본, 환경사해안)

과거에 발생하였던 태풍의 피해 이후 방재 사업을 통해 벳부항 주변의 해수욕장 등의 해안은 인공 구조물(콘크리트)로 대체되었다. 최근에 복원사업을 통해 모래해안을 조성하고 있으며, 벳부 지방이 화산 활동으로 생성된 지역으로 토사가 검은색으로 경관상 좋지 않아 나가사키 지방의 모래로 양빈을 실시하였다. 해안 침식, 고조 피해 및 도로 교통량의 증가 등에 대한 대책인 호안도로, 공원 해안환경 등 3가지 정비사업을 통해 해안 공원이 조성되었다.



Fig. 10.1.13. Plan of Beppu Mochigahama coast maintenance

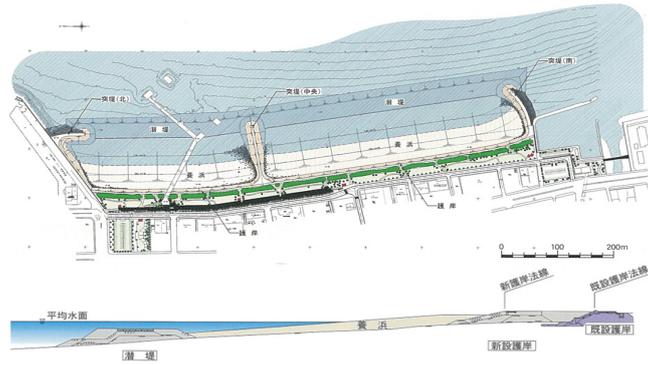
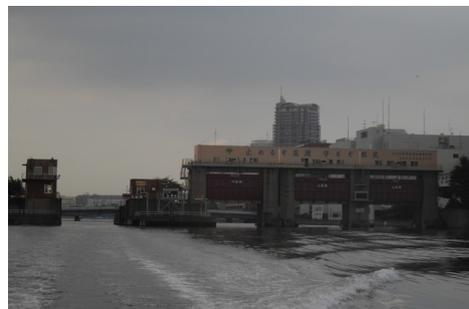


Fig. 10.1.14. Plane and Profile of Beppu Mochigahama coast maintenance plan

(7) 도쿄만 고조방재시설(도쿄도 항만국 항만정비부)

폭풍해일 피해 이후 외곽 호안의 천단고를 높이고, 내부 호안은 천단고를 높이지 않는 대신 총 19개의 수문을 설치하여 해일피해를 예방하고 있다.

1m²당 300만엔의 공사비를 투자하여 매립을 통해 도쿄항을 계속 넓히는 작업을 수행하고 있으며, 기존 방파제, 호안등을 해일방호에 이용하고 있다. 도쿄도 항만국에서 제공한 선박을 이용하여 도쿄항 인근 항만 방재시설을 조사하였으며, 도쿄항의 경우 삭망평균만조위 2.1m, 폭풍해일, 지진해일 등의 고조위가 지역에 따라 2.0~3.0m, 설계파고가 0.5~2.9m로서 해일방재를 위한 호안의 천단고는 5.6~8.0m이다. 도쿄항 내측의 호안은 게, 물고기 등 해양식물의 산란이 가능한 친수성 재료를 이용하여 건설되었으며, 호안 인근의 보도블럭은 심미성을 고려하여 건설하였으며, 주거시설 인근 호안에 마리나 시설을 건설하는 등 친환경적 항만이 되도록 노력하고 있다.



8) 나고야항 고조방파제와 인공섬 건설현장 조사(국토교통성 중부지방정비국)

국토교통성 중부지방정비국에서는 이세완 태풍 피해 50주년을 맞아 태풍피해 방재시설 홍보와 태풍피해 최소화를 위한 대피 및 방재 시민의식 고취를 위해 활발히 활동중이다.

나고야항에서는 외곽에 고조방파제를 통해 고조위 및 파랑을 1차적으로 제어하고, 고조방파제 내부의 안벽(방조벽) 및 수문을 이용하여 태풍피해를 예방하고 있다. 고조방파제의 건설로 인하여 태풍 또는 지진해일고를 0.5m, 파고를 0.7~0.9m 감소시키는 것으로 예측되었으며, 고조방파제 내부 호안 및 안벽의 천단고를 1.2~1.4m 감소시킬 수 있는 것으로 추정된다. 나고야항 외측 고조방파제 내부의 해상공간에 매립을 통해 인공섬(Port Island)이 건설중에 있으며, 인공섬 건설에 사용되는 매립토는 선박 항로를 수심 16m가 유지되도록 해상 준설선을 통해 준설하면서 준설된 모래를 호스로 운반하여 공급하고 있다.

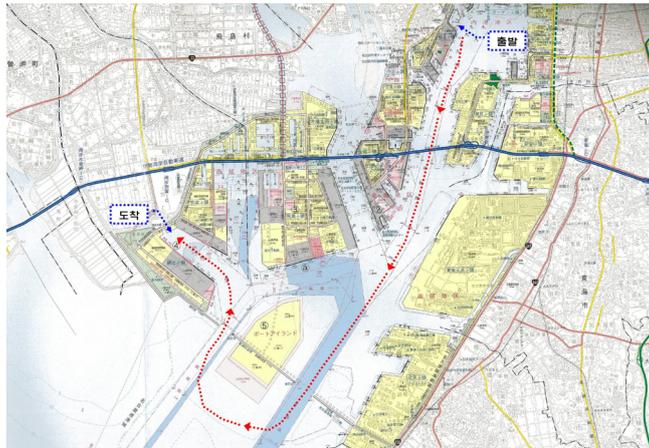


Fig. 10.1.17. Location of Disaster Prevention Facilities at Nagoya port, Japan



Fig. 10.1.18. Seawall at Nagoya port, Japan

(9) 나가라가와 하구언

나고야항 인근에 위치한 나가라가와 하구언은 폭풍해일 등 고조위가 나타나는 경우 월류로 인한 침수피해 뿐만 아니라 상류측까지 해수가 침투하는 피해를 자주 입는 지역으로서 곡선의 하천을 직선으로 정비하면서 해수 침투에 의한 상수원 확보에 어려움을 겪었다. 빈번한 해수침투 피해 이후 농업용수, 생활용수, 식수 등 담수확보를 목적으로 나가라가와 하구에 수문을 설치하였다. 폭 661m 영역에 45m길이의 수문을 10개 설치하였으며, 외해 조위에 따라 수문을 통제하여 내부 수위를 조절한다. 수문설치 이후 회류성 어류의 보호를 위해 외해측에서 수문 상류측으로 어류의 이동을 유도하는 어도를 설치하였다. 어도의 수위는 적당한 흐름을 느껴야 상류로 이동하는 어류의 특성을 감안하여 수문 내, 외측의 수위를 고려하여 일정수위차를 유지토록 설계되었다.

수문 외측에서 상류측으로 선박의 통행이 가능하도록 갑문을 설치하였으며, 원격조정 시스템을 이용하여 24시간 관리한다. 수문을 하천 전폭에 걸쳐 건설하는 것이 아니라 친환경적 관점에서 실제 하천과 유사한 형태의 어류의 상, 하류 이동이 가능한 인공하천을 추가로 건설하였으며, 고조시 해수의 침입이 염려될 때에는 인공하천에 설치된 보조수문을 닫아 해수 침입을 방지한다.



Fig. 10.1.19. Discharge water of overtopping through Sluice gate



Fig. 10.1.20. Inner side of Sluice gate

(10) 요도가와 하천관리사무소

요도가와 수계 하구에 건설된 수문은 해수방지, 갈수기 수량확보, 수위조절, 홍수시 배수시설 및 지천의 수질개선 등의 목적으로 설치되었고, 제방범람보다는 해수침투로 인한 피해가 크게 나타나는 지역으로 주목적은 수문 상류측 취수구의 해수피해를 개선하는데 있다. 요도가와 수계는 하구로부터 5.4km~7.0km 까지 폭풍해일 방재구역으로 지정되었으며, 하구로부터 10km지점인 다카시오 대교까지 폭풍해일 방재호안을 설치하였다. 지진해일에 대한 대책으로 하구로부터 10km구간까지 호안 및 방재대책을 수립 하였으며, 지진 발생시 주민들에게 문자 및 음성 경보(기상청, 지진해일 경보기 15개소 설치)를 제공하고 대피소 무선방송(절전시 8시간 동안 방송가능) 시스템을 구축하였다. 수문의 초당 방류량은 70~100톤이며, 통제실에서 24시간 통제하고 있다. 폭풍해일 등의 재해시 하구측 교량의 방재 시설로 3개소에 방조벽을 설치하여 차량 및 철도를 통제하고 주거지역으로의 범람을 예방하며, 수계 내에 위치한 소규모 어항 입구에는 보조갑문을 설치하여 해일발생시 외부와 차단하여 선박피해를 줄이고 있다.

하구측 제방의 경우 1995년 고베 대지진때 붕괴되어 보수공사를 시행하면서 친환경성을 고려하고 해일에 의한 월류를 예방하기 위해 환경사 호안을 건설하였으며, 자이언트 제방이라고 불리는 아파트 등 주거시설이 건설되어 있는 언덕 차체를 제방으로 사용하고 해일에 의해 범람이 발생하면 제방 배후의 환경사 지형을 따라 물이 흐르면서 배수되는 면적방어 개념을 도입하였다.

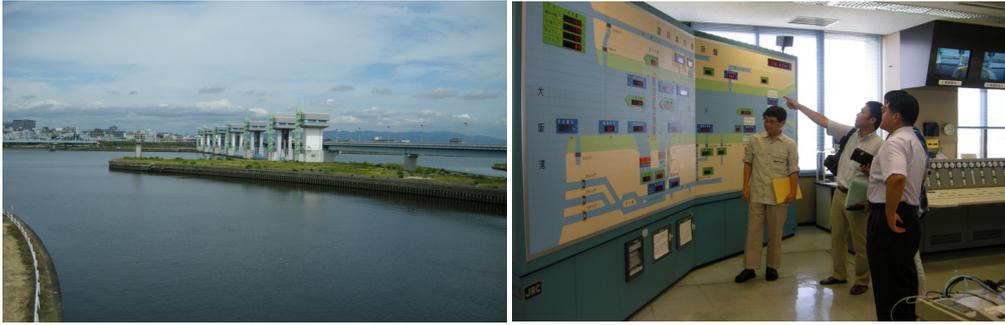


Fig. 10.1.21. Sluice gate and Control room at Yodogawa, Japan

(11) 구마모토현 우끼시 시청 및 마츠아이마을 재해 부흥 사업 현지 조사

마츠아이 지역은 일본어촌 특성상 주택이 서로 붙어 있으며, 화재나 재해 등에 취약하였다. 99년 18호 태풍 내습시 예보보다 태풍이 2시간가량 일찍 상륙하였고, 빈곤층이 사는 저지대에 큰 피해가 발생하여 사회적문제로 대두되었다.

마츠아이마을의 경우 제방의 높이는 7~8m로 높았지만, 교량부근에는 차량의 통행을 위해 제방을 높이 쌓을수 없어 해수가 월류하게 되었다. 또한 제방 후면의 주택가 지역은 염전이 있던 곳으로 표고 자체가 도로나 제방에 비해 낮으며, 이로 인해 월류된 해수가 바로 빠져나가지 못하고 정체되면서 더 큰 피해가 발생한 것으로 나타났다.

해일 피해 주택가는 매립을 통해 지상고를 3m정도 증고 시킨 후 주택을 재건축하였으며, 마츠아이외항과 내항 사이에 위치한 교량의 전면에 갑문을 설치하여 해일월과를 방지하고 기타 호안은 마루높이를 높여 해일피해를 예방하고 있다.



Fig. 10.1.22. Fishery harbor and Harbor view of Matsui, Japan

(12) 벳부 타노우라 해안공원(일본, 인공섬)

해안환경정비사업의 총 사업비는 95억엔(9.5억엔)이 소요되었으며, 오이타현에서 51억, 국토교통성에서 34억엔, 오이타시에서 10억엔을 각각 부담하였다. 사업기간은 1990년부터 1999년까지 약 10년이다. 참고로 국토정비사업은 국토교통성에서 주관한 사업으로 1,900m의 국도를 정비하는 사업으로 1992~1998년동안 수행되었으며, 공원조성사업은 오이타시에서 주관하는 사업으로 1994년부터 2003년까지 진행되었다.

해안공원에 포함된 구조물로는 210m 이안제가 2개, 방파제를 3곳(총 길이 537m)에 설치하고 완경사 해안 1,120m를 조성하기 위해 290,000m³의 양빈을 한다. 면적 1.5ha에 달하는 인공섬을 조성하였다. 해안공원 조성후 7, 8월의 이용객의 수가 약 6만명 정도라고 한다.

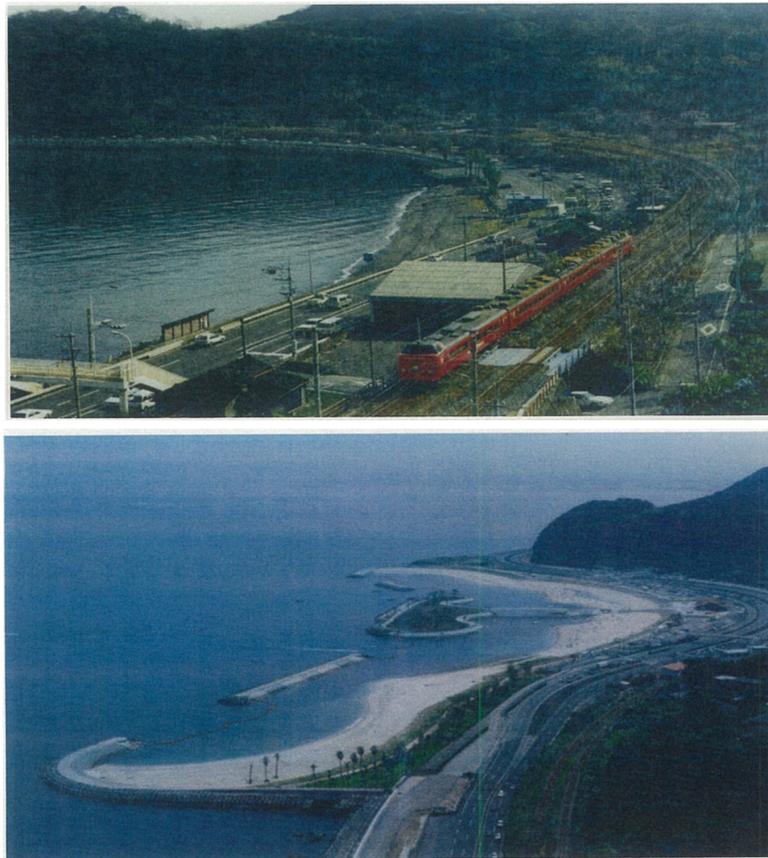


Fig. 10.1.23. Before and After the construction of Tanowoora Seaside Park

2. 미국

(1) 뉴올리언스(미국, 제방 & 호안)

태풍 카트리나 내습시 뉴올리언스의 제방구조는 시가지를 가로지르는 미시시피 강을 중심으로 하천 주변의 제방이 +25ft(MSL기준)의 높이로 축조되었으며, 소하천수로 및 해안 제방은 +12.5~+19ft(MSL기준)의 높이로 축조되었다. 또한 미국 공병단에서는 허리케인 방재 시스템에 대한 성능평가를 수행한다. Ponchartrain 호수에서 해일고가 11ft 설계시의 높이 12ft와 거의 비슷하였으나 뉴올리언스 동부해안에서는 3~5ft 정도 설계값보다 크게 나타났다. 파고의 경우 Plaquemines Parish에서는 큰 파고가 나타났으나 이곳을 제외하면 설계파고와 크게 다르지 않았다. 그러나 주기의 경우 Ponchartrain에서는 6~7sec로 설계시와 비슷하게 나왔으나, St. Bernard와 Plaquemines의 호안을 따라 14~16sec로 설계값보다 3배정도 크게 나타나 이 장주기 성분의 파가 해안으로 전파되어 월파에 큰 역할을 했을 것으로 분석된다.

미국의 남동부지역은 멕시코만에 인접하여 허리케인에 의한 피해가 상습적으로 발생하며 높지가 많은 남동부 지역인 뉴올리언스에 많이 조성되어 있다.

여러 개의 호안에 의해 단계적으로 호안이 설치되어 있으며, 도시 인접 지역에 설치되어 구역별 침수피해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 침수에 따른 대피시간 등을 확보하기 용이하다. 호안 위치와 구역에 따라 제방 높이를 12ft~25ft로 구분하여 설치되었다.

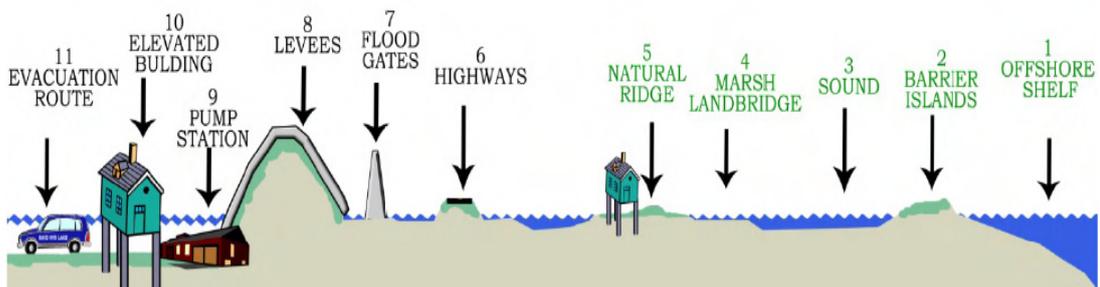


Fig. 10.1.24. Profile view of Multi-line Shore Protection (New Orleans)

BARRIERS OF EARTH AND CONCRETE

Levees and floodwalls that protect against flooding from both the Mississippi River and hurricanes are built by the Army Corps of Engineers and are maintained by local levee districts. The Corps and the local districts share the construction cost of hurricane levees, while the Mississippi River levees are a federal project. Local levee districts also build and maintain nonfederal, lower- elevation levees with construction money from each district's share of property taxes and state financing.

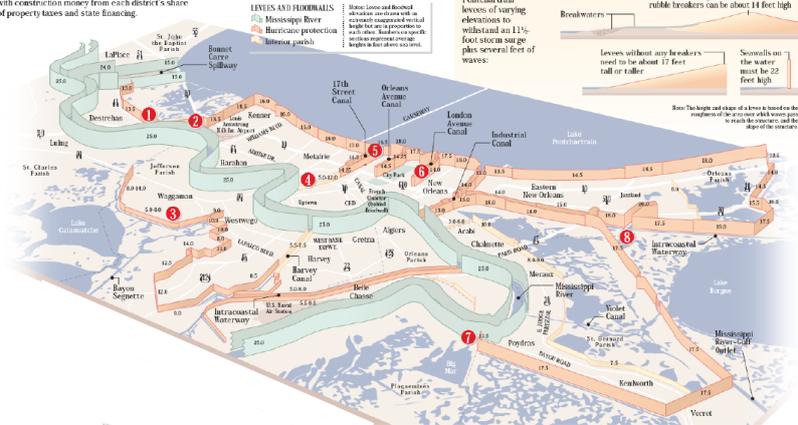


Fig. 10.125. Plane view of Multi-line Shore Protection (New Orleans)

(2) 텍사스(미국, 호안도로)

호안의 길이를 수 km 단위로 나누어서 구간별 조성으로 계획되었다. 미국 텍사스 남부 넓은 지역을 침수피해를 방지 및 호안 상부 도로와 호안 배후부지를 생태공원화 계획으로 사용성에도 있어서도 유리하다.

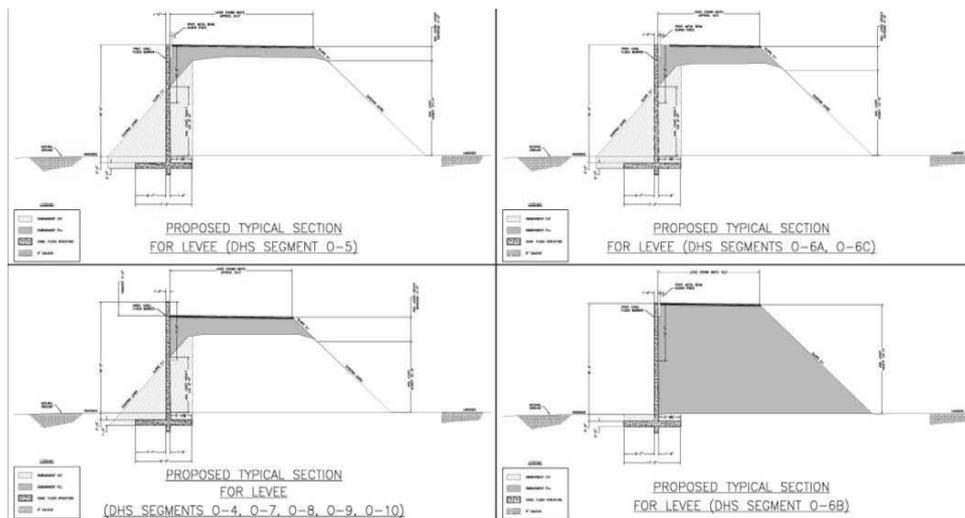


Fig. 10.126. Profile of Texas Shore Protection



Fig. 10.1.27. Texas Shore Protection Road and Behind the site

3. 네덜란드

(1) Zuyder-zee Project(네덜란드, 방조제)

Zuyder-zee Project는 홍수방지, 수자원관리 및 식량증산을 위한 농경지 확대를 목적으로 추진되었다. 현재도 간척이 진행 중이며, 시기에 따라 목적을 탄력적으로 변화시키고 있다. 위치는 네덜란드 프리즈랜드주(암스테르담), 노드홀랜드주, 프레보랜드주 등이다.

1667년 Henric Stevin이 하구를 막음으로써 국가의 심장부를 범람과 염류화로부터 막고 매립지를 조성할 수 있다고 제안하면서 시작했으나 당시에는 기술적으로 실현 불가능한 구상이었기 때문에 그다지 주목을 받지 못하였다. 1825년 자우드제이 동쪽 해안을 휩쓴 대홍수 발생과 1840~1852년에 있었던 Haarlemmermeer에서의 매립(간척)이 기술적 성공을 거두며 다시 추진되었다.

1849년에 Zuyder-zee Project 계획(19세기동안 10개의 계획)을 수립하여, 1920년 방조제건설을 시작하였다. 1932년에 방조제(Afsluit-Dijk) 32.5km 완공하였고, 현재까지 간척이 진행되고 있다.

길이 32.5km, 폭 90m, 해수면에서의 높이 7.25m로서 방조제 상부에 4차선 도로를 건설하여 300km의 해안선을 단축하였다. 방조제 내부는 22만5천ha의 토지, 12만 5천ha의 담수호로 이루어져 있으며, 이중 16만5천ha에 대해 육지화 계획을 수립하였다.



Fig. 10.1.28. Afsluit-dijk of Netherlands

(2) Delta Project(네델란드, 방조제)

Delta Project는 홍수방지, 수자원관리 및 식량증상을 위한 농경지 확대를 목적으로 추진되었으며, 현재는 수문 등을 설치하여 해수유통을 고려하였다. 위치는 네델란드 남서부 제이란드 델타 지역으로서 1953년 대홍수가 발생했을때 500km의 기존 제방이 파괴되어 지역주민 1,800여명이 희생되고, 지역의 대부분이 침수되면서 본격적으로 사업 착수되었다. 1953년 대홍수로 500km의 기존 제방이 파괴되어 지역주민 1,800여명이 희생되고, 지역의 대부분이 침수되면서 본격적 사업에 착수하였다. 1953년 1월 31일부터 2월 1일까지 허리케인급 폭풍우 급습하여 평균해수면보다 5.6m 높은 파도가 범람하여 전 국토의 9% 침수되었다. 1853명이 사망하고 가축 20만마리가 희생, 7만 2000여명의 이재민 발생하였으며, 가옥 4만 7000여채와 16만여ha의 농지가 유실된바있다.

이에 따라 기존 제방의 보수가 아닌 새로운 개념의 간척사업 계획을 구상하게 되어 1958년에 의회에서 Delta Act를 제정한 후 1967년부터 Eastern Scheldt 유입구를 차단시키는 방조제 공사 착공하게 되었다. 1972년에 7개의 댐과 방조제를 건설하고 1978년 Neeltje Jans와 Noordland간 추가 방조제가 완공되었으며, 1986년에 최종 완공되었다. 이로 인해 조성된 지역의 규모는 총면적 6,700ha 중 농경지는 1,500ha 이다.

최근 Delta Project로 조성된 지역의 자연 생태계를 보호하기 위해서는 독을 막아서는 안 된다는 환경주의자들과 북해로 진출할 수 없어 생계가 막히게 된 지역주민들의 반대로 Eastren Scheldt가 개방되어야 한다는 여론이 고조되었다. 댐을 세워 담수호를 만든다면 새로운 상수원과 수상 스포츠 센터 등의 가능성이 이 지역

산업화에 도움을 주겠지만, 홍합, 굴, 바닷가재 등의 양식이 불가능하게 되어 실질적으로 손실이 클 것으로 계산한다.

정부는 수년에 걸친 연구 조사 끝에 방조제를 건설하되 만(灣) 입구에 수문을 달아 평소에는 바닷물이 드나들 수 있게 하고 홍수가 예상되면 이를 닫는다는 계획을 수립하였다. 특별위원회가 조직되어 홍수의 위험이 있을 때 외에는 Eastren Scheldt를 개방토록 하는 타협안을 제시하였다(해수유통). 원래의 계획대로라면 1978년에 완성되어야 했지만 1977년에야 착공된 이 마지막 공사는 결국 1986년에 완공되었다.

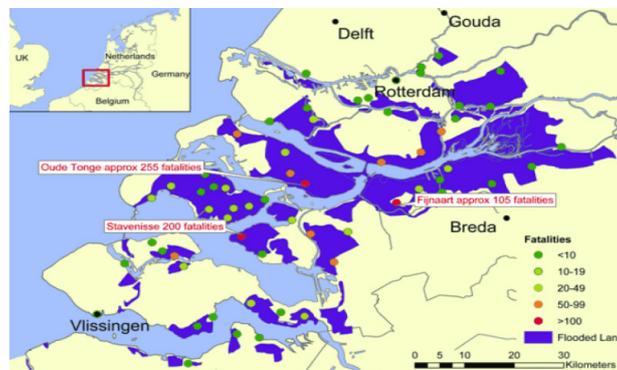


Fig. 10.1.29. Region of Delta Project at Netherland



Fig. 10.1.30. Storm surge Sluice gate of Netherland



〈Eastern Scheldt Dam〉



〈Haringvliet Dam〉

Fig. 10.1.31. Seawall and Sea Dike at Neteerland

4. 영국

(1) Thames Barrier(영국, 수문)

이전부터 크고 작은 범람피해가 많았으며, 1953년 폭풍해일이 런던 중앙부의 호안을 넘어 범람하였다. 300명 이상의 인명피해와 수많은 재산 피해를 입었고, 이를 계기로 Waverly 위원회를 설립하였다. 온난화에 따른 해수면 상승도 지속적으로 이루어지고 있으며 산업 중심지역인 런던의 보호를 위하여 많은 문제를 검토하여, 설계를 거쳐 Thames Barrier의 설치를 추진하였다. 약 61m(200ft) 폭의 주요 수문 4기와 약 30m(100ft)폭의 소규모 수문 2기로 구성되어 있으며, 수문을 올렸을 때 최대 15m 높이에 거치된다. 또한 평상시에는 수저면에 있다가 작동시 수면으로 상승하는 방식의 수문 4기(폭 약 30m)가 설치되었다. 50여명의 인원이 조종실에서 24시간 관리하며, 해상상태, 기상등의 정보를 받아 36시간 전에 경보할 수 있는 체계를 갖추고 있으며, 수문을 닫는데 걸리는 시간은 최소 15분이지만 일반적인 경우에는 3시간에 걸쳐 작동하고 있다. 1983년 완공후 2008년 1월까지 107번의 홍수방어에 성공하였다.



Fig. 10.1.32. Thames barrier at England

5. 이탈리아

(1) Venice Flood Barrier(이탈리아, 수문)

이탈리아의 Ministry of Infrastructure - Venice Water Authority에서는 폭풍해일로부터 Malamocco 및 Lido-San Nicolo 하구를 보호하기 위하여 Venice Flood Barrier Project를 실행하였다. 베니스의 하구는 3지점에서 아드리아안해와 연결되어있으며, 북측에 Lido-Treporti와 Lido-San Nicolo 등 2개의 하구와 중간의 Malamocco 하구 및 남측의 Chioggia 하구 등 총 4개의 하구를 가지고 있다. 각각의 하구에 수문을 가진 케이슨으로 방조제를 건설하였으며, 수문은 평상시에는 바닥에 붙어있어 해수소통을 가능하게 하고, 폭풍해일이 예상되면 수문을 들어올려 외해의 고조를 차단한다. Venice Flood Barrier는 4개 지역에 총 78수문으로 이루어져 있으며, 폭풍 등 고조가 예상되면 물로 채워져 있는 수문 내부에 공기를 밀어 넣어 수문을 들어올리는 방식으로 고조를 방어한다.



Fig. 10.1.33. Target Area of Venice Flood Barrier Project

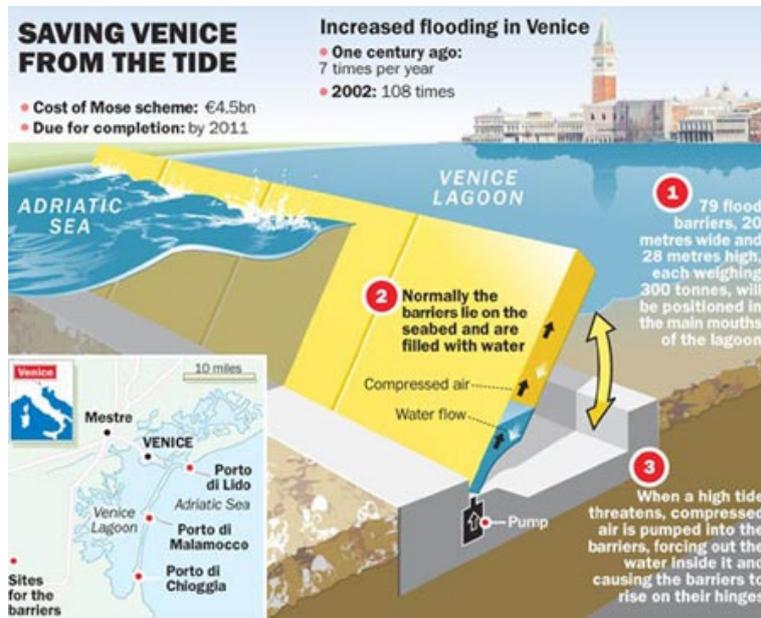


Fig. 10.1.34. Sluice gate of Venice

제 2 절 국내 재해방지시설 조사 및 제안

1. 재해방지 시설물 설치를 위한 3차원 CFD 시뮬레이션 사례

(1) 부유 플랩형 고조 방파제

정신택 등(2008, 2009)은 부유 플랩형 고조방파제의 응답특성에 대해서 연구하였다. 효율적인 연구를 위하여 파동장은 선형 포텐셜 이론을 적용하여 모형화하였으며, 구조물의 운동은 Newton의 운동 제2법칙을 사용하여 나타내었다. 유체 영역은 통상의 2차 보간함수를 갖는 등매개변수요소로 모형화하였으며, 방사경계조건에 접하는 외부 영역은 무한요소로 처리하였다. 수치실험결과와의 비교를 통하여 수립된 수치모델의 타당성을 입증하였으며, 개발된 수치모델을 이용하여 마산만에 부유 플랩형 고조방파제 적용가능성에 대해서 연구하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

일본의 항만공학기술연구소에서는 이러한 폭풍 및 지진 해일재해 방지를 위한 새로운 형식의 구조물 개발에 대한 연구를 수행한 바 있다. Shimosako et al.(2007)은 플랩식 구조물을 이용하여 파랑과 해일을 막는 연구를 실시하였으며, Arikawa et al.(2007)은 직립부상식 방파제를 이용하는 방안에 대한 연구를 실시한 바 있다. 직립부상식 방파제는 올해 와카야마(和歌山)항 부근에 시험시공될 예정이다.

“모세 프로젝트”로 불리우는 유럽 이탈리아 베니스의 사업은 길이 20 m, 높이 30 m, 무게 300톤의 대형 금속제 방벽 78개를 이어 붙여 바닷물의 범람을 막는 것이다. 평소에는 바다 밑바닥에 가라앉아 있는 이 구조물은 침수 위기시 압축공기를 주입해 부력으로 일으켜 세워진다. 지구 온난화 등으로 인해 해마다 큰 홍수 피해를 입는 베니스를 구할 수 있는 유일한 방법이라 판단하고 방벽 건설을 추진하고 있다. 지난 2003년부터 추진된 ‘모세프로젝트’는 2014년에 완공될 예정이다. 원래 2011년 완공될 예정이었으나, 환경 단체 등의 반대로 준공이 3년 늦춰졌다 ([http://www.salve.it/uk/default .htm](http://www.salve.it/uk/default.htm); Eprim, 2005; Colamussi, 1992).

본 논문(정신택 등, 2009)에서는 부유 플랩형 고조방파제의 파랑에 대한 동적응답, 파랑 반사 및 전달 특성을 효율적으로 해석할 수 있는 수치모델에 대해서 연구하였다. 수치실험 결과와 의 비교를 통하여 타당성을 검증하고, 고조방파제의 파랑 반사 및 전달 특성을 살펴보았으며, 수립된 수치모델을 마산만 고조방파제에 적용하였다.

부유 플랩형 고조방파제의 수리특성 해석을 위한 수치 모델을 수립하고 수리실험결과와의 비교를 통하여 타당성을 입증하였으며, 마산만 현지 적용 구조물에 대한 해석을 통하여 도출된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 최대 동적응답은 입사파의 주기가 길어질수록 거의 선형적으로 증가한다.
- 파랑 차단 성능은 일반 부유식 방파제와 유사하게 단주기 조건에서는 효과를 보이나 장주기로 갈수록 미미하다.
- 동적응답과 파랑차단성능은 부력에 의한 복원력과 직접적으로 관련된다. 즉, 부력변화가 크게 발생할 수 있는 단면을 갖도록 설계하면 동적응답을 감소시킬 수 있으며, 파랑차단성능도 제고할 수 있다.
- 고조 발생 전보다 고조 발생 후의 동적응답이 작으며, 파랑차단성능도 우수하다. 이러한 현상은 고조가 발생하면 구조체가 눕게 되어 부력에 의한 복원력 증대가 주요한 요인에 의한 것으로 판단되었다.
- 수심 20 m, 해일고 2 m인 마산만 입구 조건에 대해 길이 40 m, 두부폭 8 m의 부유 플랩형 고조방파제의 적용성 평가결과, 현장에서 예상되는 최대 파조건인 유의파고 3 m, 주기 14.9초에서도 고조 2 m를 제어할 수 있으며, 주기 6초 이하의 풍파 에너지는 30% 이상 차단이 가능하여 풍파에 대한 방파제로서의 역할은 어느 정도 할수 있는 것으로 평가되었다.

본 연구(정식택 등, 2009)를 통하여 수립된 수치모델은 단부에서 발생하는 난류에 의한 에너지 소모 현상을 모의할 수 없다. 이러한 현상을 고려할 수 있도록 수치모델 개선이 된다면 보다 우수한 성능을 보이는 새로운 형식의 고조방파제 개발도 가능할 것으로 판단하였다. 아울러 입사 파고가 큰 경우, 고조방파제의 움직임이 크게 발생하여 비선형 현상이 강하게 발생할 것으로 예상되는 바, 보다 면밀한 성능평가를 위한 비선형 수치해석과 수리실험이 필요한 것으로 주장하고 있다.

김정대(2010)은 부유 플랩형 고조방파제의 파랑응답을 3차원 CFD모형으로 실험을 수행하였으며, 실험결과는 다음과 같다.

- 외해에서 입사파고가 3 m, 주기가 15 s 일 경우 부유플랩형 고조방파제는 해저면에서 반시계방향으로 회전각이 38° 이다.
- 파고 1 m, 3 m에서 주기가 8, 10, 12, 15, 20, 30 s 일 경우 고조방파제의 회전각은 34~46° 로 나타남.
- 입사파의 주기가 8, 10, 15, 20, 30 s일 경우 각각 회전각 주기가 7.9, 10.1, 15,

20.1 30 s로 나타남.

- 입사파의 주기가 길어질수록 내해로 파의 전달이 커지는 것으로 사료된다.
- 파랑과 고조에 대한 대책으로 그 성능이 충분히 발휘할 것으로 판단된다.
- 향후, 파랑의 반사 및 전달 특성의 정량적인 분석과 추가적인 수치 및 수리 실험이 실시 필요하다.

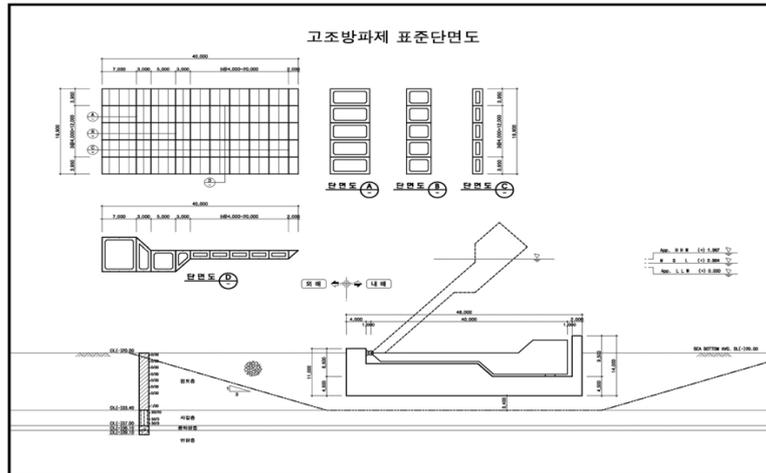


Fig. 10.2.1. Flap-type Breakwater heightened standard section(Shintak Jung et al., 2009)



Fig. 10.2.2 Location of the installation of flap-type breakwater

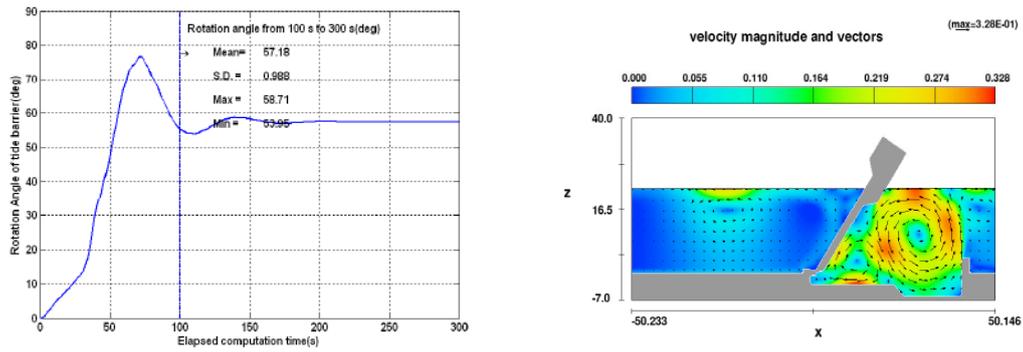


Fig. 10.2.3. Experimental result of flap-type breakwater (rotation degree: 57.18°)

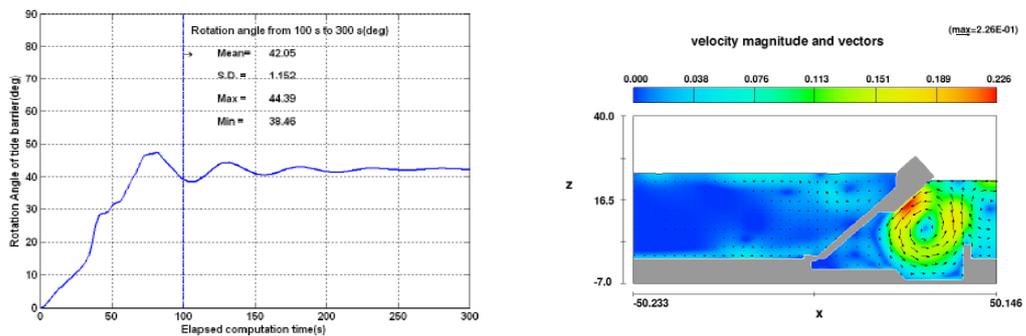


Fig. 10.2.4. Experimental result of flap-type breakwater (rotation degree: 42.0°)

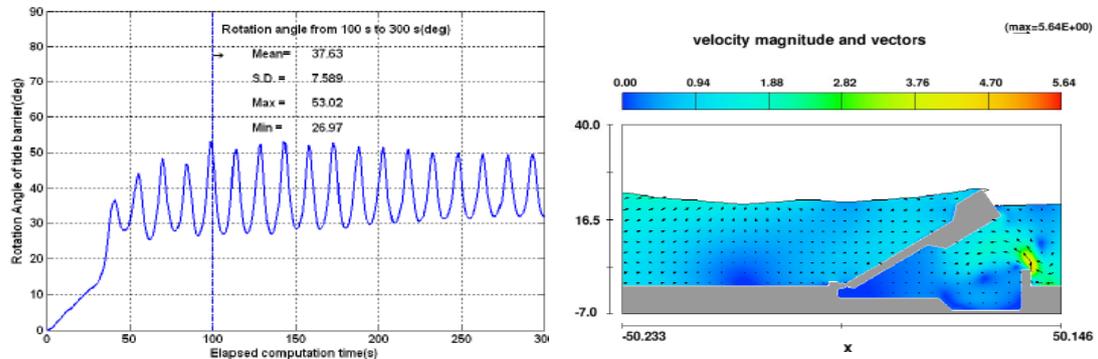


Fig. 10.2.5. Experimental result of flap-type breakwater (rotation degree: 37.63°)

2. 우리나라 지역특성에 맞는 재해방지시설 개발을 위한 3차원 CFD 시뮬레이션

가. 우리나라 지역적 특성에 적합한 재해방재 시설물 선정

우리나라 주변해역의 해일 유발환경을 연안별로 살펴보면 서해안은 조석전과 영향에 의한 조위증폭 작용과 함께 하계에는 태풍에 의한 해일, 동계에는 북서계절 풍에 의한 고파랑과 해일 등의 현상이 빈번하게 발생하는 해역특성을 가지며, 남해안은 조석현상과 더불어 하계 태풍에 의한 해일발생이 유발되는 환경이다. 또한, 조

차가 작은 동해안은 하계 태풍에 의한 해일과 동계 계절풍에 의한 해일, 지진해일 등이 유발되는 환경이며, 남서해안에서 나타나는 연안범람 등의 현상은 적은 것으로 요약할 수 있다(국립방재연구소, 2000).

해일의 종류 중 하나는 폭풍해일이며, 우리나라에 발생한 폭풍해일은 1900년 이후 현재까지 약 70회 이상의 태풍이 내습과 해일피해가 발생하였으며 서해안과 남해안이 주요 피해지역으로서 특히, 남해안에 막대한 피해를 입힌 태풍을 열거하면 1959년 태풍 '사라', 1987년 태풍 '셀마', 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미' 등을 열거할 수 있다. 따라서, 폭풍해일에 의한 ·해안 시설물의 파괴 및 해일에 의한 육상 배후부지 및 시설물의 침수에 따른 인명 · 재산피해의 증가가 예측되고 있으며, 우리나라에 내습하는 태풍 및 해일과 같은 해양외력에 대해서 최근 호안 및 해안구조물의 설계 및 시설기준이 안정적인 설계 및 유지를 위해 적합한가에 대한 재검토가 요구된다. 또한 폭풍해일과 같은 해양성 자연재해에 의한 해일 대비 및 재해경감대책을 위해 해양 물리적 외력조건에 대한 검토가 요구된다.

나. 정밀지형 및 수심 데이터를 통한 정밀한 시뮬레이션 실시

본 연구에서는 폭풍해일과 지진해일에 의한 대표적인 범람 피해 사례라 할 수 있는 2003년 태풍 매미 내습시 마산의 3차원 범람 시뮬레이션을 실시하였다. 태풍 매미호 내습이후 마산의 범람을 대비하기 위한 대책 수립이 시행되고 있다. 대책으로는 선적 방어 및 면적 방어 대책(해상매립+인공둔덕, 해안도로 표고 증고) 등이 있으며, 본 연구에서는 선적 방어책으로써 현재 호안 부지 내에 해일 저지용 방벽을 1m, 1.7m의 높이로 전체구간에 설치하는 안과 일부 구간을 낮게 하여 호안 접근성을 높이는 안으로 실험을 실시하였다.

(1) FLOW-3D 모형

본 연구에서는 Flow Science Inc.사가 개발한 범용 유동해석 프로그램인 FLOW-3D를 사용하였다. 지금까지 사용되어온 MECCA나 ADCIRC 등 3차원 수치 모형들은 자유수면을 가지는 흐름을 수치적으로 모의하기 위하여 정수압 분포를 가정하거나 수직방향의 유속을 무시하였다. 그러나 FLOW3D 모형은 x, y, z 방향의 유속을 모두 고려하여 수치모의를 수행하는 완전한 3차원 난류모형이다. FLOW3D는 자체적으로 3차원 형상의 모델링을 위한 전처리 기능을 보유하고 있지만 구조물

의 복잡한 형상을 표현하기 위해서는 3차원 CAD를 이용하는 것이 필요하다. 수치 해석 프로그램에서 사용 가능한 좌표계는 직교좌표계(x, y, z)와 원통형좌표계(r, θ , z)이지만 본 과업에서는 지형모델의 특성상 직교좌표계를 사용하였다.

FLOW-3D에서는 복잡한 3차원 형상의 표현을 위하여 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method)기법을 사용한다. FAVOR 기법은 모든 방정식에 면적과 체적에 관련된 함수인 Porosity Function이 포함되어 있고 계산격자 내에 존재하는 고체와 유체를 이러한 함수 값을 통해 구분하기 때문에 자유표면을 계산하는 유동해석에서는 계산격자의 수를 줄여 전체적인 계산시간을 절감시킬 수 있다.

○ 연속방정식(Continuity Equation)

모형은 직교 좌표계를 사용하기 때문에 복잡한 구조물 또는 하상형상을 가지는 흐름을 모의하는데 단점이 있을 수 있다. 그러나 FLOW-3D[®]는 FAVOR와 VOF 방법이 사용되었기 때문에 직교 좌표계를 사용하여도 충분한 정도로 정확한 수치모의를 수행할 수 있다. 3차원 연속 방정식은 다음과 같이 구성됨(Flow Science, 1993).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = RDIF + RSOR$$

여기서, V_F 는 유체에 접하고 있는 체적을 의미하며, ρ 는 유체의 밀도, RDIF는 난류확산항(Turbulent Diffusion Term), RSOR는 질량생성항(Mass Source Term)을 나타낸다. 속도성분 (u, v, w)는 (x, y, z)방향으로의 속도를 나타내며, A_x , A_y , A_z 는 계산 셀의 x, y, z 방향 유체가 접촉된 각각의 면적을 의미한다.

연속방정식의 우변 첫번째 항인 난류확산항은,

$$RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)$$

여기서, $v_\rho = c_\rho \mu / \rho$ 와 같다. μ 는 운동량 확산계수 즉, 점도를 나타내며, c_ρ 는 상수이며 c_ρ 의 역수는 Turbulent Schmidt Number라 불림. 위 식은 불균일한 밀도를 갖는 유체 내의 난류 혼합 과정에서만 필요한 항이다.

○ 운동량 방정식(Momentum Equation)

직교좌표계의 각 방향 속도성분 (u, v, w)에 대한 방정식은 추가적인 몇 개의 항을 포함한 Navier-Stokes 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w$$

위 방정식에서 G_x, G_y, G_z 는 체적력항 (Body Acceleration)이고, f_x, f_y, f_z 는 점성력항 (Viscous Acceleration), b_x, b_y, b_z 는 구조물을 통과하면서 발생하는 손실을 표시하며 마지막항은 계산영역내의 질량생성을 의미한다. 동점성계수(Dynamic Viscosity) μ 와 관련한 점성력항(Viscous Acceleration)은 다음과 같다.

$$\rho V_F f_x = wsx - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\}$$

$$\rho V_F f_y = wsy - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\}$$

$$\rho V_F f_z = wsz - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\}$$

위 식에서 wsx, wsy, wsz 는 벽면 전단응력(Wall Shear Stress)을 나타냄. 만일 이 항이 소거되면 벽에서의 전단응력은 발생되지 않다. 왜냐하면, 나머지 항이 유동면적 A_x, A_y, A_z 을 포함하고 있어서 벽면에서 유동이 없는 경우 제로가 되기 때문이다. 난류유동의 경우, 벽면 근처에는 벽 법칙(Law-of-the-wall)을 적용한 속도분포를 가정한다.

○ 자유표면(Free Surface) 해석

기체와 접하고 있는 액체 표면의 형상은 VOF(Volume Of Fluid) 함수, $F(x,y,z,t)$ 를 통해 얻을 수 있다. 이 함수는 단위체적 내에 포함되어 있는 액체의 체적을 나타내며, 아래와 같은 관계가 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right] = FDIF + FSOR$$

확산계수(Diffusion Coefficient)는 $V_F = C_F \mu / \rho$ 이고, 상수 C_F 의 역수는 Turbulent Schmidt Number라고도 불림. 위 확산항은 서로 다른 유체간에 난류 혼합(Turbulent Mixing)이 발생하는 경우에만 필요하다.

FSOR은 연속방정식의 RSOR에 해당하며 유체의 질량생성으로 인해 변화되는 해당 유체의 시간에 따른 체적 변화율을 의미한다.

자유표면을 포함하고 있는 비압축성유체 문제의 경우 F 는 유체가 점유하고 있는 체적비율을 의미한다. 그래서, $F=1$ 이면 계산 셀 내에 유체가 채워져 있는 것이고 $F=0$ 이면 균일한 압력이 작용되고 유체가 없는 공간 즉 빈 공간을 의미한다.

물리적으로 이 공간에는 액체로부터 증발된 증기나 기체가 채워져 있지만, 이들 가스의 밀도가 액체에 비해 무시될 수 있을 정도로 작으므로 전체 계산 영역에 걸쳐 액체 경계면 위로는 일정한 압력이 작용하고 있는 빈 공간이라고 가정한다.

○ FAVOR Method

FLOW3D[®]는 기본적으로 유한차분법(FDM, Finite Difference Method)으로 구성된 프로그램이다. 유한차분법의 장점은 공간좌표 상의 각종 변수 계산시 효율적인 데이터 처리가 가능하여 전체 계산시간을 단축시킬 수 있다는 것이다. 하지만 유동 영역과 구조물의 구분이 계단식으로 표현되어 구조물 근처에서 조밀한 격자구성이 필요하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 사용하거나 구조물의 표면과 일치하는 좌표계(Body Fitted Grid System)를 사용한다. 그러나 FLOW-3D는 계산 속도의 이점을 그대로 유지하면서 공간상의 구조물을 비교적 정확하게 표시할 수 있는 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation)기법을 적용한다. FAVOR 기법의 장점은 적은 수의 계산절점으로 Body Fitted Grid System의 정도를 유지할 수 있고 보다 복잡한 형상도 표현할 수 있다는 것이다.

그리고 유동해석의 대부분이 계산영역의 구조물형상 모델링 또는 유체영역의 모델링에 소요된다는 점에 착안하여 복잡한 형상은 별도의 전용 솔리드 모델러를 사용하여 3차원으로 모델링한 후 이를 STL Format(Stereolithography Format)이나,

IDEAS Universal Format으로 변환한 후 입력파일에서 읽어 들이도록 추천하고 있다. 이렇게 입력된 형상 데이터는 좌표계의 각 방향 절점좌표와 만나는 교점을 기준으로 이루어진 다각형 또는 체적으로 표시됨으로써 구조물을 표시할 수 있다. 구조물과 유체의 구분은 해당 계산 셀이 유체와 접촉하고 있는 면적과 체적의 비율로 나타내며 “1”이면 완전 구조물, “0”인 경우 완전 유체를 나타낸다. 전술한 바와 같이 그림의 삼각형을 명확하게 표현하는 방법은 비정렬 좌표계(Unstructured Grid System)나 Body Fitted Grid System을 사용해야 되지만 직교 좌표계를 사용하더라도 한 개의 계산 셀에 면적에 관련된 3개 변수, 체적에 관련된 1개 변수로 충분히 표현이 가능하다는 것을 알 수 있다.

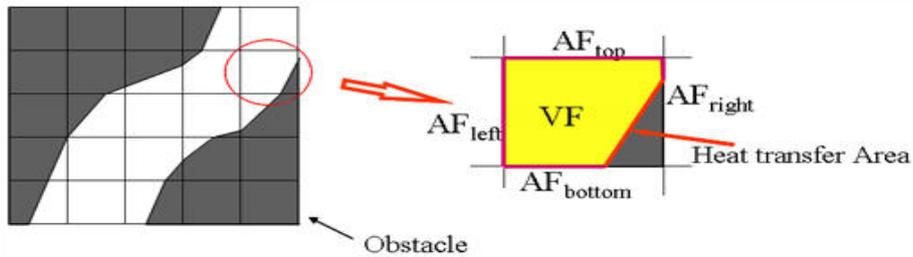


Fig. 10.2.6. Definition of FAVOR method fluid

(2) 모형 입력 조건

시뮬레이션은 약 600만 cell($x \times y \times z: 440 \times 390 \times 35: 880m \times 780m \times 50m$)로서 수평격자 해상도는 2m, 수직적으로는 최소 cell 높이가 0.5m, 최대 높이는 3.5m로서 취하였다. 지반고, 해안선의 천단고 및 수심, 건물, 도로 등을 마산항 및 마산 해안 인근의 수치해도, 수치 지형도를 활용하여 작성하였다. 해수면은 최초에 E.L.(+) 2.7m(호안의 마루높이)로 하였고, 남측 경계에서의 해수 높이가 시뮬레이션의 시작시 E.L.(+) 2.7m로부터 E.L.(+) 4.39m로 60sec 동안 서서히 상승하도록 하여 이후 시뮬레이션 기간 동안 유지되도록 하였다. 당시의 관측 최고 높이로써 모형 계산 시간인 20분 내외 동안 지속되는 것으로 가정하였는데 당시의 조위 관측치의 시계열 자료에 의하면 최고조위에 도달한 시점의 전후 시간이 한 시간 정도임을 고려하여 상기와 같이 입력 하였다.

(3) 정밀 지형 데이터 자료

정밀 지형 데이터는 항공레이저 측량 (LiDar)자료의 DEM 및 DSM 자료(중앙항업, 2009)와 국토지리정보원의 1:1,000 지형도를 활용하여 작성하였다.

DEM 자료 및 DSM자료의 포인트별 자료가 상세한 경우 수 미터 이하의 점이 다수가 인접하여 산포(scatter)하여 작성되어 있다. 따라서, 보간법을 이용하여 5미터 내외의 등간격 자료로 보간한 자료를 활용하여, 지형 및 수심을 작성하였으며, 건물 지형 효과를 정확하게 반영하기 위하여 지형도의 건물 모양을 3차원 모델링(stl file, 화)을 통해 3차원 CFD모형의 입력 자료로 가공하여 사용하였다.

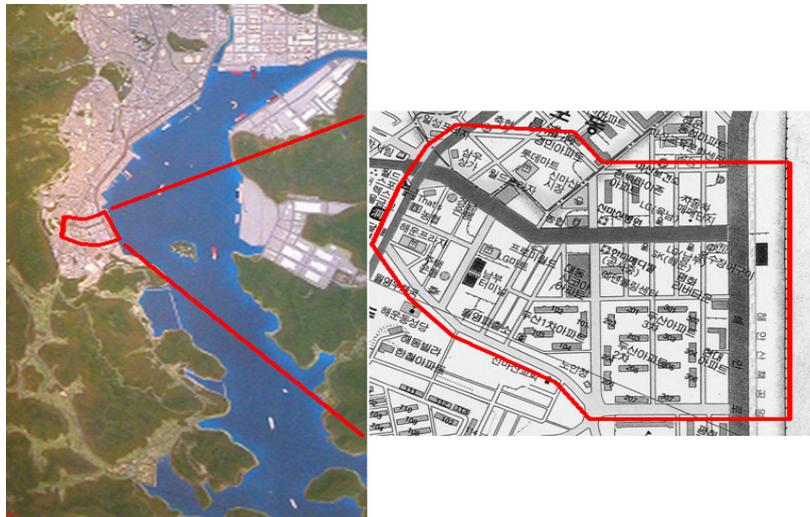


Fig. 10.2.7. Area of 3D inundation simulation

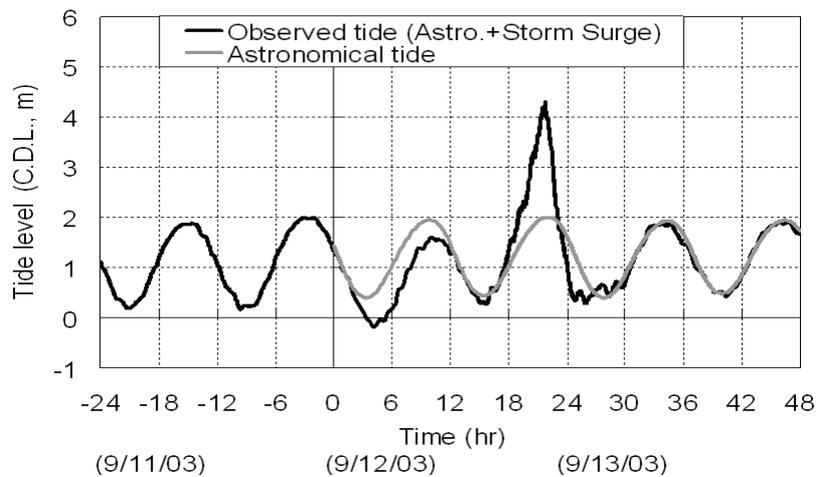


Fig. 10.2.8. Tidal observation and prediction at typhoon MAEMI (2003)

(4) 선적 방어책에 관한 산정 결과

선적 방어책으로서의 해일저지용 방벽의 설치 이전 및 이후에 대한 실험을 실시하였다. Fig. 10.2.11(a)는 마산의 지형 및 시뮬레이션의 초기 상태로서 각 안별로 동일한다. 입자의 거동을 파악하기 위하여 particle tracking을 실시하였는데 입자의 거동은 당시 마산항 야적장에 쌓여있던 목재의 이동 등 부유물의 이동을 유추할 수 있으며, 폭풍 해일방벽 설치 전후의 이동 경로를 예측 할 수 있다.

총 20분(1,200sec) 동안 실험을 실시하였는데 지진해일 방벽 설치 이전 Fig. 10.2.11(b)의 경우 월류된 해수는 도로를 따라 전파되어 800sec 내외의 시간이 경과 후 해수가 북측경계에 도달하여 이후 도로와 건물 부지로 해수가 차오르는 양상을 보였다. 남측 호안의 전 구간에서 범람이 시작되어 유입되는 해수가 마산 해안 일대로 전파되면서 나타나는 전체적인 형상을 나타냄.

Fig. 10.2.12(a)는 폭풍해일 방벽을 1m 높이로 하여 호안 전 구간에 설치하였을 경우로서 방벽 설치이전과 비교하여 범람 초기에는 방벽으로 인해 범람이 지체되는 효과로 900sec 이후 북측경계에 도달하였으며 이후 양상은 방벽 설치 이전과 유사한다.

Fig. 10.2.12(b)는 태풍 매미 내습시 최대 해수위를 상회하도록 폭풍해일 방벽을 1.7m 높이로 설치하고 일부 구간을 호안 접근성을 위하여 50cm의 저상의 개방구간을 설치한 경우로서 방벽 설치이전과 비교하여 방벽으로 인해 범람이 지체되는 효과가 있었다.

범람시간의 지체는 인명 및 재산의 대피 시간을 확보하는 수단이 될 수 있다. 그러나 개방구간으로의 해수 집중으로 유속이 설치이전보다 증가하여 오히려 대피 이동시 피해가 있을 수 있으므로 범람지체 효과가 반감된다고 할 수 있다.

보다 면밀한 시뮬레이션을 통하여 최대 해일유발 유속 산정결과를 통해 대피 경로 설정과 이에 대한 표지설치 등 비구조적 방재대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

일본의 경우 이러한 개방구간에 기계 시스템이 포함된 갑문을 설치하는 경우가 있으므로 폭풍해일 방벽의 설치 시에는 이를 참조하여 검토할 필요성이 있다.

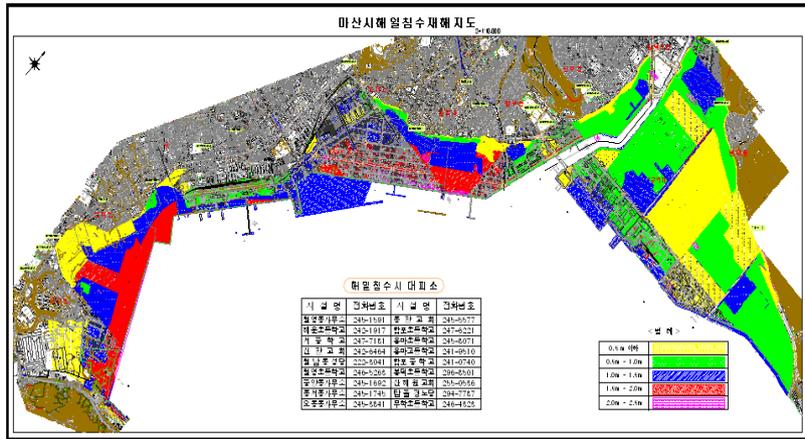


Fig. 10.2.9. Hazard map of Masan (2004)

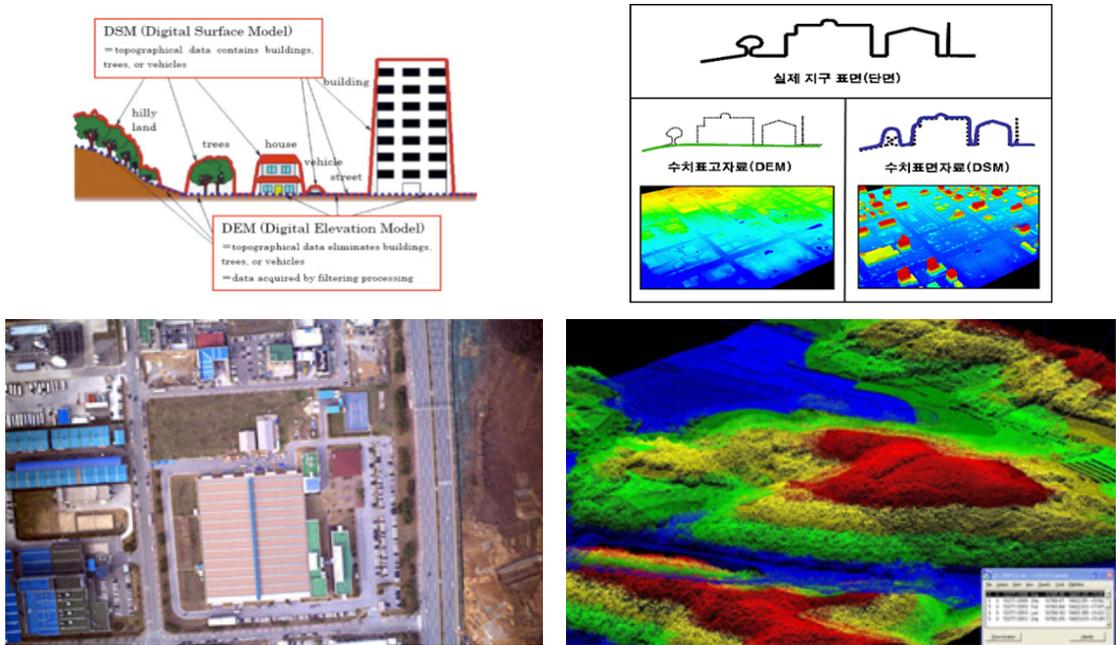


Fig. 10.2.10. DEM form LiDAR measurement

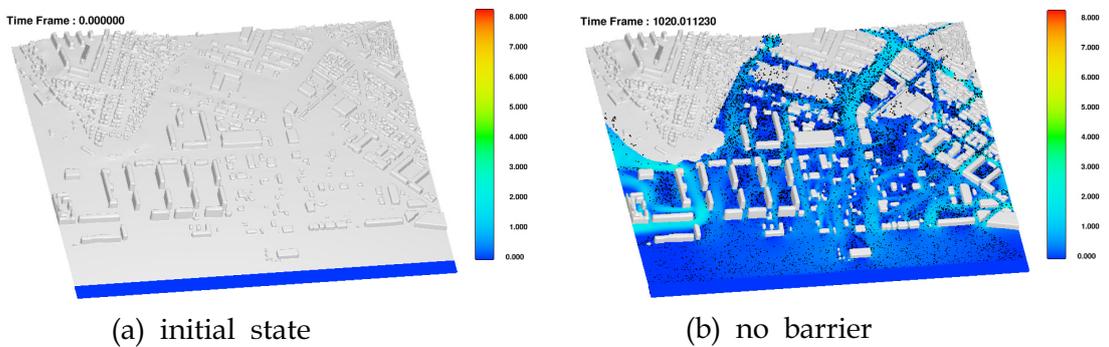


Fig. 10.2.11. Experimental result 1 of linearly inundation defence

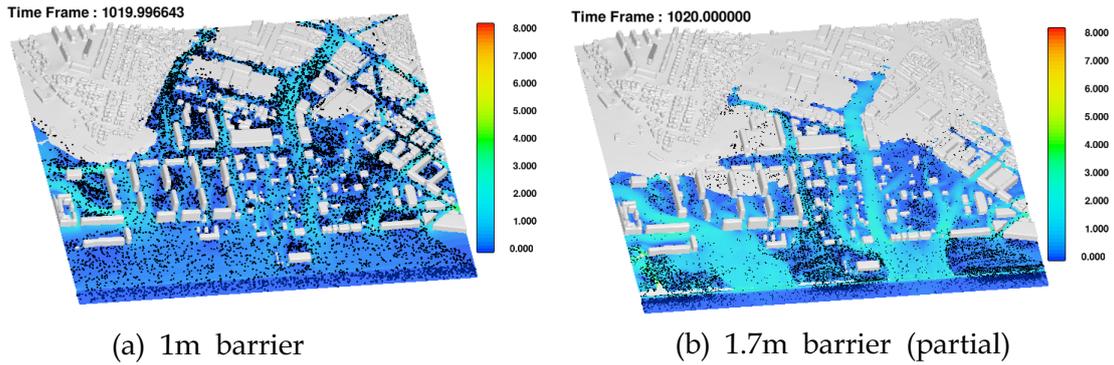


Fig. 10.2.12. Experimental result 2 of linearly inundation defence

(5) 면적 방어책에 관한 산정 결과

면적 방어책으로서의 해일저지용 방벽의 설치 이전 및 이후에 대한 실험을 실시하였다. Fig. 10.2.13의 지형은 Fig. 10.2.11과 Fig. 10.2.12의 마산 범람시물레이션 대상지역의 일부 구간에 대하여 실험을 실시하였다.

Fig. 10.2.13 ~ Fig. 10.2.15는 현재상태 안벽전면에 유공률 50% 가정의 Porous 구조물 설치시 실험을 실시하였다.

유공 구조물은 현재안벽에서 1:1.5의 경사로 구조물 폭은 10m, 20m, 30m로 실험하였으며, 제시된 그림은 10m 폭일 경우의 산정 결과이다.

실험 결과 porous 구조물의 효과는 미약한 것으로 예측되었다.

Fig. 10.2.16 ~ Fig. 10.2.17은 현재상태 안벽 전면으로 방재언덕 설치시 실험이다.

방재언덕은 기왕최대 조위(매미시)를 고려한 높이 4.5~7.5m이며 방재언덕 폭은 40~100m의 실험을 실시하였으며, 그림은 방재언덕 높이 4.5m, 방재언덕 폭 40m, 외력조건은 파고 2.1m, 주기 15초의 결과이다.

Fig. 10.2.18 ~ Fig. 10.2.23은 현재상태 안벽 전면으로 방재언덕 설치시 실험으로서 소역의 실험 결과를 바탕으로 광역에 적용하여 실험을 실시하였으며, 방재언덕 높이별, 폭별 효과 분석하였다.

방재 언덕의 설치로서 설치된 구역 내측으로의 월파 및 해일 내습을 제어할 수 있다. 그러나, 설치 구역 이외의 해역으로의 해일 에너지의 전이로 인해 방재언덕이 설치되지 않은 구역으로의 해일이 집중될 수 있어 설치에 있어 다각도의 검토가 필요할 것으로 사료된다.

(6) 광역 대상 실험

Fig. 10.2.24 ~ Fig. 10.2.30은 상기 실험이 안벽 일부 구간에 대한 정밀한 분석 실험임에도 불구하고 마산만 입구부터 내습하는 해일을 모의하는데 제한적 적용이 불가피함에 따라 만입구부터 마산만 전체를 포함하는 해역 및 연안에 대하여 3차원 해일 범람 모의를 시도하였다. 3차원 CFD모형의 특성상 컴퓨터의 계산시간이 크게 소요되며, 계산 cell이 증가 할수록 메모리 및 계산 소요시간의 제한적 적용이 불가피하여 상기의 실험에서와 같은 정밀도의 지형조건 보다 성긴 cell을 구성하여, 마산만 전체에 대한 실험을 실시하였다. 초기적 실험 결과로서 컴퓨터의 계산능력이 매우 빠르게 진화하는 현재의 상황에 비추어 볼 때 향후에는 보다 정밀한 격자체계 구성을 통해 마산만과 같은 상대적으로 넓은 영역에 대하여도 3차원 CFD 모형을 통한 해일 범람 모의의 가능성을 타진할 수 있었다.

(7) 정밀 격자구성에 의한 광역 대상 실험

Fig. 10.2.31 ~ Fig. 10.2.34는 (6)의 실험에 대하여 항공레이저 측량 성과 및 지형도를 이용하여 x-y방향의 격자 간격을 5m로 하여, 만입구부터 마산만 전체를 포함하는 해역 및 연안에 대하여 3차원 해일 범람 모의를 수행하였다. 기존의 침수흔적도 및 2차원 범람 수치모의 결과와 범람역 및 범람고 등을 비교한 결과 대체로 일치하는 결과를 도출하였다. 향후 본 실험결과를 기반으로 하여 침수범람 대책시설의 검토시 활용할 계획이다.

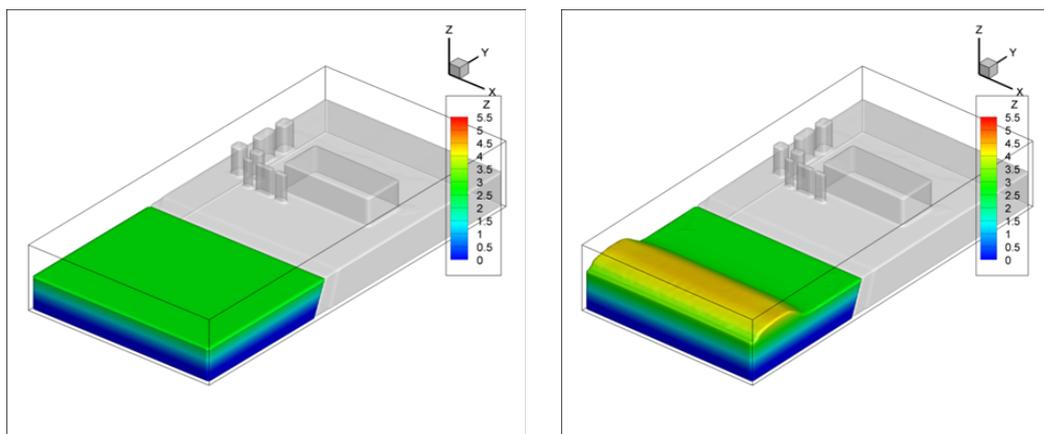


Fig. 10.2.13. Experimental result 1 of area inundation defence

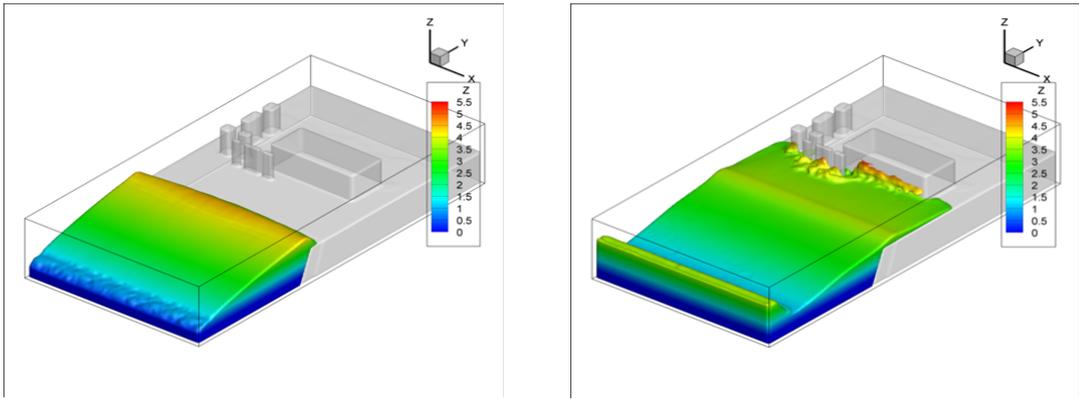


Fig. 10.2.14. Experimental result 2 of area inundation defence

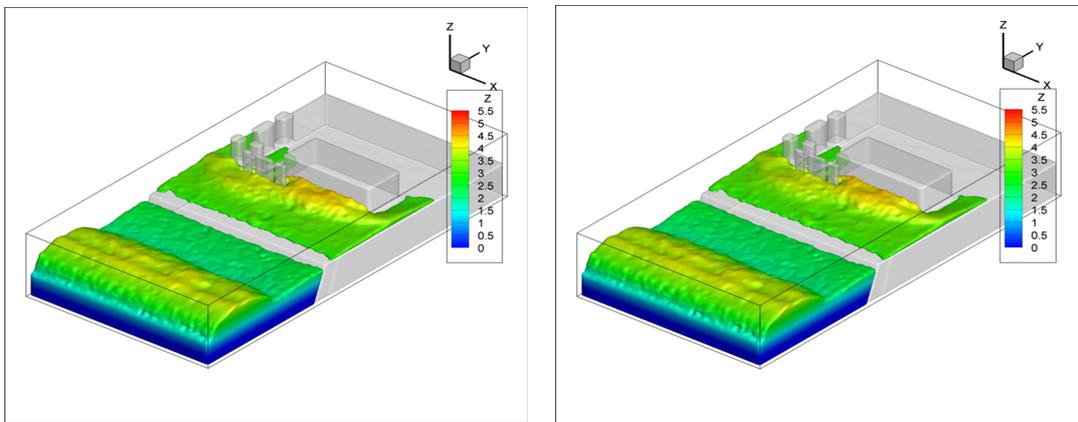


Fig. 10.2.15. Experimental result 3 of area inundation defence

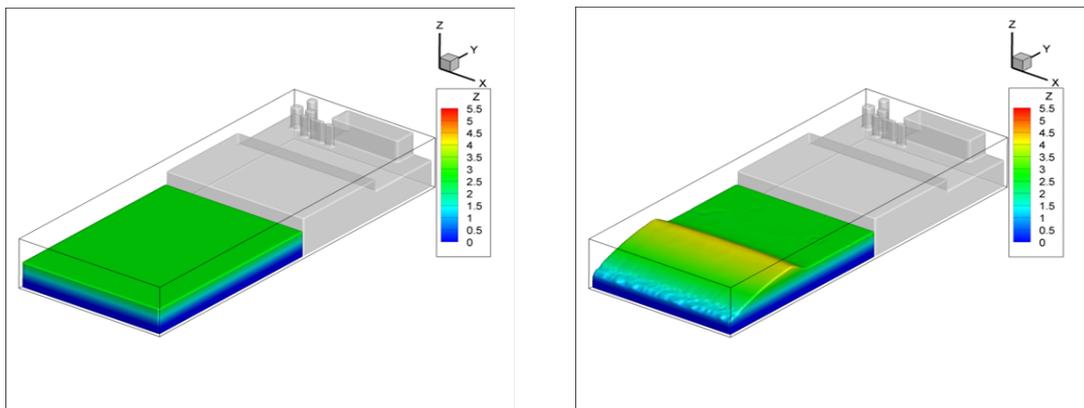


Fig. 10.2.16. Experimental result 1 of Prescription hill

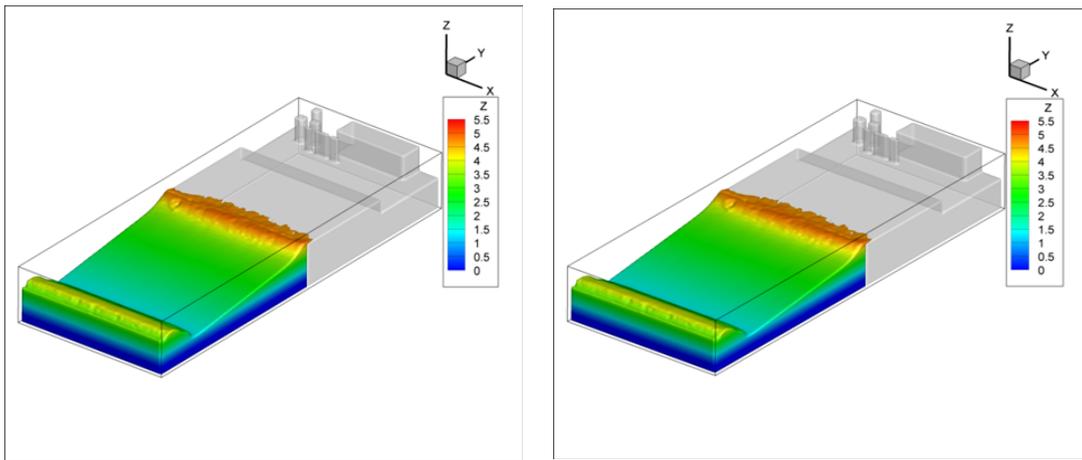


Fig. 10.2.17. Experimental result 2 of Prescription hill

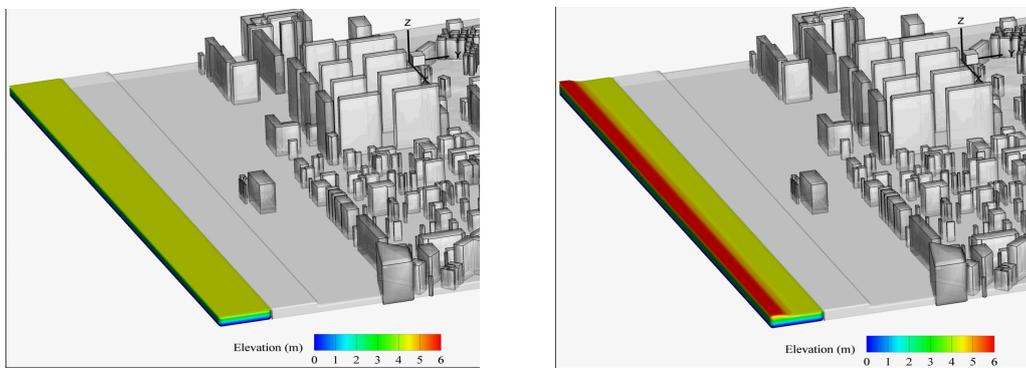


Fig. 10.2.18. Experimental result 1 of inundation (wide area)

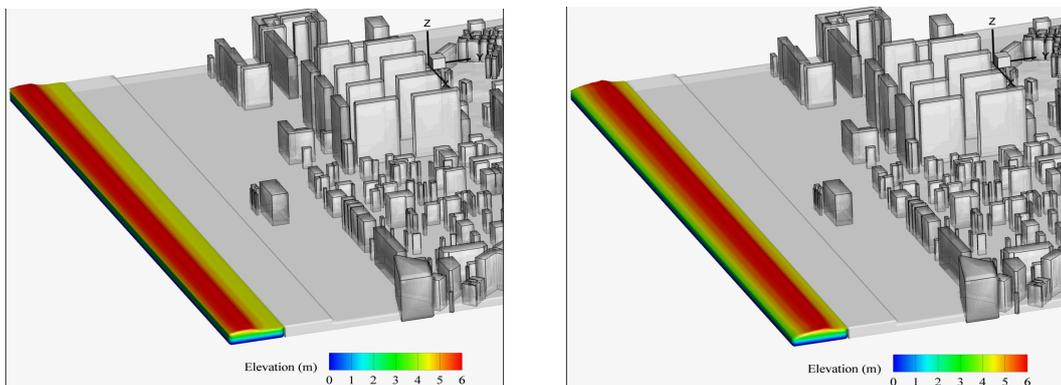


Fig. 10.2.19. Experimental result 2 of inundation (wide area)

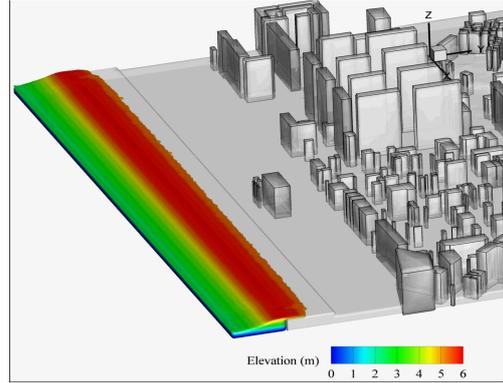
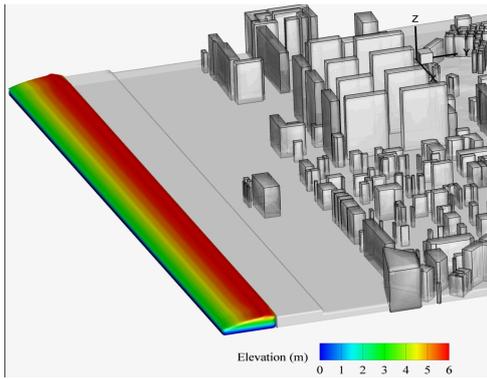


Fig. 10.2.20. Experimental result 3 of inundation (wide area)

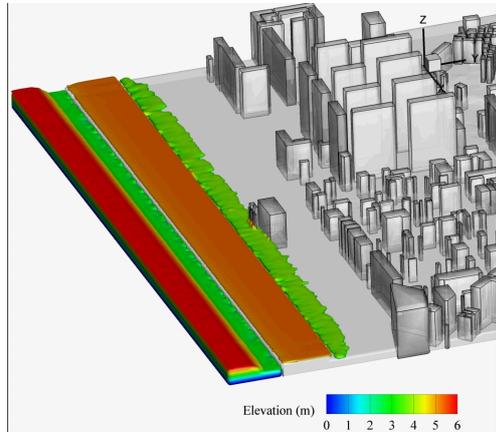
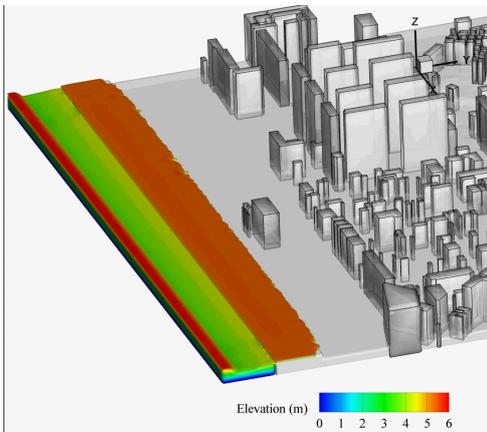


Fig. 10.2.21. Experimental result 4 of inundation (wide area)

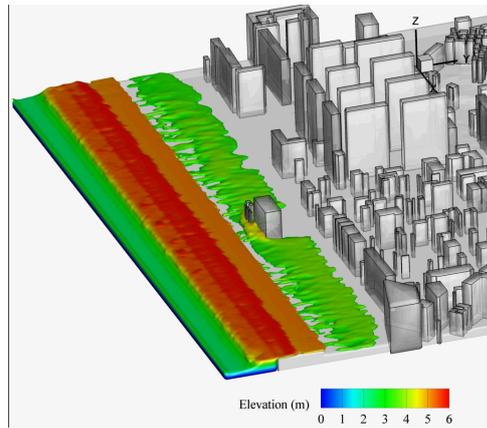
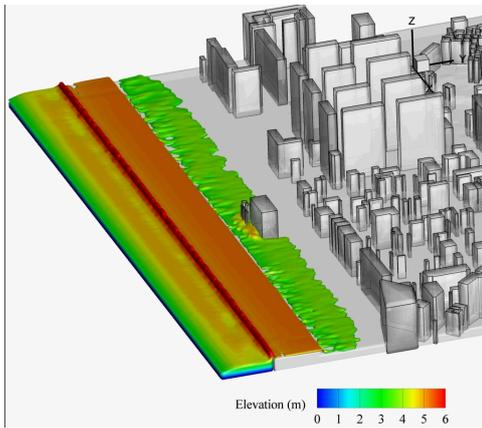


Fig. 10.2.22. Experimental result 5 of inundation (wide area)

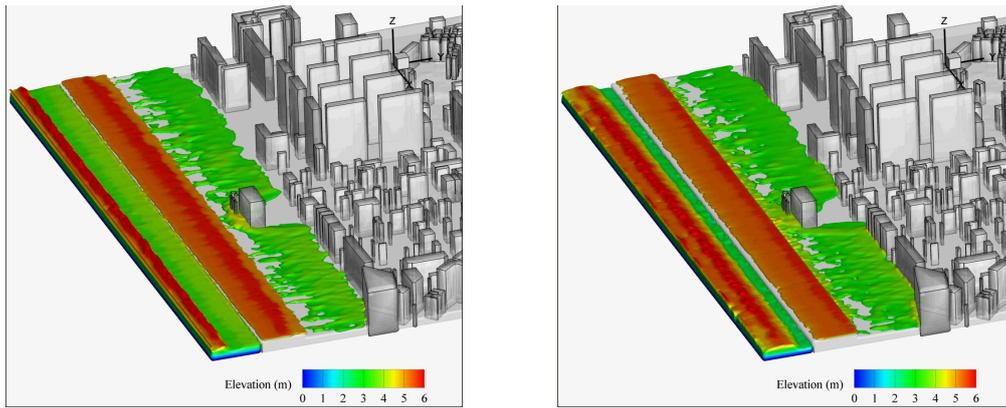


Fig. 10.2.23. Experimental result 6 of inundation (wide area)

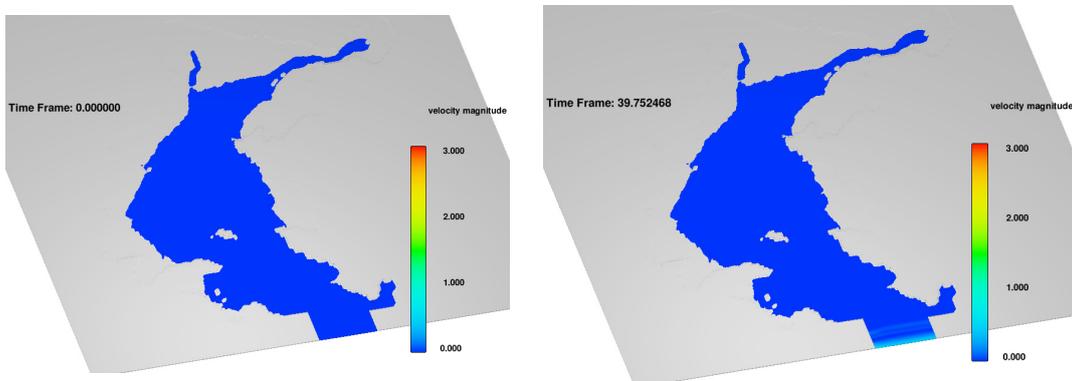


Fig. 10.2.24. Experiment of whole area of Masan (1)

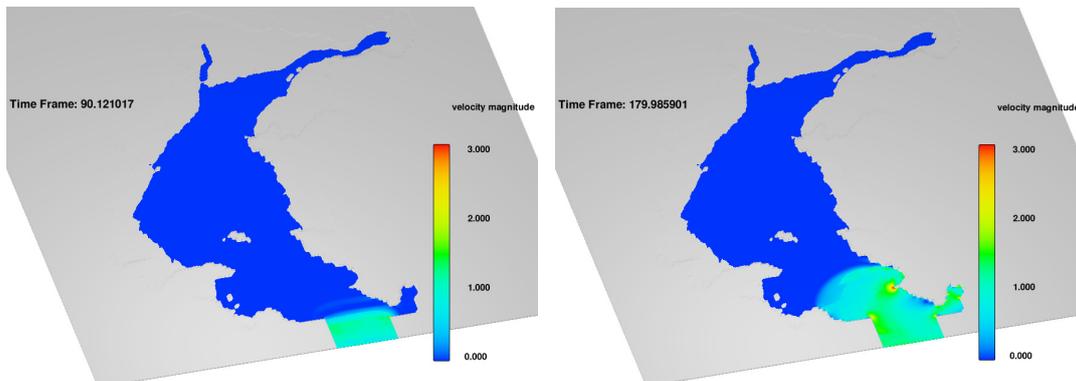


Fig. 10.2.25. Experiment of whole area of Masan (2)

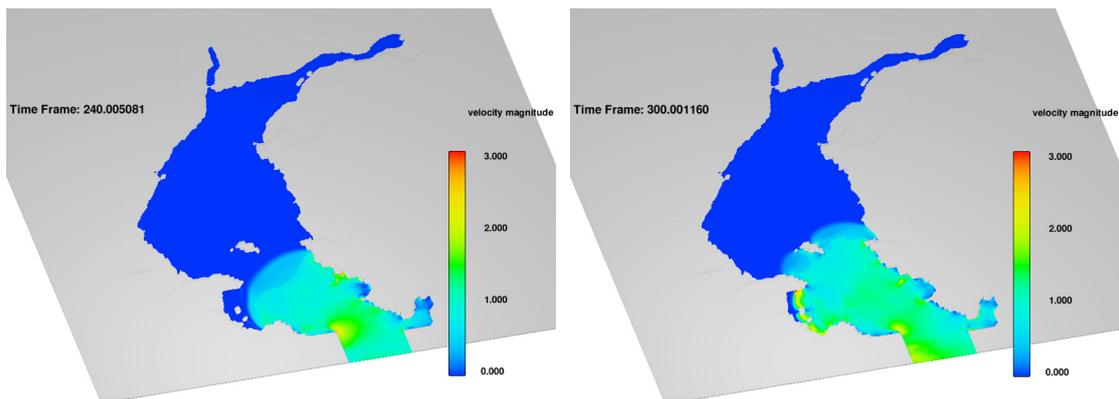


Fig. 10.2.26. Experiment of whole area of Masan (3)

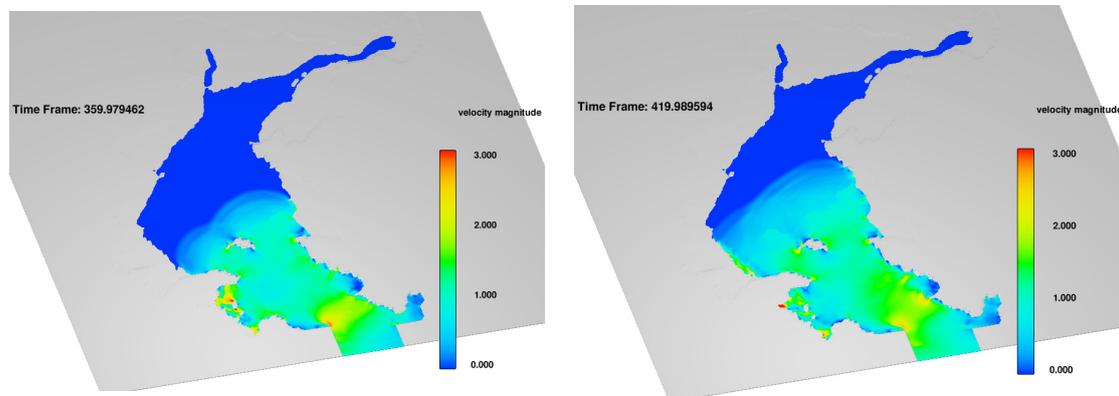


Fig. 10.2.27. Experiment of whole area of Masan (4)

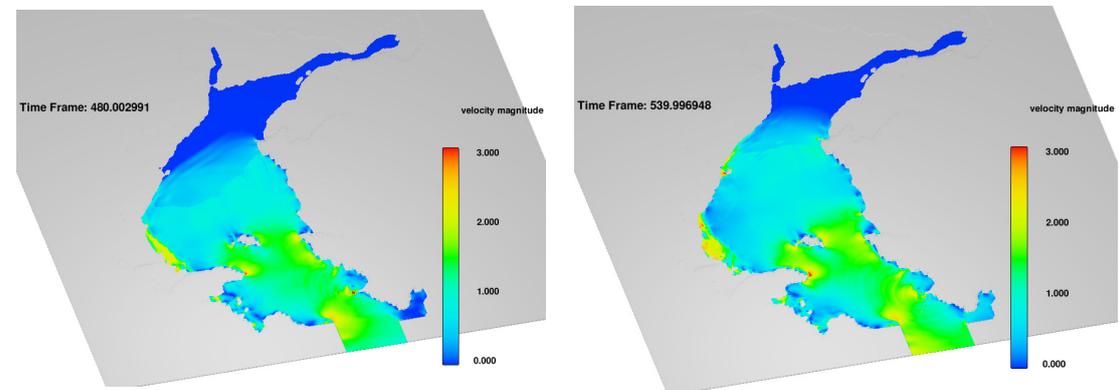


Fig. 10.2.28. Experiment of whole area of Masan (5)

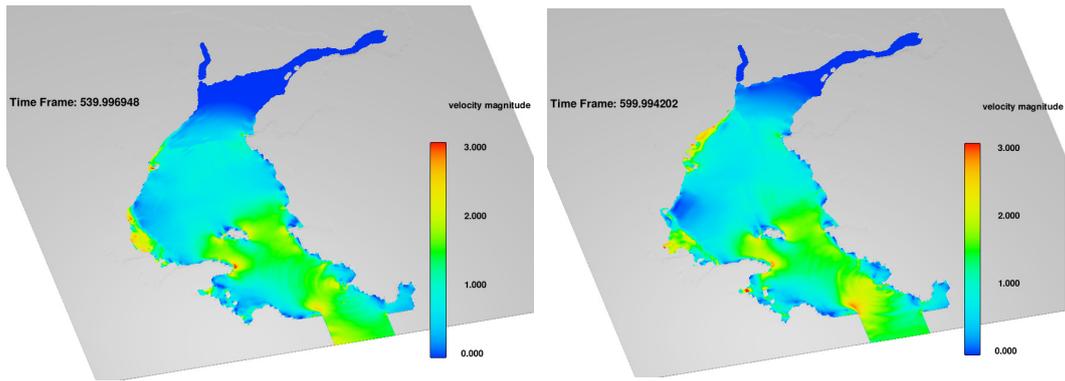


Fig. 10.2.29. Experiment of whole area of Masan (6)

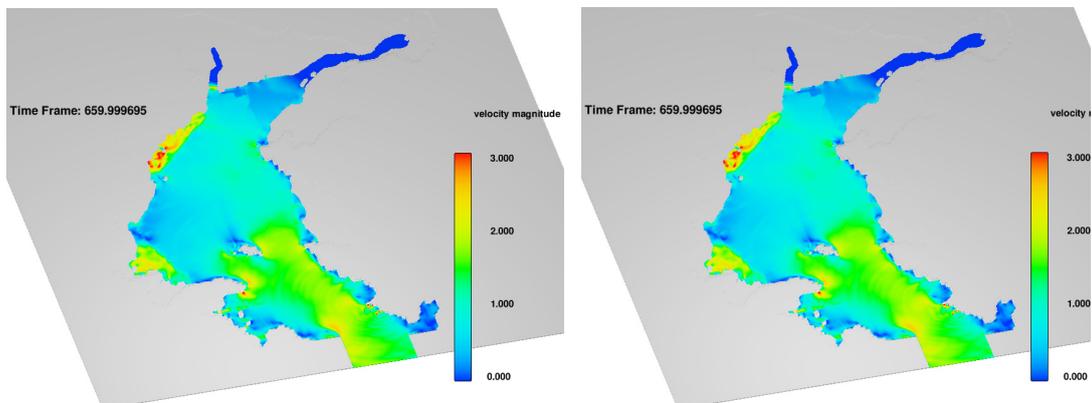


Fig. 10.2.30. Experiment of whole area of Masan (7)

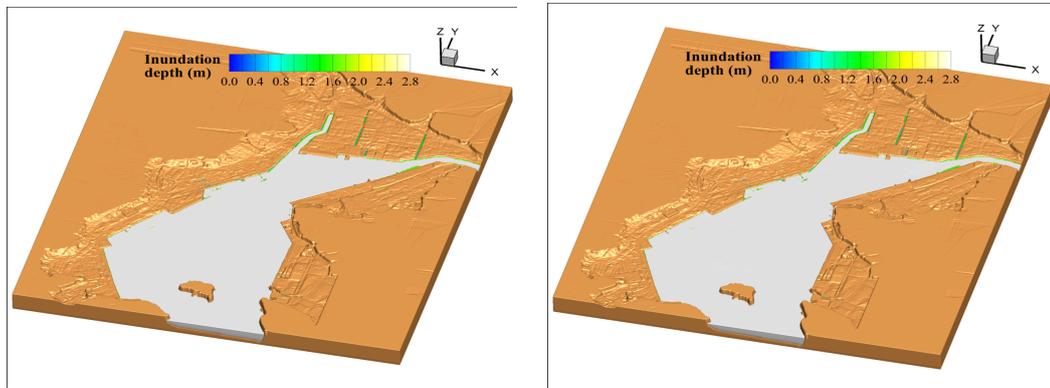


Fig. 10.2.31. Experiment of whole area of Masan (fine grid-1)

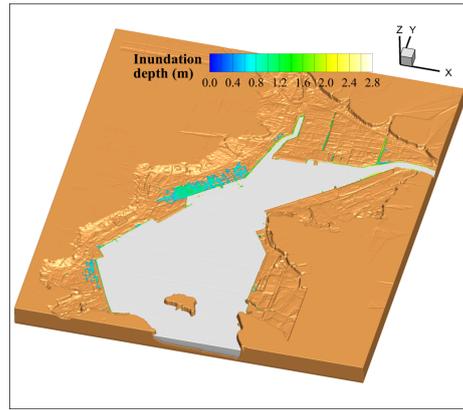
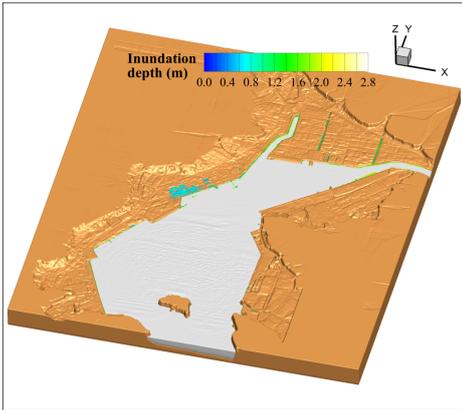


Fig. 10.2.23. Experiment of whole area of Masan (fine grid-2)

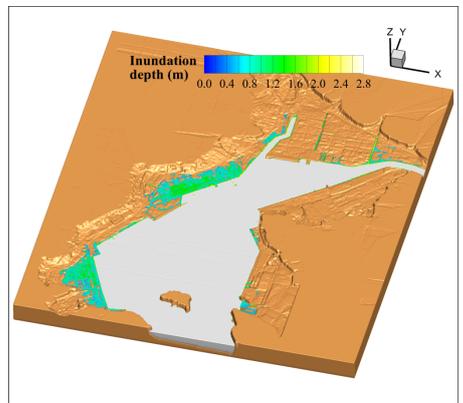
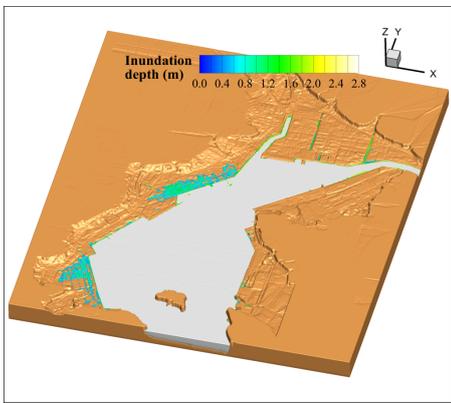


Fig. 10.2.24. Experiment of whole area of Masan (fine grid-3)

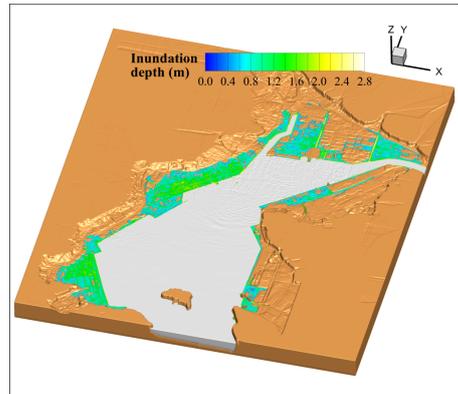
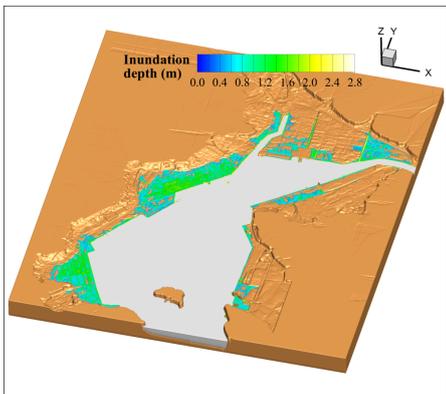


Fig. 10.2.34. Experiment of whole area of Masan (fine grid-4)

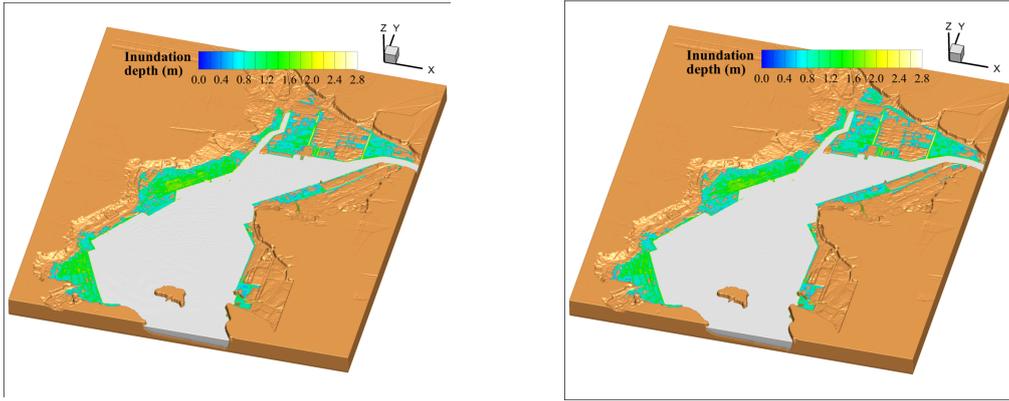


Fig. 10.2.35. Experiment of whole area of Masan (fine grid-5)

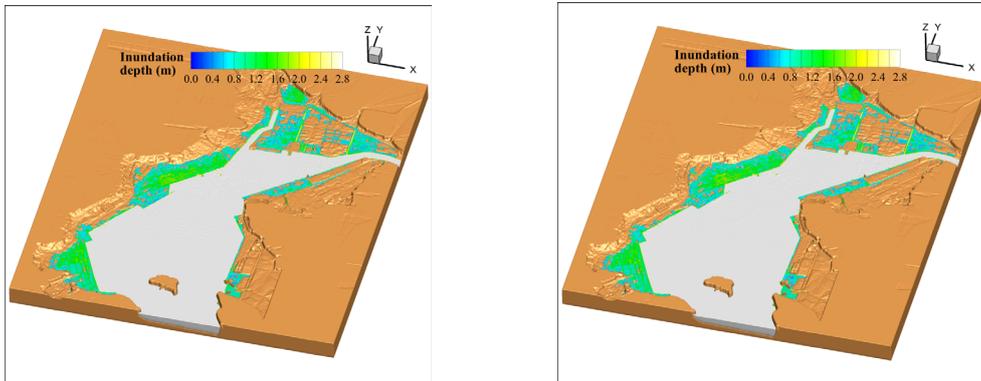


Fig. 10.2.36. Experiment of whole area of Masan (fine grid-6)

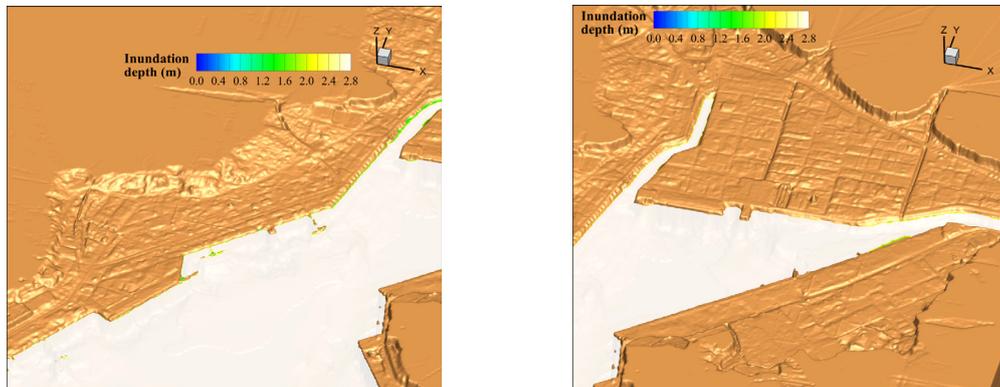


Fig. 10.2.37. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-1)

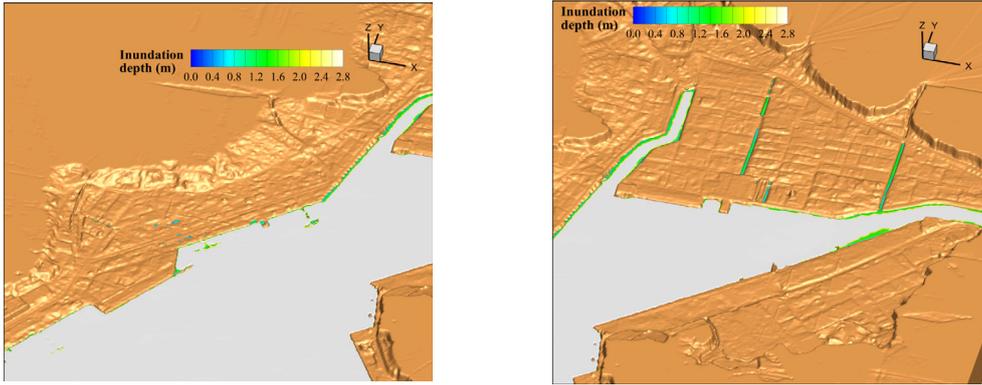


Fig. 10.2.38. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-2)

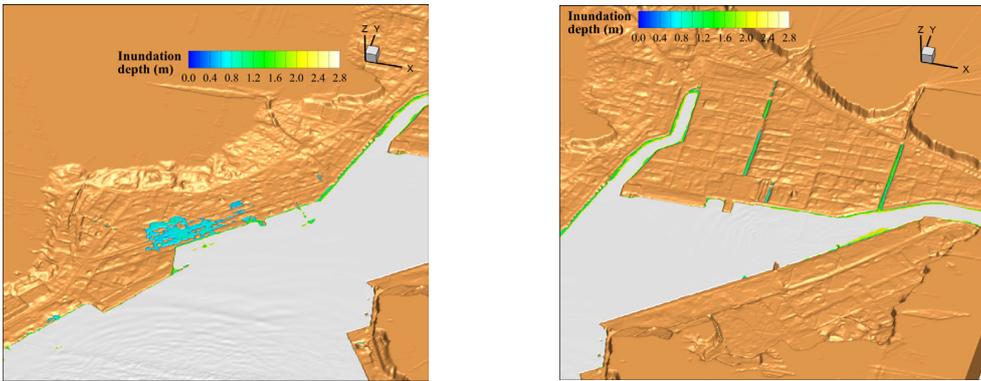


Fig. 10.2.39. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-3)

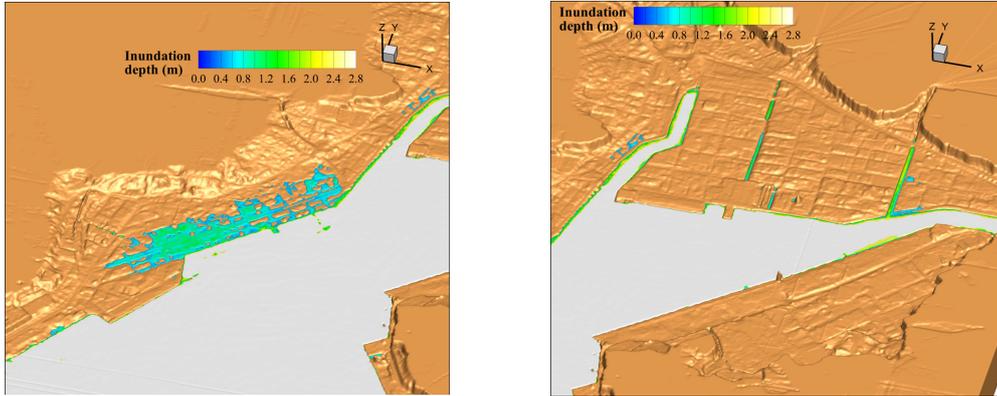


Fig. 10.2.40. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-4)

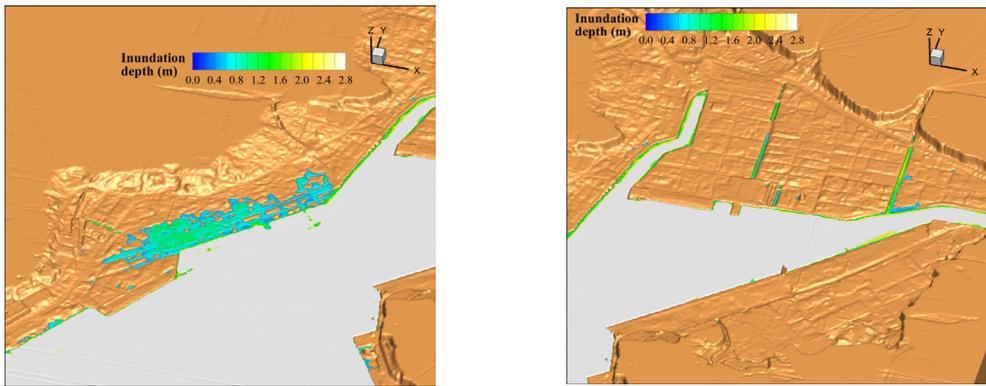


Fig. 10.2.41. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-5)

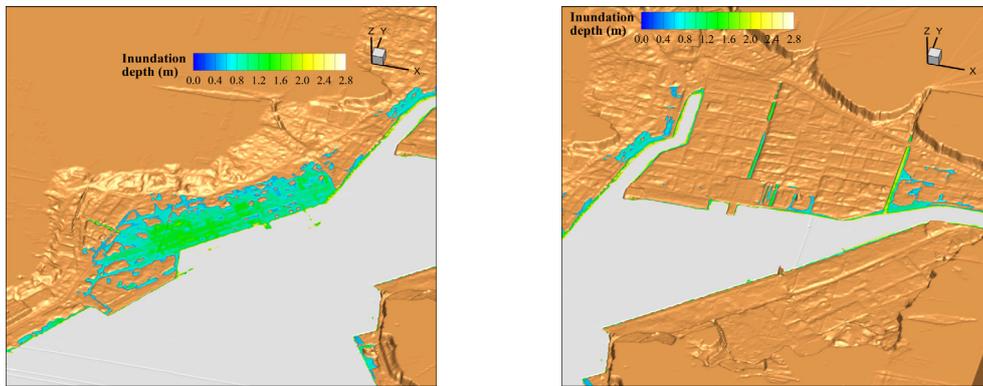


Fig. 10.2.42. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-6)

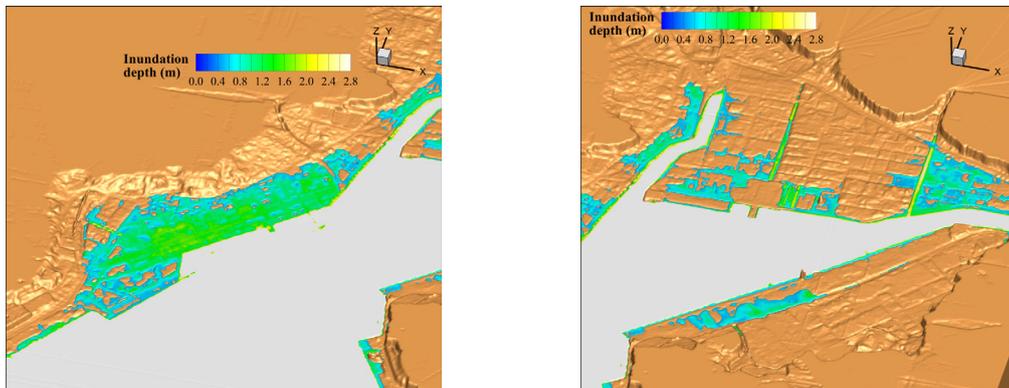


Fig. 10.2.43. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-7)

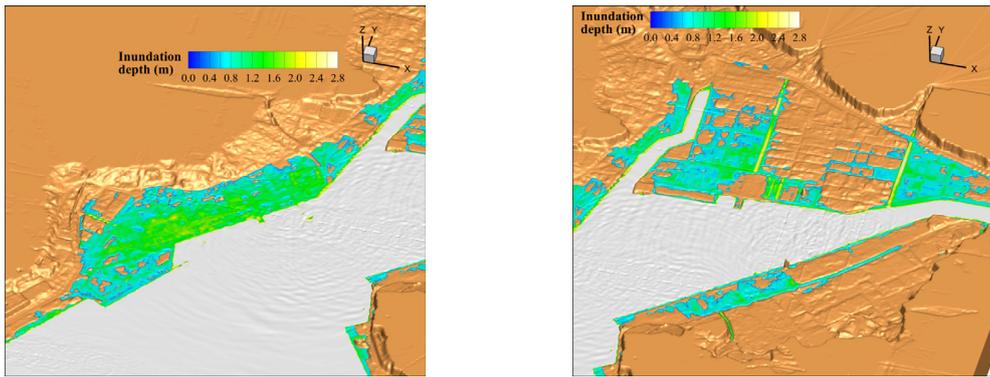


Fig. 10.2.44. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-8)

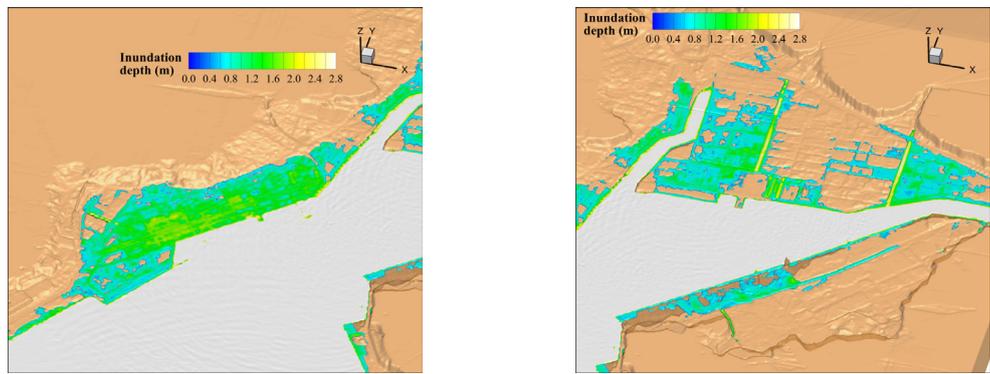


Fig. 10.2.45. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-9)

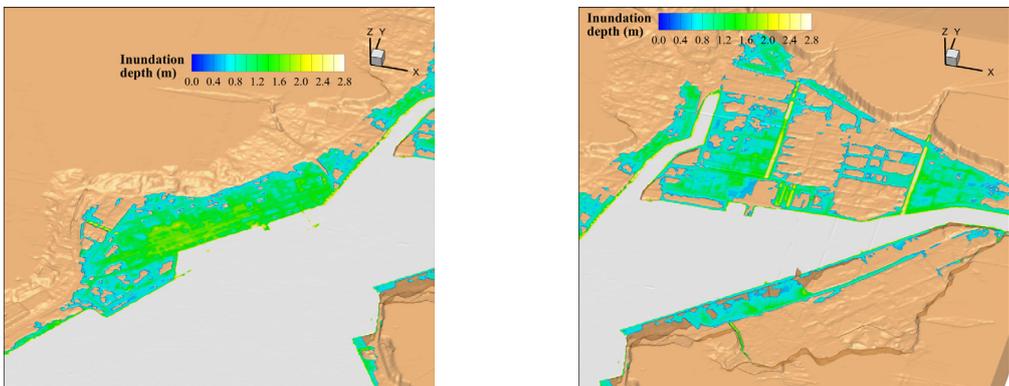


Fig. 10.2.46. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-10)

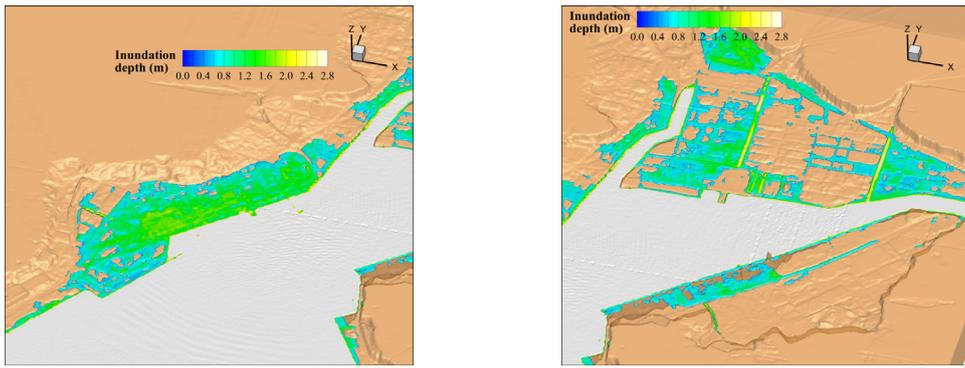


Fig. 10.2.47. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-11)

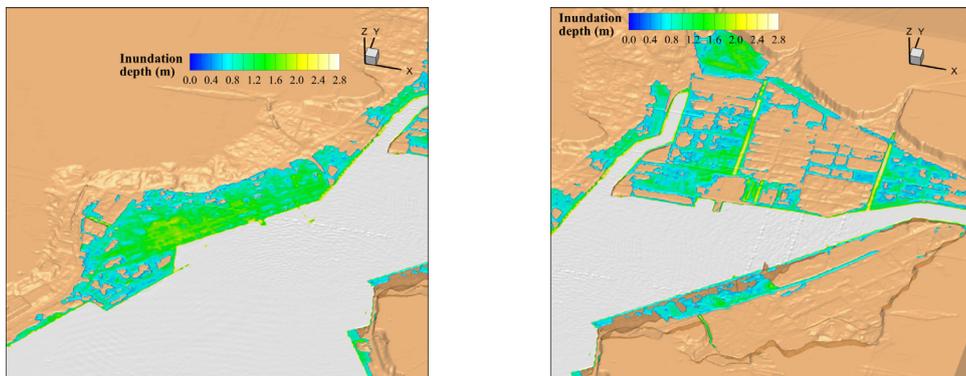


Fig. 10.2.48. Experiment of whole area of Masan (fine grid, west harbor and north side-12)

(8) 토의

본 연구에서는 CFD 모형인 FLOW3D를 이용하여, 태풍 매미 내습시 마산 지역의 폭풍해일에 의한 범람에 대한 3차원 시뮬레이션을 실시하였다.

국외 문헌자료 조사 결과 3차원 시뮬레이션에 의한 범람 해석은 몇몇 연구자에 의한 연구가 주를 이루고 있으며 폭풍해일에 의한 범람 보다는 지진해일에 의한 범람에 대한 연구가 주로 일본에서 수행되고 있다.

이외의 대부분의 범람 해석은 2차원 시뮬레이션에 국한하여 연구되고 있으며, 지형 지물의 3차원적 요소를 표현하지 못하고 육상부의 해수 흐름을 바닥 조도의 조정이나 구역별로 차지하고 있는 건물 등 지형지물의 용적에 따라 흐름을 제어하여 범람 시뮬레이션을 수행하여 범람고 및 범람역, 범람역에서의 흐름을 산정하고 있다.

현재 국외 및 국내 연구에서는 2D 또는 semi-3D 모형을 주로 활용하고 있으며, 지형지물의 완벽한 재현 및 지형지물에 의한 해수 전파 간섭 및 집중 효과 고

려에 한계, 이로 인한 침수심 및 범위, 시간적 경과 예측의 부정확성을 수반한다.

선적 방어책으로서의 해일저지용 방벽의 설치 이전 및 이후에 대한 실험을 실시하였다. 입자의 거동을 파악하기 위하여 particle tracking을 실시하였는데 입자의 거동은 당시 마산항 야적장에 쌓여있던 목재의 이동 등 부유물의 이동을 유추할 수 있으며, 폭풍 해일방벽 설치 전후의 이동 경로를 예측 할 수 있다.

총 20분(1,200sec) 동안 실험을 실시하였는데 지진해일 방벽 설치 이전의 경우 월류된 해수는 도로를 따라 전파되어 800sec 내외의 시간이 경과 후 해수가 북측경계에 도달하여 이후 도로와 건물 부지로 해수가 차오르는 양상을 보였다. 남측 호안의 전 구간에서 범람이 시작되어 유입되는 해수가 마산 해안 일대로 전파되면서 나타나는 전체적인 형상을 나내고 있다.

폭풍해일 방벽을 1m 높이로 하여 호안 전 구간에 설치하였을 경우, 태풍 매미 내습시 최대 해수위를 상회하도록 폭풍해일 방벽을 1.7m 높이로 설치하고 일부 구간을 호안 접근성을 위하여 50cm의 저상의 개방 구간을 설치한 경우로서 방벽 설치이전과 비교하여 방벽으로 인해 범람이 지체되는 효과가 있었다.

범람시간의 지체는 인명 및 재산의 대피 시간을 확보하는 수단이 될 수 있다. 그러나 개방구간으로의 해수 집중으로 유속이 설치이전보다 증가하여 오히려 대피 이동시 피해가 있을 수 있으므로 범람지체 효과가 반감된다고 할 수 있다.

보다 면밀한 시뮬레이션을 통하여 최대 해일유발 유속 산정결과를 통해 대피경로 설정과 이에 대한 표지설치 등 비구조적 방재대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

마산의 경우 폭풍해일 저지용 방벽 설치시의 효과를 초기적으로 검토하였으며, 방벽 설치시 범람시간의 지체를 가져오는 효과가 나타났으며 호안 접근성을 위한 일부 구간 개방시는 유속 증가로 악영향이 예측된다.

일본의 경우 이러한 개방구간에 기계 시스템이 포함된 갑문을 설치하는 경우가 있으므로 폭풍해일 방벽의 설치시에는 이를 참조하여 검토할 필요성이 있다.

면적 방어책으로서의 해일저지용 방벽의 설치 이전 및 이후에 대한 실험을 실시하였다. 또한, 안벽전면에 유공률 50% 가정의 Porous 구조물 설치시 실험을 실시하였다.

유공 구조물은 현재안벽에서 1:1.5의 경사로 구조물 폭은 10m, 20m, 30m로 실험하였으며 실험 결과 prous 구조물의 효과는 미약한 것으로 예측되었다.

현재상태 안벽 전면으로 방재언덕 설치시 실험을 실시하였으며, 방재언덕은 기왕최대 조위(매미시)를 고려한 높이 4.5~7.5m이며 방재언덕 폭은 40~100m의 실험을 실시하였으며, 소역의 실험 결과를 바탕으로 광역에 적용하여 실험을 실시하였으며, 방재언덕 높이별, 폭별 효과 분석하였다.

방재 언덕의 설치로서 설치된 구역 내측으로의 월파 및 해일 내습을 제어할 수 있다. 그러나, 설치 구역 이외의 해역으로의 해일 에너지의 전이로 인해 방재언덕이 설치되지 않은 구역으로의 해일이 집중될 수 있어 설치에 있어 다각도의 검토가 필요할 것으로 사료된다.

상기 실험이 안벽 일부 구간에 대한 정밀한 분석 실험임에도 불구하고 마산만 입구부터 내습하는 해일을 모의하는데 제한적 적용이 불가피함에 따라 만입구부터 마산만 전체를 포함하는 해역 및 연안에 대하여 3차원 해일 범람 모의를 시도하였다.

3차원 CFD모형의 특성상 컴퓨터의 계산시간이 크게 소요되며, 계산 cell이 증가할 수록 메모리 및 계산 소요시간의 제한적 적용이 불가피하여 상기의 실험에서와 같은 정밀도의 지형조건 보다 성긴 cell을 구성하여, 마산만 전체에 대한 실험을 실시하였다. 초기적 실험 결과로서 컴퓨터의 계산능력이 매우 빠르게 진화하는 현재의 상황에 비추어 볼 때 향후에는 보다 정밀한 격자체계 구성을 통해 마산만과 같은 상대적으로 넓은 영역에 대하여도 3차원 CFD 모형을 통한 해일 범람 모의의 가능성을 타진할 수 있었다.

상기 광역 실험에 대하여 항공레이저 측량 성과 및 지형도를 이용하여 x-y방향의 격자 간격을 5m 정도로 하여, 만입구부터 마산만 전체를 포함하는 해역 및 연안에 대하여 3차원 해일 범람 모의를 수행하였다. 기존의 침수흔적도 및 2차원 범람 수치모의 결과와 범람역 및 범람고 등을 비교한 결과 대체로 일치하는 결과를 도출하였다. 향후 본 실험결과를 기반으로 하여 침수범람 대책시설의 검토시 활용할 계획이다.

3. 마산지역 해일침수범람 특성분석 및 재해방지시설 개발사례

(1) 해일침수범람 특성

마산지역의 폐쇄성 수역으로 심해파의 영향을 적게 받으며, 해일 침수는 태풍

이나 저기압에 의한 조위 상승 및 만내에서 바람장에 의해 생성되는 파랑에 영향으로 발생한다.

해일은 태풍 및 발달한 온대성 저기압에 의해서 일어나는 수위의 상승으로, 조석의 만조시 중복하여 일어나면 수위가 매우 높아져 방조를 파괴하고 연안시설, 가옥, 인명 등에 큰 피해를 일으킴.

열대성 저기압의 폭풍과 기압하강의 직접적인 작용으로 급속하게 수위가 상승하고, 저기압이 통과하여 먼 거리로 빠져나감에 따라 바람과 기압의 작용이 감소하여 수위가 급격히 원상태로 돌아감.

주요 해일 후에는 말기해일의 단계로 저기압의 직접영향 없이 수위는 서서히 정상상태로 돌아가지만 지형이나 그 외의 영향에 의하여 진동현상을 보이며, 2~3일간 지속되기도 한다.

마산의 해안지역은 호안 도로를 중심으로 주택지역이 밀집되어 있고, 만내로 들어 갈수록 매립, 호안 및 항만시설 정비 등으로 마산만 북측 수출자유지역 등의 해역면적이 축소된다.

(2) 재해방지시설 계획

본 계획은 “마산만 방재언덕설치 및 재해방지대책 타당성 조사 보고서”(2005, 마산시)에 수록된 내용을 재편집한 것이다. 당시 검토내용은 마산시의 해일에 의한 피해를 방지하기 위한 방법으로 일반적으로 크게 소프트웨어적인 방법(경보, 피난교육, 방재메뉴얼 배포 등)과 하드웨어적인 방법(구조물 설치에 의한 항구적인 재해방지)으로 분류하였다.

마산시에 계획된 방재방법으로는 인공둔덕, 면적 해일 방재 대책, 방호벽, 방수문, 매립, 파라펫 보강, 저류BOX, 우수지, 부유구조물, 방재계단, 전면잠제+인공양빈, 인공리프, 친수방파제, 방조수문, 해일 방파제 등이 있었다. 5개의 평면 배치계획안으로 계획. 또한, 해일침수 방재계획을 위해 해안의 위치나 용도 특성에 따라 5개의 구역으로 분류한다.

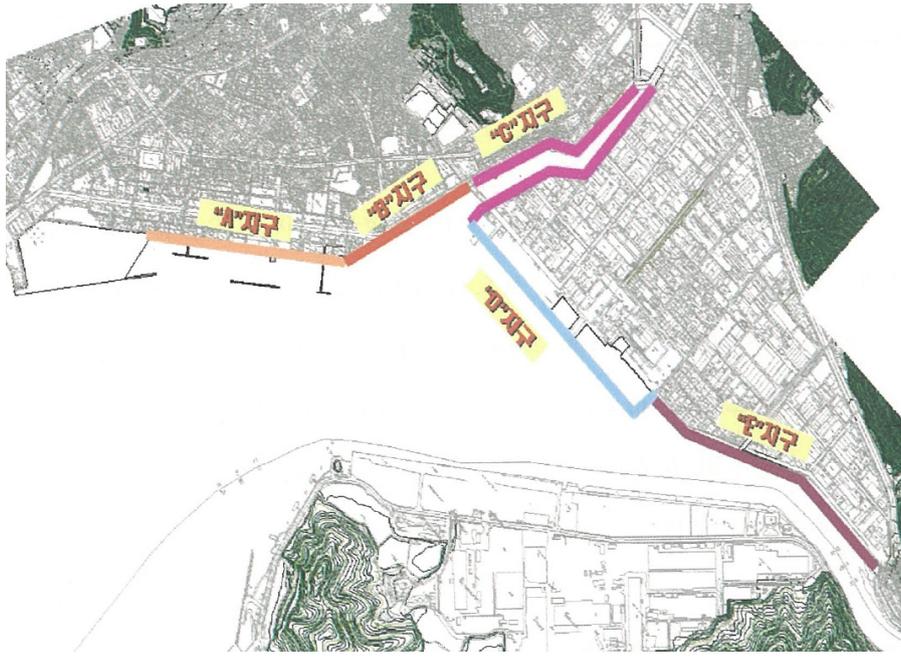


Fig. 10.2.49. Disaster planning area of Masan

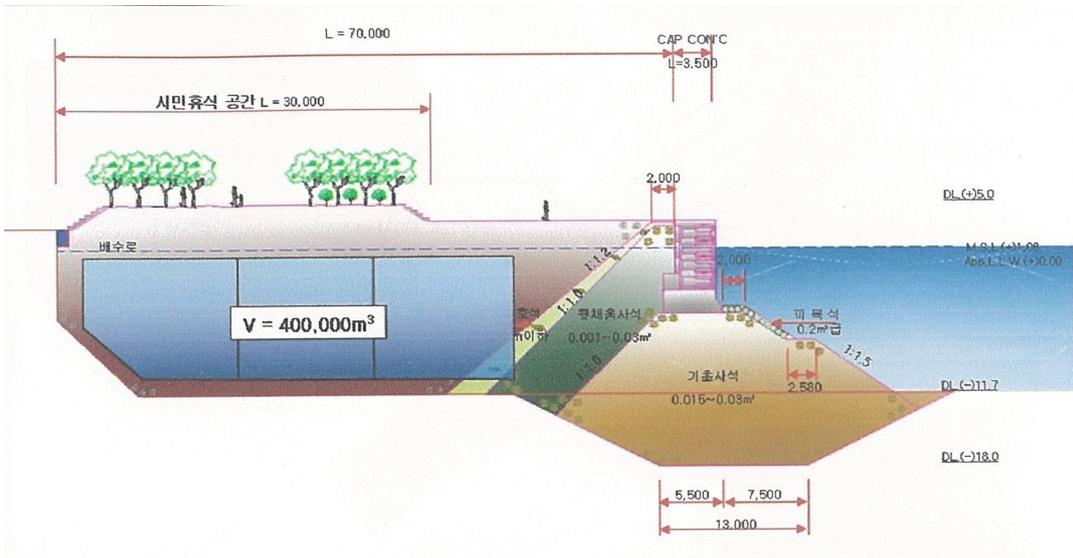


Fig. 10.2.50. Section in the construction and planning at Masan's A area

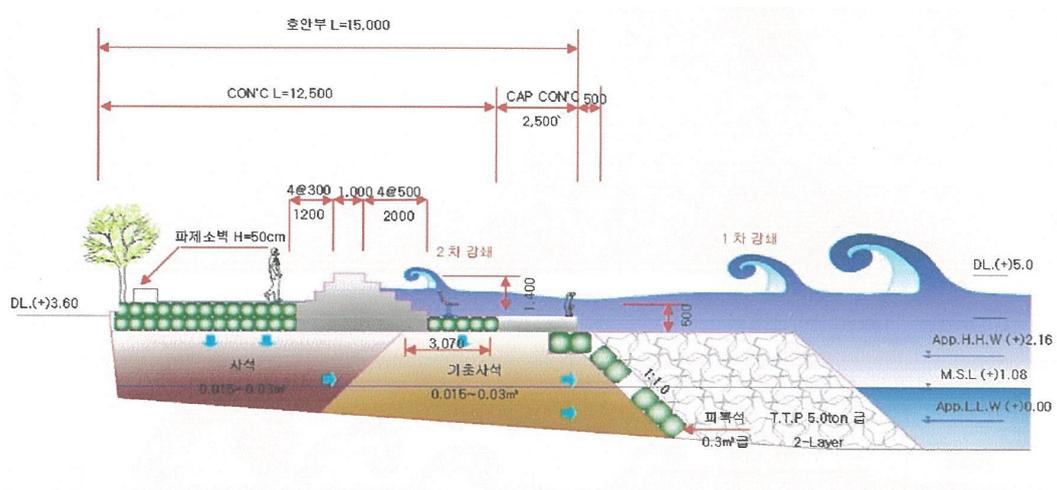


Fig. 10.2.51. Section in the construction and planning at Masan's B area

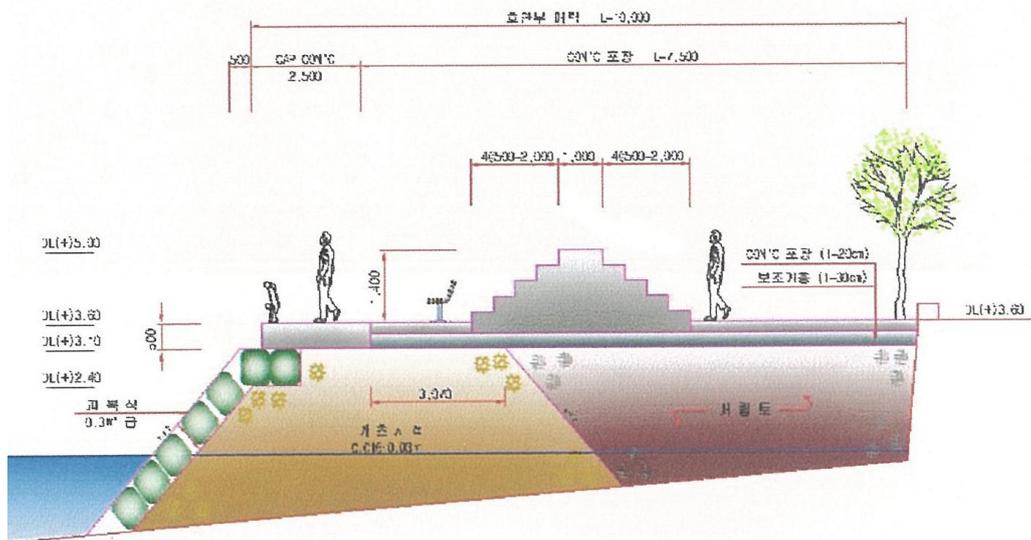


Fig. 10.2.52. Section in the construction and planning at Masan's C area



Fig. 10.2.53. Section in the construction and planning at Masan's D area

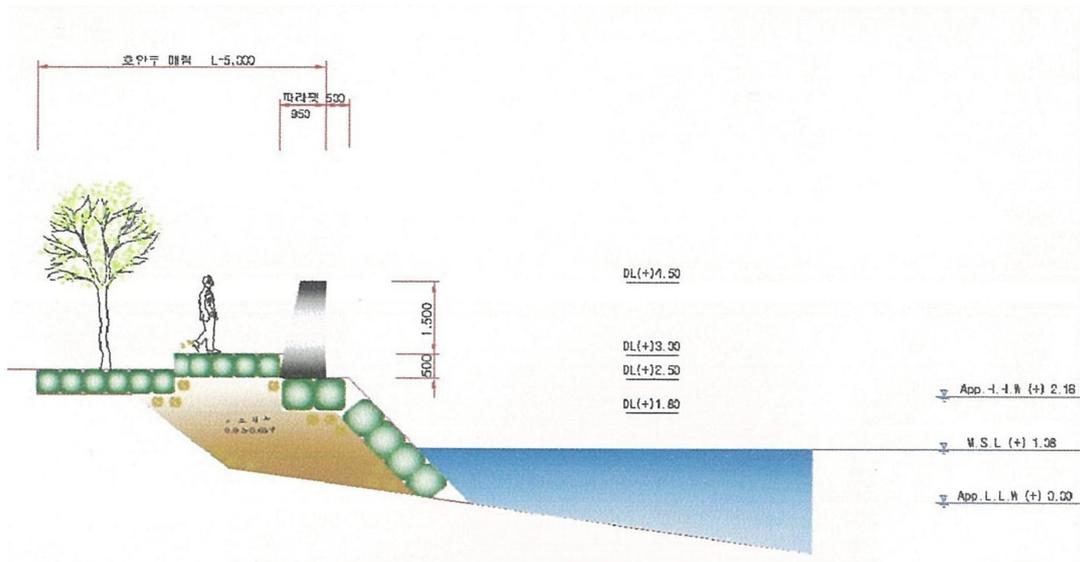


Fig. 10.2.54. Section in the construction and planning at Masan's E area

4. 마산지역 재해방지시설 제안

(1) 해일침수범람 재해방지 시설을 설치할 위한 3차원 CFD 시뮬레이션

3차원 CFD 시뮬레이션을 통한 효과 분석을 실시하였다. 항공 Lidar 자료를 활용하여 정밀한 3차원 지형 자료 작성 가능하며 이를 적용하였다. 개방경계조건(B.C)에 태풍 매미 내습시 관측 조위 시계열 자료를 입력하여 실제 폭풍해일 내습시 상황 재현 (또는, 2차원 모의 시계열 적용 - 실제 태풍 내습시 및 가상태풍 내습시) 하였다. 해일 방재 대책 시설 중 면적방어 방법으로써 호안 전면에 방재 언덕 설치로 해일 경감할 수 있다. 선적 방어 방법으로써 호안 전면에 방조벽(고정식 또는 자동 기립식) 설치로 해일 경감할 수 있다. 3차원 CFD 적용을 상세역에서 광역으로 확장하여 실질적 적용을 수행한다. 3차원 CFD 시뮬레이션을 통해 재해 방지시설의 효율성 및 적합성을 검토하였다. 기존 연구에서 수행된 부유 플랩형 해일 방재시설 시뮬레이션 결과를 검토 분석하였다.

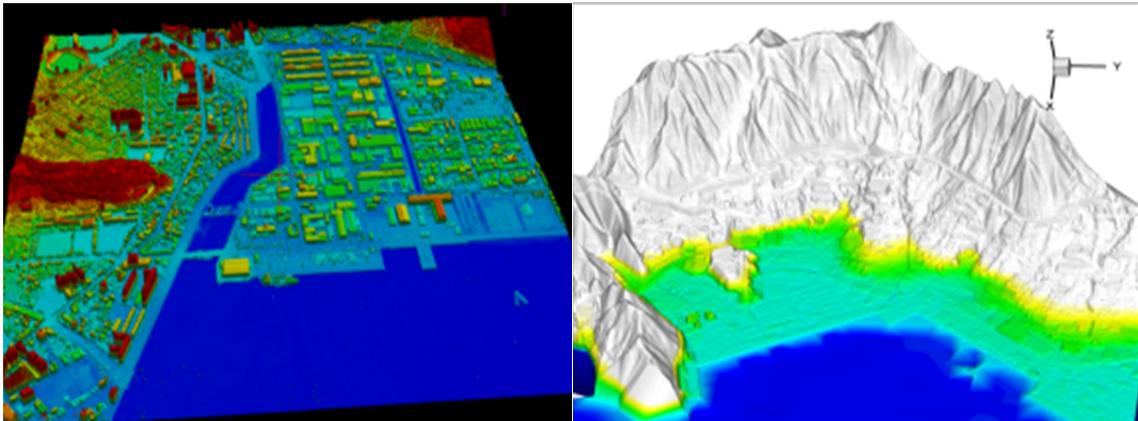


Fig. 10.255. High-resolution DEM from LiDAR

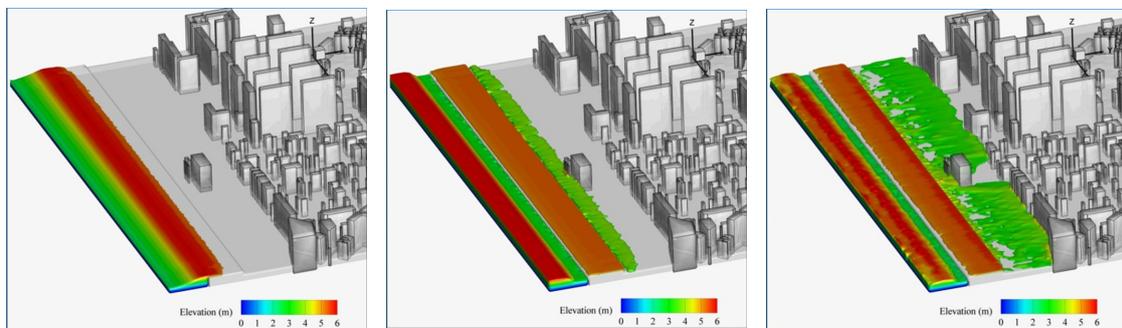


Fig. 10.256. Tsunami disaster prevention (area defense)

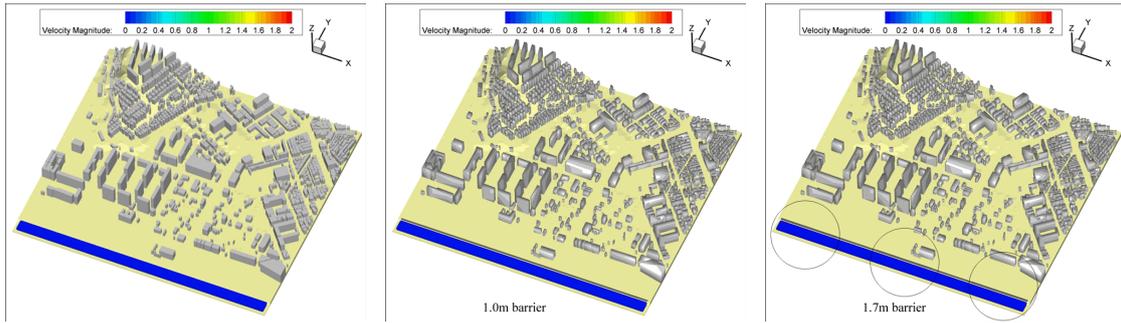


Fig. 10.2.57. Tsunami disaster prevention (linear defense)

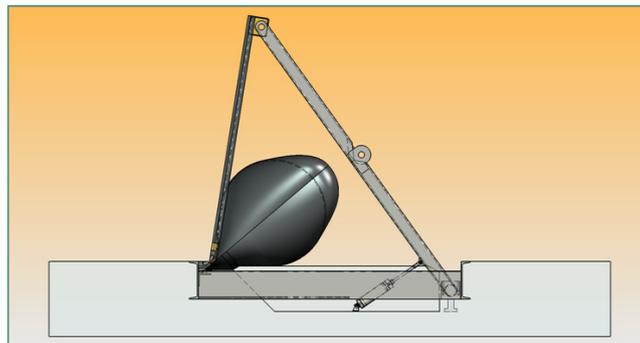


Fig. 10.2.58. Automatic standable prevention barrier

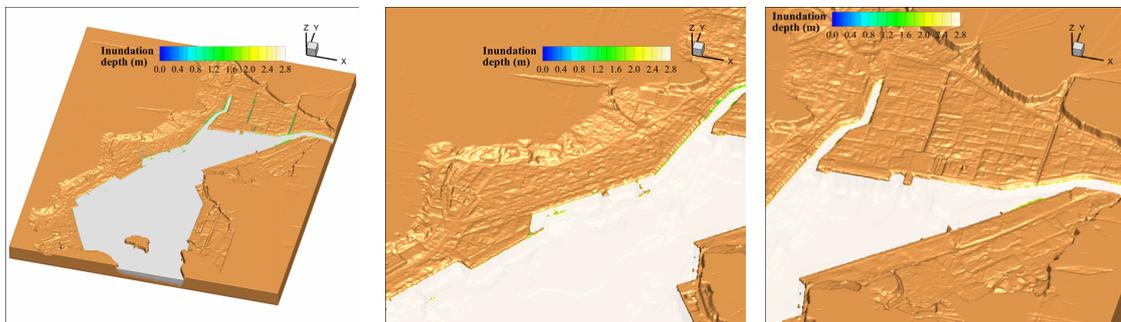


Fig. 10.2.59. Inundation simulation of wide area

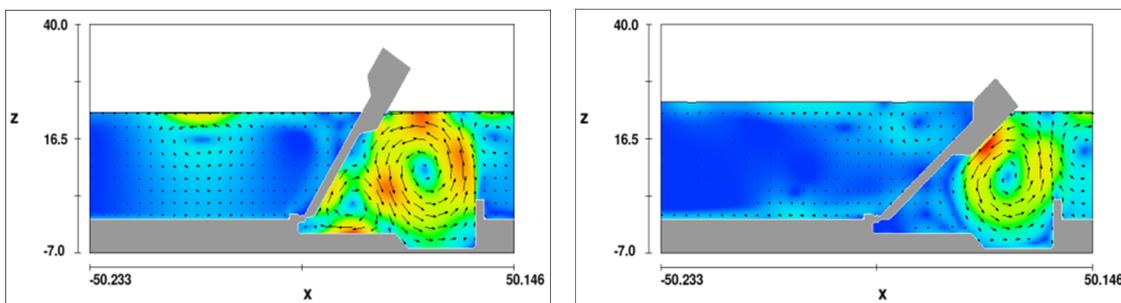


Fig. 10.2.60. Simulation of floating flap barrier

(2) 해일침수범람 재해방지 시설물 제안

마산항 내 (Area “A”~“D”) 전 영역 해일침수범람 방지시설을 설치하는 안을 제안한다. 전 연안에 각각의 방지시설 구축이 필요하며, 일부구간 설치치 미설치 구간 피해 증가 우려가 있다. 만입구 Area “E”해역에 부유식 플랩형 또는 부상식 해일 방조제 설치가 필요할 것으로 예상된다.

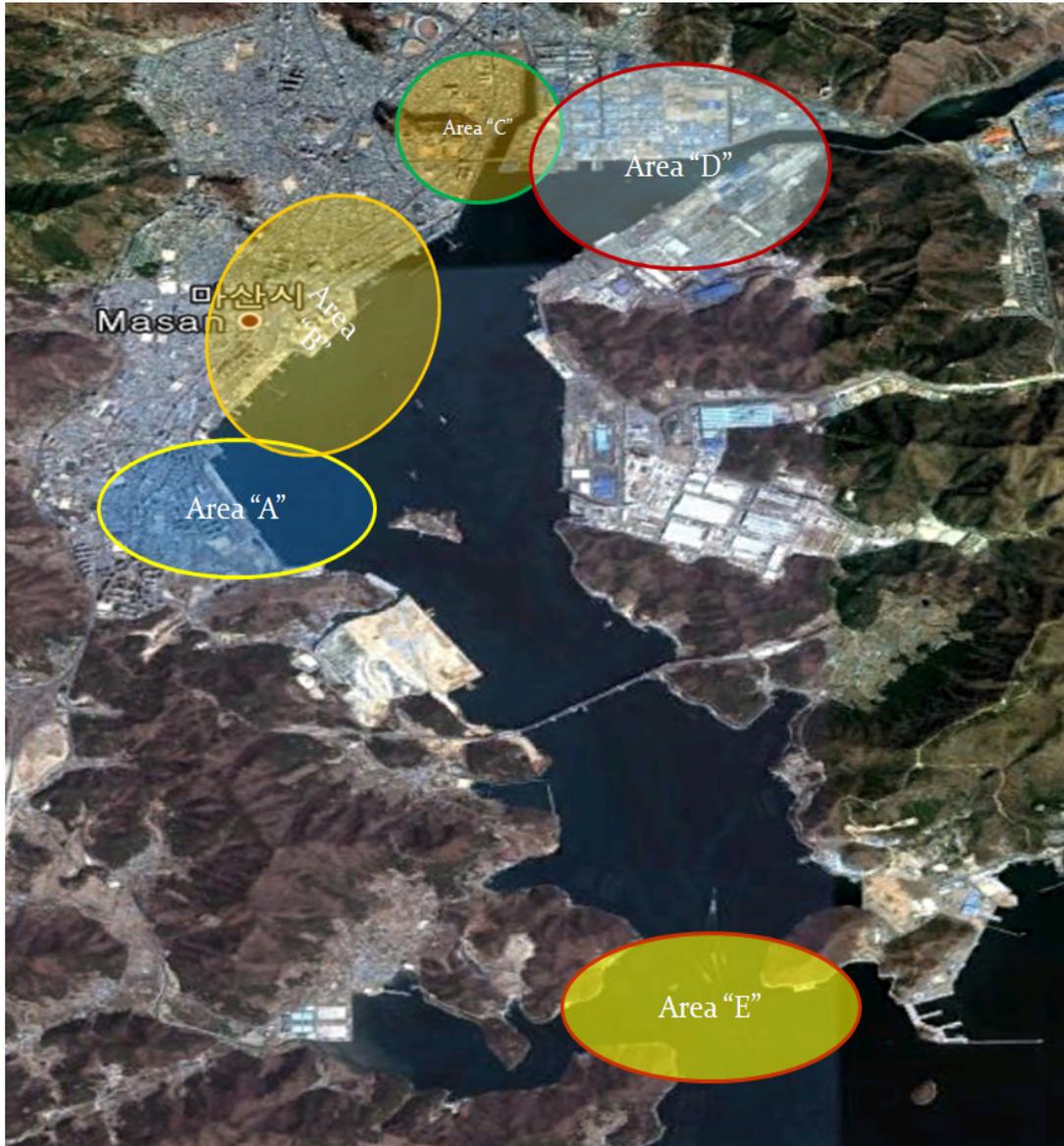


Fig. 10.2.61. Location of storm-surge prevention facility in Masan

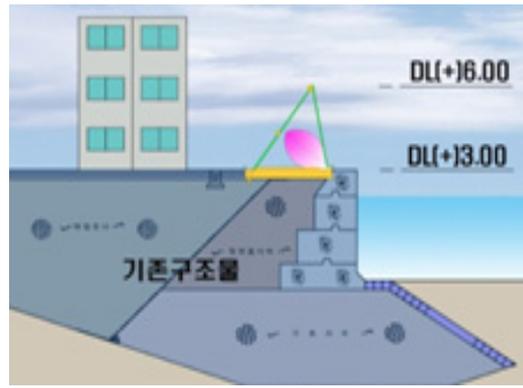


Fig. 10.2.62. Area A & D - Standable barrier (area protection)

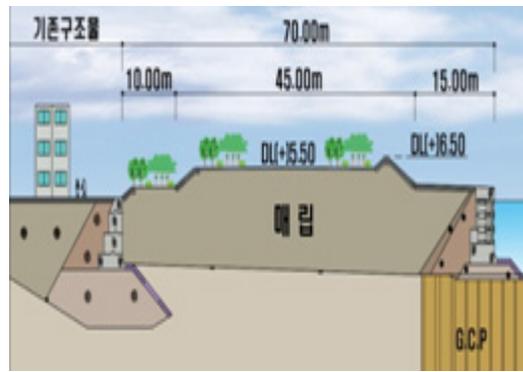


Fig. 10.2.63. Area B - prevention hill (area protection)



Fig. 10.2.64. Area C(left) - water gate at estuary, Area E(right) - floating flap barrier

일본 요코스카 마호리 해안은 2년간(1995, 1996년)에 걸쳐 태풍으로 인한 고조와 월파로 배후지역에 큰 피해를 입었으며, 방재기능을 강화함과 아울러 안전성과 친수성을 가지는 자연친화적인 고조호안을 계획한다. 해안에 설치된 호안은 계단식으로 계획하여 만조를 서서히 감쇄시켜주고, 석축 호안을 넘은 물은 구조물의 내부를 통과하여 바다로 배수한다.

일본 우라야스시는 지상 대부분이 건물과 아스팔트 도로로 덮여있어 집중호우시 저지대 침수가 발생하며, 하천의 범람시 큰 피해를 야기할 수 있다. 주택, 공업단지를 비롯하여 관광자원인 도쿄 디즈니 리조트 및 관련 시설 등을 배후로 하며, 고조대책사업으로 호안 마루높이를 높이지 않고 환경사 호안을 계획하는 등 양질의 해안 공간을 만들고자 한다.

일본 나고야 지역은 1959년 이세완 태풍에 의해 큰 피해를 입었으며, 피해 재발을 방지하기 위해 나고야항 외해에 고조방파제를 설치하고, 배후지역에 방조벽을 설치한다. 고조방파제로 인하여 해일고가 약 50cm감소하는 것으로 예측되며, 현재 56개의 방조벽을 관리하여 해일에 의한 피해를 최소화 하려는 노력을 기울이고 있다.

일본 벳부 지역에는 도로확장사업을 추진하면서 파랑의 반파를 목적으로 하고 낮은 천단고에 비해 파랑의 월류를 최소화 할 수 있는 Flare(Hybrid type) 방파호안과 벳부 타노우라 해안공원에서는 해수의 범람을 넓은 해빈으로 저감시키는 환경사 해안을 조성하고 있으며, 인공섬을 설치하여 관광자원으로도 활용하고 있다.

미국 텍사스에서는 호안도로를 수 km단위로 나누어 구간별로 조성하여 침수피해를 방지하고 호안 상부 도로와 호안 배후부지의 생태공원화를 계획하고 있다. 뉴올리언스 지역은 여러개의 호안을 단계적으로 설치하여 구역별 침수피해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 침수에 따른 대피시간 확보를 용이하게 한다.

네덜란드의 Zuyder-zee Project는 국가의 주요지역을 범람과 염류화로부터 지키고, 매립지를 조성하여 홍수방지, 수자원관리 및 식량증산을 위한 농경지 확대를 목적으로 시작되어 Afsluit-Dijk 32.5km를 완공하고 현재까지 간척이 진행된다. 1953년 대홍수로 제방 및 배후지역에 큰 피해를 입었고, 기존 제방의 보수가 아닌 새로운 개념의 간척사업인 Delta Project가 시작된다. 환경주의자들과 지역주민의 의견을 받아들여 홍수피해를 예방할 수 있는 방조제를 건설하되 만 입구에 수문을 달아 평소에는 바닷물이 드나들 수 있게 하고 홍수가 예상되면 이를 닫는 계획을 수립하였다.

영국 Thames강 인근에서는 이전부터 크고 작은 범람피해가 많았으며, 1953년

대홍수로 런던 중앙부의 호안이 범람하자 이를 계기로 Waverly 위원회를 설립하고, 20년간의 검토와 설계를 거쳐 Thames Barrier를 설치한다. 평상시에는 수저면에 있다가 작동시 수면으로 상승하는 구조로서 1983년 완공 후 2008년 1월까지 107번의 해일피해 예방에 성공한다.

남해안에 위치하여 태풍 매미 내습시 해일에 의한 침수 범람 재해로 큰 피해가 발생한 마산시에 적절한 시설을 선정하기 위하여 재해방지시설에 대한 분석 및 검토를 수행한다.

인구 밀집 지역과 산업단지 등 중요한 지역이 아닌 경우 대피구역, 피난로의 확보와 정보 전달 체계 등 비구조적인 방법을 통해 방재대책을 수립할 필요가 있다.

또한 방지시설을 재해 방지의 기능뿐만 아니라 휴식, 레저, 발전 등의 기능도 수행할 수 있도록 환경사호안 등을 계획하여야 할 것이다.

본 연구에서는 CFD 모형인 FLOW3D를 이용하여, 태풍 매미 내습시 마산 지역의 폭풍해일에 의한 범람에 대한 3차원 시뮬레이션을 실시하였다.

국외 문헌자료 조사 결과 3차원 시뮬레이션에 의한 범람 해석은 몇몇 연구자에 의한 연구가 주를 이루고 있으며 폭풍해일에 의한 범람 보다는 지진해일에 의한 범람에 대한 연구가 주로 일본에서 수행되고 있다.

이외의 대부분의 범람 해석은 2차원 시뮬레이션에 국한하여 연구되고 있으며, 지형 지물의 3차원적 요소를 표현하지 못하고 육상부의 해수 흐름을 바닥 조도의 조정이나 구역별로 차지하고 있는 건물 등 지형지물의 용적에 따라 흐름을 제어하여 범람 시뮬레이션을 수행하여 범람고 및 범람역, 범람역에서의 흐름을 산정하고 있다.

현재 국외 및 국내 연구에서는 2D 또는 semi-3D 모형을 주로 활용하고 있으며, 지형지물의 완벽한 재현 및 지형지물에 의한 해수 전파 간섭 및 집중 효과 고려에 한계, 이로 인한 침수심 및 범위, 시간적 경과 예측의 부정확성을 수반한다.

선적 방어책으로서의 해일저지용 방벽의 설치 이전 및 이후에 대한 실험을 실시하였다. 입자의 거동을 파악하기 위하여 particle tracking을 실시하였는데 입자의 거동은 당시 마산항 야적장에 쌓여있던 목재의 이동 등 부유물의 이동을 유추할 수 있으며, 폭풍 해일방벽 설치 전후의 이동 경로를 예측 할 수 있다.

폭풍해일 방벽을 호안 전 구간에 설치하였을 경우, 일부 구간을 호안 접근성을 위하여 저상의 개방 구간을 설치한 경우로서 방벽 설치이전과 비교하여 방벽으로

인해 범람이 지체되는 효과가 있었다.

범람시간의 지체는 인명 및 재산의 대피 시간을 확보하는 수단이 될 수 있다. 그러나 개방구간으로의 해수 집중으로 유속이 설치이전보다 증가하여 오히려 대피 이동시 피해가 있을 수 있으므로 범람지체 효과가 반감된다고 할 수 있다.

보다 면밀한 시뮬레이션을 통하여 최대 해일유발 유속 산정결과를 통해 대피경로 설정과 이에 대한 표지설치 등 비구조적 방재대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

마산의 경우 폭풍해일 저지용 방벽 설치시의 효과를 초기적으로 검토하였으며, 방벽 설치시 범람시간의 지체를 가져오는 효과가 나타났으며 호안 접근성을 위한 일부 구간 개방시는 유속 증가로 악영향이 예측된다.

일본의 경우 이러한 개방구간에 기계 시스템이 포함된 갑문을 설치하는 경우가 있으므로 폭풍해일 방벽의 설치시에는 이를 참조하여 검토할 필요성이 있다.

면적 방어책으로서의 해일저지용 방벽의 설치 이전 및 이후에 대한 실험을 실시하였다. 또한, 안벽전면에 유공률 50% 가정의 Pours 구조물 설치시 실험을 실시하였다.

유공 구조물은 현재안벽에서 1:1.5의 경사로 구조물 폭별로 실험하였으며 실험 결과 Pours 구조물의 효과는 미약한 것으로 예측되었다.

현재상태 안벽 전면으로 방재언덕 설치시 실험을 실시하였으며, 방재언덕은 기왕최대 조위(매미시)를 고려한 높이 4.5~7.5m이며 방재언덕 폭은 40~100m의 실험을 실시하였으며, 소역의 실험 결과를 바탕으로 광역에 적용하여 실험을 실시하였으며, 방재언덕 높이별, 폭별 효과 분석하였다.

방재 언덕의 설치로서 설치된 구역 내측으로의 율파 및 해일 내습을 제어할 수 있다. 그러나, 설치 구역 이외의 해역으로의 해일 에너지의 전이로 인해 방재언덕이 설치되지 않은 구역으로의 해일이 집중될 수 있어 설치에 있어 다각도의 검토가 필요할 것으로 사료된다.

상기 실험이 안벽 일부 구간에 대한 정밀한 분석 실험임에도 불구하고 마산만 입구부터 내습하는 해일을 모의하는데 제한적 적용이 불가피함에 따라 만입구부터 마산만 전체를 포함하는 해역 및 연안에 대하여 3차원 해일 범람 모의를 시도하였다.

광역 실험에 대하여 항공레이저 측량 성과 및 지형도를 이용하여 x-y방향의 격자 간격을 5m 정도로 하여, 만입구부터 마산만 전체를 포함하는 해역 및 연안

에 대하여 3차원 해일 범람 모의를 수행하였다. 기존의 침수흔적도 및 2차원 범람 수치모의 결과와 범람역 및 범람고 등을 비교한 결과 대체로 일치하는 결과를 도출하였다. 향후 본 실험결과를 기반으로 하여 침수범람 대책시설의 검토시 활용할 계획이다.

제 11 장 참 고 문 헌

감사원 (2007) 홍수범람위험도 작성에 관한사항.

강시환, 전기천, 박광순, 방경훈, 2002. 해상풍 관측자료에 근거한 태풍 해상풍 모형 간의 상호비교. 한국해양학회지(The Sea), 7(3):100-107.

강시환, 전기천, 방경훈, 박광순, 2002. 동북아시아 해상에서의 태풍중심기압과 최대 풍속의 경험적 관계식. 한국기상학회지, 38(5):523-530.

강윤구 (2005). “태풍 매미 내습시 해일·고파랑에 의한 호안·안벽에서의 수위증가 패턴 고찰”, 한국해양공학회지, 제19권, 제6호, pp 22-28.

강주환, 박선중, 문승록, 윤종태(2009). “태풍의 특성변화에 따른 경남해역 해일양상 고찰”. 한국해안·해양공학회지. 제21권 제1호. pp.1-14.

강태순, 문승록, 남수용, 심재설(2010) “해일/범람에 따른 해안 매립지의 취약성”. 한국해양공학회지. 제24권 제1호. pp. 68-75.

강태순, 문승록, 남수용, 황준 (2007). “폭풍해일에 의한 해안침수예상도 작성 현황 및 향후계획”, 한국방재학회지, 제7권, 제3호, pp 97-108.

건설교통부 (2005) 하천범람상황조사 지침

고진석, 1993. 동아시아 해역의 조석모형. 성균관대학교, 석사 학위 논문, 142 p.

과학기술부, 2000. 해상·연안재해 대응기술 개발. 한국해양연구소, N2-02-01-A-02. 143pp.

국립방재연구소 (2002) 폭풍해일예측을 통한 상황대처 방안 연구보고서

국립해양조사원, 1969-2000 수로기술연보

기상청 (2003) “태풍 매미 기상백서”

기상청 홈페이지 (www.kma.go.kr)

- 김남일, 김태원, 박윤성. 2008. 주운건설을 위한 수리학적 검토 -3차원 수치모의 중심으로-, 한국수자원학회지, 41(12) 58-65.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 이성대 (2007). "연안역에서 고파랑과 폭풍해일을 고려한 침수해석", 한국해양공학회지, 제21권, 제2호, pp 35-41.
- 김정대. 2010. 부유 플랩형 고조방파제의 파랑 응답, 목포대학교 해안재해분야 방재 세미나 (2010.8), 발표자료.
- 마산만 특별관리민관산학협의회, 경남대학교 연안역폐자원 및 환경연구센터 (2006). "그 생명의 숨결 마산만".
- 마산시 (2004). "태풍 매미에 의한 해일피해 원인조사 및 재해방재대책 수립용역 보고서"
- 마산시. 2005. 마산만 방재언덕설치 및 재해방지대책 타당성조사 보고서.
- 문승록, 강태순, 남수용, 임채호(2009). "태풍에 대비한 해안침수예상도 작성방안". 한국수자원학회지. 제42권 제5호, pp. 87-90.
- 문승록, 강태순, 남수용, 황준 (2007) 폭풍해일에 의한 해안침수예상도 작성 시나리오 연구, 한국해안해양공학회지, 제19권 제5호, pp. 492-501.
- 문승록, 남수용, 강주환(2010) "해안에 인접한 지방자치단체의 재해정보지도 제작 방향". 한국수자원학회지. 제43권 제10호, pp. 87-90.
- 문일주, 오임상 (2003). 파랑-해양순환 접합모델을 이용한 폭풍해일에 대한 파랑과 조석의 영향 연구. 한국기상학회지, 39(5), 563-574.
- 문일주, 오임상, 2003. 파랑-해양순환 접합모델을 이용한 폭풍해일에 대한 파랑과 조석의 영향 연구. 한국기상학회지, 제39권, 제5호, pp. 563-574.
- 미국 허리케인센터 홈페이지 (www.nhc.noaa.gov)
- 미국 JTWC 홈페이지 (metocph.nmci.navy.mil)
- 박선중 (2010). 태풍의 특성변화에 따른 해일양상 고찰 및 해안범람모의. 박사학위논문, 목포대학교. 99-150.

- 박선중, 강주환, 김양선, 문승록(2010) “조석-해일 결합모형의 적용성 검토”. 한국해양안·해양공학회지. 제22권 제4호. pp.248-257.
- 박선중, 강주환, 문승록, 윤종태(2009). “이동경계기법을 이용한 해수유동모형의 범람 적용성”. 한국해양안·해양공학회지. 제21권 제2호. pp.164-173.
- 박종길, 김병수, 정우식, 김은별, 이대근 (2006) 한반도에 영향을 주는 태풍의 통계적 특성 변화. 한국기상학회논문집, 16권 1호, 1-17.
- 방익찬, 오임상, 1994. 우리나라 근해의 장기적인 해수면 변화
- 부산광역시 (2004). “녹산공단 해일피해 방재대책 수립용역 종합보고서”.
- 부산광역시 (2005). “해일피해 영향분석 및 피해방지계획 수립용역 보고서”.
- 서승남 (2008) 한국 주변해역 30초 격자수심 - KorBathy30s, 한국해양안·해양공학회논문집, 제20권 제1호, pp. 110~120
- 서울시정개발연구원 (2004) 서울시 방재지도 작성방안
- 서울특별시 (2004) 극한강우시 침수예상지역 대피계획수립 보고서
- 세광종합기술단 등. 2007. 항만시설물의 안정성 평가 및 보수보강 방안 수립 최종 연구보고서.
- 소방방재청 (2006) 소방방재청 고시 제2006-6호(재해지도 작성기준 등에 관한 지침)
- 소방방재청 중앙재난안전대책본부. 재해연보(1969~2006).
- 수산청, 1988. 해역별(동해·남해) 심해파 추정 보고서.
- 연안기술개발기술연구센터 (2004). “일본 폭풍해일 위험지도 매뉴얼”
- 오임상, 알렉산더 비 라뷔노비치, 박명숙, 로알드 엔 만수로브, 1993. 동해 해수면의 계절적인 변동에 대하여, 한국해양학회지, 28권 1호, 1-16.
- 오임상, 이진경, 안희수 (1993). 동북 아시아 해역의 폭풍 해일 연구 II. 수치모델에 의한 해일의 규명. 한국지구과학회지, 14(4), 467-481.

- 오재호 (2007) 미래 태풍 강도 변화에 관한 연구: 기후변화가 동아시아지역 태풍에 미치는 영향, 기후변화전문가 워크숍(제5차 기후변화 학술대회 및 제4차 기후변화 정책포럼) pp.21-24
- 이다운, 이호만, 서장원, 유승협, 윤용훈, 2005. 신경망을 이용한 폭풍해일 예측연구. 한국기상학회지, 제41권, 제5호, pp. 661-670.
- 이동영 (2004). “연안 해일재해 예측 시스템 구축 및 연안 재해방지”, 한국해양해양공학회, 한반도 해역의 고파, 폭풍해일 특별 Workshop, pp 63-66.
- 이석우, 1967. 한국연안의 월평균해면의 변화에 대하여
- 이종섭, 1999. 부산항 조석과 조위편차의 장기변동특성
- 이종섭, 한성대 (2004). “마산시의 해일방재대책 방향설정에 관한 고찰”, 한국해양해양공학회, 한반도 해역의 고파, 폭풍해일 특별 Workshop, pp 45-48.
- 이종찬, 권재일, 박광순, 전기천, 해일고 산정 수치모의 실험, 태풍 매미, 2008. 한국해양해양공학회지, 20권 1호, 93-100.
- 인태훈, 이봉희, 조대회, 조용식, 2003. 범람 모의를 위한 이동경계조건. 한국수자원학회논문집, 제36권, 제6호, pp. 937-947.
- 일본 국토교통성 홈페이지(www.gsi.go.jp)
- 일본 연안기술개발기술연구센터 (2004) 폭풍해일 위험지도 매뉴얼
- 일본기상청 홈페이지 (www.jma.go.jp)
- 정신태, 고동희, 박우선. 2009. 부유 플랩형 고조방파제의 파랑 반사 및 전달 - 수치모의, 한국해양·해양공학회지, 21(2) 196-208.
- 정신태, 김정대, 고동희, 김동현, 박우선. 2008. 부유 플랩형 고조방파제의 파랑 반사 및 전달 - 수리실험, 한국해양·해양공학회지, 20(2) 238-245.
- 천재영, 이광호, 김지민, 김도삼 (2008). “태풍 매미(0314호)에 의한 마산만 주변연안역에서의 범람해석”, 한국해양공학회지, 제22권, 제3호, pp 8-17.

- 천제호, 안경모, 윤종태 (2009). 천해에 적용가능한 태풍 해일-조석-파랑 수치모델 개발 2. 태풍 매미에 의한 해일-조석-파랑 모델의 정확성 검토. 한국해안·해양공학회지, 21(1), 79-90.
- 최병호 (2004) 우리나라 서해안의 최고극 조위, 한반도 해역의 고파, 폭풍해일, 한국해안해양공학회 특별 Workshop pp. 145-154.
- 최병호 (2005). “해일분야 비상대처계획에 대한 소고”, 한국해안해양공학회, 한반도해안의 해일 논문집, pp 183-185.
- 최병호, 고진석, 엄현민 (2004) 한반도 주변 해역의 최극해양환경, 한반도 해역의 고파, 폭풍해일 워크숍 논문집 pp.87-120
- 최병호, 김경옥, 엄현민 (2002) 한국근해의 디지털 수심표고 데이터베이스. 한국해안해양공학회지, 14(1), 41-50.
- 최병호, 김동철. 2006. FLOW3D를 활용한 임원항에서의 쓰나미 범람의 동수역학적 산정, 한국해안해양공학회 지진해일 워크숍.
- 최병호, 엄현민 (2000). 약결합된 해파-조석-해일 모형에 의한 한반도 주변해면의 최극해파 추정. 한국해안·해양공학회지, 11, 37-46.
- 최병호, 에픽 페리놉스키, 홍성진, 2006. 병렬 FEM 모형을 이용한 1993년 동해 지진해일 시뮬레이션. 한국지진공학회논문집, 제10권, 제3호, pp. 35-45.
- 충청남도 (2008) 충청남도 방재정보시스템
- 태풍연구센터 홈페이지 (www.typhoon.or.kr)
- 한국지질자원연구원 (2007) IODP 사업의 경제성 평가, 연구수행기관 : 한국해양수산개발원.
- 한국토지공사 (2005). “태풍 해일에 대비한 단지조성방안 연구”.
- 한국토지공사. 2005. 태풍 해일에 대비한 단지조성방안 연구 최종보고서.
- 한국해안·해양공학회 (1999) 자연재해경감 학술대회

- 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 심해설계과 추산 보고서.
- 한국환경정책평가연구원 (2005). “해양매립사업으로 인한 환경영향의 효율적인 저감방안에 관한 연구”.
- 한국환경정책평가연구원 (2007). “갯벌 매립사업 환경평가 개선방안에 관한 연구”.
- 해양수산부, 2007. 국가해양관측망 기본 계획에 따른 운용해양학 시스템 구축 계획, 11-1520000-001091-01, 223 p.
- 행정자치부 (1998) 서해안 해수범람 흔적조사 및 종합대책 수립
- 행정자치부 (1999) 해안범람 피난지도
- 행정자치부 국립방재연구소 (2003). “2003 태풍 매미 피해 현장조사 보고서”
- 허동수, 엄경선, 김지민, 김도삼, 배기성 (2006a) 부산연안에서 폭풍해일고의 추정, 한국해양공학회지, 제20권 제3호 pp. 37-44.
- 허동수, 엄경선, 김지민, 김도삼, 배기성 (2006b) 경남연안의 지역특성에 따른 폭풍해일고의 변동, 한국해양공학회지, 제20권 제3호 pp. 45-53.
- 허동수, 이현우, 이우동, 배기성 (2008) 슈퍼태풍 내습 시 부산·경남 연안역의 폭풍해일고. 한국해안·해양공학회지, 제20권 제1호, 128-136.
- (社)全國海岸協會, 平成15年3月, 自然共生型海岸づくりの進め方
- (財)沿岸技術研究センター(CDIT), 平成16年4月, 津波・高潮ハザ?ドマップマニュアル
- (財)沿岸技術研究センター(CDIT), 平成17年6月, 津波や高潮の被害に遭わないために

(財)沿岸技術研究センター(CDIT), 平成17年12月, 津波・高潮防災ステ?ション技術資料

국토교통성 구주지방정비국 벵부항만항공정비사업소, 2007. 벵부항 해안정비사업 개요.

나고야항관리조합, 2008. 나고야항 재해도.

항만항공기술연구소, 2008. NOWPHAS, 전국항만해양과랑정보망(2005~2007) 개요.

국립지리원 방재 홈페이지, <http://www.gsi.go.jp/bousai.html>

국토교통성 방재정보제공센터 홈페이지, <http://www.bosaijoho.go.jp/>

내각부 방재정보센터 홈페이지, <http://www.bousai.go.jp/index.html>

효고현 방재기상정보 홈페이지, <http://hyogo.bosai.info/>

효고현 재해도 홈페이지, <http://www.hazardmap.pref.hyogo.jp/hazmap/top.htm>

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.

Blain, C. A., J. J. Westerink, and R. A. Luetlich, 1994. The influence of domain size on the response characteristics of a hurricane storm surge model. *J. Geophys. Res.*, 99, 18467 - 18479.

Bretschneider, C. L., and J. M. Lo, 1984. A Rankin vortex number as a guide to the

- selection of a model hurricane. *Proc. 19th ICCE*, 147-161.
- Brown J. and J. Wolf, 2009. Coupled wave and surge modelling for the eastern Irish Sea and implications for model wind-stress. *Continental Shelf research*, 29 :1329-1342.
- Cardone V. J., and A. T. Cox, 1992. Hindcast study of Hurricane Andrew (1992) offshore gulf of Mexico. Oceanweather Inc.
- Cardone, V. J., 1969. Specification of the wind field distribution in the marine boundary layer for wave forecasting. TR-69-1, *Geophys. Sci. Lab.*, New York Univ.
- Cardone, V. J., Cox, A. T., Greenwood, J. A., and Thompson, E. F. 1994. Upgrade of tropical cyclone surface wind field model. *Miscellaneous Paper CERC-94-14*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Chang, S. D., LEE, J. S., and I. C. LEE, 1993, Numerical experiment of storm surge in the coastal waters of Pusan. *Proceedings of 25th Congress of International Association for Hydraulic Research, Technical Session C. Storm Surge, Tsunami and Storm Waves*, pp 48-55.
- 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., 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.
- 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., R. C. Beardsley, and G. Cowles, 2006a. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system, *Oceanography*, 19(1), 78 - - 89.

Chen, J., W. A. Sheffer, 2001., Evaluation of surge forecasts from the NWS's extratropical storm surge model. *NOAA/NWS Tech. Rep.* pp. 25.

Cho, Y. S. 1995. Numerical simulations of tsunami propagation and run-up. Ph.D. Thesis, School of Civil and Env. Engrg., Cornell University, Ithaca, NY.

Choi, B.H., Eum, H.M., and Woo, S.B. (2003). Modeling of coupled tide-wave-surge process in the Yellow Sea, *Ocean Engineering*, 30, 739-759.

Choi, B.H., Eum, H.M., Kim, H.S., Jeong, W.M. and Shim, J.S. (2004). Wave-tide-surge coupled simulation for typhoon Maemi, Workshop on waves and storm surges around Korean peninsula, 121-144.

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, B.H., Pelinovsky, E., Kim, D.C., Kim, K.O., and Kim. K.H., 2008. Three-dimensional simulation of the 1983 central East (Japan) sea earthquake tsunami at the Imwon Port (Korea). *Ocean Engineering*, doi:10.1016/j.oceaneng. 208.07.002.

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.

DTED 홈페이지. Level 1 Data, (edc.usgs.gov/products/elevation/srtmdted.html)

Dudhia J., 1989. Numerical Study of Convection Observed during te Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *J. Atmospheric Sciences*, 46, 3077-3107.

- Dudhia, J., 1996. A multi-layer soil temperature model for MM5. *The 6th PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop*.
- 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.
- Feyen, J. C., Atkinson, J. H., and Westerink, J. J. 2000. Issues in hurricane surge computations using a GWCE-based finite-element model. *Proc., 13th Int. Conf. on Computational Methods in Water Resources*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 865-872.
- Flow Science Inc. 2007, Flow3D manual.
- Foreman, M. G. G. 1988. A comparison of tidal models for the southwest coast of Vancouver Island. *Proc., 7th Int. Conf. on Computational Methods in Water Resources*, Elsevier, New York, 231-236.
- Fujita, T., 1962. Numerical estimation of sea waves in a typhoon area. *Papers in Meteorol. and Geophys.*, 26(4):199-217.
- GEBCO 홈페이지 (www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/gebco.html)
- Global Seafloor Topography 홈페이지 (topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html)
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of marine structures, Univ. of Tokyo Press., pp. 323.
- Gray, W. G. 1989. A finite-element study of tidal flow data for the North Sea and

- English channel. *Adv. Water Resour.*, 12, 143–154.
- Grell G. A., and D. Devenyi, 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques, *Geophysical Research Letters*, 29(14):38-1~4.
- Grell G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994. A Description of te Fifth-Generation Penn state/NCAR Mesoscale Model(MM5). *NCAR Technical note*, NCAR/TN-398+STR.
- Gumbel, E. J., 1958. Statistics of extremes. Columbia Univ. Press, New York, 375p.
- Gunter, H. Rosental and M. Dunkel., 1981. The response of surface gravity waves to changing wind direction. *J. Phys. Oceano.*, 11:718-728.
- Heaps, N. S., 1983. Storm surges, 1967-1982. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 74, 331-376.
- Heo K. Y., J. W. Lee, K. J. Ha, K. C. Jun, K. S. Park, and J. I. Kwon, 2009. Simulation of atmospheric states for a storm surge on the west coast of Korea: model comparison between MM5, WRF and COAMPS. *Natural Hazards*. 10.1007/s11069-009-9395-y. Springer.
- Hirt, C.W. and Cook, J.L. 1972. Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain. *J. of Computational Physics*, 10, 324-340.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundarie. *J. Comput. Phys.*, 39, 201-225.
- Holland, G. J., 1980. An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 108:1212-1218.
- Holland, G., 1996. The maximum potential intensity of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*,
- Holland, G.J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review*, 108, 1212-1218.

- Independent Levee Investigation Team, 2006. Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005.
- IPCC, IPCC AR4 Synthesis Report, 2008.
- Iwasa, Y., Inoue, K. and Mizutori, M. (1986). "Hydraulic Analysis of Overland Flood Flows by Means of Numerical Method", Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, Vol 23, B-2, pp 305-317.
- Janjic Z. I., 1990. The Step-Mountain Coordinate:Physical Package. *Mon. Wea. Rev.*, 118(7):1429-1443.
- Janjic Z. I., 1996. The surface layer in the NCEP Eta Model. Preprints, *11th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., pp 354-355.
- Janjic Z. I., 2002. Nonsingular implementation of the Mellor - Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. *NCEP Office Note 437*, National Centers for Environmental Prediction, pp61.
- JEGG 홈페이지 (www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro.html)
- Jelesnianski, C. P., 1966. Numerical computation of storm surges with bottom stress. *Mon. Wea. Rev.*, 95, 740 - 756.
- Jelesnianski, C. P., J. Chen and W. A. Shaffer., 1992. SLOSH:Sea, lake, and overland surges from hurricanes. *NOAA Tech. Rep. NWS 48*, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S., 72 p.
- Jun K. C., J. I. Kwon, K. S. Park, J. W. Choi, 2009. Application of Weather Research and Forecasting (WRF) for numerical ocean modeling. *Proceedings of Fallscience meeting of Korea Society of Oceanography, 2009*, 1:89-95
- Jun, K. C. and D. Y. Lee. 1999. Validation of hindcast wave information for the seas around Korean Peninsula with buoy and satellite data. *Ocean Res.*, 21(1):35-44.
- Kang S. W., K. C. Jun, K. S. Park, and S. D. Han, 2009. Storm Surge Hindcasting of

- Typhoon Maemi in Masan Bay, Korea. *J. Marine Geodesy*, 32, 1-14.
- Kang, J.W., Moon, S.R., Park, S.J. and Lee, K.H.(2009). "Analyzing sea level rise and tide characteristics change driven by coastal construction at Mokpo Coastal Zone in Korea". *Ocean Engineering*. Vol. 36, pp.415-425
- Kang, S. W., K. C. Jun, K. S. Park, and D. Y. Lee, 2003. Long-term Estimation of Storm Surge in the Korean Coast. *Coastal Hazards 2003. PARI & CDIT Japan*. pp. G1-G8.
- Katell, G. and Eric, B. 2002. Accuracy of solitary wave generation by a piston wave maker, *J. of Hydraulic Research*, 4(3), 321-331.
- Kim, S. C., J. Chen and W. A. Saffer., 1996. An operational forecast model for extratropical storm surges along the U.S. East Coast. *Proceedings, Conference on Oceanic and Atmospheric Prediction*, (Atlanta, Georgia, American Meteorological Society), 281-286.
- Kolar, R. L., Gray, W. G., Westerink, J. J., and Luetlich, R. A., Jr. 1994a. Shallow water modeling in spherical coordinates:Equation formulation, numerical implementation, and application. *J. Hydraul. Res.*, 321, 3-24.
- Kwon J. I., J. C. Lee, K. S. Park, K. C. Jun, 2008. Comparison of Typhoon Wind Models Based on Storm Surge Heights Induced by Typhoon Maemi. *Asia-Pacific J. Atmospheric Sciences*, 44:443-454.
- Le Provost, C., and Vincent, P. 1986. Some tests of precision for a finite element model of ocean tides. *J. Comput. Phys.*, 65, 273-291.
- Lee J. C., J. I. Kwon, K. S. Park, K. C. Jun, 2008. Calculations of Storm Surges, Typhoon Maemi. *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng.*, 20:93-100.
- Lee J. C., K. S. Park, J. I. Kwon, S. I. Kim, 2009. Storm surge calculation using sea level data. *Marine Geodesy*, 32(2):108-117.
- Lee J. W., K. Y. Heo, K. H. Seo, K. J. Ha, K. S. Park, and K. C. Jun, 2008. Simulations of the Mesoscale Cyclone Accompanying the Storm Surge on 30

- March 2007 in the Western Coast of Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 44(2):121-135.
- Lee, H.J. and Kim, K.H. 2000. Numerical simulation of tsunami inundation at the Imwon Port. *Korea-China Conference on Port and Coastal Engineering*, Seoul, Korea, 277-286.
- Luettich, R. A. Jr., Westerink, J. J. 2005. ADCIRC – User Manual, University of North Carolina at Chapel Hill – Institute of Marine Science, NC.
- Luettich, R. A., Jr., Westerink, J. J., and Scheffner, N. W. 1992. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts and estuaries. Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. *Technical Rep. DRP-92-6*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Lynch, D. R. 1983. Progress in hydrodynamic modeling, review of U.S. contributions, 1979–1982. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 213, 741–754.
- Lynch, D. R., and Gray, W. G. 1979. A wave equation model for finite-element tidal computations. *Comput. Fluids*, 7, 207–228.
- Mellor G. L., T. Yamada, 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20(4):851-875.
- Miller, B. I., 1958: On the maximum intensity of hurricanes. *J. Meteor.* 15, 184-195.
- Mlawer, E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J., and Clough S. A. , 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102(16):663-682.
- Mofjeld, H.O., V.V. Titov, F.I. Gonz'alez, and J.C. Newman. 1999. Tsunami wave scattering in the North Pacific. IUGG 99 Abstracts, Week B, July 26 - 30, B. 132.
- Moon, I.J. (2000). Development of a coupled ocean-wave circulation model its application to numerical experiments for wind waves, storm surges and ocean

circulation for the Yellow and East China seas, Seoul National University, Ph.D Dissertation.

Multiple Lines of Defense Assessment Team, 2007. Comprehensive Recommendations Supporting the Use of the Multiple Lines of Defense Strategy to Sustain Coastal Louisiana.

Murty, T. S., 1984. Storm surge: Meteorological ocean tides. *Can. Bull. of Fisheries and Aquatic Sci.*, No. 212. Dept. Fisheries and Oceans, Canada, p. 597.

Myers, V.A. and Malkin, W. (1961). "Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories", U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.

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.

Nagoya Port Office Chubu Regional Development Bureau Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2008. 9. 19. The Port of Nagoya(Constructing a Port Leading from Ancient Times to Tomorrow).

Park K. S., J. C. Lee, K. C. Jun, S. I. Kim, J. I. Kwon, (*accepted*, 2009). Development of an operational storm surge prediction system for the Korean coast. *Ocean and Polar Res.*

Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006. The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1266-1298.

Schloemer, R. W., 1954. Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee. *Florida Hydrometeorol. Rep.* No. 31, U.S. Weather Bureau.

Sollitt, C. K., Chung-Pan L., William, G. N., and Thomas, J. P. 1986. Mechanically Coupled Buoyant Flaps: Theory and Experiment. *Coastal Engineering*, pp. 2445-2459.

- Thompson, E. F. and V. J. Cardone, 1996. Practical modeling of hurricane surface wind fields. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 122(4):195-205.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2007. Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System Final Report of the Interagency Performance Evaluation Task Force.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. 1995. An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method. Prentice Hall, 257.
- Vincent, P., and Le Provost, C. 1988. Semidiurnal tides in the northeast Atlantic from a finite-element numerical model. *J. Geophys. Res.*, 931, 543–555.
- Walters, R. A., and Werner, F. E. 1989. A comparison of two finiteelement models of tidal hydrodynamics using a North Sea data set. *Adv. Water Resour.*, 12, 184–193.
- Werner, F. E., and Lynch, D. R. 1989. Harmonic structure of English channel/southern bight tides from a wave equation simulation. *Adv. Water Resour.*, 12, 121–142.
- Westerink, J. J., and Gray, W. G. 1991. Progress in surface water modeling. *Rev. Geophys.*, 29, 210–217.
- Westerink, J. J., Luettich, R. A., Baptista, A. M., Scheffher, N. W., and Farrar, P. 1992. Tide and storm surge predictions using finiteelement model. *J. Hydraul. Eng.*, 11810, 1373–1390.
- Westerink, J. J., Luettich, R. A., Jr., and Muccino, J. C. 1994. Modeling tides in the western North Atlantic using unstructured graded grids. *Tellus, Ser. A*, 46A, 178–199.
- Wu. J., 1980. Wind-stress Coefficients Over Sea Surface Near Neutral Conditions:A Revisit. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 727-740.
- Yu F., Zhang Z., and Y. Lin, 2001. A Storm Surge Numerical Forecast System based on GIS. XXIX IAHR Congress proceedings.